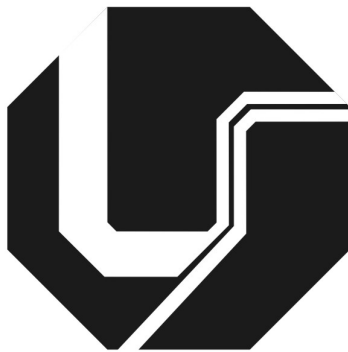


Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Pós-graduação em Engenharia Elétrica



**Desenvolvimento de um sistema de captura e
análise de movimentos baseado em técnicas
de visão computacional**

Alan Petrônio Pinheiro

Abril de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Desenvolvimento de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em técnicas de visão computacional

Alan Petrônio Pinheiro

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 30 de abril de 2008. Área de concentração: Engenharia Biomédica.

Banca examinadora:

Dr. Adriano Alves Pereira (UFU) – Orientador

Dr. Adriano de Oliveira Andrade (UFU)

Dr. Carlos Dias Maciel (USP)

Dr. Eduardo Lázaro Martins Naves (UFU)

Dr. Sílvio Soares dos Santos (UFU)

Dr. Darizon Alves de Andrade
Coordenador Pós-graduação FEELT/UFU

Dr. Adriano Alves Pereira
Orientador

Uberlândia, 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P654d Pinheiro, Alan Petrônio, 1982-
Desenvolvimento de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em técnicas de visão computacional / Alan Petrônio Pinheiro. - 2008.
109 f. : il.

Orientador: Adriano Alves Pereira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Processamento de imagens - Teses. 2. Biomecânica - Teses. 3. Cinesiologia - Teses. I. Pereira, Adriano Alves. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.39

Resumo

PINHEIRO, A. P. *Desenvolvimento de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em técnicas de visão computacional*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.

O propósito deste estudo foi pesquisar as técnicas de medição do movimento humano e desenvolver um sistema capaz de capturar e reconstruir a trajetória do movimento no espaço. O sistema desenvolvido utiliza câmeras de vídeo para registrar o movimento e um programa de computador capaz de processar as imagens extraídas dos vídeos de forma a estimar a trajetória do movimento e calcular as suas variáveis cinemáticas. Estes dados são exibidos pelo programa na forma de gráficos ou animações que reconstroem o movimento capturado. Para alcançar estes objetivos, o sistema utilizou técnicas de processamento de imagens, visão computacional, cálculos numéricos e modelos antropométricos do corpo humano. Ao final desta dissertação é feita uma avaliação experimental da precisão e exatidão do sistema proposto e alguns estudos de casos que tiveram como objetivo demonstrar o potencial deste sistema.

Palavras-chave: captura de movimento; biomecânica; processamento de imagens; visão computacional; descrição da cinemática articular.

Abstract

PINHEIRO, A. P. *Developing of a motion capture system based on computer vision techniques.* Masters Dissertation. Faculty of Electrical Engineering of the University Federal of Uberlândia. Uberlândia – Brazil, 2008.

The purpose of this study was investigate the measurement techniques of human movement and to develop a system capable of capturing and reconstructing the movement trajectory on real world. The devised system uses video cameras to record the movement and a computer program to process video footage assessing the movement trajectory and calculating its kinematical variables. Those data are showed by the program as graphics or animation which simulates the reconstructed movement. To reach these objectives, the system used techniques from image processing, computer vision and anthropometric models. In the end of this work, it is exhibited an experimental evaluation of the precision and accuracy of the system and some case studies to show its potential.

Keywords: motion capture; biomechanics; image processing; computer vision; kinematic joint description.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - MOTIVAÇÃO | 2 |
| 1.2 - OBJETIVOS | 3 |
| 1.3 - CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO | 3 |
| 1.4 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... | 4 |
| | |
| CAPÍTULO 2 - CAPTURA E ANÁLISE DO MOVIMENTO NA BIOMECÂNICA: DEFINIÇÕES, HISTÓRICO E TÉCNICAS..... | 5 |
| 2.1 - BIOMECÂNICA E O ESTUDO DO MOVIMENTO | 5 |
| 2.2 – A IMPORTÂNCIA DA MENSURAÇÃO DO MOVIMENTO NA BIOMECÂNICA..... | 6 |
| 2.3 - PROCESSO DE CAPTURA DO MOVIMENTO..... | 7 |
| 2.4 – HISTÓRICO DA CAPTURA E ANÁLISE DO MOVIMENTO..... | 8 |
| 2.5 - TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO | 13 |
| 2.5.1 - <i>Sistemas acústicos</i> | 14 |
| 2.5.2 - <i>Sistemas eletro-mecânicos</i> | 14 |
| 2.5.3 - <i>Sistemas magnéticos</i> | 15 |
| 2.5.4 - <i>Sistemas óptico-eletrônicos</i> | 15 |
| 2.6 - DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS ÓPTICO-ELETRÔNICOS..... | 17 |
| 2.7 - SISTEMAS COMERCIAIS UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DO MOVIMENTO..... | 20 |
| 2.8 - ETAPAS DE UM SISTEMA DE CAPTURA E ANÁLISE DE MOVIMENTOS..... | 23 |
| 2.9 – CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO..... | 24 |
| | |
| CAPÍTULO 3 - ALIBRAÇÃO DE CÂMERA E RECONSTRUÇÃO DE COORDENADAS..... | 25 |
| 3.1 - INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 3.2 – ESTEREOFOTOGRAMETRIA..... | 26 |
| 3.3 - PRINCÍPIO GEOMÉTRICO: TRIANGULAÇÃO ESTÉREO..... | 27 |
| 3.4 - MODELO MATEMÁTICO DA CÂMERA..... | 29 |
| 3.5 - PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO: OBJETO DE CALIBRAÇÃO E PONTOS DE CONTROLE | 33 |
| 3.6 - CÁLCULO DAS MATRIZES DE CALIBRAÇÃO | 34 |
| 3.7 - RECONSTRUÇÃO DAS COORDENADAS A PARTIR DAS MATRIZES DE CALIBRAÇÃO | 35 |
| 3.8 - CALIBRAÇÃO USANDO O “DIRECT LINEAR TRANSFORMATION”..... | 36 |
| 3.9 - RECONSTRUÇÃO USANDO O “DIRECT LINEAR TRANSFORMATION” | 43 |
| 3.10 - HOMOGRAFIA..... | 45 |
| 3.11 – CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO..... | 48 |
| | |
| CAPÍTULO 4 - PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CAPTURA E ANÁLISE DE MOVIMENTOS | 50 |
| 4.1 – CARACTERÍSTICAS E REQUERIMENTOS DO SISTEMA | 50 |
| 4.2 – FUNCIONALIDADES DO SISTEMA | 51 |
| 4.3 - ETAPAS DE PROCESSAMENTO..... | 52 |
| 4.4 - AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 54 |
| 4.4.1 – <i>Marcadores utilizados</i> | 55 |

| | |
|---|----|
| 4.4.2 – Objeto de calibração | 56 |
| 4.4.3 – Câmeras de vídeo e condições ambiente..... | 56 |
| 4.5 – FRAGMENTAÇÃO E SINCRONIZAÇÃO | 57 |
| 4.6 – CALIBRAÇÃO | 60 |
| 4.7 – INICIALIZAÇÃO | 62 |
| 4.7.1 – Modelo antropométrico | 62 |
| 4.7.2 - Definição dos marcadores e dos algoritmos utilizados no rastreamento..... | 65 |
| 4.7.3 - Representação do movimento..... | 66 |
| 4.8 – RASTREAMENTO | 69 |
| 4.8.1 – Leitura do próximo quadro e Predição | 69 |
| 4.8.2 – Segmentação e filtragem..... | 70 |
| 4.8.3 – Estimação do centro do marcador..... | 72 |
| 4.8.4 – Rotulação | 76 |
| 4.9 – RECONSTRUÇÃO E FILTRAGEM..... | 76 |
| 4.10 – CÁLCULO DAS VARIÁVEIS CINEMÁTICAS E VISUALIZAÇÃO DOS DADOS | 78 |
| 4.11 – FERRAMENTAS ADICIONAIS | 80 |
| 4.12 – CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO | 81 |

CAPÍTULO 5 - VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO E ESTUDO DE CASOS 83

| | |
|--|----|
| 5.1 – VALIDAÇÃO DO SISTEMA: EXPERIMENTOS E RESULTADOS..... | 83 |
| 5.1.1 – Validação da reconstrução 2D..... | 83 |
| 5.1.2 – Validação da reconstrução 3D..... | 86 |
| 5.1.3 – Validação do módulo de fotogrametria..... | 87 |
| 5.2 – ESTUDO DE CASOS | 89 |
| 5.2.1 – Exemplo de reconstrução de movimentos em duas dimensões: captura de movimentos mandibulares..... | 89 |
| 5.2.2 – Exemplo de reconstrução de movimentos em duas dimensões: movimento de pedalada..... | 92 |
| 5.2.3 – Exemplo de reconstrução de movimentos em três dimensões: altura do salto..... | 94 |
| 5.2.4 – Exemplo do uso da fotogrametria na avaliação postural: avaliação da flexibilidade..... | 95 |
| 5.3 – CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO..... | 97 |

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS..... 99

| | |
|-------------------------------|-----|
| 6.1 – CONCLUSÃO | 99 |
| 6.2 - TRABALHOS FUTUROS | 100 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....102

ANEXO A - DIAGRAMA DE CLASSES RESUMIDO DO PROJETO109

Lista de Figuras

- 2.1 - Determinação de algumas variáveis cinemáticas do movimento do joelho e tornozelo esquerdo de um indivíduo na esteira utilizando o sistema de captura de movimento desenvolvido nesta pesquisa. Os sensores, destacados na cena pela cor branca, irão possibilitar o cálculo da trajetória do segmento durante um intervalo de tempo conhecido. Dispondo-se deste tempo e da trajetória do movimento articular é possível a estimação de outras variáveis cinemáticas do movimento através de sucessivas derivações matemáticas. 6
- 2.2 - Diagrama ilustrando a arquitetura típica dos sistemas de captura de movimento. 8
- 2.3 - (a) Figura de um artista ilustrando a marcha de um cavalo (7 a.C.) de forma incorreta. (b) Fotografia ilustrando o formato correto desta fase de marcha do cavalo. Retirado de (Andriacchi & Alexander, 2000)..... 9
- 2.4 - (a) Reprodução dos estudos feitos por Giobanni Borelli (1608-1679) que fizeram deste o pai da biomecânica moderna. (b) Movimento de descida de uma escada registrado por Muybridge (1830-1904). Imagens retiradas de (Thurston, 1999)..... 10
- 2.5 - (a) Indivíduo com pinos inseridos na pélvis, fêmur e tíbia. (b) Arranjo das câmeras que registraram o movimento dos pinos. Retirado de (Inman *et al.*, 1948)..... 11
- 2.6 - Exemplo do método elaborado por Mary Pat Murray na década de 60. Registro visual feito de indivíduos com marcadores fixados a algumas de suas articulações. Os marcadores se destacavam nas imagens devido ao seu alto contraste o que facilitava a definição da posição e orientação das articulações representadas pelos próprios marcadores. Imagens retiradas de (Murray *et al.*, 1964)..... 11
- 2.7 - Sistema baseado em eletrogoniômetros para medir ângulos articulares dos membros inferiores. Modelo proposto pelos irmãos Karpovich na década de 60. Imagens retiradas de (Andriacchi & Alexander, 2000)..... 12
- 2.8 - (a) Animal com marcadores retro-flexíveis fixados aos pontos anatômicos de seu corpo. Estes marcadores serão utilizados para a mensuração do movimento do corpo. (b) “Vanguard motion analyzer” e “Graf-pen” utilizados para determinar as coordenadas X e Y dos marcadores retro-flexíveis projetados na tela do sistema. Figuras retiradas de (Sutherland & Hagy, 1972)..... 13
- 2.9 - Ilustração de um sistema de captura de movimento baseado em tecnologia eletromecânica. Figuras extraídas de (Silva, 2003). 15
- 2.10 - Ilustração de um sistema de captura de movimento baseado em tecnologia magnética. Figura extraídas de (Silva, 2003). 15
- 2.11 - (a) Marcadores retro-flexíveis à luz infravermelha. Eles são fixados ao ator e utilizados na captura do movimento para registrar o movimento do esqueleto humano. (b) Câmeras infravermelhas registrando o movimento de um ator com o corpo coberto parcialmente por marcadores retro-flexíveis. Figuras extraídas de www.vicon.com..... 16

| | |
|---|----|
| 2.12 - (a) Ator com marcadores (IRLEDs) fixados ao corpo e (b) marcadores com coordenadas reconstruídas no espaço e interligados por retas formando a figura de um <i>stickman</i> | 18 |
| 2.13 - (a) Conjunto de marcadores refletindo luz infravermelha. Imagem feita por uma câmera sensível à luz visível e infravermelha. (b) Imagem do mesmo marcador feita por uma câmera sensível somente à luz visível. (c) Fonte de iluminação infravermelha acoplada a uma câmera infravermelha..... | 19 |
| 2.14 - Ilustração de um conjunto de imagens estéreo: três câmeras registrando simultaneamente, sob diferentes ângulos de visão, o movimento de um ator. Retirado de (Cappozzo <i>et al.</i> , 2005)..... | 20 |
| 2.15 – Reconstrução tridimensional da forma geométrica de três diferentes atores feita por um sistema de captura e análise de movimento profissional (Vicon 360). Figuras extraídas de www.vicon.com | 21 |
| 2.16 - Diagrama ilustrando as interconexões entre os equipamentos de um sistema Vicon. | 22 |
| 2.17 - Ilustração simplificada das etapas básicas de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em vídeo. Estas etapas podem variar de sistema para sistema. | 23 |
| | |
| 3.1 - (a) Distorção causada pela projeção perspectiva. Verifica-se que a janela não forma um ângulo de 90° na imagem como era de se esperar. Em (b) é ilustrado uma imagem sem nenhuma distorção. Em (c) temos a mesma imagem, agora corrompida por distorções geométricas simuladas. Imagens (b) e (c) retiradas de (Silva, 2003)..... | 25 |
| 3.2 - Dois dos principais tipos de distorções na imagem causados por imperfeições da lente: distorção radial (dr) e distorção tangencial (dt)..... | 26 |
| 3.3 - Par estéreo de imagens. Repare que um determinado ponto do objeto real é representado nas duas imagens sob diferentes ângulos de visão..... | 27 |
| 3.4 - Geometria epipolar: <i>baseline</i> traçada a partir dos centros de duas câmeras..... | 28 |
| 3.5 - Triangulação entre o ponto A, suas projeções na imagem (A_c e A_d) e a <i>baseline</i> definida pelos centros focais de duas câmeras..... | 29 |
| 3.6 - (a) Projeção de um ponto A, pertencente ao espaço R^3 , no plano da imagem (espaço R^2). (b) Projeção de A no plano ZY e (c) projeção do mesmo ponto no plano ZX. Por meio de semelhança de triângulos é possível equacionar a projeção $R^3 \rightarrow R^2$ | 29 |
| 3.7 – Sistema de coordenadas da imagem (u,v) no computador e sistema de coordenadas da câmera (x_{im} , y_{im})..... | 30 |
| Figura 3.8 – Sistema de referência da câmera (X_{cam} , Y_{cam} , Z_{cam}) e sistema de referência do mundo (X_{mundo} , Y_{mundo} , Z_{mundo})..... | 31 |

| | |
|--|----|
| 3.9 - (a) Pontos de controle formando um objeto de calibração e seus eixos de referência euclidiana. (b) Sistemas de coordenadas do mundo definido pelos pontos de controle presentes no objeto de calibração ilustrado em (a) e o volume de calibração definido pelos eixos de referência. | 33 |
| 3.10 - Ilustração da condição de paralelismo. A distorção radial da lente não altera a direção do vetor que vai do ponto principal P_i ao ponto da imagem o que conduz à relação $P_iA_u//P_iA_d//A_{oz}A$ | 34 |
| 3.11 - Projeção perspectiva do ponto A no plano da imagem (ponto A'). Verifica-se que o ponto que antes era representado por três coordenadas (x,y,z) passa agora a ser representado por apenas duas coordenadas (U,V). Uma coordenada é suprimida neste processo de formação da imagem. | 37 |
| 3.12 - Vetor \vec{F} ilustrando a condição de colinearidade do método DLT. | 37 |
| 3.13 - Introdução do eixo W ao plano da imagem e do ponto principal P..... | 37 |
| 3.14 - Quadro usado para calibrar uma câmera. Neste quadro são exibidos 11 pontos de controle, dos quais seis deles foram selecionados para determinar os coeficientes de calibração da câmera..... | 42 |
| 3.15 - Par estéreo. (a) imagem esquerda e (b) imagem direita. O marcador esférico fixado a extremidade inferior da barra metálica terá suas coordenadas reconstruídas tridimensionalmente a partir deste par estéreo e dos coeficientes de calibração de cada uma das duas câmeras empregadas no registro do marcador. | 44 |
| 3.16 - (a) Objeto de calibração usado na homografia. (b) Pontos de controle definidos pelas interseções entre os quadros (ilustrados por círculos em diferentes cores). | 46 |
| 4.1 - Interface principal do programa BioMec ilustrando algumas das funcionalidades do sistema. | 52 |
| 4.2 - Diagrama ilustrando as principais etapas de processamento de vídeo utilizadas na reconstrução 2D ou 3D do movimento..... | 53 |
| 4.3 - Diagrama ilustrando as principais etapas de processamento de vídeo utilizadas na reconstrução 2D ou 3D do movimento..... | 54 |
| 4.4 - Marcador esférico recoberto por fita retro-flexível à luz infravermelha. A imagem deste marcador foi feita por uma câmera insensível à luz infravermelha. | 55 |
| 4.5 - Marcadores fixados à elásticos que irão envolver os principais membros do corpo.. | 56 |
| 4.6 - Modelos de objeto de calibração: (a) Modelo utilizado na calibração 2D. Este modelo é mais adequado para movimentos de amplitude menor que um metro. Os pontos de controle são definidos pela intersecção dos quadrados. (b) Modelo utilizado na calibração 2D para movimentos de amplitude maior do que 1 metro. (c) Modelo | |

| | |
|--|----|
| utilizado na calibração 3D. Nos dois últimos modelos, os pontos de controle são definidos por esferas brancas dispostas sobre a superfície do objeto de calibração... | 56 |
| 4.7 - Exemplos de arranjo de LEDs infravermelhos. Estes LEDs são os responsáveis pela iluminação dos marcadores na cena. Imagem retirada do sítio www.vicon.com | 57 |
| 4.8 - Interface do BioMec ilustrando a sincronização entre dois vídeos. Neste caso, uma lâmpada incandescente foi utilizada para fornecer informação luminosa utilizada para sincronizar os vídeos. | 59 |
| 4.9 - Interface do BioMec responsável pela fragmentação de vídeos. | 59 |
| 4.10 - Interfaces ilustrando a calibração bidimensional. (a) Detecção automática dos pontos de controle e (b) inserção manual das coordenadas dos pontos de controle. | 60 |
| 4.11 - Descrição das etapas realizadas para encontrar automaticamente os pontos de controle do objeto de calibração. (a) Objeto de calibração utilizado na detecção automática dos pontos de controle. (b) binarização e detecção de bordas do objeto de calibração ilustrado no item (a). (c) Retas ajustadas às bordas detectadas. A intersecção das retas em (c) irá determinar os pontos de controle do objeto de calibração..... | 61 |
| 4.12 - Interface utilizada para calibração 3D utilizando o DLT. | 62 |
| 4.13 - Representação dos pontos anatômicos definidos pelos três modelos antropométricos do BioMec. As figuras ilustram a posição “média” dos marcadores e os rótulos textuais associados a eles. (a) Modelo de 10 segmentos; (b) 14 segmentos e (c) 15 segmentos. Os modelos ilustrados diferem quanto ao número de segmentos utilizados na representação do corpo humano, posição e nome dos rótulos. Adaptado de Ambrósio <i>et al.</i> (2001). | 63 |
| 4.14 - Interface do BioMec onde são apresentadas alguns das variáveis pré-definidas dos modelos antropométricos..... | 64 |
| 4. 15 - Interface do BioMec onde são definidos alguns valores padrões aos modelos antropométricos disponíveis no sistema. | 65 |
| 4.16 - (a) Marcadores definindo um segmento de corpo rígido. (b) Posição dos vetores em relação aos marcadores e ao sistema de coordenadas do mundo definido pelo objeto de calibração. | 66 |
| 4.17 - (a) Ilustração da representação da posição e orientação do movimento de uma coxa (segmento): definição da base canônica tridimensional (i, j, k) formada a partir de três marcadores. Esta base canônica define o chamado “sistema de referência segmental” que irá definir a orientação e posição do segmento enquanto que o vetor C define a posição do segmento. (b) Exemplo de dois sistemas de coordenadas segmentais. Figura (b) extraída de (Chiari <i>et al.</i> , 2005)..... | 68 |
| 4.18 - Seqüência de operações para rastrear os marcadores nas imagens fragmentadas do vídeo. | 69 |

- 4.19 - Binarização de uma imagem: (a) imagem original; (b) imagem original binarizada com limiar 128; (c) imagem original binarizada com valor 150; (d) imagem original binarizada com valor 230; (e) imagem original binarizada com limiar 240 e (f) imagem original binarizada com limiar 250. Repare que em alguns casos a imagem fica muito ruidosa e em outros alguns marcadores desaparecem..... 71
- 4.20 - Filtragem morfológica feita para remoção de ruídos na imagem binarizada de um marcador: (a) imagem original com ruído; (b) imagem original erodida; (c) erosão e dilatação da imagem original, (d) dilatação da imagem do item (c) e (e) resultado final. 71
- 4.21 - (a) Matriz binária (máscara) 3x3 responsável pela: (a) análise de vizinha de oito e de (b) quatro. (c) Imagem utilizada para ilustrar um exemplo de segmentação de marcadores: (d) imagem original binarizada; (e) remoção dos ruídos através de uma seqüência de operações de erosão e dilatação da imagem binarizada; e (f) quatro imagens geradas pelo processo de segmentação (cada imagem representa um marcador)..... 72
- 4.22 - (a) Imagem binarizada de um marcador. (b) Imagem dilatada. (c) Imagem erodida. (d) Resultado da subtração da imagem dilatada pela imagem erodida resultando nas bordas do marcador..... 72
- 4.23 - Detecção do centro de um marcador bucal (11 mm de diâmetro) em três diferentes cenários: (a) imagem de espectro infravermelho com limiar de binarização inadequado; (b) imagem com espectro visível e infravermelho corrompida por iluminação inadequada e (c) imagem do espectro visível com iluminação não uniforme. Em todos os casos os centros foram estimados corretamente..... 76
- 4.24 - Gráficos ilustrando a aplicação de um filtro Butterworth de segunda ordem do tipo passa-baixa: (a) dados não filtrados e corrompidos por ruído; e (b) dados filtrados com frequência de corte de 12 Hz. 78
- 4.25 - Interface ilustrando os gráficos de algumas variáveis cinemáticas do movimento de um ciclista. A interface fornece ao usuário flexibilidade suficiente para determinar a ordem dos gráficos, as variáveis que serão exibidas e as características do gráfico. ... 79
- 4.26 - Stickman exibido pelo BioMec. As principais articulações são representadas por pontos vermelhos interligados por linhas azuis representando os segmentos corporais. A linha tracejada representa o centro de gravidade dos membros inferiores, superiores e do corpo inteiro. Esta linha define o ângulo do corpo em relação a horizontal. 79
- 4.27 - Cálculo do centro de gravidade de uma atleta. Os três pontos em laranja representam, de cima para baixo, o centro de gravidade dos membros superiores, o centro de gravidade do corpo e o centro de gravidade dos membros inferiores. Os pontos em azul representam uma estimativa do centro de gravidade radial de cada segmento. Imagem retirada do banco de imagens do Panamerico 2007..... 81
- 4.28 - Cálculo de alguns ângulos articulares de um atleta. Imagem retirada do banco de imagens do Panamerico 2007. 81

- 5.1 - Dispositivo adaptado utilizado para estimação da precisão e exatidão da reconstrução bidimensional: (a) esquema ilustrando as vistas lateral e frontal do dispositivo e (b) imagem ilustrativa do experimento. 84
- 5.2 - Dispositivo usado para estimação da precisão e exatidão do sistema em escala maior. Ao fundo verifica-se o objeto de calibração de dimensões 1,1x0,9 metros. 85
- 5.3 - Teste da barra rígida usado para estimar a precisão e exatidão de um sistema de captura de movimento 3D. Os dois marcadores fixados às extremidades da barra terão suas coordenadas reconstruídas e a variação do valor da distância entre eles é estudada para estimar os valores de precisão e exatidão do sistema. 87
- 5.4 - (a) objeto de calibração com dezesseis pontos de controle. (b) Imagens utilizadas para validar o módulo de fotogrametria. As figuras geométricas desenhadas no papel e envoltas pelo objeto de calibração têm dimensões conhecidas. 88
- 5.5 - (a) suporte para marcador retro-flexível. Este suporte foi confeccionado para encaixar entre a arcada inferior e o lábio. (b) Objetos de calibração utilizados para filmagens frontal e lateral. (c) objeto de calibração fixado entre os dentes de um indivíduo. (d) marcadores utilizados. O marcador fixado à cabeça terá a função de compensar os movimentos feitos pela cabeça. 90
- 5.6 – Gráficos exibindo alguns movimentos de avaliação funcional da mandíbula de oito indivíduos: (a) movimento de abertura e fechamento feito por um indivíduo saudável (plano sagital). (b) Movimento de abertura e fechamento de um indivíduo com deslocamento de disco da junta temporomandibular (plano sagital). (c) Movimento de abertura e fechamento normal (plano coronal). (d) Movimento de abertura e fechamento de um indivíduo com deslocamento de disco da junta temporomandibular (coronal plane). (e) Movimento de protrusão lateral normal. (f) Movimento de protrusão lateral de indivíduo com mordida profunda. (g) Movimento de laterotrusão normal (h) Movimento de laterotrusão de indivíduo com preferência mastigatória para direita. 91
- 5.7 - (a) Movimento de pedalada executado por um indivíduo. Três marcadores retro-flexíveis definiam o segmento coxa e perna do indivíduo. (b) Objeto de calibração (2D) utilizado para reconstruir o movimento realizado no plano. 92
- 5.8 - Gráficos do movimento de pedalagem: (a) variação do ângulo do joelho; (b) velocidade angular do joelho; (c) velocidade linear do joelho; (d) comparação entre a velocidade linear do joelho e a velocidade angular do joelho; (e) velocidade linear do pé; (f) trajetória do marcador fixado ao pé; (g) trajetória do marcador fixado ao joelho; (h) trajetória do marcador fixado ao quadril. 93
- 5.9 - Quadros inicial e final que definiram o início e o fim de cada salto. (a) quadros do primeiro salto; (b) quadros do segundo salto e (c) quadros do terceiro salto. A definição do quadro de início era feita quando o indivíduo estava na eminência de abandonar o contato dos pés com o solo enquanto que o quadro final era determinado quando o indivíduo alcançava sua máxima altura. Em (a) é destacado o marcador utilizado para medir a altura de cada salto. 94

- 5.10 - (a) Trajetória do terceiro salto no espaço tridimensional. Os dados foram estimados pelo BioMec e exportados para exibição tridimensional no MatLab. (b) velocidade linear instantânea do marcador fixado à cintura do indivíduo..... 94
- 5.11 - (a) Teste de elevação dos membros inferiores. Q°: ângulo quadril; P°: ângulo perna. (b) Teste de dedos ao chão. Q°: ângulo do quadril, J°: ângulo do joelho, TL°: ângulo tóraco-lombar, TT°: ângulo túbio-társico. Figuras retiradas de Carregaro *et al.* (2007). 96
- 5.12 - (a) Teste de dedos ao chão. Indivíduo com flexão normal. (b) Teste de dedos ao chão. Indivíduo com flexão diminuída. (c) Teste de elevação dos membros inferiores. Indivíduo com flexão normal. (d) Teste de elevação dos membros inferiores. Indivíduo com flexão diminuída. Fotos cedidas por Rodrigo Carregaro..... 96

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| 2.1 - Quadro comparativo das características de alguns sistemas de captura e análise de movimentos. Dados técnicos retirados de (Richards, 1999) e (Ehara, 1997). | 23 |
| 3.1 - Coordenadas de seis pontos de controle. Estes pontos podem ser visualizados na Figura 3.14. | 42 |
| 4.1 - Contribuição percentual de cada segmento na massa do corpo. | 63 |
| 4.2 - Localização do centro de gravidade das partes em valores percentuais. A referência é a porção proximal do segmento. | 64 |
| 5.1 - Resultados do teste utilizado para estimar a precisão e exatidão da reconstrução 2D. A área calibrada foi de 400 cm ² | 85 |
| 5.2 - Resultados do segundo teste utilizado para estimar a precisão e exatidão da reconstrução 2D. A área calibrada foi de 1 m ² | 86 |
| 5.3 - Resultados do teste para estimação da precisão e exatidão no espaço tridimensional. | 87 |
| 5.4 - Resultado de algumas medidas utilizadas na análise inter-observador do módulo de fotogrametria. Comparação entre valores calculados pelo programa (“medidas digitais”) e calculadas manualmente através de goniômetros e régua (“medidas manuais”). | 89 |
| 5.5 - Parâmetros mensurados de três saltos verticais..... | 95 |

Lista de Acrônimos

| | |
|-------|--|
| CCD | - Charge-Coupled Device |
| CG | - Centro de Gravidade |
| DLT | - Direct Linear Transformation |
| IRLED | - Infrared Light Diode Emissor |
| LED | - Light Diode Emissor |
| MAFM | - Movimentos de Avaliação Funcional da Mandíbula |
| Pixel | - Picture Element |
| RCD | - Random Circle Detection |
| RMS | - Root Mean Square |
| SCAM | - Sistema de Captura e Análise de Movimentos |
| SVD | - Singular Value Decompositon |
| UML | - Unified Modeling Language |

Capítulo 1

Introdução

A mensuração e análise do movimento humano é um tema amplo, utilizado em diversas áreas do conhecimento (Soutas-Little, 1998), para descrever sistemas capazes de estimar quantitativamente os parâmetros cinemáticos do movimento articular do corpo e sua trajetória no espaço. Estes dados podem ser obtidos através de dispositivos capazes de registrar o deslocamento realizado pelo corpo durante um intervalo de tempo determinado e conhecido. Neste sentido, câmeras de vídeo, sensores eletromagnéticos, dispositivos eletromecânicos e outros, têm sido amplamente utilizados para registrar o movimento e reconstruir graficamente sua trajetória no espaço bidimensional ou tridimensional.

Os sistemas utilizados na mensuração e análise do movimento, também conhecidos como sistemas de captura e análise de movimentos (SCAM), têm cada vez mais despertado interesse nos pesquisadores e cientistas da comunidade acadêmica devido ao seu grande número de aplicações. Sua inerente complexidade faz de sua pesquisa uma desafiadora tarefa sob o ponto de vista acadêmico. Em seu artigo, Moeslund *et al.* (2006) fazem um levantamento bibliográfico dos principais trabalhos e linhas de pesquisas envolvidas na construção de sistemas desta natureza. Segundo este autor, de 2000 a 2005 foram publicados cerca de 350 artigos sobre SCAMs em importantes veículos de divulgação científica internacional. Estes trabalhos abordaram em sua maioria aspectos técnicos e construtivos de sistemas de captura ou análise de movimento. A magnitude de números como este e o crescente interesse de pesquisadores por esta área descrevem parcialmente a importância científica do assunto e ilustra os esforços envolvidos da comunidade científica sobre este tema.

Tradicionalmente, as aplicações de um SCAM são classificadas em três grupos: (1) vigilância; (2) controle e (3) análise. As aplicações que envolvem vigilância (Haritaoglu *et al.*, 2000) referem-se ao monitoramento automático das atividades e comportamento de pessoas ou objetos em ambientes naturais tais como lojas, aeroportos, praças etc. Já as aplicações de controle são usadas na manipulação de um sistema ou planta. São exemplos típicos de aplicações de controle as interfaces para jogos (Noma *et al.*, 2001), modelos de realidade virtual (Mendonça & Campos, 1998) ou interfaces homem-máquina (Kim *et al.*, 2003). Em específico, este tipo de sistema tem sido amplamente utilizado na indústria

cinematográfica onde o controle dos movimentos de personagens animados é baseado em SCAMs. Por fim, tem-se as aplicações de análise que são frequentemente empregadas na biomecânica do movimento. Estas aplicações permitem o estudo, tratamento e diagnóstico de pacientes com problemas ortopédicos, a construção e simulação de modelos músculo-esqueléticos e até mesmo no estudo da otimização de desempenho de atletas.

No contexto da biomecânica do movimento humano, a determinação dos parâmetros cinemáticos do movimento tem contribuído substancialmente para a pesquisa do movimento humano na medida em que possibilita não só a sua análise, como também a elaboração de modelos e teorias. Especificamente, SCAMs têm contribuído para um melhor entendimento do sistema músculo-esquelético humano e das desordens que o acometem (Andriacchi & Alexander, 2000). Em outros casos, os dados cinemáticos estimados por SCAMs auxiliam na identificação de padrões de locomoção (Adams & Cerney, 2007), determinação da potência muscular e sua transferência entre os segmentos (Zajac *et al.*, 2002), busca por estratégias otimizadas de locomoção e um melhor controle motor (Park *et al.*, 2005), estudo da coordenação muscular e de suas desordens neurológicas (Pandy, 2001). Estes sistemas têm também sido utilizados na prática clínica para avaliar e interpretar a função mastigatória (Yoon *et al.*, 2006) e desordens ortopédicas diversas (Soutas-Little, 1998) possibilitando uma avaliação clínica mais objetiva dos pacientes (Sholukha *et al.*, 2006) e um melhor acompanhamento do estado funcional do sistema músculo-esquelético do paciente durante sua reabilitação. Enfim, a aplicação prática de um SCAM, além de diversa, é de fundamental importância ao estudo da biomecânica do movimento humano ou animal.

1.1 - Motivação

Devido à importância que vêm ganhando os SCAMs e os inúmeros benefícios trazidos por eles, estes estão se tornando equipamentos indispensáveis nos laboratórios de biomecânica e cinesiologia. Neste contexto, alguns sistemas altamente especializados como o Vicon (www.vicon.com), Elite (www.bts.it) e Optotrak (www.ndigital.com) estão se tornando padrões, já que seus desempenhos satisfazem às exigências de precisão e exatidão necessários à captura do movimento humano (Papic *et al.*, 2004). Contudo, estes sistemas apresentam dois grandes inconvenientes que podem inviabilizar seu uso: (1) o alto custo que muitas vezes é proibitivo; (2) o fato de necessitarem de condições laboratoriais rígidas devido à sua alta complexidade e baixa portabilidade. Diante destas condições desfavoráveis, outros sistemas (Ariel Systems, Peak Performance) de diferentes características têm ganhado mercado. Estes últimos são baseados no uso de filmadoras e

placas de captura de vídeo e podem ser utilizados em ambientes externos (*e.g.*, ginásios, quadras, campos etc). No entanto, não são capazes de processar a informação em tempo real, exigem muitas intervenções do usuário (pouco automatismo) e embora sejam consideravelmente mais acessíveis, ainda apresentam custo relativamente alto.

O cenário anteriormente descrito induz à elaboração de um projeto de SCAM que tenha como características o custo acessível, flexibilidade de operação, precisão, exatidão e automatismo na captura do movimento. A motivação é aumentada pelo fato de que, no Brasil, poucos núcleos de estudos consolidados investigam ou desenvolvem sistemas desta natureza. Isto insere o Brasil numa condição de desenvolvimento técnico-científico desfavorável na área, em relação aos países que já possuem a tecnologia consolidada. Desta forma, é importante uma pesquisa científica que viabilize o projeto de um sistema de captura de movimento básico agregada a um estudo objetivo que faça a análise da evolução dos métodos empregados na captura do movimento, seu atual estágio de desenvolvimento e as principais técnicas empregadas na sua estimação.

1.2 - Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de captura e análise de movimento baseado em vídeo, capaz de possibilitar ao usuário a análise quantitativa e qualitativa do movimento humano. Alguns outros objetivos secundários podem ser enumerados:

- implementar ferramentas auxiliares que permitam ao usuário fazer análises fotogramétricas a partir de imagens digitais;
- estimar a precisão e exatidão do sistema proposto;
- descrever os principais conceitos e técnicas envolvidas na mensuração do movimento possibilitando ao leitor um melhor entendimento dos sistemas de captura de movimento;
- avaliar o potencial da ferramenta desenvolvida a partir de estudo de casos.

1.3 - Contribuições desta dissertação

Pretende-se com este trabalho, iniciar um processo de desenvolvimento contínuo de um sistema que irá permitir aos profissionais da saúde avaliarem quantitativamente e qualitativamente o movimento humano ou de objetos de um modo geral. O sistema aqui proposto deverá servir como ferramenta para a realização de pesquisas acadêmicas e avaliações clínicas. Terá também o papel de consolidar no Laboratório de Engenharia Biomédica (BioLab), da Universidade Federal de Uberlândia, pesquisas voltadas ao estudo

do processamento de imagens e visão computacional, contribuindo para que este laboratório possa se tornar futuramente uma das referências nacionais no assunto em questão. Enfim, espera-se que com este trabalho seja possível criar uma base de pesquisa e um sistema que possa contribuir para a realização de outras pesquisas voltadas ao estudo da biomecânica do movimento humano.

1.4 – Organização da dissertação

O presente estudo está dividido em seis capítulos. O Capítulo 2 aborda o estado da arte e alguns conceitos básicos referentes à SCAMs. No Capítulo 3 são demonstradas as teorias matemáticas básicas que possibilitam a reconstrução do movimento a partir do registro visual de uma ou mais câmeras. Já o Capítulo 4 apresenta o projeto do SCAM desenvolvido pelo autor. Neste último, são ilustrados as fases de processamento do sistema, os algoritmos empregados e as principais características do sistema implementado. No Capítulo 5 são descritos alguns testes realizados para validar o sistema e alguns estudos de casos que tiveram como objetivo ilustrar as potencialidades e aplicações da ferramenta desenvolvida. Por fim, no Capítulo 6, são colocadas as conclusões deste estudo e algumas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Captura e análise do movimento na biomecânica: definições, histórico e técnicas

Este capítulo introduz o conceito de captura e análise do movimento do ponto de vista da biomecânica, dando enfoque principalmente ao movimento humano. Alguns conceitos técnicos são abordados no decorrer do texto. Uma descrição do estado da arte e das técnicas de captura do movimento são também ilustradas, além dos principais aspectos históricos que levaram os sistemas comerciais ao estágio atual de evolução.

2.1 - Biomecânica e o estudo do movimento

O termo biomecânica é utilizado para definir uma ciência que estuda sistemas biológicos sob uma perspectiva mecânica (Hall, 2005). Nesta ciência emprega-se a mecânica Newtoniana para estudar alguns aspectos anatômicos e funcionais dos organismos vivos. Por sua vez, a mecânica Newtoniana tem como objeto de estudo a descrição do movimento, as variações de energia e as forças que atuam sobre um determinado corpo.

A mecânica Newtoniana apresenta diversas subdivisões. Duas delas são de especial interesse na biomecânica do movimento: a dinâmica e a cinemática. A dinâmica tem como alvo de estudo a relação entre o movimento de um corpo e as forças que atuam sobre este, enquanto a cinemática se destina à descrição do movimento, levando em consideração somente o espaço e o tempo desconsiderando as possíveis forças que estejam atuando sobre o corpo. Quando conjugadas, estas duas subdivisões da mecânica clássica fornecem dados que são de fundamental importância ao estudo da biomecânica do movimento.

A importância do estudo do movimento é múltipla. Não só como estratégia de locomoção e como atividade indispensável à sobrevivência humana, o movimento é também capaz de traduzir muitas das características fisiológicas ou mecânicas de inúmeros sistemas, tais como o, músculo-esquelético, nervoso, proprioceptivo e outros que harmonicamente trabalham para realizar tarefa tão complexa e delicada que é o movimento. Diante da importância do movimento, o cálculo ou a estimação de suas variáveis dinâmicas e cinemáticas, são procedimentos executados rotineiramente em laboratórios de biomecânica (Holden *et al.*, 2003). Para obter estes conjuntos de dados, diferentes

equipamentos são empregados. Dentre eles, o equipamento mais utilizado na determinação das variáveis dinâmicas do movimento é conhecido como “plataforma de força” (Audu *et al.*, 2006). Já as variáveis cinemáticas, têm sido estimadas através de sistemas de captura e análise de movimento.

De um modo geral, os SCAMs são capazes de calcular a trajetória dos segmentos de um corpo. Disposto destes valores de trajetória e do intervalo de tempo gasto para realizá-las é possível o cálculo da velocidade e aceleração destes segmentos, que têm sua posição e orientação no espaço definidos por um conjunto de sensores fixados ao segmento em análise. A Figura 2.1 ilustra o exemplo de três sensores fixados à perna de um indivíduo e alguns exemplos de valores cinemáticos calculados por um SCAM.

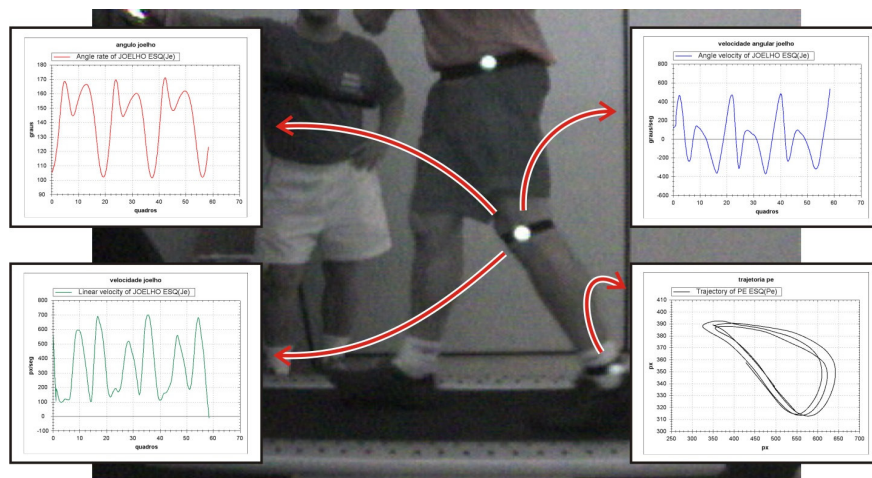


Figura 2.1 - Determinação de algumas variáveis cinemáticas do movimento do joelho e tornozelo esquerdo de um indivíduo na esteira utilizando o sistema de captura de movimento desenvolvido nesta pesquisa. Os sensores, destacados na cena pela cor branca, irão possibilitar o cálculo da trajetória do segmento durante um intervalo de tempo conhecido. Disposto-se deste tempo e da trajetória do movimento articular é possível a estimação de outras variáveis cinemáticas do movimento através de sucessivas derivações matemáticas.

2.2 – A importância da mensuração do movimento na biomecânica

A captura do movimento é um conceito utilizado em biomecânica para descrever sistemas cuja finalidade é registrar o movimento de um corpo através de algum dispositivo (*e.g.*, câmera de vídeo, sensor eletromagnéticos, potenciômetros) e a partir destes dados registrados, calcular as variáveis cinemáticas do movimento. Estes sistemas são algumas vezes conhecidos como sistemas de medição do movimento; reconstrução do movimento ou estimação do movimento.

Os SCAMs possibilitam a avaliação quantitativa do movimento o que tem contribuído substancialmente para o estudo e avaliação do sistema músculo-esquelético humano e animal (Andriacchi & Alexander, 2000). Valores cinemáticos do movimento estão sendo combinados com modelos computacionais (Delp & Loan, 2000) para prever

forças, calcular a potência muscular, torque e outras variáveis mecânicas do movimento. Isto têm ajudado na compreensão dos mecanismos do sistema músculo-esquelético (Leardini et al., 2006) durante a realização de uma determinada tarefa motora. Outros importantes estudos, envolvendo a utilização de SCAMs, tem contribuído para a pesquisa em biomecânica e ilustram a diversidade de aplicações destes sistemas. Podemos citar os estudos de Pandy (2001) que desenvolve esforços na elucidação de algumas desordens relacionadas ao sistema locomotor, alguns outros trabalhos voltados à análises clínicas (Flavel *et al.*, 2002; Fukui *et al.*, 2002), diagnósticos (Cheung *et al.*, 2002; Matsumura *et al.*, 2006), reabilitação (Mündermann *et al.*, 2006) e distinção de doenças (Leardini *et al.*, 2006). Como destacam os autores Figueroa *et al.* (2003), os SCAMs podem ser utilizados inclusive na avaliação de desempenho de atletas. Isto porque esta ferramenta pode permitir a decomposição do movimento em elementos básicos, o que possibilitaria a análise das características de um atleta e a conseqüente comparação com um outro atleta tido como referência.

2.3 - Processo de captura do movimento

O processo de captura consiste, de uma forma geral, na fixação de sensores em pontos anatômicos de interesse no corpo. Geralmente são colocados nas articulações de modo a representar o movimento humano estrategicamente. Vale ressaltar que estes sistemas capturam não só o movimento humano, como também o movimento animal e o de objetos de um modo geral. Desta forma, no decorrer desta dissertação, será denominado de **ator** o indivíduo, animal ou objeto cujo movimento será capturado e analisado.

Os sensores têm grande importância na estimativa do movimento, pois cabe a eles fornecerem direta ou indiretamente a posição e orientação das principais articulações ou partes do ator. Face a esta importância, os sensores tem papel destacado na arquitetura de um SCAM como mostra a Figura 2.2. Ressalta-se porém que as características de arquitetura podem mudar segundo a tecnologia empregada no SCAM e que o modelo ilustrado na Figura 2.2 é uma representação genérica.

Os “sensores” e a “interface com o computador” ilustrados no diagrama da Figura 2.2, são os responsáveis por fornecerem ao computador dados que serão processados por um conjunto de algoritmos que transformarão estes dados de entrada em parâmetros cinemáticos do movimento. Dependendo da tecnologia empregada, os dados do movimento podem ser fornecidos diretamente ao computador ou não. Neste último caso, o que é fornecido ao computador são informações indiretas sobre o movimento. Estas

informações indiretas deverão passar por algumas formulações matemáticas no computador para que se tornem dados concretos do movimento e posteriormente sejam exibidos ao usuário.

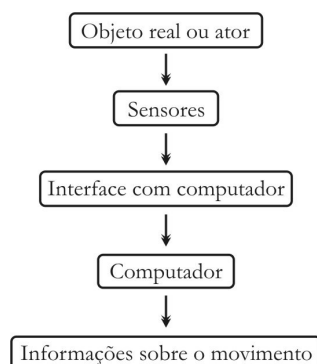


Figura 2.2 - Diagrama ilustrando a arquitetura típica dos sistemas de captura de movimento.

2.4 – Histórico da captura e análise do movimento

O histórico do movimento humano está intimamente associado ao estudo das técnicas de mensuração do movimento utilizadas no decorrer de algumas décadas. Uma análise histórica revela a diversidade dos métodos empregados para tal finalidade e os principais problemas envolvidos no processo, além dos esforços desenvolvidos na área. A visão histórica também permite entender o atual estágio de evolução dos SCAMs e alguns conceitos importantes que são utilizados nos sistemas contemporâneos.

Segundo Thurston (1999), os Egípcios foram os primeiros povos a desenvolverem o interesse na locomoção humana e animal, bem como dos mecanismos biológicos responsáveis pelo movimento. No entanto, couberam aos gregos os primeiros passos no que se refere ao estudo do movimento. Dentre estes últimos, podemos citar os trabalhos de Aristóteles (384-322 a.C.) que analisou o movimento sob uma perspectiva mais geométrica do que médica. Arquimedes (287-212 a.C.) também contribuiu ao demonstrar um conceito similar ao de centro de gravidade. No entanto, os filósofos gregos colocavam algumas restrições quanto ao estudo do movimento. Eles acreditavam que a percepção ou os sentidos enganavam o observador ao analisar o movimento e que nenhum método experimental conduziria à verdadeira forma do movimento, que só poderia ser alcançada pelo pensamento lógico.

Os filósofos gregos despertaram interessantes questões para o estudo moderno da locomoção humana: a percepção visual humana limita a habilidade de observar e analisar o movimento humano/animal? Métodos ou protocolos para estimação do movimento influenciam nas características naturais do movimento? Estas são questões relevantes que

devem ser levadas em consideração no estudo moderno da biomecânica do movimento. Um exemplo de limitação da percepção visual na análise do movimento pode ser vista na Figura 2.3. Neste exemplo, a posição das patas do cavalo foi desenhada incorretamente. O olho do artista não foi capaz de capturar a rápida seqüência de marcha do animal.

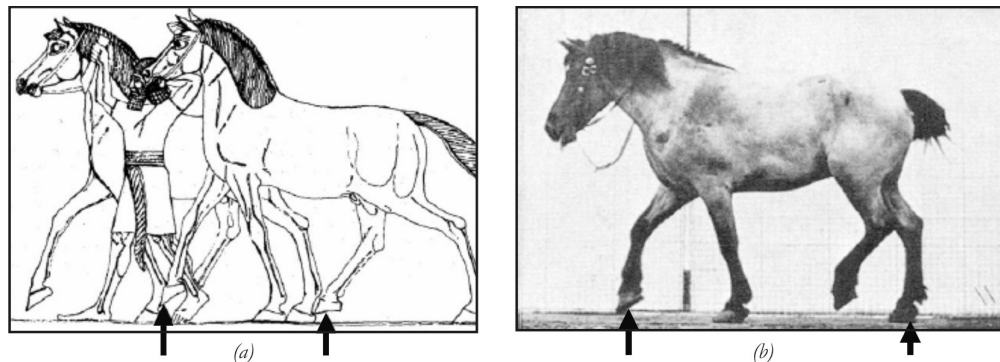


Figura 2.3 - (a) Figura de um artista ilustrando a marcha de um cavalo (7 a.C.) de forma incorreta. (b) Fotografia ilustrando o formato correto desta fase de marcha do cavalo. Retirado de (Andriacchi & Alexander, 2000).

Leonardo da Vinci (1452-1519) foi outro a estudar o movimento. Ele utilizou de seus conhecimentos anatômicos para ilustrar alguns princípios mecânicos da locomoção humana. Estes princípios foram manifestados em seus trabalhos, onde foi relatada uma relação entre o centro de gravidade e balanço do corpo. Além disto, levantou algumas hipóteses sobre a ação muscular na locomoção. Da Vinci e seus antecessores pertenciam a um período que foi conhecido como “período anatômico” no estudo da locomoção.

Com os avanços de Galileu Galilei (1560-1642) e Isaac Newton (1642-1727) na mecânica e matemática, um novo período no estudo da locomoção fora inaugurado. Neste período, conhecido como “período teórico”, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Giovanni Borelli (1608-1679), que mais tarde foi reconhecido como pai da biomecânica moderna. Borelli, que fora pupilo de Galileu, comparava homens e animais à máquinas. Suas pesquisas continham estudos detalhados das ações dos músculos no movimento. Em suas análises do movimento dos membros inferiores, Borelli tentou estabelecer a relação entre força do músculo e ângulo de aplicação, baseando-se em princípios matemáticos e geométricos. Ele ainda determinou o centro de gravidade do corpo humano e formulou teorias envolvendo o seu deslocamento. A Figura 2.4 (a) ilustra parte de seu trabalho.

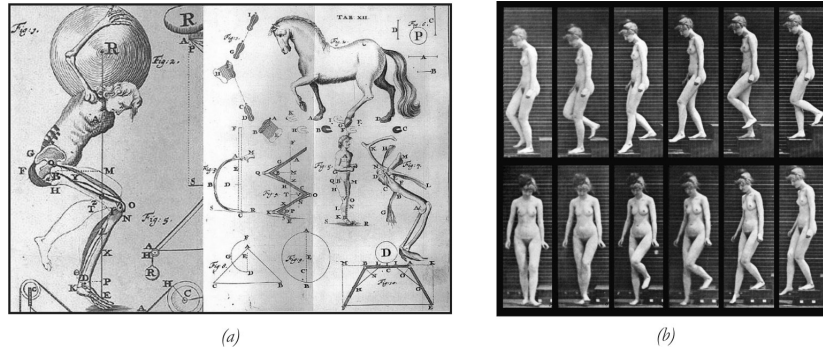


Figura 2.4 - (a) Reprodução dos estudos feitos por Giovanni Borelli (1608-1679) que fizeram deste o pai da biomecânica moderna. (b) Movimento de descida de uma escada registrado por Muybridge (1830-1904). Imagens retiradas de (Thurston, 1999).

O crescente interesse e necessidade do estudo da locomoção biológica, conduziram à introdução de métodos de observação. Neste sentido, Eadweard Muybridge (1830-1904) foi um dos primeiros cientistas a desenvolver uma técnica de registro do movimento e a quantificar alguns padrões de movimento (Mündermann *et al.*, 2006). Sua técnica, conhecida como fotogrametria, utilizava câmeras fotográficas para extrair informações métricas das imagens. Uma série de imagens eram feitas durante a realização do movimento. A Figura 2.4 (b) exibe um exemplo de movimento registrado por fotos. Na Figura 2.4 (c) é ilustrado uma das fases da marcha humana elaborada por Wilhelm Weber (1804-1891) que se baseou nos trabalhos de Muybridge.

Outros dois contemporâneos de Muybridge, Wilhelm Braune (um anatomista) e Otto Fisher (um matemático) reportaram medições de alguns segmentos do corpo para calcular as forças nas articulações e a energia despendida a partir da mecânica Newtoniana (Baker, 2007). Seu trabalho foi motivado por aplicações militares relacionadas ao incremento da eficiência do movimento de tropas.

Durante as décadas de 40 e 50, surgiu a necessidade de se entender melhor alguns princípios da locomoção humana, a fim de utilizá-los no tratamento dos veteranos da segunda guerra mundial. Neste contexto, Inman *et al.* (1948) desenvolveram trabalhos voltados ao estudo da locomoção humana na Universidade da Califórnia. Estes pesquisadores desenvolveram um método de captura do movimento também baseado em imagens (leia-se vídeo). Neste método, indivíduos eram postos a executar movimentos de marcha. Para definir os pontos anatômicos que formariam os ângulos articulares, pinos foram fixados diretamente à pélvis, fêmur e tíbia de indivíduos (Figura 2.5 (a)). Os movimentos destes pinos eram registrados por três câmeras que foram posicionadas em

três diferentes planos (Figura 2.5 (b)). Naturalmente que a inserção dos pinos ocasionava dor e desconforto.

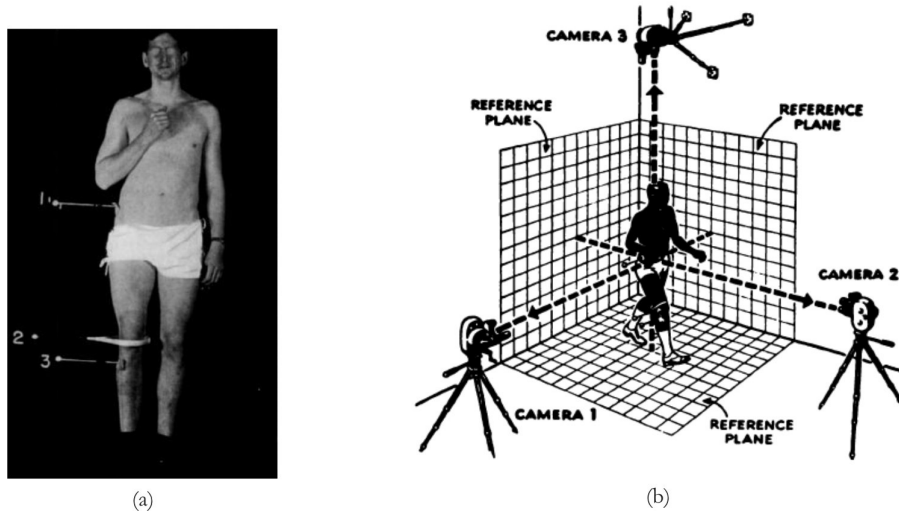


Figura 2.5 - (a) Indivíduo com pinos inseridos na pélvis, fêmur e tíbia. (b) Arranjo das câmeras que registraram o movimento dos pinos. Retirado de (Inman *et al.*, 1948).

Na década de 60, Mary Pat Murray desenvolveu um método baseado no registro visual de uma câmera de vídeo (Murray *et al.*, 1964). Seu método estipulava que fitas refletivas, chamadas de **marcadores**, fossem fixadas em pontos anatômicos específicos do indivíduo, que posteriormente era posto a caminhar sob condições especiais de iluminação fazendo com que os marcadores se destacassem nas imagens geradas. Estas imagens posteriormente eram utilizadas na medição dos segmentos corporais e determinação de ângulos articulares. A Figura 2.6 ilustra dois exemplos de registros fotográficos feitos por Murray. As medições eram feitas manualmente usando as imagens, o que tornava a análise do movimento demorada e difícil. O trabalho de Murray foi considerado de grande impacto e os resultados alcançados são coerentes com os encontrados hoje na literatura técnica.

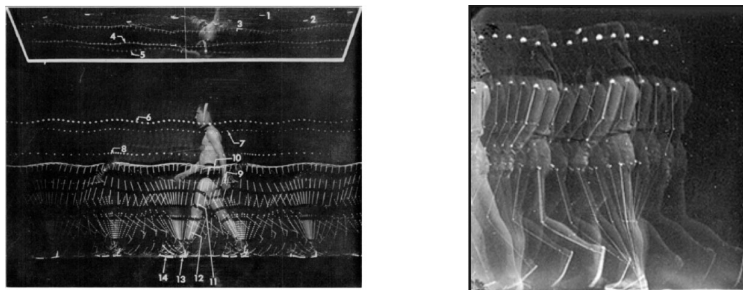


Figura 2.6 - Exemplo do método elaborado por Mary Pat Murray na década de 60. Registro visual feito de indivíduos com marcadores fixados a algumas de suas articulações. Os marcadores se destacavam nas imagens devido ao seu alto contraste o que facilitava a definição da posição e orientação das articulações representadas pelos próprios marcadores. Imagens retiradas de (Murray *et al.*, 1964).

No mesmo período em que Murray realizava seus estudos, os irmãos Karpovich desenvolviam uma nova proposta de sistema que era baseada no uso de eletrogoniômetros capazes de registrar ângulos articulares (Figura 2.7). Até então, os sistemas usavam técnicas fotogramétricas. A proposta dos irmãos fugia a esta tendência, pois era baseada em um aparato eletro-mecânico. A vantagem do sistema elaborado estava na rápida estimação dos valores dos ângulos articulares que podiam ser visualizados em tempo real. Além disto, o método era simples e relativamente barato. A desvantagem residia no indesejável fenômeno de interferência conhecido por *cross talk* e o desconforto causado pelo equipamento que impedia o movimento natural do ator.

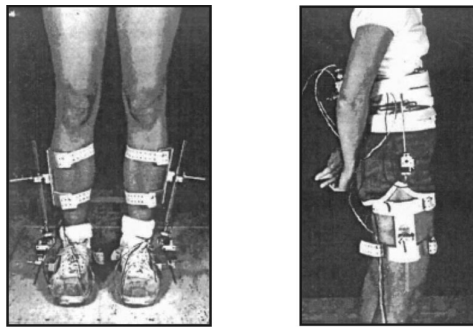


Figura 2. 7 - Sistema baseado em eletrogoniômetros para medir ângulos articulares dos membros inferiores. Modelo proposto pelos irmãos Karpovich na década de 60. Imagens retiradas de (Andriacchi & Alexander, 2000).

Na década de 70, os pesquisadores concentraram seus esforços nas técnicas fotogramétricas para a análise de marcha. Isto porque era uma técnica não invasiva, permitia a análise de corpo inteiro e não influenciava no movimento. Contudo, existiam muitos obstáculos que inviabilizavam ou restringiam o uso da técnica como, por exemplo, o tempo excessivo gasto na análise, processamento e armazenamento dos dados. Com o avanço da informática, estes obstáculos foram se desfazendo. Com isto, o computador começava a ser empregado junto às técnicas fotogramétricas na análise e medição do movimento. Um exemplo clássico da nova geração foi o *Vanguard motion analyzer* (Sutherland & Hagy, 1972). Este sistema estipulava que deveriam ser fixados aos principais pontos anatômicos do corpo, marcadores retro-flexíveis à luz infravermelha ou ultravioleta. Isto permitia que estes pontos ficassem bem destacados na cena devido ao seu alto contraste e assim pudessem ser identificados facilmente na imagem gerada. A Figura 2.8 (a) ilustra alguns marcadores fixados a pontos anatômicos de um animal. Posteriormente, o filme era projetado em uma tela quadro a quadro onde o operador do sistema selecionava manualmente todos os marcadores fixados ao ator (Figura 2.8 (b)). Após selecionados

todos os marcadores em todos os quadros, cálculos trigonométricos eram executados pelo computador, que calculava alguns parâmetros cinemáticos do movimento filmado.

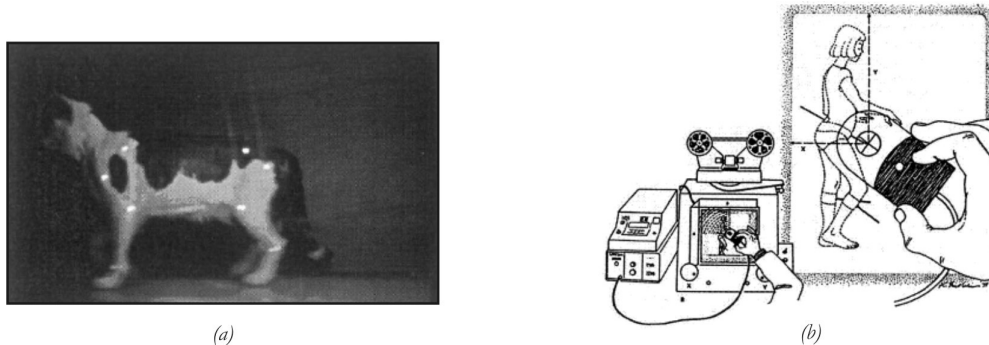


Figura 2.8 - (a) Animal com marcadores retro-flexíveis fixados aos pontos anatômicos de seu corpo. Estes marcadores serão utilizados para a mensuração do movimento do corpo. (b) “Vanguard motion analyzer” e “Graf-pen” utilizados para determinar as coordenadas X e Y dos marcadores retro-flexíveis projetados na tela do sistema. Figuras retiradas de (Sutherland & Hagy, 1972).

Com a utilização de computadores nos sistemas de captura de movimento, houve uma enorme redução no tempo de processamento, armazenamento e representação da informação. Desde então, engenheiros, físicos e matemáticos somaram esforços para automatizar o processo ao máximo e aumentar a precisão/exatidão dos resultados. Outras tecnologias de medição, não baseadas em vídeo ou imagens, também foram desenvolvidas no decorrer dos anos e praticamente todas elas utilizavam computadores para armazenar, processar e visualizar os dados do movimento.

2.5 - Tecnologias de medição

O movimento do esqueleto humano pode ser medido ou estimado por diversos métodos. Eles incluem: estereoradiografia (Valstar *et al.*, 2005); a fixação de pinos aos ossos (Leardini *et al.*, 2005); a fluoroscopia (Katada *et al.*, 1996); ou ainda a fixação de sensores à pele (Manal *et al.*, 2000). Estes três primeiros provêm a medição direta do movimento do esqueleto. No entanto, eles são invasivos ou expõem o sujeito à radiação ionizante. Já o método que emprega a fixação de sensores ou dispositivos à pele, não é invasivo e por isto tem sido o mais empregado na captura do movimento. Ele será o alvo de discussão deste tópico.

Para facilitar o estudo do método de captura do movimento utilizando sensores fixados à pele, este método será classificado em quatro categorias: (1) sistemas acústicos, (2) eletro-mecânicos, (3) eletromagnéticos e (4) sistemas óptico-eletrônicos. Esta classificação teve como critério a tecnologia empregada na aquisição dos dados relativos ao movimento.

2.5.1 - Sistemas acústicos

Os sistemas baseados na tecnologia acústica (Prinz, 1997) geralmente empregam ultra-som ou radiofrequência na aquisição dos dados do movimento. Nestes sistemas emprega-se o par transmissor/receptor onde geralmente os transmissores encontram-se nas principais articulações do ator enquanto que os receptores (geralmente três) são posicionados no local de captura.

Os transmissores são sequencialmente acionados para produzir sinais sonoros característicos que serão captados pelos receptores, que então calcularão a posição de cada transmissor. O cálculo da posição de cada transmissor é feito da seguinte forma: utilizando como dados o tempo decorrido entre a emissão do sinal pelo transmissor e o seu recebimento pelo receptor (levando-se em conta a velocidade do som no ambiente), consegue-se calcular a distância percorrida pelo som, do transmissor até cada um dos três receptores. Logo após isto, é feita a triangulação (Avidan & Shashua, 2000) das distâncias entre cada transmissor e os três receptores presentes no local de captura.

Um dos problemas dos sistemas acústicos é a dificuldade de obter uma descrição correta dos dados num instante desejado devido ao caráter seqüencial do disparo dos transmissores. Além disso, nos sistemas acústicos o número de transmissores utilizados é limitado e esta tecnologia está sujeita a problemas de reflexões do som que podem afetar a qualidade dos dados. Como vantagem, este tipo de sistema não possui problemas de oclusão, típico de sistemas ópticos e interferência por objetos metálicos, percebido em sistemas magnéticos.

2.5.2 - Sistemas eletro-mecânicos

Nos sistemas eletro-mecânicos são empregados potenciômetros (eletrogoniômetros) que, posicionados nas articulações desejadas, fornecem suas posições e orientações em altas taxas de amostragem. O uso destes potenciômetros no corpo forma uma verdadeira “armadura” como a mostrada na Figura 2.9. Já outros sistemas (Flavel *et al.*, 2002) utilizam acelerômetros para determinar a aceleração de determinado ponto.

A vantagem de sistemas desta natureza reside no fato de que eles não exigem muito poder computacional o que facilita o projeto de um sistema em tempo real além de exigirem pouca ou nenhuma calibragem. Eles também apresentam custo acessível. A desvantagem é que são extremamente obtrusivos.

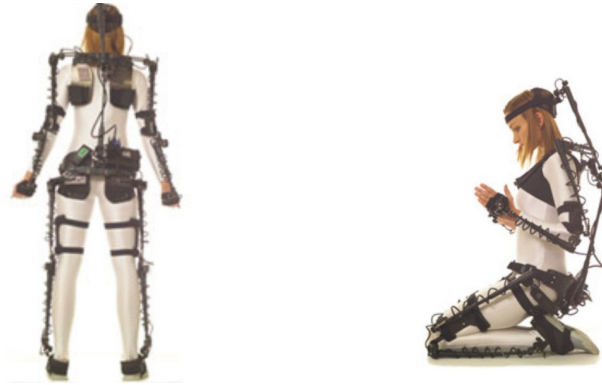


Figura 2.9 - Ilustração de um sistema de captura de movimento baseado em tecnologia eletro-mecânica. Figuras extraídas de (Silva, 2003).

2.5.3 - Sistemas magnéticos

Os sistemas magnéticos (Yoon *et al.*, 2006) caracterizam-se pela velocidade de processamento na estimativa do movimento. Neste tipo de método, emprega-se um conjunto de sensores que são posicionados nas articulações do ator. Tais sensores medem a posição 3D e orientação das articulações em relação a uma antena transmissora, que emite um sinal de pulso.

Os sistemas magnéticos são mais acessíveis em termos de preço. Sua tecnologia é menos sofisticada que a utilizada nos sistemas ópticos. A maior desvantagem deste método é a interferência causada por objetos metálicos próximos ao local de captura. Sua exatidão é também fortemente influenciada pela distância entre a antena e os sensores (Richards, 1999). Mesmo assim, este método apresenta um dos melhores valores de precisão/exatidão. A Figura 2.10 ilustra um modelo de sistema de captura baseado na tecnologia magnética.



Figura 2.10 - Ilustração de um sistema de captura de movimento baseado em tecnologia magnética. Figura extraídas de (Silva, 2003).

2.5.4 - Sistemas óptico-eletrônicos

Neste tipo de sistema são fixadas as principais articulações do ator, marcadores que

se destacam na cena através de seu contraste de cor. A Figura 2.11 (a) ilustra exemplos de marcadores fixados em um ator. Neste sentido, câmeras de vídeo são empregadas como dispositivos óptico-eletrônicos utilizados para registrar o movimento dos marcadores. Estas câmeras são posicionadas estrategicamente no espaço para permitir o rastreamento desses marcadores durante o movimento do ator. A Figura 2.11 (b) ilustra um conjunto de câmeras registrando o movimento de um ator sob diferentes ângulos. As imagens destes marcadores são analisadas por um programa de computador que irá rastrear a posição dos marcadores nas imagens geradas pelas câmeras. Em seguida, um outro programa analisa a variação das posições de cada marcador e - através de um conjunto de formulações matemáticas - reconstrói tridimensionalmente a trajetória de cada marcador no espaço tridimensional.

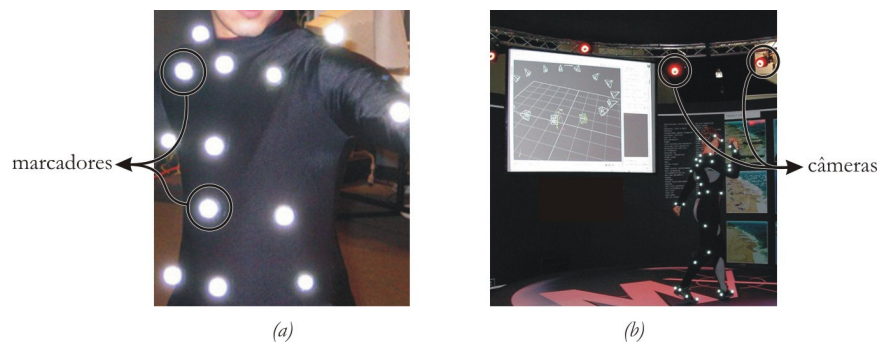


Figura 2.11 - (a) Marcadores retro-flexíveis à luz infravermelha. Eles são fixados ao ator e utilizados na captura do movimento para registrar o movimento do esqueleto humano. (b) Câmeras infravermelhas registrando o movimento de um ator com o corpo coberto parcialmente por marcadores retro-flexíveis. Adaptada de (URL 1).

Os sistemas ópticos têm preço elevado devido à alta tecnologia utilizada no processo. As câmeras, geralmente de alta resolução, e os programas de última geração são os principais responsáveis pelo preço mais elevado que os demais sistemas que empregam outros métodos. Sua vantagem é a liberdade de movimentação oferecida ao ator durante a execução do movimento, já que os marcadores não oferecem resistência aos seus movimentos. Este método também contribui para que não exista um limite para o número de marcadores posicionados no ator, o que permite alcançar um maior nível de detalhe na representação dos movimentos. No geral, este método também apresenta valores de precisão/exatidão análogos ao dos sistemas que utilizam o método magnético (Hassan *et al.*, 2007). Já sua desvantagem reside na oclusão de marcadores durante o processo de captura. Além disto, este tipo de sistema necessita de um programa para calcular as coordenadas tridimensionais dos marcadores o que pode dificultar a reconstrução do movimento em tempo real.

Embora o emprego de determinada tecnologia dependa da natureza da aplicação, os sistemas óptico-eletrônicos têm sido os mais utilizados na atualidade.

2.6 - Descrição e caracterização dos sistemas óptico-eletrônicos

A reconstrução do movimento na maioria dos sistemas mais sofisticados é feita por dispositivos óptico-eletrônicos (*e. g.*, câmeras de vídeo) que utilizam imagens para registrar o movimento e calcular seus parâmetros cinemáticos. Durante o processo de aquisição de uma imagem pelo dispositivo óptico-eletrônico, informações métricas da cena são suprimidas ou perdidas. Isto acontece porque uma imagem é uma representação bidimensional de um objeto ou cena que está em um espaço tridimensional. Existem ainda imperfeições na lente que geram distorções nas imagens, fazendo com que os objetos presentes na cena não possam ser medidos precisamente e diretamente na imagem. Desta maneira, são necessárias algumas formulações matemáticas para compensar as distorções e, quando for o caso, reconstruir a terceira coordenada suprimida durante o processo de aquisição da imagem.

As imagens realizadas do movimento deverão ser analisadas por um programa de computador que irá compensar as distorções sofridas e calculará as coordenadas dos marcadores fixados no ator. É por meio destes marcadores que o movimento será reconstruído e analisado. Assim, o que é reconstruído são os movimentos feitos pelos marcadores que correspondem ao movimento do corpo no ponto onde estão fixados. A Figura 2.12 (a) ilustra a pose de um ator em um determinado instante de tempo. A ele, estão fixados marcadores nas suas principais articulações. Neste caso, os marcadores são representados por diodos emissores de luz infravermelha (*infrared light emitter diode* - IRLED). Já a Figura 2.12 (b) mostra a reconstrução das coordenadas dos marcadores no espaço. Repare que os marcadores, quando interligados por linhas retas, formam um “boneco” articulado, conhecido na literatura técnica como *stickman* (Guo *et al.*, 1994). O *stickman* pode também ser considerado como uma representação visual de parte de um modelo antropométrico do corpo humano.

É interessante que os marcadores se destaquem na cena através de um alto contraste de modo a permitir que um programa de computador possa localizá-los (rastrear) mais facilmente na cena. Para que este contraste exista, os marcadores deverão emitir luz (marcadores ativos) ou apenas refletir com eficiência a luz incidida sobre sua superfície (marcadores passivos). Deste modo, marcadores ativos possuem fonte própria de iluminação ao contrário dos passivos que apenas refletem a luz que incide sobre sua superfície.

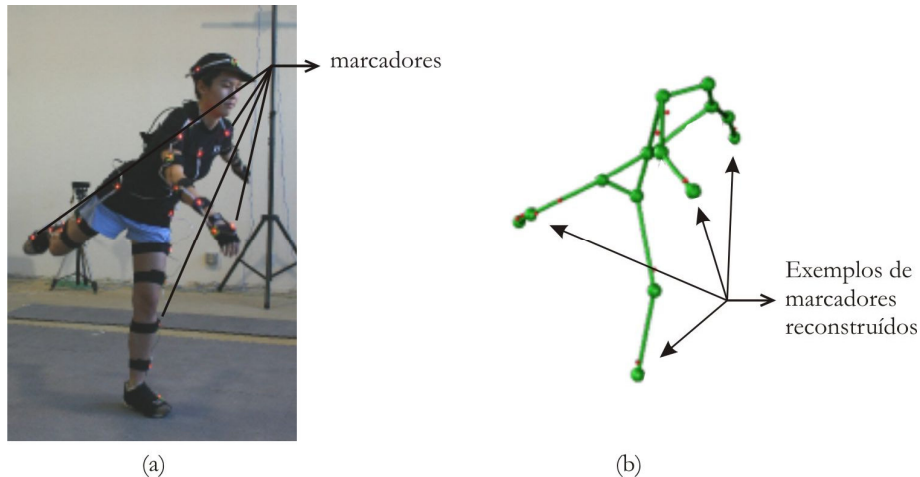


Figura 2.12 - (a) Ator com marcadores (IRLEDs) fixados ao corpo e (b) marcadores com coordenadas reconstruídas no espaço e interligados por retas formando a figura de um *stickman*.

Sistemas baseados em marcadores ativos utilizam IRLED ligados ao corpo. Cada IRLED é conectado, por fios, a uma unidade de controle transportada pelo ator e ativada estroboscopicamente por um cabo ou por multiplexação telemétrica (Figuroa *et al.*, 2003). A detecção dos marcadores ativos é direta. O rastreamento é simples porque cada IRLED é ativo por vez em um determinado intervalo de tempo. No entanto, a aplicabilidade destes sistemas é reduzida devido a restrições mecânicas impostas pelos fios. Sistemas ativos também necessitam de ambiente controlado e apresentam limitações quanto ao número de marcadores devido ao *timer* estroboscópico. A alta frequência dos pulsos, que são responsáveis pelo efeito estroboscópico do sistema, podem também introduzir interferências elétricas em outros equipamentos próximos à unidade de controle como, por exemplo, um eletromiógrafo.

Algumas das limitações presentes nos marcadores ativos podem ser evitadas através do uso de marcadores passivos. Estes operam através do registro da luz incidida e refletida por sua superfície dispensando a utilização de fios. Sistemas passivos geralmente trabalham com a combinação de luz visível e infravermelha. Isto porque os marcadores são cobertos por uma fita retro-flexiva, que reflete a luz infravermelha com alta eficiência e baixa dispersão, dando ao marcador um forte contraste de cor em relação ao plano de fundo. A Figura 2.13 (a) ilustra um conjunto de marcadores passivos. A imagem foi capturada por uma câmera sensível à luz visível e infravermelha. Na Figura 2.13 (b) tem-se a mesma imagem do conjunto de marcadores feita por uma câmera sensível somente à luz visível. Neste último caso verifica-se a diminuição do contraste já que a câmera não foi capaz de captar a luz infravermelha refletida pelo marcador. Na Figura 2.13 (c) é exibido uma fonte

de iluminação infravermelha que ilumina a superfície dos marcadores, possibilitando a reflexão e o contraste dos mesmos. Nos sistemas profissionais, a câmera é acoplada à fonte de iluminação infravermelha formando um só conjunto.

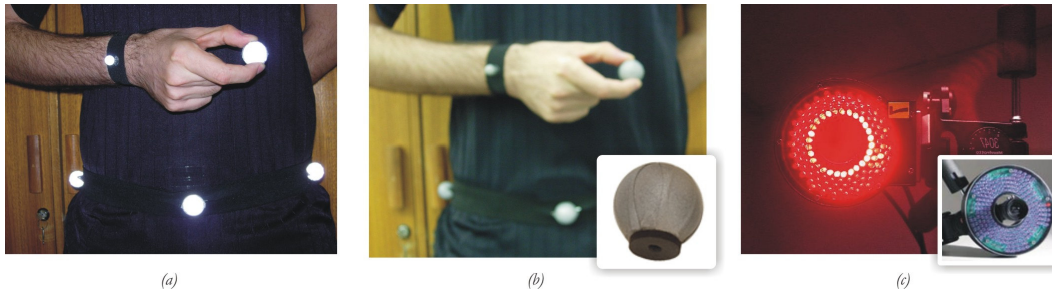


Figura 2.13 - (a) Conjunto de marcadores refletindo luz infravermelha. Imagem feita por uma câmera sensível à luz visível e infravermelha. (b) Imagem do mesmo marcador feita por uma câmera sensível somente à luz visível. (c) Fonte de iluminação infravermelha acoplada a uma câmera infravermelha.

Embora exista nos sistemas passivos um alto contraste entre os marcadores e o plano de fundo, a presença de muitos marcadores simultaneamente na imagem requer o uso de algoritmos de rotulação para atribuir uma identificação única a cada marcador (Josefsson *et al.*, 1996). Nos sistemas ativos, isto não é necessário porque somente um IRLED é aceso por vez durante um curto intervalo de tempo (*timer* estroboscópico) que é proporcional à frequência de aquisição de imagens da câmera utilizada.

Um SCAM baseado em vídeo pode medir o movimento em duas (2D) ou três dimensões (3D). Isto depende do número de câmeras e algoritmos empregados no processo de calibração e reconstrução do movimento. Sistemas 2D geralmente utilizam uma única câmera ao contrário dos 3D que devem utilizar pelo menos duas câmeras (Josefsson *et al.*, 1996). Os sistemas 2D são capazes de estimar apenas os movimentos feitos em um único plano de movimento ao contrário dos 3D onde o movimento pode ter até seis graus de liberdade.

Nos sistemas tridimensionais, cada marcador deve ser visualizado por pelo menos duas câmeras em um mesmo intervalo de tempo, para que suas coordenadas possam ser reconstruídas em três dimensões. Deve-se ter pelo menos duas imagens, feitas sobre diferentes ângulos de visão, do mesmo marcador. Esta condição remete a uma técnica conhecida como “estereoscopia” ou “conjunto estéreo” (Chiari *et al.*, 2005). A Figura 2.14 ilustra três câmeras (leia-se seis vistas) registrando o movimento feito por um ator em um mesmo intervalo de tempo sob diferentes ângulos de visão. O programa de computador que irá reconstruir tridimensionalmente o movimento deverá ser capaz de encontrar em cada vista os marcadores e, posteriormente, aplicar um conjunto de algoritmos para

reconstruir a terceira coordenada perdida no processo de aquisição das imagens recuperando assim a tridimensionalidade do movimento.

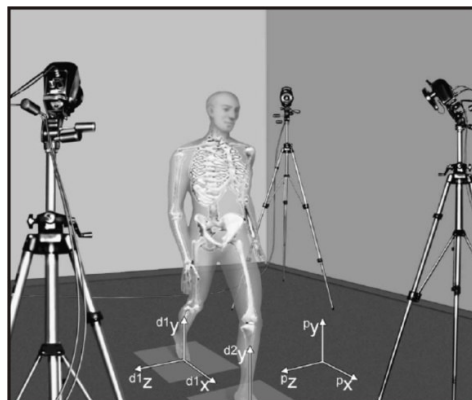


Figura 2.14 - Ilustração de um conjunto de imagens estéreo: três câmeras registrando simultaneamente, sob diferentes ângulos de visão, o movimento de um ator. Retirado de (Cappozzo *et al.*, 2005).

2.7 - Sistemas comerciais utilizados na medição do movimento

O campo de captura e análise do movimento humano usando técnicas de visão computacional tem crescido substancialmente. Com isto, uma grande variedade de sistemas baseados em vídeo tem sido propostos para rastrear o movimento humano e de outros corpos. Estes sistemas variam quanto ao número e configurações de câmeras utilizadas, representação da informação reconstruída, tipos de algoritmos ou uso de modelos antropométricos (Mündermann *et al.*, 2006).

Segundo Sutherland (2002), existiam em 2002 cerca de onze SCAMs comerciais de grande “visibilidade” dos quais a maioria utilizavam dispositivos óptico-eletrônicos e marcadores passivos para reconstruir o movimento. Dentre os principais sistemas, pode-se destacar a inglesa Vicon (www.vicon.com); a italiana BTS (www.bts.it) e as norte-americanas Qualisys (www.qualisys.com) e Motion Analysis Corporation (www.motionanalysis.com). Estas últimas, utilizam câmeras infravermelhas em seus sistemas que operam em frequências superiores a 140 quadros por segundo, podendo chegar até a 500. São sistemas que possibilitam a operação em tempo real, com até 256 marcadores e 32 câmeras operando simultaneamente. Todas utilizam *hardware* dedicado para tal tarefa e câmeras proprietárias. Em seu trabalho, Richards (1999) estimou o erro médio destes sistemas para um mesmo experimento. Os valores encontrados variaram de 0,1% a 1%. A Figura 2.15 mostra a reconstrução do movimento de três atores feito por um sistema profissional.

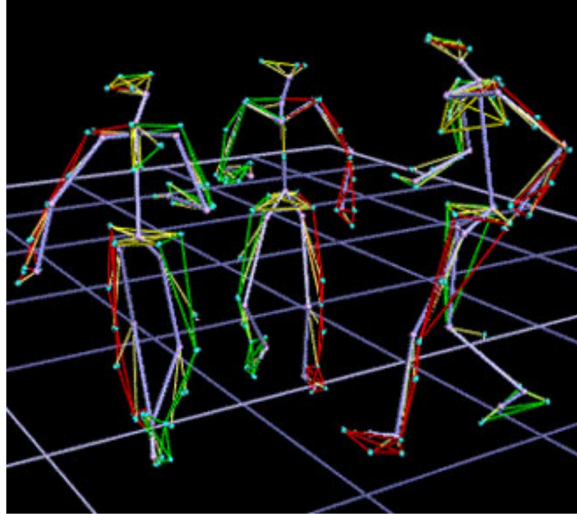


Figura 2.15 – Reconstrução tridimensional da forma geométrica de três diferentes atores feita por um sistema de captura e análise de movimento profissional (Vicon 360). Extraída de (URL 1).

No entanto, como ressalta Figueroa *et al.* (2003), muitos dos sistemas comerciais apresentam alguns inconvenientes ou limitações que podem inviabilizar o seu uso. Geralmente são sistemas que exigem *hardware* dedicado (o que eleva seu custo e restringe sua portabilidade), necessitam de ambiente altamente controlado (para garantir o rastreamento automático dos marcadores) e em alguns casos são capazes de processar apenas partes específicas do corpo como, por exemplo, os membros inferiores. Outro aspecto importante a ser levado em consideração é que estes sistemas, pelo fato de utilizarem câmeras infravermelhas e *hardware* dedicado, registram somente as coordenadas dos marcadores fazendo com que seja perdida a informação potencial da imagem que poderia ser utilizada na análise qualitativa do movimento. Como fator agravante, estes sistemas trabalham com câmeras altamente especializadas o que dificulta a sua utilização em ambientes naturais onde, por exemplo, o atleta realiza suas atividades. A Figura 2.16 mostra os equipamentos empregados na análise biomecânica do movimento de um sistema Vicon (Viel, 2001). Neste último, são usadas cinco câmeras infravermelhas para registrar o movimento dos marcadores e outras duas convencionais para registrar o movimento do ator e possibilitar a avaliação qualitativa do movimento.

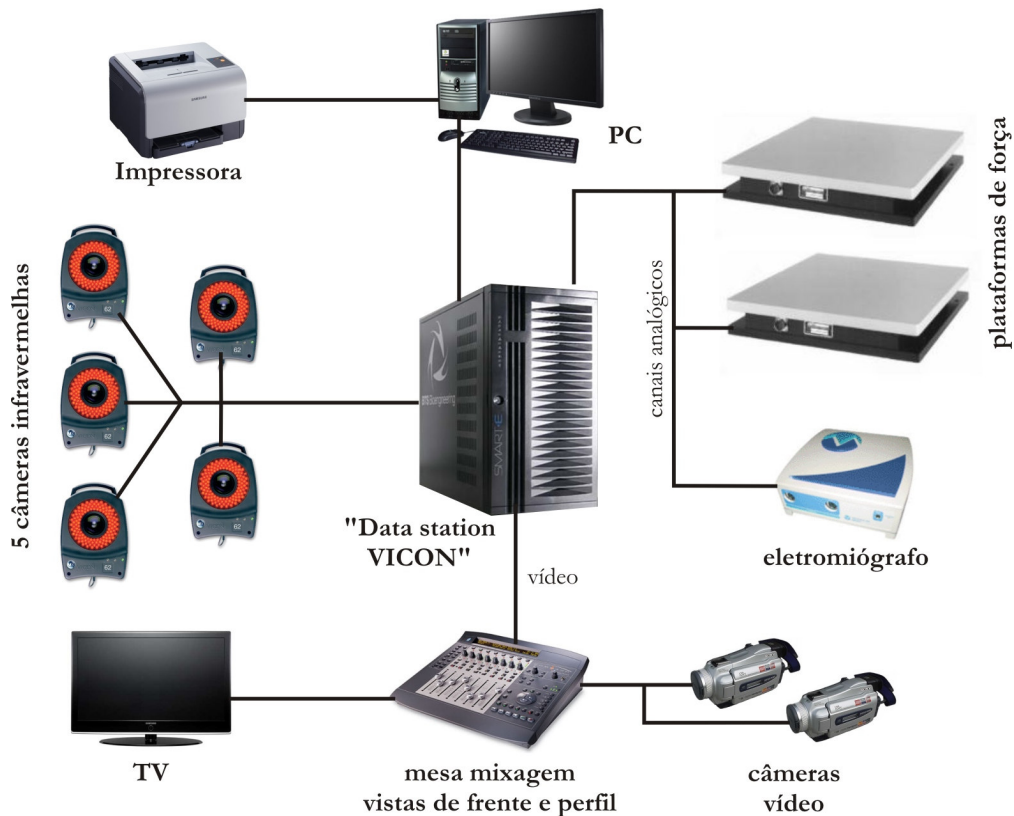


Figura 2.16 - Diagrama ilustrando as interconexões entre os equipamentos de um sistema Vicon.

Para compensar alguns dos problemas citados no parágrafo anterior, uma outra vertente de SCAMs tem merecido atenção. Podemos citar como exemplos os sistemas Ariel Analysis (www.arielnet.com) e Peak (www.peakperform.com). Estes dois últimos utilizam câmeras convencionais de alto desempenho e marcadores passivos. Não processam a informação em tempo real e possuem erro alto se comparados aos sistemas dedicados. No entanto, esta segunda vertente tem a vantagem de permitir o uso de câmeras em ambientes abertos com pouco controle de iluminação. Com isto o rastreamento automático é na maioria das vezes prejudicado e conseqüentemente a qualidade da medição também. Mesmo assim, estes sistemas ganharam ampla expressão por serem de custo mais reduzido e por não apresentarem tantas restrições referentes às condições de filmagem e portabilidade do sistema. A Tabela 2.1 faz um comparativo entre os principais sistemas comerciais existentes e o SCAM desenvolvido neste trabalho, que recebeu o nome de BioMec.

Tabela 2.1 - Quadro comparativo das características de alguns sistemas de captura e análise de movimentos. Dados técnicos retirados de (Richards, 1999) e (Ehara, 1997).

| | Vicon | Elite | Optotrak | Ariel | BioMec |
|--------------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| Tipo sensor | passivo | passivo | ativo | passivo | passivo |
| Tipo ambiente | interno | interno | interno | int. e ext. | int. e ext. |
| Portabilidade (hardware) | baixa | baixa | baixa | média | média/alta |
| Custo (versão básica) | US \$ 30.000,00 | € \$ 25.000,00 | US \$ 22.000,00 | US \$ 10.000,00 | - |
| Exatidão | 0,1% | 0,1% | 0,3% | 1,1% | 1,5% |
| Grau automatismo | alto | alto | alto | baixo | baixo |
| tempo processamento | tempo real | tempo real | tempo real | alto (<i>off-line</i>) | alto (<i>off-line</i>) |

2.8 - Etapas de um sistema de captura e análise de movimentos

O processo de captura e análise de movimentos usando imagens, segue uma série de etapas seqüenciais. Ainda que estas etapas possam variar bruscamente de sistema para sistema, geralmente elas apresentam o formato exibido no diagrama da Figura 2.17.

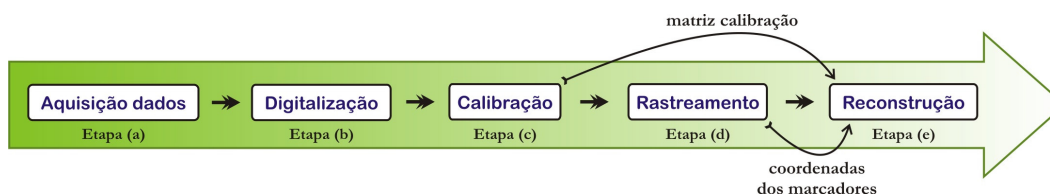


Figura 2.17 - Ilustração simplificada das etapas básicas de um sistema de captura e análise de movimentos baseado em vídeo. Estas etapas podem variar de sistema para sistema.

A “aquisição dos dados” em sistemas óptico-eletrônicos corresponde à filmagem do movimento. Como os dados serão processados por computadores digitais, o(s) vídeo(s) deve(m) estar no formato digital. Para isto, foi definida a etapa de “digitalização” do vídeo na Figura 2.17. Esta digitalização é na maioria das vezes feita por meio de uma placa de captura de vídeo. Vale ressaltar que esta etapa só é necessária quando a(s) câmera(s) empregada(s) não têm uma saída de vídeo já digital.

Após a aquisição e digitalização dos dados do movimento é necessário interpretar as imagens do movimento. Antes disto, é importante que o sistema conheça algumas características das câmeras. Isto acontece na etapa de “calibração de câmeras” ilustrada na Figura 2.17 e tida como um dos processos básicos mais importantes de um SCAM. É justamente a calibração que irá determinar uma relação matemática entre as coordenadas da imagem e as coordenadas do espaço tridimensional permitindo que o movimento possa ser

posteriormente reconstruído por meio da “matriz de calibração” calculada durante a calibração.

Depois de realizada a calibração, o sistema deverá buscar nas imagens a posição dos marcadores. Este processo de busca é denominado de “rastreamento” e é representado na Figura 2.17 como etapa (d). Após o rastreamento, o sistema possui a localização de todos os marcadores filmados e os dados de calibração (matriz de calibração). Estas informações servirão como dados de entrada para um conjunto de algoritmos que irão reconstruir as coordenadas espaciais dos marcadores (Figura 2.17 etapa (e)).

2.9 – Considerações do capítulo

Por ser um conceito de ampla utilização em diversas áreas do conhecimento, os SCAMs assumem diversas definições e nomenclaturas diferentes. Embora não exista um consenso na área, o termo “sistema de captura e análise de movimento” tem aparecido com frequência. Contudo, o termo “reconstrução do movimento” é muito utilizado para designar a tarefa básica de um SCAM que é a estimação da trajetória do movimento em escala compatível com aquela feita originalmente no espaço do mundo real.

Basicamente, o termo “captura de movimento” refere-se ao processo de registrar o movimento, compensar as distorções e estimar as coordenadas do movimento. Quando a tecnologia usada na mensuração do movimento é a óptico-eletrônica, algoritmos de visão computacional são empregados na reconstrução das coordenadas do movimento. Já o termo “análise de movimento” refere-se às variáveis cinemáticas do movimento estimado. Esta análise é feita pelo usuário do sistema que a faz por meio de gráficos e animações computadorizadas elaboradas pelo sistema através de algoritmos da computação gráfica.

Apesar de não existir uma tecnologia de medição consolidada, a óptico-eletrônica tem sido a mais utilizada e difundida devido às suas características. Esta tecnologia geralmente utiliza marcadores passivos ou ativos para representar o movimento do corpo ao qual estão fixados. Sendo assim, é função básica de um sistema com estas características buscar pelos marcadores nas imagens, identificá-los e reconstruir suas coordenadas. Naturalmente que estas etapas se subdividem em várias outras que serão abordadas nos capítulos subseqüentes. Antes disto, é importante entender os princípios geométricos e matemáticos que possibilitam a reconstrução das coordenadas dos marcadores e a conseqüente estimação do movimento articular. Estes princípios são abordados no próximo capítulo.

Capítulo 3

Calibração de câmera e reconstrução de coordenadas

Neste capítulo, são definidos os conceitos envolvidos na calibração de uma câmera, a importância e necessidade deste procedimento, além das teorias matemáticas envolvidas tanto na calibração quanto na reconstrução de coordenadas. Durante o capítulo, uma série de transformações geométricas e espaciais são feitas para formular as equações da calibração e reconstrução 2D e 3D. Foi ainda descrito o modelo genérico de uma câmera a fim de que pudesse ficar mais bem entendido o princípio matemático de formação de uma imagem em uma câmera.

3.1 - Introdução

Uma imagem é um registro visual de uma cena. Sua representação é feita no plano bidimensional (2D) embora a cena, na maioria das vezes, tenha características tridimensionais (3D). Isto significa dizer que durante o processo de aquisição da imagem ou vídeo, informações métricas da cena são perdidas ou suprimidas. Isto acontece porque há uma mudança de espaço ($\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$) de dimensões distintas. Esta mudança acontece na maioria das vezes através da “projeção perspectiva” (Azevedo & Conci, 2003) realizada por câmeras e filmadoras. Outras imperfeições presentes no processo de captura da imagem também contribuem para a perda ou distorção das características geométricas da cena na imagem como, por exemplo, as distorções geométricas da lente (Silva, 2003) que alteram o formato da imagem. A Figura 3.1 ilustra exemplos de imagens que sofreram distorções causadas pela projeção perspectiva ou imperfeições de lente.

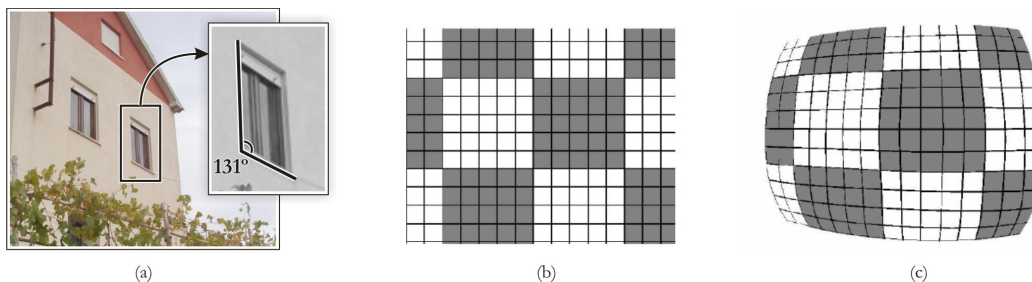


Figura 3.1 - (a) Distorção causada pela projeção perspectiva. Verifica-se que a janela não forma um ângulo de 90° na imagem como era de se esperar. Em (b) é ilustrado uma imagem sem nenhuma distorção. Em (c) temos a mesma imagem, agora corrompida por distorções geométricas simuladas. Imagens (b) e (c) retiradas de (Silva, 2003)

A distorção geométrica, percebida pela lente, é resultado de uma imperfeição no projeto ou fabricação da lente que forma o sistema óptico da câmera. Com os efeitos de distorção causados por estas imprecisões da lente, um determinado ponto na imagem (u,v) apresentará novas coordenadas (u_0, v_0) que são dadas por:

$$\begin{aligned} u_0 &= u + \delta_u(u, v) \\ v_0 &= v + \delta_v(u, v) \end{aligned}$$

onde δ_u e δ_v representam o erro introduzido pela distorção geométrica ao longo de cada eixo da imagem. Para corrigir estes erros é necessário analisar os efeitos das distorções no plano da imagem, de modo a possibilitar a elaboração de técnicas (algoritmos) que sejam capazes de compensá-los. A Figura 3.2 ilustra os dois principais tipos de distorções sofridas pelas imagens.

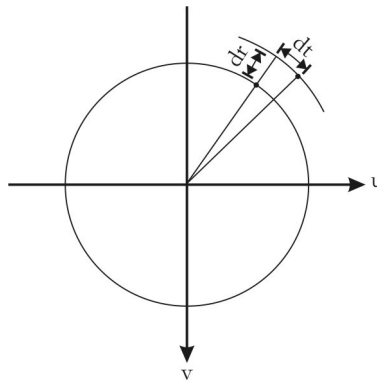


Figura 3.2 - Dois dos principais tipos de distorções na imagem causados por imperfeições da lente: distorção radial (dr) e distorção tangencial (dt).

Para que uma cena e os objetos presentes nesta possam ter suas dimensões reconstruídas tridimensionalmente, é necessário obter as informações perdidas/suprimidas durante o processo de projeção perspectiva, além de compensar as distorções na imagem causadas pela lente. Para isto, é muito utilizado, dentro da visão computacional, o conceito de estereofotogrametria e calibração de câmeras.

3.2 – Estereofotogrametria

O termo estereofotogrametria combina dois conceitos: estéreo e fotogrametria. O termo estéreo refere-se ao processo de combinar múltiplas (duas ou mais) imagens de uma mesma cena, para extrair informações métricas dela. As imagens são tomadas no mesmo instante de tempo e a disparidade entre elas é usada para estimar a profundidade dos pontos no espaço tridimensional (ver Figura 3.3). O ser humano, por exemplo, tem a sua capacidade de perceber a profundidade de forma melhorada, graças às duas imagens

formadas por seus olhos. Através de uma única imagem não é possível estimar a geometria espacial de uma cena, a não ser que se tenha algum conhecimento prévio de algumas propriedades geométricas da cena (Ambrósio *et al.*, 2001).

Por sua vez, a fotogrametria tem sido definida como o processo de obtenção de informações métricas de objetos através de medições feitas a partir de fotografias deste objeto (Gorpas *et al.*, 2007). Sendo assim, o termo estereofotogrametria refere-se à aplicação da fotogrametria na determinação das coordenadas tridimensionais de determinados pontos de uma cena, a partir de pares estéreo de imagens (Chiari *et al.*, 2005).

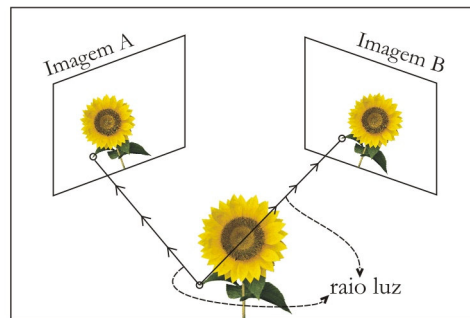


Figura 3.3 - Par estéreo de imagens. Repare que um determinado ponto do objeto real é representado nas duas imagens sob diferentes ângulos de visão.

3.3 - Princípio geométrico: triangulação estéreo

O princípio da triangulação estéreo é muito utilizado para explicar geometricamente a reconstrução tridimensional, pois seu modelo possibilita uma interpretação física da reconstrução tridimensional a partir do uso de imagens. Através deste método (Avidan & Shashua, 2000) é possível estimar as coordenadas 3D de um ponto no espaço a partir das projeções 2D deste ponto feitas em um conjunto estéreo de imagens.

A triangulação estéreo é baseada em uma geometria conhecida como “geometria epipolar”. Esta geometria é definida por uma reta, conhecida como “baseline”, que intersecciona os planos de duas imagens unindo os centros das câmeras. A Figura 3.4 ilustra o conceito.

Supondo que um ponto A , pertencente ao espaço tridimensional, tenha sua imagem capturada por duas câmeras em um mesmo instante de tempo. Estas imagens serão denominadas de imagem “esquerda” e “direita” e serão designadas pelos sub-índices “e” e “d” respectivamente. A projeção do ponto A nestas imagens irá definir os pontos A_e e A_d como visto na Figura 3.4. Esta mesma figura mostra que existe uma relação geométrica entre os pontos A_e , A_d , A e os centros de cada câmera. Fisicamente é possível imaginar que um feixe de luz, emitido ou refletido pelo ponto A , intercepta a imagem esquerda no ponto

A_e até o centro da câmera esquerda. Outro feixe de luz, também emitido ou refletido por A , intercepta a imagem direita no ponto A_d até o centro da câmera direita. A união destes dois feixes de luz com a *baseline* formam um triângulo.

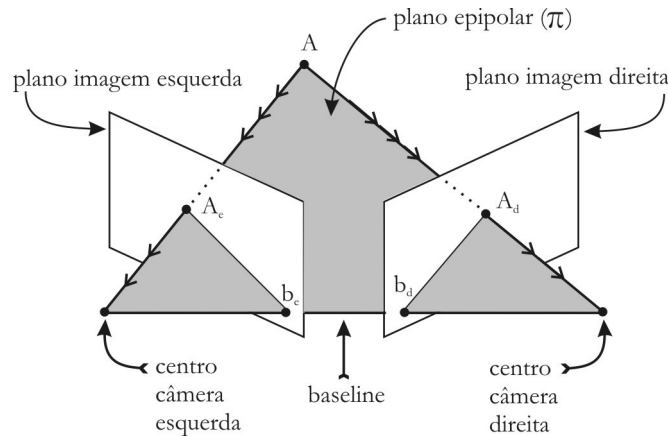


Figura 3.4 - Geometria epipolar: *baseline* traçada a partir dos centros de duas câmeras.

A partir das descrições feitas no parágrafo anterior, é possível reconstruir tridimensionalmente um ponto A , a partir das coordenadas da projeção deste ponto em um par estéreo de imagens. Para determinar estas coordenadas tridimensionais, é necessário que se tenham as coordenadas (u_d, v_d) e (u_e, v_e) do ponto projetado, além dos valores de rotação (R) e translação (T) das câmeras em relação a uma referência e suas distâncias focais. Estes valores são necessários para que a *baseline* possa ser conhecida. A Figura 3.5 ilustra a relação geométrica entre os principais pontos do sistema descrito.

As coordenadas do ponto projetado podem ser encontradas diretamente através da varredura das imagens. Já os valores de rotação, translação e distância focal não podem ser medidos ou estimados diretamente. É necessário um procedimento específico para estimar estes valores. Este procedimento é conhecido por “calibração de câmera”. A calibração de câmera também tem a função de compensar as distorções sofridas pela imagem durante seu processo de aquisição. Desta forma, é necessário antes, calibrar cada uma das câmeras para então, reconstruir as coordenadas tridimensionais do objeto em estudo. Existem métodos (Croce *et al.*, 2005) que utilizam câmeras na reconstrução e que não utilizam calibração, porém eles consomem mais recursos computacionais, são mais imprecisos e apresentam uma série de restrições que podem desfavorecer seu uso.

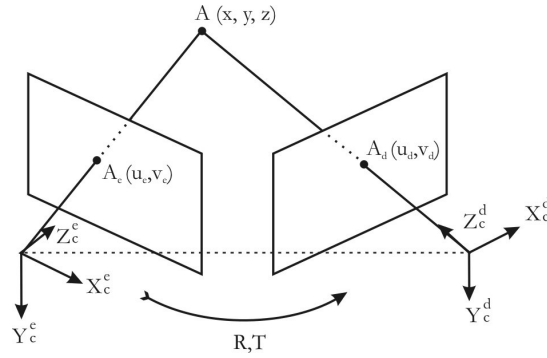


Figura 3.5 - Triangulação entre o ponto A , suas projeções na imagem (A_c e A_d) e a *baseline* definida pelos centros focais de duas câmeras.

3.4 - Modelo matemático da câmera

Para entender a calibração, é necessário conhecer o modelo matemático de uma câmera e o processo de formação de uma imagem. Neste contexto, a câmera deve ser entendida como um dispositivo de mapeamento entre as coordenadas 3D do mundo (espaço do objeto) e as coordenadas 2D de uma imagem. É possível, por meio do uso de matrizes que contenham as características da câmera, representar este mapeamento. Para isto, é necessário conhecer o modelo matemático de uma câmera que demonstre o processo básico de formação de uma imagem. O modelo matemático de câmera abordado aqui neste estudo é conhecido como “câmera de Pinhole” (Azevedo & Conci, 2003) e será descrito nos próximos parágrafos.

Dado um centro de projeção e considerando que este esteja na origem de um sistema de coordenadas euclidiana, define-se o plano $Z = f$ onde f representa a distância focal da câmera. É neste plano que a imagem será formada e por isto ele recebe o nome de “plano da imagem”. Desta forma, um ponto A de coordenadas (x_A, y_A, z_A) será mapeado no plano da imagem através de uma linha que liga este ponto ao centro de projeção da câmera, interseccionando o plano da imagem. A Figura 3.6 (a) ilustra esta projeção.

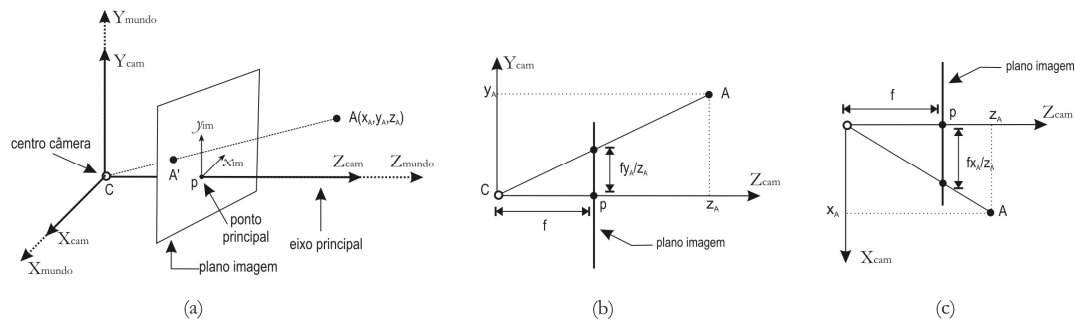


Figura 3.6 - (a) Projeção de um ponto A , pertencente ao espaço R^3 , no plano da imagem (espaço R^2). (b) Projeção de A no plano ZY e (c) projeção do mesmo ponto no plano ZX . Por meio de semelhança de triângulos é possível equacionar a projeção $R^3 \rightarrow R^2$.

$$\begin{bmatrix} fx_A + z_A p_x \\ fy_A + z_A p_y \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Onde a matriz k , definida em (3.5), será chamada de “matriz calibração”.

$$k = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Foi considerado que o centro da câmera esta localizado na origem do sistema de coordenadas do mundo e que seu eixo principal coincide com o eixo Z deste sistema. No entanto, isto é uma consideração ideal e raramente acontece. Isto quer dizer que existe um sistema de coordenadas do mundo onde a referência é determinada em um certo ponto no espaço 3D. Isto faz com que a câmera tenha um deslocamento e uma rotação em relação a esta referência. A Figura 3.8 ilustra a rotação e a translação da câmera em relação ao sistema de referência do mundo. É importante ressaltar que as coordenadas de qualquer ponto no espaço tridimensional, como as do ponto A da Figura 3.6, são em relação à referência do sistema de coordenadas do mundo.

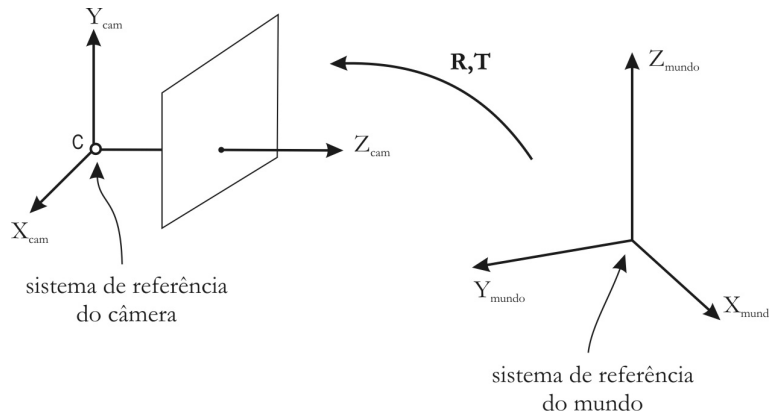


Figura 3.8 – Sistema de referência da câmera (X_{cam} , Y_{cam} , Z_{cam}) e sistema de referência do mundo (X_{mundo} , Y_{mundo} , Z_{mundo}).

A partir da consideração feita no parágrafo anterior, torna-se necessário adaptar a equação (3.4) de modo a levar em conta a translação e rotação da câmera em relação ao referencial do mundo. Para este propósito, será definida uma matriz que comporta estas operações de rotações e translações. As equações (3.6) e (3.7) ilustram a conversão do sistema de coordenadas do mundo para o sistema de coordenadas da câmera.

$$\begin{bmatrix} X_{cam} \\ Y_{cam} \\ Z_{cam} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_{mundo} \\ Y_{mundo} \\ Z_{mundo} \end{bmatrix} + T \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} X_{\text{cam}} \\ Y_{\text{cam}} \\ Z_{\text{cam}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{mundo}} \\ Y_{\text{mundo}} \\ Z_{\text{mundo}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

$$X_{\text{cam}} = r_1 X_{\text{mundo}} + r_2 Y_{\text{mundo}} + r_3 Z_{\text{mundo}} + T_x$$

$$Y_{\text{cam}} = r_4 X_{\text{mundo}} + r_5 Y_{\text{mundo}} + r_6 Z_{\text{mundo}} + T_y$$

$$Z_{\text{cam}} = r_7 X_{\text{mundo}} + r_8 Y_{\text{mundo}} + r_9 Z_{\text{mundo}} + T_z$$

O que poderia ser representado na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{cam}} \\ Y_{\text{cam}} \\ Z_{\text{cam}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{mundo}} \\ Y_{\text{mundo}} \\ Z_{\text{mundo}} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Por fim basta adaptar (3.7) à (3.4) formando a equação geral da projeção mostrada em (3.8).

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A matriz definida em (3.8) tem 9 graus de liberdade: 3 para a matriz k (f , p_x , p_y), 3 para a rotação e outros 3 para a translação (T_x , T_y , T_z). Os parâmetros contidos na matriz k são conhecidos como “parâmetros internos” da câmera ou “orientação interna” da câmera. Já os parâmetros de rotação e translação definidos na matriz 3x4 em (3.8) são conhecidos como “parâmetros externos” ou de “orientação externa” da câmera. É função da calibração de câmera definir todos estes valores.

Tanto a equação descrita em (3.8) quanto o modelo de câmera utilizado para definir as equações anteriores, assumem que ambos os eixos da imagem tenham escalas iguais, o que em termos práticos geralmente não acontece. No caso de câmeras CCD (*charge-coupled device*), existe a possibilidade de que os pixels não sejam quadrados. Assim, é necessário introduzir um fator de escala em cada eixo. Se o número de pixels por unidades de distância nas coordenadas da imagem são m_x e m_y na direção X e Y respectivamente, então a transformação das coordenadas do mundo para as coordenadas da imagem é obtida através da multiplicação de (3.5) por $(m_x, m_y, 1)$. Com isto, a forma geral da matriz de calibração interna, anteriormente definida em (3.5), passa a ser:

$$k = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Onde $\alpha_x = f m_x$ e $\alpha_y = f m_y$ representam a distância focal da câmera em termos das dimensões dos pixels. Similarmente, x_0 e y_0 representam o ponto principal em termos das dimensões dos pixels ($x_0 = m_x p_x$ e $y_0 = m_y p_y$). A equação final da câmera é dada em (3.10).

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_7 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5 - Procedimentos de calibração: objeto de calibração e pontos de controle

O processo de calibração de câmera consiste em estimar os valores das incógnitas do sistema (3.10). Para que isto possa acontecer é necessário que seja conhecido alguns pontos de referência na cena. Isto é feito por meio de um conjunto de pontos (geralmente representados por marcadores esféricos) cujas coordenadas são conhecidas no espaço tridimensional. Estes pontos recebem o nome de “**pontos de controle**”. A disposição geométrica destes pontos também define o sistema de coordenadas do mundo (eixos X, Y e Z). Estes pontos de controle e sua disposição geométrica formam o que é chamado de “objeto de calibração”. A Figura 3.9 ilustra dois exemplos clássicos de objetos de calibração, seus pontos de controle e a referência euclidiana formada pela disposição de seus pontos de controle. As coordenadas tridimensionais dos pontos de controle, ilustradas na Figura 3.9 (b), são obtidas através da medição direta da distância entre os pontos de controle com uma régua, por exemplo.

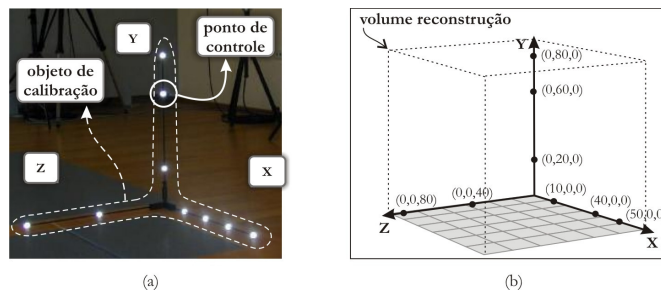


Figura 3.9 - (a) Pontos de controle formando um objeto de calibração e seus eixos de referência euclidiana. (b) Sistemas de coordenadas do mundo definido pelos pontos de controle presentes no objeto de calibração ilustrado em (a) e o volume de calibração definido pelos eixos de referência.

Resumidamente, os procedimentos de calibração de câmera estipulam que alguns pontos da cena devem ser conhecidos através dos pontos de controle. A partir das coordenadas destes pontos é possível determinar os coeficientes de calibração. Com estes coeficientes é possível calcular as coordenadas 3D de qualquer outro ponto contido no espaço definido pelo objeto de calibração (volume de calibração). No caso da filmagem de movimentos, os primeiros quadros de vídeo são usados para filmar o objeto de calibração e seus pontos de controle para que, quando o filme for processado, a câmera possa ser antes calibrada.

3.6 - Cálculo das matrizes de calibração

São diversificados os algoritmos (Abdel-Aziz & Karara, 1971; Tsai, 1987; Zhang, 1998) utilizados para estimar os valores de calibração de uma câmera a partir das coordenadas dos pontos de controle. Cada um apresenta um modelo matemático próprio e método de cálculo que caracterizam o algoritmo. O número de coeficientes utilizados para descrever as características da câmera, podem também variar segundo o modelo de câmera utilizado na definição do algoritmo. Pode-se citar, como exemplo, o método proposto por Abdel-Aziz & Karara (1971) que utiliza de 11 a 16 coeficientes, dependendo da precisão exigida e das câmeras utilizadas. Dentre todos os citados, três deles são de especial importância: (1) Tsai, (2) Zhang e (3) “Direct Linear Transformation”. Nos próximos parágrafos é feita uma breve apresentação dos dois primeiros métodos. Detalhes sobre os mesmos podem ser encontrados em suas respectivas referências. O terceiro método citado, também conhecido como DLT, é descrito com mais detalhes em tópico específico, devido a sua grande importância e utilização em SCAMs. Por fim, um quarto método, conhecido como Homografia (Hartley & Zisserman, 2003), é apresentado em tópico próprio neste capítulo. Embora este último não seja considerado um algoritmo de calibração de câmera, ele pode ser empregado na reconstrução bidimensional de coordenadas a partir de imagens.

O método proposto por Tsai (1987) define onze parâmetros de calibração. Seu modelo parte do pressuposto de que existe um paralelismo entre a linha traçada do eixo principal até o ponto 3D e a linha que une o ponto da imagem e o centro do plano da imagem (ver Figura 3.10). Esta condição de paralelismo é expressa por $A_{oz}A//P_iA_d$.

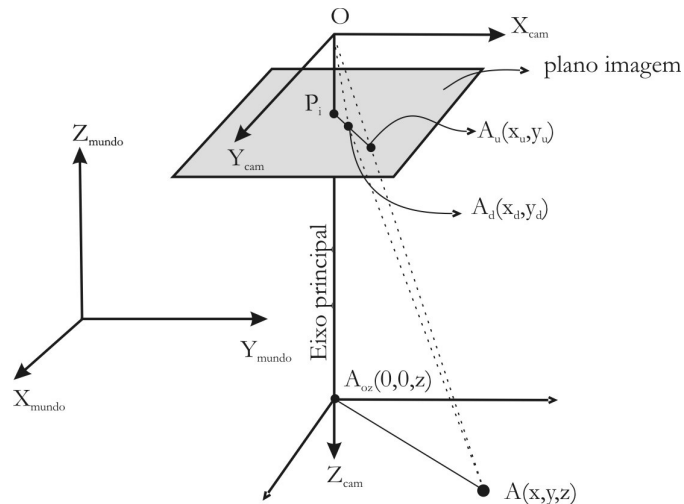


Figura 3.10 - Ilustração da condição de paralelismo. A distorção radial da lente não altera a direção do vetor que vai do ponto principal P_i ao ponto da imagem o que conduz à relação $P_iA_u//P_iA_d//A_{oz}A$.

A condição de paralelismo assumida por Tsai é suficiente para determinar a maioria dos parâmetros externos da câmera e alguns internos. O cálculo destes valores exige somente a solução de equações lineares simples. No entanto, seu modelo exige um segundo estágio para determinar os demais valores de calibração, por meio de técnicas não lineares. Embora seu modelo seja um clássico da literatura técnica, ele não é muito utilizado, pois apresenta pouca flexibilidade (coloca muitas restrições quanto ao ângulo entre a câmera e o objeto de calibração) e sua precisão é inferior a de outros modelos como o DLT, por exemplo.

Um segundo método, criado por Zhang (1998), tem adquirido grande visibilidade. Em seu método, classificado como de auto-calibração, pouca informação é exigida do usuário. Apenas movendo-se um objeto de calibração e analisando-se a correspondência entre as imagens feitas do mesmo em diferentes posições da cena, informações sobre os parâmetros internos e externos da câmera podem ser obtidos. Sua técnica exige apenas a observação de um objeto de calibração visto em pelo menos duas diferentes orientações no espaço. A distorção radial da lente é também modelada em seu algoritmo. O procedimento proposto consiste em uma solução recursiva seguida por um refinamento não-linear baseado no critério da máxima probabilidade. Comparado com outros algoritmos de calibração, sua técnica é de fácil uso e flexível.

3.7 - Reconstrução das coordenadas a partir das matrizes de calibração

Depois de estimados os coeficientes de calibração, qualquer ponto contido entre os limites definidos pelo objeto de calibração pode ter suas coordenadas 3D reconstruídas a partir de um par estéreo de imagens. Alguns algoritmos como o DLT tem seu próprio sistema de equações destinadas a reconstrução de um ponto no espaço. No entanto, existe um método de reconstrução “genérico”. Sua equação é mostrada em (3.11).

$$\begin{bmatrix} q_{11}^{(E)} - u^{(E)} q_{31}^{(E)} & q_{12}^{(E)} - u^{(E)} q_{32}^{(E)} & q_{13}^{(E)} - u^{(E)} q_{33}^{(E)} \\ q_{21}^{(E)} - v^{(E)} q_{31}^{(E)} & q_{22}^{(E)} - v^{(E)} q_{32}^{(E)} & q_{23}^{(E)} - v^{(E)} q_{33}^{(E)} \\ q_{11}^{(D)} - u^{(D)} q_{31}^{(D)} & q_{12}^{(D)} - u^{(D)} q_{32}^{(D)} & q_{13}^{(D)} - u^{(D)} q_{33}^{(D)} \\ q_{21}^{(D)} - v^{(D)} q_{31}^{(D)} & q_{22}^{(D)} - v^{(D)} q_{32}^{(D)} & q_{23}^{(D)} - v^{(D)} q_{33}^{(D)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(E)} q_{34}^{(E)} - q_{14}^{(E)} \\ v^{(E)} q_{34}^{(E)} - q_{24}^{(E)} \\ u^{(D)} q_{34}^{(D)} - q_{14}^{(D)} \\ v^{(D)} q_{34}^{(D)} - q_{24}^{(D)} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

onde

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Os índices “E” e “D” da equação (3.11) representam as vistas esquerda e direita respectivamente enquanto que (u,v) representam as coordenadas do ponto em reconstrução nas imagens esquerda e direita. Os valores de “q” são os elementos de uma

matriz de ordem 3×4 que contém os parâmetros internos e externos de cada uma das câmeras. Estes valores de “q” são calculados utilizando a equação (3.12).

A equação (3.11) faz referência à parâmetros de duas câmeras. Não existe um modelo que possa ser empregado para n câmeras, embora a maioria dos sistemas profissionais empregam mais do que duas câmeras. Neste caso, deve ser feita uma combinação entre as câmeras. Esta combinação é feita extraindo-se a média entre os valores tridimensionais encontrados pelos pares de câmeras. Com isto, quanto maior o número de câmeras empregadas no processo de reconstrução, mais precisos serão os valores (Richards, 1999).

3.8 - Calibração usando o “Direct Linear Transformation”

O “Direct Linear Transformation” (DLT), proposto por Abdel-Aziz & Karara (1971), é o algoritmo de calibração de câmera mais utilizado na captura do movimento (Ambrósio *et al.*, 2001). Ele apresenta bons valores de precisão e exatidão e seu modelo matemático é relativamente simples se comparado aos demais algoritmos (Hassan *et al.*, 2007). Seu método de solução apresenta com frequência valores satisfatórios, ao contrário de muitos outros algoritmos de calibração. Isto acontece porque o modelo proposto pelo DLT coloca poucas restrições quanto à cena e a forma do objeto de calibração, tornando-o um algoritmo flexível quanto às condições de cena. Outros modelos de calibração apresentam restrições que quando não observadas, fazem com que o método numérico empregado para calcular os coeficientes de calibração, não consigam convergir a um valor de solução apropriado.

O modelo do DLT parte do princípio de que a imagem feita por uma câmera é matematicamente equivalente a uma transformação geométrica entre os espaços do mundo e o plano da imagem. Isto equivale dizer que um determinado ponto A é projetado geometricamente no plano da imagem. O ponto A' representa esta projeção do ponto A no plano da imagem. A Figura 3.11 ilustra a referida projeção.

Na Figura 3.11 estão presentes dois sistemas de referências: (1) o espaço do mundo representado pelo sistema de coordenadas X,Y,Z e (2) o plano da imagem representado pelo par de coordenadas (U,V). O ponto N é o “centro de projeção” da câmera e está intimamente ligado ao valor de foco da câmera. Ele é também chamado de “centro da câmera”. O sistema óptico formado, projeta o ponto A (do espaço do mundo) como ponto A' no plano da imagem, através do centro de projeção N. Desta forma, os pontos A, A' e N são colineares. Esta é a chamada “condição de colinearidade” que é a base do método DLT.

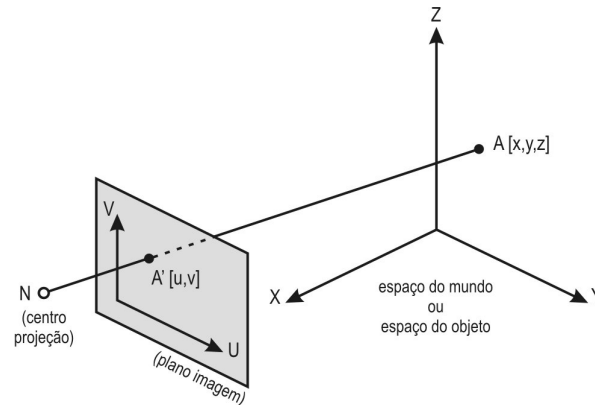


Figura 3.11 - Projeção perspectiva do ponto A no plano da imagem (ponto A'). Verifica-se que o ponto que antes era representado por três coordenadas (x,y,z) passa agora a ser representado por apenas duas coordenadas (U,V) . Uma coordenada é suprimida neste processo de formação da imagem.

Estipulando que os pontos N e A possam ser ligados por um vetor \vec{F} e assumindo que as coordenadas de N, no espaço do mundo, sejam dadas por (x_0, y_0, z_0) . Temos que pela Figura 3.12, o vetor \vec{F} é definido por $(x-x_0, y-y_0, z-z_0)$.

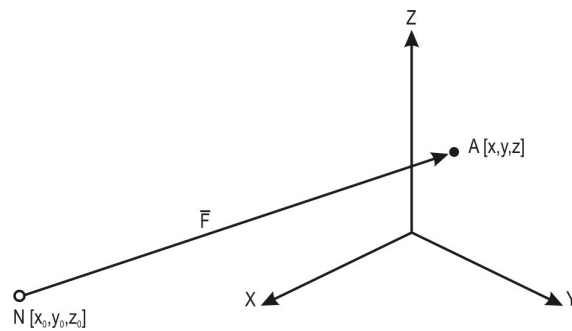


Figura 3.12 - Vetor \vec{F} ilustrando a condição de colinearidade do método DLT.

Para que o sistema de coordenadas da imagem tenha uma representação tridimensional, é necessário adicionar um eixo W ao plano da imagem. A Figura 3.13 ilustra esta operação.

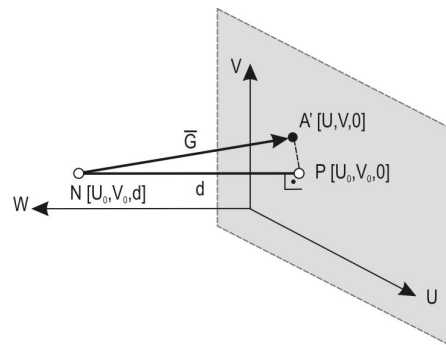


Figura 3.13 - Introdução do eixo W ao plano da imagem e do ponto principal P.

O ponto P, exibido na Figura 3.13, é definido como “ponto principal”. A linha projetada do ponto N até o plano da imagem, paralela ao eixo W e perpendicular ao plano da imagem, é denominada de “eixo principal”. O valor d ilustrado na Figura 3.13 corresponde à distância entre o ponto N ao ponto P. As coordenadas do ponto P e N no plano da imagem são respectivamente $(U_0, V_0, 0)$ e (U_0, V_0, d) . Por fim, o vetor \vec{G} liga o ponto N ao ponto A'. Suas coordenadas serão dadas por $(U-U_0, V-V_0, -d)$. Como os pontos A, A' e N são colineares, o vetor \vec{F} e \vec{G} também são. A condição de colinearidade pode ser expressa como:

$$\vec{G} = c\vec{F} \quad (3.13)$$

Onde “c” representa um valor escalar. Note que os vetores \vec{F} e \vec{G} foram representados em sistemas de coordenadas diferentes. O vetor \vec{F} teve como referência o espaço do mundo enquanto que o vetor \vec{G} teve como referência o plano da imagem. Para relacionar estas coordenadas diretamente é necessário que as mesmas tenham um sistema de coordenadas em comum. Um bom modo para fazer isto é transformar as coordenadas do vetor \vec{F} para o sistema de referência do plano da imagem. Isto é feito segundo a relação:

$$F_1 = T_{10} \cdot F_0$$

ou

$$F_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot F_0 \quad (3.14)$$

Onde F_1 representa o vetor \vec{F} descrito em relação às coordenadas do plano da imagem e F_0 o vetor \vec{F} descrito em relação às coordenadas do espaço do mundo. T_{10} representa a matriz que irá fazer a transformação do espaço do mundo para o espaço do plano da imagem. A aplicação de (3.14) à (3.13) resulta na equação (3.15).

$$\begin{bmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Que pode ser reescrita na forma mostrada em (3.16).

$$\begin{aligned} U - U_0 &= c[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)] \\ V - V_0 &= c[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)] \\ -d &= c[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)] \end{aligned} \quad (3.16)$$

A partir de (3.16) pode-se obter a relação:

$$c = \frac{-d}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \quad (3.17)$$

Substituindo (3.17) em (3.16) é possível obter as relações mostradas em (3.18).

$$\begin{aligned} U - U_0 &= -d \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ V - V_0 &= -d \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Os valores de U , V , U_0 e V_0 presentes em (3.18), estão expressos como coordenadas do plano da imagem o que admite diferentes tipos de unidades como, por exemplo, centímetros. No entanto, o processo de digitalização pode usar outro tipo de unidade de medida diferente daquela em que a imagem esta sendo representada matematicamente. Geralmente, a unidade de medida utilizada na digitalização de uma imagem é o pixel. Desta forma, é importante acomodar esta mudança de unidades de medida. Isto pode ser feito introduzindo-se as constantes λ_u e λ_v como ilustrado em (3.19).

$$\begin{aligned} u - u_0 &= \lambda_u (U - U_0) \\ v - v_0 &= \lambda_v (V - V_0) \end{aligned} \quad (3.19)$$

As constantes $[\lambda_u, \lambda_v]$ são conhecidas como fatores de conversão de unidades para os eixos U e V respectivamente. Aplicando (3.19) à (3.18) obtêm-se (3.20).

$$\begin{aligned} u - u_0 &= \frac{-d}{\lambda_u} \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ v - v_0 &= \frac{-d}{\lambda_v} \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Os valores de u , v , u_0 e v_0 utilizados em (3.20), podem ser expressos em quaisquer unidades. Note também que os dois fatores de conversão podem ser diferentes um do outro. Rearranjando (3.20) obtêm-se as equações base do método DLT ilustradas em (3.21):

$$\begin{aligned} u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\ v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

onde

$$\begin{aligned} [d_u, d_v] &= \left[\frac{d}{\lambda_u}, \frac{d}{\lambda_v} \right] \\ D &= -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_1 &= \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \\
L_2 &= \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \\
L_3 &= \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \\
L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \\
L_5 &= \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \\
L_6 &= \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \\
L_7 &= \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\
L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \\
L_9 &= \frac{r_{31}}{D} \\
L_{10} &= \frac{r_{32}}{D} \\
L_{11} &= \frac{r_{33}}{D}
\end{aligned}$$

As onze constantes (L_1, \dots, L_{11}) são conhecidas na literatura técnica como “coeficientes DLT”. O objetivo da calibração DLT é justamente determinar os valores destes onze coeficientes, que serão posteriormente usados no processo de reconstrução tridimensional. A estas constantes estão associados os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmera apresentados na equação (3.10).

Para determinar os onze coeficientes DLT, as equações definidas em (3.21) são rearranjadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4 - u L_9 x - u L_{10} y - u L_{11} z &= u \\
L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8 - v L_9 x - v L_{10} y - v L_{11} z &= v
\end{aligned} \tag{3.22}$$

O que poderia ser representado na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix}
x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\
0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
L_1 \\
L_2 \\
L_3 \\
L_4 \\
L_5 \\
L_6 \\
L_7 \\
L_8 \\
L_9 \\
L_{10} \\
L_{11}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
u \\
v
\end{bmatrix} \tag{3.23}$$

Desta forma, para calibrar a câmera basta resolver o sistema linear definido em (3.23) e encontrar os onze coeficientes de calibração (L_1, \dots, L_{11}) . No entanto, o número de

incógnitas é maior do que o de equações. Isto porque foi levando em consideração somente um ponto de controle, o que não é suficiente para executar a calibração. Verifica-se na equação (3.23), que um único ponto (u,v) gera duas equações. Assim, são necessários pelo menos seis pontos de calibração para que se tenha pelo menos onze equações e torne a resolução do sistema possível, já que o número de incógnitas são onze. A equação geral da calibração de câmera, levando em conta o número de pontos de controle n , é apresentada em (3.24).

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \\ L_7 \\ L_8 \\ L_9 \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Para resolver o sistema linear (3.24), utiliza-se o algoritmo “Single Value Decompositon” (SVD) (Press *et al.* 1993). Quando são usados seis ou mais pontos de controle, o sistema definido em (3.24) é sobre-determinado podendo assumir diversas soluções. Embora o SVD forneça soluções adequadas segundo Chiari *et al.* (2005), é possível otimizar a solução do sistema através da minimização do erro residual usando a técnica dos mínimos quadrados. Alguns outros modelos de calibração utilizam o algoritmo de Levenberg-Marquardt para realização destas otimizações (Zhang, 1998). Detalhes sobre o assunto podem ser encontrados em (Gorpas *et al.*, 2007).

De modo a ilustrar um exemplo de calibração de uma câmera utilizando o DLT, foi extraído de um vídeo um quadro contendo a imagem de um objeto de calibração. Este quadro é exibido na Figura 3.14. Na literatura técnica, o quadro ou imagem utilizada para calibrar a câmera recebe o nome de “quadro chave” (*key frame*).

Na Tabela 3.1 são exibidas as coordenadas de seis pontos de controle selecionados e extraídos da Figura 3.14. Suas coordenadas do mundo foram medidas diretamente no objeto de calibração com uma trena enquanto que as coordenadas da imagem foram estimadas a partir de um clique do *mouse* sobre o centro da imagem de cada ponto de controle.

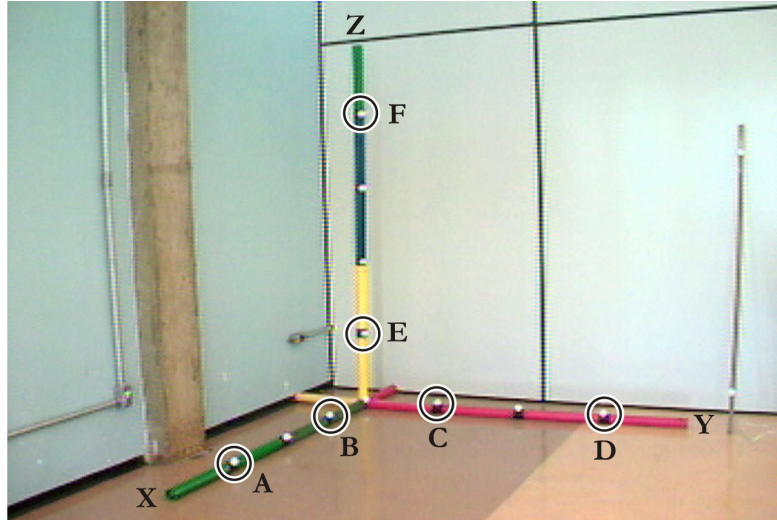


Figura 3.14 - Quadro usado para calibrar uma câmera. Neste quadro são exibidos 11 pontos de controle, dos quais seis deles foram selecionados para determinar os coeficientes de calibração da câmera.

Tabela 3.1 - Coordenadas de seis pontos de controle. Estes pontos podem ser visualizados na Figura 3.14.

| Pontos de Controle | Coordenadas | |
|--------------------|-------------------|----------------|
| | Imagem (u,v) | Mundo (x,y,z) |
| A | (209, 423) pixels | (120, 0, 0) cm |
| B | (297, 381) pixels | (40, 0, 0) cm |
| C | (397, 369) pixels | (0, 40, 0) cm |
| D | (549, 379) pixels | (0, 120, 0) cm |
| E | (330, 306) pixels | (0, 0, 40) cm |
| F | (326, 103) pixels | (0, 0, 160) cm |

Os valores ilustrados na Tabela 3.1 servirão como dados de entrada para o algoritmo DLT, a fim de que este possa determinar os onze coeficientes da câmera. De posse das coordenadas de controle e a partir de (3.24), é montada a equação (3.25) que irá possibilitar o cálculo dos valores de calibração (L_1, \dots, L_{11}).

$$\begin{bmatrix}
 120 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -209 \times 120 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 120 & 0 & 0 & 1 & -423 \times 120 & 0 & 0 \\
 40 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -297 \times 40 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 1 & -381 \times 40 & 0 & 0 \\
 0 & 40 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -397 \times 40 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 1 & 0 & -369 \times 40 & 0 \\
 0 & 120 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -549 \times 120 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 120 & 0 & 1 & 0 & -379 \times 120 & 0 \\
 0 & 0 & 40 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -330 \times 40 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 1 & 0 & 0 & -306 \times 40 \\
 0 & 0 & 160 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -326 \times 160 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 160 & 1 & 0 & 0 & -103 \times 160
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 L_1 \\
 L_2 \\
 L_3 \\
 L_4 \\
 L_5 \\
 L_6 \\
 L_7 \\
 L_8 \\
 L_9 \\
 L_{10} \\
 L_{11}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 209 \\
 423 \\
 297 \\
 381 \\
 397 \\
 369 \\
 549 \\
 379 \\
 330 \\
 306 \\
 326 \\
 103
 \end{bmatrix}
 \quad (3.25)$$

Os valores das onze incógnitas ($L_1 \dots L_{11}$) de (3.25) são mostrados em (3.26). São estes valores que possibilitarão a reconstrução tridimensional de pontos que estejam contidos dentro dos limites definidos pelo objeto de calibração da Figura 3.14.

$$\begin{aligned} L_1 &= -1.405892, L_2 = 1.200202, L_3 = -0.2188188, L_4 = 331.2115, \\ L_5 &= -0.2981277, L_6 = -0.304956, L_7 = -1.641616, L_8 = 364.6718, \\ L_9 &= -0.001853891, L_{10} = -0.001119677, L_{11} = -0.0005713106. \end{aligned} \quad (3.26)$$

3.9 - Reconstrução usando o “Direct Linear Transformation”

Depois de calculados os coeficientes DLT, já é possível a reconstrução de outros pontos presentes na imagem e contidos no volume de reconstrução. A formulação matemática necessária ao processo de reconstrução das coordenadas é feita a partir da equação (3.21) que, rearranjada, assume a forma:

$$\begin{aligned} x(L_1 - uL_9) + y(L_2 - uL_{10}) + z(L_3 - uL_{11}) &= u - L_4 \\ x(L_5 - vL_9) + y(L_6 - vL_{10}) + z(L_7 - vL_{11}) &= v - L_8 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Que equivale na forma matricial a (3.28).

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_9 & L_2 - uL_{10} & L_3 - uL_{11} \\ L_5 - vL_9 & L_6 - vL_{10} & L_7 - vL_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

O sistema linear proposto em (3.28) apresenta três incógnitas (x, y, z) e duas equações. No entanto, sabe-se que é necessário pelo menos três equações para que este sistema possa ser resolvido. Um modo prático de resolver este problema é utilizar pelo menos duas câmeras registrando o ponto que se deseja reconstruir. Isto faria com que o sistema tivesse quatro ou mais equações o que tornaria possível a sua solução e a conseqüente determinação das coordenadas tridimensionais do ponto representado nas imagens. A equação geral da reconstrução é dada em (3.29). Nela, atribui-se um índice “k” a cada câmera. Repare que cada câmera tem seus coeficientes de calibração próprios.

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - u^{(1)}L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - u^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - u^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - v^{(1)}L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - v^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - v^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_1^{(2)} - u^{(2)}L_9^{(2)} & L_2^{(2)} - u^{(2)}L_{10}^{(2)} & L_3^{(2)} - u^{(2)}L_{11}^{(2)} \\ L_5^{(2)} - v^{(2)}L_9^{(2)} & L_6^{(2)} - v^{(2)}L_{10}^{(2)} & L_7^{(2)} - v^{(2)}L_{11}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(k)} - u^{(k)}L_9^{(k)} & L_2^{(k)} - u^{(k)}L_{10}^{(k)} & L_3^{(k)} - u^{(k)}L_{11}^{(k)} \\ L_5^{(k)} - v^{(k)}L_9^{(k)} & L_6^{(k)} - v^{(k)}L_{10}^{(k)} & L_7^{(k)} - v^{(k)}L_{11}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(1)} - L_4^{(1)} \\ v^{(1)} - L_8^{(1)} \\ u^{(2)} - L_4^{(2)} \\ v^{(2)} - L_8^{(2)} \\ \vdots \\ u^{(k)} - L_4^{(k)} \\ v^{(k)} - L_8^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Nesta equação, um mesmo ponto será representado em “k” imagens. Cada imagem terá uma coordenada $(u^{(k)}, v^{(k)})$ associado ao ponto em reconstrução. A solução de (3.29) e a conseqüente estimação das três coordenadas de um ponto é também feita pelo SVD.

De modo a ilustrar um exemplo da reconstrução de coordenadas de um marcador, foi extraído um par estéreo a partir de dois vídeos sincronizados (ver Figura 3.15).

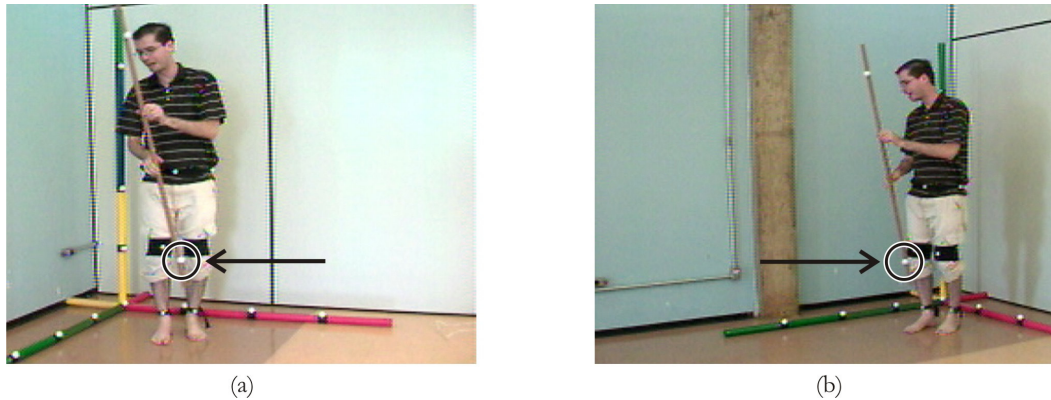


Figura 3.15 - Par estéreo. (a) imagem esquerda e (b) imagem direita. O marcador esférico fixado a extremidade inferior da barra metálica terá suas coordenadas reconstruídas tridimensionalmente a partir deste par estéreo e dos coeficientes de calibração de cada uma das duas câmeras empregadas no registro do marcador.

Em (3.30) e (3.31) são exibidos os onze coeficientes de calibração das câmeras esquerda e direita respectivamente. Os índices sobrescritos “E” e “D” foram utilizados para designar estes valores para a vista esquerda e direita.

$$\begin{aligned} L_1^E &= -1.426044, L_2^E = 1.27424, L_3^E = -0.2868324, L_4^E = 329.9606, \\ L_5^E &= -0.3675275, L_6^E = -0.269588, L_7^E = -1.759644, L_8^E = 364.95, \\ L_9^E &= -0.00199548, L_{10}^E = -0.0009942482, L_{11}^E = -0.0007778243 \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} L_1^D &= -1.749104, L_2^D = 0.317174, L_3^D = -0.267334, L_4^D = 385.3009, \\ L_5^D &= -0.3123347, L_6^D = -0.343389, L_7^D = -1.540378, L_8^D = 360.2543, \\ L_9^D &= -0.001366525, L_{10}^D = -0.001591282, L_{11}^D = -0.0006623033 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Para calcular as coordenadas tridimensionais do marcador indicado na Figura 3.15, a equação (3.29) foi utilizada. As coordenadas do marcador na imagem esquerda e direita, respectivamente foram (392, 318) e (344, 320). Elas foram selecionadas manualmente a partir das imagens. De posse destas coordenadas e dos valores exibidos em (3.30) e (3.31), foi montada a equação (3.32).

$$\begin{bmatrix} -1,4260 - 392(-0,001995) & 1,274 - 392(-0,00099424) & -0,28683 - 392(-0,00077772) \\ -0,36752 - 318(-0,001995) & -0,2695 - 318(-0,00099424) & -1,7596 - 318(-0,00077772) \\ -1,7491 - 344(-0,0013665) & 0,3171 - 344(-0,0015912) & -0,2673 - 344(-0,00066230) \\ -0,31233 - 320(-0,0013665) & -0,3433 - 320(-0,0015912) & -1,5403 - 320(-0,00066230) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 392 - 329,96 \\ 318 - 364,95 \\ 344 - 385,30 \\ 320 - 360,25 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

A resolução de (3.32) conduz ao resultado (75; 66; 46). Estas são as coordenadas tridimensionais, em centímetros, do marcador fixado à extremidade inferior da barra metálica da Figura 3.15.

3.10 - Homografia

O método de Homografia, também chamado de projeção homográfica, define uma relação de correspondência matemática ($x_n \leftrightarrow x_n'$) entre um conjunto de pontos x_n' pertencentes a um plano no espaço R^2 do mundo, com um outro conjunto de pontos x_n pertencentes à imagem feita deste plano. É importante ressaltar que estes conjuntos de pontos devem ter mesma dimensão no espaço. Como a imagem é bidimensional, este processo de “calibração” é também bidimensional e exige apenas uma imagem do objeto em reconstrução. No caso da reconstrução do movimento, ressalta-se que o movimento a ser capturado deve ser feito em um único plano do espaço, já que suas coordenadas serão reconstruídas somente em duas dimensões. Devido a esta restrição, muitos autores não tratam a homografia como um processo de “calibração de câmera”. Isto faz sentido, porque de fato a câmera não sofre uma calibração e nenhum de seus parâmetros (distância focal, rotação, translação etc.) são estimados. Mesmo assim, a homografia será ilustrada no mesmo tópico que aborda a calibração de câmera, pois é possível por meio dela, estabelecer relações métricas a partir de imagens, levando em conta as distorções perspectivas sofridas pela imagem. Como muitos movimentos têm natureza bidimensional, acredita-se que a homografia seja uma interessante ferramenta para estes casos.

O processo de homografia visa calcular uma matriz H , conhecida como matriz homografia, tal que $x_n' = Hx_n$. Um algoritmo, proposto por Hartley & Zisserman (2003), é empregado para este propósito. A entrada de dados para o algoritmo é uma outra matriz que tem o formato ilustrado em (3.33).

$$\begin{bmatrix} \overbrace{X_1}^{x'_1} & \overbrace{Y_1}^{y'_1} & \overbrace{u_1}^{x_n} & \overbrace{v_1}^{y_n} \\ X_2 & Y_2 & u_2 & v_2 \\ X_3 & Y_3 & u_3 & v_3 \\ X_4 & Y_4 & u_4 & v_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & u_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Cada linha da matriz definida em (3.33) representa uma relação $x_n \leftrightarrow x'_n$. Para determinar esta relação, são selecionados alguns pontos de coordenadas conhecidas no espaço do plano de movimento (X_n, Y_n) e as coordenadas destes mesmos pontos na imagem (u_n, v_n) feita do plano do movimento. Estes pontos são os “pontos de controle” do objeto de calibração e é necessário pelo menos quatro deles para que o sistema possa encontrar os valores de H . A Figura 3.16 ilustra o objeto de calibração usado na homografia. Os pontos de controle são definidos como a intersecção dos quadrados que compõem a figura do objeto de calibração. É também importante ressaltar que o objeto de calibração tenha um formato plano e que ele deve estar contido no plano onde será realizado o movimento. Deve-se também conhecer a distância entre os quadros que formam a figura do objeto de calibração, para que as coordenadas espaciais dos pontos de controle possam ser determinadas.

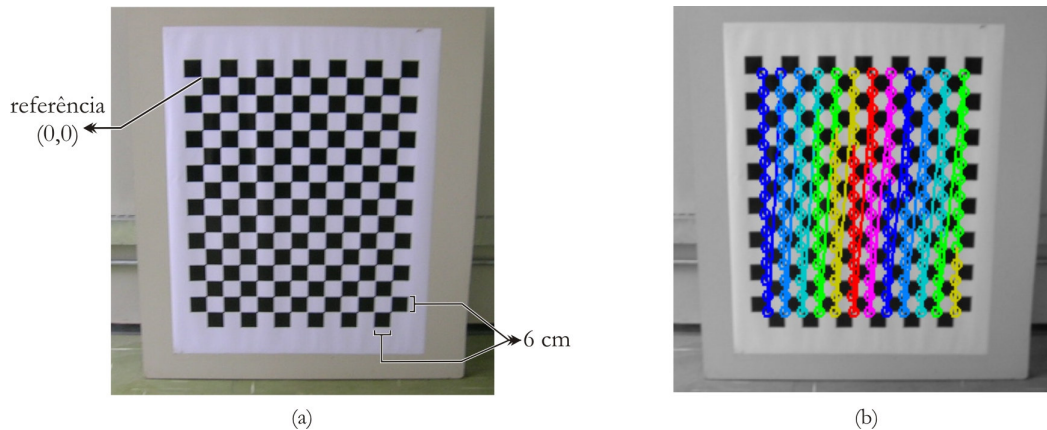


Figura 3.16 - (a) Objeto de calibração usado na homografia. (b) Pontos de controle definidos pelas intersecções entre os quadros (ilustrados por círculos em diferentes cores).

Em outras palavras, a matriz (3.33) armazena as coordenadas dos pontos de controle. Cada linha da matriz corresponde a dois tipos de representações espaciais feitas de um mesmo ponto de controle. São elas: o espaço onde é realizado o movimento no mundo real, medido em metros, e o espaço da imagem medido em pixels. Cada um destes espaços tem seu próprio sistema de coordenadas e referência. Estas duas representações, feitas para cada um dos pontos de controle contidos no objeto de calibração, determinarão

a correspondência entre o plano da imagem e o plano do movimento. É por isso que o objeto de calibração deve estar no mesmo plano em que será realizado o movimento.

Depois de adquiridos os conjuntos de pontos x_n e x_n' , é preciso encontrar uma solução para a equação $x_n' = Hx_n$. Para isto, ela será expressa como um produto vetorial na forma $x_n' \times Hx_n = 0$. Se a j -ésima linha da matriz H for denotada por h^{iT} , então pode-se escrever:

$$Hx_n = \begin{pmatrix} h^{1T}x_n \\ h^{2T}x_n \\ h^{3T}x_n \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Fazendo $x_n' = (a_n', b_n', c_n')^T$ tem-se:

$$x_n' \times Hx_n = \begin{pmatrix} b_n' h^{3T}x_n - c_n' h^{2T}x_n \\ c_n' h^{1T}x_n - a_n' h^{3T}x_n \\ a_n' h^{2T}x_n - b_n' h^{1T}x_n \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Dado que $h^{iT}x_n = x_n^T h^i$, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -c_n' x_n^T & b_n' x_n^T \\ c_n' x_n^T & 0^T & -a_n' x_n^T \\ -b_n' x_n^T & a_n' x_n^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.36)$$

Embora existam três equações em (3.36), somente duas delas são linearmente independentes. Omitindo a terceira equação tem-se:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -c_n' x_n^T & b_n' x_n^T \\ c_n' x_n^T & 0^T & -a_n' x_n^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (3.37)$$

As equações apresentadas em (3.37) têm a forma $A_n h = 0$, onde A_n é uma matriz 2×3 . Como a proposta é trabalhar no plano e não no espaço 3D, adota-se $c_n' = 1$ (outras escolhas são possíveis). Com isto, as equações em (3.37) são equações lineares com h desconhecido. A matriz A_n tem todos os seus elementos conhecidos. A matriz h tem dimensão 3×1 e será rearranjada segundo a relação (3.38) tornando-se a solução para H .

$$h = \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Por fim, aplica-se o algoritmo de homografia. As etapas deste algoritmo são descritas abaixo:

- (i) Para cada linha “n” da matriz (3.33), montar a matriz A_n a partir de (3.37) com 2 linhas e 9 colunas;
- (ii) unir as “n” matrizes 2×9 do passo (i) em uma única matriz A com $2n \times 9$ elementos;
- (iii) calcular a decomposição singular dos valores (SVD) da matriz A . A saída é uma decomposição na forma $A = UDV^T$. O valor de h será a última coluna de V ;
- (iv) a matriz H pode ser determinada a partir da relação (3.38).

Após calculado os nove valores que determinam a matriz H , é possível a reconstrução bidimensional de coordenadas. Para isto basta aplicar a equação (3.39).

$$x_n' = Hx_n$$

ou

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Onde (u,v) representa, em coordenadas da imagem, o ponto a ser reconstruído e (X, Y) o resultado da reconstrução.

3.11 – Considerações do capítulo

O processo de calibração é de suma importância na qualidade da reconstrução de coordenadas, pois este processo exerce muita influência na precisão e exatidão do sistema. Por isto, ele deve ser um procedimento robusto, o mais automático possível e permitir a reconstrução de volumes adequados à finalidade requerida pelo usuário. No contexto dos sistemas de captura e análise de movimento, o “Direct Linear Transformation” (DLT) desponta como o algoritmo mais utilizado na calibração de câmeras e reconstrução de coordenadas. Embora este algoritmo seja criticado por fazer uma análise linear da

reconstrução, os melhores valores de precisão e exatidão para volumes superiores a 1m^3 têm sido alcançados por ele.

Segundo Gorpas *et al.* (2007), um dos maiores problemas do método DLT é que este pode ser considerado uma técnica de mínimos quadrados e por isto seus resultados são sensíveis à erros na estimação das coordenadas 2D da imagem dos pontos de controle. Esta imprecisão muitas vezes é diminuída com o uso de grandes quantidades de marcadores de alto contraste e rotinas de calibração capazes de detectar estes marcadores automaticamente. No mesmo estudo, Gorpas e seus co-autores também concluíram que um ponto deve ser registrado por pelo menos quatro câmeras para que a exatidão/precisão das coordenadas tridimensionais do ponto alcancem resultados otimizados. Segundo o mesmo autor, um número de câmeras excessivo não incrementa significativamente a qualidade da medição em casos onde não há oclusão de marcadores.

Outro algoritmo, aqui usado para a reconstrução bidimensional de coordenadas, fora também usado. Conhecido pelo nome de homografia, ele compensa as distorções perspectivas sofridas por uma imagem. No entanto, ele não reconstrói a coordenada suprimida na aquisição da imagem. Sendo assim, os movimentos a serem estimados, devem estar em um plano já que a transformação de espaço realizada pela homografia é $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$. Enquanto muitos sistemas utilizam escala geométrica para recuperar as dimensões dos objetos na cena, a homografia apresenta a vantagem de compensar as distorções perspectivas sofridas pela imagem proporcionando maior precisão na maioria dos casos e sendo por isto um bom método para extração de características métricas de objetos planos presentes em uma cena.

Capítulo 4

Proposta de um sistema de captura e análise de movimentos

Neste capítulo é apresentado o projeto e a descrição de um sistema de captura e análise de movimento baseado em vídeo. As principais características e funcionalidades deste sistema são descritas bem como as etapas de processamento, algoritmos e métodos utilizados em sua construção.

4.1 – Características e requerimentos do sistema

O campo de registro do movimento humano usando técnicas de visão computacional tem crescido substancialmente e uma grande variedade de sistemas desta natureza tem sido propostos para estimar o movimento humano. Estes sistemas variam quanto ao número e configuração das câmeras empregadas, representação dos dados capturados, tipos de algoritmos, uso de modelos antropométricos e aplicação (Mündermann *et al.*, 2006). Neste contexto, propõe-se neste capítulo, descrever o projeto de um sistema de baixo custo capaz de capturar movimentos de forma mais automática possível, usando técnicas de visão computacional. Como resultado do processo de captura do movimento, o sistema exibe gráficos que permitem ao usuário a análise quantitativa de algumas das principais variáveis cinemáticas do movimento.

O sistema desenvolvido, denominado de **BioMec**, é baseado no uso de uma ou mais câmeras de vídeo convencionais e um programa de computador capaz de analisar as imagens geradas por estas câmeras. O programa abrange um conjunto de algoritmos que fornecem flexibilidade e precisão ao sistema durante a reconstrução do movimento, seja ela bidimensional ou tridimensional. O fator que determinará o tipo de reconstrução será o número de câmeras empregadas no registro do movimento e os dados de entrada fornecidos pelo usuário.

Os tipos de movimento que podem ser analisados pelo sistema são diversos, não existindo uma restrição quanto à forma ou característica. Os fatores que irão limitar a análise de determinado movimento serão impostos pelas câmeras utilizadas, oferta de iluminação, quantidade de marcadores e a proximidade entre eles. Embora a “forma” do movimento possa ser genérica, será dada especial ênfase ao movimento humano no decorrer deste trabalho.

A tecnologia escolhida para registrar e reconstruir o movimento será baseada em dispositivos óptico-eletrônicos (câmera de vídeo) e marcadores retro-flexíveis à luz infravermelha (marcadores passivos). Esta escolha justifica-se pelo fato de que este conjunto (câmeras de vídeo e marcadores passivos) permite a máxima movimentação natural dos atores, não é invasiva e apresenta grande potencial prático. Por ser um método bastante estudado, sistemas óptico-eletrônicos passivos permitem uma grande possibilidade de meios para reconstruir movimentos. Isto pode contribuir para o projeto de um sistema que possa ser empregado em condições diversificadas de ambiente de modo a torná-lo uma importante ferramenta na prática clínica e análise científica prática, que carece de sistemas com estas características. Além disso, espera-se que o sistema seja flexível quanto ao tipo de câmera utilizado, seja o mais automático possível e apresente uma combinação de operações matemáticas, estatísticas e gráficas que ajudem na avaliação dos resultados. Por fim, é fundamental que o sistema apresente características de precisão e exatidão suficientes para demonstrar sua aplicação clínica e científica.

4.2 – Funcionalidades do sistema

Para que o sistema possa atender às principais necessidades práticas e clínicas, algumas funcionalidades são requeridas. São elas:

- reconstruir, em duas ou três dimensões, os principais parâmetros cinemáticos de cada marcador fixado ao ator;
- ilustrar graficamente as variáveis cinemáticas calculadas;
- construir um modelo antropométrico simples do ator;
- permitir o cálculo de medidas fotogramétricas a partir de imagens;
- fornecer ao usuário ferramentas básicas necessárias ao manejo de vídeo, gerenciamento de dados e efeitos visuais que ajudem na interpretação quantitativa e qualitativa do movimento.

Conforme pode ser visto na Figura 4.1, o programa é dividido em etapas que, quando executadas em uma determinada ordem específica, permitem a reconstrução do movimento e a avaliação básica de seus parâmetros cinemáticos. Esta ordem é definida no próximo item.

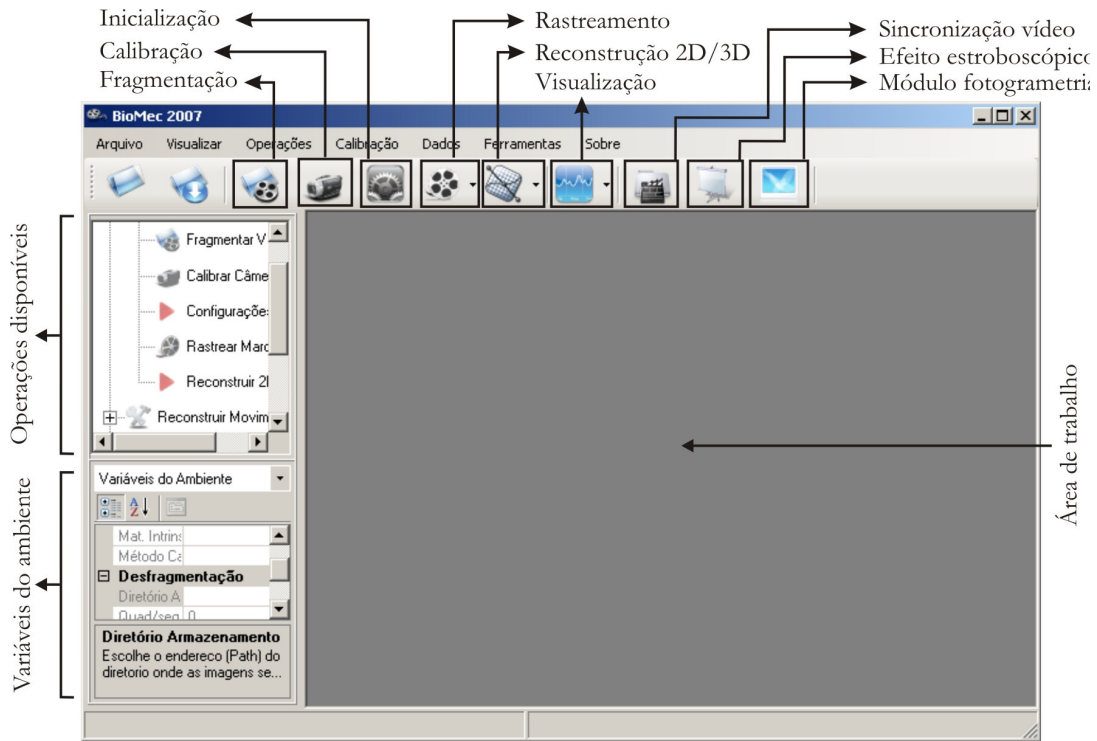


Figura 4.1 - Interface principal do programa BioMec ilustrando algumas das funcionalidades do sistema.

4.3 - Etapas de processamento

O sistema desenvolvido é capaz de reconstruir o movimento a partir de um ou mais vídeos. Cada vídeo é fragmentado em uma seqüência de imagens ou quadros (*frames*). Independentemente de se tratar de uma reconstrução bidimensional ou tridimensional, a seqüência de imagens fragmentada deverá passar por uma série de operações computacionais, que irão extrair informações do movimento registrado nestas imagens. A Figura 4.2 ilustra um diagrama geral das principais etapas de processamento utilizadas na reconstrução 2D e 3D. Verifica-se que as etapas A, C e E são comuns tanto à reconstrução 2D quanto 3D. O diagrama de classes do programa, visto no Anexo A desta dissertação, é baseado no diagrama da Figura 4.2.

Embora a finalidade seja análoga, os procedimentos e algoritmos envolvidos na reconstrução bidimensional e tridimensional são diferentes e por isto estes processos seguem algumas vezes etapas distintas e específicas para determinado tipo de reconstrução.

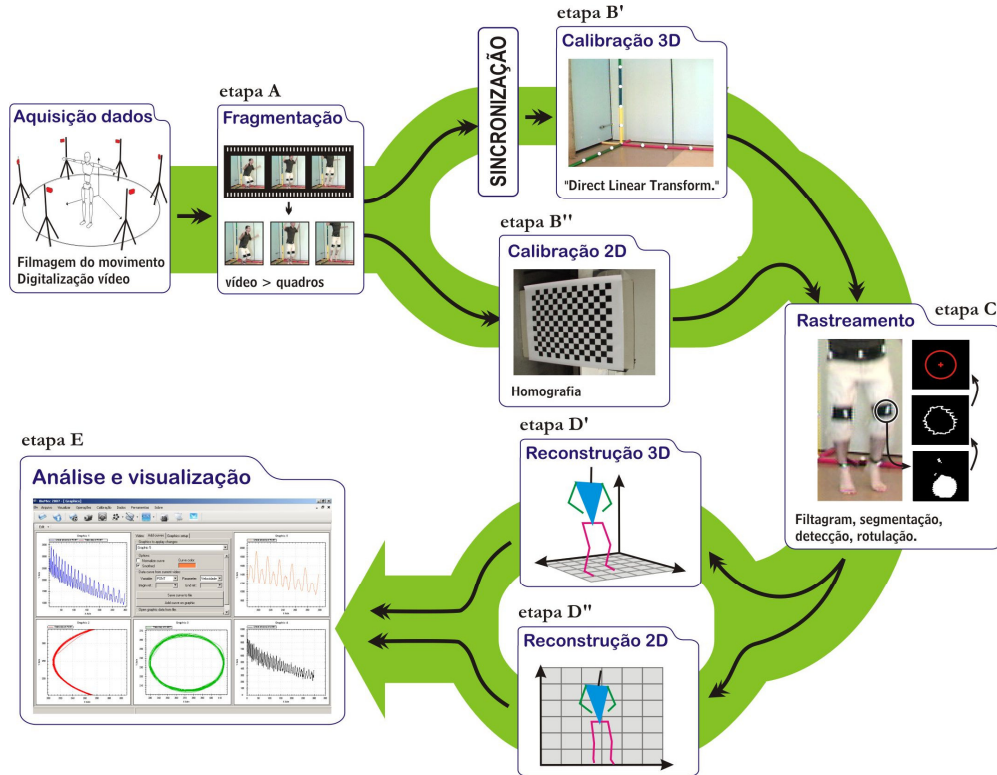


Figura 4.2 - Diagrama ilustrando as principais etapas de processamento de vídeo utilizadas na reconstrução 2D ou 3D do movimento.

No caso da reconstrução 2D é necessário apenas uma câmera. O vídeo gerado por esta câmera passará por uma seqüência de etapas computacionais que são ilustradas na Figura 4.2 e correspondem às etapas A, B'', C, D'' e E do diagrama. Sob o ponto de vista do processamento computacional, a reconstrução 2D difere da 3D na utilização de apenas uma câmera de vídeo e no uso da homografia como algoritmo de calibração e reconstrução (a calibração e reconstrução 3D utiliza o DLT). Além disto, a reconstrução 2D não exige a sincronização de vídeo.

Após a calibração 2D ou 3D, os resultados encontrados nesta etapa podem se estender às demais imagens, desde que a posição da câmera não se altere no espaço durante a filmagem garantindo que a matriz de calibração interna e externa não sofram modificações durante a filmagem (Thornton *et al.*, 1998). Realizada a calibragem, cada imagem gerada pelo processo de fragmentação será processada por um conjunto de algoritmos, que são representados como “etapa C” na Figura 4.2. Isto faz com que esta última etapa seja executada tantas vezes quanto o número de imagens fragmentadas.

Na etapa de rastreamento, os marcadores retro-flexíveis fixados ao ator são buscados nas imagens e, depois de encontrados, suas coordenadas são reconstruídas em duas ou três dimensões.

No caso da reconstrução 3D, algumas considerações devem ser feitas. Como a reconstrução tridimensional exige que o movimento seja registrado por pelo menos duas câmeras, cada um dos vídeos gerados por estas câmeras são processados separadamente até a etapa de reconstrução 3D ilustrada na Figura 4.2. Nesta última etapa, os resultados do processamento de cada vídeo feito pelas etapas anteriores à reconstrução serão agrupados e servirão como dados de entrada para o processo de reconstrução. Para facilitar o entendimento, consideraremos o caso de apenas dois vídeos. Nenhuma generalidade será perdida com esta hipótese. Serão atribuídos a estes vídeos a denominação de “vídeo esquerdo” e “vídeo direito” (eles representarão o par estéreo). A Figura 4.3 ilustra com maiores detalhes a idéia da reconstrução 3D. Salienta-se que os vídeos esquerdo e direito são processados em separado em algumas etapas, enquanto que em outras o processamento é conjunto.

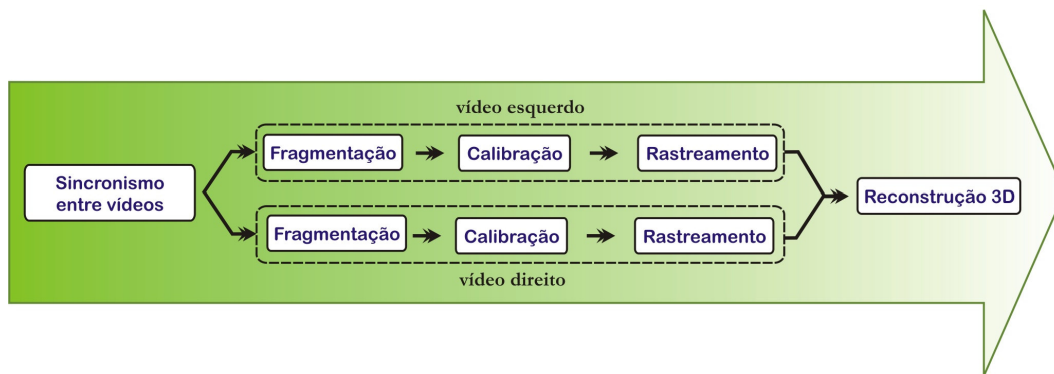


Figura 4.3 - Diagrama ilustrando as principais etapas de processamento de vídeo utilizadas na reconstrução 2D ou 3D do movimento.

4.4 - Aquisição de dados

O processo de aquisição dos dados, exibido no esquema da Figura 4.2, acontece com filmagem do movimento. Para isto, um conjunto de procedimentos são necessários para garantir que o sistema possa reconhecer o movimento no vídeo e rastreá-lo com o maior automatismo possível. Estes procedimentos levam em conta uma série de fatores que são importantes durante a aquisição de dados. Podemos citar como exemplo, os marcadores utilizados, o objeto de calibração, as câmeras e condições ambiente de filmagem. Devido a sua importância, eles são abordados separadamente na forma de tópicos na seqüência.

4.4.1 – Marcadores utilizados

O ator terá seus movimentos representados através de marcadores, que serão fixados nos pontos estratégicos de seu corpo. No caso do movimento humano, estes marcadores são fixados nas principais articulações do corpo.

Os marcadores utilizados nesta pesquisa foram construídos a partir de esferas plásticas revestidas (Abuzzahab *et al.*, 1995) por material retro-flexível à luz infravermelha. A Figura 4.4 ilustra um exemplo de marcador. O material (3M Scotchlite™ 7610) que recobre estes marcadores reflete com mínima dispersão a luz infravermelha incidida sobre sua superfície fazendo com que este marcador tenha contraste destacado na cena. Esta característica facilita o rastreamento automático dos marcadores nas imagens possibilitando o uso de algoritmos de rastreamento menos complexos e onerosos computacionalmente. Marcadores cobertos por tinta de cor visível (ao olho humano) podem também ser usados. No entanto, a busca automática é dificultada já que o contraste entre o marcador de cor visível e a cena geralmente são baixos ou de difícil detecção (Figuroa *et al.*, 2003). Outra característica importante do marcador refere-se ao seu diâmetro que pode variar segundo a aplicação. Em aplicações tradicionais, o diâmetro de um marcador pode variar de 5 mm (marcadores faciais) a 38 mm (marcadores de “corpo inteiro”). A relação entre o diâmetro do marcador, campo de visão da câmera e erro de reconstrução é estudada por Josefsson *et al.* (1996).



Figura 4.4 - Marcador esférico recoberto por fita retro-flexível à luz infravermelha. A imagem deste marcador foi feita por uma câmera insensível à luz infravermelha.

O uso de marcadores fixados à pele introduz artefatos que podem influenciar na estimativa do movimento. Estes artefatos são causados pelo movimento relativo entre a pele e o osso (Hazlewood *et al.*, 1997; Chiari *et al.*, 2005; Croce *et al.*, 2005; Leardini *et al.*, 2005) e podem ser minimizados através da utilização de algum protocolo de fixação de marcadores (Manal *et al.*, 2000; Sholukha *et al.*, 2006). Neste trabalho, a fixação do marcador no ator foi feita por meio de elásticos que envolviam os segmentos do corpo do ator. Conforme ilustrado na Figura 4.5, os marcadores são presos a estes elásticos.



Figura 4.5 - Marcadores fixados à elásticos que irão envolver os principais membros do corpo.

4.4.2 – Objeto de calibração

O objeto de calibração terá como objetivo definir a referência euclidiana no espaço do mundo e permitir a estimação dos parâmetros internos e externos da(s) câmara(s). A Figura 4.6 mostra os três diferentes modelos de objeto de calibração utilizados pelo BioMec.

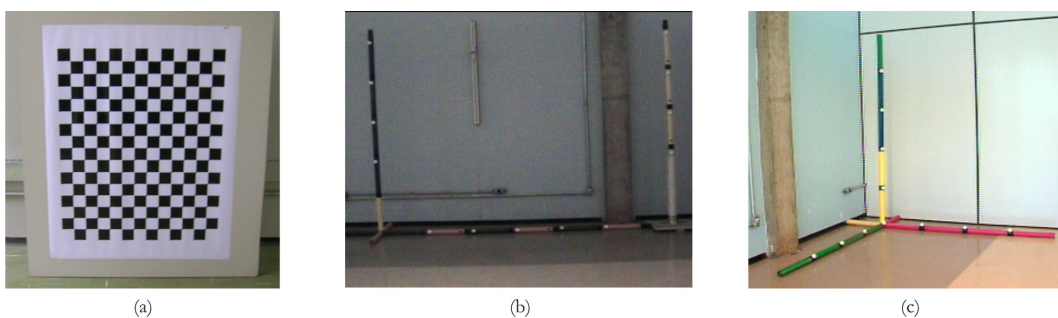


Figura 4.6 - Modelos de objeto de calibração: (a) Modelo utilizado na calibração 2D. Este modelo é mais adequado para movimentos de amplitude menor que um metro. Os pontos de controle são definidos pela intersecção dos quadrados. (b) Modelo utilizado na calibração 2D para movimentos de amplitude maior do que 1 metro. (c) Modelo utilizado na calibração 3D. Nos dois últimos modelos, os pontos de controle são definidos por esferas brancas dispostas sobre a superfície do objeto de calibração.

Com o início da filmagem, pelo menos uma imagem deve ser feita do objeto de calibração. Feito isto, ele pode ser retirado da cena de modo a permitir a movimentação natural do ator dentro do volume (ou área) definido pela sua estrutura geométrica. Depois de filmado o movimento, é extraído do vídeo a imagem do objeto de calibração registrado no início da filmagem. Esta imagem extraída será utilizada pelo processo de calibração.

4.4.3 – Câmeras de vídeo e condições ambiente

Em princípio, o BioMec não apresenta nenhuma restrição quanto ao tipo de câmara. Contudo, alguns requisitos mínimos são altamente desejáveis como, por exemplo, o

controle manual do foco, *shutter*, balanço de cores e um sensor de pelo menos um mega pixel.

Para determinar o tipo de câmera e suas características, deve-se levar em conta a natureza do movimento a ser registrado. Movimentos rápidos exigem câmeras com alta frequência de amostragem (quadros por segundo) e *shutter* alto. Como ressalta Ambrósio *et al.* (2001), não só as características técnicas das câmeras afetam a precisão e exatidão do sistema; fatores como o posicionamento e número de câmeras têm grande influência sobre os resultados e a eficiência do rastreamento automático dos marcadores. Neste último caso, a eficiência do rastreamento é aumentada quando são utilizadas câmeras sensíveis ao espectro de luz infravermelho. Como a análise qualitativa é importante, espera-se que a câmera também seja sensível à luz visível.

Como a eficiência de reflexão de luz dos marcadores é incrementada para a luz infravermelha, é necessário que se tenha uma fonte de luz desta natureza no ambiente. Geralmente, isto é feito por um conjunto de LEDs infravermelhos de alta potência e grande ângulo de abertura, que possibilitam uma iluminação mais eficiente do ambiente e conseqüentemente maior contraste do marcador na imagem. Em câmeras profissionais este sistema de iluminação é integrado à câmera como demonstra a Figura 4.7.

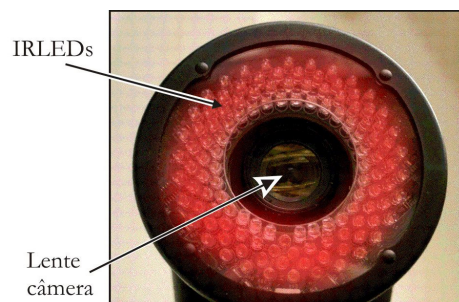


Figura 4.7 - Exemplos de arranjo de LEDs infravermelhos. Estes LEDs são os responsáveis pela iluminação dos marcadores na cena. Adaptada de (URL 1).

É importante que a iluminação visível seja suficiente para identificar os objetos da cena, porém que não seja tão intensa a ponto de diminuir o contraste entre o marcador e a cena. Caso a iluminação seja inadequada e impossibilite o rastreamento automático dos marcadores, o usuário deverá informar manualmente a posição de cada marcador.

4.5 – Fragmentação e sincronização

Depois de filmado e digitalizado, o vídeo deve ser fragmentado em imagens que serão posteriormente processadas uma por uma pelo BioMec. No caso da reconstrução tridimensional, existe um processo anterior à fragmentação. Este processo é o de

sincronismo entre vídeos. Em câmeras profissionais isto é feito na maioria das vezes por cabos que interligam as câmeras e transmitem sinais utilizados para esta finalidade. Isto implica que as câmeras sejam controladas por um dispositivo externo (*genlock*), que garante a inicialização simultânea das câmeras e sua operação na mesma frequência durante toda a aquisição. Este processo de sincronização por *genlock* é também conhecido por “sincronização por *hardware*”. Contudo, este tipo de sincronização só se aplica às câmeras especiais ou profissionais. Neste contexto, algumas soluções alternativas foram desenvolvidas. Estas soluções geralmente utilizam *software* e por isto receberam o nome de “sincronização por *software*”. Podemos citar como exemplo o método proposto por Barrosa *et al.* (2006), onde os autores desenvolvem um sistema que emite um som característico (não audível) no ambiente que é captado pelas câmeras. Este sinal sonoro é posteriormente analisado por um programa de computador, que utilizará a diferença de fase entre os sinais das câmeras para sincronizá-las. Repare que no sincronismo por *software* são os vídeos que sofrem a sincronização diretamente e, não as câmeras.

Geralmente, a sincronização por *software* utiliza alguma informação luminosa presente na cena para sincronizar os vídeos. Esta informação é muitas vezes gerada por um conjunto de LEDs que ascendem de forma sincronizada e alternada. O operador do sistema analisa a configuração de LEDs acessos em determinado intervalo de tempo e a utiliza para sincronizar os demais vídeos. Esta estratégia é a mesma adotada pelo BioMec onde existe uma interface (Figura 4.8) que possibilita a exibição simultânea de dois ou mais vídeos. Na Figura 4.8 é também mostrado um exemplo de informação luminosa utilizada para o sincronismo entre os dois vídeos. Nela, o usuário analisa a intensidade da luz nos dois vídeos e faz a correspondência de iluminação entre eles.

Contudo, o sincronismo por *software* não é na maioria das vezes eficiente. Dependendo da velocidade das câmeras ou do movimento analisado, este método poderá conduzir a grandes erros de reconstrução. Considerando o exemplo hipotético de um atleta que arremessa uma bola a 20m/s e que a trajetória desta bola esteja sendo rastreada por duas câmeras operando a 30 quadros por segundo. Isto quer dizer que o intervalo de tempo entre a aquisição de uma imagem a outra é de 0,033 segundo. Neste período de tempo, a bola percorre 66 cm aproximadamente. Caso exista uma diferença de sincronismo de um quadro, o que é fácil de acontecer, haverá uma diferença de 66 cm na localização da bola entre as duas imagens que representam o par estéreo. Isto ocasionará um grande erro na estimação tridimensional da trajetória da bola, invalidando a reconstrução. Uma

discussão mais detalhada sobre sincronismo na reconstrução tridimensional do movimento é feita em (Russomanno, 2005).

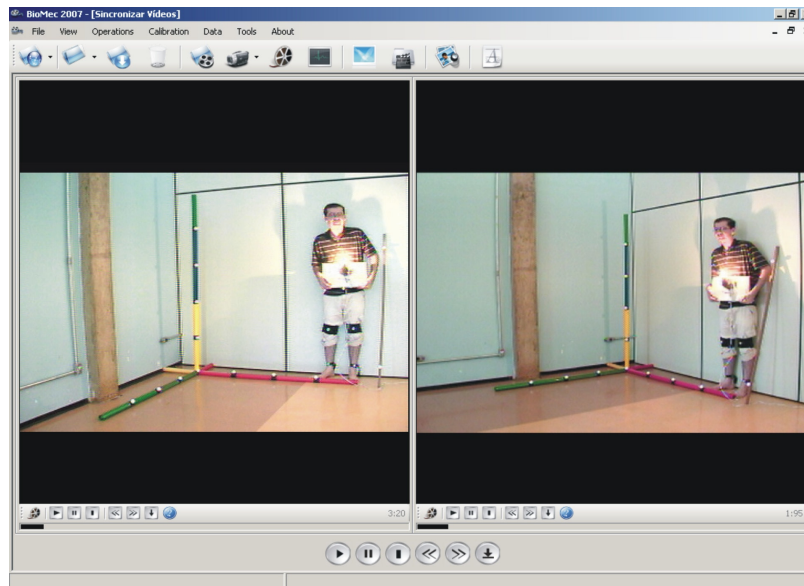


Figura 4.8 - Interface do BioMech ilustrando a sincronização entre dois vídeos. Neste caso, uma lâmpada incandescente foi utilizada para fornecer informação luminosa utilizada para sincronizar os vídeos.

Depois de sincronizado o vídeo, ele deverá ser fragmentado em imagens que serão salvas sequencialmente em um diretório. A Figura 4.9 ilustra a interface utilizada para este propósito.

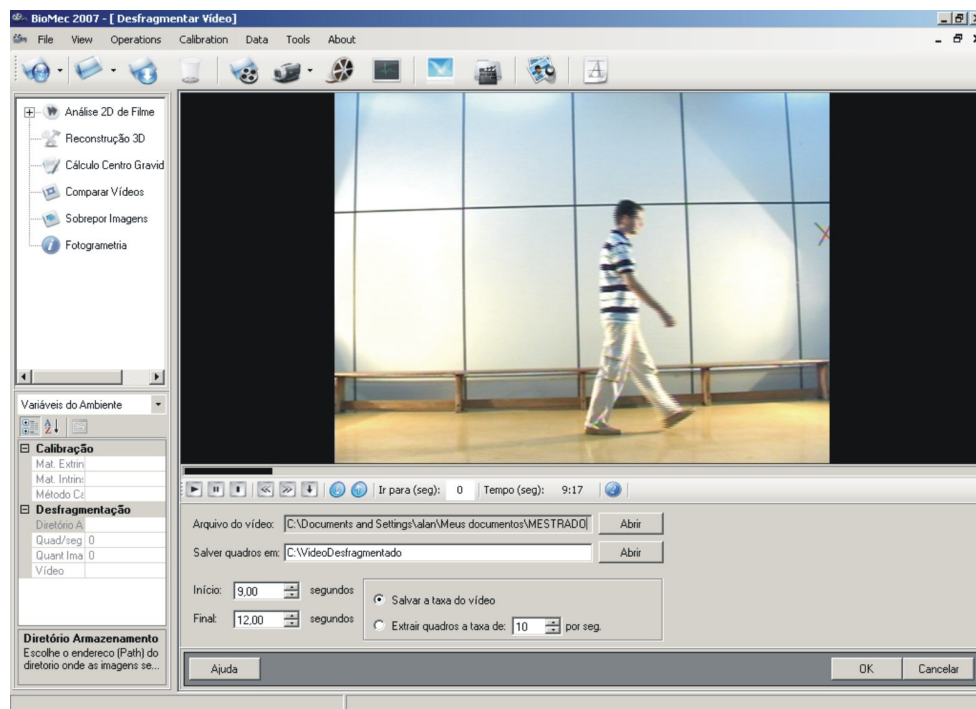


Figura 4.9 - Interface do BioMech responsável pela fragmentação de vídeos.

4.6 – Calibração

O processo de calibração, fundamental na análise de imagens e reconstrução do movimento, possibilita a reconstrução das coordenadas no espaço 2D ou 3D. Como o BioMech possibilita os dois tipos de reconstrução, dois diferentes tipos de algoritmos de calibração foram utilizados: (1) homografia, utilizada para reconstruções 2D e; (2) *Direct Linear Transformation* (DLT), utilizado na reconstrução 3D. Ambos foram discutidos no capítulo anterior.

O processo de calibração 2D, utilizando homografia, estipula o uso de um objeto de calibração de geometria espacial bidimensional. A Figura 4.6 ilustrou em seus itens (a) e (b) dois exemplo de objeto de calibração com esta natureza. Dependendo das condições da imagem, os pontos de controle destes dois modelos de objeto de calibração podem ser encontrados automaticamente pelo sistema. A Figura 4.10 (a) mostra a detecção automática dos pontos de controle de um objeto de calibração padrão “xadrez”. Neste caso, o usuário apenas forneceu a quantidade de quadrados por linha e coluna, além do tamanho real destes (em centímetros). Já a imagem do objeto de calibração ilustrado na Figura 4.10 (b) não permitiu a detecção automática dos pontos de controle. Quando for este o caso, o usuário deve selecionar manualmente na imagem cada ponto de controle e fornecer suas respectivas coordenadas no espaço do mundo, obtidas por algum instrumento de medida direta como a régua, por exemplo.

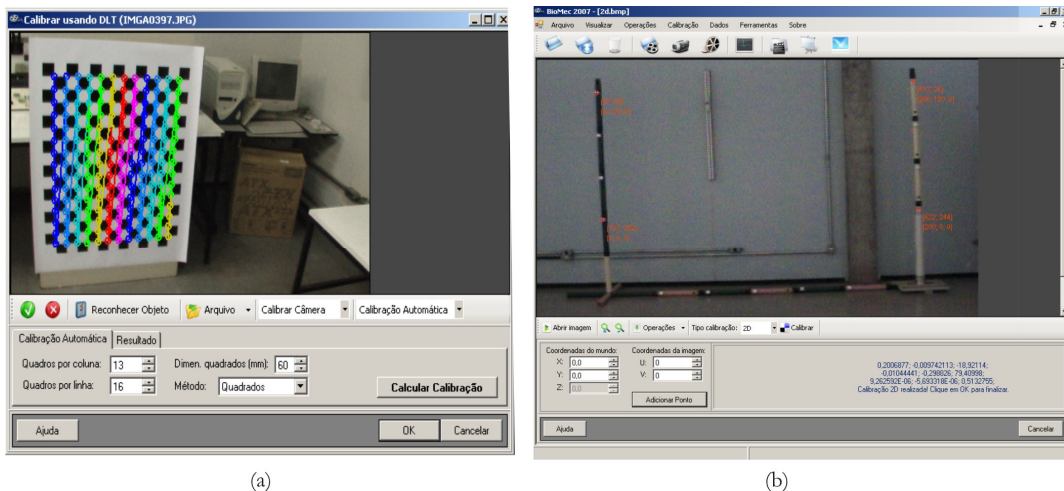


Figura 4.10 - Interfaces ilustrando a calibração bidimensional. (a) Detecção automática dos pontos de controle e (b) inserção manual das coordenadas dos pontos de controle.

A detecção automática dos pontos de controle do objeto de calibração ilustrado na Figura 4.10 (a) segue um padrão específico. O algoritmo descrito na seqüência revela este padrão.

(i) binarização da imagem e detecção das bordas através do método de Canny (1986);

- (ii) ajustar retas às bordas detectadas no passo anterior;
- (iii) os pontos de interseção entre as retas do passo (ii), determinaram os pontos de controle.

O código fonte responsável por algumas das operações descritas anteriormente foi retirado do pacote de bibliotecas de visão computacional conhecido como OpenCV (<http://www.intel.com/technology/computing/opencv/>). A Figura 4.11 ajuda a entender os três passos descritos anteriormente. O algoritmo encontra as coordenadas de cada ponto de controle na imagem e a partir do tamanho (em centímetros) dos quadros que compõem o objeto de calibração, estima as coordenadas deste ponto de controle no espaço do mundo.

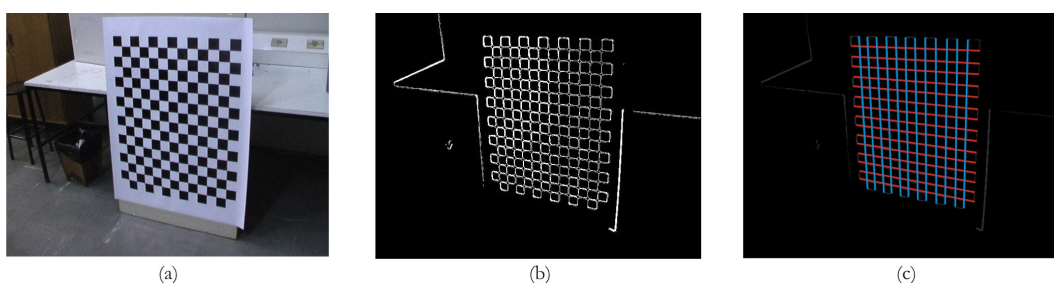


Figura 4.11 - Descrição das etapas realizadas para encontrar automaticamente os pontos de controle do objeto de calibração. (a) Objeto de calibração utilizado na detecção automática dos pontos de controle. (b) binarização e detecção de bordas do objeto de calibração ilustrado no item (a). (c) Retas ajustadas às bordas detectadas. A intersecção das retas em (c) irá determinar os pontos de controle do objeto de calibração.

Já na calibração tridimensional é requerido um objeto de calibração tridimensional análogo ao mostrado na Figura 4.12. A partir de sua imagem, o sistema tenta identificar os pontos de controle. Caso isto não seja possível, o usuário deverá fazer isto manualmente. Depois de selecionados, o usuário deve informar ao programa as coordenadas tridimensionais de cada um dos pontos de controle. Após inseridas estas coordenadas, o programa está apto a calcular os valores de calibração tridimensional.

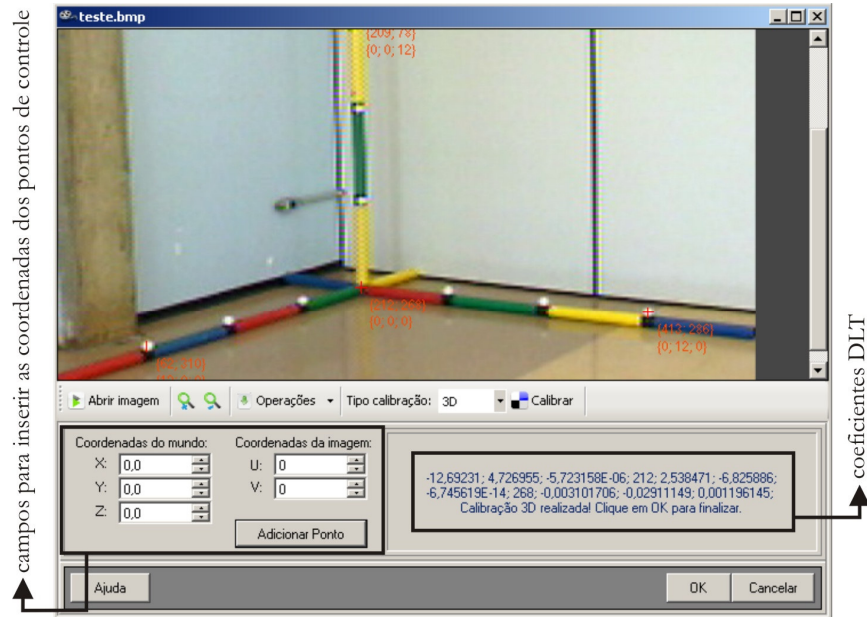


Figura 4.12 - Interface utilizada para calibração 3D utilizando o DLT.

4.7 – Inicialização

A etapa de inicialização faz parte do processo de rastreamento e é responsável por coletar informações do usuário. Estas informações irão ajudar no rastreamento automático dos marcadores, definição de alguns parâmetros do modelo antropométrico e a forma como o movimento será representado.

4.7.1 – Modelo antropométrico

Para representar o movimento humano e algumas de suas propriedades biomecânicas, o BioMec define três modelos antropométricos básicos do corpo humano. Neste sentido, a antropometria irá desempenhar o papel de definir algumas características e propriedades do aparelho locomotor, como as dimensões de segmentos corporais, distribuição de massa, posições articulares, centro de massa e de gravidade dos segmentos etc. Segundo Amadio & Duarte (1996), a definição de um modelo antropométrico e seus parâmetros contribuem para a formação de um modelo biomecânico e para representação do corpo humano e seu movimento. No contexto desta pesquisa, os modelos antropométricos foram utilizados para definir as articulações do corpo humano e associar a elas valores cinemáticos. Eles também foram utilizados para calcular o centro de gravidade do corpo.

O modelo antropométrico permite uma representação físico-geométrica do corpo humano que pode variar segundo o número de segmentos adotados. Algumas vezes, esta

representação recebe o nome de *stickman* (Guo *et al.*, 1994). É importante ressaltar que este último refere-se apenas à representação físico-geométrica dada ao corpo e, na maioria das vezes, não é considerado um modelo antropométrico por si só. Esta representação físico-geométrica é determinada pelo posicionamento dos marcador no corpo humano. A Figura 4.13 mostra os exemplos de posicionamento e rótulos adotados pelos modelos antropométricos presentes no BioMec.

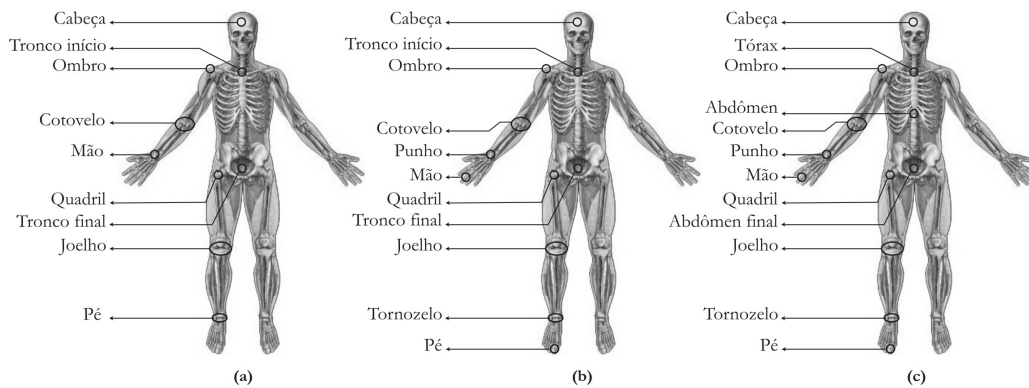


Figura 4.13 - Representação dos pontos anatômicos definidos pelos três modelos antropométricos do BioMec. As figuras ilustram a posição “média” dos marcadores e os rótulos textuais associados a eles. (a) Modelo de 10 segmentos; (b) 14 segmentos e (c) 15 segmentos. Os modelos ilustrados diferem quanto ao número de segmentos utilizados na representação do corpo humano, posição e nome dos rótulos. Adaptado de Ambrósio *et al.* (2001).

Estes modelos são definidos a partir do estudo das características e propriedades do aparelho locomotor humano, ponto de equilíbrio e outras. Estas características são definidas através de investigações antropométricas em cadáveres que tiveram seus segmentos desmembrados. Neste contexto, pode-se citar o trabalho clássico de Dempster, (1955). Baseado nas tabelas deste autor foram atribuídos aos modelos antropométricos do BioMec os parâmetros listados nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Contribuição percentual de cada segmento na massa do corpo.

| Membro | Proporção em relação à massa total |
|------------|------------------------------------|
| Cabeça | 8,2 % |
| Tórax | 23,2 % |
| Abdômen | 27,4 % |
| Braço | 2,7 % |
| Ante-braço | 1,5 % |
| Mão | 0,6 % |
| Coxa | 9,9 % |
| Perna | 4,5 % |
| Pé | 1,4 % |

Tabela 4.2 - Localização do centro de gravidade das partes em valores percentuais. A referência é a porção proximal do segmento.

| Membro | Localização do centro de gravidade das partes | | |
|------------|---|---------------------|---------------------|
| | Modelo 10 segmentos | Modelo 14 segmentos | Modelo 15 segmentos |
| Cabeça | 56,7 % | 56,7 % | 56,7 % |
| Tórax | 60,4 % | 60,4 % | 62,7 % |
| Abdômen | | | 59,9 % |
| Braço | 43,6 % | 43,6 % | 43,6 % |
| Ante-braço | 67,7 % | 43,0 % | 43,0 % |
| Mão | | 50,6 % | 50,6 % |
| Coxa | 43,3 % | 43,3 % | 43,3 % |
| Perna | 43,40 % | 24,9 % | 24,9 % |
| Pé | | 43,3 % | 43,3 % |

A Figura 4.14 exibe a interface do programa que define os valores citados nas duas tabelas anteriores. Todos eles podem ser editados e salvos pelo usuário.



Figura 4.14 - Interface do BioMec onde são apresentadas alguns das variáveis pré-definidas dos modelos antropométricos.

Para calcular o centro de gravidade (CG) do corpo, os seguintes procedimentos foram implementados:

- (i) A partir da localização dos marcadores que representam as articulações do corpo, localizar o CG radial de cada seguimento de acordo com a Tabela 4.2;
- (ii) determinar o valor da massa de cada segmento (ΔG) segundo o valor de peso do indivíduo fornecido pelo usuário e a Tabela 4.1. A seguir, o valor de massa de cada segmento deve ser normalizado;
- (iii) a partir das coordenadas X e Y dos CG's radiais de cada segmento determinados no passo (i), multiplicar a massa de cada segmento pela coordenada X e Y, gerando respectivamente os valores $X\Delta G$ e $Y\Delta G$ para cada segmento;
- (iv) fazer o somatório $X\Delta G$ de todos os segmentos. O mesmo deve ser feito para $Y\Delta G$;

(v) dividir o somatório de $X\Delta G$ – determinado no passo (iv) - pela massa normalizada. O valor final será a coordenada X do centro de gravidade do corpo. O mesmo procedimento deve ser repetido para $Y\Delta G$, a fim de determinar a coordenada Y do centro de gravidade do corpo.

4.7.2 - Definição dos marcadores e dos algoritmos utilizados no rastreamento

Deve ser atribuído a cada marcador uma identificação única, que permita ao sistema fazer uma associação ao modelo biomecânico. Esta identificação é feita por meio de um “rótulo” textual. No caso do usuário optar por algum dos três modelos antropométricos pré-definidos, uma lista de rótulos ficará disponível ao usuário. A Figura 4.13 ilustrou estes rótulos textuais pré-definidos.

A definição dos rótulos dos marcadores acontece quando o primeiro quadro de vídeo fragmentado é exibido ao usuário (Figura 4.15). A partir desta imagem, o usuário faz estas inicializações e algumas outras que auxiliarão o programa executar uma busca automática dos marcadores nos quadros subsequentes. Esta etapa também permite a definição da área de processamento, os tipos de algoritmos utilizados no rastreamento dos marcadores e algumas constantes e limites de tolerância destes algoritmos.

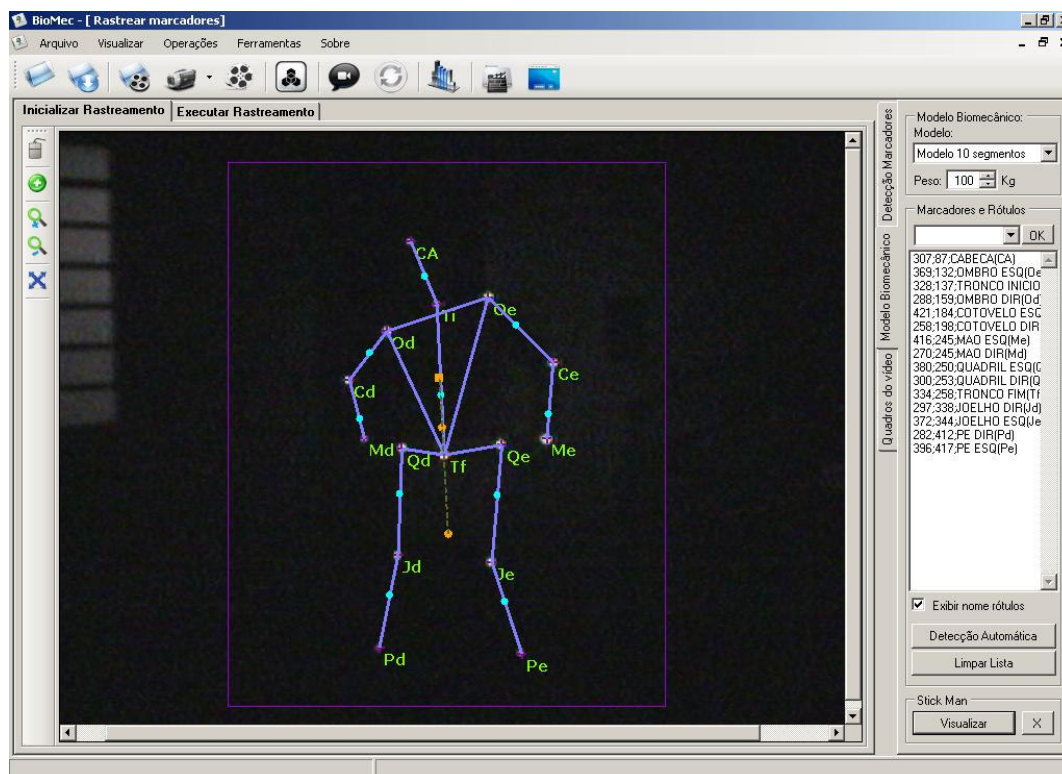


Figura 4. 15 - Interface do BioMec onde são definidos alguns valores padrões aos modelos antropométricos disponíveis no sistema.

4.7.3 - Representação do movimento

Para analisar o movimento humano, algumas suposições devem ser feitas. A mais básica delas é que os segmentos do corpo podem ser modelados como corpos rígidos (e não-deformáveis) e que a posição e movimentação do esqueleto humano podem ser estimadas por meio do rastreamento de marcadores fixados à superfície da pele. No entanto, esta suposição é falha quando se leva em conta o movimento relativo entre a pele e o esqueleto, ocasionando um erro na estimação do movimento do sistema esquelético. Pelo fato deste tipo de erro ser inerente à maioria dos SCAMs óptico-eletrônicos, pesquisadores desenvolveram métodos de representação do movimento que minimizem estes erros e são capazes de representar com boa fidelidade os detalhes do movimento. Estes métodos são baseados no uso de protocolos de marcadores e técnicas matemáticas para descrever o movimento (Cappozzo *et al.*, 1995; Ringes & Lasenby, 2004; Park *et al.*, 2005). Especificamente, destaca-se o modelo descrito por Soutas-Little (1998). Este último é muito utilizado para representar a posição e orientação dos segmentos do corpo e sua breve descrição acontece nos próximos parágrafos.

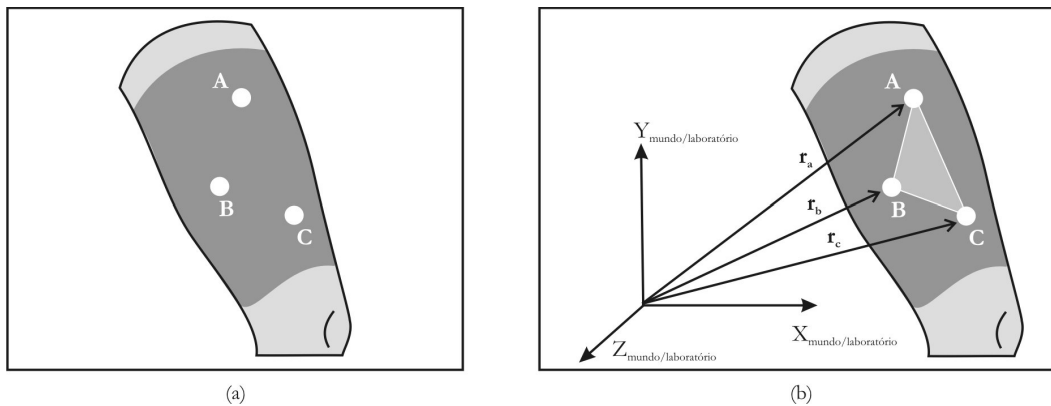


Figura 4.16 - (a) Marcadores definindo um segmento de corpo rígido. (b) Posição dos vetores em relação aos marcadores e ao sistema de coordenadas do mundo definido pelo objeto de calibração.

Utilizando-se três marcadores para representar cada segmento do corpo é possível a partir deste conjunto definir a posição e orientação de cada segmento. Considerando como exemplo a coxa exibida na Figura 4.16 (a), nela são fixados três marcadores não co-lineares. Assumido que as linhas AB, BC e CA não alteram seu tamanho, a posição de cada marcador deverá ser expressa em relação a um sistema de coordenadas presentes no laboratório (Figura 4.16 (b)). A posição destes marcadores pode ser definida na forma vetorial como mostrado na relação abaixo:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}_A &= X_A \hat{\mathbf{i}} + Y_A \hat{\mathbf{j}} + Z_A \hat{\mathbf{k}} \\
 \mathbf{r}_B &= X_B \hat{\mathbf{i}} + Y_B \hat{\mathbf{j}} + Z_B \hat{\mathbf{k}} \\
 \mathbf{r}_C &= X_C \hat{\mathbf{i}} + Y_C \hat{\mathbf{j}} + Z_C \hat{\mathbf{k}}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Onde $\hat{\mathbf{i}}$, $\hat{\mathbf{j}}$ e $\hat{\mathbf{k}}$ são vetores unitários que representam uma base canônica e podem ser definidos segundo o sistema de coordenadas do laboratório. As componentes que determinam a posição de cada vetor são definidas pelas coordenadas dos marcadores. As posições dos três vetores serão usadas para obter o “**sistema de coordenadas segmental**”. Este pode ser imaginado como três linhas mutuamente perpendiculares entre si, ligadas ao segmento do corpo e que tem a função de determinar a orientação e posição do segmento. Cada segmento terá seu próprio sistema de coordenadas segmental como bem ressalta Wu & Cavanagh (1995).

Embora existam diferentes meios para definir o sistema de coordenadas segmental, será assumido que dois dos três marcadores definem um eixo segmental e que os três marcadores formam um plano anatômico, de onde se pode obter os outros dois eixos do sistema de coordenadas do segmento. No caso da Figura 4.19 (a), os marcadores A e C definem o eixo superior da coxa. A posição relativa de um vetor de C a A é designada por $\mathbf{r}_{a/c}$ (A relativo a C) e é obtida subtraindo-se as coordenadas do marcador C das de A.

$$\mathbf{r}_{A/c} = \mathbf{r}_A - \mathbf{r}_C \tag{4.2}$$

O vetor $\mathbf{r}_{a/c}$ irá definir a primeira das três bases canônicas do sistema de coordenadas segmental. Antes disto, ele deve ter seu tamanho normalizado. A equação (4.3) normaliza o vetor $\mathbf{r}_{a/c}$, definindo a primeira base canônica ($\hat{\mathbf{k}}$) do sistema de coordenadas do segmento.

$$\hat{\mathbf{k}} = \frac{\mathbf{r}_{A/c}}{|\mathbf{r}_{A/c}|} \tag{4.3}$$

Para determinar a segunda base canônica do sistema de coordenadas do segmento, calcula-se o vetor $\mathbf{r}_{B/c}$ definido do marcador C até B e representado matematicamente por:

$$\mathbf{r}_{B/c} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_C$$

A partir do produto vetorial (Steinbruch & Winterle, 1995) entre $\mathbf{r}_{B/c}$ e $\mathbf{r}_{A/c}$ é possível obter o segundo eixo de referência ($\hat{\mathbf{j}}$). O produto vetorial, formado por dois vetores pertencentes a um mesmo plano, resulta em um terceiro vetor que é perpendicular

a este plano. Em (4.4) é exibido a equação que permite encontrar o segundo eixo do sistema de coordenadas segmental a partir do produto vetorial.

$$\hat{j} = \frac{\mathbf{r}_{B/C} \times \mathbf{r}_{A/C}}{|\mathbf{r}_{B/C} \times \mathbf{r}_{A/C}|} \quad (4.4)$$

Por fim, o último eixo (\hat{i}) que irá definir o sistema de coordenadas segmental é também obtido por meio da aplicação direta do produto vetorial entre os dois últimos eixos definidos em (4.3) e (4.4). O terceiro eixo \hat{i} pode ser obtido através da expressão (4.5) onde \times representa o produto vetorial.

$$\hat{i} = \hat{j} \times \hat{k} \quad (4.5)$$

Após definidos os três eixos do sistema de coordenadas que representam a orientação do segmento é necessário definir um modo para representar a sua posição no espaço tridimensional. Isto é feito por meio de um vetor \bar{C} (Figura 4.17 (a)) que liga a origem do sistema de referência do mundo com a origem do sistema de coordenadas segmental.

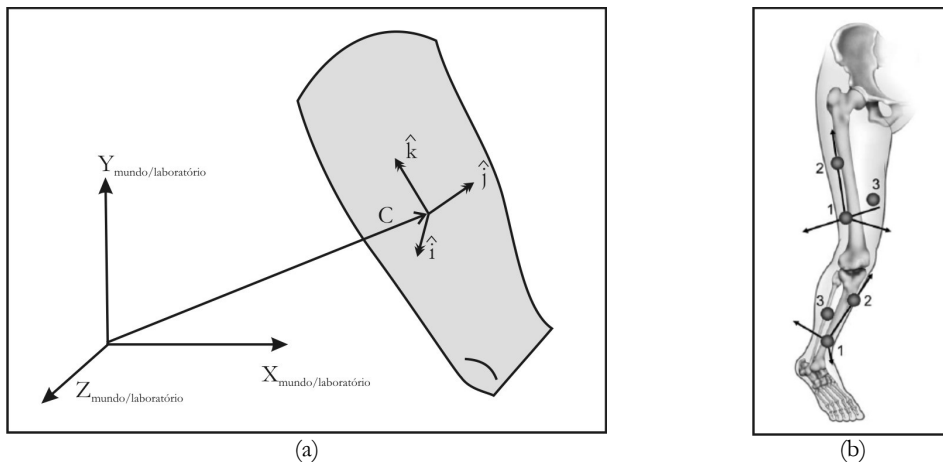


Figura 4.17 - (a) Ilustração da representação da posição e orientação do movimento de uma coxa (segmento): definição da base canônica tridimensional (\hat{i} , \hat{j} , \hat{k}) formada a partir de três marcadores. Esta base canônica define o chamado “sistema de referência segmental” que irá definir a orientação e posição do segmento enquanto que o vetor C define a posição do segmento. (b) Exemplo de dois sistemas de coordenadas segmentais. Figura (b) extraída de (Chiari *et al.*, 2005)

Embora este método de representação do movimento seja muito empregado, ele não é o utilizado pelo BioMec que usa um método mais simples para representar a posição e orientação de cada segmento. O método, utilizado no BioMec, estipula que os marcadores devem ser posicionados nas extremidades do(s) segmento(s) em análise. Embora tenha a vantagem de ser simples, consumir pouca quantidade de marcadores e ser de fácil implementação, este método é muito susceptível a erros de movimento relativo,

além de não ser capaz de representar todos movimentos. Um *review* sobre técnicas de representação da posição e orientação dos segmentos, definição de referências espaciais e representação matemática do movimento podem ser encontradas em Cappozzo *et al.* (2005).

4.8 – Rastreamento

A representação do movimento é feita através dos marcadores. Para determinar sua trajetória, é necessário identificar e rastrear a posição destes na seqüência de imagens extraídas do vídeo para depois, no processo de reconstrução, converter as coordenadas da imagem em coordenadas do movimento no espaço. Neste contexto, o processo de rastreamento (*tracking*) tem como função determinar a informação temporal da posição de cada marcador na cena.

A entrada de dados do processo de rastreamento é a seqüência de imagens fragmentadas e sua saída são as coordenadas do centro dos marcadores presentes em cada imagem. Para facilitar o entendimento deste processo, ele será dividido em etapas que são mostradas no fluxograma da Figura 4.18 e descritas na seqüência.

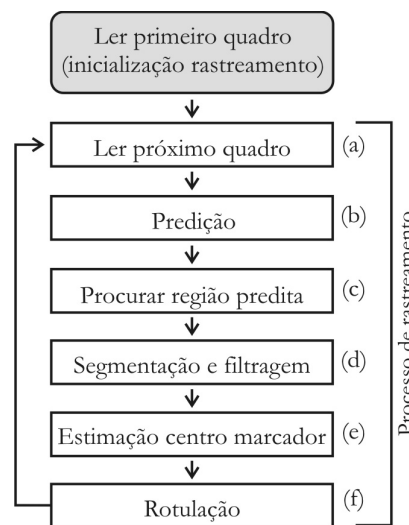


Figura 4.18 - Seqüência de operações para rastrear os marcadores nas imagens fragmentadas do vídeo.

4.8.1 – Leitura do próximo quadro e Predição

Depois de feitas as inicializações pelo usuário, o programa deverá automaticamente buscar os próximos quadros (Figura 4.18 passo (a)) e na seqüência encontrar os marcadores e seus respectivos centros. Para facilitar e reduzir a região de busca na imagem, serão processadas somente as regiões onde a probabilidade de encontrar os marcadores é maior. A definição destas regiões acontece na fase de predição (Figura 4.18 passo (b)). Para

predizer as possíveis posições dos marcadores nos sucessivos quadros, foi usado inferência simples (Herda *et al.*, 2001). A suposição básica deste método é que o deslocamento de um marcador em um quadro até o quadro subsequente é mínimo. Assim, o deslocamento de um determinado marcador de $[f-1]$ até $[f]$ prediz a posição de $[f+1]$. Uma vez predita a região de busca, é definida uma vizinhança de pesquisa em $[f+1]$ centrada na posição predita, na qual espera-se efetivamente encontrar o marcador.

Uma técnica muito utilizada na predição da posição dos marcadores em SCAMs de grande porte, apesar de não ser utilizada neste trabalho, envolve o uso de filtros de Kalman. Estes filtros são tidos como excelentes métodos de predição de trajetórias (Figueroa *et al.*, 2003), pois levam em conta uma série de fatores como, por exemplo, a velocidade do movimento. No caso onde há oclusão dos marcadores, eles são utilizados para estimar a posição do marcador evitando que o usuário tenha que intervir no sistema.

4.8.2 – Segmentação e filtragem

Após definida a área de pesquisa na etapa de predição, começa a fase de segmentação e filtragem (Figura 4.18 passo (d)). Nesta, a segmentação atuará com o intuito de extrair as regiões da imagem correspondentes aos marcadores da cena original. Este processo começa com a isolamento e supressão dos objetos da cena que não são de interesse. Como ressaltam Moeslund *et al.*, (2006), muitos SCAMs tem feito isto usando algoritmos de subtração de fundo como o MoG (*mixture of Gaussians*) (Stauffer & Grimson, 1998). No caso do BioMec, a segmentação começa com a binarização simples (*thresholding*) que tira vantagem do grande contraste dos marcadores, para identificar as regiões na imagem onde estes se encontram (as demais regiões são suprimidas). Basicamente, o processo de binarização atribui o valor 0 ou 1 a cada pixel da imagem, segundo a sua intensidade de cor e um limiar T_h definido pelo usuário no processo de inicialização. Os pixels que têm intensidade de cor maior ou igual a T_h , receberão o valor 1 que equivale a cor branca. Já os pixels que tem valor menor que T_h , receberão o valor 0 que equivale a cor preta. A Figura 4.19 ilustra o exemplo de uma imagem binarizada segundo diferentes valores de limiar (T_h).

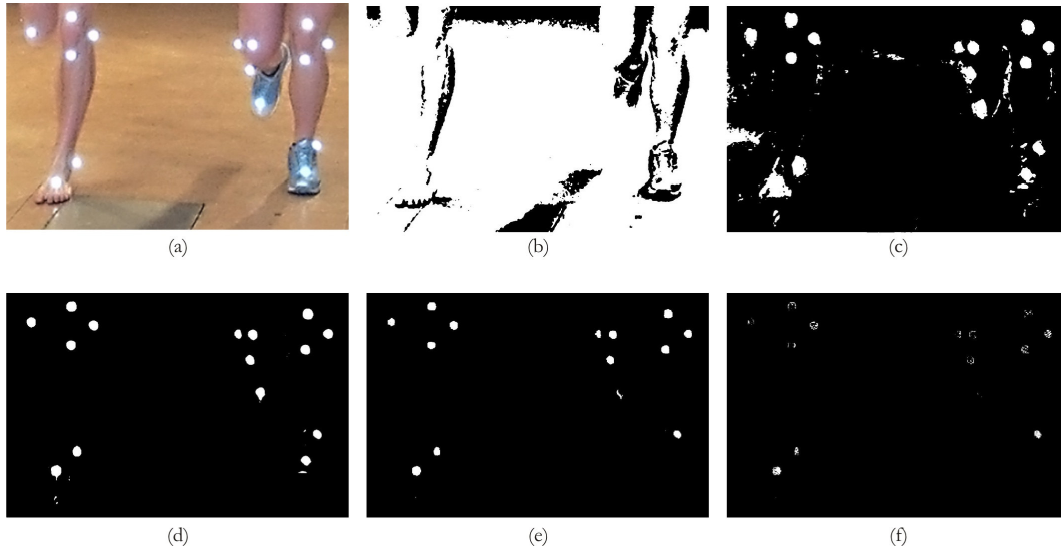


Figura 4.19 - Binarização de uma imagem: (a) imagem original; (b) imagem original binarizada com limiar 128; (c) imagem original binarizada com valor 150; (d) imagem original binarizada com valor 230; (e) imagem original binarizada com limiar 240 e (f) imagem original binarizada com limiar 250. Repare que em alguns casos a imagem fica muito ruidosa e em outros alguns marcadores desaparecem.

Binarizada a imagem, um filtro baseado em operações morfológicas de dilatação e erosão é aplicado para retirar ruídos da imagem. A definição destes dois operadores morfológicos é feita em Gonzalez & Woods (2002). Para ilustrar os efeitos práticos de uma seqüência de operações de erosão e dilatação em uma imagem, um exemplo hipotético de filtragem é feito na Figura 4.20. Neste exemplo, os ruídos próximos à figura de um marcador são suprimidos através de uma seqüência ordenada de operações de dilatação e erosão.

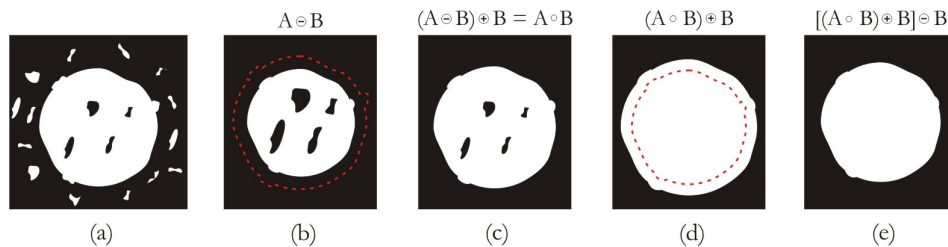


Figura 4.20 - Filtragem morfológica feita para remoção de ruídos na imagem binarizada de um marcador: (a) imagem original com ruído; (b) imagem original erodida; (c) erosão e dilatação da imagem original, (d) dilatação da imagem do item (c) e (e) resultado final.

Depois de filtrada a imagem, o algoritmo Blob (Lindeberg, 1993) extrai cada marcador da imagem filtrada agrupando os pixels que representam um mesmo marcador em outra imagem separada. Em termos práticos, isto é feito analisando-se a conexão entre os pixels utilizando o critério “vizinhança de 8” (Gonzalez & Woods, 2002). Este critério estipula que uma máscara 3x3 varre cada pixel da imagem e a cada deslocamento da

máscara na imagem, uma correlação é feita. No caso de um pixel apresentar uma “vizinhança de 8”, a correlação naquele ponto é 8. Aqueles pixels que satisfizerem a condição de vizinhança, serão extraídos da imagem e reagrupados em uma outra nova imagem que irá representar a forma de um determinado marcador. Para cada marcador presente na imagem filtrada, será gerada uma outra imagem contendo somente um único marcador. A Figura 4.21 (a) e (b) ilustra dois modelos de máscara e um exemplo de segmentação.

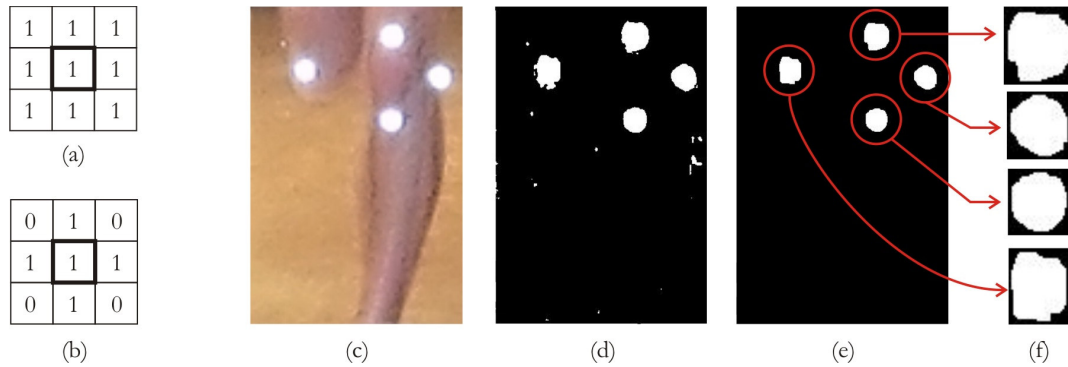


Figura 4.21 - (a) Matriz binária (máscara) 3x3 responsável pela: (a) análise de vizinha de oito e de (b) quatro. (c) Imagem utilizada para ilustrar um exemplo de segmentação de marcadores: (d) imagem original binarizada; (e) remoção dos ruídos através de uma seqüência de operações de erosão e dilatação da imagem binarizada; e (f) quatro imagens geradas pelo processo de segmentação (cada imagem representa um marcador).

4.8.3 – Estimação do centro do marcador

Depois de extraídos os marcadores do quadro corrente, é necessário estimar as coordenadas do centro de cada um deles como definido no passo (e) da Figura 4.18. A determinação deste centro é importante porque na reconstrução do movimento, o marcador será representado pelas coordenadas de seu centro.

A determinação do centro do marcador é feita através dos pixels que compõem a sua borda na imagem. Esta borda pode ser conhecida a partir da subtração da imagem dilatada do marcador pela imagem erodida do mesmo. O resultado desta subtração resultará em uma outra imagem contendo somente as bordas do marcador. A Figura 4.22 ilustra o modo como é definida a borda de um marcador a partir da subtração de imagens.

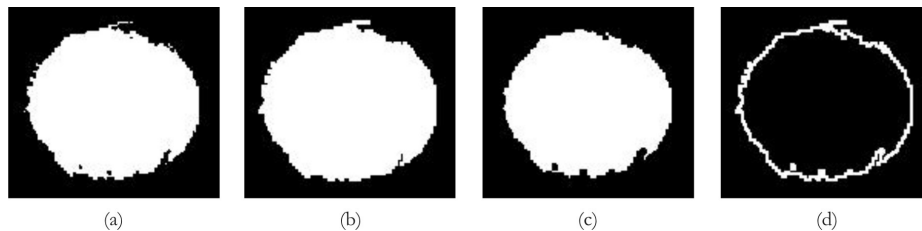


Figura 4.22 - (a) Imagem binarizada de um marcador. (b) Imagem dilatada. (c) Imagem erodida. (d) Resultado da subtração da imagem dilatada pela imagem erodida resultando nas bordas do marcador.

Para possibilitar o uso do sistema em diferentes condições de ambientes e de qualidade de câmeras, o BioMec utiliza três tipos de algoritmos para detectar o centro dos marcadores. São eles: (1) média aritmética das bordas, (2) método dos mínimos quadrados e (3) ajuste de círculo (*circle fit*). Durante a descrição destes algoritmos, o centro de um marcador será representado como (p, q) e com n indicando o número de pixels da borda. As coordenadas dos pixels da borda serão representadas como (x_i, y_i) para $i = 1 \dots n$.

A técnica baseada na média aritmética é a mais simples e rápida. Ela é utilizada em ambientes com iluminação adequada, controlada e com imagens de boa qualidade e resolução. Isto faz com que as bordas do marcador sejam regulares e uniformes (pouco ruído). Para imagens nítidas e sem deformação, este método apresenta resultados similares aos alcançados pelos outros métodos. O seu cálculo é dado pela relação seguinte:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad e \quad q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

O segundo algoritmo emprega o método dos mínimos quadrados para detecção de círculos (Chernov & Lesort, 2005). Esta opção é voltada para imagens com ruído, mas que mantiveram a iluminação constante e uniforme. Este método tem por objetivo encontrar, por aproximação, o melhor valor de centro para a imagem. Este valor pode ser alcançado pela minimização da função erro dada em (4.6).

$$E = \sum_{i=1}^n [r_i - r]^2$$

onde

$$r_i = \sqrt{(x_i - p)^2 + (y_i - q)^2}$$

Estimando a derivada parcial de (4.6) e igualando o resultado à zero, são obtidas as seguintes relações:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + r \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial p}$$

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i + r \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial q}$$

onde

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

Isto conduz às seguintes expressões de iterações, onde o valor k representa o índice da iteração.

$$r^{(k+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^{(k)}$$

$$\begin{aligned} p^{(k+1)} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \left\{ \frac{r^{(k+1)}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p^{(k)} - x_i}{r_i} \right\} \\ b^{(k+1)} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i + \left\{ \frac{r^{(k+1)}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{q^{(k)} - y_i}{r_i} \right\} \end{aligned}$$

Os valores de p e q são atualizados até que comecem a convergir.

O terceiro método para estimação do centro dos marcadores, recebe o nome de RCD (*Random Circle Detection*) (Chen & Chung, 2001). Pode ser considerado adequado para imagens ruidosas adquiridas em ambientes de intensidade luminosa variável e não uniforme ou feitas com câmeras de baixa qualidade. Apresenta a desvantagem de ser lento em relação aos outros dois algoritmos citados anteriormente.

A idéia básica do RCD é selecionar aleatoriamente três pixels da borda (s_1, s_2 e s_3) que irão determinar um círculo. Para convergência rápida da solução, a distância entre eles deve ser maior que um limiar T_d . A partir da equação do círculo temos:

$$\begin{aligned} (x - p)^2 + (y - q)^2 &= r^2 \\ 2xp + 2yq + d &= x^2 + y^2 \end{aligned}$$

onde

$$d = r^2 - p^2 - q^2$$

Como o círculo deverá passar pelos três pixels selecionados, as seguintes formulações são feitas:

$$\begin{aligned} 2x_1 p_{123} + 2y_1 q_{123} + d_{123} &= x_1^2 + y_1^2 \\ 2x_2 p_{123} + 2y_2 q_{123} + d_{123} &= x_2^2 + y_2^2 \\ 2x_3 p_{123} + 2y_3 q_{123} + d_{123} &= x_3^2 + y_3^2 \end{aligned}$$

Aqui, p_{123} e q_{123} representam as coordenadas do centro definido pelos pixels s_1, s_2 e s_3 selecionados. Representando as três equações anteriores na forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ 2x_3 & 2y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{123} \\ q_{123} \\ d_{123} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix}$$

Aplicando a eliminação Gaussiana e a regra de Cramer, o centro (p_{123}, q_{123}) pode ser dado por:

$$p_{123} = \frac{\begin{vmatrix} x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_2 - y_1) \\ x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{4((x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1))} \quad (4.7)$$

e

$$q_{123} = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ 2(x_3 - x_1) & x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) \end{vmatrix}}{4((x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1))} \quad (4.8)$$

Depois de obtido o centro (p_{123}, q_{123}), o raio é calculado pela relação:

$$r_{123} = \sqrt{(x_i - p_{123})^2 + (y_i - q_{123})^2} \quad (4.9)$$

Os valores encontrados em (4.7), (4.8) e (4.9) são determinados somente pelos três pixels selecionados. É necessário testar se estes valores são adequados para os outros pixels da borda que não foram selecionados. Para isto, são analisados todos n pixels da borda e calculada a distância de cada um deles até o ponto (p_{123}, q_{123}) . Todos pixels que tiveram este valor de distância próxima à r_{123} , segundo um limite de tolerância T_r (expresso em percentagem), uma variável V é incrementada. Assim, V representa a quantidade de pixels da borda que tem um raio próximo a r_{123} . Isto significa que quanto maior o valor de V , melhor é a estimativa do centro do círculo e de seu raio. Contudo, outros valores de centro e raio devem ser também estimados de modo a encontrar o melhor valor de centro e raio. Isto é feito sorteando-se novamente outros três pixels e calculando os novos valores para (p_{123}, q_{123}) , r_{123} e V . Este processo é repetido pelo menos n vezes e em cada iteração (sorteio) os valores de (p_{123}, q_{123}) , r_{123} e V são armazenados. Ao final das iterações, o valor de (p, q) e r será para aquela iteração que apresentou maior valor de V . Os valores de T_d e T_r dependem da qualidade da imagem e aplicação e são definidos pelo usuário no processo de inicialização do sistema. Os valores padrões estabelecidos foram:

T_d : 30% largura da imagem do marcador;

T_r : $0,9 \cdot r_{123} \leq T_r \leq 1,1 \cdot r_{123}$.

O algoritmo RCD é resumido a seguir:

- (i) atribua valores para T_d e T_r .
- (ii) selecione aleatoriamente três pixels da borda (s_1, s_2 e s_3) até que a distância entre eles seja igual ou maior que T_d .
- (iii) utilizando as equações (4.7), (4.8) e (4.9), calcule os valores de centro e raio para os pixels selecionados.
- (iv) atualize o valor de T_r segundo o raio encontrado. Calcule a distância de cada pixel da borda até o valor de centro encontrado em (iii). Se para cada pixel a distância for próxima ao valor do raio encontrado em (iii), segundo T_r , incremente a variável V . Armazene os valores de centro, raio e V encontrados para cada iteração.
- (v) repita o processo pelo menos n vezes a partir do passo (ii).
- (vi) O valor do centro e raio escolhido será daquela iteração que apresentou o maior valor de V .

A Figura 4.26 exibe alguns exemplos de detecção de marcadores.

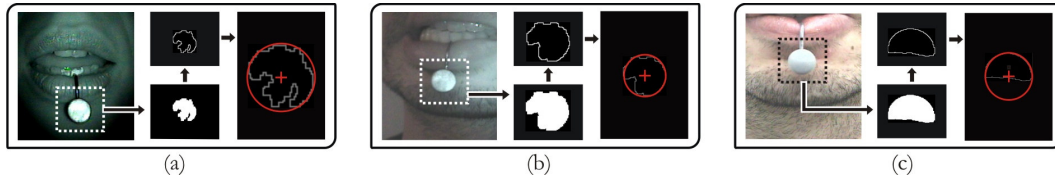


Figura 4.23 - Detecção do centro de um marcador bucal (11 mm de diâmetro) em três diferentes cenários: (a) imagem de espectro infravermelho com limiar de binarização inadequado; (b) imagem com espectro visível e infravermelho corrompida por iluminação inadequada e (c) imagem do espectro visível com iluminação não uniforme. Em todos os casos os centros foram estimados corretamente.

4.8.4 – Rotulação

Como última etapa do processo de rastreamento, tem-se a rotulação dos marcadores (Figura 4.18 etapa (f)). Esta etapa é requerida quando existe a presença de dois ou mais marcadores presentes simultaneamente nas imagens tornando necessário o uso de rótulos que atribuam a cada um destes marcadores, uma identificação única ao longo da seqüência de imagens. Esta atribuição é feita comparando-se as coordenadas dos marcadores do quadro corrente $[f]$ com os marcadores do quadro anterior $[f-1]$ e avaliando as variações das coordenadas. Os rótulos do primeiro quadro são inseridos manualmente pelo usuário na etapa de inicialização do rastreamento (Figura 4.18).

4.9 – Reconstrução e filtragem

Após o processo de rastreamento, o programa possui as coordenadas de todos os marcadores. No entanto, estas coordenadas estão no sistema de referência da imagem (dado em pixels) e não são as coordenadas do movimento realizado no espaço do mundo real. Para realizar esta transformação de espaço, é necessário “reconstruir” as coordenadas de cada marcador. Este processo de reconstrução está intimamente ligado ao processo de calibração de câmera, pois é nesta primeira que os dados obtidos na calibração são utilizados.

Na reconstrução 2D, ilustrada como etapa D" da Figura 4.2, as coordenadas (u,v) de um determinado marcador são multiplicadas pela matriz H (calculada pelo algoritmo de homografia) resultando nas coordenadas (X, Y) do movimento realizado no espaço do mundo real. Este cálculo havia sido demonstrado no capítulo 3 na equação (3.26) e agora é novamente exibido em (4.10).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Já o processo de reconstrução tridimensional não é tão direto quanto o bidimensional, pois exige alguma interação com usuário. Isto porque são necessários pelo

menos dois vídeos do movimento. Até esta fase, o usuário deverá ter rastreado cada vídeo separadamente e depois disto feito, salvar estas informações oriundas do processo de rastreamento em arquivo. Após todos os vídeos rastreados, os arquivos salvos contendo informações da calibração e do rastreamento devem ser fornecidos ao processo de reconstrução tridimensional.

Como já mencionado anteriormente, para que a reconstrução tridimensional de um ponto qualquer seja possível, é necessário que ele tenha sido representado por k câmeras ($k \geq 2$). Além disto, é preciso conhecer os onze coeficientes DLT de cada câmera ($L_1^{(k)}, \dots, L_{11}^{(k)}$) e as coordenadas do centro do marcador em questão nas k imagens ($u^{(k)}, v^{(k)}$). Como estes dados foram obtidos no processo de calibração e rastreamento respectivamente, basta reproduzir a equação (4.11) com seus valores.

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - u^{(1)}L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - u^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - u^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - v^{(1)}L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - v^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - v^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_1^{(2)} - u^{(2)}L_9^{(2)} & L_2^{(2)} - u^{(2)}L_{10}^{(2)} & L_3^{(2)} - u^{(2)}L_{11}^{(2)} \\ L_5^{(2)} - v^{(2)}L_9^{(2)} & L_6^{(2)} - v^{(2)}L_{10}^{(2)} & L_7^{(2)} - v^{(2)}L_{11}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(k)} - u^{(k)}L_9^{(k)} & L_2^{(k)} - u^{(k)}L_{10}^{(k)} & L_3^{(k)} - u^{(k)}L_{11}^{(k)} \\ L_5^{(k)} - v^{(k)}L_9^{(k)} & L_6^{(k)} - v^{(k)}L_{10}^{(k)} & L_7^{(k)} - v^{(k)}L_{11}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^{(1)} - L_4^{(1)} \\ v^{(1)} - L_8^{(1)} \\ u^{(2)} - L_4^{(2)} \\ v^{(2)} - L_8^{(2)} \\ \vdots \\ u^{(k)} - L_4^{(k)} \\ v^{(k)} - L_8^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

O número de câmeras tem grande influência durante a etapa de reconstrução. Isto porque quanto maior o sua quantidade, menor será o problema de oclusão de marcadores e maior será a quantidades de imagens que representam um mesmo marcador (Buschang *et al.*, 2001) contribuindo desta maneira para incremento da precisão/exatidão do sistema e para o automatismo da tarefa.

Depois de reconstruídos, os dados representado a posição dos marcadores no espaço devem passar por um processo de filtragem. Quando estes dados são convertidos de um sistema contínuo para um discreto, ruídos aleatórios são gerados (Alonso *et al.*, 2005). Isto ocorre não só pela discretização dos dados, mas também por uma série de outros fatores como, por exemplo, o ruído eletrônico presente na câmera ou alguma imperfeição no processo de calibração (Chiari *et al.*, 2005) ou rastreamento. Para amenizar este problema, o BioMec utiliza um filtro Butterworth de segunda ordem do tipo passa-baixa. Embora alguns trabalhos (Giakas & Baltzopoulos, 1997; Giakas *et al.*, 2000; Alonso *et al.*, 2005) tenham mostrado que existem filtros mais eficientes para sinais desta natureza, a maioria dos sistemas ainda utilizam o filtro de Butterworth.

Antes do início da filtragem, o usuário deve estipular uma freqüência de corte. O valor desta freqüência depende da câmera utilizada, pois a máxima freqüência de corte

permitida é equivalente à metade da frequência da câmera. A Figura 4.24 exibe um gráfico ilustrando os efeitos do filtro. O componente gráfico utilizado para exibição de gráficos no BioMec foi retirado de uma biblioteca conhecida como ZedGraph (disponível em <http://zedgraph.org/>).

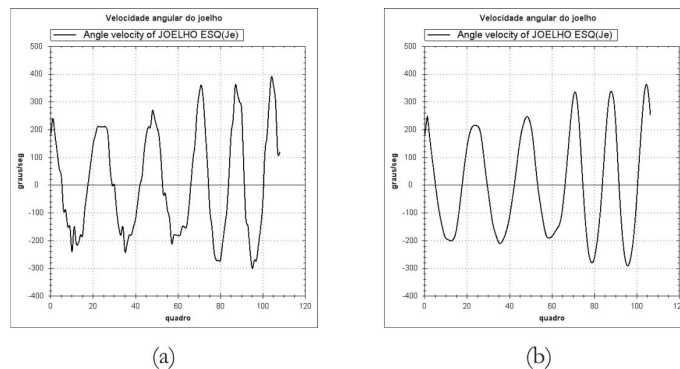


Figura 4.24 - Gráficos ilustrando a aplicação de um filtro Butterworth de segunda ordem do tipo passa-baixa: (a) dados não filtrados e corrompidos por ruído; e (b) dados filtrados com frequência de corte de 12 Hz.

Na representação gráfica da trajetória do movimento, os pontos dos gráficos são unidos por *splines cúbicas* contribuindo para a suavização do traçado do movimento. Como ressalta Alonso *et al.* (2005), esta operação é muito comum em SCAMs.

4.10 – Cálculo das variáveis cinemáticas e visualização dos dados

Depois de reconstruída a trajetória do movimento, é possível extrair a partir desta, outros dados cinemáticos como a velocidade e aceleração. A Física Newtoniana ensina que isto pode ser feito por meio de sucessivas derivadas do deslocamento em relação à variação do tempo. É possível então definir a derivada de um conjunto de dados p com N amostras representadas por p_i , medidas a cada Δt segundos, como sendo:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{2\Delta t} [(p_i - p_{i-1}) + (p_{i+1} - p_i)] \quad (4.12)$$

Contudo, pelo fato da derivada ser bastante sensível à ruídos (Walker, 1998), é importante que os dados de deslocamento do movimento já tenham passado pelo processo de filtragem. É também importante destacar que o intervalo de tempo entre as amostras é obtido através do cálculo do inverso da frequência de captura da câmera.

Depois de executada a reconstrução, filtragem e a diferenciação numérica, o sistema permite a visualização e exportação dos dados calculados. Esta visualização pode ser feita por meio de gráficos ou animação do *stickman*. As Figuras 4.25 e 4.26 ilustram as interfaces responsáveis pela exibição destes dados.

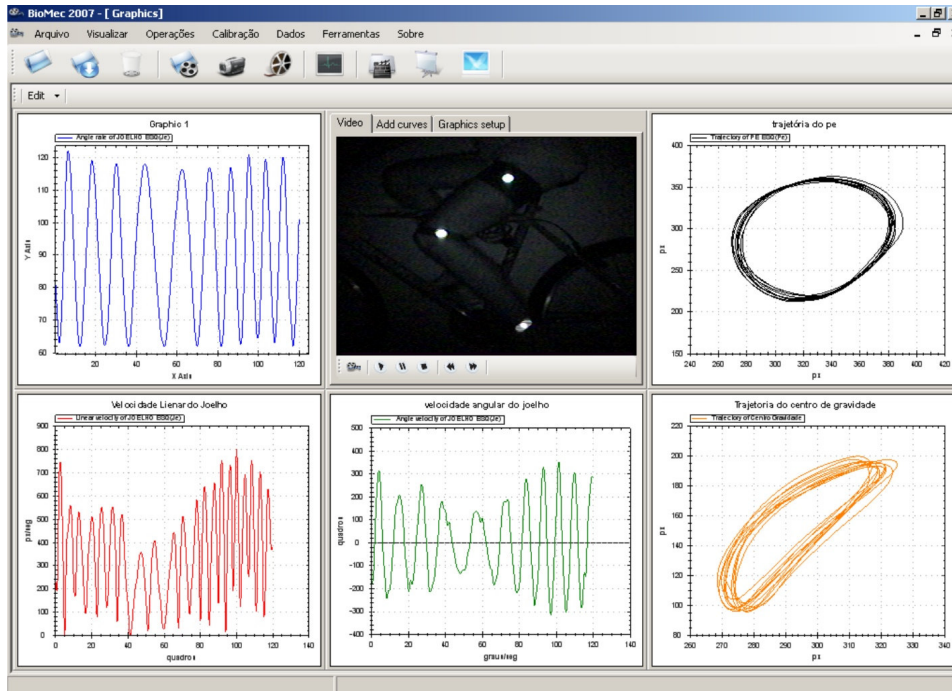


Figura 4.25 - Interface ilustrando os gráficos de algumas variáveis cinemáticas do movimento de um ciclista. A interface fornece ao usuário flexibilidade suficiente para determinar a ordem dos gráficos, as variáveis que serão exibidas e as características do gráfico.

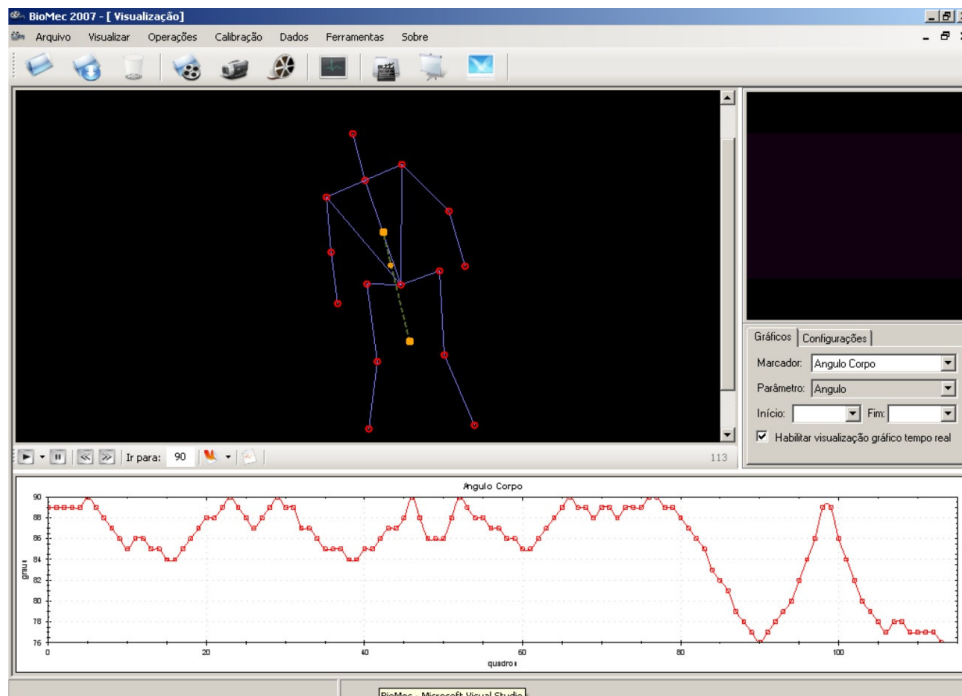


Figura 4.26 - Stickman exibido pelo BioMech. As principais articulações são representadas por pontos vermelhos interligados por linhas azuis representando os segmentos corporais. A linha tracejada representa o centro de gravidade dos membros inferiores, superiores e do corpo inteiro. Esta linha define o ângulo do corpo em relação a horizontal.

4.11 – Ferramentas adicionais

A fim de possibilitar ao usuário diferentes formas de avaliar o movimento, outras ferramentas foram desenvolvidas e agregadas ao BioMec fazendo parte de um mesmo programa. Em especial, pode-se citar o módulo de análise fotogramétrica de imagens descrito nos próximos parágrafos.

A análise fotogramétrica é de grande importância na medida em que permite a investigação de desvios posturais e alterações no sistema osteo-muscular. Na forma tradicional, este tipo de avaliação é realizada colocando o indivíduo (paciente) contra um retículo, avaliando visualmente os desvios posturais. A eficiência do método tradicional está restrita à capacidade de observação do avaliador e não permite uma reavaliação comparativa eficiente.

Com a finalidade de permitir uma avaliação postural mais eficiente e uma maior confiabilidade nos resultados, foi desenvolvido junto ao BioMec uma ferramenta que permite o cálculo de ângulos e distâncias entre dois pontos quaisquer da imagem. Para calcular estes valores é necessário que a imagem analisada seja calibrada. Embora não seja um procedimento obrigatório, a calibração é fortemente recomendada. O modelo de calibração implementado para a análise fotogramétrica é a homografia. Sua escolha é justificada pelo fato de que ela é um procedimento de fácil manuseio, apresenta boa precisão, compensa muitas distorções sofridas pela imagem, necessita de poucos pontos de controle (quatro ou mais) e é específica para análises bidimensionais.

Por meio de retas e polilinhas (união de múltiplas retas), o programa de fotogrametria permite ao seu usuário determinar distâncias e ângulos. Ele também permite a determinação do centro de gravidade de um corpo humano além de operações com a imagem como, por exemplo, a ampliação (“zoom”), mudança de cor e inserção de camadas de transparências. As Figuras 4.27 e 4.28 ilustram dois exemplos de análise fotogramétrica. O cálculo do ângulo formado pelas retas da Figura 4.28 se dá pelo produto escalar entre as coordenadas das retas.

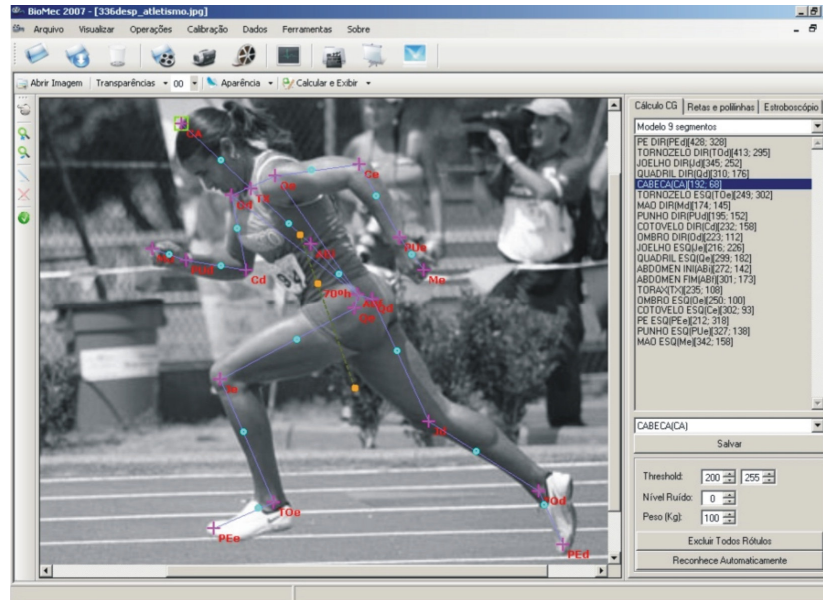


Figura 4.27 - Cálculo do centro de gravidade de uma atleta. Os três pontos em laranja representam, de cima para baixo, o centro de gravidade dos membros superiores, o centro de gravidade do corpo e o centro de gravidade dos membros inferiores. Os pontos em azul representam uma estimativa do centro de gravidade radial de cada segmento. Foto disponível em (URL 2).

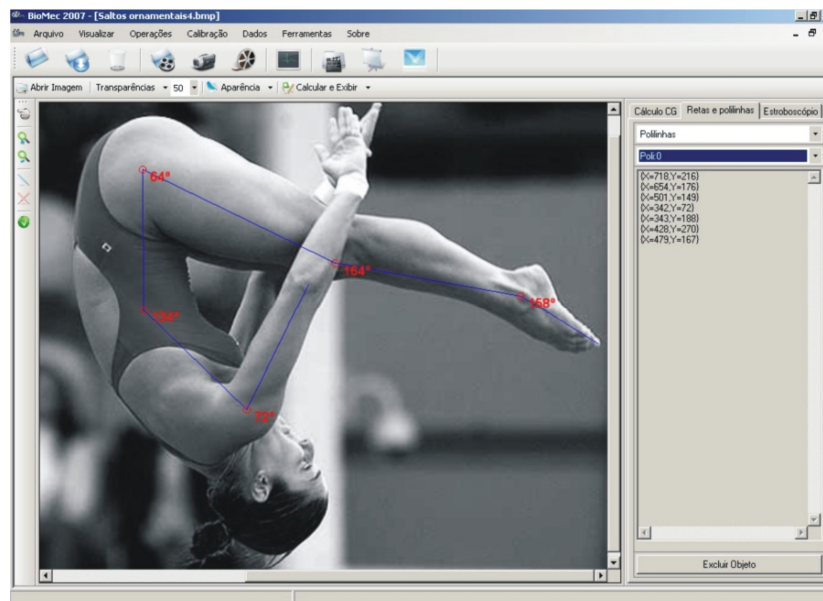


Figura 4.28 - Cálculo de alguns ângulos articulares de um atleta. Foto disponível em (URL 2).

4.12 – Considerações do capítulo

A ideia de projeto do sistema proposto tentou atender ao compromisso de ser um sistema barato, flexível e de boa precisão/exatidão se comparado aos modelos comerciais mais simples. Para que a realização desta tríade de características fosse possível, o sistema buscou por algoritmos flexíveis e robustos sem muito se preocupar com o custo

computacional. Mesmo diante da complexidade dos SCAMs comerciais, alguns aspectos básicos foram implementados no BioMec enquanto que outros não. Neste último caso, pode-se citar como exemplo a ausência de um protocolo de marcadores robusto capaz de representar os detalhes do movimento e a visualização da animação do movimento em três dimensões.

Para ajudar a assegurar bons resultados de precisão e exatidão, as rotinas de calibração e reconstrução tridimensionais envolvendo o DLT foram comparadas com outras rotinas implementadas em MatLab por outros autores e bem testadas (http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/). Para um mesmo conjunto de dados de entrada, não houve diferença significativa entre os resultados demonstrando, em partes, que as rotinas de calibração e reconstrução utilizando o DLT e codificadas pelo autor são confiáveis e estáveis.

No próximo capítulo são ilustrados alguns experimentos que demonstram as características técnicas do sistema e suas aplicações. Isto permitirá uma melhor caracterização do sistema e ilustração de suas funcionalidades.

Capítulo 5

Validação do sistema proposto e estudo de casos

Neste capítulo alguns experimentos envolvendo o sistema proposto são descritos. Eles foram divididos em dois grupos segundo sua finalidade: (1) validar o sistema estimando seus valores de precisão e exatidão e (2) demonstrar as potencialidades do sistema ou sua aplicação prática a partir de estudos de casos.

No primeiro grupo de experimentos, descrito no tópico 5.1 e em seus sub-tópicos, foram ilustrados quatro testes em que, para cada um deles, foi determinada a precisão e a exatidão das medidas realizadas pelo BioMec. No segundo grupo de testes, descrito no tópico 5.2 e em seus sub-tópicos, foram ilustrados três experimentos envolvendo a reconstrução em duas e três dimensões. Um quarto exemplo, envolvendo a aplicação da fotogrametria na análise da postura humana foi também ilustrado.

5.1 – Validação do Sistema: experimentos e resultados

Todo sistema que se proponha a medir algo deve dar ao usuário uma “confiança” no seu uso e em seus resultados. Esta confiança pode ser alcançada, em parte, por meio da estimação da precisão e exatidão das medidas. Deve ainda satisfazer critérios e especificações de requerimentos.

Buscando validar o sistema, alguns testes baseados nos trabalhos (Everaert *et al.*, 1999; Richards, 1999; Croce & Cappozzo, 2000; Yuan & Ryd, 2000; Holden *et al.*, 2003; Hassan *et al.*, 2007; Maletsky *et al.*, 2007) foram realizados. Neles, foram calculados o grau de variação (precisão) dos resultados de uma medição e a sua conformidade com o valor real (exatidão). Dois experimentos, tidos como clássicos na literatura técnica, foram realizados para determinar as características de precisão e exatidão das medidas. O primeiro deles é voltado a medidas bidimensionais enquanto que o outro a tridimensionais. É importante ressaltar que os experimentos realizados visavam somente definir a magnitude do erro e não a contribuição das diferentes fontes de erro e sua relativa contribuição para o erro global. Embora a filtragem minimize boa parcela dos erros randômicos do sistema, ressalta-se que nenhum tipo de filtragem foi realizada fazendo com que as características do sistema ficassem mais evidentes.

5.1.1 – Validação da reconstrução 2D

Para validar o método de medição bidimensional, foram realizados alguns experimentos baseados nas recomendações e procedimentos definidos por Richards (1999).

que idealizou um dispositivo capaz de avaliar duas propriedades de um SCAM: (1) a de medir a distância entre dois marcadores fixos e, (2) habilidade de estimar um ângulo formado por outros três marcadores. No dispositivo haviam cinco marcadores retro-reflexíveis (11 mm de diâmetro) e uma barra rígida de alumínio aclopada à um motor. A barra é girada somente em um plano. As Figuras 5.1 (a) e (b) ilustram o dispositivo utilizado na validação da reconstrução 2D. Dos cinco marcadores utilizados, dois deles (m_1 e m_2) foram fixados à barra a uma distância de 50 mm entre si. Outros três foram dispostos em um padrão triangular sobre uma superfície plana também fixada à barra. O ângulo formado entre os três marcadores foi de 90° . A câmera utilizada no experimento (Handycam DCR-HC28, Sony, Japão) foi colocada a cerca de 600 mm do plano de movimento da barra metálica. Durante o experimento, foram realizados quatro segundos de filmagem a 30 quadros por segundos. Antes disto, o sistema foi devidamente calibrado com um objeto de calibração de padrão planar (20 x 20 cm) com doze pontos de controle.

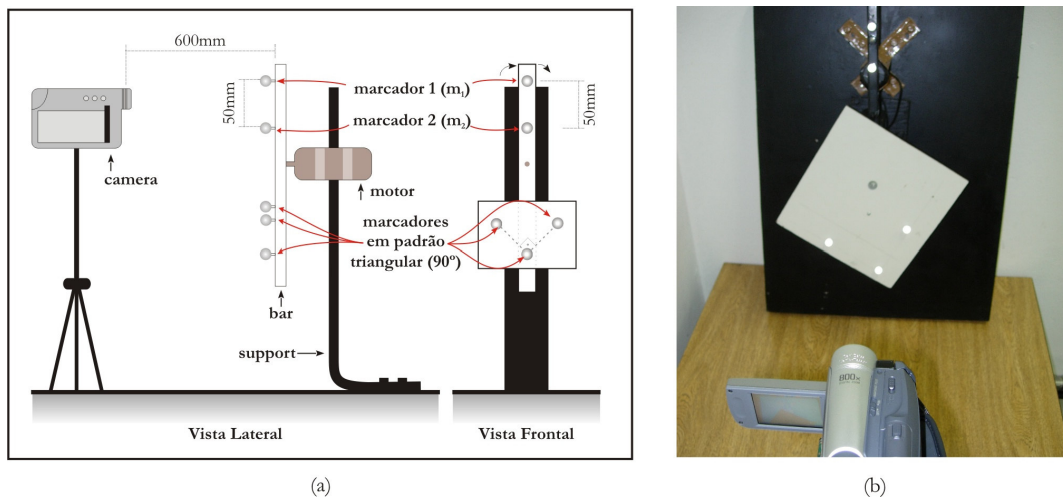


Figura 5.1 - Dispositivo adaptado utilizado para estimação da precisão e exatidão da reconstrução bidimensional: (a) esquema ilustrando as vistas lateral e frontal do dispositivo e (b) imagem ilustrativa do experimento.

Para calcular a exatidão, o programa fez a medição da distância entre os marcadores m_1 e m_2 para cada quadro. Logo em seguida, os valores estimados foram comparados com o valor conhecido de 50 mm. Quanto à precisão do sistema, esta foi estimada através do cálculo do desvio padrão da variação das medidas de distância estimadas quadro a quadro entre os dois marcadores. O mesmo procedimento foi repetido para o cálculo do ângulo formado pelos 3 marcadores dispostos em padrão triangular. Os resultados encontrados para o teste descrito são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados do teste utilizado para estimar a precisão e exatidão da reconstrução 2D. A área calibrada foi de 400 cm².

| Precisão e Exatidão | | |
|----------------------------------|----------------|------|
| Teste: distância entre 2 pontos | | |
| Valor real | 50.00 mm | |
| Estimado (média) | 49.61 mm | 0,8 |
| Desvio Padrão | 0.36 mm | 0,7 |
| Erro máximo superior (+) | 1.11 mm | 2,2 |
| Erro máximo inferior (-) | 0.92 mm | 1,8 |
| Teste: ângulo entre 3 marcadores | | |
| Valor real | 90.0° | |
| Estimado (média) | 90.6° | 0,7 |
| Desvio Padrão | 0.5° | 0,5 |
| Erro máximo superior (+) | 92.5° | 2,7 |
| Erro máximo inferior (-) | 89.1° | 1,0 |
| Processamento | | |
| Dimensão da imagem | 640x480 pixels | |
| Número de marcadores | | 5 |
| Número de quadros | | 120 |
| Tempo de processamento | | 21 s |

O sistema foi capaz de medir a distância entre dois marcadores com um erro médio de 0,4 mm ou 0,8%. Outros sistemas (Gerstner & Fehrman, 1999; Zafar *et al.*, 2000; Flavel *et al.*, 2002; Yoon *et al.*, 2006) tiveram os valores de erro variando de 0,1 a 0,6 mm para uma região de processamento com dimensões semelhantes. Durante os testes, todos os marcadores foram automaticamente encontrados.

Os valores de precisão e exatidão dependem de uma série de fatores. Dentre eles podemos citar a área de processamento e a distância entre o plano do movimento e a câmera (resolução). Assim, para que as características do sistema pudessem ficar mais evidentes, o experimento foi novamente repetido usando uma configuração diferente daquela mostrada na Figura 5.1 (a). Neste segundo experimento, os marcadores passaram a distar entre si 25 cm sendo que o ângulo formado pelos três marcadores permaneceu o mesmo (90°). A Figura 5.2 ilustra a disposição e configuração dos equipamentos utilizados no experimento.



Figura 5.2 - Dispositivo usado para estimação da precisão e exatidão do sistema em escala maior. Ao fundo verifica-se o objeto de calibração de dimensões 1,1x0,9 metros.

O objeto de calibração usado no experimento é mostrado ao fundo na Figura 5.2. Suas dimensões são de 1,1 x 0,9 metros definindo uma área de aproximadamente 1 m². Os resultados do experimento mostrado na Figura 5.2 são exibidos na Tabela 5.2. Todos marcadores foram rastreados automaticamente.

Tabela 5.2 - Resultados do segundo teste utilizado para estimar a precisão e exatidão da reconstrução 2D. A área calibrada foi de 1 m².

| Precisão e Exatidão | | |
|----------------------------------|----------------|---------|
| Teste: distância entre 2 pontos | | Erro(%) |
| Valor real | 250.0 mm | |
| Estimado (média) | 251.8 mm | 0,7 |
| Desvio Padrão | 4.5 mm | 1,8 |
| Erro máximo superior (+) | 260.3 mm | 4,1 |
| Erro máximo inferior (-) | 244.2 mm | 2,3 |
| Teste: ângulo entre 3 marcadores | | |
| Valor real | 90.0° | |
| Estimado (média) | 90.8° | 0,8 |
| Desvio Padrão | 1,0° | 1,1 |
| Erro máximo superior (+) | 93,0° | 3,3 |
| Erro máximo inferior (-) | 88,2° | 2,0 |
| Processamento | | |
| Dimensão da imagem | 640x480 pixels | |
| Número de marcadores | | 5 |
| Número quadros | | 120 |
| Tempo processamento | | 26 s |

5.1.2 – Validação da reconstrução 3D

O segundo tipo de teste, descrito em (Papic *et al.*, 2004), é usado para estimar a exatidão e precisão de SCAMs 3D. Neste teste, um indivíduo movimentava livremente em suas mãos uma barra rígida dentro dos limites definidos pelo objeto de calibração. A esta barra estão fixados dois marcadores próximos às suas extremidades (Figura 5.3). Como a barra é rígida, a distância entre estes marcadores também deve ser fixa. Sendo assim, o BioMec irá reconstruir tridimensionalmente a posição dos marcadores fixados à barra e calculará a distância entre eles. A variação destes valores de distância foram usados para avaliar a qualidade da reconstrução 3D.

Neste experimento foram utilizadas duas câmeras. A barra foi girada lentamente (para amenizar os problemas de sincronismo) dentro de um volume de calibração de aproximadamente 5,2 m³ (1,6m x 1,6m x 2m). Bolas de isopor foram utilizadas como pontos de controle e marcadores. Devido ao pouco contraste de cor entre os marcadores e algumas regiões do plano de fundo, o rastreamento automático não foi possível fazendo com que o usuário indicasse manualmente a posição dos marcadores nas imagens. A Tabela 5.3 ilustra o resultado do experimento. O erro médio do sistema foi de 1,5%.



Figura 5.3 - Teste da barra rígida usado para estimar a precisão e exatidão de um sistema de captura de movimento 3D. Os dois marcadores fixados às extremidades da barra terão suas coordenadas reconstruídas e a variação do valor da distância entre eles é estudada para estimar os valores de precisão e exatidão do sistema.

Tabela 5.3 - Resultados do teste para estimação da precisão e exatidão no espaço tridimensional.

| Precisão e Exatidão | | |
|----------------------------|----------------|---------|
| | | Erro(%) |
| Valor real | 100,2 cm | |
| Estimado (média) | 101.7 cm | 1,5 |
| Desvio Padrão | 1.9 cm | 1,9 |
| Erro máximo superior (+) | 103.8 cm | 3,6 |
| Erro máximo inferior (-) | 99.1 cm | 1,1 |
| Processamento | | |
| Dimensão imagem | 640x480 pixels | |
| Número marcadores | 2 | |
| Número quadros | 23 | |

5.1.3 – Validação do módulo de fotogrametria

Para avaliar as medidas de distâncias e ângulos calculadas no módulo de fotogrametria, foi conduzido um experimento envolvendo a análise de fotos de figuras geométricas desenhadas em papel. Estas figuras foram envolvidas por um objeto de calibração que é mostrado na Figura 5.4 (a). Este objeto é formado por uma estrutura acrílica onde círculos metálicos foram dispostos numa forma retangular de dimensões conhecidas. A Figura 5.4 (b) exhibe alguns exemplos de imagens utilizadas para estimar a precisão e exatidão do módulo de fotogrametria.

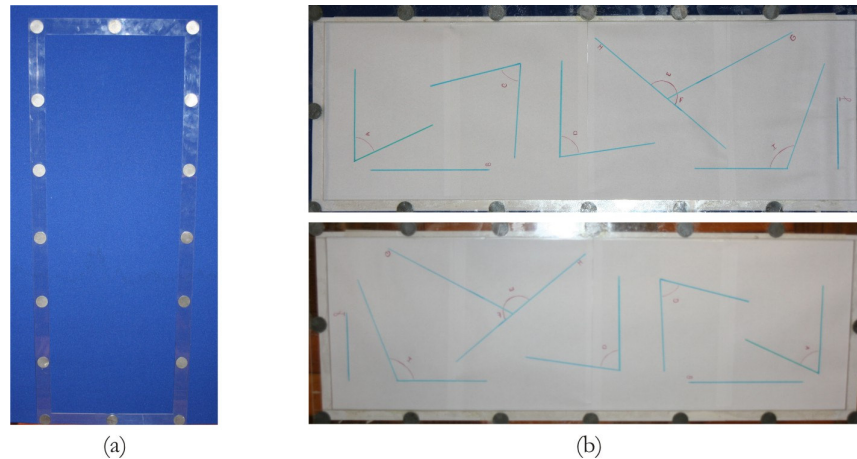


Figura 5.4 - (a) objeto de calibração com dezesseis pontos de controle. (b) Imagens utilizadas para validar o módulo de fotogrametria. As figuras geométricas desenhadas no papel e envoltas pelo objeto de calibração têm dimensões conhecidas.

Três pessoas foram convidadas a calcular valores de distância e ângulo formados pelas figuras geométricas presentes nas imagens. Estes dados foram usados na análise inter-observador. Nesta análise, cada observador mede estas figuras geométricas em dois diferentes momentos. No primeiro momento, o observador faz as medidas diretamente no papel (método manual) usando uma régua e um goniômetro. Depois de pelo menos três dias, o mesmo observador faz novamente as medidas só que agora utilizando o módulo de fotogrametria (método digital). Este procedimento é feito para todos os observadores que tem seus valores de medidas registrados por um outro observador independente. Antes de fazer as medidas, todos os observadores foram familiarizados com o programa de computador. Para evitar influências de outras fontes de erro, foi usado um mesmo goniômetro e uma mesma régua. Cada indivíduo teve de calcular em cada momento cerca de dez ângulos e vinte e um valores de distância. Estas medidas foram comparadas e parte dos resultados são vistos na Tabela 5.4.

Verifica-se na Tabela 5.4 que as diferenças entre os valores estimados pelo programa e os medidos manualmente. A vantagem demonstrada pela medição digital em relação à manual é a precisão nos valores de tamanhos (ver desvio padrão da Tabela 5.4). Embora o número de pessoas envolvidas na medição não tenha sido grande, foi perceptível uma menor variação de resultados nas medições feitas por meio do módulo de fotogrametria. Acredita-se que o uso de recursos como o “zoom” possa justificar em parte estes resultados significativamente melhores haja visto que ele permite ao usuário definir com maior clareza os limites e contornos das figuras geométricas mensuradas. Como as fotos foram feitas com uma câmera de alta definição (8 mega pixels), os contornos das

figuras geométricas ficaram bem nítidas diminuindo as imprecisões ocasionadas pela má qualidade da imagem.

Tabela 5.4 - Resultado de algumas medidas utilizadas na análise inter-observador do módulo de fotogrametria. Comparação entre valores calculados pelo programa (“medidas digitais”) e calculadas manualmente através de goniômetros e réguas (“medidas manuais”).

| Parâmetros | Medidas | | | |
|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | Digitais | | Manuais | |
| | Valor médio | Desvio Padrão | Valor médio | Desvio Padrão |
| Ângulo A | 33,0 ° | 1,0 ° | 31,8 ° | 1,9 ° |
| Ângulo B | 71,6 ° | 1,2 ° | 71,2 ° | 1,1 ° |
| Ângulo C | 80,3 ° | 0,6 ° | 79,0 ° | 1,5 ° |
| Ângulo D | 111,7 ° | 1,7 ° | 113,5 ° | 2,2 ° |
| Distância A' | 139,8 mm | 1,0 mm | 141,0 mm | 1,5 mm |
| Distância B' | 220,3 mm | 1,1 mm | 222,3 mm | 2,1 mm |
| Distância C' | 292,2 mm | 1,4 mm | 289,2 mm | 2,8 mm |
| Distância D' | 106,5 mm | 0,8 mm | 104,1 mm | 1,9 mm |

5.2 – Estudo de casos

Para ilustrar os recursos, características e potencialidades do sistema, alguns estudos de casos foram realizados. A partir deles, será ilustrada a reconstrução bidimensional, tridimensional e a análise fotogramétrica de posturas englobando assim os principais recursos do sistema BioMec. Todos os experimentos realizados pelo autor desta dissertação foram previamente aprovados pelo comitê de ética da Universidade Federal de Uberlândia (registros 043/07 e 159/07).

5.2.1 – Exemplo de reconstrução de movimentos em duas dimensões: captura de movimentos mandibulares

A aplicação clínica e prática de um sistema que possa detectar e ilustrar graficamente o traçado do movimento mandibular pode contribuir significante para aqueles profissionais que investigam desordens que afetam o sistema mastigatório. Como relata Leardini *et al.* (2006), as informações extraídas do traçado de alguns tipos de movimento específicos podem ajudar em decisões clínicas relacionadas a diagnósticos de doenças, indicações de tratamento e recomendações de técnicas de reabilitação. No caso da mandíbula, são três os movimentos especiais usados na avaliação do seu sistema músculo-esquelético: (1) abertura e fechamento, (2) protrusão e (3) laterotrusão. Estes movimentos são também chamados de movimentos de avaliação funcional da mandíbula (MAFM). Dos três tipos de movimentos citados, os dois primeiros são feitos praticamente em um plano no espaço. Já o terceiro pode também ser esboçado como um movimento bidimensional, embora exista uma terceira componente que pode na maioria dos casos pode ser suprimida.

O processo de estimação dos MAFM começa com a fixação de um marcador à boca. Essa fixação acontece através de um suporte metálico que se encaixa na boca e não obstrui a movimentação natural da mandíbula. A Figura 5.5 (a) ilustra o marcador e seu suporte metálico. Após a fixação dos marcadores, iniciam-se as filmagens.

Durante os primeiros segundos de filmagem, um objeto de calibração é colocado na boca do indivíduo. Ele é fixado entre os dentes através de um suporte (Figura 5.5 (b) e (c)). Logo após adquiridos alguns quadros de imagens do objeto de calibração na boca, ele é retirado e o indivíduo começa a realizar os MAFM somente com o marcador que está fixado na mandíbula. Como a trajetória do marcador é correspondente a da mandíbula, o programa rastreia os movimentos do marcador. Um segundo marcador é também fixado à cabeça usando Velcro (Figura 5.5 (d)). Sua função é estimar os movimentos da cabeça. Como os movimentos mandibulares são resultados da combinação do movimento da mandíbula e da cabeça (Zafar *et al.*, 2000) é necessária uma compensação dos movimentos da cabeça. Esta compensação é feita através da subtração dos movimento da cabeça

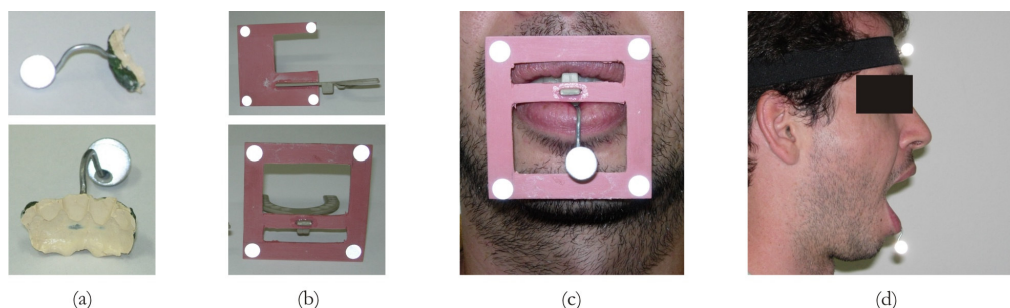


Figura 5.5 - (a) suporte para marcador retro-flexível. Este suporte foi confeccionado para encaixar entre a arcada inferior e o lábio. (b) Objetos de calibração utilizados para filmagens frontal e lateral. (c) objeto de calibração fixado entre os dentes de um indivíduo. (d) marcadores utilizados. O marcador fixado à cabeça terá a função de compensar os movimentos feitos pela cabeça.

Dez indivíduos (5 homens e 5 mulheres com idade média de 29 ± 7 anos) que participaram da pesquisa tiveram seus movimentos mandibulares capturados. Cinco deles não apresentaram nenhum problema mastigatório ou disfunção enquanto que os outros cinco apresentavam algum comprometimento de alguma de suas funções mastigatórias. Durante os procedimentos de registro do movimento, a câmera foi posicionada a 60 cm da boca, no plano sagital e posteriormente no plano coronal. Antes das filmagens, cada participante foi instruído a realizar os MAFM. Foram fornecidas instruções e demonstrações de cada movimento e a oportunidade de praticá-los.

Durante as filmagens, cada indivíduo executou pelo menos cinco ciclos de cada movimento. O início e o final de cada ciclo é selecionado no programa por um profissional da área. Os ciclos foram usados para calcular a média do movimento e o seu intervalo de

confiança através do algoritmo Bootstrap (Zoubir & Boashash, 1998). A implementação deste algoritmo é externa ao BioMec e feita em MatLab (MathWorks Inc) que por sua vez salva os resultados em um arquivo que são posteriormente importados para exibição no BioMec. A Figura 5.6 ilustra alguns resultados alcançados pelo sistema na captura dos MAFM.

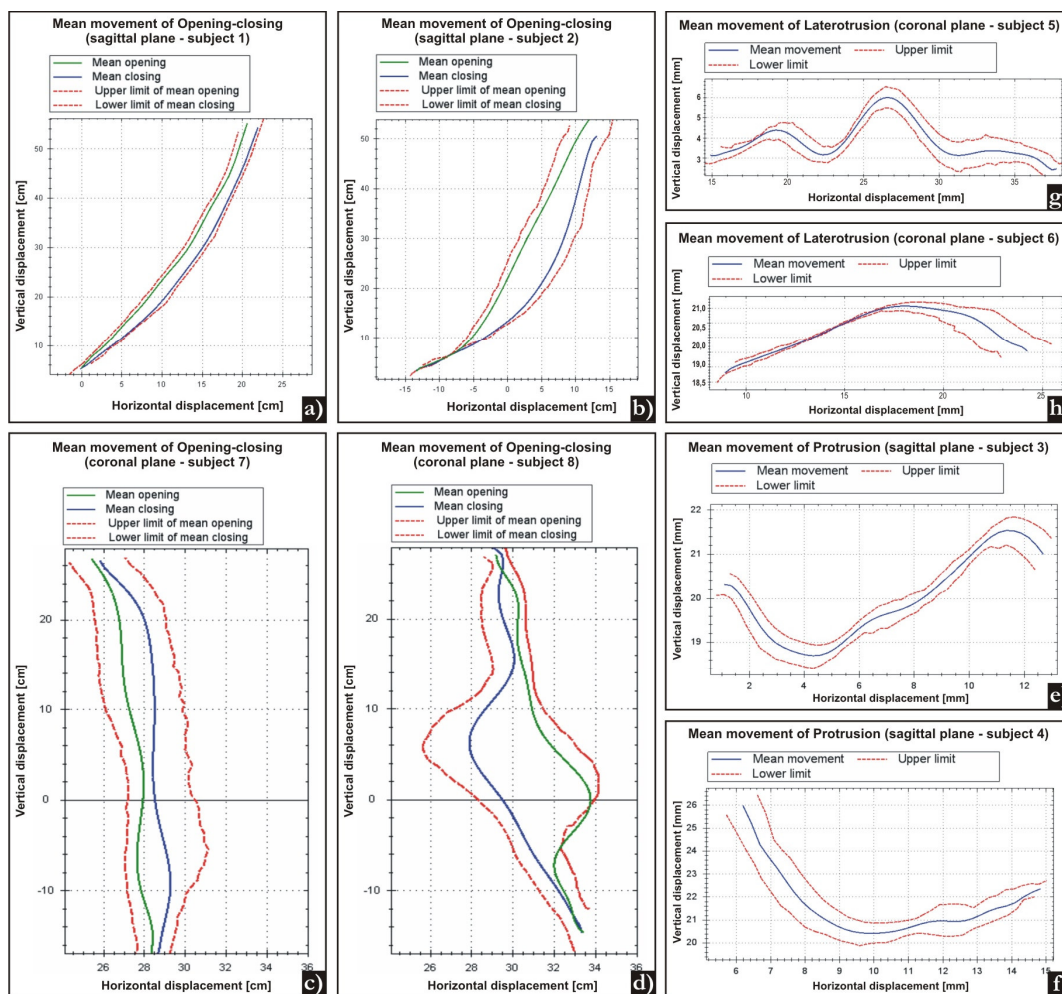


Figura 5.6 – Gráficos exibindo alguns movimentos de avaliação funcional da mandíbula de oito indivíduos: (a) movimento de abertura e fechamento feito por uma indivíduo saudável (plano sagital). (b) Movimento de abertura e fechamento de um indivíduo com deslocamento de disco da junta temporomandibular (plano sagital). (c) Movimento de abertura e fechamento normal (plano coronal). (d) Movimento de abertura e fechamento de um indivíduo com deslocamento de disco da junta temporomandibular (coronal plane). (e) Movimento de protrusão lateral normal. (f) Movimento de protrusão lateral de indivíduo com mordida profunda. (g) Movimento de laterotrusão normal (h) Movimento de laterotrusão de indivíduo com preferência mastigatória para direita.

Durante os testes o sistema foi capaz de reconhecer automaticamente os marcadores em todos os quadros. O tempo médio gasto pelo usuário para processar cada movimento com cinco ciclos foi de seis minutos. Os resultados encontrados foram condizentes com os descritos por outros pesquisadores tanto na forma quanto na

amplitude (Harper & Schneiderman, 1996; Travers *et al.*, 2000; Buschang *et al.*, 2001; Naeije, 2003).

5.2.2 – Exemplo de reconstrução de movimentos em duas dimensões: movimento de pedalada

Como segundo exemplo de reconstrução bidimensional, um indivíduo executou movimentos de pedalagem em uma bicicleta. Foram utilizados três marcadores para definir a cinemática do membro inferior direito do indivíduo. Estes marcadores foram fixados na cintura, joelho e tornozelo. A Figura 5.7 mostra o posicionamento dos marcadores (item (a)) e o quadro de imagem utilizado para calibrar o sistema (item (b)).

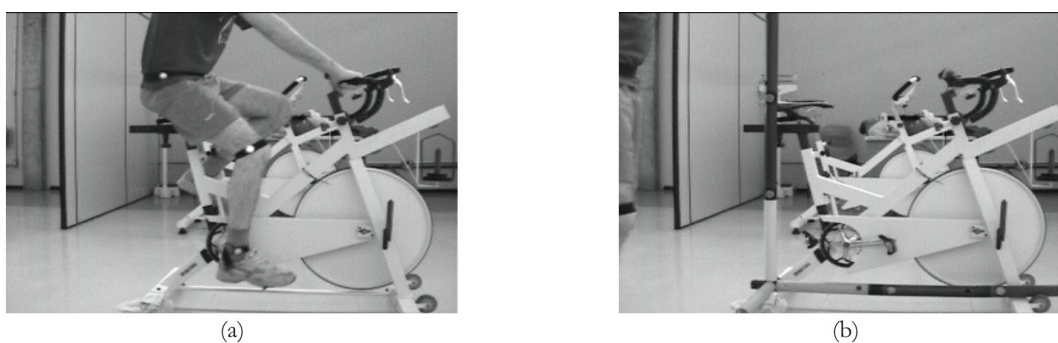


Figura 5.7 - (a) Movimento de pedalada executado por um indivíduo. Três marcadores retro-flexíveis definiam o segmento coxa e perna do indivíduo. (b) Objeto de calibração (2D) utilizado para reconstruir o movimento realizado no plano.

Depois de definido um intervalo de 10 segundos de movimento, o vídeo foi no fragmentado no BioMec a uma taxa de 10 quadros por segundo (*downsample*). Com a exceção do marcador do tornozelo, todos os outros marcadores foram encontrados automaticamente (a iluminação infravermelha na região do tornozelo era pobre). Alguns gráficos do movimento são ilustrados na Figura 5.8.

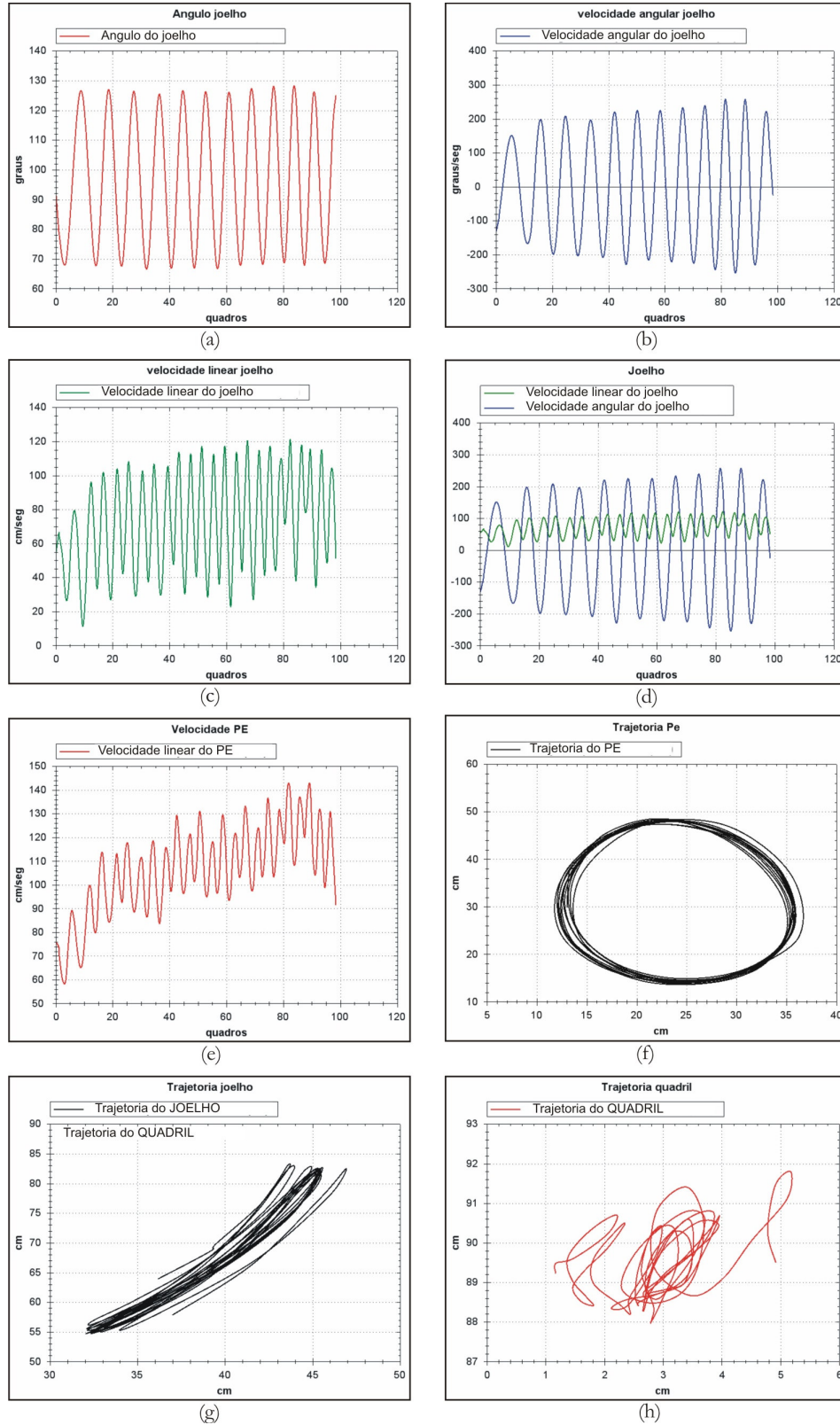


Figura 5.8 - Gráficos do movimento de pedalagem: (a) variação do ângulo do joelho; (b) velocidade angular do joelho; (c) velocidade linear do joelho; (d) comparação entre a velocidade linear do joelho e a velocidade angular do joelho; (e) velocidade linear do pé; (f) trajetória do marcador fixado ao pé; (g) trajetória do marcador fixado ao joelho; (h) trajetória do marcador fixado ao quadril.

5.2.3 – Exemplo de reconstrução de movimentos em três dimensões: altura do salto

Para ilustrar a reconstrução de coordenadas em três dimensões, um indivíduo realizou três seqüências de salto vertical que foram analisadas pelo BioMec. Os quadros que definiam o início e fim de cada salto são mostrados na Figura 5.9. A trajetória do marcador, fixado à cintura do indivíduo, foi reconstruída tridimensionalmente. Este marcador foi utilizado para determinar a altura com que o indivíduo saltava (com impulsão) e a sua velocidade instantânea de subida. Como estavam disponíveis apenas duas câmeras, movimentos mais elaborados eram inviáveis, pois a oclusão dos marcadores seria possivelmente grande afetando assim a qualidade dos resultados.

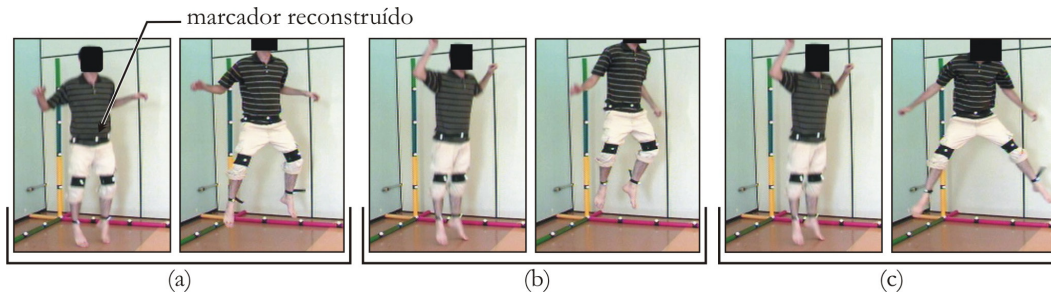


Figura 5.9 - Quadros inicial e final que definiram o início e o fim de cada salto. (a) quadros do primeiro salto; (b) quadros do segundo salto e (c) quadros do terceiro salto. A definição do quadro de início era feita quando o indivíduo estava na eminência de abandonar o contato dos pés com o solo enquanto que o quadro final era determinado quando o indivíduo alcançava sua máxima altura. Em (a) é destacado o marcador utilizado para medir a altura de cada salto.

Na Figura 5.10 e na Tabela 5.5 são exibidos alguns dos valores estimados pelo BioMec para a seqüência de saltos mencionada anteriormente. As câmeras utilizadas neste experimento operaram a 30 Hz. Devido a este fato, o número de amostras foi pequeno variando de 7 a 9 imagens. Nenhum tipo de filtragem foi usado e o marcador foi selecionado manualmente pelo usuário.

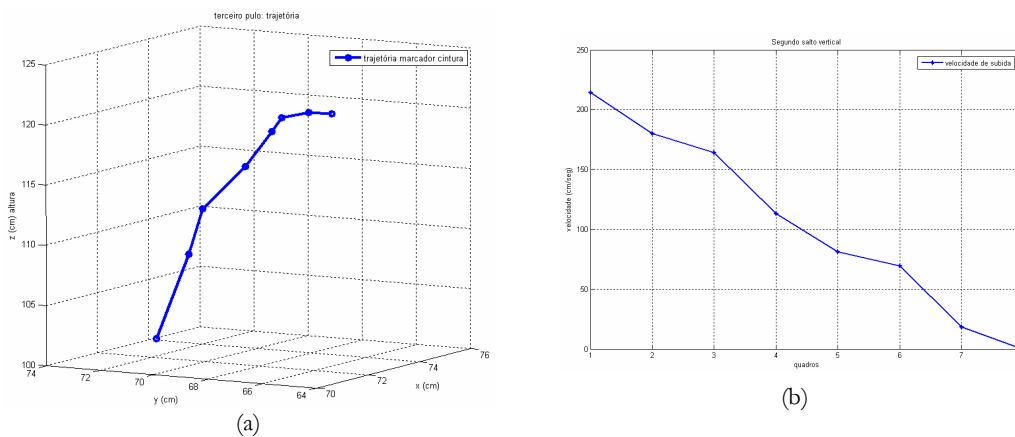


Figura 5.10 - (a) Trajetória do terceiro salto no espaço tridimensional. Os dados foram estimados pelo BioMec e exportados para exibição tridimensional no MatLab. (b) velocidade linear instantânea do marcador fixado à cintura do indivíduo.

Tabela 5.5 - Parâmetros mensurados de três saltos verticais.

| Salto | Altura: máximo deslocamento em Z | Máximo deslocamento em X | Máximo deslocamento em Y | Velocidade |
|----------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| Primeiro | 18,8 cm | 1,4 cm | 1,3 cm | 96,2 (cm/seg) |
| Segundo | 26,7 cm | 2,6 cm | 2,8 cm | 105,0 (cm/seg) |
| Terceiro | 22,2 cm | 3,6 cm | 9,6 cm | 109,4 (cm/seg) |

Analisando os resultados da Tabela 5.5, verifica-se que o terceiro salto obteve uma velocidade média superior àquela exibida pelo segundo salto mesmo não apresentando um deslocamento vertical (eixo Z) superior a este último. Contudo, os deslocamentos no eixo X e Y foram maiores para o terceiro salto. Isto pode ser explicado pelo fato de que a velocidade é um parâmetro vetorial tridimensional e a ela foram somados os valores de velocidade nos três eixos. Como os deslocamentos nos eixos X e Y foram superiores para o terceiro salto, espera-se que o módulo da velocidade seja incremento por estas componentes.

5.2.4 – Exemplo do uso da fotogrametria na avaliação postural: avaliação da flexibilidade

Embora não exista uma definição consensual para a flexibilidade, sabe-se que esta é fortemente influenciada pelo comprimento dos músculos que exercem influência sobre a articulação em análise. Sendo assim, ela pode ser avaliada pela capacidade de movimento de uma articulação utilizando como parâmetro a máxima amplitude de movimento.

Como existe uma relação entre a flexibilidade e a amplitude do movimento, é possível a avaliação da normalidade ou limitação desta primeira em função desta segunda a partir de testes clínicos. Estes testes visam alongar alguns dos músculos diretamente responsáveis pela flexibilidade de determinada articulação de modo a testá-los. Em específico, os isquiotibiais (grupo compostos pelos músculos semitendinoso, semimembranoso e bíceps da coxa) estão envolvidos diretamente na movimentação do quadril e joelhos. Este grupo de músculos tem grande influência na inclinação antero-posterior da pelvis. Desta forma, a flexibilidade alterada dos isquiotibiais pode conduzir à desvios posturais e conseqüentemente induzir à alterações na articulação do quadril.

Para avaliar a flexibilidade dos isquiotibiais, Carregaro *et al.* (2007) utilizaram em seu trabalho alguns testes clínicos voltados a esta finalidade. Estes testes são conhecidos como: (1) “teste de elevação dos membros inferiores” e (2) “teste dos dedos no chão”. A partir das imagens feitas destes, o programa de fotogrametria do BioMec é capaz de quantizar os

ângulos formados por alguns marcadores fixados em pontos anatômicos dos indivíduos em análise. A Figura 5.11 ilustra os testes e os principais ângulos mensurados.

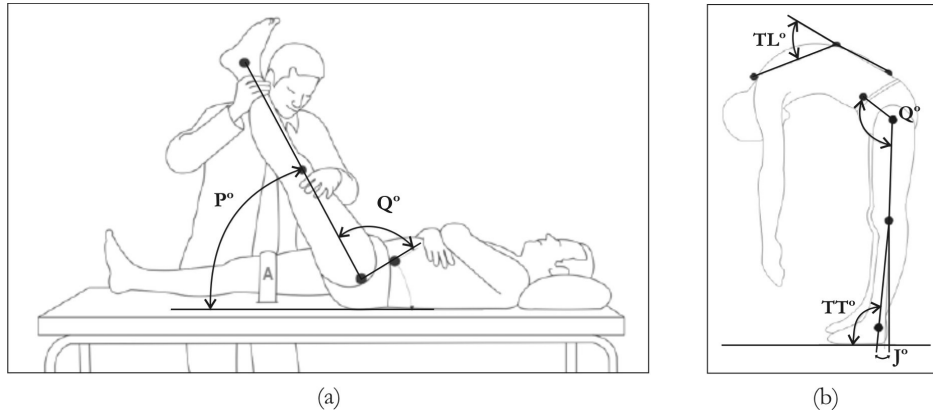


Figura 5.11 - (a) Teste de elevação dos membros inferiores. Q°: ângulo quadril; P°: ângulo perna. (b) Teste de dedos ao chão. Q°: ângulo do quadril, J°: ângulo do joelho, TL°: ângulo tóraco-lombar, TT°: ângulo tíbio-társico. Figuras retiradas de Carregaro *et al.* (2007).

Na Figura 5.12 são exibidas algumas imagens dos testes de elevação dos membros inferiores e teste dos dedos no chão. Nestas imagens são mostrados os valores calculados para os ângulos definidos anteriormente. Estes valores irão dar subsídios a um profissional da área da saúde para que este possa avaliar melhor a flexibilidade de indivíduos.

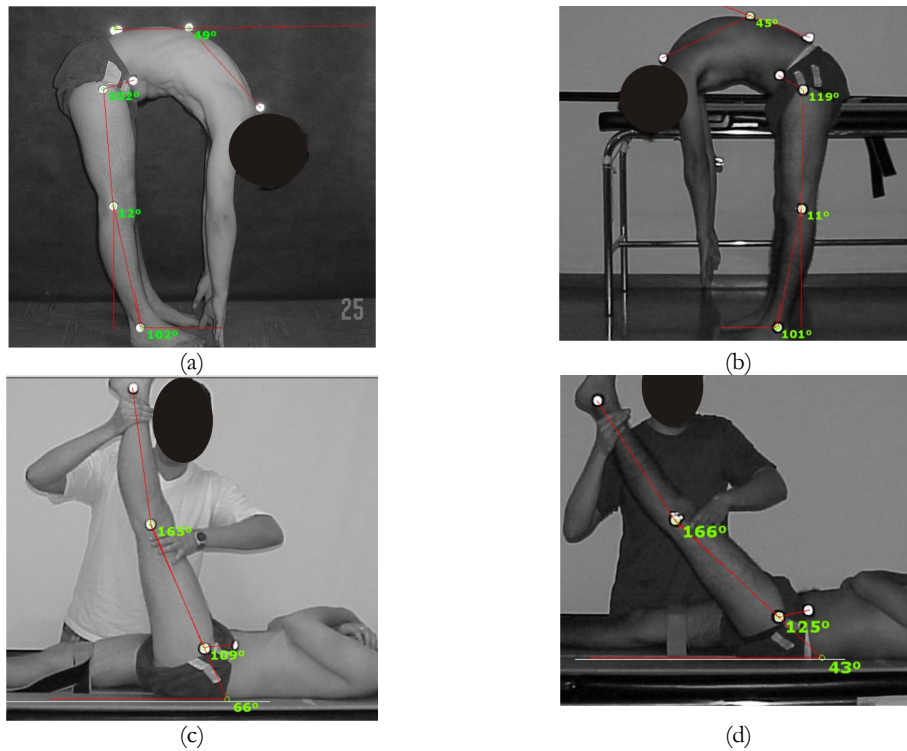


Figura 5.12 - (a) Teste de dedos ao chão. Indivíduo com flexão normal. (b) Teste de dedos ao chão. Indivíduo com flexão diminuída. (c) Teste de elevação dos membros inferiores. Indivíduo com flexão normal. (d) Teste de elevação dos membros inferiores. Indivíduo com flexão diminuída. Fotos cedidas por Rodrigo Carregaro.

5.3 – Considerações do capítulo

Neste capítulo foram descritos experimentos que tinham por objetivo validar o sistema e demonstrar sua aplicação. Algumas de suas características, interfaces e funções foram demonstradas de forma prática no decorrer do capítulo. Em boa parte dos estudos de casos, o rastreamento automático não foi possível devido ao fato que o marcador não apresentou um contraste suficiente para permitir ao programa o rastreamento automaticamente. Mesmo assim, a reconstrução do movimento foi possível graças à opção de rastreamento manual fornecida pelo programa. No processamento bidimensional, o programa forneceu ao seu usuário todas as ferramentas básicas necessárias à captura e análise do movimento. Já para a reconstrução tridimensional, o programa não foi capaz de exibir gráficos tridimensionais e nem de visualizar a animação do *stickman* tridimensionalmente, deixando a desejar neste ponto.

Quanto à questão da precisão e exatidão, esta análise pode ser feita a partir das tabelas 5.1 a 5.4. No entanto, destaca-se que as variáveis exibidas nestas tabelas dependem de uma série de fatores (alguns subjetivos) e que cada experimento pode assumir diferentes valores de precisão e exatidão não havendo assim um valor “padrão”.

Embora cada aplicação possa apresentar diferentes requerimentos de precisão e exatidão, acredita-se que os valores alcançados durante estes testes sejam capazes de atender a boa parte das aplicações práticas envolvendo a mensuração em duas dimensões. Mas especificamente, os resultados da Tabela 5.1 mostraram que o sistema pode ser usado para medir pequenos movimentos com relativa precisão como já afirmavam Josefsson *et al.* (1996). Isto é conseguido graças à relação entre a amplitude do movimento, tamanho do marcador e campo de visão da câmera.

No caso da reconstrução 3D, o erro estimado durante os testes deve ser encarado como significativo se comparado aos sistemas comerciais mais modernos cujo valores excursionam entre 0,1% e 1% (Richards, 1999). Imagina-se que durante o experimento envolvendo a análise 3D, muitos fatores materiais tenham influenciado na qualidade das medições. Dentre elas cita-se o sincronismo feito por *software*, o erro de posicionamento dos pontos de controle do objeto de calibração, o volume de reconstrução mal definido e a quantidade de câmeras empregadas. Além disto, as coordenadas dos marcadores foram selecionadas manualmente na maioria das vezes. Como relata Buschang *et al.*, (2001), quanto maior o número de câmeras empregadas (multi-câmera) no processo de rastreamento, mais preciso deverá ser o sistema. Em seu livro, Viel (2001) afirma que movimentos como o de marcha, exigem pelo menos cinco câmeras. Isto porque o

rastreamento multi-câmera ajuda na redução das ambigüidades, oclusões e provê maior realismo aos dados.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

6.1 – Conclusão

A tecnologia óptico-eletrônica mostra-se bastante atraente pelo fato de não ser invasiva, ter boa precisão e potencial prático. No entanto, ela sofre do sério problema de oclusão de marcadores que dificulta muito o processo de rastreamento. Neste sentido o emprego de muitas câmeras ajuda no rastreamento dos marcadores e na qualidade de medição. Além disto, algoritmos de predição podem ajudar em caso de oclusões confirmadas. Todos estes fatores podem determinar o nível máximo de complexidade de movimento que o sistema é capaz de registrar. Geralmente, quanto maior for a complexidade do movimento (determinada pelo número de graus de liberdade em cada articulação), maior o número de oclusões.

Outra questão importante refere-se à detecção dos marcadores na cena. Percebe-se que os sistemas de captura comerciais têm seguido duas vertentes distintas: (1) aqueles que capturam movimento em ambientes internos (*indoor*) e com algum controle, e (2) outros que voltam seus esforços à ambientes naturais externos (*outdoor*). No primeiro caso, utilizam-se marcadores retro-flexíveis e câmeras infravermelhas. Isto permite que a própria câmera calcule, através de *hardware* adequado, a posição dos marcadores na cena e envie esta posição aos computadores. Neste caso, os computadores assumirão a tarefa de apenas identificar os marcadores, filtrar o sinal e reconstruir as coordenadas do movimento. Isto facilita muito a elaboração de sistemas em tempo real e a eficiência do rastreamento.

No caso de sistemas do tipo *outdoor*, estes geralmente não utilizam marcadores retro-flexíveis e nem câmeras infravermelho. Eles possuem complexos algoritmos de remoção do plano de fundo e detecção de círculos executados por um computador fazendo com que o processamento seja *off-line* e oneroso computacionalmente.

A questão da qualidade da medição é outra questão complexa. São muitos os fatores diretos que têm grande influência sobre ela. Pode-se citar a calibração, sincronização, rastreamento e a filtragem. No caso desta última, é muito importante que o usuário tenha conhecimento de algumas das características do movimento para facilitar na escolha de uma frequência de corte adequada e evitar que características do movimento sejam suprimidas junto aos ruídos. Além disto, é também importante que o sistema seja capaz de suportar algum protocolo de marcadores robusto capaz de representar o

movimento em seus detalhes e minimizar os efeitos do erro relativo da pele em relação ao esqueleto.

Neste contexto, o BioMec apresenta uma estrutura que permite ao sistema trabalhar tanto em ambientes internos (*indoor*) e externos (*outdoor*). Naturalmente que as câmeras utilizadas também deverão ser adequadas à finalidade requerida. No entanto, a questão da oclusão é pouco resolvida neste sistema e a falta de um protocolo robusto de fixação de marcadores possivelmente irá afetar a reprodutibilidade do movimento capturado. Mesmo assim, o programa conjuga um grupo de ferramentas e processos que tornam este sistema uma boa opção na análise de movimentos mais simples. Além disto, acredita-se que o tipo de análise oferecida ao usuário do BioMec possibilite a diminuição da margem de erro envolvida na análise do movimento, além de permitir que, indivíduos diferentes sejam capazes de avaliar as características do movimento com aproximadamente a mesma validade e confiança mesmo tendo experiências e habilidades distintas.

6.2 - Trabalhos Futuros

Os testes e experimentos realizados no decorrer de todas as pesquisas mostraram que o sistema desenvolvido é capaz de capturar movimentos e exibir informações gráficas sobre ele. No entanto, somente movimentos simples foram avaliados. Isto porque o número e a qualidade das câmeras utilizadas eram insuficientes para registrar movimentos complexos.

Para que o BioMec possa reconstruir movimentos mais complexos, é também importante que novas características sejam agregadas ao sistema. Dentre elas, talvez a mais importante, seja a representação matemática do movimento através de algum protocolo confiável de marcadores. Além de poder representar alguns detalhes de movimento, estes protocolos também minimizam os erros de movimento relativo.

É também importante que rotinas de predição de marcadores oclusos sejam implementadas. Neste sentido, os filtros de Kalman tem sido amplamente utilizados (Figuroa *et al.*, 2003) e garantindo um eficiente automatismo no rastreamento dos marcadores. Outras importantes melhorias podem ser destacadas:

- Visualização tridimensional de gráficos e animações baseadas no *stickman*.
- Agregar novos algoritmos otimizados para o cálculo do centro de marcadores e remoção de planos de fundo dinâmicos. Isto ajudaria na eficiência da detecção de marcadores presentes em ambiente externos além de incrementar o automatismo do rastreamento.

- Integração do sistema com outras fontes de dados analógicos como plataformas de força e eletromiógrafos. Isto permitira o cálculo de inúmeros outros parâmetros biomecânicos e cinéticos do movimento.

Referências Bibliográficas

- ABDEL-AZIZ, I. Y. & KARARA, H. M. Direct Linear transformation from comparator coordinates into object coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, p. 1-18, 1971.
- ABUZZAHAB, F. S.; LIM, T. H. & HARRIS, G. F. A method for covering surfaces of reflective gait markers. *J. Gait & Posture*, no. 3, p. 264-265, 1995.
- ADAMS, D. D. & CERNEY, M. M. Quantifying biomechanical motion using Procrustes motion analysis. *Journal of Biomechanics*, no. 40, p. 437-444, 2007.
- ALONSO, F. J.; CASTILHO, J. M. D. & PINTADO, P. Application of singular spectrum analysis to the smoothing of raw kinematic signals. *Journal of Biomechanics*, no. 38, p. 1085-1092, 2005.
- AMADIO, A. C. & DUARTE, M. Fundamentos Biomecânicos para a análise do movimento humano. *EdUSP*, São Paulo, 1996.
- AMBRÓSIO, J.; ABRANTES, J. & LOPES, G. Spatial reconstruction of human motion by means of a single camera and a biomechanical model. *Human Movement Science*, no. 2001, p. 829-851, 2001.
- ANDRIACCHI, T. P. & ALEXANDER, E. J. Studies of human locomotion: past, present and future. *Journal of Biomechanics*, no. 33, p. 1217-1224, 2000.
- AUDU, M. L.; KIRSCH, R. F. & TRIOLO, R. J. Experimental verification of a computational technique for determining ground reactions in human bipedal stance. *Journal of Biomechanics*, (em impressão).
- AVIDAN, S. & SHASHUA, A. Trajectory triangulation: 3DD reconstruction of moving points from a monocular image sequence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 22, p. 348-357, 2000.
- AZEVEDO, E. & CONCI, A. Computação Gráfica: teoria e prática. *Campus*, São Paulo, 2003.
- BAKER, R.. The history of gait analysis before the advent of modern computers. *Gait and Posture*, no. 26, p. 331-342, 2007.
- BARROSA, R. M. L. D.; RUSSOMANNO, T. G.; BREZIKOFFERA, R. & FIGUEROA, P. J. A method to synchronise video cameras using the audio band. *Journal of Biomechanics*, no. 39, p. 776-780, 2006.
- BUSCHANG, P. H.; THROCKMORTON, G. S.; TRAVERS, K. H. & HAYASAKI, H. Incisor and mandibular condylar movements of young adult females during maximum protrusion and lateratrusion of the jaw. *J. Archives of Oral Biology*, no. 46, p. 39-48, 2001.
- CANNY, J. A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 8, p. 679-714, 1986.

- CAPPOZZO, A.; CATANI, F.; CROCE, U. D. & LEARDINI, A. Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination. *Clinical Biomechanics*, no. 10, p. 171-178, 1995.
- CAPPOZZO, A.; CROCE, U. D.; LEARDINI, A. & CHIARI, L. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 1: theoretical background. *J. Gait & Posture*, no. 21, p. 186-196, 2005.
- CARREGARO, R. L.; SILVA, L. C. B. & GIL, H. J. Comparação entre dois testes clínicos para avaliar a flexibilidade dos músculos posteriores da coxa. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, no. 11, p. 139-145, 2007.
- CHEN, T.-C. & CHUNG, K.-L. An efficient randomized algorithm for detecting circles. *Computer Vision and Image Understanding*, no. 83, p. 172-191, 2001.
- CHERNOV, N. & LESORT, C. Least Squares Fitting of Circles. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. no. 23, p. 239-252, 2005.
- CHEUNG, J.; WEVER, D. J. & VELDHUIZEN, A. G. The reliability of quantitative analysis on digital images of the scoliotic spine. *European Spine Journal*, no. 11, p. 535-542, 2002.
- CHIARI, L.; CROCE, U. D.; LEARDINI, A. & CAPPOZZO, A. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: Instrumental errors. *J. Gait & Posture*, no. 21, p. 197-211, 2005.
- CROCE, U. D. & CAPPOZZO, A. A spot check for estimating stereophotogrammetric errors. *Med. Biol. Eng. Comput*, no. 38, p. 260-266, 2000.
- CROCE, U. D.; LEARDINI, A.; CHIARI, L. & CAPPOZZO, A. Human movement analysis using stereophotogrammetry Part4: assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics. *Gait and Posture*, no. 21, p. 226-237, 2005.
- DELP, S. L. & LOAN, J. P. A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement. *Computing in Science & Engineering*, no. 46-55, 2000.
- DEMPSTER, W. T. Space Requirements of the Seated Operator. *Aerospace Medical Research Laboratory*, no. 1, p. 155-159, 1955.
- EVERAERT, D. G.; SPAEPEN, A. J. & WOUTERS, M. J. Measuring Small Linear Displacements with a three-dimensional video motion analysis system: determining its accuracy and precision. *Arch Phys Med Rehabil*, no. 80, p. 1082-1089, 1999.
- FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J. & BARROS, R. M. L. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. *J. Computer Methods and Programs in Biomedicine*, no. 72, p. 155-165, 2003.
- FLAVEL, S. C.; NORDSTROM, M. A. & MILES, T. S. A simple and inexpensive system for monitoring jaw movements in ambulatory humans. *Journal of Biomechanics*, no. 35, p. 573-577, 2002.

- FUKUI, T.; TSURUTA, M.; MURATA, K.; WAKIMOTO, Y.; TOKIWA, H. & KUWAHARA, Y. Correlation between facial morphology, mouth opening ability, and condylar movement during opening-closing jaw movements in female adults with normal occlusion. *European Journal of Orthodontics*, no. 24, p. 327-336, 2002.
- GERSTNER, G. E. & FEHRMAN, J. Comparison of chin and jaw movements during gum chewing. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, no. 81, p. 179-185, 1999.
- GIAKAS, G. & BALTZOPOULOS, V. A comparison of automatic filtering techniques applied to biomechanical walking data. *Journal of Biomechanics*, no. 8, p. 847-850, 1997.
- GIAKAS, G.; STERGIOULAS, L. K. & VOURDAS, A. Time-frequency analysis and filtering of kinematic signals with impacts using the Wigner function: accurate estimation of the second derivative. *Journal of Biomechanics*, no. 33, p. 567-574, 2000.
- GONZALEZ, R. C. & WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, NY, EUA, 2002.
- GORPAS, D.; POLITOPOULOS, K. & YOVA, D. A binocular machine vision system for three-dimensional surface measurement of small objects. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, no. 31, p. 625-637, 2007.
- GUO, Y.; XU, G. & TSUJI, S. Tracking human body motion based on a stick figure model. *Journal of Visual Communication and image representation*, no. 5, p. 1-9, 1994.
- Hall, S. J. *Biomecânica Básica*. Guanabara Koogan, NY, 2005.
- HARITAOGLU, I.; HARWOOD, D. & DAVIS, L. S. W4: Real-time Surveillance of people and their activities. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 22, p. 809-830, 2000.
- HARPER, R. P. & SCHNEIDERMAN, E. Condylar movement and centric relation in patients with internal derangement of the temporomandibular joint. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, no. 75, p. 67-71, 1996.
- Hartley, R. & Zisserman, A. *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge Press, Cambridge, 2003.
- HASSAN, E. A.; JENKYN, T. R. & DUNNING, C. E. Direct comparison of kinematic data collected using an electromagnetic tracking system versus a digital optical system. *Journal of Biomechanics*, no. 40, p. 930-935, 2007.
- HAZLEWOOD, M. E.; HILLMAN, S. J.; LAWSON, A. M. & ROBB, J. E. Marker attachment in gait analysis: on skin or lycra ? *Gait and Posture*, no. 6, p. 263-280, 1997.
- HERDA, L.; FUA P.; PLÄNKERS, R.; BOULIC, R. & THALMANN, D. Using skeleton-based tracking to increase the reliability of optical motion capture. *Human Movement Science*, no. 20, p. 313-341, 2001.

- HOLDEN, J. P.; SELBIE, W. S. & STANHOPE, S. J. A proposed test to support the clinical movement analysis laboratory accreditation process. *J. Gait & Posture*, no. 17, p. 205-213, 2003.
- INMAN, V. T.; LEVENS, A. S. & BLOSSER, J. A. Transverse rotation of the segments of the lower extremity in locomotion. *The Journal of Bone & Joint Surgery*. no. 30, p. 859-872, 1948.
- JOSEFSSON, T.; NORDH, E. & ERIKSSON, P.-O. A flexible high-precision video system for digital recording of motor acts through lightweight reflex markers. *J. Computer Methods and Programs in Biomedicine*. no. 49, p. 119-129, 1996.
- KATADA, K.; KATO, R.; ANNO, H.; OGIURA, Y.; KOGA, S.; Y. IDA & SATO, M. Guidance with Real-Time CT Fluoroscopy: Early clinical experience. *Radiology*, no. 10, p. 851-856, 1996.
- KIM, S.-E., PARK, C. J. & LEE, R. H. Analysis of 3D humamm motion in a computer vision-based motion capture system. *Proceedings of the 7th Korea-Russia International Symposium*, p. 329-334, 2003.
- LEARDINI, A.; BELVEDERE, C.; ASTOLFI, L.; FANTOZZI, S.; VICECONTI, M. & TADDEI, F. A new software tool for 3D motion analyses of the musculo-skeletal system. *J. Clinical Biomechanics*, no. 21, p. 870-879, 2006.
- LEARDINI, A.; CHIARI, L.; CROCE, U. D. & CAPPOZZO, A. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 3: soft tissue artifact assessment and compensation. *J. Gait & Posture*, no. 21, p. 212-225, 2005.
- LINDEBERG, T. Detecting salient Blob-like image structures and their scales with a scale-space primal sketch: a method for focus-of-attention. *International Journal of Computer Vision*, no. 11, p. 283-318, 1993.
- MALETSKY, L. P.; SUN, J. & NORTON, N. A. Accuracy of an optical active-marker system to track the relative motion of rigid bodies. *Journal of Biomechanics*, no. 40, p. 682-685, 2007.
- MANAL, K.; MCCLAY, I.; STANHOPE, S.; RICHARDS, J. & GALINAT, B. Comparison of surface mounted markers and attachment methods in estimating tibial rotations during walking: an in vivo study. *Gait and Posture*, no. 11, p. 38-45, 2000.
- MATSUMURA, H.; TSUKIYAMA, Y. & KOYANO, K. Analysis of sagittal condylar path inclination in consideration of Fischer's angle. *Journal of Oral Rehabilitation*, no. 33, p. 514-519, 2006.
- MENDONÇA, R. M. L. O. & CAMPOS, M. F. M. Evaluation of three-dimensional reconstructions from arbitrary images, *XI SIBGRAPI*, p. 1-8, 1998.
- MOESLUND, T. B.; HILTON, A. & KRÜGER V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Computer Vision and Image Understanding*, no. 104, p. 90-126, 2006.

- MÜNDERMANN, L.; CORAZZA, S. & ANDRIACCHI, T. P. The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, no. 3, p. 1-11, 2006.
- MURRAY, M. P.; DROUGHT, A. B. & KORY, R. C. Walking patterns of normal men. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, no. 46, p. 335-360, 1964.
- NAEIJE, M. Measurement of condylar motion: a plea for the use of the condylar kinematic centre. *Journal of Oral Rehabilitation*, no. 30, p. 225-230, 2003.
- NOMA, T.; OISHI, K. & FUTSUHARA, H. Motion generator approach to translating human motion from video to animation. Kyushu Institute of Technology, *Fukuoka Magazine*, no. 1, p.1-9, 2001.
- PANDY, M. G. Computer Modeling and simulation of human movemet. *Biomed. Eng.* no. 3, p. 245-273, 2001.
- PAPIC, V.; ZANCHI, V. & CACIC, M. Motion analysis system for identification of 3D human locomotion kinematics data and accuracy testing. *J. Simulation Modelling Praticte and Theory*, no. 12, p. 159-170, 2004.
- PARK, W.; CHAFFIN, D. B.; MARTIN, B. J. & FARAWAY, J. J. A computer algorithm for representing spatial-temporal structure of human motion and a motion generalization method. *Journal of Biomechanics*, no. 38, p. 2321-2329, 2005.
- PARK, W.; MARTIN, B. J.; CHOE, S.; CHAFFIN, D. B. & REED, M. P. Representing and identifying alternative movement techniques for goal-directed manual tasks. *Journal of Biomechanics*, no. 38, p. 519-527, 2005.
- PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A. & VETTERLING, W. T. Numerical Recipes in C: the art of scientific computing, Cambridge Press, Cambridge, 1993.
- PRINZ, J. F. The cybermouse: a simple method of describind the trajectory of the human mandibule in three dimensions. *Journal of Biomechanics*, no. 30, p. 643-645, 1997.
- RICHARDS, J. G. The measurement of human motion: A comparison of commercially available systems. *J. Human Movement Science*, no. 18, p. 589-602, 1999.
- RINGES, M. & LASENBY, J. A procedure for automatically estimating model parameters in optical motion capture. *Image and Vision Computing*, no. 22, p. 843-850, 2004.
- RUSSOMANNO, T. G. *Método de sincronização de câmeras de vídeo utilizando a banda de áudio*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas, Campinas, 2005.
- SHOLUKHA, V.; LEARDINI, A., SALVIA, P. & ROOZE, M. Double-step registration of in vivo stereophotogrammetry with both in vitro 6-DOFs electrogoniometry and CT medical imaging. *Journal of Biomechanics*, no. 39, p. 2006.
- SILVA, L. C. *Método robusto para a calibração de câmeras em estereofotogrametria*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

- SOUTAS-LITTLE, R. W. Gait Analysis in The Science Of Rehabilitation. *Diane Pub*, NY, 1998.
- STAUFFER, C. & GRIMSON, W. E. L. Adaptive background mixture models for real-time tracking. Tech. Rep. 1166.03, Computer Vision and Pattern Recognition Group, Santa Barbara, 1998.
- STEINBRUCH, A. & WINTERLE, P. Algebra Linear, *Makron Books*, São Paulo, 1995.
- SUTHERLAND, D. H. The evolution of clinical gait analysis Part II Kinematics. *Gait and Posture*, no. 16, p. 159-179, 2002.
- SUTHERLAND, D. H. & HAGY, J. L. Measurement of gait movements from motion picture film. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, no. 54, p. 787-797, 1972.
- THORNTON, M. J.; MORRISSEY, M. C. & COUTTS, F. J. Some effects of camera placement on the accuracy of the kinematrix three-dimensional motion system. *Clinical Biomechanics*, no. 13, p. 452-454, 1998.
- THURSTON, A. J. Giovanni Borelli and the study of human movement: an historical review. *Surgical History*, no. 69, p. 276-288, 1999.
- TRAVERS, K. H.; P. H. BUSCHANG; HAYASAKI, H. & THROCKMORTON, G. S. Associations between incisor and mandibular condylar movements during maximum mouth opening in humans. *J. Archives of Oral Biology*, no. 45, p. 267-275, 2000.
- TSAI, R. Y. 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*, no. 3, p. 323-344, 1987.
- VALSTAR, E. R.; GILL, R.; RYD, L. & FLIVIK, G. Guidelines for standardization of radiostereometry (RSA) of implants. *Acta Orthopaedica*, no. 76, p. 563-572, 2005.
- VIEL, É. A marcha humana, a corrida e o salto - Biomecânica, investigações, normas e disfunções, *Manole*, São Paulo, 2001.
- WALKER, J. A. Estimating velocities and accelerations of animal locomotion: a simulation experiment comparing numerical differentiation algorithms. *The Journal of Experimental Biology*, no. 201, p. 981-995, 1998.
- WU, G. & CAVANAGH, P. R. ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data. *Journal of Biomechanics*, no. 28, p. 1257-1261, 1995.
- YOON, H.-J.; ZHAO, K. D.; REBELLATO, J.; AN, K.-N. & KELLER, E. E. Kinematic study of the mandible using an electromagnetic tracking device and custom dental appliance: Introducing a new technique. *Journal of Biomechanics*, no. 39, p. 2325-2330, 2006.
- YUAN, X. & RYD, L. Accuracy analysis for RSA: a computer simulation study on 3D marker reconstruction. *Journal of Biomechanics*, no. 33, p. 493-498, 2000.

ZAFAR, H.; ERIKSSON, P.-O. & NORDH, E. Wireless optoelectronic recordings of mandibular and associated head-neck movements in man: a methodological study. *Journal of Oral Rehabilitation*. no. 27, p. 227-238, 2000.

ZAJAC, F. E.; NEPTUNE, R. R. & KAUTZ, S. A. Biomechanics and muscle coordination of human walking Part I: Introduction to concepts, power transfer, dynamics and simulations. *Gait and Posture*, no. 16, p. 215-232, 2002.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. Tech. Rep. 1166.03, Microsoft Corporation, Redmond, 1998

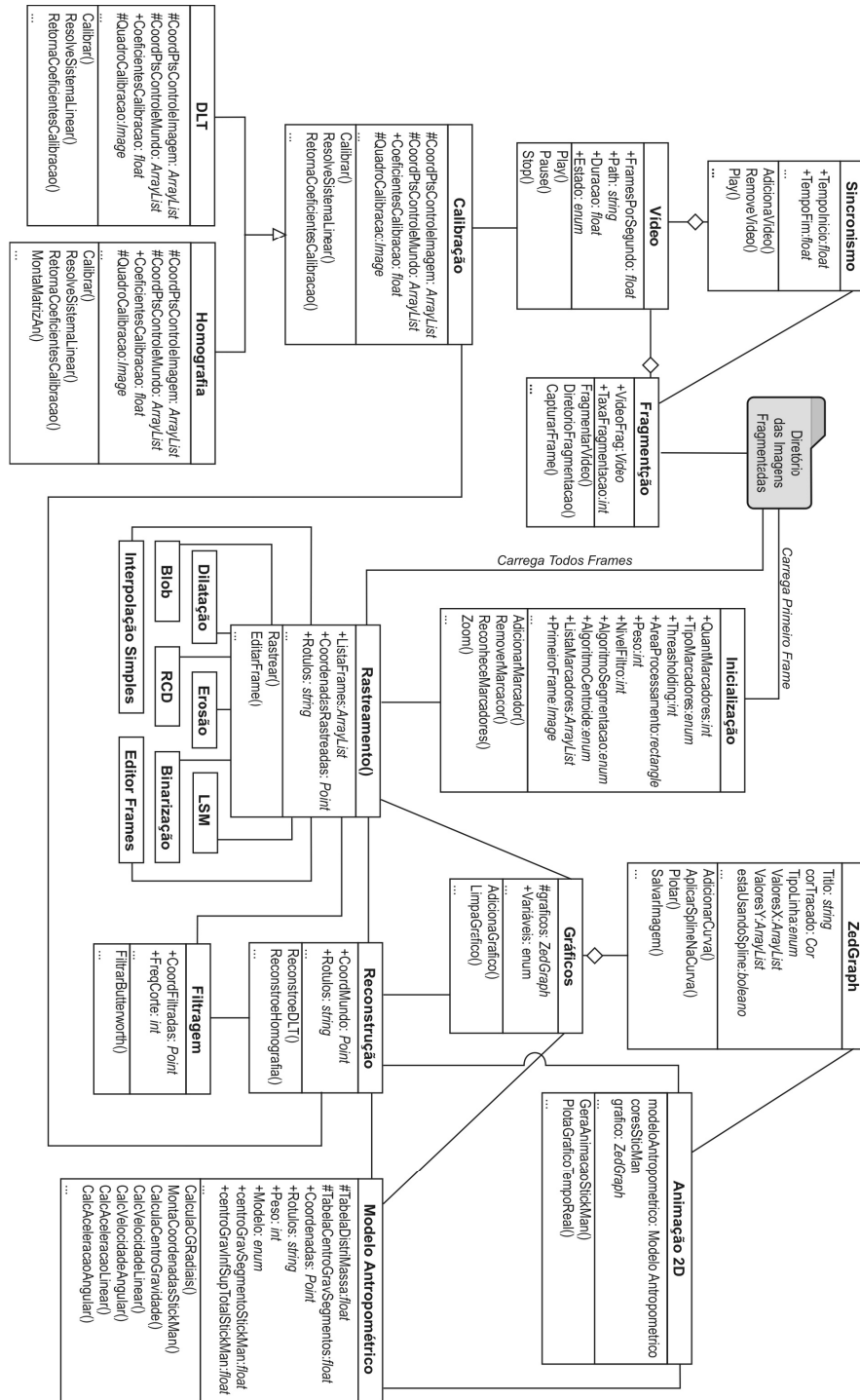
Zoubir, A. M. & Boashash, B. The bootstrap and its application in signal processing. *IEEE Signal Processing Magazine*., no. 98, p. 56-76, 1998.

URL 1: Página oficial da Vicon. Disponível em: <http://www.vicon.com/>. Acessado em: out. 2007.

URL 2: Página oficial da Panamericano Brasil 2007. Disponível em: <http://www.cob.org.br/pan2007/portugues/indexpt.asp>. Acessado em: set. 2007.

Anexo A - Diagrama de classes resumido do projeto

O diagrama abaixo ilustra as relações básicas entre as classes segundo o modelo definido pela UML.



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)