

ゴルフクラブ特性に適應するゴルフスイングロボットに関する考察*

鈴木 聡一郎*¹, 猪岡 光*²

Golf Swing-Robot adjusting to the Characteristics of a Golf Club

Soichiro SUZUKI and Hikaru INOOKA

A golf swing-robot is generally used for the evaluation of the performance of a golf club and a ball. A conventional golf swing-robot has two or three joints, and the motions of these joints are completely interrelated. Therefore, the user of this robot can specify only the initial posture and swing velocity. Thus this type of robot can not adjust the swing motion subtly to the characteristics of golf clubs. Consequently the golf swing-robot differs from a professional golfer and it causes serious problems for the evaluation of the performance of golf clubs. In this paper, we investigate analytically the golf swing-robot which can adjust its motion to the specified value of the swing velocity and the characteristics of golf clubs such as the moment of inertia around the grip and the flexural rigidity of the shaft.

Key Words: Sports Engineering, Robot, Motion Control, Measurement and Control, Golf Swing

1. 緒 論

従来から、ゴルフクラブの改良やゴルフスイングの最適化などを目的として、スイング動作に関する動力学的な検討が行われている^{(1)~(4)}。これらの中でも解析的な検討を行っているものの多くは、二重振り子をモデルの基本としている。これはゴルファーの腕ならびにゴルフクラブシャフトを剛体棒として取扱い、ゴルファーの肩関節と手首関節のみを考慮している。しかし実際には、スイング中のシャフトの振動変位は無視できないほど大きいことが一般に知られている。さらに上級者ほど新たなゴルフクラブを使用する際には、シャフトの曲げ剛性やねじり剛性に対して非常に注意深くなる。このことはスイング動作とクラブの動特性との関係が深いことを示している。このような考えに基づき、シャフトを弾性体として取扱いスイング動作との関係について検討している報告例は少ない⁽⁴⁾。

また、運動中のアームの弾性変形によって生じる動

力学的な干渉力を利用することで、ロボットアームの動作の高速化や省力化を図ることを目的とした研究も行われている⁽⁵⁾。この報告では、アームの振動を利用することで入力トルクが低減され、関節の角速度が向上することが示されている。このロボットアームと同様に、ゴルフの上級者はクラブの動特性を有効に利用したスキルで、大きな効果を得ていると考えられる。

一方、ゴルフクラブやホールの性能評価において、ゴルフスイングロボットが利用されている。この評価試験では、通常指定された速度でボールを打ち、複数のゴルフクラブ間でその飛距離を計測し比較する。すでに市販されているスイングロボットの多くは、2ないし3関節で構成されている。各関節は、ギヤならびにベルト等で連結され、相対運動があらかじめ決められているため、使用者が調整できるのは初期姿勢と駆動速度に限られてしまう。しかしながら上級者は、シャフトの剛性に留意しながら、スイング動作を微妙に調整するため、ゴルフクラブの特性に応じて動作調整ができないロボットと、上級者の評価結果に大きな違いが生じることが問題となっている。さらに、評価試験は屋外計測が中心となるため、データに対する統計的な処理の必要性から試技数が増加してしまう。これが被験者の疲労を招き、評価結果に大きな影響を及ぼ

* 原稿受付 1997年6月6日。

¹ 正員, 北見工業大学(☎090-8507 北見市公園町165)。² 正員, 東北大学工学部(☎980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

す危険性が指摘されている。これらのことから上級者の評価を必要としない、信頼性の高い評価が可能なロボットの開発が望まれている。スイングロボットの研究に関しては、人間の釘打ち動作の解析結果をダウンスイングに応用し、遠心力、コリオリ力ならびに重力を利用した手首関節の干渉駆動を行うことを特徴としているものがある⁶⁾。しかしながら、比較的大きな影響が予測されるシャフトの振動による動力的干渉については考慮されていない。

本研究では、上級者と同様にゴルフクラブの特性に応じたスイング計画が可能なゴルフスイングロボットの開発を目標とし、信頼性の高い評価の実現を目的にこれを解析的に検討する。ゴルフクラブの特性としてグリップまわりの慣性モーメントとシャフトの曲げ剛性に着目する。簡略化した力学モデルにより、さまざまなクラブに対し打球時のヘッドスピードを指示したときに入力トルク計画が決定できるかを中心に検討する。

2. モデリング

2.1 力学モデル 図1に示すように、スイング動作は同一平面内で行われるものと仮定する。固定座標系 $O-XYZ$ において、スイング平面は $X-Z$ 平面に対し α rad だけ傾斜している。通常、 α の値はゴルファーの体格や使用するクラブの番手により異なるが、本報では $\pi/3$ rad に設定する。腕ならびにクラブのグリップ部とそれを把持している手先部は、それぞれ1本の剛体棒として取扱い、以降はグリップ部と把持している手先部を単にグリップ部と表記する。この力学モデルの詳細と座標系を図2に示す。ここでゴルフクラブヘッドならびにシャフトを単にヘッド、シャフトと表記し、

- M_1, M_2 : 腕, グリップ部の質量
- M_P, R_P : ヘッドの質量, 半径
- L_1, L_2 : 腕, グリップ部の長さ

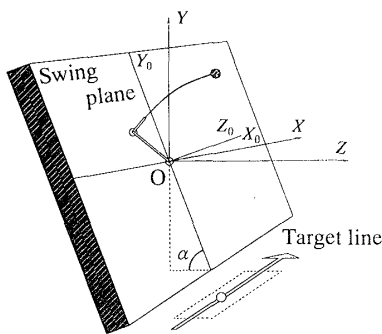


Fig.1 Swing plane of motion

- L_3 : シャフトの長さ
- I_1, I_2 : 腕, グリップ部の慣性モーメント
- I_3, I_P : シャフト, ヘッドの慣性モーメント
- E, I : シャフトのヤング率, 断面二次モーメント
- ρ_3, A_3 : シャフトの密度, 断面積

である。肩関節は、スイング平面に固定された座標系 $O-X_0Y_0Z_0$ の原点を中心に回転し、手首関節は固定あるいは解放状態のみを想定してブレーキ機構のみの非駆動関節とする。また、グリップ部のシャフト側の端点を原点に回転座標 $O'-xy$ を設定し、シャフトの振動変位を $y(x, t)$ で表す。さらに腕と X_0 軸とのなす角を θ_1 , グリップ部となす角を θ_2 とする。

2.2 運動方程式 系の運動エネルギー、ポテンシャルエネルギーならびに各関節における仮想仕事に対し、ハミルトンの原理を適用することで運動方程式を導出する。ここで各部の摩擦は無視し、手首関節のブレーキは瞬時に固定ならびに解放が行えるものとする。また、シャフトの中心軸上にヘッドの重心があると仮定する。このためシャフトの振動は、スイング平面内の曲げ振動のみを考える。式を導出する段階では、手首の駆動力を想定することとして、肩関節ならびに手首関節への入力トルクをそれぞれ Q_1 および Q_2 とすると、運動方程式は次のように示される。なお導出過程で用いた系の運動エネルギーならびにポテンシャルエネルギーについては付録に記す。

モーメントの釣合い式(肩関節)

$$C_1 \ddot{\theta}_1 + (C_2 L_C + D_1 L_S) \ddot{\theta}_2 + (C_2 L_S - D_1 L_C) \dot{\theta}_2^2 + 2 \dot{D}_1 L_S \dot{\theta}_2 + \dot{D}_1 L_C + G_1 \cos \theta_1 - Q_1 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

モーメントの釣合い式(手首関節)

$$(C_2 L_C + D_1 L_S) \ddot{\theta}_1 + (C_3 + D_2) \ddot{\theta}_2 - (C_2 L_S - D_1 L_C) \dot{\theta}_1^2 + 2 D_3 \dot{\theta}_2 + D_4 + G_2 \cos \theta_2 - S_1 \sin \theta_2 - Q_2 = 0 \dots\dots\dots (2)$$

たわみ振動方程式

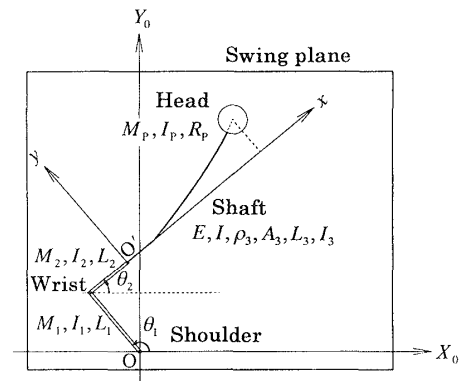


Fig.2 Coordinate system of robot

$$\rho_3 A_3 L_c \ddot{\theta}_1 + \rho_3 A_3 (L_2 + x) \ddot{\theta}_2 - \rho_3 A_3 L_s \dot{\theta}_1^2 - \rho_3 A_3 y \dot{\theta}_2^2 + \rho_3 A_3 \dot{y} + E I y'''' = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、ゴルフクラブ先端での境界条件は、

$$M_P L_c \ddot{\theta}_1 + M_P L_R \ddot{\theta}_2 - M_P L_s \dot{\theta}_1^2 - M_P y \dot{\theta}_2^2 + M_P \dot{y} - E I y''' = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$M_P R_P L_c \ddot{\theta}_1 + (M_P R_P L_R + I_P) \ddot{\theta}_2 - M_P R_P L_s \dot{\theta}_1^2 - M_P R_P y \dot{\theta}_2^2 + M_P R_P \dot{y} + I_P \dot{y}' + E I y''_{L_3} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

であり、(·)は時間での微分を、(′)はxでの微分を表す。ただし、用いた記号は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} L_c &= L_1 \cos(\theta_1 - \theta_2), L_s = L_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ L_R &= L_2 + L_3 + R_P, y_{L_3} = y(L_3, t), \\ M_3 &= \rho_3 A_3 L_3 \\ C_1 &= I_1 + (M_2 + M_3 + M_P) L_1^2 \\ C_2 &= \frac{1}{2} M_2 L_2 + M_3 \left(L_2 + \frac{1}{2} L_3 \right) + M_P L_R \\ C_3 &= I_2 + I_3 + I_P + M_3 L_2 (L_2 + L_3) + M_P L_R^2 \\ D_1 &= \rho_3 A_3 \int_0^{L_3} y dx + M_P y_P \\ D_2 &= \rho_3 A_3 \int_0^{L_3} y^2 dx + M_P y_P^2 \\ D_3 &= \rho_3 A_3 \int_0^{L_3} y \dot{y} dx + M_P y_P \dot{y}_P \\ D_4 &= \rho_3 A_3 \int_0^{L_3} (L_2 + x) y \dot{y} dx + M_P L_R \dot{y}_P + I_P \dot{y}'_{L_3} \\ G_1 &= \left(\frac{1}{2} M_1 + M_2 + M_3 + M_P \right) L_1 g \sin \alpha \\ G_2 &= \left(\frac{1}{2} M_2 L_2 + M_3 L_2 + M_P L_R + \frac{1}{2} \rho_3 A_3 L_3^2 \right) g \sin \alpha \\ S_1 &= \left(\rho_3 A_3 \int_0^{L_3} y dx + M_P y_P \right) g \sin \alpha \end{aligned}$$

シャフトの振動変位を、先端に質量を有する減衰のない片持ばりの固有関数 $\varphi_i(x)$ と時間関数 $q_i(x)$ を用いて表すと、

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) q_i(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となるが、三次モード以上の高次振動成分はロボットの運動に対する影響が小さいものと仮定し二次振動までを考慮する。さらにi次ならびにj次モード間の直交条件式は、正規化定数を M_3 としてクロネッカーのデルタを用いると次式で表せる。

$$\begin{aligned} \rho_3 A_3 \int_0^{L_3} \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx + M_P [\varphi_i(L_3) \varphi_j(L_3) + R_P \{ \varphi_i(L_3) \varphi'_j(L_3) + \varphi'_i(L_3) \varphi_j(L_3) \}] + (M_P R_P^2 + I_P) \varphi'_i(L_3) \varphi'_j(L_3) = \delta_{ij} \times M_3 \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

これを式(1)~(6)に適用して整理すると運動方程式は次のようになる。

$$J \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} = \mathbf{p} \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (8)$$

それぞれ、 \mathbf{J} は慣性マトリックス、 \mathbf{h} は非線形力ベクトル、 \mathbf{g} は重力ベクトル、 \mathbf{u} は入力ベクトルであり、次のように表せるが詳細は省略する。

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} \\ J_{12} & J_{22} & J_{23} & J_{24} \\ J_{13} & J_{23} & M_3 & 0 \\ J_{14} & J_{24} & 0 & M_3 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = [\theta_1 \ \theta_2 \ q_1 \ q_2]^T \\ \mathbf{h} &= [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4]^T, \mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4]^T \\ \mathbf{p} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{u} = [Q_1 \ Q_2]^T \end{aligned}$$

手首関節は非駆動であるため、解放中は Q_2 の値は零として計算する。固定時については二つの関節の角加速度ならびに角速度が等しく角度差が一定であるという条件を式(8)に適用し、一関節モデルとして取扱う。導出した運動方程式に対し、刻み幅を 1.0×10^{-3} に設定した4次のルンゲ・クッタ法で数値計算を行うことにより、スイングロボットの動作を解析する。

3. 動作設定

3.1 駆動開始ならびに打球時の姿勢 スイング動作における初期姿勢と打球時の設定条件を図3に示す。golfer本来の動作では、一般に上半身も背骨を軸として回転するといわれているが、本モデルでは肩関節の回転に置き換える必要がある。そのため、 θ_1 の初期値は $\pi/2$ rad とし、 θ_2 は 0 rad に設定する。また打球時には、腕とグリップ部の中心軸が同時に Y_0 軸下向きになることが要求されることから、 θ_1 ならびに θ_2 ともに $3\pi/2$ rad で打球することとする。

3.2 手首解放動作 手首関節は固定された状態でスイング動作を開始し、その後スイング中に解放され、解放状態のまま打球する設定とする。解放時刻については、多くのゴルフレッスン書などで上級者ほど

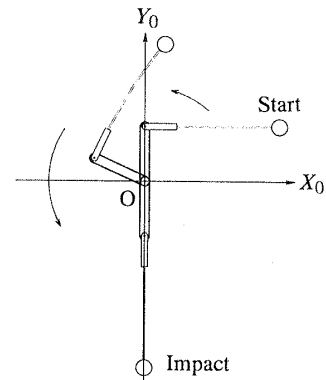


Fig. 3 Institution of golf-swing motion

解放時刻が遅いことが指摘されている。一方で上級者はシャフトの剛性を非常に重要視することから、スイング中のシャフトの振動と解放動作との関係に着目したシミュレーションを試みる。シャフトの振動変位を基準に手首の解放時刻を変化させ、打球時のヘッドスピードの違いについて検討する。ここで、ヘッドスピードとは固定座標系 O-XYZ におけるヘッドの重心の速度をさす。

解放時刻の設定については、低剛性リンクと非駆動関節をもつ水平マニピュレータの高速化に関する検討を基本にする⁽⁶⁾。この結果において低剛性リンク先端の振動変位が始めに負から正へ零クロスする時刻にブレーキを解放すると、その後のマニピュレータの運動が高速化されることが示されている。さらにこの場合、リンクの弾性ひずみエネルギーが効率よく運動エネルギーに変換されていることが指摘されている。本報で扱うモデルはスイング平面の設定から、このマニピュレータに重力が作用した場合に相当する。ゴルフスイング動作もブレーキ解放のタイミングを調整することで効率のよい動作を実現することを想定した場合、同様の傾向があるものと予想できる。また一般に上級者のスキルは、筋肉のより少ない仕事で大きな効果を得ているものと考えられる。そこでスイング動作の開始後、腕の回転方向にシャフトの振動変位が始めにゼロクロスする時刻を手首解放の基準とする。ここで肩関節の入力トルクは最大値を $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ とし、その持続時間を 50 ms 、駆動開始からの加速時間を 116 ms に設定する。ゴルフクラブのグリップまわりの慣性モーメントを $0.227 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 、シャフトの曲げ剛性を $80 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ とした場合、手首解放時刻の基準値は 140 ms となる。さらにその前後に 20 ms 間隔の間隔で3種類の解放時刻を設定する。ヘッドスピードを H_v と表し、これを比較した解析結果を図4に示す。

この結果、シャフトの振動変位が正へゼロクロスするとき、ブレーキを解放するとヘッドスピードが最大になることが示された。打球時の姿勢は、解放時刻が 140 ms の場合のみ3・1節で決定した条件を満たしており、その他の場合はヘッドが Y_0 軸を通過する時点インパクト時刻とした。 H_v 曲線の比較から、手首の解放動作がわずかに 20 ms ずれただけでもヘッドスピードには大きな影響があることがわかる。さらにシャフトが剛体の場合と H_v を比較する。図4に示した解析結果の中で、解放時刻が 140 ms の場合を比較の基準とする。これに対し、剛体シャフトで同じ動作設定の場合ならびにインパクト時のヘッドスピードがほぼ等しくなるように入力トルクと手首の解放時刻を

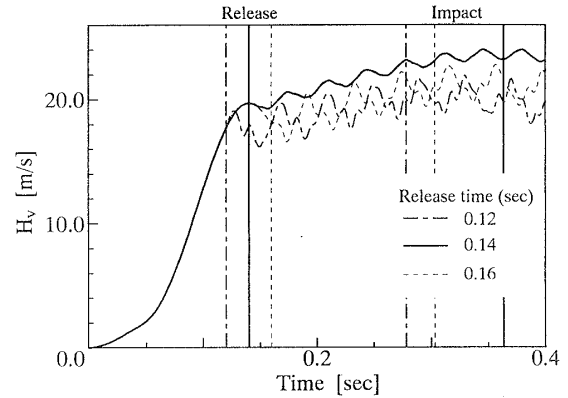


Fig. 4 Comparison of club head velocity

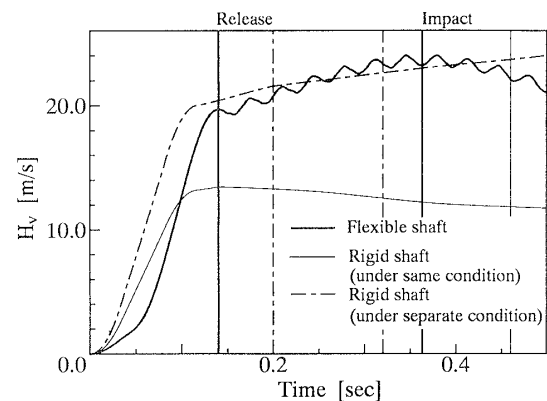


Fig. 5 Comparison of H_v between rigid shaft and flexible shaft

適当に調整して解析した結果を図5に示す。

この解析から、シャフトが剛体の場合は弾性を利用したときと比較して同じ入力トルクでは肩関節の加速が小さく結果的に H_v が非常に小さくなることが示された。また肩関節への入力トルクの最大値を比較すると、弾性を利用した場合は $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ であったのに対し、インパクト時の H_v がほぼ等しくなるようにトルクを調整した剛体の場合は $150 \text{ N}\cdot\text{m}$ となった。このことから、弾性を利用できない場合はより大きなトルクが必要であることがわかる。また、剛体の場合のインパクト時の姿勢は、クラブに対して必ず腕が先行しており、正しい姿勢に調整するためにはインパクト前に肩関節を減速する必要がある。これは実際のゴルフスイングとは異なる傾向であるといえる。

以上のことから、ゴルフスイングロボットの検討においてシャフトの振動を考慮することは重要であり、上級者はこのようなシャフトの弾性を有効に利用したスキルで、大きな効果を得ていると考えられる。そこで手首解放の条件として、シャフトの振動変位がスイング開始後、はじめに正へゼロクロスするとき解放することとする。この設定により、上級者とロボットによ

るゴルフクラブに対する評価の相違の低減が期待できる。

4. トルク計画の自動化

4.1 トルク関数 本システムは、駆動時に肩関節のみに制御入力を与えられ、その後は動力学的な干渉力だけで運動することが要求される。このため入力トルク関数を決定する際、パラメータの数が多すぎるとトルク計画が複雑になってしまう。そこで本報では、トルク関数を図6に示すように台形に設定する。この上底の高さと下底の長さの調節のみで、クラブの慣性モーメントとシャフトの曲げ剛性に応じて、動作設定条件に従ったスイングを可能にすることを試みる。下底の長さ T_u は肩関節の加速時間を決定し、上底の高さ T_{max} は、人間の最大筋力に相当する値となる。また上底の長さ T_e は、この最大筋力の持続時間に相当する。人間のゴルフスイングでは比較的短時間であり、個人差も少ないという想定から、50 ms で一定値とする。

4.2 トルク関数のパラメータ決定 スイングロボットの諸元を表1に示す。ゴルフクラブはウッド形を想定して、長さ1.0 mの密度ならびに曲げ剛性が一樣なシャフトの先端に、半径 2.5×10^{-2} mの球状のヘッドが装着されているものとする。また、シャフトのスイング平面内の曲げ剛性を $EI \text{ N}\cdot\text{m}^2$ とし、グリップまわりのクラブの慣性モーメントを $I_c \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ とする。設定値の範囲は EI が $70 \sim 110 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ であり、 I_c が $2.27 \times 10^{-1} \sim 2.78 \times 10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ である。なお、 I_c の設定範囲については、シャフトの質量が $7.5 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1} \text{ kg}$ で、ヘッドが $2.0 \times 10^{-1} \sim 2.5 \times 10^{-1} \text{ kg}$ であることを想定している。

以上の設定において、ヘッドスピードを指令したときのトルク関数の決定方法を明らかにする。

4.2.1 T_{max} と H_v の関係 図7に EI を3種類

設定したときのヘッドスピードと T_{max} の関係を示す。解析にあたり I_c は $2.27 \times 10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ で一定とし、 T_u は動作条件を満たすように任意に調整した。

この結果、3種類のクラブとも H_v と T_{max} の関係は直線で近似できることが示された。この関係から、クラブ特性を与えられればヘッドスピードの指令値に対し T_{max} を一意に定めることができる。また EI が大きくなるほど、スイング動作の設定を満たす H_v と T_{max} のレンジが上昇する傾向が認められる。このことは、筋力に恵まれヘッドスピードの速いゴルファーほど、硬いシャフトが適するという通説によく一致している。

次に EI が $70 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ で、 I_c を3種類設定したときの H_v と T_{max} の関係を図8に示す。この結果、慣性モーメントの違いは T_{max} にそれほど大きく影響しないことがわかる。

4.2.2 T_u と H_v の関係 はじめに、 θ_1 と θ_2 がスイング中に等しくなるときの角度と T_u との関係に着目する。この角度を θ_{im} とし、 T_{max} は $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 I_c は $2.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ で一定とする。3種類の EI について θ_{im} と T_u の関係を解析し、図9に示す。図9中の横の破線は Y_0 軸下向きを表しており、インパクト時に θ_{im} はこの角度でなければならない。この図から、 T_u のわずかな調整で θ_{im} は大きく変化し、動作条件を満たすためには T_u の微妙な調整が重要であることが示された。

Table 1 Parameter of golf-swing robot

	Arm	Grip
Length (m)	0.4	0.1
Mass (kg)	5.0	1.0
Moment of Inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.7×10^{-1}	3.3×10^{-3}

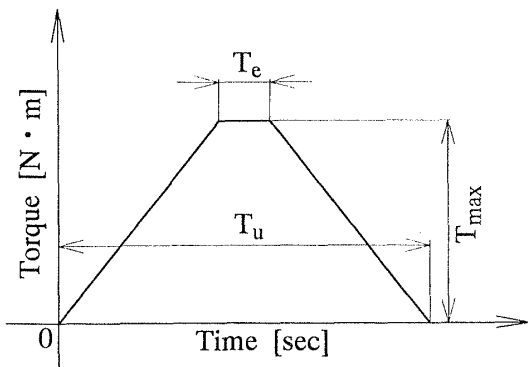


Fig. 6 Applied torque to shoulder joint

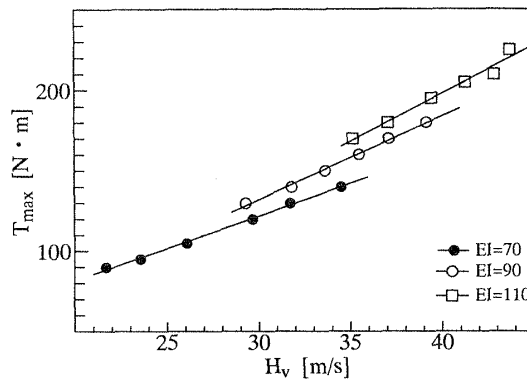


Fig. 7 Relation between H_v and T_{max}

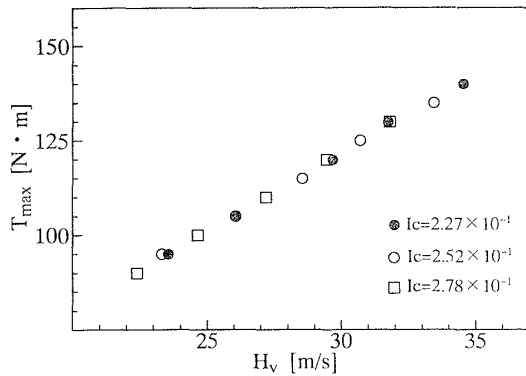


Fig. 8 Variation of T_{max} in various I_c

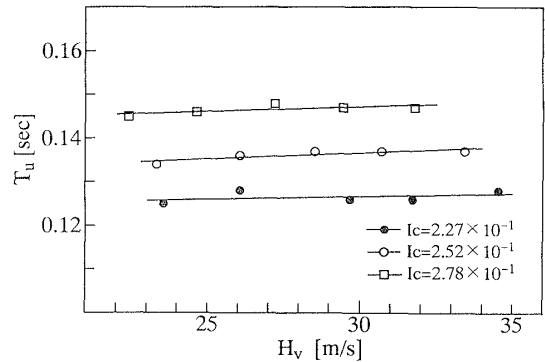


Fig. 10 Relation between H_v and T_u

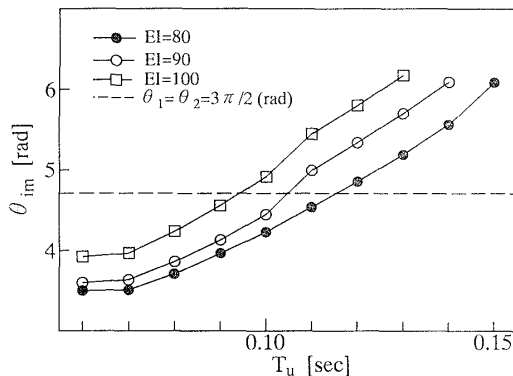


Fig. 9 Relation between T_u and θ_{im}

さらに EI が $70 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, T_{max} が $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ の設定で、3種類の I_c における H_v と T_u の関係を図10に示す。この結果 H_v と T_u の関係も直線で近似できることが示された。しかしながら、その傾きは非常に小さく、同じクラブであればヘッドスピードの指令値を変えても、 T_u の値はそれほど大きく変わらないことがわかる。

4.2.3 アルゴリズム 4.2.1項ならびに4.2.2項での検討から、クラブの特性とヘッドスピードの指令値が与えられれば直線近似式から T_{max} および T_u を一意に定めることができる。しかしながら、この時点では T_{max} と T_u の対応はとられていない。そこで T_u は暫定的に決めておき、その値を中心にある範囲と刻み幅で、繰返し計算によりインパクト時の姿勢の条件を満たす T_u を最終的に決定する。この方法によると、図9ならびに10で示されたように T_u は最終的な値と大きく異なることがないうえ、姿勢の調整に有効であることから、オフラインでの計算コストの低減が期待できる。以下にこのアルゴリズムを記述する。

- ① ゴルフクラブの EI および I_c から T_{max} と T_u に関する2本の直線式を選択する。
- ② T_{max} に関する直線式に H_v の指令値を代入し

て値を決定する。

- ③ T_u に関する直線式に H_v の指令値を代入して値を暫定的に決定する。
- ④ ③で求めた T_u を中心に 1.0 ms 刻みで5回の繰返し計算を行う。
- ⑤ θ_{im} の誤差が $\pm 4.0 \times 10^{-2} \text{ rad}$ 以下となる T_u を求め最終的に決定する。

5. 動作シミュレーション

4.2.3項で決定したアルゴリズムは θ_{im} の設定条件が優先され、ヘッドスピードの指令値に対し誤差が生じる可能性がある。そこで信頼性のある評価が可能であるかを H_v の誤差により検討する。 EI を $100 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, I_c を $2.27 \times 10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ として、ヘッドスピードの指令値を H_{vs} と表す。これを、 $33 \sim 42 \text{ m/s}$ の範囲において 1.0 m/s 間隔で変化させる。 H_{vs} に対する H_v の誤差率を $e_{HV} \%$ として次式で表し、解析結果を図11に示す。

$$e_{HV} = 100 \times (H_v - H_{vs}) / H_{vs} \dots\dots\dots (8)$$

H_{vs} に対する誤差率はすべて $\pm 3.0\%$ 以内に収まることが示され、信頼性の高い評価が期待できる。このうち H_{vs} が 35 m/s の場合の動作をスティックピクチャーで図12に示す。この図から、動作条件を満たしたトルク計画が行われていることがわかる。また、クラブ特性の検出が自動化できればスイング動作の自動調整が可能になることが容易に予想できる。

6. 結 論

ゴルフクラブの特性とヘッドスピードの指令値に応じたスイング動作の調整が可能なゴルフスイングロボットについて、以下のことを明らかにした。

- (1) 想定したモデルでは、スイング動作中の手首の解放動作はシャフトの曲げ振動変位が正へ零クロスする時刻で行うとヘッドスピードが最大になり、この

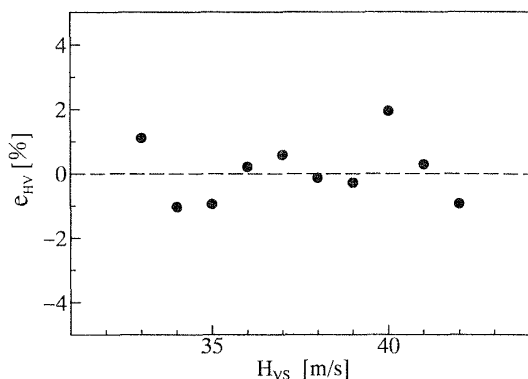


Fig. 11 Simulation result of e_{HV} vs H_{Vs}

動作設定により上級者とロボットが行うゴルフクラブの評価の相違が減少すると予想できる。

(2) 肩関節の入力トルク関数を台形に設定すると、簡単なオフライン計算で上底の高さと下底の長さが決定でき、クラブの特性とヘッドスピードの指令値に適応したスイング動作の調整が可能になる。

(3) スイング動作を調整した結果、ヘッドスピードの指令値に対する誤差率は±3.0%以内に収まり、信頼性の高い性能評価が期待できる。

今後、ここで得られた結果をもとに、実験による検証を行う予定である。またモデルの厳密化を図り、手首のねじり動作とそれに伴うシャフトのねじり振動についても検討していく。

付 録

(運動エネルギー)

腕部

$$\frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2$$

グリップ部

$$\frac{1}{2}\{M_2L_1^2\dot{\theta}_1^2 + I_2\dot{\theta}_2^2 + M_2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 - \theta_2)\}$$

シャフト

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}M_3\left\{L_1^2\dot{\theta}_1^2 + \left(L_2^2 + L_2L_3 + \frac{1}{3}L_3^2\right)\dot{\theta}_2^2\right. \\ &+ 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left(L_2 + \frac{1}{2}L_3\right)L_1\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &+ \frac{1}{2}\rho_3A_3\left\{\dot{\theta}_2^2\int_0^{L_3}y^2dx + \int_0^{L_3}\dot{y}^2dx\right. \\ &+ 2\dot{\theta}_1L_1\cos(\theta_1 - \theta_2)\int_0^{L_3}\dot{y}dx \\ &+ 2\dot{\theta}_2\int_0^{L_3}(L_2 + x)\dot{y}dx \\ &\left. + 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2L_1\sin(\theta_1 - \theta_2)\int_0^{L_3}ydx\right\} \end{aligned}$$

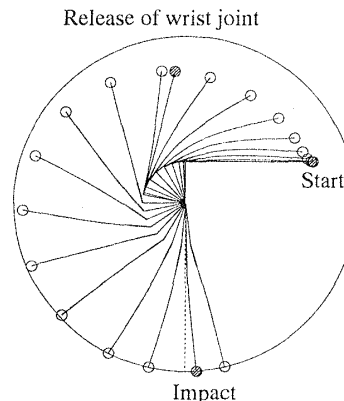


Fig. 12 Simulation of golf swing motion

ヘッド

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}M_p\{L_1^2\dot{\theta}_1^2 + L_R^2\dot{\theta}_2^2 + y_p^2\dot{\theta}_2^2 + \dot{y}_p^2 \\ &+ 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2L_RL_1\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &+ 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2y_pL_1\sin(\theta_1 - \theta_2) \\ &+ 2\dot{\theta}_1\dot{y}_pL_1\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &+ 2\dot{\theta}_2\dot{y}_pL_R\} + \frac{1}{2}I_p(\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_2\dot{y}'_L + \dot{y}'_L^2) \end{aligned}$$

(ポテンシャルエネルギー)

腕部

$$\frac{1}{2}M_1gL_1\sin\theta_1\sin\alpha$$

グリップ部

$$M_2g\left(L_1\sin\theta_1 + \frac{1}{2}L_2\sin\theta_2\right)\sin\alpha$$

シャフト

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}EI\int_0^{L_3}y''^2dx + \left\{M_3g(L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2)\right. \\ &\left. + \rho_3A_3g\left(\frac{1}{2}L_3^2\sin\theta_2 + \cos\theta_2\int_0^{L_3}ydx\right)\right\}\sin\alpha \end{aligned}$$

ヘッド

$$M_pg(L_1\sin\theta_1 + L_R\sin\theta_2 + y_p\cos\theta_2)\sin\alpha$$

ただし、

$$y_p = y_{L_3} + R_p y'_{L_3}$$

文 献

- (1) Budney, D. R. and Bellow, D. G., *Res. Quart. Exe. Sport*, **53**-3 (1982), 185-192.
- (2) Neal, R. J. and Wilson, B. D., *Int. J. Sport Biomech.*, **1** (1985), 221-232.
- (3) Lampsas, M. A., *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, **75**-12 (1975), 362-367.
- (4) 岩壺卓三・ほか2名, *機論*, **56**-529, C (1990), 2386-2391.
- (5) 鈴木聡一郎・ほか3名, *機論*, **61**-86, C (1995), 2508-2513.
- (6) 明愛国・ほか3名, *日本ロボット学会学術講演会予稿集*, No. 3 (1995-11), 1139-1140.