

Actuated-Club:クラブ姿勢補正のための力覚フィードバック付き ゴルフクラブ型デバイス

中村拓人^{†1†2} 小池英樹^{†1}

概要: ゴルフスイングにおけるクラブの軌道やフェイス角度(クラブ先端の角度)は打球の方向や軌道へ大きな影響を与える。初学者へのスイング練習において指導者やシステムからのスイング教示が行われるが、細かな情報の欠如や情報の解釈が間に合わず、スイング中にフォームを修正することは困難であった。そこで、本研究では非接地型力覚提示装置を搭載させたゴルフクラブ型デバイスによってクラブの姿勢補正し、スイング中のクラブ姿勢修正を実現するゴルフクラブ型デバイスを提案する。本論文では提案デバイスのプロトタイプを実装し、性能評価を行ったところユーザの手を動かすのに十分なトルク提示が可能であることが確認された。

1. はじめに

ゴルフスイングにおけるクラブの軌道やフェイス角度(クラブ先端の角度)は打球の方向や軌道へ大きな影響を与える。ゴルフの打球方向予測においてはDプレーン理論[1]と呼ばれる手法が広く知られており、ボールの打ち出し方向はフェイス角度、曲がる方向はクラブ軌道が影響するとされている。初学者の多くはフェイス角度及びクラブ軌道の制御を習熟していないために、ボールが意図しない方向に飛ぶ又は曲がってしまう。ボールを意図した方向に飛ばすために、多くの初学者はスイングの反復練習を行う。しかし反復練習においては、学習者は正しいフォームも誤ったフォームも学習してしまう。よって、理想的には正しい軌道を再現可能なフォームのみを反復練習することが望ましい。

理想的な反復練習を目指し、初学者へのスイングフォームの教示が行われる。一般的なスイングの教示は指導者が学習者に対して、口頭で指示する、手本を見せる、直接学習者の身体を操作するなどが行われてきた。しかし、これらはスイング中に細かな指示を行うことが困難であった。初学者自身でフォームを確認しながら学習することも考えられるが、鏡やカメラを用いた方法では確認できるフォームの範囲は限られる。また、初学者では自身のフォームが正しいものかを判断することも難しい。クラブの角度や軌道をセンサによって計測する装置も市販[2]されているが、計測結果はスイング後に確認可能となるため、スイング中にフォームを修正することはできない。

研究の分野では、ソニフィケーションを用いてクラブの位置をフィードバックする手法[3]や理想的なフォームと自分のフォームを重ねた像をプロジェクションする手法[4]などが提案されている。これらは細かな情報を教示可能な一方で、それらをスイング中に解釈する必要があるため、

スイングの修正が間に合わない。

解釈をあまり必要としない教示手法として、力覚を用いた教示がある。ロボットアーム[5]や力覚提示装置[6]によって身体部位へ力を提示することで、目的の動きや位置へ身体を操作する。しかし、これらの装置は装置自体が接地している必要があるためユーザによる操作領域を著しく制限する。また、ゴルフへの応用は行われていなかった。

そこで、本研究ではユーザの動きを制限しない非接地型の力覚提示装置を内蔵したゴルフクラブデバイスによって、ユーザのスイング軌道を補正することで正しい軌道での練習を実現する。本論文では提案装置の詳細、性能評価の結果、スイング補正アプリケーションについて述べる。

2. 提案装置

2.1 力覚提示手法

本研究ではユーザのゴルフスイング中のクラブ軌道やフェイス角度へ介入するため、強力な力覚の提示が必要となる。また、練習の効率低下を防ぐために、自ら身体を動かしているという主体性も必要となる。非接地型の力覚提示手法は偏加速度振動提示[7][8]、皮膚変形提示[9]、筋電気刺激[10]などが提案されているが、提示力覚がユーザの身体及び把持物体を動かすほど強力ではない、運動学習で重要な身体運動の主体性が失われるといった理由で採用を見送った。

そこで本研究ではジャイロ効果によるジャイロモーメントを用いた非接地型力覚提示を行う。ジャイロモーメントは高速自転する回転物体を自転軸に直行する軸に回転させると、残る1つの回転軸に生じるトルクである[11]。本手法は非接地でトルクを生成できることから力覚提示装置へも応用されている。把持棒の先に自転する回転体と自転軸と直行する2軸回転を発生させるパンチルト機構を搭載した力覚提示装置によって、2軸のトルク提示が実現されて

†1 東京工業大学

†2 日本学術振興会特別研究員 PD

いる[11][12]. また、回転体及びパンチルト機構を2機搭載することで、並進方向の力覚提示も実現されている[13]. これら搭載する回転体の質量、半径、自転速度によって提示力覚が決まるため、用途に合わせて装置の重さや大きさを設計可能である. また先行研究によって、ユーザの身体運動に介入する研究も行われており、ユーザの動作に介入するのに十分なトルクを生成可能であることも示されている[11].

2.2 提案装置のプロトタイプ

提案装置のプロトタイプを図1に示す. 装置はゴルフクラブ用グリップ、ジャイロ、モーションキャプチャ用マーカーから構成されるデバイス部と制御基板及び電源の制御部の2パーツから構成される. さらにモーションキャプチャカメラによってデバイスの位置及び姿勢追跡を行い、システムに反映させる.

デバイス部は回転体(半径 60mm, 重さ 194g)を DC モータ(144457,MAXON Motor Inc., Swiss)で自転させる. 回転体は DC モータ(Wal frontadichrpqy7-04, Wal front)でピッチ軸方向に回転させることで、グリップに対してヨー軸のトルクを生成する.

制御部はマイクロコントローラ(mbed LPC1768, NXP Semiconductors.), 2 個のモータドライバ(TB6643KQ, TOSHIBA, Japan), DC モータのエンコーダカウンタ(Dual LS7366R Quadrature Encoder Buffer, SuperDroid Robots)で構成される制御基板と電源で構成される. 2 機のモータドライバは回転体自転用と回転体をピッチ軸に回転させるそれぞれのモータの速度を制御する. また、エンコーダカウンタはピッチ軸回転用モータのエンコーダ値を読み取り、適切な速度と位置に回転体を駆動させる.

モーションキャプチャ(OptiTrack V120: Trio, OptiTrack Inc.)は中継ソフトウェア(Motive, OptiTrack Inc.)を経由し PC 内の Unity アプリケーションに装置位置及び姿勢を送り、プログラム内のクラブオブジェクトに反映させる. ジャイロの出力力覚や駆動の司令は Unity プログラム内のクラブオブジェクトの姿勢を基に制御部のマイクロコントローラに送信される(図2).

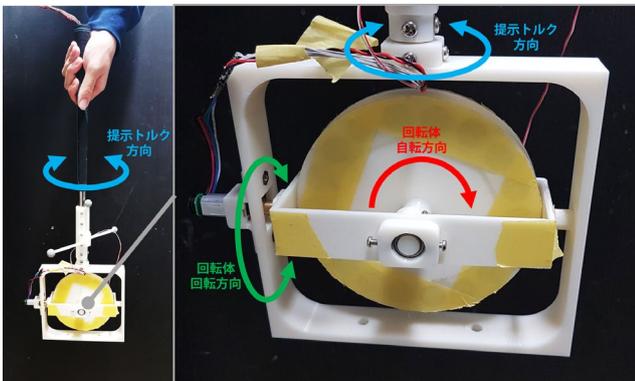


図1 開発したプロトタイプ

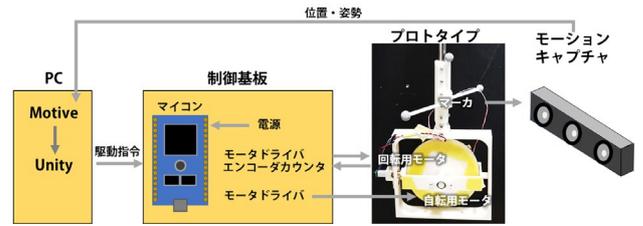


図2 システム構成図

2.3 提案デバイス出力トルク計測

開発したプロトタイプの出力トルクを計測した. ジャイロの出力トルク $-M_{max}$ は回転体の重さ m [kg], 回転体の半径 R [m], 回転体の自転角速度 ω [rad/s], 回転体の回転最大角速度 $\dot{\theta}_{max}$ [rad/s]を用いて以下の式(1)で算出される.

$$-M_{max} = \frac{1}{2} m R^2 \omega \dot{\theta}_{max} k \quad (1)$$

本節では実際に提示されているトルクを計測することで、クラブ補正に応用した際に狙ったトルクを提示可能とする. また、最高トルクに達する時間を計測することで、本装置の時間応答性を計測する. 時間応答性はクラブ補正に必要な時間に直結することから計測が必要となる.

計測環境を図3に示す. プロトタイプを6軸力センサ(WEF-6A200-4-RCD, WACOH-TECH Inc., Japan)にネジ止めした状態でジャイロを駆動した. ジャイロの駆動指令はPC内でのUnityプログラムから送信し、力センサの値を240Hzで1秒間計測した. 回転体の回転角度45度とし、各条件で3回計測を行った. ジャイロの駆動条件は回転体の重さ $m=194$ [g](0.194[kg]), 半径 $R=60$ [mm](0.06[m]), 自転速度 $\omega=2100$ [rpm](219.8[rad/s])を固定し、回転速度 $\dot{\theta}_{max}$ 5 条件 {100,110,120,130,140}[rpm]でトルク計測した. 各条件での最高出力トルク理論値はそれぞれ{0.803, 0.884, 0.964, 1.044, 1.125}[Nm]となる.



図3 トルク計測環境

トルク計測結果を図4に示す. グラフの縦軸がトルク, 横軸が各条件, エラーバーは標準偏差, 青棒グラフが計測平均値, 橙棒グラフが理論値を表している. 最高トルク到達平均時間は各条件で(条件: 平均値±標準偏差){100rpm: 0.225±0, 110rpm: 0.192±0, 120rpm: 0.147±0.02, 130rpm: 0.108±0, 140rpm: 0.114±0.008}[sec.]であった.

トルク計測の結果, 実測値は理論値の約半分であった.

これは、回転体回転角度を45度としたために、モータの加速が間に合わず、出力トルクが低くなってしまったと考えられる。しかし、出力トルクの値は先行研究[11]と比較して同等以上の値が出力されているため、プロトタイプは装置を把持したユーザの手を動かすのに十分なトルクを出力可能であることが示された。最高トルク到達時間は最速で約0.1秒ほどであり、ゴルフのパターなど動作が遅い動作への応用可能であることが示された。今後はトルク提示によって実際にユーザの手及びクラブ動作に必要な時間計測を進める。

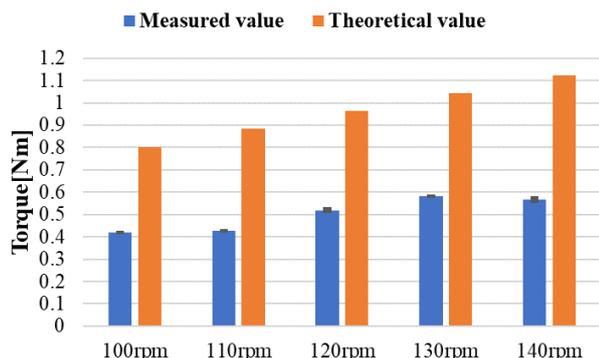


図4 トルク計測結果

3. クラブ補正アプリケーション

1軸ジャイロを搭載したプロトタイプを用いたクラブ補正アプリケーションを開発した。前章の性能評価の結果から、トルク提示には応答時間約0.1秒が必要であるため、ゴルフの動きの中でもゆったりとした動きであるパターでのアプリケーションをまず開発した。本アプリケーションでは、黄色の帯がパターの平行移動の軌跡となっており、クラブのフェイス角度が1度以上外れると、外れた角度に応じて正しい角度に向かってトルクが提示される。

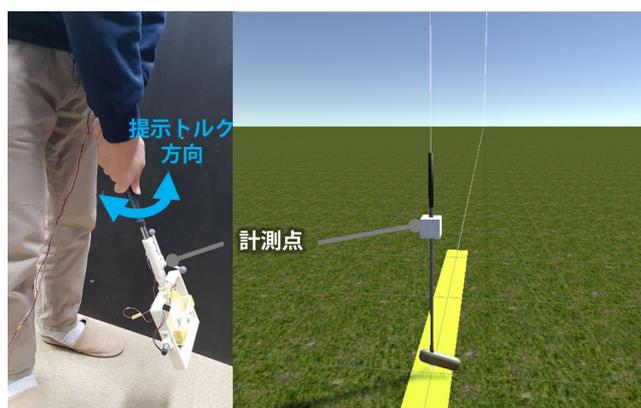


図5 クラブ補正アプリケーション

4. おわりに

本論文ではゴルフスイング練習の効率化のために、非接地力覚提示によるゴルフクラブ姿勢補正装置を提案し、そのプロトタイプを開発した。開発したプロトタイプの提示

可能トルク及び最高トルク到達時間を計測し、性能評価を行った。性能評価の結果、従来研究と同等以上のトルク提示を実現した。またプロトタイプを用いたゴルフクラブ姿勢補正アプリケーションを開発した。

今後はクラブの姿勢だけでなく、軌道補正に対応するため、回転体の回転方向を増やし提示トルク軸を増やす。また、プロトタイプを用いたアプリケーションの改善及びユーザースタディを進める。ユーザースタディにおいては、デバイスの使用によるクラブ姿勢及び軌道の学習経過や、デバイス使用の有無による学習効率の比較を行っていく。

謝辞 This work was supported by JST CREST Grant Number JPMJCR17A3 including AIP challenge program, Japan.

参考文献

- [1] Theodore P. Jorgensen, The Physics of Golf. Springer Press, 1999, 204p.
- [2] M-Tracer For Golf, EPSON: <https://www.epson.jp/products/msensor/golf/>
- [3] 田中結花, 今誉, 小池英樹. ソニフィケーションを用いたゴルフスイング学習支援システム, 第26回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2018)論文集, 2018.
- [4] A. Ikeda, D. H. Hwang, H. Koike. AR based Self Sports Learning System Using Decayed Dynamic Time Warping Algorithm, in Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2018
- [5] C.L. Teo, E. Burdet, H. P. Lim. A robot teacher of Chinese handwriting, Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2002, pp.335-341, 2002.
- [6] S. Saga, N. Kawakami, S. Tachi: Teaching using opposite force presentation, IEEE World Haptics Conference 2005, 2005.
- [7] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎. 非接地型力覚提示装置を中空で把持したときの効果的な牽引力錯覚の生起手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 4, pp. 545-556, 2006.
- [8] V. Yem, R. Okazaki, H. Kajimoto. Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration, Haptics Symposium (HAPTICS) 2016, pp. 47-51, 2016.
- [9] V. Yem, H. Kuzuoka, N. Yamashita, R. Shibusawa, H. Yano, J. Yamashita. Assisting hand skill transfer of tracheal intubation using outer-covering haptic display. ACM CHI 2012, pp.3177-3180. 2012.
- [10] P. Lopes, S. You, L.P. Cheng, S. Marwecki, P. Baudisch. Providing Haptics to Walls and Other Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation, ACM CHI 2017, pp.1471-1482, 2017.
- [11] 吉江将之, 矢野博明, 岩田洋夫. ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置. バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.3, pp.329-337, 2002.
- [12] K. N. Winfree, J. Gewirtz, T. Mather, J. Fiene, K. J. Kuchenbecker. A High Fidelity Ungrounded Torque Feedback Device: The iTorquU 2.0, World Haptics 2009-Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.261-266, 2009.
- [13] J. M. Walker, M. Raitor, A. Mallery, H. Culbertson, P. Stolka, A. M. Okamura. A Dual-Flywheel Ungrounded Haptic Feedback System Provides Single-Axis Moment Pulses for Clear Direction Signals, IEEE Haptics Symposium (HAPTICS) 2016, pp.7-13, 2016.