

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2017～2019
課題番号：17H02150
研究課題名(和文)大規模最適化シミュレーションによる身体障がい者スイマーの最速泳フォームの解明

研究課題名(英文) Investigation of the fastest swimming form for para-swimmer by large-scale optimizing simulation

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では身体障がい者スイマーの最速泳フォームを解明することを目的とした。まず片麻痺スイマーを対象とし、研究代表者らが開発した水泳の力学シミュレータSWUMを用いた最適化シミュレーションを実行した。その結果、得られた最速フォームは泳速度を0.2 m/s以上増大させることが明らかとなった。次に別の障がいの種類として、片前腕欠損スイマーについても同様の最適化シミュレーションを行い、欠損側の動作の改良により、泳速度が約7%増大することが明らかとなった。さらに検証用的人間型スイマーロボットについても性能向上が実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は実際の身体障がいスイマーを対象とし、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。また実際のパラリンピック出場選手を被験者とし、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活かされている。その結果、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 investigate the fastest swimming form for para-swimmer. First, an optimizing simulation was conducted for a swimmer with hemiplegia using mechanical simulator SWUM, which was developed by the principal investigator's team. As a result, it was found that the obtained fastest form increased the swimming speed for 0.2 m/s or more. Next another similar optimizing simulation was conducted for a swimmer with unilateral transradial deficiency. It was found that the swimming speed increased for 7% due to the improvement of the motion of the deficient arm. In addition, the improvement of performance was realized for the humanoid swimmer robot, which was used to validate the simulated results.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、パラリンピックに代表されるように、障がい者スポーツが大きな注目を集めつつある。障がいを抱えた人々にとってスポーツは、身体面、精神面、人間関係といった社会的側面などのQOL (Quality Of Life) を向上するうえで重要である。障がい者スポーツの中でも、水泳は特に障がい者に広く受け入れられており、競技としても国内・海外において多くの大会が開催されており盛んである。我が国における身体障がい者スイマーの競技力も諸外国に比して高く、先のリオデジャネイロパラリンピックでも多くのメダルが獲得されている。しかし競技としての障がい者水泳についての研究は国内・海外問わず少ないのが現状である。特にスポーツバイオメカニクスの観点からは、片前腕切断のスイマーのストローク動作(水をかく動作)を数値流体力学により解析したものなど、数例の研究がある程度であり、本格的にはほとんど議論されていない。ここで、競技としての水泳においては、パフォーマンス向上には泳フォームの改善が重要であることは広く知られている。しかし身体障がい者スイマーに関しては、理想的な泳フォームが全く解明されていないのが現状である。そのため、現在の身体障がい者スイマーの指導の現場においては、単に健常者スイマーにとっての理想の泳フォームが、身体障がい者スイマーにとっても理想の泳フォームであるとの仮定に基づき指導がなされている。しかし、身体形状、関節可動域、筋力特性などが健常者とは異なる身体障がい者スイマーにとっては、理想的な泳フォームは健常者スイマーのものとは異なる可能性がある。また、障がいの種類や程度によっては、健常者スイマーと同じ動作がそもそも不可能な場合も多い。

一方、応募者らはこれまで健常者スイマーについてであるが、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)。応募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動作を数理的に算出することに成功している。また応募者らは、すでに障がい者スイマーのための水泳用義足の開発も行っており、障がい者スイマーのシミュレーションモデル作成手法も確立しつつある。さらに応募者らは、人間型スイマーロボットを世界で初めて開発し、スイマーロボットを用いて、再現性に難を有する被験者実験を補完する新たな水泳研究用プラットフォームを確立することにも成功している(H23~H25 基盤研究(B)、H26~H28 基盤研究(B))。

2. 研究の目的

上記の背景に鑑み、本研究では、応募者がこれまで上記研究において蓄積してきた理論、技術、ノウハウを結集し、これまで全く解明されていなかった、身体障がい者スイマーの最速泳フォームを解明することを目的とした。

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. 対象とすべき身体障がいを決定し、身体障がい者スイマーの力学モデルを構築する。
2. 上記1.で決定した各々の身体障がい者スイマーの自由形泳について、大規模な最適化シミュレーションを実行し、泳速度を最大化する最速泳フォームを算出する。
3. 上記2.で得られた最速泳フォームを、被験者実験と人間型スイマーロボット実験とから多角的に検証し、その力学原理を明らかにする。
4. 上記の成果をまとめ、最速泳フォームを習得するための指導法を提案する。

4. 研究成果

(1) 片麻痺スイマーの最速泳フォーム解明

片麻痺障がいスイマーを対象とし、水泳シミュレーションモデル SWUM を用いた最適化計算を行い、泳速度を最大化する最適ストロークを解明した。本研究では、先行研究で開発された、水泳人体シミュレーションモデル SWUM を用いた最適化手法を片麻痺スイマーに応用した。人間が実行可能な範囲での最適解を得るために、関節トルクの拘束条件を設定した。SWUM の計算により泳動作中に発生する関節トルクを算出したのちに、発生しうる最大発揮トルクと比較し、発生している関節トルクが最大発揮トルクを超えた場合、その量に応じてペナルティ項が算出される。ペナルティ項が大きくなるほど目的関数の値は減少し、そのストロークの評価が下がる。なお、最大発揮トルクの算出には、競泳選手を被験者として行った筋力特性の計測実験の結果より算出されたデータベースが用いられている。本研究では水中ストローク 3 フレーム分の上肢関節角(前腕の回内・回外、肘の屈曲・伸展、肩の水平屈曲・水平伸展、外転・内転、外旋・内旋)を設計変数とした。脚のキック、胴体の傾き、患側(麻痺側)の動作などのその他の動作は撮影実験により取得した実際の片麻痺スイマーの動作を入力した。ストロークの良さを表す目的関数は泳速度とした。なおシミュレーションにおいては、人体の並進運動のみ解き、回転角度は固定した。ストローク周期を固定し、それぞれの周期での最適ストロークを求めた。周期は実際の片麻痺スイマーのストローク周期である 0.75 s から 1.6 s まで変更し最適化を行った。シミュレーションは十分に安定した泳ぎが得られるよう 5 周期ずつ行った。設計変数において、自由度を与えていない手首動作については、前腕との相対角を常に 0° としたものと、動画より取得し

た実際のスイマーの手首動作を入れたものの 2 パターンについてすべての周期で最適化を行った。その後、最も最適ストロークの泳速度が高くなった周期 1.0 s について、3 フレームの手首動作（掌屈角）を変更し、5 種類の手首動作について最適化を行った。

図 1 に実際のスイマーおよび最適ストロークの泳速度を示す。赤線と紫線は実際のスイマーの泳速度である。実際のスイマーのストローク周期は 0.75 s であったが、仮想的にストローク周期を変更し、グラフを描いた。赤線は最適化の設計変数に合わせて、手首の自由度をなくし、前腕との相対角を 0° とした場合の結果である。黒線は手首動作を入力していない最適ストロークの泳速度、緑線は実際のスイマーの手首動作を入力した最適ストロークの泳速度である。周期 1.0 s では手首動作を 5 種類変更し、最適ストロークの泳速度を示した。まず、赤線と黒線を比較する。実際のスイマーの周期に近い周期 0.75 s, 0.8 s では実際のスイマーと最適ストロークで泳速度がほぼ等しくなった。最適ストロークの泳速度は周期 1.0 s において最大となり、その際実際のスイマーの泳ぎよりも泳速度が 0.2 m/s 以上増大した。よって、適切なストローク周期と泳動作に変更することにより大幅な泳速度向上の可能性があるといえる。次に、赤線と紫線では、紫線の方が有意に泳速度が高くなっている。さらに、黒線と緑線を比較すると、ほとんどの周期で緑線の方が泳速度が高くなっている。このことから、手首動作を考慮することにより、さらに泳速度を向上させることが出来ることがわかった。周期 1.0 s における、手首動作を変更した最適ストロークの泳速度を見ると、実際のスイマーの手首動作を入れた時に最も泳速度が高くなった。片麻痺スイマーの自由形ストロークについて、泳速度を最大化するストロークを求めた。その結果、適切なストローク周期と泳動作により、大幅な泳速度の向上が達成された。また、手首動作を考慮することにより、さらに泳速度を高められることがわかった。以上の結果は被験者である選手とそのコーチに伝えられ、トレーニングに役立てられた。

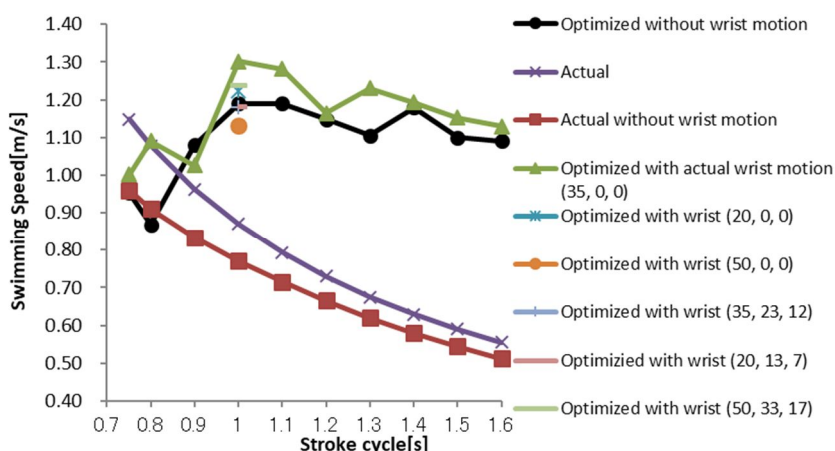


図 1 片麻痺スイマーの最適化結果（泳速度）

(2) 片前腕欠損スイマーの最速泳フォーム解明

本研究では、片前腕欠損の身体障がいスイマーのクロール泳について最速泳フォームの解明を試みた。片前腕欠損スイマーは健常側上肢と比較して、欠損側上肢ではあまり推進力を生み出すことができないと考えられているが、欠損側上肢のストロークは身体の左右のバランスを安定させ速く泳ぐために、技術的に重要である可能性がある。そこで水泳人体シミュレーションモデル SWUM を用いて、片前腕欠損スイマーの切断側上肢のクロール泳ストロークについて最適化シミュレーションを行い、最適なストロークを求めた。

まず 10000 個のランダムなストロークを作成し、SWUM でそれぞれシミュレーションを行う。その中から目的関数値が上位の 20 個を初期ストロークとする。その後各初期ストロークについて、PSO アルゴリズムを基に設計変数を変更し、SWUM でシミュレーションを行い、目的関数を計算する。PSO アルゴリズムによる設計変数の変更と SWUM のシミュレーションを 300 回繰り返す。最終的に目的関数値が最大となるストロークが最適なストロークとして出力される。ストローク周期を実際のスイマーのストロークと同じ 1.2 s に固定させて最適なストロークを求めた。また最適化シミュレーションでは計算時間短縮のため各ストロークにつき計算するのは 5 周期とし、シミュレーション後に得られた最適なストロークを、関節運動を固定して再度 20 周期解析し、実際のスイマーのストロークと比較した。

得られた結果として、5 周期以降の泳速度は両者とも安定し、5 ~ 20 周期の平均泳速度は実際のスイマーが 1.58 m/s、最適ストロークが 1.69 m/s と最適化結果の方が約 7% 速くなった。図 2 に最適ストロークと実際のスイマーのストロークの様子を示す。なお、 t^* はストローク周期で無次元化された時間であり、19 ストローク目の様子を示す。また、図中の赤線はスイマーが受ける流体力を表している。両者のエントリー（入水時）からフィニッシュ（出水時）までの欠損側上肢のストロークを比較すると、最適ストロークの方が実際のスイマーのストロークより、無次元時間 t^* の早い段階から素早くフィニッシュの位置まで水をかいており、ストロークの後半では、前半に早くかいた分フィニッシュの位置でほぼ腕を止めている点特徴的である。以上の結果は被験者である選手とそのコーチに伝えられ、トレーニングに役立てられた。

	Optimized stroke		Actual swimmer's stroke	
	Front view	Side view	Front view	Side view
$t^*=18.75$				
$t^*=18.83$				
$t^*=18.92$				
$t^*=19.00$				

図2 片前腕欠損スイマーの最適化結果（左：最適化，右：被験者の元のフォーム）

(3) 人間型スイマーロボットの性能向上

最速泳フォーム検証のための人間型スイマーロボットについて、その性能向上を実現した。具体的には多岐にわたり、背泳ぎの実現、平泳ぎのキックの性能向上、方向制御機能の実現、ローリング性能の向上であるが、ここでは特にローリング性能向上についての結果を述べる。

まず回流水槽において人間型スイマーロボット SWUMANOID を用いて推進力を測定可能な実験系を構築し、クロール・平泳ぎ・バタフライの3泳法について推進力の時間変化を捉えることに成功した。しかし、この回流水槽実験系にはクロール泳時のロール運動に問題があった。すなわち、測定の際にロボットに取り付けた実験装置により、ロール運動の回転中心位置が変わってしまうため、その運動が妨げられ、リカバリー動作に悪影響を及ぼしていた。そこで、回流水槽実験系を用いてクロール泳時の推進力を測定する際に、SWUMANOID が十分なローリングを行うことができるよう SWUMANOID に行わせる泳動作の改善が行われた。この泳動作の改善には最適化計算が用いられ、回流水槽実験系でのローリング性能を向上させることがシミュレーションによって確認された。そしてこの改善された泳動作が実験的に検証された。

まず最適化計算を用いてローリング性能を向上させるストロークが求められた。求められたストロークには下記の3点の特徴が見られた。

特徴：エントリーから水をかき始めるまでの間に上腕を外転させる

特徴：肩をより水平伸展，肘をより伸展させて，体幹の外側をかく

特徴：フィニッシュ直前に上肢を体幹外側方向に水平に移動させながら出水する

上記の特徴を有する最適ストロークは、ローリング性能に関しては十分であったが、元のストロークからの変化量が大いことにより、ストロークの自然さが減じられてしまうデメリットを有していた。そこで、上記の三つの特徴に対し、それぞれの特徴だけを有したストロークでシミュレーションを行い、ローリング性能にそれぞれの特徴が真に必要なかの調査を行った。その結果、特徴は不要で、特徴と の両方、もしくは特徴 だけで良いことがわかった。そのため、特徴 と を有するストロークをストローク A、特徴 のみを有するストロークをストローク B とし、本研究で実験的検証を行うこととした。

東京工業大学内の静水槽において SWUMANOID に自由遊泳を行わせる実験を行った。水槽の左端に SWUMANOID を設置して泳動作を行わせ、その様子を前方・側方の2か所からカメラで撮影した。同時に、ロボット内に搭載された AHRs センサにより、泳動作中のロボットの姿勢角（ロール・ピッチ・ヨー角）を取得した。ロボットに行わせる泳動作はストローク A、ストローク B および従来のストロークの3種類とし、それぞれ6周期行わせた。また自由遊泳において、本来の回流水槽実験系の「ロールしにくい環境」を再現するため、ストローク周期は先行研究でのクロール泳やシミュレーションでの2.0sよりも遅い、2.2sとした。そして、得られたストローク A とストローク B の結果を従来のストロークと比較することにより、2つのストロークが本実験系におけるローリング性能向上に有効か検証した。

各ストロークのロール角の結果を図3に示す。(a)の赤線が3周期目のストローク A のロール角を、青線が6周期目の従来のストロークのロール角を、(b)のグラフが1周期目からのストロ

ーク B のロール角を表している。ストローク A は、左上肢は手の前方で入水できておりリカバリーに成功したが、右上肢は手を前方へ移動させる途中で入水してしまいリカバリーに失敗した。しかし、従来のストロークと比較して、上肢はリカバリー時に体のより前方で入水できている。また、ロール角の振幅は 55.9° であり、従来のストロークと比較して大きく、位相は従来のストロークより遅くなった。ストローク B は、2 周期目の $t^*=0.6$ 付近において、ロール回転しすぎたため、ロール角が 90° を越え、転覆した。従来のストロークはリカバリー時に左右の上肢はどちらもほとんど水上に出ず、リカバリーに失敗した。また、ストローク A やストローク B と比較してロール角の振幅は 35.4° と小さく、位相は早かった。以上の実験結果より、従来のストロークはロール角の振幅が小さく位相は早い、フィニッシュ直前に上肢を体幹外側方向に水平に移動させながら出水する特徴の動作を取り入れたストローク B は、途中で転覆するほどロール角が大きくなり、位相は遅くなることがわかった。したがって、この動作にはフィニッシュ直前までロール回転方向のモーメントを得ることにより、ロール角の位相を遅くし、振幅を大きくする効果を有することが確認された。また、肩をより水平伸展、肘をより伸展させて体幹の外側をかく特徴と特徴を組み合わせたストローク A は、ストローク B よりロール角の振幅が抑えられ、実験した 3 つのストロークの中で最もリカバリーに成功しやすい適切な振幅・位相のロール角となることがわかった。したがって、特徴の動作には、浮力により得られるロール回転方向のモーメントの大きさを変化させ、特徴の動作により出水時に得た大きすぎるロール回転方向のモーメントを打ち消すことにより、適切なロール運動を行うことができるようにモーメントを調節する効果を有することが確認された。以上より、ストローク A やストローク B は、回流水槽実験系においてもロール角の振幅を大きく、位相を遅くする効果を有すると考えられる。したがって、これら 2 つのストロークは本実験系におけるローリング性能向上に有効であると結論付けられ、性能向上が実現された。

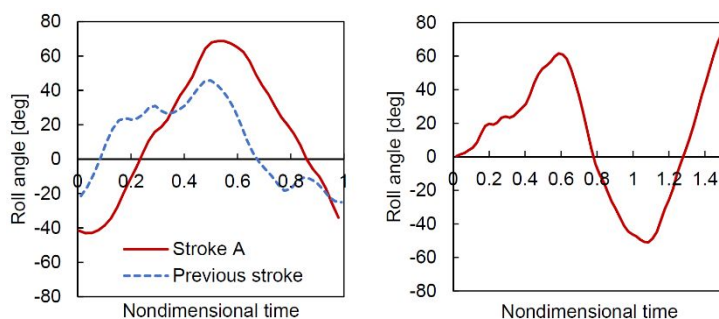


図3 人間型スイマーロボット SWUMANOID のロール角の実験結果
 (左：従来のストローク (青破線) およびストローク A, 右図：ストローク B)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Motomu NAKASHIMA, Chie NEMOTO, Taichi KISHIMOTO, Masahiro TERADA, Yasushi IKUTA	4. 巻 5
2. 論文標題 Optimizing simulation of arm stroke in freestyle for swimmers with hemiplegia	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 17-00377
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1299/mej.17-00377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fakhrur Razi, Motomu Nakashima	4. 巻 8
2. 論文標題 Realization and Swimming Performance of Backstroke by the Swimming Humanoid Robot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms	6. 最初と最後の頁 75-83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5226/jabmech.8.75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Motomu NAKASHIMA, Ryosuke TAKAHASHI, Taichi KISHIMOTO	4. 巻 15
2. 論文標題 Optimizing simulation of deficient limb's strokes in freestyle for swimmers with unilateral transradial deficiency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 19-00467
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1299/jbse.19-00467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Motomu Nakashima, Ryosuke Takahashi, Taichi Kishimoto	4. 巻 15
2. 論文標題 Optimizing simulation of deficient limb's strokes in freestyle for swimmers with unilateral transradial deficiency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1299/jbse.19-00467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋 良輔
2. 発表標題 片大腿切断スイマーのための自由形アームストロークの最適化シミュレーション（切断側上肢動作の最適化）
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryosuke Takahashi
2. 発表標題 Optimizing simulation of arm stroke in freestyle for swimmers with bilateral transfemoral amputation
3. 学会等名 13th International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 良輔
2. 発表標題 両大腿切断スイマーのための自由形アームストロークの最適化シミュレーション
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2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Razi Fakhurur
2. 発表標題 Preliminary Study of Backstroke by the 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2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角田 勇人
2. 発表標題 水泳ヒューマノイドロボットにおけるクロール泳のパフォーマンス向上
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Razi Fakhrur
2. 発表標題 Preliminary experiment of backstroke by the swimming humanoid robot
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jia Hao Yang
2. 発表標題 Improvement of breaststroke for the swimming humanoid robot
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qiuyuan Sun
2. 発表標題 Direction Control of the Swimming Humanoid Robot
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古賀 樹
2. 発表標題 水泳ヒューマノイドロボットのクロール泳におけるローリング性能の向上
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Razi Fakhrur
2. 発表標題 Realization and Swimming Performance of Backstroke by the Swimming Humanoid Robot
3. 学会等名 Seventh International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms (ISABMEC 2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

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