

氏名	加地 智哉
学位の種類	博士（体育学）
学位記番号	第 6 5 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位授与年月日	令和 6 年 3 月 2 5 日
学位論文題目	クロール泳中のキック動作による力学的効果と泳速度向上の機序
論文審査委員	主査 田巻 弘之 副査 高井 洋平 副査 村井 昭彦

論 文 概 要

【緒論】競泳競技において、クロール泳は 50 m から 1500 m の幅広い泳距離で競われるため、泳者は各泳距離に応じて泳技術を高める必要がある。クロール泳では、キック動作を行った方が行わない場合よりも高い泳速度が達成できる。泳速度は推進力と抵抗力の両者によって決定されるため、キック動作の役割は抵抗力の減少と推進力の増大の 2 点から考えることができる。前者は身体の傾き（体幹傾斜角）の減少により達成されと考えられており、後者は見込めないとされている。しかしながら、前者は最大努力泳時のみ、後者はシミュレーションにて検証されていることから、得られた知見が実際のクロール泳かつ幅広い泳速度において当てはまるか定かではない。そこで本博士論文では、クロール泳中のキック動作の役割を抵抗力と推進力の 2 点に焦点を当てて明らかにすることを目的とした。この目的を達成する上で、特に足部の力と運動を計測するには、泡によるオクルージョンという水中運動計測ならではの技術的課題を解決する必要があった。そこでまずは研究 1、研究 2 にて、泡による影響を受けない運動計測手法として、慣性センサによる水泳運動計測システムを開発したのち、研究 3 と研究 4 にてクロール 泳中のキック動作の役割について検討した。

【研究 1】慣性センサと圧力センサを併用した水泳中の推進力推定手法を検討する第一歩として、水中環境において足部よりも計測が容易な手部動作に着目し、手部で発揮される推進力を推定し、得られた値の精度について検証した。男子大学競泳選手 5 名の両手部に 2 個の慣性センサ、10 個の反射 マーカー、12 点の圧力センサを貼付し、対象者に 25m クロール泳を複数回実施させた。全対象者から得られた 297 ストロークの結果より、高い級内相関係数 ($ICC(2,1) = 0.966$) を得た。また、Bland-Altman 分析の結果、光学式モーションキャプチャとの間に固定誤差と比例誤差は確認されなかったことから、少なくとも手部においては光学式モーションキャプチャと同程度に推定可能であることがわかった。

【研究 2】複数の静止ポーズと動作を用いて慣性センサの姿勢を校正することで水泳の全身運動を推定する手法を提案し、その精度を検証することを目的とした。16 個の慣性センサを、競泳経験を有する男性 2 名に貼付した。対象者には、陸上に設置した台上で、メトロノームによって設定されたテンポ（50 bpm, 70 bpm, 90 bpm, 110 bpm）に合わせて、クロール泳の模擬動作を各テンポで 2 回実施させた。デジタルヒューマンモデル上に慣性センサの貼付位置を定義し、N ポーズのみを使用した校正方法と、複数姿勢および動作を使用した校正方法の両方で推定精度を検証した。その結果、N ポーズのみを使用する場合よりも、複数姿勢および動作を用いて校正した方が姿勢推定および位置推定精度が向上することが明らかとなった。しかしながら、依然として位置の推定精度は、光学式モーションキャプチャに比べて低かった。以上より、研究 3 では光学式モーションキャプチャにより位置情報をもとに算出する体幹傾斜角に着目して、研究 4 では研究 1, 2 で開発した手法により足部の力発揮に着目してキック動作の役割を検証した。

【研究 3】男子大学競泳選手 7 名を対象に検証した。対象者は 6-beat キックを用いたクロール泳 (SWIM)、プルブイを用いたアームストローク泳 (AWB)、プルブイを用いないアームストローク泳 (AWOB) をそれぞれ異なる泳速度で実施した。全条件における最初の試技での目標泳速度は $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ に設定し、そこから試技ごとに $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ずつ漸増させ、対象者が指定された目標泳速度を保つことができなくなるまで実施した。泳者の身体に反射マーカーを貼付して、手部推進力および体幹傾斜角を算出し、泳速度との関係を各条件で比較した。その結果、最大泳速度では、SWIM は AWB と AWOB よりも高値を示したが、最大手部推進力では低値を示した。泳速度と手部推進力の関係において、SWIM では、AWB や AWOB よりも、同一泳速度における手部推進力が小さいことがわかった。また、SWIM の体幹傾斜角は、低速度域では、AWOB よりも低値であり、高速度域では、AWB よりも低値であった。以上より、クロール泳中のキック動作は、低速度域では下肢の浮上により、高速度域では下肢の沈下抑制により体幹傾斜角を減少させ、体幹部の圧力抵抗を減少させる効果を有している可能性が示唆された。

【研究 4】男子大学競泳選手 10 名を対象に検証した。対象者は SWIM と AWOB をそれぞれ異なる泳速度で実施した。速度の設定は、研究 3 と同様に実施した。泳者の身体に 16 個の慣性センサを貼付して、研究 2 で開発した方法にて運動計測を実施した。また、圧力センサを両手部に 12 点、両足に 16 点貼付し、手部推進力、足部の進行方向および鉛直方向の力を推定した。その結果、研究 3 と同様に、SWIM では AWOB よりも最大泳速度は高値を示し、最大手部推進力は低値を示した。また SWIM では AWOB よりも同一泳速度における手部推進力が低値であった。クロール泳中のキック動作では、巨視的に見ると推進力としては寄与していないことが明らかとなった。また、クロール泳中の足部で発揮される鉛直方向の力は、ダウンビートにより獲得され、それは泳速度の増加に伴い増大することがわかった。さらに、手部推進力と足部の鉛直方向の力が、泳速度に正の影響を及ぼすことが明らかとなった。

【結論】以上のことから，クロール泳中のキック動作は，巨視的に見ると推進力としては寄与しておらず，ダウンビートにより鉛直方向の力を発揮することで，低速度域においては下肢の浮上，高速度域においては下肢の沈下抑制により体幹傾斜角の増大を防ぎ，体幹部の圧力抵抗を低減させることで，小さな手部推進力で高い泳速度が達成できる間接的な効果を有しており，泳速度を向上させる有効な手段になりうることを示唆された．

論文審査の要旨

本研究はクロール泳中のキック動作の役割について、主に抵抗力和足部で発揮される推進力に着目し、光学式モーションキャプチャシステムや慣性センサを用いて明らかにすることを目的としている。研究1～4を通して、従来の光学式モーションキャプチャシステムで課題となっていた水中での泡発生の問題を慣性センサによる水泳運動計測システムを開発して克服するなど高いオリジナリティや工夫がみられる。また計測精度検証も丁寧に行われ、クロール泳中のキック動作の働きは泳速度で異なり、比較的低速度域では下肢の浮上に、高速度域では下肢の沈下抑制に働き、体幹の傾斜角度や圧力抵抗の調整に寄与していることを明らかにしている。総じて、研究テーマ及び研究内容の独創性、研究デザインや方法、当該研究領域に対する包括的な理解、論文構成等の観点から論文審査を行った結果、上記の知見を提示した本論文の内容は、博士（体育学）の学位論文として十分な学術的価値を有するものと判定した。