

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04072

研究課題名(和文) スイマーの詳細筋力特性と慣性センサ泳動作計測の導入による個別最速泳フォームの解明

研究課題名(英文) Elucidation of individual fastest swimming form by introducing swimmers' detailed muscle force characteristics and swimming motion measurement using inertial sensors

研究代表者

中島 求 (NAKASHIMA, Motomu)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：20272669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では個人ごとの筋力特性を測定するためのシステムを構築し、競泳自由形における個人ごとの最適なストローク(腕のかきの動作)を求めることを目的とした。まず水泳用のエルゴメータを改造し筋力特性測定システムを開発した。次にエルゴメータ上で競泳選手が行ったストローク動作と手部発揮力をそれぞれ光学式モーションキャプチャシステムとロードセルにより計測し、筋力特性データベースを作成した。そして、作成したデータベースを用いて最適ストロークを算出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は競泳アスリートの個々の筋力特性を考慮した上で、より泳速度を向上させる泳フォームを数理的に解明することを目的としており、水泳においてこのような試みは世界的に見てもまったく行われておらず、学術的見地からも非常に意義深いものである。研究結果が選手およびコーチにフィードバックされてトレーニングにも活かされるようになり、その結果として選手のパフォーマンスが実際に向上すれば、社会的にも大変意義深いものとなる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to solve the individual optimum stroke (underwater arm motion) in swimming by constructing the system to measure individual muscle force characteristics. The muscle force characteristics measurement system was constructed by modifying a swim ergometer. Next the stroke motion and hand force of a swimmer were measured by an optical motion capture system and a load cell, then the muscle force characteristics database was constructed. Using the constructed database, the optimum arm stroke was computed.

研究分野：スポーツ工学

キーワード：水泳 スポーツバイオメカニクス

## 1. 研究開始当初の背景

競泳は競技スポーツとして歴史も古いですが、競泳の歴史は、いかにして泳げば他人より速く泳ぐことができるかの追求・探索の歴史であった。特に競泳自由形においては、腕のストローク(水をかく動作)が推進力に大きく貢献しているが、その自由度の高さから、これまで様々なストロークスタイルが提案・提唱されてきた。例えば1970年代ごろには、水中での手の軌跡がS字状カーブを描くS字ストロークが広く提唱されたが、その後その揺れ戻しとして、手の軌跡がより直線状となるI字ストロークが提唱されており、いまだに泳フォームに関する様々な考え方が入り乱れているのが現状である。

このような状況に対し、研究代表者らはこれまで、工学的手法の最適化シミュレーションを用いて自由形最速泳フォームの解明を行っている(H18~H20 萌芽研究)。研究代表者らは独自のモデル化に基づき、スイマー全身に作用する流体力を計算可能な水泳解析用力学シミュレータを開発し、さまざまな応用研究を行っており、上記の自由形最速泳フォームの解明においては、スイマーの筋力特性をシミュレーション上で詳細に考慮するために被験者実験に基づいた上で上肢筋骨格モデルも導入し、実際のトップレベルのスイマーに近い泳フォームを数理的に算出することに成功している。さらに研究代表者らは、同様の手法を障がいを持ったスイマー(以下パラスイマー)にも応用し、パラスイマーのための最速泳フォームを算出することにも成功している(H29~R1 基盤研究(B))。ここで上記の最適化シミュレーションにおいて、健常スイマー、パラスイマーともに、最適化において拘束条件となる筋力特性(姿勢や動作速度に依存する最大発揮筋力)については、先行研究で得られた一般化された種類のデータベースの値が用いられていた。しかし実際には、一口に健常スイマーといっても、身体形状や筋力特性は個人によって異なり、またパラスイマーについても障害の種類や度合いに応じて身体形状や筋力特性も個人によって大きく異なる。研究代表者らの最適化シミュレーションではこれまで、特に筋力特性においてこのような状況に対応できておらず、個人にとっての真に最速な泳フォームを求めることは出来ていなかった。また最適化シミュレーションを行うにあたっては、元のスイマーの泳動作を初期値として入力する必要があるが、泳動作の取得は多くの場合、映像から手動デジタルの作業を経て得られるものであり、一つの泳動作を取得するのに早くも数週間、場合によっては数ヵ月を要するような場合もあり、個人毎の最適化シミュレーションを迅速にかつ大量に行うには困難な状況であった。

## 2. 研究の目的

上記の背景に鑑み、本研究では、研究代表者らがこれまで開発済みの、最適化シミュレーションによる競泳最速泳フォームの求解手法に、スイマーの筋力特性の個別詳細モデルの計測システムと、モーションキャプチャによる泳動作計測システムを組み合わせ、アスリートごとの個別の最速泳フォームを算出するシステムを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

以下の研究方法に基づき研究を遂行した。

1. 個別の筋力特性および泳動作を簡便かつ迅速に取得できるシステムを構築する。
2. 構築したシステムを用いて、複数の健常スイマー・パラスイマーに対して筋力特性および泳動作を取得し、最適化シミュレーションを実施し、最速泳フォームを明らかにする。
3. 得られた結果を検証するための人間型スイマーロボットの性能向上を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 個別筋力特性測定システムの構築および最適泳フォームの求解

まず図1に示す、筋力特性測定システムを開発した。本システムはトレーニング機器である水泳用のエルゴメータを利用して開発した。これは遊泳時に近い身体動作および速度で計測が行えるためである。本システムにおいては、モータにより、エルゴメータのワイヤの繰り出し速度がモータの回転速度を超えた場合に負荷をかけて繰り出し速度が一定に保たれるようにしている。これにより、モータの回転速度を変化させれば、様々な速度のストローク動作における計測が可能となった。またエルゴメータ上で行ったストローク動作と手部発揮力はそれぞれ光学式モーションキャプチャシステムとロードセルにより計測される。そして計測されたストローク動作と手部発揮力を用いて、逆動力学解析により、肩の発揮関節トルクが算出される。

開発したシステムを用いて、20代の熟練した競泳経験者1名を参加者として計測実験を行った。参加者が行った試技は自由形ストローク動作であるが、肩関節における動作のバリエーションとして、1) 通常、2) 水平屈曲気味、3) 水平伸展気味、4) 外旋気味、5) 内旋気味の5種類を行った。また各種類ごとに、低速、中速、高速の3段階の速度を設定した。よって試技数としては15となった。図2に示す位置に、光学式モーションキャプチャシステム用の赤外線反射マーカを貼付し、サンプリング周波数100 Hzで動作を計測した。また手部発揮力については、ロードセルによりサンプリング周波数500 Hzで計測した。そしてマーカ-の三次元座標から、

必要な関節角を算出した。

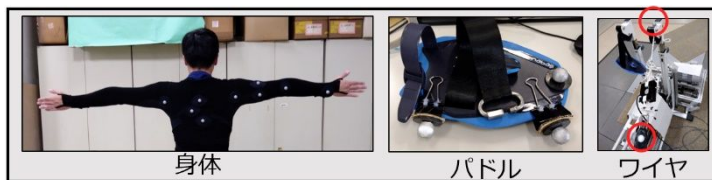
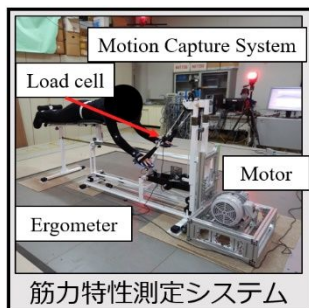


図1 筋力特性測定システム

図2 実験参加者や装置に貼付した赤外線反射マーカー

次に計測結果を用いて、最適化における筋力特性データベースの補正を行った。本研究で用いる水泳力学シミュレータを用いた最適化計算においては、肩の最大発揮トルクは、肩の関節角度・関節角速度に依存すると考え、その依存性を筋力特性としている。そして先行研究において、競泳選手 5 名を対象とした計測実験の結果が 5 名で平均化され、その筋力特性が最適化計算プログラムから呼び出せるデータベースの形式で構築された。本研究ではそのデータベースを、今回の計測実験の結果に合わせて補正するアルゴリズムを開発した。具体的には、計測結果において、肩関節トルクもしくは上腕運動の角速度が試技中最大となる時刻を抽出し、その二つの瞬間における肩の関節角度・関節角速度を実験値から抽出し、データベースからの出力値がそれらの実験値になるべく一致するように、データベース内の計算係数を補正することとした。補正結果を図3に示す。横軸は試技の種類であり（ここでは「通常」の試技を実験全体の最初と最後に2回行っているため18種類となる）、縦軸は肩関節トルクを示す。左のグラフが肩関節トルクが最大の瞬間、右のグラフが上腕運動の角速度が最大の瞬間の値である。一つの試技における3本の棒グラフは、左から順に、実験値、補正前のデータベースの値、補正後のデータベースの値を示しており、補正により肩関節トルクが実験値に近づいている、すなわち参加者の筋力特性を表現できるようになっていることが確認できる。

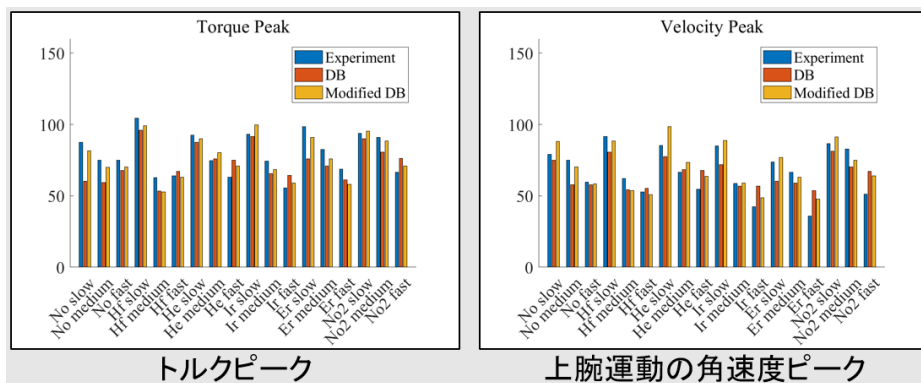


図3 筋力特性データベースの補正結果

次にストローク動作の最適化シミュレーションに先立ち、同じ参加者についての全力泳の撮影実験を行った。遊泳時の映像よりストローク周期および泳速度を算出したところ、周期 1.14 s、泳速度 1.85 m/s との結果が得られた。また参加者の身体形状を画像により取得し、シミュレーションへの入力を行った。

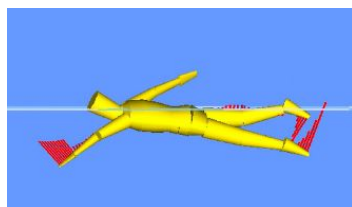


図4 最適ストローク結果



図5 実験時の映像（前方から）

最適化シミュレーションを実施した。図4に求めた最適ストロークでの遊泳の様子を示す。

泳速度は 1.86 m/s となり，実験値の 1.85 m/s と非常に近い値が得られた．また得られた最適ストロークにおいては，ストロークの序盤において，上腕を内旋させることにより肘を高く保つ，いわゆるハイエルボーのような動作が見られた．また比較的身体の外側をかく動作となった．これらの特徴は図 5 に示される実験時の映像でも確認された．よって，筋力特性を考慮したことにより，参加者本人のストロークの特徴が現れた動作が最適化計算により得られたと示唆される．

## (2) 人間型スイマーロボットの性能向上

最適ストロークの結果の検証に用いる，人間型スイマーロボットの性能向上を行った．先行研究において開発したスイマーロボットにおける問題点を解決し，より優れた遊泳性能を実現するため，図 6 に示す新型のスイマーロボットの設計を行った．アクチュエータとして，より高出力なモータを採用し，より人間に近い身体形状も実現している．

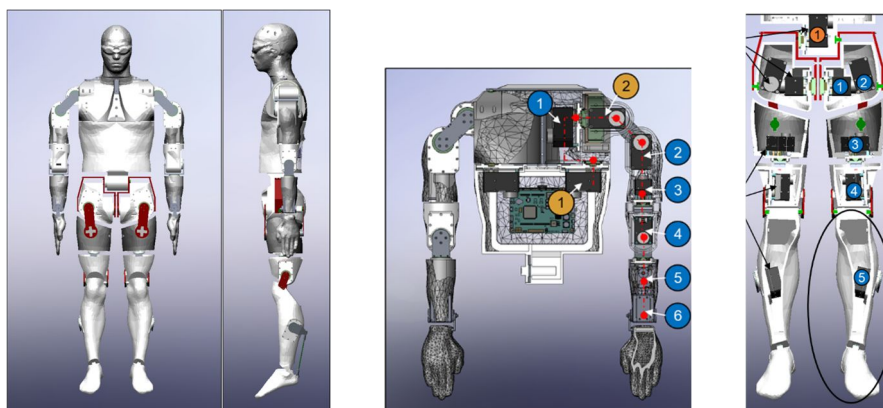


図 6 新型の人間型スイマーロボット（左：全体，中央：上半身内部，右：下半身内部）

また新型スイマーロボットに取り付ける，図 7 左に示す圧力センサ内蔵の手部の開発も行った．本手部においては，手掌側と手背側それぞれ 4 箇所ずつ，計 8 箇所に圧力センサが埋め込まれており，手掌側と手背側の圧力差を取ることで，手部に作用する流体力を推定することが可能である．図 7 中央に示すように，本手部をパイプ部を介して力覚センサに取り付け，水槽中で装置全体を移動させ，作用する直接的な流体力を力覚センサで計測し，同時に圧力センサにより圧力値を計測し，圧力値から流体力の推定値を算出し，力覚センサによる直接計測結果と比較した．結果の一例を図 7 右に示す．推定値は直接計測値と良く一致し，圧力センサにより手部に作用する流体力を推定することが可能であることがわかった．

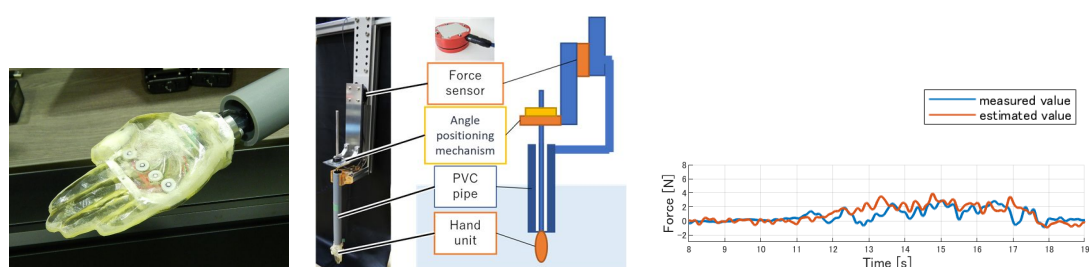


図 7 スイマーロボット用手部（左：手部，中央：実験装置全体，右：流体力計測結果例）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大部徹郎, 中島求
2. 発表標題 水泳ヒューマノイドロボットを用いた遊泳時における手部の圧力計測手法の構築
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fakhrur Razi, Motomu Nakashima
2. 発表標題 Preliminary design of lower limbs for the new swimming humanoid robot
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大部徹郎, 中島求
2. 発表標題 水泳ヒューマノイドロボットのための圧力計測可能な手部の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋 颯太郎, 豊田 涼介, 倉元 昭季, 中島 求
2. 発表標題 競泳自由形における個別最適ストローク求解のための筋力特性測定システムの構築
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motomu Nakashima
2. 発表標題 Simulate human body mechanics considering environment and even intention
3. 学会等名 ISEA Engineering of Sport 14 Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fakhrur Razi and Motomu Nakashima
2. 発表標題 Preliminary design of lower limbs for the new swimming humanoid robot
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋颯太郎, 中島求
2. 発表標題 個別最適ストローク求解のための筋力特性測定を試み
3. 学会等名 2021年日本水泳・水中運動学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fakhrur Razi, Motomu Nakashima
2. 発表標題 Preliminary design of the new swimming humanoid robot
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Motomu Nakashima, Sotaro Tsuchiya, Ryosuke Toyoda, Akisue Kuramoto, Daiki Koga and Hideki Takagi
2. 発表標題 Framework to solve the optimum armstroke in crawl swimming considering subject-specific shoulder joint torque characteristics
3. 学会等名 24th Congress of International Society of Biomechanics and 24th Congress of Japanese Society of Biomechanics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Motomu Nakashima, Sotaro Tsuchiya, Ryosuke Toyoda, Akisue Kuramoto, Daiki Koga & Hideki Takagi
2. 発表標題 Athlete-specific optimizing simulation of armstroke in crawl swimming considering individual shoulder joint torque characteristics
3. 学会等名 14th International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中島 求 のページ <a href="http://www.hei.sc.e.titech.ac.jp/nakashima_lab/motomu/index.html">http://www.hei.sc.e.titech.ac.jp/nakashima_lab/motomu/index.html</a> 水泳人体シミュレーションモデル SWUM の website <a href="http://www.swum.org/index_j.html">http://www.swum.org/index_j.html</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------