無経路誘導方式に基づく全方向移動可能な 無人搬送車の非干渉口バスト適応制御*

川崎 義則^{*1}, 岩井 善太^{*2}, 原 慎真也^{*3}

Decoupling and Robust Adaptive Control of Omnidirectional, Automated Guided Vehicle Based on Nonguided Line Navigation System

Yoshinori KAWASAKI, Zenta IWAI and Shinya HARAMAKI

This paper is concerned with a control system design for the new type of omnidirectional AGV (automated guided vehicle) without any steering mechanisms. The plant is regarded as a highly nonlinear multidimensional system with parameter uncertainties, so that the conventional control techniques are not available. Here we propose a new control algorithm by combining nonlinear decoupling control with robust simple adaptive control (SAC). Both techniques were developed by one of the authors. The control system then results in single input and single output (SISO) systems by the effect of decoupling control and the control accuracy is assured by robust SAC. The effectiveness of the proposed method is confirmed through numerical simulations.

Key Words: Automatic Control, Adaptive Control, Robotics, Automated Guided Vehicle, Decoupling Control, Robust Adaptive Control, Omnidirectional Vehicle

1. 緒 言

無人搬送車 (Automated Guided Vehicle: AGV) は、マニピュレータとともに FA システムにおける中心的な役割を果たしているが、電磁式や光学式等のいわゆる固定経路誘導方式がこれまでの主流である。しかし、生産環境を取り巻く社会状況の厳しさに対応するため無経路誘導方式の無人搬送車システムの開発が必要となっており、現在、盛んに研究されている⁽¹⁾ 本研究では、この無経路誘導方式の制御方法について考察している。

さて、生産ラインのみならず、できるだけ少スペースで移動可能な車輪形搬送車において、ステアリング機構を全く用いない全方向移動車両は、機構の簡単さと、移動モードの多様性という二つの特長を併せもつて実用面から注目される。この種の車両では、これまで、トロコイド推進機構を用いるもの⁽²⁾、三輪車タイプ⁽³⁾があるのみである。ここで用いるものは、駆動輪の円周上に軸方向に 45 度傾斜した複数のフリーローラをもった 4 個の車輪を駆動することで、全方向へ

の移動が可能であり、車両の形状の設計の自由度、車両の走行時の安定性等が上記の二例に比べ優れている。しかしながら、この車両系は本質的に、入出力間に複雑な相互干渉を伴う多入出力非線形系となるためそのままではその制御は極めて困難である。そこで本研究では、非線形系に対する非干渉制御方式と適応制御方式を併用した制御手法を、この系に適用することを考える。いま、車両系の非線形数式モデルが確定しており、かつ、各部のパラメータも既知であるとしよう。この場合には、非線形コントローラによって、干渉を完全に除去することができ、多入出力非線形系をいくつかの一入出力線形系に分離することができる。したがって、得られた一入出力系に対して制御系を構成することができる⁽⁴⁾。しかし、実際には、車両系のパラメータ同定誤差、積荷の変動、片荷、各部の不確定な摩擦等のため、完全な非干渉制御系は構成されず、得られる一入出力系は、その場合、相互干渉、パラメータ変動、不確定な非線形項の影響等を状態依存性外乱項の形で持つことになるので、それに通常の線形制御系構成理論を適用したとしても、精度は向上しない。そこで、本報告では、第一段階として、ノミナルなパラメータ値、および非線形関数値を用いて、近似的に非干渉化を行い、第二段階として、得られた複数個の近

* 原稿受付 平成 3 年 3 月 4 日。

^{*1} 正員、有明工業高等専門学校 (〒836 大牟田市東萩尾町 150)。

^{*2} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)。

^{*3} 有明工業高等専門学校。

似一入出力系のそれぞれに対しロバスト適応制御手法を応用して、精度を向上させた制御系を実現することについて考察する。適応制御手法は、未知システムに対する有効な制御方式といわれているが、その構成の複雑さのため、実用性の点で、これまで問題が残されていた⁽⁵⁾。本報告では、従来と全く異なるロバスト単純適応制御方式 (Simple Adaptive Control: SAC)⁽⁶⁾⁽⁷⁾を採用し、その点を解決している。

研究の最終目的は、試作した無人搬送車に本制御系を適用して、その有効性を実際に確認することであるが、ここでは、その前段階として、制御系構成とその数値シミュレーションについて報告する。

2. 全方向移動可能な車両の数学モデル

本研究で考察の対象とする車両は、図1に示すような、駆動輪の回りに軸と45度の角度をもつ複数のフリーローラを有した車輪4個からなっている⁽⁸⁾。四輪を適当に制御することで、前後、左右、斜行、スピターンとすべての移動モードが実現できるのである。

いま4個の車輪に正の回転を与えれば、各車輪には図2に示すような推進力(N)が生じる。図2に示す座標系においてG:車両の重心点、M:車両の質量、I:車両の慣性モーメント、 f_{rr} , f_{rl} , f_{rr} , f_{rl} :各車輪に生じる推進力(N)とすれば、 x 軸方向、 y 軸方向、および重心回りに関して次の運動方程式を得る。ただし、各部の摩擦等の不確定要素は、すべて無視するものとする。

$$M\ddot{x}_G(t) = -f_{rr}(t)\sin\{45^\circ - \theta(t)\} - f_{rl}(t) \times \sin\{45^\circ - \theta(t)\} + f_{rl}(t)\sin\{45^\circ + \theta(t)\} + f_{rr}(t)\sin\{45^\circ + \theta(t)\} \quad (1\cdot a)$$

$$M\ddot{y}_G(t) = f_{rr}(t)\cos\{45^\circ - \theta(t)\} + f_{rl}(t) \times \cos\{45^\circ - \theta(t)\} + f_{rl}(t)\cos\{45^\circ + \theta(t)\} + f_{rr}(t)\cos\{45^\circ + \theta(t)\} \quad (1\cdot b)$$

$$I\ddot{\theta}(t) = -f_{rr}(t)\sin(45^\circ + \phi) \cdot 1 + f_{rl}(t) \times \cos(45^\circ - \phi) \cdot 1 - f_{rr}(t)\cos(45^\circ - \phi) \cdot 1 + f_{rl}(t)\sin(45^\circ + \phi) \cdot 1 \quad (1\cdot c)$$

ここで、状態変数、操作量、および出力量を

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t), x_6(t)]^T$$

図1 ホイール

$$= [x_G(t), \dot{x}_G(t), y_G(t), \dot{y}_G(t), \theta(t), \dot{\theta}(t)]^T$$

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)]^T$$

$$= [f_{rr}(t), f_{rl}(t), f_{rr}(t), f_{rl}(t)]^T$$

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t)]^T$$

$$= [x_G(t), y_G(t), \theta(t)]^T$$

と選べば、次の状態方程式、出力方程式

$$\dot{x}(t) = a(x) + B(x)u(t) \quad (2\cdot a)$$

$$y(t) = K(x) \quad (2\cdot b)$$

が得られる。ここに、

$$a(x) = \begin{bmatrix} \dot{x}_2(t) \\ 0 \\ \dot{x}_4(t) \\ 0 \\ \dot{x}_6(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_1(t) & a_2(t) & a_2(t) & -a_1(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2(t) & a_1(t) & a_1(t) & a_2(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b & b & -b & b \end{bmatrix}$$

$$K(x) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix}$$

$$a_1(t) = \{\cos x_5(t) - \sin x_5(t)\} / (\sqrt{2} M)$$

$$a_2(t) = \{\cos x_5(t) + \sin x_5(t)\} / (\sqrt{2} M)$$

$$b = \phi_1 / I, \quad \phi_1 = (\cos \phi + \sin \phi) / \sqrt{2}$$

であり、式(2)は操作量を線形に含む非線形多変数系であり、入力出力間に相互干渉が存在している。ここで、操作入力 $u(t)$ は4次で、出力 $y(t)$ は3次であるが、後述の非干渉制御方式を適用するためには、入出

図2 車両モデル

力が同次元でなければならない。そこで、ここでは、入力量を3次とすることにした。4個の入力を3個にする組合せは6通り考えられるが、ここではそのうちで、後述する非干渉制御則の構成可能条件を満たす4個のうち、各種移動モードに関する開ループ系の数値シミュレーション結果に基づき入力値の小さい組合せの一つである次の

$$u(t)=[u_1(t), u_2(t), u_3(t)]^T \\ = [f_{rr}(t)=f_{rr}(t), f_{rr}(t), f_{rr}(t)] \dots\dots\dots (3)$$

を採用した。この入力量の選択により $B(x)$ は

$$B(x)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2a_2(t) & -a_1(t) & -a_1(t) \\ 0 & 0 & 0 \\ 2a_1(t) & a_2(t) & a_2(t) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b & b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

3. 操作量を線形に含む非線形系の非干渉制御⁽⁴⁾

式(2)で表される操作量を線形に含む非線形系に対し、設定入力 $v(t)$ と出力 $y(t)$ の1対1対応を実現するためには、次の状態フィードバックを用いばよい。

$$u(t)=f^*(x)+G^*(x)v(t) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $v(t)$ は r 次設定入力である。また、 $f^*(x)$ 、 $G^*(x)$ は、それぞれ r 次ベクトル、 $r \times r$ 行列であり

$$f^*(x)=-H(x)^{-1}\{n^*(x)+n_1(x)\} \dots\dots\dots (6\cdot a)$$

$$G^*(x)=H(x)^{-1} \dots\dots\dots (6\cdot b)$$

と選ぶものとする。ただし、

$$H(x)=\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial J_{1,\rho_1}(x)}{\partial x}\right)B(x) \\ \dots \\ \left(\frac{\partial J_{r,\rho_r}(x)}{\partial x}\right)B(x) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$n^*(x)=\begin{bmatrix} J_{1,\rho_{1+1}}(x) \\ \dots \\ J_{r,\rho_{r+1}}(x) \end{bmatrix}, n_1(x)=\begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{\rho_1} \lambda_{1j} J_{1j}(x) \\ \dots \\ \sum_{j=0}^{\rho_r} \lambda_{rj} J_{rj}(x) \end{bmatrix}$$

である。ここで、 $\rho_i \geq 0$ ($i=1, 2, \dots, r$) は対応定数と呼ばれる

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial J_{i0}(x)}{\partial x}\right)B(x)=\dots \\ =\left(\frac{\partial J_{i,\rho_{i-1}}(x)}{\partial x}\right)B(x)\equiv 0 \dots\dots\dots (8) \\ \left(\frac{\partial J_{i,\rho_i}(x)}{\partial x}\right)B(x)\neq 0 \end{cases}$$

で求められる。ただし

$$\begin{cases} J_{i0}(x)=K_i(x) \\ J_{ik}(x)=\left(\frac{\partial J_{i,k-1}(x)}{\partial x}, a(x)\right) \dots\dots\dots (9) \\ k=1, 2, \dots, n-1 \end{cases}$$

である。ここに、 $(\cdot)$ は内積記号であり、 $K_i(x)$ は、式(2・b)右辺 $K(x)$ の第 i 行ベクトルを示す。また、 λ_{ij} は任意定数である。

4. 非干渉ロバスト適応制御系の構成

4.1 車両の数学モデルに対する非干渉制御

本研究では、制御系の設計は二段階で行われる。まず、考察の対象とする全方向移動可能な無人搬送車の動特性が、数学モデル、式(2)に忠実に従うものと仮定すれば、3章で述べた設計法により、状態フィードバック則、式(5)を

$$H(x)^{-1}=\begin{bmatrix} \frac{a_2(t)}{2\Delta} & \frac{a_1(t)}{2\Delta} & 0 \\ -\frac{a_1(t)}{2\Delta} & \frac{a_2(t)}{2\Delta} & -\frac{1}{2b} \\ -\frac{a_1(t)}{2\Delta} & \frac{a_2(t)}{2\Delta} & \frac{1}{2b} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$n^*(x)=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, n_1(x)=\begin{bmatrix} \lambda_{10}x_1(t)+\lambda_{11}x_2(t) \\ \lambda_{20}x_3(t)+\lambda_{21}x_4(t) \\ \lambda_{30}x_5(t)+\lambda_{31}x_6(t) \end{bmatrix}$$

に基づいて構成すればよい。ここに、 $\rho_1=\rho_2=\rho_3=1$ であり、 $\Delta=a_1(t)^2+a_2(t)^2$ である。また、状態量については、実際の試作車両においては、 x, y 軸それぞれに、加速度センサ、また車体の角速度検出にガスレートジャイロを配置して車両の位置、姿勢を検出認識する慣性航法システム⁽¹⁰⁾によって直接および演算により求めることを計画している。

さて、上記状態フィードバック則により3入力3出力非線形系は、入出力間の相互干渉が除去された

$$\ddot{y}_i(t)+\lambda_{i1}\dot{y}_i(t)+\lambda_{i0}y_i(t)=v_i(t) \dots\dots\dots (11) \\ (i=1, 2, 3)$$

で表される3個の1入力1出力線形系となる。すなわち、車両の位置 $x_G(t)$ 、 $y_G(t)$ 、および姿勢 $\theta(t)$ が、それぞれ設定入力により独立に指定できることを示している。したがって、式(11)に対し、通常の線形制御系構成理論を適用する問題に帰着できることになるが、実際には、車両系の各種パラメータの同定誤差、積載ワークの変動、積載位置および各部の摩擦等、不確定要素の存在が考えられるため、完全な非干渉系は得られない。この問題に対処するために、ここでは、設計の第二段階として、次に述べる構造の極めて単純なロバスト適応制御手法を用いることになる。

4.2 ロバスト SAC の適用⁽⁶⁾⁽⁷⁾

さて、パラメータ

や非線形要素が既知として前節では、非干渉系を構成したが、実際には、それらはおおよその基準値がわかっているのが通常である。そこでその基準値を用いて非干渉化したとすれば、実際に得られる非干渉系は、式(11)ではなく

$$\ddot{y}_i(t) + \lambda_{i1} \dot{y}_i(t) + \lambda_{i0} y_i(t) = v_i(t) + f_i(t, y, \dot{y}) \quad (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

となる。ここに、 f_i は、パラメータ変動値や、未知非線形特性、外乱等をまとめた項で、以下簡単のため外乱項と呼ぶ。式(12)の状態方程式表現は

$$\begin{cases} \dot{x}_{pi}(t) = A_{pi}x_{pi}(t) + b_{pi}v_i(t) + b_{pi}f_i(t) \\ y_i = c_{pi}^T x_{pi}(t), x_{pi} \in R^{2 \times 1} \end{cases} \quad (13)$$

となる。ここで、追従すべき安定な規範モデルを

$$\begin{cases} \dot{x}_{mi}(t) = A_{mi}x_{mi}(t) + b_{mi}u_{mi}(t) \\ y_{mi}(t) = c_{mi}^T x_{mi}(t), x_{mi} \in R^{2 \times 1} \end{cases} \quad (14)$$

とおく。 x_{mi} の次数に制限はないが、ここでは $n_m = n_p$ と取る。問題は、未知パラメータ、および未知外乱を有する系、式(13)に対し、理想的には、 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{yi} = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_i - y_{mi}) = 0$ を満たすような制御則 v_i を求めることである。このための手法として適応制御手法があるが、通常の適応制御手法は、構造が複雑で、かつ外乱に対するロバスト性はあまりない。ここではそれらの問題を避けるため、最近提案されている構造簡単、かつ外乱ロバストなロバスト単純適応制御手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を適用する。

いま、外乱に対し、

$$|f_i(t)| \leq \rho_0 \quad (15)$$

となる未知定数 ρ_0 が存在するものとする。このとき入

力 $v_i(t)$ は以下のように構成される⁽⁹⁾。

$$v_i(t) = \Theta_i(t)^T z_i(t) + v_{Ri}(t) \quad (16)$$

$$\Theta_i(t) = [k_{ei}(t), k_{xi}(t)^T, k_{ui}(t)]^T$$

$$z_i(t) = [e_{yi}(t), x_{mi}(t)^T, u_{mi}(t)]^T$$

$$\Theta_i(t) = \Theta_{li}(t) + \Theta_{pi}(t)$$

$$\dot{\Theta}_{li}(t) = -\Gamma_{li} z_i(t) e_{yi}(t) - \sigma_i(t) \Theta_{li}(t)$$

$$\dot{\Theta}_{pi}(t) = -\Gamma_{pi} z_i(t) e_{yi}(t)$$

$$\Gamma_{li} = \Gamma_{li}^T > 0, \Gamma_{pi} = \Gamma_{pi}^T > 0$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_i e_{yi}(t)^2 / (1 + e_{yi}(t)^2), \sigma_i > 0$$

また、 $v_{Ri}(t)$ は以下のように構成される。

$$v_{Ri}(t) = \begin{cases} -\beta_i(t)^T z_{\beta i}(t) \operatorname{sgn} e_{yi}(t) \\ |\beta_i(t)^T z_{\beta i}(t)| > \varepsilon \\ -\{\beta_i(t)^T z_{\beta i}(t)\}^2 e_{yi}(t) / \varepsilon \\ |\beta_i(t)^T z_{\beta i}(t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

$$\beta_i(t) = \beta_{li}(t) + \beta_{pi}(t)$$

$$\dot{\beta}_{li}(t) = \Gamma_{\beta li} z_{\beta i}(t) |e_{yi}(t)| - \sigma_{\beta i}(t) \beta_{li}(t)$$

$$\beta_{pi}(t) = \Gamma_{\beta pi} z_{\beta i}(t) |e_{yi}(t)|$$

$$\sigma_{\beta i}(t) = \sigma_{\beta i} e_{yi}(t)^2 / (1 + e_{yi}(t)^2), \sigma_{\beta i} > 0$$

$$\beta_i(t) = [\beta_{0i}(t), \beta_{1i}(t)]^T$$

$$z_{\beta i}(t) = [1, |\bar{y}_{pi}(t)|]^T$$

ここに、 $\Gamma_{\beta li}$ 、 $\Gamma_{\beta pi}$ は正定対称行列、 $\varepsilon > 0$ は、切換え時のチャタリングを緩和する微小定数である。また、 $\bar{y}_{pi}(t)$ は検出可能な状態変数から構成されるものとする。式(16)で $v_{Ri}(t) = 0$ とした調整則は、Bar-Kana⁽¹¹⁾によって与えられている通常のSACのアルゴリズムである。 $v_{Ri}(t)$ はロバスト適応制御項であり、外乱の影響に対しSACよりロバストであるという意味でロバストSACと呼ばれている。ここで、注意すべきことは、SAC、およびロバストSACは線形部分が、出力フィードバックで強正実化可能な、いわゆる

図3 非干渉制御とSACを併用した制御系

ASPR 系に対してしか適用できないことである。式 (12) の線形部は、 $G_{pi}(s)=1/(s^2+\lambda_{i1}s+\lambda_{i0})$ であり ASPR でない。これを解決するためにここでは、 $F_i(s)=d_i/(s+g_i)$ (d_i : 微小正数) を考え、 $G_{ai}(s)=G_{pi}(s)+F_i(s)$ が ASPR になることを用いて近似的に $G_{ai}(s)$ に対し SAC、およびロバスト SAC を構成している。 d_i が微小であれば、考えている周波数帯域では十分な精度が得られる。また、フィードフォワード補償 $F_i(s)$ は制御アルゴリズム内のみで構成すればよく、実際にハード的要素を付加するものではないことに注意しておく⁽⁹⁾。

以上のような考えに基づき構成される非干渉ロバスト適応制御系を図 3 に示す。

5. 数値シミュレーション

本報告で述べた非干渉ロバスト適応制御による全方向移動可能な無人搬送車の数値シミュレーション結果を示し、その有効性を確認する。

本車両は、すべての移動モードが実現できるが、以下のシミュレーションは、そのうち本車両の特徴的な移動モードの一つである横行モード (右へ 1 m 移動、12 秒経過後元の位置へ戻る) について検証したものである。図 2 に示す試作中の車両の物理量は以下のとおりである。

$$M=100 \text{ kg}, I=80 \text{ kg m}^2, c=0.4 \text{ m}, h=0.8 \text{ m}$$

まず、これら車両のパラメータ値に基づいて非干渉制御系を構成し、同時に SAC を構成する。しかし、実

図 4 ワーク積載時における非干渉 SAC 制御系の操作入力, 出力
($u_{m1}=1.0, u_{m2}=0, u_{m3}=0$)

図 5 ワーク片荷積載時における非干渉 SAC 制御系の操作入力, 出力
($u_{m1}=1.0, u_{m2}=0, u_{m3}=0$)

図6 ワーク片荷積載時におけるロバスト SAC 制御系の操作入力, 出力
($u_{m1}=1.0$, $u_{m2}=0$, $u_{m3}=0$)

際には、車両の重心位置に 100 kg のワーク (0.506 m×0.506 m 厚さ 0.05 m の鋼板) の重心を一致させて積載した場合を想定してシミュレーションを行った結果が、図 4 である。図では、車両への操作入力 $u_i(t)$ 、規範モデル出力 $y_{mi}(t)$ 、および車両の出力 $y_i(t)$ を示しているが、ワーク積載によるパラメータ変動に対する適応制御の効果により、車両の三つの出力、 y_1 (位置: x_G)、 y_2 (位置: y_G)、 y_3 (姿勢: θ) が規範モデルの三つの出力にそれぞれ正確に追従していることが確認できる。ここに、各種設計パラメータは、

$$\lambda_{i1}=1.4, \lambda_{i0}=1.0, \Gamma_{Li}=\Gamma_{Pi}=1000 \text{ I},$$

$$A_{mi}=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.0 & -1.8 \end{bmatrix}, b_{mi}=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, c_{mi}^T=[1 \ 0]$$

$$\sigma_i(t)=\sigma_i=0.01, (i=1, 2, 3)$$

とおいている。また、フィードフォワード補償については、 $F_i(s)=0.001$ なる定数で構成している。

次に、上記ワークの重心位置を、車両重心位置より後方に 0.02 m だけずらして積載した場合の検討が図 5 である。図より、車両が規範モデルに従って左右方向へ移動しているものの、出力 y_3 (姿勢: θ) も変化するわね回転運動も伴っており、ワークの片荷による影響が生じていることがわかる。そこで、SAC の適応入力にロバスト項を付加したのが図 6 である。ロバスト SAC の効果により上記問題点が解決されていることが確認できる。ここに、 $\Gamma_{Pi}=\Gamma_{Pi}=100 \text{ I}$, $\sigma_{Pi}(t)=\sigma_{Pi}=0.01$, $\varepsilon=0.01$ とおいている。

6. 結 言

本報告では、ステアリング機構を用いない全く新しいタイプの全方向移動可能な無人搬送車を考察の対象

とし、非干渉制御とロバスト SAC とを併用した制御系を構成する設計手法を提案した。まず、この車両系の有する、非線形性、相互干渉性に対しては、そのパラメータの基準値に基づいて非干渉制御系が構成され 3 個の一入出力系が得られる。しかし実際には、パラメータ変動その他の不確定要素を含むため、近似非干渉系しか得られない。そこで、この問題をロバスト SAC を併用することで、解決している。

本報告では、実機に基づいた制御系構成による本制御系の有効性を検証するのに先立って、試作中の車両に近いデータに従った数値シミュレーションを行いその有効性を確認することができた。今後は、試作した無人搬送車により、実際に本制御アルゴリズムの妥当性を検証する計画である。

最後に、本研究を進めるに当たり、車両の一部および関連する情報を快くご提供いただいた(株)三井三池製作所、三池事業所技術部に謝意を表する。

文 献

- (1) 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, (1990), 321, コロナ社.
- (2) 六車, システムと制御, 29-3(1985), 171.
- (3) Carlisle, B.,ほか 2 名, *Developments in Robotics*, IFS, (1983), 79.
- (4) 得丸・岩井, 計自論, 4-3(1968), 271.
- (5) 寺尾・金井, ロバスト適応制御入門, (1989), 129, オーム社.
- (6) 岩井・大友・水本, 計自論, 27-3(1991), 306.
- (7) 岩井, コンピュータ制御, 32(1990), 66, コロナ社.
- (8) 特許登録第 1 124 681 号.
- (9) 岩井・村岡・大友, 機論, No.908-1, (1990-3), 81.
- (10) 文献(1)の 366 ページ.
- (11) Bar-Kana I. and Kaufman H., *Int. J. ACSP*, 2 (1988), 133.