

効率よいスイング動作の秘訣について

清水 鉄也^{*}, 望月 義幸[#], 姫野 龍太郎[†]

^{*} 理化学研究所 情報環境室
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: mochik@isl.mei.co.jp

[†] 理化学研究所 情報環境室
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る。本論文では、とくに、得られた最適解に含まれているスイングの秘訣について分析する。読者の練習においても、もし役立ててもらえれば幸いである。

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。本人が言っていることと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台の高速度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. 人体動作技術の練習支援システムの紹介

高速度ビデオカメラ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 高速度ビデオカメラ



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

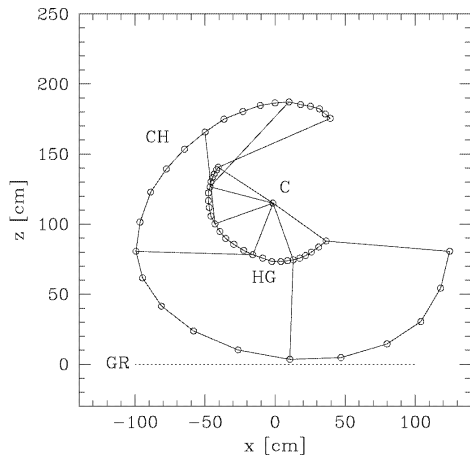


図 3 a: 3 D実動作データ
(人体前面)

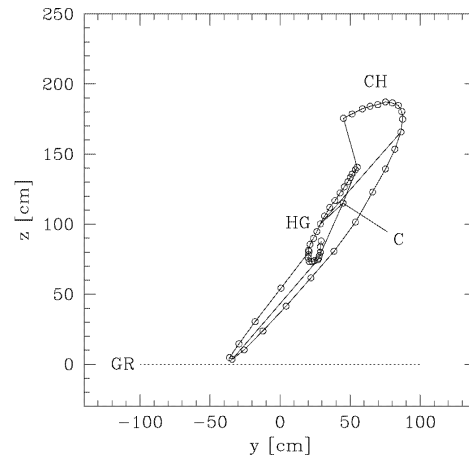


図 3 b: 3 D実動作データ
(人体側面)

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。

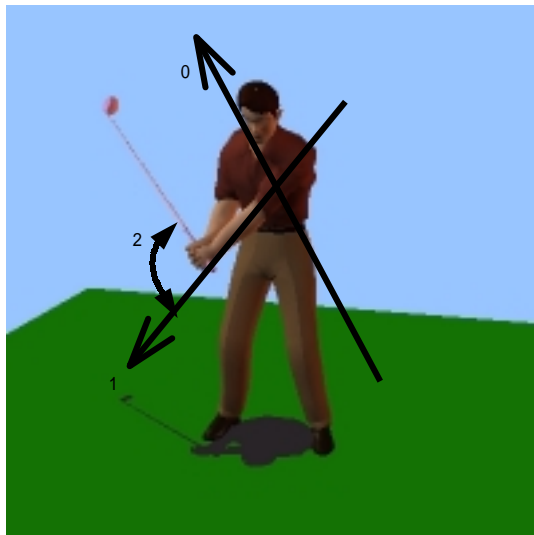


図 4: スイング動作解析の力学的モデル
(3 自由度)

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。

3. 最適解の物理的分析

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、少し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。

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。まず図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 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。このことはよく「タメをつくりなさい」と表現されている。

ここで回転による遠心力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、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 (τ_0) の初期 (~0.16秒まで) の右肩上がりの直線が必要となる。

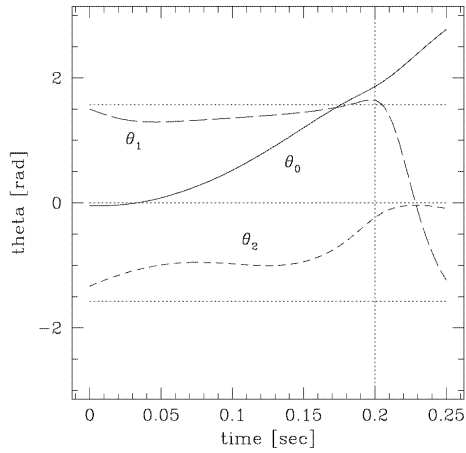


図 5 a: 最適化された
スイング動作

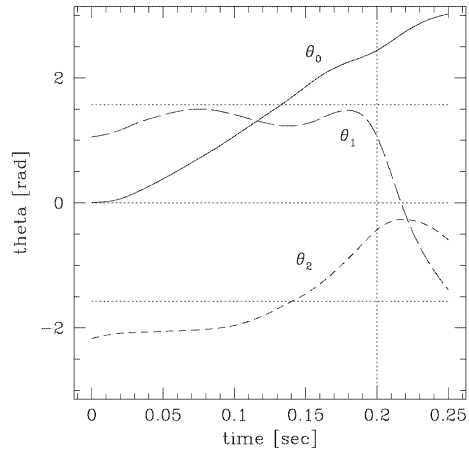


図 5 b: 実際の動作
(最適計算の初期条件)

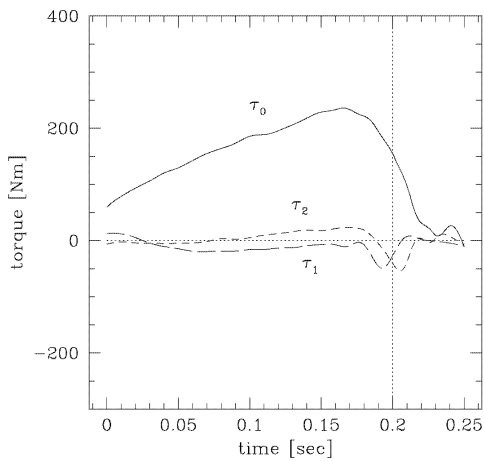


図 6 a: 最適解のトルク
(τ_0 , τ_1 , τ_2) はそれぞれ
胴体、腕、手首のまわりのトルク

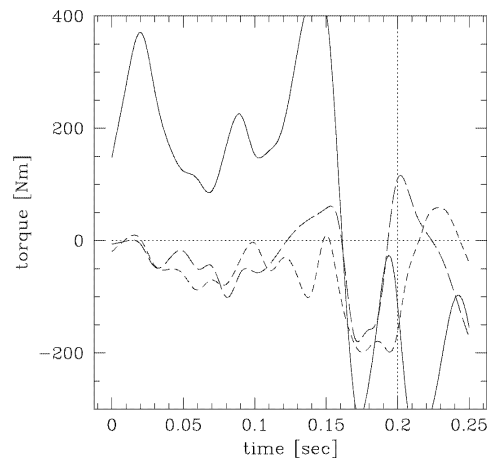


図 6 b: 実動作のトルク
(τ_0 , τ_1 , τ_2) はそれぞれ
胴体、腕、手首のまわりのトルク

今度はインパクト手前になると、胴体や腕の加速にとって重要なコック角一定の条件は、もはや必要ない。むしろインパクト直前には、胴体・腕の角運動量を手首を通して、うまくクラブへ移行してやる必要がある、そのための動作がコック角を開く動作そのものである。インパクトの手前では、今度は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 6 a で 0.16 秒から 0.22 秒にかけて下がっている実線がこれにあたる。こうするだけで、遠心力が効いているので、図 5 a 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。ただし、「加速を抑えて弱くするだけ」で十分である。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）に図6aの2つの点線（ θ_1 , θ_2 ）のよう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・腕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。このときまで手首にはほとんど力を加える必要がない（図6aの θ_1 , θ_2 の0.18秒まで）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、もしかしたらこれに対応しているのかもしれない。

4. 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、左足の使い方しだい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「左のカベ」として取り上げられるに値するが、残念ながら今回のテーマとは関係ない。

もう1つの「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：「 \times 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いけないので、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 \times 」。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、やはり手をうまく使わないといけない。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「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(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。このときの秘訣は、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(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(1, 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。

5. 議論

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、我々の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。

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。また、競技種目によるチューニングだけでなく、現システムでは個人毎の体格体力にチューニングされたオーダーメイドの練習支援を目指している。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ポーツの技量上達はもとより、将来的にはリハビリ訓練の支援をも可能にすることが期待される。

最後に、効率よいスイングのための秘訣をまとめておくと、「胴体回転は、はじめ加速を徐々に上げてゆき、インパクトの手前で加速を弱めてゆく(減速しない)こと」と「手首まわりのトルクは、インパクトの直前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