

Imagiologia Tridimensional Digital para Construção de Protótipos Industriais

A reconstrução tridimensional de superfícies a partir de imagens é um processo com grande potencial de aplicação em diferentes domínios de actividade produtiva. Neste artigo descreve-se um método de reconstrução tridimensional, usando imagens de objectos iluminados com luz estruturada. O método baseia-se em imagens múltiplas obtidas por um sistema de aquisição constituído por um plano sw luz *laser* que executa um movimento de varrimento de superfícies tridimensionais, controlado por um motor de passo. A geometria definida pelo sistema de aquisição de imagens (geometria epipolar) permite, por triangulação, obter mapas densos tridimensionais. Estes mapas são modelos digitais de objectos reais e podem ser utilizados com eficácia

na obtenção de modelos e protótipos tridimensionais de objectos. Este sistema utiliza tecnologia de baixo custo e é de fácil realização. É um instrumento com grande potencial para a indústria mas que pode ser utilizado em outras áreas tão diversas como as ciências físicas, médicas, forense ou ainda na produção cinematográfica e televisiva.

* João Ferreira, Nuno Martins, Luís Agnelo e Jorge Dias

1. Introdução

É cada vez maior a utilização de computadores na produção industrial de objectos físicos a partir de modelos digitais, especialmente na área do desenho geométrico e do *design*. No entanto, o processo inverso e correspondente à inferência da descrição digital de objectos físicos a partir das suas imagens, tem recebido menos atenção. Este processo é normalmente referido como uma actividade de engenharia reversiva ou mais especificamente, perscrutação tridimensional ou *3D scanning*. No caso da perscrutação tridimensional ou *3D scanning* existem várias características tridimensionais de um objecto que podem ter interesse em serem recuperadas. Essas características incluem a forma, as cores e as propriedades do material do objecto. Este artigo trata só o problema da recuperação de formas tridimensionais e da sua textura, também designado reconstrução de superfícies, fornecendo uma representação volumétrica e digital do objecto que poderá

ser manipulado por aplicações gráficas.

O propósito da reconstrução de superfícies é a determinação da informação geométrica sobre a forma da superfície, normalmente um conjunto de distâncias ou orientações, medidas entre a superfície e um referencial global e a textura da superfície. Desta forma e no processo descrito neste artigo propõe-se um método de gerar um modelo digital da superfície. Este modelo é designado mapa tridimensional do conjunto de distâncias adquiridas ao qual, tal como se apresenta no final deste artigo, foi combinada a textura local a cada ponto da superfície e correspondente aos valores de intensidade de radiação luminosa.

Na indústria existem diferentes técnicas de adquirir informação sobre uma superfície tridimensional ou objecto. Uma das técnicas consiste em adquirir os dados tridimensionais através do uso de sondas de tacto, montadas em sistemas mecânicos de medição de coordenadas. Esta forma de aquisição de dados é muito precisa, mas morosa e dispendiosa, estando limitada aos materiais que podem resistir ao contacto mecânico. Esta técnica é ainda muito utilizada na indústria automóvel e na indústria aeronáutica. Menos fiáveis e mais baratas as sondas digitais manuais determinam posicionamentos através de campos magnéticos ou ultrasons. Este tipo de digitalização requer, no entanto, uma significativa intervenção do homem (Hoppe, 1994).

Aproveitando as potencialidades criadas e testadas na área da visão por computador, a indústria começou, recentemente, a substituir as sondas mecânicas por sondas laser de profundidade (*laser range scanner*), uma vez que estas, para além da rapidez, permitem a obtenção de um conjunto de dados densos e precisos, a elevadas larguras de banda. Estas sondas iluminam o objecto com o feixe laser e medem a distância usando triangulação, interferência ou o tempo de voo, produzindo os mapas de profundidade com matrizes de distâncias do sensor ao objecto que está a ser sondado. Se o sensor laser e o objecto estiverem fixos então poderá haver oclusão e apenas os pontos visíveis podem ser completamente recuperados. Para se reconstruírem objectos de uma forma global e completa, deverá haver movimento entre o sensor e o objecto ou existirem vários mapas de profundidade. Neste último caso o conjunto dos mapas podem conter a estrutura do objecto mas a fusão dos vários mapas que daria a reconstrução global da superfície, não é trivial (Almeida, 1999) (Felmar, 1996).

Mais recentemente começam a ser populares os métodos em que a aquisição é feita através de luz estruturada (*lasers*) e de câmaras. Estes métodos baseiam-se nas relações geométricas que podem ser estabelecidas entre os dispositivos de aquisição, iluminação (*laser*) e as superfícies a recuperar (Martins, 1999) (Ferreira, 2000). O método descrito neste artigo insere-se no domínio destas técnicas e faz uso de câmaras de uso geral e uma iluminação estruturada obtida por um plano de luz laser que executa um movimento comandado por um motor de passo. Esta

técnica de realização de um sistema de reconstrução é de baixo custo e apresenta vantagens económicas de construção.

2. Reconstrução de superfícies e Aplicações Potenciais

Com o desenvolvimento de sistemas rápidos e baratos para a reconstrução tridimensional houve um crescimento dos domínios de aplicação destas técnicas.

Uma dessas áreas é a antropometria. Os dados antropométricos são muito usados no *design* de produtos tais como: calçado, vestuário, equipamento de segurança, móveis, veículos e outros objectos com que o ser humano interage. Este tipo de dados é, por vezes, de importância capital. Como exemplo disso, poder-se-á referir a necessidade de precisão nos equipamentos de protecção ou ligado à melhoria da ergonomia de alguns equipamentos. A maioria dos dados antropométricos de uso generalizado deriva de informações adquiridas, há cerca de 50 anos atrás, por medição manual de uma amostra da população. O advento das recentes tecnologias de recuperação tridimensional com imagens veio colmatar esta falha proporcionando um método adequado à aquisição de dados tridimensionais densos e precisos do corpo humano.

Ao nível industrial, o facto de se poder manusear modelos digitais dos objectos físicos traz vantagens visíveis de redução custos. Por exemplo, uma simulação computacional com os modelos pode dar a conhecer problemas que podem ser resolvidos antes da sua realização. Esta tecnologia também pode ser usada no controlo de produção, especificamente em inspecções e metrologia dimensional, aumentando a velocidade e qualidade da produção. Além disto, com a tecnologia emergente SFF (*solid free-form fabrication*), as reconstruções tridimensionais resultantes podem ser modificadas ou incorporadas na criação de novos produtos, obtendo-se os protótipos de objectos tridimensionais, rapidamente (Weiss, 1997). Também é iniciada a possibilidade do envio/recepção, para qualquer parte do mundo, de qualquer objecto de uma forma extremamente rápida (*fax tridimensional*) (Levoy, 2000). Com os protótipos pode-se ainda estudar o comportamento de novos produtos no mercado.

O *marketing* é uma outra das áreas que beneficia desta tecnologia. Com os resultados das reconstruções podem ser criadas bases de dados tridimensionais de produtos que podem ser publicitados pela Internet ou visualizados em computadores, explorando as potencialidades que a tridimensionalidade contém. Uma dessas potencialidades é a do uso virtual do produto, por exemplo mobiliário, onde o utilizador pode, em sua casa, fazer medições ou compor o produto que mais lhe interessa com os vários componentes existentes.

Outro campo de utilização desta tecnologia é a ciência forense. Alguns dos exemplos mais importantes do seu uso são os da identificação de corpos, especialmente na

reconstrução facial e na medição das cenas do crime. Outras áreas que este tipo de tecnologia revolucionou foram os meios audiovisuais, onde a realidade virtual, até aí apenas possível através da criatividade de alguns animadores, entrou numa era de realismo notável. Exemplos da utilização de reconstrução tridimensional existem no campo da produção cinematográfica e televisiva (ref. 3D-MATIC).

No campo cultural e educativo esta tecnologia permitiu recriar vários ambientes de outras épocas ou artefactos de civilizações perdidas, como o caso de Sagalassos, na Turquia (ref. 3D-MURALE). Com a ajuda da reconstrução tridimensional pode-se preservar os objectos que a arqueologia resgatou, usando os modelos digitais em vez dos reais, proporcionando uma melhor aprendizagem sobre os hábitos dos antepassados.

Um dos campos de maior potencialidade de disseminação desta tecnologia é o da medicina, onde numerosos exemplos de possibilidades da sua utilização podem ser encontrados. Esses exemplos vão desde a exame, o diagnóstico, o planeamento e a simulação de actividade cirúrgica e o projecto e fabrico de próteses, entre outros. Aliás, a integração de dados obtidos por sistemas de radiologia e similares com dados tridimensionais adquiridos pela recuperação tridimensional são exemplo dos avanços mais recentes deste campo. Em resumo algumas das variadas áreas de aplicação são:

- **Engenharia e produção fabril** (inspecção industrial, engenharia de metrologia dimensional, prototipagem rápida, "engenharia inversa", etc.);
- **Arte** (digitalização de artefactos de museu para arquivamento e reprodução em formato digital, incorporação em ferramentas artísticas digitais, animação por computador, pós-produção cinematográfica e vídeo, encenação virtual, etc.);
- **Simulação e realidade virtual** (composição de descrições digitais para análise e simulação por computador, criação de ambientes virtuais simulando de forma realista o mundo físico, etc.);
- "Faxing 3D";
- **Modelos e Protótipos Industriais;**
- **Factores humanos e antropometria** (dimensionamento de roupa, *design* de veículos automóveis e de locais de trabalho, etc.);
- **Internet e telecomunicações** (comércio virtual, etc.);
- **Medicina** (exanimação, diagnóstico, planeamento cirúrgico, simulação cirúrgica, projecto e fabrico de próteses, ortopedia, etc.);
- **Ciência forense** (reconstrução facial, etc.).

O presente artigo descreve os princípios e modelos utilizados na construção de um sistema protótipo para recuperação e reconstrução de estruturas tridimensionais através de projecção de luz estruturada (mais concretamente, um feixe laser). Este tipo de procedimento permite explorar a restrição geométrica imposta pelas intersecções de pla-

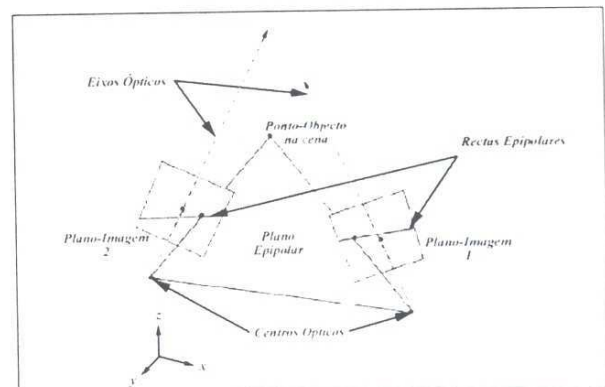


Figura 1 Modelo da geometria epipolar de um sistema binocular

nos de luz com os objectos em cena, explorando a geometria do modelo da projecção em perspectiva de uma câmara, determinando, a partir de soluções algébricas uma solução óptima para a estrutura tridimensional digital do objecto, recorrendo a imagens bidimensionais.

3. Geometria e Modelos Matemáticos

3.1. Recuperação de uma estrutura 3D

Seguidamente, apresentam-se modelos matemáticos que permitem a recuperação de estruturas 3D a partir de um qualquer objecto. O objectivo inerente aos modelos é permitir a computação, dadas as coordenadas de projecção de pontos no plano-imagem, das suas correspondentes coordenadas tridimensionais "reais".

3.1.1. Geometria epipolar

Qualquer sistema composto por duas ou mais fontes de imagens bidimensionais representando projecções do mundo tridimensional físico pode ser descrito pela sua geometria epipolar, da qual a figura 1 é o exemplo binocular.

Nela observamos dois planos-imagem capturados por duas câmaras, um ponto 3D real (que passaremos a designar por P), as linhas de projecção desse ponto em cada um desses planos e os seus correspondentes pontos de projecção (que passaremos a designar por p_1 e p_2 ou, mais genericamente, por p). A geometria epipolar impõe uma restrição que implica que qualquer ponto P seja coplanar com os seus n pontos-imagem (assim como com os n centros ópticos) pertencentes às n câmaras que constituem o sistema; o plano por eles formado é chamado *plano epipolar*. Este plano, por seu turno, intersecta os n planos-imagem, formando as chamadas *linhas epipolares*.

3.1.2. Calibração das câmaras

Qualquer ponto genérico tridimensional $P=(X,Y,Z)$ e a sua projecção correspondente $p=(u,v)$ num plano-imagem podem ser relacionados matematicamente, utilizando-se a geometria projectiva e o conceito de coordenadas homogêneas através da seguinte equação, em que s representa um factor escala arbitrário:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^T P + a_{14} \\ a^T P + a_{24} \\ a^T P + a_{34} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matriz A é chamada *matriz de calibração* e através da sua computação é possível fazer-se a correspondência entre qualquer ponto 3D e a sua projecção num plano-imagem (Dias, 1994; Zhang, 1998; Ferreira 2000). A matriz de calibração pode ser ainda mais decomposta, obtendo-se uma matriz ainda mais explícita com a seguinte forma:

$$A_{3 \times 4} = C_{3 \times 3} [R \ t] \quad (2)$$

A primeira matriz, C, modela os *parâmetros intrínsecos* da câmara, sendo, portanto, somente dependente das características internas da câmara utilizada, e a segunda matriz modela os *parâmetros extrínsecos*, por sua vez dependentes da posição e orientação da câmara, contendo a matriz de rotação R e o vector de translação t que realizam a transformação do sistema de coordenadas absoluto para o sistema de coordenadas local da câmara.

Resolvendo (1) para u e v e rearranjando os termos, obtém-se um sistema de duas equações com 12 incógnitas, i.e., um *sistema subdeterminado*. É necessário, então, obter-se mais informação a fim de resolver este sistema, que será possível se conhecermos as m correspondências entre os pontos 3D e as suas projecções e se $m \geq 12$ *incógnitas / 2 equações = 6*.

Consequentemente, torna-se desejável modificar o sistema, transformando-o num sistema *sobredeterminado* a fim de se ultrapassarem os erros na solução final, introduzidos por medições incorrectas. Fazendo-se uma escolha cuidadosa dos pontos de coordenadas bem conhecidas a fim de se simplificarem os cálculos (geralmente, e para este fim, utiliza-se uma grelha planar), é possível obter-se o desejado sistema sobre determinado:

$$\begin{cases} (a_1 - u, a_3)^T P_1 + a_{14} - u, a_{34} = 0 \\ (a_2 - v, a_3)^T P_1 + a_{24} - v, a_{34} = 0 \\ (a_1 - u, a_3)^T P_2 + a_{14} - u, a_{34} = 0 \\ (a_2 - v, a_3)^T P_2 + a_{24} - v, a_{34} = 0 \\ \dots \\ (a_1 - u_m, a_3)^T P_m + a_{14} - u_m, a_{34} = 0 \\ (a_2 - v_m, a_3)^T P_m + a_{24} - v_m, a_{34} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Uma vez que nas coordenadas homogéneas o factor escala é arbitrário, este poderá ser escolhido de modo a que $a_{34} = 1$. Então, o número de incógnitas a calcular passa a ser de 11 e a equação (3) pode ser simplificada a fim de se obter:

$$\begin{cases} (a_1 - u, a_3)^T P_1 + a_{14} = u_1 \\ (a_2 - v, a_3)^T P_1 + a_{24} = v_1 \\ (a_1 - u, a_3)^T P_2 + a_{14} = u_2 \\ (a_2 - v, a_3)^T P_2 + a_{24} = v_2 \\ \dots \\ (a_1 - u_m, a_3)^T P_m + a_{14} = u_m \\ (a_2 - v_m, a_3)^T P_m + a_{24} = v_m \end{cases} \quad (4)$$

Re-arranjando os termos a fim de exprimirem (4) em forma de matriz com os coeficientes a_{nm} como incógnitas a calcular, obtemos:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & 0 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_2 & -u_2 Y_2 & -u_2 Z_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & -v_2 X_2 & -v_2 Y_2 & -v_2 Z_2 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_m & Y_m & Z_m & 0 & 0 & 0 & -u_m X_m & -u_m Y_m & -u_m Z_m & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_m & Y_m & Z_m & -v_m X_m & -v_m Y_m & -v_m Z_m & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ a_{34} \\ a_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \dots \\ u_m \\ v_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

A equação (5) pode ser ainda mais manipulada com o objectivo de se obter a solução final

$$M \vec{a} = \vec{b} \Leftrightarrow \vec{a} = (M^T M)^{-1} M^T \vec{b} \Leftrightarrow \vec{a} = M^+ \vec{b} \quad (6)$$

utilizando a *pseudoinversa* (M^+) (Leon, 1998).

No entanto optámos por resolver (5), utilizando o método conhecido por SVD (*Decomposição do Valor Singular*) e que foi provado como sendo mais eficaz em termos computacionais (Ferreira, 2000).

3.1.3. A restrição do raio laser

Considere-se agora a Figura 2. A partir desta figura e da equação (4), é possível concluir que

$$\begin{cases} (a_1 - u a_3)^T P + a_{14} - u = 0 \\ (a_2 - v a_3)^T P + a_{24} - v = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Pi_1 P = 0 \\ \Pi_2 P = 0 \end{cases} \quad (7)$$

representa, na realidade, a solução para a linha de projecção n; i.e., (Dias, 1994)

$$\vec{n} = (a_1 - u a_3) \times (a_2 - v a_3) \quad (8)$$

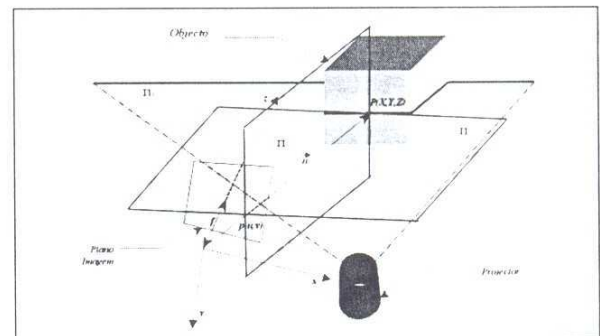


Figura 2 Esquema para a geometria de uma cena com projecção da luz estruturada e capturada pela câmara

Assim, intersectando esta linha com o plano formado pela projecção da luz estruturada, que, por seu turno, é dada e descrita por

$$\Pi_i P = 0 \quad (9)$$

obtemos finalmente

$$\Pi_i P = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

que fornece uma solução única para o ponto P a ser determinado.

A computação dos vários P_3 necessários para fazer o varrimento do objecto pode ser obtida através de calibrações sucessivas, sendo necessários 3 ou mais pontos não colineares pertencentes a cada um dos planos para esse efeito. No método descrito neste artigo os vários planos são gerados a partir de uma única fonte de luz que descreve um movimento de varrimento da cena com o plano de luz.

3.2. Reconstrução de estruturas 3D

Nas subsecções seguintes são apresentados modelos matemáticos, pertencentes ao campo de Computação Gráfica, para ajustar curvas e superfícies a pontos recuperados de um objecto para a reconstrução da sua estrutura 3D. Estes métodos serão discutidos neste texto apenas de um modo introdutório no que diz respeito a ajuste de curvas a pontos, podendo ser facilmente generalizados para superfícies – para mais referências, ver (Angel, 1990) e (Ferreira, 2000).

Uma vez que, utilizando os métodos utilizados anteriormente, só se encontram disponíveis os conjuntos de coordenadas 3D para pontos que resultam de amostras de uma estrutura 3D de um objecto, deverão ser encontrados os métodos adequados de reconstrução que se apliquem quer às curvas, quer às superfícies.

As curvas polinomiais providenciam um equilíbrio entre o nosso desejo de controlar a forma de uma curva a fim de se ajustar aos critérios de reconstrução e a facilidade com que podem ser avaliadas (Angel, 1990; Ferreira 2000).

Em ambos os casos, ao utilizar-se formas paramétricas ou explícitas de descrição da equação, obtemos polinomiais de uma única variável de grau N (Angel, 1990):

$$p(t) = \sum_{i=0}^N c_i t^i, \quad c, t \in \mathbb{R} \quad (11)$$

Uma vez que os $N+1$ coeficientes $\{c_i\}$ podem definir um polinómio de grau N , qualquer conjunto de $N+1$ condições independentes permitirá encontrar estes coeficientes e especificará um polinómio único. Diferentes formas de curvas e superfícies serão determinadas pelo tipo de condições que impusermos (Angel, 1990).

3.2.1. Polinómios de Bezier e B-Splines cúbicos

Os polinómios Bezier utilizam os mesmos dados do ponto de controlo que os polinómios usados para interpolação; eles usam estes dados para aproximar as (primeiras) derivadas na forma Hermite (Angel, 1990; Farin, 1999). Os

primeiros e últimos pontos são utilizados para se determinar os valores nos *endpoints*; os dois primeiros pontos são utilizados como forma de aproximação da primeira derivada na junção esquerda e os dois últimos são utilizados como forma de aproximação à primeira derivada na junção direita. Tal facto conduz às quatro equações desenhadas para a determinação dos coeficientes polinomiais, i.e., para calcular a matriz geométrica de Bezier M_B :

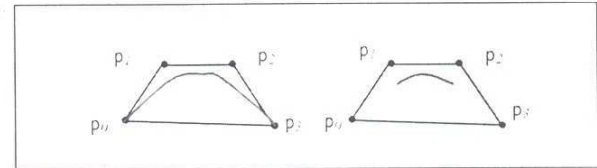


Figura 3 Curvas Bezier e B-Splines cúbicos e respectivos cascos convexos de dados

$$\begin{cases} p(0) = p_0 \\ p(1) = p_3 \\ p'(0) \approx \frac{p_1 - p_0}{\frac{1}{3}} = 3(p_1 - p_0) \\ p'(1) \approx \frac{p_3 - p_2}{\frac{1}{3}} = 3(p_3 - p_2) \end{cases} \quad (12)$$

Apesar de o polinómio calculado desta forma não passar pelos pontos de controlo, a curva por si descrita mantém uma proximidade significativa relativamente a estes últimos, já que está restringida (devido às imposições feitas às condições de cálculo dos coeficientes) àquilo a que se dá o nome de *convex hull of data* (que em português será, numa tradução livre, uma “região convexa de valores”), representado pelo polígono da figura anterior – ver (Angel, 1990) ou (Farin, 1999).

Este método, embora mais estável do que a interpolação, ainda assim não garante a continuidade da primeira e segunda derivadas nos pontos finais de cada segmento. Os B-Splines cúbicos são curvas compostas por várias partes polinomiais para as quais se obtêm 4 equações, não somente através da aproximação da primeira derivada de cada lado, mas também da segunda derivada, tal como declarado na equação (13). Será necessária uma quinta equação, uma vez que d não está presente nas primeiras equações – é uma equação simétrica (relativamente ao ponto esquerdo) e é assim escolhida a fim de fornecer condições simétricas aos *endpoints*:

$$\begin{cases} p'(0) \approx \frac{p_1 - p_0}{2} = c \\ p'(1) \approx \frac{p_3 - p_2}{2} = 3a + 2b + c \\ p''(0) \approx p_2 - 2p_1 + p_0 = 2b \\ p''(1) \approx p_3 - 2p_2 + p_1 = 6a + 2b \\ p(0) \approx \frac{p_0 + 4p_1 + p_2}{6} = d \end{cases} \quad (13)$$

mais adequado. Nas figuras 5 e 6 são apresentados os resultados obtidos com o sistema desenvolvido.

6. Referências

- L. Almeida e J. Dias, "Dense Depth Maps using Stereo Vision Head", Proceedings of SIRS '99 the 7th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, Coimbra, 20-23 Julho, Portugal, 1999.
- Angel, E. (1990). *Computer Graphics*, Addison-Wesley.
- Dias, J. (1994). *Reconstrução Tridimensional Utilizando Visão Dinâmica*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal, Novembro, 1994.
- Farin, G. (1999). *NURBS – from Projective Geometry to Practical Use*, 2ª Edição, A K Peters.
- J. Felmar and N. Ayache, "Rigid, Affine and Locally Affine Registration of Free-Form Surfaces", *IJCV*, 18(2), 99-119, 1996.
- Ferreira, J., Dias, J. (2000). "A 3D Scanner - Three-Dimensional Reconstruction From Multiple Images". In Proc. Control 2000 Conf. on Automatic Control, Student Forum, pgs. 690-695, Universidade do Minho. Portugal.
- Fowler, Martin com Scott Kendall (1997). *UML Distilled – Applying the Standard Object Modelling Language*, 2ª Edição, Addison Wesley.
- H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, M. Halstead, H. Jin, J. McDonald, J. Schweitzer, W. Stuetzle. "Piecewise Smooth Surface Reconstruction", *Computer Graphics (SIGGRAPH 1994 Proceedings)*, pages 295-302, 1994.
- Leon, S. J. (1998). *Linear Algebra With Applications*, 5ª Edição, Prentice Hall.
- M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade and D. Fulk, "The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues", *SIGGRAPH 2000*, New Orleans, LA, 24-28 July, 2000.
- Martins, N. e J. Dias (1999). "Visual Inspection based on mirror images – The 3D Reconstruction Case". In *SIRS '99 Proceedings* (University of Coimbra), Universidade de Coimbra, Portugal.
- Rational Software, et al. (1997). *UML Notation Guide - version 1.1*, Rational Software Corporation.
- Silva, A., Menezes, P., Dias, J. (1997). "Avoiding Obstacles Using a Connectionist Network - Experiments Based on Visual and Sonar Information", *IROS'97 - IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Grenoble, França, 7 a 11 de Setembro, 1997.
- Woo, M., J. Neider, and T. Davis (1997). *Open GL Programming Guide*, 2ª Edição, Addison-Wesley.
- Zhang, Z. (1998). "A Flexible New Technique For Camera Calibration", Relatório Técnico, Microsoft Research.
- Zhao, T.C. e Mark Overmars (1998). *Forms Library – a Graphics User Interface for X*.
- L. Weiss, "SFF Processes", JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, March 1997.
- IMPROOFS project, www.esat.kuleuven.ac.be/~konijn/improofs.html.
- 3D-MURALE project, www.prip.tuwien.ac.at/Research/Murale.
- 3D-MATIC, <http://www.faraday.gla.ac.uk>, "Faraday Home Frameset", EPSRC Sponsored Faraday Partnership Administered by the Department of Computing Science, University of Glasgow, última revisão – 31/08/00, University of Glasgow, 2000.

Este trabalho é financiado pelo projecto TELE-3D da Fundação para a Ciência e Tecnologia (CERN/PEEI/40121/2000)

*Instituto de Sistemas e Robótica

Universidade de Coimbra

Coimbra - Portugal

1 {,ilipe, nmartins, laa, jorge}@isr.uc.pt