

GUSTAVO RAMOS DALLA BERNARDINA

**UTILIZAÇÃO DE CÂMERAS DE AÇÃO PARA ANÁLISE CINEMÁTICA
TRIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO HUMANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Educação Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

B523u
2016

Bernardina, Gustavo Ramos Dalla, 1991-
Utilização de câmeras de ação para análise cinemática
tridimensional do movimento humano / Gustavo Ramos Dalla
Bernardina. – Viçosa, MG, 2016.
xviii, 129f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: João Carlos Bouzas Marins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Biomecânica. 2. Câmeras fotográficas - Calibração.
3. Imagem tridimensional. 4. Mecânica humana. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Educação Física. Programa
de Pós-graduação em Educação Física. II. Título.

CDD 22 ed. 612.76

GUSTAVO RAMOS DALLA BERNARDINA

**UTILIZAÇÃO DE CÂMERAS DE AÇÃO PARA ANÁLISE CINEMÁTICA
TRIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO HUMANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Educação Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de outubro de 2016.

André Gustavo Pereira de Andrade

Amanda Piaia Silvatti
(Coorientadora)

João Carlos Bouzas Marins
(Orientador)

Aos meus pais, irmãos, namorada e amigos que estavam sempre presentes durante todo esse processo, especialmente aos meus professores Amanda Piaia Silvatti e João Carlos Bouzas Marins.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus pela saúde. Por me dar a oportunidade dessa experiência que, sem dúvidas, foi de muito aprendizado.

Agradeço a toda a minha família.

Agradeço aos meus pais pela educação que me deram. Seus grandes incentivos para eu que sempre buscasse os estudos. Seus esforços para que eu pudesse sempre sonhar em alcançar objetivos.

Agradeço aos meus irmãos que, naturalmente, são sempre um incentivo para viver.

Agradeço a minha namorada pelo apoio fundamental.

Agradeço aos amigos de mestrado que compartilharam do 'sofrimento', mas que hoje também são Mestres.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa.

Agradeço ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio no desenvolvimento das pesquisas.

Agradeço ao Departamento de Educação Física, professores e funcionários, pelo suporte e conhecimento compartilhados nesses anos, desde a graduação.

Agradeço aos amigos do LAB – Laboratório de Análises Biomecânicas – e aos agregados da veterinária.

Agradeço ao pessoal da Université de Poitiers, na França, pela parceria e contribuição na elaboração dos dois últimos artigos dessa dissertação.

Agradeço à Associação Atlética Acadêmica LUVE / UFV por momentos especiais vividos em toda a trajetória acadêmica, como atleta, treinador e membro da diretoria.

Agradeço à família Natação LUVE – UFV que se resume na frase: “Os melhores amigos são os da natação”.

Agradeço a todos aqueles que não foram citados, mas que com toda a certeza foram fundamentais nesse processo.

E agradeço a aqueles que permitiram que esse trajeto acontecesse, professor João Carlos Bouzas Marins e professora Amanda Piaia Silvatti.

Ao professor João, agradeço o profissionalismo, ensinamentos e amizade, e por me acolher dentro do programa.

À professora Amanda, resumo os agradecimentos, pois senão deverei escrever outro capítulo. Por toda sua gentileza e paciência comigo. Por confiar em mim. Por todas as oportunidades que me deu e por todo conhecimento que pude adquirir.

Meus mais sinceros agradecimentos. Obrigado!

SUMÁRIO

ABREVIATURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	11
OBJETIVOS.....	13
ARTIGO 1 – Câmeras de ação como um instrumento para realizar análises 3D de movimentos subaquáticos.....	14
ARTIGO 2 – Comparação da exatidão de reconstrução 3D, dentro e fora da água, utilizando câmeras de ação.....	35
ARTIGO 3 – As câmeras de ação são exatas o suficiente para análises tridimensionais de movimento? Comparação com um sistema comercial.....	59
ARTIGO 4 – Avaliação cinemática 3D por um sistema de câmeras em movimento: câmeras de vídeo versus câmeras optoeletrônicas.....	80
CONCLUSÕES.....	94
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
Anexo A – Termo de consentimento livre e esclarecido.....	96
Anexo B – Aprovação do projeto pelo Comitê de Ética em Seres Humanos da Universidade Federal de Viçosa.....	100
Anexo C – Folha de produtividade.....	107
Anexo D – Versão original do artigo publicado na Revista PlosOne, 2016.....	113
Anexo E – Primeira página da versão original do artigo publicado na Revista Journal of Biomechanics, 2017.....	128

ABREVIATURAS

ASC = Action Sport Camera

3D = Tridimensional

2D = Bidimensional

Hz = Hertz

AVI = Audio Video Interleaved

CNC = Computer Numerical Control Machine

M1-1 = Movimento de zig-zag com um marcador

M2-1 = Movimento circular com um marcador

M3-1 = Movimento para cima e para baixo com um marcador

M1-2 = Movimento de zig-zag com dois marcadores

M2-2 = Movimento circular com dois marcadores

MOCAPs = Motion Capture

FOV = Field of view

DLT = Direct Linear Transformation

EM = Erro médio

DP = Desvio padrão

EMA = Erro médio absoluto

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1. Resultado das 5 aquisições do teste dinâmico da barra rígida (Alta e Baixa Resolução). Distancia nominal d_n entre os dois marcadores: 250mm.....23

Tabela 2. Distância mínima, media e máxima inter-marcadores, da média das 5 aquisições e o erro médio absoluto correspondente (d_n : 250mm). M1-1 (movimento de zig-zag com um marcador), M2-1 (movimento circular com um marcador), M3-1 (movimento para cima e para baixo com um marcador), M1-2 (movimento de zig-zag com dois marcadores) e M2-2 (movimento circular com dois marcadores). Resultados da comparação *post-hoc* (* $p < 0,05$).....24

Artigo 2

Tabela 1. Configurações de câmera utilizadas para avaliar a exatidão das câmeras de ação (ASC - *Action Sport Cameras*).40

Tabela 2. Resultado do teste de barra rígida (4000 amostras) em todas as configurações de câmera, em ambos ambientes. Distancia nominal d_n entre dois marcadores: 250mm.....47

Tabela 3. Variabilidade dos parâmetros de calibração nos dois ambientes em dez calibrações repetidas.....49

Artigo 3

Tabela 1. Resultados de Bland-Altman para avaliar o grau de concordância entre as medições do MOCAP e ASC, através da aquisição de uma ferramenta em forma de L com três marcadores67

Tabela 2. Resultado de duas aquisições da ferramenta em forma de L com três pontos. Distancia 1 (entre os pontos P1 e P2): 160mm. Distancia 2 (entre os pontos P2 e P3): 240mm.....71

Tabela 3. Resultado do ângulo formado entre os três pontos da ferramenta em forma de L, em duas aquisições. Valor real do ângulo: 90 graus.....72

Tabela 4. Comparações entre ASC e MOCAP para resultados de comprimento de passada, direita e esquerda, nas três aquisições da marcha. ($p < 0,05$).74

Artigo 4

Tabela 1. Dados médios dos ciclos da marcha a partir da aquisição do MOCAP e ASC, movimentados por um volume de 40 metros.....89

LISTA DE FIGURAS

Introdução geral

- Figura 1.** Etapas necessárias para estruturar uma análise cinemática.....2
- Figura 2.** Princípio da colinearidade, com base no método DLT (www.kwon3d.com)5
- Figura 3.** Exemplos de distorções. (A) Projeções perspectivas. (B) Distorções radiais.....5
- Figura 4.** Representação dos desvios devido à distorção. 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 . (Wang et al., 2008).....6
- Figura 5.** (A) Objeto de calibração não-linear ($1 \times 1 \times 1m^3$) (Silvatti et al., 2012). (B) Objeto de calibração linear ($6 \times 2,5 \times 2m^3$) (Jesus et al., 2015).....7

Artigo 1

- Figura 1.** A) Ferramentas de calibração. B) Câmeras de ação - Action Sport Camera (GoPro, Hero3+, Black). C) Barra rígida utilizada para avaliar a exatidão da reconstrução 3D. D) Posição das câmeras e volume de aquisição (Bernardina et al., 2016).....18
- Figura 2.** Fluxo esquemático das duas etapas da calibração para um amplo número de câmeras (Bernardina et al., 2016).....20
- Figura 3.** Três movimentos diferentes do bastão de calibração para avaliar a confiabilidade da calibração (Bernardina et al., 2016).....22

Figura 4. Os histogramas da distribuição de erro residual (acumulado ao longo das cinco aquisições) para Alta (1920x1080) e Baixa (1280x720) Resolução. Os valores médios foram de 1,28mm e 2,41mm, respectivamente (Bernardina et al., 2016).....23

Figura 5. Dois momentos do ciclo da braçada do nado crawl registrado por duas câmeras. O nadador está equipado com marcadores de superfície fixados no braço direito. Esta real condição esclarece como ruins contrastes de imagem e perturbações da água podem dificultar a detecção e rastreamento automático do marcador na imagem, afetando a exatidão das análises cinemáticas 3D (Bernardina et al., 2016).....27

Artigo 2

Figura 1. Posicionamento das câmeras, juntamente com os três diferentes volumes de aquisição, correspondentes aos três campos de visão (FOV) da câmera, vista 3D, superior e frontal do volume. Ferramentas de calibração, bastão e triedro usados para calibrar as câmeras (Bernardina et al., 2017).....41

Figura 2. Identificação do marcador para reconstrução 3D da trajetória subaquática da braçada esquerda do nado crawl.....45

Figura 3. Imagens da aquisição do triedro para mostrar a diferença na distorção óptica no ar e no ambiente subaquático (Bernardina et al., 2017).....46

Figura 4. Distribuição do erro médio absoluto em nove configurações de câmera testadas para ambiente subaquático (imagem superior) e laboratório (imagem inferior) (Bernardina et al., 2017).....48

Figura 4. Trajetória da mão esquerda do nadador. Vista lateral, vista frontal, vista inferior. Trajetória da mão proposta por Maglisho (2010).....50

Artigo 3

Figura 1. Disposição das câmeras.....	62
Figura 2. Esquema de calibração das câmeras.....	64
Figura 3. Marcadores (\varnothing : 14mm) usados nas aquisições de marcha e salto (vista anterior e posterior).....	66
Figura 4. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo X adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP E ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).....	68
Figura 5. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo Y adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP E ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).....	69
Figura 6. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo Z adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP E ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).....	70
Figura 7. Distribuição do erro das distâncias 1 e 2 durante aproximadamente 10 segundo de aquisição (vermelho – MOCAP e azul – ASC).....	71
Figura 8. Distribuição dos valores de ângulo calculado entre os três pontos da ferramenta em forma de L (vermelho – MOCAP e azul – ASC).....	72
Figura 9. Representação de uma passada direita. Curva de variação do ângulo do joelho em função do tempo (vermelho – MOCAP e azul – ASC).....	73
Figura 10. Variação da velocidade da marcha em função do tempo pelos dois sistemas (vermelho – MOCAP e azul – ASC).....	74

Artigo 4

- Figura 1.** Posição das câmeras (ViconMX40 e GoPro, Hero3+) fixadas em uma estrutura rígida que se move.....84
- Figura 2.** Disposição dos marcadores no chão, distanciados com 1 metro entre cada, em duas filas paralelas percorrendo todo o volume (Begon et al., 2009).....85
- Figura 3.** Volume de aquisição de 40 metros de comprimento.....86
- Figura 4.** Protocolo de marcação da marcha.....87
- Figura 5.** Distribuição da distância medida, entre os dois marcadores da barra rígida utilizada, pelas ASC (Distância inter-marcadores: 595 mm).....88
- Figura 6.** Resultados de comprimento de passo e passada, direito e esquerdo, obtidos em uma aquisição do movimento da marcha por um volume de 40m de comprimento (azul – MOCAP e vermelho – ASC).....90
- Figura 7.** Comportamento do ângulo do joelho durante um ciclo de passada. São apresentados todos os ciclos obtidos em uma aquisição do movimento da marcha por um volume de 40m de comprimento (azul – MOCAP e vermelho – ASC).....90

RESUMO

BERNARDINA, Gustavo Ramos Dalla, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2016. **Utilização de câmeras de ação para análise cinemática tridimensional do movimento humano**. Orientador: João Carlos Bouzas Marins. Coorientadoras: Amanda Piaia Silvatti e Mariana Calábria Lopes.

Câmeras de ação (ASC - *Action Sport Camera*) são principalmente utilizadas para fins recreativos. Porém contínuas melhorias técnicas, em correspondência a uma redução de custo, cria a possibilidade de seu uso em análises tridimensionais (3D) de movimentos, como no estudo de gestos esportivos e na avaliação quantitativa do desempenho atlético. Nesse contexto, o objetivo geral dessa dissertação foi avaliar a utilização de câmeras de ação (ASC – *Action Sport Camera*) para a análise cinemática tridimensional. No primeiro estudo o objetivo foi avaliar o efeito de diferentes estratégias de aquisição no protocolo de calibração das ASC e como isso afeta a exatidão tridimensional. Duas GoPro Hero3+ Black (frequência: 60Hz; resolução de imagem: 1280×720 / 1920×1080 pixels) foram posicionadas dentro da água em uma piscina, abrangendo um volume de trabalho de aproximadamente 6m³. Foi implementado um procedimento específico de calibração com duas etapas, que consiste na aquisição de um triedro estático e de um bastão em movimento, com nove e um marcadores esféricos passivos, respectivamente. Após avaliar os parâmetros da câmera, foram adquiridas várias posições de uma barra rígida, contendo dois marcadores de distância conhecida, dentro do volume de trabalho. O erro médio da reconstrução sobre a distância inter-marcadores foi inferior a 2,5mm (1280×720) e 1,5mm (1920×1080). Os resultados deste estudo demonstram que a calibração subaquática de ASC é viável, permitindo medições cinemáticas quantitativas com exatidão comparável aos sistemas tradicionais de captura de movimento. No segundo estudo o objetivo foi avaliar a exatidão e reconstrução tridimensional a partir das configurações de aquisição permitida pelas câmeras (diferentes resoluções de imagem, ângulos de visão e frequências de aquisição) em movimentos dentro

(piscina) e fora (laboratório) da água. A fim de calibrar o par de câmeras, marcadores esféricos pretos foram colocados em duas ferramentas de calibração, utilizadas tanto dentro quanto fora da água, e uma otimização não-linear de duas etapas foi realizada. A exatidão na reconstrução 3D dos marcadores e a reprodutibilidade ao estimar os parâmetros das câmeras representaram o desempenho do sistema. Para ambos ambientes (laboratório e subaquático), os testes estatísticos foram focados na comparação de diferentes configurações das câmeras. Em seguida, cada configuração foi comparada para os dois ambientes. E foi demonstrada uma aplicabilidade de obtenção de variáveis cinemáticas dentro da água. Em todas as resoluções avaliadas, e em ambos ambientes (laboratório e subaquático), o erro de reconstrução foi inferior a 3mm e o erro relacionado ao volume de trabalho diagonal variou de 1: 2000 ($3 \times 1,3 \times 1,5 \text{ m}^3$) a 1:7000 ($4,5 \times 2,2 \times 1,5 \text{ m}^3$) em concordância com a literatura. Estatisticamente, a exatidão 3D obtida em laboratório foi inferior ($p < 10^{-5}$) à subaquática, em todas as configurações de câmera testadas. Em relação à reprodutibilidade dos parâmetros das câmeras, foi encontrada uma baixa variabilidade nos dois ambientes (1.7% e 2.9%, laboratório e subaquático). Na avaliação cinemática do nado foi possível reconstruir a trajetória submersa do nado crawl. Foi identificada uma manutenção do padrão de braçada durante todo o nado e uma técnica comparada ao modelo proposto na literatura. Esses resultados apoiam o uso da tecnologia das ASC para realizar reconstruções quantitativas tanto em laboratório quanto em ambiente subaquático. No terceiro estudo o objetivo foi avaliar, em condição de laboratório, a precisão, exatidão e dados cinemáticos das câmeras ASC e comparar a um sistema comercial de análise de movimento 3D. Quatro câmeras GoPro Hero3+ Black (frequência: 120Hz; resolução de imagem: 1280×720 pixels) e quatro câmeras ViconMX40 (frequência: 120Hz; resolução de imagem: 2353×1728 pixels) foram utilizadas para comparação. Para calibração das câmeras foram utilizadas as ferramentas e o procedimento recomendado pela Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK). O desempenho do sistema foi representado pela precisão e exatidão na reconstrução 3D dos marcadores e pela aquisição de dados cinemáticos da marcha e salto. Apesar de ser encontradas altas correlações ($r=0,99$) e desvios (*bias*) inferiores a 3mm, os dois sistemas

apresentaram uma diferença sistemática confirmada pelo viés estatisticamente significativo. Em relação à exatidão foi encontrada uma diferença entre os dois sistemas, com um erro de 8 a 10 vezes maior para as câmeras ASC. Apesar desses resultados, não foram encontradas diferenças entre os dados cinemáticos. Isso sugere que, apesar do sistema comercial Vicon alcançar melhor desempenho que o sistema com câmeras ASC, como era esperado, em termos práticos, as diferenças não foram significativas para a obtenção de parâmetros cinemáticos. O objetivo principal de um sistema é a análise de movimentos e, desta forma, a ASC se mostrou viável na avaliação da cinemática 3D de movimentos humanos. No quarto estudo o objetivo foi avaliar os parâmetros de exatidão da reconstrução tridimensional e dados cinemáticos fornecidos por câmeras optoeletrônicas e câmeras de ação, colocadas em movimento. Experimentalmente as câmeras foram fixadas em uma estrutura rígida móvel ($4,4 \times 4 \times 2,5 \text{m}^3$) e os dados foram adquiridos simultaneamente pelos dois tipos de câmeras. Foram realizadas aquisições de um teste de barra rígida e da marcha humana para avaliar a exatidão da reconstrução 3D e calcular as variáveis lineares e angulares da marcha. Algoritmos foram desenvolvidos para fazer a translação do sistema de coordenadas global a partir de pontos de referência dispostos no chão de um corredor de 40 metros, conforme as câmeras e a estrutura se movimentavam. Como resultado preliminar, é importante ressaltar que o erro percentual encontrado (1%) pelas câmeras ASC é comparável ao erro encontrado em aquisições com o sistema estático, como visto no artigo 3 dessa dissertação. Em relação aos dados cinemáticos destaca-se a captura de aproximadamente 18 ciclos de passada em uma única aquisição, fato importante a ser considerado para se definir um padrão de movimento. Além disso, os dois sistemas de avaliação cinemática encontraram valores próximos para as variáveis analisadas. O artigo ainda está em fase de finalização, no entanto sugere que, ao avaliar movimentos em deslocamento horizontal de aproximadamente 40 metros, é viável utilizar ASC para reconstruir tridimensionalmente uma marcha natural, não delimitada à laboratório. Em conclusão, essa dissertação sugere que as ASC são viáveis para avaliar tridimensionalmente movimentos humanos.

ABSTRACT

BERNARDINA, Gustavo Ramos Dalla, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2016. **The use of action sport cameras for three-dimensional kinematic analysis of human movement.** Adviser: João Carlos Bouzas Marins. Co-advisers: Amanda Piaia Silvatti and Mariana Calábria Lopes.

Action sport camera (ASC) are used mainly for recreational purposes but their continuous technical improvements, in correspondence of cost decreases, creates the possibility of to use in three-dimensional (3D) motion analysis, as in sports gestures study and athletic performance evaluation quantitatively. In this context, the main purpose of this thesis was to evaluate the usage of the action sport camera (ASC) for three-dimensional (3D) kinematic analysis. In the first study the aim was to evaluate the effect of different acquisition strategies on the calibration protocol of the ASC and how this affects the three-dimensional accuracy. Two GoPro Hero3+ Black (frequency: 60Hz; image resolutions: 1280×720/1920×1080 pixels) were located underwater into a swimming pool, surveying a working volume of about 6m³. A two-step custom calibration procedure, consisting in the acquisition of one static triad and one moving wand, carrying nine and one spherical passive markers, respectively, was implemented. After assessing camera parameters, a rigid bar, carrying two markers at known distance, was acquired in several positions within the working volume. The average error upon the reconstructed inter-marker distances was less than 2.5mm (1280×720) and 1.5mm (1920×1080). The results of this study demonstrate that the calibration of underwater ASC is feasible enabling quantitative kinematic measurements with accuracy comparable to traditional motion capture systems. In the second study the aim was to evaluate the reconstruction accuracy three-dimensional from the acquisition configurations allowed by the cameras (different image resolutions, fields of view and acquisition frequencies) in in-air (laboratory) and underwater (swimming pool) movements. In order to calibrate the camera stereo pair, black spherical markers placed on two calibration tools, used both in-air and underwater, and

a two-step nonlinear optimization were exploited. The 3D reconstruction accuracy of testing markers and the repeatability of the estimated camera parameters accounted for system performance. For both environments, statistical tests were focused on the comparison of the different camera configurations. Then, each camera configuration was compared across the two environments. And it was demonstrated an applicability of obtaining underwater kinematic variables. In all assessed resolutions, and in both environments, the reconstruction error (true distance between the two testing markers) was less than 3mm and the error related to the working volume diagonal was in the range of 1:2000 ($3 \times 1.3 \times 1.5 \text{m}^3$) to 1:7000 ($4.5 \times 2.2 \times 1.5 \text{m}^3$) in agreement with the literature. Statistically, the 3D accuracy obtained in the in-air environment was poorer ($p < 10^{-5}$) than the one in the underwater environment, across all the tested camera configurations. Related to the repeatability of the camera parameters, we found a very low variability in both environments (1.7% and 2.9%, in-air and underwater). In the swimming kinematic evaluation it was possible to reconstruct the underwater trajectory of the freestyle. A stroke standard maintenance was identified throughout the swim and a technique compared to the model proposed in the literature. This result encourage the use of ASC technology to perform quantitative reconstruction both in-air and underwater environments. In the third study the aim was to evaluate, in laboratory condition, the precision, accuracy and kinematic data of the ASC cameras and to compare to a commercial system of 3D motion analysis. Four GoPro Hero3+ Black cameras (frequency: 120Hz, image resolution: 1280×720 pixels) and four ViconMX40 cameras (frequency: 120Hz, image resolution: 2353×1728 pixels) were compared. For the camera calibration, the tools and the procedure recommended by Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK) were used. The system performance was represented by the precision and accuracy in the 3D reconstruction of the markers and by the acquisition of the gait and jump kinematic data. Although high correlations ($r = 0.99$) and deviations (bias) of less than 3 mm were found, both systems showed a systematic difference confirmed by the bias statistically significant. Regarding accuracy, a difference between the two systems was found with an error of 8 to 10 times higher for the ASC cameras. Despite these results, no differences were

found between the kinematic data. This suggests that although the commercial system Vicon has obtained better performance than the system with ASC camera, as was expected, in practical terms, the differences were not significant for obtaining kinematic parameters. The main objective of a system is the motion analysis and, in this way, the ASC proved to be feasible in the evaluation of the 3D kinematics of the human movements. In the fourth study the aim was to evaluate the accuracy parameters of the 3D reconstruction and the kinematic data provided by optoelectronic cameras and ASC cameras, set in motion. Experimentally the cameras were fixed in a rolling rigid structure ($4.4 \times 4 \times 2.5 \text{m}^3$) and the data were acquired simultaneously by the two types of cameras. A rigid bar test and human gait were acquired to evaluate the 3D reconstruction accuracy and to calculate the gait linear and angular variables. Algorithms were developed to do the translation of the global coordinate system from reference points arranged on the floor of a 40 meter track runner, according as the cameras and the structure were moving. As a preliminary result, it is important to highlight that the percentage error found (1%) by ASC cameras is comparable to the error found in acquisitions with the static system, as seen in the article 3 of this dissertation. Regarding the kinematic data, it is noteworthy the capture of approximately 18 stride cycles in a single acquisition, an important fact to be considered in order to define a movement pattern. In addition, the two kinematic evaluation systems found close values for the variables analyzed. The article is still being finalized, however, it suggests that when evaluating movements in horizontal displacement of approximately 40 meters, it is feasible to use ASC to reconstruct three-dimensionally a natural gait, not delimited to the laboratory. In conclusion, this dissertation suggests that the ASC are feasible to evaluate human movements three-dimensionally.

INTRODUÇÃO GERAL

A biomecânica é a ciência que estuda o movimento humano e suas características estruturais e funcionais (Knudson, 2007). A análise biomecânica do movimento é uma ferramenta para o estudo do comportamento motor humano, amplamente usada em diversas áreas, principalmente no aperfeiçoamento da *performance* em esportes. Pela mensuração de variáveis biomecânica é possível determinar padrões de movimento, identificar características técnicas específicas de modalidades esportivas e identificar limitações em movimentos necessários a vida diária. Dessa forma, esse conhecimento orienta no ensino, através da educação física escolar, com otimização de movimentos; na saúde, na prevenção e reabilitação de atividade de trabalho e do cotidiano das pessoas; e no esporte, melhorando a qualidade técnica dos movimentos.

A biomecânica apresenta quatro principais métodos de análise: Antropometria, Dinamometria, Eletromiografia e Cinemetria. A antropometria gera parâmetros para o modelo corporal. Permite identificar a distribuição de massa, posições articulares, braços de alavanca e, dessa forma, aplicar conceitos biomecânicos, como momento de inércia, centro de gravidade. A dinamometria quantifica a força produzida por um determinado músculo ou conjunto de músculos durante um movimento. O instrumento básico é a plataforma de força, em que a força de reação contra uma superfície é mensurada. A eletromiografia investiga a atividade muscular pela análise dos comandos neurais advindos do neurônio motor para as fibras musculares. Por último, o objeto desse estudo, a cinemetria que investiga medidas de posicionamento. É responsável por descrever o movimento quantitativamente por valores de posição, velocidade, aceleração e ângulos de um corpo ou segmentos (Amadio, Serrão, 2011).

As análises cinemáticas são adquiridas a partir de sistemas de análise de movimento. Estes são compostos basicamente por câmeras, marcadores e instrumentos de calibração. A estruturação de uma análise, seja fora ou dentro da água, deve seguir basicamente oito etapas (Figura 1).

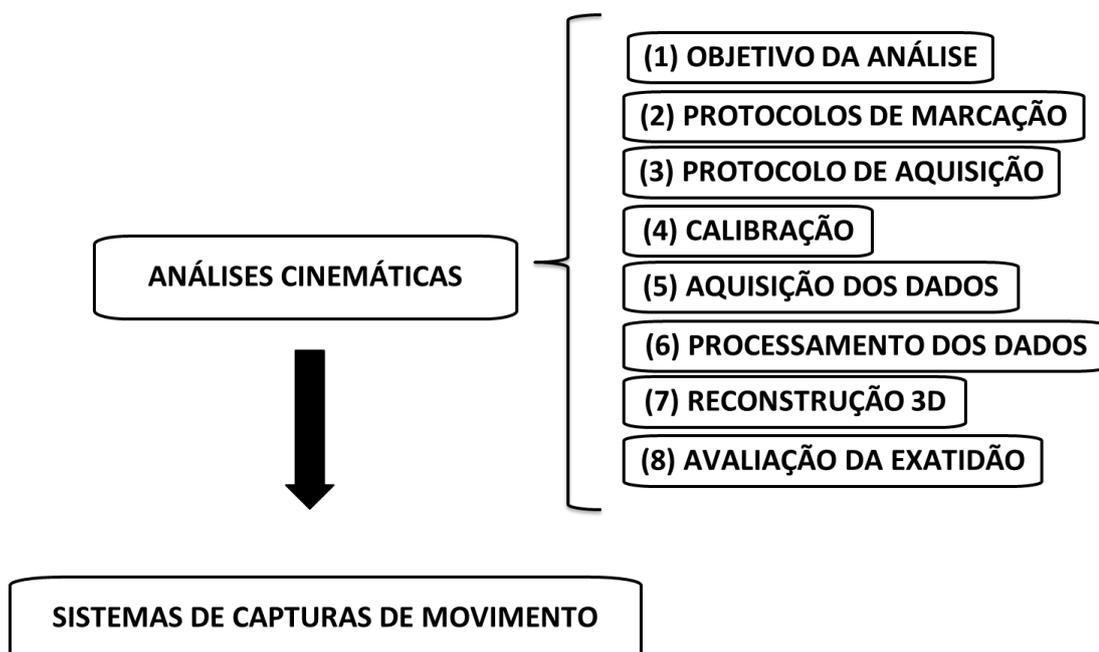


Figura 1. Etapas necessárias para estruturar uma análise cinemática.

A definição do (1) objetivo de análise compreende a escolha da tarefa motora a ser realizada e as variáveis cinemáticas de interesse, e, posteriormente, determinados os (2) protocolos de marcação (protocolos de corpo inteiro, membros superiores, inferiores, ou apenas segmentos). O mínimo de três marcadores deve ser utilizado para definir um segmento.

O (3) protocolo de aquisição envolve a escolha dos equipamentos e suas configurações, como tipos de câmera, frequência de aquisição, resolução da imagem, acessório da fixação das câmeras e escolha dos marcadores quanto ao tipo e tamanho. A escolha da câmera é influenciada por alguns fatores, sendo eles: (a) tipo de câmera, (b) o ambiente de análise, e (c) os custos e funcionalidades da câmera. O tipo de câmera, que podem ser de luz infravermelha (optoeletrônico) e luz branca (imagem) (Barros et al., 1999). Os sistemas que utilizam da tecnologia infravermelha são compostos por *hardwares* e *softwares* específicos que processam as imagens e os dados de forma rápida e em tempo real. Foram desenvolvidos

para captura de movimentos tridimensionais (3D), como por exemplo, Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK), Elite (BTS, Milan, Italy), Optitrack (NaturalPoint, Inc. Corvallis, OR). São instrumentos com alta exatidão em obter dados quantitativos do movimento humano. As câmeras com luz branca registram toda a sequência de imagens do movimento, com uma complexidade e alta demanda de tempo para análise dos dados, posterior às aquisições (Barros et al., 1999; Jesus et al., 2015; Magalhaes et al., 2013). São necessários *softwares* específicos nos procedimentos de digitalização da imagem para obter as coordenadas dos pontos de referência do corpo (Mooney et al., 2015). Esse processo pode ser feito manualmente, semiautomático ou automático, dependendo do contraste do marcador na imagem em cada um dos quadros, para cada vídeo.

Em relação ao ambiente de análise, as câmeras optoeletrônicas, geralmente, são utilizadas em ambientes controlados. Por captarem luzes refletidas seu uso em aquisições fora de laboratórios é dificultado. Além disso, possui restrições quanto às aquisições de movimentos em ambientes subaquáticos. O sistema Qualisys ampliou essa possibilidade permitindo novas investigações em esportes como a natação. Ele utiliza a mesma tecnologia, com câmeras optoeletrônicas, e é composto por um software de processamento em tempo real. As câmeras são envolvidas por uma caixa a prova d'água e possuem um recurso de filtragem ativa. Esse recurso minimiza reflexos causados pelas bolhas e outros objetos, exemplo de problemas enfrentados na captura de movimentos subaquáticos (Oqus Underwater, Qualisys, 2014).

As câmeras de vídeo se apresentam como uma tecnologia alternativa, pois podem ser manuseadas em diversos ambientes, inclusive embaixo d'água. O desenvolvimento de acessórios como, caixas-estaque e ventosas, possibilitam o posicionamento subaquático e a aplicação de métodos propostos para os sistemas de análises de movimentos 3D, utilizados em laboratório (Mooney et al., 2015).

Em relação aos custos e funcionalidades, câmeras optoeletrônicas, por apresentarem uma tecnologia mais desenvolvida, necessitam da integração de computadores e bases de transmissão que permitirão o processamento em tempo real, citado anteriormente. Devido a isso,

apresentam altos custos, além de dificultar o seu transporte devido a cabos e outros equipamentos. As câmeras de vídeo, novamente se apresentam como uma alternativa. São de relativo baixo custo e fácil acesso. Outras vantagens são a ausência de cabo, seu tamanho reduzido e facilidades no uso das funcionalidades da câmera. Além disso, o número de câmeras, que irão compor a análise, depende da complexidade da tarefa e da complexidade do modelo. É necessário um registro do movimento por pelo menos duas câmeras. As câmeras devem ser posicionadas de forma a ver os marcadores do modelo, e diminuir oclusões ou baixa definição. Em relação aos marcadores, eles podem ser de duas formas: ativos ou passivos.

Os ativos, que são lâmpadas de LED fixadas no sujeito que emitem luz as quais são registradas pelas câmeras, apresentam limitada utilização. São conectados por cabos, o que obriga o sujeito a transportá-los juntamente com uma unidade de controle que restringem sua movimentação. Já os passivos podem ser equipados com fitas retroreflexivas que refletem a luz vinda de emissores infravermelhos, diminuindo as restrições de movimento pelo sujeito (Figuroa et al., 2003).

Câmeras de vídeo podem capturar marcadores ativos ou passivos, porém eles devem contrastar com a imagem para que seja possível sua identificação. Os marcadores em cada câmera devem ser capturados de forma sincronizada, e assim, será construída uma relação entre as coordenadas no par de câmeras (Chiari et al., 2005). Após, essas etapas é necessário que o sistema seja calibrado.

A (4) calibração envolve o processo de relacionar a imagem obtida pela câmera com o espaço em que esta imagem foi adquirida. Para que isso aconteça, é necessária uma referência na imagem, que é feita pelos pontos de controle. Esses pontos são marcadores que definirão o sistema de coordenadas do mundo (X, Y, Z), através dos instrumentos de calibração. Esse processo é possível através de métodos de calibração. Amplamente utilizado, o primeiro método de calibração criado foi o de Transformação Linear Direta (DLT) que se baseia no princípio da colinearidade (Abdel-Aziz et al., 1971). Esse princípio indica que pontos de um conjunto (coordenadas 3D real do objeto e coordenadas de tela), estão posicionados de forma a

traçar uma linha reta que contenha todos eles. E assim, a imagem real captada por uma câmera é projetada geometricamente no plano da imagem (Figura 2). Esse processo de calibração determina parâmetros internos e externos das câmeras que, posteriormente serão utilizados no processo de reconstrução 3D.

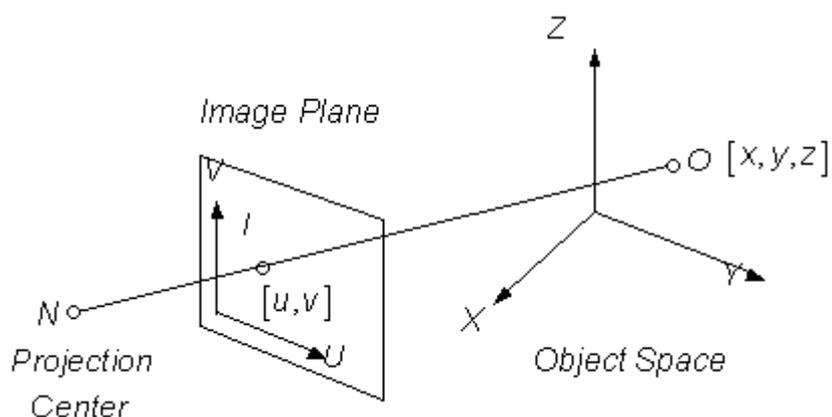


Figura 2. Princípio da colinearidade, com base no método DLT (www.kwon3d.com).

Durante esse processo de captura de imagens alguns fatores podem violar a condição de colinearidade proposta pela DLT, gerando desvios na projeção linear. As projeções perspectivas, em que há mudança do espaço 3D para o 2D, podem causar perdas ou distorções das características geométricas da imagem. Além disso, as distorções das lentes podem alterar o formato da imagem (Figura 3). (Kwon et al., 2006).

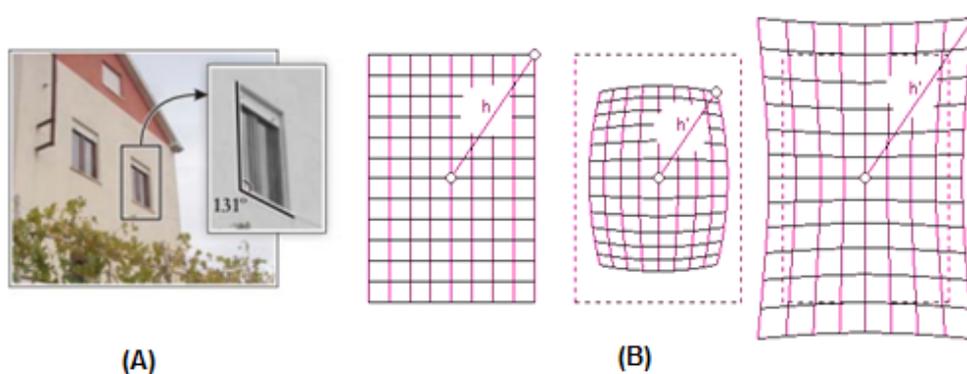


Figura 3. Exemplos de distorções. (A) Projeções perspectivas. (B) Distorções radiais.

Os métodos não-lineares, assumem que há desvios de luz e que essa projeção não acontece em linha reta (Figura 4). Algoritmos de calibração foram desenvolvidos para corrigir esses efeitos não-lineares. Silvatti et al., (2012) listou vantagens e desvantagem, ao comparar três métodos não-lineares em análise de movimentos subaquáticos. O método de Cerveri et al., (1998) apresentou bons resultados na exatidão da reconstrução e a vantagem da calibração das câmeras simultaneamente, além de utilizar ferramentas mais simples e portáteis. Esse método é composto pela aquisição de um instrumento estático, que utiliza a DLT para determinar os parâmetros iniciais das câmeras, e de um instrumento em movimento, que realiza ajustes nos parâmetros a fim de corrigir as distorções ópticas. Essas duas etapas possibilitam uma minimização do erro de projeção bidimensional, nas imagens. Sendo assim, as aberrações ópticas fazem com que a calibração seja um procedimento essencial para a qualidade da análise e diminuição de erros (Monnet et al., 2014).

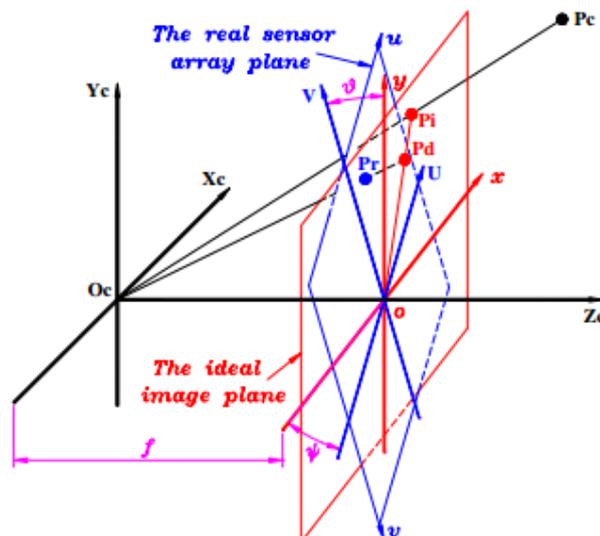


Figura 4. Representação dos desvios devido à distorção. O ponto P_c é o ponto em relação ao sistema de coordenadas 3d (X_c , Y_c e Z_c), o ponto P_i seria o ponto sem nenhuma distorção, P_d seria o ponto distorcido e P_r o ponto distorcido no plano real do sensor da câmera, que sofre uma rotação θ e ψ em relação ao plano ideal x e y . (Wang et al., 2008).

Os instrumentos de calibração são escolhidos de acordo com o método adotado para calibrar as câmeras (Figura 5). Nos métodos lineares, tradicionalmente são utilizados estruturas rígidas com grande quantidade de pontos. O tamanho desses objetos está relacionado à dimensão que ocorre o movimento. Grandes volumes exigem objetos maiores, dificultando sua manipulação e transporte. Além disso, é necessário certificar que a estrutura esteja montada corretamente a fim de manter a confiabilidade na obtenção das coordenadas 3D. Já nos métodos não-lineares, são utilizados objetos menores para obter o sistema de coordenadas e o cálculo inicial da DLT, e um objeto que se move para determinar o volume de aquisição.

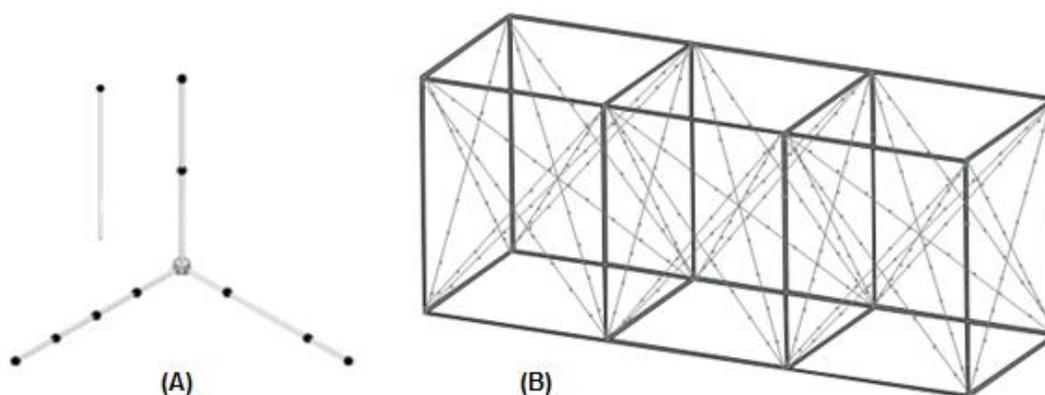


Figura 5. (A) Objeto de calibração não-linear ($1 \times 1 \times 1 \text{m}^3$) (Silvatti et al., 2012). (B) Objeto de calibração linear ($6 \times 2,5 \times 2 \text{m}^3$) (Jesus et al., 2015).

Calibrado o sistema, é feita a (5) aquisição dos dados. Essa etapa consiste na captura dos movimentos a serem analisados. Posteriormente, há (6) o processamento desses dados, que envolve a identificação e classificação dos marcadores de interesse e rastreamento dos mesmos. Como já citado, sistemas com câmeras optoeletrônicas realizam essa etapa de forma automática e em tempo real. Para as câmeras de vídeo esse processo é mais complexo. São necessárias boas resoluções de imagem e marcadores com contraste, a fim de permitir uma identificação. Através de softwares específicos são definidas as coordenadas 2D dos marcadores nos quadros adquiridos. A identificação do centro do marcador, caso seja

esférico, é dificultada pelas oclusões e indefinições na imagem. Em condições subaquáticas, pode ser afetado pela iluminação da piscina, por bolhas geradas com movimentação da água, e pela superfície da água, que age como um espelho criando marcadores indesejados. A quantidade de marcadores não influencia no tempo de processamento de imagens nos sistemas optoeletrônicos. Já para os sistemas baseados em vídeo, marcações de membros inferiores ou corpo inteiro que requerem grande quantidade de marcadores, podem aumentar consideravelmente o tempo total no rastreamento das coordenadas 2D em cada câmera.

A próxima etapa é a (7) reconstrução das coordenadas 3D dos marcadores associados ao movimento. Esse procedimento é a segunda aplicação das equações básicas da DLT. A partir dos parâmetros iniciais das câmeras e das coordenadas de tela definidas pelo rastreamento da imagem é possível encontrar a posição 3D dos pontos de interesse. Assim sendo, uma vez realizada a calibração das câmeras a posição dessas não pode ser modificada. Uma alteração em relação à posição no momento de calibração implica em mudança nos valores dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. Como esses parâmetros são utilizados nas equações de reconstrução, valores de uma posição inicial passam a ser errôneos, com consequentes reconstruções não precisas.

Por fim, para a aplicação adequada das estimativas cinemáticas é necessário (8) avaliar a exatidão do sistema, pois, como citado, existem fatores que influenciam diretamente os resultados. Um sistema com alta exatidão, a partir da reconstrução do movimento, garante dados confiáveis de relações geométricas entre marcadores, como distâncias, angulações, posições, velocidades e acelerações de movimentos. Eichelberger, et al. (2016) comentam que, frequentemente, estudos com análises 3D de movimentos humanos não relatam os valores de exatidão do sistema ao reportar seus resultados de análise. A exatidão desses dados é avaliada pelo grau de concordância entre o valor de referência, do mundo real, e o valor medido pelo sistema, que oferece a confiabilidade do resultado final.

Com o foco na análise dos movimentos da natação, essa dissertação faz uma consideração inicial em termos de avaliação das configurações e método de calibração das câmeras. Foram utilizadas câmeras de ação (ASC

– *Action Sport Camera*), modelos que possuem melhorias técnicas, em termos de resolução de imagem e frequência de captura, em comparação com outras câmeras comerciais. Realizaram-se análises fora e dentro da água, pois o objetivo final da linha de pesquisa é executar uma avaliação conjunta, visto que o gesto técnico envolve parte acima da água e parte submersa. O trabalho foi estruturado na forma de quatro artigos científicos.

O primeiro apresenta em questão a utilização das câmeras de ação. É investigada a potencialidade da ASC em termos de ajuste de calibração e exatidão da reconstrução, através da avaliação da qualidade e da confiabilidade do step de calibração. A qualidade foi avaliada pela exatidão da reconstrução 3D em duas resoluções permitidas pelas ASC. Além disso, realizou-se uma comparação da condição subaquática com a condição de laboratório. A confiabilidade foi avaliada modificando a quantidade de pontos e os movimentos de calibração.

Após essa primeira investigação das ASC, o segundo artigo realizou uma extensa avaliação das configurações de aquisição permitida pelas câmeras. Uma comparação entre diferentes resoluções de imagem, ângulos de visão e frequências de aquisição foi objeto de estudo. Além disso, novamente foi avaliada a utilização das câmeras nos dois ambientes, ar e água, uma vez que a reconstrução 3D do gesto esportivo na natação requer uma calibração de ambos. A reprodutibilidade dos parâmetros geométricos da câmara foi também utilizada para avaliar a exatidão de reconstrução 3D. E, por fim, foi testada a avaliação cinemática dentro da água, uma vez que avaliações fora da água serão abordadas nos próximos dois artigos.

O terceiro e quarto artigos estão sendo estruturados em conjunto com renomados pesquisadores franceses. Uma parceria entre o Laboratório de Análises Biomecânicas da Universidade Federal de Viçosa e um grupo de pesquisadores da Université de Poitiers, na França, ampliou a investigação com a ASC abordando uma validação concorrente com um sistema optoeletrônico comercial (Vicon). Nosso grupo viajou até a França, onde realizamos a coleta de dados. Durante duas semanas foram estruturados dois protocolos de aquisição. Primeiramente, como sistemas estáticos, foi comparada a exatidão da ASC e do Vicon. Parâmetros lineares e angulares de dois movimentos humanos básicos, caminhar e saltar, foram adquiridos

tridimensionalmente de forma simultânea pelos dois sistemas. Segundo, foi realizada uma avaliação de múltiplas câmeras colocadas em movimento. Os dois sistemas foram fixados a uma estrutura que se moveu. Essa ação possibilita aumentar o tamanho do volume de aquisição e complementa a análise de movimentos cíclicos. O estudo se desenvolveu focado na avaliação da exatidão e captura de dados cinemáticos.

REFERÊNCIAS

KNUDSON, D. **Fundamentals of Biomechanics**. 2nd ed. New York: Springer, 2007.

AMADIO, A.C; SERRÃO, J.C. **A biomecânica em educação física e esporte**. Revista Brasileira de Educação Física e Esporte, v.25, 2011.

BARROS, R.M.L.; BRENZIKOFER, R.; LEITE, N.J.; FIGUEROA, P.J. **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.

JESUS, K.; JESUS, K.; FIGUEIREDO, P.; VILAS-BOAS, J.P.; FERNANDES, R.J.; MACHADO, L.J. **Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach**. Computational and Mathematical Methods in Medicine. 2015.

MAGALHAES, F.A.; SAWACHA, Z.; DI MICHELE, R.; CORTESI, M.; GATTA, G.; FANTOZZI, S. **Effectiveness of an automatic tracking software in underwater motion analysis**. Journal of Sports Science and Medicine, v.12, n.4, p.660-7, 2013.

MOONEY, R.; CORLEY, G.; GODFREY, A.; OSBOROUGH, C.; QUINLAN, L.R.; OLAIGHIN, G. **Application of video-based methods for competitive swimming analysis: a systematic review**. Sports and Exercise Medicine, v.1, n.5, p.133-150, 2015.

Qualysis, Oqus Underwater. 2014. Disponível: http://www.qualisys.com/wp-content/uploads/2014/01/PI_Oqus_Underwater.pdf

FIGUEROA, P.J.; LEITE, N.J.; BARROS, R.M.L. **A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis**. Computer Methods and Programs in Biomedicine, v.72, n.2, p.155-165, 2003.

CHIARI, L.; CROCE, U.D.; LEARDINI, A.; CAPPOZZO, A. **Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors.** *Gait Posture*, v.21, n.2, p.197-211, 2005.

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.

Direct Linear Transformation (DLT). Disponível:
<http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>

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

SILVATTI, A.P.; DIAS, F.A.S.; CERVERI, P.; BARROS, R.M.L. **Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications.** *Journal of Biomechanics*, v.45, p.1112–1116, 2012.

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.

MONNET, T.; SAMSON, M.; BERNARD, A.; DAVID, L.; LACOUTURE, P. **Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study.** *Sports Engineering*, v.17, n.3, p.171-181, 2014.

WANG, J.; SHI, F.; ZHANG, J.; LIU, Y. **A new calibration model of camera lens distortion.** *Pattern Recognition*, v.41, n.2, p.607-615, 2008.

EICHELBERGER, P.; FERRARO, M.; MINDER, U.; DENTON, T.; BLASIMANN, A.; KRAUSE, F.; BAUR, H. **Analysis of accuracy in optical motion capture – A protocol for laboratory setup evaluation.** *Journal of Biomechanics*, v.49, p.2085–2088, 2006.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Essa dissertação foi proposta com o objetivo principal de avaliar a utilização de câmeras de ação (ASC – *Action Sport Camera*) para a análise cinemática tridimensional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o efeito de diferentes estratégias de aquisição no protocolo de calibração das câmeras de ação (ASC – *Action Sport Camera*) e como isso afeta a exatidão tridimensional.

Avaliar a exatidão da reconstrução 3D a partir das configurações de aquisição permitida pelas câmeras (diferentes resoluções de imagem, ângulos de visão e frequências de aquisição).

Avaliar, em condições de laboratório, a precisão, exatidão e dados cinemáticos das câmeras ASC e compará-lo a um sistema comercial de análise de movimentos 3D.

Avaliar os parâmetros de exatidão da reconstrução 3D e dados cinemáticos fornecidos por câmeras optoeletrônicas e câmeras de ação, colocadas em movimento.

ARTIGO 1¹

Câmeras de ação como um instrumento para realizar análises 3D de movimentos subaquáticos

Resumo

A cameras de ação (ASC - Action sport cameras) são atualmente utilizadas para fins recreativos, principalmente, porém contínuas melhorias técnicas, em correspondência a uma redução de custo, estão promovendo seu uso em análises tridimensionais (3D) de movimentos no estudo de gestos esportivos e na avaliação quantitativa do desempenho atlético. No entanto, estender essa tecnologia para a análise esportiva ainda requer um avanço metodológico que estabeleça as ASCs como um sistema métrico, abrangendo finalidades de configuração de câmeras, processamento de imagem, recursos de rastreamento, calibração e reconstrução 3D. Apesar das análises laboratoriais tradicionais, os requisitos citados se tornam um problema ao lidar com aquisições de movimento dos atletas em ambiente controlado ou ao ar livre. Em análises na natação, por exemplo, a configuração de câmeras e o protocolo de calibração são rigorosos uma vez que câmera dentro e fora da água são obrigatórias. Em particular, a calibração de câmeras subaquáticas pode ser uma questão que afeta a exatidão da reconstrução. Neste trabalho, o objetivo foi avaliar a viabilidade das ASCs para análises 3D subaquáticas, com foco na configuração de câmera e protocolo de aquisição dos dados. Duas GoPro Hero3+ Black (frequência: 60Hz; resolução de imagem: 1280×720/1920×1080 pixels) foram posicionadas dentro da água em uma piscina, abrangendo um volume de trabalho de aproximadamente 6m³. Foi implementado um procedimento específico de calibração com duas etapas, que consiste na aquisição de um triedro estático e de um bastão em movimento, com nove e um marcadores esféricos passivos, respectivamente. Após avaliar os parâmetros da câmera,

¹ Versão em português do artigo publicado na Revista PlosOne, 2016. Conceito A2 no Qualis Capes. (Versão original no anexo D).

foram adquiridas várias posições de uma barra rígida, contendo dois marcadores de distância conhecida, dentro do volume de trabalho. O erro médio da reconstrução sobre a distância inter-marcadores foi inferior a 2,5mm (1280×720) e 1,5mm (1920×1080). Os resultados deste estudo demonstram que a calibração subaquática de ASC é viável, permitindo medições cinemáticas quantitativas com exatidão comparável aos sistemas tradicionais de captura de movimento.

Abstract

Action sport cameras (ASC) are currently adopted mainly for entertainment purposes but their uninterrupted technical improvements, in correspondence of cost decreases, are going to disclose them for three-dimensional (3D) motion analysis in sport gesture study and athletic performance evaluation quantitatively. Extending this technology to sport analysis however still requires a methodologic step-forward to making ASC a metric system, encompassing ad-hoc camera setup, image processing, feature tracking, calibration and 3D reconstruction. Despite traditional laboratory analysis, such requirements become an issue when coping with both indoor and outdoor motion acquisitions of athletes. In swimming analysis for example, the camera setup and the calibration protocol are particularly demanding since land and underwater cameras are mandatory. In particular, the underwater camera calibration can be an issue affecting the reconstruction accuracy. In this paper, the aim is to evaluate the feasibility of ASC for 3D underwater analysis by focusing on camera setup and data acquisition protocols. Two GoPro Hero3+ Black (frequency: 60Hz; image resolutions: 1280×720/1920×1080 pixels) were located underwater into a swimming pool, surveying a working volume of about 6m³. A two-step custom calibration procedure, consisting in the acquisition of one static triad and one moving wand, carrying nine and one spherical passive markers, respectively, was implemented. After assessing camera parameters, a rigid bar, carrying two markers at known distance, was acquired in several positions within the working volume. The average error upon the reconstructed inter-marker

distances was less than 2.5mm (1280×720) and 1.5mm (1920×1080). The results of this study demonstrate that the calibration of underwater ASC is feasible enabling quantitative kinematic measurements with accuracy comparable to traditional motion capture systems.

Introdução

Sistemas de captura de movimentos são tradicionalmente adotados para reconstruir movimentos de animais e humanos em diferentes aplicações, como biomecânica [1-2], análise de gestos esportivos [3-7], reabilitação [8-9] e clínica [10-11]. Entretanto, dispositivos optoeletrônicos e eletromagnéticos, dedicados principalmente a análises laboratoriais, apresentam custos elevados e não são projetados para uso ao ar livre ou subaquático. A empresa Qualisys comercializa um sistema baseado em vídeo [12] desenvolvido especificamente para medições subaquáticas, com uma iluminação a fim de melhorar a qualidade da imagem. No entanto, as câmeras ainda demandam cabos e o sistema é muito caro.

Uma alternativa da tecnologia baseada em vídeo é apresentada pelas câmeras de ação (ASC - *Action Sport Cameras*), as quais são atualmente utilizadas principalmente para fins recreativos. Suas contínuas melhorias técnicas, em termos de resolução de imagem e frequência de aquisição, em correspondência a uma redução de custo, estão permitindo seu uso em estudos de gestos esportivos e na avaliação do desempenho atlético [13-17]. Trabalhos recentes na literatura descreveram a aplicação de ASC em análises bidimensionais (2D) [18-21]. No entanto, estender essa tecnologia para análises tridimensionais (3D) em esportes utilizando múltiplas câmeras ainda requer um avanço metodológico que estabeleça a ASC como um sistema métrico, abrangendo finalidades de configuração de câmeras, sincronização de aquisições e protocolos de calibração específicos.

Na análise de movimentos da natação, por exemplo, a configuração de câmeras é rigorosa já que gesto atlético se desenvolve tanto fora quando dentro da água, simultaneamente. Fabricantes de ASC abordam

parcialmente essa questão pela criação de diferentes acessórios, especialmente desenvolvidos para uso subaquático, como caixas-estanques e suporte com ventosas para fixar as câmeras na parede da piscina. De um ponto de vista operacional, a calibração de câmeras representa uma dificuldade para o desenvolvimento de sistemas de análise de movimentos subaquáticos baseados em vídeo por duas questões principais. Em primeiro lugar, a reconstrução 3D do gesto completo do atleta requer a calibração tanto no ar quando subaquática e o registro de um sistema de coordenadas entre eles. Até o presente momento, não existem protocolos padronizados disponíveis. Em segundo lugar, a calibração subaquática pode exigir soluções específicas que amenizem perturbações da água na qualidade da imagem para garantir uma alta exatidão na reconstrução.

A fim de atingir uma alta exatidão na análise de movimentos subaquáticos 3D, nosso grupo já abordou alguns pontos críticos relacionados principalmente à calibração de câmeras subaquáticas. Utilizando câmeras industriais, mostramos que os resultados de exatidão por métodos de calibração baseados em um bastão e em uma placa 2D foram menos associados à posição do instrumento de calibração no volume de trabalho e forneceu uma melhor exatidão que a calibração baseada em uma haste graduada com DLT não-linear [22]. A principal vantagem de usar a calibração baseada no bastão foi a uniformização do erro de reconstrução em todo o volume de trabalho, assegurado pelo pacote de ajuste dos parâmetros da câmera. Em contraste, na calibração baseada em uma placa 2D cada câmera é calibrada separadamente, o que leva a um conjunto de câmeras não interligadas. Entretanto, essa calibração, baseada na placa 2D, foi menos sensível à qualidade da água do que a calibração baseada no bastão. No estudo [23], foi aplicada a calibração subaquática baseada no bastão para reconstruir com alta exatidão a trajetória da mão de quatro nadadores durante os nados crawl, peito e borboleta.

Neste trabalho, o procedimento de calibração subaquática baseada no bastão foi aplicado à ASC. Experimentalmente, duas câmeras foram submersas em uma piscina e fixadas nos cantos do volume de trabalho de aproximadamente 6m^3 . O protocolo de medição compreendeu aquisições de calibração e ensaios para calcular os parâmetros da câmera e avaliar a

exatidão da reconstrução, respectivamente, com duas resoluções de imagem diferentes. Foi investigado o efeito de um conjunto de estratégias na aquisição dos dados de calibração na exatidão 3D.

Materiais e Métodos

Instrumentos

A aquisição dos dados foi realizada em uma piscina. Duas câmeras de ação (ASC - *Action Sport Camera*) em caixas-estanques (GoPro, Hero3+, Black Edition® / USA), foram fixadas na parede da piscina (Figura 1). O ângulo de visão e a frequência de aquisição foram 127° e 60Hz, respectivamente. Investigaram-se duas diferentes resoluções de imagem: 1280×720 (Baixa Resolução) e 1920×1080 (Alta Resolução) pixels. Para sincronização das câmeras foi utilizado o controle remoto Wi-Fi GoPro (Figura 1B). Após a aquisição, os vídeos foram convertidos para o formato AVI no *software* GoPro Studio.

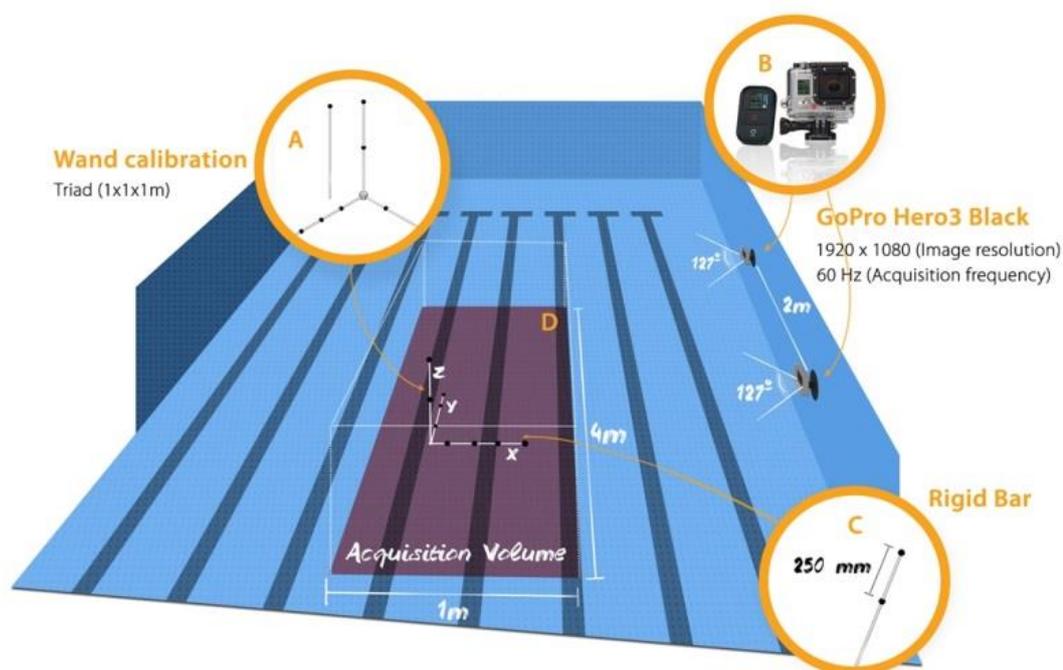


Figura 1. A) Ferramentas de calibração. B) Câmeras de ação - *Action Sport Camera* (GoPro, Hero3+, Black). C) Barra rígida utilizada para avaliar a exatidão da reconstrução 3D. D) Posição das câmeras e volume de aquisição (Bernardina et al., 2016).

Procedimento de calibração das câmeras

O método de calibração baseado no bastão consiste na aquisição de uma ferramenta estática (estrutura tríade) e uma em movimento (bastão), com nove e um marcadores esféricos passivos, respectivamente. Uma estrutura tríade ortogonal à prova d'água (1×1×1m) com nove marcadores esféricos pretos (\varnothing : 35 mm), enroscados em posições conhecidas (10 μ m de exatidão), foi construída por uma máquina de controle numérico computadorizada (CNC - *Computer Numerical Control Machine*). O triedro foi posicionado no chão da piscina, no centro do volume de aquisição (1×4×1.5m³) e adquirido por 5 segundos (Figura 1A). A identificação 2D e o cálculo do centro dos marcadores nos vídeos foi realizada utilizando o *software* "Dvideo" [24]. Os dados 2D dos marcadores do triedro foram utilizados para avaliar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos iniciais das câmeras, pelo método da DLT, desprezando distorções ópticas [22], e definir a origem e a orientação do volume de aquisição. A fim de refinar os parâmetros das câmeras, garantindo também a correção não-linear da distorção óptica [25], o bastão, com um marcador esférico localizado na extremidade, foi movimentado pelo volume de aquisição, durante aproximadamente 20 segundos. O *software* "Dvideo" foi usado novamente para rastrear o marcador nas sequências de imagens das duas câmeras. Quatrocentos quadros de vídeo úteis foram utilizados no pacote de ajuste de otimização não-linear, usando pontos de controle com coordenadas 3D conhecidas (marcadores do triedro) e coordenadas 3D desconhecidas (marcador do bastão) [26]. O pacote de ajuste estima os parâmetros de todas as câmeras juntamente com as coordenadas 3D do marcador desconhecido pela minimização do erro de projeção 2D (medido *versus* previsto pelo modelo da câmera) nas imagens. A distorção óptica foi considerada adicionando um parâmetro radial para o modelo da câmera (Figura 2).

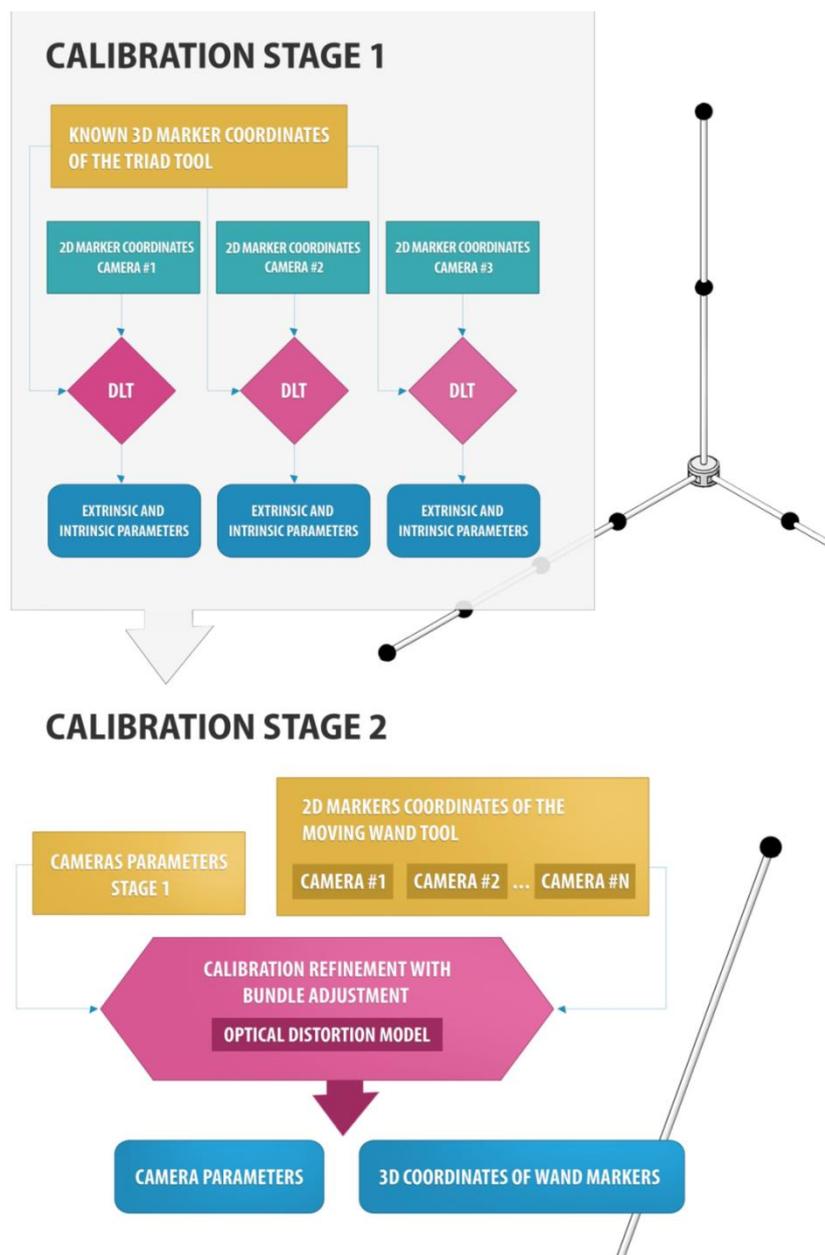


Figura 2. Fluxo esquemático das duas etapas da calibração para um amplo número de câmeras (Bernardina et al., 2016).

Qualidade da calibração

A qualidade da calibração foi avaliada pela exatidão na reconstrução 3D nas duas resoluções de imagem (Alta e Baixa Resolução). Foram feitas cinco aquisições do movimento de uma barra rígida, contendo dois marcadores com distância conhecida (d_n : 250 mm), dentro do volume de

aquisição por aproximadamente 15 segundos (Figura 1C). A barra rígida foi fabricada por uma máquina CNC garantindo uma exatidão para o posicionamento dos marcadores de aproximadamente 10 μ m. Para descrever a exatidão 3D da ASC as seguintes medidas foram calculadas para cada aquisição: (a) valor médio da distância entre os marcadores; (b) desvio-padrão da distribuição das distâncias; (c) o erro médio absoluto (diferença entre a distância nominal e a distância medida entre os marcadores); (d) a porcentagem da exatidão (a relação entre a exatidão absoluta e a máxima diagonal do volume de trabalho) [27]. A distribuição dos erros da Alta e Baixa Resolução foram comparados usando um teste não-paramétrico (Wilcoxon rank sum) com uma significância de 1%. A qualidade da calibração também foi avaliada em laboratório e comparada à condição subaquática, utilizando as mesmas configurações de câmera (duas câmeras, Alta e Baixa Resolução, 60Hz, posição das câmeras) e o mesmo protocolo de calibração (triedro e bastão de calibração).

Confiabilidade da calibração

Uma vez que a qualidade da calibração pode ser afetada pelo movimento realizado pelo bastão durante a aquisição [26], avaliou-se a confiabilidade da câmera testando três aquisições diferentes: zig-zag (M1), circular (M2) e para cima e para baixo (M3). Para este teste, foi usada a Alta Resolução de imagem. Em relação a M1, o operador foi instruído a movimentar a ferramenta de calibração cobrindo todo o campo de visão da câmera. No movimento M2, o operador foi instruído a realizar movimentos circulares dentro do volume de aquisição. Em M3, o operador foi orientado a mover o bastão para cima e para baixo dentro do volume de aquisição. Além disso, foi avaliado se a adição de um vínculo de uma distância inter-marcadores no *bundle adjustment* (dois marcadores no bastão de calibração) pode resultar em uma melhoria na exatidão da reconstrução 3D. Foram realizados cinco testes de calibração diferentes (Figura 3): M1-1 (movimento de zig-zag com um marcador), M2-1 (movimento circular com um marcador), M3-1 (movimento para cima e para baixo com um marcador), M1-2 (movimento de zig-zag com dois marcadores) e M2-2 (movimento circular com dois marcadores). A qualidade das cinco calibrações foi

avaliada novamente por meio da reconstrução da distância inter-marcadores da barra rígida movimentada dentro do volume de aquisição por aproximadamente 20 segundos.

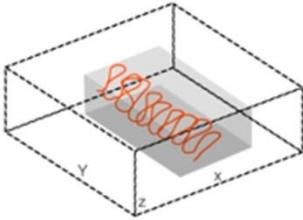
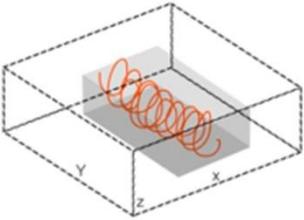
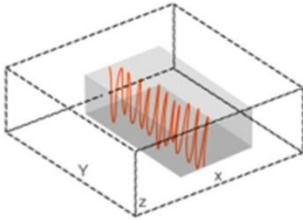
Calibration Movement Type				
M1: zig-zag		M2: circular		M3 up-down
				
Number of markers				
1	2	1	2	1

Figura 3. Três movimentos diferentes do bastão de calibração para avaliar a confiabilidade da calibração (Bernardina et al., 2016).

A fim de analisar como o tipo de movimento do bastão e o número de marcadores afetou a confiabilidade da calibração, calculou-se os valores mínimo, médio e máximo da distância inter-marcadores, o desvio-padrão e o erro médio absoluto, em todos os cinco protocolos de calibração (M1-1, M2-1, M3-1, M1-2 e M2-2). As cinco distribuições dos erros da distância foram analisadas estatisticamente por um teste não-paramétrico (Kruskal-Wallis) com um *post-hoc* (Tukey: $p\text{-valor} < 0,05$) (Matlab® 2012).

Resultados

Qualidade da calibração

Nas cinco aquisições, o erro de reconstrução foi inferior a 2,6mm para as duas resoluções de imagem. Na tabela 1 é listado o valor médio da distância entre os marcadores, o desvio-padrão e o erro médio absoluto das cinco aquisições do teste dinâmico da barra rígida (dois marcadores).

Tabela 1. Resultado das cinco aquisições do teste dinâmico da barra rígida (Alta e Baixa Resolução). Distância nominal d_n entre os dois marcadores: 250 mm.

Aquisição	Média \pm DP (mm)		Erro Médio Absoluto (mm)		Erro relativo ao tamanho do volume	
	Alta Resolução	Baixa Resolução	Alta Resolução	Baixa Resolução	Alta Resolução	Baixa Resolução
1	249,95 \pm 1,81	248,0 \pm 1,70	1,36	2,22	1:5200	1:3000
2	250,27 \pm 1,67	247,8 \pm 1,30	1,29	2,28	1:5300	1:3000
3	249,91 \pm 1,55	247,86 \pm 1,78	1,22	2,37	1:5500	1:3000
4	250,11 \pm 1,71	247,51 \pm 1,78	1,35	2,63	1:6100	1:3000
5	250,04 \pm 1,48	247,60 \pm 1,65	1,19	2,55	1:6000	1:3000
Laboratório	248,53 \pm 1,08	248,56 \pm 1,40	1,56	1,67	1:3800	1:3600

DP= desvio padrão; mm = milímetro.

Como esperado, o erro da Alta Resolução foi menor (1,28mm) do que o da Baixa Resolução (2,41mm). As duas distribuições do erro foram estatisticamente ($p < 0,0001$) diferentes (Figura 4). Em comparação, a reconstrução 3D em laboratório usando Alta e Baixa Resolução conduziu a um erro médio absoluto de 1,56mm e 1,67mm, respectivamente.

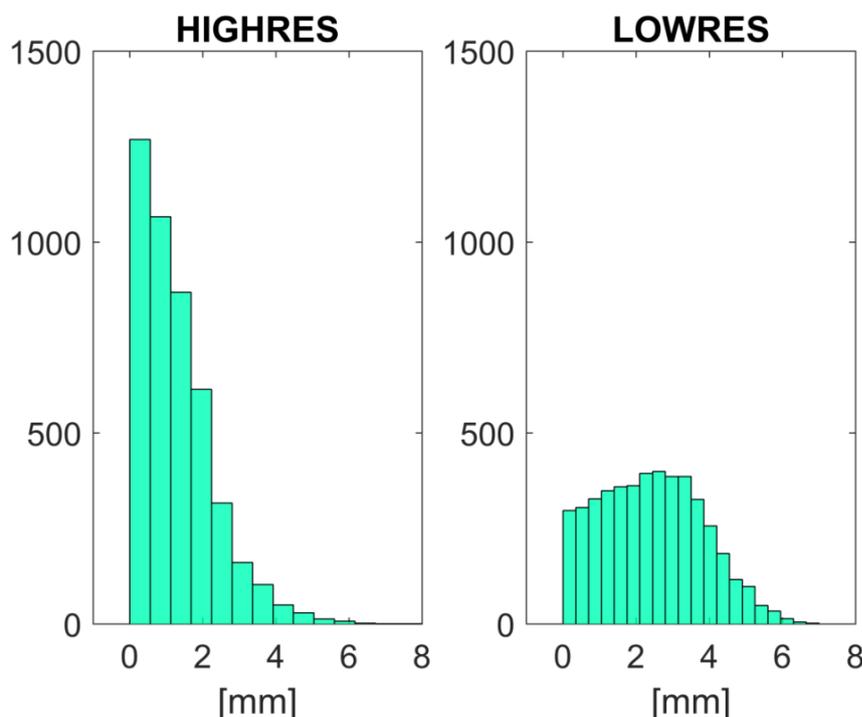


Figura 4. Os histogramas da distribuição de erro residual (acumulado ao longo das cinco aquisições) para Alta (1920x1080) e Baixa (1280x720) Resolução. Os valores médios foram de 1,28mm e 2,41mm, respectivamente (Bernardina et al., 2016).

Confiabilidade da calibração

Houve diferença significativa ($p < 0,001$) entre as cinco calibrações diferentes (Tabela 2). Uma vez que o movimento M1 preenche mais o volume de aquisição, foi encontrado os melhores resultados de exatidão em M1-1 (1,17mm) e M1-2 (1,28mm).

Tabela 2. Distância mínima, média e máxima inter-marcadores, da média das 5 aquisições e o erro médio absoluto correspondente (d_n : 250mm). M1-1 (movimento de zig-zag com um marcador), M2-1 (movimento circular com um marcador), M3-1 (movimento para cima e para baixo com um marcador), M1-2 (movimento de zig-zag com dois marcadores) e M2-2 (movimento circular com dois marcadores). Resultados da comparação *post-hoc* (* $p < 0,05$).

Calibração	Distância (mm)			Erro Médio Absoluto (mm)	Comparação <i>post-hoc</i>	<i>p</i> -valor
	Mínima	Média	Máxima			
M1-1	249,31	249,43	249,55	1,17	M1-2	0,08
					M2-1	0,000*
					M2-2	0,01*
					M3-1	0,000*
M1-2	249,07	249,15	249,23	1,28	M2-1	0,000*
					M2-2	0,06
					M3-1	0,000*
M2-1	248,57	248,60	248,67	1,80	M2-2	0,000*
					M3-1	0,000*
M2-2	248,89	248,95	249,08	1,47	M3-1	0,000*
M3-1	247,92	248,13	248,29	2,63		

mm = milímetro.

Não foi encontrada diferença significativa quando comparado o movimento M1 com ou sem uma distância restrita entre os marcadores (Tabela 2). Quando o movimento não preencheu sistematicamente o volume de aquisição (M2), o uso da distância restrita no pacote de calibração melhorou de forma significativa a exatidão dos resultados (M2-1 = 1,80mm, M2-2 = 1,47mm, $p < 0,001$). O protocolo de aquisição M3-1 (movimento não sistemático e com um marcador) produziu o pior erro de reconstrução (2,63mm). Como observado, quando se considera M1-2 e M2-2 (movimentos diferente, mas com uma distância restrita) não são encontradas diferenças significativas.

Discussão

Realizar análises cinemáticas 3D em esportes, como no caso da natação, requer alta exatidão na reconstrução. A utilização da calibração não-linear de câmeras foi descrita para melhorar os resultados de exatidão encontrados em condições de laboratório [25, 28, 29]. Erros de reconstrução, variando de 0,58 a 1 mm, foram obtidos utilizando sistemas optoeletrônicos e câmeras industriais [15, 30, 23]. A exatidão da reconstrução da ASC (lentes grande-angulares – GoPro) foi avaliada em condições fora da água obtendo 10mm de erro para um modelo linear de câmera [31]. No mesmo artigo, os autores relataram um aumento de cinco vezes da exatidão (2mm) quando adotaram um modelo não-linear de câmera. Este último resultado está de acordo com o teste da GoPro em laboratório, do presente trabalho (Tabela 1).

Análises subaquáticas 3D, baseadas em uma complexa estrutura de calibração e modelos lineares de câmeras, utilizando sistemas tradicionais baseados em vídeo, obtiveram um erro de reconstrução maior que 5mm [32-35]. Em [22], foi mostrado que a calibração de câmeras subaquáticas com câmeras industriais e modelo não-linear de câmera, em média, melhora a exatidão da reconstrução em até 1 mm em um volume de trabalho aproximado de 7m^3 . Este resultado é comparável com os valores (2mm a 10m de distância) relatados pelos sistemas comerciais destinados a análises 3D subaquáticas [12].

À luz dessas considerações, o presente estudo avaliou a exatidão da reconstrução subaquática das ASCs calibradas por um modelo não-linear de câmera abrangendo distorções ópticas [22]. O erro médio sobre a reconstrução da distância inter-marcadores foi inferior a 1,5mm (Alta Resolução em ambiente subaquático e em laboratório) em um volume de aquisição aproximado de 6m^3 . Esses resultados são comparáveis a valores reportados anteriormente [22], a erros de reconstrução relatados em [36] utilizando câmeras GoPro e em [12] utilizando o sistema Oqus-Underwater.

Em relação à confiabilidade da calibração, como esperado, os movimentos de calibração afetaram os resultados de exatidão na reconstrução. Como mostrado (Tabela 2), movimentar o bastão de forma

sistemática por todo o volume de trabalho (M1) resultou nos melhores resultados de exatidão. O protocolo M3, caracterizado por movimentos para cima e para baixo sem controle sistemático, conduziu aos piores resultados. O movimento circular, embora não abranja sistematicamente a totalidade do volume de aquisição, assegurou resultados de exatidão menores que 2mm, porém piores que os resultados obtidos em M1. A análise da confiabilidade da calibração relacionada ao número de marcadores do bastão de calibração mostrou que um marcador é suficiente quando adquirido preenchendo todo o volume de aquisição. Vale ressaltar que o uso de dois marcadores (distância restrita) pode melhorar a exatidão na reconstrução tornando o resultado menos dependente do movimento do bastão de calibração (Tabela 2: M1-2 vs M2-2). Com base nessas considerações, pode-se argumentar que a calibração baseada no bastão torna a ASC uma concorrente das câmeras industriais para análises de movimento subaquático.

Alguns limites do presente estudo devem ser discutidos. Primeiro, realizou-se uma avaliação da potencialidade da ASC em termos de configuração de calibração e exatidão na reconstrução, desconsiderando as questões do ambiente relativas às condições subaquáticas. Por exemplo, o contraste da imagem, que pode ser afetado pela iluminação da piscina, e a perturbação da água, que está diretamente relacionada com a velocidade do nadador, prejudicam a qualidade da detecção do marcador nas imagens (Figura 5). Tais questões ambientais demandam testes específicos para avaliar seus efeitos sobre a exatidão na reconstrução 3D. Pretendemos realizar uma análise sistemática desse efeito em trabalhos futuros.

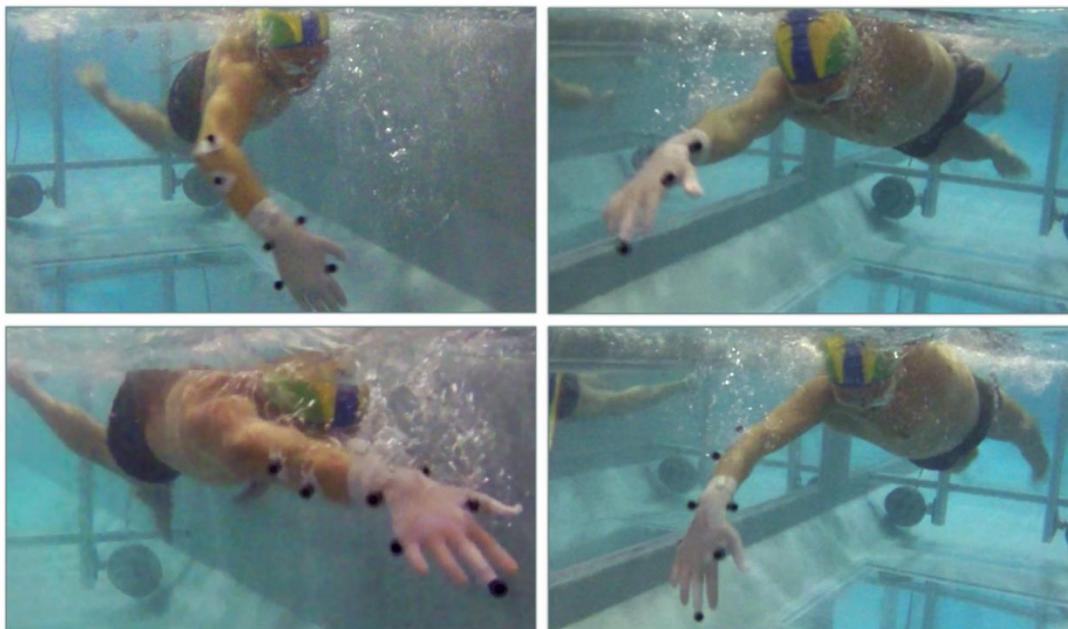


Figura 5. Dois momentos do ciclo da braçada do nado crawl registrado por duas câmeras. O nadador está equipado com marcadores de superfície fixados no braço direito. Esta real condição esclarece como ruins contrastes de imagem e perturbações da água podem dificultar a detecção e rastreamento automático do marcador na imagem, afetando a exatidão das análises cinemáticas 3D (Bernardina et al., 2016).

Segundo, a questão relativa à análise cinemática subaquática 3D se refere ao protocolo de marcação utilizado para calcular a cinemática linear e angular. Embora aumentar o número de marcadores assegure uma melhor definição dos segmentos do corpo, procedimentos de marcação, rastreamento dos marcadores e o desempenho do nadador seriam bastante afetados pelo aumento do arrasto na água [37]. A fim de evitar isso, o uso de cruzes ou círculos desenhados na pele do nadador foi proposto [38]. Como alternativa, uma abordagem sem marcadores pode ser aplicada, como descrito em [39-40]. Entretanto, a segmentação da silhueta completa do nadador nas imagens exige uma complexa rede de câmeras com uma iluminação subaquática adequada para aumentar o contraste nadador-água [40].

Terceiro, não foi realizada uma extensa avaliação dos recursos de configuração da GoPro (resolução de imagem, frequência de aquisição e

ângulos de visão da câmera). Neste trabalho, o objetivo foi estudar a exatidão da calibração para um tamanho específico de volume de aquisição, garantindo pelo menos um ciclo completo do nado crawl. Para um volume de aquisição de 6m de largura e cerca de 3m de distância para as câmeras é necessário um ângulo de visão de aproximadamente 130°. A única opção de configuração da GoPro que atende às exigências é o ângulo de visão de 127° (médio). Com esta configuração de câmera são disponíveis 24Hz, 30Hz, 48Hz e 60Hz de frequência de aquisição. Foi escolhida a frequência de 60Hz devido a velocidade típica dos nadadores. Uma comparação mais sistemática entre as diferentes configurações permitidas pela GoPro (resolução, ângulo de visão e frequência de aquisição) será objeto de estudo de avaliações futuras.

Quarto, não foram consideradas “tecnologias vestíveis” para comparação. Especialmente, as unidades de medição magnéticas inerciais (IMMUs) foram recentemente propostas na literatura para análise cinemática [41]. Apesar de serem sem fio, esses sensores podem afetar o desempenho do nadador devido ao efeito do arrasto que é aumentado na medida em que a velocidade do nadador aumenta. Tem de ser salientado que o arrasto provoca, por exemplo, vibrações nos sensores, os quais afetam a qualidade da medida cinemática. Além disso, para assegurar a transmissão de dados sem fios, baterias de alta capacidade são obrigatórias para suprir o consumo de energia, aumentando o tamanho dos dispositivos.

Conclusão

Este artigo foi desenvolvido para demonstrar, principalmente, a viabilidade do uso de câmeras de ação na realização de medições quantitativas 3D de movimentos subaquáticos. Mostrou-se que, atribuindo um método de calibração (instrumentos e pacotes de ajuste) apropriado, as câmeras de ação podem constituir um sistema métrico exato. Comparada aos dispositivos optoeletrônicos, desenvolvidos especificamente para análises 3D de movimentos, essa tecnologia apresenta baixo custo, tamanho reduzido, alta portabilidade, instalação sem fio e caixas-estanques.

Natação, marcha subaquática, hidroginástica e polo aquático são potenciais aplicações para essa tecnologia emergente.

Referências

1. Olsen E, Andersen PH, Pfau T. Accuracy and Precision of Equine Gait Event Detection during Walking with Limb and Trunk Mounted Inertial Sensors. *Sensors*. 2012; 12(6): 8145-8156. doi:10.3390/s120608145.
2. Safayi S, Jeffery ND, Shivapour SK, Zamanighomi M, Zylstra TJ, Bratsch-Prince J, et al. Kinematic analysis of the gait of adult sheep during treadmill locomotion: Parameter values, allowable total error, and potential for use in evaluating spinal cord injury. *J Neurol Sci*. 2015; 358: 107–112. doi:10.1016/j.jns.2015.08.031.
3. Sinclair J, Richards J, Taylor PJ, Edmundson CJ, Brooks D, Hobbs SJ. Three-dimensional kinematic comparison of treadmill and overground running. *Sport Biomech*. 2013; 12(3): 272-282. doi:10.1080/14763141.2012.759614.
4. Bates NA, Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Impact differences in ground reaction force and center of mass between the first and second landing phases of a drop vertical jump and their implications for injury risk assessment. *J Biomech*. 2013; 46(7):1237–1241. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.02.024.
5. Joyce C, Burnett A, Cochrane J, Ball K. Three-dimensional trunk kinematics in golf: between-club differences and relationships to clubhead speed. *Sport Biomech*. 2013; 12(2): 108-120. doi: 10.1080/14763141.2015.1052747.
6. Seminati E, Marzari A, Vacondio O, Minetti AE. Shoulder 3D range of motion and humerus rotation in two volleyball spike techniques: injury prevention and performance. *Sport Biomech*. 2015; 14(2):216-231. doi:10.1080/14763141.2015.1052747.

7. Begon M, Leardini A, Belvedere C, Farahpourc N, Allard P. Effects of front a land sagittal thorax attitudes in gait on trunk and pelvis three-dimensional kinematics. *Med Eng Phys.* 2015; 37(10):1032-6. doi:10.1016/j.medengphy.2015.08.001.
8. Klotz MCM, Kost L, Braatz F, Ewerbeck V, Heitzmann D, Gantz S, et al. Motion capture of the upper extremity during activities of daily living in patients with spastic hemiplegic cerebral palsy. *Gait Posture.* 2013; 38(1):148–152. doi:10.1016/j.gaitpost.2012.11.005.
9. Maier MW, Niklasch M, Dreher T, Zeifang F, Rettig O, Klotz MC, et al. Motion patterns in activities of daily living: 3- year longitudinal follow-up after total shoulder arthroplasty using an optical 3D motion analysis system. *BMC Musculoskelet Disord.* 2014; 15(244). doi:10.1186/1471-2474-15-244.
10. Gefen A, Megido-Ravid M, Itzchak Y, Arcan M. Biomechanical Analysis of the Three-Dimensional Foot Structure During Gait: A Basic Tool for Clinical Applications. *J Biomech Eng.* 2000; 122(6): 630-639. doi:10.1115/1.1318904.
11. Wahid F, Begg R, McClelland JA, Webster KE, Halgamuge S, Ackland DC. A multiple regression normalization approach to evaluation of gait in total knee arthroplasty patients. *Clin Biomech.* 2016; 32:92-101. doi:10.1016/j.clinbiomech.2015.12.012.
12. Qualysis, Oqus Underwater. 2014. Available: http://www.qualisys.com/wp-content/uploads/2014/01/PI_Oqus_Underwater.pdf
13. Chong AK. Low-cost compact cameras: a medical application in CMT disease monitoring. *Photogramm Rec.* 2011; 26(134): 263-273. doi:10.1111/j.1477-9730.2011.00638.x
14. Silvatti AP, Sarro KJ, Cerveri P, Baroni G, Barros RML. A 3D kinematic analysis of breathing patterns in competitive swimmers. *J*

Sports Sci. 2012; 30(14): 1551-1560.
doi:10.1080/02640414.2012.713976.

15. Bernardina, GRD., Silva, RG, Cerveri, P., Barros RML and Silvatti AP, Accuracy of sport action cameras for 3d underwater motion analysis. Proceedings of the 32 International Conference of Biomechanics in Sports 2014. pp. 505-508 ISSN 1999-4168.
16. Monnet T, Samson M, Bernard A, David L, Lacouture P. Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study. Sports Eng. 2014; 17(3): 171-181. doi:10.1007/s12283-014-0152-4.
17. Fujii K, Shinya M, Yamashita D, Kouzaki M, Oda S. Anticipation by basketball defenders: An explanation based on the three-dimensional inverted pendulum model. Eur J Sport Sci. 2014; 14(6): 538-546. doi:10.1080/17461391.2013.876104.
18. García-Ramos A, Feriche B, de la Fuente B, Argüelles-Cienfuegos J, Strojnik V, Strumbelj B, et al. Relationship between different push-off variables and start performance in experienced swimmers. Eur J Sport Sci. 2015; 15(8): 687-695. doi:10.1080/17461391.2015.1063699.
19. McDonnell L, Hume P, Nolte V. Sprint kayaking stroke rate reliability, variability and validity of the Digitrainer accelerometer compared to GoPro video measurement. In Proceedings of the XXX International Symposium on Biomechanics in Sports, Melbourne, Australia. 2012. pp. 316-319. ISSN 1999-4168.
20. Timmis MA, Turner K, van Paridon KN. Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. PLoS ONE. 2014; 9(12): 115-179. doi:10.1371/journal.pone.0115179.
21. Vieira LHP, Pagnoca EA, Milioni F, Barbieri RA, Menezes RP, Alvarez L, et al. Tracking futsal players with a wide-angle lens camera: accuracy analysis of the radial distortion correction based on an

- improved Hough transform algorithm. *Comput Methods Biomech Biomed Eng Imaging Vis.* 2015. doi:10.1080/21681163.2015.1072055.
- 22.** Silvatti AP, Dias FAS, Cerveri P, Barros RML. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. *J Biomech.* 2012; 45(6): 1112-1116. doi:10.1016/j.jbiomech.2012.01.004.
- 23.** Silvatti AP, Cerveri P, Telles T, Dias FAZ, Baroni G, Barros RML. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. *Comput Methods Biomech Biomed Eng.* 2013; 16(11): 1240-1248. doi:10.1080/10255842.2012.664637.
- 24.** Figueroa PJ, Leite NJ, Barros RML. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. *Comput Methods Programs Biomed.* 2003; 72(2): 155-165. doi:10.1016/S0169-2607(02)00122-0
- 25.** Cerveri P, Borghese NA, Pedotti A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. *J Biomech.* 1998; 31(10): 935-940. doi:10.1016/S0021-9290(98)00104-3.
- 26.** Cerveri P, Pedotti A, Borghese NA. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. *IEEE Trans Evolut Comput.* 2001; 5(3): 271-282. doi:10.1109/4235.930315.
- 27.** Chiari L, Della Croce U, Leardini A, Cappozzo A., Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. *Gait Posture.* 2005, 21(2):197-211. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.04.004
- 28.** Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans Pattern Anal.* 2000; 22(11): 1330-1334. doi:10.1109/34.888718.
- 29.** Wang J, Shi F, Zhang J, Liu Y. A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern Recognit.* 2008; 41(2): 607-615. doi:10.1016/j.patcog.2007.06.012.

- 30.** Pribanić T, Sturm P, Cifrek M. Calibration of 3D kinematic systems using 2D calibration plate. In Proceedings of the XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports, Seoul, Korea. 2008. pp. 77-80. ISSN 1999-4168.
- 31.** Balletti C, Guerra F, Tsioukas V, Vernier P. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. *Sensors*. 2014; 14(9): 17471-17490. doi:10.3390/s140917471.
- 32.** Yanai T, Hay JG, Gerot JT. Three-dimensional videography of swimming with panning periscopes. *J Biomech*. 1996; 29(5): 673-678. doi:10.1016/0021-9290(95)00123-9.
- 33.** Kwon YH, Lindley SL. Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. In Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, Hong Kong, China. 2000. pp. 48-55. ISSN 1999-4168.
- 34.** Gourgoulis V, Aggeloussis N, Kasimatis P, Vezos N, Boli A, Mavromatis G. Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *J Sci Med Sport*. 2008; 11(2): 90-95. doi:10.1016/j.jsams.2007.02.010
- 35.** Jesus K, Jesus K, Figueiredo P, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ, Machado LJ. Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach. *Comput Math Methods Med*. 2015. Article ID 269264. doi:10.1155/2015/269264.
- 36.** Shortis M. Calibration Techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors* 2015, 15(12), 30810-30826; doi:10.3390/s151229831
- 37.** Magalhaes FA, Sawacha Z, Di Michele R, Cortesi M, Gatta G, Fantozzi S., Effectiveness of an automatic tracking software in underwater motion analysis. *J Sports Sci Med*. 2013; 12(4):660-7.
- 38.** Ceccon S, Ceseracciu E, Sawacha Z, Gatta G, Cortesi M, Cobelli C, Fantozzi S. Motion analysis of front crawl swimming applying CAST

technique by means of automatic tracking. *J Sports Sci.*, 2013; 31(3) 276-287. doi:10.1080/02640414.2012.729134.

- 39.** Ceseracciu E, Sawacha Z, Fantozzi S, Cortesi M, Gatta G, Corazza S, et al. Markerless analysis of front crawl swimming. *J Biomech.* 2011; 44(12): 2236-2242. doi:10.1016/j.jbiomech.2011.06.003.
- 40.** Ceseracciu E, Sawacha Z, Cobelli C. Comparison of markerless and marker-based motion capture technologies through simultaneous data collection during gait: proof of concept. *PLoS ONE.* 2014; 9(3): e87640. doi:10.1371/journal.pone.0087640.
- 41.** Fantozzi S, Giovanardi A, Borra D, Gatta G. Gait kinematic analysis in water using wearable inertial magnetic sensors. *PLoS ONE.* 2015; 10(9): e0138105. doi: 10.1371/journal.pone.0138105.

ARTIGO 2²

Comparação da exatidão de reconstrução 3D, dentro e fora da água, utilizando câmeras de ação

Resumo

Câmeras de ação (ASC - Action sport cameras) têm sido amplamente utilizada para fins recreativos devido à diminuição contínua de custo, resolução de imagem e aumento das frequências de aquisição, juntamente com ferramentas fáceis de usar. Como consequência, têm sido recentemente utilizadas para estudos de gesto esportivo e avaliação quantitativa do desempenho atlético. Neste trabalho, foi avaliado o potencial de duas ASCs (GoPro Hero3 +) para análise de movimentos tridimensionais (3D), fora (laboratório) e dentro da água (piscina) em função de diferentes configurações de câmera como frequência de aquisição, resolução de imagem e campo de visão. Isso é motivado pelo fato de que na natação os ciclos do movimento são caracterizados por fase dentro e fora da água que estabelece o desafio de ter uma configuração em dois volumes: um volume de medição subaquática capturado por câmeras subaquáticas e um volume de medição no ar capturado por câmeras fora da água. A reconstrução de ciclos completos na natação requer, portanto, a junção de medidas simultâneas adquiridas em ambos os volumes. Caracterizar e otimizar os erros instrumentais de tal configuração torna obrigatória a avaliação desses erros em ambos os volumes.

A fim de calibrar o par de câmeras, marcadores esféricos pretos foram colocados em duas ferramentas de calibração, utilizadas tanto dentro quanto fora da água, e uma otimização não-linear de duas etapas foi realizada. A exatidão na reconstrução 3D dos marcadores e a reprodutibilidade ao

² Versão em português do artigo parcialmente publicado na Revista Journal of Biomechanics, 2017. Conceito A1 no Qualis Capes. (Primeira página da versão original no anexo E).

estimar os parâmetros das câmeras representaram o desempenho do sistema. Para ambos ambientes (laboratório e subaquático), os testes estatísticos foram focados na comparação de diferentes configurações das câmeras. Em seguida, cada configuração foi comparada para os dois ambientes. E foi demonstrada uma aplicabilidade de obtenção de variáveis cinemáticas dentro da água. Em todas as resoluções avaliadas, e em ambos ambientes (laboratório e subaquático), o erro de reconstrução foi inferior a 3mm e o erro relacionado ao volume de trabalho diagonal variou de 1: 2000 ($3 \times 1,3 \times 1,5 \text{ m}^3$) a 1:7000 ($4,5 \times 2,2 \times 1,5 \text{ m}^3$) em concordância com a literatura. Estatisticamente, a exatidão 3D obtida em laboratório foi inferior ($p < 10^{-5}$) à subaquática, em todas as configurações de câmera testadas. Em relação à reprodutibilidade dos parâmetros das câmeras, foi encontrada uma baixa variabilidade nos dois ambientes (1.7% e 2.9%, laboratório e subaquático). Na avaliação cinemática do nado foi possível reconstruir a trajetória submersa do nado crawl. Foi identificada uma manutenção do padrão de braçada durante todo o nado e uma técnica comparada ao modelo proposto na literatura. Esses resultados apoiam o uso da tecnologia das ASC para realizar reconstruções quantitativas tanto em laboratório quanto em ambiente subaquático.

Abstract

Action sport cameras (ASC) have achieved a large consensus for recreational purposes due to ongoing cost decrease, image resolution and frame rate increase, along with plug-and-play usability. Consequently, they have been recently considered for sport gesture studies and quantitative athletic performance evaluation. In this paper, we evaluated the potential of two ASCs (GoPro Hero3+) for in-air (laboratory) and underwater (swimming pool) three-dimensional (3D) motion analysis as a function of different camera setups involving the acquisition frequency, image resolution and field of view. This is motivated by the fact that in swimming, movement cycles are characterized by underwater and in-air phases what imposes the technical challenge of having a split volume configuration: an underwater

measurement volume observed by underwater cameras and an in-air measurement volume observed by in-air cameras. The reconstruction of whole swimming cycles requires thus merging of simultaneous measurements acquired in both volumes. Characterizing and optimizing the instrumental errors of such a configuration makes mandatory the assessment of the instrumental errors of both volumes.

In order to calibrate the camera stereo pair, black spherical markers placed on two calibration tools, used both in-air and underwater, and a two-step nonlinear optimization were exploited. The 3D reconstruction accuracy of testing markers and the repeatability of the estimated camera parameters accounted for system performance. For both environments, statistical tests were focused on the comparison of the different camera configurations. Then, each camera configuration was compared across the two environments. And it was demonstrated an applicability of obtaining underwater kinematic variables. In all assessed resolutions, and in both environments, the reconstruction error (true distance between the two testing markers) was less than 3mm and the error related to the working volume diagonal was in the range of 1:2000 ($3 \times 1.3 \times 1.5 \text{m}^3$) to 1:7000 ($4.5 \times 2.2 \times 1.5 \text{m}^3$) in agreement with the literature. Statistically, the 3D accuracy obtained in the in-air environment was poorer ($p < 10^{-5}$) than the one in the underwater environment, across all the tested camera configurations. Related to the repeatability of the camera parameters, we found a very low variability in both environments (1.7% and 2.9%, in-air and underwater). In the swimming kinematic evaluation it was possible to reconstruct the underwater trajectory of the freestyle. A stroke standard maintenance was identified throughout the swim and a technique compared to the model proposed in the literature. This result encourage the use of ASC technology to perform quantitative reconstruction both in-air and underwater environments.

Introdução

Sistemas comerciais de captura de movimento com câmeras optoeletrônicas (MOCAPs – *Motion Capture*) têm sido amplamente utilizados para avaliar a cinemática de uma variedade de movimentos humanos, de animais e robôs em ambientes controlados (Chiari et al., 2005; Windolf et al., 2008; Monnet et al., 2014; Safayi et al., 2015), fornecendo resultados com alta exatidão tridimensional (3D), variando de 1:5000 com quatro câmeras (Shortis e Harvey, 1998) a 1:15000 (em relação à diagonal do volume) com 36 câmeras (Schmid, 2001).

Da mesma forma, câmeras de consumo, industrial e de ação (ASC - *Action Sport Camera*) têm sido analisadas como uma potencial alternativa para obter medições confiáveis fora de laboratórios com interesse especial para ambientes não controlados e críticos, como subaquáticos, neve e campo de futebol. No que diz respeito às medições bidimensionais (2D), análises automáticas de imagens permitiram quantificar o movimento de jogadores de futebol durante jogos (Barros et al., 2007). No que se refere às medidas tridimensionais (3D), mostrou-se a viabilidade da reconstrução de ações de esqui (Baroni et al., 1998) e de natação (Silvatti et al., 2012; Silvatti et al., 2013; Jesus et al., 2015; Bernardina et al., 2016).

Em particular, as tecnologias das ASC, que alcançaram altos consumos para fins recreativos, devido às contínuas reduções de custo, melhoras na resolução de imagem e frequência de aquisição, juntamente com ferramentas fáceis de usar, têm sido definitivamente consideradas para estudos de gesto esportivo e na avaliação quantitativa de desempenho de atletas (Timmis et al; 2014; Vieira et al., 2015). No entanto, ainda não está claro se as técnicas de configuração (iluminação de cena, aquisição de imagem, processamento de imagens, recursos de rastreamento, objetos de calibração de câmeras e metodologias para a estimação de parâmetros internos e externos das câmeras), adotadas pelos sistemas comerciais com câmeras optoeletrônicas, podem ser facilmente dimensionadas para as ASC. Por exemplo, o uso de fontes ativas de iluminação infravermelha e ultravioleta em ambientes externos não é viável, especialmente no subaquático, que necessitam de estroboscópios ultra-potentes e filtros de

band-pass personalizados (Qualysis, 2015; Optitrack, 2016). À luz dessas considerações, o objetivo de testar a viabilidade de ASC para análise de movimento quantitativo é duplo, ou seja, o foco no gerenciamento de erros de medição em termos de configurações de câmera (campo de visão, resolução de imagem, frequência de aquisição) e a disposição de técnicas de instalação portátil.

Especificamente, neste artigo, avaliou-se a exatidão de reconstrução 3D de duas ASCs fora e dentro da água. Isso é motivado pelo fato de que na natação os ciclos do movimento são caracterizados por fase dentro e fora da água que estabelece o desafio de ter uma configuração em dois volumes: um volume de medição subaquática capturado por câmeras subaquáticas e um volume de medição no ar capturado por câmeras fora da água. A reconstrução de ciclos completos na natação requer, portanto, a junção de medidas simultâneas adquiridas em ambos os volumes. Caracterizar e otimizar os erros instrumentais de tal configuração torna obrigatória a avaliação desses erros em ambos os volumes. E foi demonstrada uma aplicabilidade na obtenção de variáveis cinemáticas dentro da água. Assim a fase submersa da trajetória da mão na braçada do nado crawl foi reconstruída tridimensionalmente.

Materiais e Métodos

Câmeras GoPro Hero3+

Câmeras Hero3+ (GoPro, Black Edition®, 2013 - USA) foram utilizadas neste trabalho. Diferentes configurações da câmera, fornecidas pelo fabricante, podem ser escolhidas pelo ajuste manual. Primeiramente, três campos de visão (FOV – *field of view*), estreito, médio e largo, são disponíveis correspondendo à 90°, 127° e 170° graus de abertura, respectivamente. Para cada FOV, uma série de combinações de resolução de imagem e frequência de aquisição é disponível (Tabela 1). O controle remoto Wi-Fi GoPro foi adotado para iniciar e parar as câmeras. Após a aquisição, os vídeos foram convertidos para o formato AVI no *software* GoPro *Studio* (GoPro, Inc., USA). O processamento de imagem foi baseado

em uma ferramenta de software customizada, denominada "Dvideo", desenvolvida e validada pelos mesmos autores do presente trabalho (Figuerola et al., 2003). O cálculo do centro dos marcadores foi baseado em operadores morfológicos robustos.

Tabela 1. Configurações de câmera utilizadas para avaliar a exatidão das câmeras de ação (ASC - Action Sport Cameras).

Configuração	FOV	Frequência de aquisição	Resolução de imagem	Volume de aquisição
1	Estreito	120 Hz	1280x720p	3x1,3x1,5m ³
2	Estreito	60 Hz	1920x1080p	3x1,3x1,5m ³
3	Médio	60 Hz	1280x720p	4x1,8x1,5m ³
4	Médio	60 Hz	1920x1080p	4x1,8x1,5m ³
5	Largo	240 Hz	848x480p	4,5x2,2x1,5m ³
6	Largo	120 Hz	1280x720p	4,5x2,2x1,5m ³
7	Largo	100 Hz	1280x960p	4,5x2,2x1,5m ³
8	Largo	60 Hz	1920x1080p	4,5x2,2x1,5m ³
9	Largo	48 Hz	1920x1440p	4,5x2,2x1,5m ³

FOV = campo de visão (*field of view*); Hz = hertz; p = pixels; m = metros.

Posicionamento das câmeras

A fim de permitir a reconstrução 3D, foram utilizadas duas câmeras GoPro Hero3+. A sincronização das câmeras foi assegurada através da luz de uma lanterna, que identificou o frame inicial da aquisição. As distâncias inter-câmeras e câmera-volume foram definidas em aproximadamente 2 e 3,6m, respectivamente (Figura 1). Cada câmera, montadas em tripés, foi colocada a uma altura de aproximadamente 1m do chão. O mesmo posicionamento de câmera foi aplicado nos dois diferentes ambientes, laboratório e embaixo d'água. Considerando os três diferentes FOVs da câmera (estreito, médio e largo) e o posicionamento das câmeras, foram obtidos três diferentes volumes de aquisição: 3x1,3x1,5m³ (Volume 1), 4x1,8x1,5m³ (Volume 2) e 4,5x2,2x1,5m³ (Volume 3) (Figura 1).

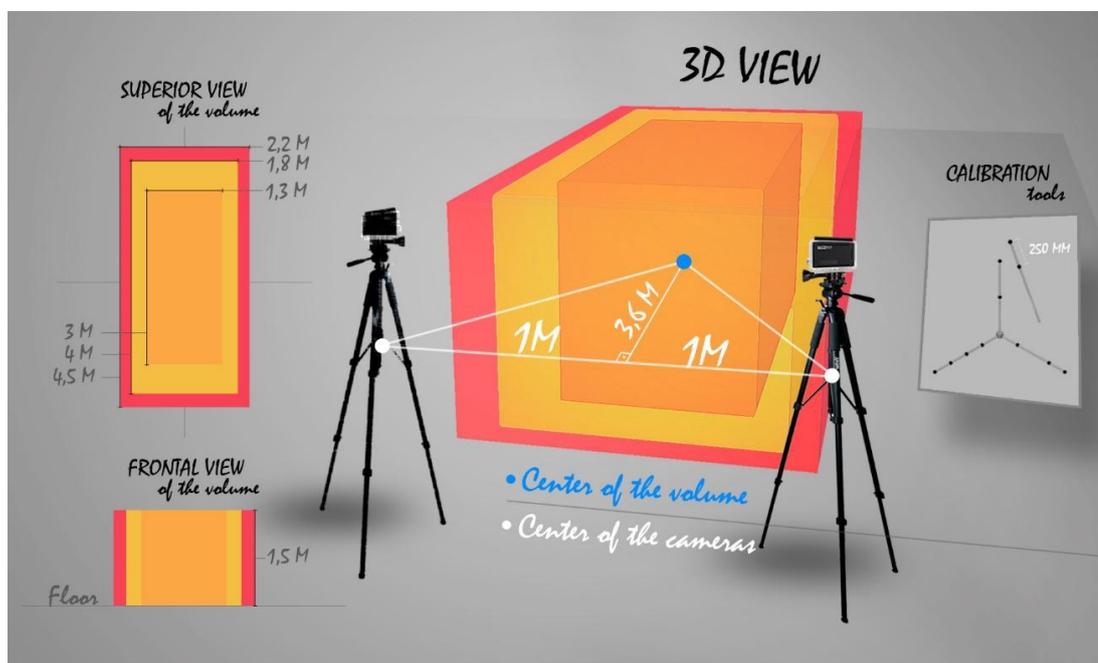


Figura 1. Posicionamento das câmeras juntamente com os três diferentes volumes de aquisição correspondentes aos três campos de visão (FOV) da câmera, vista 3D, superior e frontal do volume. Ferramentas de calibração, bastão e triedro usados para calibrar as câmeras (Bernardina et al., 2017).

Calibração de câmeras

A calibração das câmeras foi realizada para estimar os parâmetros interiores (distância focal, ponto principal e escala x/y) e exteriores (posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas de referência) de ambas as câmeras. Distorções ópticas radial / tangencial foram incluídas no modelo de perspectiva da câmera. A calibração foi realizada em duas etapas, envolvendo a aquisição de um objeto estático e um em movimento (Figura 1, ferramenta de calibração). O objeto estático consistiu em uma estrutura tríade ortogonal impermeável ($1 \times 1 \times 1$ m), com nove marcadores esféricos pretos (\varnothing : 35 mm) em distâncias conhecidas, em relação à origem do triedro. Nove marcadores foram utilizados para determinar o sistema de coordenadas de referência (Silvatti et al., 2012). O objeto móvel era um bastão, com dois marcadores esféricos (\varnothing : 35 mm) a

uma distância conhecida (d_n : 250 mm) (Bernardina et al., 2016). Ambas as ferramentas foram construída por uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC - *Computer Numerical Control Machine*).

Na primeira etapa, o triedro foi posicionado no chão, no centro do ângulo de visão das câmeras e adquirido durante 5 segundos. Para cada câmera, os pontos de imagem dos marcadores e as coordenadas 3D correspondentes dos marcadores do triedro foram utilizados no algoritmo de transformada linear direta (DLT) (Hatze, 1998; Abdel-Aziz e Karara, 1971) para estimar os parâmetros internos e externos, desconsiderando as distorções ópticas. Na segunda etapa, o triedro foi retirado e o bastão foi movido, por aproximadamente 20 segundos, dentro do volume, de forma a preencher os campos de visão das câmeras e os dois marcadores foram adquiridos. Do total de quadros adquiridos, 100 posições do bastão, distribuídas homogeneamente no volume de aquisição, foram usadas em um pacote de ajuste dos parâmetros da câmera, incluindo o modelo de distorção óptica. O modelo de câmera foi suplementado com um único parâmetro radial k_1 ao usar o FOV estreito, dois parâmetros radiais k_1 e k_2 ao usar o FOV médio e dois radiais, juntamente com um parâmetro tangencial adicional p_1 , quando se utilizado o FOV largo. O algoritmo de calibração utilizou os parâmetros iniciais das câmeras (estimado pelo algoritmo DLT) e as coordenadas 2D de 200 posições do bastão para refinar os parâmetros da câmera, estimar os parâmetros de distorção e calcular as coordenadas 3D dos marcadores do bastão. A distância entre os dois marcadores foi explorada como uma restrição adicional no pacote de ajuste. A implementação da calibração de câmeras baseou-se em um desenvolvimento personalizado, cuja validação foi relatada anteriormente na literatura pelos mesmos autores do presente trabalho (Cerveri et al., 1998; Cerveri et al., 2001).

Avaliação de desempenho

Exatidão da reconstrução 3D

A exatidão da reconstrução 3D do par de ASCs foi estudada em função da configuração de câmeras. Uma configuração de câmera foi

definida como uma combinação de FOV, frequência de aquisição, resolução de imagem e volume de aquisição (Tabela 2). Cada configuração foi testada em dois ambientes: laboratório e dentro d'água. A exatidão 3D foi analisada em um teste de barra rígida (cinco aquisições da barra de pelo menos 10 segundos cada), usando o mesmo bastão adotado na fase de calibração. O bastão de calibração, equipado com dois marcadores, foi movido dentro do volume de aquisição de forma a preencher os campos de visão das câmeras. Independentemente da frequência de aquisição e do FOV, foram coletadas, dos cinco ensaios, 4000 distâncias do bastão distribuídas homogeneamente dentro do volume de aquisição.

Usando as 4000 distâncias reconstruídas, foram considerados os seguintes erros: (a) média da distribuição do erro da distância inter-marcadores (ME) para quantificar o viés da reconstrução; (b) o desvio-padrão da distribuição do erro da distância inter-marcadores (DP) para quantificar a precisão da reconstrução; (c) o valor absoluto médio da distribuição do erro da distância inter-marcadores (EMA) para quantificar a exatidão global da reconstrução; (d) o erro percentual (a relação entre o EMA e a máxima diagonal do volume de aquisição) para referir a exatidão global ao volume de aquisição alvo e torná-la comparável a diferentes tamanhos de volume (Chiari et al., 2005).

Para comparar as diferentes configurações da câmera (Tabela 1) em cada ambiente (laboratório / embaixo d'água), foi realizado o teste não-paramétrico Kruskal-Wallis com *post-hoc* de Tukey ($p=0,05$). Para comparar a mesma configuração de câmera nos dois ambientes, foi realizado o teste não-paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney ($p=0,05$). Para ambos os testes estatísticos, foi utilizada a distribuição dos 4000 erros médios absolutos da distância. Todas as análises foram realizadas no *software* Matlab (*release* 2015b) (Matworks Natick, USA).

Repetibilidade dos parâmetros da câmera

De modo a avaliar a repetibilidade dos parâmetros da câmera (internos, externos e de distorção), escolheu-se a configuração que obteve os melhores resultados de exatidão. Dez diferentes aquisições de dados do

bastão de calibragem foram usadas para estimar dez conjuntos de parâmetros de calibração. A repetibilidade foi reportada em termos de variabilidade de cada parâmetro sobre o seu valor médio correspondente entre as 10 calibrações.

Dados cinemáticos da braçada do nado crawl

Após a avaliação da exatidão da reconstrução 3D, dentre todas as configurações de FOV largo (frequência de aquisição, resolução de imagem, volume de aquisição), a com o menor erro serviu para analisar uma aplicação prática do sistema. A aquisição no FOV largo foi escolhida devido enquadramento de um maior volume, como uma possível solução para diferentes envergaduras por parte dos avaliados. Como foi feita uma nova aquisição, foi calculada novamente a exatidão.

A análise foi realizada em uma piscina coberta, de 15m, a uma temperatura de 25°C, localizada nas dependências do Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Viçosa. Foi recrutado um atleta de natação (25 anos, 1,74m, 75kg), do sexo masculino, da categoria Sênior – classificação da Confederação Brasileira de Desportos Aquáticos (CBDA), especialista no nado crawl, que possui mais de 5 anos de prática competitiva a nível nacional e se encontra em regime de treinamento regular.

Foi executado o nado crawl atado, em que o nadador se mantém preso a um objeto de tração (exemplo: uma corda) e realiza naturalmente os movimentos, porém sem um deslocamento do corpo. O teste foi realizado no horário em que o atleta costuma treinar, e foi orientado que realizasse o nado em velocidade confortável. Com a ajuda de uma fita adesiva e uma dupla face foi colocado um marcador preto (\varnothing : 20mm) na extremidade distal do dedo médio na mão esquerda do nadador. As posições 3D desse marcador foram obtidas por medição semiautomática e calculadas a trajetória da mão na fase submersa (Figura 2). Foram coletados cinco ciclos de braçada, sem que houvesse respiração. Os dados foram analisados qualitativamente pelo padrão da trajetória nos três planos, para os cinco ciclos, e, equiparados ao modelo do Maglischo (2010).

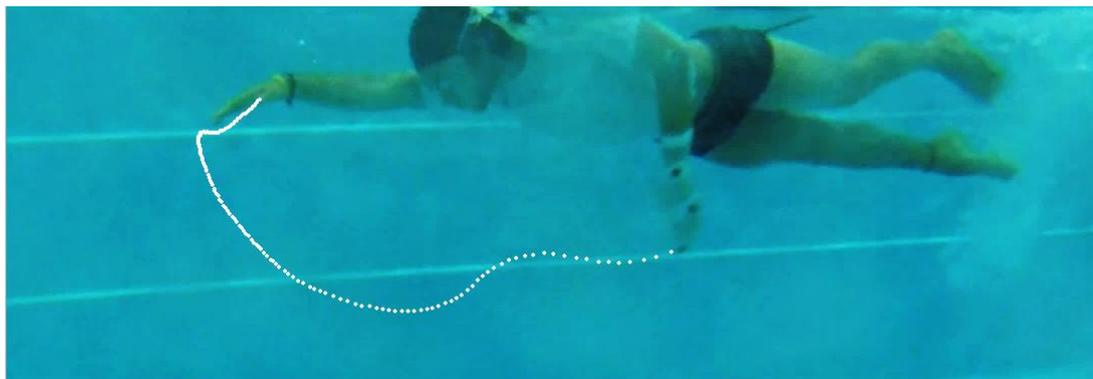


Figura 2. Identificação do marcador para reconstrução 3D da trajetória subaquática da braçada esquerda do nado crawl.

Resultados

Exatidão da reconstrução 3D

Em todas as resoluções avaliadas, e em ambos os ambientes (laboratório e subaquático), o erro de reconstrução (EMA) foi inferior a 3mm (Tabela 2). O melhor e pior valor de EMA foram 0,60mm (1:7000) e 2,76mm (1:2000), nas configurações 2 e 5, ambos no ambiente aquático, respectivamente. Curiosamente, todas as calibrações em laboratório forneceram um viés negativo do erro médio, enquanto que as calibrações subaquáticas conduziram, em média, a um viés positivo. Além disso, o DP e o EMA para os valores em laboratório foram consistentemente maiores do que os dos testes subaquáticos. Nenhuma dependência específica do erro na distribuição dos marcadores no espaço foi apreciada. Uma vez que o posicionamento da câmera foi muito semelhante e que o FOV da câmera foi exatamente igual em cada configuração, a discrepância do viés do erro entre os ambientes de laboratório e subaquático poderia ser atribuída a alguns problemas na detecção do centro do marcador ou efeitos de distorção óptica. Na figura 3, é mostrada como exemplo as imagens das câmeras de duas configurações (configuração #2 e configuração #8). Os diferentes efeitos de distorção óptica são claramente visíveis, com maior efeito *fisheye*

no ambiente de laboratório. Como consequência, os parâmetros de distorção estimados foram maiores em laboratório (config. 2, somente k_1 : câmera #1: -0,30; câmera #2: -0,28; config. 8, k_1, k_2, p_1 : câmera #1: -0,28, -0,08, 0,004; câmera #2: -0,27, -0,09, 0,003) do que embaixo d'água (config. 2, somente k_1 : câmera #1: -0,05; câmera #2: -0,09 ; config. 8, k_1, k_2, p_1 : câmera #1: -0.19, 0.80, -0.002; câmera #2: -0.13, 0.10, -0.009). Esta discrepância entre os valores dos parâmetros encontrados pode ser atribuída provavelmente à mudança do meio do ar para a água.



Figura 3. Imagens da aquisição do triedro para mostrar a diferença na distorção óptica no ar e no ambiente subaquático (Bernardina et al., 2017).

Tabela 2. Resultado do teste de barra rígida (4000 amostras) em todas as configurações de câmera, em ambos ambientes. Distância nominal d_n entre dois marcadores: 250mm.

FOV	Configuração	Ambiente	ME \pm DP [mm]	EMA [mm]
Estreito (90°)	1	Subaquático	0,57 \pm 0,87	0,82
		Laboratório	-0,69 \pm 0,96	1,03
	2	Subaquático	0,08 \pm 0,77	0,60
		Laboratório	-0,67 \pm 0,99	0,97
Médio (127°)	3	Subaquático	0,20 \pm 1,11	0,89
		Laboratório	-0,47 \pm 1,86	1,49
	4	Subaquático	-0,09 \pm 0,77	0,61
		Laboratório	-0,47 \pm 1,13	0,97
Largo (170°)	5	Subaquático	-0,39 \pm 3,51	2,76
		Laboratório	-0,77 \pm 3,72	2,67
	6	Subaquático	0,02 \pm 1,88	1,44
		Laboratório	-0,77 \pm 2,04	1,66
	7	Subaquático	0,23 \pm 2,02	1,62
		Laboratório	-0,31 \pm 2,19	1,66
	8	Subaquático	0,37 \pm 0,98	0,79
		Laboratório	-0,60 \pm 1,42	1,23
	9	Subaquático	0,60 \pm 1,11	1,00
		Laboratório	-0,81 \pm 1,53	1,37

FOV = field of view; ME = média da distribuição do erro da distância inter-marcadores; DP = desvio-padrão; mm = milímetro; EMA = valor absoluto médio da distribuição do erro da distância inter-marcadores.

Nos dois ambientes, a comparação entre as configurações 1 e 2 (mesmo FOV, mas diferentes frequências de aquisição e resolução de imagem) revelou resultados significativos de menor exatidão na configuração 1 ($p < 10^{-5}$). Da mesma forma, quando avaliamos apenas as configurações com o FOV largo (5, 6, 7, 8, 9), conforme esperado, a configuração com a resolução de imagem mais baixa (5), em ambos ambientes, obteve os piores resultados de exatidão ($p < 10^{-5}$) (Tabela 2 / Figura 4).

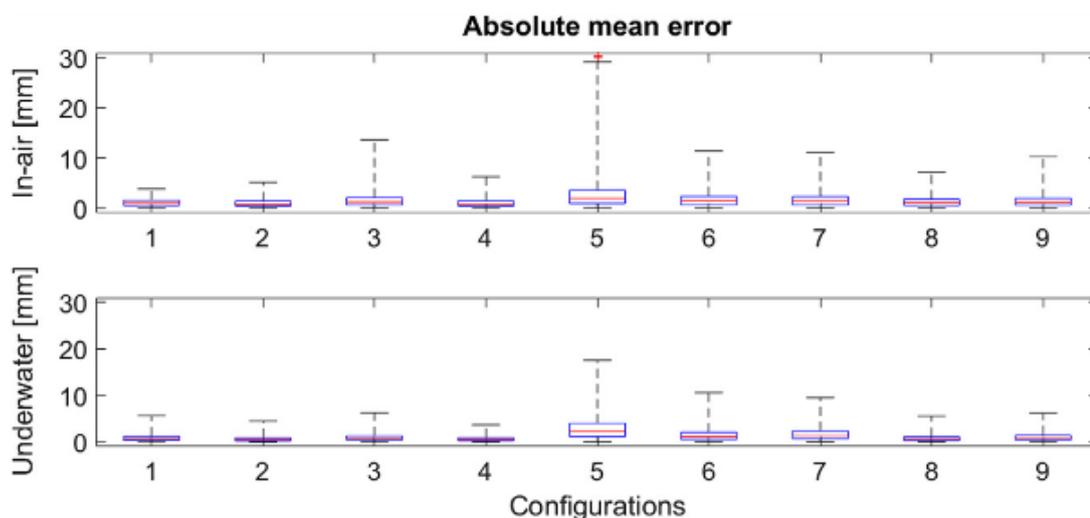


Figura 4. Distribuição do erro médio absoluto nas nove configurações de câmera testadas para ambiente de laboratório (imagem superior) e subaquático (imagem inferior) (Bernardina et al., 2017).

A fim de avaliar como o FOV afetou a exatidão 3D, comparou-se as configurações 2, 4 e 8, tendo todas as três a mesma frequência e resolução de imagem. Não houve diferença (laboratório e subaquático: $p=0,99$) entre os FOVs estreito e médio. Por outro lado, para o FOV largo o EMA foi significativamente pior que nos outros dois FOVs ($p<10^{-5}$) em ambos os ambientes (Tabela 2).

A fim de avaliar como a resolução de imagem afetou a exatidão 3D, comparou-se as configurações 3 e 4, tendo a mesma FOV e frequência. Como esperado, na mais alta resolução de imagem encontrou-se erros significativamente menores que na resolução mais baixa (laboratório e subaquática: $p<10^{-5}$). Estatisticamente, a exatidão 3D obtida em ambiente de laboratório foi inferior ($p<10^{-5}$) que a em ambiente subaquático, em todas as configurações de câmera testadas.

Repetibilidade dos parâmetros da câmera

Em média, a variabilidade dos parâmetros foi inferior a 1,7% e 2,9% em laboratório e subaquático, respectivamente (Tabela 3). O parâmetro mais variável foi o ângulo γ (orientação do eixo Z do sistema de coordenadas da

câmera em relação ao sistema de coordenadas de referência) no ambiente de laboratório e as coordenadas do ponto principal para o ambiente subaquático. A distância inter-câmeras calculada foi em média 1945,5 ($\pm 4,6$) e 2208,5 mm ($\pm 7,0$) para as calibrações subaquáticas e de laboratório, respectivamente. No que diz respeito às distorções ópticas, o parâmetro radial médio k_1 diferiu sensivelmente entre o ar (câmera #1: $-0,32 \pm 0,01$; câmera #2: $-0,27 \pm 0,01$) e embaixo d'água (câmera #1: $-0,05 \pm 0,01$; câmera #2: $-0,09 \pm 0,02$), de acordo com os resultados acima.

Tabela 3. Variabilidade dos parâmetros de calibração nos dois ambientes em dez calibrações repetidas.

Ambiente	Câmera	Localização [%]			Ângulos de rotação [%]			Ponto principal [%]		Distância Focal [%]	
		X	Y	Z	α	β	γ	x	y	f/c_x	f/c_y
Subaquático	1	0,24	0,23	0,15	0,65	0,13	0,35	1,24	1,28	0,20	0,24
	2	0,24	0,36	0,18	0,59	0,53	1,91	0,85	2,89	0,18	0,27
Laboratório	1	0,21	0,29	0,25	0,27	0,38	1,61	1,02	0,78	0,20	0,23
	2	0,19	0,37	0,21	0,60	0,21	0,34	0,51	0,99	0,24	0,29

Dados cinemáticos da braçada do nado crawl

Uma vez que foi feita uma nova aquisição, a exatidão da configuração 8 (1920 x 1080p, 60Hz), melhor resultado da avaliação anterior para o FOV largo, foi avaliada novamente. Confirmado os baixos valores de erro (EMA mínimo: 0,58mm; EMA máximo: 0,72mm) calculou-se a trajetória da fase submersa do nado crawl.

As trajetórias da mão reconstruídas foram plotadas no plano frontal, lateral e transversal (Figura 5). O tempo médio de duração da fase submersa foi de aproximadamente 2,8 segundos com uma velocidade média de 0,76m/s, um nado com baixa frequência. A figura 5 mostra o padrão de trajetória para os cinco ciclos de braçada.

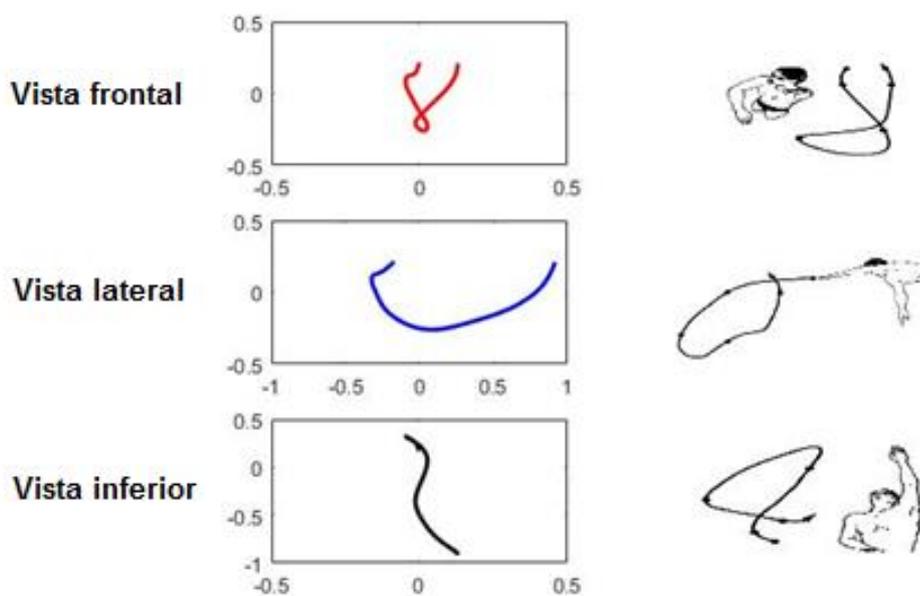


Figura 5. Trajetória da mão esquerda do nadador. Vista frontal, vista lateral e vista inferior. Trajetória da mão proposta por Maglisho (2010).

Discussão e conclusão

Com o objetivo de possibilitar a análise do movimento 3D na natação, que é caracterizado por movimentos cíclicos com fases subaquática e aérea, o primeiro passo fundamental consiste em caracterizar a exatidão da reconstrução 3D em ambientes dentro e fora da água. Neste trabalho, foi proposto o uso de ASCs, alternativas aos MOCAPs tradicionais, para a análise quantitativa na natação e foi avaliada a exatidão de reconstrução 3D embaixo d'água em comparação ao ambiente fora (laboratório).

Para o ambiente de laboratório, os MOCAPs aplicados à análise da marcha foram extensivamente avaliados e mostraram que a exatidão na reconstrução pode variar de 0,5 a 11 mm em função do número de câmeras dispostas num típico volume de trabalho de $6 \times 1.5 \times 2 \text{m}^3$ (Chiari et al., 1996; Ehara et al., 1997; Richards, 1999; Pribanić et al., 2008; Eichelberger et al., 2016). A evolução dessas tecnologias, incluindo filtros ópticos ativos, permitiu estender a captura de movimentos para ambientes ao ar livre e subaquáticos, garantindo exatidões sub-milimétricas de reconstrução ao

usar um grande número de câmeras (Vicon, 2016; BTS Bioengineering 2014; Qualisys, 2014; Motion Analysis Corporation, 2016; Optitrack, 2016).

Câmeras industriais e ASCs representam uma alternativa menos cara para MOCAPs aplicados em ambientes ao ar livre e subaquáticos. Saltos, chutes no futebol e ações de combate são exemplos de possíveis aplicações ao ar livre que podem ser analisadas quantitativamente adotando essas tecnologias (Payton, 2008). Da mesma forma, caminhada na água e natação são exemplos de aplicações subaquáticas (Ceseracciu et al., 2014; Silvatti et al., 2013; Mooney et al., 2015). Utilizando protocolos de calibração de câmeras, resultados aceitáveis de exatidão (0,7 a 3,0mm) foram reportados (Silvatti et al., 2012; Balletti et al., 2014; Shortis, 2015; Helmholtz, et al., 2016; Bernardina et al., 2016; Jackson et al., 2016).

Em análise subaquática, duas câmeras Basler forneceram uma exatidão na reconstrução inferior a 1,15mm (1:4000) (Silvatti et al., 2012). Duas ASCs foram descritas para assegurar uma exatidão na reconstrução subaquática de 1,00mm em média (1:1000) (Shortis, 2015). Novamente, duas ACS proporcionou uma exatidão na reconstrução subaquática de 1,20mm em média (1:3000) (Bernardina et al. 2016).

Na captura de movimento ao ar livre, foram relatadas três ASCs para fornecer uma exatidão na reconstrução 3D de 7,20mm (1:10000) (Jackson et al., 2016). No presente estudo, o melhor e pior resultado de exatidão, em ambos os ambientes, apoiaram resultados anteriores (Tabela 2). Nos parâmetros geométricos da câmera foi encontrada uma variabilidade baixa, em ambos os ambientes, uma vez que os valores máximos (1,7% em laboratório e 2,9% subaquático) foram inferiores a 5%, encontrados na literatura (Cerveri et al. 1998). Em relação à frequência de aquisição e resolução de imagem, como esperado a resolução revelou ser mais decisiva. As configurações 2 e 4 (1920×1080, 60Hz) foram as que forneceram melhores resultados de exatidão (Tabela 2). Apesar de uma maior frequência de aquisição ser disponível (240Hz), piores resultados são encontrados quando se utiliza uma resolução de imagem baixa (848×480 pixel). Como esperado, o FOV largo afetou negativamente os resultados de exatidão, suportado pela comparação entre a configuração 1 e 6 e a configuração 2 e 8. Em ambos os casos, a frequência e a resolução de

imagem foram iguais e somente o FOV mudou (estrito para largo), e as exatidões foram piores nas configurações com o FOV largo (config. 6 e 8).

Na avaliação cinemática do nado foi possível reconstruir a trajetória submersa do nado crawl. O atleta avaliado apresentou, para a braçada esquerda, uma técnica de nado comparada ao modelo proposto (Maglisho, 2010) (Figura 5), além de uma manutenção do padrão durante o nado. Na vista lateral e vista inferior, foram observadas as mesmas características de trajetória, porém uma pequena diferença pode ser notada. Na vista lateral, como exemplo, acompanhando a trajetória, o momento de saída da mão da água ao final da braçada se encontra com um momento anterior de entrada da mão na água. Isso se deve ao deslocamento do corpo do nadador para frente. Na trajetória reconstruída não é observado esse encontro, justamente por não ser um nado livre. No nado atado, o deslocamento do nadador é impedido por uma tração contrária ao seu movimento propulsivo.

Além disso, foi possível identificar as velocidades da fase submersa do nado. Foi caracterizado um nado de baixa frequência, visto que a fase submersa durou, em média, 2,8 segundos, com velocidade média de 0,76m/s (Gourgoulis et al., 2008; Vezos et al., 2007). A velocidade máxima na braçada (1,62m/s) ocorreu entre 2 e 2,5 segundos, próxima à fase de finalização. Essa é uma característica da técnica em que a velocidade máxima acontece na fase de varredura para cima, ao final do movimento (Maglisho, 2010; Telles et al., 2011).

Uma visão de trajetórias possibilita identificar erros técnicos do nado, além de assimetrias entre braçadas direita e esquerda. Nesse estudo, devido ao posicionamento unilateral das câmeras, não foi realizada uma avaliação bilateral. Uma visão do treinador à beira da piscina aliada à utilização de câmeras para análises da técnica resulta em uma implicação prática desse estudo. Essa análise conjunta proporciona uma melhor visão do nadador ao treinador com provável diminuição de erro na prescrição de educativos e treinos para correção do nado.

Como uma conclusão geral, foi mostrado que um par de ASCs pode ser configurado para análises subaquáticas variando o volume de aquisição de 5,85m³ a 14,85m³, com precisões de 0,60 e 0,80mm, respectivamente. Além disso, os resultados sustentam a possibilidade de uso das ASCs a

altas frequências de aquisição (240Hz), adequadas para avaliações de movimentos rápidos, como corrida, ciclismo e chutes (Tabelas 1 e 2), entretanto sofrendo uma diminuição na exatidão. Como um achado específico, observou-se que resultados significativos de exatidão mais altos foram encontrados em ambiente subaquático do que em laboratório. Como mencionado acima, isto pode ser explicado pelo efeito *fish-eye* na lente e pela detecção do centro do marcador. Embaixo d'água, foi encontrado menos efeito *fish-eye* na lente do que fora da água (Figura 3). A calibração da câmera levou em consideração esse fato e estimou maiores valores dos parâmetros de distorção óptica, conforme relatado nos resultados. Apesar da calibração de câmeras calcular o ajuste da distorção óptica, os valores de EMA ainda foram significativamente diferentes. Além disso, o uso de marcadores pretos forneceu um melhor contraste de imagem com o plano de fundo na água. Isto assegurou um erro menor na detecção 2D do centro do marcador do que a detecção realizada em imagens fora da água. É relevante ressaltar, no entanto, que os algoritmos de processamento de imagem, utilizados para calcular o centro dos marcadores, foram baseados em operadores morfológicos. Métodos mais robustos, baseados em encaixe circular (*circle fitting*), poderiam aumentar a exatidão da detecção 2D.

Utilizando ASC, foi possível também reconstruções da fase submersa da braçada do nado crawl com alta exatidão. Essa exatidão foi assegurada pelo reteste da barra rígida. Os dados das trajetórias representam uma aplicabilidade para treinadores na identificação de possíveis erros técnicos e assimetrias das braçadas.

À luz dessas considerações, é coerente afirmar que ASC é uma tecnologia de custo efetivo para realizar reconstruções quantitativas tanto em laboratório quanto em ambientes subaquáticos. Para analisar tridimensionalmente um ciclo completo na natação é necessário, contudo, integrar ambos os ambientes abordando a definição de um sistema de coordenadas comum e a sincronização das câmeras dentro e fora da água. Além disso, o uso de marcadores de superfície ainda permanece um problema para o rastreamento devido ao arrasto de água que produz bolhas, e a análise sem marcador tem sido desenvolvida para superar esse problema (Ceseracciu et al., 2014). Futuros trabalhos abordarão uma

validação concorrente com sistemas comerciais de câmeras optoeletrônicas e a avaliação de múltiplas câmeras (ASCs), colocadas em movimento, para aumentar o tamanho do volume de aquisição, juntamente com procedimentos de configurações adequados (ex. calibração, rastreamento do movimento).

Referências

1. Balletti, C., Guerra, F., Tsioukas, V., Vernier, P., 2014. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. *Sensors*. 14(9), 17471-17490.
2. Baroni, G., Ferrigno, G., Rodano, R., 1998. Three-dimensional sport movement analysis by means of free floating tv cameras with variable optics. In *Proceedings of the 16 International Symposium on Biomechanics in Sports*. Konstanz, Germany.
3. Barros, R.M.L., Misuta, M.S., Menezes, R.P., Figueroa, P.J., Moura, F.A., Cunha, S.A., Anido, R., Leite, N.J., 2007. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *Journal of Sports Science and Medicine*. 6, 233-242.
4. Bernardina, G.R.D., Cerveri, P., Barros, R.M.L., Marins, J.C.B., Silvatti, A.P., 2016. Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. *PLoS ONE*. 11(8), 1-14.
5. BTS Bioengineering. BTS Smart DX. 2014. Available: http://www.btsbioengineering.com/wp-content/uploads/2014/02/BTSBRO_SMART-DX-1113UK_LQ.pdf
6. Cerveri, P., Borghese, N.A., Pedotti, A., 1998. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. *Journal of Biomechanics*. 31(10), 935-940.
7. Cerveri, P., Pedotti, A., Borghese, N.A., 2001. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 5(3), 271-282.

8. Ceseracciu E., Sawacha Z., Cobelli C., 2014. Comparison of markerless and marker-based motion capture technologies through simultaneous data collection during gait: proof of concept. *PLoS ONE.*; 9(3), e87640.
9. Chiari, L., Croce, U.D., Leardini, A., Cappozzo, A., 2005. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. *Gait Posture.* 21(2), 197-211.
10. Ehara Y., Fujimoto H., Miyazaki S., Mochimaru M., Tanaka S., Yamamoto S., 1997. Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait & Posture.* 5(3), 251-255.
11. Eichelberger, P., Ferraro, M., Minder, U., Denton, T., Blasimann, A., Krause, F., Baur, H., 2016. Analysis of accuracy in optical motion capture – A protocol for laboratory setup evaluation. *Journal of Biomechanics.* 49, 2085–2088.
12. Figueroa, P.J., Leite, N.J., Barros, R.M.L., 2003. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* 72(2), 155-165.
13. Helmholz, P., Long, J., Munsie, T., Belton, D., 2016. Accuracy assessment of Go Pro Hero 3 (black) camera in underwater environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 41, 477-483.
14. Jackson, B.E., Evangelista, D.J., Ray, D.D., Hedrick, T.L., 2016. 3D for the people: multi-camera motion capture in the field with consumer-grade cameras and open source software. *Biology Open.* doi: 10.1242/bio.018713
15. Jesus, K., Jesus, K., Figueiredo, P., Vilas-Boas, J.P., Fernandes, R.J., Machado, L.J., 2015. Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach. *Computational and Mathematical Methods in Medicine.* 2015, 1-8.
16. Hatze H., 1998. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. 21(7), 533-538.
17. Monnet, T., Samson, M., Bernard, A., David, L., Lacouture, P., 2014. Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming

- with a motion capture system: a feasibility study. *Sports Engineering*. 17(3): 171-181.
18. Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Osborough, C., Quinlan, L.R., O'Laighin, G., 2015. Application of video-based methods for competitive swimming analysis: a systematic review. *Sports and Exercise Medicine*. 1(5), 133-150.
19. Motion Analysis Corporation. Movement analysis products. 2016, Available:
<http://www.motionanalysis.com/html/movement/products.html>.
20. Optitrack, 2016. <http://www.optitrack.com/motion-capture-movement-sciences/>
21. Payton, C.J., 2008. Motion analysis using video. In: Payton, C.J., Barlett, R.M. (Eds.), *Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise: The British Association of Sport and Exercise Sciences Guidelines*. Routledge, London and New York, pp. 8-32.
22. Pribanić, T., Sturm, P., Cifrek, M. Calibration of 3D kinematic systems using 2D calibration plate. In *Proceedings of the XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports*, Seoul, Korea. 2008. pp. 77-80. ISSN 1999-4168.
23. Qualisys, Oqus. 2015. Available: <http://www.qualisys.com>
24. Richards, J., 1999. The measurement of human motion: A comparison of commercially available systems. *Human Movement Sciences*. 18, 589-602.
25. Safayi, S., Jeffery, N.D., Shivapour, S.K., Zamanighomi, M., Zylstra, T.J., Bratsch-Prince, J., Wilson, S., Reddy, C.G., Fredericks, D.C., Gillies, G.T., Howard, M.A., 2015. Kinematic analysis of the gait of adult sheep during treadmill locomotion: Parameter values, allowable total error, and potential for use in evaluating spinal cord injury. *Journal of the Neurological Sciences*. 358, 107–112.
26. Silvatti, A.P., Dias, F.A.S., Cerveri, P., Barros, R.M.L., 2012. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. *Journal of Biomechanics*. 45(6), 1112-1116.
27. Silvatti, A.P., Cerveri, P., Telles, T., Dias, F.A.Z., Baroni, G., Barros, R.M.L., 2013. Quantitative underwater 3D motion analysis using

- submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 16(11), 1240-1248.
28. Shortis, M.R., Harvey, E.S., 1998. Design and calibration of an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna populations. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 32, 792–799.
29. Shortis, M.R., 2015. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors*. 15(12), 30810-30826
30. Schmid, O.A., 2001. A new calibration method for 3-D position measurement in biomedical applications. *Biomedizinische Technik*. 46(3), 50–54.
31. Timmis, M.A., Turner, K., van Paridon, K.N., 2014. Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. *PLoS ONE*. 9(12): 115-179.
32. Trobbiani, G., Venerus, L., 2015. A novel method to obtain accurate length estimates of carnivorous reef fishes from a single video camera. *Neotropical Ichthyology*. 13(1), 93-102.
33. Vicon. Bonita. 2016. Available: <https://www.vicon.com/file/vicon/bonita-brochure.pdf>
34. Vieira, L.H.P., Pagnoca, E.A., Milioni, F., Barbieri, R.A., Menezes, R.P., Alvarez, L., 2015. Tracking futsal players with a wide-angle lens camera: accuracy analysis of the radial distortion correction based on an improved Hough transform algorithm. *Comput Methods Biomech Biomed Eng Imaging Vis*. doi:10.1080/21681163.2015.1072055.
35. Windolf, M., Gotzen, N., Morlock, M., 2008. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems – exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics*. 41, 2776–2780.
36. Maglisho, E.W., 2010. *Nadando o mais rápido possível*. 3. Ed. Barueri, SP: Manole.
37. Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Vezos, N., Mavromatis, G., 2008. Hand orientation in hand paddle swimming. *International Journal of Sports Medicine*. 29(5), 429-43.

38. Vezos, N., Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Christoforidis, C., Mavromatis, G., 2007. Underwater stroke kinematics during breathing and breath-holding front crawl swimming. *Journal of Sports Science and Medicine*. 6(1), 58-62.
39. Telles, T., Silvatti, A.P., Barros, R.M.L., Cerveri, P., 2011. Análise dos movimentos da mão de um nadador nos quatro estilos da natação: comparação entre modelo teórico e análise cinemática tridimensional. *Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte*. 10(1), 38-46.

ARTIGO 3

As câmeras de ação são exatas o suficiente para análises tridimensionais de movimento? Comparação com um sistema comercial

Resumo

Sistemas especializados em movimentos 3D possuem seus altos custos como obstáculo na decisão de compra de equipamentos para análises biomecânicas. Câmeras de ação (ASC – *Action Sport Camera*) têm sido testadas como uma alternativa. No entanto são necessárias mais investigações acerca de seu uso. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar, em condição de laboratório, a precisão, exatidão e dados cinemáticos das câmeras ASC e comparar a um sistema comercial de análise de movimento 3D. Quatro câmeras GoPro Hero3+ Black (frequência: 120Hz; resolução de imagem: 1280×720 pixels) e quatro câmeras ViconMX40 (frequência: 120Hz; resolução de imagem: 2353×1728 pixels) foram utilizadas para comparação. Para calibração das câmeras foram utilizadas as ferramentas e o procedimento recomendado pela Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK). O desempenho do sistema foi representado pela precisão e exatidão na reconstrução 3D dos marcadores e pela aquisição de dados cinemáticos da marcha e salto. Apesar de ser encontradas altas correlações ($r=0,99$) e desvios (*bias*) inferiores a 3mm, os dois sistemas apresentaram uma diferença sistemática confirmada pelo viés estatisticamente significativo. Em relação à exatidão foi encontrada uma diferença entre os dois sistemas, com um erro de 8 a 10 vezes maior para as câmeras ASC. Apesar desses resultados, não foram encontradas diferenças entre os dados cinemáticos. Isso sugere que, apesar do sistema comercial Vicon alcançar melhor desempenho que o sistema com câmeras ASC, como era esperado, em termos práticos, as diferenças não foram significativas para a obtenção de parâmetros cinemáticos. O objetivo principal de um sistema é a análise

de movimentos e, desta forma, a ASC se mostrou viável na avaliação da cinemática 3D de movimentos humanos.

Abstract

Specialized 3D motion systems have their high-cost as an obstacle in the decision to purchase equipment for biomechanical analysis. Action Sport Cameras (ASC) have been tested as an alternative. However more research are necessary about their use. Thus, the aim of this study was to evaluate, in laboratory condition, the precision, accuracy and kinematic data of the ASC cameras and to compare to a commercial system of 3D motion analysis. Four GoPro Hero3+ Black cameras (frequency: 120Hz, image resolution: 1280×720 pixels) and four ViconMX40 cameras (frequency: 120Hz, image resolution: 2353×1728 pixels) were compared. For the camera calibration, the tools and the procedure recommended by Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK) were used. The system performance was represented by the precision and accuracy in the 3D reconstruction of the markers and by the acquisition of the gait and jump kinematic data. Although high correlations ($r = 0.99$) and deviations (bias) of less than 3 mm were found, both systems showed a systematic difference confirmed by the bias statistically significant. Regarding accuracy, a difference between the two systems was found with an error of 8 to 10 times higher for the ASC cameras. Despite these results, no differences were found between the kinematic data. This suggests that although the commercial system Vicon has obtained better performance than the system with ASC camera, as was expected, in practical terms, the differences were not significant for obtaining kinematic parameters. The main objective of a system is the motion analysis and, in this way, the ASC proved to be feasible in the evaluation of the 3D kinematics of the human movements.

Introdução

Sistemas especializados em movimentos 3D, como Vicon (Oxford Metrics Ltd., UK), Elite (BTS, Milan, Italy), Qualysis (Göteborg, Sweden) and

Optitrack (NaturalPoint, Inc. Corvallis, OR) são reconhecidos como equipamentos padrões para obtenção de medidas quantitativas do movimento humano em clínicas, esportes e indústrias de entretenimento.

Infelizmente, seu alto custo é, por vezes, o mais importante obstáculo na decisão de compra de novos equipamentos para laboratórios de análises biomecânicas.

Como alternativa para tais sistemas, câmeras industriais e de ação (ASC – *Action Sport Camera*) tem sido testadas para avaliar a exatidão de reconstrução 3D, em laboratório (Barros et al., 2007; Lodovico et al., 2011; Silvatti et al., 2012a) e medições subaquáticas (Silvatti et al., 2012b; Silvatti et al., 2013; Shortis, 2015; Jesus et al., 2015; Helmholtz et al., 2016).

No entanto, a qualidade das medições depende fortemente da sua configuração e é altamente sensível a modificações. Propriedades de marcação, projeções ópticas, conversão de vídeo digital, configuração de câmera, distorção da lente, procedimento de calibração, etc, influenciam o desempenho em várias extensões.

Envolvendo técnicas de configuração personalizadas, ASCs foram qualificadas para medições quantitativas em laboratório e embaixo d'água, proporcionando uma exatidão de reconstrução 3D inferior a 3mm em um volume de aquisição de cerca de $3 \times 1,3 \times 1,5 \text{m}^3$ (Bernardina et al., 2016; Bernardina et al., 2017). No presente trabalho, o objetivo foi qualificar uma rede de câmeras de ação (ASC) em um laboratório clínico para análise cinemática segmentar, comparando os resultados com um sistema MOCAP comercial usando uma configuração idêntica.

Materiais e métodos

Sistema de câmeras

A tecnologia GoPro (Hero 3+) foi comparada ao sistema de captura de movimento ViconMX40 (Vicon, Oxford Metrics Ltd., UK). Quatro câmeras foram consideradas para ambos os sistemas. A resolução de imagem foi 2353x1728 e 1280x720 pixels para o MOCAP e ASC, respectivamente. A frequência de aquisição foi definida em 120 Hz para ambos os sistemas. O

volume de aquisição alvo foi de aproximadamente $4,0 \times 1,5 \times 2,0 \text{m}^3$, um tamanho típico para análises da marcha. As câmeras foram colocadas nos cantos do retângulo formado pelo volume (Figura 1). A sincronização das câmeras Hero 3+ foi assegurada pelo controle remoto Wi-Fi da GoPro. O MOCAP e ASC adquiriram as imagens simultaneamente. A fim de alinhar a escala de tempo dos dois sistemas, utilizou-se um disparo de luz no início de cada aquisição.

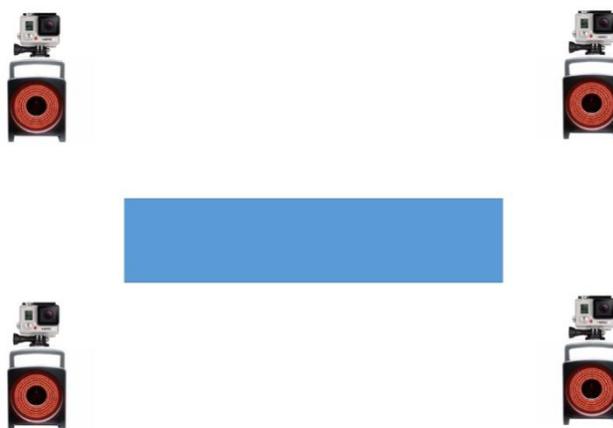


Figura 1. Disposição das câmeras.

Calibração de câmera

As câmeras do sistema de captura de movimento ViconMX40 foram calibradas utilizando a ferramenta de calibração (em forma de T com cinco marcadores passivos de \varnothing : 14mm) e o procedimento recomendado pelo fornecedor. O procedimento envolveu primeiro a aquisição da ferramenta em forma de T, com marcadores, em vários locais e orientações dentro do volume. Posteriormente, a aquisição da ferramenta em forma de T estável no chão, no centro do volume, definiu o sistema de coordenadas do volume calibrado.

Para calibração das câmeras GoPro, utilizou-se a mesma ferramenta Vicon com os mesmos procedimentos de aquisição. A fim de aumentar o contraste dos marcadores com o plano de fundo, cada GoPro Hero 3+ foi equipada com um anel de iluminação customizado que consiste em

lâmpadas LEDs brancas de alto brilho (potência: 4w, 1w cada). Os vídeos adquiridos foram convertidos para o formato de filme AVI no *software* GoPro Studio (GoPro, Inc., USA). O processamento de imagem para detecção do centro do marcador foi executado em uma plataforma SW personalizada, desenvolvida em Matlab[®] 2015 (Mathworks, Natick MS).

Os parâmetros da câmera GoPro foram calculados usando um método personalizado em duas fases (Figura 2). Os marcadores adquiridos a partir da aquisição da ferramenta em forma de T estática e em movimento foram utilizados para calcular uma estimativa preliminar dos parâmetros com base na geometria epipolar (Cerveri et al., 2001). Esse método prevê quatro sub-etapas, sendo elas: (a) primeiro, os marcadores adquiridos da ferramenta em forma de T móvel foram usados para determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do par de câmeras, do qual se tinha a maior inter-distância e o melhor ângulo de intersecção; (b) segundo, os marcadores da ferramenta estática, localizada no chão, foram reconstruídos tridimensionalmente (3D), referentes ao sistema de coordenadas do par de câmeras; (c) terceiro, essas coordenadas foram usadas para construir um sistema de coordenadas 3D no chão (sistema de referência global), ao qual o sistema de coordenadas do par de câmeras foi referenciado; (d) quarto, os marcadores na ferramenta em forma de T móvel foram reconstruídos no quadro de referência no mundo. Na segunda etapa da calibração, as quatro câmeras foram calibradas explorando a correspondência 2D/3D dos marcadores da ferramenta móvel. O método DLT forneceu uma estimativa inicial dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos, desconsiderando distorções ópticas (Silvatti et al., 2012). Em seguida, os parâmetros foram refinados por um procedimento chamado *bundle adjustment*, o qual tenta minimizar o erro de projeção 2D e o erro do tamanho da barra (Bernardina et al., 2016). A distorção óptica foi considerada adicionando um parâmetro radial para o modelo da câmera (Figura 2).

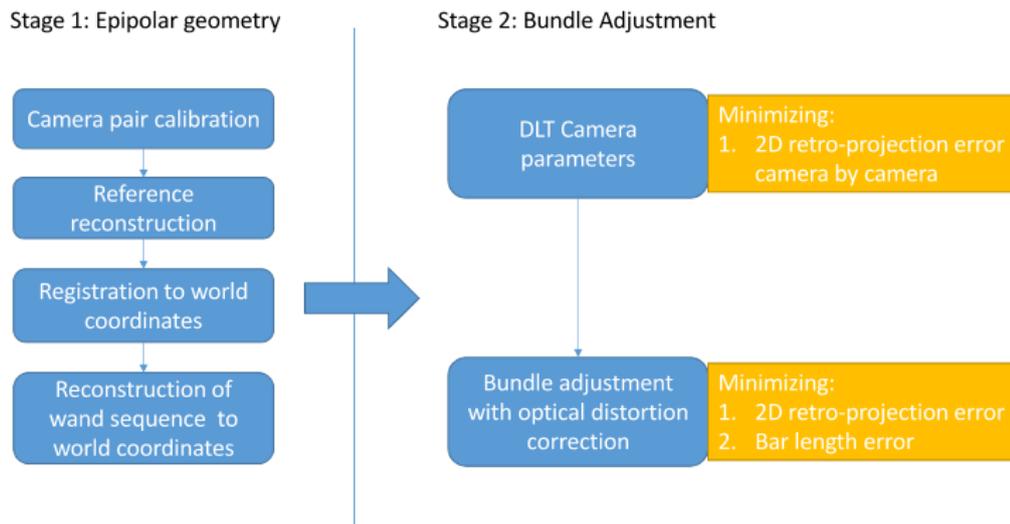


Figura 2. Esquema de calibração das câmeras.

Validação experimental

A comparação entre o sistema MOCAP e a ASC foi realizada através das medidas de: (1) precisão, (2) exatidão, (3) dados cinemáticos de movimentos padrões típicos (marcha e salto). Foi considerada uma configuração de câmeras posicionadas ao redor do volume de aquisição. A precisão e exatidão foram calculadas pela aquisição de uma ferramenta em forma de L, contendo três marcadores não alinhados (distância #1: 160mm e distância #2: 240mm). A ferramenta de aquisição foi movida dentro do volume de trabalho e adquirida por 10 segundos por ambos os sistemas, simultaneamente.

A precisão foi calculada pelo o valor médio da diferença entre as coordenadas medidas pelos dois sistemas (*bias*). Esses cálculos foram realizados para as três coordenadas dos três pontos fixos na ferramenta em forma de L. Gráficos de Bland e Altman foram usados para verificar possíveis diferenças sistemáticas entre as medidas. O teste Wilcoxon signed rank foi utilizado para comparar estatisticamente as correspondentes distribuições das coordenadas ($p < 0,05$).

A exatidão da reconstrução 3D dos pontos fixos na ferramenta em forma de L foi avaliada pela: (a) média da distribuição do erro da distância

inter-marcadores (ME) para quantificar o viés da reconstrução; (b) o desvio-padrão da distribuição do erro da distância inter-marcadores (DP) para quantificar a precisão da reconstrução; (c) o valor absoluto médio da distribuição do erro da distância inter-marcadores (EMA) para quantificar a exatidão global da reconstrução; (d) o erro percentual (a relação entre o EMA e a máxima diagonal do volume de aquisição) para referir a exatidão global ao volume de aquisição alvo e torná-la comparável a diferentes tamanhos de volume (Chiari et al., 2005) e (e) o ângulo entre os marcadores. A distribuição do erro para o MOCAP e a ASC foi comparada usando um teste não-paramétrico (Wilcoxon rank sum) com significância de 5%.

Para análise dos dados cinemáticos foi recrutado um indivíduo (feminino, 32 anos, 1,70 m e 58,5 kg), sem lesões ou qualquer comprometimento que pudesse influenciar na marcha. Para marcação foi utilizado um protocolo de marcha tradicional (Figura 3). Foram utilizados marcadores retro-reflexivos (\varnothing : 14mm) pregados a uma roupa justa ao corpo com auxílio de uma fita dupla-face. Foram realizadas três aquisições de marcha, velocidade auto-selecionada, pelo volume de aquisição ($4,0 \times 1,5 \times 2,0 \text{m}^3$), e uma aquisição de um salto *counter movement*. Novamente, os dados foram adquiridos simultaneamente pelos dois sistemas. Calculou-se o ângulo de flexão e extensão do joelho (trocânter maior e epicôndilo lateral do fêmur, e maléolo lateral), a velocidade da marcha e o comprimento da passada para as aquisições da marcha e o ângulo do joelho e altura do salto para a aquisição do salto. A fim de comparar os dados cinemáticos entre os dois sistemas foi utilizado um teste não paramétrico (Wilcoxon rank sum) com significância de 5%.

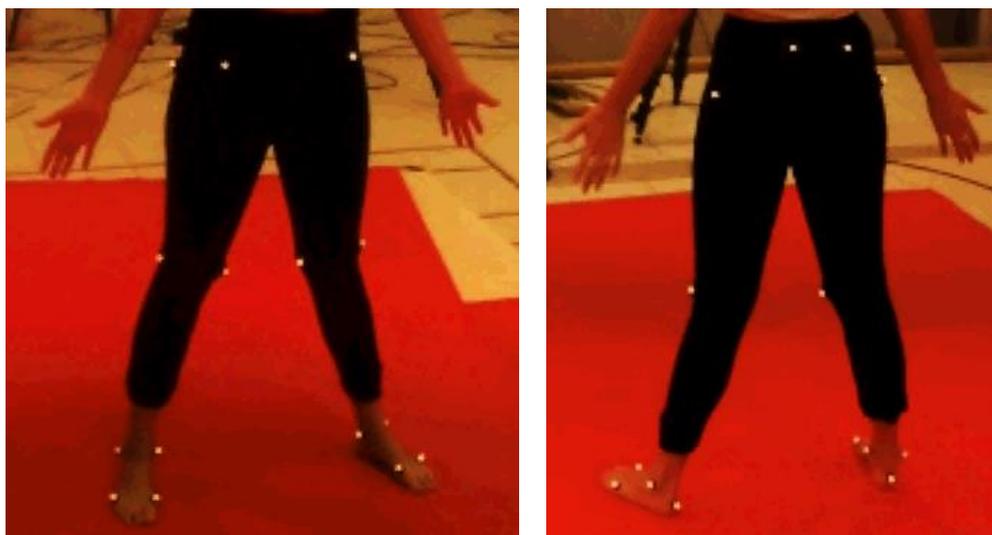


Figura 3. Marcadores (\emptyset : 14mm) usada nas aquisições de marcha e salto (vista anterior e posterior).

Resultados

Precisão

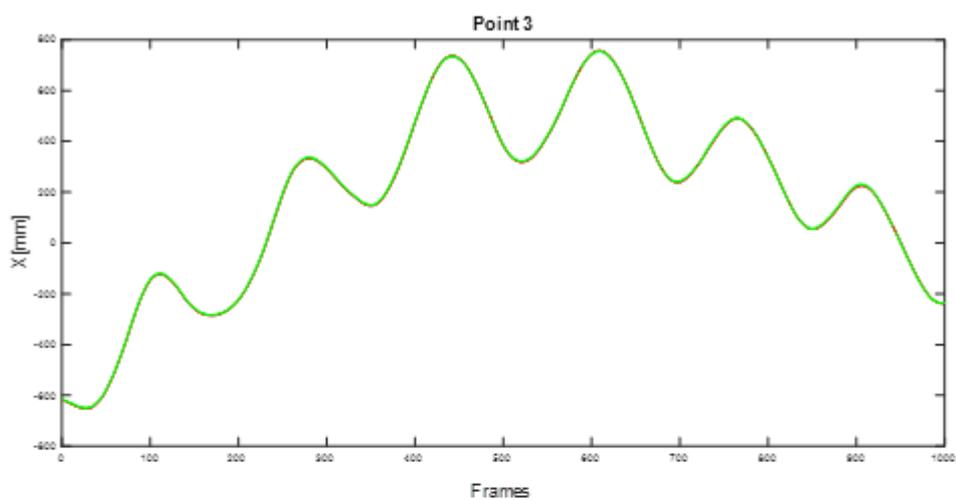
Uma alta correlação e um viés menor que 3mm foram encontrados entre os dois sistemas quando comparamos as três coordenadas dos três marcadores reconstruídos da ferramenta em forma de L (Tabela 1, Figuras 4, 5 e 6). Apesar de o viés ter sido inferior a 3 mm, estes valores foram estatisticamente significativos. Uma exceção foi encontrada na coordenada Y do ponto 3 (aquisição 1), confirmando uma diferença sistemática entre os sistemas (Tabela 1, Figura 4).

Tabela 1. Resultados de Bland-Altman para avaliar o grau de concordância entre as medições do MOCAP e ASC, através da aquisição de uma ferramenta em forma de L com três marcadores.

		Aquisição 1			Aquisição 2		
		r^2	bias	p	r^2	bias	p
P1	x	0,99	-0,49	10^{-10}	0,99	-0,93	10^{-10}
	y	0,99	1,20	10^{-10}	0,99	1,20	10^{-10}
	z	0,99	1,70	10^{-10}	0,99	1,90	10^{-10}
P2	x	0,99	-0,34	10^{-10}	0,99	-1,60	10^{-10}
	y	0,99	-1,40	10^{-10}	0,99	-1,90	10^{-10}
	z	0,99	-1,30	10^{-10}	0,99	-1,50	10^{-10}
P3	x	0,99	-1,90	10^{-10}	0,99	-2,50	10^{-10}
	y	0,99	0,16	0,26	0,99	0,70	10^{-10}
	z	0,99	-0,14	10^{-10}	0,99	-0,46	10^{-10}

P1 = ponto 1; P2 = ponto 2; P3 = ponto 3; $p < 0,05$.

As medidas correlacionadas e não-concordantes entre as medições podem ser conferida a partir das figuras 4, 5 e 6. Para mostrar os resultados gráficos de Bland-Altman, foi utilizado o ponto P3 como exemplo. As figuras ilustram a trajetória do ponto P3 (gráfico superior) nos eixos X, Y e Z, respectivamente, em que o valor da coordenada medida pela ASC (linha verde) é sobreposto ao valor medido pelo MOCAP (linha vermelha). A linha de regressão (gráfico inferior direito) e o gráfico de dispersão (gráfico inferior esquerdo) com os limites de concordância também podem ser verificados.



Bland-Altman Plot

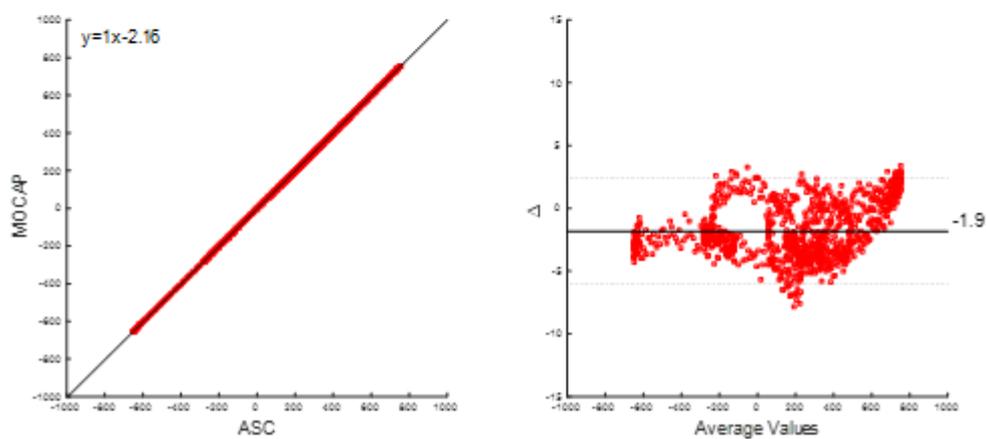


Figura 4. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo X adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP e ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).

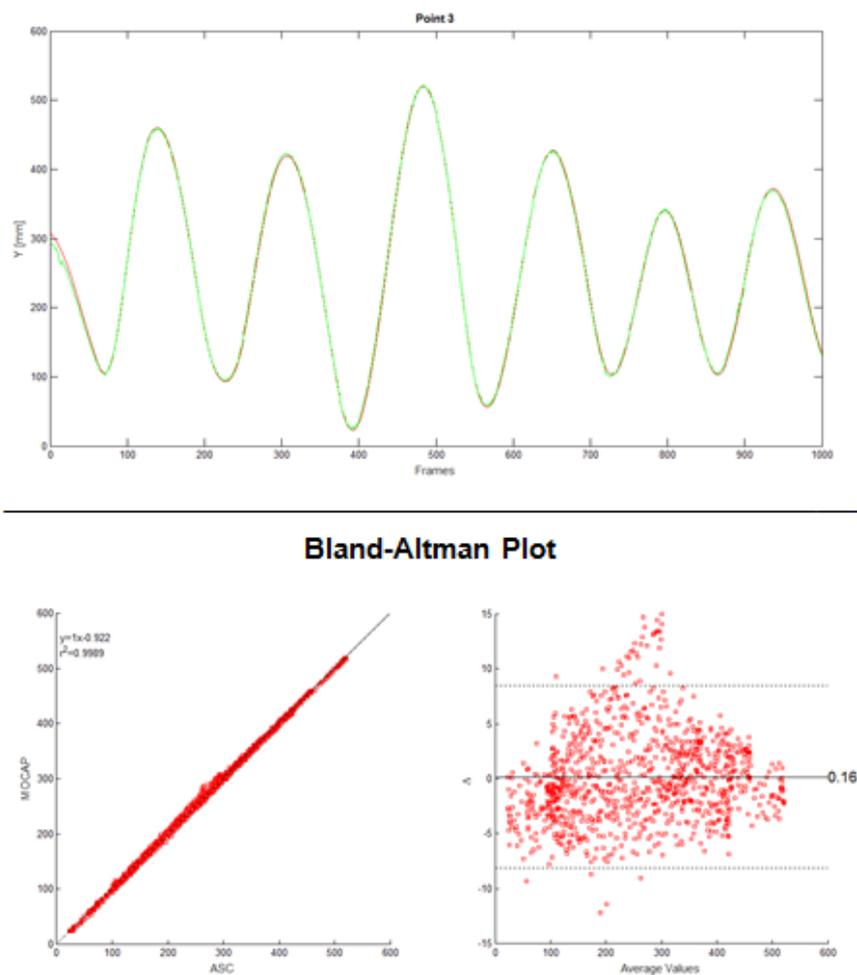
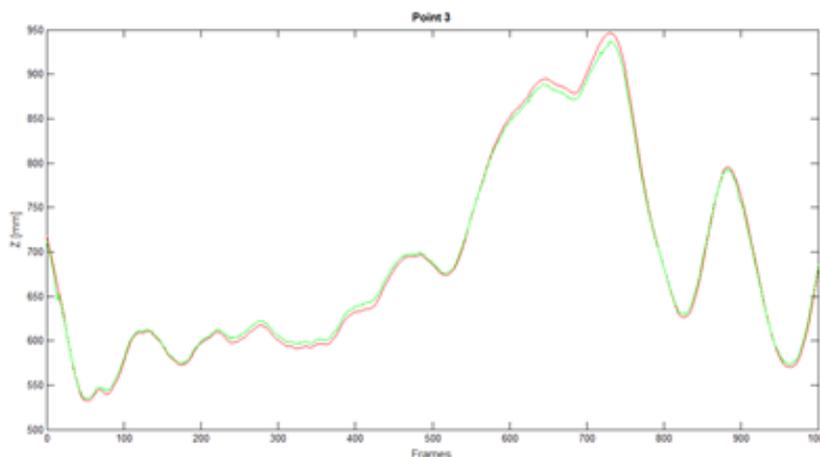


Figura 5. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo Y adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP E ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).



Bland-Altman Plot

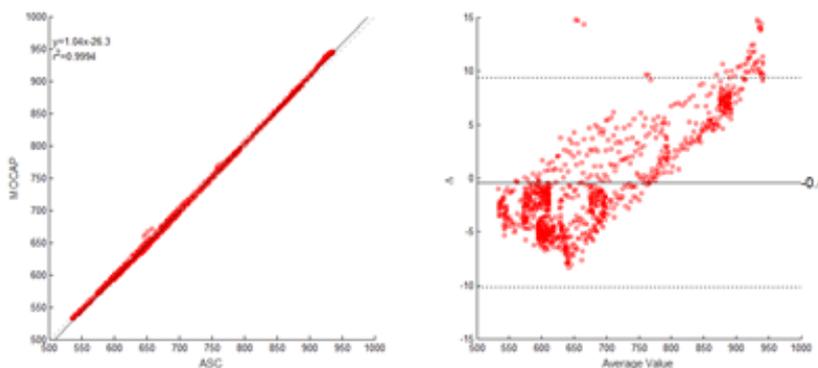


Figura 6. Trajetórias (vermelho – MOCAP e verde – ASC), sobrepostas, do ponto P3 no eixo Z adquiridas pelos dois sistemas de câmeras (Gráfico superior). Linha de regressão entre os dados medidos pelo MOCAP E ASC (Gráfico inferior esquerdo). Gráfico de dispersão com representação dos limites de concordância (Bland-Altman) (Gráfico inferior direito).

Exatidão

Foi encontrada diferença significativa relacionada à média do erro das distâncias D1 e D2 medida pelos sistemas ASC e MOCAP ($p < 0,05$). Em ambas as aquisições da ferramenta em forma de L, o EMA foi menor para o MOCAP do que para o ASC. Foi encontrada valores inferiores a 2,5mm para ASC e 0,3mm para o MOCAP (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado de duas aquisições da ferramenta em forma de L com três marcadores. Distancia 1 (entre os pontos P1 e P2): 160mm. Distancia 2 (entre os pontos P2 e P3): 240mm.

		ASC			MOCAP		
		ME	DP	EMA	ME	DP	EMA
Aquisição 1	D1*	-2,15	2,10	2,47	0,06	0,27	0,17
	D2*	0,60	1,82	1,53	0,01	0,28	0,18
Aquisição 2	D1*	-2,23	2,68	2,02	0,11	0,16	0,21
	D2*	1,63	2,04	1,53	0,11	0,25	0,16

D1 = distância 1; D2 = distância 2; ASC = *action sport camera*; MOCAP = *motion capture*; DP = desvio-padrão; MAE = *mean absolute error*; * $p < 0,05$.

A figura 7 mostra, como exemplo, a distribuição do erro médio absoluto durante toda a aquisição em ambos os sistemas (vermelho – Vicon, azul – ASC).

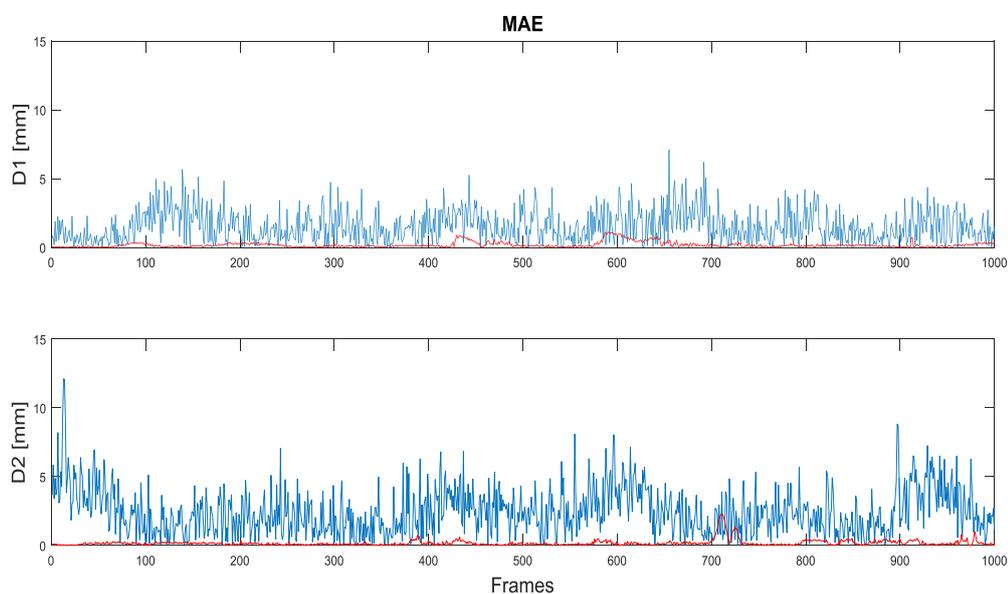


Figura 7. Distribuição do erro das distâncias 1 e 2 durante aproximadamente 10 segundo de aquisição (vermelho – MOCAP e azul – ASC).

Em relação ao ângulo entre os marcadores, apenas na aquisição 1 houve diferença significativa entre as medições dos dois sistemas ($p < 0,05$). Apesar disso, os dois sistemas encontraram valores próximos a 90° (valor real), nas duas aquisições (Tabela 3).

Tabela 3. Resultado do ângulo formado entre os três pontos da ferramenta em forma de L, em duas aquisições. Valor real do ângulo: 90° graus.

	ASC		MOCAP	
	Média	DP	Média	DP
Aquisição 1*	90,13	0,70	89,54	0,12
Aquisição 2	89,54	0,81	89,54	0,07

ASC = *action sport camera*; MOCAP = *motion capture*; DP = desvio-padrão; * $p < 0,05$.

A figura 8 mostra o ângulo entre os marcadores calculados durante toda a aquisição, para ambos os sistemas (vermelho – MOCAP, azul – ASC).

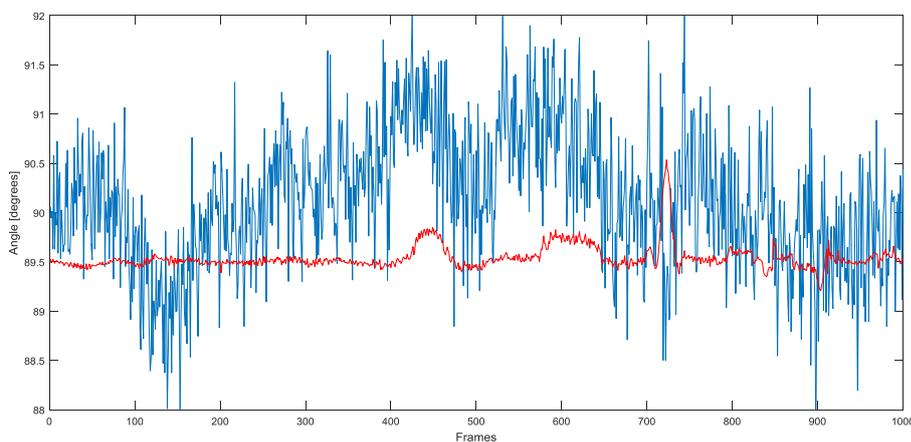


Figura 8. Distribuição dos valores de ângulo calculado entre os três pontos da ferramenta em forma de L (vermelho – MOCAP e azul – ASC).

Dados cinemáticos

Marcha

A figura 9 mostra a curva de variação do ângulo do joelho (direito e esquerdo) obtido pelas ASC (azul) e pelo MOCAP (vermelho). Foi apresentado um padrão de trajetórias similares e não houve diferença significativa entre os ângulos dos joelhos, nas três marchas adquiridas ($p > 0,35$).

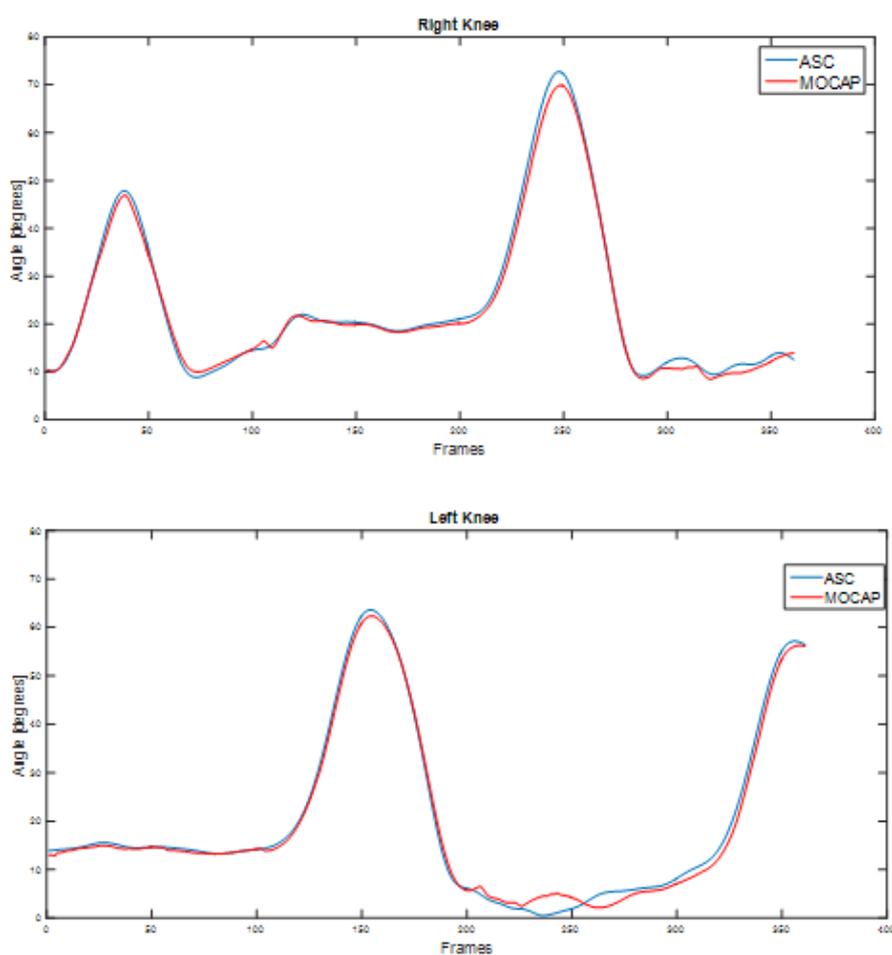


Figura 9. Representação de uma passada direita. Curva de variação do ângulo do joelho em função do tempo (vermelho – MOCAP e azul – ASC).

Em relação aos valores de velocidade da marcha, não foi encontrada diferença significativa ($p>0,07$). As curvas de variação da velocidade em função do tempo foram similares para os dois sistemas (Figura 10).

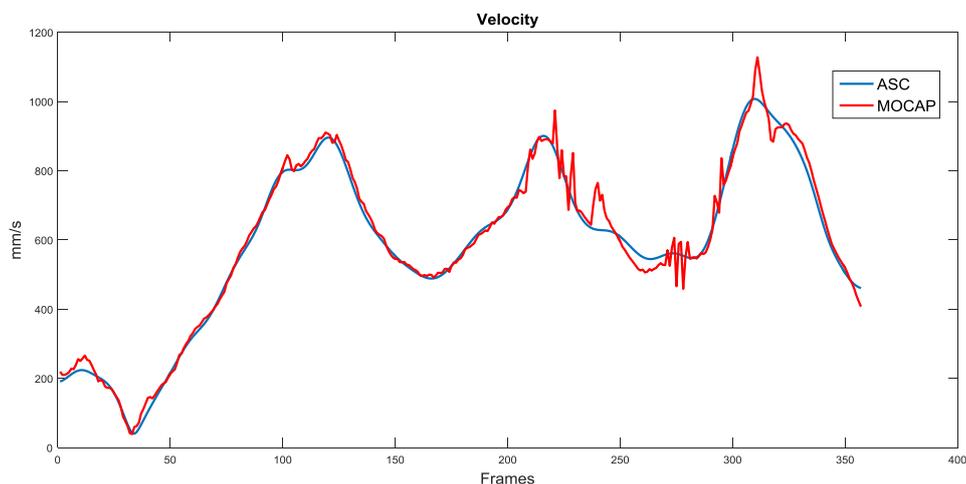


Figura 10. Variação da velocidade da marcha em função do tempo pelos dois sistemas (vermelho – MOCAP e azul – ASC).

Os dados de comprimento de passada podem ser conferidos na tabela 4. Novamente não foram encontradas diferenças significativas entre os valores calculados pelos dois sistemas.

Tabela 4. Comparações entre ASC e MOCAP para resultados de comprimento de passada, direita e esquerda, nas três aquisições da marcha ($p<0,05$).

Aquisição	Perna	Comprimento da passada	
		ASC	MOCAP
W1	Direita	1,06	1,05
	Esquerda	1,23	1,25
W2	Direita	1,01	1,03
	Esquerda	1,10	1,13
W3	Direita	0,95	0,96
	Esquerda	1,15	1,17

W1 = marcha 1; W2 = marcha 2; W3 = marcha 3; ASC = *action sport camera*; MOCAP = *motion capture*.

Salto

Em relação ao salto, não foi encontrada diferença significativa para os ângulos direito ($p=0,07$) e esquerdo ($p=0,43$) do joelho. No cálculo de altura máxima do salto, os valores de 0,25m e 0,24m, para o MOCAP e ASC, respectivamente, não apresentaram diferença.

Discussão

Este estudo realizou uma avaliação entre um sistema comercial de captura de movimento e um sistema personalizado constituído de câmeras de ação. Uma vez que os dois sistemas são baseados em abordagens diferentes para obter dados 3D é necessário avaliar a concordância entre os mesmos. O método Bland-Altman foi utilizado para avaliar a qualidade das medidas obtidas pela ASC em relação aos dados obtidos pelo MOCAP, verificando possíveis diferenças sistemáticas entre eles (Giavarina, 2015). Foram identificados altos valores de correlação entre os sistemas (0,99, tabela 1). Valores de *bias* menores que 3mm foram encontrados entre os sistemas, no entanto, estes foram estatisticamente significativos. Este fato confirma uma diferença sistemática entre o MOCAP e a ASC (Tabela 1, Figura 4).

A distribuição das diferenças não indica uma relação entre as diferenças das medidas e a média das medições. Um exemplo disso pode ser visto na figura 4, em que, na parte final da aquisição o *bias* tende a valores positivos. Uma concordância das medidas foi encontrada apenas na coordenada Y do ponto P3, na primeira aquisição. Seis dos nove valores de *bias*, das duas aquisições, tiveram valores negativos. Isso sugere que os valores de coordenadas obtidos pelo MOCAP, em sua grande maioria, são maiores que os obtidos pela ASC. Esse fato destaca que ocorre uma subestimação da coordenada real dos marcadores por parte das ASC. Uma melhoria em algumas etapas de aquisição e análise usando as ASC, como o uso de marcadores maiores, maior contraste, e ajuste no círculo (*circle fitting*) na identificação do marcador durante o processamento dos dados,

poderiam reduzir o erro sistemático e aproximar as ASC aos valores do MOCAP.

Além disso, foi avaliada a exatidão das medições. Erros abaixo de 0,25mm foram encontrados ao avaliar as distâncias 1 e 2 (Tabela 2) pelo MOCAP. Esses sistemas têm alta tecnologia em termos de processamento de imagem que lhes conferem altas exatidões (Vicon, 2016). Os valores de EMA encontrados pela ASC foram maiores. Em relação à distância 1 inter-marcadores, os resultados mostraram um erro 10 vezes maior que o MOCAP. Para a distância 2 inter-marcadores, essa diferença de resultados diminuiu e o erro se mostrou 8 vezes maior. Apesar dessa diferença entre os dois sistemas, os valores encontrados (variando de 0,16 a 2,47mm, MOCAP e ASC) se relacionam com valores relatados em outros estudos (Windolf et al., 2008; Eichelberger et al., 2016; Jackson et al., 2016; Bernardina et al., 2016).

Na avaliação do ângulo entre os três marcadores, os sistemas apresentaram resultados semelhantes. Apesar de, na aquisição 1, ter sido encontrada diferença significativa (Tabela 3), o valor angular entre os marcadores permaneceu próximo ao valor real (90°) tanto nas duas aquisições como para os dois sistemas.

Mesmo que MOCAP e ASC não tenham se concordado na medida e apresentado EMA diferentes, não foram encontradas diferenças significativas entre os dados cinemáticos da marcha e do salto. O indivíduo avaliado apresentou valores de dados cinemáticos comparáveis com os valores de referência para sua respectiva idade (Oberg et al., 1993). A velocidade da marcha foi classificada como alto-selecionada, com velocidade média de 1,0m/s. Esse valor se encontra entre uma velocidade lenta (0,87 m/s) e normal (1,29 m/s) (Oberg et al., 1993). A curva de variação da velocidade (Figura 10) mostra uma sobreposição dos dados dos dois sistemas, confirmando os valores próximos. Os ângulos do joelho durante uma passada (Figura 9) apresentaram o padrão esperado de um movimento articular de flexão e extensão durante a marcha (Pietraszewsk et al., 2012). Não foram encontradas diferenças significativas nos valores dos ângulos da articulação em nenhuma das três aquisições de marcha, e ainda, não houve diferenças significativas entre os comprimentos de passada (Tabela 4). O

foco deste trabalho não foi analisar a simetria entre os membros, porém é confirmada pelos dois sistemas uma tendência de uma passada esquerda de maior comprimento que a direita. O mesmo aconteceu na análise do salto. Nenhuma diferença foi encontrada para as variáveis calculadas (ângulos direito e esquerdo do joelho e altura máxima do salto).

Os resultados apontam para uma diferença significativa nas coordenadas 3D e nos valores de EMA entre os sistemas, porém essas diferenças não influenciaram os dados cinemáticos, uma vez que não houve diferença significativa e os dois sistemas identificaram uma mesma tendência no movimento do indivíduo avaliado.

Conclusão

A análise de precisão e exatidão permitiu concluir que o MOCAP alcançou melhor desempenho que a ASC, como esperado. No entanto, são necessárias mais investigações quanto à comparação dos dois sistemas, uma vez que a diferença entre as medidas (*bias*) foi inferior a 3mm. Estatisticamente, isso indica um resultado significativo. No entanto, o objetivo principal de um sistema é a análise de movimento. Em termos práticos, as diferenças não foram significativas para a obtenção dos parâmetros cinemáticos de marcha e salto. Desta forma, a ASC provou ser viável na avaliação cinemática 3D dos movimentos humanos.

Referências

1. Jackson BE, Evangelista DJ, Ray DD, Hedrick TL. 3D for the people: multi-camera motion capture in the field with consumer-grade cameras and open source software. *Biology Open*. 2016. doi: 10.1242/bio.018713
2. Barros RML, Misuta MS, Menezes RP, Figueroa PJ, Moura FA, Cunha SA, Anido R, Leite NJ. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic

tracking method. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2007; 6: 233-242.

3. Lodovico A, Cerveri P, Ferrigno G, and Barros RML. A novel video-based method using projected light to measure trunk volumes during respiration. *Computer Methods in Biomechanical and Biomedical Engineering*. 2011; 14: 707–713.
4. Silvatti AP, Dias FAS, Cerveri P, Barros RML. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. *J Biomech*. 2012; 45(6): 1112-1116. doi:10.1016/j.jbiomech.2012.01.004.
5. Silvatti AP, Cerveri P, Telles T, Dias FAZ, Baroni G, Barros RML. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2013; 16(11): 1240-1248.
6. Shortis MR. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors*. 2015; 15(12): 30810-30826.
7. Jesus K, Jesus K, Figueiredo P, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ, Machado LJ. Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2015; 1-8.
8. Helmholtz P, Long J, Munsie T, Belton D. Accuracy assessment of Go Pro Hero 3 (black) camera in underwater environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016; 41: 477-483.
9. Bernardina GRD, Cerveri P, Barros RML, Marins JCB, Silvatti AP. Action sport cameras as an instrument to perform a 3d underwater motion analysis. *PlosOne*. 2016; 11(8). doi.org/10.1371/journal.pone.0160490.

10. Bernardina GRD, Cerveri P, Barros RML, Marins JCB, Silvatti AP. In-air versus underwater comparison of 3D reconstruction accuracy using action sport cameras. *Journal of Biomechanics*. 2017; 51: 77–82. doi: 10.1016/j.jbiomech.2016.11.068.
11. Cerveri P, Pedotti A, Borghese NA. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. *IEEE Trans Evolut Comput*. 2001; 5(3): 271-282. doi:10.1109/4235.930315.
12. Chiari L, Della Croce U, Leardini A, Cappozzo A., Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. *Gait Posture*. 2005, 21(2):197-211. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.04.004.
13. Giavarina, D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*. 2015, 25(2): 141-151. doi: 10.11613/BM.2015.015.
14. Vicon. Bonita. 2016. Available: <https://www.vicon.com/file/vicon/bonita-brochure.pdf>
15. Windolf M, Gotzen N, Morlock M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems – exemplified on the Vicon-460 system. *Journal of Biomechanics*. 2008, 41, 2776–2780.
16. Eichelberger P, Ferraro M, Minder U, Denton T, Blasimann A, Krause F, Baur H. Analysis of accuracy in optical motion capture – A protocol for laboratory setup evaluation. *Journal of Biomechanics*. 2016, 49, 2085–2088.
17. Oberg T, Karsznia A, Ober K. Basic gait parameters: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *Journal of Rehabilitation Research*. 1993, 30(2): 210-223.
18. Pietraszewski B, Winiarski S, Jaroszczuk S. Three-dimensional human gait pattern – reference data for normal men. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2012, 14(3). doi: 10.5277/abb120302

ARTIGO 4

Avaliação cinemática 3D por um sistema de câmeras em movimento: câmeras de vídeo *versus* câmeras optoeletrônicas

Resumo

Alguns movimentos humanos são caracterizados como cíclicos e exigem um deslocamento do corpo. As avaliações tridimensionais (3D) destes movimentos são realizadas por sistemas compostos por câmeras fixas, o que torna o volume de aquisição muito restrito. Alternativas para essas análises cinemáticas são consideradas, como o uso de ergômetros, aumento do número de câmeras, sensores inerciais. Porém, é necessário investigar a viabilidade de sistemas que coloquem as câmeras em movimento, acompanhando o avaliado e tornando possível a captura de vários ciclos de movimento. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar os parâmetros de exatidão da reconstrução 3D e dados cinemáticos fornecidos por câmeras optoeletrônicas (MOCAP) e câmeras de ação (ASC), colocadas em movimento. Experimentalmente as câmeras foram fixadas em uma estrutura rígida móvel ($4,4 \times 4 \times 2,5 \text{m}^3$) e os dados foram adquiridos simultaneamente pelos dois tipos de câmeras. Foram realizadas aquisições de um teste de barra rígida e da marcha humana para avaliar a exatidão da reconstrução 3D e calcular as variáveis lineares e angulares da marcha. Algoritmos foram desenvolvidos para fazer a translação do sistema de coordenadas global a partir de pontos de referência dispostos no chão de um corredor de 40 metros, conforme as câmeras e a estrutura se movimentavam. Como resultado preliminar, é importante ressaltar que o erro percentual encontrado (1%) pelas câmeras ASC é comparável ao erro encontrado em aquisições com o sistema estático, como visto no artigo 3 dessa dissertação. Em relação aos dados cinemáticos destaca-se a captura de aproximadamente 18 ciclos de passada em uma única aquisição, fato

importante a ser considerado para se definir um padrão de movimento. Além disso, os dois sistemas de avaliação cinemática encontraram valores próximos para as variáveis analisadas. O artigo ainda está em fase de finalização, no entanto sugere que, ao avaliar movimentos em deslocamento horizontal de aproximadamente 40 metros, é viável utilizar ASC para reconstruir tridimensionalmente uma marcha natural, não delimitada à laboratório. Em conclusão, essa dissertação sugere que as ASC são viáveis para avaliar tridimensionalmente movimentos humanos.

Abstract

Some human motions are characterized as cyclic motion and they require a body displacement. The 3D evaluations of these movements are performed by systems composed of fixed cameras, which makes the acquisition volume very restricted. Alternatives to these kinematic analyzes are considered, such as ergometers, increase of the number of cameras, inertial sensors. However, it is necessary to investigate the feasibility of systems which put the cameras in motion, following the subject and make it possible to capture several cycles of the movement. Thus, the aim of this study was to evaluate the accuracy parameters of the 3D reconstruction and the kinematic data provided by optoelectronic cameras (MOCAP) and action sport cameras (ASC), set in motion. Experimentally the cameras were fixed in a rolling rigid structure ($4.4 \times 4 \times 2.5 \text{m}^3$) and the data were acquired simultaneously by the two types of cameras. A rigid bar test and human gait were acquired to evaluate the 3D reconstruction accuracy and to calculate the gait linear and angular variables. Algorithms were developed to do the translation of the global coordinate system from reference points arranged on the floor of a 40 meter track runner, according as the cameras and the structure were moving. As a preliminary result, it is important to highlight that the percentage error found (1%) by ASC cameras is comparable to the error found in acquisitions with the static system, as seen in the article 3 of this dissertation. Regarding the kinematic data, it is noteworthy the capture of approximately 18 stride cycles in a single acquisition, an important fact to be

considered in order to define a movement pattern. In addition, the two kinematic evaluation systems found close values for the variables analyzed. The article is still being finalized, however, it suggests that when evaluating movements in horizontal displacement of approximately 40 meters, it is feasible to use ASC to reconstruct three-dimensionally a natural gait, not delimited to the laboratory. In conclusion, this dissertation suggests that the ASC are feasible to evaluate human movements three-dimensionally.

Introdução

Alguns movimentos humanos, como caminhar, remar, nadar e pedalar, são caracterizados como movimentos cíclicos e eles exigem um deslocamento do corpo. A análise desses movimentos é importante no esporte ou na manutenção da qualidade de vida (Monnet et al, 2014; Mirek et al, 2016). As avaliações 3D são realizadas por sistemas de análise de movimento. Estes são constituídos por câmeras fixas que permitem a aquisição de dados de um volume restrito. Como consequência, os movimentos cíclicos são estudados por alguns ciclos.

Uma alternativa para esta limitação é o uso de ergômetros. Alguns estudos utilizaram desses equipamentos para analisar grande quantidade de ciclos do movimento (esteira – Riley et al, 2007; bicicleta ergométrica – Bini et al, 2010; remo-ergômetro – Steer et al, 2006). No entanto, a utilização de tais equipamentos pode não reproduzir totalmente o movimento real, porque limita o movimento do sujeito e, ainda, é necessária a familiarização com o equipamento.

Outra alternativa seria aumentar o número de câmeras e distribuí-las por um volume maior. Porém, isso poderia dificultar a definição do volume de aquisição, uma vez que todas as câmeras têm de ver o centro do volume, a fim de definir o sistema de referência. Desta forma, o elevado número de câmeras necessárias seria um limitante para muitos pesquisadores. Os sistemas de análise de movimento baseados em sensores inerciais são investigados em uma tentativa de resolver essas limitações, no entanto,

apresentam problemas relacionados com a exatidão dos dados (Fong et al, 2010; Fantozzi et al, 2016).

Por estas razões, é necessário investigar a viabilidade de sistemas que coloquem as câmeras em movimento, acompanhando o avaliado. Dessa forma, tornaria possível a captura de vários ciclos para um volume de aquisição maior. Câmeras móveis são amplamente utilizadas para capturar movimentos 2D, especialmente em eventos esportivos, no entanto, no campo da ciência, poucos estudos consideram este tipo de aquisição para análise cinemática 3D (Colloud et al, 2008; Bergon et al, 2009). Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar os parâmetros de exatidão da reconstrução 3D e dados cinemáticos fornecidos por câmeras optoeletrônicas (MOCAP) e câmeras de ação (ASC), colocadas em movimento.

Materiais e métodos

Instrumentos

Foram comparados dois sistemas com câmeras distintas: optoeletrônica e de vídeo. Para isso, foram utilizadas quatro câmeras ViconMX40 (Sistema de captura de movimento - Vicon, Oxford Metrics Ltd., UK) e quatro ASC *Cameras* (GoPro, Hero3+, Black Edition® / USA). Como configuração foi definida uma resolução de imagem de 2353 x 1728 e 1280 x 720 pixels, respectivamente e uma frequência de aquisição de 120 Hertz para ambos os sistemas. Como os marcadores utilizados eram retroreflexivos (marcadores passivos de \varnothing : 14mm), foi conectada às câmeras GoPro um acessório customizado composto por lâmpadas de LED brancas de alto brilho (potência: 4w, 1w cada). Com essa iluminação foi possível aumentar o contraste dos marcadores com o plano de fundo.

O conjunto de câmeras foi fixado em uma estrutura rígida (4,4 x 4 x 2,5m³) a uma altura de aproximadamente 2,30 metros em relação ao chão (Figura 1). A aquisição dos dados ocorreu de forma simultânea. A sincronização das GoPro se deu pelo disparo de gravação do controle remoto Wi-Fi. A fim de equiparar o mesmo instante pelos dois sistemas, foi efetuado um disparo de luz no início de cada aquisição.

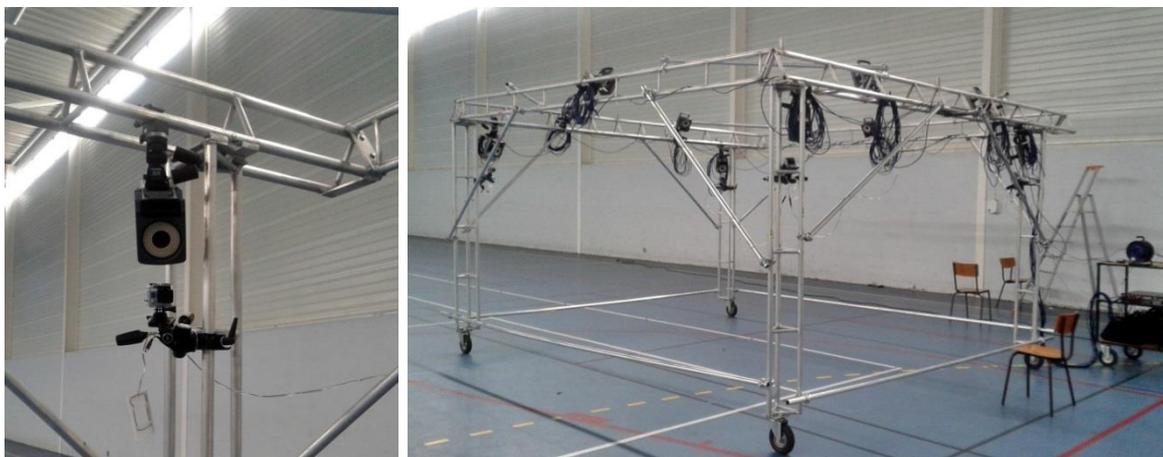


Figura 1. Posição das câmeras (ViconMX40 e GoPro, Hero3+) fixadas em uma estrutura rígida que se move.

Procedimento de calibração das câmeras

Estático

O procedimento de calibração aconteceu anteriormente a cada aquisição. Para os dois sistemas foram utilizados as ferramentas e o procedimento recomendado pela Vicon. Inicialmente, a ferramenta de calibração (em forma de T com cinco marcadores) foi adquirida se movimentando por um volume de aquisição limitado pela visão das câmeras, uma vez que, neste momento a estrutura rígida, juntamente com as câmeras, se mantinha estática.

Posteriormente, houve a aquisição da ferramenta de calibração de forma estática no centro do volume, para definir o sistema de coordenadas. Os parâmetros da GoPro foram calculados inicialmente com base na geometria epipolar (Cerveri et al., 2001). Posteriormente, as quatro câmeras foram calibradas segundo um método não-linear (Cerveri et al., 1998). O procedimento completo de calibração pode ser encontrado no artigo 3 dessa dissertação.

Movimento

Foram dispostas por todo o comprimento do volume duas linhas paralelas de 41 marcadores reflexivos cada. Cada um desses marcadores foi posicionado no chão com uma distância de 1 metro entre eles (Figura 2 - Begon et al., 2009). Algoritmos foram desenvolvidos para transladar o sistema de coordenadas global a partir dos três pontos de referência no chão, conforme as câmeras se movimentavam. A translação do sistema de referência aconteceu durante todo o trajeto de execução dos movimentos. O procedimento detalhado para reconstrução da movimentação pode ser conferida em Bergon et al (2009).

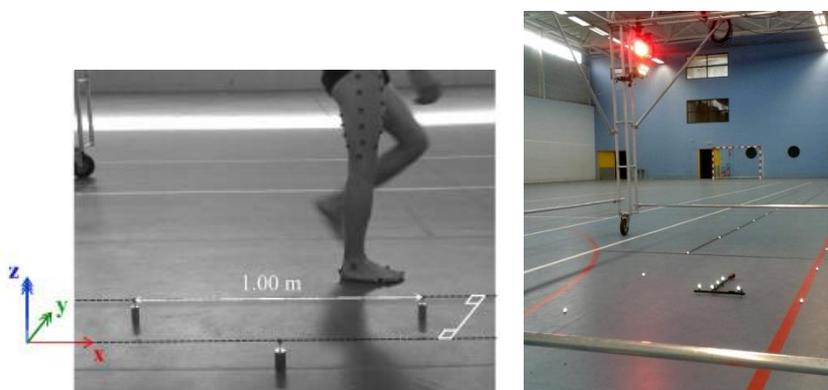


Figura 2. Disposição dos marcadores no chão, distanciados com 1 metro entre cada, em duas filas paralelas percorrendo todo o volume (Begon et al., 2009).

Avaliação da exatidão e dos dados cinemáticos

Foram realizadas duas avaliações: (1) a exatidão da reconstrução 3D e (2) dados cinemáticos angulares e lineares da marcha. A primeira envolveu uma aquisição de uma barra rígida com dois marcadores (distância inter-marcadores: 595 mm). À medida que essa barra se movia pelos 40 metros do corredor (Figura 3), a estrutura rígida que carregava as câmeras era movida juntamente, com seu deslocamento sendo feito por força humana. A exatidão foi definida pelo desvio-padrão da distribuição das distâncias (DP) na aquisição da barra rígida. A segunda foi através de uma aquisição de um movimento de marcha percorrendo todo o corredor. Da mesma forma, à medida que o indivíduo se caminha pelo corredor, a estrutura

rígida era movida. As variáveis cinemáticas foram: cálculo angular das articulações direita e esquerda do joelho (trocânter maior e epicôndilo lateral do fêmur e maléolo lateral), velocidade da marcha e o comprimento do passo e passada de ambas os membros inferiores.

Os vídeos adquiridos pelo conjunto de câmeras GoPro foram convertidos para o formato AVI. O processamento das imagens com rastreamento dos marcadores foi executado em uma plataforma desenvolvida no *software* MatLab[®] 2015 (Mathworks, Natick MS).



Figura 3. Volume de aquisição de 40 metros de comprimento.

Para a aquisição de marcha, os procedimentos de calibração e translação do sistema de coordenadas durante o movimento foram novamente realizados. Foi recrutado um indivíduo (feminino, 32 anos, 1,70 m e 58,5 kg), sem lesões ou qualquer comprometimento que pudesse influenciar na marcha. Para marcação foram utilizados os pontos anatômicos representados na figura 4. Foram utilizados marcadores retro-reflexivos (\emptyset : 14mm) pregados a uma roupa justa ao corpo com auxílio de uma fita dupla-face. Os dados foram adquiridos simultaneamente pelos dois sistemas. Os resultados dos dados cinemáticos foram apresentados de forma descritiva.

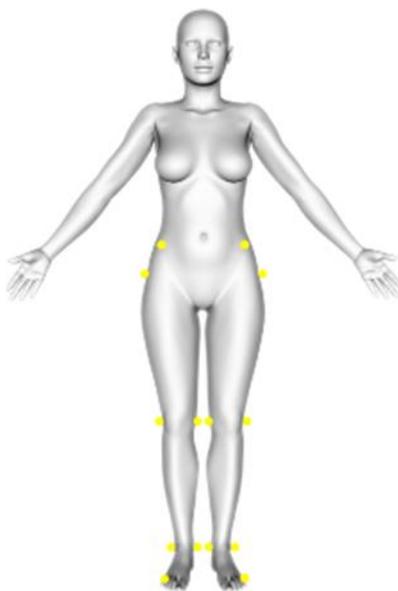


Figura 4. Protocolo de marcação da marcha.

Resultado e discussão

Avaliação da exatidão do sistema

A reconstrução pela ASC é dificultada pelo processo de rastreamento. Esse processo, realizado manualmente ou de forma semi-automática, requer que o marcador seja bem definido. Uma indefinição desses marcadores pode aumentar a variação das medições, com conseqüente diminuição da exatidão. Isso pode ser evidenciado na figura 5, que ilustra a distribuição da distância medida, entre os dois marcadores da barra rígida utilizada, pelas ASC. Foi encontrado um desvio-padrão de 6,21mm durante o deslocamento da barra pelos 40 metros. Esse resultado foi similar ao encontrado por Colloud et al., (2008). Os pesquisadores utilizaram sistema optoeletrônico, em outro momento, e encontraram um desvio-padrão de 6,74mm em condição similar (movimento de um objeto e da estrutura com as câmeras fixadas). Sistemas com essa tecnologia sofrem menos efeito da indefinição do marcador, uma vez que não fazem a captura da imagem e sim do reflexo de luminosidade do marcador.

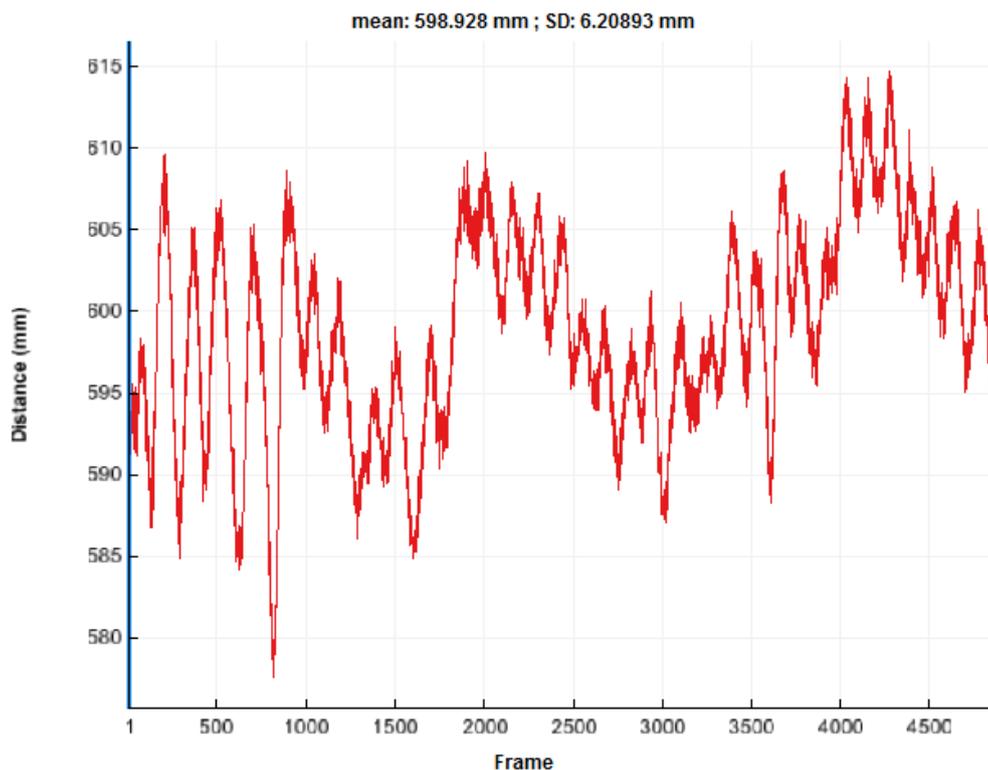


Figura 5. Distribuição da distância medida, entre os dois marcadores da barra rígida utilizada, pelas ASC (Distância inter-marcadores: 595 mm).

Um fato que pode ter influenciado as duas câmeras foram possíveis mudanças de posicionamento durante a aquisição dos movimentos. Ao mover a estrutura rígida, as câmeras podem sofrer vibrações que dificultam uma reconstrução precisa. Essas vibrações podem alterar de forma milimétrica a posição das câmeras. Uma alteração da posição em relação à posição inicial no momento de calibração implica em mudança nos valores dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera (Begon et al., 2009). Como esses parâmetros são utilizados nas equações de reconstrução, valores de uma posição inicial passam a ser errôneos após as vibrações, com conseqüente reconstrução não precisa. Contudo, é importante ressaltar que o erro percentual encontrado, de 1%, é comparável ao erro encontrado em aquisições com o sistema estático, como visto no artigo anterior.

Avaliação dos dados cinemáticos

Os dados cinemáticos da marcha são descritos para os dois sistemas, MOCAP e ASC (Tabela 1). Esses resultados permitem afirmar que o sujeito avaliado se enquadrou em valores normativos de variáveis espaço-temporais (Oberg et al., 1993). Porém, os estudos que avaliam a marcha, seja em indivíduos saudáveis ou em um grupo que apresentem alguma patologia, registram em média 3 a 6 ciclos de passada por aquisição (Pietraszewski et al., 2012; Mirek et al, 2016).

Tabela 1. Dados médios dos ciclos da marcha a partir da aquisição do MOCAP e ASC, movimentados por um volume de 40 metros de comprimento.

Parâmetros	Perna	MOCAP	ASC
		Média \pm DP	Média \pm DP
Comprimento do passo (m)	Direita	0,61 \pm 0,02	0,62 \pm 0,02
	Esquerda	0,60 \pm 0,03	0,58 \pm 0,03
Comprimento da passada (m)	Direita	1,21 \pm 0,04	1,21 \pm 0,04
	Esquerda	1,21 \pm 0,04	1,20 \pm 0,05
Velocidade media (m/s)	--	0,72	0,72

m = metro; m/s = metro/segundo; MOCAP = *motion capture*; ASC = *action sport* câmera; DP= desvio padrão.

A figura 6 apresenta os dados de comprimento de passo e passada, direita e esquerda, adquiridos em uma única aquisição. Dessa forma é possível avaliar o comportamento entre os dois membros e entre cada passada, a fim de identificar uma disfunção na marcha ou definir um padrão. Da mesma forma, a avaliação do comportamento angular das articulações é possível. A figura 7 nos permite observar um movimento angular característico dos passos para a articulação do joelho. Assim, as aquisições passam a ser realizadas em um ambiente não-controlado, possibilitando um andar naturalmente por parte do avaliado.

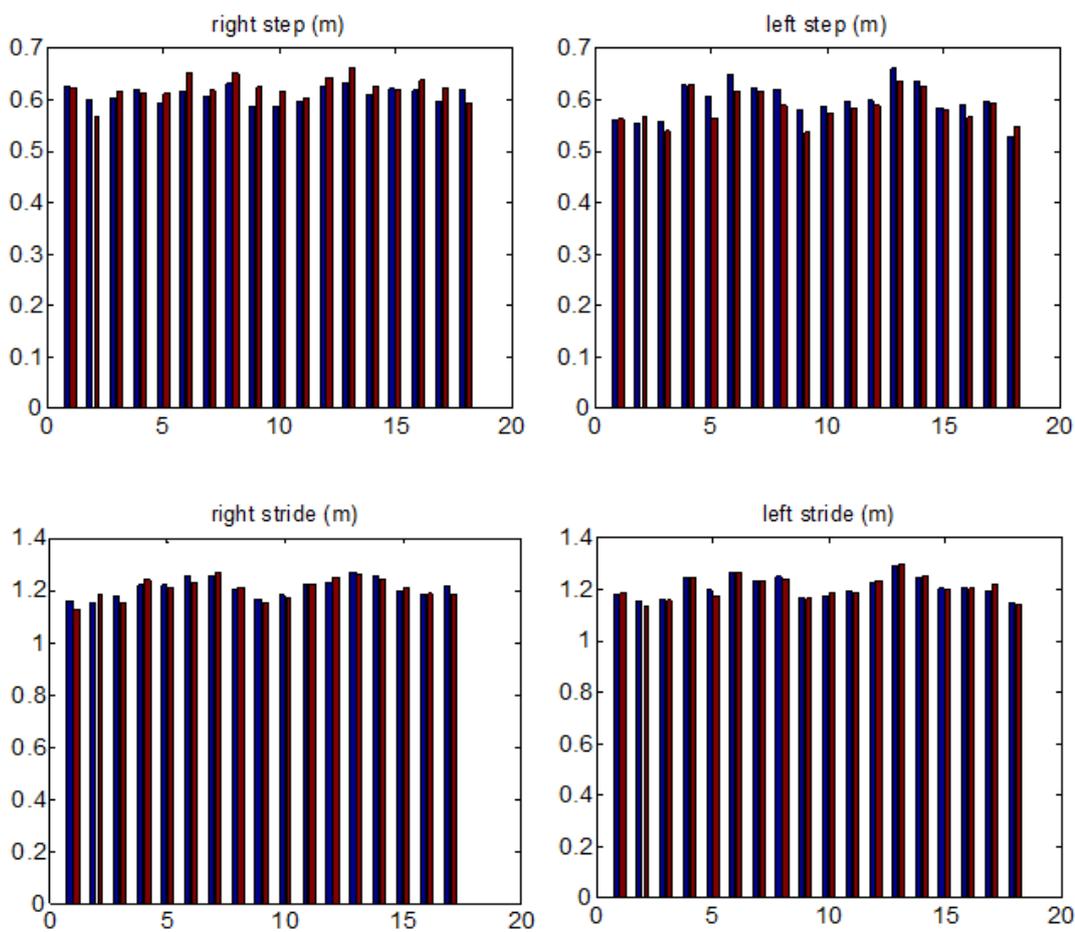


Figura 6. Resultados de comprimento de passo e passada, direito e esquerdo, obtidos um uma aquisição do movimento da marcha por um volume de 40m de comprimento (Azul – MOCAP e vermelho – ASC).

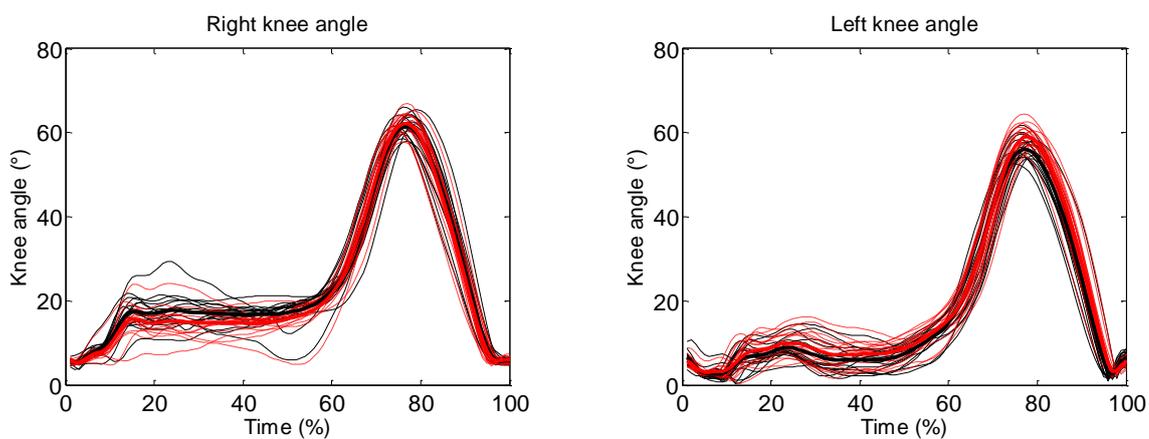


Figura 7. Comportamento do ângulo do joelho durante um ciclo de passada. São apresentados todos os ciclos obtidos um uma aquisição do movimento da marcha por um volume de 40m de comprimento (Azul – MOCAP e vermelho – ASC).

Sendo assim, observa-se, nas figuras 6 e 7, que a utilização de câmeras em movimento possibilita resultados, em relação às variáveis lineares, mais relacionados a uma marcha natural. Os valores médios gerados (Tabela 1) caracterizam melhor a marcha em relação às aquisições em volumes pequenos, principalmente pela quantidade de ciclos adquiridos.

O grande avanço deste presente estudo deve-se à possibilidade de aquisição de grandes quantidades de ciclos de um movimento caracterizado como cíclico, que é o caso a marcha humana. Foi possível adquirir aproximadamente 18 ciclos de passada do sujeito avaliado em uma única aquisição (Figura 6). Esse é um fato importante a ser considerado, pois para se definir um padrão de movimento são necessárias várias análises desse mesmo movimento. Quando estes são cíclicos, avaliar poucos ciclos a cada aquisição e posteriormente fundir os dados pode ser considerada uma forma errônea de definir um padrão.

Além disso, pode-se perceber que os dois sistemas de avaliação cinemática encontraram valores próximos para as variáveis analisadas (Tabela 1 / Figuras 6 e 7). Análises estatísticas ainda não foram realizadas, o que poderia confirmar a medição equivalente pelos sistemas.

Possibilidade de futuras pesquisas poderiam investigar mudanças no comportamento da marcha em terrenos com obstáculo, influências de disfunções musculares no movimento da marcha, padrões de marcha para diferentes idades, além da aplicação em avaliações esportivas.

Apesar dos resultados, o estudo apresenta limitações. Além do problema das vibrações das câmeras citado anteriormente, a principal dificuldade foi minimizar a oclusão dos marcadores. O protocolo de marcação envolvia marcadores nos dois membros inferiores e pelve. Sendo assim, apesar do sistema possuir quatro câmeras, número mínimo para a avaliação bilateral, incluir mais câmeras poderia diminuir essas perdas ou oclusões.

Conclusão

Os sistemas, MOCAP e ASC, compostos por câmeras em movimento são viáveis para adquirir dados cinemáticos, com principal foco para movimentos cíclicos. A ASC apresenta vantagens quanto à ausência de cabos, que facilitam colocá-las em movimento. Porém, seria interessante, em pesquisas futuras, utilizar mais câmeras, a fim de minimizar limitações encontradas neste estudo, além de aprimorar protocolos de aquisição e reconstrução, envolvendo posicionamento das câmeras, iluminação e rastreamento dos marcadores.

Referências

1. Monnet T, Samson M, Bernard A, David L, Lacouture P. Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study. *Sports Eng.* 2014, 17(3): 171-181. doi:10.1007/s12283-014-0152-4.
2. Mirek E, Kubica JL, Szymura J, Pasiut S, Rudzinska M, Chwala W. Assessment of gait therapy effectiveness in patients with parkinson's disease on the basis of three-dimensional movement analysis. *Front Neurol.* 2016, 7(102). doi: 10.3389/fneur.2016.00102.
3. Riley PO, Paolini G, Croce UD, Paylo KW, Kerrigan DC. A kinematic and kinetic comparison of over ground and treadmill walking in healthy subjects. *Gait & Posture.* 2007, 26(1):17–24.
4. Bini RR, Diefenthaler F. Kinetics and kinematics analysis of incremental cycling to exhaustion. *Sports Biomechanics.* 2010, 9(4): 223-235, doi: 10.1080/14763141.2010.540672
5. Steer R, McGregor A, Bull A. A comparison of kinematics and performance measures of two rowing ergometers. *Journal of Sports Science and Medicine.* 2006, 5(1): 52–59.

6. Fong DT, Chan Y. The use of wearable inertial motion sensors in human lower limb biomechanics studies: a systematic review. *Sensors*. 2010, 10(12): 11556-11565; doi:10.3390/s101211556.
7. Fantozzi S, Giovanardi A, Borra D, Gatta G. Gait kinematic analysis in water using wearable inertial magnetic sensors. *PLoS ONE*. 2015, 10(9): e0138105. doi: 10.1371/journal.pone.0138105.
8. Colloud F, Cheze L, Andre N, Bahuaud P. An innovative solution for 3D kinematics measurement for large volumes. *Journal of Biomechanics*. 2008, 41(S1), S57.
9. Bergon M, Colloud F, Fohanno V, Bahuaud P, Monnet T. Computation of the 3D kinematics in a global frame over a 40 m-long pathway using a rolling motion analysis system. *Journal of Biomechanics*. 2009, 42: 2649-2653.
10. Cerveri P, Pedotti A, Borghese NA. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2001; 5(3): 271-282.
11. Cerveri P, Borghese NA, Pedotti A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. *Journal of Biomechanics*. 1998; 31(10): 935-940.
12. Oberg T, Karsznia A, Ober K. Basic gait parameters: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *Journal of Rehabilitation Research*. 1993, 30(2): 210-223.
13. Pietraszewski B, Winiarski S, Jaroszczuk, S. Three-dimensional human gait pattern – reference data for normal men. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2012, 14(3). doi: 10.5277/abb120302.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados pelo primeiro artigo evidenciaram que o método de calibração aplicado às câmeras de ação em ambiente subaquático faz delas um potencial instrumento para medições tridimensionais de movimentos. Apesar dos baixos erros encontrados pelo sistema, essa foi uma avaliação inicial. Sendo assim, o segundo estudo abordou outras investigações necessárias fim de tornar as câmeras instrumentos concretos de medição. Investigaram-se diversas configurações possíveis, quanto à resolução da imagem, frequência de aquisição e ângulo de visão. Dos três parâmetros, a resolução foi a que maior influenciou a exatidão. Além disso, as câmeras obtiveram bons resultados tanto para aquisições na água quanto fora. Esse foi o primeiro passo para se pensar uma avaliação conjunta, visto que o gesto esportivo na natação é composto por fase aérea e fase submersa. Uma aplicabilidade do sistema foi demonstrada para a fase submersa do nado. Os resultados relatados apresentam exames qualitativos da técnica do nado que podem ser utilizados por treinadores.

Após essas avaliações iniciais, concluiu-se que as ASC podem compor uma alternativa de sistema para análise de movimento. Os resultados foram confirmados pelos estudos três e quatro, com comparação com um sistema 3D comercial. Apesar de diferenças nos erros encontrados pelos dois sistemas, para os parâmetros lineares e angulares analisados, no caso, marcha e salto, os resultados foram similares. Quando foi utilizado um sistema em movimento, novamente os resultados cinemáticos analisados foram similares. Essa última análise, permitiu avaliar movimentos em deslocamento horizontal de aproximadamente 40 metros, no qual possibilitou capturar 18 ciclos de passada com uma marcha natural não delimitada à laboratório.

Portanto, esse estudo representa um avanço ao utilizar ASC como uma nova forma de avaliar tridimensionalmente movimentos em laboratório, embaixo da água e, ainda, em grandes volumes com a câmera em movimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Uma avaliação inicial mostrou as câmeras de ação como um potencial instrumento para medições tridimensionais de movimentos.
- Além disso, as câmeras obtiveram bons resultados tanto para aquisições na água quanto fora.
- A resolução da imagem influencia a exatidão.
- Uma aplicabilidade do sistema, através da análise de trajetória para a fase submersa do nado, apresenta dados da técnica do nado que podem ser utilizados por treinadores.
- Apesar de diferenças nos erros encontrados pelos dois sistemas, para os parâmetros lineares e angulares analisados, no caso, marcha e salto, os resultados foram similares.
- Um sistema em movimento permitiu avaliar movimentos em deslocamento horizontal de aproximadamente 40 metros, no qual possibilitou capturar 18 ciclos de passada com uma marcha natural.
- Esse foi o primeiro passo para se pensar uma avaliação conjunta na natação, visto que o gesto esportivo é composto por fase aérea e fase submersa.

Anexo A

**Termo de consentimento livre e
esclarecido**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO FÍSICA



TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

TÍTULO DO PROJETO: UTILIZAÇÃO DE CÂMERAS DE AÇÃO PARA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL DO MOVIMENTO HUMANO

COORDENADOR DA PESQUISA (Pesquisador responsável):

Prof. Dr. João Carlos Bouzas Marins

Dep. Educação Física -UFV

Tel.: (31) 99653195 -jcbouzas@ufv.br

EQUIPE DE TRABALHO:

Gustavo Ramos Dalla Bernardina

Dep. Educação Física – UFV

Tel.: (33)91335577 – gustavo.bernardina@ufv.br

Você está sendo convidado a participar da pesquisa “**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COM CÂMERAS SUBMERSAS EM MOVIMENTO PARA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL EM NADADORES**”, cujos objetivos são: (1) testar a precisão das câmeras esportivas para análises tridimensionais de movimentos; (2) desenvolver um sistema que coloque as câmeras submersas na água em movimento, o que possibilitaria fazer uma análise cinemática do nadador durante todo o trajeto de nado. Sua colaboração neste estudo é **MUITO IMPORTANTE**, mas a decisão de participar é **VOLUNTÁRIA**, o que significa que você terá o direito de decidir se quer ou não participar, ou mesmo recusar a participar de alguma parte do estudo em especial. Também poderá desistir de participar do estudo em qualquer momento.

CONFIDENCIALIDADE DOS DADOS E ANONIMATO

Garantimos que será mantida a **CONFIDENCIALIDADE** das informações e o **ANONIMATO**. Ou seja, o seu nome não será mencionado em qualquer hipótese ou circunstância, mesmo em publicações científicas. Informamos que os resultados obtidos irão compor uma base de dados que poderão ser utilizados em outros estudos desenvolvidos pelo grupo dirigido pelo coordenador geral dessa investigação, o prof. João Carlos Bouzas Marins.

PROCEDIMENTOS DA DINÂMICA DO ESTUDO QUE ESTARÁ SENDO REALIZADO.

A dinâmica do estudo prevê que, ao longo de 15 dias, você deverá comparecer 6 dias ao Laboratório de Análises Biomecânicas. Por 3 dias você fará o manuseio de instrumentos de calibração dentro do laboratório e realização de exercícios físicos de baixa intensidade (caminhada, movimentos de salto e agachamento). Os testes serão realizados com o posicionamento de câmeras ao redor de um volume de aquisição. Você movimentará uma barra rígida, com marcadores, por esse volume durante um tempo determinado, e, posteriormente realizará movimentos de caminhada, salto e agachamento. Por mais 3 dias você fará o manuseio de instrumentos de calibração dentro da piscina e nadará em baixa intensidade. Os testes serão com a fixação das câmeras nas paredes da piscina e definição de um volume de aquisição. Você movimentará uma

barra rígida, com marcadores, por esse volume durante um tempo determinado, e, posteriormente realizará os nados em baixa intensidade. As rotinas correspondem aproximadamente a 3 horas por dia. Não é necessário estar em jejum. É necessário levar equipamento básico para natação, como sunga, óculos e touca de natação.

INFORMAÇÕES FINANCEIRAS

Os pesquisadores deixam claro que não haverá nenhuma compensação financeira por participar do estudo, ou custos de transporte e de alimentação. Também não será exigido por parte do avaliado nenhuma cobrança financeira por estar participando do estudo.

São considerados como benefícios de sua participação:

Você irá receber um relatório com os resultados dos seus testes e os resultados finais do estudo. As informações obtidas com sua participação irão colaborar com a divulgação de dados científicos sobre a possibilidade ou não do uso de câmeras esportivas para análises biomecânicas tridimensionais.

Quanto aos riscos de participação do Estudo:

Tendo em vista que o estudo será desenvolvido em meio aquático, você deverá se um nadador experiente e estará sendo observado por no mínimo dois avaliadores com experiência em técnicas de salvamento, além de contar com equipamento de segurança para em caso de afogamento. Para diminuir o risco corresponde ao nível de exposição solar, considerando que todo o processo de coleta será feito em ambiente aberto, será disponibilizado filtro solar para minimizar os efeitos da radiação. Por último, existe a possibilidade, mesmo que mínima que o esforço físico exigido, venha provocar alguma dor muscular residual após 24 horas da atividade. Entretanto o nível de intensidade proposta de exercício não será elevado o que dificulta o aparecimento deste desconforto.

O presente estudo não prevê ação invasiva, ou seja, não haverá punção sanguínea nem oferecimento do consumo de algum alimento experimental. **É importante ter claro que, caso estas ações podem provocar desconforto ou mal estar, você tem toda liberdade de abandonar o estudo.**

DÚVIDAS SOBRE O ESTUDO

Em caso de dúvida o(a) senhor(a) poderá entrar em contato com o Prof. Dr. JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS, orientador da pesquisa, no Departamento de Educação Física – Universidade Federal de Viçosa – DES/UFV, na Av. P.H.Holfs, ns/n – Laboratório de Performance Humana (LAPEH) –, ou pelo telefone (31) 3899-2076, ou no e-mail: jcbouzas@ufv.br

Para que possamos manter contato posteriormente, por favor, preencha os seguintes dados:

[] Não tenho interesse de receber os resultados.

[] Tenho interesse de ter minhas informações.

Nome: _____

Data de nascimento: ___/___/_____ Sexo: _____ Nacionalidade: _____

Telefone: _____ e-mail: _____

Endereço: _____

Bairro: _____ Cidade: _____ Estado: _____ CEP.: _____

Eu....., declaro estar esclarecido(a) sobre os termos apresentados quanto aos objetivos, dinâmica do estudo, confidencialidade de meus dados, benefícios e riscos, além da possibilidade de recusar minha participação parcial do estudo, ou mesmo solicitar minha exclusão posteriormente. Também fui esclarecido de todas as dúvidas. Consinto por minha livre e espontânea vontade em participar desta pesquisa e assino o presente documento em duas vias de igual teor e forma, ficando uma em minha posse.

Para qualquer dúvida ou queixa geral sobre o aspecto ético deste estudo poderei entrar em contato com o seguinte setor:

Comitê de ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal de Viçosa, CEP/UFV, localizada no Prédio Arthur Bernardes, ou pelo e-mail cep@ufv.br , pelo site www.cep.ufv.br ou ainda pelo telefone:

(31)3899 2492

Gustavo Ramos Dalla Bernardina

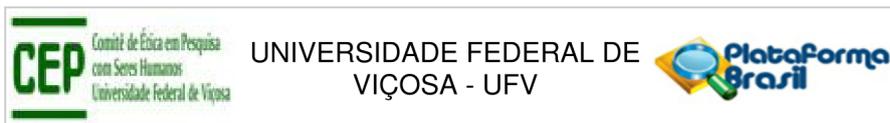
Prof. Dr. João Carlos Bouzas Marins
(assinatura do pesquisador responsável)

(assinatura do participante)

Viçosa, ____ de _____ de 2015.

Anexo B

**Aprovação do projeto pelo Comitê de
Ética em Seres Humanos da
Universidade Federal de Viçosa**



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COM CÂMERAS SUBMERSAS EM MOVIMENTO PARA ANÁLISE CINEMÁTICA TRIDIMENSIONAL EM NADADORES

Pesquisador: JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 49426115.1.0000.5153

Instituição Proponente: Departamento de Educação Física

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

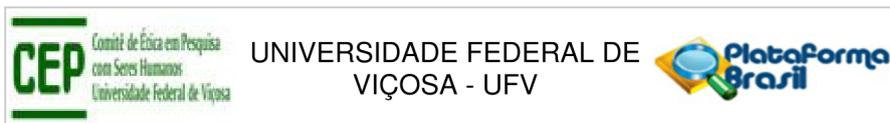
Número do Parecer: 1.365.180

Apresentação do Projeto:

Apresentação da pesquisa:

O presente protocolo foi enquadrado como pertencente à Área Temática: Grande Área 4. Ciências da Saúde Conforme resumo apresentado no formulário on line: O projeto envolve o desenvolvimento de um sistema, assim a validade do produto será testada comparando os resultados com produtos existentes no mercado. Além disso, será testada a fidedignidade e objetividade do sistema. Será um modelo quase-experimental, sem randomização e grupo controle, pois o objetivo é testar o sistema criado. O modelo do experimento consiste em analisar a movimentação de pontos tridimensionalmente. As variáveis independentes do estudo são: parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras, frequência de aquisição, quantidade de câmeras, resolução. As variáveis dependentes do estudo são: reconstrução tridimensional, posição, velocidade, aceleração, trajetórias, acurácia. Para uma análise tridimensional é necessário que o sistema seja preciso, ou seja, um menor erro de reconstrução. Métodos de calibração foram desenvolvidos e continuam sendo estudados a fim de melhorar a acurácia desses sistemas de análise. Os sistemas de análise de movimento vêm sendo melhorados com o desenvolvimento de câmeras e processamento de imagens. No mercado, os sistemas mais comercializados possuem câmeras optoeletrônicas que

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br



Continuação do Parecer: 1.365.180

tem apresentado baixos erros, e assim, maior precisão. Em contra partida, os mesmos são de alto custo. Na tentativa de resolver o problema do alto custo, algumas câmeras comerciais vêm sendo testadas. Câmeras esportivas são exemplos e possuem vantagens como o tamanho, a fácil portabilidade e o baixo custo, quando comparadas às câmeras optoeletrônicas projetadas para análises 3D. Assim, um primeiro objetivo deste estudo é testar a precisão das câmeras esportivas para análises tridimensionais de movimentos. E um segundo objetivo é desenvolver um sistema que coloque as câmeras submersas na água em movimento. Isso possibilitaria fazer uma análise cinemática do nadador durante todo o trajeto de nado.

Objetivo da Pesquisa:

Objetivos da pesquisa:

Objetivo Primário: Desenvolver um sistema com câmeras submersas na água em movimento para análise cinemática tridimensional em nadadores;

Objetivos Secundários:

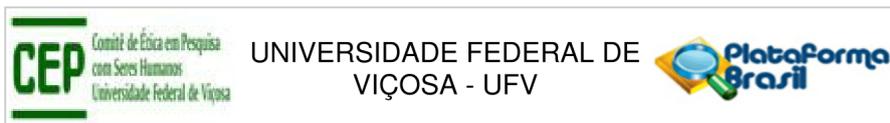
- Testar a precisão das câmeras esportivas para análises tridimensionais de movimentos;
- Investigar a aplicabilidade de um sistema para captura de movimentos 3D com câmeras, submersas na água, em movimento;
- Avaliar a acurácia / exatidão do sistema;
- Investigar variáveis que podem influenciar na acurácia;
- Desenvolver um sistema de análise cinemática 3D de relativo baixo custo.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

Os pesquisadores apresentam no formulário on line os seguintes Riscos: Tendo em vista que o estudo será desenvolvido em meio aquático, existe um risco de afogamento do sujeito envolvido no estudo. Contudo essa possibilidade é mínima tendo em vista que o sujeito selecionado corresponde a um nadador experimentado, e que está sendo observado por no mínimo dois avaliadores com experiência em técnicas de salvamento, além de contar com equipamento de segurança para este tipo de emergência. Outro risco corresponde ao nível de exposição solar tendo considerando que todo o processo de coleta será feito em ambiente aberto. Neste caso será disponibilizado filtro solar para minimizar os efeitos da radiação. Por último, existe a possibilidade, mesmo que mínima que o esforço físico exigido, venha provocar alguma dor muscular residual após 24 horas da atividade. Entretanto o nível de intensidade proposta de

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br



Continuação do Parecer: 1.365.180

exercício não será elevado o que dificulta o aparecimento deste desconforto .

Benefícios:

O principal benefício da pesquisa é apresentar uma alternativa para obtenção de dados tridimensionais precisos com baixo custo. Assim, poderíamos analisar tridimensionalmente diversos movimentos subaquáticos, como natação, hidroginástica, polo aquático, etc.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Considerações sobre a pesquisa:

Metodologia:

O presente estudo pretende desenvolver um sistema que coloque as câmeras submersas na água em movimento. Isso possibilitaria fazer uma análise cinemática do nadador durante todo o trajeto de nado. Para tanto, propõe-se 3.1. Procedimentos para uma análise 3D submersa

3.1.1. Câmeras estáticas

3.1.1.1. Aquisição de dados

Serão utilizadas para aquisição das imagens duas câmeras GoPro, Hero3, Black Edition® (EUA). Essas câmeras serão fixadas na borda da piscina com uma distancia entre si e definido um volume de aquisição. Serão testadas diferentes frequências e resoluções. A sincronização será feita por um controle wifi, que dispara as câmeras simultaneamente. A escolha dessa câmera deve-se às suas características (Altas frequências, altas resoluções, a não utilização de cabos e fácil portabilidade).

3.1.1.2. Calibração de câmeras

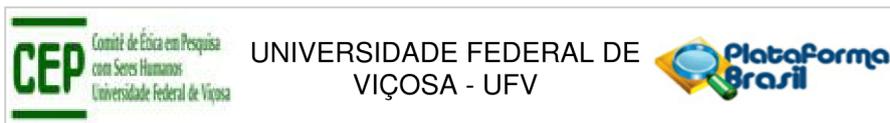
Um triedro (1x1x1m) de nove marcadores será utilizado para determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos iniciais da câmera usando a equação de DLT (Direct Linear Transformation) e definição dos eixos X, Y e Z (SILVATTI et al. 2012). Para calibração não-linear das câmeras (CERVERI et al. 1998), uma barra rígida será movimentada por um volume durante um tempo a fim de determinar os parâmetros de distorção.

3.1.1.3. Medição dos dados

As imagens serão convertidas no software GoPro Studio para o formato AVI. O processamento de imagens e rastreamento dos marcadores será feito via software DVideo (FIGUEROA, 2003). Posteriormente, no software CalibrationModule será reconstruída a posição das câmeras tridimensionalmente, escritos os parâmetros de calibração, distorção das imagens e reconstrução 3D.

3.1.1.4. Análise da acurácia

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br



Continuação do Parecer: 1.365.180

Uma barra rígida, contendo dois marcadores com distância conhecida (250mm), será filmada movimentando por todo o volume de aquisição. Será avaliada a curva de variação da distância entre os dois marcadores em função. Para avaliar a acurácia, serão calculados via software Matlab® 2012 as variáveis: distância mínima, média e máxima; desvio padrão; e erro médio absoluto.

3.1.2. Câmeras em movimento

3.1.2.1. Aquisição de dados Seram utilizadas para aquisição das imagens duas câmeras GoPro, Hero3, Black Edition® (EUA). Essas câmeras serão fixadas em um suporte rígido desenvolvido para não vibrar quando movimentado pela borda da piscina. Esse suporte será conectado a um carrinho que se locomoverá por um caminho guiado, por todo o trajeto da piscina. Após a avaliação dos testes com as câmeras estáticas, o melhor resultado para frequência e resolução será utilizado na aquisição das imagens. A sincronização será feita por um controle wifi, que dispara as câmeras simultaneamente. A escolha dessa câmera deve-se às suas características (Altas frequências, altas resoluções, a não utilização de cabos e fácil portabilidade).

3.1.2.2. Calibração de câmeras Para a calibração das câmeras será utilizada o método descrito por BERGON et al., 2009.

3.1.2.3. Medição dos dados As imagens serão convertidas no software GoPro Studio para o formato AVI. O processamento de imagens e rastreamento dos marcadores será feito via software DVideo (FIGUEROA, 2003). Posteriormente, no software CalibrationModule será reconstruída a posição das câmeras tridimensionalmente, escritos os parâmetros de calibração, distorção das imagens e reconstrução 3D.

3.1.2.4. Análise da acurácia

Uma barra rígida, contendo dois marcadores com distância conhecida (250mm), será filmada movimentando por todo o volume de aquisição. Será avaliada a curva de variação da distância entre os dois marcadores em função. Para avaliar a acurácia, serão calculados via software Matlab® 2012 as variáveis: distância mínima, média e máxima; desvio-padrão; e erro médio absoluto.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Considerações sobre os termos de apresentação obrigatória:

Folha de Rosto: sem sugestões;

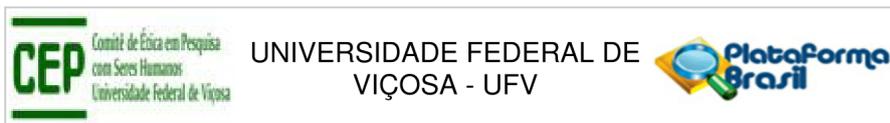
Autorizações 1 e 2 para realização da pesquisa: sem sugestões;

TCLE: Sem sugestões;

Projeto de mestrado: sem sugestões;

Autorizações 1 e 2: sem sugestões.

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br



Continuação do Parecer: 1.365.180

Recomendações:

Quando da coleta de dados, o TCLE deve ser elaborado em duas vias, rubricado em todas as suas páginas e assinado, ao seu término, pelo convidado a participar da pesquisa ou responsável legal, bem como pelo pesquisador responsável, ou pessoa(s) por ele delegada(s), devendo todas as assinaturas constar na mesma folha.

Não é necessário apresentar os TCLEs assinados ao CEP/UFV. Uma via deve ser mantida em arquivo pelo pesquisador e a outra é do participante da pesquisa.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Aprovado

Considerações Finais a critério do CEP:

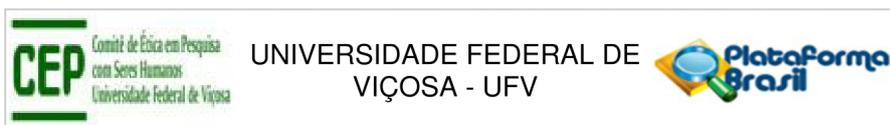
Ao término da pesquisa é necessário apresentar, via notificação, o Relatório Final (modelo disponível no site www.cep.ufv.br). Após ser emitido o Parecer Consubstanciado de aprovação do Relatório Final, deve ser encaminhado, via notificação, o Comunicado de Término dos Estudos.

Projeto analisado durante a 8ª reunião de 2015.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_594191.pdf	20/11/2015 06:22:55		Aceito
Outros	CARTARESPOSTA.docx	20/11/2015 06:22:31	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLEMODIFICADO.docx	20/11/2015 06:19:15	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito
Outros	AUTORIZACAO2.pdf	21/09/2015 09:26:44	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito
Outros	AUTORIZACAO1.pdf	21/09/2015 09:26:02	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Mestrado.pdf	21/09/2015 09:19:52	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito
Folha de Rosto	Folha_Rosto.pdf	21/09/2015 09:19:25	JOÃO CARLOS BOUZAS MARINS	Aceito

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br



Continuação do Parecer: 1.365.180

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

VICOSA, 14 de Dezembro de 2015

Assinado por:
HELEN HERMANA MIRANDA HERMSDORFF
(Coordenador)

Endereço: Universidade Federal de Viçosa, Avenida PH Rolfs s/n, Edifício Arthur Bernardes
Bairro: Campus Universitário **CEP:** 36.570-900
UF: MG **Município:** VICOSA
Telefone: (31)3899-2492 **E-mail:** cep@ufv.br

Anexo C

Folha de produtividade

MESTRADO EM EDUCAÇÃO FÍSICA

	
Universidade Federal de Viçosa Departamento de Educação Física	Universidade Federal de Juiz de Fora Faculdade de Educação Física e Desportos

FOLHA DE ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO CURSO

1. PARTICIPAÇÃO EM ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

BERNARDINA, GUSTAVO R. D.; CERVERI, PIETRO; BARROS, RICARDO M. L.; MARINS, JOÃO C. B.; SILVATTI, AMANDA P. In-air *versus* underwater comparison of 3D reconstruction accuracy using Action Sport Cameras. *Journal of Biomechanics* **JCR**, v. 51, p. 77-82, 2017.

Origem:

Trabalho originário de disciplina do mestrado: EFI 792

Trabalho originário do texto da dissertação.

Trabalho originário de outras parcerias

BERNARDINA, GUSTAVO R. D.; CERVERI, PIETRO; BARROS, RICARDO M. L.; MARINS, JOÃO C. B.; SILVATTI, AMANDA P. Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. *Plos One* **JCR**, v. 11, p. e0160490, 2016.

Origem:

Trabalho originário de disciplina do mestrado: EFI 792

Trabalho originário do texto da dissertação.

Trabalho originário de outras parcerias

2. PARTICIPAÇÃO EM ARTIGOS ACEITOS EM PERIÓDICOS

Não há

3. PARTICIPAÇÃO EM ARTIGOS SUBMETIDOS EM PERIÓDICOS

Não há

4. LIVROS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

Não há

5. PARTICIPAÇÃO EM CAPÍTULO DE LIVROS PUBLICADOS

Não há

6. PARTICIPAÇÃO EM JORNAIS DE NOTÍCIAS OU REVISTAS

Não há

7. PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS, SEMINÁRIOS, CURSOS, SIMPÓSIOS COMO PALESTRANTE

Evento: --

Título: Concentração no esporte

Data: Maio, 2016

Local: Sede da A.A.A / LUVE

Órgão promotor: A.A.A / LUVE - UFV

Público estimado: 25 pessoas

Evento: Workshop: análise biomecânica

Título: Análises biomecânicas 3D.

Data: Outubro, 2014

Local: LAB (Laboratório de Análises Biomecânicas) – CenTev / UFV

Órgão promotor: LAB (Laboratório de Análises Biomecânicas)

Público estimado: 30 pessoas

8. RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

SILVATTI, A. P.; LOPES A. L. C.; **BERNARDINA G. R. D.**; CERVERI P. The influence of the backpack load in the biomechanical gait parameters: preliminary results. In: XVII Congresso Nazionale SIAMOC. 2016

CALDAS L.; LOPES A. L. C.; FREITAS G.; **BERNARDINA G. R. D.**; CERVERI P.; SILVATTI A. P. Physical fitness and gait parameters of middle-aged women: preliminary results after a strength training. In: International Convention on Science, Education and Medicine in Sport. 2016.

LOPES A. L. C.; **BERNARDINA G. R. D.**; SARRO K. J.; CERVERI P.; SILVATTI A. P. 3D kinematic analysis during progressive maximal exercise test in competitive cyclists: preliminary results. In: 22nd Congress of the European Society of Biomechanics. 2016.

RODRIGUES, I.; **BERNARDINA G. R. D.**; SARRO K. J.; CERVERI P.; SILVATTI A. P. Respiratory movement coordination of professional ballet dancers: preliminary results. In: 22nd Congress of the European Society of Biomechanics. 2016.

LOPES A. L. C.; PINTAVALLE. C.; BERTOLI N.; **BERNARDINA G. R. D.**; BARONI G.; CERVERI P.; SILVATTI A. P. A 3D kinematic analysis of the competitive cyclists during progressive exercise: knee joint and foot movement pattern. In: International Convention on Science, Education and Medicine in Sport. 2016

FONSECA, B. P. A; SIMONATO, S. P.; SILVATTI, A. P.; **BERNARDINA, G. R. D.**; FERREIRA, L. C. R.; BAPTISTA, A. A. Análise cinemática do movimento dorsoventral da coluna toracolombar de equinos marchadores. In: XVII Conferência anual da ABRAVEQ, 2016.

BERNARDINA, G. R. D.; Cerveri, P.; BARROS, R. M. L.; Silvatti, A.P. The influence of two variables of the nonlinear camera calibration on the 3d underwater accuracy. In: 33 International Conference of Biomechanics in Sports, 2015, Poitiers. ISBS - Conference Proceedings Archive, 2015.

SUAREZ, P.; **BERNARDINA, G.** ; SILVA, A. ; ANDRADE, A. ; SILVATTI, A. . A case study of the kicking foot and stance in roundhouse kick: control and combat situations. In: 33 International Conference of Biomechanics in Sports, 2015, Poitiers. ISBS - Conference Proceedings Archive, 2015.

FLOR, C. A. G.; SILVATTI, A. P. ; MENZEL, H. ; **BERNARDINA, G.** ; VICENTE, C. M. S. ; ANDRADE, A. G. P. . Validity and reliability of the microsoft kinect to obtain the execution time of the taekwondo's frontal kick. In: 33 International Conference of Biomechanics in Sports, 2015, Poitiers. ISBS - Conference Proceedings Archive, 2015.

FLOR, C. ; BANJA, T. ; ANDRADE, A. ; SUAREZ, P. ; **BERNARDINA, G. R. D.** ; Silvatti, A.P. . Influencia da Posição do Membro Inferior no Tempo de Movimento de Três Diferentes Técnicas de Chutes de Taekwondo. In: XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015, Florianópolis. XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015.

RODRIGUES, I. ; CALDAS, L. ; **BERNARDINA, G. R. D.** ; SANTIAGO, P. ; SILVATTI, A.P. . Análise Cinemática e Eletromiográfica da Influência do En Dehors no Salto: Dados Preliminares. In: XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015, Florianópolis. XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015.

ROSADO, D. ; SUAREZ, P. ; CALDAS, L. ; **BERNARDINA, G. R. D.** ; LOPES, M. ; Silvatti, A.P. . Analise da Altura do Salto no Squat Jump e Countermovement Jump em Mulheres de Meia Idade: Resultados Preliminares. In: XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015. XVI Congresso Brasileiro de Biomecânica, 2015.

SIMONATO, S. P.; **BERNARDINA, G. R. D.**; BAPTISTA, A. A.; RODRIGUES, I. M.; FERREIRA, L. C. R.; ANDRADE, A. G. P.; SILVATTI, A. P.; FONSECA, B. P. A. Análise cinemática tridimensional das variáveis lineares da marcha batida de cavalos Mangalarga Marchador. In: XVI Conferência anual da ABRAVEQ, 2015.

CALDAS, L. R. R.; **BERNARDINA, G. D.**; SILVATTI, A. P. Efeitos da prática de atividade física nos parâmetros biomecânicos da marcha e da aptidão física de mulheres de meia idade In: VII SIMPAC, 2015, Viçosa - MG. VII SIMPAC. , 2015.

SILVATTI, A. P.; CALDAS, L.R.R.; RODRIGUES, M.; RODRIGUES, I.; **BERNARDINA, G. D.**; ANDRADE, A. G.; HAMIL, J. Physical Fitness Of Middleaged Women: Effects Of Systematized Exercise In: 20th Annual Congress of the European College of Sport Science, 2015, Malmö - Sweden. 20th Annual Congress of the European College of Sport Science. , 2015.

BERNARDINA, G. R. D.; SILVA, R. G. ; Cerveri, P. ; BARROS, R. M. L. ; Silvatti, A.P. . ACCURACY OF SPORT ACTION CAMERAS FOR 3D UNDERWATER MOTION ANALYSIS. In: 32nd Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, 2014, Johnson City. 32nd Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, 2014.

9. VISITAS TÉCNICAS, INTERCÂMBIOS OU ESTÁGIOS

Instituição: Université de Poitiers

Data: 29 de junho a 18 de julho de 2015

Local: França

Órgão promotor: LAB (Laboratório de Análises Biomecânicas)

Instituição: XXXIV Exponacional Mangalarga Marchador - Análise cinemática tridimensional da marcha batida e picada.

Data: 24 a 30 de julho de 2015

Local: Belo Horizonte

Órgão promotor: Associação Brasileira dos Criadores de Cavalos Mangalarga Marchador

Instituição: Hospital Universitário - UFJF

Data: 06 de março de 2015

Local: Juiz de Fora

Órgão promotor: Programa de pós-graduação em Educação Física / UFV-UFJF

10. ORIENTAÇÕES

Nome do Aluno (Matrícula): Débora Máfia Macedo (74796)

Título do trabalho: Influência do peso da mochila nos aspectos posturais e nas variáveis lineares da marcha de universitários

Data: 2015

11. PARTICIPAÇÃO EM BANCAS

Nome do Aluno (Matrícula): Isabela Martins Rodrigues (70717)

Título do trabalho: Análise cinemática e eletromiográfica da influência do en *dehors* no salto: dados preliminares.

Data: 12/06/2015

Nome dos demais membros da avaliação: Amanda Piaia Silvatti e Andréa Bergallo Snizek

12. AULAS MINISTRADAS DE GRADUAÇÃO NA UFV ou UFJF

Nome da disciplina: Cinesiologia – 2014/2

Carga horária: 8 horas

Nome da disciplina: Biomecânica – 2015/1

Carga horária: 8 horas

Nome da disciplina: Cinesiologia – 2015/2

Carga horária: 8 horas

Nome da disciplina: Natação III – 2015/2
Carga horária: 1 hora

Nome da disciplina: Biomecânica – 2016/1
Carga horária: 60 horas

Nome da disciplina: Cinesiologia – 2016/2
Carga horária: 30 horas

Anexo D

**Versão original do artigo publicado na
Revista PlosOne, 2016.**

RESEARCH ARTICLE

Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis

Gustavo R. D. Bernardina^{1*}, Pietro Cerveri², Ricardo M. L. Barros³, João C. B. Marins¹, Amanda P. Silvatti¹

1 Department of Physical Education, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, **2** Department of Electronics, Information and Bioengineering, Politecnico di Milano, Milan, Itália, **3** Faculty of Physical Education, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil

* gustavordalla@gmail.com


 OPEN ACCESS

Citation: Bernardina GRD, Cerveri P, Barros RML, Marins JCB, Silvatti AP (2016) Action Sport Cameras as an Instrument to Perform a 3D Underwater Motion Analysis. PLoS ONE 11(8): e0160490. doi:10.1371/journal.pone.0160490

Editor: Roi Gurka, Coastal Carolina University, UNITED STATES

Received: March 4, 2016

Accepted: July 20, 2016

Published: August 11, 2016

Copyright: © 2016 Bernardina et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

Funding: RMLB received funding from Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (São Paulo Research Foundation) (www.fapesp.br) through Award Numbers 00/1293-1, 2006/02403-1, and 2009/09359-6. RMLB and APS received funding from Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (National Counsel of Technological and Scientific Development) (www.cnpq.br) through Award Numbers 473729/2008-3, 304975/2009-5, 478120/2011-7, 234088/2014-1, and 481391/2013-4. GRDB and this study received

Abstract

Action sport cameras (ASC) are currently adopted mainly for entertainment purposes but their uninterrupted technical improvements, in correspondence of cost decreases, are going to disclose them for three-dimensional (3D) motion analysis in sport gesture study and athletic performance evaluation quantitatively. Extending this technology to sport analysis however still requires a methodologic step-forward to making ASC a metric system, encompassing ad-hoc camera setup, image processing, feature tracking, calibration and 3D reconstruction. Despite traditional laboratory analysis, such requirements become an issue when coping with both indoor and outdoor motion acquisitions of athletes. In swimming analysis for example, the camera setup and the calibration protocol are particularly demanding since land and underwater cameras are mandatory. In particular, the underwater camera calibration can be an issue affecting the reconstruction accuracy. In this paper, the aim is to evaluate the feasibility of ASC for 3D underwater analysis by focusing on camera setup and data acquisition protocols. Two GoPro Hero3+ Black (frequency: 60Hz; image resolutions: 1280×720/1920×1080 pixels) were located underwater into a swimming pool, surveying a working volume of about 6m³. A two-step custom calibration procedure, consisting in the acquisition of one static triad and one moving wand, carrying nine and one spherical passive markers, respectively, was implemented. After assessing camera parameters, a rigid bar, carrying two markers at known distance, was acquired in several positions within the working volume. The average error upon the reconstructed inter-marker distances was less than 2.5mm (1280×720) and 1.5mm (1920×1080). The results of this study demonstrate that the calibration of underwater ASC is feasible enabling quantitative kinematic measurements with accuracy comparable to traditional motion capture systems.

Introduction

Motion capture systems are traditionally adopted to reconstruct the movements of animals and humans in different applications such as biomechanics [1–2], sport gesture analysis [3–7],

funding from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduation Education) (www.capes.gov.br) through Award Numbers 2011/10-7 and 08/2014. APS received funding from Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Minas Gerais Research Foundation) (www.fapemig.br) through Award Number PEE-00596-14. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

rehabilitation [8–9] and clinics [10–11]. However, optoelectronics and electromagnetic devices, mainly devoted to laboratory analysis, feature high costs and are not designed for both outdoor and underwater usage. Qualisys company distributes a video-based commercial system [12], specifically designed for underwater measurements using devoted illumination to enhance image quality. However, cameras still demand cables and the system is very expensive.

An alternative video-based technology is represented by action sport cameras (ASC), which are currently used mainly for recreational purposes. Their uninterrupted technical improvements, in terms of image resolution and capture frequency, in correspondence of a cost decrease, are enabling them to sport gesture study and athletic performance evaluation [13–17]. Recent works in the literature described the application of ASC for two-dimensional (2D) analysis [18–21]. Extending this technology for three-dimensional (3D) sport analysis using multiple cameras, however, still requires a methodologic step-forward to making ASC a metric system, encompassing ad-hoc camera setup, synchronization of the acquisitions, and devoted calibration protocols.

In swimming motion analysis for example, the camera setup is particularly demanding as the athletic gesture develops both in air and underwater concurrently. ASC manufacturers partially addressed this issue by developing different accessories, especially designed for underwater usage, as waterproof housings and support with suction cups to secure the cameras to the wall of the swimming pool. From an operational point of view, camera calibration represents a bottleneck to the development of video-based underwater motion analysis systems because of two main issues. First, the 3D reconstruction of the complete athletic gesture requires the calibration of both air and underwater cameras and a coordinate system registration in between them. At present time however, there are no standardized protocols available. Second, underwater calibration can require specific solutions addressing water disturbance of the image quality to ensure high reconstruction accuracy.

In order to achieve high accurate 3D underwater movement analysis, our group already addressed some critical points related mainly to underwater camera calibration. Using industrial cameras, we showed that the accuracy results of the wand-based and 2D plate-based calibration methods were less associated to the testing tool position in the working volume and provided better accuracy than the graduated rod-based calibration with nonlinear DLT [22]. The main advantage of using wand-based calibration was the equalization of the reconstruction error across the working volume, ensured by the bundle adjustment of the camera parameters. In contrast, 2D plate-based calibration led to an unregistered camera network as each camera was calibrated separately. However, 2D plate-based calibration was less sensitive to water quality than wand-based. In the [23], we applied wand-based underwater calibration to reconstruct with high accuracy the hand trajectory of four swimmers during front-crawl, breaststroke and butterfly styles.

In this paper, the underwater wand-based calibration procedure was applied to the ASC. Experimentally, two cameras were submerged into a swimming pool and located steady at the corners of a working volume of about 6m³. The measurement protocol encompassed calibration and testing acquisitions to compute camera parameters and evaluate the reconstruction accuracy, respectively, with two different image resolutions. The effect of a set of calibration data acquisition strategies, on the 3D accuracy, was investigated.

Materials and Methods

Instruments

The data acquisition was performed in a swimming pool. Two action sport cameras with waterproof housings (GoPro, Hero3+, Black Edition[®] / USA), were fixed on the wall of the swimming

pool (see Fig 1). The view angle and acquisition frequency were 127° and 60Hz, respectively. Two different image resolutions were investigated, namely 1280×720 (LOWRES) and 1920×1080 (HIGHRES) pixels. In order to synchronize the cameras, we used the Wi-Fi remote GoPro control (see Fig 1B). After acquisition, the videos were converted to AVI movie format in the GoPro studio software.

Camera calibration procedure

The wand-based calibration method consists in the acquisition of one static (a triad structure) and one moving (a wand structure) tool, carrying nine and one spherical passive markers, respectively. One waterproof orthogonal triad structure (1×1×1m) was built by a computer numerical control machine (CNC) screwing onto it nine spherical black markers (Ø: 35 mm) in known positions (10µm accuracy). The triad was located at the floor of the swimming pool, in the center of the working volume (1×4×1.5m³) and acquired for 5 seconds (see Fig 1A). 2D marker segmentation in videos and centroid computation were performed using “Dvideo” software [24]. 2D data of triad markers were used to assess the initial intrinsic and extrinsic parameters of the cameras, using DLT method disregarding optical distortions [22], and define the origin and orientation of the working volume. In order to refine the camera parameters, also ensuring nonlinear optical distortion correction [25], a wand, carrying one spherical marker located at its extremity, was moved in the working volume, during about 20 seconds. “Dvideo” software was used again to track the marker in the image sequence of the two cameras. Four hundred useful video frames were used into a bundle adjustment nonlinear optimization, using control points with both known (triad markers) and unknown (wand marker) 3D coordinates [26]. The bundle adjustment iteratively estimates the parameters of all the cameras along with the unknown 3D marker coordinates by minimizing the 2D projection error (measured vs predicted by the camera model) on the images. The optical distortion was taken into account by adding one radial parameter into the camera model (Fig 2).

Calibration quality

The calibration quality was evaluated by the accuracy of 3D reconstruction in both image resolutions (HIGHRES and LOWRES). We used five acquisitions of the rigid bar, carrying two markers at known distance (d_i ; 250 mm), moved within the working volume during 15 seconds (Fig 1C). The wand was manufactured by CNC machine ensuring a marker positioning accuracy of about 10µm. In order to describe the 3D accuracy of ASC the following quantities were calculated for each trial: a) mean value of the marker distance; b) the standard deviation of the distance distribution; c) the mean absolute error (difference between the nominal and the measured marker distances); d) the percentage accuracy (the ratio between the absolute accuracy and the maximum diagonal of the working volume) [27]. The error distributions for HIGHRES and LOWRES were compared using a non-parametric test (Wilcoxon rank sum) with a significance of 1%. The calibration quality was also evaluated in laboratory and were compared to the underwater condition, using same camera setup (two cameras, HIGHRES and LOWRES, 60Hz, camera position) and calibration protocol (triad and wand tools).

Calibration dependability

Since the calibration quality can be affected by the performed wand acquisition movement [26], we evaluated the camera dependability testing three different acquisitions, namely zig-zag (M1), circular (M2) and up and down (M3). For this test, we used the high image resolution. As far as M1 is concerned, the operator was instructed to well cover all the camera field of view. In the M2 wand movement, the operator was instructed to perform circular movements

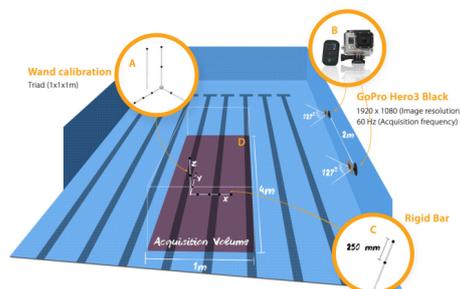


Fig 1. A) Calibration tools. B) Action sport cameras (GoPro, Hero3+, Black). C) Rigid bar used to 3D reconstruction accuracy evaluation. D) Camera position and acquisition volume.

doi:10.1371/journal.pone.0160490.g001

within the working volume. In M3, the operator was instructed to move up-down the wand within the working volume. In addition, we evaluated whether to add an inter-marker distance constraint into the bundle adjustment (two-marker in the wand tool) could result in an improvement of the 3D reconstruction accuracy. Operatively, five different calibration tests (see Fig 3), explicitly M1-1 (one marker with zig-zig movement), M2-1 (one marker with circular movement), M3-1 (one marker with up-down), M1-2 (two markers with zig-zig movement) and M2-2 (two markers with circular movement), were performed. The quality of all the five calibrations was assessed again by reconstructing the distance between the markers of the test rigid bar moved within the working volume during about 20s.

In order to analyze how the wand movement type and the number of markers affected the calibration dependability, we calculated the minimum, mean and maximum value of the distance between the markers, the standard deviation and the mean absolute error, in all the five acquisition protocols (M1-1, M2-1, M3-1, M1-2 and M2-2). The five distance error distributions were statistically analyzed by using a non-parametric test (Kruskal-Wallis) with a *post-hoc* (Tukey: p -value < 0.05) (Matlab[®] 2012).

Results

Calibration quality

In the five repeated calibrations, the reconstruction error was below 2.6mm for both image resolutions. In Table 1, we listed mean of the distance between the markers, standard deviation and mean absolute errors (bias) of the five trials of the dynamic rigid bar test (2 markers).

As expected, the bias of HIGHRES was lower (1.28mm) than that of LOWRES (2.41mm). The two error distributions were statistically (p -value < 0.0001) different (see Fig 4). For comparison, the 3D reconstruction in laboratory using HIGHRES and LOWRES led to a mean absolute error of 1.56mm and 1.67mm, respectively.

Calibration dependability

There was a significant difference (p < 0.001) among the five different calibrations (Table 2). Since the movement M1 spread more the working volume, we found the best accuracy results in M1-1 (1.17 mm) and M1-2 (1.28 mm).

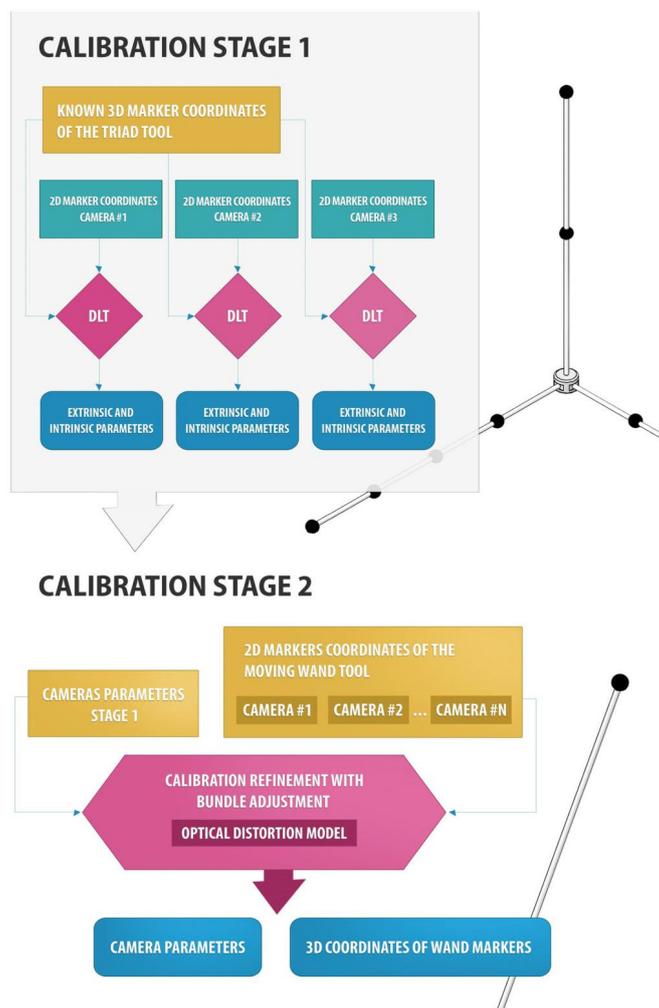


Fig 2. Schematic workflow of the two-stage camera calibration for a generic number of cameras.

doi:10.1371/journal.pone.0160490.g002

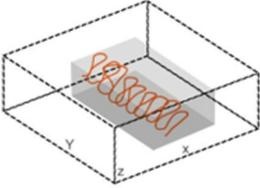
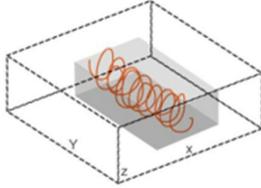
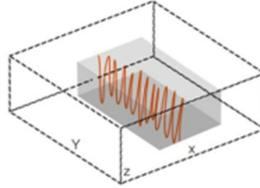
Calibration Movement Type					
M1: zig-zag		M2: circular		M3 up-down	
					
Number of markers					
1	2	1	2	1	

Fig 3. Three different calibration wand movements to evaluate the calibration dependability.

doi:10.1371/journal.pone.0160490.g003

No significant difference was found when we compared M1 movement using or not the distance constraints (Table 2). When the movement did not spread systematically the working volume (M2), the usage of the distance constraint in the bundle calibration improved significantly the accuracy of results (M2-1 = 1.80mm, M2-2 = 1.47mm, $p < 0.001$). M3-1 acquisition protocol (non-systematic movement and one marker wand) yielded the worst reconstruction error (2.63mm). As noticed, when considering M1-2 and M2-2 (different movements but with bar length constraint), no statistical difference was found.

Discussion

Performing 3D kinematic analysis in sports, as in the case of swimming, requires high reconstruction accuracy. The usage of nonlinear camera calibration was reported to improve the accuracy results found in laboratory conditions [25, 28, 29]. Reconstruction errors, ranging from 0.58 to about 1mm, were obtained when using optoelectronic systems and industrial cameras [15, 30, 23]. The reconstruction accuracy of ASC (wide-angle lenses—GoPro) was evaluated out of water conditions obtaining 10mm error in correspondence of a linear camera model [31]. In the same paper, the authors reported that the accuracy increased by five times (2mm) when adopting a nonlinear camera model. This last result is in agreement with our GoPro laboratory test (cf. Table 1).

Table 1. Results of the 5 trials of dynamic rigid bar test (HIGHRES and LOWRES). Nominal distance d_n between the two markers: 250mm.

Trial	Mean \pm SD (mm)		Mean Absolute Error (mm)		Error related to volume size	
	HIGHRES	LOWRES	HIGHRES	LOWRES	HIGHRES	LOWRES
1	249.95 \pm 1.81	248.0 \pm 1.70	1.36	2.22	1:3000	1:5200
2	250.27 \pm 1.67	247.8 \pm 1.30	1.29	2.28	1:3000	1:5300
3	249.91 \pm 1.55	247.86 \pm 1.78	1.22	2.37	1:3000	1:5500
4	250.11 \pm 1.71	247.51 \pm 1.78	1.35	2.63	1:3000	1:6100
5	250.04 \pm 1.48	247.60 \pm 1.65	1.19	2.55	1:3000	1:6000
Land	248.53 \pm 1.08	248.56 \pm 1.40	1.56	1.67	1:3600	1:3800

doi:10.1371/journal.pone.0160490.t001

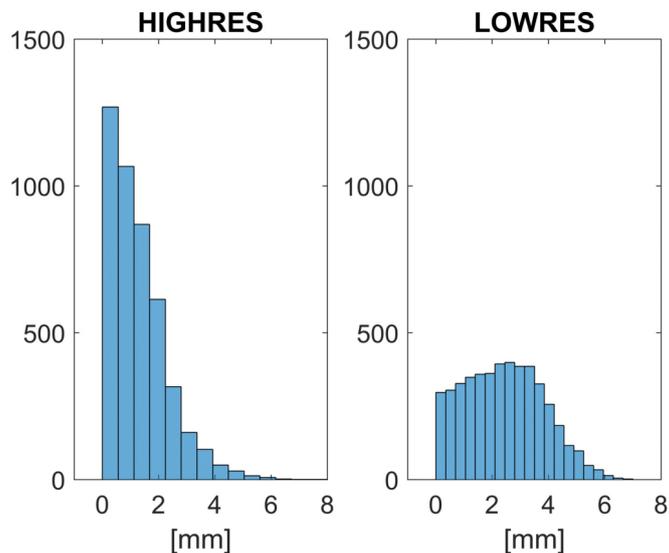


Fig 4. The histograms of the residual error distribution (cumulated over the five trials) for HIGHRES (1920–1080) and LOWRES (1280–720). The average values were 1.28 and 2.41mm, respectively.

doi:10.1371/journal.pone.0160490.g004

Underwater 3D analysis, based on cumbersome calibration structure and linear camera models, using traditional video-based systems, provided a reconstruction error higher than 5mm [32–35]. In [22], it was shown that underwater camera calibration using industrial cameras and nonlinear camera model, improves on average the reconstruction accuracy up to

Table 2. Minimum, mean and maximum inter-marker distance, averaged across 5 trials and the corresponding mean absolute error (d_e ; 250mm). M1-1 (one marker with zig-zig movement); M2-1 (one marker with circular movement); M3-1 (one marker with up-down); M1-2 (two markers with zig-zig movement); M2-2 (two markers with circular movement). The post-hoc comparison results were reported (* $p < 0.05$).

Calibration	Distance (mm)			Mean Absolute Error (mm)	Post-hoc comparison	p -value
	Minimum	Mean	Maximum			
M1-1	249.31	249.43	249.55	1.17	M1-2	0.08
					M2-1	0.000*
					M2-2	0.01*
					M3-1	0.000*
M1-2	249.07	249.15	249.23	1.28	M2-1	0.000*
					M2-2	0.06
					M3-1	0.000*
M2-1	248.57	248.60	248.67	1.80	M2-2	0.000*
					M3-1	0.000*
M2-2	248.89	248.95	249.08	1.47	M3-1	0.000*
M3-1	247.92	248.13	248.29	2.63		

doi:10.1371/journal.pone.0160490.t002

1mm across a working volume of about 7m^3 . This result was comparable with the values (2mm at 10m distance) reported by commercial systems devoted to 3D underwater analysis [12].

In the light of such prior results, the present study evaluated the reconstruction accuracy of underwater ASC calibrated using the wand method with a nonlinear camera model encompassing optical distortions [22]. We found that the average error upon the reconstructed inter-marker distances was less than 1.5mm (HIGHRES underwater and Land) on average across the whole working volume of about 6m^3 , comparable with the values reported in our previous work [22], with reconstruction errors reported in [36] using GoPro cameras and in [12] using the Oqus-Underwater system.

As far as the calibration dependability is concerned, the wand calibration movement, as expected, affected the reconstruction accuracy results. As shown (cfr. Table 2), spreading the wand systematically across the whole working volume (M1), led to the best accuracy results. The M3 protocol, featuring up-down wand movements without any systematic control, led in contrast to the poorest results. Circular movement (M2), while not systematically covering the entire working volume, ensured accuracy results less than 2mm, nonetheless worse than the results obtained with M1. The analysis of the calibration dependability related to the number of markers upon the calibration wand showed that one marker is sufficient when it is acquired well spread within the whole working volume. We point out that the use of two markers (distance constraint) can improve the reconstruction accuracy making the result less dependent on the wand movement performed by the operator (see Table 2: M1-2 vs M2-2). Based on these considerations, we can argue that the wand-based calibration makes ASC suitable competitive to industrial cameras for underwater motion analysis.

Some limits of the present study must be however discussed. First, we performed an evaluation of the potentiality of ASC in terms of calibration setup and reconstruction accuracy, disregarding the environmental issues relative to underwater conditions. For instance, the image contrast, which can be affected by the illumination of swimming pool, and the water disturbance, which is directly related to the speed of the swimmer, deteriorate the marker detection quality on the images (see Fig 5). Such environmental issues demand therefore specific testing to evaluate their effects on the 3D reconstruction accuracy. We plan to perform a systematic analysis of this effect in future works.

Second, the issue relative to the 3D kinematic analysis underwater is concerning the marker protocol utilized to compute the absolute and angular kinematics. While increasing the number of markers ensures a better body segment definition, marker labeling and tracking procedures complicate and the swimmer performance would be greater affected by water drag increase [37]. In order to avoid it, the use of crosses or circles drawn on the swimmer skin was proposed [38]. Alternatively, a complete markerless approach could be applied as described in [39–40]. However, the segmentation of the complete swimmer silhouette on the images demand a complex network of camera with an enhanced underwater illumination to increase swimmer-to-water contrast [40].

Third, we did not perform an extensive evaluation of the role of the GoPro acquisition setup (image resolution, acquisition frequency and view angle of the camera). In this work, we aimed at studying the calibration accuracy for a typical size of the working volume ensuring at least one complete front crawl cycle. Arranging a 6m working volume wide and camera-to-working volume distance of about 3m required a camera view angle of about 130° . The only option from GoPro setup to cope with such demands was “medium”, featuring a view angle of 127° . With this camera setup we had available 24Hz, 30Hz, 48Hz and 60Hz frequencies. In order to cope with typical swimmer speed we choose 60Hz. A more systematic comparison among different setup, allowed by GoPro (resolution, view angle and acquisition frequency), will be the subject of future evaluations.

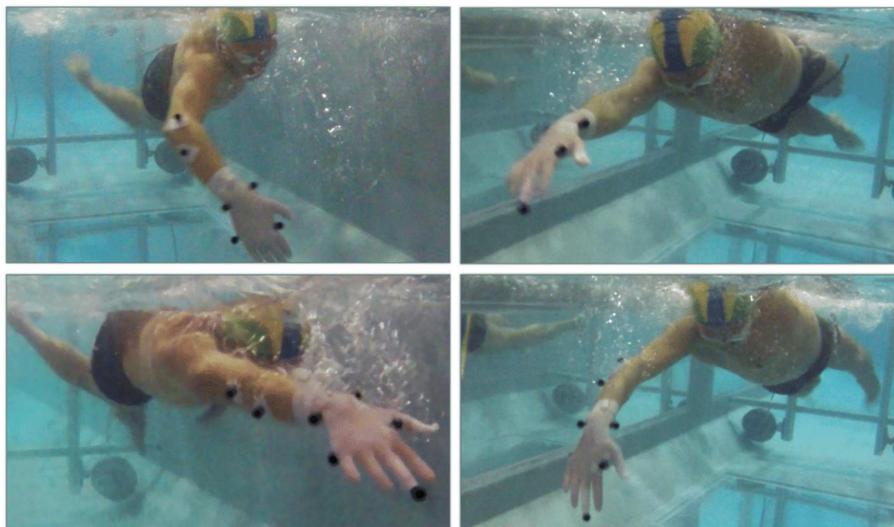


Fig 5. Two instants of the front-crawl swim cycle surveyed by two cameras. The swimmer is equipped with surface markers attached to the right arm. This real condition elucidates how poor image contrast and water disturbance can complicate the automatic marker detection on the image and tracking analysis, affecting the accuracy of the 3D kinematic analysis.

doi:10.1371/journal.pone.0160490.g005

Fourth, we did not consider wearable technology for benchmark comparison. Especially, inertial-magnetic measurements units (IMMUs) have been recently proposed in the literature for underwater kinematic analysis [41]. While being in principle plug & play as they are wireless, these sensors can affect the swimmer performance due to the drag effect, which is augmented as the swimmer speed increases. It has to be pointed out that the drag causes for instance vibrations of the sensors, affecting the quality of the kinematic measure. In addition, to ensure underwater wireless data transmission, high capacity batteries are mandatory to cope with power consumption, increasing the size of the wearable devices.

Conclusions

This article was conceived to mainly demonstrate the feasibility of the quantitative 3D measurements underwater using action sport cameras. We showed that, by endowing action sport cameras with an opportune calibration methodology (handy tools and bundle adjustment), they can be made an accurate metric system. Compared to optoelectronic devices, especially designed for 3D motion analysis, this technology features low cost, reduced size, high portability, wireless facility and waterproof housings. Swimming, underwater gait, water aerobics, water polo are relevant potential applications for such an emerging technology.

Supporting Information

S1 Supporting Information. S1.1_Calibration Quality > S1.1.1_Underwater > S1.1.1.1_Highres > S1.1.1.1.1_Calibration > File A. This is the BUNDLE_CameraParameters. This

is the camera calibration parameters. **File B. This is the Triad.** This is the 2D coordinates of the waterproof orthogonal triad structure carrying nine spherical black markers. **File C. This is the WandCalibration.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker. **S1.1.1.1.2_Accuracy > File D. This is the Trial_1.** This is the 2D coordinates of the first rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File E. This is the Trial_2.** This is the 2D coordinates of the second rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File F. This is the Trial_3.** This is the 2D coordinates of the third rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File G. This is the Trial_4.** This is the 2D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File H. This is the Trial_5.** This is the 2D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File I. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File J. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File K. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File L. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File M. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.1.1.2_Lowres > S1.1.1.2.1_Calibration > File N. This is the BUNDLE_CameraParameters.** This is the camera calibration parameters. **File O. This is the Triad.** This is the 2D coordinates of the waterproof orthogonal triad structure carrying nine spherical black markers. **File P. This is the WandCalibration.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker. **S1.1.1.2.2_Accuracy > File Q. This is the Trial_1.** This is the 2D coordinates of the first rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File R. This is the Trial_2.** This is the 2D coordinates of the second rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File S. This is the Trial_3.** This is the 2D coordinates of the third rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File T. This is the Trial_4.** This is the 2D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File U. This is the Trial_5.** This is the 2D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File V. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File W. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File X. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File Y. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File Z. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.1.2_Land > S1.1.2.1_Highres > S1.1.2.1.1_Calibration > File AA. This is the BUNDLE_CameraParameters.** This is the camera calibration parameters. **File AB. This is the Triad.** This is the 2D coordinates of the waterproof orthogonal triad structure carrying nine spherical black markers. **File AC. This is the WandCalibration.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker. **S1.1.2.1.2_Accuracy > File AD. This is the Trial_Land.** This is the 2D coordinates of the first rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File AE. This is the MotionSequence3D_Land.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **S1.1.2.2_Lowres > S1.1.2.2.1_Calibration File AF. This is the BUNDLE_CameraParameters.** This is the camera calibration parameters. **File AG. This is the Triad.** This is the 2D coordinates of the waterproof orthogonal triad structure carrying nine spherical black markers. **File AH. This is the WandCalibration.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker. **S1.1.2.2.2_Accuracy > File AI. This is the Trial_Land.** This is the 2D coordinates of the first rigid bar test acquisitions, carrying two markers at known distance. **File AJ. This is the**

MotionSequence3D_Land. This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisitions. **S1.2_Calibration Dependability > S1.2.1_Calibration > File AK. This is the BUNDLE_CameraParameters_Cal_Mov1_1p.** This is the camera calibration parameters of the first movement (M1) with one marker. **File AL. This is the BUNDLE_CameraParameters_Cal_Mov1_2p.** This is the camera calibration parameters of the first movement (M1) with two markers. **File AM. This is the BUNDLE_CameraParameters_Cal_Mov2_1p.** This is the camera calibration parameters of the second movement (M2) with one marker. **File AN. This is the BUNDLE_CameraParameters_Cal_Mov2_2p.** This is the camera calibration parameters of the second movement (M2) with two markers. **File AO. This is the BUNDLE_CameraParameters_Cal_Mov3_1p.** This is the camera calibration parameters of the third movement (M3) with one marker. **File AP. This is the Triad.** This is the 2D coordinates of the waterproof orthogonal triad structure carrying nine spherical black markers. **File AQ. This is the Cal_Mov1_1p.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker using the first movement (M1). **File AR. This is the Cal_Mov1_2p.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying two spherical black markers using the first movement (M1). **File AS. This is the Cal_Mov2_1p.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker using the second movement (M2). **File AT. This is the Cal_Mov2_2p.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying two spherical black markers using the second movement (M2). **File AU. This is the Cal_Mov3_1p.** This is the 2D coordinates of the wand structure carrying one spherical black marker using the third movement (M3). **S1.2.2_Accuracy > File AV. This is the Trial_1.** This is the 2D coordinates of the first rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File AW. This is the Trial_2.** This is the 2D coordinates of the second rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File AX. This is the Trial_3.** This is the 2D coordinates of the third rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File AY. This is the Trial_4.** This is the 2D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **File AZ. This is the Trial_5.** This is the 2D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition, carrying two markers at known distance. **S1.2.2.1_Mov1_1p > File BA. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File BB. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File BC. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File BD. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File BE. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.2.2.2_Mov1_2p > File BF. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File BG. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinate of the second rigid bar test acquisition. **File BH. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File BI. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File BJ. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.2.2.3_Mov2_1p > File BK. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File BL. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File BM. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File BN. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File BO. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.2.2.4_Mov2_2p > File BP. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File BQ. This is the MotionSequence3D_Trial_2.**

This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File BR. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File BS. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinate of the fourth rigid bar test acquisition. **File BT. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition. **S1.2.2.5_Mov3_1p > File BU. This is the MotionSequence3D_Trial_1.** This is the 3D coordinates of the first rigid bar test acquisition. **File BV. This is the MotionSequence3D_Trial_2.** This is the 3D coordinates of the second rigid bar test acquisition. **File BW. This is the MotionSequence3D_Trial_3.** This is the 3D coordinates of the third rigid bar test acquisition. **File BX. This is the MotionSequence3D_Trial_4.** This is the 3D coordinates of the fourth rigid bar test acquisition. **File BY. This is the MotionSequence3D_Trial_5.** This is the 3D coordinates of the fifth rigid bar test acquisition.
(ZIP)

Author Contributions

Conceptualization: GRDB APS PC JCBM.

Formal analysis: GRDB APS PC RMLB.

Funding acquisition: APS RMLB.

Investigation: GRDB APS.

Methodology: GRDB APS PC RMLB JCBM.

Project administration: APS.

Resources: APS RMLB.

Software: GRDB APS PC RMLB.

Supervision: APS.

Visualization: APS PC.

Writing - original draft: GRDB APS.

Writing - review & editing: GRDB APS PC RMLB JCBM.

References

- Olsen E, Andersen PH, Pfau T. Accuracy and Precision of Equine Gait Event Detection during Walking with Limb and Trunk Mounted Inertial Sensors. *Sensors*. 2012; 12(6): 8145–8156. doi: [10.3390/s120608145](https://doi.org/10.3390/s120608145) PMID: [22969392](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22969392/)
- Safayi S, Jeffery ND, Shivapour SK, Zamanighomi M, Zylstra TJ, Bratsch-Prince J, et al. Kinematic analysis of the gait of adult sheep during treadmill locomotion: Parameter values, allowable total error, and potential for use in evaluating spinal cord injury. *J Neuro Sci*. 2015; 358: 107–112. doi: [10.1016/j.jns.2015.08.031](https://doi.org/10.1016/j.jns.2015.08.031) PMID: [26341152](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26341152/)
- Sinclair J, Richards J, Taylor PJ, Edmundson CJ, Brooks D, Hobbs SJ. Three-dimensional kinematic comparison of treadmill and overground running. *Sport Biomech*. 2013; 12(3): 272–282. doi: [10.1080/14763141.2012.759614](https://doi.org/10.1080/14763141.2012.759614)
- Bates NA, Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Impact differences in ground reaction force and center of mass between the first and second landing phases of a drop vertical jump and their implications for injury risk assessment. *J Biomech*. 2013; 46(7):1237–1241. doi: [10.1016/j.jbiomech.2013.02.024](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.02.024) PMID: [23538000](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23538000/)
- Joyce C, Burnett A, Cochrane J, Ball K. Three-dimensional trunk kinematics in golf: between-club differences and relationships to clubhead speed. *Sport Biomech*. 2013; 12(2): 108–120.

6. Seminati E, Marzari A, Vacondio O, Minetti AE. Shoulder 3D range of motion and humerus rotation in two volleyball spike techniques: injury prevention and performance. *Sport Biomech*. 2015; 14(2):216–231. doi: [10.1080/14763141.2015.1052747](https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1052747)
7. Begon M, Leardini A, Belvedere C, Farahpour N, Allard P. Effects of front a land sagittal thorax attitudes in gait on trunk and pelvis three-dimensional kinematics. *Med Eng Phys*. 2015; 37(10):1032–6. doi: [10.1016/j.medengphy.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.08.001) PMID: [26337553](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26337553/)
8. Klotz MCM, Kost L, Braatz F, Ewerbeck V, Heitzmann D, Gantz S, et al. Motion capture of the upper extremity during activities of daily living in patients with spastic hemiplegic cerebral palsy. *Gait Posture*. 2013; 38(1):148–152. doi: [10.1016/j.gaitpost.2012.11.005](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.11.005) PMID: [23216727](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23216727/)
9. Maier MW, Niklasch M, Dreher T, Zeifang F, Rettig O, Klotz MC, et al. Motion patterns in activities of daily living: 3- year longitudinal follow-up after total shoulder arthroplasty using an optical 3D motion analysis system. *BMC Musculoskelet Disord*. 2014; 15(244). doi: [10.1186/1471-2474-15-244](https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-244)
10. Gefen A, Megido-Ravid M, Itzchak Y, Arcan M. Biomechanical Analysis of the Three-Dimensional Foot Structure During Gait: A Basic Tool for Clinical Applications. *J Biomech Eng*. 2000; 122(6): 630–639. doi: [10.1115/1.1318904](https://doi.org/10.1115/1.1318904) PMID: [11192385](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11192385/)
11. Wahid F, Begg R, McClelland JA, Webster KE, Halgamuge S, Ackland DC. A multiple regression normalization approach to evaluation of gait in total knee arthroplasty patients. *Clin Biomech*. 2016; 32:92–101. doi: [10.1016/j.clinbiomech.2015.12.012](https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.12.012)
12. Qualysis Oqus Underwater. 2014. Available: http://www.qualysis.com/wp-content/uploads/2014/01/Pl_Oqus_Underwater.pdf
13. Chong AK. Low-cost compact cameras: a medical application in CMT disease monitoring. *Photogramm Rec*. 2011; 26(134): 263–273. doi: [10.1111/j.1477-9730.2011.00638.x](https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00638.x)
14. Silvatti AP, Sarro KJ, Cerveri P, Baroni G, Barros RML. A 3D kinematic analysis of breathing patterns in competitive swimmers. *J Sports Sci*. 2012; 30(14): 1551–1560. doi: [10.1080/02640414.2012.713976](https://doi.org/10.1080/02640414.2012.713976) PMID: [22897476](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22897476/)
15. Bernardina, GRD, Silva, RG, Cerveri, P., Barros RML and Silvatti AP. Accuracy of sport action cameras for 3d underwater motion analysis. *Proceedings of the 32 International Conference of Biomechanics in Sports 2014*. pp. 505–508 ISSN 1999-4168.
16. Monnet T, Samson M, Bernard A, David L, Lacouture P. Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: a feasibility study. *Sports Eng*. 2014; 17(3): 171–181. doi: [10.1007/s12283-014-0152-4](https://doi.org/10.1007/s12283-014-0152-4)
17. Fujii K, Shinya M, Yamashita D, Kouzaki M, Oda S. Anticipation by basketball defenders: An explanation based on the three-dimensional inverted pendulum model. *Eur J Sport Sci*. 2014; 14(6): 538–546. doi: [10.1080/17461391.2013.876104](https://doi.org/10.1080/17461391.2013.876104) PMID: [24397711](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24397711/)
18. García-Ramos A, Feriche B, de la Fuente B, Argüelles-Cienfuegos J, Strojnik V, Strumbelj B, et al. Relationship between different push-off variables and start performance in experienced swimmers. *Eur J Sport Sci*. 2015; 15(8): 687–695. doi: [10.1080/17461391.2015.1063699](https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1063699) PMID: [26305175](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26305175/)
19. McDonnell L, Hume P, Nolte V. Sprint kayaking stroke rate reliability, variability and validity of the Digi-trainer accelerometer compared to GoPro video measurement. In *Proceedings of the XXX International Symposium on Biomechanics in Sports, Melbourne, Australia*. 2012. pp. 316–319. ISSN 1999-4168.
20. Timmis MA, Turner K, van Paridon KN. Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick. *PLoS ONE*. 2014; 9(12): 115–179. doi: [10.1371/journal.pone.0115179](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115179)
21. Vieira LHP, Pagnoca EA, Milioni F, Barbieri RA, Menezes RP, Alvarez L, et al. Tracking futsal players with a wide-angle lens camera: accuracy analysis of the radial distortion correction based on an improved Hough transform algorithm. *Comput Methods Biomech Biomed Eng Imaging Vis*. 2015. doi: [10.1080/21681163.2015.1072055](https://doi.org/10.1080/21681163.2015.1072055)
22. Silvatti AP, Dias FAS, Cerveri P, Barros RML. Comparison of different camera calibration approaches for underwater applications. *J Biomech*. 2012; 45(6): 1112–1116. doi: [10.1016/j.jbiomech.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.01.004) PMID: [22284990](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22284990/)
23. Silvatti AP, Cerveri P, Telles T, Dias FAZ, Baroni G, Barros RML. Quantitative underwater 3D motion analysis using submerged video cameras: accuracy analysis and trajectory reconstruction. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*. 2013; 16(11): 1240–1248. doi: [10.1080/10255842.2012.664637](https://doi.org/10.1080/10255842.2012.664637)
24. Figueroa PJ, Leite NJ, Barros RML. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. *Comput Methods Programs Biomed*. 2003; 72(2): 155–165. doi: [10.1016/S0169-2607\(02\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0169-2607(02)00122-0) PMID: [12941519](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12941519/)
25. Cerveri P, Borghese NA, Pedotti A. Complete calibration of a stereo photogrammetric system through control points of unknown coordinates. *J Biomech*. 1998; 31(10): 935–940. doi: [10.1016/S0021-9290\(98\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00104-3) PMID: [9840759](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9840759/)

26. Cerveri P, Pedotti A, Borghese NA. Combined evolution strategies for dynamic calibration of video-based measurement systems. *IEEE Trans Evolut Comput*. 2001; 5(3): 271–282. doi: [10.1109/4235.930315](https://doi.org/10.1109/4235.930315)
27. Chiari L, Della Croce U, Leardini A, Cappozzo A. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. *Gait Posture*. 2005; 21(2):197–211. doi: [10.1016/j.gaitpost.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2004.04.004) PMID: [15639399](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15639399/)
28. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans Pattern Anal*. 2000; 22(11): 1330–1334. doi: [10.1109/34.888718](https://doi.org/10.1109/34.888718)
29. Wang J, Shi F, Zhang J, Liu Y. A new calibration model of camera lens distortion. *Pattern Recognit*. 2008; 41(2): 607–615. doi: [10.1016/j.patcog.2007.06.012](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.06.012)
30. Pribanić T, Sturm P, Cifrek M. Calibration of 3D kinematic systems using 2D calibration plate. In Proceedings of the XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports, Seoul, Korea. 2008. pp. 77–80. ISSN 1999-4168.
31. Balletti C, Guerra F, Tsioukas V, Vernier P. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. *Sensors*. 2014; 14(9): 17471–17490. doi: [10.3390/s140917471](https://doi.org/10.3390/s140917471) PMID: [25237898](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25237898/)
32. Yanai T, Hay JG, Gerot JT. Three-dimensional videography of swimming with panning periscopes. *J Biomech*. 1996; 29(5): 673–678. doi: [10.1016/0021-9290\(95\)00123-9](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00123-9) PMID: [8707797](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8707797/)
33. Kwon YH, Lindley SL. Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. In Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, Hong Kong, China. 2000. pp. 48–55. ISSN 1999-4168.
34. Gourgoulis V, Aggeloussis N, Kasimatis P, Vezos N, Boli A, Mavromatis G. Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *J Sci Med Sport*. 2008; 11(2): 90–95. doi: [10.1016/j.jsams.2007.02.010](https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.02.010) PMID: [17544326](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17544326/)
35. Jesus K, Jesus K, Figueiredo P, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ, Machado LJ. Reconstruction accuracy assessment of surface and underwater 3D motion analysis: a new approach. *Comput Math Methods Med*. 2015. Article ID 269264. doi: [10.1155/2015/269264](https://doi.org/10.1155/2015/269264)
36. Shortis M. Calibration Techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors* 2015; 15(12), 30810–30826; doi: [10.3390/s151229831](https://doi.org/10.3390/s151229831) PMID: [26690172](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26690172/)
37. Magalhaes FA, Sawacha Z, Di Michele R, Cortesi M, Gatta G, Fantozzi S. Effectiveness of an automatic tracking software in underwater motion analysis. *J Sports Sci Med*. 2013; 12(4):660–7. PMID: [24421725](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24421725/)
38. Cecon S, Ceseracciu E, Sawacha Z, Gatta G, Cortesi M, Cobelli C, Fantozzi S. Motion analysis of front crawl swimming applying CAST technique by means of automatic tracking. *J Sports Sci*. 2013; 31(3) 276–287. doi: [10.1080/02640414.2012.729134](https://doi.org/10.1080/02640414.2012.729134) PMID: [23057667](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23057667/)
39. Ceseracciu E, Sawacha Z, Fantozzi S, Cortesi M, Gatta G, Corazza S, et al. Markerless analysis of front crawl swimming. *J Biomech*. 2011; 44(12): 2236–2242. doi: [10.1016/j.jbiomech.2011.06.003](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.06.003) PMID: [21719017](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21719017/)
40. Ceseracciu E, Sawacha Z, Cobelli C. Comparison of markerless and marker-based motion capture technologies through simultaneous data collection during gait: proof of concept. *PLoS ONE*. 2014; 9(3): e87640. doi: [10.1371/journal.pone.0087640](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087640) PMID: [24595273](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24595273/)
41. Fantozzi S, Giovanardi A, Borra D, Gatta G. Gait kinematic analysis in water using wearable inertial magnetic sensors. *PLoS ONE*. 2015; 10(9): e0138105. doi: [10.1371/journal.pone.0138105](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138105) PMID: [26368131](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26368131/)

Anexo E

Primeira página da versão original do artigo publicado na Revista Journal of Biomechanics, 2017.



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Biomechanics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jbiomech
www.JBiomech.com

In-air versus underwater comparison of 3D reconstruction accuracy using action sport cameras



Gustavo R.D. Bernardina^a, Pietro Cerveri^b, Ricardo M.L. Barros^c, João C.B. Marins^a,
Amanda P. Silvatti^{a,*}

^a Department of Physical Education, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brazil

^b Department of Electronics, Information and Bioengineering, Politecnico di Milano, Milano, Italia

^c Faculty of Physical Education, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Accepted 29 November 2016

Keywords:

Camera calibration
3D reconstruction
Action sport cameras
Underwater 3D measurements

ABSTRACT

Action sport cameras (ASC) have achieved a large consensus for recreational purposes due to ongoing cost decrease, image resolution and frame rate increase, along with plug-and-play usability. Consequently, they have been recently considered for sport gesture studies and quantitative athletic performance evaluation. In this paper, we evaluated the potential of two ASCs (GoPro Hero3+) for in-air (laboratory) and underwater (swimming pool) three-dimensional (3D) motion analysis as a function of different camera setups involving the acquisition frequency, image resolution and field of view. This is motivated by the fact that in swimming, movement cycles are characterized by underwater and in-air phases what imposes the technical challenge of having a split volume configuration: an underwater measurement volume observed by underwater cameras and an in-air measurement volume observed by in-air cameras. The reconstruction of whole swimming cycles requires thus merging of simultaneous measurements acquired in both volumes. Characterizing and optimizing the instrumental errors of such a configuration makes mandatory the assessment of the instrumental errors of both volumes.

In order to calibrate the camera stereo pair, black spherical markers placed on two calibration tools, used both in-air and underwater, and a two-step nonlinear optimization were exploited. The 3D reconstruction accuracy of testing markers and the repeatability of the estimated camera parameters accounted for system performance. For both environments, statistical tests were focused on the comparison of the different camera configurations. Then, each camera configuration was compared across the two environments. In all assessed resolutions, and in both environments, the reconstruction error (true distance between the two testing markers) was less than 3mm and the error related to the working volume diagonal was in the range of 1:2000 ($3 \times 1.3 \times 1.5 \text{ m}^3$) to 1:7000 ($4.5 \times 2.2 \times 1.5 \text{ m}^3$) in agreement with the literature. Statistically, the 3D accuracy obtained in the in-air environment was poorer ($p < 10^{-5}$) than the one in the underwater environment, across all the tested camera configurations. Related to the repeatability of the camera parameters, we found a very low variability in both environments (1.7% and 2.9%, in-air and underwater). This result encourage the use of ASC technology to perform quantitative reconstruction both in-air and underwater environments.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Commercial optoelectronic motion capture systems (MOCAPs) have been extensively used to compute the kinematics of many different types of human, animal and robot movements in controlled environments (Chiarì et al., 2005; Windolf et al., 2008; Monnet et al., 2014; Safayí et al., 2015), providing results with high

three-dimensional (3D) accuracy,¹ ranging from 1:5000 with four cameras (Shortis and Harvey, 1998) to 1:15000 (with respect to the volume diagonal) with 36 cameras (Schmid 2001). Likewise, consumer, industrial and action sport cameras (ASC) have been analyzed as a potential alternative to such systems to obtain reliable outdoor measurements with special interest for uncontrolled and critical environments such as underwater, snow and soccer fields.

* Correspondence to: Departamento de Educação Física, Avenida P. H. Rolfs, s/nº, Campus Universitário, Fax: +55 31 38992249.
E-mail address: amanda.silvatti@gmail.com (A.P. Silvatti).

¹ With the term "accuracy" here we mean the joint of the average and standard deviation errors of a distribution of distances between two points, distributed in the working volume.