

**Um novo método
fotogramétrico Adequado a
análises Biomecânicas:
comparação com o método
DLT (Transformação
Linear Direta)**

*A New Photogrammetric
method suitable to
Biomechanical Analysis: A
comparison with DLT (Direct
Linear Transformation)*

Ana Cristina de David
José Carlos P. da Fonseca
Aluísio O. V. Ávila

Resumo

O presente estudo teve por objetivo descrever e obter dados, para fins de comparação, de dois métodos fotogramétricos que possibilitam a análise especial em estudos biomecânicos, utilizando-se câmeras não-métricas: o método desenvolvido por Fonseca & Ávila (1991) e o método da Transformação Linear Direta (DLT) elaborado por Abdel-Aziz & Karara (1971). Através da obtenção das coordenadas espaciais de 25 pontos distribuídos no espaço, segundo cada método, foi possível compará-los entre si e com as médias das coordenadas X, Y e Z, previamente medidas, utilizando-se análise de variância e regressão linear.

Os resultados indicaram não haver diferença estatisticamente significativa entre as médias das coordenadas em relação aos eixos X, Y ou Z, para qualquer um dos métodos, notando-se, no entanto, uma maior precisão nos resultados do Método DLT. A regressão linear mostrou uma elevada correlação entre erros absolutos, variações no valor da distância focal e variações no fator de aplicação, como esperado, tendo-se observado maior influência deste último com relação à precisão no cálculo das coordenadas. Acredita-se que o método Fonseca & Ávila possa ser uma alternativa quando o método DLT não puder ser empregado.

Abstract

Three-dimensional image analysis from non-metric cameras has also been the subject of recent biomechanical investigation. a new photogrammetric method, suitable to this application, worked out by Fonseca and Ávila (1991) is discussed. Experimental data concerning this method are compared with Abdel-Aziz and Karara's well known Direct Linear Transformation (DLT), which is conveniently translated into current terms. Data from 25 unevenly distributed points whose coordinates were previously known, were obtained by both methods and the precision of each one carefully evaluated. Results were then statistically compared using analysis of variance and linear regression. There was no statistical discrepancy among the coordinate means with respect to X, Y and Z axes in any method but DLT was considered to be superior in precision. Linear regression showed a high correlation between absolute errors on coordinates and variations on lens focal length and photo enlargement factor, as previously conceived. Enlargement factor was considered the main responsible for accuracy deviation. It may be suggested that Fonseca and Ávila's method can be considered an efficient option in case the DLT can not, for any reason, be used.

Introdução

Métodos fotográficos, cinematográficos e opto-eletrônicos têm sido utilizados por biomecânicos para a análise cinemática do movimento humano. Embora aspectos qualitativos possam ser obtidos à simples inspeção das imagens, estudos quantitativos exigem refinamentos técnicos, algumas vezes com a adoção de métodos fotográficos que podem atingir razoável complexidade. A análise dos movimentos planos é razoavelmente simples. Embora técnicas fotogramétricas possam ser empregadas, é suficiente na maioria dos casos a filmagem de uma escala situada no mesmo plano do objeto. A recuperação das coordenadas de pontos de interesse é obtido a partir do analisador de imagem ou do fotograma, corrigindo-as através de um fator obtido por meio da escala filmada. Conhecida a velocidade da câmera, as variações de posição de cada ponto poderão ser facilmente determinadas. São desta forma estudadas as trajetórias das diversas partes corporais, do centro de massa ou de outros pontos importantes, assim como grandezas derivadas destas posições tais como velocidade e aceleração.

Quando o objetivo do estudo é o movimento em suas três dimensões, necessária se faz a análise espacial. Posição corporal e grandeza dela derivadas devem ser determinadas no espaço, necessitando-se, nestes casos, empregar duas ou mais câmeras devidamente sincronizadas. A recuperação do objeto será obtida a partir de pelo menos duas contendo os pontos de interesse, porém, métodos apropriados são indispensáveis. Obviamente, a análise dos deslocamentos exigirá o levantamento e composição de inúmeras coordenadas seqüenciais a partir das imagens de cada câmera utilizada.

As técnicas de filmagem dependerão, além dos requisitos usuais da fotografia, do método fotogramétrico adotado. Assim, posição e orientação das câmeras podem ser fatores essenciais para a precisa localização futura do objeto. Exceção, o método hoje tido como referência universal, é conhecido como DLT.

A Transformação Linear Direta DLT de Abdel-Aziz e Karara (1971), é um método fotogramétrico analítico, capaz de

permitir, dentro de certos limites, livre posicionamento e orientação das câmeras, exigindo, no entanto, a presença de uma adequada estrutura de calibração a ser previamente fotografada no espaço onde ocorrerá o evento. Os chamados parâmetros de transformação, capazes de permitir a reconstituição de um objeto a partir de suas imagens, dependem da precisão com que pontos referenciais distribuídos nesta estrutura, são medidos, sendo calculados a partir destes pontos. A dificuldade de manuseio, transporte ou montagem de calibradores adequados, particularmente em situações em que o evento a ser analisado abrange uma área muito grande, pode fazer com que outros métodos se tornem mais convenientes, mesmo com o risco da perda de precisão.

Coube a Miller & Petak (1973) rever antigos métodos de recuperação tridimensional de imagens fotográficas, propondo um método que envolve o uso de três câmeras orientadas em estrela, a ângulos de 120° , cujos eixos óticos interceptam-se em uma origem comum. Transformações trigonométricas e manipulações algébricas são exigidas para resolver sistemas de equações envolvendo as coordenadas das três imagens. Necessário se faz posicionar e alinhar precisamente as câmeras, além do que as distâncias lente-origem e lente-imagem devem ser determinadas.

Alguns métodos de outros autores (Noble e Kelly, 1969; Duquet et alii, 1973; Van Gheluwe, 1974) ou propunham o uso de espelhos ou faziam uso de câmeras alinhadas com os três eixos cartesianos, algumas vezes utilizando uma das câmeras para obter imagens capazes de compensar erros de perspectiva. Estas situações, além de imprescicas, podem também trazer inconvenientes em situações reais.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo descrever, em detalhes, um novo método fotogramétrico utilizando câmeras não-métricas, desenvolvido por Fonseca e Ávila (1991), onde os eixos óticos de duas câmeras cruzam-se ortogonalmente, não necessariamente interceptando-se, na origem de um sistema cartesiano (Método I), e comparar seus resultados com os obtidos através do método DLT (Método II), cuja precisão tem sido universalmente reconhecida.

Metodologia

Baseado nas relações geométricas objeto-imagem para lentes convergentes simples (conforme fig. 1), foi desenvolvido por Fonseca e Ávila um método de obtenção de coordenadas espaciais de pontos, que pode ser estendido a sistemas óticos compostos onde.

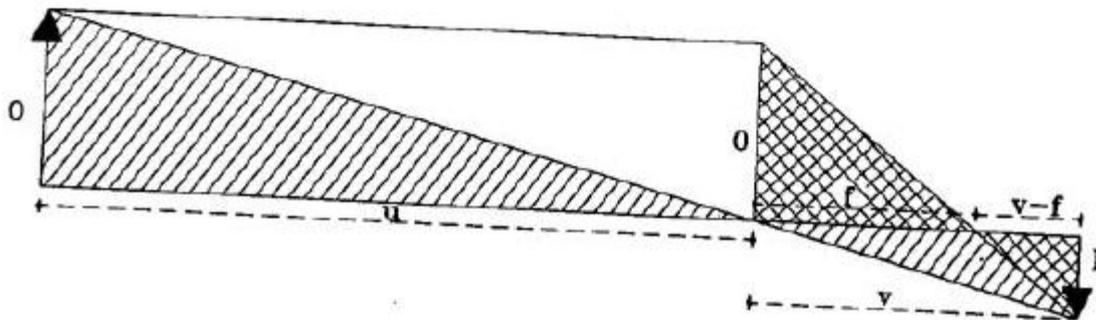


Figura I- Representação de relações geométricas para uma lente simples

- O é o tamanho do objeto
- I é o tamanho da imagem
- U é a distância lente-objeto
- V é a distância lente-imagem
- F é a distância focal da lente

As relações abaixo são obtidas por semelhança:

e

$$\frac{O}{I} = \frac{U}{V} \quad \text{(I)}$$

$$\frac{O}{I} = \frac{F}{V-F} \quad \text{(II)}$$

Das relações (I) e (II) obtemos uma expressão para distância lente-imagem que será de extrema utilidade:

$$V = \frac{UF}{U-F} \quad \text{(III)}$$

Considera-se o caso particular de duas câmeras (c1 e c2), respectivamente situadas sobre os semi-eixos positivos X e -z de um sistema de coordenadas cartesianas direto (figura 2). A ilustração é vista desde o sentido positivo do eixo Y, onde:

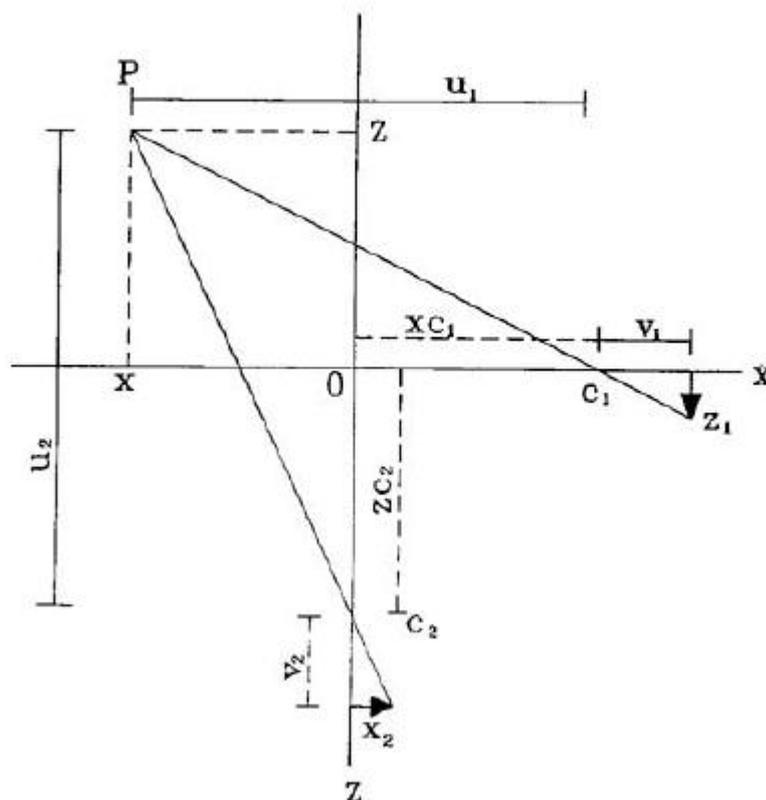


Figura 2 - Caso particular: C1 a C2 nos semi-eixos positivos

X e Z são coordenadas de um dado P

X_2 e Z_1 são coordenadas nas imagens das câmeras 2 e 1

X_{c1} e Z_{c2} são Coordenadas de posição das câmeras 1 e 2

U_1 e U_2 são distâncias medidas sobre os eixos óticos das projeções do ponto P sobre os eixos coordenados, às lentes das câmeras 1 e 2 respectivamente, correspondendo às distâncias lente-objeto.

V_1 e V_2 são distâncias lente-imagem das câmeras 1 e 2, respectivamente.

Podemos agora escrever, de acordo com a equação (I):

Câmera 1:

$$\frac{Z}{Z_1} = \frac{U_1}{V_1} X \quad (\text{IV}) \text{ onde } U_1 = X_{c1} -$$

e, por

$$V1 = \frac{U2 \cdot F2}{U2 - F2} \quad (\text{III})$$

Câmera 2:

$$\frac{X}{X2} = \frac{U2}{V2} \quad (\text{III}) \text{ onde } U2 = Zc2 - Z$$

e, por

$$V2 = \frac{U2 \cdot f2}{U2 - f2}$$

As substituições das expressões à direita nas respectivas equações à esquerda, permitem escrever:

$$Z = \frac{Z1(Xc1 - X - F1)}{F1} \quad (\text{VI})$$

$$X = \frac{X_2(Z_{c2} - Z - F_2)}{F_2} \quad (\text{VII})$$

As substituições recíprocas de X e Z no interior das equações (VI) e (VII) fornecem, após algumas manipulações algébricas, as relações finais para as coordenadas Z e X do ponto de interesse:

$$Z = \frac{Z_1(X_{c1} \cdot F_2 + X_2 + F_2 - X_2 \cdot Z_{c2} - F_1 \cdot F_2)}{F_1 \cdot F_2 - X_2 \cdot Z_1} \quad (\text{VIII})$$

$$X = \frac{X_2(Z_{c2} \cdot F_1 + Z_1 \cdot F_1 - Z_1 \cdot X_{c1} - F_1 \cdot F_2)}{F_1 \cdot F_2 - X_2 \cdot Z_1} \quad (\text{IX})$$

Para a determinação da coordenada Y , necessitamos observar a ilustração a seguir (fig 3), que representa a câmera alinhada com o eixo X , sendo o desenvolvimento válido para a câmera situada sobre o eixo Z . Espera-se que qualquer das câmeras tenha seu eixo ótico situado a uma determinada elevação Y_c . Por razões práticas, o plano XZ deve ser o solo, assim o eixo ótico X' deverá ser paralelo ao eixo cartesiano X , isto é, paralelo ao solo. As considerações que seguirão são referenciadas ao eixo ótico X' .

Sabe-se que caso o eixo ótico pudesse ser coincidente com o eixo cartesiano, a relação objeto-imagem seria simplesmente:

onde $U = X_c - X$

$$\frac{Y}{Y'} = \frac{U}{V} \quad \text{(IX) onde } U = X_c - X$$

e por III

$$V = \frac{U \cdot F}{u - F} \quad \text{(III)}$$

Ou seja, a coordenada Y deveria, após as substituições das relações à direita e conveniente manipulação algébrica, ser dada por:

$$Y = \frac{Y'(X_c - X - F)}{F}$$

No entanto, o fato de o eixo ótico estar elevado de YC, exigirá um fator de correção cuja dedução a figura 3 permite.

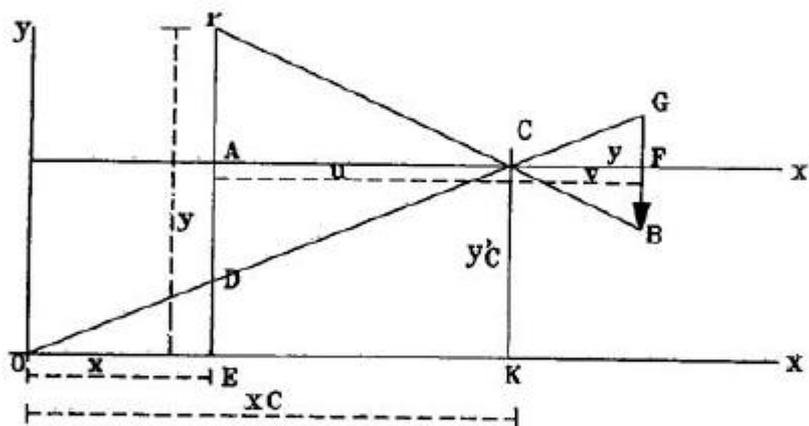


Figura 3 - Caso particular: câmera a determinada altura do solo.

$$Y = AP - AE \quad \text{sendo: } AE = AD + DE$$

A semelhança entre os triângulos ODE e OCK permite:

$$\frac{DE}{CK} = \frac{X}{X_c}$$

logo:

$$DE = \frac{(YC.X)}{X_c}$$

Por sua vez, a semelhança entre APC e FBC fornece:

$$\frac{AP}{FB} = \frac{U}{V} = AP = \frac{FB.U}{V}$$

e entre ADC e FGC obtemos:

$$\frac{AD}{FG} = \frac{U}{V} = AD = \frac{FG.U}{V}$$

Subtraindo AD de AP:

$$AP - AD = \frac{(FB - FG) \cdot U}{V} = AP \cdot AD = Y \frac{U}{V}$$

Observa-se aqui que AP - AD representa a coordenada Y caso o eixo ótico fosse coincidente com o eixo cartesiano, tal como mencionado no início da presente demonstração.

$$Y = AP - AD - DE$$

Ou seja:

$$Y = y \frac{U}{V} - \frac{Y_c}{X_c} \cdot X$$

Referenciando finalmente ao eixo cartesiano, a expressão para Y será:

$$Y = y \frac{u}{V} - \frac{Y_c}{X_c} \cdot X$$

Onde o segundo termo à direita da equação é direta da equação é o fator de correção devido à elevação da câmera.

Finalmente é necessário considerar que são duas câmeras que observam o ponto cuja coordenada é Y, existindo portanto duas expressões para esta coordenada, óbvio que qualquer das duas deverá levar ao mesmo valor.

A substituição adequada de u e v, e a adoção dos índices, permitem escrever as seguintes expressões para Y:

câmera 1:

$$Y = \frac{Y_2(Z_{c1} - Z - F_1)}{F_1} + \frac{Y_{c1}}{X_{c1}} X$$

câmera 2:

$$Y = \frac{Y_2(Z_{c2} - Z - F_2)}{F_2} + \frac{Y_{c2}}{Z_{c2}} Z$$

Após alguma álgebra, podemos finalmente expressar as duas equações para a coordenada Y:

$$Y = \left[\frac{X_{c1}}{f_1} - 1 \right] y_1 + \left[\frac{Y_{c1}}{X_{c1}} - \frac{y_1}{f_1} \right] X$$

$$Y = \left[\frac{Z_{c2}}{f_2} - 1 \right] y_2 + \left[\frac{Y_{c2}}{Z_{c2}} - \frac{y_2}{f_2} \right] Z$$

Onde os termos novos significam:

y_1 e y_2 são coordenados nas imagens das câmeras 1 e 2

Y_{c1} e y_2 são coordenadas de posição das câmeras 1 e 2

Necessariamente, a determinação da coordenada Y implica no prévio cálculo das coordenadas X ou Z. Estas são, por sua vez, interdependentes, como pode ser inferido das equações VI e VII.

O trabalho experimental descrito a seguir ilustra os procedimentos na execução do dois métodos.

Utilizando-se um teodolito repetidor, marca Vasconcelos, modelos M3, foram marcados quatro pontos no solo, delimitando as extremidades de duas perpendiculares, utilizadas como os eixo X e Z de um sistema cartesiano. Os eixos foram marcados com um fio escuro de modo a contrastar com o piso.

Quatro postes (B, C, D, E) de alumínio, de seção circular, com 2,70 metros de altura, base de ferro e suporte para suspensão de um prumo foram distribuídos ao redor de interseção dos dois eixos. Um outro fio de prumo (A) foi posicionado exatamente sobre a interseção dos dois eixos, servindo como o eixo vertical Y do sistema. Em cada fio foram fixadas cinco esferas de plástico, em alturas diferentes, servindo como pontos cujas coordenadas seriam buscadas.

As medidas das coordenadas X, Y, Z dos pontos que serviram para comparar com os valores das coordenadas calculadas através dos dois métodos foram feitas por três indivíduos separadamente, utilizando-se uma fita métrica marca Stanley, com precisão de 0,5 mm. O valor médio destas coordenadas foi o adotado (Grupo Controle).

O erro na medida das coordenadas Y, devido ao desnível do solo foi corrigido utilizando-se o teodolito.

Por se tratar de uma situação estática foi utilizada uma só câmera, tipo Reflex, marca Yashica FX-D, com distância focal nominal de 50 mm.

Quando da análise do movimento, duas câmeras perfeitamente sincronizadas no tempo são necessárias.

Para a execução do método (I), a câmera foi primeiramente colocada no semi-eixo positivo Z, sobre um tripé, marca UN 926 Apolo R, a uma distância de 8,401 metros da origem e altura de 0,98 metros. A distância da lente à origem foi medida a partir da superfície mais extrema da lente e a altura a

partir do centro da objetiva até o solo. O eixo ótico da lente foi alinhado paralelamente ao eixo traçado no solo, com o auxílio de um emissor laser, marca Spectre Physics Inc, modelo 155, com potência de saída de 0,95 mW, colocado na extremidade oposta à câmera, de forma a seus raios coincidirem com o centro geométrico do quadro onde é formada a imagem. Após tirada a fotografia, a câmera foi removida para o semi-eixo positivo X e o mesmo processo anterior executado. A distância da superfície mais externa da lente à origem nesta situação foi de 6,817 metros e a altura de 0,99 metros.

O fator de ampliação para as fotografias foi calculado através da relação geométrica entre o tamanho de um objeto-padrão na fotografia e seu respectivo tamanho na imagem do negativo. O valor encontrado para ambas as fotografias foi de 4,91.

As coordenadas dos pontos nas fotos foram lidas três vezes sendo posteriormente calculado o valor médio entre elas por três indivíduos diferentes, utilizando-se um paquímetro, marca Mitutoyo, com precisão de 1/50mm.

Diferentes valores de distância focal e do fator de ampliação foram testados separadamente, procurando-se observar a influência de suas variações na determinação das coordenadas espaciais dos pontos.

Para o método II, (DLT), as distâncias da câmera à origem foram de 9 metros, sendo de 5 metros o afastamento entre elas, com um pequeno ângulo de convergência entre os eixos óticos, como recomendado por Karara e Abdel-Aziz (1974).

Três situações diferentes foram testadas: a primeira utilizou como origem nas fotografias a própria origem estabelecida pela intercepção dos eixos no solo (Método II A). Segundo, tomou como origem para a foto A, o ponto E_1 e para a foto B, o ponto C_4 (Método II B). Para a terceira situação a origem nas fotografias foi a mesma da primeira, porém os eixos sofreram uma rotação de 20° para a foto A e 10° para a foto B (Método II C). Todas as três situações utilizaram onze pontos de controle para cálculo dos parâmetros de transformação das equações. Adicionalmente foi testada a situação II A utilizando somente seis pontos (Método II A-6).

Softwares específicos para cada método foram desenvolvidos para o processamento dos dados.

Resultados

Na Tabela 1 é fornecida a comparação entre as médias das coordenadas em relação aos eixos X, Y e Z dos 25 pontos observados para os seis diferentes grupos: Controle, Método I, Método IIA, Método IIB, Método IIC e Método IIA com seis pontos de controle, e seus resultados estatísticos, utilizando a análise de variância de 1ª ordem. Não foi observada diferença estatisticamente significativa ($p > 0,01$) entre os grupos em qualquer um dos eixos. As médias dos Métodos IIA, IIB e IIC aproximaram-se mais da média do grupo Controle que as médias do Método I e IIA utilizando seis pontos de controle, em relação a todos os três eixos. O Método I apresentou sempre o maior desvio-padrão em relação aos outros. Para o cálculo das médias das coordenadas foram utilizados valores positivos e negativos.

Tabela 1 - Comparação múltipla de médias das coordenadas X, Y e Z dos 25 pontos entre o grupo Controle, Método I, Método IIA, Método IIB, Método IIC e Método IIA utilizando seis pontos de controle.

Grupos	N	Coordenada X	Coordenada Y	coordenada Z
Controle	25	-0,001799 ±0,809	1,3154 ±0,634	0,1906 ±0,831
Met-I	25	0,00080 ±0,843	1,3565 ±0,655	0,1969 ±0,861
Met-IIA	25	-0,001839 ±0,809	1,3144 ±0,635	0,1902 ±0,832
Met-IIB	25	-0,002399 ±0,808	1,3142 ±0,635	0,1890 ±,831
Met-IIC	25	-0,001759 ±0,810	1,3139 ±0,635	0,1901 ±0,834
Met-IIA6	25	0,000200 ±0,811	1,3153 ±0,637	0,1978 ±0,823

Tabela 5 - Coeficientes angulares das equações de regressão entre os erros absolutos das coordenadas X e Z calculadas através do Método I e variações no valor do fator de ampliação.

Coeficientes de Inclinação

Pontos	Coord. X	Coord. Z
B ₁ a B ₅	- 0,230	0,130
C ₁ a B ₅	- 0,130	- 0,220
D ₁ a D ₅	0,170	- 0,120
E ₁ a E ₅	0,180	- 0,260

Discussão

A análise estatística dos resultados demonstrou que não há diferença significativa entre o Grupo Controle, Método I e Método II, de acordo com o teste de análise de variância.

Por outro lado, uma consideração mais determinística deve ser feita. Embora os resultados não tenham mostrado diferença estatística, observou-se, no entanto, uma tendência de os valores das médias das coordenadas X, Y e Z, calculadas através do Método I, se distanciarem mais das médias das coordenadas medidas do grupo Controle. Pela análise dos erros médios percentuais e erro médio quadrático nota-se um razoável aumento na precisão quando utilizado o Método II (DLT).

Esta tendência pode ser melhor entendida quando analisamos os valores dos erros percentuais e notamos que existe um erro positivo constante no cálculo das coordenadas através do Método I, em relação aos três eixos X, Y e Z. Este erro pode ser devido à imprecisão na determinação do valor da distância focal ou no valor do fator de ampliação das fotografias, ou mais provavelmente da conjugação de ambos.

Pela observação dos valores dos coeficientes angulares das

equações de regressão verifica-se que o valor da distância focal é um fator crítico dentro das equações de determinação das coordenadas X e Z, ou seja, pequenas variações no valor da distância focal provocam grandes variações nos valores das coordenadas calculadas. No entanto, nota-se que os valores dos coeficientes angulares das equações de regressão entre os erros absolutos nas coordenadas X e Z e variações no fator de ampliação foram dez vezes maiores que os da relação com a distância focal. Tal fato leva a crer que as variações neste afetarão de forma mais intensa os resultados calculados pelas equações.

Outro fator de imprecisão na realização do Método I é o alinhamento dos eixos óticos das lentes com os eixos cartesianos do sistema adotado, problema também verificado nos trabalhos de Noble & Kelly (1969); Miller & Petak (1973) e Martin & Pongratz (1974). O fato é que, dependendo da distância em que a câmera da origem, qualquer leve inclinação da mesma representará um considerável desvio do eixo ótico em relação à origem do sistema. O desvio será maior quanto maior for a distância da câmera à origem.

A diferença entre os valores do erro médio percentual das coordenadas no eixo X em relação à do eixo Z sugerem um desalinhamento do eixo ótico de uma das câmeras.

Em relação ao maior valor de erro médio quadrático encontrado no eixo Y, em relação aos eixos X e Z, este pode ser devido ao fato de que os pontos encontram-se mais afastados em relação a este eixo.

Em relação ao Método II (DLT), a precisão na obtenção de coordenadas espaciais, depende fundamentalmente do rigor com que o experimentador mede as coordenadas dos pontos de controle, em campo, e as coordenadas nas imagens. Não são necessários, como no Método I, medidas de distância focal, fator de ampliação, distâncias das câmeras à origem e altura das câmeras, já que todos estes parâmetros de orientação interna e externa são calculados automaticamente pelas equações. Não são necessários, também, alinhamento dos eixos óticos com os eixos do sistema cartesiano, sendo as câmeras posicionadas livremente.

Os resultados obtidos através dos Métodos IIA, IIB, IIC

e IIA com seis pontos de controle estão dentro dos limites de precisão encontrados por diversos autores que também utilizaram o DLT: VanGhelwe, 1978; Shapiro, 1978; Alem et alii, 1978; Putnam, 1979; Dapena et alii, 1982; Wood & Marshall, 1986.

Pela análise estatística dos resultados, confirmam-se as afirmações de Putnam (1979) de que a origem do sistema de coordenadas dos pontos referenciais no espaço-objeto, bem como do sistema de coordenadas nas imagens e a orientação dos eixos são completamente arbitrários.

Quanto à questão do número de pontos de controle mais adequado, somente foram testados dois conjuntos de parâmetros: um com onze e outro com seis pontos. Apenas da situação que utilizou seis pontos (Método IIA-6) e daquela que utilizou onze (Método IIA) não terem diferido estatisticamente, observou-se uma superioridade em termos de precisão, através dos valores de erro médio quadrático e erro médio percentual, na utilização de onze pontos (Putnam, 1979; Wood & Marshall, 1986). Esta precisão está ligada, segundo Wood & Marshall, à distribuição dos pontos de controle no espaço. Estes devem ser posicionados de forma a cobrir todo o volume abrangido pelos pontos cujas coordenadas se quer determinar. A solução para os parâmetros das equações com mais de seis pontos, utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados, tem sido freqüentemente citada na literatura específica (Van Gheluwe, 1978); Shapiro, 1978; Stucke, 1984).

Tanto o Método I quanto o Método II são sensíveis a variações nos valores das coordenadas nas imagens, especialmente na leitura das coordenadas das imagens dos pontos de controle para o Método II (Putnam, 1979). Uma boa luminosidade dos pontos a serem medidos nas imagens, de modo a facilitar a leitura das coordenadas, contribuirá para o aumento da precisão na determinação das coordenadas espaciais, assim como várias repetições, com vários observadores, na leitura das coordenadas das imagens, faz com que diminua o erro intra e inter-observador.

Lentes de boa qualidade e sistemas de medida precisos são fatores importantes para obtenção de melhores resultados em ambos os métodos.

Embora o problema da determinação do fator de

ampliação no Método I, possa ser relativamente fácil de ser resolvido, o mesmo não acontece com o alinhamento dos eixos óticos, que continua sendo um fator extremamente crítico.

A principal vantagem do Método I em relação a métodos anteriores, como o de Miller & Petak (1973) é que não é necessário o conhecimento prévio do valor de distância principal, simplificando bastante a sua aplicação.

Conclusões

O Método II (DLT) apresentou maior precisão na obtenção das coordenadas espaciais (X, Y e Z) dos pontos, mostrando ser um método relativamente simples em sua execução, embora seja mais complexo na tarefa computacional. Sua precisão depende basicamente do rigor com que as medidas das coordenadas dos pontos de controle, em campo e nas imagens, são feitas.

Não foi encontrada diferença, para o Método II, em situações em que há inclinações dos eixos e modificações da posição da origem do sistema adotado nas imagens em relação ao sistema original.

A solução utilizando onze pontos de controle com mínimo quadrados, mostrou superioridade em relação àquela utilizando somente seis pontos, recomendando-se então, apesar de seis pontos serem suficientes para a solução das equações, adotar um número maior.

A precisão na obtenção de coordenadas para o Método I está ligada principalmente à determinação do valor do fator de ampliação seguida pelo valor da distância focal das lentes.

A maior dificuldade na execução experimental deste método, está com o alinhamento dos eixos óticos das câmeras com os eixos do sistema cartesiano de referência.

O interessante seria que se fizesse um estudo da aplicação destes métodos em uma situação dinâmica, com o objetivo de verificar seus comportamentos na determinação dos parâmetros

cinemáticos do movimento.

Referências Bibliográficas

1. ABDEL-AZIZ, Y. I. e KARARA, H. M. -*Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object-Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry* in Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana - Champaign, Illinois, 1971. p.1-18.
2. ALEM, N., MELVIN, J. W. e HOLSTEIN, G. L. *Biomechanics Applications of Direct Linear Transformation in Close-Range Photometry* - in Sixth New England Bioengineering Conference, eds.: Jason, D., Pergamon Press, Rhode Island, New York, 1978. p. 202-206.
3. DAPENA, J., HORMAN, E.A. e MILLER, J. A. -*Three-dimensional Cinematography with Control Object of Unknown Shape* - Journal of Biomechanics, 15: 11 - 19, 1982.
4. DUQUET, W., BORUS, J. e HEBBELINCK, M. *A Method of Three-dimensional analysis of Twisting Movements* - in: Biomechanics III - Medicine and Sports, eds.: Cerquiglini, S., Venerando, A e Wartenweiler, J., University Park Press, Baltimore, 1973, p. 175 - 186.
5. FONSECA, J. C. P. e ÁVILA, A. O. V. -*Eixos Óticos Ortogonais para Obtenção de Coordenadas Especiais com Duas Câmeras* -Trabalho apresentado no IV Congresso Nacional de Biomecânica - Juiz de Fora - MG, 1991 (em publicação).
6. MARTIN, T. P. e PONGRATZ, M. B. - *Validation of a Mathematical Model for Correction of Photographic Perspective Error* - in: Biomechanics IV, eds.: Nelson, R.C. e Morehouse, C. A., University Park Press, 1974. p. 469 -475.
7. MILLER, D. I. e PETAK, K. L. -*Three-dimensional Cinematography* - in: Kinesiology III, American Association for Health, Physical Education and Recreation, eds.: The Committee on Kinesiology of the Physical Education Division, Washington, D. C., 1973. p. 14-19.
8. NOBLE, M.L. e KELLY, D.L. - *Accuracy of Tri-axial Cinematographic Analysis in Determining Parameters of Curvilinear Motion* - Research Quarterly, 40: 643 - 645, 1969.
9. PUTNAM, C. *DLT Method of Three-dimensional Cinematography* -Instruction Manual. University of Iowa, Iowa, 1979 (em fase de elaboração).
10. SHAPIRO, R. *Direct Linear Transformation Method for Three-dimensional Cinematography* - Research quarterly, 49: 197 -205, 1978.
11. STUCKE, H. - *Zur Dynamischen Belastungen des Oberen, Sprunggelenkes und seines Sehnen - und Bandapparates*. Dissertation der sport - Wissenschaften, DSHS - Köln, 1984.
12. VAN GHELWEE, B. *A new Three-dimensional Filming Technique Involving Simplified alignment and Measurement Procedures* - in: Biomechanics IV, eds.: Nelson, r. e Marehouse, C.A., University Perk Press, Baltimore, 1974. p. 476 - 481.

13. VAN GHELUWE, B. - *Computerized Three-dimensional Cinematography for Any Arbitrary Camera Setup* - in: Biomechanics VI - A, eds.: Asmussen, E e Jorgensen, K., University Park Press, Baltimore, 1978. p. 343 - 348.
14. WOOD, G.A. e MARSHALL, R. N. - *The Accuracy of DLT Extrapolation in Three-dimensional Film Analysis* - Journal of biomechanics, 19: 781 -785, 1986.

Ana Cristina de David: Dep. de Ed. Física Faculdade de Ciências da Saúde.

José Carlos P. da Fonseca: Dep. de Clínica Cirúrgica Fac. de Ciências da Saúde UNB.

Aluísio O.V. Ávila: CEFD - Universidade Federal de Santa Maria.

