

高速バッティングロボットシステムの性能評価

妹尾 拓 (東大) 並木 明夫 (東大) 石川 正俊 (東大)

Performance Evaluation of a High-speed Robotic Batting System

*Taku SENOO (Univ. of Tokyo), Akio NAMIKI (Univ. of Tokyo),
Masatoshi ISHIKAWA (Univ. of Tokyo)

Abstract— Our group has developed a vision system with a sampling rate higher than 1kHz. This technique was applied to a sensory-motor fusion system to produce high-speed manipulation. We have realized high-speed robotic batting as an example. In this algorithm, in order to achieve both rapidity of swing and accuracy of hitting, a hybrid trajectory generator of both visual information and the time variable function is proposed. In this paper performance evaluation based on manipulator dynamics for high-speed batting is analyzed.

Key Words: robotic batting, visual feedback, performance evaluation

1. はじめに

従来のロボットはセンシング速度および運動速度が不十分であったので、高速に動く対象に対するマニピュレーションは困難であった。これに対して我々は、サンプリングレートが 1 kHz 以上のビジョンシステムを開発し [3]、視覚情報をロボット制御のサーボループに組み込むことで高い応答性能の行動制御を可能とした [4][5][6]。このような動的マニピュレーションの一例としてバッティング動作を取り上げ、研究を行ってきた [1][2]。バッティング動作では、高速かつ正確なスウィングを実現するために、対象の特徴量と時間変数を陽に組み込んだハイブリッドな軌道生成アルゴリズムが提案されている。本稿では、このリアルタイムに生成されるアームの軌道が打撃点の変動に対してどの程度追従可能かをダイナミクスの観点から解析した。

2. システム構成

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。CPV は PD(photo detector) と PE(processing element) で構成されている。PD の解像度は 128×128 画素・8 bit 階調であり、



Fig.1 System configuration

この出力を 128 列並列に PE に転送する。並列に視覚処理ができるため、領域分割・モーメント検出などの視覚処理を 1 kHz 以上で実現する能力を持つ。アクチュエータ部は、チルト・パンの 2 自由度を持つ DD モータからなり、高速に移動する物体に対しても十分な追従能力を持つ。

運動系はワイヤ駆動の 4 軸マニピュレータである (Barrett Technology Inc.)。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を持っている。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・最高加速度 58 m/s² の高速な動作を実現している。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。

図 1 にシステムの構成を示す。

3. 打撃動作

3.1 打撃戦略

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提案する。

前者のスウィング動作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。後者のヒッティング動作は、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

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

と表される。ここで ξ は対象の位置、 t は時間である。

バッティングタスクでは、この軌道生成関数を各軸に分散して実装することより、高速かつ正確で滑らかなスウィングを実現している。

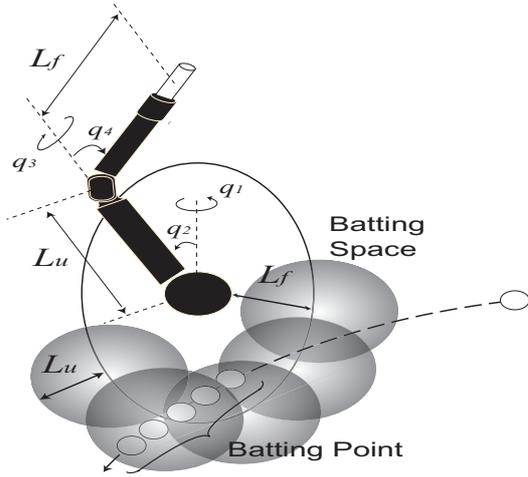


Fig.2 Batting space and batting point

3.2 パッティングアルゴリズム

ビジョンによりボールの位置 $r_o \in \mathbb{R}^3$ が認識され、アームの目標関節角 $q_d \in \mathbb{R}^4$ が計算される。実際の関節角 $q \in \mathbb{R}^4$ は適切な制御器によって q_d に追従するように制御されるものとする。以後、 $q = q_d$ と仮定する。

上腕ベクトルと前腕ベクトルを $r_u \in \mathbb{R}^3, r_f \in \mathbb{R}^3$ で表す。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。パッティングとは、ある時刻 $t = t_b$ においてバットの位置とボールの位置がある打撃点 $r_b \in \mathbb{R}^3$ で一致することであり

$$r_u + r_f = r_b \quad (2)$$

と書ける。また打撃時の条件を、ボールが飛んでくる方向 (x 方向: 単位ベクトル $e_x \in \mathbb{R}^3$) と前腕ベクトルが直交することと設定して次式で表す。

$$r_f \cdot e_x = 0 \quad (3)$$

バットとボールが衝突するときに、前腕は次式で表す平面内にある。

$$x = r_b \cdot e_x \quad (4)$$

式 (2)(3) より打撃時にバットの芯が取りうる空間 S は、次式ようになる。

$$C = \{r \mid \|r\| = L_f, r \cdot e_x = 0\} \quad (5)$$

$$S = \{r \mid \|r - r'\| = L_u, r' \in C\} \quad (6)$$

以後、この空間 S を打撃空間と呼ぶことにする。 q の自由度が 4 なので、 S は 3 次元の領域になる。ボールが打撃空間を横切るときにはいつでも打撃可能となる。ここでは簡単のため関節の自由度を 1 つ固定して打撃点を一意に定める。具体的には 2 軸を固定した。図 2 に打撃空間と打撃点の関係を示す。

打撃軌道は、バットの位置・速度・加速度を連続的に制御するために関節角において 5 次関数で与える。

$$q(t) = \sum_{i=0}^5 k_i t^i \quad (7)$$

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。

$$q(0) = q_s, \quad q(t_b) = q_b \quad (8)$$

ただし、 q_s は初期関節角である。

バットを振り始めてからボールと衝突するまではボールの軌道・打撃点の補正を逐次行う。肩関節は高速スウィング動作に、肘関節はビジュアルフィードバックによるヒッティング動作に対応させた。補正したボールの軌道と平面 (4) 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。ここで新たな打撃点 $r_{b'}$ に対応する関節角ベクトルを $q'_b \in \mathbb{R}^4$ とすると、 k_i は $q(t_b) = q'_b$ を満たすように補正される。つまり k_i は、肩関節では $t = 0$ に決まる定数であり、肘関節では $r_{b'}$ に関する非線形関数となる。

$$k_i = \begin{cases} k_i(r_{b'}) & \text{elbow-joint} \\ \text{constant} & \text{shoulder-joint} \end{cases} \quad (9)$$

打撃後のスウィングも同様にして関節角において 5 次関数で与えて滑らかに停止するようにした。

詳細は文献 [1][2] を参照のこと。

4. 実験

4.1 実験設定

図 3 のように約 2.5 m 離れた位置から半径 4.5 cm の発泡スチロールのボールをアームに向かって人間が投げた。ボールの速度は 6~8 m/s であり、バットの速度は約 5 m/s である。また、打撃時間を $t_b = 0.23$ s と設定した。

4.2 実験結果

図 4 に関節角の時間応答を示す。高速な視覚フィードバックにより、 r_b に基づく目標軌道が $r_{b'}$ に基づく目標軌道に補正され、かつ高速アームが補正された軌道に追従していることがわかる。

図 5 にボールとアームの 3 次元的な動きを示す。視覚フィードバックによる打撃点の補正により、打撃点で正確にボールと衝突していることがわかる。また、図 6 にパッティングの様子を 30 ms 間隔の連続写真で示す。

成功率は約 90% であり、この結果の動画は本研究室のウェブサイト [7] から見る事ができる。

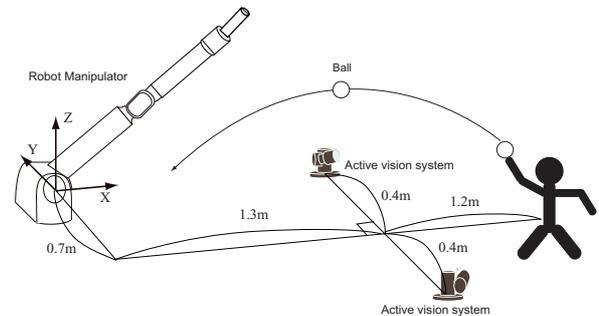


Fig.3 Experimental configuration

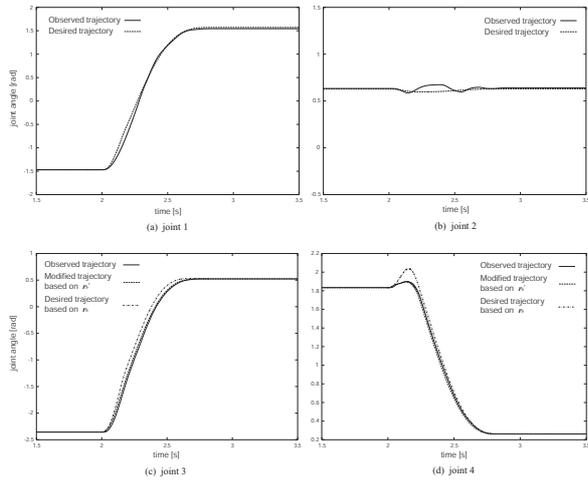


Fig.4 Time response of joint angles

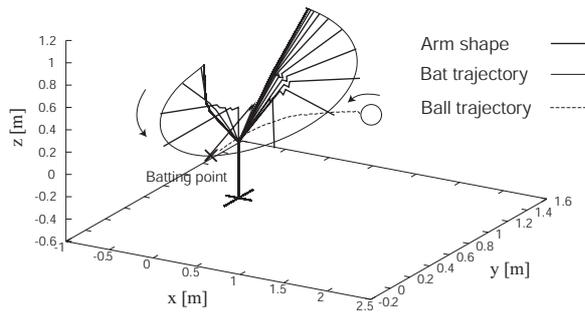


Fig.5 Batting motion

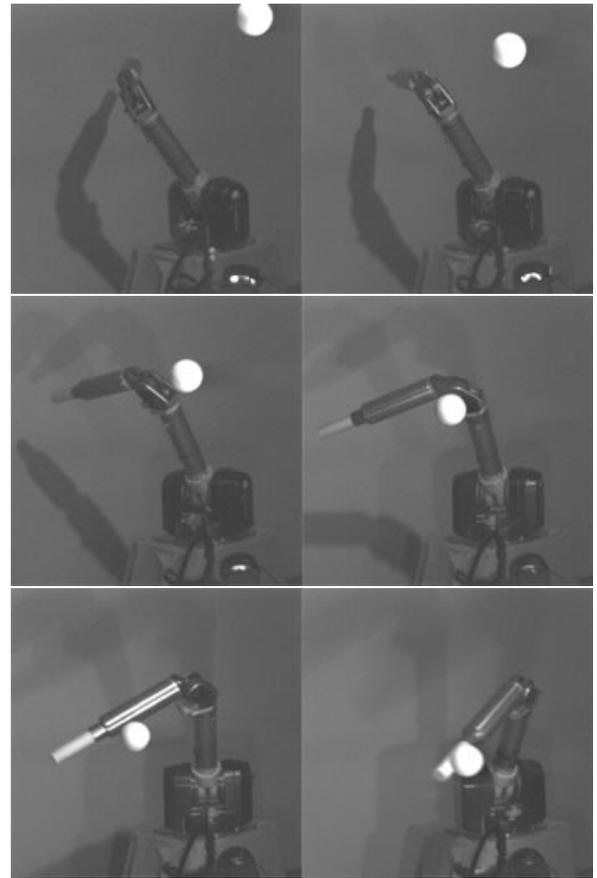


Fig.6 Continuous sequence of pictures

5. 解析

アームがスイングを開始するための打撃点領域と、スイング開始後のアームの追従可能性をダイナミクスの観点から考察する。

5.1 打撃曲面

打撃空間 S に条件 $q_2 = q_{s2}$ という条件を付与すると、打撃空間 S は次の打撃曲面 S' になる。

$$C' = \{r \mid \|r - (0, 0, L_u \cos q_2)\| = L_f, x = 0\} \quad (10)$$

$$S' = \{r \mid \|r - r'\| = L_u \sin q_2, r' \in C'\} \quad (11)$$

これは幾何学的な拘束条件から決まる領域であり、図7の青色の曲面となる。

一方、ロボットの運動学的・動力的な制約条件は

$$q_{min} \leq q \leq q_{max} \quad (12)$$

$$\omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max} \quad (13)$$

$$\tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (14)$$

と表される。 $q_{min}, q_{max} \in \mathbb{R}^4$ は関節角度の最小値と最大値、 $\omega_{min}, \omega_{max} \in \mathbb{R}^4$ は関節速度の最小値と最大値、 $\tau_{min}, \tau_{max} \in \mathbb{R}^4$ は関節トルクの最小値と最大値である。ここで、関節角 q は式(7)として、また関節角速度 $\omega \in \mathbb{R}^4$ と関節トルク $\tau \in \mathbb{R}^4$ は

$$\omega = \dot{q} \quad (15)$$

$$\tau = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) \quad (16)$$

として計算する。 $M(q) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ は慣性項、 $h(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^4$ は遠心・コリオリ項、 $g(q) \in \mathbb{R}^4$ は重力項である。この制約条件を適用し、実際にバットが到達できる領域を調べると打撃曲面は図7の赤色の領域となる。以後、この領域をストライクゾーンと呼ぶ。

$t = 0$ における打撃点 r_b がストライクゾーン上であればスイングを開始する。つまり、 $k_i = const$ において事前に計算できる領域であり、ボールの軌道に依存せずに初期姿勢と終端姿勢から決定される。ストライクゾーンはアームがスイングをするかしないかの指標であり、 $0 \leq t \leq t_b$ の間に打撃点がまったく変化しない場合のみ、つまり $r_b = r_{b'}$ の場合のみ打撃が保証される。アームが打撃点の変化にどの程度追従できるかどうかは次節で議論する。図7の下図は、ボールを投げる方向 (x 方向) から yz 平面を見たときのストライクゾーンであり、高さ約 80 cm、幅約 50 cm の大きさとなる。

5.2 追従可能性

計測誤差やボールのモデル化誤差によって打撃点は $0 \leq t \leq t_b$ の間に变化する。また、変化球では打撃点は大きく変化すると考えられる。ここでは時間的な誤差は考慮せずに $t = t_b$ においてボールが平面(4)に到達すると仮定し、スイング開始後の打撃点の変化に対するアームの追従性を検討する。

スイング開始後は肩関節は時間軌道として振り切ってしまうために、アームが追従できる範囲は平面(4)内に限定して議論できる。バットの芯から $\pm \delta$ 外れた場所

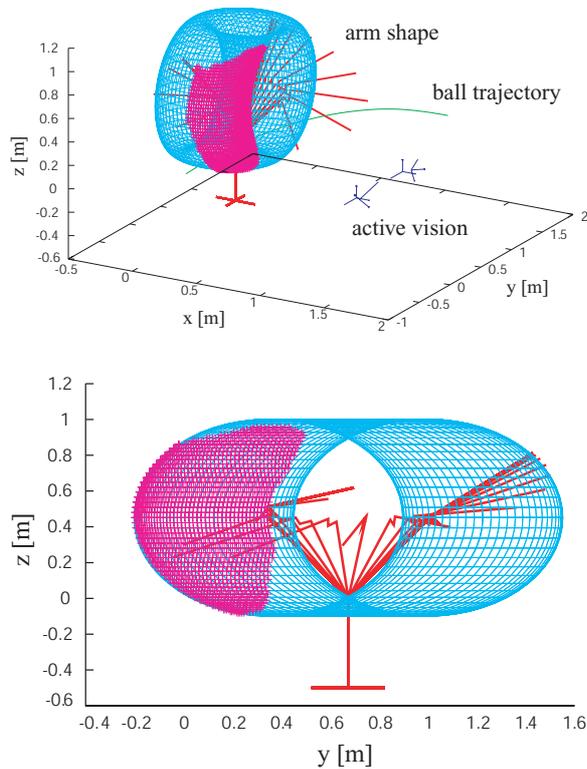


Fig.7 Strike Zone

でのバッティングを許容範囲とすると、 $r_{b'} \in W$ 及び制約条件 (12) ~ (16) を満たす領域で打撃可能となる。

$$W = \{r \mid -\delta \leq \|r - r_u\| - L_f \leq \delta, x = r_b \cdot e_x\} \quad (17)$$

打撃点が $r_{b'} = r_b + vt$, $\|v\|=2\text{ m/s}$ で動くときのシミュレーション結果を図 8 に示す。打撃点 r_b は同じ平面内 $x = 0.299$ の異なる 3 点を選んだ。打撃点から放射状に伸びている線は打撃点の移動を表しており、打撃可能領域はトルクの制限ではなく、アームの機構的制限あるいは打撃点移動の時間的制限に飽和している。また、他の打撃点に対しても同様なシミュレーション結果が得られた。

以上より、打撃点の変化に対してダイナミクスの観点より打撃可能であることを確認した。

6. まとめ

マニピュレータのダイナミクスに基づく高速バッティングロボットシステムの性能評価を行った。今後の課題としては、時間誤差に対する打撃可能性の検討・変化球を投げての実験などが挙げられる。

参考文献

- [1] 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: “多関節マニピュレータを用いた高速打撃動作の研究”, SICE 第 4 回システムインテグレーション部門学術講演会, pp.123-124, 2003.
- [2] Taku Senoo, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: “High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator”, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1191-1196, 2004.
- [3] Y. Nakabo, M. Ishikawa, H. Toyoda, and S. Mizuno: “1ms Column Parallel Vision System and It's Application of High Speed Target Tracking”, Proc. IEEE

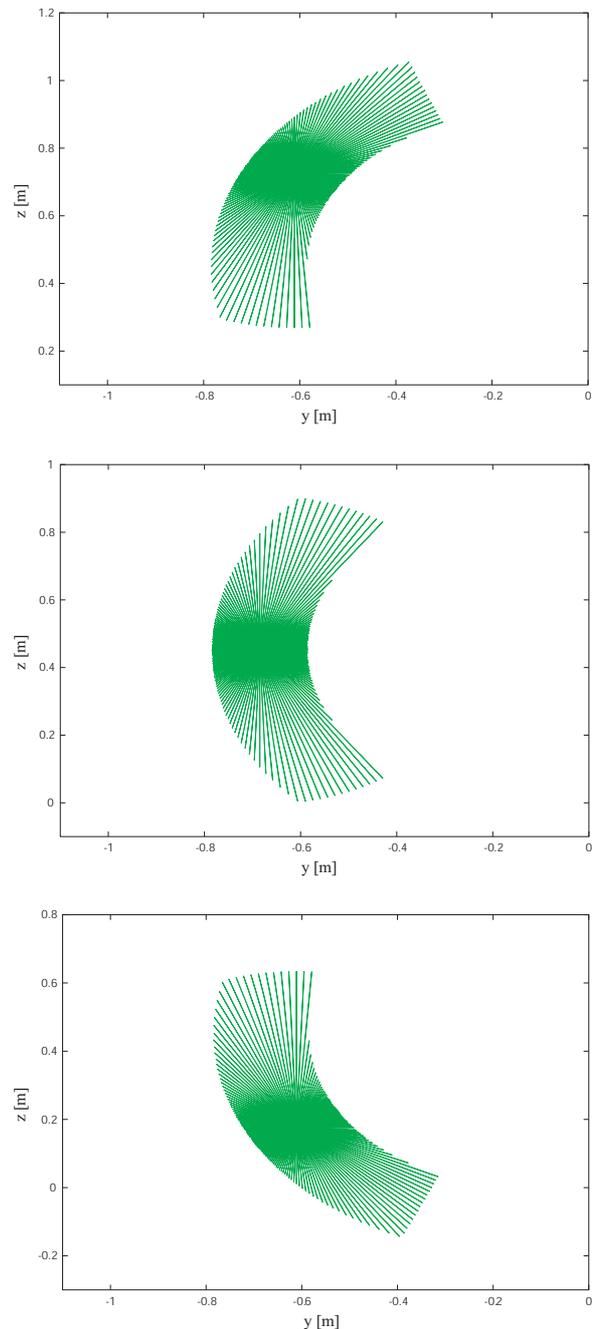


Fig.8 Permissible Zone

- Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 650-655, 2000.
- [4] 並木明夫, 石川正俊: “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.
- [5] Yoshiro Imai, Akio Namiki, Koichi Hasimoto and Masatoshi Ishikawa: “Dynamic Active Catching Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System”, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1849-1854, 2004.
- [6] 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 高速センサフィードバックに基づく把握行動”, 日本ロボット学会誌, 20, 7, pp.47-56, 2002.
- [7] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedBatting/>