GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES TÉRMICAS COM O AUXÍLIO DE UM SCANNER 3D

A. G. Krefer*, M. A. de Souza*, T. M. Centeno*, H. R. Gamba*, G. B. Borba**

* Prog. de Pós-Grad. em Eng. Elétrica e Informática Industrial - CPGEI/UTFPR, Curitiba, Brasil
** Prog. de Pós-Grad. em Eng. Biomédica - PPGEB/UTFPR, Curitiba, Brasil
email: andriy.krefer@gmail.com

Resumo: Imagens térmicas podem retratar valores de temperatura corporal e por isso são utilizadas como ferramenta de diagnóstico. Técnicas de termografia convencionais geram apenas imagens bidimensionais. O presente artigo propõe um método para a geração de superfícies térmicas tridimensionais. O conjunto de técnicas conhecido como *Structure from Motion* (SfM) é utilizado para restaurar informações tridimensionais de imagens bidimensionais e auxiliar na determinação da estrutura do corpo e posicionamentos da câmera. São utilizadas imagens térmicas adquiridas em torno do voluntário e a malha 3D adquirida através de um scanner 3D. Ambas são fundidas em uma superfície térmica 3D sem costuras ou descontinuidades na textura.
Palavras-chave: Imagens térmicas, reconstrução 3D, fusão de imagens.

Abstract: Thermal images can be used on body temperature measurements and as a diagnosis tool. Conventional thermography techniques produce only 2D images. We propose a methodology to generate 3D thermal surfaces. Using a set of algorithms called Structure from Motion (SfM), we were able to get the required data to assist the 3D projection of 2D images over the scanned 3D surface. The resulting surface has a seamless and continuous texture.
Keywords: Thermal Images, 3D reconstruction, structure from motion.

Introdução

Imagens infravermelhas ou termográficas são utilizadas como uma técnica diagnóstica através das variações térmicas provenientes do corpo humano. Os sensores infravermelhos atuais são extremamente sensíveis na medição de diferenças térmicas. Desse modo, a expansão da termografia para aplicações biomédicas está se tornando uma técnica muito útil para auxiliar no diagnóstico de diversas doenças, tais como: oncologia, doenças vasculares, doenças respiratórias, procedimentos cirúrgicos e de forma geral na verificação da vitalidade dos tecidos [1].

As imagens infravermelhas obtidas podem proporcionar informações fisiológicas relevantes se comparadas com outros métodos de imageamento médico, os quais na maioria das vezes proporcionam somente informações anatômicas. Como principais vantagens pode-se citar: é de rápida aquisição, é um método não-invasivo (por não utilizar nenhum tipo de radiação e nem meio de contraste), e também não precisa contato com o paciente. No entanto, existem algumas limitações, por exemplo, geram apenas imagens bidimensionais da superfície externa do corpo.

Desse modo, esse artigo apresenta um método para a geração de modelos térmicos tridimensionais, os quais possam ser utilizados em aplicações biomédicas, de forma a manter a geometria tridimensional precisa além da incorporação das imagens térmicas. A literatura apresenta poucos trabalhos com essa abordagem, sendo que o mais significativo é a geração de um modelo 3D térmico para análise de úlceras em pés diabéticos [2], permitindo um diagnóstico e monitoramento não invasivo.

O método proposto no presente artigo utiliza o *Structure from Motion* (SfM) para a reconstrução 3D da face do voluntário a partir de imagens térmicas bidimensionais. A reconstrução também estima as posições e rotações da câmera térmica no espaço tridimensional para todas as imagens adquiridas. Com essas informações é possível fazer a projeção da textura térmica sobre a superfície 3D estimada pelo SfM.

Entretanto, devido à sua maior resolução espacial, atualmente o *scanner* 3D é considerado o padrão-ouro para a aquisição de superfícies. Porém o *scanner* é incapaz de prover os valores de temperatura do corpo.

Sendo assim, esse artigo propõe a utilização do SfM como uma etapa intermediária para auxiliar na projeção das imagens infravermelhas sobre a superfície 3D adquirida pelo *scanner*.

Materiais e métodos

Imagens térmicas – Todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica na faixa infravermelha do espectro eletromagnético, que compreende comprimentos de onda de 0,7 a 1000 μm. As câmeras infravermelhas, também chamadas de câmeras térmicas, possuem sensores capazes de captar essa radiação. Como resultado, o dispositivo é capaz de gerar uma imagem na qual cada pixel corresponde a um valor de temperatura.

Structure from Motion (SfM) – É um conjunto de técnicas utilizado para a reconstrução tridimensional de um objeto dadas múltiplas imagens bidimensionais como entrada. Como resultado, o algoritmo provê tanto os pontos no espaço 3D quanto os posicionamentos das câmeras. As principais etapas são: detecção de pontos salientes (*features*), reconstrução da nuvem de pontos e

reconstrução da superfície.

Modelagem da câmera – Para que a determinação de pontos no espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais seja possível, são necessárias as relações matemáticas que mapeiam essa transformação. A Equação (1) é conhecida por modelar câmeras do tipo *pinhole* [3].

$$X_{ch} = K.R[I \mid t].X_{wh} \quad (1)$$

Xch é uma matriz coluna 3x1 que representa um ponto no sistema de coordenadas da imagem, em coordenadas homogêneas. X_{wh} é uma matriz 4x1 representando um ponto no espaço tridimensional no sistema de coordenadas global. *K* é conhecida como matriz intrínseca e modela parâmetros internos da câmera [3].

A equação também modela a posição e a inclinação da câmera no momento da aquisição da imagem. *R* é uma matriz de rotação 3x3, *I* é a matriz identidade 3x3 e *t* é uma matriz 3x1 com as translações em relação a *x*, *y* e *z* nas coordenadas globais [3].

A matriz intrínseca *K* modela parâmetros característicos da câmera e lente como distância focal e *offsets* (deslocamentos) do sensor em relação à projeção do plano de imagem [3]. A Equação (2) explicita esses parâmetros de *K*.

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & cx \\ 0 & f & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde *f* é a distância focal em pixels e *cx* e *cy* são os *offsets* da projeção do plano de imagem no sensor da câmera (em pixels). Em geral, os valores de *cx* e *cy* são a metade da largura e da altura do sensor, respectivamente, indicando que a imagem é projetada no centro do sensor.

Normalmente, a distância focal nominal f_{mm} de uma lente é fornecida em milímetros pelo fabricante. Nesse caso, pode-se encontrar a distância focal em pixels através da Equação (3).

$$f = f_{mm}.(d_{px}/d_{mm}) \quad (3)$$

Onde a largura d_{mm} do sensor é expressa em milímetros e a largura da imagem d_{px} produzida em pixels.

Voltando à Equação (1), a matriz $R[I \mid t]$ é chamada de matriz extrínseca, pois mapeia os parâmetros externos: translações (através de *t*) e rotações (através de *R*) em relação a *x*, y e *z* nas coordenadas globais.

Resultados

O *scanner* 3D Gemini da empresa Creaform foi utilizado para a aquisição da malha 3D. Ele possui uma resolução 0,4 mm nos eixos x e y e 0,2 mm em z. A Figura 1 mostra a superfície adquirida, respectivamente com e sem textura.

(a) (b)

Figura 1: Superfícies 3D adquiridas com o *scanner*.

A câmera infravermelha FLIR modelo A325 foi utilizada para a aquisição das imagens térmicas. Ela possui sensibilidade a comprimentos de onda de 7,5 a 13µm e pode registrar temperaturas de -20 a 120 ºC com uma resolução térmica de 0,05 ºC. Grava filmes a uma taxa de 30 quadros por segundo com uma resolução de 320 x 240 pixels. A lente utilizada apresenta distância focal nominal de 18 mm.

A câmera é afixada em um suporte rotatório (representado na Figura 2). Um motor com controle de velocidade acoplado permite a captura de imagens igualmente espaçadas e sem trepidações. Ao término de uma volta completa, o fim de curso é detectado através de uma chave mecânica e o motor é desligado. O suporte permite ajuste de altura (*h*), distância ao centro (*d*), inclinação da câmera (*α, β* e *γ*) e posicionamento (*θ*).

Todas as coletas de imagens térmicas foram conduzidas em uma sala com temperatura e circulação de ar controladas, mitigando possíveis artefatos provenientes de variações térmicas.

Primeiramente, o voluntário é posicionado no centro do dispositivo. Em seguida a distância (*d*), altura (h) e inclinação (*α, β* e *γ*) da câmera são ajustadas de maneira que o voluntário permaneça enquadrado durante todo o percurso da câmera. O foco da câmera é então regulado para o posicionamento definido.

O voluntário é instruído a permanecer imóvel para o início da captura. A gravação da sequência de imagens térmicas, a 30 quadros por segundo, é então iniciada. O motor é ligado e é feita a captura das imagens com o ângulo de rotação (*θ*) variando de 0 a 360°. Das imagens coletadas, são selecionadas 70, igualmente espaçadas.

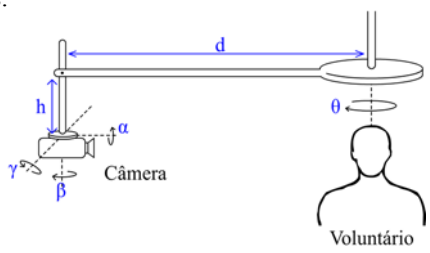
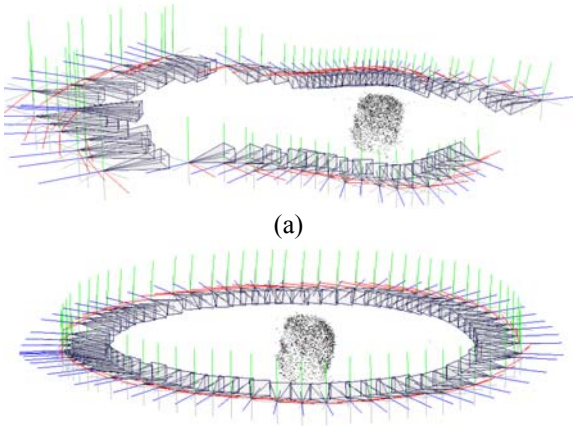


Figura 2: Suporte rotatório para aquisição das imagens térmicas.

O processo de reconstrução 3D a partir das imagens térmicas bidimensionais (nesse caso o SfM) inicia-se com a determinação dos pontos e câmeras no espaço tridimensional. Para isso utilizou-se o *software* PBA (*Parallel Bundle Adjustment*) [5]. As entradas do algoritmo são as imagens térmicas e as correspondências entre os pontos salientes. A saída está retratada na Figura 3-(a), onde a nuvem de pontos aparece ao centro, circundada pelas posições e rotações

estimadas da câmera nas diferentes imagens.

O PBA também aceita como parâmetro a matriz intrínseca da câmera de cada imagem. Tendo-se a dimensão da largura do sensor da câmera (d_{mm} = 8 mm), a resolução de saída das imagens (d_{px} = 320 pixels), a distância focal nominal (f_{mm} = 18 mm) e considerando o plano de imagem centralizado (cx = 320/2 = 160 pixels e cy = 240/2 = 120 pixels), utilizando-se a Equação (3) chega-se à matriz intrínseca estimada K da câmera, retratada na Equação (2). A Figura 3-(b) apresenta os resultados utilizando-se esta matriz intrínseca estimada.



(a) (b)

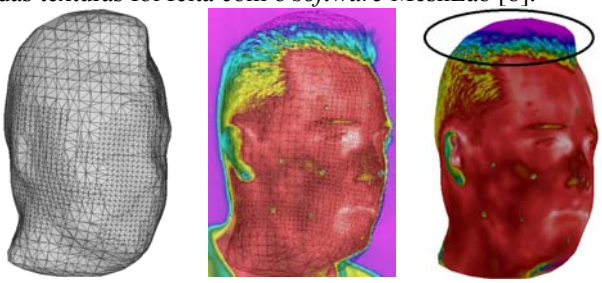
Figura 3: (a) Triangulação convencional das câmeras. (b) Triangulação com a matriz intrínseca previamente estimada.

Até aqui foram obtidas a nuvem de pontos esparsa e as matrizes extrínsecas da câmera térmica, as quais contêm as informações de posicionamento e rotação desse dispositivo. Essa primeira nuvem de pontos é do tipo esparsa, pois obtém apenas os pontos salientes triangulados. A determinação dos pontos intermediários gera a nuvem de pontos densa e é feita através do *software* PMVS (*Patch-based Multi-view Stereo Software*) [6].

A nuvem de pontos densa ainda possui ruídos e pontos provenientes de objetos do fundo. Portanto é realizado um processo de segmentação a fim de limpar esses pontos que não são de interesse no experimento. O PMVS realiza esse processo através das matrizes das câmeras e das máscaras de segmentação. As máscaras são obtidas pela limiarização das imagens originais. A limiarização é bastante efetiva uma vez que a temperatura do corpo humano está bem acima da temperatura de outros objetos na sala.

Com a nuvem pontos densa segmentada podemos gerar a malha tridimensional. Através do método Poisson de reconstrução de superfícies [7] é possível, a partir de um conjunto de pontos 3D, estimar uma superfície 3D, ou seja, um conjunto de faces poligonais. A Figura 4-(a) mostra a superfície tridimensional obtida.

Na Figura 4-(b) está a malha da Figura 4-(a) com a imagem térmica sobreposta, na visão de uma das câmeras. Na Figura 4-(c) está a malha após a projeção da textura térmica provinda da combinação das imagens de todas as câmeras. A área em destaque na Figura 4-(c) será abordada na discussão dos resultados. A projeção das texturas foi feita com o *software* MeshLab [8].



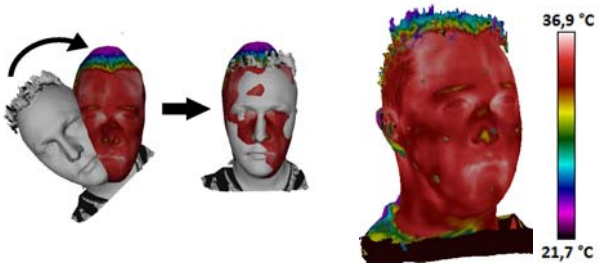
(a) (b) (c)

Figura 4: (a) Superfície 3D gerada a partir das imagens térmicas. (b) Imagem térmica sobreposta à superfície obtida em (a). (c) Malha 3D térmica (superfície 3D em (a) + imagens térmicas).

Apesar do sucesso da reconstrução 3D e da projeção da textura térmica a partir das imagens infravermelhas, o *scanner* apresenta uma superfície com maior resolução (Figura 1). Desse modo, propomos a utilização da malha provinda do SfM como auxiliar na projeção da textura térmica sobre o malha do *scanner*.

Isso é feito alinhando-se a superfície do *scanner* com a superfície do SfM e, utilizando os mesmos posicionamentos de câmera, fazendo a projeção sobre a superfície do *scanner*. Outra maneira de visualizar o método é observando a Figura 2-(b) e imaginar a malha do *scanner* sendo posicionada no lugar da estrutura central (nuvem de pontos) para que as texturas possam ser projetadas de maneira adequada.

O processo de alinhamento entre as malhas foi feito de maneira manual e é apresentado na Figura 5-(a). No lado esquerdo da figura são apresentadas as malhas antes do alinhamento e, no lado direto, alinhadas. A malha cinza é a proveniente do *scanner*, enquanto, a colorida, do SfM. Após o alinhamento, chega-se ao resultado final com a projeção das texturas térmicas sobre o modelo do *scanner*, sendo apresentado na Figura 5-(b).



(a) (b)

Figura 5: (a) Processo de alinhamento entre as malhas. (b) Malha do *scanner* com a textura térmica projetada.

Discussão

Para determinar as posições dos pontos e matrizes intrínseca e extrínseca das câmeras, o PBA tenta resolver um sistema sobredeterminado de equações não-lineares. Devido à presença de ruídos, possíveis distorções não previstas no modelo matemático da câmera e outros problemas inerentes da transformação projetiva, não é possível encontrar uma solução única

para o sistema. Portanto, busca-se otimizar uma solução com o menor erro de reprojeção possível. O erro de reprojeção é calculado entre a posição real do ponto na imagem e a projeção do ponto tridimensional estimado sobre o plano de imagem da câmera.

Por padrão, o PBA considera as câmeras separadamente e tenta encontrar uma matriz intrínseca individual para cada uma. A Figura 3 mostra a nuvem de pontos adquirida rodeada pelas câmeras. Sabendo-se que as imagens foram adquiridas com o auxílio de um suporte rotatório de distância ao centro fixa, pode-se perceber que em (a) as posições das câmeras não estão condizentes com esse cenário. O que acontece é que o PBA compensou a distância da câmera com a alteração de outros parâmetros na matriz intrínseca. Entretanto isso não é desejável.

Sabendo-se que todas as imagens foram adquiridas com a mesma câmera, todas compartilham a mesma matriz intrínseca. A Figura 3-(b) retrata a saída do algoritmo ao se utilizar a matriz estimada anteriormente em todas as câmeras. Visualmente é possível perceber que a solução é muito mais próxima das condições em que o experimento foi realizado. Ou seja, onde foram adquiridas diversas imagens circundando o voluntário.

Em relação à malha obtida pelo SfM, pode-se observar uma falha na geometria do topo da cabeça, destacada na Figura 4-(c). Outra maneira de perceber que se trata de uma falha é através da cor da textura na região, que é a mesma do fundo, como mostra a Figura 4-(b). Isso ocorreu porque não foram obtidas imagens do topo da cabeça, portando é uma área em que não houveram pontos triangulados. Na etapa geração da malha a partir da nuvem de pontos, o método Poisson assumiu uma estrutura incorreta devido à ausência de pontos na região. Para a correção desse resultado deve-se fazer a aquisição de imagens de maneira que não existam áreas de oclusão. Entretanto, como essa malha é utilizada apenas como auxiliar em uma etapa intermediária e não é a malha utilizada no resultado final, essa imprecisão pode ser ignorada.

A Figura 5-(b) mostra o resultado final, a superfície 3D do *scanner* com a projeção das imagens térmicas. O alinhamento foi feito de forma manual e, a partir de uma análise visual, mostra-se correto. Devido ao alto número de imagens térmicas (70) não apresenta costuras ou descontinuidades na textura.

Conclusão

A estimativa da matriz intrínseca da câmera a partir dos valores nominais dos parâmetros fornecidos pelo fabricante foi de grande valia para a determinação das posições e rotação da câmera no momento da aquisição de cada imagem. A Figura 3 apresenta esses resultados. Desse modo, foi possível recuperar essas informações diretamente das imagens térmicas, sem a necessidade de nenhum sensor externo de posição ou inclinação.

A etapa de alinhamento da malha do *scanner* com a malha do SfM foi feita de maneira manual. Apesar de visualmente não apresentar problemas, é uma etapa que pode ser automatizada em futuros trabalhos. Além disso, uma análise quantitativa do erro entre a textura térmica projetada e a textura original (a pele da face, provinda do *scanner*) também é proposta para trabalhos futuros. Para isso pode-se utilizar marcadores como referência.

O número de imagens utilizadas (70) foi suficiente para projeção da textura térmica sobre a superfície 3D vinda do *scanner* sem nenhum tipo de costura ou descontinuidade.

Outra possível linha de trabalho é a geração de superfícies tridimensionais diretamente das imagens térmicas, sem a utilização do *scanner*. Para isso recomenda-se uma câmera térmica de maior resolução e aquisição de imagens de diferentes posições, a fim de diminuir as regiões de oclusão.

A malha e o posicionamento das câmeras também podem ser melhorados ao se fazer a calibração da câmera, isso é, determinar sua matriz intrínseca empiricamente ao invés de utilizar os valores nominais. Além disso, o modelo matemático de câmera utilizado não inclui distorções radiais, por serem consideradas desprezíveis, entretanto, sua determinação poderá levar a melhores resultados.

Agradecimentos

Agradecimentos à UTFPR pela estrutura e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa processos 133994/2013-9 e 310262/2011-9.

Referências

[1] N. A. Diakides and J. D. Bronzino, *Medical infrared imaging*. CRC press, 2007.

[2] S. Barone, A. Paoli, and A. V. Razionale, “A biomedical application combining visible and thermal 3D imaging,” in *XVIII Congreso internactional de Ingenieria Grafica, Barcelona*, 2006, pp. 1–9.

[3] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.

[4] S. Twelves, “Multi-spectral Imaging System Calibration and Data Fusion for Applications in the Assessment of Rheumatoid Arthritis,” Carleton University, 2012.

[5] C. Wu, S. Agarwal, B. Curless, and S. M. Seitz, “Multicore bundle adjustment,” in *2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2011, pp. 3057–3064.

[6] Y. Furukawa and J. Ponce, “Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 32, no. 8, pp. 1362–1376, 2010.

[7] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, “Poisson surface reconstruction,” in *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing*, 2006.

[8] P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, and G. Ranzuglia, “Meshlab: an open-source mesh processing tool,” in *Eurographics Italian Chapter Conference*, 2008, pp. 129–136.