

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

仮想アームを用いた複数マニピュレータの軌道生成

辻 敏夫*・山中 徹*

Trajectory Generation for Multiple Manipulators Using Virtual Arms

Toshio TSUJI* and Tohru YAMANAKA*

The present paper proposes a trajectory generation method for multiple manipulators. Firstly, kinematics of the manipulators connected each other is divided into a set of closed-chains formed by two manipulators. Then, the instantaneous inverse kinematics of the multiple manipulators is derived using virtual arms. The method can generate trajectory of the manipulators utilizing kinematic redundancy.

Key Words: trajectory generation, multiple manipulators, virtual arm, kinematic redundancy

1. ま え が き

物体を把握し、移動させる動作を複数のマニピュレータで行うときのような閉リンク機構の軌道生成問題は、マニピュレータ間の協調を実現するうえで重要な問題となる。特にマニピュレータの数が増加すると構成される閉リンク機構は非常に多くの冗長自由度をもつことになる。従来の研究では静力学的な手先の把握や移動に重点がおかれていて、この冗長自由度を積極的に利用する方法についてはあまり検討されていない。

われわれはすでにマニピュレータの冗長自由度を利用するために仮想アームという概念を導入し、マニピュレータの姿勢を作業空間上で表現して軌道生成を行う方法を提案している^{1)~3)}。この方法は、開リンク機構の軌道生成を対象にしたもので複数のマニピュレータによって構成される閉リンク機構には適用することができない。そこで本稿では仮想アームという概念を複数アームの閉リンク機構に対して拡張することを試みる。

2. 閉リンク機構の仮想アーム

2.1 連結アームの定義

いま、複数マニピュレータによる閉リンク機構として Fig. 1 のような状況を考えよう。N 本のマニピュレータが互いに協調して共通の物体を把握している。ここで各マニピュレータの関節数を $m_i (i=1, 2, \dots, N)$ とし、関節数の総和を $M (= \sum_{i=1}^N m_i)$ とする。

複数マニピュレータによる閉リンク機構をモデル化す

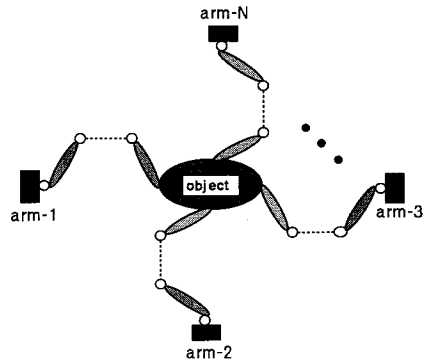


Fig. 1 Closed-chain formed by multiple manipulators

るため、まずアーム 1 とアーム 2 によって構成される閉リンクについて考える。本稿では、アーム 1 のベースからアーム 2 のベースまでを 1 本のマニピュレータと考え、これを連結アームと呼ぶ。ただし、アーム 1 のベースをこの連結アームのベースとし、アーム 2 のベースを連結アームの手先とみなす。アーム 1 とアーム 3, ..., アーム N についても同様に連結アームが定義されるので、結局、アーム 1 とアーム $j (j=2, 3, \dots, N)$ によって構成される $N-1$ 本の連結アームにより複数マニピュレータの閉リンク機構をモデル化することができる。

連結アーム j の手先(アーム j のベース)が拘束されている自由度を l_c とすると、手先変位 $dX_j \in R^{l_c}$ と全てのアームの関節角変位をまとめたベクトル $d\theta \in R^M$ との関係は

$$dX_j = (S_j^T (S_j^T)^{-1} J_1 + J_j) d\theta \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $J_1 \in R^{l_c \times M}$ はアーム 1 のヤコビ行列である。また、 $S_1 \in R^{l_c \times l_c}$ は、アーム 1 の手先位置と物体の代表点との間の幾何学的関係を表す正則な変換行列であり⁴⁾、 $J_j \in R^{l_c \times M}$ はアーム j の手先をベース、ペー

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima
(Received August 3, 1992)

スを手先と考えたアームのヤコビ行列である。(1)式を全ての連結アーム ($j=2, 3, \dots, N$) についてまとめると

$$dX = Jd\theta \quad (2)$$

となる。ここで、 $dX \in R^{l(N-1)}$ 、 $J \in R^{l(N-1) \times M}$ は、

$$dX = \begin{bmatrix} dX_2 \\ dX_3 \\ \vdots \\ dX_N \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} S_2^T(S_1^T)^{-1}J_1 + J_2^T \\ S_3^T(S_1^T)^{-1}J_1 + J_3^T \\ \vdots \\ S_N^T(S_1^T)^{-1}J_1 + J_N^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。

2.2 仮想アームの運動学

連結アームに対して、アームの関節やリンク上に手先をもつような仮想アームを一般に K 本定義する¹⁾。いま、仮想アーム k の手先変位ベクトルを $dX_{vk} \in R^l$ とすると、 dX_{vk} と $d\theta$ との関係は、

$$dX_{vk} = J_{vk}d\theta \quad (4)$$

と書くことができる。ここで $J_{vk} \in R^{l \times M}$ は仮想アーム k のヤコビ行列¹⁾、 l は作業空間の自由度を表わす。(4)式を全ての仮想アームについてまとめると

$$dX_v = J_v d\theta \quad (5)$$

となる。ただし、 $dX_v = [dX_{v1}^T, dX_{v2}^T, \dots, dX_{vK}^T]^T \in R^{lK}$ は各仮想アームの手先変位をまとめたベクトルで、 $J_v = [J_{v1}^T, J_{v2}^T, \dots, J_{vK}^T]^T \in R^{lK \times M}$ は各仮想アームのヤコビ行列をまとめた行列である。

3. 仮想アームに基づく閉リンク機構の軌道生成法

まず、閉リンク機構を維持するための条件を導出しよう。2.1節で導きだした連結アームの運動学(2)式を $d\theta$ について解くと、

$$d\theta = J^+ dX + (I_M - J^+ J)z \quad (6)$$

を得る。ここで、 $J^+ \in R^{M \times l(N-1)}$ は擬似逆行列、 $I_M \in R^{M \times M}$ は単位行列、 $z \in R^M$ は任意ベクトルを表わす。連結アームの手先は、実際にはアーム 2, 3, ..., N のベースであるから、(6)式の手先変位 dX は 0 である。したがって、

$$d\theta = (I_M - J^+ J)z \quad (7)$$

となる。上式が複数マニピュレータの閉リンク機構を壊さないための条件である。ここでは、仮想アームを用いて任意ベクトル z を決定する。

(5)式に(7)式を代入すると、

$$dX_v = Gz \quad (8)$$

を得る。ただし、 $G \equiv J_v(I_M - J^+ J) \in R^{lK \times M}$ である。ここで、仮想アームに目標変位 dX_v^* が与えられたとすると(8)式の連立1次方程式は設定された仮想アームにより冗長、過拘束、特異の三つの場合に分けることができる¹⁾。行列 G の最大階数分解を用いると任意ベクトル z の一般解は、

$$z = G_b^+(G_a^T W G_a) G_a^T W dX_v^* \quad (9)$$

で与えられる¹⁾。ただし $G = G_a G_b$ で、 $\text{rank}(G) = \text{rank}(G_a) = \text{rank}(G_b) = p$ である。 $G_a \in R^{lK \times p}$ は G の過拘束部分、 $G_b \in R^{p \times M}$ は G の冗長部分である。 $W \in R^{lK \times lK}$ は各仮想手先に優先度を与える正定な重み行列である。このとき、関節角変位 $d\theta$ は、(7)、(9)式から

$$d\theta = (I_M - J^+ J) G_b^+(G_a^T W G_a) G_a^T W dX_v^* \quad (10)$$

となる。上式は閉リンク機構を維持するという条件のもとで、複数マニピュレータの関節角変位を与えるとともに仮想アームを用いてマニピュレータの冗長自由度を積極的に利用することを可能にする。以上のように目標仮想手先変位 dX_v^* が与えられると、(10)式を用いて複数マニピュレータの関節角変位 $d\theta$ を求めることができる。

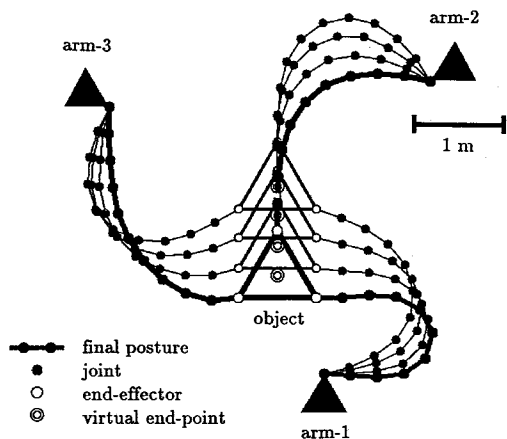
4. シミュレーション実験

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った。用いたマニピュレータは10関節の平面マニピュレータ3本 ($m_1 = m_2 = m_3 = 10$, $M = 30$, $N = 3$, $l_c = 2$, $l = 3$) で各リンク長は0.3mとした。また、把握対象として各頂点から重心への長さが0.5mの正三角形の物体を使用した。

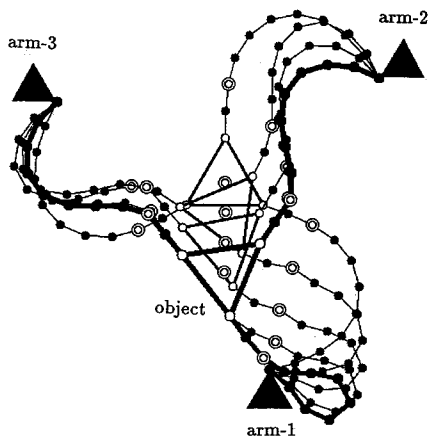
Fig. 2は物体の重心を下方方向に1m動かした場合の結果である。(a)は仮想アームを物体の重心位置に設定した場合 ($K=1$)、(b)は、物体の重心位置と各マニピュレータの第9関節上に仮想アームを設定した場合 ($K=4$) で、マニピュレータ上に設定した仮想手先の目標変位は対応するマニピュレータのベースに向かう方向ベクトルとした。(a)では各関節を滑らかに動かしてゴールに到達しているのに対して(b)では第9関節がマニピュレータのベースに近づいている様子がわかる。このように仮想アームを用いることにより冗長自由度を利用しながら複数マニピュレータの軌道を生成できることがわかる。

5. まとめ

本稿では、閉リンク機構を形成する複数のマニピュレータ群の関節軌道を生成する手法を提案した。この方法は、閉リンク機構を構成するマニピュレータを連結アームとして定義することによって閉リンク機構を壊すことなくマニピュレータの軌道生成を可能にしている。さらに仮想アームを用いることによって、システム全体の冗長自由度を積極的に利用することができる。今後は各マニピュレータで分散的に実行可能な軌道生成法を開発するとともに複数マニピュレータ間の協調制御につい



(a) A virtual end-point is set on the center of the object



(b) Four kinds of virtual end-points are set on the center of the object and on the 9th joint of each manipulator

Fig. 2 Simulation results of positioning tasks

て考察する予定である。

参 考 文 献

- 1) 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 回自律分散システムシンポジウム資料, 13/16(1990)
- 2) 辻, 中山, 伊藤: ニューラルネットを用いた冗長マニピュレータの分散的軌道生成, 第 2 回自律分散システムシンポジウム資料, 89/94(1991)

- 3) 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軌道生成, 第 3 回自律分散システムシンポジウム資料, 201/206(1992)
- 4) V. R. Kumar and K. J. Waldron: Force Distribution in Closed Kinematic Chains, IEEE Journal of Robotics and Automation, 4-6, 657/664 (1988)