

<研究資料 (査読あり)>

モーションセンサを用いた水中ドルフィンキック中の 下肢関節運動計測の検討

Examination of joint motion measurement in lower limb during underwater dolphin
kicking using inertial measurement units

山川 啓介¹⁾ 金田 晃一²⁾ 古賀 大樹³⁾ 甫本 研太³⁾ 高木 英樹⁴⁾
Keisuke KOBAYASHI-YAMAKAWA, Koichi KANEDA, Daiki KOGA
Kenta HOMOTO, Hideki TAKAGI

Abstract

The purpose of this study was to verify the validity of joint motion measurement in lower limbs during underwater dolphin kicking using inertial measurement unit (IMU) sensors. One female competitive swimmer participated to this study, and she performed a 20 m underwater dolphin kick swimming at her maximum effort. To evaluate the validity of the methodology using IMU sensors, we used both IMU sensors and 3D motion capture system to analyze the hip and knee joint motions during one kick cycle. From the results of the cross-correlation analysis, the maximum r-values in hip flexion/extension angle was 0.94 and the maximum r-values in knee flexion/extension angle was 0.94, while the maximum r-value in hip internal/external rotation angle was 0.37. Therefore, it was shown that the validity of measurement for hip rotational motion during underwater dolphin kicking was low. Furthermore, the ranges of differences in peak hip and knee flexion/extension angles through one kick cycle were 1.7—13.3 degrees, while the similarities in these angle changes were very high. From these results, it was clarified that it can be applied to evaluate the changes of hip and knee joint angles during underwater dolphin kicking while it was difficult to compare the absolute joint angles.

Keywords: swimming, inertial measurement unit, 3D motion analysis

I. 緒言

競泳競技において、水中ドルフィンキックはスタート・ターン後に用いられる潜水泳法であり、スタート時の飛び込みやターン時の壁蹴りで獲得した高い速度の減少を抑えるのに効果的であることが知られている¹²⁾。現在の競泳競技規則では、スタート・ターン後の15 mの範囲で潜水泳が許可され、平泳ぎを含むすべての泳法で水中ドルフィンキックをレースで用いることができる（平泳ぎではキック回数の制限がある）。このことから、近年では競泳競技者が近代4泳法（クロール、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライ）と同時に練習すべき第5のストロークとして重要視されている²⁾。

水中ドルフィンキックは水中波動泳（Underwater Undulatory Swimming）とも呼ばれ、両腕を挙げて

上半身でストリームライン姿勢を作りながら全身をうねらせ、両足を揃えたキック動作で推進する泳法である。キック中は体幹から下肢をムチ打ちのように動かして足先の移動速度を高めるため⁷⁾、水中ドルフィンキックの泳動作では関節間の高い連動性と素早い関節運動が求められる^{3,5,6,11)}。このような動作の特徴は、クロールで用いられるフラッターキック（所謂バタ足）中の下肢の関節運動と類似している。Sanders et al.⁹⁾のフラッターキックを対象とした研究では、水泳の熟練度が高い者ほどキック中の関節間の連動性が高く周期間の動作変動が少ないため、関節運動のコーディネーションから泳技能の熟練度を評価できることを報告している。そのため、水中ドルフィンキック中の下肢関節運動の分析は、泳パフォーマンスや熟練度を評価することに応用できると考えられる。さらに、Shimojo et al.¹⁰⁾は、水中ドルフィンキックのダウンキック中に観察された足部の外旋動作が足裏で生じる渦の回転速度を高め、それがダウンキック中の推進力の増大に貢献している可能性があることを報告している。実際に、Yamakawa et al.¹³⁾は、水中ドルフィンキック

¹⁾ 日本女子体育大学（講師）

²⁾ 千葉工業大学先進工学部（准教授）

³⁾ 筑波大学大学院人間総合科学研究科（院生）

⁴⁾ 筑波大学体育系（教授）

ク中の平均泳速度とキック中の股関節最大外旋速度に有意な正の相関関係があったことを報告している。そのため、水中ドルフィンキック中の関節運動を分析する上では、屈曲—伸展方向の関節運動だけでなく、内旋—外旋方向の関節運動についても分析することが必要であると言える。

しかしながら、従来の水中環境における3次元動作分析では、防水仕様のカメラを複数台使用しながら、全身の泳動作を分析するための十分な空間（広さと深さ）を有するプールで実験を行う必要があり、機材や施設などの面で様々な制約がある。そこで我々は、これらの問題を解決するための手法として、加速度センサやジャイロセンサなどの慣性計測装置を内蔵したモーションセンサ（以下IMUと略す）を利用した関節運動分析手法に着目した。近年、IMUはスポーツ分野における様々な運動計測に用いられてきており、いくつかの先行研究では水中ドルフィンキック中の動作分析にIMUを利用している^{4,8)}。しかしながら、IMUを利用して水中ドルフィンキック中の3次元的な関節運動の分析を試みた研究は報告されていない。

そこで本研究は、防水仕様IMUを用いて水中ドルフィンキック中の下肢関節運動を3次元的に分析し、モーションキャプチャシステム（以下MCと略す）で計測した関節角度データとの比較からIMUを用いて計測した関節角度データの妥当性について検討することを目的とした。

II. 方法

1. 対象

本研究には大学水泳部の所属する女性競泳選手1名（身長164.0cm, 体重62.5kg, 競技歴15年）が参加した。対象者には実験の目的、方法、リスク、安全対策について事前に説明を行い、書面にて参加の同意を得た。本研究は筆者が所属する組織の研究倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号：2019-12）。

2. 実験試技

実験は屋内25 mプール（水温 28.0—29.0℃）で実施した。実験の30分前から対象者は任意のウォーミ

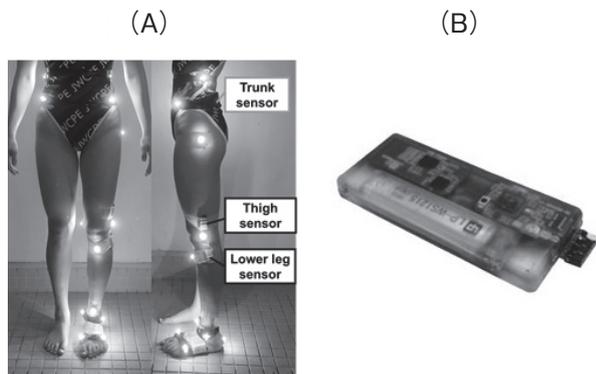


図1 身体マーキングとモーションセンサの貼付位置 (A) と本研究で使用したモーションセンサ (B)

ングアップを行った。対象者は、運動課題として最大努力での20 m水中ドルフィンキック泳を実施した。試技のスタートは水中プッシュオフ（壁蹴り）スタートを採用し、スタート地点より20 mまでを可能な限り速く泳ぐよう対象者に指示した。水中ドルフィンキック中の身体の傾きがパフォーマンスに与える影響を考慮して、対象者には可能な限り水平にまっすぐ泳ぐよう指示をした。さらに、水面付近における造波抵抗の影響を考慮して対象者に水深1 mで泳ぐよう指示をした。実験試技は分析可能なデータが収集できるまで3分程度休息を挟みながら繰り返し行い、対象者は実験試技を3回実施した。

3. 関節角度計測

1) IMUを用いた関節角度データの算出

IMUを用いた関節角度データの算出では防水型9軸ワイヤレスモーションセンサ（LP-WS121, ロジカルプロダクト社製, サンプル周波数200 Hz, 図1-B）を使用した。図1-Aのように、対象者の腰部、大腿部、下腿部にセンサを貼付し、それぞれのセンサで計測された加速度と角速度のデータからオイラー角で表されたセンサの姿勢推定角を算出した。各々のセンサにおける姿勢推定角を体幹、大腿、下腿セグメントの姿勢推定角と定義し、Philips et al.⁸⁾を参考に基準軸となるセグメントの姿勢推定角データと、運動軸となるセグメントの姿勢推定角データの差分として関節角度を算出した。角度算出に伴うノイズ除去のために、算出した関節角度データは遮断周波数10 Hzの位相ずれのない4次のバターワースローパスフィルターを用いてフィルタリングした。

2) MCを用いた関節角度データの算出

MCを用いた関節角度データの算出では水中用モーションキャプチャシステム（VENUS 3D, ノビテック社製, サンプル周波数200 Hz）を使用した。MCによる動作分析を行うために、対象者の15点の身体分析点（左右の肋骨下端、左右の股関節大転子、左右の上前腸骨棘、大腿骨内側/外側上果、足関節内果/外果、第一中足骨端、第五中足骨端、踵骨隆起）にLEDマーカー（煌, ノビテック社製）を用いてマーキングを行った（図1-A）。カメラの設置位置は、計測空間（スタート地点より10 mから20mの間）を囲むように14台のモーションカメラを水中に設置した（図2）。また、MCの計測データはIMUの計測データと時間同期を行うために、同期発光装置（LP-WSYLT2, ロジカルプロダクト社製）を用いて同期

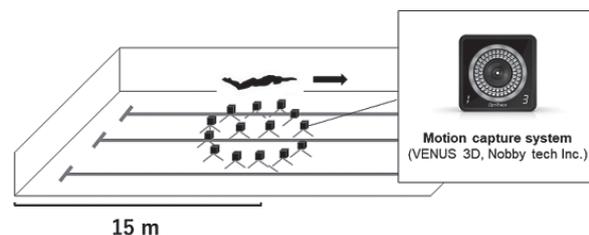


図2 実験設定

シグナルがIMUとMCの両計測データに同時に記録されるように設定した。

計測された3次元座標データを用いて、股関節と膝関節の角度をYamakawa et al.¹³⁾の方法を参考に体幹、大腿、下腿のセグメント座標系を定義してカルダン角で算出した。IMUの計測手法と同様、角度算出に伴うノイズ除去のために、算出した関節角度データは遮断周波数10 Hzの位相ずれのない4次のバターワースローパスフィルターを用いてフィルタリングした。

4. データ分析

本研究では分析区間を通過した際のキック1周期のデータを分析した。本研究において、キック中の足先(第五中足骨)が下方に移動し始めた時点から次に下方に移動し始める時点をキック1周期として定義し、さらに足先が下方に移動し始めてから上方に移動し始めるまでの局面をダウンキック局面、足先が上方に移動し始めてから下方に移動し始めるまでの局面をアップキック局面と定義した。関節角度データは各軸周りの回転を右手座標系で表した。関節角度の分析では、Yamakawa et al.¹³⁾の研究結果に従い、水中ドルフィンキックの下肢関節運動に主に関わる股関節の屈曲—伸展角度、股関節の外旋—内旋角度、膝関節の屈曲—伸展角度のみを分析対象とした。キック周期中の最大角度をそれぞれ算出し、角度変位の類似度については相互相関法を用いて評価した。相互相関分析は数値解析ソフトウェアMATLAB(Mathworks社製)を用いて行い、データ間の最大相関係数と位相ずれ時間をそれぞれ算出した。

III. 結果

図3, 4, 5には水中ドルフィンキック1周期における両測定方法で算出した関節角度データの結果を示した。表1には計測手法間における相互相関分析の結果を示した。表2には最大角度の結果を示した。

IV. 考察

本研究の目的はIMUを用いて水中ドルフィンキック中の下肢関節運動を3次元的に分析し、その妥当性を検討することであった。先行研究ではIMUを用いて水中ドルフィンキック中の矢状面上の泳動作を分析しており、キック頻度、ダウンキック時間、アップキック時間、股関節・膝関節の屈曲—伸展角度などの分析結果を報告している^{4,8)}。そのため、本研究はIMUを用いて3次元的に水中ドルフィンキック中の関節運動の分析を試みた最初の研究であったと言える。

MCを用いた水中ドルフィンキック中の下肢関節運動の3次元動作分析の結果はYamakawa et al.¹³⁾が報告しており、水中ドルフィンキック中はダウンキック前半に股関節が内旋し、ダウンキック後半に股関節が外旋することが明らかになっている。図4のように、本研究ではIMUとMCの両計測手法においてダウン

表1 最大相関係数と位相ずれ時間の結果

変数	単位	股関節 屈曲—伸展角度	股関節 内旋—外旋角度	膝関節 屈曲—伸展角度
最大相関係数		0.94	0.37	0.95
位相ずれ時間	(sec)	0.01	0.02	0.00

表2 キック中の最大角度の結果

変数	単位	IMU	MC
股関節 最大伸展角度	(degree)	21.7	11.2
股関節 最大屈曲角度	(degree)	-31.9	-18.7
股関節 最大内旋角度	(degree)	-5.2	43.2
股関節 最大外旋角度	(degree)	-58.7	-22.1
膝関節 最大屈曲角度	(degree)	75.0	70.7
膝関節 最大伸展角度	(degree)	-9.9	-8.2

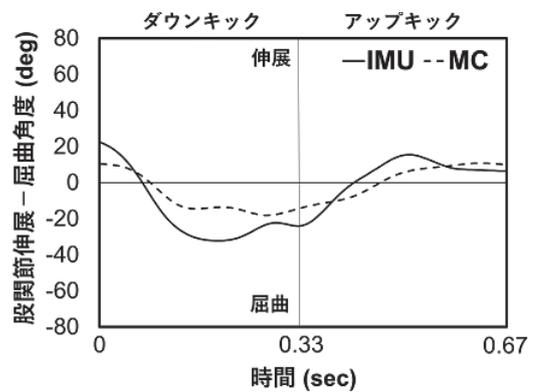


図3 キック中の股関節伸展—屈曲角度の時系列変化

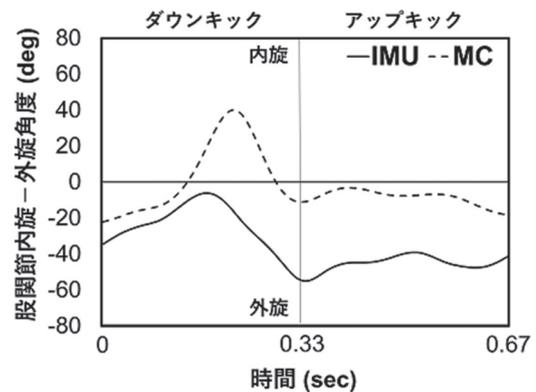


図4 キック中の股関節内旋—外旋角度の時系列変化

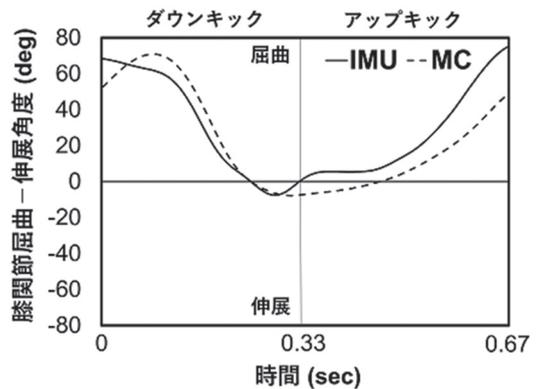


図5 キック中の膝関節屈曲—伸展角度の時系列変化

キック前半に股関節が内旋し、ダウンキック後半に股関節が外旋したことが観察された。しかしながら、表1の相互相関分析の結果では、両計測手法のデータ間の位相ずれは概ねないことが示されたものの、股関節・膝関節の屈曲—伸展角度に比べて股関節内旋—外旋角度の相関係数が低いことが示された。この理由として、図4のように股関節内旋—外旋運動が少ないアップキック局面中の角度変位パターンが反転していたことが影響した可能性が考えられた。アップキック時の大腿部に貼付されたセンサは水の抵抗によって内旋方向への力を受けるため、皮膚揺動によってわずかな内旋運動がデータに反映される可能性がある。今後の課題としてセンサの貼付位置やセンサの固定の方法について更なる工夫が必要であると考えられた。

一方、股関節・膝関節の屈曲—伸展角度では、相互相関分析における最大相関係数が高くデータ間の位相ずれも概ねないことから（表1）、IMUから計測された角度変位データとMCで得られた角度変位データは十分に比較可能であることが示された。しかしながら、表2のキック中の最大角度の結果では、1.7—13.3度の範囲で差が生じていた。この理由として、IMUを用いて計測された関節角度とMCを用いて計測された関節角度は関節運動の基準軸と運動軸が厳密には異なっているため、それが絶対角度に影響したと考えられた。Benjaminse et al.¹⁾は、陸上でのスクワット動作をVICON（光学式モーションカメラを用いたモーションキャプチャシステム）とXsens（IMUデータを用いたモーションキャプチャシステム）の2つの計測装置を用いて分析し、相互相関分析における下肢関節角度の最大相関係数の範囲は0.75—0.99で、絶対角度の差分の範囲は0.7—14.7度であったと報告している。この先行研究においても、関節角度変位は十分に比較可能であるものの、絶対角度の比較は難しく、これらの計測手法の違いに伴う差を考慮したデータ解釈が必要であると結論付けられている。本研究における最大角度の差分の範囲は先行研究とほぼ同等の値であった。従って、今後IMUを利用して泳動作中の関節運動を分析する場合、このような計測手法特有の誤差が含まれていることに注意しながら、他の分析手法を用いた研究と比較することを推奨する。

研究の限界として、IMUとMCの両計測手法は身体表面にマーカーやセンサを医療用テープで貼付したため、動作と水の抵抗に伴う皮膚揺動のノイズがデータに乗っていることが挙げられる。本研究のフィルタリング今後の課題として、マーカーやセンサをより小さくしていくことがこのようなノイズを最小限にすることが可能になると考えられる。また、本研究は女性競泳選手1名のデータのみを分析したため、今後は男性などの体組成などの身体的特徴の異なる複数の対象者のデータも取り扱うことで計測手法の妥当性や信頼性についてより深く議論できると考えられる。

V. まとめ

本研究はIMUとMCを併用して水中ドルフィンキック中の股関節・膝関節における関節角度計測を行い、慣性計測装置を用いた関節角度計測手法の妥当性の検討を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- IMUによる股関節・膝関節における屈曲—伸展角度の計測では、時系列の角度変位の類似度が高いことが確認されたものの、MCによる計測データと比較して最大角度に1.7—13.3度の範囲で差が生じていた。
- IMUによる股関節の内旋—外旋角度の計測では、時系列の角度変位の類似度が低いことが確認され、今後はセンサの貼付位置やセンサの固定の方法についての更なる工夫が必要であると考えられた。

付記

本研究は令和元年度日本女子体育大学二階堂奨励研究費の助成の補助を受けて実施された。

謝辞

本研究の実験実施にあたりご協力いただいた日本女子体育大学水泳部の部員、筑波大学水泳研究室の大学院生ならびに関係者の方々に深く感謝申し上げます。

引用・参考文献

- 1) Benjaminse, A., Bolt, R., Gokeler, A., & Otten, B. (2020) A Validity study comparing Xsens with VICON. *ISBS Proceedings Archive*, 38 (1) : 752.
- 2) Collard, L., Gourmelin, E., & Schwob, V. (2013) The fifth stroke: the effect of learning the dolphin- kick technique on swimming speed in 22 novice swimmers. *Journal of swimming research*, 21 (1) .
- 3) Connaboy, C., Naemi, R., Brown, S., Psycharakis, S., McCabe, C., Coleman, S., & Sanders, R.H. (2016) The key kinematic determinants of undulatory underwater swimming at maximal velocity. *Journal of Sports Sciences*, 34 (11) : 1036-1043.
- 4) Engel, A., Schaffert, N., Wobbe, J.F., & Mattes, K. (2020) Comparison of video and IMU data for analyzing the underwater dolphin kick. *Journal of Sport and Human Performance*, 8 (1) : 1-11.
- 5) Higgs, A.J., Pease, D.L., & Sanders, R.H. (2017) Relationships between kinematics and undulatory underwater swimming performance.

- Journal of Sports Sciences, 35 (10) : 995-1003.
- 6) Houel, N., Elipot, M., André, F., & Hellard, P. (2013) Influence of angles of attack, frequency and kick amplitude on swimmer's horizontal velocity during underwater phase of a grab start. *Journal of applied biomechanics*, 29 (1) : 49-54.
 - 7) 小林啓介, 下門洋文, 高木英樹, 椿本昇三, 仙石泰雄 (2016) エリート女性競泳選手の水中ドルフィンキックにおける体幹, 大腿, 下腿の筋活動様式. *体育学研究*, 61 (1) : 185-195.
 - 8) Phillips, C.W., Forrester, A.I., Hudson, D.A., & Turnock, S.R. (2014) Comparison of kinematic acquisition methods for musculoskeletal analysis of underwater flykick. *Procedia engineering*, 72: 56-61.
 - 9) Sanders, R.H. (2007) Kinematics, coordination, variability, and biological noise in the prone flutter kick at different levels of a "learn-to-swim" programme. *Journal of sports sciences*, 25 (2) : 213-227.
 - 10) Shimojo, H., Gonjo, T., Sakakibara, J., Sengoku, Y., Sanders, R., & Takagi, H. (2019) A quasi three-dimensional visualization of unsteady wake flow in human undulatory swimming. *Journal of Biomechanics*, 93: 60-69.
 - 11) 下門洋文, 仙石泰雄, 椿本昇三, 高木英樹 (2014) 屋内プールおよび回流水槽におけるドルフィンキック泳のキネマティクスと競泳泳者が抱く身体感覚. *体育学研究*, 59 (1) : 237-249.
 - 12) Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H., & Tsubakimoto, S. (2009) Do differences in initial speed persist to the stroke phase in front-crawl swimming? *Journal of Sports Sciences*, 27 (13) : 1449-1454.
 - 13) Yamakawa, K.K., Takagi, H., & Sengoku, Y. (2018) Three-dimensional analysis of hip and knee joint movements during dolphin kicking and butterfly swimming. *Proceeding of the XIIIth international symposium on biomechanics and medicine in swimming*. Tsukuba: University of Tsukuba. pp187-192

