

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

WAGNER SCHMITT

**Um Estudo Experimental sobre
Processamento e Captura de Campos
Luminosos Utilizando Câmeras Plenópticas**

Trabalho de Graduação.

Prof. Dr. Menezes Manuel
Orientador

Prof. Dr. Fortunato Horacio
Co-orientador

Porto Alegre, dezembro de 2011

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Wagner Schmitt,

Um Estudo Experimental sobre Processamento e Captura de Campos Luminosos Utilizando Câmeras Plenópticas /

Wagner Schmitt. – Porto Alegre: Graduação em Ciência da Computação da UFRGS, 2011.

61 f.: il.

Trabalho de Conclusão (bacharelado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Ciência da Computação, Porto Alegre, BR–RS, 2011. Orientador: Menezes Manuel; Co-orientador: Fortunato Horacio.

1. Câmeras Plenópticas. 2. Campo Luminoso. 3. Radiância. 4. Fotografia Computacional. 5. Refoco. 6. Abertura sintética. I. Manuel, Menezes. II. Horacio, Fortunato. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitora de Graduação: Prof^a. Valquiria Link Bassani

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do CIC: Prof. Raul Fernando Weber

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pela dedicação e esforços dispensados a mim durante o curso. Agradeço a eles também pelos valores e princípios valiosos a mim transmitidos, que me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço também aos professores Manuel Menezes e Horacio Fortunato pela orientação e apoio que me ofereceram ao longo do curso de graduação, principalmente durante o desenvolvimento deste trabalho. Certamente, esse período de aprendizagem foi determinante no meu crescimento como estudante e profissional.

Agradeço aos meus colegas de curso pelas contribuições com ideias e também ajuda na revisão deste trabalho.

Por fim, Agradeço em especial minha namorada pelo carinho e apoio constante, que me acompanhou desde o começo do curso de graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Evolução da Fotografia	17
1.2 Fotografia Integral	19
1.3 Câmeras Plenópticas	20
1.4 Objetivo do Trabalho	21
1.5 Estrutura do Texto	22
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	25
2.1 Câmeras Pinhole	25
2.2 Óptica Geométrica	25
2.2.1 Matrizes de Transferência	26
2.3 Função Plenóptica	27
3 CÂMERAS PLENÓPTICAS	29
3.1 Abertura Sintética e Refoco	29
3.2 Câmera Plenóptica 1.0	29
3.2.1 Resultados	30
3.3 <i>Light Field Camera</i>	33
3.3.1 Resultados	34
3.4 Câmera Plenóptica 2.0	35
3.4.1 Resultados	36
4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS DE CÂMERAS PLE- NÓPTICAS	39
4.1 Simulador da Câmera Plenóptica 1.0	39
4.2 Simulador da Câmera Plenóptica 2.0	40
4.3 Simulador do Modelo de Câmera Plenóptica Compacta	42
4.3.1 <i>Tri-View Morphing</i>	43
4.3.2 Algoritmos de Renderização	44

5	RESULTADOS	47
5.1	Câmera Plenóptica 1.0	47
5.2	Câmera Plenóptica 2.0	49
5.3	Câmera Plenóptica Compacta	49
5.3.1	Utilizando Espaçamento Amplo entre as Lentes	49
5.3.2	Utilizando Espaçamento Curto entre as Lentes	50
5.3.3	<i>Tri-View Morphing</i>	51
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A SUPORTE MÓVEL PARA CÂMERA	61

LISTA DE FIGURAS

1.1	Fotografias de (a) Louis-Jacques-Mande Daguerre; e (b) William Henry Fox Talbot utilizando o processo daguerreótipo.	18
1.2	Popularização da fotografia com as primeiras câmeras <i>Kodak</i> em 1889, por George Eastman.	18
1.3	Exibição fotográfica na <i>Photographic Society of London</i> , em 1958.	19
1.4	(a) Estrutura da câmera de Lippmann, baseada em uma matriz de lentes, proposta em 1908. (b) Estrutura da câmera integral de Ives, baseada em uma matriz de pinholes.	20
1.5	(a) Câmera plenóptica 1.0; (b) <i>Light Field Câmera</i>	22
2.1	Câmera pinhole capturando a distribuição angular dos raios passam pelo pequeno buraco.	25
2.2	Unidade de medida da radiância: energia emitida por unidade de superfície e ângulo sólido na direção do raio.	26
2.3	Um raio representado pela parametrização ponto-ângulo, antes (coordenadas (p, q)) e após (coordenadas (p', q')) a transformação por um sistema óptico.	27
3.1	Exemplo do processo de obtenção de uma fotografia com abertura sintética. Os vértices da grade representam as posições de onde as amostras do campo luminoso foram capturadas, e os vértices delimitados pelo círculo da abertura são as posições consideradas para a renderização da fotografia final.	30
3.2	Distribuição dos componentes da câmera plenóptica 1.0 (fora de escala). A lente principal está focada na matriz de microlentes. As microlentes estão focadas na lente principal (infinito óptico, devido a proporção entre as dimensões reais da microlente e a distância da lente principal). O sensor está separado a distância focal f das microlentes.	31
3.3	Exemplo de formação de imagens através de subaberturas na câmera plenóptica 1.0. Escolhendo-se o mesmo pixel correspondente sob cada microlente resultará em uma fotografia convencional da cena, como se ela tivesse sido obtida com uma câmera com abertura igual a subabertura mostrada em (a) ou (b). Escolhendo-se outros pixels de cada microlente é equivalente a escolher outra subabertura sobre a lente principal. Portanto, cada uma das imagens extraídas com subaberturas diferentes apresentará uma perspectiva ligeiramente diferente.	31

3.4	Como as microlentes estão focadas no infinito óptico na câmera plenóptica 1.0, raios de mesma direção serão integrados em um mesmo ponto do sensor. É necessário levar em consideração o deslocamento d de cada subimagem no sensor devido ao deslocamento das lentes em relação ao eixo óptico.	32
3.5	Imagem bruta capturada com a câmera plenóptica 1.0. As subimagens (a), (b) e (c), apresentam magnificações da imagem principal nas regiões especificadas pelos retângulos vermelhos a,b e c, respectivamente.	32
3.6	Efeito de refoco com a câmera plenóptica 1.0.	33
3.7	As imagens da esquerda e da direita apresentam uma perspectiva ligeiramente diferente, os retângulos verdes foram traçados para ajudar a perceber essa pequena diferença nas imagens. Efeito obtido com a câmera plenóptica 1.0.	33
3.8	Esquemático da <i>Light Field Camera</i> . Mostra o equipamento com uma grande lente principal seguido de uma matriz de 20 lentes negativas acoplado externamente na câmera. Essa configuração cria imagens virtuais do lado esquerdo da grande lente, e todas essas imagens são capturadas pela câmera em uma única exposição.	34
3.9	Imagem bruta capturada com a <i>Light Field Camera</i>	34
3.10	Simulação de abertura sintética com a <i>Light Field Camera</i> utilizando apenas as 20 amostras direcionais capturadas pela câmera. As áreas fora de foco da imagem apresentam um alto <i>aliasing</i> . Além disso, componentes ópticos de baixa qualidade utilizados neste protótipo resultam em imagens de baixa qualidade.	35
3.11	Efeito de refoco alcançado com a <i>Light Field Camera</i> , utilizando a técnica de <i>view morphing</i> para obter um campo luminoso denso direcionalmente. Da esquerda para direita, o plano focal move-se da frente para o fundo nas imagens.	35
3.12	Renderização de uma imagem com a câmera plenóptica 2.0. Assumindo que a imagem formada pela lente principal encontra-se a uma distância a das microlentes, então é possível extrair $M = \mu \frac{b}{a}$ pixels sob cada microlente, sendo possível sintetizar uma imagem com resolução M vezes o número de microlentes. Portanto, quanto maior o valor de a , menos pixels serão extraídos, resultando em imagens com menores resoluções, já que o valor de b é fixo.	36
3.13	Representações internas da câmera plenóptica 2.0.	37
3.14	Resultados obtidos com a Câmera Plenóptica 2.0. (a) Abertura sintética com plano focal afastado da câmera. (b) Abertura sintética com plano focal próximo a câmera. (c) Recorte da imagem bruta capturada com a plenóptica 2.0, referente a posição indicada pelo retângulo vermelho em (a).	37
4.1	Processo para gerar a imagem bruta capturada pela câmera plenóptica 1.0, ou seja, da forma como ela é multiplexada no sensor agrupando-se os pixels de diferentes direções através do conjunto de imagens adquiridas com o simulador.	40

4.2	Cisalhamento aplicado na projeção perspectiva da câmera em cada uma das fotografias. Dessa forma, pixels de mesma posição em diferentes imagens irão corresponder a diferentes direções dessa mesma posição espacial.	40
4.3	Conceitos de planos principais aplicados a plenóptica 2.0. F representa a distância focal da objetiva; f é a distância focal da microlente; D é a distância da microlente à objetiva. Apenas a microlente posicionada sobre o eixo óptico é mostrada.	41
4.4	Simulação de uma câmera plenóptica através de uma matriz de câmeras. Cada microlente é simulada por uma câmera a uma distância x objetiva da câmera plenóptica (primeiro plano principal), e cada câmera resultante estará espaçada uma distância d_r , das suas vizinhas.	42
4.5	(a) Esboço da câmera proposta mostrando a disposição das seis lentes no corpo principal. (b) campo luminoso obtido sinteticamente com o modelo de câmera proposto.	43
4.6	Vértices em azul representam a posição em que as fotografias foram capturadas. Os pontos em vermelho representam as posições onde foram geradas as novas imagens interpoladas.	44
4.7	Resultado da aplicação do algoritmo de fluxo óptico aplicado nas imagens (a) e (b), a ideia é obter um fluxo dos pixels de (a) para (b). Esse fluxo está representações em (c) por um esquema de cores, onde tons mais escuros indicam um deslocamento maior do pixel, e em (d) é mostrado um recorte desse fluxo em forma de vetores, onde cada vetor representa o deslocamento de um pixel.	45
5.1	(a) Imagem da radiância capturada com a simulação computacional da câmera plenóptica 1.0. (b) Recorte da imagem de radiância mostrada em (a).	48
5.2	Imagens com diferentes perspectivas sintetizadas com a câmera plenóptica 1.0.	48
5.3	Imagem sintetizada através da radiância obtida com a câmera plenóptica 1.0, formada integrando-se os pixels sob cada microlente. Que é equivalente a fotografia convencional com a abertura completa da lente.	49
5.4	(a) Imagem da radiância capturada com a simulação computacional da câmera plenóptica 2.0. (b) Recorte da imagem de radiância mostrada em (a).	50
5.5	Imagem com abertura sintética obtida com o modelo computacional da câmera plenóptica 2.0. Mudando-se a distância do plano focal.	50
5.6	Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento amplo entre as lentes. Utilizando somente as seis imagens capturadas.	51
5.7	Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento amplo entre as lentes. Utilizando um campo luminoso denso direcionalmente contendo 120 amostras. Apenas objetos muito próximos ao plano focal aparecem em foco devido a grande abertura simulada.	51

5.8	Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento pequeno entre as lentes. Utilizando somente as seis imagens capturadas.	52
5.9	Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento pequeno entre as lentes. Utilizando um campo luminoso denso direcionalmente contendo 120 amostras.	52
5.10	Análise da técnica de <i>view morphing</i> empregada no modelo de câmera com um longo espaço entre as lentes. É possível notar através de (c) e (d) que há artefatos na imagem interpolada, principalmente nas arestas das imagens. Isso ocorre devido as imagens não terem correspondência suficiente para que o algoritmo de fluxo óptico tenha uma alta precisão.	53
5.11	Análise da técnica de <i>view morphing</i> empregada no modelo de câmera com um curto espaço entre as lentes. Como a correspondência das imagens interpoladas nessa versão da câmera é alto, o algoritmo de fluxo óptico gera um mapa de vetores com boa precisão. Pode-se perceber em (b) e (c) que há poucos artefatos.	54
A.1	As imagens (a), (b) e (c) mostram o suporte móvel desenvolvido. Ele permite deslocar a câmera horizontal e verticalmente. As fendas são espaçadas igualmente de <i>1cm</i> , e a câmera é presa ao suporte por um parafuso.	61

LISTA DE TABELAS

5.1	Configurações relevantes das três câmeras plenópticas simuladas computacionalmente. Um '—' indica que a configuração não se aplica, ou não é relevante para o modelo em questão.	47
-----	--	----

RESUMO

As câmeras plenópticas encontradas na literatura utilizam uma matriz de microlentes para amostrar o campo luminoso da cena. Dessa forma, são capturadas tanto informação espacial quanto direcional, que são multiplexadas de alguma forma no sensor. A captura da informação direcional, permitiu o desenvolvimento de novas formas de processamento digital muito além do que é possível obter com uma câmera convencional, como a possibilidade de refocar uma fotografia após a sua captura. Porém, isso implica em uma baixa resolução espacial das fotografias, visto que agora a área do sensor destinada a essa informação é reduzida.

Neste trabalho, é feito um estudo experimental sobre o processamento e a captura de campos luminosos por câmeras plenópticas. Para isso, foram desenvolvidas simulações computacionais de três modelos diferentes dessas câmeras — duas delas bastante conhecidas na literatura, e outra a qual foi proposta neste trabalho. Com isso, são obtidos campos luminosos de cenas sintéticas com diferentes quantidades de informação direcional e espacial. Uma alta quantidade de informação direcional nos permite aplicar efeitos de abertura sintética e refoco com maior qualidade no resultado final. Por outro lado, uma maior quantidade de informação espacial nos permite sintetizar fotografias com uma alta resolução espacial.

Atualmente, a baixa resolução espacial das fotografias sintetizadas é uma das principais desvantagens das câmeras plenópticas em relação as câmeras convencionais. Portanto, o modelo proposto aqui tem a finalidade de superar esta limitação priorizando a captura de informação espacial. Essa câmera é composta por seis sensores e seis lentes acopladas ao seu corpo, o que a torna bastante compacta. Assim, a baixa quantidade de informação direcional obtida prejudicaria os efeitos de abertura sintética e refoco. Entretanto, é possível utilizar técnicas de interpolação da visão computacional com a finalidade de ampliar a quantidade de amostras angulares adquiridas inicialmente. Se valendo desta técnica, conseguimos obter efeitos com boa qualidade mantendo uma resolução espacial tão alta quanto as das câmeras convencionais.

Palavras-chave: Câmeras Plenópticas, Campo Luminoso, Radiância, Fotografia Computacional, Refoco, Abertura sintética.

An Experimental Study on Processing and Capture of Light Fields Using Plenoptic Cameras

ABSTRACT

Plenoptic cameras found in the literature use an array of microlens to sample the light field of the scene. Thus, both spatial and directional information are captured and multiplexed in some way on the sensor. The capture of directional information, allowed the development of new forms of digital processing beyond what is possible to achieve with a conventional camera, like the ability to refocus a picture after its capture. But this implies a lower spatial resolution of the photographs, since now the area of the sensor intended for such information is reduced.

In this paper, an experimental study is done on the processing and capture of light fields using plenoptic cameras. For this, we developed computer simulations of three different models of these cameras: two of them are well known in the literature, and another which was proposed in this paper. Thus, we obtain light fields of synthetic scenes with different amounts of spatial and directional information. A high amount of directional information allows us to apply synthetic aperture effects and refocus on higher-quality end result. On the other hand, a greater amount of spatial information allows us to synthesize images with high spatial resolution.

Currently, the low spatial resolution of the photographs synthesized is one of the main drawbacks of plenoptic cameras over conventional ones. Therefore, the model proposed here aims to overcome this limitation by prioritising the capture of spatial information. This camera is made up of six sensors and six lenses attached to its body, making it very compact. Consequently, the low amount of directional information obtained would undermine the effects of synthetic aperture and refocus. However, it is possible to use interpolation techniques in computer vision that allow increasing the number of angular samples acquired initially. Taking advantage of this technique, we obtain effects with good quality while maintaining a spatial resolution as high as conventional cameras.

Keywords: plenoptic cameras, light field, radiance, computational photography, integral photography, refocus, synthetic aperture.

1 INTRODUÇÃO

Desde o seu surgimento, no Século XIX, a fotografia tornou-se uma prática de grande importância cultural para a sociedade. Neste Capítulo, são discutidos fatos importantes que conduziram a evolução da fotografia para a forma na qual a conhecemos atualmente. Além disso, é introduzido o conceito de fotografia integral, desenvolvido no início do século XX, o qual vem se destacando nas últimas décadas devido aos avanços na fotografia digital. Por fim, são descritos o objetivo e a estrutura do texto.

1.1 Evolução da Fotografia

A fotografia deu seus primeiros passos em 1839, quando dois notáveis processos foram anunciados em diferentes regiões (Rosenblum 1997) — um em Londres pelo inventor William Henry Fox Talbot (Figura 1.1b), o outro em Paris por Louis Jacques Mande Daguerre (Figura 1.1a). O primeiro processo de Talbot permitia capturar imagens através de negativos e transferi-las para uma superfície de papel utilizando princípios químicos já bastante conhecidos na época. Esse processo ficou conhecido como calótipo ou talbótipo. O segundo, foi chamado de daguerreótipo, permitia que a fotografia fosse capturada em uma lâmina de metal, após 20 a 30 minutos de exposição em uma câmera escura. Apesar do processo de Daguerre ser o mais popular na época, o processo de Talbot foi o que serviu de base para futuros avanços na área da fotografia.

A partir daí, novas ideias e processos começaram a surgir continuamente visando resolver os problemas técnicos dos processos anteriores. Com a descoberta de um novo processo chamado de colódio, pelo inglês Frederick Scott Archer no ano de 1851, houve um crescimento da comunidade fotográfica (Rosenblum 1997). Consequentemente, vários fotógrafos profissionais começaram a se destacar, bem como o surgimento de sociedades com o intuito de divulgar os trabalhos na área fotográfica, como a *Photographic Society of London*, criada em 1853 (Figura 1.3), hoje conhecida como *Royal Photographic Society*¹.

Posteriormente, no final da década de 1880, George Eastman Kodak popularizou a fotografia refinando e simplificando os equipamentos existentes na época, com o lançamento de uma nova câmera fotográfica, intitulada *The Kodak Câmera* (Company 1888) (Figura 1.2a). Essa câmera utilizava uma nova tecnologia de filme de celulose, empregando uma espécie de emulsão de gel seco. Assim, os fotógrafos não precisavam mais carregar consigo placas fotográficas e produtos químicos tóxicos. Devido a esses avanços, a câmera Kodak surgiu com o *slogan* "Você pressiona o botão, nós fazemos o resto" (Figura 1.2b), inferindo que agora cada pessoa poderia se tornar um fotógrafo em potencial.

¹<http://www.rps.org/history>



(a)

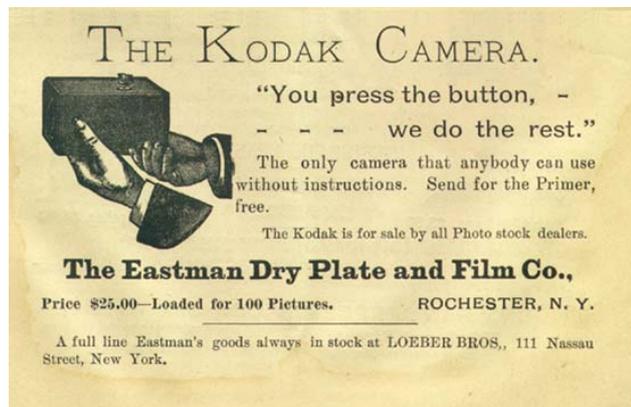


(b)

Figura 1.1: Fotografias de (a) Louis-Jacques-Mande Daguerre (Louis-Jacques-Mande Daguerre 2000); e (b) William Henry Fox Talbot (Claudet 1844) utilizando o processo daguerreótipo.



(a) A primeira câmera *Kodak*, intitulada "*The Kodak Camera*", criada em 1889.



(b) Comercial da câmera *Kodak*, divulgado em 1889. Que popularizou a fotografia na época com o *slogan* "Você pressiona o botão, nós fazemos o resto".

Figura 1.2: Popularização da fotografia com as primeiras câmeras *Kodak* em 1889, por George Eastman (Company 1888).

Conseqüentemente, o surgimento da fotografia contribuiu tanto artística quanto cientificamente (Rosenblum 1997). Artisticamente, ela possibilitou satisfazer a necessidade da época de se adquirir representações mais precisas da realidade, da forma como ela é percebida pelo olho humano. Já na área científica, ela facilitou a investigação sobre a vida animal e vegetal por parte de anatomistas, botânicos entre outros. Isso permitiu criar um banco de conhecimento sobre a aparência interna e externa de seres vivos. Além disso, ela proporcionou avanços no estudo de fenômenos físicos, como calor e luz. O que levou a um melhor entendimento de fatores como a natureza das cores e efeitos visuais.



Figura 1.3: Exibição fotográfica na *Photographic Society of London*, em 1958 (Photographic Society of London).

1.2 Fotografia Integral

A ideia de utilizar uma câmera para capturar o campo luminoso, *i.e.*, a distribuição da luz no espaço vazio (Ver Seção 2.3), em vez de uma simples fotografia (uma fatia 2D do campo luminoso), teve suas raízes na fotografia integral no início do século passado, com Lippmann e Ives (Lippmann 1908; Ives 1928). Inicialmente, Lippmann utilizou uma matriz de lentes para fotografar uma cena de vários pontos de vista ligeiramente diferentes. A visualização da cena era feita através de uma matriz de lentes semelhante posicionada sobre a superfície da imagem, o que produz um *display* estereoscópico, isto é, um *display* capaz de exibir paralaxe de acordo com o ângulo de visão do observador. Com isso, consegue-se reconstruir a geometria visual da cena original. Para o observador, é como se estivesse visualizando a cena através de uma janela, onde os limites da matriz correspondem às bordas dessa janela, a cena é percebida em tamanho real e em três dimensões. Contudo, esse método possui algumas desvantagens, a principal era que a profundidade da cena era visualizada de forma reversa. Esse problema foi apontado por Ives em 1928, juntamente com uma proposta de correção (Ives 1928). Além disso, Ives também aperfeiçoou o método inserindo uma grande lente a frente da sua câmera, o que permitiu que a cena fosse visualizada com uma maior profundidade de campo. A estrutura das câmeras de Lippmann e Ives estão representadas na Figura 1.4.

Ao longo do século anterior surgiram várias propostas de câmeras integrais na literatura (Adelson e Wang 1992) essas câmeras são baseadas nas ideias pioneiras de Lippmann e Ives, e conseqüentemente, são capazes de capturar a distribuição 4D dos raios de luz no espaço. Contudo, somente agora, mais de 100 anos depois, esses conceitos estão se tornando viáveis devido aos recentes avanços da fotografia digital. Na última década, vários modelos de câmeras integrais — ou câmeras plenópticas como são mais conhecidas atualmente —, foram construídas (Ng et al. 2005; Lumsdaine e Georgiev 2009). Essas câme-

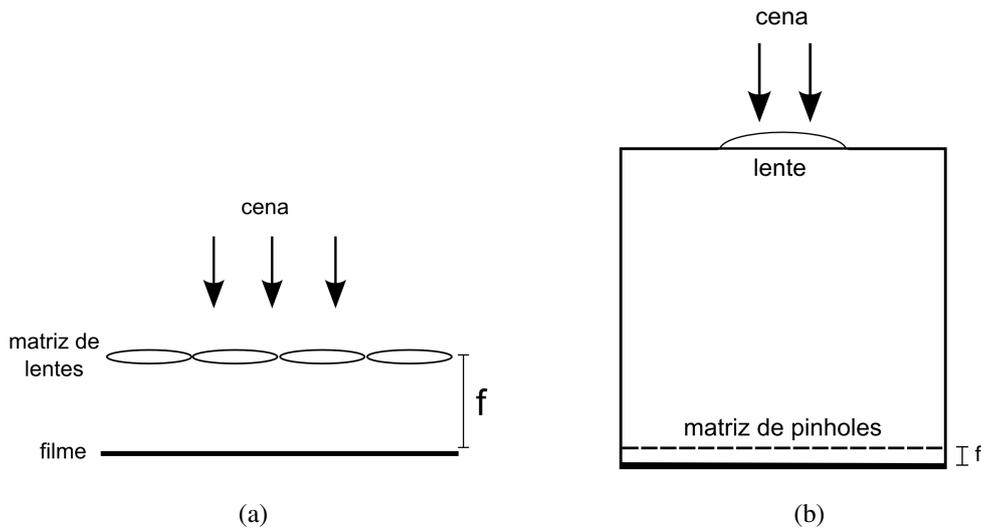


Figura 1.4: (a) Estrutura da câmera de Lippmann, baseada em uma matriz de lentes, proposta em 1908. (b) Estrutura da câmera integral de Ives, baseada em uma matriz de pinholes.

ras introduziram novas formas de processamento digital, mostrando capacidades muito além das câmeras tradicionais, como a possibilidade de mudar o ponto de vista e mudar o plano de foco das imagens através de uma etapa de pós-processamento (Ng 2005). Por essa razão, tiveram uma boa recepção da comunidade fotográfica, tendo já disponíveis modelos comerciais Lytro² e Raytrix³. (Ng et al. 2005; Ng 2005).

1.3 Câmeras Plenópticas

Inúmeras variações de câmeras integrais já foram propostas na literatura nas últimas décadas. Entretanto, em 2006 Ng aperfeiçoou esses sistemas (Ng 2006), desenvolvendo uma câmera plenóptica portátil (Figura 1.5a) capaz de capturar o campo luminoso da cena no interior da câmera. Além disso, ele demonstrou que com essa informação luminosa capturada era possível selecionar os raios de luz de forma a sintetizar fotografias diferentes. Isso permitiu realizar efeitos de modificar levemente a perspectiva da cena, mudar o plano focal, ou até mesmo obter uma fotografia completamente em foco, tudo isso como etapas de pós-processamento. Assim, essas novas técnicas possibilitaram eliminar problemas fundamentais inerentes à fotografia convencional, como o histórico compromisso entre a abertura e a profundidade de campo.

Entretanto, as câmeras plenópticas ainda sofrem de uma grande desvantagem, pois elas precisam capturar informações em 4D (angular e espacial) dos raios de luz, e multiplexar essa informação em sensores 2D. Dessa forma, a área destinada a resolução espacial é drasticamente reduzida. Portanto, a câmera plenóptica construída por Ng, ou simplesmente câmera plenóptica 1.0, como é conhecida na literatura (Lumsdaine e Georgiev 2009), possibilitava obter fotografias com resolução espacial de aproximadamente 300×300 pixels apenas.

²<http://www.raytrix.de/>

³<http://www.lytro.com/>

No mesmo ano Georgiev e Lunsdaine lançaram um novo design de câmeras plenópticas (Georgiev e Intwala 2005) (Figura 1.5b). Os autores desenvolveram um equipamento com uma grande lente principal e uma matriz de 20 lentes negativas que era acoplado externamente em uma câmera convencional. Esse aparato produzia imagens virtuais que eram capturadas pela câmera em uma única exposição, onde cada fotografia tinha uma resolução de 700×700 pixels, muito superior ao obtido com a câmera plenóptica 1.0. Contudo, as 20 visualizações da cena geravam um campo luminoso com baixa informação direcional, o que resultaria em artefatos nas imagens finais, devido a baixa amostragem. Dessa forma, eles utilizaram técnicas de *view morphing* (Seitz e Dyer 1996), para sintetizar várias novas perspectivas da cena e obter um campo luminoso mais denso. Apesar dos resultados satisfatórios, esse equipamento não se mostrou muito prático, devido ao tamanho e peso, desviando-se da ideia de uma câmera portátil de fácil utilização.

Porém, um novo projeto de câmera plenóptica foi lançado em 2009, chamado de *Focused Plenoptic Camera* (Lumsdaine e Georgiev 2009). Esse novo modelo proporcionou diversas vantagens sobre as duas câmeras anteriores. Dessa vez, a câmera desenvolvida foi semelhante a da câmera plenóptica 1.0, também empregando uma matriz de microlentes. A principal diferença era a disposição dos componentes internos. Com esse novo modelo, os autores conseguiram obter um compromisso mais flexível entre resolução espacial e angular. Consequentemente, com essa nova câmera poderia se atingir uma resolução máxima de até 1040×976 pixels.

Outras formas para capturar o campo luminoso envolvem utilizar uma matriz de câmeras (Wilburn et al.), ou uma câmera capturando fotografias de diferentes posições (Wood et al. 2000). Contudo, ambos métodos não são convenientes para fotografia portátil.

Assim, com o desenvolvimento de sensores mais baratos, juntamente com o grande aumento do poder computacional, hoje é possível armazenar e processar uma quantidade muito grande de dados. Dessa forma, está-se abrindo espaço para as novas câmeras plenópticas explorarem esses recursos computacionais disponíveis, possibilitando uma melhor experiência fotográfica aos usuários.

1.4 Objetivo do Trabalho

A consolidação da fotografia digital, juntamente com o aumento do poder computacional, trouxeram grandes avanços na área de fotografia computacional. Atualmente, usuários comuns têm grande facilidade em manipular fotografias digitalmente — devido à enorme quantidade de *softwares* que há no mercado para essa finalidade—, assim, alcançam resultados que jamais poderiam ser conseguidos com uma câmera tradicional. Além disso, a Internet se tornou um meio muito prático para compartilhar informações, inclusive fotografias, ainda mais com o crescimento de redes sociais. Com isso, está se originando uma necessidade cultural de melhores efeitos e recursos fotográficos disponibilizados a usuários comuns, que extrapolem as possibilidades obtidas com uma câmera convencional.

As novas câmeras plenópticas estão sendo desenvolvidas para suprir essa necessidade. Empresas já começaram a investir em novos *designs* de câmeras plenópticas. Hoje há disponível no mercado dois tipos diferentes, produzidas pelas empresas Lytro e Raytrix. Portanto, há uma grande tendência em popularizar esse tipo de câmera, porém, hoje ela ainda é mais destinada a fotógrafos profissionais.



(a)



(b)

Figura 1.5: (a) Câmera plenóptica 1.0 (Ng et al. 2005); (b) *Light Field Câmera* (Georgiev e Intwala 2005)

Dessa forma, esse trabalho destina-se principalmente a explorar as estruturas das câmeras plenópticas avaliando a forma como elas capturam e multiplexam o campo luminoso da cena no sensor. Inclusive, foi estudada e implementada uma simulação de um novo modelo de câmera plenóptica ainda não proposto na literatura, que não utiliza matrizes de microlentes, mas sim é baseada em matrizes de câmeras (com seis lentes e seis sensores), sua estrutura é melhor descrita na Seção 4.3. A ideia é processar o campo luminoso capturado com essa câmera, verificando a possibilidade e a qualidade da renderização de fotografias com efeitos de abertura sintética e refoco, comparado com outras câmeras plenópticas encontradas na literatura. Para isso, também foram simulados computacionalmente outros dois modelos de câmeras plenópticas bastante conhecidos na literatura.

Uma grande vantagem do modelo proposto seria que com a utilização de vários sensores é possível obter altas resoluções, contornando um dos maiores problemas das câmeras plenópticas atuais: a baixa resolução espacial. Assim, a câmera proposta seria capaz de alcançar resoluções comparáveis às das câmeras convencionais desenvolvidas atualmente. Entretanto, o número pequeno de amostras direcionais capturadas (apenas seis) com esse modelo é extremamente esparsa, comparado com as outras câmeras plenópticas. Porém, é possível aumentar o número de amostras direcionais nos valendo de técnicas de interpolação da visão computacional, e com isso reconstruir o campo luminoso da cena, semelhante ao que foi desenvolvido em (Georgiev et al. 2006).

1.5 Estrutura do Texto

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta uma revisão de conceitos importantes para o entendimento dos sistemas ópticos das câmeras plenópticas. No capítulo 3 é feito uma revisão dos mais recentes modelos de câmeras plenópticas encontrados na literatura, explicando suas estruturas internas e apresentando

alguns resultados importantes que os autores tenham alcançado. No capítulo 4 é descrito em mais detalhes o modelo da câmera plenóptica compacta, juntamente com as simulações dos modelos tradicionais. No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos com a simulação das câmeras. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões e ideias para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste Capítulo, são introduzidos ao leitor alguns conceitos importantes posteriormente abordados ao longo do trabalho. O domínio destes conceitos irá proporcionar um melhor entendimento sobre os sistemas ópticos discutidos, as câmeras plenópticas.

2.1 Câmeras Pinhole

As câmeras pinhole são muito simples pois não utilizam nenhum tipo de lente. Os raios luminosos entram por um único buraco pequeno. Consequentemente, essa câmera captura a distribuição angular dos raios que passam no centro desse buraco, esses raios de diferentes direções são espalhados no interior da câmera em diferentes posições do sensor, produzindo uma fotografia (Figura 2.1).

As primeiras câmeras construídas foram baseadas neste modelo, e chamaram-se de câmeras escuras (Gernsheim 1982). Porém, elas têm pouco uso prático atualmente, visto que sua eficiência luminosa é extremamente baixa, o que as torna inviáveis na fotografia convencional devido ao longo tempo de exposição necessário para capturar uma fotografia. Já do ponto de vista teórico, elas foram altamente influentes para a evolução e o entendimento da fotografia, com a elaboração das câmeras escuras.

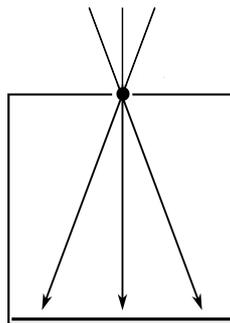


Figura 2.1: Câmera pinhole capturando a distribuição angular dos raios que passam pelo pequeno buraco.

2.2 Óptica Geométrica

Na óptica geométrica utiliza-se a noção de raios para modelar a propagação da luz através de um sistema óptico. Com cada raio é associada uma medida de intensidade

dada pela quantidade física denominada radiância L . A radiância mede a energia emitida por unidade de superfície e ângulo sólido na superfície onde o raio foi originado (na direção do raio), mais claramente visualizado na Figura 2.2. Esta magnitude se conserva ao longo do raio sempre que este não atravesse meios que dispersem ou absorvam a energia (Jahne e Geissler 1999). Apesar dessa ser uma representação simplificada do comportamento da luz, é altamente coerente quando é tratado de objetos cujas dimensões são maiores do que o comprimento de onda da luz. Além disso, em consequência do tratamento do campo luminoso como raios discretos, sistemas muito complexos podem ser analisado matematicamente sem muito esforço ou simulados computacionalmente através de técnicas de *ray tracing*.

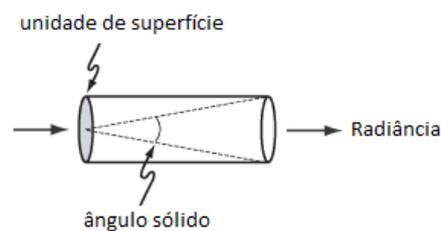


Figura 2.2: Unidade de medida da radiância: energia emitida por unidade de superfície e ângulo sólido na direção do raio.

As equações demonstradas nesta seção tem a finalidade de introduzir o leitor aos sistemas ópticos encontrados tanto em câmeras plenópticas quanto em câmeras convencionais.

Os raios serão representados através da parametrização ponto-ângulo, que é amplamente utilizada na literatura para representar sistemas ópticos (Mouroulis e Macdonald 1997). Dessa forma, a representação de um raio no espaço é dada por suas coordenadas $x = (p, q)^t$, onde q e p representam, respectivamente, o deslocamento e o ângulo do raio em relação ao eixo principal do sistema, que é o eixo de referência o qual passa pelo centro óptico e de curvatura de uma lente ou espelho curvado, a Figura 2.3 mostra mais claramente a utilização dessa parametrização. Os ângulos envolvidos são considerados pequenos o suficiente para que seja possível obter uma boa aproximação dos senos e tangentes desses ângulos, fazendo-os serem iguais aos seus respectivos argumentos (aproximação paraxial). Isso é válido para a maior parte das lentes devido aos pequenos ângulos formados pelos raios com o eixo óptico. Para raios no espaço tridimensional, p e q são vetores bidimensionais. Neste trabalho foi adotada, sem perda de generalização, a convenção de um plano $q - p$ bidimensional, neste caso p e q são unidimensionais, e o vetor x é bidimensional.

2.2.1 Matrizes de Transferência

O tratamento matricial é uma aproximação (paraxial) que modela o caminho dos raios para sistemas ópticos reais. Uma matriz de transferência arbitrária A , transforma um raio de coordenada x , da seguinte forma

$$x' = Ax. \quad (2.1)$$

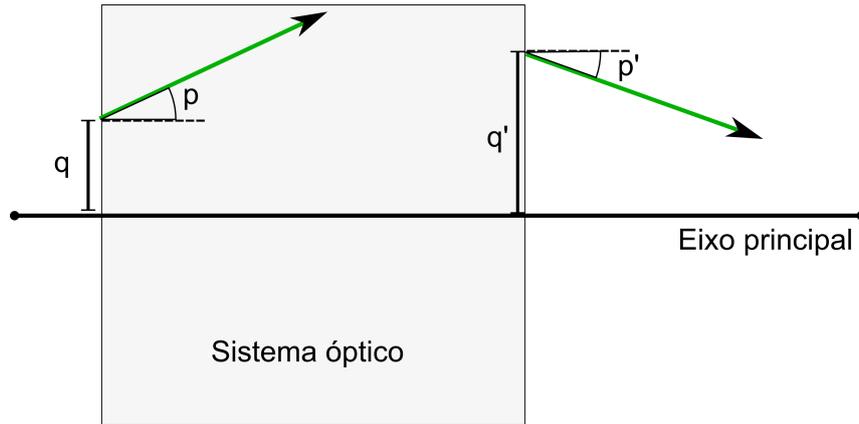


Figura 2.3: Um raio representado pela parametrização ponto-ângulo, antes (coordenadas (p, q)) e após (coordenadas (p', q')) a transformação por um sistema óptico.

A propagação do raio através do espaço por uma distância d é associada com uma matriz de transporte T_d

$$T_d = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Assim

$$[q' p']^t = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [q p]^t \implies \begin{cases} q' = q + d \cdot p \\ p' = p \end{cases}$$

O que mostra que o ângulo p permanece igual após a transformação, enquanto que o deslocamento aumenta ou diminui de acordo com o ângulo p . Também é possível representar a refração de um raio em uma lente delgada através da seguinte matriz L_f

$$L_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

Portanto

$$[q' p']^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot [q p]^t \implies \begin{cases} q' = q \\ p' = \frac{-q}{f} + p \end{cases}$$

O que mostra que o deslocamento q permanece constante e o ângulo p muda de forma proporcional a q .

Para aproximar as transformações de sistemas ópticos mais complexos, são multiplicadas as matrizes de transporte e as matrizes de refração dos elementos, deve-se multiplicá-las na mesma ordem na qual o raio encontra esses elementos durante sua travessia pelo sistema.

2.3 Função Plenóptica

Há uma imensa quantidade de informação sobre o mundo viajando por todas as direções do espaço. Essa informação é conduzida através de densos conjuntos de raios

luminosos de diferentes intensidades, esses raios permeiam toda essa região sem interferirem uns com os outros. Através dessa informação somos capazes de criar uma percepção visual do mundo a nossa volta.

O conjunto de raios que passa por um mesmo ponto no espaço é chamado formalmente de pincel de luz. Se for posicionada uma câmera *pinhole* em algum ponto do espaço um certo pincel de luz será selecionado, e cada um deles irá resultar na obtenção de uma fotografia com a perspectiva diferente. O conjunto de pinceis descreve cada fotografia possível tirada de cada posição particular do espaço. Tal representação completa da estrutura luminosa da cena é descrita pela função plenóptica, proposta por (Adelson e Bergen 1991) em 1991. Através dessa função é possível descrever a radiância de qualquer raio de luz presente na nossa cena, dado uma posição V_x, V_y e V_z no espaço, os ângulos ϕ e θ que o raio forma com o eixo óptico e o seu comprimento de onda λ no instante de tempo t . Portanto, a função descrita possui 7 dimensões, *i.e.*,

$$p(V_x, V_y, V_z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (2.2)$$

Como resultado dessa complexidade, ainda não é conhecido na literatura aplicações práticas que utilizam uma representação completa desta função. Entretanto, há várias suposições razoáveis que visam simplificá-la, permitindo reduzir o seu espaço de dimensões. Por exemplo, a maior parte das aplicações práticas trata a dimensão do comprimento de onda como três canais (vermelho, verde e azul). Cada canal representa a integração da função plenóptica sobre um certo intervalo de comprimentos de onda. Outra suposição comum é que a radiância de um raio permanece constante ao longo do seu caminho no espaço vazio, visto que o ar é um meio que não atenua a propagação da luz. Dessa forma, é possível reduzir em duas dimensões a função plenóptica, ademais, se for considerada somente cenas estáticas, ainda é possível descartar a dimensão do tempo, resultando em apenas 4 dimensões.

As representações da função plenóptica 4D foram introduzidas para a comunidade de computação gráfica em 1996, através do trabalho de *Light Field Rendering*, que utiliza campos luminosos (Levoy e Hanrahan 1996) e do *Lumigraph* (Gortler et al. 1996). Esses métodos estabeleceram técnicas para análise e processamento desses dados. Ambos os métodos ignoram não só as dimensões de comprimento de onda e tempo, como também assumem que a radiância é constante ao longo de uma direção no espaço. A principal diferença entre as duas abordagens é que o *Lumigraph* assume conhecimento prévio da geometria da cena.

3 CÂMERAS PLENÓPTICAS

Neste Capítulo, são apresentados mais detalhes sobre três diferentes modelos de câmeras plenópticas encontradas na literatura na última década. Além disso, são apresentados resultados importantes alcançados pelos autores, com a finalidade de comparar os modelos computacionais desenvolvidos, e também, ressaltar as novas possibilidades deste tipo de câmera.

3.1 Abertura Sintética e Refoco

Quando é capturado o campo luminoso da cena, seja com uma câmera plenóptica ou com uma matriz de câmeras, posteriormente é possível utilizar a informação para sintetizar fotografias como se tivessem sido capturadas por câmeras convencionais, com diferentes configurações de parâmetros, como diferentes tamanhos de abertura (Vaish 2007). Por exemplo, para obter uma imagem com uma abertura sintética — o que causaria efeito de desfoque em objetos fora do plano focal —, é necessário decidir o tamanho da abertura e um plano focal virtual onde serão projetados os raios. Mudando-se a posição desse plano focal virtual, é obtido o efeito de refoco.

Assim, de forma prática, para se obter uma fotografia com abertura sintética primeiramente é escolhido o tamanho da abertura; seleciona-se fotografias obtidas de perspectivas diferentes dentro dos limites do tamanho da lente escolhida; projeta-se essas fotografias obtidas de diferentes perspectivas em um plano focal virtual (Figura 3.1). Quanto maior o número de amostras que são integradas mais realista é o desfoque obtido, a baixa amostragem causa um *aliasing* notável nas imagens sintetizadas. Isso pode ser visto nos resultados apresentados no Capítulo 5.

3.2 Câmera Plenóptica 1.0

Em 2006, Ng (Ng et al. 2005) aperfeiçoou o projeto de câmera plenóptica proposto por Adelson e Wang (Adelson e Wang 1992), em 1992. Como resultado, ele demonstrou que era possível — a partir dos dados de radiância adquiridos com a câmera — sintetizar novas fotografias focadas a diferentes distâncias e pontos de vista, através de uma etapa de pós-processamento.

A Figura 3.2, representa a distribuição dos componentes internos da câmera plenóptica 1.0, fora de escala. É possível notar que a lente principal está focada no plano da matriz de microlentes e não no sensor. Além disso, o sensor é colocado a uma distância f das microlentes, onde f é a distância focal de cada microlente. Com essa configuração, a

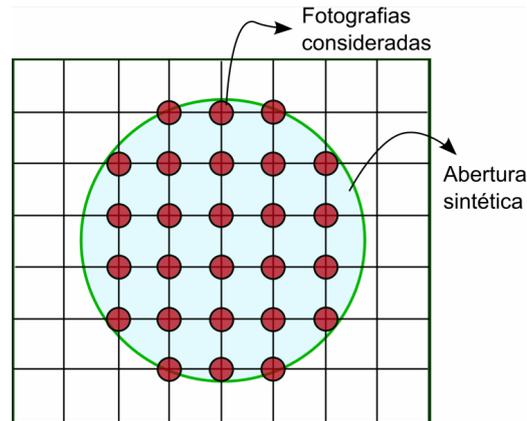


Figura 3.1: Exemplo do processo de obtenção de uma fotografia com abertura sintética. Os vértices da grade representam as posições de onde as amostras do campo luminoso foram capturadas, e os vértices delimitados pelo círculo da abertura são as posições consideradas para a renderização da fotografia final.

imagem formada atrás de cada microlente — que neste caso é uma região de 14×14 pixels —, irá acomodar informação direcional de um mesmo ponto arbitrário que encontra-se no plano focal da câmera. Essa informação direcional seria perdida na fotografia convencional, visto que todos os raios que chegam em uma mesma posição do sensor são integrados resultando na intensidade do pixel, sem levar em consideração o ângulo de incidência dos raios.

Portanto, quando uma imagem é sintetizada com esta câmera, cada microlente contribui com apenas um pixel, ou seja, escolhe-se uma das direções capturadas pela microlente. Por esse motivo a resolução final da fotografia sintetizada por essa câmera é extremamente baixa, 296×296 pixels, que é igual ao número de microlentes utilizados no modelo. Dessa forma, é importante destacar que devido a utilização de uma matriz de microlentes, é capturada a distribuição 4D dos raios no interior da câmera, *i.e.*, o campo luminoso, e não mais uma fatia 2D dessa distribuição, como ocorre na fotografia convencional.

É interessante também analisar imagens formadas extraíndo-se os pixels de mesma posição relativa sob cada microlente, como descrito por Adelson e Wang (Adelson e Wang 1992). Ele demonstrou que todos os raios que formam essa imagem são raios que passam pela mesma subabertura na lente principal (Figura 3.3). Escolhendo diferentes pixels corresponde a escolher diferentes subaberturas na lente principal, e a soma de todas essas aberturas representa a imagem obtida com a abertura completa original da lente. Como são obtidas imagens de subaberturas diferentes, essas imagens apresentarão pontos de vista ligeiramente diferentes. A Figura 3.4 permite visualizar mais claramente que os raios derivados de uma mesma subabertura acabam sendo integrados para mesma posição relativa atrás de cada microlente, porém, é importante notar que com o deslocamento das microlentes em relação ao eixo óptico, as imagens produzidas por cada microlente também irão apresentar um deslocamento no sensor.

3.2.1 Resultados

Na Figura 3.5 é possível visualizar a imagem bruta capturada por esta câmera. Com esta informação os autores mostraram que é possível mudar o plano focal da imagem (Figura 3.6) e também modificar a posição do observador (Figura 3.7), note que as duas

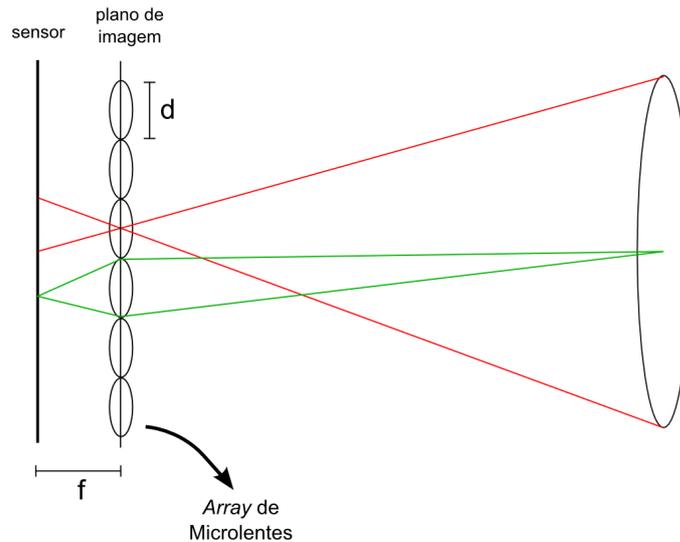


Figura 3.2: Distribuição dos componentes da câmera plenótica 1.0 (fora de escala). A lente principal está focada na matriz de microlentes. As microlentes estão focadas na lente principal (infinito óptico, devido a proporção entre as dimensões reais da microlente e a distância da lente principal). O sensor está separado a distância focal f das microlentes.

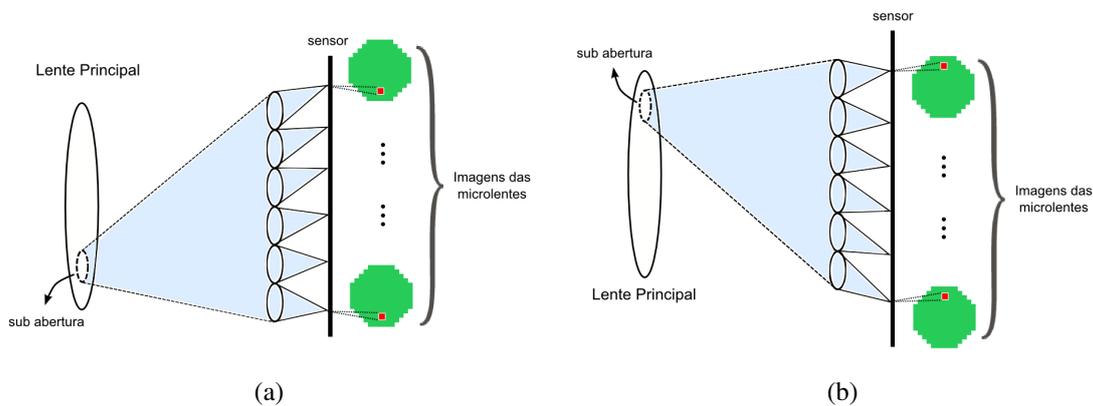


Figura 3.3: Exemplo de formação de imagens através de subaberturas na câmera plenótica 1.0. Escolhendo-se o mesmo pixel correspondente sob cada microlente resultará em uma fotografia convencional da cena, como se ela tivesse sido obtida com uma câmera com abertura igual a subabertura mostrada em (a) ou (b). Escolhendo-se outros pixels de cada microlente é equivalente a escolher outra subabertura sobre a lente principal. Portanto, cada uma das imagens extraídas com subaberturas diferentes apresentará uma perspectiva ligeiramente diferente.

imagens apresentam um pequeno paralaxe.

Apesar das baixas resoluções espaciais resultantes com esse modelo, as demonstrações desses efeitos geraram um grande impacto na comunidade fotográfica, o que hoje se reflete nos vários diferentes modelos de câmeras plenóticas que estão surgindo, inclusive comercialmente.

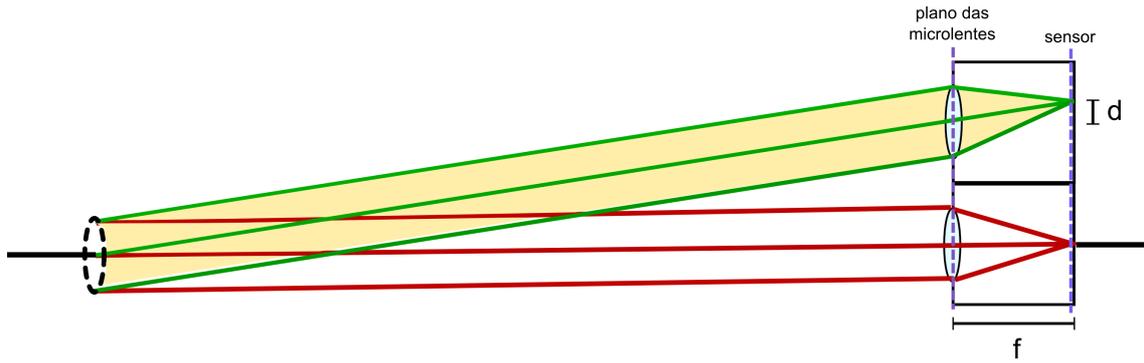


Figura 3.4: Como as microlentes estão focadas no infinito óptico na câmera plenótica 1.0, raios de mesma direção serão integrados em um mesmo ponto do sensor. É necessário levar em consideração o deslocamento d de cada subimagem no sensor devido ao deslocamento das lentes em relação ao eixo óptico.

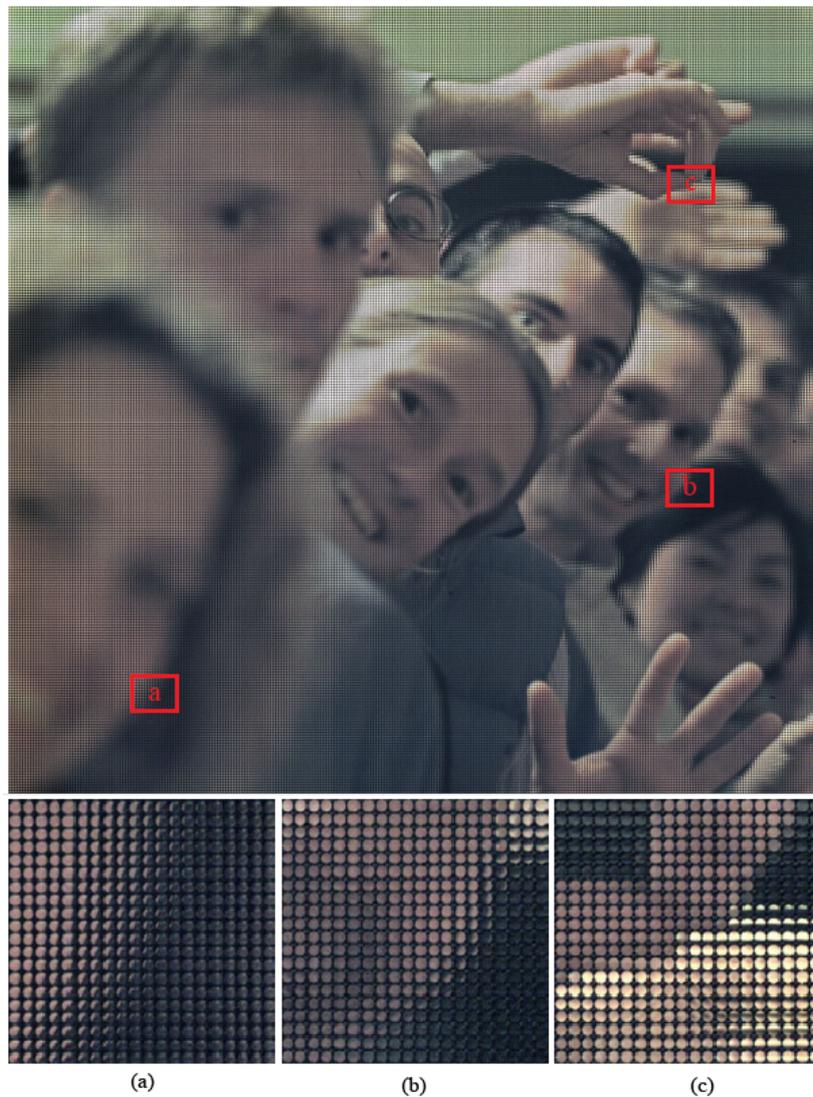


Figura 3.5: Imagem bruta capturada com a câmera plenótica 1.0. As subimagens (a), (b) e (c), apresentam magnificações da imagem principal nas regiões especificadas pelos retângulos vermelhos a, b e c, respectivamente (Ng et al. 2005).



Figura 3.6: Efeito de refoco com a câmera plenótica 1.0 (Ng et al. 2005).

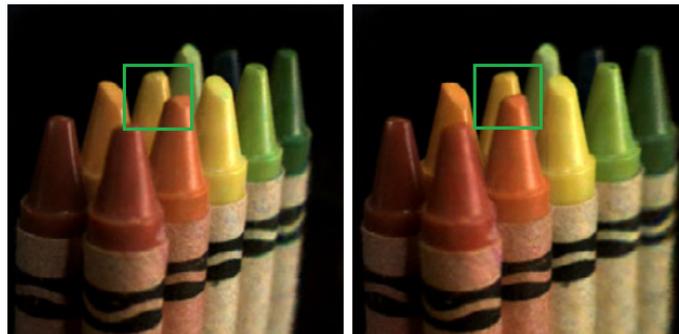


Figura 3.7: As imagens da esquerda e da direita apresentam uma perspectiva ligeiramente diferente, os retângulos verdes foram traçados para ajudar a perceber essa pequena diferença nas imagens. Efeito obtido com a câmera plenótica 1.0 (Ng et al. 2005)

3.3 *Light Field Camera*

Este novo *design* de câmera plenótica foi proposta por Georgiev em 2005 (Georgiev e Intwala 2005). Os autores construíram um equipamento composto por uma lente principal e 20 lentes negativas acoplados à frente de uma câmera convencional (Figura 1.5b). Com esse equipamento, eles geram imagens virtuais da cena que são então capturada pela câmera em uma única exposição (Figura 3.8).

Com apenas 20 amostras a câmera captura informação direcional esparsa da cena (Figura 3.9), e, conseqüentemente, isso leva a imagens finais com forte *aliasing*, como constatado pelos autores.

Uma forma que eles encontraram para contornar o problema da baixa amostragem direcional foi utilizar interpolação através das técnicas de *view morphing* (Seitz e Dyer 1996). Dessa forma, eles conseguiram gerar mais de 200 imagens com pontos de vistas diferentes a partir das 20 obtidas originalmente. Para se utilizar esta técnica, é assumido que a cena seja formada por superfícies lambertianas, *i.e.*, os raios incidentes na superfície são distribuídos de tal forma que suas radiâncias sejam constantes em todas as direções; assim, independente do ponto de visto do observador, ele irá perceber uma intensidade constante nesta superfície. Além disso, as imagens foram calibradas e capturadas de um mesmo plano perpendicular ao eixo de visão da câmera. Satisfazendo estas restrições é possível encontrar raios de luz correspondentes nas imagens através de algoritmos de fluxo óptico, e assim, obter novas perspectivas fisicamente corretas entre as duas imagens apenas aplicando uma interpolação linear nos pixels (ver Seção 4.3.1).

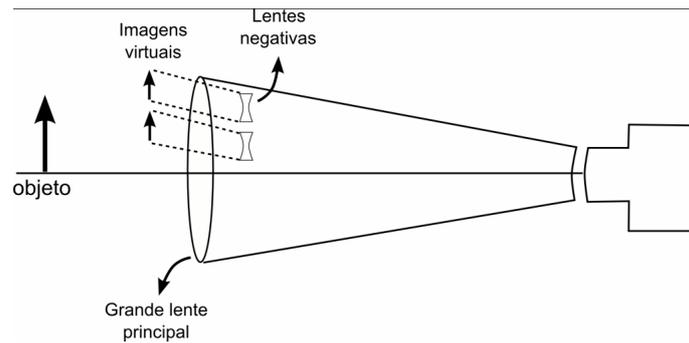


Figura 3.8: Esquemático da *Light Field Camera*. Mostra o equipamento com uma grande lente principal seguido de uma matriz de 20 lentes negativas acoplado externamente na câmera. Essa configuração cria imagens virtuais do lado esquerdo da grande lente, e todas essas imagens são capturadas pela câmera em uma única exposição.

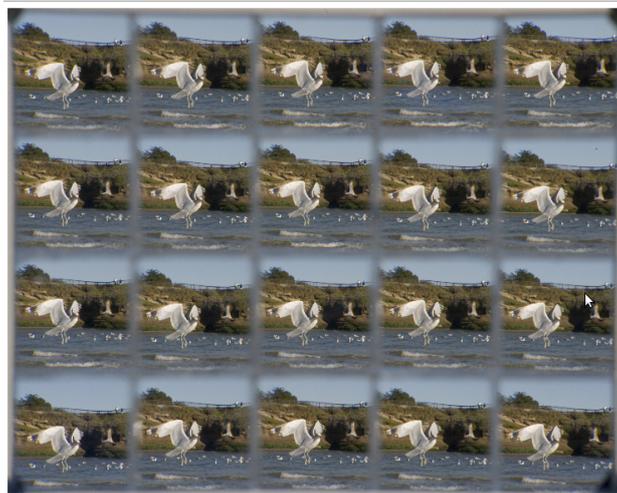


Figura 3.9: Imagem bruta capturada com a *Light Field Camera* (Georgiev et al. 2006).

3.3.1 Resultados

Com somente 20 amostras direcionais, a renderização das imagens com abertura sintética apresentou forte *aliasing* devido a baixa informação angular capturada da cena (Figura 3.10). Porém, com a utilização da técnica de *view morphing*, os autores criaram um campo luminoso contendo mais de 200 amostras direcionais (Georgiev et al. 2006). Essa informação adicional foi suficiente para simular uma abertura sintética com qualidade muito superior a utilizando o campo luminoso original, ou seja, as imagens tornaram-se mais realistas sem a presença de *aliasing*.

A possibilidade de interpolar amostras do campo luminoso é a ideia fundamental da câmera compacta apresentada nesse trabalho. Pois capturando o mínimo necessário de informação angular que permitisse ainda realizar a interpolação de forma precisa, seria possível aproveitar uma grande parte dos sensores para guardar resolução espacial. (Figura 3.11).



Figura 3.10: Simulação de abertura sintética com a *Light Field Camera* utilizando apenas as 20 amostras direcionais capturadas pela câmera. As áreas fora de foco da imagem apresentam um alto *aliasing*. Além disso, componentes ópticos de baixa qualidade utilizados neste protótipo resultam em imagens de baixa qualidade (Georgiev et al. 2006).



Figura 3.11: Efeito de refoco alcançado com a *Light Field Camera*, utilizando a técnica de *view morphing* (Seitz e Dyer 1996) para obter um campo luminoso denso direcionalmente. Da esquerda para direita, o plano focal move-se da frente para trás nas imagens. (Georgiev et al. 2006)

3.4 Câmera Plenóptica 2.0

Esse modelo foi desenvolvido por (Lumsdaine e Georgiev 2009), em 2009. É o mais recente encontrado na literatura. A sua principal vantagem sobre a câmera plenóptica tradicional é uma resolução um pouco mais aceitável, entre 3 a 5 vezes maior de acordo com (Lumsdaine e Georgiev 2009). De forma análoga a anterior, este modelo também utiliza uma matriz de microlentes interna posicionada à frente do sensor para capturar o campo luminoso no interior da câmera (Figura 3.13a). A principal diferença da câmera plenóptica tradicional é que a lente principal agora está focada um pouco a frente das microlentes, e essas estão focadas no plano de imagem da lente principal. Dessa forma, elas funcionam como uma matriz de microcâmeras capturando no sensor porções de uma cena real formada pela lente principal (Figura 3.13b). Esta configuração permite um compromisso mais flexível entre resolução espacial e angular, visto que, nesse modelo a resolução espacial é $\frac{b}{a}$ vezes o tamanho do sensor, onde a e b são, respectivamente, a distância das microlentes a lente principal, e a distância das microlentes ao sensor. Isso ocorre, devido a minificação da imagem capturada pela microlente ser dada por $\frac{a}{b}$, como

mostrado na Figura 3.12. Portanto, a resolução aumenta quando o plano da imagem está mais próximo das microlentes (o valor de a se aproxima de b), enquanto que na versão tradicional a resolução espacial está restrita a quantidade de microlentes.

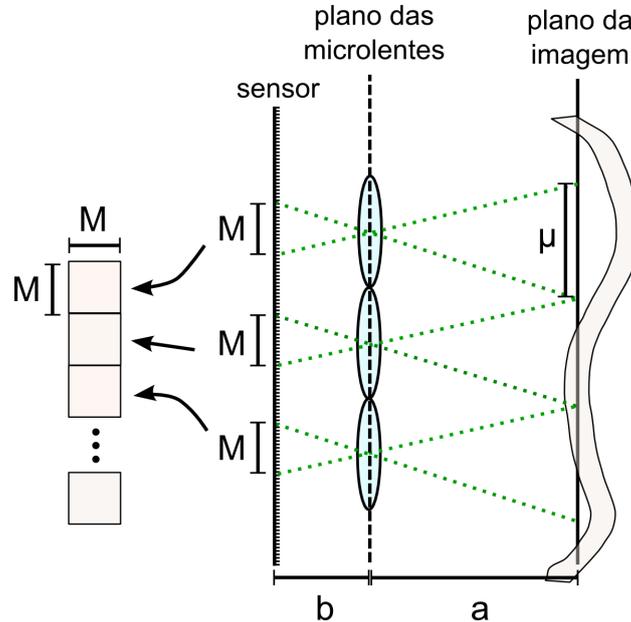
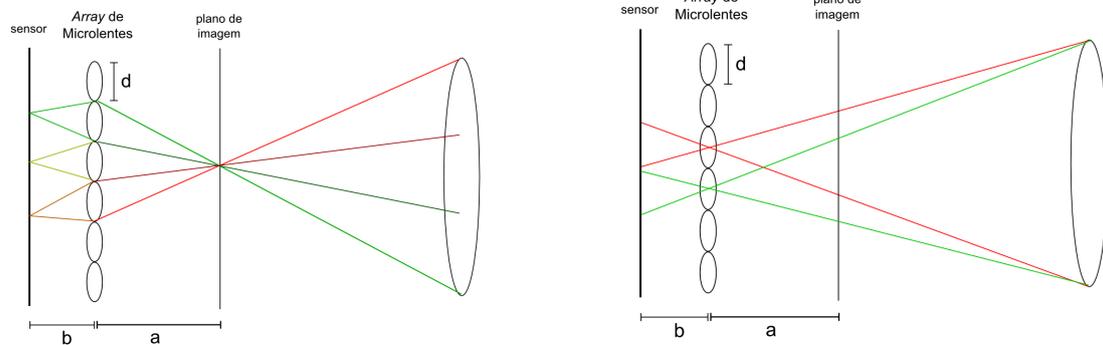


Figura 3.12: Renderização de uma imagem com a câmera plenóptica 2.0. Assumindo que a imagem formada pela lente principal encontra-se a uma distância a das microlentes, então é possível extrair $M = \mu \frac{b}{a}$ pixels sob cada microlente, sendo possível sintetizar uma imagem com resolução M vezes o número de microlentes. Portanto, quanto maior o valor de a , menos pixels serão extraídos, resultando em imagens com menores resoluções, já que o valor de b é fixo.

Também foram desenvolvidos em (Georgiev e Lumsdaine 2010) algoritmos que possibilitam sintetizar imagens totalmente em foco (extraíndo-se a quantidade correta de pixels sob cada microlente), ou simulando uma abertura sintética com diferentes tamanhos, juntamente com a possibilidade de deslocar o plano focal para realizar efeitos de refoco.

3.4.1 Resultados

Os autores mostraram que priorizando a captura de informação espacial sobre a angular, conseguem obter imagens com resoluções melhores e, ainda assim, os efeitos de abertura sintética com mudança do plano focal apresentam uma qualidade satisfatória, onde não é perceptível a presença de *aliasing*. A Figura 3.14 mostra os resultados obtidos com efeitos de abertura sintética e refoco, juntamente com um recorte da imagem bruta capturada pela câmera.



(a) Distribuição dos componentes internos da câmera plenótica 2.0 (fora de escala). É interessante notar que diferentes microlentes capturam informações direcionais diferentes de uma mesma posição, em contraste com a plenótica 1.0, onde a informação direcional de uma mesma posição era capturada por uma única microlente.

(b) Matriz de microlentes capturam porções da imagem real formada pela lente principal no plano de imagem. Cada subimagem é capturada de forma invertida e apresenta paralaxe em relação às imagens das microlentes vizinhas.

Figura 3.13: Representações internas da câmera plenótica 2.0.



Figura 3.14: Resultados obtidos com a Câmera Plenótica 2.0. (a) Abertura sintética com plano focal próximo a câmera. (b) Abertura sintética com plano focal afastado da câmera. (c) Recorte da imagem bruta capturada com a plenótica 2.0, referente a posição indicada pelo retângulo vermelho em (a) (Georgiev e Lumsdaine 2010).

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS DE CÂMERAS PLENÓPTICAS

Neste Capítulo, são apresentados detalhes sobre as simulações computacionais realizadas. Estas simulações visam capturar o campo luminoso de uma cena sintética de forma equivalente à câmera plenóptica em questão. Com isso, é possível utilizar algoritmos de renderização para sintetizar imagens a partir do campo luminoso adquirido nas simulações. Os modelos simulados foram os das câmeras plenópticas 1.0 e 2.0, e a do modelo compacto proposto.

Esses simuladores foram desenvolvidos através de *scripts* para a ferramenta *Unity3D*¹, os parâmetros relevantes para a simulação das câmeras são apresentados na Tabela 5.1.

4.1 Simulador da Câmera Plenóptica 1.0

Para simular a câmera plenóptica 1.0, foi utilizada a propriedade das subaberturas apresentada na Figura 3.3. Essa propriedade mostra que é possível extrair um pixel de mesma posição relativa sob cada uma das microlentes para sintetizar imagens 2D convencionais, com uma resolução de 296×296 pixels. Assim, escolhendo-se outro pixel sob cada microlente será obtida outra imagem com uma perspectiva ligeiramente diferente, como mostrado na Figura 3.7. No total é possível renderizar 14×14 imagens diferentes, que é igual ao número de pixels sob cada microlente. Portanto, cada uma dessas imagens sintetizadas é equivalente a uma fotografia convencional capturada através de uma subabertura da lente principal. Assim, simulação é feita posicionando-se a câmera sintética do simulador em 14×14 posições diferentes no plano da lente principal, com isso adquirindo de forma direta todas as imagens que seriam possíveis sintetizar com o modelo da câmera plenóptica 1.0 (é obtida uma matriz 2D de imagens 2D). Assim, estas 196 imagens contêm a mesma informação da imagem bruta obtida com a câmera plenóptica 1.0 (Figura 3.5), porém, os pixels não estão multiplexados da mesma forma. A Figura 4.1 mostra a forma de multiplexar os pixels destas 196 imagens capturadas, para que a informação seja agrupada da mesma forma que a câmera plenóptica tradicional captura a informação, agrupando os pixels que representam diferentes direções.

Na simulação, foram utilizadas câmeras pinhole para capturar as 196 imagens de diferentes perspectivas sob o plano da lente principal. Essa simplificação foi feita de forma a evitar a complexidade de simular aberturas finitas na computação gráfica. Porém, essa simplificação implica que todas as imagens capturadas estarão totalmente em foco, o que

¹<http://unity3d.com/>

pode não acontecer na realidade, dependendo do tamanho da subabertura da lente principal, das quais as fotografias seriam capturadas. Além disso, quando a câmera é posicionada em diferentes posições é aplicado um cisalhamento na projeção perspectiva da câmera para que o *frustum* fique constante (Figura 4.2). Dessa forma, não ocorre paralaxe nas imagens capturadas, e com isso a resolução direcional obtida é 196 para cada amostra espacial da imagem, exatamente como acontece na câmera plenóptica 1.0.

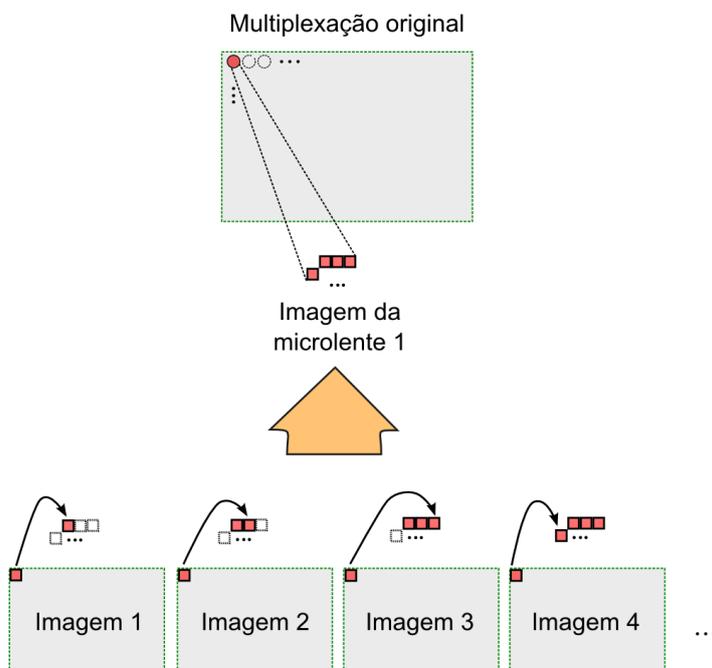


Figura 4.1: Processo para gerar a imagem bruta capturada pela câmera plenóptica 1.0, ou seja, da forma como ela é multiplexada no sensor agrupando-se os pixels de diferentes direções através do conjunto de imagens adquiridas com o simulador.

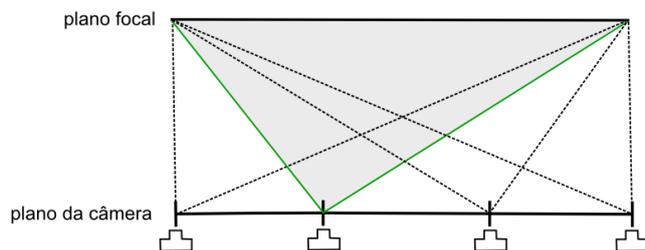


Figura 4.2: Cisalhamento aplicado na projeção perspectiva da câmera em cada uma das fotografias. Dessa forma, pixels de mesma posição em diferentes imagens irão corresponder a diferentes direções dessa mesma posição espacial.

4.2 Simulador da Câmera Plenóptica 2.0

Para simular este modelo, utilizou-se a correspondência entre câmeras plenópticas e matrizes de câmeras. Pois, como foi provado em (Georgiev e Lumsdaine 2011), uma

câmera plenóptica captura radiância de forma equivalente a alguma matriz de câmeras. Utilizando o princípio de planos principais explicados por Gauss, pode-se encontrar a configuração da matriz de câmeras equivalente à câmera plenóptica da qual deseja-se simular.

A partir deste princípio pode-se representar qualquer sistema óptico complexo através de um sistema equivalente composto por transporte até o primeiro plano principal, refração por uma lente apropriada, seguida de um transporte do segundo plano principal até a saída do sistema óptico. Raios entre os planos principais viajam paralelamente ao eixo óptico do sistema.

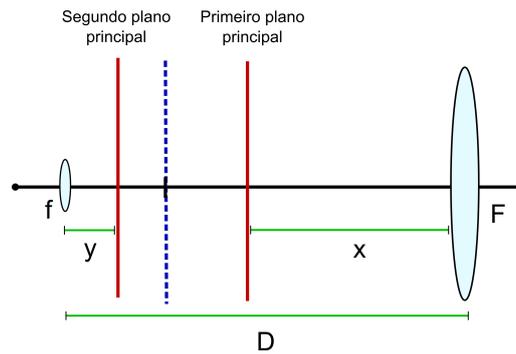


Figura 4.3: Conceitos de planos principais aplicados a plenóptica 2.0. F representa a distância focal da objetiva; f é a distância focal da microlente; D é a distância da microlente à objetiva. Apenas a microlente posicionada sobre o eixo óptico é mostrada.

O sistema óptico da câmera plenóptica é composto por uma refração da lente objetiva (com distância focal F), um deslocamento D da objetiva até a microlente, seguido de uma refração da microlente (com distância focal f). Assim, a matriz resultante será o produto $L_F T_D L_f$, onde T e L são as matrizes de transporte e lente, respectivamente. Assim, essa matriz pode ser escrita de forma equivalente:

$$L_F T_D L_f = T_x L_\alpha T_y \quad (4.1)$$

Onde x , é a distância até o primeiro plano principal, α é a distância focal da lente virtual e y é a distância do segundo plano focal à saída do sistema (Figura 4.3). Para cada microlente deve-se considerar o seu deslocamento em relação ao eixo óptico. Substituindo-se os valores F , D e f , pelos valores apresentados na Tabela 5.1 e resolvendo o sistemas encontra-se os seguinte valores de x , α e y :

$$L_{140} T_{144.5} L_{750} = T_x L_\alpha T_y = \begin{cases} x \approx 5336mm \\ \alpha = 28mm \\ y \approx 28,9mm \end{cases} \quad (4.2)$$

Esses valores indicam que o primeiro plano principal deve ser colocado a distância s atrás do objetiva. Porém, para as microlentes que estão deslocadas em relação ao eixo óptico do sistema, deve-se levar em consideração o deslocamento $\frac{x \cdot d}{D}$, calculado por semelhança de triângulos, onde d é o deslocamento da microlente ao eixo óptico. Além disso, as câmeras deslocadas do eixo óptico devem estar apontadas em direção ao centro da objetiva, para capturar os raios de forma equivalente ao sistema de microlentes (Figura 4.4).

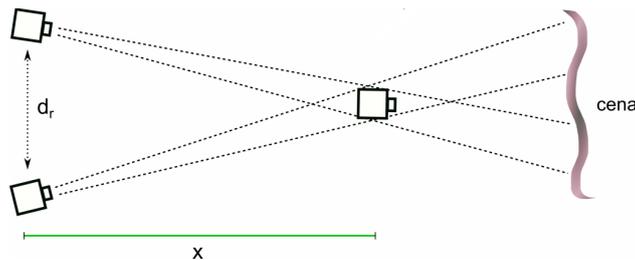


Figura 4.4: Simulação de uma câmera plenóptica através de uma matriz de câmeras. Cada microlente é simulada por uma câmera a uma distância x objetiva da câmera plenóptica (primeiro plano principal), e cada câmera resultante estará espaçada uma distância d_r , das suas vizinhas.

4.3 Simulador do Modelo de Câmera Plenóptica Compacta

O modelo de câmera elaborado neste trabalho possui seis lentes e seis sensores acoplados em seu corpo. A quantidade de lentes foi escolhida de modo a aproveitar o máximo da área de uma câmera convencional, para que ela ainda continuasse sendo compacta. Apesar desse trabalho se restringir a um modelo de com seis lentes, seria possível obter outras composições, desde que não tenha-se menos de três lentes, visto que para realização do algoritmo de interpolação são necessárias pelo menos três amostras.

O fato de utilizar-se sensores separados para capturar cada fotografia (ou fatia 2D do campo luminoso), nos traz uma grande vantagem, pois dessa forma, consegue-se evitar desperdício de área do sensor. Isso não acontece nas versões anteriores, principalmente na plenóptica 1.0, que a cada $14 \times 14 = 196$ pixels capturados por cada microlente, aproximadamente 100 deles podem ser utilizados devido a interferência que ocorre nas bordas com outras microlentes (Georgiev et al. 2006). Assim, essa forma de multiplexação desperdiça em torno de 49% da área do sensor. Além disso, com vários sensores, pode-se obter uma resolução espacial tão alta quanto as câmeras convencionais produzidas atualmente. A desvantagem desse modelo é que será necessário utilizar lentes com aberturas suficientemente pequenas, para obter fotografias totalmente em foco com cada uma das lentes.

Foram implementadas duas simulações desta câmera, cada uma com diferentes espaçamentos entre as lentes, com 1 e 5cm. O segundo irá capturar o campo luminoso de forma mais dispersa direcionalmente — amostras apresentam um paralaxe maior —, porém, essa configuração permite simular uma abertura sintética consideravelmente maior. Por outro lado, o modelo com 1cm de espaçamento seria mais compacto e capturaria um campo luminoso menos disperso direcionalmente, o que aumenta a qualidade das interpolações (Ver Seção 5.3.3).

A implementação virtual deste modelo é bastante trivial, correspondendo há uma pequena matriz 2×3 de câmeras. Utilizou-se está configuração, pois é a quantidade de lentes que consegue-se acoplar no corpo de uma câmera convencional que seja altamente compacta. Outras configurações, quantidades de lentes e sensores podem ser livremente modificados neste modelo, contudo é necessário ter pelo menos três lentes para formar um triângulo com as imagens, permitindo assim gerar a interpolação de novas perspectivas utilizando a técnica de *tri-view morphing*. Um esboço desse modelo é apresentado na Figura 4.5, juntamente com o campo luminoso capturado de uma cena sintética com esta câmera.



Figura 4.5: (a) Esboço da câmera proposta mostrando a disposição das seis lentes no corpo principal. (b) campo luminoso obtido sinteticamente com o modelo de câmera proposto.

4.3.1 *Tri-View Morphing*

Com a técnica de *tri-view morphing* (Xiao e Shah 2004) pode-se criar novas perspectivas fisicamente corretas de qualquer posição dentro do triângulo formado por três imagens quaisquer. Assim, é possível criar um campo luminoso sintético com grande quantidade de amostras direcionais. A técnica de *view morphing* (Seitz e Dyer 1996) garante que as imagens renderizadas sejam fisicamente válidas, isso é realizado através das etapas de *prewarping* e *postwarping*, que retificam as imagens. Entretanto, essas etapas não são necessárias pois se está capturando imagens em um mesmo plano perpendicular ao eixo de visão da câmera, e (Werner et al. 1996) provou matematicamente que sob essas condições, apenas aplicar interpolação linear é suficiente para gerar perspectivas fisicamente corretas.

Para interpolar linearmente as imagens é necessário computar os vetores de deslocamento do fluxo óptico entre as imagens, que podem ser vistos na Figura 4.7. Para isso, utiliza-se o algoritmo proposto em (Liu. 2009), pois os autores demonstraram resultados satisfatórios mesmo utilizando imagens de cenas reais. Além disso, o algoritmo mostrou resultados bastante preciso nos testes com imagens sintéticas, principalmente quando as imagens possuem uma alta redundância. Dessa forma, os vetores de deslocamento são interpolados linearmente, assim os pixels de origem são movidos pelo vetor interpolado para seu destino na nova perspectiva. O fluxo óptico é calculado da imagem atual para as imagens vizinhas, formando *meshs* triangulares (Figura 4.6, semelhante ao que foi realizado em (Georgiev et al. 2006).

Com os fluxos de vetores, ou *warps*, calculados de uma imagem I_1 arbitrária para suas imagens vizinhas I_2 e I_3 , pode-se obter uma nova perspectiva de qualquer posição dentro do triângulo formado pelas imagens I_1 , I_2 e I_3 . Denota-se a função de *warp* W_{ij} como a conversão da imagem I_i para a imagem I_j . Para selecionar a posição da nova perspectiva dentro do triângulo utiliza-se coordenadas baricêntricas, com os coeficientes denotados por λ_1 , λ_2 e λ_3 . A seguir, foi feita uma combinação das funções de *warp* utilizando as coordenadas baricêntricas, e então é feito o *blend* das imagens baseados nas mesmas

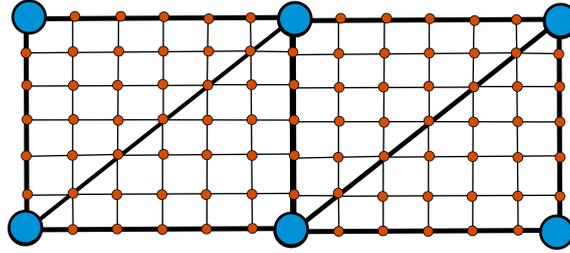


Figura 4.6: Vértices em azul representam a posição em que as fotografias foram capturadas. Os pontos em vermelho representam as posições onde foram geradas as novas imagens interpoladas.

coordenadas baricêntricas (Equação 4.3), apresentado em (Xiao e Shah 2004).

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i I_i \left(\sum_{j=1}^3 \lambda_j W_{ij} \right) \quad (4.3)$$

Com as restrições $\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1$ e $\lambda_i > 0$.

4.3.2 Algoritmos de Renderização

Os algoritmos para renderizar fotografias a partir do campo luminoso da câmera compacta são bastante diretos, semelhantes ao descrito por (Georgiev et al. 2006) para a *Light Field Camera*.

Para renderizar fotografias com diferentes planos focais, primeiramente gera-se quatro triângulos com as posições das imagens vizinhas e interpola-se para obter amostras suficientes a fim de evitar *aliasing* na imagem final. A partir daí é aplicado um deslocamento nas imagens seguidos de uma soma. Deslocamentos maiores implicam em planos focais mais próximos da câmera, já deslocamentos menores implicam em planos focais mais afastados. Isso acontece pois, objetos mais próximos a câmera apresentam um paralaxe maior do que objetos mais distantes. Assim, é obtido uma fotografia capturada a partir de uma abertura sintética.

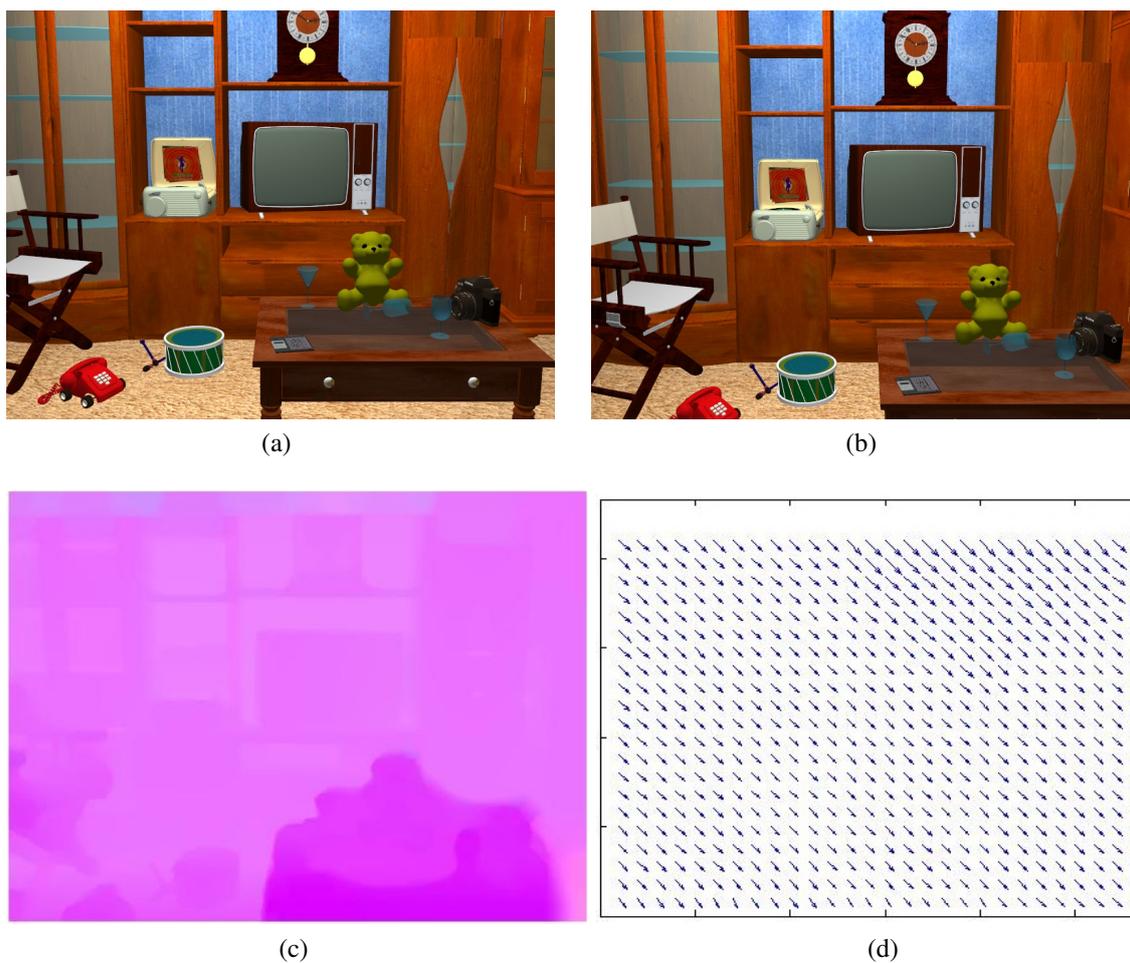


Figura 4.7: Resultado da aplicação do algoritmo de fluxo óptico aplicado nas imagens (a) e (b), a ideia é obter um fluxo dos pixels de (a) para (b). Esse fluxo está representações em (c) por um esquema de cores, onde tons mais escuros indicam um deslocamento maior do pixel, e em (d) é mostrado um recorte desse fluxo em forma de vetores, onde cada vetor representa o deslocamento de um pixel.

5 RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados das simulações computacionais das três câmeras plenópticas implementadas. A ideia é comparar as fotografias sintetizadas com os três modelos, e com isso, verificar se é possível obter com nossa câmera, mesmo com uma amostragem baixa, resultados com qualidade competitiva a das câmeras plenópticas apresentadas na literatura. Além disso, também foi verificado a precisão do algoritmo de interpolação.

Todos os modelos utilizados para compor o ambiente sintético utilizado na realização dos testes foram adquiridos em (DE ESPONA INFOGRAFICA).

A tabela 5.1 mostra as configurações relevantes das câmeras plenópticas empregadas nos testes.

Tabela 5.1: Configurações relevantes das três câmeras plenópticas simuladas computacionalmente. Um '—' indica que a configuração não se aplica, ou não é relevante para o modelo em questão.

Configuração	Plenóptica 1.0	Plenóptica 2.0	Câmera Proposta
Distância Focal Objetiva	50mm	140mm	—
Distância Focal Microlente	—	750 μ m	—
Qtd. Lentes/Microlentes	296 \times 296	72 \times 96	2 \times 3
Distância Microlentes/Objetiva	—	144.5mm	—
Espaçamento Lentes/Microlentes	—	250 μ m	1 e 5cm

5.1 Câmera Plenóptica 1.0

Cada microlente forma uma imagem de 14 \times 14 pixels no sensor. É importante ressaltar que as aberturas das microlentes foram aproximadas através de *pinholes*. Isso implica que as imagens são capturadas com profundidade de campo infinita, o que não acontece na realidade. Assim, no caso de uma profundidade muito grande na cena, ocorreria borramento nas informações capturadas pelas microlentes, caso isso aconteça seria perdido informações direcionais capturadas, conseqüentemente, não seria mais possível renderizar imagens com diferentes planos focais. Outra limitação da utilização de *pinholes* seria o fato de eles não apresentarem distorções radiais, o que ocorre quando se utiliza lentes. Essa aproximação, também implica que não há interferência dos pixels das bordas das microlentes vizinhas, como ocorre na plenóptica original. A Figura 5.1a mostra a imagem de radiância adquirida com o modelo computacional utilizando as configurações da

Tabela 5.1. A partir desses dados, pode-se sintetizar imagens com diferentes perspectivas (Figura 5.2), ou integrando-se os pixels sob cada microlente *i.e.* que possuem diferentes direções, renderiza-se uma fotografia convencional tirada com a abertura completa da lente principal (Figura 5.3). Assim como no modelo real, é possível sintetizar imagens com uma resolução máxima de 296×296 pixels.

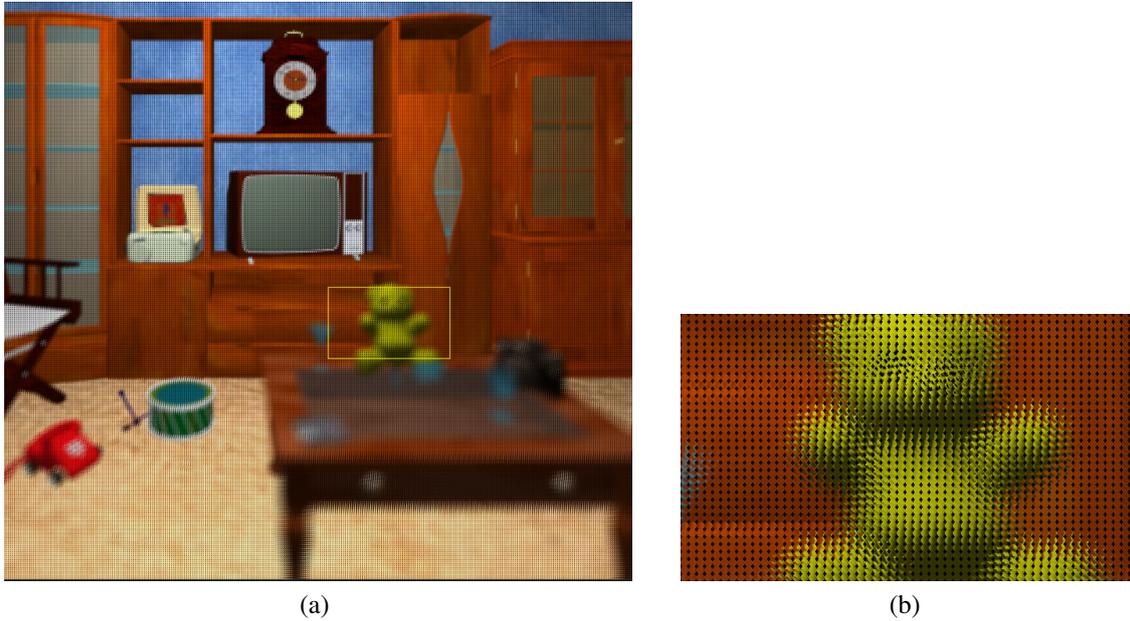


Figura 5.1: (a) Imagem da radiância capturada com a simulação computacional da câmera plenótica 1.0. (b) Recorte da imagem de radiância mostrada em (a).



Figura 5.2: Imagens com diferentes perspectivas sintetizadas com a câmera plenótica 1.0.



Figura 5.3: Imagem sintetizada através da radiância obtida com a câmera plenótica 1.0, formada integrando-se os pixels sob cada microlente. Que é equivalente a fotografia convencional com a abertura completa da lente.

5.2 Câmera Plenótica 2.0

As 72×96 microlentes deste modelo amostram pequenas porções da cena que apresentam paralaxe. A imagem de radiância capturada com este modelo está representada na Figura 5.4, onde cada microlente captura uma imagem com resolução fixa 74×74 pixels. Com esse modelo foi possível sintetizar imagens com resoluções entre 384×288 , quando a cena está no infinito óptico da câmera, assim os objetos apresentam um paralaxe de quatro pixels; até 768×576 , apresentando um paralaxe de oito pixels, com a câmera há uma distância de aproximadamente três metros da cena (as imagens mostradas aqui foram redimensionadas para melhor visualização).

As imagens renderizadas utilizando o efeito de abertura sintética completa estão apresentadas na Figura 5.5.

5.3 Câmera Plenótica Compacta

5.3.1 Utilizando Espaçamento Amplo entre as Lentes

A versão com 5cm de espaçamento entre as lentes amostra uma parte do campo luminoso que apresenta um grande paralaxe entre as imagens amostradas. Consequentemente, a informação direcional das imagens capturadas torna-se mais baixa. Isso resulta em artefatos nas imagens sintetizadas, não só pelo fato da captura de pouca informação direcional, mas também é inserido artefatos na aplicação da técnica de *view morphing*, pois, o algoritmo para encontrar o fluxo de vetores não é exato e quando as imagens são próximas (apresentam alto paralaxe), isso proporciona resultados mais precisos. O campo luminoso sintético adquirido com esta versão é apresentado na Figura 4.5b. Utilizando

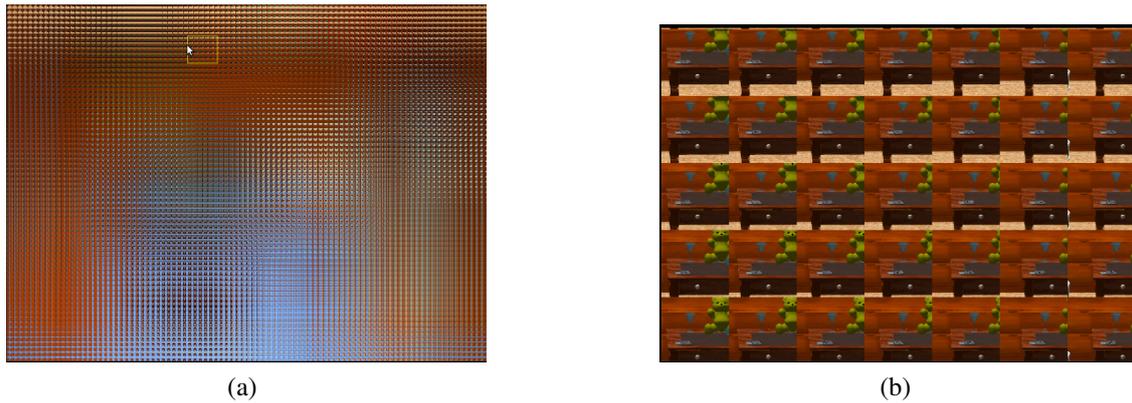
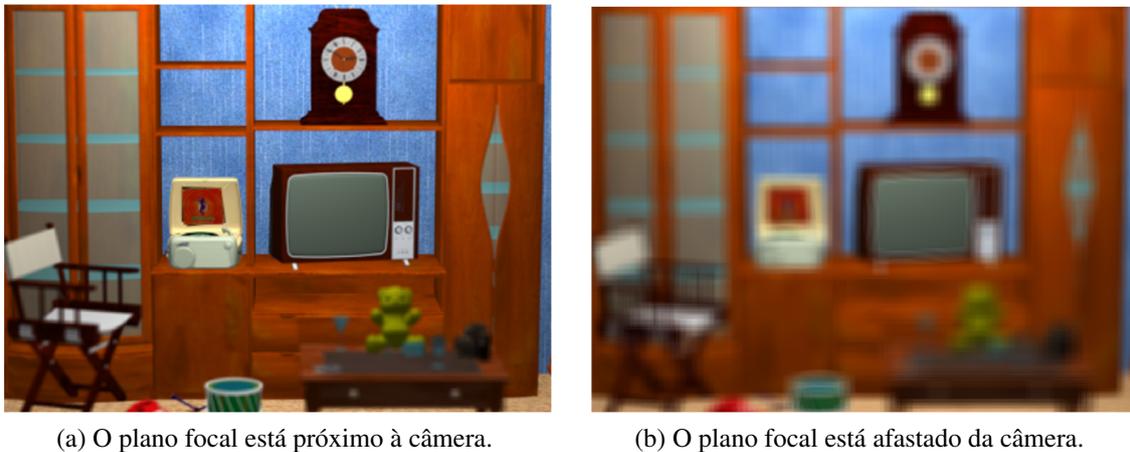


Figura 5.4: (a) Imagem da radiância capturada com a simulação computacional da câmera plenóptica 2.0. (b) Recorte da imagem de radiância mostrada em (a).



(a) O plano focal está próximo à câmera.

(b) O plano focal está afastado da câmera.

Figura 5.5: Imagem com abertura sintética obtida com o modelo computacional da câmera plenóptica 2.0. Mudando-se a distância do plano focal.

somente essas seis amostras para simular uma abertura sintética completa nota-se a presença de artefatos devido a baixa amostragem de informação angular (Figura 5.6). Entretanto, após gerar 114 perspectivas diferentes, os artefatos diminuíram de forma considerável 5.7. Contudo, perdeu-se qualidade devido a artefatos inseridos durante a interpolação (Figura 5.10).

5.3.2 Utilizando Espaçamento Curto entre as Lentes

A versão com espaçamento de 1cm entre as lentes apresentou resultados de abertura sintética muito bons, visto que a técnica de *view morphing* mostrou alta precisão na interpolação das amostras, como é possível verificar na Figura 5.9. Nesse modelo a abertura sintética simulada é menor devido a pequena distância das lentes, consequentemente é obtido um borrramento menor na imagem (Figura 5.9).



(a) Plano focal afastado da câmera.

(b) Plano focal próximo à câmera.

Figura 5.6: Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento amplo entre as lentes. Utilizando somente as seis imagens capturadas.



(a) Plano focal afastado da câmera.

(b) Plano focal próximo ao urso na cena.

Figura 5.7: Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento amplo entre as lentes. Utilizando um campo luminoso denso direcionalmente contendo 120 amostras. Apenas objetos muito próximos ao plano focal aparecem em foco devido a grande abertura simulada.

5.3.3 *Tri-View Morphing*

Nas imagens com alta redundância, os resultados da interpolação tiveram uma boa precisão, mantendo bem definidas as bordas dos objetos (Figura 5.11). Já a versão com menor redundância, algumas imagens interpoladas apresentaram artefatos nas bordas de alguns objetos, perdendo informações de algumas arestas (Figura 5.10).

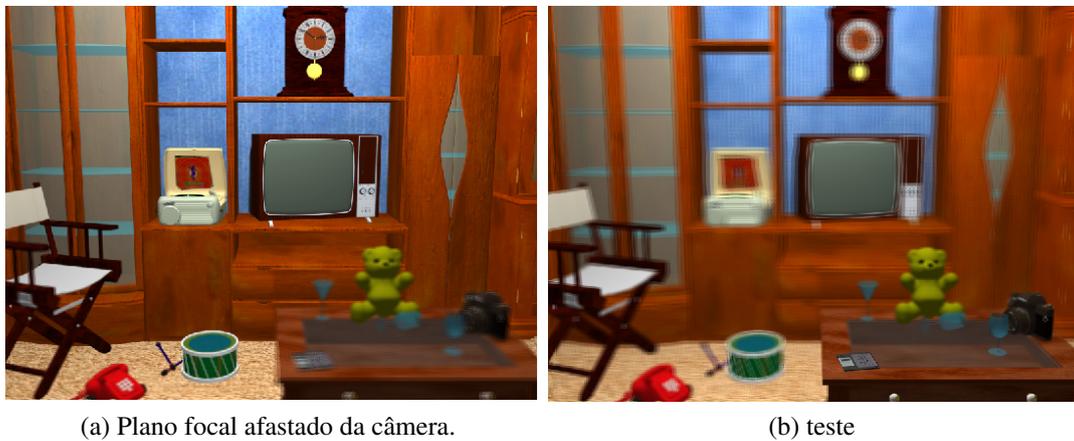


Figura 5.8: Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento pequeno entre as lentes. Utilizando somente as seis imagens capturadas.

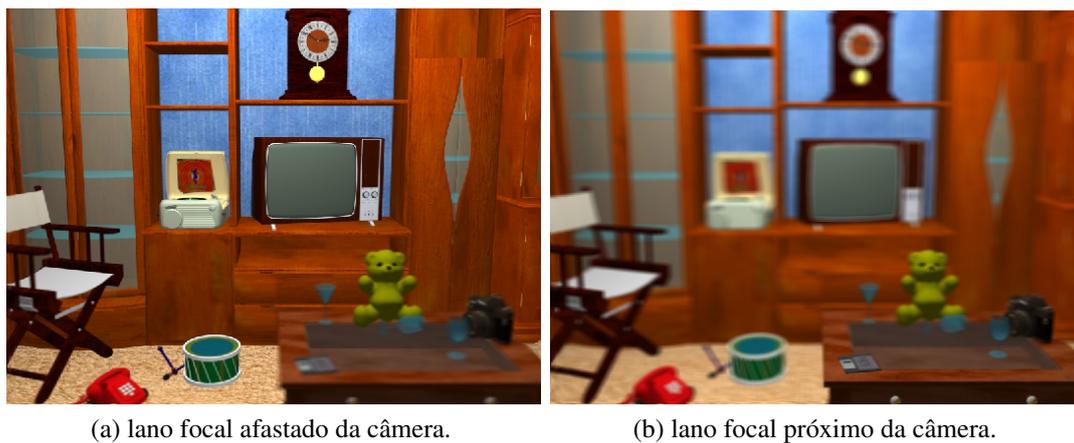


Figura 5.9: Simulação de abertura sintética com a câmera compacta com espaçamento pequeno entre as lentes. Utilizando um campo luminoso denso direcionalmente contendo 120 amostras.



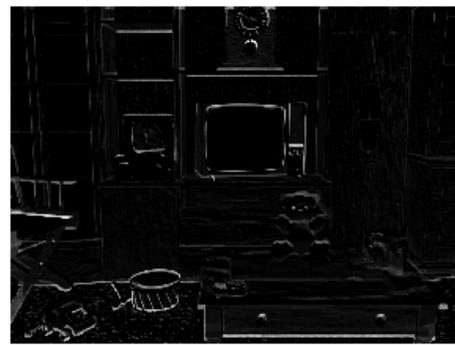
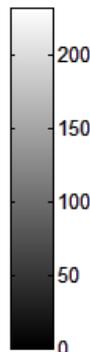
(a) Imagem original com mesma perspectiva da imagem (b).



(b) Imagem sintetizada utilizando a técnica de *view morphing*.



(c) Diferença absoluta entre as imagens (a) e (b)



(d) Erro mínimo quadrático entre as imagens (a) e (b). Supondo que suas intensidades podem ser escaladas linearmente

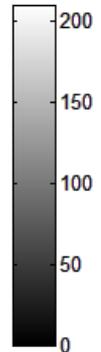


Figura 5.10: Análise da técnica de *view morphing* empregada no modelo de câmera com um longo espaço entre as lentes. É possível notar através de (c) e (d) que há artefatos na imagem interpolada, principalmente nas arestas das imagens. Isso ocorre devido as imagens não terem correspondência suficiente para que o algoritmo de fluxo óptico tenha uma alta precisão.



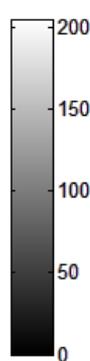
(a) Imagem original com mesma perspectiva da imagem (b).



(b) Imagem sintetizada utilizando a técnica de *view morphing*.



(c) Diferença absoluta entre as imagens (a) e (b)



(d) Erro mínimo quadrático entre as imagens (a) e (b). Supondo que suas intensidades podem ser escaladas linearmente.

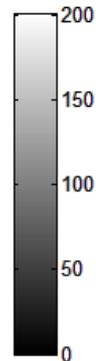


Figura 5.11: Análise da técnica de *view morphing* empregada no modelo de câmera com um curto espaço entre as lentes. Como a correspondência das imagens interpoladas nessas versão da câmera é alto, o algoritmo de fluxo óptico gera um mapa de vetores com boa precisão. Pode-se perceber em (b) e (c) que há poucos artefatos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi estudada a forma como as câmeras plenópticas capturam o campo luminoso da cena no seu interior, e esses campos luminosos foram processados para se obter fotografias (fatias 2D do campo luminoso), com efeitos de abertura sintética e refoco. Para isso, foram simulados computacionalmente três modelos de câmeras plenópticas, dois deles muito conhecidos na literatura, e outro proposto neste trabalho.

Foram mostrados os resultados das fotografias renderizadas com esse modelo para diferentes espaçamentos entre suas lentes, de 1 e 5cm, com e sem a utilização de técnicas de interpolação por *view morphing* para aumentar as amostras direcionais. Obteve-se resultados muito bons para câmera com espaçamento de 1cm e a utilização de interpolação, visto que, além de sintetizar uma imagem com alta resolução, ainda é possível obter os efeitos de abertura sintética e refoco.

O principal ganho desse trabalho não está na contribuição de um novo modelo de câmera plenóptica. Mas sim, na busca de ideias diferentes que permitam criar oportunidades de novos estudos relacionados as câmeras plenópticas, já que este é um assunto que começou a ser explorado recentemente, e com certeza ainda possui muitos frutos para serem colhidos.

Além disso, as implementações dos modelos computacionais das câmeras plenópticas e os algoritmos de renderização permitiram adquirir um amplo conhecimento sobre as estruturas das câmeras plenópticas. Contudo, ainda há vários desafios que são simplificados na simulação computacional, e devem ser levados em consideração durante a construção de um protótipo real. Como exemplo, no Apêndice A, é mostrado o suporte móvel construído que nos permite deslocar a câmera vertical e horizontalmente, funcionando como uma matriz de câmeras. Porém, devido a a falta de precisão de um protótipo real, seria necessário realizar etapas de calibração para obter os parâmetros extrínsecos da câmeras, o que se tornou uma tarefa bastante complexa, a qual fugia do escopo principal do trabalho.

Para realização de trabalhos futuros, seria interessante desenvolver um protótipo real de câmera plenóptica, com a finalidade de estudar mais a fundo as possibilidades e limitações deste e outros modelos. Além disso, seria relevante testar outras possibilidades, como trabalhar com sensores que apresentem diferentes resoluções.

Enfim, apesar do que foi realizado neste trabalho, ainda há diversas oportunidades que devem ser exploradas. Com certeza, elas contribuirão com o desenvolvimento de novos avanços importantes que permitam desenvolver novos modelos que superam as limitações atuais das câmeras plenópticas, como a baixa resolução espacial das imagens sintetizadas.

REFERÊNCIAS

- [Adelson e Bergen 1991]ADELSON, E. H.; BERGEN, J. R. The plenoptic function and the elements of early vision. In: *Computational Models of Visual Processing*. [S.l.]: MIT Press, 1991. p. 3–20.
- [Adelson e Wang 1992]ADELSON, E. H.; WANG, J. Y. A. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, v. 14, p. 99–106, February 1992. ISSN 0162-8828. Acesso em setembro de 2011. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=132013.132014>>.
- [Claudet 1844]CLAUDET, A. *William Henry Fox Talbot*. [S.l.]: Fox Talbot Museum, 1844.
- [Company 1888]COMPANY, E. D. P. . F. *The Kodak camera*. Eastman Dry Plate and Film Co., 1888. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=eCP6HAAACAAJ>>.
- [DE ESPONA INFOGRAFICA]DE ESPONA INFOGRAFICA. Disponível em: <<http://www.deespona.com>>.
- [Georgiev e Intwala 2005]GEORGIEV, T.; INTWALA, C. *Light Field Camera Design for Integral View Photography*. 2005.
- [Georgiev e Lumsdaine 2010]GEORGIEV, T.; LUMSDAINE, A. focused plenoptic camera and rendering. In: *J. Electron.* [S.l.]: Imaging 19, 2010. p. 1–8.
- [Georgiev e Lumsdaine 2011]GEORGIEV, T.; LUMSDAINE, A. Plenoptic principal planes. In: *Computational Optical Sensing and Imaging*. Optical Society of America, 2011. p. JTuD3. Acesso em setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=COSI-2011-JTuD3>>.
- [Georgiev et al. 2006]GEORGIEV, T. et al. Spatio-angular resolution tradeoff in integral photography. In: *Eurographics Symposium on Rendering*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 263–272.
- [Gernsheim 1982]GERNSHEIM, H. *The origins of photography*. 3rd. ed. London, England: Thames and Hudson, 1982. (History of photography, v. 1982,pt. 2). Acesso em setembro de 2011. Disponível em: <<http://books.google.co.in/books?id=GJNTAAAAMAAJ>>.

- [Gortler et al. 1996]GORTLER, S. J. et al. The lumigraph. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1996. (SIGGRAPH '96), p. 43–54. ISBN 0-89791-746-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/237170.237200>>.
- [Ives 1928]IVES, H. E. A camera for making parallax panoramagrams. *J. Opt. Soc. Am.*, OSA, v. 17, n. 6, p. 435–437, Nov 1928. Acesso em setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-17-6-435>>.
- [Jahne e Geissler 1999]JAHNE, B.; GEISSLER, P. *Handbook of Computer Vision and Applications with Cdrom*. 1st. ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. ISBN 0123797705.
- [Levoy e Hanrahan 1996]LEVOY, M.; HANRAHAN, P. Light field rendering. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1996. (SIGGRAPH '96), p. 31–42. ISBN 0-89791-746-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/237170.237199>>.
- [Lippmann 1908]LIPPMANN, G. *Épreuves réversibles. photographies intégrales. Académie des sciences*, 1908.
- [Liu. 2009]LIU., C. *Beyond Pixels: Exploring New Representations and Applications for Motion Analysis*. Tese (Doctoral thesis) — Massachusetts Institute of Technology, May 2009.
- [Louis-Jacques-Mande Daguerre 2000]LOUIS-JACQUES-MANDE Daguerre. The Metropolitan Museum of Art, 2000. Disponível em: <<http://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/2005.100.611>>.
- [Lumsdaine e Georgiev 2009]LUMSDAINE, A.; GEORGIEV, T. The focused plenoptic camera. In: *In Proc. IEEE ICCP*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–8.
- [Mouroulis e Macdonald 1997]MOUROULIS, P.; MACDONALD, J. *Geometrical optics and optical design*. Oxford University Press, 1997. (Oxford series in optical and imaging sciences). ISBN 9780195089318. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=Qx5vsmVyGK0C>>.
- [Ng 2005]NG, R. Fourier slice photography. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 24, p. 735–744, July 2005. ISSN 0730-0301. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1073204.1073256>>.
- [Ng 2006]NG, R. *Digital Light Field Photography*. Tese (PhD thesis) — Stanford University, CA, USA, July 2006. Disponível em: <<http://www.lytro.com/renng-thesis.pdf>>.
- [Ng et al. 2005]NG, R. et al. *Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera*. [S.l.], abr. 2005. Disponível em: <<http://graphics.stanford.edu/papers/lfcamera/>>.
- [Photographic Society of London]PHOTOGRAPHIC Society of London. [S.l.]: Victoria and Albert Museum.

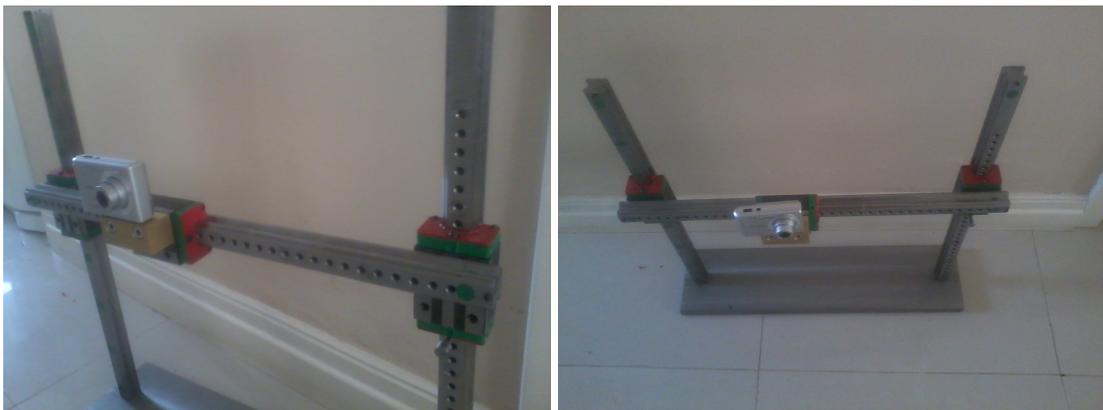
- [Rosenblum 1997]ROSENBLUM, N. *A world history of photography*. Abbeville Press, 1997. ISBN 9780789203298. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=OI7rAAAAMAAJ>>.
- [Seitz e Dyer 1996]SEITZ, S. M.; DYER, C. R. View morphing. In: . [S.l.: s.n.], 1996. p. 21–30.
- [Vaish 2007]VAISH, V. *Synthetic aperture imaging using dense camera arrays*. Tese (Doutorado), Stanford, CA, USA, 2007. AAI3253550.
- [Werner et al. 1996]WERNER, T. et al. *Rendering Real-World Objects Using View Interpolation*. 1996.
- [Wilburn et al.]WILBURN, B. et al. The light field video camera. In: *Media Processors 2002*. San Jose, CA, USA: [s.n.].
- [Wood et al. 2000]WOOD, D. N. et al. Surface light fields for 3d photography. In: *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. (SIGGRAPH '00), p. 287–296. ISBN 1-58113-208-5. Acesso em setembro de 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/344779.344925>>.
- [Xiao e Shah 2004]XIAO, J.; SHAH, M. Tri-view morphing. *Comput. Vis. Image Underst.*, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 96, p. 345–366, December 2004. ISSN 1077-3142. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2004.03.014>>.

APÊNDICE A SUPORTE MÓVEL PARA CÂMERA

A Figura A.1, mostra o suporte móvel construído. Contudo, a falta de precisão do suporte não permitia saber a posição exata da câmera em cada disparo. Portanto, não foi possível utilizá-lo na captura dos campos luminosos neste trabalho.



(a)



(b)

(c)

Figura A.1: As imagens (a), (b) e (c) mostram o suporte móvel desenvolvido. Ele permite deslocar a câmera horizontal e verticalmente. As fendas são espaçadas igualmente de 1 cm , e a câmera é presa ao suporte por um parafuso.