

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Educação Física

METODOLOGIA PARA DESCRIÇÃO TRIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO HUMANO  
A PARTIR DE CÂMERAS DE VÍDEO NÃO SINCRONIZADAS

RICARDO MACHADO LEITE DE BARROS

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

Data: 07/03/93

Assinatura:

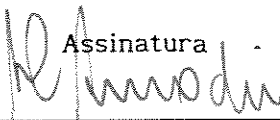

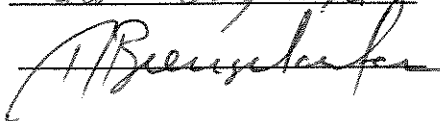


Dissertação apresentada como  
exigência parcial para obtenção do  
Título de Mestre em Educação Física  
na área de concentração: biências  
do Esporte

à Comissão Julgadora da Faculdade de  
Educação Física da Universidade  
Estadual de Campinas, sob orientação  
do Prof. Dr. RENÉ BREZIKOFER

COMISSÃO JULGADORA

Nome  
Alberto Carlos Amadio  
Alberto Cliquet Junior  
René Brenzikofer

Assinatura  
  
  


## AGRADECIMENTOS

Ao professor e amigo RENÉ BREZIKOFER agradeço pelo brilhantismo, pela paciência, pela presença constante, pelo rigor científico, enfim, pela maneira sábia de conduzir uma orientação.

Aos colegas do Laboratório de Instrumentação para Biomecânica: Sérgio Cunha, Luciano Mercadante, Renata Ortale, e Mauro Muñoz que dividiram comigo o cotidiano deste trabalho, sugerindo, criticando e auxiliando concretamente em cada fase.

Aos professores Alberto Carlos Amadio, Alberto Cliquet e João Frederico Meyer (Joni) pela leitura rigorosa, pelas inúmeras sugestões apresentadas e pela crítica generosa que fizeram ao trabalho.

Aos professores e amigos Euclides , Cristina, Ribeiro, Lotuffo e João Freire pela ajuda direta e pelas conversas esclarecedoras nas suas áreas de especialidade.

Aos colegas que fazem dos laboratórios da FEF um lugar de trabalho agradável e produtivo: Carlos, Regina, D. Alaíde, Barreto, Patrícia, Vera, Roseli, Gallo, Roberto, Mônica, Iara e tantos outros.

À direção da Faculdade de Educação Física na pessoa do seu diretor prof. Ademir Gebara e aos demais colegas.

Devo destacar também os recursos colocados à nossa disposição pelo Laboratório de Fisiologia do Exercício (FEF), Laboratório de Matemática Aplicada (IMECC), Laboratório de Microscopia Eletrônica (LPD-IFGW) e ao Centro de Computação.

## RESUMO

# METODOLOGIA PARA DESCRIÇÃO TRIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO HUMANO A PARTIR DE CÂMERAS DE VÍDEO NÃO SINCRONIZADAS

Autor: RICARDO MACHADO LEITE DE BARROS

Orientador: Prof. Dr. RENÉ BRENZIKOFER

Este trabalho pretende contribuir para o incremento das pesquisas em Biomecânica por meio de uma metodologia para descrição tridimensional de movimentos que seja rigorosa e precisa quanto aos seus resultados, simples quanto à sua implementação, que evite causar constrangimentos à livre movimentação do sujeito estudado e acessível financeiramente.

Para que obtenhamos essa descrição necessitamos, no mínimo, de duas vistas do mesmo movimento (filmagem estereoscópica) e que cada ponto de interesse seja observado simultaneamente pelas duas câmeras. O principal problema no uso de câmeras de vídeo padrão na reconstrução de movimentos é a falta de sincronização entre os registros. As causas dessa falta de sincronismo nos registros são o fato de que eles não se iniciam no mesmo instante e a possível diferença de frequência entre os equipamentos.

Para que possamos determinar a posição no espaço dos pontos de interesse a cada instante, primeiramente fazemos medições das *imagens* deste pontos que obtemos por meio das filmagens. Depois que nossas seqüências de imagens de vídeo foram digitalizadas e estão armazenadas em memória no computador, aplicamos um programa que realiza as medições. Obtidas as projeções do ponto procurado e de marcas de referência no plano da imagem, fazemos as transformações imagem-objeto que nos permitem determinar a posição dessas projeções em planos de referência previamente definidos.

Sabendo as posições das projeções do ponto característico em dois planos de referência e a posição dos focos das câmeras (medição direta), podemos determinar as retas suporte dos raios de luz registrados pelas câmeras e admitir que o ponto procurado encontra-se no ponto médio do menor segmento que une essas duas retas (BRENZIKOFER, 1991). Ao módulo deste menor segmento entre as retas chamamos **parâmetro delta**.

Tomando uma das seqüências como de referência e interpolando a outra por splines cúbicas fazemos, então, aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução entre cada quadro da seqüência de referência e todos os quadros, reais ou gerados por interpolação, da seqüência interpolada. A determinação dos parâmetros de sincronização é obtida da avaliação estatística do comportamento do **parâmetro delta**.

Da comparação entre resultados encontrados e esperados na reconstrução da trajetória de um objeto em queda livre, concluímos que o desvio padrão tanto no plano horizontal quanto no vertical é da ordem de 4.6 milímetros. Considerando-se que as câmeras estavam posicionadas a aproximadamente 12 metros da região onde ocorreu a trajetória, a precisão é bastante boa. A estimativa da aceleração da gravidade mostrou-se extremamente satisfatória ( $g = 9.87 \text{ m/s}^2$ ).

Obtivemos uma metodologia que permite a determinação dos parâmetros de sincronização e, portanto, a reconstrução tridimensional com registros não simultâneos, sem a colocação de marcas ou dispositivos nos sujeitos, sem conhecimento prévio da trajetória e sem que seja necessário adicionar equipamentos às câmeras de vídeo.

## ABSTRACT

# METHODOLOGY FOR A THREE-DIMENSIONAL DESCRIPTION OF HUMAN MOVEMENT FROM NON-SYNCHRONIZED VIDEO CAMERAS

Author: RICARDO MACHADO LEITE DE BARROS  
Supervisor: Professor. RENÉ BRENZIKOFER

The aim of this work is to contribute to the development of research in Biomechanics with a methodology for the three-dimensional description of movements. This methodology should be both precise and of simple implementation, it should avoid constraints to the subject studied and be financially affordable.

In order to obtain this description we need at least two views of the same movement (stereoscopic filming) and also that each point of interest be simultaneously observed by both cameras. The main problem in the use of standard video cameras is the lack of synchronization between registers. The causes of this lack are (1) the fact that the registers do not start at the same time and (2) the possible frequency mismatch between the machines.

To determinate the position of the points of interest in space at each moment, we first measure the *images* of the points obtained with the filming. After having digitalized the sequences of video images and having stored them in the computer memory, we run a software which enables measurements. Next, we need to obtain the projections of the searched points and the reference marks on the image plane and then to make the image-object transformations which will allow us to determine the position of these projections in reference planes previously defined.

Knowing the positions of the projections of the searched point in two reference planes and the position of the camera focuses (direct measurement) we can determine the support straight lines of the light beams registered by the cameras and admit that the searched point is to be found in the middle point of the shortest segment between these two straight lines (BRENZIKOFER, 1991). This shortest segment between the straight lines we shall call **delta parameter**.

Taking one of the sequences as reference and interpolating the other one through cubic splines we then apply successive reconstruction algorithm between each picture of the reference sequence and all the pictures, real or interpolation-generated ones, of the interpolated sequence. The synchronization parameters are defined from the statistic analysis of the **delta parameter** variation.

Comparing expected and obtained results in the reconstruction of the trajectory of an object (freely falling body) we have concluded that the standard deviation both on the horizontal and on the vertical plane is 4.6 mm. Considering that the cameras stood at approximately 12 m. the spot where the trajectory took place, the precision is quite satisfactory, and even more so is our estimate acceleration of gravity ( $g = 9.87 \text{ m/s}^2$ ).

We have obtained a methodology which allows determining the synchronization parameters and, thus, the reconstruction with non-simultaneous registers, without placing marks or devices on the subject, with no previous knowledge of the trajectory and without the need to add equipment to the video cameras.



## ÍNDICE

INTRODUÇÃO	01
Capítulo 1      AQUISIÇÃO DE DADOS	08
1.1 Aspectos teóricos da descrição de movimentos.....	09
1.2 A construção do modelo.....	10
1.3 Um pequeno histórico das técnicas de registro.....	12
1.4 A opção pelo sistema V.H.S.....	14
1.5 O registro em vídeo.....	15
1.6 Filmagem estereoscópica.....	19
1.7 Sincronização das câmeras.....	20
1.8 Conversão analógico digital.....	23
1.9 Montagem dos cenários.....	24
Capítulo 2      O PROCESSO DE MEDIÇÃO	26
2.1 Medição manual.....	27
2.2 O problema da colocação de marcas nos sujeitos.....	28
2.3 O programa pixel.....	30
2.4 Os resultados obtidos.....	33
Capítulo 3      TRANSFORMAÇÕES IMAGEM - OBJETO	34
3.1 Formação da imagem por projeção.....	35
3.2 Propriedades projetivas.....	37
3.3 Interpolação e extrapolação do ponto procurado.....	39
3.4 A solução matemática.....	43
3.5 Os resultados obtidos.....	44

Capítulo 4	INTERPOLAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS	45
4.1	Interpolação de funções.....	46
4.2	Justificativa para interpolação.....	47
4.3	Interpolação por splines.....	50
4.4	O software para cálculo da interpolação spline.....	54
Capítulo 5	RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL	56
5.1	Os princípios da reconstrução.....	57
5.2	A solução vetorial.....	60
5.3	Resultados obtidos.....	63
Capítulo 6	SINCRONIZAÇÃO DAS CÂMERAS A POSTERIORI	64
6.1	Definição de escalas.....	65
6.2	Aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução.....	70
6.3	Minimização das funções $\Psi_i$ .....	73
6.4	Critérios de seleção das funções $\Psi_i$ .....	78
6.5	Determinação dos parâmetros de sincronização.....	81
6.6	O resultado obtido.....	83
Capítulo 7	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA	85
7.1	O modelo teórico.....	87
7.2	Os resultados experimentais.....	88
7.3	Discussão dos resultados.....	94
7.4	Apresentação dos resultados.....	95
7.5	Conclusões.....	96
Bibliografia		97

## INTRODUÇÃO

Descrever o movimento humano com precisão cada dia maior vem sendo uma das preocupações centrais da biomecânica. Motivada pelo interesse em conhecer como se dá, em detalhes, o movimento do homem, a biomecânica valeu-se de inúmeras técnicas e métodos de pesquisa - dos mais simples e trabalhosos, aos mais sofisticados e automatizados - para atingir este objetivo.

Aplicada ao estudo do caminhar de uma pessoa comum, por exemplo, de uma pessoa portadora de deficiência ou mesmo de um atleta super-dotado, a biomecânica e outras áreas correlatas podem contribuir para avaliar, comparar e corrigir os mais diferentes movimentos do homem nas mais variadas situações.

Este trabalho pretende contribuir para o incremento dessas pesquisas, por meio de uma metodologia acessível financeiramente, simples quanto à sua implementação e, sobretudo, rigorosa e precisa quanto aos seus resultados.

O interesse em desenvolver uma metodologia para descrição de movimentos humanos em três dimensões a partir de câmeras de vídeo padrão (não sincronizadas) nasceu das necessidades concretas do LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BIOMECÂNICA da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas. Porém, mais do que apenas implementar uma metodologia que atendesse às demandas provenientes de pesquisas aplicadas, o que por si só já é uma tarefa importante, decidimos desenvolver uma método próprio

## I.1 A PERSPECTIVA HISTÓRICA

Buscando na literatura trabalhos a respeito das técnicas de descrição tridimensional de movimentos (especialmente movimentos humanos), descobrimos que foi no fim do século passado e início deste século que estudos mais detalhados puderam ser realizados.

Na obra intitulada Human Gait (BRAUNE & FISHER, 1987) tivemos acesso a uma compilação, em edição comemorativa, de um dos mais completos e interessantes trabalhos produzidos na área. Realizado no início do século, portanto poucos anos depois da descoberta da fotografia, esses pesquisadores alemães apresentaram descrições tridimensionais do movimento humano, a partir de fotos estroboscópicas e estereoscópicas, com precisão ainda hoje difícil de ser reproduzida.

Sobre a utilização da fotografia para descrição do movimento humano, uma importante contribuição foi dada por WOLTRING (1989). Partindo dos trabalhos de BRAUNE & FISHER, BERNSTEIN (1967) e do grupo de BERKELEY, o autor nos informa sobre as origens da fotogrametria e aponta os principais avanços e as dificuldades enfrentadas. O autor descreve os fundamentos do Direct Linear Transformation (DLT), método capaz de calibrar as câmeras e reconstruir a posição de pontos no espaço<sup>1</sup>, e algumas de suas alterações.

Muitos dos métodos de reconstrução 3D utilizados foram adaptados para câmeras cinematográficas e de vídeo.

<sup>1</sup> Este método é amplamente usado nos sistemas de vídeo que fazem reconstrução tridimensional

## I.2 O PROBLEMA

O levantamento bibliográfico que iremos apresentar concentrou-se no tópico central de nosso trabalho, a sincronização das câmeras para possibilitar a reconstrução tridimensional.

A adaptação de metodologias de descrição 3D criadas para fotografia, ou mesmo a criação de métodos específicos para vídeo, enfrentam, entre outros, o problema da falta de sincronização entre os registros feitos pelas diferentes câmeras (ou CCDs), necessários à reconstrução de posições no espaço. Isto é, os registros tomados por uma das câmeras podem não ser simultâneos aos feitos pelas outras. Como o sujeito (ou um objeto qualquer) em estudo está em movimento, esta falta de simultaneidade fará com que a reconstrução seja feita entre projeções tomadas em instantes diferentes.

As causas desta defasagem são a possível diferença de frequência entre os equipamentos e o fato de que eles não iniciam seus registros no mesmo instante.

Ao nosso ver, a solução deste problema passa pela determinação dos parâmetros de sincronização (diferença entre frequências e defasagem inicial) e, necessariamente, pela interpolação de pelo menos um dos registros. Note que sem a interpolação do registro a determinação dos parâmetro de sincronização não garantiria a simultaneidade necessária à reconstrução tridimensional.

Encontramos na literatura duas formas de encaminhar a solução deste problema. A primeira é usar equipamentos (câmeras, CCDs etc) que aceitam comandos eletrônicos externos (por Hardware) para a sincronização dos registros. Esta solução garante a simultaneidade dos registros eliminando, portanto, a necessidade de determinação dos parâmetros de sincronização e da interpolação. Contudo, esta solução só é possível para equipamentos especiais, ou adaptados, e foge do nosso objetivo de trabalhar com sistemas de vídeo padrão.

A segunda maneira de equacionar este problema está relacionada ao que chamamos de sincronização *a posteriori*. Nesta forma a defasagem entre os registros é determinada após a filmagem.

MANN et al (1983), entre outros, utilizou-se do sistema SELSPOT (Selective Eletronics AB, Partille, Sweden) no qual o problema da determinação dos parâmetros de sincronização é tratado pela colocação de LEDs (Light Emitting Diodes) que pulsam com frequências conhecidas, permitindo a determinação da defasagem entre os registros. Neste sistema os LEDs também são usados para a identificação automática de suas posições nas imagens. Não há referência, neste trabalho, à interpolação de trajetórias.

CAPPOZZO, LEO & MACELLARI (1983), desenvolveram um sistema de monitoramento cinemático chamado CoSTEL. Neste sistema, além do uso de LEDs de frequência conhecida, os registros feitos por cada CCD são interpolados por spline, e a informação sobre a defasagem entre os registros é usada para encontrar os registros *virtuais* (criados por interpolação) simultâneos.

As soluções até agora apresentadas obrigam os sujeitos deslocarem-se carregando, atados a seus corpos, dispositivos que podem, de alguma forma, limitar ou alterar seus movimentos.

A solução proposta por YEADON (1989) é a mais próxima que encontramos da desenvolvida por nós. O método por ele apresentado faz a sincronização *a posteriori*, também com interpolação por spline, sem colocar qualquer dispositivo no sujeito estudado. Assumindo que em uma trajetória previamente conhecida<sup>2</sup> pode-se encontrar trechos onde é possível relacionar uma razão entre os deslocamentos das projeções dos raios de luz captados por cada câmera, em um determinado plano, com a defasagem entre os registros e, conseqüentemente, solucionar o problema

Uma solução intermediária possível, mas que não encontramos na literatura, é a utilização de um dispositivo capaz de colocar um ruído simultaneamente nos registros analógicos de duas câmeras diferentes, através das entradas *Video in*. Essas " marcas " aparecerão nas imagens de cada seqüência em posições distintas e podem ser usadas para a determinação dos parâmetros de sincronização. Este procedimento, contudo, não elimina a necessidade de interpolação.

<sup>2</sup> O autor trabalhou com salto em esqui

O método que desenvolvemos destaca-se dos demais pois permite, conforme mostraremos ao longo do trabalho, a determinação dos parâmetros de sincronização e a reconstrução com projeções simultâneas, sem a colocação de marcas ou dispositivos nos sujeitos, sem conhecimento prévio da trajetória e sem que seja necessário adicionar equipamentos às câmeras de vídeo.

### I.3 SOBRE O TEXTO

O texto que se segue foi escrito de maneira a apresentar em cada capítulo um tópico ou procedimento que utilizamos para viabilizar a descrição tridimensional do movimento humano. Esta forma foi definida levando-se em conta que o trabalho consiste em uma nova metodologia e, portanto, entendemos ser conveniente uma exposição didática que possibilite aos usuários em potencial uma fácil compreensão.

No capítulo sobre aquisição de dados restringimos o posicionamento das câmeras de vídeo de maneira a que seus eixos ópticos sejam ortogonais aos planos de projeção.

É importante destacar que os procedimentos de medição, transformações imagem-objeto e reconstrução tridimensional foram idealizados pelo professor RENÉ BREZIKOFER, cabendo-nos a implementação e automatização deles.



OBJETIVO:

DESENVOLVER UMA METODOLOGIA DE DESCRIÇÃO TRIDIMENSIONAL DE MOVIMENTOS HUMANOS, A PARTIR DE CÂMERAS DE VÍDEO (V.H.S) SINCRONIZADAS A POSTERIORI.

# CAPÍTULO 1

## AQUISIÇÃO DE DADOS

A metodologia aqui proposta é capaz de descrever movimentos de uma grande variedade de objetos ou corpos, desde que possamos representá-los esquematicamente por um modelo de pontos característicos. Apesar disso, iremos nos concentrar na descrição do movimento do corpo humano, ou melhor, no movimento de um modelo a ele associado. Isto nos garante generalidade porque o modelo do corpo humano é bastante complexo e nos aproxima das aplicações mais diretas da metodologia.

A primeira etapa de nosso trabalho consiste em coletar as informações necessárias para a descrição quantitativa do movimento humano. Discutiremos então neste capítulo os aspectos teóricos desta descrição, a construção de modelos para representar o corpo humano e algumas técnicas desenvolvidas para fazer esta descrição. Acrescentaremos explicações sobre os conceitos de registro em vídeo, digitalização de imagens, filmagem estereoscópica e justificaremos nossa escolha em trabalhar com vídeo V.H.S (Vídeo Home System). Apresentaremos também considerações sobre os detalhes necessários para realizar a montagem dos " cenários " para coleta de dados.

## 1.1 ASPECTOS TEÓRICOS DA DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO

A teoria quantitativa a para descrição genérica do movimento de um objeto material foi desenvolvida pela física, em um capítulo especial da mecânica, a cinemática.

KOMPANEYETS (1962) explica a idéia da seguinte maneira: A fim de descrever o movimento de um sistema mecânico, é necessário especificar sua posição no espaço como uma função do tempo. Indo mais além, o autor acrescenta que a posição de um ponto qualquer é sempre uma posição relativa a um dado sistema de referência.

Sabemos que a cinemática pode ser aplicada para o caso de movimento unidimensional, bidimensional e tridimensional. Definindo mais precisamente, devemos especificar as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  da partícula, com respeito a um sistema cartesiano retangular. Isto significa que se as funções

$$x = x(t), \quad y = y(t) \text{ e } \quad z = z(t)$$

onde  $t$  é o tempo, são conhecidas, então a posição da partícula no espaço é conhecida (STARZHINSKII, 1982).

Conforme já ficou claro, é a descrição tridimensional de um modelo do corpo humano que iremos realizar. Assim, devemos obter como resultado final de nosso trabalho as coordenadas tridimensionais do modelo do corpo humano estudadas em função do tempo em relação a um dado sistema de referência.

## 1.2 A CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo utilizado para representar o corpo humano nesta descrição poderá ser construído em função dos objetivos traçados pelo usuário da metodologia, podendo ele escolher os pontos característicos que melhor representam os elementos essenciais do movimento que pretende estudar.

Entretanto, o modelo construído para ser usado nesta metodologia deverá considerar cada membro ou parte do corpo humano como um sistema rígido definido pelos pontos característicos, que articula-se com outras partes - também sistemas rígidos - de maneira a formar uma " estrutura " maior que chamamos de modelo. Considera-se corpo rígido (ou segmento rígido) como sendo aquele que não se deforma (BEER & JOHNSTON, 1980).

Muitas vezes a posição real de um ponto de interesse é inacessível para medição direta. Se pensarmos na localização do centro de rotação de uma articulação concluiremos que ele é um ponto virtual interno ao corpo do sujeito, e que sua posição relativa dentro da articulação pode variar durante todo o movimento. Problema semelhante ocorre quando acompanhamos a trajetória de um ponto anatômico no estudo de posturas dinâmicas.

Nossos modelos serão, portanto, sempre baseados em uma estimativa que fazemos da localização do ponto característico, seja pela impossibilidade de medição direta, pelo fato de alguma parte dele estar oculta constante ou momentaneamente ou mesmo pelas incertezas inerentes ao processo de medição de objetos reais.

### 1.2.1 Critérios para Construção do Modelo

Apresentamos abaixo mais alguns critérios para construção do modelo que representará o corpo humano, em função das características da metodologia.

a) Cada ponto característico deve ser definido de maneira a permitir que sua posição possa ser estimada sob diferentes ângulos (perspectivas).

b) Esses pontos devem ser caracterizados em função de acidentes ósseos, regiões anatômicas ou outras características da estrutura que não sofram alterações durante a movimentação (segmentos rígidos). Como trata-se de uma metodologia de reconstrução de pontos no espaço o modelo anatômico utilizado pode ser tridimensional.

Uma vez que definimos o modelo do corpo humano que queremos estudar, devemos agora movimentá-lo no espaço tridimensional conforme o indivíduo. Para isso, precisamos fazer o levantamento (registro) da sua posição real em função do tempo.

No intuito de se obter essa posição do corpo em função do tempo com precisão cada vez maior não apenas os modelos foram sendo aprimorados com o passar do tempo, mas também as técnicas de registro desses movimentos.

### 1.3 UM PEQUENO HISTÓRICO DAS TÉCNICAS DE REGISTRO

A necessidade de se conhecer a posição do modelo em função do tempo cada vez com maior precisão estimulou a aplicação de técnicas de registro cada vez mais sofisticadas ao movimento.

Como exemplo das primeiras técnicas de registro do movimento humano podemos citar a fotografia estroboscópica. Esta técnica consiste no deslocamento do sujeito em um ambiente onde *flashes* de luz são disparados (luz estroboscópica) diante de uma câmera fotográfica que mantém o obturador aberto. Assim, em uma mesma região do filme (chapa fotográfica) teremos várias sensibilizações sucessivas, cada uma ocorrida no momento que a luz se acende. Como o sujeito está se deslocando, obtemos vários instantes de seu movimento em uma única fotografia. A escala de tempo é definida, nesta técnica, pela frequência da luz estroboscópica. O sistema de referência deve ser registrado juntamente com o movimento.

Os primeiros trabalhos realizados com essa técnica, e de referência obrigatória, são os trabalhos de BRAUNE & FISHER no início do século.

Apesar desta técnica conter a essência das futuras metodologias de análise do movimento humano, é fácil notar suas limitações. Como os segmentos do corpo apresentam velocidades lineares distintas, para uma dada frequência de luz estroboscópica, poderemos ter sobreposição de imagens em alguns segmentos e uma quantidade insuficiente de imagens para outro.

A próxima figura ilustra a técnica com uma experiência realizada recentemente pelo Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da Faculdade de Educação Física da UNICAMP.

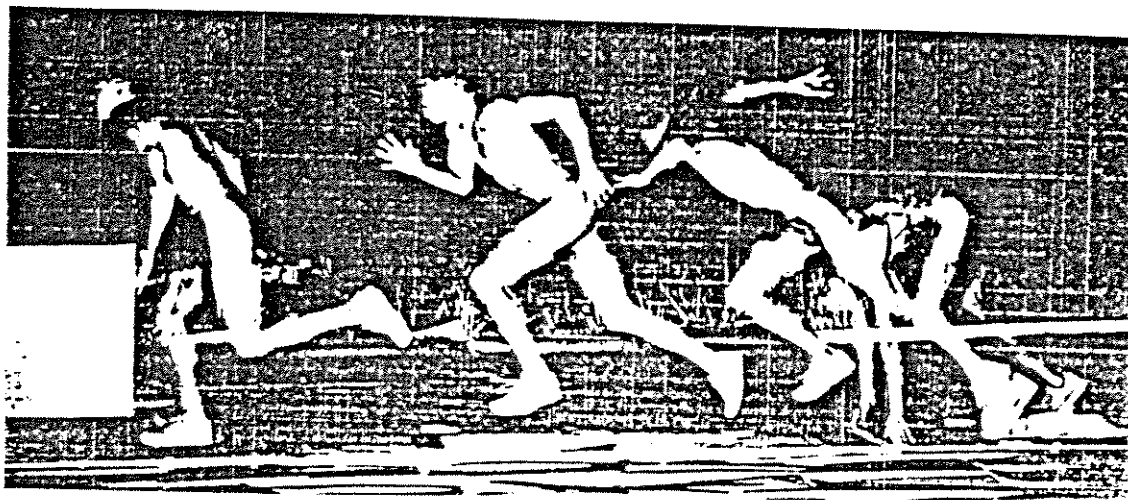


Figura 1.1: Fotografia Estroboscópica Realizada pelo LIB-UNICAMP

Algumas das limitações da foto estroboscópica foram evitadas em outras técnicas como o ciclograma (BERNSTEIN, 1967), contudo é com o aparecimento da cinematografia que ocorre um real avanço nas técnicas para análise. Segundo o próprio Bernstein, ela (a cinematografia) fornece uma oportunidade para gravar e ligar as fases rapidamente alteradas do movimento a fim de subsequentemente analisá-lo com qualquer grau de precisão requerido.

Sistemas complexos também foram desenvolvidos para os mesmos objetivos, porém são os sistemas de vídeo comuns, V.H.S ou Super-V.H.S, que permitem a simplificação e disseminação desse tipo de análise, ao nosso ver.

#### 1.4 A OPÇÃO PELO SISTEMA V.H.S

Os sistemas de vídeo simplificaram e diminuíram custos em relação ao uso da cinematografia, facilitando o manuseio e eliminando os gastos com revelação de filmes entre outras vantagens. Câmeras de vídeo são atualmente comercializadas em larga escala e com custos relativamente baixos.

É objetivo deste trabalho, como já foi mencionado, desenvolver uma metodologia de pesquisa que permita aplicações com o menor grau de interferência em relação ao fenômeno estudado. Associado a isso vem a necessidade de se baratear custos e simplificar os equipamentos necessários para a aplicação da metodologia. Sem isso não estaríamos atendendo áreas tradicionalmente carentes de recursos como a educação física, os esportes, estudos sobre o desenvolvimento motor e trabalhos associados à pesquisa com pessoas portadoras de deficiências físicas, mentais, sensoriais entre outras.

Dos sistemas para registro em vídeo aquele que atende a esses requisitos e mantém a qualidade da informação necessária para a análise de nosso interesse é o V.H.S.

Contudo, é importante frisar que a metodologia independe do sistema de vídeo utilizado, funcionando até mesmo com câmeras cinematográficas. A precisão da metodologia seria até mesmo maior caso utilizássemos câmeras U-Matic ou Super-V.H.S., devido a melhoria na resolução das imagens.



## 1.5 O REGISTRO EM VÍDEO

A câmera de vídeo possui um sensor eletrônico que é responsável pela captação de luz que irá dar origem a imagem. Este sensor recebe continuamente a luz do ambiente mas só a registra a intervalos regulares, de acordo com a frequência de captação da câmera.

Cada vez que a câmera de vídeo abre esse obturador (shutter) ela captura um quadro completo (equivalente a uma fotografia) da cena focalizada. Segundo BROWN & BALLARD (1982), no sistema adotado para vídeo no Brasil uma imagem inteira é chamada um frame, possui 525 linhas e é formada por dois campos (fields) de linhas alternadas - linhas pares e linhas ímpares. Esses campos são transmitidos em seqüência pelas câmeras eletrônicas. Cada dois campos formam assim um frame. Estas informações são codificadas e armazenadas magneticamente nas fitas de vídeo

Para quem pretende fazer medições nas imagens as características distintivas mais relevantes dos diferentes sistemas são a quantidade de linhas em cada imagem (resolução), o número de quadros captados por segundo (frequência de captação) e o controle do tempo de abertura do shutter (tempo de abertura).

### 1.5.1 A Resolução da Imagem

A resolução de uma imagem é dada pelo tamanho mínimo dos objetos para que possam ser diferenciados, na prática essa limitação é dada pelo número de linhas que compõem um frame.

Para estimarmos o que representa a resolução de uma imagem V.H.S. suponha que utilizemos as 256 linhas úteis de um field para enquadrar completamente um indivíduo com 2.0 metros de altura. Teremos então que cada linha estará representando  $2/256$  metros, aproximadamente 8 milímetros, na altura do sujeito. Esta é a nossa resolução vertical máxima por field. Se utilizarmos os dois *fiels*, isto é, as 556 linhas nossa resolução vertical máxima será de 4 mm.

Apenas como ilustração cabe lembrar que o número de linhas de uma câmera profissional pode ser até quatro vezes maior que o V.H.S, o que determina uma resolução 4 vezes maior, isto é, 2 milímetros por field.

### 1.5.2 Freqüência de Captação ( $\phi$ )

Como vimos anteriormente um frame é formado por dois fields, logo podemos dizer que a freqüência de fields é duas vezes a freqüência de frames. Para simplificar, passaremos a falar apenas em freqüência de captação de quadros ( $\phi$ ) e ela será igual a freqüência de captação dos frames.

Nas câmeras V.H.S o  $\phi$  é de 30 Hertz, e esta será a nossa freqüência máxima de trabalho. Existem câmeras especiais que registram em freqüências de até 400 Hertz ou mais, porém com um elevado custo, fora portanto do interesse deste trabalho.

Vale a pena destacar que a utilização de câmeras com frequências maiores do que 30 Hertz permitiria a utilização da metodologia para a descrição de movimentos que o V.H.S é incapaz de registrar satisfatoriamente. Imagine que vamos descrever o movimento da mão de um lutador de boxe durante o impacto com o rosto do adversário. Devido á pequena duração do fenômeno, teremos apenas poucos quadros para descrever a trajetória da mão do sujeito.

### 1.5.3 Tempo de Abertura (n)

Ao fotografarmos uma cena sabemos que a luminosidade do ambiente é um fator essencial para a qualidade da fotografia. Além disso, devemos controlar o tempo que o obturador da máquina fotográfica fica aberto, isto é, o tempo que o filme fica exposto às radiações luminosas provenientes da cena focalizada. Esta segunda característica interveniente baseia-se no fato de que a sensibilização do filme é cumulativa.

De maneira análoga podemos entender o tempo de abertura do shutter de uma câmera de vídeo. Logicamente que o sistema de controle de *abertura* do obturador da câmera é eletrônico e não mecânico como o da máquina fotográfica. Contudo, o registro da energia luminosa nas câmeras de vídeo também é cumulativo, por meio da integração deste sinal em relação ao tempo que ele atua.

Para a indicação (medição) da posição de um ponto que esteja na extremidade de um membro superior durante uma corrida de velocidade, por exemplo, o tempo de abertura normal do V.H.S pode ser grande.

Normalmente essas câmeras trabalham com um tempo de abertura perto de 1/60 segundos. Para movimentos de grande velocidade como o acima citado iremos ver na imagem um " borrão " ao invés de um único ponto, o que aumenta significativamente a imprecisão na medição da posição do ponto característico de interesse.

Felizmente a maioria das câmeras V.H.S possuem, pelo menos as mais recentes, um dispositivo de controle do shutter para diminuir este tempo de abertura para 1/500 e 1/1000 segundos ou menos.

A figura 1.2 ilustra os parâmetros frequência de captação ( $\phi$ ) e tempo de abertura (n) para uma câmera de vídeo em duas situações: com o shutter aberto e com o shutter fechado, em função do tempo. A frequência  $\phi$  é dada pelo número de vezes que o obturador abre em um segundo. Para facilitar sua representação indicamos  $\phi^{-1}$ , isto é, o período (T).

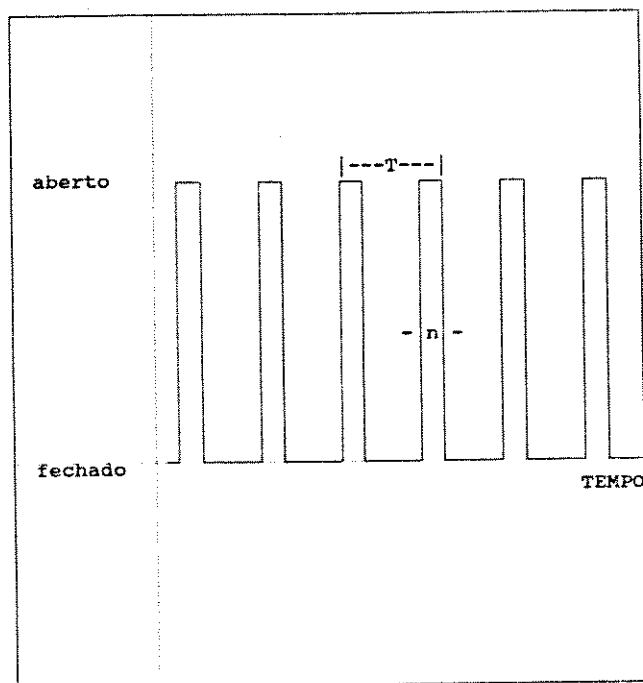


Figura 1.2: Sinal captado pelo vídeo. Parâmetros relevantes

## 1.6 FILMAGEM ESTEREOSCÓPICA

Para alguns movimentos que possuem suas principais alterações ocorrendo em um plano a análise cinemática bidimensional pode, dentro de certos limites de precisão, ser satisfatória. Lembramos que, a uma representação de um objeto em um plano chamamos de representação bidimensional (2-D) e a representação no espaço euclidiano chamamos tridimensional (3-D).

Em um estudo comparativo sobre métodos de análise 2-D e 3-D para estudo da corrida concluiu-se que o efeito dos movimentos fora do plano sagital tem pouca influência sobre parâmetros cinemáticos e de energia (WILLIANS, 1985).

Contudo, cabe lembrar que este estudo foi realizado com corredores bem treinados e suas conclusões não se aplicam a corrida de crianças ou de indivíduos não treinados, por exemplo. Para a descrição de movimentos que envolvam mudança de direção ou mesmo que não possam ser analisados em um único plano os métodos bidimensionais não são eficientes.

Para que tenhamos a descrição de um movimento no espaço necessitamos, no mínimo, de duas vistas do mesmo movimento (filmagem estereoscópica). Para que a filmagem estereoscópica possibilite a reconstrução tridimensional é necessário, como ficará claro no capítulo sobre reconstrução, que cada ponto seja observado simultaneamente pelas duas câmeras.

## 1.7 SINCRONIZAÇÃO DE CÂMERAS

Sabemos que é a frequência de captação  $\phi$  que determina o número de quadros que serão registrados por segundo e que esta frequência é finita. Concluimos então que o vídeo não registra todo o movimento mas apenas um número determinado de instantâneos dele. Como garantir que o instantâneo registrado por uma câmera corresponda exatamente ao registrado pela outra ?

Este problema ocorre devido a dois fatores: o primeiro é que as câmeras não iniciam seus registros no mesmo instante, o que provoca uma defasagem inicial em tempo entre os registros, que chamaremos a partir de agora de  $\Delta\tau$ . O segundo fator está ligado a diferença possivelmente existente nas frequências de captação de cada câmera, denominaremos esta diferença por  $\Delta\phi$ .

### 1.7.1 Defesagem Inicial em Tempo dos Registros ( $\Delta\tau$ )

O início do registro em uma câmera de vídeo é um comando eletrônico disparado a partir de que o operador acionou o botão de gravação. Como estamos tratando aqui de tempos muito pequenos, frações de 1/30 de segundos ( $\phi$  de uma câmera V.H.S), não é possível imaginar que possamos iniciar o registro de duas câmeras diferentes no mesmo instante a partir de um comando vocal ou coisa parecida. Na verdade, uma câmera passará a registrar instantâneos diferentes dos da outra em função desta defasagem. Com isso, as informações existentes em uma seqüência não serão simultâneas às da outra.

Apesar de serem tempos próximos a frações de segundo, estas diferenças tornam-se extremamente significativas quando estudamos membros do corpo em grande velocidade. Como já foi exemplificado anteriormente, mesmo um sujeito deslocando-se (o seu centro de massa) com pouca velocidade possui pontos no corpo com velocidades muito grandes. Mostraremos mais adiante que esta defasagem inicial  $\Delta\tau$  pode acarretar erros de dezenas de centímetros na posição reconstruída de um ponto no espaço.

#### **4.7.2 Diferença de Frequências de Aquisição das Câmeras**

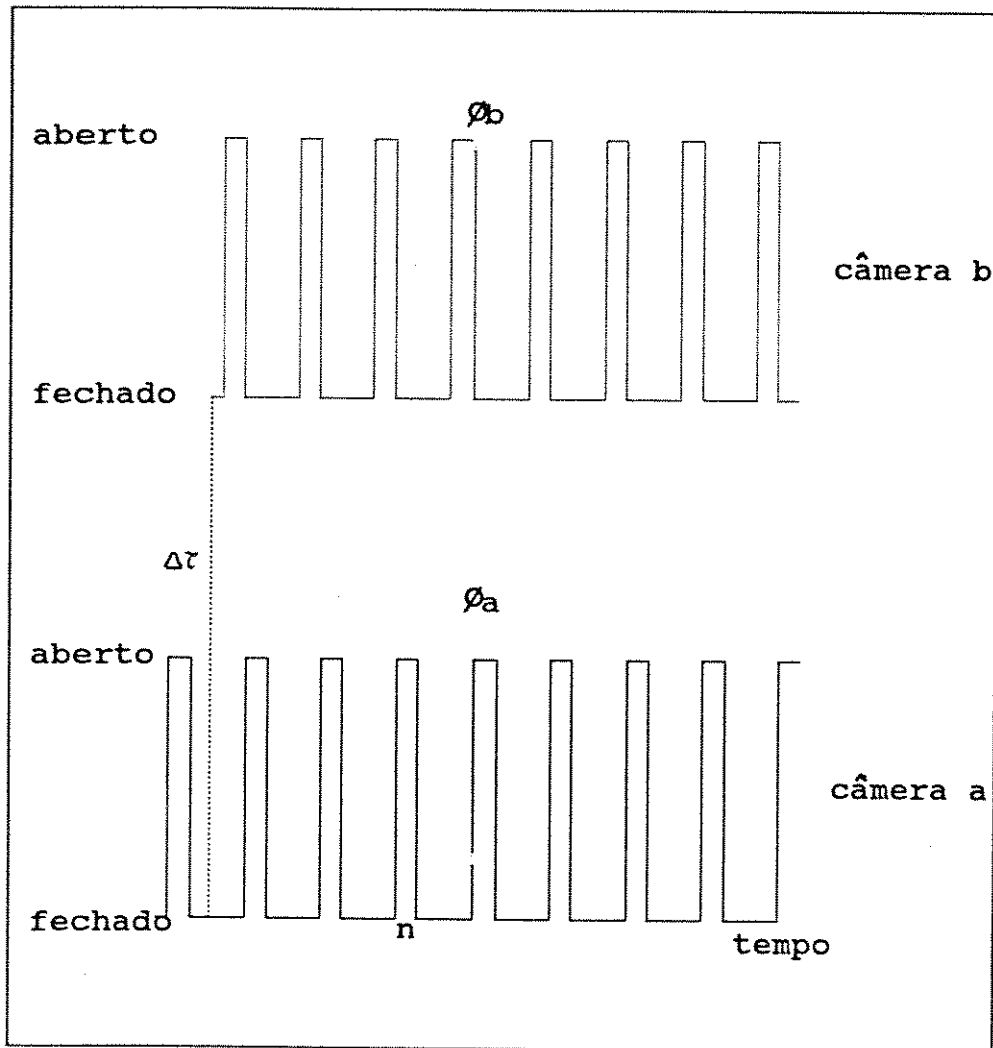
Quando dizemos que a frequência de captação de uma câmera V.H.S é de 30 quadros por segundo estamos fazendo uma aproximação. Este número está inclusive muito perto de 30 Hertz mas pode ser  $\phi=30.02$  Hz ou  $\phi=29.99$  Hz, por exemplo.

Concluimos disto que a probabilidade de encontrarmos duas câmeras registrando exatamente na mesma frequência é pequena.

A variação nesta frequência é função de características próprias do equipamento, de condições ambientais como temperatura, entre outros fatores, muitas vezes fora do controle do observador.

Mostraremos no capítulo sobre sincronização, como determinamos automaticamente os parâmetros  $\Delta\tau$  e  $\Delta\phi$  para cada par de seqüências reconstruídas.

A figura 1.3 ilustra os parâmetros  $\Delta\tau$  e  $\Delta\phi$  para dois registros feitos por duas câmeras diferentes.



$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a$$

Figura 1.3: Defesagem Inicial em Tempo dos Registros ( $\Delta\tau$ )

e Diferença de Frequências de Aquisição das Câmeras ( $\Delta\phi$ )



## 1.8 CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

No estudo quantitativo de uma grande massa de dados não é suficiente possuímos as informações armazenadas em fita de vídeo. Necessitamos transferir estas informações para um computador onde os dados possam ser rapidamente avaliados. Usamos, então, um conversor analógico-digital.

A função de um conversor A/D é tomar como entrada uma tensão elétrica, tal como um sinal de vídeo, e produzir como saída uma representação destas tensões em memória digital, adequada para ser lida por uma interface de um computador. A qualidade de um conversor A/D é medida pela sua resolução temporal (a velocidade na qual ele pode realizar conversões) e a exatidão de sua saída digital. (BROWN & BALLARD, 1982)

Assim, cada registro da imagem de vídeo possui uma localização e uma intensidade de brilho (ou cor) que será transferida para o computador como posição de memória digital com seu respectivo nível-de-cinza (grey-scale) ou cor correspondente. Quando projetado na tela gráfica esse imagem assume duas coordenadas na tela associadas também a um nível-de-cinza, a cada um desses pontos chamamos pixel.

Utilizamos um conversor analógico digital montado no LIB-UNICAMP, e suas características principais são que ele captura apenas um field - linhas ímpares -, no mínimo 244, e que cada linha contém 256 pixels. O modelo é DT01-KIT, o fabricante é CIRCUIT CELLAR e suas especificações estão detalhadas em CIARCIA (1987).

## 1.9 MONTAGEM DOS CENÁRIOS

A primeira característica dos cenários que devem ser montados para a coleta de dados é a existência de um sistema de referência bem aferido. Precisamos conhecer com precisão as coordenadas espaciais dos pontos de referência.

Mostraremos no capítulo sobre as transformações imagem-objeto porque é importante que os planos x-y, x-z e y-z sejam ortogonais e que os pontos de referência estejam distribuídos de maneira a definir retas paralelas aos eixos x, y e z conforme a figura 1.4.

As posições espaciais dos focos das câmeras são outras informações fundamentais e foram obtidas em nossas filmagens por medição direta. É possível obtê-las também, em cada instante no caso da câmera em movimento, por auto-posicionamento (BRENZIKOFER, 1991)

Exemplificando como utilizamos os parâmetros ajustáveis das câmeras de vídeo, o foco foi colocado em " manual ", com um sujeito posicionado em uma localização intermediária da trajetória prevista para o movimento a ser estudado.

O shutter foi ajustado para 1/500 segundos, com iluminação adicional quando a filmagem deu-se em local fechado. Os demais parâmetros tiveram ajuste automático.

A seguir mostramos o cenário em perspectiva com a notação de identificação dos pontos que usaremos até o final deste texto. Indicaremos com uma aspa simples (') as projeções dos pontos nas imagens, apesar delas não aparecerem no desenho.

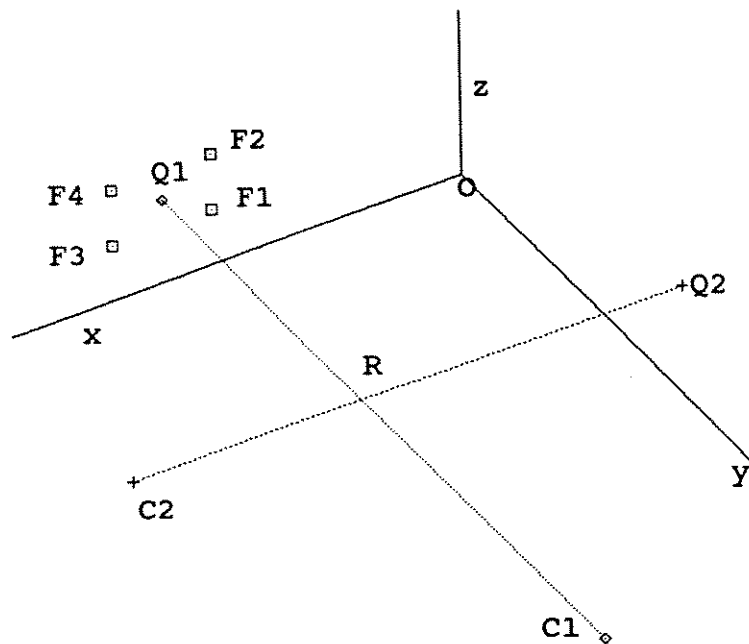


Figura 1.4: O cenário em perspectiva e as convenções utilizadas.

R é o ponto característico no espaço tridimensional  
 C1 é o foco da câmera 1 e C2 é o foco da câmera 2  
 Q1 é a projeção de R no plano x-z a partir de C1  
 Q2 é a projeção de R no plano y-z a partir de C2  
 Q1' é a projeção de R no plano da imagem da camera 1  
 Q2' é a projeção de R no plano da imagem da camera 2  
 F1, F2, F3 e F4 são os pontos do quadrado mais próximo a Q1(ou Q2)  
 F1', F2', F3' e F4' são imagens em C1 (ou C2) de F1, F2, F3 e F4  
 Os eixos ópticos das câmeras foram posicionados ortogonalmente em relação aos planos de referência.

## CAPÍTULO 2

### O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Para que possamos determinar a posição no espaço eucladiano dos pontos de interesse (R) a cada instante, faremos medições das *imagens* deste pontos que obtivemos por meio das filmagens. Quando um determinado ponto da realidade tridimensional é projetado em um plano, dizemos que este ponto no plano é a *imagem* do ponto real ou sua projeção. Ao conjunto de todos os pontos *imagem* de uma determinada cena chamamos apenas imagem da cena.

Essa medição será feita para que possamos encontrar relações entre as posições dos *pontos imagens* com as posições dos pontos conhecidos (sistema de referência) e desconhecidos (pontos característicos) na realidade. Estas transformações serão detalhadas nos capítulos subseqüentes.

Discutiremos, neste capítulo, os procedimentos que utilizamos para a localização, nas imagens bidimensionais, das projeções ( $Q_1'$  e  $Q_2'$ ) dos pontos de interesse, apresentando as razões que nos levaram a realizar medição manual e a não investir em técnicas de medição automática. Faremos uma breve descrição do software que utilizamos para a medição e justificaremos nossa opção em não colocar marcas no indivíduo a ser estudado. Ao final mostraremos a que tipo de resultados é possível chegar.

## 2.1 MEDIÇÃO MANUAL

Conforme foi exposto na introdução, trabalhamos integradamente com um grupo que pesquisa instrumentação para biomecânica. Parte importante do trabalho desse grupo é o desenvolvimento de softwares para determinação automática da posição dos centros de rotação das articulações do corpo humano durante o movimento. Assim, não faria sentido dispendermos esforços paralelos para otimizar a solução deste problema, visto que, a contribuição mais relevante deste trabalho não está no processo de medição.

Contudo, a medição manual, apesar de mais trabalhosa, não inviabiliza a utilização da metodologia. Como exemplo podemos citar que a análise de uma seqüência de sessenta imagens consome, aproximadamente, duas horas de trabalho (2 segundos de filmagem aproximadamente).

## 2.2 O PROBLEMA DA COLOCAÇÃO DE MARCAS NOS SUJEITOS

Nos testes de aplicabilidade do método optamos por não colocar marcações de qualquer tipo no corpo do sujeito para destacar os pontos de interesse, como adesivos, LED's etc, devido às seguintes razões:

O primeiro motivo é o de não causar constrangimentos à livre movimentação dos sujeitos estudados. Durante toda a formulação da metodologia tivemos presente que ela seria tanto melhor quanto menor fosse sua interferência em relação ao fenômeno estudado. Assim, a colocação de dispositivos eletrônicos e suas respectivas fontes, adesivos ou outro tipo qualquer de marca no sujeito configurariam um fator limitante.

A segunda razão para esta escolha prende-se ao fato de que se a metodologia for eficiente para sujeitos não marcados, tanto mais o será para o caso de indivíduos com marcas. O inverso, contudo, não é necessariamente verdade.

A terceira, e não menos importante, razão para evitarmos a colocação de marcas é o risco que corremos em introduzir um erro sistemático às nossas medições em função do efeito de paralaxe.

### 2.2.1 O Efeito de Paralaxe

Quando colocamos uma marca em um determinado ponto da superfície do corpo estamos, em grande parte das vezes, procurando indicar a posição mais provável para a localização da projeção de um centro de rotação que é interno a uma articulação, por exemplo. Porém este ponto não será observado na imagem sob a mesma perspectiva da qual ele foi posicionado. O resultado disso pode ser entendido como um erro devido ao efeito de paralaxe.

No caso da descrição de movimento, a paralaxe é a diferença na direção em que um objeto é observado, causada por uma mudança na posição do sujeito. Considere a situação abaixo:

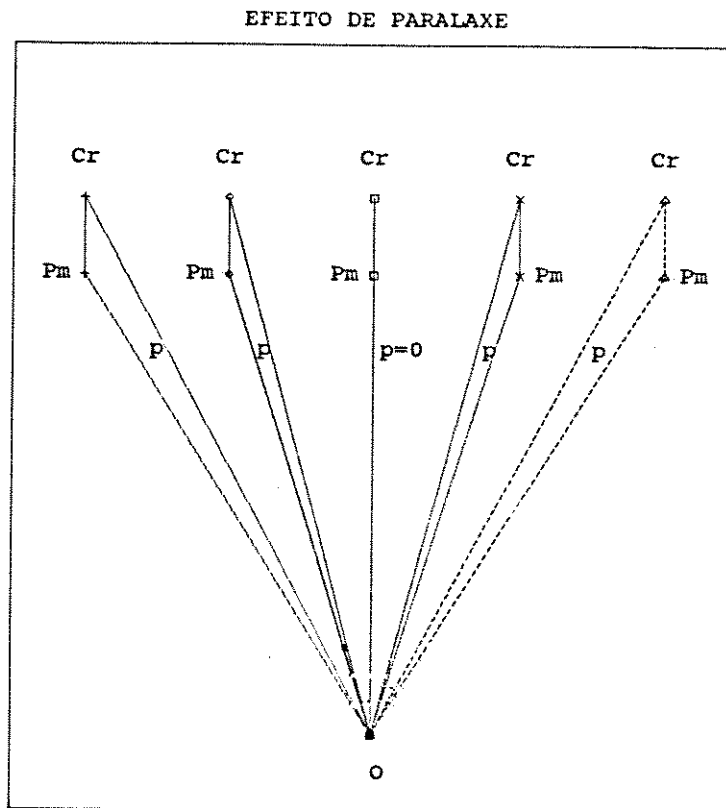


Figura 2.1: Efeito de Paralaxe, vista superior.

Cr é o centro de rotação de uma articulação  
Pm é o ponto marcado e P é o ângulo de paralaxe

### 2.3 O PROGRAMA PIXEL

Depois que as seqüências de imagens de vídeo foram digitalizadas e estão armazenadas em memória no computador, aplicamos um programa desenvolvido por MUÑOZ & BRENZIKOFER (1992) para realizar as medições.

Este software lê os arquivos que foram gerados pela conversão analógico-digital de dados das imagens e os projeta em uma *janela* especialmente criada para a seqüência de imagens.

O programa " pixel " permite ampliar a imagem original, ampliar somente uma região da imagem (zoom), visualizar apenas as marcas feitas pelo operador, associar erro às medições e produzir um efeito de animação . Esta animação é conseguida projetando-se rapidamente em uma mesma janela gráfica cada imagem da seqüência.

#### 2.3.1 A Marcação da Projeção do Ponto de Interesse (Q')

Uma vez que temos a imagem na tela do computador posicionamos um cursor, controlado via *mouse*, no local desejado e pressionamos a tecla que comanda ao computador registrar aquela posição em um arquivo previamente escolhido.

O reconhecimento do ponto característico é feito visualmente pelo operador, que lhe associa uma numeração para sua futura identificação dentro das seqüências de imagens. A posição indicada é relativa a coordenadas de tela, linhas e colunas. O pixel de coordenadas (0,0) localiza-se no canto superior esquerdo da tela.

Ilustramos, a seguir, a imagem digitalizada e o sistema de referências.



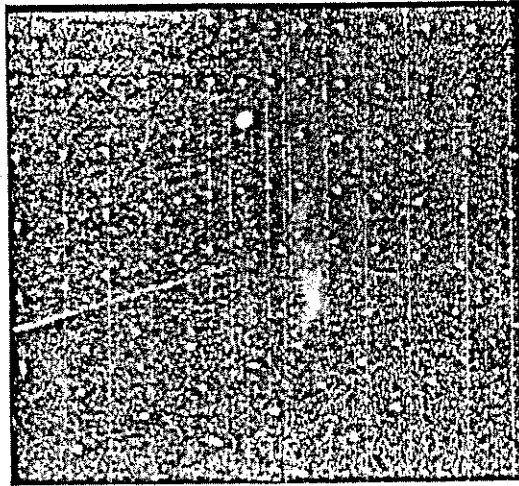


Figura 2.2: Imagem Digitalizada e Projetada na Tela da Computador.

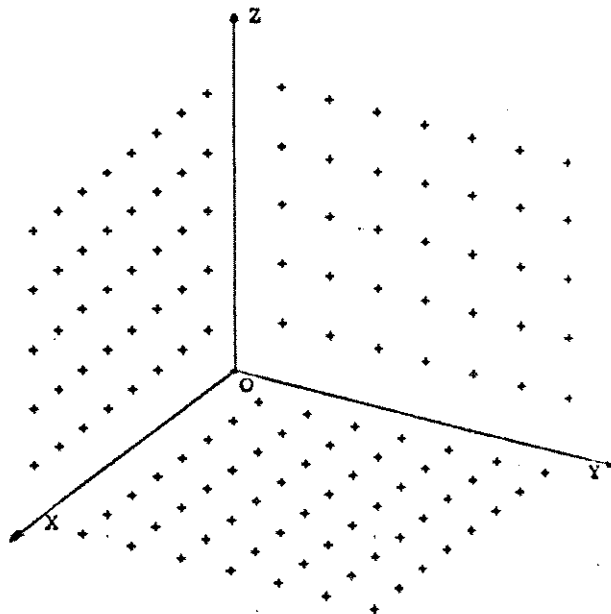


Figura 2.3 Representação Tridimensional do Sistema de Referências

Para que a partir destas coordenadas do pixel possamos saber qual é a posição da projeção do ponto característico representado por ele em relação ao nosso sistema de referência (ponto Q), necessitamos conhecer as coordenadas dos pixels imagens dos pontos de referência ( $F_1'$ ,  $F_2'$ ,  $F_3'$  e  $F_4'$ ).

### 2.3.2 Indicação dos Pixels de Referência ( $F_1'$ , $F_2'$ , $F_3'$ e $F_4'$ )

Para a indicação das projeções das marcas de referência escolhemos a opção adequada no *menu* do programa e fazemos as marcações como foi explicado acima. Também associamos a cada  $F'$  3 coordenadas ( $X_s$ ,  $Y_s$  e  $Z_s$ ), no momento da medição. Segundo esta convenção devemos caminhar  $X_s$  pontos na direção X,  $Y_s$  pontos na direção Y e  $Z_s$  pontos na direção Z no nosso sistema de coordenadas para encontrar o ponto F. Assim convencionada, a identificação de uma marca de referência é facilmente feita pelo operador do programa.

A relação entre as posições  $X_s$ ,  $Y_s$  e  $Z_s$  e o valor real das coordenadas medidas do sistema de referência são guardadas em um arquivo como o mostrado a seguir.

$X_s$	$Y_s$	$Z_s$	X	Y	Z
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	0	3	3.238	0	1.24
8	0	3	3.738	0	1.24
1	0	4	0.238	0	1.74
2	0	4	0.738	0	1.74
3	0	4	1.238	0	1.74
4	0	4	1.738	0	1.74
5	0	4	2.238	0	1.74
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Quadro 1: Coordenadas dos Sistema de Referências

X, Y, e Z representam os valores medidos (em metros) das posições das marcas de referência no sistema de coordenadas.

Naturalmente este software não é o único disponível para realizar essas medições, outros podem ser usados desde que atendam as condições gerais de uso aqui especificadas.

## 2.4 OS RESULTADOS OBTIDOS

Concluído o processo de medição teremos encontrado as projeções dos pontos característicos (Q') em cada imagem da seqüência e das quatro referências (F1', F2', F3', F4') associadas a cada um deles, com seus respectivos valores F1, F2, F3 e F4.

Para que possamos converter as medições feitas na tela em posições relativas ao sistema de referência precisamos também conhecer as relações geométricas envolvidas no nosso problema.

### CAPÍTULO 3

## TRANSFORMAÇÕES IMAGEM - OBJETO

Como nós vemos as coisas ? Nós vemos as coisas exatamente como elas são ? Qual a relação existente entre a figura projetada (imagem) em um plano (tela) e o objeto real ?

Serão estas as questões centrais que procuraremos discutir neste capítulo. Vamos estabelecer relações entre os pontos *imagens* que obtivemos por meio das filmagens, os pontos característicos do sujeito e o nosso sistema de referência.

Resumidamente, podemos dizer que mostraremos a formação de uma imagem por projeção, identificaremos quais são as propriedades invariantes e não-invariantes na formação da imagem e justificaremos os recursos de interpolação e extrapolação que utilizamos. A solução matemática do problema foi concentrada em um único item.

Não faremos as demonstrações acerca das afirmações sobre propriedades invariantes e não-invariantes que citamos, pois elas podem ser encontradas em SEIDENBERG (1962). Deduziremos apenas as relações que estabelecemos para a solução do nosso problema.

### 3.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM POR PROJEÇÃO

Projeção de ponto é o modelo fundamental para as transformações feitas por nossos olhos, por câmeras e outros instrumentos. Para uma primeira ordem de aproximação, esses instrumentos atuam como uma câmera escura na qual a imagem resulta de pontos da cena projetados através de um único orifício sobre um *plano de imagem* (BROWN & BALLARD, 1982). Mostramos abaixo uma trajetória projetada através de um ponto de projeção.

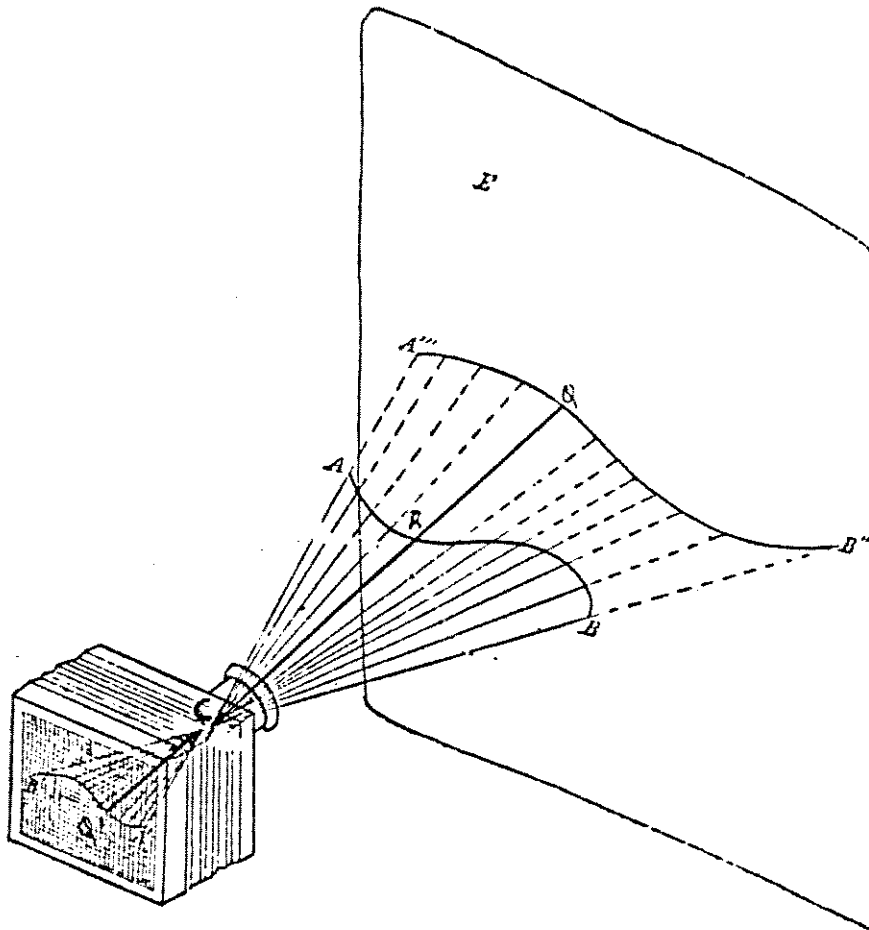


Figura 3.1: Imagem formada por projeção

\* Inspirada em BRAUNE & FISHER (1987)

A figura, apesar de referir-se a uma máquina fotográfica, ilustra bem a situação que temos ao filmarmos o deslocamento de um ponto característico. A trajetória contínua de A para B é mostrada no plano de projeção da imagem com o deslocamento de A' para B'. Perceba que quando temos apenas a imagem, como no nosso caso, o ponto A' representa o raio de luz que parte de A (ponto característico) passando por C (foco da câmera).

Para encontrar a posição de A no espaço nós já dissemos que apenas uma projeção é insuficiente. No capítulo sobre reconstrução nós mostraremos que o ponto característico estará na intersecção de duas retas, sendo que uma delas é a reta A'A. Contudo, a reta A'A é a mesma que a que passa pelos ponto C e A'''. O ponto C é medido diretamente no momento da filmagem e o ponto A''' é a projeção do ponto A no plano de projeção E.

Conseqüentemente, neste capítulo, o nosso objetivo é encontrar A''' partindo de A'. Estabelecendo uma relação com a notação que usamos na figura 3.1, podemos dizer que estamos passando de Q' para Q.

Para estabelecermos relações entre a imagem formada por projeção e os objetos reais necessitamos de propriedades que se conservem na transformação objeto-imagem. Usando um conceito encontrado em SEIDENBERG, temos: se uma propriedade da figura está presente também na sua projeção, para todas as possíveis projeções, então esta propriedade é chamada *propriedade projetiva invariante*. As propriedades que não satisfizerem esta condição serão chamadas de *propriedades projetivas não-invariantes*.

## 3.2 PROPRIEDADES PROJETIVAS

### 3.2.1 Propriedades Projetivas Não-Invariantes

Em nossas filmagens, tomamos como base física para nosso sistema de referência a junção de duas paredes e mais o chão, onde fixamos marcas contrastantes em posições conhecidas. Considere apenas, por enquanto, os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  deste sistema e sua projeção correspondente, conforme a figura 2.3.

Admitindo que as paredes formem entre si, e com o solo, ângulos de 90 graus, temos uma soma de 270 graus para a situação real. Na imagem, a soma dos ângulos das projeções dos eixos é de 360 graus. Logo, **ângulos não têm propriedade projetiva invariante.**

Obviamente que **distâncias não têm propriedade projetiva invariante.**

Demonstra-se que a divisão de um segmento em uma dada razão **também é não invariante**, exceto quando o plano da imagem e o do objeto são paralelos.

Estas propriedades não-invariantes que listamos nos fornecem um alerta sobre o tipo de relação que não irá nos auxiliar quando formos fazer transformações imagem-objeto. Contudo, uma delas, o *paralelismo*, irá de alguma forma nos ajudar. Esta propriedade, segundo o mesmo SEIDENBERG (1962), não só é não-invariante como quaisquer duas retas paralelas na realidade terão, na imagem, um ponto de intersecção, exceto também para planos paralelos.

### 3.2.2 Propriedades Projetivas Invariantes

**Um ponto tem uma propriedade projetiva invariante.** Uma reta também a terá sob certas condições. A idéia de que um ponto projetado mantém sua propriedade de ponto pode ser aceita intuitivamente.

A situação onde uma reta (ou um segmento de reta) deixa de ter a propriedade invariante pode ser entendida se pensarmos em uma reta no espaço, vista a partir de vários pontos de projeção. Quando o ponto de projeção estiver sob a reta a ser projetada, ou na reta suporte do segmento a ser projetado, sua projeção não será uma reta e sim um ponto. Um exemplo disso foi dado na figura 3.1 quando vários pontos de uma reta eram projetados como um único ponto na imagem.

A menos da situação *degenerada* acima citada, que podemos facilmente avaliar quando fazemos medições, consideraremos que **uma reta tem a propriedade projetiva invariante.**

Como ponto e reta são invariantes sob projeção, a intersecção de duas retas, dada por um ponto, a menos de situações degeneradas, também o será.



### 3.3 INTERPOLAÇÃO E EXTRAPOLAÇÃO DO PONTO PROCURADO

Estabelecidas estas relações genéricas entre imagem e objeto, podemos agora nos ocupar da solução do problema específico de passar de  $Q'$  para  $Q$  (fig. 3.1).

Sabemos que o ponto  $Q$  pertence a um dos planos de referência, por definição. Da mesma maneira sabemos que  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$  também estão no mesmo plano e nós conhecemos suas coordenadas, pois são pontos do nosso sistema de referência. A posição de  $Q$  será definida, então, como uma posição relativa dentro do quadrado formado pelos pontos  $F$ . Faremos toda a solução do problema para um único plano, por exemplo o plano  $x-z$ , pois as demais soluções são análogas. Esquemáticamente, temos:

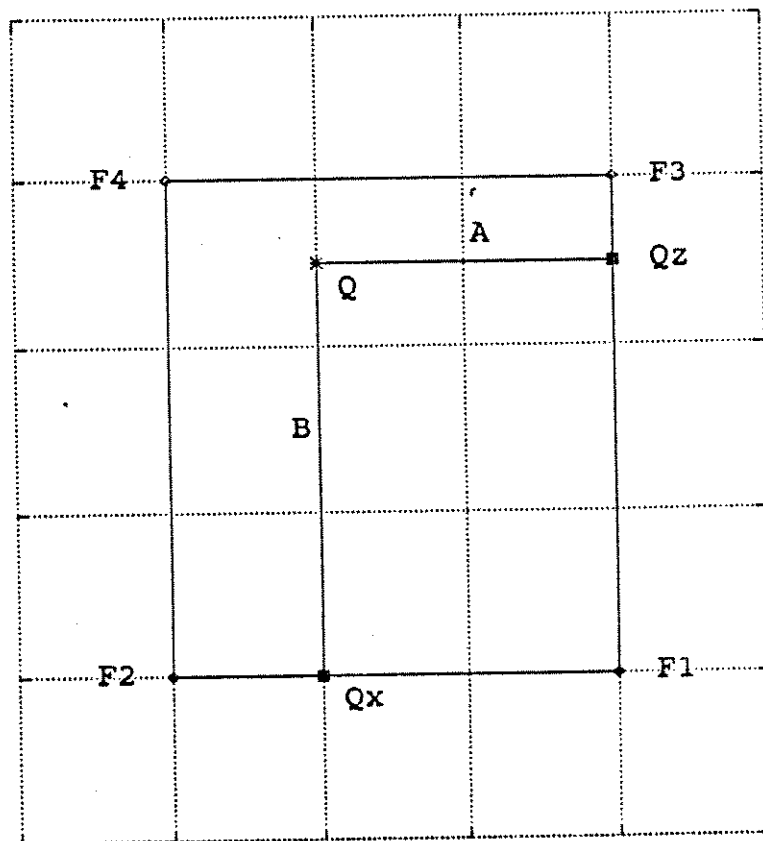


Figura 3.2: Interpolação de  $Q$  em Relação aos Pontos de Referência.

Para que possamos determinar Q precisamos estabelecer, na figura acima, as distâncias A e B , para que somadas às coordenadas x e z, respectivamente, do ponto F1, nos forneçam as coordenadas do ponto Q.

Para isso, nos valeremos da projeção do quadrado formado pelos pontos F1, F2, F3 e F4, a partir de um dado ponto de projeção. As figuras abaixo mostram como este quadrado, e um feixe de retas paralelas aos seus lados, são vistos na imagem.

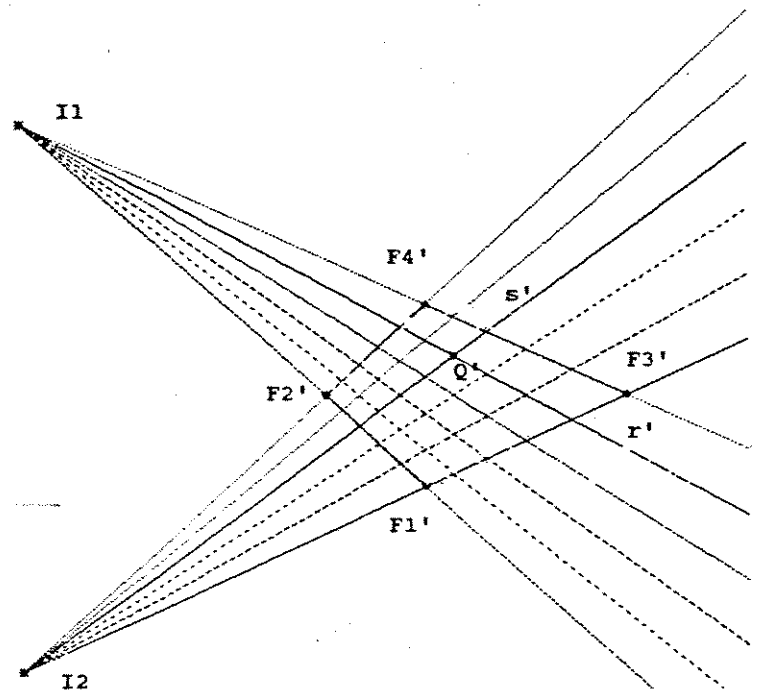
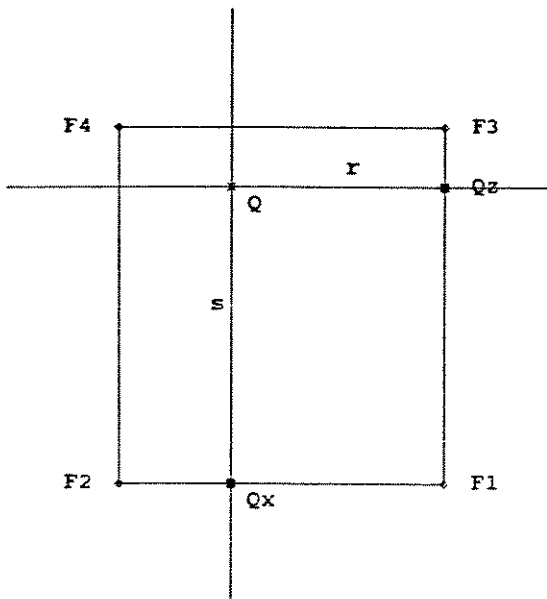


Figura 3.3: Quadrado na Realidade      Figura 3.4: Imagem do Quadrado

Nas figuras 3.3 e 3.4 percebemos a propriedade sobre paralelismo anunciada anteriormente e o aparecimento de pontos únicos de intersecção entre todas as retas de cada feixe, conhecidos em perspectiva como *pontos de fuga* ( $I_1$  e  $I_2$  da figura 3.4) .

Na próxima figura mostramos os pontos utilizados no equacionamento matemático da interpolação e extrapolação que fazemos.

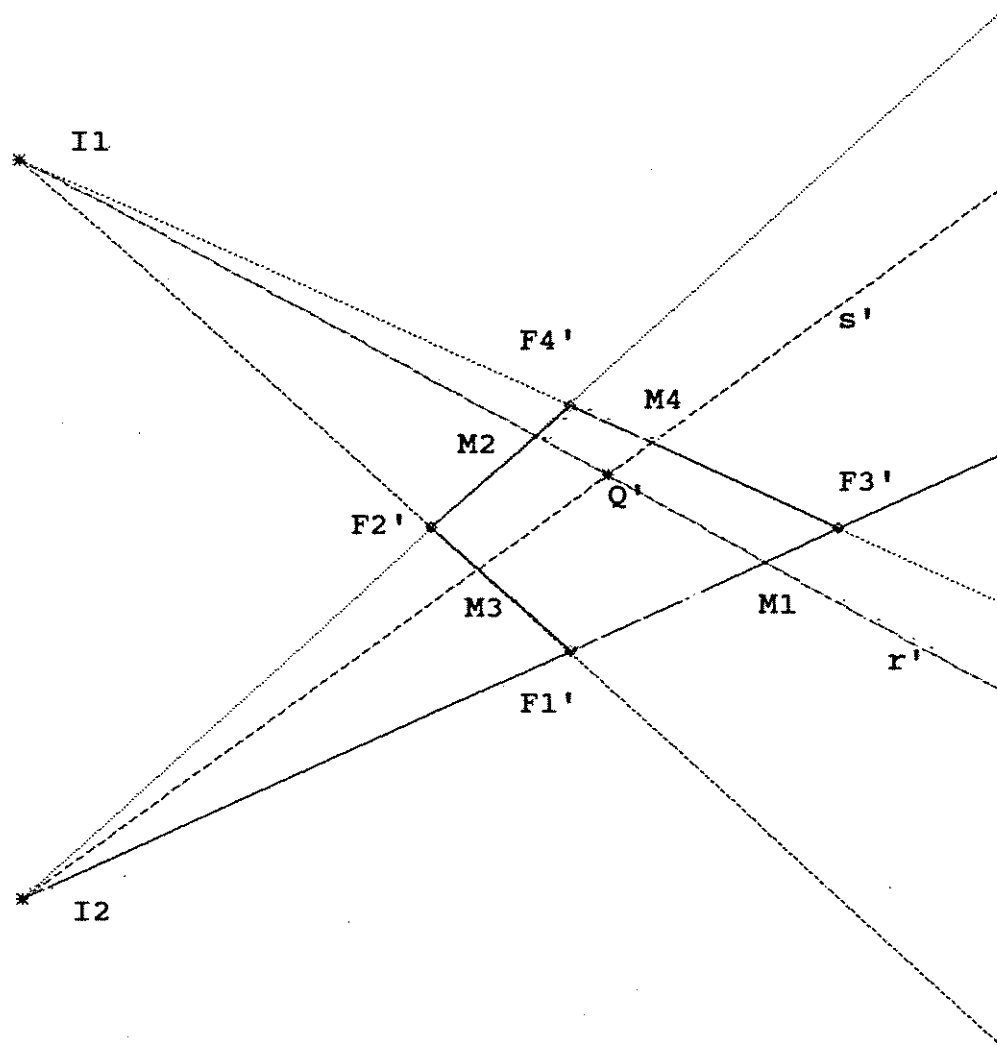


Figura 3.5: Pontos Relevante no Equacionamento Matemático

O ponto  $Q$  cujas coordenadas estamos procurando está na intersecção das retas  $r$  e  $s$  da figura 3.3. Como sabemos que a intersecção de duas retas é uma **propriedade projetiva invariante**, podemos dizer que  $Q'$  está na intersecção das retas  $r'$  e  $s'$ .

A distância  $A$  procurada é dada por uma proporção ( $\lambda_x$ ) do segmento que vai do ponto  $F_1$  até  $F_2$ . Consideraremos que este coeficiente é o mesmo obtido da divisão do segmento que vai de  $Q'$  até  $M_1'$  pelo segmento que vai de  $M_2$  até  $M_1$  (figura 3.5), o que é razoável para a situação onde o ângulo entre os plano de projeção da imagem e de referência é muito pequeno.. O raciocínio para encontrar  $\lambda_z$ , e conseqüentemente a distância  $B$ , é análogo.

A extrapolação da posição  $Q$ , que é necessária quando  $Q$  não é interno ao quadrado  $F_1, F_2, F_3$  e  $F_4$ , é feita da mesma maneira, apenas os coeficientes  $\lambda$  passam a ser maiores do que 1.

### 3.3.1 O Caso dos Segmentos Paralelos

Podemos ter uma situação onde os pontos  $I_1$  e  $I_2$  não existam. Isto se deve ao fato que o eixo óptico está *aproximadamente* ortogonal ao plano de referência e, por conseguinte, podemos ter segmentos paralelos também na imagem. Neste caso adotamos que os pontos  $I$  são substituídos pelos pontos  $M$  na determinação das retas  $r'$  e  $s'$ .



### 3.4 A SOLUÇÃO MATEMÁTICA

Partindo das figuras 3.3, 3.4 e 3.5, temos:

$$\vec{Q}_1 = \vec{F}_1 + [\lambda_x (\vec{F}_2 - \vec{F}_1) + \lambda_z (\vec{F}_3 - \vec{F}_1)]$$

Cálculo do  $\lambda_x$ :

$$\vec{I}_1 = \vec{F}_1' + \lambda_{110} (\vec{F}_2' - \vec{F}_1') = \vec{F}_3' + \lambda_{111} (\vec{F}_4' - \vec{F}_3')$$

$$\vec{M}_1 = \vec{F}_1' + \lambda_{m10} (\vec{F}_3' - \vec{F}_1') = \vec{I}_1 + \lambda_{m11} (\vec{Q}_1' - \vec{I}_1)$$

$$\vec{M}_2 = \vec{F}_2' + \lambda_{m20} (\vec{F}_4' - \vec{F}_2') = \vec{I}_1 + \lambda_{m21} (\vec{Q}_1' - \vec{I}_1)$$

$$\lambda_x (\vec{M}_2 - \vec{M}_1) = (\vec{Q}_1' - \vec{M}_1')$$

Cálculo do  $\lambda_z$ :

$$\vec{I}_2 = \vec{F}_1' + \lambda_{120} (\vec{F}_3' - \vec{F}_1') = \vec{F}_2' + \lambda_{121} (\vec{F}_4' - \vec{F}_2')$$

$$\vec{M}_3 = \vec{F}_1' + \lambda_{m30} (\vec{F}_2' - \vec{F}_1') = \vec{I}_2 + \lambda_{m31} (\vec{Q}_1' - \vec{I}_2)$$

$$\vec{M}_4 = \vec{F}_3' + \lambda_{m40} (\vec{F}_4' - \vec{F}_3') = \vec{I}_2 + \lambda_{m41} (\vec{Q}_1' - \vec{I}_2)$$

$$\lambda_z (\vec{M}_4 - \vec{M}_3) = (\vec{Q}_1' - \vec{M}_3')$$

Cálculo de  $\lambda_x$ , quando segmentos são paralelos

$$\vec{M}_1 = \vec{F}_1' + \lambda_{m01} (\vec{F}_3' - \vec{F}_1') = \vec{Q}_1' + \lambda_{m02} (\vec{F}_2' - \vec{F}_1')$$

$$\vec{M}_2 = \vec{F}_2' + \lambda_{m03} (\vec{F}_4' - \vec{F}_2') = \vec{Q}_1' + \lambda_{m04} (\vec{F}_2' - \vec{F}_1')$$

$$\lambda_x (\vec{M}_2 - \vec{M}_1) = (\vec{Q}_1' - \vec{M}_1)$$

### 3.5 OS RESULTADOS OBTIDOS

Determinamos, então, os valores de  $\lambda$  que faltavam para que pudéssemos solucionar a equação abaixo, já anteriormente formulada:

$$\vec{Q}_1 = \vec{F}_1 + [\lambda_x (\vec{F}_2 - \vec{F}_1) + \lambda_z (\vec{F}_3 - \vec{F}_1)]$$

Assim, obtivemos as projeções dos pontos característicos nos planos do nosso sistema de referência, pontos Q. Como estes pontos são obtidos para cada imagem temos vários pontos da trajetória do ponto projetado definidos. Este fato é fundamental para que possamos construir a projeção contínua da trajetória do ponto de interesse. Mostraremos como fazemos isso no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 4

### INTERPOLAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

Como já foi explicitado anteriormente, o registro em vídeo não armazena informações sobre toda a trajetória de um ponto (ou projeção dele), mas apenas uma quantidade finita de suas posições em função do tempo. Assim, entre uma posição e outra - ou entre um quadro e outro que a câmera de vídeo pode captar - existe um número infinito de outras posições (ou quadros virtuais) às quais não temos acesso direto, mas que precisamos recriar.

Partimos, então, de um conjunto discreto de dados experimentais e procuramos encontrar uma forma analítica de representá-los, ou uma maneira de conhecermos valores intermediários aos que obtivemos experimentalmente. Para se obter isso é que fazemos as interpolações.

Neste capítulo definiremos, portanto, o que são métodos de interpolação, o que significa aplicá-los aos dados obtidos de nossas seqüências e a justificativa para fazê-lo. Mostraremos as razões pelas quais a interpolação por meio das funções spline é a mais adequada ao nosso problema. Delimitaremos, contudo, as condições gerais de aplicabilidade deste tipo de ajuste. Apresentaremos o software auxiliar para cálculo das interpolações e, finalmente, resumiremos os resultados obtidos. As formulações matemáticas detalhadas relativas às funções spline que utilizamos e suas demonstrações foram evitadas no nosso texto, podendo ser encontradas em HAMMING (1962).

#### 4.1 INTERPOLAÇÃO DE FUNÇÕES

Considere que as posições das projeções dos pontos característicos nos planos de referência sejam dadas por uma função discreta do tempo  $f(t_i)$ , conhecida para um número finito de argumentos  $t_i$  - chamados pontos base -, de tal maneira que:

$t_0$	$f(t_0)$
$t_1$	$f(t_1)$
$t_2$	$f(t_2)$
$\vdots$	$\vdots$
$t_i$	$f(t_i)$
$\vdots$	$\vdots$
$t_n$	$f(t_n)$

Nós desejamos gerar uma função aproximada contínua  $g(t)$  que permita uma estimação dos valores de  $f(t)$  para qualquer  $t \neq t_i$ . Este procedimento é definido como interpolação de uma função (CARNAHAN et al, 1969).

Segundo os mesmos autores, a síntese de uma nova função analítica  $g(t)$  que aproxime a função original  $f(t)$  depende de muitos fatores tais como: conhecimento das características da função, a origem e precisão dos valores tabulados da função, do uso pretendido da função aproximada e da precisão esperada para a aproximação.

Raciocinando a partir de nossas seqüência de imagens, isto significa dizer que estamos buscando encontrar uma função que nos permita obter valores aproximados para a posição de uma dada projeção de um ponto característico em um quadro virtual que não foi registrado pelo vídeo, isto é, entre quaisquer dois quadros conhecidos de uma seqüência.



#### 4.2 JUSTIFICATIVA PARA A INTERPOLAÇÃO

Sabemos que a reconstrução 3D da posição de um ponto característico só é possível quando temos duas vistas simultâneas deste ponto em uma posição definida, isto é, duas projeções no mesmo instante. Aos quadros de seqüências, de duas câmeras distintas, que satisfazem esta condição chamaremos simultâneos.

Contudo, de acordo com as explicações dadas no capítulo sobre aquisição de dados, existe uma defasagem inicial (em tempo) para o início dos registros das seqüências, bem como uma diferença nas freqüências de aquisição das câmeras de vídeo.

Em decorrência disso, os quadros de uma seqüência só serão simultâneos aos da outra para câmeras especiais sincronizadas eletronicamente, o que não ocorre no nosso caso.

A solução para esse problema passa por gerar em uma seqüência, por interpolação, as posições das projeções da trajetória do ponto característico que são simultâneas às projeções do mesmo ponto na outra seqüência. O problema seguinte será identificar no conjunto de pontos gerados qual é simultâneo a um dado ponto da outra seqüência; isto, porém, será tratado no capítulo sobre sincronização de câmeras.

Podemos compreender melhor as idéias aqui expostas com o auxílio da figura 4.1. Nela está representada uma seqüência de quadros consecutivos, inicialmente registrados em vídeo, digitalizados e, posteriormente, impressos.

O movimento do sujeito foi registrado por uma única câmera de vídeo VHS, com uma frequência aproximada de 30 Hertz e o tempo de abertura ajustado para 1/500 segundos.

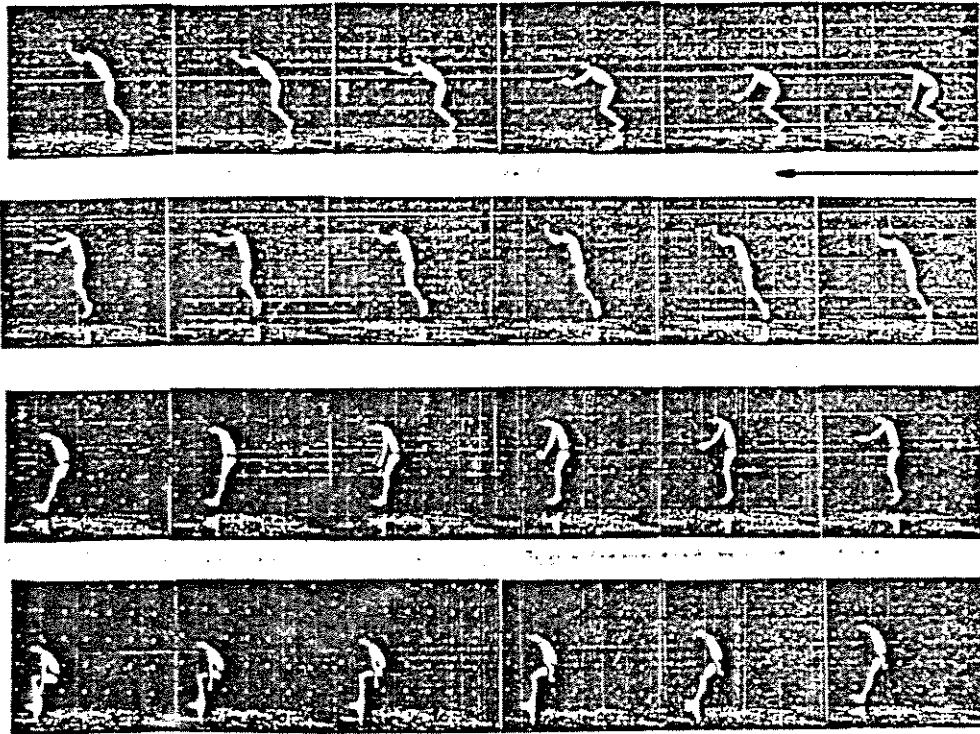


Figura 4.1: Seqüência de imagens de vídeo digitalizadas.

Note que comparando-se quadros consecutivos, mesmo sabendo que a diferença entre eles é de apenas 1/30 segundos, alguns segmentos permanecem praticamente na mesma posição mas outros tem um deslocamento significativo. Tome como exemplo o deslocamento de um ponto colocado no joelho do sujeito e outro na mão, nos três primeiros quadros da seqüência.

Suponha, agora, que outra câmera estivesse colocada ao lado da que registrou a seqüência acima mas não sincronizada com ela. Esta segunda câmera poderia ter registrado posições intermediárias às registradas nos três primeiros quadros, conforme a próxima figura.

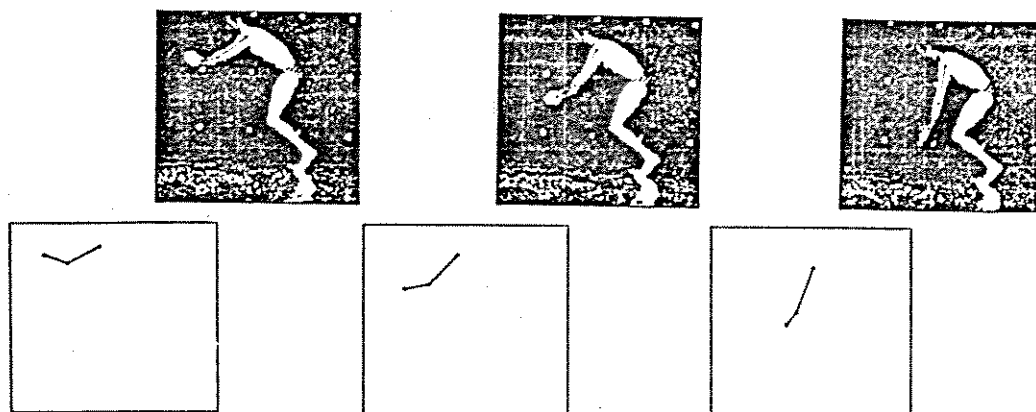


Figura 4.2: Ilustração de dois registros não sincronizados

É fácil percebermos desses exemplos que necessitamos gerar as posições intermediárias da projeção do ponto característico tal que alguma destas corresponda exatamente, ou o mais próximo possível, ao da seqüência da outra câmera.

### 4.3 INTERPOLAÇÃO POR SPLINE

Existem diversas maneiras de interpolar um conjunto de pontos, por exemplo por meio de retas (interpolação linear) ou de polinômios, entre outras. Escolhemos a interpolação por spline por entendê-la adequada ao nosso problema, conforme mostraremos a seguir.

Funções spline são definidas como polinômios de um grau  $m$  conectados suavemente por pontos, chamados nós, de tal maneira que existam  $m-1$  derivadas delas que sejam contínuas. Sendo  $g(t)$  uma função spline, ela deve ser uma seqüência finita estritamente crescente em  $t$ .

É uma característica das funções spline, muito importante para o estudo do movimento humano, que um comportamento local da função não afeta severamente seu comportamento em outras regiões (NIINOMI et al, 1983).

Ao comparar a interpolação por spline com a interpolação polinomial<sup>3</sup>, HAMMING (1962), diz que as vantagens da primeira são mais significativas quando tratamos de dados experimentais esparsos. Segundo o autor, dados são experimentalmente esparsos quando o número de pontos é menor que uma ordem de grandeza vezes o número de pontos de inflexão esperados.

As características das funções spline listadas acima - e particularmente das splines cúbicas - são apropriadas para a descrição do movimento humano, pelas seguintes razões:

<sup>3</sup> Um único polinômio definindo toda a função

#### 4.3.1 Justificativa para Aplicação de Funções Splines

Primeiramente, ficou claro que a trajetória de um corpo no espaço, em relação ao tempo, é uma função contínua. Um ajuste por splines cúbicas ( $m=3$ ), determina que duas derivadas sejam contínuas. Partindo-se da trajetória, isto significa que velocidade e aceleração também são funções contínuas, o que é de muita importância em aplicações da metodologia onde a descrição cinemática será feita para possibilitar estudos sobre a dinâmica de um dado movimento.

A segunda característica das splines que se adapta bem aos nossos objetivos é a que garante independência (relativa) do ajuste nas diferentes regiões da função. No movimento, isto equivale à situação onde uma trajetória alterada por uma decisão do sujeito, ou outra razão qualquer, a partir de um dado instante, em nada deveria influenciar o que já ocorreu antes na trajetória.

Para justificar que nossos dados são, em geral, esparsos - segundo a definição apresentada - fizemos as seguintes considerações. O número de dados experimentais que temos é dado pela frequência das câmeras de vídeo, isto é, coletamos 30 projeções da trajetória por segundo. Um ponto de inflexão em uma curva representativa de uma trajetória no espaço 3D significa uma mudança de sinal na segunda derivada, neste caso a aceleração. Para um intervalo de tempo pequeno como o que temos de uma aquisição para outra não é razoável supor que um dado ponto característico tenha acelerado e desacelerado mais de dez vezes.

Caso isso aconteça, será, com certeza, um caso de excepcionalidade. Assim, assumiremos de modo conclusivo que trabalhamos com dados experimentalmente esparsos.

#### 4.3.2 Condições Gerais de Aplicabilidade

Matematicamente, para interpolarmos por splines precisamos estabelecer condições adicionais, além do conjunto de pontos a serem interpolados, relativas aos extremos do ajuste. Como não possuímos, a priori, estas informações optamos por desconsiderar o ajuste para os dois primeiros e os dois últimos pontos da trajetória.

As condições de continuidade das derivadas superiores impostas pelo spline forçam uma suavização do ajuste da curva. Assim, alterações muito rápidas na trajetória podem ser representadas de maneira amenizada pelo ajuste por spline.

Como os ajustes são aplicados às projeções das trajetórias dos pontos característicos em um plano, aplicamos esses ajustes primeiramente em uma dimensão e a seguir na outra, trabalhando sempre com as equações paramétricas - em relação ao tempo - dessas projeções. Dado que a frequência para os registros em vídeo é aproximadamente constante (30 Hertz), utilizamos um tipo de spline para intervalos constantes de tempo.

Concluimos, de todas as considerações anteriores, que spline é extremamente bom, e as situações ou regiões da curva onde o spline excepcionalmente não fornece um bom ajuste são, quando existem, aceitáveis uma vez que não produzem resultados anômalos e, principalmente, não se propagam para regiões onde o movimento comporta-se dentro do esperado.

### 4.3.3 Exemplo de Ajuste por Spline

A fim de verificar o comportamento da interpolação por meio de funções splines da trajetória de pontos característicos projetadas em um plano, testamos como seria o ajuste produzido em um movimento de projétil (queda livre). No processo de medição indicamos a posição estimada do centro de massa de uma bola de tênis (centro geométrico da esfera). Apresentamos na figura 4.3 o resultado do ajuste por splines que obtivemos experimentalmente para a projeção da trajetória do projétil em um plano.

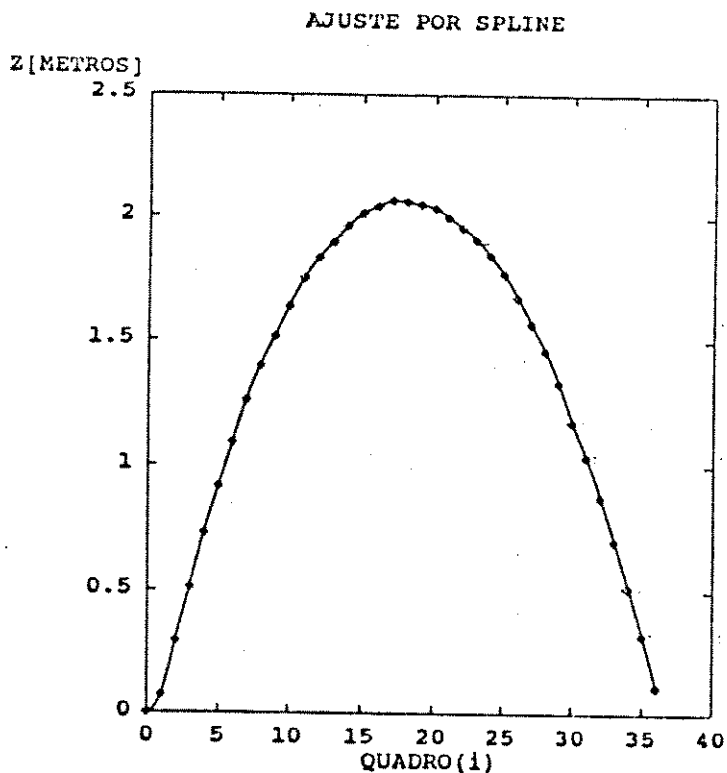


Figura 5.3: Projeção Ajustada da Trajetória de um Projétil

Perceba que apesar da distribuição dos pontos medidos apresentarem pequenas variações em relação a uma curva de segundo grau, o ajuste por spline interpolou os pontos de maneira bastante suave e precisa.

#### 4.4 O SOFTWARE PARA CÁLCULO DA INTERPOLAÇÃO POR SPLINE

Conforme já foi mencionado anteriormente, trabalhamos em uma *Work Station*, tipo SUN, para o desenvolvimento dos aplicativos referentes à metodologia proposta. Em nossa estação contamos com um utilitário para cálculo de interpolação por meio de spline assim, por medida de simplificação optamos por nos servir dele ao invés de desenvolver uma rotina específica para a tarefa. As características desse *pacote* podem ser encontradas em HAMMING (1962), e estão totalmente de acordo com as condições estabelecidas.

Este software toma como entrada um arquivo com os valores das projeções do ponto característico em um plano de referência<sup>4</sup> e os valores correspondentes da variável tempo. Nos dá como saída, um outro arquivo de dados com as coordenadas interpoladas com os respectivos tempos.

Fornecemos ao programa, na entrada, um número N que, multiplicado pelo número de dados experimentais, nos fornecerá o número de pontos calculados e arquivados para cada interpolação.

<sup>4</sup> Depois do registro em vídeo, medição e transformações imagem-objeto.



Como exemplo, suponha que registramos 2 segundos de filmagem e obtivemos 60 pontos projetados dessa trajetória para uma seqüência. Então, para um N igual a 100, teremos gerado um arquivo com 6000 pontos interpolados da trajetória. Isto equivale a dizer que a trajetória que anteriormente era descrita a cada 1/30 de segundo, passa agora a ser estimada a cada 1/3000 de segundo. A definição do valor de N deve ser feita em função do tipo de movimento a ser estudado, esta definição cabe ao usuário da metodologia.

Tendo gerado os " quadros virtuais simultâneos ", ou muito boa aproximação, podemos agora resolver o problema da falta de sincronização das câmeras. Antes, porém, falaremos de como fazemos a reconstrução tridimensional.

## CAPÍTULO 5

### RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL

No capítulo 3, transformações imagem-objeto, mostramos como a realidade é alterada quando projetada através de lentes. Discutimos a passagem de um espaço tridimensional para outro bidimensional. Estabelecemos relações que nos permitem, tendo uma imagem do ponto característico de interesse e das marcas de referência, determinar a posição da projeção desse ponto em um dos planos de referência.

Devemos, agora, mostrar como, sabendo as posições das projeções do ponto característico em dois planos de referência e a posição dos focos das câmeras, determinamos a posição desse ponto no espaço.

Entretanto, há uma restrição importante que deve ser lembrada. A reconstrução só tem sentido quando as duas projeções do ponto forem simultâneas. Caso contrário estaremos reconstruindo uma projeção do ponto em um instante, com a projeção deste mesmo ponto em outro instante, o que não faz sentido exceto se o ponto permanecer imóvel no tempo.

Portanto, durante este capítulo mostraremos como fazer a reconstrução quando temos imagens ou quadros sincronizados, sejam eles reais ou obtidos por interpolação.

## 5.1 OS PRINCÍPIOS DA RECONSTRUÇÃO

Lembramos que este método de reconstrução foi idealizado por BREZIKOFER (1991) e sua primeira implementação computacional feita por BARROS & BREZIKOFER (1991). Ele foi aplicado em estudos sobre postura estática (MUNHOZ et al, 1992) e está sendo automatizado por ORTALE & BREZIKOFER (1992) com o mesmo fim. Iremos resumi-lo, a seguir.

Como somente consideramos como reconstruções válidas aquelas feitas a partir de informações simultâneas, obtidas depois de termos feito a sincronização das câmeras a posteriori e interpolado as trajetórias, tudo se passa como se estivéssemos reconstruindo pares de fotos estereoscópicas ou quadros de câmeras sincronizadas eletronicamente.

O método faz a reconstrução a partir de duas imagens (fotografias, vídeo etc) de um ponto, ou conjunto deles, colocados no corpo de uma pessoa, vistos sob diferentes ângulos.

Considerando-se que os raios de luz que são registrados iniciam-se no ponto procurado e passam pelo foco das câmeras, o princípio da reconstrução é o de localizar o cruzamento das retas suporte desses dois raios.

Visto que as posições dos focos das câmeras podem ser determinados por medição direta ou autoposicionamento (BREZIKOFER, 1990), precisamos apenas de mais um ponto conhecido em cada uma das retas para que estejam posicionadas no espaço e, conseqüentemente, localizar o ponto em questão.

### 5.1.1 Princípio da Reconstrução para Retas Concorrentes

Para a determinação deste segundo ponto optamos por prolongar as retas até as paredes de fundo, onde existe um sistema de referência previamente demarcado, conforme a figura seguinte.

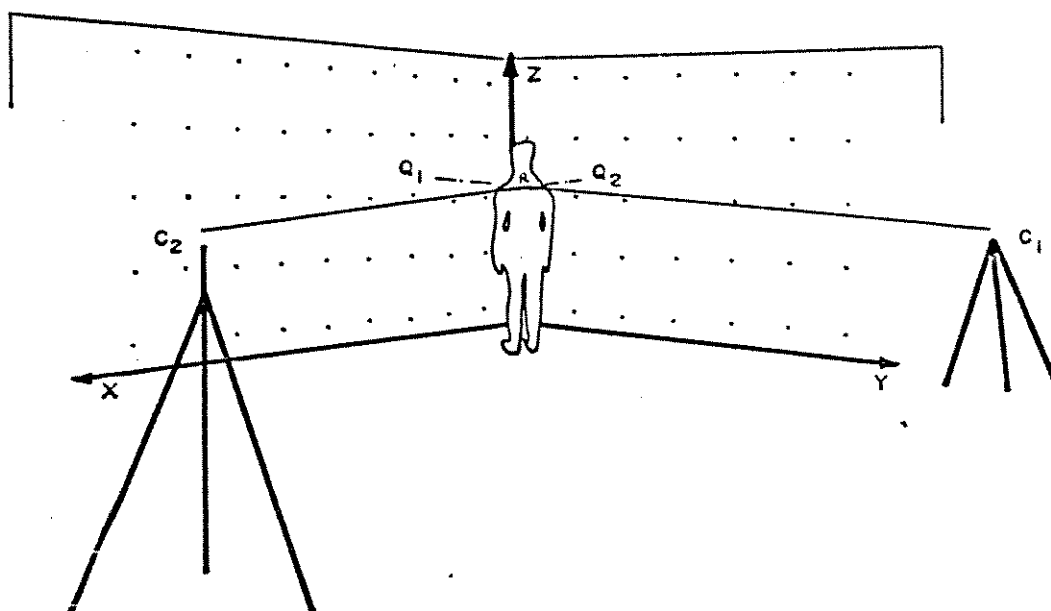


Figura 5.1: Intersecção das Retas Suporte dos Raios de Luz

A reta que passa pelos pontos  $C_1$  e  $Q_1$  é suporte do raio de luz que parte do ponto  $R$  procurado e é registrado pela câmera  $C_1$ , como sendo a projeção de  $R$  no plano da imagem. Analogamente, a reta que passa por  $C_2$  e  $Q_2$  é suporte do raio de luz que parte de  $R$  e é registrado pela câmera  $C_2$  como a projeção de  $R$  no plano da imagem de  $C_2$ .

Conhecemos as coordenadas dos pontos  $C_1$  e  $C_2$ , por medição direta ou autoposicionamento, e os pontos  $Q_1$  e  $Q_2$ , de acordo com as transformações explicadas nos capítulos 2 e 3.

O ponto  $R$  estará, no espaço real, na intersecção das retas que passam por  $C_1$ ,  $Q_1$  e  $C_2$ ,  $Q_2$ , respectivamente.

### **5.1.2 Princípio da Reconstrução para Retas Reversas.**

Qualquer pequena imprecisão na determinação das projeções do ponto característico nos planos de referência ou na determinação da posição dos focos das câmeras fará com que as retas suporte dos raios de luz não se cruzem no espaço (retas reversas). Como não é possível eliminar esses erros, precisamos levá-los em consideração.

Sabemos que o ponto procurado está em uma região do espaço em torno do menor segmento de une as duas retas suporte. Assim, encontramos o menor segmento entre essas retas e consideramos, por hipótese, que o ponto procurado está no ponto médio desse segmento.

## 5.2 A Solução Vetorial

Representamos, na figura seguinte, a situação onde as retas são reversas e apresentamos os vetores envolvidos na determinação do vetor  $\vec{R}$ .

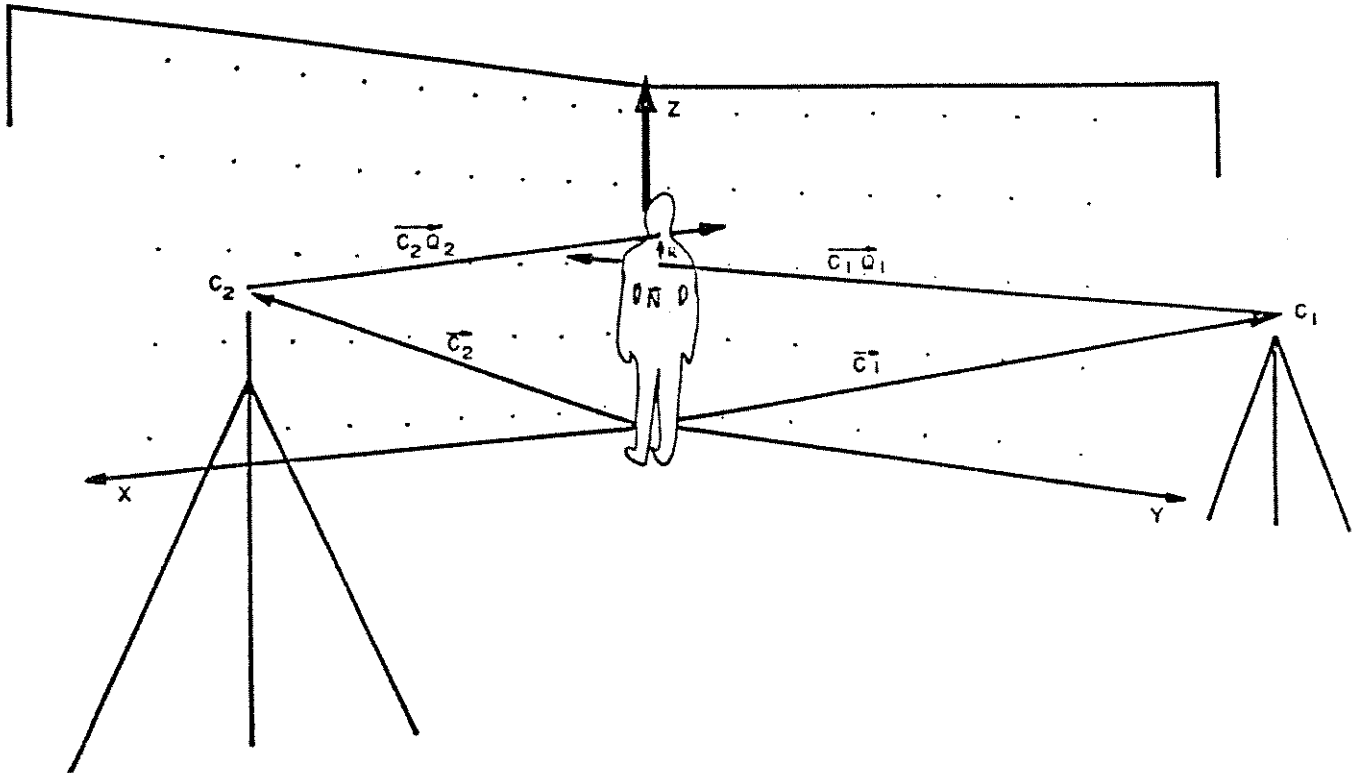


Figura 5.2: Representação dos Vetores Envolvidos na Reconstrução.

$O$  é a origem do sistema de referência e  $\vec{R}$  o vetor procurado

$\vec{c}_1$  e  $\vec{c}_2$  são vetores associados às posições dos focos das câmeras

$\vec{q}_1$  e  $\vec{q}_2$  são os vetores associados às projeções de  $\vec{R}$  nos planos de referência.

$\vec{c}_1\vec{q}_1$  e  $\vec{c}_2\vec{q}_2$  são os vetores associados aos raios de luz

$\vec{N}$  é vetor unitário associado ao menor segmento entre  $\vec{c}_1\vec{q}_1$  e  $\vec{c}_2\vec{q}_2$

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\delta$  são números reais a serem determinados.

A solução vetorial para o problema de determinar a posição do vetor  $\vec{R}$  é dada pela equação (1):

$$\vec{R} = \vec{C}_1 + \lambda_1(\vec{Q}_1 - \vec{C}_1) - \frac{\delta}{2} (\vec{N}) = \vec{C}_2 + \lambda_2(\vec{Q}_2 - \vec{C}_2) + \frac{\delta}{2} (\vec{N})$$

Note que para encontrarmos a posição de  $\vec{R}$  devemos somar o vetor  $\vec{C}_1$  uma proporção  $\lambda_1$  do vetor diferença entre  $\vec{Q}_1$  e  $\vec{C}_1$  e menos metade do segmento orientado de comprimento  $\delta$  e que tem a direção do vetor  $\vec{N}$ . Encontramos o mesmo resultado partindo do vetor  $\vec{C}_2$ , somando uma proporção  $\lambda_2$  do vetor diferença entre  $\vec{Q}_2$  e  $\vec{C}_2$  e somando (sentido contrário para o vetor  $\vec{N}$ ) metade do vetor que tem  $\delta$  como módulo e a mesma direção de  $\vec{N}$ . O vetor  $\vec{N}$  (unitário) é obtido pelo produto vetorial de  $\vec{C}_1\vec{Q}_1$  e  $\vec{C}_2\vec{Q}_2$  dividido pelo módulo deste produto. Equacionando esses vetores chegamos à solução como mostraremos mais adiante.

Ao considerarmos que a origem do segmento delta se encontra nas imprecisões das medidas, o segmento delta passa a ser um estimador da nossa incerteza na determinação de  $\vec{R}$ . Para justificar isso, pensemos no caso limite em que nossa reconstrução é exata. Neste caso, o valor do coeficiente  $\delta$  é zero. Assim, quanto maior for o valor de delta menor será a precisão de nossa reconstrução.

Contudo, devemos salientar que delta é um estimador em apenas uma direção, naquela do vetor  $\vec{N}$ . Admitimos, portanto, que há simetria na distribuição dos erros em torno do ponto procurado.

### 5.2.1 O Equacionamento Matemático

Partindo da equação básica (1), a solução desejada é dada por:

$$\vec{R} = \vec{C}_1 + \lambda_1(\vec{Q}_1 - \vec{C}_1) - \frac{\delta}{2} (\vec{N}) = \vec{C}_2 + \lambda_2(\vec{Q}_2 - \vec{C}_2) + \frac{\delta}{2} (\vec{N})$$

onde  $\lambda_1, \lambda_2, \delta \in \mathbb{R}$

O Produto Vetorial é dado por (2):

$$\vec{N} = \frac{(\vec{Q}_1 - \vec{C}_1) \times (\vec{Q}_2 - \vec{C}_2)}{|(\vec{Q}_1 - \vec{C}_1) \times (\vec{Q}_2 - \vec{C}_2)|}$$

sendo  $\vec{N}$  portanto um vetor unitário.

O Sistema Linear fica assim equacionado:

$$\begin{aligned} \lambda_1.X_{c1q1} - \lambda_2.X_{c2q2} - \delta.X_N &= X_{c2} - X_{c1} \\ \lambda_1.Y_{c1q1} - \lambda_2.Y_{c2q2} - \delta.Y_N &= Y_{c2} - Y_{c1} \\ \lambda_1.Z_{c1q1} - \lambda_2.Z_{c2q2} - \delta.Z_N &= Z_{c2} - Z_{c1} \end{aligned} \quad (3)$$

A solução deste sistema linear é facilmente encontrada e nos dá os parâmetros  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\delta$ , que colocados na equação 1 nos fornecem o valor de vetor  $\vec{R}$  procurado.



### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS

O método descrito parte de duas projeções ( $Q_1$  e  $Q_2$ ) de um determinado ponto no espaço real, em relação a planos de referência, e das coordenadas dos focos das câmeras e nos fornece a posição no espaço daquele ponto. Além desta informação, este método também nos dá uma informação adicional acerca da incerteza que tivemos, em uma dada direção, naquela reconstrução.

Este último dado é muito útil para a sincronização a posteriori das câmeras, onde aplicamos o algoritmo definido no método a quadros não sincronizados onde avaliamos o comportamento do parâmetro delta.

As verificações relativas à precisão da metodologia estão apresentadas no capítulo sobre avaliação da metodologia, mas podemos adiantar que a precisão é bastante satisfatória para nossos objetivos.

Os procedimentos de cálculo para reconstrução estão automatizados em nosso programa.

## CAPÍTULO 6

### SINCRONIZAÇÃO DAS CÂMERAS A POSTERIORI

Deixamos claro, nos capítulos anteriores, que a sincronização eletrônica das câmeras, ou o conhecimento da diferença de frequências ( $\Delta\phi$ ) e a defasagem inicial ( $\Delta\tau$ ) entre elas - sincronização a posteriori - é essencial para que possamos fazer reconstruções 3D de movimentos.

Para determinar estes parâmetros utilizamos duas idéias fundamentais. A primeira é a aplicação sucessiva do algoritmo de reconstrução entre os pontos da seqüência de referência e os pontos da seqüência interpolada. A segunda idéia é que o comportamento do parâmetro delta em uma seqüência de aplicações do algoritmo de reconstrução é um indicador das melhores aplicações do algoritmo. Mostraremos, neste capítulo, como utilizamos essas idéias para encontrar os parâmetros de sincronização.

Trataremos de definir escalas de posições relativas e tempo, aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução, minimização do parâmetro delta, critérios de eliminação de curvas atípicas, determinação dos parâmetros de sincronização e seleção da curva que melhor representa a trajetória 3D do ponto característico. Ao final do capítulo, teremos mostrado como obtemos a trajetória reconstruída para cada ponto característico de interesse do indivíduo em movimento.

## 6.1 DEFINIÇÃO DE ESCALAS

### 6.1.1 Escala de Posições Relativas

Tomando-se uma das seqüências como de referência, seqüência U, os quadros registrados pela outra, seqüência V, estarão atrasados ou adiantados no tempo em relação a primeira. Isto ocorre em virtude da defasagem inicial em tempo ( $\Delta\tau$ ) e a possível diferença de freqüências ( $\Delta\phi$ ) entre as câmeras, como já dissemos.

Para fazermos reconstruções 3D necessitamos de quadros simultâneos, reais ou gerados por interpolação (quadros virtuais). Para que possamos saber o quanto um quadro da seqüência V está atrasado ou adiantado - em intervalos de quadros - em relação a um quadro da seqüência U, definimos uma escala (j) de posições relativas.

O quadro da seqüência interpolada V que é simultâneo ao quadro  $U_i$ , ou o mais próximo disso, será um quadro virtual dado por  $V_{i+j}$ . O índice j nos define um intervalo de varredura - que vai de  $-k$  até  $k$  - dentro de uma escala de posições relativas, positivas e negativas, em torno do quadro real  $V_i$  onde buscamos encontrar  $V_{i+j}$ . Definindo i e j de uma maneira mais precisa, dizemos que o quadro da seqüência V simultâneo ao quadro  $U_i$  é:

$$V_{i+j}$$

$$2 \leq i \leq p-3, i \in \mathbb{N}, \quad e \quad -k \leq j \leq k, j \in \mathbb{Q},$$

Onde  $p \in \mathbb{N}$  e é igual ao número de quadros reais da seqüência e onde  $k \in \mathbb{N}$  e é o número de intervalos entre quadros reais a mais e a menos em relação a posição i que desejamos varrer.

A variação do índice  $j$  é dada por:

$$j = -k + \frac{n}{N}$$

Para  $n = 0, 1, 2, \dots, N, \dots, 2 * N * k$ .

$N$  é o número de intervalos gerados por spline entre dois quadros reais.

Sabemos, da literatura, algumas informações do comportamento das frequências de captação das câmeras. Após os primeiros segundos em que a câmera foi ligada podemos admitir que a sua frequência permanece constante. Apesar disso, pode haver alterações importantes entre as frequências de duas câmeras diferentes.

Como veremos mais adiante, não iremos determinar a diferença entre as frequências, mas sim o quociente entre a frequência de captação da seqüência interpolada  $V$  sobre a frequência da seqüência de referência  $U$ , que denominaremos  $\vartheta\phi$ , uma vez que admitimos a frequência da seqüência de referência como conhecida.

Considerando a defasagem inicial em número de intervalos de quadros como sendo  $\alpha$  o quociente entre as frequências como sendo a constante ( $\vartheta\phi$ ), assumimos que a variação de  $j$  em função de  $i$  é:

$$j = \alpha + \vartheta\phi * i$$

onde  $\alpha = \Delta\tau * \phi_u$  e  $\vartheta\phi = \frac{\phi_v}{\phi_u}$

Este é o comportamento estatisticamente esperado para a variação da posição relativa ( $j$ ) em relação ao número ( $i$ ) do quadro.

### 6.1.2 Escala de Tempo

Como vimos, para a determinação dos parâmetros de sincronização necessitamos determinar os parâmetros  $\alpha$  e  $\vartheta\phi$ . Para isso é mais conveniente trabalharmos com uma escala de posições relativas, conforme foi definido. Entretanto, podemos converter esta escala de posições relativas para uma escala de tempo, como se segue.

Como não temos nenhuma escala de tempo absoluta para poder determinar a frequência e o momento inicial de registro de cada câmera, trabalhamos com valores relativos. Assim, o primeiro quadro da seqüência U é definido como o início de nossa escala de tempo e a diferença de tempo de um quadro para outro na mesma seqüência tomada como 30 Hertz.

Definida desta maneira a escala de tempo a partir da seqüência U, podemos prever a relação que nos dará a mesma escala de tempo na seqüência V.

Para o iésimo quadro da seqüência U, o tempo  $T_u(i)$  será dado por:

$$T_u(i) = \frac{i}{\phi_u}$$

Sabemos que o quadro simultâneo a este na seqüência V é dado por  $V_{i+j}$ . Então:

$$T_v(i+j) = \frac{i+j}{\phi_v}$$

como  $j = \alpha + \vartheta\phi * i$

$$T_v(i+j) = \frac{\alpha}{\phi_v} + \frac{1 + \vartheta\phi}{\phi_v} * i$$

Para uma melhor compreensão da escala de posições relativas e também qual o significado das aplicações sucessivas que veremos, a seguir, consulte o quadro seguinte. Ele ilustra as seqüências U e V, dá os valores correspondentes de  $j$  e delta e indica as reconstruções sucessivas.

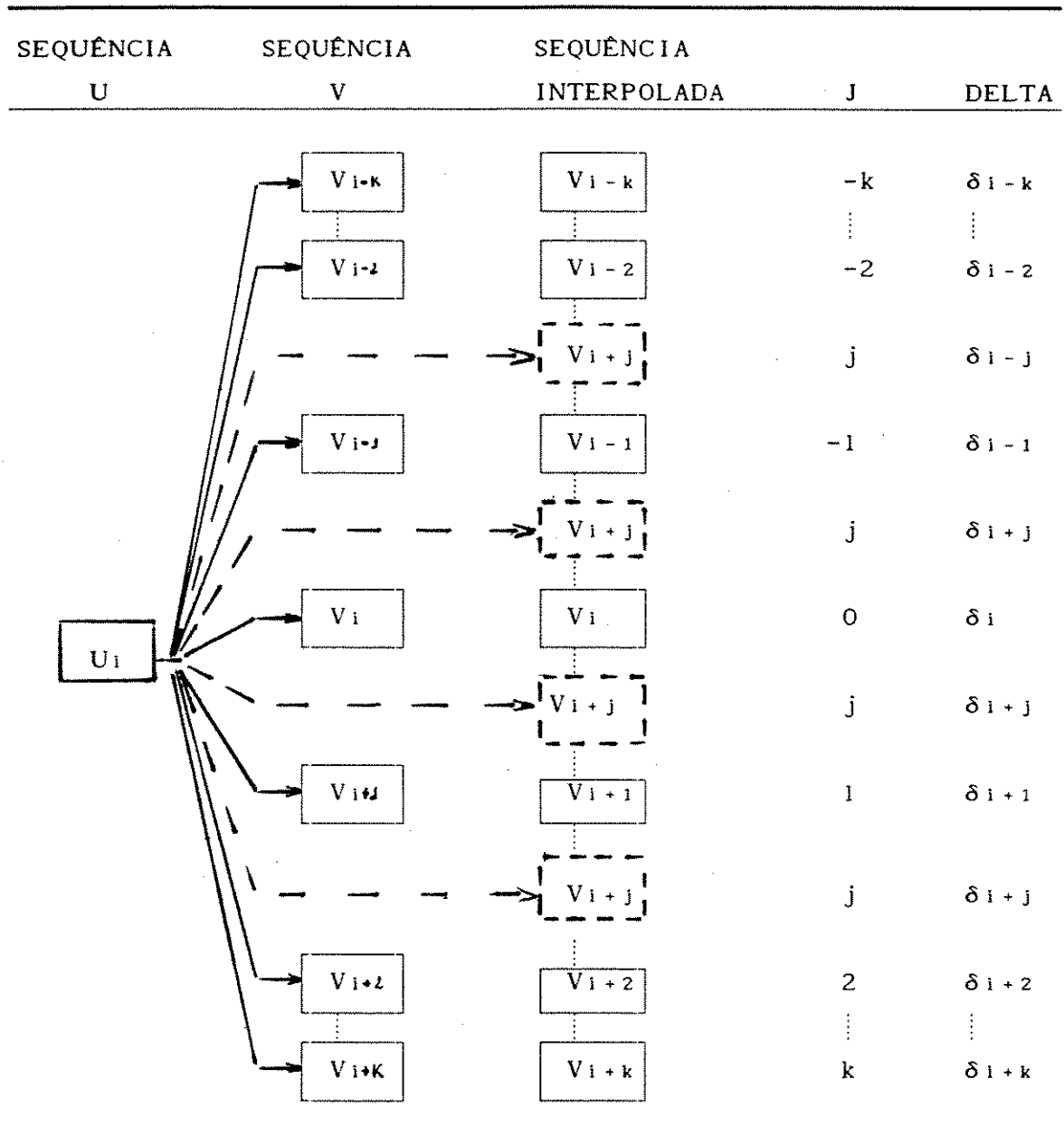


Figura 6.1: Escalas de Posições Relativas e

Aplicações Sucessivas do Algoritmo de Reconstrução

A figura anterior indica com retângulos de linhas cheias os quadros reais de cada seqüência e as setas construídas com linhas contínuas as aplicações do algoritmo de reconstrução entre esses quadros. Os retângulos em linhas tracejadas representam os quadros virtuais gerados por interpolação e as setas tracejadas as aplicações do algoritmo de reconstrução feitas entre um quadro real da seqüência  $U_i$  e os quadros virtuais da seqüência  $V$ , pontos  $V_{i+j}$ .

Lembramos que os dois primeiros e os dois últimos pontos do ajuste são desconsiderados por imposição da técnica de splines. Assim, começamos as reconstruções a partir do terceiro quadro da seqüência  $U$  e reconstruímos até o antepenúltimo.

A escolha dos quadros iniciais de cada seqüência é arbitrária, contudo ao examinarmos as duas seqüências de imagens estimamos visualmente quais pontos iniciais de cada seqüência são mais próximos na escala de tempo. Este procedimento é facilmente realizado e diminui o gasto computacional. Porém, esta primeira aproximação pode ser substituída pelo aumento do número de combinações (número  $k$ ).

## 6.2 APLICAÇÕES SUCESSIVAS DO ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO

No capítulo sobre reconstrução 3D mostramos que uma reconstrução ideal entre duas projeções é aquela onde o parâmetro delta é igual a zero, isto é, as retas suporte dos raios de luz registrados pela duas câmeras são concorrentes.

Ao interpolarmos os quadros da seqüência V, uma determinada projeção do ponto característico registrado na seqüência U, pontos  $U_i$ , será simultânea - ou próximo disso - a uma projeção do mesmo ponto característico na posição  $V_{i+j}$  da seqüência V. Portanto esta aplicação do algoritmo de reconstrução apresentará um valor para delta próximo a zero.

Essas aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução, significam, geometricamente, que estamos mantendo para cada ponto da seqüência a reta suporte correspondente à seqüência de referência e varrendo a posição da outra até que elas se cruzem.

A próxima figura ilustra graficamente as seqüências U e V obtidas em um dos testes que realizamos para o movimento de um projétil. Neste teste filmamos, digitalizamos, medimos e fizemos as transformações imagem-objeto do movimento de uma bola de tênis em queda livre. A seqüência U é a de referência e a seqüência V é a interpolada.



### PROJEÇÕES DA TRAJETÓRIA

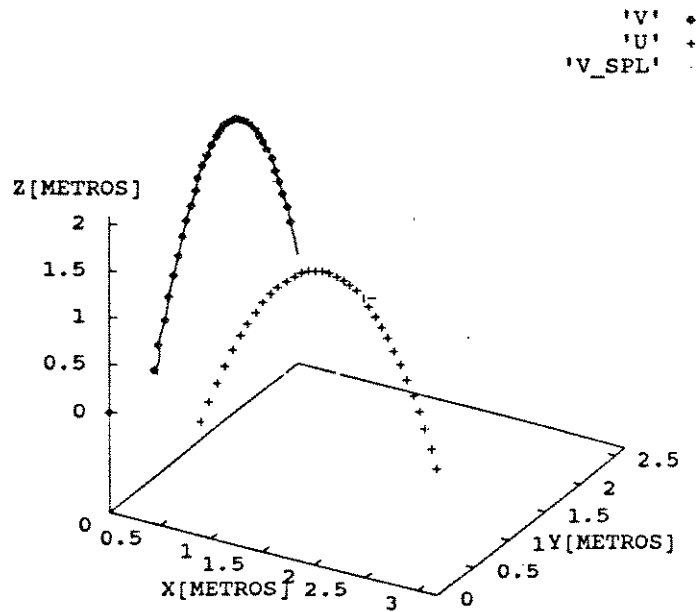


Figura 6.2: Projeções da Trajetória de um projétil .

Conforme pode ser observado, a seqüência U representa as projeções da trajetória no plano x-z obtidas experimentalmente. A seqüência V representa as projeções obtidas experimentalmente e mais as posições interpoladas no plano y-z.

Aplicando em cada par de pontos  $U_i$  e  $V_{i+j}$  o algoritmo de reconstrução, obtemos um conjunto de pontos  $W_{i+j}$  no espaço e valores associados para os parâmetros  $\delta_{i+j}$ . Cada vez que variamos a posição relativa<sup>5</sup> j de -2 até 2 os pontos  $W_{i,j}$  descrevem uma linha de pontos que contém um dos pontos que pertencem à curva que melhor representa a trajetória original.

<sup>5</sup> Utilizamos k=2 e N=200

## CONJUNTO DE TRAJETÓRIAS POSSÍVEIS

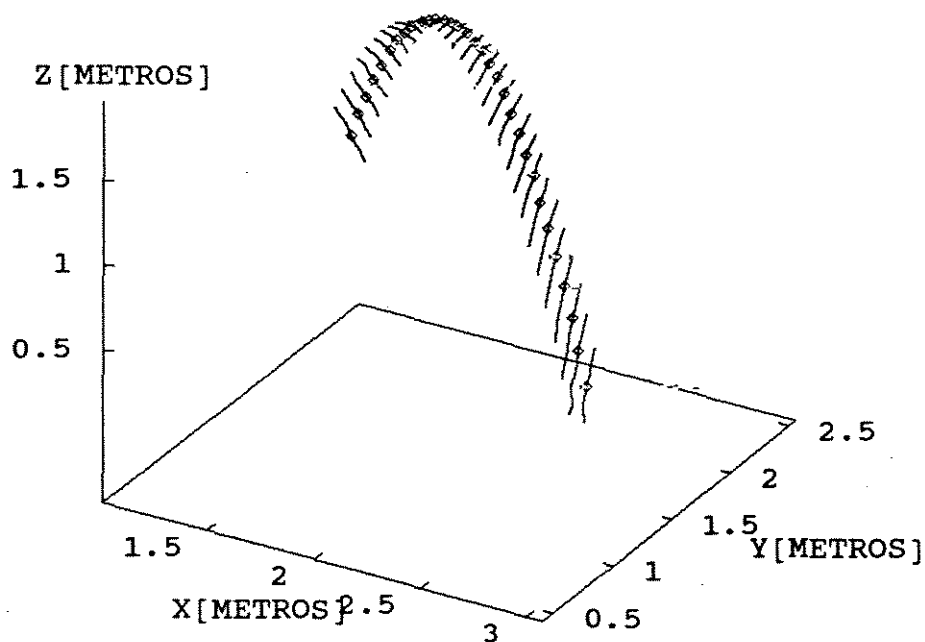


Figura 6.3: Conjunto de Trajetórias Possíveis.

Podemos entender este gráfico como representativo do conjunto das inúmeras trajetórias que encontramos das aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução. Os pontos em destaque foram colocados para ilustrar a curva que melhor descreve a trajetória original juntamente com as demais e obtida após a determinação dos parâmetros de sincronização.

### 6.3 MINIMIZAÇÃO DAS FUNÇÕES $\Psi_i$

Uma vez que obtivemos um conjunto de curvas que contém a melhor representação possível da trajetória que procuramos reconstruir, devemos identificá-la dentro deste conjunto.

Para fazermos isso, precisamos avaliar o comportamento do parâmetro delta para este mesmo conjunto de aplicações do algoritmo de reconstrução. Isto é, devemos avaliar o comportamento das funções  $\Psi_i$ , definidas a seguir.

Como foi visto, para um dado ponto  $U_i$  existe uma escala de posições relativas na seqüência  $V$  que vai de  $-k$  até  $k$ . Como na reconstrução de cada par de pontos -  $U_i$  e  $V_{i+j}$  - nós obtemos um valor para delta, existe uma função  $\Psi$  da posição relativa onde ocorre a reconstrução e o valor do parâmetro delta. Estas funções são do tipo  $\delta_{i+j} = \Psi_i(j)$ . Cada função desta nos fornecerá uma posição relativa onde o valor delta é mais próximo de zero.

Para exemplificar como se comporta este tipo de função, consideramos os valores obtidos no exemplo que demos do movimento de um projétil, tomando o trigésimo quadro da seqüência  $U$  como base para a aplicação sucessiva do algoritmo de reconstrução ( $i=30$ ). Os quadros reais da seqüência  $V$  são  $V_{28}$ ,  $V_{29}$ ,  $V_{30}$ ,  $V_{31}$  e  $V_{32}$ . A figura seguinte representa graficamente o comportamento da função  $\Psi_{30}$ .

## CURVA REPRESENTATIVA DA VARIAÇÃO DE DELTA PARA $i=30$

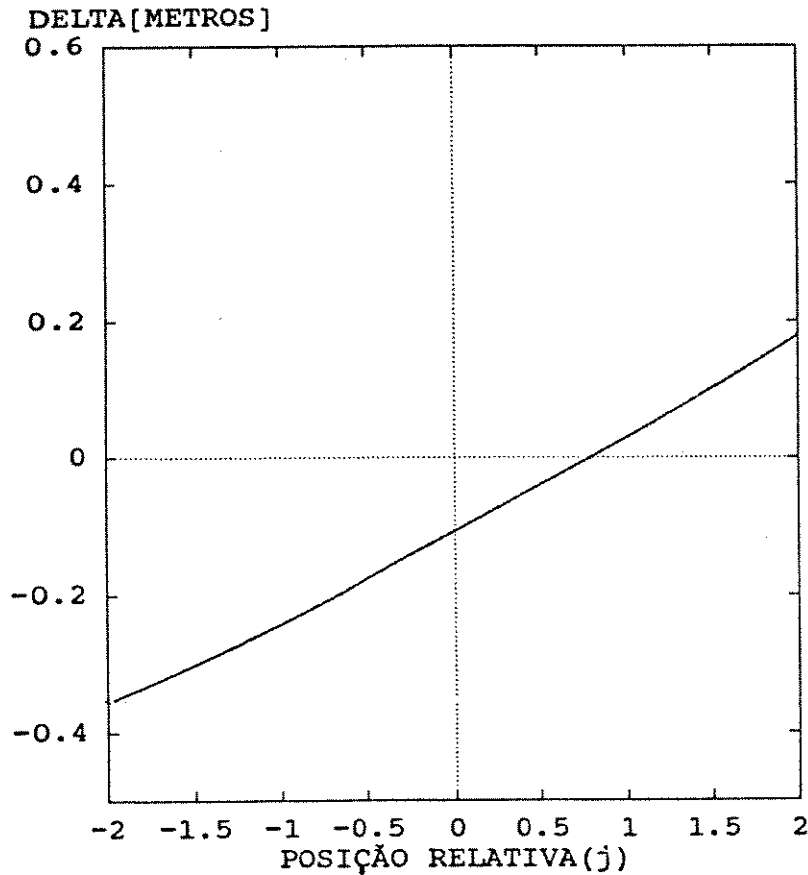


Figura 6.4: Variação de Delta ( $\delta$ ) em Função da Posição Relativa

A posição relativa em que o valor de delta está mais próximo de zero está entre  $j = 0.780$  e  $j = 0.785$ , isto é, entre 78 e 78.5 por cento adiantado em relação ao quadro V30. Este intervalo de incerteza existe uma vez que a interpolação que fazemos nos dá um número finito de quadros virtuais.

Este valor significa que a melhor aplicação do algoritmo de reconstrução ocorreu entre o quadro U30, quadro de referência, e um quadro que está entre o quadro virtual V30.156 e o quadro V30.157. Lembramos que o número N de intervalos de spline foi 200.

Apesar desta curva nos fornecer uma informação interessante sobre a posição relativa onde ocorre o valor de delta mais próximo a zero, e conseqüentemente a melhor reconstrução, para podermos fazer qualquer afirmação conclusiva necessitamos avaliar o comportamento do conjunto de funções  $\Psi_i$  varrendo a seqüência.

Para isso, colocaremos no mesmo gráfico - DELTA X POSIÇÃO RELATIVA -, todas as curvas  $\Psi_i$  que obtivemos com  $i$  variando de 2 a 32. No teste que fizemos tínhamos em cada seqüência 36 quadros.

A figura seguinte ilustra o resultado que obtivemos.

#### CONJUNTO DE CURVAS DE VARIAÇÃO DO DELTA

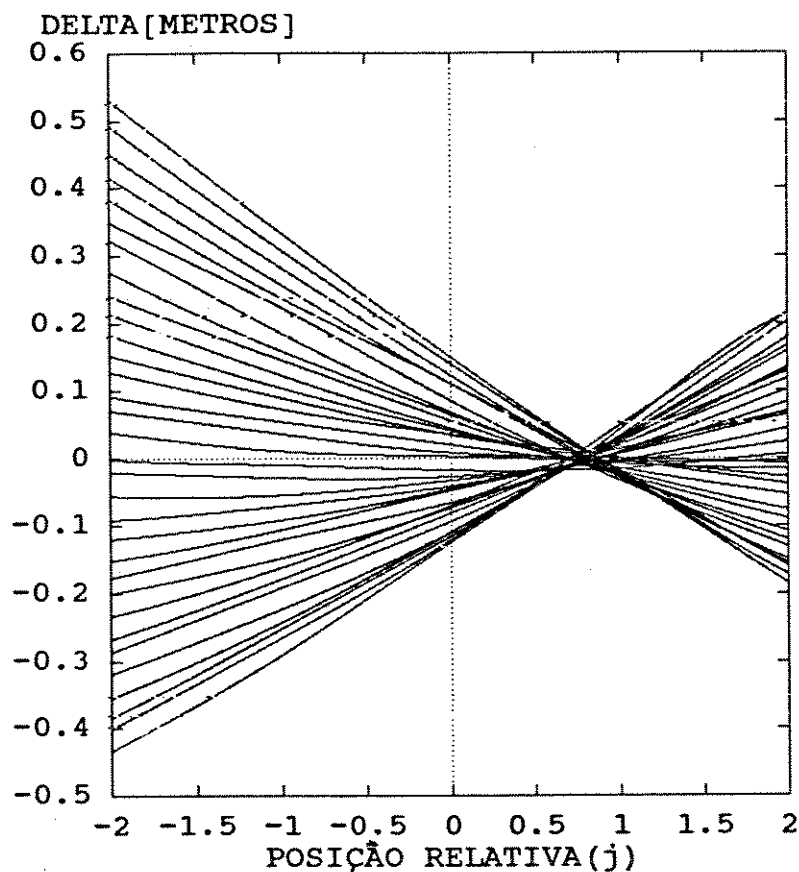


Figura 6.5: Conjunto de Funções  $\Psi_i$ .

A primeira conclusão que podemos tirar deste gráfico é que existe uma região de convergência de todas as funções  $\Psi_i$ . Isto significa que todas estas funções têm seu valor de delta próximo a zero em torno de uma posição relativa bem definida.

Note que se todas as curvas se cruzassem em zero no eixo das posições relativas significaria que as câmeras estavam sincronizadas.

A variação absoluta do parâmetro delta é indicativa do tamanho do erro que cometeríamos caso tentássemos fazer reconstruções sem sincronizar as câmeras.

Mesmo supondo que acertássemos qual quadro real de uma seqüência é mais próximo ao da outra, e, portanto, incorrêssemos em variações de delta referentes a  $-1$  e  $1$  na escala de posições relativas, uma reconstrução poderia apresentar um valor de delta de até 30 centímetros, em nosso exemplo, como podemos ver no gráfico. Dificilmente uma incerteza desta ordem poderia ser aceita na reconstrução de um movimento humano.

Devemos destacar também, que as intersecções das curvas com coeficientes angulares próximos a zero, isto é, com pequena variação no parâmetro delta não definem bem uma região, e, conseqüentemente, a posição relativa onde o valor de delta é próximo a zero fica indefinida.

Isto decorre do fato de que o parâmetro delta é a dimensão de um vetor com direção perpendicular a dois raios de luz, assim, delta só é estimador de incerteza em uma determinada direção.

Contudo, esta limitação determinada pela definição do parâmetro delta pode ser compensada posicionando-se as câmeras de maneira que o vetor associado ao parâmetro delta aponte para a direção onde ocorre a maior variação no movimento. Na maioria dos casos, isto é desnecessário quando o movimento tem pelo menos um trecho da sua trajetória variando na direção do vetor associado a delta, visto que não esperamos grandes variações nos parâmetros de sincronização durante uma seqüência de imagens.

As curvas  $\Psi_i$  encontradas onde a variação de delta era muito pequena não apresentam o mesmo comportamento da curva mostrada na figura 6.4. Esses casos serão analisados a seguir.

#### 6.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS FUNÇÕES $\Psi_i$

Voltando ao nosso exemplo, mostraremos a curva  $\Psi_{18}$ , que corresponde a aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução na região onde a velocidade vertical do projétil que lançamos era próxima a zero, apresenta um comportamento atípico<sup>6</sup>. Veja o gráfico seguinte.

COMPORTAMENTO DA CURVA COM PEQUENA VARIAÇÃO DE DELTA

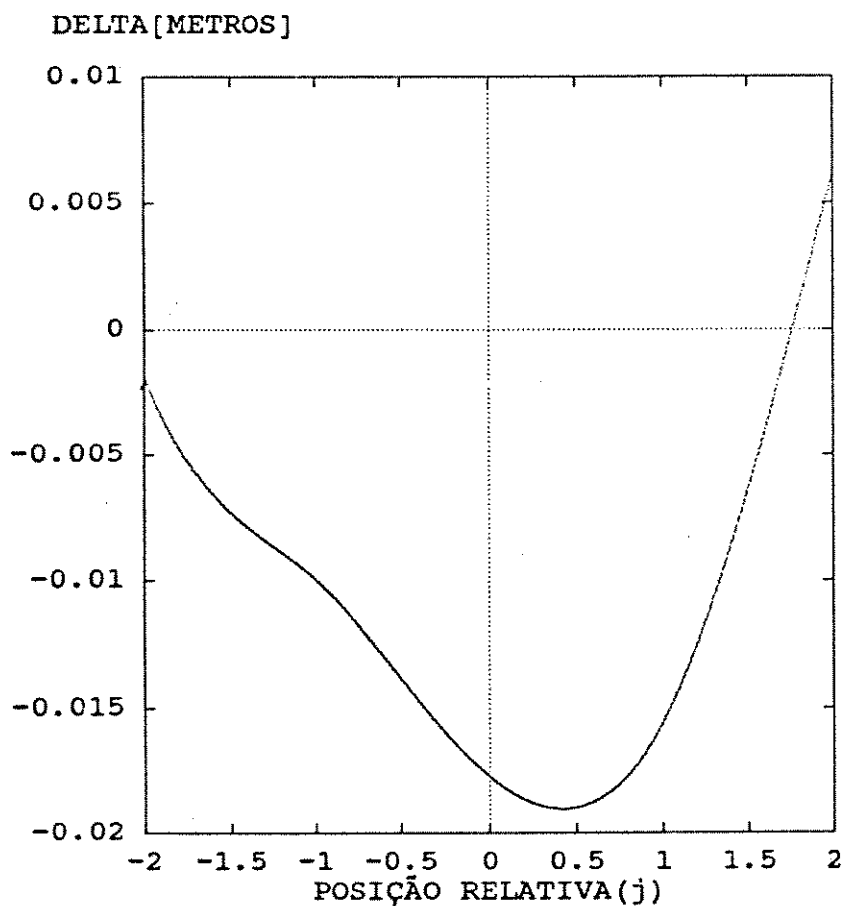


Figura 6.6: Comportamento da Função  $\Psi_{18}$ .

Perceba que a escala no eixo das ordenadas foi alterada em relação aos gráficos anteriores de variação de delta.

<sup>6</sup> As câmeras estavam posicionadas aproximadamente em um plano horizontal com os eixos horizontais.



#### 6.4.1 Eliminação de Curvas

Como não é razoável imaginar que essas alterações sejam decorrentes de uma súbita mudança de comportamento na frequência de captação das câmeras e considerando as limitações já explicadas do parâmetro delta como estimador de incerteza, decidimos eliminar algumas curvas e ponderar os resultados das outras.

Eliminaremos todas as curvas que cortam mais de uma vez o eixo ( $\delta = 0$ ) das posições relativas. A justificativa para isso é que só pode haver um quadro da seqüência V que é simultâneo ao da seqüência U.

O segundo caso de eliminação se aplica a curvas que não sejam estritamente crescentes ou estritamente decrescentes. A explicação é dada pelo fato de que se um quadro  $U_i$  está defasado (adiantado ou atrasado) do quadro  $V_{i+j}$  esta defasagem deve aumentar ou diminuir continuamente se aplicarmos o algoritmo de reconstrução entre o mesmo quadro  $U_i$  e um quadro de V posterior ou anterior a  $V_{i+j}$ .

O último caso de eliminação é para a situação onde a curva não corta o eixo das posições relativas. Isto é simples de entender uma vez que não teríamos um valor de posição relativa associado ao delta igual a zero.

#### 6.4.2 Ponderação de Resultados

Como já mostramos anteriormente, as curvas que apresentam maior variação do parâmetro delta são mais confiáveis que as que apresentam variações pequenas. Para quantificar este fator de confiabilidade utilizamos os coeficientes angulares das curvas  $\Psi_i$  como parâmetros.

Para determinar estes coeficientes  $\Upsilon_i$  tomamos arbitrariamente os valores das funções  $\Psi_i(j)$  para  $j = -1$  e  $j = 1$ .

$$\Upsilon_i = \frac{\Psi_i(-1) - \Psi_i(1)}{2}$$

Assim, cada valor de posição relativa correspondente ao valor de delta mais próximo de zero tem um peso diferenciado ao analisarmos estatisticamente o comportamento do conjunto das posições relativas em função do número do quadro.

Como desejamos que quanto maior for o coeficiente angular maior seja a contribuição daquele ponto na estatística podemos trabalhar com o quadrado do inverso do coeficiente angular.

Encontramos, portanto, uma maneira de ponderar os resultados que obtivemos nas curvas de variação do parâmetro delta.

Mostraremos, a seguir, um gráfico onde estão representadas as posições relativas em que o delta é mínimo para cada um dos quadros  $U_i$  de referência. Este gráfico nos permite encontrar os parâmetros  $\alpha$  e  $\vartheta\phi$  que determinam os parâmetros de sincronização e resolvem o nosso problema de saber das diversas curvas provenientes das aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução representa melhor a trajetória real.

## 6.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SINCRONIZAÇÃO

O gráfico apresentado na figura 23 mostrou a existência de uma região de convergência nas posições relativas onde os valores de delta eram mais próximos a zero. Para que possamos realizar uma estatística destes resultados, colocamos a posição relativa onde ocorreu o delta mais próximo a zero em função do número do quadro(i). Não foram representadas as posições i descartadas.

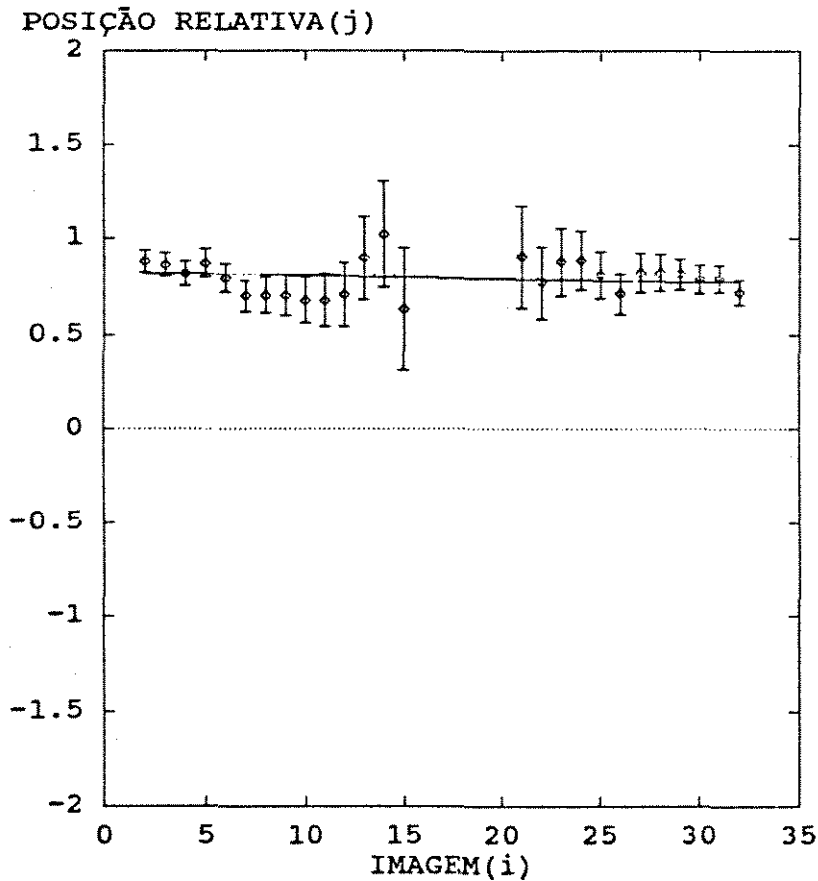


Figura 6.7: Posição Relativa(j) X Número da Imagem(i)

A escala relativa das barras verticais associadas a cada ponto nos indica o fator de ponderação a ele associado (quanto maior a barra, menor sua contribuição).

A melhor reta passando pelos pontos representa o modelo estatístico escolhido e é obtida pela regressão linear (quadrados mínimos) ponderada por  $1/Y_i^2$ .

O coeficiente linear desta reta nos dá a posição relativa estatisticamente esperada  $j$  do ponto inicial da seqüência  $V$  em relação ao ponto inicial da seqüência  $U$ . Isto é, nos dá a defasagem inicial em número de quadros, que é o parâmetro  $\alpha$  que queríamos encontrar.

Já o coeficiente angular nos indica a variação desta posição relativa em função  $i$ . Isto é, indica que a posição relativa média onde ocorrem as melhores reconstruções está se deslocando linearmente. Este deslocamento ocorre devido à diferença de freqüência entre as câmeras. Assim, o coeficiente angular nos permite determinar o quociente entre as freqüências das câmeras que é o parâmetro  $\vartheta\phi$  que procurávamos.

O nosso modelo estatístico (reta) fica determinado então pela seguinte equação:

$$j = \alpha + \vartheta\phi * i$$

Com os coeficientes  $\alpha$  e  $\vartheta\phi$  determinados, definimos nossa escala de posições relativas ( $j$ ) para qualquer valor de  $i$  e, conseqüentemente, sabemos, para cada quadro  $U_i$ , qual é o quadro - real ou virtual -  $V_{i+j}$  simultâneo ou mais próximo disso.

Nosso problema está então resolvido. Para converter estes resultados para uma escala de tempo basta utilizar as equações definidas no item 6.1.2.

## 6.6 O RESULTADO OBTIDO

Os valores que encontramos no teste do lançamento do projétil, foram:

$$\alpha = 82.32\% \quad \text{e} \quad \vartheta\phi = - 0.165\%$$

Com esses resultados, podemos agora escolher dentro do conjunto de curvas resultantes das aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução a que melhor representa a trajetória do projétil lançado, veja a próxima figura.

### TRAJETÓRIA RECONSTRUÍDA COM SINCRONIZAÇÃO A POSTERIORI

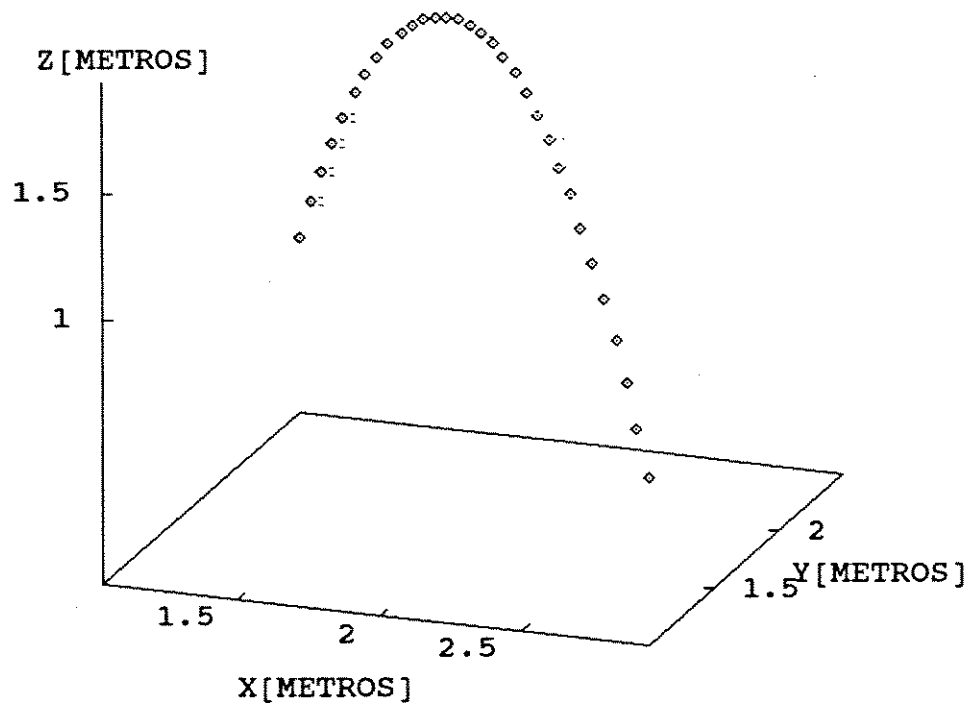


Figura 6.8: Reconstrução com Sincronização a Posteriori

Para finalizar o capítulo, apresentaremos um gráfico que sintetiza o procedimento de varredura resultante do processo de aplicações sucessivas do algoritmo de reconstrução, que desenvolvemos.

### VARREDURA DO PARÂMETRO DELTA.

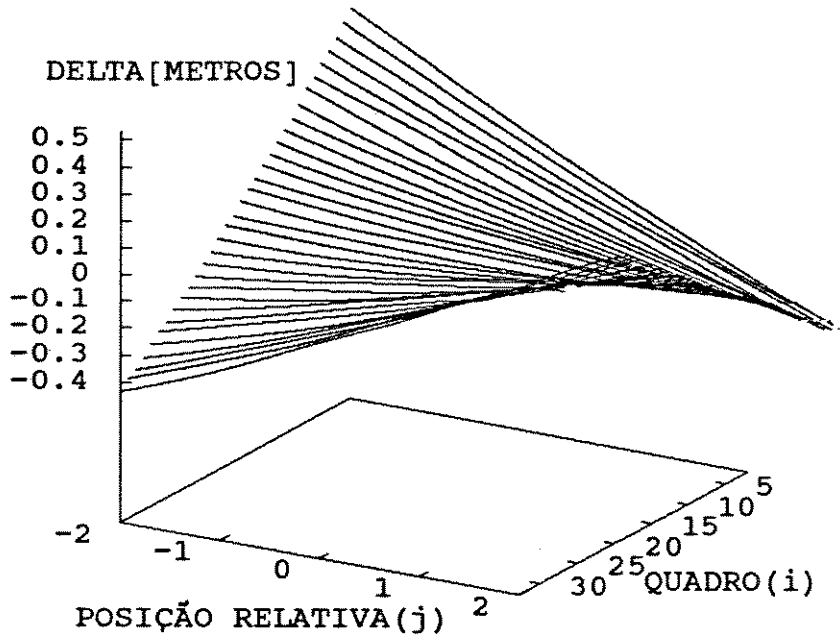


Figura 6.9: Comportamento de Delta nas Aplicações Sucessivas do Algoritmo de Reconstrução

## CAPÍTULO 7

### AValiação DA METODOLOGIA

No capítulo anterior, concluímos a apresentação da metodologia que estamos propondo para a descrição de movimentos. Com a determinação dos parâmetros de sincronização, viabilizamos a aplicação do método de reconstrução tridimensional para câmeras não sincronizadas.

Necessitamos, agora, avaliar com que precisão podemos realizar descrições tridimensionais. Como nosso modelo de descrição associado ao movimento humano é baseado em um conjunto de pontos característicos que descrevem trajetórias desconhecidas *a priori*, uma boa avaliação será obtida a partir da aplicação da metodologia ao movimento do centro de massa de um objeto simples para o qual a trajetória é conhecida.

Esta escolha, longe de restringir a avaliação dos resultados, confronta-os com um modelo físico bem definido que é a queda livre dos corpos no campo gravitacional. A trajetória a ser reconstruída é a parábola esperada do movimento de um projétil em queda livre. Alguns resultados parciais deste teste já foram apresentados nos capítulos anteriores.

Mostraremos, neste capítulo, que esses resultados nos indicam para cada ponto reconstruído uma incerteza associada (desvio padrão) da ordem de 4.6 milímetros, o que é extremamente satisfatório e, além disso, pode ser melhorado se tivermos maior precisão na medição do sistema de referências e no posicionamento das câmeras.

Trataremos, então, do modelo teórico associado ao nosso experimento, dos resultados experimentais que obtivemos e da comparação entre o modelo teórico e os resultados experimentais.

Esta verificação nos dará informações sobre os erros verificados para o conjunto dos pontos da trajetória e possibilitará considerações em relação aos erros individuais de cada ponto da trajetória reconstruída.

Evitamos um detalhamento das incertezas associadas a cada parte do trabalho - em virtude do objetivo deste texto - e nos concentramos na avaliação dos resultados finais obtidos.



## 7.1 O MODELO TEÓRICO

Assumindo que a única força atuando sobre o projétil lançado é a força peso, sabendo que ela é orientada na direção vertical<sup>7</sup>, e desconsiderando os efeitos provenientes da resistência do ar e da rotação do corpo, podemos dizer que a trajetória esperada para o centro de massa do projétil no espaço é uma parábola no plano vertical, e, portanto, sua projeção no plano x-y (horizontal) será uma reta. Utilizando o mesmo sistema referencial até agora adotado, a equação da projeção do ponto no plano que descreve esta curva é dada por:

$$y = a + b x$$

Onde  $a$  é o coeficiente linear da reta e  $b$  o coeficiente angular.

A equação da parábola esperada para a descrição da variação da coordenada  $Z$  em função do tempo é dada por:

$$Z(t) = Z_0 + V_0 * t + \frac{-g}{2} * t^2$$

onde  $t$  é o tempo,  $Z_0$  e  $V_0$  são, respectivamente, a altura e a velocidade do projétil para  $t = 0$  e  $g$  é o valor da aceleração da gravidade.

<sup>7</sup> Oposta ao eixo  $Z$  do nosso sistema de referência

## 7.2 OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme já dissemos, o teste que fizemos foi lançar uma bola de tênis ao solo e filmar, estereoscopicamente, o seu movimento de subida e queda, juntamente com o sistema de referência. Aplicamos todos os procedimentos descritos nos capítulos anteriores com auxílio de um software que desenvolvemos. O resultado foi um conjunto de pontos reconstruídos experimentalmente, um vetor  $\vec{R}(x,y,z)$  em função do tempo, e está apresentado graficamente na figura 6.9.

Para verificar se os nossos dados experimentais comportam-se de acordo com o modelo esperado, utilizamos a técnica de quadrados mínimos. Para ajustar projeções no plano x-y utilizamos um polinômio de primeiro grau, e para o ajuste das coordenadas Z do projétil em função do tempo, um polinômio de segundo grau.

Construímos, nos dois casos, os histogramas dos resíduos entre o modelo teórico e os resultados experimentalmente obtidos e calculamos as médias e os desvios padrão de cada parâmetro ajustado.

### 7.2.1 Teste da Projeção em um Plano

Tomamos as coordenadas x e y do vetor  $\vec{R}$  em função do tempo, considerando que o intervalo entre um quadro e outro na seqüência de imagens é de 1/30 de segundo. Fazendo a regressão linear por quadrados mínimos, encontramos o coeficiente linear e angular da reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais.

O gráfico seguinte apresenta os pontos experimentais e o modelo estatístico associado (reta).

PROJEÇÃO DOS PONTOS RECONSTRUÍDOS NO PLANO X-Y

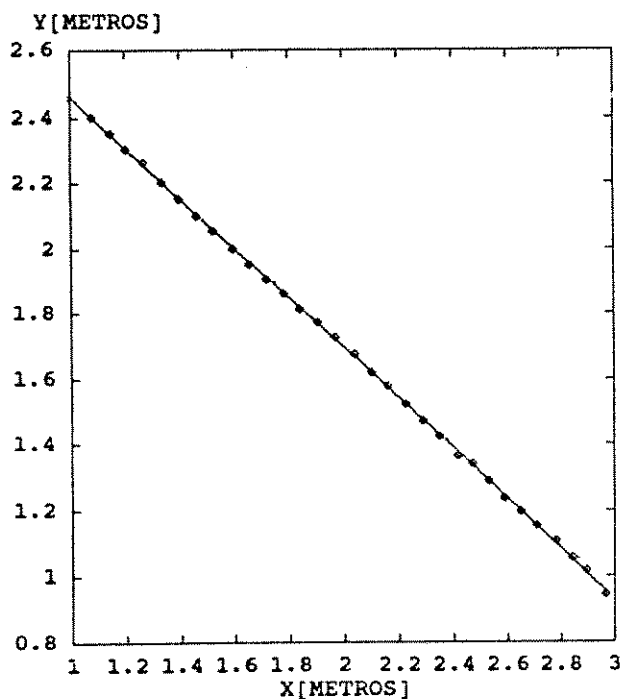


Figura 7.1: Regressão Linear por Quadrados Mínimos

A equação da reta que melhor ajusta os pontos é dada por:

$$y = 3.226571 - 0.765519 * x$$

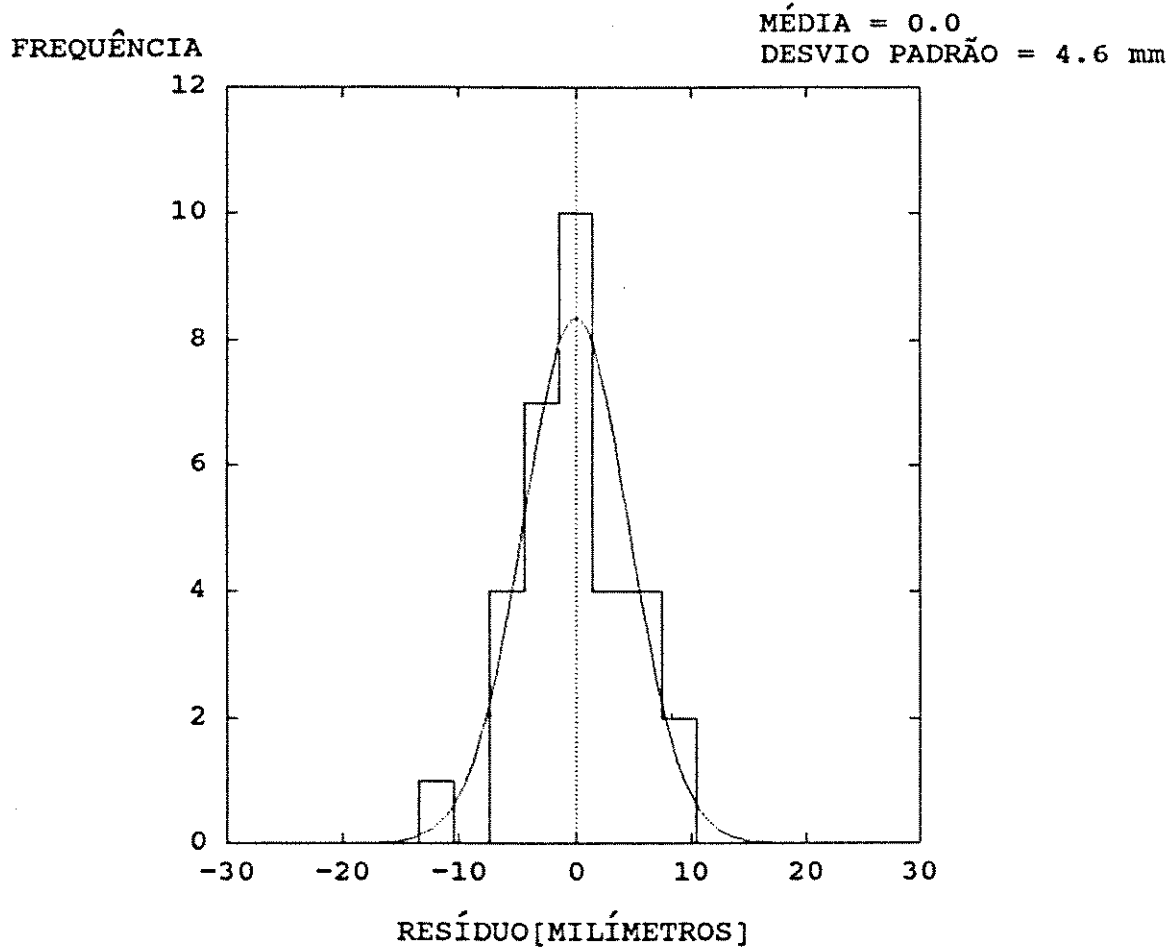
Como nos interessa saber quais são os erros experimentais ao longo da trajetória, e não em um plano arbitrariamente definido no lançamento, alteramos o nosso sistema de coordenadas<sup>8</sup> no gráfico da figura 7.1 de maneira que o eixo das abscissas coincida com a trajetória descrita pela projeção do projétil no plano horizontal.

<sup>8</sup> Aplicamos rotação e translação do sistema de coordenadas.

Assim, todas as variações, positivas e negativas, ocorridas nas ordenadas estão relacionadas aos erros experimentais.

Para quantificar os nossos desvios, fizemos o histograma dos resíduos entre os valores experimentalmente obtidos e a equação estimada da reta.

#### AVALIAÇÃO DO DESVIO LATERAL



Média = 0.0 milímetros

Desvio Padrão = 4.6 milímetros

Figura 7.2: Histograma dos Resíduos no Plano Horizontal

### 7.2.2 Estimativa da Velocidade Horizontal

Como temos a variação da posição ao longo da trajetória (S) em função do tempo, podemos aplicar novamente a técnica de mínimos quadrados e descobrir a velocidade de deslocamento horizontal do projétil. A figura abaixo ilustra os resultados.

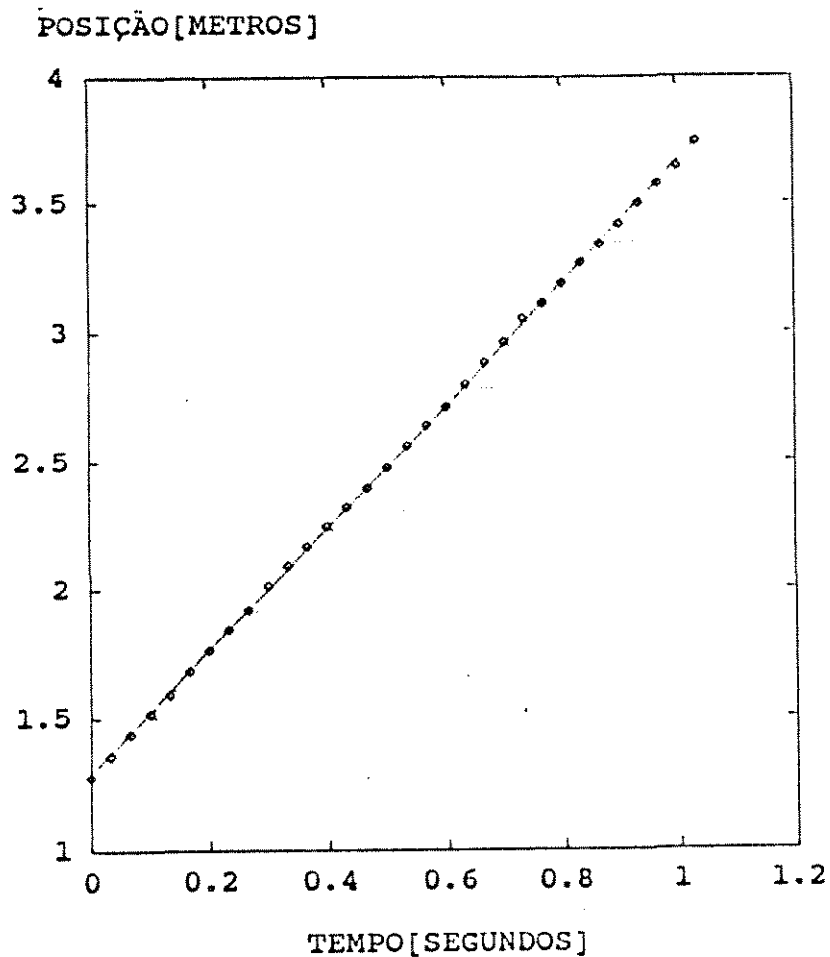


Figura 8.3: Variação no Tempo da Posição ao longo da Trajetória.

Fazendo o ajuste com um polinômio de primeiro grau obtivemos a seguinte equação:

$$S = 1.289 + 2.374 * t$$

O valor estimado da velocidade horizontal é 2.37 m/s.

### 7.2.3 Estimativa de g

Para a estimativa da aceleração da gravidade, e, conseqüentemente, estimar o grau de incerteza no plano vertical, aplicamos a técnica de quadrados mínimos, com polinômio de segundo grau, à variação da coordenada Z dos pontos reconstruídos em função do tempo.

#### ALTURA DO PROJÉTIL EM QUEDA LIVRE EM FUNÇÃO DO TEMPO

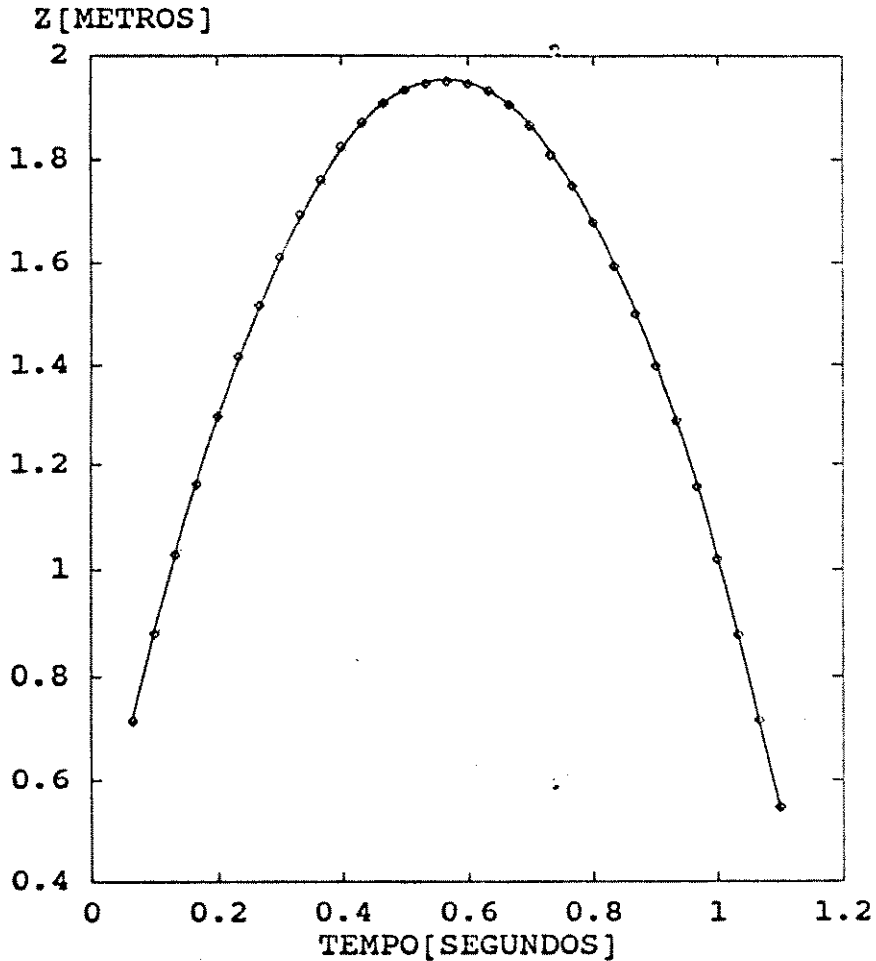
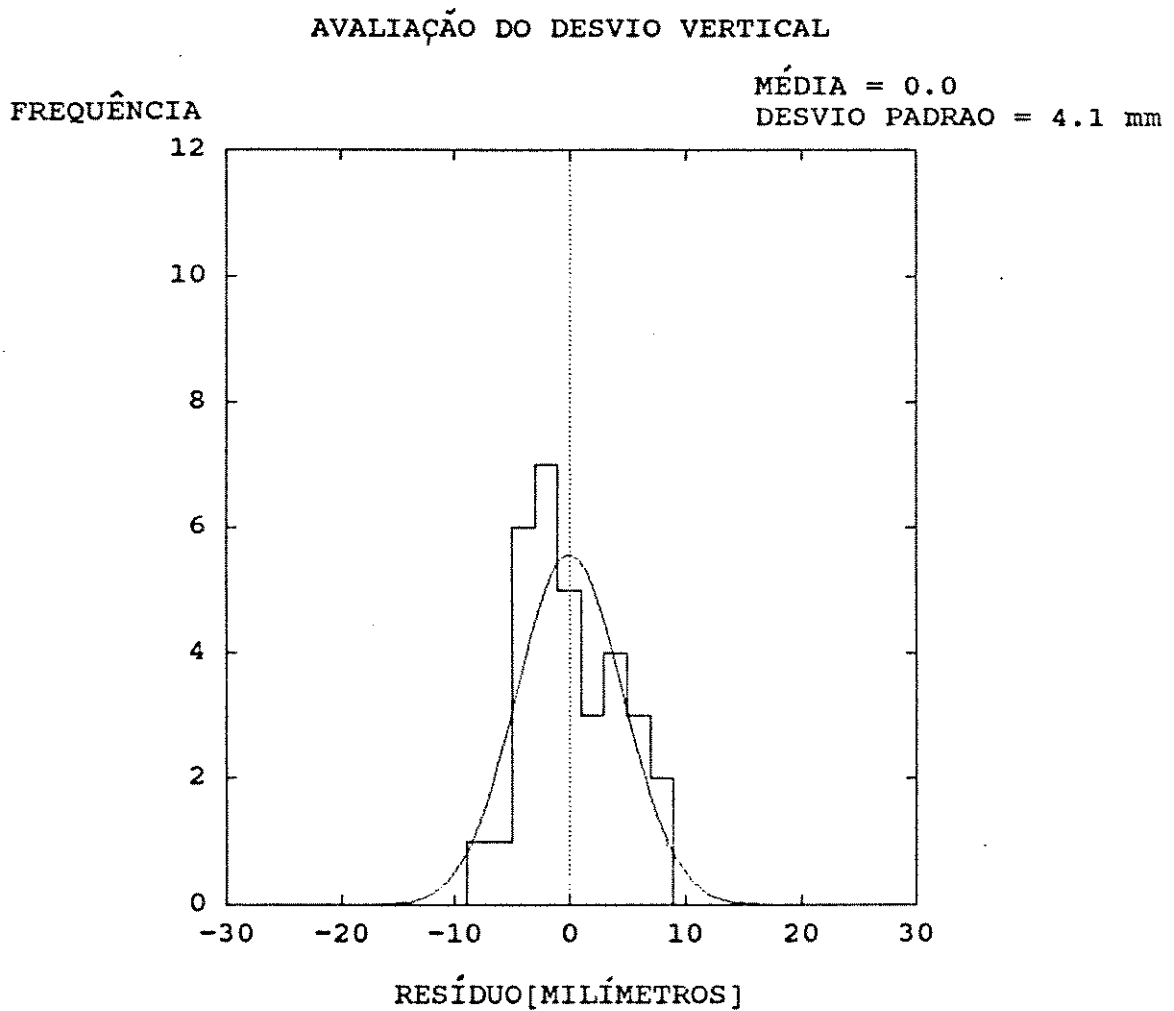


Figura 7.4: Ajuste por Quadrados Mínimos (Polinômio de grau 2)

A equação estimada para a parábola é dada por:

$$Z(t) = 0.375 + 5.579 * t + \frac{- 9.866}{2} * t^2$$

Para estimarmos a média e o desvio padrão dos resíduos verticais entre o modelo teórico (parábola) e os pontos obtidos experimentalmente, traçamos o histograma desses resíduos, conforme a figura abaixo.



Média = 0.0 milímetro

Desvio Padrão = 4.1 milímetros

Figura 7.5: Histograma dos Resíduos no Plano Vertical.

### 7.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Da comparação entre resultados estimados e esperados, concluímos que o desvio padrão tanto no plano horizontal quanto no vertical é da ordem de 4.6 milímetros. Considerando-se que as câmeras estavam posicionadas a aproximadamente 12 metros da região onde ocorreu a trajetória, a precisão é bastante boa.

A estimativa da aceleração da gravidade ( $g = 9.87 \text{ m/s}^2$ ) mostrou-se extremamente satisfatória. Comparando-se com o valor apresentado por HALLIDAY & RESNICK (1983),  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ , nosso erro é de 0.6%.

Sabemos, contudo, que a incerteza na estimação das coordenadas do centro de rotação das articulações é maior do que nosso desvio padrão. Isso nos garante que a metodologia é confiável.



#### 7.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Resumindo a metodologia proposta, temos como dados de entrada as coordenadas das câmeras, as coordenadas das marcas de referência e as posições das projeções dos pontos característicos e dessas marcas de referência no plano da imagem. Os dados de saída podem assumir diferentes formas.

A primeira é a de tabela com coordenadas do vetor posição ( $\vec{R}$ ) em função do tempo, temos, então, uma saída discreta. Estes dados podem assumir a forma de gráficos tridimensionais, ou outra combinação qualquer entre as coordenadas. Desta maneira pode-se visualizar o modelo formado pelos pontos característico em diversos momentos de sua trajetória no espaço.

A segunda maneira é a de interpolarmos, também por spline, cada uma das coordenadas do vetor  $\vec{R}$  em função do tempo e, assim, obter uma quantidade maior de pontos entre cada ponto reconstruído ou mesmo a forma analítica da trajetória.<sup>9</sup> Esta forma possibilita uma visualização da trajetória contínua do modelo em sua movimentação tridimensional.

As informações obtidas permitem fazer toda a cinemática do movimento humano e abrem as portas para estudos sobre a dinâmica.

<sup>9</sup>O software de interpolação por spline que utilizamos não fornece os parâmetros necessários, mas outros tipos de softwares podem fornecer esta tipo de saída.

## 7.5 CONCLUSÕES

Outros resultados de interesse são obtidos da aplicação da metodologia como o vetor velocidade de cada ponto característico em função do tempo, por derivação da equação da trajetória ou de suas coordenadas, e o vetor aceleração pela derivação do vetor velocidade.

De acordo com o interesse do usuário da metodologia, e a partir dos dados de saída fornecidos, é possível representar o movimento de diversas maneiras e com os mais distintos fins.

Vale destacar que as aplicações da metodologia são inúmeras, podemos citar a avaliação da *performance* de atletas, diagnóstico de pessoas portadoras de deficiência, estudos sobre desenvolvimento e aprendizagem motora, estudos sobre ergonomia, posturas dinâmicas entre outras.

Obtivemos, portanto, uma metodologia que descreve com precisão os movimentos do corpo humano, a partir de equipamentos relativamente simples, baratos e criando condições mínimas de constrangimento ao sujeito estudado.

Contudo, estamos cientes que uma verificação posterior mais exaustiva certamente irá contribuir decisivamente para melhorar o método.

## BIBLIOGRAFIA

- AMADIO, A. C. **Biomechanische Analyse des Dreispungs.** Tese de Doutorado, Deutschen Sporthochschule Köln, Köln, 1985
- BARROS, Ricardo, BRENZIKOFER, René. **Reconstrução Tridimensional: Um Método Simples .** In III Congresso Nacional de Biomecânica. Juiz de Fora, 1991.
- BARROS, Ricardo, BRENZIKOFER, René. **Reconstrução 3D do Movimento Humano. A Partir de Câmeras de Vídeo Não Métricas e Não Sincronizadas.** In XV Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, Caxambú, 1992
- BERNSTEIN, N. **The Co-ordination and Regulation of Movements.** Pergamon Press, 1967.
- BEER, Ferdinand, JOHNSTON, E. Russel Jr. **Mecânica Vetorial para Engenheiros Dinâmica.** 3ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. II, 1980
- BRAUNE, W., FISHER, O. **Human Gait.** Springer, 1987.
- BRENZIKOFER, René. **Instrumentação para uma Biomecânica de Corpo Inteiro.** In III Congresso Nacional de Biomecânica. Juiz de Fora, 1991.
- BRENZIKOFER, René, BRAZ, Henrique. **Reconstrução 3D do Movimento Humano. Autoposicionamento das Câmeras de Vídeo.** In XIV Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada. Caxambú, 1991.
- BROWN, C. M., BALLARD, D. H. **Computer Vision.** New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

- CAPPOZZO, Aurelio, LEO, Tommaso, MACELLARI, Velio. **The CoSTEL Kinematics Monitoring System: Performance and Use in Human Movements Measurements.** Biomechanics VIII-B, International Series on Biomechanics, Nagoya, v. 4-B, 1983. p.1067-1074.
- CARNAHAN, Brice, LUTHER, H. A., WILKES, James O. **Applied Numerical Methods.** United States of America: John Wiley & Sons, 1969.
- CIARCIA, Steven A. **Build a Gray-Scale Video Digitizer. Part 1: Display/Receiver.** BYTE, may, 1987. p.95-138.
- CIARCIA, Steven A. **Build a Gray-Scale Video Digitizer. Part 2: Digitizer/Transmitter.** BYTE, june, 1987. p.129-138.
- DOWLING, James J. **A Modeling Strategy for the Smoothing of Biomechanical Data.** Biomechanics X-B, International Series on Biomechanics, v. 6-B, p.1067-1074.
- FERRIGNO, G., PEDOTTI, A. **ELITE: A Digital Dedicated Hardware System for Movement Analysis Via Real-Time TV Signal Processing.** IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME-32 (11):943-949,1985.
- HAMMING, R. **Numerical Methods for Scientists and Engineers.** 2<sup>o</sup> ed. New York: McGraw-Hill, v. ix, 1962. 721p.
- KOMPANEYETS, A. S. **Theoretical Physics.** New York: Dover, 1962.
- McLAUGHLIN, Thomas M., DILLMAN, Charles J., LARDNER, Thomas J. **Biomechanical Analysis with Cubic Spline Functions.** The Research Quarterly, v.48, n<sup>o</sup> 3, 1977. p.569-582.

- MANN, R. W., ROWELL, D., DALRYMPLE, G., CONATI, F., TETESKY, A., OTTENHEIMER, D., ANTONSSON, E. **Precise, Rapid, Automatic 3D Position and Orientation Tracking of Multiple Moving Bodies.** Biomechanics VIII-B, International Series on Biomechanics, Nagoya, v. 4-B, 1983. p.1105-1112.
- MUNHOZ, Monica P., BARROS, Ricardo M. L., BREZIKOFER, René, VILARTA, Roberto, BANKOFF, Antônia. **Study of the Momentary Posture Modification Patterns Caused by Progressive Unilateral Excess Load Application.** In Olympic Scientific Congress, Málaga, 1992.
- MUÑOZ, Mauro, BREZIKOFER, René. **Processamento de Imagens para Biomecânica.** In IV Congresso Nacional de Biomecânica, São Paulo, 1992.
- NIINOMI, Shigeru, SUZUKI, Yoshitaka, TSUCHIYA, Kazuo. **A Data Smoothing Method Using Spline Functions and Its Application in Motion Analysis.** Biomechanics VIII-B, International Series on Biomechanics, Nagoya, v. 4-B, 1983. p.1215-1223.
- ORTALE, Renata L., BREZIKOFER, René. **Método de Reconstrução Tridimensional Para Análise Postural.** In IV Congresso Nacional de Biomecânica, São Paulo, 1992.
- REINSH, Christian H. **Smoothing by Spline Functions.** Numerische Mathematik, v. 10, 1967. p.177-183.
- REINSH, Christian H. **Smoothing by Spline Functions. II** Numerische Mathematik, v. 16, 1971. p.451-454.
- RESNICK, Robert, HALLIDAY, David. **Física.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v. I, 1983.

- SCHULTZ, Martin H. **Spline Analysis.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.
- SEIDENBERG, A. **Lectures in Projective Geometry.** Princeton: Van Nostrand, v. x, 1968. 230p.
- STARZHINSKII, V. M. **An Advanced Course of Theoretical Mechanics for Engineering Students.** 1<sup>o</sup> ed. Moscow: Mir Publishers, 1982.
- SYMON, Keith R. **Mecânica.** 2<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: Campus, 1986.
- TOMMASELLI, Antônio M. G., TOZZI, Clésio T. **Tutorial Calibração de Câmaras Usando Feições Genéricas.** In IV Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 1991, São Paulo. Adendo aos anais.35p.
- WILLIAMS, K. R. **A Comparison of 2-D Versus 3-D Analyses of Distance Running Kinematics.** Biomechanics IX-B, International Series on Biomechanics, v. 5-B, 1983. p.331-336.
- WOLD, Svante. **Spline Functions in Data Analysis.** Technometrics, v.16, n<sup>o</sup> 1, feb., 1974. p.1-11.
- WOLTRING, Herman J. **One Hundred Years of Photogrammetry in Biolocomotion.** In Proceeding of the Symposium on Biolocomotion: A Century of Research Using Moving Pictures, Formia, Italy. 1989
- YEADON, Maurice R. **A Method for Obtaining Three-Dimensional Data on Ski Jumping Using Pan and Tilt Cameras.** International Journal of Sports Biomechanics, v. 5, 1989.p. 238-247.