

# 高速バッティングシステムによる打ち分け動作

○ 妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (東大) 石川 正俊 (東大)

## Spray Hitting Using a High-speed Batting System

○ Taku Senoo (Univ. of Tokyo) Akio Namiki (Univ. of Tokyo) Masatoshi Ishikawa (Univ. of Tokyo)

**Abstract:** Speeding up of robot motion provides not only improvement of operating efficiency but also dexterous manipulation taking advantage of unstable state or non-contact state. In this paper, a hybrid trajectory generator is presented in order to produce high-speed manipulation. This algorithm consists of both mechanical high-speed motion and sensor-based reactive motion. As an example of high-speed manipulation, a robotic ball control in batting task has been realized.

**Key Words:** *high-speed manipulation, robotic batting, visual feedback*

### 1 はじめに

マニピュレーション能力は腕や指を含めた運動機能だけでなく、視覚や触覚を中心とした感覚機能との協調によって生み出される。従来のロボットシステムは、アームやハンドなど運動系だけでなくセンサ処理まで含めた統合的な高速化が行われていないため、運動能力を十分に発揮できていなかった。

我々は高速マニピュレーションシステムの開発に加えて、運動速度と反応速度の両者の高速化を意識した動作戦略を提案し、高速バッティングタスクを実現してきた[1]。本稿では、このアルゴリズムを拡張することでボールを目標地点に打ち返す打ち分け動作について実験した。

### 2 打ち分け動作

#### 2.1 ハイブリッド軌道生成

ロボット自体にとって運動しやすいような滑らかな指令を生成することで素早い動作を獲得することがコンセプトである。そこで関節空間内で2つの動作軌道を考える。1つはスウィング動作 (SW モード) であり、対象の動きに依存せず高速に運動する動作である。これを時間関数の軌道として表す。もう1つはヒッティング動作 (HT モード) であり、視覚フィードバック制御でマニピュレータの軌道をリアルタイムで補正する。これはマニピュレータの軌道をセンサ情報からダイレクトに決定することに対応し、対象の位置の関数として表す。結果として両者を組み合わせた軌道生成関数は

$$q = f(p_o, t) \quad (1)$$

と表される。ここで  $p_o \in \mathbb{R}^3$  は対象の位置、 $t$  は時間である。

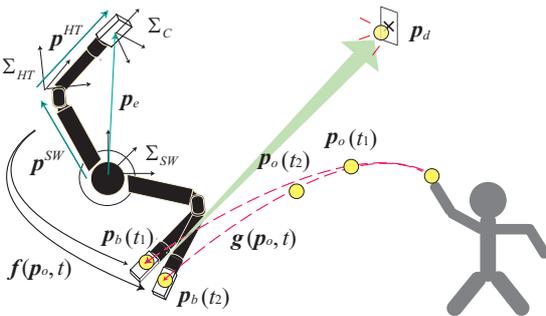


Fig. 1 Ball control in batting task

本稿では、軌道生成関数  $f$  として時間の多項式を取り上げる。

$$q = \sum_i k_i t^i \quad (2)$$

そして各自由度に対して SW モードあるいは HT モードを分散して制御することにし、係数  $k_i$  を以下のように表現する。

$$k_i = \begin{cases} k_i^{SW} = constant & \text{Swing mode} \\ k_i^{HT}(p_o) & \text{Hitting mode} \end{cases} \quad (3)$$

シリアルリンク構造において手先速度を大きくするには、台座側の関節速度を大きくした方がよい。また手先側の自由度の方が慣性負荷が小さい分、未知な対象の運動に追従しやすい。そこで SW モードの自由度を根元近くに、HT モードの自由度を手先近くに集中させる。すると、手先位置  $p_e \in \mathbb{R}^3$  は次式で表される。

$$p^{SW} + {}^S T_H p^{HT} = p_e \quad (4)$$

ただし、 $p^{SW} \in \Sigma_{SW}$ 、 $p^{HT} \in \Sigma_{HT}$  はそれぞれの座標系で表現されたベクトルであり、 ${}^S T_H(q^{SW}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は姿勢変換行列である (図 1)。ここで順運動学演算を  $l$  とすると、姿勢  $\phi_e \in \mathbb{R}^3$  を含めた手先ベクトル  $r_e^T = [p_e^T \ \phi_e^T] \in \mathbb{R}^6$  は以下のように表現される。

$$r_e = l(q) \quad (5)$$

#### 2.2 バッティングアルゴリズム

次のステップ (i)~(iii) をサイクルタイム (1 ms) 毎に繰り返すことで、アームの軌道を決定する。(i) ボールの位置  $p_o$  を計測する。(ii) それに対して関数  $g(p_o, t)$  で衝突時の打撃位置姿勢  $r_b(t) \in \mathbb{R}^6$  を生成する。(iii) その打撃点を境界条件とするアームの軌道  $q$  を決定する。

打撃位置に関しては、以下の拘束条件を満たす関数によって生成する。

$$g(p_o, t_b) = p_o(t_b) = p_e(t_b) \quad (6)$$

これは、打撃時刻  $t = t_b$  に手先位置とボール位置と打撃点が一一致することを表している。本実験では逐次最小二乗法によりボールの推定軌道とした。

打撃姿勢を決定するために、球状ボールと平面バットの衝突モデルについて考える。衝突時における摩擦力および垂直抗力の力積をそれぞれ  $F, R \in \mathbb{R}^3$ 、衝突前後のボー

ル速度と角速度をそれぞれ  $v, v' \in \mathbb{R}^3$ ,  $\omega, \omega' \in \mathbb{R}^3$  と表すと、運動量・角運動量保存則は以下のように表される。

$$m(v' - v) = \bar{F} + \bar{R}, \quad I(\omega' - \omega) = d \times \bar{F} \quad (7)$$

ここで  $m$  はボールの質量,  $I = \frac{2}{5}ma^2$  は慣性モーメント,  $d \in \mathbb{R}^3$  は衝突点からボールの質量中心に向かうベクトルであり,  $a = \|d\|$  である。また衝突において滑りが生じないとすると、反発の法則は以下のように書ける。

$$v' = \omega' \times d - e \frac{v \cdot d}{\|d\|^2} d \quad (8)$$

ここで  $e$  は反発係数である。バットに固定された座標系  $\Sigma_C$  の  $z$  軸をバットの法線方向にとると、式 (7)(8) より衝突直後のボール速度は以下のように計算される。

$$v'_x = \frac{2}{7}(a\omega_y + \frac{5}{2}v_x), \quad v'_y = \frac{2}{7}(-a\omega_x + \frac{5}{2}v_y) \quad (9)$$

$$v'_z = -e v_z$$

本実験では半径  $a = 0.05$  m のボールを使用したので角速度  $\omega$  が与える影響は速度  $v$  より十分小さいとして  $v' = Kv$ ,  $K = \text{diag}(\frac{5}{7}, \frac{5}{7}, -e)$  と近似した。衝突直後のボールの運動を直線運動と仮定すると、アームの姿勢が次式を満たすときにボールが目標地点  $p_d \in \mathbb{R}^3$  の方向に飛んでいく。

$${}^S T_C K v \times (p_d - p_b) = 0 \quad (10)$$

ここで  ${}^S T_C(q)$  は座標系  $\Sigma_C$  から  $\Sigma_{SW}$  への回転行列であり、これより打撃姿勢  $\phi_b$  が計算される。

スウィング開始時刻を  $t = 0$  とすると、関節軌道は以下の境界条件を満たすように決定される。

$$q(0) = q_s, \quad q(t_b) = q_b = l^{-1}(r_b) \quad (11)$$

ただし  $q_s$  は初期関節角,  $q_b$  は打撃時の関節角である。軌道係数  $k_i$  は  $q_s, q_b$  および任意のベクトル  $c$  を用いて  $k_i(q_s, q_b, c)$  と表現できる。

SW モードの打撃時の関節角  $q_b^{SW}$  は

$$q_b^{SW} = A l^{-1}(\hat{r}_b(0)) \quad (12)$$

によって求める。ここで  $A = [E_{n_s} \ 0] \in \mathbb{R}^{n_s \times n}$ ,  $E_{n_s} \in \mathbb{R}^{n_s \times n_s}$  は単位行列である。このように値を決定することで、定数  $k_i^{SW}$  は試行毎に各々のボール軌道に適した値として設定される。時刻  $t$  における HT モードの打撃時の関節角  $q_b^{HT}$  は、式 (4)(10) より

$$l_{HT}(q_b^{HT}) = {}^S \hat{T}_H^{-1}(\hat{p}_b(t) - \hat{p}^{SW}) \quad (13)$$

$${}^H \hat{T}_C(q_b^{HT}) = \alpha {}^S \hat{T}_H^{-1}(p_d - \hat{p}_b(t))(K\hat{v})^+ \quad (14)$$

を満たす値となる。ここで  $l_{HT}$  は座標系  $\Sigma_{HT}$  における HT モードの順運動学演算,  $\alpha$  は規格化定数,  ${}^H T_C(q^{HT}) = {}^S T_H^{-1} {}^S T_C$  である。また,  $+$  は擬似逆行列を表している。

また任意のベクトル  $c$  を、対象の変動に追従する余力を残した範囲内で高速動作となるように設定する [1]。これにより軌道係数  $k_i(q_s, q_b, c)$  は決定される。

### 3 実験

視覚系は列並列ビジョンシステム (CPV) を搭載した 2 自由度アクティブビジョンである。領域分割・モーメント検

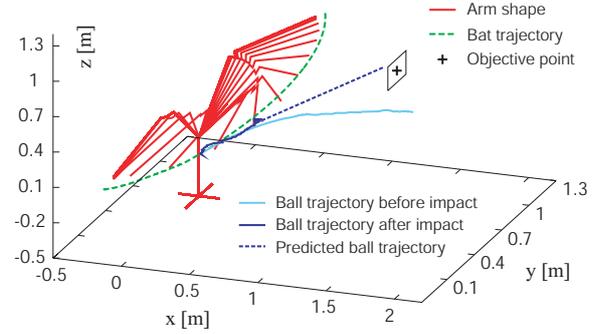


Fig. 2 Batting motion



Fig. 3 Continuous sequence of pictures

出などの視覚処理を 1 kHz 以上で実現する能力を持つ。運動系はワイヤ駆動のマニピュレータ (Barrett Technology Inc.) に手先の旋回軸を付加した 5 軸マニピュレータである。高出力・低減速なアクチュエータを用いることで、最高加速度  $58 \text{ m/s}^2$  の高速な動作を実現している。

マニピュレータに向かって 2.3 m 離れた位置から人間がボールを投げた。打撃時間を  $t_b = 0.25$  s と設定した。Fig.2 に、ボールの軌道とそれに対するアームの動きを示す。ボールを  $x = 2.1$  m の位置から認識し始め、打撃点でバットと衝突して目標点の方向に跳ね返されている様子がわかる。Fig.3 に 132 ms 間隔の連続写真を示す。

### 4 まとめ

ハイブリッド軌道を拡張することで、高速バッティングシステムによる打球方向の制御をおこなった。今後の課題は、ハンドとアームの協調を利用した器用な高速マニピュレーションを実現することである。

### Reference

- [1] 妹尾, 並木, 石川. 高速ロボットシステムによるバッティングタスクの実現. 第 10 回ロボティクスシンポジウム, 講演論文集, pp.75-80.