

# Um Sistema Portátil para Realidade Aumentada de Artefatos Arqueológicos

Lucas Teixeira

TeCGraf, Departamento de Informática, PUC-Rio  
Rua Marquês de São Vicente, 225  
22453 Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

lucas@tecgraf.puc-rio.br

Marcelo Gattass

TeCGraf, Departamento de Informática, PUC-Rio  
Rua Marquês de São Vicente, 225  
22453 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

mgattass@tecgraf.puc-rio.br

## ABSTRACT

This work presents a system for visualization of archaeological artifacts using Augmented Reality. The proposed system is portable and uses commodity hardware. Portability aims to take care of itinerant expositions where the system needs to be easily mounted and remounted. To validate our proposal we implemented a system using robust algorithms for camera calibration, feature detection, correlation, elimination of outliers and homography calculation. Results are presented to validate our proposal and to draw some conclusions.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema para visualização de artefatos arqueológicos utilizando Realidade Aumentada. O sistema proposto é portátil e utiliza equipamentos convencionais. A idéia de ser portátil visa atender às exposições itinerantes onde o sistema precisa ser montado e re-montado facilmente. Para validar nossa proposta, implementamos um sistema com algoritmos robustos de calibração de câmera, de detecção de feições, de correlação, de eliminação de *outliers* e cálculo de homografia. Os resultados são apresentados como forma de validar nosso sistema e apoiar algumas conclusões.

## Keywords

Calibração de câmera, Realidade Aumentada, Recalibragem automática, artefato arqueológico.

## 1. INTRODUÇÃO

As exposições arqueológicas em geral exibem pedaços de artefatos que muitas vezes estão tão destruídos que o visitante é incapaz de reconstituir mentalmente o objeto. Sistemas de Realidade Aumentada podem auxiliar nesta visualização, recriando artificialmente os pedaços que faltam no artefato. Quando a exposição é itinerante o sistema precisa ser simples de montar e desmontar. Esses sistemas são denominados aqui de portáteis.

Um dos problemas principais desses sistemas de Realidade Aumentada é a etapa de calibração da câmera [2] que determina os parâmetros internos e externos da câmera correspondentes a cada imagem capturada. Em um sistema fixo essa calibração pode ser feita uma única vez, já que a posição da câmera não se altera. Neste caso é possível até mesmo empregar um método manual que resulta num procedimento simples e de fácil controle da precisão.

Para sistemas móveis é necessário calibrar constantemente a câmera e por isso esses sistemas requerem métodos de calibração

rápidos para que esta etapa seja feita em tempo real. Os requisitos de um sistema portátil são menos restritos que os de sistemas móveis, porém são mais exigentes que os de um sistema fixo. Um sistema portátil não pode contar com a estabilidade do sistema fixo, pois não está preso ao ambiente. Por outro lado ele também não precisa tratar das mudanças constantes de um sistema móvel, que geralmente, pode apresentar grandes variações de posição no tempo. Uma situação típica de movimento da câmera em um sistema portátil ocorre quando alguém, involuntariamente esbarra no suporte da câmera ou do artefato.

Este artigo propõe um sistema portátil que possa ser montado em uma sala de exposição, permanecer em uso pelo tempo em que a exposição naquele local durar e no final ser desmontado e levado para um outro local. Desta forma, a proposta é apresentar um sistema que em cada local em que for montado, seja feita apenas uma calibração inicial com assistência do instalador. Posteriormente o sistema fica se recalibrando automaticamente sempre que detectar que houve movimento da câmera ou do artefato de interesse.

Na seção 2 estão relacionados trabalhos de realidade aumentada e virtual aplicados à arqueologia. Na seção 3 está explicada a proposta do sistema. Na seção 4 há uma breve descrição dos algoritmos implementados. A seção 5 apresenta os resultados e a seção 6 as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

A literatura apresenta várias iniciativas parecidas. Por limitação de espaço, esta seção mostra apenas algumas como o projeto Ename 974 [4] que promove soluções de Realidade Aumentada para sítios arqueológicos. Neste projeto se constrói uma cabine e dentro dela é montado um sistema de câmeras e monitores onde os visitantes podem ver a reconstrução das ruínas. Outra iniciativa é o ARQUEGUIDE [5], que consiste em um sistema no qual o visitante coloca um HMD (capacete de realidade virtual) com uma câmera presa a ele. O usuário carrega, além do capacete, uma mochila com um computador, antena de rede sem fio e uma antena GPS. Com esse equipamento o visitante pode andar por dentro do sítio arqueológico e ver o ambiente reconstruído. Pujol [1] apresenta um bom resumo das tecnologias e soluções existentes para usar realidade virtual e aumentada em arqueologia e museus.

Os trabalhos do tipo do Ename 974 montam instalações fixas e complexas para visualizar sítios arqueológicos. Os sistemas móveis do tipo do ARQUEGUIDE utilizam equipamentos especializados como o GPS e as antenas de rede sem fio.

A diferença deste trabalho para os já existentes é que ele apresenta uma solução totalmente baseada em óptica que depende apenas de computadores convencionais, podendo acompanhar uma exposição itinerante e ser instalado por um leigo com um rápido treinamento.

### 3. O SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto gera uma imagem de realidade aumentada a partir da imagem capturada por uma câmera e do conhecimento do modelo digital do artefato. Por ser um sistema portátil, onde a câmera e/ou o artefato podem ter se deslocado, foi utilizado um método manual para calibrar a câmera numa posição padrão e um método automático para correção da calibração.

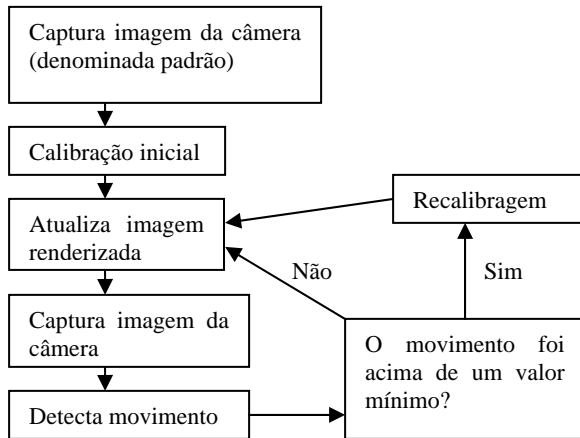


Fig 1. Funcionamento geral do sistema.

### 3.1 Equipamento e Montagem

Para tornar o sistema mais acessível, o equipamento necessário foi limitado a uma câmera e um microcomputador. A câmera é quem define a qualidade da imagem do sistema e as webcams são as que têm o melhor custo/ benefício. A montagem é feita apontando a câmera para o artefato de interesse e posicionando o monitor do computador em frente ao artefato com a tela virada para a posição do observador (Fig 2).

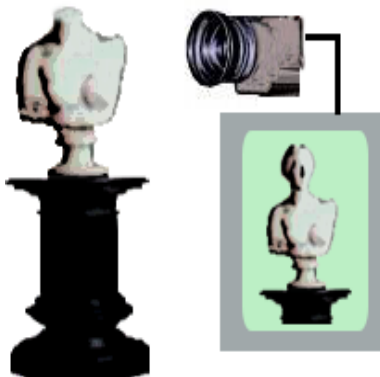


Fig 2. Montagem do sistema. A estátua destruída, uma câmera capturando a estátua e a reconstrução apresentada no monitor.

### 3.2 Modelagem

O sistema necessita que o artefato de interesse seja digitalizado de forma a obter um modelo 3D da parte existente. Este modelo é

utilizado para atualizar o ZBuffer do OpenGL de forma a tratar a oclusão corretamente. Um scanner 3D é a ferramenta ideal para esse processo onde o artefato a ser modelado já existe [10].

Para gerar uma imagem com a restauração das partes destruídas precisa-se de um modelo digital do que foi perdido. A geração deste modelo é um trabalho artístico que requer conhecimento de como era aquele artefato originalmente. Este modelo é renderizado sobre a imagem capturada pela câmera com auxílio do mapa de oclusão do ZBuffer produzido pelo modelo da parte existente do artefato.

### 3.3 Calibração inicial

Após posicionar o equipamento no lugar desejado passa-se a etapa da calibração inicial. Essa etapa é determinante para a qualidade da imagem gerada. Em geral, todas as novas imagens geradas serão de qualidade igual ou inferior a inicial, dado que o processo de recalibragem contém mais erros como discute a seção 3.5.

O primeiro passo da calibração inicial é capturar uma imagem que será definida como padrão nesta nova instalação. Nessa imagem o instalador associa os pontos  $(U_i, V_i)$  correspondentes a pontos do modelo digital 3D  $(X_m, Y_m, Z_m)$  do artefato. Essa associação pode ser assistida por um detector de cantos [3] que permite a extração automática de feições do artefato.

O algoritmo de calibração de Tsai [2] utiliza este conjunto de pares de pontos correspondentes para determinar a distância focal, o parâmetro de distorção radial e a posição da câmera.

### 3.4 Detecção de movimento

Em cada nova imagem, que pode estar sujeita à pequenos deslocamentos da posição padrão, é necessário um algoritmo de recalibração automática. Esse algoritmo deve ser executado sempre que a câmera e/ou artefato se afastarem significativamente da posição padrão. Este artigo propõe que essa detecção seja feita seguindo os passos ilustrados na Fig 3.

### 3.5 Recalibração

Para recalibrar a câmera é preciso pares de pontos entre a nova imagem capturada e seus correspondentes no espaço do modelo 3D. Da calibração inicial feita na posição padrão tem-se o conjunto de pontos associados pelo instalador. Estes pontos correlacionam a imagem padrão com o modelo 3D.

Como se tem, do passo anterior, a homografia que leva pontos da imagem padrão para a nova imagem capturada, basta aplicar a essa homografia os pontos  $(U_i, V_i)$ , obtendo  $(U_i', V_i')$ .

Desta forma tem-se a associação dos pontos do modelo 3D  $(X_m, Y_m, Z_m)$  com  $(U_i, V_i)$  na imagem padrão e com  $(U_i', V_i')$  na nova imagem capturada. Aos erros da associação da imagem padrão somam-se os erros da homografia, resultando em uma calibração de menor qualidade. Pelo exposto é que, sempre foi feito o cálculo da homografia com base na imagem padrão e não outras já recalibradas.

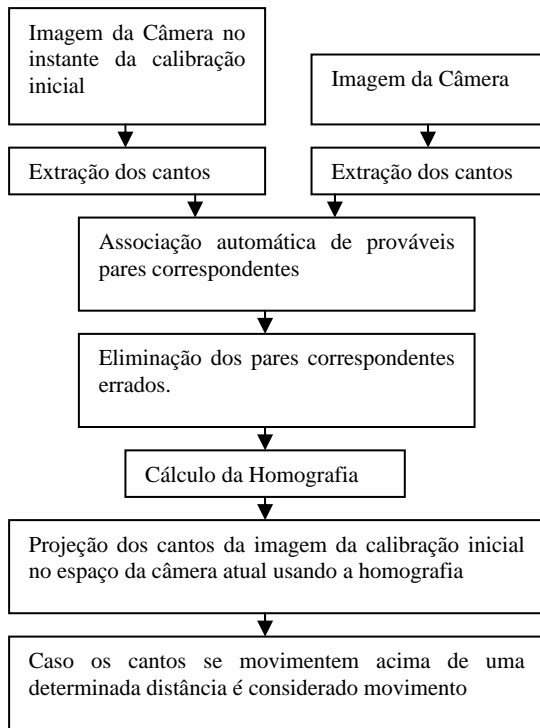


Fig 3. Funcionamento da detecção de movimento.

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO

Com a finalidade de validar o sistema proposto, foi implementado um software na linguagem C usando algoritmos robustos. Já que o modelo do objeto é tridimensional utilizou-se o método de calibração de câmera descrito por Tsai para modelos 3D [2], enquanto para a detecção de cantos foi empregado o detector de Harris [3].

A Associação automática de prováveis pares de cantos correspondentes foi feita usando um método baseado em janela de similaridade. Normalmente, métodos dessa natureza são sensíveis à mudança de iluminação, tanto global quanto local. Salas de exposição têm iluminação controlada em cima das peças, o que reduz o problema das alterações da iluminação local. Tendo em vista as condições descritas acima, foi escolhido o algoritmo ZNCC (*zero-mean normalized cross-correlation*) [7]. Esse algoritmo, por ser normalizado, é menos sensível às alterações de iluminação global.

Na eliminação dos pares correspondentes errados foi utilizado o algoritmo descrito no livro do Hartley e Zimmerman [8] pág 275. A eliminação de pares ruins é parte de um método de estimação automática da matriz fundamental. Essa eliminação é feita usando o RANSAC [11], o Algoritmo dos 8 Pontos Normalizado [12] e a Distância de Sampson [13].

Para a elaboração do cálculo da homografia empregou-se o algoritmo descrito por Zhang em [9] no apêndice A. Esse algoritmo utiliza um critério de probabilidade para encontrar uma primeira aproximação da homografia e posteriormente usa o ajuste não linear de Levenberg-Marquardt para modificar a homografia de forma a minimizar o erro.

#### 5. RESULTADOS

Para os testes foi utilizada a câmera Logitech QuickCam Pro 5000 na resolução de 640x480. O artefato de teste foi uma montagem com blocos de madeira. Foi utilizado este material para possibilitar a digitalização do artefato apenas usando um paquímetro. Com o objetivo de aferir a eficácia dos algoritmos empregados foram feitos testes independentes de cada passo do sistema.

A calibração inicial é dependente dos pontos associados pelo instalador. Em geral atingiu-se um erro médio foi de 5.2 pixels usando no mínimo 20 pares de pontos. O erro da calibração de câmera foi calculado projetando os pontos do modelo  $(X_m, Y_m, Z_m)$  no espaço de coordenada da imagem utilizando as matrizes de calibração de câmera. Essa projeção resulta em  $(U_m, V_m)$ . O erro é a distância média entre os pontos  $(U_m, V_m)$  e os seus correspondentes  $(U_i, V_i)$ .

A associação automática dos pares, também chamada de correlação, foi parametrizada de forma que o ponto correspondente na nova imagem possa estar no máximo a 50 pixels de distância do ponto na imagem padrão. O número de pares associados corretamente, chamados de inliers, e os associados incorretamente, chamados de outliers, foram analisados visualmente. Para um movimento de cerca de 30 pixels, em média, são detectados 87 associações e desses cerca de 40% de outliers. Para movimentos de 5 a 10 pixels o número médio de outliers diminui para cerca de 18%.

A eliminação do pares errados usa o RANSAC, um algoritmo aleatório que utiliza probabilidade para determinar o número de iterações que devem ser feitas. Foi Calibrado o RANSAC de forma a parar quando tiver 0,1% de chance de haver outliers no conjunto de pares associados ou extrapolar o limite de 100 iterações. Na realidade sempre sobram até 5% de pares errados, isso porque foi constatado que a forma de determinar os outliers usando o algoritmo de 8 pontos e Distância de Sampson não é capaz de identificar sempre todos os outliers. Em contrapartida, o algoritmo é muito mais eficiente comparado ao uso de algoritmos mais robustos, por causa do custo computacional associado a eles.

O cálculo da Homografia acumula os erros da eliminação dos pares, sendo assim quanto melhor a eliminação melhor será a o cálculo da homografia. O erro da homografia é calculado projetando os pontos extraídos da imagem padrão, usando a própria homografia e calculando a distância média desses pontos para os seus correspondentes da imagem nova. Quando os pares são todos inliers o erro médio é de 1.5 pixels, porém se existem 5% de outliers o erro médio sobe para 3.5 pixels.

O erro da recalibração é definido pelo erro na homografia, pois se a homografia mantém o erro médio abaixo dos 2 pixels, então o erro vai estar próximo do valor da calibração inicial, mas se a homografia produzir pontos  $(U_i', V_i')$  posicionados acima dos 2 pixels do local ideal vai aumentar o erro da recalibração comparado com o da calibração inicial.

##### 5.1 Exemplo

As figuras 4 a 6 ilustram os resultados do sistema para a “ruína” de blocos utilizada para teste.

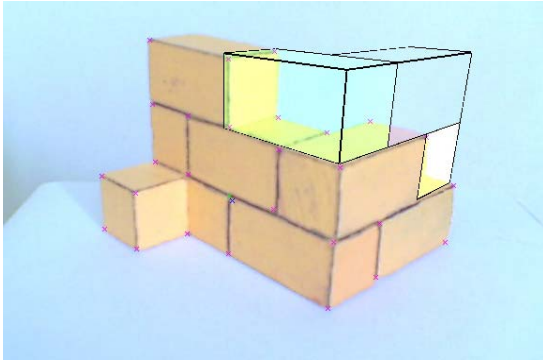


Fig 4. Calibração inicial.

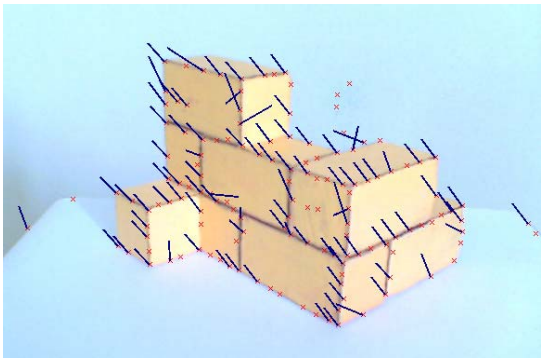


Fig 5. Os pares correspondentes associados automaticamente (a extremidade da linha azul é onde o ponto está na imagem padrão).

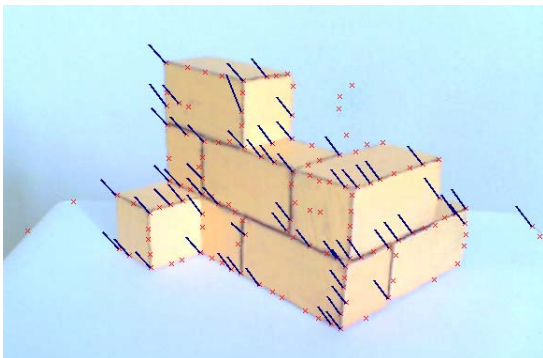


Fig 6. Os pares correspondentes após a eliminação dos pares errados

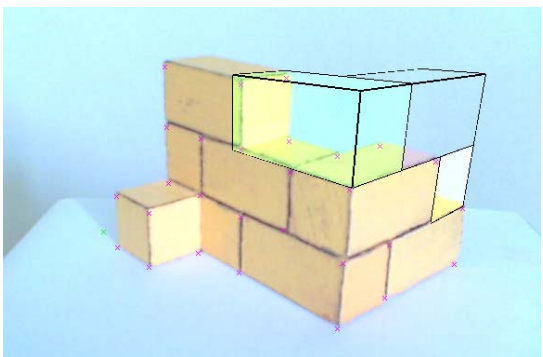


Fig 7. Reconstrução usando a recalibração da câmera

## 6. CONCLUSÃO

O sistema se mostrou bastante viável para reconstrução de artefatos. Os resultados iniciais indicam que a reconstrução continua suficientemente boa para a distância máxima de 50 pixels e para o caso mais comum, de pequenos movimentos, a reconstrução continua igual a da calibração inicial. No futuro, pretende-se estudar outras formas de se fazer a calibração inicial, como por exemplo, introduzir marcadores temporários no artefato e calibrar automaticamente. Além disso, pretendemos incorporar técnicas para aumentar o realismo da parte reconstruída, como proposto por Debevec[6] para determinar a iluminação.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Flávio Szenberg pela implementação do método de calibração de câmera TSAI 3D.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Laia Pujol, "Archaeology, museums and virtual reality" <http://www.uoc.edu/humfil/articles/eng/pujol0304/pujol0304.pdf>.
- [2] R.Y. Tsai, A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323-344, Aug. 1987.
- [3] Harris, C. and M. Stephens: A combined corner and edge detector. Fourth Alvey Vision Conference, pp.147-151, 1988.
- [4] ENAME 974. <http://www.ename974.org/>
- [5] ARCHEOGUIDE. Augmented Reality-based Cultural Heritage On-site Guide. <http://archeoguide.intranet.gr/>
- [6] Debevec, P.. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In Proceedings SIGGRAPH 98
- [7] Di Stefano, L., Mattocchia, S., and Tombari, F. 2005. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation. *Pattern Recogn. Lett.* 26, 14 (Oct. 2005), 2129-2134.
- [8] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge Univ. Press, 2000.
- [9] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, Nov. 2000.
- [10] R. Bernardini and H. Rushmeier. The 3d model acquisition pipeline. In Eurographics 2000 State of the Art Report (STAR), Aug. 2000.
- [11] Fischler, M. A. and Bolles, R. C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM* 24, 6 (Jun. 1981)
- [12] Hartley, R.I. In defense of the eight-point algorithm Pattern Analysis and Machine Intelligence, *IEEE Transactions* vol. 19, Issue 6, June 1997 Page(s):580 – 593
- [13] Sampson, P.D.. Fitting conic sections to 'very scattered' data: An iterative refinement of the Bookstein algorithm. *Computer Graphics and Image Processing*, 18:97–108. 1982