高速多指ハンドアームと高速ビジョンを用いた ボールジャグリングシステム

木 崎 昂 裕^{*1} 並 木 明 夫^{*1} 脇 屋 慎 一^{*1}
石 川 正 俊^{*2} 野 波 健 蔵^{*1}

Ball Juggling System with High-speed Multifingered Hand-Arm and High-speed Vision

Takahiro Kizaki^{*1}, Akio Namiki^{*1}, Shinichi Wakiya^{*1},
Masatoshi Ishikawa^{*2} and Kenzo Nonami^{*1}

Humans can perform fast and skillful manipulations using various parts of the body by effectively utilizing the dynamics of the targets. Visual sensation is the most important human sense used for such manipulations. It is obviously preferable that robot can perform various tasks using same end effectors like a human hand and using visual information. Juggling is one such example involving skillful and dynamic manipulations, and visual information is essential for it to be successful. Previously, there have been several studies about robotic juggling. However, none of these studies have considered cases in which a human-like multifingered hand-arm is used for the robotic juggling. The purpose of this study is to achieve two-ball juggling using our robotic hand-arm, which has three general purpose fingers, and stereo vision. The trajectory of the robotic hand-arm is generated based on the ball's estimated dropping position and moment, and the robot catches the ball. The juggling motion is achieved by repeating this cycle.

Key Words: High-speed Hand-Arm, Multifingered Hand, Juggling, Dynamic Manipulation, Visual Feedback

1. 序 論

人間は対象のダイナミクスを利用し、手を用いて巧みで動的な操り動作を行うことができる。ロボットでも多指ハンドを用いて人間のようなマニピュレーションが行えれば、生産性の大幅な向上や作業の高速化が期待できる。本研究グループではロボットに人間のような操り能力を持たせることを目標とし、ロボットアームを用いたボールバッティング動作 [1] や高速多指ハンドアームを用いた投球動作の実現 [2] [3] など、高速で動的なボールの操りについて研究を行ってきた。瞬時に対象とのダイナミクスが変化する動作を行えるのは人間の器用さの一例であるが、さらに人間はジャグリング動作のように動的な繰り返し動作を行うこともできる。動的な繰り返し動作を行うためにはそれぞれの動作の精度が大きな問題となるため、これまでの研究成果であるバッティングや投げ動作よりも困難である。

動的な繰り返し動作の例としてジャグリング動作を挙げたが、ロボットによるジャグリング動作を成功させた先行研究は多数あり、それらの多くは平板をエンドエフェクタとして用いたパドルジャグリングである [4] [5]。ほかにはカップ状のエンドエフェクタを用いて受動的にボールを把持し、ボールジャグリング動作を行った研究例 [6] [7] がある。ジャグリング動作の研究例ではすべて単純な形状のエンドエフェクタを用いており、対象とのダイナミクスを単純化することで安定性を高めている。しかし、エンドエフェクタが能動的に動くことができないため、他の種類のジャグリングなどさらに高度な繰り返し動作に応用することは難しいと考えられる。人間の手のような汎用的なロボットハンドを用いれば様々なジャグリング動作に応用可能であるが、そのような研究例は存在しない。

そこで、本研究では多指ハンドアームを用いたボールジャグリング動作を取り上げる。多指ハンドを用いた場合は自由度が多いために動作生成は困難となる。しかし、対象を把持できるためにキャッチとリリースの位置や時間が操作可能となり、より高度なジャグリングに応用が可能である。また、ボールジャグリングはキャッチとリリースという動的で基本的な把持動作の素早い繰り返しから成るため、高速な把持動作についての制御開発のよいテストモデルになる。

多指ハンドでジャグリング動作を実現するためには以下の課

原稿受付 2012 年 2 月 8 日

^{*1}千葉大学大学院工学研究科

^{*2}東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*1}Graduate School of Engineering, Chiba University

^{*2}Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

■ 本論文は提案性で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

題が挙げられる。

- ①対象の位置情報を高速かつ高精度で取得する。
 - ②アーム先端に質量の大きいハンド部が取り付けられているため、効率的な軌道を生成する必要がある。
 - ③連続して投げ上げるために、キャッチの際に安定して把持しなければならない。
- ①に関しては3章の視覚認識で、②と③に関しては4章の動作制御で説明する。本研究グループでの先行研究において1ボールジャグリング動作にはすでに成功しているため[8]、本論文では2ボールジャグリング動作について述べるが、この提案手法は2個以上のボールのジャグリングにも応用可能である。

2. システム

本研究では高速ハンドアーム、高速ビジョンシステム (IDP Express R2000 F) [9]、リアルタイム制御演算装置 (dSPACE 社製) を用いる。システム構成を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の Σ_0 は基準座標系である。動作の流れは、(1) 市販のトスマシン (FTS-100; Promark 社) でボールを打ち上げ、それに合わせてハンドアームがボールを投げ上げる。(2) それぞれのビジョンから得られる画像を Image PC に取り込んだ後に GPU (Tesla C2050; NVIDIA 社) を用いて画像処理および演算を行い、ボールの三次元位置の推定結果を制御演算装置に送信する。(3) 制御演算装置においてボールの推定軌道からハンドアームの軌道を修正し、キャッチを行うというものである。制御演算は 1 [kHz]

Fig. 1 System configuration

Fig. 2 Joint configuration and link coordinates

Table 1 Specifications of high-speed hand-arm

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
max torque [Nm]	150	150	150	32.6	22.35	1.8	0.9
max speed of revolution [rpm]	112	112	112	50	120	150	150

で行われ、ソフトウェア開発には Matlab の Simulink を用いる。

2.1 高速アーム

本研究で用いる高速ハンドアームの軸構成を Fig. 2 に、概観を Fig. 3 に、仕様を Table 1 に示す。アーム部は 7 自由度であり、肩 3 軸、肘 2 軸、手首 2 軸の人間と同様な構成となっている。関節角度センサはすべてインクリメンタルエンコーダである。第 1 関節から第 3 関節には近接センサ (GXL-8F-R) が取り付けられており、これは初期姿勢を決定する際に使用する。全軸の減速比は 1 : 50 と低減速比であるため、高速に動作することが可能である。第 1 関節は 45 [deg] 傾いているので可動範囲を大きく取ることができるが、本研究においてジャグリング動作中は第 1 関節は固定したままで使用しない。

2.2 高速多指ハンド

ハンドの概観図を Fig. 4 に示す。このハンドはアームに搭載して動的な操作を行うことを想定して開発されたので [10]、約 450 [g] 程度 (ケーブルを除く) に軽量化が図られている。そのため、指本数は 3 本、自由度は中指が 2 自由度、左右の指が 3 自由度の合計 8 自由度と削減されている。3 指は主に球形物体と柱形物体の把握に対応できるように配置されているが、左右の指の付け根には可動範囲が 180 [deg] の旋回軸があり、それらが人間の親指の機能を果たして様々な把握形態に対応できるように設計されている。

2.3 高速ビジョン

高速ビジョンシステムには Photron 社と広島大学が開発した高速ビジョンプラットフォーム IDP-Express R2000 F を用いる。このシステムは 2 台の小型高速カメラヘッドと専用 FPGA 画像処理ボード (IDP-Express ボード) からなり、カメラヘッドには Photron 社製 Fastcam MH4-10K 用カメラヘッドが採

Fig. 3 High-speed hand-arm

Fig. 4 High-speed hand

用されている。このシステムでは 512×512 [pixel] の画像を最大 2,000 [fps] で取得することができるが、本研究では取得画像の明るさと画像処理速度の問題から 500 [fps] で撮影を行う。

3. ボールの軌道推定

ボールの三次元位置を取得画像から推定し、逐次最小二乗法を用いてボールの軌道を推定する。

3.1 視覚情報処理

カメラからはプレイヤー画像データが得られるため、これを HSV 表色系に変換し、背景差分と色相を用いた色抽出によりボールのみを抽出して二値化する。ボールが映っていた場合は重心座標を中心として ROI (Region Of Interest) を設定することで計算量を削減する。ボールの重心座標と面積は二値画像の画像モーメントを求めることで算出する。

ステレオ法を用いてボールの三次元位置を推定するためカメラは 2 台使用し、黄色とピンクのポリウレタンボールをジャグリングに使用する。したがって、2 台のカメラから得られた画像にそれぞれ黄色とピンクについて色抽出を行うため、同時に 4 枚の画像を扱うことになる。精度のよいキャッチ位置の推定結果を得るためには、サンプリング数が多いほうがよい。そこで、上記の画像処理をすべて GPU を用いた並列演算により実行することで 500 [fps] での処理が可能となる。求めたボールの重心座標に歪み補正を行ったあと、Ethernet 通信により制御演算装置へ歪みを含まない画像上の重心座標を非同期で送信する。ボールの三次元座標はステレオ法を用いて推定する。

3.2 逐次最小二乗法による軌道パラメータ推定

求めた座標群から逐次最小二乗法 (RLS 法) によってボールの軌道を推定する。空気抵抗を無視するとボールの軌道は放物線となり、以下の式で表される。

$$\mathbf{r}_b(t) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 t + a_2 \\ b_1 t + b_2 \\ c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

これらのボールの軌道パラメータ $\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3]$ を推定することでボールの軌道を推定できる。 c_1 は重力加速度から求められる定数であるが、レンズの歪みなどの影響により推定値が一定とならなかったために変数とした。RLS 法では N 個のデータから得られた推定値を $\hat{\boldsymbol{\theta}}_N$ として表したときに、新しく得られたデータと $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{N-1}$ を用いて $\hat{\boldsymbol{\theta}}_N$ を求められる。逐次計算のアルゴリズムは

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_N = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{N-1} + \frac{\mathbf{P}_{N-1} \boldsymbol{\varphi}_N (\mathbf{y}_N - \boldsymbol{\varphi}_N^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_{N-1})}{1 + \boldsymbol{\varphi}_N^T \mathbf{P}_{N-1} \boldsymbol{\varphi}_N} \quad (2)$$

で表される。 $\mathbf{P}_N$ は共分散行列であり、

$$\mathbf{P}_N = \mathbf{P}_{N-1} - \frac{\mathbf{P}_{N-1} \boldsymbol{\varphi}_N \boldsymbol{\varphi}_N^T \mathbf{P}_{N-1}}{1 + \boldsymbol{\varphi}_N^T \mathbf{P}_{N-1} \boldsymbol{\varphi}_N} \quad (3)$$

として更新される。事前情報がない場合、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0 = \mathbf{0}$, $\mathbf{P}_0 = \gamma \mathbf{I}$ とされる。ただし、 $\gamma > 0$ であり、 γ は通常 10^3 から 10^4 程度に設定される。

Fig. 5 Block diagram of juggling

Fig. 6 Outline of juggling motion

4. ジャグリング動作の軌道生成

ジャグリング動作のブロック線図と概要を、Fig. 5 と Fig. 6 に示す。Fig. 5 に示すように、本研究のジャグリング動作は投げ上げ動作、キャッチ動作、キャッチ姿勢から投げ上げの準備姿勢に移るためのリターン動作の三つの動作で構成され、三つの動作を順番に切り替えることでジャグリング動作を実現させる。関節角度の制御には PD 制御器を用いる。Fig. 6 の $\mathbf{q}_t, \mathbf{q}_c, \mathbf{q}_r$ は各動作を生成するための基準となる各関節角度であり、 t_t, t_c, t_r は各動作に要する時間である。各動作の生成方法について以下に述べる。

4.1 投げ上げ動作

本研究グループでの投球動作に関する研究 [3] により、各関節に正弦波を用いて目標軌道を与えることで運動連鎖を利用した効率的な投球動作を実現できることが実験的に分かっている。ジャグリングにおいては小さい腕の動きでボールを高く投げ上げられることが望ましい。そこで本研究においても運動連鎖を利用して手先速度を向上させる目的で、以下の式のように正弦波を用いて目標関節軌道を生成する。

$$q_{d_i}(t) = q_{r_i} + \frac{1}{2} (q_{t_i} - q_{r_i}) (1 + \sin(\omega_{t_i} t + \phi_{t_i})) \quad (0 < t < t_t) \quad (4)$$

ただし, q_{d_i} ($i = 2, 4, 6$) は第 i 関節の目標関節角度, q_{r_i} は投げ上げ準備姿勢の目標関節角度である.

投げ上げ終了時の姿勢 q_{t_i} とパラメータ $(\omega_{t_i}, \phi_{t_i})$ は q_{r_i} をあらかじめ設定して q_{t_i} と $(\omega_{t_i}, \phi_{t_i})$ を一定間隔で変化させながら, 投げ上げ動作における最高手先速度 $\mathbf{v}_{\max}$ とそのときの手先姿勢 $\mathbf{R}_{t7}$ を総当たりで計算し, 計算結果の中で以下の評価関数 e が最小となるものを選んだ後に実験により調整を行って決定した.

$$e = (\mathbf{R}_{t7}(1, 1) - \mathbf{R}_{\text{ref}7})^2 + \mathbf{v}_{\max_x}^2 + (\mathbf{v}_{\max_z} - \mathbf{v}_{\text{ref}_z})^2 \quad (5)$$

ただし, $\mathbf{R}_{\text{ref}7}$ は MP 関節と IP 関節の間のリンクが水平となるように, $\mathbf{v}_{\text{ref}_z}$ はボールを十分な高さまで投げ上げられるように設定する.

リリースの瞬間にはハンドの中指を開いてボールの把持状態を解除すると同時に, 左右の指が同じスナップ動作を行ってボールを手先速度方向へわずかに押し出す. この動作により, ボールは左右の指の上を指先方向に転がりながらリリースされる. これは妹尾らによる投球動作[2]と同様のリリース方法である. 具体的には, 手先速度が最高となるときに合わせて各指の MP 関節の関節目標値を式 (4) と同様に正弦波を用いて変化させ, スナップ動作を行う. この際, 各パラメータはボールがアームの可動範囲に落下するように, 実験により試行錯誤的に決定する. パラメータの設定精度は主に x_0 軸方向におけるボールの落下位置に影響するが, アームの可動範囲は x_0 軸方向に 30 [cm] 以上あるため, 試行錯誤的であっても十分な精度で決定できる. ボールがリリースされた直後, 投げ上げ動作からキャッチ動作に移る.

4.2 キャッチ動作

ボールがある平面 ($z_0 = z_c$) まで落下してきたときにキャッチを行うとし, その平面をキャッチ平面, 位置をキャッチ位置, 時間をキャッチ時間と呼ぶことにする. また, キャッチの瞬間のハンドアームの手先姿勢, つまり第 7 関節に固定した座標系 Σ_7 の基準座標系 Σ_0 に対する姿勢行列をキャッチ姿勢 $\mathbf{R}_{c7}$ とする.

4.2.1 キャッチ位置とキャッチ姿勢の計算

式 (2) よりボールの軌道パラメータの推定値 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_N = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3]$ を求め, 式 (1) に $\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_N$ および $z = z_c$ を代入することでキャッチ時間 t_c , キャッチ位置 $\mathbf{p}_c$ および速度ベクトル $\dot{\mathbf{p}}_c$ が以下の式より求まる.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_c(\hat{\boldsymbol{\theta}}) &= \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{a}_1 t_c + \hat{a}_2 \\ \hat{b}_1 t_c + \hat{b}_2 \\ \hat{c}_1 t_c^2 + \hat{c}_2 t_c + \hat{c}_3 \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{p}}_c(\hat{\boldsymbol{\theta}}) &= \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{b}_1 \\ 2\hat{c}_1 t_c + \hat{c}_2 \end{bmatrix} \\ t_c &= \frac{-\hat{c}_2 + \sqrt{\hat{c}_2^2 - 4\hat{c}_1(\hat{c}_3 - z_c)}}{2\hat{c}_1} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 7 Hand orientation at the moment of catching

ただし, $t = 0[s]$ のときは投げ上げ動作からキャッチ動作に切り替わる瞬間である. また, Fig. 7 に示すように, キャッチ姿勢 $\mathbf{R}_{c7}$ をキャッチ時のボールの速度ベクトル $\dot{\mathbf{p}}_c$ に対向する姿勢とすると, $\mathbf{R}_{c7}$ は

$$\mathbf{R}_{c7}(\dot{\mathbf{p}}_c) = \begin{bmatrix} \cos \lambda \cos \phi & \sin \lambda & \sin \phi \cos \lambda \\ \sin \lambda \cos \phi & -\cos \lambda & \sin \lambda \sin \phi \\ \sin \phi & 0 & -\cos \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y}_c}{\dot{x}_c} \right), \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{-\dot{z}_c}{\sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2}} \right)$$

と表すことができる. ただし, キャッチ可能なときは $\dot{z}_c < 0$ かつ $\dot{x}_c < 0$ である. さらに, キャッチの瞬間の Σ_7 の原点座標 $\mathbf{r}_w$ は

$$\mathbf{r}_w(\mathbf{p}_c, \dot{\mathbf{p}}_c) = \mathbf{p}_c - \mathbf{R}_{c7}^T \mathbf{r}_{\text{end}} \quad (8)$$

と表される. ただし, ${}^7\mathbf{r}_{\text{end}}$ は Σ_7 における手先座標であり, ボールを静的に把持した時の Σ_7 におけるボールの重心座標として事前に求める.

手先 3 関節は回転関節で関節軸が 1 点交わっているとき, 手先姿勢と関節軸の交点座標が与えられれば Pieper の方法[11]を用いて 6 自由度マニピュレータの逆運動学を解くことができる. 第 1 関節を固定した場合, 本研究で用いるハンドアームは 6 自由度である. さらに Fig. 2 に示すように手先 3 関節は回転関節で, 関節軸は $\mathbf{r}_w$ で交わっている. したがって, 式 (7) および式 (8) よりキャッチ位置とキャッチ姿勢を求めると, Pieper の方法を用いることで以下のようにキャッチ時の第 i 関節の目標関節角度 $\mathbf{q}_c = [q_{c2}, q_{c3}, \dots, q_{c7}]$ を求めることができる.

$$\mathbf{q}_c = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{r}_w, \mathbf{R}_{c7}) \quad (9)$$

さらにキャッチ時には Σ_7 の角速度をゼロとしてハンド姿勢をボールの方向に固定し, 並進速度を $\dot{\mathbf{p}}_c$ に合わせてキャッチが容易となるようにする. Σ_7 の角速度はゼロであるので, 手先 3 関節の関節角速度をゼロ ($\omega_5 = \omega_6 = \omega_7 = 0$) とすると, 手先速度 $\mathbf{v}$ を実現する関節角速度 $\boldsymbol{\omega}_{234} = [\omega_2, \omega_3, \omega_4]^T$ は

$$\boldsymbol{\omega}_{234} = \mathbf{J}_r^{-1} \mathbf{v}, \quad \mathbf{J}_r(\boldsymbol{\omega}) = \frac{\partial \mathbf{p}_c}{\partial \mathbf{q}_{c234}^T} \quad (10)$$

と表される. ただし, $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{p}}_c$ とするとハンドアームの軌道が大きくなりすぎる. そのためボールの α 倍の速度 ($0 < \alpha < 1$) でキャッチすることとし, $\mathbf{v} = \alpha \dot{\mathbf{p}}_c$ を式 (10) に代入してキャッチ時の目標関節角速度 $\boldsymbol{\omega}_c = [\omega_2, \omega_3, \omega_4, 0, 0, 0]^T$ を求める.

4.2.2 キャッチ軌道の計算

ハンドアームを用いたボールキャッチについての先行研究は複数存在する。Hong によるハンドアームを用いたボールキャッチについての研究 [12] では、三次多項式によりアームの手先目標位置を変化させ、キャッチに成功している。これは、五次多項式を用いてアームの手先目標位置を変化させた場合は手先の加速度が連続となる滑らかで変化の大きい軌道が生成されるため、アームの関節角度の上下限を大きく超えてしまう可能性があるという理由による。本研究でも同様の理由により三次多項式を用いてキャッチ動作のための目標関節軌道を生成する。

投げ上げ終了時からキャッチまでのハンドアームの軌道は、投げ上げ動作からキャッチ動作へ切り替わったときの目標関節角度 q_t と目標関節角速度 ω_t を初期条件、キャッチ時の目標関節角度 q_c と目標関節角速度 ω_c を終端条件として、目標関節軌道 $q_d(t)$ を以下の三次多項式で生成する。

$$\begin{aligned} q_d(t) &= a_c t^3 + b_c t^2 + \omega_t t + q_t \\ a_c &= \frac{2(q_t - q_c) + (\omega_c + \omega_t t_c)}{t_c^3} \quad (0 < t < t_c) \\ b_c &= \frac{3(q_c - q_t) - (\omega_c + 2\omega_t t_c)}{t_c^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ボールの三次元位置のサンプリング数が少ない場合は落下位置の推定結果の変化が激しく、式 (6) および式 (9) を用いて t_c と q_c を算出し、式 (11) より目標軌道を生成すると軌道が不連続になってしまう。そこで、式 (3) の共分散行列 P_N に含まれる $\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{c}_1$ の標準偏差が閾値以下となれば推定結果が十分収束したと判断し、キャッチ動作軌道の算出を開始する。この閾値は実験により求める。 q_c と ω_c は収束後からキャッチ時間の 200 [ms] 前まで、 $\hat{\theta}$ に変化があるたびに更新される。

キャッチの瞬間には Fig. 7 のように展開しておいた 3 本の指を一定角度まで閉じてボールを把持する。この動作にはおよそ 30 [ms] を要するため、キャッチ時間の 10 [ms] 前にステップ目標値を与える。

4.3 リターン動作

リターン動作とはキャッチ時の姿勢から投げ上げ動作に移るための動作である。ハンドアームの軌道はキャッチ時の目標関節角度 q_c と目標関節角速度 ω_c を初期条件、投げ上げ開始時の目標関節角度 q_r と目標関節角速度 ω_r を終端条件として、キャッチ動作と同様に目標関節軌道を以下の三次多項式で生成する。

$$\begin{aligned} q_d(t) &= a_r t^3 + b_r t^2 + \omega_c t + q_c \\ a_r &= \frac{2(q_c - q_r) + (\omega_r + \omega_c t_r)}{t_r^3} \quad (0 < t < t_r) \\ b_r &= \frac{3(q_r - q_c) - (\omega_r + 2\omega_c t_r)}{t_r^2} \end{aligned} \quad (12)$$

n 個のボールでジャグリングを行う場合、各動作に要する時間 (t_t, t_c, t_r) は以下の式を満たさなければならない。

$$nt_c + (n-1)(t_t + t_r) \leq T \quad (13)$$

(1) Unstable grasp (2) Loosen grasp (3) Regrasp

Fig. 8 Regrasping strategy

ただし、 T はボールを投げ上げてからそのボールをキャッチするまでの時間であり、ボールが天井近く ($z_0 = 1,790$ [mm]) まで投げ上げられた場合は $T = 1.18$ [s] である。本実験では t_t を定数とし、 $t_t = 0.18$ [s] である。 t_c はボールの運動によって変化する。したがって、式 (13) を満たすためには t_r を調節する必要がある。2 個のボールのジャグリングを行うので $n = 2$ とし、以上を式 (13) に代入すると

$$t_r \leq 1 - 2t_c \quad (14)$$

となる。リターン動作後に再度投げ上げ軌道を生成することでジャグリングのサイクル軌道を生成することができる。

4.4 持ち直し動作

投げ上げ動作はボールを静的に把持した状態を前提としている。そのため、不安定な把持からの投げ上げではボールがハンドアームの作業領域外に落下してしまう場合がある。したがって、ジャグリング動作を行うにはキャッチ時に多少不安定な状態で把持したとしても、安定な把持状態になるように持ち直し動作を行う必要がある。

そこで Fig. 8 のように、リターン動作中に一定角度まで中指を開いて把持を緩めて握り直すという動作を行う。Fig. 8 (2) に示すように、ボールを把持した場合は各指の中心からなる三角形内にボールの重心が存在すると仮定する。また、ボールは剛体であり、 γ は十分小さく、 ${}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}} = [{}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_x}, {}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_y}, {}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_z}]^T \simeq {}^7\ddot{\mathbf{r}}_b$ であるとする。 ${}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_z} > 0$ のときに把持を緩めたとすると、ボールに加わるモーメント $\mathbf{N}$ は

$$\mathbf{N} = b_r ({}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_z} \cos(\beta + \gamma) + {}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_y} \sin(\beta + \gamma)) \quad (15)$$

と表せる。ただし、 b_r はボールの半径である。したがって、 $\psi = \tan^{-1}({}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_z} / {}^7\ddot{\mathbf{r}}_{\text{end}_y})$ とすると

$$\begin{aligned} -\frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma) \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma) \\ \text{かつ} \\ -\frac{\pi}{2} + \beta + \gamma \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} + \beta + \gamma \end{aligned} \quad (16)$$

のときに把持を緩めれば、ボールは ${}^7\mathbf{r}_b$ が ${}^7\mathbf{r}_{\text{end}}$ に近づくように指の上を転がってより安定な把持状態となる。ただし、この持ち直し動作は主に y_7 軸方向にのみ静的把持状態に近づける効果がある。式 (16) を満たすとき、中指の目標関節軌道 $q_{\text{index}}(t)$ を以下の式で与える。

Table 2 Main parameters for trajectory generation

	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
ω_t	2π		2π		10π
ϕ_t	0		$-\frac{1}{3}\pi$		$\frac{3.27}{2}\pi$
q_t	0.05π	$-\pi$	-0.12π	0.5π	-0.15π
q_r	0.42π	$-\pi$	0.14π	0.5π	0.04π

Fig. 9 Yellow ball trajectory

$$q_{\text{index}}(t) = q_{\text{index}}(t) + q_{\text{reg}} f \propto |\dot{r}_{\text{end}}| \quad (17)$$

ただし, q_{index} はリターン動作中の中指の角度目標軌道, q_{reg} は定数, f は $|\dot{r}_{\text{end}}|$ に比例する変数で $0 \leq f \leq 1$ とする.

5. 実験

持ち直し動作を行う場合と行わない場合とで, それぞれ4回ずつジャグリング動作実験を行った. 持ち直し動作を行う場合の連続キャッチ回数は平均3.3回, 最大5回であり, 行わない場合は平均3.0回, 最大3回であった. また, 投げ上げたボールがアームの可動範囲に落下した確率は, 持ち直し動作を行う場合は71%, 行わない場合は50%であった. 今回の実験では $z_c = -210$ [mm], $\alpha = 0.1$ とした. 軌道生成に用いたパラメータを **Table 2** に示す.

5.1 ボールの放物線軌道の推定結果

黄色いボールの放物線軌道を3回推定した結果を **Fig. 9** に示す. 図中の実線がRLS法によって求めた軌道の最終推定結果であり, ボールの三次元位置の推定結果と推定軌道は十分一致している. この実験において収束判断直後の初期落下予測位置 ($t = \text{約 } 0.26$ [s]) とキャッチ直前の最終落下予測位置 ($t = \text{約 } 0.59$ [s]) の差は x_0 軸方向に30 [mm], y_0 軸方向に40 [mm] 以下であるが, キャッチそのものの成功率は9割以上であったため, 十分な精度で最終落下位置を予測できていると考えられる.

5.2 ハンドアームの軌道生成結果

5回連続でボールをキャッチした際に生成されたハンドアームの軌道を **Fig. 10** に示す. キャッチ位置とキャッチ時間が各サイクルごとに变化しても滑らかな軌道を生成できていることが分かる. 変化の大きいところでは追従誤差がみられるが, 投げ上げ動作時やキャッチの瞬間は問題なく追従できている. 1サイクル約1.3 [s] という非常に高速な動作であるが, このような追従性を得られたことから効率的なハンドアーム軌道が生成できていると考えられる.

Fig. 10 Juggling trajectory ($x_0 - z_0$) **Fig. 11** MP joint angle of index finger **Fig. 12** Results of drop position estimation**Table 3** Average value of drop position

	x-axis [mm]	y-axis [mm]
With regrasping	398	-40
Without regrasping	120	-132

5.3 持ち直し動作による投げ上げの安定化

持ち直し動作を行った際の中央の指のMP関節角度を **Fig. 11** に示す. $f(7\dot{r}_{\text{end}})$ に合わせて目標値が変化しているのが分かる. 持ち直し動作を行う場合と行わない場合で, キャッチからの投げ上げをそれぞれ16回ずつ行った結果から求めた落下位置の最終推定結果を **Fig. 12** に, 平均値を **Table 3** に示す. どちらの場合も落下位置のばらつきがみられ, 特に x_0 軸方向のばらつきが大きいことが分かる. F検定を行った結果, どちらの軸方向についても等分散性が認められた. そこでt検定を行ったところ, どちらの軸方向についても有意水準1%で有意差があり, 持ち直し動作を行った場合のほうが平均落下位置が可動範囲のより内側にあることが分かった. したがって, 持ち直し動作によって静的把持状態へ近づいたため投げ上げが安定し, ボール

が可動範囲のより内側に落下するようになったが、指先方向へは静的把持状態に近づきにくく、キャッチ時の把持状態によってばらつきが生じていると考えられる。これは今後の課題である。

6. 結 論

高速ビジョンシステムと GPU を用いることで 500 [Hz] でボールの重心座標を算出することができ、サンプリング数を多くとることができたために精度よくボールの落下位置を推定することができた。このアルゴリズムは高速ビジョンでなくても実現可能であるが、レートが落ちるにしたがって精度が低下することが予想される。また、単純な PD 制御でありながらハンドアームが問題なく高速に追従できる軌道が正弦波を用いて生成でき、持ち直し動作を行うことで投げ上げの安定化を図ることができた。このような持ち替えはジャグリングに限らず他の高速動作に応用できる可能性があり、検討中である。以上の要因によって、**Fig. 13** に示すようにハンドアームによる 2 ボールジャグリング動作を実現できた。

今後の課題としてはジャグリング回数の向上が挙げられる。特に投げ上げの安定性がジャグリングの成功率に影響するので、投げ上げ軌道の最適化とボールの投げ上げ方向の制御を取り入れる必要がある。安定性を向上させ、さらに複雑なジャグリング動作への応用を目指しながら、動的な操り動作の基礎技術の開発と他の動作への応用について研究を進める。

参 考 文 献

- [1] T. Senoo, A. Namiki and M. Ishikawa: "Ball Control in High-speed Batting Motion using Hybrid Trajectory Generator," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1762–1767, 2006.
- [2] T. Senoo, A. Namiki and M. Ishikawa: "High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Approach," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3206–3211, 2008.
- [3] 西島良雅, 妹尾拓, 石川正俊, 並木明夫: "高速多指ロボットアームを用いた投球制御", 第 16 回 ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.417–422, 2011.
- [4] A. Nakashima, Y. Sugiyama and Y. Hayakawa: "Paddle Juggling of one Ball by Robot Manipulator with Visual Servo," Proceeding of 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp.2025–2030, 2006.
- [5] P. Kulchenko and E. Todorow: "First-Exit Model Predictive Control of Fast Discontinuous Dynamics: Application to Ball Bouncing," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 9–13, 2011.
- [6] C.G. Atkeson, et al.: "Using Humanoid Robots to Study Human Behavior," IEEE Intelligent Systems, vol.15, no.4, pp.46–56, 2000.
- [7] P. Burget and P. Mezera: "A Visual-Feedback Juggler With Servo Drives," The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp.472–477, 2010.
- [8] 木崎昂裕, 西島良雅, 並木明夫: "高速ハンドアームと高速ビジョンを用いたボールジャグリング", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11 講演論文集, 2P2-P02, 2011.
- [9] I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu, Y. Moriue, T. Takaki and K. Tajima: "2000fps Real-time Vision System with High-frame-rate Video Recording," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation Anchorage Convention District, pp.1536–1541, 2010.
- [10] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa and M. Kaneko: "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent

Fig. 13 Juggling motion

Robots and Systems, pp.2666–2671, 2003.

- [11] D.L. Pieper: The kinematics of manipulators under computer control, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 72, 1968.

- [12] W. Hong: Robotic Catching and Manipulation Using Active Vision, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1995.

木崎昂裕 (Takahiro Kizaki)

2011 年 3 月千葉大学工学部電子機械工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科人工システム科学専攻博士前期 (修士) 課程進学, 現在に至る。ロボットアームの研究に従事。

脇屋慎一 (Shinichi Wakiya)

2010 年 3 月千葉大学工学部電子機械工学科卒業。同年 4 月三菱重工精密鑄造株式会社入社, 現在に至る。在学中はロボットアームの研究に従事。

野波健蔵 (Kenzo Nonami)

1979 年東京都立大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。千葉大学助手, 助教授を経て 1994 年千葉大学教授, 現在に至る。この間 1985 年~1986 年, 1988 年に NASA 研究員, 2008 年~2011 年理事, 2011 年から副学長。UAV・MAV, および, UGV との協調制御, 油圧駆動型 6 脚歩行ロボット, 双腕ロボット, ホームヘルスケアロボット, 電力貯蔵磁気軸受フライホールなどの研究に従事。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会等の会員。 (日本ロボット学会正会員)

並木明夫 (Akio Namiki)

1994 年東京大学工学部計数工学科卒業。1996 年東京大学大学院工学研究科計数工学専攻修士課程修了。1999 年同専攻博士課程修了。同年日本学術振興会リサーチアソシエート。2000 年科学技術振興機構研究員。2004 年東京大学大学院情報理工学研究科システム情報学専攻講師。2008 年千葉大学大学院工学研究科准教授。多指ロボットハンド, 視覚フィードバック制御, センサフュージョンの研究に従事。博士 (工学)。

(日本ロボット学会正会員)

石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1977 年東京大学工学部計数工学科卒業。1979 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年通産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。1999 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻教授。現在東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002, 2003 年度東京大学総長特任補佐。2004 年度東京大学副学長。2005 年度東京大学理事・副学長。超並列・超高速ビジョン, センサフュージョン, メタ・パーセプションなどの研究に従事。1984, 2010 年計測自動制御学会論文賞, 1990 年応用物理学会光学論文賞, 1999 年櫻井健二郎氏記念賞, 2004 年計測自動制御学会技術賞友田賞, 2005 年応用物理学会光・電子集積技術業績賞 (林巖雄賞), 2010 年日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2012 年島津賞, 1998, 2001, 2008, 2010 年本学会論文賞等受賞。2011 年紫綬褒章受章。計測自動制御学会および本学会フェロー。工学博士。

(日本ロボット学会正会員・フェロー)