

高速打撃動作における多関節マニピュレータの ハイブリッド軌道生成

妹尾 拓* 並木 明夫* 石川 正俊*

Hybrid Trajectory Generation of an Articulated Manipulator for High-speed Batting

Taku Senoo*, Akio Namiki* and Masatoshi Ishikawa*

Speeding up of robot motion provides not only improvement in operating efficiency but also dexterous manipulation using unstable state or non-contact state. To produce high-speed manipulation, we have developed a robot system with 1 [kHz] vision sensors. In this paper, a hybrid trajectory generator is proposed so as to get high performance out of high-speed robot system. This algorithm consists of both mechanical high-speed motion and sensor-based reactive motion to target movement. As an example of high-speed manipulation, a robotic batting task have been achieved. In addition, performance evaluation based on manipulator dynamics and system constraint is analyzed.

Key Words: High-speed Manipulation, Robotic Batting, Hybrid Trajectory Generation

1. はじめに

現在のロボットマニピュレーションにおいて欠けている要素の一つに、「俊敏さ」が挙げられる。ロボットの高速化は作業効率の向上につながるという点だけではなく、対象との間に生じるダイナミクスを積極的に利用した器用な操り [1] を実現するための要因となることから重要な指標といえる。

川村らは高速なマニピュレータ FALCON を開発した [2]。アクチュエータをすべてベースに設置することで手先慣性を小さくし、そして駆動部分の質量を極端に軽くすることで最高速度 13 [m/s]、最高加速度 43 [G] を達成している。金子らは高速なロボットハンドを開発した [3]。バネ機構を用いて力学的エネルギーをためてから瞬時に放出することで、100 [G] もの加速度を実現している。このように、従来のロボットの高速化は運動系に焦点が当てられていた。

一方、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。ロボットアームの制御に必要なサーボレートが 1 [kHz] 程度であることを考えると [4]、例えば、視覚センサとして一般的に用いられている CCD (30 [Hz]) では、センサ処理の遅れがボトルネックとなり運動能力を十分に引き出せていなかった。特に接触を伴う高速動作では不確実性が大きくなるため、作業をロバストに遂行するためには運動機構の速度、ある

いは操作対象の速度に対応した実時間でのセンサフィードバックは不可欠である。並木らは 1 [ms] の視覚システムを導入することで、高速マニピュレーションシステムを開発している [5]。視覚を高速化することで、単なる速いサーボ制御だけではなく、高次の運動計画やタスク設定を適切かつ瞬時に処理できることを示している [6]。

これらハードウェアの改良に加えて、ロボットの応答性能を改善するためには動作軌道とセンサ情報をどのように統合するかが重要な役割を果たす。従来のシステムでは反応速度の遅れを補償するために、物体の動きの予測や学習などフィードフォワードに重点が置かれていた [7] [8]。また、人間も同様に体性感覚や視覚の遅れを遠心性コピーで補うことで、高速な動作を実現している [9]。センサの処理速度が向上した高速ロボットシステムでは、センサ情報からアームの位置を一意に対応付けるミラー則 [10] のようなセンサベース軌道生成は有効であるが、運動速度の高速化まで意識したアルゴリズムは見当たらない。環境の変化に対応しながらも、とにかく迅速にロボットを動かすためには、運動速度と反応速度の両者の高速性を最大限に利用するアプローチが必要である。

そこで本稿では、高速なロボットシステムに適した動作戦略としてハイブリッド軌道生成アルゴリズムを提案する。この軌道は外界の状態にかかわらずとにかく素早く運動する動作と、操作対象の変動に瞬時に追従する動作から構成されている。この軌道関数は、時間変数と対象の特徴量を陽に組み合わせた形で記述されており、2章において詳しく説明する。3章では、本研究において構築した高速マニピュレーションシステムについて述べる。そして高速マニピュレーションの一例として、人間

原稿受付 2005年6月24日

*東京大学大学院情報理工学系研究科

*Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

がランダムに投げたボールをロボットが打ち返すバッティング動作を取り上げて実験し、その結果を示す。4章では、提案したハイブリッド軌道の評価を行う。対象の運動に対する追従性や、時間誤差におけるロバスト性などについてバッティング動作を例に解析計算を行う。5章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 打撃動作

本章ではバッティング動作を例として、提案するアルゴリズムについて具体的に説明する。

2.1 動作戦略

マニピュレータの運動を生成するには、手先の位置や関節角の目標軌道とそれを実現するための制御則が必要である。対象やロボットの動特性に基づいたモデルベースな制御系の設計に焦点を絞り、どのような目標軌道に対しても高精度で追従することを目指すアプローチは効果的である。しかし、高速動作では非線形要素が無視できずパラメータ誤差やモデル化誤差の影響が顕著に現れてくるため、制御系を工夫するだけで速い動作を実現することは難しい場合が多い。そこで本実験のコンセプトは、制御系設計よりも軌道生成に重点を置き、ロボット自体にとって運動しやすいような滑らかな軌道を生成することで素早い動作を獲得することである。

そのために、作業空間 \mathbb{R}^3 で与えられる対象との拘束条件以外は、目標軌道をロボットの関節空間 \mathbb{R}^n で与えることにする。ここで、 n はマニピュレータの自由度である。関節軌道を明示的に与えることで、作業空間での軌道生成に比べて滑らかな運動指令を与えることが可能となり、また特異点の回避や出力制限の条件判定が容易にできるという特徴がある。

2.2 ハイブリッド軌道生成

上記の動作戦略に基づき、高速かつ滑らかな動作を得るためにハイブリッド軌道生成を提案する [11]。このアルゴリズムは、運動速度を獲得するための動作および対象の動きに反応する動作の両者から構成されている (Fig. 1)。

前者のスウィング動作としては、マニピュレータの最大速度に近い高速動作となるように設定しておき、これを時間変数 t の関数として軌道を与える。つまり時系列入力をスウィング開始前に決定し、スウィング開始後はボールの軌道や速度がどのように変化してもとにかく高速に振り切る動作に対応する。この動作を SW モードと定義する。

後者のヒッティング動作は、視覚フィードバックによりマニピュレータの軌道をセンサ情報からダイレクトかつリアルタイムに決定することに対応する。アームの目標軌道を対象の特徴

量 ξ の関数として与えることでスウィング中でも対象の運動に合わせた動作が可能であり、予測を用いた場合と異なって変化球を打つことも可能である。この動作を HT モードと定義する。

マニピュレータ全体として調和の取れた運動を行うために、独立に動作する SW モードと HT モードを統合する変数が必要である。そこで SW モードの軌道を一意に決定する特徴量 η^{SW} を導入し、HT モードが SW モードの動きを把握しながら調整することにする。結果として両者を組み合わせた軌道生成関数は

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}(\xi, \eta^{SW}, t) \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

と表される。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、関節変数を以下のように表現する。

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^{SW}(t) \\ \mathbf{q}^{HT}(\xi, \eta^{SW}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{q}^{SW} \in \mathbb{R}^{n_s}$ 、 $\mathbf{q}^{HT} \in \mathbb{R}^{n_t}$ はそれぞれのモードに対応する関節を表しており、今後は他の変数や演算に対して添え字を使って同様の表記をする。また n_s 、 n_t はそれぞれ SW モードと HT モードの自由度数であり、 $n_s + n_t = n$ である。

本論文では軌道生成関数 \mathbf{f} として、位置・速度・加速度を連続に制御するために 5 次多項式を取り上げる。

$$\mathbf{q} = \sum_{i=0}^5 \mathbf{k}_i t^i \quad (3)$$

また、対象の特徴量 ξ としてボールの位置 $\mathbf{r}_o \in \mathbb{R}^3$ を、SW モードの特徴量 η^{SW} として時間変数 t を採用する。すると、式 (2)、(3) より軌道係数 $\mathbf{k}_i \in \mathbb{R}^n$ は次のようになる。

$$\mathbf{k}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_i^{SW} \\ \mathbf{k}_i^{HT}(\mathbf{r}_o) \end{bmatrix}, \quad \text{ただし } \mathbf{k}_i^{SW} = \text{constant} \quad (4)$$

つまりマニピュレータの軌道を求めることは、この軌道係数 \mathbf{k}_i を求める問題に帰着する。

次に二つの動作モードをどのようにマニピュレータに割り当てるかを考える。マニピュレータのようなリンク構造において手先速度を大きくするには、手先側より台座側の関節速度を大きくするほうがその効果は大きい。また機構が手先に近づくにつれて慣性負荷が小さくなることを考慮すると、対象の運動に瞬時に反応する追従動作は手先側の自由度のほうが適している。そこで SW モードの自由度を台座側に、HT モードの自由度を手先側に集中させて制御することにする。

そこで、0 番目のリンク (基準座標) に固定された座標系 Σ_{SW} と n_s 番目のリンクに固定された座標系 Σ_{HT} を導入する。すると、 Σ_{SW} で表現された手先位置 $\mathbf{r}_e \in \mathbb{R}^3$ は次式のようになる。

$$\mathbf{r}^{SW} + T\mathbf{r}^{HT} = \mathbf{r}_e \quad (5)$$

ここで $\mathbf{r}^{SW} \in \mathbb{R}^3$ は Σ_{SW} で表現された上腕ベクトル、 $\mathbf{r}^{HT} \in \mathbb{R}^3$ は Σ_{HT} で表現された前腕ベクトルである。また $T(\mathbf{q}^{SW}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は Σ_{SW} から Σ_{HT} への姿勢変換行列である。異なる座標系で \mathbf{r}^{SW} と \mathbf{r}^{HT} を記述することで、それぞれのモード変数を

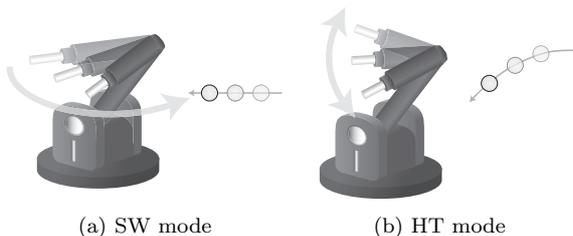


Fig. 1 Hybrid trajectory

分離した形式で表現できる。順運動学演算を l とすると、それぞれのベクトルは以下ようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^{SW} &= l_{SW}(\mathbf{q}^{SW}), \quad \mathbf{r}^{HT} = l_{HT}(\mathbf{q}^{HT}) \\ \mathbf{r}_e &= l(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 バッティングアルゴリズム

実際の関節角 \mathbf{q} は適切な制御器によって目標関節角 $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$ に追従するように制御されるものとする。以後、 $\mathbf{q} = \mathbf{q}_d$ と仮定する。Fig. 2 にブロック線図を示す。

アームの軌道は次の三つのプロセスで決定する (Fig. 3)。

- (i) ビジョンによりボールの位置 $\mathbf{r}_o \in \mathbb{R}^3$ を認識
- (ii) 関数 $\mathbf{g}(\mathbf{r}_o, t)$ により打撃点 $\hat{\mathbf{r}}_b(t) \in \mathbb{R}^3$ を生成
- (iii) 打撃点を境界条件とするアームの軌道 \mathbf{q} を決定

視覚センサがボールを認識してからスウィングを開始するまでは (i), (ii) を、バットを振り始めてからボールと衝突するまでは (i)~(iii) をサイクルタイム (1 [ms]) ごとに繰り返す。つまり衝突前から明示的に打撃点を計算し、それを補正していくことで打撃を行う。上付き添え字 $\hat{\cdot}$ は打撃時刻における推定値を表しており、他の変数に対しても同様の表記をする。またスウィング開始時刻を $t = 0$ 、打撃時刻を $t = t_b$ とする。

以下、各プロセスの詳細を述べる。

(i) 2台のアクティブビジョンを用いて立体視を行うことで、三次元視覚情報を計算する。画像ベースのビジュアルサーボにより、アクティブビジョンはボールを常に視野内に入れながら三次元トラッキングを行っている。画像の1次モーメント(重心)を求めて、それを対象の位置 \mathbf{r}_o として認識する。

(ii) 打撃点を計算する関数を \mathbf{g} とおく。

$$\mathbf{r}_b(t) = \mathbf{g}(\mathbf{r}_o, t) \quad (7)$$

この関数は、打撃時刻 $t = t_b$ においてボールとバットが衝突するために次式の拘束条件を満たす関数として設定される。

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}_o, t_b) = \mathbf{r}_o(t_b) = \mathbf{r}_e(t_b) \quad (8)$$

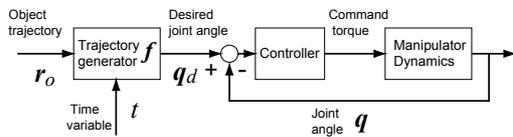


Fig. 2 Block diagram

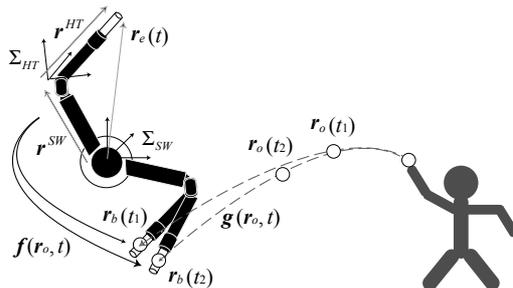


Fig. 3 Batting task

本実験では、逐次最小二乗近似によるボールの推定軌道で関数 \mathbf{g} を表し、推定軌道とストライクゾーンの交点を初期打撃点とした。そして、現在のボール位置から打撃点までの推定到達時間が打撃時間 (0.23 [s]) に一致した瞬間からスウィングを開始する。ストライクゾーンはアームのダイナミクスから計算される曲面であり、4.2 節で述べる。すると時刻 $t = 0$ において推定される衝突平面は次式のように表される。

$$x = \hat{\mathbf{r}}_b(0) \cdot \mathbf{e}_x \quad (9)$$

ここで \mathbf{e}_x は x 方向 (ピッチャーの投球方向) の単位ベクトルである。スウィング開始後は時刻 t_b にボールが平面 (9) に到達すると近似し、ボールの推定軌道と平面 (9) との交点を打撃点 $\hat{\mathbf{r}}_b$ と設定した。

(iii) 軌道を求める問題は次式の 2 点境界値問題となる。

$$\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_s, \quad \mathbf{q}(t_b) = l^{-1}(\mathbf{r}_b) = \mathbf{q}_b \quad (10)$$

ここで $\mathbf{q}_s \in \mathbb{R}^n$ は初期姿勢、 $\mathbf{q}_b \in \mathbb{R}^n$ は打撃時の姿勢を表す。軌道係数 \mathbf{k}_i を位置・速度・加速度の境界条件に置き換えると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_0 &= \mathbf{q}_s, \quad \mathbf{k}_1 = \dot{\mathbf{q}}(0), \quad \mathbf{k}_2 = \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{q}}(0) \\ \mathbf{k}_3 &= \frac{1}{2t_b^3} \{20[\mathbf{q}_b - \mathbf{q}_s] - t_b[8\mathbf{c}_v + 12\dot{\mathbf{q}}(0)] \\ &\quad + t_b^2[\mathbf{c}_a - 3\ddot{\mathbf{q}}(0)]\} \\ \mathbf{k}_4 &= \frac{1}{2t_b^4} \{-30[\mathbf{q}_b - \mathbf{q}_s] + t_b[14\mathbf{c}_v + 16\dot{\mathbf{q}}(0)] \\ &\quad - t_b^2[2\mathbf{c}_a - 3\ddot{\mathbf{q}}(0)]\} \\ \mathbf{k}_5 &= \frac{1}{2t_b^5} \{12[\mathbf{q}_b - \mathbf{q}_s] - 6t_b[\mathbf{c}_v + \dot{\mathbf{q}}(0)] \\ &\quad + t_b^2[\mathbf{c}_a - \ddot{\mathbf{q}}(0)]\} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで \mathbf{c}_v 、 \mathbf{c}_a は任意のベクトルであり、スウィング中に打撃点と打撃時間が変化しない場合は $\mathbf{c}_v = \dot{\mathbf{q}}(t_b)$ 、 $\mathbf{c}_a = \ddot{\mathbf{q}}(t_b)$ となる。よって、この任意のベクトルを適切に設定することで打撃点付近の大まかなアームの速度・加速度を設定できる。

SW モードの打撃姿勢を次式により計算する。

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

ここで $\mathbf{A} = [\mathbf{I}_{n_s} \mathbf{0}] \in \mathbb{R}^{n_s \times n}$ であり、 $\mathbf{I}_{n_s} \in \mathbb{R}^{n_s \times n_s}$ は単位行列である。これはスウィング開始時において計算される打撃姿勢 \mathbf{q}_b のうち SW モードに対応する関節角となっている。SW モードの軌道係数 \mathbf{k}_i^{SW} は、この \mathbf{q}_b^{SW} を式 (11) に代入することで求める。HT モードも含めた打撃姿勢から SW モードの軌道を計算することにより、HT モードの自由度に過大な補正が働くことを防いでいる。そして速度あるいはトルクが出力限界に近づくようにベクトル \mathbf{c}_v 、 \mathbf{c}_a を調整することで高速なスウィングを達成している。実際には、HT モードによる推定軌道の修正に対応させるために出力限界よりもある程度の余裕を設けて \mathbf{c}_v 、 \mathbf{c}_a を設定している (4.1 節)。また、軌道係数 \mathbf{k}_i^{SW} はスウィング開始時における推定打撃点 $\hat{\mathbf{r}}_b(0)$ から計算するため、ランダムに投げられるボールに対しておのおののボール軌道に

適した値として決定される。

スウィング開始後は、SW モードの関節の動きを考慮しながら境界条件 (10) を満たす軌道を生成する。式 (5) より、時刻 $t(0 \leq t \leq t_b)$ における HT モードの打撃姿勢は

$$\mathbf{q}_b^{HT} = \mathbf{I}_{HT}^{-1} \left(\hat{\mathbf{T}}^{-1} (\hat{\mathbf{r}}_b(t) - \hat{\mathbf{r}}^{SW}(t)) \right) \quad (13)$$

と計算される。これを式 (11) に代入することで、HT モードの軌道係数 \mathbf{k}_i^{HT} が決定する。推定打撃点 $\hat{\mathbf{r}}_b(0)$ の初期位置からの移動に対して HT モードがどの程度対応できるかは 4.3 節で述べる。

3. 実験

3.1 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、この出力を 128 列並列に PE へ転送する。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。高出力かつ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] の高速な動作が可能である。

処理系は合計 16 GFLOPS の高速な浮動小数点演算能力をもつ 16 個の DSP (TMS320C6701 : Texas Instrument Inc.) からなる。これは階層並列処理システムであり、センサフィードバックを 1 [ms] のサイクルタイムで実現するための主要部分となっている。また、多数の I/O を複数の DSP にできる限り分散して配置することで I/O のボトルネックを小さく抑えている。

システム全体のサイクルタイムは 1 [ms] であり、機械系のサーボ制御とセンサフィードバックが同じサイクルタイムとなっている点が特徴である。Fig. 4 に高速ロボットシステムの写真を、

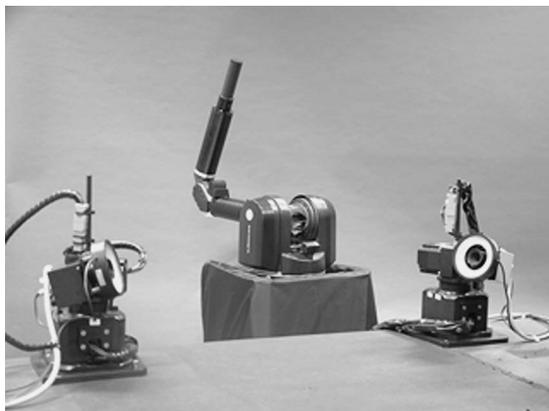


Fig. 4 High-speed robot system

Fig. 5 にシステム構成を示す。

3.2 実験設定

簡略化のために、アームの手先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。バットの長軸方向に直動の仮想自由度 q_5 を想定して、バットの中心からある程度離れた位置でのバッティングを許容した。計 5 自由度のマニピュレータとして扱い、2 自由度を SW モードに、3 自由度を HT モードに割り当てた。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。また、基準座標を Fig. 6 のように設定した。

制御コントローラは、PD 制御系を用いた。打撃点生成関数 \mathbf{g} は x, y 方向は 1 次関数、 z 方向は 2 次関数で近似した。滑らかなスウィングとなるように初期条件を $\dot{\mathbf{q}}(0) = \ddot{\mathbf{q}}(0) = \mathbf{0}$ とし、打撃時間は $t_b = 0.23$ に固定した。任意のベクトルは $\mathbf{c}_v = [1.5, 0.0, -1.0, 1.5]^T$, $\mathbf{c}_a = [1.5, 0.0, -2.0, 2.5]^T$ と設定した。打撃後も同様にして 5 次多項式によりアームの軌道を生成し、0.6 [s] かけて滑らかに停止するようにした。

また、打撃時において前腕ベクトル $\hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{r}}^{HT}$ がピッチャーの打球方向と直交する条件を付加する。

$$(\hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{r}}^{HT}) \cdot \mathbf{e}_x = 0 \quad (14)$$

これにより、ストライクゾーンは三次元空間内の 2 自由度曲面になる。また第 2 関節を固定する条件 $q_2 = constant$ を加えることで、式 (12) の逆運動学が一意に定まりアームの姿勢が決定する。

3.3 実験結果

ボールは 6~8 [m/s] の速度で投げて、バットの速度は打撃点

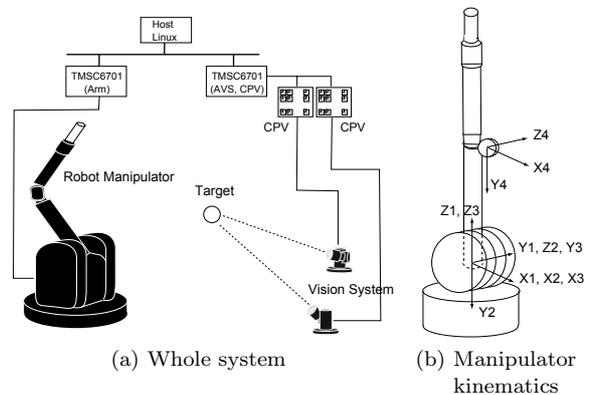


Fig. 5 System configuration

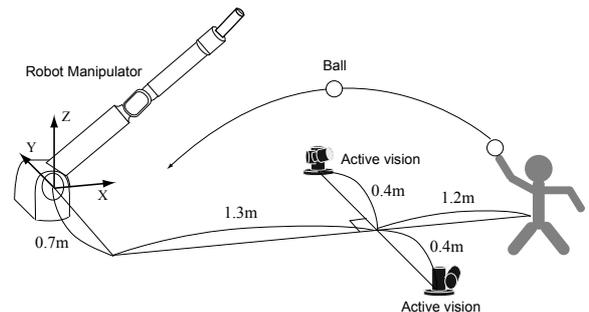


Fig. 6 Experimental configuration

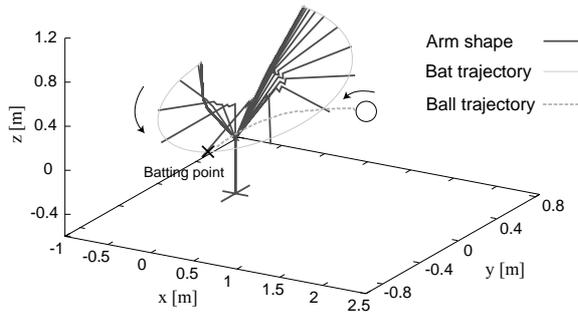


Fig. 7 Batting motion

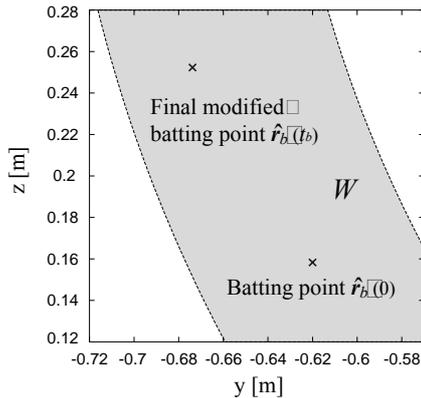


Fig. 8 Movement of a batting point

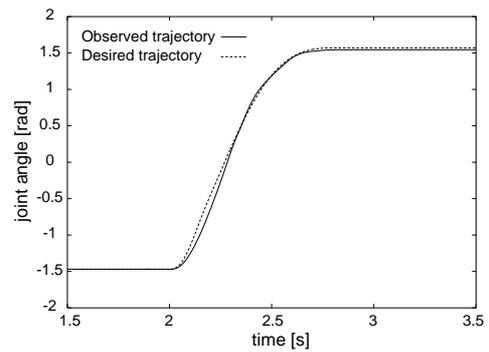
付近で約 6 [m/s] である。ボールを投げてから打つまでの時間は 0.3~0.4 [s] であり、視覚センサがボールを認識し始めてから約 0.1 [s] 後にはスウィングを開始している。

Fig. 7 にボールとアームの三次元的な動きを示す。x = 2.1 [m] からボールを認識し始め、x = 0.33 [m] で打撃を行っている。視覚フィードバックによる打撃点の補正の結果、打撃点で正確にボールと衝突していることが確認できる。

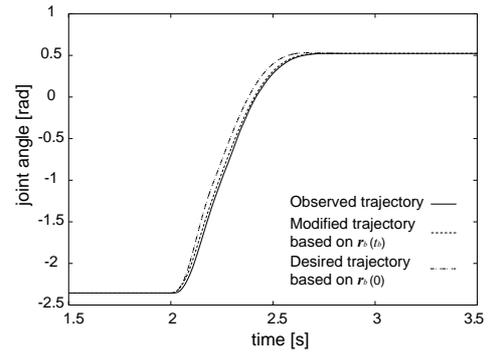
Fig. 8 は、時間に対する打撃点の位置変化を表している。また領域 W は運動学・動力学の出力制限を考慮したときの追従可能範囲であり、この範囲の導出方法は 4.3 節で述べる。時間 0.23 [s] の間に打撃点が $\hat{r}_b(0)$ から $\hat{r}_b(t_b)$ まで約 15 [cm] 移動している。発泡スチロールのボールは軽量で空気抵抗が大きいいため、2 次曲線の推定軌道に正確には当てはまらないためである。このような打撃点の変化に対しても、1 [ms] の打撃点補正および HT モードの動きによりバッティングに成功している。この結果は変化球でも打撃可能であることを示している。

Fig. 9 に関節角の時間応答を示す。どちらのモードも滑らかな目標指令が生成されていることが分かる。HT モードの関節角では、打撃点の変動により $\hat{r}_b(0)$ に基づく目標軌道が最終的に $\hat{r}_b(t_b)$ に基づく目標軌道に修正され、マニピュレータが修正された軌道に追従している様子が分かる。

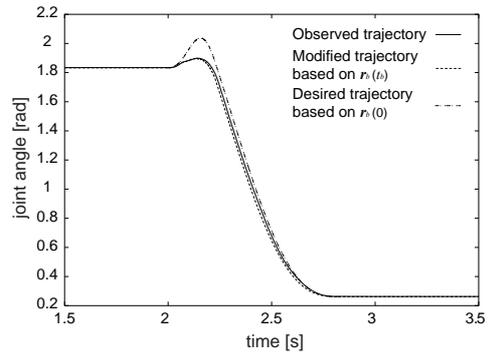
このようにシステムの高速化に適したマニピュレータの軌道を生成することで、コントローラとして単純な PD 制御を用いてもボールの軌道変化に瞬時に対応できる高速動作が可能となっている。Fig. 10 にバッティングの様子を 30 [ms] 間隔の連続写真で示す。成功率は 90% 以上であり、この結果の動画は本研究



(a) SW mode (q_1)



(b) HT mode (q_3)



(c) HT mode (q_4)

Fig. 9 Time response of joint angles

室のウェブサイト [12] から見る事ができる。

4. 解 析

マニピュレータの運動学・動力学における拘束条件を以下のように表す。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_{\min} &\leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max} \\ \boldsymbol{\omega}_{\min} &\leq \boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{\omega}_{\max} \\ \boldsymbol{\tau}_{\min} &\leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \end{aligned} \tag{15}$$

ここで $\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ は関節速度および関節トルクであり、添え字 max, min はその変数の最大値・最小値を表している。関節速度と関節トルクは

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\mathbf{q}} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \tag{17}$$

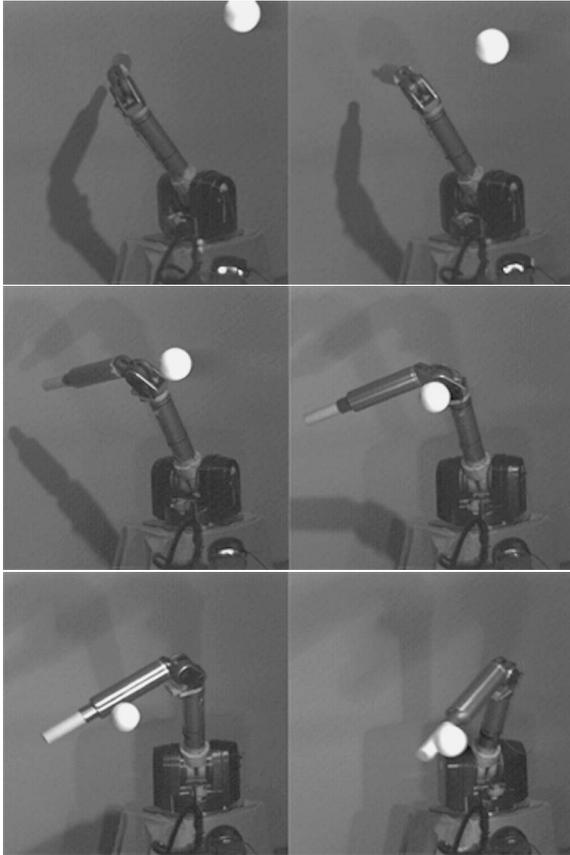


Fig. 10 Continuous sequence of pictures

によって計算される。ここで $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は慣性項, $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n$ は遠心力・コリオリ力の項, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ は重力項である。

ここでは上記の動学的効果および拘束条件に基づいて、マニピュレータの軌道、打撃点の存在領域（ストライクゾーン）、スウィング中の打撃点の変化に対するアームの追従可能性、および時間誤差に対する打撃可能性についてシミュレーションで定量的に評価する。

4.1 マニピュレータ軌道

スウィング中に打撃点を上下方向に 10 [cm] 移動したときの、関節速度とモータトルクの応答変化を Fig. 11 に示す。時刻 $t=0$ でボールを認識し始め、 $t=0.1$ でスウィングを開始して $t=0.33$ でボールと衝突している。初期時刻に計算される打撃点から生成した軌道に比べて、それほど大差なく滑らかな修正軌道が生成できていることが確認できる。トルクは連続的に変化しているが、スウィング開始時刻 $t=0.1$ と打撃時刻 $t=0.33$ において滑らかではなくなっている。これは、マニピュレータの軌道を 5 次関数で生成していること、ならびにその時刻において軌道の切り替えを行っているためであり、躍度まで考慮した軌道（多項式では 7 次以上の軌道）を用いることでトルクまで滑らかな軌道を生成することができる。本実験では様々な軌道や速度のボールに対してモータトルクが大きくなるように、任意の軌道パラメータ \mathbf{c}_v , \mathbf{c}_a をヒューリスティックに調整することで高速動作を獲得している。また限界トルクまで多少の余裕が設けられていることが確認できるが、これはシミュレーションで

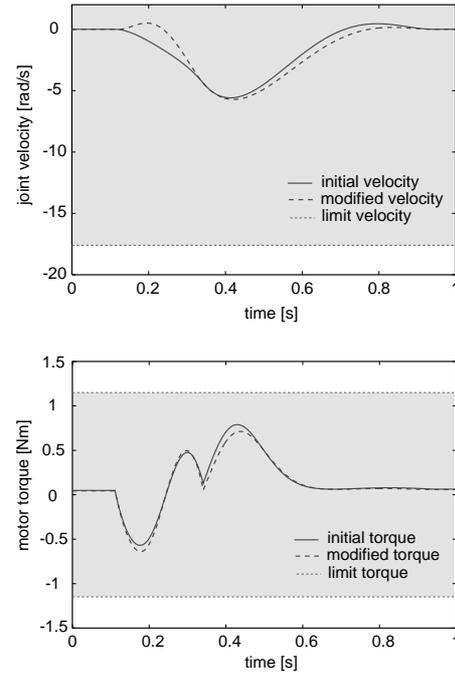


Fig. 11 Time response of velocity and torque

は表現されないモデル化誤差やパラメータ誤差などに対応するためである。

4.2 ストライクゾーン

直交条件 (14) より打撃時におけるマニピュレータの手先位置は $\mathbf{r}_e = L_u[\cos q_1 \sin q_2, \sin q_1 \sin q_2, \cos q_2]^T + L_f[0, \cos \phi, \sin \phi]^T$ と表現できる。ここで L_u , L_f はそれぞれ上腕ベクトルと前腕ベクトルの長さであり、前腕ベクトルは 1 自由度のパラメータ $\phi(\mathbf{q})$ によって記述可能なベクトルである。この手先が到達可能な領域 S は次式のように変形できる。

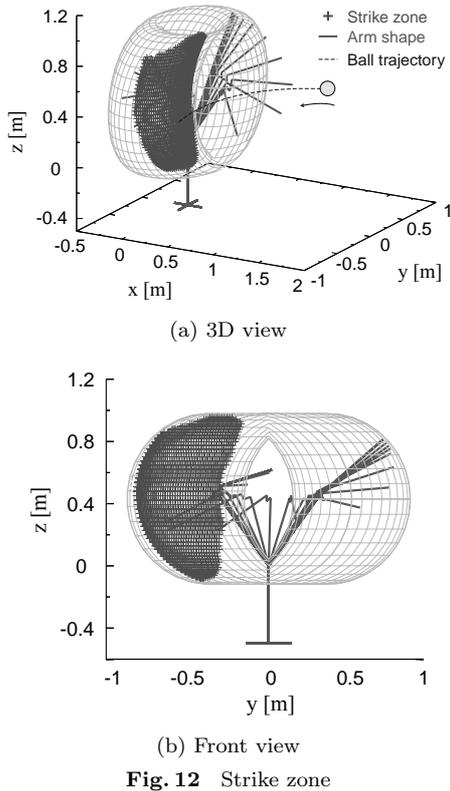
$$S = \{\mathbf{r} \mid \|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\| = L_u \sin q_2, \mathbf{r}' \in C\} \quad (18)$$

$$\text{ただし } C = \{\mathbf{r} \mid \|\mathbf{r} - \boldsymbol{\alpha}\| = L_f, r_x = 0\}$$

ここで $\boldsymbol{\alpha} = [0, 0, L_u \cos q_2]^T$ である。また、条件 $q_2 = \text{constant}$ より領域 S は 2 自由度曲面となる。初期姿勢から打撃時間までに到達できる領域は、制約条件 (15) を考慮すると曲面 S の一部の領域となり、この領域をストライクゾーンと定義する (Fig. 12)。スウィング時の打撃点 $\hat{\mathbf{r}}_b(0)$ は、ボールの推定軌道とストライクゾーンとの交点として設定される。

Fig. 12 (b) は、投球方向 (x 軸) から見たときのストライクゾーンであり、高さ 100 [cm] 程度、幅 60 [cm] 程度の大きさとなる。ストライクゾーンはボールの軌道に依存せず初期姿勢と打撃時間から決定し、アームがスウィングをするかしないかの指標となる。つまり、この領域の外に向かうボールは打てないことが事前に分かっているので、スウィングをしないように設定してある。スウィング中に打撃点に変化しない場合、つまり $\hat{\mathbf{r}}_b(t) = \text{constant}$ ($0 \leq t \leq t_b$) の場合はこの領域内に $\hat{\mathbf{r}}_b(0)$ を設定するだけで打撃が保証される。

本実験では打撃時間 t_b を短くすることが望ましいが、それに伴ってストライクゾーンも小さくなってしまふ。そこでパッ



ティングタスクにとって十分なストライクゾーンを確保したうえで、打撃時間ができる限り短くなるように 0.23 [s] が選定されている。

4.3 打撃点変化に対する追従可能性

変化球ではボールの軌道はスウィング中に変化する。このような打撃点の変化に対して、マニピュレータがどの程度追従可能であるかをダイナミクスの観点より確認する。上腕部の SW モードの動きと直交条件 (14) より、打撃時刻 t_b において前腕部は平面 (9) に存在する。また打撃時刻においてボールがこの平面に到達すると仮定し、平面内の打撃点変化に限定して議論する。時間誤差については次節で述べる。

実験では打撃点の移動速度は最高でも 2 [m/s] 程度であった。そこで打撃点が $\hat{r}_b(t) = \hat{r}_b(0) + \mathbf{v}_b t$, $\|\mathbf{v}_b\| = 2$ [m/s] で動くとき、どの程度までアームが追従できるかシミュレーションした結果を Fig. 13 に示す。打撃点 $\hat{r}_b(0)$ は、 z 方向に関して高め・低めの 2 点が表示されている。打撃点から放射状に伸びている線分は打撃点の移動を表し、その長さが追従可能な領域を表している。打撃可能な領域は、速度・トルクの出力制限ではなくアームの可動範囲制限あるいは打撃点移動の時間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。つまり次式の領域 W 内で打撃点が移動する限り、マニピュレータは追従可能である。

$$W = \{ \mathbf{r} \mid q_{5 \min} \leq \|\mathbf{r} - \hat{r}^{SW}\| \leq q_{5 \max}, r_x = \hat{r}_b(0) \cdot \mathbf{e}_x \} \quad (19)$$

本実験では HT モード 3 自由度のうち一つが直動の仮想関節であるため、領域 W は肘関節を中心とする円周で挟まれた領域

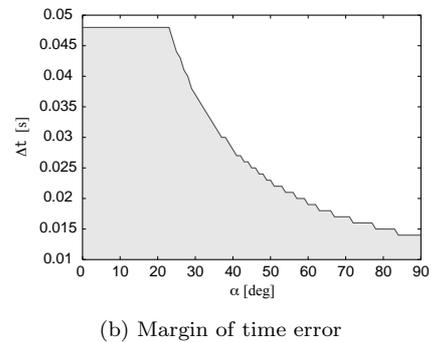
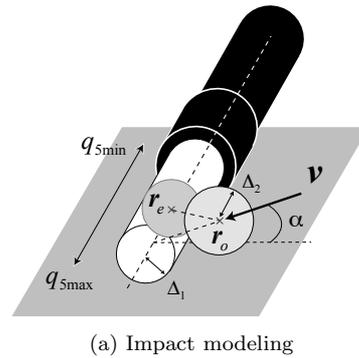
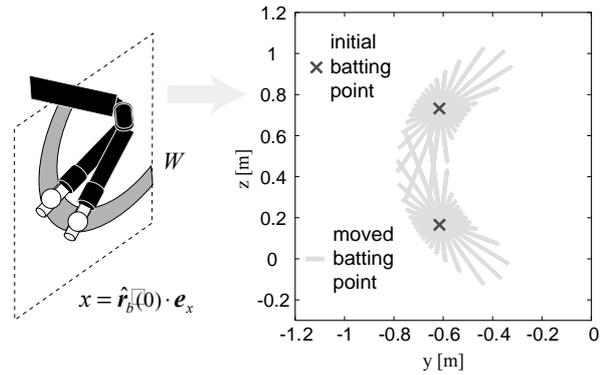


Fig. 14 Impact modeling and margin of time error

となり、その追従範囲は仮想関節の可動範囲制限に大きく依存していることが確認された。また、円周方向に関しては打撃点がスウィング中に 40 [cm] 程度移動しても打撃が成功することが確認された。

4.4 時間誤差に対する打撃可能性

ボールが時刻 $t_b + \Delta t$ に平面 (9) を通過すると仮定する。このとき、バットの半径 Δ_1 とボールの半径 Δ_2 を考慮した衝突条件は次式で表される。

$${}^3\Delta t \text{ s.t. } \|\mathbf{r}_e(t) - \mathbf{r}_o(t)\| = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (20)$$

ある打撃点 \hat{r}_b に向かって様々な角度からボールが等速直線運動してくると仮定したとき、打撃可能となる許容誤差時間を計算する。バットとボールの半径を $\Delta_1 = \Delta_2 = 5$ [cm]、ボールの動きを $\mathbf{r}_o(t) = \hat{r}_b + \mathbf{v}_o(t - t_b - \Delta t)$, $\|\mathbf{v}_o\| = 6$ [m/s] と設定したときのシミュレーション結果を Fig. 14 に示す。横軸 α

は、ボールが衝突するときの水平面に対する入射角を表している。入射角が小さくなるほど、許容誤差時間は大きくなる。これは、衝突直前のボールとアームの速度ベクトルのなす角度が平行に近くなるためである。また、入射角が23度で許容誤差時間が飽和している。これは対象の運動に依存せずに動くSWモードの影響により、HTモードの自由度だけでは追従しきれなくなることを表している。入射角が0~23度付近のボールに対しては、許容誤差時間は48[ms]である。これは打撃時間0.23[s]の約20%であり、ある程度の時間誤差に対しても打撃が成功することを確認した。

5. ま と め

本論文では、ロボットシステムの高速化を目指す動作戦略としてハイブリッド軌道生成を提案した。これは運動速度と反応速度を意識した二つの動作モードから構成されており、アクチュエータだけでなくセンサも含めて高速化されたシステムに適したアルゴリズムである。応用例として、人間が投げたボールをロボットが打ち返すバッティング動作を実現した。またバッティング動作を例に追従可能性やロボаст性をシミュレーションで定量的に評価し、提案したアルゴリズムの有効性を確認した。

今後の課題としては、マニピュレータなどの運動系だけではなく、センサや処理系も含めたシステム全体の動特性に基づき、「高速性」を具体的に評価できる指標を導入することが挙げられる。またアームだけでなくハンドも組み合わせることで、非接触状態や不安定状態を有効的に扱った器用な高速マニピュレーションを実現する予定である。

参 考 文 献

- [1] M.T. Mason and K.M. Lynch: "Dynamic Manipulation," Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.152-159, 1993.
- [2] 川村貞夫, 雀源, 田中訓, 木野仁: "パラレルワイヤ駆動方式を用いた超高速ロボット FALCON の開発", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, pp.82-89, 1997.
- [3] M. Kaneko, M. Higashimori, R. Takenaka, A. Namiki and M. Ishikawa: "The 100G Capturing Robot—too Fast to See—," IEEE Trans. on Mechatronics, vol.8, no.1, pp.37-44, 2003.
- [4] 垣本達美: "ソフトウェアサーボの実現", ロボット工学ハンドブック, pp.532-534, コロナ社, 1990.
- [5] A. Namiki and M. Ishikawa: "Sensory-Motor Fusion Architecture Based on High-Speed Sensory Feedback and Its Application to Grasping and Manipulation," Proc. 32nd Int. Symp. on Robotics, pp.784-789, 2001.
- [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, vol.20, no.7, pp.707-716, 2002.
- [7] W. Hong and J. Slotine: "Experiments in hand-eye coordination using active vision," Proc. 4th Int. Symp. on Experimental Robots, pp.130-139, 1995.
- [8] F. Miyazaki, M. Takeuchi, M. Matsushima, T. Kusano and T. Hashimoto: "Realization of the Table Tennis Task based on Virtual Targets," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3844-3849, 2002.
- [9] 川人光男: "脳の運動学習", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp.11-19, 1995.
- [10] M. Bühler, D. Koditschek and P. Kindlmann: "Planning and control of robotic juggling and catching tasks," Int. J. of Robotics Research, vol.13, no.2, pp.101-118, 1994.
- [11] T. Senoo, A. Namiki and M. Ishikawa: "High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1191-1196, 2004.
- [12] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedBatting/>



妹尾 拓 (Taku Senoo)

1980年11月25日生。2003年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業, 2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。現在, 同大学大学院博士課程在学中。高速マニピュレーション, ダイナミックマニピュレーションの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1954年8月22日生。1979年, 東京大学工学系研究科計数工学修士課程修了。同年, 通商産業省工業技術院製品科学研究所入所。1989年, 東京大学工学部計数工学科助教授, 現在, 同大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。生体情報処理の回路モデル, 触覚センサおよびその知能化, 超並列・超高速ビジョン, 並列処理, 光コンピューティング, センサフュージョンの研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)



並木明夫 (Akio Namiki)

1971年10月11日生。1999年, 東京大学工学系研究科計数工学博士課程修了。日本学術振興会リサーチアソシエイト, 科学技術振興機構研究員を経て, 2004年, 東京大学情報理工学系研究科システム情報学専攻講師。センサフィードバック制御, 多指ロボットハンド, センサフュージョン, 感覚運動統合の研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)