

人体動作の技術練習支援システムの構築と

効率よいスイング動作の研究

清水 鉄也^{*}, 望月 義幸[#], 姫野 龍太郎[†]

^{*} 独立行政法人・理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット
埼玉県和光市広沢 2-1

e-mail: tss@postman.riken.go.jp

[#] 松下電器産業 マルチメディア開発センター
大阪府門真市大字門真 1006

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

[†] 独立行政法人・理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット
埼玉県和光市広沢 2-1

e-mail: himeno@postman.riken.go.jp

要旨 高速度ビデオカメラ 2 台を使い、人体動作を解析して技術練習を支援するシステムを構築した。実際のスイング動作を 3 次元データとして取得し、それを初期条件として最適化計算を行い、実際の動作と最適解を比較した。そうしたところ、上級レベルのゴルフ選手のスイングでも、まだまだ効率のよいスイングが可能であることが明らかになった。実動作と最適解との違いを調べることによって被験者のスイング技術について分析でき、練習のアドバイスとして役立てることができた。また、最適解を分析することにより、効率よくスイングするための物理について理解が進んだ。本論文では、技術練習支援システムの概要を述べ、これまでの研究成果をまとめておく。

1. 始めに

スポーツ運動などにおいて、もっと上手になりたい、という欲求は万人のものであるが、一般に上達にはなかなか時間がかかるものである。まず、自らが運動しているときは自分の動きを見ることができない。しばしば、自分がこう動かしていると思っている動きと実際の結果としての動きは一致していないものである。そこで、自分の動作を人に見てもらったり、鏡に写したり、あるいは、ビデオに撮って見ると運動の欠点やクセなどが明らかになって参考になることがある。しかし、それにも限界があって、現段階の運動技術よりもっとよい方法があるかどうかまでは、わからない。また、上達者のアドバイスを仰ぐときの問題点は、本人の内部感覚だけが教えられることがしばしばで、言われたとおり再現できるほうが稀である。「手首は回転させずに腕をまっすぐ振っているだけ」などと、本人が言っていることと実際やっていることが矛盾しているケースはプロ選手にさえも見受けられる。このような状況を考えると、最適化シミュレーションは大変有効な手段となると期待される。例えば、野球のピッチ

チングとバッティングの最適化シミュレーション [1, 2, 3] の結果から、「ダブルスピン原理」と呼ばれている一種のジャイロ効果の存在が、非常に効率的に上腕を加速するメカニズムとして明らかになった。このように最適化計算は人体動作の隠された秘訣を明らかにし、よりよい技術を探るのに有効な手段となりうる。うまく応用すれば、もっと早く上達する方法を見つけることができるはずである。

我々の研究室では2台の高速ビデオカメラが導入されている。このカメラは人体の動作解析だけではなく、ボール周りの流れの数値計算の精度を検証する目的でも使用されている。我々は、この高性能なカメラを応用して動作技術練習を支援するシステムを構築してきた。このシステムの検証のためにまず、ゴルフのスイングを選択することにした。なぜなら、あまり複雑な人体動作ではなく、しかし一方で3次元的要素を十分含んでいて動作解析システムの有効性を試すのに適していると考えられるからである。また、ゴルフのスイングには、パワーだけではなく、同時に精確さを求められる要素が大きい。実際、タイガー・ウッズは決して筋骨隆々としているわけではないけれども、驚くほどのドライバーの飛距離を誇っている。技術練習を支援するシステムを検証するにふさわしい人体動作と言える。

2. 人体動作の技術練習支援システムの概要

高速ビデオカメラ2台は「Phantom」という米 Vision Research 社製 [4] のものである(図1)。画素数は512x512ピクセルで、毎秒1000フレームでの撮像が可能である。2台のカメラは、同軸ケーブルやIEEE1394ケーブルを通じて同期を取ることができる。

実際にゴルフの上級者に被験者になってもらい、スイングを撮影したものが図2である。カメラを被験者の前方と側方にそれぞれ1台ずつ設置した。これらの映像から、図3のように、手・グリップ(HG) および、クラブヘッド(CH)の位置を抽出した。胴体の回転中心(C)はグリップの時系列点群の隣り合う3点から等距離で、かつ、直交性の条件を満たす点をそれぞれ求めた。これらを平均化した中心点(C)と各グリップ点との間の距離をもう一度検証してみると、一定とみなして差し支えないという、驚くほど良好な結果が得られた。したがって、胴体回転中心(C)は固定されたものとして解析を行った。ちなみに、図3において地面をGRにて示した。



図1: Phantom 高速ビデオカメラ



図 2 a: 人体前方からの
カメラ映像

図 2 b: 人体側方からの
カメラ映像

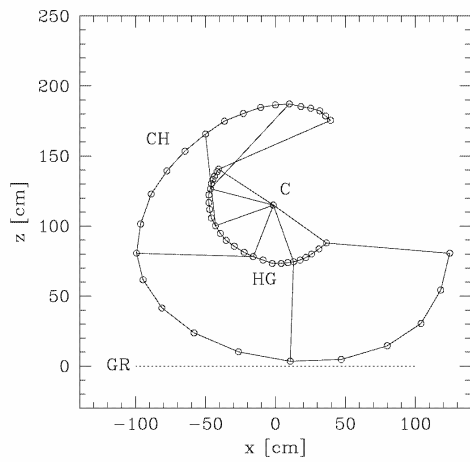


図 3 a: 3 D実動作データ
(人体前面)

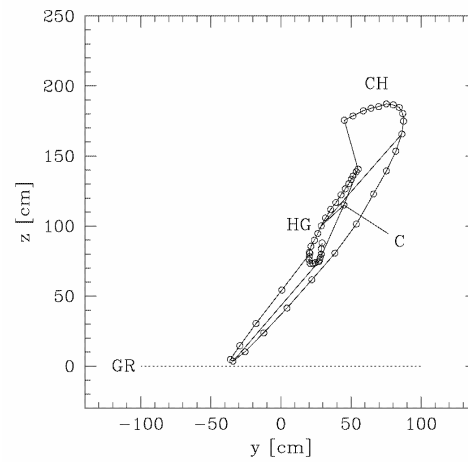


図 3 b: 3 D実動作データ
(人体側面)

スイング解析のために、まず、胴体、腕、ゴルフクラブを含む力学的モデル（詳しくは [1] を参照）を採用した。図 4 のように、 θ_0 が胴体まわりの回転角で、 θ_1 が腕の軸まわりの回転角で、 θ_2 が腕の軸とゴルフクラブの軸とのなす角度である。これは、スイングの力学を 3 次元的に解析するのに最低限必要な 3 自由度を含んでいる。これらの角度 (θ_0 , θ_1 , θ_2) は、3 D 動作データ点 (HG, CH, C) に対してベクトル解析を施すことにより算出した。

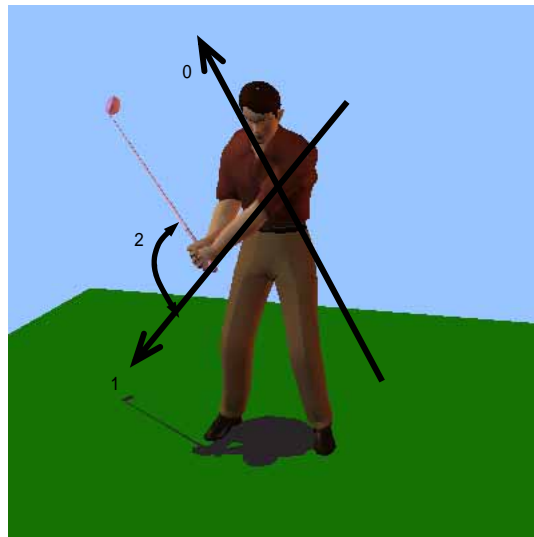


図 4: スイング動作解析の力学的モデル
(3 自由度)

次に、計測されたスイング動作を初期条件として用いて最適化計算を実行した。その際の目的関数は、トルクの2乗の時系列和およびトルクの1階・2階時間微分の時系列和の最小化、クラブの軌道の滑らかさ、クラブヘッド最大速度の要求を満たさないときのペナルティ、手首まわりのトルクが大き過ぎるときのペナルティ、それぞれの関節の可動域を超えたときのペナルティから構成されている。ここでクラブヘッド速度の最大値は 37.0m/s 以上となることを要求した。この値は実際に撮影された被験者のクラブヘッド最大速度である。最適計算の後、実際のスイング動作と最適化された動作とを比較した。各角度($\theta_0, \theta_1, \theta_2$)に対するグラフが図5に示してある。図5bの縦の点線がクラブが最下点に来た瞬間(0.2秒)である。この2枚のグラフをぱっと見た限りでは大きな違いがあるようには見えないが、これを図6のように、トルク(τ_0, τ_1, τ_2)のグラフに変換してみると、違いが一目瞭然となる。ここで、トルク(τ_0, τ_1, τ_2)はそれぞれ角度($\theta_0, \theta_1, \theta_2$)に対応して、胴体、腕、手首まわりのトルクを表わす。

最適解および実動作をトルクの空間で比較したものが図6であるが、明らかに最適解のほうが、胴体・腕ともに、加えられているトルクの絶対値が数倍も小さい。最適解のようにスイングすれば、同じスイング速度を再現するのであっても、もっと小さい力を加えるので十分というわけである。ただし、ここで実動作(図6b)の各角度の細かい振動は、主に空間測定誤差に起因するものである。しかし、多少スムージングをかけてながめてみても、実動作では大きな力をかけていることにはかわりがない。

3. 技術診断と練習指導

今回の被験者は、理研ゴルフ部に所属する飛ばし屋の上級者であり、本コース上においても普段からシングルに近いよいスコアを記録している方である。しかし、依然として、ずっと効率よい最適解が見つかったのである。この違いを分析して現状のスイングの診断を行えば、さらなる上達につながる練習指導ができると期待できる。

最適スイングと比較すると、まず被験者のスイングには、スイング初期の早いうちから胴体を加速しすぎるきらいがある。次の章で詳しく解説する理由により、スイング始動の体の回転はもっとソフトにゆっくりと行い、スイング後半にかけて力を強めるようにするとよい。また、この前半加速しすぎたことによるものか、インパクト直前に体の回転を止めるような力を加えているのがわかる。これも後の章で説明するように減速要素でしかなく、インパクト直前には体の回転の加速を抑えるだけでよい。さらに、手首にまだ力が入り過ぎている。正しい体の回転ができれば、もっと軽い力でクラブを振り抜くことができるはずである。その分、手首はクラブのコントロールに集中することができるようになるだろう。

これらの点を説明し、実際に被験者に実践してもらったところ、たしかに飛距離がさらにのびるようになった。しかし一方で、ボールが曲がりやすくなるということだった。たしかに、今回の最適化計算ではスイングの効率だけに焦点を絞っているので、そうなるのもある程度やむをえない。手首に加える力が少なければ、即スイングが安定するだろうとはそう単純には行かないようである。現段階では、今回の最適解を最終目標とするよりも、スイングの安定性が失われない範囲内で、この最適解に近づけ

る練習を行ってもらうのが好ましい。将来的には、スイングの精確さや再現性をも取り入れて、スイング効率とのバランスをとるような最適化計算を開発する必要がある。

4. 最適解の物理的分析

さてここで、今回得られた最適解を物理的に分析しておこう。結論から言ってしまうと、最適解のスイング中には、スイング始動期(フェイズ1)とインパクト準備期(フェイズ2)の2つのフェイズが存在することがわかった。

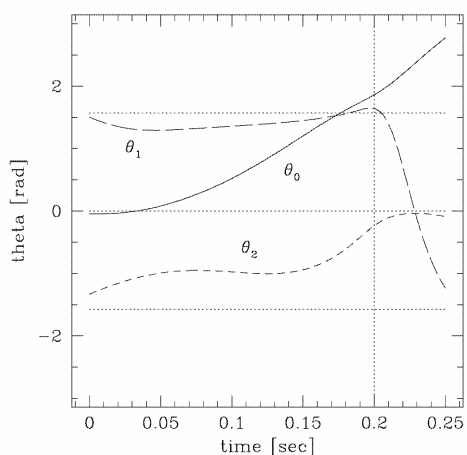


図 5 a: 最適化された
スイング動作

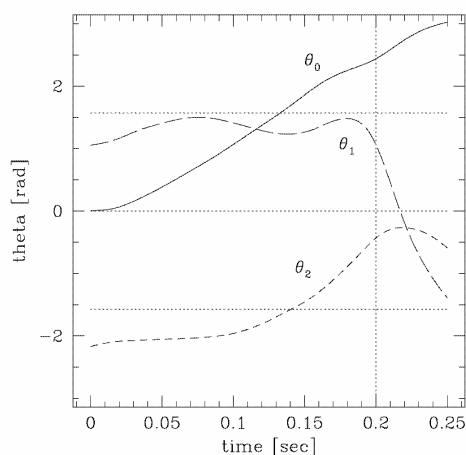


図 5 b: 実際の動作
(最適計算の初期条件)

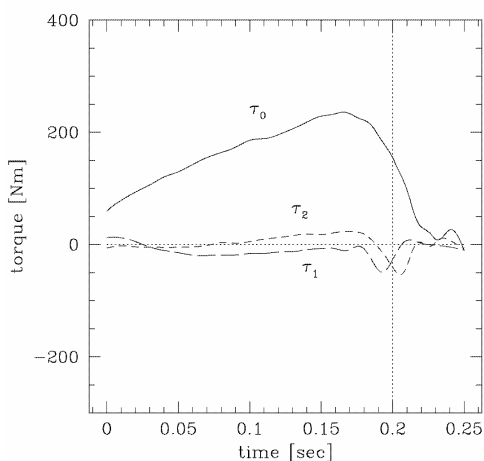


図 6 a: 最適解のトルク
(τ_0 , τ_1 , τ_2) はそれぞれ
(τ_0 , τ_1 , τ_2) に対応したトルク

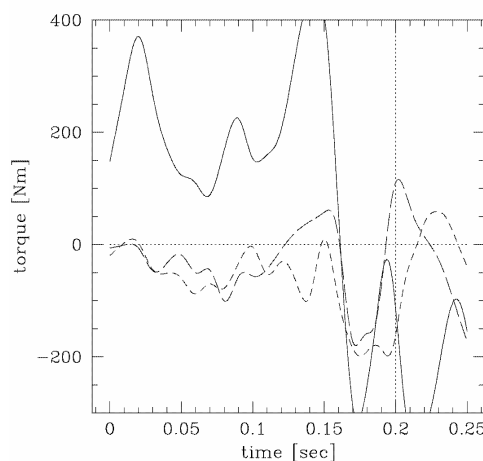


図 6 b: 実動作のトルク
(τ_0 , τ_1 , τ_2) はそれぞれ
胴体、腕、手首のまわりのトルク

まずスイング始動期（フェイズ1）から説明していこう。図6aを見てわかるように胴体まわりのトルク（ τ_0 、実線）はスイング開始直後から大きくかけないで、徐々に徐々に加速を強くしていくべきことがわかる。このようにするとよい理由は、ゴルフでコック角と呼ばれている角度 θ_2 と深い関係がある。このクラブと腕のなす角度をある大きさにとったまま、キープすることが力学的に効率のよいスイングのために重要なのである。なぜなら、このコック角を早く開いて腕とクラブを一直線にしてしまうと、腕とクラブを合わせた系の慣性モーメントが大きくなってしまふ。これでは、同じトルクを胴体に加えてもなかなか回転速度はあがってくれない。まずは、コック角を閉じたままキープして慣性モーメントを小さく抑えることにより、胴体・腕・クラブの系全体の回転を効率よく加速するのがよい（フェイズ1）。このことはよく「タメをつくりなさい」と表現されている。

ここでクラブにかかっている回転による遠心力（ $-m \times (\dot{\theta} \times r) = m \cdot \dot{\theta}^2 r$ 、遠心力の項、通常記法による）はコック角を開く方向に作用する。一方で、胴体回転を加速すること自体（ $-m(d\dot{\theta}/dt) \times r$ 、回転系での第3の慣性力、「タメのための力」と呼ぶべきか？）はコック角を閉じる方向に働いていて、この両者が釣り合うことで、ある一定のコック角がキープされているメカニズムになっている。しかし、加速すれば、もちろん回転速度が上がるので、それに伴う遠心力も大きくなってコック角が開くような方向に、この釣り合いはずれる効果がある。それでも釣り合いをとるためには、トルク加速そのものも徐々に大きくしてやる必要がある。このようにして図6aの実線（胴体まわりのトルク τ_0 ）のように、スイング初期（～0.16秒まで）において右肩上がりの「加速度の上昇！」が必要となる（フェイズ1）。

次に、インパクト準備期（フェイズ2）に移ろう。インパクト手前に来ると、胴体や腕の加速にとっては重要であったコック角一定の条件をくずす必要が出てくる。なぜなら、クラブを伸ばしてボールに当ててやらなければならないからである。そのための動作がコック角を開く動作そのものである。また、インパクト直前には、胴体や腕の中にため込んだ角運動量を、手首を通して効率よくクラブへ移行してやるほうがよい。つまり、コック角一定から一転して、一気にコック角を解放する必要がある。そのために必要なのが、まず、胴体まわりの回転の加速を弱める動作である。図6aで0.16秒から0.22秒にかけて下がっている実線（トルク τ_0 ）がこれにあたる（フェイズ2）。こうするだけで、遠心力が効いているので、図5aの短い点線（ τ_2 の0.16-0.22秒）のようにコック角が開いて、腕とクラブは一直線に近づいていく。ただ「加速を抑えて弱くするだけ」で十分であることに注意してほしい。加速を止めたり、減速したりする必要はない。胴体を減速すれば当然、最終的なクラブヘッド速度も落ちてしまうことになる。そして、インパクト直前の瞬間（0.2秒付近、フェイズ2）に図6aの2つの点線（ τ_1 、 τ_2 ）のように、瞬間的に手首を使ってクラブを加速する必要がある。こうして初めて胴体や腕の中に蓄えられた角運動量は十分クラブへと伝えられて、クラブヘッド速度を効率よく加速することができる。このとき（図6aの τ_1 、 τ_2 の0.18秒まで、フェイズ1）まで手首にはほとんど力を加える必要がないと教えてくれている最適解には驚きさえ感じる。「クラブを雛鳥をつかむようにそっと軽く握りなさい」という教えが存在するが、おそらくこのことを指摘しているのではないだろうか。

5. いわゆる「左のカベ」についてコメント

世間一般には、ゴルフはもとより、たとえば野球のスイングにおいても「左のカベ」[5, 6]というものが、しばしば話題となっている。筆者の見解では、この言葉の意味するものはちゃんと定義されておらず、そもそもこのこと自体が誤解のもととなっていると感じている。いろいろな話をまとめてみると、少なくとも2通りの「左のカベ」が存在している。まず1つめは、胴体を回転する前には、まず胴体を並進移動させて勢いをつけてから、その並進運動量を回転運動に変換しているものであるが、このとき回転を起こすために左足を踏ん張っていることに由来する。左大腿部の付け根でつかえ棒のようにして、胴体重心への方向からずれた方向に、胴体の勢いを止める力を加えれば、並進運動を回転運動に変えることができる。このとき、左足の使い方だけで回転運動への変換効率が変わってくるので、この技術は重要で「(フェイズ1の)左のカベ」として取り上げられるに値するが、今回のテーマとは関係ない。

もう1つ「(フェイズ2の)左のカベ」は、ボールを打つ瞬間に胴体や腕の運動を止めるような力を加えなさいという教え [7] である。しかし、これは残念ながら間違っている。この教えの物理的な理由付けは、こうである：「×胴体や腕を止めることにより、胴体・腕の持つ運動量は減少する。運動力学の法則によれば、全運動量は保存しないとイケないので、減少した分の運動量はクラブヘッドに移り、こうしてクラブヘッドは加速される×」。これは物理学の初学生がよく陥りやすいミスである。地面、つまり、地球を見落としてしまっている！重い胴体は足を使って動かすものであって、ふつう手ではやらない。胴体を止めるような動きをすると、せっかく蓄えられた運動量は足を通して地面へと戻っていただけである。胴体の運動量を手の先にあるクラブヘッドへ移すためには、やはり、手そのものをうまく使わないとイケない。うまく使った結果として、手を通して運動量は胴体からクラブヘッドへと流れ込んで、クラブヘッドは加速され、胴体は反作用として減速をうける。あくまでもこのような「(フェイズ2の)左のカベ」は、この動作技術が成功したときの結果として得られる現象であって、自ら構えて作るものではない！

実際、今回得られた最適解を調べてみても、このことがはっきりと見て取れる。図5aの胴体の回転角(θ_0 の実線)を見てほしい、スイング初期から徐々に加速されるため、後になるほど勾配がきつくなる右肩上がりの曲線を描くが、しかし、インパクト(~0.2秒)の前後で、右肩上がりの滑らかさがなくなって、少々凹凸していることがわかる。一方、図6aを見ても胴体(θ_0)を自主的に減速した形跡すらない。つまり、クラブヘッドが有効に加速された反作用として胴体が減速を受けているのである。こうするための秘訣は、前章で述べたとおりである。このように効率のよいスイングをした結果として、あたかもインパクトの瞬間に胴体の運動が「止まる」(正確には、減速する)ような現象が見られるのである。

残念ながら、今回の被験者はこの「教え」を忠実に守っているせいか、図6bのように本当に胴体(実線)を減速して、結果として、この様子が図5bの実線(θ_0)の大きな振れとして顕著に現れている。ここまで減速する必要はなく、力を余分に加えることでつじつまを合わせないといけなくなっている。例えば、図6bの2つの点線(θ_1 , θ_2)を見てほしい。コック角を開くために最適解より5倍くらいも大きな

力を手首に加えないといけなくなっている。

6. まとめ

同じスイング速度を得るために、実際の動作よりも効率のよい最適解を得た。これは、かなり上手なプレイヤーでもスイング動作の上達の余地が大きく残されていることを意味している。違いをよく見れば、どういう練習をすれば、よりよいスイングへと改善できるかがわかるので、最適化計算は大変有効である。また改良の余地はあるものの、現試作段階において十分、我々が構築している技術練習支援システムの有効性を示すことができたと言えよう。

将来的には、現状のスイングから被験者にとって理想的なスイングへの練習の道のりを案内するようなシステムに育てあげたいと考えている。もちろん、被験者個人個人の体格・筋力・柔軟性にチューニングされたオーダーメイドの練習メニューを提示することを目指したい。

今回はゴルフのスイングを具体的な題材にとりあげたが、他にもスイング動作であれば、たとえば野球のバットでも、本質的なことは同じことが言える。違いと言えば、バットは丸くどの角度であてても同じように飛ぶとか、ライトからレフトの間に入っていればボールが飛ぶ方向はどうでもいいとか、である。これは、最適化計算の目的関数を再チューニングする問題に帰着されるだけである。このような変更は容易で、大変大きな汎用性を持っていると言える。

さらに、このようなシステムはスイング動作に限らず、スポーツ一般の技量上達に応用できるはずである。無駄な練習を省き、効率よく上達することを目的とするだけでなく、ケガを引き起こしやすい動作があれば、たとえまわり道をしてでも、それを避けるようなケガ防止機能をも取り入れたい。またこうして、医療的なりハビリ訓練の支援をも可能にすることが期待される。

一方、最適解のスイングを物理的に分析することにより、効率よいスイング中においては、回転系における（遠心力、コリオリ力に次ぐ）第3の慣性力「タメのための力」が重要な役割を果たしているということが新たにわかった。また、「（フェイズ2の）左のカベ」はあくまで結果として生ずる現象であって、自発的に行う技ではないことも明らかにした。

最後に、効率よいスイングを行う秘訣をまとめておくと、「胴体回転は、スイング初期（フェイズ1）に加速を徐々に上げてゆき、インパクトの手前（フェイズ2）で加速を弱めるだけで、減速はしないこと」と「手首まわりのトルクは、インパクトの直前（フェイズ2）になってはじめて一気に加えること」である。

参考文献

- [1] Yoshiyuki Mochizuki, Koichi Omura, “Computer Simulation for Optimization and Dynamics Analysis in Sports Motion”, Proceedings of RIKEN symposium, pp.167-186, 2000
- [2] Yoshiyuki Mochizuki, Haruo Amano, Kazushi Tezuka, Tsuyoshi Matsumoto,

Shinichi Yamashita, and Koichi Omura, "Computer Simulation for Upper Limb during High Speed Baseball Pitching", Theoretical and Applied Mechanics, Vol.46, pp.271-277, 1997

[3] Yoshiyuki Mochizuki, Seiji Inokuchi, and Koichi 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, pp373-382, 2000.

[4] <http://www.visible-solutions.com/>

[5] 手塚一志、「バッティングの正体」、ベースボール・マガジン社、1999年

[6] 手塚一志、「バッティングの極意」、ベースボール・マガジン社、2002年

[7] 増田正美、「ゴルフの物理」、裳華房、1995年