

多眼視覚を備えたロボットハンドの開発と高速キャッチングへの適用

Development of Robot Hand with Multi-Vision and Its Application to High-Speed Catching

○学 佐藤 将貴 (千葉大) 高橋 晃 (千葉大) 正 並木 明夫 (千葉大)

Masaki SATO, Akira TAKAHASHI, and Akio NAMIKI, Chiba University

In this paper, we propose a “multi-vision han” system which has a number of small high-speed cameras arranged on its surface, and application to ball catching by a visual servoing technique. As a target of control with the multi-vision hand system, the ball catching motion control. In the proposed catching control, the ball catching position is estimated by a Kalman fitter using an external stereo camera, and then the position is corrected by real-time visual servoing control using the multi-vision hand. In the experiment, the hand caught the ball at high speed even if the estimated position contained an error, and the effectiveness of the system was verified.

Key Words: Multi-Vision, Hand-Eye, Robot hand, Visual servoing, Catching

1. 緒言

近年、視覚センサの小型化、低価格化により多数のカメラの実装が容易となり、GPUなどの並列計算機の普及により実時間での視覚情報の処理が可能となってきている。本研究の目標は、多数のカメラをロボットハンド上に配置して外部の固定高速ビジョンからの視覚情報と統合することで、視野角を広げて死角をなくした高速・高精度でのマニピュレーションを実現することである。これまで監視やトラッキングを目的としたマルチカメラに関する研究が多く存在するが [1]、それら自身が動的な環境に配置されることはほとんどなかった。これに対して、ロボットハンド表面上に多数配置されたカメラからは、ハンドの周辺を遠近問わず観測可能なため、得られたセンサ情報を通常の視覚として利用するだけでなく近接覚としての利用も可能で、幅広い分野を対象に応用が期待される。

特に本研究では [2] で開発したシステム・手法を拡張して、実機での多眼視覚によるボールキャッチング制御を実現する。従来のボールキャッチングは我々の研究グループにおいて多指ハンドアームロボットによるボールジャグリング制御の一部として研究が進められている [3][4][5]。ボールジャグリング制御では3ボールで最大4回のキャッチに成功しているが、ボールの位置推定不良を原因としたキャッチ位置推定の精度低下のなどにより、長期の安定動作が困難であった [6]。そこで多眼視覚による視覚サーボによりキャッチ位置の修正を導入し、成功率の向上を図る。

制御のコンセプトを図1に示す。多眼視覚ハンドで計測したボールの画像重心を、ボール推定位置を多眼視覚ハンドに投影した、画像上での位置に到達させるように視覚サーボ制御を行う。また、手先姿勢についても同時に制御を行い、ボールがキャッチ可能な姿勢を保持する。

2. システム構成

図2にシステムの全体構造を示す。多眼視覚システムは2台の固定された外部高速ビジョンとロボットに取り付けられた多眼視覚ハンドにより構成され、視覚情報はUDP通信によりコントローラに送信される。コントローラでは固定カメラの視覚情報によりボールの軌道を推定し、ボールキャッチ時における目標関節角度を計算、多眼視覚ハンドの視覚情報により目標関節角度を修正する。

2.1 高速ハンドアーム

アームは肩3自由度、肘2自由度、手首2自由度の計7自由度で構成される。第1軸が45degの斜行軸であるため、可動範囲が広いことが特徴の一つとして挙げられる。また、各関節の減速比が約50:1と比較的小さいため、高速な動作に適している。軸の関節角度センサにはインクリメンタルエンコーダを使用している。

多眼視覚ハンドはロボットアームの先端に取り付けられている。多眼視覚ハンドの詳細については第3章で別途取り扱う。

2.2 リアルタイム制御システム

コントローラにはdSPACEモジュラシステムを使用した、図2に示したHostPCとの通信は専用バスで接続されており、制御指

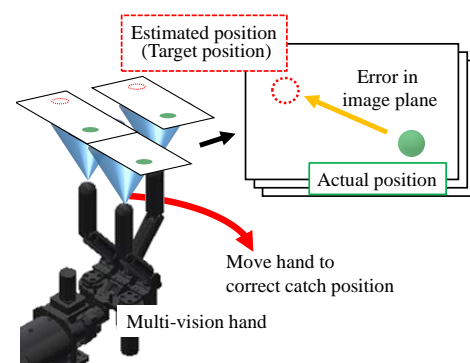


Fig.1 Control concept

令の送信と入出力のモニタを行うことができる。制御ソフトウェアの開発はMatlabのSimulinkによって行う。動的な環境変化に対応してセンサフィードバックに基づく運動制御を行うためには計算を高速で実行できることが望ましいが、dSPACEモジュラシステムを用いることで、1kHzでの演算によるマニピュレーションが可能である。

2.3 外部高速ビジョン

高速ビジョンには小型高速ビジョンプラットフォーム IDP-Express R2000F (フォトロン製) を用いる。512x512pixel, 8bitのベイヤーパターン情報を最大1000Hzで取得可能である。

撮影されたベイヤーパターン情報はカメラ2ch入力を持つIDP-Expressボードへ同時に高速転送され、Vision PCのメインメモリに転送・記録される。

3. 多眼視覚ハンド

多眼視覚ハンドは本研究グループで使用されている高速ハンドを改修したもので、ベースとなった高速ハンドは、動的な高速動作を行わせることを想定し開発が進められているものである [7]。多眼視覚ハンドの外観を図3に示す。各指の指頭部、指腹部および左右の指の付け根に小型カメラを設置した。また、撮影時の光量確保のために指頭部と指腹部のカメラの両方にLEDを配置している (図4)。

小型カメラはIU233N2-Z (SONY製) を使用している。このカメラは2.6x3.3x2.32mmと超小型であり、CSI2接続により最大240Hzでの画像出力が可能である。ただし現状では、小型基盤を介してUSB形式に変換し120Hzで320x200pixel, 8bit RGB画像を取得している。

小型カメラ、LED、信号変換基板はすべて指の内部に配置され、ボールの衝突した際など、指に衝撃を受けた際も安定して映像を取得し続けられるように設計されている。また、指は3Dプリン

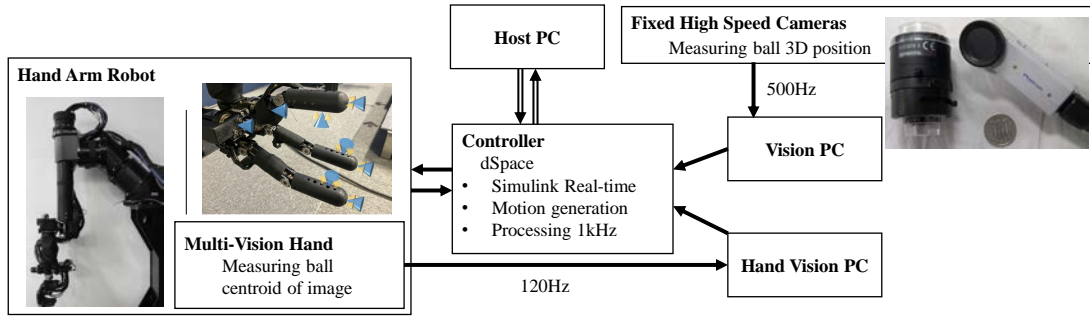


Fig.2 System configuration

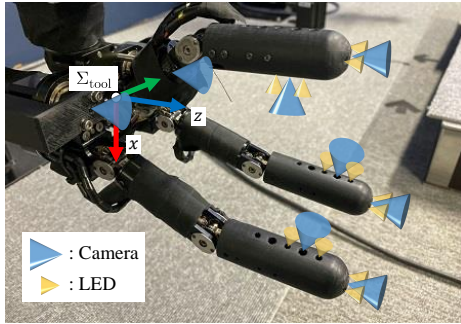


Fig.3 Multi-vision hand

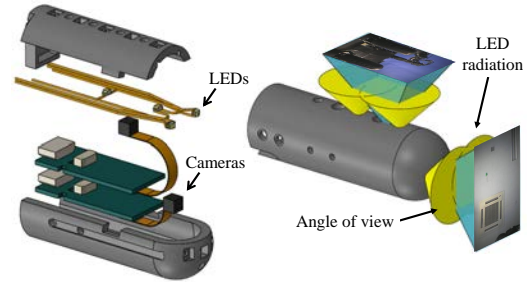


Fig.4 Finger configuration

タによって ABS 樹脂で形成され、小型カメラなどを含めた指全体の重量は 14g に抑えられている。

4. 制御手法

制御概要は図 1 に示した通りで、外部高速ビジョンにより推定されたキャッチ位置を多眼視覚ハンド情報により修正する。本章ではキャッチ位置の修正に焦点を当て、キャッチ位置の推定については簡単な紹介にとどめる。

4.1 外部固定カメラによるボール軌道推定

外部高速ビジョンよりステレオ視を使用してボールの 3 次元位置 ${}^w x$ を計測する。ただし、左上つき w は世界座標系であることを表す。計測した 3 次元位置よりカルマンフィルタを用いてボールの推定状態 ${}^w \hat{x}$, ${}^w \hat{\dot{x}}$ を得る。推定状態からボールの軌道を計算し、キャッチ位置 p_{catch} 、キャッチ時間 t_{catch} を決定する。手先姿勢 R_{catch} はハンドが上方を向き自然な姿勢となるように与える。設定した手先位置・姿勢より逆運動学を解くことで目標関節角度 q_{catch} を決定し、5 次多項式により関節角度軌道を生成する。

4.2 多眼視覚ハンドによるキャッチ位置の視覚サーボ制御

4.2.1 姿勢を考慮しない修正

まず、多眼視覚ハンドのカメラのうち任意の 1 つのカメラについて考える。カメラの位置・姿勢変化 $[{}^{cam}t_w, {}^{cam}\omega_w]^T \in \mathbb{R}^6$ 、ボールの速度 ${}^w \dot{x} \in \mathbb{R}^3$ に対して、画像上に投影されたボールの速度 $\dot{m} \in \mathbb{R}^2$ は次のように与えられる。

$$\dot{m} = L_m \begin{bmatrix} {}^{cam}t_w \\ {}^{cam}\omega_w \end{bmatrix} + L_b {}^w \dot{x} \quad (1)$$

ただし、 $L_m \in \mathbb{R}^{2 \times 7}$ 、 $L_b \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ は次のように表される。

$$L_m = \frac{1}{\text{cam}_z} \bar{A} \left[I_3 \mid -[{}^{cam}R_w {}^w x]_{\times} \right] \quad (2)$$

$$L_b = \frac{1}{\text{cam}_z} \bar{A} {}^{cam}R_w {}^w \dot{x} \quad (3)$$

ただし、 $\bar{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ はカメラ行列 $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ の上 2 行、 ${}^{cam}R_w \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はカメラ固有の座標系 Σ_{cam} から Σ_w の姿勢変化を表す回転行列、 ${}^{cam}_z$ は Σ_{cam} におけるボールの奥行位置で、 I_n は $n \times n$ の単位行列、 $[\]_{\times}$ は外積行列を表す。

ロボット根元からカメラが取り付けられた位置までの関節角速度 \dot{q} に対し、 $[{}^{cam}t_w, {}^{cam}\omega_w]^T = J\dot{q}$ となるようなヤコビアン J を定義することで、式 (2)、式 (3)、 J により画像座標上のボールの移動をロボットの動作およびボールの移動と対応付けできる。

しかし、この方法では多眼視覚に拡張した際にヤコビアン J を全てのカメラについて計算する必要で、効率的ではない。そこで、ボールキャッチ時はハンドの関節角が一定であるとして、ハンドに固定された座標系である tool 座標系 Σ_{tool} から各カメラの座標系までの座標変換を事前に求めておくことで計算を簡略化する。

Σ_w 、 Σ_{tool} 、 Σ_{cam} の相対運動を考えるとハンドの関節角度一定 (Σ_{tool} と Σ_{cam} の相対関係が不変) より次の関係がある。

$$\begin{bmatrix} {}^{cam}t_w \\ {}^{cam}\omega_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^{cam}R_w & -{}^{cam}R_w [{}^w t_{tool}]_{\times} \\ 0 & -{}^{cam}R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w t_{tool} \\ {}^w \omega_{tool} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} {}^w t_{tool} \\ {}^w \omega_{tool} \end{bmatrix} \quad (4)$$

したがって、画像座標上のボールの位置変化 $\Delta m \in \mathbb{R}^2$ とロボットの関節角度変化 $\Delta q \in \mathbb{R}^7$ 、ボールの 3 次元位置変化 $\Delta {}^w x \in \mathbb{R}^3$ の関係は次のように表される。

$$\Delta m = L_m V J_{tool} \Delta q + L_b \Delta {}^w x \quad (5)$$

ただし、 J_{tool} は関節角度変化に対する Σ_{tool} の位置・姿勢変化を表すヤコビアンである。

式 (5) を多眼視覚に拡張するためには各項を縦列させればよく、ボールを撮影できた N 台のカメラに投影されたボールの画像上の位置を $m_{all} \in \mathbb{R}^N$ とすれば次のようになる。

$$\Delta m_{all} = J_m \Delta q + J_b \Delta {}^w x \quad (6)$$

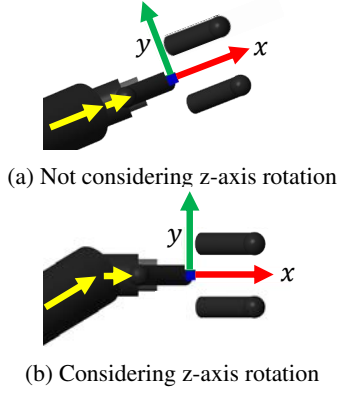


Fig.5 Orientation control of hand

ただし、

$$\mathbf{J}_m = [(\mathbf{L}_{m1}\mathbf{V}_1)^T \cdots (\mathbf{L}_{mN}\mathbf{V}_N)^T]^T \mathbf{J}_{tool} \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_N = \begin{bmatrix} -{}^{\text{cam}N}\mathbf{R}_w & -{}^{\text{cam}N}\mathbf{R}_w [{}^w\mathbf{t}_{tool}]_x \\ \mathbf{0} & -{}^{\text{cam}N}\mathbf{R}_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_b = [\mathbf{L}_{b1}^T \cdots \mathbf{L}_{bN}^T]^T \quad (9)$$

式(6)より、次の制御則が得られる。

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}_m^+ [\Delta \mathbf{m}_{\text{all}} - \mathbf{J}_b \Delta^w \mathbf{x}] = \mathbf{J}_m^+ [(\mathbf{m}_d - \mathbf{m}_{\text{all}}) - \mathbf{J}_b \Delta^w \mathbf{x}] \quad (10)$$

ただし、 \mathbf{m}_d は各画像座標系における目標位置であり、ボールの推定位置 ${}^w\hat{\mathbf{x}}$ を修正を行わない状態での画像座標への仮想的な投影位置を使用する。

しかし、式(10)ではボールの位置とハンドの位置の関係は定まるが、姿勢の関係は一意に定まらない。そこで、次節4.3では姿勢を考慮したキャッチ位置修正について述べる。

4.3 姿勢を考慮した修正

現在姿勢と4.1節で決定されたキャッチ姿勢をそれぞれ ${}^w\mathbf{R}_{tool} = [{}^R\mathbf{x}, {}^R\mathbf{y}, {}^R\mathbf{z}]$, ${}^w\mathbf{R}_{\text{catch}} = [{}^R\mathbf{x}_{\text{catch}}, {}^R\mathbf{y}_{\text{catch}}, {}^R\mathbf{z}_{\text{catch}}]$ として姿勢偏差 ${}^{Rz}\mathbf{e}$ を次のように与える。

$${}^{Rz}\mathbf{e} = {}^R\mathbf{z}_{\text{catch}} \times {}^R\mathbf{z} \quad (11)$$

${}^{Rz}\mathbf{e}$ は Σ_{tool} のz方向回転変化を無視した姿勢偏差で、ハンドの掌平面の法線ベクトル周りの回転を許容することを表す。このように姿勢偏差を与えることで、図5のようにキャッチ位置の修正に対してハンドの姿勢が柔軟に決定される。

${}^{Rz}\mathbf{e}$ が確かにz方向回転の姿勢変化を許容しているか確認するために次の評価関数 E_{Rz} を定義する。

$$E_{Rz} := -\frac{1}{2} ({}^{Rz}\mathbf{e})^T ({}^{Rz}\mathbf{e}) \quad (12)$$

現在姿勢 ${}^w\mathbf{R}_{tool}$ を回転軸 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, 1 - (n_x^2 + n_y^2)^{1/2}]^T$, 回転量 ϕ で表される $\mathbf{R}_\phi \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とし、目標姿勢を $\mathbf{R}_{\phi=0} = \mathbf{I}_3$ として計算したときの E_{Rz} を図6にカラーマップで示した。 ϕ が小さい領域に加え、回転軸がz軸方向に近い(n_x, n_y が小さい)領域で評価が高くなっていることが確認できる。

関節角変化 $\Delta \mathbf{q}$ に対する、姿勢偏差変化 $\Delta^R \mathbf{e}$ に対し $\Delta^R \mathbf{z}_e = \mathbf{J}_e \Delta \mathbf{q}$ の関係を持つ行列 $\mathbf{J}_e \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$ は次のように導出できる。

$$\mathbf{J}_e = \frac{\partial {}^{Rz}\mathbf{e}}{\partial \mathbf{q}} = {}^R\mathbf{z}_{\text{catch}} \times \frac{\partial {}^R\mathbf{z}}{\partial \mathbf{q}} \quad (13)$$

したがって、画像上偏差と姿勢偏差を同時に制御するには次のようにする。

$$\Delta \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_m \\ \mathbf{J}_e \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{m}_{\text{all}} - \mathbf{J}_b \Delta^w \mathbf{x} \\ \Delta^R \mathbf{z}_e \end{bmatrix} \quad (14)$$

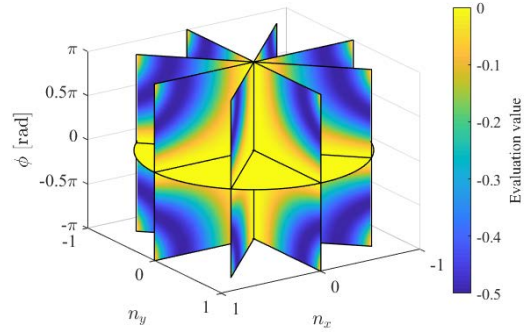


Fig.6 Evaluation function E_{Rz}

ボールを見失うなどが原因で視覚情報が得られなかった場合は、目標値が突然得られなくなる可能性がある。そこで実際の制御においては、4.1節のボールの予測軌道から計算された目標関節角度 $\mathbf{q}_{\text{catch}}$ からのオフセット $\mathbf{q}_{\text{offset}}$ を定義し、視覚情報が得られたステップのみオフセットを更新することで目標関節角度の急激な変化を抑制する。

$$\mathbf{q}_{\text{offset}} = \Delta \mathbf{q} - \mathbf{q}_{\text{catch}} + \mathbf{q} \quad (15)$$

ただし、 \mathbf{q} は現在の関節角度で、 $\Delta \mathbf{q}$ は式(14)により得られた関節角偏差である。したがって、キャッチ時の目標角度を次のように修正することで、キャッチ位置の修正を行う。

$$\mathbf{q}_{\text{correct}} = \mathbf{q}_{\text{catch}} + \mathbf{q}_{\text{offset}} \quad (16)$$

5. 実験

実験条件は以下のとおりである。

- $t=0\text{s}$ に投擲器からボールが投擲され、カルマンフィルタの収束後キャッチ位置が決定される。その後、ボールが多眼視覚ハンドの画角内に入るとキャッチ位置の修正が開始される。
- ボールのキャッチ動作において、指腹部および指付根のカメラはボールを画角内に捉えられる時間はごくわずかであるため、実験においては指頭部のカメラ情報のみを使用する。
- キャッチ位置の修正が妥当であったか確認するためにボール状態推定精度を意図的に低下させて実験を行う。推定精度の低下はカルマンフィルタが収束した時点で、観測更新を行わなくすることで生じさせている。
- 今回の実験では、外部高速ビジョンは500Hz、多眼視覚ハンドは60Hzで撮影を行う。

実験は複数回行われたが、本稿では特に多眼視覚によるキャッチ位置修正の効果が顕著に現れた結果について示す。

実験の様子を図9に示す。 $t=0.00\text{s}$ にボールが投擲され、 $t=0.14\text{s}$ にカルマンフィルタが収束し、目標キャッチ位置が決定された。カルマンフィルタが収束した時点でボールが多眼視覚ハンドの画角内に捉えられていたため、同時に関節角度の修正が開始された。その後 $t=0.91\text{s}$ でボールのキャッチに成功している。

実験中に低精度で推定されたボールの位置 ${}^w\hat{\mathbf{x}}$ と、実験後に再推定したボールの位置 ${}^w\hat{\mathbf{x}}_{\text{ref}}$ を図7に示す。また、図8に実行された手先位置 $\mathbf{p}(t)$ および修正を行わなかった場合の手先位置 $\mathbf{p}'(t)$ を示す。

ボールの推定位置と再推定位置にはキャッチ時においてx方向に約60mm、z方向に約130mmの差が生じており、キャッチ位置の修正が妥当であることを示せる実験環境であったことがわかる。また、キャッチ位置のキャッチの許容誤差は15mm程度であるが、図8では修正された誤差が135mm程度にもなっており、多眼視覚ハンドによるキャッチ位置の修正は有効に働いている。

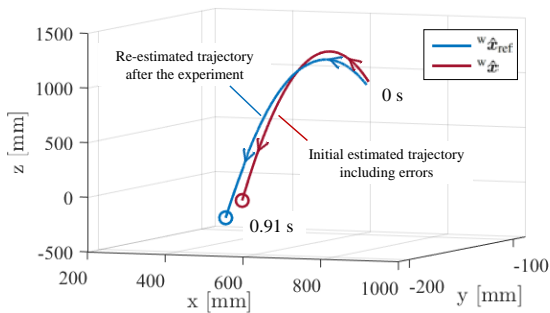


Fig.7 Estimate ball position

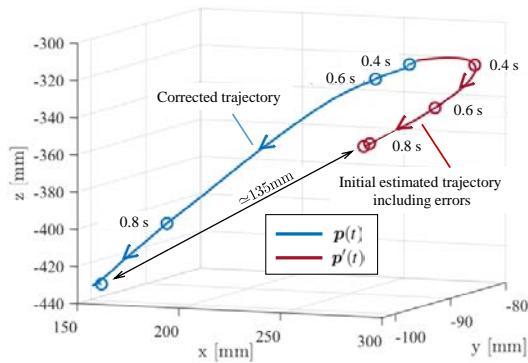


Fig.8 Trajectory of hand position

6. 結言

本研究では多眼視覚システムとして多眼視覚ハンドを開発した。また、多眼視覚システムによる制御の一例としてボールのキャッチング動作を行い、実験によりその有効性を確認した。

今後の課題は多眼視覚ハンドのキャリブレーション方法の構築や他のマニピュレーション作業への適用がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP1069176 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] X. Wang, "Intelligent multi-camera video surveillance: A review", Pattern Recognition Letters, Volume 34, Issue 1, pp.3-19, 2013.
- [2] 佐藤将貴, 高橋晃, 並木明夫, "多眼高速視覚を備えたロボットハンドによる視覚フィードバック制御", 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2C4-13, 2019.
- [3] N. Furukawa, A. Namiki, T. Senoo and M. Ishikawa, "Dynamic Re-grasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.181-187, 2006.
- [4] T. Kizaki and A. Namiki, Two Ball Juggling with High-speed Hand-Arm and High-speed Vision System, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1372-1377, June, 2012
- [5] T. Oka and A. Namiki, Ball Juggling Robot System Controlled by High-Speed Vision, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, pp. 91-96, January, 2017.
- [6] 高橋晃, 甲村直夫, 並木明夫, "高速双腕ジャグリングロボットにおける最適軌道生成", 日本ロボット学会学術講演会, 1H1-06, 2019.
- [7] Akio Namiki, Yoshiro Imai, Masatoshi Ishikawa and Makoto Kaneko, "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2666-2671, 2003.

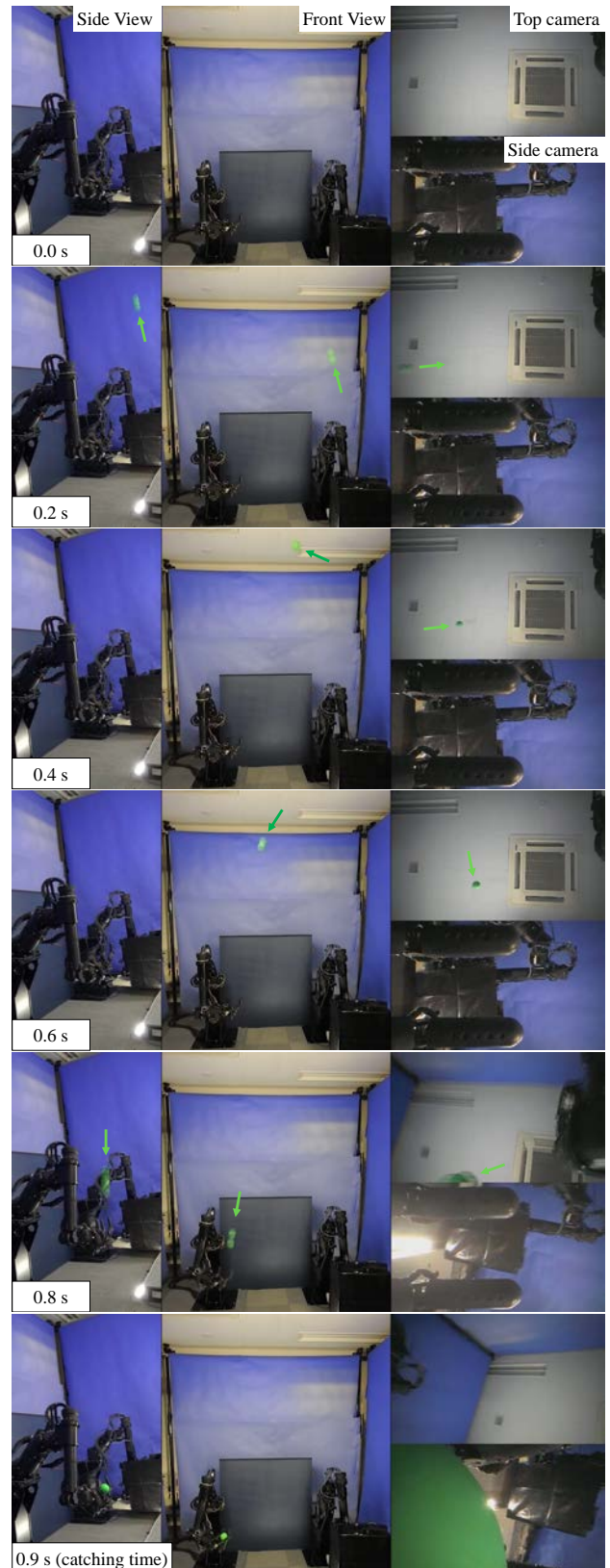


Fig.9 Continuous photos of catching: (Left) Side view, (Center) Front View, (Upper right) tip camera of multi-vision hand, (Lower right) link surface camera of multi-vision hand.