

スポーツにおける生体力学シミュレーション研究と新運動原理

望月 義幸* , 姫野 龍太郎† , 大村皓一#

*松下電器産業株式会社 AV コア技術開発センター

大阪府門真市大字門真 1006

e-mail: Mochizuki.y@jp.panasonic.com

†理化学研究所 情報基盤研究部

埼玉県和光市広沢 2 1

e-mail: himeno@riken.jp

#宝塚造形芸術大学

兵庫県宝塚市花屋敷つつじヶ丘 7 - 27

要旨 スポーツにおける生体力学シミュレーションに関して、投球動作を中心に、最適化を取り入れた生体力学シミュレーションの手法とその応用実験、及び、その実験結果について述べる。また、生体力学シミュレーション実験結果から導かれる新たな運動原理と伝承システムについても報告する。

1. はじめに

人間の活動には知的側面と技能的側面があるが、科学的、工学的な取り組みという点からすると、知的側面に比べ、技能的側面へのトライアルが十分とは言い難い。また、保存や継承という点から見ても、知能に関しては、例えば、古来より書物があるが、技能の保存は基本的には保有者その人自身であり、継承については一子相伝に代表されるように、師匠の傍らでひたすら観察して試行錯誤的に学ぶという術しかなかった。仮に、「コンピュータを代表とする人工物上に保存された技能」や、「人工物上で再現される技能」、更に「人工物上で新たに生成された技能」を人工技能と呼ぶことにすると、従来、師匠と同時代に生き、同じ場所にいなければ技能は継承できないという時空間的な制約を、人工技能は開放することになる。この人工技能という観点で生体力学シミュレーション研究を考えた場合、「人工物上で再現される技能」、「人工物上で新たに生成された技能」を実現するための研究、更に言えば、再現・生成した結果を科学的な方法で解析して原理化できるならば、従来とは異なる技能を伝承するための科学的な研究と捉えることもできる。

一方、技能の特徴の一つは身体性を伴う点にあるが、近年の人工知能や脳研究では、人間が知能を発現するには、身体性が重要な役割を果たしているという立脚点の研究が数多く行われている [1]。その意味では、技能研究は知能研究に通じ、技能研究の成果が知能研究にとって有効な材料を提供するものと思われる。特に、スポーツにお

ける技能動作は、人間の身体的な限界能力の発揮によるものなので、もしこれに関連した知能研究というものがあるのならば、それは知能的にも何らかの限界性に関連したものとなるのではないかと思われる。

以下では、これまで行ってきたスポーツにおける生体力学シミュレーション研究に関して、従来の研究結果も交えながら報告するが、スポーツ動作としては、特に力点をおいて研究を行ってきたことから、投球動作を中心に述べることにする。

2. 動作計測手法によるアプローチ

スポーツ・バイオメカニクス分野では、スポーツ動作の研究を中心として、医学、運動生理学的な側面からの身体機構の研究や、集団スポーツにおけるゲーム戦略的な研究をも含み、アプローチの仕方の面でも、またスポーツ種目の点でも、非常に多岐に渡ってスポーツの研究を行っている。中心テーマのスポーツ動作に関する研究手法としては、基本的には現存する選手の動作計測と、動作メカニズムの解析が主流を占めている。例えば、投球動作に関しては、DLT法(Direct Linear Transformation法)[2]による3次元動作計測によって実際の投球動作を計測し、その計測データに対して簡易な物理解析や統計処理による分析を行い、その動作メカニズムを調べるといったような研究が行われてきた[3-8]。

我々の研究においても、スポーツ技能動作の収集や動作メカニズムの解明という観点から3次元動作計測技術に基づき、プロ野球選手の投球動作やバッティング動作や、大学競技自転車選手のペダリング動作[9]などの研究を行ってきた。

3次元動作計測データに基づく解析結果としては、例えば150km/s以上の速球を投げる選手として有名な、あるプロ野球投手の場合、体幹の長軸周りの回転運動の最大角速度と、他の2軸周りの合成回転運動(屈曲と側屈の合成回転)の最大角速度が、通常の投手(130km/h程度の投球速度)に比べ、前者は約1.1~1.2倍速かただけであるが、後者については約2倍も高速であることが解った。更に、後述するスパイラル状の手先の軌跡が非常に滑らかで美しいということも、手先の3次元軌道を解析することで判明した。これらのDLT法による3次元動作計測以外に、コンピュータ・グラフィックス技術を応用した3次元動作計測によって、米国大リーグのR.ジョンソン投手と先の有名投手の投球動作、及び、米国大リーグのB.ボンズ選手と元巨人軍の松井選手のバッティング動作の比較解析を行ったものを著作物[10]にまとめている。

3. 生体力学シミュレーションによるアプローチ

3.1 生体力学シミュレーションによるアプローチの利点

スポーツ動作の研究において、生体力学シミュレーション手法を適用したときの、一般的な利点については以下のことが挙げられる。

(1) 定量的な条件での実験が可能、

- (2) 身体を損傷するような危険な実験が可能 ,
- (3) 動作の再現性を保証した実験が可能 ,
- (4) 時空間的自由度が高い .

このような生体力学シミュレーションの一般的な利点に加え , 更に最適化を応用した生体力学シミュレーション手法では , 多くのスポーツ選手にとって最も重要な問題の一つである , 「自分の動作が理想的なものなのかどうか」 , 「もっと理想に近い動作は存在しないのか」という問いに対して , 数理解析に基づく解答を提供できる (この解を人工熟達技能と呼んでいる) . また , 条件の変化に応じた適合的な動作を生成できるので , 条件の違いが動作に与える影響解析に関して , 現実の人間が行った場合に近い予測結果を得ることが期待できる . 例えば , 被験者に対する実験の危険予測としての利用も可能である . また , 最適化の時間発展に着目すれば , トレーニングによる習熟という観点での生体力学シミュレーションに応用することも可能である . 以上のことから , 最適化を応用した生体力学シミュレーションは , スポーツにおける技能動作研究の強力な手法の一つであると考え , 以下に述べる取り組みを行ってきた .

3 . 2 投球の数理モデル

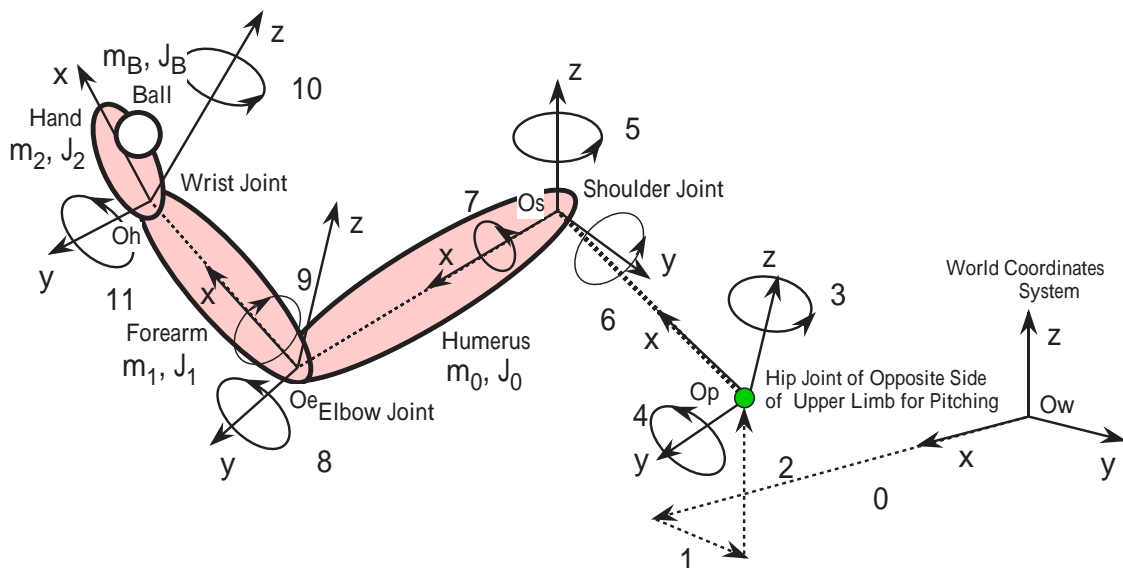


図1 投球における上肢のモデル

投球動作においてボールを投げる側の上肢が最も重要であり , 肩関節以降の上肢運動は肩関節の軌道のみの影響を受けることから , 図 1 による数理モデルを構築した . 肩関節の軌道の制御は , ボールを投げる側の上肢と反対側の股関節位置の 3 自由度の並進運動 (0 , 1 , 2) と , この股関節位置を中心とする 2 自由度の回転運動 (3 , 4) によって行う . 肩関節の 3 自由度については , 5 が水平位内転・外転に相当す

る変数， 6は外転・内転に相当する変数， 7は内旋・外旋の変数である．肘関節については， 8が屈曲・伸展の変数で，前腕関節の回内・回外については近似的に肘関節の位置に 9を割り付けた．手関節については， 10が橈屈・尺屈の変数で， 11は背屈・掌屈の変数である．各局所座標系はD-H記法 [11]に基づき，上肢の形状については，断面が楕円で側面が3次spline的に変化する剛体で近似している．投球動作中の運動方程式は，ボールがあるモデルとないモデルに対してLagrange運動方程式を求め，ボールのリリース前後で，これらの運動方程式を切り替えて使用する．ボールのリリースポイントは，ボールを持った状態で投球動作を行ったときに，ボールの速度が垂直下方向に成分を有し，かつボールの水平速度が最大となる位置として決定している（これとは別に，投擲角度とボール速度の微小区間での評価式による決定方法も採用している）．

3.3 最適化処理方法

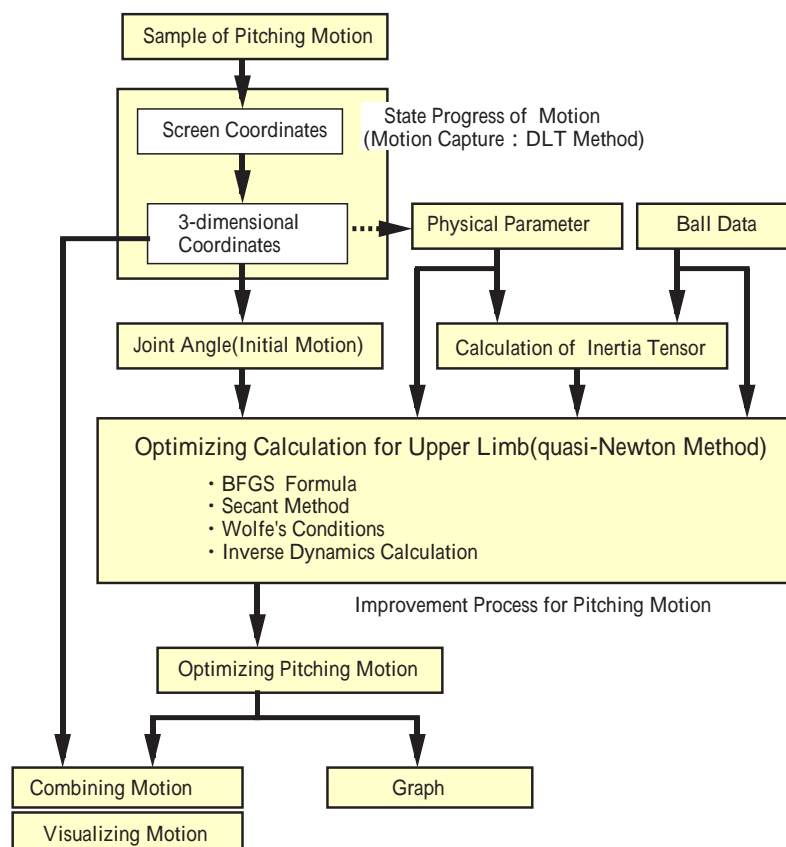


図2 最適化生体力学シミュレーションの処理の流れ

図2は最適化生体力学シミュレーションの処理の流れを示したものである．本手法の

特徴の一つは、最適化を行う初期動作を3次元動作計測で得た実際の投球動作として
いる点である。これは、現実の動作に対して改良を加えて最適な動作を得るとい
う点で意味があり、また、初期動作が実際の人間の行っているものであれば、実
行不能な動作への収束は起こり難いだろうとの考えに基づいている。初期動作の
関節角の時系列データや、別途算出した慣性テンソルや上肢セグメントの重心位
置、長さ、質量などの物理パラメータを入力として最適化計算を実行する。最
適化計算は上肢の7自由度(遠投動作のときは9自由度)に対して行い、BFGS
(Broyden Fletcher - Goldfarb - Shanno)公式によるヘシアン計算で探索ベ
クトルを算出し、セカント法とWolfeの条件式によってステップ幅を決定する準
Newton法によって実行している。なお、各関節角の時間関数(つまり、ここ
での最適化は汎関数の最適化である)は初期動作の動作計測点を節点とし、端
区間で3次、それ以外の区間では5次のSpline関数によって近似している。最
適化計算の結果得られた動作は、独自開発したブラウジングソフトを用いて可
視化する。但し、上肢運動のみを可視化しても、全身の運動との関連性が分
からないので、3次元計測した上肢以外の身体部位のデータと生体力学シミュ
レーション結果の上肢運動とを同期合成している。

3.4 目的関数

「最適である」とは対象が定義される空間において、何らかの評価基準に従っ
て評価された結果であるが、スポーツ動作の場合、主観的要因も関係して評価
基準が一意的でないため異なる最適性を定義し得る。しかしながら、我々はス
ポーツ動作の最適性もしくは理想的な動作を論じる上で、

- (1) 動作の目的に対する達成度、
- (2) 労力、
- (3) 動作の滑らかさ、
- (4) 物理運動としての制限、
- (5) 運動生理学的な制限、

が少なくとも必要であると考えている。特に、スポーツの場合、競争や勝敗が
関係するために(1)は重要であり、(2)については、体力の浪費を最小にする
ということばかりでなく、疲労や疲弊による肉体的な損傷の可能性を少なくす
るという意味でも重要である。(3)は作用部位や身体部位の空間中での描く軌
跡の滑らかさと、動力の発生という観点からの滑らかさがある。急激な筋力
の発生は肉体的な損傷、特に筋肉断裂などと密接な関係があることから、動
力の発生という点での滑らかさは、スポーツ障害を防ぐ意味で重要である。
動力の発生によって作用部位の軌道は描かれるので、動力の発生時の滑ら
かさとは作用部位の空間軌道の滑らかさとは、何らかの関係が存在するもの
と思われる。なお、人間の行う自然な動作では、滑らかさによる最適化原
理が働いているということについて、文献[1]で解説を行っている。(4)と(5)

は、最適化動作の現実性や肉体的な損傷の回避を保証するもので、特に(5)については、怪我などのハンディキャップを負った者に対する表現としても利用可能である。我々はこれらの評価要素を投球に関して定式化し、重み付きの線形和として目的関数を構成した。また、目的関数の重み付けの違いによって最適化結果の動作がどのような特徴を持つか解析を行った[12]。特に、動作の滑らかさについては、トルク変化の1次だけでなく、2次の滑らかさを考慮した目的関数を用いた生体力学シミュレーション実験を行った。この実験では、目的関数の違いで様々なスタイルの投球動作が生成されること、投球におけるブレーキングにおいては、動力の発生の滑らかさが、作用部位(手先)の空間軌道の滑らかさを実現することが分かった。また、トルク変化の1次に加えて、2次まで考慮すると、より空間軌道の滑らかさが増すという結果も得た。

3.5 最適化生体力学シミュレーションの応用

投球動作や遠投動作に関して、ボールや上肢に関する物理的な条件など(投球ボールの要求速度変化[13]、ボールの質量と形状変化[14, 15]、投擲角度の変化[16]、習熟目的の動的変化[17]、上肢の質量と形状変化[18]など)を変更したときに、その動作に与える影響について、最適化生体力学シミュレーションを応用して解析を行ってきた。

投球ボールの要求速度変化の場合、要求速度を高速(43 m/s):条件A、中速(35 m/s):条件B、低速(20 m/s):条件Cの3通りについて生体力学シミュレーション実験を行った。

表1は各要求速度条件の最適化投球動作における、ボールリリース時のボール速度と最大外旋角度を到達時刻とともに示したものである。図3は各要求速度条件での最適化結果の投球動作で、図中の帯は手軌道を示している。図4は条件Aでの関節角の時間変化のグラフ、図5は同条件での各部位の速度の時間変化のグラフ(最大速度到達時刻が遅延を伴って末端部位に移行していく様子をはっきりと分かるが、これをキネティック・チェーンという)、図6は同条件での肩関節の関節トルクの時間変化グラフと、ボールと手先の速度の時間変化グラフ、および投球動作の状態を付加したものである。但し、5、6、7は、それぞれ関節角 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 に対応した関節トルクである。

図3から見た目での明らかな違いは、第2章の某有名投手の特徴で述べた、手軌道のスパイラル部の大きさに現れていることが分かる。このスパイラル部の生成には、肩関節における、体幹の回転方向とは逆向きの外旋、外転、水平位外転運動と、その後の体幹の回転方向と合致した方向の内旋、内転、水平位内転運動が関与して生じるが、ここで着目すべき回転運動は、内/外旋運動であり、以下では、それらを含めて、要求速度変化に対して投球動作の違いが生じるメカニズムについて考察を述べる。

どの要求速度条件においても、最大外旋角に達したとき、手先位置はスパイラル部の最下点付近にあった。この最大外旋角は、表1から分かるように大きくなっており、しかも最大外旋角に到達してからボールリリースに至るまでの時間が、要求速度が高いほど短くなっている。図5でボールおよび手先が大きく加速を開始する時刻は、図4の最大外旋角（ θ の最小点、 θ は右下がりの状態は外旋方向の回転運動、右上がりの状態は内旋方向の回転運動をしている）に到達するちょっと手前で、これは図6の内旋トルクの発生時刻に一致し、投球動作の状態はState0の状態にある。図6のState1で図4のほぼ最大外旋角に達するが、このとき内旋トルクは最大となる。ボールのリリースはState4で起こり、これは図4の θ の最小点と最大点の真中付近で角速度（グラフの傾き）がほぼ最大のところである。従って、先ず解ることは、スパイラル部が大きいということは、空間的な軌道における加速区間の距離が長くなっているということである。しかも要求速度が高いほど、ボールリリースに至るまでの時間が短いので、空間的な軌道における加速度自体も大きくなっていることを表している。このスパイラル部が滑らかで美しいことは、空間軌道での加速が滑らかなことを示しており、その意味で某有名投手は滑らかな加速を行っているものと理解される。また、回旋に関しては、要求速度が高いほど最大外旋角が大きくなっていることから、内旋運動の角速度は大きくなっている。

次に、State0の加速開始からState4のボールリリースまでの投球動作の状態をみると、肘関節で屈曲して折り畳まれていた上肢が、肘関節が伸展して伸びていく様子がわかる。このような、折り畳まれている状態から伸びる状態に移行する現象は、末端作用部位の速度獲得を必要とする他のスポーツ動作、例えば、槍投げ、バレーボールのスパイク、テニスのサーブ、ゴルフスイング、バッティングなどに共通な現象である。但し、道具を使うテニスやゴルフスイング、バッティングなどでは、肘関節だけでなく手関節でも折り畳まれる。これは、体幹の回転運動の始動に対して、慣性モーメントが小さな状態から初めて、伸展によって末端作用部位までの距離を大きくし、最終的な末端作用部位の速度を獲得していることを示している。従って、肘関節の進展は投球動作における、ボール速度の獲得において非常に重要な要素なのであるが、問題はこの伸展トルクが何によって獲得されるかということである。肘関節の角加速度による回転力（肘関節における自発的な伸展トルクの発生）だけかということ、そう単純ではない。体幹の回転運動の間、上記からも分かるようにState1からState4まで肩関節は内旋運動を行っており、しかも、獲得速度が大きくなるにつれ内旋角速度も大きくなっている。体幹の回転運動や水平位の内転運動による遠心力もこの伸展に影響するが、それ以外に、体幹の回転運動と肩関節の回旋運動とによってコリオリ力（ジャイロ効果）が発生し、この影響も考慮する必要がある。なお、このコリオリ力は肘関節の伸展方向に働く。この影響がどの程度のものなのか生体力学シミュレーション実験を行ったところ（簡易なバッティングのモデルだが本質は同じ）、遠心力

の影響とともに、想像以上に大きいという結果を得た[19]。

コリオリ力は、同じ慣性力の遠心力よりも更に馴染みの薄いものであり、回転軸方向の異なる2つの回転運動が同時に発生しているときに生じる慣性力なので、3次元空間での回転運動ということ意識しなければ見落とすものである。逆に、コリオリ力を意識するということは、3次元空間での回転運動としての理解を促すと言え、ここに後述の新運動原理の背景がある。これまでコリオリ力は、スポーツ分野では全く意識されてこなかったのだが、一つには平面運動として近似したモデルでの研究が多かったことが、その要因として挙げられる。なお、両上肢を使うバッティングやゴルフスイングの場合、回旋運動は両肩甲骨のスライド運動によって起こるのだが、このメカニズムについては文献[10]に詳述している。

他の最適化を応用した生体力学シミュレーション実験の結果について簡単に要点だけ報告すると、他種目ボール（ゴルフボール、野球ボール、ソフトボール、ハンドボール、バスケットボールなど）によるボール質量と形状変化の実験では、ボールの種類によって投球動作が2つのグループに分類でき、ちょうどその境界に位置するのがソフトボールであった。投擲角度の変化が与える影響については、投擲角度が大きくなると、「リリースポイントが早くなる」、「手先軌道の描くスパイラル部の始まりでは、肩関節のトルクが上肢を後下方向へ移動するように働き、スパイラル部の最下点からは急速に前方へ移動するように働く」等が分かった。習熟目的の動的変化の実験では、複数の習熟目的を持つ練習においては、重視する練習目的の順序も重要であり、これにより現実の選手の微妙に異なる動作の違いは、身体的な要因ばかりでなく、重視する練習目的の順序が関係している可能性があることが分かった。上肢の質量と形状変化に関する実験では、筋力トレーニングによる筋肉の増強で投球速度を上げるためには投球動作の改善を同時に行うことが重要であり、筋肉の増強は投球動作を改善するためのきっかけとなる可能性があることが分かった。

その他、競技自転車のペダリング動作[20]などについても、最適化生体力学シミュレーションを行った。

表1 ボールリリース時のボール速度と最大外旋角度（到達時刻付き）

最適化条件		ボール速度	肩関節の最大外旋角
条件 A	時刻	0.650741 (sec)	0.613475 (sec)
	値	42.044094 (m/s)	-2.545132 (rad)
条件 B	時刻	0.650741 (sec)	0.579076 (sec)
	値	34.761332 (m/s)	-2.394837 (rad)
条件 C	時刻	0.653607 (sec)	0.579076 (sec)
	値	25.756440 (m/s)	-2.361247 (rad)

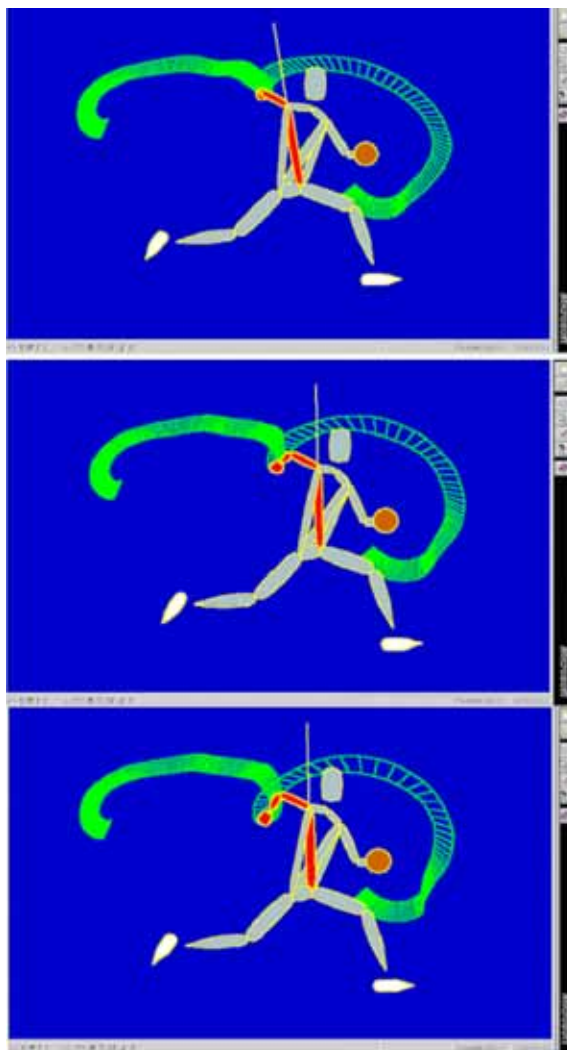


図3 速度条件を変えたときの最適化結果の投球動作。

上から順に低速条件(20 m/s), 中速条件(35 m/s), 高速条件(43 m/s)で最適化を行った。

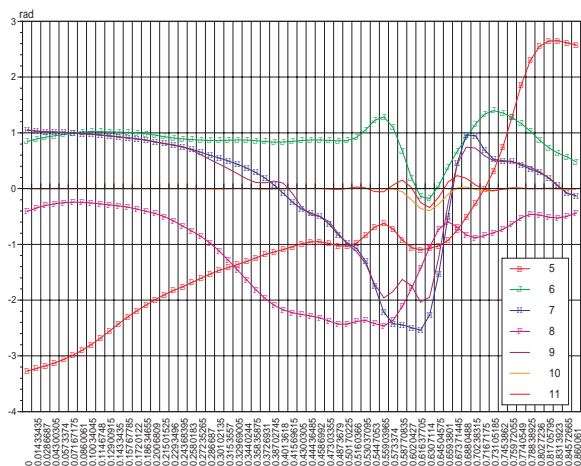


図4 高速条件での関節角の時間変化

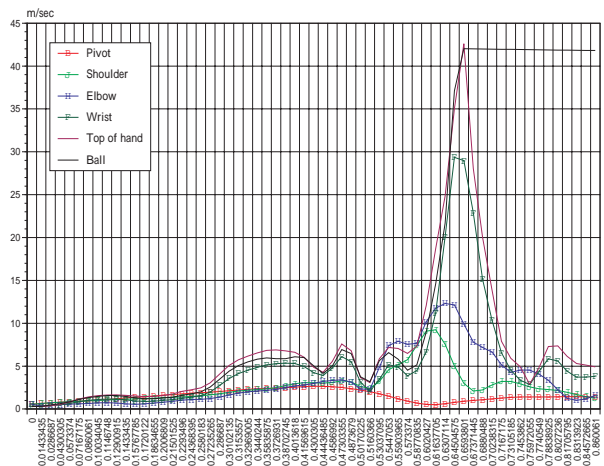


図5 高速条件での各部位の速度の時間変化

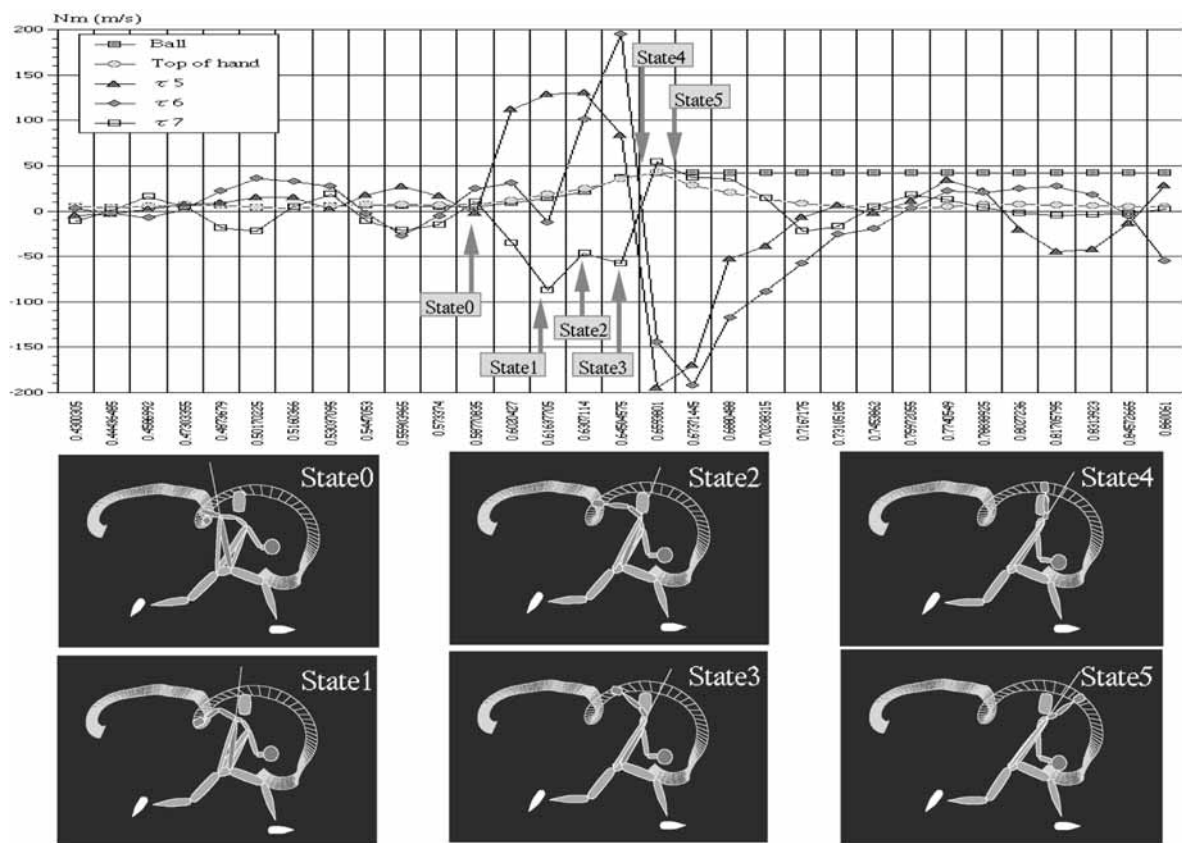


図6 高速条件での肩関節の関節トルクの時間変化とボール，手先の速度の時間変化，および投球動作の状態

3.6 ボールの飛翔シミュレーション

図7は野球ボールに関する流体計算のための差分格子で，縫い目部の盛り上がり流れに及ぼす影響も解析するために，実際の野球ボールを計測したモデルである．計算点数は $169 \times 92 \times 101$ の157万点である．時速150km程度では空気の圧縮性は無視できるので，非定常非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と連続方程式を基礎方程式とした．MAC法により Poisson 方程式を導き，Poisson 方程式と Navier-Stokes 方程式を連立させて解くが，離散化には一般曲線座標系での差分法を用いた．Navier-Stokes 方程式の対流項には3次精度の上流差分を，他の空間微分項には2次精度の中心差分，時間微分には1次精度の Euler 陰解法を使った．このモデルを用いて，マグナス力による変化球（直球やカーブ，スライダーなど）や，マグナス力によらない変化球（ナックルボール，フォークボールなど），新魔球ジャイロボールについての解析（図8に流脈で可視化したものを示す），前章の投球動作の最適化計算と連動した解析を行ってきた[21, 22]．変化球に関して特筆すべきことは，新魔球ジャイロボールであるが，これはボールの飛翔方向とボール回転の回転軸が一致するもので（アメリカンフットボールのボールパス時に観察されるボールの回転），フォークボールと同様に重

力作用だけで落ちる変化球である。但し特異な性質を持ち，飛翔方向正面に向くボールの縫い目のパターンによって，抵抗係数が2倍も変化する（U字型の縫い目が正面を向くとき最大：図8の下側のケース）。従って，投球時に飛翔方向の縫い目の向きを変えるだけで，ベースへの到達時間や落下量を大きく変化させることができる。また，最適化計算結果の投球動作におけるリリース時の手の動きとボールの擦れ方向からすると，このジャイロボールを投げている可能性が高く，その実践的な投球方法については文献[25]に詳しく述べている。

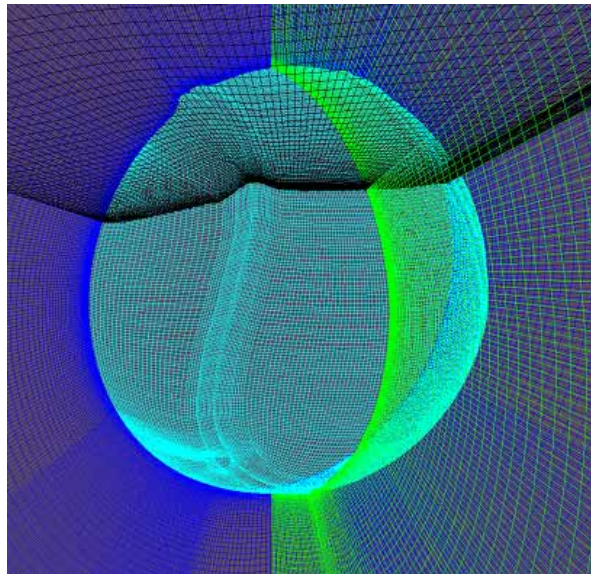


図7 野球ボールの計算格子

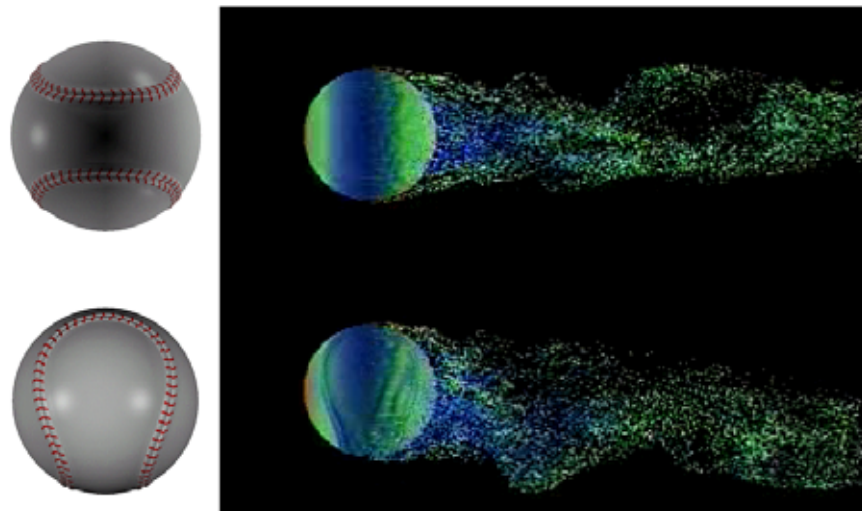


図8 正面の縫い目のパターンとその場合の新魔球ジャイロボールの流脈での可視化（下側のケースは上側のケースより，抵抗係数が2倍高い）。

4. 新運動原理と技能の伝達

投球動作を中心に述べてきたが、投球動作に限らず上肢や下肢、バットやラケットなど、何かを振り回す動作（しかも大抵の場合、高速に振り回す必要がある）がスポーツ動作にはよく現れる。このような振り回す動作を、我々はスイング動作と呼んでいる。これまで行ってきた動作メカニズムの解析成果から、スイング動作の3次元的な考察や理解に基づく統一的な議論を可能とする原理の必要性を感じ、これを新運動原理と呼んでいる（従来の運動原理と区別する意味で、単に“新”を付加しただけで、実は“新”が取れてしまうことを期待している）。一言で言うと、スイング動作に関しては、「コリオリ力（ジャイロ効果）がリリース現象の原動力である」という主張が、我々の新運動原理であり、すべての議論はその上に形作られるべきであると考えている。但し、ここでいうリリース現象とは、第3.5節でも述べたが、スイング動作では、折り畳まれた状態から伸びた状態に移行する現象を伴って、作用目的に必要な速度を獲得するのだが、この折り畳まれた状態から伸びた状態に至る現象のことである。スイング動作は身体各部位の回転軸方向が3次元的に異なる多重回転運動を基本としており、Lagrange 運動方程式におけるコリオリ力・遠心力の項が作用する。この作用は第3.5節で述べたように、リリース現象に大きく関与していることが分かった。これを根拠として、上記の新運動原理に至ったわけであるが、特にコリオリ力を強調しているのは、遠心力や角加速度による回転力は一般的に馴染みがあって、ことさら強調する必要はないこと、また、遠心力や角加速度による回転力を中心して動作を考察すると、平面運動としての解釈に陥りがちになることからである。新運動原理は、遠心力や角加速度による回転力は無視して良いと主張している訳ではない。コリオリ力を意識することが、スイング動作を3次元運動として正しく議論するためには必要なのである。

文献[1]で中村は、「N.Berstein[26]は、運動の問題を文脈の問題と自由度の問題に分けた。前者は筋肉の指令が同じでも現れる運動は前後の運動によって干渉を受け変化する。この文脈を捉えることが必要であるという指摘である。後者は多くの筋肉の自由度を脳が集中的に制御するのは現実的ではなく、筋肉間の干渉構造（協応構造）を作り上げることで、制御する自由度数を抑えている。この協応構造を獲得するのが学習や習熟であるとの考えである」と解説を述べている。正にこのような文脈の問題や自由度の問題を考察するための指標足りうるものが、スイング動作に関しては新運動原理なのである。新運動原理の構築によって、新運動原理的なスイング動作を実践するためには、人間の身体をどう使ったらよいのかという新たな方法論の開発や、逆に様々なスイング動作のメカニズムがこの原理の下で3次元的に解釈できるようになった。また、この原理の下で共通の認識に基づく議論を展開することも可能となった。投球動作やバッティング動作に関して新運動原理に基づいて考察した結果や実践方法論は、一般啓蒙書やスポーツ教則書の形にまとめられている[10, 23-25]。

一方、技能の伝達にはミメシスが基本であるとの考えの下、CGアニメーションを用いた可視化による動作の再現に取り組んできた。図9は投球動作の最適化結果をCGアニメーションにより可視化した時の1コマである。また、この発展的展開として、理化学研究所所有のバーチャルリアリティシステムを活用した、仮想空間での最適化動作の再現に取り組んでいる。このシステムは、視覚的再現による技能伝達システムとしての活用ばかりでなく、例えば、図10に示したような、前章のボールの飛翔シミュレーション結果を用いたバッティングのトレーニングや、バッティング時の人間の視覚情報とそれに呼応した動作制御に関する解析への活用も図っていく予定である。生体力学シミュレーションと実際の人間の被験者による融合実験を可能とする、新たな解析システムとしても期待を寄せている。

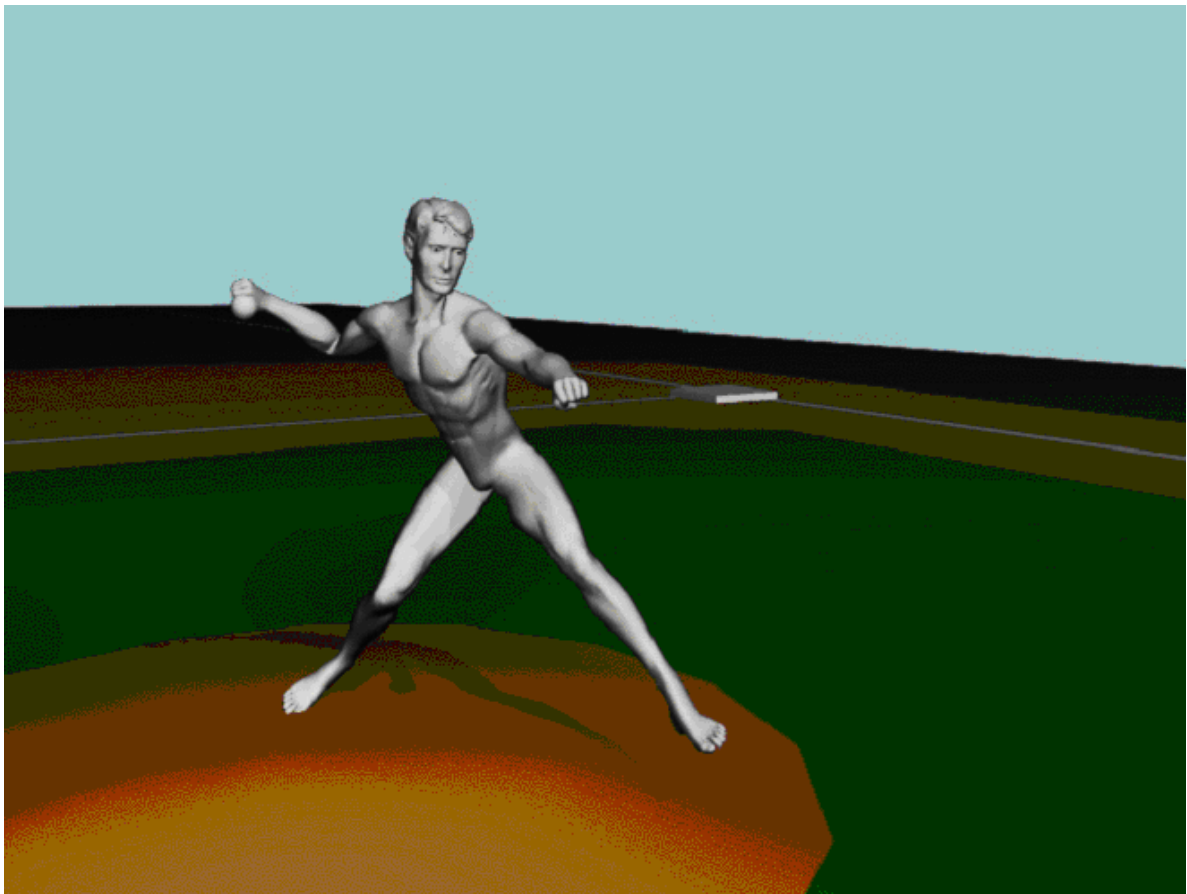


図9 最適化した投球動作のCGアニメーションによる可視化の一コマ

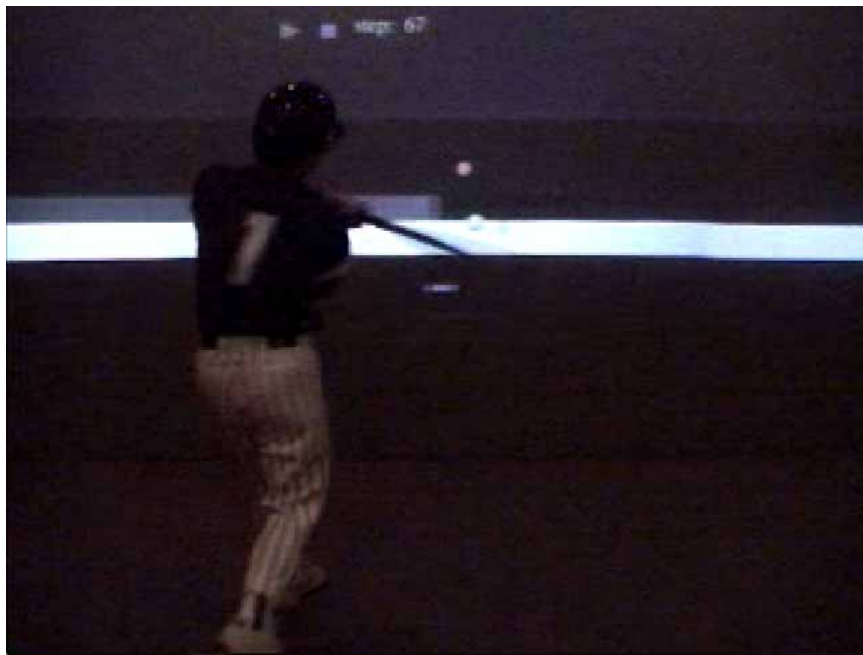


図 1 0 パーチャルリアリティシステムを利用した仮想バッティングトレーニングシステム

5. おわりに

以上，投球動作を中心に，スポーツにおける生体力学シミュレーションと新運動原理について，従来研究結果を簡単に交えながら，我々の行ってきた研究を報告した．近年，ヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われ，様々な研究成果が発表されている．このようなヒューマノイドロボットの最終目標の一つは，人間のように行動し，人間との共生が可能となることであろう．スポーツにおける技能動作を深く研究すればする程，人間の運動能力には驚きを禁じえない訳であるが，別の見方をすれば，日常生活の中で我々人間が行う動作は，スポーツ動作までが可能な運動能力のマージンの中で営まれているとも言える．このようなことからすると，人間と共生するヒューマノイドロボットも，やはりスポーツ動作が可能なくらいの運動能力のマージンが必要なのではないかとも考えられる．そうだとするならば，いきなりスポーツ動作をターゲットにしたヒューマノイドロボットを研究することが，意外にも人間との共生目標を達成するための近道だったりするのかもしれない．いずにしる，我々の研究がスポーツ分野だけでなく，冒頭に述べた知能研究やロボット研究などの異分野の研究に活用され，何がしかのブレークスルーのきっかけとなることを切に希望する．

参考文献

- [1]佐野，中村，多賀，有本，宇野，篠田，三嶋，遠藤，“人間における知能の力学的理解特集号解説”，システム制御情報学会誌，Vol.46，No.1，pp.2-41（2002）．
- [2] Shapiro, R.: “The direct linear transformation method for

three-dimensional cinematography” , Res. Quart., 49, pp.197-205 (1978).

[3] M.Feltner and J. Dapena: “ Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch” , International Journal of Sports Biomechanics, pp.235-259 (1986).

[4] M.Feltner and J.Dapena: “ Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part 1 : General model” , International Journal of Sports Biomechanics, pp.403-419 (1989).

[5] M.Feltner: “ Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part 2 : Application to the throwing arm in a baseball pitching” , International Journal of Sports Biomechanics, pp.420-450 (1989).

[6] S. Sakurai, Y. Ikegami, A. Okamoto, K. Yabe, and S. Toyoshima: “ A Three-Dimensional Cinematographic Analysis of Upper Limb Movement During Fastball and Curveball Baseball Pitches ” , Journal of Applied Biomechanics, 9, pp.47-65 (1993).

[7] R.Escamilla, G.Fleisig, S.Barrentine, N.Zheng, and J.Andrews, “ Kinematic Comparison of Throwing Different Types of Baseball Pitches ” , Journal of Applied Biomechanics, 14, pp.1-23 (1998).

[8] S.Barrentine, T.Matsuo, R.Escamilla, G.Fleisig, and James R. Andrews, “ Kinematic Analysis of the Wrist and Forearm During Baseball Pitching ” , Journal of Applied Biomechanics, 14, pp.24-39 (1998).

[9] A.Uesaki, Y.Mochizuki, T.Matsuo, K.Hashizume, K.Omura, and S.Inokuchi, "Computer Simulation for Dynamics Analysis of Pedaling Motion on Lower Limbs in a Racing Cycle", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.48, pp.197-205 (1999).

[10]大村, “ メジャーリーグ VS. 日本野球 - スイング理論の冒険 ” , 講談社現代新書 1555 , 講談社 (2001).

[11]] Denavit, J. and Hartenberg, R.: “ A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices ” , ASME Journal of Applied Mechanics, 22, pp.215-221 (1955).

[12] Y.Mochizuki, S.Inokuchi, and K.Omura, "Generating Artificial Proficient Skill Motion for Upper Limb in Baseball Pitch from Several Objective Functions", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol.30, No.3, pp.373-382 (2000).

[13] Y.Mochizuki, H.Amano, K.Tezuka, T.Matsumoto, S.Yamashita, and K.Omura, "Computer Simulation for Upper Limb during High Speed Baseball Pitching", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.46, pp.271-277 (1997).

- [14] Y.Mochizuki, T.Matsumoto, S.Inokuchi, and K.Omura, "Computer Simulation of the Effect of Ball Mass and Shape to Upper Limb in Baseball Pitching", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.47, pp.283-292 (1998).
- [15] Y.Mochizuki, S.Inokuchi, and K.Omura, "Simulation Analysis of the Influenced Motion from Ball Mass nad Shape for Upper Limb during Baseball Pitching", Proceedings of WorldMulticonference on Systemics, Cybernetics and informatics and 4th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, Vol.3, pp.709-716 (1998).
- [16] Y.Mochizuki, S.Inokuchi, and K.Omura, "Computer Simulation for Dynamics Analysis of Making a Long Throw in Baseball", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.48, pp.207-216 (1999).
- [17] Y.Mochizuki, S.Inokuchi, and K.Omura, "Optimizing Simulation for Long Distance Throw in Baseball from a 3-dimensional Captured Motion", Proceedings of WorldMulticonference on Systemics, Cybernetics and informatics and 5th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, Vol..5, pp493-500 (1999).
- [18] 望月, "投球における上肢の質量と形状変化に関する影響解析", 理研シンポジウム「生体力学シミュレーション研究」, 理化学研究所 (2001).
- [19] Y.Mochizuki, T.Matsuo, S.Inokuchi, and K.Omura, "DYNAMIC ANALYSIS FOR THE EFFECT OF CENTRIFUGAL AND CORIOLIS FORCES IN SWINGING A BAT", Scientific Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports, pp.393-396 (1999).
- [20] 上崎, 望月, 大村, 井口, "競技自転車におけるペダリング動作の最適化シミュレーション", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J85-D-II No.1, pp.121-129 (2002).
- [21] 姫野, "魔球をつくる 究極の変化球を求めて", 岩波科学ライブラリ 75, 岩波書店 (1999).
- [22] 姫野, 望月, 横山, 高野, 松本, 土肥, "新しい魔球ジャイロボールの投球動作とボールが作る流れの数値解析", Computer Visualization Symposium 2000 論文集, pp.45-48 (2000). および, 日経サイエンス 2000年10月号特集記事 (2000).
- [23] 手塚, 「ピッチングの正体」, ベースボールマガジン社 (1998).
- [24] 手塚, 「バッティングの正体」, ベースボールマガジン社 (1999).
- [25] 手塚, 姫野, 「魔球の正体」, ベースボールマガジン社 (2001).
- [26] N.Bernstein: The co-ordination and regulation of movements, Pergamon Press (1967).