

Desenvolvimento de uma unidade de medida inercial de baixo custo para controlo e avaliação do treino de nadadores

Autores

Eduardo Félix^{1,2}; Pedro Morouço^{3,4}; Paulo Correia^{1,2}; Hugo Silva^{1,2}

pedro.morouco@ipleiria.pt

Resumo

A melhoria da performance dos nadadores, como em qualquer outra modalidade desportiva, assenta na eficiente monitorização do treino. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma unidade de medida inercial, prática, leve e de baixo custo para controlo do treino em natação. Neste âmbito, foi concebido um dispositivo (com 21g) otimizado para incluir o hardware de aquisição de dados (com sistema de referência de atitude e direção – AHRS) e um processo de machine learning para análise de dados. Treze nadadores (2 femininos) com diferentes níveis competitivos testaram o sistema, realizando as quatro técnicas de nado. Foi obtida uma precisão de segmentação dos percursos de 100%, uma concordância de 100% de reconhecimento na técnica de costas e de 89,6% para as restantes técnicas. Considerando os resultados do AHRS, foram desenvolvidos três novos indicadores: elevação do tronco, equilíbrio corporal e rotação corporal. A unidade de medição proposta tem características úteis únicas para serem usadas na monitorização do treino.

Palavras-chave: controlo e avaliação; engenharia; sensor inercial; ângulos de Euler

Introdução

A natação de competição é baseada em percorrer uma dada distância (previamente conhecida) no menor tempo possível. Classificado como um dos desportos mais relevantes da sociedade, a natação dispõe de várias tecnologias para apoiar os nadadores e treinadores no seu trabalho diário, assumindo-se as mesmas como uma

¹ Instituto Superior Técnico

² Instituto de Telecomunicações

³ Instituto Politécnico de Leiria

⁴ CIPER - Universidade de Lisboa

ferramenta extremamente útil no processo de melhoria do desempenho dos atletas, e na prevenção das lesões. Na natação de competição, cada nadador utiliza a sua própria pista, sem interferência direta dos adversários. O processo de treino é, portanto, altamente individualizado, incidindo a competição sobre o que foi treinado (Smith, Norris, & Hogg, 2002). Por exemplo, os nadadores de elite sabem a priori quantas braçadas irão realizar em cada curso, tentando garantir a máxima eficiência (Aspenes & Karlsen, 2012). Consequentemente, o balanço ótimo entre volume e intensidade demonstram a importância crucial do controlo e da avaliação. Existem diferentes metodologias fidedignas e válidas na avaliação do processo de treino (Smith et al., 2002). No processo de treino diário, as séries são comumente realizadas em função da velocidade média que é obtida nos indicadores tempo e distância (Barbosa et al., 2010). Contudo, tendo em conta as partidas e viragens, a velocidade média pode ser pouco representativa da velocidade instantânea (Veiga & Roig, 2017). Por conseguinte, a capacidade de medir instantaneamente uma velocidade de nadador é extremamente relevante.

Entre os diferentes métodos para determinar a velocidade, pode-se recorrer à avaliação por análise cinemática de vídeo (1, 2 ou 3D) ou por velocímetros, sendo as abordagens mais comuns as que são baseadas em vídeo. Alguns métodos consideram várias câmaras de gravação, exigindo um esforço maior para a sincronização. O tratamento de dados exige a localização dos marcadores em cada imagem de vídeo, para reconstruir o movimento do nadador e extrair parâmetros relevantes. A visibilidade do marcador é muitas vezes prejudicada pela turbulência da água, refração ou reflexões de luz. Para contornar este problema, surgiu nos últimos anos a possibilidade de recorrer ao uso de marcadores optoelectrónicos. Contudo, estes parecem condicionar o desempenho devido a uma força de arrasto adicional (Washino, Mayfield, Lichtwark, Mankyu, & Yoshitake, 2019).

A fim de obter resultados de forma mais célere, é possível usar um velocímetro que, acoplado ao nadador, mede a velocidade instantânea em tempo real. Este é um dispositivo usado para medir as variações de velocidade, permitindo inferir sobre a eficiência dos nadadores (Barbosa et al., 2013). No entanto, a ação turbulenta da água ou tocar no cabo involuntariamente com os membros inferiores irá induzir erros de recolha de dados. Também pode ser questionado se os nadadores inibem as suas amplitudes normais dos membros inferiores, pois percebem que os pés tocam

facilmente o cabo. Superando estas limitações, há uma outra desvantagem principal com este equipamento: é uma ferramenta de medida de apenas um sentido. Assim, limita a avaliação a um percurso de 25 ou 50-m (de acordo com o comprimento da piscina), tornando-o não tão relevante para fins de controlo e avaliação regular no processo de treino.

Aproveitando os avanços tecnológicos, outras abordagens têm vindo a ser testadas. Nas últimas três décadas, as unidades de medida inercial (IMUs) provaram ser ferramentas extremamente úteis para a análise do movimento humano. Tanto a portabilidade, quanto o baixo custo atraíram grupos de investigação em todo o mundo para a sua utilização em biomecânica do desporto. Especificamente para natação, embora ainda esteja nos desenvolvimentos preliminares, existem já alguns resultados prometedores (Bächlin & Tröster, 2012; Cortesi et al., 2019; Dadashi, Crettenand, Millet, & Aminian, 2012; Dadashi et al., 2015). Esses resultados foram escrutinados numa revisão sistemática que demonstrou que o uso de sensores inerciais parece permitir a aquisição de dados em natação, sem as restrições previamente identificadas (Magalhaes, Vannozzi, Gatta, & Fantozzi, 2015). As unidades de medida inerciais podem ser de dimensões e peso reduzidos, com transmissão de dados sem fio (a fim de poder executar as análises num espaço de tempo), não necessitam de calibrações complexas e podem ser usados facilmente sem grandes conhecimentos tecnológicos. Além disso, é possível examinar e monitorizar continuamente todo um treino natação sem limitação espacial especificada, característica típica da análise de vídeo (Cortesi et al., 2019). Se assim for, muita informação pode ser obtida para ajudar os treinadores a construir uma prescrição customizada para os seus nadadores.

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema conveniente, prático e de baixo custo, aplicado à prática da natação, incluindo o hardware de aquisição de dados (baseado em um sistema de referência de atitude e direção – AHRS) e um processo de *machine learning* para análise de dados. Foi colocado como hipótese que este sistema seria capaz de identificar com precisão o percurso realizado e a segmentação das viragens.

Materiais e métodos

Participantes

Treze nadadores masculinos (2 femininos e 11 masculinos) voluntariaram-se para participar nas experiências (idade: $20,8 \pm 3,5$ anos; estatura: $173,7 \pm 5,3$ cm; massa corporal: $63,5 \pm 6,3$ kg). Os participantes apresentavam diferentes níveis de desempenho, proporcionando performances heterogéneas para o desenvolvimento de uma base de dados representativa (4 nível internacional, 6 nível nacional e 3 ex-praticantes federados). Todos os participantes forneceram o consentimento informado por escrito para participar no estudo, após o protocolo ter sido aprovado pelo Comité de Ética institucional no espírito da Declaração de Helsínquia.

Hardware

O hardware do dispositivo inclui uma unidade de medição inercial (IMU) com um acelerómetro de 3 eixos, giroscópio e magnetómetro, permitindo o cálculo da orientação absoluta do módulo no espaço. Embora o dispositivo esteja preparado para a transmissão de dados sem fios, este foi modificado para armazenar os dados em um cartão de memória, devido ao enfraquecimento do sinal no ambiente aquático (Liu, Zhou, & Cui, 2008). A aquisição de dados é efetuada a 100-Hz, registando o tempo [ms], os nove canais do acelerómetro [g], giroscópio [$^{\circ}$ /s] e magnetómetro [Gauss], e os três ângulos de Euler e de direção [$^{\circ}$], em formato de valores separados por vírgula (CSV). O firmware desenvolvido está publicamente disponível como código aberto. Na Figura 1 são apresentados o dispositivo (pesando 21g) e as suas dimensões (painel a), a fixação do dispositivo nas costas de um nadador (painel b) e a orientação dos eixos durante o nado (painel c).

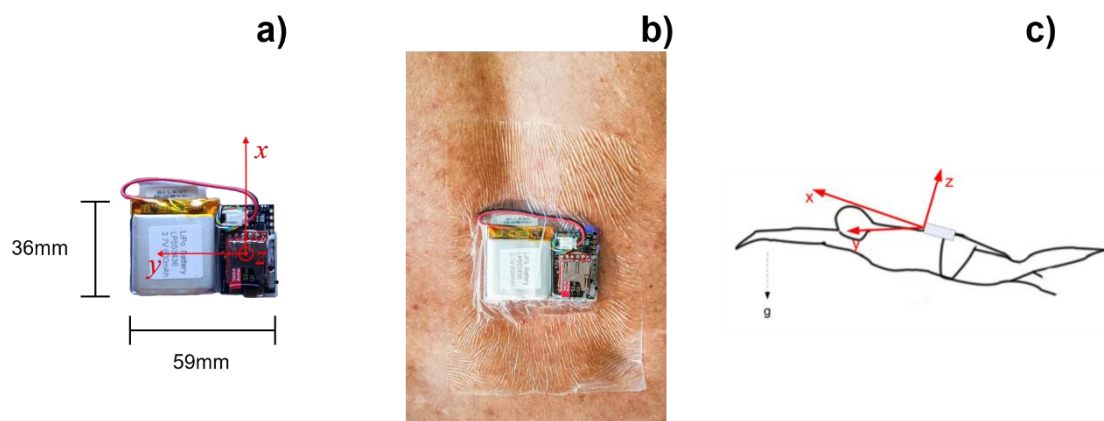


Figura 1. Ilustração da unidade de medida inercial: dimensões (painel a), fixação (painel b) e orientação (painel c).

Procedimentos

Os dados foram coletados numa piscina de 50 m com uma profundidade mínima de 1,8 m. Depois de completar o seu aquecimento típico (dentro e fora de água), cada participante foi instruído a nadar 100 m de cada técnica de nado. Nenhuma informação foi dada a respeito de: a ordem de execução, o ritmo a adotar, ou as interrupções que poderiam realizar. Assim, um total de 202 percursos foram obtidos (48 de mariposa, 50 de costas, 50 de bruços e 54 de crol), uma vez que alguns nadadores não completaram os 400 m.

Os algoritmos de processamento de dados foram desenvolvidos para analisar o desempenho do nadador, seguindo o fluxo de trabalho representado na Figura 2. O módulo de inicialização identifica parâmetros gerais (por exemplo, comprimento da piscina, características sobre o nadador). A seguir, um arquivo CSV contendo os dados adquiridos é carregado e os indicadores de desempenho pretendidos são computados. Em seguida, a terceira fase consiste em encontrar as viragens e/ou paragens dos nadadores para que os percursos possam ser isolados e processados. Numa quarta fase, e assim que a identificação da chegada é efetuada, a técnica de nado utilizada em cada percurso é estimada. Em uma quinta fase, e de acordo com a técnica estimada no módulo anterior, o número de ciclos de nado em cada percurso é contado. Em seguida, e com base em todas as fases de processamento anteriores, uma extração final é realizada (viragens e/ou paragens, bem como estatísticas de equilíbrio e rotação do corpo, elevação do tronco, frequência de ciclo e tempos de percurso). Finalmente, os sinais recolhidos e processados, bem como alguns eventos

relevantes, são colocados em gráfico para o caso de o treinador querer analisar cada sinal recolhido e ir além das características apresentadas.

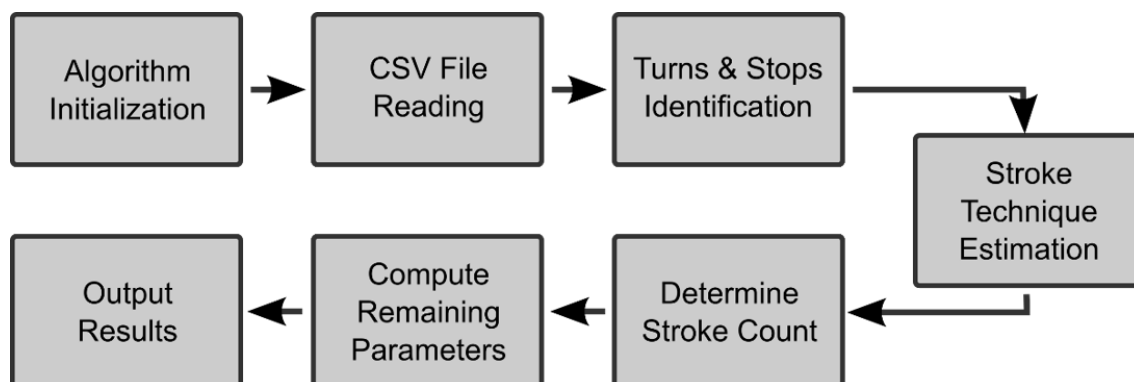


Figura 2. Fluxo de trabalho dos algoritmos de processamento de dados.

Tratamento de dados

Os indicadores de desempenho computados pelo sistema incluem: viragens e chegadas (instantes de início e término, bem como a duração de cada percurso e paragens); técnica de nado (técnica utilizada em cada percurso); tempo de percurso (em segundos); contagem de ciclos de nado (número de ciclos por percurso); frequência de ciclo (ciclos/min por percurso); elevação do tronco (ângulo de elevação do tronco em cada percurso); equilíbrio corporal (a amplitude do movimento do corpo angular); rotação do corpo (ângulo do rolamento sobre o eixo longitudinal). Uma explicação detalhada sobre o processo para cada variável está disponível no material on-line suplementar.

Resultados

Viragens e chegadas

Os dados recolhidos incluíram um total de 202 percursos, cada um delimitado por uma viragem ou chegada. Todos os eventos de delimitação foram detetados corretamente pelos algoritmos propostos, levando a 100% de precisão na segmentação. Todas as paragens foram detetadas corretamente, mas 2 das 181 viragens no conjunto de dados foram identificadas incorretamente como paragens. Estas 2 classificações erradas corresponderam a 2 viragens consecutivas que demoraram mais de 3 segundos a serem realizadas pelo mesmo nadador (um valor inesperado em um contexto competitivo). Uma vez que é utilizado um parâmetro ajustável para

especificar o limite de tempo para distinguir uma viragem de uma paragem, um treinador pode facilmente ajustá-lo para se adequar ao nível de desempenho dos nadadores que estão a ser monitorizados.

Técnica de nado

O valor do acelerómetro - eixo z - foi usado para identificar o nado de costas (se o valor rondar os -1 g). Os classificadores automáticos foram testados para distinguir as outras três técnicas (a saber, um SVM e um ANN). Neste trabalho, o conjunto de dados consistiu em 48 (mariposa) + 50 (bruços) + 54 (crol) = 152 percursos, dos quais 122 foram selecionadas aleatoriamente para treino e os restantes 30 usados para testes, somando-se um total de 1000 execuções realizadas.

O crol, o bruços e a mariposa não foram separáveis linearmente; nomeadamente para as técnicas de bruços e mariposa. Para o classificador SVM a melhor eficácia foi obtida por um kernel polinomial $\text{BoxConstraint} = 10^5$, $\rho = 1$. A ANN incluiu 3 camadas: a camada de entrada composta por 3 (correspondendo aos 3 valores dos eixos acelerómetro), uma camada oculta composta por 10 e a camada de saída composta por 3 (correspondendo às 3 técnicas). O melhor desempenho foi obtido durante o treino com o algoritmo de descida de gradiente com momento (com $\alpha = 0,5$ constante e taxa de aprendizagem $\eta = 0,3$).

A técnica de costas foi reconhecida com 100% de precisão nos 50 percursos. Para as outras 3 técnicas de nado, os melhores resultados obtidos com os dois classificadores foram muito semelhantes; os valores de concordância foram: $89\% \pm 5,51$ para a SVM e $89,6\% \pm 5,67$ para a ANN.

Contagem de ciclos

A avaliação de desempenho foi baseada na exatidão (definida em eq. 1), onde o FP representa os falsos positivos, FN os falsos negativos, VP os verdadeiros positivos e VN os verdadeiros negativos, que podem então ser usados para avaliação de desempenho. Um FP é um ciclo não contabilizado pelo algoritmo, enquanto um VN é um ciclo que é rejeitado corretamente.

$$\text{Exatidão} = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN} \quad (1)$$

Os resultados obtidos foram: 91,52% para bruços, 91,99% para mariposa, 97,48% para crol e 95,69% para costas. Alguns dos problemas observados corresponderam ao último percurso de mariposa que, ocasionalmente, não foi reconhecido, porque é executado numa rotação contínua do tronco que culmina na aproximação da viragem.

Equilíbrio corporal, rotação do corpo e elevação do tronco

Para as técnicas alternadas, o crol apresentou valores de rotação do corpo superiores aos obtidos na técnica de costas. Nas técnicas simultâneas, a mariposa obteve valores superiores de elevação do tronco em relação ao bruços. Os valores médios \pm DP são apresentados na tabela 1 e um exemplo ilustrativo dos sinais de adquiridos são apresentados na Figura 3. Nesta figura, as paragens são representadas com uma cruz enquanto as viragens são representadas com um círculo.

Tabela 1. Valores obtidos para cada uma das técnicas de nado.

		Equilíbrio corporal (°)	Rotação corpo (°)	Elevação tronco (°)
Mariposa	Min	8.33 \pm 9.21	-2.00 \pm 3.29	38.27 \pm 8.81
	Max	-29.94 \pm 8.61		
Costas	Min	0.01 \pm 6.00	33.85 \pm 15.62	n.a.
	Max		-30.13 \pm 6.76	
Bruços	Min	-3.59 \pm 8.57	-1.48 \pm 3.72	26.15 \pm 8.30
	Max	-29.74 \pm 7.61		
Crol	Min	-7.69 \pm 5.32	47.95 \pm 10.23	n.a.
	Max		-49.62 \pm 9.74	

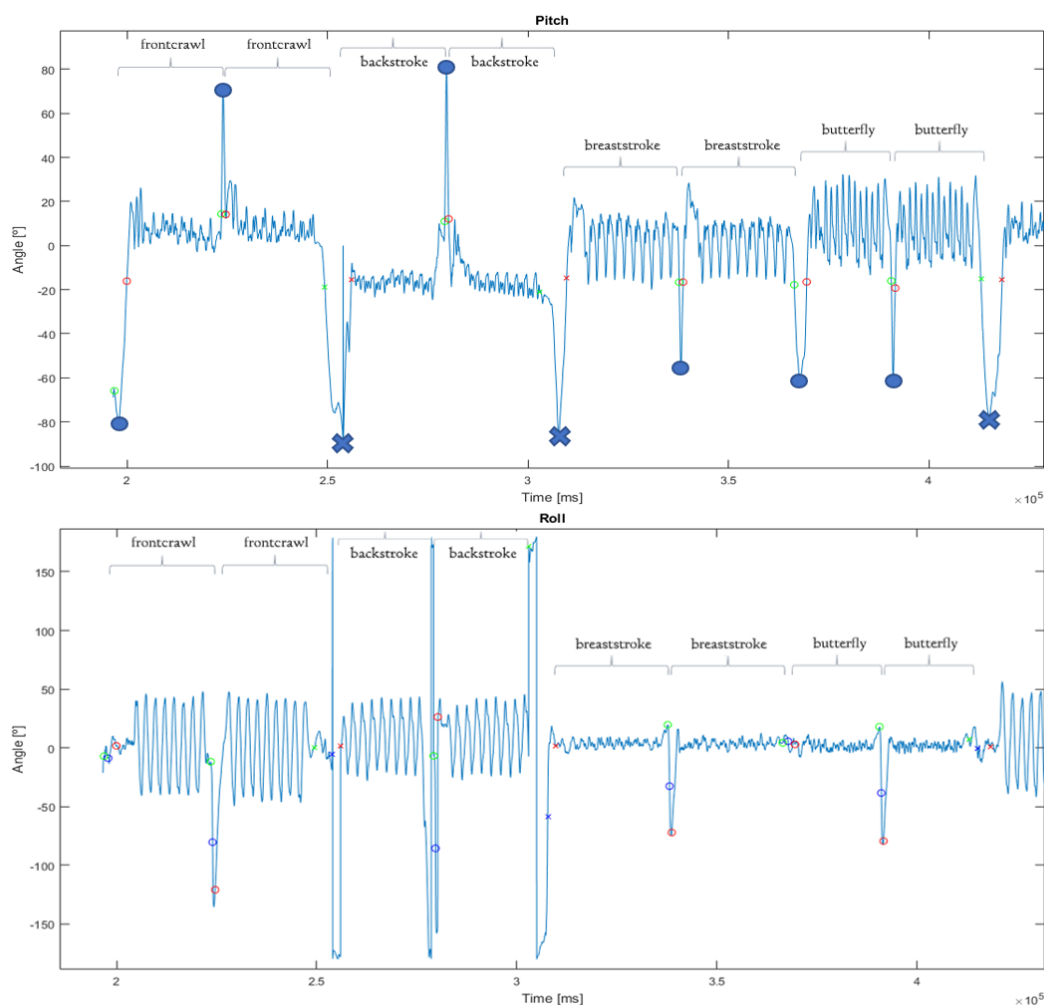


Figura 3. Ilustração representativa dos dados recolhidos com identificação das técnicas utilizadas.

Discussão e implicações

O objetivo principal do presente estudo foi desenvolver um dispositivo capaz de recolher sinais inerciais de um nadador, por forma a facultar um conjunto de informações relevantes ao processo. Para tal, foi concebido um hardware para aquisição de dados (com sistema de referência de atitude e direção – AHRS) e um processo de *machine learning* para análise de dados. Como resultado, obteve-se um dispositivo de baixo peso, baixo custo e prático, capaz de avaliar 14 variáveis instantâneas. Estudos adicionais poderão validar as variações de velocidade intracíclica (com um velocímetro) e ângulos corporais (com análise cinemática), para otimizar uma ferramenta de treino para treinadores de natação.

O recurso ao vídeo é das técnicas mais utilizadas por atletas e treinadores em todo o mundo, para corrigir erros técnicos e monitorizar alguns dos parâmetros essenciais

para uma boa prática de natação (Callaway, Cobb, & Jones, 2009; Smith et al., 2002). No entanto, é maioritariamente qualitativa, em vez de quantitativa (Mooney et al., 2016). Uma simples configuração pode ser utilizada para gravar um nadador, por exemplo, usando o telemóvel (fora de água) e/ou uma câmara de ação (subaquática). As câmaras também podem ser impermeabilizadas para obter imagens submergíveis (Osborough, Daly, & Payton, 2015), em algumas piscinas pode recorrer-se a uma janela subaquática (Monnet, Samson, Bernard, David, & Lacouture, 2014), ou ainda a um sistema de periscópio (Gourgoulis et al., 2014). Independentemente disso, a avaliação cinemática exige um trabalho bastante moroso, muito dependente das capacidades do observador, limitando o retorno imediato (Dadashi, Millet, & Aminian, 2015). Além do mais, as câmaras são bastante dispendiosas, e os efeitos negativos na precisão do sinal (mesmo com recurso a marcadores visuais) induzida pela água são outros inconvenientes que limitam a sua funcionalidade (Cortesi, Fantozzi, Di Michele, Zamparo, & Gatta, 2014). Ao considerar uma configuração mais complexa (por exemplo, SwimPro, SwimRight, Qualisys Oqus, ou sistemas análogos), aumenta-se o potencial de avaliação. No entanto, quanto mais complexa se torna a configuração, mais tempo gasto na sincronização e processamento de dados será necessário. Todo este processo pode ser facilitado pelos recentes avanços obtidos ao nível dos sensores inerciais.

Com os dados recolhidos, foram desenvolvidos algoritmos para a computação dos indicadores de desempenho. Não só foi objetivo fornecer um elevado número de variáveis, mas principalmente para adotar um algoritmo eficiente para fornecer resultados imediatos. Assim, um conjunto de algoritmos foram desenvolvidos usando o MATLAB®, que computam indicadores de desempenho relevantes (por exemplo, elevação de tronco). Tendo em consideração a importância da posição hidrodinâmica para minimizar o arrasto (Kolmogorov & Duplishcheva, 1992; Kjendlie & Stallman, 2008), controlar a elevação do tronco ao longo de toda uma série típica de treino poderá ser de extrema relevância para examinar a inferência de fadiga e erros técnicos. Similarmente, através de uma rotação de corpo ideal, os nadadores podem otimizar sua trajetória de mão atingindo trajetórias mais longas (Psycharakis & Sanders, 2010). E, pela literatura existente, este é o primeiro sistema a recorrer aos ângulos de Euler para executar o processamento e calcular estes indicadores de desempenho em natação.

Uma vez impermeabilizadas, as IMUs fornecem várias vantagens sobre os sinais recolhidos através de vídeo na análise do comportamento dinâmico em atletas. Em primeiro lugar, porque a digitalização dos dados recolhidos não é necessária: parte do processamento pode ser feita diretamente no IMU, e o pós-processamento remanescente é, conseqüentemente, realizado no computador (Magalhaes et al., 2015). Em segundo lugar, é muito mais prático, pois o desconforto causado por um pequeno dispositivo anexado é muito menor do que o desconforto causado por um fato completo com marcadores visuais anexados a ele (Callaway et al., 2009). Em terceiro lugar, este tipo de dispositivo pode, em alguns casos, armazenar uma enorme quantidade de informação (Dadashi, Millet, & Aminian, 2013). Em quarto lugar, uma vez que o processamento é feito automaticamente no computador, os resultados estão prontos de uma forma muito rápida e simples. Por último, é uma alternativa acessível e cada atleta pode facilmente adquirir um. Os participantes indicaram que se sentiram confortáveis com a presença do dispositivo, descrevendo que as costas seria o lugar mais prático e menos inconveniente para tê-lo no treino diário, comparativamente a colocações como o pulso, na zona da cabeça ou dos óculos.

Conclusão

Neste trabalho descrevemos o projeto e o desenvolvimento de um sistema de natação capaz de auxiliar o treinador. Tendo em consideração a especificidade que cada nadador tem na realização da sua técnica de nado, o reconhecimento nas técnicas simultâneas revelou-se mais complexo: no caso da técnica de mariposa o movimento dos membros inferiores no percurso subaquático após viragem é praticamente igual ao realizado durante o nado. O presente sistema, recorrendo aos ângulos de Euler, conseguiu processar e calcular parâmetros relevantes para o controlo de treino de nadadores que não estão disponíveis nos sistemas ou soluções comerciais existentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos treinadores e nadadores pela sua participação neste estudo.

Referências

- Aspenes, S. T., & Karlsen, T. (2012, June). Exercise-training intervention studies in competitive swimming. *Sports Medicine*, Vol. 42, pp. 527–543. <https://doi.org/10.2165/11630760-000000000-00000>
- Bächlin, M., & Tröster, G. (2012). Swimming performance and technique evaluation with wearable acceleration sensors. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(1), 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2011.05.003>
- Barbosa, T. M., Bragada, J. A., Reis, V. M., Marinho, D. A., Carvalho, C., & Silva, A. J. (2010). Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: updating the state of the art. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.01.003>
- Barbosa, T. M., Morouço, P. G. F., Jesus, S., Feitosa, W. G., Costa, M. J., Marinho, D. A., ... Garrido, N. D. (2013). The interaction between intra-cyclic variation of the velocity and mean swimming velocity in young competitive swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 34(2), 123–130. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1312582>
- Callaway, A. J., Cobb, J. E., & Jones, I. (2009). A Comparison of Video and Accelerometer Based Approaches Applied to Performance Monitoring in Swimming. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 4(1), 139–153. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.4.1.139>
- Chakravorti, N., Le Sage, T., Slawson, S. E., Conway, P. P., & West, A. A. (2013). Design and Implementation of an Integrated Performance Monitoring Tool for Swimming to Extract Stroke Information at Real Time. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(2), 199–213. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2012.2235428>
- Cortesi, M., Fantozzi, S., Di Michele, R., Zamparo, P., & Gatta, G. (2014). Passive drag reduction using full-body swimsuits: The role of body position. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(11), 3164–3171. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000508>
- Cortesi, M., Giovanardi, A., Gatta, G., Mangia, A. L., Bartolomei, S., & Fantozzi, S. (2019). Inertial Sensors in Swimming: Detection of Stroke Phases through 3D Wrist Trajectory. *Journal of Sports Science*, 18(3), 438–447. Retrieved from <https://www.jssm.org/hf.php?id=jssm-18-438.xml#7>

- Dadashi, F., Crettenand, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2012). Front-crawl instantaneous velocity estimation using a wearable inertial measurement unit. *Sensors (Switzerland)*, 12(10), 12927–12939. <https://doi.org/10.3390/s121012927>
- Dadashi, F., Millet, G., & Aminian, K. (2013). Inertial measurement unit and biomechanical analysis of swimming: an update. *Swiss Society of Sports Medicine*, Vol. 61, pp. 21–26. Retrieved from <http://infoscience.epfl.ch/record/189819/files/Sportmedizin - Dadashi et al- 2013.pdf>
- Dadashi, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2015). A Bayesian approach for pervasive estimation of breaststroke velocity using a wearable IMU. *Pervasive and Mobile Computing*, 19, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.03.001>
- Davey, N., Anderson, M., & James, D. A. (2008). Validation trial of an accelerometer-based sensor platform for swimming. *Sports Technology*, 1(4–5), 202–207. <https://doi.org/10.1080/19346182.2008.9648474>
- Davey, N. P., James, D. A., & Anderson, M. E. (2004, March 30). *Signal analysis of accelerometry data using gravity-based modeling* (D. Abbott, K. Eshraghian, C. A. Musca, D. Pavlidis, & N. Weste, Eds.). <https://doi.org/10.1117/12.530184>
- Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M., & Pelayo, P. (2002). Validity and Reliability of Critical Speed, Critical Stroke Rate, and Anaerobic Capacity in Relation to Front Crawl Swimming Performances. *International Journal of Sports Medicine*, 23(2), 93–98. <https://doi.org/10.1055/s-2002-20125>
- Gourgoulis, V., Boli, A., Aggeloussis, N., Toubekis, A., Antoniou, P., Kasimatis, P., ... Mavromatis, G. (2014). The effect of leg kick on sprint front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 32(3), 278–289. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.823224>
- Kjendlie, P.-L., & Stallman, R. K. (2008). Drag Characteristics of Competitive Swimming Children and Adults. *Journal of Applied Biomechanics*, 24(1), 35–42. <https://doi.org/10.1123/jab.24.1.35>
- Kolmogorov, S. V., & Duplishcheva, O. A. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics*, 25(3), 311–318. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(92\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90028-Y)
- Liu, L., Zhou, S., & Cui, J. H. (2008). Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(8), 977–994. <https://doi.org/10.1002/wcm.654>

- Magalhaes, F. A. de, Vannozzi, G., Gatta, G., & Fantozzi, S. (2015, April 21). Wearable inertial sensors in swimming motion analysis: a systematic review. *Journal of Sports Sciences*, Vol. 33, pp. 732–745. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962574>
- Monnet, T., Samson, M., Bernard, A., David, L., & Lacouture, P. (2014). Measurement of three-dimensional hand kinematics during swimming with a motion capture system: A feasibility study. *Sports Engineering*, 17(3), 171–181. <https://doi.org/10.1007/s12283-014-0152-4>
- Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Osborough, C., Newell, J., Quinlan, L. R., & ÓLaighin, G. (2016). Analysis of swimming performance: perceptions and practices of US-based swimming coaches. *Journal of Sports Sciences*, 34(11), 997–1005. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1085074>
- Osborough, C., Daly, D., & Payton, C. (2015). Effect of swim speed on leg-to-arm coordination in unilateral arm amputee front crawl swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 33(14), 1523–1531. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996181>
- Psycharakis, S. G., & Sanders, R. H. (2010). Body roll in swimming: A review. *Journal of Sports Sciences*, 28(3), 229–236. <https://doi.org/10.1080/02640410903508847>
- Smith, D. J., Norris, S. R., & Hogg, J. M. (2002). Performance evaluation of swimmers: Scientific tools. *Sports Medicine*, Vol. 32, pp. 539–554. <https://doi.org/10.2165/00007256-200232090-00001>
- Veiga, S., & Roig, A. (2017). Effect of the starting and turning performances on the subsequent swimming parameters of elite swimmers. *Sports Biomechanics*, 16(1), 34–44. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1179782>
- Washino, S., Mayfield, D. L., Lichtwark, G. A., Mankyu, H., & Yoshitake, Y. (2019). Swimming performance is reduced by reflective markers intended for the analysis of swimming kinematics. *Journal of Biomechanics*, 91, 109–113. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.05.017>