

Amanda Piaia Silvatti

**CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS PARA
ANÁLISES SUBAQUÁTICAS DE
MOVIMENTOS**

***CAMERA CALIBRATION FOR
UNDERWATER ANALYSIS***

**Campinas
2013**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

Amanda Piaia Silvatti

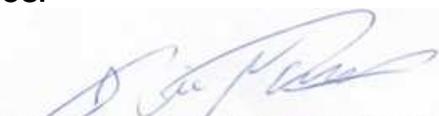
**CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS PARA ANÁLISES
SUBAQUÁTICAS DE MOVIMENTOS**

CAMERA CALIBRATION FOR UNDERWATER ANALYSIS

Tese de Doutorado apresentada à Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Educação Física. Área de concentração: Biodinâmica do movimento humano.

Doctorate thesis presented to the Post Graduation Programme of the School of Physical Education of University of Campinas to obtain the Ph.D grade in Physical Education. Concentration area: Biodynamics of human movement.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELA ALUNA AMANDA PIAIA SILVATTI, E
ORIENTADA PELO PROF. DR. RICARDO MACHADO LEITE DE
BARROS.**



Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Campinas
2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
DULCE INES LEOCÁDIO DOS SANTOS AUGUSTO – CRB8/4991
BIBLIOTECA “PROF. ASDRUBAL FERREIRA BATISTA”
FEF - UNICAMP

Si38c	<p>Silvatti, Amanda Piaia, 1983- Calibração de câmeras para análises subaquáticas de movimentos / Amanda Piaia Silvatti. --Campinas, SP: [s.n], 2013.</p> <p style="text-align: center;">Orientador: Ricardo Machado Leite de Barros. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.</p> <p style="text-align: center;">1. Câmera-Calibração. 2. Exatidão. 3. Cinemática. 4. Análise tridimensional. 5. Sistema de análise de movimento. 6. Sistemas de imagens subaquáticas. 7. Nadadores. I. Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação Física. III. Título.</p>
-------	---

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Camera calibration for underwater analysis.

Varição acadêmica: Silvatti, A. P.

Palavras-chave em inglês:

Camera-Calibration

Accuracy

Kinematics

Three-dimensional analysis

Motion analysis system

Underwater imaging system

Swimmers

Área de Concentração: Biodinâmica do movimento humano.

Titulação: Doutor em Educação Física

Banca Examinadora:

Ricardo Machado Leite de Barros [Orientador]

Andre Luiz Felix Rodacki

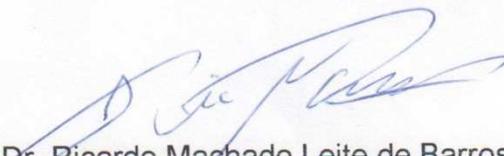
Claudio Alexandre Gobatto

Luis Eduardo Barreto Martins

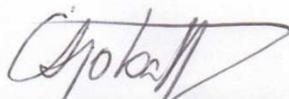
Marcos Duarte

Data da defesa: 07-02-2013

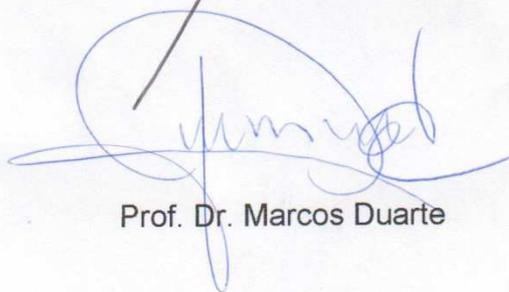
Programa de Pós-Graduação: Educação Física

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador



Prof. Dr. Claudio Alexandre Gobatto



Prof. Dr. Marcos Duarte



Prof. Dr. Luiz Eduardo Barreto Martins



Prof. Dr. Andre Luiz Felix Rodacki

Dedicatória

*Dedico este trabalho ao meu avô Antonio Piaia, que me ensinou e ainda ensina muito sobre o mundo;
ao meu marido, Gustavo Silveira Serra,
aos meus pais, Claudia e Ederaldo Silvatti, que me ensinaram que:*

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Breves (ao menos tentei que fossem) e sinceros.

Gostaria de começar com um poema de Manuel Bandeira que representa o que eu senti para escrever esses agradecimentos:

O último poema

Assim eu queria o meu último poema.

Que fosse terno dizendo as coisas mais simples e menos intencionais

Que fosse ardente como um soluço sem lágrimas

Que tivesse a beleza das flores quase sem perfume

A pureza da chama em que se consomem os diamantes mais límpidos

A paixão dos suicidas que se matam sem explicação...

Portanto, gostaria de agradecer, inicialmente, ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros pela orientação, sua dedicação, seus ensinamentos, seu profissionalismo, honestidade e principalmente pela paciência e tempo despendidos comigo durante este longo período em que convivemos (10 anos...).

Fica aqui também meu Muito Obrigado, ao meu “segundo” orientador, Prof. Pietro Cerveri, por ter me recebido na Itália, me co-orientado, ter confiado em meu trabalho, pela preocupação com a minha estadia em um país diferente do meu, ter possibilitado conhecer a sua família, ter me orientado de forma tão atenciosa, ter me ensinado a esquiar e me atualizado sobre a política da Itália semanalmente (*Grazie Mille*),

Também gostaria de agradecer aos membros da banca, por participarem e opinarem neste trabalho dando sua honrosa contribuição, em especial ao Prof. Dr. Claudio Gobatto, o qual também participou da minha formação como professora (Muito obrigada pela oportunidade de participar de um PED com você).

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos que passaram pelo LIB, afinal foram DEZ anos de laboratório... Tentarei citar todos: Miltinho, Rafael, Clodoaldo, Tiago, Pascual, Mário, Jerusa, Lorena, Felipe, Ju's, Aline, Angélica, Ana, Márcio, Karine, Feco, Marcelo, Marcel, Telles, Cláudio, Fábio, Bruno, Jana e Andréia por todo o tempo que estivemos juntos, pela presença nas coletas, pelo apoio nas indecisões, brincadeiras e momentos sérios, e o mais importante os Congressos...

Em especial gostaria de agradecer: à Jerusa, que ela pode não saber, mas sua seriedade e competência sempre me inspiraram.

Ao Telles, Marcel e Fábio (o que falar de você, hein? Valeu por tudo) companheiros de todos os meus trabalhos.

À minha amiga (irmã para alguns) Janaína que representa da melhor forma o sentido da palavra amizade, é claro que o Héber também faz parte dessa definição...

Todos vocês tenham a certeza de que levarei um pedacinho de vocês... Deixo a vocês um poema do Einstein de novo... Sentirei saudades...

Pode ser que um dia deixemos de nos falar...

Mas, enquanto houver amizade,

Faremos as pazes de novo.

Pode ser que um dia o tempo passe...

Mas, se a amizade permanecer,

Um de outro se há-de lembrar.

Pode ser que um dia nos afastemos...

Mas, se formos amigos de verdade,

A amizade nos reaproximará.

Pode ser que um dia não mais existamos...

Mas, se ainda sobrar amizade,

Nasceremos de novo, um para o outro.

Pode ser que um dia tudo acabe...

Mas, com a amizade construiremos tudo novamente,

Cada vez de forma diferente.

Sendo único e inesquecível cada momento

Que juntos viveremos e nos lembraremos para sempre.

Há duas formas para viver a sua vida:

Uma é acreditar que não existe milagre.

A outra é acreditar que todas as coisas são um milagre.

Para finalizar gostaria de agradecer a base da minha vida: minha família, quero que saibam que se sou o que sou hoje foi porque os tive ao meu lado Pai, Mãe, Grazzi, Vó e Vô, sem vocês eu não chegaria até aqui.

Agradeço ao meu marido Gustavo, que me acompanhou e me acompanha nessa loucura que é a vida acadêmica, e que me ajuda com todas as figuras dos meus trabalhos... Muito Obrigada pela paciência, compreensão, carinho, conforto, mas principalmente pela presença...

Agradeço também à Capes, CNPq e Fapesp pelo suporte às minhas pesquisas.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Obrigado!

SILVATTI, Amanda Piaia. **Calibração de câmeras para análises subaquáticas de movimentos**. 2013. 86f. Tese (Doutorado em Educação Física) - Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

RESUMO

Para análises subaquáticas de movimentos tridimensionais é necessário uma calibração precisa de grandes volumes. Métodos baseados em modelos lineares de câmeras são comumente utilizados na biomecânica e para isso faz-se necessário a construção, o transporte e a medição de estruturas rígidas, o que torna-se mais difícil quando volumes maiores estão envolvidos. Recentemente, métodos alternativos baseados em modelos não-lineares de câmeras, foram propostos para resolver este aspecto. Assim, os objetivos deste trabalho foram 1) avaliar a exatidão da reconstrução tridimensional fora e dentro da água utilizando o método proposto por Zhang (2000); 2) avaliar a exatidão dos métodos não-lineares para a calibração de câmeras propostos por Hatze, 1988, Cerveri, et al., 1998 e Zhang, 2000 para aplicações com câmeras submersas e os efeitos da variação da posição no volume de calibração sobre a exatidão de reconstrução tridimensional dos métodos e ressaltando, ainda as vantagens e desvantagens de cada método e 3) testar a aplicabilidade dos métodos não-lineares propostos por Cerveri et al., 1998 e Zhang, 2000 para a reconstrução da trajetória da mão de nadadores em diferentes nados. Para aquisição dos dados foi utilizado um sistema de análise cinemática (DVideo), que foi adaptado para aquisição de imagens submersa. O sistema consiste de computadores ligados em câmeras (Basler) para aquisição online de dados. Caixa-estanques especialmente desenvolvidas para o modelos das câmeras foram utilizadas para proteção e um *genlocker trigger* foi utilizado para a sincronização das câmeras. Tripés para sustentação e fixação das câmeras foram adaptados com ventosas para fixação no fundo da piscina. Para a correção da distorção foram implementados em Matlab os métodos não-lineares para a calibração de câmeras. Um teste de barra rígida foi usado para avaliação da exatidão e precisão. Os resultados mostraram que os métodos propostos por Cerveri et al., 1998 (1,16mm à 0,96mm) e Zhang, 2000 (0,73mm) são alternativas promissoras para análise tridimensional de movimentos subaquáticos. Ambas as metodologias apresentaram resultados com maior exatidão que os encontrados na literatura. Este fato ocorreu devido a uma melhor modelagem da distorção óptica que foi confirmada pela menor influência no erro relativo à posição do objeto no volume de aquisição. Quanto à flexibilidade e portabilidade em relação ao objeto de calibração, ambos os métodos usam objetos mais fáceis de construir e manipular do que os objetos tradicionalmente utilizados. O sistema para a análise tridimensional do movimento utilizando câmeras submersas mostrou-se ser adequado para aplicações subaquáticas. Uma vez que, os resultados aqui relatados podem ser imediatamente apreciados pelos treinadores, pois foi possível identificar simetria ou assimetria entre os dois lados, a variabilidade intra e inter-sujeitos em termos de padrões de movimento e concordância ou discordância com o modelo teórico. Importante ressaltar que existe a possibilidade de extensão da análise para os diferentes segmentos corporais e o sistema e os métodos para a calibração de câmeras apresentados neste trabalho podem ser utilizado para qualquer esporte ou atividade realizada na água, como por exemplo, hidroginásticas ou práticas de reabilitação.

Palavras-Chaves: Câmera-Calibração, Exatidão, Cinemática, Análise tridimensional, Sistema de análise de movimento, Sistemas de imagens subaquáticas, Nadadores.

SILVATTI, Amanda Piaia. Camera calibration for underwater analysis. 2013. 86f. Tese (Doutorado em Educação Física) - Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

ABSTRACT

In order to perform a three-dimensional motion analysis in underwater conditions is necessary to calibrate accurately large volumes. Methods based on linear camera models are commonly used in biomechanics and this requires to construct, to transport and to measurement rigid structures, which becomes more difficult when larger volumes are involved. Recently, alternative methods based on nonlinear camera models have been proposed to address this aspect. The aims of this study were 1) to evaluate the accuracy of 3D reconstruction out and underwater using the method proposed by Zhang (2000); 2) to evaluate the accuracy of nonlinear camera calibration methods proposed by Hatze, 1988, Cerveri, et al., 1998 and Zhang, 2000 for underwater applications using submerged cameras and the effects of object position in the acquisition volume on the accuracy of 3D reconstruction methods, highlighting the advantages and disadvantages of each method, and 3) to test the applicability of the nonlinear methods proposed by Cerveri et al., 1998 and Zhang, 2000 for the reconstruction of the swimmers hand trajectory in different swims styles. For data acquisition, we used a kinematic analysis system (DVideo), which was adapted for underwater conditions. The system consists of cameras (Basler) connected in computers for online data acquisition. Waterproof housings were specially designed to protect the cameras and a genlocker trigger was used to synchronize the cameras. Tripods to support and to fix the cameras were adapted with suction cups and were used to fix them on the swimming pool floor. In order to perform the distortion correction the nonlinear camera calibration methods were implemented in Matlab software. A rigid bar test was used to assess the accuracy and precision. The results showed that the methods proposed by Cerveri et al. 1998 (1.16 mm to 0.96 mm) and Zhang, 2000 (0.73 mm) are promising alternatives for 3D underwater motion analysis. Both methodologies presented results with greater accuracy than those found in the literature. This occurred due to an improvement of the distortion modeling and that was confirmed by the smallest influence of the object position on the error values. Related to the flexibility and portability of the calibration object, both methods use objects easier to build and manipulate than the objects traditionally used. The 3D motion analysis system using submerged cameras showed to be suitable for underwater applications. The results reported here can be immediately appreciated by coaches, because it was possible to identify symmetry or asymmetry between the two sides, the variability within and between subjects in terms of movement patterns and agreement or disagreement with the theoretical model. Important to emphasize that there is the possibility of extending the analysis for different body segments and the system and the camera calibration methods presented in this work can be used for any sport or activity performed in water, such as hydro gymnastic or rehabilitation practices.

Keywords: Camera-Calibration, Accuracy, Kinematics, Three-dimensional analysis, Motion analysis system, Underwater imaging system, Swimmers

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo perfeito de câmera – Pinhole.	20
Figura 2	Exemplo de objeto rígido utilizado para determinação do volume de calibração, utilizada no sistema proposto por Kwon (1994). (fonte: http://www.kwon3d.com/).	23
Figura 3	Exemplo de fios de prumos utilizados para a calibração das câmeras.	24
Figura 4	Representação analítica do deslocamento de um ponto contido no plano ideal para o plano real devido à distorção, segundo o modelo de Wang et al. (2008).	25
Figura 5	Exemplo de distorção em barril, representada pelo desenho em vermelho.	26
Figura 6	Exemplo de distorção em almofada representada pelo desenho em vermelho.	26
Figura 7	Diferentes configurações do objeto de calibração plano utilizado na metodologia proposta por Zhang (2000).	32
Figura 8	Objetos utilizados para determinação do sistema de referência.	33
Figura 9	Exemplo de movimento e barra utilizada para refinamento dos parâmetros das câmeras com um marcador. (fonte: http://www.iotracker.com/index.php?q=calibration).	33
Figura 10	Exemplo de barra utilizada para refinamento dos parâmetros das câmeras com dois marcadores. (fonte: http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis/tema-wand-calibration---automotive.aspx).	34
Figura 11	Objeto Planar de calibração similar a um tabuleiro de xadrez que foi utilizado para a calibração das câmeras.	37
Figura 12	Posicionamento das câmeras e o volume de aquisição definido.	38
Figura 13	Barra rígida utilizado para avaliação da exatidão.	38
Figura 14	Câmeras Basler dentro da caixa-estanque especialmente desenvolvida.	40
Figura 15	Câmera Basler fc602A, utilizadas no sistema e dentro da caixa-estanque.	40
Figura 16	Objeto planar de calibração similar a um tabuleiro de xadrez utilizado para aquisições subaquáticas.	41
Figura 17	Setup do sistema de aquisição.	46
Figura 18	Erros do método 1 (A), método 3 (B) e método 2 (C), em função dos quadros adquiridos. A distribuição do erro relativo à distância calculada em 700 quadros da barra rígida e o erro sobreposto a um marcador foram exibidos em (D) método 1, (E) método 3 e (F) método 2.	51

Figura 19	Erro de reconstrução tridimensional em função da posição da barra rígida no volume de aquisição (longitudinal (X), transversal (Y) e vertical (Z)) em cada método de calibração de câmera (método 1, Fig. 19A, 19B, 19C; método 2, Fig. 19D, 19E, 19F, método 3, Fig. 19G, 19H, 19I).	53
Figura 20	Protocolos dinâmico para os métodos propostos por Zhang, 2000 (a) e Cerveri et al., 1998 (b).	63
Figura 21	Resultado gráfico da medição manual do movimento do dedo médio direito (vermelho) e esquerdo (amarelo) (a) e suas trajetórias tridimensionais correspondentes (b).	65
Figura 22	Comprimento da barra rígida reconstruído com os três conjuntos de calibração de parâmetros (DLT em preto, WC2 em azul e PC em vermelho) em função de quadros, juntamente com o comprimento da barra nominal (D: 291,89 milímetros).	67
Figura 23	Trajетórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Borboleta). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).	69
Figura 24	Trajетórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Peito). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).	71
Figura 25	Exemplo de figura com as trajetórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Crawl). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores das variáveis comparados com os encontrados na literatura (mm).	39
Tabela 2 -	Comparação procedimentos realizados para cada método.	48
Tabela 3 -	Resultados do método 1, 2 e ambos os testes do método 3 (8 e 16 pontos controle (CP)). Valor nominal da distância do marcador: 291,89 milímetros. Os valores são expressos em milímetros (mm).	50
Tabela 4 -	Síntese das vantagens e desvantagens de todos os métodos.	56
Tabela 5 -	Resultados da calibração proposta por Cerveri et al., 1998 com dois parâmetros (WC2), com 4 parâmetros (WC4), da calibração proposta por Zhang (2000) usando 16 pontos de controle (PC) e da DLT clássica no teste de barra rígida em movimento.D: 291.89 mm. Valores em milímetros (mm).	66

SUMÁRIO

Introdução e Justificativa.....	14
Objetivos	18
1.Capítulo I - Fundamentação Teórica - Calibração de Câmeras.....	19
Modelos Lineares de Câmeras.....	19
Método Linear - DLT	20
Objetos de Calibração Utilizados no Método Linear	23
Modelos Não-Lineares de Câmeras.....	24
Métodos Não-Lineares.....	29
Método proposto por Hatze, MDLT (1988).....	29
Método proposto por Zhang (2000).....	30
Método proposto por Cerveri (1998).....	30
Objetos de Calibração Utilizados nos Métodos Não- Lineares.....	32
Objeto planar	32
Barra rígida	32
2.Capítulo II – Avaliação da Exatidão 3D fora e dentro da água usando o método proposto por Zhang	35
Introdução	35
Teste para avaliação da exatidão - fora da água	36
Método.....	36
Análise da Exatidão	38
Resultados.....	39
Discussão.....	39
Conclusão.....	39
Testes para avaliação da exatidão com câmeras submersas	40
Método	40
Análise da Exatidão	42
Resultados e discussão	42
Conclusão.....	43
3.Capítulo III – Comparação de diferentes métodos de calibração de câmeras para aplicações subaquáticas	44

Introdução	44
Método.....	45
Teste de Exatidão	49
Resultados.....	49
Discussão.....	54
Conclusão.....	57
4.Capítulo IV - Análise tridimensional dos movimentos subaquáticos usando câmeras de vídeo submersas: análise da exatidão e da reconstrução de trajetórias.....	58
Introdução	58
Método	61
Resultados.....	66
Discussão.....	74
Conclusão.....	77
Considerações Finais	78
Referências	80

Introdução e Justificativa

A natação é um esporte que exige coordenação, velocidade e força do corpo humano, evidenciando uma alta relação da mecânica, ou técnica dos movimentos dos segmentos corporais, com o desempenho do atleta. A evolução do desempenho dos nadadores em competições internacionais exige que métodos cada vez mais sofisticados de análise do movimento sejam desenvolvidos, para uma melhor compreensão da mecânica do nado, o que possibilita encontrar o melhor desempenho e eficiência da técnica realizada pelo atleta.

Para tanto, sistemas de análise tridimensional do movimento em condições subaquáticas têm sido utilizados para uma avaliação individual e quantitativa de diferentes variáveis relacionadas com o desempenho dos nadadores (SCHLEIHAUF et al., 1983; CAPPAERT et al., 1995; SANDERS et al., 1995; PAYTON; BARTLETT, 1995; VILAS-BOAS et al., 1997; VEZOS et al., 2007; SUITO et al. 2008). Porém, em condições subaquáticas questões específicas relativas à aquisição dos dados, o protocolo de marcação utilizado para a definição dos pontos de interesse nos atletas, a medição dos dados e a calibração das câmeras devem ser solucionadas.

A primeira questão a ser solucionada é a proteção das câmeras do contato com a água, e para isso, três principais soluções foram propostas. Uma das soluções propostas foi a utilização de câmeras posicionadas atrás de janelas construídas nas paredes da piscina, porém o posicionamento das câmeras utilizadas sempre está limitado pela quantidade de janelas e estas, não necessariamente, podem fornecer uma visão adequada dos nadadores, dificultando uma análise dos movimentos (LAUDER et al., 2001; LAUDER; DABNICHKI, 2005; VEZOS et al., 2007). Outra solução, foi o uso de sistemas de periscópios, que, normalmente, utilizam uma distribuição interna dos espelhos de uma forma na qual a câmera capture, na parte superior da tela, os movimentos no meio aéreo e, na parte inferior da tela, os movimentos subaquáticos, ou ainda podem ser utilizados os periscópios inversos para aquisição somente do movimento realizado embaixo da água. (HAY; GEROT, 1991; YANAI, 1996; YANAI et al., 2000; YANAI; HAY, 2000; YANAI, 2002; YANAI, 2004; GOURGOULIS et al., 2007). A utilização de caixa-estaque para a vedação das câmeras é a última solução proposta, e seu uso possibilita a aplicação da

maioria dos métodos propostos para os sistemas de análise de movimentos tridimensionais utilizados em laboratório e, ainda apresenta uma maior flexibilidade em relação ao posicionamento das câmeras utilizadas, que podem estar longe ou próximas do atleta, dependendo do objetivo de análise (SANDERS et al., 1995; CAPPAERT et al., 1995; PAYTON; BARTLETT, 1995; LAUDER et al., 2001; LAUDER; DABNICHKI, 2005; PSYCHARAKIS et al., 2005; PSYCHARAKIS et al., 2007; PSYCHARAKIS et al., 2008; SUITO et al., 2008).

Para a análise cinemática, o corpo humano pode ser modelado de diversas formas, desde um ponto no espaço até a combinação de diversos pontos em diferentes segmentos. Normalmente são utilizados marcadores fixados na pele do sujeito nos membros superiores e inferiores (SANDERS, 2007). Estes marcadores são utilizados para identificar referências ósseas ou pontos de interesses e definir um modelo de marcação e orientação dos segmentos do corpo, que é dependente do objetivo do trabalho a ser realizado. O uso de marcadores fixados na pele implica em uma boa visualização desses pontos na imagem para a medição dos dados e para isso, foram desenvolvidos softwares, que identificam de forma automática, semi-automática ou manual do ponto de interesse. Recentemente, Ceseracciu et al., (2011) propuseram uma outra solução para a modelagem do corpo humano aplicada na análise de nadadores, o método proposto baseia-se na extração de silhuetas dos sujeitos para realizar um ajuste do modelo cinemático pré-definido.

A calibração das câmeras é um procedimento realizado para a determinação dos parâmetros intrínsecos (distância focal, pontos principais, fator de escala de pixel e parâmetros de distorção) e extrínsecos (localização e orientação) de cada câmera utilizada. Este procedimento está diretamente relacionado com a exatidão e a precisão dos dados obtidos pelos sistemas de análises cinemáticas tridimensionais de movimentos.

A exatidão do sistema é definida pela avaliação do grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro esperado (Vocabulário Internacional Metrologia, 2012) e a precisão é uma avaliação dos indicadores de incertezas relacionadas às medidas obtidas (Vocabulário Internacional Metrologia, 2012). Para a avaliação da performance dos sistemas (exatidão e precisão) diferentes testes podem ser realizados, que usualmente fazem uso de um objeto rígido (dois marcadores fixados), que é movimentado de diferentes

formas no volume de aquisição (*Pedulum test, full volume test, walking test e MAL test*, CHIARI et al., 2005). Normalmente, é calculado o erro de medição, que é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência para a avaliação do grau de exatidão, e variáveis como dispersão, desvio-padrão, variância ou coeficiente de variação, sob condições de medição especificadas são utilizados para a avaliação do grau de precisão.

Para a aplicação adequada nas estimativas cinemáticas segmentares e articulares é essencial o conhecimento de quanto exato o sistema é. A falta de um controle da exatidão dos sistemas pode refletir em uma menor confiabilidade (uma indicação quantitativa da qualidade dos resultados) relacionada à reconstrução da cinemática articular, que é um dos objetivos finais da análise de movimentos humanos.

A maioria dos sistemas propostos para a análise cinemática tridimensionais em aplicações subaquáticas utiliza um modelo linear (DLT) para a calibração das câmeras. Com respeito à avaliação da performance destes sistemas, Yanai (1996) encontrou um erro médio absoluto de 5,12mm, já o sistema APAS foi avaliado e o erro resultante foi de 5,92mm, sendo que o eixo com o maior erro foi o longitudinal, 4,64 mm (GOURGOULIS et al., 2008). Machtsiras e Sanders, (2009) avaliaram um sistema chamado PTZ digital e o valor de RMS encontrado foi de 5,2mm. Hatze (1988) propôs um método de calibração não-linear, no qual foram modeladas as distorções ópticas e acrescentadas nas equações da DLT. Kwon et al. (1999) utilizaram este método de calibração em aplicações subaquáticas, porém os resultados de exatidão não melhoraram significativamente. Recentemente, abordagens alternativas baseadas em um modelo de câmera não-linear foram propostas e valores submilímetro de erro de medição foram encontrados em aplicações fora da água (CERVERI et al., 1998; ZHANG, 2000; PRIBANIĆ; STURM; CIFREK, 2008).

Métodos de calibração não-linear permitem o uso de câmeras com lentes grande angulares, pois estes métodos são baseados em um modelo de câmera não-linear, que modela e corrige as distorções ópticas envolvidas pelo uso deste tipo de lente, possibilitando aumentar o volume de aquisição obtido pelas câmeras fixas, e conseqüentemente, uma análise mais completa dos nadadores.

Contudo, os métodos de calibração não-linear de câmeras, que se mostraram promissores quando utilizados em condições de laboratório, não foram avaliados para aplicações com câmeras subaquáticas.

Assim, este trabalho objetivou 1) avaliar e comparar a exatidão de reconstrução tridimensional para os métodos que usam modelos de calibração não-lineares: a) Hatze (1988), b) Cerveri et al., (1998) e c) Zhang (2000) e o método linear tradicional (DLT) em aplicações com câmeras subaquáticas, ressaltando, ainda as vantagens e desvantagens de cada método, e 2) avaliar a aplicabilidade do uso de câmeras de vídeo submersas e dos métodos de calibração não-lineares propostos por Zhang (2000) e Cerveri et al., (1998) para a análise tridimensional de movimentos subaquáticos.

A apresentação do trabalho foi dividida em quatro capítulos. No primeiro capítulo será mostrada a fundamentação teórica do procedimento de calibração de câmeras. Este será dividido em: uma explicação geral sobre o procedimento de calibração de câmeras, os modelos de câmeras: linear e não-linear, os métodos baseados em cada modelo de câmera e os objetos de calibração utilizados para o procedimento de calibração das câmeras encontrados na literatura.

Os capítulos seguintes foram estruturados na forma dos artigos científicos. Assim, no segundo capítulo será apresentada a avaliação da exatidão da reconstrução tridimensional fora e dentro da água utilizando o método proposto por Zhang (2000). Primeiramente o método foi testado e avaliado em condições de laboratório com um volume de aquisição maior que o comumente reportado na literatura. Posteriormente, o mesmo método foi testado e avaliado para a aplicação com câmeras.

No terceiro capítulo serão apresentados os resultados em relação à avaliação da exatidão dos métodos não-lineares propostos por Hatze (1988), Cerveri, et al., (1998) e Zhang, (2000) com a utilização de câmeras submersas e os efeitos da variação da posição no volume de calibração sobre a exatidão de reconstrução tridimensional dos métodos e ressaltando as vantagens e desvantagens de cada método.

No quarto capítulo será apresentada a aplicabilidade dos métodos não-lineares propostos por Cerveri et al., (1998) e Zhang, (2000) para a reconstrução da trajetória da mão de nadadores em diferentes nados.

O trabalho será finalizado com a apresentação das considerações finais e as perspectivas futuras.

Objetivos

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar e comparar diferentes métodos para calibração de câmeras em condições subaquáticas. Os objetivos específicos foram:

1. Avaliar a exatidão da reconstrução tridimensional fora e dentro da água utilizando o método proposto por Zhang (2000).

2. Avaliar a exatidão dos métodos não-lineares para a calibração de câmeras propostos por Hatze, (1988), Cerveri, et al., (1998) e Zhang, 2000 para aplicações com câmeras submersas e os efeitos da variação da posição no volume de calibração sobre a exatidão de reconstrução tridimensional dos métodos e ressaltando as vantagens e desvantagens de cada método.

3. Testar a aplicabilidade dos métodos não-lineares propostos por Cerveri et al., (1998) e Zhang, (2000) para a reconstrução da trajetória da mão de nadadores em diferentes nados.

1. Capítulo I

Fundamentação Teórica

Calibração de Câmeras

Calibração de câmeras é um processo realizado para determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras. Parâmetros intrínsecos estão associados às características físicas internas de uma câmera, como a geometria de montagem da câmera, as características e configuração das lentes, as características do elemento sensor, a distância focal, as coordenadas do centro da imagem, o tamanho do pixel da imagem e os parâmetros de distorção da imagem. Parâmetros extrínsecos são definidos pela posição tridimensional e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas do mundo.

O procedimento de calibração das câmeras precisa ser realizado para encontrar os parâmetros das câmeras e permitir uma relação matemática entre as coordenadas 3D de um ponto no espaço e as coordenadas 2D de suas projeções nas imagem gravadas pela câmera.

Modelos Lineares de Câmeras

A utilização de um método linear de calibração de câmeras implica em definir que a câmera possui um caso perfeito de lente (modelo pinhole, FIGURA 1). Neste modelo de câmera, todos os raios de luz passam por um único ponto, o centro óptico da câmera. Assume-se, então, que a câmera produz uma projeção central perfeita, na qual os raios de luz passam através da lente da câmera e são projetados através de um único ponto, e que a imagem no plano focal da câmera é uma superfície planar rígida. Assumindo que não existem desvios nos raios de luz, podemos fazer uma relação matemática baseada no princípio de colinearidade entre o objeto, o centro óptico da câmera e o ponto de projeção na imagem, ou seja, estes três pontos estão posicionados de uma forma que é possível traçar uma reta que contenha todos eles.

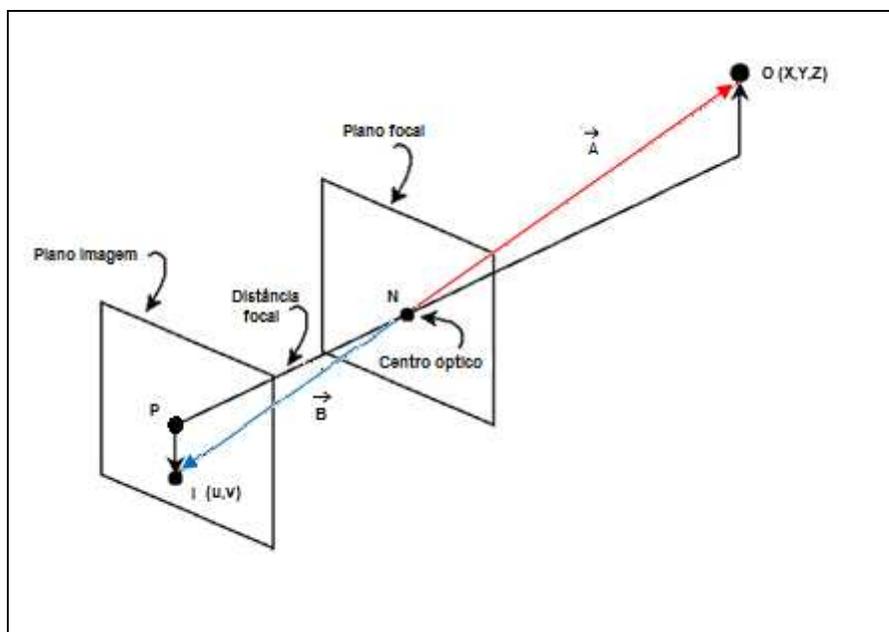


Figura 1 – Modelo perfeito de câmera – Pinhole.

Método Linear – DLT

Um dos métodos mais utilizados para a calibração das câmeras e a reconstrução tridimensional modela linearmente a relação do objeto no espaço e a imagem de tela. Este método foi desenvolvido por Abdel-Aziz e Karara (1971), denominado de Transformação Linear Direta (Direct Linear Transformation - DLT) e baseia-se no princípio da colinearidade. O objetivo do método DLT é realizar uma transformação linear direta das coordenadas do sistema de referência de calibração para as coordenadas no espaço-objeto. Para explicação das equações da DLT serão utilizadas as considerações sobre este método feitas por Kwon (2000).

Para explicação da DLT, primeiramente definiremos dois sistemas de coordenadas, um sistema de coordenadas associado ao objeto no espaço, denominado sistema de coordenadas global (XYZ) e um sistema de coordenadas associado ao plano de imagem (UV). Assim, as coordenadas de um objeto no espaço (ponto O) no sistema de coordenadas global serão (x,y,z) , e as coordenadas da projeção do objeto no plano da imagem (ponto I) escritas em relação ao sistema de coordenadas do plano da imagem serão

(u,v) (ref. FIGURA 1). O centro de projeção da câmera será o ponto N, e as suas coordenadas associadas ao sistema de coordenadas global serão (x_o, y_o, z_o) . A partir do princípio da colinearidade temos que os três pontos: O (objeto no espaço), I (projeção do objeto no plano de imagem com coordenadas) e N (centro de projeção da câmera) são colineares (ref. FIGURA 1).

Assim, se for traçado um vetor \vec{A} com origem no ponto N e extremidade no ponto O, as coordenadas deste vetor \vec{A} serão $(x-x_o, y-y_o, z-z_o)$. O eixo principal será definido pela linha a partir do ponto N até sua projeção no plano de imagem, que é perpendicular ao plano da imagem e sua intersecção com o plano da imagem define o ponto principal (ponto P). A distância focal d é a distância entre os pontos N e P (ref. FIGURA 1).

Para obtermos uma referência tridimensional dos pontos I, N e P, um eixo W deve ser adicionado no plano da imagem (U,V). Se for traçado agora um vetor \vec{B} com extremidade no ponto I e origem no ponto N teremos as coordenadas $(u-u_o, v-v_o, d)$.

Como os pontos O, N e I são colineares, os vetores \vec{A} e \vec{B} estão em uma mesma linha reta, assim é possível fazer uma relação entre eles: $\vec{B} = c\vec{A}$, onde c é um valor escalar.

Os vetores \vec{A} e \vec{B} foram originalmente descritos no sistema de coordenadas global (X,Y,Z) e no sistema de coordenadas do plano de imagem (U,V), respectivamente. Para relacionar diretamente as coordenadas é necessário descrevê-los em um quadro de referência comum. Uma boa maneira de fazer isso é transformar o vetor \vec{A} no sistema de coordenadas do plano da imagem substituindo:

$$\begin{bmatrix} u-u_o \\ v-v_o \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-x_o \\ y-y_o \\ z-z_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde $\begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix}$ é a matriz de rotação do sistema de coordenadas global

para o sistema de coordenadas do plano de imagem.

Como as coordenadas da imagem, no plano de imagem, são expressas em pixels, temos que fazer uma relação entre essa unidade com a unidade do objeto no espaço evidenciando a razão de aspecto.

$$\begin{aligned} u - u_0 &= \lambda_u (u - u_0) \\ v - v_0 &= \lambda_v (v - v_0) \end{aligned} \quad (2)$$

λ_u, λ_v = Fatores de conversão da unidade para o eixo U e V , respectivamente.

As equações 1e 2, podem ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} u - u_0 &= -\frac{d}{\lambda_u} \frac{r11(x - x_0) + r12(y - y_0) + r13(z - z_0)}{r31(x - x_0) + r32(y - y_0) + r33(z - z_0)} \\ v - v_0 &= -\frac{d}{\lambda_v} \frac{r21(x - x_0) + r22(y - y_0) + r23(z - z_0)}{r31(x - x_0) + r32(y - y_0) + r33(z - z_0)} \end{aligned} \quad (3)$$

Considerando:

$$\begin{aligned} [d_u, d_v] &\equiv \left[\frac{d}{\lambda_u}, \frac{d}{\lambda_v} \right] & D &\equiv -(x_0 r31 + y_0 r32 + z_0 r33) \\ L1 &= \frac{u_0 r31 - d_u r11}{D} & L5 &= \frac{v_0 r31 - d_v r21}{D} & L9 &= \frac{r31}{D} \\ L2 &= \frac{u_0 r32 - d_u r12}{D} & L6 &= \frac{v_0 r32 - d_v r22}{D} & L10 &= \frac{r32}{D} \\ L3 &= \frac{u_0 r33 - d_u r13}{D} & L7 &= \frac{v_0 r33 - d_v r23}{D} & L11 &= \frac{r33}{D} \\ L4 &= \frac{(d_u r11 - u_0 r31)x_0 + (d_u r12 - u_0 r32)y_0 + (d_u r13 - u_0 r33)z_0}{D} \\ L8 &= \frac{(d_v r21 - v_0 r31)x_0 + (d_v r22 - v_0 r32)y_0 + (d_v r23 - v_0 r33)z_0}{D} \end{aligned}$$

Chegamos às equações:

$$\begin{aligned} u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\ v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

Onde parâmetros L_1 a L_{11} refletem a relação entre o objeto do espaço e a imagem no plano da imagem. Logo, cada câmera possui seu próprio conjunto de 11 parâmetros de transformação. Neste método não há uma separação entre parâmetros

intrínsecos e extrínsecos, os 11 parâmetros encontrados precisam ser reescritos para encontrar sua relação física. Assim, são necessários onze parâmetros para a calibração de cada câmera. No mínimo seis pontos de referência com coordenadas conhecidas no sistema de coordenadas global e no sistema de coordenadas no plano da imagem, são necessários para resultar em um sistema de doze equações lineares independentes e onze incógnitas.

Objetos de Calibração Utilizados no Método

Linear

Para a delimitação do volume calibrado no método da DLT, tradicionalmente são utilizados objetos rígidos (FIGURA 2) ou ainda fios de prumos (FIGURA 3) com diferentes quantidades e distribuição de pontos de controle. Porém, quando grandes volumes de aquisição estão envolvidos, a construção de forma acurada, a manipulação e transporte são dificultados.



Figura 2 - Exemplo de objeto rígido utilizado para determinação do volume de calibração, utilizada no sistema proposto por Kwon (1994).

Fonte: <http://www.kwon3d.com/>.

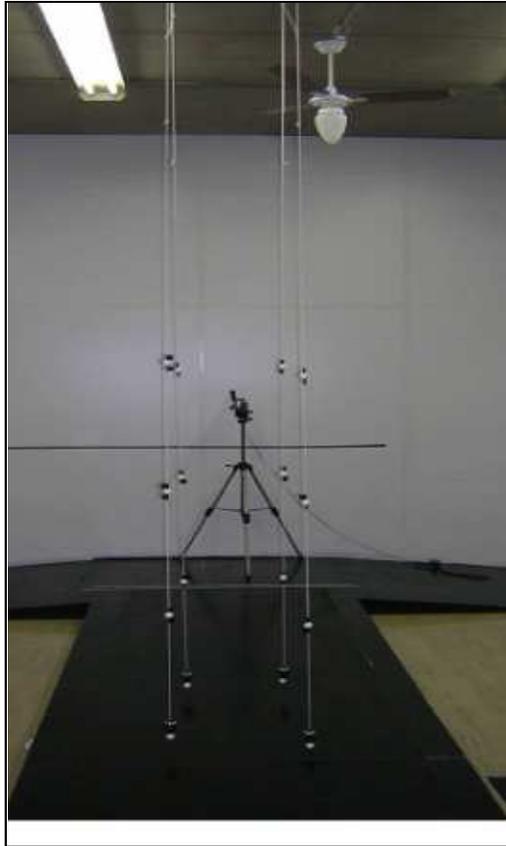


Figura 3 – Exemplo de fios de prumos utilizados para a calibração das câmeras.

Modelos Não-Lineares de Câmeras

A distorção óptica é um desvio na projeção linear, ou seja, as linhas retas na cena não permanecem retas na imagem, e é uma forma de aberração óptica. Como podemos visualizar na Figura 4, o ponto P_c é o ponto em relação ao sistema de coordenadas 3d (X_c , Y_c e Z_c), o ponto P_i seria o ponto sem nenhuma distorção, P_d seria o ponto distorcido e P_r o ponto distorcido no plano real do sensor da câmera que sofre uma rotação ϑ e ψ em relação ao plano ideal x e y .

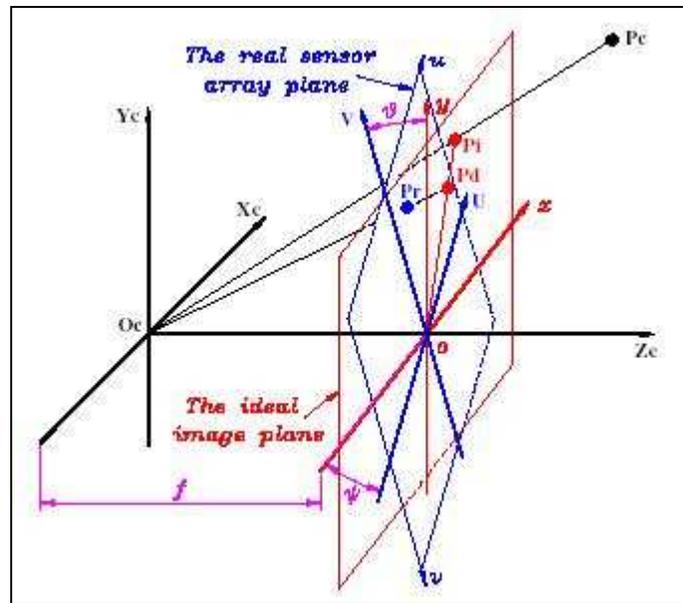


Figura 4 - Representação analítica do deslocamento de um ponto contido no plano ideal para o plano real devido à distorção, segundo o modelo de Wang et al. (2008).

A distorção óptica pode ser irregular ou seguir padrões, mas a mais comum é a distorção radial. Esta é causada pelo fato que objetos com diferentes distâncias angulares dos eixos das lentes serão submetidos a diferentes aumentos, quanto mais longe do centro da imagem maior será a distorção.

A distorção radial divide-se em: barril, na qual a ampliação da imagem diminui com a distância a partir do eixo óptico. O efeito visual é que a imagem é mapeada em torno de uma esfera. Lentes *Fisheye*, a qual leva em consideração visões hemisféricas, utiliza este tipo de distorção como um meio para mapear um plano do objeto amplo (FIGURA 5).

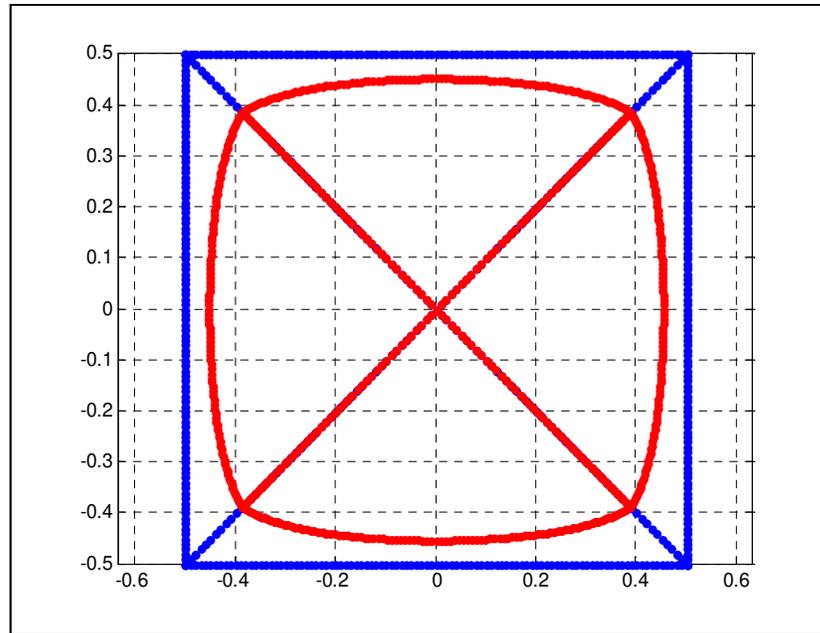


Figura 5 – Exemplo de distorção em barril, representada pelo desenho em vermelho.

A distorção em almofada amplia com o aumento da distância do eixo óptico. O efeito visual é que as linhas que não passam no centro da imagem são curvadas para dentro, em direção ao centro da imagem. Na fotografia esta aberração é normalmente vista em lentes de telefoto (FIGURA 6).

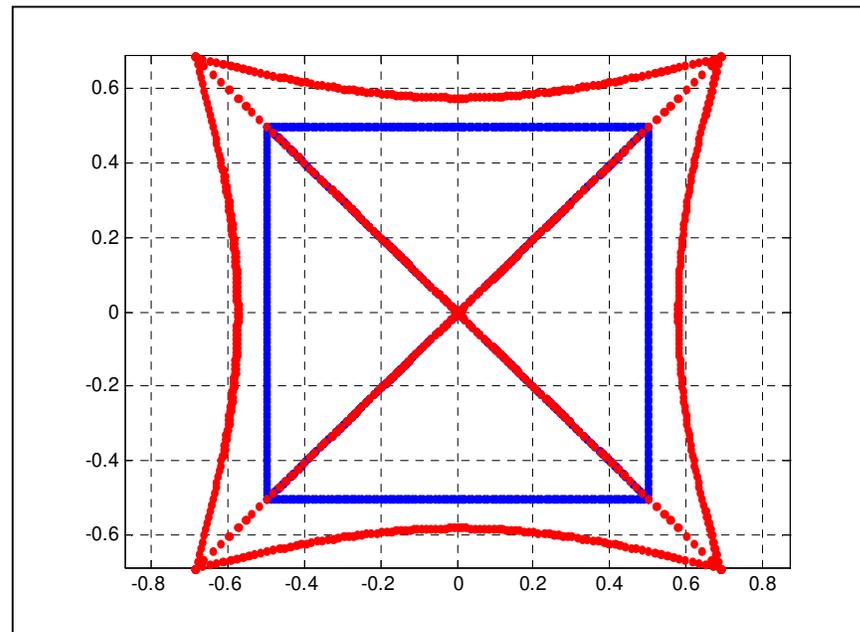


Figura 6 – Exemplo de distorção em almofada representada pelo desenho em vermelho.

Existem também outros dois parâmetros relacionados à distorção. A descentralização, que é causada pelo fato de que os centros ópticos de lentes múltiplas não são perfeitamente alinhados com o centro da câmera e o prisma fino, que é causado pela imperfeição das lentes, causado pelo design, fabricação, ou montagem da câmera. Segundo Lei, Hendriks e Katsaggelos, 2004 o prisma fino é a que menos afeta a erro de medição final, pois esta componente somente causa distorção radial e tangencial adicional.

Heikkila e Silven (1997) serão utilizados para facilitar o entendimento dos cálculos para a obtenção dos parâmetros de distorção. Considere que \mathbf{P} seja um ponto no espaço, com coordenadas $\mathbf{XX}_c = [\mathbf{X}_c; \mathbf{Y}_c; \mathbf{Z}_c]$, no quadro de referência da câmera. Este ponto deve ser projetado no plano da imagem de acordo com os parâmetros intrínsecos (\mathbf{f}_c , \mathbf{cc} , \mathbf{alpha}_c , \mathbf{kc}). Seja \mathbf{x}_n a projeção da imagem, considerando que todos os raios de luz atravessem por um único ponto como no caso da câmera perfeita (*pinhole*), e que o centro óptico da câmera corresponde ao eixo Z do sistema de coordenadas associado à câmera, temos que:

$$\mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Agora, com $r^2 = x^2 + y^2$

Incluindo a distorção de lentes, um novo ponto normalizado \mathbf{x}_d é definido:

$$\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6)\mathbf{x}_n + d\mathbf{x}$$

No qual $d\mathbf{x}$ é o vetor da distorção e onde kc são os parâmetros de distorção.

$$d\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2kc(3)xy + kc(4)(r^2 + 2x^2) \\ kc(3)(r^2 + 2y^2) + 2kc(4)xy \end{bmatrix}$$

A coordenada em pixel $\mathbf{x}_{\text{pixel}} = [x_p; y_p]$ da projeção de \mathbf{P} no plano da imagem com a distorção será:

$$\begin{cases} x_p = fc(1)(x_d(1) + \alpha_c * x_d(2)) + cc(1) \\ y_p = fc(2)x_d(2) + cc(2) \end{cases}$$

Sendo KK a matriz de parâmetros intrínsecos

$$KK = \begin{bmatrix} fc(1) & \alpha_c * fc(1) & cc(1) \\ 0 & fc(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Temos que:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = KK \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Considerando agora X como um ponto no mundo real (X, Y, Z) , x_d um ponto (distorcido) da imagem (u, v) , x_u um ponto sem distorção da imagem (x, y) , F_d a função de distorção e KK é a matriz de parâmetros intrínsecos, podemos determinar os parâmetros de distorção de duas formas:

Direto: 3D – imagem

$$x_d = K F_d \left([R|T] X \right)$$

inverso: imagem – imagem

$$\left(K K^{-1} x_d \right) = F_d [R|T] X$$

Métodos Não-Lineares

Método proposto por Hatze, MDLT (1988)

Este método foi proposto por Hatze (1988) e é baseado no método proposto por Abdel-Aziz e Karara (1971 DLT), porém são incluídos os parâmetros de distorção óptica nas equações:

$$\begin{aligned} x_i^k - \Delta u &= \frac{L_1^k X_i + L_2^k Y_i + L_3^k Z_i + L_4^k}{L_9^k X_i + L_{10}^k Y_i + L_{11}^k Z_i + 1} \\ y_i^k - \Delta v &= \frac{L_5^k X_i + L_6^k Y_i + L_7^k Z_i + L_8^k}{L_9^k X_i + L_{10}^k Y_i + L_{11}^k Z_i + 1} \end{aligned} \quad (6)$$

Onde x_i^k e y_i^k são as coordenadas de tela do i -ésimo ponto do sistema de referências, seus valores são dados em *pixels* e para cada câmera k . X_i , Y_i e Z_i são as coordenadas espaciais do i -ésimo ponto de referência em relação a um Sistema de Coordenadas Global (SCG) $OXYZ$. L_h^k ($h=1,\dots,11$) são os 11 parâmetros (sem significado físico) da transformação para a k -ésima câmera. E Δu e Δv são as distorções ópticas e podem ser expressas por:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \xi(L_{12}^k r^2 + L_{13}^k r^4 + L_{14}^k r^6) + L_{15}^k (r^2 + 2\xi^2) + L_{16}^k \xi\eta \\ \Delta v &= \eta(L_{12}^k r^2 + L_{13}^k r^4 + L_{14}^k r^6) + L_{15}^k \eta\xi + L_{16}^k (r^2 + 2\eta^2) \\ \xi &= x_i^k - x_{0i}^k \\ \eta &= y_i^k - y_{0i}^k \\ r^2 &= \xi^2 + \eta^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Onde L_{12}^k a L_{14}^k são os parâmetros relacionados à distorção radial e L_{15}^k e L_{16}^k são os parâmetros relacionados à descentralização. x_{0i}^k e y_{0i}^k são as coordenadas de tela do ponto principal.

A solução destas equações é dada pelo uso do método de mínimos quadrados. Para obter os parâmetros DLT e os parâmetros adicionais usando o método dos mínimos quadrados, o número de equações deve ser maior que o número de incógnitas (superdeterminado). Uma vez que cada ponto controle fornece duas equações, o número

mínimo de pontos de controle necessários são seis para obter L_{11} e L_{12} , sete pontos para obter L_{11} a L_{14} e oito para obter de L_{11} a L_{16} .

Método proposto por Zhang (2000)

O método proposto por Zhang (2000) baseia-se em uma transformação projetiva, ou homografia, entre o plano do objeto de calibração e o plano da imagem. Assim, as coordenadas bidimensionais em tela e as coordenadas tridimensionais dos pontos (cantos) estão relacionadas segundo:

$$s(x, y, 1) = H(X, Y, 1) \quad (8)$$

A partir de homografias H 's, obtidas das diferentes posições do objeto de calibração, são calculados os parâmetros intrínsecos e os parâmetros extrínsecos. Através da determinação de uma solução analítica (*closed-form solution*), obtêm-se uma aproximação inicial desses parâmetros, seguida de um refinamento não-linear baseado no critério de máxima verossimilhança (*maximum likelihood estimation*), solucionada com o algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Em seguida, são determinados os valores de k_1 e k_2 para a distorção radial (seu método não inclui os parâmetros de distorção tangencial).

Por fim, é feita a otimização não-linear de todos os parâmetros utilizados segundo o critério de máxima verossimilhança e através do algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Método proposto por Cerveri (1998)

Cerveri et al. (1998) propôseram uma alternativa para uma simplificação no procedimento para a calibração das câmeras. Este método utiliza dois objetos de calibração; um triedro composto por 9 marcadores com coordenadas tridimensionais conhecidas e uma barra rígida na qual é fixado um marcador. O objeto de forma triédrica possibilita a

definição dos parâmetros extrínsecos das câmeras (orientação e posicionamento das câmeras) e dos parâmetros intrínsecos iniciais de calibração a partir de um primeiro cálculo da DLT para estimativa inicial destes parâmetros. O refinamento dos parâmetros é feito com a movimentação do corpo rígido no volume visto pelo maior número de possível câmeras (CERVERI et al., 1998, PRIBANIĆ et al., 2007). Muitos sistemas comerciais de análise cinemática tridimensional utilizam a movimentação da barra, que definirá o volume calibrado, para a calibração das câmeras.

Assim, essa sequência é usada para refinar os parâmetros para a otimização de um ajuste em conjunto (*bundle adjustment optimization*) de todas as câmeras simultaneamente, considerando tanto os pontos do triedro como os pontos tridimensionais da barra. O ajuste em conjunto iterativamente estima os parâmetros de todas as câmeras, juntamente com as coordenadas desconhecidas tridimensionais da barra, minimizando o erro de reprojeção 2D (medido versus predito pelo modelo da câmera) na imagem. A distorção pode ser considerada adotando diferentes modelos, como radial, tangencial e prisma fino, com diferentes quantidades de parâmetros. O sistema de coordenadas global é fornecido pela geometria do triedro. Dadas as duas equações de colinearidade (Eq. 6) estendida para os parâmetros de distorção temos:

$$\begin{aligned} g_u(p) &= u - u_o + \frac{N_u}{D_u} + d_u \\ g_v(p) &= v - v_o + \frac{N_v}{D_v} + d_v \end{aligned} \quad (9)$$

O método de ajuste em conjunto baseia-se na solução pelo método dos mínimos quadrados. Neste método a linearização do modelo de perspectiva é feita com relação a todos os parâmetros da câmera juntamente com as coordenadas 3D desconhecidas do ponto de movimento:

$$g(p) = g(\bar{p}) + \frac{\partial g}{\partial p_1} \bigg|_{\bar{p}} (p_1 - \bar{p}_1) + \frac{\partial g}{\partial p_2} \bigg|_{\bar{p}} (p_2 - \bar{p}_2) + \dots + \frac{\partial g}{\partial p_n} \bigg|_{\bar{p}} (p_n - \bar{p}_n) \quad (10)$$

Onde as entradas do vetor p são os parâmetros desconhecidos.

Objetos de Calibração Utilizados nos Métodos Não-Lineares

Objeto planar

Zhang (2000) elaborou uma metodologia flexível de calibração de câmeras, que faz uso de um objeto de calibração com padrões coplanares, cuja estrutura geométrica é conhecida de forma bastante acurada. Esse objeto é filmado em pelo menos duas posições distintas, sem que se faça necessário o conhecimento a posição desse objeto.

Através dela, são obtidos os parâmetros de distorção juntamente com os parâmetros extrínsecos (localização espacial do plano de calibração em relação à posição da câmera) e intrínsecos da câmera.

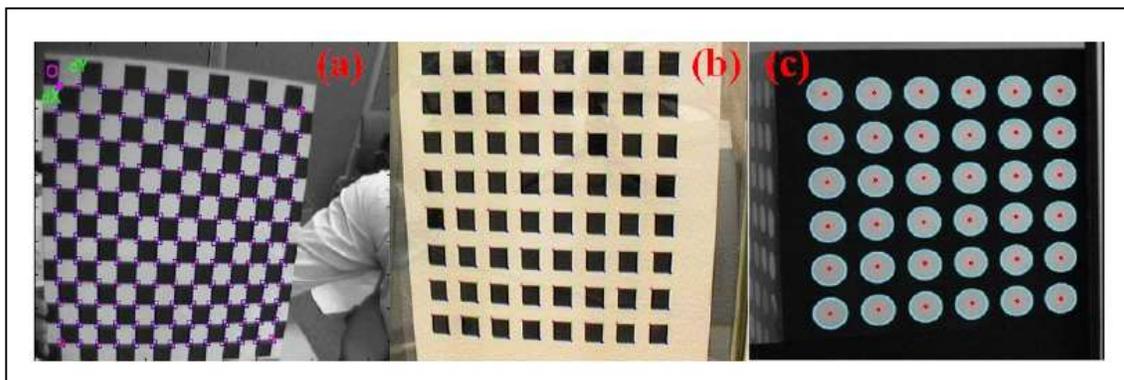


Figura 7 – Diferentes configurações do objeto de calibração plano utilizado na metodologia proposta por Zhang (2000)

Barra rígida

Cerveri et al. (1998) propôseram uma alternativa para uma simplificação no procedimento para a calibração das câmeras. Este método utiliza dois objetos de calibração; um objeto na forma de L com 3 marcadores no eixo X e 2 no eixo Y (FIGURA 8a), sendo que o eixo Z será determinado pelo produto vetorial de X e Y, ou um triedro composto por 9 marcadores com coordenadas tridimensionais conhecidas (FIGURA 8b) e uma barra rígida no qual é fixado um marcador (FIGURA 9) ou dois marcadores (FIGURA 10). O

objeto em forma de 'L' ou de forma triédrica possibilita a definição dos parâmetros extrínsecos das câmeras (orientação e posicionamento das câmeras) e define os parâmetros intrínsecos iniciais de calibração. O refinamento dos parâmetros intrínsecos é feito com a movimentação do corpo rígido no volume visto pelo maior número de câmeras possível (CERVERI et al., 1998, PRIBANIĆ et al., 2007).

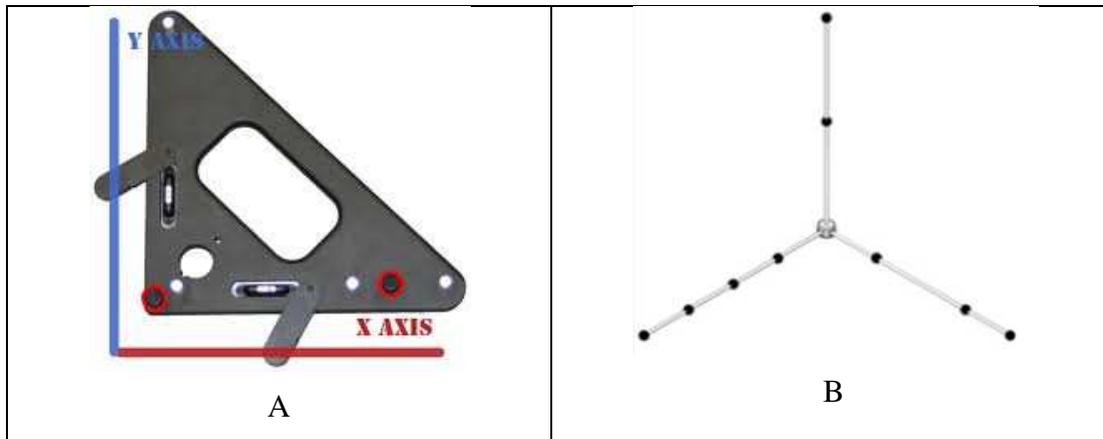


Figura 8 – Objetos utilizados para determinação do sistema de referência.

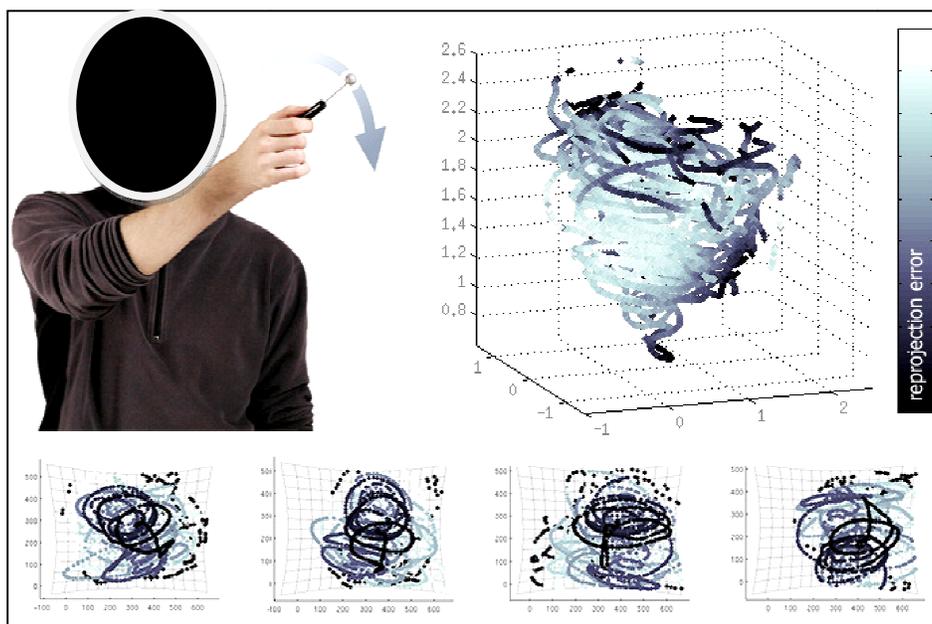


Figura 9 – Exemplo de movimento e barra utilizada para refinamento dos parâmetros das câmeras com um marcador.

Fonte: <http://www.iotracker.com/index.php?q=calibration>.



Figura 10 – Exemplo de barra utilizada para refinamento dos parâmetros das câmeras com dois marcadores.

Fonte: <http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis/tema-wand-calibration---automotive.aspx>.

2. Capítulo II

Avaliação da Exatidão 3D fora e dentro da água usando o método proposto por Zhang

Introdução

Com a crescente necessidade de maior precisão nos resultados apresentados nos sistemas de análise tridimensional de movimento, a calibração de câmeras tem atraído vários esforços de pesquisa, nas áreas de visão computacional, bioengenharia e biomecânica, uma vez que o desempenho dos sistemas está altamente relacionado com este procedimento.

Fabricantes dos sistemas comerciais normalmente relatam que a exatidão da reconstrução dos marcadores dentro de um determinado volume de aquisição é de cerca de 1:3000 da diagonal do volume calibrado. Shortis (1988) relatam que esta exatidão melhora ainda mais com a utilização de mais câmeras, posicionadas coerentemente em relação ao movimento realizado. Sistemas comerciais apresentam um erro relativo à medida da distância que pode variar de 0,09 a 1,77% (SCHMID, 2001; CHIARI et al., 2005).

Os valores acima mencionados são, em grande parte, aceitáveis para a análise do movimento. No entanto, a avaliação do erro de medição real e a precisão das medições de posição tridimensional do marcador merecem uma investigação durante o uso destes sistemas (DELLA CROCE e CAPOZZO, 2000).

Para a avaliação de novos métodos de calibração de câmeras, diferentes testes para a avaliação da exatidão e controle da capacidade das limitações de cada sistema devem ser realizados para uma aplicação apropriada na estimativa da cinemática articular e dos segmentos (DELUZIO et al., 1993).

Para os sistemas desenvolvidos visando aplicações subaquáticas, a exatidão também tem sido avaliada e valores dos erros relativos à medida de distância variando de 0,66 a 1,99% foram relatados (YANAI, 1996), estes resultados são similares aos apresentados pelos sistemas comerciais (CHIARI et al., 2005). Contudo, o

desenvolvimento de sistemas subaquáticos apresenta outras dificuldades a serem abordadas, tais como o enquadramento de grandes volumes pelas câmeras fixas e a calibração exata e precisa destas, normalmente envolvidos na análise de práticas desportivas, como por exemplo, a natação. Lentes grande angular podem ser usadas para enquadramento pelas câmeras fixas em grandes volumes, porém distorções ópticas são incluídas e estas devem ser corrigidas no modelo de câmera adotado para a calibração de câmeras. Este fato evidencia que o modelo de câmera linear não pode ser utilizado, conseqüentemente, a calibração baseada nas equações de transformação linear direta (DLT) não devem ser utilizadas como são pela maioria dos sistemas propostos para a análise cinemática tridimensional para aplicações subaquáticas (YANAI et al., 1996; MACHTSIRAS e SANDERS, 2009 e GOURGOULIS, et al., 2008). Kwon et al., (1999) propõe uma modificação no algoritmo da DLT para modelar a distorção, mas os resultados de exatidão e precisão não apresentaram uma melhora substancial (RMS variando de 5,6 a 7,2mm). Recentemente, abordagens alternativas foram propostas para calibração da câmera com modelos não-lineares e resultados de erro de medição submilímetro foram alcançados em testes realizados fora da água (CERVERI et al., 1998; ZHANG, 2000; PRIBANIĆ; STURM; CIFREK, 2008).

Assim, este capítulo mostra a avaliação da exatidão de reconstrução tridimensional do método proposto por Zhang (2000), primeiramente, testado fora da água utilizando câmeras com lentes grande angular, que possibilitam enquadrar grandes volumes de aquisição, maiores que os normalmente utilizados em laboratório (análise de marcha) e posteriormente, o mesmo método foi testado e avaliado para a aplicação com câmeras subaquáticas.

Teste para avaliação da exatidão - fora da água

Método

O método de calibração não-linear proposto por Zhang (2000) e implementado como um toolbox de calibração de câmeras para Matlab ([http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)) foi adaptado para a análise com vídeos

e testado (chamado **CM**). Este método usa 12 pontos distribuídos em um volume pequeno ($2.7 \times 0.9 \times 1.0 \text{ m}^3$) para a obtenção dos parâmetros extrínsecos. Um objeto planar contendo um padrão de 5×8 quadrados, similar a um tabuleiro de xadrez, no qual são definidas linhas retas e ortogonais ($100\text{mm} \times 100\text{mm}$ com 54 cantos) foi movimentado por todo o volume de aquisição para calcular os parâmetros intrínsecos e de distorção.

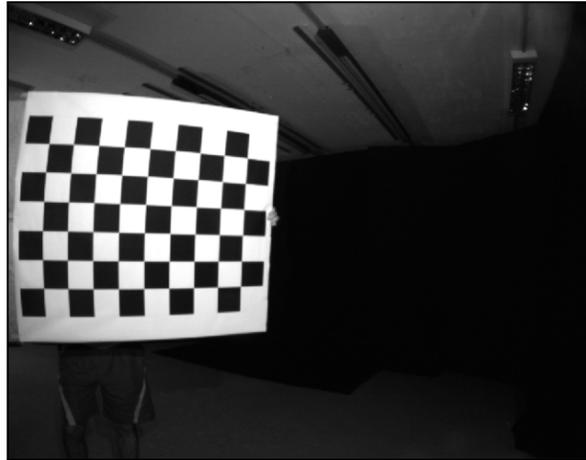


Figura 11 – Objeto Planar de calibração similar a um tabuleiro de xadrez que foi utilizado para a calibração das câmeras.

Foram usadas quatro câmeras Basler, capturando uma imagem de 656 por 490 pixels (60 Hz) com lentes de grande angular (4 mm) cobrindo um volume de aquisição de aproximadamente $5 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$. O objeto de calibração planar foi automaticamente rastreado em 700 quadros. A Figura 12 mostra o posicionamento das câmeras em relação ao volume de aquisição.

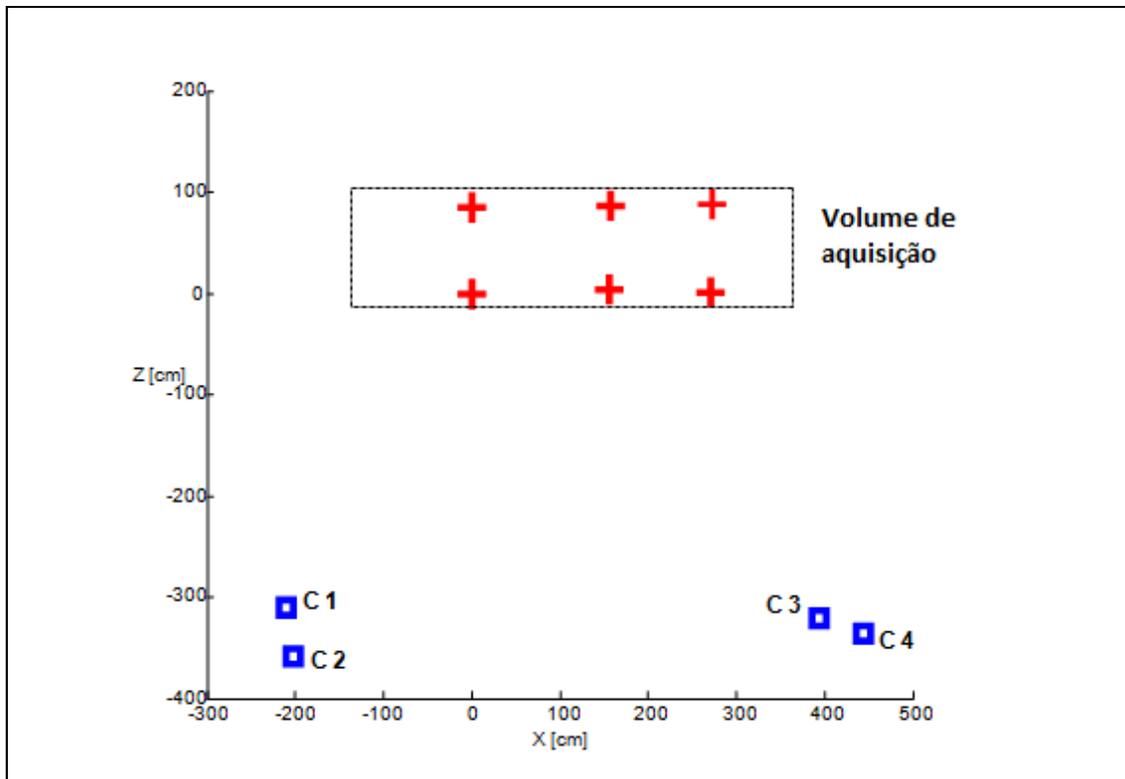


Figura 12 – Posicionamento das câmeras e o volume de aquisição definido.

Análise da Exatidão

Para análise da exatidão foi utilizado um teste de barra rígida. A barra rígida foi movimentada por todo o volume, e a medição automática dos pontos foi realizada no software Dvideo (FIGUEROA et al., 2003). A exatidão foi definida pelo erro médio absoluto das curvas de distância entre dois marcadores (tamanho de cada marcador: 25 mm) (FIGURA 13, valor esperado $D=285.4$ mm) obtidos em função do tempo. Foram calculados também o erro médio e o desvio padrão das curvas de distância.

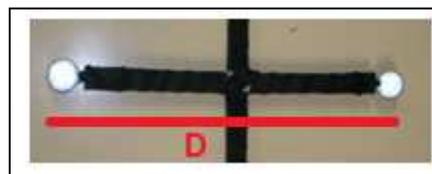


Figura 13 – Barra rígida utilizado para avaliação da exatidão.

Resultados

A Tabela 1 mostra os valores das variáveis: erro médio, desvio padrão (DP), encontrados na literatura (Chiari et al., 2005) e usando o **CM**.

Tabela 1 - Valores das variáveis comparados com os encontrados na literatura (mm).

NA: dados não disponíveis.

	Elite Plus	Vicon 370	Peak 5	Kinemetrix 3D	Ariel Apas	CM
Erro médio	NA	2.3	5.3	3.0	NA	1.1
DP	0.3	1.2	4.2	3.8	5.4	3.7
Erro Médio Absoluto (Exatidão)	0.5	2.3	5.3	3.3	11.6	3.0

Discussão

De acordo com Chiari et al. (2005), a exatidão (erro médio absoluto) dos sistemas comerciais variam de 0.5 mm à 11.6 mm. Nossos resultados apresentaram valores compatíveis. Porém, neste trabalho, o corpo rígido foi movimentado em um volume maior do que considerado usado em Chiari et al. (2005) (volume de análise da marcha, 2.4x0.6x1.0 m³). Uma característica importante do **CM** é que cada câmera é calibrada separadamente o que é diferente dos métodos baseados em ajustes feitos para todas as câmeras simultaneamente juntas.

Conclusão

Os resultados do **CM** revelaram que este método é uma boa alternativa para a correção da distorção óptica gerada pelo uso de lentes grande angular para o enquadramento de grandes volumes, pois apresentou bons resultados de exatidão para a calibração e a reconstrução tridimensional.

Testes para avaliação da exatidão com câmeras submersas

Método

Um sistema de análise cinemática (DVideo, Figueroa et al., 2003) foi adaptado para aquisição de imagens *online* subaquática. O sistema consiste de um computador ligado a duas câmeras Basler (50Hz, lente grande-angular) colocadas em caixa- estanques especialmente desenvolvidas (FIGURA 14, 15). Tripés foram adaptados com ventosas para fixá-las no fundo da piscina. As câmeras foram sincronizadas por um *gen-locked trigger*.

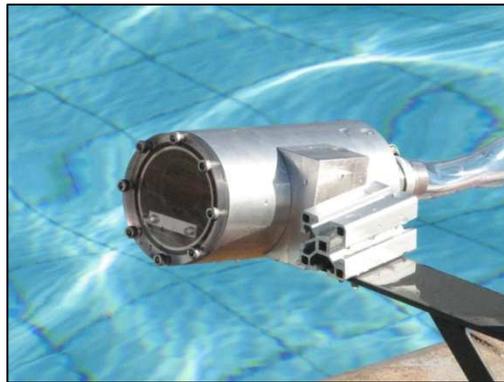


Figura 14 - Câmeras Basler dentro da caixa-estanque especialmente desenvolvida.



Figura 15 - Câmera Basler fc602A, utilizadas no sistema e dentro da caixa-estanque.

O método de calibração de câmeras não-linear proposto por Zhang (2000) e adaptado neste trabalho utiliza oito pontos, com coordenadas conhecidas, para a definição dos parâmetros extrínsecos (posição e orientação das câmeras) e aquisição do movimento de um objeto planar de calibração para obtenção dos parâmetros intrínsecos e de distorção. Um objeto planar de calibração, descrito anteriormente, foi adaptado para aplicações subaquáticas. Este continha um padrão de quadrados 5x6 (FIGURA 16, 100mm x 100mm com 42 cantos) e era à prova de água. O objeto planar de calibração foi movido em todo o volume de aquisição ($4.5 \times 0.6 \times 1 \text{m}^3$) e medido automaticamente em cerca de 300 quadros. A equação 1 mostra o modelo de calibração baseada em Zhang (2000). Onde X é um ponto com coordenadas no mundo (coordenadas homogêneas), x é a sua projeção, K é a matriz de parâmetros intrínsecos, f_d representa a função de distorção, R é a matriz de rotação e T é a matriz de translação. Neste modelo foram utilizados os parâmetros de distorção radial (k) e a descentralização (p).

$$(7) \quad x = K_{3 \times 3} f_d \left([R_{3 \times 3} | T_{3 \times 1}] X \right)$$

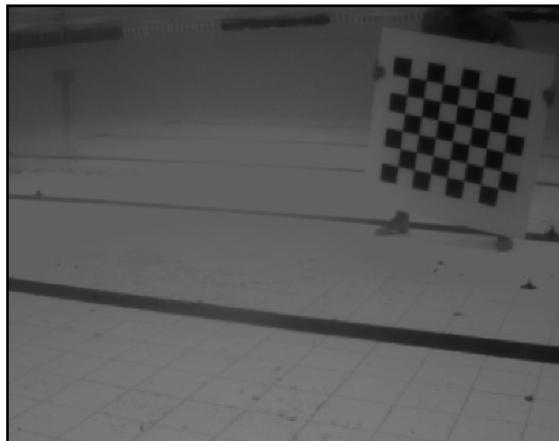


Figura 16 – Objeto planar de calibração similar a um tabuleiro de xadrez utilizado para aquisições subaquáticas.

Análise da Exatidão

A exatidão foi avaliada em um teste dinâmico, utilizando uma barra rígida que foi movimentada por todo o volume de aquisição e medida automaticamente no software Dvideo (Figuroa et al. 2003). A partir das curvas de distância entre os marcadores em função do tempo, as seguintes variáveis foram calculadas: a) os erros médios absolutos b) o desvio padrão, c) o valor mínimo e d), erro máximo, e) o RMS das distâncias entre dois marcadores (valor esperado = 283,14 milímetros) obtidos em função do tempo (15 segundos) e f) do RMS em relação à reconstrução, expressa em percentagem do comprimento real do movimento da barra rígida.

Resultados e Discussão

A média da curva de distância entre os marcadores da distância foi de 283,22mm, o desvio-padrão foi de 0,8mm, o erro mínimo de 0,07mm, o erro médio absoluto de 0,64mm, o erro máximo de 4,57mm, o RMS foi de 0.8mm e o RMS% foi 0,28.

O erro médio absoluto apresentado em Yanai et al., (1996) foi de 5,12 mm contra 0,64 mm encontrado no método proposto. O RMS% encontrado em Gourgoulis et al., (2008) foi de 1,28%, em um volume de aquisição $4.5 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ e 0,65% no volume de aquisição de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$. O método proposto atingiu um valor melhor em ambos os casos (0,28%) com um volume de aquisição de $4.5 \times 0.6 \times 1 \text{ m}^3$. Utilizando o método DLT regular, Kwon et al., (2000) obtiveram RMS e valores de erro máximo de 39,3 mm e 17,4 mm, respectivamente, e utilizando as equações que modelavam a distorção (Modified Direct Linear Transformation) os valores de RMS variaram de 5,6 mm a 7,2 mm e o erro máximo variou de 9,3 mm a 9,7 mm, contra os 0,8 mm e 4,57 mm utilizando o método proposto por Zhang (2000), adaptado para aplicações subaquáticas.

Os resultados deste trabalho podem ser comparados aos métodos de calibração de câmeras com alta performance (exatos e precisos), porém testados fora da água. De acordo com Pribanić et al., (2008) o erro de medição encontrado em dois métodos de calibração de câmera não-linear (CERVERI et al., 1998 e ZHANG, 2000) foram menores que 1 mm. Outra vantagem que deve ser ressaltada do método utilizado neste trabalho é a

simplicidade e a portabilidade do objeto de calibração. O método apresentado requer apenas um objeto planar, similar a um tabuleiro de xadrez, impermeável, previamente montado, e poucos pontos com coordenadas conhecidas. A maioria dos métodos de calibração utilizados em Biomecânica exige a construção e transporte de estruturas rígidas volumétricas com muitos marcadores. Esse tipo de objeto é muito difícil de medir acuradamente quando grandes volumes envolvidos.

Conclusão

Os resultados do método proposto forneceram exatidão melhor dentro d'água comparada a todos os trabalhos anteriores relatados na literatura. Os resultados do **CM** revelaram que este é uma alternativa aplicável com boa precisão e portabilidade para calibração não-linear de câmeras submersas.

3. Capítulo III

Comparação de diferentes métodos de calibração de câmeras para aplicações subaquáticas¹

Introdução

No capítulo anterior mostramos que o método proposto por Zhang (2000) era uma das alternativas para solucionar os problemas relacionados à calibração de grandes volumes com alta performance relacionado à exatidão e precisão. Neste capítulo será mostrada a comparação do método proposto por Zhang (2000) com outros métodos não lineares encontrados na literatura.

O método proposto por Zhang (2000) consiste na aquisição de um objeto planar 2D em diferentes posições e orientações. Este método utiliza o modelo DLT para determinar uma estimativa inicial dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos e uma otimização não-linear para refinar os parâmetros de cada câmara separadamente (ZHANG, 2000).

Outro método encontrado na literatura, que faz uso de objetos mais simples de calibração e inclui modelos não-lineares para a modelagem das câmeras, foi o método proposto por Cerveri et al., (1998). Este método utiliza a aquisição estática de uma estrutura rígida, com pontos de controle (CP), e a aquisição de um movimento de um único ponto em uma barra rígida, a qual deve ser movimentada dentro do campo de visão de todas as câmeras. As equações da DLT são usadas para estimar o valor inicial dos parâmetros das câmeras, o qual é baseado nos dados 2D/3D provenientes da estrutura rígida conhecida. Para refinar os parâmetros das câmeras é utilizada uma otimização não-linear baseada na abordagem de ajuste em conjunto (*bundle adjustment*), que utiliza os dados

¹ Trabalho na íntegra disponível em: SILVATTI, A. P. et al. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. Journal of Biomechanics, v. 45, n. 6, p. 1112-1116, 2012.

2D provenientes do movimento adquirido da barra rígida (FRASER, 1997; CERVERI et al., 1998).

Assim, nosso objetivo foi comparar as abordagens de calibração propostas por Zhang (2000) e Cerveri et al., (1998) com uma abordagem de calibração proposta por Hatze (1988), que é baseada nas equações da DLT, porém levam em consideração os parâmetros de distorção. Comparamos a exatidão e a flexibilidade dos métodos, a fim de verificar as vantagens e desvantagens relativas para aplicações subaquáticas.

Método

O sistema de análise cinemática DVideo (FIGUEROA et al., 2003; SILVATTI et al., 2010) foi utilizado para aquisição de dados on-line com câmeras submersas. O sistema consiste em duas câmeras Basler (gen-locked 100Hz), com lentes grande angular (8mm) fechados em caixas estanques à prova d'água (FIGURA 17A).

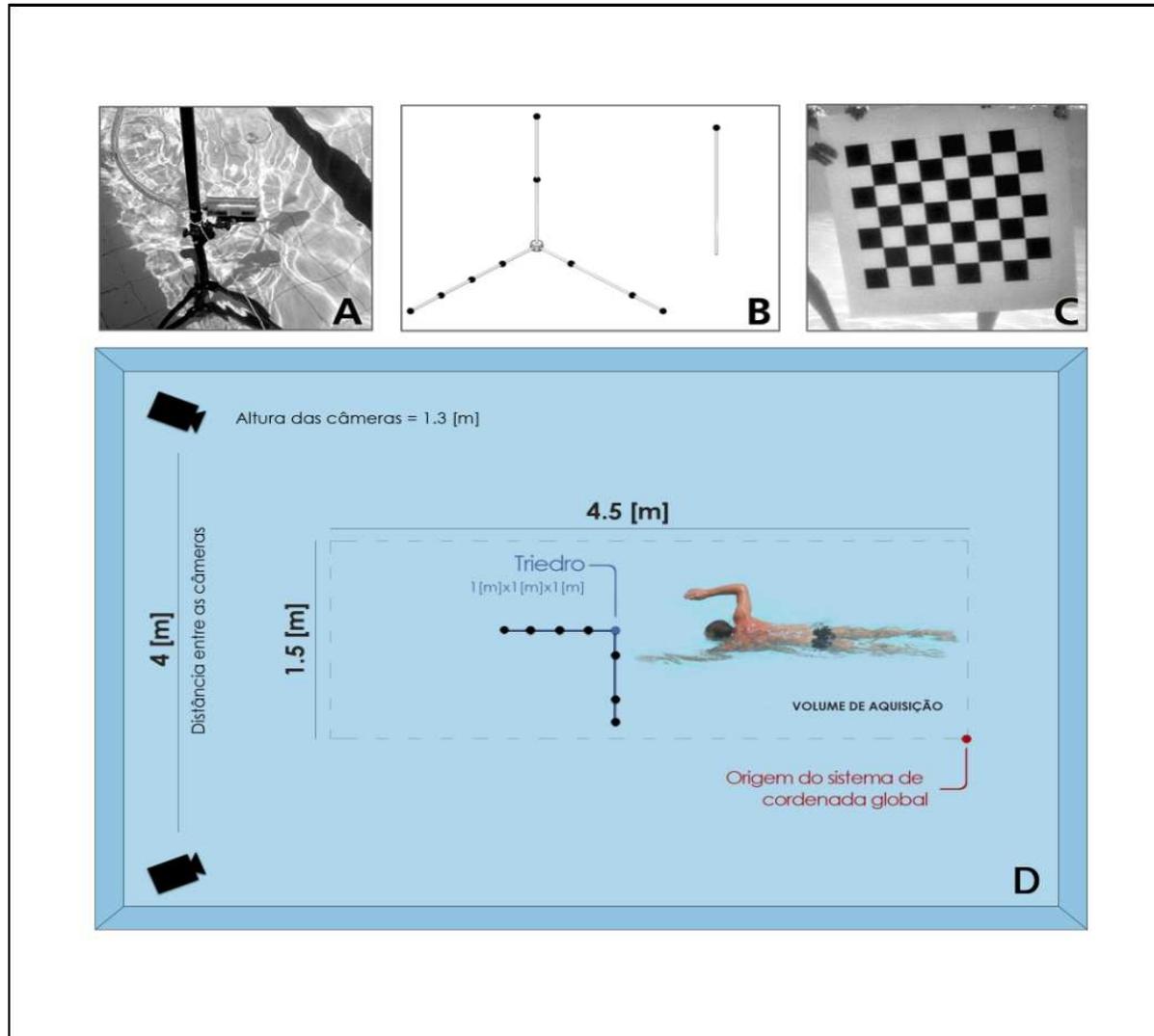


Figura 17 - Setup do sistema de aquisição.

Para realizar o método proposto por Cerveri et al., (1998) (TABELA 2), um triedro ortogonal à prova de água ($1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$) foi construído e posicionado de forma estática no fundo da piscina, para a determinação dos parâmetros extrínsecos e intrínsecos iniciais a partir das equações da DLT. Nove marcadores esféricos pretos (35mm) foram fixados no triedro (FIGURA 17B). Todos os furos para fixação dos marcadores foram obtidos por uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC). As coordenadas tridimensionais dos marcadores eram conhecidas com exatidão de cerca de $10\ \mu\text{m}$. O bastão em movimento, carregando um marcador em sua extremidade (FIGURA 17B), foi adquirido no volume de aquisição ($4,5 \times 1 \times 1,5\text{m}^3$) durante 15 segundos. A partir da aquisição do movimento do bastão, foram selecionados os duzentos e cinquenta quadros com menor erro de reprojeção para refinar os parâmetros iniciais com a otimização de ajuste não-linear em conjunto (*'bundle adjustment'*), que usa pontos controle com coordenadas 3D conhecidas (marcadores do triedro) e desconhecidas (marcador do bastão). Essa otimização iterativamente estima os parâmetros de todas as câmeras, juntamente com as coordenadas desconhecidas tridimensionais, minimizando o erro de reprojeção 2D (medido versus predito pelo modelo da câmera) na imagem. No método proposto por Cerveri et al., (1998) é utilizado apenas um marcador para simplificação da medição durante a sequência de aquisição. Sistemas comerciais (SMART, BTS. SpA, Itália) utilizam dois marcadores nas extremidades do bastão, incluindo a distância do marcador como uma restrição adicional na otimização. A distorção foi levada em conta no modelo matemático da câmera adotando um modelo radial com dois parâmetros.

Para realizar a calibração proposta por Zhang (2000) (TABELA 1), um objeto planar similar a um tabuleiro de xadrez à prova de água (5×6 quadrados, $100 \times 100\text{mm}$ com 42 cantos, FIGURA 17C) foi utilizado (SILVATTI et al., 2010). Uma barra graduada, com quatro marcadores pretos, foi adquirida em quatro diferentes posições submersas. Os níveis de água foram medidos em cada posição da barra graduada para construir o sistema de coordenadas no plano de água. As distâncias entre as quatro posições da barra graduada e os dois pontos localizados na borda da piscina foram medidos para executar a triangulação e obter as coordenadas tridimensionais dos pontos de controle. Duas quantidades diferentes de pontos controle (8 e 16) foram usados para fornecer a solução da DLT dos parâmetros iniciais da câmera. O objeto de calibração foi movido no volume de

aquisição e automaticamente rastreado. A frequência de aquisição de 100Hz foi reajustada para 10Hz para adquirir 200 quadros sequenciais, a fim de refinar os parâmetros intrínsecos e de distorção para cada câmera. A distorção foi considerada no modelo matemático da câmera, adotando um modelo radial e tangencial, com cinco parâmetros. A correção da distorção, neste modelo, explora as linhas retas do tabuleiro de xadrez, e os pontos de encontro destas linhas foram automaticamente rastreado em 700 quadros.

Para calcular a DLT modificada proposta por Hatze (1988), foram utilizados os mesmos 16 pontos controles adquiridos para a calibração usando o método proposto por Zhang (2000). A distorção óptica foi levada em consideração no modelo matemático da câmera, adotando um modelo radial e tangencial com 5 parâmetros. Uma comparação entre os procedimentos de cada calibração utilizada pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação procedimentos realizados para cada método.

		Tipo de Calibração		
		Método 1	Método 2	Método 3
		Hatze, 1988	Cerveri et al., 1998	Zhang, 2000
Objetos Utilizados		Barra rígida graduada	Triedro + bastão	Barra rígida graduada + Objeto planar de calibração similar a um tabuleiro de xadrez
Pontos para rastrear		16 Esféricos - Marcadores Pretos	Esféricos - Marcadores Pretos	Planos - Cantos
Protocolo de aquisição	de	Barra rígida graduada em 4 posições	Triedro estático + bastão em movimento	Barra rígida graduada em 4 posições + Objeto planar de calibração em movimento
Procedimento de calibração	de	Método dos Mínimos Quadrados	DLT para estimativa inicial Refinamento por ajuste em conjunto	DLT para estimativa inicial Refinamento dos Parâmetros intrínsecos
		Calibração feita em cada câmera separadamente	Calibração feita com todas as câmeras simultaneamente	Calibração feita em cada câmera separadamente
Modelo de Distorção	de	Radial e Tangencial	Radial	Radial e Tangencial

Teste de Exatidão

A exatidão dos métodos de calibração foi avaliada na mesma sequência de aquisição (700 frames) do movimento de barra rígida com dois marcadores pretos no volume de aquisição. A distância entre os marcadores (valor nominal D: 291,89 mm) foi calculada em função do tempo. As seguintes variáveis foram calculadas: a) o erro médio absoluto b) o desvio padrão, c) o erro mínimo e d) máximo, e) o *root mean square error* (RMSE) e f) o RMSE em relação à reconstrução, expressa em porcentagem do tamanho real do movimento da barra rígida.

Resultados

Os erros médios absolutos foram de 6,19mm para o método 1 (HATZE, 1988), 1,16mm para o método 2 (CERVERI et al., 1998), 1,20mm para a método 3 (ZHANG, 2000) utilizando 8 pontos de controle e 0,73 mm para o método 3 utilizando 16 pontos de controle. Os resultados do método 2 e 3 foram menos associados à posição de corpo rígido no volume de aquisição e obteve-se melhor exatidão do que o método 1 (TABELA 2).

A Tabela 3 mostra a média, desvio padrão, erro mínimo, a erro médio absoluto (MAE), erro máximo, RMSE das curvas de distância entre os marcadores e o RMSE% para o método 1, 2 e para ambos os testes realizados com o método 3 para o teste de barra rígida. O método 1 apresentou os piores resultados em todas as variáveis. Os resultados dos métodos 2 e 3 (8 e 16 pontos de controle) são comparáveis em termos do erro médio absoluto (1,16 mm, 1,20 mm, 0,73 mm). Os valores médios do comprimento da barra rígida e do erro médio absoluto para o método 3 com 16 pontos controle foram melhores do que os obtidos na configuração com oito pontos controle, com o método 2 e 1. No entanto, o desvio padrão (0,69 mm, 1,07 mm e 0,89 mm) e o erro máximo (3,99 mm, 8,03 mm e 6,90 mm) foram menores no método 2 do que em ambas as configurações do método 3 e método 1.

Tabela 3: Resultados do método 1, 2 e ambos os testes do método 3 (8 e 16 pontos controle (CP)). Valor nominal da distância do marcador: 291,89 milímetros. Os valores são expressos em milímetros (mm).

	Média	Desvio Padrão	Erro Mínimo	Erro Médio Absoluto	Erro Máximo	RMSE	%RMSE
Método 1 Hatze, 1988	297.98	3.43	4.79	6.19	19.71	6.98	2.39
Método 2 Cerveri et al., 1998	290.77	0.69	0.20	1.16	3.99	1.31	0.45
Método 3 Zhang, 2000 (8 CP)	292.87	1.07	0.19	1.20	8.03	1.45	0.50
Método 3 Zhang, 2000 (16 CP)	291.67	0.89	0.07	0.73	6.90	0.92	0.31

As Figuras 18 (A,B,C) mostram o erro em função dos quadros e as figuras 18 (D,E,F) mostram a influência da posição da barra rígida no volume de aquisição sobre a distribuição de erro para cada método de calibração de câmeras. O método 1 (0,05 a 14,56 mm) apresentou erros maiores quando comparados com os métodos 2 (0,01 a 3,29 mm) e o método 3 (0,002 a 3,65 mm). O erro aumentou quando a barra rígida moveu-se para longe do centro do volume (FIGURA 18d, 18e e 18f). Visto que, um maior erro e um sinal claro do movimento da barra rígida relacionado com a posição da barra rígida pode ser identificado, podemos afirmar que o método 1 foi mais afetado pelo movimento da barra rígida (FIGURA 18a) e a sua posição no volume de aquisição (FIGURA 18d) do que o método 3 (FIGURA 18b e 18e) e método 2 (FIGURA 18c e 18f).

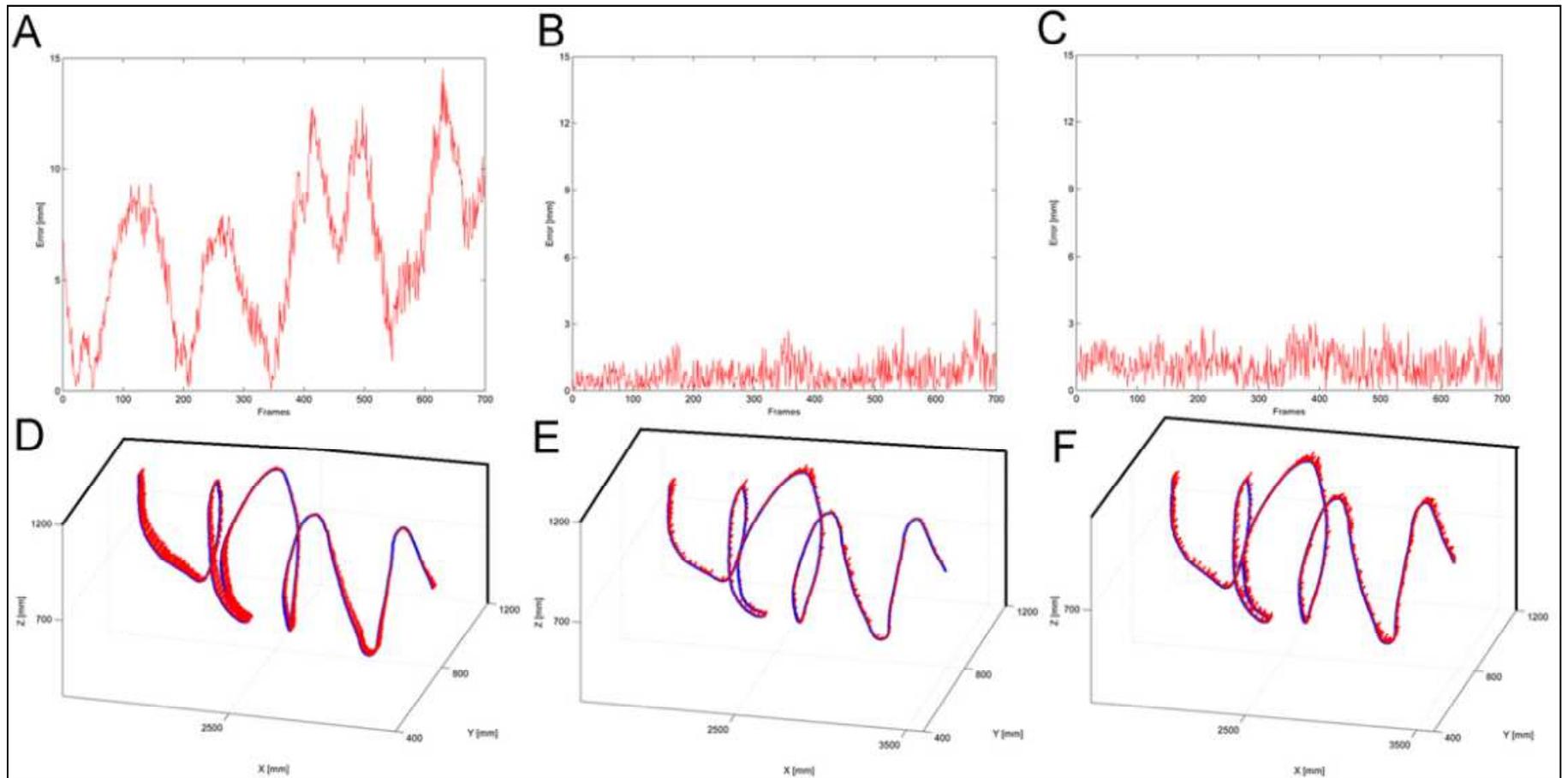


Figura 18 - Erros do método 1 (A), método 3 (B) e método 2 (C), em função dos quadros adquiridos. A distribuição do erro relativo à distância calculada em 700 quadros da barra rígida e o erro sobreposto a um marcador foram exibidos em (D) método 1, (E) método 3 e (F) método 2.

A Figura 19 mostra a avaliação do erro em função da posição tridimensional da barra rígida no volume de aquisição, em termos das suas coordenadas (direções da piscina: longitudinal (X), transversal (Y) e vertical (Z)), para verificar qual eixo foi mais afetado pelo erro. No eixo X, o método 1 apresentou um sinal claro, variando em função da posição da barra rígida no volume de aquisição. Esta relação entre o erro e a posição não foi identificável nos resultados dos métodos 2 e 3. Em ambos os eixos Y e Z, o método 1 apresentou erros mais distribuídos do que os métodos 2 e 3, no entanto nenhum dos métodos apresentou uma associação com o movimento realizado pela barra rígida no teste.

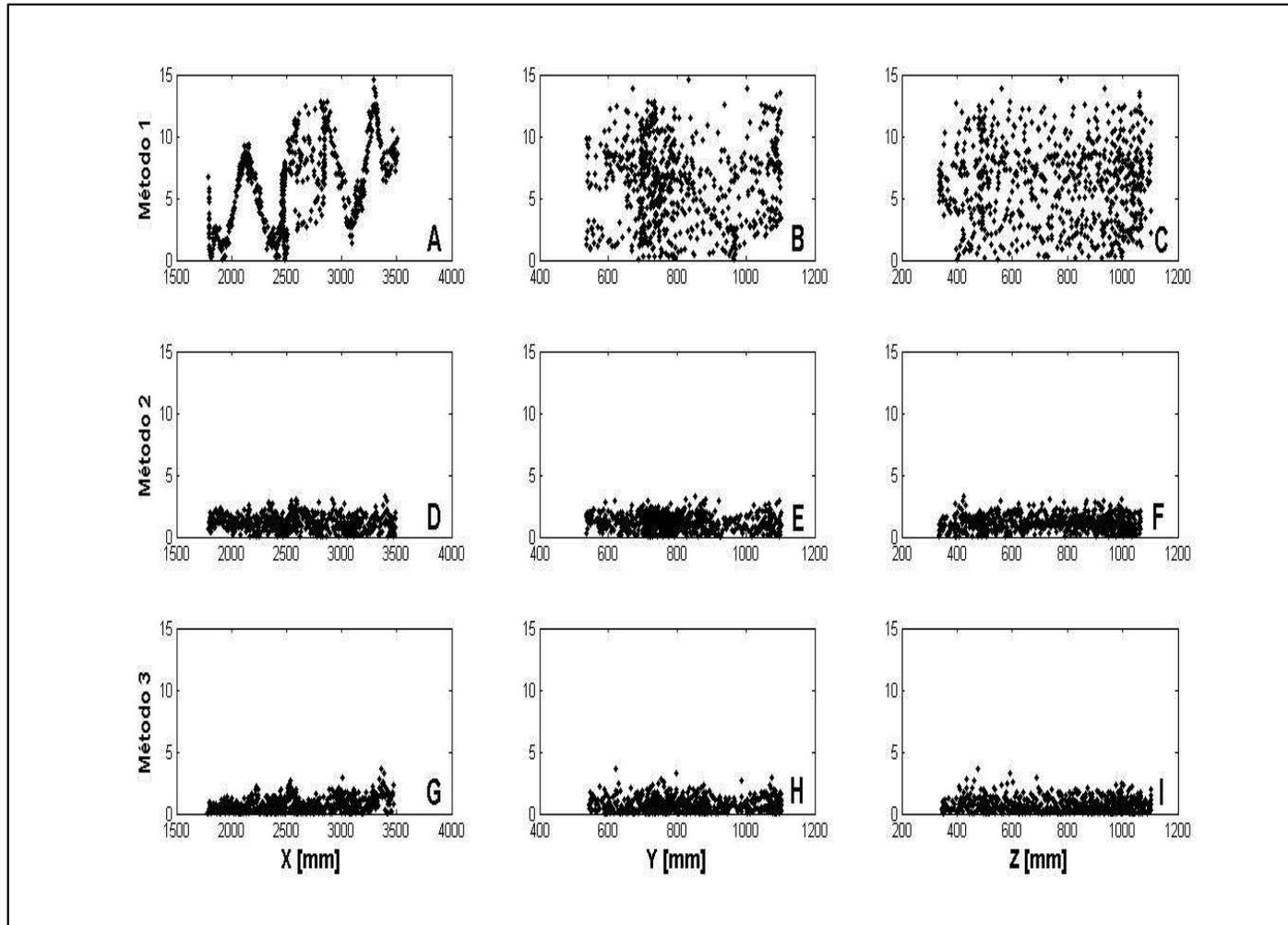


Figura 19 - Erro de reconstrução tridimensional em função da posição da barra rígida no volume de aquisição (longitudinal (X), transversal (Y) e vertical (Z)) em cada método de calibração de câmera (método 1, Fig. 19A, 19B, 19C; método 2, Fig. 19D, 19E, 19F, método 3, Fig. 19G, 19H, 19I).

Discussão

No método 2, apenas um marcador foi utilizado, para simplificar a medição durante a sequência de aquisição. Comumente, sistemas comerciais (BTS Engineering, Milão, Itália; Vicon, Oxford UK) utilizam dois marcadores nas extremidades da barra rígida e incluem a distância entre os marcadores como uma restrição adicional na otimização. No método 2 utilizado neste trabalho, será adicionado a utilização de dois marcadores e atualizada a implementação do ajuste em conjunto de modo a incluir as restrições sobre a distância entre marcadores. Isto poderia aumentar ainda mais a performance (exatidão e precisão) obtida por este método de calibração.

De acordo com os resultados, podemos afirmar que método 2 permite uma redução (3,99 mm) da distribuição do erro no volume de calibração. Isto pode ser justificado pela utilização da abordagem de ajuste em conjunto, que intrinsecamente tende a diminuir a dispersão do erro de reconstrução no volume calibrado.

Quanto ao método 3, a estimativa da distorção explora as linhas retas do objeto de calibração, o que pode justificar aos resultados melhores de erro médio absoluto encontrados (0,73 mm). No entanto, os resultados de erro médio absoluto foram ligeiramente piores do que os encontrados com uma configuração similar (SILVATTI et al., 2010). Este fato pode ser devido à transparência da água, que era melhor no teste anterior e pode ter afetado o erro de localização 2D apresentado neste trabalho. Isto sugere que a transparência da água deve ser levada em consideração quando são necessários resultados altamente acurados. A utilização da barra graduada permite a definição do sistema de coordenada global alinhado com o nível da água. Apesar da configuração da barra graduada consumir mais tempo do que o triedro, a sua utilização seria uma vantagem técnica em dois aspectos: 1) permite corrigir diferentes profundidades na piscina de natação, 2) fornece a oportunidade de lidar com um eixo geométrico que divide a tarefa de movimento do nadador em dentro da água (positivo) e fora da água (negativo). Porém, a configuração da barra graduada não é tão flexível e a utilização do triedro poderia ser uma alternativa valiosa se o nível de água em relação ao seu sistema de coordenada global fosse medido.

É bem conhecido que o número e a distribuição dos pontos controle (CP) afeta fortemente a DLT (KWON; LINDLEY, 2000). Este fato é também verdade para o método 1. Os resultados de baixa exatidão e precisão e um aumento do erro relacionado com a posição da barra rígida do método 1 encontrados neste trabalho podem ser explicada pela pequena quantidade de pontos de controle e a sua distribuição. De acordo com Kwon (2008), o uso de um pequeno número de pontos de controle do volume de aquisição ou a sua má distribuição podem afetar negativamente a exatidão. Neste estudo, dezesseis pontos de controle foram assumidos como sendo suficiente para calibrar as câmeras utilizando o método 1, uma vez que o mínimo de pontos controles necessários são oito. A distribuição dos pontos pode ser outra explicação, mas nenhum experimento foi previsto para possibilitar esta análise neste trabalho. Os resultados da avaliação da relação entre a posição do objeto no volume de aquisição e a exatidão de reconstrução tridimensional apontaram que os métodos 2 e 3 não foram afetados pela posição do objeto ao contrário do método 1. Miks e Novak (2005) demonstraram a relação teórica entre a posição objeto e a exatidão, mostrando que, quando a distorção é adequadamente modelada não há efeito da posição do objeto sobre a exatidão.

O método 2 e ambas as configurações do método 3 (8 e 16 CP), mostraram uma exatidão em condições subaquáticas melhores do que os valores descritos anteriormente na literatura (valores do erro médio absoluto de 5,12mm foram encontrados em YANAI et al., 1996;. RMS de 5,6 mm e um erro máximo de 9,3 mm foram detectados em KWON; LINDLEY, 2000; %RMS de 1,28% foi obtida em GOURGOULIS et al., 2008;. e RMS de 5,2 mm foi apresentado em MACHTSIRAS; SANDERS, 2009). Pribanić et al. (2008 e 2009) comparou o método 2 e o método 3 em condições de laboratório e encontrou distribuições de erro médio absoluto (5 ensaios de calibração), variando de 0,66 mm a 0,75 mm para o método 2 e 0,69 mm a 0,84 mm para o método 3. Os nossos resultados foram comparáveis com estes valores e com a exatidão e precisão dos sistemas comerciais utilizados para análise tridimensional fora da água (CHIARI et al., 2005).

A Tabela 4 mostra uma síntese das vantagens e desvantagens de todos os métodos apresentados.

Tabela 4: Síntese das vantagens e desvantagens de todos os métodos

Tipo de Calibração	Vantagens	Desvantagens
Método 1 Hatze (1988)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Somente 16 pontos em um único quadro para medir ○ Possibilita definir o Sistema de coordenadas global (SCG) no plano da água. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ O procedimento com a barra é muito demorado ○ A calibração de câmera é feita separadamente ○ Resultados de exatidão são relacionados com a quantidade de pontos controle utilizados ○ O aumento do erro é relacionado com a posição no volume de aquisição.
Método 2 Cerveri et al. (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ○ A configuração do triedro é rápida e fácil ○ Apenas um ponto para medir ○ Equalização do erro de reconstrução em todo o volume de calibração ○ Alta portabilidade ○ O uso de dois marcadores de distância conhecida sobre o bastão pode melhorar a calibração através da inclusão desta restrição 	<ul style="list-style-type: none"> ○ O bastão deve ser movimentado oportunamente para cobrir todo o volume de calibração ○ Exatidão estritamente dependente da construção do triedro ○ Alta sensibilidade do marcador do bastão em relação à qualidade da água ○ Assume o eixo vertical com base no fundo da piscina
Método 3 Zhang (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fácil medição dos cantos do objeto planar de calibração ○ Correção de distorção mais precisa ○ Baixa sensibilidade de detecção dos cantos com a qualidade da água ○ Permite definir um sistema de coordenada global (SCG) alinhada ao plano de água ○ Realização simples do projeto para a construção do objeto planar de calibração 	<ul style="list-style-type: none"> ○ O procedimento com a barra é muito demorado ○ Cada câmera é calibrada separadamente. ○ Elevado número de cantos para medir ○ Barra e movimento do objeto planar de calibração são trabalhosos ○ Limitação na movimentação do objeto planar de calibração para garantir alta precisão na detecção e rotulagem dos cantos automaticamente

Conclusão

O método 2 e 3 são alternativas promissoras para análise tridimensional de movimentos subaquáticos e não foram influenciados pela posição de objeto no volume de aquisição comparado ao método 1.

Quanto as avaliações de performance no esporte, serão realizados estudos futuros envolvendo a avaliação da aplicabilidade de câmeras em movimento para a análise de atletas durante tarefas da natação baseados na auto-calibração dos parâmetros intrínsecos e medição do movimento retilíneo para obtenção dos parâmetros extrínsecos.

4. Capítulo IV

Análise tridimensional dos movimentos subaquáticos usando câmeras de vídeo submersas: análise da exatidão e da reconstrução de trajetórias²

Introdução

A análise de movimento tridimensional subaquática permite a avaliação individual e quantitativa do desempenho do nadador, revelando a potencialidade para melhorar a eficiência do padrão de movimento dos atletas e seus resultados de performance. Sistemas baseados em videogrametria para a análise de movimento são amplamente utilizados para estudar o movimento humano, usando computadores para capturar, processar e analisar os dados do vídeo. Em princípio, esses dados de vídeo podem ser coletadas em qualquer ambiente onde as câmeras possam ser fixadas. No entanto, em condições subaquáticas uma série de questões técnicas específicas relativas à organização da câmera, ao protocolo e metodologia de calibração da câmera e a coleta de dados devem ser estruturadas.

Diferentes soluções técnicas como sistemas de periscópio, janelas submersas na piscina, caixas-estanques para a proteção das câmeras têm sido utilizadas (GOURGOULIS et al., 2008;. PEASE, 1999; YANAI et al., 1996). Vários sistemas de periscópio utilizam um par de espelhos paralelos fora e dentro da água para refletir as duas vistas para uma câmera de vídeo única (YANAI et al., 1996). Embora necessite apenas de uma câmera, a viabilidade desta solução depende da precisão da montagem dos espelhos. Janelas submersas na piscina requerem uma configuração personalizada da piscina para fixar

² Trabalho na íntegra disponível em: SILVATTI, A. P. et al. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, p. 1-9, 2012.

câmeras externas, reduzindo sensivelmente a flexibilidade do protocolo de aquisição de dados. Com base em medições 2D, esta solução tem sido adotada principalmente para a análise qualitativa do treinador (PEASE, 1999). Câmeras submersas são, em princípio, mais flexíveis, pois com algumas modificações no que diz respeito aos sistemas comerciais, podem explorar a maioria dos métodos desenvolvidos para aplicações fora da água. Atualmente, caixas-estanques personalizadas podem ser facilmente construídas ou, ainda, caixas-estanques para modelos comerciais estão disponíveis no mercado a baixo custo.

Em relação ao protocolo de calibração câmera, a abordagem clássica (DLT) consiste na utilização de pontos de referência (pontos de calibração), ligados a um sistema de suporte adicional, que são identificados e gravados pelas câmeras durante aquisições estáticas ou dinâmicas. Para as aquisições de grandes volumes são utilizados grandes estruturas que, nesses casos, tornam-se complicadas e de difícil configuração (GOURGOULIS et al., 2008;. KWON; LINDLEY, 2000; MACHTSIRAS; SANDERS, 2009). Particularmente, a fabricação com precisão, a garantia da rigidez, o transporte e a montagem dificultam a difusão dessa abordagem. Alternativamente, o modo dinâmico implica em um protocolo de aquisição de dois passos: 1) poucos marcadores em uma estrutura menor de forma estática e 2) um objeto em movimento de geometria conhecida. Abordagens utilizando um bastão (objeto rígido) como objetos de calibração (CERVERI et al., 1998) e objetos planares (objeto similar a um tabuleiro de xadrez, ZHANG, 2000) foram propostas e provaram ser adequadas, flexíveis e de fácil configuração (BOUGUET, 1999; CERVERI et al., 1998; PRIBANIĆ et al., 2008; ZHANG, 2002). O método proposto por Cerveri et al., (1998) é normalmente adotado pela grande maioria dos fabricantes de sistemas para análise tridimensional usados em laboratório de marcha (BTS, Milão, Itália; Vicon, Oxford, UK). O método proposto por Zhang, (2000) é mais usado em aplicações de visão computacional (ZHANG, 2000, ZHANG, 2002; MENG; ZHUANG, 2007;. PRIBANIĆ et al., 2008).

Considerando a metodologia de calibração de câmeras, a abordagem clássica usa a transformação linear direta (DLT). Em sua formulação inicial, o algoritmo DLT não inclui parâmetros de distorção óptica. Em condições subaquáticas este modelo foi aplicado em vários trabalhos (GOURGOULIS et al., 2008;. YANAI et al., 1996;. MACHTSIRAS; SANDERS, 2009). A DLT modificada, proposta originalmente por Hatze (1988) inclui

alguns parâmetros de distorção óptica. Porém, em condições submersas existem distorções não-lineares adicionais causadas pelas propriedades de refração das interfaces entre a água e a lente da câmera. A fim de lidar com esses erros, o grupo Kwon (KWON; LINDLEY, 2000; KWON et al., 2002; KWON; CASEBOLT, 2006) propôs uma nova alteração da DLT, mas os resultados de exatidão não foram comparáveis aos resultados obtidos fora da água usando o modelo não-linear das equações que determinava os erros sistemáticos da imagem a partir dos parâmetros de distorção radial e tangencial. A maioria das abordagens baseadas em objetos de calibração, como a que utiliza uma barra rígida (CERVERI et al., 1998) e os objetos planares (ZHANG, 2000), resolveram o problema de calibração de câmera por abordar diretamente as equações não-lineares (CERVERI et al., 1998; ZHANG, 2000, 2002; PRIBANIĆ et al., 2008).

No que diz respeito à coleta de dados, a maioria das abordagens fazem uso de marcas fixadas nos braços e pernas dos nadadores (SANDERS, 2007). O processamento de dados requer a identificação manual das marcas técnicas e anatômicas sobre o sujeito durante a sequência de imagens. Como consequência, a medição manual pode aumentar o tempo de rastreamento dos dados e os resultados podem ser afetados pela variabilidade da marcação realizada por diferentes operadores. A análise do movimento humano subaquático, com base na extração de silhuetas dos nadadores, reconstrução tridimensional, análise de volume e ajuste do modelo cinemático, foi proposta recentemente (CESERACCIU et al., 2011; CORAZZA et al., 2006), uma vez que não necessitam de marcadores especiais sobre a pele do voluntário (captura de movimento e utilização de nenhum marcador na pele, técnica denominada *'markerless'*). No entanto, o método não foi extensivamente validado e a replicabilidade dos resultados não foi ainda demonstrada.

Neste capítulo, pretendemos investigar a aplicabilidade de um sistema baseado em câmeras de vídeo submersas para a captura de movimento tridimensional subaquático em termos de análise da exatidão e da reconstrução tridimensional da trajetória da mão de nadadores. Pontos estáticos para a solução da DLT clássica (SILVATTI et al. 2011), um bastão com um marcador em movimento associado ao ajuste em conjunto com todas as câmeras (*'bundle adjustment'*), e um objeto de calibração planar em movimento associado ao método de Zhang, (2000) (SILVATTI et al., 2009; 2010; 2011) foram considerados para calibração das câmeras. Como exemplo de uma possível aplicação para a análise

cinemática subaquática tridimensional do nadador foram reconstruídas as trajetórias das mãos, na fase submersa, de quatro nadadores em diferentes estilos da natação. Os dados obtidos do movimento da mão foram qualitativamente comparados com as trajetórias de referência propostos no modelo do Maglischo (1993). Este modelo foi selecionado para comparações devido à sua ampla utilização no ensino e treinamento da natação.

Método

O sistema de análise cinemática DVideo foi amplamente utilizado para aplicações como análise da marcha e do desporto (MIANA et al., 2009; SILVATTI et al., 2009; BARROS et al., 2010) e recentemente foi adaptado para aquisição de dados em condições subaquática (SILVATTI et al., 2010). A versão utilizada neste estudo consistiu de duas câmeras Basler (gen-locked, 100Hz), com lentes grande angular (8 mm distância focal) protegidas por caixas-estanques. As câmeras foram posicionados com vista frontal para o nadador, focando-se no centro do volume de aquisição.

Para realizar a calibração proposta por Zhang (2000), um padrão similar a um tabuleiro de xadrez (5×6 quadrados, 100×100 mm) com 42 cantos foi impresso (300dpi) e colado a um plano rígido impermeável. Um toolbox de calibração de câmeras para Matlab baseado na abordagem do Zhang (2000) e Bouguet (2004) foi adaptado para a análise de vídeo (disponível em: <http://code.google.com/p/calib/>) e modificada neste estudo para utilizar uma estrutura adicional rígida que consiste em uma haste graduada, equipada com quatro marcadores pretos, que foi adquirida em 4 diferentes posições subaquáticas. Os níveis de água foram medidos em cada posição da haste graduada para construir o sistema de coordenadas global (SCG) nivelado com o plano de água. As distâncias entre as 4 posições da barra graduada e dois pontos localizados na borda da piscina foram medidos para executar a triangulação e assim obter as coordenadas tridimensionais dos 16 pontos controles, que foram utilizados para calcular o valores iniciais dos parâmetros da câmera. O objeto planar de calibração foi movido varrendo o volume de aquisição ($4,5 \times 1 \times 1,5 \text{ m}^3$) em diferentes posições e atitudes (FIGURA 20A). Os cantos do padrão similar ao tabuleiro de xadrez foram automaticamente detectados nas imagens e rastreados durante a

sequência. Neste método o refinamento dos parâmetros intrínsecos é feito separadamente para cada câmera (distância focal, ponto principal, tamanho do pixel) e para isso a aquisição das imagens a frequência foi reajustada para 10Hz e foram obtidos 200 quadros sequenciais. A distorção foi modelada adotando os parâmetros radial e tangencial (4 parâmetros e nomeado de método **PC**) (Zhang, 2000).

Para realizar a calibração proposta por Cerveri et al., (1998) um triedro ortogonal à prova de água (1m×1m×1m) foi construído por uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC) no qual foram fixados nove marcadores pretos e esféricos (\varnothing : 35mm) em posições conhecidas (10 μ m exatidão). O sistema de coordenadas global foi definido pela geometria do triedro. Os marcadores foram utilizados para determinar a estimativa inicial dos parâmetros da câmera. O bastão em movimento, carregando um marcador na sua ponta, foi adquirido em todo o volume de aquisição durante 15 segundos (FIGURA 20B).

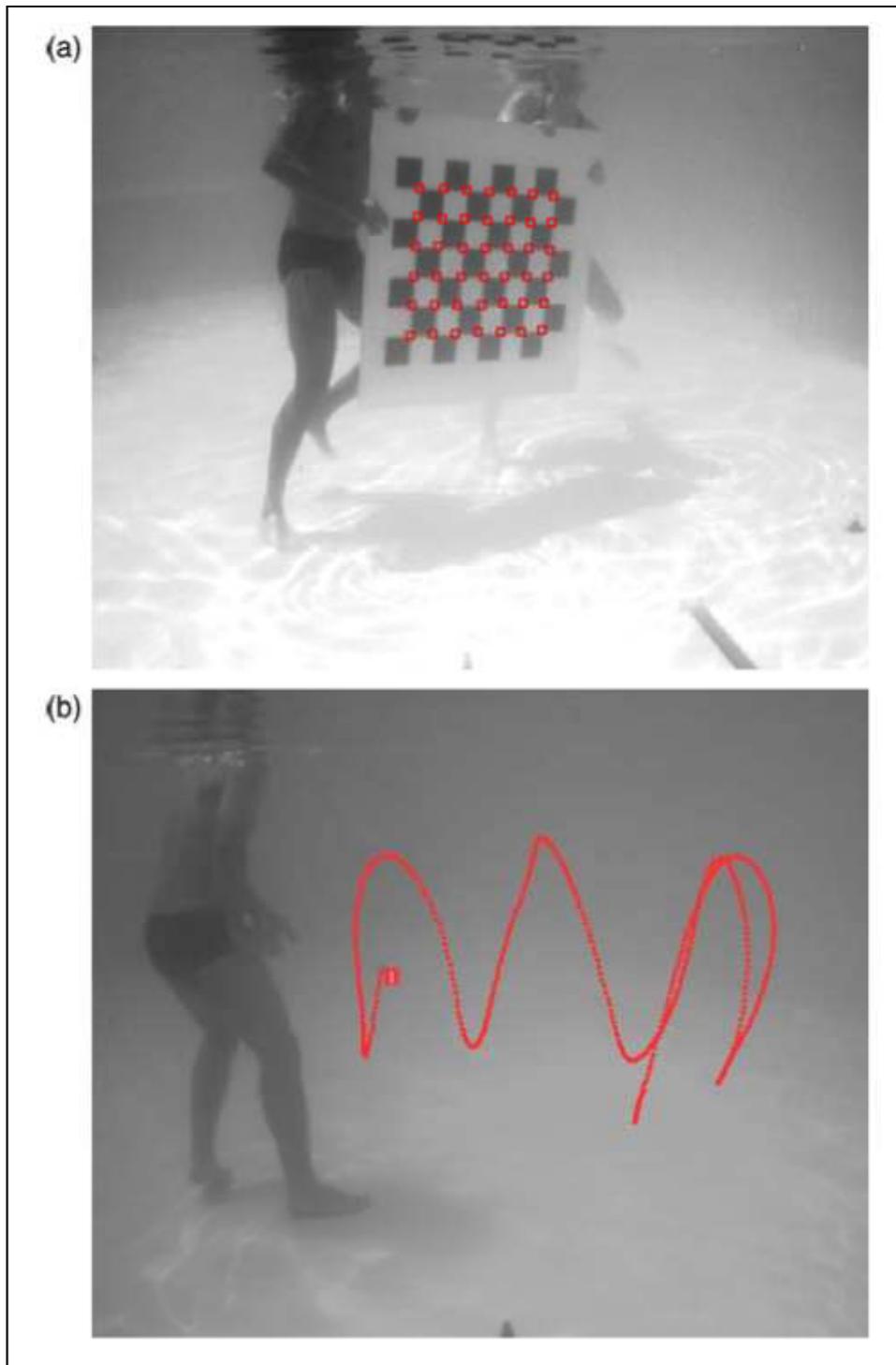


Figura 20 – Protocolos dinâmico para os métodos propostos por Zhang, (2000) (a) e Cerveri et al., (1998) (b).

Duzentos e cinquenta quadros úteis foram oportunamente extraídos de toda a sequência para refinar os parâmetros por esta otimização, que usa como pontos de controle as coordenadas tridimensionais conhecidas (marcadores do triedro) e desconhecido (marcador do bastão). O ajuste em conjunto (FRASER, 1997; CERVERI et al., 1998) iterativamente refina os parâmetros de todas as câmeras, juntamente com as coordenadas tridimensionais desconhecidas por minimização do erro de reprojeção 2D (medido versus previsto pelo modelo de câmera) na imagem. A distorção foi levada em conta no modelo de câmera que adota dois modelos: a) um modelo radial com 2 parâmetros (**WC2**) e b) um modelo radial e tangencial com 4 parâmetros (**WC4**). Para comparação, uma calibração baseada nas equações da DLT foi realizada utilizando os 16 pontos de controle sobre a barra graduada.

A exatidão foi avaliada em uma sequência de aquisição de 10s do movimento de uma barra rígida, com dois marcadores nas suas extremidades, que foi movimentada dentro do volume de aquisição. A distância entre os dois marcadores (valor nominal D: 291,89 mm) foi obtida em função do tempo. As seguintes variáveis foram calculadas: a) os erros médios absolutos b) o desvio padrão, c) mínimo e d) erro máximo, e) o erro quadrático (RMSE) e f) o RMSE para a reconstrução expressa como uma porcentagem do comprimento real do movimento barra rígida.

Como um exemplo da aplicação potencial de uma reconstrução 3D subaquática precisa e exata para a análise cinemática do nadador, quatro nadadores voluntários, dois deles altamente treinados em estilo livre, um em borboleta e um em peito, foram analisados. Os estilos analisados foram o crawl, o borboleta e o peito. As posições tridimensionais das extremidades das mãos na fase subaquática de ambos os braços foram obtidos por medição manual. Os dados foram filtrados usando um filtro digital Butterworth passa-baixo (frequência de corte de 5 Hz). As trajetórias das mãos foram normalizadas por subtração da correspondente média e foram reconstruídas para cada nadador e cada braço (FIGURA 21). A simetria da forma e da amplitude das curvas das trajetórias das mãos esquerdas (ME) e direitas (MD), a variabilidade entre os nadadores e concordância com o modelo (MAGLISCHO, 1993) foram analisadas qualitativamente.

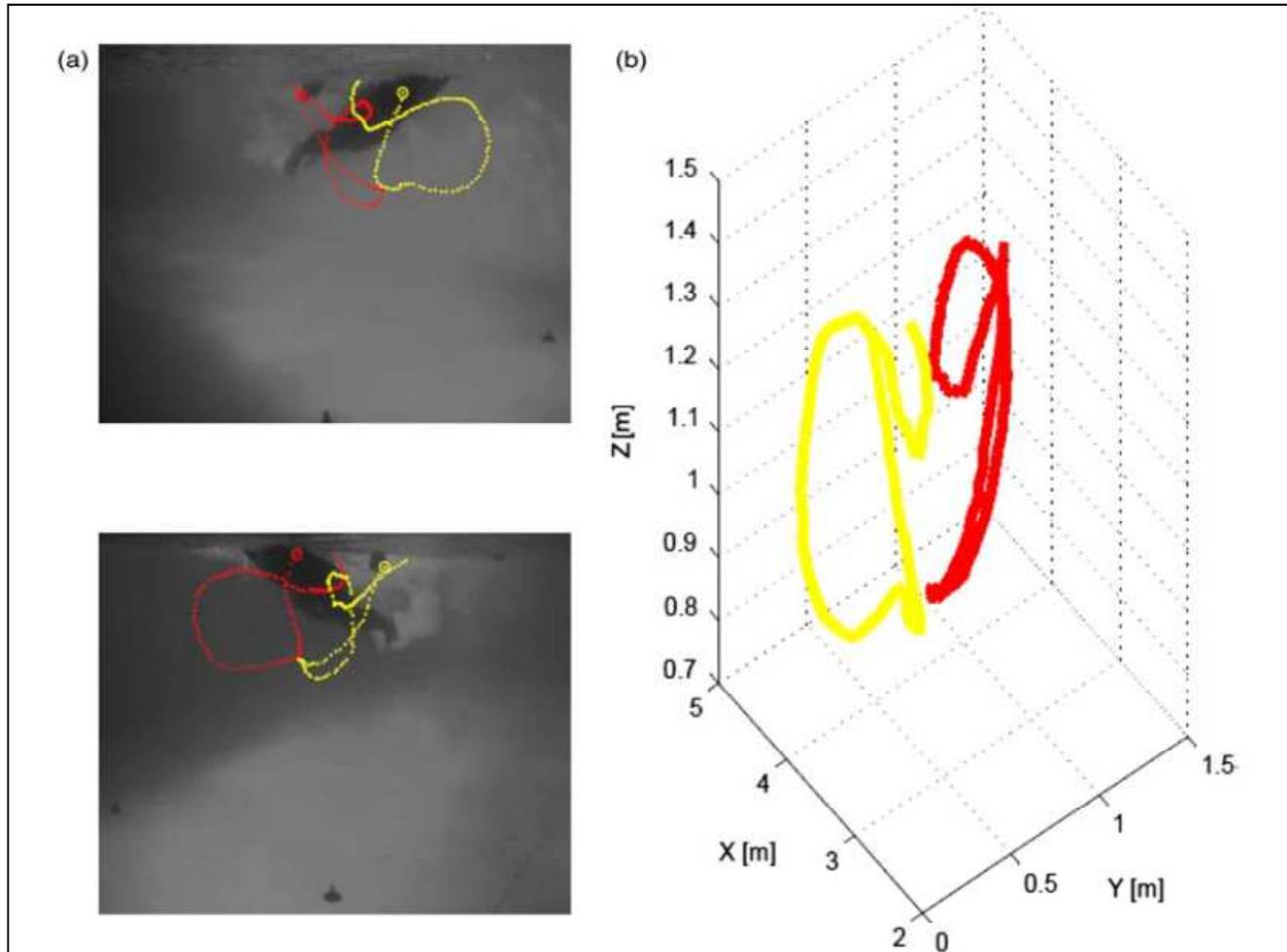


Figura 21 - Resultado gráfico da medição manual do movimento do dedo médio direito (vermelho) e esquerdo (amarelo) (a) e suas trajetórias tridimensionais correspondentes (b).

Resultados

Os resultados (TABELA 5) de ambos os modelos de distorção do método proposto por Cerveri et al., 1998 e do método proposto por Zhang, 2000 foram comparáveis em termos do erro médio absoluto (1,16 mm, 0,96 mm e 0,73 mm). Os valores médios do comprimento da barra rígida e do erro médio absoluto para o método proposto por Zhang, 2000 foram melhores do que os obtidos na configuração de ambos os modelos de distorção do método proposto por Cerveri et al., 1998 (WC2 e WC4). No entanto, o desvio padrão (0,69 mm, 1,09 mm, e 0,89 mm) e o erro máximo (3,99 mm, 5,07 mm, e 6,90 mm) foram menores no WC2. Os resultados da calibração baseada em DLT foram muito piores em comparação com os anteriores. O comprimento da barra rígida foi altamente distorcido (MAE: 9,74 mm) com um erro máximo maior do que 10 milímetros (FIGURA 22). O erro médio absoluto das duas abordagens de calibração (WC2: 0,96mm – PC: 0,73 mm) foram comparáveis aos resultados fora de água e muito superior aos resultados DLT clássica (9,74mm).

Tabela 5: Resultados da calibração proposta por Cerveri et al., (1998) com dois parâmetros (WC2), com 4 parâmetros (WC4), da calibração proposta por Zhang (2000) usando 16 pontos de controle (PC) e da DLT clássica no teste de barra rígida em movimento.

D: 291.89 mm. Valores em milímetros (mm).

Método de Calibração	Média	Desvio-Padrão	Erro Mínimo	Erro Médio	Erro Máximo	RMSE	%RMSE
				Absoluto			
WC2	290.77	0.69	0.20	1.16	3.99	1.31	0.45
WC4	292.28	1.09	0.13	0.96	5.27	1.15	0.39
PC	291.67	0.89	0.07	0.73	6.90	0.92	0.31
DLT	301.64	1.73	4.45	9.74	13.42	9.90	3.39

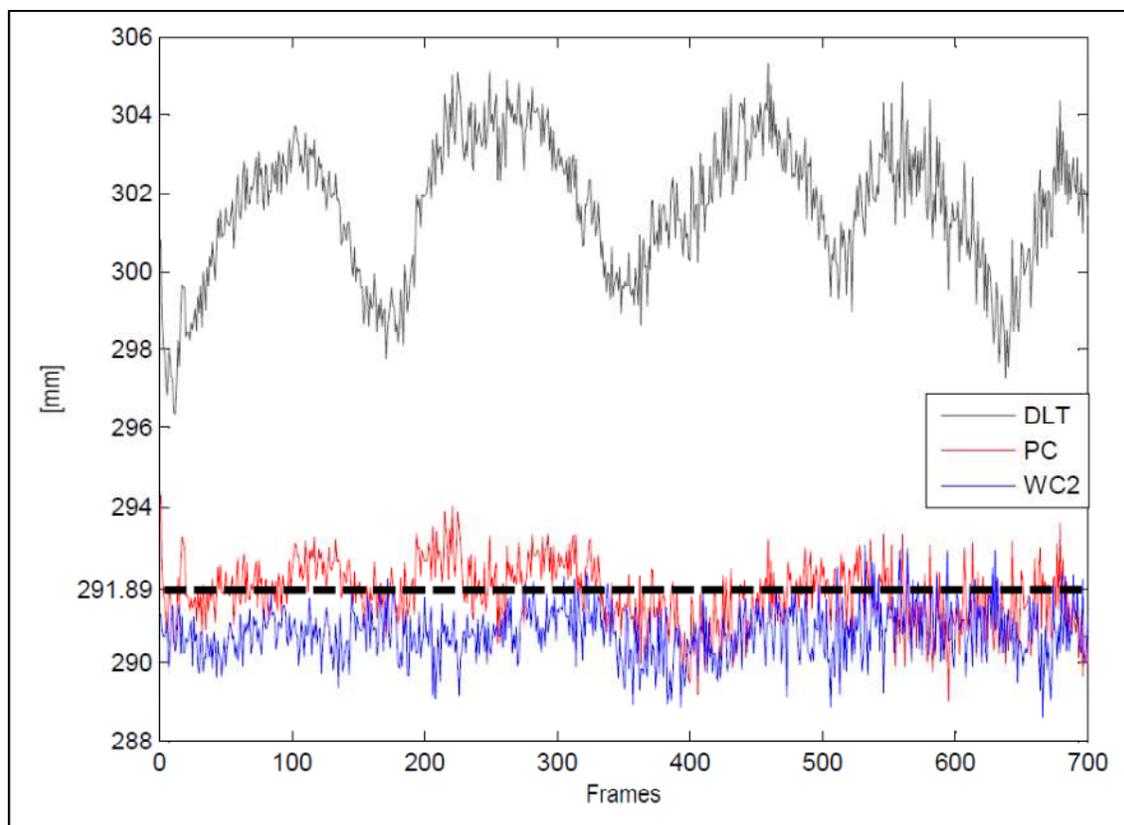


Figura 22 - Comprimento da barra rígida reconstruído com os três conjuntos de calibração de parâmetros (DLT em preto, WC2 em azul e PC em vermelho) em função de quadros, juntamente com o comprimento da barra nominal (D: 291,89 milímetros).

As trajetórias das mãos reconstruídas com a calibração baseada no método proposto por Zhang, (2000) (PC) foram plotadas nas vistas frontais (VF, plano frontal), laterais (VL, plano sagital) e inferior (VI, plano transversal) para permitir uma comparação das formas das trajetórias das mãos com os modelos descritos em Maglischo (1993). Cada nadador foi codificado em cores: verde para o atleta borboleta (V), vermelho para o atleta de peito (Vm), preto (P) e azul (A) para os atletas de crawl.

Em relação ao nado de borboleta (FIGURA 23), dois nadadores mostraram formas das trajetórias assimétricas com uma maior amplitude de movimento no lado direito (P, 0,5m e Vm, 0,56m na vista VF). A maior variabilidade entre os nadadores foi detectada no lado direito (MD). Um padrão de movimento inesperado do nadador (Vm) foi identificado em ambas as mãos direita e esquerda (VL). As trajetórias da mão esquerda (ME) estavam mais em concordância com o modelo de Maglischo (1993) do que as da mão

direita (MD). Entre todos os nadadores as trajetórias das mãos do nadador especialista no nado borboleta (V) foram mais simétricas e em concordância com o modelo (Maglischo, 1993).

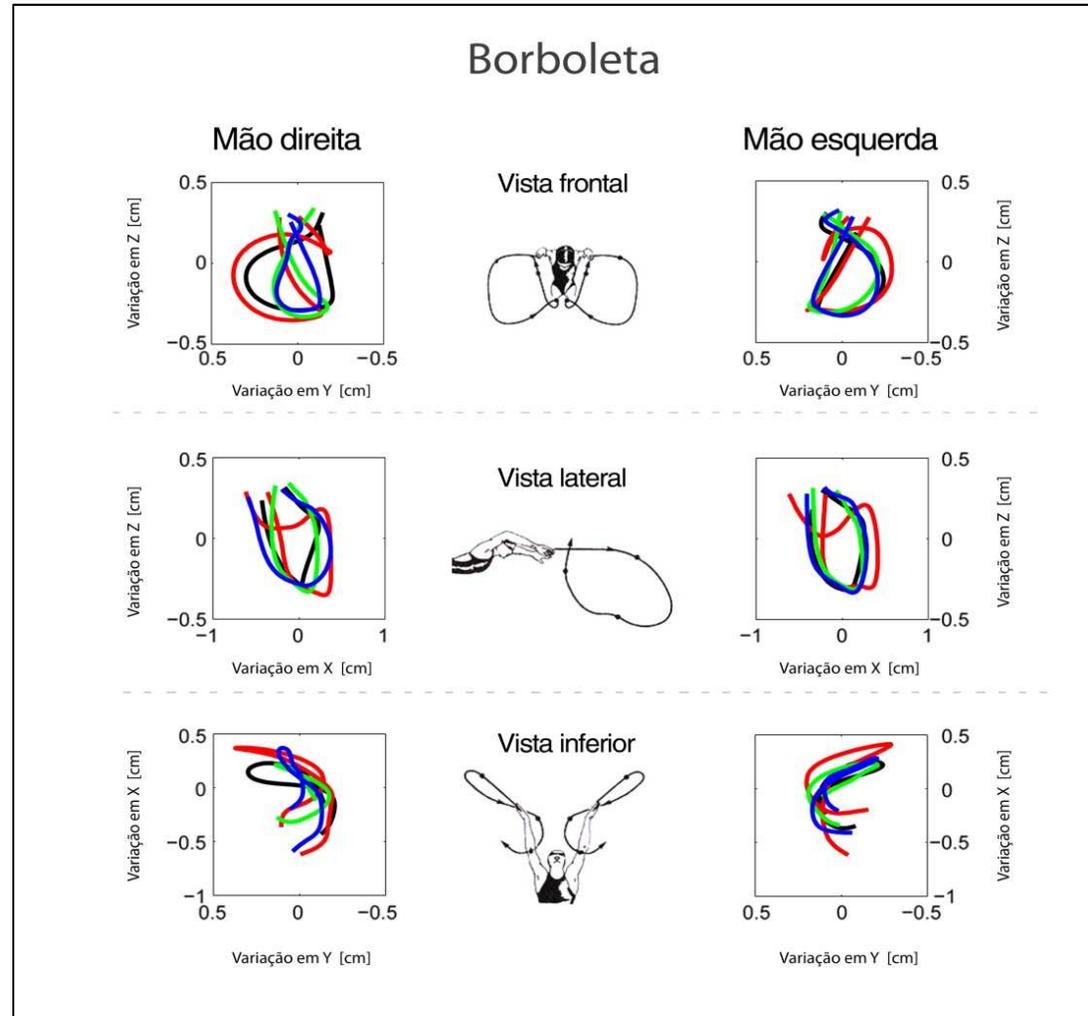


Figura 23 - Trajetórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Borboleta). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).

No nado peito (FIGURA 24), os resultados em relação às assimetrias das formas das trajetórias (P, 0,73m, e Vm, 0,73m), a variabilidade entre os nadadores e as trajetórias em concordância com o modelo (Maglischo 1993) foram os mesmos encontrados no nado borboleta. As trajetórias do nadador (V) estavam de acordo com o modelo (Maglischo, 1993), porém diferente dos outros nadadores, os quais realizaram uma técnica ondulatória (Persyn et al., 1992). Entre todos os nadadores as trajetórias das mãos do nadador especialista no nado peito (Vm) foram mais simétricas e de acordo com o modelo (VF e VI), porém em desacordo na VL (Maglischo, 1993).

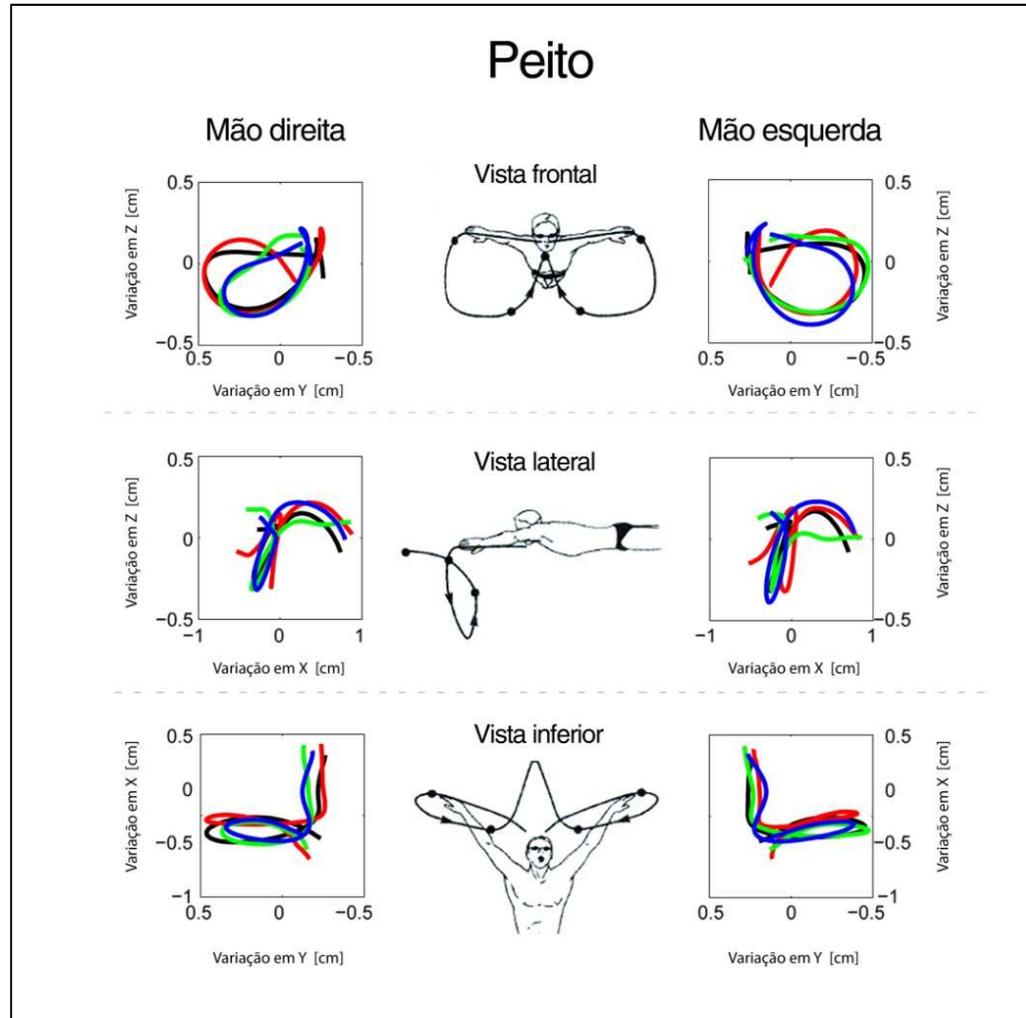


Figura 24 - Trajetórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Peito). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).

Para a tarefa do nado crawl (FIGURA 25), dois nadadores mostraram trajetórias com formas assimétricas (VF), apresentando uma maior amplitude de movimento no lado direito (amplitude da braçada do nadador representado pela cor preta 0,44 m lado direito e 30cm lado esquerdo e do nadador representado pela cor verde 0,24 m lado direito e 0,29 m lado esquerdo). Neste nado uma maior variabilidade entre os nadadores foi encontrado. Um movimento de flexão e extensão excessiva (VL) no lado esquerdo (ME) foi detectado (Vm), que era diferente dos outros nadadores e do modelo (Maglischo, 1993). Entre todos os nadadores as trajetórias das mãos dos nadadores especialistas do nado crawl (P e A) foram mais simétricas e de acordo com o modelo (Maglischo, 1993).

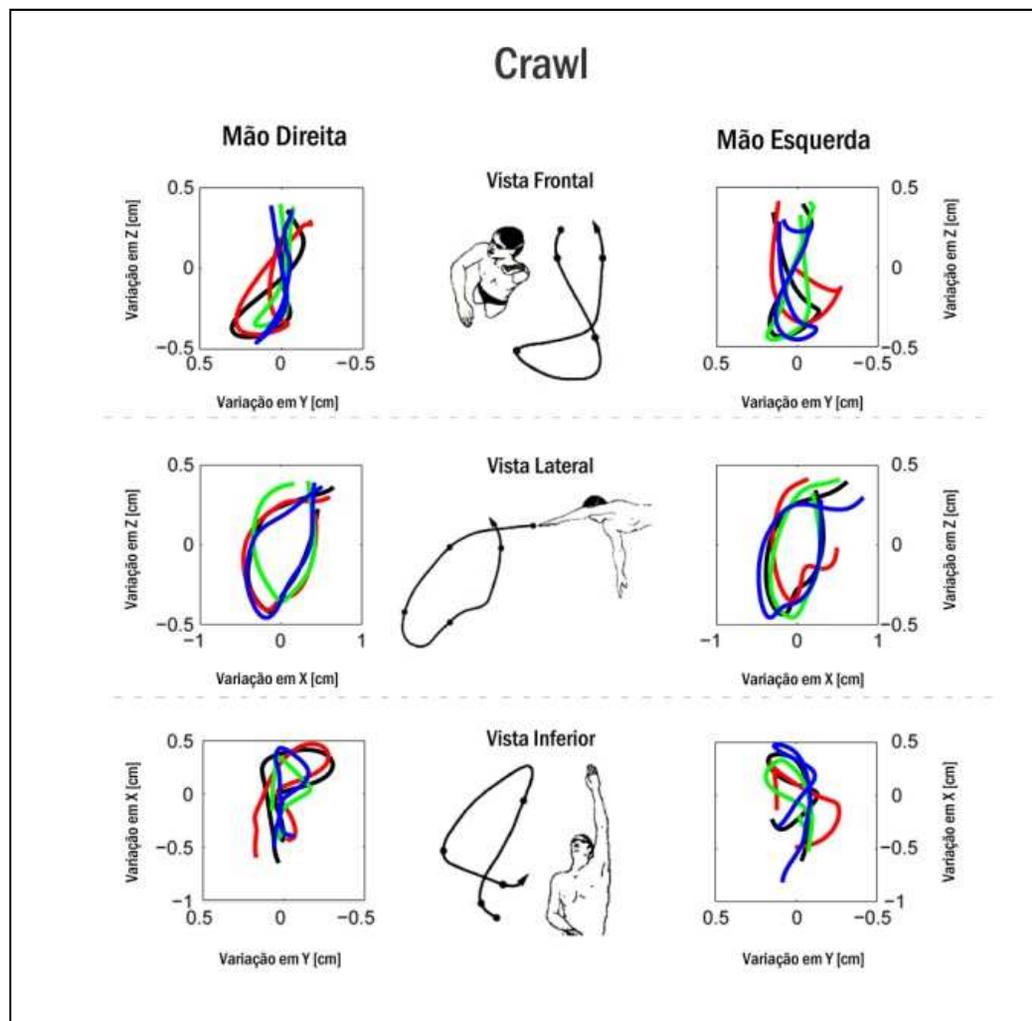


Figura 25 - Trajetórias da mão dos nadadores na vista frontal, lateral e inferior (Crawl). Cada nadador foi codificado por cores (verde para o atleta de borboleta, vermelho para o atleta de peito, preto e azul para o atleta do livre).

Discussão

Como esperado, a exatidão de reconstrução baseada na calibração DLT foi a pior, mostrando *bias* de cerca de 1cm. Isso pode ser justificado, considerando que poucos pontos de calibração foram utilizados e as distorções ópticas não foram corrigidas. Por outro lado, os métodos não-lineares foram altamente precisos com variações em torno de 1 mm. Estes resultados são melhores que os resultados previamente relatados na literatura (valores do MAE de 5,12 mm em YANAI et al., 1996;. RMS valor de erro de 5,6 mm e um máximo de 9,3 mm em KWON; LINDLEY, 2000;% RMS valor de 1,28% em GOURGOULIS et al., 2008;. e RMS valor de 5,2 mm em MACHTSIRAS; SANDERS, 2009). Pribanić et al., (2008), avaliaram os mesmos dois métodos de calibração de câmera, mas fora da água, e encontraram distribuições de erro médio absoluto (5 ensaios de calibração) variando de 0,66 mm a 0,75 mm para o método proposto por Cerveri et al., (1998) e 0,69mm a 0,84mm para o método proposto por Zhang, (2000). Os nossos resultados foram comparáveis a estes valores e com a exatidão dos sistemas comerciais utilizados para análise tridimensional em laboratório (CHIARI et al., 2005).

A maioria dos métodos para calibração das câmeras utilizadas em sistemas de captura do movimento subaquáticas ainda envolvem o uso de grandes estruturas volumétricas com muitos marcadores (GOURGOULIS et al., 2008;. MACHTSIRAS; SANDERS 2009). Em geral, tanto os métodos propostos por Cerveri et al., (1998) quanto Zhang, (2000) são preferíveis, pois envolvem a utilização de objetos de calibragem mais simples e portáteis.

Algumas vantagens específicas da abordagem do método proposto por Cerveri et al., (1998) podem ainda ser resumidas: 1) uma melhor equalização do erro de reconstrução através do volume de calibração obtida pela abordagem do de ajuste em conjunto que intrinsecamente tende a diminuir a dispersão do erro de reconstrução em todo o volume calibrado, 2) facilidade na medição do marcador, 3) redução do tempo do protocolo de aquisição em comparação com a abordagem adaptada do método proposto por Zhang, (2000); 4) uso de estruturas de calibração flexíveis. No entanto, algumas desvantagens podem ser resumidas : 1) o bastão deve ser movido oportunamente a cobrir tanto quanto possível todo o volume de aquisição; 2) a precisão é estritamente dependente

da confiabilidade da construção do triedro; 3) a medição do marcador do bastão tem uma sensibilidade maior à qualidade da água; 4) o uso do triedro leva à dependência do sistema de coordenada global a profundidade da piscina e inclinação. O erro médio absoluto diminuiu (0,96 mm) quando um modelo mais complexo, como o radial e tangencial, foi aplicado (WC4), no entanto o erro máximo e o desvio padrão (1,09 mm e 5,27 mm) aumentaram, indicando que o modelo de 4 parâmetros pode superajustar os dados. Uma solução para este problema poderia ser a aplicação de um modelo de distorção em pequenas regiões.

Equivalentemente, as vantagens e as desvantagens do método proposto por Zhang (2000) podem ser apontados. Por exemplo, o rastreamento dos pontos do objeto de calibração é facilitado pelo alto contraste da imagem do objeto, sendo este método menos sensível a transparência da água e a retificação da imagem pode ser alcançada através da exploração das linhas retas. Esta abordagem permite calibrar cada câmera separadamente e calcular os parâmetros intrínsecos. A fim de executar uma calibração subaquática das câmeras Lavest et al., (2000 e 2003) propuseram uma pré-calibração realizada fora da água usando o objeto planar de calibração e depois os parâmetros intrínsecos pré-determinados foram multiplicados por 1,33 para serem usados em condições subaquáticas. No entanto, a calibração de câmeras separadas conduz a uma rede desequilibrada de calibração com um erro de medição heterogêneo no volume de aquisição, que é mais crítica quando mais de duas câmeras estão envolvidas. A estimativa da distorção explora as linhas retas do objeto planar de calibração, o que pode ter levado a um menor erro médio absoluto (0,73 mm). No entanto, os resultados da exatidão foram ligeiramente piores do que os encontrados em configuração similar (SILVATTI et al., 2010). Este fato pode ser devido à transparência da água, que afeta o erro de localização 2D que foi menor no trabalho anterior. Isto sugere que a transparência da água deve ser levada em consideração quando os resultados com alta exatidão e precisão são necessários. Em comparação com o bastão, o objeto planar é pesado e o tamanho do volume de aquisição afeta o tamanho deste objeto. É importante ressaltar que a utilização da barra graduada permitiu a definição de um sistema de coordenadas global adequado. Enquanto a configuração da barra graduada é mais demorada, seu uso pode ser uma vantagem técnica em duas características: 1) permite corrigir diferentes profundidades na piscina de natação, 2) oferece a oportunidade

de lidar com um plano geométrico que divide a tarefa de movimento do nadador dentro da água (positivo) e fora da água (negativo).

Os resultados cinemáticos aqui relatados podem ser imediatamente apreciados pelos treinadores, pois foi possível identificar simetria ou assimetria entre os dois lados, a variabilidade intra e inter sujeitos em termos de padrões de movimento e concordância ou discordância com o modelo (MAGLISCHO, 1993). Particularmente neste trabalho, a maior amplitude da mão direita (MD) encontrado nos dois nadadores (Vm e P) em todos os nados (ref. FIGURA 23, 24 e 25) pode sugerir uma força aumentada neste braço em comparação com o outro lado. Uma vez que, esta diferença de força pode causar um aumento na descoordenação e instabilidade, o que provoca um aumento no rolamento do corpo na água (*'body roll'*), este resultado para o treinador pode indicar uma necessidade de um treino de força para melhorar o lado com menor força. Equivalentemente, o movimento ondulatorio excessivo mostrado pelo nadador (Vm) no nado borboleta (ref. FIGURA 23) poderia ser causado pela velocidade da tarefa executada, no entanto, este pode gerar uma diminuição do desempenho e a técnica deve ser corrigida pelo treinador. A técnica de peito com base no movimento ondulatorio do corpo (PERSYN et al., 1992) foi encontrada na presente investigação (ref. FIGURA 24) e é diferente, principalmente na fase inicial, comparado com o modelo (MAGLISCHO 1993). Porém, este trabalho não forneceu evidências estatísticas sobre as diferenças entre os desempenhos dos atletas, entre os lados (direito e esquerdo) e comparado com o modelo de Maglischo (1993), entretanto isto pode ser considerado relevante para trabalhos futuros.

Conclusão

Em conclusão, a análise tridimensional do movimento utilizando câmeras de vídeo submersas mostrou ser adequada para aplicações subaquáticas. Os resultados dos métodos não-lineares (CERVERI et al., 1998; ZHANG, 2000) forneceram resultados semelhantes, com alta exatidão e precisão, e foram melhores do que os relatados pela literatura, indicando que ambos os métodos são boas alternativas.

Os resultados cinemáticos destacaram simetria ou assimetria entre os dois lados (direito e esquerdo), variabilidade intra e inter-sujeitos em termos de padrões de movimento e concordância ou discordância com o modelo teórico. A extensão para os diferentes segmentos corporais é simples. Para um uso sistemático, deveria ser adotado um elevado número de câmeras distribuídas fora e dentro da água ao longo da piscina para adquirir o padrão de movimento durante todo o nado do atleta (ELIPOT et al., 2008; ELIPOT et al., 2010). Alternativamente, pode ser considerada a movimentação das câmeras, porém para isso é necessário um esforço tecnológico e um aumento nos custos.

Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e comparar a exatidão, precisão e os erros em diferentes métodos para a calibração de câmeras visando análises subaquáticas de movimentos humanos.

Os resultados mostraram que os métodos propostos por Cerveri et al., (1998) e Zhang, (2000) são alternativas promissoras para análise tridimensional de movimentos subaquáticos. Ambas as metodologias apresentaram resultados com maior exatidão que os encontrados na literatura. Este fato ocorreu devido a uma melhor modelagem da distorção óptica que foi confirmada pela menor influência no erro relativo à posição do objeto no volume de aquisição. Quanto à flexibilidade e portabilidade em relação ao objeto de calibração utilizado, ambos os métodos usam objetos mais fáceis de construir e manipular do que os objetos tradicionalmente utilizados.

O resultado da avaliação da aplicabilidade do sistema para a análise tridimensional do movimento utilizando câmeras submersas foi que este sistema é adequado para aplicações subaquáticas. Uma vez que, os resultados aqui relatados podem ser imediatamente apreciados pelos treinadores, pois foi possível identificar simetria ou assimetria entre os dois lados, a variabilidade intra e inter-sujeitos em termos de padrões de movimento e concordância ou discordância com o modelo teórico. Com possibilidade de extensão da análise para os diferentes segmentos corporais. Importante ressaltar que os métodos apresentados podem ser utilizados para qualquer esporte ou atividade realizada na água, como por exemplo, hidroginásticas ou práticas de reabilitação.

Em relação à calibração de câmeras estudos futuros objetivando modelar a distorção relativa à água e as lentes poderiam ser realizados e comparados com a modelagem da distorção aqui apresentada, para verificar se os resultados de exatidão melhoram ainda mais. A hipótese de Lavest (2000, 2003) relativa a uma pré-calibração realizada fora da água, e posterior multiplicação (1,33) dos parâmetros intrínsecos pré-determinados para aplicações em condições subaquáticas deve ser testada e a sua exatidão avaliada e comparada com a apresentada neste trabalho. A calibração de câmeras fora e dentro da água (duplo meio) também deve ser estudada e avaliada, pois possibilitará a aquisição do padrão de movimento durante todo o nado do atleta. Este padrão de

movimento pode ainda ser relacionado com capacidades fisiológicas do atleta, possibilitando relacionar uma alteração no padrão de movimento do atleta com sinais de desgaste muscular. Um outro ponto interessante seria avaliar a aplicabilidade de câmeras em movimento para a análise de atletas durante tarefas da natação baseados na auto-calibração dos parâmetros intrínsecos e a medição do movimento retilíneo será utilizado para obtenção dos parâmetros extrínsecos.

Para a definição como um produto para requerimento da patente alguns problemas devem ser ainda resolvidos no sistema apresentado no capítulo 4, tais como: 1) uma maior quantidade de câmeras distribuídas fora e dentro da água ao longo da piscina para possibilitar um uso sistemático da análise tridimensional de nadadores, e para isso a calibração de câmeras em duplo meio deve estar solucionada; 2) posicionamento das câmeras, com o objetivo de facilitar o manuseio do operador, podem estar em estruturas especialmente desenvolvidas para o suporte destas; 3) testar a utilização e avaliar a exatidão obtida com câmeras digitais comerciais, 4) definição de qual tipo de marcador que será utilizado, pois sem não forem fixados marcadores nos atletas, podem ser utilizada a a) marcação manual, porém será necessário a avaliação da reprodutibilidade e repetibilidade dos dados obtidos, ou ainda b) pode ser utilizado os conceitos baseados na extração de silhuetas dos nadadores, análise de volume e ajuste do modelo cinemático (*markerless*) e sua validade deve ser testada e 5) definição e padronização de um protocolo de aquisição para a natação que pode ainda ser estendida para as diferentes modalidades realizadas na água.

Referências

ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M.. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. In: SYMPOSIUM ON CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY, 1-18, Falls Church. 1971. Proceedings of Close-Range Photogrammetry. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 1971.

BARROS, R. M. L. Concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos. 1997. 119f. Tese (Doutorado em Educação Física) – Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

_____. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática tridimensional de movimentos humanos. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v.15, n.1/2, p.79-86, 1999.

_____. Respiratory pattern changes in elderly yoga practitioners. Journal of Human Movement Studies, v. 44, p. 387-400, 2003.

_____. et al. A method to synchronize video cameras using the audio band. Journal of Biomechanics, v. 39, n. 4, p.776-780, 2006.

_____. et al. Measuring handball players trajectories using an automatically trained boosting algorithm. Comput Method Appl M. v. 14, n. 1, p. 53–63, 2010.

BOUGUET, J. Y. Camera calibration toolbox for matlab. 2004. Disponível em: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. Acesso em: 15 mar. 2009.

BOULOS, P.; CAMARGO, I. Geometria analítica: um tratamento vetorial. São Paulo: MacGraw-Hill, 1987. 385p.

CERVERI, P.; BORGHESE, N. A.; PEDOTTI, A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. Journal of Biomechanics, v. 31, n. 10, p. 935-940, 1998.

CESERACCIU E, et al., Markerless analysis of front crawl swimming. *Journal of Biomechanics*, v. 44, n. 12, p. 2236–2242, 2011.

CHIARI, L. et al. Human movement analysis using stereophotogrammetry: part 2: instrumental errors. *Gait & Posture*, v. 21, n. 2, p.197-211, 2005.

CORAZZA S, et al., A markerless motion capture system to study musculoskeletal biomechanics: visual hull and simulated annealing approach. *Ann Biomed Eng.* v. 34, n. 6, p. 1019–1029, 2006.

DELLA CROCE, U.; CAPPOZZO A. A spot-check for estimating stereophotogrammetric errors. *Medical & Biological Engineering & Computing*, v. 38, p. 260–266, 2000.

DELUZIO K. J. et al. A procedure to validate three-dimensional motion assessment systems. *Journal of Biomechanics*, v. 26, p. 753–759, 1993.

EHARA, Y., et al. Comparison of the performance of 3D camera systems. *Gait & Posture*, v. 3, n. 3, p.166-169. 1995.

_____. Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait & Posture*, v. 5, n. 3, p. 251-255. 1997.

ELIPOT M.; DIETRICH G.; HELLARD P. N. H. Cinalysis: a new software for swimming races analysis. Paper presented at: ISEA 2010. 8th Conference of the International Sports Engineering Association; Vienna, Austria. 2010.

ELIPOT M.; et al., Comparaison de méthodes de calibration de camera pour l'analyse du mouvement en conditions sous-marines. 4èmes journées spécialisées de notation Lille, France. 2008.

FAUGERAS, O. D.; TOSCANI, G. Camera calibration for 3D computer vision. Proc. International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence. Japan: Silken, 1987. p. 240-247.

FIGUEROA, P. J. et al. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. Computer Methods and Programs in Biology, v. 72, n. 2, p.155-165, 2003.

FRASER C. S. Digital camera self-calibration. ISPRS J Photogram Rem Sens. v. 52, p. 149–159, 1997.

FUSIELLO, A. Uncalibrated Euclidean reconstruction: a review. Image and Vision Computing, v.18, n. 6-7, p. 555–563, 2000.

FUSIELLO, A. A new autocalibration algorithm: Experimental evaluation. In: SKARBEEK, W. (Ed.). Computer Analysis of Images and Patterns, n. 2124 in Lecture Notes in Computer Science, p.717–24. Springer, 2001. Proceedings of the 9th International Conference, CAIP 2001.

GOURGOULIS, V. et al. Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. Journal of Science and Medicine in Sport, v. 11, n. 2, p. 90-95, 2008.

HANSELMAN, B. Matlab 5: Versão do estudante: guia prático. Tradução Alberto Vasquez Saa, Francisco Assis Neto e Maria Aparecida Ehrhardt, São Paulo: Makron Books,1999.

HATZE H. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. Journal of Biomechanics. v. 21, n. 7, p. 533–538. 1988.

HAY J. C. E GEROT, J. T. Periscope system for recording the underwater motions of a swimmer. International Journal of Sport Biomechanics, v. 7, p. 392-399. 1991.

HEIKKILA, J.; SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), page 1106. IEEE Computer Society, 1997.

KWON Y. H. Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. Journal Applied Biomechanics, v.15, p. 396-403. 1999.

KWON Y.; ABLES A.; POPE P. Examination of different double-plane camera calibration strategies for underwater motion analysis. Paper presented at: ISBS 2002. 20th International Conference on Biomechanics in Sport; Caceres, Spain. 2002.

KWON, Y. H.; LINDLEY, S. Applicability of 4 localized-calibration methods in underwater motion analysis. In: SANDERS, R.H.; HONG, Y. (Ed.). Proceedings of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, Applied Program: application of biomechanical studies in swimming. Hong Kong: International Society of Biomechanics in Sports, 2000. p. 48-55, 2000.

KWON Y. H.; CASEBOLT J. B. Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. Sports Biomech. v. 5, n. 2, p. 315–340, 2006.

LARA, J. P. et al. Angular kinematics of high level long jumpers in competition. In: European College of Sport Science, 2008. Estoril: European College of Sport Science, 2008. p. 185

LAVEST J.; RIVES G.; LAPRESTE´ J. Underwater camera calibration. Paper presented at: ECCV 2000. 6th European Conference on Computer Vision; Dublin, Ireland, 2000.

LAVEST J.; RIVES G.; LAPRESTE´ J. T. Dry camera calibration for underwater applications. Mach Vision Appl. v. 13, n. 5, p. 245–253, 2003.

LEARDINI, A.; CHIARI, L. Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. Gait and Posture, v. 21, p. 212-225, 2005.

LEI, B. J.; HENDRIKS, E. A.; KATSAGGELOS, A. K.; Camera calibration for 3D reconstruction and view transformation. In: SARRIS, N.; STRINTZIS, M. C. (Ed.). 3D modeling & animation: synthesis and analysis techniques for the human body. Hershey: IRM Press, 2004, 395p.

MACHTSIRAS, G.; SANDERS R. H. Accuracy of portable (PTZ digital) camera system designed for aquatic three-dimensional analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMECHANICS IN SPORT, 27., Limerick, 2009. Limerick, 2009. p. 451.

MAGLISCHO E. W. 1993. Swimming even faster. Mountain View, CA: Mayfield Publisher.

MENG Y, ZHUANG H. Autonomous robot calibration using vision technology. Robot Comput-Integr Manuf. v. 23, n. 4, p. 436–446, 2007.

MIANA A. N.; PRUDÊNCIO M. V.; BARROS R. M. L. Comparison of protocols for walking and running kinematics based on skin surface markers and rigid clusters of markers. Int J Sports Med. v. 30, n. 11, p. 827–833, 2009.

PEASE D. Spotting technique faults- below & above the water. Paper presented at: International Society of Biomechanics in Sport 1999. 17th International Conference on Biomechanics in Sport; Perth Australia, 1999.

PERSYN U.; COLMAN V.; VAN TILBORGH L. Movement analysis of flat and undulating breaststroke patterns. In: MacLaren D, Reilly T, Lees A editors. Swimming Science VI (Biomechanics and medicine in swimming), London: E & FN SPON, 75–80, 1992.

PRIBANIĆ, T.; STURM, P.; CIFREK, M. Calibration of 3D kinematic systems using 2D calibration plate. In: International Conference on Biomechanics in Sport, 26., Seoul. Seoul, 2008, p. 77-80, 2008.

SANDERS R. Kinematics, coordination, variability, and biological noise in the prone flutter kick at different levels of a learn-to-swim programme. Journal of Sports Sciences. v. 5, n. 2, p. 213–227, 2007.

SCHMID O. A. A new calibration method for 3-D position measurement in biomedical applications. Biomedizinische Technik, v. 46, p. 50–54, 2001.

SHORTIS M. R. Precision evaluations of digital imagery for close-range photogrammetric applications. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 54, p. 1395–1401, 1988.

SILVATTI A. P. et al. Accuracy of a novel three-dimensional underwater kinematic analysis system. In: ANNUAL CONGRESS OF THE EUROPEAN COLLEGE OF SPORT AND SCIENCE, 13., Estoril, 2008, Proceedings... Estoril: Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

SILVATTI A. P. et al. Non-linear camera calibration for 3D reconstruction using straight line plane object. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMECHANICS IN SPORT, 27., Limerick, 2009. Proceedings..., Limerick, 2009.

SILVATTI A. P. et al. Underwater non-linear camera calibration: an accuracy analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMECHANICS IN SPORT, 28., Marquette, 2010. Proceedings... Marquette: Michigan University, 2010.

SILVATTI, A .P. et al. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, p. 1-9, 2012.

SILVATTI, A. P. et al. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. Journal of Biomechanics, v. 45, n. 6, p. 1112-1116, 2012.

STURM P, MAYBANK S. On plane-based camera calibration: a general algorithm, singularities, applications. IEEE Computer Vision Pattern Recognition, p. 432–437, 1999.

WANG, J. et al. A new calibration model of camera lens distortion. Pattern Recognition, v. 41, n. 2, p. 607-615. 2008.

YANAI, T. Buoyancy is the primary source of generating bodyroll in front-crawl swimming. Journal of Biomechanics, v. 37, n. 5, p. 605-612. 2004.

YANAI, T., et al. Three-dimensional videography of swimming with panning periscopes. Journal of Biomechanics, v. 29, n. 5, p. 673-678, 1996.

ZAR, J. H. Biostatistical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 663 p.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 22, n. 11, p. 1330-1334, 2000.

ZHANG, Z. Camera calibration with one-dimensional objects. Paper presented at: ECCV 2002. 8th European Conference on Computer Vision; Copenhagen, Denmark, 2002.