水泳研究用水中ロボットアームの開発【要約】

Development of an underwater robot arm for swimming study (Summary)

中島 求 (Motomu Nakashima)
高橋 明美 (Akemi Takahashi)

東京工業大学大学院情報理工学研究科
東芝

(abstract)

Thrust generated by limbs is quite important in swimming. However, the fluid force acting on limbs during unsteady motion such as swimming has been difficult to measure. Therefore, the authors developed an underwater robot arm, which can perform 5 degrees-of-motion, and can represent both upper and lower limb's swimming motion. The contents of this paper consist of the specification of the robot arm, an experiment to measure the unsteady fluid force using the robot arm, and the present status of the fluid force modeling based on the experimental results. As the result, it was verified that the unsteady fluid force during the swimming motion can be measured by the experimental setup. In addition, the validity of the fluid force model which was identified based on the experimental results was also verified.

Keywords : Robot Arm, Unsteady Fluid Force, Modeling of Fluid Force

1. 緒言

水泳においては、四肢が生み出す推力が重要である。水泳時の四肢に働く流体力についてはこれまで、実験による測定やCFDによって多くの研究が行われてきた。Bergerら¹⁾は、手部・上腕部の模型を曳航水槽内で等速度運動させることにより定常状態における抗力と揚力の測定を行っている。またBixlerら²⁾やRouboaら³⁾はコンピュータ上に手部および前腕部のモデルを構築し、CFDを用いた解析によって手部および前腕部に働く流体力を算出している。しかし、泳動作によって生じる非定常流体力を直接測定した例はなく、実際の水泳時に発生する流体力についてはいまだに不明な点が多いのが現状である。近年では著者ら⁴⁾が全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルSWUMの提案を行い、その中でシミュレーションにおける流体力モデルの諸係数を決定するために四肢模型を

用いた非定常流体力の測定を行っている。またLauderら⁵⁾はモータ駆動により肩の伸展/屈曲動作を行うことのできる上肢模型を作製し非定常状態における上肢の流体力測定実験を行っている。しかしこれらの模型は1自由度しか有していないため、泳動作を再現しているとは言い難い。

そこで著者らは、5自由度を有し水泳時の人間の四肢に近い運動が可能な水泳研究用水中ロボットアームを開発した。本稿では本ロボットアームの仕様、本ロボットアームを用いて行っている非定常流体力測定実験、および実験に基づく流体力のモデル化の現状について報告する。

2. 水中ロボットアームと流体力測定実験の概要^{6) 7)}

図1に、実験に用いた水中ロボットアーム((株)三井造船昭島研究所社製)の写真を示す。本ロボットアーム

Fig. 1 Photograph of developed underwater robot arm

は上肢・下肢両方の泳動作が可能であり、上肢として説明すれば、胴体部・肩部・上腕部・前腕部・手部によって構成される。肩に3自由度、肘に2自由度を有し、合計5自由度の運動によって泳動作が再現される。各関節の付け根には、ひずみゲージを用いた3軸モーメントセンサを有する。また胴体部上面には分力計が取り付けられ、ロボットアーム全体に作用する荷重が計測される。手部／足部は着脱可能であり、手部としてクロール、平泳ぎ、バタフライ用の右手、背泳ぎ用の左手、さらに足部としてクロール、背泳ぎ、バタフライ用の足先を伸ばした底屈状態、平泳ぎ用の足先を立てた背屈状態の合計4種類のモデルを用意した。

実験では上肢および下肢の動作としてそれぞれクロール、平泳ぎ、バタフライ、背泳ぎの4泳法を行った。クロール上肢では手をS字状にかくS字ストローク、比較的まっすぐかくI字ストロークの2種類を実施した。各試技の実験条件として、1ストローク周期分の関節角、ストローク周期、ロボットアーム取り付け高さ、流速を与えた。関節角については、実際の競泳選手の模範泳映像に基づき決定した。流速については、ロボットアームの出力パワーの制限から0.2～0.5 m/sと実際の泳速度より低めであったが、それに対応させてストローク周期も長くした。

3. 実験に基づく流体力のモデル化の概要^{*)}

図2に、流体力のモデル化のための、ロボットアームのシミュレーションモデルの模式図を示す。腕部（脚部）は径の異なる複数の円柱によって表現され、手部（足部）は楕円錐台として表現される。また、各楕円錐台の質量中心位置および慣性特性は陸上試験の結果を用いて同定した。またロボットアームに働く流体力については、SWUM⁴⁾と同様のモデルを用いた。本モデルでは、各体節を構成する円柱もしくは楕円錐台を長手軸方向に微小

Fig. 2 Simulation model of the robot arm

分割し、分割してできた微小楕円ごとに、水との相対速度および加速度を用いて流体力が表現可能であると仮定している。具体的な流体力の成分としては、付加質量による慣性力、楕円板軸に対して法線方向の抵抗力（速度の2乗に比例する成分）、接線方向の抵抗力、および浮力が考慮され、これらの和として流体力が求まると仮定している。

上記の流体力モデルにおいては、各成分の大きさを決定するため、流体力係数が用いられている。このうち接線方向抵抗力については、四肢に働く流体力において影響は小さいため、それ以外の付加質量による慣性力および法線方向抵抗力の係数を同定して流体力モデルを決定した。本研究ではこれらの係数を、実験結果とモデルによるシミュレーション結果がなるべく一致するように、最適化計算を行って同定した。その結果、四肢の形状が異なる上肢と下肢では、流体力係数は異なる値とする必要があるものの、上肢では1種類の流体力係数の組み合わせにより、クロールと平泳ぎなど、かなり異なる泳動作でも精度良く近似できることが明らかとなり、流体力モデルの妥当性が確認された。

4. 結言

本論文では、著者らが開発した水泳研究用水中ロボットアームによる研究の現状を報告した。本ロボットアームは、報告した競泳の4泳法以外にも、スクリングやシンクロなど、さまざまな水中動作において発生する非定常流体力を測定することが可能であると考えられる。また流体力の測定だけでなく、流れの可視化実験などにおいても、精度良く繰り返し動作が行えるため、有用であると考えられる。著者らも本ロボットアームが今後さまざまな水泳の研究に利用されれば幸いと考えているので、共同研究のお申し出などは気軽に著者らまでご相談頂きたい。

なお本研究は科研費No.17680045の支援を受けた。ま

た手足模型の製作には防衛大学校講師伊藤慎一郎氏に多大なるご協力を頂いた。記して謝意を表する。

【引用文献】

- 1) Berger, M.A.M., de Groot, G., Hollander, A.P. (1995). Hydrodynamic drag and lift forces on human hand arm models, *Journal of Biomechanics*, 28(2), 125-133.
- 2) Bixler, B.S., Riewald, S. (2002). Analysis of swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics, *Journal of Biomechanics*, 35, 713-717.
- 3) Rouboa, A. et al. (2006). The effect of swimmer's hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics, *Journal of Biomechanics*, 39, 1239-1248.
- 4) 中島・佐藤・三浦 (2005). 全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルの開発, *日本機械学会論文集 (B編)*, 71 (705), 1361-1369.
- 5) Lauder, M.A., Dabnichki, P. (2005). Estimating propulsive forces - sink or swim?, *Journal of Biomechanics*, 38, 1984-1990.
- 6) 高橋・中島 (2006). 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測定, *日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集*, No.06-21, 401 (CD-ROM).
- 7) 高橋・中島 (2007). 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測定 (第2報, 改良機による実験), *日本機械学会第19回バイオエンジニアリング講演会講演論文集*, No.06-65, 330-331.
- 8) 中島・高橋 (2007). 水中ロボットアーム実験に基づく水泳時の四肢に働く非定常流体力のモデル化, *日本機械学会2007年度年次大会講演論文集*, No.07-1, Vol.2, 187-188.