



Correção de cor em imagens em sistemas fotogramétricos de luz estruturada

Hélder SANTOS¹, Nuno CORTÊS¹, Gil GONÇALVES^{2,3} Miguel ALMEIDA¹

¹ Morph Lda / Grupo Dryas Octopetala, Coimbra

² INESC-Coimbra

³ Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, Coimbra

(helderbcsantos@gmail.com, nmrcortes@gmail.com, gil@mat.uc.pt, miguel.almeida@dryas.pt)

Palavras-chave: Fotogrametria com luz estruturada, Correção radiométrica, Modelação 3D, Arqueologia

Resumo: Existe atualmente uma grande diversidade de tecnologias de aquisição de dados para a digitalização tridimensional de objetos. De entre essas tecnologias a Fotogrametria ativa que, com recurso a *scanners* fotogramétricos de luz estruturada reconstitui a geometria a partir de imagens sobre padrões de luz projetados no objecto, oferece índices notáveis de precisão e exatidão.

A colorização em cor realista dos modelos é dada pelas componentes RGB das imagens das diferentes aquisições, realizadas com um determinado conjunto de parâmetros fotográficos e projetadas depois sobre a malha triangulada do modelo. Consequentemente, as condições de iluminação são determinantes para a qualidade da colorização fotográfica, podendo uma variação dessas condições de iluminação provocar heterogeneidades no aspeto final do modelo colorido. Este problema verifica-se principalmente na digitalização de objetos inamovíveis ou que não podem ser deslocados para laboratório. Neste contexto, é importante utilizar metodologias que produzam modelos com cores homogéneas, exigindo-se para tanto procedimentos exaustivos de correção de cor.

Neste artigo é apresentada uma metodologia que permite obter modelos 3D com cor homogénea e próxima da cor original. Para isso são utilizadas várias técnicas, incluindo o uso de iluminação artificial, o uso de cartões de cor e a correção radiométrica das imagens originais. Nos três casos de estudo apresentados (as gravuras rupestres nos rios Xingu e Bacajá, túmulo no Mosteiro da Batalha e os quadros de Kelmscott) foram aplicadas algumas ou todas as técnicas de correção discutidas, as quais permitiram obter modelos 3D com radiometria normalizada, corrigindo assim distorções e variações de iluminação durante o processo de aquisição.



1. Introdução

No contexto da Arqueologia, a digitalização tridimensional oferece hoje um vasto leque de técnicas possíveis, dependendo a opção pela utilização de uma dada técnica (ou combinação de técnicas) de: (1) dos objetivos do trabalho, (2) de uma avaliação criteriosa das características e dimensões do objeto e (3) das próprias condições de aquisição. Entre estas técnicas, a Fotogrametria ativa, realizada com recurso a *scanners* fotogramétricos de luz estruturada (como é o caso do *Breuckmann smartSCAN 3D-HE*), capazes de reconstruir a geometria a partir de imagens sobre padrões de luz projetados no objecto, oferece índices notáveis de precisão e exatidão, embora à custa da rentabilidade do trabalho, uma vez que estes *scanners* captam em cada aquisição apenas áreas pequenas do objecto, em função da distância focal das lentes utilizadas.

Na medida em que se trata de uma técnica fotogramétrica, a qualidade final do modelo está obviamente dependente das condições de iluminação do objecto a digitalizar, quer porque destas depende a qualidade da geometria reconstituída, quer porque a precisão de cada uma das malhas trianguladas que resultam do processamento dos dados adquiridos incide também sobre o ajuste das malhas entre si para produção do modelo final. A precisão e exatidão das aquisições e do registo são também, por outro lado, função das lentes utilizadas na aquisição, variando de forma inversa com a dimensão das áreas de interesse. Para além da precisão e exactidão, outra das vantagens reconhecidas da Fotogrametria ativa reside na qualidade fotográfica dos modelos. Com efeito, no que respeita à colorização fotográfica, para cada uma das aquisições é captada uma fotografia com um determinado conjunto de parâmetros fotográficos (abertura, exposição e balanço de brancos), a qual será projectada sobre a malha triangulada do modelo final.

Por consequência, e para além da própria qualidade geométrica do modelo, as condições de iluminação são obviamente determinantes para a qualidade da colorização fotográfica, podendo uma variação dessas condições de iluminação provocar heterogeneidades no aspeto final do modelo colorido. Este problema torna-se particularmente sensível no caso de projetos que visam a digitalização de objetos imóveis, necessariamente exposta às condições de iluminação exterior, ou de objetos inamovíveis, que não podem ser deslocados para laboratório, e sobre os quais se torna difícil trabalhar em ambientes de iluminação controlada, caso típico dos trabalhos sobre património histórico, como se verificou em diversos projetos realizados nos últimos anos (gravuras pré-históricas do Rio Xingu, Mosteiro da Batalha, Sé Velha de Coimbra, etc.). Ora, precisamente, nos projectos de modelação digital na área do património histórico, o aspeto fotográfico surge frequentemente tão importante como a própria geometria dos modelos finais, pelo que foram desenvolvidas técnicas destinadas a produzir modelos com cores homogéneas, exigindo-se para tanto a aplicação de procedimentos exaustivos de correção radiométrica das fotografias originais de terreno.

Neste artigo é apresentada uma metodologia que permite gerar modelos 3D com cor homogénea e próxima da cor original dos objectos imageados. Para obter esses resultados foram utilizadas várias técnicas, desde o uso de cartões de cor à correção da cor das fotografias fora do *software* de processamento das malhas.

2. Aquisição e processamento de dados com o sistema Breuckmann

2.1 Aquisição de dados

O equipamento utilizado foi o *scanner Breuckmann smartScan 3D-HE*, que funciona com base no princípio da luz estruturada, o qual consiste em duas câmaras posicionadas em ângulo fixo convergente em relação ao objeto e um projetor situado entre as câmaras. O projetor emite um conjunto de padrões verticais sobre o objeto, que permitem calcular as coordenadas 3D de cada um dos píxeis observados numa câmara, ou em ambas (Breuckmann, 2009). O resultado final do varrimento é uma malha triangulada (Figura 1).

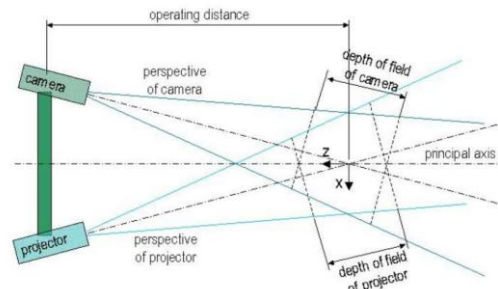


Figura 1 - Princípio de funcionamento do scanner fotogramétrico Breuckmann smartSCAN 3D-HE (Fonte: Manual do OPTOCAT)

Previamente ao processo de aquisição de geometria é adquirida uma imagem RGB por cada uma das câmaras. Estas imagens serão utilizadas para atribuir cor a cada um dos vértices da malha final. O processo de aquisição da cor está dependente da definição de dois conjuntos de parâmetros: parâmetros de inicialização e parâmetros fotográficos. Nos parâmetros de inicialização é possível definir qual a fonte da luz durante a aquisição: pode ser utilizada a luz ambiente ou a luz proveniente do projetor. Também é possível definir qual a imagem que é utilizada para colorizar a malha obtida (a esquerda, a direita ou ambas). Em todos os projetos foi utilizada a luz ambiente por ser a que permite uma cor mais realista; a imagem utilizada foi a da esquerda na maior parte dos casos pois, devido a estar mais afastada do projetor, apresenta menos reflexos. Alguns dos parâmetros fotográficos das lentes estão predefinidos pelo fabricante, sendo impossível a sua alteração. Estes constam de: a abertura das lentes e consequentemente a profundidade de campo, e a resolução da imagem. Os outros parâmetros, tais como, a exposição, a sensibilidade e a calibração (orientação interna do conjunto câmara/lente) são ajustados pelo utilizador no início do processo de aquisição.

A configuração realizada no início da aquisição pressupõe que as condições de iluminação se mantenham constantes ao longo do processo de aquisição. Quando tal não acontece a aplicação das imagens adquiridas ao modelo final gera discrepâncias de cor no modelo final. Embora seja possível efetuar nova configuração de parâmetros fotográficos durante a aquisição, torna-se nestas condições impossível garantir a coerência de cor entre as imagens.

2.2 Processamento de dados

Para processar os dados da geometria são utilizados os parâmetros de calibração das câmaras e do projetor. Esta calibração, efetuada com recurso a painéis fornecidos pelo fabricante, permite obter os parâmetros internos e externos das câmaras e do projetor. O cálculo da geometria recorre ao princípio da triangulação, isto é, com base nos ângulos α e β e a distância entre a câmara e o projetor (Figura 2) é possível resolver o triângulo e assim calcular a posição do píxel observado (Adolf, 2011).

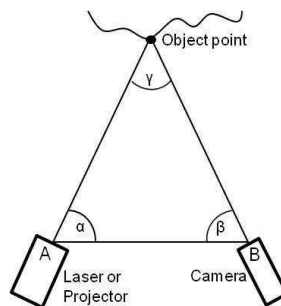


Figura 2 - Princípio da triangulação (Fonte: Adolf, 2011)

A imagem RGB obtida é projetada sobre a malha utilizando os parâmetros internos e externos previamente estimados. Note-se que quando a aquisição da geometria é feita em modo stereo o processo de projeção garante que toda a superfície é colorizada utilizando as imagens adquiridas e os parâmetros externos e internos previamente estimados.

Na construção do modelo final são utilizadas as malhas colorizadas correspondentes a cada um dos varrimentos. Para a obtenção deste modelo é necessário efetuar a fusão dos varrimentos, processo que consiste na remoção de vértices redundantes na área de sobreposição. Este processo é controlado com base em dois parâmetros, distância mínima e distância máxima: os vértices que se encontrem a uma distância inferior à distância mínima são fundidos e os que se encontram a uma distância superior à distância máxima não são utilizados para a construção da malha final. Para a obtenção da cor final são considerados, para cada vértice, o pixel da imagem de cada um dos varrimentos na zona de sobreposição. Esta operação é atualmente responsável por uma importante amplitude de heterogeneidade da cor dos modelos finais.

3. Processo de modelação 3D

No processo de modelação 3D com a tecnologia da Fotogrametria com luz estruturada foram seguidos dois fluxos de trabalho sequenciais: a reconstrução da geometria e a reconstrução da cor. A figura 3 ilustra este processo de modelação 3D o qual foi idealizado pelos autores em três níveis sequenciais envolvendo cada um deles conceitos similares tanto na reconstrução da geometria como na reconstrução da cor..

Assim, a reconstrução da geometria envolve três fases de manipulação dos dados:

1. Na fase de aquisição (nível 1), os dados são adquiridos e processados de forma a obter as malhas que constituem o modelo 3D pretendido. As malhas são constituídas por pontos 3D que, devido à natureza do equipamento utilizado, têm precisões muito semelhantes, de algumas de dezenas de micrómetros;
2. Na fase do registo (nível 2), as malhas são integradas num único sistema de coordenadas arbitrário. Este registo, realizado com base na geometria das malhas, recorrendo ao algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), permite obter o bloco de malhas;
3. Na fase de georreferenciação (nível 3), o bloco de malhas definido num sistemas de coordenadas interno é transformado num sistema de coordenadas externo tendo por base pontos de controlo comuns aos dois sistemas. Esta fase não é executada para o caso de objetos móveis.

Por outro lado a reconstrução da cor envolve as três fases:

1. Na primeira fase (nível 1) são adquiridas as imagens que serão utilizadas para atribuir cor ao modelo 3D;
2. Na fase de normalização radiométrica relativa (nível 2) as imagens são transformadas de forma a apresentarem níveis RGB semelhantes entre si (ou seja com histogramas semelhantes), para toda a superfície do modelo 3D. Assim, quando da projeção da cor nas malhas, será possível efetuar a fusão da cor de todas as imagens;
3. Na fase de normalização radiométrica absoluta (nível 3), é efetuada a calibração de brancos das imagens, de acordo com uma referência de cor. Esta calibração elimina desvios de cor nas imagens (*color cast*).

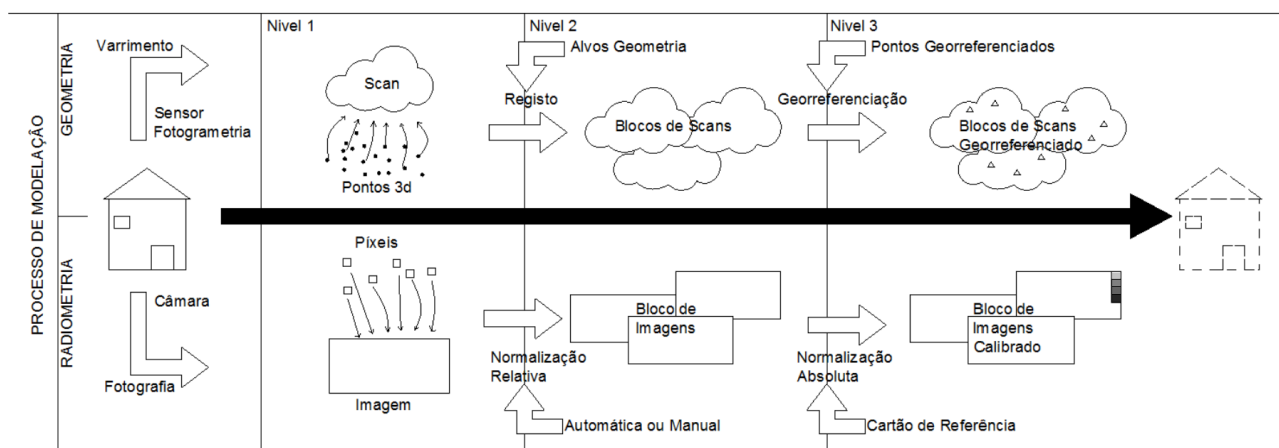


Figura 3 - Esquema do processo de modelação utilizado



4. Técnicas de Correção da Cor

Recorrendo às ferramentas de fusão disponíveis no *software* do fabricante (OPTOCAT®), é possível combinar os dados dos vários varrimentos numa malha final com uma geometria única, com a densidade requerida; ou seja, o *software* permite executar os três níveis da reconstrução da geometria ilustrados na figura 3. Pelo contrário, o *software* não possui ainda ferramentas análogas para efetuar a normalização e fusão da cor entre todos os varrimentos.

Como se referiu anteriormente, no âmbito do património histórico, a cor associada aos modelos produzidos assume uma importância primordial, sendo portanto necessário desenvolver técnicas que permitam melhorar esta componente na modelação 3D. São consideradas as seguintes condicionantes para a obtenção de modelos com componente radiométrica aceitável:

- O objeto deve ser iluminado por uma fonte de luz homogénea, isto é, não devem existir zonas de sombras, nem zonas com reflexos;
- A fonte de luz deve ser constante, isto é, a sua intensidade não deve variar ao longo da extensão do objeto;
- A cor não deve apresentar desvios significativos do branco (*color cast*).

Tornou-se, portanto, necessário recorrer a um conjunto de dispositivos auxiliares e *software* adicional capazes de favorecer o cumprimento destas condicionantes, incluindo:

- A utilização de uma fonte de iluminação artificial, constituída por duas lâmpadas com elevada iluminância (equivalente a 500 W) e dois difusores (guarda-chuvas) com transmitância de 50% (a temperatura da cor das lâmpadas é de 5500 K, padrão utilizado em fotografia, correspondente à luz do sol ao meio-dia);
- A utilização de um cartão de correção de cor, o qual apresenta um conjunto de áreas com valores definidos de cor RGB (no início de cada sessão de aquisição é efetuado um varrimento inicial do objeto com o cartão de correção para servir como referência para a correção de brancos).

A correção efetuada no *software* de tratamento de imagem Adobe *PhotoShop CS6* consistiu nas seguintes tarefas:

- Normalização da cor: partindo da normalização da cor da imagem de referência através da calibração de brancos do cartão de correção, a definição de normalização é copiada para as restantes imagens. Caso não tenha sido utilizado o cartão de correção, ainda é possível obter uma normalização aproximada, a partir da calibração de um elemento cinzento numa imagem de referência;
- Ajuste de histograma: o histograma da imagem é ajustado de forma a melhorar a definição da imagem, procurando-se a redefinição dos níveis mínimo e máximo da imagem de forma a compensar o excesso ou falta de iluminação;
- Ajuste manual entre imagens: na falta de outras soluções viáveis, é sempre possível manipular os valores de brilho e contraste de uma imagem de forma a torná-la compatível com outra, carecendo porém evidentemente os resultados desta operação aproximativa da precisão necessária;
- Ajuste automático entre imagens: A ferramenta *Match Color*, ou ainda, transferência de cor (ver por ex. Papadakis *et al.*, 2011), disponível no *Photoshop CS6*, permite efetuar esta transformação de forma automática: utilizando uma imagem de referência e uma imagem a modificar, são selecionadas áreas equivalentes de ambas as imagens que servirão para o cálculo da transformação, a qual pode ser aplicada apenas à área modificada ou à totalidade da imagem.

5. Casos de Estudo

Os 3 casos de estudo que são apresentados de seguida representam uma diversidade de condicionamentos de aquisição de dados 3D cuja solução exigiu diferentes combinações das técnicas acima descritas.

5.1 Gravuras rupestres da Barragem de Belo Monte (rios Xingu e Bacajá)

Neste caso de estudo foram digitalizados vários conjuntos de gravuras rupestres ao longo dos rios Xingu e Bacajá, no Pará, Brasil. Como os trabalhos foram executados ao ar livre, durante o dia, foi necessária a utilização de uma estrutura amovível para controlo da iluminação incidente sobre os painéis de gravuras. A dificuldade logística de instalação de uma estrutura absolutamente estanque à penetração da luz provocou evidentes variações da iluminação ao longo do processo de aquisição.

Em consequência, as imagens associadas aos varrimentos obtidos apresentaram uma grande variação de brilho, verificando-se na maior parte um brilho reduzido resultante daquela dificuldade em controlar a iluminação incidente sobre os objetos a modelar. A colorização dos modelos finais exigiu que todas as imagens associadas a cada um dos varrimentos fossem extraídas, corrigidas e importadas novamente para os varrimentos, procedendo-se ao reprocessamento da geometria com a cor já corrigida.

Neste trabalho não foram utilizados meios de iluminação artificial, nem o cartão de correção de cor, devendo por isso o subsequente processamento de correção no Photoshop procurar suprir as deficiências provocadas pela ausência destes recursos: numa primeira fase, e sempre que possível, foi selecionada uma imagem de referência, a partir da qual foi efetuada a calibração de brancos, tendo o histograma desta imagem sido otimizado para garantir níveis adequados de brilho e de contraste; de seguida, e tendo em conta que o tom da rocha era constante em toda a extensão da gravura, esta imagem serviu também de referência para o ajuste automático das restantes imagens (Figura 4).

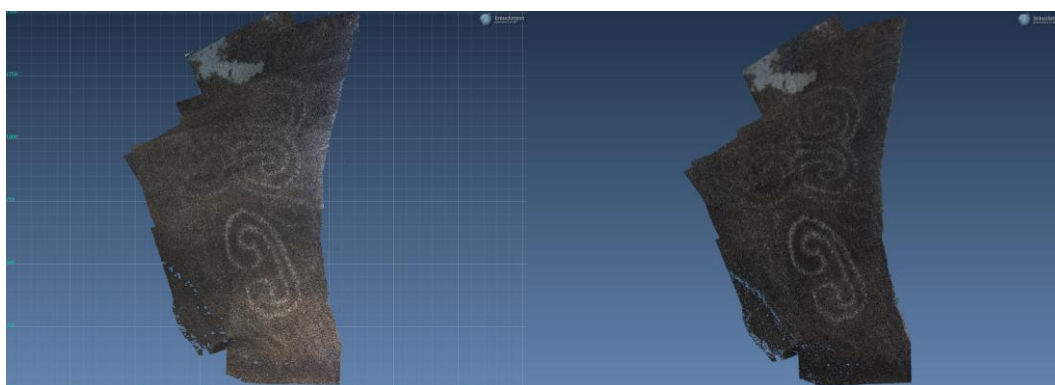


Figura 4 - Correção da cor num painel com gravuras rupestres: antes (esquerda) e depois (direita)

5.2 Túmulo no Mosteiro da Batalha

O túmulo de Mateus Fernandes situa-se no interior do mosteiro de Batalha, junto à entrada principal. Para proceder à digitalização foi instalada uma estrutura coberta com tecido opaco de forma a reduzir a iluminação e utilizado o *kit* de iluminação acima descrito. As imagens produzidas apresentaram alguma variação de brilho, obrigando à sua correção. Para tanto foi selecionada uma imagem de referência com características de brilho e contraste adequadas, corrigindo-se depois as imagens dos restantes varrimentos, num total de 85 imagens, com base nesta imagem através do recurso à ferramenta *Match Color* do Photoshop (Figura 5).



Figura 5 – Vista do modelo 3D do túmulo Manuel Fernandes: antes (esquerda) e após a correção (direita)

5.3 Quadros de Kelmscott

A coleção de quadros de Kelmscott é um conjunto de dois quadros a óleo de autor desconhecido pertencentes ao museu *The Wallace Collection*, que representam paisagens do centro de Lisboa antes do terramoto de 1715. Um dos objetivos desta aquisição consistiu na reconstrução 3D da geometria do quadro, o qual poderá permitir a caracterização da técnica de pintura utilizada pelo autor. A digitalização destes quadros foi realizada num atelier, sob condições que permitiam algum controlo de iluminação: foi utilizada iluminação artificial e o cartão de correção de cor. Na fase de processamento da informação adquirida, verificou-se a existência de alguma variabilidade no brilho dos varrimentos, devida ao reposicionamento da fonte de iluminação ao longo do processo de aquisição. Para a correção destes desvios de brilho, foi realizada a calibração de brancos da primeira imagem de cada quadro com base nas cores do cartão de correção de cor, tendo-se depois utilizado essa primeira imagem como referência de brancos para todas as restantes imagens, aproximadamente 100 imagens, que foram equalizadas com recurso ao ajuste de brilho e *Match Color* e, de seguida, ajustadas para a definição da imagem de referência. Em alguns casos foi necessário utilizar imagens da câmara da direita, devido à existência de reflexos. O processo de equalização foi particularmente intensivo devido ao grau de pormenor contido nas imagens (Figura 6).



Figura 6 - Correção da cor num dos quadros de Kelmscott: antes (esquerda) e depois (direita)

6. Discussão

No processo da modelação 3D com a tecnologia da fotogrametria com luz estruturada foram seguidos dois fluxos de trabalho sequenciais: a reconstrução da geometria e a reconstrução da cor. A reconstrução da geometria, acima descrita, é um processo já bastante automatizado, que apresenta resultados fiáveis e previsíveis, enquanto que a reconstrução da cor envolve hoje ainda uma intervenção intensiva por parte do operador.

A descrição comparativa dos processos de reconstrução da geometria e de reconstrução da cor permite esclarecer as dificuldades que surgem aquando da reconstrução da cor. São considerados 3 níveis no processo de modelação 3D, análogos para os dois fluxos de trabalho:

- Um primeiro nível, imediatamente a seguir à aquisição, resulta nos próprios dados adquiridos (o varrimento e a imagem com cor RGB);
- O segundo nível, realizado após o registo dos varrimentos e equalização de cor das imagens, visa a obtenção de um bloco de varrimentos registados num sistema de referência (geométrico ou radiométrico) arbitrário;
- O terceiro e último nível, refere-se à integração num sistema absoluto de referência (georreferenciação dos varrimentos e a calibração de brancos das imagens)

Em relação à reconstrução da geometria, verifica-se, no primeiro nível, que os pontos que constituem o varrimento apresentam níveis de precisão muito semelhantes. Esta característica permite, num segundo nível, efetuar um registo fiável dos vários varrimentos, com base em alvos materializados ou na geometria do próprio objeto, e assim obter um bloco de varrimentos com informação coerente, que conserva um índice de precisão próximo do de cada um dos varrimentos individuais. Finalmente, no terceiro nível, este bloco coerente pode ser georreferenciado com base em dados externos (por exemplo: pontos coordenados medidos por outro equipamento), dependendo agora a fiabilidade e precisão deste passo final da qualidade desses dados externos.



Em relação à reconstrução da cor, verifica-se à partida uma dificuldade inerente ao próprio processo de aquisição da imagem, isto é: não é possível garantir que os píxeis que constituem uma imagem apresentem o mesmo nível de precisão (por força da ocorrência de reflexos e zonas de iluminação deficiente). Em consequência, no segundo nível já não é possível garantir que o processo de equalização automática produza conjuntos de imagens completamente coerentes entre si sem uma intervenção intensiva por parte do operador (através da manipulação do histograma, brilho e contraste de cada imagem). Num terceiro nível, a correção de brancos é efetuada com base em dados externos (p.e.: cartão de correção de cor, objetos cinzentos presentes na imagem).

Uma diferença fundamental na fiabilidade dos processos de reconstrução reside na própria natureza dos sensores utilizados: O sensor fotogramétrico é um sensor ativo (utiliza uma fonte de iluminação no projetor dos padrões verticais), o que permite iluminar a área de interesse de forma homogênea, permitindo assim obter dados com níveis de precisão elevados e equivalentes;

O sensor fotográfico é um sensor passivo, e portanto dependente da iluminação externa, obrigando o operador a garantir uma iluminação homogênea e constante para permitir uma aquisição eficaz da cor. Quando esta iluminação não respeita estes parâmetros torna-se necessário aplicar as técnicas de correção acima descritas, que suprem as deficiências dos processos automáticos atuais no que respeita à equalização da cor dos modelos 3D.

7. Conclusão

Na utilização corrente de sistemas fotogramétricos por luz estruturada surge frequentemente a necessidade de produzir modelos 3D com cor homogênea. Neste trabalho foram utilizadas diferentes técnicas selecionadas em função da natureza do problema subjacente: (i) a utilização de iluminação artificial permitiu homogeneizar a iluminação do objeto a modelar; (ii) a utilização do cartão de correção permitiu obter modelos com uma cor mais próxima do real; (iii) a utilização de *software* de processamento de imagem permitiu efetuar uma normalização radiométrica relativa das imagens que compunham o modelo.

O *software* utilizado para a produção dos modelos não apresentava a funcionalidade de texturização, a qual permitiria aumentar significativamente a qualidade da cor nos modelos produzidos. Com efeito, um modelo texturizado sobrepõe uma imagem de elevada resolução à informação geométrica, sendo portanto independente desta. Em contrapartida, os modelos de malha triangulada produzidos pelo *software* utilizado têm a informação de cor associada ao vértice, estando assim a resolução da informação radiométrica limitada pela resolução da informação geométrica.

Algumas partes do processo de correção radiométrica podem ser passíveis de alguma automatização. De forma análoga à produção de imagens HDR (*High Dynamic Range*), em que várias imagens contribuem para a criação de uma imagem com o píxel mais adequado nas imagens que o constituem, seria desejável a existência de uma funcionalidade que, para cada elemento de superfície seleccionasse a melhor contribuição nas imagens que incidem sobre este elemento. Seria desejável uma calibração de brancos semi-automatizada, através da indicação pelo operador de uma referência visível na imagem, de forma semelhante, no registo de geometria, à identificação de pontos homólogos.

Referências Bibliográficas

- Adolf, Stephanie (2011). Optical Measurement Techniques for multi-dimensional measurement of Cultural Heritage. Electronic Visualisation and the Arts.
- Breuckmann, B. (2009). Surface scanning - New Perspectives for Archaeological Data Management and Methodology?, CAA Williamsburg.
- Breuckmann GMBH (2011). OPTOCAT Brief Instruction Manual. Breuckmann GMBH.
- Papadakis, N.; Provenzi, E.; Caselles, V. (2011). A Variational Model for Histogram Transfer of Color Images. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 20, no. 6, pp.1682-1695.