

視覚サーボと内力の制御の統合に基づく多指ハンドによる操り

久野拓也*¹ 細田 耕*² 浅田 稔*²

Manipulation by a Multi-Fingered Hand Based on Integration of Visual Servoing and Internal Force Servoing

Takuya Hisano*¹, Koh Hosoda*² and Minoru Asada*²

In this paper, we describe a control method for a multi-fingered hand with uncalibrated vision to manipulate an object. To achieve a robust and quick manipulation without precise calibration, adaptive visual servoing is applied. On the other hand, internal force control also has to be applied to maintain grasping. To integrate these controllers, we utilize the concepts of visual impedance and the principle of virtual work, and eliminate the interference. Experimental results are shown to demonstrate the validity of the proposed scheme.

Key Words: multi-fingered hand, grasping and manipulation, adaptive visual servoing, vision-based manipulation, Integration of vision and force

1. はじめに

ロボットがさまざまな物体を器用に扱う上で、多自由度を有する多指多関節型のハンドは大きな役割を果たす。多指ハンドが与えられる作業に応じて物体を把持し操作するとき、ハンドおよび対象物に関して動的な変化や未知な要素を含む状況が多く存在することが予想され、その状態を観測するために多くのセンサを持つことが必要となる。このように多くの自由度と多くのセンサを持つハンドをどのように制御するかにより、ハンドの性能は大きく異なってくる。

多指ハンドに関してはこれまでに幾何学的・力学的解析や制御についてさまざまな研究がなされている [1]~[4]。そのほとんどは指に装備された力覚センサや触覚センサを利用しているため、指先周りの局所的な情報しか得られない。したがって、例えば対象物を大局的に位置決めしたい場合などには、対象物の形状や指との接触点などの幾何学的関係をあらかじめ詳しく知る必要があった。

対象物に関する大局的な情報を得るために視覚センサを用いて多指ハンドを制御する方法は今までに数例提案されている [5]~[7] が、これらの方法ではセンサから得られた情報を基に作業座標系での対象物の3次元位置を再構成し、これに対して様々な制御を適用している。したがって対象物の形状やカメラとハン

ドに対するモデルをあらかじめ必要とし、また3次元再構成の際に計算時間を要するため状態の変化に対して高い応答性を得られにくい。このような欠点を補うため、Muñoz [8] は視覚センサにより得られる情報を直接ロボットの制御に用いるビジュアルサーボをハンドの制御に利用しているが、この研究でも視覚センサがハンドや力覚センサ、あるいは対象物に対してキャリブレーションされていると仮定している。

キャリブレーションをあらかじめ実施するには大きな労力がかかり、またモデル化誤差や外乱に弱いシステムとなってしまう。もしキャリブレーションが必要ない、つまりある制御則について未知のパラメータがあってもそれを適応的に推定する能力があれば、別々に設計あるいは制御されているモジュールを組み合わせることで容易にロボット全体を構成できるなどのメリットも大きい。特にハンドのように多自由度、多種のセンサを持つシステムの場合、全体として単一の制御則を構成するより、このようにモジュールに分けて構成することが、効率よい制御のために必要である。

本論文では、視覚センサがあらかじめキャリブレーションされていないハンドに適応型ビジュアルサーボを適用し、把持を実現するための内力の制御と組み合わせて対象物の操りを実現する。このような構成を実現する際に最も問題になるのは、制御則間で出力が干渉することである [9]。ここでは視覚コンプライアンスと仮想仕事の原理を用いて、ビジュアルサーボと内力の制御を統合し、出力を非干渉化する方法を提案する。

以下ではまず把持を実現するための内力の制御について述べ、次に操りを実現するための適応型ビジュアルサーボ [10] を導入する。その際、従来のビジュアルサーボで行われていたように

原稿受付

*¹大阪大学大学院工学研究科、現在村田機械(株)に勤務*²大阪大学大学院工学研究科*¹Osaka University, currently with Murata Machinery, Ltd.*²Osaka University, Graduate School of Engineering

速度指令値をロボットに与えるのではなく、視覚コンプライアンス [11] [12] を導入し、仮想仕事の原理を用いて力指令値を与える．そしてこれら二つの制御則を矛盾なく統合するための非干渉化について述べ、最後に実験により提案する制御機構が物体の操りを実現できることを示す．

2. ハンド・カメラシステムの構成

本論文では多指ハンドと視覚センサからなるシステムを対象とし、ハンドにより物体を把持しながら、その物体を画像上で目標の見え方になるように移動させることを目的とする．Fig.1 にシステム構成を示す． Σ_H はハンド本体に固定された座標系、 $p_i \in \mathbb{R}^3$ および $f_i \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ Σ_H からみた第 i 指の指先位置および指先力、 $x \in \mathbb{R}^n$ は画像上で定義される対象物の像に関する特徴量である．

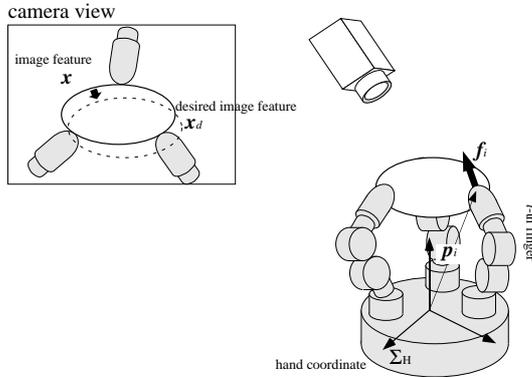


Fig.1 A hand-camera system is manipulating an object to make the image features converge to the desired ones.

ハンドは3本の指で構成され、各関節の角度および指先に働く力は測定することができる．ハンドに与えられる知識は各指の運動学的関係のみであり、指先の形状や対象物の位置・姿勢など、その他の知識は与えられていない．対象物は剛体であるとし、ハンドは対象物と各指の先端で接触すると仮定する．一方、視覚センサは常に対象物を捉えており、画像上の物体の像に関する特徴量を観測できる．視覚センサとハンドは別々のモジュールとして構築されていることを想定し、視覚センサとして用いるカメラの構造やパラメータおよびハンドとの関係は未知とする．

3. 内力の制御による把持

3.1 内力の幾何学的表現

各指の指先力 f_i をまとめたものを $f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ とする．物体の把持は、物体表面で指が滑らない程度の大きさの内力を各指により加えることで実現される．内力は、3つの接触点を含む平面内で Fig.2 のように表現され、指先力 f のうち内力に相当する成分を f_g とすると、

$$f_g = Ez \quad (1)$$

のように書くことができる [1]．ただし、

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -e_2 & e_3 \\ e_1 & \mathbf{0} & -e_3 \\ -e_1 & e_2 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$e_1 \triangleq \frac{p_3 - p_2}{\|p_3 - p_2\|}, e_2 \triangleq \frac{p_1 - p_3}{\|p_1 - p_3\|}, e_3 \triangleq \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|}$$

である．ここで $z \in \mathbb{R}^3$ は一対の指の間に働く圧縮力または引っ張り力の大きさを表すベクトルである． E は各指の指先位置により決定される行列なので、把持を実現するためには内力が指と物体との間で滑りが起こらないように適当な大きさになるように z を設定すればよい．

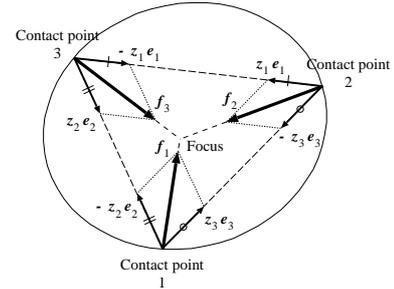


Fig.2 Representation of internal force

3.2 内力の制御

式 (1) から、目標の内力の大きさ z_d が与えられたとき、それを実現するための指先力 f_u を、比例・積分動作のフィードバック項を加えた

$$f_u = E\{z_d + K_p(z_d - E^+ f) + K_i \int_0^T (z_d - E^+ f) dt\} + (I_9 - EE^+)f' \quad (3)$$

として与える．ここで $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $K_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ比例及び積分動作に対するフィードバックゲイン、 f' は任意の指先力を表すベクトルである．式 (3) のうち、右辺第2項は目標の内力を実現するために必要な自由度に対してロボットが冗長な自由度を持っているときに、内力と干渉しない指先力を表している．

4. 適応型ビジュアルサーボによる操り

4.1 指先位置と画像特徴量の幾何学的関係

ハンドにより物体を把持しているとき、画像特徴量 x は各指の指先位置 $p = [p_1^T \ p_2^T \ p_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ によって一意に決定されるので、 x は p の関数として表現することができる．

$$x = x(p) \quad (4)$$

両辺の変分をとると、

$$\delta x = J_{xp}(p)\delta p \quad (5)$$

が得られる．ただし、 $J_{xp} = \partial x / \partial p^T \in \mathbb{R}^{n \times 9}$ は画像特徴量 x と指先位置 p の変化の関係を記述するヤコビ行列である．ここで式 (5) が成立するのはハンドが対象物を滑りなく把持してい

場合であることに注意しておく。

画像特徴量は対象物の位置・姿勢を反映する量であるが、式 (5) における δp は対象物の 6 次元の運動を記述する上で冗長な表現となっているために、任意の δp が画像特徴量の運動に反映されるわけではない。そこで、 δp のうち画像上の変化に反映される成分とそうでない成分を明らかにしておく。指先変位のうち、画像特徴量の運動に反映される成分を δp_x 、反映されない成分を $\delta \bar{p}_x$ とすると、

$$\delta p = \delta p_x + \delta \bar{p}_x \quad (6)$$

$$J_{xp} \delta \bar{p}_x = 0 \quad (7)$$

が成り立つ。以上から

$$\delta p_x = J_{xp}^+ J_{xp} \delta p \quad (8)$$

が導かれる。

4.2 仮想仕事の原理に基づく力学的関係

視覚センサ空間に対して仮想的に力学的な概念を導入し、画像特徴量 x に対応する一般化力を $\xi \in \mathbb{R}^n$ とする。仮想仕事の原理より画像特徴量変位とそれに反映される指先変位の間には

$$(\delta p_x)^T f = (\delta x)^T \xi \quad (9)$$

という関係が成り立つ。ここに式 (5), (8) を代入すると、仮想仕事の原理より

$$(J_{xp}^+ J_{xp})^T f = J_{xp}^T \xi \quad (10)$$

が得られる。さらにこれを変形すると

$$f = (J_{xp}^+ J_{xp})^+ J_{xp}^T \xi + \{I_9 - (J_{xp}^+ J_{xp})^+ J_{xp}^+ J_{xp}\} f'' \quad (11)$$

が導かれる。ここで、 f'' は任意の指先力を表すベクトルである。右辺第 2 項は画像特徴量の変化に反映されない指先変位に対応する力である。

4.3 視覚コンプライアンスを用いた力への変換

従来のビジュアルサーボに関する研究では、ロボットに対して速度指令値を与える枠組みで議論されていることがほとんどである。ここでは内力の制御の制御入力と統合するので、ビジュアルサーボの制御入力も指先力を与える必要がある。画像特徴量の目標値との誤差を力に変換するために、画像内で定義される視覚コンプライアンスを以下のように導入する。

$$\xi = K_x (x_d - x) \quad (12)$$

ここで x_d は画像特徴量の目標値、 $K_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は画像特徴量の目標値との誤差に対するコンプライアンス特性を表す非負定対角行列である。

式 (12) を実現するために指先に発生すべき指先力 f_v は、式 (11) から

$$f_v = (J_{xp}^+ J_{xp})^+ J_{xp}^T K_x (x_d - x) + \{I_9 - (J_{xp}^+ J_{xp})^+ J_{xp}^+ J_{xp}\} f'' \quad (13)$$

のように導かれる。

4.4 適応機構を持つビジュアルサーボ系

ハンドとカメラの関係があらかじめ与えられていない場合には、その関係を推定することで適応的に操りを実現する必要がある。以下では、これを実現するための画像ヤコビ行列の推定法 [10] を簡単に述べるとともに、それを用いたビジュアルサーボ系の構成について述べる。

視覚センサのサンプリング時間が十分短く、その間ヤコビ行列 J_{xp} は一定とみなせると仮定する。式 (5) を離散的に表現すると

$$\Delta x(k) = J_{xp}(k) \Delta p(k) \quad (14)$$

と書ける。ここで、 $\Delta x(k)$ 、 $\Delta p(k)$ はそれぞれ k 番目のサンプリングにおける画像特徴量変位および指先変位、 $J_{xp}(k)$ はサンプリング時間の間一定とみなせるヤコビ行列である。式 (14) から、ヤコビ行列 $J_{xp}(k)$ の推定値 $\hat{J}_{xp}(k)$ を以下の式によって求める。

$$\begin{aligned} & \hat{J}_{xp}(k) - \hat{J}_{xp}(k-1) \\ &= \frac{\{\Delta x(k) - \hat{J}_{xp}(k-1) \Delta p(k)\} \Delta p(k)^T W(k-1)}{\rho + \Delta p(k)^T W(k-1) \Delta p(k)} \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、 $W(k)$ はヤコビ行列の更新に対する重み、 ρ は右辺が発散しないための適当な正の定数である。 ρ を $0 \leq \rho \leq 1$ に限定し、重み行列 $W(k)$ を

$$W(k) = \frac{1}{\rho} \left\{ W(k-1) - \frac{W(k-1) \Delta p(k) \Delta p(k)^T W(k-1)}{\rho + \Delta p(k)^T W(k-1) \Delta p(k)} \right\} \quad (16)$$

とすると、式 (15) は指数重み付き最小二乗法となる。

以上の方法で求められる画像ヤコビ行列の推定値 \hat{J}_{xp} を用いることで式 (13) は

$$f_v = (\hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp})^+ \hat{J}_{xp}^T K_x (x_d - x) + \{I_9 - (\hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp})^+ \hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp}\} f'' \quad (17)$$

と書き直される。これにより、カメラ・ハンド間の関係が未知の場合にも、その関係を実時間で推定することで適応的な制御を実現することが可能となる。

5. 視覚と力覚に基づく把持と操りのハイブリッド制御系

3 章および 4 章で述べた 2 つのサーボを同時に実行することで、ハンドによる物体の把持と操りを実現することができる。しかしながらこれら 2 つのサーボ系はそれぞれのセンサ空間で個別に定義されるタスクを実行するだけであり、その干渉については考慮していない。特にここでの場合、視覚を用いた操りの出力が把持成分に加算されてしまうと、把持力は明らかに変化してしまい、把持失敗の原因となる。そこでこれらを統合する際には 2 つのサーボ系の出力を非干渉化する必要がある。

物体を操るためには前提条件として物体を把持し続けなければならないことから、把持は操りに対して優先的に実行されるべきである。そこで 2 つのサーボ系を統合する際、適応型ビジュ

アルサーボ系の出力から内力の方向に対して干渉する成分を取り除くこととする。つまり式 (3) の右辺第 2 項を利用して操り力 (17) を定め、ハイブリッド制御系

$$\begin{aligned} f_u = & E\{z_d + K_p(z_d - E^+ f) + K_i \int_0^T (z_d - E^+ f) dt\} \\ & + (I_9 - EE^+)(\hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp}) + \hat{J}_{xp}^T K_x(x_d - x) \\ & + (I_9 - EE^+)\{I_9 - (\hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp}) + \hat{J}_{xp}^+ \hat{J}_{xp}\} f'' \quad (18) \end{aligned}$$

を構成する。

内力の制御では 3 次元の制御変数 z を目標値に収束させるため、3 自由度が必要とされる。一方、ビジュアルサーボにより画像特徴量 x を目標値に収束させるためには、対象物の位置・姿勢を決定するために必要な 6 自由度があればよい。以上から、ハンドが 9 自由度以上を有し、内力制御を実現するための出力とビジュアルサーボを実現するそれとの方向が完全に一致しない、つまり式 (18) の右辺第 2 項の係数行列のランクが 6 であれば、2 つのタスクを並列に実行することができる。式 (18) の右辺第 3 項は、把持および操りを実行するために必要な自由度に対してロボットが冗長な自由度を持っている場合に現れる冗長項である。

6. 実 験

6.1 実験装置

実験に用いた装置の構成を Fig.3 に示す。本実験では各指に 3 関節を有した 3 本指ハンド (安川電機製) を用いる。各関節にはオプティカルエンコーダが備えられており、モータの回転角度を計測することができる。また、指先には力とモーメントを測定できるように 6 軸力センサ (ピーエル・NANO センサ, ピーエル・オートテック社製) を取りつけた。力センサの出力信号は OP アンプ回路において増幅される。エンコーダおよび力センサの値はそれぞれロボットインターフェイスボード (RIF-01, 富士通製) 上の UPP 部および A/D 部へ送られ、ホストコンピュータ (CPU: Pentium II 450[MHz], OS: VxWorks 5.3.1, Gateway2000 G6-200) へ伝えられる。さらに、物体を観測するために CCD カメラ (ソニー製) を一台設置した。カメラからの画像情報はホストコンピュータ上のカラー-trackingビジョン-PCI ボード (TRV-CPW5, 富士通製) へ送られる。この画像サイズは 640[pixel]×480[pixel] である。trackingモジュールでは、現在の画像とあらかじめ与えられた参照画像との間で相関をとり、現在の画像の中で最も相関の高い部分を検出できる。一方、ホストコンピュータからはロボットインターフェイスボード上の D/A 部を通してモータドライバへトルク指令値が送られ、ハンドの各関節のモータが駆動される。サンプリング時間はカサーボ系が約 2[ms], ビジュアルサーボ系が約 33[ms] である。

6.2 カメラ・ハンド間の位置関係が変化しない場合の目標軌道追従の実験結果

実験で用いたハンド・カメラシステムの概要を Fig.4 に示す。このときのカメラと対象物との距離は約 0.85[m] である。なお、本実験で用いた画像特徴量は、物体上の 4 つの特徴点の画

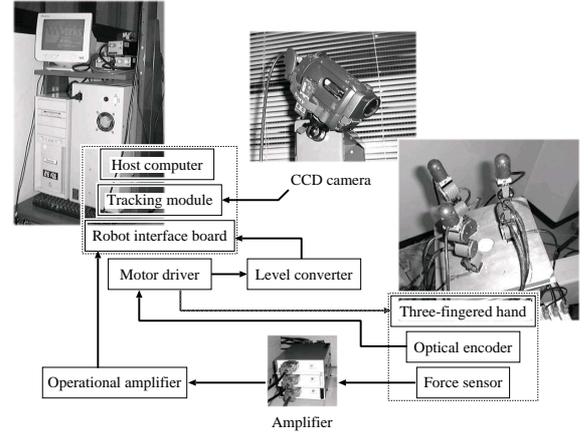


Fig.3 Experimental equipments

像上での位置 (Fig.5 参照) $x_i = [x_i \ y_i]^T$ ($i = 1, 2, 3, 4$) をすべてまとめたものとし、 $x = [x_1^T \ x_2^T \ x_3^T \ x_4^T]^T \in \mathbb{R}^8$ のように定義した。

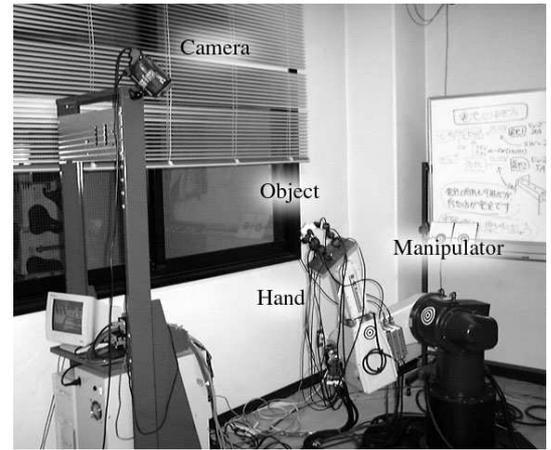


Fig.4 Overview of the experimental system

内力の目標値は、3 本の指の指先で構成される三角形の重心に内力の焦点が一致し、ノルムが $\|z_d\| = 2.94$ [N] となるように逐次計算して与えた。内力が十分に目標値に収束してから操りを行うため、内力の制御を開始してから 60 秒後にビジュアルサーボを開始することとし、画像特徴量の目標値としては、速度 20[pixel/s] で Fig.5 のように各辺 24[pixel], 32[pixel], 40[pixel] の直角三角形を描き、1 周したら 1 秒間停止する軌道を与えた。各フィードバックゲインおよびコンプライアンスは

$$\begin{aligned} K_p &= \text{diag}[3.8 \ 3.8 \ 3.8] \\ K_i &= \text{diag}[0.2 \ 0.2 \ 0.2] \\ K_x &= \text{diag}[8.0 \ 8.0 \ \dots \ 8.0] \end{aligned}$$

とした。また、画像ヤコビ行列の推定則としては最小二乗法を用い、共分散行列の初期値を $P(0) = I_9$, 忘却率を $\rho = 0.995$ とした。カメラはハンドに対してキャリブレーションされていないという仮定から、画像ヤコビ行列の初期値 $\hat{J}_{xp}(0)$ として、

適当な行列

$$\hat{J}_{xp}(0) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

を与えた。

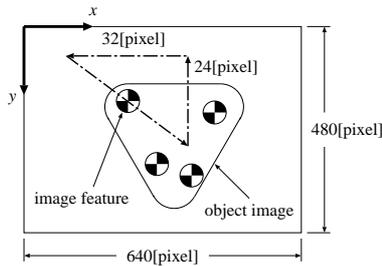


Fig. 5 Desired trajectory

まずは内力制御の出力とビジュアルサーボのそれを非干渉化しない実験を行い、制御開始と同時に対象物に過大な力がかかり、把持を失敗する現象を確認した。次に非干渉化を行って実験した結果、ハンドは対象物を落とさずに操ることができた。そのときの画像上での一つの特徴点の目標値との誤差を Fig.6 に、内力を Fig.7 に示す。ハンドに対してカメラをキャリブレーションせず、適当なヤコビ行列の初期値を与えたにもかかわらず、Fig.6 より画像特徴量誤差が $\pm 10[\text{pixel}]$ 程度の範囲で対象物を操ることができるのがわかる。この誤差はヤコビ行列の初期値の妥当性や推定則の各パラメータ、サンプリング時間などの影響で視覚サーボのゲインを十分にあげられなかったことに起因すると考えられる。一方 Fig.7 で内力の変化を見ると、視覚制御を開始するまでは目標値に収束しているが、視覚制御が開始されてから値が大きく振れている様子が分かる。これは操りの最中に指先における転がり頻りに起因し、そのために接触点に変化し、3つの指先で構成される三角形がその度に変形して内力の状態が変化するためである。

6.3 カメラ・ハンド間の位置関係が変化する場合の目標軌道追従の実験結果

次に、ハンドを制御している最中にマニピュレータを動かして、カメラに対するハンドの姿勢を変化させた。内力の制御の開始後 60 秒に視覚制御を開始し、さらに約 80 秒後から約 120 秒後までにマニピュレータを Fig.8 のように $22.5[\text{deg}]$ だけ動かした。なお、実験における各パラメータは前に述べた実験と同様とした。画像上での一つの特徴点の目標値との誤差を Fig.9 に、内力を Fig.10 に示し、そのときのハンド全体の様子を Fig.11 に示す。

前の実験と同様に画像特徴量誤差が $\pm 10[\text{pixel}]$ 程度の範囲で対象物を操ることができるのがわかる。これは提案する制御則

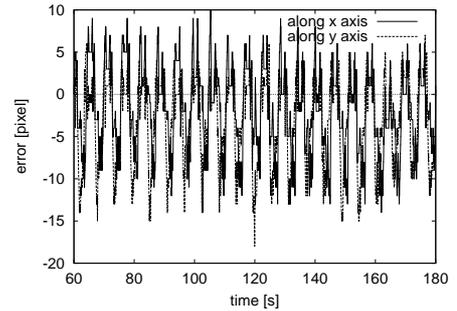


Fig. 6 Error in the image plane when the hand's pose is fixed

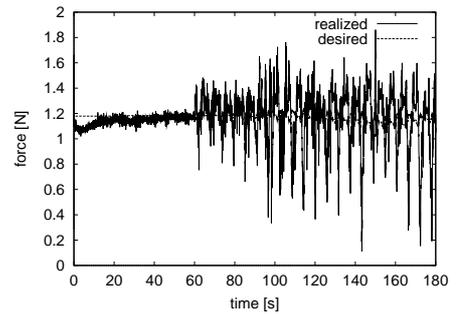


Fig. 7 Internal force z_1 when the hand's pose is fixed

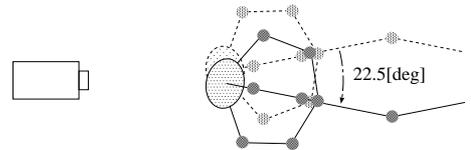


Fig. 8 Hand's pose transition (top view)

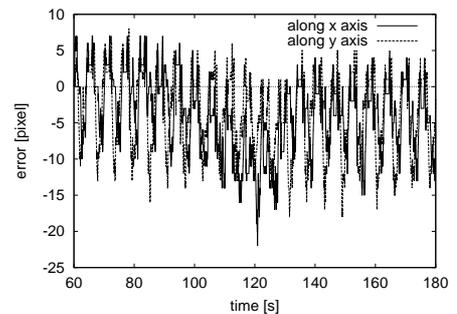


Fig. 9 Error in the image plane when the hand's pose is changed

がカメラパラメータの変化に対応できることを示している。このようにアームの動きのデータをハンドに正確に伝えなくても、適応視覚サーボの持つロバスト性で操りを実現できるということは、ロボットシステムのモジュール化に重要な示唆を与える。ただし内力、画像特徴量ともマニピュレータの停止する約 120 秒後に性能が落ちている。これは Fig.11(a)(d) において点線で示した指に注目したとき、(a) では他の指と同じようなコンフィギュレーションにあるのに対し、(d) では第 2 関節が伸びており、これによってハンドの可操作性 [13] が落ちているためであると考えられる。

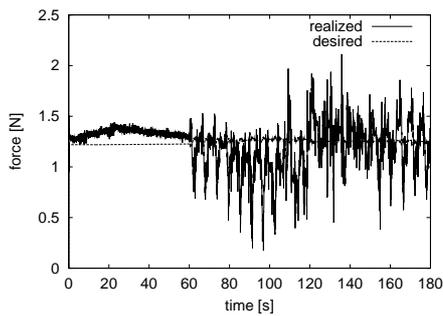


Fig. 10 Internal force z_1 when the hand's pose is changed

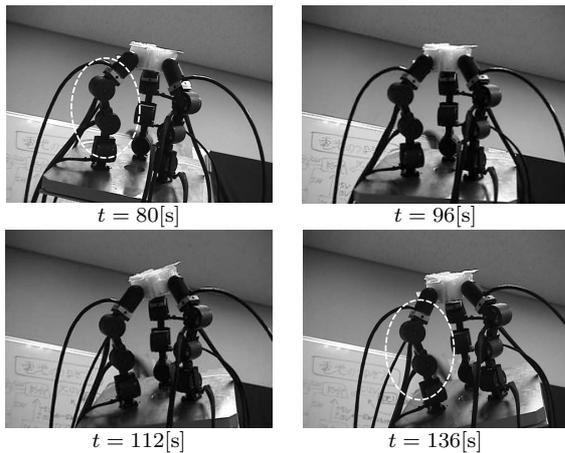


Fig. 11 Movement of fingers

7. おわりに

本論文では、内力の制御と適応型ビジュアルサーボを統合することにより、多指ハンドによる把持と操りを実現するハイブリッド制御系を提案した。提案する手法では画像ヤコビ行列を推定する機構を制御系の中に持つために、視覚センサがハンドに対してキャリブレーションされていない場合やハンド・カメラ間の関係の変化する場合でも適応的に対処できる。本手法を用いた実験により、ハンドを取り巻く環境の変化に対して適応的に対処しながら把持と操りを実現できることを検証した。

本論文では、把持が操りに対して優先されるべきタスクであるという考えから、ビジュアルサーボ系の出力から内力の方向に対して干渉する成分を取り除くこととしたが、複数のタスクを実行する際、タスクの優先度をロボットが自律的に構築することができれば、ロボットは状況に応じて適応的にタスクを選択・実行することができると期待される。

ここでの結果は単にハンド・カメラ系の制御を提案したのではなく、多自由度、たくさんのセンサを持つロボットを効率的にモジュール化し制御するには、複数の適応制御系とその統合や非干渉化を行うことが有効であることを示している。特に今後ヒューマノイドなど多自由度多センサを持つロボットが必要となることは明白で、そのような複雑なロボットをモジュール化し効率的に制御するための重要な示唆であると考えられる。

参考文献

[1] 吉川, 永井. 多指ハンドの操り力と握力. 計測自動制御学会論文集,

- Vol. 23, No. 11, pp. 1206–1213, 1987.
- [2] 吉川. 把持と操りの基礎理論 3. 制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 505–511, 1996.
- [3] 前川, 谷江, 小森田. 指先での転がり接触を考慮した多指ハンドによる三次元把握の運動学・静力学および剛性効果. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 205–213, 1998.
- [4] 金子. 多指ハンド. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 889–892, 1998.
- [5] P. K. Allen, A. T. Miller, P. Y. Oh, and B. S. Leibowitz. Using tactile and visual sensing with a robotic hand. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 676–681, 1997.
- [6] T. Matsuoka, T. Hasegawa, and K. Honda. A dexterous manipulation system with error detection and recovery by a multi-fingered robotic hand. In *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 418–423, 1999.
- [7] Y. Yokokohji, M. Sakamoto, and T. Yoshikawa. Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3201–3208, 1999.
- [8] L. A. Muñoz. Robust dexterous manipulation: A methodology using visual servoing. In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 292–297, 1998.
- [9] 細田, 五十嵐, 浅田. 未知環境内で動作するロボットのビジュアルサーボ/カサーボハイブリッド制御系. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 642–647, 1997.
- [10] 細田, 浅田. 構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 313–319, 1996.
- [11] Y. Nakabo and M. Ishikawa. Visual impedance using 1ms visual feedback system. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2333–2338, 1998.
- [12] T. Tsuji and M. Kaneko. Noncontact impedance control for redundant manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, Vol. 29, No. 2, pp. 184–193, 1999.
- [13] 吉川. ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.

久野 拓也 (Takuya HISANO)

2000年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士前期課程修了。同年村田機械(株)に入社、現在に至る。在学中、ビジュアルサーボを用いたロボットハンド制御の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

細田 耕 (Koh HOSODA)

1993年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手。1997年同大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る。この間1998年から1年間スイスチューリヒ大学客員教授。ビジュアルサーボ、知能ロボットの研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

浅田 稔 (Minoru ASADA)

1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。同年同大学基礎工学部助手。1989年同大学工学部助教授。1995年同教授。1997年同大学大学院工学教授となり現在に至る。この間1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員。知能ロボットの研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)