

8

Conclusões e trabalhos futuros

8.1

Conclusões e comentários finais

Neste trabalho, investigamos alguns aspectos relacionados à reconstrução de cenas a partir de imagens através de métodos de escultura do espaço. De certa forma, o trabalho aqui apresentado, se aproxima dos trabalhos de Sainz e Prock, uma vez que se baseia na realização do processo de escultura diretamente no espaço da cena com base no registro de informações através da técnica de mapeamento projetivo de texturas. Entretanto, diferentemente destes trabalhos, justificamos o uso de tal técnica não somente para simplificação da etapa de registro e otimização do processo de escultura, mas também como uma forma de lidar apropriadamente com os efeitos causados por aliasing durante a amostragem das informações necessárias a avaliação da foto-consistência dos voxels que compõem o espaço de reconstrução.

Além disso, procuramos tratar todos os subproblemas pertinentes à escultura do espaço no espaço da cena exclusivamente através de mapeamento de textura projetivo, incluindo tanto o tratamento da visibilidade quanto o da oclusão parcial causada pelos elementos determinados como foto-consistente nos estágios intermediários do processo de reconstrução. Sainz por exemplo, trata do problema de oclusão através de uma técnica bastante distinta, baseando-se na determinação da sombra gerada pelos elementos detectados como foto-consistentes sobre o restante do volume a ser esculpido).

Procuramos também explorar o uso do mapeamento de textura projetivo como forma de registro de informações relevantes em um nível não encontrado nos trabalhos anteriores. Por exemplo, propusemos a avaliação da foto-consistência dos voxels através de um critério estatístico que permite a adoção de limiares específicos para cada pixel das imagens de entrada, os quais, por sua vez são estimados com base no ruído introduzido por cada

um dos sensores das câmeras. Tais limiares são inseridos em uma textura, juntamente com as informações de oclusão para que posteriormente possam ser registrados e utilizados durante a avaliação da foto-consistência.

A principal inovação deste trabalho está, entretanto, no desenvolvimento de um método de escultura do espaço capaz de recuperar a forma e os atributos fotométricos de uma cena através de um processo de refinamento adaptativo. É verdade que Prock também propôs um método capaz de reconstruir uma cena de forma progressiva. Contudo, ele não o faz de forma adaptativa. Além disso, o método por ele proposto pode implicar em perdas de partes da cena caso o volume de reconstrução inicial não tenha resolução suficiente para capturar a maior parte das feições importantes. Através da adoção de uma estrutura espacial adaptativa e de critérios de subdivisão apropriados, conseguimos não só efetuar o processo de forma adaptativa como também garantimos que não haverá perdas causadas pelo processo por refinamento independentemente da resolução do volume de reconstrução inicial.

Finalmente, como resultado final dos esforços, desenvolvemos um sistema de reconstrução de objetos a partir de imagens que utiliza as técnicas de reconstrução aqui apresentadas.

Nas seções abaixo, efetuamos uma pequena digressão sobre cada um dos aspectos abordados no presente trabalho, enumerando as principais conclusões.

8.1.1

Processamento no espaço da cena

O processamento no espaço da cena, baseado na técnica de mapeamento projetivo de textura, não só possibilitou o tratamento correto e eficiente do problema de registro das informações provenientes de cada uma das câmeras, com também foi crucial para que o método pudesse ser aplicado sob condições adversas, em que as imagens de entrada eram de baixa resolução e foram bastante corrompidas por ruído proveniente dos sensores. Graças às operações de filtragem existentes nos procedimentos de mapeamento projetivo das placas gráficas atuais, foi possível realizar apropriadamente a amostragem das informações necessárias à etapa de determinação da foto-consistência, reduzindo consideravelmente os problemas de aliasing existentes nos métodos que efetuam o processamento no espaço das imagens. Além disso, através da técnica de mapeamento projetivo de texturas, nos foi possível lidar de forma adequada com o problema de gerenciamento das

informações sobre a visibilidade dos elementos do espaço de reconstrução, quer sejam voxels, quer sejam células de uma estrutura espacial hierárquica.

Apesar das vantagens proporcionadas, o processamento no espaço da cena também introduz algumas dificuldades inexistentes no processamento no espaço das imagens. Primeiramente, toda e qualquer informação necessária à realização do processo de escultura do espaço deve ser registrada sobre planos de referência através de mapeamento projetivo, o que nos obriga a codificá-las através de mapas de textura. Em nosso caso, o uso de mais informações codificadas através de mapas de textura implica em um maior número de cópias do framebuffer para memória convencional, o que pode chegar a ser proibitivo. Entretanto, cremos que através do cálculo da foto-consistência diretamente na placa gráfica tal problema será solucionado, pois não precisaremos efetuar tais cópias.

Um outro problema é o de que a filtragem das imagens, apesar de necessária, altera os valores dos pixels nas regiões próximas às transições entre regiões que representam algum tipo de classificação como, por exemplo, no caso dos mapas de segmentação e de visibilidade. Este efeito faz com que as fronteiras entre tais regiões se tornem imprecisas o que pode levar à introdução de artefatos indesejáveis na cena reconstruída. A simples desabilitação da operação de filtragem não resolve o problema pois nestes casos, as fronteiras podem ser afetadas significativamente por aliasing o que introduz artefatos muito piores.

Por este motivo, é fundamental que tais dados, antes de serem utilizados, sejam reclassificados através de funções capazes de remapear os novos valores nos valores de classificação originais, o que por sua vez, requer a escolha de funções de classificação adequadas. Estas funções normalmente são bastante simples; no entanto, requerem a escolha de limiares de separação apropriados, caso contrário a classificação original pode ser corrompida. Não conhecemos no momento uma estratégia melhor para lidar com este problema, já que não é possível, sem o auxílio de programação em placa, realizar uma filtragem seletiva, isto é, que não afete determinado grupos de pixels com certas características, sem alterar os demais.

8.1.2

Uso das informações sobre segmentação dos objetos de interesse nas imagens

O uso das informações de segmentação foi fundamental para que obtivéssemos sucesso nas reconstruções a partir das imagens obtidas por

nosso sistema de aquisição. Em primeiro lugar, através desta estratégia nos foi possível obter resultados razoáveis através de pouquíssimas imagens o que seria muito difícil se nos baseássemos somente em informações fotométricas.

Por outro lado, o uso de informações de segmentação nos obrigou a desenvolver estratégias capazes de lidar com o problema de segmentação de modo eficaz, pois a segmentação errônea dos objetos de interesse pode levar à obtenção de reconstruções incorretas. Por exemplo, podemos perder partes do objeto devido à segmentação não apropriada ou então podemos incluir parte do fundo da cena como objeto de interesse o que nos obriga a usar limiares para o teste de foto-consistência extremamente rígidos para que tais partes sejam removidas, o qual pode ser problemático principalmente quando o fundo da cena não é muito distinto das cores do objeto que desejamos reconstruir.

8.1.3

Estratégias de escultura do espaço por refinamento adaptativo

Concluimos também que os métodos de escultura do espaço convencionais realizam um número de operações de avaliação de foto-consistência desnecessário, principalmente quando o objeto de interesse ocupa uma porção restrita do espaço de reconstrução. Por este motivo, um dos focos deste trabalho foi desenvolver um método adaptativo que fosse capaz de concentrar esforços nas regiões do espaço próximas à região que contém a cena.

A solução que foi apresentada é baseada em um processo de refinamento no qual a estrutura da cena é descoberta progressivamente à medida em que o processo de reconstrução é realizado. Para que pudéssemos realizar o processo de reconstrução através de refinamento adaptativo foi fundamental a utilização das informações sobre a segmentação dos objetos nas imagens já que estas são as únicas informações que nos garantem de forma simples e segura a remoção de espaços vazios de grandes dimensões. Obviamente é possível também descartar grandes espaços extensos somente através das informações fotométricas, entretanto isto requer uma análise mais profunda e complexa sobre a natureza da variabilidade existente nas regiões das imagens registradas sobre o espaço da cena.

Uma questão crítica, relacionada à estratégia por refinamento adaptativo, é a forma como as informações provenientes das câmeras são amostradas durante a etapa de registro e avaliação da foto-consistência. Nestes casos, como as imagens são projetadas no espaço da cena em níveis de resolução de-

pendentes do grau de refinamento foi fundamental a utilização de operações de filtragem baseadas em mipmaps.

Os resultados demonstraram que a estratégia proposta é bastante eficiente quando comparada à estratégia convencional que se baseia em um processamento exaustivo sobre o espaço de reconstrução. Além disso, acreditamos que tal abordagem ainda pode se tornar muito mais eficiente, caso o teste para determinação da foto-consistência seja implementado diretamente em hardware gráfico. Desta forma, poderemos não só efetuar as operações de maneira muito mais rápida, como também evitaremos o atraso causado pelas cópias das informações da memória de vídeo para a memória convencional, operação está que corresponde à maior parte do tempo computacional gasto durante o processo de escultura do espaço.

8.1.4

Construção de sistemas de reconstrução de baixo custo

Finalmente, concluímos que através das técnicas apresentadas neste trabalho, é possível construir sistemas de reconstrução 3D de baixo custo, capazes de produzir resultados aceitáveis nos casos em que não é necessário uma grande precisão. Além disso, por serem de baixo custo, são facilmente escaláveis, como, por exemplo, através do acréscimo de um maior número de câmeras. Nada impede também que câmeras de alta resolução sejam usadas, o que aumentaria significativamente a qualidade das reconstruções obtidas. Resumindo, acreditamos que os resultados obtidos indicam que os métodos de escultura do espaço são bastante promissores e que podem futuramente ser utilizados extensivamente em aplicações que envolvem a aquisição de forma de cenas com qualidade fotométrica.

8.2

Trabalhos futuros

Neste trabalho apresentamos algumas contribuições aos métodos de reconstrução de cenas a partir de imagens através de escultura do espaço. Entretanto, é evidente que esta linha de pesquisa está longe de ser esgotada pois restam ainda muitos tópicos a serem investigados. Abaixo citamos alguns possíveis temas para investigação que podem ser seguidos com base no presente trabalho.

8.2.1

Programação em placas gráficas

Um dos primeiros tópicos a ser investigado futuramente é a verificação do ganho em eficiência que pode ser obtido através do cálculo da estimativa utilizada na etapa de determinação da foto-consistência, diretamente nas placas gráficas através de programação sobre fragmentos. O uso desta técnica elimina a necessidade de cópia do conteúdo do framebuffer para memória convencional o que, por sua vez, pode tornar os algoritmos que trabalham no espaço da cena muito mais eficientes.

Com o surgimento das novas placas gráficas acreditamos que a programação das estatísticas seja bem mais simples que a que pode ser realizada atualmente através da customização de registradores e combinadores. Acreditamos também que as linguagens utilizadas para a programação sobre fragmentos tenham alcançado um grau de abstração razoável tornando simples o processo de implementação.

8.2.2

Investigação de outras estruturas de dados espaciais

Em nosso trabalho, descrevemos o espaço de reconstrução da cena através de um esquema de subdivisão espacial, representado através de uma octree. Apesar dos resultados satisfatórios, acreditamos que outras estruturas de dados espaciais possam permitir uma maior adaptabilidade às características da cena, reduzindo ainda mais o número de elementos individuais a serem analisados.

Em especial, acreditamos que as árvores de partição binária (*bintrees*) sejam capazes de fornecer resultados superiores aos obtidos atualmente. Uma vantagem que pode ser obtida através desta estrutura é a de que os planos de subdivisão podem ser selecionados de forma arbitrária permitindo assim uma maior adaptabilidade à geometria da cena.

8.2.3

Uso de câmeras não-fixas

Nosso sistema de reconstrução é composto por um conjunto de câmeras fixas montadas sobre um cubo, as quais são calibradas com base em um padrão de calibração fixo no espaço da cena. Este tipo de configuração impõe sérias restrições ao número de imagens que podem ser utilizadas no

processo de reconstrução, pois o acréscimo de imagens requer a adição de novas câmeras no sistema de aquisição.

Um trabalho futuro consistiria em adaptar o sistema existente para que possa lidar com câmeras reposicionáveis, o que é viável já que o processo de calibração utilizado é capaz de calibrar câmeras que se movem suavemente e funciona mesmo quando o padrão está apenas parcialmente visível.

8.2.4

Comparação entre métodos para o registro das informações

O registro das informações no espaço da cena, necessários para a determinação de foto-consistência, também pode ser realizado em memória convencional através de técnicas de *warping projetivo* em vários passos.

Um trabalho futuro consiste em comparar a eficiência entre o processo de registro através do mapeamento projetivo de textura por hardware e o processo que envolve uma operação de warping por software.

8.2.5

Reconstrução em tempo real

Em algumas aplicações é essencial que o processo de reconstrução seja realizado em tempo real como, por exemplo, em aplicações de telepresença e imersão em ambientes virtuais. Nestes casos é fundamental que os algoritmos utilizados sejam os mais rápidos possíveis.

Para alcançar este objetivo é necessário a utilização de diversas técnicas em conjunto, algumas delas abordadas neste trabalho, e outras que foram apenas mencionadas nesta seção sobre trabalhos futuros.

Primeiramente, é fundamental que o processo de registro e determinação de foto-consistência seja realizado diretamente em hardware gráfico. Isto eliminará retardos introduzidos pela cópia de framebuffer além de liberar a CPU para a realização de outras tarefas. Um segundo aspecto que talvez seja essencial é a utilização de paralelismo. Podemos facilmente observar que os métodos de escultura do espaço são essencialmente paralelizáveis, pois várias etapas podem ser efetuadas de forma independente para cada uma das imagens, como, por exemplo a etapa de segmentação e a etapa de registro das informações no plano de referência. Um terceiro aspecto que deve ser levado em consideração, e que de certa forma já está sendo explorado, é o uso de estruturas de subdivisão espacial que nos permita aproveitar

não só a coerência espacial existente na cena, mas também a coerência temporal. A primeira, na verdade já é utilizada no método que apresentamos. O uso da coerência temporal, por sua vez, é fundamental em qualquer método que se proponha a realizar tarefas em tempo real.

8.2.6

Refinamento do teste probabilístico e busca por novos modelos

No capítulo 5 deste trabalho, descrevemos um teste probabilístico para determinação da foto-consistência dos elementos do espaço de reconstrução que leva em consideração erros locais nas observações provenientes de ruído produzido pelas câmeras. Vimos também, através dos resultados, que tal teste não se apresentou totalmente satisfatório, pois, a princípio, não leva em consideração outras fontes de erro, que estão presentes na reconstrução de cenas reais. A extensão deste teste para que possa lidar com fontes de erro mais gerais é naturalmente um tema que deve ser pesquisado em trabalhos de pesquisa futuros. Ademais, possíveis interações com os trabalhos de de Broadhurst [71, 72] e Bhotika [73], os quais procuram modelar o processo de reconstrução através de formalismos probabilísticos, devem ser cuidadosamente investigadas.

8.2.7

Uso de estimativa de superfície na determinação da foto-consistência

Neste trabalho, abordamos métodos que avaliam a foto-consistência de regiões do espaço, quer sejam voxels ou células de uma octree, através de amostras em uma região planar. Apesar de produzir bons resultados, esta abordagem limita consideravelmente a ação dos métodos de escultura do espaço.

Um aspecto que pretendemos investigar é a possibilidade de avaliarmos a foto-consistência em superfícies de referência mais genéricas, as quais seriam provenientes de uma estimativa da superfície da cena. De fato, o método que pretendemos investigar receberia como entrada uma subdivisão do espaço representando a envoltória visual, isto é, uma estimativa da superfície da cena a partir das suas silhuetas nas imagens. Tal subdivisão espacial seria triangulada em seus diversos níveis de resolução através de um processo conhecido como triangulação dual [78]. Desta forma, para cada célula, teríamos uma estimativa do fragmento de superfície da cena que passa em seu interior.

Com base nesta estrutura calcularíamos a envoltória fotométrica (*photo hull*) através da avaliação da foto-consistência de cada um de seus elementos com base nas superfícies estimadas. O processo seria aplicado primeiramente sobre as células dos níveis de menor resolução e posteriormente nas de maior resolução. Células inconsistentes seriam removidas do modelo, e em seguida, faríamos um ajuste na estimativa da superfície da cena. As células consideradas indefinidas seriam subdividas, tendo também suas superfícies locais reajustadas. Já as células foto-consistentes teriam seus fragmentos de superfície colorizados de acordo com uma combinação das porções das imagens sobre eles projetados. O resultado da aplicação deste método seria uma reconstrução poligonal texturizada do objeto em múltiplas resoluções.