

ゴルフクラブ特性に適應するゴルフスイングロボットの実験的検討*

鈴木 聡一郎*¹, 猪岡 光*²

Experimental Study on Golf Swing-Robot Adjusting to the Characteristics of Golf Clubs

Soichiro SUZUKI*³ and Hikaru INOOKA*³ Kitami Institute of Technology, Dept. of Mechanical System Engineering,
Koen-cho 165, Kitami Hokkaido, 090-8507 Japan

Conventional golf swing-robots are generally used to evaluate the performance of golf clubs and balls. Most of the robots have two or three joints with completely interrelated motion. Therefore, subtle adjustments in swing motion that advanced golfers make according to the characteristics of individual golf clubs are not possible. Consequently, golf swing-robots can not accurately emulate the performance of advanced golfers, which is a problem for evaluation of golf club performance. In this study, a new golf swing-robot that can adjust its motion to both a specified value of swing velocity and the specific characteristics of individual golf clubs was experimentally investigated. This robot utilizes the dynamic interference force produced by swing motion and shaft vibration like advanced golfers. Thus, this new robot can emulate the performance of advanced golfers and can therefore be used for accurate evaluation of golf clubs.

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

1. 緒 論

ゴルフクラブの改良や新商品の開発に伴い、ゴルフスイングロボットを用いた性能評価試験が行われている。使用するゴルフボールの空力学的特性を正確に把握することが困難なことから、打球の飛距離を実測する手法が一般的である。この場合、天候の影響を強く受けるため計測データの統計的処理が必要となり、実験回数が増大するため指定したヘッドスピードやスイング計画に対する再現性能に着目されてきた。従来のゴルフスイングロボットは、肩ならびに手首関節を備えた2軸あるいは手首のねじり動作を加えた3軸で構成されている。これらのロボットはインパクト時のヘッドスピード、あるいはあらかじめ指定された各関節の目標軌道に従って、アクチュエータは常時制御されている。

一方、多くのゴルフレッスン書において、ボールの位置を意識しない自然なスイング動作や手首関節を解放した後の自由な回転運動が重要であることが指摘さ

れている。また、上級者はゴルフクラブシャフトの曲げやねじり剛性に非常に敏感であることから、クラブの動特性とスイング動作には深い関係があると予想できる。従来のゴルフスイングロボットは、スイング動作のスキルに関係なくシャフトの弾性を無視したヘッドスピードやスイング計画を直接指令することにより運転されていた。このため、クラブの動特性に応じた上級ゴルファーのスイング動作を実現することができなかった。その結果、ゴルフクラブの性能評価においてゴルファーとロボットの評価結果が異なることが問題となっている。

既報⁽¹⁾⁻⁽³⁾では、肩と手首の2関節モデルにより上級者のスキルを解析的に検討した。肩関節の最大トルクが同じ条件下で、スイング中のシャフトの曲げ振動変位がはじめに正に零クロスするときに手首の解放を行うと、ヘッドスピードが最大になることを明らかにした。さらに、手首は固定か解放のみの非駆動関節とし、肩関節のトルク入力のみでゴルフクラブの慣性モーメントがシャフトの曲げ剛性に応じたスイング動作を可能とするアルゴリズムを検討した。この結果、ゴルファーのスキルを有するロボットの実現の可能性を示した。このロボットを用いることで信頼性の高い性能評価ならびに仮想ゴルファーに対するクラブの最

* 原稿受付 1998年9月18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 (☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。

E-mail: zuki@syst1.mech.kitami-it.ac.jp

適設計が可能となると期待できる。

本研究では実験装置を用いて、ゴルファーのスキルを有するロボットの解析結果を検証することで実現の可能性について明らかにすることを目的とする。特に、ゴルファーのスキルをロボットの動作で実現する際に重要となる関節の機構を検討し、さらにクラブの動特性に応じた肩関節のトルク計画が実際の装置にも適用可能であるかを動作精度から検証する。

2. 動作設定

2.1 スイング動作の姿勢 製作したロボットの動作設定を検討するために、図1に示すような簡略化した解析モデルを用いた。スイング動作は同一平面内で行われ、肩と手首の2関節が回転する。手首のねじり動作やシャフトのねじり振動については検討しないこととする。ゴルファー本来の動作では、左肩を中心に左腕を回転させながら、上半身の回転と下半身の移動が同時に行われる。この動作を図2に示すように、2関節の回転運動に置き換える。このため、下半身の移動は検討しない。スイング動作の開始時では腕とグリップ部のなす角度を $\pi/2$ rad で固定し、腕と X_0 軸

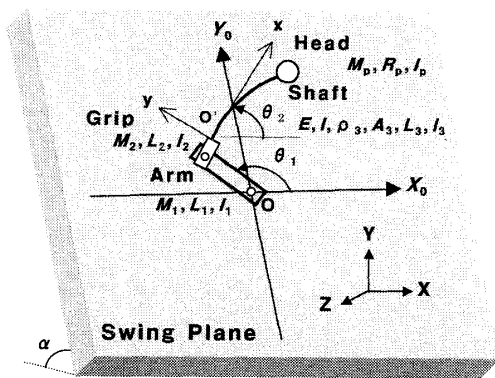


Fig. 1 Dynamic model of golf swing-robot

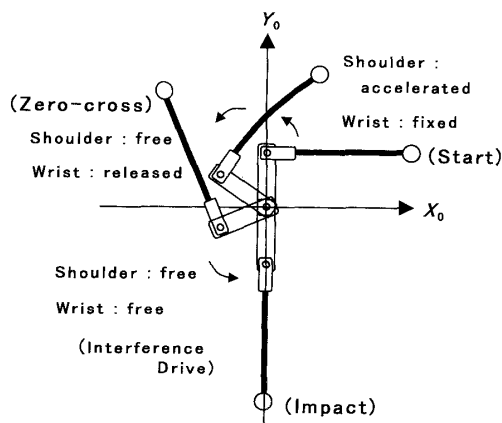


Fig. 2 Institution of swing motion

とのなす角 θ_1 を $\pi/2$ rad に設定する。またインパクトでは、腕部、グリップ部ともに Y_0 軸下向きで打球することとする。

2.2 ゴルファーのスキルと関節の解放 一般に上級ゴルファーは、スイング中に手首の「ため」がしっかりとでき、手首の解放後は力みのない自由な運動をすることができるといわれている。また上級者は、クラブシャフトの曲げ剛性に対し非常に敏感である。さらに、多くのスポーツに該当するスキルとして、上級者は余計な筋力を必要とせず大きな効果を得ることができると考えられる。既報^{(1)~(3)}では、スイング中のシャフトの曲げ振動変位と手首の解放タイミングとの関係に着目したスイング動作の解析的検討を行った。その結果、スイング開始後シャフトの振動変位が負から正に零クロスするとき手首を解放するとインパクト時のヘッドスピードが最大になることが示された。これは、シャフトの弾性ひずみエネルギーを効率よく運動エネルギーに変換した結果であるといえる。以上の一般論およびスイング動作の解析結果をまとめ、本報ではゴルファーのスキルとして次の(1)~(3)の能力を想定することにする。

(1) ボールの位置を意識せず、自然でスムーズなスイング動作が行える。

(2) アンコック後に手首関節を自由に回転させることができる。

(3) ダウンスイングにおいて手首の「ため」があり、シャフト先端の変位が零クロスしたとき、手首のアンコックが開始される。

ここで、アンコックとは手首を解放しながら返す動作を表す。

以上のことから、実験においても手首関節の解放は零クロス時に行い、その後は図2に示すように肩、手首関節ともに自由とすることで、干渉力の影響のみで回転させる。ダウンスイングの後半は、各関節には全く制御力が働かない状態で正しく打球時の姿勢になる必要がある。これらの設定により、ロボットとゴルファーとの相違が低減できると予想される。

3. 実験装置

3.1 装置の構成 実験に用いた装置の構成を図3に示す。肩関節は、バックラッシュがない加茂精工(株)製のボール減速機を介して、DCサーボモーターをトルク制御することにより駆動される。手首関節は非駆動のため、アクチュエータをもたない。肩、手首の回転角度は、分解能がそれぞれ 24 000 p/r および 800 p/r のロータリエンコーダで計測する。腕部、手

Table 1 Specifications of golf swing-robot

	Arm	Grip	Shaft	Head
L_1, L_2, L_3, R_p (m)	8.3×10^{-2}	5.0×10^{-2}	2.7×10^{-1}	5.0×10^{-3}
M_1, M_2, M_3, M_p (kg)	1.7	1.7×10^{-1}	1.4×10^{-2}	$0.6 \sim 1.0 \times 10^{-1}$
I_1, I_2, I_3, I_p ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1.1×10^{-3}	5.3×10^{-5}	3.2×10^{-4}	—

先部ともにアルミ角材を関節回転軸に固定する形式とした。クラブシャフトは、厚さ1mmのスチール板を加工し、スイング平面内の断面二次モーメントが小さくなるように装着する。なお、グリップ部と手先部は完全に固定されている。クラブヘッドは、スイング中にシャフトのねじりが生じないように工夫したジグで固定される。通常、スイング平面は水平面に対して50~60 deg 傾斜しているといわれている。このため、重力の影響で初期姿勢において肩関節には反モーメントが作用することとなる。これに対して、モータが十分なトルクを発生できなければ肩関節の加速不足を招き、零クロスでの手首のアンコックが早いタイミングで行われてしまう。実験装置でもモータのトルク不足が問題となり、上級者の手首の「ため」を実現する目的で、スイング平面の傾斜角を通常のゴルフスイングよりも小さい10 deg に設定した。実験装置の詳細は表1に示す。なお、表1中のグリップは手先部も含めた値であり、腕およびグリップともに回転軸を含んでいる。

3.2 手首の解放機構 手首関節は、ダウンスイング開始後に大きく負の値をもつシャフト先端の振動変位が、再び零に戻るとき解放する。これが上級者のようにシャフトの弾性を利用して、効率のよいスイング動作を行うための動作設定条件となる⁽¹⁾。実用化を想定したとき、この動作を可能にする最も簡単な機構として、図4に示すようなストッパの採用を試みる。手首関節の回転軸に隣接する手先部にストッパを設けると、肩関節の加速時は手先部ストッパに押し付けられ、初期姿勢のまま手首は固定される。その後、シャフトの振動変位が零クロスすると、手首関節まわりのモーメントに大きな変化が生じ、自然に手首が解放されると考えられる。このストッパの有効性を実験により検証した。手首の解放時刻は、ストッパにひずみゲージを接着した板ばねを用いて計測する。この板ばねは非常に軽量かつ柔軟であり、ロボットの運動に影響を及ぼすことはない。これを手首が解放した瞬間に復元しはじめるようにストッパに設置し、出力信号から解放時刻を計測した。シャフトのグリップ側に接着したひずみゲージ出力から算出したシャフトの先端変位

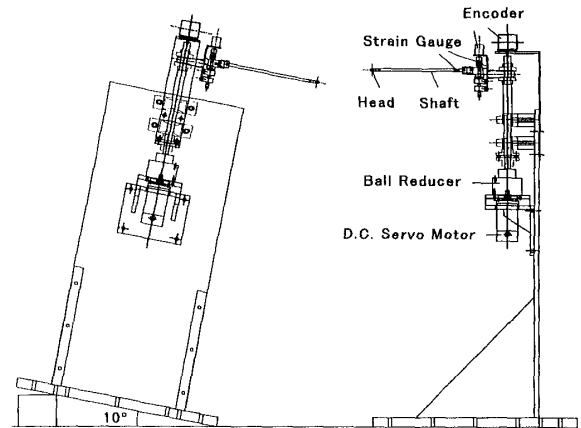


Fig. 3 Outline of the equipment

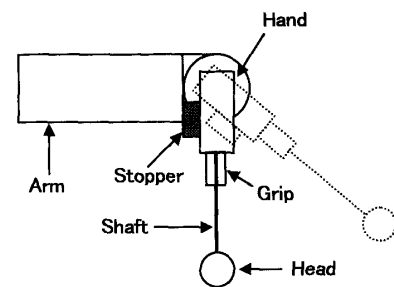


Fig. 4 Schematic diagram of wrist joint

と解放時刻の関係を図5に示す。

この結果、手首関節はストッパのみで固定ならびに解放される簡単な機構で、シャフトの振動変位に適合したリスタートが可能となることが示された。また図で示されるように零クロスでの解放直後に手首の回転が加速されるため、シャフト先端の振動変位がわずかながら再び負になることが確認できる。肩関節についてもスキルの実現のために、加速後は自由に回転させる必要がある。そこで、減速機の出力軸先端の軸継手の継手ボルトを外し、双方の継手からボルトの頭部を継手間に突出させる構造とした。この二つのボルト頭部をストッパとして利用し、出力軸のトルク発生時は双方が接触することで回転軸にトルクが伝達される。トルク入力終了すると自然に回転軸は駆動部から切り離され、干渉力の影響のみで回転する。

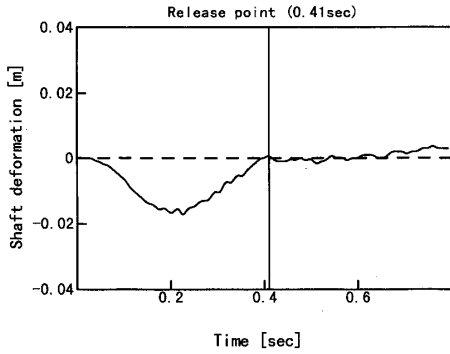


Fig. 5 Relationship between release point of the wrist and shaft deformation

4. トルク計画

4.1 駆動部のパラメータ同定 使用する装置にはボール減速機を用いている。これは密閉された容器の中に、おのおの別の速度で回転するボールベアリングが多重に挿入され、潤滑油が充てんされている。このため、大きな影響が予想される粘性抵抗力や慣性モーメントをあらかじめ特定することができない。さらに、モータやロータリエンコーダについても、同様の影響が無視できない。そこで、腕部から先をはずした状態でロータリエンコーダだけを改めて設置し、これらを一つの系とみなし慣性モーメント、クーロン摩擦力および粘性抵抗係数の同定を行う。減速機の出力トルクと減速機出力軸の角速度の関係から次の計算により求めることができる。減速機の出力トルクを T_M 、粘性抵抗トルクおよび摩擦トルクを T_F 、系全体の慣性モーメントを I_D 、減速機出力軸の回転角度を θ_R とすると、次の関係がある。

$$T_M - T_F = I_D \ddot{\theta}_R \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_F の粘性抵抗係数を a 、摩擦トルクを b とおくと

$$T_F = a\dot{\theta}_R + b \dots\dots\dots (2)$$

で表され、式(2)を式(1)に代入することで次の運動方程式が求まる。

$$I_D \ddot{\theta}_R + a\dot{\theta}_R = T_M - b \dots\dots\dots (3)$$

この式に対し、 $y = \dot{\theta}$ の変数変換を行うと

$$I_D \dot{y} + ay = T_M - b \dots\dots\dots (4)$$

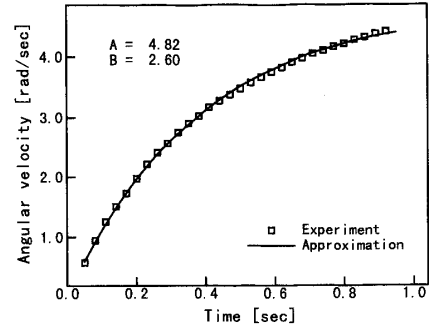
となり、次の解が得られる。

$$y = -Ae^{-bt} + A \dots\dots\dots (5)$$

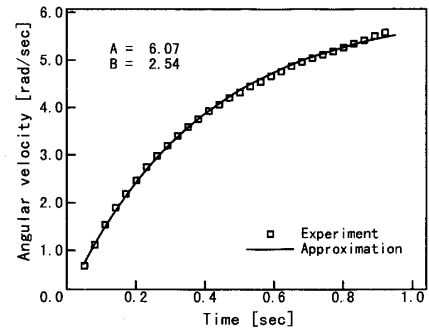
ただし、

$$A = \frac{T_M - b}{a}, \quad B = \frac{a}{I_D}$$

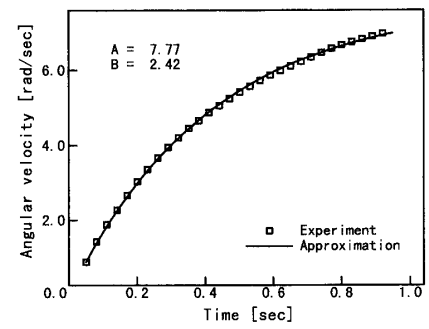
である。



(a) $T_M = 3.0 \text{ N}\cdot\text{m}$



(b) $T_M = 3.5 \text{ N}\cdot\text{m}$



(c) $T_M = 4.0 \text{ N}\cdot\text{m}$

Fig. 6 Identification for parameters of driving unit

ある T_M に対して角速度を計測し、それぞれ最小二乗法により近似曲線を求めれば、 A および B の値が決定される。最低2組の A と B の値があれば、 a 、 b ならびに I_D が同定できる。3種類の T_M に対する角速度計測の実験結果と、その近似曲線を求めた結果を図6に示す。

これらの値から同定は可能であるが、取上げるデータの組によりパラメータの値が微妙に異なるという結果が得られた。そこでこれらの値を微調整しながら、入力トルクが一定で系が等角加速度運動をするように、モータの出力を補正する実験を行い同定の精度を確認した。この時の角速度の計測値と式(5)による計算値を比較した例を図7に示す。この結果、 $a=0.2$ 、 $b=1.1$ 、 $I_D=0.14$ において両者はよく一致しており、パラメータの値が妥当であることが示された。

4・2 トルク関数 今回の動作設定では、手首関節を解放した後は肩、手首ともにトルク入力がないため、干渉力のみで回転しながらインパクト時の姿勢を実現しなくてはならない。さらに、ゴルフクラブの特性変化や打球時のヘッドスピードの指令値にも適応できなければならない。そのため、スイング開始時の肩関節のトルク計画が重要となる。しかしながら、トルク関数のパラメータが多いと計画が複雑になり望ましくない。そこで、肩関節のトルク関数を図8に示すように台形に設定し、上底の高さ T_{MAX} と下底の長さ T_U でスイングを調整することを試みる。なお、上底の長さは最大筋力の持続時間に相当し、ゴルファー間に大きな差はないと仮定し、0.1sで固定した。既報⁽¹⁾の解析結果によると、 T_{MAX} の調整はヘッドスピードの調整に有効であり、 T_U はインパクト時の姿勢に大きく影響し、ほぼ独立に調整可能であることが示されている。

従来のゴルフスイングロボットは、関節の目標軌道が必要であり、インパクト時のヘッドスピードをあらかじめ決めなくてはならなかった。そのため、テスト用クラブを変更しても同じ速度で打球することになり、クラブの特性の違いによるボールの飛距離の差が正しく評価できなかった。ゴルファーの体力を想定して、トルク入力が決まればクラブの特性に応じて自然なヘッドスピードが得られ、より正しい評価が期

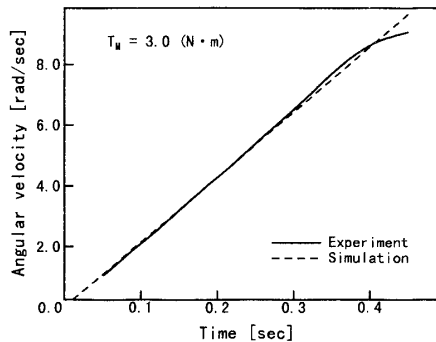


Fig. 7 Verification of defined parameters

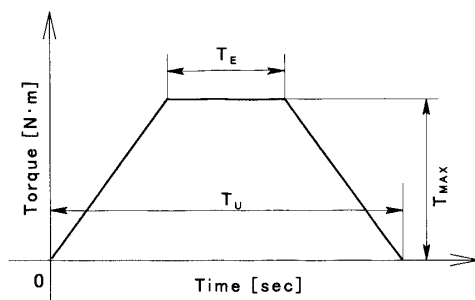


Fig. 8 Torque function of the shoulder joint

待できる。このとき、クラブの特性が変わるたび、動作設定条件を満たす T_{MAX} と T_U の組合せを試行錯誤で探索するのは好ましくない。そこで簡略化モデルを用いたシミュレーションで、動作条件を満たす T_{MAX} と T_U の関係式をクラブ特別にデータベースとしてあらかじめ用意する。実際に与えられるクラブは、この特性どおりとは限らないため、最終的には T_U の繰返し計算でインパクト時に正しい姿勢を維持する値を決定する^{(1)~(3)}。実際にゴルフクラブをスイングするロボットは、今回使用した装置よりもさらに複雑な構造になることが予想される。トルク計画において解析モデルの精度が強く要求されると、実際のロボットの開発に大きな障害となってしまう。そのため、図1で示した簡略化モデルでトルク計画を行うことで実用性を検証する。クラブの特性としては、グリップまわりの慣性モーメント $I_c \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ とシャフトの曲げ剛性 $EI \text{ N}\cdot\text{m}^2$ を取扱う。 $I_c=3.4\times 10^{-4}$ 、 $EI=1.3\times 10^{-1}$ のクラブについて決定された $T_{MAX}-T_U$ 曲線の例を図9に示す。なお、近似は三次曲線で行う。

5. スイング実験

5・1 トルク指令によるスイング実験 4章で決定した駆動部のパラメータを用いて補正トルクを算出し、スイング動作実験を行った結果から、設定条件を満たした動作となっているかを検証する。

その手順は、ゴルファーの体力の代表値として T_{MAX} を入力し、さらにクラブ特性を入力することでオフライン計算により T_U が決定され、台形トルクが求まる。次に4・1節で同定したパラメータに従い、角速度のシミュレーションデータをあらかじめオフラインで計算しておき、これを式(2)に適用することで補正トルクが計算され台形トルクに加算される。最終的にこの値をモータへの指令トルクとしてフィードフォワード制御により肩関節の駆動が行われる。本来、補正トルクは実時間で角速度を計測しながら常時フィー

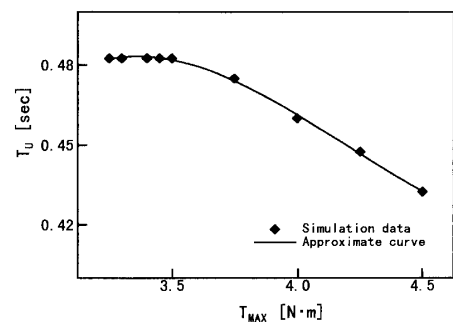


Fig. 9 Relationship between T_{MAX} and T_U

ドバックされるのが望ましい。しかしながら、今回使用したロータリエンコーダの出力の差分から角速度を求めようとするとSN比が悪くなるため、シミュレーションデータを用いたフィードフォワード制御を行った。このことにより、補正トルクには誤差が生じる可能性がある反面、肩関節のトルク計画は完全にオフライン計算で行うことが可能になる。このとき簡略化モデルの解析データで十分な動作精度が得られれば、実用化もしやすい。図9の検討で用いたクラブを使用し、 T_{MAX} を $4.0\text{ N}\cdot\text{m}$ に設定した場合において、二つの関節の回転角度を計測した結果を図10に示す。図10中の二つの曲線の交点は腕とグリップが直線状になったときの角度を表す。この角度がほぼ $3\pi/2\text{ rad}$ となっていることから、設定に従った動作が実現されていることが示された。さらに上級者のスキルである、自然でスムーズなスイング動作が行われていることがわかる。この結果、ゴルファーの力量を指示するだけで、上級者のようにクラブの特性に応じたスイングが正しく行われることが確認できた。

5.2 速度指令によるスイング実験

ゴルフクラブの性能評価としては、5.1節で検討したトルク指令が望ましい。その一方で、ゴルファーの力量はインパクト時のヘッドスピードで分類されるのが一般的である。さらにクラブやボールの耐久試験ならびにクラブヘッドの性能のみに着目する場合は、ヘッドスピードを指定できた方が都合がよい。インパクト時の指令ヘッドスピードに対する T_{MAX} が決定できれば、これまで検討してきた動作設定はそのままに、4.2節で述べた手順でモータへの指令値が決まることとなる。そこで、この関係を実験である程度求めておき、近似曲線を求めることで任意の指令速度に対応する方法を検討する。

図11に、 $I_c=3.6\times 10^{-4}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 、 $EI=1.3\times 10^{-1}\text{ N}\cdot\text{m}^2$ のクラブを用いて計測したインパクト時のヘッド

スピード $H_v\text{ m/s}$ に対する T_{MAX} の近似曲線を示す。 H_v の値は、二つのロータリエンコーダとシャフトに接着したひずみゲージの出力から移動平均によりSN比を高くして計測する。これらの変化率から速度を計算で求め、それぞれ4回の実験における平均値を H_v の値とした。これを四次曲線で近似し、4種類の H_v 指令値を設定した場合でそれぞれのトルク指令値を決定し、スイング実験を行った。一つの指令値に対し5回ずつスイングを繰返したときの平均速度誤差率を図12に示す。図で示されるように、ヘッドスピードの算出に際してシャフトのひずみ速度を考慮した場合とそうでない場合で、平均誤差率にはそれほど大きな差はみられない。このことから、インパクト時のわずかな時間のずれで、シャフトの振動がヘッドスピードに及ぼす影響は一定の傾向を示さないことがわかる。

このため、上級ゴルファーでもインパクト瞬間のシャフトの振動速度まではコントロールしきれないと想定できる。このとき、平均しない誤差率の最大値は7%程度であり、平均した最大値は4%以下であることから、良好な動作精度が得られていると考えられる。

速度の誤差が生じるもう一つの要因としては、減速機内部の潤滑油の温度変化が挙げられる。図12の結果は、一定時間モータを定常運転した後に計測したものであるが、厳密な温度管理はしていない。実際、冷え切ったときと過熱状態ではさらに大きな誤差が生じ

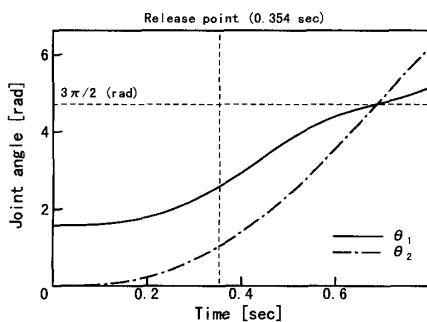


Fig. 10 Experimental results of joint angles in golf swing motion

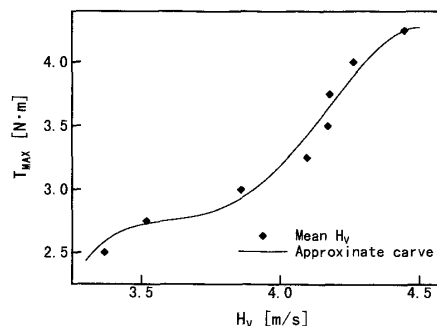


Fig. 11 Relationship between H_v and T_{MAX}

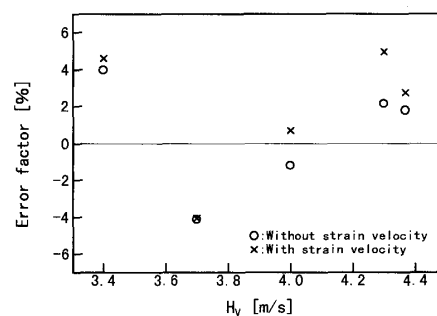


Fig. 12 Error factor of H_v

たため、実用では検討する必要がある。これを改良することで、簡略化モデルを用いたトルク計画でも実機において精度の高いスイング動作が期待できる。

以上、2種類のスイング動作実験による格闘から、ゴルファーの力量を想定したトルク指令でも、あるいは従来のロボットと同様に速度を指令した場合でも、ゴルフクラブの動特性に適應した精度よいスイング動作が可能となることが明らかになった。

6. 結 論

ゴルフスイングロボットの解析結果^{(1)~(3)}に基づき、実験装置によるスイング動作計測を行った。ゴルフクラブの特性に適應したゴルファーのスキルを実現するために関節の干渉駆動が必要となり、関節の機構を検討した。肩ならびに手首関節ともにクラッチやブレーキ機構などを用いることなく、簡単なストッパを設けるだけで設定した動作が実現可能となることが示された。また、肩関節のトルク計画は簡略化モデルを用いたオフライン計算により、トルク関数の二つのパラメ

ータをクラブの特性に応じて決定できることが明らかとなった。さらに駆動部の摩擦、粘性、慣性に関するパラメータ同定からトルク補償を行うことで、比較的精度が高いスイング動作が実現できた。この結果、想定した上級者のスキルをスイング動作で実現できるロボットの実用化の可能性を示した。このロボットを実用化することで、テストクラブの性能評価に対するゴルファーとの相違が低減され、開発コストの低減ならびに想定されたゴルファーの特徴に対する最適設計への利用が期待できる。

文 献

- (1) 鈴木聡一郎・猪岡光, 機論, **64**-623, C(1998), 2341-2347.
- (2) Suzuki, S. and Inooka, H., *Proc. 6th IEEE Int. Workshop RO-MAN*, (1997), 28-33.
- (3) Suzuki, S. and Inooka, H., *Proc. Intelligent Autonomous Systems IAS-5*, (1998), 391-398.
- (4) 明愛国・梶谷誠, 機講論(ロボティクス・メカトロニクス), No. **95**-17 (1995), 951-953.
- (5) 金貞玉・ほか3名, 機講論(ロボティクス・メカトロニクス), No. **97**-22(1997), 381-382.