

# 適応型ビジュアルサーボを用いたハンドによる未知物体の操り

○久野 拓也      細田 耕      浅田 稔  
大阪大学大学院 工学研究科

## Manipulation by Hand utilizing Adaptive Visual Servoing

○Takuya Hisano      Koh Hosoda      Minoru Asada  
Osaka University

### 1 はじめに

多自由度を有したロボットハンドは、物体を器用に扱うことができると期待される。ハンドによって物体を操るとき、観測対象に対し物理的に干渉することなく大局的情報を得ることが可能な視覚センサの利用が有効であるが、これまでは視覚センサが観測対象に対しキャリブレーションされたものがほとんどであった。これに対し、原ら<sup>1)</sup>は適応型ビジュアルサーボ<sup>2)</sup>を利用したハンドの操り制御を実現している。しかしこれは関節角度を制御入力としたハンドのための手法であり、力学的な外乱に対しロバストな制御系ではなかった。本報告では、画像内でコンプライアンスを設定することで、各関節がトルク制御できるハンドによりビジュアルサーボを適用した物体の操りを実現するための制御則を提案する。これによりロバストで速応性のある系が設計できるとともに、未知環境で動作するシステムが構成できる。また、実験により本手法の有効性を示す。

### 2 視覚と力覚を用いた把持と操り

各指は指先に任意の力を発生できるだけの自由度を有し、その運動学は既知、指先に働く力は測定可能な3本指ハンドを考える。指先形状や物体と指先との接触点における摩擦係数、物体の位置姿勢や指先は未知とする。また、物体と指先とは指の先端で接触すると仮定する。以上の設定において、力覚センサを用いた把持とキャリブレーションされていない視覚センサを用いた操りを互いに独立なタスクとして与えたときに、矛盾なく同時に実現するための方法について述べる。

### 3 内力の制御による把持

物体が安定に把持されているとき、その物体には各指によって適当な大きさの内力が働いている。内力  $f_g \in \mathbb{R}^9$  は Fig.1 に示されるように一対の指の間の押し引きの組み合わせとして、

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

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -e_2 & e_3 \\ e_1 & 0 & -e_3 \\ -e_1 & e_2 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{9 \times 3} \quad (2)$$

と記述できる<sup>3)</sup>。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、 $e_i (i = 1, 2, 3)$  は Fig.1 に示す各指先間を結ぶ単位ベクトルである。

式(1)から、内力の目標値が与えられたとき、それを実現するための指先力  $f$  は

$$f = Ez_d + (I - EE^+)f_v \quad (3)$$

と記述できる。ここで、 $z_d$  は  $z$  に対する目標値、 $f_v$  は任意の指先力である。右辺第2項は内力の制御を実現した後、ロボットが持つ冗長自由度を表している。

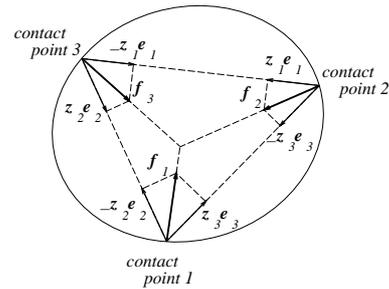


Fig.1 Representation of internal force

式(3)から各指の指先速度と関節速度の関係を記述するヤコビ行列  $J_{robot}$  を用いると入力となる関節駆動力  $\tau$  を得ることができる。ここでは実システムにおけるモデル化誤差や外乱を考慮して、PI制御を施した

$$\begin{aligned} \tau = & J_{robot}^T \{ Ez_d + K_p(z_d - E^+ f) \\ & + K_i \int_0^t (z_d - E^+ f) dt' \} \\ & + J_{robot}^T (I - EE^+) f_v \end{aligned} \quad (4)$$

を用いることとする。

### 4 適応型ビジュアルサーボによる操り

#### 4.1 視覚による観測対象との関係の推定

物体上の特徴点に対応する画像特徴量  $x \in \mathbb{R}^m$  は各指先位置  $p \in \mathbb{R}^9$  の関数として表され、そこから

$$\dot{x} = J_{img}(p)\dot{p} \quad (5)$$

を得る。ここで  $J_{img} = \partial x / \partial p^T \in \mathbb{R}^{m \times 9}$  はシステムに関する知識に乏しいとき、時間重み付き最小二乗法を基に次のように推定できる<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned} \hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) = & \\ \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}_{img}(k)u(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_i(k)u(k)} W_i(k)u(k) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $T$  はサンプリング時間、 $\hat{J}_{img}(k)$ 、 $\hat{j}_i^T(k)$ 、 $u(k) (= T\dot{p})$  はそれぞれ  $k$  番目のサンプリングにおけるヤコビ行列の推定値とその第  $i$  行ベクトル、および指先変位、 $W_i(k+1)$  は  $\hat{j}_i(k)$  の変化に対する重み行列、 $\rho_i$  は正の定数であり、右辺が発散しないように適当な値を選ぶ必要がある。

## 4.2 ビジュアルサーボ系の構成

### 4.2.1 静力学的関係

画像平面内で作用する一般化力を考え、これを  $\xi \in \mathbb{R}^m$  とする。指先位置および画像特徴量の仮想変位  $\delta p$ 、 $\delta x$  の間の  $\delta x = \hat{J}_{image} \delta p$  という関係と仮想仕事の原理を利用することで、 $f$  との間に

$$f = \hat{J}_{img}^T \xi \quad (7)$$

という関係が導かれる。

### 4.2.2 画像内のコンプライアンスの設定

画像内における特徴点の望みの挙動として次のようなコンプライアンス特性を考える。

$$\xi = K_x(x - x_d) \quad (8)$$

ここで、 $K_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$  は正定対称行列、 $x_d$  は  $x$  に対する目標値である。式(7)(8)を利用して、

$$f_v = \hat{J}_{img}^T K_x(x - x_d) \quad (9)$$

を得る。これによって把持物体を操るためのビジュアルサーボ系を構成できるとともに、画像平面内における望みのコンプライアンス特性を実現できる。

## 5 視覚と力覚のハイブリッド制御系

ハンドの制御では、操りを行う以前に物体を落さないように把持しなければならない。そこで内力の制御を優先的に行い、その際残った自由度を利用してビジュアルサーボを行う。ここで内力の制御には3自由度、操りによる物体の位置姿勢の決定には6自由度が必要であり、ハンドはこれらを実現するための十分な自由度を有している。式(4)に表れている冗長自由度を用いてビジュアルサーボ(9)を行うことで、

$$\begin{aligned} \tau = & J_{robot}^T \{ E z_d + K_p(z_d - E^+ f) \\ & + K_i \int_0^t (z_d - E^+ f) dt' \} \\ & + J_{robot}^T (I - E E^+) \hat{J}_{img}^T K_x(x - x_d) \end{aligned} \quad (10)$$

というハイブリッド制御系が構成される(Fig.2)。視覚と観測対象との関係を推定しながら制御を行うことで未知環境に適応でき、また転がり接触による接触位置の変化などの系の不確かさを吸収することができる。

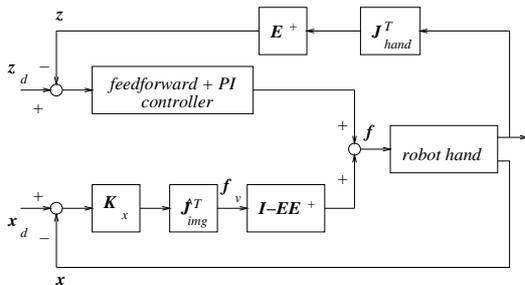


Fig.2 Block diagram of the system

## 6 実験

本手法の有効性を検証するために実験を行った。用いるカメラは単眼とし、オクルージョンを考慮しないためハンドと向かい合う位置に配置した。ハンドにより物体を軽く挿んだ状態から実験を開始し、特徴点が一見の見え方になるようなビジュアルサーボを行いながらカメラを一定方向に動かした。そのときの内力と画像特徴量の様子をそれぞれ Fig.3, 4 に示す。Fig.3 から内力は徐々に目標値に収束している。また、Fig.4 からビジュアルサーボを行った場合には目標値との誤差が少なく、カメラの動きに追従していることがわかる。

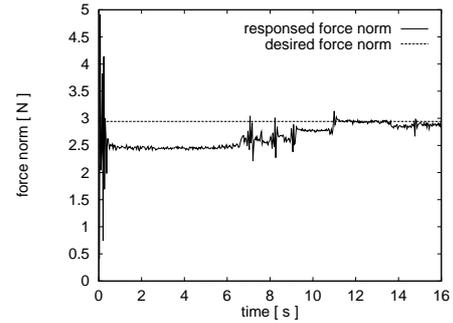


Fig.3 Force response

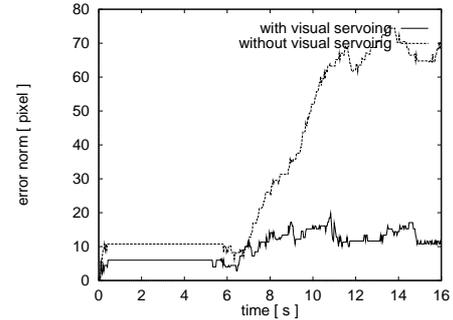


Fig.4 Error norm in image plane

## 7 おわりに

本報告では、画像内でコンプライアンスを設定することで、トルク制御が可能なハンドに対し適応型ビジュアルサーボを適用した物体の操りのための制御則を提案し、実験によりその有効性を検証した。

### 参考文献

- [1] 原猛, 細田耕, 浅田稔. 視覚と力覚を用いたハンドによる物体の把持・操り. ロボティクス・メカトロニクス '97 講演会講演論文集, Vol. B, pp. 761-762, 1997.
- [2] 細田耕, 浅田稔. 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.
- [3] 吉川恒夫, 永井清. 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.