

スイングのばらつきを考慮したゴルフクラブの最適設計

096696 板垣 祐太
指導教員 鈴木 克幸 教授

The optimum design of the golf club contains the uncertainty that is attribute to variability of swing motion. So, in the purpose of this paper is that analyzing the variability quantitatively and designing golf club that can do the highest performance even when the swing have variability. Approximating the swing by a function using Fourier series and cutting down the dimension by analysis of principal component. The motion that includes the uncertainty is made artificially by adding this function to response surface of movement and design variables. It is use for input of FEM, and making objective function with the solution. Using this function, maximize the head speed.

Key words: FEM, Optimal Design, Golf Swing, Response Surface, Mini-Max Type Formulation

1 緒言

本研究の目的は、ゴルフクラブの最適化に数値シミュレーションを導入することで、これまで熟練技術者の経験と勘に頼っていたところに客観性を持たせることである。これにより、クラブ開発における経済的あるいは人的コストの削減や、商品開発期間の短縮と品質向上による商品競争力強化につながることが期待される。

前回までの試みとしては、グリップの動きを3次元計測し、その計測結果に基づきゴルフクラブの運動の解析を行った。ゴルフクラブの曲げ剛性、ねじり剛性、ヘッド重量などの特性の変化によるスイングの変化の影響を考慮するために、実験計画法に基づき試作したクラブに対してプロのゴルファーによるスイング計測を行い、その計測データを多項式による応答曲面で補間し、それを用いて最適化を行った¹⁾。最適化の目的関数としボールをより遠くにとばすという目的のためのインパクト時のヘッド速度、および方向安定性を考えた身体負荷を採用し、2目的関数としてパレート解を求めた。また、先行研究ではゴルフスイングの動き、を統計学の正規分布モデルを用いてパターン認識を行った²⁾。

これまでの手法では、実験の際に使用するデータは被験者本人がナイスショットと感じたデータのみを用いて最適計算を行ってきたため、算出された最適解はクラブ使用者が最高のスイングをした際に最高の飛距離を生み出すことが保障されていた。しかし、スイングがばらつき、最高のスイングから少しでも離れてしまうとこの最適解は成り立たなくなる。

そこで本研究では、計測されたデータには、スイングがばらつくことにより発生する、ブレという不確実性が含まれているものと仮定する。その不確実性を定量的に表すことによって、ブレに対してロバストな最適解を見つけ出すことを目的とする。

2 スイング計測実験

2.1 実験目的

本研究では以下の2つの実験(実験1、実験2)を行う。実験1は、ゴルフシャフトの特性がスイング動作に及ぼす影響を定量的に分析するため、異なるシャフト特性を持つクラブを被験者に振ってもらい、そのスイング動作データを元にシャフト特性の変化に対するスイング動作応答曲面の式を作成することを目的とする。実験2では、複数回分のスイングデータの違いから、スイングのばらつきを定量的に量ることを目的とする。

2.2 実験計画法によるゴルフクラブの設計

本研究のゴルフクラブ最適化では設計変数をフレックス、調子、ねじれ角とする。フレックスはシャフトの曲げ硬さ、調子は硬さ分布のバランス、ねじれ角はねじれ硬さを意味する。これらの特性は多く考慮した方がより確実で、値・量の差をなるべく細かく設定した方は正確だが、ただやみくもに作成する個数を増やせば実験数は指数関数的に膨大になり非効率である。そこで、実験計画法を利用して計画的に実験を行う。まず要素と水準を決定し、それを元に実験計画法に基づいた直交表を作成する。そして直交表に基づいて決定されたクラブを作成する。設計変数を正規化し、L9直交表を用いて Table. 1 に示す9本の異なるクラブを作成した。

Table. 1 L9 Orthogonal Array

クラブ No.	フレックス	調子	ねじれ角
1	0	0	0
2	0	0.5	0.5
3	0	1	1
4	0.5	0	0.5
5	0.5	0.5	1
6	0.5	1	0
7	1	0	1
8	1	0.5	0
9	1	1	0.5

2.3 実験の実施

実験はプロゴルファー2名とアマチュア上級者1名を対象に行った。実験内容は、実験1では作成した9本のクラブでそれぞれ1回スイングを行う。実験2では、決められた1本のクラブを使用して10回のスイングを行った。

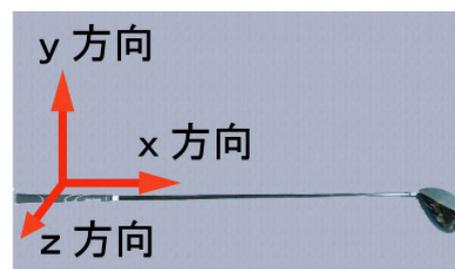


Fig. 1 Local coordinate system

計測項目はグリップ部分の加速度と角速度とし、加速度センサーとジャイロセンサーをグリップ部分に取り付けたクラブを使用した。センサーの局所座標系の x 方向はグリップからヘッドに向かう方向、y 方向は打ち出し方向、z 方向は x、y に直交するように定めた。(Fig. 1)

3 隠れマルコフモデルを用いた動作認識

先行研究で行われたパターン認識の識別能力はそれほど大きいものではなかった。そこで、本研究では音声認識等に多く用いられている隠れマルコフモデル(HMM)を使用してゴルフスイングのパターン認識を行った。7人分のスイングデータを使って識別を行い、先行研究の方法と正答率を比較したものを Table. 2 に示す。この結果から、これまでの手法よりも本手法の方がゴルフスイングの識別に適していることがわかる。

Table. 2 Discrimination capacity

	正答率
HMM	7/7
先行研究手法	6/7

4 スイング動作応答曲面

4.1 応答曲面作成方法

実験 1 の結果を用いて、設計変数を変数としたスイング動作の応答曲面を作成する。応答曲面の式はフレックス、調子、ねじれ角を (x, y, z) とすると、以下のようになる。

$$f(x, y, z, t) = a_1(t) + a_2(t)x + a_3(t)y + a_4(t)z + a_5(t)x^2 + a_6(t)y^2 + a_7(t)z^2 + a_8(t)xy \quad (1)$$

5 不確定性の評価

5.1 ブレ量の測定方法

実験 2 の結果から得られたデータのばらつきを測るため、10 回のスイングの平均を、各時間でのデータの平均として算出した。Fig. 2 中に計測データと平均データを示す。今回の被験者は上級者を対象に行ったため、10 回のスイングともナイスショットとなったが、データを見ると明らかにばらつきが生じていることがわかる。

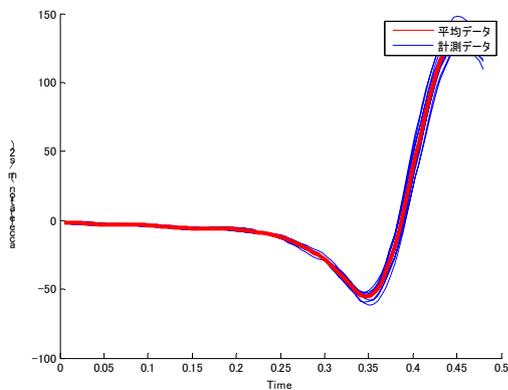


Fig. 2 Measurement and average data of acceleration

次に計測データと平均データの各時間でのズレを算出し、ブレ量とする。Fig. 3 に算出されたブレ量を示す。

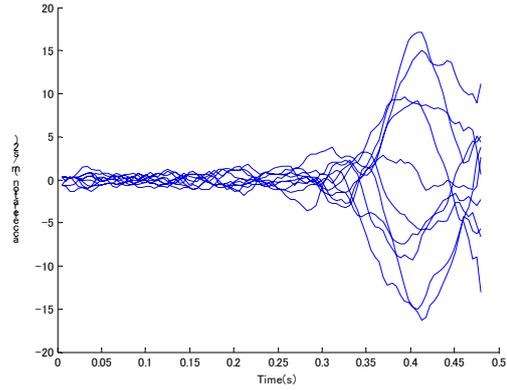


Fig. 3 Variation of swing data

5.2 フーリエ級数近似

計測されたブレ量を関数として定義するため、式(2)に示す有限のフーリエ級数展開を用いた、ブレ量のフーリエ級数近似³⁾を行う。フーリエ級数近似した際の係数を関数の変数として扱うことによってブレ量を定式化する。

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right\} \quad (2)$$

フーリエ級数近似をする際に重要なのが、係数の数である。係数を多くするほど近似精度は上がるが、ブレを定義するための変数が増えてしまい、近似関数を設定したメリットがなくなってしまう。そこで、近似誤差が許容できる範囲に収まるようなフーリエ係数の数の検討を行った。Fig. 4 に、フーリエ係数の数の違いによる近似誤差の違いを示す。図中 x 軸はフーリエ係数の低次から何番目までの次数を採用しているのかを表している。この結果から、近似誤差が 5% 以内に収まるように、 $n=9$ つまり、定数項を含めて 19 次のフーリエ級数を関数近似として採用する。

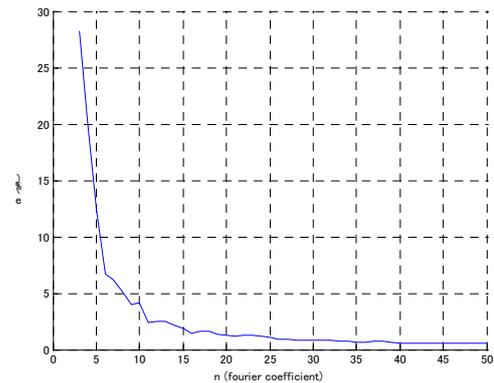


Fig. 4 the approximation error and the number of Fourier coefficient

5.3 主成分分析を用いた低次元化

フーリエ級数近似により 1 つのパラメータを 19 個の変数で定義したが、全パラメータだと $19 \times 6 = 114$ 個の変数が存在する。つまり、1 つのブレをもったスイングを表すのに 114 個の変数を設定しなければならないので、大変扱いづらい。そこで、これらをより少ない変数で表すため、

主成分分析を用いた低次元化を行う。主成分分析とは総合的指標を統計的に設置し、変数間の関係を把握するための手法である。互いに直交した基底を作り出すことによってより少ない変数で全体の特徴を捉えることが出来る。⁴⁾ただし、次元の圧縮を行わずに、元の情報が損失してしまうため、圧縮したときに含まれる元の情報量の割合を示す累積寄与率を用いて圧縮次元数を決定する。Table. 3に圧縮した次元数と累積寄与率の関係を示す。この結果から、114変数を累積寄与率が90%以上となる6変数まで低次元化した。

Table. 3 The relationship between cumulative contribution ratio and dimension number

次元数	累積寄与率(%)	次元数	累積寄与率
1	41.084	5	87.723
2	62.022	6	92.37
3	74.075	7	95.849
4	81.694	8	98.233

5.4 プレを含んだスイング動作の作成

前節までで作成したスイング応答曲面 f とスイングのプレを表す関数（以下、プレ関数） g を組み合わせることで、プレを持ったスイング動作 h を作り出す。設計変数を \mathbf{x} 、プレ関数を定義する変数（以下、プレ変数）を \mathbf{y} として、 h を式(3)のように定める。

$$h_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = f_i(\mathbf{x}, t) + g_i(\mathbf{y}, t) \quad (i=1, \dots, 6) \quad (3)$$

6 ヘッド速度解析

6.1 解析モデル

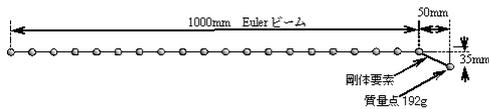


Fig. 5 Club model

4章で求めたスイング動作を使い、シャフト特性とプレ変数が変化するとヘッドのインパクト直前の速度がどのように変わるかを解析する。スイング解析の際のクラブモデルはシャフト部分を弾性梁要素で構成し、先端にはヘッドとして剛体モデルを連結した(Fig.5)。

7 ゴルフクラブ最適化

7.1 最適化手法

前章までに求めた解析結果を用いて、不確実性を含んだヘッド速度最大化を目的関数としたゴルフクラブを設計する。不確実性を持った最適化法には想定出来る最悪の状態となった場合でも、最良の結果を得ることの出来る解を最適解とした、ミニマックス問題を解くことによって最適解を求める。

7.2 ヘッド速度応答曲面

5章の解析結果を用いてヘッド速度の応答曲面を作成する。ヘッド速度は式(4)で示す2次応答曲面を作成する。

$$v(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + a_3x_3^2 + a_4y_1^2 + a_5y_2^2 + a_6y_3^2 + a_7y_4^2 + a_8y_5^2 + a_9y_6^2 + x_1(a_{10}x_2 + a_{11}x_3 + a_{12}y_1) + x_2(a_{13}x_3 + a_{14}y_1) + a_{15}x_3y_1 + a_{16}x_1 + a_{17}x_2 + a_{18}x_3 + a_{19}y_1 + a_{20}y_2 + a_{21}y_3 + a_{22}y_4 + a_{23}y_5 + a_{24}y_6 + a_{25} \quad (4)$$

設計変数ごとに表した解析結果を Fig.6 に示す。Fig.6のフレックスに対する応答の変化の特徴としては、フレックスが小さくなり、曲げ剛性が全体として大きくなるほどヘッド速度が大きくなる。

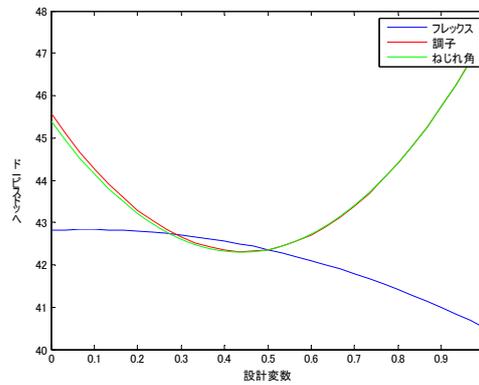


Fig. 6 Design variable and Head velocity

調子に対する応答の変化の特徴は、0.4付近でヘッド速度が最も小さくなっており、調子が大い、つまり先調子になったときにヘッド速度が最大となる。ねじれ角に対する応答の変化の特徴としては、調子の場合とほぼ同じ結果が得られていることがわかる。次にプレ変数を変化させたときのヘッド速度応答の様子を示す。Fig. 7ではプレ変数の内の2つ (y_1, y_2) とヘッド速度の関係を表したものを示す。この中で上の曲面は (y_3, y_4, y_5, y_6) をすべて0にした(プレが小さい)場合で、下は全て上限値の2にした(プレが大い)場合の2つの結果を示している。 y_1, y_2 が変化するときの特徴として、 y_1 が大きいほど、 y_2 が小さいほどヘッド速度が大きくなることがわかる。また、他のプレ変数 (y_3, y_4, y_5, y_6) を変化させたときの特徴は、変数の値が大きくなるほど、ヘッド速度は全体的に下がる傾向があることがわかる。以上のことから、同じプレを表す変数でも、 y_1 は、変数が大きくなるにつれてヘッド速度を向上させる方向に、その他のプレ変数は、ヘッド速度を遅くするように働いている、ということが出来る。

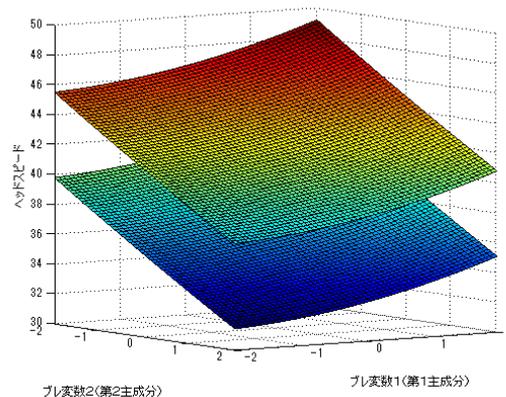


Fig. 7 Variation and Head velocity

7.3 目的関数・制約条件の設計

本研究の目的関数は、前節で求めた応答曲面を用いる。制約条件は、①設計変数の設計可能領域、②ブレ変数の可能領域、③ブレ量に対する制約の3つを与える。この内②は、10回の実験で算出したブレ変数の分散と平均を求め、 $\mu_b \pm 2\sigma_b$ の範囲とした。また、③については全スイング時間でのブレ関数を時間で積分した値を $\Delta(\mathbf{y})$ として、2と同様に分散と平均によって制約を与える。以上をまとめて式(5)の最適化問題を解く。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \max_{\mathbf{b}} \quad & -v(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq \mathbf{x} \leq 1 \\ & \sqrt{\sum_{i=1}^6 y_i^2} \leq \mu_y + n\sigma_y \\ & \Delta(\mathbf{y}) \leq \mu_{\Delta} + n\sigma_{\Delta} \end{aligned} \tag{5}$$

7.4 最適化計算

式(4)の際に用いるアルゴリズムは以下ようになる。⁵⁾

I. 数値実験の際に目的関数が最も大きかった変数の組み合わせを、初期値 $(\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{y}^{(0)})$ とする。(初期解1)

II. $\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{y}^{(k)}$ と固定して、 \mathbf{x} に対する制約条件の下で、目的関数を最小化する。このとき求められた \mathbf{x} を $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(k+1)}$ とする。

III. $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^{(k)}$ と固定して、 \mathbf{y} に対する制約条件の下で、目的関数を最大化する。このとき求められた \mathbf{y} を $\mathbf{y} = \mathbf{y}^{(k+1)}$ とする。

IV. 目的関数、設計変数の値が収束した場合は終了し、収束していない場合は $k+1 \rightarrow k$ としてIIへ戻る。

ここで、最小化と最大化繰り返しによって解が振動し、収束しない場合があるので、式(6)で表す緩和法を使って収束の安定化を行う。

$$\mathbf{x}^k = \mathbf{x}^{k-1} + \omega(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k-1}) \tag{6}$$

7.5 最適解

7.4節のようにして算出した最適解を Table. 4 の B にまとめる。比較のために、ロバスト性を考慮しなかったときの最適解と、そのときに最悪のばらつきが生じた際のヘッド速度を A に示す。3人の被験者の内、P3についてはロバスト性を考慮しない場合と同様の解になっているが、これはP3のスイングが、スイングのばらつきよりもシャフト特性の影響を強く受け、ばらつきによるシャフト特性の変化が小さいためにこのようになったと考えることができる。次に P1 と P2 については、ロバスト性を考慮することによって最適解が変化しているのがわかる。P1 はフレックスが小さくなり、剛性が大きくなっているのがわかる。剛性が小さいとグリップ部分で発生したばらつきが、ヘッド部分で増幅され、より大きなばらつきが生まれてしまう。つまり、フレックスを小さくする(剛性を大きくすることによって、ばらつきの増幅を抑えているということが言える。最後に P2 は全ての設計変数で、剛性が小さくなるように変化している。これは P1 のときとは逆の結果となる。これを Fig.8 に示すスイングの軌跡と比較する。この結果から、P2 は剛性が小さいほどインパクトにかけて体に近い位置でスイングをしているのがわかる。これによってヘッド部分の慣性モーメントが小さくなり、結果的

にばらつきの影響を小さくして、飛距離を向上させているとすることが出来る。

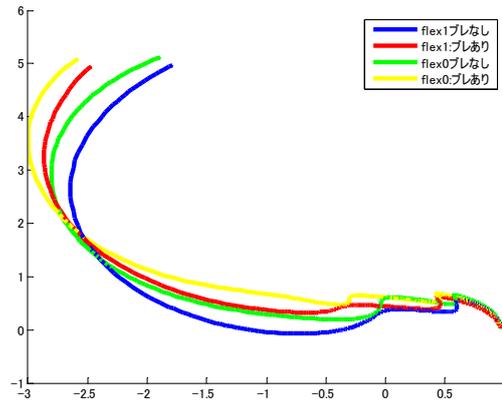


Fig. 8 Swing Plane

Table. 4 Optimum solution (A is not considering robust of variability. B is considering robust of variability)

	P1		P2		P3	
ロバスト性	A	B	A	B	A	B
ヘッド速度(m/s)	36.58	40.36	55.39	56.93	55.29	55.40
フレックス	0.27	0.00	0.47	0.97	1.00	1.00
調子	0.00	0.00	0.38	0.15	1.00	1.00
ねじれ角	0.00	1.00	0.45	0.51	1.00	1.00

8 結言

8.1 今後の計画・展望

今後は、本研究で提案した最適設計とパターン認識の手法を組み合わせ、現在はデータの安定性から上級者のみとなっている最適設計を、初級者や中級者に対しても行えるようにする。

参考文献

- 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・大学院・新領域創成科学研究科・人間環境学，修士論文（2008）
- 王春暁：“スイングのばらつきを考慮したゴルフクラブの最適設計”，東京大学・大学院・新領域創成科学研究科・人間環境学，修士論文（2009）
- 中村宏樹：“偏微分方程式とフーリエ解析”，東京大学出版会（1981）
- 上田尚一：“主成分分析”，岩波書店（2003）
- ISAAC ELISHAKOFF, MAKOTO OHSAKI：“Optimization and Anti-Optimization of Structures Under Uncertainty”