Simplified Internal Model Control and its Applications to Sensorless Grasping Control

Ryoichi Suzuki Non-member (Kanazawa Institute of Technology)

Kouhei Itou Non-member (Kanazawa Technical College)

Akira Sugawara Non-member (Sohgo Security Services Co., Ltd)

Nobuaki Kobayashi Non-member (Kanazawa Institute of Technology)

Yoshinori Takei Member (Kanazawa Institute of Technology)

Keywords : Internal model control, Reduction of controller, Unknown input estimation, State estimation, Grasping control

A simplified IMC scheme is proposed in this paper. By using an inverse system or an approximate inverse system for the IMC structure, the order of the controller leads the high order, meanwhile the high order controller is not practical in implementation. This paper is concerned with the problem of reducing a high order controller to reduced order one. The disturbance estimation property of the closed loop system is also discussed. The proposed procedure is applied to prototype robotic

Fig. 1. Proposed controller structure

Fig. 2. Robotic hand with two fingers

hand that can hold an object with suitable grasping force without force sensor. The effectiveness of the proposed controller scheme is confirmed by experiments.

Fig. 3. Experimental result

Fig. 4. Successful result

簡易型内部モデル制御の構成法と把持力制御への応用

非会員 鈴木 亮一* 非会員 伊藤 恒平**
 非会員 菅原 映*** 非会員 小林 伸明*
 正 員 竹井 義法*

Simplified Internal Model Control and its Applications to Sensorless Grasping Control

Ryoichi Suzuki*, Non-member, Kouhei Itou**, Non-member, Akira Sugawara***, Non-member,
 Nobuaki Kobayashi*, Non-member, Yoshinori Takei*, Member

A simplified IMC scheme is proposed in this paper. By using an inverse system or an approximate inverse system for the IMC structure, the order of the controller leads the high order, meanwhile the high order controller is not practical in implementation. This paper is concerned with the problem of reducing a high order controller to a reduced order one. The disturbance estimation property of the closed loop system is also discussed. The proposed procedure is applied to prototype robotic hand that can hold an object with suitable grasping force without force sensor. The effectiveness of the proposed controller scheme is confirmed by experiments.

Keywords: Internal model control, Reduction of controller, Unknown input estimation, State estimation, Grasping control

1. はじめに

プロセス制御などに利用されている内部モデル制御は、Horowitz や Morari らによって提案され、研究が進められてきた制御方法で、制御対象に制御対象のモデルを並列に接続し、両者の出力誤差をコントローラに通しフィードバックする制御方法である⁽¹⁾。Zhou らは、内部モデル制御の外側にループを施しロバスト性を有する制御系を提案し、これを一般化内部モデル制御 (GIMC) と呼んでいる⁽²⁾。

内部モデル制御の一つの特徴として、コントローラにモデルの近似逆系を使うことで未知入力 (外乱) を新たなセンサを必要とせずに再構成でき、これを種々な制御に利用できる点にある。この特徴を利用して再構成した外乱を入力

に加え、入力端に加わる外乱と相殺して目標追従性を高めている。未知入力 (外乱) の推定値を利用した応用にはマスター、スレーブのバイラテラルサーボに応用した研究報告もあるが、未知入力の推定値を利用した応用事例は比較的少ない。また、内部モデル制御は、制御対象のモデルを内蔵するため、制御対象が安定であるか、状態を用いて安定化できる必要があり、かつ、コントローラの次数が増大してしまう。これらの欠点を解決する手法もいくつか提案されているが、両方を満足する方法は示されていない。

本論文では、未知入力 (外乱) の推定が可能な低次元内部モデル制御の簡易設計手順を導入し、この手法をオブザーバにもとづく一般化安定化補償器による制御に展開し、新しい簡易な設計法を提案し、得られる制御系が外乱の推定と抑制という内部モデル制御固有の特徴をもつことを示す。さらに、推定した外乱を積極的に利用する例として、力センサを使用しないワイヤ駆動のハンドによる把持力制御に応用し、提案する制御系の有効性を検証する。

2. 未知入力 (把持力) の推定と状態推定の基本理論

〈2・1〉 内部モデル制御の概要と問題点 つぎの 1 入力 1 出力系で、入力端に外乱の加わるシステム

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + bu + b\xi \\ y &= cx\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (1)$$

* 金沢工業大学
〒 921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1
Kanazawa Institute of Technology

7-1, Nonoichi, Ishikawa 921-8501
** 金沢工業高等専門学校
〒 921-8601 石川県金沢市久安 2-270
Kanazawa Technical College
2-270 Hisayasu Kanazawa, Ishikawa 921-8601

*** 総合警備保障 (株)
〒 107-8511 東京都港区元赤坂 1-6-6
Sohgo Security Services Co., Ltd.
1-6-6 Motoakasaka, Minatoku, Tokyo 107-8511

を考える。 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ は状態ベクトル, $u \in \mathbb{R}^1$, $y \in \mathbb{R}^1$ は入力, 出力で, システムは可制御, 可観測である。 ξ は $\mathbb{R}^1$ の未知入力で, 後に応用する把持機構においては把持した際の把持物体からの反力がこれにあたる。

上述のシステムの把持力制御システムを考える前に, このようなシステムに対して, 状態 $\mathbf{x}$ が既知の場合, あるいは未知の場合に, 把持の際に生じる反力 (未知入力) を推定する機能を持つシステムを構成することを考える。未知入力は比較的低周波数のものであるとして, 問題は前述したように内部モデル制御と同等の未知入力推定機能を有する低次元のコントローラの構成法を示すことである。

(1) のシステムに最適レギュレータ問題の解である状態フィードバック

$$u = \mathbf{f}\mathbf{x} \quad \mathbf{f} = -\gamma^{-1}\mathbf{b}^T\mathbf{P} \\ \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \gamma^{-1}\mathbf{P}\mathbf{b}\mathbf{b}^T\mathbf{P} + \mathbf{c}^T\mathbf{c} = \mathbf{0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を施した閉ループ系について, つぎの補題が知られている。

(補題)⁽³⁾ $\gamma \rightarrow 0$ と極限するとき, システム $(\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ の不変零点がすべて負であれば,

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b} \rightarrow 0 \dots\dots\dots (3)$$

が成立し, 閉ループ極は等価零点に漸近するものと, 残り は実部が負の無限遠点となる。

☒

このフィードバックループを取り込んだシステム Σ_f は

$$\Sigma_f: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{f})\mathbf{x} + \mathbf{b}v + \mathbf{b}\xi \\ y = \mathbf{c}\mathbf{x} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

であるから, フィードバック系 Σ_f とした内部モデル制御のブロック線図は次の Fig.1 となる。

Σ_f と内部モデル $\bar{\Sigma}_f$ の誤差システム Σ_e は

$$\Sigma_e: \begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{f})\mathbf{e} + \mathbf{b}\xi \\ \eta = \mathbf{c}\mathbf{e} \end{cases}$$

であるから, この拡大系の状態方程式表現はつぎのように書ける。

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{e}} \\ \dot{\boldsymbol{\mu}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{f} & -\mathbf{b}d_Q\mathbf{c} & -\mathbf{b}c_Q \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{f} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{b}_Q\mathbf{c} & A_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{e} \\ \boldsymbol{\mu} \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \xi + \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} v \dots\dots\dots (5) \\ y = \begin{pmatrix} \mathbf{c} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{e} \\ \boldsymbol{\mu} \end{pmatrix}$$

ただし $(A_Q, \mathbf{b}_Q, \mathbf{c}_Q, d_Q)$ は Σ_e の近似逆系 $\Sigma_{e\tau}^{-1}$ で

$$\Sigma_{e\tau}^{-1}\Sigma_e = (\tau s + 1)^{-d} \dots\dots\dots (6)$$

となるシステムの最小実現であり, d は $\Sigma_{e\tau}^{-1}$ をプロパーと

Fig. 1. Internal Model Control with Approximate Inverse System

する指数である。また μ は近似逆系の内部変数である。

このように状態が既知の場合, フィードバックと内部モデル制御の併用系について, つぎのような特性が成立している。

(フィードバック併用内部モデル制御の特性) 最適レギュレータによるフィードバックと内部モデル併用系は相乗的外乱抑制効果により $\gamma \rightarrow 0$, $\tau \rightarrow 0$ において目標値追従性を向上させる。また, 逆システムの出力端で $\hat{\xi}$ は ξ を $\tau \rightarrow 0$ の極限で再構成する。

これは出力 y のラプラス変換 $Y(s)$ が

$$Y(s) = H_{yv}(s)v(s) + H_{y\xi}(s)\xi(s)$$

であり, 各々 $H_{yv}(s)$, $H_{y\xi}(s)$, $v(s)$ はつぎのように与えられる。

$$H_{yv}(s) = \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b} \\ H_{y\xi}(s) = [1 - \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b} \\ \{\mathbf{c}_Q(s\mathbf{I} - A_Q)^{-1}\mathbf{b}_Q + d_Q\}] \\ \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b} \dots\dots\dots (7)$$

また, $v(s) = g^*(s)r$ とし $g^*(s)$ を次のように選定すると, 次の (8) 式, (9) 式の特性をそれぞれ得る。つまり, $g^*(s)$; $\bar{\Sigma}_f$ の近似逆系と選定するとき

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} H_{yr}(s) = 1 \dots\dots\dots (8)$$

$g^*(s)$; 定数 $g = \{\mathbf{c}(-\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b}\}^{-1}$ と選定するとき

$$\lim_{s \rightarrow 0} \mathbf{c}(-\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b}g = 1 \dots\dots\dots (9)$$

となる。外乱から出力までの伝達関数は $\gamma \rightarrow 0, \tau \rightarrow 0$ により $H_{y\xi}$ は

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0, \tau \rightarrow 0} H_{y\xi}(s) \rightarrow 0 \dots\dots\dots (10)$$

となるため, 外乱除去特性の効果により, 目標値追従性が向上する。

また外乱推定値は $H_{\hat{\xi}\xi}$ は

$$H_{\hat{\xi}\xi}(s) = \{\mathbf{c}_Q(s\mathbf{I} - A_Q)^{-1}\mathbf{b}_Q + d_Q\} \\ \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{f})^{-1}\mathbf{b} \dots\dots\dots (11)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} H_{\xi}(s) \rightarrow 1 \dots\dots\dots (12)$$

となり、 τ の選定によって、特定の周波数 ω^* より小さい $\omega < \omega^*$ において $\hat{\xi}$ として外乱 ξ を推定する特性をもつ。

この上式 (10)(12) の 2 つが成立すれば、外乱抑制と外乱推定両方に良い制御効果を生み出すが、次の 2 つの問題がある。

- 1) 制御対象のモデルと誤差式の近似逆系がコントローラに入るため、コントローラの次数が高くなる。
- 2) 状態の利用が可能であるか、システムが安定でなければこの手法は適用できない。前述した手順では状態が利用できるとして安定化と特性改善を行っている。

1) についての対策は文献⁽⁴⁾で、2) については文献⁽⁵⁾で扱われているが、ここでは問題の解決を同時に達成する簡便な設計法を提案する。

〈2・2〉 反力 (外乱) 推定と内部状態推定のための簡易内部モデル制御の構成 内部状態が利用可能であるとき、つぎのブロック線図の構成法 I の制御系を提案する。

ここで、 Σ_f は (4) 式で与えられるシステムで、 $\bar{\Sigma}_f$ は外乱のないモデルであるから

$$\bar{\Sigma}_f: \begin{cases} \dot{\hat{x}} = (A + bf)\hat{x} + b\bar{v} \\ y = c\hat{x} \end{cases}$$

となる。また、 $g = \{c(-A - bf)^{-1}b\}^{-1}$ とする。

このとき、構成法 I の制御系は、内部モデル制御でコントローラに近似逆系を用いた場合と同様、設計パラメータ γ の選定により低い周波数の未知入力を再構成するつぎの性質がある。

性質 1 システム (A, b, c) の不変零点が安定で、内部状態の利用が可能であるとき $g = \{c(-A - bf)^{-1}b\}^{-1}$ と選定すれば、構成法 I のシステムは目標値追従について

$$\lim_{s \rightarrow 0} c(sI - A - bf)^{-1}bg = 1 \dots\dots\dots (13)$$

が成立し、また、 $\gamma \rightarrow 0$ とするとある特定の周波数 ω^* より低い周波数 $\omega < \omega^*$ の外乱に対し

$$\hat{\xi} \doteq \xi \dots\dots\dots (14)$$

が成り立つ。

証明 制御対象 Σ_f 及びモデル $\bar{\Sigma}_f$ の方程式とブロック線図より

Fig. 2. Proposed Controller Scheme I

$$\bar{v} = -gc(x - \bar{x}) + gr$$

であるから、 $x - \bar{x} = e$ といった拡大系は

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + bf & -bgc \\ 0 & A + bf \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} bg \\ 0 \end{pmatrix} r + \begin{pmatrix} b \\ b \end{pmatrix} \xi$$

$$y = \begin{pmatrix} c & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ e \end{pmatrix}$$

$$\hat{\xi} = \begin{pmatrix} 0 & gc \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ e \end{pmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

となる。まず r から y の伝達関数は

$$c(sI - A - bf)^{-1}bg$$

で、 $g = \{c(-A - bf)^{-1}b\}^{-1}$ より、(13) 式が成立する。

また ξ から $\hat{\xi}$ の伝達関数は

$$gc(sI - A - bf)^{-1}b$$

であり、閉ループ系の極は補題から $\gamma \rightarrow 0$ の極限において安定な零点と実部が負の無限遠点で、安定零点は相殺されるから

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} gc(j\omega I - A - bf)^{-1}b = 1 \dots\dots\dots (16)$$

及び

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} c(j\omega I - A - bf)^{-1}b \rightarrow 0 \dots\dots\dots (17)$$

となり、これにより、構成法 I では内部モデルのコントローラに近似逆系を利用した場合と同等の特性として $\hat{\xi} \doteq \xi (\omega < \omega^*)$ を有し、コントローラ次数は低減化される。□

〈2・3〉 一般化安定化補償器の簡易設計と特性 構成法 I では制御対象のモデルを利用し、内部変数を利用可能とした。後に示す構成法 II (Fig.4) として、内部状態を必要としない形に拡張することができる。

制御対象の数式モデルの代わりに、つぎのフルオーダーオブザーバ

$$\Sigma_{ob} \quad \dot{\hat{x}} = (A + k_\rho c)\hat{x} + bu - k_\rho y \dots\dots\dots (18)$$

を導入する。

ここでオブザーバゲイン k_ρ を

$$\begin{aligned} k_\rho &= -\rho^{-1}cM \\ MA^T + AM - \rho^{-1}Mc^TcM + bb^T &= 0 \end{aligned} \dots\dots (19)$$

のように選定し、状態推定値を利用したフィードバック $u = f\hat{x}$ を併用した Fig.3 のブロック線図の構成法を考え、未知入力オブザーバを利用した安定化補償器の一般形を導入する。

ここで、オブザーバの誤差方程式は $x - \hat{x} = \hat{e}$ とすると

$$\dot{\hat{e}} = (A + k_\rho c)\hat{e} + b\xi \dots\dots\dots (20)$$

であるので、

$$\psi = c\hat{e} \dots\dots\dots (21)$$

を出力として、(20)(21) の誤差システムの近似逆システム $\hat{Q}_o(s)$ を

$$\hat{Q}_o(s)c(sI - A - k_\rho c)b = (\tau s + 1)^{-d} \dots\dots\dots (22)$$

Fig. 3. Full order observer-based stabilizing controller

を満足するように決定し、その実現を $(\hat{A}_q, \hat{b}_q, \hat{c}_q, \hat{d}_q)$ とする。これを用いて、Fig.3 のような制御系を構成する。

この制御系は一般化安定化補償器の形であり、パラメータを特別に前述のように選定したものであるが、これは内部モデル制御と同等の性能としてつぎの性質があることが知られている。

性質 2 ⁽⁵⁾ ブロック線図の一般化安定化補償器の制御系は、 (A, b, c) が最小位相系であるとき、 $\rho \rightarrow 0$ とすると、オブザーバは未知入力系のオブザーバとなる。また、 $\tau \rightarrow 0$ とすると $\hat{\xi}$ は ξ の推定値となり、 ξ から y への伝達関数は零に漸近する。これによって、内部モデル制御と同等の外乱推定、外乱除去、目標値追従特性を持つ。 □

ここで、 ξ から y への伝達関数 $H_{y\xi}(s)$ は

$$H_{y\xi}(s) = c(sI - A - bf)^{-1}b[1 - c(sI - A - k_\rho c)^{-1}b(\hat{c}_q(sI - \hat{A}_q)^{-1}\hat{b}_q + \hat{d}_q)] - c(sI - A - bf)^{-1}bf(sI - A - k_\rho c)^{-1}b \quad (23)$$

となり、(7) 式との差異は最後の項の状態推定による誤差の影響分だけが異なるが、 $\rho \rightarrow 0$ とすることでこの項も零に漸近するので $H_{y\xi}(s)$ も零に漸近する。

このような構成で、内部状態が既知の制約を緩和できるが、コントローラ次数は内部モデル制御の場合と同じ $(n+d)$ 次である。

そこで、この一般化安定化補償器の制御系に、前節の内部モデル制御を低次元化した手法を利用した簡易設計法として、Fig.4 のブロック線図の制御系を提案する。ただし、 $g = \{c(-A - bf)^{-1}b\}^{-1}$ 、 $\bar{k} = \{c(-A - k_\rho c)^{-1}b\}^{-1}$ である。

このとき構成法 II について、つぎの性質を得る。

性質 3 (A, b, c) の不変零点のすべての実部が負 (最小位相) である。ここで $\rho \rightarrow 0$ とすると構成法 II では、内部状態を推定すると同時に、性質 2 と同様の低い周波数の外乱の推定も可能で、外乱除去特性を持ち、コントローラ次数はオブザーバの次数と等しい。

証明 $x - \hat{x} = \hat{e}$ と定義したので、ブロック図の拡大状態方程式は

Fig. 4. Proposed Controller Scheme II

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + bf)x - b(f + \bar{k}c)\hat{e} + b\xi + bgr \\ \dot{\hat{e}} &= (A + k_\rho c)\hat{e} + b\xi \quad (24) \\ \dot{\hat{\xi}} &= \bar{k}c\hat{e} \end{aligned}$$

である。ここで $\hat{e}$ は (A, b, c) のすべての不変零点の実部が負であるから、補題の LQ 制御の極限特性の双対から

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} (sI - A - k_\rho c)^{-1}b \rightarrow 0 \quad (25)$$

が成立する。これより (18), (19) は $\rho \rightarrow 0$ で

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \hat{e} \rightarrow 0 \quad (26)$$

が成立し、未知入力系のオブザーバとなる。また $\hat{\xi}$ は

$$\hat{\xi}(s) = \bar{k}c(sI - A - k_\rho c)^{-1}b\xi(s) \quad (27)$$

となるので、 LQ の極限特性の双対から、 $\rho \rightarrow 0$ と選定すると、性質 1 と同様の性能、すなわち、ある周波数 (ω^*) より低い周波数 $\omega < \omega^*$ の外乱に対して

$$\hat{\xi} \doteq \xi$$

が成立し、低い周波数の未知入力の再構成ができる。

外乱から出力までの伝達関数 $H_{y\xi}$ は

$$H_{y\xi}(s) = c(sI - A - bf)^{-1}b \left\{ 1 - \bar{k}c(sI - A - k_\rho c)^{-1}b \right\} - c(sI - A - bf)^{-1}bf(sI - A - k_\rho c)^{-1}b \quad (28)$$

であるから、一般化安定化補償器で近似逆系を構成した場合の (23) と類似の伝達関数となるので、外乱抑制効果も同じである。 □

このように構成法 II では、内部モデル制御と同等の低周波数外乱 (入力) の再構成機能を持ち、コントローラ次数は対象の次数と同じ n 次元で、しかもオブザーバは未知入力系の状態推定を達成するから、内部モデル制御や構成法 I のように状態が既知、あるいは対象が安定であるという制約は不要となり、問題 1), 2) に対する解決策を得たことになる。

3. ワイヤ駆動方式把持機構への応用

〈3・1〉 把持力制御の為のシステム 人が物を掴んで持

Fig. 5. Proposed Controller Scheme II for Grasping Control

ち運びするとき、物体を握り潰さずかつ適切な力で把持している。堅く重いものと、シュークリームやバームクーヘンのように軽くて軟らかいものとを掴む場合、対象を認識し、先験的な経験則に従い力を加減し把持する機能と、触れたときの感触から力を加減しながら把持する機能の2つがあると考えられる。ここでは、前者の機能を自動化するシステムを、前章で展開した一般化安定化補償器の簡易設計法を利用して構成し、実験によりその有効性を示す。

把持機構は、ワイヤ駆動方式の2指2リンクマニピュレータとして、把持力を加減するシステムは、提案した制御系を利用した Fig.5 のような制御系とする。ここで、物体に応じて設定する把持力(反力) ξ^* は、あらかじめ物体に応じた適正な把持力をデータベース化しておき、カメラ等の画像情報等から物体を認識し、その物体に応じた設定値を引き出し ξ^* と選定するとして、ここでの実験では ξ^* の設定値が決定されたものとして行う。目標値 r は把持できるワイヤの巻き取り量を与え、Fig.5 の制御系で把持動作を行う。物体に接触するまではワイヤを巻き取り、マニピュレータが物体に接触すると反力 ξ が徐々に増大していく。ここで、この ξ の推定値 $\hat{\xi}$ と設定値 ξ^* との比較により、反力と把持力が $\hat{\xi} = \xi^*$ となった段階で制御入力を u^* ($\hat{\xi} = \xi^*$ となった時点でのトルク) に固定することで、対象物に応じた力で把持するシステムを提案することができる。この制御系の最も特徴的な点は力に関するセンサを必要としない点である。

〈3・2〉 ワイヤ駆動方式 2 指 2 リンクマニピュレータとそのモデル マニピュレータの機構は文献⁽⁷⁾の差動機構を応用する。これは1つの入力を2つの出力端に分岐するもので Fig.6 の機構である。Fig.6 のリンク 2 の α の部分に一端を固定したワイヤ(一点鎖線で表記)を、回転自在になるように装着されたプーリ 2 に反時計回りに1回巻き付ける。同様にプーリ 1、プーリ 0 の順にワイヤを同一回転方向に巻き付け、最後にワイヤの一端をモータ軸に固定する。この時、張力 f を与えると各リンクにはプーリ半径に応じたトルクが発生する。ここで、プーリ 1、プーリ 2 の半径を r_1 , r_2 と置くと、各リンクに発生するトルクは次式で求められる⁽⁷⁾。

Fig. 6. Tendon-Driven Mechanism for Robotic Hand

Fig. 7. Prototype Robotic Hand with Two Fingers

$$\tau_1 = fr_1 \quad \tau_2 = fr_2 \dots \dots \dots (29)$$

(29) 式よりワイヤ 1 本で 2 つのリンクを動かすことが可能である。

前述の機構に、リンクの外側に動作後の指が初期位置に戻るためと、張力維持のためにバネ k を付加したワイヤを取り付ける。外部のワイヤは β の部分に一端を取り付け、プーリ 2、プーリ 1 の順に時計回りに1回ずつ巻き付け、バネを付加し γ の部分で1端を固定する。これにより1つのモータで2本の指を動作させ、対象物を把持させる機構である。この機構は、モータを逆転させることでバネにより元の状態に復元する。また、Fig.6 を基に試作したマニピュレータを Fig.7 に示す。

急激な把持動作を行うことを考えず、ゆっくりとした把持を想定し慣性モーメントを無視すると、このワイヤ駆動の把持システムは Fig.8 のようなモデルで表現できる。ここでモータトルク τ 、回転角 θ やワイヤの変位 x を定義すると

$$\begin{aligned} \tau &= fr \\ f &= c\dot{x} + kx \\ x &= r\theta \end{aligned}$$

で、 $x_1 + x_2 = x$, $\theta = \theta_1 + \theta_2$ であり $x_1 = x_2$ より

$$2cr^2\ddot{\theta} + 2kr^2\theta = \tau$$

なる運動方程式となる。

Fig. 8. Model of Robotic Hand with Two Fingers

Table 1. Physical Parameters

c [Ns/mm]	8.40
k [N/mm]	0.20
r [mm]	4.5

Fig. 9. Experimental Result : Proposed Controller SchemeII

4. 実験による評価と検証

前節で導入した運動モデルに対し、各々の物理パラメータの測定値を Table 1 のように求め、このモデルから制御系を Fig.8 のように構成し実験を行った。本実験では、本手法を用いて設定する把持力 (目標値) に追従して把持制御が可能か確認する。

構成法 II による把持制御実験結果を Fig.9 と Fig.11 に示す。Fig.9 は把持力を $\xi^* = -200$ [Nmm] (内容物の入ったペットボトルを把持できる力)、Fig.11 はバームクーヘンを適切に把持する力として $\xi^* = -25$ [Nmm] と設定している。

どちらの実験においてもフィードバックゲインは重み係数が $\gamma = 10^{-6}$ で $\mathbf{f} = -992.1$ とし、オブザーバゲインは重み係数が $\rho = 10^{-7}$ で $\mathbf{k}_\rho = -9.5$ としている。どちらの場合もバームクーヘンを対象物として把持させている。また、Input Angle はモータシャフトの目標回転角度で、Output Angle はそれをロータリエンコーダにより測定したものである。

Fig.10 は設定値を $\xi^* = -200$ [Nmm] とした場合の実験の様子であるが、マニピュレータがバームクーヘンを大きく変形させていることがわかる。

一方、設定値を $\xi^* = -25$ [Nmm] とした場合の実験である Fig.12 を見ると、大きく変形させずに適切な把持が行われていることがわかる。この場合の実験結果である Fig.11

Fig. 10. Unsuccessful result

Fig. 11. Experimental Result : Proposed Controller SchemeII

Fig. 12. Successful result

をみても、モータシャフトの回転角度が 1.4 [rad] 程度でとどまっており、設定値 ξ^* を適正な値に設定することで、バームクーヘンなどの軟らかい物体を大きく変形させず把持することができる。

本手法の推定特性の精度をさらに向上させるため、力センサー等によるセンサ測定値との比較、検討実験が今後必要な課題である。

5. おわりに

本研究では、従来の内部モデル制御の問題点であったコントローラ次数の増大という問題と、内部状態の利用が可能という制約を解決するため、内部モデル制御の簡易設計手順を導入し、この手法をオブザーバにもとづく一般化安定化補償器による制御に展開し、新しい簡易な設計法を提案し、その有効性をマニピュレータによる把持力制御実験により検証した。

この簡易設計手順により構成した制御系が、従来の内部モデル制御と同じ目標値追従特性と未知入力推定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。指にかかる反力が一定であるという限定条件はあるものの、指の根本部が動かない静的な把持や、重力や慣性力の影響が少ない状況下の把持において、センサーレスで把持制御を実現できることを、本研究で明らかにした。

本研究では1入出力系について述べた。本理論の多入出力系への拡張による一般化についての結果も見通しを得ており、今後明らかにする予定である。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) (No.21560476) によるものである。

(平成21年3月17日受付, 平成21年7月14日再受付)

文 献

- (1) M. Morari and E. Zafriou: "Robust Process Control", Prentice Hall (1987)
- (2) K. Zhou and Z. Ren: "A New Controller Architecture for High Performance, Robust, and Fault-Tolerant Control", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.46, No.10, pp.1613-1618 (2001)
- (3) N. Kobayashi, M. Sakurai, T. Nakamizo, and Y. Yano: "The Limiting Form of Optimal Regulations and Disturbance Decoupling Problem", *Trans. SICE*, Vol.34, No.6, pp.563-570 (1998) (in Japanese)
小林伸明・櫻井光広・中溝高好・矢野靖仁:「最適レギュレータの極限形式と外乱分離問題」, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.6, pp.563-570 (1998)
- (4) Z. shu, K. Watanabe, and K. Yamada: "Unification of Model and Compensation of Internal Model Control", *Trans. SICE*, Vol.31, No.8, pp.1030-1036 (1995) (in Japanese)
舒 志斌・渡部慶二・山田 功:「内部モデル制御系のモデルと補償器の一体化」, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.1030-1036 (1995)
- (5) M. Tani, R. Suzuki, D. Yamashita, and N. Kobayashi: "Generalized Internal Model Control with Servo Compensation Using a Reduced Order Observer", *textitTrans. SICE*, Vol.42, No.9, pp.1027-1034 (2006) (in Japanese)
谷 正史・鈴木亮一・山下大輔・小林伸明:「低次元オブザーバを利用したサーボ特性をもつ一般化内部モデル制御の構成法」, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.9, pp.1027-1034 (2006)
- (6) R. Suzuki, T. Miyazaki, and N. Kobayashi: "Decoupling Control via All Stabilizing Control with Limiting Properties of LQ Control and Its Application to A Mechanical System", *IEEE Conference on Control Applications*, pp.412-417 (2001)
- (7) S. Hirose and S. Ma: "Development of Tendon Driven Multi-Joint Manipulator Based on Coupled Drive", *Trans. SICE*, Vol.26, No.11, pp.1291-1298 (1990) (in Japanese)
広瀬茂男・馬 書根:「ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発」, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.11, pp.1291-1298 (1990)

鈴木 亮 一 (非会員) 1999 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期後期課程修了。日本学術振興会研究員を経て、現在、金沢工業大学工学部ロボティクス学科 准教授。博士 (情報科学)。

伊藤 恒 平 (非会員) 1993 年防衛大学航空宇宙工学教室修了。同大学校理工学研究科修了。川崎重工業会社研修員, 防衛庁技術研究本部第3研究所勤務を経て、現在、金沢工業高等専門学校機械工学科教授。

菅 原 映 (非会員) 2006 年金沢工業大学工学部機械システム工学科卒業。2008 年金沢工業大学機械工学専攻修了。現在、総合警備保障 (株) に勤務。

小 林 伸 明 (非会員) 1971 年防衛大学機械工学科卒業。熊本大学大学院工学研究科修士課程 (機械工学) 修了。東京工業大学研修生, 防衛庁技術研究本部勤務を経て、現在、金沢工業大学工学部ロボティクス学科 教授。工学博士。

竹 井 義 法 (正員) 1996 年福岡大学大学院工学研究科博士課程前期 (電気工学) 修了。九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程単位取得後退学。同助手, 金沢工業大学工学部特別研究員を経て、現在、金沢工業大学工学部ロボティクス学科 准教授。博士 (工学)。