ゴルフスイングロボットに関する研究

-エネルギー制御を用いた運動軌道の生成-

Study on Golf Swing Robot -Motion Planning Based on Energy Control-

○学 山田 心也 (電通大院), 許 春権 (電通大院), 長谷川 雄一 (電通大), 正 明 愛国 (電通大)

Shinya YAMADA, Chunquan XU, Yuichi HASEGAWA, Aiguo MING

The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, Japan, 182-8585

Abstract- A golf swing robot which has a smart structure and enables high-speed swing based on dynamic coupling drive has been developed by authors. We have reported the feasibility of combining target dynamics and energy control to generate the golf swing trajectory from address position to impact position by now. In this paper, we apply the method to generate the whole swing trajectory and show its efficacy through experimental results.

Key words : golf swing robot, dynamic coupling drive, target dynamics, energy control

1. 諸言

近年, スポーツなどの高い運動仕様と高度な運動制御技術が必要とされる動作 (以後, ハイパーダイナミックマニピュレーションと呼ぶ) をロボットで実現するということが注目されている。著者らは, スポーツなどにおける人間のハイパーダイナミック動作として, ゴルフスイング動作を取り上げ, スマートな構造を活かす「干渉駆動による多段加速」を有効に利用した, 肩関節と手首関節の2関節からなるゴルフスイングロボットを開発した。

現在, 解析的方法として, ゴルフスイングロボットにエネルギー制御を導入した目標スイング運動軌道を生成する方法を研究しており, エネルギー制御をアドレスポジションからインパクトポジションまで導入していた [1]。本稿ではアドレスポジションからフィニッシュポジションまでエネルギー制御を導入して, 一連のスイング動作を実現することを目標としている。

2. ゴルフスイングロボットのモデル

ゴルフスイングロボットを2関節の剛体としてモデリングしたモデルを図1に示す。

運動方程式は各関節に働く粘性摩擦及びクーロン摩擦を無視すると式 (1) と表せる。

Fig.1: Model of Golf Swing Robot

$$\begin{aligned}\tau_1 &= M_{11}\ddot{\theta}_1 + M_{12}\ddot{\theta}_2 + h_{122}\dot{\theta}_2^2 + 2h_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + g_1 \\ \tau_2 &= M_{21}\ddot{\theta}_1 + M_{22}\ddot{\theta}_2 + h_{211}\dot{\theta}_1^2 + g_2\end{aligned}\quad (1)$$

l_{gi} : 関節 i からリンク i の質量中心までの長さ
 τ_i : 関節 i のトルク
 l_i : リンク i の長さ
 h_{ijj} : 重心加速度係数
 l_i : リンク i の重心周りのモーメント
 m_i : リンク i の質量
 M_{ij} ($i \neq j$): 相互慣性
 h_{ijk} ($i \neq j$): コリオリ加速度係数
 θ_i : 関節 i の角位置
 M_{ii} : 有効慣性
 g_i : 重力負荷

3. エネルギー制御

インパクトポジションとフィニッシュポジションにおけるエネルギーを目標値とし, フィードバックによりエネルギーを制御することで, ゴルフスイングロボットの目標運動軌道とフィードフォワードトルクを求めることを目標とする。そのため, 次に示す2つの方法を組み合わせて, エネルギーの目標値とスイングの境界条件を同時に満足させる。

3.1 ハミルトニアンシステムによる制御則

スイング運動軌道を得るために, ゴルフスイングロボットの力学的エネルギーに着目する。ゴルフスイングロボットのハミルトニアンシステムの表現式より, 閉ループ系を満たすためのフィードバック制御則は式 (2) となる [1]。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_p \bar{H} \dot{\theta}_1 + K_p \bar{H} \dot{\theta}_2 \\ K_p \bar{H} \dot{\theta}_1 - K_p \bar{H} \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}\quad (2)$$

ただし, $\bar{H} = H - H_d$

H : ハミルトニアン

H_d : 目標エネルギー

3.2 目標ダイナミクスによる制御則

目標ダイナミクス法 [2] とは, 所望される動作をダイナミクスで記述し, システムがその動特性を持つように制御することで, 動作を実現しようとするものである。

3.1 節よりゴルフスイングロボットの力学的エネルギーを目標値に収束させるだけでは, 境界条件を満たすスイング運動を得ることを保証できないので, スイングの軌道情報を目標ダイナミクスとして与え, ゴルフスイングロボットの仮想エネルギーを制御することで, 境界条件を満たすスイング軌道を得ることを目標とする。

ゴルフスイングは振り子運動に近いことに着目し, 目標ダイナミクスを調和振動とし, 図2のようにゴルフスイングロボットモデルの座標系を関節座標系から極座標系へ変換し仮想的に単振り子として見る。この仮想的な振り子のエネルギーをゴルフスイングロボットの仮想エネルギーとして導入することで, 目標ダイナミクスを式 (3) とする。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -K_e(E - E^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}\quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}\omega^2\theta^2\quad (4)$$

E : 仮想エネルギー

E^* : 仮想エネルギーの目標値

Fig.2: Transformation to imaginary pendulum

システムの出力が式 (3) の目標ダイナミクスをもつように制御するには式 (5) を満たす必要がある [1]. 式 (5) を満たすトルクの組み合わせは無数に存在する.

$$a_1 \tau_1 + a_2 \tau_2 = -\omega^2 \theta - K_e (E - E^*) \dot{\theta} + a_3 + a_1 N_1 + a_2 N_2 \quad (5)$$

3.3 ロボットの制御則

ゴルフスイングロボットの制御入力 (肩関節と手首関節のトルク) を求めるために, ハミルトニアンシステムによる制御則 (式 (2)) と目標ダイナミクスによる制御則 (式 (5)) を組み合わせて使用する. 具体的には式 (2) のハミルトニアン (H) を仮想エネルギー (E) に置き換えることで, 肩関節のトルクを得て, 式 (5) に代入して手首関節のトルクを得る. その結果, 式 (6) が得られる.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= -K_p (E - E^*) \dot{\theta}_1 + K_p (E - E^*) \dot{\theta}_2 \\ \tau_2 &= \frac{((- \omega^2 \theta - K_e (E - E^*) \dot{\theta} + a_3 + a_1 N_1 + a_2 N_2) - a_1 \tau_1)}{a_2} \end{aligned} \quad (6)$$

今回は, 目標エネルギーをインパクトポジションとフィニッシュポジションで次式のように定義しており, フィニッシュポジションで目標エネルギーを達成することで制御則を切り替えずに一連のスイング軌道の生成を行う.

$$E_i^* = \frac{1}{2} \frac{v^2}{l_1 + l_2} \quad (7)$$

$$E_f^* = \frac{1}{2} \omega^2 \theta_f^2 \quad (8)$$

E_i^* : インパクトポジションでの仮想エネルギーの目標値

E_f^* : フィニッシュポジションでの仮想エネルギーの目標値

θ_f : フィニッシュポジションでの仮想振り子の角度

4. 運動軌道の生成

Fig.3: Generation of the reference trajectory

アドレスポジションから, フィニッシュポジションまでのスイング軌道を式 (6) の制御則に基づいて, 計算する流れを図 3 に示す. 式 (6) において, スイング軌道を得るための 3 つのパラメータ ω, K_p, K_e を拘束条件と境界条件を評価関数として最適化計算によって求める. ただし, 仮想エネルギーの目標値は, インパクトポジションまではインパクトポジションでの仮想エネルギー, それ以降はフィニッシュポジションでの仮想エネルギーとなっている. 目標インパクトスピード 20[m/s] のエネルギーの変化の様子を図 4 に示す.

5. スイング実験

第 4. 章の方法を用いて, 得られたフィードフォワードトルクと目標スイング軌道を図 5 に示す制御系で構築され

Fig.4: Change of target and current pseudo energy

ているゴルフスイングロボットに与えてスイング実験を行った. 20[m/s] のスイング実験結果を図 6~図 7 に示す. ここで, 今回のケースではフィニッシュポジションでの仮想振り子の角度 $\theta_f = \pi$ とした.

スイング実験結果より, 干渉駆動を利用して目標ヘッドスピードを達成し, 目標スイング軌道に精度よく追従していることが分かる.

Fig.5: Control system of golf swing robot

Fig.6: Experimental result : Angular velocity

Fig.7: Experimental result : Torque

6. 結言

ゴルフスイング全過程にエネルギー制御と目標ダイナミクスを導入することで, 目標スイング軌道を生成する方法について検討した. また, 実験によりその有効性を確認できた.

参考文献

- [1] 長岡武治, 許春権, 明愛国, 下条誠: ゴルフスイングロボットに関する研究~エネルギー制御を導入した運動制御方法の検討~, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06, 1A1-E17, (2006.5)
- [2] 中西淳, 福田敏男, Daniel E.Koditschek: 解析的手法による 2 リンクブラキエーションロボットの制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp361-368, (1998).