

別刷

計測自動制御学会 論文集

年 第 卷 第 号

(P. ~P.)



社団法人 計測自動制御学会

仮想アームに基づいた冗長マニピュレータの 分散型フィードバック制御[†]

辻 敏夫*・中山 聖也*・伊藤 宏司**

Distributed Feedback Control for Redundant Manipulators Based on Virtual Arms

Toshio TSUJI*, Seiya NAKAYAMA* and Koji ITO**

The present paper proposes a distributed feedback control for redundant manipulators based on virtual arms. The virtual arm has the same kinematic structure as the manipulator except that its end-point is located on the joint or link of the manipulator. Therefore, the redundant manipulator can be represented as a set of virtual arms. First of all, each subsystem which constitutes the distributed control system is designed corresponding to the virtual arm. Dynamic behavior of each subsystem is basically an end-point position feedback control of virtual arm on the operation space. Then, it is shown that the position control of the manipulator utilizing kinematic redundancy can be realized through the cooperative and competitive interactions between subsystems, and that the dynamic behavior of the whole system is always stable. The advantages of the method are summarized as follows:

- 1) each subsystem can work fully autonomously and the joint control torque of the redundant manipulator can be calculated in a parallel and distributed way,
- 2) the kinematic redundancy of the manipulator can be utilized positively using virtual arms,
- 3) some subtasks can be executed by introducing a potential function on the joint space of the manipulator.

Key Words : redundant manipulator, distributed control, virtual arm, feedback control

1. ま え が き

手先の位置決めや目標軌道追従など与えられた作業に必要な自由度以上の関節自由度を有するマニピュレータを冗長マニピュレータという。冗長マニピュレータの特徴は、障害物回避や特異姿勢回避などマニピュレーションの器用さ、柔軟性を実現できることである。従来から、この冗長性は、特に逆運動学問題の解法に関して積極的に利用されている^{1)~7)}。Liegeoisは微小変位の逆運動学の一般解に評価関数を導入し、零空間ベクトルを用いて解を求める方法を示した¹⁾。Hollerback and Suh²⁾、Vu-

kobratovic and Kircanski³⁾は、Liegeoisの方法に基づき、それぞれ、関節トルクの2乗和とアクチュエータ消費エネルギーの最小化を実現する逆運動学解を導出している。また、吉川は可操作用度を考慮して、特異姿勢を回避する逆運動学解を導きだした⁴⁾。一方、Tsutsumiら⁵⁾、Leeら⁶⁾、田中ら⁷⁾はニューラルネットを用いて冗長マニピュレータの軌道を生成する方法を示している。これらの方法を用いて冗長マニピュレータを制御するためには、導出された逆運動学解を用いて関節トルクを計算することが必要となる。

ところが、現在、一般に用いられているマニピュレータ制御では、制御計算を行うコンピュータを中央に配置し、各関節を独立に時分割で制御するという集中型の構成をとっている。そのため、冗長マニピュレータのように関節自由度が大きいとつぎのような点が問題となる。

- 1) 柔軟性：制御ソフトウェアが大規模で複雑になるのを避けられず、システムの拡張性、生産性、保守性

† 第3回自律分散シンポジウムで発表 (1992・1)

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

** 豊橋技術科学大学 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

** Toyohashi University of Technology, Toyohashi (Received March 25, 1992)

の面で問題を生ずる。

- 2) 信頼性：一部のソフトウェア，ハードウェアの故障がシステム全体の致命的な障害につながる。
- 3) 実時間性：マニピュレータの制御アルゴリズムは強い実時間性を有している。したがって，高度な情報処理が要求されるにつれて，このアルゴリズムを一台の計算機で実行することはきわめて困難である。

これらの問題を克服するための一つのアプローチは，複数の自律的な要素(サブシステム)で制御系を分散的に構成するという自律分散型の制御方式である。この実現のためには，個々が自律的に行動し，全体として協調的に動作するようなサブシステムを，マニピュレータ制御の力学的な特徴に基づいて構成する必要がある。

本論文では，このサブシステムとして仮想アームという概念を採用する。仮想アームとは対象とするマニピュレータ(以下，実アームと呼ぶ)の関節位置やリンク上に手先をもつ仮想的なアームで，これにより実アームを複数のアームの集合体としてとらえることができる。その結果，実アームの関節空間の運動(姿勢)は仮想手先の運動として表現されることになり，作業空間と関節空間との中間表現を形成することが可能となる。われわれはすでに，この仮想アームの運動学問題を解析し，これを用いてマニピュレータの運動を作業空間上で分散的に表現して軌道生成を行う方法を提案してきた⁹⁻¹⁰。しかしながらこの方法は，逆運動学に基づいて関節軌道を生成するもので，マニピュレータの動力学は考慮されていない。そこで，本論文ではマニピュレータの動力学を考慮し，各仮想アームの目標軌道から，直接，駆動トルクを生成する方法を提案する。この方法では，仮想アームに対応した各サブシステムで並列に駆動トルクを計算でき，各サブシステムはほかのサブシステムとは独立して動作できるという分散型の制御系を構成することができる。以下，2章で仮想アームの定義を与え，3章で本論文で提案する分散型フィードバック制御法について説明する。4章では本手法を平面マニピュレータに適用したシミュレーション結果を示す。

2. 仮想アームの定義と運動学

制御対象として，関節自由度が m の冗長マニピュレータ(実アーム)を考える。この実アームに対して，実アームの関節部分やリンク上に手先をもつような仮想アームを定義する。Fig. 1は，5関節平面マニピュレータに対して，仮想アームを定義した例である。各仮想アームのベースの位置，関節角度，リンク長さなどのパラメータは，実アームに対応している。ここでは，一般に $n-1$ 本の仮想アームを定義することにし， n 番目の仮想アームを実

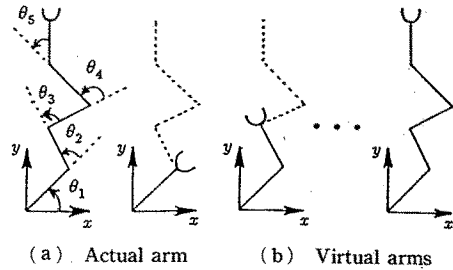


Fig. 1 Examples of virtual arms for a five-joint planar manipulator

アームに対応させる。適切な仮想アームを用意することにより，実アームの姿勢を作業空間上の仮想アームの手先位置の集合として表現することが可能となる。

仮想アームに基づいて冗長マニピュレータを制御するためには，

- 1) 各仮想手先の目標位置を各サブシステムで独立に計画すること，
- 2) すべての仮想手先の目標位置から，対応する実アームの関節駆動トルク τ を求めること，

の二つの問題を解決しなければならない。1)の問題は外部環境から得られる情報に基づいて，与えられたタスクを実現するための各仮想手先の目標位置を計画する問題である。これについてはすでに，障害物回避動作¹¹，まきつき動作¹²などを対象として，環境情報からそれぞれの目的に応じた軌道を計画する方法を示した。本論文では，1)で計画された各仮想手先の目標位置を実現する実アームの駆動トルクをどのようにして生成するかについて考察する。

ここで注意すべき問題は，目標位置の運動学的な実現可能性である。いま，作業空間の自由度を l とし，アーム i の手先位置ベクトルを $X_i^j \in R^l$ ，実アームの関節角度ベクトルを $\theta \in R^m$ とする。アーム i の手先位置と実アームの関節角度との関係は，一般に非線形で，

$$X_i^j = f^i(\theta) \tag{1}$$

で与えられる。(1)式を全アームについてまとめると，

$$X_v = f(\theta) \tag{2}$$

となる。ただし，

$$X_v = \begin{bmatrix} X_1^j \\ X_2^j \\ \vdots \\ X_n^j \end{bmatrix}, \quad f(\theta) = \begin{bmatrix} f^1(\theta) \\ f^2(\theta) \\ \vdots \\ f^n(\theta) \end{bmatrix} \tag{3}$$

で， $X_v, f(\theta) \in R^{ln}$ である。目標位置 X_i^j の実現可能性は(2)式の連立方程式の解の存在性と等価で，関節自由度と仮想アームの設定条件によってつぎの三つに分類できる¹⁰。

- 1) 冗長：関節自由度 m に対して，仮想アームの数 n が少ない場合は，目標位置 X_v^* を実現する実アームの関節角度 θ は無数に存在する。
- 2) 過拘束：仮想アームの数 n が増加すると，すべての仮想手先を目標位置に一致させるような実アームの関節角度 θ は存在しない。
- 3) 特異：設定される仮想手先の位置によっては仮想アームの数 n が少ないときでも，(2)式の解が存在しなくなる。このとき，実アームの一部は冗長でほかの部分は過拘束状態となる。

仮想アームを用いて制御を行うためには，この三つの場合を考慮して制御系を設計する必要がある。

次章では，各仮想アームに対応するサブシステム間の競合と協調によって実アームの駆動トルクを求める方法を提案する。そして，この方法が冗長，過拘束，特異のいずれの場合にも適用でき，冗長マニピュレータの駆動トルクを並列，分散的に生成できることを示す。

3. 仮想アームを用いた分散型フィードバック制御法

3.1 制御則

マニピュレータ(実アーム)の運動方程式は，一般に次式で表現される。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau \quad (4)$$

ここで， $M(\theta) \in R^{m \times m}$ は慣性行列， $h(\theta, \dot{\theta}) \in R^m$ は遠心力・コリオリ力によるトルク， $g(\theta) \in R^m$ は重力トルク， $\tau \in R^m$ は制御入力である。ここで，実アームの駆動トルク τ を以下のように構成する。

$$\tau = \sum_{i=1}^n w^i \bar{\tau}^i \quad (5)$$

$$\bar{\tau}^i = \delta^i - \lambda \frac{\partial Q(\theta)}{\partial \theta} - \bar{B}^i \dot{\theta} + \bar{g}^i(\theta) \quad (6)$$

ただし， w^i は正の定数で仮想アーム i の優先度を表わす重み係数， $\bar{\tau}^i \in R^m$ は仮想アーム i の駆動トルク， λ はラグランジュ乗数で $w^1 \lambda^1 = w^2 \lambda^2 = \dots = w^n \lambda^n \geq 0$ を満たす。また， $Q(\theta) > 0$ は θ に関して一階微分可能なポテンシャル関数， $\bar{B}^i \in R^{m \times m}$ は速度ゲインで正定値行列， $\bar{g}^i(\theta)$ は重力補償トルクで $g(\theta) = \sum_{i=1}^n w^i \bar{g}^i(\theta)$ である。

ここで，重力補償トルク $\bar{g}^i(\theta)$ は，各サブシステムで分散的に計算できるものとする。 $\delta^i \in R^m$ は，

$$\delta^i = (J_v^i)^T (X_v^{i*} - X_v^i) \quad (7)$$

である。ここで， $X_v^{i*} \in R^l$ は仮想アーム i に対する目標位置， $J_v^i = \partial X_v^i / \partial \theta \in R^{l \times m}$ は仮想アーム i のヤコビ行列である。

以上の制御則による制御系の構成を Fig. 2 に示す。各サブシステムでは(6)式を用いて駆動トルク $\bar{\tau}^i$ を計算

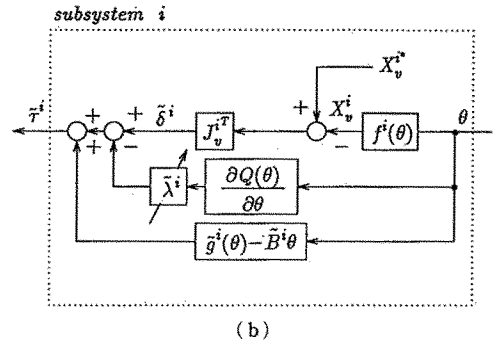
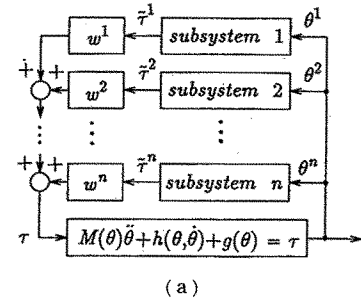


Fig. 2 Distributed feedback control based on virtual arms

し，それらの重みつき和がアクチュエータへの入力となる。つぎに，仮想手先の各自由度 (l) に対して，異なった優先度(重み係数)を設定することを考えよう。このため，仮想手先 i に対する重み行列 $W^i \in R^{l \times l}$ を導入し，制御則(5)，(6)，(7)式をつぎのように拡張する。

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau^i \quad (8)$$

$$\tau^i = \delta^i - \lambda \frac{\partial Q(\theta)}{\partial \theta} - B^i \dot{\theta} + g^i(\theta) \quad (9)$$

$$\delta^i = (J_v^i)^T W^i (X_v^{i*} - X_v^i) \quad (10)$$

ただし， $\lambda \equiv w^i \lambda^i$ ($i=1, 2, \dots, n$)， $g^i(\theta) \equiv w^i \bar{g}^i(\theta)$ ， $B^i \equiv w^i \bar{B}^i$ とおいた。重み行列 W^i は， $W^i = \text{diag.}[w_1^i, w_2^i, \dots, w_l^i]$ で， $w_j^i > 0$ はアーム i の目標手先位置の j 番目の要素に対する重み係数である。 W^i の対角要素が等しい ($w_1^i = w_2^i = \dots = w_l^i = w^i$) とき，(8)，(9)，(10)式は(5)，(6)，(7)式と一致する。

重み行列 W^i は(10)式からわかるように，作業空間における位置フィードバックゲインと等価である。したがって，本手法は Takegaki¹³⁾ や川村¹⁴⁾ の作業空間における線形フィードバック制御を拡張したものと考えられる。彼らは，手先の誤差をヤコビ行列の転置行列を用いて関節にフィードバックすることによって，手先の安定な位置制御が実現できることをリアプノフの安定性理論を用いて示した。これらの方法は冗長マニピュ

レータにも適用可能であるが、手先目標位置が実現可能な場合に限られるため、冗長性を十分に考慮しているとはいえない。これに対して、本手法ではポテンシャル関数 $Q(\theta)$ と仮想アームの働きによりアームの冗長自由度を積極的に利用することができるが、逆に2章で示した冗長、過拘束、特異な場合のすべてを考慮せねばならない。以下では、より一般的な(8), (9), (10)式の制御則に基づいて制御系の安定性、平衡点の運動学的性質を解析する。

3.2 力学系の安定性

いま、次式のエネルギー関数 H を考える。

$$H = V + E + n\lambda Q(\theta) \tag{11}$$

$$V = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \tag{12}$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (X_v^{k*} - X_v^k)^T W^k (X_v^{k*} - X_v^k) \tag{13}$$

V は、実アーム全体の運動エネルギー、 E は仮想手先位置と目標位置との誤差、 $Q(\theta)$ は関節角度 θ に関して一階微分可能なポテンシャル関数である。このとき、エネルギー関数 H の時間変化 \dot{H} は、

$$\begin{aligned} \dot{H} = & \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{M}(\theta) \dot{\theta} + \dot{\theta}^T M(\theta) \ddot{\theta} \\ & + \dot{\theta}^T \left\{ -\frac{\partial E}{\partial \theta} + n\lambda \frac{\partial Q(\theta)}{\partial \theta} \right\} + nQ(\theta) \dot{\lambda} \end{aligned} \tag{14}$$

となる。

一方、(8), (9)式の制御則を運動方程式(4)式に代入すると、

$$M(\theta) \ddot{\theta} = -h(\theta, \dot{\theta}) + \delta - n\lambda \frac{\partial Q(\theta)}{\partial \theta} - B\dot{\theta} \tag{15}$$

を得る。ただし、 $\delta = \sum_{i=1}^n \delta^i$ 、 $B = \sum_{i=1}^n B^i$ とおいた。

(15)式を(14)式に代入し、 $\dot{\theta}^T \dot{M}(\theta) \dot{\theta} = 2\dot{\theta}^T h(\theta, \dot{\theta})$ に注意すると、

$$\dot{H} = -\dot{\theta}^T B \dot{\theta} + nQ(\theta) \dot{\lambda} \tag{16}$$

を得る。

ここで、状態変数 s を導入し、 λ を s の関数としてつぎのように定義する。

$$\lambda = g(s) \tag{17}$$

ただし、 $g(s)$ は一階微分可能な単調増加関数で、たとえば、シグモイド関数

$$g(s) = \frac{g_{\max}}{1 + e^{-s}} \geq 0 \tag{18}$$

を用いる。 g_{\max} は正の定数である。ここで、 s を δ のノルム $\|\delta\|$ を用いて

$$\dot{s} = -\alpha \frac{\|\delta\|}{Q(\theta)g'(s)} < 0 \tag{19}$$

のように定義する。 α は正の定数で、 $g'(s) = dg(s)/ds > 0$ である。(17), (19)式を(16)式に代入すると、

$$\dot{H} = -\dot{\theta}^T B \dot{\theta} - n\alpha \|\delta\| \leq 0 \tag{20}$$

となる。 B は正定値行列、 $n\alpha > 0$ であるから、この力学系は漸近安定となり、エネルギー関数 H は $\dot{\theta} = 0$ かつ $\|\delta\| = 0$ (すなわち $\delta = 0$) となるまで単調に減少する。

3.3 平衡点の運動学的性質

平衡点 $\delta = 0$ が運動学的にどのような意味をもつか解析する。平衡点では $\dot{\theta} = 0$ であるからこのときの仮想手先位置を $X_v(t_f)$ と書くと、誤差信号 δ は定義より、

$$\delta = J_v^T W (X_v^* - X_v(t_f)) \tag{21}$$

となる。ここで、 $J_v = [J_v^{1T} \ J_v^{2T} \ \dots \ J_v^{nT}]^T \in R^{ln \times m}$ 、 $W = \text{block diag.} [W^1, W^2, \dots, W^n] \in R^{ln \times ln}$ である。

$\text{block diag.} [\]$ はブロック対角行列を表わす。平衡点では $\delta = 0$ であるので、(21)式を仮想手先の初期位置 $X_v(0)$ からの変位 dX_v を用いて展開すると、

$$J_v^T W dX_v^* = J_v^T W dX_v \tag{22}$$

となる。ただし、 $dX_v^* = X_v^* - X(0)$ 、 $dX_v = X_v(t_f) - X(0) \in R^{ln}$ である。したがって、平衡点では、線形の連立方程式(22)式を満足する点に各仮想手先が存在することになる。(22)式の解は行列 J_v のランクによりつぎの二つに分けられる。

(i) $\text{rank}(J_v) = ln$ のとき

行列 W は正定値であるから、 $\text{rank}(J_v^T W) = ln$ となり、(22)式は、

$$dX_v = dX_v^* \tag{23}$$

以外に解をもたない。このことは、アームが冗長であるかぎり、各仮想手先は目標位置に収束することを示している。このとき、エネルギー関数 H ((14)式)の第3項 $Q(\theta)$ の働きにより、マニピュレータの姿勢は $Q(\theta)$ を極小化しているものと期待される。

(ii) $\text{rank}(J_v) < ln$ のとき

このとき、(22)式は不定となり、一般解 dX_v は

$$dX_v = (J_v^T W)^+ J_v^T W dX_v^* + [I_{ln} - (J_v^T W)^+ (J_v^T W)] z_{ln} \tag{24}$$

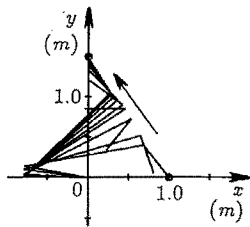
となる¹⁵⁾。ただし I_{ln} は ln 次の単位行列、 z_{ln} は ln 次の任意ベクトルである。すなわち、アームが過拘束または特異な((2)式)の非線形連立方程式が解をもたない場合、各仮想手先は位置決め誤差の重み付き2乗和が最小となる点に収束する。さらに、(i)の場合と同様、ポテンシャル関数 $Q(\theta)$ の働きにより、各仮想手先は(24)式の解のうち、 $Q(\theta)$ を極小とする姿勢に収束することが期待される。

以上、本論文で提案する分散型制御法について述べた。この方法ではマニピュレータの冗長自由度を作業空間上で積極的に利用できるとともに、各仮想手先の制御に必要な駆動トルクを対応するサブシステムで分散的に計算することが可能である。次章では、本手法の

有効性を示すために計算機シミュレーションを行う。

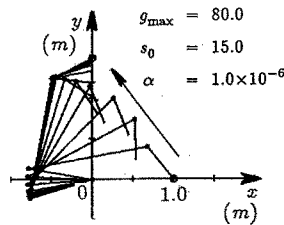
4. シミュレーション実験

まず、3.1 節で導入したポテンシャル関数 $Q(\theta)$ の働きを示すため、仮想アームを実アームと一致するもののみを用い ($n=1$)、3 関節平面マニピュレータに適用した ($l=2, m=3$)。このとき、アームは冗長な場合に対応している。結果の一例を Fig. 3 に示す。シミュレーションに用いたパラメータは図中に示す。また、重み行列 W^1 (10式) は $W^1 = \text{diag.} [300, 100]$ (N/m)、速度ゲイン B^1 (10式) は $B^1 = \text{diag.} [120.0, 160.0, 7.0]$ (Nm/rad/



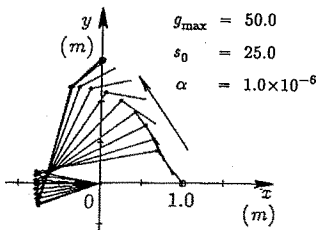
initial posture $\theta(0) = [2.967146, -2.792473, -1.091282]^T$ (rad)
 final posture $\theta(t_f) = [3.163653, -2.307091, -4.988992]^T$ (rad)

(a)



initial posture $\theta(0) = [2.967146, -2.792473, -1.091282]^T$ (rad)
 final posture $\theta(t_f) = [3.490397, -2.170737, -0.612733]^T$ (rad)

(b)



initial posture $\theta(0) = [2.967146, -2.792473, -1.091282]^T$ (rad)
 final posture $\theta(t_f) = [3.406421, -2.058269, -0.852928]^T$ (rad)

(c)

Fig. 3 Changes of manipulator trajectory by potential functions

Table 1 Link parameters of a three-joint planar manipulator

	link 1	link 2	link 3
length(m)	0.8	1.5	0.5
mass(kg)	1.0	1.2	0.5
center of mass(m)	0.4	0.75	0.25
moment of inertia (kg·m ²)	0.053333	0.225	0.0104166

sec))とした。なお、アームの動力学計算にはアッペル法を用い¹⁶⁾、マニピュレータのリンクパラメータは Table 1 のように定めた。

Fig. 3 はいずれも初期手先位置 $X_o(0) = (1.0, 0.0)^T$ (m)、目標手先位置 $X_o^* = (0.0, 1.5)^T$ (m)とした場合の結果で、(a)はポテンシャル関数を

$$Q_1(\theta) = \epsilon_1 \tag{25}$$

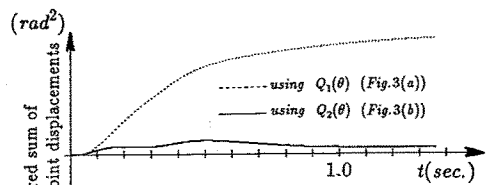
とした場合、(b)は関節変位の自乗和

$$Q_2(\theta) = \frac{1}{2}(\theta(0) - \theta(t))^T(\theta(0) - \theta(t)) + \epsilon_2 \tag{26}$$

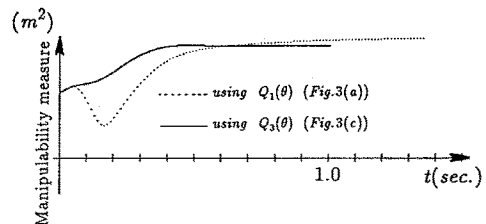
とした場合で、いずれもポテンシャル関数の極小化を行っている ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1.0$)。 (a)の $Q_1(\theta)$ の場合は、 $\partial Q_1(\theta)/\partial \theta = 0$ となるため、Takegaki ら¹³⁾の方法と一致する。また、Fig. 3(c)は可操作度⁴⁾

$$Q_3(\theta) = \sqrt{\det J_v J_v^T} + \epsilon_3 \tag{27}$$

を用い、可操作度の極大化を行った場合の結果である ($\epsilon_3 = 0.001$)。ポテンシャル関数の極大化を行う場合は、制御則(6)、(9)式に含まれる勾配方向 $\partial Q(\theta)/\partial \theta$ の符号を反転させればよい。 Fig. 3 からいずれも手先は目標位置に達しているが、ポテンシャル関数によって軌道が大



(a) Squared sum of joint displacements



(b) Manipulability measure

Fig. 4 Dynamic behavior of squared sum of joint displacements and manipulability measure

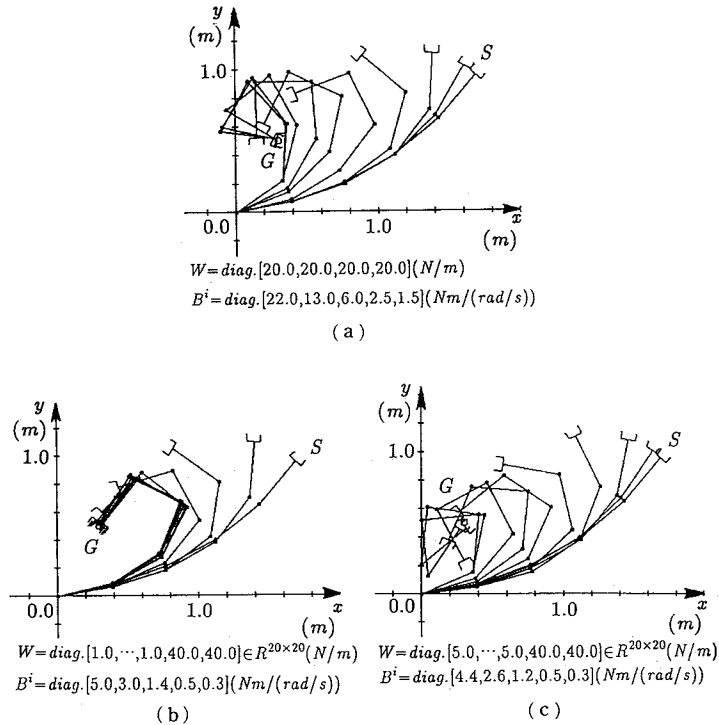


Fig. 5 Simulation results of the distributed feedback control

Table 2 Link parameters of a five-joint planar manipulator

	link i ($i=1, \dots, 5$)
length(m)	0.4
mass(kg)	1.0
center of mass(m)	0.2
moment of inertia(kg·m ²)	0.013333

大きく異なることがわかる。Fig. 3(a)では第3関節が大きく動き、第2リンクと第3リンクが重なる部分がみられる。これに対してFig. 3(b), (c)ではリンクが重なるのを避けながら手先が目標に向かって動いている。これは、特定の関節が大きく動くと関節変位の自乗和((26)式)が増加し、第2リンクと第3リンクが重なる($\theta_2 = -\pi(\text{rad})$)付近で可操作度((27)式)が減少するためである。Fig. 4(a), (b)に、このときの関節変位の自乗和と可操作度((26), (27)式の右辺第1項)の時間変化を示す。いずれもポテンシャル関数を導入することによって、軌道が大きく改善されていることがわかる。しかしながら、本手法では各時刻におけるポテンシャル関数の勾配方向を利用しているため、軌道全体の最適化を行うことはできない。今後は繰返し制御¹⁷⁾などを導入することによってこの問題に対処する必要がある。

つぎに仮想アームの数を増やした場合の結果をFig. 5に示す。用いたリンクモデルはTable 2に示す。各パラメータは $g_{\max} = 50$ ((18)式)、状態変数 s の初期値 $s_0 = 0.1$ 、 $\alpha = 10^{-7}g'(s)$ ((19)式)とし、重み行列 W ((10)式)、速度ゲイン B ((15)式)については図中に示す。Fig. 5(a)は第3関節に仮想アームを設定し($n=2$)、両方の手先に同じ目標位置を指定した場合、(b)は第1関節以外の関節上と各リンクの中心に手先をもつ仮想アームを9本設定し($n=10$)、実アーム以外の仮想手先にそれぞれの初期位置を目標位置として与えた場合、(c)は(b)と同様の仮想アームを用い、実アーム以外の仮想手先にマニピュレータのベースを目標位置として与えた場合で、(a)は冗長な場合、(b), (c)は過拘束な場合に相当する。

Fig. 5から、いずれも実手先は目標位置に到達しているが、最終姿勢、軌道が異なっていることがわかる。Fig. 5(a), (c)では各関節を大きく動かして目標位置に向かうが、(b)では各仮想アームの手先はその位置にとどまろうとするので、手先に引っ張られるように目標位置へ向かっている。これに対して、Fig. 5(c)では仮想手先はベースに向かおうとするので、結局、大きく屈曲した姿勢で実手先が目標位置に到達している。一方、Fig. 5(a)では実手先だけでなく第3関節も目標位置に向かっている

る。仮想アームの目標位置を作業空間上で独立に計画することによってさまざまなマニピュレータの姿勢を実現できることがわかる。

5. ま と め

本論文では、マニピュレータの動力学を考慮し、仮想アームを用いた冗長マニピュレータの分散型フィードバック制御法を提案した。この方法は、

- 1) 各サブシステムはほかのサブシステムに拘わらず、独立に動作できる。
- 2) 各サブシステムの協調動作によって冗長マニピュレータの駆動トルクを並列、分散的に求めることができる。
- 3) 仮想アームにより、アームの冗長自由度を積極的に利用できる。
- 4) ポテンシャル関数を導入することにより、冗長性を利用したサブタスクを実行できる。

などの特徴を備えている。今後は、繰返し制御を用いた軌道最適化、複数のマニピュレータからなるロボットシステムへの適用などについて検討していく予定である。なお、本研究は文部省科学研究費重点領域研究「自律分散システム」(03234105)によるもので、ここに改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. Liegeois: Automatic Supervisory Control of Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-7-12, 861/871(1977)
- 2) J. M. Hollerback and K. C. Suh: Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE J. of Robotics and Automation, RA-3-4, 308/314 (1984)
- 3) M. Vukobratovic and M. Kircanski: A Dynamic Approach to Normal Trajectory Synthesis for Redundant Manipulators, IEEE Trans., SMC-14-4, 580/586 (1984)
- 4) 吉川恒夫: 冗長性を有するロボットの制御, 日本ロボット学会誌, 2-6, 587/592(1984)
- 5) K. Tsutsumi and H. Matsumoto: Neural Computation and Learning Strategy for Manipulator Position Control, Proc. of IEEE 1st ICNN, 525/534(1987)
- 6) S. Lee and R. M. Kil: Robot Kinematic Control Based on Bidirectional Mapping Neural Network, Proc. of IJCNN, 3, 327/335(1990)
- 7) 田中, 清水, 土屋: 神経回路網による冗長マニピュレータの逆キネマティクス問題の解法, 計測自動制御学会論文集, 27-7, 815/821(1991)
- 8) 辻, 中山, 伊藤: 仮想アームを用いた冗長マニピュレータの軌道計画, 第1回自律分散シンポジウム資料, 13/16(1990)
- 9) 辻, 中山, 伊藤: ニューラルネットワークを用いた冗長マニピ

レータの分散的軌道生成, 第2回自律分散シンポジウム資料, 89/94(1991)

- 10) 辻, 中山, 伊藤: 仮想アームを用いた冗長マニピュレータの分散的軌道生成, 計測自動制御学会論文集, 27-12, 1412/1419(1991)
- 11) T. Tsuji, J. Kaneta and K. Ito: A Hierarchical Collision-free Path Planning for Redundant Manipulators Based on Virtual Arms, Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control, 301/306 (1990)
- 12) 荒木, 辻, 伊藤: 仮想アームによる冗長マニピュレータの軌道生成, 電気・情報関連学会中国支部第42回連合大会講演論文集, 82/83(1991)
- 13) M. Takegaki and S. Arimoto: A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators, Trans. of ASMEJ. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 103, 119/125(1981)
- 14) 川村貞夫: 索状マニピュレータの多点位置決め制御, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 231/232(1989)
- 15) 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論, 計測自動制御学会(1986)
- 16) 増田, 二川, 有本, 宮崎: アップル法による閉ループ力学系の運動解析, 日本ロボット学会誌, 4-1, 9/15(1985)
- 17) 有本卓: ロボットの力学と制御, 朝倉書店(1990)

[著 者 紹 介]

辻 敏 夫 (正会員)



1985年, 広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手, 現在に至る。人間とロボットの運動制御, ニューラルネット, マン・マシンシステムなどの研究に従事。電気学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員(工学博士)。

中山 聖 也



1992年, 広島大学大学院工学研究科博士課程前期情報工学専攻修了。同年日本電装(株)入社。在学中, 冗長マニピュレータの分散制御に関する研究に従事。

伊 藤 宏 司 (正会員)



1969年, 名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。70年同工学部助手, 79年広島大学工学部助教授。92年豊橋技術科学大学情報工学系教授。生体システム, ロボティクス, マン・マシンインタフェースの研究に従事。電気学会論文賞受賞。電気学会, 日本ME学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員(工学博士)。