

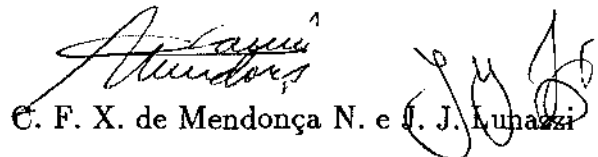
Um Sistema para Visualização Holográfica

Este exemplar corresponde à redação final da
Dissertação devidamente corrigida e defendida
por Eloisa Bertini e aprovada pela Banca Exa-
minadora.

Campinas, 30 de março de 1998.

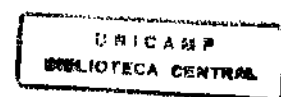


Paulo Lício de Geus (Orientador)



C. F. X. de Mendonça N. e J. J. Lunazzi

Dissertação apresentada ao Instituto de Com-
putação, UNICAMP, como requisito parcial para
a obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação.



21/10/98

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
N.º	
V. Ex.	
TOMBO IN/	34712
PROC.	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/08/98
N.º CPD	

CM-00114805-0

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Bertini, Eloisa

B462s Um sistema para visualização holográfica / Eloisa Bertini --
Campinas, [S.P. :s.n.], 1998.

Orientadores : Paulo Lício de Geus, C.F.X. de Mendonça N.,
J.J. Lunazzi

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Computação.

I. Holografia. 2. Visualização - Técnica. 3. Processamento de
imagens. 4. Computação gráfica. I. de Geus, Paulo Lício. II. de
Mendonça N., C.F.X. III. Lunazzi, J.J. IV. Universidade Estadual
de Campinas. Instituto de Computação. V. Título.

Um Sistema para Visualização Holográfica

Eloisa Bertini¹

Março de 1998

Banca Examinadora:

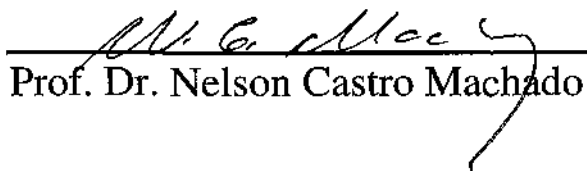
- Paulo Lício de Geus (Orientador)
- Roberto de A. Lotufo
DCA-FEEC-UNICAMP
- Nelson de C. Machado
- Alexandre Xavier Falcão (Suplente)

¹financiado em parte por CAPES e FAEP-UNICAMP

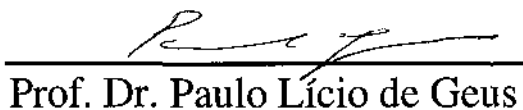
Tese de Mestrado defendida e aprovada em 29 de abril de 1998
pela Banca Examinadora composta pelos professores Doutores



Prof. Dr. Roberto Lotufo



Prof. Dr. Nelson Castro Machado



Prof. Dr. Paulo Lício de Geus

Resumo

Este trabalho apresenta os desenvolvimentos obtidos com o Holoprojetor, um projetor tridimensional que faz uso de um dispositivo chamado *tela holográfica*, inicialmente apresentado por Lunazzi e Diamand [29] [11]. O holoprojetor original utilizava movimentos vetoriais para estabelecer as coordenadas x , y e z , ao passo que a nova versão apresentada neste trabalho faz uso de um painel LCD para obter x e y , restando apenas z para o aparato opto-mecânico. Esta nova versão do Holoprojetor permite taxas de atualização de imagem muito maiores que as iniciais, com resultados visuais muito bons e independentes da capacidade de ajuste visual do observador, como é o caso da visualização de pares-estéreo.

Abstract

This work presents the developments with the Holoprojector, a three-dimensional projector that makes use of a device called *holographic screen*, initially presented by Lunazzi and Diamand [29] [11]. The first holoprojector used vector movements to establish the x , y and z coordinates, whereas the new version, presented in this work, makes use of a LCD panel to render x and y , leaving only z to be rendered by the opto-mechanical setup. This new version of the Holoprojector allows refresh rates much higher than the ones obtained by the pioneering system, yielding very good visual results that are independent from the observer's ability to adapt his vision, as is the case with stereo-pair visualization.

Dedico este trabalho ao meu Senhor a quem se pode dizer:

“Render-te-ei graças, Senhor,
de todo o meu coração;
na presença dos poderosos te cantarei louvores.
Prostrar-me-ei para o teu santo templo
e louvarei o teu nome, por causa da tua misericórdia
e da tua verdade,
pois magnificaste acima de tudo
o teu nome e a tua palavra.
No dia em que eu clamei, tu me acudiste
e alentaste a força da minha alma...”

(Salmo 138)

“A tua misericórdia ó Senhor, dura para sempre”.

Agradecimentos

Agradeço este trabalho ao meu orientador Paulo Lício de Geus pelo investimento e confiança.

Agradeço em especial ao Xavier e sua esposa Marilice pela orientação espiritual, apoio, incentivo e acolhimento nos momentos árduos.

À minha amiga Sueli que muito me ajudou no conhecimento do meu Senhor Jesus.

Às minhas amigas Ângela e Fernanda, pela pureza e encorajadura.

Aos meus pais Célia e Darcy, pelo amor, confiança e apoio investidos; aos meus irmãos Eduardo e Renato, pela descontração em situações difíceis.

Aos avós Hortência ² e Walter, pela paciência e participação nas pesquisas técnicas;

Ao meu namorado, noivo e futuro marido Márcio pela presença firme e tranquila nas várias etapas do trabalho.

A todo o grupo da Nova Aliança pela preocupação e oração.

À AMIX Integração de Sistemas, agradeço a compreensão e permissão para ausentarme do atual emprego em momentos críticos, os quais foram fundamentais para o término deste trabalho.

Aos amigos e coorientadores Xavier e Lunazzi pelo investimento técnico e científico e a confiança que em muito ajudaram na conclusão deste trabalho.

A todo o Instituto de Computação e ao Laboratório de Óptica, pela amizade e o agradável ambiente de trabalho oferecido.

Ao suporte financeiro da CAPES e da FAEP.

À Mila, minha grande amiga.

À todos aqueles que contribuíram de maneira direta ou indireta a esta tese.

Àqueles que duvidaram da finalização deste trabalho, que contribuíram com o estímulo do desafio.

Finalmente, agradeço a Deus, meu Pai.

²in memoriam

Conteúdo

Resumo	v
Abstract	vi
	vii
Agradecimentos	viii
1 Introdução e Definições Básicas	3
1.1 A Necessidade de Visualização Tridimensional	3
1.1.1 Estereoscopia	6
1.1.1.1 Imagens bicromáticas	6
1.1.1.2 Imagens com Padrões Repetitivos	7
1.1.1.3 Realidade Virtual	7
1.1.2 Holografia	7
2 Trabalhos Relacionados	11
2.1 Estereografia	12
2.2 Realidade Virtual	13
2.3 Holografia <i>Hard Copy</i> ou Estática	13
2.3.1 Luz	16
2.3.1.1 Modelo ondulatório de Huygens	17
2.3.1.2 Modelo eletromagnético de Maxwell	18
2.3.1.3 Modelo de Fourier	19
2.3.1.4 Modelo Quântico	20
2.3.2 Laser	20
2.3.2.1 Componentes	22
2.3.2.2 Modos de funcionamento	23
2.3.3 Interferência	24
2.3.4 Difração	28

2.3.4.1	Difração por uma fenda	31
2.3.4.2	Redes de difração	32
2.3.5	Material de registro	34
2.3.5.1	Sensibilidade	34
2.3.5.2	Sistema de processamento óptico	35
2.3.5.3	Materiais Existentes	37
2.3.6	Etapas para obtenção do holograma	41
2.3.6.1	Formação	41
2.3.6.2	Modelo simplificado	42
2.3.6.3	Reconstrução	44
2.3.6.4	Difração de Bragg	47
2.3.6.5	Modelo simplificado	48
2.3.7	Tipos de hologramas	49
2.3.7.1	Holograma de Gabor	50
2.3.7.2	Holograma de Fraunhofer	53
2.3.7.3	Holograma Off-axis	54
2.3.7.4	Formação do holograma	55
2.3.7.5	Reconstrução do holograma	56
2.3.7.6	Holograma de Denisyuk	57
2.3.7.7	Holograma de Benton	58
2.3.7.8	Holograma de Imagem	59
2.3.7.9	Holograma de Fourier	60
2.3.7.10	Formação do holograma	60
2.3.7.11	Reconstrução do holograma	61
2.3.7.12	Holograma Estereoscópico	63
2.3.8	Exibição de hologramas	64
2.3.8.1	Holograma de Denisyuk	64
2.3.8.2	Holograma de Transmissão	64
2.3.9	Holografia colorida	72
2.3.9.1	Sistemas de cores	72
2.3.9.2	Fluxo luminoso	74
2.3.9.3	Cromaticidade	76
2.3.9.4	Holografia	77
2.3.10	Processamento e armazenamento de informação	80
2.3.10.1	Processamento de imagens	80
2.3.10.2	Armazenamento	84
2.3.10.3	Hologramas gerados por computador (CGH)	84
2.3.11	Aplicações	93

2.3.11.1	Interferometria holográfica	93
2.3.11.2	Holografia “sandwich”	96
2.3.11.3	Holografia e medicina	97
2.3.11.4	Scanners holográficos	97
2.3.11.5	Elementos ópticos holográficos	98
2.3.11.6	Imagens múltiplas	99
2.3.11.7	Imagens de alta resolução	99
2.4	Holografia Virtual ou Dinâmica	100
2.4.1	Holografia eletrônica	100
2.4.1.1	Sistema do MIT	101
2.4.1.2	Variação do sistema do MIT	105
2.4.1.3	Projeto 3D	108
2.4.2	Varredura volumétrica	109
2.4.3	Outros tipos de display	111
3	Um Protótipo de Holoprojetor	112
3.1	O Holoprojetor de Lunazzi e Diamand	112
3.2	Holoprojetor versão 2.0	116
3.2.1	Prototipação do Sistema	118
3.2.2	A tela holográfica	119
3.2.3	O refletor	119
3.2.4	O projetor de imagens	123
3.2.5	Pré-Processamento de Imagens: Fatiamento de Imagens	125
3.2.5.1	Fatiando imagens	126
3.2.5.2	Modificação do código do POV-Ray	127
4	Resultados	130
4.1	O cubo de Diamand	130
4.2	Resultados mostrados pelo protótipo	130
5	Conclusão	138
5.1	Resumo dos resultados obtidos	138
5.2	Contribuições deste trabalho	138
5.3	Limitações	139
5.4	Sugestões e tendências	140
	Bibliografia	142

Lista de Tabelas

Lista de Figuras

2.1	Esquema do Espectro Visível	16
2.2	Campo elétrico e campo magnético	19
2.3	Raio de luz branca espacialmente coerente	21
2.4	Comprimentos de coerência: A) lâmpada de tungstênio; B) Gas Discharge Tube; C) Laser	21
2.5	Duas ondas de mesmo comprimento de onda somam-se (à esquerda) se suas cristas e vales coincidem, e subtraem-se (à direita) se as cristas de uma coincidem com os vales da outra.	24
2.6	A luz difratada do orifício S_0 incide sobre os orifícios S_1 e S_2 no anteparo B. As luzes difratadas destes dois orifícios se superpõem na região entre os anteparos B e C, produzindo uma configuração de interferência sobre o anteparo C.	25
2.7	As ondas provenientes das fendas S_1 e S_2 combinam-se em um ponto P , um ponto arbitrário sobre o anteparo. O ângulo θ localiza o ponto P	26
2.8	Difração ocorrida nos contornos de uma gilete iluminada por luz monocromática. Note as franjas alternadas de máximos e mínimos.	28
2.9	Propagação de uma frente de ondas conforme princípio de Huygens.	30
2.10	Condições para o primeiro mínimo da configuração de difração.	31
2.11	Uma frente de onda coerente incide sobre um objeto opaco B que contém uma abertura arbitrária. A configuração da difração será formada sobre o anteparo C.	33
2.12	(a) difração em rede com duas fendas; (b) difração em rede com cinco fendas.	34
2.13	Material de registro fototermoplástico.	39
2.14	Padrão de interferência formado na interação entre duas ondas planas.	45
2.15	Geração da imagem virtual de um objeto usando o raio referência original para iluminar o holograma.	46
2.16	Geração de uma imagem real de um objeto usando o conjugado do raio referência original para iluminar o holograma.	46
2.17	Formação de um holograma elementar em meio espesso.	47
2.18	Planos de Bragg.	48

2.19	Sistema óptico de registro de um holograma de Gabor.	51
2.20	Sistema óptico de reconstrução de um holograma de Gabor.	52
2.21	Formação de um holograma de Fraunhofer.	53
2.22	Princípio da holografia off-axis.	54
2.23	Registro de um holograma com RR não paraxial.	55
2.24	Reconstrução de um holograma com registro não paraxial	57
2.25	Holograma de Benton.	59
2.26	(a) geometria de transferência com o master invertido para obter a imagem real pseudoscópica; (b)hologramas de transferência resultantes.	60
2.27	Sistema óptico para a formação do holograma de Fourier.	61
2.28	Configuração para a reconstrução do holograma de Fourier.	62
2.29	Imagens reconstruídas por um holograma de Fourier.	63
2.30	Exibição de hologramas de reflexão.	65
2.31	Observação de hologramas de reflexão utilizando o movimento da cabeça.	65
2.32	Configurações para exibição de hologramas de transmissão de luz branca.	66
2.33	Exibição de hologramas de transmissão de luz branca.	67
2.34	Configuração para holoanimação.	68
2.35	Esquema da impressora holográfica.	69
2.36	Sistema óptico de registro multipontos.	70
2.37	Geometria para cálculo das imagens a serem expostas.	71
2.38	Display holográfico do MIT.	72
2.39	Sínteses aditiva e subtrativa.	73
2.40	Curvas de sensibilidade.	74
2.41	Número de lumens de cada uma das componentes, necessário à obtenção de um watt de fluxo radiante monocromático.	75
2.42	Diagrama de cromaticidade.	76
2.43	(A) O ponto K representa um tom de púrpura complementar à cor M do espectro (B) Pontos do triângulo RGB podem representar praticamente qualquer cor.	77
2.44	Transformada de Fourier da letra E realizada por um computador óptico.	81
2.45	Formação da imagem com duas lentes: (a) modelo geométrico; (b) modelo de Fourier.	81
2.46	Holograma binário detour-phase (a) o holograma (b) a imagem reconstruída.	88
2.47	Configuração de células e diagrama de fasor para hologramas detour-phase.	88
2.48	Simulação de iluminação por um objeto com aleatoriedade de fase (a) o holograma (b) a imagem.	89

2.49	Geometria para a determinação da luz difratada pelo plano I no plano do holograma H . O espectro angular dos planos virtuais A e B são considerados no cálculo.	92
2.50	Exemplo de uma parte SLM usando diodos lasers	106
2.51	Diagrama da parte de varredura horizontal e a parte imagem	107
2.52	Diagrama da parte de varredura vertical	108
2.53	Configuração do display do Projeto 3D	110
2.54	Configuração do protótipo da Universidade do Alabama	111
3.1	Visão geral do Holoprojetor de Lunazzi e Diamand	114
3.2	Esquema do “seletor angular com rede fixa”	115
3.3	O holoprojetor versão 2.0.	117
3.4	Esquema da utilização da experiência com laser	121
3.5	Pinagem de conexão entre a Saída Paralela e o Floppy	121
3.6	Resultado desejado na experiência com laser	122
3.7	Resultado da experiência com laser	122
3.8	Vista superior do refletor	123
3.9	Vista lateral do refletor	124
3.10	Vista lateral do projetor de imagens Sharp	124
3.11	Planos de corte em par estéreo.	126
3.12	Planos de corte em par estéreo (vista lateral).	126
3.13	Algoritmo de fatiamento em pseudo-pascal	128
3.14	Delimitação dos planos de corte.	129
3.15	Seis fatias de uma cena.	129
3.16	Vista dos planos de corte em par estéreo.	129
4.1	O cubo de Diamand.	130
4.2	As dimensões do protótipo.	131
4.3	O primeiro resultado obtido.	132
4.4	Esqueleto do cubo a ser fatiado.	133
4.5	Reprodução da cena do cubo no Holoprojetor.	133
4.6	Cena contendo uma esfera, um cone e um cubo a ser fatiada	133
4.7	Reprodução da cena da esfera, cone e cubo no Holoprojetor.	134
4.8	Cena contendo um besouro rinoceronte a ser fatiada	134
4.9	Reprodução da cena do besouro rinoceronte no Holoprojetor.	134
4.10	Cena contendo um avião de combate F15E	135
4.11	Reprodução da cena do avião F15E no Holoprojetor.	135
4.12	Cena contendo um avião Fokker Dr I	135
4.13	Reprodução da cena do avião Fokker Dr I no Holoprojetor.	136

4.14	Cena contendo a nave Klingon Bird of Prey	136
4.15	Reprodução da cena da nav Klingon no Holoprojetor.	136
4.16	Cena contendo a nave USS NightHawk Federation	137
4.17	Reprodução da cena da nave USS NightHawk Federation no Holoprojetor.	137

Apresentação

(Partes deste trabalho estão descritas em artigo [1] no SIBGRAPI'96).

Resumo do trabalho

Este trabalho apresenta os desenvolvimentos obtidos com o Holoprojetor, um projetor tridimensional que faz uso de um dispositivo chamado *tela holográfica*, inicialmente apresentado por Lunazzi e Diamand [29] [11]. O holoprojetor original utilizava movimentos vetoriais para estabelecer as coordenadas x , y e z , ao passo que a nova versão apresentada neste trabalho faz uso de um painel LCD para obter x e y , restando apenas z para o aparato opto-mecânico. Esta nova versão do Holoprojetor permite taxas de atualização de imagem muito maiores que as do protótipo pioneiro, com resultados visuais muito bons e independentes da capacidade de ajuste visual do observador, diferentemente da visualização de pares-estéreo.

Vários melhoramentos tecnológicos foram introduzidos, sobre o Holoprojetor versão 1.0, para se obter o resultado acima, de onde pode-se destacar:

- a aceleração da movimentação do espelho refletor, agora na faixa de $5-6ms$ (contra cerca de $27ms$)
- a eliminação de trepidações verticais, através da redução do aparato mecânico de fixação e respectivo reposicionamento no aparato opto-mecânico
- a redução da massa do conjunto, fundamental para o aumento da velocidade de atuação do espelho e para a eliminação de perturbações no movimento do mesmo
- a eliminação de trepidações horizontais, com a eliminação da correia de transmissão de movimento por um conjunto com mais rigidez e resposta mais rápida, semelhante ao eixo comando de válvulas de um motor a explosão
- a ampliação da persistência visual, graças aos melhoramentos obtidos na massa do conjunto e na aceleração da movimentação do espelho refletor

Partes desta dissertação

- o Capítulo 1 apresenta a visualização tridimensional, chegando até a holografia, mas apenas de maneira intuitiva
- o Capítulo 2 descreve a holografia em detalhes, sob a forma de uma revisão da literatura relacionada; a leitura deste capítulo, dependendo da formação do leitor interessado, pode ser deixada para o final, exceto pela Seção 2.3.4.2, necessária para a compreensão do Capítulo 3
- o Capítulo 3 apresenta a técnica holográfica utilizada para a construção do protótipo do sistema de visualização de imagens, chamado de *Holoprojetor versão 2.0*, assim como as etapas de seu desenvolvimento; detalhes do sistema pioneiro—*Holoprojetor versão 1.0*—são também apresentados para contextualização
- o Capítulo 4 consiste de uma coletânea dos resultados obtidos com o novo protótipo (sistema desenvolvido neste trabalho)
- o Capítulo 5 conclui esta dissertação, resumindo os resultados obtidos e as limitações do sistema desenvolvido, propondo algumas sugestões e apresentando tendências na área

Capítulo 1

Introdução e Definições Básicas

Este capítulo apresenta a visualização tridimensional, chegando até à holografia, discorrendo de maneira intuitiva.

1.1 A Necessidade de Visualização Tridimensional

Nos dias atuais, a informação tem ocupado cada vez mais uma posição de destaque. De maneira contínua e consistente esta informação tem crescido em volume e diversidade, o que impulsiona o acolhimento de um novo desafio: “Como fazer com que esta informação chegue ao seu público alvo de maneira eficiente?” Os profissionais de marketing foram os primeiros a buscar uma resposta a esta questão fazendo uso cada vez maior de imagens. Seguindo este mesmo caminho os sistemas operacionais tem explorado a capacidade humana de interpretação de imagens, havendo interfaces gráficas onde o usuário interage, por exemplo, através de ícones ou menus de comandos. Assim, o uso de dispositivos como o mouse vem assumindo um lugar crescente em nossas escrivaninhas, com imagens se tornando cada vez mais uma constante em nossos monitores. A utilização de cenas é bastante natural, pois é muito mais fácil comunicar uma imagem de uma dada cena do que a sua descrição oral ou escrita.

É de comum conhecimento a existência de incentivos à leitura de jornais e livros de literatura e ao mesmo tempo a divulgação de advertências sobre o abuso do uso da televisão. A imagem exprime de maneira eficiente uma idéia completa, instigando o raciocínio e a imaginação do expectador. A palavra, escrita ou falada, apenas informa, deixando a cargo do leitor o exercício da imaginação para formar imagens em sua mente. É bastante agradável a leitura de uma boa obra de literatura onde o autor consegue exprimir imagens por meio do texto ou da linguagem, entretanto este método exige talento por parte do autor e não é suficientemente eficiente. Deste modo, criamos clubes de leitura e não criamos associações de incentivo a assistir televisão!

Sendo a comunicação da imagem qualitativamente mais eficiente que a comunicação da palavra, torna-se natural existirem esforços no sentido de aprimorar as formas de apresentação de cenas por meio gráfico. Quanto mais próxima a técnica estiver da forma real com que objetos são vistos, maior será a precisão em imitar o comportamento do sistema visual e a riqueza de detalhes; conseqüentemente, a mais eficiente será a comunicação.

A busca da reprodução de imagens capazes de tirar proveito do sistema visual humano enfrenta um considerável desafio. O mundo real possui largura, altura e profundidade. Uma fotografia exprime duas dessas dimensões, e embora seja mais abrangente que um conjunto de palavras em termos de comunicabilidade, ainda há carência de dados, uma vez que nem toda informação está contida numa imagem bidimensional.

Uma observação adequada é que o público em geral não está habituado à observação da terceira dimensão, que num futuro próximo será até obrigatória, em certas situações. Isto ocorre porque os meios de exibição mais comumente utilizados são bidimensionais, faltando oportunidade para exercitar e estimular as habilidades baseadas na visão espacial; a sensação ilusória de profundidade é obtida nesses meios através de cálculos matemáticos de alguns indicadores de profundidade, referenciados como *Indicadores 2.5D*, como segue:

Perspectiva Linear: objetos mais distantes aparentam ter menores proporções que os mais próximos

Perspectiva Aérea: objetos mais distantes são vistos com menor riqueza de detalhes que os mais próximos; além disso parecem ser mais escuros, nebulosos e menos distintos

Tamanho da Imagem na Retina: objetos cujos tamanhos são conhecidos pela memória do observador também têm suas profundidades reconhecidas; nesse contexto, quando dois objetos iguais tem tamanhos diferentes, o maior aparentará estar mais próximo

Gradiente de Textura: objetos localizados a distâncias maiores do observador tem sua textura gradativamente mais confusa (borrada)

Oclusão: objetos mais próximos do ponto de observação ocultam objetos situados a maiores distâncias

Tonalização e Sombreamento: considerando a fonte luminosa como ponto de referência, o observador pode determinar a profundidade dos objetos tomando como base a posição das sombras e da tonalidade da luz incidente (indicação da posição do objeto em relação a fonte de luz)

Paralaxe Temporal: serão necessários movimentos mais amplos para um observador alterar o ponto de vista de um objeto mais distante

Além dos indicadores de profundidade 2.5D já descritos, e tendo em mente o comportamento do sistema visual humano, é possível identificar novos indicadores que, quando associados aos anteriores, conferem uma noção mais precisa e completa de profundidade. Tais elementos, que serão referenciados como *Indicadores 3.0D*, não podem ser reproduzidos nos meios de exibição de imagem convencionais:

Acomodação: alteração da distância focal entre a lente e o olho

Convergência: rotação interna dos olhos; o cérebro tenta manter os dois olhos atentos na visualização de um objeto que se movimenta para distâncias maiores ou menores do observador; é possível considerar que linhas imaginárias emanem dos olhos do observador para encontrar um objeto a ser visualizado; nesse contexto, pode-se dizer que quando o objeto se aproxima, as linhas imaginárias tendem a convergir, e quando ele se afasta, tendem a divergir; o cérebro está muito atento à posição dos olhos e usa isso para avaliar a distância entre aquele que observa e o alvo de observação

Disparidade Binocular: caracteriza as diferenças entre as imagens captadas pelos dois olhos: como os olhos ficam localizados em pontos diferentes da cabeça, eles não vêem sempre a mesma coisa, necessariamente

Paralaxe de Movimento: são mudanças na imagem acarretadas pelo movimento do observador

Conforme citado anteriormente, os *Indicadores 3.0D* de profundidade não podem ser reproduzidos pela fotografia ou pela televisão, os quais obtêm o sucesso dos dias de hoje pela utilização dos *Indicadores 2.5D*, primeiramente apresentados. Entretanto, existe no ser humano a necessidade intrínseca da percepção tridimensional. Os olhos frontais no crânio sempre permitiram a visão com paralaxe: os globos oculares possuem a função de criar a disparidade visual e com isso permitir a captação de dois pontos de vista que, por meio da ação cerebral, resultam na percepção da profundidade.

A criação de um dispositivo capaz de tirar proveito do sistema visual humano implica em acolher toda a capacidade de percepção disponível. Um exemplo simples desse fato pode ser notado através de uma experiência pessoal numa máquina de simulação de trânsito, como a utilizada em nosso país nos anos 80. A falta de sucesso deste dispositivo estava diretamente relacionada à sua incapacidade de reproduzir a sensação visual apropriada. Mesmo que esse equipamento exercite alguns dos indicadores apontados anteriormente, o sistema visual humano necessita das três dimensões para a função de dirigir. Isso ocorre porque apenas um ponto de vista é exibido, não havendo disparidade binocular e conseqüentemente prejudicando a percepção da terceira dimensão. Esta necessidade fica

mais evidenciada na avaliação para a habilitação de motoristas profissionais, que exige um teste onde o candidato deve mostrar a capacidade de alinhar três pontos numa mesma profundidade.

Uma vez entendida a necessidade de exibir imagens contendo todas as dimensões conhecidas, é possível classificar as diversas abordagens 3D para apresentação de imagens sob dois grandes paradigmas: a estereoscopia e a holografia.

1.1.1 Estereoscopia

Intuitivamente, a estereoscopia baseia-se na obtenção de dois pontos de vista que devem ser mostrados simultaneamente ao observador, com cada olho capturando respectivamente o ponto de vista a ele destinado. A estereoscopia é significativamente mais informativa que os displays monoscópicos (apenas um ponto de vista). Por exemplo, na área médica imagens estereoscópicas são utilizadas na análise de defeitos cardiológicos congênitos para obter a apreciação da estrutura interna de modo não destrutivo. Outro exemplo de utilização está na visualização precisa das placas do cérebro de pacientes com esclerose múltipla—incluindo sua distância em relação à superfície cerebral.

A seguir serão descritas as técnicas mais comuns da estereoscopia.

1.1.1.1 Imagens bicromáticas

As imagens bicromáticas, ou anaglifos, como o próprio nome diz, correspondem a somente um par de pontos de vista, cada qual codificado em uma cor (azul e vermelho ou verde e vermelho). A canalização dessas duas cenas a cada olho correspondente pode ser obtida através da utilização de óculos especiais. O observador deve usar óculos com filtros cromáticos polarizadores (azul e vermelho ou verde e vermelho) onde cada olho verá apenas uma das imagens bicromáticas. O resultado é a exibição de uma única imagem tridimensional colorida por uma mistura de roxo ou laranja.

As principais desvantagens desta técnica consistem no desconforto do uso dos óculos polarizadores, na limitação da profundidade devida à codificação de apenas dois pontos de vista e na existência de uma única imagem tridimensional, independente da posição da cabeça do observador, vista dentro de um espaço extremamente reduzido de observação.

O desconforto causado pelo uso dos óculos polarizadores poderia ser eliminado com o uso da tela holográfica, como será mostrado na Seção 3.2.2. Na Seção 2.2 será discutida uma generalização da estereoscopia, possibilitando a visualização de novos pares de cenas a cada movimento, observáveis dentro dos limites permitidos por sensores de um capacete de realidade virtual.

1.1.1.2 Imagens com Padrões Repetitivos

Uma técnica curiosa são estereogramas formados por imagens que compõem pares-estéreo colocados lado a lado ou imagens com padrões repetitivos. Em ambos os casos a percepção da imagem 3D é obtida por meio de uma visão divergente (ou convergente), na qual o ajuste de atenção a cada imagem é feito com ponto de encontro da visão depois (ou antes) do plano de observação. A grande desvantagem desta abordagem é a dificuldade encontrada pelo observador em especializar-se na percepção destas imagens.

Uma desvantagem geral nas abordagens citadas compreende a codificação de dois pontos de vista fixos, perdendo assim a paralaxe de movimento, que consiste num dos indicadores importantes de profundidade.

1.1.1.3 Realidade Virtual

A realidade virtual é uma ramificação da estereoscopia que permite o tratamento de imagens tridimensionais exibindo de maneira síncrona os dois pontos de vista a cada olho de maneira independente. A paralaxe de movimento pode ser a grosso modo implementada colocando-se um sensor no observador; os pontos de vista são adaptados baseados na sua posição relativa. Um exemplo comum consiste na utilização de dois equipamentos apropriados: o visor e a luva. O visor consiste de um par de pequenos monitores que exibem individualmente um ponto de vista. A luva consiste de um complexo dispositivo capaz de reproduzir a sensação de tato ao usuário; a descrição deste equipamento vai muito além dos objetivos deste trabalho. Assim, os equipamentos utilizados nessa técnica são fundamentais, pois incluem na estereoscopia a idéia de presença humana num espaço artificial.

As duas grandes vantagens dessa técnica são: a possibilidade de exibir cenas a cores e o acréscimo da paralaxe de movimento. A grande desvantagem é o desconforto causado pela utilização dos acessórios citados. Apesar dos aspectos negativos dessa abordagem, existem várias aplicações em simulação de vôo, engenharia, arquitetura, entretenimento e educação.

1.1.2 Holografia

A palavra holografia é originada do grego “holos” que significa totalidade, ou seja, um registro completo de todos os pontos de vista de um objeto em um meio óptico. Assim, a holografia é uma forma de tratamento de imagens que permite registrar todos os pontos de vista de uma cena. Qualquer alteração na posição de apreciação da imagem é imediatamente acompanhada pela captação de um novo perfil, o qual pode corresponder a uma vista lateral, inferior ou superior da imagem. Sendo assim, os objetos, além de serem per-

cebidos em três dimensões, são também notados com todos indicadores de profundidade, conferindo um resultado natural.

A holografia pode ser dividida em duas abordagens principais: a holografia estática e a holografia dinâmica. A holografia estática, comumente chamada por leigos de “fotografia em três dimensões”, envolve registros permanentes de imagens em algum meio óptico de altíssima resolução, através da utilização de laser. O conceito de holografia estática corresponde ao conceito de holografia *hard copy*, ou seja, é bastante difícil reproduzir uma outra imagem no mesmo filme.

Para dar uma idéia da ordem de grandeza desta resolução, será feita uma comparação entre uma tela de televisão NTSC (contendo $512 \times 400 = 204.800$ pixels) e um holograma contendo cerca de 62.000.000 pontos por mm^2 . Devido à alta resolução dos hologramas, é possível colocar cerca de 302 telas NTSC em um único mm^2 de holograma. Naturalmente, torna-se praticamente impossível alcançar a resolução e qualidade de um holograma utilizando-se dispositivos como um monitor de TV, mesmo se utilizados os monitores de maior resolução encontrados no mercado.

A holografia estática pode ser obtida devido à alta resolução e ao fato do material holográfico permitir um armazenamento da codificação dos espectros de ondas luminosas ao invés das cores da cena. Devido à complexidade do registro e da paralaxe vertical e horizontal, a holografia dinâmica se restringe exclusivamente à paralaxe horizontal. Essa restrição é bastante natural, uma vez que o observador possui um par de olhos na horizontal. Assim, doravante, fica subentendido pela palavra paralaxe a referência à paralaxe horizontal somente.

A holografia estática está relacionada a: artigos de entretenimento, encontrados em lojas de souvenirs, na forma de chaveiros, cartões, porta-retratos; ferramentas de marketing, para atrair a atenção das pessoas em relação a algum assunto; livros específicos de holografia, ou até mesmo livros de arte. É usado comumente como selo identificador (cartões de crédito, p. ex.).

A holografia dinâmica recebe essa denominação por referir-se a hologramas exibidos dentro de um período determinado, em sistemas que permitam tanto a apresentação como a mudança de uma imagem. Essa forma de holografia está associada à apresentação de imagens em tempo real que, em geral, está vinculada a algum aparato eletro-óptico-mecânico, necessário na criação da imagem. Devido ao atual estágio das pesquisas na área é possível afirmar que o benefício da obtenção real das três dimensões faz o assunto tornar-se de grande interesse científico e prático, mesmo considerando a resolução mencionada anteriormente.

A holografia dinâmica recente está dividida em três técnicas: holografia eletrônica, varredura volumétrica e holoprojeção. A holografia eletrônica baseia-se na simulação computacional do resultado da interação de dois feixes de laser, um funcionando como

objeto e o outro como referência. O grande problema desta técnica é que uma imensa quantidade de computação é necessária para reconstruir o efeito luminoso da imagem ponto a ponto da superfície objeto. Neste esquema, a imagem holográfica é normalmente projetada em áreas de tamanho reduzido (aproximadamente cinco centímetros cúbicos ou pouco mais), obedecendo uma varredura orientada de exibição, cujo resultado possui todos os indicadores de profundidade, inclusive paralaxe de movimento.

A segunda forma de holografia dinâmica é a varredura volumétrica. Este esquema baseia-se no resultado da interação de um feixe de laser que projeta os pontos do objeto numa tela giratória. Como resultado, as imagens são dotadas de disparidade binocular, paralaxe de movimento e paralaxe temporal. A visualização dessas imagens é feita sem auxílio de instrumentos de visualização, costumando oferecer as melhores zonas de visão (podendo chegar até 360 graus) e permitindo que várias pessoas observem a imagem simultaneamente. Esta técnica tem grandes vantagens sobre a anterior, pois o efeito visual do objeto não depende de um processamento por transformada de Fourier ponto a ponto, reduzindo assim drasticamente a demanda computacional da holografia eletrônica. Além disso, a imagem é realmente projetada num meio físico 3D. O problema desta técnica reside numa dificuldade mecânica, pois o meio físico em que a imagem é exibida deve ser movido em todo o volume da exibição. Além disso, permite o controle do posicionamento do feixe de elétrons sobre cada ponto do volume de exibição (voxel), reduzindo a demanda computacional. Quando este meio é constituído de fumaça ou vapor, o problema consiste no fato do feixe ser completamente visível, o que elimina a imagem por falta de contraste.

Finalmente, a holoprojeção também é classificada como holografia dinâmica. Esta técnica consiste em projetar a imagem que, partindo de uma fonte luminosa, passa por um arranjo óptico, sobre uma tela holográfica [29]. Esta configuração permite uma imagem muito maior que a gerada pela holografia eletrônica, pois depende somente do tamanho da tela holográfica e da intensidade da fonte luminosa. O sistema tem baixa demanda computacional, uma vez que grande parte do processo depende do arranjo óptico. É de baixo custo, podendo ser construído a partir de componentes comumente encontrados no mercado, exceto obviamente com relação à tela holográfica. Além disso, a imagem é projetada a cores, não necessita de ferramentas de visualização e oferece paralaxe contínua codificada cromaticamente. À medida que o observador muda de posição a imagem adquire uma cor diferente. Influenciada pela luminosidade de uma fonte comum, permite a criação de figuras de maiores dimensões que as geradas pela holografia eletrônica e, diferentemente do esquema de varredura volumétrica, não precisa de gabinetes de proteção.

Uma aplicação possível na área médica [33] está em submeter os cortes, produzidos em tomografia, ou ressonância magnética, ao sistema em questão, Isto permite que o órgão alvo de análise seja volumetricamente demonstrado, facilitando desse modo o diagnóstico de doenças. Uma outra aplicação [28], não menos importante, consiste em melhorar a

interface de aplicativos, tais como 3D-Studio ou Autocad, para que não seja necessário o esforço mental para compor tridimensionalmente os resultados das projeções.

O objetivo deste trabalho concentra-se numa das técnicas (holoprojeção) da segunda forma de abordagem de holografia (holografia dinâmica). Baseia-se na holoprojeção como forma de exibição tridimensional de imagens. Especificamente, este trabalho consiste numa proposta tecnológica para a construção de um protótipo de um holoprojetor. Ele pode ser melhorado imediatamente através da animação de imagens, o que vem sendo desenvolvido por Da Fonseca [9].

Após a revisão de literatura do Capítulo 2, o Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do protótipo e o Capítulo 4 os resultados obtidos com o mesmo.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Este capítulo faz uma revisão da literatura sobre holografia, de maneira mais detalhada. Dependendo da formação do leitor interessado, pode ser deixada para o final, exceto pela Seção 2.3.4.2, necessária para a compreensão do Capítulo 3.

A terceira dimensão é um tópico comum na descrição das inovações que acompanham o ano 2000. O assunto vem sendo frequentemente explorado pelo mercado que gradativamente investe em recursos para o desenvolvimento de tecnologia 3D. Projetos de dispositivos de exibição de imagens estão sendo elaborados e já existem possibilidades de comercialização, em algumas empresas japonesas, de televisores 3D.

Existem conceitos básicos relacionados à terceira dimensão que devem ser especificados para garantir a compreensão global do assunto. A terceira dimensão pode ser obtida através de dois tipos principais de tecnologia: uma delas consiste em empregar técnicas de computação gráfica (sombreamento, “renderização” *ray tracing*, fonte luminosa virtual), descritas em [12], e o outro tipo abrange a realidade virtual, estereoscopia e a holografia, descritos subsequentemente, e cuja união será chamada de *Tecnologia REH*. A diferença básica entre elas está no tipo de percepção da profundidade, que no primeiro caso é ilusória e no segundo é real, uma vez que não existe diferença entre a imagem e o objeto propriamente dito.

A computação gráfica, embora seja o tipo mais empregado atualmente, não é absolutamente tridimensional (conhecida como 2.5D), uma vez que é feita a exibição de um plano por vez, gerando a sensação ilusória de profundidade pela aplicação de mecanismos tais como perspectiva, oclusão, sombreamento, descritos em [11].

A *Tecnologia REH* (realidade virtual, estereoscopia e holografia) é basicamente sustentada pela simulação do comportamento do sistema visual humano, cujo mecanismo é baseado em três características:

Disparidade Binocular: os objetos são vistos em três dimensões devido ao fato de cada olho perceber a imagem a um ângulo ligeiramente diferente que do outro; as duas

imagens são processadas pelo cérebro para produzir uma única imagem em 3D, a qual provoca uma verdadeira sensação de profundidade.

Convergência: o cérebro possui a habilidade de avaliar a distância entre a pessoa e o objeto observado apenas pela rotação interna dos olhos, os quais tentam focalizar o objeto em movimento. Quando o objeto se aproxima, os olhos tendem a convergir, quando ele se afasta, tendem a divergir.

Paralaxe: à medida que acontece o movimento do observador, surgem novos pontos de vista e conseqüentemente a aparência do objeto se renova em relação ao observador. As discrepâncias entre o que é visto pelos olhos direito e esquerdo, quando registradas, constituem um par-estéreo. O termo discrepância significa que o olho direito vê um pouco mais do lado direito do objeto e o olho esquerdo vê um pouco mais do lado esquerdo. O cérebro confia nessas discrepâncias. Essas visões ligeiramente diferentes do mesmo objeto fornecem ao cérebro importantes informações para a percepção da profundidade.

A seguir serão descritos os três componentes da *Tecnologia REH*. A Holografia será apresentada em duas seções, cada qual dedicada a uma das duas abordagens adotadas, conforme descrito no Capítulo 1: Holografia Estática ou *Hard Copy*, na Seção 2.3 e Holografia Dinâmica ou Virtual, na Seção 2.4). A diferenciação básica entre ambas é dada na Seção 1.1.2, no capítulo anterior.

2.1 Estereografia

Uma das formas de captar a tridimensionalidade embutida no par-estéreo, sem usar visor especial, é utilizar a visão divergente. Isso significa que ao invés de focalizar o plano que contém a imagem, deve-se fixar o foco em um ponto aquém ou além do plano em questão. Aprender a controlar esse foco implica, em alguns casos, em treinamento do observador. Uma vez dominada a visão divergente, torna-se possível apreciar os estereogramas.

Um estereograma é o registro de pelo menos duas perspectivas sutilmente distintas de uma cena. Quanto maior o número de pontos de vista maior é a paralaxe e maior a semelhança com a imagem naturalmente em 3D. As vantagens obtidas nesse tipo de imagem ocorrem principalmente devido à disparidade binocular, a qual permite a visualização tridimensional a partir da exposição de quadros bidimensionais tomados da mesma cena a ângulos ligeiramente diferentes. Entretanto, é importante ressaltar que o estereograma oferece visão com limitação de profundidade.

A apreciação de imagens estereoscópicas é facilitada pela utilização de ferramentas de apoio à visualização, pois é preciso assegurar que cada uma das duas imagens correlatas

possa ser vista apenas pelo olho apropriado (uma observada pelo esquerdo, outra pelo olho direito), sem qualquer esforço pelo observador. A ferramenta utilizada deve provocar a canalização de imagens aos olhos correspondentes, sendo praticável de formas tais como espelhos, lentes, utilização de óculos especiais ou emprego de um material de registro lenticular.

2.2 Realidade Virtual

A realidade virtual, termo criado pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) para expressar a idéia de presença humana num espaço gerado por computador, é um dos componentes da *Tecnologia REH*. Nessa técnica associou-se os conceitos de estereoscopia e sensoriamento de posição, para obter disparidade binocular e paralaxe, e consequentemente o efeito 3D. Essa técnica permite uma extensa zona de visão (ângulo definido pela área sobre a qual o observador pode mover-se e ainda ver a imagem).

A realidade virtual permite a interação com o espaço computacional através de alguns dos cinco sentidos tais como a visão, possivelmente a audição, e o tato. Um exemplo comum consiste na utilização de um capacete em cujo visor aparece um par estéreo. O movimento da cabeça acarreta a alteração do par, da mesma forma que ocorreria em um ambiente real. A manipulação de objetos exige um dispositivo de entrada, como por exemplo uma luva, de pouco peso, cujos sensores refletem não só a posição, mas também a forma e a curvatura da mão. Tanto a luva quanto o visor têm dispositivos de rastreamento de posição que monitoram o movimento do usuário e alimentam, com essas informações, um computador que é o centro de um ambiente virtual. Entretanto, existem problemas associados que dificultam a evolução da realidade virtual: a necessidade de atualização em tempo real do par-estéreo ou o incômodo da utilização de ferramentas (capacetes, visores ou luvas). Apesar disso, a realidade virtual encontra aplicações em simulação de vôo, arquitetura, entretenimento e educação.

2.3 Holografia *Hard Copy* ou Estática

A holografia é o último componente da *Tecnologia REH*. Conforme descrito anteriormente, este assunto será visto de duas maneiras: Holografia *Hard Copy* ou Estática e Holografia Virtual ou Dinâmica. Esta seção refere-se à primeira das abordagens e a Seção 2.4 refere-se à segunda abordagem. Um holograma pode ser grosseiramente definido como uma fotografia em três dimensões. Pode ainda ser descrito como parte de um filme fotográfico exposto ao laser e processado de algum modo que, quando iluminado adequadamente, produz uma imagem tridimensional. Numa definição mais refinada, um holograma é uma rede de difração complexa que, quando apropriadamente iluminada, gera a imagem de um

objeto, normalmente com paralaxe total, ou seja, semelhante à observada naturalmente nos objetos. Os conceitos físicos envolvidos nessa definição serão descritos subseqüentemente.

A holografia e a fotografia são técnicas distintas que produzem imagens de modos diferentes e são estruturadas a partir de conjuntos disjuntos de princípios básicos. A natureza da imagem fotográfica produzida através de uma câmera pode ser descrita usando um modelo geométrico simples para representar o comportamento da luz, o qual permite descrever a formação da imagem, calcular a profundidade de campo e o ângulo de visão. Por outro lado, a natureza da imagem holográfica exige um modelo ondulatório para que a luz seja considerada como uma radiação eletromagnética, sendo possível representar os detalhes da imagem além dos fenômenos físicos envolvidos, como interferência e difração. A diferença básica entre as técnicas é que a holografia registra a energia luminosa, isto é, a frente de onda vinda do objeto e a fotografia registra a intensidade da imagem propriamente dita.

Um fotograma—por analogia a holograma—é obtido iluminando um objeto com luz artificial ou solar e registrando a luz difundida com uma câmera adequadamente posicionada. A imagem obtida é um registro plano de apenas um ponto de vista; assim, a fotografia não possui os indicadores de profundidade contidos na *Tecnologia REH*, os quais permitem a percepção 3D. É redundante dizer que qualquer fotografia considerada separadamente gera apenas duas dimensões, mas um número maior de fotografias de pontos de vista distintos já atinge algumas características tridimensionais, típicas da estereografia e da realidade virtual.

O mundo real é percebido pelo sistema visual humano porque os objetos nele existentes refletem ou transmitem luz originada em alguma fonte do ambiente. O lugar geométrico, em relação à fonte, de todos os pontos de luz que oscilam em concordância de fase é chamado de linha de onda (similar àquelas produzidas quando uma pedra é jogada na água). A linha de onda interceptada pelo globo ocular é chamada de frente de onda. Qualquer objeto colocado no caminho entre a fonte e o observador provoca uma perturbação nas linhas de onda, as quais transportam a informação do objeto até o observador que finalmente o vê. Como cada olho intercepta uma porção distinta da frente de onda, a percepção é tridimensional e qualquer movimento dos olhos faz com que duas novas porções da frente de onda sejam captadas. Um holograma é o registro completo da informação do objeto, e se corretamente iluminado irá gerar uma cópia da frente de onda, capacitando o observador a ver uma imagem que, sob todos os aspectos, replica o objeto com paralaxe total e perfeita visualização 3D.

Para se obter um holograma o objeto deve ser iluminado por laser. Isso ocorre porque a frente de onda emanada do objeto também transporta dados sobre a fonte de iluminação. Para que seja registrado somente as características do objeto desejado, a fonte de luz deve

consistir de frentes de onda planas como as produzidas numa fonte puntual monocromática (um comprimento de onda) no infinito, ou seja, um laser. A lâmpada comum não deve ser empregada, pois é uma fonte de luz que emite todo o espectro de comprimentos de onda.

O holograma é uma rede de difração, ou seja, é um registro do resultado da interferência gerada entre a frente de onda do objeto (raio objeto) e uma frente de onda não modulada (raio referência).

A holografia [6, 8, 20] é uma técnica constituída de três etapas principais: formação, processamento fotográfico e reconstrução. Na fase de formação do holograma o fenômeno físico básico envolvido é a interferência entre ondas luminosas; uma onda luminosa é completamente descrita através de dados sobre sua amplitude e fase, as quais, ao serem registradas em material fotográfico de excelente resolução, representam um objeto em sua totalidade, significado—vindo da palavra grega “holos”—do termo holograma. A amplitude corresponde a um valor de intensidade luminosa e, sem os dados da diferença de fase dos raios componentes, contém informação suficiente apenas para produzir imagens de duas dimensões. Para obter essas duas informações sobre o objeto iluminado, é preciso particionar a luz vinda da fonte em dois raios: um que ilumina o objeto (raio objeto) sendo por ele difratado, e outro que provém diretamente da fonte (raio referência), o qual preserva as informações de fase, permitindo a recuperação volumétrica. A interceptação desses dois raios constitui um padrão de interferência que contém toda a informação do objeto holografado; tal padrão, ao incidir no material de registro, produz franjas de interferência: uma área de franjas claras (concordância de fase) e outra de escuras (discordância de fase), correspondendo à codificação das características do objeto iluminado.

Após o processamento fotográfico do resultado da primeira etapa, o material é submetido à fase de reconstrução holográfica. Nesse momento, o registro das franjas de interferência é iluminado com uma onda similar à que foi usada na obtenção do holograma, e a imagem do objeto é restaurada, mantendo todas as características da cena inicial. Isso é possível devido ao principal fenômeno físico embutido nesta etapa: a difração da luz. Denomina-se difração o desvio sofrido pela luz ao passar por um obstáculo pequeno, da ordem de poucos micrômetros, tal como as bordas de uma fenda. Pode-se ver este fenômeno na prática diária em objetos que apresentam cores iridescentes como as matizes luminosas refletidas de um CD ou a cauda de um pavão.

Portanto, pode-se dizer que a holografia é um congelamento da onda procedente do objeto e não um registro da imagem, como é feito na fotografia. Em outras palavras, na fotografia o que se registra ponto-a-ponto no filme é a função “brilho”; na holografia, registra-se a função “interferência” (amplitude da soma de duas ondas mais informação sobre o desvio de fase que responde à inclinação dos raios). Em consequência, não se perde o caráter tridimensional. É interessante notar que não existe correspondência ponto-a-

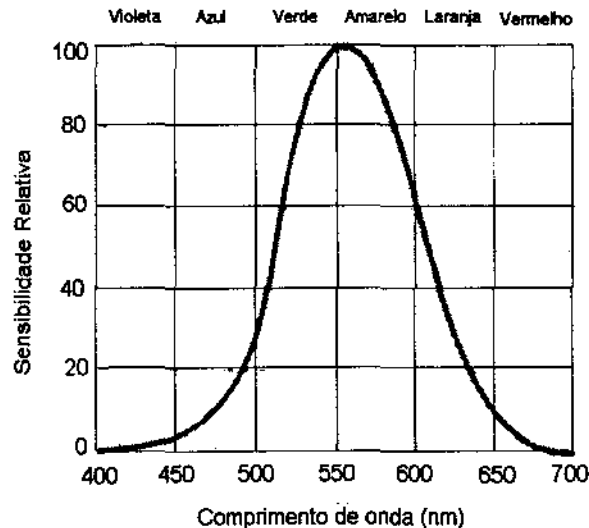


Figura 2.1: Esquema do Espectro Visível

ponto entre objeto e imagem, como ocorre em fotografia: a cada ponto do holograma está associada informação de todos os pontos do objeto. Como resultado, se um holograma que contém a imagem fora de seu plano é danificado em parte, ainda assim é possível observar o objeto em sua totalidade, embora com um número menor de perspectivas.

A seguir serão apresentados cada um dos tópicos envolvidos com a holografia *Hard Copy*: luz, raio laser, interferência e difração de ondas luminosas, as características específicas dos materiais empregados em holografia e o processo de obtenção de um holograma, os tipos de hologramas existentes,

2.3.1 Luz

A luz é um tipo de energia emitida a partir de fontes luminosas, tais como o Sol ou a chama de uma vela, capaz de estimular o sentido da visão. A luz é caracterizada pelos seus diversos comprimentos de onda, cujos valores podem variar entre $0,4\mu\text{m}$ (violeta) a $0,7\mu\text{m}$ (vermelho), intervalo este chamado de espectro visível. O gráfico da Figura 2.1 representa a reação de um observador padrão aos vários comprimentos de onda. A característica assintótica dessa curva indica que não existem limites bem definidos tanto para maiores como para menores comprimentos de onda; além disso é notório que o verde-amarelado é a gama de comprimentos de onda que melhor estimula a visão.

A luz pode ser completamente descrita através de quatro modelos para o seu com-

portamento, os quais não devem ser vistos como mutuamente exclusivos. A escolha do modelo de análise depende do propósito em questão, que indicará qual deles é o mais simples e adequado. São eles: modelo ondulatório de Huygens, modelo eletromagnético de Maxwell, modelo Quântico e modelo de Fourier, descritos a seguir.

2.3.1.1 Modelo ondulatório de Huygens

É o modelo mais adotado na previsão dos fenômenos da holografia. Uma onda pode ser representada por uma sucessão regular e periódica de pulsos caracterizados por sua amplitude e fase. Pelo princípio de Huygens, descrito em [21], cada ponto de uma frente de onda (primária) constitui uma fonte para ondas esféricas (secundárias), e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas essas ondas secundárias, que se propagam com velocidade e frequência igual à onda primária. Em outras palavras, a luz se propaga semelhantemente a quando se atira uma pedra na água: as perturbações caminham em todas as direções como circunferências concêntricas à velocidade constante (considerando o meio homogêneo).

Em algum instante, após o lançamento da pedra, o meio se encontrará dividido em duas regiões distintas: uma região perturbada—com sucessivas cristas e vales—e outra ainda não perturbada. O princípio de Huygens constitui um método gráfico útil para determinar a forma da superfície de onda. Por convenção gráfica, as cristas são representadas por circunferências em traço cheio e os vales, por circunferências pontilhadas. Nesse contexto é possível definir os conceitos de linha de onda e frente de onda: o primeiro consiste no conjunto dos pontos do meio que equidistam da fonte (envolvente), e que, portanto, começam a oscilar juntos e com as mesmas características—são pontos que oscilam em fase; frente de onda é a linha de onda que separa a região perturbada de outra ainda não perturbada (superfície de onda).

Uma onda é facilmente equacionada quando adotado um perfil cossenoidal. Nesse contexto, analisa-se o comportamento de um ponto P em movimento circular uniforme (MCU) e de sua projeção ortogonal M (sobre um diâmetro da circunferência) em movimento harmônico simples (MHS). Isso é feito para representar a periodicidade da onda luminosa, uma vez que qualquer oscilação periódica é resultado da combinação de MHS's. Sendo T o tempo gasto por P para dar uma volta completa em MCU, T é também o período do MHS realizado por M .

No estudo cinemático do MCU a velocidade com que a onda se propaga no meio é dada pelo produto entre frequência e comprimento de onda. A frequência corresponde ao número de oscilações (cristas) por segundo para um dado ponto do meio, e o comprimento de onda é a distância entre duas cristas ou vales sucessivos em um dado instante. A frequência é denotada por f para ondas de rádio e ν para ondas luminosas; o comprimento de onda é denotado por λ em ambos os casos. Se o meio é o vácuo, a velocidade da onda é

denotada por $c = 3 \times 10^8 m/s$; a amplitude A de pico da onda, correspondendo ao desvio máximo em relação a zero é normalmente medida em *Volts/metro*.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 + \omega t, \text{ onde } \omega = \frac{2\pi}{T} \\ \cos \phi = \frac{x}{R} &\rightarrow R = A \rightarrow x = A \cos(\phi_0 + \omega t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

ω → velocidade angular do MCU ou frequência angular para o MHS

T → período

f → frequência

x → amplitude instantânea

R → raio da circunferência

A → amplitude total

ϕ_0 → desvio em relação à origem

ω → frequência angular

t → tempo

2.3.1.2 Modelo eletromagnético de Maxwell

A luz é a propagação de uma perturbação eletromagnética, sendo capaz de transportar energia de um ponto para outro. É caracterizada pela oscilação de um campo eletromagnético: o vetor associado ao campo elétrico é perpendicular àquele associado ao campo magnético. O vetor resultante (vetor Poynting) indica a quantidade de energia transportada, por unidade de tempo e área, através de uma onda eletromagnética.

As fontes luminosas emitem energia durante a reorganização da estrutura de seus átomos a fim de adquirir maior estabilidade. Essa alteração da estrutura atômica é melhor explicada pelo modelo de Niels Bohr, segundo o qual o átomo possui um núcleo central contendo prótons e nêutrons, envolvidos por orbitais tridimensionais que alojam elétrons. Cada orbital representa um nível de energia capaz de suportar um número específico de elétrons. Esse valor, fixado pelas leis da Física Quântica, conforme descrito em [38], quando respeitado, garante a estabilidade energética. A passagem de um elétron de uma posição para outra mais afastada do núcleo corresponde a um aumento da energia interna do átomo. Isso acarreta emissão de energia no momento em que o átomo rearranja sua estrutura para adquirir um estado mais estável.

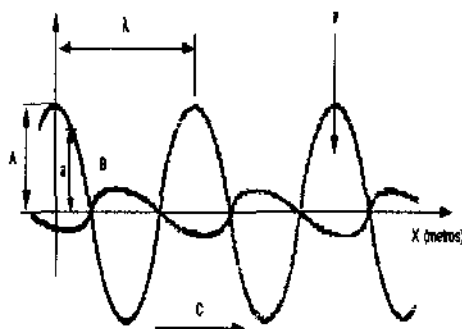


Figura 2.2: Campo elétrico e campo magnético

Denomina-se estado fundamental o estado que corresponde à energia mínima, isto é, os elétrons ocupam as camadas que representam a menor energia possível. Assim, por exemplo, num átomo de Neônio, que possui 10 elétrons, as duas primeiras camadas estão completamente preenchidas (2 e 8) e num átomo de Magnésio, com 13 elétrons, as duas primeiras camadas estão totalmente ocupadas e os 3 elétrons restantes estão no terceiro nível. Os outros estados, de energia superior à do estado normal, são estados “excitados”. A energia adquirida pelo átomo excitado poderá ser perdida espontaneamente por transição para um nível inferior, e transformada, por exemplo, em energia cinética durante colisões, conduzindo assim a um aumento de temperatura. Um átomo excitado pode emitir um fóton, após um certo tempo, de forma espontânea e numa direção aleatória. A emissão espontânea, como é chamada, é incoerente; como cada átomo emite independentemente de outros, em qualquer momento e durante um período de tempo muito curto, não existe relação de fase, de direção ou de polarização entre todas essas emissões, e a radiação é multidirecional.

2.3.1.3 Modelo de Fourier

A grande vantagem do modelo de Fourier sobre os outros três modelos está no fato de conseguir prever todos os fenômenos de formação da imagem, inclusive a existência de uma transformada de Fourier óptica num plano focal das lentes e o padrão de interferência, cujo registro resulta no holograma. Embora a óptica de Fourier tenha um embasamento teórico rigoroso, ela pode ser usada intuitivamente, somente considerando seus conceitos básicos. Uma lente simples pode atuar como um transformador de Fourier: ao colocar um objeto à distância focal na frente da lente e iluminá-lo com uma luz coerente e colimada, a distribuição complexa da luz à distância focal depois da lente, chamado de plano de Fourier, representa a transformada de Fourier (TF) do objeto. Há ainda a possibilidade de criação de um sistema que realiza uma transformada de Fourier dupla. Uma primeira

lente projeta a TF do objeto no plano focal e uma segunda repete a operação entre este último e o plano da imagem. O resultado é a dupla TF do objeto no plano da imagem, acarretando a formação da imagem invertida do objeto. O ponto de importância está no plano de Fourier, o qual permite realizar uma série de operações sobre o objeto, tais como filtragem espacial, reconhecimento de padrões ou produto de convolução [13].

2.3.1.4 Modelo Quântico

É útil para modelar a forma na qual a luz é gerada e o que acontece quando ela é absorvida por uma emulsão fotográfica. Esse modelo representa a energia luminosa como sendo gerada de forma não contínua, isto é, como um grande número de pulsos de energia eletromagnética, os fótons. Essa energia, conforme dito anteriormente, pode ser emitida de modo espontâneo: os fótons podem ser absorvidos e emitidos pelos átomos que constituem a matéria, por transição de um átomo excitado a um nível inferior de energia. A absorção de um fóton transfere sua energia ao átomo, que se torna excitado. A chegada de um fóton, de energia igual àquela passível de ser liberada pelo átomo que retorna ao nível inferior, provoca uma liberação de energia, que não é mais espontânea; o fóton indutor deve ter a mesma frequência que o fóton cuja emissão ele vai induzir, o qual terá a mesma direção, sentido e energia incidente. Essa emissão estimulada possui propriedades importantes às propostas holográficas: as radiações induzidas e indutoras têm a mesma fase, a mesma direção e a mesma polarização. Portanto, não existe qualquer discriminação física possível entre o fóton indutor e o fóton induzido, e tudo ocorre como se houvesse uma verdadeira “Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação”: LASER .

2.3.2 Laser

A fonte de luz usada para produzir um holograma deve possuir três características principais: coerência espacial, coerência temporal e polarização, descritas a seguir, as quais são encontradas no laser.

Coerência temporal: É uma medida da diferença entre os trajetos percorridos pelos raios de luz de uma mesma fonte, que foram separados por um elemento óptico (por exemplo, um divisor de raios). A coerência temporal de uma fonte luminosa é imprescindível para a percepção das franjas de interferência que não serão visíveis se a fonte luminosa for incoerente. O comprimento de coerência (comprimento de concordância de fase de ondas luminosas) de radiação para o laser é medido em metros e chega a atingir a ordem de grandeza do quilômetro, sendo, portanto, uma fonte de luz apropriada para a holografia.

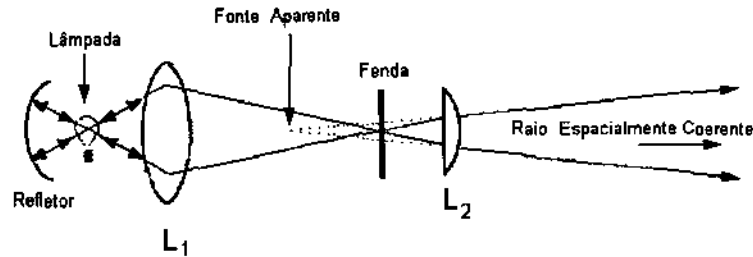


Figura 2.3: Raio de luz branca espacialmente coerente

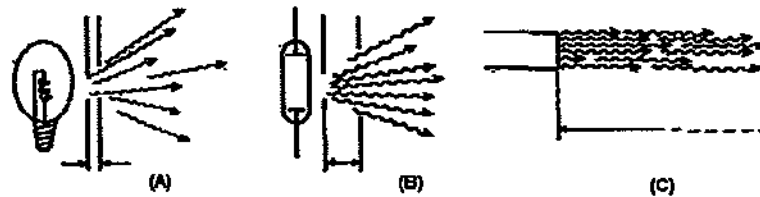


Figura 2.4: Comprimentos de coerência: A) lâmpada de tungstênio; B) Gas Discharge Tube; C) Laser

Coerência espacial: É uma forma de medir a capacidade de vibração em fase das ondas provenientes das fontes coerentes (em oposição às fontes incoerentes clássicas), para as quais não há qualquer relação de fase na extensão da fonte. Um raio de luz é dito espacialmente coerente quando ele parece ter se originado a partir de um ponto (o qual pode estar no infinito); de certo modo é uma medida do tamanho da fonte luminosa, sendo inversamente proporcional ao diâmetro aparente da fonte. Se a fonte possuir um diâmetro grande ela pode ser restringida, mediante o uso de orifícios, espelhos e lentes, a uma pequena região, conforme a Figura 2.3. A maioria dos lasers, além de possuir alta coerência espacial, são também dotados de amplo grau de colimação, isto é, a divergência do raio é bastante pequena. Um raio com coerência temporal, por outro lado, possui todos os seus fótons na mesma frequência (ou comprimento de onda). O espalhamento de frequências numa radiação eletromagnética é expresso pela largura de banda (*bandwidth*); em se tratando de luz costuma-se descrever a largura de banda em termos de comprimento de onda. Sabendo-se a largura de banda é possível calcular a distância onde os fótons permanecerão substancialmente em fase (comprimento de coerência). Para luz branca esse valor é somente de alguns nanômetros, para um arco de mercúrio filtrado é de alguns milímetros e para o laser pode variar desde centímetros até 20 metros ou mais, dependendo do tipo de laser e da óptica usada (Figura 2.4). É o comprimento de coerência que determina qual é a profundidade disponível do espaço do objeto na confecção do holograma.

Polarização É outra propriedade que a fonte de luz deve possuir para a formação de uma boa interferência. Ela consiste no confinamento do vetor elétrico do raio de luz numa direção específica. Se essa direção é constante, o raio é dito linearmente polarizado ou de polarização planar. (O componente magnético permanece numa direção perpendicular a ele). Em geral, a luz proveniente do laser é linearmente polarizada embora alguns tipos de laser possuam polarização aleatória.

2.3.2.1 Componentes

Um laser é constituído de um material ativo, o qual será violentamente iluminado por uma fonte de bombeamento (tais termos serão definidos subseqüentemente). Envolvendo o conjunto com um invólucro de material refletor acarretará uma melhor concentração da luz de bombeamento sobre o material ativo. Um feixe de luz monocromática, de comprimento de onda apropriado, atinge uma das faces do invólucro, por exemplo, cilíndrico, segundo o eixo principal; sai pela outra face, na mesma direção, amplificado pela emissão estimulada. Entretanto, para que ocorra a amplificação é necessário utilizar uma cavidade ressonante, a qual possui dois espelhos planos perpendiculares ao eixo da barra laser e situados de cada lado dessa barra. Pelo menos um desses espelhos é semitransparente, de forma a permitir a saída da radiação obtida por emissão estimulada. Os componentes do laser e seu modo de funcionamento são descritos a seguir.

Material ativo: O material ativo pode ser um sólido tal como o rubi, o vidro de neodímio ou o YAG (Yttrium Aluminium Garnet), isto é, uma granada de ítrio e alumínio, dopada por neodímio. Pode ser também um líquido ou um gás, o qual é fechado em um recipiente do qual duas paredes opostas são transparentes e planas. Os lasers de gás são muito mais divulgados que os de líquido; entre os gases utilizados estão o hélio-neônio, anidrido carbônico, argônio ionizado ou o criptônio ionizado.

Cavidade ressonante: Apresenta variantes, conforme o material ativo: no caso de um laser de estado sólido, os espelhos podem ser as faces terminais do cilindro de material ativo. Em um laser de gás, eles podem ser constituídos pelas paredes que fecham o recipiente.

Dispositivo de bombeamento: Os lasers de estado sólido com bombeamento óptico possuem um rendimento pequeno—em torno de 10 %—e portanto é preciso eliminar o calor gerado pela fonte de bombeamento e pelo material ativo, geralmente pela circulação de ar ou de líquido. Os lasers de gás praticamente não podem utilizar um bombeamento óptico, devido à fraca absorção dos mesmos. Em contrapartida, uma descarga elétrica em um gás libera elétrons ou íons animados por grandes velocidades que podem, por meio de choques, levar átomos a estados excitados. Portanto,

um laser de gás muito provavelmente será bombeado por descarga elétrica. Outra variedade de bombeamento é o bombeamento químico: moléculas podem encontrar-se em um estado excitado quando acabam de ser formadas por uma reação química. Neste caso, a reação é que constitui a fonte de bombeamento, e os lasers assim construídos denominam-se lasers químicos. Nos lasers pulsados com bombeamento óptico, o dispositivo de bombeamento é um flash. Tal flash pode ser linear ou helicoidal, envolvendo a barra de laser. Certos materiais laser—YAG, por exemplo—admitem uma potência instantânea de bombeamento mais fraca que a do flash além de poderem ser bombeados por tubos de emissão contínua—arco de xenônio, por exemplo. Finalmente, a barra laser e o dispositivo de bombeamento é envolvido por um refletor ou difusor de modo conveniente. Nos lasers de gás, utiliza-se como dispositivo de bombeamento uma descarga elétrica no próprio gás; neste caso, a estrutura envolvente difere do esquema anterior.

2.3.2.2 Modos de funcionamento

Emissão contínua: Se o meio ativo for excitado de forma contínua, seja por uma descarga elétrica no caso de lasers de gás, seja por uma fonte contínua de bombeamento óptico, evidentemente a emissão a laser será permanente.

Emissão pulsada: Quando o bombeamento é pulsado (bombeamento óptico por flash, por exemplo), é claro que a emissão também será pulsada. Sua duração será inferior à do funcionamento do flash. Com efeito, no início do clarão, o material é progressivamente bombeado para chegar a um nível de excitação suficiente para que se produza a emissão de laser. Essa emissão libera parcialmente os níveis excitados enquanto o bombeamento prossegue; obtém-se assim, uma sucessão de pulsos muito próximos até o final do funcionamento do flash. Esse tipo de funcionamento denomina-se pulsado. Sua duração situa-se, conforme a duração do clarão do flash, entre algumas centenas de microssegundos e uma dezena de milissegundos.

Emissão desencadeada ou destravada (Q-Switched): No caso dos lasers pulsados, o princípio desse funcionamento consiste em deixar o bombeamento efetuar-se para além do limite de funcionamento, e permitir a emissão laser apenas quando tal bombeamento atinge nível suficiente. Produz-se assim um pulso de energia muito maior que no modo anterior e, em seguida, a emissão é encerrada. Resultam pulsos de curta duração (nanossegundos) com consideráveis potências de pico. A proibição ou permissão de emissão é produzida por uma grande variação do coeficiente de supertensão da cavidade (Q-Switch). Todos os processos de desencadeamento utilizados consistem em introduzir um dispositivo que atenua ou bloqueia a passagem da radiação na cavidade.

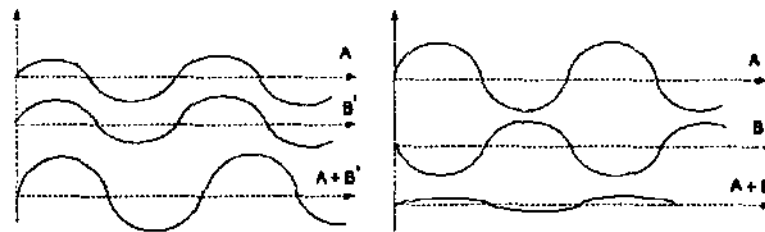


Figura 2.5: Duas ondas de mesmo comprimento de onda somam-se (à esquerda) se suas cristas e vales coincidem, e subtraem-se (à direita) se as cristas de uma coincidem com os vales da outra.

2.3.3 Interferência

A interferência é um fenômeno físico que ocorre quando dois ou mais conjuntos de ondas se cruzam em um ponto qualquer do espaço. Isso não significa que a propagação de um conjunto seja dificultada pela presença de outros; refere-se apenas ao efeito combinado de todos eles no ponto em que se cruzam. O resultado desse efeito pode ser encontrado na natureza em certos padrões de cores tal como a coloração percebida em manchas de óleo ou bolhas de sabão. Outros resultados importantes para a holografia [21], podem ser obtidos através de sistemas ópticos produzidos para gerar a interferência entre dois conjuntos de ondas eletromagnéticas similares e uniformes: em certos pontos, os dois conjuntos se somarão, criando uma interferência construtiva, em outros pontos ocorrerá a subtração dos conjuntos de ondas, gerando uma interferência destrutiva. Conforme a Figura 2.5, quando as cristas de um conjunto coincidem com as de outro conjunto, ocorre interferência construtiva e a altura das cristas combinadas é aumentada. Por outro lado, quando as cristas de uma fonte coincidem com os vales da segunda fonte, ocorre interferência destrutiva e a altura das cristas combinadas é diminuída. Para ondas sonoras, tais efeitos aditivos e subtrativos aumentam ou diminuem a altura do padrão sonoro; para ondas luminosas, eles causam variações de intensidade luminosa [24].

Uma condição para que o padrão de interferência (as posições onde ocorrem adição ou subtração de ondas) seja observável é a coerência da fonte de luz. Não é necessário que os conjuntos de ondas em interferência estejam exatamente em fase; um defasamento arbitrário é permitido, desde que seja constante, produzindo ainda resultados observáveis. Outra condição exigida é a coerência temporal, uma medida do intervalo de tempo ao longo do qual o campo luminoso varia harmonicamente. O tempo de coerência da radiação representa, portanto, o valor médio do intervalo de tempo durante o qual é possível prever o comportamento do campo luminoso. Outra condição é o comprimento de coerência, ou seja, a extensão espacial do trem de ondas ao longo do qual a fase varia de uma forma determinística. A situação ideal consiste no caso da luz ser perfeitamente monocromática,

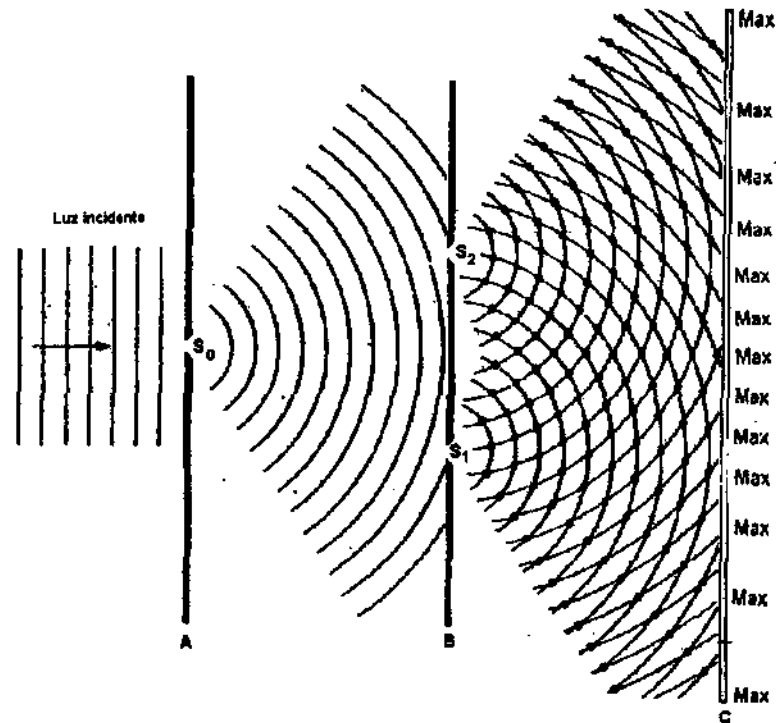


Figura 2.6: A luz difratada do orifício S_0 incide sobre os orifícios S_1 e S_2 no anteparo B. As luzes difratadas destes dois orifícios se superpõem na região entre os anteparos B e C, produzindo uma configuração de interferência sobre o anteparo C

o que resultaria num comprimento de coerência infinito.

Com o objetivo de compreender a forma com que a imagem de um objeto está codificada num holograma, na forma de um padrão de interferência, é necessário por simplicidade estabelecer algumas condições: os conjuntos de ondas devem ter mesma frequência (e portanto mesma cor), derivados de uma só fonte de luz perfeitamente coerente. Além disso, a diferença de fase e a intensidade do padrão de interferência são absolutamente constantes no tempo.

A Figura 2.6, segundo [19] mostra três anteparos A, B e C, sendo que A e B possuem um e dois orifícios pequenos, respectivamente. Quando a luz incidente atinge alguma dessas fendas ocorre desvio no percurso das ondas, a ponto de gerar superposição dos raios luminosos após o anteparo B. Esse fato impede que o anteparo C seja uniformemente iluminado, gerando um padrão composto por áreas claras intercaladas por regiões escuras, que, em conjunto, são chamadas de franjas de interferência.

A Figura 2.7, em [19], especifica alguns parâmetros necessários para determinar quais são as posições do anteparo C que exibirão franjas de interferência. Assume-se que dois raios r_1 e r_2 emergem das posições centrais da fendas S_1 e S_2 , respectivamente, e que o

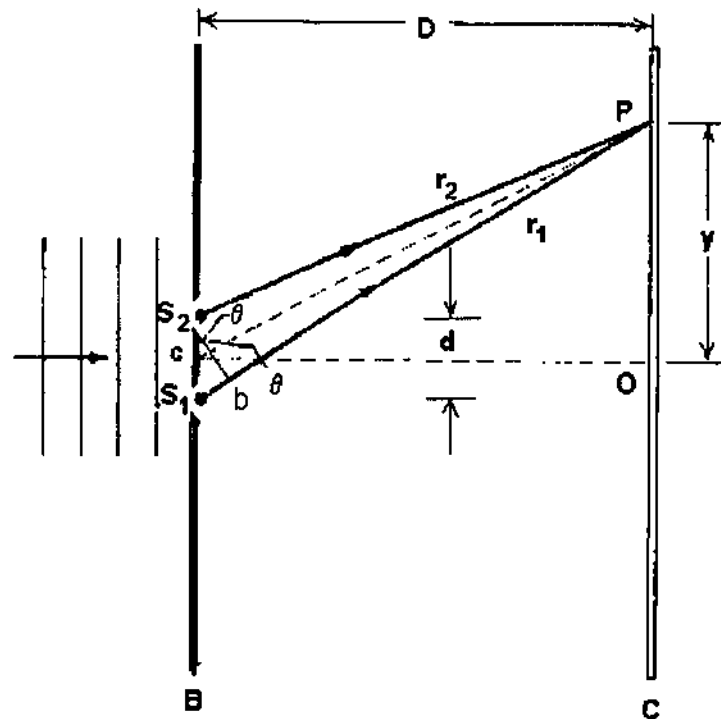


Figura 2.7: As ondas provenientes das fendas S_1 e S_2 combinam-se em um ponto P , um ponto arbitrário sobre o anteparo. O ângulo θ localiza o ponto P .

encontro deles acontece no ponto P do anteparo C . Conforme a ilustração, são traçados os segmentos r_1 e r_2 e o segmento $\overline{S_2b}$, tal que $\overline{S_2P}$ e \overline{bP} sejam iguais. Por simplicidade, assume-se que $\overline{S_2b}$ é perpendicular a r_1 .

Quando a distância entre os orifícios é muito menor que a distância entre os anteparos, r_1 e r_2 são praticamente paralelos. Isso pode ser alcançado colocando-se os anteparos bem distantes uns dos outros; na prática, entretanto, é colocada uma lente em frente a B , e o anteparo C é colocado no seu plano focal. Como a frente de onda da fonte é plana, pode-se dizer que os raios chegam a S_1 e S_2 em concordância de fase. O segmento $\overline{S_1b}$ provoca uma diferença de percurso óptico que acarreta discordância de fase. O número de comprimentos de onda em $\overline{S_1b}$ é que determina a natureza da interferência em P .

É possível saber se o ponto P exibirá uma área clara ou escura. Para que P seja um ponto de interferência construtiva (ponto de máximo) é preciso que $\overline{S_1b}$ contenha um número inteiro de comprimentos de onda, ou seja, $\overline{S_1b} = m\lambda \rightarrow d \sin \theta = m\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$. É interessante notar que, para cada ponto de máximo acima do nível de O , haverá um máximo simétrico abaixo de O ; para $m = 0$ existe um máximo central em O .

Para que P seja um ponto de interferência destrutiva (ponto de mínimo) é preciso que $\overline{S_1b}$ contenha um número ímpar de meios comprimentos de onda, ou seja, $\overline{S_1b} =$

$(m + \frac{1}{2})\lambda \rightarrow d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$. É interessante notar que para cada ponto de mínimo acima do nível de O haverá um mínimo simétrico abaixo de O .

Uma observação adequada a respeito da lente é que ela não altera a fase das ondas que nela incidem, uma vez que raios paralelos focalizados por uma lente possuem percursos ópticos idênticos, e como raios nessa situação possuem o mesmo número de comprimentos de onda, então não haverá alteração de fase pelo simples fato de se atravessar a lente.

Nessa combinação produz-se uma nova onda cuja amplitude (e portanto intensidade) é a soma algébrica das componentes: se a amplitude resultante é maior que a das ondas formadoras então a interferência é construtiva ou em concordância de fase; se menor, a interferência é destrutiva ou em oposição de fase. Na interferência entre as ondas que se originam de um objeto e as ondas provenientes da fonte de iluminação pode-se observar, através de um microscópio, regiões alternadas de interferência construtiva e destrutiva. O registro fotográfico dessas interferências, como são chamadas, nada mais é que o próprio holograma que posteriormente poderá ser reconstruído. Os padrões mais bem definidos observam-se quando as amplitudes das ondas que interferem são iguais. As regiões centrais ou franjas iluminadas ou escurecidas correspondem a situações de interferência construtiva ou destrutiva total, respectivamente.

É possível conhecer e descrever matematicamente a localização da interferência construtiva e destrutiva entre os raios objeto e referência no plano do holograma [19]. Além dessa informação, também é útil saber a intensidade da luz em qualquer ponto do padrão interferência: ela consiste da soma das intensidades individuais acrescentando-se um termo de interferência no qual está contida a informação de diferença de fase [8].

Sabe-se que a informação existente na frente de onda do objeto pode ser congelada num padrão de franjas no holograma, com posição e intensidade perfeitamente determináveis. Entretanto, é óbvio que essa codificação só tem utilidade se existir uma forma de decodificar as franjas de interferência em uma imagem 3D. A decodificação implica em submeter a placa holográfica a processos químicos (semelhantes àqueles usados para revelação fotográfica), recolocando o material na posição original e iluminando-o com o raio referência usado na etapa anterior, que passa a ser chamado de raio de reconstrução. Nesse processo de replay, emerge do holograma uma réplica do raio objeto, agora denominado de raio imagem. Como o raio imagem é idêntico ao raio objeto, pode-se agora observar uma imagem idêntica à do próprio objeto, com realismo completo e o que é melhor, com paralaxe total, uma vez que um deslocamento de ponto-de-vista fará com que o olho intercepte uma parte diferente da frente de onda que está totalmente registrada. A parte superior do holograma registra a visão da parte superior do objeto, o lado direito registra a visão direita do objeto e assim por diante. A sensação é análoga a observar o objeto através de uma janela: se o holograma for partido ao meio, a imagem não será destruída, apenas a visão será restringida.

O fenômeno explicado a seguir, relata melhor como um padrão de franjas irregulares faz com que um raio transforme-se em três quando a luz o atravessa: o que ocorre é um fenômeno chamado difração, o qual possui papel fundamental na reconstrução da imagem.

2.3.4 Difração

A difração é um fenômeno ondulatório que produz uma sombra complexa, constituída por regiões claras e escuras. Esse efeito é melhor percebido quando a fonte de luz que ilumina um objeto, colocado à sua frente, é por ele obstruída, gerando uma sombra em uma tela de projeção, conforme a Figura 2.8. A imagem gerada é resultante de alterações de amplitude e fase ocorridas com a luz que interage com algum tipo de obstáculo. Segundo [21] tal efeito ocorre exclusivamente com fenômenos ondulatórios, sejam ondas acústicas, luminosas ou mesmo materiais, verificando-se sempre que uma parte da frente de onda é obstruída. O conhecimento da difração é necessário para determinar qual é a distribuição de luz na tela de projeção e conseqüentemente a imagem obtida holograficamente.

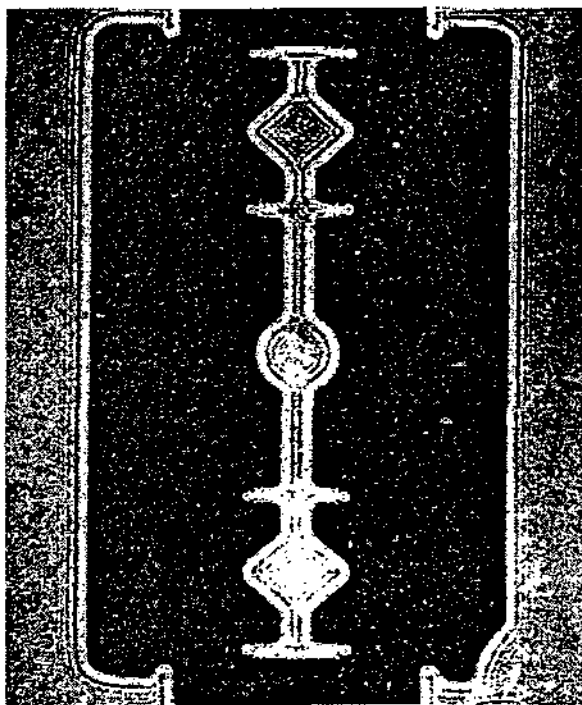


Figura 2.8: Difração ocorrida nos contornos de uma gilete iluminada por luz monocromática. Note as franjas alternadas de máximos e mínimos.

Quando um objeto é iluminado por uma fonte puntual contra uma tela opaca, é possível perceber todos os contornos do elemento com grande nitidez. O objeto iluminado mostra-se envolvido por franjas brilhantes, cuja intensidade diminui à medida que se afasta do

objeto. Se a luz emitida pela fonte não for puntual (naturalmente ou artificialmente gerada com o auxílio de uma lente), a imagem resultante é caracterizada por franjas superpostas, de tal modo que nenhuma Figura individual pode ser observada.

A presença da sombra é devido às várias partes da frente de onda que continuam seu caminho, mesmo após o desvio sofrido, que ao interferirem, originam um padrão de difração. Não existe uma distinção física significativa entre interferência e difração. No entanto, dependendo do contexto, utiliza-se um termo ou outro; é frequente usar o termo interferência quando se considera a sobreposição de um número reduzido de ondas, reservando-se a difração para os casos em que o número de ondas é elevado. Em holografia é comum dizer que a interferência é o fenômeno básico envolvido na etapa de formação do holograma, enquanto que a difração da luz é o processo responsável pela obtenção da imagem holográfica.

O princípio de Huygens e Fresnel constitui um elemento essencial para a compreensão dos fenômenos da difração. Esse princípio propõe que uma frente de onda, não obstruída, pode ser vista como um conjunto de fontes secundárias de ondas esféricas (com a mesma frequência da onda original) [21]. Esse fato é útil para prever a posição da frente de onda em qualquer instante posterior, desde que seja conhecida sua posição atual. Assim, após um certo tempo, a frente de onda passa a ser a superfície que tangencia as ondas secundárias emitidas pelas fontes pontuais conforme a Figura 2.9 [21]. Além disso, é importante saber que a nova frente de onda possui a mesma frequência da frente de onda primária, e a amplitude do campo óptico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição das amplitudes de cada campo componente, levando em consideração as amplitudes e fases relativas. Por exemplo, quando uma frente de onda plana incide num anteparo opaco com um pequeno orifício, o trem de ondas deixa de ser plano e assume um formato circular, mais arredondado nas extremidades da abertura; quanto menor a diferença entre o tamanho da fenda e o comprimento de onda maior será o encurvamento da frente de onda. Quando essa diferença é muito grande, a difração pode ser ignorada.

O fenômeno da difração está convenientemente dividido em duas classes gerais: o primeiro grupo abrange todo o tipo de difração na qual a fonte de luz e a tela de projeção estão infinitamente distantes do objeto, fenda ou saliência que originou a difração; o segundo grupo engloba os casos em que a fonte de luz e a tela, ou ambos, estão a uma distância finita do motivo de difração. O primeiro caso, por razões históricas, é chamado de difração de Fraunhofer ou de campo longínquo; o segundo tipo é chamado de difração de Fresnel ou de campo próximo.

A difração de Fraunhofer é teoricamente mais simples e o padrão resultante facilmente observável na prática com o auxílio de duas lentes: uma colocada à frente da fonte, para tornar paralelos os raios incidentes, e a outra adaptada à frente da tela para que os raios projetados que emanam da fenda sejam paralelos. Esse arranjo efetivamente remove a

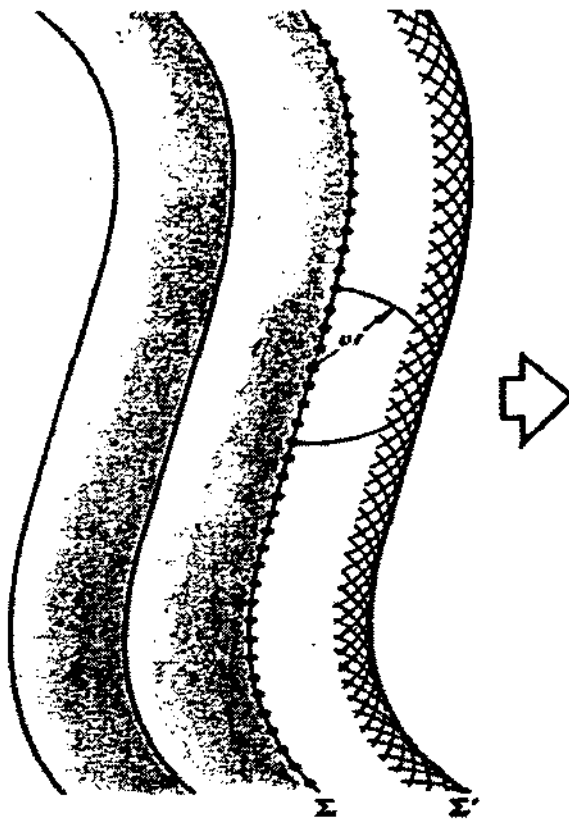


Figura 2.9: Propagação de uma frente de ondas conforme princípio de Huygens.

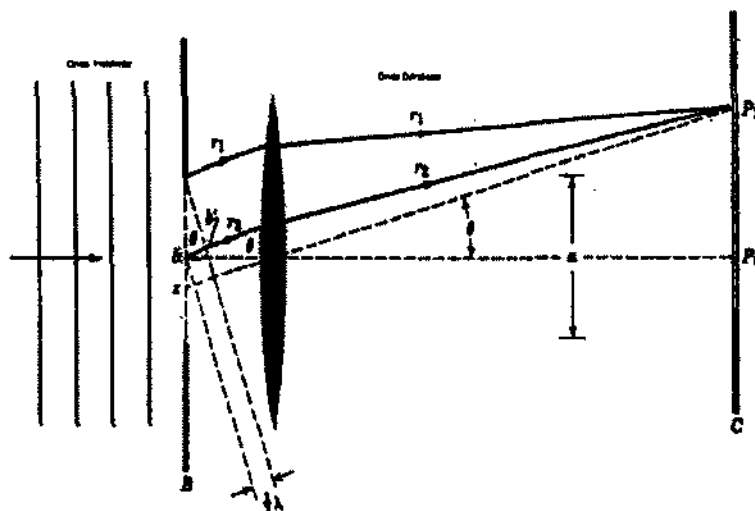


Figura 2.10: Condições para o primeiro mínimo da configuração de difração.

fonte e a tela para o infinito. Por outro lado, a difração de Fresnel não requer o uso de lentes, mas como as frentes de onda são divergentes, ao invés de planas, requerem um tratamento mais complexo. Os casos de difração serão considerados conforme as condições de Fraunhofer.

2.3.4.1 Difração por uma fenda

O objetivo consiste em analisar a distribuição de energia luminosa resultante da difração ocasionada por uma abertura num alvo opaco, conforme a Figura 2.10. Observa-se a incidência de uma onda plana sobre uma fenda: a luz não difratada concentra-se no ponto central P_0 , onde todos os raios componentes contém o mesmo número de comprimentos de onda e , uma vez assumido que estavam em fase ao atingir a fenda, assim permanecerão no ponto P_0 . Dessa forma, as amplitudes se somam e P_0 é um ponto central de intensidade máxima.

Quando são considerados pontos mais afastados do centro do anteparo, ocorre um aumento da diferença de trajeto a ser percorrido pela luz. Assim, sendo P_1 um desses pontos, os raios luminosos que o atingem deixam a abertura com um ângulo θ . A diferença de percurso óptico entre r_1 e r_2 é dada por $\frac{a}{2} \sin\theta$, onde a é a largura da fenda. Não existem outras diferenças de trajeto, pois conforme [39] a incidência de raios paralelos de luz sobre uma lente contém o mesmo número de ondas em todos os raios, no trecho compreendido entre um plano normal ao feixe incidente e a imagem obtida.

Quando a diferença de percurso assume o valor de meio comprimento de onda, r_1 e r_2 se encontram em P_1 com interferência destrutiva, surgindo uma faixa escura, o primeiro mínimo:

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Dessa forma, assumindo que λ seja fixo, à medida que o tamanho da abertura diminui, $\sin \theta$ tende a um valor máximo, ou seja, $a \sin \theta = \lambda$, $\frac{a}{2} \sin \theta = \lambda$, $\frac{a}{4} \sin \theta = \lambda$, ..., $\frac{a}{n} \sin \theta = \lambda$, e portanto os mínimos são dados pela seguinte equação:

$$a \sin \theta = n\lambda, \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

Existe um máximo situado aproximadamente a meia distância entre dois mínimos consecutivos; a configuração de máximos e mínimos é completamente simétrica em relação a P_0 , ou seja, o padrão de difração da parte superior é igual ao da parte inferior.

A Figura 2.11 mostra uma situação generalizada para o problema da difração [19]. Frentes de ondas incidem sobre um objeto opaco, contendo uma abertura de forma arbitrária, atingindo um anteparo. Para conhecer a distribuição de intensidade do padrão de difração formado no anteparo, é preciso dividir a frente de onda em áreas elementares dA , cada uma das quais, segundo o princípio de Huygens e Fresnel, tornando-se uma fonte de frentes de onda secundárias. A intensidade luminosa num ponto P é obtida pela superposição das perturbações ondulatórias produzidas pelas ondas secundárias que emanam dos elementos de área elementares e atingem o ponto P . As perturbações ondulatórias que atingem o ponto P possuem amplitudes e fases diferentes, porque as fontes secundárias estão a diferentes distâncias de P . Assumindo as condições de Fraunhofer para a difração calcula-se a intensidade para cada ponto do anteparo, obtendo-se a distribuição de intensidade luminosa.

2.3.4.2 Redes de difração

A rede de difração [19] é uma malha óptica obtida pela abertura de sulcos paralelos numa placa de vidro ou metal. Suas fendas são criadas traçando-se retas equidistantes empregando régua e uma ferramenta com extremidade de diamante controlada através de um hardware de gravação. As redes de difração são largamente empregadas no estudo da estrutura e da intensidade dos espectros de raios.

A rede associa dois fenômenos: difração e interferência. Cada abertura da rede origina um feixe difratado, onde a distribuição de intensidade (formas das linhas espectrais) é função da largura da fenda; os diversos feixes difratados interferem-se, então, para produzir o padrão de difração final [39].

Existem dois tipos principais de rede de difração: reflexão e transmissão. As redes gravadas em metais (tal como o alumínio, que não provoca grande desgaste no diamante) denominam-se redes de reflexão, porque os efeitos de interferência são produzidos por

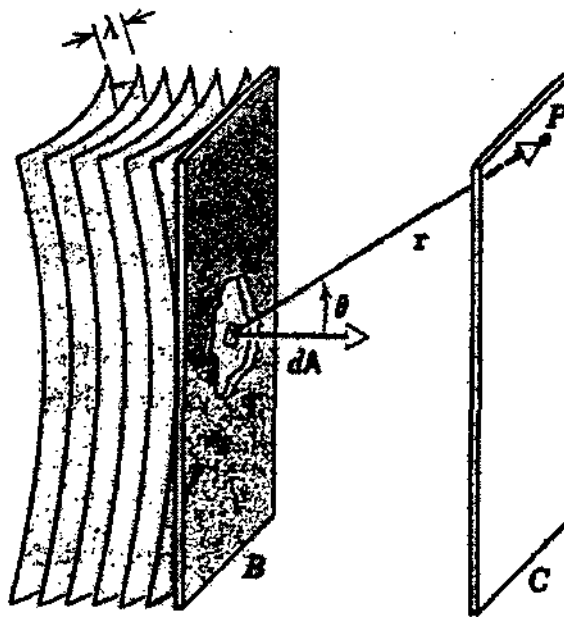


Figura 2.11: Uma frente de onda coerente incide sobre um objeto opaco B que contém uma abertura arbitrária. A configuração da difração será formada sobre o anteparo C.

reflexão; tais redes também são conhecidas como redes de reflexão em fase. A fabricação desse tipo de rede normalmente envolve a obtenção de uma matriz de metal, como molde, a partir da qual são formadas as réplicas, de plástico.

As redes de transmissão estão divididas em dois conjuntos: transmissão em amplitude e transmissão em fase. O primeiro grupo é exemplificado por rede com múltiplas aberturas: regiões opacas alternadas com regiões transparentes; o segundo grupo consiste de redes de material transparente, nas quais a modulação de amplitude é desprezível variação de espessura, ou índice de refração, é responsável pela modulação de fase.

As redes de difração obedecem uma equação—a mesma usada na difração de fenda única—que define a posição dos máximos de interferência, os quais correspondem a ângulos bem definidos. A variável m indica a ordem dos máximos principais. Para uma fonte de espectro largo e contínuo, como um filamento de tungstênio, a imagem, ou ordem zero, corresponde à imagem não defletida da fonte ($\theta = 0$). A equação da rede depende do comprimento de onda, o que significa que, para qualquer valor de m não nulo, as diversas imagens coloridas da fonte, construídas segundo ângulos de difração ligeiramente diferentes, dão origem a um espectro contínuo. As regiões ocupadas pelos máximos secundários, agora muito tênues, têm o aspecto de bandas aparentemente não iluminadas. A primeira ordem, $m = \pm 1$, ladeia a ordem zero, $\theta = 0$, e é seguida, alternando com bandas escuras, pelos espectros de ordem superior, $m = \pm 2, \pm 3$.

Numa rede de difração, a distribuição de intensidades que surge quando a luz mono-

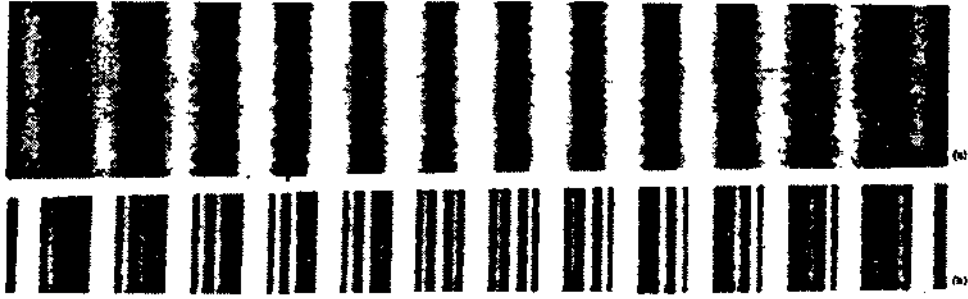


Figura 2.12: (a) difração em rede com duas fendas; (b) difração em rede com cinco fendas.

cromática, de comprimento de onda l , incide sobre a rede, consiste numa série de franjas de interferência. Os afastamentos angulares entre essas franjas são determinados pela relação l/a , onde a é a distância entre os centros de duas fendas adjacentes. A relação l/a expressa a frequência espacial: o número de franjas de interferência por uma certa unidade de espaço. As intensidades relativas dessas franjas são determinadas pelo espectro de difração de fenda única que, depende da relação l/b , onde b é a largura da fenda.

Considerando x a posição do elemento, $v(x)$ a frequência espacial em x , $\theta_r(x)$ e $\theta_o(x)$ os ângulos de incidência dos feixes referência e objeto em relação à normal ao filme em x e λ_0 o comprimento da onda utilizada, a equação da rede de difração é dada em 2.2.

$$v(x)\lambda_0 = \sin \theta_r(x) - \sin \theta_o(x) \quad (2.2)$$

Observações importantes são feitas em relação ao número de fendas de uma rede de difração. A primeira delas consiste no fato de que aumentar esse valor não implica em variar a distância entre os máximos (principais) das franjas de interferência (desde que a distância entre duas fendas adjacentes e a largura da fenda mantenham-se constantes). Outra conclusão é que o aumento do número de fendas faz com que os máximos (principais) tornem-se mais estreitos, além de introduzir pequenos máximos secundários entre os principais (Figura 2.12).

2.3.5 Material de registro

2.3.5.1 Sensibilidade

A curva H&D [23] é adequada para expressar a sensibilidade de filmes fotográficos, mas não é satisfatória para a holografia, a qual exige uma análise mais refinada. Deseja-se conhecer, por exemplo, o contraste das franjas de interferência que codificam o objeto ou uma avaliação do resultado em termos de qualidade de registro dessas franjas (contraste da imagem), ou ainda a relação entre esses valores.

Sabe-se que o material utilizado para registrar o holograma sofre alterações em suas propriedades ópticas quando é exposto à luz. Essa variação sofrida pelo meio pode ser usada para classificá-lo em dois grupos principais: material de modulação em amplitude (quando o meio absorve luz) ou de modulação em fase (quando o meio é espesso ou possui índice de refração distinto). Considerando α como o coeficiente de absorção do material, d sua espessura, n o índice de refração e λ o comprimento de onda, o perfil de transmissão do holograma, t , quando exposto à luz, é dado por:

$$t = | \exp(-\alpha d) \exp[-i(2\pi n d / \lambda)] | \exp(-i\phi) \quad (2.3)$$

2.3.5.2 Sistema de processamento óptico

Uma análise mais refinada do meio de registro requer que o material utilizado seja visto como um componente básico de um sistema de processamento óptico. O comportamento de tal sistema é descrito pela relação existente entre uma certa função-saída, $g(x, y)$, gerada como resposta ao estímulo de uma dada função-entrada, $f(x, y)$, conforme [46]. O material de registro influencia diretamente no comportamento do sistema; ele pode atuar como o meio no qual os dados são introduzidos no sistema óptico para processamento ou mesmo fornecer as atenuações necessárias, no plano de frequências, para a síntese de uma determinada função de transferência. Pode ainda agir como meio onde será registrada a saída do sistema [18].

O meio de registro geralmente se comporta de um modo não linear, isto é, não se encaixa nas propriedades de sistemas lineares [23], não sendo adequado associar uma função de transferência. Entretanto, o fenômeno físico que limita a resposta em frequência é, na maior parte, linear (por exemplo, a dispersão da luz na emulsão ou os processos químicos de revelação). Assim, pode-se esperar que os fenômenos lineares que limitam a resposta em frequência podem ser separados das propriedades não lineares. Pode-se relacionar o mapeamento do material a uma cascata de filtros lineares, invariantes no espaço, tendo uma determinada função de transferência.

Função de transferência O sistema óptico linear é completamente descrito por uma função de transferência óptica (OTF). A função de transferência de modulação (MTF) é a parte da OTF associada à análise do contraste das franjas de interferência pertinentes ao sistema em questão. A avaliação é feita no domínio das frequências espaciais, sendo expressa pela razão entre a modulação do contraste da imagem e a modulação do contraste do objeto. A modulação expressa contraste pela razão entre transmitâncias ou, equivalentemente, pela visibilidade das franjas de interferência. Obter tal resultado corresponde a avaliar a eficiência de difração do holograma.

A eficiência de difração pode ser definida como a razão entre a energia difratada na imagem desejada através de um elemento do holograma, e a energia nele incidente, vinda da fonte de iluminação. A eficiência de difração de um holograma, da qual depende a luminância da imagem reconstruída, é essencialmente determinada pelo meio de registro usado e a visibilidade das franjas portadoras.

Visibilidade das franjas Para produzir um holograma que reconstrua uma imagem com brilho, o padrão de interferência formado no meio de registro, pelas ondas objeto e referência, deve ter o maior contraste possível. O contraste do padrão de interferência em qualquer ponto do holograma, considerando as intensidades máximas e mínimas (I_{max}, I_{min}) é medido pela visibilidade das franjas (V), pela relação:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.4)$$

Intensidade luminosa A intensidade (I) em qualquer ponto do material usado para fazer o holograma, considerando $\langle I \rangle$ como intensidade média, ϕ_r e ϕ_o fase da onda referência e onda objeto, respectivamente, e V a visibilidade das franjas de interferência, é dada pela relação:

$$I = \langle I \rangle [1 + V \cos(\phi_r - \phi_o)] \quad (2.5)$$

Mean Transfer Function Como ocorre difusão da luz dentro do meio de registro a modulação real da intensidade é sempre menor que o padrão de interferência original. Para qualquer frequência espacial s , a razão entre $V_2(s)$, a modulação real da distribuição de intensidade luminosa no material e $V_1(s)$, a modulação de entrada, é expressa pela *MTF*. Esse valor é geralmente menor que um e serve para caracterizar o comportamento do material às diferentes frequências espaciais.

$$MTF = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} \quad (2.6)$$

Quando o material de registro é ideal, a resolução da imagem é limitada apenas pelas dimensões do holograma. Na prática, entretanto, a *MTF* do sistema, em geral, afeta tanto a resolução quanto a intensidade da imagem reconstruída. Isso ocorre porque na maioria dos sistemas holográficos a frequência espacial assume diferentes valores ao longo da superfície do holograma, causando variações correspondentes na *MTF* do sistema e produzindo, para um mesmo meio, valores de eficiência de difração distintos. Quando essa variação é significativa torna-se necessário considerá-la na avaliação das propriedades

da imagem do holograma. As únicas exceções para tal situação ocorrem quando a imagem é formada sobre o holograma ou próximo a ele ou nos hologramas de Fourier [20].

Uma maneira de visualizar os efeitos da MTF do material, para um certo ponto do holograma, consiste em utilizar um filtro fictício no raio objeto. A transmitância de amplitude dessa máscara é proporcional à MTF, variando da unidade—em pontos do objeto alinhados com o raio referência (e conseqüentemente correspondendo à frequência espacial zero no holograma)—até pontos bem separados da fonte referência, completamente opacos. Em conclusão, os efeitos da MTF do material de registro podem ser considerados através da criação de uma função pupila, dependente da frequência espacial e da MTF do material.

Ruído Ruído é termo, em holografia óptica, conveniente para definir a luz que não é formadora da imagem, luz que é difratada ou difundida nas várias direções da luz que restaura a imagem. Uma possível fonte de ruído é o próprio material de registro, tal como as emulsões fotográficas, cujas partículas componentes, distribuídas aleatoriamente sobre o meio, são responsáveis por difusão de luz.

2.3.5.3 Materiais Existentes

É importante que o meio de registro ideal à holografia seja reciclável ou relativamente barato e seja caracterizado por:

- sensibilidade espectral adequada aos comprimentos de onda dos lasers disponíveis
- possuir alta resolução
- taxa de transferência linear
- pouco ruído

Existem várias categorias de materiais usados em holografia, tais como a emulsão fotográfica de haleto de prata—a mais empregada, meio de fotorresina, meio fotocromico, fototermoplástico, fotopolímero, cristal fotorefrativo e gelatina dicromatada. Existem vários fabricantes, por exemplo a Agfa-Gevaert, situada na Bélgica e de propriedade alemã, e a norte-americana Kodak. Outros nomes cujos produtos são usados no processo de revelação fotográfica são Ecibra, Merck, Synt, Cinética Química, Reagen - Quimibrás Indústrias Químicas, no Rio de Janeiro, Carlo Erba do Brasil - Divisão Química, em São Paulo, City Chemical Corporation - New York, Produtos Químicos Labor Ltda, em Campinas, entre outros.

A tecnologia das emulsões recebe papel de destaque devido à extraordinária sensibilidade do haleto de prata à luz. Os demais processos (que não utilizam a química da prata)

são atrativos por serem comparativamente mais baratos, resultarem em meios confiáveis, os quais podem, por exemplo, serem usados para criação de réplicas através de processos mecânicos, e por não apresentarem granulações; a desvantagem está na baixa sensibilidade à luz, em particular à luz vermelha. A seguir está uma descrição de cada material empregado em holografia.

Fotorresinas A fotorresina é um filme orgânico que possibilita a criação de uma imagem confiável após a exposição à luz e posterior revelação. Essa substância assume posição bem definida na presença da energia luminosa, sendo classificada em dois grupos: fotorresinas negativas e positivas. Àquelas cuja área atingida pela luz torna-se insolúvel e a não exposta torna-se solúvel em solvente orgânico, durante a revelação, é dita negativa; de modo análogo as fotorresinas positivas caracterizam-se pela solubilidade das regiões iluminadas e a insolubilidade das áreas não expostas à luz. Hologramas de fotorresina não permitem reutilização; são hologramas de fase obtidos por lavagem química; abrangem desde o ultravioleta até 500 nm do espectro; possuem resolução limite de três mil pontos por milímetro e eficiência de difração máxima, em rede senoidal, de 0,30. Esse material pode ser usado nos hologramas de transmissão (mas não satisfaz as condições de Bragg para difração) e também pode atuar como matriz em hologramas de relevo (o que permite a criação de réplicas), uma vez que as franjas primárias obtidas são de boa qualidade. Trabalhos com a fotorresina vêm sendo desenvolvidos por Cescato [7].

Fotocromos O material fotocromômico também é empregado em holografia. Ele pode ser reutilizado; não requer processos químicos; sua resolução é superior a cinco mil pontos por milímetro e os hologramas produzidos são de transmissão. Entretanto, a sensibilidade espectral associada corresponde a um valor comparativamente baixo (entre 300 e 700 nm), além de possuir reduzida eficiência de difração (inferior à 0,02 em rede senoidal).

Fototermoplásticos Um fototermoplástico é uma substância isolante que se torna eletricamente condutora quando iluminada. Conforme a Figura 2.13, existe um substrato base (fotocondutor) coberto por uma camada de termoplástico transparente que reage ao serem iluminados. Durante o registro do holograma esse substrato é carregado eletrostaticamente, e quando o meio é confrontado com as franjas de interferência são produzidas portadoras de carga nas áreas do fotocondutor, que permitirão a passagem da luz (as cargas replicam as franjas de interferência). Em seguida a superfície é carregada da mesma forma inicial, o que faz com que cargas adicionais sejam depositadas nas áreas que recebem luz. A imagem latente assim produzida é revelada aquecendo-se uniformemente o termoplástico, que sofre deformação local como resultado da variação de campo elétrico em sua extensão, tornando-se mais fina quando o campo é maior (áreas iluminadas) e mais

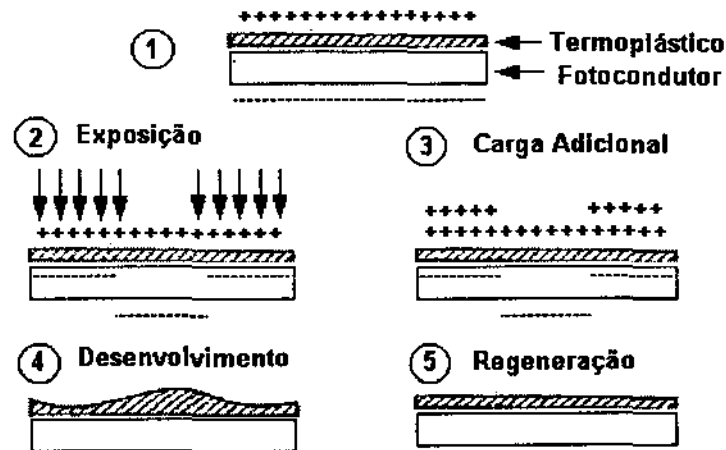


Figura 2.13: Material de registro fototermoplástico.

espessa quando o campo é menor (áreas não iluminadas). Ao retornar à temperatura ambiente, a variação de espessura é congelada e o holograma se torna estável. O material pode ser regenerado pela aplicação de uma corrente elétrica superior à usada na revelação; a resolução compreende um valor entre 500 e 1200 pontos por milímetro, a sensibilidade espectral varia de 400 a 650 nm e a eficiência de difração assemelha-se à da fotorresina (0,30 em rede senoidal). Uma aplicação imediata é a holografia interferométrica.

Fotopolímeros Um fotopolímero é uma substância que polimeriza na presença da luz. Polimerização é um processo através do qual moléculas pequenas de um composto orgânico simples se ligam formando longas cadeias. Assim, uma propriedade importante de um fotopolímero é que a exposição à luz—e subsequente processamento—alteram sua estrutura química e física, influenciando diretamente no índice de refração e na espessura do material. Materiais mais espessos podem ser usados na criação de hologramas volumétricos de fase com alta eficiência de difração (máxima de 0,90 em rede senoidal) e seletividade angular. Entretanto, hologramas que utilizam esse material apresentam uma alta relação de sinal-ruído (300 : 1); o material não pode ser reutilizado; sensibilidade espectral entre raios ultravioletas até 650 nm e resolução limite comparativamente baixa (200 a 1500 pontos por milímetro).

Cristais Os cristais fotorefrativos, como o próprio nome diz, podem ter o seu índice de refração alterado pela exposição a um padrão de luz. Os fótons fornecem energia aos elétrons que deixam seu nível de energia—dentro da chamada banda de valência—e passam a ser livres, ocupando uma outra banda, de condução; à medida que mais elétrons excitados chegam à banda de condução ocorre repulsão entre eles, fazendo-os migrar para

as regiões escuras. Assim, passam a existir áreas de concentração de carga positiva, nas regiões claras, e áreas de concentração de cargas negativas, nas regiões escuras; ocorre a modulação da densidade de cargas no volume do cristal. Essa modulação por sua vez dá origem a um campo elétrico, também modulado espacialmente, o que altera o índice de refração do cristal devido à sua característica eletroóptica (luz altera campo elétrico), formando o holograma de fase por índice refrativo. O procedimento descrito é chamado de difusão de elétrons e ocorre em cristais de estrutura simétrica, tal como os cristais BSO ($Bi_{12}SiO_{20}$) e BGO ($Bi_{12}GeO_{20}$). Nas estruturas assimétricas, como o niobato de lítio ($LiNbO_3$), existe uma certa tendência de polarização do cristal; mesmo sem aplicar campo elétrico externo, pode ser produzida uma fotocorrente nesses cristais, uma vez que os elétrons excitados para a banda de condução tendem a migrar para uma certa direção, movimento este conhecido como efeito fotovoltaico. Os materiais fotorefrativos são reutilizáveis; de sensibilidade espectral entre 350 a 550 nm; resolução superior a 1500 pontos por nanômetros para o niobato de lítio e 10000 para o BSO; têm a vantagem de não exigirem processamento químico, mas caracterizam-se pela sua baixa eficiência de difração (0,20 em rede senoidal). Esse tipo de material vem sendo estudado por Frejlich [14].

Gelatina dicromatada A gelatina dicromatada (DCG) é uma emulsão fotosensível composta de gelatina sensibilizada pela presença de um dicromato—tal como o dicromato $(NH_4)_2Cr_2O_7$, alaranjado—que, quando estimulados por energia luminosa de ondas curtas, favorecem a ligação entre moléculas (cross-linking), gerando, durante o processamento, um holograma de fase de alta eficiência de difração. O cross-linking é um fenômeno que ocorre em substâncias formadas por moléculas de cadeia longa tais como a gelatina, uma espécie de colágeno e certos polímeros. Essas moléculas, na presença da luz, formam ligações em vários pontos de seu comprimento com moléculas adjacentes, fazendo com que a substância transforme-se de líquido ou gel para um sólido rígido e insolúvel, o qual possui um índice refrativo diferente do inicial. A razão disso é a criação de fraturas que deixam espaços vazios no instante da revelação. Isso já é o suficiente para a formação de um holograma reflexivo de fase; entretanto, o material não pode ser reutilizado; abrange o intervalo entre 350 e 580 nm do espectro, mas tem alta eficiência de difração (0,90 em rede senoidal) e excelente resolução (acima de dez mil pontos por milímetro).

Haleto de prata A emulsão de haleto de prata é o material mais empregado em holografia, devido à sua relativamente alta sensibilidade à luz, além de ser comercialmente disponível. Quando exposto a energia luminosa ocorre a formação de uma imagem latente; o material é então revelado possibilitando a visualização como uma imagem fotográfica. O que ocorre, na verdade, é o enfraquecimento da ligação do composto, pela presença da luz,

liberando ions de prata—transparentes e instáveis—que através de processo químico são transformados em prata metálica—opaca—que nada mais é que a imagem anteriormente oculta. A emulsão é submetida ao processo de fixação para eliminar resíduos químicos excedentes.

Brometo, cloreto e iodeto, coletivamente conhecidos como haletos de prata (fluoreto é solúvel em água e o haleto de astato é altamente radioativo, não servindo aos propósitos em questão) são usados em várias proporções nas emulsões fotográficas: é formada uma dispersão de partículas bastante pequenas—microcristais—na gelatina, a qual é depositada sobre vidro ou filme e posta a secar. O resultado é uma camada transparente, fina, flexível e extremamente sensível à luz de pequeno comprimento de onda (inferior a 500 nm). É ainda possível aumentar o intervalo útil do espectro visível, até mesmo próximo ao infravermelho, pela adição de corantes apropriados. Quando a luz incide na superfície da emulsão, sua energia é absorvida pelas partículas do haleto de prata, acarretando a ruptura de algumas ligações que mantém unida a estrutura cristalina, liberando átomos de prata no interior do cristal. Atingindo determinada energia crítica, um certo número de átomos de prata é liberado para formar uma pequena mancha de prata metálica, ou imagem latente. O revelador, usado para transformar a imagem latente em imagem fotográfica visível de prata metálica—um processo também chamado de redução—é uma solução contendo um agente redutor (fornece elétrons), o qual é capaz de reduzir haleto de prata em prata, mas não somente aquelas moléculas que compõem a imagem latente. Reveladores possuem dois componentes principais: o agente revelador e um sal alcalino, este último sendo necessário porque a maioria dos agentes redutores é mais eficiente em meios com pH elevado. A proporção real de cristais que são reduzidos durante a revelação aumenta, mas a reação é suficientemente lenta para interrompê-la quando a imagem for julgada suficientemente escura. A fixação é então executada pela imersão do resultado obtido numa solução salina, tal como o tiosulfato de amônio, na qual o haleto de prata não alterado imediatamente forma complexos solúveis, os quais podem ser removidos com água.

2.3.6 Etapas para obtenção do holograma

2.3.6.1 Formação

Para compreender a essência da holografia é necessário conhecer alguns princípios da Física. Esses tópicos abrangem principalmente interferência e difração da luz. A luz é uma onda e, como tal, é descrita em termos de sua amplitude e fase. Amplitude é o valor máximo do deslocamento de um ponto pertencente à onda a partir de um valor médio; a fase é uma relação entre a posição da crista de uma onda e um certo ponto de referência, sendo normalmente especificada em radianos ou frações de um ciclo (2π radianos é igual

a um ciclo) [38].

O sistema visual humano percebe a presença dos objetos porque eles estão (ou são) iluminados, refletindo ou refratando luz. Para facilitar a compreensão, pode-se imaginar que raios de luz emanam do objeto; as circunferências concêntricas que teoricamente unem as posições em concordância de fase em um certo instante são chamadas de linhas de onda. Uma frente de onda é a linha de onda que separa uma região perturbada de outra não perturbada.

Assim, a frente de onda carrega informação de amplitude dos raios que partem do objeto, estando relacionada a um valor de intensidade luminosa. Entretanto, quando o percurso de propagação da luz é interceptado pela presença do objeto ocorre perda da informação de fase, e conseqüentemente ocorre perda de algumas características da imagem, tal como a profundidade, uma vez que não se pode calcular a diferença de fase da onda após passar pelo objeto. Sabe-se que a informação de fase é preservada em padrões de interferência entre raios de luz.

A técnica básica da formação de um holograma está em criar um padrão de interferência através da partição da luz (coerente), proveniente de um laser, em dois raios, um que ilumina o objeto (raio objeto - RO) e outro que atua como referencial (raio referência - RR), vindo direto da fonte, sem interceptar o objeto, e portanto mantendo a informação de fase original.

Frequentemente são usadas frentes de onda planas ou esféricas, não moduladas, como referência. O raio referência é direcionado de forma a interceptar a luz transmitida ou refletida pelo objeto. Assumindo que os dois raios sejam perfeitamente coerentes, um padrão de interferência é formado na porção do espaço onde os raios se sobrepõem. Um meio fotosensível colocado nessa região certamente irá sofrer alterações físico-químicas devido à intensidade luminosa aí presente. Após um certo período de exposição à luz, esse material é submetido a um processamento capaz de registrar efetivamente as alterações de transmissão óptica do meio, o qual passa a ser chamado de holograma.

Holograma é o registro sobre uma película sensível à luz, tal como uma placa fotográfica, das figuras de interferência formadas entre dois ou mais feixes de luz vindos de um laser [19]. O padrão de interferência formado no material sensível é chamada de franja de interferência. A sensibilização na película é então submetida a um processamento fotográfico para registro permanente.

2.3.6.2 Modelo simplificado

Existem várias formas de descrever o comportamento ondulatório da frente de onda registrada num holograma, algumas mais elaboradas que outras, que demandam alto nível de atenção matemática (vide Seção 2.3.7.1). O tratamento adotado é o perfil cossenoidal, por mera questão de simplicidade. Uma onda cossenoidal obedece uma equação da forma:

$$U = A \cos(\omega t + \phi_{[x,y]}) \text{ e } \omega = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.7)$$

onde U representa a frente de onda, A é sua amplitude, ω é a velocidade angular, t é o tempo, λ é o comprimento de onda e ϕ é o deslocamento da curva em relação à origem.

Representando o raio objeto (RO) por U_o , o raio referência (RR) por U_r , a diferença de fase em relação à origem do RO e do RR respectivamente por ϕ_o e ϕ_r , as intensidades de RO e RR denotadas por I_o e I_r , e por $\langle \frac{1}{2}U_o^2 \rangle$ e $\langle \frac{1}{2}U_r^2 \rangle$ (valores obtidos em tempo médio), deseja-se conhecer a intensidade em um determinado ponto do material devido à ação de RR e RO, mutuamente correlatos (coerentes). Esse valor será dado em tempo médio, cujo operador não será indicado por motivo de simplicidade.

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}(U_r^2 + U_o^2 + 2U_r U_o) \\ I &= \frac{1}{2}A_r^2 \cos^2(\omega t + \phi_r) + \frac{1}{2}A_o^2 \cos^2(\omega t + \phi_o) + \\ &\quad \frac{1}{2}A_r \underbrace{\cos(\omega t + \phi_r)}_M A_o \underbrace{\cos(\omega t + \phi_o)}_N \end{aligned} \quad (2.8)$$

Pela trigonometria, sendo M e N valores genéricos:

$$\begin{aligned}\cos(M + N) + \cos(M - N) &= \cos M \cos N - \sin M \sin N + \\ &\quad \cos M \cos N + \sin M \sin N \\ \cos(M + N) + \cos(M - N) &= 2 \cos M \cos N\end{aligned}\quad (2.9)$$

o que permite concluir que:

$$\begin{aligned}I &= \frac{1}{2}A_r^2 \cos^2(\omega t + \phi_r) + \frac{1}{2}A_o^2 \cos^2(\omega t + \phi_o) + A_r A_o \cos(\omega t + \phi_r) \cos(\omega t + \phi_o) \\ I &= \frac{1}{2}A_r^2 \cos^2(\omega t + \phi_r) + \frac{1}{2}A_o^2 \cos^2(\omega t + \phi_o) + \frac{1}{2}A_r A_o \cos(\omega t + \phi_r + \omega t + \phi_o) + \\ &\quad \cos(\omega t + \phi_r - \omega t - \phi_o) \\ I &= \frac{1}{2}A_r^2 \cos^2(\omega t + \phi_r) + \frac{1}{2}A_o^2 \cos^2(\omega t + \phi_o) + \frac{1}{2}A_r A_o \cos(2\omega t + \phi_r + \phi_o) \cos(\phi_r - \phi_o) \\ I &= \frac{1}{2}A_r^2 \cos^2(\omega t + \phi_r) + \frac{1}{2}A_o^2 \cos^2(\omega t + \phi_o) + \frac{1}{2}A_r A_o \cos(2\omega t + \phi_r + \phi_o) + \\ &\quad \frac{1}{2}A_r A_o \cos(\phi_r - \phi_o)\end{aligned}\quad (2.10)$$

Aplicando a média temporal em todos os termos da Equação 2.10 e lembrando que $\langle M \cos^2 N \rangle = \frac{M^2}{2}$ e $\langle \cos N \rangle = 0$, com M e N genéricos, notando que o último termo da equação não depende do tempo, conclui-se que:

$$I = \frac{A_r^2}{4} + \frac{A_o^2}{4} + \frac{1}{2}A_r A_o \cos(\phi_r - \phi_o)\quad (2.11)$$

A Equação 2.11 representa o padrão de franjas cossenoidais perturbado pelas variações de amplitude e fase da onda objeto. Esse padrão é registrado num material o qual transforma intensidades em transmissão de amplitude, valores estes diretamente proporcionais.

2.3.6.3 Reconstrução

O padrão de interferência, como é sabido, é determinado pela variação espacial das amplitudes e fases das ondas que participam do fenômeno físico. Esse padrão de interferência, quando registrado e reconstruído, passa a ser chamado de holograma. Para compreender o processo da reconstrução é necessário entender a formação de um holograma elementar, formado pela interferência entre duas ondas planas. Assume-se que elas são derivadas da

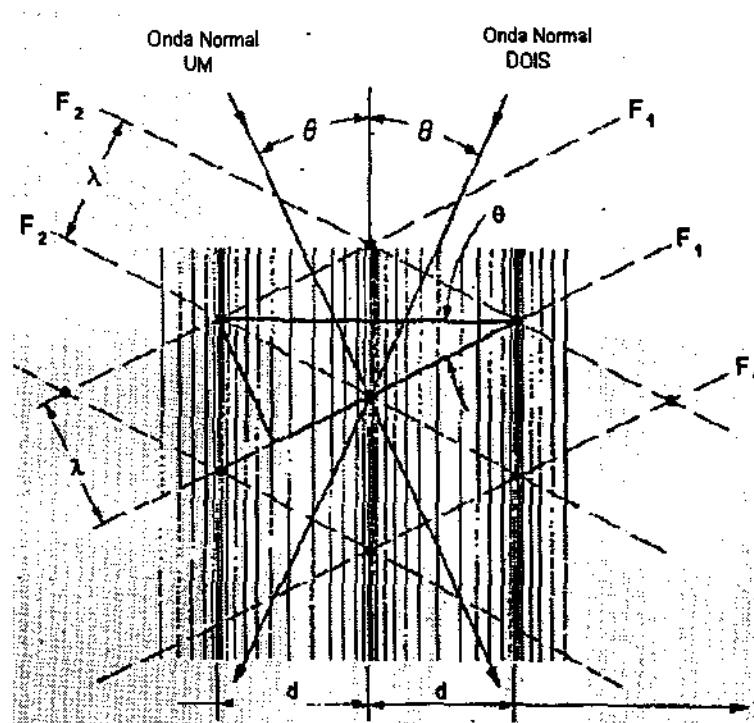


Figura 2.14: Padrão de interferência formado na interação entre duas ondas planas.

mesma fonte perfeitamente coerente e se interceptam a um ângulo relativo de 2θ , conforme a Figura 2.14. Para tais ondas, as frentes de onda são planas. Para simplificar a ilustração, somente os planos de amplitude máxima, F_1 e F_2 estão representados (espaçados de um comprimento de onda λ , sendo perpendiculares ao plano do papel). Assim, dois conjuntos de linhas tracejadas, periodicamente espaçadas, representam uma sucessão de linhas de onda que se interferem. As ondas r_1 e r_2 , normais a F_1 e F_2 , respectivamente, contidas no plano do papel, indicam as direções de propagação.

As interseções entre os planos F_1 e F_2 são linhas perpendiculares ao plano do papel, indicadas por pontos pretos, correspondentes a adição das cristas da onda. Como as ondas progridem na direção de suas normais, essas linhas de interseção se movem, gerando planos de amplitude resultante máxima que particionam o ângulo entre as normais. Tais planos são perpendiculares ao plano do papel e estão localizados onde a densidade dessas linhas verticais é máxima. A média temporal do quadrado da amplitude resultante, a intensidade, é também máxima ao longo dessas linhas verticais ou franjas.

A defasagem entre as linhas de onda 1 e 2 geram as franjas de interferência, cuja distribuição de intensidade obedece a um padrão senoidal, com $\lambda = 2d \sin \theta$. As linhas escuras das franjas de interferência correspondem a linhas de prata, nos hologramas planos, ou superfícies de prata, nos hologramas volumétricos, as quais estão suficientemente próximas para produzir uma difração significativa.

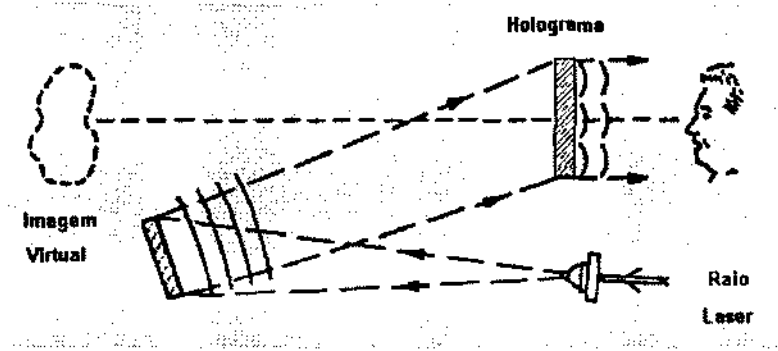


Figura 2.15: Geração da imagem virtual de um objeto usando o raio referência original para iluminar o holograma.

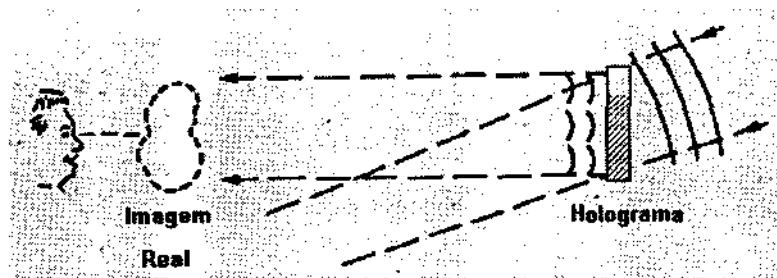


Figura 2.16: Geração de uma imagem real de um objeto usando o conjugado do raio referência original para iluminar o holograma.

Quando o holograma é iluminado pelo raio referência (RR), conforme a Figura 2.15, ocorre difração de parte da luz, gerando uma réplica da frente de onda do objeto. O observador, corretamente posicionado, percebe a imagem virtual do objeto como se o próprio estivesse presente. Quando o holograma é iluminado pelo RR da Figura 2.16 (o qual, por ser oposto ao RR original é chamado de raio conjugado), que atinge o holograma pela outra face, surge a imagem real do objeto, da mesma forma que no exemplo anterior. Conseqüentemente, pode-se concluir que um holograma é resultado de um sistema de projeção e registro de um objeto e RR bem determinados.

O processo anterior mostra a formação de um holograma elementar pela interseção de duas ondas planas. Sua compreensão é fundamental para entender o processo de reconstrução da imagem holográfica. Pela análise de Fourier [8], a frente de onda transmitida pelo objeto pode ser vista como uma soma de ondas planas, onde cada uma delas interfere com outra onda plana de referência para formar simples hologramas sobrepostos. A resposta de cada holograma componente à iluminação é a mesma do holograma elementar.

Conforme a Figura 2.17, o padrão de interferência é registrado num material de espessura T . A densidade das linhas verticais, ou franjas, corresponde à densidade dos grãos de prata depositados na gelatina durante a fase de gravação.

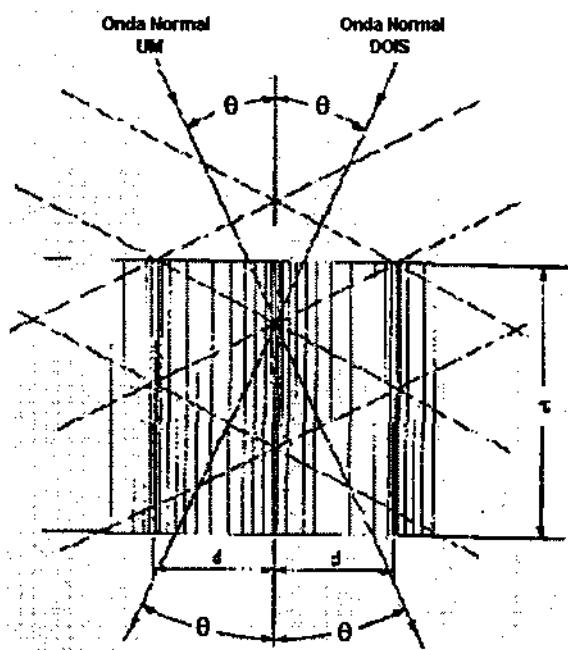


Figura 2.17: Formação de um holograma elementar em meio espesso.

2.3.6.4 Difração de Bragg

As franjas de interferência que constituem um holograma de transmissão não pertencem somente à superfície, mas penetram na espessura do material de registro tal como uma janela veneziana: as franjas são planos mergulhados no material. Tais planos são paralelos à bissetriz do ângulo entre o raio objeto e o referencial. O espaçamento entre as franjas, dado implicitamente pela linha que as une, paralela à superfície do material, é dado por $\lambda = d \sin \theta$.

Para que a intensidade d raio difratado seja máxima, as frentes de onda que sofrem difração pela presença das franjas devem todas estar em fase, ou mais precisamente, qualquer diferença de fase entre as frentes de onda deve ser um número inteiro de comprimentos de onda. Para compreender melhor, pode-se encarar as franjas como simples espelhos planos e notar as condições necessárias para que isso ocorra.

Se o espaçamento da rede for adequado ao comprimento de onda do raio de reconstrução, surgirá uma imagem de brilho. A geometria determinante do espaçamento das franjas (chamadas de planos de Bragg) é dada na Figura 2.18. Se chamarmos a separação dos planos de Bragg de w , poderemos obter o ângulo de incidência do raio de replay que permite um raio difratado com intensidade máxima.

A condição de Bragg requer que a diferença de caminho óptico da luz difratada por planos sucessivos seja $n\lambda$ onde n é inteiro. Seja d o espaçamento da rede por linhas paralelas à superfície da emulsão e θ o ângulo entre os raios objeto e referencial: a condição

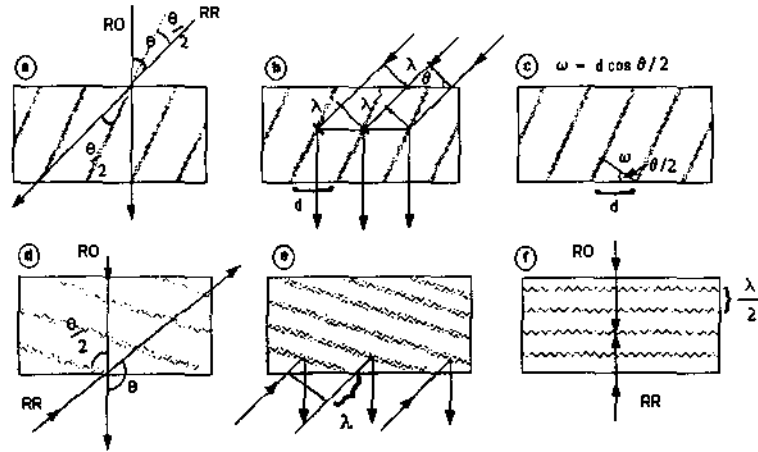


Figura 2.18: Planos de Bragg.

de rede é determinada por 2.12. Sendo w o espaçamento entre os planos de Bragg e substituindo a relação trigonométrica $\sin(\frac{\theta}{2} + \frac{\theta}{2}) = 2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}$, a condição de Bragg para a reconstrução é dada em 2.13.

$$\lambda = d \sin \theta \tag{2.12}$$

$$\frac{\lambda}{2} = w \sin \frac{\theta}{2} \tag{2.13}$$

2.3.6.5 Modelo simplificado

O holograma reconstrói a frente de onda do objeto assim que o raio referência incide no padrão de formação. Em qualquer ponto, uma onda emergente U_e pode ser obtida pelo produto entre U_r (no ponto em questão) e a função de transmitância especificada pelo padrão de formação. Como esse resultado é proporcional à intensidade I , a onda emergente U_e será proporcional a $U_r \times I$. Substituindo I pela equação 2.11, U_r por 2.7 e adequando M e N pela Equação 2.9:

$$\begin{aligned} U_e &= U_r \times \left[\frac{A_r^2}{4} + \frac{A_o^2}{4} + \frac{1}{2} A_r A_o \cos(\phi_r - \phi_o) \right] \\ &= U_r \times \frac{1}{4} [A_r^2 + A_o^2 + 2 A_r A_o \cos(\phi_r - \phi_o)] \\ &= \frac{U_r}{4} (A_r^2 + A_o^2) + \frac{U_r}{2} A_r A_o \cos(\phi_r - \phi_o) \\ &= \frac{U_r}{4} (A_r^2 + A_o^2) + \frac{1}{2} A_r^2 \underbrace{\cos(\omega t + \phi_r)}_M A_o \underbrace{\cos(\phi_r - \phi_o)}_N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{U_r}{4}(A_r^2 + A_o^2) + \frac{1}{2}A_r^2A_o\left[\frac{1}{2}\cos(\omega t + \phi_r + \phi_r - \phi_o) + \frac{1}{2}\cos(\omega t + \phi_r - \phi_r + \phi_o)\right] \\
&= \underbrace{\frac{1}{4}(A_r^2 + A_o^2)U_r}_1 + \underbrace{\frac{1}{4}A_r^2A_o}_2 \underbrace{\cos(\omega t + \phi_o)}_3 + \underbrace{\frac{1}{4}A_r^2A_o}_4 \underbrace{\cos(\omega t + 2\phi_r - \phi_o)}_5 \quad (2.14)
\end{aligned}$$

A parte 1 da Equação 2.14 corresponde ao raio referência atenuado, agora chamado de raio de replay ou de reconstrução; a parte 3 é idêntica ao raio objeto atenuado; a parte 5 é a onda que emerge do outro lado do raio referência, alterado em $2\phi_r$ e com fase invertida (imagem pseudoscópica); as demais partes são valores constantes.

2.3.7 Tipos de hologramas

Os hologramas são classificados de várias formas através da literatura. O objetivo desse texto consiste em oferecer uma caracterização possivelmente genérica e abrangente, fornecendo os princípios básicos encontrados em cada categoria. Os critérios adotados para a realização dessa tarefa são descritos a seguir.

- Meio de registro: espesso ou não espesso (volumétrico ou plano).
- Luz usada na reconstrução do holograma: laser ou luz branca.
- Codificação das franjas de interferência: amplitude (codificação por variação da transmitância) ou fase (codificação por variação de índice refrativo ou espessura).
- Posição do observador: reflexão (o raio de reconstrução e o observador estão na mesma região, em relação ao holograma) ou transmissão (o raio de reconstrução e o observador estão em lados opostos em relação ao holograma).

Baseando-se nos critérios anteriores, é possível classificar os hologramas da seguinte forma:

- holograma plano
 - holograma transmissão
 - * holograma de amplitude
 - * holograma de fase (qualidade inferior)
 - holograma de reflexão
 - * holograma de amplitude
 - * holograma de fase (por relevo)

- holograma volumétrico
 - holograma transmissão
 - * holograma de amplitude
 - * holograma de fase
 - holograma de reflexão
 - * holograma de amplitude (qualidade inferior)
 - * holograma de fase

A seguir estão especificados os principais tipos e as várias denominações encontradas na literatura:

- Holograma in-line (ou de Gabor, reconstrução por luz branca, transmissão de amplitude)
- Holograma de Fraunhofer (far-field, campo longínquo)
- Holograma off-axis (Leith-Upatnieks, Fresnel)
- Holograma single beam (Denisyuk, Lippman, Bragg)
- Holograma rainbow (slit transfer, Benton)
- Holograma de imagem
- Holograma de Fourier
- Holograma estereoscópico (ou estereograma holográfico)

2.3.7.1 Holograma de Gabor

O holograma de Gabor foi o primeiro a ser realizado, em 1947. É caracterizado pelo alinhamento entre a fonte de luz e o objeto (composto por um conjunto de detalhes opacos numa transparência) ao longo de um eixo normal ao meio de registro, conforme a Figura 2.19. O holograma obtido é plano, reconstruído por luz branca, as franjas de interferência estão codificadas por variações de amplitude e a imagem é vista por reflexão.

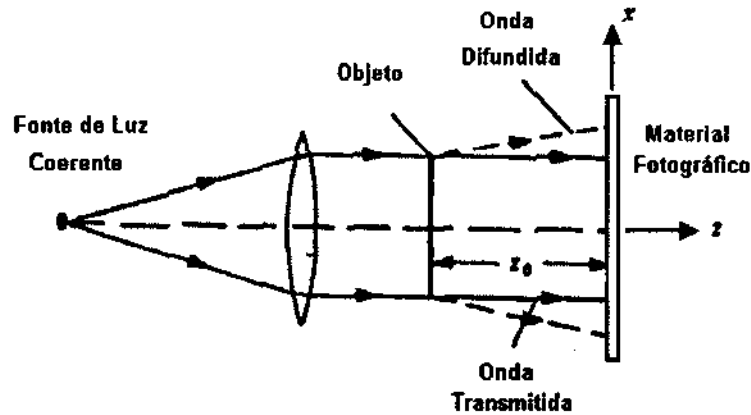


Figura 2.19: Sistema óptico de registro de um holograma de Gabor.

Formação do holograma Quando o objeto é iluminado com um raio paralelo e uniforme, a luz por ele transmitida pode ser especificada em duas partes. A primeira é uma onda plana uniforme correspondente à luz diretamente transmitida, chamada de raio referência (RR); a segunda é um raio atenuado e disperso pela presença dos detalhes opacos da transparência, dito raio objeto (RO). O RR possui amplitude constante designada por r ; o RO possui amplitude variável ao longo da chapa fotográfica, dada por $o(x, y)$, onde $|o(x, y)| \leq r$. A interação entre RR e o RO resulta num padrão de intensidade luminosa, $I(x, y)$ (energia que atravessa uma unidade de área do material, na direção perpendicular ao fluxo radiante, em uma unidade de tempo), onde (x, y) é a coordenada de um ponto do material. A intensidade é matematicamente obtida pela multiplicação da amplitude complexa, A , pelo seu conjugado, A^* .

$$I(x, y) = |A|^2 = A A^* \text{ onde } A = r + o(x, y) \quad (2.15)$$

A intensidade luminosa, em qualquer ponto do material fotográfico, resultante da interferência de duas ondas durante a fase de registro, é equacionada em 2.16.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |r + o(x, y)|^2 \\ &= |r|^2 + |o(x, y)|^2 + r o^*(x, y) + r^* o(x, y) \text{ sendo } r \text{ real e portanto } r = r^* \\ I(x, y) &= r^2 + |o(x, y)|^2 + r o^*(x, y) + r o(x, y) \end{aligned} \quad (2.16)$$

sendo r^* e o^* os conjugados da amplitude complexa do RR e do RO, respectivamente.

O material é então submetido a procedimentos químicos, semelhante à revelação fotográfica; por simplicidade, assume-se que o material tenha sido processado de forma que a transmitância de amplitude complexa antes de aplicar o raio referência (fase de

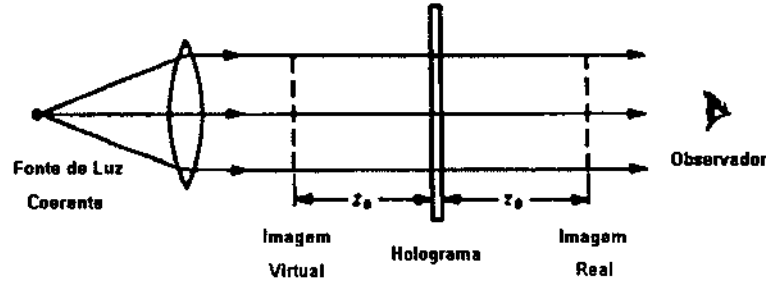


Figura 2.20: Sistema óptico de reconstrução de um holograma de Gabor.

formação) seja uma função linear da intensidade. A transmitância (razão entre a amplitude transmitida pela amplitude incidente) é dada por t ; t_0 é a transmitância do material (constante); β é um parâmetro associado ao material e às condições de processamento; T é o tempo de exposição; I é a intensidade luminosa e (x, y) são as coordenadas de um ponto do material.

$$\begin{aligned} t(x, y) &= t_0 + \beta T I \\ t(x, y) &= t_0 + \beta T [r^2 + |o(x, y)|^2 + ro(x, y)^* + ro(x, y)] \end{aligned} \quad (2.17)$$

Reconstrução do holograma Na etapa de reconstrução da imagem a transparência é precisamente reposicionada e novamente iluminada com o raio referência, conforme a Figura 2.20. A transmitância de amplitude complexa resultante na reconstrução, $u(x, y)$, possui quatro partes básicas especificadas em 2.18.

$$\begin{aligned} u(x, y) &= r(t_0 + \beta T I) \\ &= r\{t_0 + \beta T [r^2 + |o(x, y)|^2 + ro(x, y) + ro(x, y)^*]\} \\ &= r t_0 + r \beta T r^2 + r \beta T |o(x, y)|^2 + r \beta T r o(x, y) + r \beta T ro(x, y)^* \\ &= \underbrace{r(t_0 + \beta T r^2)}_1 + \underbrace{r \beta T |o(x, y)|^2}_2 + \underbrace{r^2 \beta T o(x, y)}_3 + \underbrace{r^2 \beta T o(x, y)^*}_4 \end{aligned} \quad (2.18)$$

1. Raio referência diretamente transmitido.
2. Esse valor pode ser desprezado, pois $o(x, y) \ll r$, cujo produto é um número muito pequeno.
3. Corresponde à frente de onda vinda do objeto; ocorre a reconstrução da imagem do objeto na mesma posição original. Como ela aparece atrás da transparência e os raios formadores parecem dela divergir, ela é uma imagem virtual.

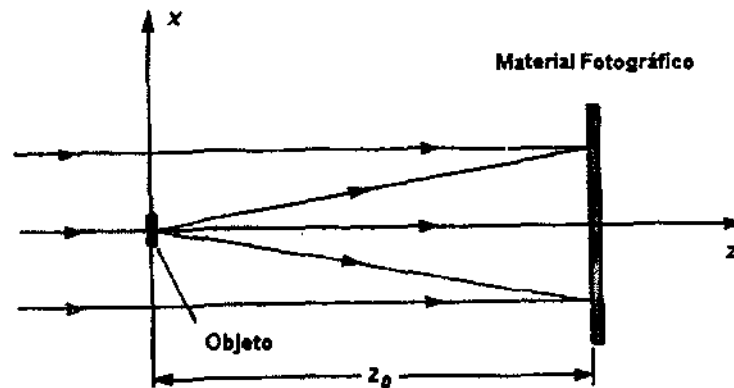


Figura 2.21: Formação de um holograma de Fraunhofer.

4. Da mesma forma que o anterior, o quarto termo reconstrói a frente de onda do objeto mas com curvatura oposta: a imagem é real (imagem conjugada - pseudoscópica), formada à mesma distância do holograma que a imagem virtual.

A técnica apresentada [20] possui várias limitações. Uma delas é o alinhamento entre as imagens real e virtual, resultando numa imagem de baixa nitidez. Outra limitação é a necessidade do objeto possuir elevada transmitância para que o segundo termo da Equação 2.18 seja desprezado, não interferindo na reconstrução da imagem: é possível formar imagens de objetos transparentes com alguns detalhes opacos, embora o contrário não seja viável. Embora existam problemas associados, os hologramas in-line podem ser úteis em pesquisa industrial tal como contagem de partículas.

2.3.7.2 Holograma de Fraunhofer

A holografia em campo longínquo é caracterizada por uma configuração semelhante àquela da difração de Fraunhofer: o objeto é iluminado por frentes de ondas planas (os raios associados a estas frentes são paralelos) e a chapa de registro é colocada numa posição distante do objeto, conforme a Figura 2.21. A luz difratada que atravessa o material atua como raio referência (RR); na reconstrução o holograma é iluminado por uma onda similar àquela usada na fase de formação. A reconstrução pode ser feita com laser ou luz branca colimada, o material de registro usado é plano e as franjas nele armazenadas codificam amplitude, sendo a imagem vista por transmissão.

A holografia de Fraunhofer é uma variação da holografia in-line, com a vantagem de se poder visualizar a imagem do objeto sem o incômodo produzido pela presença da imagem conjugada. Um exemplo típico é o holograma de partículas de aerosol. As partículas possuem dimensão infinitesimal, mesmo quando colocadas a distâncias de poucos milímetros do meio de registro, configuram um caso de holografia de campo longínquo. Nesse caso, a

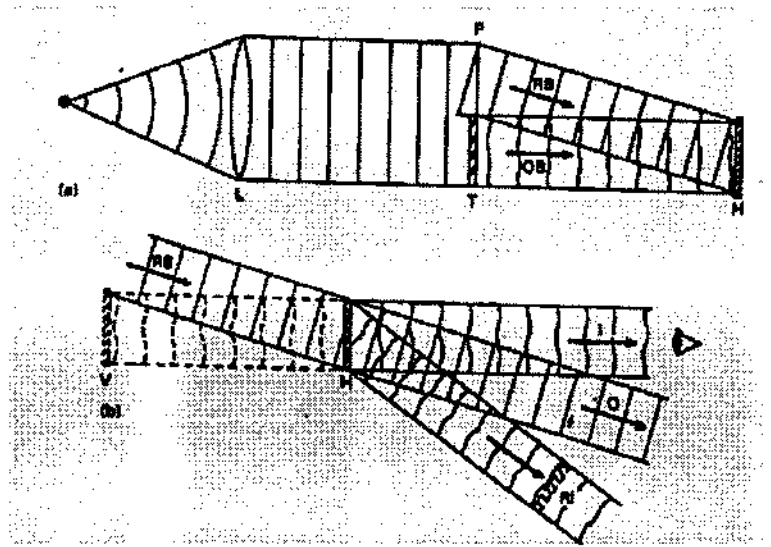


Figura 2.22: Princípio da holografia off-axis.

imagem conjugada é dispersada em um espaço amplo, que somente contribui para uniformizar o plano de fundo (background), não interferindo na observação da outra imagem.

2.3.7.3 Holograma Off-axis

A holografia de Leith-Upatnieks é uma técnica que permite separar as imagens real e virtual sobrepostas nos hologramas de Gabor. Para alcançar esse objetivo, o raio referência (RR) fica fora do eixo normal ao holograma, formando um ângulo de θ graus com o raio objeto (RO) (Figuras 2.22 e 2.23). Assim, a imagem virtual pode ser vista sem ser interceptada pela imagem real.

Sabe-se que a luz é uma radiação eletromagnética cujo componente elétrico V é descrito em termos da frequência ν , tempo t , amplitude a , fase ϕ e é dado pela Equação 2.19.

$$V(t) = \int_0^{\infty} a(\nu) \exp[-i\phi(\nu) \exp(i2\pi\nu t)] \quad (2.19)$$

O campo elétrico, com direção constante e considerando uma só frequência é dado pela Equação 2.20.

$$V(t) = \underbrace{|a| \exp(-i\phi)}_{\text{amplitude complexa}} \exp(i2\pi\nu t) \quad (2.20)$$

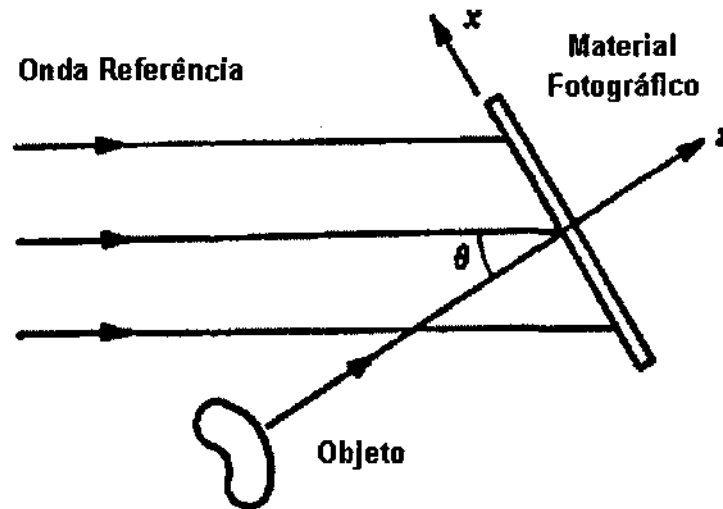


Figura 2.23: Registro de um holograma com RR não paraxial.

2.3.7.4 Formação do holograma

A Equação 2.20 foi introduzida com o propósito de sugerir a amplitude complexa da onda objeto e referência, e assim obter o valor de intensidade luminosa em qualquer ponto do holograma. As amplitudes complexas dos raios objeto (RO) e referência (RR) são dadas, respectivamente, pelas Equações 2.21 e 2.22; RR possui intensidade uniforme e fase variando ao longo do meio de registro. A intensidade luminosa resultante é exibida na Equação 2.23

$$o(x, y) = |o(x, y) \exp[-i\phi(x, y)]| \quad (2.21)$$

$$r(x, y) = r \exp(i2\pi\epsilon_r x) \text{ onde } \epsilon_r = \frac{\sin}{\lambda} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |r(x, y) + o(x, y)|^2 \\ &= |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + r(x, y)^* o(x, y) + r(x, y) o(x, y)^* \\ &= r^2 + |o(x, y)|^2 + r \exp(-i2\pi\epsilon_r x) o(x, y) \exp[-i\phi(x, y)] + \\ &\quad r \exp(i2\pi\epsilon_r x) |o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \\ &= r^2 + |o(x, y)|^2 + r |o(x, y)| \{ \exp(-i2\pi\epsilon_r x) \exp[-i\phi(x, y)] + \\ &\quad \exp(i2\pi\epsilon_r x) \exp[i\phi(x, y)] \} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Como a intensidade está na forma complexa é interessante lembrar como escrevê-la

numa forma não complexa. Por exemplo, as equações não complexa e complexa do campo elétrico são dadas respectivamente por 2.24 e 2.25.

$$V(t) = a \cos(2\pi vt + \phi) \quad (2.24)$$

$$V(t) = \frac{a}{2} [\exp(i2\pi vt + i\phi) + \exp(-i2\pi vt - i\phi)] \quad (2.25)$$

De modo análogo, pode-se alterar a equação da intensidade da luz na chapa fotográfica para a forma não complexa, dada pela Equação 2.26. Esta equação representa um padrão cossenoidal de franjas formado na transparência, ou seja, a amplitude e a fase do objeto estão moduladas num conjunto de franjas de interferência equivalente a uma onda portadora espacial com frequência igual a ϵ_r .

$$I(x, y) = r^2 + |o(x, y)|^2 + 2r|o(x, y)| \cos[2\pi\epsilon_r x + \phi(x, y)] \quad (2.26)$$

Considerando que a transmitância de amplitude está linearmente relacionada com a intensidade do padrão de interferência, seu equacionamento é dado por 2.27.

$$\begin{aligned} t(x, y) = & t_0 + \beta T \{ r^2 + |o(x, y)|^2 + \\ & r|o(x, y)| \{ \exp[-i\phi(x, y)\exp(-i2\pi\epsilon_r x)] + \\ & r|o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)\exp(i2\pi\epsilon_r x)] \} \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.3.7.5 Reconstrução do holograma

Para reconstruir a imagem, o holograma é novamente iluminado, conforme a Figura 2.24, pelo mesmo raio referência usado para registrá-lo. Esse raio produz o deslocamento da imagem indesejável de um ângulo correspondente ao dobro daquele existente entre os raios objeto e referência. Esse fato faz com que essa imagem seja suficientemente movida de forma a não interferir na observação. A amplitude complexa da onda transmitida também é a soma de quatro termos 2.28.

$$\begin{aligned} u(x, y) = & r(x, y) t(x, y) \\ = & r(x, y) (t_0 + \beta T I) \\ = & r(x, y)t_0 + r(x, y)\beta T + \{r^2 + |o(x, y)|^2 + \\ & r|o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \exp(-i2\pi\epsilon_r x) + \\ & r|o(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \exp(i2\pi\epsilon_r x)\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

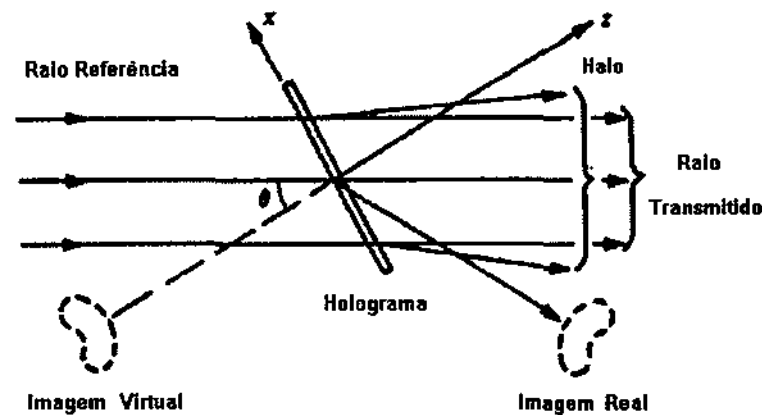


Figura 2.24: Reconstrução de um holograma com registro não paraxial

2.3.7.6 Holograma de Denisyuk

Nos hologramas de Denisyuk, a fonte de luz e o objeto estão separados pelo meio de registro. O raio objeto consiste na luz que ultrapassa o material e que em seguida é refletida pela presença do objeto. Dessa forma, os raios objeto e referência (RO e RR) caminham em sentidos opostos e portanto incidem em faces distintas da emulsão.

A interação entre o RO e o RR geram as franjas de interferência que ocupam lâminas aproximadamente paralelas à superfície da emulsão, como se fossem páginas de um livro. Pelo fato de tais planos serem similares àqueles formados pelo método fotográfico de obtenção de cores naturais, de Gabriel Lippmann, os hologramas obtidos pelo modo descrito são classificados como hologramas de Lippmann. Outra denominação advém do fato de o RO ser obtido por reflexão: hologramas de reflexão. Em muitos hologramas e equipamentos didáticos é utilizado apenas um raio (single-beam); entretanto, na prática utiliza-se dois feixes de luz.

Os hologramas de Denisyuk utilizam meio espesso e podem ser reconstruídos com luz branca. Isso é possível quando as franjas de interferência formam um ângulo máximo de 45 graus com a superfície da emulsão. Esse comportamento está baseado nas condições de Bragg para difração [38].

As cores obtidas nos hologramas *single beam* não são necessariamente as mesmas dos lasers usados para criá-los. Normalmente o processamento químico ao qual a emulsão é submetida faz com que o comprimento de onda resultante seja menor que àquele usado em sua formação, produzindo uma nova cor. O tratamento das matizes das imagens desse tipo de holograma é realizado pela holografia criativa [38].

2.3.7.7 Holograma de Benton

O holograma rainbow [10], também chamado *slit transfer* ou holograma de Benton, pode ser um holograma tanto de transmissão como de reflexão (meio volumétrico) que pode ser reconstruído com luz branca. A grande vantagem desse tipo de holograma consiste na redução da informação nele contida pela eliminação da paralaxe vertical, o que foi descoberto por Benton durante seus estudos para viabilizar a transmissão de hologramas por televisão. Tal redução é possível porque a visão binocular se baseia fundamentalmente na paralaxe horizontal para percepção de profundidade [20].

Os hologramas de Benton normalmente são produzidos em duas etapas. No primeiro passo é construído um holograma de transmissão simples, de um objeto, que recebe o nome de master. No próximo passo a imagem gerada pelo holograma master é usada como objeto a ser holografado. Nessa segunda etapa, o master é protegido por uma máscara opaca dotada de uma estreita abertura, a fim de limitar o intervalo de ângulos no plano vertical a partir dos quais a imagem pode ser vista. Essa máscara não restringe o intervalo de ângulos de observação no plano horizontal.

A fase de formação do holograma usando a imagem do master como objeto necessita atenção. A imagem registrada aparece invertida, o que exige a inversão do holograma para reconstruí-lo. O master é iluminado pelo raio objeto (RO), que passa pela abertura da máscara antes de interagir com o raio referência (RR). A interferência entre o RO e o RR resulta numa imagem real, sem paralaxe vertical, que é novamente registrada em outro holograma. O RR para esse holograma é um raio convergente inclinado no plano vertical; se o RR é posicionado frontalmente à fenda, ocorrerá uma interferência entre a informação transportada pelos raios refletidos e pelos refratados, o que opticamente produz na reconstrução da frente de ondas uma sobreposição de imagens, impedindo a correta visualização. O material de registro é posicionado de forma que a imagem real formada pelo primeiro holograma esteja bem próximo à tal chapa. Quando o holograma final é reconstruído, iluminando-o pelo conjugado do RR usado na formação, surge uma imagem real ortoscópica do objeto, próximo ao holograma.

Observando tal imagem sob luz branca, pode-se notar que uma alteração vertical de ponto de vista não afeta a perspectiva e sim a matiz da imagem: cada altura corresponde a um comprimento de onda; uma alteração vertical progressiva no ponto de vista, de cima a baixo, altera a cor da imagem através do espectro visível, do vermelho ao violeta (Figura 2.25).

Tanto a profundidade como a extensão da cor, no holograma rainbow, dependem das dimensões da fenda, e há uma relação inversa entre os dois aspectos [10]. Quanto menor a largura da fenda existente na máscara usada na criação desse tipo de holograma, maior será a profundidade; a utilização de uma fenda muito estreita, entretanto, resulta numa imagem granulada. Para iniciantes, um valor adequado é aproximadamente 0,5 *mm*.

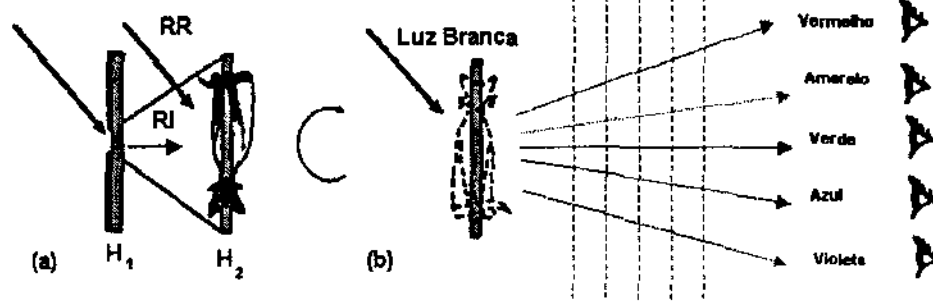


Figura 2.25: Holograma de Benton.

2.3.7.8 Holograma de Imagem

O holograma de imagem (ou image plane) consiste num tipo de holograma no qual o objeto é uma imagem real produzida através de lentes ou por outro holograma. Dependendo do caso, os hologramas de imagem estão divididos em dois grupos: imagem focalizada (focused image) e de transferência (transfer), ambos descritos a seguir.

Imagem focalizada É um tipo de holograma cujo objeto é uma imagem real, formada através de lentes, no plano que contém o material de registro (corresponde a um plano focal da lente). A imagem produzida por lentes é invertida e ortoscópica (paralaxe correta). A fase de reconstrução nos hologramas de imagem focalizada produz uma imagem na mesma posição que foi registrada (parte à frente, parte atrás da emulsão).

Existem alguns hologramas que se encaixam nessa categoria: full aperture, rainbow in one step, Fourier transform; este último será comentado na Seção 2.3.7.9 e os demais podem ser conhecidos através de [38] e [8].

Transferência É um tipo de holograma cujo objeto é uma imagem real formada por outro holograma. A imagem produzida por outro holograma é pseudoscópica, com paralaxe total mas reversa: a observação de um ponto de vista mais à direita revela uma porção esquerda da imagem, uma posição superior revela a porção inferior do objeto.

Dependendo da posição da imagem obtida pelo primeiro holograma (master), em relação ao plano do filme, a imagem holográfica pode ser real, virtual ou mista (parte real, parte virtual). Na Figura 2.26 é exibida a separação do master e os hologramas de transferência para (i) imagem virtual, (ii) imagem no plano do holograma e (iii) imagem real (H_1 é o holograma master e H_2 o holograma de transferência).

O material é exposto ao raio referência (RR) e ao raio objeto (RO), frente de onda vinda do master). Quando o holograma é processado e iluminado da maneira usual, surgem duas imagens, real e virtual, que são vistas simultaneamente [10]. A imagem real

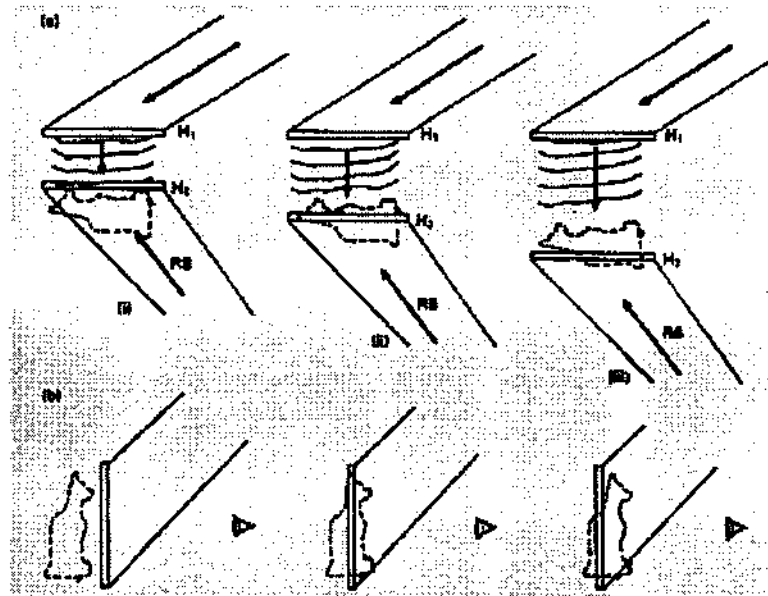


Figura 2.26: (a) geometria de transferência com o master invertido para obter a imagem real pseudoscópica; (b) hologramas de transferência resultantes.

será uma versão pseudoscópica da imagem real do master, que também é pseudoscópica. Essa dupla inversão resulta numa imagem real ortoscópica. Esse método de elaboração permite transformar um holograma de transmissão normal em cópias geradas por reflexão, visíveis à luz branca.

Alguns exemplos de hologramas que se encaixam nessa categoria são: *full aperture transfer*, *full aperture transmission transfer* e, acromático [38] [8].

2.3.7.9 Holograma de Fourier

Nesse tipo de holograma, o padrão de interferência registrado é a interação entre as transformadas de Fourier do raio objeto (RO) e referência (RR). O objeto utilizado deve ser de pequena espessura, tal como uma transparência, localizado no plano focal frontal da lente; quando iluminado por uma frente de onda plana e monocromática, a imagem aparece no plano focal após a lente.

2.3.7.10 Formação do holograma

A interação entre os raios objeto e referência (RO e RR), resulta num padrão de intensidade luminosa que corresponde ao quadrado da amplitude complexa das ondas objeto e referência. A amplitude complexa do RO na posição da chapa fotográfica corresponde à transformada de Fourier da amplitude complexa no plano do objeto. O RR é derivado de uma fonte puntual posicionada no plano focal frontal da lente, e sua amplitude complexa

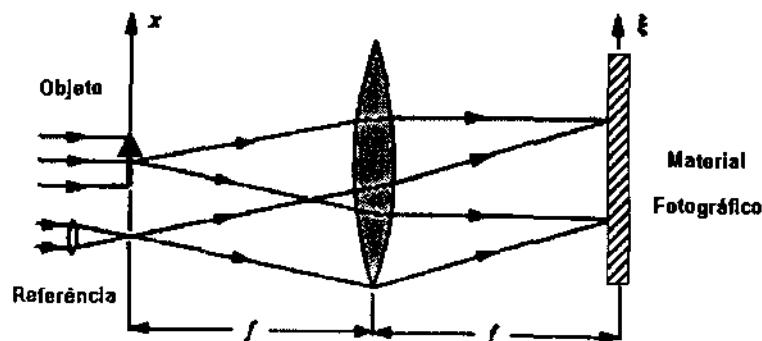


Figura 2.27: Sistema óptico para a formação do holograma de Fourier.

no plano do material é a transformada de Fourier da amplitude complexa no plano da fonte.

Considerando $o(x, y)$ e $\delta(x + b, y)$, respectivamente a amplitude complexa do objeto (RO) e do raio referência (RR) no plano focal frontal da lente, a amplitude complexa no plano do holograma é dada pela Equação 2.29.

$$\begin{aligned} O(\epsilon, \eta) &= \mathcal{F}\{o(x, y)\} \\ R(\epsilon, \eta) &= \exp(-i2\pi\epsilon b) \end{aligned} \quad (2.29)$$

onde $O(\epsilon, \eta)$ e $R(\epsilon, \eta)$ constituem respectivamente da amplitude complexa do RO e RR no plano do holograma \mathcal{F} é a transformada de Fourier.

Pode-se agora obter a intensidade luminosa, $U(\epsilon, \eta)$, do padrão de interferência luminosa formado pelas ondas objeto e referência:

$$I(\epsilon, \eta) = 1 + |O(\epsilon, \eta)|^2 + O(\epsilon, \eta)\exp(i2\pi\epsilon b) + O(\epsilon, \eta)^*\exp(-i2\pi\epsilon b) \quad (2.30)$$

2.3.7.11 Reconstrução do holograma

Na reconstrução, o holograma é colocado no plano focal anterior as lentes e iluminado com uma frente de onda plana, monocromática e de amplitude unitária, conforme as Figuras 2.27 e 2.28. Assumindo que a transmitância de amplitude do holograma, na reconstrução, seja uma função linear da intensidade luminosa, a amplitude complexa da luz transmitida pela holograma é equacionada conforme 2.31. A amplitude complexa no plano focal após as lentes é a transformada de Fourier dada pela Equação 2.32.

$$U(\epsilon, \eta) = t_0 + \beta T I(\epsilon, \eta) \quad (2.31)$$

$$u(x, y) = \mathcal{F}\{U(\epsilon, \eta)\}$$

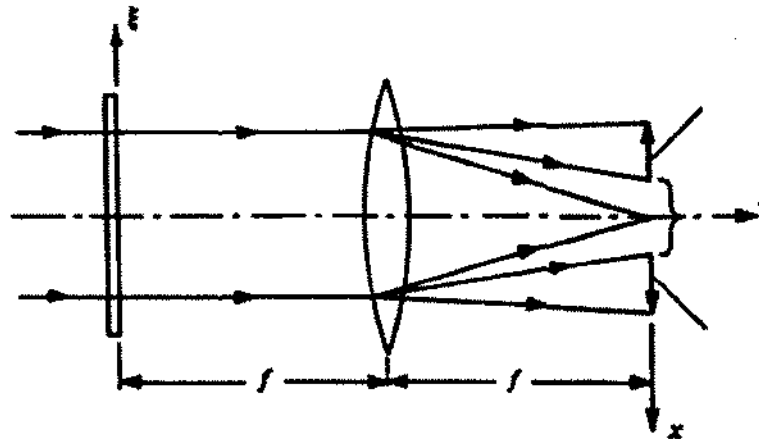


Figura 2.28: Configuração para a reconstrução do holograma de Fourier.

$$u(x, y) = \underbrace{(t_0 + \beta T)\delta(x, y)}_1 + \underbrace{\beta T o(x, y) \star o(x, y)}_2 + \underbrace{\beta T o(x - b, y)}_3 + \underbrace{\beta T o^*(-x + b, -y)}_4 \quad (2.32)$$

1. indica que o foco está sobre o eixo óptico
2. indica a presença de um halo ao redor do foco
3. corresponde à onda objeto original deslocada por uma distância b
4. corresponde ao conjugado da onda objeto original, invertida e deslocada para cima por um valor b .

Tanto a onda objeto original como a conjugada são reais e podem ser registradas num filme fotográfico colocado no plano focal após as lentes. Como o filme somente registra a distribuição de intensidade luminosa, a imagem conjugada só poderá ser identificada pelo fato de estar invertida, conforme a Figura 2.29.

Os hologramas de Fourier possuem características interessantes. Uma delas está no fato da imagem reconstruída ser estacionária mesmo quando ocorre translação do holograma. Isso ocorre porque o deslocamento de uma função no domínio espacial somente faz que sua transformada de Fourier seja multiplicada por um fator de fase constante (função linear da frequência espacial), o qual não tem efeito na distribuição de intensidade da imagem.

Outro ponto de interesse é que esse tipo de holograma não necessita de filme holográfico. Isso é, em parte, devido ao pequeno ângulo entre os raios referência e objeto e, em parte, devido à natureza da codificação da informação (detalhes cada vez mais apurados são codificados gradativamente mais distantes do centro óptico do holograma).

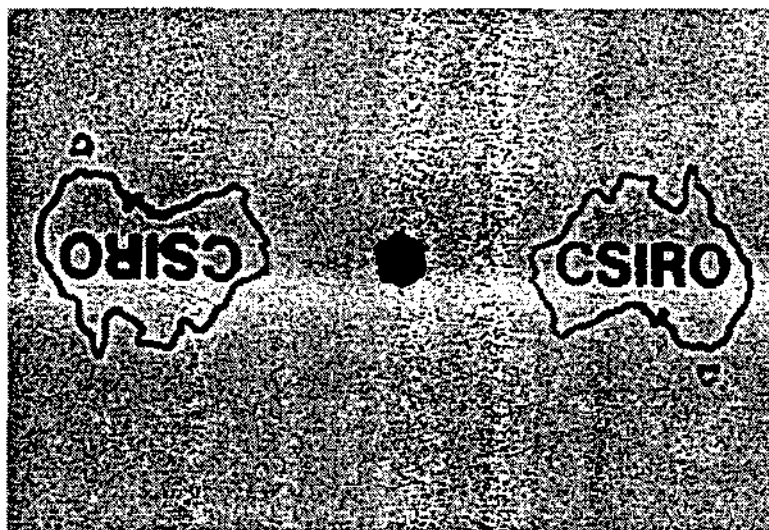


Figura 2.29: Imagens reconstruídas por um holograma de Fourier.

Além disso, devido à natureza da codificação da informação, a resolução do holograma não é dependente da resolução da emulsão, mas do tamanho do holograma. A informação posicional é totalmente codificada sobre a área do holograma, da qual depende a capacidade de resolução. Essa situação é oposta àquela dos hologramas *focused-image* onde a informação posicional é localmente codificada e a resolução dos detalhes depende da capacidade de resolução da emulsão. Hologramas de Fresnel, os mais tradicionais, estão em situação intermediária e os hologramas *rainbow* assumem posição híbrida entre hologramas de Fresnel e *focused-image*.

2.3.7.12 Holograma Estereoscópico

O holograma estereoscópico, também chamado de estereograma holográfico, é obtido usando tanto técnicas holográficas como fotográficas. Esse tipo de holograma consiste numa tentativa de produzir hologramas de objetos maiores que aqueles utilizados nas técnicas convencionais, além de tentar superar a dificuldade de produzir hologramas ao ar livre, tal como se faz com a fotografia.

O estereograma holográfico é sintetizado a partir de um conjunto de fotografias tiradas do objeto, cada qual correspondendo a um ponto de vista sutilmente diferente do anterior. As várias imagens são registradas em faixas estreitas igualmente espaçadas e contíguas da emulsão. A imagem tridimensional resultante possui a vantagem de poder ser observada com luz branca, o que permite obter cenas mais amplas.

Existem estereogramas fotográficos e holográficos. No primeiro caso, as várias cenas são associadas a um conjunto de linhas entrelaçadas, que podem ser vistas separadamente devido à presença de uma tela lenticular. O segundo tipo de estereograma envolve dois

casos, um deles atribuído a Benton e o outro a Lloyd Cross.

Nos hologramas de Benton, a codificação das várias imagens ocupa toda a área do meio de registro e são distinguidas através do direcionamento de cada imagem dado pela posição das franjas de interferência. Esse tipo de holograma é multiplexado, ou seja, ocorre a exibição simultânea das várias imagens tridimensionais no mesmo holograma. Por outro lado, um holograma de Cross é composto por vários hologramas estreitos, tendo a informação codificada localmente em cada holograma individual, assim como um sinal no qual cada mensagem é enviada separadamente, uma por vez, comprimidas e não multiplexadas. O holograma de Cross também é chamado de holograma integral, integrama ou Multiplex. Esse último termo refere-se ao nome da empresa de Cross; esses hologramas não são multiplexados.

2.3.8 Exibição de hologramas

Holografia é reconhecida como uma forma efetiva de expressar a informação tridimensional. Existem os meios convencionais, que podem produzir imagens coloridas de alta resolução e brilho, além de abranger um amplo intervalo de profundidades; existe também a holografia usada para representar estruturas tridimensionais complexas, tais como aquelas encontradas em imagens médicas, projeto auxiliado por computador (CAD) ou mesmo navegação.

Em exibições públicas convencionais, de modo geral, existem dois tipos básicos de hologramas que podem ser utilizados, Holograma de Denisyuk e de Transmissão.

2.3.8.1 Holograma de Denisyuk

É o tipo de holograma que permite reconstrução tolerável em praticamente todas as condições de iluminação. Apresenta paralaxe horizontal de boa qualidade, bastando posicionar o holograma adequadamente no caminho da luz vinda de um retroprojetor, conforme a Figura 2.30, ou ainda, em ambientes domésticos, bastando pendurá-lo na parede e usar um foco de luz direcionado, em frente ao holograma (fazendo 45 graus com a parede e a uma distância de aproximadamente 1,5 metros, para iluminá-lo) (Figura 2.31). Para o caso de filme holográfico, torna-se necessário envolvê-lo em vidro ou acrílico. O holograma deve ser colocado a uma altura mediana para que as pessoas baixas possam ver ficando nas pontas dos pés e as altas necessitando dobrar levemente os joelhos. Caso contrário nada pode ser visto devido à deficiência na paralaxe vertical.

2.3.8.2 Holograma de Transmissão

Normalmente é necessário aproximadamente um metro de espaço atrás do holograma que deseja ser visto, com o foco de luz situado no lado oposto do observador; caso não exista

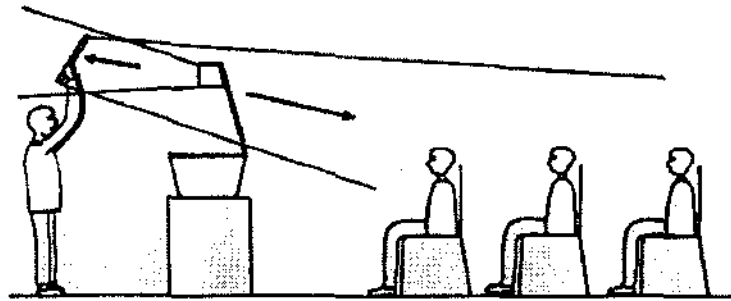


Figura 2.30: Exibição de hologramas de reflexão.

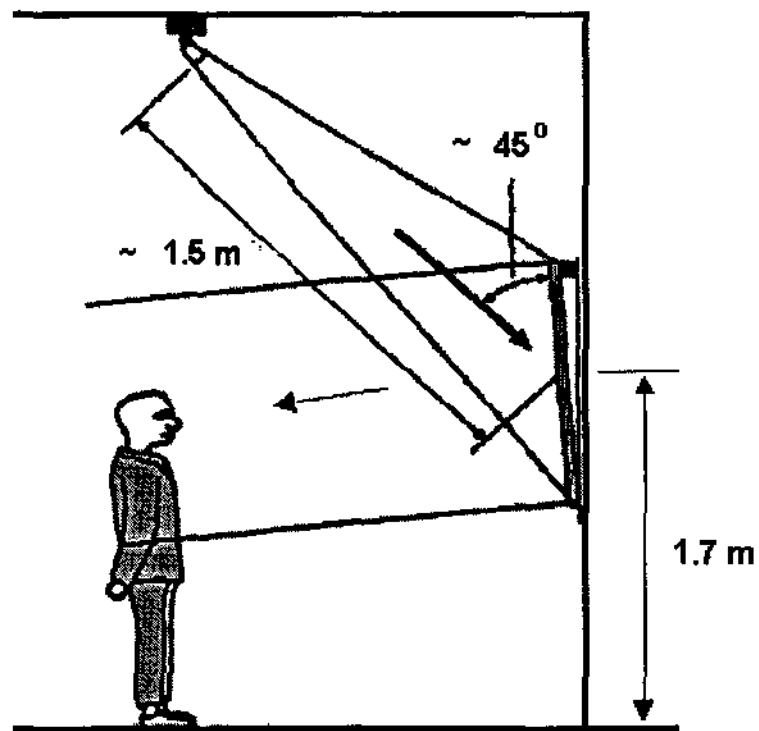


Figura 2.31: Observação de hologramas de reflexão utilizando o movimento da cabeça.

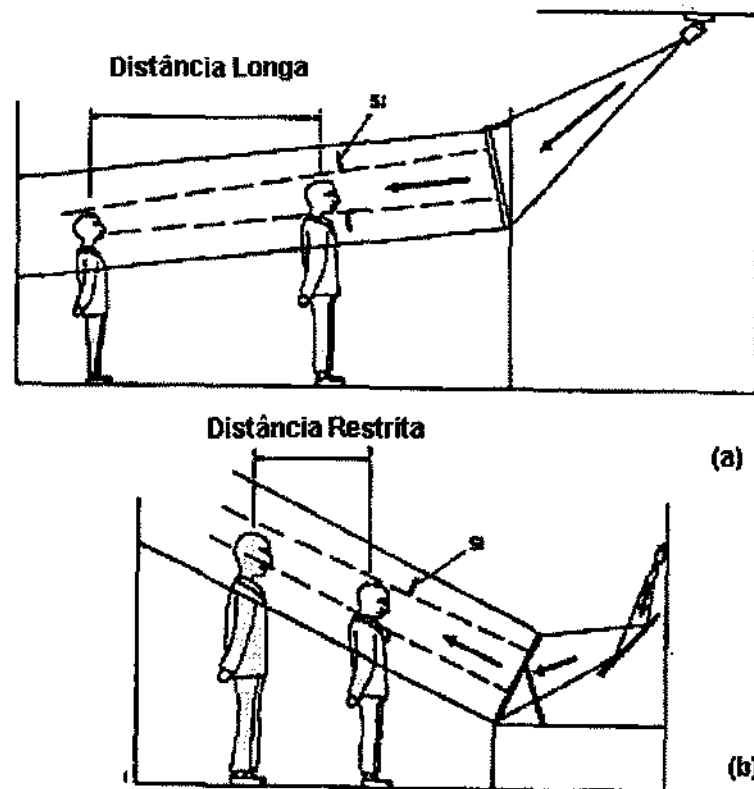


Figura 2.32: Configurações para exibição de hologramas de transmissão de luz branca.

espaço suficiente pode-se diminuir gradativamente a altura da fonte de luz, direcionando-a com a ajuda de um espelho. Na Figura 2.32 exibe-se os hologramas de transmissão de luz branca: (a) configuração de exibição para pessoas altas e baixas, (b) configuração de exibição com restrição de espaço. O holograma rainbow, com cores espectrais puras, constitui o tipo mais comum, produzindo imagens dotadas de cores saturadas e brilho intenso, mas extremamente dependentes do posicionamento da fonte luminosa. Esta deve ser situada atrás e acima do holograma, o qual deve ser suspenso, juntamente com um espelho, nas proximidades de um retroprojetor, conforme a Figura 2.33. Apesar do ângulo de observação ser horizontalmente restrito, além de ser extremamente limitado na direção vertical, é possível produzir imagens de boa profundidade.

Como o próprio nome indica, a holografia por reflexão é caracterizada pela difusão das ondas como resultado da reflexão da onda iluminante, pelo objeto que está sendo registrado, o que significa que a superfície do objeto é visualizada. Em contrapartida, a holografia por transmissão refere-se ao registro de elementos transparentes, fazendo com que somente a sombra do objeto seja vista. Nos hologramas por reflexão, apenas uma porção extremamente pequena de energia atinge o holograma, exigindo uma fonte de alta potência; ao contrário, os hologramas por transmissão requisitam uma quantidade de ener-

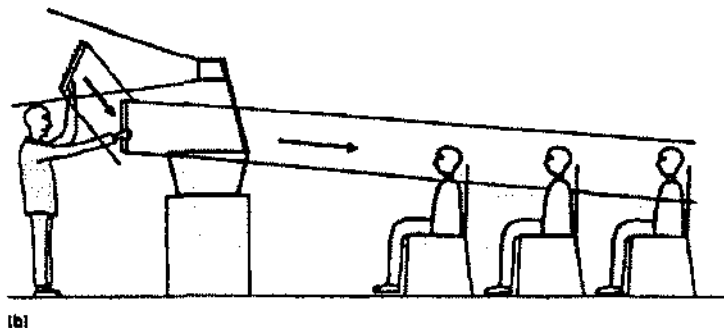


Figura 2.33: Exibição de hologramas de transmissão de luz branca.

gia relativamente menor, além de não exigirem alta coerência (relaciona-se à concordância de fase dos fótons).

A cinematografia holográfica, ou cinema holográfico, é uma ferramenta em potencial para obter animação de hologramas sem adotar óculos especiais. É baseada principalmente na técnica de hologramas de transmissão, uma vez que lasers com alta taxa de repetição, baixa energia e grau de coerência estão sempre disponíveis; entretanto, também existem expoentes na cinematografia baseada em holografia por reflexão, tal como o “Holotrain”, um dos filmes holográficos pioneiros, registrado em outubro de 1983 na Europa. Empregava um filme de 35 mm e obteve a taxa de 24 hologramas por segundo. Em filmes de 70 ou 35 mm—como do exemplo anterior—a separação das imagens no filme é adquirida por meios convencionais, ou seja, através do movimento de translação do filme, característico dos projetores de cinema convencionais. A cinematografia holográfica que emprega uma câmera de transporte de filme contínuo—a qual pode operar com filmes de 16 a 126 mm—apresenta maior rapidez na exibição, uma vez que cada holograma é apresentado com um pulso do laser. A sincronização da repetição do laser com a taxa de exibição de quadros permite a animação de 25 hologramas por segundo. Entretanto, a iluminação por laser pulsado e as inúmeras precauções para garantir estabilidade do sistema dificultam sua utilização. Existem outras formas possíveis para adquirir animação holográfica, a maioria delas não garantindo um bom resultado na exibição de seqüências de imagens [42].

Os avanços na tecnologia de processamento de imagens contribuíram para aumentar a demanda de processamento de informação tridimensional (3D). A medicina é uma das áreas onde se encontra a necessidade de visualização de movimentos em três dimensões: por exemplo, para diagnosticar deficiências da artéria coronária através da cineangiografia, ou mesmo para facilitar a compreensão da tomografia computadorizada. Na indústria mecânica já existem meios de expressar movimentos de componentes em terceira dimensão, simulada através da exibição do resultado em um CRT (Tubo de Raios Catódicos), embora não seja uma forma de exposição verdadeiramente 3D.

Existem duas técnicas para revelar imagens verdadeiramente tridimensionais: holoim-

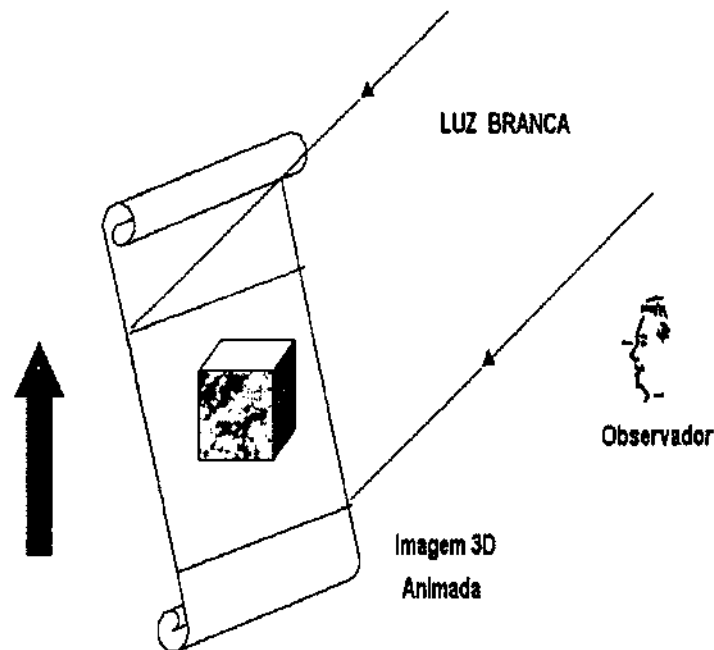


Figura 2.34: Configuração para holoanimação.

pressão e holoexibição. No primeiro método, os dados da imagem são sintetizados ou armazenados pelo computador e registrados automaticamente num dispositivo chamado de holoprinter, o qual produz hologramas estáticos com paralaxe horizontal e vertical. Permite também a holoanimação eliminando a paralaxe vertical e adota um aparato que permite fazer o rolamento da imagem (scroll), conforme a Figura 2.34. No segundo grupo existem alguns modos convencionais, tal como aquele que emprega óculos 3D, usados em indústrias, na medicina ou para simples entretenimento; entretanto, a paralaxe oferecida é insuficiente para uma observação tridimensional (3D) realística. Outro modo é um sistema autoestereoscópico que utiliza uma tela lenticular, mas que apresenta paralaxe e resolução espacial deficiente; um método desenvolvido há poucos anos é chamado de holoexibição interativa e está limitado pelo estado da arte dos dispositivos de modulação da luz, além de consumir tempo de computação elevado para produzir boa animação.

A *holoprinter* é um dispositivo periférico computacional que oferece cópias verdadeiramente tridimensionais a partir dos dados de entrada da imagem (Figura 2.35). Cada ponto registrado, diferentemente das impressoras convencionais, contém uma imagem bidimensional assim como um holograma, composto por pequenos pontos de hologramas elementares. O sistema óptico de registro inclui apenas um painel de cristal líquido e lentes esféricas, sendo adequado para a produção de um sistema compacto. O meio de registro é um material fotográfico relativamente espesso, sendo possível gravar a paralaxe

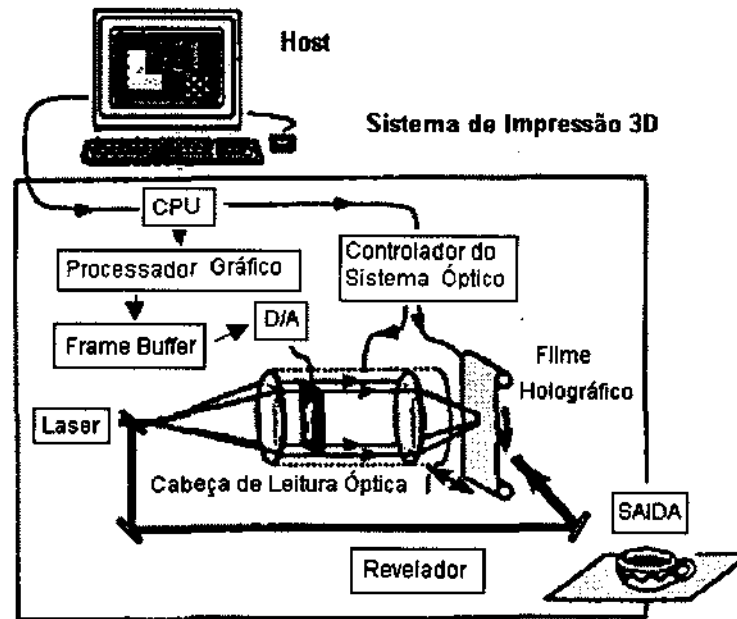


Figura 2.35: Esquema da impressora holográfica.

horizontal e vertical e reconstruir a informação livre de distorção, utilizando luz branca, gerando uma imagem tridimensional numa região próxima ao plano do holograma. Ao realizar o rolamento do filme é possível ver uma sequência de imagens 3D, as quais compõem um holograma do conjunto que mantém a paralaxe horizontal dos componentes, que são verticalmente registrados.

O sistema óptico de registro da *Holoprinter* é esquematizado na Figura 2.36. Uma imagem calculada pelo computador é direcionada a um painel de cristal líquido (modulador espacial de luz), o qual é iluminado por um raio laser colimado, constituindo o raio objeto (RO). Este raio atravessa o painel e ao atingir as lentes converge para o plano do filme: o ângulo de convergência máximo das lentes determina o campo de visão. O raio laser referência (RR) vem na direção oposta ao RO, em relação ao plano do filme, e um holograma elementar é gerado. O filme é deslocado verticalmente e então horizontalmente por um certo número de pontos, até que toda a superfície do filme seja completamente exposta.

O cálculo da imagem exibida no painel de cristal líquido é feito pelo computador conforme o esquema da Figura 2.37. Cada ponto do objeto tridimensional é projetado no plano de projeção para a direção horizontal. Em (a), o centro da projeção está situado no ponto a ser exposto no plano do holograma, e não corresponde à posição real do observador. Por outro lado, a geometria de cálculo para a direção vertical é específica à imagem animada. Em (b), cada objeto do quadro em questão deve estar localizado à altura correspondente e projetado sobre o plano de projeção, onde o centro de projeção é a

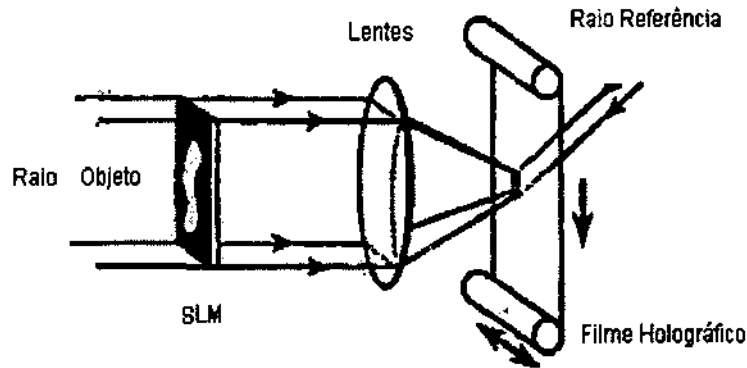


Figura 2.36: Sistema óptico de registro multipontos.

posição dos olhos do observador. Uma imagem para exposição é verticalmente sintetizada de forma que cada quadro possa ser visto à altura adequada. A imagem projetada pode também ser gerada coletando as imagens associadas a diferentes instantes, após vários quadros, e calculada através da projeção horizontal. Esses conceitos foram experimentados com uma holoanimação de 25 quadros, obtendo-se uma imagem tridimensional com o uso de luz branca. Com esse método é possível imprimir holoanimação em cores reais empregando três lasers nas cores primárias.

Na holoexibição, diferentemente dos hologramas convencionais, existe a possibilidade da exibição em tempo real. Dispositivos desse tipo necessitam de um amplo intervalo de frequências (*bandwidth*) para viabilizar a sua implementação. Embora os hologramas gerados por computador (CGH) constituam um assunto de destaque na área, relativamente pouca ênfase é dada à exibição de hologramas à taxas próximas as de vídeo. Existe um método baseado em tecnologia acusto-óptica (AO), onde o meio de exibição consiste de um cristal AO e a imagem é produzida por varredura (raster scan). É capaz de minimizar os problemas encontrados nas tentativas anteriores de holografia gerada por computador em tempo real.

Sabe-se que a largura de banda de informação disponível nos sistemas eletrônicos, computacionais e de comunicação restringe severamente o progresso da holografia em tempo real. O conteúdo de informação de uma imagem holográfica é prontamente calculado pela equação da rede de difração (Equação 2.2). Conforme o teorema da amostragem, a frequência de amostragem mínima requerida para a geração ou transmissão digital do holograma deve ser igual ao dobro da frequência máxima da imagem.

Dessa forma, o conteúdo de informação de um holograma típico é muito maior que uma imagem bidimensional, tal como aquela exibida em um CRT (Tubo de Raios Catódicos). Por exemplo, um holograma de 10 x 10 cm, com paralaxe total e ângulo máximo de difração de 300 graus contém, aproximadamente, 25 x 10⁹ amostras de informação, todas

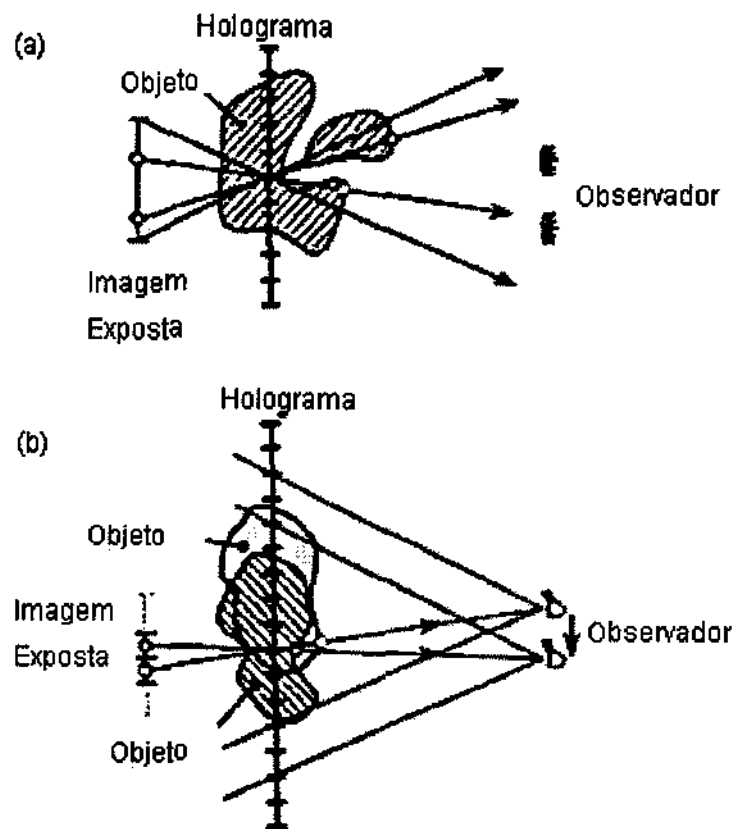


Figura 2.37: Geometria para cálculo das imagens a serem expostas.

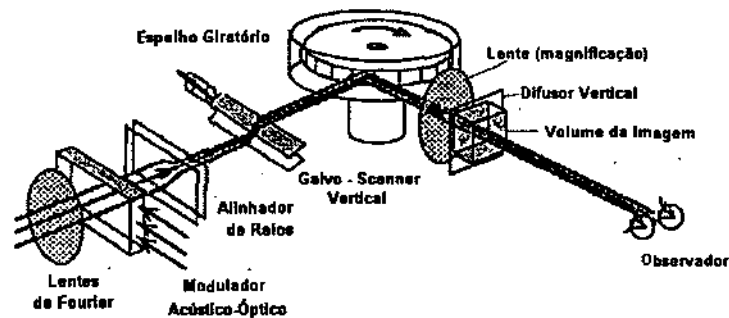


Figura 2.38: Display holográfico do MIT.

para um mesmo quadro. Para atualizar tal imagem, com resolução de 8 bits, a uma taxa de 60 quadros por segundo, é necessário uma taxa de transmissão de dados de 12 Terabits por segundo. Entretanto, pode-se reduzir o conteúdo de informação eliminando-se a paralaxe vertical de um holograma gerado por computador, antes da computação, gerando um holograma similar ao holograma rainbow; pode-se também reduzir o campo de visão horizontal a 15 graus, o que limita o número de pessoas que podem simultaneamente observar o holograma. Além disso, a resolução da imagem pode ser reduzida ao limite visual; por exemplo, uma imagem de 5 x 5 cm, campo de visão de 15 graus e 100 linhas horizontais requer $4,1 \times 10^6$ amostras por quadro, ou seja, 2 Gigabits por segundo de *bandwidth*, assumindo taxa de refresh de 60 Hz.

Um exemplo de dispositivo de holoexibição é o holovídeo do MIT (Massachusetts Institute of Technology) esquematizado na Figura 2.38.

2.3.9 Holografia colorida

O sistema visual humano é capaz de discernir alguns milhares de cores e apenas cerca de trinta a sessenta níveis de cinza. O termo cor refere-se a um conjunto de atributos da luz: fluxo luminoso, comprimento de onda dominante e pureza. O primeiro é responsável pelo brilho, o segundo, pela sensação de cor (matiz) e o terceiro relaciona-se com a saturação. Cromaticidade é o nome dado aos dois últimos atributos tomados em conjunto.

2.3.9.1 Sistemas de cores

A teoria de Thomas Young constitui a base da teoria das cores. Projeta-se luz através de filtros Vermelho, Verde e Azul, de modo a obter três círculos superpostos. A porção onde os círculos coincidem torna-se branca, as três combinações duas a duas de Vermelho, Verde e Azul produzem Ciano, Magenta e Amarelo (Equação 2.33). Combinações duas a duas dessas três últimas produzem Vermelho, Verde e Azul (Equação 2.34). A nomenclatura

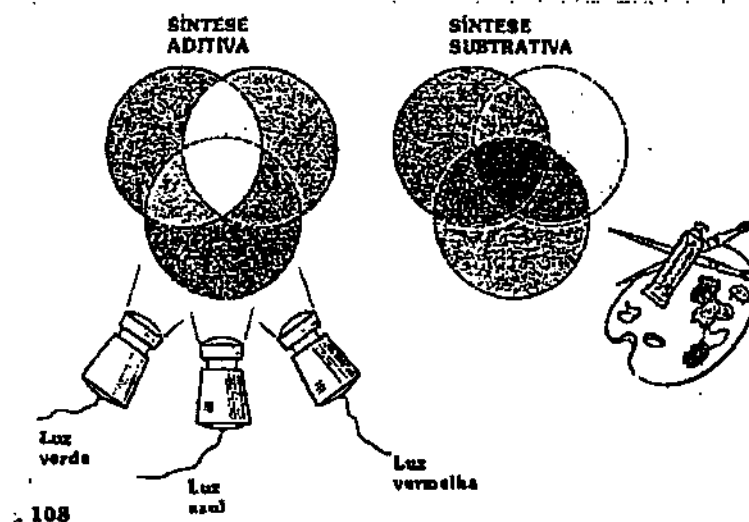


Figura 2.39: Sínteses aditiva e subtrativa.

internacional convencionada a cor do filtro pela inicial em inglês: Yellow, Green, Blue, Magenta, Red e Cyan. Para compreender a mistura de cores considere a relação entre cada elemento das seguintes triplas (por exemplo GB, primeiro elemento da primeira tripla consiste numa combinação de cores dada pelo primeiro elemento da segunda tripla, ou seja, C):

$$(GB, RB, RG) = (C, M, Y) \quad (2.33)$$

$$(MY, CY, CM) = (R, G, B) \quad (2.34)$$

Pela teoria de Young, qualquer uma dessas três cores, Vermelho, Verde ou Azul (RGB), não podem ser produzidas com a mistura de duas delas, chamadas de primárias aditivas. Quando ocorre a combinação de duas cores primárias obtém-se matizes secundários.

Um efeito complementar é obtido ao subtrair Vermelho, Verde e Azul da luz branca, usando filtros, esquematizados em 2.35, produzindo Magenta, Cyan e Amarelo. Por isso, Young denominou essas três cores de cores primárias subtrativas (Figura 2.39).

$$\text{BRANCO} - (R, G, B) = (C, M, Y) \quad (2.35)$$

Qualquer cor pode ser reproduzida pela mistura de um conjunto apropriado de três cores primárias. Nas células fotoreceptoras da retina existem bastonetes e três tipos de cones, cada qual associado a um terço do espectro visível, com curvas de sensibilidade que se sobrepõem (Figura 2.40). As sensibilidades máximas dos três tipos de cones indicam a habilidade de perceber separadamente os matizes primários Vermelho, Verde e Azul.

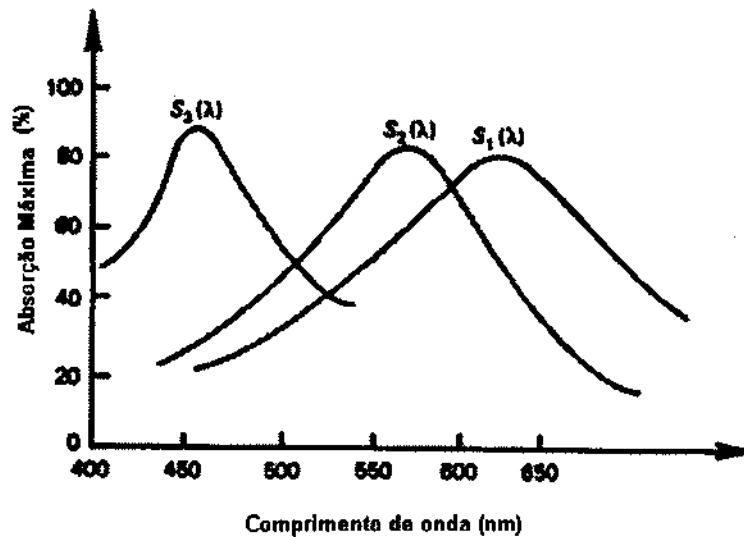


Figura 2.40: Curvas de sensibilidade.

Outras cores não espectrais como marrom, rosa, cinza e branco resultam do estímulo de todos os três tipos de receptores em proporções variadas.

Mesmo que não seja possível reproduzir a cor desconhecida por meio de três componentes, é possível especificá-la, estabelecendo em que quantidade uma ou mais componentes devem ser a ela adicionadas para que seja possível reproduzir a cor de fato. Dessa maneira, qualquer cor pode ser medida em função de três componentes quaisquer e o resultado dessa medição ser expresso por três números. Um outro fato é que não existem apenas três cores que devam ser utilizadas como componentes. Entretanto, sabe-se que as três cores que permitem a obtenção da mais extensa gama de cores, sem recorrer ao conceito de composição, são aquelas pertencentes ao espaço RGB. Convém assinalar que as noções precedentes decorrem de fatos experimentais e independem de qualquer teoria sobre a percepção de cores.

2.3.9.2 Fluxo luminoso

O fluxo luminoso constitui a relação entre brilho e fluxo energético. Este último, também chamado de fluxo radiante ou luminosidade relativa, é a energia emitida por uma fonte em uma unidade de tempo, sendo medida em Watts. O brilho produzido depende do comprimento de onda; por exemplo, o espectro solar tem maior brilho na região amarelo-esverdeada, sendo gradualmente diminuído na direção dos maiores e menores comprimentos de onda.

O fluxo luminoso é medido em lúmens. Para se obter um lúmen de brilho, a um certo comprimento de onda λ , é preciso ter fluxo radiante de $\frac{1}{\lambda}$ Watts. Nessas condições, o

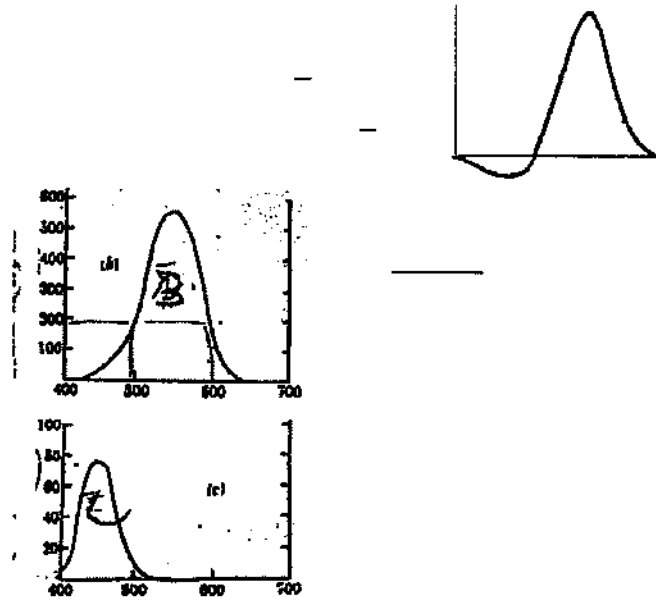


Figura 2.41: Número de lumens de cada uma das componentes, necessário à obtenção de um watt de fluxo radiante monocromático.

comportamento do fluxo luminoso de cada uma das cores primárias RGB é descrito na Figura 2.41. Como nem sempre os valores obtidos são positivos, então, por facilidade, a C.I.I. decidiu exprimir todos os dados para a composição de cores em função das três componentes RGB, de tal forma que as curvas correspondentes apenas expressassem números positivos. As proporções de cada componente, a um certo comprimento de onda, usadas para representar uma cor, são chamadas de valores *tristimulus*. Como existe uma curva para cada componente, então a representação gráfica das cores só seria possível em três dimensões. Essa dificuldade é contornada empregando-se três outras grandezas, x , y e z , chamadas de coeficientes tricromáticos:

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}, \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}, \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}$$

Por definição $x + y + z = 1$, sendo suficientes dois quaisquer desses coeficientes para definir uma cor. Fazendo o cálculo desses coeficientes para todos os comprimentos de onda, obtém-se a representação numérica de todas as cores do espectro: o diagrama de cromaticidade. A curva dada nesse diagrama envolve todas as cores visíveis; além disso, ele contém várias elipses de diferentes tamanhos e orientações onde o interior de cada uma delas abrange um pequeno intervalo de comprimentos de onda que provocam uma mesma sensação de cor ao sistema visual humano.

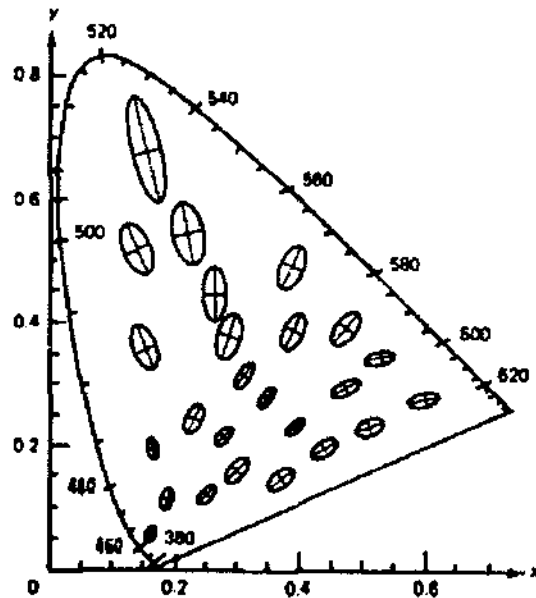


Figura 2.42: Diagrama de cromaticidade.

2.3.9.3 Cromaticidade

Além de fluxo luminoso, a luz está relacionada com o diagrama de cromaticidade (comprimento de onda dominante e a pureza) dado pela Figura 2.42. Ele facilita a compreensão da representação das cores, sendo um método alternativo para a descrição da cor ao invés dos valores *tristimulus* ou coeficientes tricromáticos. Pelo diagrama é possível obter geometricamente a cromaticidade conjunta pela reta que une a cromaticidade das componentes. Quando a proporção de uma cor aumenta, o ponto representativo da cromaticidade conjunta se aproxima do extremo do segmento correspondente ao comprimento de onda dominante. O ponto central do diagrama é chamado de ponto branco. A avaliação de pureza da cor é geometricamente dada pela distância que o comprimento de onda dominante está do ponto branco.

O triângulo HCJ do diagrama de cromaticidade da Figura 2.43 corresponde à região das cores púrpuras. A distância que separa uma cor púrpura do ponto branco exprime a pureza da cor. As cores púrpuras não são espectrais, uma vez que elas não podem ser obtidas pela combinação de branco com outra cor do espectro. Isso é explicado geometricamente pelas retas que passam pelo ponto branco e um ponto qualquer do triângulo HCJ: elas não interceptam a curva espectral em nenhum ponto. Quando a soma de duas cores resultam no ponto branco, elas recebem o nome de complementares. O comprimento de onda dominante de um tom de púrpura é dado pela intersecção da curva espectral com a reta que passa pelo seu ponto representativo e pelo ponto branco. O comprimento de

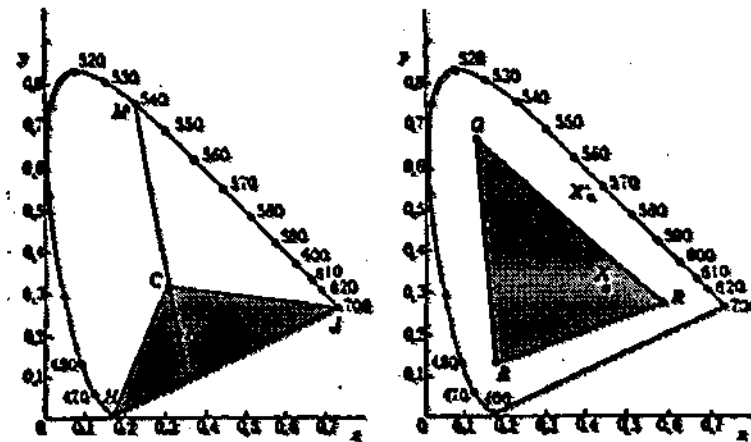


Figura 2.43: (A) O ponto K representa um tom de púrpura complementar à cor M do espectro (B) Pontos do triângulo RGB podem representar praticamente qualquer cor.

onda dominante representado pelo ponto K na Figura 2.43(A) é o da cor do espectro representada pelo ponto M; as amostras de púrpura refletem mais intensamente na região do Vermelho e do Azul e menos na região do Verde.

Qualquer cor pode ser obtida pela composição aditiva das cores espectrais. Geometricamente, o ponto representativo da cor em questão está contido no diagrama de cromaticidade. O maior triângulo, interno ao diagrama, que pode ser obtido, e conseqüentemente a mais extensa gama de cores, é aquele cujos vértices são R, G e B. Nessa composição ocorre a soma de raios luminosos e todas as cores são percebidas pelo observador ao incidirem numa tela branca. Se a superfície que reflete tal luz possuir corantes, ocorre subtração de raios luminosos e nem todas as cores podem ser notadas. Por exemplo, para a luz branca (RGB) incidente numa superfície com corante amarelo (R+G), ocorre a absorção do azul e reflexão do vermelho (R) e verde (G). Quando existe a mistura de tintas, a cor refletida é aquela que é comum a todos os corantes presentes; as demais são absorvidas. Por exemplo, luz branca incidindo numa superfície com corante amarelo (R+G) e magenta (R+B), apenas o vermelho (R) é refletido. Esse método, por razões óbvias, é chamado de síntese subtrativa. Assim, quando se misturam raios de luz colorida, o feixe resultante é mais claro e mais luminoso, pois houve adição de luz. Por outro lado, quando se misturam corantes, a cor resultante é sempre mais escura que a dos componentes misturados, pois houve subtração de luz.

2.3.9.4 Holografia

A fotografia colorida emprega um material de registro formado pela superposição de três camadas (por exemplo, de haleto de prata) correspondendo às primárias R, G, e B (red, green, blue), que, quando reveladas, transformam-se respectivamente em C, M e Y (cyan,

magenta, yellow), pelo processo de síntese subtrativa.

As cores obtidas em fotografia dependem do tipo da fonte de luz: natural ou artificial. No primeiro caso, sob a luz do dia, pigmentos corantes formados após a revelação reproduzem precisamente as cores do objeto holografado. Quando a fonte de luz é artificial, no segundo caso, ocorrem distorções na reprodução das cores, uma vez que R, G e B estão a diferentes proporções. Por exemplo, a luz fluorescente possui predominância da componente verde, acarretando alterações na revelação das cores.

O sistema visual humano compensa o desequilíbrio de proporções gerado na presença de fontes de luz artificiais. Por exemplo, ao entrar, durante o dia, em um ambiente iluminado por lâmpada de tungstênio, percebe-se um tom amarelado que depois volta ao normal por adaptação do sistema visual. Entretanto, esse processo de adaptação não pode ser imitado pelo material de registro.

Cada fonte de luz possui proporções específicas das componentes RGB e é caracterizada pela temperatura da cor, medida em graus kelvin, através de fotômetros especiais. Por exemplo, ao aquecer um corpo negro (carvão) ocorrem variações das cores: primeiramente ele fica avermelhado, e à medida que a temperatura aumenta vai-se notando a presença gradativa de amarelo, logo após branco e, à grandes temperaturas, fica azulado. É então importante compreender o conceito de temperatura da cor: a temperatura de um corpo aquecido que emite luz da cor em questão, ou seja, com a mesma composição espectral.

O objetivo da holografia colorida consiste em gerar imagens com, aproximadamente, a mesma cor do objeto holografado. Para isso é utilizado o modelo de Young-Helmholtz para a percepção das cores, que define uma célula colorida de um certo material como sendo caracterizada pelos atributos matiz, saturação e brilho. Como este último atributo se refere à intensidade da luz percebida pelo olho e não é influenciado pela cor, ele não é incluído no modelo.

O diagrama para padronização de cores, adotado pelo Comitê Internacional de L'Eclairage, é baseado somente nos atributos matriz e saturação. O eixo horizontal está associado ao vermelho, o vertical ao verde e o azul é obtido pela relação $1 - (\text{Vermelho} + \text{Verde})$. O diagrama define o intervalo de cores que pode ser obtido com três lasers (de alta potência) de comprimentos de onda bem determinados como primárias, tal como hélio-neônio, vermelho ($\lambda = 633nm$), íon argônio, verde $\lambda = 514nm$ e argônio azul ($\lambda = 488nm$), onde λ é o comprimento de onda.

Existem vários problemas associados à holografia colorida. Um deles é o alinhamento preciso de três lasers ao longo do mesmo percurso. Outro inconveniente são as anomalias de matiz causadas pela refletância espectral dos objetos. Como exemplo, considere que três objetos A, azul-esverdeado ($500 \leq \lambda \leq 550$), B, verde-amarelado ($550 \leq \lambda \leq 580$) e C, amarelo-alaranjado ($580 \leq \lambda \leq 600$) são registrados, obedecendo uma certa configuração, através de laser. Na reconstrução, com laser R (633 nm), G (514 nm) e B (477 nm), A

e B terão tom vermelho-esverdeado e C apresentará coloração preta. Isso ocorre porque somente quando o intervalo de comprimentos de onda refletidos consideravelmente exceder o espaçamento entre dois dos comprimentos de onda dos lasers poderá se obter cor natural. Isso significa que se um holograma colorido é feito para reproduzir as cores realisticamente, o tema holografado deve fornecer um amplo intervalo de refletância espectral; felizmente a maioria dos corantes e pigmentos exibem tal intervalo.

O *cross-talk* é outro problema da holografia colorida. Ele é manifestado pela presença de duas ou mais imagens falsas na fase da reconstrução holográfica. Num holograma colorido contendo três comprimentos de onda, as franjas que registram a imagem Azul estão mais próximas que aquelas da imagem Verde que, por sua vez, estão mais agrupadas que as interfranjas vermelhas. As franjas formadas pelo Vermelho, além de reconstruir a imagem vermelha real, gera também as imagens vermelhas falsas dos conjuntos de franjas formados pelas outras duas cores. O mesmo ocorre com as outras cores, obtendo-se assim nove imagens, onde somente três delas são genuínas. Sua superposição gera o objeto de cor natural, e as outras seis, falsas, surgem em diferentes posições, inclusive sobre a verdadeira, em diferentes tamanhos.

Uma solução para o problema do excesso de informação consiste em fazer os hologramas separadamente, um para cada cor, e finalmente agrupá-los em um só registro. Para a maioria das propostas duas chapas são suficientes: uma registrando as imagens Verde e Azul, e a outra a imagem vermelha. O material de registro deve ser apropriado, sendo suscetível aos vários comprimentos de onda. Um dos materiais mais eficientes, a gelatina dicromática, está excluído, devido à sua insensibilidade à luz vermelha.

A quantidade de informação que deve ser armazenada para uma mesma imagem é um dos maiores problemas da holografia colorida. Como são registrados três comprimentos de onda distintos, ocorre considerável sobreposição das franjas de interferência, o que sobrecarrega a capacidade de informação do material.

Os hologramas volumétricos de absorção (transmissão) são os mais usados em holografia colorida, devido à sua grande sensibilidade aos vários comprimentos de onda. Entretanto, a difração ocorrida é pouco eficiente, uma vez que existe sobreposição dos três registros das primárias, cada qual com seu comprimento de onda: quanto maior o número de camadas sobrepostas, menor é a eficiência de difração.

Os hologramas volumétricos de reflexão, embora possam ser reconstruídos com luz branca, são pouco usados em holografia colorida devido à sua sensibilidade restrita a uma estreita banda espectral e baixa eficiência de difração; esse tipo de holograma requer que o ambiente esteja escurecido para que a imagem possa ser vista.

2.3.10 Processamento e armazenamento de informação

2.3.10.1 Processamento de imagens

Para definir uma imagem pode-se considerar o espaço como um enorme conjunto de cubos de volume unitário, cada qual associado a um certo valor de energia (densidade). Nesse contexto, uma imagem é descrita como uma distribuição de energia em um certo instante e espaço, podendo ser representada pelo gráfico das densidades associadas. Pela análise de Fourier, o gráfico da distribuição das densidades de energia pode ser transformado numa soma de funções harmônicas, cada qual com sua amplitude e frequência apropriadas. A criação de uma imagem holográfica envolve o fenômeno da difração; uma onda difratada por uma abertura emerge em diversas direções e cada onda emergente corresponde exatamente a uma componente de Fourier associada a um valor específico da frequência espacial: a frequência de ordem zero está relacionada com a onda axial que não sofre desvio: as frequências espaciais mais elevadas correspondem aos raios de luz que se propagam ao longo das direções que fazem um ângulo cada vez maior com o eixo central [38].

A imagem holográfica então corresponde ao padrão de difração (de Fraunhofer), o qual é idêntico à transformada de Fourier da função que descreve a rede de difração (holograma). Como tal padrão se materializa num campo distante do plano objeto, utiliza-se uma lente (lente de Fourier) que captura a transformada de Fourier (TF) para o plano imagem. Como exemplo, utilizando uma rede de difração com perfil senoidal de energia, iluminada por uma fonte, com o campo aproximado por uma lente de Fourier, no plano imagem surge a TF composta por três manchas luminosas: uma associada à frequência central de ordem zero e as outras duas associadas a frequência de primeira ordem, uma acima e outra abaixo do eixo. Tal imagem constitui o espectro de frequências espaciais do objeto (a rede de difração), chamado de plano de Fourier. As redes que apresentam maiores frequências espaciais, e portanto divergindo a ângulos maiores, são mais apropriadas para expressar detalhes do objeto [38]. Colocando outra rede de difração no plano de Fourier, a imagem se materializaria num campo distante e, aproximando-o por uma outra lente de Fourier, a imagem (invertida) retornaria à sua aparência original (Figura 2.44). O procedimento anteriormente descrito representa um computador óptico (Figura 2.45), responsável pelo processamento de imagens [13].

Um aspecto importante a ser observado no computador óptico é que qualquer perturbação ocorrida na frente de onda do objeto pode ser separada da informação original. Esse fato é explicado pelo teorema da convolução da transformada de Fourier (TF): quando duas funções são multiplicadas no espaço do objeto (espaço x), suas transformadas no espaço da TF (espaço frequência) são convolucionadas e vice-versa. Por exemplo, quando uma fotografia fica borrada, ocorre a multiplicação da função imagem por uma

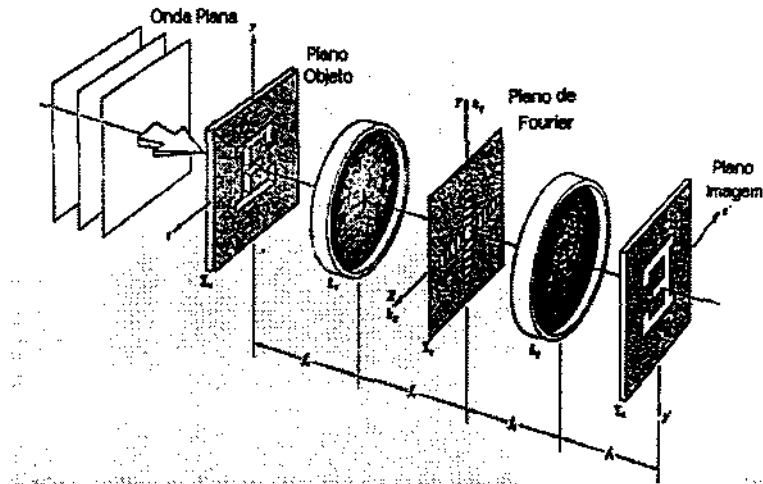


Figura 2.44: Transformada de Fourier da letra E realizada por um computador óptico.

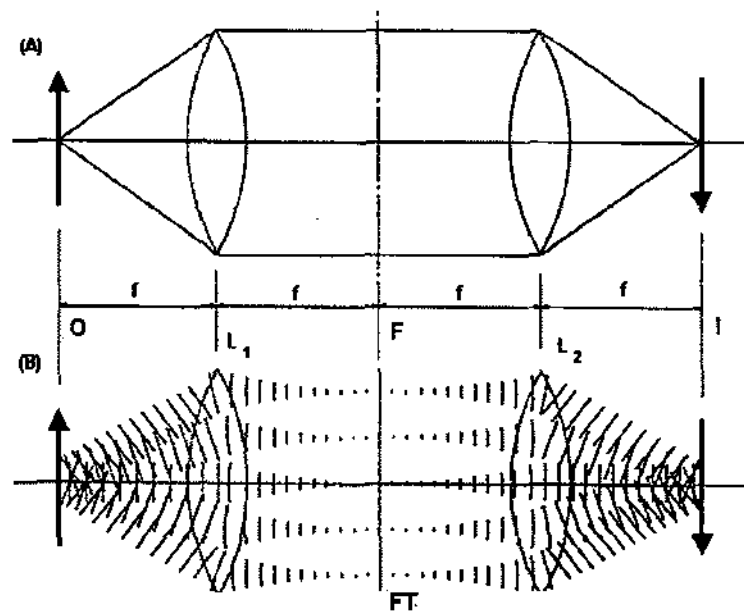


Figura 2.45: Formação da imagem com duas lentes: (a) modelo geométrico; (b) modelo de Fourier.

certa função borrão no espaço do objeto e a convolução das respectivas transformadas no espaço da TF. Assume-se que o borrão na fotografia seja ocasionado por algum movimento da câmera no momento da foto. Tal função é uma pequena linha reta representando o movimento real do ponto, no negativo, durante a exposição. Tendo encontrado a função borrão, deve-se calcular sua TF. A TF da função combinada (imagem + borrão) deve ser dividida pela TF da função borrão. Uma dificuldade presente é que a TF da função borrão não pode assumir valores maiores que um, uma vez que a transmitância não pode assumir valores superiores à unidade [38].

Processamento óptico e eletrônico O processamento óptico de imagens é caracterizado por suas facilidades tais como detecção e armazenamento simultâneo de grande quantidade de sinais ópticos, tratados bidimensionalmente, o que evidencia a rapidez de processamento. Entretanto, existem alguns problemas que são melhor resolvidos pela combinação de técnicas ópticas e computacionais tais como o controle preciso de brilho, a restauração de imagens degradadas ou a fabricação de filtros complexos [22].

A filtragem espacial, uma das áreas mais importantes do processamento de informação, consiste na manipulação do espectro de frequências da imagem. O computador óptico permite inserir máscaras ou filtros no plano de Fourier com o objetivo de bloquear total, ou parcialmente, determinadas frequências espaciais, impedindo-as, por algum motivo, de participar da imagem final. A simulação da filtragem espacial, por exemplo, é útil na compreensão das características do espectro de Fourier dos objetos, precisamente controlado por operações computacionais, o que não pode ser feito num experimento óptico ordinário [22].

Os filtros holográficos podem ser empregados no reconhecimento óptico de caracteres. Admitindo um arranjo óptico semelhante ao da dupla transformada de Fourier (TF) e colocando no plano de Fourier um holograma contendo um conjunto de caracteres, é possível realizar uma análise de correlação da imagem de entrada em relação ao filtro holográfico, tal como feito por Van der Lugt [37]. Quando um caracter desconhecido presente no plano de entrada corresponde a um caracter existente no filtro, surge um intenso brilho no plano de saída. Se o caracter de entrada for deslocado para uma posição distinta daquela ocupada pelo mesmo caracter no filtro, ainda é possível exibir a autocorrelação, embora o brilho de saída também apareça deslocado conforme o caracter de entrada. Filtros formados fora do plano de Fourier não reconhecem um caracter transladado de sua posição original [8].

Uma imagem pode ser processada tanto opticamente quanto computacionalmente. No primeiro caso existe a vantagem do processamento paralelo da imagem de entrada, enquanto que no segundo caso é preciso calcular a transmitância de amplitude complexa de cada ponto digitalizado. O primeiro caso ainda pode produzir naturalmente, no plano

focal após uma lente, a transformada de Fourier (TF) da frente de onda situada no plano antes da lente. Entretanto, existem técnicas computacionais para sintetizar filtros com uma função de transmitância de amplitude complexa arbitrária, o que nem sempre pode ser opticamente realizado (a função de transmitância de amplitude complexa deve modificar tanto a intensidade da luz como o ângulo de fase)[3].

Existem vários aspectos de interesse em sistemas de processamento óptico, em comparação com os sistemas eletrônicos: eles são caracterizados invariavelmente pelo processamento paralelo; não são afetados por ruídos de transmissão; possuem grande capacidade de armazenamento de informações. Uma placa fotográfica para holografia (de 10 x 12 cm) é capaz de manter 5×10^9 informações independentes a mais que um sistema eletrônico [13]. Outra limitação comum dos sistemas eletrônicos consiste na necessidade de conexões metálicas, as quais limitam o grau de integração desses sistemas. Tal fato não ocorre nos sistemas ópticos, que podem ser interconectados através de hologramas moduladores espaciais ao invés de empregar conexões materiais.

Pré-processamento Uma câmera RAM binária é um dispositivo que pode ser usado para pré-processamento de imagens. As células de armazenamento da RAM dinâmica são capacitores que, quando carregados, assumem valor lógico um, e quando descarregados assumem o valor zero, estando dispostos em forma matricial. As linhas da matriz são periodicamente varridas (*refreshed*) e, dependendo do seu estado atual, recarregadas. A RAM torna-se sensível à luz sob certas condições. Se o cristal é iluminado e a varredura é inibida por um certo tempo, os capacitores começam a perder carga. Dependendo da duração do período sem *refresh*, no momento que a varredura é reassumida a voltagem em algumas das células iluminadas está abaixo de um valor limite (*threshold*), e essas células comutam de um para zero lógico. Embora o cristal ainda esteja iluminado após o *refresh* da linha, ele continua a funcionar como uma memória de leitura/escrita ordinária e salva em forma binária uma seção óptica da imagem projetada. A câmera RAM possui três importantes vantagens: memória própria, duas entradas (óptica e eletrônica) e acesso aleatório a cada célula [32].

O sistema tem vários modos de operação, garantindo operações de entrada/saída e pré-processamento de imagem. No modo *off-line* todas as células da matriz são sequencialmente varridas, e a informação é convertida em sinal de vídeo composto para permitir visualização num monitor de TV. O valor de cada célula lida durante a varredura pode ser preservado, apagado ou invertido. No modo *on-line*, as operações básicas são leitura/escrita. Um comando READ (via software) faz com que o conteúdo da matriz seja transferido, byte por byte, ao computador. Dependendo do comando, o conteúdo da matriz é preservado, apagado ou invertido. Um comando WRITE (via software) faz com que o computador escreva na RAM uma imagem modelada por software ou introduzida

no computador por alguma outra operação prévia. Combinando os modos de operação, são possíveis algumas operações eletro-ópticas paralelas em tempo real, em duas ou mais imagens: adição, subtração, etc.

2.3.10.2 Armazenamento

Os hologramas apresentam propriedades que os fazem particularmente interessantes como memórias [13]. Eles podem armazenar tanto informação tridimensional como bidimensional; podem ser armazenados na superfície do holograma bem como em seu volume; os componentes registrados podem ou não estar relacionados e as imagens podem ser tanto cenas compreensíveis quanto padrões ilegíveis.

Os métodos de armazenamento holográfico possuem vantagens bem definidas sobre os meios magnéticos convencionais (fitas, discos): a operação de leitura é mais rápida, tem grande capacidade de armazenamento de informação (um holograma é capaz de conter aproximadamente sete gigabytes). Entretanto, os métodos holográficos possuem desvantagens imediatas: a operação de escrita não é tão rápida quanto a leitura e a memória holográfica não pode ser apagada [20].

As memórias holográficas possuem duas características específicas: a reconstrução é associativa e o registro é distribuído [13]. Na etapa da reconstrução, no primeiro caso, o holograma é iluminado apenas pelo raio referência (RR) para formar o raio objeto (RO): o RO fica assim associado ao RR no holograma e o holograma passa a ser classificado como uma memória associativa. No segundo caso, a danificação de uma parte de um meio de registro binário tradicional (fita magnética, disco óptico) acarreta perda total da informação, o que não ocorre no meio holográfico. Num holograma, porém, a informação encontra-se distribuída em toda a placa holográfica, de tal forma que apenas um pedaço da placa é capaz de reproduzir o holograma por completo. A destruição de uma parte da placa produz uma degradação na qualidade do holograma (definição) como um todo, degradação essa que se agrava progressivamente na medida em que aumenta a área destruída [13].

2.3.10.3 Hologramas gerados por computador (CGH)

Os hologramas gerados por computador constituem a sub-área mais importante do processamento óptico de imagens. Os hologramas gerados por computador podem ser usados para diversas finalidades: apresentação tridimensional de objetos reais (amostragem) ou sintetizados (descrição matemática); como filtro para casos onde a função filtro é de difícil obtenção; para recuperação de imagens degradadas; em reconhecimento de padrões.

Para obter um CGH é preciso descrever o objeto como um conjunto de pontos dispersores de luz iluminados por laser. Além das coordenadas de cada ponto, deve-se fornecer o comprimento de onda associado e a direção dos raios objeto e referência (RO e RR),

calculando a distribuição de intensidade formada no plano do holograma. Um exemplo tradicional consiste em se codificar as franjas de interferência resultantes da interação entre RR e RO, direcionando-as para um plotter ou impressora especial, e em seguida fotografando-as como uma transparência. Ao iluminar essa transparência surge a imagem tridimensional do objeto.

A solução teórica para obtenção de um CGH consiste em calcular a distribuição de intensidade (igual ao quadrado da amplitude), pelo cálculo da amplitude através da equação de difração de Fresnel ou da equação generalizada de Rayleigh-Sommerfeld. A superposição de todas as amplitudes gera a distribuição de amplitude total e, conseqüentemente, a configuração de intensidade. Essa questão envolve o cálculo da transformada de Fourier bidimensional para cada ponto, o que dispende muito tempo uma vez que grande número de pontos são necessários para a representação precisa de um objeto. Uma forma de amenizar o problema de tempo consiste em usar o algoritmo Fast Fourier Transform (FFT) e considerar o holograma como sendo composto por vários hologramas de Fourier a diferentes pontos de vista de um objeto, conseguindo a visualização 3D pelo efeito estereoscópico.

A obtenção de um CGH usando FFT e a equação de difração de Fresnel pode ser feita de duas maneiras. Uma delas consiste em calcular a FFT para descobrir a luz difratada por objetos 2D paralelos ao plano do holograma. A outra forma relaciona-se com a criação de cortes de um objeto 3D: a superposição das amplitudes de cada fatia fornece a distribuição de amplitude total.

A codificação da distribuição de fase baseia-se num esquema dito *detour-phase*. Foi observado por Rayleigh que o deslocamento suave de algumas fendas de uma rede de difração cria fantasmas no espectro difratado.

Os CGH's possuem várias vantagens. Uma delas está na geração da frente de onda de um objeto que não existe fisicamente, apenas está matematicamente especificado. O CGH é uma forma de obter uma frente de onda que tornou possível a criação de protótipos interferométricos para teste de superfícies ópticas complexas durante sua fabricação. Além disso, permite estudar certos efeitos holográficos pela simulação, além de possibilitar a criação de filtros complexos [4].

A síntese de hologramas por computador é um processo que requer quatro passos. O primeiro deles consiste no cálculo da amplitude (ou intensidade luminosa) da frente de onda do objeto. Essa etapa possui limitações, uma vez que o computador fica restrito a um certo número de pontos amostrais; o resultado será ainda tolerável, em vista do teorema da amostragem para funções de banda limitada [23]. Na segunda etapa a amplitude complexa deve ser especificada como uma função real não negativa, para ser exibida como um holograma em algum dispositivo de saída adequado. Um exemplo para esta fase consiste em simular as franjas de interferência, criadas pela interação entre os raios objeto

e referência, sendo a amplitude uma função do contraste entre as franjas senoidais. Se o dispositivo de saída não for adequado, permitindo escrever o holograma diretamente no tamanho correto, será necessário incluir um passo de redução das dimensões do holograma, até um estágio suficiente para difratar a luz. Finalmente, o holograma é enviado ao dispositivo de saída.

A Holocopiadora é um sistema usado para produção em massa de hologramas [5]. É composta por uma unidade de exposição, unidade de processamento e unidade de laminação—arte final. Todas as unidades são automatizadas: o filme é adaptado a uma bobina acoplada a um mecanismo de transporte, responsável pelo encaminhamento e retirada do material numa área de exposição luminosa. A imagem latente é em seguida processada quimicamente, e os vários banhos a que o material é submetido garantem um resultado de boa qualidade. Por último, o holograma é laminado para proteger a emulsão e aprimorar a qualidade final do holograma.

A fonte de luz usada na Holocopiadora é um laser de rubi-pulsado. O material fotográfico adotado foi desenvolvido pela Ilford: é apropriado para o registro holográfico em massa; possui baixa dispersão e alta eficiência de difração e é composto por grãos pequenos e capazes de armazenar uma quantidade razoável de detalhes.

Existem várias técnicas para obtenção do CGH:

- Holograma binário com desvio de fase
- Holograma binário com desvio de fase usando o método de Lee
- Holograma com aleatoriedade de fase
- Kinoform
- ROACH
- Holograma por interferometria
- Holograma de objetos 3D usando *cross-sections*
- Holograma de objetos 3D usando análise de Wigner

Holograma binário com desvio de fase Um holograma binário é aquele cuja transmitância pode assumir apenas dois níveis: transparente ou opaco. Ele constitui um bom elo de ligação entre técnicas digitais e ópticas: conecta computação numérica com as vantagens de sistemas ópticos coerentes para processamento paralelo e exibição gráfica.

Os hologramas binários possuem várias vantagens sobre os hologramas em níveis de cinza. Uma delas consiste numa quantidade inferior de ruído acoplado à onda luminosa

dispersada na fase de reconstrução: existem poucos grãos dispersores de luz quando a transmitância está próxima ao valor unitário, enquanto que existem várias camadas de prata para transmitância zero, o que torna a emulsão confiavelmente opaca. Por outro lado, a transmitância de um holograma em tons de cinza assume valores próximos a 0,5, sendo mais afetada pela presença de ruído. Enfim, hologramas binários produzem menos ruído que os hologramas em tons de cinza; por consequência, direcionam uma maior quantidade de energia luminosa para a imagem reconstruída.

O holograma binário *detour-phase* é feito sem uso explícito de uma onda referência. Para produzir tal holograma, a saída é considerada como $N \times N$ células, cada qual correspondendo a um dos $N \times N$ coeficientes da transformada de Fourier discreta da amplitude complexa, no plano do objeto. Cada coeficiente de Fourier complexo é então representado por uma única área transparente dentro da célula correspondente. Seu tamanho é determinado através do módulo do coeficiente de Fourier, enquanto sua posição dentro da célula representa a fase do coeficiente de Fourier. Esse método tem seu nome vindo do fato de que um deslocamento da região transparente, dentro de cada célula, afeta o caminho da luz que por ela passa (maior ou menor), até atingir a imagem reconstruída. Na Figura 2.46-A está um holograma binário *detour-phase* das letras ICO e na Figura 2.46-B está a imagem por ele produzida. As imagens de primeira ordem são aquelas acima e abaixo do feixe de luz central; em adição, as imagens de alta ordem são vistas devido a efeitos não lineares.

Holograma binário com desvio de fase por Lee É um método alternativo de registrar um CGH. Nessa técnica cada célula do holograma é dividida em quatro sub-células de igual tamanho arranjadas lado a lado, conforme a Figura 2.47. As quatro sub-células então contribuem para os componentes do fasor com fases relativas de 0, 90, 180 e 270 graus, devido às suas posições dentro da célula, a amplitude de cada contribuição sendo determinada pela transmitância de cada sub-célula. No uso real, duas das quatro sub-células em qualquer célula são totalmente opacas, enquanto que as outras duas são parcialmente transmissíveis. Isso dá controle completo sobre a amplitude e a fase da amplitude complexa resultante.

Uma simplificação dessa técnica decorre do fato de que o mesmo resultado pode ser adquirido com somente três sub-células para cada coeficiente de Fourier. Hologramas binários baseados nessa técnica também podem ser produzidos.

Holograma com aleatoriedade de fase As TFs das frentes de onda correspondendo à maioria dos objetos simples têm intervalos dinâmicos muito grandes, uma vez que os coeficientes dos termos de baixa frequência têm módulo muito maior que os termos de alta frequência. Isso resulta em uma não-linearidade devido ao intervalo dinâmico limitado do

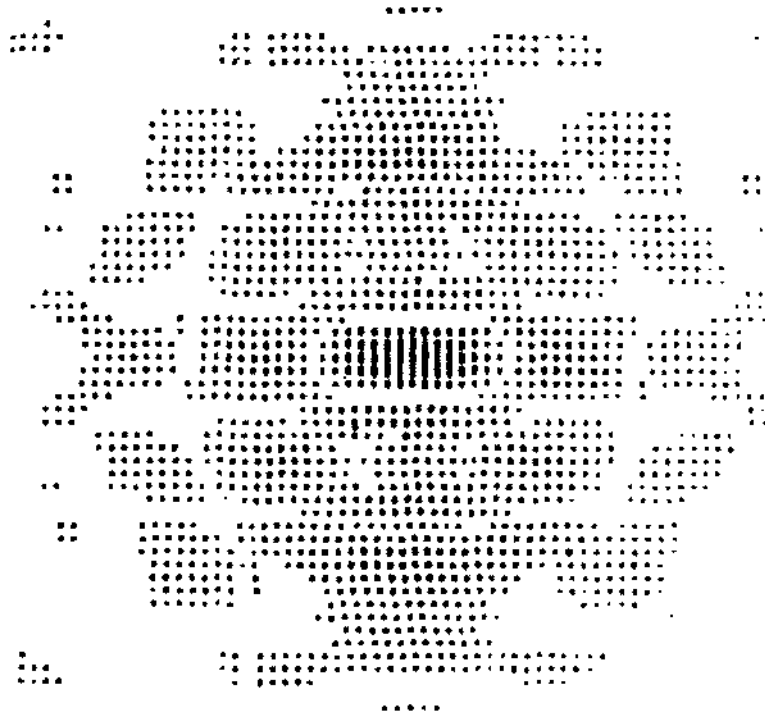


Figura 2.46: Holograma binário detour-phase (a) o holograma (b) a imagem reconstruída.

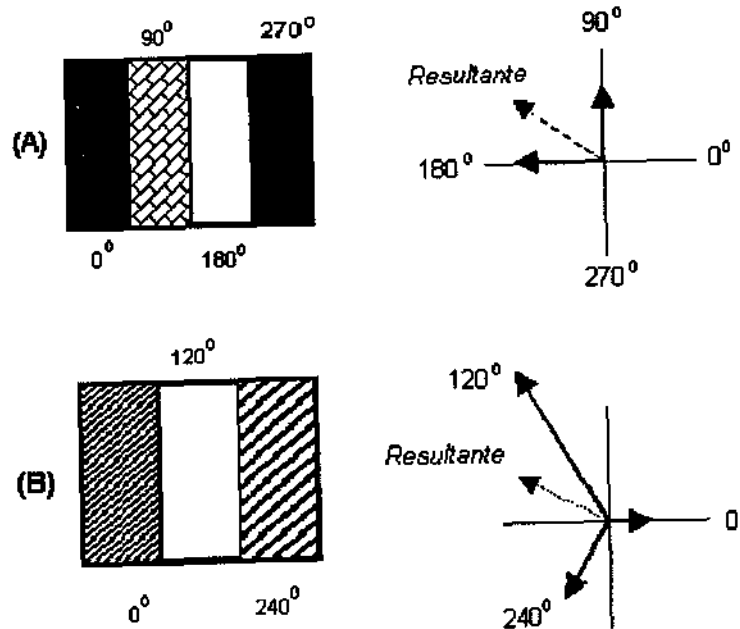


Figura 2.47: Configuração de células e diagrama de fasor para hologramas detour-phase.

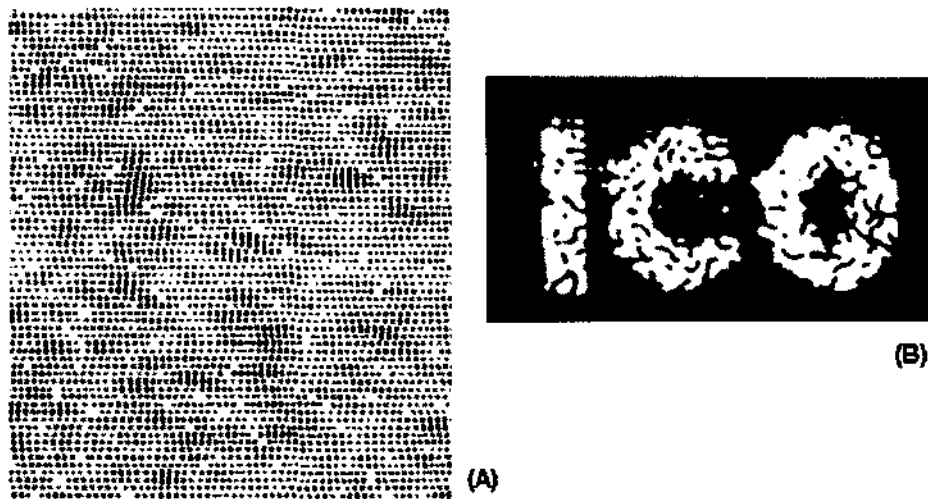


Figura 2.48: Simulação de iluminação por um objeto com aleatoriedade de fase (a) o holograma (b) a imagem.

meio de registro. Para minimizar esse problema é conveniente (onde a fase da imagem reconstruída final não é importante) multiplicar as amplitudes complexas, nos pontos objeto originalmente amostrados, por um fator de fase randômico, antes de calcular a TF. Isso é opticamente análogo a colocar um difusor em frente à transparência do objeto, e tem o efeito de tornar as magnitudes dos coeficientes de Fourier muito mais uniformes, conforme a Figura 2.48. Entretanto, a imagem reconstruída é então modulada por um padrão granular.

Kinoform É um holograma gerado por computador (capaz de difratar toda a luz incidente para a imagem final) no qual todas as células são completamente transparentes. Isto faz com que o módulo de todos coeficientes de Fourier assumam valor unitário, e somente a fase da luz transmitida seja controlada conforme a fase dos coeficientes de Fourier computados; o objeto pode ser reconstruído usando apenas a informação sobre o desvio de fase.

Para registrar o kinoform, os valores de fase calculados são codificados numa escala de tons de cinza e usados para controlar a atuação de um plotter fotográfico sobre um pedaço de filme. O holograma master resultante é novamente fotografado para reduzir o tamanho final, e submetido a branqueamento para converter os níveis de cinza às variações correspondentes de espessura óptica.

ROACH - referenceless on-axis complex hologram Esse tipo de holograma utiliza como meio de registro um filme colorido de múltiplas camadas, as quais são seletivamente

expostas à luz de diferentes cores. Quando iluminada com luz de uma certa cor, uma camada do filme a absorve; as outras camadas, as quais são efetivamente transparentes, podem causar desvio de fase devido a variações na espessura ou índice de refração do filme. Assim, tanto a amplitude como a fase do raio transmitido podem ser controladas através de um único elemento.

Ao registrar um ROACH (o qual será finalmente iluminado com luz vermelha) são usados os valores dos coeficientes de Fourier obtidos para, primeiramente, controlar o brilho de um CRT preto-e-branco. O resultado é fotografado num filme colorido reverso, tal como o Kodachrome II, usando um filtro vermelho. Em seguida, os valores de fase dos coeficientes de Fourier complexos calculados são exibidos da mesma forma, e fotografados no mesmo quadro de filme colorido anteriormente usado empregando um filtro azul e verde. Após o processamento, a camada do filme que absorveu vermelho controla a amplitude da luz vermelha transmitida, de modo proporcional aos coeficientes de Fourier. As emulsões que absorvem verde e azul são transparentes à luz vermelha mas introduzem deslocamentos de fase devido à variação de espessura introduzida pela exposição verde-azul.

O ROACH possui elevada eficiência de difração, uma vez que toda a luz é difratada na imagem. Além disso a qualidade da imagem produzida é muito boa, superior aos kinoforms, pois tanto a amplitude como a fase da onda objeto são codificadas. O ROACH também é de melhor qualidade que os hologramas binários *detour-phase*, pois somente um feixe de luz é requerido para cada coeficiente de Fourier, além da quantização de ruído ser irrelevante.

Holograma por interferometria Quando as frentes de onda registradas contém apenas informação de fase, tais hologramas gerados por computador assemelham-se a interferogramas (registro de um padrão de ondas secundárias, útil na medição de pequenas deformações ou perturbações). A não linearidade da resposta da emulsão pode ser explorada para um holograma que seja aproximadamente binário; esse tipo de holograma pode registrar tanto a amplitude como a fase, sem as aproximações do holograma *detour-phase*. Existem inúmeros métodos de registro de amplitude e fase de maneira separada.

Holograma de objetos 3D usando *cross-sections* Um objeto tridimensional pode ser considerado como uma soma de planos inclinados e deslocados. O cálculo da luz difratada pelo holograma pode ser feito pela análise da distribuição de amplitude complexa para cada plano do objeto 3D. A teoria da difração escalar para a luz monocromática pode ser formulada tanto no domínio espacial quanto no domínio das frequências. No segundo caso, se a distribuição de amplitude complexa de qualquer plano é analisada por Fourier, as componentes de Fourier podem ser vistas como ondas planas com diferentes direções

de propagação, e a transformada de Fourier da amplitude é especificada como espectro angular.

Qualquer superfície tridimensional pode ser gerada e sua amplitude complexa avaliada, bastando modelar a superfície como uma série de planos rotacionados e transladados. Um modelo simples de objetos em três dimensões pode assumir que não ocorre interação entre os planos, o que significa que a luz vinda de um plano não é difratada por outros objetos; conseqüentemente o problema das superfícies ocultas é desconsiderado. A onda propagada a partir de cada plano é avaliada no domínio de frequências aplicando as transformações—rotações e translações—para o espectro angular de dois planos; por simplicidade não são feitas restrições quanto às posições dos planos. A transformada de Fourier inversa do espectro angular, calculada no plano do holograma, fornece a amplitude complexa gerada pelo plano em questão. A superposição das amplitudes produzidas por todos os planos que constituem o objeto 3D forma a distribuição de amplitude complexa total. Um holograma pode então ser gerado acrescentando-se uma onda referência.

O esquema da Figura 2.49 constitui a geometria para um caso geral de um CGH de um plano rotacionado e transladado em relação a um certo plano inicial. O objetivo consiste em determinar a luz difratada por um plano I no plano H do holograma, o que exige seis etapas principais. Assume-se que é sabido calcular as frequências e a direção de propagação de uma onda plana e também a equação que relaciona o espectro angular de dois planos paralelos.

O primeiro passo é calcular a amplitude imediatamente anterior ao plano I ; em seguida, o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) é executado para calcular a transformada de Fourier da amplitude resultante da etapa anterior, obtendo o espectro angular do plano I . Considera-se, na terceira fase, um plano A perpendicular ao eixo óptico auxiliar Z , o qual une os baricentros O e O' dos planos I e H , respectivamente; uma rotação do espectro entre os planos I e A é calculada, produzindo o espectro do plano A . No quarto passo é realizada uma translação ao longo do eixo Z , determinando o espectro do plano B ; uma rotação entre o espectro do plano B e H é calculada, fornecendo, nessa quinta etapa, o espectro do plano H . Como resultado final é aplicada a transformada de Fourier inversa, produzindo a distribuição de amplitude da luz difratada produzida pelo plano I sobre o plano H . Todos esses passos são executados para os vários planos que formam o objeto tridimensional. As amplitudes complexas resultantes são superpostas para determinar a distribuição de amplitude total no plano do holograma. Uma onda referência plana w é acrescentada e a soma dos resultados é elevada à segunda potência, gerando um padrão de interferência, ou seja, um holograma.

Holograma de objetos 3D usando análise de Wigner A análise de Wigner pode ser usada para inspecionar com maior precisão os hologramas *in-line*. Estes são muito

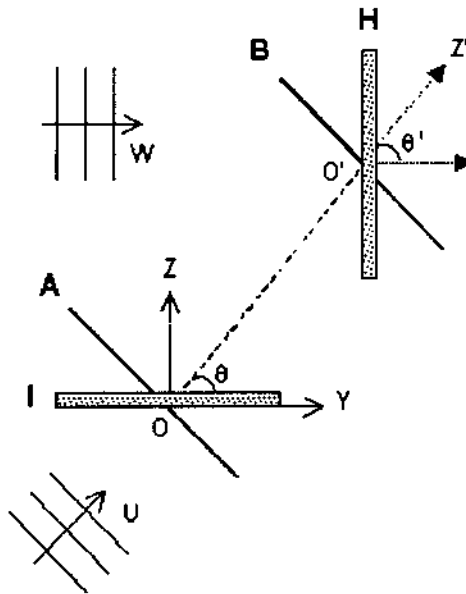


Figura 2.49: Geometria para a determinação da luz difratada pelo plano I no plano do holograma H . O espectro angular dos planos virtuais A e B são considerados no cálculo.

usados em análise do movimento de partículas que envolvem detecção e medida de neblina, fumaça e outros tipos de partículas transportadas pelo ar. Tipicamente é feito um holograma do volume contendo as partículas de interesse, e então uma imagem estacionária daquele volume é reconstruída, possibilitando a investigação. A holografia *in-line*—um tipo de holografia que emprega um único raio para a iluminação do objeto—é indispensável nesses tipos de aplicação, pois elimina o problema do ajuste de foco durante o registro. Permite ainda exames prolongados de uma imagem tridimensional “congelada” que está em constante movimentação na vida real. Entretanto a imagem reconstruída pode ser extremamente tediosa de se averiguar, simplesmente devido ao grande número de partículas envolvidas.

A reconstrução computacional—ao invés de óptica—desses hologramas, os quais são digitalizados e submetidos ao computador, pode resolver o problema da análise de partículas. O resultado pode até mesmo ser exibido como cortes bidimensionais do volume analisado. Assim o CGH pode ser uma simples simulação da fase de reconstrução óptica. Entretanto, a investigação dos cortes do objeto continua sendo tediosa e a conclusão do processo pode dispendar tempo demais.

Uma sugestão ao problema da análise de partículas é, ao invés de examinar o resultado da reconstrução computacional, tentar conseguir tal resultado sem efetuar a reconstrução do holograma. A análise de Wigner, uma técnica de processamento de sinal, é usada

diretamente no holograma digitalizado. A distribuição de Wigner, ferramenta de análise no domínio de frequência, é usada na verificação de sinais não estacionários e produz a variação no tempo das componentes de frequência do sinal.

2.3.11 Aplicações

2.3.11.1 Interferometria holográfica

A interferometria consiste na obtenção de medidas precisas de comprimentos ou variações destes através do auxílio de franjas de interferência. A interferometria holográfica é uma extensão das técnicas interferométricas usadas na obtenção de medidas cuja única vantagem está no fato do holografia permitir o armazenamento de uma frente de onda, “congelando” a imagem, para reconstrução posterior. Frentes de onda que originalmente estavam separadas no tempo ou espaço, ou até mesmo aquelas de diferentes comprimentos de onda, podem ser comparadas por esse método holográfico.

Uma das aplicações mais importantes da interferometria holográfica é a avaliação não destrutiva de materiais; ela pode ser usada sempre que a presença de uma fragilidade estrutural resulta em deformação da superfície quando esta é colocada em situação de stress, seja pela aplicação de uma carga, alteração de pressão ou temperatura tal como peças de um reator nuclear, análise de componentes situados em ambiente desfavorável como por exemplo, para verificar a existência de corrosão em estruturas submersas de plataformas petrolíferas ou controle minucioso de qualidade em tempo real. Outra área de interesse é na pesquisa médica e dentária para encontrar deformações de estruturas anatômicas submetidas ao desgaste bem como a avaliação de próteses. Detecção de saliências ou conexões debilitadas de estruturas compostas, análise de superfícies vibrantes—como alto-falantes, turbinas, silenciadores de carros ou instrumentos musicais—investigação na preservação e recuperação de trabalhos artísticos, obtenção de mapas de contorno são áreas onde a interferometria holográfica tem demonstrado aplicabilidade.

Conforme anteriormente definido, um holograma é o registro da interação de dois raios de luz coerentes os quais são mutuamente correlatos na forma de um padrão microscópico de franjas de interferência. Essas franjas são ditas primárias. Existem, entretanto, franjas muito maiores que aparecem no holograma sempre que o objeto ou a chapa fotográfica tenha sido deslocada por uma pequena distância durante a exposição. Elas constituem um padrão ondulado gerado pelos dois conjuntos de franjas primárias deslocados um em relação ao outro. Foi provado que essas franjas secundárias são extremamente úteis na análise de vibrações. Desde então, a interferometria holográfica ou holometria tornou-se a aplicação mais importante da holografia, englobando algumas técnicas que serão tratadas a seguir.

Interferometria holográfica em tempo real Quando a interferência entre raio objeto (RO) e raio referência (RR) é apropriadamente registrada num holograma torna-se possível reconstruir, a partir desse registro, uma onda cuja amplitude complexa é linearmente proporcional a amplitude do RO original. Em outras palavras, recolocando-se a chapa holográfica na posição assumida durante a exposição e iluminando com o mesmo RR inicial, então, exceto por uma diferença de um fator constante de amplitude e fase, a onda resultante corresponderá a uma réplica exata do RO original. É possível também tornar a razão entre as amplitudes da onda original e onda reconstruída do objeto igual a unidade alterando a intensidade de iluminação.

Considere que o processamento do holograma não distorce a emulsão, o reposicionamento é exato e a iluminação ajustada para que a razão acima mencionada seja um. Se o objeto for observado através do holograma, a frente de onda reconstruída irá cancelar a frente de onda do objeto original em todo o ponto. Assim, para a pessoa que está observando através do holograma, o objeto não será visível. O que é visto na prática é uma ampla franja de brilho pois a fase de processamento inevitavelmente distorce a emulsão.

Na interferometria holográfica em tempo real, o holograma após processado é reconstruído na mesma posição em que foi registrado. Assim, quando o raio referência é acionado, a imagem virtual coincide com o objeto. Se esse objeto sofre qualquer alteração de formato, dois conjuntos de ondas de luz atingirão o observador: a onda reconstruída e a onda diretamente transmitida do objeto em seu novo estado. As amplitudes dessas duas ondas irão somar-se nos pontos onde a diferença de caminho óptico é zero ou um número inteiro de comprimentos de onda e irão cancelar-se em outros pontos intermediários. Como resultado, a imagem reconstruída fica coberta por um padrão de franjas de interferência que se aproximam em tempo real conforme aumenta o grau de distorção.

Usualmente, algumas franjas serão vistas até mesmo quando o objeto não foi perturbado e pode se tornar uma franja única através de um simples e sutil reposicionamento da chapa. Se nenhuma franja estiver visível, é provável que o objeto ou chapa tenham um grande erro de reposicionamento. Em tais casos pode ser possível ver um contorno duplo que deve ser ajustado para que as franjas apareçam e conseqüentemente possam ser minimizadas. Franjas geradas por movimento translacional obscurecem aquelas formadas por deformação; as primeiras são paralelas e devem desaparecer para que as franjas que indicam o local de deformação apareçam.

Essas franjas ativas, como são chamadas, compõem um mapa de contorno resultante da comparação do objeto com um holograma—que pode ser o do próprio objeto antes do stress ou de um componente padrão—que permite a visualização em tempo real de deformações ou erros de fabricação. Assim, esse método se mostra consideravelmente promissor para controle de qualidade—de extrema precisão—de componentes resultantes da produção automatizada: basta fazer um holograma do padrão ideal e então introduzir

um a um os componentes confeccionados no espaço da imagem, podendo assim notar se existem diferenças entre um e outro.

Existem dois tipos de objetos a considerar: os de superfície espelhada plana e os de superfície difusora irregular. No primeiro caso, o método holográfico não apresenta vantagem pois tem a mesma função que um interferômetro de Michelson iluminado com luz coerente (aparelho que mede com grande precisão os comprimentos ou variações deles com o auxílio de franjas de interferência), o qual permite observar interferência construtiva ou destrutiva assim como o outro método. No segundo caso, a comparação do objeto irregular com sua imagem virtual (gerada pelo holograma)—réplica do objeto, com as mesmas propriedades difusoras de luz—é teoricamente obtida com a mesma facilidade encontrada no primeiro caso.

Tendo obtido imagem virtual pode-se submeter o objeto as condições de teste. Como resultado, a distância óptica do ponto de observação em relação a qualquer ponto da superfície deslocado será diferente se considerado qualquer ponto da superfície original. As distâncias de pontos da superfície com relação a fonte de luz também mudam. Em consequência ocorrerá um deslocamento de fase que transita do plano da fonte até o plano de observação. O deslocamento de fase e consequente soma e subtração de amplitudes geram um padrão de franjas característico da deformação da superfície. Pode-se observar—em tempo real—que uma alteração na superfície do objeto é acompanhada por uma variação no padrão de franjas. Existem várias dificuldades associadas a interferometria holográfica:

- A posição do objeto e a iluminação utilizada na fase de reconstrução holográfica devem ser idênticos a fase de formação. Isso implica que o objeto e o aparato óptico requerido para formar o holograma devem permanecer fixos durante o período entre a exposição e a observação ou então deve ser possível recolocá-los, precisamente, na posição original.
- A contração da emulsão ocorrida durante o processamento fotográfico ocasiona distorção nas franjas de interferência e, conseqüentemente afeta a frente de onda reconstruída.
- Enquanto a luz difratada pelo holograma permanece linearmente polarizada, a luz difratada pelo objeto refletor difuso é amplamente despolarizada o que afeta a visibilidade das franjas. É preciso usar um polarizador para observar ou fotografar as franjas.

Apesar das dificuldades existentes é possível obter franjas de bom contraste: as franjas da figura caracterizam uma deformação aplicada a um garfo de metal. Além disso, a interferometria em tempo real permite o monitoramento contínuo de deslocamentos ocorridos em superfícies irregulares sem tocar ou marcar a superfície. Outra vantagem é a

possibilidade de efetuar pequenos ajustes na chapa holográfica em tempo real o que pode otimizar a exibição das franjas para interpretação qualitativa.

Interferometria holográfica com dupla exposição Esse tipo de interferometria é utilizado quando se deseja obter um registro permanente dos padrões de interferência produzidos. Nessa técnica, são registrados dois conjuntos de franjas de interferência: o primeiro corresponde a frente de onda inicial do objeto, o segundo indica a frente de onda após o objeto ter sido submetido a situação de stress, tal como uma variação de temperatura. Após o duplo registro das franjas, o material é fotograficamente processado, e as imagens correspondentes são reconstruídas iluminando-as com o raio referência inicial; o padrão de interferência resultante revela as alterações ocorridas no formato do objeto.

A interferometria holográfica com dupla exposição apresenta algumas vantagens em relação àquela de tempo real: o resultado não é afetado pela contração do material durante o processamento uma vez que ambas imagens são afetadas e a variação entre elas permanece constante; não exige cuidado especial para o posicionamento do raio referência usado na reconstrução além da visibilidade das franjas não ser afetada uma vez que as duas frentes de onda difratadas são similarmente polarizadas.

2.3.11.2 Holografia “sandwich”

Técnica interferométrica envolvendo a formação de dois hologramas separados os quais criam franjas secundárias quando registrados no material. As franjas secundárias são aquelas formadas, tanto no holograma com dupla exposição como no holograma sandwich, a partir de um objeto que tenha sido movimentado ou deformado entre as exposições; tais franjas são muito maiores que as franjas primárias que constituem o próprio holograma. Em interferogramas de dupla exposição não há como informar se o movimento normal ao plano de registro é de aproximação ou afastamento do observador pois não há registro de qual das frentes de onda se refere ao objeto original.

A técnica conhecida como holografia sandwich oferece uma solução e acrescenta versatilidade a configuração com exposição dupla. O princípio básico consiste em registrar as frentes de onda—do objeto original e do objeto deformado—em duas chapas separadas as quais são processadas e, em seguida, reconstruídas de forma que a primeira chapa utilize o raio referência usado para formar a segunda chapa e vice-versa (o número de pares pode ser superior a dois). A imagem obtida é um padrão de interferência correspondente as deformações da superfície.

2.3.11.3 Holografia e medicina

Na medicina, a holografia tem se destacado em três áreas principais. A primeira delas é o registro tridimensional sendo principalmente utilizado em registros dentários. Por propósitos médicos e legais é necessário armazenar arranjos dentários por até 12 anos o que gera inconvenientes de armazenamento. Simples hologramas de Denisyuk para cada arranjo dentário podem melhorar tal situação. Ao mesmo tempo, torna-se comparativamente fácil realizar medições na imagem reconstruída usando apenas um compasso comum.

O segundo campo relevante para a holografia é a tomografia axial computadorizada (CAT), uma técnica para exibir seções transversais do corpo humano tal como a área pélvica, torácica, craniana, através do uso de raio-X. O resultado auxilia no diagnóstico de tumores e outras lesões. O paciente é movimentado dentro de um scanner poucos milímetros por vez e cortes sucessivos da cabeça ou corpo são mostrados numa tela VDU. As imagens são inicialmente armazenadas na memória do computador e podem ser processadas para eliminar ou enfatizar detalhes. A dificuldade nessa prática é que somente uma fatia é exibida por vez na tela e o diagnóstico tem que ser mentalmente montado com todas as informações visuais sucessivas num quadro tridimensional. Numa construção holográfica da imagem, cerca de 20 cortes são necessários os quais são registrados num filme de 35 mm e as transparências resultantes são consecutivamente dispostas num projetor para produzir imagens numa tela de vidro fosco. Estes são usados para fazer hologramas de transmissão ou reflexão numa só chapa, movendo a tela entre as exposições por uma distância correspondente a dois cortes sucessivos. O holograma final contém imagens de todas as cortes em sua posição correta no espaço e quando observados aparecem com paralaxe completa.

A terceira área está relacionada a construção de próteses de alta qualidade para, por exemplo, substituir uma articulação ilíaca. Esse é um uso direto da interferometria de exposição dupla. Interferogramas são feitos mostrando os padrões de stress em um osso ilíaco normal e a estrutura artificialmente reconstruída, esta pode ser alterada a fim de imitar ao máximo o comportamento da articulação natural.

2.3.11.4 Scanners holográficos

O scanner holográfico é um desenvolvimento relativamente recente que pode solucionar muitos dos problemas associados aos scanners de espelho. Suas maiores aplicações são como terminais em pontos de venda e, associado ao raio laser modulado, para impressão sem impacto e de alta velocidade.

Um scanner holográfico em disco simples possui um certo número de hologramas registrados no disco, cada qual tendo uma fonte puntual como objeto e usando um raio

referência colimado. Cada um desses hologramas, quando iluminado com o conjugado do raio referência, reconstrói o objeto, ou seja, a fonte puntual. Rotacionando o defletor ao longo de um eixo perpendicular a sua superfície faz com que a luz da fonte puntual—o objeto reconstruído—constitua um arco de varredura—e não uma reta—no plano da imagem.

O maior problema desse sistema é justamente o formato não retilíneo da linha de varredura.

Entretanto, tais scanners são mais difíceis de fabricar que aqueles em disco, os quais podem ser replicados de modo relativamente mais fácil.

2.3.11.5 Elementos ópticos holográficos

Um holograma pode ser criado de modo a funcionar como um elemento óptico: um elemento óptico holográfico (Holographic Optical Element - HOE). O HOE apresenta algumas vantagens em relação aos elementos ópticos convencionais:

- como vários hologramas podem ser registrados numa mesma camada existe a possibilidade de superposição espacial dos elementos, o que não ocorre na óptica comum
- um elemento óptico é dependente do substrato que o contém, diferentemente, não existe vínculo entre a geometria de suporte e o HOE
- o HOE é tão espesso quanto uma emulsão fotográfica. Isso significa que o HOE pode ser colocado em lugares cujo espaço seria insuficiente para sistema de lentes ou espelhos
- a superfície óptica do HOE não precisa estar orientada a um ângulo que obedeça as leis das lentes convencionais; é a direção dos planos de interferência e o espaçamento entre eles que determinam a direção do raio emergente
- o HOE não necessita de raios laser para sua manufatura: ele pode ser desenhado por um computador e fotografado no tamanho apropriado
- o HOE é comparativamente mais barato de ser produzido
- o HOE seleciona comprimentos de onda

O material de registro usado num HOE deve ter alta resolução, boa estabilidade, alta eficiência de difração e baixa dispersão de luz. Embora fotoreinas, fotopolímeros e emulsões fotográficas possam ser usadas, o material mais amplamente empregado é a gelatina dicromada. A estabilização eletrônica de franjas é comumente realizada para permitir que o tempo de exposição seja relativamente longo, conforme a necessidade.

Os HOEs podem agir como colimadores, divisores de raio, lentes, espelhos, entre outros. Por exemplo, seja um holograma de um ponto de luz, feito com raio referência colimado; a imagem reconstruída aparecerá no mesmo local que o objeto estava, produto da convergência dos raios transmitidos. Na verdade, o holograma agiu como uma lente côncava. Para o caso da reflexão dos raios que convergem na imagem, o holograma—de reflexão—atuou como um espelho convexo. Existem duas importantes diferenças. A primeira delas é que o holograma da imagem não está alinhado com o raio referência, e a outra é que, diferentemente de lentes ou espelhos, o holograma pode ser invertido o que formará uma imagem real da fonte puntual.

Uma rede de difração holográfica, por exemplo, tem comportamento óptico equivalente a um prisma, o qual funciona, entre outras coisas, como elemento dispersivo, separando as frequências que constituem um feixe de luz policromática ou então como controlador da direção de propagação de um feixe luminoso.

2.3.11.6 Imagens múltiplas

Existem muitas aplicações tal como a produção de circuitos integrados ou projeção de imagem de alta resolução onde é preciso produzir um conjunto (array) de imagens idênticas. Isso pode ser obtido holograficamente, embora esse array normalmente seja gerado através de repetidas exposições. Para formar tal holograma, a interferência resultante da interação de um conjunto de fontes puntuais com uma fonte referência também puntual é registrada no material.

Para que o conjunto de imagens possa ser reconstruído é preciso adaptar uma lente e um objeto iluminado por laser na região anterior ao holograma. Tanto as lentes como o laser são posicionados de forma que a luz que atravessa as lentes, e não é difratada pelo holograma, forme uma imagem real invertida do objeto, chamada de imagem de ordem zero (região onde ocorre a difração de ordem zero). Na região de difração de primeira ordem (posições originais das fontes puntuais) surgem múltiplas imagens reais e invertidas do objeto considerado.

2.3.11.7 Imagens de alta resolução

Obter imagens de alta resolução a partir de máscaras fotolitográficas é um passo importante na produção de dispositivos semicondutores, sendo uma tarefa difícil mesmo que sejam usadas lentes fotográficas de excelente qualidade, uma vez que, em geral, existem limitações de resolução e campo de abrangência. Nesse sentido, as imagens holográficas possuem grande potencial: o holograma é uma alternativa às imagens de alta precisão. Teoricamente, ao ser iluminado pelo conjugado do raio referência usado em sua formação, apareceria a imagem do objeto livre de aberração ou distorção. A resolução dessa imagem

deveria ser limitada somente pela difração ocorrida nas bordas do holograma o que seria resolvido com aumento de tamanho. Na prática, entretanto, a qualidade desta imagem é afetada por problemas de ruído introduzido através do material de registro, dificuldade de alinhamento exato do holograma com o raio que o ilumina e o surgimento de granulações, grau de cromaticidade e tamanho finito da fonte de luz.

Todos esses efeitos tem papel fundamental na determinação da resolução da imagem e podem ser minimizados colocando o objeto bem próximo ao material de registro na fase de formação holográfica. Eis um arranjo para essa proposta: usa-se um prisma na parte anterior da chapa o qual é atingido pelo raio referência num ângulo suficientemente grande para que ocorra reflexão total. Com esse arranjo são registrados dois hologramas na mesma emulsão: um deles, de reflexão, é o resultado da interferência do raio objeto (RO) com o raio referência (RR) que atinge a emulsão; o outro, de transmissão, é obtido pela interferência do RO com o raio totalmente refletido pela emulsão e novamente refletido pelas paredes do prisma.

Quando o holograma é iluminado com o conjugado do RR original, ocorre difração pelo holograma de transmissão. A luz que não foi difratada por esse holograma é totalmente refletida na superfície da emulsão e então difratada pelo holograma de reflexão. O conjunto dessas duas ondas constitui um padrão reconstruído que compõem a imagem real formada no plano do objeto original. A luz que não sofre difração chega a outra face do prisma e é totalmente refletida, não afetando a imagem real. Uma boa escolha dos parâmetros de registro pode gerar uma resolução de aproximadamente 600 ciclos/mm.

2.4 Holografia Virtual ou Dinâmica

2.4.1 Holografia eletrônica

A Holografia Eletrônica teve como motivação a holografia convencional, baseada no registro do padrão de interferência entre dois feixes de laser, um proveniente do objeto e o outro servindo como referência. Esse registro é feito, por exemplo, na superfície de um detector, tal como uma câmera CCD (Charge Coupled Detector)—que em sua forma mais simples consiste de uma câmera de TV comum—o qual é introduzido tipicamente em um computador, que faz os cálculos necessários para que o passo da reconstrução seja simulado, e finalmente exibindo o resultado num monitor. Dessa forma torna-se possível registrar e reconstruir hologramas sequencialmente, combinando imagens consecutivas de modo a fornecer dinamismo à exposição.

A Holografia Eletrônica foi a princípio considerada impraticável devido à enorme exigência computacional. Para viabilizá-la tornou-se necessário o uso de estratégias para redução da informação envolvida, uma vez que os hologramas apresentados possuíam mais

informação que o olho humano normal poderia apreciar: redução da resolução vertical, redução do campo horizontal de visão, eliminação da paralaxe vertical ou diminuição do tamanho do holograma. Para um sistema específico, essas restrições de informação traduzem-se em características da engenharia de displays e computação que permitem que uma imagem protótipo seja gerada e exibida. A eliminação da paralaxe vertical, por exemplo, significa que o holograma de um ponto imagem irá se estender somente sobre uma linha horizontal (ou, em outras palavras, o padrão de interferência para um único ponto do objeto aparecerá apenas em uma única linha do holograma—ao invés de cobrir todos os pontos do holograma, na forma tradicional) a uma altura correspondente àquele ponto na cena original. Isso significa que a computação do padrão de interferência poderá ser completada mais rapidamente, necessitará de um espaço menor de armazenamento e o meio de exibição precisa ser coerente apenas horizontalmente, ao longo de uma só linha por vez. A resolução limitada implica que apenas um número relativamente pequeno de pixels devem ser exibidos em certo instante, simplificando enormemente o sistema de exibição.

2.4.1.1 Sistema do MIT

Um sistema de exibição de imagens baseado em Holografia Eletrônica foi desenvolvido pelo MIT e é, de fato, uma forma de apresentar imagens tridimensionais em tempo real. Imagens sintéticas e aquelas derivadas de cenas naturais são convertidas em franjas de interferência através de algoritmos computacionais que simulam o fenômeno físico da difração usando um sistema de processamento de sinal de arquitetura paralela. A preocupação inicial consistiu na eliminação da paralaxe vertical e então redução da resolução vertical a limites próximos aos de vídeo; manteve-se a alta resolução horizontal para adquirir bons resultados em termos de paralaxe de movimento e disparidade binocular. Baseado nessas idéias surgiu o primeiro sistema de vídeo gerando imagens holográficas eletronicamente (1989), simulando linha a linha, onde cada porção elementar é calculada considerando todos os efeitos existentes naquele plano horizontal. Esse sistema possui um volume máximo de imagem de 40mm de largura por 35mm de altura por 50mm de profundidade além do observador poder se movimentar numa área correspondente a um ângulo de 15 graus—um sistema relativamente pequeno se comparado aos meios de exibição convencionais e portanto insuficientes para testes de interesse realmente prático; exige 6 megabytes de memória de vídeo para armazenar cada quadro holográfico, permitindo gerar duas atualizações a cada segundo e uma taxa de refresh de 37 Hz.

Na segunda versão do sistema de vídeo do MIT, a memória de vídeo necessária ao armazenamento do holograma foi aumentada para 36 megabytes a fim de permitir a triplicação aproximada do tamanho da imagem e a duplicação do ângulo de visão: 135mm de largura por 90mm de altura por 150mm de profundidade e zona de visão de 36 graus.

Para comportar essa imagem foi escolhido um vídeo de resolução horizontal de 256 Kpixels (262.144 pixels); a computação realizada por uma Connection Machine - 2 interligada com o framebuffer (memória de quadros) pela tecnologia VME. Convém esclarecer que o framebuffer armazena a imagem apresentada na tela em forma digital; este conteúdo é lido várias vezes durante um segundo—taxa de refresh—enquanto a imagem é apresentada na tela do monitor. Como não é provável que exista um framebuffer digital capaz de emitir ininterruptamente sinais de vídeo abrangendo aproximadamente 256 mil pixels, o MIT adaptou ao projeto seu sistema processador de vídeo - Cheops, desenvolvido no Media Lab em pesquisa de TV digital avançada, que possui 3 memórias de vídeo independentes com 6 megabytes cada. Mesmo assim cada atualização demanda ao menos 10 segundos e a taxa de refresh é de 30Hz. Embora se obtenha bons resultados, o aparato computacional envolvido é enorme e dependente da evolução da tecnologia de telecomunicações de imagem.

O MIT (Massachusetts Institute of Technology) tem desenvolvido sistemas de vídeo holográfico, primeiro lugar, como periféricos para workstations de última geração, com aplicação em CAD (computer aided design), imagens médicas ou visualização de resultados de computação técnica e científica avançada [40]. O esquema de display do sistema do MIT, conforme [26], consiste na geração e armazenamento de hologramas gerados por computador (CGH), transmissão de dados e subsistemas de exibição eletro-ópticos. Um objeto 3D é sintetizado usando métodos de desenho e animação convencionais. Os dados que descrevem o objeto são transferidos a um minisupercomputador que contém 16384 microprocessadores numa arquitetura paralela hipercúbica de processamento.

Após a computação, a informação holográfica é enviada a um frame buffer de alta resolução e convertida num sinal com a mesma largura de banda que o AOM; sinal é então convertido num valor dentro do intervalo de frequências do AOM. Um frame consiste de uma série complexa de variações sinusoidais, carregando esse padrão de franjas no frame buffer (o frame buffer está configurado para armazenar e ler o CGH com 64 linhas horizontais, cada uma contendo 32768 pixels). Todo frame buffer comercialmente disponível inclui um intervalo de retraço, entre as linhas de vídeo, durante o qual o sinal é interrompido (blanked). O padrão de franjas é transmitido do frame buffer ao display como um sinal de vídeo com largura de banda de 50 MHz, que se propaga em um cabo de fibra óptica. Um receptor óptico envia o sinal de vídeo ao mecanismo eletrônico de exibição e processado como sinais de controle para o esquema de varredura óptico-mecânico existente. O sinal de vídeo é mixado com uma portadora de 100 MHz e filtrado para manter somente a banda baixa. Isso é convertido a um valor operacional entre 50-100 MHz do AOM. O sinal é amplificado e usado para controlar o AOM.

A operação do display requer uma sincronização precisa entre as várias partes do sistema (polígono de espelhos, espelho galvanométrico e frame buffer). A compreensão

da varredura horizontal implica na análise de frequências espaciais baseada na óptica de Fourier. O display pode ser descrito como um sistema linear no qual a informação tem entrada como um sinal rf (radio frequência) e é convertido a um certo intervalo de frequências espaciais. Uma condição necessária para a reprodução do CGH é que a largura da banda espacial do display seja maior que a largura da banda do sinal de entrada [26].

A varredura vertical é mais simples porque o display não possui paralaxe vertical. A varredura vertical é feita por um scanner galvanométrico cíclico, tal como a varredura do feixe de elétrons realizada em displays CRT, ou seja, é feita no modo raster scan a uma taxa comercialmente disponível para o galvo-scanner (tipicamente de 30 à 60 Hz). Além do mais, a resolução vertical requerida é relativamente baixa (menor que 1000 linhas) [26].

A idéia fundamental do vídeo holográfico do MIT está na utilização de um modulador acusto-óptico (AOM) como meio no qual os hologramas são escritos. O AOM consiste de um só cristal de dióxido de telúrio (TeO_2): numa das extremidades do cristal existe um transdutor ultrasônico o qual converte o sinal elétrico, contendo informação holográfica, em uma onda acústica a qual é lançada ao interior do cristal. A propagação da onda acústica gera a modulação do índice de refração do material, afetando a fase da luz que perpendicularmente o atravessa. O raio de luz (raio óptico) emerge do cristal com um padrão de diferença de fase relativa cruzando sua largura. Esse padrão transfere os dados do holograma gerado por computador ao raio de luz. Como o ângulo total de difração varia somente de três graus, um fator de demagnificação é necessário para trazer o ângulo de visão a um valor mais aceitável (tipicamente quinze graus) [27].

O vídeo holográfico do MIT pode exibir imagens coloridas iluminando os três canais acústicos do modulador acusto-óptico (AOM) com lasers correspondentes as partes vermelho (633 nm), verde (532 nm) e azul (442 nm) do espectro visível. O AOM funciona nas condições de Bragg para difração e cada comprimento de onda é difratado a intervalos angulares distintos, resultando numa imagem final composta por três cores primárias que não se sobrepõem. Essa situação pode ser corrigida pelo deslocamento das frequências espaciais (difratadas) realizado com o auxílio de um elemento óptico holográfico (HOE). O HOE, consistindo de uma única malha (rede), é colocado logo após o AOM na configuração óptica. O cálculo da frequência espacial requerida para o HOE deve ser levada em consideração na atividade óptica do cristal usado no AOM. O HOE introduz distorções na imagem final, mas são tão insignificantes que podem ser visualmente negligenciadas. As imagens finais são de boa qualidade e exibem excelente registro de cores. O campo de visão horizontal, entretanto, tende a diminuir para comprimentos de onda menores [27].

No AOM, as franjas se propagam a uma taxa de 617 m/s que é a velocidade das ondas no cristal. Portanto, a imagem difratada Também se movimenta (da esquerda para a direita) a uma taxa relativamente rápida. Para que a imagem pareça estacionária é usado um espelho poligonal, em rotação, para varrer a imagem do cristal, criando um

cristal virtual que é exatamente tão longo quanto uma linha do CGH. Essa multiplexação é necessária devido ao fato de que o cristal só consegue manter uma pequena fração do número total de franjas por vez. A deflexão vertical é criada através de um scanner galvanométrico de loop fechado (Figura 2.38).

É possível escrever padrões de difração independentes, simultaneamente no cristal, usando um array de transdutores. Sob condições adequadas, tal técnica pode multiplicar a resolução vertical por um fator igual ao número de transdutores, sem crosstalk significativo. Tal técnica tem sido mostrada com um AOM de três canais; nesse caso, o sinal holográfico é dado pelas saídas vermelho, verde e azul (RGB) de um frame buffer com banda larga. Essa técnica permite obter imagens com o volume de uma polegada cúbica, ângulo de visão horizontal de 12 graus e resolução vertical de 192 linhas [27].

A computação do holograma é feita por um algoritmo baseado na simulação do processo físico da interferência luminosa. A tarefa de adaptar esses algoritmos a imagens multiespectrais é relativamente simples: é feita a alteração do comprimento de onda do raio referência (RR) simulado para o comprimento de onda do display desejado. O ângulo do RR é dado pela geometria de display [27].

À medida que o número de pixels do holograma cresce, o esquema computacional acompanha a evolução, tornando-se mais eficiente a fim de manter a imagem atualizada a velocidades interativas e as técnicas de codificação dos hologramas como conjuntos de dados cada vez menores a fim de transmitir os sinais holográficos sobre os canais de banda limitada a alta velocidade. Tipicamente, os métodos computacionais tem emulado os processos de interferência encontrados na natureza. No computador, variações físicas reais positivas, tal como irradiância, pode se tornar bipolar, e a computação de padrões de interferência bipolares podem ser acelerados por mais que um fator de dois. A discretização da profundidade da cena permite que o holograma seja construído a partir de um catálogo finito de padrões pré-computados, dessa forma acelerando o processo computacional [40].

Os métodos anteriores são aproximações do padrão de interferência ao invés de trabalhar a partir da especificação de o que o observador deve ver direção a uma especificação de o que o padrão de franjas difrativas do holograma pode ser. Existe um número infinito de padrões de franjas do holograma que irão produzir padrões de intensidade idênticos ao observador e algum deles são mais rápidos para computar que outros. A computação das franjas específicas de difração é feita de modo a “retroceder” a partir do resultado de difração desejado. A implementação do método é baseado na discretização do espaço e das frequências espaciais num padrão de franjas. A arquitetura da computação de difração específica é direcionado por dois objetivos: (1) produzir franjas a uma taxa elevada e (2) habilitar esquemas de codificação holográfica que irão reduzir a banda requerida a exibição de imagens holográficas [40].

Esquemas de compressão e codificação de imagem podem reduzir a quantidade de

dados necessários para a comunicação de vídeo holográfico a taxas comparáveis a transmissão de vídeo 2D sem compressão. Mas a quantia de dados necessários dentro da própria unidade de display, gerado pelo driver de display e armazenados num frame buffer, irá, inevitavelmente, crescer a medida que o display evolui. Para display que não tem memória de vídeo intrínseca ou persistência eletrônica (como displays TFT LCD), todas as dezenas de megabytes deve ter taxa de refresh de 30 Hz ou mais, o que irá requerer altíssimas *bandwidths* internas para tais sistemas.

2.4.1.2 Variação do sistema do MIT

O sistema do MIT utiliza um dispositivo acusto-óptico como modulador espacial da luz o qual influi diretamente no desempenho do sistema, tal como o tamanho da imagem, o ângulo de observação ou a taxa de refresh, pela frequency *bandwidth* do dispositivo. Para superar essa limitação, é proposto a utilização de um dispositivo acusto-óptico multicanal (18 canais), além de reduzir também o conteúdo de informação das imagens de difração intermediárias com a exploração das limitações do sistema visual humano. Como resultado obtém-se um padrão de franjas holográficas usando um acelerador de hardware ("Cheops"). O conteúdo de informação das imagens intermediárias no sistema em questão é de 1,5 MB/frame e o padrão de franjas final é composto por 36 MB/frame.

É difícil obter um display eletro-holográfico que represente imagens 3D, de grande tamanho, em tempo real, uma vez que muitos cálculos são requeridos para gerar dados holográficos, além de um frame buffer de banda larga, moduladores espaciais da luz e grandes elementos ópticos e mecânicos. Por razões óbvias, a arquitetura paralela de processamento é indicada para displays eletro-holográficos; além de ser composto por múltiplos displays pequenos [44]. Um sistema de display holográfico 3D interativo exige três processos: (1) geração dos dados do objeto 3D original (2) computação dos padrões holográficos (3) modulação de dispositivos de display eletro-ópticos [45].

Uma variação do sistema do MIT [43] é composta por uma arquitetura paralela constituída de pequenas unidades, compondo um grande display eletro-holográfico: parte de modulação espacial da luz, parte de varredura, parte da imagem, parte de processamento de sinal. Geralmente, um dispositivo acusto-óptico (AO) é usado como modulador de intensidade (AOM) ou como defletor de raio (AOD). No holograma a ser exibido, a frequência espacial das franjas corresponde a ângulos de difração e a amplitude das franjas corresponde a intensidade da imagem a um certo ângulo de difração. Portanto, pode-se dizer que a modulação holográfica de um dispositivo AO é a múltipla modulação de intensidade dos vários ângulos defletidos.

O conteúdo de informação da parte de modulação espacial da luz (Spatial Light Modulation - SLM) está limitada pela modulation frequency *bandwidth* do dispositivo AO. Esse problema é evitado pelo reposicionamento do raio multiplexado num array de raios

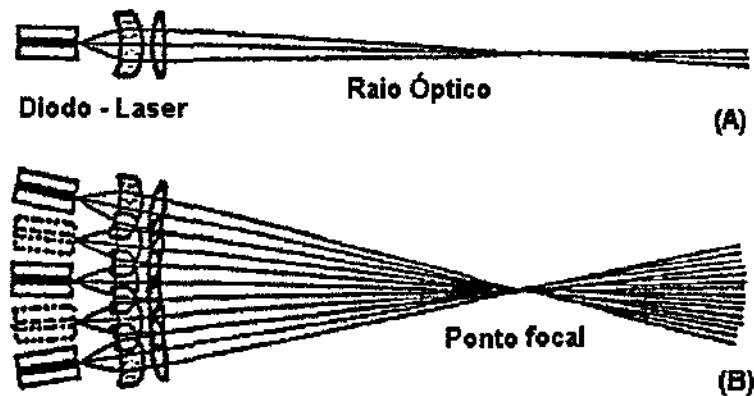


Figura 2.50: Exemplo de uma parte SLM usando diodos lasers

separados. Isso é feito por duas razões: (1) a *modulation-frequency-bandwidth* de cada raio é dividido pelo número de raios e (2) o conteúdo de informação do SLM é reduzido pois a deflexão é limitada de um número de amostras antes contínuo, agora discreto. Assim, é proposto a troca de um AO pelo array de raios separados. A Figura 2.50 mostra um exemplo de uma parte SLM usando diodos lasers (LD). O raio de saída de cada LD encontra-se no foco (parte (a)). Vários displays são dispostos ciclicamente (no plano horizontal) a intervalos pequenos e esses raios de saída possuem foco no centro do círculo, conforme a parte (b). A intensidade de cada LD é modulada através da amplitude das franjas do â ngulo correspondente. A amplitude das franjas de um ângulo de deflexão específico indica uma imagem componente da paralaxe, a um certo ângulo. O SLM é chamado de Focused Light Array (FLA). A deflexão foi limitada pela discretização das amostras, o que significa que a paralaxe horizontal é amostrada e essa amostragem significa que a profundidade da imagem reconstruída é limitada mas a paralaxe horizontal pode ser amostrada tão precisamente quanto a resolução da paralaxe característica de um observador (a resolução da paralaxe é definida pelo ângulo entre a distância de observação e o tamanho da pupila). Por exemplo, se o FLA é contruído por numerosas fontes de luz semicondutoras (LDs ou LEDs) e lentes minúsculas, então as imagens com boa paralaxe podem ser projetadas a intervalos estreitos, menores que meio grau, pois o tamanho das componentes é suficientemente pequeno.

A construção da parte de varredura e da parte imagem é praticamente a mesma que a do MIT e está esquematizada na Figura 2.51. O foco do FLA é projetado na posição da imagem pelas lentes objetivas L_1 e lentes de imagem L_2 . A posição da imagem é varrida no plano da imagem por um scanner horizontal tal como um polígono de espelhos e um galvanô metro. A distância entre a superfície refrativa do scanner horizontal e as lentes L_2 é igual a distância focal de L_2 . Nessas condições, cada raio do FLA é varrido em paralelo. No sistema do MIT, a velocidade e a direção de varredura horizontal devem sincronizar-se

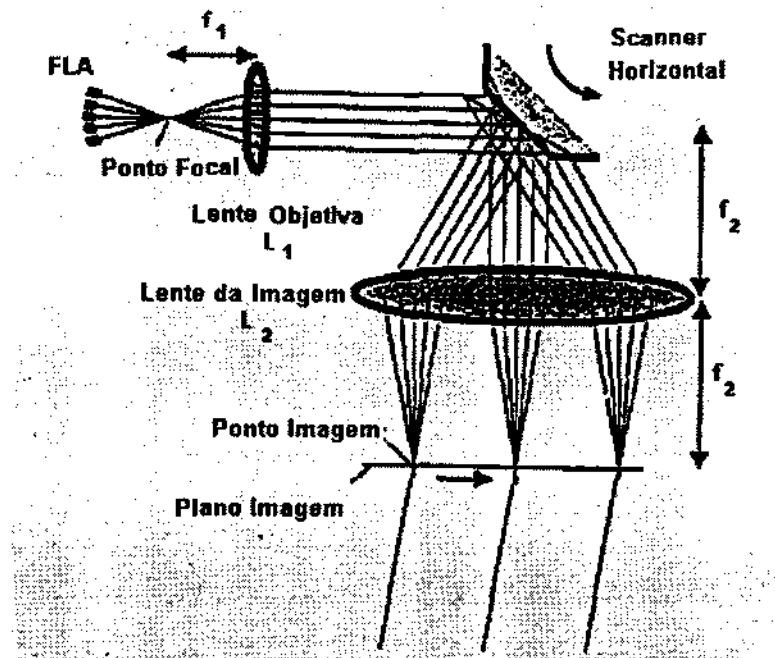


Figura 2.51: Diagrama da parte de varredura horizontal e a parte imagem

com a velocidade e a direção da onda acústica no cristal AO; no display em questão não existe esse problema. Essa flexibilidade permite expandir o tamanho da imagem, a altas taxas de refresh, por um método de varredura rápida. No sistema do MIT, a magnificação da óptica da imagem horizontal é decidida pela razão do ângulo de observação horizontal da imagem e o ângulo defletido do dispositivo AO. No display em questão existe maior flexibilidade. Portanto, pode-se projetar um display em tamanho pequeno.

A Figura 2.52 é um esquema da parte de varredura vertical. Os raios de saída do FEA são varridos pelo scanner vertical. Existe uma óptica especial, chamada difusor vertical, o qual é usado para expandir o ângulo de observação vertical. As funções do difusor vertical são tanto difundir no plano vertical quanto horizontal. Também é possível empregar uma tela lenticular para esse propósito. A lente L_3 corrige a largura do raio para minimizar a incidência na superfície do difusor vertical.

Na parte de processamento de sinal, a intensidade de cada fonte de luz é modulada por uma imagem associada a paralaxe do ângulo correspondente. Nenhuma computação é requerida para transformar as imagens componentes da paralaxe em dados modulados. Tais imagens podem ser renderizadas por diferentes técnicas no processamento paralelo. Uma animação 3D em tempo real (projetada numa superfície 2D) pode ser gerada por computadores gráficos convencionais.

O display FEA não usa interferência óptica. Portanto pode-se projetar sua resolução espacial e a resolução da paralaxe através de sua construção óptica. É importante que a

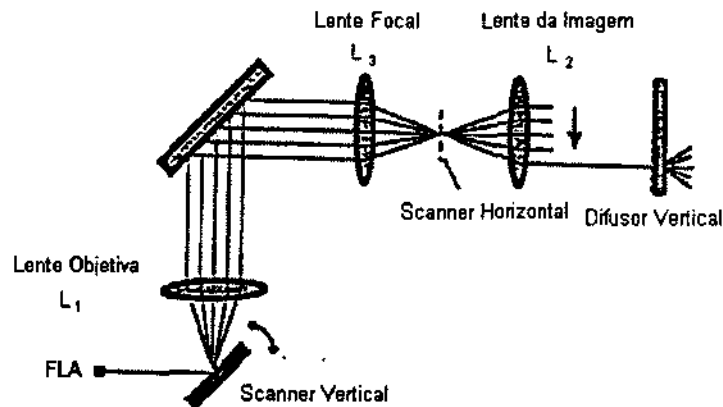


Figura 2.52: Diagrama da parte de varredura vertical

resolução do display seja maior que a resolução do sistema visual humano; mas a alta resolução significa maior conteúdo de informação. O aumento da quantidade de informação tende a dificultar o processamento e a transmissão do sinal. O display FLA é monocromático, embora imagens a cores naturais possam ser exibidas com fontes de luz emitindo vermelho, verde e azul do espectro visível. O display deve ter scanners mecânicos e lentes; portanto a taxa de refresh está limitada pela velocidade de varredura. O tamanho do campo e ângulo da zona de visão são limitados pela abertura numérica das lentes e pela abertura efetiva do scanner horizontal [43].

2.4.1.3 Projeto 3D

O mercado vem se empenhando no desenvolvimento da próxima geração de meios de exibição tridimensional de imagens. Desenvolveu-se um display eletro-holográfico, chamado de Projeto 3D (TAO - Telecommunications Advancement Organization - Japão) usando cinco painéis de cristal líquido (LCD) de propósito específico (especializados para holografia, conforme [17] [16]). O pixel pitch, equivalente a um décimo do dot pitch de cada painel, corresponde a 0,028 mm na horizontal e a 0,056 mm na vertical, totalizando 3200 (horizontal) por 960 (vertical) pixels por LCD. O meio de exibição holográfico produzido, com cinco LCD's submetidos a um controlador, corresponde a uma região contínua de luz, obtida com a utilização de um semi-espelho (reflete 50%, transmite 50%), aumentando o número de pixels na horizontal. O display resultante necessita de aproximadamente 15 MB, gerando uma imagem maior, com campo de visão mais amplo. A imagem reconstruída possui 50 mm de largura, 150 mm de altura e 50 mm de profundidade, com paralaxe horizontal. A paralaxe vertical é desconsiderada, colocando um difusor unidimensional no plano vertical da imagem [17]: uma lente cilíndrica para expandir a imagem na vertical.

O resultado pode ser visto binocularmente sem desconforto visual, a uma distância de 900 mm, o que permite uma razoável percepção da profundidade da imagem (campo de visão de 65 mm a, aproximadamente, 1000 mm a partir da imagem) [17].

Os LCD's são compostos por pixels de tamanho extremamente reduzido, o que provoca a difração da luz, sob determinadas condições de iluminação (laser), no próprio LCD. A área da imagem reconstruída depende do tamanho do LCD, do comprimento de onda e da distância focal; o campo de visão depende do número de pixels do LCD: ambos bastante limitados. Para minimizar estas desvantagens, os LCD's empregados foram construídos especificamente para a criação de displays 3D. A utilização de LCD's permite excluir o passo de varredura usado em muitos meios 3D, uma vez que LCD's difratam a luz em 2D: eles possuem pixels tanto na horizontal como na vertical, possuindo grandes aberturas e difratam em ambas direções, como moduladores espaciais da luz. Diferentemente dos LCD's, os moduladores acusto-ópticos possuem abertura pequena e difratam luz apenas em uma dimensão, requerendo um mecanismo de varredura.

O LCD funciona como modulador espacial de luz para controlar a reconstrução da frente de onda, usando laser, o que irá gerar uma imagem tridimensional. A modulação, parâmetro útil para avaliar o funcionamento dos sistemas ópticos, indica a forma de atuação de influências externas (campos eletromagnéticos, força mecânica) sobre o meio óptico, mostrando que estas podem modificar a maneira com que a luz se propaga [17] [21].

Além dos cinco LCD's, o sistema é composto por um expansor, um divisor e um combinador de raios, lentes convexas e cilíndricas (com distância focal de 1200 mm) e alguns espelhos. A vantagem desse sistema em relação àquele do MIT está na não utilização de moduladores acusto-ópticos como modulador espacial da luz, uma vez que estes difratam a luz apenas unidimensionalmente. Como consequência da unidimensionalidade do AOM do protótipo do MIT, está na exigência de um mecanismo de varredura o qual é dispensado quando o LCD é usado.

A distância entre a imagem e o observador é considerada grande, afetando negativamente a percepção da profundidade. A focalização feita pelos olhos para enxergar os objetos é um dos mecanismos de percepção de profundidade, reagindo melhor a distâncias pequenas [16]. Para minimizar esse problema, utiliza-se uma lente colocada no centro da imagem reconstruída. Tal procedimento gera uma distorção considerável na imagem. Esse problema pode ser minimizado usando lentes de grande diâmetro, de modo que a aberração apareça antes da tela lenticular de projeção (Figura 2.53 [15]).

2.4.2 Varredura volumétrica

Ainda dentro dos meios de exibição do tipo Holo existe a categoria Varredura Volumétrica. Nessa classe as imagens são distribuídas dentro de um espaço fisicamente tridimensional,

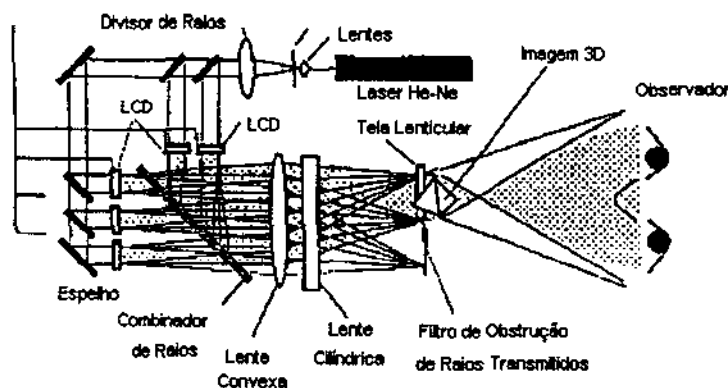


Figura 2.53: Configuração do display do Projeto 3D

permitindo a existência de disparidade binocular e paralaxe de movimento (chamados também de paralaxe binocular) além da paralaxe temporal, sem a necessidade de instrumentos de auxílio à visualização. Costuma oferecer as melhores zonas de visão (podendo chegar até 360 graus) permitindo que várias pessoas observem a imagem simultaneamente. A grande vantagem em relação à Holografia Eletrônica está em permitir o controle do posicionamento do feixe de elétrons sobre cada ponto do volume de exibição (voxel), reduzindo drasticamente a demanda computacional.

Um protótipo, chamado de Esfera de Raios Catódicos (Cathode Ray Sphere - CRS) [2], é um exemplo de meio de exibição Holo-Volumétrico. Ele acompanha uma tela móvel recoberta de fósforo para varrer todo o volume e utiliza hardware e software dedicado para controlar feixes de elétrons de forma que a imagem seja construída a partir dos voxels componentes; a tela percorre ciclicamente todo o volume exibindo as fatias componentes da imagem. Entretanto existem problemas como a restrição do tamanho da imagem que pode ser exibida uma vez que a tela precisa percorrer (translação ou rotação) o espaço correspondente com a menor vibração e maior velocidade possível, além de, por questões de segurança existir a necessidade de envolver a imagem por um gabinete de proteção, o qual prejudica a naturalidade de observação. Um outro exemplo, consistindo de um meio fluorescente embutido num cubo o qual pode ser varrido por pontos obtidos do cruzamento de dois feixes de laser ainda se encontra em estágio de desenvolvimento.

Um sistema chamado Espelho Varifocal emprega um espelho vibrante para produzir imagens 3D. A idéia básica é utilizar um espelho flexível cuja distância focal possa ser rapidamente alterada e posicioná-lo de forma a refletir um monitor convencional para o observador. A mudança periódica de distância focal faz com que a distância ao monitor pareça aumentar ou diminuir de alguns centímetros durante um ciclo de tipicamente 30 Hz. Pontos, linhas e outras primitivas simples podem ser exibidas [11] [31].

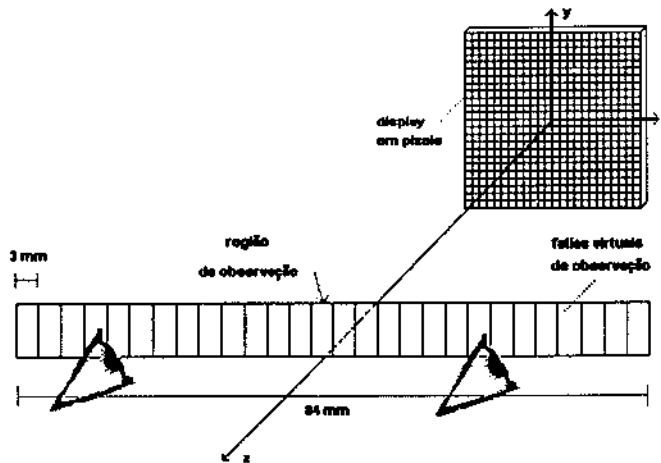


Figura 2.54: Configuração do protótipo da Universidade do Alabama

2.4.3 Outros tipos de display

Existe uma intensa competição internacional para desenvolver displays avançados para serem utilizados em televisões de alta definição, workstations 3D e sistemas de realidade virtual. Um outro exemplo de display tridimensional é a arquitetura de display holográfico em tempo real desenvolvida na Universidade do Alabama [34], mostrada na Figura 2.54. Esse protótipo exibe uma cena 3D estática, permite visão binocular com paralaxe de movimento (quando o observador balança a cabeça de um lado a outro dentro da região de observação) e apresenta funcionamento semelhante a um estereograma holográfico. Cada célula que compõe a tela tem o diâmetro equivalente ao da pupila, de forma que o tamanho de cada pixel esteja próximo ao limite de resolução captada pelo olho humano. Cada pixel é composto por uma única rede de difração projetada de forma que todas as ordens de difração, exceto a primeira ordem, sejam exibidas fora do campo de observação, não apresentando, portanto, o crosstalk. Futuramente, pretende-se empregar nesse protótipo, a tecnologia de cristal líquido.

O capítulo seguinte descreve a forma de Holografia Virtual implementada no protótipo desenvolvido.

Capítulo 3

Um Protótipo de Holoprojetor

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do Holoprojetor versão 2.0, passando pelas diversas etapas intermediárias (problemas, soluções encontradas etc). Detalhes do sistema pioneiro são também apresentados para contextualização dos detalhes de projeto da nova versão.

Conforme visto na Seção 1.1.2, a *Holoprojeção* é uma das técnicas de Holografia Dinâmica para tratamento e exibição de imagens. Consiste em projetar uma imagem que, partindo da fonte luminosa, atravessa um arranjo óptico e incide na tela holográfica, sendo a imagem resultante apresentada em três dimensões [29]. O processo de exibição de imagens descrito neste capítulo possui diversas vantagens com relação às demais técnicas dinâmicas. Dentre essas vantagens dois itens merecem maior destaque: a maior parte do equipamento utilizado é comumente encontrada no mercado (exceto obviamente a tela holográfica e a rede de difração) e além disso todo o sistema é de baixo custo.

Este capítulo explica o funcionamento do primeiro holoprojetor criado por Lunazzi e Diamand [11], esclarecendo as mudanças realizadas para obtenção da segunda implementação. Em seguida, o novo sistema de visualização holográfica é apresentado em duas partes: na primeira delas descreve-se o protótipo de holoprojeção de imagens criado e os elementos componentes; na segunda apresenta-se a etapa de pré-processamento necessária à preparação da imagem a ser submetida ao novo sistema.

3.1 O Holoprojetor de Lunazzi e Diamand

Para entender o sistema desenvolvido neste trabalho é preciso compreender o funcionamento do Holoprojetor proposto por Lunazzi e Diamand [11]. O Holoprojetor anteriormente desenvolvido é composto principalmente por uma fonte de luz, uma rede de difração, uma tela holográfica e um computador que coordena o funcionamento do processo e fornece as imagens a serem apresentadas em três dimensões. Em particular, a Holoprojeção

ocorre por Codificação Cromática, permitindo a visualização tridimensional: as imagens se formam parte à frente (imagem real) e parte atrás (imagem virtual) da tela holográfica.

Um modelo desse protótipo foi desenvolvido por Lunazzi e Diamand no Laboratório de Óptica da Unicamp recebendo o nome de **Holo projetor Versão 1.0**. Para compreendê-lo é interessante acompanhar o percurso da luz e entender como é feita a atribuição das coordenadas X , Y e Z de cada elemento volumétrico (voxel). Em linhas gerais, as duas últimas coordenadas são selecionadas diretamente com o auxílio de espelhos ortogonalmente dispostos para desviar horizontal e verticalmente o feixe de luz, enquanto que a coordenada X depende de duas etapas: codificação e decodificação, as quais serão descritas subsequentemente. É importante notar que houve propositadamente uma inversão das coordenadas X e Z com relação ao protótipo descrito por Lunazzi e Diamand em [11]. Esta modificação é necessária para tornar mais claro o entendimento do novo protótipo proposto neste trabalho. Esse primeiro sistema é basicamente composto por um simples PC, um software de interface para motores de passo (*drivers*), uma fonte de luz branca, um obturador, três defletores de feixe, uma rede de difração, uma lente objetiva e uma tela holográfica, além do próprio sistema visual humano. A Figura 3.1 apresenta uma visão geral do sistema. Os olhos direito (OD) e esquerdo (OE) do observador recebem raios de cores diferentes (por exemplo verde e laranja) que o cérebro funde numa cor intermediária durante a percepção visual.

A luz parte da fonte na forma de um feixe convergente, o qual é desviado por dois defletores (X e Y) antes de atingir a rede de difração. Optou-se por defletir uma fonte de luz vertical para aproveitar a concentração do feixe e assim operar com espelhos pequenos. Sobre a própria rede forma-se a primeira imagem—é a imagem reduzida do filamento da lâmpada; essa diminuição é importante, pois a imagem sofrerá posterior ampliação antes de atingir a tela holográfica. Ao atingir a rede, o feixe de luz convergente é difratado, gerando uma mancha difusa multicolorida chamada de *região de difração* ou *leque espectral* [35]. Esse leque espectral corresponde a uma segunda imagem do objeto original, só que agora cheio de listras coloridas. Cada comprimento de onda que compõe a luz branca possui uma direção ligeiramente diferente dos demais, fazendo com que a cor da imagem varie conforme o ângulo de observação.

Nessa etapa ocorre a codificação da coordenada X , baseando-se na posição relativa entre a rede de difração e o objeto a ser projetado tridimensionalmente. Conforme este posicionamento, o leque espectral irá se formar sobre a malha difrativa, atrás ou à frente desta, sempre no ponto de convergência dos raios luminosos vindos da fonte de luz (foco). Constituirá assim diferentes dispersões cromáticas, as quais resultarão, no momento da decodificação, em diferentes profundidades.

Existem várias técnicas para codificar a profundidade [11]. A forma adotada no **Holo projetor Versão 1.0** é chamada de **Seleção Angular com Rede Fixa**, a qual permite

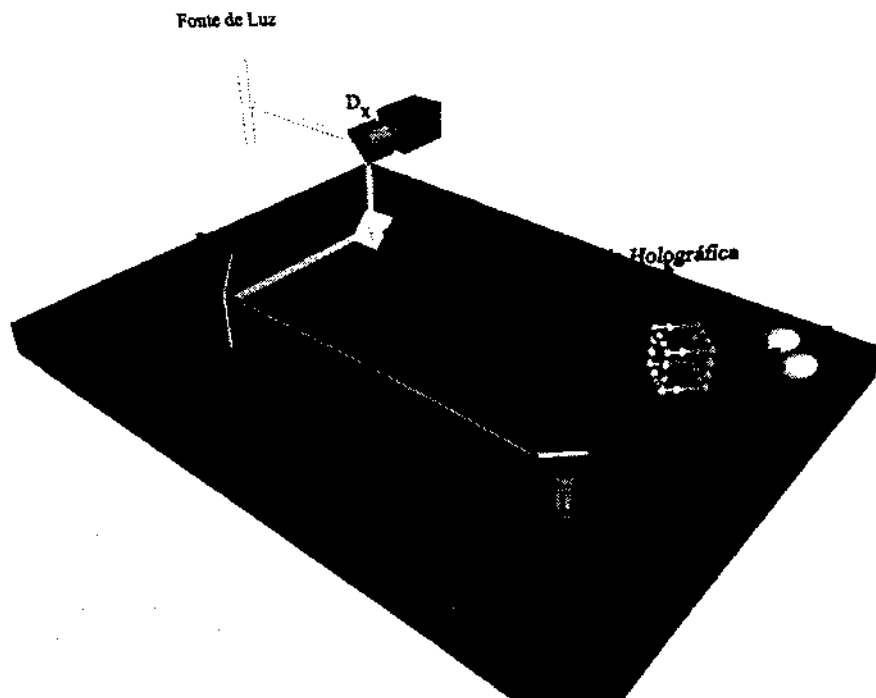


Figura 3.1: Visão geral do Holoprojetor de Lunazzi e Diamand

produzir diferentes dispersões cromáticas. Um dos motivos para a escolha desta técnica estava na preocupação de não afetar a velocidade do sistema pelo movimento da rede através de um motor de passo. Para obter diferentes focos uma malha difrativa fica inclinada em relação a um espelho móvel, cuja localização determina a posição do espectro. Como mostrado na Figura 3.2, um feixe convergente, ao incidir num espelho em movimento angular horizontal, produzirá um foco deslocando-se por uma região aproximadamente plana. Se uma rede for posicionada de forma a cruzar esta região, haverá variação da dispersão cromática, a qual é nula no ponto de interseção. Esta técnica adotada na solução do problema permitiu a substituição do movimento longitudinal da rede pelo movimento angular de um espelho. A velocidade de resposta mecânica, tão importante para a qualidade das figuras geradas, tornou-se potencialmente compatível com a de um sistema bidimensional (tipo show de laser), sendo um espelho defletor a única parte móvel necessária ao controle de X .

A luz espectral intercepta uma lente objetiva, adequadamente posicionada, para efeito de ampliação e direcionamento a um segundo defletor (horizontal), o qual define o valor da coordenada Z . Este defletor também é encarregado de compensar o deslocamento lateral anteriormente introduzido pelo defletor de X , a fim de obter o grau de seleção cromática desejado. A luz então atinge a tela holográfica, a qual permite que os vários

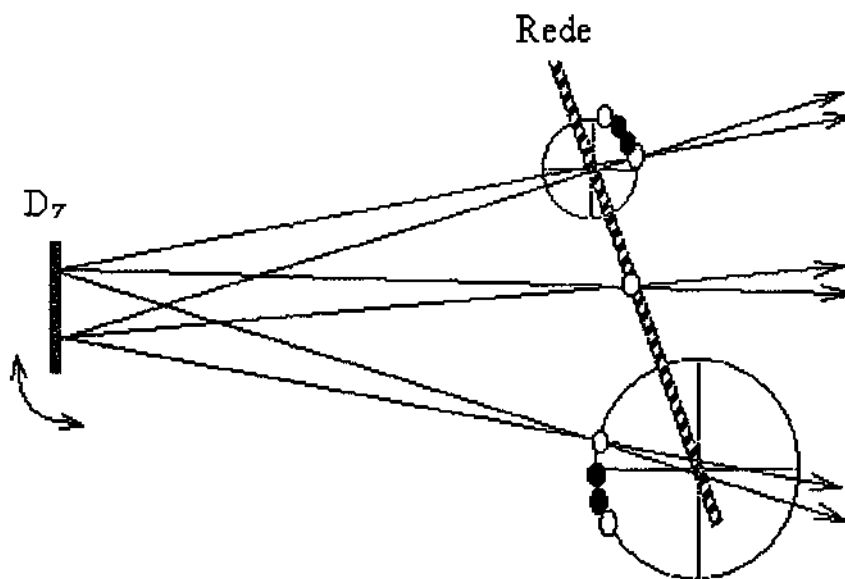


Figura 3.2: Esquema do “seletor angular com rede fixa”

comprimentos de onda sejam redistribuídos no espaço—decodificação de X . Isto gera os vários pontos de vista (cada qual de uma cor) percebidos com paralaxe horizontal contínua pelo observador, último estágio do sistema.

O programa computacional é responsável pelo comando do arranjo óptico acima descrito, de forma que seja produzido um ponto de luz correspondente a cada vértice de uma figura geométrica simples, descrita por um arquivo que lista os vértices. O desenho completo é formado através da movimentação desse ponto de luz—o holocursor—de um vértice a outro. O programa deve atuar diretamente sobre os defletores X , Y e Z para obter o vértice desejado. Além disso deve controlar o obturador, que nada mais é que um “tampão” colocado na saída da fonte luminosa, controlado por um motor de passo. Sua finalidade é de tornar invisível certos retraços do holocursor.

Uma das grandes desvantagens deste sistema é a sua baixa velocidade, conforme [11]. Um exemplo disso está no fato de que o cubo exibido por esse protótipo leva 3600 ms para ser exibido, uma vez que foram usados 4 voxels para exibir cada aresta do cubo, enquanto que a mesma imagem mostrada no novo sistema leva apenas 104 ms (4 fatias). Além disso, a imagem do cubo produzida pelo sistema de Diamand apresenta distorções, provocadas pela acomodação dos defletores ao final de cada movimento.

Outro ponto a ser considerado consiste na dependência da memória do observador e não da persistência visual. Isto pode ser explicado considerando que no sistema de Lunazzi

e Diamand a figura é apresentada como um conjunto de voxels (pontos volumétricos): a persistência visual dada nesse tipo de imagem consiste na persistência visual ponto a ponto, ou seja, um observador consegue identificar um voxel com relação ao voxel anterior, cada qual exibido a uma taxa de 10 Hz. Desse modo, a persistência visual observada por Lunazzi e Diamand não implica na visualização de todo o volume, mas sim na percepção da trajetória de um ponto luminoso pelas arestas de um cubo.

No sistema de holoprojeção agora implementado, o cilindro observado na Figura 4.3 foi apresentado a uma taxa de 12,48 Hz. Nesse caso a persistência visual não é relativa, mas real, embora tendo algum *flickering*. Nessa figura foram mostradas 4 fatias em 104 ms, entretanto no *refresh* da imagem não é necessário mostrar a última fatia, deste modo foram contabilizados somente o tempo necessário para mostrar apenas 3 fatias (78 ms). Assim, a imagem do cubo obtida no sistema anterior pode ser reproduzida no novo holoprojetor a uma frequência de 44,9 vezes maior (0,277... Hz para 12,48 Hz). Além disso, a resolução do sistema de Lunazzi e Diamand é melhorada em X e Y (Y e Z na notação dada em [11]) uma vez que esta resolução corresponde à resolução de um projetor LCD NTSC (512x400).

Contudo, o trabalho descrito anteriormente serviu como estímulo para a implementação apresentada a seguir, com o principal objetivo de aperfeiçoar o experimento; especificamente, atingir taxas de retraço próximas às de um televisor comum.

A grande inovação do protótipo aqui descrito consistiu em remover a fonte luminosa e os dois defletores X e Y e substituí-los por um projetor LCD, substituindo também a rede de difração reflexiva por uma rede translúcida. Deste modo foi possível usar a região de um dos lados da rede de difração para projetar a imagem sobre a rede, e o outro lado para colher o leque espectral, conforme a Figura 3.3. Deve-se notar que se a rede de difração reflexiva fosse usada, tanto o acoplamento óptico como o projetor deveriam ocupar o mesmo lado, o que geraria obviamente um problema de espaço.

3.2 Holoprojetor versão 2.0

A implementação deste sistema envolveu duas tarefas principais: a criação de hardware de propósito específico para oscilação da imagem exibida e a elaboração de software para tratamento das imagens de exibição no sistema. As principais vantagens sobre o sistema anterior são: i) o aumento da frequência básica à faixa de 40 Hz; ii) o aproveitamento da persistência visual da retina ao invés da memória do observador; iii) a montagem de um novo protótipo para exibição de imagens mais complexas.

Para alcançar tal objetivo, o sistema foi estruturado de forma a permitir que, a partir de seções planas de um objeto descrito em um certo padrão, seja possível projetar sua imagem em três dimensões. O projetor de cristal líquido acoplado a um cartão de vídeo é

então sincronizado ao movimento de um espelho ajustado a um motor, ambos acionados por um PC, o qual coordena a exibição volumétrica final, sobre a tela holográfica (Figura 3.3).

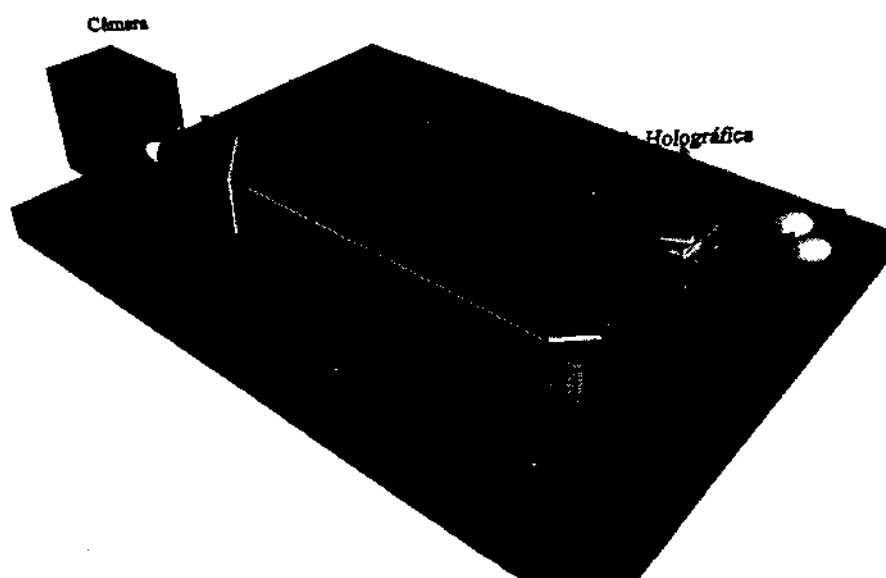


Figura 3.3: O holoprojetor versão 2.0.

O sistema apresentado neste trabalho requer o tratamento de imagens em duas fases. A segunda fase é chamada de **Prototipação do Sistema** e corresponde à montagem e configuração do sistema propriamente dito, no qual as imagens provenientes do projetor de televisão são apresentadas na tela holográfica. A primeira fase é chamada de **Pré-processamento da Imagem**, pois a imagem deve ser preparada para que uma cena em duas dimensões receba a variável de profundidade, assumindo um formato adequado à alimentação do sistema.

A integração das duas fases é realizada pelo projetor de cristal líquido. Este permite que a imagem artificial, dada em termos de suas componentes RGB (*Red, Green, Blue*) e produzida durante a primeira fase, percorra o caminho através dos componentes ópticos da segunda fase; atinge então o estágio final de exibição em três dimensões. Diferentemente do trabalho anterior, no qual o feixe de luz precisa ser desviado em X e Y , o sistema em questão lança, passo a passo, fatias de uma imagem tridimensional, como aquelas produzidas em tomografia ou ressonância magnética. Assim, como a cena introduzida no sistema já possui duas dimensões, a necessidade de seleção em X e Y fica eliminada e o

quadro é inteiramente projetado na tela holográfica.

Na fase de **Prototipação do Sistema**, cada fatia proveniente do projetor atravessa: i) uma rede de difração, para codificação da coordenada Z ; ii) um pacote de lentes, que entre outras coisas funciona como ampliador; iii) um espelho em movimento oscilatório, cuja função é deslocar transversalmente cada holoimagem, antes de atingir o estágio de decodificação da profundidade pela tela final. Este espelho posiciona cada fatia vinda do projetor numa posição transversal à tela holográfica, de forma que o conjunto de fatias exibidas componha o volume de exibição. Este espelho está fixado a um motor, cujo movimento e sincronismo com as demais partes do sistema também são controlados pelo computador.

Na fase de **Pré-processamento da Imagem** ocorre a criação do bitmap e sua decomposição, de forma que cada pixel receba um sinal indicando a fatia a que ele pertence. Esta separação da imagem em fatias é realizada através de uma modificação do *raytracing* realizado pelo programa *shareware* POV-Ray (Persistence of Vision Ray Tracer).

Para facilitar a compreensão geral, a segunda fase (**Prototipação**) é descrita em precedência à primeira fase (**Pré-processamento**).

3.2.1 Prototipação do Sistema

Esta etapa é responsável por duas tarefas principais: o processamento óptico da informação e a sincronização entre emissão e exibição da holoimagem. A concretização destas atividades é realizada através da utilização dos seguintes componentes: um PC equipado com um cartão de vídeo TARGA+ e um projetor de LCD (*Liquid Crystal Display*) da SHARP (XG-400U), além de um programa distribuidor de fatias bidimensionais (a uma taxa constante de exibição).

Cada fatia da imagem proveniente do projetor é opticamente traduzida por uma rede de difração, de modo a estabelecer a codificação da profundidade pela separação dos diversos comprimentos de onda. Como a imagem obtida é reduzida, torna-se necessário lançá-la a um pacote de lentes para ampliação. Na posição focal deste conjunto de lentes está posicionado um espelho que oscila pelo movimento do motor de passo a ele acoplado (conjunto este chamado de refletor). Sua função é deslocar cada holoimagem num percurso transversal à tela holográfica, criando assim um espaço de exibição que deve estar ocupado pela própria tela. A tela holográfica é responsável pela integração dos comprimentos de onda no passo de decodificação da profundidade. Finalmente o observador, colocado aproximadamente a um metro de distância deste espaço, pode ver a imagem em três dimensões.

A Figura 4.3 é o par estéreo do primeiro resultado obtido. A seguir descreve-se os módulos básicos envolvidos neste projeto.

3.2.2 A tela holográfica

A tela holográfica [29] é uma rede de difração com propriedades focalizadoras. Foi obtida por processo semelhante à produção de hologramas, ou seja, pelo registro da interferência de duas ondas luminosas. O resultado desse processo é um conjunto de orifícios distribuídos numa camada fina de material transparente, chamado de rede de difração. Quando um feixe de luz branca passa por esta tela, ele é defletido em direções particulares, a distâncias focais específicas, dependentes do comprimento de onda da luz incidente. Os vários comprimentos de onda difratados formam uma imagem nas cores do arco-íris, chamando esse processo de formação da imagem por dispersão cromática.

A tela holográfica é um elemento óptico difrativo construído a partir da interferência de duas ondas monocromáticas, uma convergente e outra divergente. Mas ao contrário de uma rede de difração, a frequência espacial não é constante ao longo do elemento, o que faz com que os raios incidentes sejam difratados a ângulos diferentes e interceptem-se a uma certa distância do elemento.

A tela holográfica—o maior exemplar disponível para o experimento tendo as medidas de 1,14m de altura por 0,75m de largura—foi desenvolvida por Lunazzi [29]. Foi apresentada tanto em mostras de cinema em Madrid, na Espanha, como também levada para o Japão e compartilhada com os profissionais da SHARP, e que também buscam a criação de uma forma tridimensional de exibição de imagens. Esta tela possui papel fundamental na transformação de cenas bidimensionais, sejam slides ou cenas de televisão, em holomagens. Dessa forma, torna-se componente fundamental do Holoprojetor desenvolvido neste trabalho. Além disso, esta tela ainda acrescenta ao experimento a vantagem de ser capaz de manter a paralaxe da imagem, oferecendo visão estereoscópica sem o auxílio de ferramentas de visualização. Uma característica peculiar é o efeito de paralaxe contínuo, cromaticamente codificado, que pode ser notado quando o observador altera sua posição ao longo de um percurso horizontal diante da tela. Os olhos direito e esquerdo recebem raios de cores distintas, as quais são fundidas pelo cérebro numa cor intermediária durante a percepção visual. Em cada trecho, a imagem possui uma cor diferente. Uma apresentação mais completa da tela holográfica é realizada em [11].

3.2.3 O refletor

O sistema oscilador do refletor é uma parte crítica do holoprojetor apresentado neste capítulo¹. Ocorreram várias experiências frustrantes no decorrer deste trabalho, até a obtenção do refletor adequado aos propósitos do novo sistema de visualização de imagens.

O grande problema encontrado relacionou-se às dimensões da estrutura espelhada adotada. Como a fonte de luz empregada no primeiro holoprojetor gerava uma imagem

¹Este trabalho foi desenvolvido em conjunto com o trabalho de Da Fonseca [9]

puntual (inferior a 1 mm^2) o espelho utilizado podia ser extremamente pequeno (aproximadamente 1 cm^2). Com a substituição da fonte de luz puntual por um projetor de quadros, o espelho necessário a este sistema correspondia a um tamanho cerca de dez vezes superior aos espelhos empregados por Diamand e Lunazzi. Assim, a necessidade de alcançar taxas de exibição melhores acarretou o surgimento de diversos efeitos de inércia e movimentos harmônicos indesejáveis. Não sendo possível reduzir mais o tamanho do espelho para eliminar os movimentos inoportunos, optou-se por substituir o sistema mecânico de suporte ao espelho, adotado no primeiro holoprojetor.

Com o objetivo de encontrar um sistema mecânico que ofereça as melhores frequências a baixo custo, surge a idéia de *canibalizar* um acionador de disquetes de um PC usando a mecânica associada ao motor de passo. Retira-se os parafusos e os discos sobrepostos, componentes do *drive*: o eixo da estrutura constitui o aparato base do motor, um rolamento adaptado pela utilização de uma lima triangular para obter um formato apropriado ao propósito em questão.

A mecânica fina do motor é mantida, apenas recortando a estrutura circular para obter um dispositivo de tamanho reduzido, sobre o qual é colado um espelho. A movimentação do espelho é baseada em instruções para movimentação em cilindros do disco. O comando *seek* utilizado apenas posiciona a cabeça do *drive*, retornando um erro, irrelevante ao propósito em questão porque as características do dispositivo em sua função original são desconsideradas. Uma lingueta, feita com material leve (como o alumínio), é colada sobre o rolamento acoplado ao rolamento central, constituindo uma lâmina para detecção da trilha zero, o que permite inicializar o dispositivo.

Um problema encontrado foi proveniente do controlador de disquete/motor utilizado: o chip 8272. Este dispositivo leva em consideração que o motor de passo está realmente acoplado ao mecanismo de um acionador. Por isso produz um tempo mínimo de 26 a 27 ms para cada passo, obtido em experiências de programação tanto em código assembly como em código que faz referência direta à BIOS. Ainda assim, este valor é extremamente elevado, pois gera uma frequência de oscilação do espelho de aproximadamente 40 Hz, impraticável na exibição de imagens com a qualidade desejada.

Para resolver este problema utilizou-se um espelho sobre um suporte estável, com a forma de um disco, sobre um eixo preso por rolamentos com movimento circular livre. O disco de suporte é preso por uma correia ao eixo do motor de passo. Devido à inércia, tanto do espelho como de seu suporte, e à elasticidade da correia, a imagem refletida apresenta borrões de maneira indefinida. Para determinar com precisão tal problema, utilizou-se um feixe de laser refletido pelo espelho sobre uma superfície a certa distância. Isto amplificou o deslocamento do feixe, permitindo sua análise (Figura 3.4).

Quando o motor de passo avança e movimenta o disco de suporte em um ângulo a o feixe de laser é alterado de um ângulo $2a$. O efeito esperado consiste em um conjunto de

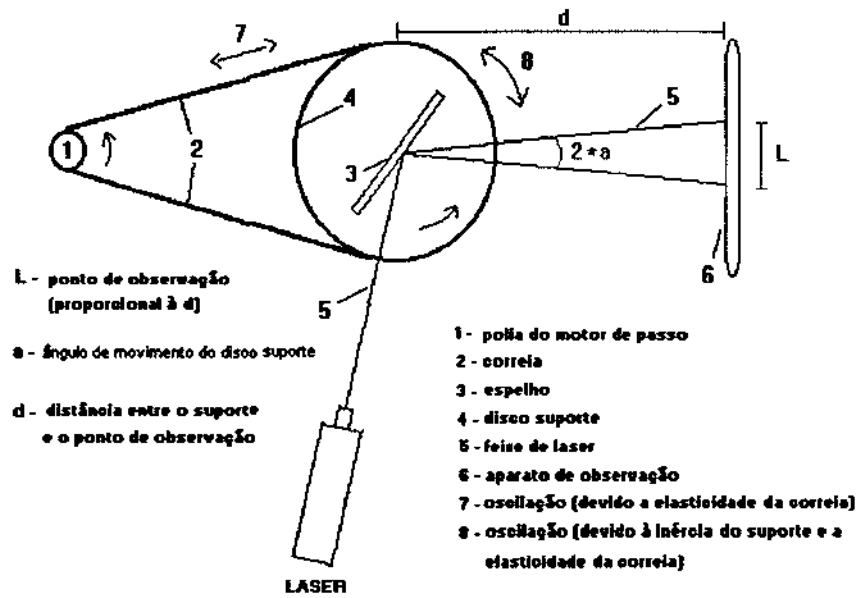


Figura 3.4: Esquema da utilização da experiência com laser

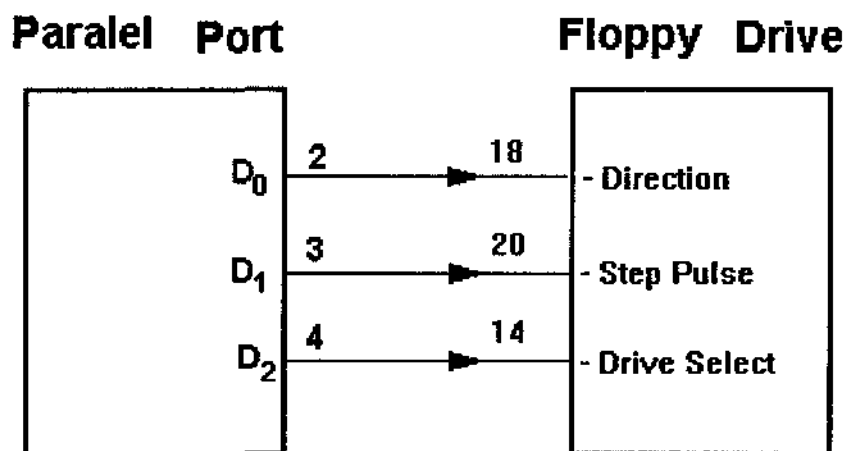


Figura 3.5: Pinagem de conexão entre a Saída Paralela e o Floppy

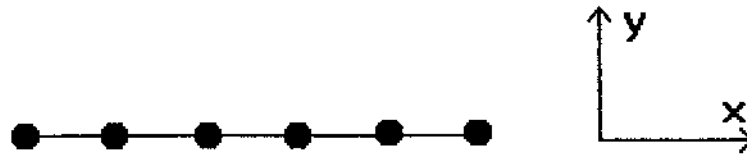


Figura 3.6: Resultado desejado na experiência com laser

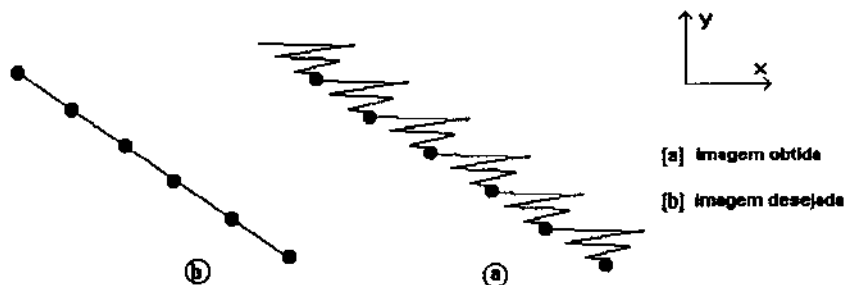


Figura 3.7: Resultado da experiência com laser

pontos brilhantes ligados por uma linha como na Figura 3.6.

Entretanto, o resultado obtido não foi satisfatório devido à elasticidade da correia e à inércia da massa, tanto do espelho como do disco de suporte. Para facilitar a compreensão do problema a imagem obtida será deslocada nos pontos de observação em y através do tempo; a imagem associada pode ser observada na Figura 3.7.

Assim, mesmo reduzindo as frequências os resultados continuaram sendo insatisfatórios, obrigando a realização de uma nova tentativa. Na segunda tentativa, a solução anteriormente descrita foi modificada tanto com relação ao dispositivo eletrônico controlador do motor de passo como ao sistema mecânico. Para modificar o sistema eletrônico de controle utiliza-se a saída paralela do computador, ligando os bits D_0 , D_1 e D_2 aos pinos F_{18} , F_{20} e F_{14} respectivamente (Figura 3.5).

Com essa configuração, um programa que envia bits pela interface paralela é capaz de controlar o sistema. Obteve-se “velocidades” bem maiores: cerca de 5 a 6 ms para cada passo, apenas. Este valor é praticamente a velocidade nominal do motor de passo utilizado, permitindo alcançar frequências na faixa de 180 a 200 Hz.

Finalmente, a modificação do sistema mecânico resolveu o problema de inércia. A solução deste empecilho não seria tão simples, pois implicaria na habilidade de construir um sistema estável. A solução adotada consistiu em construir um sistema de suporte do espelho como alavanca sobre um rolamento, e com um rolamento na extremidade deslizando sobre uma polia excêntrica presa ao motor de passo. Este sistema deve incluir

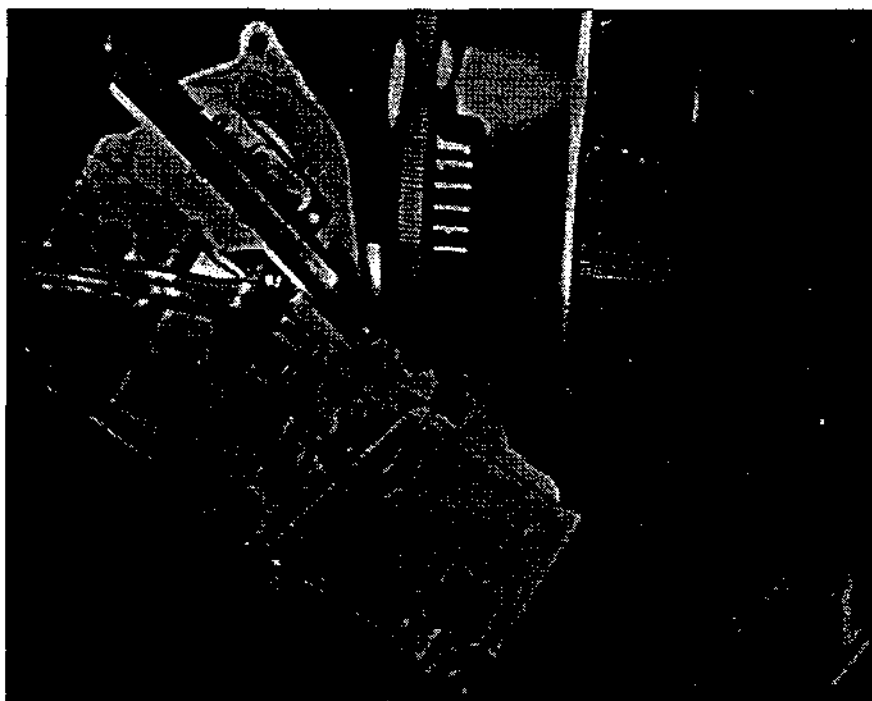


Figura 3.8: Vista superior do refletor

uma mola para eliminar as trepidações (Figuras 3.8 e 3.9). Esta solução é bastante parecida com o eixo de comando de válvulas de um motor a explosão.

A imagem obtida no ponto de observação aproxima-se do ótimo (Figura 3.7-a). Este nosso sistema refletor foi obtido através da canibalização de um acionador de disquetes sem que houvesse prejuízo da mecânica fina. Enquanto que o refletor anterior trepidava mesmo em baixas velocidades (38 Hz) o refletor atual mantém-se em valores próximos ao ótimo, mesmo a 200 Hz.

3.2.4 O projetor de imagens

O sistema de projeção SharpVision 3.10 incorpora três painéis LCD (Liquid Crystal Display). Cada LCD é classificado como sendo de matriz ativa, mais comumente chamado de tecnologia TFT (Thin Film Transistor). Esse tipo de LCD atribui um transistor a cada pixel (o transistor funciona como um relé), o qual é representado por uma interseção numa malha de condutores horizontais e verticais. Quando uma pequena corrente é enviada através desta grade que compõe o painel, o transistor é acionado, usando uma corrente muito maior para ativar o pixel. A vantagem do projeto de matriz ativa é que uma corrente menor precisa atravessar a malha, de modo que cada pixel pode ser ligado e desligado mais rapidamente. A desvantagem é que ela requer a fabricação de um transistor para cada pixel da tela.

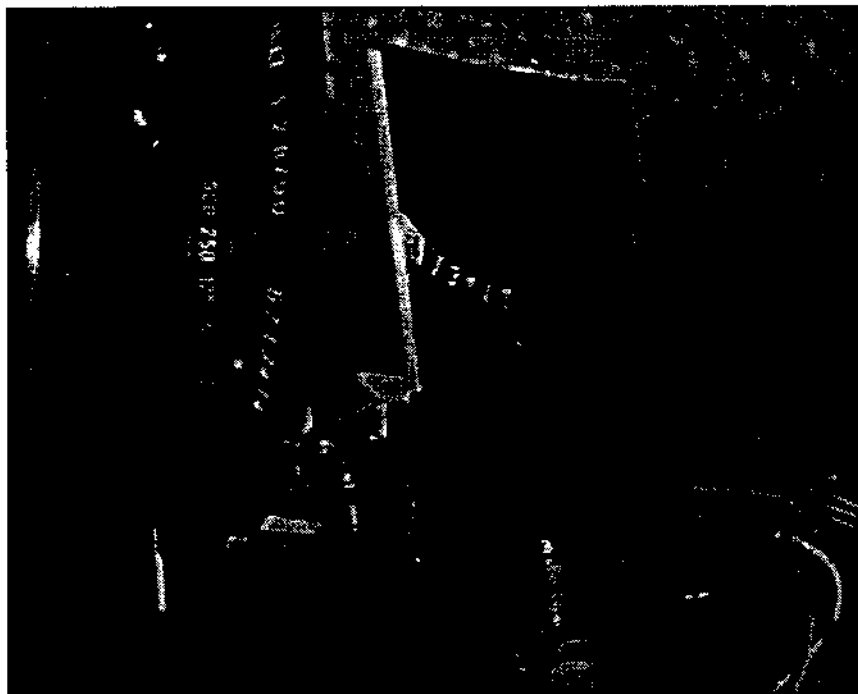


Figura 3.9: Vista lateral do refletor

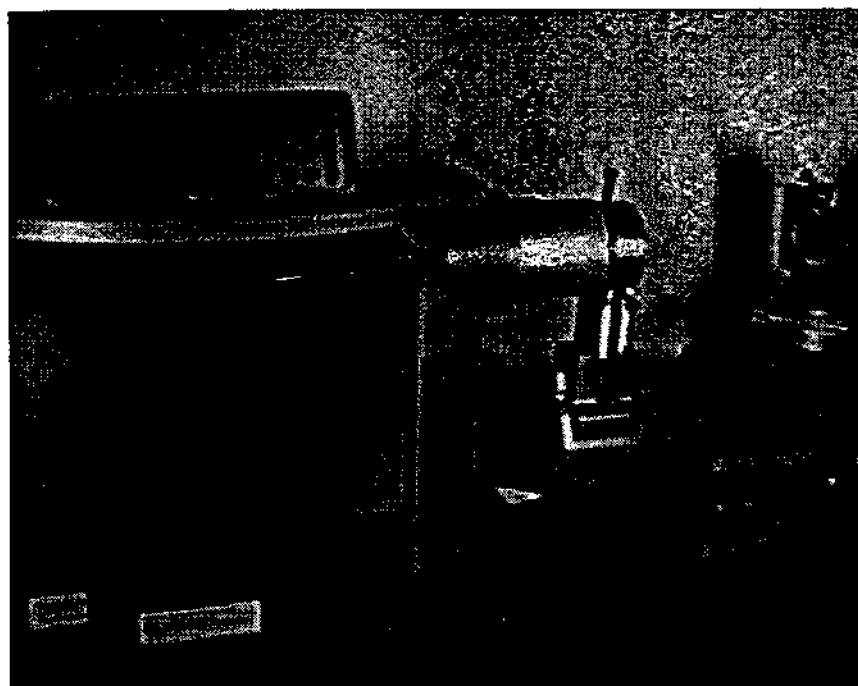


Figura 3.10: Vista lateral do projetor de imagens Sharp

Cada painel LCD é composto por duas folhas de plástico separadas por um líquido especial, constituído por moléculas em forma de bastão. Uma propriedade importante dessas moléculas (chamadas de nemáticas) é que elas flexionam a luz (polarizada), ou seja, introduzem uma rotação no ângulo de polarização. A luz comum não é visivelmente alterada pelo cristal líquido; torna-se necessário polarizar a luz, isto é, alinhar em uma só direção a oscilação de fótons que a compõe, através do uso de um filtro. Este filtro permite que apenas a luz de uma determinada polaridade (ou eixo de oscilação) passe. Sendo a luz polarizada, o cristal pode atuar como defletor. Assim, em um painel de LCD a luz primeiro passa através de um filtro que a polariza. O cristal líquido flexiona a polaridade da luz que dele emerge e em seguida atinge um segundo filtro, do outro lado do cristal.

Uma outra propriedade importante das moléculas nemáticas é que a forma com que elas alteram o percurso da luz pode ser controlada pela aplicação de corrente elétrica. Quando uma corrente atravessa o cristal líquido, a força dessas alterações é afetada, influenciando o volume de luz que passa através do segundo polarizador. Assim, a aplicação de corrente elétrica a pequenas áreas do cristal fará com que essa região seja escura e nas áreas onde isso não acontece, sejam claras.

Além de três painéis de LCD, um para cada cor primária, o sistema de projeção SharpVision utiliza uma série de espelhos dicróicos sofisticados e uma lâmpada de haleto metálico de projeto especial. Os espelhos são usados para separar a intensa luz vinda desta fonte nas três componentes RGB (vermelho, verde, azul). Cada componente é então direcionada pelo painel a ela associado. Na saída de cada painel elas são novamente fundidas e a luz resultante segue seu caminho.

A conexão entre o projetor e o PC utilizado é feita através de um cartão gráfico TARGA+ [41] que oferece capacidade para captura e exibição de imagens. Ela permite o gerenciamento dos sinais RGB necessários ao projetor, além de possuir velocidade e resolução espacial “suportáveis” (existem inúmeras placas melhores atualmente no mercado) ao uso da computação gráfica e da holoprojeção proposta.

3.2.5 Pré-Processamento de Imagens: Fatiamento de Imagens

As imagens encontradas nesta seção foram geradas pelo processo de fatiamento descrito por Da Fonseca em [9] e incluídas neste texto com a autorização do autor.

O pré-processamento de imagens consiste no fatiamento de imagens descrito nesta seção. As imagens são fatiadas de modo que a partir de seções planas de um objeto real, descrito em um certo padrão, seja possível projetar sua imagem com a terceira dimensão restaurada. O fatiamento de imagens em questão considera um tratamento semelhante ao trabalho descrito por Leseberg em [25]. No trabalho apresentado neste capítulo, o fatiamento é obtido através de modificações em um programa de *ray-tracing*. Define-se um conjunto de planos de corte que possuem o mesmo vetor normal. Cada plano é definido

por um passo constante, dependendo da complexidade da figura e da quantidade de fatias desejada. Devido às limitações de resolução e velocidade do equipamento utilizado no protótipo desenvolvido, foi observado que a normal ótima é $< 1,0,1 >$ e o número de fatias da imagem não deve exceder 5; o fatiamento a seguir possui um número maior de fatias somente para ilustração. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram um plano de fatiamento de uma cena contendo uma esfera, um cone e um cubo.

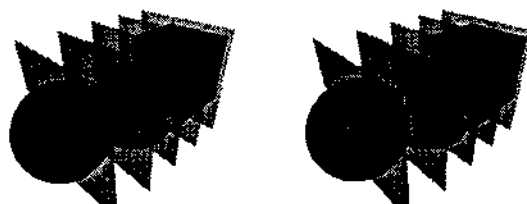


Figura 3.11: Planos de corte em par estéreo.



Figura 3.12: Planos de corte em par estéreo (vista lateral).

3.2.5.1 Fatiando imagens

O processo de geração automática de fatias foi obtido através da criação do dep-povray, que é uma versão modificada do POV-Ray 2.2 (Persistence of Vision Ray Tracer). O POV-Ray foi o software escolhido para compor o protótipo pelos seguintes fatos: o software é de fácil utilização, com o código em domínio público (*freeware*), e permite a geração automática de uma cena a partir de uma descrição matemática, característica de um *ray-tracer* [36]. Dessa forma, tornou-se adequado para os propósitos do projeto desistir da especificação inicial onde o AutoCad constava como programa gerador de fatias de profundidade.

O dep-povray permite a criação de uma tabela de profundidade dos pixels da imagem, além da “renderização” da cena descrita. A entrada é um arquivo texto em formato ASCII com a descrição da cena, um conjunto de objetos, cores, texturas, iluminação e posicionamento da câmera de uma imagem. O processamento simula matematicamente os raios luminosos presentes na cena, os quais determinam sombreamento, perspectiva,

reflexões e luminosidade existentes numa imagem foto-realística. Finalmente, tem como saída outros arquivos: a imagem propriamente dita, com extensão TGA e um arquivo de profundidades OUT.DEP, que consiste de triplas de coordenadas (x, y, z) (distância relativa à origem do sistema de eixos da descrição da cena) referentes a cada pixel da imagem.

3.2.5.2 Modificação do código do POV-Ray

As modificações realizadas no POV-Ray 2.2 para atender as necessidades do Holoprojetor versão 2.0 são descritas a seguir. Devido à implementação de um módulo de animação na versão 3.0 do POV-Ray, é possível fatiar uma cena com operações CSG [9], eliminando portanto a necessidade da modificação do código aqui descrita.

Para obtenção do protótipo foram modificados os códigos dos seguintes módulos do POV-Ray:

frame.h: inclusão da definição de novas variáveis

povray.c: inclusão das operações de abertura e fechamento do arquivo OUT.DEP

render.c: inclusão da escrita da tripla de coordenadas de cada ponto referente a um pixel da cena; caso um pixel pertença à cena de fundo ou tenha coordenadas infinitas, este será representado pela tripla $(0, 0, 10000)$

O processamento principal envolve as informações contidas nos arquivos .TGA e OUT.DEP em 2 etapas.

A primeira etapa consiste em submeter o arquivo de imagem ao processo de *dithering*, obtendo-se uma imagem em 2 cores. A segunda etapa consiste em substituir cada pixel branco por um caracter que corresponda à fatia a que seu ponto de referência pertence. Nesta etapa os caracteres pretos são colocados na última fatia. A decisão é baseada no comprimento da projeção das coordenadas do ponto de referência (tripla no arquivo OUT.DEP) do pixel (branco no arquivo .TGA) sobre o vetor de fatiamento. O processo da determinação das fatias pode ser visto na Figura 3.11 e sua vista lateral na Figura 3.12. Note que a segunda etapa consiste em associar cada pixel branco do *dithering* da cena à sua tripla correspondente no arquivo OUT.DEP. Outra observação importante é que essa implementação ainda não funciona para objetos transparentes ou fundo de cores diferente do preto. Esse processo pode ser ilustrado pelo algoritmo em pseudo-pascal da Figura 3.13.

A função *profundidade* é normal a cada plano \mathcal{P}_i , e portanto, constante para cada plano \mathcal{P}_i . Uma vez obtida a fatia a que cada pixel pertence, é possível determinar exatamente o desenho que compõe cada fatia (veja Figuras 3.14 e 3.15). Finalmente, torna-se possível

Sejam :

$n = \text{número de fatias} + 1;$

$\mathcal{P}_i = \text{planos de corte } i, \text{ onde } (i = 0, 1, \dots, n)$

Para cada pixel p_{ij} faça

se $(\text{cor}(p_{ij}) = \text{preto})$ ou $(\text{profundidade}(p_{ij}) \geq P_n)$

então $\text{fatia}(p_{ij}) := n$

senão $\text{fatia}(p_{ij}) := k$

onde $\text{profundidade}(\mathcal{P}_k) \leq \text{profundidade}(p_{ij}) < \text{profundidade}(\mathcal{P}_{k+1})$

Figura 3.13: Algoritmo de fatiamento em pseudo-pascal

exibir todo o volume da Figura 3.11 codificando cada pixel de uma dada fatia numa certa profundidade. A Figura 3.16 ilustra o resultado esperado.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos com o Holoprojetor 2.0, na forma de tempos de atualização obtidos e de amostras de imagens tridimensionais.

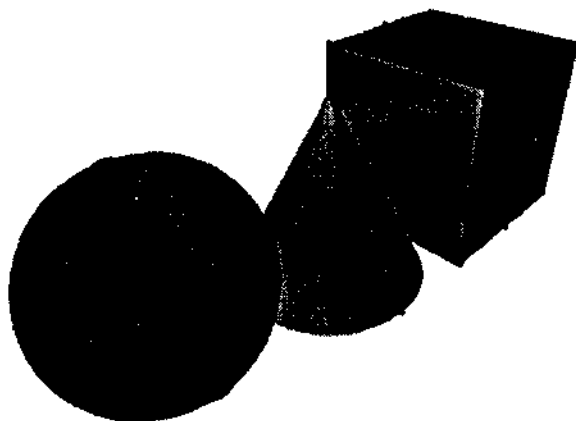


Figura 3.14: Delimitação dos planos de corte.



Figura 3.15: Seis fatias de uma cena.



Figura 3.16: Vista dos planos de corte em par estéreo.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta uma série de resultados obtidos pelo Holoprojetor versão 2.0, tanto na forma dos tempos de atualização obtidos quanto em amostras de imagens tridimensionais. Infelizmente, dadas as limitações do meio “papel” desta tese, elas só estão disponíveis na forma de pares-estéreo.

4.1 O cubo de Diamand

O primeiro resultado obtido em holoprojeção foi mostrado por Diamand [11], onde um cubo aparece como resultado da exibição de 32 voxels. Para desenhar este cubo o Holoprojetor versão 1.0 leva cerca de 100 ms por voxel. O resultado pode ser visto na Figura 4.1.

4.2 Resultados mostrados pelo protótipo

A Figura 4.2 mostra as medidas reais tomadas na configuração do protótipo do Holoprojetor versão 2.0, bem como a posição da câmera nas tomadas dos pares estéreo encontrados nesta seção.



Figura 4.1: O cubo de Diamand.

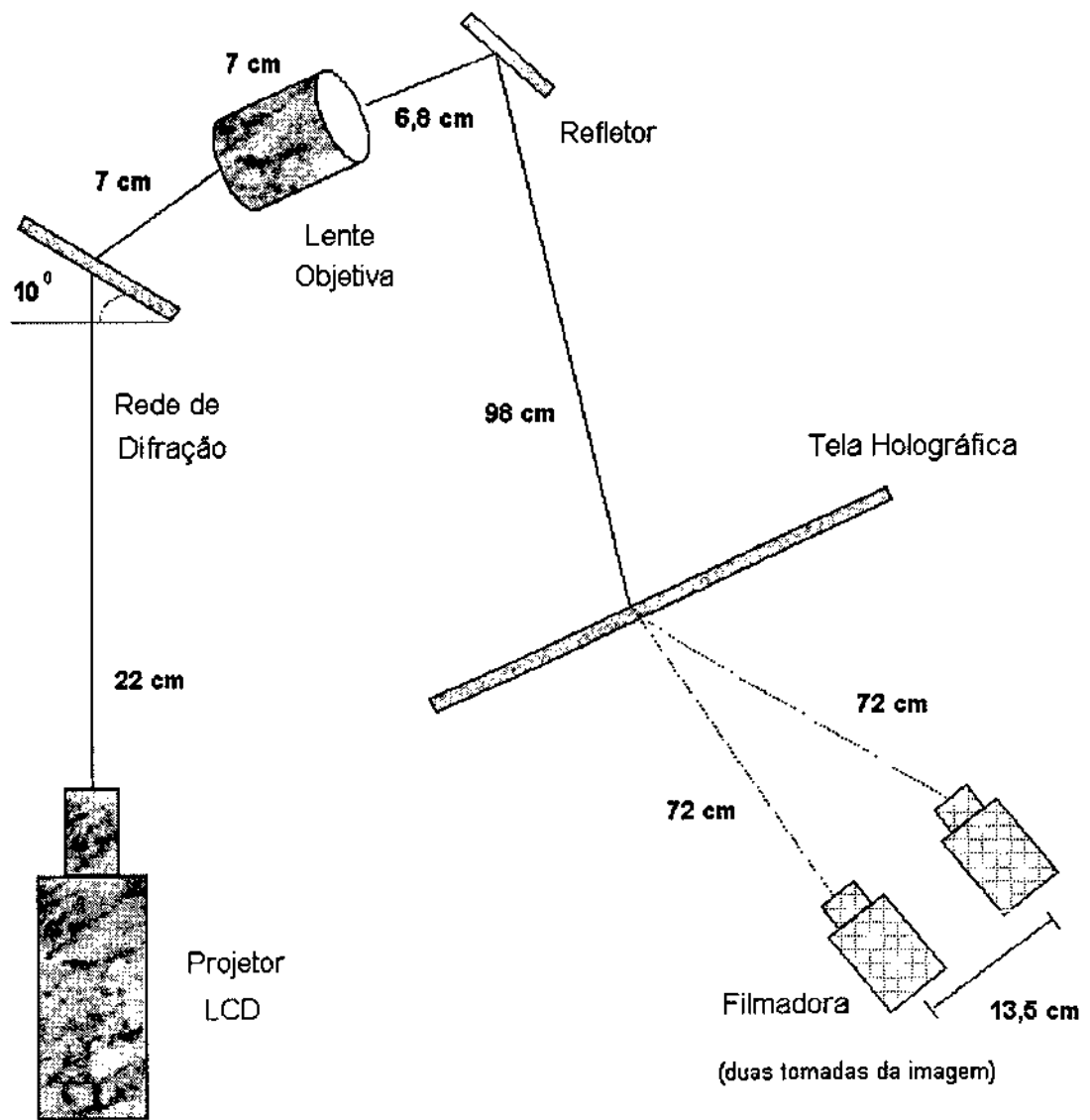


Figura 4.2: As dimensões do protótipo.



Figura 4.3: O primeiro resultado obtido.

O primeiro resultado obtido no *Holoprojetor versão 2.0*, descrito no Capítulo 3, corresponde ao esqueleto de um cilindro (Figura 4.3) composto por 4 fatias iguais. Esta cena foi a primeira figura exibida pelo protótipo descrito. As fatias consistem de uma única figura, movimentando-se apenas o refletor. Devido a este fato, a frequência de amostragem é de cerca de 27,77 Hz.

As demais figuras foram produzidas recentemente a uma frequência de 12,48 Hz, subdividindo a cena em 4 fatias a serem carregadas em páginas diferentes da memória da placa Targa+. As fatias são mostradas sincronamente com o movimento do refletor; após cada passo o movimento do motor é detido de modo a permitir que a imagem seja formada na retina do observador. Em seguida exibe-se a próxima fatia. Devido às limitações do hardware, o tempo ótimo encontrado foi de 20 ms de espera após cada movimento do motor.

Todas as cenas foram exibidas com cerca de 180 mm de largura e com uma profundidade aproximada de 64 mm. A altura varia de acordo com os objetos contidos em cada cena. As tomadas de cada par estéreo foram feitas a uma distância de 720 mm da tela com uma distância lateral de 135 mm entre cada tomada (veja Figura 4.2). Foram colocadas duas fibras ópticas com vazamento de luz para servir como referência. A fibra colocada à direita dista de 3 mm da tela holográfica, e a fibra à esquerda dista a 62 mm da tela holográfica. A distância entre as fibras é de cerca de 10 cm.

A Figura 4.4 exibe um par estéreo do esqueleto de um cubo semelhante ao cubo de Diamand. A Figura 4.5 exibe um par estéreo do resultado final obtido. O objeto possui as medidas de 180 mm de altura, 128 mm de largura e 64 mm de profundidade. Para auxílio, duas marcas foram colocadas na parte superior, indicando a posição de duas fibras ópticas iluminadas, que servem como referência de profundidade.

Uma outra imagem obtida no novo Holoprojetor é uma cena contendo três figuras geométricas, esfera, cone e cubo com par estéreo mostrado na Figura 4.6. A Figura 4.7 contém um par estéreo do resultado obtido. Devido à imperfeição do sistema, a esfera

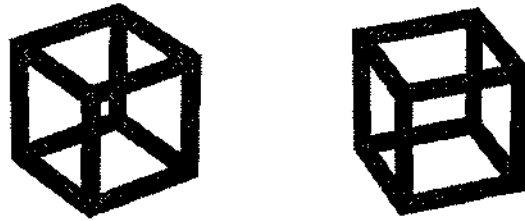


Figura 4.4: Esqueleto do cubo a ser fatiado.

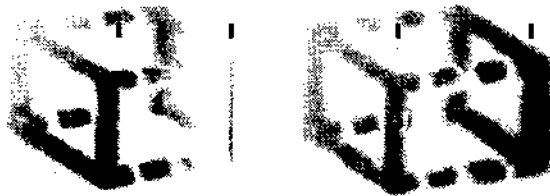


Figura 4.5: Reprodução da cena do cubo no Holo projetor.

aparece numa profundidade atrás do esperado (este efeito pode ser observado no par estéreo). As dimensões do volume da cena são (165,82,64) mm, onde a tripla corresponde à largura, altura e profundidade, respectivamente.

As imagens apresentadas a seguir são cenas descritas em Moray [30], foram exibidas no *Holo projetor versão 2.0* e não poderiam ser mostradas pelo antigo Holo projetor devido à sua relativa complexidade.

A próxima cena, vista na Figura 4.8, corresponde à tridimensionalização do desenho *Rhinoceros Beetle* (Robert Mickelsen). A Figura 4.9 contém um par estéreo do resultado obtido. Devido às cores e textura do besouro, a imagem final não ficou muito boa. As dimensões do volume da cena são (152,39,64) mm.

A próxima cena, vista na Figura 4.10, corresponde à tridimensionalização da imagem

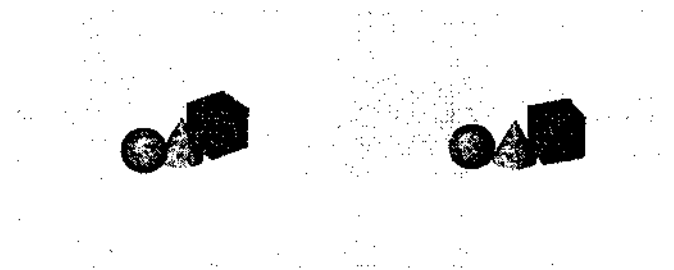


Figura 4.6: Cena contendo uma esfera, um cone e um cubo a ser fatiada

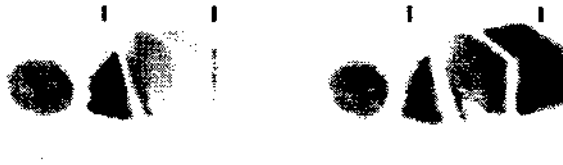


Figura 4.7: Reprodução da cena da esfera, cone e cubo no Holoprojetor.



Figura 4.8: Cena contendo um besouro rinoceronte a ser fatiada



Figura 4.9: Reprodução da cena do besouro rinoceronte no Holoprojetor.



Figura 4.10: Cena contendo um avião de combate F15E

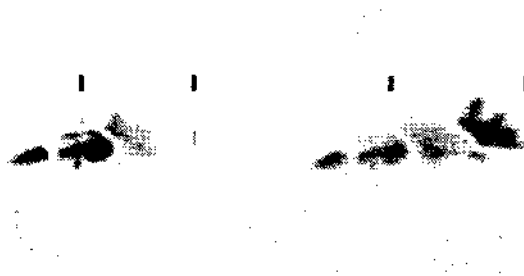


Figura 4.11: Reprodução da cena do avião F15E no Holoprojetor.

do *F15E Fighter Plane* (de McDonnell-Douglas, desenhado por Julian Serrano). A Figura 4.11 contém um par estéreo do resultado obtido. As dimensões do volume da cena são (156,64,64) mm.

A próxima cena, vista na Figura 4.12, corresponde à tridimensionalização da imagem do avião *Fokker Dr I* (de Red Barons, desenhado por Julian Perez Serrano). Devido à dificuldade em capturar as imagens, o bico do avião aparece ligeiramente mais à frente do que o observado. A Figura 4.13 contém um par estéreo do resultado obtido. As dimensões do volume da cena são (164,101,64) mm.

A próxima cena, vista na Figura 4.14, corresponde à tridimensionalização da imagem da nave *Klingon Bird of Prey* (de Taura LearFox). A Figura 4.15 contém um par estéreo do resultado obtido. As dimensões do volume da cena são (200,144,64) mm.

A próxima cena, vista na Figura 4.16, corresponde à tridimensionalização da imagem



Figura 4.12: Cena contendo um avião Fokker Dr I



Figura 4.13: Reprodução da cena do avião Fokker Dr I no Holoprojetor.



Figura 4.14: Cena contendo a nave Klingon Bird of Prey

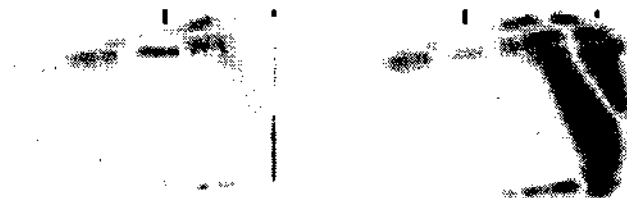


Figura 4.15: Reprodução da cena da nav Klingon no Holoprojetor.



Figura 4.16: Cena contendo a nave USS NightHawk Federation



Figura 4.17: Reprodução da cena da nave USS NightHawk Federation no Holoprojetor.

da nave *USS NightHawk Federation* (Taura LearFox). A Figura 4.17 contém um par estéreo do resultado obtido. As dimensões do volume da cena são (171,551,64) mm.

O capítulo seguinte conclui esta dissertação, resumindo os trabalhos obtidos e limitações, propondo sugestões e apresentando tendências na área.

Capítulo 5

Conclusão

Este capítulo resume os principais resultados obtidos, relata as deficiências/limitações do sistema desenvolvido, propõe soluções para melhoria do sistema e apresenta tendências na área de projetores holográficos.

5.1 Resumo dos resultados obtidos

O Holoprojetor versão 2.0 mostra-se efetivo para exibição de imagens de cenas estáticas, com taxas de atualização próximas às taxas de projeção aceitáveis (≈ 14 Hz). A imagem pode ser observada a cerca de $1m$ de distância da tela holográfica, com volume de projeção nas dimensões aproximadas de $30 \times 14 \times 6cm$. Por princípio de projeto não há paralaxe vertical, porém a paralaxe horizontal permite um movimento lateral do observador de cerca de $20cm$. A cena possui alguma cintilação, devido à frequência de varredura ainda ser considerada baixa. As cenas são monocromáticas, uma vez que o espectro de cores é utilizado no processo da tela holográfica. O observador irá notar variações de tonalidade nas imagens observadas, dependendo de sua posição relativa.

As taxas de atualização obtidas já permitem o vislumbre de novas aplicações, por exemplo animação tridimensional. De fato, o trabalho de Da Fonseca [9] é justamente a evolução lógica deste trabalho, onde se conseguiu obter animação a taxas consideradas já razoáveis.

5.2 Contribuições deste trabalho

As contribuições deste trabalho consideradas de desenvolvimento mais difícil foram:

aceleração do refletor: o Holoprojetor original trabalhava na prática com passos (no motor de passos) de cerca de $27ms$, mas cuja estabilização forçava o tempo total a

cerca de 100ms (para a exibição de um único voxel); a nova versão do Holoprojetor passou a trabalhar com 5-6ms total (incluindo a estabilização), mas que foi estendido a 25-26ms para permitir uma maior persistência na retina do observador (para a exibição de um plano de voxels)

eliminação de trepidações verticais: o aparato da versão original, com um tubo de PVC, fazia com que o espelho estivesse a cerca de 10cm de distância do plano de atuação mecânica da correia; a torção do tubo e a inércia da massa do espelho introduziam vibrações verticais indesejadas, conforme visto na Figura 3.7, solucionadas com o reposicionamento mecânico para a eliminação do tubo e com a diminuição da massa do conjunto;

redução da massa do conjunto: reduziu-se a massa do espelho propriamente dita, usando-se um espelho de acrílico; substituiu-se metal pesado por plástico e alumínio no aparato de fixação do espelho

eliminação de trepidações horizontais: a correia original do *floppy drive* cedia durante operação, causando trepidações horizontais no plano de acionamento mecânico, ou “chicoteamento”; sua solução envolveu a mudança do mecanismo de acionamento de *belt-drive* para *direct-drive*¹, ao estilo dos toca-discos de vinil; colocação de mola para aumentar a resposta do sistema no braço de atuação, para os períodos de “volta” do braço, ao estilo do eixo comando de válvulas de motores a explosão; colocação de rolamento na ponta da haste de atuação para eliminação de trepidações decorrentes de atrito, já que, ao contrário do motor a explosão, o Holoprojetor trabalha “a seco”, sem lubrificação forçada

persistência ampliada: graças à utilização do painel LCD, foi possível trabalhar com um plano de voxels de cada vez: a persistência de cada voxel era prejudicada pela necessidade de se mostrar cada um dos demais voxels; a persistência anterior era dedicada a voxels individualmente, e agora a planos individuais de voxels; a aceleração do refletor permitiu também que a atualização de quadros pudesse dedicar mais tempo garantindo a persistência na retina do observador do que ao movimento do mecanismo

5.3 Limitações

Alguns tópicos apresentaram dificuldades variadas para sobrepujá-los ou contorná-los. Eis uma relação dos principais:

¹não é bem um *direct-drive*: o Holoprojetor 2.0 ainda usa um braço para reduzir o ângulo de atuação
...

- o aparato opto-mecânico, como montado, é bastante instável, devido principalmente a dilatações térmicas e mecânicas das mesas metálicas e do posicionamento dos elementos opto-mecânicos
- a rede de difração exerce influência ainda não compreendida no sistema, uma vez que sua inversão de 180 deg torna o aparato inoperante; alguma característica física herdada do processo de construção da rede de difração é o provável suspeito
- na Figura 4.7, a esfera aparece num plano atrás do cone, o que é inexplicável; novamente, algum processo óptico está sendo subestimado e influenciando na codificação de profundidade
- a taxa de atualização obtida ainda é baixa, mas ela está no momento sendo limitada pelo adaptador gráfico e pelo painel LCD utilizado; é de nosso conhecimento a existência de alguns produtos comerciais nessas áreas que permitiriam taxas de atualização das imagens que produzem a profundidade da ordem de 2 KHz (cerca de 40 vezes mais rápido); novamente, o espelho refletor passa a ser o gargalo do sistema, como o era no Holoprojetor versão 1.0

5.4 Sugestões e tendências

Serão discutidas a seguir algumas idéias para aprimoramento do Holoprojetor e ampliação dos seus possíveis usos, assim como apresentados alguns desenvolvimentos relacionados diretamente ao Holoprojetor:

- Uma pequena modificação que pode ser feita é com relação ao movimento do espelho refletor. Notou-se que, ao manter o projetor ligado enquanto o espelho está se movimentando, artefatos aparecem na imagem. Se a imagem for temporariamente desabilitada durante esse evento (fazendo o adaptador gráfico gerar *blank video*), o resultado visual será melhorado.
- Uma idéia interessante consiste no aproveitamento dos outros dois painéis de LCD do projetor através da eliminação dos filtros usados na tricotomia. Com isso cada painel pode ser relacionado a um subconjunto distinto de cortes da imagem, o que permitiria exibir volumes com maior número de fatias e portanto com maior riqueza de detalhes. Além disso a taxa de exibição (*refresh*) do sistema seria aumentada, conseqüentemente reduzindo a cintilação da imagem. É conveniente lembrar que isso pode ser feito porque as cores não assumem papel de relevo, uma vez que o esquema de codificação da profundidade é baseado na distribuição cromática. (as cores são usadas para a obtenção de Z—profundidade).

- Uma proposta de continuidade consiste na tentativa de captar imagens (por uma câmera) e projetá-las na tela holográfica de modo simultâneo; a placa TARGA+ permite essa conexão. Dessa forma seria obtida uma verdadeira televisão holográfica. O trabalho de Da Fonseca [9], continuação lógica deste trabalho, apresenta os desenvolvimentos obtidos a partir do Holoprojetor versão 2.0, com a adição de mecanismo de animação e primeiros resultados concretos.
- No laboratório de computação da Universidade de Cambridge já existe um projeto de TV tridimensional baseada em cristal líquido para uso médico. O objetivo principal é ajudar os cirurgiões na observação de órgãos internos de todos os ângulos antes de uma operação, sem necessitar de ferramentas de visualização (óculos).
- Na Universidade do Alabama, nos EUA, já foi possível fazer holoimagens em movimento, gerando uma TV verdadeiramente tridimensional. O problema é que uma só pessoa consegue ver esta TV de cada vez, por limitações de volume útil de projeção da tecnologia empregada.

Bibliografia

- [1] E. Bertini, C. F. X. de Mendonça N., J. J. Lunazzi, and P. L. de Geus. Um Sistema para Visualização Holográfica. In *Anais do SIBGRAPI'96, IX Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens*, pages 23–29, Caxambó, MG, outubro 1996.
- [2] B. G. Blundell, A. J. Schwarz, and D. K. Horrell. The Cathode Ray Sphere: a Prototype System to Display Volumetric Three Dimensional Images. *Opt. Eng.*, 1994.
- [3] B. R. Brown. Computer Synthesis of Holograms and Spatial Filters. In *Applications of Holography Proceedings of the United States - Japan Seminar on Information Processing by Holography*, pages 215–227, Washington - D. C., 1969.
- [4] B. R. Brown and A. W. Lohmann. Computer Generated Holograms. In *Proc. of a Conference held at the University of Strathclyde*, pages 77–97, 1970.
- [5] S. J. S. Brown. Automated Holographic Mass Production. In *Proc. of SPIE, Practical Holography*, number 615, pages 46–49, Los Angeles, California, January 1986.
- [6] W. T. Cathey. Optical Information Processing, Holography. *Wiley Series in Pure, Applied Optics*, pages 314–363, 1974.
- [7] L. H. D. Cescato and J. Frejlich. Gravação Holográfica de Padrões Periódicos de Alta Frequência Espacial para a Confecção de Dispositivos ópticos. Master's thesis, Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, 1987.
- [8] R. J. Collier, C. B. Burckhard, and L. H. Lin. *Optical Holography*. Academic Press, 1971.
- [9] E. G. Da Fonseca. Sistemas para Animação Holográfica. Master's thesis, Instituto de Computação, UNICAMP, 1998.
- [10] R. de Medeiros. Holográfica. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, PUC, 1992.

- [11] M. Diamand. Sistema para Visualização Holográfica de Figuras Geradas por Computador. Master's thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, 1994.
- [12] J. D. Foley, A. V. Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes. *Computer Graphics – Principles and Practice*. Addison Wesley Publishing Company, 1990.
- [13] J. Frejlich. Cristais Fotorrefrativos e Processamento Óptico de Sinais. Technical report, Workshop sobre Computação de Alto Desempenho para Processamento de Sinais - São Carlos, Setembro 1993.
- [14] J. Frejlich and S. Bian. Actively Stabilized Holographic Recording for the Measurement of Photorefractive Properties of a Ti-doped KNSBN Crystal. *Journal of the Optical Society of America B*, 12, 1995.
- [15] N. Fukaya, K. Maeno, K. Sato, and T. Honda. Electro-holographic Display using 15mega pixels LCD. In *Proc. of SPIE, Practical Holography X*, volume 2652, pages 15–23, January 1996.
- [16] N. Fukaya, K. Maeno, K. Sato, and T. Honda. Improved Electroholographic Display using Liquid Crystal Devices to Shorten the Viewing Distance with Both-eye Observation. *Opt. Eng.*, pages 1545–1549, June 1996.
- [17] N. Fukaya, K. Matsumoto, K. Sato, and T. Honda. Expansion of the Image Size and Viewing Zone in Holographic Display using Liquid Crystal Devices. In *proc. of SPIE, Practical Holography IX*, volume 2406, pages 283–289, February 1995.
- [18] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw Hill Book Company, 1968.
- [19] D. Halliday and R. Resnick. *Fundamentos de Física 4*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.
- [20] P. Hariharan. Optical Holography – Principles, Techniques, Applications. *Cambridge Studies in Modern Optics*, 2:1–6, 116–130, 146–158, 174–203, 1984.
- [21] E. Hecht. *Optics*. Addison Wesley Publishing Company, 1987.
- [22] Y. Ichioka, M. Izumi, and T. Suzuki. Digital Picture Processing and Holography. In *Applications of Holography, Proceedings of the United States - Japan Seminar on Information Processing by Holography*, pages 195–214, Washington - DC, 1969.
- [23] A. K. Jain. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1989.
- [24] W. E. Kock. *Lasers and Holography – An Introduction to Coherent Optics*. Dover Publications, 1981.

- [25] D. Leseberg and C. Frere. Computer-Generated Holograms of 3D objects composed of tilted planar segments. *Applied Optics*, 27(14):3020–3024, July 1988.
- [26] M. Lucente, P. St. Hilaire, and S. A. Benton. Synthetic Aperture Holography: a Novel Approach to Three-Dimensional Displays. *Journal of the Optical Society of America A - Optics and Image Science*, 9(11):1969–1977, November 1992.
- [27] M. Lucente, P. St. Hilaire, S. A. Benton, and P. M. Hubel. Color Images with the MIT Holographic Video Display. In *proc. of SPIE, Practical Holography VI*, pages 73–84, 1992.
- [28] J. J. Lunazzi. CAD com Visualiza ão 3D por Tela Holográfica. In *XXIV Congresso Nacional de Informática, XI Feira Internacional de Informática, Sucesu 91*, pages 423–426, Parque Anhembi, São Paulo, 1991. Universidade Estadual de Campinas.
- [29] J. J. Lunazzi. Pseudoscopic Imaging by Means of a Holographic Screen. In *Proc. of SPIE, 16th Congress of the International Commission for Optics - Optics as a Key to High Technology*, number 1983 in Part Two, pages 583–584, Budapest, Hungary, August 1993.
- [30] Lutz Kretschmar. *Moray Version 3.0*. <http://www.stmuc.com/moray>, 1998.
- [31] D. L. MacFarlane. Volumetric Three-Dimensional Display. *Applied Optics*, 33(31):7453–7457, November 1994.
- [32] S. Mitkov, G. Mintchev, and E. Mitev. Some Methods for Preliminary Image for Processing. In *In Proc. of SPIE, Holography*, number 1183, pages 607–612, 1989.
- [33] B. Myers. Use of Holography in Medicine. In *Proc. of SPIE, Fifth International Symposium on Display Holography*, number 2333, page 266, Illinois, 1994.
- [34] G. P. Nordin, M. Jones, P. Nasiatka, and S. T. Kowel. Demonstration of a Novel Three-Dimensional, Autostereoscopic Display. *Optics Letters*, 19(12):901–903, June 1994.
- [35] J. M. J. Ocampo. Estudo de Imagens sob Luz Branca por uma Rede de Difração. Master's thesis, Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP, Março 1994.
- [36] POV-Team. *Persistence of Vision Ray-Tracer (POV-Ray), User's Documentation 2.2*, 1993.
- [37] O. V. Rozhkov and L. N. Timashova. Multichannel Coherent Optical Correlator for Processing of High Informative Images. In *In Proc. of SPIE, Holography*, number 1183, pages 561–572, 1989.

- [38] G. Saxby. *Practical Holography*. Prentice Hall, 1988.
- [39] F. W. Sears. *Física Óptica*. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1964.
- [40] J. D. Sutter, M. Lucente, and P. St. Hilaire. Scaling up the MIT Holographic Video System. *Fifth International Symposium on Display Holography*, 2333:374–380, July 1994.
- [41] TrueVision, A RasterOps Company. *TARGA+, Installation, Reference Guide*, March 1993.
- [42] M. Yamaguchi, H. Sugiura, T. Honda, and N. Ohya. Automatic Recording Method for Holographic Three-dimensional Animation. *Journal of the Optical Society of America A - Optics and Image Science*, 9, 1992.
- [43] H. Yoshikawa, T. Honda, and Y. Kajiki. Three-Dimensional Display with Focused Light Array. In *proc. of SPIE, Practical Holography X*, volume 2652, pages 106–116, San Jose - California, January 1996.
- [44] H. Yoshikawa, T. Okada, S. Iwata, and S. Tsujikawa. Basic Research for a Large Electro-Holographic Display. In *proc. of SPIE, Practical Holography IX*, volume 2406, pages 165–171, February 1995.
- [45] H. Yoshikawa, K. Sato, T. Honda, T. Okada, S. Iwata, O. Nishikawa, and K. Matsumoto. The Fast Computation of Holograms for the Interactive Holographic 3D Display System. In *proc. of SPIE, Applications of Optical Holography*, volume 2577, pages 33–39, June 1995.
- [46] F. T. S. Yu and I. C. Khoo. *Principles of Optical Engineering*. John Wiley & Sons, 1990.