

# 多関節マニピュレータを用いた高速打撃動作の研究

○ 妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (東大/JST) 石川 正俊 (東大)

## High-speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator

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

**Abstract:** In this paper a robotic batting algorithm using a high-speed arm and a high-speed stereo vision is proposed. In this strategy a desired trajectory of a manipulator is generated so that both high-speed swing motion and tracking motion to meet the ball squarely with the bat. As a result a manipulator can follow the ball while swinging a bat at high speed if some prediction errors occur. Experimental results are shown in which a high-speed manipulator hits the ball thrown by a human.

**Key Words:** *batting, multi-jointed manipulator, visual feedback*

### 1 はじめに

人間が何らかのタスクを行うとき、「速く・正確に」行うことは一つの評価基準となる。ロボットにしても同様であり、この両者が高精度で実現されることが望まれる。しかし対象の動きが未知な場合、高速にセンシング・マニピュレーションや計算処理ができなければ、そもそも正確な動作は実現できない。よってシステム全体に高速性が要求される。そこで、高速性に重点を置いた捕球動作の研究が行われてきた [1]。これは従来の予測を用いて遅れを補償するアプローチに対して、視覚フィードバックを 1 kHz に高速化することで遅れの問題を解決する。こちらの方がシンプルかつ有効な方法であると考えられる。

以上の背景のもと、本稿では高速性と視覚フィードバックに重点を置いたタスクとして野球のバッティングを取り上げ、システムの高速性を利用したバッティングアルゴリズムを提案する。4 軸マニピュレータを用いて実験を行い、その有効性を示す。

### 2 打撃動作

#### 2.1 打撃戦略

バッティングではボールに速度を与えることとバットの芯で捉えることが重要である。文献 [1] の捕球動作では、時間を陽に含まない形で視覚情報からダイレクトに目標軌道を生成する方法でタスクを実現している。この方法は対象の位置から手先の位置が一意に決まり、対象に合わせた動作が容易となるが、バッティングにおいてはボールの速度に関わらずバットを高速に振り切ったほうがボールに速度を与えられるためこの方法だけでは不

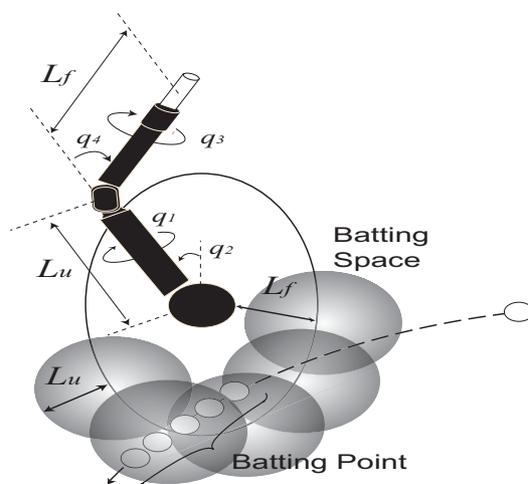


Figure 2 Coordinate system

十分である。そこで、バットを高速に振り切る動作とボールを芯で捉える動作を分離した形のアルゴリズムを提案する。

#### 2.2 バッティングアルゴリズム

簡略化のために、アームにバットを固定して実験を行った。つまり、アームの先端でボールを打つことに相当する。

マニピュレータは肩・肘関節にそれぞれ旋回と屈曲の自由度 (関節角  $q \in \mathbb{R}^4$ ) を持ち、上腕ベクトルと前腕ベクトルを  $r_u \in \mathbb{R}^3, r_f \in \mathbb{R}^3$  とする。ただし  $L_u = \|r_u\|$  は上腕長、 $L_f = \|r_f\|$  は肘からバットの芯までの長さとする。バッティングとは、ある時刻  $t = t_b$  においてバットの位置とボールの位置  $r_o = r_b \in \mathbb{R}^3$  が一致することであり

$$r_u + r_f = r_b \quad (1)$$

と書ける。また打撃時の条件を、ボールを投げる方向 ( $x$  方向: 単位ベクトル  $e_x$ ) と前腕ベクトルが直交することと設定し、次式で表す。

$$r_f \cdot e_x = 0 \quad (2)$$

つまり、次式の平面上でバットとボールが衝突する。

$$x = r_b \cdot e_x \quad (3)$$

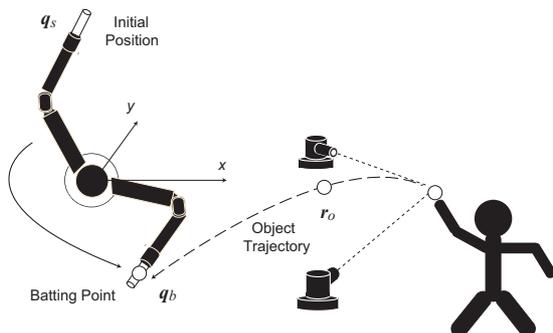


Figure 1 Batting task

式 (2) より打撃時にバットの芯が取りうる空間は、平面  $x = 0$  上において肩関節を中心とした半径  $L_f$  の円を考え、この円上の各点を中心とした半径  $L_u$  の球面が埋め尽くす空間となる。以後、この空間を「打撃空間」と呼ぶことにする。ボールが打撃空間を横切るとき打撃空間内のどの位置でも打撃可能となるが、このうち打撃を行う1点「打撃点」 $r_b$  を選ぶ必要がある。今回の実験では、ボールの位置から逐次最小自乗近似により予測軌道を求め、この軌道が打撃空間と交わる曲線上のうち  $q_2 = q_{s2}$  を満たす点を打撃点として選んだ。ただし、 $q_s$  は初期関節角である。打撃点が決まれば、式 (1)(2) より打撃時の関節角  $q_b$  が一意に求まる。ボールが打撃点に到達するまでの到達予測時間を  $t = t_p$  としたとき、 $t_p \leq t_b$  ならバットを振り始め、 $t_p > t_b$  なら以後のサイクルは  $t_p < t_b$  となるまで  $r_o, r_b, q_b$  の計算を繰り返す。

バットの位置・速度・加速度を連続的に与えるため、打撃軌道を関節角上で5次関数によって与える。

$$q(t) = \sum_{i=0}^5 k_i t^i \quad (4)$$

スウィングを開始した時間を  $t = 0$  とすると、境界条件は次式ようになる。

$$q(0) = q_s, \quad q(t_b) = q_b \quad (5)$$

バットを振り始めてからボールに当たるまではボールの予測軌道・打撃点の補正を行い、多少の予測誤差に対してもバッティングができるようにする。前腕は上腕に比べて慣性が小さく、高速にスウィングしている最中でも多少の補正に対して追従できるため、肘関節のみ関節角指令の補正を行う。補正した予測軌道と平面 (3) が交わる点を新たな打撃点  $r_{b'}$  とし、ここを通過するようにアームの軌道を修正する。

$$k_i = \begin{cases} k_i(r_{b'}) & \text{elbow-joint} \\ \text{constant} & \text{shoulder-joint} \end{cases} \quad (6)$$

つまり、アームの高速性を利用して  $t_b$  を短くできることから  $t_p$  は誤差がないと仮定し、 $r_b \neq r_{b'}$  でもバットの芯からはずれた場所でバッティングを行うことができる。また式 (6) より、肩関節はボールの位置に依存せずバットを高速に振り切る動作、肘関節は視覚フィードバックによりボールをバットの芯付近に当てる動作に寄与することがわかる。

打撃後のスウィングも同様にして関節角上で5次関数により与え、滑らかに停止するようにした。

### 3 実験

実験システムとして高速アームと高速ビジョンシステム CPV-II を用いた [2]。アームは、ワイヤ駆動の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とともに、全アクチュエータを台座付近に配置して手先慣性を小さくすることで、最高速度 6 m/s の高速な動作を実現している。CPV-II は領域分割・モーメント検出などの視覚処理を 1 ms で実現する能力を持つ。CPV-II に取り付けられているアクティブビジョンはチルト・パンの2自由度を持ち、高速に移動する物体に対しても十分な追従能力を持つ。

約 2.5 m 離れた位置から半径 4.5 cm のプラスチックボールをアームに向かって人間が投げた。アクティブビ

ジョンの視野制限によりボールを認識できる時間は 0.3 ~ 0.4 s 程度なので、あらかじめテイクバックした状態から振り切るという動作を行った。また、センサが情報を取得してからアームのアクチュエータに指令を与えるまでのサイクルタイムは 1 ms、 $t_b = 0.23$  s と設定した。

Fig.3 に、バッティングの様子を 20 ms 間隔の連続写真で示す。ボールの速度は約 6 ~ 8 m/s であり、バットの速度は約 5 m/s である。高速アームでは  $t_b$  を短くでき、また高速ビジョンでは  $r_o$  が高速に計算できることから打撃点の補正がうまくいき、結果として高速にスウィングしながらバットの芯付近に当てることに成功している。

### 4 まとめ

高速性を利用したバッティングアルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を確認した。今後の課題としては、アームのダイナミクスを考慮した目標軌道・打撃点の選定の見直し・打撃直後のボール速度ベクトルの制御などを考えている。

### References

- [1] 並木, 石川. 視覚情報から運動指令へのダイレクトマッピングによる捕球動作の実現. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-1F-C5, 2003.
- [2] 並木, 中坊, 石川. 高速視覚を用いたダイナミックマニピュレーションシステム. 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, pp. 389-390, 2001.

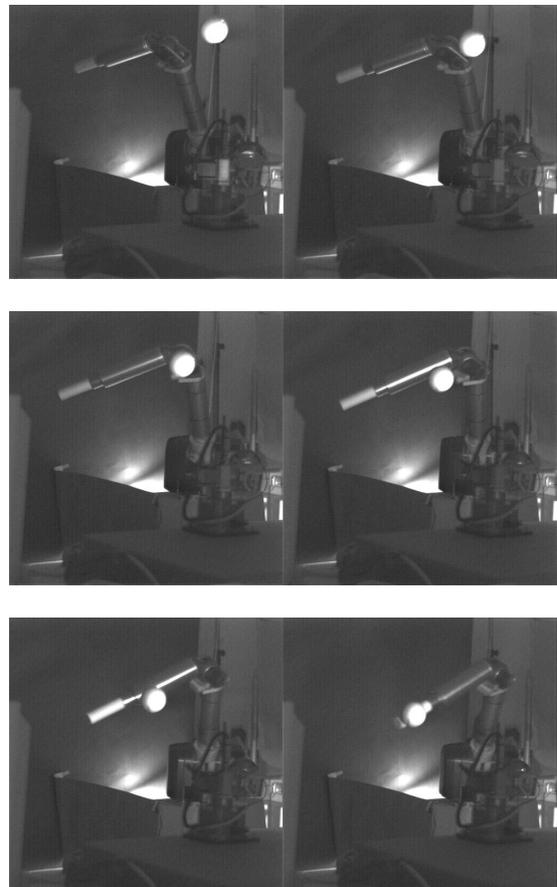


Figure 3 Continuous sequence of pictures