

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO

**RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES
FOTOMÉTRICAS DE CENAS COM ILUMINAÇÃO
GLOBAL A PARTIR DE UMA ÚNICA IMAGEM**

Belo Horizonte
11 de julho de 2008

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO
ORIENTADOR: RODRIGO LIMA CARCERONI

**RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES
FOTOMÉTRICAS DE CENAS COM ILUMINAÇÃO
GLOBAL A PARTIR DE UMA ÚNICA IMAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Belo Horizonte
11 de julho de 2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Recuperação de Propriedades Fotométricas de Cenas com Iluminação Global a Partir de uma única Imagem

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. RODRIGO LIMA CARCERONI - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. JOSÉ PINHEIRO DE QUEIROZ NETO - Co-orientador
Centro Federal de Educação Tec. do Amazonas - CEFET

PROF. ALEXEI MANSO CORREA MACHADO
Departamento de Ciência da Computação - PUC - MG

PROF. MÁRIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

Belo Horizonte, 11 de julho de 2008.

Dedico este trabalho aos meus pais, Avelino e Maria, por terem me mostrado que o conhecimento é o bem mais precioso que eu poderia conquistar.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Rodrigo Lima Carceroni e José Pinheiro de Queiroz Neto, por terem dividido comigo o imenso conhecimento que possuem e continuado me orientando mesmo nas situações mais adversas.

Aos Profs. Mário Campos e Alexei Machado, pela avaliação e valiosas contribuições dadas ao trabalho.

Aos colegas do Verlab, em especial ao Vilar Neto, Marcelo Borghetti, Pedro Shirota, Flávio Cardeal, José Pio e Wagner Barros pelas inúmeras ajudas prestadas durante esses anos de trabalho juntos.

Aos meus pais Avelino André Rodrigues e Maria das Graças Coelho Rodrigues, pelo amor e apoio incondicionais. Aos meus irmãos Mara Lúcia Rodrigues Coelho e André Leandro Rodrigues Coelho pela compreensão e carinho durante os tempos mais difíceis.

Ao meu namorado Anísio Mendes Lacerda, pelo amor, apoio e por ter sido meu grande companheiro durante a graduação e pós.

Aos meus amigos, em especial, ao Mário Sérgio Ferreira Alvim Jr., por ter sido meu parceiro de trabalhos durante os anos de faculdade, e por ter me auxiliado na montagem dos experimentos realizados neste trabalho.

A todos que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho.
Muito obrigada!

Resumo

Um grande desafio na visão computacional é de obter-se os parâmetros fotométricos de superfícies que apresentem variação espacial das propriedades fotométricas (textura) partindo-se de imagens. Nesse caso, em geral, os algoritmos precisam estimar os parâmetros fotométricos em cada ponto da cena, demandando um processo caro de otimização e, na maioria das vezes, várias imagens. Além disso, a maioria dos métodos considera que a luz interage na cena de forma simplificada (iluminação local) o que não é capaz de explicar efeitos de reflexão (superfícies espelhadas) ou refração (transparências) de forma apropriada. Nesta dissertação é apresentado um método para se obter as propriedades fotométricas de superfícies que apresentem textura, a partir de uma única imagem, considerando-se que a luz interage na cena refletindo e refratando através dos objetos, o que é conhecido como iluminação global. Mais especificamente, o método assume que as seguintes informações da cena são conhecidas *a priori*: a geometria 3D; as informações de posição e intensidade das fontes de luz; uma única imagem; um conjunto fixo e único de parâmetros fotométricos não-Lambertianos para cada superfície, levando em conta objetos altamente reflectivos e/ou transparentes; os índices de refração dos objetos. Com essas informações é gerado um sistema de equações lineares cuja solução descreve a variação das propriedades fotométricas sobre as superfícies vistas diretamente e indiretamente pela imagem de entrada. Resultados experimentais sobre uma cena real demonstram a robustez, eficiência, qualidade e aplicabilidade do método.

Abstract

Obtaining the photometric properties of a scene considering it contains textured surfaces is a challenge on Computer Vision. In general, the existing algorithms will estimate the surface's photometric parameters in every scene's 3D point, which is a very expensive optimization process that also demands as input several images of the scene. Moreover, many of those methods does not consider reflection and transparency among the scene's objects. In this thesis, we present a methodology to obtain the photometric properties of textured surfaces from a single image of the scene, considering that light can reflect and refract among the scene's objects. The method assumes that the following information about the scene is known *a priori*: the 3D geometry; information on the position and intensity of the light sources; a single image; the refraction indices of the objects; a fixed and unique set of non-Lambertian photometric parameters for each surface. The solution of a linear equation system will describe the variation of the photometric properties of the surfaces observed directly or indirectly by the input image. Experimental results are shown using a real scene, and it demonstrates that the method is efficient and precise, as we can see by the resulting images its corresponding processing time.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Conceitos Básicos	4
1.2.1	Modelagem e Renderização Baseada em Imagens	4
1.2.2	Conceitos de Reflectância	4
1.2.3	Modelos de Iluminação Local e Global	5
1.3	Trabalhos Relacionados	7
1.4	Objetivos	9
1.5	Definição do Problema	10
1.6	Abordagem	10
1.7	Contribuições	10
1.8	Organização da Dissertação	11
2	Metodologia	12
2.1	Modelo de Formação da Imagem	13
2.2	Obtenção dos Parâmetros Não-Lambertianos	16
2.2.1	Fatoração Fotométrica	17
2.2.2	Otimização Fatorizada Baseada em Árvores (F-TBO)	19
2.3	Recuperação de Textura	19
2.4	Análise de Complexidade do Método	22
2.5	Limitações	22
3	Resultados	23
3.1	Calibração das Câmeras e das Fontes de Luz	25
3.2	Modelagem 3D da Cena	27

3.3	Obtenção dos Parâmetros Não-Lambertianos	27
3.4	Computação da Textura Lambertiana	28
3.5	Limitações e Perspectivas Futuras	29
4	Conclusão e Trabalhos Futuros	38
	Referências Bibliográficas	40

Lista de Figuras

1.1	Método básico de renderização de uma imagem.	2
1.2	Renderização com iluminação local e iluminação global.	3
1.3	Exemplo de cena com textura.	9
2.1	Idéia geral do método proposto.	13
2.2	Exemplo de ACIP	14
3.1	Imagens capturadas para obter a modelagem 3D da cena.	24
3.2	Alvo de calibração geométrica.	25
3.3	Esquema de calibração das fontes de luz.	26
3.4	Comparação visual da computação dos parâmetros não-Lambertianos.	31
3.5	Estatísticas para a computação dos parâmetros fotométricos não-Lambertianos.	32
3.6	Comparação visual dos resultados para a computação da textura Lambertiana.	33
3.7	Estatísticas de tempo médio de CPU por banda para a computação da textura Lambertiana.	34
3.8	Estatísticas de erro RMS $\hat{\epsilon}$ por banda para a computação da textura Lambertiana.	35
3.9	Imagens sintéticas da cena real sob novos pontos de vista.	36
3.10	Imagens sintéticas da cena real sob novas condições de iluminação.	37

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO

**RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES
FOTOMÉTRICAS DE CENAS COM ILUMINAÇÃO
GLOBAL A PARTIR DE UMA ÚNICA IMAGEM**

Belo Horizonte

11 de julho de 2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

**Recuperação de propriedades fotométricas de cenas com
iluminação global a partir de uma única imagem**

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

**Prof. Dr. RODRIGO LIMA CARCERONI – Orientador
Departamento de Ciência da Computação – UFMG**

**Prof. Dr. JOSÉ PINHEIRO DE QUEIROZ NETO – Co-orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Manaus – Cefet-AM**

**Prof. Dr. MÁRIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS
Departamento de Ciência da Computação – UFMG**

**Prof. Dr. ALEXEI MANSO CORRÊA MACHADO
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/MG**

Belo Horizonte, 11 de julho de 2008

LARA CRISTINA RODRIGUES COELHO
ORIENTADOR: RODRIGO LIMA CARCERONI

RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES
FOTOMÉTRICAS DE CENAS COM ILUMINAÇÃO
GLOBAL A PARTIR DE UMA ÚNICA IMAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Belo Horizonte
11 de julho de 2008

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

No início do século passado muitos desenhos animados foram criados com base no mundo real. Personagens como Branca de Neve e Cinderela já encantaram muitas pessoas e continuam famosos pelo mundo. A popularidade dessas criaturas encorajou o desenvolvimento de técnicas mais apuradas para a criação de ambientes sintéticos. Atualmente, o grande sucesso de filmes como "Beowulf", "O Senhor dos Anéis" e "Shrek" mostram como as pessoas ainda se divertem com personagens e mundos sintéticos. O avanço das técnicas de computação gráfica e visão computacional juntamente com a disponibilidade de computadores de alto desempenho vêm contribuindo para que o mundo real seja cada vez mais perfeitamente recriado.

Várias técnicas computacionais já foram propostas para a reprodução sintética de ambientes reais. A computação gráfica representa o mundo real de forma com técnicas de renderização baseados em modelos matemáticos complexos. Já visão computacional visa extrair informações do mundo real a partir de imagens. Em grande parte dos casos, os métodos propostos em visão computacional procuram recriar sinteticamente uma cena real utilizando como base os modelos de renderização propostos na computação gráfica. Modelos de renderização partem da representação de três informações de uma cena (Figura 1.1):

Geometria: especifica a localização e forma tridimensionais de cada objeto da cena.



Figura 1.1: Método básico de renderização de uma imagem. Tem como entrada as informações de geometria, iluminação e reflectometria (parâmetros fotométricos) da cena.

Iluminação: mostra a localização tridimensional e a intensidade (potência) de cada fonte de luz presente na cena.

Reflectometria: provê os parâmetros fotométricos da função que descreve a reflectância de cada ponto das superfícies da cena (BRDF - *Bidirectional Reflectance Description Function*).

É importante considerar ainda a maneira como a iluminação interage com os objetos, que pode ser primária ou secundária. Iluminação primária contabiliza somente a luz proveniente diretamente das fontes de luz presentes na cena; a iluminação secundária leva em conta a luz vinda como resultado da interação da luz primária em outros objetos da cena, também conhecida como iluminação indireta. Essa interação pode ser via reflexão, conhecida como inter-reflexão, ou transmissão, conhecida como efeito de transparência.

Devido às diferentes maneiras de interação da luz com os objetos, a renderização pode ser feita de duas formas distintas. A primeira utiliza um modelo de iluminação local, onde a cor observada de um ponto na cena depende apenas das propriedades materiais do objeto, da iluminação primária e do ponto de vista. A segunda forma utiliza um modelo de iluminação global, onde a cor observada de um ponto na cena depende das propriedades materiais do objeto, da iluminação primária e da iluminação secundária incidentes, além do ponto de vista, considerando os efeitos de inter-reflexividade e transparência resultante da interação da luz com outros objetos da cena. A Figura 1.2 apresenta um exemplo de ambos os casos.

Vários métodos foram propostos nos últimos anos para recuperar a forma tridimensional (3D) dos objetos, seus parâmetros de reflectância (BRDF) e informações sobre

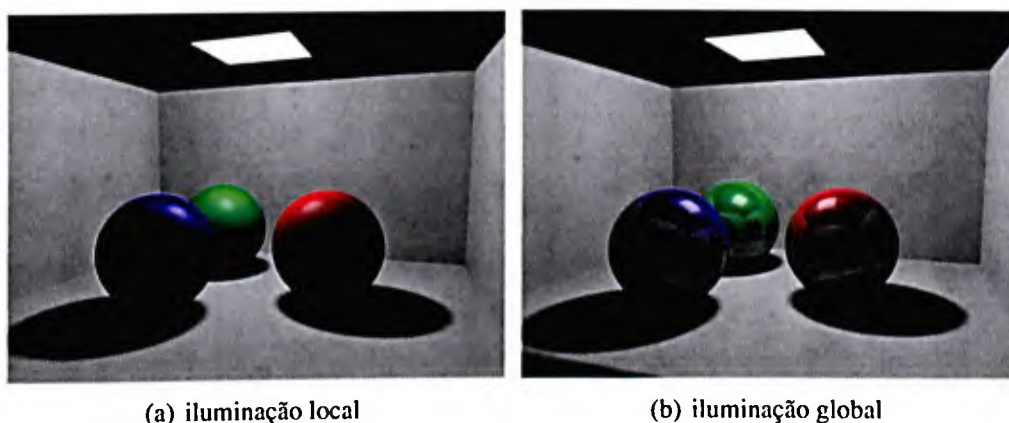


Figura 1.2: Imagens sintetizadas de uma mesma cena com objetos de características difusas, reflexivas e transmissivas, respectivamente. Em (a) a imagem renderizada utilizando um modelo de iluminação local. Observe que os objetos não apresentam inter-reflexão e transmissão, embora dois deles tenham essas características. Em (b) a mesma cena renderizada com um modelo de iluminação global. Neste caso é possível perceber as características de inter-reflexão e transmissão entre os objetos da cena.

as fontes de iluminação. Alguns desses métodos utilizam imagens da cena na tentativa de extrair essas informações, fazendo parte de uma área chamada Modelagem e Renderização Baseada em Imagens (*Imaged-Based Modeling and Rendering - IBMR*) que, basicamente, consiste em obter informações do modelo de uma cena utilizando uma ou mais imagens. De acordo com Marschner e Greenberg (1998), os principais problemas de modelagem e renderização baseada em imagens são: a geometria inversa, onde se busca obter o modelo 3D de cada objeto da cena; a reflectometria inversa, que consiste em obter os parâmetros do modelo de reflectância das superfícies dos objetos da cena; e a iluminação inversa, cujo problema é extrair informações sobre as fontes de luz que iluminam a cena.

Considerando a Figura 1.1, o caso ideal seria aquele em que as imagens são fornecidas como entrada e as informações de iluminação, geometria e reflectância são obtidas como resultado. Entretanto, dentre as principais dificuldades deste método está o fato de que a reflectância e a forma, juntamente com a iluminação, são informações que estão integradas aos dados da imagem. Assim, uma vez conhecidos os dados referentes à forma e à iluminação, é possível obter informações da reflectância e, conseqüentemente, uma vez conhecido algo a respeito da reflectância e iluminação, é possível obter

informações a respeito da forma.

1.2 Conceitos Básicos

Nesta Seção são apresentados conceitos básicos considerados importantes à compreensão desta dissertação, baseado no texto de Queiroz-Neto (2005).

1.2.1 Modelagem e Renderização Baseada em Imagens

Em computação gráfica e visão computacional, métodos de Modelagem e Renderização Baseada em Imagens (MRBI) partem de um conjunto de imagens 2D de uma cena para gerar um modelo 3D e então renderizar novos pontos de vista dessa cena. Na abordagem tradicional de computação gráfica, é criado um modelo 3D e feita a sua reprojeção em uma imagem 2D. Visão computacional, porém, foca em detectar, agrupar e extrair características presentes em uma dada imagem e então tentar interpretar essas características no espaço 3D. MRBI permit o uso de múltiplas imagens para gerar diretamente novas imagens, excluindo a modelagem 3D manual feita pela computação gráfica. Ao invés de considerar apenas o modelo físico de um sólido, métodos de MRBI geralmente focam na modelagem de iluminação.

1.2.2 Conceitos de Reflectância

Várias técnicas de visão computacional e computação gráfica se baseiam na maneira como a luz incide e reflete em um dado material. Pode-se definir a irradiância como a quantidade de luz incidente em uma dada área de uma superfície em um determinado intervalo de tempo. A irradiância após refletir na superfície se torna *radiância*, que é a quantidade de luz que emana de uma superfície em uma dada direção e em um dado intervalo de tempo.

A luz incidente em um ponto de uma dada superfície pode ser refletida, internamente dispersa e re-emitida, absorvida ou transmitida Carceroni (2001), o que vem a ser uma característica própria de cada material. A *reflectância* é dada pela razão entre a radiância e a irradiância Oren e Nayar (1995), ou seja, a fração da luz incidente que é efetivamente refletida em um ponto da cena. Um modelo de reflectância obtém esta

razão através de uma equação analítica que depende do tipo de material da superfície. Um algoritmo de renderização parte de um modelo de reflectância para calcular a intensidade da luz refletida em cada ponto da superfície de cada objeto de uma cena, para todas as projeções destes pontos em um plano de imagem, obtendo assim uma imagem foto-realística da cena Hearn e Baker (1994).

A função de reflectância é difícil de se determinar com precisão, mas pode ser representada por uma função conhecida como BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*). A BRDF caracteriza a reflectância de uma superfície em termos dos ângulos de incidência, da luz incidente, e dos ângulos de reflexão. De acordo com a forma da BRDF, as superfícies podem ser divididas em dois tipos principais Schlick (1993):

- Superfícies difusas: a luz é refletida em todas as direções. No caso ideal, quando a superfície é perfeitamente difusa (*Lambertiana*), a BRDF se torna uma função constante.
- Superfícies especulares: a luz é refletida somente em uma pequena região em torno da direção ideal de reflexão geométrica. No caso ideal, onde a superfície é perfeitamente especular (um espelho), a BRDF torna-se uma função não nula em apenas uma única direção.

O modelo de Lambert é aplicado às superfícies perfeitamente difusas; a BRDF é simplesmente uma constante para todas as direções, comprimento de onda e polarizações. O modelo de *Phong* expressa a BRDF como uma combinação linear de uma parte difusa e uma parte especular¹, e introduz um termo cossenoidal com expoente para modelar os efeitos de especularidade, em particular o *specular highlight*, que é a concentração da luz em determinado ponto.

1.2.3 Modelos de Iluminação Local e Global

Os modelos de iluminação, ou modelos de reflexão, são uma forma de representar como as imagens são percebidas pelos nossos olhos, e consistem em simular como os objetos refletem a luz incidente. Sem um modelo de iluminação adequado, os objetos tendem

¹para algoritmos de renderização leva-se em conta uma terceira componente correspondente à luz proveniente do ambiente em que os objetos da cena estão inseridos

a não apresentar características realistas. Basicamente, os modelos de iluminação estão divididos em:

Local a cor de um ponto na cena depende apenas das propriedades materiais do objeto e da iluminação primária vinda de uma ou mais fontes de luz. Exemplo: modelo de *Phong Phong* (1975).

Global a cor de um ponto na cena depende das propriedades materiais do objeto e das iluminações primária e secundária, considerando os efeitos de inter-reflexão e transmissão da luz em outros objetos da cena, também chamada de iluminação indireta. Estes modelos são fisicamente mais abrangentes e produzem imagens com um grau de realismo muito próximo da cena real. Exemplo: *Radiosidade* Hearn e Baker (1994).

Os modelos de iluminação local, ao contrário dos modelos de iluminação global, não são capazes de representar a interação entre diferentes superfícies, tais como sombras, iluminação indireta refletida de outras superfícies, interação da luz com o meio em que é transmitida (água, ar, etc).

Entre os principais métodos de iluminação global encontram-se os métodos *Ray Tracing* e *Radiosidade*.

No *Ray Tracing*, um raio é lançado a partir de cada pixel no plano de imagem da câmera em direção à cena, seguindo o caminho inverso da luz. A cada intersecção deste raio com uma superfície da cena o mesmo é refletido e ou transmitido em direção a outras superfícies e assim por diante, “ricocheteando” na cena até ir em direção a uma fonte de luz, se perder no espaço ou atingir um número máximo de interações pré-estabelecido. Esses raios permitem construir uma árvore binária com a qual, conhecidas as intensidades e posições das fontes de luz, é possível calcular e armazenar em cada nó a contribuição daquela superfície interceptada para o valor final de intensidade do pixel. Por se tratar do modelo a ser utilizado nesta dissertação, maiores detalhes são dados no Capítulo 2, quando será apresentado o método proposto para a reflectância inversa.

A *Radiosidade* é um método de renderização baseado em uma análise detalhada das reflexões da luz em superfícies difusas e é baseado em um modelo de transferência de energia. A superfície é dividida em elementos (pequenas partes), todos com reflexão considerada difusa, e em cada superfície a quantidade de energia é a soma da energia que

o elemento de uma superfície emite internamente e da quantidade de energia refletida pelos elementos das superfícies que interagem com a primeira. Considerando todos os elementos de cada superfície, o método estabelece um sistema de equações lineares cuja solução é a distribuição da luz na superfície.

Ambos os métodos de iluminação global apresentados possuem vantagens e desvantagens. O *Ray Tracing* não representa bem a interação luminosa difusa, criando imagens altamente reflexivas, além tem alto custo computacional. Contudo, tem a vantagem de permitir o cálculo de cada pixel isoladamente, e de ser aplicado a superfícies especulares, com forte inter-reflexão e materiais translúcidos. Essa última característica se configura uma das limitações da Radiosidade, que em contrapartida tem um custo computacional reduzido, se comparado ao *Ray Tracing*.

1.3 Trabalhos Relacionados

Obter a renderização inversa completa da cena, ou seja, a descrição simultânea da geometria, iluminação e reflectometria é um problema bastante difícil. Em geral tenta-se obter uma ou duas das informações conhecendo-se o restante. Tentativas de se obter a renderização inversa completa foram feitas em Miyazaki et al. (2003) e Vogiatzis et al. (2005). Ambos assumem que a cena é composta de um único objeto com iluminação local. O primeiro trabalho considera que a superfície é texturizada enquanto o segundo assume que a superfície possui BRDF homogênea. Miyazaki et al. (2003) utiliza uma única imagem da cena como entrada, enquanto Vogiatzis et al. (2005) utiliza múltiplas imagens. Miyazaki et al. (2003) obtém cada uma das informações separadamente, enquanto Vogiatzis et al. (2005) primeiramente obtém a geometria e em seguida ambas a reflectância e iluminação em conjunto.

Em Shen et al. (2005), Zickler et al. (2005), Yu et al. (2004), Zhang (1998) e Sato et al. (1997) são apresentados métodos que obtém simultaneamente a geometria e a reflectometria inversa da cena a partir de múltiplas imagens, assumindo que se conheça a iluminação da cena. Porém, esses trabalhos se aplicam apenas para cenas compostas de um único objeto e com iluminação local.

Métodos para se recuperar simultaneamente a iluminação e reflectometria inversas conhecendo-se a geometria da cena são mostrados em Ramamoorthi e Hanrahan (2001), Nishino et al. (2001), Yu e Ahuja (2005), Hara et al. (2005a) e Hara et al. (2005b),

Nielsen e Brodersen (2004). Todos eles assumem que a cena é composta de um só objeto com iluminação local. Ramamoorthi e Hanrahan (2001), Nishino et al. (2001), Nielsen e Brodersen (2004) e Yu e Ahuja (2005) utilizam múltiplas imagens, enquanto Hara et al. (2005a) e Hara et al. (2005b) usam uma única imagem da cena.

Muitos trabalhos foram propostos para se obter a geometria inversa da cena. Em Levoy et al. (2000) a geometria da cena é obtida utilizando sensores de alcance. Em Debevec et al. (1996) obtém-se a geometria da cena através de correspondência de pontos em múltiplas imagens.

O problema da iluminação inversa pode ser subdividido em dois subproblemas: obtenção das intensidades e das posições de cada fonte de luz presentes na cena. Um levantamento completo dos problemas da iluminação inversa pode ser encontrado em Patow e Pueyo (2003).

Diversos trabalhos foram propostos para o problema da reflectometria inversa. Entretanto, a maioria deles assume que a luz interage na cena através de iluminação local, como em Tominaga e Tanaka (2000), Miyazaki et al. (2003), Hara et al. (2003), Hara et al. (2005a), Ramamoorthi e Hanrahan (2001), Park et al. (2005), Shen e Takemura (2006), Wu et al. (2004).

Queiroz-Neto et al. (2005), Yu et al. (1999), Boivin e Gagalowicz (2001) e Boivin e Gagalowicz (2002) obtém a reflectometria inversa para cenas com iluminação global, porém, somente Queiroz-Neto et al. (2005) leva também em consideração que todos os seguintes efeitos são significativos na cena: inter-reflexões, transparências e sombras.

Uma outra limitação dos métodos propostos para a reflectometria inversa é o fato de que alguns deles requer que múltiplas imagens sejam adquiridas com iluminação controlada ou a partir de posições pré-definidas, como é o caso de Debevec et al. (2000), Zickler et al. (2005) e Yu et al. (1999), ou então requerem um aparato complicado para medir a reflectância das superfícies, como é o caso de Hawkins et al. (2005), Matusik et al. (2003), Gardner et al. (2003) e Marschner e Greenberg (1998).

Finalmente, grande parte dos métodos de reflectometria inversa assume que cada superfície da cena possui parâmetros fotométricos homogêneas (sem textura), como em Yu et al. (2004), Hara et al. (2005b), Queiroz-Neto et al. (2005) e Wu et al. (2004). Alguns métodos assumem que as superfícies apresentam textura Lambertiana, ou seja, que pode haver variação espacial do albedo nas superfícies enquanto os parâmetros fotométricos não-Lambertianos são considerados constantes para cada objeto/região da



Figura 1.3: Exemplo de cena com iluminação global, inter-reflexões, sombras e superfícies transparentes, reflectivas e texturizadas.

cena. Porém nenhum desses trabalhos considera os efeitos de inter-reflexões, sombras e transparências Yu et al. (1999), Boivin e Gagalowicz (2002), Park et al. (2005), Shen e Takemura (2006). Alguns deles, além disso, utilizam múltiplas imagens da cena Yu et al. (1999), Shen e Takemura (2006).

1.4 Objetivos

Em Queiroz-Neto et al. (2005) é proposto um método para se obter reflectometria inversa de cenas com iluminação global, objetos reflectivos e transparentes utilizando uma única imagem da cena. Entretanto, tal método assume que cada superfície da cena é homogênea, ou seja, cada superfície possui apenas um conjunto fixo de parâmetros fotométricos que não variam ao longo de sua extensão. O objetivo desta dissertação é propor um método, tendo como base Queiroz-Neto et al. (2005), para que se possa obter os parâmetros fotométricos de cenas em que as superfícies apresentem textura. O método proposto considera os efeitos de inter-reflexões, transparências e sombras sejam significativos, e utiliza uma única imagem da cena, como a mostrada na Figura 1.3.

1.5 Definição do Problema

Nesta dissertação é abordado o problema de se obter os parâmetros fotométricos de uma cena composta de objetos reflectivos e/ou refrativos, considerando que cada superfície presente apresente textura Lambertiana, e levando em consideração os efeitos de inter-reflexões, transparência e sombras, tendo como entrada as seguintes informações da cena:

- uma única imagem;
- a geometria 3D;
- a descrição das fontes de luz (posição 3D + intensidade);
- os parâmetros não-Lambertianos das superfícies.

1.6 Abordagem

A recuperação de textura sobre iluminação global é, em geral, um problema ambíguo. Porém, a textura Lambertiana pode ser computada através de uma minimização dos resíduos fotométricos, desde que todos os parâmetros não-Lambertianos sejam conhecidos e mantidos fixos. A idéia central do método proposto nesta dissertação é de computar a variação dos parâmetros Lambertianos nos pontos da cena vistos pela imagem de entrada de maneira direta ou indireta (via inter-reflexões) assumindo que cada superfície tem um conjunto conhecido único e fixo de parâmetros fotométricos não-Lambertianos. O método mantém esses parâmetros constante e gera um sistema de equações lineares cujas incógnitas são os albedos de pontos da cena visto direta ou indiretamente pela imagem de entrada.

A solução desse sistema permite obter a textura não somente dos pontos diretamente vistos pela imagem de entrada, mas também os pontos vistos através de inter-reflexões, como, por exemplo, a parte do paralelepípedo que é refletida no espelho na Figura 1.3.

1.7 Contribuições

De forma resumida, as contribuições do método proposto neste trabalho são:

1. Recupera a textura Lambertiana das superfícies da cena;
2. Permite a modelagem fotométrica de cenas com inter-reflexões, efeitos de transparência e sombras;
3. Funciona mesmo se somente uma imagem da cena estiver disponível, desde que a geometria, os índices de refração, as fontes de luz e os parâmetros não-Lambertianos da cena sejam conhecidos;
4. Pode ser usada com uma grande variedade de modelos de BRDF, desde que conformem com a Definição 2.2.

Todas essas contribuições foram adicionadas às contribuições do método de Queiroz-Neto et al. (2005) em um artigo submetido ao periódico *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - PAMI*.

1.8 Organização da Dissertação

No Capítulo 2 é descrito o modelo de formação de imagem, base da metodologia proposta; em seguida é descrito o método de Queiroz-Neto et al. (2005); Queiroz-Neto (2005) para se obter os parâmetros não-Lambertianos; a seguir é descrito o método proposto nesta dissertação para se estimar a textura Lambertiana de uma cena. O Capítulo 3 mostra os resultados obtidos para a computação da textura Lambertiana em uma cena real. Finalmente, conclusões e trabalhos futuros são mostrados no Capítulo 4.

Capítulo 2

Metodologia

Como mostrado no Capítulo 1, muitos trabalhos já foram propostos para o problema da recuperação de parâmetros fotométricos de superfícies. Entretanto, no presente estado da arte, apenas o trabalho proposto em Queiroz-Neto et al. (2005) leva em consideração cenas em que os efeitos de inter-reflexões, transparências e sombras são significantes. Queiroz-Neto et al. (2005), porém, possui dentre suas restrições a de que a cena deve ser composta de um pequeno conjunto de superfícies homogêneas e especularmente uniformes. Este trabalho visa eliminar essa restrição de maneira que cenas que contenham superfícies texturizadas, como as da Figura 1.3, possam também ter seus parâmetros fotométricos obtidos.

Como mencionado anteriormente, a recuperação de textura sob iluminação global é, em geral, um problema ambíguo. Porém, a textura Lambertiana pode ser computada por meio de uma minimização dos resíduos fotométricos, desde que todos os parâmetros não-Lambertianos sejam conhecidos e mantidos fixos. A idéia central do método proposto nesta dissertação é de computar a variação dos parâmetros Lambertianos nos pontos da cena vistos, de maneira direta ou indireta (via inter-reflexões), a partir de um único ponto de vista assumindo que: os índices de refração são conhecidos *a priori*; a iluminação da cena se origina de uma quantidade finita de pontos de luz cujas posições e intensidades são conhecidas *a priori*; a imagem de entrada é adquirida por uma câmera geometricamente calibrada; cada superfície tem um conjunto único e fixo de parâmetros fotométricos não-Lambertianos e estes devem ser computados levando em consideração os efeitos de inter-reflexões, sombras e transparências. O método mantém

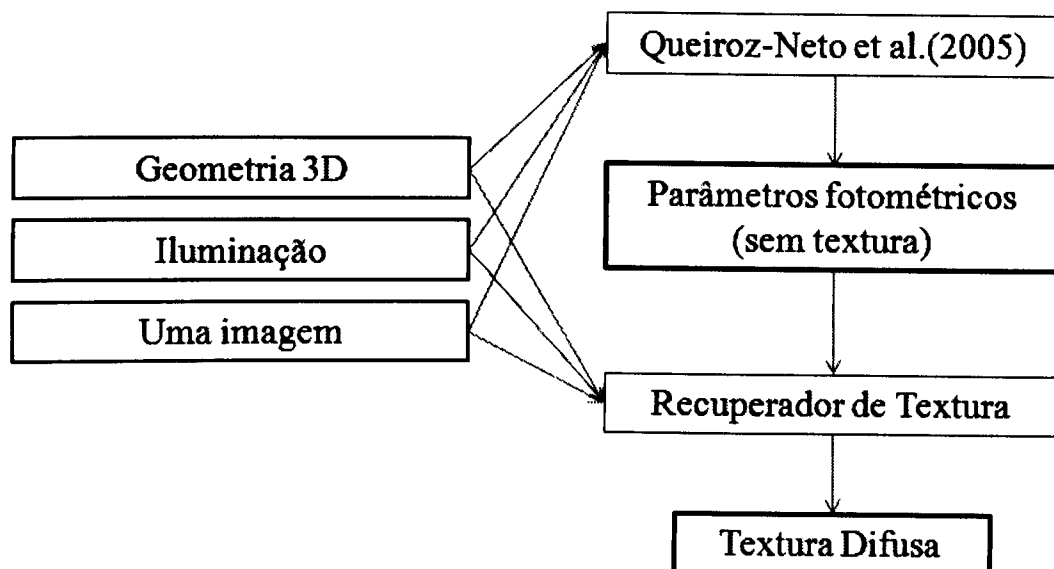


Figura 2.1: Idéia geral do método proposto. Primeiramente, partindo-se da geometria 3D, iluminação e uma imagem da cena, os parâmetros fotométricos são calculados por Queiroz-Neto et al. (2005) assumindo-se que a cena é composta apenas por superfícies homogêneas. Em seguida, tendo como entrada os parâmetros calculados e também a geometria 3D, iluminação e imagem da cena, o método proposto calcula a textura difusa das superfícies da cena.

constante todos os parâmetros não-Lambertianos e gera um sistema de equações lineares cujas incógnitas são os albedos de pontos da cena visto direta ou indiretamente pela imagem de entrada.

Portanto, a metodologia proposta consegue obter a textura não somente dos pontos diretamente vistos na imagem de entrada, mas também os pontos vistos por meio de inter-reflexões, como, por exemplo, a parte do paralelepípedo que é refletida no espelho na Figura 1.3 ou o que é visto através do plano azul transparente na mesma figura. A Figura 2.1 mostra a idéia geral do método.

2.1 Modelo de Formação da Imagem

Para ser possível extrair as propriedades fotométricas das superfícies de uma cena diretamente de uma única imagem, é preciso definir como a intensidade de um pixel é

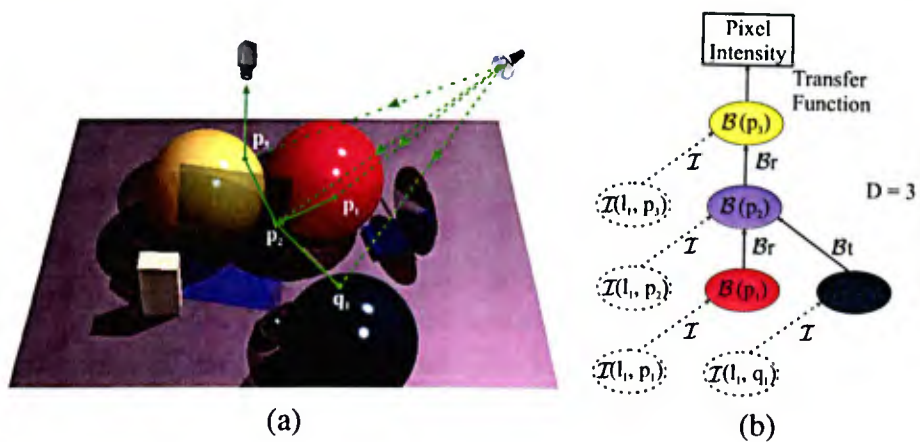


Figura 2.2: Uma ACIP com profundidade $D = 3$ (a) Todos os caminhos passando por reflexões/refrações a partir da fonte de luz l_1 para o pixel. (b) A árvore resultante, com $\mathcal{I}(l_i, p)$ dado pela Equação 2.1, e $\mathcal{B}(p)$ dado pela Equação 2.4. Figura extraída da tese Queiroz-Neto (2005)

calculada por meio de uma função da iluminação, da geometria 3D e das propriedades fotométricas. Para isso, usa-se um modelo bem estabelecido na literatura conhecido como *Ray Tracing*, que consegue explicar inter-reflexões, efeitos de transparência, refrações e sombras a partir de múltiplas fontes de luz. O *Ray Tracing* assume que a intensidade de cada pixel é obtida usando os princípios da óptica geométrica para traçar todos os caminhos que a luz deve fazer partindo de qualquer fonte de luz em direção àquele pixel, fazendo isso através de reflexões e refrações sobre as superfícies da cena.

Para modelar superfícies rugosas com propriedades fotométricas não-ideais, permite-se que a primeira reflexão ou refração em cada caminho seja não-ideal, ou seja, assume-se que depois que a luz irradia da fonte de luz, sua primeira interação com uma superfície da cena deve mudar sua direção de propagação arbitrariamente. A fração de energia incidente que irradia ao longo de cada direção possível depois dessa primeira interação com a cena é determinada por um modelo de BRTDF (*Bidirectional Reflectance and Transmittance Distribution Function*) pré-definido. Por outro lado, para preservar a viabilidade computacional do *Ray Tracing*, assume-se que todas as interações subsequentes da luz com a cena ao longo de cada caminho de propagação são geometricamente ideais, ou seja, que em cada uma das interações subsequentes a luz é apenas refletida ou refratada ao longo das direções ideais ditadas pela Teoria de Fresnel.

Como mostrado na Figura 2.2, para qualquer pixel, o conjunto de caminhos que

a luz atravessa na cena determina uma *Árvore de Computação da Intensidade do Pixel (ACIP)*. As folhas da árvore armazenam a contribuição luminosa de cada fonte de luz naquele caminho; os nós internos calculam a radiância acumulada a partir de reflexões/refrações ao longo dos caminhos da luz; o nó raiz computa a intensidade resultante do pixel.

Como assume-se que se conhece a geometria 3D e a iluminação da cena, cada nó folha da árvore de computação do pixel tem seus valores conhecidos. Em particular, a irradiância que chega a um ponto \mathbf{p} partindo de uma fonte de luz \mathbf{l}_k é dada por

$$\mathcal{I} = \frac{\omega_k}{\text{dist}^2(\mathbf{l}_k, \mathbf{p})}, \quad (2.1)$$

na qual ω_k é a potência da fonte de luz \mathbf{l}_k e dist mede a distância entre \mathbf{l}_k e \mathbf{p} .

As arestas conectando as folhas com os nós internos convertem valores de irradiância em valores de radiância. Portanto, a operação executada pelos nós internos é definida através de um modelo de BRTDF. Tendo eficiência computacional como objetivo, observa-se que alguns dos mais populares modelos de BRTDF na literatura são parcialmente lineares de acordo com a seguinte definição:

[BRTDF Parcialmente Linear] Um modelo de BRTDF é parcialmente linear se, e somente se, ele pode ser escrito como o produto escalar

$$\mathbf{g}(\theta) \cdot \mathbf{x}, \quad (2.2)$$

na qual \mathbf{x} é um vetor de parâmetros fotométricos lineares, θ é um vetor de parâmetros fotométricos não-lineares, e $\mathbf{g}(\theta)$ é uma função que não depende de \mathbf{x} .

A metodologia proposta funciona com qualquer modelo diferenciável de BRTDF que esteja de acordo com a definição acima. Um exemplo é o modelo de reflectância proposto por Phong (1975), no qual $\mathbf{x} = \langle k_d, k_s \rangle$ são as reflectâncias difusa e especular, respectivamente, $\theta = \langle n_s \rangle$ é o coeficiente de *shininess*, e

$$\mathbf{g}(\theta) = \langle \hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{l}}, (\hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{\mathbf{h}})^{n_s} \rangle,$$

onde $\hat{\mathbf{n}}$ é a normal da superfície, $\hat{\mathbf{l}}$ é a direção da fonte de luz e $\hat{\mathbf{h}}$ é o vetor unitário no médio entre $\hat{\mathbf{l}}$ e a direção da câmera. Podem-se citar outros modelos populares de BRTDF que são parcialmente lineares e diferenciáveis, tais como Oren e Nayar (1995),

Wolff et al. (1998) e Ward (1992).

As arestas entre os nós internos da ACIP mapeiam radiâncias para radiâncias, a fim de modelar as reflexões e os refrações ideais em que a luz é refletida somente ao longo de uma única direção e refratada somente ao longo de uma outra direção. Em tais casos ideais, se os meios da propagação em ambos os lados da superfície forem transparentes, a fração da energia refletida é dada pelo fator de atenuação de Fresnel

$$F(\theta_i, \theta_r) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1 \sin^2(\theta_i - \theta_r)}{2 \sin^2(\theta_i + \theta_r)} \left[1 + \frac{\cos^2(\theta_i + \theta_r)}{\cos^2(\theta_i - \theta_r)} \right], \quad (2.3)$$

onde θ_i e θ_r são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração do raio com respeito à normal da superfície. Neste caso, a fração de energia transmitida é $1 - F(\theta_i, \theta_r)$.

Entretanto, para modelar o fato que as superfícies da cena devem absorver parte da energia incidente, incluem-se dois fatores de atenuação: r que modela a reflectância das superfícies e t , que modela a refração das superfícies da cena. Ambos devem ser recuperados junto com a BRTDF primária das superfícies.

Assim, se um nodo interno na árvore recebe como entrada uma irradiância incidente \mathcal{I} , uma radiância refletida \mathcal{B}_r e uma radiância transmitida \mathcal{B}_t , ele retorna a radiância

$$\mathcal{B}_{\text{nodo}} = \mathcal{I} \mathbf{g}(\theta) \cdot \mathbf{x} + \mathcal{B}_r r + \mathcal{B}_t t. \quad (2.4)$$

Finalmente, a aresta entre o nó interno superior e a raiz da árvore corresponde à função de transferência de pixel, que mapeia os valores de radiância para intensidade de pixels. Tais funções devem ser conhecidas *a priori* se a câmera for radiometricamente calibrada. Na prática, é possível usar imagens adquiridas de câmeras sem calibração radiométrica para extrair as propriedades fotométricas a menos de um ganho linear para cada banda de cor, já que as configurações da câmera são ajustadas para eliminar componentes fortemente não-lineares (tipicamente, a correção gamma) de sua função de transferência de pixel.

2.2 Obtenção dos Parâmetros Não-Lambertianos

Nesta seção será mostrado, de maneira simplificada, como Queiroz-Neto et al. (2005) obtém-se os parâmetros fotométricos não-Lambertianos de uma cena considerando que

os efeitos de inter-reflexões, transparências e sombras são significativos. O método considera que a cena é composta de N superfícies, cada uma com propriedades fotométricas homogêneas. Além disso, o método de Queiroz-Neto et al. (2005) supõe que todos os índices de refração das superfícies são conhecidos *a priori*, de maneira que todos os trajetos possíveis da propagação da luz relevantes ao processo de formação da imagem podem ser computados mesmo antes que as propriedades fotométricas das superfícies sejam conhecidas.

Um ponto chave nesta metodologia é o fato de que, sob estas circunstâncias, o sistema de equações obtido a partir das ACIPs de todos os pixels na imagem de entrada pode ser fatorados em: (1) uma matriz que depende somente da iluminação conhecida, da geometria conhecida e dos parâmetros fotométricos não-lineares desconhecidos; e (2) um vetor dos fatores polinomiais que envolvem somente os parâmetros fotométricos lineares, também desconhecidos. Este fato pode ser verificado a partir da forma geral da ACIP, dada na Figura 2.2 e na Equação (2.4).

2.2.1 Fatoração Fotométrica

Sejam $\mathbf{x}^{(i)}$ e $\theta^{(i)}$ os parâmetros fotométricos da BRTDF da i -ésima superfície, $i = 1, \dots, N$, e sejam $r^{(i)}$ e $t^{(i)}$ os parâmetros secundários de reflectividade e transmissividade, respectivamente. Seja, ainda,

$$\tilde{\mathbf{x}} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{x}^{(1)} \Downarrow \dots \Downarrow \mathbf{x}^{(N)}, \quad \tilde{\theta} \stackrel{\text{def}}{=} \theta^{(1)} \Downarrow \dots \Downarrow \theta^{(N)},$$

onde o operador \Downarrow denota uma concatenação vetorial, e

$$\tilde{\mathbf{r}} \stackrel{\text{def}}{=} \langle r^{(1)}, \dots, r^{(N)} \rangle, \quad \tilde{\mathbf{t}} \stackrel{\text{def}}{=} \langle t^{(1)}, \dots, t^{(N)} \rangle.$$

Considere, agora, um trajeto ascendente que conecta uma folha arbitrária à raiz por meio dos nós internos $D_{\text{path}} \leq D$ em uma ACIP (Dé a profundidade da ACIP). Se esses nós internos corresponderem aos pontos nas superfícies com os índices $i_1, \dots, i_{D_{\text{path}}}$, a

contribuição desse trajeto à radiância total na raiz da árvore é

$$\mathcal{B}_{\text{path}} = \mathbf{c}(\tilde{\theta}) \cdot \mathbf{x}^{(i_1)} \prod_{d=2}^{D_{\text{path}}} s^{(i_d)}, \quad (2.5)$$

onde: $s^{(i_d)} \stackrel{\text{def}}{=} r^{(i_d)} \text{ ou } t^{(i_d)},$

respectivamente se a aresta entre o $(d-1)$ -ésimo e d -ésimo nós internos do trajeto se referem a uma reflexão ou refração secundária; $\mathbf{c}(\tilde{\theta})$ é o produto entre o termo $\mathcal{I} \mathbf{g}(\theta)$ da Equação (2.4) e todos os fatores conhecidos de atenuação de Fresnel no trajeto.

Adicionando todas as contribuições de todos os trajetos na árvore, a radiância total na raiz pode ser escrita como

$$\mathcal{B}_{\text{pixel}} = \mathbf{a}(\tilde{\theta}) \cdot \mathbf{y}, \quad (2.6)$$

onde: $\mathbf{y} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{\mathbf{x}} \otimes \text{Kron}^{D-1} (\langle 1 \rangle \Downarrow \tilde{\mathbf{r}} \Downarrow \tilde{\mathbf{t}}),$ (2.7)

o operador \otimes denota o Produto de Kronecker (ou Produto Tensorial) de dois vetores coluna, e $\text{Kron}^n(\cdot)$ é a Exponencial de Kronecker, recursivamente definida como $\text{Kron}^0(\cdot) = \langle 1 \rangle$, $\text{Kron}^n(\mathbf{v}) = \text{Kron}^{n-1}(\mathbf{v}) \otimes \mathbf{v}$.

O vetor \mathbf{y} na Equação (2.6) é composto dos fatores polinomiais que envolvem somente os parâmetros fotométricos lineares. Cada elemento em \mathbf{y} é obtido multiplicando-se um elemento do vetor \mathbf{x} por uma instância possível do elemento $(D_{\text{path}} - 1)$ que aparece na Equação (2.5). Similarmente, o vetor $\mathbf{a}(\tilde{\theta})$ é obtido coletando os elementos de todas as instâncias do vetor $\mathbf{c}(\tilde{\theta})$ gerado pelos trajetos ascendentes que conectam as folhas à raiz da ACIP. Empilhando todas as instâncias da Equação (2.6), uma para cada intensidade na imagem da entrada, obtém-se o sistema não linear

$$\mathbf{A}(\tilde{\theta}) \mathbf{y} = \mathbf{b}, \quad (2.8)$$

onde $\mathbf{A}(\tilde{\theta})$ é uma matriz com tantas linhas quanto o número de pixels da imagem de entrada e com $\mathcal{O}(N^D)$ colunas, obtidas a partir dos vetores $\mathbf{a}(\tilde{\theta})$; e o vetor \mathbf{b} consiste nas radiâncias obtidas aplicando-se a função de transferência inversa do pixel às intensidades da imagem.

A Equação (2.8), o resultado final da fatoração fotométrica, é a base de um método eficiente para recuperar todos os parâmetros fotométricos de uma cena globalmente

iluminada a partir de uma única imagem, que é descrito na Seção 2.2.2.

2.2.2 Otimização Fatorizada Baseada em Árvores (F-TBO)

Em Queiroz-Neto et al. (2005), o problema de recuperar as propriedades fotométricas da cena a partir de uma imagem de entrada é tratado como um problema de otimização. Mais especificamente, propõe-se minimizar a norma do vetor residual que é equivalente à diferença entre os dois lados da Equação (2.8). Escrevendo essa norma como sendo a norma Euclidiana (que é uma boa escolha se as radiâncias da imagem são contaminadas por um ruído que obedeça a uma distribuição gaussiana simples (Weng et al. (1993)), o objetivo do método torna-se, então

$$\text{encontrar } \arg \min_{\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}, \tilde{\theta}} \epsilon \stackrel{\text{def}}{=} \left\| \mathbf{A}(\tilde{\theta}) \mathbf{y}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}) - \mathbf{b} \right\|^2. \quad (2.9)$$

Esse problema de encontrar o mínimo de uma função não linear bi-dimensional é uma tarefa que demanda um alto custo computacional. Tendo como objetivo resolver esse problema eficientemente, observa-se que dentro do espaço de parâmetros da medida do erro dado na Equação (2.9), existe um sub-espaço onde as projeções dessa medida sejam polinomiais, geralmente de um grau baixo. Encontrar os mínimos de tais projeções é mais fácil do que encontrar os mínimos de funções arbitrárias não-lineares de mesma dimensão. Esta observação é explorada decompondo a Equação (2.9) nos seguintes sub-problemas: (1) obter os parâmetros lineares $\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}$, dado um vetor fixo $\tilde{\theta}$; e (2) otimizar os parâmetros não-lineares $\tilde{\theta}$, supondo que há um oráculo para computar os mínimos no sub-espaço polinomial da medida do erro. As soluções para esses dois sub-problemas são apresentadas em Queiroz-Neto et al. (2005), e são conhecidas como Otimização Fatorizada Baseada em Árvores (F-TBO - *Factorized Tree-Based Optimization*), já que se baseiam na fatoração fotométrica apresentada na Seção 2.2.1.

2.3 Recuperação de Textura

Na Seção 2.1 foi definido como obter a intensidade de um pixel por meio de uma função da iluminação, geometria 3D e dos parâmetros fotométricos. Além disso, a Seção 2.2 mostra como Queiroz-Neto et al. (2005) computa eficientemente as propriedades

fotométricas assumindo que a cena é composta de N superfícies, cada uma com propriedades fotométricas homogêneas. Nesta dissertação considera-se o caso em que as superfícies apresentam textura Lambertiana, representada pela variação do albedo em cada ponto visto, direta ou indiretamente, de um único ponto de vista da cena. Assume-se que cada superfície da cena possui um conjunto constante e único de propriedades fotométricas não-Lambertianas. É mostrado nesta seção como é possível obter essa textura de maneira eficiente.

A proposta deste trabalho, portanto, é a de obter a descrição completa da BRTDF de uma cena complexa que inclui superfícies não-homogêneas (texturizadas) em duas etapas: primeiramente assume-se que cada superfície da cena é homogênea e obtêm-se os parâmetros fotométricos por qualquer método existente na literatura, como, por exemplo, o proposto em Queiroz-Neto et al. (2005); por último, a textura difusa (albedo) é computada em cada ponto da cena alcançado pelo modelo de formação de imagem mostrado na Seção 2.1, utilizando como entrada os parâmetros fotométricos não-Lambertianos calculados no passo anterior, a geometria 3D, iluminação e uma única imagem da cena. A Figura 2.1 mostra a idéia geral do método.

Assumindo que os parâmetros fotométricos não-Lambertianos foram computados e que cada superfície possui um conjunto único e fixo de parâmetros fotométricos (cada superfície é homogênea), será mostrado a seguir como computar a textura (variação do parâmetro Lambertiano) de cada superfície.

Considere uma superfície composta por um material de índice i e um ponto \mathbf{p} 3D nessa superfície, para o qual será calculada a radiância. Tendo como base a Equação (2.4), a radiância em um nodo da ACIP, levando em conta a contribuição de textura difusa, pode ser calculado como

$$\mathcal{B}_{\text{nodo}}^{\text{Tex}}(\mathbf{p}) = \mathcal{I} \mathbf{g}(\theta) \cdot \mathbf{u}^{(\mathbf{p})} + \mathcal{B}_{\text{nodo}}, \quad (2.10)$$

em que \mathbf{u} é um vetor do mesmo tamanho que o vetor \mathbf{x} porém contendo zero em todas as posições exceto na posição correspondente ao parâmetro que representa a reflectância difusa (Lambertiana) em \mathbf{x} . O vetor $\mathbf{u}^{(\mathbf{p})}$ contém o parâmetro $\rho^{(\mathbf{p})}$ que modela a variação de textura difusa no ponto \mathbf{p} . Como exemplo, no caso do modelo de reflectância de Phong, $\mathbf{u}^{(\mathbf{p})} = \langle \rho^{(\mathbf{p})}, 0 \rangle$.

Considere um caminho ascendente conectando uma folha arbitrária até a raiz através

de $D_{path} \leq D$ nodos internos em uma ACIP. Se esses nodos correspondem a pontos 3D com índices $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{D_{path}}$ em superfícies correspondentes com materiais de índices $i_1, \dots, i_{D_{path}}$, a contribuição de radiância desse caminho para o nodo raiz é

$$\mathcal{B}_{path}^{Tex}(\mathbf{p}_1) = \mathbf{c}(\tilde{\theta}) \cdot \mathbf{u}^{(\mathbf{p}_1)} \prod_{d=2}^{D_{path}} s^{(i_d)} + \mathcal{B}_{path}, \quad (2.11)$$

onde: $s^{(i_d)} \stackrel{\text{def}}{=} r^{(i_d)} \text{ ou } t^{(i_d)}$,

respectivamente se a aresta entre o $(d-1)$ -ésimo e d -ésimo nodo interno do trajeto se referem a uma reflexão ou refração secundária; $\mathbf{c}(\tilde{\theta})$ é o produto entre o termo $\mathcal{I}g(\theta)$ da Equação (2.10) e todos os fatores conhecidos de atenuação de Fresnel no trajeto; e \mathcal{B}_{path} é uma constante dada pela contribuição de radiância do caminho calculada utilizando-se os parâmetros não-Lambertianos das superfícies, os quais são constantes (veja Equação (2.5)). Portanto, na Equação (2.11) a única incógnita é o parâmetro de textura Lambertiana (albedo) $\rho^{(\mathbf{p}_1)}$, já que todos os outros parâmetros fotométricos são conhecidos e constantes.

Seja \mathbf{P} o número de pontos da cena visto na imagem de entrada, direta ou indiretamente (via inter-reflexões). Define-se $\mathbf{z} = \langle \rho^{(\mathbf{p}_1)}, \dots, \rho^{(\mathbf{p}_P)} \rangle$ como a concatenação de todos os parâmetros de textura difusa da cena. Adicionando as contribuições de todos os nodos na Árvore, a radiância na entrada da raiz pode ser escrita como

$$\mathcal{B}_{pixel}^{Tex} = \mathbf{e}(\tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}) \cdot \mathbf{z} + \mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}), \quad (2.12)$$

sendo $\mathbf{q}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}})$ uma constante dada pela radiância na raiz da Árvore sem levar em consideração os parâmetros de textura, ou seja, a soma da contribuição de todos os \mathcal{B}_{path} da Árvore; $\mathbf{e}(\tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}})$ é um vetor obtido coletando todas as instâncias do termo $\prod_{d=2}^{D_{path}} s^{(i_d)} \mathbf{c}(\tilde{\theta})$ gerados por caminhos que conectam as folhas até a raiz na ACIP.

Empilhando-se todas as instâncias da Equação (2.12), uma para cada intensidade na imagem de entrada, obtém-se o sistema linear

$$\mathbf{E}(\tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}) \mathbf{z} = \mathbf{b} - \mathbf{Q}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}}), \quad (2.13)$$

onde o vetor \mathbf{b} consiste nas radiâncias obtidas aplicando-se a função de transferên-

cia inversa do pixel às intensidades da imagem; e $\mathbf{Q}(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}})$ é o vetor das radiâncias obtidas com o modelo de formação de imagem mostrado na Seção 2.1, partindo dos parâmetros fotométricos não-Lambertianos, os quais são conhecidos. $\mathbf{E}(\tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}})$ é uma matriz com tantas linhas quanto o número de intensidades da imagem de entrada e \mathbf{P} colunas. Entretanto, \mathbf{P} é da ordem do número de pixels na imagem de entrada, já que, em geral, são pequenas as regiões da imagem que cobrem partes da cena vistas indiretamente (através de um objeto muito reflectivo ou transparente). Na prática observou-se que $\mathbf{E}(\tilde{\theta}, \tilde{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{t}})$ era frequentemente uma matriz aproximadamente quadrada.

A Equação (2.13) é um sistema linear para o qual já existem soluções eficientes presentes na literatura. A solução desse sistema possibilita que seja obtida a variação de textura Lambertiana não somente nos pontos diretamente vistos na imagem de entrada, mas também em pontos alcançados através de inter-reflexão.

2.4 Análise de Complexidade do Método

O custo de tempo para a solução do sistema linear mostrado na Equação 2.13 é de $\mathcal{O}(\mathbf{P}^3)$ (Skiena (1997)). O custo de espaço para a geração das ACIPs e, em seguida, do sistema linear 2.13 é de $\mathcal{O}(\mathbf{P}^{2D} + \mathbf{P}^2)$. Como D é mantido constante no método apresentado, a complexidade de espaço é então $\mathcal{O}(\mathbf{P}^2)$.

2.5 Limitações

O método é restrito aos modelos de BRTDF parcialmente lineares, ou seja, que estejam em conformidade com a Equação (2.2). Entretanto, a maioria dos modelos BRTDF estão de acordo com essa definição, o que torna o método bastante abrangente. Além disso, o método depende do conhecimento, *a priori*, dos índices de refração dos materiais contidos na cena. Em geral, esses índices podem ser obtidos em tabelas de padrão de índices de refração, quando os materiais são conhecidos *a priori*. Caso contrário, os índices podem ser estimados iterativamente minimizando as distâncias entre as projeções na imagem real das características da cena que são visíveis através dos objetos transparentes e das projeções dessas características na imagem gerada pelo *Ray Tracing*.

Capítulo 3

Resultados

Como mostrado na Seção 2, o método proposto neste trabalho visa obter a textura Lambertiana de uma cena. Para isso, recebe como entrada as seguintes informações: uma imagem capturada de uma câmera calibrada; as posições e intensidades dos pontos de luz; a geometria 3D; os índices de refração dos materiais; e os parâmetros fotométricos não-Lambertianos das superfícies. As Seções 3.1, 3.2 e 3.3 mostram como todas essas informações podem ser obtidas para uma cena real como a mostrada na Figura 3.1, a qual possui efeitos significativos de inter-reflexões, sombras e transparências.

São mostrados os resultados quantitativos para a computação dos parâmetros fotométricos em termos de tempo médio de processamento de CPU e de erro RMS (*Root mean square error* - raiz do erro médio quadrático) $\hat{\epsilon}$, definido como $\hat{\epsilon} = \sqrt{\epsilon}$ (ϵ é o erro médio quadrático - veja Equação 2.9) dividido pelo número de intensidades (pixels) na imagem de entrada. A imagem de entrada (Figura 1.3) foi adquirida utilizando uma câmera CCD com correção gamma desligado e uma resolução de 640×480 pixels. Os testes foram também aplicados em imagens de tamanhos 320×240 e 160×120 . Os experimentos foram repetidos a quantidade necessária para que todos os intervalos fossem obtidos com 5% de erro e 90% de confiança ao aplicar o teste *t* (a quantidade de repetições variou para cada experimento). Os experimentos foram executados em um Pentium IV 3.0GHz, 1GB RAM, executando Windows XP.

A Figura 3.1 mostra a montagem da cena real utilizada nos experimentos. Foram utilizadas duas fontes de luz aproximadamente pontuais, e cinco diferentes objetos: um paralelepípedo de papel texturizado plastificado; um plástico azul translúcido; um espe-



Figura 3.1: Imagens capturadas para obter a modelagem 3D da cena.

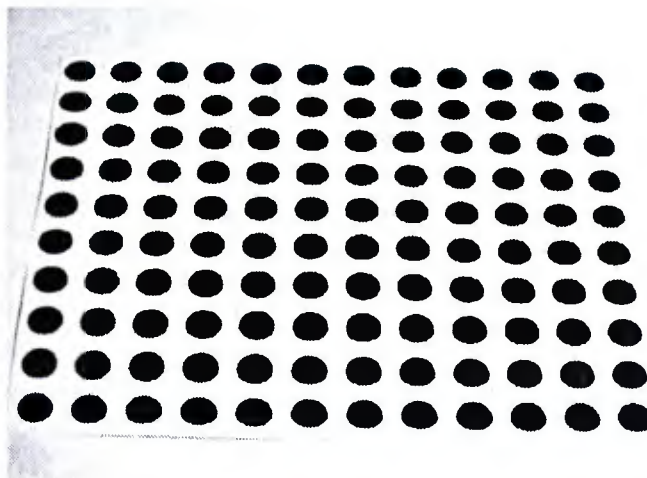


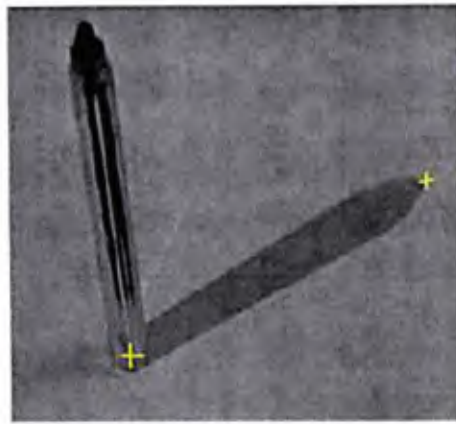
Figura 3.2: Alvo de calibração geométrica.

lho em forma de paralelepípedo; um azulejo em cerâmica texturizado; e um papel em formato A4 como plano base da cena. Os índices de refração foram considerados como os valores padrão para o plástico (1,46) e vidro (1,52).

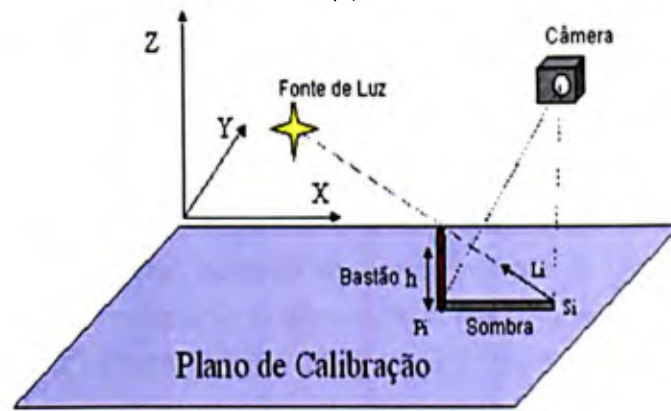
3.1 Calibração das Câmeras e das Fontes de Luz

Para realizar a calibração geométrica da câmera foi utilizado o método de Tsai (1986, 1987), o qual produziu erros de re-projeção de no máximo 0.6 pixels. O método utiliza um alvo de calibração planar contendo círculos cujos centros estão distantes entre si por uma distância conhecida (no caso, de 15mm - Figura 3.2).

A iluminação da cena foi fornecida por duas lâmpadas de halogênio de 100-W, cujas intensidades foram estimadas pelos dados do fabricante. As posições 3D das fontes de luz foram estimadas a partir de um processo de calibração em que diversas imagens de um bastão em diferentes posições são obtidas. Todas as imagens são obtidas com a câmera calibrada e em uma única posição e orientação. Em cada imagem, são marcados manualmente o ponto da base do bastão e o ponto máximo da sombra projetada pelo bastão no plano determinado horizontal da cena (Figura 3.3(a)). Ambos os pontos devem estar visíveis na imagem. Feito isso, são gerados vários vetores em direção à fonte de luz. A interseção das retas formadas por todos esses vetores determina a posição 3D

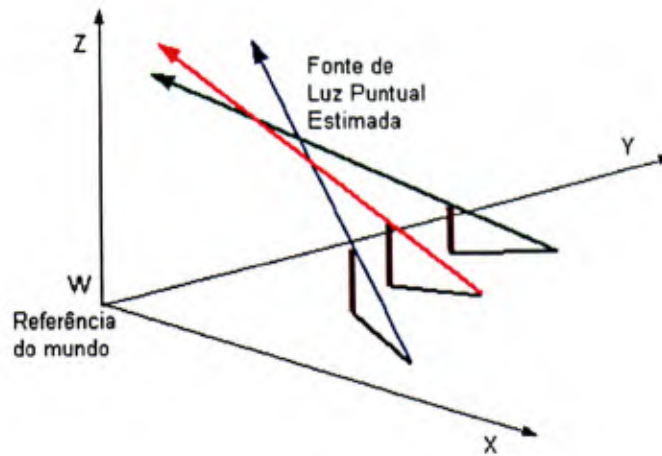


(a)



(b)

A partir de n posições para o bastão, podemos obter n vetores



(c)

Figura 3.3: Esquema de calibração das fontes de luz.

da fonte de luz. A Figura 3.3 mostra de maneira geral como a calibração das fontes de luz é realizada.

Ambos os processos de calibração (de câmera e de fonte de luz) foram executados com o uso do aplicativo desenvolvido por Fábio Marinho e Rodrigo Carceroni, de propriedade do Laboratório de Visão Computacional e Robótica do DCC/UFMG.

3.2 Modelagem 3D da Cena

A modelagem 3D da cena pode ser obtida através de diversos processos, inclusive manual. A maneira mais precisa seria o uso de um scanner 3D, entretanto, considerando a indisponibilidade de acesso a essa tecnologia e a exemplo do trabalho de Boivin e Gagalowicz (2001), foi utilizado um pacote de modelagem 3D baseado em imagens que utiliza o método *FACADE* desenvolvido em Debevec et al. (1996).

O aplicativo tem como entrada pelo menos oito imagens sob diferentes pontos de vista da cena e, após indicações manuais de correspondência de pontos em cada imagem, é possível se obter a calibração da câmera escolhida como referencial e, com isso, as posições 3D dos pontos marcados nas imagens. Com esses dados é possível modelar primitivas básicas como paralelepípedos, planos, esferas, cones e cilindros. A Figura 3.1 mostra as imagens utilizadas na obtenção da modelagem 3D. Observe que somente uma das imagens capturadas no processo de modelagem 3D (canto superior esquerdo da Figura 3.1) é utilizada como entrada para o método proposto neste trabalho. O restante das imagens é somente utilizada no processo de modelagem da cena.

3.3 Obtenção dos Parâmetros Não-Lambertianos

Os parâmetros não-Lambertianos foram computados pelo método apresentado em Queiroz-Neto et al. (2005) – *Factorized Tree-Based Optimization* (F-TBO) – e uma alternativa mais simples – denominada *Non-Factorized Tree-Based Optimization* (NF-TBO) – que também utiliza as Árvores de Computação de Intensidade do Pixel para evitar mais que uma renderização completa da cena, mas otimiza os parâmetros lineares e não lineares juntos, usando o método do Gradiente Conjugado. Ambos utilizam o modelo de BRTDF de Phong (1975) e levam em consideração os efeitos de inter-reflexões, som-

bras e transparência. Os métodos recebem como entrada uma única imagem da cena, mostrada na Figura 3.4(a), a sua geometria 3D e informações das fontes de luz (posições e intensidades). Foram utilizados como parâmetros iniciais $\tilde{\mathbf{x}} = \langle 0, 1, \dots, 0, 1 \rangle$, $\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{\mathbf{t}} = \langle 0, 1, \dots, 0, 1 \rangle$ e $\tilde{\theta} = \langle 2^{6,5}, \dots, 2^{6,5} \rangle$.

Nas Figuras 3.4(b, c) podem ser vistas as imagens de saída da computação dos parâmetros não-Lambertianos utilizando os métodos F-TBO e NF-TBO. Observe que assume-se que cada superfície da cena possui um único parâmetro de Lambertiano, e por isso uma estimativa média de cor é obtida para as superfícies que apresentam textura (como exemplo, o plano base da cena na Figura 3.4(a) – alvo de calibração – recebe uma cor cinza como aproximação pela variação de preto e branco sobre ele). Além disso, perceba nas Figuras 3.4(b, c) que o F-TBO tenta explicar de forma mais precisa a reflexão do paralelepípedo roxo vista no plano azul transparente (concentração de luz) na Figura 3.4(a).

A Figura 3.5(a) mostra que F-TBO é mais eficiente que NF-TBO em termos de tempo médio de CPU. De fato, o ganho (speedup) de F-TBO em relação à NF-TBO está no intervalo [3.5, 6.4].

Na Figura 3.5(b) observa-se que ambos os métodos obtiveram erros $\hat{\epsilon}$ similares para todas as resoluções de imagens testadas. Aplicando o teste *t* para a diferença dos erros $\hat{\epsilon}$ para as três resoluções de imagem obtém-se o intervalo $[-0.13, 0.15]$. Isso significa que os erros gerados por F-TBO e NF-TBO não podem ser considerados diferentes. Portanto, F-TBO é capaz de computar os parâmetros não-Lambertianos obtendo um resultado similar ao NF-TBO, porém com eficiência computacional significativamente maior.

3.4 Computação da Textura Lambertiana

Computaram-se os parâmetros de textura Lambertiana utilizando o método proposto na Seção 2.3 tendo como entrada os parâmetros não-Lambertianos obtidos por ambos F-TBO e NF-TBO, além da geometria 3D, iluminação e uma única imagem da cena (Figura 3.6a).

As Figuras 3.6 (b, c) mostram as imagens de saída após a computação dos parâmetros de textura Lambertiana. Observando as imagens diferença – Figuras 3.6 (d, e) – percebe-se que o resultado obtido utilizando os parâmetros não-Lambertianos computa-

dos por NF-TBO resultou em menores regiões de erros. Isso é explicado pelo fato de o algoritmo F-TBO atribuir maior reflectividade às superfícies reflectivas – como o plano azul transparente e o paralelepípedo roxo texturizado – do que o algoritmo NF-TBO, numa tentativa de explicar melhor os pontos de concentração de luz da cena, como foi mencionado na Seção 3.3. Entretanto, ainda assim o resultado obtido ao se utilizar F-TBO (Figura 3.6b) apresenta excelente qualidade visual se comparada à imagem original (Figura 3.6a).

A Figura 3.7 mostra os gráficos de tempo. Observe na Figura 3.7 que os intervalos da média de tempo de CPU se sobrepõem para todos os tamanhos de entrada, para todas as bandas. Note, além disso, que comparado ao tempo gasto por F-TBO e NF-TBO para se obterem os parâmetros não-Lambertianos (Figura 3.5), o tempo gasto para se obter a textura Lambertiana é insignificante.

O erro $\hat{\epsilon}$ é computado independentemente para cada banda. A Figura 3.8 mostra o erro $\hat{\epsilon}$ obtido para cada resolução de imagem e banda utilizando os parâmetros obtidos por F-TBO e NF-TBO. Usando o *teste t* para calcular o intervalo de confiança para a diferença entre os erros ao se utilizar os parâmetros computados por F-TBO menos os de NF-TBO dos erros obtidos para as três resoluções de imagens e as três bandas obtém-se o intervalo $[-1, 10, 3, 06]$, o qual contém zero, e por isso podemos dizer que F-TBO e NF-TBO resultam em imagens de qualidades semelhantes.

Portanto, a qualidade dos resultados e o tempo médio de CPU ao se computar a textura Lambertiana é similar tanto utilizando F-TBO quanto NF-TBO para a computação dos parâmetros não-Lambertianos. F-TBO, porém, obtém os parâmetros não-Lambertianos de forma mais eficiente que NF-TBO. Finalmente, o cálculo de textura consome um tempo muito pequeno se comparado ao tempo gasto para se calcular os parâmetros não-Lambertianos.

A Figura 3.10 mostra diferentes modos no qual os resultados obtidos podem ser usados para produzir novas imagens da cena.

3.5 Limitações e Perspectivas Futuras

Na Figura 3.9 é possível observar que foi atribuída ao espelho parte da textura que deveria ter sido atribuída ao paralelepípedo roxo refletido nele. Além disso, observa-se que foi atribuída textura ao plano azul transparente que na verdade pertence ao objeto

sendo visto através desse plano. Quando uma superfície pode ser visto através de outra superfície não é possível inferir com precisão à qual das superfícies pertence a textura observada, e essa é uma limitação do método. Uma solução possível seria também fornecer como entrada *a priori* ao método uma indicação de quais superfícies têm textura e quais podem ter ser consideradas homogêneas.

Outra limitação do método é a obtenção de textura em áreas de concentração de luz. Nessas áreas, em geral, dois problemas fazem com que a precisão do método diminua: erros geométricos (tantos dos objetos quanto das posições das fontes de luz) e atribuição incorreta de parâmetros não-Lambertianos. Quando ocorre esse caso, o método tenta explicar esses problemas atribuindo uma textura incorreta para a região. Isso pode ser observado na Figura 3.9. A concentração de luz observada no plástico azul transparente, que na verdade é a reflexão do paralelepípedo roxo, recebe textura incorretamente e por isso não gera um efeito muito realista ao se mudar de ponto de vista.

Além disso, erros geométricos podem resultar em inferência incorreta de textura, e por isso ao se mudar o ponto de vista não foi atribuída textura nas arestas dos objetos. Uma solução possível para este problema seria otimizar, juntamente dos parâmetros de textura, as normais das superfícies nos pontos de aresta ou concentração de luz.



(a) imagem de entrada



(b) saída do F-TBO



(c) saída do NF-TBO

Figura 3.4: Comparação visual da computação dos parâmetros não-Lambertianos por F-TBO e NF-TBO. (a) Imagem de entrada, (b)-(c) renderizações finais obtidas por F-TBO e NF-TBO, respectivamente.

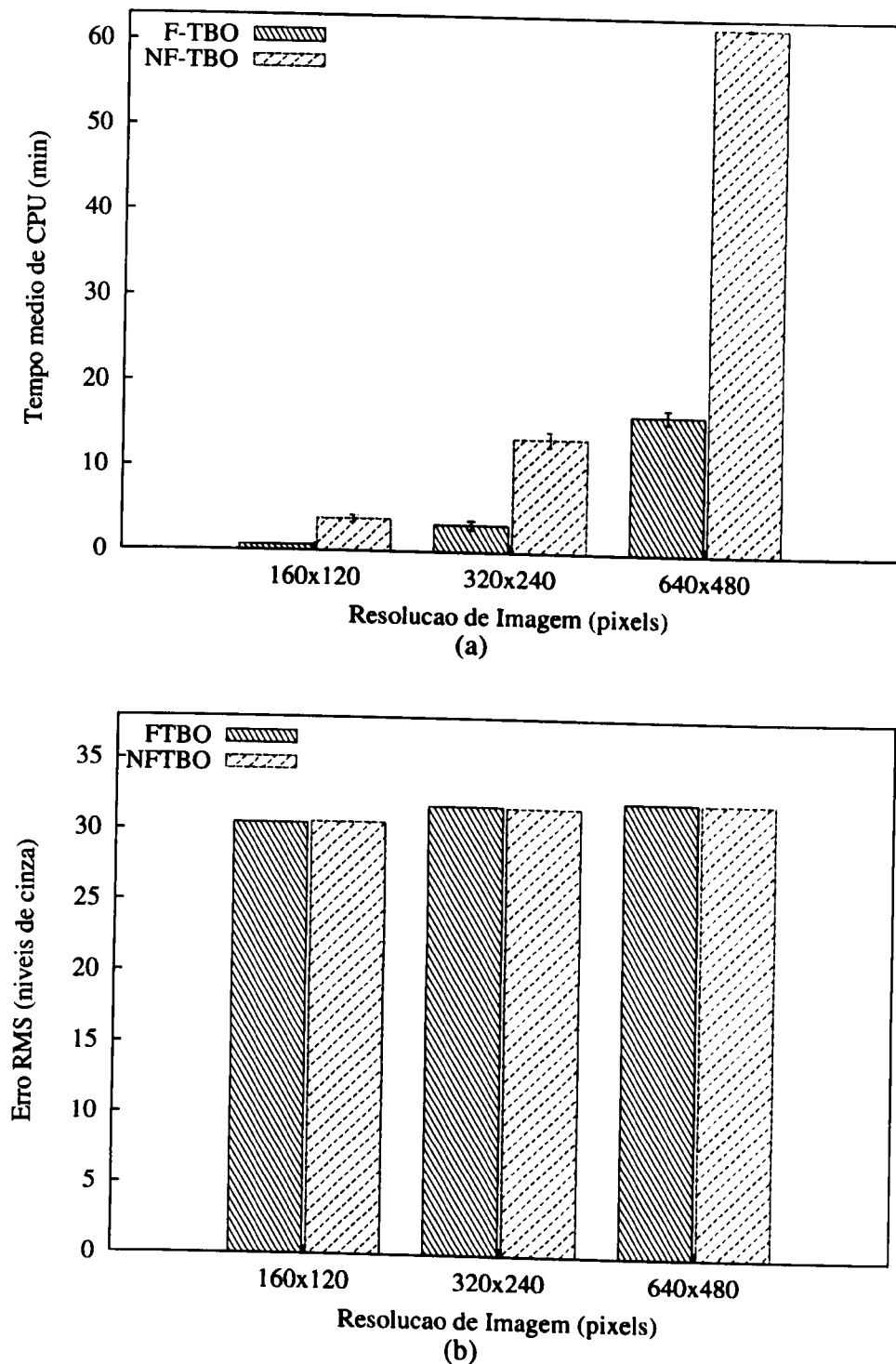


Figura 3.5: Estatísticas de eficiência para a computação dos parâmetros fotométricos não-Lambertianos. (a) Tempos médios de execução para obtenção dos parâmetros não-Lambertianos por F-TBO e NF-TBO e (b) erros radiométricos RMS (ϵ) para obtenção dos parâmetros não-Lambertianos usando F-TBO e NF-TBO.



(a) Imagem de entrada



(b) F-TBO



(c) NF-TBO



(d) Imagem diferença (b) – (a)



(e) Imagem diferença (c) – (a)

Figura 3.6: Comparação visual dos resultados para a computação da textura Lambertiana. (a) Imagem de Entrada, (b)-(c) renderizações finais obtidas ao se calcular a textura Lambertiana, respectivamente, utilizando as saídas geradas por F-TBO (Figura 3.4b) e NF-TBO (Figura 3.4c) como entrada, (d)-(e) mostram as imagens de diferença entre a imagem original (a) e as imagens resultado (b e c).

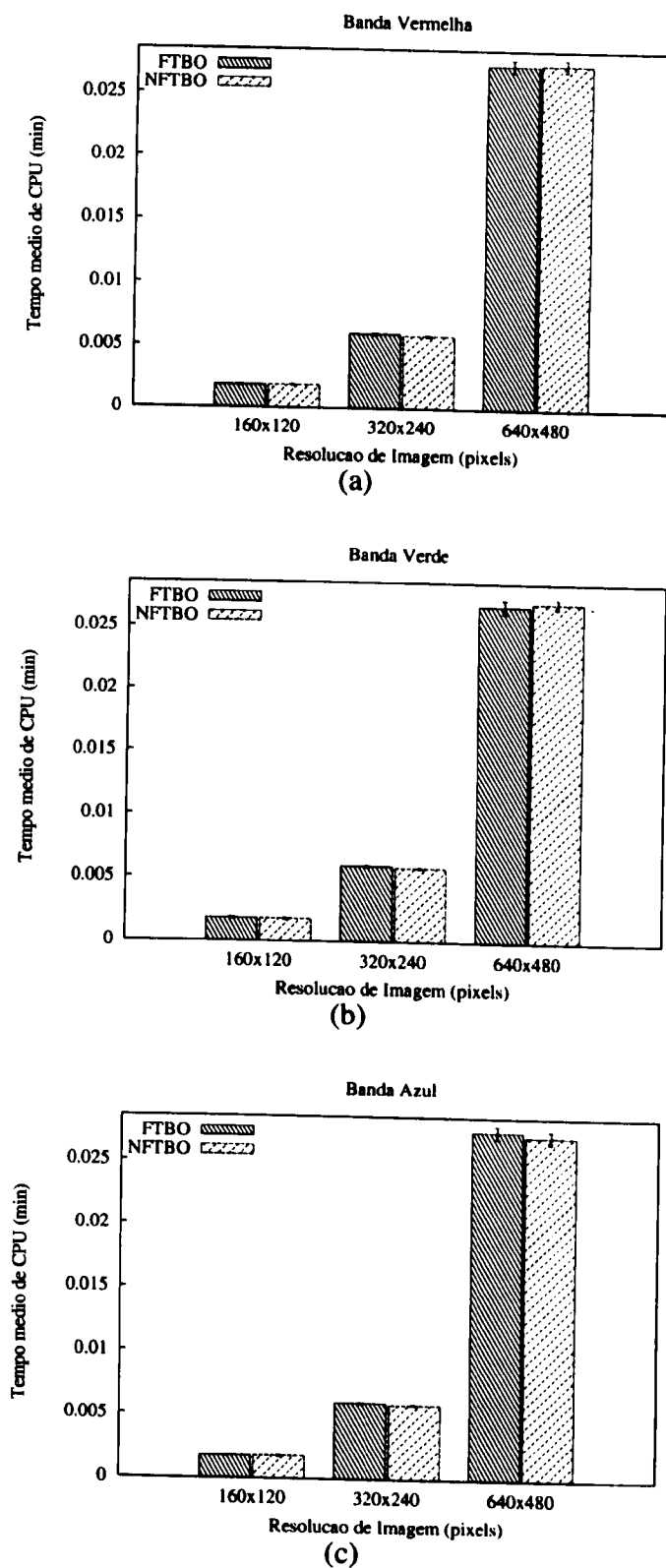


Figura 3.7: Estatísticas de tempo médio de CPU por banda para a computação da textura Lambertiana. (a), (b) e (c) mostram os gráficos para as bandas vermelha, verde e azul, respectivamente.

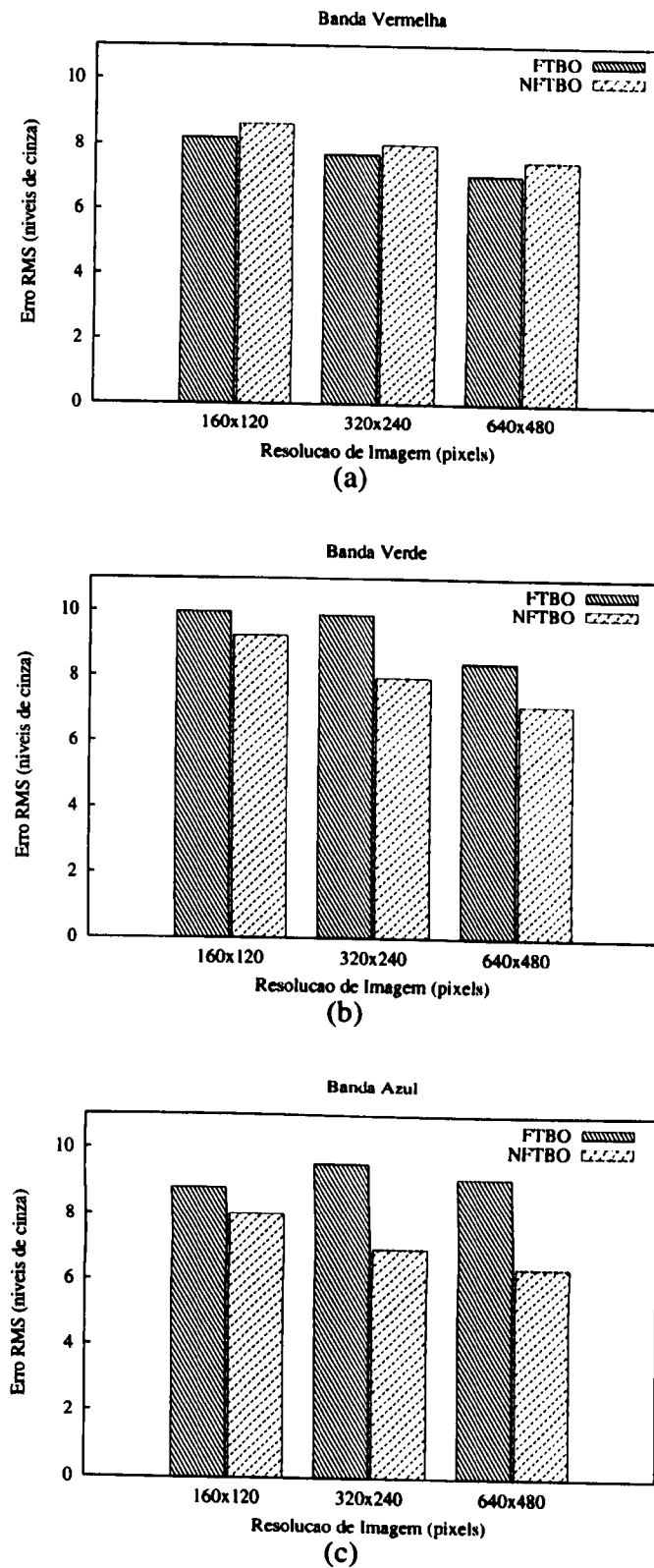


Figura 3.8: Estatísticas de erro RMS $\hat{\epsilon}$ por banda para a computação da textura Lambertiana. (a), (b) e (c) mostram os gráficos para as bandas vermelha, verde e azul, respectivamente.

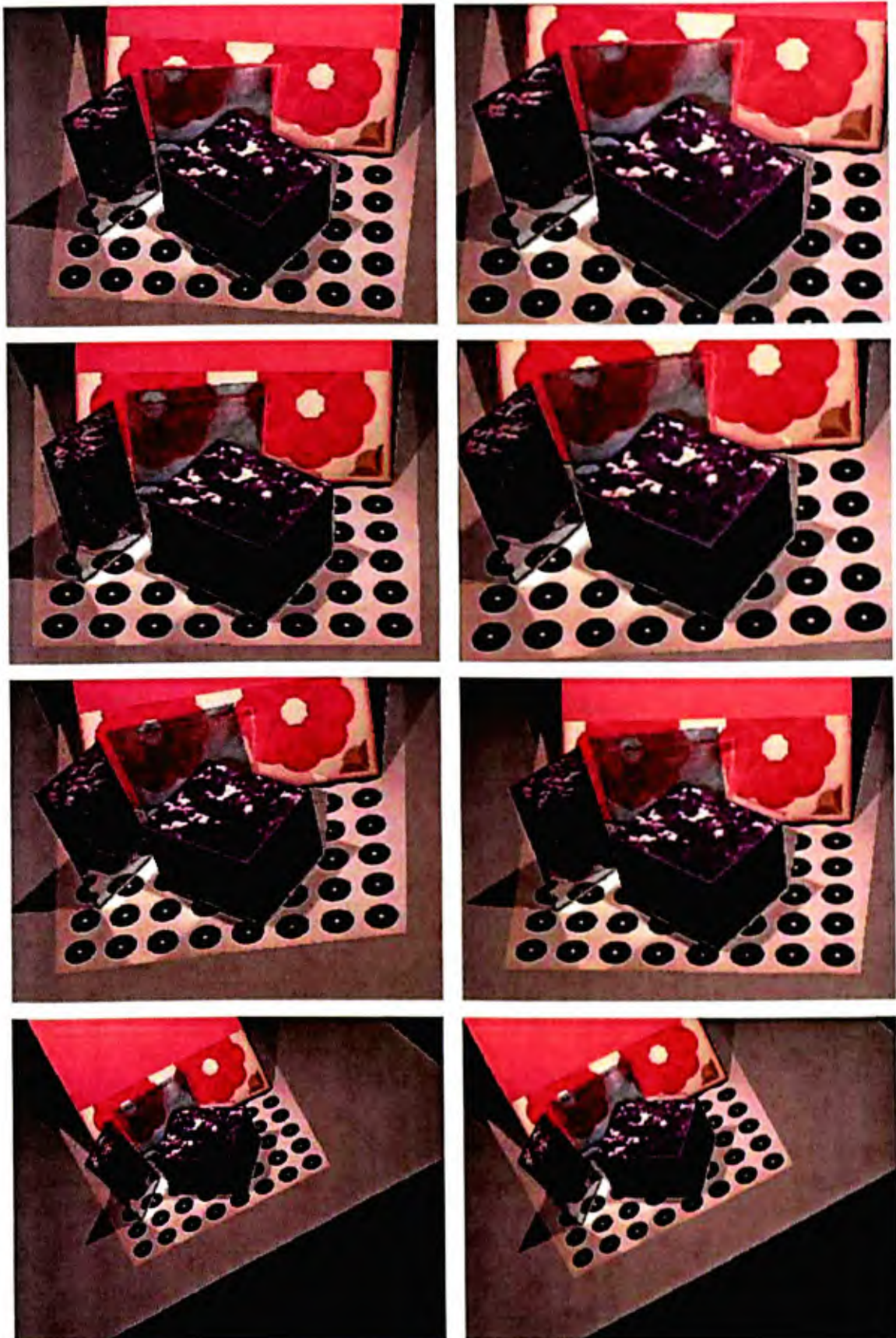
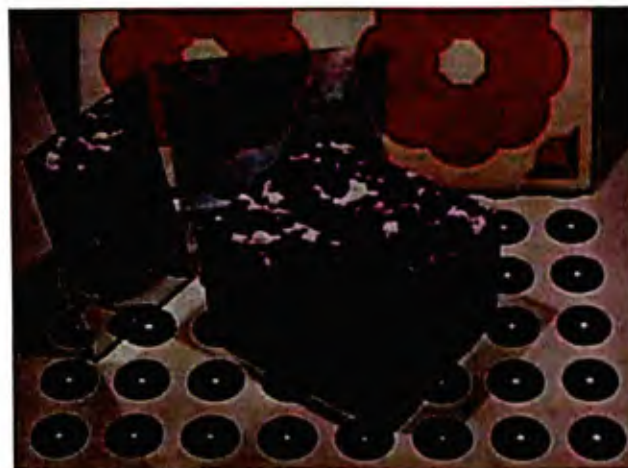


Figura 3.9: Imagens sintéticas da cena real usando a solução de F-TBO e entrada de resolução 320×240 sob novos pontos de vista. Foi utilizado interpolação bi-linear para obter os parâmetros de textura Lambertiana dos novos pontos de vista a partir da posição original, e descartado os parâmetros computados nas bordas dos objetos para evitar ruídos devido a erros geométricos.



(a)



(b)

Figura 3.10: Imagens sintéticas da cena real usando a solução de F-TBO e entrada de resolução 320×240 : (a) e (b) com iluminação mais escura e mais clara, respectivamente.

Capítulo 4

Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi mostrado um método para se obter a textura Lambertiana de todas as superfícies de uma cena em que os efeitos de inter-reflexões, transparência e sombra são significativos, dando continuidade ao trabalho proposto por Queiroz-Neto et al. (2005), o qual assume que cada superfície da cena tem parâmetros fotométricos homogêneos (não leva em conta textura). É recebido como entrada a geometria 3D, informações relativas às fontes de luz, os parâmetros não-Lambertianos das superfícies e uma única imagem da cena. O algoritmo proposto gera, após uma única renderização completa da cena, um sistema de equações lineares cuja solução são os albedos dos pontos da cena vistos direta ou indiretamente (via inter-reflexões) pela imagem de entrada. Com isso é possível representar sinteticamente cenas do mundo real de maneira mais realística e como resultado se pode renderizar essa cena de qualquer ângulo ou condições de iluminação.

Foram mostrados resultados qualitativos e quantitativos para a obtenção da textura Lambertiana em uma cena real. Os parâmetros não-Lambertianos foram computados utilizando-se dois métodos citados em Queiroz-Neto et al. (2005): F-TBO e NF-TBO. Mostra-se então uma comparação ao se obter os parâmetros de textura Lambertiana utilizando os parâmetros não-Lambertianos obtidos por ambos os métodos. Uma análise qualitativa sugere que se obtém melhor qualidade visual ao se utilizar os parâmetros não-Lambertianos obtidos por NF-TBO. Entretanto, uma análise quantitativa mostra que ambos os métodos resultam em qualidades similares. Além disso, observa-se que o tempo de CPU necessário para se obter os parâmetros de textura Lambertiana

é muito pequeno se comparado ao tempo necessário para de obter os parâmetros não-Lambertianos. É demonstrado quantitativamente também que o método F-TBO é mais eficiente computacionalmente que NF-TBO, tendo sido obtido um speedup na faixa [3.5, 6.4]. Novas renderizações da cena são mostradas sob novos pontos de vista e novas condições de iluminação.

Por fim, o método demonstrou limitações ao atribuir textura para os pontos vistos indiretamente pela imagem de entrada. Futuramente, tal limitação poderá ser diminuída caso se informe também ao método, além dos índices de refração, quais superfícies com textura e sem textura presentes na cena. Outra limitação do método é nas regiões de alta concentração de luz. Nestas regiões, um pequeno erro no parâmetro de especularidade resulta em um grande erro no parâmetro Lambertiano. Esse problema pode ser amenizado fazendo-se uma otimização geométrica nessas regiões, seguida de uma otimização dos parâmetros especulares, para que assim seja possível amenizar o erro ao se obter a textura.

Referências Bibliográficas

- Boivin, S. e Gagalowicz, A. (2001). Image-based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 107–116.
- Boivin, S. e Gagalowicz, A. (2002). Inverse rendering from a single image. In *European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*.
- Carceroni, R. L. (2001). *Recovering Non-Rigid 3D Motion, Shape and Reflectance from Multi-View Image Sequences: A Differential-Geometric Approach*. Phd thesis, University of Rochester.
- Debevec, P.; Hawkins, T.; Tchou, C.; Duiker, H.-P.; Sarokin, W. e Sagar, M. (2000). Acquiring the reflectance field of a human face. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 145–156.
- Debevec, P. E.; C.J.Taylor e Malik, J. (1996). Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry-and image-based approach. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 11–20.
- Gardner, A.; Tchou, C.; Hawkins, T. e Debevec, P. (2003). Linear light source reflectometry. *ACM Trans. on Graphics*, 22(3):749–758.
- Hara, K.; Nishino, K. e Ikeuchi, K. (2003). Determining reflectance and light position from a single image without distant illumination assumption. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 560–567.
- Hara, K.; Nishino, K. e Ikeuchi, K. (2005a). Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(4):493– 505.

- Hara, K.; Nishino, K. e Ikeuchi, K. (2005b). Multiple light sources and reflectance property estimation based on a mixture of spherical distributions. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1627–1634.
- Hawkins, T.; Einarsson, P. e Debevec, P. (2005). A dual light stage. In *Proc. Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 91–98.
- Hearn, D. e Baker, M. P. (1994). *Computer Graphics - C Version*. PrenticeHall, 2nd edição.
- Levoy, M.; Pulli, K.; Curless, B.; Rusinkiewicz, S.; Koller, D.; Pereira, L.; Ginzton, M.; Anderson, S.; Davis, J.; Ginsberg, J.; Shade, J. e Fulk, D. (2000). The digital michelangelo project: 3d scanning of large statues. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 131–144.
- Marschner, S. R. e Greenberg, D. P. (1998). *Inverse Rendering for Computer Graphics*. Phd thesis, Cornell University.
- Matusik, W.; Pfister, H.; Brand, M. e McMillan, L. (2003). A data-driven reflectance model. *ACM Trans. on Graphics*, 22(3):759–769.
- Miyazaki, D.; Tan, R. T.; Hara, K. e Ikeuchi, K. (2003). Polarization-based inverse rendering from a single view. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 982–987.
- Nielsen, M. B. e Brodersen, A. (2004). Inverse rendering of polished materials under constant complex uncontrolled illumination. In *WSCG*, pp. 309–316.
- Nishino, K.; Zhang, Z. e Ikeuchi, K. (2001). Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set of images for view-dependent image synthesis. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 599–606.
- Oren, M. e Nayar, S. K. (1995). Generalization of the lambertian model and implications for machine vision. *International Journal in Computer Vision*, 14(3):227–251.
- Park, Y.; Choi, T. e Yoon, K. (2005). Brdf recovering and scene re-lighting using an environment map. In *European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, pp. 310–314.

- Patow, G. e Pueyo, X. (2003). A survey of inverse rendering problems. *Computer Graphics Forum*, 22(4):663–678.
- Phong, B. T. (1975). Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317.
- Queiroz-Neto, J. (2005). *Modelagem Automática de Cenas com Iluminação Não-Local a Partir de Imagens*. Phd thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Queiroz-Neto, J.; Carceroni, R. e Coelho, L. (2005). Recovering photometric properties of multiple strongly-reflective, partially-transparent surfaces from a single image. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1409–1416.
- Ramamoorthi, R. e Hanrahan, P. (2001). A signal-processing framework for inverse rendering. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 117–128.
- Sato, Y.; Wheeler, M. D. e Ikeuchi, K. (1997). Object shape and reflectance modeling from observation. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 379–387.
- Schlick, C. (1993). A Customizable Reflectance Model for Everyday Rendering. In *Fourth Eurographics W. on Rendering*, pp. 73–84.
- Shen, L.; Mashida, T. e Takemura, H. (2005). Efficient photometric stereo technique for three-dimensional surfaces with unknown brdf. In *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 326–333.
- Shen, L. e Takemura, H. (2006). Spatial reflectance recovery under complex illumination from sparse images. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1833–1838.
- Skiena, S. S. (1997). *The Algorithm Design Manual*. Springer-Verlag.
- Tominaga, S. e Tanaka, N. (2000). Estimating reflection parameters from a single color image. *IEEE Comp. Graph. and Applications*, 20:58–66.

- Tsai, R. Y. (1986). An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 364–374.
- Tsai, R. Y. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE J. of Robotics and Automation*, RA-3(4):323–344.
- Vogiatzis, G.; Favaro, P. e Cipolla, R. (2005). Using frontier points to recover shape, reflectance and illumination. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 1, pp. 228–235.
- Ward, G. J. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, pp. 265–272.
- Weng, J.; Ahuja, N. e Huang, T. S. (1993). Optimal motion and structure estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(9):864–884.
- Wolff, L. B.; Nayar, S. K. e Oren, M. (1998). Improved diffuse reflection models for computer vision. *International Journal in Computer Vision*, 30(1):55–71.
- Wu, E.; Sun, Q. e Liu, X. (2004). Recovery of material under complex illumination conditions. In *Proceedings of the 2nd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 39–45.
- Yu, R. e Ahuja, N. (2005). Simultaneous estimation of texture map and pseudo illumination from multiple views. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Texture Analysis and Synthesis*, pp. 19–24.
- Yu, T.; Xu, N. e Ahuja, N. (2004). Recovering shape and reflectance model of non-lambertian objects from multiple views. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 226–233.
- Yu, Y.; Debevec, P.; Malik, J. e Hawkins, T. (1999). Inverse global illumination: Recovering reflectance models of real scene from photographs. In *ACM Special Interest Group for Computer Graphics Conference Proceedings*, volume 19, pp. 215–224.

- Zhang, Z. (1998). Modeling geometric structure and illumination variation of a scene from real images. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1041–1046.
- Zickler, T.; Enrique, S.; Ramamoorthi, R. e Belhumeur, P. N. (2005). Reflectance sharing: Image-based rendering from a sparse set of images. In *Rendering Techniques*, pp. 253–264. Eurographics Association.