

3D-CG に基づく競泳用水着を着用したスイマーの筋骨格解析

中島 求^{*1}, 長谷川 貴大^{*2}, 松田 昭博^{*3}, 島名 孝次^{*4}

3D-CG based musculoskeletal analysis for a swimmer attaching competitive swimwear

Motomu NAKASHIMA^{*1}, Takahiro HASEGAWA, Akihiro MATSUDA and Takatsugu SHIMANA

^{*1} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Mechanical and Control Engineering
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

The objective of this study was to develop the method of musculoskeletal simulation for a swimmer attaching a competitive swimwear. For the simulation, the body geometry and joint motion were put into the swimming human simulation model SWUM in order to calculate the distributed fluid forces acting on the whole swimmer's body. The distributed fluid forces were put into the musculoskeletal model. In addition to the fluid forces, the forces induced by the tension of the swimwear were also considered. The distribution of the forces acting on the swimmer was calculated from the stress distribution of the swimwear. Since the swimwear targeted in the present study was a half spat type, the forces by the swimwear acted on three segments; the right and left thighs, and the pelvis. Therefore, the ratio of one distributed force to these three segments had to be determined. In order to determine this ratio, the deformation of the swimwear measured in an experiment was used. As an example, the simulation for the crawl stroke was conducted. The results showed the time-varying effect of the swimwear on the muscle activity during swimming.

Key Words : Swimwear, Musculoskeletal simulation, Swimming, Crawl stroke, 3D-CG based

1. 結 言

競泳において水着は、競技パフォーマンスに確実に影響を及ぼすことが知られており、非常に重要なものとなっている。従来は、摩擦抗力削減のための特殊な表面処理やスイマーの軟組織の振動を抑えるための固いパネルの挿入などの、流体力学的な観点为主要な研究対象であった。しかしこれまで水着が筋活動に及ぼす影響はほとんど研究されていない。そこで本研究では競泳用水着を着用したスイマーの筋骨格シミュレーション手法を開発することを目的とした。

筋骨格シミュレーションは、身体運動から筋活動を推定する手法としてバイオメカニクス分野で一般的になりつつあるが⁽¹⁾、泳動作に関してはわずかな研究例しか報告されていない。先駆的な研究として、Nakashima and Motegi⁽²⁾は水泳の筋骨格シミュレータを開発した。本シミュレータは本研究においても使用された。またNakashima ら⁽³⁾は平泳ぎについて、被験者実験により取得した泳動作を本シミュレータに入力し、泳動作と同時に測定された筋電図とシミュレーション結果の筋活動との比較を行い、本シミュレータによって筋活動のピークのタイミングや被験者ごとの波形の違いなどを再現可能であることを示している。本研究では、本シミュレータにさらに水着の張力特性もモデル化されて加えられている。なお、水着の張力特性が3D-CGに基づくスイマーモデルから計算されるため、開発された本シミュレーション手法を「3D-CGに基づく筋骨格シミュレーション」と呼ぶ。

^{*1} 正員, 東京工業大学 機械制御システム専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 東京工業大学大学院 情報環境学専攻

^{*3} 正員, 筑波大学 システム情報系

^{*4} ミズノ(株) 研究開発部

E-mail: motomu@mech.titech.ac.jp

2. シミュレーション手法

2.1 大まかな流れ

本研究におけるシミュレーションの流れを図1に示す。スイマーの身体データ（身体寸法・形状）、泳動作中の関節角（身体相対運動）、および身体全体の絶対運動、以上が水泳の力学シミュレーションのために開発された水泳人体シミュレーションモデル SWUM⁽⁴⁾に入力される。SWUMにより、スイマーに作用する流体力が計算され出力される。その他の入力データは筋骨格シミュレーションのためのフォーマットに変換される。SWUMからの出力は筋骨格シミュレーションのための市販ソフトウェアである AnyBody Modeling System (AnyBody Technology 社, デンマーク) に入力される。水着の張力特性も筋骨格モデルに入力される。そして最終的にスイマーの筋活動が得られる。各部の詳細は以下の節で述べられる。

2.2 水泳人体シミュレーションモデル SWUM

水泳人体シミュレーションモデル SWUM は、スイマーの身体形状および相対関節運動を入力として用い、時間積分により、一つの剛体としてのスイマー全身の絶対運動の6自由度の運動方程式を解くように設計されている。よって、泳速度、ロール・ピッチ・ヨー運動、推進効率、関節トルクなどが出力データとして計算される。スイマーの身体は以下の21個の剛体体節の連なりとして表現される：上・下腰、上・下胸、肩、首、頭、上・下臀部、左右腿、左右脛、左右足、左右上腕、左右前腕、左右手。各体節は楕円錐台として表現される。全身に作用する外力として非定常流体力と重力が考量されている。非定常流体力は流体の付加質量による慣性力、法線・接線方向抵抗力および浮力の合計として計算されると仮定されている。これらの成分は各時間ステップでの人体各部の局所位置、速度、加速度、向き、角速度および角加速度より、流れを解くことなく計算可能であると仮定されている。流体力モデルの係数は、先行研究における、四肢模型を用いた実験とけのび姿勢を取ったスイマーに作用する抵抗力の測定の結果を用いて同定されている。SWUMにおける身体表現とシミュレーション結果の一例を図2に示す。SWUMについてのさらなる詳細は文献⁽⁴⁾において述べられている。

2.3 筋骨格モデル

本研究の筋骨格モデルを図3(a)に示す。人体は筋を伴う剛体リンクモデルとしてモデル化されている。筋は581本（上肢294本、下肢84本、体幹203本）のワイヤーとしてモデル化されている。スイマーに作用する分布流体力および水着の張力は AnyBody に外力として入力される。外力と人体自体の慣性を考慮し、関節トルクが AnyBody において計算される。関節トルクの釣り合いの方程式を解くことにより筋力が得られる。この計算においては、筋骨格系は極めて冗長であり筋力の配分は釣り合い方程式のみからでは決定できないため、なんらかの筋力配分を決定するためのアルゴリズムが必要になる。本研究ではこのアルゴリズムとして Min/Max Criterion⁽⁵⁾を使用した。本 criterion においてはすべての筋活動の値の最大値が最小化される。Rasmussen ら⁽⁵⁾は、本アルゴリ

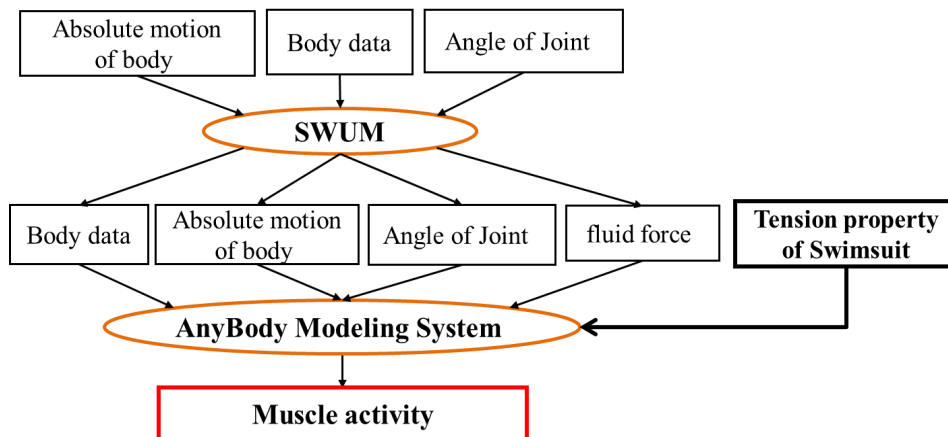


Fig. 1 Flow of the simulation

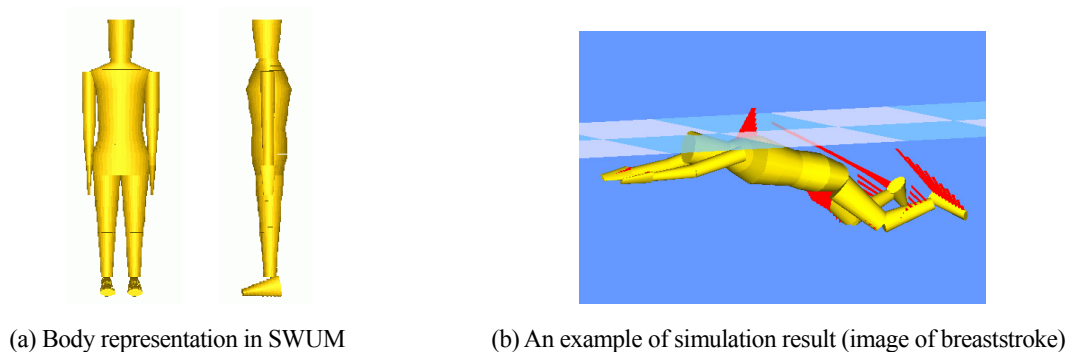


Fig. 2 Body representation in SWUM and an example of simulation result

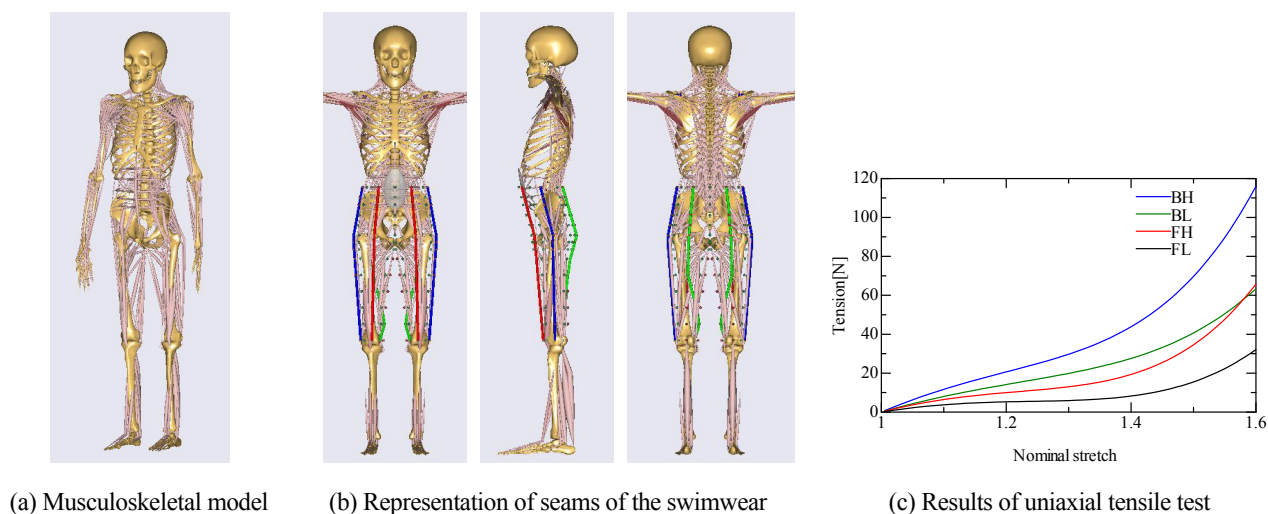


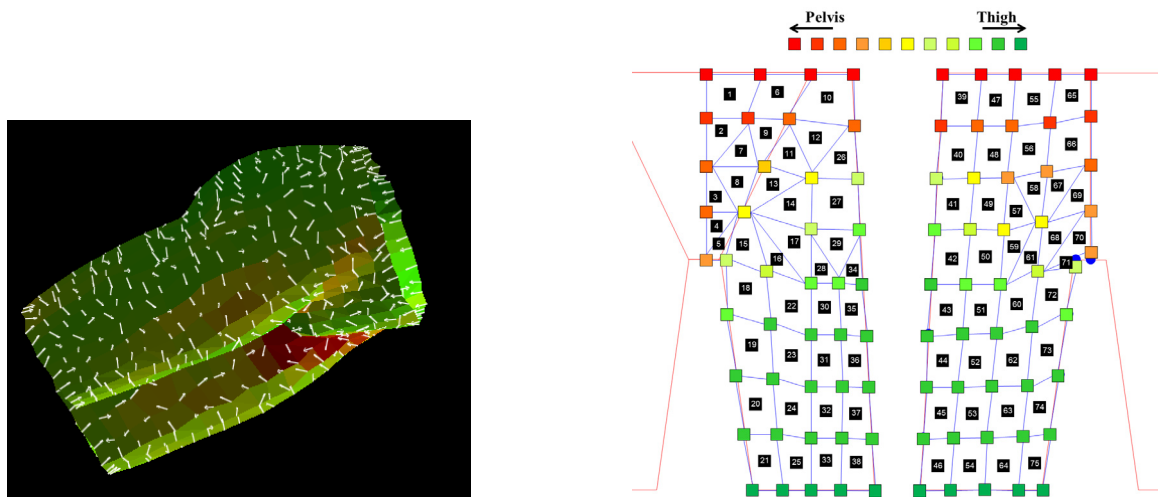
Fig. 3 Modeling of swimmer and swimwear

ズムは生理学的にも妥当であり、計算においても効率的であると主張している。

2・4 競泳用水着のモデル化

競泳用水着において、シーム（つなぎ目）部の張力は一様生地（イコノメ）の張力よりずっと大きいため、本研究では、水着の張力をシームの張力と一様生地の張力の和として考慮した。シームは筋骨格モデルにおいて、付加的な「仮想靭帯」としてモデル化された。モデル化されたシームを図 3(b)に示す。図中の赤、青、緑の線がシームを表している。シミュレーションの張力特性が、図 3(c)に 4 種類のシームの結果が示されている 1 軸引張試験において得られた結果と一致するよう、人体モデルにおける 5 個のパラメータを調整することによりシームの超弾性張力特性が表現された。

一様生地の張力は筋骨格モデル自体において表現することは困難であったため、股関節における外モーメントとして表現された。一様生地のオリジナルの張力特性は異方性超弾性モデルにより計算された。データは水着の表面上に定義されたメッシュ点における張力分布として得られた。張力分布の一例を図 4(a)に示す。張力分布より股関節トルクを計算するため、本研究では各メッシュ点に対して「付着比」が新たに定義された。もし、あるメッシュ点が完全に腿の体節に付着している場合には、付着比は腿と骨盤についてそれぞれ、1:0 となる。この場合には、メッシュ点において作用する分布力は完全に腿の体節に作用すると考えられる。もし別のメッシュ点がより股関節に近い場所に位置する場合には、付着比は例えば 0.7:0.3 となる。この場合には、 $0.4 (= 0.7 - 0.3)$ を乗じた分布力が腿に作用すると考えられる。ある水着についての付着比の分布状態を図 4(b)に示す。この結果は水着の変形を測定した実験に基づいて決定された。この実験では、被験者が着用した水着上に多くのマーカーを



(a) An example of tension distribution

(b) Color map of the attaching rates of the mesh points

Fig. 4 An example of tension distribution of a swimwear and color map of the attaching rates of the mesh points

貼付し，動作解析システムにより水着の変形を測定した．そして付着比を実験におけるマーカーの変位より計算した．

3. 結果と考察

自由形（クロール）の筋骨格シミュレーションを行った．シームの条件としては，図 3(c)における BH, FL, BL の張力特性をそれぞれ図 3(b)の緑，赤，青の仮想靱帯に用いた．一様生地については，Matsuda ら⁽⁶⁾が計算した張力特性を用いた．泳動作のシミュレーション結果を図 5 に示す．左がオリジナルの 3D-CG アニメーション画像である．中央が SWUM による結果である．右が筋骨格シミュレーションによる結果である．これら 3 種類のシミュレーションにおける人体姿勢は十分近いものとなっており，オリジナルの 3D-CG の泳動作が適切に変換され，SWUM と筋骨格シミュレーションに入力されていることが確認できる．屈曲／伸展方向における水着による股関節トルクのシミュレーション結果を図 6(a)に示す．横軸はストローク周期で無次元化された無次元時間である．クロール中では 1 ストローク周期に 3 回のバタ足のキックが打たれるが，本図では一つのキックの周期が示されている．黒線は屈曲／伸展方向における股関節トルクである．股関節変位に抗う方向に，水着による股関節トルク（赤線）が発生していることがわかる．すなわち，股関節が伸展位にあるときは，関節トルクは屈曲方向に発生し，逆も同様である．屈筋および伸筋の筋力を図 6(b)に示す．赤線と青線は屈筋と伸筋それぞれのすべての筋の筋力の合計値である．無次元時間が 0.6 の近辺で伸筋の筋力は大きなピークを持っていることがわかる．このタイミングは伸展動作の開始時に対応する．張力無しの状態からの筋力の差を図 6(c)に示す．屈筋の筋力が増加し，伸筋の筋力が減少していることがわかる．これは，この水着が基本的にスイマーの股関節を伸展させる方向に作用していることを示唆している．

4. 結 言

本研究では競泳用水着を着用したスイマーの筋骨格シミュレーション手法を開発した．クロールのシミュレーション例が示され，妥当と考えられる結果が得られた．その他の泳動作や水着条件についてのより詳細な解析は今後の課題である．さらに妥当性を検証するための筋電図測定も今後の課題である．

文 献

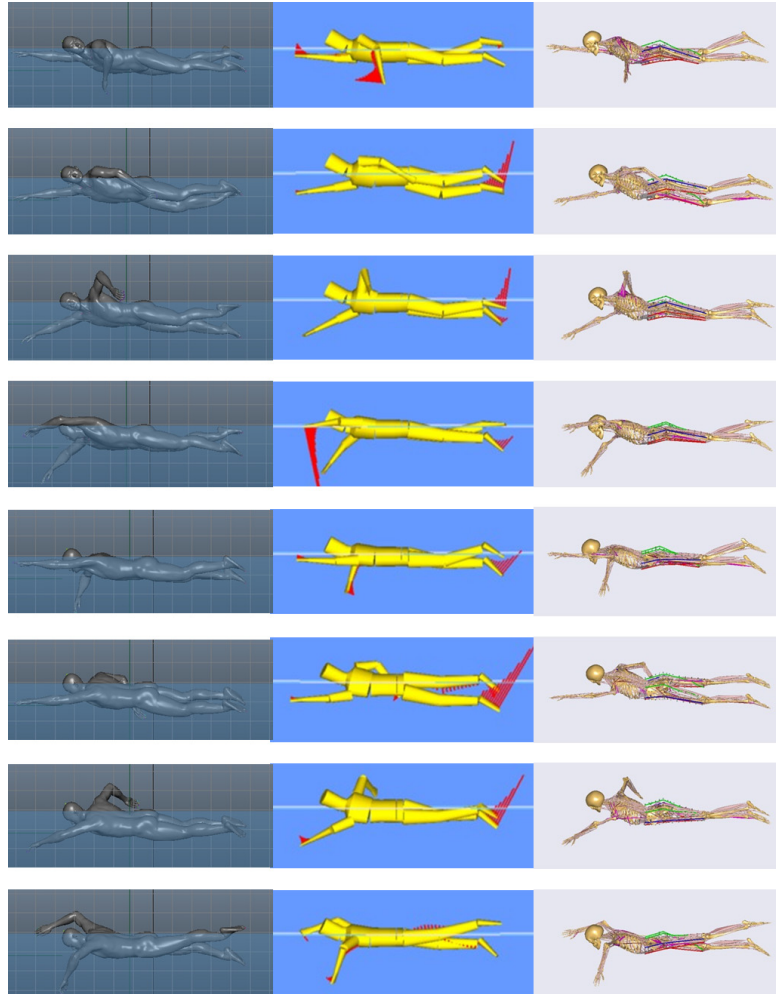
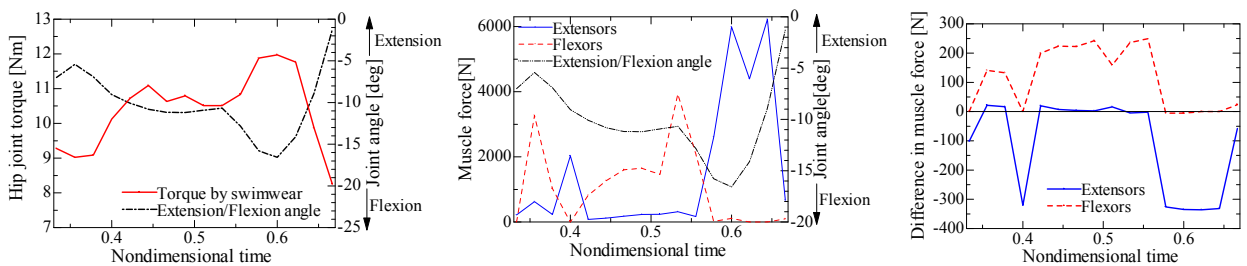


Fig. 5 Simulated swimming motion of the crawl stroke (left, CG model; center, SWUM; right, musculoskeletal simulation)



(a) Hip joint torque by swimwear

(b) Muscle forces of flexors and extensors

(c) differences in muscle forces

Fig. 6 Simulation results

- (1) Rasmussen, J., "Challenges in Human Body Mechanics Simulation", *Proceedings of 2011 Symposium on Human Body Dynamics* (2011), pp.176-185.
- (2) Nakashima, M and Motegi, Y., "Development of a Full-Body Musculo-Skeletal Simulator for Swimming", *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Computer Simulation in Biomechanics* (2007), pp.59-60.
- (3) Nakashima, M., Hasegawa, T., Kamiya, S., and Takagi, H., "Musculoskeletal Simulation of the Breaststroke", *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 8, No. 2 (2013), pp. 152-163.

- (4) Nakashima, M., Miura, Y., and Satou, K., “Development of Swimming Human Simulation Model Considering Rigid Body Dynamics and Unsteady Fluid Force for Whole Body”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 2, No. 1 (2007), pp.56–67.
- (5) Rasmussen, J., Damsgaard, M., and Voigt, M., “Muscle Recruitment by the Min/Max Criterion – a Comparative Numerical Study”, *Journal of Biomechanics*, Vol. 34, No. 3 (2001), pp.409–415.
- (6) Matsuda, A., Tanabe, H., Nagaoka, T., Nakashima, M., Shimana, T., and Omori, K., “Stress Calculation of Competitive Swimwear Using 3D-CG Based Anisotropic Hyperelastic Model”, *Procedia Engineering (Proceedings of the 6th Asia-Pacific Congress on Sports Technology (APCST 2013))*, Vol. 60 (2013), pp.349-354.