

Detecção Automática da Localização dos Focos de Luz na Modelação de Baixos Relevos em Texturas PTM

João Garcia Barbosa João Luís Sobral Alberto José Proença
Universidade do Minho
Braga

jbarbosa, jls, aproenca@di.uminho.pt

Resumo

A modelação de baixos relevos com mapas polinomiais de texturas (PTM) permite uma análise pormenorizada dos seus detalhes. A geração dum modelo PTM de qualidade requer, contudo, a colocação de um conjunto elevado de focos de iluminação adequadamente distribuídos pela superfície de uma semi-esfera envolvente, e as coordenadas do seu posicionamento. Estas tarefas requerem ainda uma longa intervenção humana e estão sujeitas a erros, mas podem ser automatizadas e tornadas mais robustas com o uso de técnicas de processamento de imagem e de geometria espacial. Esta comunicação descreve as técnicas usadas para calcular a direcção dos focos de luz, a partir das coordenadas do centro de uma esfera colocada junto ao objecto, e do reflexo de cada um dos focos de luz na sua superfície. Apresenta ainda uma ferramenta de software que automatiza o processo de modelação PTM, o LPtracker, fazendo a leitura de todas as imagens captadas com o objecto, o cálculo e ajuste da posição dos focos de luz desse conjunto de imagens e a invocação do PTMfitter (da HP Labs), para a geração do ficheiro PTM.

Modelling bass reliefs with polynomial texture maps (PTM) allows a detailed analysis of their features. The generation of high quality PTM models requires, however, an adequate placement of a large set of spot lights over a surrounding dome, and the coordinates of these lighting positions. These tasks are still very time consuming and error prone, but they can be automated and become more robust through the use of image processing techniques and space geometry. This communication describes the techniques that were used to compute the direction of the lightings, from the coordinates of the centre of a sphere placed next to the object, and from the highlight positions on its surface. It also presents a software tool to automate the PTM modelling process, the LPtracker, which reads all images from the object, computes and adjusts the detected lighting positions at each image, and runs the PTMfitter (from HP Labs) to generate the PTM file.

Palavras-Chave

Modelação de Objectos, Visualização de Texturas, Técnicas de Processamento de Imagens, Mapas Polinomiais de Textura

1. Introdução

A herança cultural da humanidade é constituída por inúmeros baixos relevos com detalhes minuciosos, que se podem tornar deveras difíceis de analisar à vista desarmada e sem apoio de instrumentos ópticos de precisão. Os equipamentos fotográficos profissionais são actualmente excelentes instrumentos para o exercício dessa actividade, mas apenas permitem representar com precisão a imagem das superfícies, uma vez que apenas trabalham com duas dimensões. Contudo, algumas técnicas que exploram o comportamento da visão humana permitem criar a ilusão de tridimensionalidade.

Uma das mais comuns é a variação dinâmica da fonte de luz, permitindo que o cérebro humano tenha a ilusão da profundidade pelo movimento e localização das sombras criadas pelas irregularidades presentes na superfície de um

objecto. Sob esta perspectiva, a representação de um baixo relevo pode ser eficientemente analisada através do seu mapa polinomial de texturas (*Polynomial Texture Map - PTM*).

O PTM de um objecto obtém-se a partir de um conjunto de imagens captadas com uma câmara fotográfica fixa e variando adequadamente a localização dos focos de luz na superfície de uma semi-esfera envolvente. Para que a representação polinomial desse mapa de texturas tenha uma precisão aceitável, o conjunto de imagens utilizadas para o seu cálculo deverá ser significativo (da ordem das dezenas) e os focos de luz deverão ser adequadamente distribuídos sobre a superfície de uma semi-esfera envolvente. Só assim se consegue garantir que a iluminação está uniformemente distribuída, para que o cálculo dos coeficientes desse polinómio (que representa o comportamento da

textura da superfície captada) permita uma aproximação matemática do PTM mais precisa ao comportamento real de uma iluminação continuamente variável de um objecto. No caso de objectos de pequena dimensão (moedas, por exemplo), foram já construídas estruturas rígidas (cúpulas semi-esféricas) com um conjunto grande de focos de luz embutidos, permitindo uma rápida e correcta captação de todas as imagens. Para objectos ligeiramente maiores (com alguns decímetros), e em ambientes controlados de laboratório, estruturas rígidas emulando quartos de meridiano foram também usadas com sucesso. Contudo, para objectos de maiores dimensões, os focos de luz terão de ser manualmente colocados nas devidas posições.

O correcto posicionamento manual dos focos de luz, sobre uma superfície volumétrica e equidistantes do objecto a ser fotografado, é uma tarefa morosa e sujeita a erros. Técnicas recentemente introduzidas e adiante descritas apoiam o fotógrafo a planear a posição exacta dos focos de luz, ou a calcular as direcções de iluminação, facilitando assim a obtenção dos modelos PTM. Contudo, requerem ainda uma longa intervenção humana e não verificam (ou validam) se os focos de luz foram correctamente posicionados.

As técnicas de processamento de imagem e de geometria espacial propostas neste trabalho visam a automação do processo de geração da descrição PTM de um objecto, a partir de um conjunto alargado de fotografias desse objecto (ao lado de uma esfera negra), armazenado numa directoria. Os fundamentos teóricos necessários relacionados com a criação do mapa polinomial de texturas de um objecto e com a geometria de reflexão de luzes numa esfera, são descritos na secção 2. Com base neles, aplicam-se técnicas de processamento de imagem para se detectar a esfera preta nas imagens e para se encontrar os centros dos reflexos dos focos de luz nessa esfera, conforme se descreve na secção 3. Aplicando os resultados descritos nestas secções, é então possível calcular a direcção do foco de luz em cada imagem, e com esta informação gerar automaticamente o ficheiro com a descrição PTM de um objecto.

A ferramenta de software desenvolvida, o LPtracker, é descrita na secção 4. O LPtracker procura em todas as imagens da directoria seleccionada a localização da esfera preta, mostra ao utilizador a sua localização para que este confirme ou a modifique, e uma vez confirmada detecta os centros do reflexo do foco de luz em todas as imagens, calcula a posição dos focos de luz (e guarda-os num ficheiro de texto), e invoca o PTMfitter da HP Labs para que este gere o ficheiro PTM. Se o utilizador pretender, pode voltar atrás e validar a localização dos reflexos, corrigindo os que entender e actualizando o ficheiro PTM quando o solicitar.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Mapa Polinomial de Textura

Os aspectos relevantes de uma superfície como a difusão, oclusão, inter-reflexão e refracção variam mediante as condições de iluminação da mesma. Tradicionalmente, em computação gráfica, estas características de realismo de uma superfície são conseguidas através de métodos mo-

rosos e computacionalmente intensivos para a modelação tridimensional, a descrição de uma função de reflexão bidireccional (BDRF) para a superfície e a criação do *bump map* para provocar interferências no mapa de normais na superfície.

A necessidade de uma alternativa coerente levou ao surgimento de técnicas de modelação por transformação reflectiva de imagem (*Reflection Transformation Imaging - RTI*). Tom Malzbender et al. [Malzbender 01] propôs em 2001 uma das mais simples e eficientes técnicas, o mapa polinomial de textura (PTM).

Um PTM é uma representação 2D de um objecto baseado na sua imagem, que pode capturar com grande detalhe as características de iluminação da sua superfície, aproximando a BDRF em cada texel ao polinómio biquadrático

$$L(u, v, l_u, l_v) = a_0(u, v)l_u^2 + a_1(u, v)l_v^2 + a_2(u, v)l_u l_v + a_3(u, v)l_u + a_4(u, v)l_v + a_5(u, v) \quad (1)$$

onde (l_u, l_v) representa a projecção da direcção de luz no plano tangente da superfície. Os coeficientes são calculados a partir de um conjunto de imagens obtidas por uma câmara fixa junto do objecto, com iluminação proveniente de direcções diferentes previamente estabelecidas.

O cálculo destes coeficientes é efectuado pela melhor aproximação do polinómio de segundo grau ao conjunto discreto dos focos de iluminação colocados na superfície de uma hemisfera virtual envolvendo o objecto. Quanto maior for o número destes focos melhor será a precisão do resultado dos cálculos dos coeficientes.

Este polinómio descreve com uma precisão considerável as características de reflexão da superfície, permitindo modelar todos os detalhes num baixo relevo sem o trabalho tedioso de extracção e reconstrução tridimensional do mesmo. Outra grande vantagem da técnica de PTM é a extracção do mapa de normais de superfície a partir dos coeficientes do polinómio, permitindo a manipulação dos coeficientes de especularidade, difusão e brilho da função de reflexão Blinn-Phong [Malzbender 01].

2.2 Encadeamento do Processo de Aquisição

O cálculo dos coeficientes do polinómio requer o conhecimento prévio da posição do foco de luz em cada uma das imagens do conjunto usado no processo. O posicionamento de um elevado número de focos de luz é uma tarefa morosa que sugere procedimentos de automação, desde a construção de dispositivos rígidos de suporte de conjuntos de focos de luz, a esquemas de apoio à sua colocação no local da captação fotográfica [Malzbender 01].

O uso de dispositivos rígidos simplifica e acelera o processo de aquisição das imagens. No entanto, estes tipos de estruturas são pouco flexíveis para objectos de maior dimensão ou de vários tamanhos. Isto é particularmente crítico quando o objecto de estudo é um baixo relevo de grande dimensão e com acesso difícil a estruturas rígidas

de iluminação.

A necessidade de se adaptar o posicionamento de luz ao ambiente onde se irá desenrolar o processo de aquisição levou R. Scopigno a propôr um solução baseada num pré-planeamento do processo de aquisição [Dellepiane 06], o PTMplanner. Mediante as condicionantes físicas do local, este software permite gerar planos de posicionamento a serem utilizados durante o processo de captura, bem como a informação necessária para o processo de cálculo dos coeficientes do polinómio PTM na última fase do processo. Sugere ainda uma cobertura de iluminação mínima de 60 a 70 posições distintas de luz dispostas em meridianos.

Em contraponto, M. Mudge propõe uma abordagem alternativa sem o prévio planeamento minucioso do posicionamento dos focos de luz [Mudge 06]. Com a introdução de uma esfera preta difusa na imagem, seguindo metodologias de alguns autores [Masselus 02], ele usa a geometria da esfera para calcular a direcção do foco de luz, aproximando a reflexão possível na esfera a uma função de reflexão Lambert. A Fig. 1 sugere como calcular as coordenadas (S_x, S_y) do ponto de reflexão de um foco de luz L numa esfera unitária, com origem no centro da esfera, a partir das coordenadas (C_x, C_y) e (H_x, H_y) , que representam respectivamente a distancia em pixeis do centro da esfera real e do centro de reflexo, relativamente ao canto superior esquerdo da imagem

$$S_x = dx/r = (H_x - C_x)/r \quad (2)$$

$$S_y = -dy/r = -(H_y - C_y)/r \quad (3)$$

A normal unitária à superfície da esfera nesse ponto vem definida por

$$(S_x, S_y, \sqrt{1.0 - S_x^2 - S_y^2}) \quad (4)$$

Convertendo de coordenadas cartesianas para esféricas, as inclinações dos vectores da normal e da direcção do foco de luz vêm dadas por

$$\Phi_N = \cos^{-1}(\sqrt{1.0 - S_x^2 - S_y^2}) \quad (5)$$

$$\Phi_L = 2.\cos^{-1}(\sqrt{1.0 - S_x^2 - S_y^2}) \quad (6)$$

tendo em conta um ponto de vista localizado no infinito. O outro ângulo das coordenadas esféricas vem dado por

$$\Theta_L = \sin^{-1}(S_y/\sin(\Phi_L)) \quad (7)$$

Desta forma, o vector normalizado de direcção do foco de luz é dado por L

$$(\sin(\Phi_L) * \cos(\Theta_L), \sin(\Phi_L) * \sin(\Theta_L), \cos(\Theta_L)) \quad (8)$$

O processo descrito depende do utilizador para encontrar, em cada imagem, as coordenadas do centro da esfera e o centro dos reflexos. No entanto, como sugerido em [Mudge 06], este processo pode ser automatizado com algoritmos de visão por computador conforme apresentado a seguir.

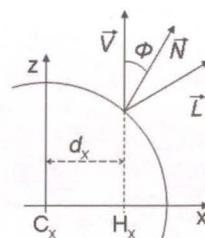


Figura 1. Cálculo da direcção de luz no 1º quadrante da esfera



(a) Detalhe de esfera junto a rocha com o Homem de Piscos



(b) Detalhe da esfera junto à placa Fariseus 1a

Figura 2. Exemplos com uma esfera preta

3. Automação do Processo

3.1 Detecção da Esfera Preta

O processo de detecção automática da localização dos focos de luz assenta na detecção inicial de uma esfera preta na imagem (Fig. 2(a)), possibilitando a detecção posterior do reflexo de cada um dos focos de luz nessa esfera. O desenvolvimento de um processo robusto para localização da esfera envolve um conjunto de algoritmos de visão, uma vez que se trata de uma detecção em ambiente aberto, onde as condições de luminosidade não podem ser controladas e onde o fundo da imagem pode apresentar características que se podem confundir com a própria esfera (Fig. 2(b)). O processo desenvolvido envolve quatro fases:

1. Pré-selecção da região de interesse na imagem
2. Remoção da sombra da esfera causada pelo foco de luz
3. Detecção do gradiente da imagem
4. Detecção do contorno da esfera e correspondente centro de massa

A pré-selecção de uma região de interesse tem por objectivo acelerar o processo de detecção da esfera, eliminando o processamento de determinadas zonas da imagem. Esta fase consiste em seleccionar uma região da imagem envolvente à esfera. Quando não é explicitamente indicada uma região de interesse toda a imagem é analisada. A incidência de um foco de luz sobre a esfera tende a produzir uma sombra, que é facilmente confundida com a própria esfera (Fig. 2(a) e 2(b)). A segunda fase do

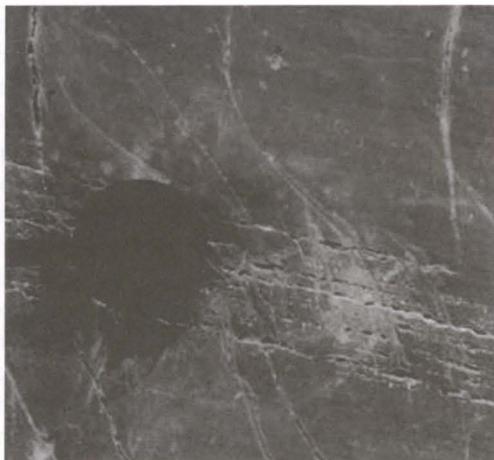


Figura 3. Mediana do conjunto de imagens na rocha com o Homem de Piscos

processamento consiste em remover esta sombra para que, posteriormente, se detecte com precisão o contorno da esfera. O processo de construção do PTM assenta na produção de um conjunto de imagens em que o foco de luz cobre os vários pontos da cúpula envolvente à imagem de uma forma homogénea. Assim, a posição da sombra também varia de forma homogénea. Esta segunda fase calcula a mediana das várias imagens produzidas, variando o foco de luz (ou de um sub-conjunto dessas imagens). Desta forma é possível obter uma imagem da esfera em que a sombra é completamente removida (Fig. 3).

A terceira fase de detecção da esfera consiste em aplicar uma detecção de contornos à mediana das imagens produzida pelo passo anterior. Infelizmente, em várias situações o contorno da esfera não é suficiente pronunciado para produzir um valor de gradiente suficientemente alto para detectar o contorno da esfera (caso Fig. 2(a)). Por outro lado, quando o fundo da imagem é de uma cor semelhante à esfera, não é possível aplicar uma binarização tradicional para segmentar a esfera do fundo da imagem (caso da mediana produzida para o conjunto de imagens da Fig. 2(b)). O problema reside no facto de o fundo da imagem, em geral, não ser homogéneo, gerando valores elevados para o gradiente. A solução passa por aplicar um filtro de suavização antes de calcular o gradiente, suavizando assim o fundo da imagem (e a esfera). No entanto, os tradicionais filtros de Gauss não são adequados para este caso, uma vez que também suavizam o contorno da esfera. A preservação deste contorno é indispensável para uma detecção com precisão do centro de massa da esfera. Face a este objectivo optou-se por aplicar um filtro de mediana de média dimensão (7x7). Este filtro preserva o contorno da esfera, suavizando o fundo da imagem e reduzindo, assim, os correspondentes valores do gradiente. As figuras 4(a) e 4(b) apresentam o resultado do filtro de Sobel, aplicado à imagem da figura 3., sem e com o filtro de mediana, respectivamente.

A última fase da detecção da esfera consiste em aplicar



(a) Filtro Sobel sem mediana



(b) Filtro Sobel com mediana

Figura 4. Aplicação de filtro Sobel



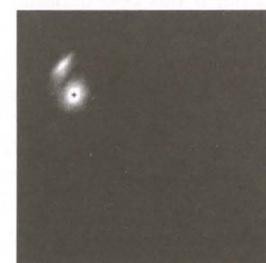
(a) Esfera numa das imagens



(b) Resultado da binarização



(c) Resultado da etiquetagem



(d) Centro de reflexo

Figura 5. Diferentes fases de detecção de centro de reflexo

a transformada de Hough à imagem resultante do passo anterior, aproximando o contorno da esfera por um círculo. A estratégia convencional consiste em binarizar a imagem obtida no passo anterior, seleccionando os pontos onde o gradiente é maior e aplicando, de seguida, a transformada. No entanto, o processo convencional não apresenta precisão suficiente na detecção dos contornos da esfera, uma vez que o processo de selecção dos pontos com maior gradiente remove informação que é importante para aproximar com precisão o contorno da esfera a um círculo. Para solucionar este problema desenvolveu-se uma transformada de Hough que analisa directamente a imagem resultante do gradiente. Esta transformada acumula no espaço de Hough os valores do gradiente, ao contrário da transformada tradicional que incrementa uma unidade ao espaço de Hough para cada píxel branco.

3.2 Detecção do Reflexo

Após a correcta identificação do centro da esfera e dos seus limites pelo processo descrito anterior, o próximo passo

será detectar o centro de cada reflexo que determina a direcção do foco de luz (Fig. 5(a)). Para a identificação do centro de massa foi utilizado um processo com cinco fases encadeadas:

1. Conversão a escala de cinzas
2. Remoção da informação exterior à esfera
3. Binarização da imagem
4. Etiquetagem e cálculo de centro e área
5. Escolha de reflexo, caso exista mais do que um

As duas primeiras fases, conversão a tons de cinza e remoção da informação exterior à esfera, tentam eliminar toda a informação não relevante exterior à esfera detectada, bem como a interferência das variações cromáticas no algoritmo de etiquetagem.

A terceira fase binariza a imagem com um brilho elevado (o reflexo do foco de luz provoca normalmente uma sobre-exposição na fotografia) por forma a eliminar todos os ruídos de iluminação presentes na superfície da esfera (Fig. 5(b)). Outro objectivo da binarização é a criação de zonas bem definidas, uma vez que podem existir vários candidatos a reflexo do foco de luz, devido a inter-reflexões com outros objectos.

A identificação e levantamento de cada um dos reflexos é realizado por um processo de etiquetagem, obtendo não apenas uma identificação por cor (Fig. 5(c)), mas também a área do reflexo e o seu centro de massa, através das equações

$$A(tag) = NPR \quad (9)$$

$$C_X(tag) = \frac{\sum P(tag)_x}{A(tag)} \quad (10)$$

$$C_Y(tag) = \frac{\sum P(tag)_y}{A(tag)} \quad (11)$$

onde NPR é o número total de píxeis do reflexo, $P(tag)_x$ e $P(tag)_y$ representam respectivamente as coordenadas (x, y) respectivamente de um ponto pertencente ao reflexo tag .

Na última fase selecciona-se o reflexo do foco de luz original de entre os reflexos detectados, caso exista mais que um (Fig. 5(d)). O algoritmo faz dois tipos de selecção:

- eliminação dos reflexos de menor dimensão considerando-os como ruído; são eliminados aqueles que entre si sejam inferiores a 20% do de maior área;
- se sobrar ainda mais que um reflexo, considera-se que o reflexo do foco de luz original é o que se encontra mais próximo do centro da esfera.

O cálculo da distância do centro do reflexo ao centro da esfera obtém-se por

$$dc = \sqrt{1.0 - (CB_x - C_x)^2 - (CB_y - C_y)^2} \quad (12)$$

onde (CB_x, CB_y) é o centro da bola já calculado anteriormente e (C_x, C_y) o centro do reflexo. Usando as técnicas descritas na secção 2.2 obtemos a direcção do foco de luz.

4. LPtracker

O LPtracker é uma aplicação em Java para automação do encadeamento descrito. A aplicação é composta por quatro tarefas encadeadas e apresentadas em separadores principais:

1. escolha do conjunto de imagens a processar e selecção da área que contém a bola
2. detecção e ajuste do centro e raio da esfera
3. detecção, visualização e ajuste do centro dos reflexos
4. visualização do ficheiro LP (*Light Position*), com as coordenadas de direcção de luz, requeridas pelo PTMfitter

Os três primeiros separadores seguem a mesma filosofia para apresentar informação relativa a cada uma das imagens do conjunto a processar: no lado direito miniaturas seleccionáveis de cada uma das imagens; no lado esquerdo um painel de desenho e ajuste sobre uma imagem seleccionada.

No processo de procura de esfera nas imagens, o LPtracker tem automaticamente seleccionada a imagem toda, mas começa por verificar se a dimensão do ficheiro de imagem não excede um valor pré-definido. Caso exceda, a aplicação pede ao utilizador que seleccione uma área menor. Esta opção deveu-se a limitações da JVM¹ e da preocupação com reduzir tempos de espera do utilizador. Se se considerar um conjunto de análise com 60 imagens (ver secção 2.2) com uma resolução de 12Mpx (resolução típica das actuais máquinas fotográficas profissionais) o carregamento em memória dessas imagens todas (não compactadas) iria representar a disponibilização de aproximadamente 3GB de memória primária. O processo de transferência de uma imagem de 12Mpx é moroso uma vez que para além do tempo necessário de leitura do suporte de armazenamento, acresce o tempo de necessário para descompressão do formato (tipicamente as imagens usam o formato JPEG). Realizar esta operação sempre que a imagem é requerida diminuiria o tamanho de memória necessário mas aumentaria o tempo total de execução da aplicação. Outro problema surge com o tempo necessário para pesquisar uma esfera, que tipicamente não excede 10% da área total, na imagem. Tendo em conta estes factores no primeiro separador, caso a imagem seja superior a 2Mpx, é pedido ao utilizador que seleccione uma área que contenha a esfera. Uma vez que a posição da esfera é fixa (a posição da câmara é fixa em todas as imagens) a selecção realizada sobre uma das imagens é usada como área de recorte para todas as imagens do conjunto e alimentadas à tarefa seguinte, de detecção de esfera.

¹Java Virtual Machine

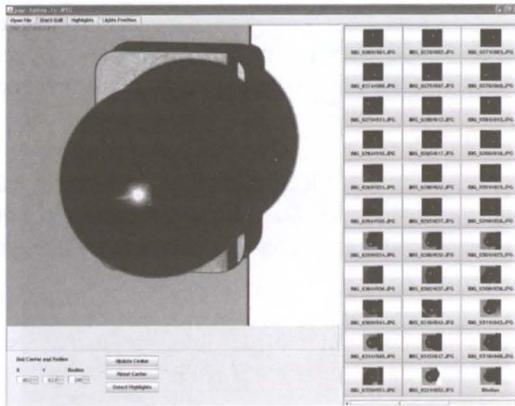


Figura 6. Detecção da esfera e seu centro

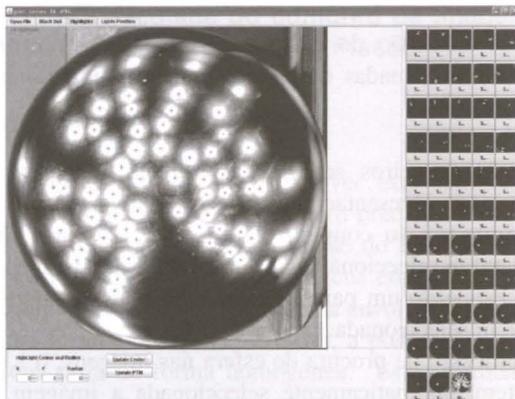


Figura 7. Detecção dos centros de reflexo

Após o software ter realizado as operações para a detecção da esfera os resultados são apresentados no segundo separador (Fig. 6). As miniaturas neste separador mostram a área previamente seleccionada pelo utilizador. O painel de desenho permite o ajuste do centro e raio da esfera, usando como fundo a imagem respectiva de cada uma das miniaturas, conforme selecção de utilizador. O utilizador poderá despoletar a detecção dos centros de reflexo se estiver satisfeito com os parâmetros que descrevem a esfera (posição de centro (C_x, C_y) e raio r).

Para o processo de detecção do centro de reflexo apenas é considerada, em cada imagem, a área que contém a esfera $(C_x - r, C_y - r, r^2, r^2)$. O resultado da detecção do centro de reflexo é associado a cada uma das miniaturas correspondentes, no terceiro separador, permitindo assim ao utilizador verificar, e se necessário ajustar, cada um dos centros de reflexo no painel de desenho. É ainda gerada uma imagem extra com todos os reflexos do conjunto de imagens sendo esta a imagem por omissão (Fig. 7).

O último separador permite visualizar o ficheiro LP para verificação de pequenas inconsistências que possam ocorrer e permite a invocação do PTMfitter.

5. Conclusões

A técnica de uso da esfera preta tinha-se revelado um das mais eficientes em campo como demonstrado em

[Mudge 06]. O processo automatizado descrito nesta comunicação consegue de uma forma eficiente simplificar e agilizar todo o processo de extracção da direcção de luz a partir dos reflexos, permitindo ao utilizador um acompanhamento passo a passo de todo o processo e a sua intervenção nas fases chave do mesmo, caso necessário.

O processo de detecção da esfera ainda necessita de algumas melhorias, nomeadamente a redução do seu tempo de execução recorrendo a técnicas mais eficientes, como por exemplo a selecção de apenas um subconjunto de imagens. O erro de paralaxe resultante da simplificação do modelo na equação (5), no cálculo da direcção de luz na função de reflexão de Lambert poderá ser corrigido automaticamente pelo LPtracker.

Um dos resultados interessantes do software é a última imagem gerada pela detecção do centro de reflexo, que junta todos os reflexos permitindo ao fotógrafo verificar de imediato se o posicionamento dos focos de luz foi homogéneo ou não.

6. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a disponibilização de imagens captadas por Mark Mudge e Carla Schroer (Cultural Heritage Imaging, <http://www.c-h-i.org>) no Parque Arqueológico do Vale do Côa (PAVC), bem como as sugestões apontadas por Tom Malzbender (HP Labs) no decurso dos ensaios do LPtracker.

Referências

- [Dellepiane 06] M. Dellepiane, M. Corsini, M. Callieri, e R. Scopigno. High quality ptm acquisition: Reflection transformation imaging for large objects. Em *VAST'06: Proc. 7th Int. Symp. Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Cyprus, 2006.
- [Malzbender 01] Tom Malzbender, Dan Gelb, e Hans Wolters. Polynomial texture maps. Em *SIGGRAPH'01: Proc. 28th Conf. Computer Graphics and Interactive Techniques*, USA, 2001.
- [Masselus 02] V. Masselus, Ph. Dutré, e F. Anrys. The free-form light stage. Em *EGRW'02: Proc. 13th Eurographics Workshop on Rendering*, Switzerland, 2002.
- [Mudge 06] M. Mudge, T. Malzbender, C. Schroer, e M. Lum. New reflection transformation imaging methods for rock art and multiple viewpoint display. Em *VAST'06: Proc. 7th Int. Symp. Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, Cyprus, 2006.