

Caracterização do Movimento Tridimensional de Corpos Articulados

Pedro Mogadouro Couto
CETAV - U.T.A.D
Vila Real
pcouto@utad.pt

Luís Gonzaga Magalhães
U.T.A.D
Vila Real
lmagalha@utad.pt

Ronaldo Gabriel
CETAV - U.T.A.D
Vila Real
rgabriel@utad.pt

Pedro Melo Pinto
CETAV - U.T.A.D
Vila Real
pmelo@utad.pt

Sumário

Este trabalho recorre a técnicas de Visão por Computador e de Computação Gráfica para caracterizar o movimento 3D de corpos articulados. As técnicas de Visão por Computador são utilizadas para efectuar o seguimento de marcas e para obter a sua posição tridimensional em relação às câmaras. Com recurso a técnicas de Computação Gráfica é efectuada uma animação do movimento tridimensional do corpo articulado, a qual poderá ser um auxiliar precioso, por exemplo, no domínio da Biomecânica. No âmbito deste trabalho, foi efectuada uma aplicação ao caso do estudo da estabilidade articular do tornozelo. Os resultados obtidos mostram que a metodologia é viável.

Palavras-chave

Análise de movimento, seguimento de objectos, alta resolução temporal, reconstrução 3D, calibração, visualização 3D, biomecânica.

1. INTRODUÇÃO

Com este trabalho, que deriva da dissertação de mestrado do primeiro autor [Couto, 2003], pretende-se desenvolver e testar uma metodologia que permita caracterizar o movimento tridimensional de corpos articulados, com vista à sua aplicação no domínio da Biomecânica, mais precisamente na locomoção bípede.

A metodologia proposta neste trabalho tem por base técnicas de Visão por Computador, para efectuar o seguimento de marcas nas sequências de imagens obtidas pelas câmaras, e para estimar (reconstruir) a posição tridimensional dessas marcas. O recurso às técnicas de Computação Gráfica é realizado com o objectivo de visualizar o movimento tridimensional das marcas, fornecendo uma ferramenta para análise do movimento tridimensional do corpo articulado.

No âmbito deste trabalho, a metodologia proposta é aplicada ao caso do estudo 3D do comportamento da estabilidade articular do tornozelo. Os resultados obtidos permitiram obter dados importantes para o estudo biomecânico da estabilidade articular do tornozelo.

Estes resultados mostram a viabilidade da metodologia proposta e também que as aplicações desenvolvidas são ferramentas que podem constituir um auxiliar precioso

para o estudo, de um ponto de vista biomecânico, da locomoção bípede.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

Esta metodologia vem no seguimento dos trabalhos de Gabriel [Gabriel, 1998], [Gabriel, 1999] e [Mourão, 1999], nos quais foram já identificados parâmetros biomecânicos para a análise de estabilidade articular. Estes parâmetros podem ser determinados com recurso a sequências de imagem de alta resolução temporal descritivas do movimento, em sincronismo com dados dinâmicos no apoio [Mourão, 1999].

O processo de extracção da informação tridimensional, presente nas imagens, pode ser dividido em duas fases distintas: a da análise/detecção de movimento 2D (independente para cada sequência de imagens) e a da reconstrução 3D propriamente dita. Numa terceira fase é efectuada a visualização dos resultados, utilizando técnicas de computação gráfica, no sentido de recriar o movimento original.

2.1 Aquisição das imagens

As sequências adquiridas à taxa habitual, de 25 imagens por segundo, mostram-se insuficientes para caracterizar o comportamento do movimento humano, durante a locomoção bípede com velocidade e cadência de passada natural. Este problema foi identificado por diversos

autores, nomeadamente por Krebs [Krebs, 1995], no âmbito da biomecânica, e também por Singh [Singh, 1991] e Fleet [Fleet, 1992] em visão por computador. Justifica-se assim o recurso a frequências de amostragem mais elevadas, como forma de diminuir uma possível ocorrência de *aliasing*. No trabalho experimental, que realizámos, optámos por utilizar uma taxa de aquisição de 125 imagens/segundo. Esta opção foi baseada em alguns critérios que serão abordados na secção 3.

Para se poder efectuar uma análise biomecânica do Movimento Humano, a partir de sequências de imagens, é, numa primeira fase, necessário identificar em cada imagem da sequência determinados pontos considerados significativos para a caracterização do movimento.

A escolha das marcas a utilizar para a sinalização dos pontos obedece, entre outros, a dois critérios fundamentais: as marcas devem ser confortáveis para os indivíduos, de forma a não condicionarem a execução da tarefa, e devem, pelas suas características ópticas em confronto com o meio envolvente, facilitar o processo de análise de imagem via computador.

Deste modo, foram considerados vários tipos de marcas, que variavam em tamanho, forma e cor, tendo sido escolhidas esferas negras, com 0,5cm de diâmetro e 10 mg de peso, que foram “coladas” no indivíduo por intermédio de uma fita adesiva. O diâmetro e peso das marcas foram escolhidos de maneira a que, quando reproduzida na imagem, a marca represente uma área reduzida, idealmente 1 *pixel*, e de modo a não dificultarem a execução da tarefa por parte do indivíduo. A cor negra foi escolhida por apresentar grande contraste em relação a todo o meio envolvente e facilitar, deste modo, a sua identificação e posterior seguimento nas imagens. Este tipo de marcas provou ser bastante fiável, com a vantagem adicional de ser uma solução bastante económica.

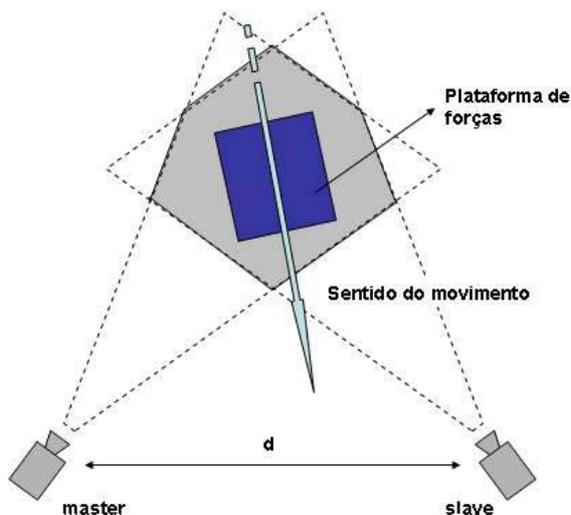


Figura 1 - Disposição das câmaras

Nos objectos articulados a estrutura do objecto pode mudar de instante para instante, o que pode inviabilizar a sua reconstrução a partir de uma única câmara. A solução encontrada, passa pela utilização de duas câmaras

sincronizadas, uma vez que com duas imagens do objecto obtidas no mesmo instante e a partir de duas posições diferentes, o problema da reconstrução 3D, para cada instante, transforma-se num problema de estimação do modelo 3D de um objecto rígido a partir de duas imagens, para o qual existem diversos métodos robustos. Na verdade, o recurso a duas câmaras sincronizadas pode tornar também possível, a utilização desta metodologia mesmo num contexto de corpos não rígidos, ou mesmo no caso limite da existência de vários corpos em movimento.

A disposição das câmaras obedece a dois critérios que a figura 1 ajuda a ilustrar: têm de estar dispostas de maneira a que as marcas sejam sempre visíveis pelas duas câmaras, devendo ser a distância entre estas (valor d na figura), no mínimo, equivalente à distância das câmaras em relação à zona de filmagem (área definida pela intersecção das áreas de visão de cada uma das câmaras, como se pode observar na figura). Este problema foi identificado através de testes laboratoriais, tendo-se verificado que quanto maior for a abertura das câmaras, respeitando o primeiro critério atrás descrito, maior é a eficácia das técnicas de reconstrução. Esta conclusão advém do facto de, ao se aumentar a abertura das câmaras, aumenta-se consequentemente o rácio, entre a amplitude do movimento de translação das marcas, e o ruído inerente às imagens, diminuindo assim, significativamente, a influência deste último na qualidade dos resultados.

2.2 Análise das imagens

Um dos problemas mais complexos e actuais com que se depara o processamento digital de imagem é, sem dúvida, o da detecção e seguimento de objectos em movimento numa sequência de imagens, ou seja, a implementação numa máquina de uma das principais características da visão humana - a apreensão do movimento.

Para a reconstrução tridimensional ser possível são necessárias, no mínimo, duas vistas da cena obtidas a partir de duas posições diferentes. Para isso, foram utilizadas duas câmaras sincronizadas com elevadas taxas de aquisição.

Uma vez que as câmaras estavam sincronizadas, as sequências por elas adquiridas foram analisadas separadamente, reduzindo a questão a um problema de detecção de movimento em sequências de imagens digitais adquiridas com câmara fixa. Esta abordagem é exequível, visto que, nesta fase, o único objectivo é determinar as trajectórias 2D das marcas quando “vistas” por cada uma das câmaras independentemente da outra. Só numa fase posterior (estimação das coordenadas 3D) haverá cruzamento entre a informação resultante da análise das sequências adquiridas por cada uma das câmaras.

Para efectuar a detecção das marcas e o seu seguimento ao longo da sequência de imagens foi desenvolvida uma aplicação para obtenção das trajectórias 2D de cada marca, com base na aplicação desenvolvida por Mourão [Mourão, 1999]. Essa aplicação foi desenvolvida com o

objectivo de comparar diferentes técnicas de *Block Matching*, e tinha também por objectivo facilitar a tarefa de marcação de pontos e o seu seguimento, ao longo de uma sequência de imagens digitais gravadas em disco. Apesar de algumas das suas funcionalidades terem sido mantidas, a dita aplicação necessitou de alterações de fundo de maneira a corresponder às exigências deste trabalho, visto ter-se revelado ineficaz no processamento das sequências de imagens digitais utilizadas no âmbito deste trabalho.

Nas técnicas de *Block Matching* (Figura 2) podem ser distinguidas duas etapas: numa primeira fase é necessário definir, numa das imagens da sequência, uma área de referência (*template window*) que englobe o objecto a “seguir”, neste caso as marcas. Numa segunda fase, para as restantes imagens da sequência, é preciso encontrar a melhor correspondência (*match*) numa área maior (área de pesquisa, *search window*) onde se supõe ocorrer o padrão inicial.

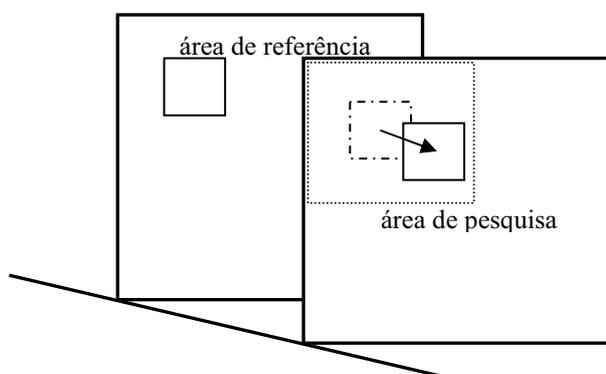


Figura 2 - Funcionamento das técnicas baseadas em *Block Matching*

Na primeira fase, de extrema importância neste tipo de estudos [Melo-Pinto, 1995], é necessário efectuar a marcação das marcas na primeira imagem da sequência. O tamanho da área de referência deve ser suficiente para englobar as marcas, assim, e como o tamanho das marcas pode ser diferente dependendo da câmara com que são “vistas” (a trajectória do indivíduo não é exactamente perpendicular em relação à linha imaginária que une as duas câmaras, o que devido à ampliação usada pelas câmaras origina diferenças na ordem do 4/5 *pixels* no tamanho das marcas), foram definidos tamanhos distintos consoante as sequências tenham sido adquiridas pelas câmaras *master* ou *slave* (Figura 1).

Na segunda fase do processo, é necessário definir a área de pesquisa onde se supõe encontrar o objecto. As dimensões da área de pesquisa são directamente proporcionais ao peso computacional do processo e inversamente proporcionais ao desempenho dos algoritmos de *Block Matching*. A escolha da área de pesquisa foi feita a partir dos seguintes pressupostos: Devido às elevadas taxas de amostragem usadas na aquisição das imagens, os deslocamentos das marcas de imagem para imagem serão pequenos em amplitude e,

tendo em conta a existência da inércia, nenhum objecto que se encontre em movimento poderá mudar “repentinamente” de direcção de uma imagem para a seguinte [Mourão, 1999]. Por outro lado, e como consequência das características do movimento das marcas serem diferentes, devido à disposição das câmaras (Figura 1), à semelhança da área de referência, também a escolha das dimensões da área de pesquisa foi feita de maneira distinta para cada uma das sequências, dependendo da câmara com que foram adquiridas.

Desta forma, as sequências, adquiridas por cada uma das câmaras, foram analisadas recorrendo a dois algoritmos de *Block Matching* distintos (o mesmo algoritmo com diferentes parametrizações), que produziram as trajectórias 2D das marcas, as quais foram armazenadas em ficheiros para posteriormente serem usadas na estimação 3D do seu movimento.

Outro factor que pode influenciar a velocidade de processamento é a forma como é implementado o procedimento de procura na área de pesquisa [Mourão, 1999], assim, foi mantida a pesquisa em espiral usada por Mourão que foi aplicada à semelhança de [Mendonça, 1993]. A medida de avaliação usada para calcular o ponto de maior semelhança foi a Correlação Normalizada (CN) [Mourão, 1999].

2.3 Reconstrução 3D

As imagens são captadas por dispositivos de aquisição de imagem tais como câmaras fotográficas ou de vídeo. À semelhança do que acontece na visão humana e em grande parte dos sistemas de visão naturais, o processo de formação de uma imagem inicia-se quando as amostras de intensidade luminosa, reflectida pelos objectos da cena, atingem os sensores da câmara (pupila). Ou seja, uma imagem é uma função bidimensional da intensidade luminosa [Niblack, 1986].

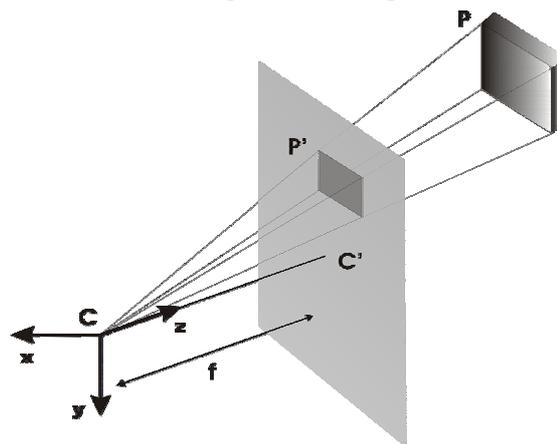


Figura 3 – Modelo perspectivo

A imagem criada pela câmara representa uma projecção bidimensional (2D) da cena tridimensional (3D) visualizada. O processo de aquisição da imagem pode ser assim entendido como uma transformação, na qual um modelo 3D dá origem a um modelo 2D, a imagem. O grande objectivo da reconstrução 3D é recriar (estimar) o modelo 3D que deu origem à projecção 2D.

O processo de aquisição da imagem tem implícita uma transformação geométrica, através da qual se relacionam os pontos da cena com os seus correspondentes na imagem. Para se poder efectuar a reconstrução 3D da cena é necessário perceber esta transformação geométrica, associada ao processo da aquisição da imagem, pois, o que se pretende é efectuar a transformação inversa.

O modelo adoptado neste trabalho é o modelo perspectivo (Figura 3) ou *pinhole model*, o qual pressupõe que a câmara executa uma projecção perspectiva. Neste modelo a relação entre as coordenadas imagem de um ponto e as coordenadas 3D desse mesmo ponto é definida pela equação [Faugeras, 1993]:

$$\tilde{p} \cong M \cdot \tilde{P} \quad (1)$$

com

$$M = K \cdot (R \quad -R \cdot t) \quad (2)$$

em que \tilde{p} e \tilde{P} correspondem, respectivamente, às coordenadas homogéneas do ponto imagem e do ponto 3D.

A matriz K contém os parâmetros internos da câmara, isto é, aqueles que só dependem das características da câmara. Esta matriz tem a seguinte composição:

$$K = \begin{bmatrix} f \cdot ku & -f \cdot kv \cdot \cot g(\theta) & u_0 \\ 0 & \frac{f \cdot kv}{\sin(\theta)} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

em que ku e kv representam respectivamente o factor de escala em cada um dos eixos da imagem, θ o ângulo entre os eixos, f a distância focal e u_0 e v_0 as coordenadas do centro de projecção ou de perspectiva.

A matriz R e o vector t formam os parâmetros externos da câmara, os quais definem, respectivamente, a orientação e a posição da câmara em relação a um referencial global.

Para ser possível a reconstrução tridimensional são necessárias duas ou mais vistas da cena obtidas, a partir de posições diferentes, e conhecer as matrizes de projecção para cada uma das vistas. O conhecimento das matrizes de projecção implica a obtenção dos parâmetros internos e externos da câmara. Numa abordagem convencional para a reconstrução tridimensional são executados os seguintes passos: em primeiro lugar são obtidos os parâmetros internos da câmara, de seguida são determinados os parâmetros externos e só depois é possível a reconstrução tridimensional (triangulação).

Neste trabalho, e uma vez que as câmaras se mantêm estáticas, o processo de calibração permite-nos obter os parâmetros internos e os externos. Na verdade só estamos interessados na obtenção da matriz de projecção para cada uma das câmaras, as quais se supõe que se mantêm constantes ao longo do tempo. Uma vez obtidas as matrizes de projecção para cada câmara e os pares de pontos imagem correspondentes, para cada ponto (marca)

é estimada a sua posição em relação às câmaras usando uma técnica que se designa por triangulação.

2.3.1 Calibração

No âmbito do trabalho desenvolvido neste trabalho, o termo calibração designa a tarefa de obtenção de um conjunto de parâmetros que caracterizam a câmara, normalmente designados por parâmetros internos e externos.

Se forem conhecidas as coordenadas 3D de alguns pontos da cena é possível obter a matriz de projecção para cada vista, desde que se encontrem visíveis, em cada vista, um número suficiente de pontos. Este número mínimo está directamente relacionado com o número de parâmetros a obter, ou seja, com o número de incógnitas do sistema de equações (5).

Esses pontos podem ser conhecidos a priori, sendo designados na fotogrametria por pontos de controlo, ou fazendo parte de um objecto de calibração do qual se conhece a estrutura ([Faugeras, 1987b] e [Tsai, 1986]).

Vamos supor que a distorção radial e a tangencial podem ser consideradas desprezáveis. Desta forma a relação entre cada ponto $P_i = (x_i \quad y_i \quad z_i)^T$ e a sua projecção $p_i = (u_i \quad v_i)$ é definida por

$$s \cdot p_i = M \cdot \tilde{P}_i \quad (4)$$

em que s representa um factor de escala, M a matriz de projecção e \tilde{P}_i as coordenadas homogéneas do ponto P_i .

Esta relação pode ser escrita, após algumas manipulações matemáticas, na forma matricial

$$B_i \cdot m = 0 \quad (5)$$

com

$$B_i = \begin{pmatrix} -x_i & -y_i & -z_i & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_i x_i & u_i y_i & u_i z_i & u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -x_i & -y_i & -z_i & -1 & v_i x_i & v_i y_i & v_i z_i & v_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

e

$$m = (m_{11} \quad m_{12} \quad m_{13} \quad m_{14} \quad m_{21} \quad m_{22} \quad m_{23} \quad m_{24} \quad m_{31} \quad m_{32} \quad m_{33} \quad m_{34})^T \quad (7)$$

em que m_{ij} representa o elemento na posição (i,j) da matriz M .

Conhecendo um número suficiente de coordenadas P_i e a sua projecção p_i é possível resolver o sistema de equações (5) (de preferência o sistema de equações deverá ser sobredeterminado uma vez que um maior número de pontos originará, à partida, um menor valor do erro na obtenção dos parâmetros) e determinar (7). Este problema foi abordado por Abdel-Aziz e Karara [Abdel-Aziz, 1971], donde resultou um método conhecido por DLT (*Direct Linear Transformation*). Este método foi mais tarde revisto por diversos autores (ex: [Faugeras, 1987, Melen, 1994]).

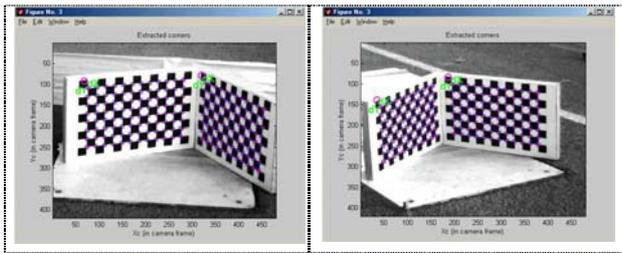


Figura 4 - Procedimento para a calibração das imagens

Para calibrar as câmaras foi desenvolvida uma aplicação em Matlab com base nas aplicações de Bouguet [Bouguet, 2001] e de Pribanic [Pribanic, 1999]. Primeiro é necessário identificar nas imagens alguns dos pontos característicos do objecto de calibração, mais concretamente, os cantos dos quadrados que fazem parte do padrão do objecto (Figura 4). Posteriormente são fornecidas ao programa as coordenadas (x,y,z) reais dos referidos pontos do objecto de calibração, a partir das quais são determinadas as matrizes de projecção que deram origem às imagens.

2.3.2 Triangulação

Designa-se por triangulação o processo de reconstruir espacialmente um ponto P a partir das suas projecções p_1 e p_2 , em duas vistas diferentes, e conhecendo as matrizes de projecção para cada uma das câmaras (podem ser câmaras diferentes ou a mesma câmara mas em posições diferentes). Geometricamente este processo resume-se à determinação do ponto de intersecção de duas rectas (ver figura 5), a recta que passa pelo centro de projecção C_1 e pela projecção p_1 e a recta que passa pelo centro de projecção C_2 e pela projecção p_2 , o que é um problema de fácil resolução.

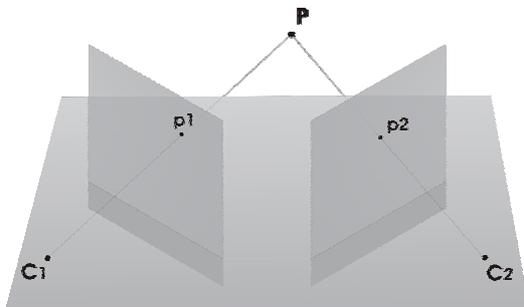


Figura 5 - Triangulação

Contudo, devido ao ruído introduzido pelos erros cometidos na obtenção das coordenadas das projecções p_1 e p_2 , pelo facto de as matrizes de projecção serem unicamente aproximações, ou por erros cometidos pelos arredondamentos nos cálculos, o problema deixa de ter uma resolução simples, uma vez que as duas rectas podem não se intersectar. Torna-se então necessário usar métodos de triangulação, que nos permitam obter a solução que minimiza um determinado erro.

Uma possível solução pode ser encontrada na análise numérica, a qual apresenta métodos para a resolução de sistemas de equações lineares tendo em conta a minimização de um determinado erro. O sistema de equações pode ser resolvido, usando o método dos mínimos quadrados. Em Matlab é possível resolver um

sistema de equações sobredeterminado, que é o caso, usando o método dos mínimos quadrados.

2.4 Visualização 3D

Com base na informação da posição das marcas para cada instante é possível efectuar uma animação do movimento tridimensional do corpo (neste caso das marcas). Para visualizar o movimento 3D do corpo articulado foi desenvolvida uma aplicação em OpenGL que apresenta para cada instante a posição das marcas (ver figura 6). Esta aplicação permite mudar a posição da câmara de visualização enquanto se observa a animação, fornecendo uma ferramenta de análise do movimento tridimensional do corpo articulado.

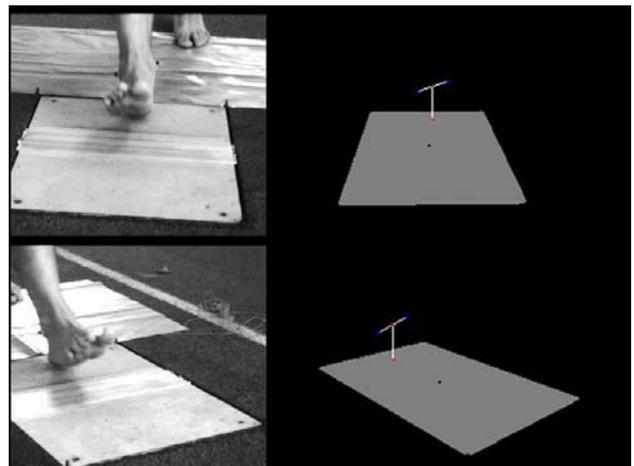


Figura 6 – Visualização do movimento 3D em OpenGL

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Pretende-se aplicar a metodologia proposta ao estudo do comportamento de estabilidade articular, feita através da análise de duas sequências de imagens de alta resolução temporal, que torne possível a caracterização tridimensional do movimento.

O parâmetro biomecânico que se pretende caracterizar é o comportamento 3D do centro articular do tornozelo do indivíduo, durante a passada normal. Assim, torna-se necessário a colocação de marcas no executante da tarefa, que serão posteriormente identificadas em cada uma das imagens das sequências.

A colocação das marcas nos executantes foi feita de acordo com as recomendações do comité de terminologia e standardização (STC – *Standardization and Terminology Committee*) da sociedade internacional de biomecânica (ISB – *International Society of Biomechanics*) no que respeita ao sistema de coordenadas das articulações (JCS – *Joint Coordinate System*) [jbiomech, 2002], [Ying, 2002]. Assim, foram colocadas duas marcas no tornozelo do indivíduo, uma no maléolo interno (MM – *medial malleolus*) e outra no maléolo externo (LM – *lateral malleolus*) (ver figura 7). Esta disposição permite o posterior cálculo do centro articular do tornozelo (IM – *inter- malleolar point*), localizado no ponto médio do segmento de recta definido pelos pontos MM e LM [jbiomech, 2002], [Ying, 2002].

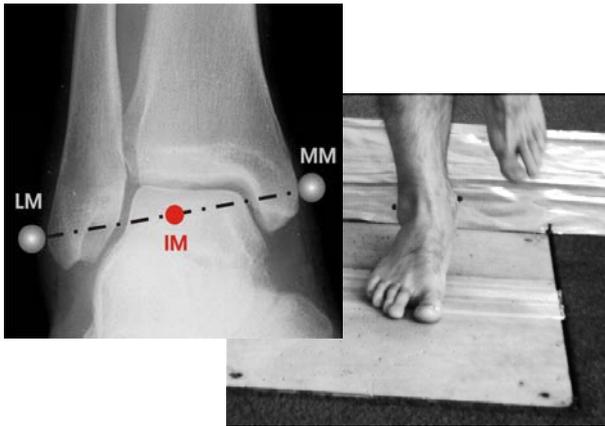


Figura 7 – Colocação das marcas

Para a aquisição das sequências de imagens foram utilizadas duas câmaras de alta resolução temporal REDLAKE PCI 500S, pertencentes ao departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Estas câmaras permitem adquirir imagens com dimensões e taxas de aquisição apresentadas na tabela 1.

Taxa de aquisição (imagens/seg)	50	125	250	500
Resolução do sensor (pixels)	480x420	480x420	480x420	320x280

Tabela 1 – Relação Taxa de aquisição versus resolução do sensor

Como já foi referido, as sequências, adquiridas à habitual taxa de 25 imagens por segundo, mostram-se insuficientes para caracterizar o comportamento do movimento humano, durante a locomoção bípede com velocidade e cadência de passada natural. Em princípio, escolher-se-ia a taxa de aquisição mais elevada para evitar uma possível ocorrência de *aliasing*. Contudo, existem vários factores que condicionam esta escolha, tornando-se necessário encontrar uma solução de compromisso de maneira a facilitar o posterior processamento de imagem, uma vez que estes se revelam determinantes no que respeita à qualidade das imagens.

Assim, a escolha da taxa de aquisição a utilizar foi baseada nos seguintes critérios:

- Quanto maiores forem as dimensões, em *pixels*, da imagem, mais fácil e eficaz se torna a sua análise, uma vez que estas determinam a resolução espacial da mesma.
- As taxas de aquisição mais elevadas acarretam dois tipos de problemas: por um lado, quanto maior é a taxa de aquisição menor é a resolução da imagem, por outro lado, maiores serão os problemas relacionados com as exigências nas condições de iluminação.

Após vários testes preliminares, concluiu-se que o uso de taxas de aquisição de 250 e 500 imagens por segundo implica o recurso a um complexo sistema de iluminação, pois quanto maior for a taxa de aquisição menor será o tempo de exposição do sensor para cada imagem. O recurso a sistemas de iluminação comuns revelou-se

ineficaz, uma vez que a estas velocidades de aquisição, até mesmo as flutuações na intensidade das lâmpadas, devidas à natureza alternada da rede de alimentação (corrente alternada a 50Hz), são visíveis e provocam diferenças de luminosidade, acentuadas de imagem para imagem. Aconselha-se o uso da fibra óptica ou de lâmpadas fluorescentes de alta-freqüência.

A taxa de amostragem escolhida para a realização deste trabalho, segundo os critérios supra mencionados, foi de 125 imagens/segundo, garantindo a não ocorrência de *aliasing* nos dados e, também, porque a esta velocidade não é necessário o recurso a iluminação artificial. Assim sendo, as imagens das diferentes sequências são de dimensões 480x420 *pixels* com 8 bits de resolução (256 níveis de cinzento).

As sequências foram adquiridas na Nave de Desportos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro sem o recurso a iluminação artificial.

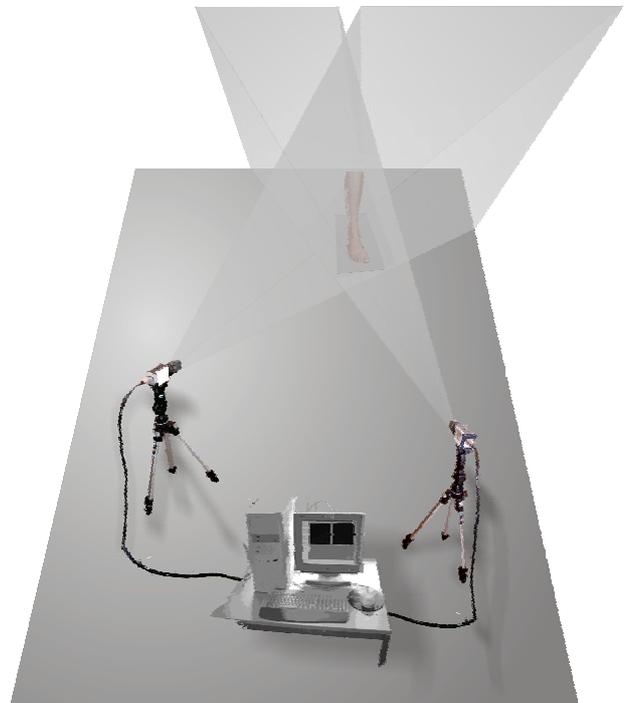


Figura 8 – Disposição das câmaras

Para guardar as sequências de imagens, foi utilizado um computador pessoal IBM-PC Pentium III 866 MHz, com sistema operativo windows, equipado com 512 Mbytes de RAM e dois discos rígidos de 40 Gbytes cada.

As câmaras foram dispostas como se indica na Figura 8, encontrando-se sincronizadas, entre elas e a plataforma de forças (KISTLER 9281-B), por intermédio de um sinal de *trigger*. No âmbito deste trabalho, os dados adquiridos pela plataforma de forças serviram apenas para comprovar a imagem das sequências em que ocorre o contacto inicial do pé do indivíduo com a plataforma.

As câmaras foram calibradas com um objecto de calibração tridimensional (dois planos ortogonais, com um padrão de xadrez 7x11 quadrados, em que cada quadrado tem as dimensões de 2x2 cm. Ver Figura 9).

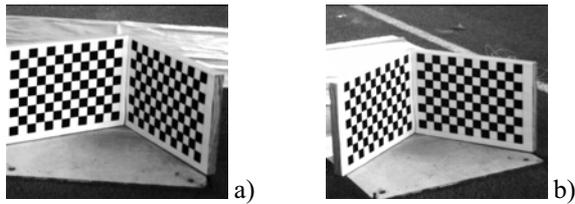


Figura 9 - Objecto de calibração "visto" pelas câmaras
a) *master* b) *slave*

O recurso a elevadas taxas de amostragem (125 imagens/segundo) coloca o problema da localização das marcas, colocadas nos executantes, em todas as imagens da sequência. Com efeito, sendo cada sequência composta por 360 imagens e sendo necessário identificar 2 marcas em cada imagem, esta tarefa, quando executada manualmente por um operador (teria de marcar 720 pontos), seria um processo moroso, cansativo e também sujeito a erros. Assim, este trabalho é levado a efeito, de uma forma semi-automática (só é necessário marcar os pontos na 1ª imagem), pela aplicação desenvolvida no âmbito deste trabalho. Esta aplicação permite o seguimento semi-automático das marcas colocadas nos membros inferiores dos indivíduos.

A segunda aplicação desenvolvida faz a estimação 3D da posição relativa das marcas, a partir de cada par de coordenadas 2D correspondentes a duas imagens adquiridas no mesmo instante de tempo. Posteriormente, toda a trajectória 3D do centro articular do tornozelo é caracterizada.

A terceira aplicação é utilizada para visualização e análise de resultados.

4. RESULTADOS

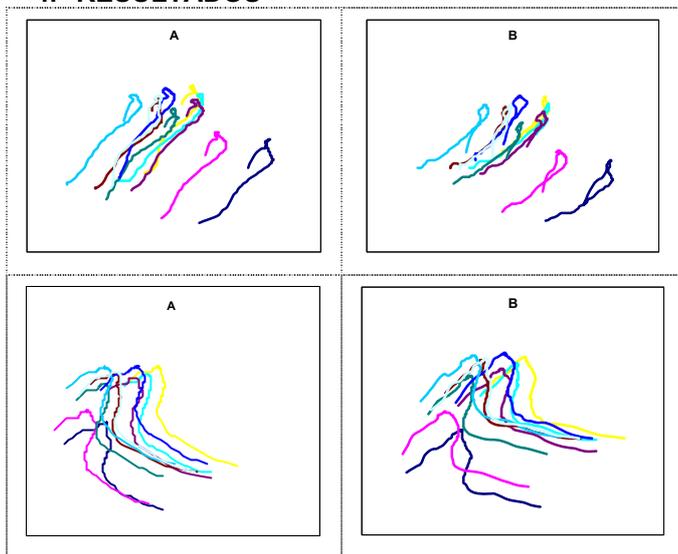


Figura 10 – Trajectórias 2D das marcas

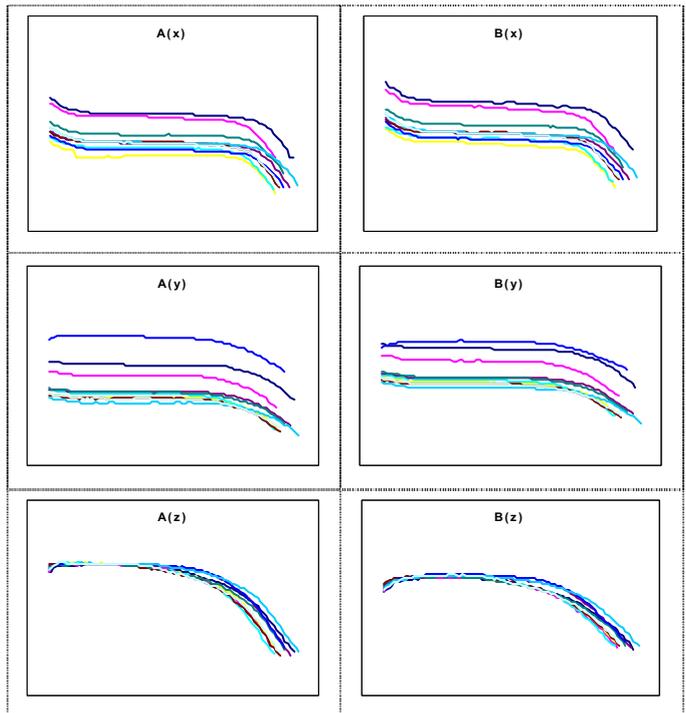


Figura 11 – Coordenadas x, y e z das marcas A e B ao longo das sequências

Neste ponto são apresentados alguns dos resultados obtidos na determinação das trajectórias 2D das marcas por aplicação de técnicas de *Block Matching*.

Na figura 10 pode ser visto na 1ª linha: gráficos (x,y) das trajectórias, das marcas A e B, obtidas a partir da análise das sequências adquiridas pela câmara *master*; 2ª linha: gráficos (x,y) das trajectórias obtidas a partir da análise das sequências adquiridas pela câmara *slave*.

Neste ponto são apresentados, também, alguns dos resultados obtidos na determinação das trajectórias 3D das marcas.

Na figura 11 pode ser visto o comportamento das coordenadas (x,y,z) das marcas A e B, coordenadas essas que definem as trajectórias 3D das mesmas.

Na figura 12 podem ser vistas, num gráfico (x,y,z), as trajectórias 3D do centro articular do tornozelo. As coordenadas do centro articular do tornozelo foram determinadas, achando o ponto médio do segmento de recta que une as duas marcas.

Observando as figuras 11 e 12 facilmente se verifica que não existem diferenças significativas nas trajectórias 3D das marcas e do centro articular entre cada uma das passagens. Por outro lado, a distância entre as marcas manteve-se constante ao longo do tempo e com valores coincidentes com os valores obtidos através de medição. Estas observações apontam para a fiabilidade da metodologia proposta.

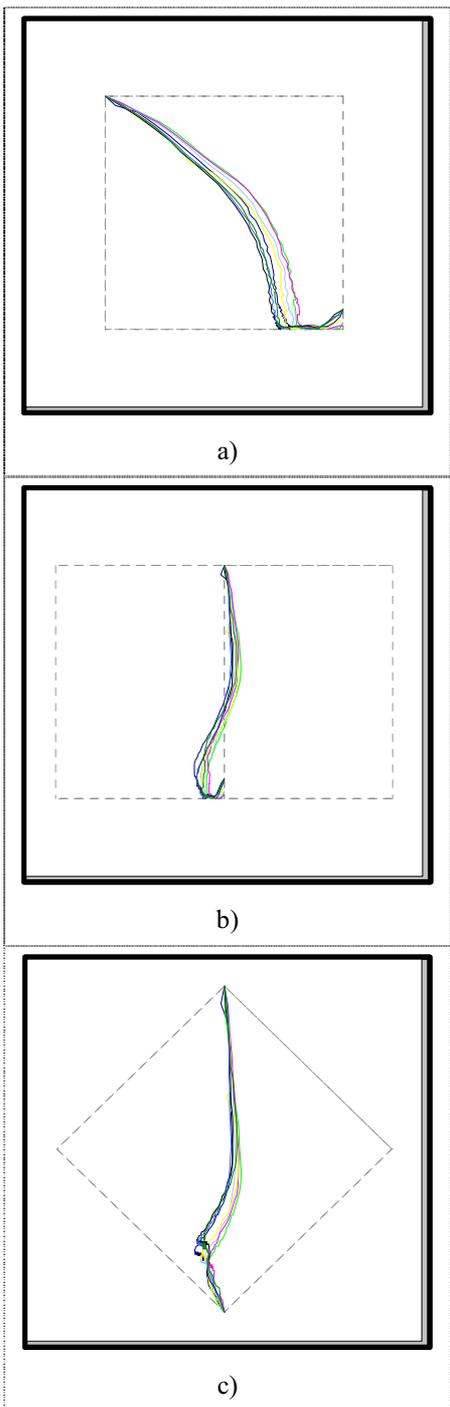


Figura 12 – Trajectórias 3D do centro articular do tornozelo

a) Vista lateral; b) vista anterior; c) vista superior

A aplicação desenvolvida em OpenGL destina-se a permitir a visualização de resultados num ambiente tridimensional. Note-se que a trajectória visualizada é a trajectória do centro articular do tornozelo e não das marcas.

Na figura 13 pode-se ver a referida trajectória, relativa a uma passagem do executante da tarefa, de uma perspectiva lateral.

A figura 14 mostra a mesma trajectória que a figura anterior, vista de cima.

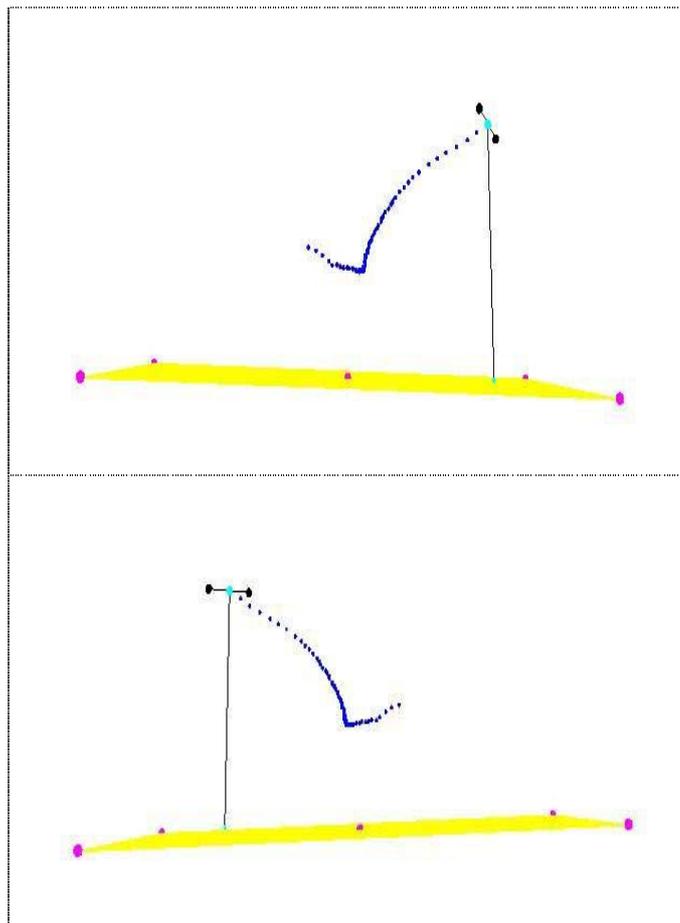


Figura 13 – Trajectórias 3D do centro articular do tornozelo (perspectivas direita e esquerda do plano sagital)

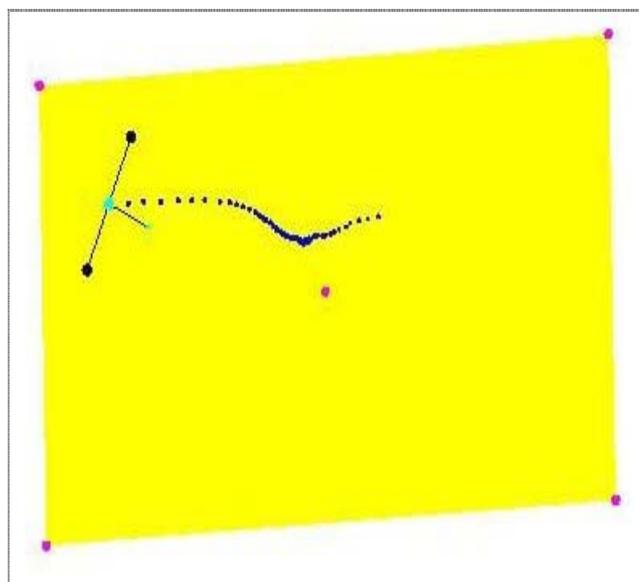


Figura 14 – Trajectória 3D do centro articular do tornozelo (plano horizontal)

Na figura 15 pode-se observar a trajectória do centro articular do tornozelo, relativa à mesma passagem da figura anterior, de duas perspectivas, anterior e posterior do plano frontal.

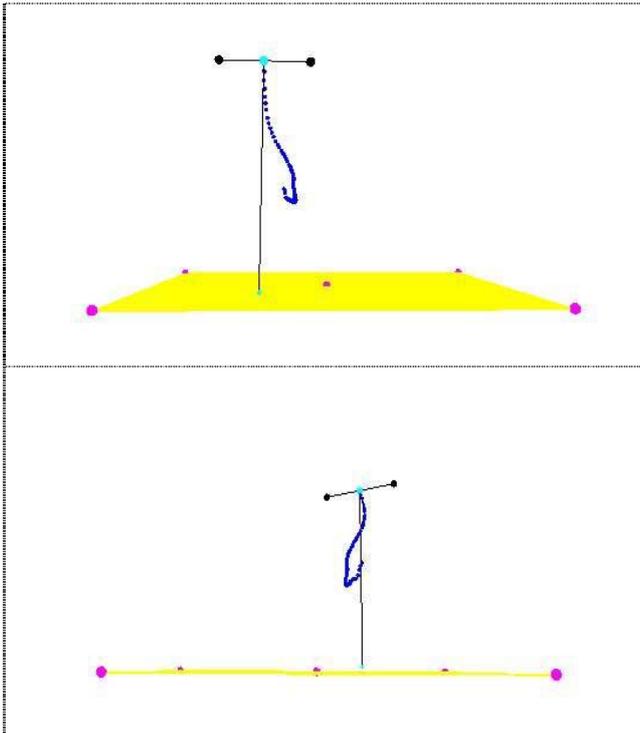


Figura 15 – Trajectórias 3D do centro articular do tornozelo (perspectivas anterior e posterior do plano frontal)

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste trabalho foram desenvolvidas três aplicações, que em conjunto permitem a caracterização biomecânica do movimento 3D de um corpo articulado. Uma primeira aplicação faz o seguimento de objectos em imagens de alta resolução temporal, a segunda estima a posição 3D dos mesmos, e a terceira permite a visualização do movimento dos pontos num ambiente tridimensional.

A metodologia foi aplicada com sucesso no caso da caracterização 3D do movimento articular do tornozelo, constituindo assim uma ferramenta auxiliar para a respectiva caracterização biomecânica. Os resultados obtidos nessa experiência mostram a viabilidade da metodologia proposta.

De referir, a relevância da metodologia desenvolvida, na medida em que permite ter acesso à análise biomecânica, no caso particular, do comportamento do tornozelo, mais especificamente do seu centro articular. Este ponto é de extrema importância na medida em que possibilita a execução dos cálculos posteriores dos momentos articulares naquela articulação, cálculos estes indispensáveis para se ter acesso ao estudo de estabilidade articular.

Os métodos desenvolvidos poderão ser facilmente adaptados para a avaliação funcional de próteses dos membros inferiores/superiores, tendo em vista a realização de uma ferramenta capaz de auxiliar o especialista de reabilitação na avaliação da adequação, e eventual ajuste, desse tipo de próteses.

Como trabalho futuro, julgamos ser necessário o desenvolvimento de metodologias que permitam uma

maior compreensão dos resultados em termos biomecânicos. Também julgamos ser necessária a evolução da metodologia desenvolvida para um maior número de câmaras utilizadas, como forma de, simultaneamente dar ainda maior robustez ao método desenvolvido e permitir alargar o campo de estudo em termos de objectivos biomecânicos.

6. REFERÊNCIAS

- [Abdel-Aziz, 1971] Abdel-Aziz, Y. I. e Karara, H. M. - "Direct Linear Transformation Into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry" - In *Proc. Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Urbana, Illinois, USA, p. 1-18, 1971.
- [Bouguet, 2001] Bouguet, Jean-Ives - Camera Calibration Toolbox for Matlab, Março de 2001. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc
- [Couto, 2003] Couto PA - Visão por Computador no estudo 3D do comportamento de estabilidade articular - Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2003.
- [Faugeras, 1993] Faugeras, O. - Three-dimensional Computer Vision: a geometric viewpoint - MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.
- [Faugeras, 1987a] O.D. Faugeras, F. Lustman, and G. Toscani. - Motion and structure from point and line matches. - In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, London, England, pages 25-34. IEEE Computer Society Press, June 1987.
- [Faugeras, 1987b] O.D. Faugeras and G. Toscani. - Camera calibration for 3D computer vision. - In *Proceedings of International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, Tokyo, Japan, 1987.
- [Fleet, 1992] Fleet, D.J. - Measurement of Image Velocity - Kluwer Academic Publishers, Boston, 1992.
- [Gabriel, 1998] Gabriel, R.; Mourão, A.; Filipe, V.; Filipe, S.; Melo, P.; Bulas-Cruz, J.; Abrantes, J. - "A method for automatic relocation of skinn markers in rearfoot motion analysis" - In: Hartmut J. Riehle & Manfred M. Vieten (Eds), *Proceedings I of ISBS'98*, University of Konstanz, Germany, 264-465, 1998.
- [Gabriel, 1999] Gabriel, R. - Biomecânica da estabilidade articular. Análise do comportamento do tornozelo na mudança de direcção do caminhar - Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 1999.
- [jbiomech, 2002] ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion - Part I: ankle, hip, and spine - In *Journal of Biomechanics*, 35, 543-548, 2002.
- [Krebs, 1995] Krebs, David E. - Interpretation of Standards in Locomotor Studies in Human Gait - in Rebecca L. Craik & Carol A. Oatis, *Gait Analysis*, Mosby, St. Louis, Missouri, USA, 1995.

- [Melen, 1994] Melen, T. - "Geometrical Modelling and Calibration of Video Cameras for Underwater Navigation" - Tese de doutoramento, Norges tekniske hogskole, Institutt for teknisk kybernetikk, 1994.
- [Melo-Pinto, 1995] Melo-Pinto, P.; Bulas-Cruz, J. e Couto C. - A aplicação de visão por computador à análise biomecânica - 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Electrotécnica, IST, Lisboa, 1995.
- [Mendonça, 1993] Mendonça, Ana M. - Métodos de tratamento digital de imagem - aplicação no arquivo, processamento e análise de imagem de oftalmologia - Tese de doutoramento, Universidade do Porto, 1993.
- [Mourão, 1999] Mourão, A. - Análise de imagem na caracterização Biomecânica do movimento dos membros inferiores - Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, 1999.
- [Niblack, 1986] Niblack, W. - An Introduction to Digital Image Processing - Prentice Hall International, UK, 1986.
- [Pribanic, 1999] Pribanic, Tomislav - *Matlab Function mdt1.m*, Outubro de 1999.
<http://isb.ri.ccf.org/software/movanal.htm>
- [Singh, 1991] Singh, A. - Optic Flow Computation: A Unified Perspective - IEEE Computer Society Press, USA, 1991.
- [Tsay, 1986] R. Y. Tsay - An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision - Proceedings, CVPR '86 (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Miami Beach, FL, June 22--26, 1986)", IEEE Publ.86CH2290-5, pp. 364-374, IEEE, 1986.
- [Ying, 2002] Ying, N.; Kim, W. - Use of dual Euler angles to quantify the three-dimensional joint motion and its application to the ankle joint complex - In Journal of Biomechanics 35, 1647-1657, 2002.