

## 仮想ダイナミクスを用いた複数マニピュレータの 分散的軌道生成法\*

辻 敏夫<sup>\*1</sup>, 荒木 淳<sup>\*2</sup>

### Distributed Trajectory Generation for Multiple Manipulators Using Virtual Dynamics

Toshio TSUJI and Atsushi ARAKI

This paper proposes a trajectory generation method for multiple manipulators through cooperative and competitive interactions among subsystems corresponding to each manipulator. The method can generate the trajectories of multiple manipulators in a parallel and distributed way using virtual dynamics. The virtual dynamics for each manipulator result in virtual interaction forces which represent the interaction among manipulators. It is shown that the method is effective not only for simple cooperative tasks such as positioning a common object, but also for more complicated tasks including relative motions among manipulators.

**Key Words:** Mechatronics, Robotics, Manipulator, Computer Control, Trajectory Generation, Distributed System, Cooperative Task, Virtual Dynamics

#### 1. まえがき

複数のマニピュレータが互いに協調しながら作業を行なえば、1台のマニピュレータでは不可能であった複雑な作業が実行可能となり、ロボットシステム全体の作業能力が向上する。本論文では、複数マニピュレータの軌道生成問題を取り上げ、各マニピュレータの軌道を分散的に生成する方法を提案する。

複数マニピュレータによる協調作業に関する研究は最近、活発に行なわれているけれども、その多くは対象物の安定把持に関する研究である。これらの研究では物体を把握する作業を対象として、各マニピュレータへの最適な力の分配問題や、最適な把持位置の計画法などを議論している<sup>(1)-(3)</sup>。一方、協調作業のための軌道生成問題を扱っている研究には、例えば、最短時間軌道計画法<sup>(4),(5)</sup>がある。この場合は各マニピュレータの空間軌道はあらかじめ与えられており、協調動作そのものの軌道を生成するわけではない。また、

複数マニピュレータの可操作度を用いて軌道生成を行なう方法<sup>(6)</sup>は、複数マニピュレータによる単一物体の把持動作に作業が限定され、さらに可操作度の定義からマニピュレータの台数が2台の場合にしか適用できない。

これらの研究に対して山本ら<sup>(7)</sup>は、1台のマニピュレータが物体の把持・移動を行ない、もう1台がその物体の表面を加工するという作業を取り上げ、その軌道生成法を提案している。また、辻ら<sup>(8)</sup>は複数マニピュレータが構成する閉リンク系の冗長自由度を積極的に利用し姿勢の制御を行なう軌道生成法を提案している。しかしながら、これらはいずれも、複数マニピュレータによって構成される閉リンク機構の幾何学的拘束条件に基づいて軌道生成を行なっているため、各マニピュレータの軌道計画を行なうのに、他のすべてのマニピュレータの動作情報が必要となる。このように1台の計算機で全マニピュレータの動作を計画するという集中型システムでは、マニピュレータの数や関節自由度の増加に伴い、耐故障性、柔軟性、拡張性などさまざまな面で問題を生じてしまう。

このような集中型システムが有する問題を克服する

\* 原稿受付 平成5年2月22日。

<sup>\*1</sup> 正員, 広島大学工学部 (〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

<sup>\*2</sup> 広島大学大学院。

ための一つのアプローチとして、複数の自律的な構成要素(サブシステム)でシステムを分散的に構成するという自律分散システムがある<sup>(9)</sup>。対象とするシステムが大規模で複雑になったとき、その機能を各サブシステムで分担し、全体として協調的に制御すれば、

- 1) 全体を統括するシステムが存在しないので、一部のサブシステムの故障は局所的に処理することができる(耐故障性)、
- 2) 各サブシステムの相互作用を変化させることにより、さまざまな目的に対して柔軟に対応できる(柔軟性)、
- 3) サブシステムの付加により容易にシステムを拡張でき、全体の動作を計画し直す必要がない(拡張性)、

などの特徴を実現することができる。最近、多関節マニピュレータの制御に関してこの自律分散システム概念に基づいた制御法<sup>(10)-(12)</sup>がいくつか提案されている。これらの方法はいずれも、1台のマニピュレータを複数のサブシステムに分散して制御しようというもので、複数マニピュレータを対象としたものではない。

以上の観点から本論文では、複数マニピュレータシステムを構成する各マニピュレータに対応してサブシステムを用意し、複数マニピュレータの協調作業に必要な空間軌道を、サブシステム間の協調によって分散的に生成する方法を提案する。この方法は、各マニピュレータに仮想的なダイナミクスを想定し、この仮想ダイナミクスから発生するマニピュレータ間の仮想的な相互作用力によってサブシステム間の情報のやりとりを行なおうとするもので、把持物体の移動といった比較的単純な協調作業とマニピュレータ間の相対運動を含むより複雑な協調作業を同様に扱うことができる。

以下、2.では本論文で対象とする複数マニピュレータの協調作業について説明し、3.では複数マニピュレータの運動学を定式化する。そして、4.で新しく提案する仮想ダイナミクスを用いた複数マニピュレータの分散的軌道生成法について説明し、5.ではシミュレーション実験により本手法の有効性を考察する。

## 2. 複数マニピュレータによる協調作業

例えば、ある物体を複数のマニピュレータで保持し、他のマニピュレータがその物体表面の加工を行なうといった作業を考えよう。物体を保持しているマニピュレータ群は、作業中、その物体を作業空間内のある位置に固定する必要がある。一方、物体表面の加工を担

当するマニピュレータ群にとつては、絶対座標で示された作業空間内の目標位置に手先を制御するというよりはむしろ、物体(あるいは物体を保持している他のマニピュレータ)との相対位置の制御が重要である。

本論文では、複数マニピュレータによる把持物体の移動といった比較的単純な協調作業とマニピュレータ間の相対運動を含むより複雑な協調作業を同様に扱うために、作業の代表点を定義する。そして、複数マニピュレータによる協調作業を、1) 作業代表点の運動、2) 各マニピュレータと作業代表点との間の相対運動の2種類の運動により表現する。

### 1) 作業代表点の運動

これは複数のマニピュレータによって、作業代表点の位置・姿勢を制御する作業である。このとき、各マニピュレータの手先と作業代表点の間には相対的な運動は存在しない。

### 2) 各マニピュレータと作業代表点との間の相対運動

複数マニピュレータの手先間の相対運動を、各マニピュレータの手先と作業代表点との間の相対運動に分解する。対象物の加工・組立といった、より複雑な協調作業を表現することができる。

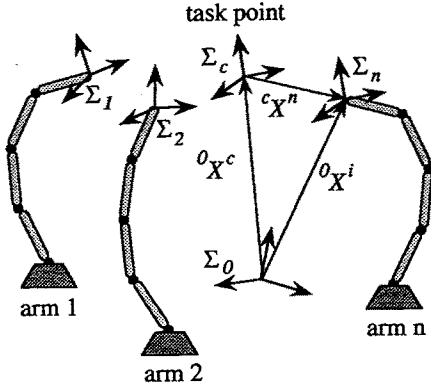
本論文では、この2種類の運動を取り扱うことができるサブシステムを各マニピュレータに対応して構成し、全体として協調動作可能な軌道生成法を提案する。

## 3. 複数マニピュレータの定式化と運動学

3.1 複数マニピュレータの定式化 いま、図1のように  $n$  本のマニピュレータで作業を行なうことを考える。各マニピュレータの関節自由度は  $m^i$  ( $i=1, \dots, n$ )、作業空間の自由度は  $l$  で、作業目的に応じて作業代表点を1つ定義する。

ここで3種類の座標系、1) 基準座標系  $\Sigma_0$ 、2) 作業代表点に原点を持つ作業座標系  $\Sigma_c$ 、3) 各マニピュレータの手先に原点を持つ手先座標系  $\Sigma_i$ ;  $i=1, \dots, n$  を用いて、基準座標系  $\Sigma_0$  でみた作業座標系  $\Sigma_c$  の原点の位置・姿勢ベクトル  ${}^0X^c = [{}^0p^c, {}^0\phi^c]^T \in \mathbb{R}^l$ 、基準座標系  $\Sigma_0$  でみた手先座標系  $\Sigma_i$  の原点の位置・姿勢ベクトル  ${}^0X^i = [{}^0p^i, {}^0\phi^i]^T \in \mathbb{R}^l$  ( $i=1, \dots, n$ )、作業座標系  $\Sigma_c$  でみた手先座標系  $\Sigma_i$  の原点の位置・姿勢ベクトル  ${}^cX^i = [{}^cp^i, {}^c\phi^i]^T \in \mathbb{R}^l$  ( $i=1, \dots, n$ ) を考える(図1参照)。このとき、作業代表点の位置・姿勢ベクトル  ${}^0X^c$  は、 ${}^0X^i$  と  ${}^cX^i$  から一意に求めることができる。

例えば、3次元空間内での作業 ( $l=6$ ) では、次のようになる。いま、 $\Sigma_i$  から  $\Sigma_0$  への回転行列を  ${}^0R_i({}^0\phi^i)$ 、 $\Sigma_i$  から  $\Sigma_c$  への回転行列を  ${}^cR_i({}^c\phi^i)$  と



$\Sigma_0$ : Base coordinate system

$\Sigma_c$ : Task coordinate system

$\Sigma_1 \cdots \Sigma_n$ : End-point coordinate system

図1 複数マニピュレータによる協同作業

書くと位置ベクトル  ${}^0p^c$  と  ${}^0p^i$ ,  ${}^c p^i$  の関係は,

$${}^0p^c = {}^0p^i - {}^0R_i({}^0\Phi^i) {}^cR_i({}^c\Phi^i)^T {}^c p^i \quad (1)$$

で与えられる. 一方, 各姿勢ベクトルをオイラー角  $\Phi = [\phi, \theta, \psi]^T$  を用いて表現すると,  $\Sigma_c$  から  $\Sigma_0$  への回転行列  ${}^0R_c({}^0\Phi^c)$  は,

$$\begin{aligned} {}^0R_c({}^0\Phi^c) &= {}^0R_i({}^0\Phi^i) {}^cR_i({}^c\Phi^i)^T \\ &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

となる. このときオイラー角の性質から, 姿勢ベクトル  ${}^0\Phi^c = [{}^0\phi^c, {}^0\theta^c, {}^0\psi^c]^T$  は,

i)  $\sin {}^0\theta^c \neq 0$  のとき

$${}^0\phi^c = \text{atan2}(\pm R_{23}, \pm R_{13}) \quad (3)$$

$${}^0\theta^c = \text{atan2}(\pm \sqrt{R_{13}^2 + R_{23}^2}, R_{33}) \quad (4)$$

$${}^0\psi^c = \text{atan2}(\pm R_{32}, \mp R_{31}) \quad (5)$$

ii)  $\sin {}^0\theta^c = 0$  のとき

$${}^0\phi^c = \text{任意} \quad (6)$$

$${}^0\theta^c = 90^\circ - R_{33} \times 90^\circ \quad (7)$$

$${}^0\psi^c = \text{atan2}(R_{21}, R_{22}) - R_{33} \times {}^0\phi^c \quad (8)$$

で与えられる (13).

3.2 複数マニピュレータの運動学 アーム  $i$  の手先速度  ${}^0\dot{X}^i$  と関節角速度ベクトル  $\dot{q}^i \in \mathbb{R}^{m^i}$  との関係は, よく知られているように

$${}^0\dot{X}^i = J^i \dot{q}^i \quad (9)$$

で与えられる. ここで,  $J^i \in \mathbb{R}^{l \times m^i}$  はアーム  $i$  のヤコビ行列である.

一方, 作業代表点とアーム  $i$  の手先の間に rigid なリンクが存在すると仮定すると, アーム  $i$  の手先と作業代表点の間には以下のような関係が成り立つ.

$${}^0F^{ci} = G^i H^i {}^0F^i = G^i {}^0F^{tri} \quad (10)$$

$${}^0\dot{X}^{tri} = H^i {}^0\dot{X}^i = G^{iT} {}^0\dot{X}^c \quad (11)$$

ここで,  ${}^0F^i \in \mathbb{R}^l$  は  $\Sigma_0$  でみたアーム  $i$  の手先の力・モーメント,  ${}^0\dot{X}^c, {}^0F^{ci} \in \mathbb{R}^l$  は  $\Sigma_0$  で見た作業代表点の速度およびアーム  $i$  から作業代表点に伝達された力を表す. また, マニピュレータの手先と作業代表点との間のさまざまな接触メカニズムを考慮するため, 接触タイプを表す行列  $H^i \in \mathbb{R}^{l \times l}$ , および  $G^i = S^i H^{iT} \in \mathbb{R}^{l \times l}$  を用いてアーム  $i$  の手先の速度のうち作業代表点から伝達される成分を  ${}^0\dot{X}^{tri}$ , アーム  $i$  の手先の力の成分のうち作業代表点に伝達可能な成分を  ${}^0F^{tri}$  と表している (14),(15).  $l_i$  はアーム  $i$  と作業代表点の間で伝達可能な力の自由度である. 行列  $S^i \in \mathbb{R}^{l \times l}$  は作業代表点と手先の間の幾何学的関係を表す行列で,

$$S^i = \begin{bmatrix} I & 0 \\ ({}^c p^i)_{\Sigma_0} & I \end{bmatrix} \quad (12)$$

で与えられる. ただし,  $I$  は単位行列,  $0$  は零行列で,  $({}^c p^i)_{\Sigma_0}$  は  $\Sigma_0$  でみた  ${}^c p^i$  を表す. また,  $\chi$  は任意のベクトル  $a, b$  について  $(a \times) b = a \times b$  を満たす演算子で,  $a = [a, b, c]^T$  のとき,

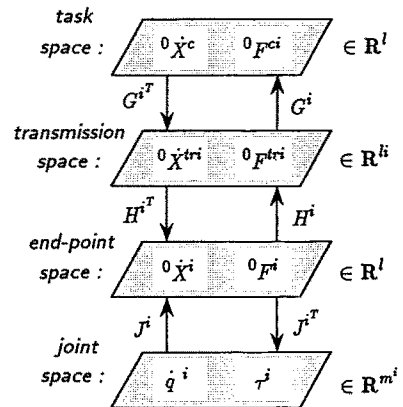


図2 複数マニピュレータの運動学的関係

$$a\chi = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

と定義される(16)。

もちろん作業代表点に働く力・モーメント  ${}^0F^c$  は、すべてのマニピュレータの手先から作業代表点に伝達される力の総和となるから、

$${}^0F^c = \sum_{i=1}^n {}^0F^{ci} \quad (14)$$

という関係が成り立つ。以上の関係を図2にまとめておく。次章では以上の定式化に基づき、本論文で提案する仮想ダイナミクスを用いた複数マニピュレータの分散的軌道生成法について説明する。

#### 4. 仮想ダイナミクスに基づく複数マニピュレータの分散的軌道生成法

本手法は、各マニピュレータに対応してサブシステムを構成し、運動学的な拘束条件を満足する関節軌道をサブシステム間の協調によって分散的に生成しようというものである。このためには、まず各サブシステム間の相互作用を表現する必要がある。ここでは各マニピュレータと作業代表点に仮想的なダイナミクスを想定し、この仮想ダイナミクスから発生する仮想的な拘束力、および互いに結合していることから発生する位置拘束を用いて各サブシステム間の相互作用を表現することにする。

**4.1 サブシステムの構成** いま  $n$  本のマニピュレータのうち  $1, \dots, n'$  番目までのマニピュレータで作業代表点を制御し、 $n'+1, \dots, n$  番目のマニピュレータが作業代表点との相対運動を行なう場合を考えよう。

まずマニピュレータ  $i$  の仮想ダイナミクスを、もっとも単純な2次の微分方程式を用いて

$$\ddot{q}^i = \tau^i + (H^i J^i)^T \lambda^i \quad (15)$$

のように表現する。ここで、 $\tau^i \in \mathbb{R}^{m^i}$  はマニピュレータ  $i$  の仮想制御トルク、 $\lambda^i \in \mathbb{R}^k$  は作業代表点からマニピュレータ  $i$  に加わる仮想拘束力である。

このとき、この仮想制御トルク  $\tau^i$  を作業代表点の目標位置  ${}^0X^c$  を用いて次式のように計算する。

$$\begin{aligned} \tau^i &= (H^i J^i)^T (G^i)^+ K^i ({}^0X^c - {}^0X^c) - B^i \dot{q}^i \\ &= (H^i J^i)^T H^i S^{i-1} K^i ({}^0X^c - {}^0X^c) - B^i \dot{q}^i \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $(G^i)^+ = (G^{i^T} G^i)^{-1} G^{i^T} = H^i S^{i-1} \in \mathbb{R}^{k \times l}$  は  $G^i$  の擬似逆行列、 $K^i \in \mathbb{R}^{l \times l}$  は正定な位置フィードバックゲイン、 $B^i \in \mathbb{R}^{m^i \times m^i}$  は正定な粘性摩擦行列

である。 $i = n'+1, \dots, n$  のマニピュレータに対しては  $G^i = 0$ 、即ち  $(G^i)^+ = 0$  と書くことができるので(16)式は、

$$\tau^i = -B^i \dot{q}^i \quad (i = n'+1, \dots, n) \quad (17)$$

となる。

次に作業代表点について考えよう。マニピュレータ  $i$  の手先には作業代表点からの仮想拘束力  $\lambda^i$  が加わっているの、逆に各手先から作業代表点には  $-\lambda^i$  の仮想的な力が加わる。そこで、作業代表点の仮想ダイナミクスを、

$${}^0\ddot{X}^c = M_c^{-1} \sum_{j=1}^n G^j (-\lambda^j) = -M_c^{-1} \sum_{j=1}^n G^j \lambda^j \quad (18)$$

とおく。ただし、 $M_c \in \mathbb{R}^{l \times l}$  は作業代表点の仮想慣性行列である。

ここで、各マニピュレータの手先に課せられる拘束条件について考えよう。まず、マニピュレータ  $i = 1, \dots, n'$  については(18)式の仮想ダイナミクスによって決定された作業代表点の運動に拘束されねばならない。即ち、(11)式から

$${}^0\ddot{X}^{tri} = \dot{G}^{iT} {}^0\dot{X}^c + G^{iT} {}^0\ddot{X}^c \quad (19)$$

となる。一方、マニピュレータ  $i = n'+1, \dots, n$  については、作業代表点の運動だけでなく、運動目標として与えられる相対運動  ${}^cX^i \in \mathbb{R}^l$  も拘束条件に含めて考慮せねばならない。このとき  $l_i = l, H = I$  とおくことができるので手先加速度  ${}^0\ddot{X}^{tri}$  は

$$\begin{aligned} {}^0\ddot{X}^{tri} &= {}^0\ddot{X}^c + \begin{bmatrix} {}^0R_c & 0 \\ 0 & {}^0R_c \end{bmatrix} {}^c\ddot{X}^i \\ &+ \begin{bmatrix} 2 {}^0\dot{R}_c & 0 \\ 0 & {}^0\dot{R}_c \end{bmatrix} {}^c\dot{X}^i + \begin{bmatrix} {}^0\ddot{R}_c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} {}^cX^i \end{aligned} \quad (20)$$

で与えられる。(19),(20)式によって課せられた手先加速度  ${}^0\ddot{X}^{tri}$  は、マニピュレータの関節運動から決定される手先加速度と常に一致せねばならない。従って、

$${}^0\ddot{X}^{tri} = H^i J^i \ddot{q}^i + H^i J^i \dot{q}^i \quad (21)$$

である。

このときマニピュレータ  $i$  の関節軌道は(15),(21)式を用いて、

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}^i \\ \dot{q}^i \\ q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -(H^i J^i)^T \\ H^i J^i & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau^i \\ {}^0\ddot{X}^{tri} - H^i J^i \dot{q}^i \end{bmatrix} \quad (22)$$

のように求めることができる。

以上、提案した軌道生成法を図3に示す。各サブシステムは、計算した仮想手先力  $\lambda^i$  を作業代表点の仮想ダイナミクスを介してやりとりすることで、互いに

協調しながら軌道を生成する。このとき、各サブシステムは他のサブシステムとは独立して動作できるため、たとえばあるマニピュレータが物体の保持から相対運動に変化したり、新しいマニピュレータがシステムに付加されたりした場合にも、その動作方程式を変更する必要はない。それでは、次にこのシステムの安定性、および平衡点の性質について解析する。

4・2 システム全体の安定性 いま、次式で与えられる2種類のエネルギー関数  $H_1, H_2$  を考える。

$$H_1 = \sum_{i=1}^{n'} E^i + V_c + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n'} \dot{q}^i{}^T \dot{q}^i \quad (23)$$

$$E^i = \frac{1}{2} ({}^0X^{c*} - {}^0X^c)^T K^i ({}^0X^{c*} - {}^0X^c) \quad (24)$$

$$V_c = \frac{1}{2} {}^0\dot{X}^{c*T} M_c {}^0\dot{X}^c \quad (25)$$

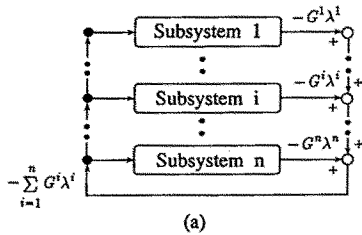
$$H_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=n'+1}^n \dot{q}^i{}^T \dot{q}^i \quad (26)$$

$H_1, H_2$  はそれぞれ作業代表点の運動、代表点との相対運動に関するエネルギー関数で、 $E^i$  は各手先で計算される作業代表点の位置と目標位置との誤差、 $V_c$  は作業代表点の仮想運動エネルギーを表している。

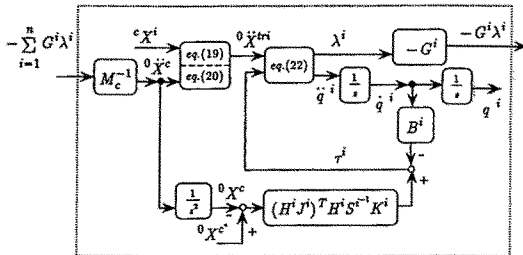
まず、作業代表点の運動  $H_1$  について考えよう。エネルギー関数  $H_1$  の時間変化  $\dot{H}_1$  は、

$$\dot{H}_1 = \sum_{i=1}^{n'} \dot{E}^i + \dot{V}_c + \sum_{i=1}^{n'} \dot{q}^i{}^T \ddot{q}^i \quad (27)$$

$$\dot{E}^i = -{}^0\dot{X}^{c*T} K^i ({}^0X^{c*} - {}^0X^c) \quad (28)$$



Subsystem i



(b)

図3 サブシステムの構成

$$\dot{V}_c = {}^0\dot{X}^{c*T} M_c {}^0\dot{X}^c \quad (29)$$

となる。(15), (16), (18)式を(27), (28), (29)式に代入して整理すると、

$$\dot{H}_1 = - \sum_{i=1}^{n'} \dot{q}^i{}^T B^i \dot{q}^i \quad (30)$$

を得る。 $B^i$  は正定値行列であるから、常に  $\dot{H}_1 \leq 0$  であり、エネルギー関数  $H_1$  は  $\dot{H}_1 = 0$ 、即ち、 $\dot{q}^i = 0$  ( $i=1, \dots, n'$ ) となるまで単調に減少する。このようにして作業代表点、および作業代表点の制御を行なうマニピュレータの安定性を保証することができる。

次に作業代表点との相対運動  $H_2$  について考える。 $H_2$  の時間変化  $\dot{H}_2$  は、

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 &= \sum_{i=n'+1}^n \dot{q}^i{}^T \ddot{q}^i \\ &= \sum_{i=n'+1}^n [-\dot{q}^i{}^T B^i \dot{q}^i + {}^0\dot{X}^{triT} \lambda^i] \quad (31) \end{aligned}$$

となる。

ここで運動目標である相対運動  ${}^c X^i$  ( $i = n'+1, \dots, n$ ) は、最終時刻において  ${}^c \dot{X}^i = {}^c X^i = 0$  を満足するように与えられると仮定する。一方、エネルギー関数  $H_1$  が収束したとき、 ${}^0\dot{X}^c = {}^0X^c = 0$  であるから、必ずある時刻で  ${}^0\dot{X}^i = {}^0X^i = 0$  ( $i = n'+1, \dots, n$ ) が満足される。即ち、(31)式の右辺第二項は0となり、エネルギー関数  $H_2$  は  $H_1$  と同様に  $\dot{H}_2 = 0$  即ち  $\dot{q}^i = 0$  ( $i = n'+1, \dots, n$ ) となるまで減少することになる。以上のように、システム全体の安定性が示された。

4・3 平衡点の性質 本手法では作業代表点と各マニピュレータの手先との間の相対運動は、マニピュレータが従わねばならない拘束条件として扱っているため、それが実現可能な運動であるかぎり必ず満足される。そこでここではエネルギー関数  $H_1$  が収束する平衡点において、作業代表点がどのような位置に存在するかを運動学的に解析しよう。

平衡点では作業代表点は静止しているの、(18)式より

$$\sum_{j=1}^{n'} G^j \lambda^j = 0 \quad (32)$$

を得る。(15), (16) 式を上式に代入し整理すると、

$$[\sum_{j=1}^{n'} G^j (G^j)^+ K^j] ({}^0X^{c*} - {}^0X^c) = 0 \quad (33)$$

となる。ここで  $G^j (G^j)^+$  は準正定、 $K^j$  は定義から正定である。したがって、 $n'$  本のマニピュレータの関節トルクを用いて作業代表点のすべての力・モーメ

ントが制御でき、かつ、 $n'$ が十分大きいとき、(33)式の[]内は正則となると期待できる。例えば、(33)式において、 $K^j = K$  ( $j=1, \dots, n'$ )とおくと(33)式は

$$\left[ \sum_{j=1}^{n'} G^j (G^j)^+ \right] K ({}^0X^e - {}^0X^c) = 0 \quad (34)$$

となる。ここで  $n'$  本のマニピュレータのうち少なくとも1本が作業対象物と rigid に接触していると仮定する( $k_k = I$ )と、 $G^k (G^k)^+ = I_k$  ( $I_k$  次の単位行列)となり、(34)式の[]内は必ず正則になる。このとき(34)式の解は、 ${}^0X^e = {}^0X^c$  となり、平衡点は目標位置に一致することが示される。

ただし、本アルゴリズムでは、作業代表点の現在位置と目標位置との誤差のみによって仮想制御トルクを決定しているため、関節可動域などによってマニピュレータの動作範囲が制限されている場合にはデッドロックにおちいってしまう可能性がある。また  $n'$  本のマニピュレータの手先を用いて力・モーメントを制御できない自由度が作業代表点に存在する場合も、(33)式は不定となり平衡点は必ずしも目標位置に一致しない。もちろんこれら場合でも、前節で示したように複数マニピュレータシステムの安定性は常に保証されるが、今後はより複雑なポテンシャル関数の導入やアーム間での高度な情報通信によりこの問題を考察する必要があるであろう。

以上、本論文で提案する分散的軌道生成法の性質を解析した。次章では、本手法の動作を確認するために行なった計算機シミュレーションについて説明する。

### 5. シミュレーション実験

本論文で提案した分散的軌道生成法を4関節平面マニピュレータ3本による協調作業に適用し、計算機シミュレーションを行なった(図4参照)。ただし、マニピュレータの各リンク長はすべて等しく0.4mとし、作業代表点是对象物の重心(作業座標系の原点: 図4参照)に設定した。

図5にシミュレーション結果の一例を示す。用いたパラメータは(16)式的位置フィードバックゲイン  $K^i = \text{diag.} [100(N/m), 100(N/m), 100(Nm/rad)]$  ( $i=1,2,3$ ), 粘性摩擦行列  $B^i = \text{diag.} [10, 10, 10, 10] (Nm/(rad/sec.))$  ( $i=1,2,3$ ), (18)式の仮想慣性行列  $M_c = \text{diag.} [50(kg), 50(kg), 50(kgm^2)]$ である。

図5(a),(b),(c),(d) はともに同じ初期姿勢からスタートし、作業代表点を同じ目標位置まで操作している。ここで、図5(a)はすべてのマニピュレータの手先の接

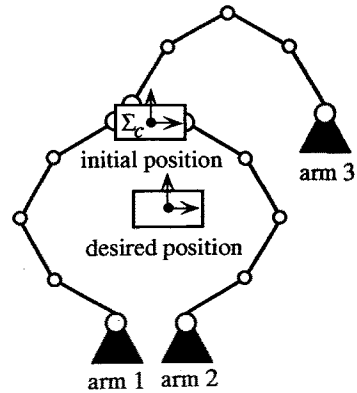


図4 3本の4関節平面マニピュレータと作業座標系

触タイプが rigid grasping であり、かつ全関節が正常に動作している場合である。これに対し、図5(b)はアーム1とアーム2の第1関節の故障を想定してその関節を固定した場合、図5(c)はすべてのアームの手先が対象物と点接触している場合、図5(d)は対象物の加工動作を想定してアーム3の手先が対象物の表面に沿って相対運動をした場合のシミュレーション結果である。図5から、すべて作業代表点は目標位置に到達しているが、途中の軌道および最終姿勢が大きく異なっていることがわかる。

図5(a)では、全関節を利用して対象物の移動を行なっているのに対し、図5(b)では関節を固定しているため、アーム1とアーム2はともに3関節のみを用いて動作している。本手法では関節の固定は各アーム内で処理され他のサブシステムには直接影響を与えないため、このような故障に簡単に対応できる。

また、図5(a)と(c)を比較すると、(a)では手先と対象物との角度が一定に保たれているのに対し、(c)ではその角度が大きく変化している。このようにマニピュレータの手先と対象物との間のさまざまな接触メカニズムを考慮した形で、マニピュレータの空間軌道を生成することが可能である。

図5(d)では、アーム1とアーム2が作業代表点の操作を行ない、アーム3の手先が作業代表点に対して相対運動をしている。アーム3の手先の相対運動は、時間 $t$ の関数として

$${}^cX^3(t) = \begin{cases} [0.1t^2 - 0.1(m), 0.1(m), \frac{4}{3}\pi(\text{rad})]^T & \text{if } 0 \leq t < 1 \\ [-0.1t^2 + 0.4t - 0.3(m), 0.1(m), \frac{4}{3}\pi(\text{rad})]^T & \text{if } 1 \leq t < 2 \\ [0.1(m), 0.1(m), \frac{4}{3}\pi(\text{rad})]^T & \text{if } t \geq 2 \end{cases} \quad (35)$$

のように与えた。図から手先が相対運動をしている場合でも、閉リンク機構を崩すことなく協調作業が実現できることがわかる。

## 6. まとめと今後の課題

本論文では仮想ダイナミクスという概念を用いて、複数マニピュレータの軌道生成を分散的に行なう方法を提案した。この方法は、各マニピュレータから作業代表点に伝達される仮想的な力、および互いに結合していることから発生する位置拘束を用いてマニピュレータ間の相互作用を表現しようというもので、各マニピュレータは仮想ダイナミクスを含むサブシステムとして表現される。そして、

- 1) サブシステム間の協調により複数マニピュレータの軌道を並列・分散的に生成できること、
- 2) マニピュレータの手先と作業代表点との間の相対運動を手先に課せられた拘束条件として表現できること、

- 3) 各サブシステムは他のサブシステムとは独立に動作でき、またシステム全体の安定性も保証されること、

などを明らかにした。

今後は、ポテンシャル関数の改善やより高度な情報通信によるデッドロックの回避問題を考察するとともに、冗長自由度を積極的に利用したサブタスクの導入、より複雑な協調作業のための目標軌道の計画法などについて検討していく予定である。

### 【参考文献】

- (1) Montana, D.J., IEEE Trans. Robotics Automat., 8 - 4 (1992), 421.
- (2) Kerr, J. and Roth, B., Int. J. Robotics Res., 4 - 4 (1986), 3.
- (3) Nahon, M.A. and Angeles, J., IEEE Trans. Robotics Automat., 8 - 4 (1992), 439.
- (4) Moon, S.B. and Ahmad, S., IEEE Trans. Syst.,

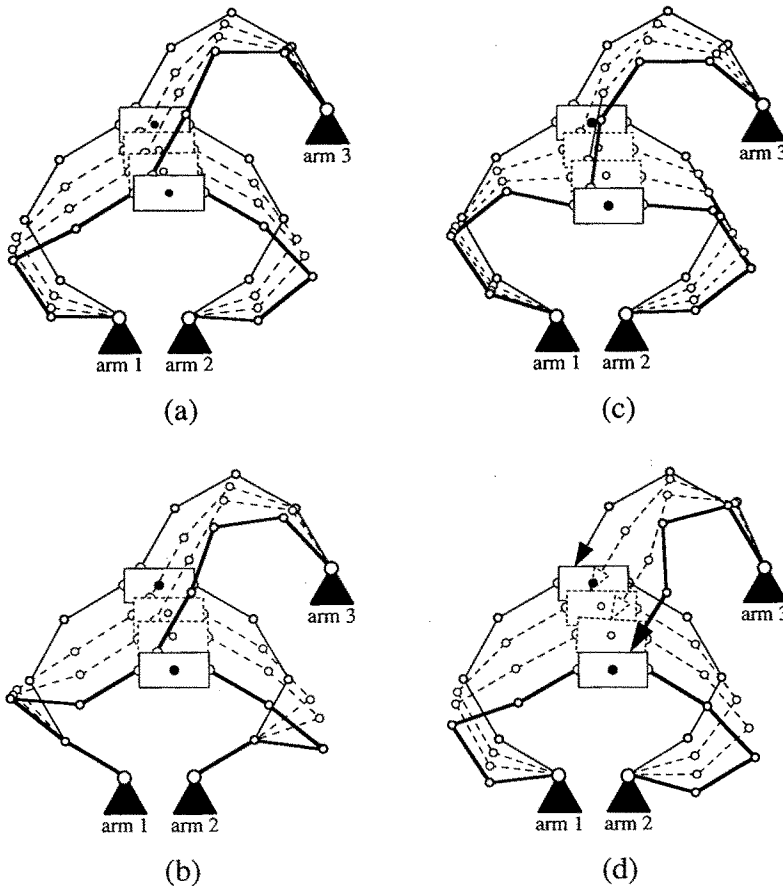


図5 シミュレーション結果

- Man, Cybern., 21 - 4 (1991), 900.
- (5) Yun-Hui Liu and Arimoto, S., IEEE/RSJ International Workshop IROS'91, (1991), 322.
- (6) Lee, S., IEEE Trans. Robotics Automat., 5 - 1 (1989), 78.
- (7) 山本・毛利, 第9回日本ロボット学会学術講演会, (1991), 489.
- (8) 辻・山中, 計測自動制御学会論文集, 29 - 3 (1993). (掲載予定)
- (9) 伊藤 (正), 計測と制御, 29 - 10 (1990), 1.
- (10) 石井・広瀬・池井, 第7回自律分散システム研究会講演論文集, (1988), 61.
- (11) 辻・中山・伊藤, 計測自動制御学会論文集, 27 - 12 (1991), 1412.
- (12) 辻・中山・伊藤, 計測自動制御学会論文集, 28 - 11 (1992), 1314.
- (13) 吉川, ロボット制御基礎論, (1988), コロナ社.
- (14) Cutkosky, M.R. and Kao, I., IEEE Trans. Robotics Automat., 5 - 2 (1989), 151.
- (15) Mason, M.T. and Salisbury, J.K., Robot hands and the mechanics of manipulation, (1985), Cambridge, MA: MIT Press.
- (16) Featherstone, R., Robot Dynamics Algorithms, (1987), Kluwer Academic Publishers.