仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御[†]

小 菅 一 弘*・古 賀 雅 伸*・古 田 勝 久*・野 崎 景 春**

Coordinated Motion Control of Robot Arm Based on Virtual Internal Model

Kazuhiro KOSUGE*, Masanobu KOGA*, Katsuhisa FURUTA* and Kageharu NOSAKI**

This paper proposes an alternative coordinated motion control architecture of robot arms manipulating an object. The motion and the internal force of the object are resolved into the motion of each arm. And each arm is controlled based on the virtual internal model so as to operate in coordination even if geometric errors exist in the robot arms and the object. The virtual internal model is a reference model driven by sensory information implemented in the controller. The proposed architecture will keep the stability of the system even if the breakage of the manipulated object occurs. The control algorithm is experimentally applied to the coordinated motion control of two planar robot arms, each of which has three degrees of freedom. The results illustrate the validity of the proposed control architecture.

Key Words: coordinated robot arm, software compliance, force feedback control, nonlinear feedback control, manipulator

1. はじめに

複数台のロボットアームによる協調制御は、ロボットアームをより高度な分野へ適用する上で重要な技術である。本稿の目的は、複数台のロボットアームによる1個の物体の協調制御のための新しい制御アルゴリズムを提案することである。

協調制御に関しては、多くの研究^{4)~13)}が報告されているが、主な問題は、複数台のロボットアームの運動をどのように協調させるか、対象物に加わる内力をど

のように制御するかということである。これまで報告されているほとんどの制御アルゴリズムでは、ロボットアームの幾何学的誤差や、対象物の破壊が生じたときの安定性について考慮されていない。しかしながら、ロボットアームには幾何学的パラメータの不確定性から生じる幾何学的誤差があるため、対象物に過大な内力がかかることがある。また、対象物の破壊が生じたときの安定性は、実用的な応用問題において、大変重要な問題である。

本稿では、仮想内部モデルの概念^{1)~3)}に基づいて、これらの問題を解決するために新しい制御系を提案する。提案する制御系において、対象物の運動と内力はそれぞれのロボットアームの運動に分解される。そして、ロボットアームの先端に取り付けられた力センサからの情報により駆動される参照モデルに従って、幾何学的誤差の影響を軽減するようにそれぞれのロボットアームを制御する。提案する制御系は、対象物の破壊に対して安定であるように設計される。2台の水平3自由度ロボットアームによる協調制御の実験を行い、提案する制御系の有効性を示す。

2. 運動と力／モーメントの分解

この章では、対象物の運動をそれぞれのロボットアームの運動に分解するための基本的な関係式を導く。座標系と記号をつぎのように定義する。

$O_u-x_u y_u z_u$: 絶対座標系

$O_o-x_o y_o z_o$: 対象物の重心に固定された対象物座標系

$O_{hi}-x_{hi} y_{hi} z_{hi}$: 第 i 番目のロボットアームの先端に固定された第 i 番目手先座標系 (力とモーメントは、対象物の O_i に加えられると仮定する)

$r_o \in R^3$: 絶対座標系の原点 O_u から対象物の重心 O_o への位置ベクトル

$v_o \in R^3$: 対象物の速度ベクトル

[†] 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation で発表 (1989・5)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** SONY (株) 東京都品川区北品川 6-7-35

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** SONY Corporation, Shinagawa-ku, Tokyo
(Received May 10, 1990)

(Revised September 14, 1990)

$\omega_o \in R^3$: 対象物の角速度ベクトル

$r_i \in R^3$: 絶対座標系の原点 O_o から第 i 番目の手先座標系の原点への位置ベクトル

$\omega_i \in R^3$: 手先座標系の角速度ベクトル

$p_i \in R^3$: 対象物座標系の原点 O_o から手先座標系の原点 O_{hi} への位置ベクトル

$I_N \in R^{N \times N}$: $N \times N$ の単位行列

$g \in R^3$: 重力加速度

Fig. 1 に示すように、1 個の剛体を把持する n 台のロボットアームを考え、それぞれのロボットアームが対象物に力とモーメントを加えていると仮定する。対象物の位置／方向は、機構学の関係を用いることにより、それぞれのロボットアームの運動に簡単に分解することができるので、ここでは対象物に加わる力／モーメントの分解について述べる。この問題は、中村ら⁴⁾によって明確な定義を用いて取り扱われている。本稿では、内山と Dauchez⁵⁾による作業空間での力ベクトルの概念を用いて中村らの導出方法を修正する。

ロボットアームによって操られる物体の運動方程式が、つぎのように表わされるとしよう。

$$m\ddot{r}_o = F_o + mg \quad (1)$$

$$M\dot{\omega}_o + \omega_o \times (M\omega_o) = N_o \quad (2)$$

ただし、 F_o と N_o は、ロボットアームによって対象物に加えられる合力と合モーメントである。

$$F_o = \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

$$N_o = \sum_{i=1}^n N_i \quad (4)$$

F_i と N_i は、第 i 番目のロボットアームによって対

Fig. 1 Coordinate systems.

象物座標系の原点 O_o に加えられる等価な力とモーメントである。

$$F_i = f_i \quad (5)$$

$$N_i = n_i + p_i \times f_i \quad (6)$$

(1), (2) 式を書き換えることによって、

$$L = KF \quad (7)$$

を得る。ただし、

$$L \triangleq \begin{bmatrix} mI_3 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_o \\ \dot{\omega}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg \\ \omega_o \times (M\omega_o) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K \triangleq [I_6, \dots, I_6] \in R^{6 \times 6n} \quad (9)$$

$$F \triangleq [F_1^T, N_1^T, \dots, F_n^T, N_n^T]^T \in R^{6n} \quad (10)$$

である。

つまり、対象物の運動が与えられると、(8) 式を用いて L を計算することができ、(7) 式を解くことにより、

$$F = K^+ L + (I_{6n} - K^+ K) \xi \quad (11)$$

を得ることができる。ただし、 K^+ は K の擬逆行列であり、 ξ は任意の $6n$ 次元のベクトルである。

(11) 式の右辺第 2 項が、内力⁵⁾に相当する。

一般に、(7) 式の解すなわち (11) 式は、一意には決まらず、負荷がロボットアームにどのように分散されるかに依存している。対象物座標系の原点で、ロボットアームが負荷を同じように分配するような解は、つぎのように与えられる。

$$F = \frac{1}{n} [I_6, \dots, I_6]^T L + \begin{bmatrix} I_6 & -\frac{1}{n-1}I_6 & \dots & -\frac{1}{n-1}I_6 \\ -\frac{1}{n-1}I_6 & I_6 & \dots & -\frac{1}{n-1}I_6 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{n-1}I_6 & \dots & -\frac{1}{n-1}I_6 & I_6 \end{bmatrix} \xi' \quad (12)$$

ただし、 ξ' は任意の $6n$ 次元ベクトルである。 $n=2$ のときの解は、内山と Dauchez⁵⁾による解と一致し、(12) 式は彼らの解の拡張になっている。(12) 式の右辺第 1 項は負荷分配を、第 2 項は内力の分配を与えている。 $n \geq 3$ の場合については、ロボットアームの内力分配問題はとても難しくなるが、実用的な解としてつぎのようなものがある。

$$F = \frac{1}{n} [I_6, \dots, I_6]^T L + \begin{bmatrix} -\frac{1}{n-1}I_6, \dots, -\frac{1}{n-1}I_6, I_6, \\ -\frac{1}{n-1}I_6, \dots, -\frac{1}{n-1}I_6 \end{bmatrix}^T F_{int} \quad (13)$$

ただし, $F_{in_i} \in R^6$ は, 対象物に加えられる内力である.

以上より, 対象物の運動と内力が与えられると, (11)~(13)式により力 F を計算することができ, それぞれのロボットアームによって加えるべき力 f_i とモーメント n_i は, (5), (6)式からつぎのように計算することができる.

$$f_i = F_i \quad (14)$$

$$n_i = N_i - p_i \times F_i \quad (15)$$

3. ロボットアームの動力学

議論を簡単にするために, それぞれのロボットアームは, 6自由度であると仮定する. 第 i 番目のロボットアームの運動方程式をつぎのように定義しよう.

$$M_i(\theta_i)\ddot{\theta}_i + V_i\dot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) = \tau_i + \tau_{di} \quad (16)$$

ただし,

θ_i : 6×1 の関節座標ベクトル

$M_i(\theta_i)$: 6×6 の正定対称慣性行列

V_i : 6×6 の粘性摩擦係数行列

$C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)$: 6×1 のコリオリ力, 求心力ベクトル

$G_i(\theta_i)$: 6×1 の重力項ベクトル

τ_i : 6×1 のアクチュエータによって関節に加えられる力/トルクからなる入力ベクトル

τ_{di} : 6×1 のロボットアームに加えられる外力に対応する入力ベクトル

である. また, 絶対座標系におけるロボットアームのエンドエフェクタの位置/方向 x_i と関節座標ベクトル θ_i との関係をつぎのように定義する.

$$x_i = T_i(\theta_i) \quad (17)$$

ただし, $x_i, T_i(\theta_i) \in R^6$ である. (17)式を用いて, (16)式を書き換えると,

$$M_i(\theta_i)J_i^{-1}(\theta_i)\{\ddot{x}_i - \ddot{J}_i\dot{\theta}_i\} + V_i\dot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) = \tau_i - J_i^T(\theta_i)\ddot{f}_i \quad (18)$$

を得る. ただし,

$$J_i(\theta_i) \triangleq \frac{\partial T_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \in R^{6 \times 6} \quad (19)$$

そして,

$$\ddot{f}_i \triangleq [f_i^T, n_i^T]^T \quad (20)$$

であり, $J_i(\theta_i)$ は考えている作業空間で正則であると仮定する. $\ddot{f}_i$ は, 対象物に加えられる力とモーメントである.

つぎの非線形フィードバック^{1)-3), 14), 15)}を用いることにより, ロボットアームの動力学は, 絶対座標系で線形化される.

$$\begin{aligned} \tau_i = & M_i(\theta_i)J_i^{-1}\{u_i - \ddot{J}_i\dot{\theta}_i\} + V_i\dot{\theta}_i \\ & + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) + J_i^T(\theta_i)\ddot{f}_i \end{aligned} \quad (21)$$

線形化されたロボットアームの動力学は, つぎのようになる.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} u_i \quad (22)$$

パラメータの不確定性などのため, (21)式を正確に計算することはできないが, 不確定性による影響は, (21)式に対して適当に線形制御則を設計することにより軽減することができる.

4. 制 御 系

この章では, Fig. 1 に示すように 1 個の剛体を n 台のロボットアームによって協調的にあやつるための制御系を設計する. このためには, つぎのような問題を考慮しなければならない.

- (1) 対象物をどのように把持するか?
- (2) 対象物の軌道をどのように制御するか?
- (3) 対象物に加わる内力をどのように制御するか?

本稿では, ロボットアームが対象物をしっかりと把持していて, 力とモーメントの両方を対象物に加えると仮定する. すなわち, ロボットアームや対象物に小さな幾何学的誤差があるという仮定のもとで, 2 番目, 3 番目の問題について考える. また, 対象物の破壊が生じた場合でも, 系全体の安定性が保たれるように制御アルゴリズムを設計する. ロボットアームに幾何学的誤差がある場合でも, 協調的に動作するように仮想内部モデル (VIM) の概念¹⁾⁻³⁾に基づいて, それぞれのロボットアームの制御アルゴリズムを設計する. まず, 簡単に仮想内部モデルの概念について復習する.

4.1 仮想内部モデルの概念

ロボットアームのサーボ制御系において, ロボットアームの運動は, 参照信号にできるだけ正確に追従するように制御される. 参照信号は, スーパーバイザリシステムによって与えられたり, オペレータによって命令される. ロボットアームと作業環境の間に危険な関係が生じて, サervo系は参照信号を修正するようなことはない. サervo系は, 常に参照信号に対して忠実であるように設計されている.

一般に, ロボットはその作業環境と分けて考えることはできない. ロボットをうまく制御するための一つの方法は, センサなどからの環境に関する情報のフィードバックを利用することである.

忠実なサーボ系をもつロボットシステムにおいて,

このような機能は、スーパーバイザリシステムの中に構築される。すなわち、センサからスーパーバイザリシステムにフィードバックされた情報に基づいて、サーボ系に対する参照信号の修正が行われる。このようなシステムにおいて、一連の手続きには長い時間がかかり、ロボットシステムとサーボ系の全体はサーボ系の特性に大きく依存するため、さまざまな環境に適合することが難しくなる。

これらの問題を解決するためには、ロボットと作業環境の相互作用を制御するための機能は最小時間で望まれる動特性を達成しなければならないので、サーボ系中に構築することを考える。このようなシステムでは、環境を監視するセンサからの情報に基づいてサーボ系中で参照信号が修正され、ロボットは修正された参照信号に追従することになる。この修正された参照信号がロボットに対する「仮想目標値」ということになる。

ロボットと作業環境の相互作用を動的に制御するために、相互作用の動特性、すなわちセンサからの情報に対するロボットの動的動作を、モデルを用いて指定する。このモデルのことを「仮想モデル」、あるいは「仮想内部モデル」と呼ぶ。後者は、モデルが参照モデルとしてサーボ系中に、陽に実現されるとき使われる。すなわち、仮想内部モデルとは、制御系中に実現され、センサからの情報により駆動される参照モデルのことである。

Fig. 2 に、ロボットと作業環境の相互作用の制御問題に対するわれわれの方法の概略を示す。まず、作業環境の情報が、参照信号とともに仮想内部モデルに入力される。仮想内部モデルは、指定された動特性に従って仮想信号を生成する。そして、ロボットがあたかも仮想内部モデルと同じ動特性をもっているかのように、サーボ補償器がロボットのハードウェアを制御する。

Fig. 2 Concept of Virtual Internal Model

4.2 制御系の設計

Fig. 3 に、本稿で提案する制御系を示す。2章での結果を用いて、対象物の運動をそれぞれのロボットアームの軌道と対象物に加えるべき力／モーメントに分解する。 $x_{id} \in R^6$ と $\bar{f}_{id}$ を第 i 番目のロボットアームに対する分解された軌道と力／モーメントとしよう。(21)式に対して、つぎのように $\bar{f}_{id}$ をフィードフォワードに加える。

$$\tau_i(\theta_i) = M_i(\theta_i)J_i^{-1}(\theta_i)\{u_i - \dot{J}_i\dot{\theta}_i\} + V_i\dot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) + G_i(\theta_i) + J_i^T(\theta_i)\bar{f}_{id} \quad (23)$$

それぞれのロボットアームの軌道に矛盾が生じないように制御するために、つぎのような動的モデルを導入する。

$$M_{im}\Delta\ddot{x}_i + D_{im}\Delta\dot{x}_i + K_{im}\Delta x_i = \bar{f}_i - \bar{f}_{id} \quad (24)$$

ただし、

$$\Delta x_i = x_{im} - x_{id} \quad (25)$$

であり、 $\bar{f}_i$ は、ロボットアームの先端に取り付けられた力センサによって測定された実際の力／モーメントである。 x_{im} は、 i 番目のロボットアームの修正された参照軌道である。 $M_{im}, D_{im}, K_{im} \in R^{6 \times 6}$ は、正定行列である。(24)式は、バイアスの力／モーメント $\bar{f}_{id}$ のまわりにある種のインピーダンス¹⁶⁾を実現して、ロボットアームに幾何学的不確実性がある場合でも、対象物に加わる内力を望まれる値のまわりに保つことができる。注目すべきことは、幾何学的誤差がないとき、

$$\bar{f}_i = \bar{f}_{id} \quad (26)$$

$$x_{im} = x_{id} \quad (27)$$

が成り立つということである。(24)式を書き換えることにより、

Fig. 3 Proposed control architecture

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{im} \\ \dot{x}_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{im} \\ \dot{x}_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} u_{im} \quad (28)$$

を得る。ただし、

$$u_{im} = \ddot{x}_d - M_{im}^{-1} D_{im} (\dot{x}_{im} - \dot{x}_{id}) - M_{im}^{-1} K_{im} (x_{im} - x_{id}) + M_{im}^{-1} (\ddot{f}_i - \ddot{f}_{id}) \quad (29)$$

である。(28)式が第 i 番目のロボットアームの仮想内部モデルであり、 x_{im} が仮想目標値である。

4.3 制御アルゴリズムの設計

仮想目標値 x_{im} に実際のロボットアームが追従するように、制御則を設計する。(22), (28)式より、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_6 \end{bmatrix} \hat{u}_i \quad (30)$$

を得る。ただし、

$$e_i = x_{im} - x_i \quad (31)$$

$$\hat{u}_i = \ddot{u}_{im} - \ddot{u}_i \quad (32)$$

である。(30)式を安定化するように制御則^{1),2)}を設計する。そのような制御則の一つとして、つぎのようなものを考える。

$$\hat{u}_i = K_{1i} e_i + K_{2i} \dot{e}_i + K_{3i} \int_0^t e_i(t') dt' \quad (33)$$

最終的な制御入力 u_i は、

$$u_i = u_{im} - \hat{u}_i \quad (34)$$

のようになり、第 i 番目のロボットアームの実際の入力は、(23), (34)式より計算される。

対象物の破壊が生じたとき、 $\ddot{f}_i$ は一定に保たれ、参照モデル(28)式の状態は有限であるから、実際のロボットアームの軌道は有限に保たれる。この意味において、対象物の破壊が生じたときのロボットアームの安定性は保たれる。

5. 実験

5.1 実験装置

提案した制御系の有効性を示すために、Fig. 4 に示す2台の水平ダイレクト・ドライブ・ロボットアームを用いて実験を行った。それぞれのロボットアームは3自由度で、各関節にメガトルクモータ (NSK) が取り付けられていて、直接リンクを駆動する。それぞれのモータは、モータドライバに送られる入力信号に応じてトルクを発生する。モータとリンクのパラメータを Table 1 と Table 2 に示す。また、力センサ (日立建機-LS 6010 と Load-FT 30/100) が、アームの先端に取り付けられている。

制御アルゴリズムを実現するために、高速マイクロ・プロセッサ・システム(注¹⁾) (1個の Am 29332 を ALU として、2個の Am 29325 を FPU としても

Fig. 4 Experimental system

Table 1 Parameters of motors

Joint No.	1	2	3
Motor size (inch)	14	6	4
Mass (kg)	73	14	6.5
Rotor inertia (kg·m ²)	0.268	2.0E-3	7.75E-3
Torque constant (Nm/V)	24.5	3.9	0.98

Table 2 Link parameters

Link No.	1	2	3
Mass (kg)	34.14	14.41	3.22
Length (m)	0.36	0.26	0.12
Distance between axis and G.C. (m)	0.145	0.119	0.001
Inertia moment around its G.C. (m)	1.576	0.244	3.17E-3

Fig. 5 Absolute coordinates for experiments

つ)を使用した。サンプリング周波数は 250 Hz で、制御アルゴリズムだけの計算は 200 μs で終わる。

5.2 実験結果

実験で用いた絶対座標系を Fig. 5 に示す。すなわ

(注1) このマイクロ・プロセッサ・システムは、SONY (株)生産技術グループの野崎景春氏とそのグループによって開発された。

ち, x_i ($i=1,3$) は, 二つの位置変数 x_{ix} , x_{iy} と方向変数 x_{iz} であり, 内力 f_i ($i=1,3$) は, 二つの力 f_x , f_y とモーメント n_z である. 参照モデルのパラ

Fig. 6 Motion along a straight line

Fig. 7 Motion of arms carrying an object 1
($f_{xd}=0$, $f_{yd}=5$ N, $n_{zd}=0$)

Fig. 8 Motion of arms carrying an object 2
($f_{xd}=0$, $f_{yd}=0$, $n_{zd}=10$ N·m)

メータは, 実験によりつぎのように求めた.

$$M_{1m}=M_{2m}=10I_3$$

$$K_{1m}=K_{2m}=160I_3$$

$$D_{1m}=D_{2m}=200I_3$$

制御則 (33) 式のパラメータはつぎのように選んだ.

$$K_{1i}=\text{diag}(-3000, -3000, -2500) \quad (i=1, 2)$$

$$K_{2i}=-30I_3 \quad (i=1, 2)$$

$$K_{3i}=\text{diag}(-6000, -6000, -2000) \quad (i=1, 2)$$

(a) Experimental result 1

(b) Experimental result 2

(c) Experimental result 3

ここで, $\text{diag}(\)$ は, 括弧内の要素を対角にもつ対角行列を表す.

Fig. 6 に示す 0.4m の直線に沿って1秒で対象物を運んだときのようすを **Fig. 7** と **Fig. 8** に示す. 対象物に加わる内力の影響が見えるように, 発砲スチロールを対象物として使用した. **Fig. 7** では, y 軸方

(d) Experimental result 4

(e) Experimental result 5

(f) Experimental result 6

Fig. 9 Experimental results of coordinated motion control ($f_{xd}=0$, $f_{yd}=4$ N, $n_{zd}=0$)

Fig. 10 Breakage of an object

向に $f_y=5$ (N) の内力が, **Fig. 8** では, $n_{zd}=10$ (N·m) の内モーメントがそれぞれ対象物に加えられている. $f_{xd}=0$ (N), $f_{yd}=4$ (N), $n_{zd}=0$ (N·m) のデータを **Fig. 9** に示す. 過大な内力(揃断力)を対象物に加えて, 対象物を破壊したようすを **Fig. 10** に示す.

6. おわりに

本稿では, 1個の物体を複数台のロボットアームにより協調的にあやつるための新しい制御系を提案した. まず, 対象物の運動と内力をそれぞれのロボットアームの運動と対象物に加える力に分解する. そして, ロボットアームの幾何学的誤差の影響を軽減するために, 力センサにより駆動される仮想内部モデルを用いてそれぞれのロボットアームの制御則を設計する. この制御系は, 対象物の破壊が生じても安定である. 2台の水平3自由度ロボットアームを用いて実験を行い, 提案した制御系の有効性を示した.

これまで提案されてきたほとんどの制御アルゴリズムでは, ロボットアームの幾何学的誤差や, 対象物の破壊が生じたときの安定性について考慮されていない. しかし, この問題はロボットアームを実用的問題に応用するためには, とても重要である.

本稿では, ロボットアームの協調制御のために力センサのみを使用した, 高度な作業を行わせるためには他のセンサを用いなければならない. これは, 今後の課題である.

参考文献

- 1) K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: A Control Architecture for Intelligent Mechanical System:

- Virtual Internal Model Following Control, Proc. of 1987 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 489/494 (1987)
- 2) K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: Virtual Internal Model Following Control of Robot Arms, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1594/1554 (1987)
- 3) K. Furuta, K. Kosuge, Y. Shiote and H. Hatano: Master-Slave Manipulator Based on Virtual Internal Model Following Control Concept, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 567/572 (1987)
- 4) Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa: Mechanics of Coordinative Manipulation by multiple Robotic Mechanisms, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 991/998 (1987)
- 5) M. Uchiyama and P. Dauchez: A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of two Robots, Proc. of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 350/356 (1988)
- 6) E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida and I. Kato: Co-operational Control of the Anthropomorphous Manipulator 'Melarm', Proc. of the 4th International Symposium on Industrial Robots, 251/260 (1974)
- 7) S. Kurono: Coordinated Computer Control of a Pair of Artificial Arms, Biomechanism 3, 182/193, The Tokyo University Press (1975)
- 8) 高瀬国克: 束縛運動の表現と束縛下にあるマニピュレータの動的制御, 計測自動制御学会論文集, **21**-5, 508/513 (1985)
- 9) S. Hayati: Hybrid Position/Force Control of Multi-Arm Cooperating Robots, Proc. of 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 82/89 (1986)
- 10) T. J. Tarn, A. K. Bejczy and X. Yun: Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms; Closed Chain Formulation, Proc. of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 7/13 (1987)
- 11) Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh: Control of Two Coordinated Robots in Motion, Proc. of 24th IEEE Conference on Decision and Control, **1**, 1761/1765 (1985)
- 12) Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh: Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object, Proc. of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 344/349 (1988)
- 13) M. E. Pittelkau: Adaptive Load-Sharing Force Control for Two-Arm Manipulators, Proc. of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 498/503 (1988)
- 14) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: Resolved Acceleration Control of Manipulators, IEEE Trans. Automatic Control, **AC-25**-3, 468/474 (1980)
- 15) T. J. Tarn, A. bejzy, A. Ishidori and Y. Chen: Nonlinear Feedback in Robot Arm Control, Proc. of IEEE 23rd Conference on Decision and Control, 736/751 (1984)
- 16) N. Hogan: Impedance Control: An Approach to Manipulation Part i-iii, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **107**, 1/24 (1985)
-