

U. PORTO



FACULDADE DE DESPORTO
UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise Cinemática do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração para Análise 3D em Natação

Sara Maria Elvas da Silva Brandão

Porto, 2009

Análise Cinemática do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração para Análise 3D em Natação

Monografia realizada no âmbito da disciplina de
Seminário do 5º ano da licenciatura em Desporto e
Educação Física, na área do Alto Rendimento
Desportivo - Natação, da Faculdade de Desporto da
Universidade do Porto

Orientador: Prof. Doutor João Paulo Vilas-Boas
Co-Orientador: Prof. Doutor Ricardo Fernandes
Sara Maria Elvas da Silva Brandão

Porto, 2009

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho desta natureza nunca seria possível se não fosse a colaboração de algumas e importantes pessoas, a quem, desde já, dirijo o meu muito obrigada!

Ao Prof. Doutor João Paulo Vilas-Boas por me ter apoiado desde logo na realização deste trabalho cujo tema inicialmente poderia não ser ou parecer o mais motivador. Agradecer ainda por toda a disponibilidade para corrigir vezes sem fim os artigos e todo o material necessário para a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Ricardo Fernandes, co-orientador deste trabalho, principalmente pela motivação dada aquando da escolha do tema, motivando-me para a sua realização, elucidando-me sobre os seus prós e contras, sendo acima de tudo sincero. Obrigada ainda pelas correcções efectuadas em todos os artigos que eram realizados.

Ao Dr. Pedro Figueiredo, sem o qual este trabalho não seguiria o caminho traçado, obrigada por toda a ajuda, obrigada por todas as insistências, pela paciência, pelos ensinamentos, obrigada pelas horas de disponibilidade, obrigada também pelos momentos de distração, ou seja, obrigada por tudo!

Ao Engenheiro Pedro Gonçalves por toda a paciência e disponibilidade para me instalar o programa informático imprescindível à realização deste trabalho, resolvendo alguns problemas que surgiram, assim como pelas

sugestões dadas para a resolução de problemas relacionados com a recolha de dados.

À Júlia, minha orientadora de Estágio Pedagógico, por ter estado sempre ao meu lado, ajudando-me principalmente nas alturas onde o trabalho era imenso, apoiando-me e percebendo que, este ano lectivo não se restringe apenas ao Estágio Pedagógico.

Aos meus amigos, Catarina, João, Marco, Bandeirinha, Maikel, André, Salvador, Rafinha, que apesar de estarem longe, me apoiam incondicionalmente e por perceberem o porquê de por vezes estar ausente.

Aos meus colegas de Faculdade, mas também amigos, Marisa, Laura, Mauro, Jorge, Macieira e Marta, por toda a ajuda disponibilizada, pela amizade, incentivo e colaboração, bem como pelas experiências vividas e pela aprendizagem conseguida.

Ao Diogo, pela ajuda prestada em tudo o que era necessário e até no que não o era, por todo o apoio e por toda a disponibilidade. Obrigado pela compreensão de por vezes, o trabalho ser o mais importante!

Por fim mas não menos importante, aos meus pais, irmã, avós, tios e primos, por todo o apoio e incentivo ao longo destes cinco anos de licenciatura, por compreenderem e admirarem o caminho que foi construído até aqui.

Esta tese é baseada nos seguintes documentos, que são referidos no texto em numeração romana:

I.

Análise Cinemática Tridimensional do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração em Natação

A submeter à Revista Portuguesa de Ciências do Desporto

Sara Brandão, Pedro Figueiredo, Ricardo Fernandes, João Paulo Vilas-Boas

II.

Análise Cinemática do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração para Análise 3D em Natação

Submetido e aceite para o Congresso Nacional de Biomecânica, Bragança, Portugal

Publicado: Figueiredo, P.; Brandão, S.; Gonçalves, P.; Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. (2009).

Análise cinemática do erro de reconstrução de um volume de calibração para análise 3D em natação. In: M. A. Vaz, P. A. G. Piloto, J. C. R. Campos (eds), CD de Actas do 3º Congresso Nacional de Biomecânica 2009. ISBN: 978-989-96114-0-5.

III.

Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming

Submetido e aceite para o Congresso Brasileiro de Biomecânica, São Paulo, Brasil

Pedro Figueiredo, Sara Brandão, Pedro Gonçalves, João Paulo Vilas-Boas, Ricardo Fernandes

IV.

Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming

Submetido e aceite para o 1st International Symposium of Sports Performance, Vila Real, Portugal

Sara Brandão, Pedro Figueiredo, Pedro Gonçalves, João Paulo Vilas-Boas, Ricardo Fernandes

V.

Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming

A submeter ao Journal of Applied Biomechanics

Sara Brandão, Pedro Figueiredo, Pedro Gonçalves, João Paulo Vilas-Boas, Ricardo Fernandes

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	II
Índice Geral	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas	VIII
Resumo	IX
Abstract	X
Resumé	XI
Lista de Abreviaturas	XII
1. Introdução	1
2. I. Análise Cinemática Tridimensional do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração em Natação	4
3. Objectivos	21
4. Hipóteses	22
5. II. Análise Cinemática do Erro de Reconstrução de um Volume de Calibração para Análise 3D em Natação	23
6. III. Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming	26
7. IV. Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming	28
8. V. Kinematic Analysis of the Reconstruction Error of a Calibration Volume for 3D Analysis in Swimming	33
9. Discussão Geral	42

10.	Conclusões	50
11.	Referências Bibliográficas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

DOCUMENTO II.

Figura 1: Volume de Calibração 24

DOCUMENTO III.

Figure 1: RMS errors for the x, y and z coordinates, for a minimum and maximum number of calibration points in underwater (A panel) and above water (B panel) cameras 27

DOCUMENTO V.

Figure 1. Different Calibration Volumes (cubic calibration volume where the points are only placed on the edges (1a), cubic calibration volume where the points were marked on edges and on the square faces (1b), and a volume whose placement of calibration points define diagonals (parallels to the bottom of the pool) (1c)) 37

Figure 2. Underwater RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) axes for the different calibration frames (1, 2, 3) 38

Figure 3. Above water RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) axes for the different calibration frames (1, 2, 3) 39

ÍNDICE DE TABELAS

DOCUMENTO I.

Tabela 1. Diferenças médias e erros RMS com e sem utilização de janelas subaquáticas para a captação de imagens 17

Tabela 2: Erro Absoluto e respectivo desvio padrão para uma distribuição não uniforme dos pontos de calibração 18

DOCUMENTO II.

Tabela 1. Valores do erro RMS e do Dp do volume de calibração no eixo do x, y e z 25

DOCUMENTO IV.

Table 1. Mean difference and mean RMS errors for underwater cameras in the x, y and z axis 31

Table 2. Mean difference and mean RMS errors for the above water cameras in the x, y and z axis 31

DOCUMENTO V.

Table 1. Resultant RMS error for underwater and above water viewers 39

RESUMO

Os nadadores estão permanentemente a interagir com o meio aquático procurando a produção de forças propulsivas, que mantêm ou aceleraram a sua velocidade de deslocamento. Assim, torna-se importante determinar com precisão e fiabilidade o movimento dos segmentos propulsivos e a respectiva força propulsiva gerada. O propósito do presente estudo consistiu em verificar o erro de reconstrução de um volume de calibração para análise 3D em Natação, em imersão e em emersão. Para tal foi utilizado um volume de calibração que foi sofrendo alterações durante o decorrer do estudo. Inicialmente os pontos estavam marcados apenas nas arestas do cubo de calibração, posteriormente foram colocados pontos nas faces laterais deste e finalmente, o cubo de calibração continha pontos a definir diagonais (paralelas ao fundo da piscina). Verificou-se que na maioria dos dados analisados, o erro RMS diminui com o aumento do número de pontos de calibração, até um certo número de pontos. O desvio padrão associado à digitalização destes volumes de calibração foi reduzido quando comparado com os resultados existentes na literatura, como sendo, para as câmaras subaquáticas 1.22mm, 0.33mm e 3.47mm para x, y e z respectivamente. Para as câmaras aéreas os valores foram para x, y e z, respectivamente, 1.57mm, 2.63mm e 2.35mm. Posto isto, concluímos que o volume de calibração estudado parece ter uma boa precisão, quando comparado com a literatura especializada, evidenciando validade para a realização de análises cinemáticas 3D em Natação.

PALAVRAS-CHAVE: Natação, Calibração, 3D, Erro de Reconstrução

ABSTRACT

Swimmers are constantly interacting with the water looking for the production of propellant forces which maintain or accelerate its speed of movement. Therefore it is important to determine accurately and reliably the propulsive movement of the segments and the propulsive force generated. The purpose of this study was to determine the error of reconstruction of a volume calibration for 3D analysis in Swimming, both in immersion and emersion. For that matter, the volume that was used for calibration has been changed during the study. Initially the items were marked only in the edges of the cube for calibration, were then placed in the side of points and finally the cube containing the calibration points to define diagonals (parallel to the bottom of the pool). It was found that the majority of data analyzed, the RMS error decreases with increasing of the number of calibration points to a number of points. The standard deviation associated with the scanning of volumes for calibration was reduced when compared with the results in the literature, as for underwater cameras 1.22mm, 0.33mm and 3.47mm for x, Y, and Z respectively. For air chambers were the values for x, Y, and Z, respectively, 1.57mm, 2.63mm and 2.35mm. Hence, we conclude that the amount of calibration seems to have studied a good accuracy when compared with the literature, showing validity for analysis cinematic 3D in Swimming.

KEY WORDS: Swimming, Calibration, 3D, Reconstruction Error

RESUMÉ

Les nageurs sont en constante interaction avec la recherche d'eau pour la production de propergol forces qui maintiennent ou accélèrent la vitesse de déplacement. Il est donc important de déterminer avec précision et fiabilité le mouvement de propulsion des segments et de la force propulsive. Le but de cette étude était de déterminer l'erreur de reconstruction d'un volume d'étalonnage pour l'analyse 3D de Natation en émergence et d'immersion. Pour un volume qui a été utilisé pour l'étalonnage a été modifié au cours de l'étude. Au départ, les points ont été marqués que dans les arêtes du cube pour l'étalonnage, ont ensuite été placés dans le côté de points et, enfin, le cube qui contient les points d'étalonnage à définir diagonales (parallèle au fond de la piscine). Il a été constaté que la majorité des données analysées, le RMS erreur diminue avec l'augmentation du nombre de points d'étalonnage à un certain nombre de points. L'écart-type associé à la numérisation des volumes à l'étalonnage a été réduit en comparaison avec les résultats dans la littérature, que pour les caméras sous-marines 1.22mm, 3.47mm et 0,33 pour X, Y et Z, respectivement. Pour les chambres à air sont les valeurs de x, Y et Z, respectivement, 1.57mm, 2.63mm et 2.35mm. Par conséquent, nous concluons que le montant de l'étalonnage semble avoir étudié une bonne précision par rapport à la littérature, montrant la validité de l'analyse cinématique 3D à la natation.

MOTS-CLÉS: natation, etalonnage, 3D, Erreur de reconstruction

LISTA DE ABREVIATURAS

2D: Bidimensional (ais)

3D: Tridimensional (ais)

DLT: Direct Linear Transformation

Dp: Desvio Padrão

E_x: Eixo do x

E_y: Eixo do y

E_z: Eixo do z

m³: metros cúbicos

NPD: Natação Pura Desportiva

RMS: Root Mean Square

1. INTRODUÇÃO

A Natação Pura Desportiva (NPD) é uma actividade individual, contínua, cíclica, mista e fechada, que depende de factores genéticos, contextuais, bioenergéticos, biomecânicos e psicológicos (Fernandes et al., 2009). A NPD distingue-se de outras actividades desportivas pela natureza do meio onde se desenrola (o meio aquático), impondo adaptações espaço-temporais e energéticas particulares (Vilas-Boas, 1998). Desta forma, os nadadores estão permanentemente a interagir com o meio aquático procurando a produção de forças propulsivas, que mantêm ou aceleraram a sua velocidade de deslocamento (Kwon & Casebolt, 2006). Assim, torna-se importante determinar com precisão e fiabilidade o movimento dos segmentos propulsivos e a respectiva força propulsiva gerada. Para tal, é necessário avaliar a precisão e fiabilidade das técnicas utilizadas.

Depois de um período em que as melhorias do rendimento desportivo se deveram principalmente ao aumento do volume de treino, a procura de técnicas de recuperação e a melhoria na eficiência do treino passaram a ser as estratégias utilizadas para a melhoria da prestação desportiva (Vilas-Boas, 1989). A eficiência do processo de treino parece ser fortemente determinada pela possibilidade de se obterem dados objectivos sobre as necessidades particulares e capacidades de cada nadador. Neste sentido, a eficiência do processo de treino só poderá ser melhorada se formos capazes também de melhorar a metodologia utilizada para a avaliação específica de cada uma das componentes que determinam o rendimento desportivo.

Uma das formas de avaliação específica em NPD, são as análises cinemáticas do movimento desportivo, que se constituem como um tema de interesse que poderá contribuir grandemente para o controlo de treino em NPD. No entanto, os estudos existentes nesta temática não são em grande número, devendo ser dada uma maior ênfase a este tema, principalmente no que toca a análises cinemáticas tridimensionais (3D), uma vez que a NPD se constitui como uma actividade multiplanar, onde as análises a duas dimensões (2D) originam um maior número de erros (Psycharakis et al., 2005).

Para a realização de análises cinemáticas, quer 2D, quer 3D, são necessários calibradores de forma a padronizar as imagens capturadas. Esses calibradores, quando utilizados para análises cinemáticas 3D, designam-se por volume de calibração. O volume de calibração é, então, uma estrutura rígida composta por marcas colocadas a uma distância conhecida entre elas, que tem como objectivo permitir a calibração das imagens capturadas. Assim, através das marcas colocadas no volume de calibração e após a reconstrução 3D, é possível saber-se a distância observada entre duas marcas distintas após a captura de imagens.

Apesar de existirem alguns estudos relativos ao cálculo do erro associado a determinado volume de calibração em algumas modalidades desportivas (e.g. golf, futebol e NPD), a literatura da especialidade continua a ser escassa. De realçar os estudos de Psycharakis et al. (2005) e Gourgoulis et al. (2008) que se constituem como elementos chave nesta temática, uma vez que ambos foram realizados tendo como objectivo a análise cinemática 3D em NPD. No entanto, ambos os estudos se centraram separadamente no meio subaquático e no meio aéreo, sendo que nenhum analisou a junção dos dois meios: ar e água.

Para o presente estudo centramo-nos sobre a análise cinemática 3D em NPD, examinando o erro de reconstrução de um volume de calibração em imersão e em emersão. Adicionalmente, procuramos perceber a variação do erro *Root Mean Square* (diferença entre os valores preditos, por um modelo ou estimador, e os valores realmente observados) com a variação do número de pontos de calibração e com a localização dos pontos em diversos planos, assim como comparar o erro obtido em imersão com o erro obtido em emersão.

A pertinência deste trabalho justifica-se pelo facto de permitir que, em trabalhos futuros realizados com o volume de calibração utilizado, possa estar descrito o erro que se lhe encontra associado. Note-se que é consensual na literatura que o maior erro obtido é encontrado em condições dinâmicas e subaquáticas, aumentando de um volume de calibração pequeno para um maior (Lauder et al., 1998; Gourgoulis et al., 2008).

Este trabalho é constituído por uma revisão exaustiva da literatura, a qual será submetida à Revista Portuguesa de Ciências do Desporto. Seguidamente são elaborados os objectivos e as hipóteses relativas a estes. Posteriormente seguem-se três artigos, submetidos e aceites respectivamente ao Congresso Nacional de Biomecânica, Congresso Brasileiro de Biomecânica e ao 1st International Symposium of Sports Performance (Vila Real), e ainda um artigo, que se encontra em fase de melhoramento, para posteriormente ser submetido ao Journal of Applied Biomechanics. Finalmente, segue-se uma discussão geral englobando todos os dados obtidos e analisados, bem como as conclusões do trabalho e as respectivas referências bibliográficas.

2. DOCUMENTO I:

Artigo de Revisão

**Análise Cinemática Tridimensional
do Erro de Reconstrução de um
Volume de Calibração em Natação**

Brandão, S.; Figueiredo, P.; Fernandes, R.; Machado, L.;

Vilas-Boas, J. P.

“Calibração Tridimensional em Natação”

Faculdade de Desporto, Universidade do Porto

Resumo

Natação, Calibração, 3D

Quando se fala em movimentos desportivos, torna-se quase obrigatório fazer referência a estudos biomecânicos desses mesmos movimentos, com o intuito de tentar perceber de que forma estes se desenrolam tendo em vista atingir o movimento ideal, culminando com o alto rendimento desportivo. Desta forma, tradicionalmente era dada uma maior predominância às análises cinemáticas bidimensionais, no entanto, e com o evoluir da ciência, estas têm sido substituídas por análises cinemáticas tridimensionais. Para que estas possam ser realizadas são necessárias pelo menos duas câmaras que fornecerão imagem de dois planos distintos e perpendiculares, sendo as coordenadas da imagem bidimensional obtidas e transformadas em coordenadas espaciais através do algoritmo *Direct Linear Transformation*. As coordenadas tridimensionais de um determinado ponto do objecto com base nos dados de calibração da câmara, designa-se por reconstrução, a qual resulta no erro *Root Mean Square*, sendo que a distribuição dos pontos de controlo deve ser realizada uniformemente por todo o espaço de calibração, independentemente dos pontos utilizados para a calibração.

Abstract

Swimming, Calibration, 3D

When we talk about sport movements, it is almost obligatory to make reference to biomechanical studies of these movements in order to try to understand how they are developed in order to achieve the ideal motion, culminating with the high performance sport. Thus, it was traditionally given greater prevalence of two-dimensional kinematic analysis, however, and with the progress of science, they have been replaced by three-dimensional kinematic analysis. So they can be carried out at least two cameras placed on two separated planes and perpendicular, and the coordinates of the image obtained and processed into two-dimensional spatial coordinates using the Direct Linear Transformation algorithm. The three-dimensional coordinates of a point of the object based on calibration, is called reconstruction, which results in Root Mean Square error, and the distribution of the control points should be done uniformly throughout the area of calibration, regardless of points used for calibration.

1. Introdução

As técnicas para recolha, processamento e análise de dados são componentes essenciais para os estudos biomecânicos dos movimentos desportivos. Segundo Bartlett⁽⁴⁾ é importante conhecer as suas limitações, sobretudo no que se refere à precisão e fiabilidade dos dados obtidos. No caso particular da Natação Pura Desportiva (NPD), verifica-se que tradicionalmente a maioria das análises cinemáticas foi bidimensional (2D) tendo originado um maior número de erros. Este facto é devido à NPD ser uma actividade multiplanar⁽²⁰⁾, havendo a necessidade de captar a actividade tal e qual como ela é nos diferentes eixos. Assim, tornou-se importante promover um desenvolvimento nesta área científica visando cada vez mais a utilização de análises cinemáticas tridimensionais (3D). Para a realização de estudos de análises cinemáticas 3D, é necessária uma abordagem a questões como a utilização do algoritmo *Direct Linear Transformation* (DLT) e o erro de reconstrução (tentando perceber qual o erro de reconstrução associado à introdução da câmara subaquática na água e à refacção, bem como o próprio erro associado ao volume de calibração utilizado, que é muitas vezes desprezado). No entanto, o erro RMS associado ao volume de calibração utilizado é raras vezes mencionado, uma vez que poucos são os valores de erro conhecidos. Desta forma, torna-se importante estudar esta questão, pois este erro associado levará a que a investigação, aquando da utilização de determinado volume de calibração, evolua. O erro RMS pode então ser definido como a diferença entre os valores preditos por um modelo ou estimador e os valores realmente observados, tornando-se uma boa medida de precisão⁽¹³⁾.

O objectivo do presente estudo consiste na realização de uma revisão exhaustiva da literatura da especialidade sobre as técnicas e metodologias mais utilizadas para a realização de análises cinemáticas em NPD. Adicionalmente, através das suas vantagens e desvantagens, procuraremos estabelecer uma nova metodologia que melhor se aplique à nossa realidade. Efectuaremos uma revisão da literatura entre 1960 e 2008 fundamentada com base num total de 22 artigos, recolhidos entre Outubro de 2008 e Fevereiro de 2009, nas bases de dados "PUBMED", "Scopus", "EBSCO" e do Gabinete de Natação da

Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, utilizando, para tal, as palavras-chave “natação/swimming”, “calibração/calibration”, “2D” e “3D”, “erro de reconstrução/reconstruction error”, “*Root Mean Square*” e “*Direct Linear Transformation*”. O presente trabalho divide-se em quatro partes distintas intituladas: Técnicas para a Gravação e Análise dos Movimentos Desportivos, Natação Pura Desportiva como Actividade Multiplanar, Aquisição de Imagens Bidimensionais e Tridimensionais e Calibração do Objecto e Erro de Reconstrução, possuindo algumas destas sub-tópicos distintos.

2. Técnicas para a Gravação e Análise dos Movimentos Desportivos

Muitas das análises biomecânicas 3D do movimento humano começam pela captura de dados através de um dispositivo de registo de imagem. Com um mínimo de duas perspectivas, podem ser determinadas as coordenadas espaciais dos pontos considerados relevantes no objecto ou das marcas corporais ⁽²⁾.

Bartlett ⁽⁴⁾ referiu que as principais técnicas de recolha de dados utilizadas nos estudos dos movimentos desportivos eram o filme e o vídeo, podendo estes ser realizados não só em laboratório (situação experimental) mas também em situação de treino/competição (situação real), devendo qualquer uma das técnicas referidas minimizar a interferência com o executante. Na actualidade, o registo de vídeo é a técnica mais utilizada para o registo de imagem, devido às suas inúmeras vantagens quando comparadas com o filme, nomeadamente a redução do esbatimento da imagem, a alta qualidade da imagem em *slow-motion*, exibição de dois campos sequenciais que compõe um fotograma (duplicação da frequência de amostragem), sendo imediato, acessível e controlável ⁽⁴⁾.

No entanto, Kennedy e Smith ⁽¹⁰⁾ verificaram que as diferenças entre o filme e o vídeo são pequenas quando a reconstrução é 3D, sendo a média de erros 4,8 mm e 5,8 mm, respectivamente. Os mesmos autores referem que quanto maior for a área abrangida pelo pixel, mais degradada se torna a qualidade da imagem, sendo susceptível de produzir um maior número de erros na análise de vídeo. Angulo e Dapena ⁽³⁾, por seu lado, constataram que

dentro do volume de calibração, tanto as análises de filme como de vídeo são suficientemente precisas para a maioria das aplicações práticas.

3. Natação Pura Desportiva como Actividade Multiplanar

Em desportos como a NPD, os nadadores estão permanentemente a interagir com o meio aquático, procurando a produção forças propulsivas, que mantêm ou aceleraram a sua velocidade de deslocamento ⁽¹³⁾. Assim, os gestos técnicos dos nadadores desempenham um papel fundamental nesse processo, tornando-se importante determinar com precisão e fiabilidade o movimento dos segmentos propulsivos e a respectiva força propulsiva gerada. Para tal, é necessário avaliar a precisão e fiabilidade das técnicas utilizadas.

Alguns dos estudos realizados em NPD estão limitados a análises técnicas 2D, estando-lhes, por isso, associado um maior número de erros, uma vez que a NPD é uma actividade multiplanar ⁽²⁰⁾. Para que a análise técnica em NPD seja mais fiável e precisa, requerem-se, métodos de análise cinemática 3D. No entanto, estes métodos são mais complexos do que as anteriormente referidas devido, principalmente, à necessidade de digitalização dos pontos anatómicos do sujeito e à refacção diferenciada nos meios aéreo e aquático ⁽²⁰⁾. A análise 3D requer um maior tempo de digitalização, tendo associados maiores problemas metodológicos, tais como a transformação das coordenadas da imagem em 3D.

Adicionalmente, a análise do movimento subaquático impõe vários obstáculos ao observador, a saber ⁽¹²⁾: (i) deformação da imagem causada pela refacção; (ii) uso de gravação em ambientes especiais (e.g. caixas impermeáveis ou visualização subaquática através de janelas); (iii) dificuldade em colocar o volume de calibração em imersão; (iv) insuficiente iluminação e (v) presença de bolhas de ar. Assim, para a quantificação da precisão do movimento subaquático do nadador, um dos maiores obstáculos, é a deformação da imagem causada pela refacção, a qual ocorre na interface do plano ar/água devido à diferença de densidade (dependendo dos meios envolvidos e do ângulo de incidência do raio de luz) ⁽¹²⁾.

4. Aquisição de Imagens Bidimensionais e Tridimensionais

Quando se trata do estudo e análise do movimento desportivo, torna-se essencial perceber quais as vantagens e desvantagens das análises 2D e 3D ⁽⁴⁾. A gravação e análise 2D é simples e pouco dispendiosa, requerendo um plano de movimento pré-seleccionado onde os movimentos sejam predominantes. Requer menos tempo de digitalização e tem associados menos problemas metodológicos (e.g. transformação das coordenadas da imagem em 3D). Pelo seu lado, a recolha e posterior análise 3D de imagens, possui uma maior complexidade, pois evidência o movimento corporal real, exigindo mais equipamento, sendo por isso mais dispendiosa. No entanto, a análise 3D torna-se mais apropriada para minimizar os erros de perspectiva ^(6,20).

Complementarmente é necessário conhecer outras possíveis fontes de erro que afectam os estudos, como a precisão e a fiabilidade do equipamento e os métodos de análise utilizados. Note-se que os investigadores raramente reportam os erros encontrados nos procedimentos metodológicos utilizados. Outras das possíveis fontes de erro nas análises cinemáticas 2D em NPD são a colocação da câmara relativamente ao movimento do nadador e as diferenças que ocorrem nos ângulos de visão a estas associadas ⁽¹¹⁾, bem como os procedimentos de calibração seguidos (igualmente não referidos na maioria dos estudos) ⁽²⁰⁾. Uma vez que a colocação da câmara que regista a imagem bidimensional pode não captar o melhor ângulo do nadador e os procedimentos utilizados poderão nem sempre ser os mais adequados, poder-se-á originar um maior número de erros.

Para minimizar os erros de gravação de imagens, de forma a melhorar a precisão dos dados recolhidos tem sido considerado necessário assumir os seguintes passos ⁽⁵⁾: (i) a câmara deve ser montada num tripé estacionário e rígido, apontado para o centro do plano do movimento, devendo estar situada de forma a reduzir os erros de perspectiva captando o movimento pretendido; (ii) devem ser utilizadas marcas anatómicas com cor contrastante; (iii) o registo do movimento deve ser não intrusivo, ou seja, o processo de gravação não deverá interferir com o movimento realizado pelo nadador. No caso específico das análises cinemáticas a 3D, (iv) o plano do movimento deve ser

perpendicular ao eixo óptico da câmara e (v) deverão ser incluídas uma escala de comprimento e uma referência vertical no campo de visão da câmara.

Para a reconstrução das coordenadas dos pontos no espaço do movimento 3D são necessárias no mínimo duas câmaras, sendo necessária uma sincronização entre elas. No entanto, esta sincronização nem sempre é possível, nomeadamente durante a gravação dos movimentos desportivos situação de competição ⁽⁴⁾. Hamill e Selbie ⁽⁹⁾ referem que qualquer sistema de muticâmaras permite a análise do movimento 3D, afirmando ainda que a orientação e o arranjo das câmaras numa configuração 3D não são tão críticos como numa configuração 2D. Os referidos autores salientam que cada câmara apenas fornece um conjunto de dados a 2D, sendo que cada ponto digitalizado tem que ser visível, pelo menos por duas câmaras, i.e., através do conjunto dos diferentes pares de coordenadas a 2D, são geradas as coordenadas espaciais.

4.1. Direct Linear Transformation

Na maioria dos estudos revistos, o método DLT ^(1, 18) é o utilizado para calcular as coordenadas 3D, estabelecendo uma relação linear entre as coordenadas 2D para cada ponto e a representação desses mesmos pontos no espaço 3D ⁽¹³⁾. Ou seja, quando dois ou mais conjuntos de imagens 2D diferentes estão digitalizados, obtemos através do DLT as coordenadas 3D dos pontos relevantes ⁽⁷⁾. Assim, os parâmetros DLT reflectem a relação entre o espaço 3D e a imagem das câmaras 2D, contendo informação implícita relativamente à orientação e localização das mesmas ⁽⁹⁾. Os marcadores colocados sobre o volume de calibração (estrutura rígida composta por marcas colocadas a uma distância conhecida, que tem como objectivo permitir a calibração das imagens capturadas) podem ser capturados pelas mesmas câmaras que registam o movimento executado dentro do espaço de calibração, tornando o processo de captação de imagens mais rápido e eficaz. Os parâmetros DLT incorporam os parâmetros ópticos da câmara e os factores de distorção linear da lente ⁽⁴⁾, referindo Bartlett ⁽⁴⁾ que podem ser incluídos até onze parâmetros DLT adicionais por forma a melhorar a reconstrução 3D.

Adicionalmente, com o processo de calibração finalizado torna-se imperativo que a posição das câmaras e a sua orientação espacial não seja alterada durante a experiência ⁽¹⁶⁾, devendo ser tomados cuidados para que não haja deslocamentos acidentais ⁽²¹⁾. Qualquer recolocação ou reorientação das câmaras requer um novo processo de calibração.

Na calibração efectuada, um conjunto de “n” pontos, designados por pontos de calibração, define um objecto espacial, ou um sistema de coordenadas em laboratório, sendo que os pontos de calibração têm uma localização conhecida, em unidades reais no espaço 3D ⁽⁹⁾. Allard, Bianchi e Aissaoui ⁽²⁾ referem que, uma vez identificado o sistema de coordenadas, são usadas equações para determinar as coordenadas dos pontos do objecto a partir das coordenadas da imagem. Essas equações relacionam os parâmetros externos (e.g. a orientação espacial da câmara) e os parâmetros internos (e.g. as características das lentes ou o tipo de câmara), relativamente ao ponto ou à posição das marcas, através do DLT. Assim, o algoritmo DLT tridimensional completo contém 22 parâmetros, sendo expresso pelas seguintes equações:

$$u + \Delta u = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

$$v + \Delta v = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2)$$

Onde, “u” e “v” são as coordenadas da imagem, “Δv” e “Δu” são as coordenadas corrigidas da imagem pelas lentes de distorção, “X”, “Y” e “Z” são as coordenadas dos pontos do objecto, “L₁” a “L₁₁” são as constantes consideradas como sendo os parâmetros DLT que definem a posição e orientação das câmaras, assim como os parâmetros internos da câmara e os factores de distorção linear das lentes.

4.2. Técnicas de Reconstrução Tridimensional

As técnicas de reconstrução tridimensional para câmaras fixas podem ser utilizadas com mais de duas vistas/perspectivas de câmaras, sendo a técnica standard baseada no uso de duas imagens. As câmaras devem seguir um dos princípios orientadores da análise fotogramétrica que é a condição de colinearidade⁽²⁾. Esta condição, requer que um ponto do objecto, ou uma marca, e a sua imagem correspondente, formem uma linha recta que passa através do ponto focal. Se esta condição for satisfeita, então as relações geométricas e trigonométricas podem ser aplicadas para determinar a posição espacial do objecto ou marca.

Igualmente importante é a condição de coplanaridade, que exige que um ponto do objecto (correspondendo ao seu par de imagens), bem como os pontos do foco das câmaras, estejam num mesmo plano comum. Considerando que a condição de colinearidade se refere a um ponto do objecto relativamente à sua imagem, a condição de coplanaridade refere-se à imagem (no mínimo duas) relativamente aos pontos do objecto. Com estas duas condições preenchidas, as coordenadas espaciais podem ser analiticamente reconstruídas a partir das representações da imagem ⁽²⁾.

Allard, Blanchi e Aissaoui⁽²⁾ afirmam que para determinar experimentalmente pontos desconhecidos é utilizado um dispositivo de calibração, o qual é constituído por medidas precisas entre vários pontos do objecto. Essas medidas são usadas para determinar os valores desconhecidos em duas fases: (i) o dispositivo de calibração é captado e a imagem e as coordenadas reais dos pontos do objecto são usadas para determinar os valores constantes desconhecidos, sendo esta a forma de calibração da câmara e (ii) o dispositivo de calibração é substituído pelos pontos desconhecidos do objecto ou as marcas anatómicas a serem estudados, sendo as suas coordenadas determinadas através da imagem com as coordenadas do objecto e o cálculo analítico prévio das constantes (coordenadas dos pontos de calibração).

Após a calibração das câmaras ter sido realizada, através das imagens captadas é necessário efectuar a reconstrução 3D tentando o menor erro

possível. Hallert ⁽⁸⁾ refere que cada medição tem associado um erro, erro esse que faz com que esta se torne mais ou menos precisa ⁽⁸⁾.

A qualidade da reconstrução das coordenadas é influenciada por muitos factores, sendo os principais: o dispositivo utilizado para a captação de imagem, a identificação das marcas e a instalação e calibração das câmaras ⁽²⁾.

Relativamente à definição terminológica de erro, torna-se necessário distinguir exactidão e precisão, referindo-se a exactidão a diferenças sistemáticas entre os valores de referência e os valores medidos; enquanto o segundo termo se relaciona com a repetibilidade com que cada valor medido é obtido. Allard, Blanchi e Aissaoui ⁽²⁾ referem que apenas o erro *Root Mean Square* (RMS) pode ser expresso através de percentagem da média da distância da câmara ao objecto. Este erro RMS pode ser definido como sendo, a diferença entre os valores preditos por um modelo ou estimador e os valores realmente observados a partir desse modelo ou estimador, podendo ser expresso através da seguinte equação:

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}{N}} \quad (3)$$

Onde, “N” corresponde ao número de observações; “ x_r ” ao valor de real e “ x_i ” ao valor observado, devendo esta fórmula apenas ser aplicada nas coordenadas dos pontos que não foram usados para determinar as constantes analíticas. Para cada “ x_i ” existe um “ x_{ni} ”, uma vez que para cada ponto de controlo é utilizada a equação em causa.

Os autores ⁽²⁾ acima referidos afirmam que o erro médio é inadequado para expressar a exactidão de um instrumento, porque os erros negativos são anulados pelos positivos. Desta forma, qualquer marcador de referência utilizado no cálculo de constantes analíticas tem geralmente associado um menor erro, uma vez que os parâmetros analíticos já foram optimizados para esses pontos. Consequentemente, só as coordenadas dos restantes valores de referência devem ser usadas para o cálculo do erro ⁽²⁾. Em suma, Allard,

Blanchi e Aissaoui ⁽²⁾ referem que o erro RMS deve ser calculado a partir das coordenadas das marcas/pontos que não foram usadas no processo de calibração.

5. Calibração do Objecto e Erro de Reconstrução

São muitas as fontes de erro existentes, mas provavelmente a mais importante e, curiosamente, a mais negligenciada está relacionada com a qualidade e a atenção prestada à medição do objecto de calibração. Allard, Blanchi e Assaoui ⁽²⁾ referem-se à impossibilidade de calibrar um dispositivo ou um instrumento para uma precisão maior do que a do padrão com a qual é comparado. A origem do erro pode ser determinada em diferentes etapas da obtenção das coordenadas reconstruídas, nomeadamente: (i) o dispositivo de medição, (ii) o objecto de calibração, (iii) a identificação de marcas de referência, (iv) a calibração da câmara, (v) a identificação das marcas corporais e (vi) as coordenadas 3D das marcas corporais.

Para além da atenção dada à medição do objecto de calibração, é necessário atender a um número de outros factores influenciadores da precisão global, tais como ^(12; 14): (i) o número e a escolha das marcas/pontos de referência utilizados na técnica de reconstrução, (ii) a forma do objecto de calibração, (iii) a posição relativa da câmara, (iv) o algoritmo de reconstrução e (v) as dimensões da imagem calibrada.

Psycharakis, Sanders e Mill ⁽²⁰⁾ utilizaram 92 esferas de poliestireno (46 acima e 46 abaixo da superfície da água), cada uma com 3 cm de diâmetro, referindo que o seu centro era facilmente identificável de qualquer uma das perspectivas. As câmaras aéreas encontravam-se numa posição a 8 m do centro do volume de calibração, enquanto as câmaras subaquáticas estavam colocadas a 12 m do centro do volume de calibração, estando a uma profundidade que variava entre 0.5m e 1.5m da superfície da água (de forma a evitar erros devido aos eixos ópticos das câmaras estarem no mesmo plano que os planos de referência do volume de calibração). Os ângulos médios propostos pelos referidos autores para as câmaras aéreas são de 100°, podendo variar entre os 75° e os 110° para as câmaras subaquáticas.

Kwon e Casebolt⁽¹³⁾ referem a existência de discrepâncias relativamente às posições dos pontos de controlo, sendo que os erros não aleatórios devem ser distribuídos por todos os pontos de controlo e ao longo de todo o volume de calibração. Se os pontos de controlo são distribuídos mais densamente no centro do volume de calibração do que na periferia, o erro RMS diminui, aumentando o erro máximo⁽¹²⁾. Assim, quando os pontos de controlo estão localizados mais na periferia reduz-se o erro máximo de reconstrução e, eventualmente, o erro por extrapolação torna-se uma preocupação primordial⁽¹³⁾. Estes erros por extrapolação são esperados quando a reconstrução é feita fora do espaço de controlo⁽¹⁴⁾, ou seja, fora do volume de calibração, ou porque o volume de calibração é demasiado pequeno ou porque está posicionado inadequadamente⁽¹³⁾. Wood e Marshall⁽²²⁾ e Kwon e Lindley⁽¹⁴⁾ referem que para diminuir a ocorrência de erros por extrapolação, ou para reduzir a sua magnitude quando esta é inevitável, o volume de calibração deve ser grande o suficiente de modo a circundar todo o espaço ocupado pelo corpo/objecto. No entanto, o volume de calibração não deve ser demasiado grande, pois à medida que este aumenta, os erros de reconstrução subaquática também aumentam devido ao aumento da não linearidade da imagem deformada⁽¹²⁾.

Quando se verifica a utilização de múltiplas câmaras, torna-se mais complicada a monitorização da propagação do erro. No entanto, uma regra geral refere que quanto mais coordenadas erradas de uma imagem forem usadas na reconstrução, maiores erros de reconstrução ocorrerão⁽¹³⁾. Desta forma, também é de esperar que ocorram mais erros de reconstrução nos estudos que recorrem a imagens subaquáticas do que nos estudos fora de água. Psycharakis, Sanders e Mill⁽²⁰⁾ referem que as janelas subaquáticas apenas possuem um pequeno efeito na precisão das medições quando são comparadas as diferenças médias e os erros RMS (Tabela 1).

Tabela 1. Diferenças médias e erros RMS sem e com utilização de janelas subaquáticas para a captação de imagens.

Adaptado de Psycharakis, Sanders e Mill ⁽²⁰⁾

Sem Janela Subaquática						Com Janela Subaquática					
Diferenças Médias (mm)			Erro RMS (mm)			Diferenças Médias (mm)			Erro RMS (mm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
3.6	2.9	5.3	4.1	3.8	6.1	4.2	3.3	5.1	4.6	3.7	6.0

Kwon, Moon e Lee⁽¹⁵⁾ realizaram um estudo com um volume de calibração de 3 m x 1 m x 1 m, encontrando um erro RMS de 6.4 mm, 6.6 mm e 4.2 mm para os eixos x, y e z respectivamente, sendo o erro máximo de 14.6 mm, 17.6 mm e 7.2 mm. Por outro lado, na reconstrução 2D os erros observados foram de 3.5 mm e 3.4 mm, para os eixos x e y respectivamente, e o erro máximo de 7.5 mm e 8.4 mm. Este estudo foi realizado, estando a câmara colocada por detrás de uma janela subaquática a 6m, sendo este um factor que poderá afectar o erro de reconstrução devido à elevada espessura do vidro ⁽¹³⁾.

Assim, a melhor forma de garantir a validade do erro RMS consiste em distribuir uniformemente os pontos de controlo por todo o espaço, independentemente dos pontos utilizados na calibração⁽¹³⁾, bem como prevenir os efeitos de refração.

Leroux, Allard e Murphy⁽¹⁸⁾ mediram marcadores de posição a 0,02mm num volume de calibração com cerca de 0,027m³ e com uma distância entre a câmara e o objecto de 0,6 m, inicialmente com 8 e depois 21 marcas de referência. Aferiram que a magnitude do erro absoluto foi de 0,41 mm e 0,34 mm. No entanto, deve ser tomada precaução quando se aumenta o número de pontos com o objectivo de reduzir o erro de reconstrução ⁽²⁾. Psycharakis, Sanders e Mill ⁽²⁰⁾ verificaram ainda que a exactidão aumenta com o aumento do número de pontos de calibração de 10 para 20 no volume de calibração utilizado. No entanto, um aumento para 25 e 30 pontos não melhora a precisão das medições.

Quando se fala em calibração, a distribuição das marcas/pontos de referência pelo volume de calibração constitui-se como importante. Leroux, Allard e Murphy ⁽¹⁸⁾ compararam os erros RMS após calibrar com marcadores adicionais e de uma forma tendenciosa (definindo locais específicos para cada ponto), as partes frontal, lateral e inferior do cubo de referência. Inicialmente tinham 8 marcas em cada uma das partes (frontal, lateral e inferior), e de seguida acrescentaram mais 7 marcas. Os resultados obtidos pelos referidos autores estão presentes na Tabela 2 e indicam que uma distribuição tendenciosa de marcadores de referência praticamente duplica o erro, principalmente na direcção perpendicular do plano da imagem (direcção do eixo z).

Tabela 2: Erro Absoluto e respectivo desvio padrão para uma distribuição não uniforme dos pontos de calibração.

Adaptado de Marzan e Karara ⁽¹⁸⁾

Posição do Ponto	Ex (mm)	Ey (mm)	Ez (mm)	Magnitude $\sqrt{Ex^2 + Ey^2 + Ez^2}$
Inferior	0.23 (0.19)	0.18 (0.18)	0.46 (0,36)	0.54 (0.45)
Lateral	0.22 (0.17)	0.23 (0.22)	0.48 (0.36)	0.58 (0.45)
Frontal	0.23 (0.19)	0.23 (0.22)	0.47 (0.40)	0.57 (0.49)

5.1. Digitalização das Imagens

O processo de extracção das coordenadas da imagem do filme ou vídeo através da digitalização manual tem sido substituído pela extracção electrónica da informação, uma vez que o primeiro se constitui como maçador e moroso ⁽¹⁶⁾. Este processo requer marcas ligadas ao sujeito/objecto que se desloca e, em seguida, a identificação das marcas na visualização do volume pelas câmaras. As marcas podem ser divididas em dois grupos ^(16, 19): (i) marcas

activas, nomeadamente díodos emissores de luz (LED's), que normalmente emitem luz infravermelha e (ii) marcas passivas que reflectem a luz ambiente ou a luz projectada ou que simplesmente assinalam apenas em cor contrastante o ponto de referência.

Ladin⁽¹⁶⁾ refere que a maioria dos sistemas de marcas activas possuem um movimento ritmado do LED de forma sequencial, o que implica que em qualquer instante de tempo só poderá haver um LED ligado. As câmaras apenas identificam a localização espacial momentânea dessa marca. Este autor ⁽¹⁶⁾ acrescenta que os sistemas de marcas passivas que reflectem a luz projectada aparecem no ecrã de um monitor de vídeo como manchas brilhantes, sendo a localização espacial de cada marca determinada através da identificação (automática ou pelo investigador) das referidas manchas que pertencem ao mesmo marcador físico.

6. Conclusões

Efectuada esta revisão da literatura, podemos então perceber que inicialmente, a captação e recolha de imagens em biomecânica do desporto era realizada através de fotografia, tendo evoluído posteriormente para o filme. Assim, e após muitos avanços relativamente ao registo de vídeo, a filmagem tornou-se a técnica primordialmente utilizada. Adicionalmente, por tradição, as análises cinemáticas realizadas no campo desportivo, mais precisamente no âmbito da NPD, estavam limitadas a 2D. No entanto, com o avanço da ciência, os investigadores começaram a recorrer às análises cinemáticas 3D, uma vez que sendo esta uma actividade que decorre em múltiplos planos, as análises cinemáticas 2D originam uma maior quantidade de erros.

Para análise do movimento subaquático do nadador é imprescindível ter em atenção quais os obstáculos impostos ao observador, quais as fontes de erro que afectam os estudos e quais os passos para os minimizar. Desta forma, para a realização de análises cinemáticas 3D em NPD são necessárias, pelo menos, duas câmaras, fornecendo estas dois planos distintos, devendo ser respeitadas as condições de colinearidade e coplanaridade.

É unânime que a posição das câmaras e a sua orientação espacial não deve ser alterada durante a experiência, devendo ser tomados cuidados para que não haja deslocamentos acidentais. Qualquer recolocação ou reorientação das câmaras requer uma nova calibração, uma vez que se a imagem do volume de calibração é captada num determinado momento, a imagem do movimento desportivo deve ser captada tendo em conta essa mesma imagem do volume de calibração. Esta condição deve ser rigorosamente cumprida, de forma a permitir que a reconstrução 3D seja o mais fiável e válida possível.

Futuramente, importa que os investigadores se continuem a debruçar sobre as análises cinemáticas 3D desenvolvendo e criando adaptações aos volumes de calibração utilizados de forma a reduzirem os erros RMS obtidos.

3. OBJECTIVOS

Objectivo Geral

O objectivo geral do nosso trabalho consistiu em verificar o erro de reconstrução de um volume de calibração para análise 3D em Natação, em imersão e em emersão.

Objectivos Específicos

Partindo do nosso objectivo geral, foram definidos 3 objectivos específicos que constituíram a base a partir da qual se definiram os diferentes artigos a realizar:

1. Verificar a variação do erro com o número de pontos de calibração (8, 12, 16, 20, 24, 28 e 30)
2. Verificar a variação do erro da reconstrução tridimensional com a localização dos pontos em diversos planos
3. Comparar o erro da reconstrução tridimensional em imersão, com o erro obtido em emersão

4. HIPÓTESES

Em conformidade com os objectivos específicos definidos no ponto anterior foram formuladas 3 hipóteses:

H1: O erro aumenta quanto menor for o número de pontos de calibração

H2: O erro é maior quanto mais exteriorizados estiverem os pontos de calibração do centro do volume

H3: O erro é maior quando associado à calibração do volume em imersão

5. DOCUMENTO II.

ANÁLISE CINEMÁTICA DO ERRO DE RECONSTRUÇÃO DE UM VOLUME DE CALIBRAÇÃO PARA ANÁLISE 3D EM NATAÇÃO

Figueiredo, P., Brandão, S., Gonçalves, P., Vilas-Boas, J. P. e Fernandes, R.

Faculdade de Desporto da Universidade do Porto; spafg@vodafone.pt

PALAVRAS CHAVE: 3D, Erros de reconstrução, Volume de Calibração, Natação

RESUMO: *A Natação Pura Desportiva é uma actividade multi-planar, pelo que a sua análise cinemática requer uma abordagem 3D. O propósito deste estudo foi o de avaliar a exactidão da reconstrução 3D dentro e fora de água, bem como a fiabilidade de um volume de calibração utilizado para essa análise. A aquisição de imagens consistiu na utilização de seis câmaras, duas aéreas e quatro subaquáticas, tendo sido digitalizados manualmente 16 pontos de calibração e 8 pontos de controlo. O erro associado à reconstrução foi calculado através do Root Mean Square, enquanto a fiabilidade do volume de calibração foi avaliada pelo desvio padrão. Os resultados obtidos permitem afirmar que o volume de calibração estudado poderá ser utilizado para a análise cinemática 3D em natação pura desportiva.*

1. INTRODUÇÃO

Em natação pura desportiva, os estudos cinemáticos estão muitas vezes limitados a análises 2D, as quais são normalmente obtidas nos planos sagital e transversal. Tendo em consideração que a natação é uma actividade que decorre em múltiplos planos, a sua análise 2D implicará, necessariamente, um volume acrescido de erros. Desta forma, a comunidade técnico-científica ligada a esta modalidade desportiva começa a recorrer com maior frequência à análise cinemática 3D. O presente estudo tem como objectivo avaliar a

exactidão da reconstrução 3D dentro e fora de água, assim como a fiabilidade de um volume de calibração (Fig. 1) utilizado para essa análise.



Fig. 1. Volume de Calibração

2. METODOLOGIA

O protocolo de aquisição de imagens consistiu na utilização de seis câmaras, duas aéreas e quatro subaquáticas (Sony® DCR-HC42E), tendo sido conduzido numa piscina coberta e aquecida de 25x12.5mx2m. Foram digitalizados 16 pontos de calibração e 8 pontos de controlo, havendo em cada *frame* um ponto fixo que se constituía como referência. O volume de calibração utilizado foi um cubo com 3 x 3 x 3 m (27 m³) no eixo transversal (x), no eixo vertical (y) e no eixo lateral (z), respectivamente. Cinquenta *frames* foram digitalizados manualmente recorrendo ao APASystem (Ariel Dynamics, USA), a uma frequência de 50 Hz. A calibração das câmaras foi obtida usando um par de luzes fixas no volume de calibração. A reconstrução 3D foi realizada através do procedimento *Direct Linear Transformation*. O erro associado à reconstrução foi calculado através do *Root Mean Square* (RMS), enquanto a fiabilidade do volume de calibração foi avaliada pelo desvio padrão (Dp).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 é possível observar os resultados do erro RMS e da fiabilidade da digitalização do volume de calibração, fora e dentro de água, nos três eixos do movimento.

Tabela 1. Valores do erro RMS e do Dp do volume de calibração no eixo do x, y e z.

	Fora de água			Dentro de água		
	Eixo x	Eixo y	Eixo z	Eixo x	Eixo y	Eixo z
Erro RMS (mm)	3.4	2.5	5.6	7.5	1.9	3.2
Dp (mm)	0.2	0.2	0.6	0.2	0.1	0.1

Contrariamente ao esperado, quer pelos dados presentes na literatura (cf. [1]), quer pela refração da água e/ou a possível deformação da imagem gravada, observaram-se valores superiores de erro RMS nos eixos y e z fora de água. Este facto parece dever-se a terem sido utilizadas quatro câmaras subaquáticas e apenas duas aéreas. Contudo, no eixo x esse facto não se verificou, possivelmente devido à disposição das câmaras. Adicionalmente, através dos valores reduzidos de Dp, foi observada uma alta fiabilidade do volume de calibração, semelhantes aos apresentados por Psycharakis et al. [2].

4. CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos é possível afirmar que o volume de calibração estudado poderá ser utilizado para a análise cinemática 3D em natação.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal pela bolsa de Doutoramento (SFRH / BD / 38462 / 2007).

6. DOCUMENTO III.

KINEMATIC ANALYSIS OF THE RECONSTRUCTION ERROR OF A CALIBRATION VOLUME FOR 3D ANALYSIS IN SWIMMING

Pedro Figueiredo, Sara Brandão, Pedro Gonçalves, João Paulo Vilas-Boas,

Ricardo Fernandes

University of Porto, Faculty of Sport, CIF12D, Portugal

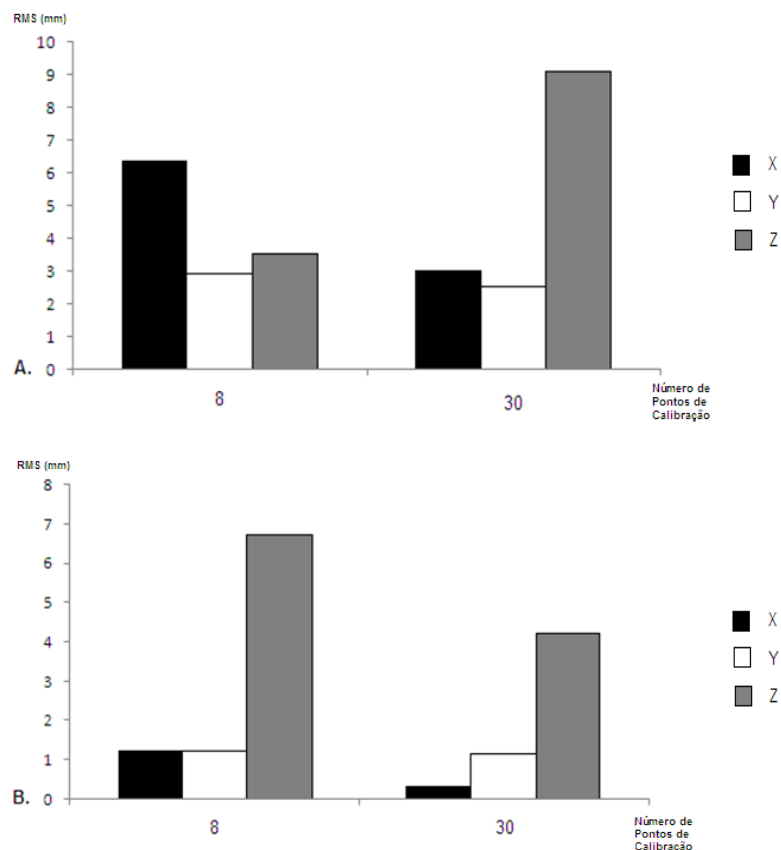
spafg@vodafone.pt

erro de reconstrução, natação, reconstruction error, swimming

Introduction. Most kinematic studies conducted in swimming are limited to a two-dimensional analysis. As swimming is a multiplanar activity, this type of analysis will lead, necessarily, to an increased amount of errors. In this sense, it becomes fundamental to use more frequently the kinematic three-dimensional (3D) analysis ^[1]. The present study aims to evaluate the accuracy of a 3D reconstruction, under and above the water surface, with different numbers of calibration points. **Methods.** Six video cameras were used for images acquisition, being two above surface and four underwater (Sony® DCR-HC42E). The underwater cameras were protected using specific waterproof boxes. The angles of the optical axes of cameras varied between 75° to 110° in the underwater view, and approximately 120° between above water cameras. The study was conducted in an indoor swimming pool with 25 x 12.5 m. Eight (minimum) and 30 (maximum) calibration points were digitised in each frame, plus a fixed point, which constituted a reference point. The volume of calibration used was a cube with 3 x 3 x 3 m (27 m³) in the horizontal (x), vertical (y) and lateral (z) axes, respectively. Ten frames were digitized manually using the APASystem (Ariel Dynamics, USA) at a frequency of 50 Hz. The calibration of the cameras was obtained using a pair of lights (underwater and surface) fixed in the calibration volume. The 3D reconstruction was performed using the Direct

Linear Transformation (DLT) procedure. The error associated with the reconstruction was calculated using the Root Mean Square (RMS). **Results.** In Figure 1 (A panel) it is possible to observe that in the underwater cameras the RMS error is smaller in the x and y axes when passing from 8 to 30 calibration points. However, for z axis, the RMS error increases with the raise of the number of calibration points, possibly due to the positioning of the cameras. In the above water cameras, it appears that in any of the three axes, the RMS error decreases with increasing the number of calibration points, from 8 to 30 (Figure 1, B panel). **Conclusion.** According to the observed results, it seems that the RMS error decreases with increasing the number of calibration points, from 8 to 30. The calibration frame used in this study appears to have good accuracy when comparing to the specialized literature, evidencing that it is a valid apparatus to be used for 3D swimming analysis.

Figure 1. RMS errors for the x, y and z coordinates, for a minimum and maximum number of calibration points in underwater (A panel) and above water (B panel) cameras



7. DOCUMENTO IV.

KINEMATIC ANALYSIS OF THE RECONSTRUCTION ERROR OF A CALIBRATION VOLUME FOR 3D ANALYSIS IN SWIMMING

Brandão S, Figueiredo P, Gonçalves P, Vilas-Boas JP, Fernandes R

Centre of Research, Education, Innovation and Intervention in Sport, Faculty of
Sport, University of Porto, Portugal

INTRODUCTION

In multiplanar activities as swimming, kinematical analysis should be three-dimensional (3D). However, most studies in swimming were limited to two-dimensional (2D) analysis techniques, which imply higher number of errors, once disregards especial characteristics of movements, particularly of the limbs. In 3D analysis the most popular technique used for the transformation of the 2D image coordinates into 3D space coordinates is the direct linear transformation procedure (DLT) [1]. With the DLT technique an appropriate number of points with known 3D coordinates (control points) on a calibration frame are used for the calibration of the recording space. In this procedure, the number and distribution [1] of the control points, as well as the size of calibration volume [2] affect reconstruction accuracy. Psycharakis et al. [3] showed improvement in the calibration accuracy when the number of control points were increased from 10 to 20, using a calibration volume of 6.75m^3 , while Gourgoulis et al. [4] using measurements carried out in two different recording conditions: (i) out of the water and (ii) in the water, found larger reconstruction errors in water compared to above water conditions, whatever the size of the calibration volume. Moreover, Chen et al. [1] and Kwon [5] pointed out that reconstruction accuracy should be assessed using a number of validation points that did not serve as

control points since the DLT parameters are optimised for the reconstruction of the control points.

The purpose of this study was to assess the accuracy of the 3D reconstruction, above and below water of a calibration volume for 3D analysis in swimming.

METHODS

The calibration frame was placed into a 25m x 12.5m x 2m swimming pool and recorded simultaneously by 4 under and 2 above water cameras (Sony® DCR-HC42E). The cameras were at depths varying from 1.0 to 1.5m below the water surface to avoid errors due to the camera axes being in the same planes as the reference planes of the frame. The cameras above water were varying from 3.0 to 3.5m above water surface. The angle between the axes of the two above water camera axes was approximately 120°, while the angles between axes of adjacent below water camera axes varied from approximately 75° to 110°. The following procedure was applied to assess the number of control points required to maximise the accuracy of 3D coordinate reconstruction for the below water calibration: 12 markers in the calibrated space were digitised over 10 fields for each underwater and above water camera viewers. Seven series of digitising were performed for this set of 12 markers, using 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 30 control points respectively. To avoid overestimating accuracy the 12 markers selected for these comparisons were not included in any set of calibration points [6]. The 3D coordinates were obtained using the DLT procedure [7], and the associated error with RMS. The differences between the obtained and the known values were calculated for the x, y, and z coordinates of each point for each of the 10 video fields. To obtain an estimate of reliability, the same operator (in order to avoid any inter-operator errors) repeated the procedure 10 times. The reliability measure was considered to be the standard deviation across all digitisations of the marker.

RESULTS

In Table 1 it is presented the mean difference and the mean RMS errors for the x, y and z coordinates, for different numbers of control points for the underwater cameras. The accuracy increased as the number of control points increased from 8 to 16, and from 20 to 28. A further increase to 30 points did not improve the accuracy of the measurements.

In Table 2 it is possible to observe the mean difference and the mean RMS errors for the x, y and z coordinates, for different numbers of control points in above water cameras, where the accuracy increased as the number of control points increased from 24 to 30.

For the calculations performed following the selection of a set of 12 control points, the average RMS errors for the set of 20 digitised points underwater, was 4.85mm, 2.52mm and 7.43mm for the x, y and z directions, respectively, representing 0.16%, 0.08% and 0.25% of the calibrated space. For the set of 16 digitised points above water, the average RMS errors was 4.11mm, 5.69mm and 3.90mm for the x, y and z directions respectively, representing 0.14%, 0.19% and 0.13% of the calibrated space. These values were lower than the values found for all the sets of different numbers of control points described above, both under and above water. The standard deviation in underwater cameras was 1.22mm, 0.33mm and 3.47mm for the x, y and z directions respectively. In the above water cameras the values are 1.57mm, 2.63mm and 2.35mm.

Table 1. Mean difference and mean RMS errors for underwater cameras in the x, y and z axis.

Underwater Cameras						
Number of Control Points	RMS (mm)			Mean Difference (mm)		
	x	y	z	x	y	z
8	6.38	2.93	3.52	0.09	0.41	0.12
12	5.93	3.31	4.43	0.35	0.11	0.19
16	4.88	2.93	8.09	0.24	0.09	0.65
20	4.85	2.52	7.43	0.24	0.06	0.55
24	4.35	2.38	9.71	0.19	0.06	0.94
28	3.39	2.52	13.9	0.11	0.06	1.93
30	3.05	2.52	9.13	0.09	0.06	0.83

Table 2. Mean difference and mean RMS errors for the above water cameras in the x, y and z axis.

Above Water Cameras						
Number of Control Points	RMS (mm)			Mean Difference (mm)		
	x	y	z	x	y	z
8	1.26	1.26	6.7	0.02	0.02	0.08
12	2.18	8.32	2.85	4.76	0.69	0.12
16	4.11	5.69	3.9	0.17	0.00	0.78
20	4.11	5.69	4.34	0.17	0.00	0.78
24	4.11	3.82	9.87	0.17	0.15	0.06
28	1.65	2.75	4.81	0.00	0.08	0.00
30	0.33	1.17	4.25	0.29	0.00	0.53

DISCUSSION

Considering the calibration frame used, the errors were similar or even lower than those reported in other studies. Psycharakis et al. [3] reported the mean difference for the set of 30 digitised points was 3.3 mm, 2.6 mm and 4.0 mm, for the x, y and z axes respectively. The average RMS error for these points was 3.9 mm, 3.8 mm and 4.8 mm for the x, y and z directions respectively. Gourgoulis et al. [4] using two calibration volumes, one smaller and other larger, were the RMS values were respectively 1.61mm and 2.35mm in the transverse axis, 2.99mm and 4.64mm in the longitudinal axis and 2.83mm and 2.59mm in the vertical axis. Payton and Bartlett [8] reported corresponding values of 2.3mm, 3.3mm and 2.9mm while Payton et al.[9] reported mean errors of 1.5 to 3.1 mm for a 1.1 m³ volume (representing 0.2%, of the calibrated space for each direction). Using a similar volume in a study of the golf swing, Coleman and Rankin [10] reported RMS errors of 5.1 to 9.8 mm (representing 0.4%, 0.5% and 0.3% of the calibrated space, for the x, y and z directions respectively). The reliabilities were lower when compared with Psycharakis' study [3], where the reliabilities indicated by repeated digitisations of one marker were ± 0.4 mm, ± 0.5 mm and ± 0.4 mm, for the X, Y and Z axes respectively.

8. DOCUMENTO V.

**KINEMATIC ANALYSIS OF THE RECONSTRUCTION ERROR OF A
CALIBRATION VOLUME FOR 3D ANALYSIS IN SWIMMING**

Brandão S, Figueiredo P, Gonçalves P, Vilas-Boas JP, Machado, L,
Fernandes RJ

Centre of Research, Education, Innovation and Intervention in Sport, Faculty
of Sport, University of Porto, Portugal

ABSTRACT

In swimming, the swimmers must constantly interact with the water to produce propulsive forces. However, all the immersed and emerged body parts play a key role in this aquatic activity, since it is a complex and highly integrated form of movement. This analysis impose obstacles to data acquisition, like errors associated to image. Therefore the purpose of this study was to assess the influence of the control points in the accuracy of the 3D reconstruction, above and below water of a calibration volume for 3D analysis for aquatic activities. The calibration frames were 3 m x 1.5m x 3 m for x, y and z, respectively. This size of the calibration volumes was selected to permit a complete stroke cycle during swimming.

For the set of 12 digitised points under and above water, the better resultant RMS error for the volume 1 was 4.04 mm for underwater and 3.35 mm for above water views. For the volume 2 the better resultant RMS error was 2.46 mm for underwater and 2.80 mm for above water views. Finally, to the third volume the better resultant RMS error was 4.76 mm for underwater and 3.29 mm for above water viewers.

INTRODUCTION

When analyzing human movement, it is common to measure the position of significant body landmarks so that the kinematics and kinetics of the movement can be determined (Challis, 1995), this approach has been applied to a wide variety of problems (Chen et al., 1994). Gait analysis when involving multiplanar activities engage three-dimensional (3D) reconstruction. For the transformation of the two-dimensional (2D) image coordinates into 3D space coordinates the most common procedure is the direct linear transformation (DLT) (Chen et al., 1994). With the DLT technique, an appropriate number of points with known 3D coordinates on a calibration frame are used as control points for the calibration of the recording space. In this procedure, the number and distribution of the control points, as well as the size of calibration volume affect reconstruction accuracy (Chen et al., 1994; Lam et al., 1992).

In swimming, the swimmers must constantly interact with the water to produce propulsive forces. However, all the immersed and emerged body parts play a key role in this aquatic activity, since it is a complex and highly integrated form of movement. This analysis imposes obstacles to data acquisition, like errors associated to image distortion as a result of filming through three media (air, perspex and water), to the digitization and to the three-dimensional reconstruction (Payton et al., 1995; Kwon and Casebolt, 2006), being important the study and the quantification of these errors. Although the use of this technique has been largely used in swimming studies (Cappaert et al., 1995), only a few studies have focused on the accuracy of the reconstruction (Kwon et al., 1995; Kwon & Kwak, 1996; Lauder et al., 1998; Psycharakis et al., 2005; Gourgoulis et al., 2008).

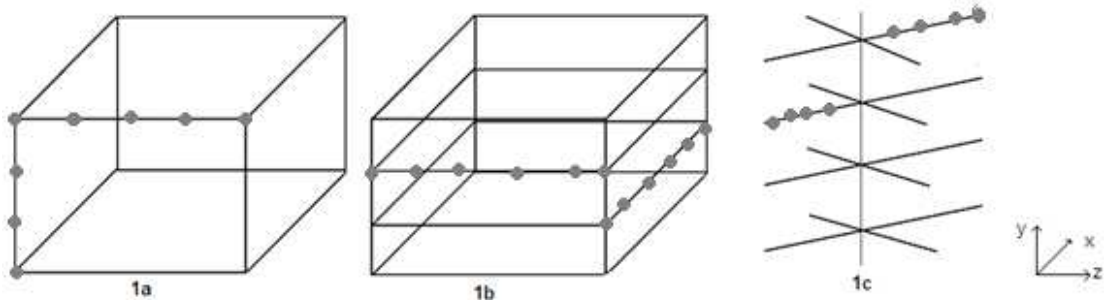
In underwater conditions Psycharakis et al. (2005) showed improvement in the calibration accuracy when the number of control points were increased from 10 to 20, using a calibration volume of 6.75m^3 , while Gourgoulis et al. (2008) using measurements carried out in two different recording conditions found larger reconstruction errors in water compared to above water conditions, whatever the size of the calibration volume.

Therefore the purpose of this study was to assess the influence of the control points in the accuracy of the 3D reconstruction, above and below water of a calibration volume for 3D analysis for aquatic activities.

METHODS

Measurements were carried out in the water and out of the water, to record the calibration of three different calibration volumes: (i) cubic calibration volume where the points are only placed on the edges (Figure 1a); (ii) cubic calibration volume where the points were marked on edges and on the square faces (Figure 1b); and, (iii) a volume whose placement of calibration points define diagonals (parallels to the bottom of the pool) (Figure 1c). Each calibration frame was recorded simultaneously by 4 under and 2 above water cameras (Sony® DCR-HC42E). The cameras were at depths varying from 1.0 to 1.5m below the water surface to avoid errors due to the camera axes being in the same planes as the reference planes of the frame. The cameras above water were varying from 3.0 to 3.5m above water surface. The angle between the axes of the two above water camera axes was approximately 100°, while the angles between axes of adjacent below water camera axes varied from approximately 75° to 110°. Fifty frames were digitized manually using the APASystem (Ariel Dynamics, USA) at a frequency of 50 Hz and the 3D coordinates obtained using the DLT procedure (Abdel-Aziz & Karara, 1971). A pair of lights, fixed in calibration volume, visible in the field of view of each camera was used for synchronization.

Figure 1. Different Calibration Volumes (cubic calibration volume where the points are only placed on the edges (1a), cubic calibration volume where the points were marked on edges and on the square faces (1b), and a volume whose placement of calibration points define diagonals (parallels to the bottom of the pool) (1c)



The calibration frames were 3 m x 1.5m x 3 m for x, y and z, respectively. The calibration volume was 1m in underwater, and 0.50m above water. This size of the calibration volumes was selected to permit a complete stroke cycle during swimming.

The following procedure was applied to assess the number of control points required to maximise the accuracy of 3D coordinate reconstruction for the below and above water calibration: 12 markers in the calibrated space were digitised over 50 fields for each underwater and above water camera views. Seven series of digitising were performed for this set of 12 markers, using 8, 12, 16, 20, 24, 28 and 30 control points respectively. Moreover, the validation points used did not serve as control points since the DLT parameters are optimised for the reconstruction of the control points (Challis & Kerwin, 1992; Chen et al., 1994; Kwon, 1999).

Accuracy was determined by the error of the reconstruction of the 3D coordinates of the 12 validation points, in each calibration frame calculated through the Root Mean Square error (RMS) using the following equations:

$$E_{x_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_n - x_i)^2}{N}} \quad E_{y_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_n - y_i)^2}{N}} \quad E_{z_r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_n - z_i)^2}{N}}$$

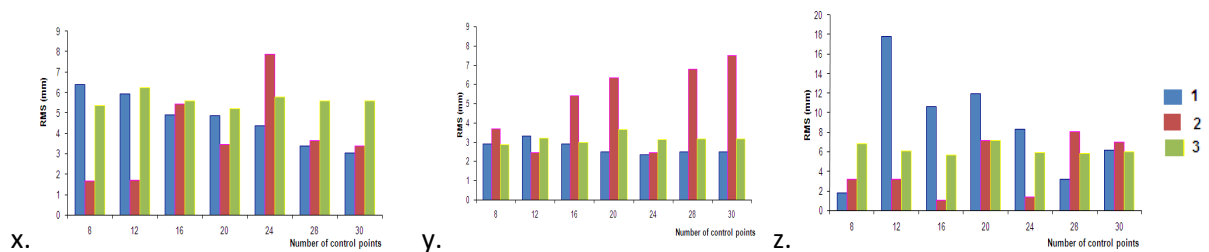
$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}{N}}$$

where E_{X_r} , E_{Y_r} , E_{Z_r} , E_r were the RMS errors for each axis x, y, z and the resultant error, respectively; X_n , Y_n , Z_n , the real coordinates; X_i , Y_i , Z_i , the reconstructed coordinates and N was the number of points used (12 validation points). These equations were used in the 50 frames scanned. To obtain an estimate of reliability, the same operator (in order to avoid any inter-operator errors) repeated the procedure 10 times. The reliability measure was considered to be the standard deviation across all digitisations of the marker.

RESULTS

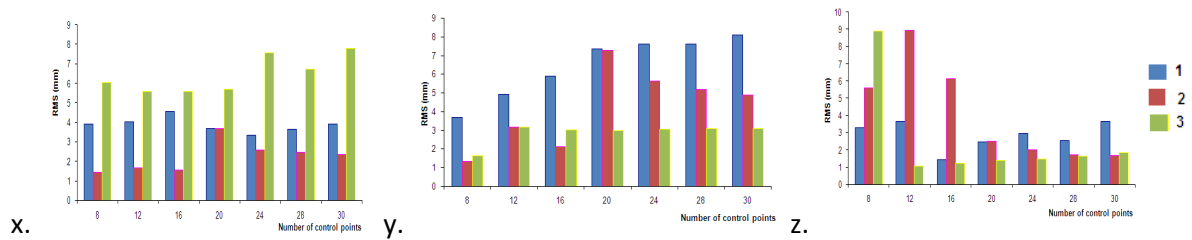
In Figure 2 it is presented the RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) coordinates, for different numbers of control points for the underwater and for the different calibration volumes.

Figure 2. Underwater RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) axes for the different calibration volumes (1, 2, 3).



In Figure 3 it is possible to observe the RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) coordinates, for different numbers of control points above water, for the different calibration volumes .

Figure 3. Above water RMS errors for the x (panel a), y (panel b) and z (panel c) axes for the different calibration volumes (1, 2, 3).



Generally the reconstruction errors were larger in water than out of the water. The RMS errors for each axis in each environment (water-air), as well as the resultant RMS error (Table 1)

Table 1. Resultant RMS error for underwater and above water viewers

Number of control points	Underwater			Above water		
	1	2	3	1	2	3
8	4.06	2.85	5.02	4.68	2.80	5.53
12	7.01	2.46	5.18	3.96	4.59	3.28
16	5.14	3.97	4.76	3.35	3.26	3.29
20	5.92	5.66	5.35	3.58	4.49	3.36
24	5.00	3.90	4.94	4.19	3.41	4.04
28	4.04	6.18	4.88	3.71	3.13	3.83
30	4.92	5.97	4.92	4.54	2.97	4.25

For the set of 12 digitised points under and above water, the better resultant RMS error for the volume 1 was 4.04 mm for underwater and 3.35 mm for above water views, corresponding to 28 and 16 control points, respectively. For the volume 2 the better resultant RMS error was 2.46 mm for underwater and 2.80 mm for above water views, corresponding to 12 and 8 control points, respectively. Finally, to the third volume the better resultant RMS error was 4.76 mm for underwater and 3.29 mm for above water viewers, corresponding to 16 control points, in both cases.

The standard deviation in underwater cameras varying between 0.1 mm and 0.29 mm, and in the above water cameras the values varies between 0.13 mm and 0.6 mm.

DISCUSSION

After analyzing all data collected, we found that the best volume of calibration is 1b. We find that the largest RMS error is associated to the calibration volume 1a. This is probably the location of points is only on the edges, not to suit the mentioned by Kwon and Casebolt (2006), that when near the center of the calibration volume are the points, the smaller is the error that it is associated. The placement of the points in the square faces of the cube was to be beneficial, since the errors were lower for any of the lines (in different points of calibration). For the volume 1c we see that for some sets of calibration points, the error obtained is less. In our opinion, after conducting the analysis to the three volumes studied, we found that, although the latter has (in some cases) a lower RMS error, this is, possibly, because of the marks (or the control points, or the calibration points) are near each other. This calibration volume is better, both for the study of the synchronized swimming and rowing for stationary swimming, since the values found in the x axis are high, however, this axis does not interfere greatly for these purposes .

Shapiro (1978) and Chen et al. (1994) report that the number of calibration points must fall between 12 and 20, since they cause a minor error. The results we obtained are consistent with these statements, except for the volume calibration 1b whose number of calibration points for underwater cameras are 28, and the above water cameras for the volume 1c that have an ideal of 8 calibration points .

CONCLUSION

The calibration volume 1b shows the results more reliable and accuracy than the other two volumes studied.

9. DISCUSSÃO GERAL

O objectivo geral deste trabalho consistiu em verificar qual o erro de reconstrução de um volume de calibração para análise 3D em NPD, em imersão e em emersão. Para isto, foram realizadas análises cinemáticas 3D tendo em conta diferentes condições, que permitiram chegar a diferentes conclusões. O volume de calibração utilizado em todos os estudos abrange simultaneamente o meio aéreo e o meio aquático, para que todo o movimento do nadador (em imersão e emersão) seja captado e registado no mesmo referencial, sendo este um procedimento que se espera que tenha um efeito benéfico, tal como se encontra referenciado na literatura da especialidade (Kwon & Casebolt, 2006).

Chen et al. (1994), referem que o número mínimo de pontos de calibração que deve ser utilizado é 6, uma vez que sendo menor, mais vulnerável se torna o aparecimento de erros associados. Desta forma, foram inicialmente analisadas imagens já recolhidas, com o intuito de tentar perceber se aquela metodologia seria ou não viável e o que poderia ser melhorado para posteriores recolhas de dados (**Documento II**). Para este estudo foram utilizados 8 pontos de controlo e 12 de calibração. Psycharakis et al. (2005) utilizaram 10 pontos de controlo e conjuntos de diferentes números de pontos de calibração (10, 15, 20, 25 e 30). Por seu lado, Gourgoulis et al. (2008) digitalizaram, em cada um dos dois volumes de calibração utilizados, 8 pontos de controlo e 24 pontos de calibração. Em nosso entender, o número de pontos digitalizado no nosso estudo constituiu-se (previamente à realização do estudo) como sendo o ideal para o volume em questão, uma vez que esta foi a primeira análise efectuada ao erro associado ao volume de calibração e pelas suas dimensões, pensamos ser a opção mais correcta (para iniciar). Chen et al. (1994), referiram que um dos maiores dilemas encontrado na literatura está relacionado com a região específica de controlo da calibração (volume de calibração), sendo o número de pontos de controlo específico de cada um deles, havendo inúmeras combinações possíveis, quer seja um volume em forma de cubo, rectângulo, pirâmide ou outros do mesmo género. Acrescentaram ainda que

a distribuição dos pontos de controlo deve ser bem definida, pois possui uma importância especial quando o número de pontos utilizado é reduzido. Os mesmos autores verificaram que são obtidos melhores resultados quando os pontos de controlo se encontram distribuídos por todo o volume de calibração. Desta forma, pensamos que este número se constituiu como sendo o número mínimo de pontos que possibilitaria a análise simultânea do erro obtido para os três eixos, bem como dos dois meios ar/água, havendo dois pontos para a análise relativa a cada eixo e em cada meio (ar/água). Através dos resultados obtidos pudemos constatar que os valores de erro RMS foram superiores para os eixos y e z fora de água, quando comparado com os resultados obtidos dentro de água, o que vem contrariar os dados da literatura da especialidade (Psycharakis et al., 2005). Isto porque a literatura refere que os maiores valores encontrados foram obtidos em imagens subaquáticas, devido à maior refacção causada pela água e/ou a possível deformação da imagem gravada (Gourgoulis et al., 2008). Os resultados por nós obtidos devem-se, provavelmente, ao facto de terem sido utilizadas quatro câmaras subaquáticas e apenas duas aéreas. No entanto, quando se analisa o eixo x, este facto não se verificou, possivelmente devido à disposição das câmaras, uma vez que provavelmente não estão posicionadas da maneira mais correcta, ou da maneira mais propícia à reconstrução 3D efectuada pelo DLT. Quanto à fiabilidade do volume de calibração em estudo, pudemos constatar que este possui valores reduzidos de desvio-padrão. Quando comparados os valores por nós obtidos, 0.2mm, 0.2mm e 0.6mm para os eixos x, y e z, respectivamente, para as câmaras aéreas, e 0.2mm, 0.1mm e 0.1mm para os eixos x, y e z respectivamente, para as câmaras subaquáticas, com os valores obtidos por Psycharakis et al. (2005) constatamos que estes são mais reduzidos, uma vez que estes autores obtiveram valores de desvio-padrão de 0.4mm, 0.5mm e 0.6mm para os eixos x, y e z, respectivamente. Desta forma, pudemos concluir que o volume de calibração estudado poderá ser utilizado para análises cinemática 3D em NPD.

Seguidamente, e tendo como objectivo tentar diminuir o erro associado ao volume de calibração em estudo, introduzimos pequenas alterações na metodologia utilizada, como sendo, a colocação das câmaras e os seus eixos ópticos, bem como o número de pontos digitalizados, quer de controlo, quer de calibração (**Documento III**). Assim, relativamente ao posicionamento das câmaras, as alterações foram efectuadas principalmente ao nível das câmaras aéreas, onde os eixos ópticos estavam colocados a, aproximadamente 120° . Psycharakis et al. (2005) propuseram no seu estudo um ângulo entre as câmaras aéreas de 100° . No entanto, no nosso estudo, essa colocação não permitia a melhor visão de todas as arestas do cubo, pois uma das arestas era ocultada por outra. Quanto às câmaras subaquáticas, os ângulos entre os eixos ópticos foram os propostos por Psycharakis et al. (2005), variando entre os 75° e os 110° , tendo como objectivo a captação de todo o volume de calibração. O número de pontos de controlo foi aumentado para 12 tendo em vista a maximização da precisão na reconstrução das coordenadas 3D. Inicialmente, o nosso objectivo consistiu no cálculo do erro RMS quer para o número mínimo de pontos de calibração (8), quer para o máximo (30). Desta forma, pudemos perceber que, para as câmaras subaquáticas, o erro RMS diminui com o aumento do número de pontos de calibração de 8 para 30 nos eixos x e y. No entanto, talvez pelo posicionamento das câmaras o erro RMS aumenta com o aumento do número de pontos de 8 para 30 no eixo z, uma vez que esta pode não ser a colocação mais favorável à reconstrução 3D efectuada pelo DLT. Relativamente às câmaras aéreas, constatamos que, para os três eixos, o erro RMS diminui com o aumento do número de pontos de calibração de 8 para 30. Assim, o Volume de Calibração estudado, parece ter uma boa precisão, quando comparado com a literatura especializada, evidenciando validade para a realização de análises cinemáticas a 3D em NPD.

Tendo estudado a evolução do erro RMS com o aumento do número de pontos de calibração, do mínimo (8) ao máximo (30), tivemos também como objectivo tentar perceber a variação do erro RMS com o aumento do

número de pontos de calibração, utilizando a mesma metodologia e alterando apenas esta variável (**Documento IV**). Esta progressão foi anteriormente realizada por Psycharakis et al. (2005), utilizando diferentes conjuntos de números de pontos de calibração, como sendo, 10, 15, 20, 25 e 30. Os diferentes conjuntos de números de pontos de calibração por nós utilizados foram 8, 12, 16, 20, 24, 28 e 30. A escolha pelos diferentes conjuntos de números de pontos de calibração teve por base o número mínimo (8), uma vez que este delimitava o cubo na sua totalidade, sendo que cada um dos oito pontos coincidia com cada um dos vértices do cubo. Posteriormente a opção do aumento do número de pontos recaiu na possibilidade de aumentar quatro pontos de cada vez, o que possibilitaria a colocação de mais um ponto em cada um dos planos laterais do cubo. Constatámos que, para as câmaras subaquáticas a precisão dos valores obtidos aumenta dos 8 para os 16 pontos de calibração e dos 20 para os 28. No que se refere às câmaras aéreas a precisão aumenta dos 24 para os 30 pontos de calibração. Analisando os valores obtidos, aferimos que para um conjunto de 12 pontos de controlo no volume de calibração por nós estudado, o número ideal de pontos de calibração para as câmaras subaquáticas se situa nos 20 pontos de calibração, onde foi encontrado o menor erro RMS, com 4.85mm, 2.52mm e 7.43 mm para x, y e z respectivamente, representando 0.16%, 0.08% e 0.25% do espaço calibrado. Quanto às câmaras aéreas o menor erro RMS obtido para o conjunto de 12 pontos de controlo foram os 16 pontos de calibração, com 4.11mm, 5.69mm e 3.90 mm para x, y e z respectivamente, representando 0.14%, 0.19% e 0.13% do espaço calibrado. Verificamos ainda que os erros encontrados foram semelhantes, ou mesmo inferiores, aos relatados noutros estudos. Psycharakis et al. (2005) relataram que a diferença média para o conjunto de 30 pontos digitalizados foi de 3.3 mm, 2.6 mm e 4.0 mm para os eixos x, y e z respectivamente. O erro RMS médio para esses pontos foi de 3.9 mm, 3.8 mm e 4.8 mm para os eixos x, y e z respectivamente. Por seu lado, Gourgoulis et al. (2008) utilizaram dois volumes de calibração distintos. Os volumes de calibração utilizados por

estes autores consistiam num volume mais pequeno, e outro maior, sendo este último a junção de três volumes de calibração pequenos, onde os valores de erro RMS foram respectivamente, 1.61mm e 2.35mm no eixo transversal (x), 2.99mm e 4.64mm no eixo longitudinal (z) e 2.83mm e 2.59mm, no eixo vertical (y). Payton e Bartlett (1995) relataram valores de 2.3mm, 3.3mm e 2.9mm, enquanto Payton et al. (2002) relataram erros médios de 1.5 a 3.1mm, para um volume $1,1 \text{ m}^3$ (representando 0,2%, do espaço calibrado para cada direcção). Utilizando um volume similar num estudo de golf, Coleman e Rankin (2005) relataram erros RMS de 5.1 a 9.8 mm (representando 0,4%, 0,5% e 0,3% do espaço calibrado para os eixos x, y e z respectivamente). A fiabilidade do volume de calibração por nós estudado foi menor quando comparada com os resultados obtidos por Psycharakis et al. (2005), onde a fiabilidade indicada foi obtida por repetidas digitalizações de um marcador. Os valores obtidos por estes autores foram $\pm 0.4\text{mm}$, $\pm 0.5\text{mm}$ e $\pm 0.4\text{mm}$ para os eixos x, y e z respectivamente.

Depois de termos analisado imagens captadas para recolhas anteriores e após termos recolhido novas imagens, com uma nova disposição das câmaras e tendo analisado o erro RMS com o aumento do número de pontos de calibração, restou-nos a comparação do erro RMS para o mesmo volume de calibração com alterações estruturais diferenciadas (**Documento V**). A comparação foi efectuada tendo em conta os diferentes locais onde seriam colocados e posteriormente digitalizados os pontos de controlo e digitalização. Os diferentes volumes de calibração analisados tiveram a colocação dos pontos: (i) nas arestas do volume de calibração (Volume de Calibração 1), (ii) nos planos laterais do volume de calibração (Volume de Calibração 2) e (iii) dentro do volume de calibração, sendo definidas diagonais (paralelas ao fundo da piscina) das arestas do volume ao centro deste (Volume de Calibração 3). Para a realização deste estudo foram utilizados os valores de erro RMS calculados aquando da realização do **documento III**, relativos ao volume de calibração 1. Posteriormente, e tendo em vista a análise em NPD foram colocados pontos nos planos laterais do volume de calibração, com o intuito de perceber se com a

colocação de pontos nestes locais o erro associado ao volume de calibração diminuiria, uma vez que a disposição destes se constituía como diferente (Volume de Calibração 2). Os pontos estavam definidos ao nível da água, bem como pontos 50cm acima destes, e pontos abaixo destes, respectivamente a 50cm e 1m. Foram digitalizados 40 pontos de controlo, uma vez que existiam muitos mais pontos, sendo depois utilizados apenas 12, tal como no estudo realizado anteriormente de forma a maximizar a precisão da reconstrução das coordenadas. Relativamente aos pontos de calibração, foi efectuada mais uma vez a progressão do número mínimo (8) ao máximo (30). Relativamente à última alteração estrutural efectuada ao volume de calibração, esta foi constituída por diagonais paralelas ao fundo da piscina (Volume de Calibração 3), em que, o objectivo consistia na análise das remadas de Natação Sincronizada. Desta forma, uma das diagonais estava colocada ao nível da superfície da água, estando uma 45cm acima, e duas (45cm e 90cm) abaixo desta. Um dos principais objectivos deste trabalho foi tentar perceber qual a melhor metodologia a utilizar nas recolhas efectuadas em Natação. Analisando os resultados encontrados perante as alterações efectuadas ao volume de calibração existente, pudemos perceber qual a melhor disposição dos pontos, de forma a obter um menor erro RMS. Desta forma, e após a análise dos resultados obtidos através da captação de imagens referentes ao volume de calibração com adaptações diferentes, verificamos que a melhor opção recai sobre o volume de calibração 2, volume este onde os pontos estavam distribuídos pelas arestas do volume e pelas suas faces laterais.

Após analisar todos os dados obtidos, pudemos constatar que, o maior erro RMS encontrado está associado ao volume de calibração 1. Este facto deve-se provavelmente à localização dos pontos estar apenas nas arestas deste, não indo ao encontro do mencionado por Kwon e Casebolt (2006), em que quando mais perto do centro do volume de calibração estiverem os pontos, menor será o erro que se lhe encontra associado. Concluimos que a alteração efectuada, aquando da colocação de pontos nas faces laterais do cubo (Volume de Calibração 2), se revelou como benéfica, uma vez que

os erros encontrados foram menores para qualquer um dos eixos (em diferentes números de pontos de calibração). Relativamente ao volume de calibração 3 verificamos que para alguns conjuntos de números de pontos de calibração, o erro RMS obtido é menor. Em nosso entender, e após realizar a análise aos três volumes estudados, constatamos que, apesar deste último possuir (em alguns casos) um menor erro RMS, este deve-se, possivelmente, ao facto das marcas (quer os pontos de controlo, quer os pontos de calibração) estarem mais próximas umas das outras. Este volume de calibração (3) foi elaborado visando principalmente o estudo das características das remadas de Natação Sincronizada e, posto isto, concluímos que este volume de calibração é preferível para estes fins. Apesar dos valores encontrados no eixo do x serem elevados, se o nado for estacionário ou o objectivo for, por exemplo, o estudo das remadas, este eixo não interfere grandemente, uma vez que não há deslocamento acentuado em x.

Shapiro (1978) e Chen et al. (1994) referem que o número de pontos de calibração se deve situar entre os 12 e os 20, uma vez que estes originam um menor erro. Os resultados por nós obtidos são concordantes com estas afirmações, com excepção para o volume de calibração 1 cujo número de pontos de calibração para as câmaras subaquáticas são 28, e para o volume de calibração 2 que para as câmaras aéreas possui um ideal de 8 pontos de calibração.

Relativamente aos objectivos específicos e às hipóteses formuladas verificamos que a precisão aumenta com o aumento do número de pontos de calibração. No entanto, como referem Allard et al. (1995), deve ser tomada precaução quando se aumenta o número de pontos com o objectivo de reduzir o erro de reconstrução, uma vez que a partir de um certo número de pontos de calibração (que é variável) de acordo com o volume de calibração em estudo, o aumento ou diminuição do erro RMS é diferenciado consoante as características em análise. Relativamente à variação do erro de reconstrução 3D com a localização dos pontos em diversos planos, constatamos que o menor erro é obtido se verificou no volume de calibração

cujos pontos estão localizados nas arestas e nas faces laterais do volume (2) (tendo em conta as características diferenciadas do volume de calibração cujos pontos formam diagonais paralelas ao fundo da piscina, como sendo a distância entre as marcas). No entanto, podemos afirmar que o erro encontrado para a maioria dos diferentes conjuntos de números de pontos de calibração, é menor aquando da utilização do volume de calibração 3 (pontos em diversos planos, quer nas faces laterais do volume, quer nas diagonais formadas pelos pontos), em detrimento do volume de calibração 1 (pontos localizados apenas nas arestas). Os valores por nós encontrados, vão de encontro ao mencionado na literatura (Lauder et al., 1998; Psycharakis et al., 2005; Gourgoulis et al., 2008) onde foi obtido um maior erro de reconstrução 3D em condições subaquáticas, provavelmente devido à refração.

10. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos diferentes estudos realizados para a elaboração desta monografia, permitem retirar algumas conclusões, nomeadamente:

- (i) O maior erro RMS obtido foi encontrado em condições subaquáticas, quando comparado com o erro RMS obtido em condições aéreas;
- (ii) O erro RMS diminui com o aumento do número de pontos de calibração de 8 para 30 (Volume de Calibração 2);
- (iii) Para o volume de calibração 2 (cujos pontos estão localizados nos planos laterais do volume), a precisão aumenta de 8 para 16 pontos de calibração e de 20 para 28, em condições subaquáticas;
- (iv) Para o volume de calibração 2 (cujos pontos estão localizados nos planos laterais do volume), a precisão aumenta de 24 para 30 pontos de calibração em condições aéreas;
- (v) Para um conjunto de 12 pontos de controlo e aquando da utilização do volume de calibração 2 (cujos pontos estão localizados nos planos laterais do volume), o número ideal de pontos de calibração é 20 em condições subaquáticas e 16 em condições aéreas;
- (vi) Para um conjunto de 12 pontos de controlo e aquando da utilização do volume de calibração 3 (cujos pontos formam diagonais paralelas ao fundo da piscina), o número ideal de pontos de calibração é 20 em condições subaquáticas e 12 em condições aéreas;
- (vii) O volume de calibração 3 (cujos pontos formam diagonais paralelas ao fundo da piscina), é ideal, por exemplo, para a realização de nado amarrado ou para o estudo das remadas de Natação Sincronizada;

- (viii) O maior erro RMS encontrado está associado ao volume de calibração 1 (cujos pontos apenas estão localizados nas arestas);
- (ix) A precisão aumenta com o aumento do número de pontos de calibração, até determinado ponto consoante o volume de calibração em estudo;
- (x) O erro RMS encontrado é menor aquando da utilização de pontos em diversos planos;
- (xi) O maior erro de reconstrução 3D obtido foi encontrado em condições subaquáticas.

Desta forma, podemos referir que:

- A Hipótese 1 confirma-se, uma vez que até determinado conjunto de números de pontos de calibração o erro RMS diminui. No entanto, este aumento não é linear dependendo do volume de calibração em estudo e da distribuição dos pontos pelo espaço;
- A Hipótese 2 confirma-se, pois aquando da utilização de pontos só nas arestas do volume de calibração (Volume de Calibração 1), ou nas arestas e nas faces laterais (Volume de Calibração 2), ou formando diagonais paralelas ao fundo da piscina (Volume de Calibração 3), constatamos que a primeira situação é a que origina um maior erro RMS, estando os pontos mais afastados do centro do volume de calibração;
- A Hipótese 3 confirma-se, sendo que o maior erro obtido foi encontrado quando associado à calibração do volume em imersão, provavelmente devido aos efeitos da refração.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTRODUÇÃO

Fernandes, R.J.; Aleixo, I.; Soares, S.; Vilas-Boas, J.P. (2009). Anaerobic Critical Velocity: A New Tool for Young Swimmers Training Advice (chapter 10). In: N. P. Beaulieu (edt.), *Physical Activity and Children: New Research*, pp. 211-223. Nova Science Publishers, Inc. New York. ISBN: 978-1-60456-306-1.

Gourgoulis, V.; Aggeloussis, N.; et al; Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11, 90 – 95, 2008.

Kwon, Y. H., & Casebolt, J. B. (2006). Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. *Sports Biomech*, 5(1), 95-120.

Lauder, M. A., Dabnichki, P., & Bartlett, R. M. (1998). Three-dimensional reconstruction accuracy within a calibrated volume *In The engineering of sport: design and development*, Blackwell Science, p.441-448. United Kingdom.

Psycharakis, S.G.; Sanders, R.; et al; A calibration frame for 3D swimming analysis. In Wang, Q. (Ed.): *Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*, Beijing, China, pp. 901 – 905, 2005.

Vilas-Boas, J.P.(1989). Controlo do treino em natação: considerações gerais, rigor e operacionalidade dos métodos de avaliação. Comunicação apresentada Às Jornadas Técnico Galaico-Duriences de Natação. Corunha, Espanha.

Vilas Boas, J.P. (1998). Concepção, planeamento e operacionalização de um macrociclo de treino em natação. Comunicações do XXI Congresso Técnico - Científico da Associação Português de Técnicos de Natação. Porto.

DOCUMENTO I.

- [1] Abdel-Aziz, Y. I., & Karara, H. M. (1971). Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. American Society of Photogrammetry Symposium on Close Range Photogrammetry. Fall Church: VA: American Society of Photogrammetry, 1-18.
- [2] Allard, P., Blanchi, J. P., & Aissaoui, R. (1995). Bases of three-dimensional reconstruction. In, Allard, P. (ed.) et al..Three-dimensional analysis of human movement, Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers, 19-40. United States.
- [3] Angulo, R. M., & Dapena, J. (1992). Comparison of film and video techniques for estimating three-dimensional coordinates within a large field. International Journal of Sport Biomechanics, 8(2), 145-151.
- [4] Bartlett, R. (1997). Introduction to Sport Biomechanics: London: E & FN SPON.
- [5] Bartlett, R. M. (1992). Biomechanical Analysis of Performance in Sport. In: R. M. Bartlett (Ed.). Leeds: British Association of Sport Science.
- [6] Dainty, D. A., & Norman, R. W. (1987). Standardizing biomechanical testing in sport. Champaign, Ill. United States: Human Kinetics Publishers.
- [7] Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Vezos, N., Boli, A., & Mavromatis, G. (2008). Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. J Sci Med Sport, 11(2), 90-95.
- [8] Hallert, B. (1960). Photogrammetry. New York McGraw-Hill.

- [9] Hamill, J. & Selbie, W. S. (2004). Three-dimensional kinematics. In: S. N. Whittlesey (Ed.), 35-52: Research methods in biomechanics: Human Kinetics.
- [10] Kennedy, P. W. & Smith, G. A. (1989). Comparison of film and video techniques for the three-dimensional DLT repredictions. Wriight, D. L. International Journal of Sport Biomechanics, 5, 457-460.
- [11] Keskinen, O. P., & Keskinen, K. L. (1997). Velocity profiles of competitive swimmers and triathlonists during an all-out 100-M swim. In: XII FINA World Congress on Swimming Medicine, April 12-15, Goteborg, Sweden, 90.
- [12] Kwon, Y. H. (1999). Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. Journal of Applied Biomechanics, 15(4), 396-403.
- [13] Kwon, Y. H., & Casebolt, J. B. (2006). Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. Sports Biomech, 5(1), 95-120.
- [14] Kwon, Y. H., & Lindley, S. L. (2004). Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis. Sci. Proc. of the XVII Inter. Symp. on Biomechanics in Sports, Perth, Australia: Edith Cowan University, 1999, 361-364.
- [15] Kwon, Y. H., Moon, Y. J., & Lee, J. S. (1995). Application of the DLT method to the underwater motion analysis. Korean Journal of Sport Biomechanics, 5, 49-54.
- [16] Ladin, Z. (1995). Three-dimensional instrumentation. In: P. Allard, P.; J. P. Blanchi & R. Aissaoui (Eds.). Three-dimensional analysis of

- human movement, Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers, 3-17. United States.
- [17] Leroux, M.; Allard, P. & Murphy, N. (1990). Accuracy and precision of the direct linear technique (DLT) in very-close-range photogrammetry with videos cameras. Paper presented at the 14th annual meeting of the America Society of Biomechanics, Miami, FL.
- [18] Marzan, G. T. & Karara, H. M. (1975). A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition and some applications of it. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems: American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA.
- [19] Pedotti, A., & Ferrigno, G. (1995). Optoelectronic-based systems. In: P. Allard, P.; J. P. Blanchi & R. Aissaoui (Eds.). Three-dimensional analysis of human movement, Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers, 57-77. United States.
- [20] Psycharakis, S., Sanders, R., & Mill, F. (2005). A calibration frame for 3D swimming analysis. Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports, 901-904.
- [21] Winter, D. A. (2005). Biomechanics and Motor Control of Human Movement (3 ed.): John Wiley & Sons, INC.
- [22] Wood, G. A., & Marshall, R. N. (1986). The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. Journal of Biomechanics, 19(9), 781-785.

DOCUMENTO II.

[1] Gourgoulis, V.; Aggeloussis, N.; et al; Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11, 90 – 95, 2008.

[2] Psycharakis, S.G.; Sanders, R.; et al; A calibration frame for 3D swimming analysis. In Wang, Q. (Ed.): *Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*, Beijing, China, pp. 901 – 905, 2005.

DOCUMENTO III.

1. Psycharakis, S., Sanders, R., & Mill, F. (2005). A calibration frame for 3D swimming analysis. *Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports*, 901-904

DOCUMENTO IV.

[1] Chen L, Armstrong CW, Raftopoulos DD. An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *J Biomech*1994; 27:493-500.

[2] Lam TC, Frank CB, Shrive NG. Calibration characteristics of a video dimension analyser (VDA) system. *J Biomech*1992; 25: 1227-31.

[3] Psycharakis S, Sanders R, Mill F. A calibration frame for 3D swimming analysis. *Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports*2005:901-4.

[4] 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 Apr;11(2):90-5.

[5] Kwon YH. Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. *J Appl Biomech*1999; 15: 396-403.

[6] Challis JH, Kerwin DG. Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry. *Journal of Biomechanics*1992; 25(9):1053-8.

[7] Abdel-Aziz YI, Karara HM. Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry: American Society of Photogrammetry Symposium on Close Range Photogrammetry. Fall Church: VA: American Society of Photogrammetry1971:1-18.

[8] Payton CJ, Bartlett RM. Estimating propulsive forces in swimming from three-dimensional kinematic data. *Journal of Sports Sciences*1995;13(6):447-54.

[9] Payton C, Baltzopoulos V, Bartlett R. Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. *Journal of Applied Biomechanics*2002;18(3):243-56.

[10] Coleman SG, Rankin AJ. A three-dimensional examination of the planar nature of the golf swing. *J Sports Sci*2005 Mar;23(3):227-34.

DOCUMENTO V.

Challis, J. H. (1995). A multiphase calibration procedure for the direct linear transformation. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(3), 351-358.

Chen L.; Armstrong, C.W.; Raftopoulos, D.D. (1994). An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *J Biomech*. 27:493-500.

Lam, T.C.; Frank, C.B.; Shrive, N.G. (1992). Calibration characteristics of a video dimension analyser (VDA) system. *J Biomech.* 25: 1227-31.

Payton, C.J.; Bartlett, R.M. (1995). Estimating propulsive forces in swimming from three-dimensional kinematic data. *Journal of Sports Sciences.* 13(6):447-54.

Kwon, Y. H.; Casebolt, J. B. (2006). Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. *Sports Biomech.* 5(1), 95-120.

Cappaert, J. M., Pease, D. L., & Troup, J. P. (1995). Three-dimensional analysis of the men's 100-m freestyle during the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics.* 11(1), 103-112.

Kwon, Y. H., Moon, Y. J., & Lee, J. S. (1995). Application of the DLT method to the underwater motion analysis. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 5, 49-54.

Kwon, Y. H.; Kwak, C. S. (1996). Developmentt on an inverse-periscope for underwater motion analysis in swimming. *Sport Science.* 7, 1-7.

Lauder, M. A., Dabnichki, P., & Bartlett, R. M. (1998). Three-dimensional reconstruction accuracy within a calibrated volume In: *The engineering of sport: design and development*, Blackwell Science.441-448. United Kingdom.

Psycharakis, S.; Sanders, R.; Mill, F. (2005). A calibration frame for 3D swimming analysis. *Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports.* 901-904.

Gourgoulis, V.; Aggeloussis, N.; Kasimatis, P.; Vezos, N.; Boli, A.; Mavromatis, G. (2008). Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *J Sci Med Sport*. 11(2), 90-95.

Abdel-Aziz, Y. I.; Karara, H. M. (1971). Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry: American Society of Photogrammetry Symposium on Close Range Photogrammetry. Fall Church: VA: American Society of Photogrammetry. 1-18.

Challis, J. H.; Kerwin, D. G. (1992). Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry. *Journal of Biomechanics*. 25(9), 1053-1058.

Kwon, Y. H. (1999). Object plane deformation due to refraction in two-dimensional underwater motion analysis. *Journal of Applied Biomechanics*. 15(4), 396-403.

Payton, C.; Baltzopoulos, V.; Bartlett, R. (2002). Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. *Journal of Applied Biomechanics*. 18(3), 243-256.

Coleman, S. G., & Rankin, A. J. (2005). A three-dimensional examination of the planar nature of the golf swing. *J Sports Sci*. 23(3), 227-234.

DISCUSSÃO GERAL

Allard, P., Blanchi, J. P., & Aissaoui, R. (1995). Bases of three-dimensional reconstruction In P. Allard, I.A.F. Stokes, & J.P. Blanchi, *Three-dimensional analysis of human movement*, Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers, 19-40. United States.

Chen, L.; Armstrong, C.W. & Raftopoulos, D.D. (1994). An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. *Journal of Biomechanics*, 27:493-500.

Coleman, S. G., & Rankin, A. J. (2005). A three-dimensional examination of the planar nature of the golf swing. *Journal of Sport Sciences*, 23(3), 227-234.

Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Vezos, N., Boli, A., & Mavromatis, G. (2008). Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *Journal of Sport Science and Medicine*, 11(2), 90-95.

Kwon, Y. H., & Casebolt, J. B. (2006). Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis. *Sports Biomechanics*, 5(1), 95-120.

Lauder, M. A., Dabnichki, P., & Bartlett, R. M. (1998). Three-dimensional reconstruction accuracy within a calibrated volume In *The engineering of sport: design and development*, Blackwell Science, 441-448. United Kingdom.

Payton, C.J. & Bartlett, R.M. (1995). Estimating propulsive forces in swimming from three-dimensional kinematic data. *Journal of Sports Sciences*;13(6):447-54.

Payton, C., Baltzopoulos, V., & Bartlett, R. (2002). Contributions of rotations of the trunk and upper extremity to hand velocity during front crawl swimming. *Journal of Applied Biomechanics*, 18(3), 243-256.

Psycharakis, S., Sanders, R., & Mill, F. (2005). A calibration frame for 3D swimming analysis. In *Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports*, 901-904.

Shapiro, R. (1978). Direct Linear Transformation method for three-dimensional cinematography. *ResQ*. 49, 197-205.