

水泳人体シミュレーションソフトウェア Swumsuit の開発[†]

中 島 求*

ABSTRACT This paper describes the swimming human simulation software “Swumsuit”, which was developed by the authors in order to analyze mechanical problems in human swimming. Swumsuit is an implementation of the swimming human simulation model “SWUM”, which has been developed by the authors and whose validity has been already verified. Swumsuit is a free software under GPL, and consists of the analysis engine part written in Fortran and GUI part written in Tcl/Tk. In this paper, the summary of SWUM is firstly described. Next, Swumsuit’s structure, specification, and the function of each part, that is, startup window, editor for body geometry, joint motion and analysis settings, animation display part, and graph display part, are respectively described in order to show its practicality. In addition, analysis examples and its applications in various areas are demonstrated in order to show its usefulness.

1. はじめに

水泳における力学的問題に関しては、これまで多くの研究が行われているが、全身各部に働く非定常流体力と全身の動力学をすべて考慮した議論は十分なされておらず、議論のための解析ツールもほとんど存在していなかった。そこで著者らは近年、水泳における全身の動力学を詳細に表現することができ、力学的諸問題のための汎用解析ツールとなることを目指した水泳人体シミュレーションモデル SWUM (SWimming hUman Model) を提案している。本シミュレーションモデルにおいては、身体各部に働く流体力として付加質量力、法線方向抵抗力、接線方向抵抗力、および浮力が考慮され、全身の相対運動を関節角として与えることにより、一つの剛体とみなした全身の絶対運動が求められる。そして実際の映像に基づいて関節運動を入力した6ビートクロール泳の解析を行い、泳速度を実際と比較したところ良い一致が見られ、シミュレーションモデルの妥当性が確認されている¹⁾。

本シミュレーションモデルは上記のように妥当性も確認され、水泳における様々な力学的問題に適用することが可能と考えられるが、これまで本モデルの実装はFortranプログラム上で行われ、何らインターフェースなどを有していなかったため、本モデルを使用する

ためには何千行ものソースコードをすべて理解しなければならず、開発者や一部の人間しか用いることができなかった。そこで著者らは今回、水泳のシミュレーションが誰でも容易に行えるよう、新たにGUI (Graphical User Interface) によるインターフェース部分を開発し、Fortran部分と統合したシミュレーションソフトウェアを開発したので本論文にて報告する。本シミュレーションソフトウェアはSwumsuit (SWimming hUman Model with Synthetic User Interface Tools) と名付けられ、使用や改変が自由なライセンス形態であるGPL (GNU General Public License²⁾) に従って配布されるフリーソフトウェアであり、すでに著者らのウェブサイト (<http://www.swum.org/>) にてサンプルデータやマニュアルとともに公開されている。このような水泳の力学シミュレーションが可能なソフトウェア自体、類を見ないものであるが、本ソフトはさらにフリーソフトとして公開され誰でも利用可能な環境が提供されており、その存在意義は大きいと考えられる。本論文では、まずシミュレーションモデルSWUMの概要を述べた後、ソフトウェアSwumsuitの構造、仕様、各部の具体的機能について述べ、本ソフトウェア上で何ができるかを示すことにより、ソフトウェアの実用性を示す。そして様々な分野における解析例と応用範囲を述べることにより、その有用性を示す。

2. シミュレーションモデル SWUM 概要

本シミュレーションモデルは、泳者の身体の相対運動を関節角として与え、一つの剛体としての全身の6

Development of the Swimming Human Simulation Software “Swumsuit”. By Motomu Nakashima (Tokyo Institute of Technology).

* 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻

[†] 2006年10月10日受付 2007年1月5日再受付

自由度の絶対運動を、身体についての剛体の運動方程式により求めるものである。よって、泳速度、身体の浮き具合、さらには身体全体のロール・ピッチ・ヨーの回転運動などが計算結果として求まる。また身体に働く外力としては、浮力を含む非定常流体力および重力を考慮する。非定常流体力については、流れ場は解かずに、身体各部位の運動状態(位置、速度、加速度、向き、角速度、角加速度)から流体力が求まると仮定する。流体力の成分としては、付加質量力、法線方向抵抗抗力、接線方向抵抗抗力、および浮力を考慮する。本流体力モデルにおける諸係数については、既報¹⁾において、四肢模型を用いた著者らの実験と、実際の泳者のけのび姿勢における抵抗測定の結果を用いて同定した。その結果、流体力モデルについては実験に対して10%程度の誤差を有するものの、傾向は十分捉えられることがわかった。また既報¹⁾における6ビートクロールの解析例では、シミュレーション結果の泳速度は実際より7.5%程度低めなもの、現象を十分表現できることがわかった。本シミュレーションモデルおよび上記の結果の詳細については既報¹⁾を参照されたい。

なお本シミュレーションモデルに類似性のあるモデルとして、篠原³⁾によるモデルが挙げられる。しかし既報¹⁾中でも述べているように、篠原らのモデルにおいては、人体モデルの体節(body segment)数や形状に関してもかなりの単純化がなされており、水中と空中の違いも考慮されておらず、流体力としても速度の2乗に比例する抵抗抗力しか考慮されておらず、さらに抵抗抗力の係数値についても実験的に求めたものでなく、定量的議論をするには不十分であった。著者らのシミュレーションモデルは、これらの篠原らのモデルの不足点をすべてカバーしている点異なる。

3. シミュレーションソフトウェアSwumsuit

本章では、まずソフトウェアの構造と主な仕様について述べた後、各部の具体的な機能について述べ、本ソフトウェアの実用性を示す。

3.1 ソフトウェアの構造と主な仕様

Swumsuitは、Fortranにより記述された解析エンジン部と、GUI開発に適したスクリプト言語である Tcl/Tk⁴⁾により記述されたGUI部とからなる。図1にSwumsuitの構造を示す。色のついた部分がソフトウェアを表わす。シミュレーションモデルSWUMを実装した解析エンジン部は、身体形状データファイル、関節運動データファイル、および解析設定データファイルの三個の

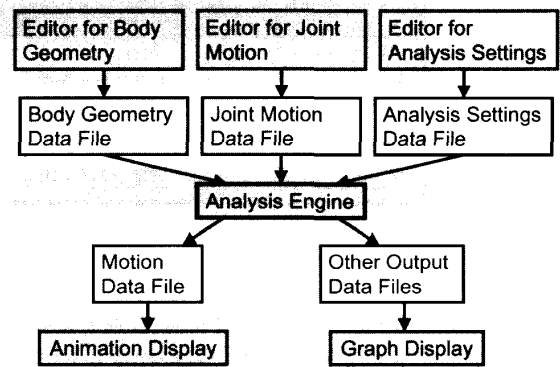


図1 Swumsuitの構造

入力ファイルを読み込む。これらのデータファイル中のデータは、GUIによるそれぞれの編集部を用いて変更可能である。出力については、泳運動のアニメーションを表示するためモーションデータファイルが生成される。またそれ以外にも、泳速度、身体重心の絶対位置・速度、消費パワー、推力、ロールモーメント、全ての関節の関節トルク等、多くのデータファイルが出力される。これらの出力データファイルはグラフ表示部によって表示される。

ソフトウェアの動作環境としては現在、Tcl/Tkのクロスプラットフォーム性によりWindows(2000, XP以降)およびLinux上で動作する。また本ソフトウェアの開発には以下のツールを用いた。OpenGLアニメーションのためにTogl⁵⁾、グラフ表示のためにBLT⁶⁾、Tclコードをラッピングし一つの実行ファイルにするためにfreeWrap⁷⁾、FortranコンパイラとしてVisual Fortran⁸⁾、そして解析エンジン部での数値計算のために数値計算ライブラリのSLATEC⁹⁾である。

なお現在日本語版と英語版が用意されており、起動時に選択することが可能である。両者の違いはメッセージ部分のデータのみである。また、このメッセージ部分のデータはプログラム本体から完全に切り離されているため、多言語対応することも容易に可能である。

3.2 起動ウィンドウ

図2に起動ウィンドウのスクリーンショットを示す。Swumsuitを起動してまず現れるのが本起動ウィンドウである。この起動ウィンドウの各ボタンをクリックすることにより、以下に述べる個別の機能が呼び出される。またSwumsuitにおいては、すべての入出力データファイルを含んだデータセットが“プロジェクトフォルダ”という一つのフォルダに格納される。よって

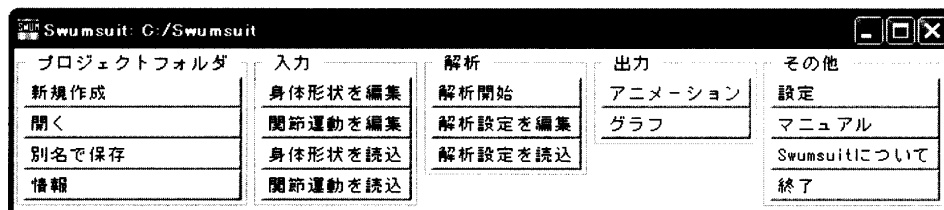


図2 起動ウィンドウ

ユーザは一つ一つのデータファイルを意識することなく、プロジェクトフォルダ単位で解析作業を行うことができる。

3.3 身体形状編集部

図3に示す身体形状編集部では身体形状の編集が可能である。図3(a)に起動ウィンドウから起動した身体形状編集部のメインウィンドウを示す。SWUMでは、人体は21個の体節(body segment)の剛体リンクの連なりとして表現される。各体節は順に、下腰(腰部の下部)、上腰(腰部の上部)、下胸(胸部の下部)、上胸(胸部の上部)、肩、首、頭、上臀部(臀部の上部)、下臀部(臀部の下部)、右腿、左腿、右脛、左脛、右足、左足、右上腕、左上腕、右前腕、左前腕、右手、左手である。さらに各体節は、楕円錐台(長軸・短軸半径が長手方向に沿って一次的に変化する楕円柱)として表現される。よって体節の形状としては、楕円錐台の根本・先端それぞれの長径・短径(Swumsuit上では「奥行き・幅」と表現される)および長さを設定する必要があり、さらに水に対する比重(密度)も各体節ごとに設定される。また体節同士の連結点の変位のオフセット量(例えば肩関節の位置を記述するのに必要である)も設定可能である。

形状の設定の結果は、メインウィンドウにおいて「図」をクリックして起動される、図3(b)に示される図ウィンドウで確認することができる。図ウィンドウではマウスのドラッグにより任意の角度から身体を眺めて確認することができる。

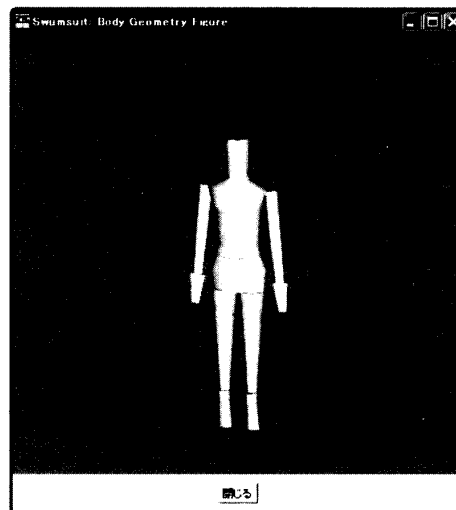
現在ウェブサイトにてサンプルデータとして公開されているのは、日本人の人体形状データベース¹⁰⁾に基づいた、日本人20代男性平均の身体形状であるが、著者らはすでに、人体形状データベースから各楕円錐台寸法を算出するアルゴリズムを作成済みであるので¹¹⁾、今後順次、様々な性別・年齢層の楕円錐台形状データを公開していく予定である。

3.4 関節運動編集部

図4に示す関節運動編集部では、身体関節運動(各部の相対運動)の編集が可能である。まずSWUMにお

体節名	根本奥行き	根本幅	先端奥行き	先端幅	長さ	密度
下腰	0.0646334	0.0846963	0.0600203	0.0787683	0.0363079	1.042
上腰	0.0600203	0.0787683	0.0711379	0.0846774	0.0718475	1.042
下胸	0.0711379	0.0846774	0.0822555	0.0905865	0.0718475	0.7
上胸	0.0822555	0.0905865	0.0585924	0.113724	0.0656891	0.7
肩	0.0585924	0.113724	0.0406597	0.0406597	0.0312023	1.042
首	0.0406597	0.0406597	0.033903	0.033903	0.0164223	1.042
頭	0.041393	0.0405718	0.0551906	0.0496862	0.139062	1.042
上臀部	0.0646398	0.0846908	0.0654023	0.105926	0.0544169	1.042
下臀部	0.0654023	0.105926	0.0500197	0.10003	0.0748959	1.042
右腿	0.0500148	0.0500148	0.0344282	0.0329589	0.187566	1.042
左腿	0.0500148	0.0500148	0.0344282	0.0329589	0.187566	1.042
右脛	0.0344282	0.0329589	0.0203588	0.0203588	0.180938	1.042
左脛	0.0344282	0.0329589	0.0203588	0.0203588	0.180938	1.042
右足	0.0378481	0.0203588	0.0106976	0.0282405	0.137193	1.042
左足	0.0378481	0.0203588	0.0106976	0.0282405	0.137193	1.042
右上腕	0.0260342	0.0260342	0.0233552	0.0233552	0.186628	1.042
左上腕	0.0260342	0.0260342	0.0233552	0.0233552	0.186628	1.042
右前腕	0.0233552	0.0233552	0.0119648	0.0180051	0.15132	1.042
左前腕	0.0233552	0.0233552	0.0119648	0.0180051	0.15132	1.042
右手	0.0119648	0.0294135	0.00410557	0.0150147	0.107331	1.042
左手	0.0119648	0.0294135	0.00410557	0.0150147	0.107331	1.042
肩関節と上腕根本部のyb方向距離						
F=0.00779373233						
肩関節と上腕根本部のzb方向距離						
F=0.0131378299						実際の身長[m] 1.705
首先端と頸根本部のxb距離						実際の体重[kg] 64.9
F=0.00599197012						
下臀部先端と股関節のyb方向距離						
F=0.0500147909						
下臀部先端と股関節のzb方向距離						
F=0.068865305						
脛先端と足関節のzb方向距離						
F=0.0374193548						
上下臀部の回転角度[rad]						
F=0.0140119644						

(a) メインウィンドウ



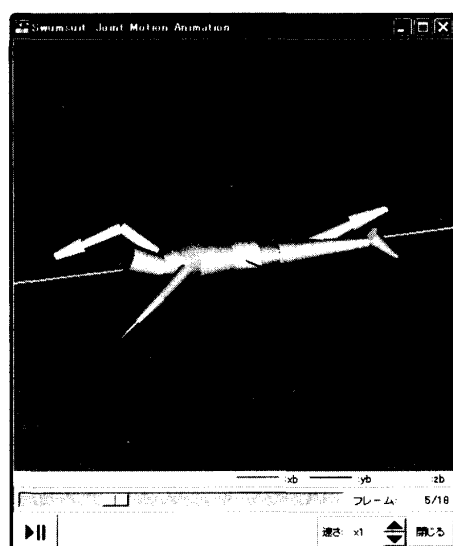
(b) 図ウィンドウ

図3 身体形状編集部

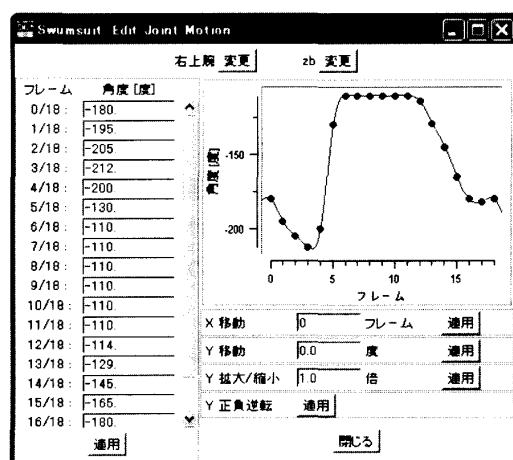
いては、関節運動は後述する胴体基準座標系 $O-x_b, y_b, z_b$ の各軸方向まわりの各体節の回転として表現される。また運動1周期は複数の時間フレームに分割され、各



(a) メインウィンドウ



(b) 関節運動表示用アニメーションウィンドウ



(c) 関節運動個別編集ウィンドウ

図4 関節運動編集部

フレームでの回転角度をユーザが与える。フレーム間の角度は、解析エンジンにおいて自動的にスプライン関数補間されて与えられる。

図4(a)に関節運動編集部のメインウィンドウを示す。左上の「フレーム数」は、1周期を何個の時間フレームに分割するかを示す。右側は、すべての体節の回転をリスト形式で示したものである。リスト中の左端の列は回転させる体節であり、2番目の列は回転軸を表す。3番目以降の列は、各フレームでの回転角度を示す。図4(b)には関節運動表示用アニメーションウィンドウを示す。本アニメーションウィンドウはメインウィンドウから起動でき、設定した関節運動をアニメーションやコマ送りにより確認することができる。本ウィンドウ中には人体を貫く3本の直線として胴体基準座標系 $O-x_b y_b z_b$ が示されており、 x_b, y_b, z_b がそれぞれが、解剖学上の定義における人体矢状軸、横軸、縦軸に対応する。Swumsuitでは、この3本の軸に平行な方向の回転のみ可能となっており、複雑な向きは組み合わせにより表現される。例えば図4(a)の右側リスト部において現在選択されているのは右上腕の z_b 方向の回転(解剖学における肩関節の内旋・外旋に対応する)である。右上腕にはその他にも三つの回転が設定されており、その結果として右上腕の向きが決定される。

図4(a)のメインウィンドウでは回転の切り取り、コピー、貼り付けや、フレーム数変更が可能である。フレーム数変更においては、古い分割数で各フレーム間をスプライン関数補間された曲線が、新しいフレーム数で再分割される。また「運動を編集」をクリックするか、右側のリストの該当の回転をダブルクリックすることにより、図4(c)の関節運動個別編集ウィンドウが起動される。本ウィンドウにおいては該当の回転の1周期分の角度値を設定可能である。画面左側では個別に値を入力することができ、右下部では、全体の横軸・縦軸方向の移動や、拡大・縮小、正負逆転といった、編集作業において頻繁に必要な作業が容易に行えるようになっている。また右上には1周期分の角度がグラフで表示され確認可能になっている。画面最上部では、この回転が対象とする体節や回転軸の変更が可能である。

なおユーザが与えるべき角度の数は、(全体節の回転自由度の合計)×(フレーム数)だけあるので、一から泳動作を作成するのは煩雑な作業となるが、前述の著者らのウェブサイトではすでに4泳法(クロール、平泳ぎ、背泳ぎ、バタフライ)についての標準的泳動作の関節運動データが公開されているので、これを基に所望

の泳動作を作成すれば省力化が可能である。

3.5 解析設定編集部

図5に示す解析設定編集部では、さまざまな解析条件の編集が可能である。まず起動ウィンドウにおいて「解析設定を編集」をクリックすると、「計算設定」「初期条件」「出力設定」が選択でき、それぞれを編集するためのウィンドウが起動される。以下それぞれのウィンドウについて述べる。

図5(a)には計算設定編集ウィンドウを示す。まず上部7行では、身体の質量中心、慣性主軸の向き、および身体の6自由度の剛体運動の運動方程式を解くか与えるかが選択可能である。これらは、SWUMにおいては基本的にはプログラムにより解かれるものである。すなわち、身体の相対運動を与えることにより、各瞬間での身体の質量中心と慣性主軸の向きが求められ、

質量中心と慣性主軸を基準とした、身体を一つの剛体とみなした並進と回転の6自由度の運動方程式が解かれる。しかし解析対象によっては、剛体としての運動はユーザが与え、身体各部に働く流体力のみを算出したい場合、すなわち完全な逆動力学問題の場合もある。そのような場合には、ユーザが与える自由度のみ本ウィンドウで「与える」を選択すれば、その自由度については別途ユーザが用意するデータファイルからデータを読み込んで解析を実行するようになっている。次に、8～13行目は解析を実際と対応付けるための諸パラメータである。「1周期の実際の時間」は解析エンジン中では無次元化して行われる計算を有次元化するために用いられる。「単位泳速度当たりのけのび時の抵抗」は水泳における推進効率(パワー効率)の計算に用いられる。「流体力係数(C_n, C_p, C_a)」はSWUMの流体力モデルにおける係数であり、それぞれ法線方向抵抗力、接線方向抵抗力、流体の付加質量による慣性力の係数である。現在のSWUMにおいては、これらは身体各部においてすべて同じ値を用いているが、体節ごとに異なる係数を設定することも可能である。14～18行目は分割数などの数値計算のためのパラメータである。

次に図5(b)に初期条件編集ウィンドウを示す。本ウィンドウでは泳者身体の初期位置・向き、および初期速度・角速度が設定される。これらは絶対座標系 O_{-xyz} において設定される。 x - y 平面が水面に対応し、 z 軸が鉛直方向である。

次に図5(c)に出力設定編集ウィンドウを示す。本ウィンドウでは、PCのディスクスペース節約およびデータ書き込みによる時間ロスの防止のため、出力結果について、全ての周期出力するのか、最後の1周期のみ出力するのか、出力しないのか選択することができる。後に3.7節で見るように、データファイルはさらに細分化されているが、ここでは4種類のカテゴリ単位で設定される。

3.6 アニメーション表示部

図6に、起動ウィンドウから起動される、解析結果表示用アニメーションウィンドウを示す。本ウィンドウでは、解析結果としての身体の絶対運動と、身体各部に働く流体力が視覚化される。まず画面中央付近に身体が表示され、泳速度に対応して、濃淡で塗り分けられた水面が移動する。淡い領域と濃い領域の泳方向についての長さの和が1周期に進む距離を示している。また身体各部に働く流体力の向きと大きさが、身体から出ている赤線によって示される。ここで定常状態に落ち着く泳動作の場合、最後の1周期のみを繰り返し

質量中心と慣性主軸		☒ 解く	☐ 与える
x方向速度		☒ 解く	☐ 与える
y方向速度		☒ 解く	☐ 与える
z方向速度		☒ 解く	☐ 与える
1軸まわりの角速度		☒ 解く	☐ 与える
2軸まわりの角速度		☒ 解く	☐ 与える
3軸まわりの角速度		☒ 解く	☐ 与える
1周期の実際の時間 [sec]	:	1.955555555	
単位泳速度当たりのけのび時の抵抗 [N]	:	0.009018558	
流体力係数 (C_n)	:	1.077492593	
流体力係数 (C_t)	:	0.036	
流体力係数 (C_a)	:	0.650845054	
☒ 全て同じ ☐ 体節毎に設定		OK	
計算する周期数	:	5	
1周期の時間分割数	:	72	
楕円錐台長手方向分割数	:	10	
楕円錐台半径方向分割数	:	10	
楕円錐台円周方向分割数	:	36	
保存		キャンセル	

(a) 計算設定編集ウィンドウ

初期位置		x	y	z
初期位置	1	0.0	0.0	0.0
慣性主軸の初期の向き	2	1.0	0.0	0.0
	3	0.0	-1.0	0.0
初期速度	x	0.0	y	0.0
初期角速度	x	0.0	y	0.0
x-y平面での初期の向き(度で指定)		64.865		
保存		キャンセル		

(b) 初期条件編集ウィンドウ

剛体としての運動	☒ 全ての周期	☐ 最後の1周期	☐ なし
流体による力、モーメント、パワー	☒ 全ての周期	☐ 最後の1周期	☐ なし
関節トルク(各体節の付け根における)	☒ 全ての周期	☐ 最後の1周期	☐ なし
アニメーション	☒ 全ての周期	☐ 最後の1周期	☐ なし
保存		キャンセル	

(c) 出力設定編集ウィンドウ

図5 解析設定編集部

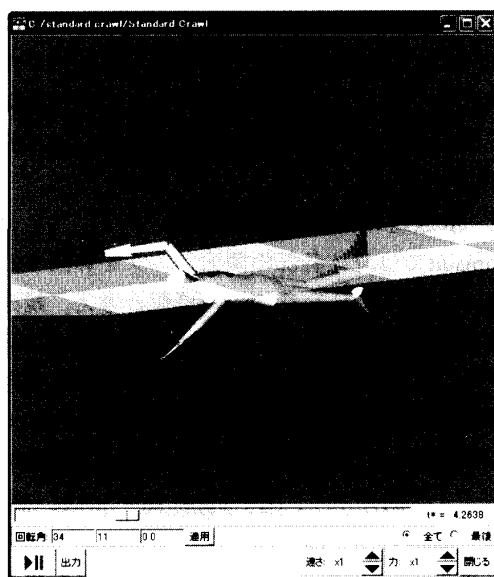


図6 解析結果表示用アニメーションウィンドウ

見たい場合があり、また一方、定常状態に落ち着く過程を見るため全ての周期の運動を見たい場合もあるため、画面右下において、全ての周期か最後の1周期かを選択できるようになっている。またアニメーションが表示されている画面上でマウスをドラッグすることにより、視点を回転して変更することができる。また画面下部のスライダにより、コマ送りなども可能であり、画面右下において、流体力を表す赤線の長さや表示速度も調整可能である。さらに「出力」をクリックすることにより、アニメーション結果を様々な形式で出力することが可能である。現在対応している形式は、BMP, GIF, JPEG, Encapsulated Postscript(以上静止画像)およびMPEG動画である。

3.7 グラフ表示部

グラフ表示部では、解析エンジンが出力した様々な結果をグラフ表示する。まず起動ウィンドウにおいて「グラフ」をクリックすると、「1周期毎の量」「剛体としての運動」「流体による力、モーメント、パワー」「関節トルク」の4個のカテゴリーが表示される。「1周期毎の量」では、泳速度、ストローク長、向き、パワー効率(推進効率)、入力パワー(身体がしたパワー:パワー効率の分母)、出力パワー(身体を推進体とみなしたときに推進体がするパワー:パワー効率の分子)が出力される。

次に「剛体としての運動」では、身体重心の絶対座標系 O -xyz における位置、速度、加速度、また回転の角速度、角加速度などが出力される。

「流体による力、モーメント、パワー」では、力とパ

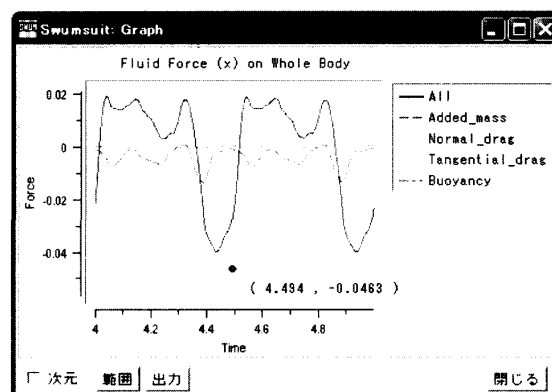


図7 グラフ表示ウィンドウ(6ビートクロールにおけるx方向流体力)

ワーについては x, y, z 軸方向、モーメントについては身体の剛体としての3本の慣性主軸方向成分が表示される。そしてそれぞれについて、全身、上肢・下肢・体幹、または21個の各体節について、各々に働く成分を表示可能である。さらに、すべての流体力成分の合計と、それぞれの流体力成分が複数の曲線でグラフ中に描画される。

「関節トルク」では、各体節間の位置における、絶対座標 x, y, z と胴体基準座標 x_b, y_b, z_b のそれぞれの軸方向まわりのモーメント(トルク)が表示される。例えば右肩における関節トルクを見たい場合には、右肩を始点とする体節、すなわち右上腕を選択する。

図7にグラフ表示画面の例として、既報にて示した標準的6ビートクロールにおけるx方向の流体力のグラフを示す。各流体力成分の凡例なども自動的に出力される。左下の「次元」のチェックボックスにチェックを入れるかどうかで、グラフの有・無次元を変更できる。また「出力」をクリックすることにより、グラフを様々な形式で出力することが可能である。現在対応している形式は、クリップボード、WMF(Windowsメタファイル)、EMF(拡張メタファイル)(以上Windows上のみ)と、Encapsulated Postscriptである。

4. 解析例と応用範囲

本章では、様々な分野におけるSwumsuitを用いた解析例と応用範囲を述べることにより、本ソフトウェアの有用性を示す。なお本章で示すグラフはすべてSwumsuitから直接出力されたものである。

4.1 水泳のメカニクスの解析

前章にて述べたように、Swumsuitでは様々な物理量を出力することができるので、それらを用いて水泳と

いう運動自体のメカニクス(動力学)を理論的に考察することが可能である。例として図8および図9に、標準的6ビートクロールの場合の重心の x 方向(泳方向)の速度変動の1周期分、および左手に働く x 方向流体力をそれぞれ示す。ここでは $-x$ 方向に推進しているので、速度としては負となり、流体力も負の成分が推力を表す。図8について、8.55s～8.80sにかけて絶対値が増加しており加速しているが、これは図9で示される、左手が水を最も強く押して推力を得る、いわゆるプッシュ局面に対応する。よってこの加速は手の推力によることがわかる。また図9については、線が重なっており見づらいが、8.5s～8.9sにかけての大きなピークは、ほとんどが法線方向抵抗成分(図中のNormal drag)であることなど、どの流体力成分が寄与しているかも知ることができる。

なお著者らはすでに、標準的な6ビートクロールにおける、各流体力・身体各部の推力への寄与、バタ足の効果、自己推進時抵抗の算出、ロール運動、および推進効率について解析を行っている¹¹⁾。また平泳ぎ、背泳ぎ、バタフライの解析、およびクロールを含めた4泳法の力学的な比較も行っている¹²⁾。今後はフォームの個人差による違いなどが解析されるべき研究課題として挙げられる。

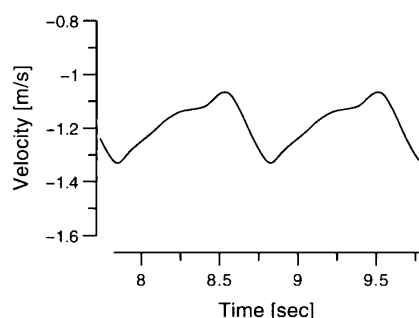


図8 6ビートクロールにおける泳方向速度変動(1周期分)

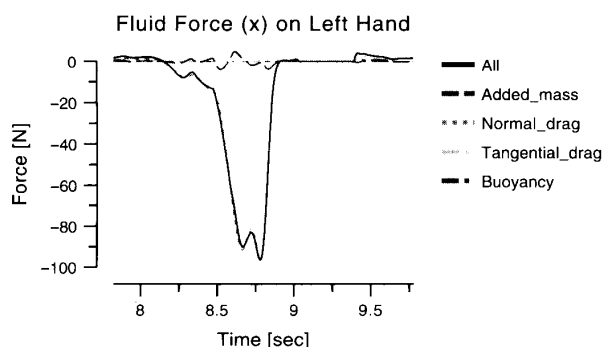


図9 6ビートクロールにおける左手に働く x 方向流体力(1周期分)

また、図6で示したように本ソフトウェアでは身体の運動だけでなく身体に働く流体力も視覚化されるので、競泳選手のトレーニングやコーチングの現場などで、イメージをつかむための教育用に用いられることも期待される。

4.2 水泳時の身体負荷の解析

Swumsuitでは身体各部の関節トルクを算出することが可能なため、これを身体への負荷と考え、競泳選手の傷害予防に役立てることができると考えられる。図10に例として、標準的6ビートクロールの場合の上腰・下腰間(本箇所は解剖学上の定義での「ウエスト高」の位置に対応する)の関節トルクの身体横軸(y_b)方向成分を1周期分示す。図中upper side, lower sideとあるのは、関節トルクの算出方法によるものである。すなわち関節トルクは、関節トルクの算出点を挟んで両側から、身体各部に働く流体力、自身の慣性力、重力による寄与を合計することによりそれぞれ算出される。両者は厳密には一致するはずであるが、計算誤差によりずれが生じる。よってSwumsuitでは両者の平均を取って関節トルクとしている。図10において大きく6回のピークがあるのはバタ足によるものであり、また手のかきに対応して、より大きなピークが8.7s付近と9.7s付近に2回出ている。著者らはすでに、この短い周期の変動的な負荷が競泳選手の腰部に及ぼす影響について、さらに筋骨格モデルを用いたシミュレーションおよびX線シネ撮影装置を用いた実験を行い、そのメカニズムの検討と、腰部傷害予防についての提言を行っている¹³⁾。今後は他泳法や身体他部位の傷害などが課題として挙げられる。

4.3 肢体不自由者の水泳

水泳を競技としてではなく日常的なエクササイズとして見た場合、水泳は健康者にとって理想的な全身運動と言われているが、肢体不自由者にとっても重力か

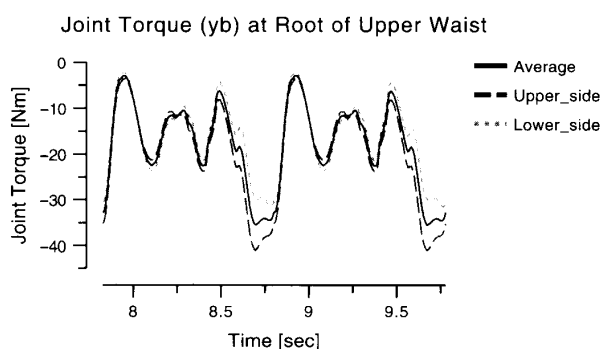
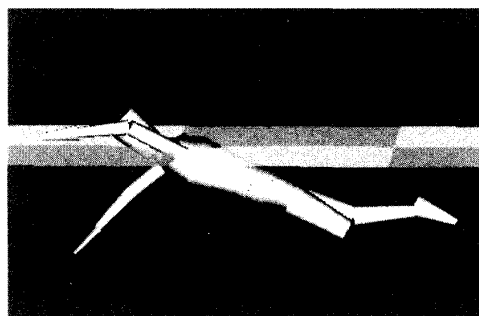


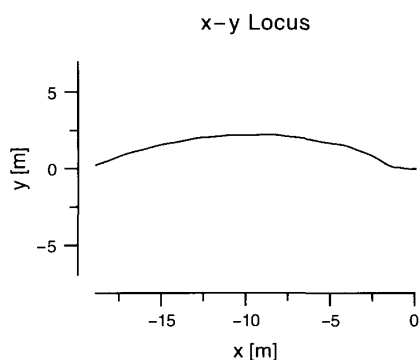
図10 6ビートクロールにおける腰部関節トルクの身体横軸方向成分(1周期分)

ら解放され自由に身体を動かすことができ魅力的な運動である。しかし肢体の不自由により、左右のアンバランスが生じるなどの問題が考えられるため、そのような問題にSwumsuitを適用することが考えられる。3.3節で述べたように、Swumsuitでは身体形状を任意にユーザが設定できるため、切断の肢体不自由を表現することも可能である。図11に例として左膝関節離断の場合の6ビートクロールの解析結果を示す。本結果は、関節運動は健常の場合と同じとして、左脛および左足の長さを0として計算したものである。図11(a)を見ると、左下腿以下が無いことにより下半身が沈み気味になっていることが確認できる。また図11(b)には10周期分の身体重心の水面(x-y平面)での軌跡を表す。右端の原点から出発し、健常であれば定常状態に達して直線的に推進するはずであるが、下腿以下が無いことにより反時計回りの方向に弧を描いて推進していることがわかる。

なお著者らはすでに、片上腕切断の場合について、切断の影響の解析を行い、その影響を軽減する補助具の設計をSWUMに最適化手法を組み合わせることにより行っている。そして最適設計結果に基づき補助具を試作し被験者実験を行いその有効性を確認している¹⁴⁾。



(a)運動の様子



(b)身体重心の水面(x-y平面)での軌跡(10周期分)

図11 左膝関節離断の場合の6ビートクロールの解析結果

今後は様々な肢体不自由についてのより詳細な解析と、アンバランスを軽減する補助具や泳フォームの提案などが課題として挙げられる。

4.4 その他

その他にも著者らはすでに、ヒューマノイドロボットのモビリティを水中に拡張することを提案し、水泳用ヒューマノイドの設計用シミュレーションをSWUMを用いて行っている¹⁵⁾。Swumsuitでは関節トルクなどのロボット設計に必要な諸元が容易に求まることから、今後水泳用ヒューマノイドロボットの設計にも用いることができると考えられる。また著者らは、上手に泳げないと感じている水泳初心者を楽に泳げるようにすることを目的として、浮力体を内蔵した水着を提案し、その効果を実験およびSwumsuitを用いたシミュレーションの両面から検討している¹⁶⁾。このような水着などの水中用具・装具の設計開発に本ソフトウェアを用いることも可能であろう。

さらに著者らは、水泳だけでなく水中ウォーキングにおける解析も本ソフトウェアを用いて行っている¹⁷⁾。今後は、水中フィットネスなどの人間の水中運動全般に関する研究開発にも本ソフトウェアは適用可能であると考えられる。

なおバージョン2.0.0以降では、非線形最適化手法の滑降シプレックス法が実装され、Swumsuit上でのパラメータ最適化計算が可能となった。Sugimotoらはすでにこの機能を用いて、ドルフィンキック時の泳速度の時刻歴をシミュレーションと実験で合わせるように流体力係数の最適化を行っている¹⁸⁾。流体力係数以外にも、身体形状や関節運動を最適化することにより、用具・装具の最適設計や、より効率的な泳フォームの解明など、様々な応用が可能と考えられる。

5. おわりに

本論文では、筆者らが開発した水泳用解析ソフトウェアSwumsuitについて、まずシミュレーションモデルSWUMの概要を述べた後、Swumsuitの構造、仕様、各部の具体的機能について述べ、その実用性を示した。そして解析例と応用範囲を述べることによりその有用性を示した。今後は様々な分野に本ソフトウェアが利用されることが期待される。

ただし、改良すべき点もまだ残されている。例えば身体形状や関節運動の入力方法についてである。現在のソフトウェアではこれらをユーザが手動で入力しなければならないが、身体形状についてはデジタルカメラ映像や三次元スキャナ装置の出力データ、関節運動

については三次元動作解析システムの出力データを、それぞれ本ソフトウェアに直接入力できれば労力の大幅な軽減が期待できる。よってこれらの出力データを本ソフトウェアへの入力データに変換するプログラムの開発が課題として挙げられる。また、ソフトウェアでなくモデル自体の問題であるが、人体に作用する流体力のモデルの詳細化・厳密化も重要な課題である。今後これらの課題を解決していき、本ソフトウェアをより発展させたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中島求, 佐藤憲, 三浦康郁: 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 (2005)
- 2) <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>
- 3) 篠原主勲, 古川知成, 矢川元基: 流体力学を考慮したスイマーのシミュレーションと準最適運動計画, 日本機械学会論文集 C 編, **68**-673, 2643/2650 (2002)
- 4) <http://www.tcl.tk/>
- 5) <http://togl.sourceforge.net/>
- 6) <http://sourceforge.net/projects/blt/>
- 7) <http://freewrap.sourceforge.net/>
- 8) <http://www.intel.com/software/products/compiler/fwin/>
- 9) <http://www.netlib.org/>
- 10) 人間生活工学研究センター: 日本人の人体計測データ (CD-ROM) (1997) <http://www.hql.or.jp>
- 11) 中島求: 水泳人体シミュレーションモデルによる標準的6ビートクロール泳の力学的考察, 日本機械学会論文集 B 編, **71**-705, 1370/1376 (2005)
- 12) 中島求: 水泳人体シミュレーションモデル SWUM による平泳ぎ・背泳ぎ・バタフライの解析, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, **05**-32, 1601 (CD-ROM) (2005)
- 13) 中島求, 三浦康郁, 金岡恒治: 水泳運動における腰椎の負荷と挙動のシミュレーションと実験的検証, バイオメカニズム, **18**, 45/55 (2006)
- 14) 米山啓子, 中島求: 肢体不自由者のための水泳用補助具の開発(片上腕切断の場合の最適設計と被験者実験), バイオメカニズム学会誌, **30**-4, 216/224 (2006)
- 15) 中島求: ヒューマノイドの水中モビリティ(水泳運動時における設計用シミュレーション), 日本機械学会 Robomec 2004 講演論文集, **04**-4, 2A1-H-69 (CD-ROM) (2004)
- 16) 茂木勇悟, 中島求, 伊藤慎一郎, 仰木裕嗣: 水着に装着した浮力体が泳ぎに及ぼす影響, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 402 (CD-ROM) (2006)
- 17) 米山啓子, 中島求, 三好扶: 下肢に働く流体力を考慮した水中ウォーキングのシミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 403 (CD-ROM) (2006)
- 18) S. Sugimoto, M. Nakashima, H. Ichikawa and T. Nomura: Estimation of Thrusts Generated by Each Body Part During Underwater Dolphin Kick Using "SWUM", Biomechanics and Medicine in Swimming X, 100/102 (2006)