動体を扱うロボットの運動計画と制御*

阪 口 健^{*1}, 藤 田 政 宜^{*2}
升 谷 保 博^{*3}, 宮 崎 文 夫^{*4}

Robot Motion Planning and Control for Moving Objects

Takeshi SAKAGUCHI, Masanori FUJITA,
Yasuhiro MASUTANI and Fumio MIYAZAKI

This paper describes robot motion planning in a very dynamic environment, that is, a trajectory generation to attain a working purpose with redundancy freedom to use under the restriction of time and space. In particular, we focus on "juggling" as the typical example of such a task. We will describe a parametric representation of the robot motion which makes it easy to generate the appropriate trajectory of the end-effector for the "juggling" task. Also, we will describe a hierarchical learning control strategy which is effective in generating a desired motion pattern for juggling which has not been previously taught to the robot. For an actual robot juggling several balls, we predict the location and time at which a ball is caught using sensory feedback signals and modify the end-tip trajectory. Experimental results obtained using a 2-d. o. f. direct-drive manipulator are also presented.

Key Words: Motion Planning, Dynamic Environment, Juggling Task, Hierarchical Learning Control

1 はじめに

ロボットのように自由度の多い機械システムでは、目的のタスクを実現する運動パターンをいかに生成するかが最も基本的な問題となる。これは通常、運動計画と呼ばれる静的な問題と、それに対して動的なサーボ問題（ロボットの運動制御問題）に分けて扱われる。従来、両者の問題はそれぞれ独立に考察されることが多かったが、近年タクトタイムを短縮するニーズの高まりと共に、互いに切り離して考えられなくなってきている。

センサ情報と機械システムの運動をタスク内容に応じて有機的に対応付ける問題は、センサ・ベース制御問題として近年注目を浴びている。中でもニューラル・ネットワークによるアプローチは、生体機能との類似性のみならず、その自己学習能力と並列処理化が容易であることから、極めて有望視されている[1]。しかし、ネットワークの設計指針を明確に与えることができない現段階では、複雑な特性を有する全システムをブラックボックス化して捉えることにはかなりの無理がある。むしろ、タスクを実現するために必要な以下の機能

1. 先見的知識や学習制御戦略を用いた理想運動パターンの獲得
2. センサ情報の前処理と環境変化の予測
3. 状況に応じた理想運動パターンの修正

を個々に具現化した後、それらを統合するアプローチが有効である。本論文では、これらの機能を駆使して実現される人間の器用なタスクとして「ジャグリング」に注目する。地球の重力場において自由落下する対象物との相互作用を含むタ

スク、つまり、投げや捕獲といった一連の行動を必要とするタスクがジャグリングである。本タスクは対象物個数の増加と共にその実現は難易度を増す。これは、次に受け取るべき対象物がアームの可動範囲外に出る前に、投げや捕獲といった一連のタスクを行わなければならない、それに要する時間も個数の増加と共に短くなるからである。さらに、ジャグリングは、その上達が可視であること、センサ処理を含めたトータルなシステムの設計が必要であること、作業に対する自由度が大きいこと、などの特色を持っている。

このようなジャグリングに関して、複数の物体の投げ上げと捕獲を繰り返す通常の「ジャグリング（お手玉）」とは異なり、ボールをバドルで上方に打つ連続動作を取り上げた研究が幾つかなされている。文献[2]では、タスクレベルでの学習規則が提案され、獲得されたフィードフォワードの制御入力だけでタスクを実現しようとしている。文献[3]では、ロボットがリアルタイムでボールの位置をモニタできることを前提として、ボールとロボットの相互作用を考慮して導いた非線形フィードバック則によりタスクを実現している。しかしながら、どちらの研究でも動作パターンの自由度の利用については考察されていない。また、同様なアプローチが必要な剣玉に関して、ロボット化を念頭においた研究[5]も行なわれている。非線形補償によるロボットの軌道追従制御や視覚フィードバックを工夫しているが、ロボットの手先軌道を人間の操作パターンに基づいて決定しており、作業環境との相互作用を考慮した系統的な軌道計画を行なっていない。そのほか、動環境下での軌道生成法の確立を目指し、人間とピンポンをするロボットの研究[7]も行なわれている。

本論文では、ロボット自身がタスク遂行能力を身に付け、ジャグリングを繰り返し実行する方法を提案する。なお、ここで取り上げるジャグリングは、1本の腕で複数個のボールを順に投げて捕る一般的なパターンを考えている。しかも、

* 原稿受付 平成5年1月25日。

*¹ 正員、工業技術院機械技術研究所(〒305 つくば市並木1-2)。*² 大阪大学大学院。*³ 大阪大学基礎工学部。*⁴ 正員、大阪大学基礎工学部(〒560 豊中市待兼山町1-1)。

手先には特別な把持機構は用いず、カップのみを用いることにする。タスク遂行に必要なボールの運動状態の検出は、ロボットから離れた場所に設置した視覚センサにより行う。

そのために、まず作業環境とロボット自身の相互作用により生じる時空間的拘束を自由に設定できるパラメータ表現をロボットの手先軌道に導入することにより、様々な運動パターンの手先軌道を獲得できる方法を提案する。次に、計画された軌道を視覚情報を用いて修正することにより、実際に理想的なボールの弾道軌道を生成する手先軌道を学習的に獲得する方法として階層学習制御則を提案する。そして、ジャグリングタスクを周期的に連続して行うために必要な手先軌道の微小修正のためのビジュアルフィードバック則について述べる。最後に、平面2自由度ロボットマニピュレータによるジャグリングの実験結果を示す。

2 手先の計画軌道

2.1 楕円軌道の採用

ジャグリングのように複数の基本運動(投げと捕獲)から成り立っているタスクでは、各運動をどのように連結し全運動をどのように構成すればよいのか定かではない。

人間の腕もロボットのマニピュレータも各関節の可動範囲や各アクチュエータの出力トルクの限界を持っているので、ジャグリングを効果的に実行するためには「投げ」と「捕獲」をできる限り滑らかに結合する必要がある。また、これらのタスクを交互に繰り返す行なうのであるから、閉ループが妥当であろう。ここでは、

1. 軌道の滑らかさ
2. 軌道の周期性
3. 広いクラスの軌道パターンを少数のパラメータで表現できること

を考慮し、ロボットの手先軌道として楕円軌道を用いることにする。

2.2 楕円の表現法

楕円の幾何学式は、 l_a を楕円の長径、 l_b を短径としたとき、

$$\frac{x^2}{l_a^2} + \frac{y^2}{l_b^2} = 1 \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} x = l_a \cos \theta \\ y = l_b \sin \theta \end{cases}$$

と表わすことができる。ここで θ は媒介変数であり、これを図示したのが図1である。

図1: 媒介変数 θ の取り方

楕円が水平面に対して角度 β だけ傾いているとすると、楕円を表すパラメータは l_a, l_b, β, θ の4つとなる。従って、こ

図2: 人間のジャグリングにおける手先位置の軌跡

(b) 被験者 B

図3: 人間のジャグリングの解析— $(\theta, \dot{\theta})$ の変位

れらを別々に変更することによって様々な軌道を作成することができる。

2.3 人間の運動パターンの解析

本論文では工学的な立場から楕円軌道を採用したが、これは「人間の手先は楕円を描いているようだ」という直観に基づいている。そこで、実証のために人間の動作パターンも解析し、その特徴を抽出してみた。

2人の被験者—A, B—to片手で2個のテニスボールをジャグリングするように指示し、その動きをビデオテープに記録した。彼らの手先が2次元平面内を動くものと仮定して、ビデオ画面から1コマずつ(1/30秒間隔)手先位置をプロットしていった。図2は、ジャグリング1周期の手先位置をプロットしたものの一例である。これらのデータから、いずれの手先軌道も楕円に近いことがわかる。また、楕円のパラメータには個人差があることも読み取れる。

次に、軌道の時間的変化を見るために、図2のデータから媒介変数 θ とその時間微分 $\dot{\theta}$ の時間履歴を計算した。この一例を図3に示す。これらのデータから、以下の事実がわかる。

1. 媒介変数 θ の変化は、ボールを捕獲する直前を除いてはほとんど周期的である。
2. θ は時間に関する増加関数である(但し1周期内)。
3. 媒介変数の時間微分 $\dot{\theta}$ は、ある一定範囲内で変化している。

以上の解析結果から考えても、投げと捕獲を滑らかに途切れることなく連結し、しかも周期的に実現できる手先軌道として、楕円軌道は妥当と考えられる。

2.4 手先軌道と弾道軌道

図4に示すような x - y 座標系における楕円軌道を考える。

図4: 手先の楕円軌道

- l_a, l_b, β : 楕円の長短径, および傾き
 θ_t : 楕円の媒介変数 $\theta_t = \theta(t)$
 b_x, b_y : ボール位置
 x_{ti}, y_{ti} : 手先位置
 t_i, t_c : ボールの投げ上げ時刻, 捕獲時刻
 g : 重力加速度

ジャグリングでは手先軌道と弾道軌道の2つの軌道を同時に考えなければならず, これらを区別するために時刻 t における手先位置を $x_t = (x_t, y_t)^T$ と記述する. 手先は図に示すように初期位置から動き出すものとし, その時刻を $t = 0$ として手先軌道の時間履歴を考える. このとき, 手先位置は以下のように書ける.

$$x_t = R A_t l \quad (1)$$

ここで, R は次式で表される回転行列であり

$$R = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$$

A_t と l は

$$A_t = \begin{pmatrix} \cos \theta_t & 0 \\ 0 & \sin \theta_t \end{pmatrix}, \quad l = \begin{pmatrix} l_a \\ l_b \end{pmatrix}$$

である. また, θ_t は時間に依存する楕円の媒介変数である.

一方, 弾道方程式は以下のような式で書ける.

$$b_x = x_{ti} + t^2 \ddot{x}_{ti} - \frac{1}{2} t^2 g \quad (2)$$

ここで, $g = (0, g)^T$ は重力加速度ベクトルであり, 時刻 t はボールの投げ上げ時刻 t_i と標的とするボールの捕獲時刻 t_c の間の値をとる ($t_i \leq t \leq t_c$).

2.5 ジャグリング実現のための拘束条件

以下にジャグリングを実現するために必要な拘束条件を示す.

1. [位置条件] 手先は捕獲直前に標的とするボールに到達していなければならない.
2. [速度条件] 手先の速度は捕獲直前には標的とするボールの速度とほとんど同じでなくてはならない.
3. [加速度条件] y 方向におけるボールの加速度は投げ上げ時において重力加速度 ($-g$) と等しい.

1. の位置条件と 2. の速度条件はボールの捕獲条件であり, 2. はボールと手先の反発を考慮した条件となっている. つまり, 互いの相対速度を零にすることによってファンブリングを防ぐのである. 3. の加速度条件は, 手先からボールに加わる抗力が零になったときにボールが手先から離れるとした投げ上げ条件である.

これらの拘束条件を考慮すると, 以下の条件を得る.

$$x_{tc} = x_{ti} + (t_c - t_i) \dot{x}_{ti} - \frac{1}{2} (t_c - t_i)^2 g \quad (3)$$

$$\dot{x}_{tc} = \dot{x}_{ti} - (t_c - t_i) g \quad (4)$$

$$\ddot{y}_{ti} = -g \quad (5)$$

式 (3), (4) に式 (1) を代入すると以下ようになる.

$$l = -\frac{1}{2} (t_c - t_i)^2 B_1^{-1} R^T g \quad (6)$$

$$l = - (t_c - t_i) B_2^{-1} R^T g \quad (7)$$

ここで,

$$B_1 = A_{tc} - A_{ti} - (t_c - t_i) \dot{A}_{ti}$$

$$B_2 = \dot{A}_{tc} - \dot{A}_{ti}$$

である. これら2式より,

$$2B_1 - (t_c - t_i) B_2 = 0 \quad (8)$$

を得る. これを成分で書き表せば,

$$\begin{cases} 2(\cos \theta_{tc} - \cos \theta_{ti}) + (t_c - t_i)(\dot{\theta}_{tc} \sin \theta_{tc} + \dot{\theta}_{ti} \sin \theta_{ti}) = 0 \\ 2(\sin \theta_{tc} - \sin \theta_{ti}) - (t_c - t_i)(\dot{\theta}_{tc} \cos \theta_{tc} + \dot{\theta}_{ti} \cos \theta_{ti}) = 0 \end{cases}$$

となる. これらから $(t_c - t_i)$ を消去すると, 以下のような条件式を得る.

$$(1 - \cos(\theta_{tc} - \theta_{ti}))(\dot{\theta}_{tc} - \dot{\theta}_{ti}) = 0 \quad (9)$$

ボールの投げ上げ位置と捕獲位置は違うと仮定しているのだから, $\theta_{tc} - \theta_{ti} \neq 0$ であるから, 以下のような条件式が導き出される.

$$\dot{\theta}_{tc} = \dot{\theta}_{ti} \quad (10)$$

式 (8) は投げ上げ時刻 t_i と捕獲時刻 t_c のみに依存する連立方程式とみなすこともできるので, これを解くことにより, 拘束条件を満たす t_i, t_c を決定することができる. なおこの決定に関して, 楕円形状を決定するパラメータ l_a, l_b, β には依存しないことに注意されたい.

2.6 軌道パラメータの導出

式 (8) から求まる t_i, t_c を用いて楕円形状を決定するパラメータ l_a, l_b, β を表わす。三角関数の性質を用い、式 (5), (7) を式 (10) のもとに解けば、楕円形状のパラメータは次式のように与えられる。

$$l_a = \sqrt{\frac{p_b - q_b}{p_a(p_b q_a - p_a q_b)}}, \quad l_b = \sqrt{\frac{q_a - p_a}{p_b(p_b q_a - p_a q_b)}} \quad (11)$$

$$\beta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{p_a(p_b - q_b)}{p_b(q_a - p_a)}}$$

ここで、

$$p_a = \frac{\dot{\theta}_i(\sin \theta_{t_c} - \sin \theta_{t_i})}{g(t_c - t_i)}, \quad p_b = \frac{\dot{\theta}_i(\cos \theta_{t_i} - \cos \theta_{t_c})}{g(t_c - t_i)},$$

$$q_a = \frac{\ddot{\theta}_i \cos \theta_{t_i} + \ddot{\theta}_i \sin \theta_{t_i}}{g}, \quad q_b = \frac{\ddot{\theta}_i \sin \theta_{t_i} - \ddot{\theta}_i \cos \theta_{t_i}}{g}$$

である。つまり、楕円形状を決定するパラメータ l_a, l_b, β がそれぞれ投げ上げ時刻 t_i 、捕獲時刻 t_c 、媒介変数 θ_i によって表わされたことになる。

2.7 媒介変数 θ_i に関する拘束条件

先に述べたように、ロボット手先の運動パターンは媒介変数 θ_i の関数として決定される。残っている問題はこの θ_i の与え方である。ここでは、以下の条件によって特定化されたあるクラスの関数に θ_i を限定する。

1. θ_i は周期関数である。
2. θ_i は時間に関する増加関数である (但し 1 周期内)。
3. θ_i は C^3 級である。

この第 1 条件は θ が $0 \sim 2\pi$ の周期的な値を取らなければジャグリングのような連続した楕円軌道を描けないことから、第 2 条件は手先が逆行しないように、第 3 条件は加速度の急激な変化によってロボットアームに掛かる負担をできる限り抑えるようにした条件である。これらの条件は、人間のジャグリングの観察結果とも合致する。

そこで、幾つものボールを用いたジャグリングに対する手先軌道を簡単に表すために、次のような媒介変数 θ_i を採用する (図 5)。

$$\theta_i = \omega t - k \sin \omega t + \theta_0 \quad (12)$$

ここで、 ω は T をジャグリングの周期としたとき $\omega = \frac{2\pi}{T}$ で与えられる。また、 k の範囲は条件 2 より $-1 \leq k \leq 1$ であり、 θ_0 は θ_i の初期値である。

これらのパラメータ T, k, θ_0 を変えることにより、媒介変数の時間履歴を調整することができ、マニピュレータの手先軌道とボールの弾道軌道も調整できる。なお、先に述べた 3 条件を満たす媒介変数 θ_i であれば、式 (12) 以外の関数を採用することもできる。

図 5: 媒介変数 θ_i の一例

図 6: ジャグリングパラメータ獲得のためのフローチャート

2.8 ジャグリングにおけるパラメータ獲得

図 6 は、ジャグリングにおける全パラメータを計算するための手順を示したものである。この際予め与えるのは、ボールの個数 n と媒介変数 θ_i の形、及び Newton 法に与える初期値としての投げ上げ時刻 t_{i0} と捕獲時刻 t_{c0} である。ここで、 t_{i0} は周期 T に対して $0 < t_{i0} < T$ の範囲内、 t_{c0} はボールの個数により $(n-1)T < t_{c0} < nT$ の範囲内で与えなければならない。

3 軌道の計画結果

前節で述べた方法により、様々な媒介変数 θ_i を用いてシミュレーションを行なった。本方法によって獲得された楕円軌道の幾つかを以下に示す。

図 7 (a) に周期 T を変化させた例を示す。周期 T が大きくなるにつれて手先軌道は相似形で大きくなる。そのため、ボールの滞空時間も長くなり弾道軌道の最高点も高くなる。式 (12) の $\theta_i = \theta(t)$ は周期 T の周期関数であるから、 t_i, t_c は周期に比例する。また式 (11), (12) から l_a, l_b が周期の 2 乗に比例する関係が得られる。図 7 (b) に $\sin \omega t$ の係数 k を変化させた場合の例を示す。 k の変化によって投げ上げ位置とボールの最高到達位置との距離はほとんど変化しないが、手

(a) $n = 2, k = 1.0, \theta_0 = 195^\circ$

(b) $n = 2, T = 0.6[\text{sec}], \theta_0 = 195^\circ$

(c) $n = 2, T = 0.6[\text{sec}], k = 1.0$

図 7: シミュレーション結果

先軌道の形状は大きく変化することがわかる。図 7 (c) に初期角度 θ_0 を変化させた場合の例を示す。ボールの最高到達位置はほとんど変わらないが、 θ_0 の変化によって手先軌道の形状が多少変化することがわかる。 t_t 及び t_c が θ_0 に依存しないことは、式 (8) の θ_t の代わりに $\theta_t + \delta\theta$ を代入すれば明らかである。

これらのシミュレーション結果から、弾道軌道の頂点高さを変えるには周期 T を、手先軌道の形状を大きく変えるには k を、弾道軌道の頂点高さを一定に保ちながら手先軌道を変えるには θ_0 をそれぞれ調節すればよいことがわかる。

なお、今回のシミュレーションで採用した投げ上げ条件 (5) は、厳密に言えば、

$$\begin{aligned} t < t_t : & \quad \ddot{y}_{it} > -g \\ t = t_t : & \quad \ddot{y}_{it} = -g \\ t > t_t : & \quad \ddot{y}_{it} < -g \end{aligned} \quad (13)$$

でなければならない。なぜなら $t < t_t$ で $\ddot{y}_{it} < -g$ になると、ボールは投げ上げ時刻 t_t 以前に手先を離れ、宙に浮いてしまうからである。図 8 に手先の y 方向の加速度の一例を示す。この図からもわかるように、 $\ddot{y}_{it}$ はあらゆる時点において式 (13) を満たしている。そして本節に示すシミュレーション結果は、すべてこの条件を満足している。

図 8: 鉛直方向の手先の加速度変化

また、ジャグリングに関して Shannon が提案した理論 [8] によると、ボールの個数 (B)、手の数 (H)、各ボールが手に握られているときの時間 (D)、各ボールの飛翔時間 (F)、それぞれの手が空の時間 (E) の間には、次の関係が成り立つ。

$$\frac{B}{H} = \frac{D + F}{D + E}$$

我々が提案した理論式によって導出された結果は、すべて上式を満たしている。

4 実験的検討

4.1 システム構成

図 9 に本システムの全景を示す。リアルタイムの信号処理のために複数のトランスピュータ (T-800 20MHz) を用い、視覚を含んだトータルなシステムとなっている。

図 9: システム全景

ジャグリングを行なわせるためのマニピュレータとして、ダイレクトドライブ方式の鉛直平面 2 自由度平行リンクマニピュレータを使用する。なお、手先効果器には特別な把持機構や射出機構を持たず漏斗状の受け皿を用いる。また、環境認識のための視覚センサ (CCD カメラ) をマニピュレータから 4.76m 離れた場所に床から高さ 1.69m の位置に固定し、マニピュレータの上方 0.64m×0.60m の範囲が撮像されるように設定した。この範囲のシーンが 256×240pixel の画像データに変換され、トランスピュータを用いた画像処理ボードによって処理された後、制御を司るトランスピュータに転送される。マニピュレータへの指令はパルス発信モジュールを介

して位置制御モードで行い、マニピュレータの関節の角変位はDD モータ付属のエンコーダにより発生するパルス信号をカウンタモジュールでカウントして取り込む。サンプリング時間は0.533msecである。ボールは反発係数がほぼ零の直径約0.05m、質量0.025kgのお手玉（小豆を袋に詰めた不定形物）を用い、手先効果器にはプラスチック製のカップで口の直径0.15m、高さ0.13mのものを用いる。

4.2 理想運動パターンの獲得

4.2.1 階層学習制御則

理論的に軌道を計画しても、実際にはボールやロボットアームのダイナミクスの影響により理想通りのジャグリングが実現されるとは限らない。実際、実験では学習制御則 [10],[11] を用いて手先をほぼ計画軌道通り実行させたにもかかわらず、思い通りの投げ上げが行なわれない場合が生じた。これはボールを質点、手先を板状の物とした簡単なモデルで理論を構築したため、実際には理論通りの速度ベクトルがボールに伝達されなかったと考えられる。モデルを厳密にして計画し直してもよいが、それでは対象物や手先が限定されてしまい汎用性を失ったり、結局はモデル化し得ない要因により望みの投げ上げが行なわれないことが考えられる。そこで、本論文では計画軌道と実軌道の mismatches を解消するアプローチをとる。

弾道軌道を左右するのは投げ上げ時の速度であり、この速度は手先の楕円軌道によって生じる。ボールの位置は、楕円軌道式 (1) を用いて

$$\mathbf{b}_{x_t} = \mathbf{R}(\mathbf{A}_t + t\dot{\mathbf{A}}_t)\mathbf{l} - \frac{1}{2}t^2\mathbf{g} \quad (14)$$

と表わせるので、手先軌道を構成するパラメータ ($l_a, l_b, \beta, \theta_0$) をそれぞれ変更することによってボールの投げ上げ速度、すなわち弾道軌道を修正することができる。

そこで、弾道軌道の頂点を仮想的な入力と見なし、目標投げ上げ速度を達成するための手先軌道の修正と目標弾道軌道を達成するための投げ上げ速度の修正を階層的に行う図10のようなアルゴリズム（階層学習制御則）を考えた。具体的には、図10の内側のループにより、変更された各パラメータによって再生成された楕円軌道を実現できるまで、手先軌道を学習制御則により修正する。ここで、学習則を用いた最大の理由は、投げと捕獲の動作を結合した軌道は加減速が激しく、一般の制御則でその手先軌道を実現することがかなり困難であることによる。

再生成された楕円軌道が達成されたならば、実際にジャグリングを行い、ボールの捕獲の成否を確認する。ボールの捕獲に失敗した場合、外側のループによって目標弾道軌道を達成するようにボールの投げ上げ速度を修正する。投げ上げ速度を変更するためには、前に述べたようにその速度を生み出すロボットの手先軌道を変更する必要がある。これは、手先の楕円軌道の各パラメータに対して次のようにして行なう。画像から取り込んだボール位置より実際の弾道軌道の最頂点 ($\mathbf{b}_{x_{t_p}^*}, \mathbf{b}_{y_{t_p}^*}$) を割り出し、これと弾道軌道モデルによる理論上の最頂点 ($\mathbf{b}_{x_{t_p}}, \mathbf{b}_{y_{t_p}}$) を用いて、次の評価量 J を計算する。

$$J = w_1(\mathbf{b}_{x_{t_p}} - \mathbf{b}_{x_{t_p}^*})^2 + w_2(\mathbf{b}_{y_{t_p}} - \mathbf{b}_{y_{t_p}^*})^2 \quad (15)$$

ここで、 w_i ($i=1, 2$) は重み定数である。次に J を最小化するように、パラメータベクトル $\mathbf{P} = (l_a, l_b, \beta, T)^T$ の修正値 $\Delta\mathbf{P}$ を次式より求める [9]。

$$\Delta\mathbf{P} = -\mathbf{K}_P \frac{\partial J}{\partial \mathbf{P}} \quad : \quad \mathbf{K}_P = \text{diag}(K_{l_a}, \dots, K_T) > 0 \quad (16)$$

図 10: 階層学習制御則

ここで、媒介変数 θ_t の初期値 θ_0 は、投げ上げ時刻や捕獲時刻、並びに弾道軌道の頂点高さに影響を及ぼさないことがシミュレーションにより示されており、なおかつ、実験からもそれが明らかになったので、修正の対象としない。

このようにして式 (16) により修正された各パラメータから楕円軌道を再生成し、内側のループに戻る。この2つの学習ループを交互に実行することによって、最終的に目標弾道軌道を達成する手先軌道を得ることができる。

4.2.2 実験結果

計画軌道で得られたパラメータ

2 個のジャグリングの計画軌道パラメータ

$$(l_a, l_b, \beta, \theta_0, T) = (0.156[\text{m}], 0.094[\text{m}], 81.0[\text{deg}], 218.0[\text{deg}], 0.50[\text{sec}])$$

に対して、本アルゴリズムを以下のような条件

条件

$$\text{目標弾道頂点 } (\mathbf{b}_{x_{t_p}}, \mathbf{b}_{y_{t_p}}) = (0.0, 0.67[\text{m}])$$

$$(w_1, w_2) = (0.0001, 0.00001)$$

$$(K_{l_a}, K_{l_b}, K_{\beta}, K_T) = (50.0, 200.0, 0.0045, 0.000009)$$

で適用した結果、手先の楕円軌道は

階層学習後の軌道パラメータ

$$(l_a, l_b, \beta, T) = (0.143[\text{m}], 0.055[\text{m}], 66.5[\text{deg}], 0.38[\text{sec}])$$

に変更された。このときの評価量 J の変化の様子を図11に示す。初期条件として計画軌道を与えているので、どのような手先軌道でも図11のようにほぼ10回で理想的な捕獲が可能となる。なお、ボールより少し大きめのカップを手先効果器として用いているため、捕獲自体は8回前後で実現されている。

図 11: 階層学習制御の評価量変化

4.3 ビジュアルフィードバックによる手先軌道の微小修正

階層学習制御則はあくまでも実現可能なジャグリング運動のフィードフォワード入力を生成するものであって、再現性のない外乱は補償できない。この種の外乱に対処するには、視覚によるボールの運動予測に基づいた手先軌道の微小修正が必要となる。

手先軌道の微小修正は標的とするボールが空中にある間に行われなければならない。対象とするボールが増えるほどそれに費やせる時間は短くなるので、ボールの軌道に合わせて捕獲のための手先軌道を再生成していたのでは間に合わなくなる可能性が高い。そこで、

- ・ボールの弾道軌道は大きくずれない。
- ・ボールの弾道軌道と手先軌道は常に交差する。

という仮定の下に、捕獲のタイミングを調整する次のような方法を考えた。

図 12: ビジュアルフィードバックの概念図

[手先軌道を微小修正するアルゴリズム]

1. 捕獲する区間を図 12 のように限定し、その区間内の楕円軌道上の離散点と、待機地点からその点へ手先が移動するのに要する時間とを関連付けたテーブルを予め作成する。
この離散点の個数によって予測捕獲地点の精度が決定される。
2. 連続した画像数枚から得られたボールの位置情報(重心)より、最小 2 乗法を用いてボールの弾道(放物)軌道を決定する。

3. ボールの弾道軌道と手先の楕円軌道との交点を 2 分割法を用いて算出する。
4. 3. で得られた交点から、1. で作成したテーブルを用いて、待機地点から捕獲予定地点までのロボットアームの移動時間を割り出す。
ボールの捕獲予定時刻も先の交点計算にともなって算出されるので、この移動時間を考慮して待機時間が計算される。
5. この予測結果に基づいてロボットコントローラに与える待機時間を調整する。
6. 以後 2.~5. を繰り返す。

1~4. までは、全て画像処理ボードに搭載されたトランスピュータによって計算し、待機時間を調整する微小時間だけを制御を司るトランスピュータに送信する。

以上の方法により、学習した手先軌道を変化させることなく連続的なジャグリングが可能となった。

5 実験例

階層学習制御則で得られた軌道パラメータ

ボールの個数 $n = 2$ に対して

$$(l_a, l_b, \beta, \theta_0, T) = (0.143[\text{m}], 0.055[\text{m}], 66.5[\text{deg}], 218.0[\text{deg}], 0.38[\text{sec}])$$

に対して実験したときの様子を分解写真として図 13 に示す。この結果は、ボール 1 個につき 200 回、つまり延べ回数にして 400 回のジャグリングを実行させたときの一部を表したものであるが、400 回目にボールを 2 個とも捕獲して終わるように指令したもので、これ以上の回数も可能である。

なお、最初に投げ上げるボールは既にカップの中に収めてあり、このボールが投げ出されて捕獲されるまでの間に 2 個目のボールを人間が投げ入れるようになっている。つまり、2 個目を投入するタイミングも疎かにできないが、ビジュアルフィードバックを用いているので多少のズレはカバーできる。

6 おわりに

本章では、人間の器用なタスクとしてジャグリングを取り上げ、それをロボットが実行する方法について考察した。

タスク実行前の手先軌道を計画する段階では、時空間的に拘束されているが自由度の大きいジャグリングタスクに対して、ロボットの手先軌道をパラメトリックに決定できることを示した。もちろん、この計画方法はロボットの形状に依存せず、タスクに対する「ノウハウ」として用いられるものである。タスクの実行段階では、計画軌道と実軌道の誤差を解消する階層学習制御則を提案し、また繰り返し段階においては、ビジュアルフィードバックによる捕獲タイミングの微小修正法を示し、それらの有効性を実験的に検証した。

本論文で提案する方法は、対象とするボールの個数を限定するものではないが、ボールが 3 個以上になると、その実現はかなり難しくなる。これは、さらなる高速な運動の必要性から生じる、アームにかかる非線形力の増大と、それに伴うロボットを駆動するモータのトルク不足といった本質的ではない部分に起因するところが大きい。そこで今後の課題として、ボールの個数増加に注目するよりも、手先軌道としてど

の様なパラメータ表現が適しているか、効率よく学習するにはどれほどの事前知識をロボットに与えればよいかなどの考察を深めていきたい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、ご助言とお励ましを賜りました東京大学の有本卓教授に感謝致しますと共に、ロボットアームの設計製作にご協力戴いた三菱電機(株)の増田隆広氏、森内賀義氏、武田宗久氏、坪井光明氏に心より感謝致します。

参考文献

- [1] W. Thomas Miller III: "Real-Time Application of Neural Networks for Sensor-Based Control of Robots with Vision," *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, **19**-4(1989), 825.
- [2] S. Schaal, C. G. Atkeson: "Passive Control Strategies for Robot Juggling," *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, (1993-5), 913.
- [3] A. A. Rizzi, D. E. Koditschek: "Further Progress in Robot Juggling: The Spatial Two-Juggle," *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, (1993-5), 919.
- [4] T. Sakaguchi, M. Fujita, H. Watanabe, F. Miyazaki: "Motion Planning and Control for a Robot Performer," *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Georgia, (1993-5), 925.
- [5] 竹中一起: "視覚をもつマニピレータの動的制御 (ロボットによる「けんだま」の実現)", 日本機械学会論文集 (C 編), **50**-458(1984), 2046.
- [6] 佐藤守一, 阪口健, 升谷保博, 宮崎文夫: "作業環境との相互干渉を有するタスクの自律生成—ロボットによる剣玉の実現—", 日本機械学会論文集 (C 編), **59**-558(1993), 487.
- [7] R. L. Andersson: "A Robot Ping-Pong Player: Experiment in Real-Time Intelligent Control," *The MIT Press*, (1987).
- [8] Claude E. Shannon: "Unified Field Theory of Juggling" (in "PROFILE/CAREERS"), *IEEE SPECTRUM*, (1992-4), 75.
- [9] Peter Dyer and Stephen R. McPeynolds: "The Computation and Theory of Optimal Control," *Academic Press*, (1965).
- [10] 有本卓: "ロボットの力学と制御", 朝倉書店, (1991).
- [11] 内山勝: "試行による人工の手の高速運動パターン形成", 計測自動制御学会論文集, **14**-6(1978), 706.

図 13: 2 個のジャグリングの実験結果