

# 高速バッティングシステムによる打球方向の制御

○ 妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (東大) 石川 正俊 (東大)

## Directional Control of a ball using a High-speed Batting System

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

**Abstract:** We have achieved a high-speed robotic batting task as an example of dynamic manipulation. In this batting algorithm, a hybrid trajectory generator was proposed in order to achieve both rapidity of swing and accuracy of hitting. This function is composed of both visual information and time variable. In this paper the directional control of a ball with the above strategy is verified by computer simulation.

**Key Words:** robotic batting, directional control, visual feedback

### 1 はじめに

従来のロボットマニピュレーションは静的あるいは準静的な操り動作が多く、低速の作業が中心に行われてきた。その理由としては、動的なマニピュレーションを行うのに十分な能力（運動速度やセンシング速度）を、従来のシステムが持っていなかったことが挙げられる。そのため、打つ・投げる・回すなど対象との間に生じるダイナミクスを積極的に利用した高速動作を実現するのは困難であった。

これに対して我々は、高速ロボットシステムを構築することでバッティング [1] やキャッチング [2] などのダイナミックマニピュレーションの研究を行ってきた。本稿では、ランダムに投げられたボールを狙った場所に打ち返すバッティング動作について考察し、シミュレーションをおこなった。

### 2 打撃動作

#### 2.1 衝突モデル

ボールとバットの衝突時において次の仮定をおく。

- (i) 衝突時間は十分に小さく、外力（重力）が関与する力積は 0 と近似する。
- (ii) ロボットの剛性は対象のそれに比べてかなり大きい。
- (iii) 点接触をし、クーロン摩擦のみを考える。
- (iv) 回転速度は考慮しない。

衝突直前のバットとボールの速度を  $V, v$ 、衝突直後の速度を  $V', v'$  とする。衝突時にロボットが対象に加える垂直抗力を  $f_N$  とすると、摩擦力  $f_F$  は相対速度を減じる方向に働くことから

$$f_F = -\mu \|f_N\| \frac{\xi}{\|\xi\|} \quad (1)$$

$$\xi = (v - V) - \{(v - V) \cdot f_N\} \frac{f_N}{\|f_N\|^2} \quad (2)$$

となる。 $\xi$  は、相対速度  $v - V$  の垂直抗力  $f_N$  に垂直な成分である。すると、対象に加わる力  $f$  は

$$\begin{aligned} f &= f_F + f_N \\ &= -\mu \|f_N\| \frac{\xi}{\|\xi\|} + f_N \end{aligned} \quad (3)$$

である。運動量保存則と反発の法則より次式が成り立つ。

$$\int_{\Delta t} f dt = -M(V' - V) = m(v' - v) \quad (4)$$

$$-e(V - v) \cdot f_N = (V' - v') \cdot f_N \quad (5)$$

ここで、 $M, m$  はバットとボールの質量、 $e$  は反発係数である。仮定 (ii) より  $M \rightarrow \infty$  とすると、式 (4)(5) より衝突直後の速度はそれぞれ

$$v' = v + (1 + e)\{(V - v) \cdot f_N\} \frac{f}{\|f_N\|^2} \quad (6)$$

$$V' = V \quad (7)$$

となる。

#### 2.2 ハイブリッド軌道生成

ボールの速度に関わらず高速なスウィングを実現するために、バットを素早く振り切る高速な動作とバットの芯で捉える正確な動作を統合するリアルタイム軌道生成アルゴリズムを採用する [1]。

前者のスウィング動作 (SW モード) としては時間関数で表される軌道として与えることにした。後者のバッティング動作 (HT モード) は、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ようにした。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現される。結果として両者を組み合わせた軌道生成関数は

$$q = f(r_o, t) \quad (8)$$

と表される。ここで  $r_o$  は対象の位置、 $t$  は時間である。

よって、SW モードと HT モードの関節変数は以下のようになる。

$$q = \begin{cases} q^{SW}(t) & \text{Swing mode} \\ q^{HT}(r_o, t) & \text{Hitting mode} \end{cases} \quad (9)$$

ここで HT モードに時間変数が入っているが、これは現在の時刻において SW モードの関節がどのように動いて

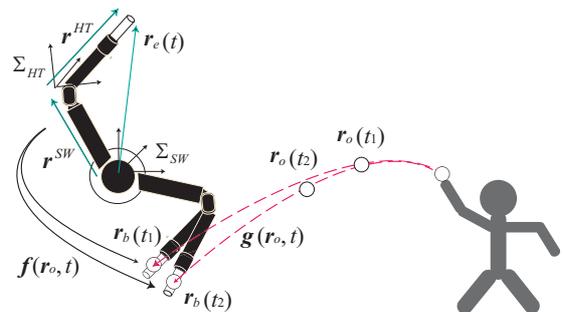


Fig. 1 Batting task

いるか把握するための項であり、SW モードの時間変数とは意味が異なることに注意する。

ここでは、軌道生成関数  $f$  として時間の多項式を取り上げる。

$$q = \sum_i k_i t^i \quad (10)$$

式 (9) に基づくと、係数  $k_i$  は次のようになる。

$$k_i = \begin{cases} k_i^{SW} = \text{constant} & \text{Swing mode} \\ k_i^{HT}(r_o) & \text{Hitting mode} \end{cases} \quad (11)$$

よって、軌道を決める問題は係数  $k_i$  を求める問題に帰着する。この係数の具体的な決め方は次節で述べる。

### 2.3 バッティングアルゴリズム

アームの軌道を次のように決定する。まずはボールの位置  $r_o$  を計測し、それに対して関数  $g(r_o)$  で打撃点  $r_b(t)$  を生成する。そして、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。この操作をサイクルタイム (1 ms) 毎に繰り返すことで、打撃が可能となる (図 1 参照)。

今、SW モードの自由度をベース座標近くに、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  $r_e$  は次式で表される。

$$r^{SW} + T r^{HT} = r_e \quad (12)$$

ただし、 $r^{SW} \in \Sigma_{SW}$ 、 $r^{HT} \in \Sigma_{HT}$  はそれぞれの座標系で表現されたベクトルであり、 $T = T(q^{SW}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は姿勢変換行列である。

動作開始時刻を  $t = 0$ 、打撃時刻を  $t = t_b$  とする。関節角に関する拘束条件は次式となる。

$$q(0) = q_s, \quad q(t_b) = q_b = l^{-1}(r_b) \quad (13)$$

ただし、 $q_s$  は初期関節角、 $l$  は順運動学演算である。

衝突直後の目標ボール速度を  $v_d$  とすると、式 (6) より衝突時のアーム関節角速度  $q_v = J^+ V$  が計算できる。ここで  $J = \partial l / \partial q$  はヤコビアンである。この  $v_d$  を適切に設定することで打球方向の制御が可能となる。関節角速度に関する拘束条件は次式となる。

$$\dot{q}(t_b) = q_v \quad (14)$$

また、打撃点生成関数に関する拘束条件は

$$g(r_b)|_{t=t_b} = r_e = r_o \quad (15)$$

となる。これは、打撃時刻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。

つまり、SW モードの軌道係数  $k_i^{SW}$  は

$$q^{SW}(t_b) = q_b^{SW}(r_b(0)) \quad (16)$$

によって求まる。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なる。時刻  $t$  における HT モードの軌道係数  $k_i^{HT}$  は

$$q^{HT}(t_b) = l_{HT}^{-1}(T^{-1}(r_b(t) - r^{SW}(t))) \quad (17)$$

によって求まる。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である。

以上より、マニピュレータの軌道が決定する。

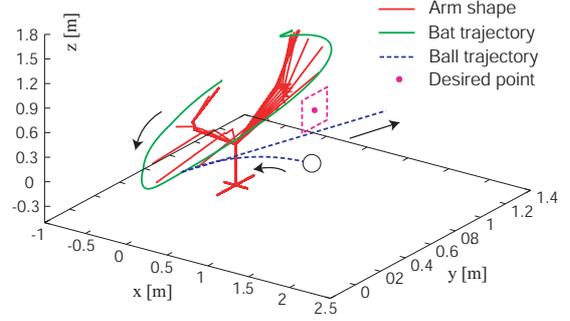


Fig. 2 Batting motion

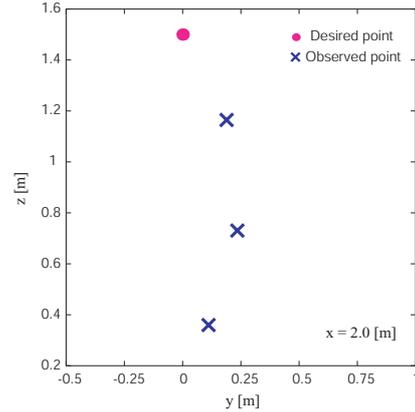


Fig. 3 Passing point on the plane  $x=2.0$

## 3 シミュレーション

4 自由度のマニピュレータの手先に、仮想 2 自由度の円柱バットを追加した計 6 自由度のアームとしてシミュレーションした。2 自由度を SW モードに、4 自由度を HT モードに対応させた。衝突後のボールは等速直線運動をすると仮定し、 $v_d \cdot (R - r_b) = 0$  を満たすように  $v_d$  を選んだ。ここで  $R$  は狙い打ちをする目標点である。また、打撃時間を  $t_b = 0.23$  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。2 m 離れた位置からボールが投げられて、打撃点でバットと衝突し、目標点の方向に跳ね返されているのがわかる。

Fig.3 は、異なるボール軌道に対して同一の目標点へ狙い打ちしたときの結果を表している。横方向のずれは 20 cm 前後であるが、高さ方向のずれは 1 m 程度ある。これは、ボールを跳ね返す方向に大きく影響する 2 つの要因 (接触面法線およびアーム手先速度) が、アームの微かな制御誤差に対して大きく変動するためと考えられる。

## 4 まとめ

高速バッティングシステムによる打球方向の制御についてシミュレーションを行い、検討した。今後の課題は、誤差にロバストな軌道へ改良することや、実システムによる実験を行うことである。

## References

- [1] 妹尾, 並木, 石川. 高速バッティングロボットシステムの性能評価. 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, 1D25, 2004.
- [2] 並木, 今井, 石川. 高速多指ハンドによる能動的捕獲戦略. ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-L1-9, 2004.