一般化安定化補償器による反力推定を利用した ロボットハンドの把持機構の制御*

谷 正史^{*1}, 鈴木 亮一^{*2}, 鳥田 武司^{*3}
藤木 信彰^{*2}, 小林 伸明^{*4}

Mechanism of Robot Hand Using on Control for Grasping by All Stabilizing Controller

Masashi TANI^{*5}, Ryoichi SUZUKI, Takeshi TORITA,
Nobuaki FUJIKI and Nobuaki KOBAYASHI

^{*5} Engineering Education Center, Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa-gun, Ishikawa, 921-8501 Japan

In this paper, we propose a control system for a prototype robotic hand that can hold an object with suitable grasping force without using a force sensor. This control system is composed of two 1-DOF robot hands and a CCD camera. The control system recognizes the object with the CCD camera, and the database retrieves the suitable grasping force for holding each object. We propose the control method of a reduced order observer-based stabilizing controller by using limiting properties of LQR for this control system. The proposed reduced order observer-based stabilizing controller has disturbance estimation property and disturbance decoupling property which is the same as the internal model control design structure. We apply the proposed method to the robot hand, and confirm effectiveness of the method by comparative experiments.

Key Words: Linear Optimal Quadratic Regulators (LQR), All Stabilizing Controller, Internal Model Control (IMC), Robot Hand, Reduced Order Observer

1. はじめに

人が物を掴んで持ち運びするときは、物体を握り潰さずかつ落とさないように適度な力で把持している。例えば、紙コップやトマト等軟らかい物を掴む場合がそうである。人が物体を把持する際は、その形状、大きさ、色等の視覚情報から経験的に把持力を予め決めて把持する行動と、触れたときの質感から徐々に力を加減して把持する行動がある。これと同じことをロボットハンドで行う場合、圧力センサや力センサを用いて掴む力を検出して把持する方法があるが、圧力センサ等を用いた装置で任意の物体を把持する際の欠点は、(a)掴む物体の形状や大きさによりセンサの取り付け位置や個数の調整が必要となる、(b)温度・水分等の使用環境がセンサにより制限されてしまう、(c)検出する力の最大許容値が大きいセンサで小さい値を計測する場合は精度が低下する、また逆に最大許容値が小さいセンサで質量の大きいものを把持できない等、センサの仕様や特性による制約条件が加わる。

このため本論文では、圧力センサ等を用いることな

く人が行う把持行為をロボットハンドで実現するシステムとして、視覚情報から物体を特定しその物体に見合った把持力を設定して把持する制御系を提案し、実験により検証を行う。圧力センサ等を用いずにこれを実現するための制御は、ロボットハンドが把持対象物に接触した際の反力を外乱として捉え、この未知外乱を推定しその値を基に把持制御を行うもので、制御系の構成は低次元オブザーバを用いた一般化安定化補償器⁽¹⁰⁾を利用したものである。

本論文の構成は、2章で把持装置全体の構成を示し、3章で最適レギュレータと状態推定の極限的性質、一般化安定化補償器および内部モデル制御⁽²⁾の特性について概説する。4章では、提案する制御系の基本である低次元オブザーバに基づく一般化安定化補償器の構成法と特性を示す。5章では、4章で提案した制御系を2章の把持機構に適合するよう発展させた新しい制御系を提案し、6章で把持制御のための具体的な制御系設計と実験結果について述べその有効性を示す。

2. 把持システムの構成

人が物体を認識し、その物体に見合った適切な力で把持する動作を再現するシステムとして、図1のよう

* 原稿受付 2006年4月21日。

^{*1} 正員、金沢工業大学工学設計教育センター(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)。

^{*2} 正員、金沢工業大学工学部。

^{*3} 金沢工業大学大学院工学研究科。

^{*4} 金沢工業大学工学部。

E-mail: tani@neptune.kanazawa-it.ac.jp

なシステムを提案する。この提案システムの把持動作手順を述べる。

まず人が視覚から物を認識するための行為として、(1)パーソナルコンピュータ(以下、PC)は、CCD カメラから得た形状、色等の情報から物体を特定する。次にその物体に見合った適切な握む力を設定する行為として、(2)PC には物体に応じた把持力が予めデータベース化されており、その把持力(以下、設定把持力 α)を読み出す。次に対象物に見合った力で把持する動作を行うために、(3)PC は後述する制御則に従って物体からの反力 $\hat{\xi}$ を推定しながら、 $\hat{\xi}$ が設定把持力 α になるまでアームを駆動する。(4)反力 $\hat{\xi}$ が設定把持力 α と等しくなると、制御系の構成を切り換えて把持を行う。これが提案システムの一連の動作である。

なお、把持対象物として硬さの軟・硬、質量の大・小、形状の違いから、今回はトマト、紙コップ、金属製立方体を評価対象物とした。データベースに登録した各々の設定把持力 α を表1に示す。本来、データベースには多くの物体を用意すべきであるが、ここでは物体認識を主テーマとしていないため、HALCON[®]により比較的識別容易な3種類の対象物とした。

把持に用いるロボットハンドには、それ自体が動き回るためのタイヤが取り付けられており、CCD カメラからの画像情報を基に自立移動が可能となる構造である。その機能は、1自由度の2本のアームを各々独立したモータで駆動し、把持対象物まで画像情報を基に自立移動して、その物体に見合った力で把持するものである。しかし、本論文の主テーマは把持制御であるため、自立移動についてはここではふれない。

Fig.1 Robot hand and control system structure

Table.1 Desired grasping force α

Object	Metallic cube	Tomato	Paper cup
α [Nm]	3.0	1.0	0.4

3. 一般化安定化補償器と内部モデル制御

2章で述べた把持システムの実現のための把持制御を考える前に、一般化安定化補償器と内部モデル制御の概要について述べておく。

3・1 一般化安定化補償器 次のような外乱が印加される線形システム

$$\dot{x} = Ax + Bu + D\xi, \quad y = Cx \quad (1)$$

を考える。ここで、 $x \in R^n$ は状態、 $u \in R^m$ は入力、 $y \in R^p$ は出力であり、 $\xi \in R^r$ は外乱とする。このとき、システム (A, B, C) の伝達関数 $\Sigma(s)$ に対し、全ての安定化補償器 $K(s)$ は、

$$K(s) = (Y - MQ)(X - NQ)^{-1}, \det(X - NQ) \neq 0 \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $Q \in RH_\infty$ 、 $\Sigma(s) = NM^{-1}$ で X 、 Y はベズー方程式の解である。これを状態フィードバックとオブザーバで実現する。つまり、各々のゲインを F 、 L として、 $A + BF$ 、 $A + LC$ を安定とする安定化補償器の一般形 $K(s)$ は、

$$K(s) = \text{LFT}\{M(s), Q(s)\}, \quad Q(s) \in RH_\infty$$

$$M(s) = \begin{pmatrix} A + BF + LC & -L & B \\ F & 0 & I \\ C & -I & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

で与えられる^①。ここで、 $M(s)$ はドイルの記法に従った伝達関数を表す。

Fig.2 Observer based all stabilizing controller

ここで用いるロボットハンドは、入力端に外乱が加わるので、式(1)は

$$\dot{x} = Ax + Bu + B\xi, \quad y = Cx \quad (4)$$

と表現できる。ここで、外部入力を $r'(t)$ 、オブザーバの変数を $\hat{x}$ 、状態推定の誤差 $e = \hat{x} - x$ 、および $y - \hat{y} = -Ce$ を定義すると、安定化補償器の一般形を用いた図2に示す制御系の拡大系は、式(5)のように整理できる。ここで、 $x_e = (x \ e \ \eta)^T$ であり、 (A_Q, B_Q, C_Q, D_Q) は $Q(s)$ の最小実現である。

$$\dot{x}_e = \begin{pmatrix} A+BF & B(F+D_QC) & -BC_Q \\ 0 & A+LC & 0 \\ 0 & -B_QC & A_Q \end{pmatrix} x_e + \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} r' + \begin{pmatrix} B \\ -B \\ 0 \end{pmatrix} \xi \quad (5)$$

$$y = \begin{pmatrix} C & 0 & 0 \end{pmatrix} x_e$$

図2に示す制御系の構成法に関して、状態空間からのゲイン設定や補償器設計の自由度を活用する方法についての研究はあまりなされていない。一方、内部モデル制御は、制御対象のモデルを内蔵するため制御対象が安定な状態が既知である必要があり、かつコントローラの次数が増大する点が指摘されている。そこで、ここでの一般化安定化補償器の構成では、次節の性質を使って4章で示す低次元オブザーバと最適レギュレータの極限的性質を利用して、ゲイン F 、 L の選定を行い、 $Q(s)$ の構成により外乱推定と外乱除去が可能となることを示し、この制御系の構成を発展させ把持を行うのに適した制御系を新しく提案する。

上述の点を明らかにする準備として、最適レギュレータとオブザーバの極限的性質および内部モデル制御の特性について以下に述べる。

3・2 最適レギュレータと状態推定の極限特性と内部モデル制御

式(1)の外乱のない次の線形システムを考える。

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (6)$$

ここで、システム (A, B, C) は可制御、可観測で可逆とする。このシステムに対し、評価関数

$$J = \int_0^\infty (y^T \tilde{Q} y + u^T R u) dt, \quad \tilde{Q} > 0, \quad R > 0 \quad (7)$$

を最小とする制御入力 u は、重み行列を $R=I$ 、 $\tilde{Q} \rightarrow (1/\varepsilon^2) \cdot I$ とし $\varepsilon \rightarrow 0$ とすれば、

$$u = F_\varepsilon x = -B^T P_\varepsilon x \quad (8)$$

$$A^T P_\varepsilon + P_\varepsilon A - P_\varepsilon B B^T P_\varepsilon + \varepsilon^{-2} C^T C = 0 \quad (9)$$

と導ける。

ここで、 $\varepsilon \rightarrow 0$ とした F_ε を極限フィードバックゲインと呼び、これを施した閉ループ系に対して、次の外乱除去特性が導かれる。

[補題 1]^{(4),(6)} 外乱が加わるシステム (A, B, C, D) において極限フィードバックを施した閉ループ系の外乱 ξ から出力 y までの伝達関数は、システム (A, B, C) の不変零点から

$$\text{rank} \begin{pmatrix} -sI + A & B & D \\ C & 0 & 0 \end{pmatrix} < n + m \quad (10)$$

を満たす s を除いたものが安定であるとき

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} C(sI - A - BF_\varepsilon)^{-1} D = 0 \quad (11)$$

となり極限において外乱除去を達成する。

さらにLQ制御の双対としてオブザーバを考えると、オブザーバの誤差方程式に関して次の補題を得る。
[補題 2]^{(6),(7)} 最小位相系 (A, B, C) に対してオブザーバを次のように構成する。

$$\dot{\hat{x}} = (A + L_p C) \hat{x} - L_p y + Bu \quad (12)$$

$$L_p = -M_p C^T \quad (13)$$

$$A^T M_p + M_p A - M_p C C^T M_p + B^T B \rho^{-2} = 0 \quad (14)$$

このとき、 $\rho \rightarrow 0$ の極限において推定誤差は、未知外乱 ξ のもと $e \rightarrow 0$ を達成する。すなわち、

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} (sI - A - L_p C)^{-1} B = 0 \quad (15)$$

が成り立つ。

次に、内部モデル制御と極限フィードバックを併用したときの外乱除去特性について述べておく。式(4)のシステムに対して、

$$u = F_\varepsilon x + v \quad (16)$$

という、最適レギュレータのフィードバックを施し、これを、

$$\Sigma_f: \dot{x} = (A + BF_\varepsilon)x + Bv + B\xi, \quad y = Cx \quad (17)$$

とする。この Σ_f のモデル $\bar{\Sigma}_f$ を

$$\bar{\Sigma}_f: \dot{x} = (A + BF_\varepsilon)x + Bv, \quad y = Cx \quad (18)$$

とし、 $\bar{\Sigma}_f$ の近似逆システムの伝達関数を $\bar{\Sigma}_f^{-1}(s)$ とすると

$$\bar{\Sigma}_f^{-1}(s) \cdot \bar{\Sigma}_f(s) = \text{diag}((\tau s + 1)^{-d_1}, \dots, (\tau s + 1)^{-d_m}) \quad (19)$$

と定義される。ただし、 $\tau < 1$ 、 d_i は $\bar{\Sigma}_f^{-1}(s)$ をプロポーとする最小積分指数である。このとき、図3に示す構成が内部モデル制御の一つであり次の特性を持つ。

Fig.3 Internal Model Control design structure

[補題 3]⁶⁾ フィードバック $u = F_e x$ と内部モデル制御を併用することで、内部モデル制御が持つ外乱除去特性と、最適レギュレータの極限的性質が持つ外乱除去特性の二つの効果により、 $\varepsilon, \tau \rightarrow 0$ の極限において出力 y から外乱 ξ までの伝達関数は $H_{y\xi}(s) \rightarrow 0$ を達成し、また外乱 ξ から外乱推定値 $\hat{\xi}$ までの伝達関数は $H_{\hat{\xi}\xi}(s) = I$ (20) となる。

4. 低次元オブザーバによる一般化安定化補償器の特性と把持制御システム

4・1 低次元オブザーバの導入 一般化安定化補償器に低次元オブザーバを用いて構成する為、オブザーバの低次元化について述べる。ここで用いるロボットハンドでは $CB = 0$ を満足するため、適当な変換行列を用いて

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix} \xi \quad (21)$$

$$y = \begin{pmatrix} I_p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

と表現できる。式(21)から y の微分値は、

$$\dot{y} = A_{11}y + A_{12}x_2 \quad (22)$$

である。そこで、

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = A_{22}x_2 + A_{21}y + B_2\xi + B_2u \\ \varphi = \dot{y} - A_{11}y = A_{12}x_2 \end{cases} \quad (23)$$

に対して、 $(n-p)$ 次元オブザーバを次のように構成する。

$$\dot{\hat{x}}_2 = (A_{22} + \bar{L}_p A_{12})\hat{x}_2 - \bar{L}_p(\dot{y} - A_{11}y) + A_{21}y + B_2u \quad (24)$$

ただし、 $\bar{L}_p$ は次のように求められる。

$$\bar{L}_p = -\bar{M}_p A_{12}^T \quad (25)$$

$$A_{22}\bar{M}_p + \bar{M}_p A_{22}^T - \bar{M}_p A_{12}^T A_{12} \bar{M}_p + B_2 B_2^T p^{-2} = 0 \quad (26)$$

ここで、 $e_2 = \hat{x}_2 - x_2$ とおくと誤差方程式は、

$$\dot{e}_2 = (A_{22} + \bar{L}_p A_{12})e_2 - B_2\xi \quad (27)$$

となる。

以上から $(n-p)$ 次元オブザーバを用いた推定誤差は次のようになる。

[補題 4] システム (A, B, C) は最小位相系とする。このとき $(n-p)$ 次元オブザーバが構成でき、オブザーバの状態推定誤差 e_2 は $p \rightarrow 0$ の極限操作で式(28)が成立する。

$$\lim_{p \rightarrow 0} (sI - A_{22} - \bar{L}_p A_{12})^{-1} B_2 \rightarrow 0 \quad \left(\lim_{p \rightarrow 0} e_2 \rightarrow 0 \right) \quad (28)$$

証明： システム (A, B, C) が最小位相系なら、サブシステム (A_{22}, B_2, A_{12}) も最小位相系となる。したがって、サブシステムに補題 2 を適用すると式(28)が成立する。□

実際のオブザーバとしては、式(24)に y の微分値を含むので、これを避けるため変数変換して

$$\hat{x}_2 = z - \bar{L}_p y \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} = & (A_{22} + \bar{L}_p A_{12})z - (A_{22} + \bar{L}_p A_{12})\bar{L}_p y \\ & + \bar{L}_p A_{11}y + A_{21}y + B_2u \end{aligned} \quad (30)$$

と、低次元オブザーバを構成すれば良い。なお、この場合オブザーバの性能はそのまま保存される。

ここで、状態推定と同時に内部モデル制御のように外乱を推定するために、外乱 ξ を再構成する近似逆システムを構成する必要がある。このため、式(27)、(30)に着目すると、次のようなシステム

$$\begin{cases} \dot{e}_2 = (A_{22} + \bar{L}_p A_{12})e_2 - B_2\xi \\ \mu = -A_{12}e_2 \end{cases} \quad (31)$$

とみなして、安定な近似逆システムを構成できる。

$$\text{rank} \begin{pmatrix} -\lambda I + A_{22} + \bar{L}_p A_{12} & B_2 \\ A_{12} & 0 \end{pmatrix} < n + m - p \quad (32)$$

を満たす λ は、 (A, B, C) の零点に一致し、 (A, B, C) が左可逆で最小位相系とすると、式(31)のシステムも同様となる。よって、未知外乱 ξ は、

$$\xi = \{A_{12}(sI - A_{\bar{p}})^{-1} B_2\}^{-1} \{(sI - A_{11})y - A_{12}\hat{x}_2\} \quad (33)$$

となる。ここで、 $A_{\bar{p}} = A_{22} + \bar{L}_p A_{12}$ とおいた。

これより、外乱 ξ の推定値である $\hat{\xi}$ は、

$$\begin{aligned} \hat{\xi} = & \text{diag}((\tau s + 1)^{-d_1}, \dots, (\tau s + 1)^{-d_m}) \\ & \cdot \{A_{12}(sI - A_{\bar{p}})^{-1} B_2\}^{-1} \{(sI - A_{11})y - A_{12}\hat{x}_2\} \end{aligned} \quad (34)$$

で構成可能となる。実際設計するには利用できる情報は y と $\hat{x}_2$ であるから

$$\hat{\xi}(s) = \bar{Q}(s)\bar{\mu}(s) \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}(s) = & \text{diag}((\tau s + 1)^{-d_1+1}, \dots, (\tau s + 1)^{-d_m+1}) \\ & \cdot \{A_{12}(sI - A_{\bar{p}})^{-1} B_2\}^{-1} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mu}(s) = & \text{diag}((\tau s + 1)^{-1}, \dots, (\tau s + 1)^{-1}) \\ & \cdot \{(sI - A_{11})y - A_{12}\hat{x}_2\} = \bar{W}(s) \begin{pmatrix} y \\ \hat{x}_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

で構成すれば実現可能である。

[注意 1] 式(35)の近似逆系の次数は、同一次元オブザーバを用いた場合の逆系と同じである。よ

って、コントローラ全体の次数は、低次元オブザーバ分の次数が低下することになる。

4・2 低次元オブザーバによる一般化安定化補償器

特性 外乱推定と外乱除去特性を持つ低次元オブザーバを用いた一般化安定化補償器の構成として、図4に示す構成を示しておく。ここで、 $\bar{\Sigma}_{ob}$ は式(29)、(30)の低次元オブザーバであり、コントローラと低次元オブザーバのゲインを $F = F_e$, $\bar{L} = \bar{L}_p$, $G(s)$ を

$$G(s) = \{C(-A - BF_e)^{-1}B\}^{-1} \quad (38)$$

と選定し、 $\bar{Q}(s)$, $\bar{W}(s)$ は式(36), (37)とする。

フィードバック制御則 $F_e x$ は、

$$F_e x = F_{e1}x_1 + F_{e2}\hat{x}_2 = F_{e1}x_1 + F_{e2}x_2 + F_{e2}e_2 \quad (39)$$

と書けるから、誤差方程式の近似逆システムの実現を $(\bar{A}_Q, \bar{B}_Q, \bar{C}_Q, \bar{D}_Q)$ すると、拡大系は、

$$\dot{x}_{e2} = \begin{pmatrix} A_{F_e} & B(F_{e2} + \bar{D}_Q A_{12}) & -B\bar{C}_Q \\ 0 & sI - A_{\bar{L}_p} & 0 \\ 0 & -\bar{B}_Q A_{12} & \bar{A}_Q \end{pmatrix} x_{e2} + \begin{pmatrix} B \\ -B_2 \\ 0 \end{pmatrix} \xi + \begin{pmatrix} BG \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} r \quad (40)$$

$$y = (C \ 0 \ 0) x_{e2}$$

となる。ここで $x_{e2} = (x \ e_2 \ \bar{\eta})^T$, $A_{F_e} = A + BF_e$ とおいた。

Fig. 4 Reduced order observer-based stabilizing controller

この制御系の外乱推定と外乱除去について、次の性質を得る。

[性質 1] ⁽¹⁰⁾ (A, B, C) は最小位相系とする。

$\bar{Q}(s)$ の出力を $\hat{\xi}$ とし $\tau \rightarrow 0$ とすると、 $\hat{\xi}$ は入力端に加わる未知外乱 ξ の推定値である。

証明: 未知外乱 ξ から、推定値 $\hat{\xi}$ までの伝達関数は、

$$H_{\hat{\xi}\xi}(s) = \begin{pmatrix} 0 & -\bar{D}_Q A_{12} & \bar{C}_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sI - A_{F_e} & -B(F_{e2} + \bar{D}_Q A_{12}) & -B\bar{C}_Q \\ 0 & sI - A_{\bar{L}_p} & 0 \\ 0 & \bar{B}_Q A_{12} & sI - \bar{A}_Q \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B \\ -B_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (41)$$

であり、整理すると次のようなる。

$$H_{\hat{\xi}\xi}(s) = \{\bar{D}_Q + \bar{C}_Q(sI - \bar{A}_Q)^{-1}\bar{B}_Q\} \cdot A_{12}(sI - A_{\bar{L}_p})^{-1}B_2 \quad (42)$$

したがって、

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} H_{\hat{\xi}\xi}(s) = I \quad (43)$$

が成立し、 $\hat{\xi}$ は ξ の推定値となる。□

次に、外乱除去に関して次の性質を得る。

[性質 2] (A, B, C) は最小位相系とする。外乱が入力端に加わるとき、いかなる未知外乱に対してもフィードバックゲインとオブザーバゲインの極限特性と、外乱推定値と外乱の相殺により、外乱が出力に与える影響を減少させることができる。

証明: 外乱 ξ から出力 y までの伝達関数は、

$$H_{y\xi}(s) = \begin{pmatrix} C & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sI - A_{F_e} & -B(F_{e2} + \bar{D}_Q A_{12}) & -B\bar{C}_Q \\ 0 & sI - A_{\bar{L}_p} & 0 \\ 0 & \bar{B}_Q A_{12} & sI - \bar{A}_Q \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B \\ -B_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (44)$$

であり、整理すると次のようになる。

$$H_{y\xi}(s) = C(sI - A_{F_e})^{-1}B \cdot [I - \{\bar{D}_Q + \bar{C}_Q(sI - \bar{A}_Q)^{-1}\bar{B}_Q\}A_{12}(sI - A_{\bar{L}_p})^{-1}B_2] \cdot C(sI - A_{F_e})^{-1}BF_{e2}(sI - A_{\bar{L}_p})^{-1}B_2 \quad (45)$$

ここで、補題 1 より $\varepsilon \rightarrow 0$ で $C(sI - A_{F_e})^{-1}B \rightarrow 0$ となり $H_{y\xi} \rightarrow 0$ となる。さらに、第 1 項は有限の周波数の外乱に対して、 $\tau \rightarrow 0$ とすることで $[I - \text{diag}((ts+1)^{-d_1}, \dots, (ts+1)^{-d_m})]$ も零に近づく。これは、提案手法が $\varepsilon \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow 0$ の二つのパラメータ操作で零に漸近するという内部モデル制御と同じ特性である。第 2 項は、オブザーバの誤差でこれも $\rho \rightarrow 0$ とすることで、補題 4 より式(28)が成立するので、 $\varepsilon \rightarrow 0$, $\rho \rightarrow 0$ により、この項も両方の極限で各々零に漸近し、これより

$$\lim_{\varepsilon, \rho, \tau \rightarrow 0} H_{y\xi}(s) \rightarrow 0 \quad (46)$$

が成立する。□

さらに、目標値 r から出力 y までの伝達関数を考えると、

$$H_{yr}(s) = C(sI - A_{F_e})^{-1}BG \quad (47)$$

であるから、 G を式(38)と選んでいるため、

$$\lim_{s \rightarrow 0} H_{yr}(s) \rightarrow I \quad (48)$$

となり、内部モデル制御の構成と同じになり目標追従が可能となる。

状態フィードバックとオブザーバを使った安定化制御則から導く安定化補償器の一般形⁽¹¹⁾についてはよ

く知られているが、ここで示したように設計パラメータを特別な形として選定すると、補題3の内部モデル制御と同様の外乱推定機能と共にこれを活用した外乱除去特性が得られる。

4.3 パラメータの不確かさが存在する場合の特性

ロボットハンドの粘性抵抗の同定には、不確かさが存在しやすい。そこで、パラメータの不確かさがある場合の制御系の特性について議論しておく。この粘性抵抗の不確かさは、 $(A + \Delta A)$ で $\Delta A = B\delta$ と表記できる。このとき式(4)は、

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu + B\xi, \quad y = Cx \quad (49)$$

となる。そこで、式(40)は次のように整理できる。

$$\dot{x}_{e2} = \begin{pmatrix} A_{F_e} + \Delta A & B(F_{e2} + \bar{D}_Q A_{12}) & -B\bar{C}_Q \\ -\Delta A_2 & A_{I_p} & 0 \\ 0 & -\bar{B}_Q C & \bar{A}_Q \end{pmatrix} x_{e2} + \begin{pmatrix} B \\ -B_2 \\ 0 \end{pmatrix} \xi + \begin{pmatrix} BG \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} r \quad (50)$$

$$y = (C \ 0 \ 0)x_{e2}$$

ここで、 $\Delta A_2 = (\Delta A_{21} \ \Delta A_{22})$ とおいた。

このとき、内部モデル制御と同様の手順⁹⁾で次の性質が示せる。

[性質 3] システム (A, B, C) は $CB = 0$ 、 $|CAB| \neq 0$ を満足し不変零点がないと仮定する。この対象に対して $\Delta A = B\delta$ なるパラメータ変動が存在する場合、極限フィードバックゲイン F_e で、 ε の調整により閉ループ系の安定性は保証される。また、

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (sI - A_{F_e})^{-1} B \rightarrow 0 \quad (51)$$

も成立するので、外乱推定値 $\hat{\xi}$ も ξ に近づく。

さらに、外乱除去特性について次の性質が得られる。

[性質 4] 最小位相系 $(A + \Delta A, B, C)$ に対する安定化補償器の一般形において、 $\Delta A = B\delta$ と記述できる場合、制御系の設計パラメータを $F = F_e$ 、 $\bar{L} = \bar{L}_p$ および $\bar{Q}(s)$ 、 $\bar{W}(s)$ を式(36)、(37)と選定する。このとき、各々のパラメータ $\tau, \rho, \varepsilon \rightarrow 0$ とすることで、外乱から出力までの伝達関数は零に漸近する。

証明： 外乱から出力までの伝達関数 $H_{y\xi}(s)$ は、式(50)から $\Delta A = B\delta$ 、 $\Delta A_2 = B_2\delta$ および

$$\bar{D}_Q + \bar{C}_Q(sI - \bar{A}_Q)^{-1} \bar{B}_Q = \{A_{12}(sI - A_{F_p})^{-1} B_2\}^{-1} \text{ より、}$$

$$\begin{aligned} H_{y\xi}(s) &= [C\{(sI - A_{F_e}) - B\delta + BF_{e2}(sI - A_{F_p})^{-1} B_2\delta \\ &\quad + B \cdot \text{diag}((\tau s + 1)^{-d_1}, \dots, (\tau s + 1)^{-d_m}) \cdot \delta\}^{-1} B] \\ &\quad \cdot [I - \text{diag}((\tau s + 1)^{-d_1}, \dots, (\tau s + 1)^{-d_m})] \end{aligned} \quad (52)$$

となる。よって、式(53)を得る。

$$\lim_{\varepsilon, \rho, \tau \rightarrow 0} H_{y\xi}(s) \rightarrow 0 \quad (53)$$

□

5. 把持のための制御系

2章で示した把持システムを具体化するために、4章で導出した制御系を発展させた把持制御の構成を図5のように提案する。実際に実験装置として構成した1リンクロボットハンドをもとに把持の流れと制御の流れを説明する。

図5の $\Sigma(s)$ が制御対象の1リンクのロボットハンドで、その形状は図8のようなものである。簡単のために1リンクで構成しており、物体を把持できるように物体との接触面は可動とし、接触面が物体にほぼ垂直にあたるような構造としてある。なお、1リンクでは物体の大きさによって接触面と垂直に接することが困難となるため、物体の大きさが不揃いの場合は2つのリンクの間隔を制御する必要があるが、ここではこの機能については考えない。

図5の制御系の目標値はアームの角度で、対象物を十分掴むことのできる角度を与えている。 $\Sigma(s)$ への入力トルク、 $\Sigma(s)$ からの出力はアームの角度で図1に示すエンコーダで検出している。 $\bar{\Sigma}_{0g}(s)$ は、ロボットハンドの数式モデルから得られる式(29)、(30)の未知入力系の低次元オブザーバで、 $\Sigma(s)$ への入力値(トルク)と出力値(角度)から内部状態である角速度を推定している。 $\bar{W}(s)$ と $\bar{Q}(s)$ で、オブザーバの誤差方程式の近似逆システム式(35)を構成し、オブザーバで推定した内部状態(角速度)と出力値(角度)から $\Sigma(s)$ の入力端に加わる未知外乱 ξ を $\hat{\xi}$ として推定している。

ξ については、ロボットハンドにトルクを与えれば目標の角度に向けて動くが、ロボットハンドが物体に接触するとハンドの動きに応じた反力により逆のトルクが加わる。これを本研究では、未知外乱 ξ として扱う。これらの信号の説明を図6に示す。

図5の制御系では2章で概説したように、CCDカメラによる物体認識と、特定した物体に応じた設定把持力 α をデータベースから読み出す。物体に接する前および接触しても反力が小さい、すなわち $\xi < \alpha$ のときの信号の流れは低次元オブザーバを利用した一般化安定化補償器のそのものであるから図4と同じ構成で図6となる。ここで ξ は、未知であるから $\xi < \alpha$ や $\xi \geq \alpha$ の判定には、推定値 $\hat{\xi}$ を用いて実行している。ハンドのモデル、オブザーバおよび近似逆システムは、次章でまとめて記述する。

図6の構成であると対象物を十分掴むことのできる目標角度を与え続ければ、4章で得た性質1, 2によりロボットハンドは目標回転角に追従するため、軟らかい物体では反力を打消し対象物を押し潰してしまう。ここで押し潰さないために物体に見合った設定把持力 α と ξ の比較で $\xi \geq \alpha$ となった段階で図5のスイッチを切り換えて図7に示す信号の流れとする。スイッチが切り換えられた状態ではハンドを駆動する必要はなく、対象物の反力と釣り合う力(設定把持力 α)のトルクを加え続けることで把持が可能となる。スイッチの切り換えには、切り換え判断と切り換え動作のため数サンプル分だけ遅れが生じる。この遅れについての影響および対策等については次章の実験結果で説明する。

Fig. 5 Proposed control structure

Fig. 6 Proposed control structure $\hat{\xi} < \alpha$ Fig. 7 Proposed control structure $\hat{\xi} \geq \alpha$

6. 実験による結果と評価

6・1 制御系設計 ロボットハンドを単純化したモデルを図8(a)に、トマトを把持した様子を(b)に示す。また、物理パラメータを表2に示す。

Table.2 Physical parameters			
J	Moment of inertia [kgm ²]	0.17	
c	Damping coefficient [Ns/m]	8.1	
T	Torque [Nm]	θ	Angle [rad]

Fig. 8 A model of robot hand

図8より、 O 点周りのハンドの運動方程式は、

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} = T \quad (54)$$

であるから、ここで状態変数を $x = (\theta \ \dot{\theta})^T$, 操作入力 $u = T$ として状態変数表現すると、制御対象は、

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{c}{J} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{pmatrix} T, \quad y = (1 \ 0)x \quad (55)$$

と表すことができる。これに対する低次元オブザーバは、式(29), (30)より、

$$\begin{cases} \dot{z} = \left(-\frac{c}{J} + \bar{L}_p\right)z - \left(-\frac{c}{J} + \bar{L}_p\right)\bar{L}_p y + \frac{1}{J}T \\ \hat{x}_2 = z - \bar{L}_p y \end{cases} \quad (56)$$

であり、オブザーバの誤差方程式の近似逆システムは、

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}} = -\frac{1}{\tau}\hat{\eta} + \mu \\ \hat{\xi} = \left(\frac{J}{\tau^2} - \frac{c - J\bar{L}_p}{\tau}\right)\hat{\eta} - \frac{J}{\tau}\mu \end{cases} \quad (57)$$

と構成でき、ロボットハンドの制御系設計が完了する。

設計パラメータは、シミュレーションと実験による試行により $\varepsilon = 0.018$, $\rho = 0.03$, $\tau = 0.05$ と選定し、これらから得られるゲインは、 $F_g = (-54.64 \ -1.05)$, $\bar{L}_p = -159.59$ である。なお、サンプリングタイムは 20ms とした。

6・2 実験結果とその評価

実験は、CCD カメラにより対象物の色と外形の情報から物体の認識を行う画像認識から、物体把持までの一連の動作を行った。金属立方体とトマトの設定把持力 α は、表1のとおり各々3.0Nm, 1.0Nmである。図9に金属立方体、図10にトマトを認識し、ハンドに目標入力を与え把持するまでの実験結果を示す。各々の図の上部が右側アーム、下部が左側アームであり、図中には左右のアームの目標角度と出力角度、制御入力であるトルクと外乱推定値である反力をトルクで示している。なお、横軸は時間である。

物体を認識しハンドに目標角度が与えられてから約4.5sまでは、アームが物体に触れておらず反力もほぼ零を示している。4.5s付近でアームが物体に接触すると目標値である角度に追従するように入力である

トルクが増加し、これに伴い反力も増加していることが確認できる。図9の場合、画像から金属立方体を認識し設定値 $\alpha = 3.0 \text{ Nm}$ が設定され、反力が 3.0 Nm となった時点で制御方式が切り換わり設定把持力 3.0 Nm で把持していることが確認できる。また図10も同様にトマトと認識し設定値 $\alpha = 1.0 \text{ Nm}$ で制御方式が切り換わり、以後は設定値 1.0 Nm で適切に把持していることが確認できる。

ここで図9、図10に示す左右のハンドの制御トルクは、物体に接触後から推定トルク分(反力である逆トルク)だけ増大している。硬い立方体の場合、制御トルクを増大してもアームは動かないため制御トルクが急増しているが、図中の出力角度は推定トルクが上昇時から動いていない。一方、図10のトマトの場合、硬い立方体と比較すると推定トルクの上昇に対してこの外乱を打ち消し、出力角度は目標角度に追従している様子が認められ性質2を実証する結果となっている。

制御トルクは、推定値 $\hat{\tau}$ が設定把持力 α を超えた時点で切り換えるため、瞬間的に α を超えることになる。図9、図10のいずれも瞬間的に制御トルクが上昇しているが、時間が短いためトマトを潰す力を生じるには至っていない。これを抑えるためには柔らかい物体には目標角度をゆっくり与えることで避けられると考える。

これらの実験より、対象物に見合った力で把持するロボットハンドについて、提案する制御システムが有効であり実現可能であることを示している。

Fig. 9 Experimental result (metallic cube)

Fig. 10 Experimental result (tomato)

7. おわりに

本研究では、視覚情報から物体を認識し、その物体に見合った力で把持するシステムを提案し、その有効性を実験により検証した。圧力センサ等を用いることなく、これを達成するために低次元未知入力オブザーバを利用した一般化安定化補償器の構成で、内部モデル制御と同じ外乱推定と外乱除去特性を持つことを示し、さらにこれを拡張し把持に適した新しい制御系を提案し、実験により有効であることを示した。

提案したシステムが今後実用的に意味あるものとするためには、より多くの対象物を把持できるように、視覚認識システムの改善とデータベースの構築が必要となる。

最後に有益なご意見をいただきました査読者の方々に心より感謝いたします。

文 献

- (1) Zhou, K., Robust and Optimal Control, Prentice Hall (1997)
- (2) Morari, M., Zafiriou, E., Robust process control, Prentice Hall (1999).
- (3) Image Processing with HALCON (in Japanese), LinX Corporation
- (4) Kobayashi, N et al., The Limiting Form of Optimal Regulations and Disturbance Decoupling Problem, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.34, No.6 (1998), pp.563-570
- (5) Suzuki, R et al., Decoupling Control with Limiting Form of Linear Optimal Regulations for Non-minimum Phase System, Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Series C, Vol.119, No.2 (1999), pp.183-189
- (6) Kimura, H., Perfect and Subperfect Regulation in Linear Multivariable Control Systems, Automatica, Vol.18, No.2 (1982), pp.125-145
- (7) Kimura, H., Sugiyama, O., Design of Robust Controller Using Perfect Regulation and Perfect Observation, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.18, No.10 (1982), pp.995-960
- (8) Suzuki, R et al., Multiplicative Effect by Combining IMC Design with Limiting Properties of LQR and Its Application to Trajectory Tracking Control, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.67, NO.663, (2001), pp.3519-3524
- (9) Kobayashi, N et al., Disturbance Estimation via IMC Design with Limiting Properties of LQR and Its Application, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.70, No.695, (2004), pp.1984-1991
- (10) Tani, M et al., Generalized Internal Model Control with Servo Compensation using a Reduced Order Observer, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.42, No.9 (2006), pp.1027-1034