

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

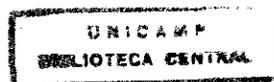
Faculdade de Educação Física

**CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DE MOVIMENTOS
HUMANOS**

Ricardo Machado Leite de Barros

Campinas, março de 1997

ii



6019046

UNIDADE	BC
F. CH. MADA:	F7 UNICAMP
V.	B278c
TOMBO DE	30673
PROC.	28497
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/05/97
N.º CPD	

CM-00098808-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA FEF-UNICAMP

Barros, Ricardo Machado Leite de
B278c Concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos / Ricardo Machado Leite de Barros. -- Campinas, SP : [s. n.], 1997.

Orientador: René Brenzikofer
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.

I. Biomecânica. 2. Instrumentação. I. Brenzikofer, René. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título

**CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DE MOVIMENTOS
HUMANOS**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Educação Física

**CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DE MOVIMENTOS
HUMANOS**

Autor: Ricardo Machado Leite de Barros

Orientador: Prof. Dr. René Brenzikofer

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Educação Física

**CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DE MOVIMENTOS
HUMANOS**

Ricardo Machado Leite de Barros

Este exemplar corresponde à
redação final da tese de
doutoramento defendida por
RICARDO MACHADO LEITE DE
BARROS e aprovada pela comissão
julgadora em:

Data: *11 de março de 1997*

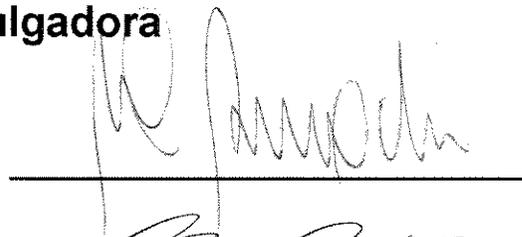
Assinatura:



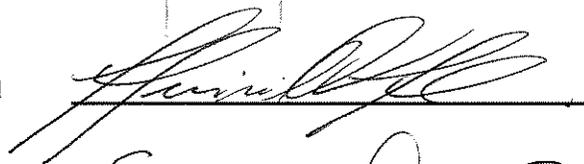
Tese defendida como exigência à obtenção do título de DOUTOR EM EDUCAÇÃO FÍSICA, na área de concentração: Ciências do Esporte à comissão julgadora da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas, sob orientação do Prof. Dr. René Brenzikofer.

Comissão Julgadora

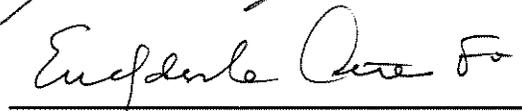
Prof. Dr. Alberto Carlos Amadio



Prof. Dr. Aluísio Otávio Vargas Ávila



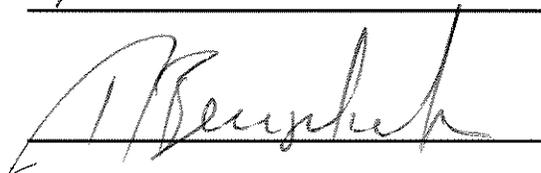
Prof. Dr. Euclides Custódio Lima Filho



Prof. Dr. Luis Eduardo Barreto Martins



Prof. Dr. René Brenzikofer



AGRADECIMENTOS

Meu muito obrigado às pessoas que orientaram a minha formação acadêmica a quem eu espero não decepcionar: Prof. Dr. René Brenzikofer, Prof. Dr. Wolfgang Baumann e Prof. Dr. Euclides Custódio Lima Filho.

Aos amigos do dia-a-dia: Sergio Cunha, Luciano Mercadante, Pascual Figueroa, Luis Barreto, Roseli Golfetti, João Freire e tantos outros.

Aos colegas do Instituto de Biomecânica da Universidade de Esportes de Colônia.

Ao Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD) e a Faculdade de Educação Física da UNICAMP, pela viabilização do programa de doutorado cooperativo.

Aos meus pais: Sr. Omar e D. Lenita.

À Cristina, minha esposa.

Ao Caio, meu filho.

CONCEPÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA ANÁLISE CINEMÁTICA DE MOVIMENTOS HUMANOS

Ricardo Machado Leite de Barros

Orientador: Prof. Dr. René Brenzikofer

RESUMO

Esta pesquisa consiste da concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos, baseado em registros de vídeo. O conceito orientador do sistema é apresentado. Problemas inerentes à análise cinemática tridimensional de movimentos são equacionados e soluções propostas. As soluções implementadas são testadas e exemplos de aplicação do sistema são mostrados.

As características principais do sistema proposto são a independência em relação a equipamentos dedicados, a possibilidade de utilizar marcadores passivos e ativos sob condições experimentais diversas, a confiabilidade dos resultados, a simplicidade de operação e o baixo custo.

Duas câmeras ou mais registram o movimento de interesse. As sequências de imagens são digitalizadas e armazenadas no disco rígido do computador. Essas imagens são medidas e analisadas no software dedicado ao sistema, onde algoritmos de medição manual e automática estão disponíveis. No software estão implementadas ferramentas para busca automática de marcas, reconhecimento de padrões e processamento de imagens.

A fim de permitir a análise tridimensional de movimentos, procedimentos foram implementados para calibração de câmeras, reconstrução de coordenadas, sincronização de registros para câmeras não sincronizáveis por hardware e avaliação da qualidade das aquisições.

CONCEPTION AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM FOR KINEMATIC ANALYSIS OF HUMAN MOVEMENTS

Ricardo Machado Leite de Barros

Supervisor: Dr. René Brenzikofer

ABSTRACT

This research consists in the conception and implementation of a system for kinematic analysis of human movements, based on video registers. The guide concept is presented. Problems inherent to the three-dimensional kinematic analysis of human movements are formulated and solutions proposed. The implemented solutions are tested and applied examples shown.

The main features of the proposed system are the independence in relation to dedicated hardware, the possibility to use passive and active markers under distinct experimental condition, the goodness of the results, the simplicity to operate and the low cost.

Two video cameras or more register the movement of interest. The image sequences are digitalised and saved on the hard disk. The images are measured and analysed in a dedicated software, where algorithms to manual and automatic measurement are available. In the software were implemented tools for automatic tracking of markers, pattern recognition and image processing.

In order to allow the three-dimensional analysis of movements, procedures are implemented for cameras calibration, co-ordinates reconstruction, register synchronisation from non-synchronised cameras and the estimation of the goodness from results.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	01
1. Introdução.....	02
2. Objetivos.....	08
3. Justificativa.....	10
CAPÍTULO I - Apresentação do Sistema	12
1. Sistemas para Análise Cinemática Tridimensional de Movimentos.....	14
2. Concepção do Sistema.....	16
3. Descrição do Sistema.....	21
4. Caracterização dos Equipamentos.....	25
4.1 Câmeras de Vídeo.....	25
4.2 Tripés para câmeras de Vídeo.....	26
4.3 Conversor Analógico-Digital para Sinal de Vídeo.....	26
4.4 Computador.....	27
CAPÍTULO II - Calibração de Câmeras e Reconstrução Tridimensional	28
1. O Método DLT.....	31
1.1 Primeiro Procedimento: Calibração de Câmeras.....	31
1.2 Segundo Procedimento: Reconstrução Tridimensional.....	34
2. Descrição e Avaliação da Implementação.....	37
2.1 Implementação do Algoritmo de Calibração de Câmeras.....	37
2.2 Implementação do Algoritmo de Reconstrução Tridimensional.....	40
2.3 Avaliação dos Algoritmos de Calibração e Reconstrução.....	41
CAPÍTULO III - Sincronização de Registros	
1. Caracterização do Problema.....	49
2. Parâmetros Necessários à Sincronização por Software.....	51
2.1 Defasagem Temporal entre os Registros.....	51
2.2 Diferença de Freqüências.....	54

3. Sincronização por meio de Sinal Externo de Sincronização (SES).....	56
3.1 Formulação da Solução.....	56
3.2 Resultados Experimentais.....	57
4. Sincronização por meio de Calibração Dinâmica (SCD).....	64
4.1 Formulação da Solução.....	64
4.2 Resultados Experimentais.....	70
5. Interpolação de Coordenadas para Reconstrução Tridimensional.....	73
6. Fluxograma da Implementação.....	74

CAPÍTULO IV - Procedimentos de Medição, Tracking Automático e Reconhecimento de Padrões 77

1. Procedimentos de Medição.....	79
1.1 Medição Manual.....	80
1.2 Medição Semi-Automática.....	81
1.3 Medição Automática.....	82
2. Algoritmos Implementados para Detecção de Marcas.....	85
2.1 Procedimentos de Inicialização dos Algoritmos.....	85
2.2 Algoritmo de Definição das Regiões de Busca.....	88
2.3 Algoritmos de Casamentos de Padrões.....	88
3. Fluxograma.....	91
4. Avaliação dos Algoritmos de Medição.....	93
4.1 Medição Manual e Automática de Marcas Ativas.....	93

CAPÍTULO V - Exemplos de Aplicação do Sistema 99

1. Análise Comparativa do Sistema Proposto e um Sistema de Maior Resolução Espacial e Temporal.....	100
1.1 Descrição da Metodologia.....	100
1.2 Resultados e Discussão.....	103
1.3 Conclusões do Experimento.....	107
2. Análise da Marcha de um Sujeito Normal com o Sistema DVIDEO.....	109
1.1 Descrição da Metodologia.....	109
1.2 Resultados e Discussão.....	111

1.3 Conclusões do Experimento.....	113
CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

APRESENTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A descrição quantitativa de movimentos humanos tem despertado grande interesse em diferentes áreas do conhecimento. Cada vez mais faz-se necessário e torna-se possível que o movimento humano seja estudado em detalhes, de maneira sistemática e como objeto de investigação científica.

Estabelecem-se assim relações quantificáveis entre o resultado da ação de movimentar-se, em sua particularidade e em seu conjunto, e fenômenos passíveis de investigação científica ou de interesse prático. Exemplos são a utilização desta metodologia nos estudos de distúrbios, deficiências, anomalias ou limitações com reflexos sobre o aparelho locomotor.

Da mesma forma, a análise biomecânica do movimento permite a avaliação de graus de habilidade ou destreza na execução de uma dada tarefa motora, abrindo assim caminho para as diferentes avaliações da performance humana, seja no esporte, no trabalho ou em atividades da vida diária.

Tomando-se o ato motor como um fenômeno integrado, isto é, não se trata de um corpo qualquer que se movimenta mas de um ser humano, ampliam-se os limites da referida análise pelas suas intrínsecas relações com os processos de decisão e controle motor. Desta relação entre o controle motor e o ato motor propriamente dito, surgem inúmeras possibilidades de estudos integrados sobre importantes processos como, por exemplo, o desenvolvimento e a aprendizagem motora.

Desta forma, como meio de pesquisa, instrumento de avaliação clínica, pedagógica ou da performance humana, a descrição quantitativa de movimentos ganha relevância acadêmica e também social. Contudo, apesar de todas as potencialidades acima citadas, entre outras certamente existentes, não é possível verificar uma grande difusão da referida análise.

Estabelecidos os benefícios potenciais da análise, uma melhor compreensão das razões que contribuíram para uma restrita difusão da análise 3D de movimentos humanos depende do entendimento das dificuldades inerentes em realizá-la. Deve-se, portanto, considerar os aspectos ligados à complexidade e custo para a sua realização.

Conjuntamente, devem ser avaliados os fatores ligados ao estágio de desenvolvimento tecnológico dos equipamentos necessários a realização da análise. Deve-se atentar também para fatores intrínsecos às tecnologias selecionadas por cada sistema para efetuar-la.

Outro complicador para a realização da análise cinemática tridimensional é que o movimento humano pode apresentar-se de maneira extremamente complexa, de forma que inexiste para todos os problemas, pelo menos até o momento, uma solução genérica e única.

A adequação e eficiência de um determinado sistema de análise mantém estreita relação com a complexidade do movimento que ele permite estudar. Faz-se necessário, portanto, um contínuo desenvolvimento das metodologias para o estudo dos movimentos humanos, nas suas diferentes aplicações potenciais.

Em consequência dos benefícios desta análise e das dificuldades em realizá-la, diferentes sistemas foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas com tal finalidade. Da análise da produção na área, podemos afirmar que a pesquisa em metodologia biomecânica voltada para o desenvolvimento de sistemas de análise cinemática continua intensa. É nesse contexto de desenvolvimento de instrumentação para biomecânica que se insere nosso trabalho.

Tendo em vista a relevância da análise cinemática tridimensional de movimentos, as suas potencialidades e as suas necessidades de difusão e aperfeiçoamento metodológico, propusemos nesse trabalho um sistema para tal finalidade.

Nossa proposta será apresentar o conceito do sistema proposto, discutir as principais barreiras metodológicas à sua implementação, apresentar as soluções por nós formuladas e, finalmente, mostrar exemplos de aplicação do sistema.

Devemos destacar que o desenvolvimento do sistema manteve estreita vinculação com dois aspectos. O primeiro é o aperfeiçoamento dos instrumentos necessários à análise (câmeras de vídeo, conversores analógico-digitais e computadores pessoais). O segundo diz respeito ao desenvolvimento dos algoritmos para que a análise possa ser realizada de maneira rápida e confiável.

Projetamos o software dedicado ao sistema de maneira a oferecer um ambiente computacional para a análise de seqüências de imagens, com aplicações em Biomecânica. Concentramos nele recursos como algoritmos de medição manual, semi-automática e automática de coordenadas, sincronização de registros, calibração de câmeras e reconstrução tridimensional de pontos de interesse, além de algoritmos de controle da qualidade das aquisições. Desta forma, o sistema permite, a partir dos recursos implementados, a utilização das câmeras de vídeo como instrumentos confiáveis de medida.

Os objetivos centrais de nosso trabalho orientam-se, primeiramente, para a apresentação do conceito geral de um sistema de processamento, análise e extração de padrões em imagens digitais, voltado para análise biomecânicas, e capaz de interfacear-se com diferentes sistemas de captação de imagens.

Em segundo lugar, pretendemos equacionar e apresentar soluções para a implementação do conceito, contribuindo de maneira genérica para a melhoria da análise cinemática 3D de movimentos. Por fim, pretendemos descrever detalhadamente o sistema e mostrar exemplos de sua aplicação, avaliando sua precisão e adequação em problemas típicos da análise biomecânica.

Ao longo do trabalho, tentaremos mostrar que algumas características que conferem confiabilidade e permitem a facilitação da difusão da análise cinemática por vídeo estão presentes no sistema proposto. As referidas características são basicamente:

- a) confiabilidade nos resultados fornecidos pela análise.
- b) simplicidade de operação do sistema.
- c) rapidez no processamento das informações.
- d) flexibilidade de uso.
- e) custos compatíveis.

Contextualizando a pesquisa, devemos ressaltar que ela foi realizada parcialmente no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas e no Institut für Biomechanik - Deutsche Sporthochschule Köln (IfB - DSHS) - Alemanha.

A oportunidade a nós oferecida pelo Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD) possibilitou que tivéssemos contato com os pesquisadores de um instituto de grande tradição dentro da Biomecânica mundial. Certamente que o produto final de nosso trabalho carrega parte da experiência acumulada nos dois citados laboratórios, sendo muitas vezes difícil distinguir a nossa contribuição individual da produção coletiva dos referidos laboratórios.

Outro aspecto que merece destaque ainda a respeito da realização do programa de doutoramento cooperativo é que pudemos avaliar a adequação do sistema proposto em dois contextos distintos. Uma realidade de escassez de recursos e pequena infra-estrutura, e a outra em situação ótima com relação a instalações e recursos materiais.

A respeito deste texto, devemos dizer que ele foi elaborado como requisito à defesa de doutoramento, na Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas. O texto foi estruturado de maneira a permitir que os

problemas essenciais da pesquisa fossem tratados em capítulos que - apesar de integrados - possuam relativa independência em cada tema.

Na apresentação incluímos esta introdução, os objetivos e a justificativa para o trabalho. Procuramos mostrar o contexto em que se insere a análise biomecânica de movimentos, a motivação que nos levou a realizar este trabalho, as características genéricas do sistema proposto e os objetivos específicos do trabalho. Uma discussão sobre a literatura especializada relativa aos diversos temas abordados foi incluída nos capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o conceito norteador do sistema, descreve-o quanto aos procedimentos de operação e equipamentos necessários a sua utilização e mostra a estrutura do software dedicado ao sistema.

O segundo capítulo discute os procedimentos de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional adotados, avaliando a qualidade obtida a partir da implementação feita. Estes procedimentos permitem que a partir das medições feitas nas imagens digitais, possamos determinar os valores das coordenadas espaciais dos pontos de interesse em função do tempo.

O capítulo três apresenta o problema da sincronização de registros para a análise tridimensional de movimentos, bem como, descreve os métodos que desenvolvemos para solucionar este problema.

O capítulo quatro trata dos procedimentos de medição, tracking automático e reconhecimento de padrões em imagens digitais. Além disso, contém uma discussão genérica sobre o assunto, descrevendo os algoritmos que implementamos em nosso sistema de análise. Destacamos as principais características da medição manual, semi-automática e automática de coordenadas em seqüências de imagens. Apresentaremos também, avaliações feitas dos algoritmos de medição manual e automática.

O quinto e último capítulo contém exemplos de aplicação do sistema e avaliações sobre a qualidade do mesmo, de maneira a fornecer elementos de apreciação tanto da aplicabilidade como da precisão das análises fornecidas.

2. OBJETIVOS

A presente pesquisa teve, portanto, como objetivos:

1. A apresentação de um conceito para um sistema de análise tridimensional de movimentos humanos que integre os recentes avanços tecnológicos nas áreas de vídeo e computação pessoal e que pelas suas características permita maior difusão da referida análise.
2. Equacionar e apresentar soluções para os seguintes problemas inerentes à análise 3D de movimentos:
 - Implementação de algoritmos de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional de coordenadas.
 - Desenvolvimentos de métodos de sincronização de registros para realização de reconstrução tridimensional.
 - Concepção e implementação de algoritmos para detecção e busca de padrões em seqüências de imagens digitais, que permitam a medição manual, semi-automática e automática de pontos de interesse à análise de movimentos humanos.
 - Desenvolvimento de algoritmos integrados ao sistema que permitam o controle e avaliação da qualidade das aquisições e medições feitas pelo sistema.
3. A implementação do sistema e sua aplicação na análise de movimentos em diferentes contextos onde haja aplicação potencial do sistema. Análise dos dados obtidos para confrontação com valores esperados e avaliação da precisão obtida pelo sistema nas diferentes situações de uso.

É importante aqui destacar que o enfoque principal do nosso trabalho não está no estudo de problemas aplicados. Portanto, as análises aqui apresentadas tomam forma de exemplos de aplicação orientados para o aprimoramento e avaliação do sistema e não de estudos completos de problemas aplicados.

Apesar disso, atentamos para que o desenvolvimento metodológico ocorresse sempre intimamente ligado às possíveis aplicações, buscando nessa relação sempre a solução ótima dentro dos limites de aplicabilidade.

3. JUSTIFICATIVA

Tarefa importante diante dos objetivos propostos é a justificativa de termos trabalhado na direção de um novo sistema, uma vez que existem outros sistemas para a mesma finalidade, embora com outras características.

A principal justificativa para a concepção deste sistema é o interesse acadêmico-científico de pesquisar sempre soluções mais genéricas e concisas para problemas relevantes a um determinado campo de investigação.

No sistema que apresentamos, estas características de generalidade e concisão estão presentes de diferentes maneiras. Podemos citar a característica do sistema de independência em relação a equipamentos dedicados. Assim, suas potencialidades de utilização ficam largamente ampliadas.

Da mesma forma, a integração em único ambiente computacional de diversos algoritmos para busca e detecção de diferentes tipos de marcadores confere flexibilidade de aplicação ao sistema. Lembramos que a grande maioria dos sistemas capazes de realizar detecção automática de marcas pode operar com apenas um único tipo de marcador.

Ainda devemos destacar que as soluções implementadas para o problema da sincronização de registros tornam possível que câmeras não sincronizáveis, por hardware, sejam utilizadas em aplicações onde a sincronização é indispensável.

Não bastando justificar o trabalho pelas suas características internas, devemos destacar as mínimas exigências impostas pelo sistema no que diz respeito a equipamentos ou recursos computacionais. Além disso, procuraremos mostrar ao longo do texto a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo sistema.

Aspecto que não pode ser considerado irrelevante em um trabalho de pesquisa é sua adequação à realidade que gerou a necessidade da pesquisa. Assim, torna-se importante considerar que características de simplicidade e de baixo custo do sistema proposto são elementos facilitadores importantes quando objetiva-se a difusão de um determinado tipo de análise.

Como último ponto a ser destacado, devemos levar em consideração que os recursos tecnológicos que permitiram a proposição do conceito e a implementação deste sistema surgiram apenas nos últimos três anos.

CAPÍTULO I

Apresentação do Sistema

APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo, descreveremos o sistema proposto evidenciando seu conceito gerador, as suas partes constitutivas e as interligações de cada elemento. Apresentaremos considerações gerais sobre outros sistemas existentes (item 1), mostraremos a concepção do sistema proposto (item 2), faremos a sua descrição detalhada (item 3) e buscaremos caracterizar os equipamentos necessários a sua operação (item 4).

No terceiro item, onde apresentaremos o conjunto do sistema, iremos enfatizar não apenas os seus elementos constituintes mas também pretendemos mostrar o fluxo de informações no sistema.

Os fluxogramas e as avaliações detalhadas dos algoritmos específicos para calibração de câmeras e reconstrução tridimensional de coordenadas, sincronização de registros e medição de coordenadas serão apresentados nos capítulos II, III e IV, respectivamente.

1. SISTEMAS PARA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DE MOVIMENTOS

A história das ciências registra inúmeros casos de obstinação de pesquisadores na busca por uma determinada informação, instrumento de medida ou resultado. A história da Biomecânica é rica em exemplos.

Os trabalhos fotográficos pioneiros de MUYBRIDGE (1878) oferecem uma síntese brilhante de interesse científico associado à expressão artística, na análise de movimentos humanos. Publicado originalmente em onze volumes em 1887, o trabalho contém mais de 4700 fotografias dos mais diferentes movimentos humanos.

Atentando mais especificamente à descrição quantitativa do movimento humano, os trabalhos de BRAUNE & FISCHER (1897), realizados no final do século passado, são referências tanto no que diz respeito às análises realizadas mas também pela instrumentação desenvolvida por eles para fazê-las.

Inúmeros outros autores e grupos de pesquisa são exemplos da obstinação na busca de criar meios para a construção dos conhecimentos em Biomecânica. WOLTRING (1989) relatou com propriedade a evolução da análise de movimentos a partir de conceitos de fotogrametria.

WOLTRING & HUISKES (1986) demonstram como, a partir da década de sessenta, várias alternativas à cinematografia foram desenvolvidas. Os autores destacam o surgimento de sistemas óptico-eletrônicos e outros baseados em vídeo.

FURNÉE (1986) enfatizou que a evolução de equipamentos (câmeras, conversores A/D etc) e de procedimentos significou uma drástica melhoria na resolução espacial fornecida por sistemas baseados em vídeo-digital. GREAVES (1991) reafirma esta posição dizendo que a evolução dos equipamentos

computacionais e metodologias de programação tem sido parte necessária dos progressos da instrumentação para análise 3D.

Muitos autores trabalharam no desenvolvimento de sistemas como (WINTER, 1972; WHITTLE, 1982; WESTERMARKT 1990; MORRIS, 1990; FERRIGNO, 1990; HERRMANN, 1990; MITCHELSON, 1990; VAUGHAN, 1992).

Foge, entretanto, aos objetivos deste trabalho uma caracterização ou comparação dos inúmeros sistemas para análise de movimentos hoje existentes. Esse trabalho encontra-se sistematizado em publicações como as de BOENICK & NÄDER (1991), BERME & CAPOZZO (1990) e ALLARD & STOKES & BLANCHI (1995).

2. CONCEPÇÃO DO SISTEMA

O conceito norteador do sistema define-se em acordo com o duplo objetivo de melhoria genérica da análise cinemática tridimensional e da contribuição científico-acadêmica para viabilizar a sua difusão nos mais diversos contextos de utilização, conforme já explicitamos anteriormente. Esta idéia permeia assim, todos os nossos esforços na formulação e implementação do sistema.

A concretização do conceito faz-se, por exemplo, pela característica imposta ao sistema de não exigir equipamentos dedicados para a realização da análise. Mais do que isso, optou-se por instrumentos de grande simplicidade de operação, baixo custo, largamente difundidos mas que apesar disso fornecem a confiabilidade necessária.

Para compreender as condições concretas a partir das quais o sistema pode ser formulado, discutiremos, a seguir, tendências das pesquisas e dos resultados concretos na área de vídeo digital. Os recentes resultados das pesquisas sobre equipamentos de vídeo mostra uma grande evolução na qualidade dos equipamentos para captação de vídeo doméstico (VHS e Video8), semi-profissional como o S-VHS e Hi-8 e, mais recentemente, o aparecimento no mercado das câmeras de vídeo digitais (DV).

Paralelamente ocorreu, nos últimos dois anos, uma impressionante evolução dos conversores analógico-digitais de sinais de vídeo, que permitem hoje o armazenamento em tempo real de seqüências de imagens. Este fato viabilizou a construção de um sistema que trabalha com seqüências de imagens armazenadas em disco rígido. Alia-se a esses fatores a importante evolução na capacidade de armazenamento e processamento de informações dos computadores pessoais.

No que diz respeito aos equipamentos de vídeo, a evolução ocorreu tanto nos componentes eletrônicos das câmeras como nos ópticos. Pode-se dizer hoje

que as distorções ópticas das câmeras citadas foram minimizadas de tal forma que são irrelevantes para a maioria das aplicações feitas na análise biomecânica de movimentos.

Sabemos que um dos problemas limitadores da utilização de sistemas baseados em vídeo na análise de certas aplicações da biomecânica é a relativamente baixa resolução espacial. Este fato está diretamente ligado ao número total de linhas captadas pela câmera para formar cada campo de imagem.

Contudo, o aumento do número de linhas captadas de 260 no padrão VHS / Video8 para 400 no padrão S-VHS / Hi-8, 500 linhas captadas no padrão DV (ainda uma câmera semi-profissional) e mais de 1000 linhas no padrão HD-TV mostram uma forte tendência de incremento da qualidade final da imagem (SANDBANK & CHILDS, 1985; FUJIO, 1985).

Some-se a isso também, a transmissão em separado dos sinais de luminância e crominância já presente nas câmeras semi-profissionais. Este fator confere maior qualidade nos registros e, conseqüentemente, uma melhoria das condições de operação do sistema de análise de imagens.

Além de todos esses fatores, a evolução dos componentes eletrônicos das referidas câmeras permitiu sua redução de volume e massa, estando disponíveis hoje, em praticamente todos os padrões e tamanhos. Desde câmeras compactas até as micro-câmeras.

Para aplicações em esportes, por exemplo, as mini e micro-câmeras são extremamente adequadas. O tamanho reduzido associado à possibilidade de controle remoto e transmissão por telemetria das imagens, permite posicioná-las em locais de acesso difícil ou impossível para um operador.

Deve-se destacar ainda que as tecnologias de aquisição, transmissão e armazenamento de seqüências de imagens digitais tendem a evoluir ainda mais

rapidamente, pressionadas pela demanda do mercado "multimídia", além de apresentarem concomitantemente uma redução significativa de custos.

Em síntese, podemos antever a ampliação das potencialidades dos sistemas baseados em vídeo pois estes são beneficiários diretos de uma tendência de evolução tecnológica irreversível.

Associa-se a estas características dos equipamentos selecionados, o fato que no sistema proposto foi dada ênfase especial ao ambiente computacional e ao software correspondente. Privilegiou-se soluções por software para problemas inerentes a análise de movimentos em detrimento de soluções que implicassem na adição de novos equipamentos ao sistema. Como exemplo, podemos citar que a sincronização das câmeras faz-se possível por meio de algoritmos implementados.

Além disso, estão disponíveis no software rotinas que permitem ainda a calibração de câmeras, reconstrução de coordenadas espaciais, medição manual e automática de pontos de interesse, avaliação da qualidade da medição feita, entre outros, em um ambiente amigável para o usuário.

É importante destacar que o conceito proposto para o sistema transcende a implementação que foi possível realizar. Isto significa que a idéia geradora do sistema não se esgota no software e nos algoritmos que efetivamente são apresentados.

Isto não se deve a imperfeições da implementação feita, mas as características e limites inerentes a um trabalho de desenvolvimento de tese. Essas características impõem restrições ao volume de algoritmos implementados, por exemplo, em um sistema como esse.

Da mesma forma, algumas das soluções que elaboramos para problemas centrais da análise de movimentos a partir de câmeras de vídeo, como os algoritmos

de medição automática de projeções e a sincronização de diversas câmeras, não se restringem ao sistema proposto.

Estas soluções são genericamente válidas e confiáveis, como mostraremos em capítulos próprios. Isto significa que as soluções aqui formuladas e testadas podem ser adotadas, de forma parcial ou completa, em outros sistemas de análise de movimentos.

Este sistema foi concebido, portanto, levando-se em conta principalmente quatro fatores:

1. O primeiro é o aperfeiçoamento e a difusão dos instrumentos necessários à análise cinemática tridimensional de movimentos, como: câmeras de vídeo, conversores analógico-digitais e computadores pessoais. Como exemplo, podemos citar os avanços ocorridos nos últimos três anos na tecnologia de placas de conversão A/D para vídeo. A partir destes equipamentos tornou-se possível o armazenamento de seqüências de imagens de vídeo - em tempo real - em discos rígidos de computadores pessoais. Ainda no que se refere a equipamentos podemos destacar que a melhoria progressiva da qualidade das câmeras de vídeo e o aumento da capacidade de processamento dos computadores pessoais, permitiram-nos projetar um sistema que utiliza equipamentos não dedicados e largamente difundidos.
2. O segundo é o surgimento de ambientes computacionais e linguagens de programação que permitem a implementação integrada dos diferentes algoritmos necessários à análise de movimentos. Desta maneira, importantes etapas da análise de movimentos, como a medição de coordenadas em imagens ou a análise dos dados, podem estar integradas em um único ambiente computacional ou software.
3. Aspecto importante também é o surgimento na literatura especializada de soluções teóricas para problemas ligados a análise cinemática, tanto originárias das áreas de metodologia biomecânica, como de áreas como a de reconhecimento de padrões em imagens, entre outras.

4. Por último, devemos destacar nossa contribuição individual para a viabilização do conceito do sistema, na medida em que formulamos e implementamos também soluções para problemas genéricos da análise cinemática tridimensional de movimentos.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para a compreensão do sistema como um todo, apresentamos, na figura 1, um fluxograma de suas partes constitutivas e identificamos as principais conexões entre os recursos disponíveis.

FLUXOGRAMA DO SISTEMA

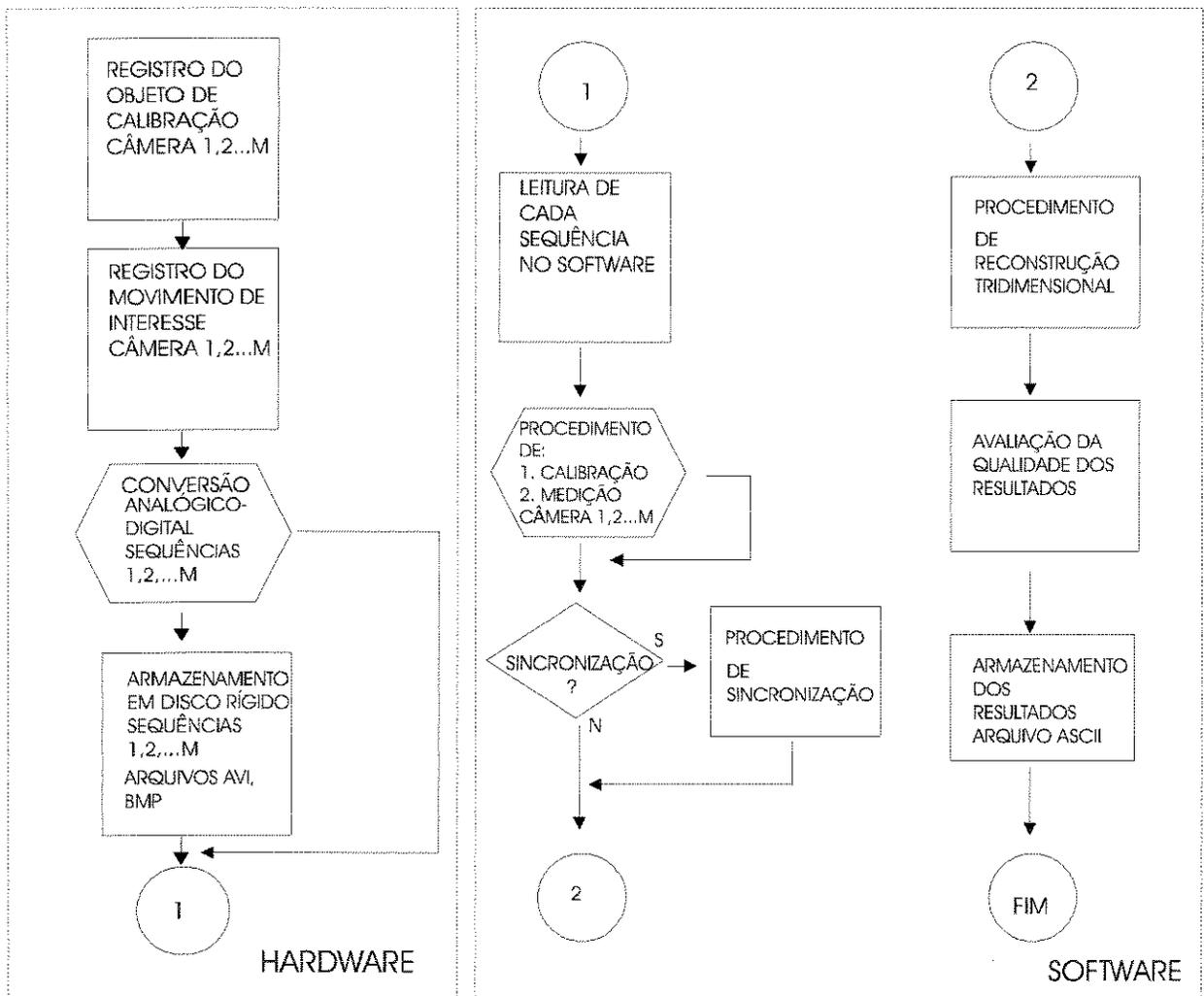


Figura 1: Fluxograma do sistema proposto

O sistema consiste fundamentalmente de equipamentos (hardware) e um programa de computador (software). Os equipamentos necessários para o

funcionamento do sistema não são dedicados podendo ser utilizados quaisquer equipamentos que atendam as exigências mínimas do sistema, como mostraremos no item (4).

Na parte indicada como "software", apresentamos a estrutura do menu principal do programa dedicado ao sistema que foi denominado DVIDEOW, Digital Video for Biomechanics for Windows 32 bits.

Salientamos que a característica de independência em relação a um único equipamento estende-se não apenas às câmeras de vídeo que podem ser usadas para os registros, mas também aos conversores analógico-digitais.

Conforme pode ser visto no fluxograma do sistema, o primeiro procedimento que deve ser adotado é o registro do objeto de calibração. Uma vez posicionadas as câmeras, um conjunto de pontos de apoio com coordenadas espaciais conhecidas, no mínimo seis, deve ser registrado simultaneamente por todas as câmeras que serão utilizadas na filmagem. Também é possível utilizar pontos de apoio previamente existentes no cenário onde a filmagem será realizada, desde que suas coordenadas espaciais relativas sejam conhecidas.

Uma vez feito o registro dos pontos de apoio, o objeto de calibração (caso tenha sido usado) deve ser retirado do local da filmagem e o movimento de interesse ali realizado, sem que a posição, orientação ou foco das câmeras tenham sido alterados.

Completado o registro do movimento, efetua-se, a partir do gravador da própria câmera ou de um videocassete, a conversão analógico-digital dos trechos de vídeo que contém os movimentos de interesse, para cada câmera. Feito isso, arquivos digitais no disco rígido do computador armazenarão o registro feito por cada câmera e servirão de entrada para o software de análise de movimentos.

Os procedimentos seguintes são realizados já no software DVIDEOW. Este software foi desenvolvido inicialmente em ambiente BORLANDC C++ para DOS e, em versão posterior, em VISUAL C++ for Windows 32 bits.

O software aceita como entrada os arquivos de imagens com extensões BMP, DIB ou AVI, com número de linhas e colunas variáveis até o máximo de 480 linhas por 640 colunas. A profundidade de cor é de 24 bits, o que significa que para cada pixel temos três valores de cor no padrão RGB (RED, GREEN e BLUE), com 8 bits destinados para cada canal de cor.

Cada sequência de imagens armazenada em disco deve ser carregada no software para que sejam realizados os procedimentos de calibração das câmeras e medição de coordenadas. Os procedimentos de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional serão detalhados no capítulo II.

A teoria do reconhecimento de padrões fornece os fundamentos para a medição automática de pontos de interesse que realizamos. Contudo, integramos aos conceitos genéricos desta teoria, como a segmentação, processamento da imagem, extração de cantos e linhas, casamento (matching) de padrões, às características particulares da aplicação feita: a análise do movimento humano.

As marcas de identificação podem ser marcas ativas ou passivas, marcas ou pontos características diferenciáveis na imagem ou pontos visualmente estimáveis (medição manual). O número máximo de marcas por imagem permitido pelo software é trinta.

Para que sejam efetuadas as medições, foram implementados algoritmos de busca e detecção automática de padrões com propriedades diferentes, adequáveis as características da aplicação feita pelo usuário. Esses algoritmos podem ser combinados entre si, ou com a medição manual de coordenadas, quando não for possível a identificação plenamente automática das marcações. Esses algoritmos são detalhados no capítulo IV.

Um problema inerente ao uso de câmeras de vídeo padrão é a impossibilidade de sincronização externa dos registros, sem alteração da eletrônica original da câmera. Esta limitação pode tornar-se uma fonte importante de erros quando da reconstrução das coordenadas espaciais, uma vez que os registros das projeções não ocorrem simultaneamente.

A solução para tal problema por nós formulada está apresentada em detalhes no capítulo III e consiste em determinar os parâmetros de sincronização das câmeras: diferença inicial em tempo e diferença na frequência de aquisição, a partir de processos de otimização. Esta solução encontra-se implementada em forma de rotinas no software.

4. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

4.1 Câmeras de Vídeo

O sistema permite a utilização de praticamente todos os tipos de câmeras existentes no mercado para o registro de movimentos, excetuando-se aquelas que não satisfazem as condições discriminadas, a seguir.

As câmeras devem permitir controle sobre o tempo de abertura (shutter), uma vez que mesmo para movimentos lentos como a marcha, verifica-se que marcas localizadas em segmentos como pernas e braços produzem “borrões” nas imagens. Este fato deve-se ao fato que os deslocamentos na imagem da projeção dos pontos em questão são significativos, durante o tempo em que os foto-sensores acumularam a informação luminosa.

Uma observação importante é que alguns sistema automáticos de ajuste do tempo de abertura de câmera podem não operar de maneira satisfatória para análise de movimentos. Caso as câmeras sejam posicionadas frente a um cenário onde nenhum movimento ocorre, os programas automáticos de controle do tempo de abertura tendem a adotar um tempo de abertura grande, por exemplo 1/50 s. Quando um sujeito ou objeto surge no referido cenário, o controle automático pode não responder de maneira suficientemente rápida para ajustar-se a nova situação. Para que esse efeito seja evitado recomenda-se a escolha de câmeras que permitam a fixação de um determinado valor para o shutter (opção manual).

Em razão da necessidade que a distância focal da câmera seja a mesma durante a calibração e o registro dos movimentos de interesse, o foco deve ser fixado no momento da calibração.

Devem ser utilizadas no mínimo duas câmeras quando se pretende realizar reconstrução tridimensional. Estas devem ser posicionadas de maneira a que cada

ponto de interesse seja simultaneamente visível a partir de, no mínimo, duas câmeras.

O uso de câmeras semi-profissionais como as S-VHS e Hi8 incrementa a qualidade das imagens em relação ao VHS ou Video8, pelo registro de um número maior de linhas, número total de sensores e pela transmissão em separado dos sinais de luminância e crominância. Contudo, para que se possa saber se as diferenças apontadas justificam a adoção dessas câmeras é necessário avaliar a aplicação pretendida.

4.2 Tripés para Câmera de Vídeo

Para que seja possível a realização da reconstrução tridimensional de coordenadas conforme descreveremos no capítulo II, é necessário que as câmeras não alterem suas posições, orientações e distância focal desde o momento da calibragem até o fim do registro dos movimentos de interesse. Com esta finalidade, os tripés devem ser utilizados.

A característica principal do tripé deve ser sua estabilidade, impedindo que a câmera mova-se durante a sessão de registro de movimentos. Dependendo do tamanho da câmera utilizada deve-se optar por um tripé mais ou menos robusto. Destaca-se que em tripés muito instáveis o acionamento manual das câmeras ou mesmo as vibrações do seu motor podem alterar sua posição.

4.3 Conversor Analógico-Digital para Sinal de Vídeo (Capture Board)

O padrão de entrada do sinal aceito pela placa deve ser compatível com as câmeras utilizadas. Preferencialmente deve-se utilizar uma placa de conversão capaz de capturar e permitir o armazenamento do sinal de vídeo em tempo real (60 Fields/s - sistema NTSC / PAL-M). Caso não seja possível a conversão em tempo real, pode-se utilizar a digitalização quadro-a-quadro, contudo o processo aumenta o tempo total para análise dos dados.

Deve-se optar por aquelas placas que fazem a conversão e armazenamento em tempo real uma perda mínima de informações. Cada placa utiliza algoritmos de compressão, por hardware ou software, para dar conta de processar o grande volume de informações transmitidas. Muitas vezes essa compressão não ocorre sem perda de informações.

4.4 Computador

Um computador pessoal, tipo PC 486 ou superior, com monitor capaz de operar com paletas de mais de 256 cores simultâneas, mínimo de 8 Mbytes de memória RAM e sistema operacional windows for 32bits (Windows 95 ou NT) deve ser utilizado.

CAPÍTULO II

Calibração de Câmeras e Reconstrução Tridimensional

CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS E RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

Neste capítulo apresentaremos os problemas inerentes ao uso de câmeras - fotográficas, cinematográficas ou de vídeo - para que possamos usar os registros a fim de realizar descrições quantitativas de movimentos. Mostraremos como estabelecer relações que permitam, a partir de medições nas projeções de determinados movimentos (imagens), descrever cinematicamente o movimento no espaço tridimensional.

O método de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional de coordenadas, conhecido por Direct linear Transformation (DLT) será apresentado de maneira detalhada. Também mostraremos a implementação feita e avaliaremos a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para que possamos efetuar uma descrição quantitativa de um movimento necessitamos inicialmente registrá-lo. Desde o surgimento das primeiras formas de registro de movimentos para análise tridimensional, como por exemplo a fotografia, até a utilização da câmera digital (DV) enfrentou-se o mesmo problema de calibração e reconstrução de coordenadas.

O problema consiste em que as câmeras fotográficas, filmadoras cinematográficas ou câmeras de vídeo registram apenas uma projeção do movimento em um plano, o plano da imagem. Este registro é, portanto, insuficiente para uma descrição do movimento no espaço. Isto se deve ao fato que somente com informações relativas a duas dimensões do movimento (plano da imagem) não é possível reconstruir uma trajetória ocorrida em três dimensões (espaço euclidiano).

A solução para este problema envolve dois procedimentos integrados. O primeiro deles é conhecido como calibração das câmeras e o segundo reconstrução

tridimensional. A calibração das câmeras pode ser definida como sendo o procedimento que permite obter o posicionamento e orientação de duas ou mais câmeras em relação a um sistema de referência previamente definido.

Conhecidas as transformações objeto-imagem dadas pelo procedimento de calibração, a reconstrução de coordenadas (transformação imagem-objeto) consiste em calcular as coordenadas espaciais dos pontos de interesse, a partir da medição das projeções.

O procedimento que utilizamos foi inicialmente proposto por ABDEL-AZIZ & KARARA (1971) e é conhecido como DLT (Direct Linear Transformation). A seguir detalhamos o algoritmo:

1. O MÉTODO DLT

Para que seja possível a obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos de interesse a partir da medição em suas projeções é necessário encontrar as transformações matemáticas que relacionam as projeções do ponto procurado às suas coordenadas espaciais.

A solução completa do problema divide-se em dois procedimentos, a saber: a) calibração de cada câmera (item 1.1) e b) reconstrução das coordenadas espaciais a partir das medições das projeções em, no mínimo, duas câmeras (item 1.2). O primeiro procedimento pode ser descrito analiticamente da seguinte maneira.

1.1 Primeiro Procedimento: Calibração das Câmeras

Considere um objeto rígido, estático, contendo pontos contrastantes marcados com coordenadas relativas conhecidas, que será filmado por pelo menos duas câmeras, conforme mostrado abaixo:

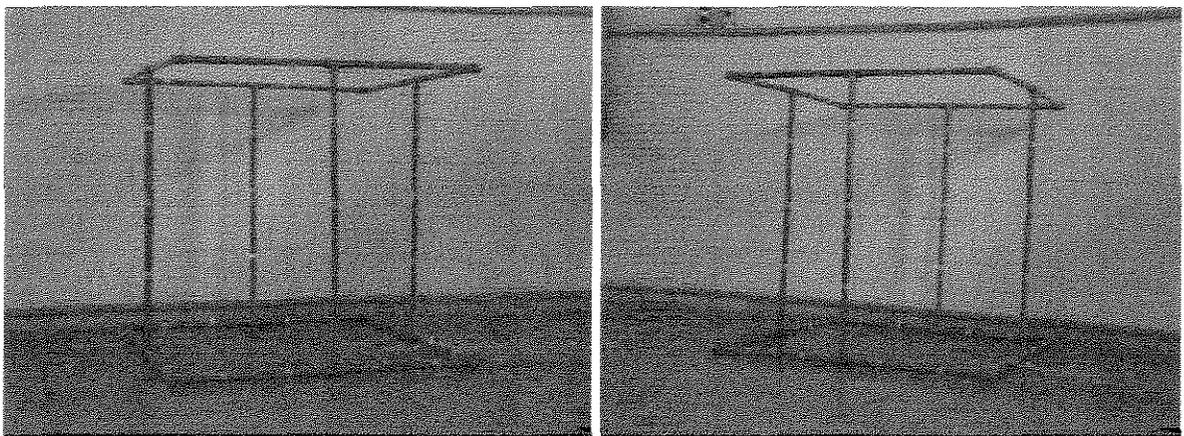


Figura 2: Imagens do sistema de referências para calibração do espaço onde serão realizadas as medições. Na imagem, a cada uma das referências estão associadas coordenadas de tela, isto é, a linha e a coluna da imagem. As coordenadas espaciais das referências devem ser conhecidas.

As equações básicas do método (DLT) são mostradas abaixo.

$$(n_1^k - n_3^k x_i) X_i + (n_4^k - n_6^k x_i) Y_i + (n_7^k - n_9^k x_i) Z_i + n_{10}^k - x_i = 0 \quad [E1]$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i) X_i + (n_5^k - n_6^k y_i) Y_i + (n_8^k - n_9^k y_i) Z_i + n_{11}^k - y_i = 0 \quad [E2]$$

Onde x_i e y_i são as coordenadas de tela da i -ésima referência, X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais da i -ésima referência e n_h^k ($h=1,\dots,11$) são os 11 parâmetros da transformação para a k -ésima câmera, a serem determinados. O número mínimo de referências é seis e o número máximo, em acordo com a implementação feita, vinte e quatro.

Para cada referência, em cada câmera, obtemos duas equações: E1 e E2. Como são onze os parâmetros (n_h) necessários para a calibração de cada câmera, necessitamos das coordenadas (x,y) e $(X, Y$ e $Z)$ de, no mínimo, seis referências. Desta maneira, teremos um sistema de doze equações lineares independentes e onze incógnitas.

Isto significa que o objeto de calibração deverá ter, no mínimo, seis referências com coordenadas conhecidas, que foram medidas na imagem da câmera que está sendo calibrada. Cabe lembrar que para cada câmera realizamos um procedimento independente de calibração, obtendo um conjunto independente de onze parâmetros de calibração (n_{11}^k) para cada câmera.

Como o sistema apresentado é sempre superdimensionado, isto é, maior número de equações independentes do que incógnitas, e conseqüentemente mais de uma solução para o problema, efetuamos uma otimização das soluções possíveis.

Para que possamos encontrar os onze parâmetros que otimizam a solução do sistema de equações minimizaremos para cada câmera uma função R , por quadrados mínimos (linear), conforme definida abaixo. A função será mínima

quando as derivadas parciais da função em relação a cada um dos parâmetros da transformação forem iguais a zero, conforme descrevemos abaixo:

$$R = \sum_{i=1}^N ((E1(x_i, X_i, Y_i, Z_i, n_h))^2 + (E2(y_i, X_i, Y_i, Z_i, n_h))^2) \quad [E3]$$

Onde N é o número total de referências utilizadas para a calibração da câmera, x_i e y_i são as coordenadas de tela da i -ésima referência, X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais da i -ésima referência e n_h ($h=1, \dots, 11$) são os parâmetros da transformação.

As condições para solução do sistema de equações do método DLT, para os 11 parâmetros n_h são obtidas pela minimização do resíduo, conforme mostra a equação abaixo.

$$\frac{\partial R}{\partial n_h} = 0 \quad [E4]$$

Com $h=1, 2, \dots, 11$. A função R pode ser interpretada como sendo o resíduo, ou a medida da distância residual, entre o modelo utilizado e os dados existentes. O resíduo nos fornece, neste caso, uma boa estimativa da qualidade do ajuste entre a solução encontrada e os dados disponíveis. Este resíduo será utilizado posteriormente por nós nos procedimentos de sincronização.

Da maneira acima descrita, obtemos os parâmetros de orientação interna e externa para cada câmera em relação ao nosso sistema de referências. Uma vez que a posição e orientação das câmeras não serão mais alteradas, o objeto de calibração poderá ser retirado da frente das câmeras para que neste espaço sejam realizados os movimentos de interesse.

O espaço para filmagem tendo sido calibrado, isto é, de posse dos parâmetros (n_i da transformação direta) para cada câmera, basta que obtenhamos, no mínimo, duas projeções de um ponto qualquer no espaço para que possamos determinar sua posição espacial. Este procedimento está descrito como sendo o “segundo passo” do método.

1.2 Segundo Procedimento: Reconstrução Tridimensional

Uma vez determinados os valores dos parâmetros para a transformação linear direta (DLT) para cada uma das câmeras podemos considerá-las calibradas. Assim, todos os movimentos que as câmeras registrarem, a partir da mesma posição e orientação em que foi feita a calibração, poderão ser posicionados no espaço pela medição apenas dos valores das coordenadas de tela (projeções).

Considere as projeções de pontos marcados sobre a pele de um sujeito e registradas por duas câmeras em um espaço previamente calibrado, conforme as figuras a seguir.

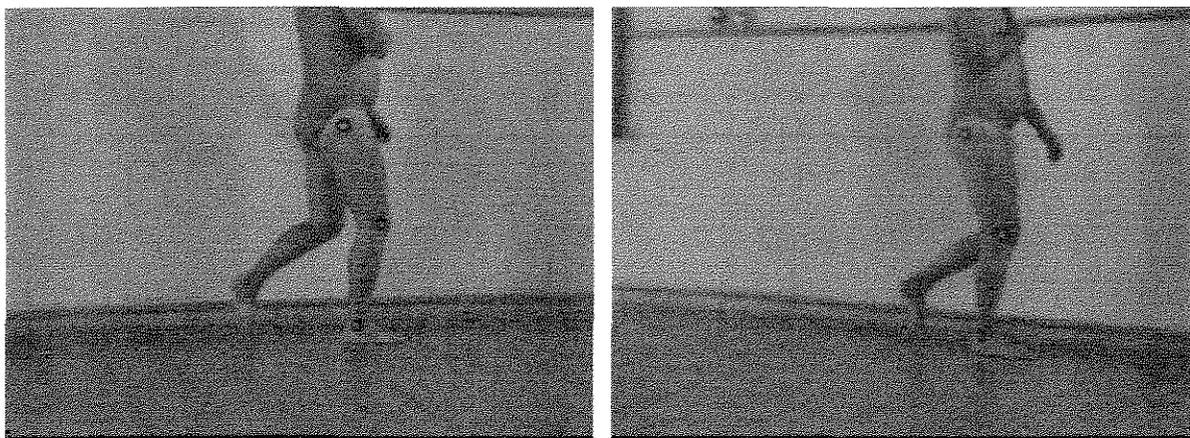


Figura 3: Imagens projetadas registradas por duas câmeras da marcha de um sujeito, com pontos de interesse assinalados sobre a pele.

Dado que as câmeras foram calibradas, isto é, os 11 parâmetros do DLT foram obtidos no procedimento de calibração para cada câmera, e as coordenadas

das projeções de pontos de interesse podem ser obtidas - também em cada sequência captada por cada câmera, a reconstrução das coordenadas espaciais pode ser feita. Analiticamente, temos:

$$(n_1^k - n_3^k x_i^k) X_i + (n_4^k - n_6^k x_i^k) Y_i + (n_7^k - n_9^k x_i^k) Z_i + n_{10}^k - x_i^k = 0 \quad [E5]$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i^k) X_i + (n_5^k - n_6^k y_i^k) Y_i + (n_8^k - n_9^k y_i^k) Z_i + n_{11}^k - y_i^k = 0 \quad [E6]$$

Onde x_i^k e y_i^k são as coordenadas de tela do ponto de interesse na i -ésima imagem, da k -ésima câmera. n_h^k ($h=1,\dots,11$) são os 11 parâmetros de calibração para a k -ésima câmera e X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do ponto de interesse na i -ésima imagem, a serem determinadas. $k \geq 2$

Para determinarmos cada ponto de interesse no espaço o número de câmeras deve ser, no mínimo, dois. Portanto, obtemos um sistema de, no mínimo, quatro equações com três incógnitas. A solução deste sistema superdimensionado também é feita por minimização dos resíduos, conforme o caso análogo utilizado na calibração das câmeras.

$$R = \sum_{k=1}^M ((E5(x_i, X_i, Y_i, Z_i, n_h^k))^2 + (E6(y_i, X_i, Y_i, Z_i, n_h^k))^2) \quad [E7]$$

A Equação [E7] define o resíduo do sistema de equações do método DLT. Onde M é o número total de câmeras utilizadas para reconstrução, x_i e y_i são as coordenadas de tela do i -ésimo ponto de interesse, n_h^k ($h=1,\dots,11$) são os parâmetros da transformação, para a k -ésima câmera. X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do i -ésimo ponto de interesse, a serem determinados

De maneira análoga a realizada no primeiro procedimento, as condições de solução do sistema de equações do método DLT, para as coordenadas X , Y , Z , minimizando-se o resíduo são dadas por:

$$\frac{\partial \mathcal{R}}{\partial X} = 0 \quad [E8], \quad \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial Y} = 0 \quad [E9], \quad \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial Z} = 0 \quad [E10]$$

Da maneira acima descrita, obtemos as coordenadas espaciais de cada ponto de interesse em cada imagem, conforme desejamos. A seguir, mostraremos o algoritmo implementado a partir das equações descritas, neste capítulo, e avaliaremos os resultados obtidos.

2. DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO

Detalharemos, a seguir, as implementações feitas para os algoritmos de calibração de câmeras (item **2.1**), reconstrução de coordenadas (item **2.2**) e apresentaremos resultados da avaliação dos referidos procedimentos (item **2.3**).

2.1 Implementação do Algoritmo de Calibração de Câmeras.

Como todos os demais algoritmos que iremos apresentar, o da calibração das câmeras associa-se ao menu principal do programa DVIDEOW, sendo a partir dele chamado e a ele retornando ao final.

O algoritmo deve ser aplicado para a imagem de calibração de cada câmera. Os valores retornados pela função são os onze parâmetros n_h , conforme descrito no primeiro procedimento (item **1.1**), deste capítulo. A figura 4 mostra o fluxograma do algoritmo implementado.

CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS

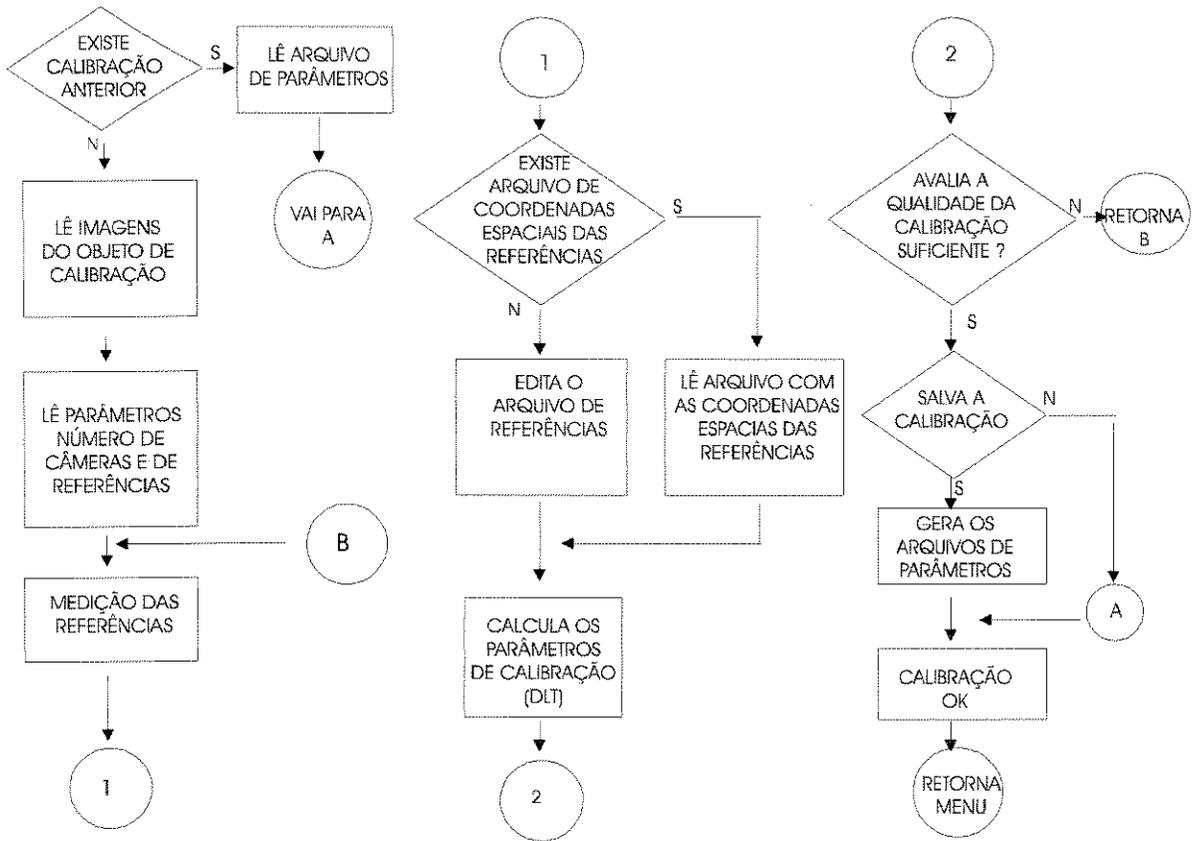


Figura 4: Fluxograma do algoritmo de calibração das câmeras.

O primeiro bloco do fluxograma representa a possibilidade dada ao operador de ler um arquivo de calibração previamente existente. Como muitas vezes vários registros de movimentos são feitos a partir de uma mesma posição e orientação da câmera, o software permite que os parâmetros relativos a calibração de uma câmera possam ser armazenados em arquivo independente. Desta maneira, não será preciso repetir todo o procedimento de calibração para cada movimento de interesse.

O próximo passo do procedimento é a leitura da imagem do objeto de calibração ou da imagem que contém os pontos de referência com coordenadas espaciais conhecidas. Ao realizar o procedimento, o software gera uma janela própria onde a medição das coordenadas de tela das referências deve ser efetuada.

O bloco referente a leitura de parâmetros corresponde ao procedimento que o operador deve realizar de fornecer qual o número da câmera que está sendo calibrada e o número total de referências que deverão ser utilizadas para a calibração.

A seguir devem ser medidas manualmente as coordenadas de tela das referências. Embora a implementação da medição automática das coordenadas das referências não apresente dificuldade maior, desde que as marcações sejam contrastantes com o fundo das imagens, esta opção não está implementada. Apesar disso, este procedimento é bastante simples pois trata-se apenas de medir, em uma única imagem, as coordenadas das referências. O número máximo de referências que o sistema permite para a calibração é vinte e quatro e o número mínimo seis referências.

Para que se forneça ao sistema os valores das coordenadas espaciais das referências pode-se optar pela leitura de um arquivo previamente editado ou então pela edição, em janela de diálogo própria, das referidas coordenadas.

O cálculo dos parâmetros de calibração é feito a partir da solução do sistema de equações mostrado no item 1.1, deste capítulo. Esta rotina foi extraída de PEETRONIS & SPAEPEN (1984).

2.2 Implementação do Algoritmo de Reconstrução Tridimensional

RECONSTRUÇÃO DE COORDENADAS

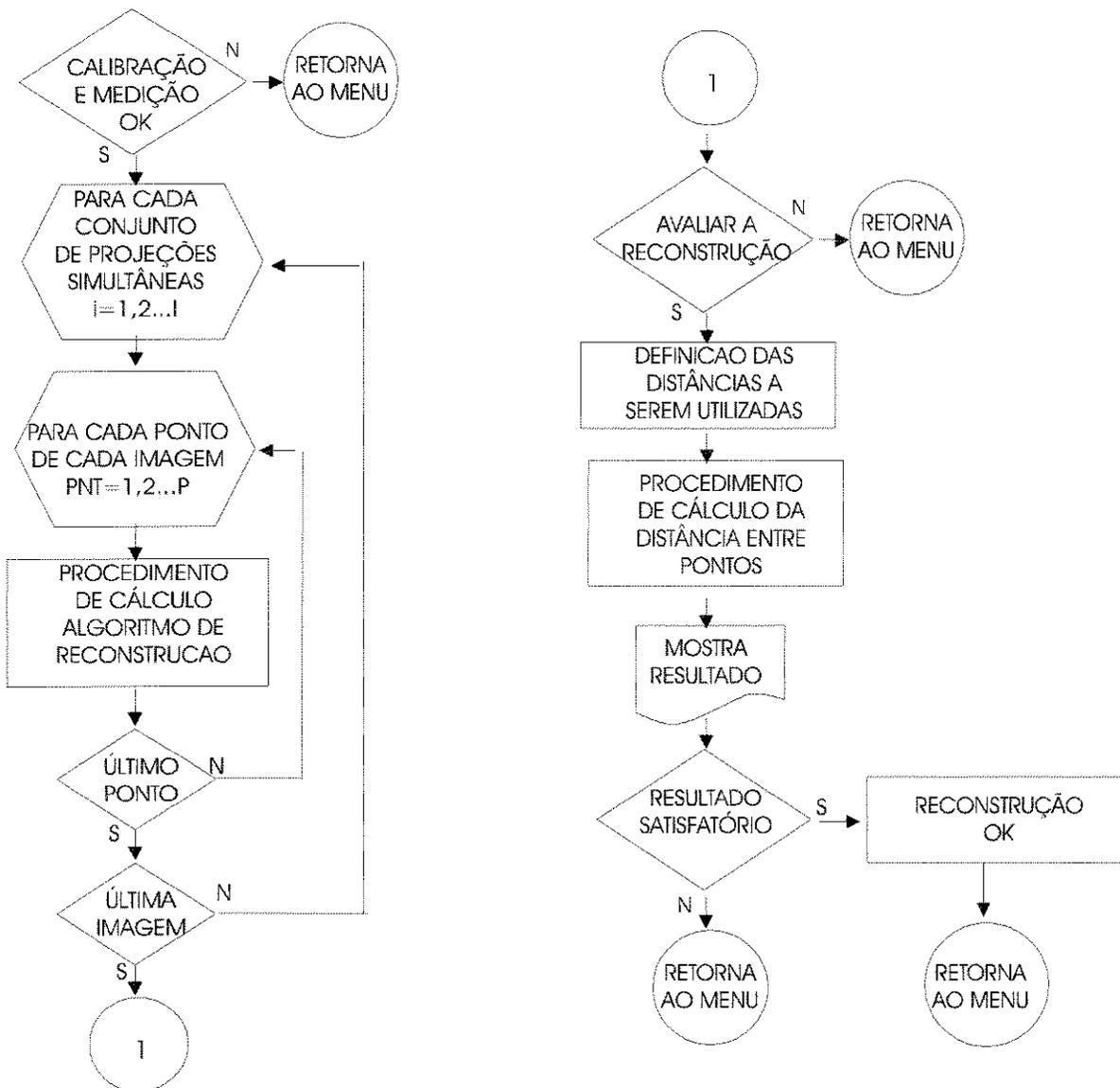


Figura 5: Fluxograma do algoritmo de reconstrução tridimensional de coordenadas.

Partindo-se do menu principal do programa, o algoritmo de reconstrução de coordenadas é representado pelo fluxograma mostrado na figura 5.

Para que a reconstrução de coordenadas possa ser realizada, o software controla se a calibração das câmeras e medição de coordenadas nas seqüências correspondentes foram realizadas com sucesso. Caso isto não seja verdade, uma mensagem é fornecida ao operador e retorna-se ao menu principal.

A aplicação do procedimento de reconstrução faz-se, então os pontos medidos de todas as imagens das seqüências. A rotina de reconstrução foi implementada da mesma forma que descrita em PEETRONIS & SPAEPEN (1984).

Para a avaliação dos resultados da reconstrução integrou-se ao software duas opções:

- a) Avaliar as diferenças encontradas entre os valores absolutos reconstruídos e esperados de pontos com coordenadas espaciais conhecidas.
- b) Avaliar a distância entre dois pontos obtidas da reconstrução, quando conhece-se estas distâncias ou sabe-se que elas são constantes durante um dado movimento. Pode-se confrontar essas coordenadas espaciais com os valores esperados ou avaliar flutuação em torno de um valor esperado.

Enquanto o resultado da avaliação não mostrar-se satisfatório, pode-se procurar melhorar a medição das coordenadas dos pontos de interesse nas imagens, ou então, refazer a calibração das câmeras.

2.3 Avaliação dos Algoritmos de Calibração e Reconstrução

Para que pudéssemos avaliar a variabilidade das medidas obtidas da reconstrução tridimensional de coordenadas realizada a partir do sistema proposto, projetamos um experimento para a análise de resultados coletados. O experimento seguiu a sugestão feita por MORRIS & MACLEOD (1990) para avaliação de erros de medidas em sistemas de análise baseados em vídeo.

O experimento consistiu em utilizar o sistema na reconstrução da trajetória espacial de três pontos marcados sobre um corpo rígido. Este objeto foi colocado em suspensão por um único ponto de sustentação realizando um movimento pendular. O ângulo inicial a partir do qual o corpo rígido foi abandonado e começou a oscilar foi de quinze graus.

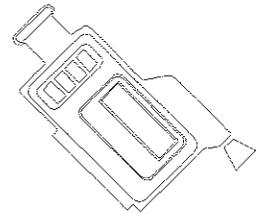
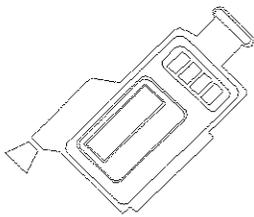
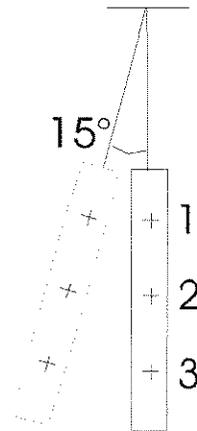


Figura 6: Representação esquemática da montagem experimental para avaliação da acurácia dos algoritmos de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional de coordenadas.

Conforme representado na figura 6, duas câmeras foram utilizadas para registrar o movimento pendular de um objeto rígido que continha três pontos marcados sobre ele.

O espaço onde foi realizada a aquisição foi previamente calibrado, em acordo com os procedimentos descritos previamente. O tempo de aquisição foi de 3.22 segundos do movimento do objeto.

As distâncias entre os pontos foram medidas cinco vezes cada com régua milimetrada, tendo-se encontrado os seguintes valores: distância do ponto 1 ao ponto 2 (1-2) 200 ± 1 mm; a distância do ponto 1 ao 3 (1-3) 400 ± 1 mm; e distância do ponto 2 ao 3 (2-3) 200 ± 1 mm. Estes valores foram tomados como valores esperados.

As coordenadas espaciais e as distâncias entre os pontos foram calculadas em cada par estereoscópico de imagens. Os valores médios obtidos para as distâncias foram: distância 1-2 igual a 201.2 mm, distância 1-3 igual a 402.6 mm e a distância 2-3 encontrada foi de 201.1 mm.

As variações em relação às médias, dos valores das distâncias entre os pontos, estão mostradas na tabela a seguir:

	Média (mm)	SD (mm)	Soma (mm)	N
DISTÂNCIA 1-2	-8,5714E-6	0,83687	0,00138	161
DISTÂNCIA 1-3	0,00003	1,03386	0,00421	161
DISTÂNCIA 2-3	0,00003	0,92236	0,0044	161

Tabela 1: Valores obtidos para a variação da distância em relação à média entre os pontos marcados sobre o objeto rígido, durante 3.22 segundos de aquisição. SD, Soma e N significam os valores obtidos para o desvio-padrão, soma dos valores e número de elementos, respectivamente.

Os valores apresentados na tabela indicam que a variabilidade inerente ao processo de medição e reconstrução de coordenadas no sistema proposto, fornece valores para o desvio-padrão da ordem de 1 mm.

Para que possamos entender o significado deste valor absoluto, devemos destacar que o enquadramento utilizado foi de aproximadamente 1.5 metros na vertical. Desta maneira, o desvio-padrão pode ser entendido como sendo de 0.06 % do enquadramento utilizado.

Para que possamos entender agora a distribuição das flutuações obtidas, apresentaremos os histogramas e os "boxplots" dessas distâncias, a seguir:

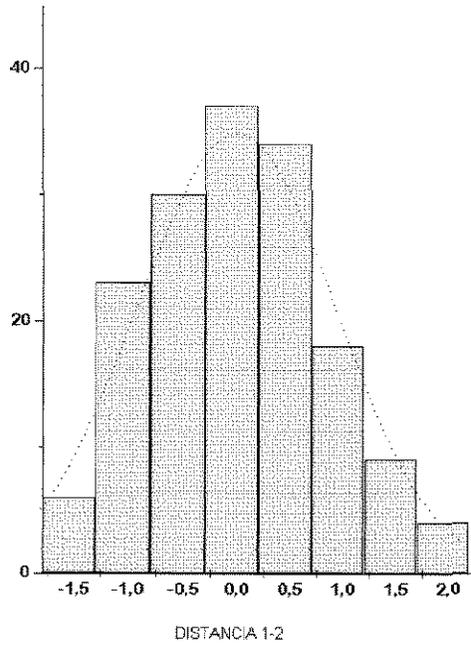


Figura 7: Histograma da variação em relação a média da distância entre os pontos 1 e 2 marcados sobre o objeto rígido.

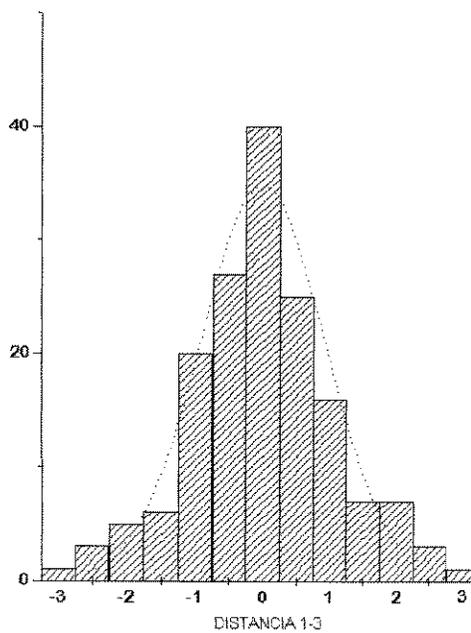


Figura 8: Histograma da variação em relação a média da distância entre os pontos 1 e 3 marcados sobre o objeto rígido.

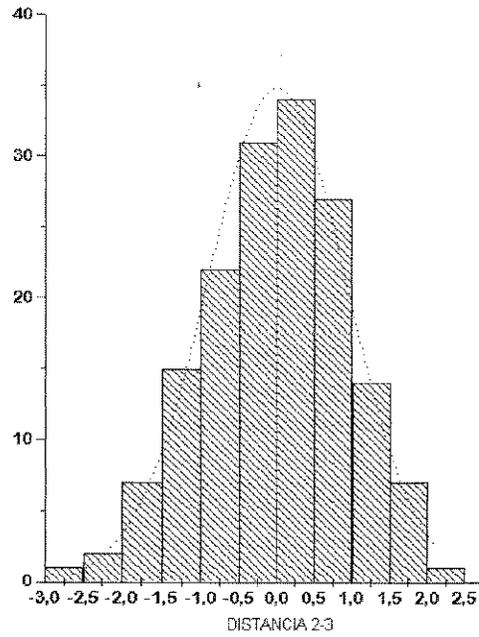


Figura 9: Histograma da variação em relação a média da distância entre os pontos 2 e 3 marcados sobre o objeto rígido.

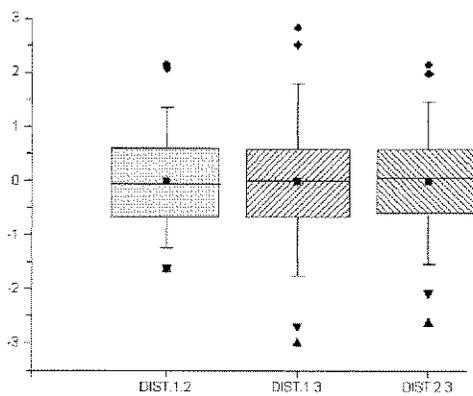


Figura 10: Boxplot da variação em relação a média da distância entre os pontos 1-2, 1-3 e 2-3 marcados sobre o objeto rígido.

A partir dos histogramas e dos “boxplots” apresentados, podemos admitir que as distribuições de erros são normais, centradas na média e os desvio-padrão são da ordem de 1 milímetro. Diante disso, é razoável admitir que os erros tem caráter aleatório.

Não havendo nenhuma evidência de erro sistemático nos dados observados e sabendo-se do caráter aleatório do processo de medição de coordenadas, entendemos que os algoritmos de calibração de câmeras e reconstrução de coordenadas estão satisfatoriamente implementados e são confiáveis.

CAPÍTULO III

Sincronização de Registros

SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS

Neste capítulo, abordaremos os problemas relativos à sincronização de registros para análise tridimensional de movimentos. Inicialmente, procuraremos caracterizar o problema da falta de simultaneidade na aquisição de dados quando usamos registros videográficos. A seguir, dividiremos as soluções para o problema em dois grandes grupos: soluções por hardware e soluções por software e mostraremos as razões que nos levaram a optar pela segunda em nosso sistema.(item 1)

Identificaremos, no item 2, os parâmetros a serem determinados para que sejam possíveis as soluções por software. Iremos, neste item, distinguir entre a defasagem temporal dos registros e a diferença de frequências entre os instrumentos, bem como, dimensionar os dois efeitos para a análise tridimensional de movimentos.

Os próximos itens consistem da descrição e avaliação de duas soluções que formulamos e implementamos em nossa sistema de análise, para determinação dos parâmetros de sincronização. O item 3, descreve a solução por meio de sinal externo de sincronização (SES). O item 4 mostra a solução por meio de calibração dinâmica (SCD).

No item 5, apresentaremos o procedimento de interpolação de coordenadas medidas em imagens, em função do tempo, que será adotado nas soluções por software. Este procedimento objetiva a “geração” matemática dos conjuntos simultâneos de projeções dos pontos de interesse. Os conjuntos de projeções simultâneas serão usados nas reconstruções de coordenadas. No item 6 apresentamos um fluxograma da implementação feita.

1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Sabemos que é a frequência de aquisição da câmera que determina o número de quadros de vídeo (imagens) que serão registrados por segundo. Esta frequência é finita e, portanto, os registros feitos pelas câmeras não são contínuos mas sim discretos.

Uma vez que a reconstrução tridimensional exige que as projeções dos pontos de interesse em cada câmera sejam simultâneas, como garantir que no mesmo instante em que uma câmera registrou um quadro (imagem) a outra também o fez ? Este é, de maneira sucinta, o problema da falta de sincronização entre as câmeras, que deve ser solucionado.

A diferença em tempo entre os registros feitos por câmeras diferentes, em um dado instante t , chamaremos defasagem temporal $\Delta\tau(t)$ entre elas. A defasagem temporal decorre basicamente de duas causas.

A primeira delas surge quando existe uma impossibilidade de fazer as câmeras iniciarem seus registros no mesmo instante. Isto faz com que os registros entre duas câmeras estejam sistematicamente adiantados ou atrasados.

A segunda causa é uma possível diferença das frequências de aquisição das câmeras. Caso as câmeras não operem exatamente na mesma frequência, a defasagem temporal entre os registros passa a variar a cada instante. Isto ocorre pois o número de quadros registrados por uma câmera não é exatamente o mesmo da outra. Mostraremos, ainda neste capítulo, em que condições este efeito passa a ser significativo na análise de movimentos e em que condições pode ser desprezado.

Basicamente existem dois tipos de solução para o problema da falta de sincronização dos registros. A primeira é a chamada “sincronização por hardware”

dos equipamentos. Esta solução implica que todas as câmeras sejam controladas por um único dispositivo externo. Este mecanismo deve ser tal que comande o início da aquisição, bem como, garanta que todas as câmeras operem na mesma frequência, durante toda a aquisição.

A segunda forma possível de solução do problema é a "sincronização por software". Este procedimento exige a determinação dos parâmetros de sincronização entre os registros e a geração, por procedimento de interpolação matemática, das posições intermediárias, nas trajetórias das projeções de interesse. Dessa maneira, pode-se obter as coordenadas simultâneas entre seqüências de imagens.

A primeira solução aplica-se somente a câmeras especiais - de pequena difusão e alto custo - que aceitam este controle externo de aquisição. Para todas as outras situações, onde câmeras especiais não podem ser utilizadas, a solução por software é adequada. Em acordo com os objetivos de difusão do sistema proposto, trabalharemos com esta solução.

2. PARÂMETROS NECESSÁRIOS À SINCRONIZAÇÃO POR SOFTWARE

Para que possamos determinar os parâmetros importantes para a sincronização de registros, devemos compreender como se dá o registro das imagens - em especial em sistemas de vídeo - para que possamos solucionar o problema.

Devido a complexidade do assunto e os objetivos deste trabalho, descreveremos, apenas, as características do sinal de vídeo que são essenciais para a compreensão dos parâmetros necessários à realização da sincronização por software. Para uma compreensão detalhada do funcionamento da maioria das câmeras de vídeo existentes, em especial das câmeras baseadas em CCD (Charge Coupled Device), bem como o entendimento do registro de imagens, transmissão de sinais e outras questões ligadas aos fundamentos do vídeo sugerimos a leitura de MATTISON (1994).

2.1 Defasagem Temporal entre os Registros ($\Delta\tau$)

Mostraremos, a seguir, uma imagem de dois sinais de vídeo - registrados simultaneamente em um osciloscópio filmada e posteriormente digitalizada - de maneira a identificar a defasagem temporal entre os registros.

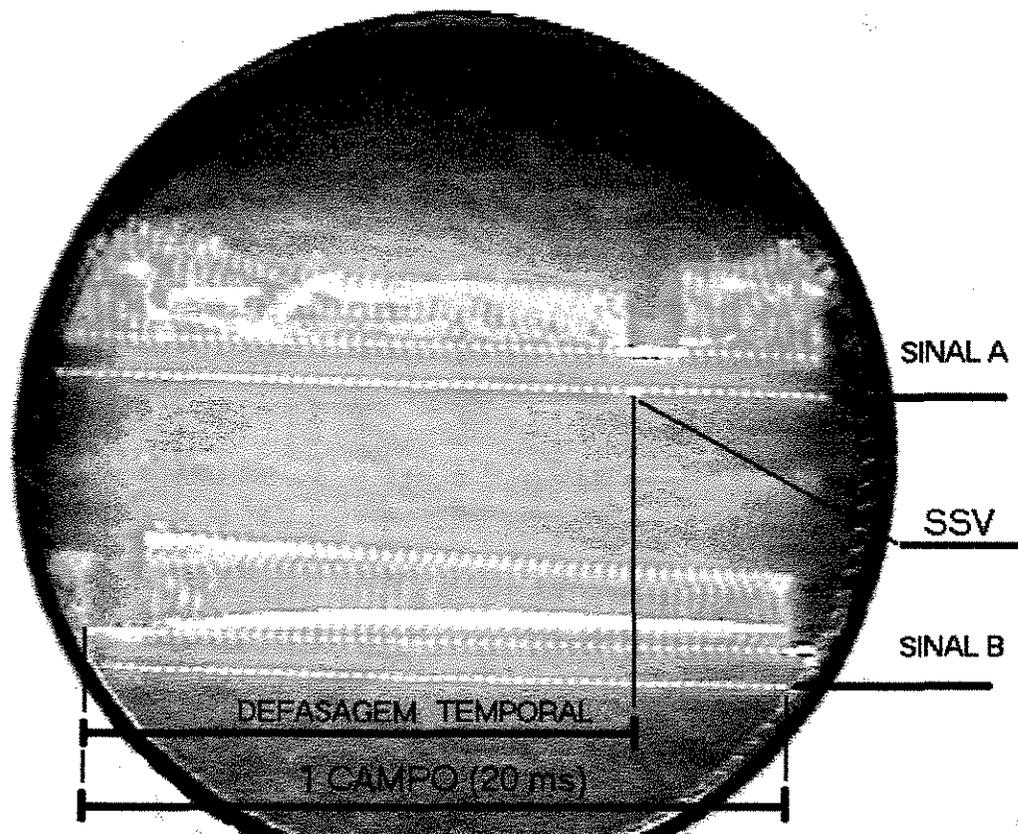


Figura 11: Imagem de dois sinais de vídeo representados em um osciloscópio, com indicação da defasagem temporal entre os registros, a duração do campo de registro de uma imagem (*field*) e o sinal de sincronização vertical (SSV).

Os valores registrados pelo osciloscópio são as variações das tensões elétricas no tempo, para os sinais das duas câmeras. Estas tensões correspondem a valores de luminância e crominância ordenadamente registrados pelos foto-sensores da câmera de vídeo, de maneira a formarem sequencialmente as linhas das imagens de vídeo.

Os sinais da figura 11 foram obtidos conectando-se as saídas de vídeo de duas câmeras a um osciloscópio. É possível identificar os campos (*fields*) no sinal A e sinal B como sendo os trechos do registro entre dois sinais de sincronização vertical (SSV). Como as câmeras utilizadas operavam no sistema PAL (alemão), a duração de cada campo é de 20 ms, no sistema NTSC ou PAL-M (Brasil) o tempo é de 16.67 ms.

Na figura 11 observam-se os dois sinais gerados pelas câmeras não sincronizadas e a defasagem temporal entre os registros. Esta defasagem é absolutamente aleatória, podendo ser determinada ou estimada - como mostraremos posteriormente - mas não controlada.

A defasagem temporal depende do momento do acionamento de cada câmera e da diferença de frequências entre elas. Caso as câmeras operem exatamente com a mesma frequência, a defasagem temporal entre elas permanecerá constante.

Para que seja possível entender melhor uma das soluções que será apresentada posteriormente, é importante compreender o que se segue. Se ao sinal B da figura 11 adicionássemos um sinal externo de duração de 12 ms e 5 V de intensidade, por exemplo, logo no início do campo, estaríamos “marcando” uma linha da imagem correspondente.

Como as informações luminosas estão ordenadas no campo (field) da imagem, a “marca” apareceria no início da imagem. Caso o sinal fosse adicionado próximo ao final do campo, a marca apareceria no final da imagem.

Consideremos agora, a adição de um sinal externo simultaneamente aos sinais A e B, gerados pelas duas câmeras. Os dois sinais apareceriam nos dois canais alinhados, na mesma posição horizontal da tela do osciloscópio. Devido a defasagem temporal entre os registros, ao observarmos as imagens veríamos as “marcações” correspondentes ao sinal externo em posições (linhas) diferentes nas imagens.

Sendo o tempo de duração de uma linha conhecido, a diferença entre linhas em que aparece a marca, na imagem obtida por uma câmera e pela outra, pode ser usada para a determinação da defasagem temporal entre os registros.

2.2 Diferença de Frequências

A figura 12 procura evidenciar os efeitos da diferença de frequência das câmeras sobre a defasagem temporal dos registros. Na figura, a tela de um osciloscópio é apresentada em dois momentos distintos $t=0$ min e $t=40$ min, sem que durante este intervalo de tempo as câmeras tivessem sido desligadas. As duas câmeras eram da mesma marca e modelo.

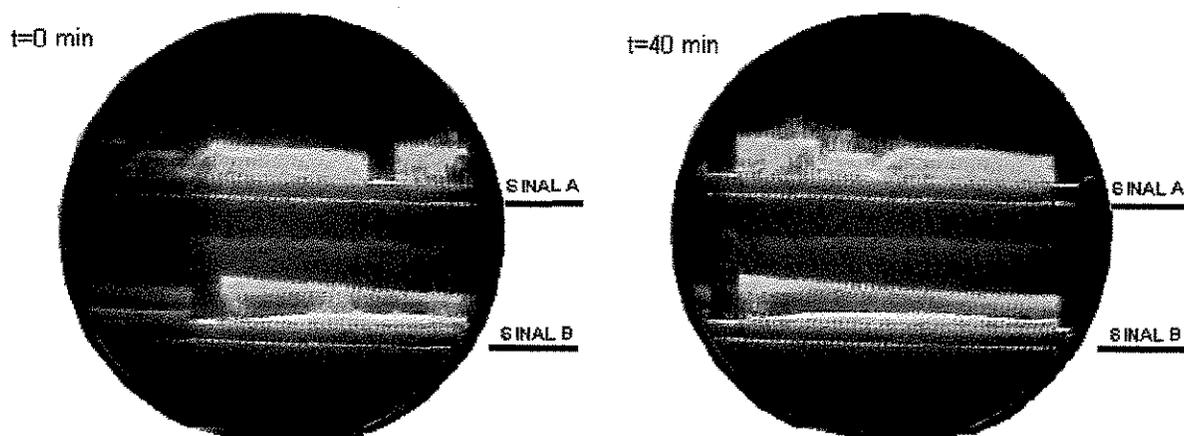


Figura 12: Imagem de dois sinais de vídeo registrados por um osciloscópio, em dois tempos diferentes ($t=0$ e $t=40$ min), de maneira a demonstrar o efeito de variação da defasagem temporal entre os registros.

Tendo observado a evolução dos registros durante 40 minutos, notamos que a defasagem temporal entre eles altera-se continuamente da primeira situação ($t=0$ min) até a segunda ($t=40$ min). Considerando-se que o tempo correspondente a um campo é de 20 ms estimamos a variação como tendo sido de 50% de um campo (aproximadamente), portanto uma variação de 10 ms na defasagem temporal entre os registros no período em questão.

A explicação para o fenômeno observado é a diferença na frequência de aquisição das câmeras. Como as câmeras não operam exatamente a na mesma frequência de aquisição, esta diferença acarreta uma variação na defasagem temporal.

Para explicar a variação da defasagem temporal em função do tempo assumimos um modelo de variação linear da defasagem temporal em relação ao tempo, conforme mostrado na equação E11. A equação expressa o modelo adotado para a variação da defasagem temporal ($\Delta\tau$), em função do tempo.

$$\Delta\tau(t) = t_0 + \Delta\Phi \cdot t \quad E11$$

Onde, t_0 é a diferença temporal entre os registros no momento do acionamento das câmeras e t é o tempo desde o acionamento das câmeras. $\Delta\Phi$ é o quociente entre as frequências de aquisição.

É evidente que a variação registrada devida à diferença de frequências das câmeras é bastante pequena. Seus efeitos podem ser considerados desprezíveis se comparados aos efeitos devidos a defasagem temporal, em aquisições de poucos segundos. Contudo, este efeito só pode ser considerado irrelevante quando o trecho do registro analisado estiver temporalmente próximo ao trecho no qual foi feita a determinação da defasagem temporal.

Em situações onde o tempo de aquisição das imagens (tempo de filmagem) corresponder a poucos segundos e a determinação da defasagem temporal possa ser feita próxima (em tempo) do instante da filmagem, os efeitos da diferença de frequência podem ser desconsiderados.

Tendo caracterizado os parâmetros responsáveis pela falta de sincronização dos registros, apresentaremos duas soluções para determinar quantitativamente a defasagem temporal entre eles.

3. SINCRONIZAÇÃO POR MEIO DE SINAL EXTERNO DE SINCRONIZAÇÃO (SES)

3.1 Formulação da Solução

Os procedimentos para esta solução consistem em produzir um sinal elétrico, somá-lo simultaneamente aos sinais de vídeo de cada câmera a ser sincronizada, identificá-lo e medir sua posição na imagem registrada por cada câmera. Faz-se, então, a diferença em número de linhas dos valores obtidos para cada câmera, tomando-se uma delas como de referência.

Mostraremos, a seguir, como a medição da diferença em número de linhas medidas nas imagens digitais permite-nos determinar a defasagem temporal entre os registros. Para isso, algumas informações sobre o sinal de vídeo devem ser consideradas.

A solução se baseia no fato que algumas informações referentes ao sinal de vídeo são conhecidas. Por exemplo, o tempo para formação de um campo de imagem de vídeo é conhecido. Nos sistemas PAL (Phase Alternation Line) e SECAM (Sequencial Couleur Avec Memoire), utilizados respectivamente na Alemanha e França, o tempo para formação de um field é de 20.0 ms. No sistema NTSC (National Television System Committee) este tempo é de 16.7 ms.

Outras informações importantes para a formulação da solução é que o tempo para formação de uma linha de vídeo e o número total de linhas em um field também são conhecidos. Nos sistema PAL e SECAM o tempo de duração de uma linha é de 64.0 ms e o número total de linhas de um field é 312.5. No sistema NTSC o tempo para formar uma linha é praticamente o mesmo, 63.5 ms, mas o número total de linhas do field é 262.

Ao realizarmos a conversão analógico-digital do sinal de vídeo o número total de linhas da imagem de vídeo será proporcional ao número total de linhas da imagem digital. Desta forma, pode-se, a partir da medição da diferença entre linhas na imagem digitalizada, saber a defasagem temporal entre os registros.

Com o sinal de sincronização sendo adicionado em um tempo próximo ao do trecho do registro que será analisado, é possível admitir que naquele intervalo de tempo as freqüências das câmeras são iguais. Assim, o único parâmetro a ser determinado para permitir a sincronização dos registros será a defasagem temporal entre eles.

De maneira analítica, a determinação da defasagem temporal entre os registros, a partir da medição da diferença de linhas nas imagens faz-se pela equação E12.

$$\Delta\tau = \frac{I_V}{I_D} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot t_i \quad E12$$

Onde, $\Delta\tau$ é a defasagem temporal entre os dois registros. λ_1 e λ_2 são as linhas marcadas pelo sinal simultâneo na imagem digital, respectivamente nas câmeras 1 e 2, medidas a partir da parte superior da imagem. I_D é o número total de linhas da imagem digital, definido no momento da digitalização da imagem. I_V é o número total de linhas de um field da imagem de vídeo. t_i é o tempo para formação de uma linha de vídeo.

3.2 Resultados Experimentais

Uma vez formulada a solução do problema apresentaremos, a seguir, os resultados experimentais que obtivemos. A montagem experimental para implementação da solução encontra-se esquematizada na figura 13.

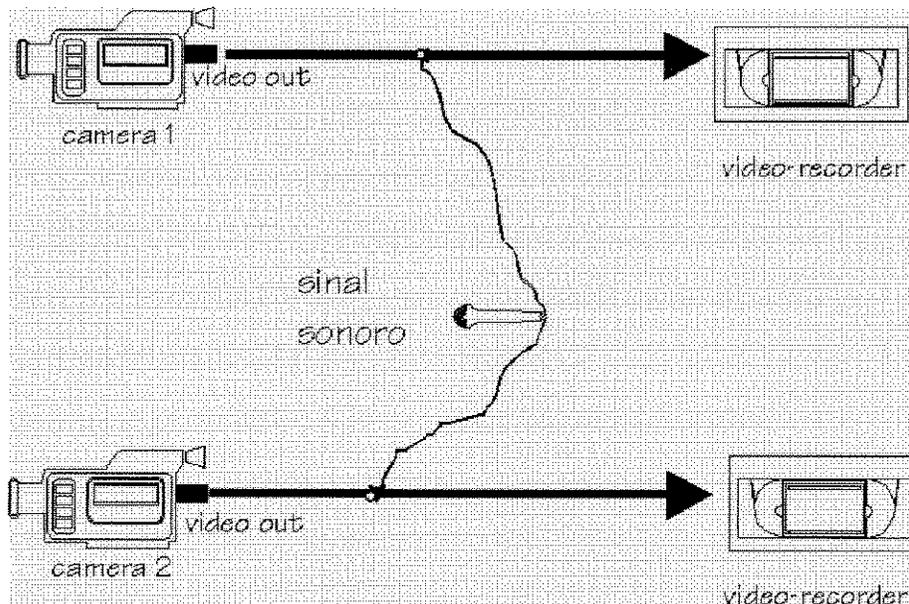


Figura 13: Representação esquemática da montagem experimental utilizada para obtenção dos registros em vídeo, adicionados de um sinal externo de sincronização, que será usado para determinação da defasagem temporal entre os registros.

A montagem consiste portanto de duas câmeras de vídeo, um gerador de sinais e dois videocassetes. Aos sinais de vídeo, retirados pelas saídas “vídeo out” das câmeras, é adicionado o sinal externo simultânea e periodicamente, entre as câmeras e os videocassetes.

O sinal externo utilizado foi o som produzido de um metrômetro, que convertido em sinal elétrico pelo microfone, pôde ser adicionado aos sinais de vídeo de cada câmera. A duração de cada sinal sonoro foi de aproximadamente 4 ms. Embora a duração do sinal tenha provocado a “marcação” de várias linhas da imagem, tomamos sempre a primeira linha em que o sinal surgiu em cada imagem para determinar a diferença das linhas.

O sinal sonoro foi gerado a, aproximadamente, 1 Hz. A precisão na frequência de geração deste sinal não altera os resultados, visto que estamos medindo diferenças entre os registros.

Conforme destacamos anteriormente, o sinal adicionado aos registros de vídeo é interpretado como uma informação luminosa e armazenada na fita de registro. Isto faz com que o sinal adicionado “apareça” na imagem na forma de uma perturbação visível.

Como o sinal gerado é adicionado simultaneamente aos dois registros mas em posições relativas diferentes dentro de cada campo (*field*), a perturbação aparecerá em linhas distintas, a menos que os registros estejam perfeitamente sincronizados. Essa diferença de linhas nas duas imagens correspondentes está relacionada com a defasagem temporal entre os registros. Para uma melhor compreensão, observe as figuras abaixo:

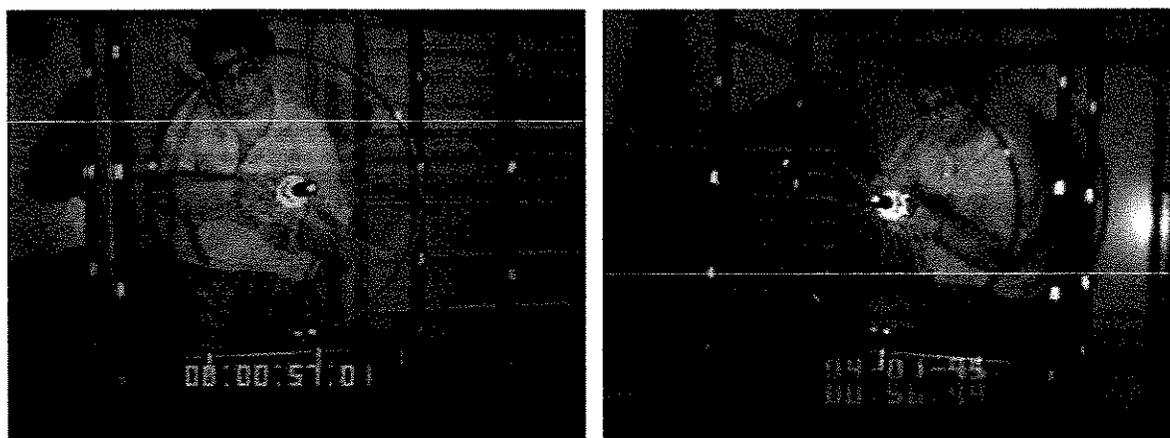


Figura 14: Movimento de uma roda girando com pontos marcados sobre ela, registrado por duas câmeras não sincronizadas. Câmera 1 à esquerda e Câmera 2 à direita. Nas imagens pode ser visto o sinal externo simultâneo de sincronização em diferentes linhas das imagens. Também pode ser visto o registro feito por timers.

Editamos as imagens para que a marca adicionada ficasse mais visível e evidenciasse que o sinal, embora tenha sido gerado simultaneamente, ocupa linhas diferentes nas imagens. A aquisição foi feita de acordo com a montagem mostrada na figura 13, de maneira a podermos obter a defasagem entre as câmeras.

Como pode ser visto nas imagens, filmamos o movimento de uma roda girando com pontos marcados sobre ela. Sendo o movimento da roda contínuo e os

registros discretos é possível perceber também visualmente que as câmeras não se encontravam perfeitamente sincronizadas. Para isso, basta observar que os pontos marcados sobre a roda, por exemplo na parte inferior dela, não ocupam a mesma posição angular nas duas imagens.

Outra informação relevante que pode ser obtida do experimento, diz respeito ao uso de um timer durante as filmagens, com o intuito de localizarmos quadros simultâneos - ou aqueles que mais se aproximam temporalmente.

Como pode ser visto na imagem da esquerda, o timer indica 00:00:57:01 (0 hora, 0 minutos, 57 segundos e 1 centésimo de segundo). Na imagem colocada à direita temos: 00:56:99 (0 minutos, 56 segundos e 99 centésimos). Embora saibamos que as imagens das duas câmeras que mais se aproximam temporalmente são as mostradas na figura 14, o timer induziria o operador a adotar a imagem seguinte da câmera 2 (não mostrada na figura), como correspondente à mostrada como câmera 1.

Para verificarmos a flutuação do valor medido da defasagem entre os registros por meio da utilização do sinal externo de sincronização (SES), realizamos várias medidas da defasagem temporal entre os registros, em um intervalo de 16 segundos de aquisição. Medimos a diferença entre as linhas nas imagens de cada câmera onde o SES e aplicamos a equação E12.

Visto que o intervalo de tempo é pequeno, podemos admitir que o efeito da diferença de frequência entre as câmeras é desprezível. Mostramos, na tabela a seguir, os valores obtidos.

Timer 1 (min:s:centésimo)	Linha (λ_1)	Timer 2 (min:s:centésimo)	Linha (λ_2)	Defasagem ($\Delta\tau$ ms)
00:55:59	206	00:55:61	412	-7.4
00:56:15	174	00:56:17	379	-7.3
00:56:43	127	00:56:45	331	-7.3
00:56:71	257	00:56:73	461	-7.4
00:56:99	169	00:57:01	376	-7.4
01:09:57	132	01:09:59	339	-7.4
01:09:85	238	01:09:87	444	-7.4
01:10:13	154	01:10:15	360	-7.4
01:10:69	166	01:10:71	373	-7.3
01:11:25	197	01:11:27	402	-7.4
01:11:81	238	01:11:83	446	-7.5

Tabela 2: Valores medidos das linhas em que foi observado o sinal externo de sincronização (SES), em cada câmera (λ_1 e λ_2), as indicações dadas pelos timers e os correspondentes valores calculados da defasagem temporal entre os registros.

O sinal negativo obtido para o valor da defasagem indica que tomando-se a câmera 1 (λ_1) como referência, o registro da outra câmera encontra-se atrasado. Isto é, o registro da câmera 1 (imagem à esquerda) ocorreu 7.4 ms depois do registro mostrado pela câmera 2. A roda girava em sentido anti-horário.

Dos valores mostrados na tabela 2 calculamos que o valor médio da defasagem temporal é $\Delta\tau_{med} = -7.4$ ms, o valor da mediana é $\Delta\tau_{md} = -7.4$ ms e o desvio padrão encontrado foi $SD = 0.05$ ms. O número de repetições das medidas foi $n = 11$.

A figura 15 mostra o instante em que o sinal externo de sincronização foi identificado, calculado a partir do número da linha, para cada câmera, em cada medida, tomando-se a câmera 2 como referência.

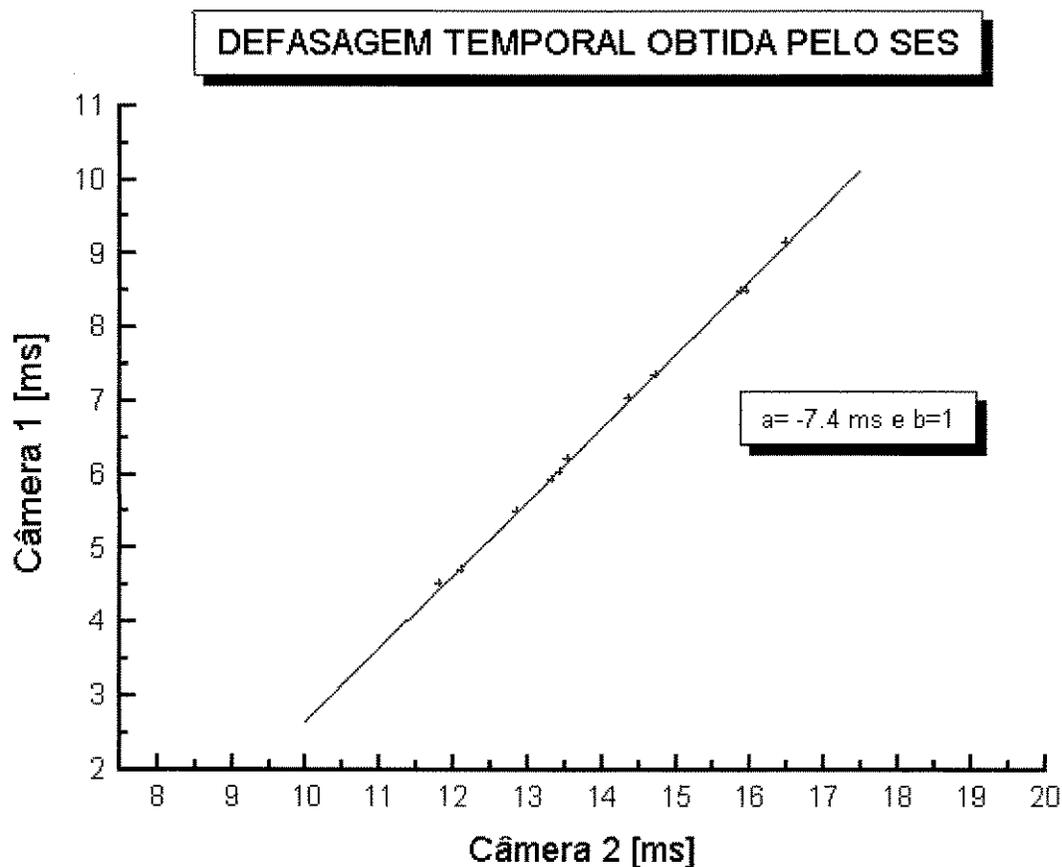


Figura 15: Representação da defasagem temporal medida repetidas vezes (n=11) através do SES, com a indicação do coeficiente linear da reta ajustada ($a=-7.4 \text{ ms}$) e o coeficiente angular ($b=1$).

Ao efetuarmos a regressão linear determinamos o valor do coeficiente linear da reta ajustada ($a=-7.4 \text{ ms}$), que corresponde a defasagem temporal entre os registros. O valor do desvio-padrão para o parâmetro a (defasagem temporal) foi de 0.05 ms indicando que a medida apresenta uma variabilidade bastante pequena.

Os resultados anteriormente mostrados exemplificam a qualidade da solução apresentada. A determinação dos parâmetros por meio desta solução mostrou-se de simples implementação e possibilitou a determinação da defasagem temporal com uma precisão adequada aos objetivos da análise de movimento.

Contudo, a aplicabilidade desta solução depende da possibilidade de utilização, durante a aquisição, de um videocassete externo para cada câmera utilizada. Certamente isto não representa nenhuma limitação em diversas situações, mas em certas condições de aquisição pode tornar-se inviável.

Caso as câmeras utilizadas possuam uma entrada para sinal de vídeo (*video in*), o método proposto dispensa o uso do videocassete externo. Neste caso, o sinal simultâneo seria adicionado às imagens pela entrada *video in*.

Apresentaremos, a seguir, uma solução que independe da adição de qualquer instrumento ou equipamento externo para a determinação da defasagem dos registros, podendo ser aplicada com praticamente qualquer tipo de câmera. Trata-se, portanto, de uma solução mais genérica que as anteriores.

4. SINCRONIZAÇÃO POR MEIO DE CALIBRAÇÃO DINÂMICA (SCD)

4.1 Formulação da Solução

Para obtermos a defasagem temporal entre os registros a partir desta solução não é necessária a adição de qualquer equipamento durante a coleta de dados. A solução parte de dois conjuntos de coordenadas das projeções dos pontos de interesse para a determinação da defasagem temporal entre os registros. A determinação da defasagem temporal é feita consequentemente “a posteriori”.

Cabe lembrar que o método de calibração de câmeras e reconstrução tridimensional DLT, em sua forma original, não previa qualquer possibilidade de determinação da defasagem temporal entre os registros. A solução aqui apresentada não faz parte, portanto, da forma original daquele método de reconstrução. Não obstante, iremos mostrar que utilizaremos o algoritmo básico do DLT na implementação da solução por nós desenvolvida.

O método de reconstrução tridimensional que utilizamos neste trabalho, DLT, foi inicialmente concebido para a aplicação em situações onde os objetos de interesse permaneciam estáticos (fotogrametria). Isto pode ser confirmado pelo fato do instrumento calibrador permanecer parado para a calibração das câmeras.

Como a defasagem entre os registros das câmeras é uma variável temporal, os efeitos produzidos por ela durante o procedimento de calibração não podem ser sentidos. Logicamente que ao filmarmos um objeto estático o efeito da falta de sincronização desaparece, pois embora os registros tenham sido feitos em instantes diferentes o objeto manteve a sua posição e orientação.

Consideremos agora que as câmeras estejam calibradas. Ao efetuarmos a reconstrução tridimensional entre as coordenadas de dois registros que estejam

acidentalmente sincronizados, os erros experimentais serão apenas os erros típicos do procedimento de reconstrução. Por exemplo, erros nos procedimentos de medição de coordenadas nas imagens, erros devidos a óptica das câmeras e outros.

Suponhamos agora que os registros apresentem uma “pequena” defasagem temporal. Isto certamente introduzirá um novo erro aos valores obtidos para as coordenadas espaciais. Caso a defasagem temporal entre os registros seja maior, esperamos que os erros introduzidos no procedimento de reconstrução, pela falta de sincronização, também cresçam. O erro acrescido devido a falta de sincronização será nulo quando os registros estiverem sincronizados.

Baseada nessas idéias, a determinação da defasagem temporal entre os registros por meio de calibração dinâmica estrutura-se em dois procedimentos. O primeiro é a interpolação das coordenadas das projeções em uma das seqüências. E o segundo é avaliação de parâmetros associados ao erro nas reconstruções, quando realizamos essas reconstruções atribuindo diferentes valores para a defasagem temporal. Os parâmetros associados ao erro utilizados serão descritos no item **4.1.3**.

4.1.1 Primeiro procedimento: Interpolação de coordenadas

Ao realizarmos as medições das coordenadas de tela das projeções dos pontos de interesse para duas câmeras, obtemos duas seqüências de dados discretos que podem ser representados como $R(x_t, y_t)$ e $S(x_{t+\Delta\tau}, y_{t+\Delta\tau})$, onde t é o tempo e $\Delta\tau$ é a defasagem temporal entre os registros. Sabemos que os registros estarão sincronizadas quando $\Delta\tau$ for igual a zero.

Como os registros são discretos para as duas seqüências, a variável tempo assume apenas um número finito de valores. Abaixo a equação da variação temporal dos registros em função do número de quadros registrados.

$$t_i = \frac{1}{\Phi} \cdot i$$

E13

Onde, t_i é o instante em que o i -ésimo quadro foi registrado e Φ é a frequência de aquisição da câmera.

Necessitamos conhecer os valores das coordenadas de S não apenas nos tempos $t_i + \Delta\tau$, mas para qualquer tempo, e em especial nos tempos t_i . Para isso, iremos construir uma função contínua, tal que $G(x,y) = S(x_{t+\Delta\tau}, y_{t+\Delta\tau})$, quando $x = x_{t+\Delta\tau}$ e $y = y_{t+\Delta\tau}$. A interpolação que utilizamos é baseada em funções splines cúbicas.

A interpolação de trajetórias será utilizada no procedimento de determinação da defasagem temporal, conforme mostraremos a seguir.

4.1.2 Segundo procedimento: Reconstruções Sucessivas

Para uma melhor compreensão deste procedimento, observe a figura seguinte.

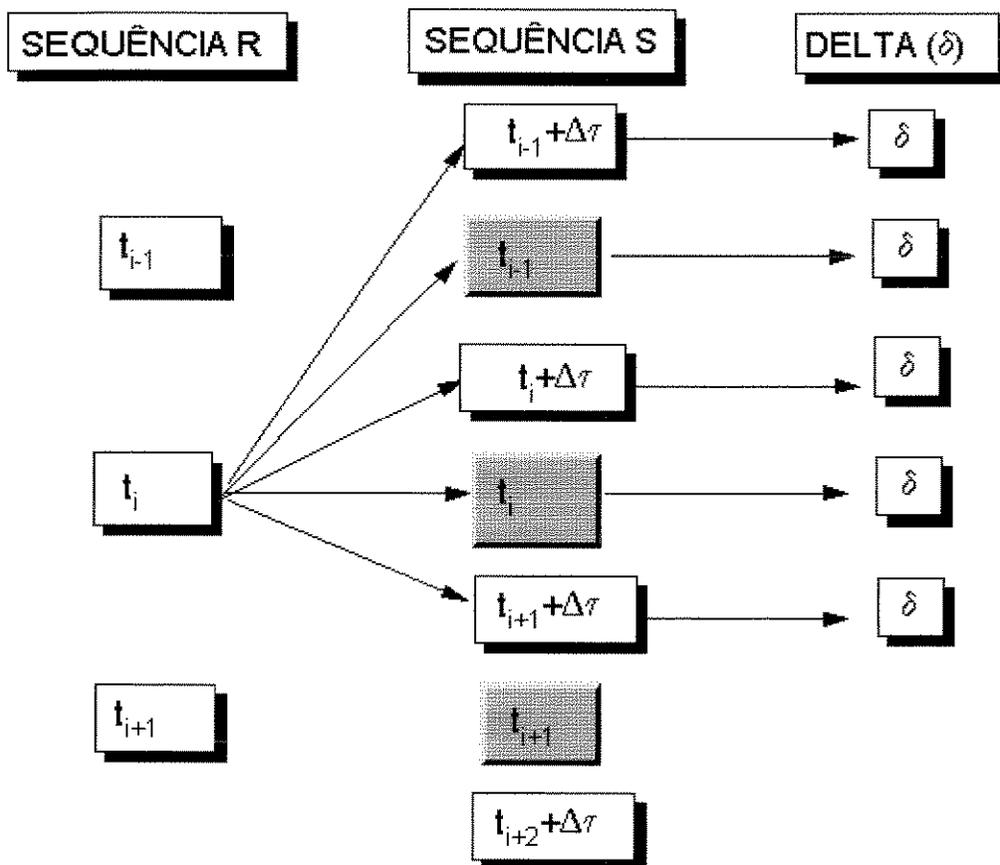


Figura 16: Representação esquemática das imagens nas seqüências R e S e dos quadros interpolados da seqüência S (em cor escura). Indicação das reconstruções sucessivas efetuadas entre as coordenadas dos quadros da seqüência de referência R e as coordenadas medidas e as interpoladas em S. Representação dos valores (delta) associados ao erro devido a defasagem temporal dos registros.

A figura 16 pode ser interpretada da seguinte maneira. Tendo sido feita a interpolação da seqüências S, atribuem-se arbitrariamente valores para a defasagem temporal dos registros entre determinados limites (k), por exemplo no sistema PAL de -40 ms a 40 ms.

Para cada valor arbitrado para a defasagem temporal, por exemplo a intervalos de 1 ms, calculamos os valores das coordenadas da seqüência S com $\Delta\tau=1$, através da função contínua G. Efetuamos a reconstrução dos valores de R e os valores interpolados de S e avaliamos os valores de delta.

Observa-se, então, as variações do parâmetro delta, quando da realização das reconstruções com os diferentes valores de defasagem temporal. O valor da defasagem temporal adotado é aquele que determinar os menores valores acumulados do parâmetro delta, quando as reconstruções sucessivas são realizadas para cada imagem (i).

Explicaremos, a seguir, as maneiras como podemos definir o parâmetro delta (δ) utilizado nas reconstruções sucessivas.

4.1.3 O parâmetro Delta

O parâmetro delta que utilizamos nas reconstruções sucessivas, pode ser definido de duas maneiras diferentes.

- a) o resíduo numérico da solução otimizada do sistema de equações do método DLT
- b) o menor coeficiente de variação médio da distância entre dois pontos escolhidos nas imagens, que devessem permanecer eqüidistantes no espaço, durante o movimento

A adoção do resíduo numérico da solução otimizada do sistema de equações do método DLT utiliza cada ponto de interesse independentemente para a determinação da defasagem temporal. O uso do coeficiente de variação pressupõe que no modelo de pontos de interesse existam, pelo menos dois pontos que mantenham sua distância (no espaço) fixa, durante o movimento estudado.

Para diferenciarmos a utilização do método de sincronização por meio de calibração dinâmica (SCD), quando utilizamos o resíduo como parâmetro delta e quando utilizamos o coeficiente de variação da distância, designaremos ao primeiro (SCD-R) e ao segundo (SCD-D).

4.1.3.1 Resíduo do sistema de equações do DLT

O primeiro parâmetro que utilizamos para a determinação da defasagem entre os registros é o menor resíduo médio obtido do sistema de equações de

reconstrução tridimensional. O resíduo médio é calculado quando as reconstruções são feitas entre coordenadas medidas com diferentes valores para a defasagem temporal.

Abaixo, as equações para determinação do resíduo do sistema de equações da reconstrução tridimensional.

$$R_x = \sum_{k=1}^2 (n_1^k - n_3^k x^k)X + (n_4^k - n_6^k x^k)Y + (n_7^k - n_9^k x^k)Z + n_{10}^k - x^k \quad E14$$

$$R_y = \sum_{k=1}^2 (n_2^k - n_3^k y^k)X + (n_5^k - n_6^k y^k)Y + (n_8^k - n_9^k y^k)Z + n_{11}^k - y^k \quad E15$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad E16$$

Onde x^k e y^k são as coordenadas de tela do ponto de interesse, registrado pela k-ésima câmera. n_h^k ($h=1, \dots, 11$) são os 11 parâmetros de calibração para a k-ésima câmera e X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do ponto de interesse. R_x e R_y são componentes do resíduo em x e y, respectivamente, e R é o resíduo total.

4.1.3.2 Minimização do coeficiente de variação da distância entre dois pontos

Outra forma de avaliar a qualidade do conjunto da reconstrução tridimensional realizada é observarmos o comportamento da distância entre dois pontos, quando sabemos que esta distância deveria flutuar em torno de um valor fixo. Em muitos movimentos estudados em biomecânica reconstruímos a trajetória de segmentos corporais - ou de modelos a eles associados -, de modo que é possível avaliar as flutuações obtidas para a distância entre dois pontos.

A medida utilizada será o coeficiente de variação associado à distância entre dois pontos, quando calculado para o conjunto de imagens das duas seqüências.

Analicamente a medida é descrita como se segue:

$$d_i = \sqrt{(x_1(i) - x_2(i))^2 + (y_1(i) - y_2(i))^2 + (z_1(i) - z_2(i))^2} \quad E17$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{N} \quad E18$$

$$sd = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(d_i - \bar{d})^2}{N-1}} \quad E19$$

$$cv = \frac{sd}{\bar{d}} \quad E20$$

Cálculo da distância média (\bar{d}), desvio-padrão (sd) e o coeficiente de variação (cv) entre dois pontos (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) no conjunto de N imagens reconstruídas.

4.2 Resultados Experimentais

Para que pudéssemos testar o método de determinação da defasagem temporal entre os registros através da sincronização por meio da calibração dinâmica (SCD) realizamos uma série de coletas de dados. Nestes experimentos, calculamos a defasagem temporal pelo método da calibração dinâmica e utilizamos o método do sinal externo de sincronização (SES) simultaneamente, de maneira a podermos avaliar os resultados obtidos.

Os experimentos foram montados em acordo com o esquema mostrado na figura 13, mostrada no item 3.2, deste capítulo. Os movimentos escolhidos foram a reconstrução tridimensional da trajetória de: um objeto em queda livre (item 4.2.1) e três pontos marcados sobre uma roda girando (item 4.2.2).

A avaliação dos resultados foi feita pela comparação dos valores obtidos para a defasagem temporal pelo método do sinal externo de sincronização (SES) e pelo método da calibração dinâmica (SCD).

Nos movimentos do objeto em queda livre o parâmetro delta utilizado na sincronização foi o resíduo do sistema de equações, método SCD-R. No segundo

experimento, foram empregados tanto o resíduo do sistema de equações como o coeficiente de variação da distância entre dois pontos para, independentemente, determinar a defasagem entre os registros, método SCD-R e SCD-D, respectivamente.

4.2.1 Objeto em queda livre

A partir da montagem mostrada na figura 13, os registros foram feitos de maneira a ser possível utilizar o método do sinal externo de sincronização (SES) conjunta e independentemente do método de sincronização por calibração dinâmica pelo resíduo (SCD-R).

Uma esfera de metal com diâmetro de 5 cm foi lançada repetidas vezes frente à duas câmeras, de mesma marca e modelo, a uma altura aproximada de dois metros. Os valores das defasagens temporais foram calculados pelos métodos (SES) e (SCD-R), em cada um dos lançamentos. A tabela abaixo mostra os resultados:

Lançamento	Defasagem Temporal [ms]	
	Método (SES)	Método (SDC-R)
1	-3,8	-2
2	-3.8	-2
3	-3.8	-2
4	-3.8	-2
5	-3.8	-2
6	-3.8	-2
7	-8.2	-8
8	-8.2	-8
9	-8.2	-8
10	-7.6	-6
11	9.2	8

Tabela 3: Experimento do objeto em queda livre. Valores das defasagens temporais entre os registros obtidos pelo método do sinal externo de sincronização (SES) e pelo método de sincronização por calibração dinâmica usando o resíduo (SCD-R).

Para verificar a proximidade dos resultados fornecidos pelos dois sistemas calculamos o coeficiente de correlação (cor) entre os dois conjuntos de dados. O valor encontrado foi $cor=0.9779$. Outra medida utilizada para avaliar os resultados foi o valor médio do módulo da diferença entre os resultados (dv). O valor encontrado foi $dv=1.3$ ms. O valor máximo do módulo da diferença encontrado foi 1.8 ms. Admitindo a maior acurácia do método do SES e tomando-o como referência podemos assumir os valores relativos encontrados como indicativos da confiabilidade do método SCD-R

4.2.2 Pontos marcados sobre uma roda girando

A partir da mesma montagem do experimento anterior, reconstruímos a trajetória de pontos colocados sobre uma roda e calculamos a defasagem temporal entre os registros com os métodos SES, SCD-R e SCD-D. Os resultados para a defasagem temporal entre os registros foram SES -7 ms, SCD-R -7 ms e SCD-D -8 ms.

Outros resultados da aplicação dos métodos de sincronização de registros serão mostrados no capítulo de exemplos de aplicação da metodologia.

5. INTERPOLAÇÃO DE COORDENADAS PARA RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

No item 4.1.1, descrevemos o procedimento de interpolação de coordenadas com a finalidade de possibilitar as reconstruções sucessivas de projeções. Este procedimento visava determinar a defasagem temporal entre os registros pelo método de sincronização por calibração dinâmica.

Este mesmo procedimento de interpolação deve ser adotado quando, já de posse dos valores da defasagem temporal entre os registros, efetua-se a reconstrução tridimensional das coordenadas e completa-se a solução por software. Cabe destacar que este procedimento deve ser efetuado em associação com qualquer dos métodos de determinação da defasagem temporal.

O procedimento consiste em substituir os valores discretos das coordenadas das imagens, originalmente medidos em uma das seqüências, pelos valores calculados por interpolação adotando-se a defasagem temporal determinada entre os registros.

A reconstrução tridimensional de coordenadas é, então, feita entre os valores medidos de uma das seqüências e os calculados da outra.

6. FLUXOGRAMA DA IMPLEMENTAÇÃO

Neste item, procuraremos mostrar a forma como os algoritmos de sincronização foram implementados no software dedicado ao sistema. A chamada para este algoritmo é feita a partir do menu principal do programa e os valores de retorno são as coordenadas reconstruídas a partir de projeções simultâneas.

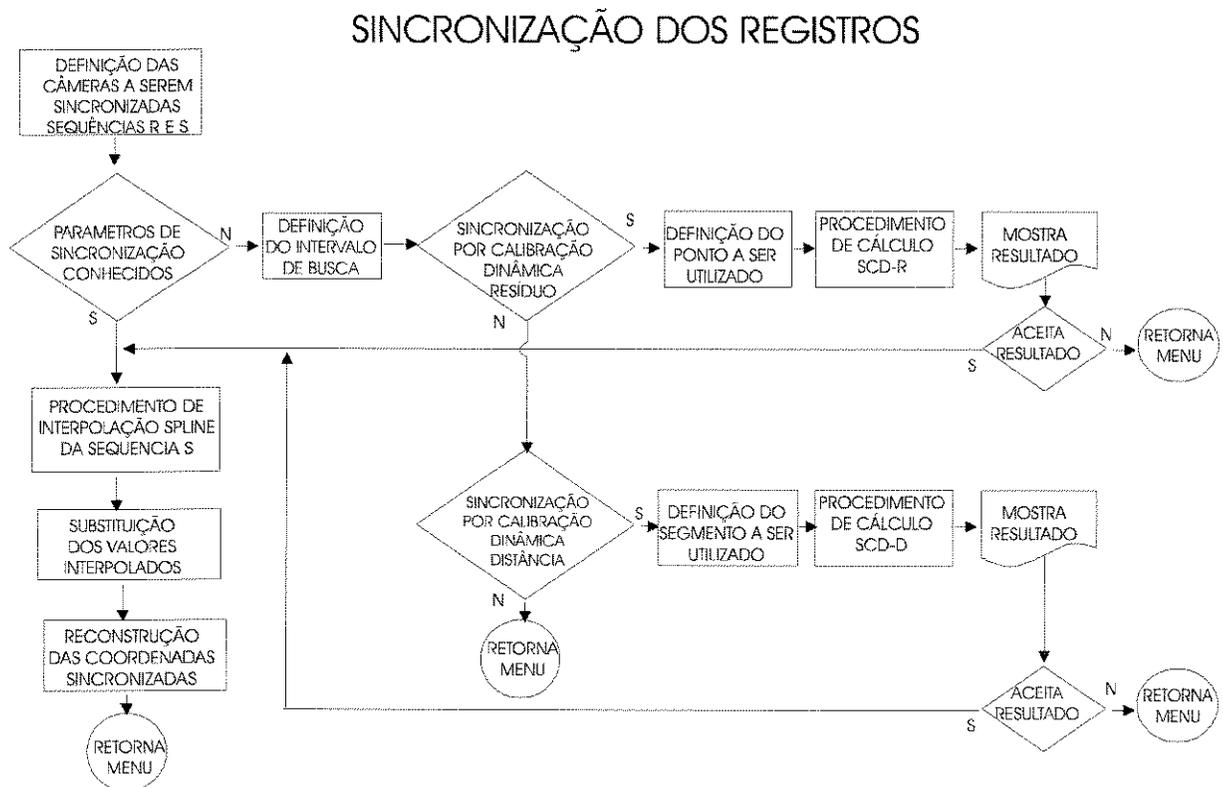


Figura 17: Fluxograma do algoritmo de sincronização dos registros

O algoritmo inicia-se pela seleção de quais das seqüências de imagens medidas deverão ser sincronizadas e pela definição de qual seqüência será mantida como de referência (R) e qual será interpolada (S). O próximo passo é o questionamento ao operador se os parâmetros de sincronização são conhecidos. Esta opção corresponde ao método de sincronização designado, neste capítulo, como Sinal Externo de Sincronização (SES).

Caso esta opção seja selecionada, o próximo procedimento realizado na rotina é o de interpolação por funções splines cúbicas das medições feitas na seqüência S. A seguir, substituem-se os valores originalmente medidos pelos valores interpolados nos tempos correspondentes a defasagem temporal, fornecida pelo operador. Faz-se, então, a reconstrução tridimensional entre as coordenadas originais da seqüência R e as coordenadas interpoladas sincronizadas da seqüência S.

Caso os parâmetros de sincronização não sejam conhecidos, passa-se aos procedimentos correspondentes ao método de sincronização designado por Sincronização por Calibração Dinâmica (SCD).

Fornece-se ao programa, a seguir, quais são os valores máximos esperados para o adiantamento / atraso entre os registros. Os valores iniciais fornecidos (default) são -40 ms e 40 ms, que correspondem a uma busca pela defasagem temporal dos registros em um intervalo correspondente a dois quadros de adiantamento / atraso.

Seleciona-se o método de calibração dinâmica utilizando-se o resíduo (SCD-R) ou a distância entre dois pontos (SCD-D). No primeiro caso, deve-se selecionar um único ponto para a determinação da defasagem temporal entre os registros. No segundo, fornece-se dois pontos (segmento) e a distância entre eles será usada.

Nos dois métodos, SCD-R e SCD-D, tem-se a possibilidade de aceitar o resultado fornecido ou não, antes de se realizar a reconstrução de coordenadas. Os passos seguintes são os mesmos descritos quando os parâmetros de sincronização eram conhecidos.

CAPÍTULO IV

**Procedimentos de Medição, Tracking Automático e
Reconhecimento de Padrões**

PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO, TRACKING AUTOMÁTICO E RECONHECIMENTO DE PADRÕES

Para caracterizar o problema da medição de coordenadas em imagens mostraremos, a seguir, algumas imagens que formam um trecho da seqüência da marcha de um sujeito, com marcas desenhadas sobre o corpo

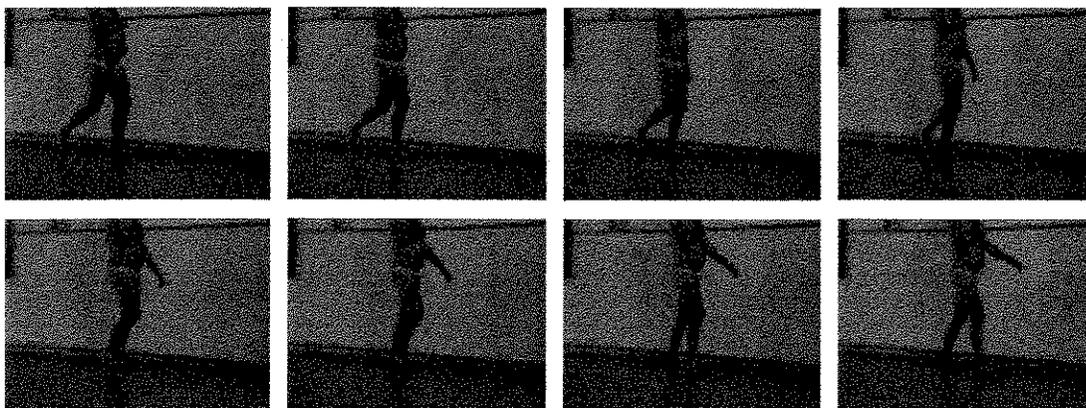


Figura 18: Seqüência de quadros registrando um trecho da marcha de um sujeito normal, a 25 Hz, com marcadores passivos desenhados sobre a pele do sujeito.

As imagens da figura 18 são obtidas no formato de arquivo digital utilizado pelo sistema de análise. O sistema aceita os formatos com extensões BMP ou DIB, com número de linhas e colunas variáveis até o máximo de 480 linhas por 640 colunas.

A profundidade de cor é de 24 bits, o que significa que para cada pixel temos três valores de cor no padrão RGB (RED, GREEN e BLUE) com 8 bits destinados para cada canal de cor. Obtemos assim, 256 níveis de cor para cada canal, o que corresponde a 16.7 milhões de possibilidades de cores resultantes.

Esta qualidade é conhecida como TRUE COLOR, uma vez que o número potencial de cores a ser mostrado é maior que a capacidade de distinção humana

de cores simultâneas. Cada arquivo corresponde a 900 Kbytes, no seu tamanho máximo de linhas e colunas.

Escolhemos os referidos formatos de arquivos por eles serem extremamente difundidos, sendo gerados pelos principais softwares de captura de imagens; por serem encontrados normalmente sem compressão, o que facilita a leitura e por aceitarem 24 bits de profundidade de cor. Como esclareceremos posteriormente, os procedimentos de busca automática de padrões trabalham com comparações (casamentos) baseados nos valores de cor de um conjunto de pixels. Assim, o maior número de cores disponíveis pode favorecer a identificação de padrões.

1. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Todo o processo de descrição de movimentos a partir do registro em vídeo baseia-se na possibilidade de obtenção de coordenadas em um plano comparador, no caso específico nas imagens digitais projetadas no monitor de um computador, como mostrado na figura 18. Para cada imagem, a tela do computador assume assim a forma de uma matriz de pontos (pixels) .

De maneira analítica podemos descrever uma seqüência de imagens da seguinte maneira:

$$S_k = s(x, y, r, g, b, t) \quad E21$$

Onde S_k indica a seqüência de imagens para cada câmara k ; x e y correspondem a coluna e linha dos pixels das imagens digitais; r , g , b (red, green, blue) são as componentes da cor para cada pixel e t corresponde ao instante em que cada imagem foi registrada.

Das imagens assim formadas, interessa-nos extrair as coordenadas (x, y) de apenas alguns pontos particulares da seqüência, aqueles que formam o modelo do objeto ou corpo do qual desejamos descrever a trajetória. Comumente nosso objeto de estudo é o movimento humano. A ele devemos associar um modelo tridimensional de representação para descrever sua trajetória no espaço, com um número finito de pontos.

Podemos distinguir três maneiras de determinar coordenadas no plano das imagens: manual, semi-automática e automática.

1. **Medição Manual:** consiste na identificação visual feita por um operador dos pontos de interesse nas imagens e a indicação da posição na tela por meio do cursor comandado pelo mouse do computador. Com isso, é possível obter as coordenadas correspondentes por software.

2. **Medição Semi-Automática:** consiste em realizar a medição parcialmente por meio de um operador e parcialmente pela aplicação de algoritmos de extração de padrões nas seqüências de imagens.
3. **Medição Automática:** é aquela que uma vez dado um padrão inicial a ser identificado (modelo) aplica algoritmos de busca nas imagens digitais que dispensam o monitoramento e o auxílio de um operador.

1.1 Medição Manual

Embora possa parecer que a medição manual de coordenadas, quadro a quadro, em seqüências de imagens seja um procedimento já superado na análise cinemática de movimentos, isto não é verdade. Para ilustrar esta afirmação, citaremos algumas situações onde a medição totalmente dependente do operador não só é indicada como, muitas vezes, a única alternativa.

Uma das características de um bom sistema de análise é que ele interfira o menos possível no movimento estudado. Em condições onde praticamente nenhum constrangimento possa ser impingido ao sujeito em estudo, como a competição esportiva de alto nível, é impensável o desenho de marcas sobre a pele ou a fixação de identificadores no sujeito. Assim, para que se possa realizar a referida análise a medição manual é ainda uma boa opção.

A utilização da medição manual também ocorre naquelas situações onde não é possível controlar devidamente as situações ambientais. Por exemplo, quando a necessidade de se obter sempre ao menos duas projeções de cada ponto de interesse simultaneamente para diferentes condições de luminosidade e enquadramento não seja possível.

Um exemplo interessante de necessidade de medição manual são estudos com crianças pequenas ou em situações onde o uso de vestimenta apropriada ou utilização de marcadores pode inibir a movimentação espontânea dos sujeitos.

Também é bastante freqüente encontrarmos a medição manual aplicada quando o modelo de representação do corpo humano adotado baseia-se em pontos anatômicos, não diretamente identificáveis externamente. Por exemplo em centros de rotações articulares que devem ter a sua posição na imagem estimada pelo operador.

Assim, o sistema proposto permite a medição manual de pontos em qualquer seqüência de imagens digitais em acordo com o modelo de representação adotado pelo pesquisador. Para auxiliar na estimação das projeções dos pontos escolhidos na medição manual o programa desenvolvido permite a visualização simultânea de imagens de diferentes câmeras. Este recurso facilita a estimação das coordenadas em casos de oclusão ou mesmo por fornecer outro ângulo de observação ao operador do sistema.

Citaremos, a seguir, outros recursos implantados no sistema para facilitar a medição e aumentar a sua precisão:

- Avanço por meio do teclado para a imagem seguinte. Este recurso permite ao operador manter sua atenção no movimento registrado e aumenta a rapidez no procedimento.
- Possibilidade de visualização das coordenadas já medidas e do número de quadros anteriores. Este recurso incrementa a precisão da medição, uma vez que o operador obtém uma visão da trajetória descrita pelos pontos até aquela imagem. O operador também pode escolher se deseja visualizar um conjunto de pontos ou um modelo de segmentos ligando pontos escolhidos.
- Possibilidade de visualização dos pontos medidos ou do modelo associado sobre a própria imagem ou sobre um fundo homogêneo.

1.2 Medição Semi-Automática

Seria desejável que um sistema de análise de movimentos funcionasse sempre de maneira automática, para qualquer movimento e sem causar qualquer tipo de constrangimento ao sujeito estudado. Contudo, nenhum sistema existente

hoje pode garantir simultaneamente essas características. Esta impossibilidade deve-se principalmente a complexidade que o movimento humano pode assumir aliada as limitações dos instrumentos de registro.

Conforme descrevemos anteriormente, a medição semi-automática integra a ação do operador com os recursos existentes para detecção de padrões automaticamente. Nas situações onde esta forma de trabalho é indicada, ou inevitável, podemos salientar as seguintes características:

1. Nos trechos onde o funcionamento dos algoritmos de busca é satisfatório ganha-se tempo em relação a medição manual.
2. A possibilidade de interferência no processo automático, pela interrupção da busca quando os resultados não forem satisfatórios ou quando os algoritmos estiverem apresentando falhas.
3. Uma vez feitas correções manuais em algumas imagens, pode-se acionar novamente o processo automático.
4. A correção manual de algumas medidas feitas automaticamente, quando os resultados não são satisfatórios. Como exemplo, lembramos que sistemas que funcionam de maneira totalmente automática, principalmente aqueles baseados em registros de luz infravermelha, não permitem qualquer correção dos dados coletados, informando apenas situações extremas como oclusões ou perda de registros.

1.3 Medição Automática

Um dos temas centrais na área de análise de movimentos humanos é a localização automática dos pontos de interesse em seqüências de imagens. Este problema recebe um tratamento genérico no campo da visão computacional, sendo uma área de profundo interesse para diferentes ramos da ciência atual, BALLARD & BROWN (1982).

A teoria de reconhecimento de padrões (HABERÄCKER, 1995; PAULUS & HORNEGGER, 1995), que não detalharemos neste trabalho, fornece os

fundamentos para a medição automática de pontos de interesse que realizamos. Contudo, integramos aos conceitos genéricos desta teoria, como a segmentação, processamento da imagem, extração de cantos e linhas, casamento (matching) de padrões, as características particulares da aplicação feita: a análise do movimento humano.

Assim, obtemos soluções particulares na problemática da detecção de padrões que dificilmente seriam encontradas para um movimento qualquer. Detalharemos, a seguir, algumas características da análise biomecânica de movimentos que facilitaram a formulação dos algoritmos de busca de padrões que implementamos.

1. As trajetórias dos pontos e segmentos do corpo de um sujeito no espaço (\mathbb{R}^3) são sempre contínuas.
2. As trajetórias esperadas das projeções (nas imagens) dos movimentos dos pontos de interesse, podem ser bem representadas por trajetórias contínuas, em grande parte da seqüência de imagens.
3. Os movimentos em estudo na biomecânica referem-se, na maioria das vezes, a corpos que estão sobre a ação de um campo gravitacional. A inércia do corpo confere uma relativa “suavidade” ao movimento, fato este que pode ser usado nas predições de posições em seqüências de imagens.

Por outro lado, a análise biomecânica de movimentos também possui particularidades que dificultam a identificação de padrões em seqüências de imagens digitais. Para os sistemas baseados em registros de imagens, os principais problemas enfrentados são:

1. Auto-oclusões que o corpo provoca de suas partes e, conseqüentemente, dos pontos de interesse.
2. Dificuldade advinda da obrigatoriedade do registro simultâneo de pelo menos duas câmeras de cada ponto de interesse.

3. Dificuldades na diferenciação entre o ponto de interesse e os demais componentes da imagem.
4. Constante alteração da representação dos pontos de interesse na imagem, tanto pela alteração no número de pixels associados a ele como de suas cores. Esse problema deriva dos efeitos de perspectiva e iluminação no local de coleta de dados.
5. Necessidade de se definir regiões de maior probabilidade de localizar os pontos de interesse, de maneira a diminuir o custo computacional e conseqüente tempo total de processamento.
6. Grande quantidade de dados a serem analisados em uma seqüência de imagens. Um segundo de aquisição de imagens a 60 Hz, com imagens de maior número de linhas e colunas, corresponde a aproximadamente 54 Mbytes de dados para serem analisados.

Diante da impossibilidade em propor uma solução genérica única, projetamos nosso sistema de maneira a estar apto a trabalhar com as três formas de medição integradamente (manual, semi-automática e automática). Pretendemos com isso, conferir flexibilidade ao sistema em função das condições experimentais específicas de cada estudo.

Mostraremos, a seguir, os alguns conceitos envolvidos na problemática do reconhecimento de padrões e explicitaremos as soluções que implementamos em nosso sistema de análise de movimentos.

2. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS PARA DETECÇÃO DE MARCAS

Os algoritmos que desenvolvemos para a detecção de marcas orientaram-se de acordo com as características anteriormente listadas, tanto no que diz respeito aos elementos facilitadores como limitantes presentes na análise cinemática de movimentos humanos.

A medição automática implementada consiste, basicamente, dos seguintes procedimentos.

- Inicialização dos algoritmos de busca.
- Determinação das regiões de máxima probabilidade de encontrar as marcas de interesse.
- Algoritmos LIKE, que trabalha com o conceito de “cor mais próxima”.
- Algoritmo CIRCLE, que trabalha com a noção de correlação de matrizes de dados.

2.1 Procedimento de Inicialização dos Algoritmos

A identificação das marcas a serem “perseguidas” nas seqüências é feita na primeira imagem. Uma vez que as imagens já estão disponíveis, a rotina de reconhecimento automático deve ser acionada.

Estando a primeira imagem da seqüência visível para o operador e definido o número de marcas a serem procuradas, este deve selecionar o método de reconhecimento adequado às marcações feitas (LIKE ou CIRCLE).

Escolhido o algoritmo LIKE, o operador indicará na imagem, na posição onde se encontra a marca, um pixel “padrão” ou máscara, que deverá ser da cor dos demais pixels que compõe a marca. As coordenadas deste pixel e os valores R (red)

G (green) e B (blue) dele serão utilizados para comparações com pixels de outras imagens da seqüência, conforme detalharemos posteriormente.

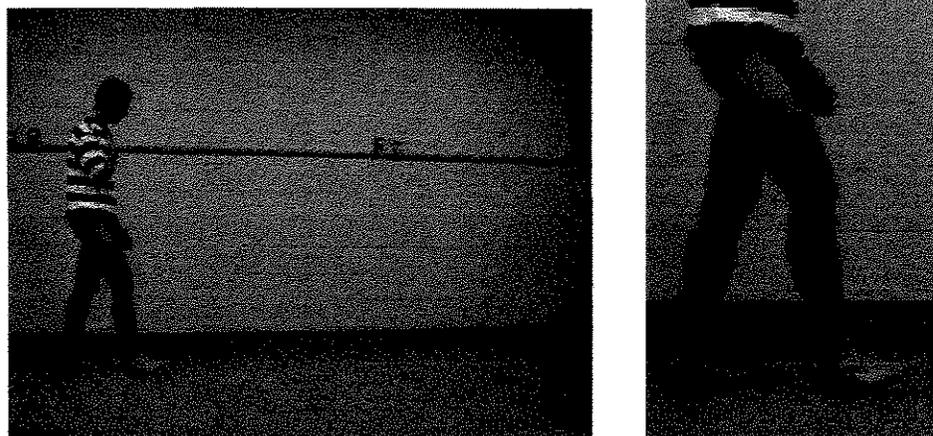


Figura 19: Ilustração do procedimento de inicialização do algoritmo LIKE

O algoritmo CIRCLE é inicializado a partir da identificação, pelo operador, de dois pontos. O pixel central da marcação (posição estimada) e um segundo pixel que indicará o raio da região definida para a marca. Com este procedimento é construída uma matriz de pixels (máscara) que será utilizada para comparações nas demais imagens da seqüência.



Figura 20: Ilustração do procedimento de inicialização do algoritmo CIRCLE

2.2 Algoritmo de Definição das Regiões de Busca

Tanto o algoritmo LIKE como o algoritmo CIRCLE utilizam-se do mesmo método de definição das regiões de máxima probabilidade de se encontrar as marcas, na seqüência de imagens.

Uma vez que o procedimento de inicialização é executado na primeira imagem, um pixel é tomado como centro da região de busca, na primeira imagem. No algoritmo LIKE, este pixel é o escolhido pelo operador. No CIRCLE, o pixel central é adotado como centro da região de busca.

Os limites são dados por um número determinado de linhas - acima e abaixo - e colunas - à direita e à esquerda - da posição do pixel central da região de busca. Esses limites são parâmetros do algoritmo. Eles possuem um valor inicial no programa mas podem ser alterados pelo operador. As alterações podem ser feitas em função do enquadramento das imagens ou da distância entre as marcas, em qualquer instante das medições.

A região de busca na segunda imagem da seqüência é a mesma da definida na primeira imagem. A posição central da região de busca na terceira imagem é obtida por extrapolação linear nas linhas e colunas, das coordenadas dos pontos identificados como sendo os pontos de interesse na primeira e segunda imagens.

A partir da quarta imagem, o pixel central da região de busca, na i -ésima imagem, $P_i(x_i, y_i)$ será determinado pela extrapolação dos três últimos pontos encontrados, segundo as equações E22 e E23.

$$x_i = \frac{7}{3} \cdot x_{(i-1)} - \frac{5}{3} \cdot x_{(i-2)} + \frac{1}{3} \cdot x_{(i-3)} \quad E22$$

$$y_i = \frac{7}{3} \cdot y_{(i-1)} - \frac{5}{3} \cdot y_{(i-2)} + \frac{1}{3} \cdot y_{(i-3)} \quad E23$$

2.3 Algoritmos de Casamento de Padrões (Matching)

2.3.1 Algoritmo LIKE

Este algoritmo opera a partir da comparação de valores de cor entre o pixel de coordenadas x, y fornecido pelo operador na primeira imagem (R_1, G_1, B_1), e os pixels encontrados nas regiões de busca das demais imagens (i) da seqüência (R_i, G_i, B_i).

A comparação é feita em relação a valores de tolerância (ε), inicialmente fornecidos pelo programa, mas que também podem ser alterados pelo operador a qualquer momento. Algebricamente, temos as seguintes condições:

$$R_1 - \varepsilon \leq R_i \leq R_1 + \varepsilon \quad E24$$

$$G_1 - \varepsilon \leq G_i \leq G_1 + \varepsilon \quad E25$$

$$B_1 - \varepsilon \leq B_i \leq B_1 + \varepsilon \quad E26$$

Onde ε é um número inteiro de 0 a 128.

Das coordenadas (x,y) de todos os pixels encontrados na região de busca em cada imagem, que satisfazem simultaneamente as condições das equações E24, E25 e E26, calculamos a posição do ponto central que será adotado como a coordenada da marca naquela imagem. As expressões abaixo fornecem as equações das coordenadas x_c e y_c do ponto procurado.

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad E27$$

$$y_c = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad E28$$

Onde N é o número de pontos da região de busca que satisfizeram simultaneamente as condições das equações E24, E25 e E26.

2.3.2 Algoritmo CIRCLE

Conforme descrevemos anteriormente, a inicialização deste algoritmo faz-se a partir da indicação na primeira imagem, pelo operador, de dois pixels na tela. Definimos, então, uma matriz de pixels formada da seguinte maneira:

Seja o pixel central marcado na imagem inicial designado por P_1 e o mais externo por P_2 , respectivamente, indicados pelo operador. Definimos a distância d como sendo:

$$\text{Se, } |P_2(x) - P_1(x)| \leq |P_2(y) - P_1(y)|, \quad \text{então } d = |P_2(y) - P_1(y)| \quad E29$$

$$\text{Se, } |P_2(x) - P_1(x)| \geq |P_2(y) - P_1(y)|, \quad \text{então } d = |P_2(x) - P_1(x)| \quad E30$$

O número de elementos em cada matriz, uma para cada canal de cor (R,G,B), como sendo l :

$$l = (2 \cdot d + 1)^2 \quad E31$$

E onde será formada uma matriz M para cada canal de cor R, G e B, a partir do pixel central (x_c, y_c) , onde c é o índice (linha, coluna), da seguinte maneira:

$$M = \begin{pmatrix} (x_c - d, y_c - d) & (x_c - d + 1, y_c - d) & \dots & (x_c + d, y_c - d) \\ (x_c - d, y_c - d + 1) & (x_c - d + 1, y_c - d + 1) & \dots & (x_c + d, y_c - d + 1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & (x_c, y_c) & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (x_c - d, y_c + d) & (x_c - d + 1, y_c + d) & \dots & (x_c + d, y_c + d) \end{pmatrix} \quad E32$$

Tendo obtido as matrizes acima descritas na primeira imagem, o algoritmo de busca CIRCLE procede da seguinte maneira para localizar o ponto de interesse:

1. Constrói, na imagem seguinte e dentro da região de busca, seqüencialmente e para cada canal de cor, todas as matrizes de mesmas dimensões que as extraídas da primeira imagem.

2. Faz comparações entre as matrizes extraídas da primeira imagem e todas as outras possíveis encontradas na região de busca das imagens seguintes.
3. Define o ponto central da matriz e o adota como a coordenada da marca procurada.

A comparação entre matrizes é feita utilizando-se o valor médio dos coeficientes de correlação das três matrizes, uma para cada canal de cor.

3. FLUXOGRAMA DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Apresentaremos, a seguir, o fluxograma dos algoritmos de medição de coordenadas implementados no software dedicado ao sistema. Em particular, procuramos detalhar como se dá a medição manual e automática de coordenadas, enfatizando as possibilidades de utilização integrada dos diferentes algoritmos disponíveis.

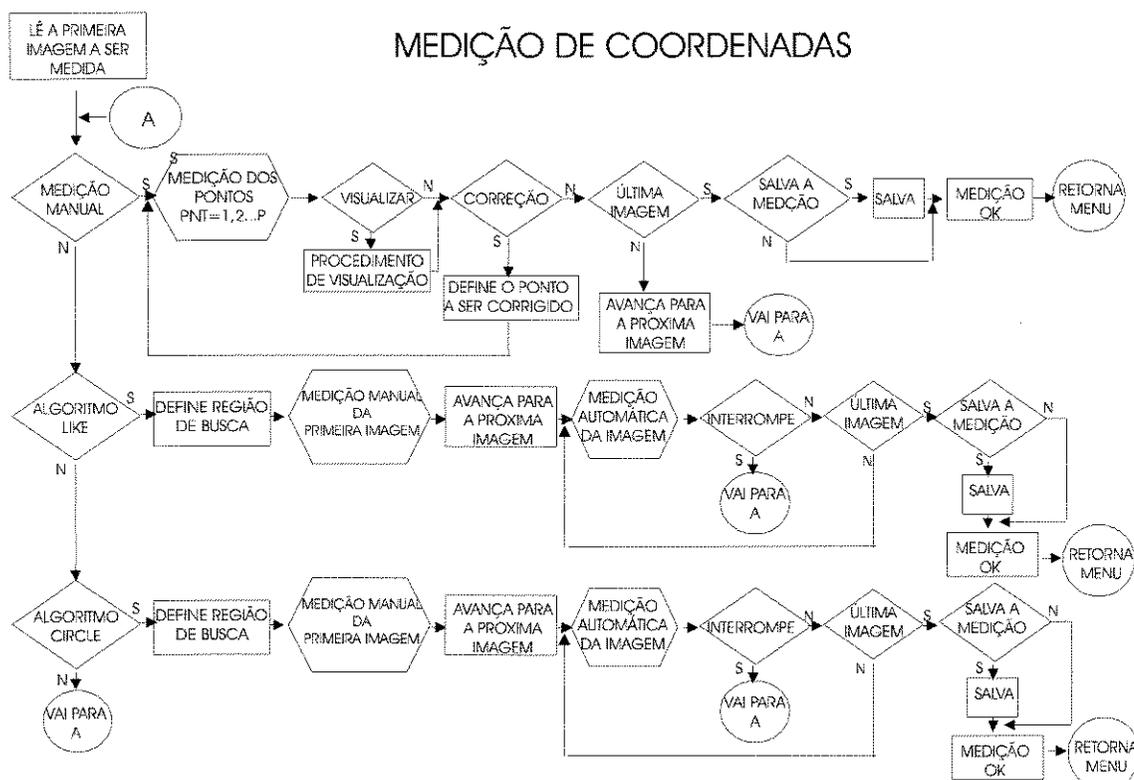


Figura 21: Fluxograma dos algoritmos de medição de coordenadas.

Inicia-se o procedimento de medição de coordenadas pela seleção da seqüência de imagens a serem medidas, ainda no menu principal do programa. Lê-se, então, a primeira imagem da seqüência a ser medida e opta-se pelo método manual ou automática.

Caso a escolha tenha sido pela medição manual, inicia-se naquela imagem a identificação de todos os pontos de interesse. Em qualquer momento da medição dos pontos (pixels) pode-se optar pela visualização das coordenadas de tela em sobreposição a imagem.

Da mesma forma, pode-se corrigir uma medida imediatamente após ela ter sido feita ou em análise posterior. A cada imagem medida na seqüência pode-se alterar o método de medição, passando-se para a medição automática, através dos algoritmos LIKE ou CIRCLE.

Na medição automática deve-se definir as dimensões iniciais da região de busca e realizar os procedimentos inicialização do algoritmo escolhido. Como a medição automática pode ser visualizada a cada ponto, pode-se interromper o procedimento a qualquer momento.

Caso o procedimento seja interrompido, pode-se reiniciá-lo com o mesmo algoritmo de medição ou outro qualquer. Isto permite que em seqüências onde, em alguns quadros, não é possível a medição automática, faça-se a medição manual.

4. AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MEDIÇÃO

Neste item, pretendemos mostrar a confiabilidade dos algoritmos de medição de coordenadas do sistema proposto. Faremos isso, mostrando os resultados obtidos em um experimento, onde marcadores foram medidos pelo método manual e automático e os resultados comparados.

Não pretendemos confrontar os algoritmos de medição manual e automática nos aspectos relativos a tempo para realizar as medições ou na simplicidade de cada um. Nestes casos é evidente a superioridade da medição automática.

Também não faria sentido a comparação entre os algoritmos se as marcas utilizadas ficassem ocultas por várias imagens na seqüência, impedindo o algoritmo de medição automática de operar. Em casos onde a ocultação das marcas é muito freqüente, as vantagens do algoritmo de medição manual são evidentes. Assim sendo, optamos por projetar o experimento de maneira que a “visibilidade” das marcas fosse adequada tanto para a medição manual como para a automática.

Para que a confrontação de resultados pudesse ser feita evidenciando-se apenas as características de cada algoritmo de medição utilizado, os resultados analisados são relativos às coordenadas de tela das marcas e não de coordenadas espaciais reconstruídas.

4.1 Medição Manual e Automática de Marcas Ativas

O experimento realizado consistiu da medição manual e automática das coordenadas de tela (linhas e colunas) de três marcas ativas fixadas à perna de um sujeito normal, durante sua marcha. As marcas ativas foram projetadas e montadas por nós e são descritas abaixo.

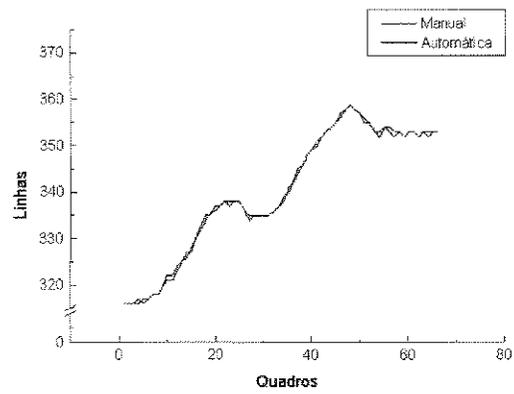
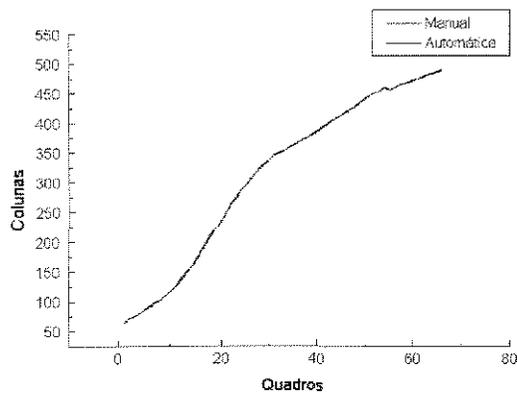
Como marcas ativas foram utilizados três LED's emissores de luz, de três cores distintas. Os LED's foram montados sobre uma base rígida em forma de cruz e fixada à perna do sujeito por meio de uma fita de velcro de dupla face. O diâmetro dos LED's é de 15 mm e o comprimento de cada segmento do suporte 100 mm. Baterias de 3V e diâmetro 10 mm são colocadas sob os LED's acionando-os quando desejado.

A seqüência que foi medida por meio dos dois algoritmos (manual e automático) continha 66 imagens de 560 linhas por 735 colunas cada. O tempo para medição manual foi de aproximadamente 45 minutos, enquanto a medição automática se deu em 2 minutos. A figura 22 mostra uma das imagens medidas.

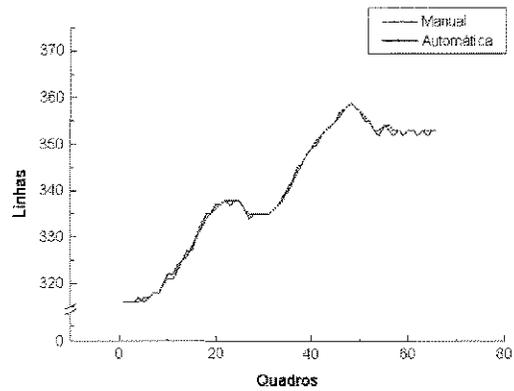
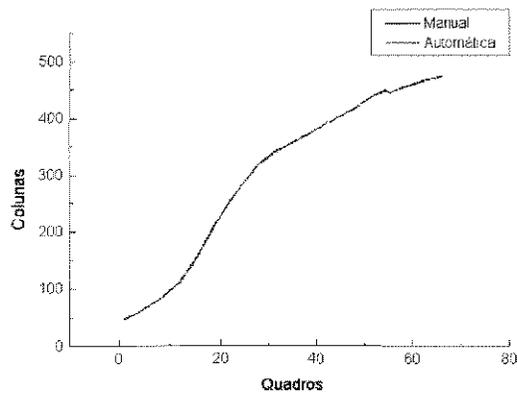


Figura 22: Uma das 66 imagens medidas utilizando-se os algoritmos de medição manual e automática.

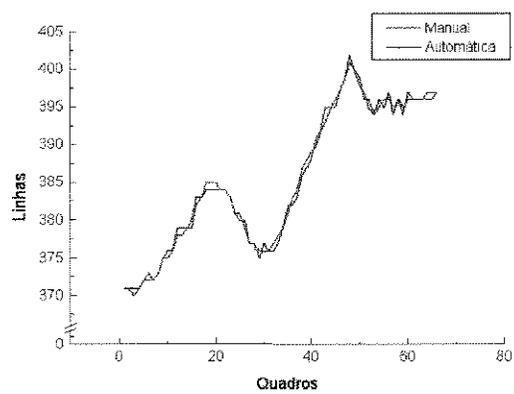
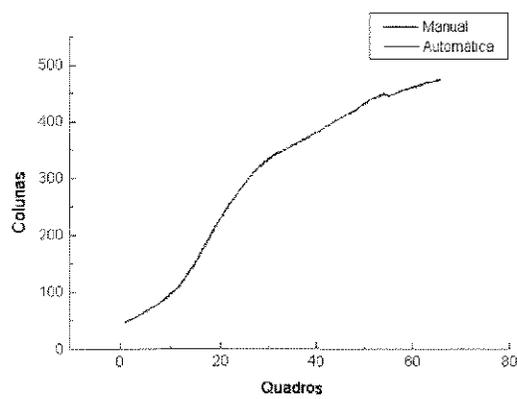
Apresentaremos, a seguir, os resultados obtidos por cada um dos algoritmos de medição.



Figuras 23a e 23b: Coordenadas do ponto 1 medidas manual e automaticamente.

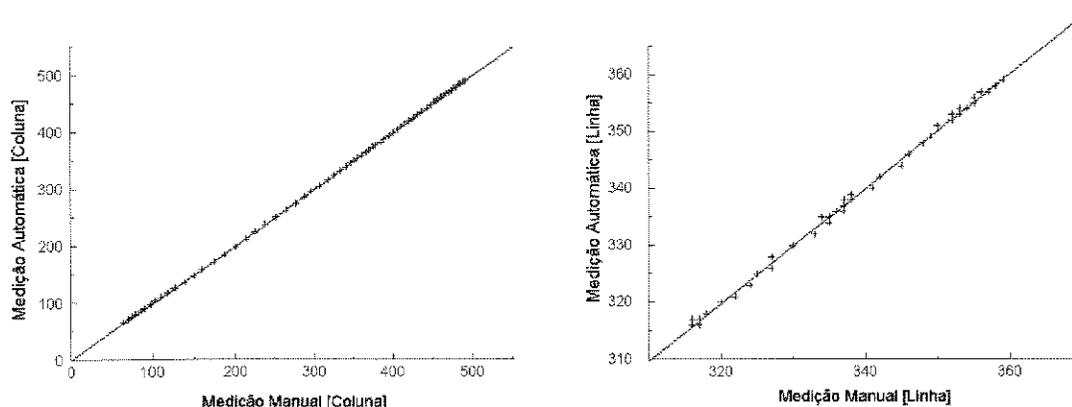


Figuras 24a e 24b: Coordenadas do ponto 2 medidas manual e automaticamente.



Figuras 25a e 25 b: Coordenadas do ponto 3 medidas manual e automaticamente.

A seguir, mostraremos as regressões entre as medições feitas por cada um dos algoritmos, manual e automática.



Figuras 26a e 26b: Representação dos valores medidos manual e automaticamente para as colunas e linhas do ponto 1.

Nos dois casos os coeficientes angulares das retas ajustadas foram muito próximos a um. Para as colunas o valor do coeficiente angular da reta ajustada aos dados foi 1,0010 sendo o desvio-padrão do coeficiente igual a 0,0007. Para as linhas o coeficiente angular encontrado foi 1,0116 e o desvio-padrão 0,0050.

Analisando os desvios entre os valores encontrados por cada algoritmo de medição para as colunas e linhas do ponto 1 encontramos:

Variável	Média	Desvio-padrão	Máximo	Mínimo	Imagens
Linha	0,0303	0,58097	1	1	66
Coluna	-0,87879	0,81364	0	-3	66

Tabela 4: Valores dos desvios entre as medições feitas com os algoritmos de medição manual e automático, nas linhas e colunas.

Este resultados nos mostram a alta correlação entre os algoritmos de medição manual e automática. Como as medições manuais foram feitas em

condições de muito boa visibilidade das marcas de interesse, os resultados encontrados conferem grande confiabilidade ao algoritmo de medição automática.

CAPÍTULO V

Exemplos de Aplicação do Sistema

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo apresentaremos exemplos de aplicação do sistema proposto em dois problemas relativos à análise biomecânica de movimentos, entre outros possíveis.

Avaliaremos principalmente aspectos relacionados a acurácia fornecida pelo sistema. Desta forma estaremos fornecendo subsídios para a compreensão das propriedades do referido sistema, quando aplicado à diferentes problemas biomecânicos.

No primeiro exemplo, mostraremos uma comparação entre o sistema proposto e um sistema óptico-eletrônico de maior resolução temporal e espacial. Procuramos manter condições idênticas para a coleta de dados, usando a mesma tentativa do sujeito e os mesmos pontos de interesse tanto para a o sistema óptico-eletrônico como para o sistema de vídeo. Os resultados de ambos são apresentados conjuntamente para possibilitar comparações.

Um segundo exemplo, será a análise de repetidas marchas de um mesmo sujeito sem qualquer histórico de alteração no aparelho locomotor. Procuraremos avaliar a reprodutibilidade e precisão fornecida pelo sistema. Destacaremos, neste exemplo, os resultados proporcionados pela utilização dos métodos sincronização propostos neste trabalho.

1. ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA PROPOSTO E UM SISTEMA DE MAIOR RESOLUÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL

O objetivo deste estudo foi apresentar uma comparação entre os resultados fornecidos pelo sistema proposto e por um sistema óptico-eletrônico de maior resolução temporal e espacial. O movimento estudado foi a marcha de uma criança normal (8 anos).

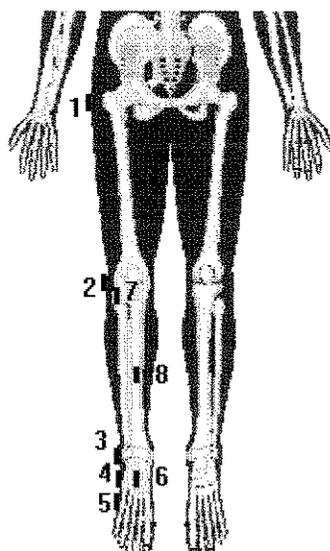
O intuito principal foi ressaltar dos resultados obtidos as características próprias de cada sistema, não de maneira a confrontá-los, mas de forma a evidenciar suas virtudes e limitações. O sistema óptico-eletrônico testado, que passaremos a identificar por S-II, está instalado no Institut für Biomechanik - Deutsche Sporthochschule Köln, onde o estudo foi realizado. O sistema descrito por nós será designado por DVIDEO.

1.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Para que fosse possível uma comparação entre os sistemas, fizemos a aquisição dos dados simultaneamente. Ao membro inferior direito de um único sujeito, idade 8 anos, altura 1.38 m, massa 40.2 Kg, foram fixados 8 LED's emissores de luz infravermelha, captados pelo sistema S-II, e que serviram também como pontos a serem digitalizados no sistema descrito neste trabalho. O referido sujeito caminhou naturalmente em linha reta frente ao cenário previamente preparado.

A localização dos LED's foi feita de maneira a refletir o modelo antropométrico e cinemático a ser adotado para a reconstrução de pontos de interesse inatingíveis, segundo BAUMANN et al (1993), por exemplo os centros de

rotação articulares. A figura 27 mostra os pontos escolhidos para a fixação dos diodos de maneira a definirem um conjunto de marcas técnicas.



- 1 Trocanter Maior
- 2 Projeção do eixo de rotação do joelho
- 3 Projeção do eixo de rotação do tornozelo
- 4 Centro da sola do calçado, na direção do centro de rotação do tornozelo
- 5 V Metatarso
- 6 Suporte metálico sobre o dorso do pé
- 7 Cabeça da Fíbula
- 8 Suporte Metálico sobre a tíbia

Figura 27: Representação esquemática dos pontos usados como referência para fixação dos LED's utilizados pelo sistema S-II para aquisição de dados. Os mesmos pontos foram registrados pelo sistema DVIDEO.

O sistema S-II consiste de duas câmeras sensíveis a luz infravermelha, um conjunto de LED's emissores de luz infravermelha, uma unidade controladora dos LED's (LCU) e unidade central de processamento. O sistema está conectado a um computador PC 386, que possui um conversor analógico digital de 12 bits. As características técnicas do sistema apresentadas abaixo são descritas por KRABBE (1994).

A aquisição das coordenadas 2D é feita em tempo real e os procedimentos de cálculo das coordenadas tridimensionais é automático. O sistema faz a aquisição simultânea (sincronizada) de cada LED. A resolução temporal do sistema é limitada pela sua frequência de trabalho que é igual a 10.000 Hz. A frequência máxima de quadros é dada por:

$$f_{max} = 10000 / (N_C \cdot N_L)$$

E33

Onde N_C é o número de câmeras usadas e N_L é o número de LED's utilizados no experimento.

A resolução espacial do sistema S-II é dependente do enquadramento utilizado, no nosso experimento foi estimada em 0.33 mm para cada câmera. Trabalhamos com uma frequência de 500 Hz e o tempo de aquisição foi de 702 ms.

O sistema DVIDEO operou com duas câmeras Video8 (PAL), com frequência de 50 Hz. O enquadramento utilizado foi de aproximadamente 2 m e a resolução espacial obtida estimada em 7.5 mm (2 metros/256 linhas). Utilizamos um tempo de abertura (Shutter) de 1/250 s. As medições foram feitas no software dedicado ao sistema.

Tanto para o sistema DVIDEO como para o sistema S-II, utilizamos o mesmo método de calibração de câmeras e reconstrução de coordenadas, conhecido como DLT (Direct Linear Transformation), descrito anteriormente, com os mesmos pontos de apoio e o sistema de coordenadas sendo utilizados para ambos os sistemas.

A sincronização entre os sistemas de aquisição, tanto quanto possível, foi feita a partir do ajuste da base de tempo em relação ao primeiro contato do pé do sujeito com a plataforma de força. A próxima figura mostra uma representação do experimento.

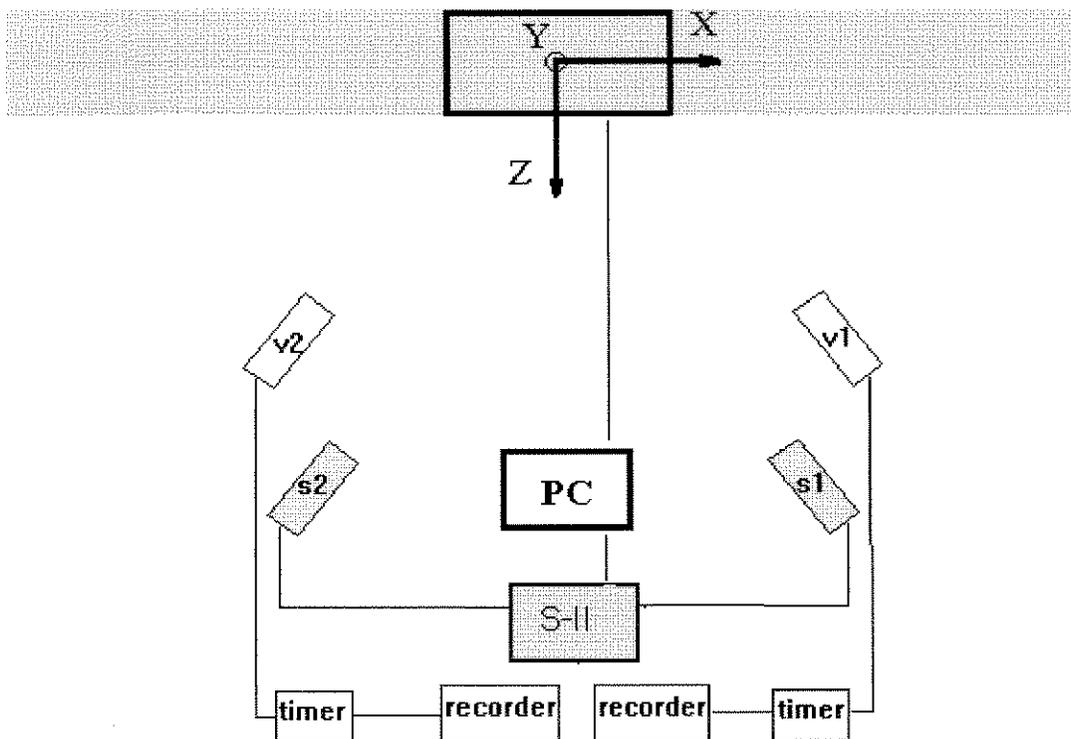


Figura 28: Representação esquemática da montagem do experimento. S1 e S2 são as câmeras de infravermelho do sistema S-II. V1 e V2 são as câmeras de vídeo do sistema DVIDEO. Como foram utilizados timers externos o registro de vídeo foi feito em videocassetes.

1.2 Resultados e Discussão

Apresentaremos, a seguir, os resultados obtidos da medição das coordenadas espaciais dos LED's fixados nas projeções dos eixos de rotação do joelho e tornozelo, para cada coordenada.

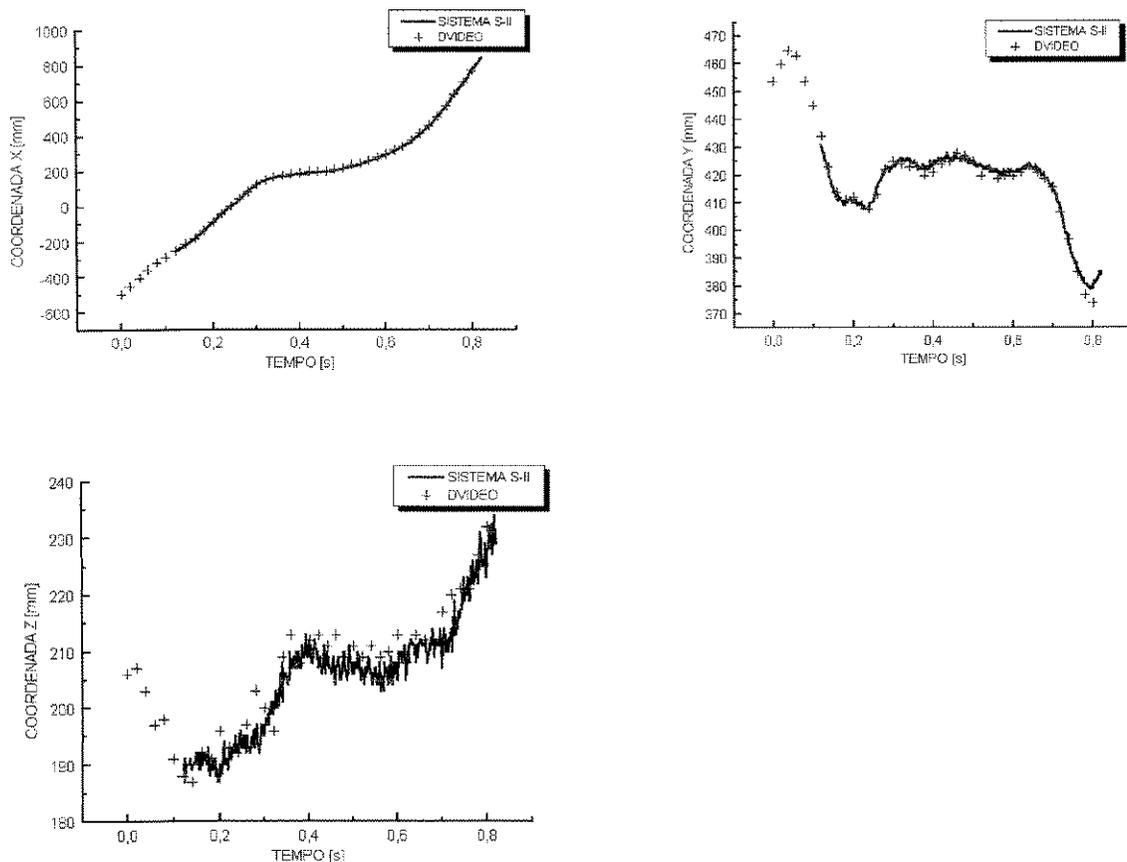


Figura 29: Os gráficos acima mostram as trajetórias X, Y e Z dos LED's fixados na direção do eixo de rotação do joelho (LED 2). As legendas indicam as coordenadas registradas pelo sistema S-II a 500 Hz e o sistema DVIDEO a 50 Hz.

Como fica evidente dos gráficos, embora o sistema DVIDEO possua menor resolução temporal e espacial, este foi capaz de reproduzir as trajetórias com bastante detalhes. Note-se como no gráfico da coordenada Y - posição vertical - o sistema DVIDEO acompanha as inflexões da trajetória registrada pelo sistema S-II. É importante ressaltar que os dados não foram submetidos a qualquer procedimento de filtragem ou tratamento numérico.

Com o objetivo de poder comparar a variabilidade de cada sistema, avaliamos a variação da distância em relação a média para cada dois pontos do nosso sistema de marcas técnicas em função do tempo.

Apresentamos, a seguir, os resultados para a variação da distância entre os LED's 2 e 3 (equivalente ao comprimento da perna) e entre os LED's 3 e 8 em relação ao valor médio obtido. Consideramos como variação positiva aquela onde a distância entre os dois pontos foi maior que a média encontrada e negativa no caso contrário.

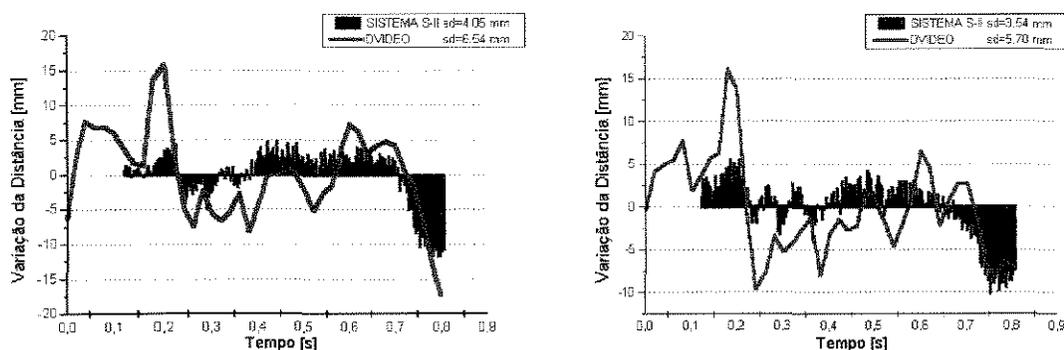


Figura 30: Variação da distância entre os LED's 2 e 3 (esquerda) e entre os LED's 3 e 8 (direita) em relação a média, para o sistema DVIDEO e S-II.

Os gráficos mostram claramente a menor variabilidade do sistema S-II, mas mostram também que o sistema DVIDEO apresentou resultados bastante satisfatórios, da ordem de 2 mm de diferença nos valores dos desvios-padrão. É importante ressaltar também a coerência entre os pontos de inflexão das curvas dos dois sistemas, de maneira que as suas formas se assemelham.

Note-se que as variações acima representadas não derivam unicamente dos erros intrínsecos de cada sistema, mas também dos movimentos relativos entre as marcas. Esses movimentos das marcas sobre a pele durante o movimento são, segundo ANGELONI et al. (1992), hoje a maior fonte de erros em análise de movimentos humanos baseados em conceitos de fotogrametria.

Para uma melhor compreensão da variabilidade de cada sistema, mostramos, a seguir, uma representação da distribuição dos valores encontrados para a distância entre os pontos 2 e 3, por meio do desenho esquemático (BOXPLOT).

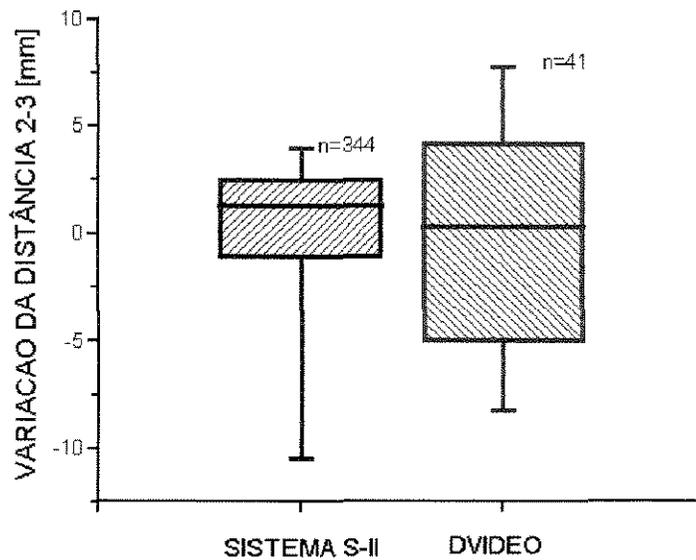


Figura 31: Desenho esquemáticos dos valores obtidos pelo sistema S-II e DVIDEO para a variação em relação à média da distância entre os pontos 2 e 3, equivalente ao comprimento da perna, encontrados medindo-se cada uma das imagens da seqüência.

Dos resultados apresentados pudemos observar a variabilidade de cada sistema de maneira comparada. Contudo, é interessante determinar de maneira quantitativa a proximidade entre os resultados fornecidos por cada sistema.

Para interpretar essa relação entre os conjuntos de resultados obtidos em cada uma das coordenadas e para cada ponto, utilizamos uma medida estatística capaz de avaliar a proximidade entre dois conjuntos de dados: o coeficiente de correlação. Os valores numéricos dos coeficiente de correlação são apresentados na tabela 5.

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
1	0.99991	0.98962	0.94059
2	0.99990	0.99024	0.95515
3	0.99896	0.99716	0.91935
4	0.99866	0.99775	0.87473
5	0.99736	0.99711	0.82984
6	0.99869	0.99281	0.86966
7	0.9982	0.98150	0.77033
8	0.99979	0.98866	0.89249

Tabela 5: Coeficientes de correlação entre os valores obtidos pelo sistema DVIDEO e S-II, para cada uma das coordenadas de cada ponto

Os altos coeficientes de correlação indicam uma boa proximidade entre os conjuntos de dados permitindo-nos afirmar que, para esse experimento, os resultados obtidos pelo sistema DVIDEO são bastante semelhantes aos do sistema S-II.

Os dados mostram também que houve para todos as marcas técnicas uma maior correlação entre os dois sistemas na coordenada X (plano sagital) do que na coordenada Y (plano vertical), que por sua vez apresentou sempre melhores resultados que a coordenada Z (plano transversal).

Além da identificação dos planos onde ocorre menor correspondência entre os dois sistemas, pudemos observar para quais LED's deu-se esta menor correspondência, como por exemplo para o ponto 7. Cabe notar que este ponto apresentou uma baixa visibilidade para o sistema DVIDEO durante o experimento.

1.3 Conclusões do Experimento

Tendo em vista as condições de baixa velocidade do movimento estudado, a menor resolução temporal (número de quadros por segundo) do sistema DVIDEO não significou limitação importante. Este fato pode ser verificado na capacidade

apresentada pelo sistema para representar bem as inflexões nas curvas de trajetória das coordenadas.

A comparação da variabilidade de cada sistema permitiu-nos saber a ordem de grandeza da diferença entre eles no movimento estudado. Da análise dos coeficientes de correlação entre os conjuntos de dados pudemos observar, de maneira geral, a similaridade dos resultados obtidos e, em particular, em quais marcas técnicas houve menor concordância entre os dois sistemas.

Como conclusão geral observamos que embora os resultados obtidos pelo sistema S-II sejam melhores que os do sistema DVIDEO, este último apresentou resultados satisfatórios.

2. ANÁLISE DA MARCHA DE UM SUJEITO NORMAL COM O SISTEMA DVIDEO

O objetivo deste segundo exemplo foi avaliar a reprodutibilidade dos resultados fornecidos pelo sistema e testar os efeitos dos métodos de sincronização apresentados neste trabalho sobre a análise de marcha. A análise consiste, portanto, da descrição cinemática tridimensional da marcha de um sujeito normal a partir do sistema DVIDEO

2.1 Descrição da Metodologia

Mostraremos o funcionamento do sistema DVIDEO aplicado à análise de três repetições da marcha de um sujeito voluntário adulto (37), sexo masculino e sem histórico de patologia ou deficiência motora. As marcas de interesse foram identificadas no sujeito diretamente sobre a pele, com material lavável e não tóxico.

Três identificações foram feitas de maneira a estimar a posição do trocanter maior (PONTO 1), eixo de rotação do joelho (PONTO 2) e maléolo lateral (PONTO 3), todas no membro inferior direito do sujeito.

O movimento foi descrito a partir das seguintes variáveis: coordenadas espaciais (X , Y , Z) dos pontos indicados em função do tempo e o ângulo do joelho (J). Calculamos também, os comprimentos dos segmentos definidos pelos pontos 1 e 2 e pelos pontos 2 e 3 para cada um dos pontos da trajetória.

Note, na figura abaixo, que o ângulo do joelho (j) é o ângulo entre os segmentos no espaço, e não uma projeção sobre qualquer plano. A imagem mostra as convenções adotadas:

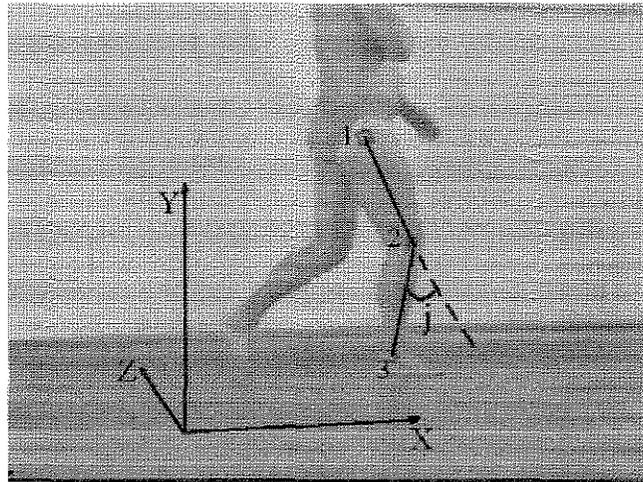


Figura 32: Identificação das marcas feitas no sujeito: Ponto 1, trocanter maior; Ponto 2, projeção do eixo de rotação do joelho; Ponto 3, maléolo lateral. J é o ângulo do joelho.

Para o registro foram utilizadas duas câmeras Hi8 e o shutter utilizado foi de $1/250$ s. Os registros foram feitos a 25 Hz (sistema PAL) e o tempo de aquisição foi de 1.2 s. As seqüências de imagens foram digitalizadas em tempo real e posteriormente descomprimidas para formato BMP, 24 bits de profundidade de cor, em tamanho de 640 colunas por 480 linhas.

As medições foram feitas de maneira automática para os pontos 1 e 2. Apenas para o ponto 3 foi necessária a utilização da medição semi-automática. O algoritmo utilizado foi o algoritmo LIKE, descrito no capítulo III.

O método de sincronização utilizado foi o de sincronização por calibração dinâmica a partir da distância entre pontos (SCD-D).

2.2 Resultados e Discussão

Os primeiros resultados que iremos apresentar são os gráficos das coordenadas tridimensionais obtidas para cada um dos três pontos medidos.

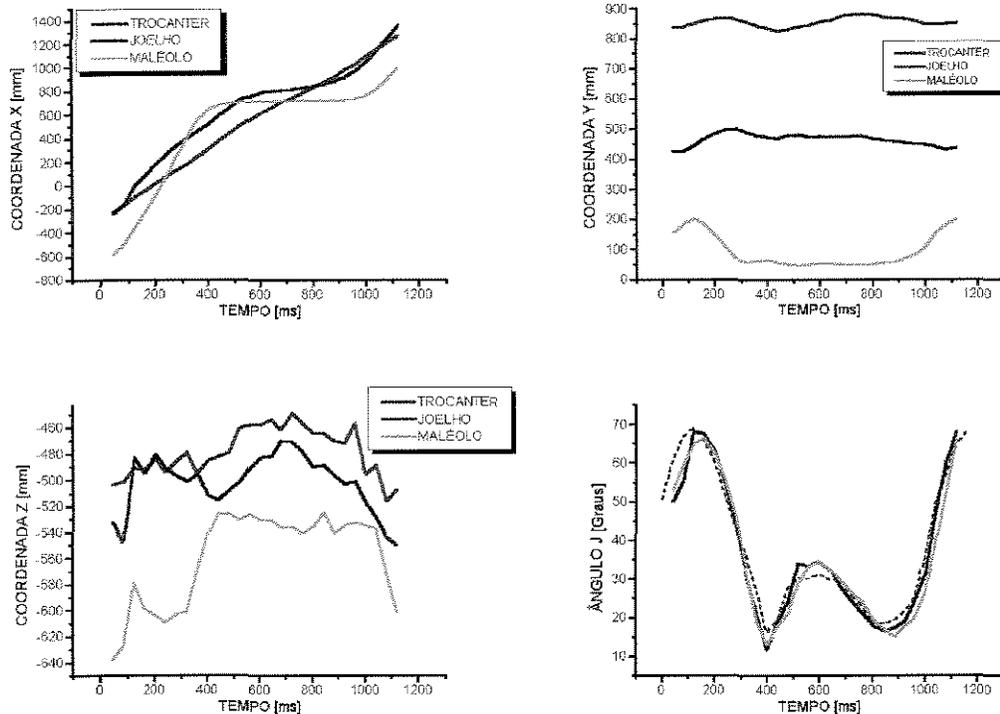


Figura 33: Trajetórias das coordenadas X, Y e Z dos pontos 1, 2 e 3 marcados sobre a pele do sujeito em função do tempo. Ângulos do joelho (3 repetições) para a marcha de um sujeito normal, à direita embaixo.

É importante destacar que os dados acima apresentados são os dados brutos obtidos pelo sistema, isto é, sem qualquer tipo de filtragem ou tratamento numérico, o que nos dá uma primeira avaliação da qualidade dos resultados obtidos.

Para que pudéssemos avaliar a qualidade dos dados, estudamos as flutuações no módulo dos vetores formados pelos pontos 1 e 2 e os pontos 2 e 3. Embora saibamos que devido aos movimentos relativos de pele essas distâncias não permanecem absolutamente constantes, aceitamos inicialmente tratarem-se de corpos rígidos.

Para que conjuntamente pudéssemos observar os resultados do método de sincronização entre os registros SCD-D, apresentaremos, nas tabelas 1 e 2, os valores “sincronizados” e “ não sincronizados” obtidos para os valores médios e de variabilidade dos segmentos 1-2 e 2-3.

DESCRIÇÃO	Média [mm]	SD [mm]	CV [%]	Máx [mm]	Min [mm]	N [quadros]
1a. sem sincro.	404.50	8.96	2.2	427.98	389.08	38
1a. com sincro.	411.94	6.51	1.6	427.98	393.30	38
2a. sem sincro.	417.63	5.17	1.2	426.19	407.81	28
2a com sincro	416.99	5.00	1.2	426.19	404.58	28
3a sem sincro	419.86	9.45	2.3	447.69	407.40	28
3a com sincro	417.77	8.79	2.1	447.69	406.79	28

Tabela 6: Valores médios, de desvio-padrão (SD), coeficiente de variação, máximos e mínimos da distância entre os pontos indicadores do trocanter maior (1) e o eixo de rotação do joelho (2), quando observados em N quadros, com e sem aplicação do método de sincronização.

DESCRIÇÃO	Média [mm]	SD [mm]	CV [%]	Máx [mm]	Min [mm]	N [quadros]
1a. sem sincro.	430.75	26.69	6.2	473.74	373.65	38
1a. com sincro.	433.67	9.42	2.2	451.77	400.95	38
2a. sem sincro.	436.49	9.11	2.1	459.89	419.98	28
2a. com sincro.	434.66	6.73	1.5	449.98	419.36	28
3a. sem sincro.	429.33	18.50	4.3	472.78	391.80	28
3a.com sincro.	426.83	17.52	4.1	445.71	381.02	28

Tabela 7: Valores médios, de desvio-padrão (SD), coeficiente de variação, máximos e mínimos da distância entre os pontos indicadores do eixo de rotação do joelho (2) e do maléolo lateral (3) quando observados em N quadros, com e sem aplicação do método de sincronização.

Observando os resultados percebemos que a ordem de grandeza do coeficiente de variação, desvio-padrão sobre a média, está abaixo de 5% para todas as análises com aplicação do método de sincronização, o que significa uma precisão

bastante boa para o sistema. Também é importante destacar a diminuição do coeficiente de variação quando da aplicação do método de sincronização.

Visto que as distâncias avaliadas não eram efetivamente constantes e nem é nosso objetivo apresentar aqui um estudo detalhado da precisão ou sensibilidade da metodologia, entendemos os dados apresentados como suficientes para indicar a qualidade do sistema quando aplicado em condições concretas de análise.

2.3 Conclusões do Experimento

Pelos resultados apresentados podemos concluir que o referido sistema foi totalmente satisfatório para descrever quantitativamente a marcha do sujeito estudado, com a precisão necessária. Por outro lado, a simplicidade do sistema permite a realização em pouco tempo das análises desejadas, cerca de 30 minutos entre a filmagem e a obtenção dos resultados, quando a filmagem é feita em condições adequadas.

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nos diversos capítulos deste trabalho permitem a afirmação que os objetivos estabelecidos foram atingidos. Para fundamentar essa afirmação, examinaremos em que medida cada objetivo foi alcançado.

A idéia central do trabalho, sintetizada no conceito do sistema, mostrou-se abrangente, viável e fecunda. A abrangência pode ser percebida pela diversidade de problemas e aplicações da análise biomecânica que o sistema permite estudar.

Ao estruturar-se o sistema de maneira a liberá-lo de equipamentos dedicados, ou um único ambiente para coleta de dados, ou de um determinado tipo de marcador fez-se mais do que favorecer a difusão do sistema, o primeiro objetivo. Possibilitou-se a aplicação da análise cinemática tridimensional em contextos nos quais esta análise não seria possível.

Entendendo-se que as implementações feitas apontam e destacam apenas algumas das potencialidades do conceito proposto, mas não todas, percebe-se melhor a abrangência do conceito proposto. Em particular no que se refere aos problemas relativos a tracking automático de padrões, o conceito norteador deste trabalho interfaceia-se e beneficia-se de teorias como a morfologia matemática, o processamento de imagens, além do desenvolvimento de equipamentos para vídeo digital. Desta maneira, o conceito fundamenta-se teoricamente de maneira sólida e acompanha as tendências de evolução tecnológica recente. A viabilidade do sistema verifica-se nos exemplos de aplicação apresentados.

A fecundidade do conceito está na possibilidade do sistema adequar-se a novas situações de aplicação. Contudo sobre isso não podemos ter garantias, apenas alguns indicadores.

Como o sistema concentra seus recursos no ambiente computacional, a sua aplicação em um novo contexto ou aplicação torna-se, principalmente, um problema de formulação e implementação do algoritmo correto. Por exemplo, a aplicação do sistema na análise postural tridimensional, de maneira que toda a medição seja feita automaticamente, depende apenas do desenvolvimento do algoritmo adequado.

Quanto aos objetivos do trabalho que se referem ao equacionamento e apresentação de soluções para problemas genéricos da análise cinemática, como reconstrução de coordenadas e sincronização de registros, entendemos que as avaliações das soluções propostas e implementações feitas demonstraram as qualidades inerentes a cada uma delas.

Cabe mais uma vez destacar que as soluções apresentadas para a sincronização de registros e detecção de marcas podem ser implementadas em outros sistemas.

Sobre a implementação e os exemplos de aplicação do sistema, terceiro objetivo do trabalho, acreditamos ter mostrado a confiabilidade do sistema proposto.

A principal conclusão deste trabalho é a comprovação da viabilidade de realizar a análise 3D de movimentos a partir do sistema desenvolvido e do novo conceito. Entendemos que fatores como custo, complexidade e demora na obtenção dos resultados são responsáveis pela não difusão, em larga escala, desse tipo de análise.

Assim, o sistema proposto mostrou-se adequado para, dentro de sua especificidade, ser aplicado em diferentes áreas do estudo da Biomecânica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-AZIZ, Y. I., KARARA, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. **Proc. ASP/UI Symp. on Close-Range Photogrammetry**. Urbana, Illinois, 1971.
- ALLARD, Paul, STOKES, A., BLANCHI, Jean-Pierre, **Three-Dimensional Analysis of Human Movement**. Human Kinetics, USA, 1995.
- ANGELONI, C., CAPPOZZO, A., CATANI, F., LEARDINI, A. **Quantification of relative displacement between bones and skin- and plate-mounted markers**. In Proceedings of the Eight Meeting of the European Society of Biomechanics. p. 279, Rome, 1992.
- BALLARD, D., BROWN, C., **Computer Vision**. Prentice-Hall, New Jersey, 1982.
- BARROS, Ricardo, BREZIKOFER, René. Synchronization of Register for 3D Description of Human Movement. In **XIV International Society of Biomechanics**. Paris, 1993.
- BARROS, Ricardo., **Metodologia para descrição tridimensional do movimento humano. A partir de câmeras de vídeo não sincronizadas**. Tese de Mestrado. Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- BAUMANN, W., GLITSCH, U., SIEBERTZ, K.: **Intersegmental loads during locomotion**. In Joint Dynamics, CAMARC (A2002)/AIM/DG XIII-F/CEC, Deliverable 6 (Public Report) 100-110, 1993.
- BERME, N., CAPPOZZO, A. **Biomechanics of Human Movement: Application in Rehabilitation, Sport and Ergonomics**. Bertec Corporation. U.S.A, 1990.
- BOENICK, U., NÄDER, M., **Gangbildanalyse. Stand der Meßtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Internationales Symposium "Gangbildanalyse". Mecke Druck und Verlag, Berlin, 1991.
- DRENK, V., **Erarbeitung von Photogrammetrischen Auswertverfahren für den Einsatz Schwenkbarer Kameras in der Leistungssportforschung**. Tese de Doutorado. Forschungsinstitut für Körperkultur und Sport. Leipzig, 1988.

- FERRIGNO, G. ELITE System: State of the Art. In: BOENICK, U, NÄDER, M. (Org.) **Gangbildanalyse - Stand der Messtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Berlin, 1990.
- FUJIO, TAKASHI, High-Definition Television Systems. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 73, n° 4, p. 646-655, 1985.
- FURNÉE, E. H., Innovation in Video-Digital Coordinate Measurement for Movement Analysis. **Proceedings of the Study Institute and Conference on Biomechanics of Human Movement: Applications in Rehabilitation, Sports and Ergonomics**. Formia, Italia, 1986.
- GLITSCH, U. **Einsatz verschiedener Optimierungsansätze zur komplexen Belastungsanalyse der unteren Extremität**. Tese de doutorado. Deutsche Sporthochschule Köln, 1992.
- GREAVES, John, Instrumentation in Video-Based Three-Dimensional Systems. **Symposium on Three-Dimensional Analysis**, Montreal, 1991.
- HABERÄCKER, P. **Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung**. Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- HERRMANN, J. PRIMAS precision motion Analysis System. In: BOENICK, U, NÄDER, M. (Org.) **Gangbildanalyse - Stand der Messtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Berlin, 1990.
- KRABBE, B. **Zur Belastung des Bewegungsapparates beim Laufen. Einfluß von Laufschuh und Lauftechnik**. Tese de doutorado, Deutsche Sporthochschule Köln. Alemanha, 1994.
- KRÖLL, D. **Belastungen der unteren Extremität beim langsamen Laufen auf verschiedenen Sportbodensystemen**. Staatsexamensarbeit, Deutsche Sporthochschule Köln, 1985.
- MATTISON, P., **Practical digital video with programming examples in C**. John Wiley & Sons, United States of America, 1994.
- MUYBRIDGE, Eadweard, The human figure in motion. Dover Publication, Ontario e London, 1955.
- MITCHELSON, D. L. The CODA System: A brief history and Current Application. In: BOENICK, U, NÄDER, M. (Org.) **Gangbildanalyse - Stand der Messtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Berlin, 1990.

- MORRIS, J. A Standard test Protocol for assesment of 3-D Kinematic System Accuracy Exemplified on its Application to the VICON system. In: BOENICK, U, NÄDER, M. (Org.) **Gangbildanalyse - Stand der Messtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Berlin, 1990.
- MORRIS, J. R. W., MACLEOD, A., **An Investigation of the Source and Characteristics of Noise in a Video-Based Kinematic Measurement System**. In: Models, Connection with Experimental Apparatus and Relevant DSP Techniques for Functional Movement analysis, Deliverable F, CAMARC (A1012) CEC/AIM Project, june, 1990.
- MURRAY, J., vanRYPEN, W. **Encyclopedia of file formats**. O'Reilly & Associates, United States of America, 1994.
- PAULUS, D., HORNEGGER, J., **Pattern recognition and image processing in C++**. Verlag Vieweg, Göttingen, 1995.
- PEETRONIS, L., SPAEPEN, A., **Drie dimensionele Filmanalyse: Reconstructie van Ruimtelijke Koördinaten D.M.V. de 'Direct Linear Transformation' Methode**. Katholieke Universiteit Te Leuven. Leuven, 1984.
- SANDBANK, Charles, CHILDS, Ian, The Evolution Towards High-Definition Television. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 73, n° 4, p. 638-645, 1985.
- VAUGHAN, C. L. **Dynamics of Human Gait**. Human Kinetics Publishers, Champaign, 1992.
- VESELY, I. EICKMEIER, B. CAMPBELL, G., **An automated, Video Tape-Based Image Archiving System**. *Comput. Biol. Med.*, v. 21, n° 5, p 267-273, 1991.
- WESTERMARKT, J. The SELSPOT MULTILab-System. In: BOENICK, U, NÄDER, M. (Org.) **Gangbildanalyse - Stand der Messtechnik und Bedeutung für die Orthopädie-Technik**. Berlin, 1990.
- WHITTLE, M. W., **Calibration and Performance of a Three-Dimensional Television System for Kinematics Analysis**. *Journal of Biomechanics*, 15, p. 185-196, 1982.
- WINTER, D. A., GREENLAW, R. K., HOBSON, D. A., **Television Computer Analysis of Kinematics of Human Gait**; *Comp. Biomed. Res.*, v. 5, p. 498-504, 1972.

WOLTRING, Herman J. One Hundred Years of Photogrammetry in Biolocomotion. In **Proceeding of the Symposium on Biolocomotion: A Century of Reserch Using Moving Picture**, Formia, Italy, 1989.

WOLTRING, Herman, HUISKES, R., Stereophotogrammetry. **Proceedings of the Study Institute and Conference on Biomechanics of Human Movement: Applications in Rehabilitation, Sports and Ergonomics**. Formia, Italia, 1986.