

# 最適制御によるゴルフスイングメカニズムの解明

47106725 宿利 雄太  
指導教員 鈴木 克幸 教授

This paper shows how to control a body and the relationship with a golf club and a body motion by using the forward dynamical optimal control method. In this research, '2 dimensional model' and '3 dimensional model' are conducted. The '2 dimensional model' analysis aims at validating the motion of a left arm and a golf club qualitatively. The '3 dimensional model' analysis aims at validating the motion of trunk, arms and golf club. They are constructed from multibody dynamics idea, finite element method, floating frame method, considering the elastic deformation of club shafts. The validity of these model is verified by comparing the result of simulation and experiment. The results of The '2 dimensional model' and '3 dimensional model' analysis show that the rigidity and the weight of a shaft affect how to control a body and the head speed of a golf club.

Key words: Golf Swing, Optimal Control, Multibody dynamics, Floating frame method

## 1 序論

### 1.1 研究背景

多くが経験や勘という主観的なものに支えられているゴルフの指導や開発の現場に、ゴルフを科学することで得られた客観的な見解を加えることは、ゴルフの発展に有効であるものと思われる。

ゴルフスイングのような人間の動作には、様々な要素が関わっており、非常に複雑である。この複雑さの解明のために、様々な方面からのアプローチを組み合わせる必要があり、動力学的解析は、バイオメカニクス分野で、よく用いられる手法である。

### 1.2 既存研究

動力学的解析には、順動力学的な解析と逆動力学的な解析がある。この内、順動力学的な解析は、運動制御が難しく、実用化が難しいが、研究レベルで、順動力学的な解析を行うことは人間の動作を知る上で、有効である。

动力学における人体の力学モデルには、「身体重心点モデル」「剛体リンクモデル」「筋骨格モデル」などがあるが、ゴルフスイングのように体幹と四肢の連動が重要な動作の解析には、剛体リンクモデルが有効と思われる。

ゴルフに関する研究には、クラブに着目した研究と身体の使い方に着目した研究があり、順動力学的な解析は、あまり行われていない。

### 1.3 先行研究

先行研究（2009年、磯部氏の修士論文：[1]）では、応答曲面を用いた逆動力学的なゴルフクラブの最適化が行われており、剛性が小さいほど、ヘッドスピードが大きくなるということが示されている。

### 1.4 本研究

本研究では、身体の使い方に着目しており、順動力学的に、関節トルクの最適制御を行うことで得られた最適解から、最適な身体の使い方を導き出し、また、クラブ特性と身体の使い方との関係性を見出すことを目的とする。

## 2 ゴルフのメカニズムと解析

### 2.1 ゴルフスイングのメカニズム

クラブと身体の連成運動を調和させるために、次のようなことが言われている。

(i) 時間遅れのタイミングと運動量の伝達

ゴルフにおいて、体幹の回転で発生したエネルギーを腕、シャフト、ヘッドへと伝えることが必要であり、そのために、腰、肩、手首の順で、時間遅れを発生させて動かすと良いと言われている。

(ii) シャフト剛性とスイング特性の関係

ゴルフクラブシャフトは、弾性変形するので、手首の力が直接的には伝わらず、遅れて伝わると思われるので、柔らかいシャフトを使う時ほど、インパクトより前に、手首の最大トルクを発揮すると良いと言われている。

(iii) 順しなりと逆しなり

シャフトの状態には、「順しなり」と「逆しなり」があり、一般的に、スイング序盤には、「順しなり」の状態、インパクト直前に、「順しなり」からのしなり戻りを利用すると良いと言われている。

### 2.2 スイング解析モデル

Fig.1、2のように、スイングの力学的特長を表現できるような二次元と三次元のスイングモデルを構築する。

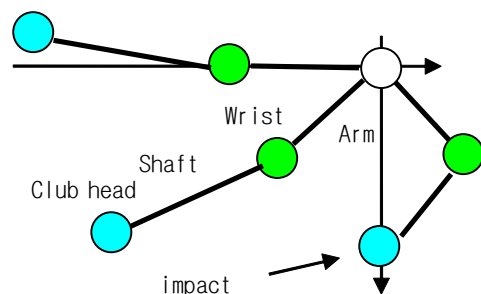


Fig.1 Two dimensional golf swing model

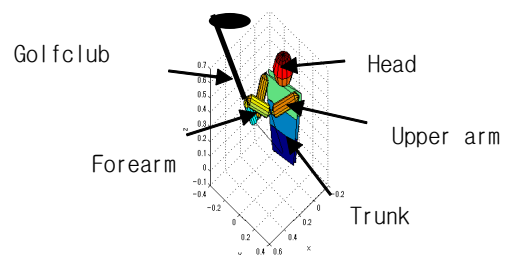


Fig.2 Three dimensional golf swing model

## 2.3 解析手法

それぞれのモデルにおいて、身体部分については、剛体としみなし、マルチボディダイナミクスの概念を用いて、次のように定式化する。

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & C_r^T \\ 0 & J_r & C_\theta^T \\ C_r & C_\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^A \\ n^A - \tilde{\omega} J_r \omega \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、オイラービームでモデル化されたクラブは、次のように定式化される。

$$M_e \ddot{U} + KU = F \quad (2)$$

この剛体運動と弾性体運動の連成をフローティングフレーム法を用いて、次のように定式化する。

$$\begin{bmatrix} M_{RR} & M_{R\theta} & M_{Rf} \\ M_{R\theta}^T & M_{\theta\theta} & M_{\theta f} \\ M_{Rf}^T & M_{\theta f}^T & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^A \\ n^A - \tilde{\omega} M_{\theta\theta} \omega \\ F \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 3 ゴルフスイングの最適制御

### 3.1 ゴルフスイングの最適制御の概要

本研究では、ゴルフスイングの解析モデルを作成し、逐次二次計画法を用いて、ヘッドスピードを最大化する関節トルクを算出している。

### 3.2 最適制御条件

関節トルクの制約条件は、次のように、最大エネルギーに関する制約と発揮筋力の変化に関する制約を用いる。

$$\int_0^{t_f} \{N(t)\}^2 dt \leq A \quad (A \text{ は定数}) \quad (4)$$

$$\int_0^{t_f} \left\{ \frac{dN(t)}{dt} \right\}^2 dt \leq B \quad (B \text{ は定数}) \quad (5)$$

設計変数は、次のように、関節トルクをルジャンドル関数  $P(t)$  で近似した時の各次数の係数  $a_k$  とする。

$$N(t) = \sum_{k=1}^n a_k P_k(t) \quad (6)$$

## 4 ゴルフスイング再現性の検証

### 4.1 ゴルフスイング再現性の検証の概要

2009年に、磯部氏らによって行われた実験[1]と解析結果を比較することで、解析モデルの妥当性を検証する。

この実験は、被験者の腰、肩、肘、シャフトにマーカーを取り付け、スイングを高速カメラで撮影することで、マーカー位置の三次元軌跡を計測したものである。

### 4.2 二次元モデルのゴルフスイング再現性の検証

二次元のゴルフスイングモデルは、スイング中に腕部が真っ直ぐの状態になっていると仮定しており、この仮定の下、肩から先の動きを表現できると思われる。

Fig.3のように、実験の被験者の左腕は、スイング中にほぼ真っ直ぐの状態であるので、この仮定は、正しいと考えられる。

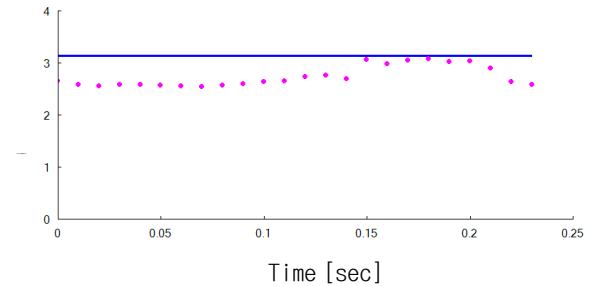


Fig.3 The angle consist of a left forearm and a left upper arm

### 4.3 三次元モデルのゴルフスイング再現性の検証

Fig.4~Fig.8に示すように、解析と実験におけるスイング中の腰、肩、肘、手首の位置を比較する。トッププロでも選手によって、スイングの仕方が異なることを考慮すると、肩、肘、手首の位置については、十分に一致していると言え、体幹の回転を上腕、前腕へと伝える様子が表現できていれば、スイングの特徴を抑えられていると考えられるので、解析モデルは妥当であると判断できる。

下の図において、○が解析、×が実験の結果を示し、青が全体座標系における位置座標のx成分、緑がy成分、赤がz成分を表している。

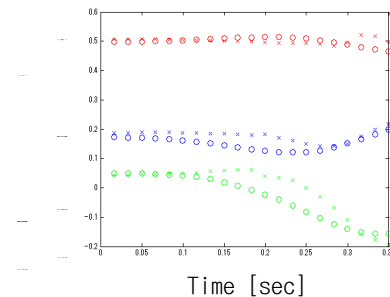


Fig.4 The coordinates of the right shoulder

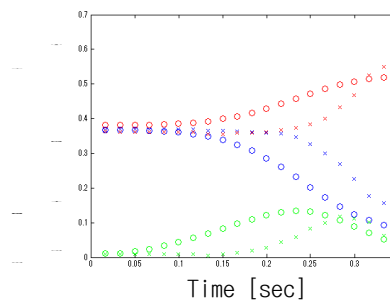


Fig.5 The coordinates o the left shoulder

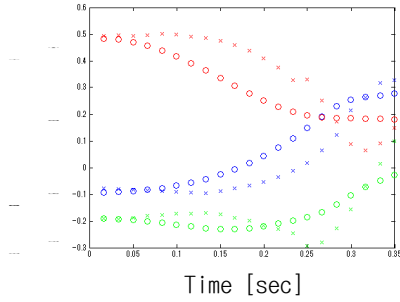


Fig.6 The coordinates of the right elbow

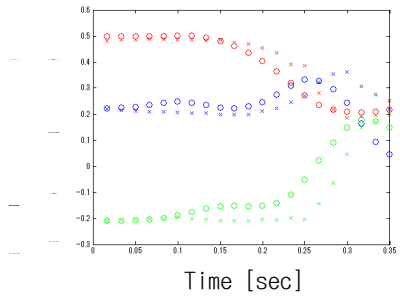


Fig.7 The coordinates of the left elbow

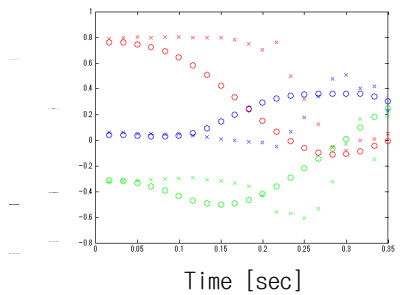


Fig.8 The coordinates of the wrists

## 5 二次元モデルによる最適制御

### 5.1 シャフト剛性がゴルフスイングに及ぼす影響

Fig.9とFig.10から、シャフトの剛性が小さい場合には、スイング序盤に手首の最大トルクを発揮し、剛性が大きい場合には、インパクト時に手首の最大のトルクを発揮していることが分かる。また、剛性が小さい場合には、スイングの軌跡に、順しなりと逆しなりが見られ、ヘッドスピードが大きくなる事が分かる。

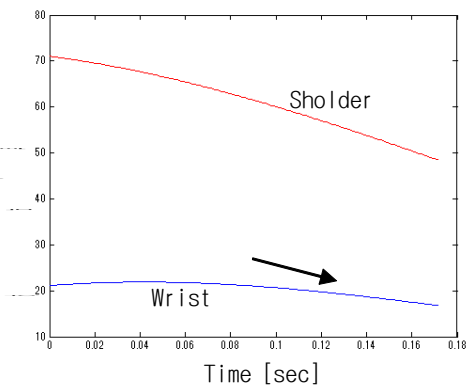


Fig.9 The optimal torque ( $EI = 2.0 \text{ [Nm}^2\text{]}$ , 2D)

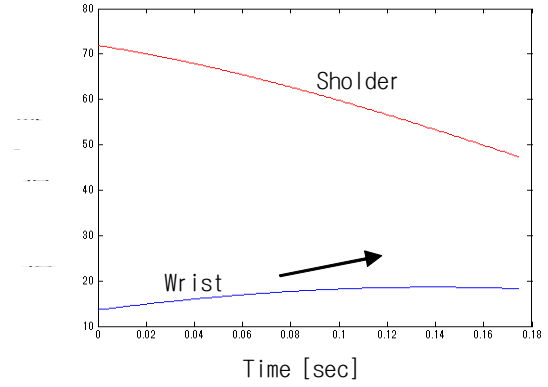


Fig.10 The optimal torque ( $EI = 8.0 \text{ [Nm}^2\text{]}$ , 2D)

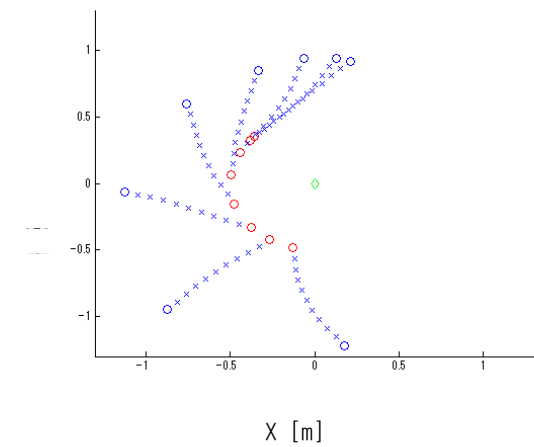


Fig.11 The optimal swing ( $EI = 8.0 \text{ [Nm}^2\text{]}$ , 2D)

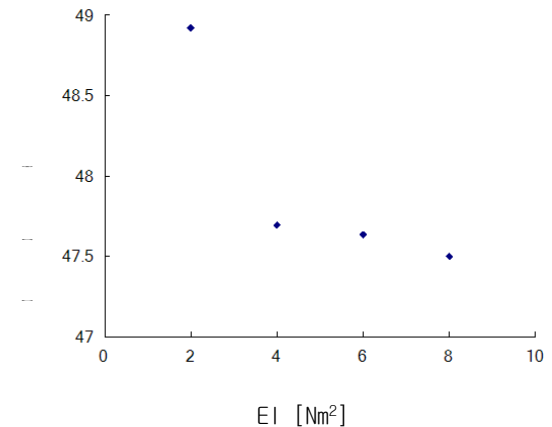


Fig.12 The head speed of each EI shaft (2D)

### 5.2 シャフト重量がゴルフスイングに及ぼす影響

Fig.13に示すように、シャフトの重量が小さくなると、慣性モーメントが小さくなり、ヘッドスピードが大きくなると考えられる。また、重量が大きくなるに従って、剛体運動の影響が強くなり、肩と手首のトルクのピークがインパクトの時刻に近づく。

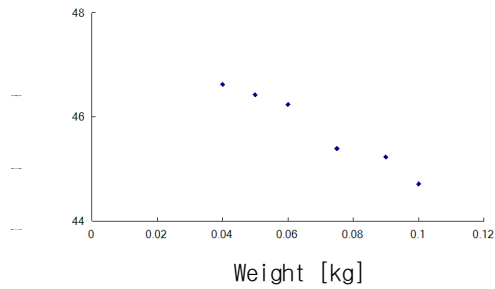
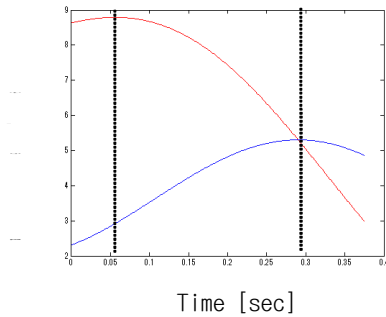
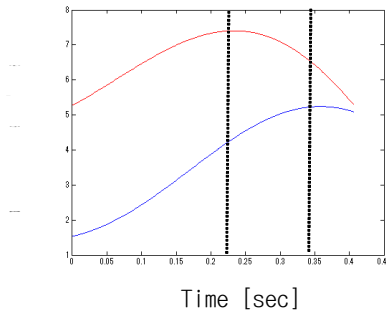


Fig. 13 Head speed of each weight shaft

Fig. 14 The optimal torque ( $m = 0.04$  [kg], 2D)Fig. 15 The optimal torque ( $m = 0.10$  [kg], 2D)

## 6 三次元モデルによる最適制御

Fig. 16、Fig. 17は、腰の捻りのトルクであり、負の方向がスイング方向である。これによると、二次元の場合と同様に、シャフト剛性が小さい方がトルクのピークの時刻が早くなることが分かる。

また、シャフト剛性が小さいほど、ヘッドスピードが大きくなることが分かる。

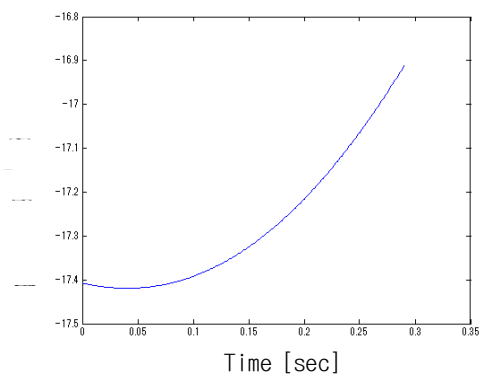
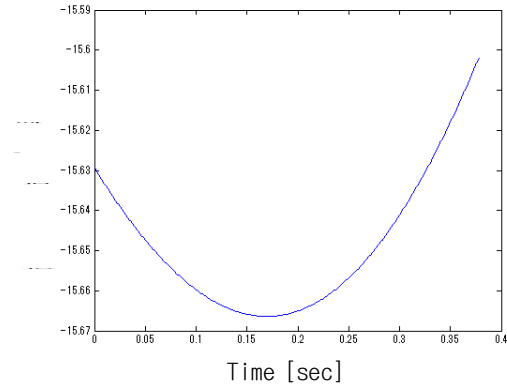
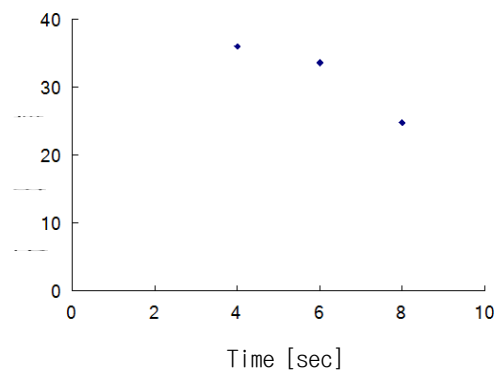
Fig. 16 The optimal torque ( $EI = 4.0$  [Nm<sup>2</sup>], 3D)Fig. 17 The optimal torque ( $EI = 8.0$  [Nm<sup>2</sup>], 3D)

Fig. 18 The head speed of each EI shaft (3D)

## 7 結論

本研究で得られた結果から、最適制御の観点からは次のようなことが言える。

- ・シャフトの質量や剛性が大きい場合、インパクト時に手首の最大トルクを発揮し、小さい場合、インパクトより前に手首の最大トルクを発揮するという身体の使い方になる。

- ・シャフトの剛性や質量が小さいほど、ヘッドスピードが大きくなる。

本研究では、普遍的なスイングについて議論を行ったが、今後、個人レベルに合わせたスイングについて検討をするためには、スイングモデルの再構築が必要である。また、得られた力学的に最適なスイングを実際に行うために、どのようなトレーニングが必要なのかを検討するべきである。

## 文献

- 1) 磯部信：「身体負荷を考慮したゴルフクラブの最適設計」，東京大学修士論文，2009
- 2) 清水信行，今西悦二郎：「マルチボディダイナミクス(1)基礎理論」，コロナ社，2008
- 3) 清水信行，今西悦二郎：「マルチボディダイナミクス(2)数値解析と実際」，コロナ社，2008
- 4) 杉山博之：「柔軟マルチボディダイナミクス～フローティングフレーム法によるモデル化と定式化～」，(株) モーションラボ講習会