

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300229

研究課題名(和文) 全身駆動型スイマーロボットによる水泳時の人体に働く非定常流体力の全容解明

研究課題名(英文) Elucidation of whole mechanism for unsteady fluid forces acting on a human body in swimming by a whole-body-driven swimmer robot

研究代表者

中島 求 (Nakashima, Motomu)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20272669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではまず、全身駆動型スイマーロボットを開発した。本ロボットは実際の競泳選手の1/2サイズのヒューマノイドロボットであり、全身に20個のサーボモータを内蔵し、人間の泳動作を忠実に再現することができる。本ロボットを回流水槽に設置し、クロールの泳動作を行わせ、ロボット全体に作用する非定常流体力を測定する実験を行った。その結果、手が水をかく瞬間における推進力発揮が実験的に確認された。

研究成果の概要(英文)：A swimmer robot which could move the whole body was firstly developed in the present study. This humanoid robot has half scale as an actual competitive swimmer and has 20 servo motors inside the body. This robot can precisely reproduce the swimming motion of a human. This robot was mounted in a circulating water tank. The swimming motion of the crawl stroke was performed by the robot. The unsteady fluid force acting on the whole robot was experimentally measured. As a result, it was experimentally confirmed that the thrust was produced when the hand pushed the water.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

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

水泳は、アスリートによる競技としても、一般人によるエクササイズとしても広く親しまれており、重要なスポーツである。しかし水泳における力学、特に水から受ける反力である流体力の特性についてはいまだ不明な点が多い。そのため、実験による測定研究が従来から多くなされている。1970年代頃からは、推進力の主な発生源である手部（もしくは前腕部までを含む）の模型を作成し、その模型を水槽や風洞中に置き、一定の流れ（定常流）中での流体力の特性を測定する研究が行われている。一方、推進力と釣り合う抵抗力を発生する体幹についても、1970年代頃より、実際のスイマーや人体マネキンにけのび姿勢を取らせ、やはり定常流の水槽中で牽引し、体幹を含む身体全体の定常抵抗力特性を測定する研究が行われている。

しかし上記の手部および体幹部の実験いずれについても、測定は実際の人間の遊泳の状況からほど遠い定常流中での静的な特性であり、これをそのまま遊泳中の流体力として考えてよいかは疑問である。この疑問は1980年代ごろから指摘されており、より実際の水泳の状況に近い、動的な非定常流体力を測定する試みがなされている。しかし、これらの従来研究においても、実際の泳動作中の非定常流体力の測定は困難をきわめている。そのような状況の中、申請者らは、まず四肢に働く流体力をターゲットとし、H17～H19年度において、若手研究(A)「水中ロボットアームによる水泳時の四肢に働く非定常流体力の解明と高精度モデルの開発」として、上肢・下肢いずれの泳ぎの動作も実現可能な水中ロボットアームを開発し、従来の実験よりはるかに人間の泳ぎに近い動作時での、四肢に働く非定常流体力特性の測定に世界で初めて成功した。本測定により、四肢に働く非定常流体力特性は申請者らによって解明されつつある。さらに引き続き、今度は四肢以外の体幹部に働く流体力をターゲットとし、H20～H22年度において、基盤研究(B)「スイーママネキンロボットを用いた水泳時の体幹に働く非定常流体力特性の解明」として、スイマーの身体形状を1/2スケールで詳細に再現し、ローリング（クロール・背泳ぎ）、およびピッチング・上下運動（平泳ぎ・バタフライ）が可能なスイーママネキンロボットを開発し、水泳動作に近い状況での体幹に働く流体力測定を解明しつつある。

しかし、水泳は全身動作であるにも関わらず、水中ロボットアームは四肢のみが駆動されるため、例えばクロールにおける、体幹がローリングしながらの手のかきは完全には再現できない。また、スイーママネキンロボットでは、マネキン全体が運動するのみである。以上から、これまでの申請者らの研究の延長線上として、身体全体も駆動され、さらにその四肢がロボットアームとして駆動する、すなわち、より忠実に人体運動を再現す

ることができるスイマーロボットを開発し、ロボットを用いて流体力測定を行い、水泳において人体に作用する非定常流体力特性の全容を解明することが必要であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、水泳の力学的問題としてこれまで十分解明されていなかった、非定常運動中に人体に働く流体力特性の全容を、より忠実に人体運動を再現可能な全身駆動型スイマーロボットを開発して、実験的に測定することにより解明することを目的とする。さらに明らかになった流体力特性を、申請者らが開発ずみの水泳力学シミュレーションモデルに組み入れ、モデルの高精度化を実現する。以上により、水泳の力学原理の解明、さまざまな水泳の力学的問題に適用可能な高精度シミュレーションモデルの実現、さらにはより高速に泳げる競泳用水着の開発などが可能になる。

### 3. 研究の方法

- (1) 回流水槽中での非定常多自由度運動が可能で全身駆動型スイマーロボットを設計製作する。
- (2) 製作したスイマーロボットを用いて、非定常運動中にスイマーロボットに作用する流体力特性を測定する。測定結果を整理することにより、非定常流体力特性を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 全身駆動型スイマーロボット (SWUMANOID) の基本構造

本研究で開発した全身駆動型スイマーロボットは、SWUMANOID と名付けられた。SWUMANOID は実際の競泳選手の1/2サイズのヒューマノイドロボットである。またSWUMANOIDの全身には20個のサーボモータDXNAMIXELシリーズ、Robotis社)が配置されている。図1にモータの配置を示す。手首

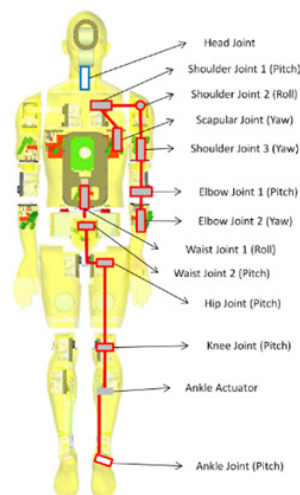


図1 スイマーロボットの関節配置

および足首の回内、回外動作については稼働域が比較的狭いことからアクチュエータは配置されていない。また、水をかいた腕を水上から前方に戻すリカバリー動作がスムーズに行えるよう、肩の部分にロール方向の運動を生成するアクチュエータが配置されている。また、開発当初のモデルにおいては漏水時のメンテナンスが困難であったため、現行モデルでは、OリングとXリング（クアドリング）を用いて防水性とメンテナンス性が高められている。

### (2) スイマーロボットの泳動作生成方法

SWUMANOIDの泳動作生成の流れを図2に示す。まず、実際の競泳選手の泳動作を取得し、水泳人体シミュレーションモデル SWUM への入力角度を決定する。SWUMとは人体を21個の体節に分け、剛体動力学と非定常流体力を考慮したシミュレーションモデルであり、複数の時間フレームにおける身体姿勢によって表現された関節運動を入力して解析を行うことにより、各関節に作用する流体力や関節トルクを計算することが可能である。次にSWUMANOIDのシミュレーションモデルをSWUM上で作成し、競泳選手から得られたクロール泳動作を入力することにより、関節トルクや泳動作が正しく再現されているかを確認する。次に、手先の位置と方向を順運動学により算出し、それらに対し今度は逆運動学計算を行うことにより各モータ角度を計算する。これはSWUMとSWUMANOIDの関節中心の位置や自由度が異なるためである。最後に3DCAD上で各関節の干渉を確認する。

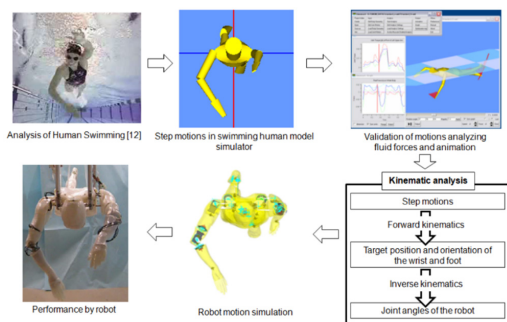


図2 泳動作生成方法の流れ

### (3) 流体力測定実験方法

実験は国立スポーツ科学センター（JISS）内のポート・カヌー実験場にある回流水槽を用いて行った。SWUMANOIDを図3に示すように駆動装置に取り付けて推進力の測定を行った。駆動装置の概要を図4に示す。本駆動装置は本来競技用カヌーやカヤックを取り付けて実験を行うためのものであるが、SWUMANOIDが取り付けられるよう、新たに治具などを設計製作した。図5に示すように、駆動装置に力センサおよびSWUMANOIDを取り付けた。また図5に示すように、SWUMANOIDと力センサとは、首2箇所、腰2箇所とで接

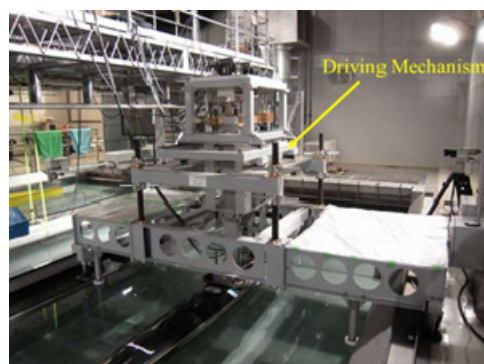


図3 実験装置系外観

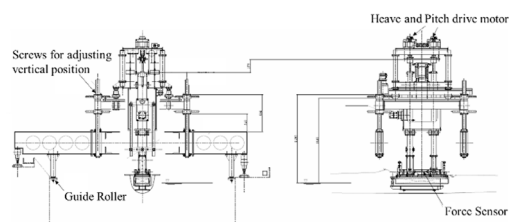


図4 駆動装置

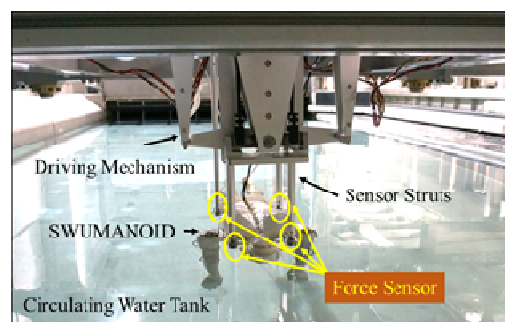


図5 力センサ

続されている。なお腰2箇所のセンサが取り付けられているストラットの上部はフリージョイントとなっている。よって推進力の測定は首2箇所に取り付けられた力センサによって行われる。力センサは進行方向荷重および鉛直方向荷重を測定可能である。なお駆動装置は取り付け対象に対してロール・ピッチ・ヨーの運動を与えることが可能であるが、今回はその機能は使用しなかった。

### (4) 流体力測定実験結果

SWUMANOIDに標準的なフォームのクロール泳を一周期9.0sで実行させた。また回流水槽の流速を0.0m/sとし、測定時間を60sとした。測定した推進力は右肩上部に取り付けられた力センサの進行方向成分の値を $F_{x1}$ [N]、左肩上部の値を $F_{x3}$ [N]とした。1周期目の $F_{x1}$ と $F_{x3}$ の測定結果を図6に示す。

### (5) 実験結果の考察

スイマーロボットに作用する推進力 $F$ は $F_{x1}$ と $F_{x3}$ の和として与えられる。次に求め

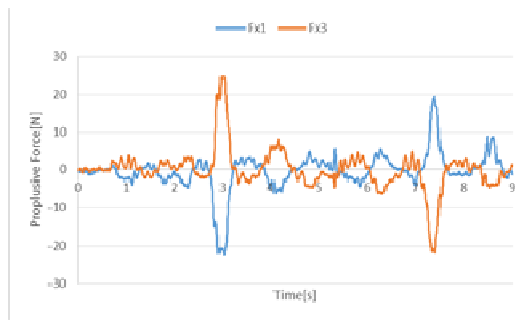


図6 カセンサからの出力結果

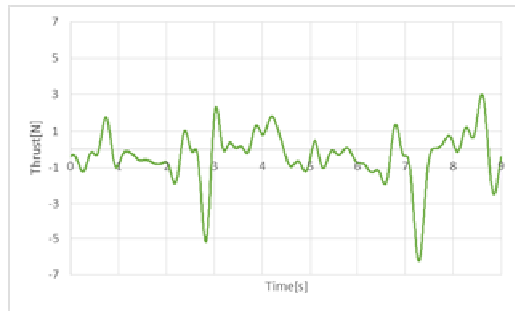


図7 スイマーロボットに作用する推進力

られたFに対して、機械的振動の影響を取り除くためにカットオフ周波数 3 Hz のローパスフィルタを用いノイズを除去した。フィルタリング後の一周期の推進力を図7に示す。図7を見ると、 $t=3.8 \sim 4.4$  s および、 $t=8.1 \sim 8.7$  s において前方への推進力が発揮されていることがわかる。これは右手や左手が水中で水をかくことにより推進力を得ているためである。一方で図7において  $t=2.8$  s および  $7.3$  s 付近で大きく負の推進力が発生している。これは  $t=2.8$  s および  $7.3$  s 付近において腕のリカバリー動作が不十分であったため腕の入水時に反力が発生したためと考えられ、実験系やロボットの動作について、さらなる改良が必要であることも示唆される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Development of a Swimming Humanoid Robot for Research of Human Swimming, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 3 (2013) No. 1, p. 109-117 (査読あり).

(2) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Free Swimming of the Swimming Humanoid Robot for the Crawl Stroke, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 3 (2013) No. 1, p. 118-126 (査読あり).

[学会発表] (計 7 件)

(1) 桑原宏介, 中島求, 水泳ヒューマノイドロボットを用いたクロール時の推進力測定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (ROBOMECH2014) 講演論文集, 3A1-J05 (DVD-ROM) (2014), 富山市総合体育館, 2014年5月28日.

(2) Motomu Nakashima and Changhyun Chung, A new experimental platform for biomechanics in swimming using the swimming humanoid robot 'SWUMANOID', Abstracts of the XIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, pp.144-145 (2014), Australian Institute of Sport, Canberra, Australia, 2014年5月1日.

(3) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Development of a Swimming Humanoid Robot as an Experimental Platform of Human Swimming, Proceedings of the 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), pp.82-83 (2013), Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea, 2013年10月31日.

(4) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Realization of Free Swimming in the Crawl Stroke by a Humanoid Robot, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH2013) 講演論文集, 1A2-B05 (DVD-ROM) (2013), つくば国際会議場, つくば, 2013年5月23日.

(5) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Measurement System of Fluid Force in Human Swimming Using a Swimming Humanoid Robot, Proceedings of the Fifth International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, pp.174-179 (2012), Howard Civil Service International House, Taipei, Taiwan, 2012年8月27日.

(6) Changhyun Chung and Motomu Nakashima, Development of the Upper Body of an Underwater Humanoid Robot for Research of Unsteady Fluid Forces Acting on a Swimmer, Proceedings of Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 701-706 (2012), Downtown Rome, Italy, 2012年6月25日.

(7) Chung Changhyun and Motomu Nakashima, Development of an underwater humanoid for the research of unsteady fluid forces acting on swimmer, 日本機械学会 ROBOMECH2012 講演論文集, 1A2-R07 (CDROM) (2012), 浜松アクトシティ, 2012年5月28日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 求 (Motomu Nakashima)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20272669