

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

手先拘束を考慮したマニピュレータの多点 コンプライアンス制御[†]

辻 敏夫*・高橋 利彰*・伊藤 宏 司*

Multi-Point Compliance Control for Manipulators Constrained by Task Objects

Toshio TSUJI*, Toshiaki TAKAHASHI* and Koji ITO*

The present paper proposes a multi-point compliance control for manipulators whose end-points are constrained by task objects. Compliance of the contact point is affected by the mechanical compliance of the objects as well as the joint compliance of the manipulator. Therefore, to derive the joint compliance which realizes the desired contact point compliance, the manipulator and the task object need to be represented as the parallel link structure. The method presented here can regulate not only the contact point compliance but also the compliance of several points on the manipulator's links utilizing kinematic redundancy.

First of all, the manipulator and the object are divided into a couple of virtual arms whose end-points are connected each other at the contact point or the points on the manipulator's links. Consequently, the kinematic structure of the manipulator becomes the parallel link structure and the relationship between the stiffness of the connected points and the joint stiffness of the manipulator is formalized. Then the optimal joint stiffness is derived, which realizes the desired connected point stiffness as nearly as possible. Finally, it is shown that the multi-point compliance control can regulate the compliance of the connected points for obstacle avoidance while controlling the contact point compliance.

Key Words: compliance control, redundant manipulator, parallel link structure, virtual arm, obstacle avoidance

1. ま え が き

マニピュレータの手先の運動は、自由運動と拘束運動の二つに分けられる。自由運動の場合、手先の運動は関節の運動のみによって決定されるが、拘束運動では手先は対象物からの反力を受けながら運動する。したがって拘束運動時には、手先の位置だけでなく、対象物との接触力も制御する必要がある。このようなマニピュレータの手先の位置と力の制御には、手先のかたさ、やわらかさを調節するコンプライアンス制御が有効であり、従来から位置や力などのフィードバックを用いた方法が提案されている^{1)~5)}。特に Salisbury が提案した能動的剛性制御⁶⁾は、手先の目標ステイフネスを実現するのに必要な関節のサーボゲインを求めることができ、冗長アームにも適用可能であるという点で一般的である。ただし、この方法では手先が自由運動をしているマニピュレータを対象としている。手先が拘束されているときに対象物との接触点に発生するコンプライアンスは対象物の特性にも影響されるため、接触点コンプライアンスはマニピュレータの手先コンプライアンスとは異なったものになってしまう。

一方、われわれは先に冗長マニピュレータを対象として、手先コンプライアンス制御を行いながら、同時にリンク上のいくつかの部位に関するコンプライアンスを調節可能な多点コンプライアンス制御法を提案した⁶⁾。この多点コンプライアンス制御では、コンプライアンスを調節したいリンク上の部位を仮想手先として表現することにより、作業環境とマニピュレータ全体との相互干渉をコンプライアンス制御の枠組みでとらえることができ、関節自由度の冗長性を積極的に利用することができる。したがって、化学プラントなどのように多くの障害物が存在するような環境での作業や、マニピュレータの手先以外の部位も対象物に接触しているような場合などに有効である。しかしながら

† 第 29 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1990・7)

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

(Received April 11, 1990)

(Revised August 13, 1990)

この多点コンプライアンス制御も、能動的剛性制御と同様に、手先が自由運動をしているときのコンプライアンス調節法であり、対象物との接触により手先が拘束されている場合にはそのまま適用することはできない。

そこで本論文では、コンプライアンス（あるいはスティフネス）でその特性を記述できるような対象物に対して、手先拘束を考慮できる形に多点コンプライアンス制御を拡張することを考える。マニピュレータが対象物に拘束されている状態を考えると、接触点でのコンプライアンスはマニピュレータの関節コンプライアンスによって生じる手先コンプライアンスと対象物のもつ構造コンプライアンスによって決まる。したがって、目標とする接触点コンプライアンスを実現する関節コンプライアンスを導出するためには、対象物コンプライアンスを考慮した形でマニピュレータと対象物をモデル化せねばならない。

本論文では、一台の多関節マニピュレータを二つの仮想的なアームに分割して表現することにより、手先が拘束されたマニピュレータをパラレルリンク構造としてモデル化する。そして、対象物コンプライアンスを考慮した形でマニピュレータの接触点（手先）コンプライアンスを調節できるだけでなく、冗長自由度を利用することにより、リンク上のいくつかの部位に関するコンプライアンスも同時に調節できるというコンプライアンス制御法を提案する。以下、2章では手先拘束をモデル化するために導入する仮想アームを定義し、パラレルリンク構造におけるコンプライアンス制御の定式化を行う。3章では目標コンプライアンスと対象物コンプライアンスから関節コンプライアンスを求める方法を示す。4章では本手法を障害物回避問題に適用し、その有効性を検討する。

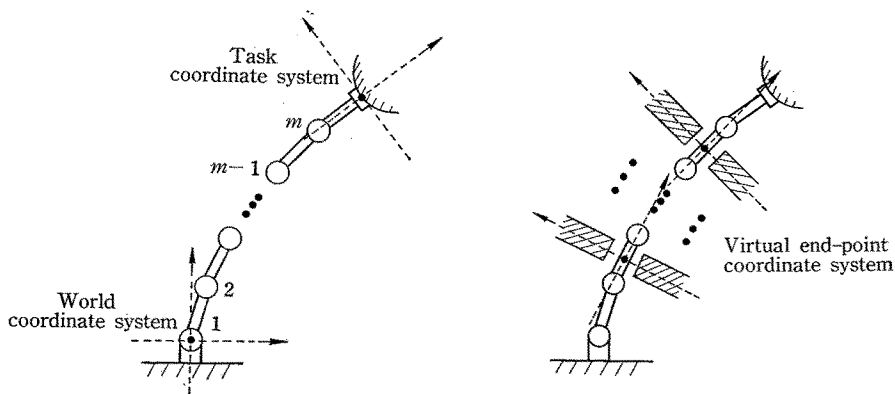
2. 多点コンプライアンス制御の定式化

2.1 仮想アームの導入

Fig. 1(a)の m 自由度マニピュレータを考えよう。マニピュレータの手先は、コンプライアンス特性を有する対象物に拘束されている。そこで、マニピュレータを拘束している対象物を、Fig. 2(a)のように、仮想的なアーム（対象物アーム）としてモデル化する。このとき、マニピュレータと対象物アームは、接触点で接続したパラレルリンク構造と考えることができる。

パラレルリンク構造のマニピュレータの代表例は、多指ハンドである。多指ハンドのコンプライアンス制御については、Cutkosky and Kao⁷⁾が、把持物体の運動に関するコンプライアンスと接触点コンプライアンス、指先コンプライアンス、関節コンプライアンスの間の運動学的関係を定式化し、目標とする把持物体コンプライアンスが与えられたとき、それを関節コンプライアンスに変換する方法を提案している。しかしこの方法では、指先コンプライアンスを実現可能な値に限定しており、目標とする物体コンプライアンスから直接、関節コンプライアンスを得ることは困難である。

本論文ではさらに Fig. 1(b)のように、マニピュレータの近くに障害物が存在する場合を考える。もし、外乱などの影響でマニピュレータの姿勢が変化すると、障害物に接触してしまう可能性がある。そこで、Fig. 2(b)のように、障害物に最も接近しているアーム上の点に手先をもつような仮想アームを考える。この仮想アームの手先コンプライアンスを、たとえば、障害物が存在する方向にできるだけかたく設定すれば、たとえ外力が加わっても障害物との接触を回避することができる。そこでマニピュレータの手先に



(a) A manipulator in contact with the object

(b) A manipulator close to obstacles

Fig. 1 The manipulator performing a task which requires the end-point's compliant motion

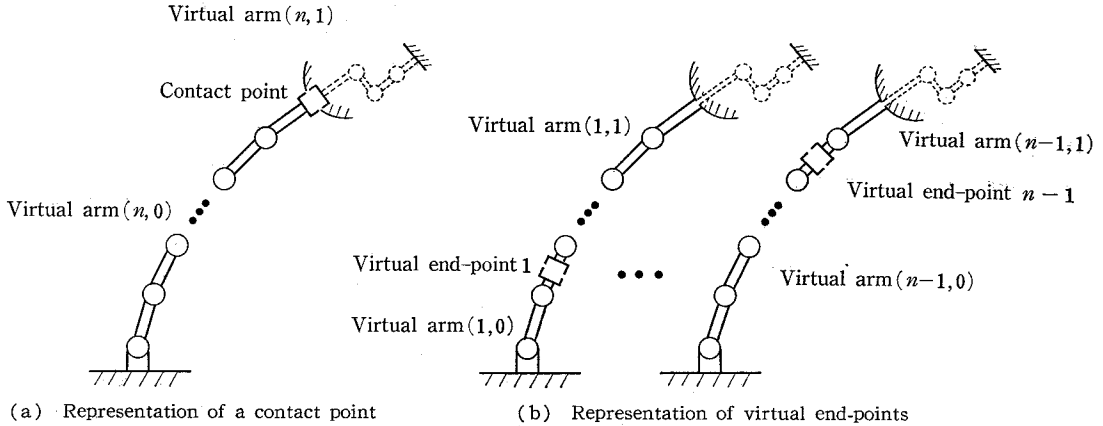


Fig. 2 The virtual arms

対応する接触点コンプライアンスと同時に、これらの仮想手先コンプライアンスを制御することを考える。ここでは、一般に $n-1$ 個の仮想手先を定義する。 h 番目の仮想手先 ($h=1, 2, \dots, n-1$) には、ベース側からの仮想アーム ($h, 0$) と対象物側からの仮想アーム ($h, 1$) が接続している (Fig. 2(b))。マニピュレータの手先が対象物に拘束されていない場合はベース側からの仮想アームを考えるだけでよいが⁶⁾、手先が拘束されている場合には対象物側からの仮想アームを考え、アーム全体をパラレルリンク構造として扱わねばならない。

ここで、マニピュレータと対象物との接触点を n 番目の仮想手先とみなせば、コンプライアンスを調節したい n 個の部位を統一的に取り扱うことができる。このとき、マニピュレータは仮想アーム ($n, 0$) に対応し、対象物アームは仮想アーム ($n, 1$) に対応することになる。本論文で考察する問題は、これら n 個の仮想手先での目標コンプライアンスと対象物が有する構造コンプライアンスが与えられたとき、目標コンプライアンスをできるだけ満足するような関節コンプライアンスを求めることである。

2.2 コンプライアンスの定義と基礎式の導出

まず、絶対座標系、作業座標系 (Fig. 1(a)参照)、および仮想手先座標系 (Fig. 1(b)参照) の3種類の l 次元座標系を定義する。絶対座標系はマニピュレータのベースを原点、作業座標系は対象物との接触点を原点とする直交座標系である。さらに仮想アームの手先を原点とする仮想手先座標系を考える。

いま、マニピュレータと対象物アームの関節変位をまとめたベクトル $d\theta_0 \in R^{m+l}$ を

$$d\theta_0 = \begin{bmatrix} d\theta \\ dO \end{bmatrix} \quad (1)$$

とし、力・トルクベクトル $\tau_0 \in R^{m+l}$ を

$$\tau_0 = \begin{bmatrix} \tau \\ r \end{bmatrix} \quad (2)$$

とする。ここで、 $d\theta \in R^m$ と $\tau \in R^m$ はマニピュレータの関節変位とトルクを表わすベクトルで、 $dO \in R^l$ と $r \in R^l$ はそれぞれ対象物アームの関節変位ベクトルと力・トルクベクトルである (Fig. 2(a))。このとき、マニピュレータの関節コンプライアンス $C_j \in R^{m \times m}$ と対象物コンプライアンス $C_0 \in R^{l \times l}$ をまとめて、 $C_{j0} \in R^{(m+l) \times (m+l)}$ とおくと、 C_{j0} は、

$$d\theta_0 = C_{j0} \tau_0 \quad (3)$$

$$C_{j0} = \begin{bmatrix} C_j & 0 \\ 0 & C_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

のように定義することができる。

一方、各仮想手先の位置・姿勢ベクトルを $dX_{Vhi} \in R^l$ 、力・トルクのベクトルを $F_{Vhi} \in R^l$ とする。ここで、添字 h 、 i は h 番目の仮想手先のベース側からの仮想アーム ($i=0$) と対象物側からの仮想アーム ($i=1$) を表わす (Fig. 2(b))。このとき、仮想アーム (j, k) の手先に作用する外力 F_{Vjk} によって仮想アーム (h, i) の手先に生じる変位 dX_{Vhi} は、仮想手先コンプライアンス $C_{Vhijk} \in R^{l \times l}$ ($h, j=1, 2, \dots, n; i=0, 1; k=0, 1$) を用いて、

$$dX_{Vhi} = C_{Vhijk} F_{Vjk} \quad (5)$$

と定義することができる。ただし、仮想アーム ($n, 0$) と仮想アーム ($n, 1$) はそれぞれ、マニピュレータと対象物に対応しているから、

$$C_{Vn0n0} = C_e \quad (6)$$

$$C_{Vn1n1} = C_0 \quad (7)$$

である。ここで、 $C_e \in R^{l \times l}$ は、関節コンプライアンス C_j によってマニピュレータ (仮想アーム ($n, 0$)) の手先に発生するコンプライアンスを表わす。また、

$C_{Vn1n0} = C_{Vn0n1} = 0$ である。

以上のように定義したコンプライアンス C_{Vhijk} と K_{j0} の関係は、

$$C_{Vhijk} = J_{Vhi} C_{j0} J_{VjkT} \quad (8)$$

と書くことができる。ここで、 $J_{Vhi} \in R^{l \times (m+1)}$ は、関節変位 $d\theta_0$ と仮想手先変位 dX_{Vhi} との関係を表わす仮想アーム (h, i) のヤコビ行列である。ただし、(6)、(7)式と同様に J_{Vn0} 、 $J_{Vn1} \in R^{l \times (m+1)}$ はそれぞれ、マニピュレータ、対象物アームに対応し、マニピュレータのヤコビ行列 $J_m \in R^{l \times m}$ と対象物アームのヤコビ行列 I_l (l 次の単位行列) を用いて、

$$J_{Vn0} = [J_m : 0] \quad (9)$$

$$J_{Vn1} = [0 : I_l] \quad (10)$$

と定義する。

つぎに、これら $2n$ 本の仮想アームをベース側と対象物側の二つのアーム群にまとめることを考える。

(8)式を各仮想手先 h に関してまとめると、

$$C_{ik} = J_i C_{j0} J_k^T \quad (i=0, 1; k=0, 1) \quad (11)$$

と書くことができる。ただし、

$$C_{ik} = \begin{bmatrix} C_{V1i1k} & C_{V1i2k} & \cdots & C_{V1inik} \\ C_{V2i1k} & C_{V2i2k} & \cdots & C_{V2inik} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{Vni1k} & C_{Vni2k} & \cdots & C_{Vninik} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_0 = \begin{bmatrix} J_{V10} \\ \vdots \\ J_{Vn-10} \\ J_{Vn0} \end{bmatrix}, \quad J_1 = \begin{bmatrix} J_{V11} \\ \vdots \\ J_{Vn-11} \\ J_{Vn1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

で、 $C_{ik} \in R^{n \times n}$ 、 $J_0, J_1 \in R^{(m+1) \times n}$ である。行列 J_0 、 J_1 はそれぞれベース側と対象物側の仮想アーム群のヤコビ行列をまとめた行列で、 C_{ik} の非対角要素は仮想アーム間のクロスコンプライアンスを表わす。(11)式は、各仮想手先のコンプライアンスと関節コンプライアンスの関係をシリアルリンク構造として表現したものである。

さらに、(11)式のコンプライアンス C_{ik} に対応する実現可能なスティフネス $K_{ik} \in R^{n \times n}$ を、

$$F_{Vi} = K_{ik} dX_{Vk} \quad (i=0, 1; k=0, 1) \quad (14)$$

と定義する。ここで、 F_{Vi} 、 $dX_{Vk} \in R^n$ は、それぞれ各アーム群の手先の力・トルクベクトル、位置・姿勢ベクトルで

$$F_{Vi} = \begin{bmatrix} F_{V1i} \\ \vdots \\ F_{Vn-1i} \\ F_{Vni} \end{bmatrix}, \quad dX_{Vk} = \begin{bmatrix} dX_{V1k} \\ \vdots \\ dX_{Vn-1k} \\ dX_{Vnk} \end{bmatrix} \quad (15)$$

である。

このとき(11)式に対応するスティフネスの関係式は、

$$K_{ik} = (J_k^T)^T K_{j0} J_i^T \quad (i=0, 1; k=0, 1) \quad (16)$$

となる。ただし、 $(\)^+$ は疑似逆行列を表わし、関節スティフネス行列 K_{j0} は

$$K_{j0} = \begin{bmatrix} K_j & 0 \\ 0 & K_0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

と定義する。ここで、 $K_j = C_j^+$ 、 $K_0 = C_0^+$ である。

(16)式は各仮想手先のスティフネスと関節スティフネスの関係を表わすが、実現可能なスティフネス K_{ik} に関してしか成り立たないことに注意すべきである。

以上の定式化は、手先が拘束されたパラレルリンク構造のマニピュレータを $2n$ 本のシリアルリンクに分解し、そのコンプライアンス、スティフネスの関係を定式化したものである。そこで次章では各仮想手先の接続を考慮して関節コンプライアンスを導出する。

3. 手先拘束を考慮した関節コンプライアンスの導出

パラレルリンク構造のマニピュレータでは、仮想手先に作用する力・トルクは、その仮想手先に接続している2本の仮想アームの手先の力・トルクの和となる。したがって、各仮想アームの手先の力・トルクベクトルをベース側と対象物側でまとめた(15)式のベクトル F_{Vi} ($i=0, 1$) を用いて、接続を考慮した各仮想手先の力・トルクベクトル $F_V \in R^n$ は、

$$F_V = F_{V0} + F_{V1} \quad (18)$$

と表わすことができる。一方、仮想手先で2本のアームは拘束されているから、2本の仮想アームの手先変位は一致する。すなわち、各仮想手先変位をまとめたベクトルを $dX_V \in R^n$ とすると、

$$dX_V = dX_{V0} = dX_{V1} \quad (19)$$

となる。そこで、接続を考慮した実現可能な各仮想手先のスティフネス行列を $K \in R^{n \times n}$ とおくと、

$$F_V = K dX_V \quad (20)$$

$$K = K_{00} + K_{01} + K_{10} + K_{11} \quad (21)$$

となる。ここで、 K_{ik} は(16)式で与えられる接続を考慮していない仮想手先のスティフネス行列である。

(21)式に(16)式を代入して整理すると、

$$K = J^T K_{j0} J \quad (22)$$

$$J = J_0^+ + J_1^+ \quad (23)$$

となる。ただし、 $J \in R^{(m+1) \times n}$ である。上式は仮想手先のスティフネスと関節スティフネスの関係を、手先の拘束を考慮した形で表現している。

つぎに、(22)式の関節スティフネス行列 K_{j0} のうち、対象物スティフネス K_0 ((17)式) を分離することを考える。まず(23)式の行列 J を、

$$J = \begin{bmatrix} J_j \\ J_0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

のように分解する。ただし、 $J_j \in R^{m \times n}$ 、 $J_0 \in R^{1 \times n}$ である。このとき、(17)、(24)式を(22)式に代入すると、

$$K = J_j^+ K_j J_j + J_0^+ K_0 J_0 \quad (25)$$

が得られる。結局、手先が拘束されたマニピュレータの多点コンプライアンス制御は、接触点と仮想手先の目標スティフネス K^* および対象物スティフネス K_0 が与えられたとき、(25)式をマニピュレータの関節スティフネス行列 K_j に関して解く問題に帰着する。

ここで、(25)式の関係は実現可能な手先スティフネス K に関してしか成り立たないから、目標スティフネス K^* によっては解が存在しない場合がある。そこで評価関数

$$\begin{aligned} G(K_j) &= \|W(K^* - K)W^T\| \\ &= \|W(K^* - J_0^+ K_0 J_0 - J_j^+ K_j J_j)W^T\| \end{aligned} \quad (26)$$

を導入し、この評価関数を最小にする解 K_j を求めることを考える。ここで、 $\|A\|$ は行列 A のマトリクスノルム $\{\text{tr}[A^T A]\}^{1/2}$ と定義する⁶⁾。 $\text{tr}[A^T A]$ は行列 $A^T A$ のトレースである。また行列 $W \in R^{1 \times n}$ は重み行列で、正則な対角行列とする。この重み行列 W を適切に設定することにより、各仮想手先のスティフネスに優先順位を指定することが可能になる⁶⁾。

この問題は最小2乗法により解くことができ(付録参照)、

$$K_j = (T^T)^+ (WU^T)^* W(K^* - J_0^+ K_0 J_0) W^T \cdot \{(WU^T)^*\}^+ T^+ \quad (27)$$

$$(WU^T)^* = \{(WU^T)^T WU^T\}^{-1} (WU^T)^T \quad (28)$$

となる。ただし、 $T \in R^{m \times s}$ 、 $U \in R^{1 \times n}$ は行列 J_j (24式) の最大階数分解を表わし、

$$J_j = TU \quad (29)$$

で、 $\text{rank } J_j = \text{rank } T = \text{rank } U = s$ を満たす。実現可能な目標スティフネス K^* が与えられた場合には、 $T = J_j$ 、 $U = I_n$ (n 次の単位行列) と置けばよく、

$$K_j = (J_j^T)^+ (K^* - J_0^+ K_0 J_0) J_j \quad (30)$$

となる。(30)式の解 K_j は最小ノルム解である⁶⁾。このようにして求めた関節スティフネス行列 K_j に対応する関節コンプライアンス C_j は、

$$C_j = K_j^+ \quad (31)$$

として、求めることができる。

以上のように、手先が対象物に拘束されたマニピュレータの多点コンプライアンス制御が導出された。本手法は、対象物コンプライアンスを考慮した形でマニピュレータの接触点(手先)コンプライアンスを調節できるだけでなく、冗長自由度を利用することにより、リンク上のいくつかの部位に関するコンプライア

ンスも同時に調節できる。そこで次章では、障害物回避問題を取り上げ、本手法の有効性を示す。

4. 剛性制御による障害物回避

Fig. 3 に示す平面8関節マニピュレータ(静止リンクを含む)を対象として、手先が拘束されたマニピュレータの接触点および仮想手先コンプライアンス制御のシミュレーション実験を行った。それぞれの座標系は図中に示す。マニピュレータは作業座標系の x 軸方向にはかたく(0.0012 m/N)、 y 軸方向、回転方向にはやわらかい(それぞれ 0.006 m/N, 0.006 rad/Nm) ような対象物と接触して作業を行っている。すなわち、対象物コンプライアンス C_0 は、

$$C_0 = \text{diag}[0.0012(\text{m/N}), 0.006(\text{m/N}), 0.006(\text{rad/Nm})]$$

となる。また、第4リンクは障害物に接近しており、外部からマニピュレータに力が加わると姿勢が変化して障害物に衝突してしまう危険性がある。

このようなマニピュレータを対象として、まず、対象物のコンプライアンス特性を考慮した接触点コンプライアンスの調節が可能かどうか調べてみた。目標接触点コンプライアンス C^* は

$$C^* = \text{diag}[0.001(\text{m/N}), 0.005(\text{m/N}), 0.005(\text{rad/Nm})]$$

とした。そして、(30)式より求めた関節剛性行列 K_j を用いてマニピュレータの関節トルク τ を

$$\tau = K_j d\theta + B_j \dot{\theta} \quad (32)$$

のように制御し、外部からマニピュレータの手先に外力 $f = [10, -10, 0]^T$ (N) (作業座標系) を加えた。

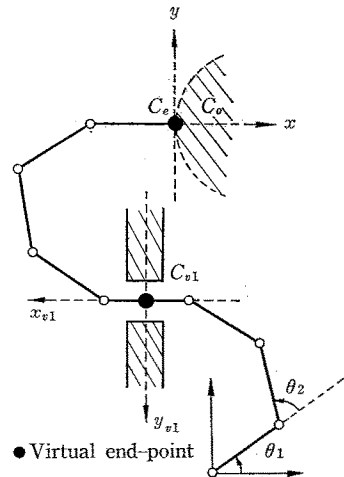


Fig. 3 An eight-joint planar manipulator close to the obstacle

きのマニピュレータの姿勢変化を求めた。ここで $B_j \in R^{m \times m}$ は正則な粘性摩擦行列である。なお、シミュレーションにはパラレルリンク構造の動力学計算が可能なアッペル法を用い⁹⁾、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. 4 に結果を示す。Fig. 4(a) はマニピュレータの初期姿勢と最終姿勢を、Fig. 4(b) は接触点の時間変化を表わしている。一方、Fig. 5 は対象物の特性を考慮せずに能動的剛性制御²⁾を適用した場合の結果である。本手法を用いた場合 (Fig. 4)、接触点は x 軸方向に 1 cm、 y 軸方向に -5 cm 変位しており、目標コンプライアンスが完全に実現できていることがわかる。これに対して能動的剛性制御 (Fig. 5) では、接触点の動きは目標コンプライアンスよりもかたくなっている。接触点のコンプライアンスがマニピュレー

Table 1 Link parameters

	Link i ($i=1, \dots, 8$)
Length (m)	0.2
Mass (kg)	0.003
Center of mass (m)	0.1
Moment of inertia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.0015

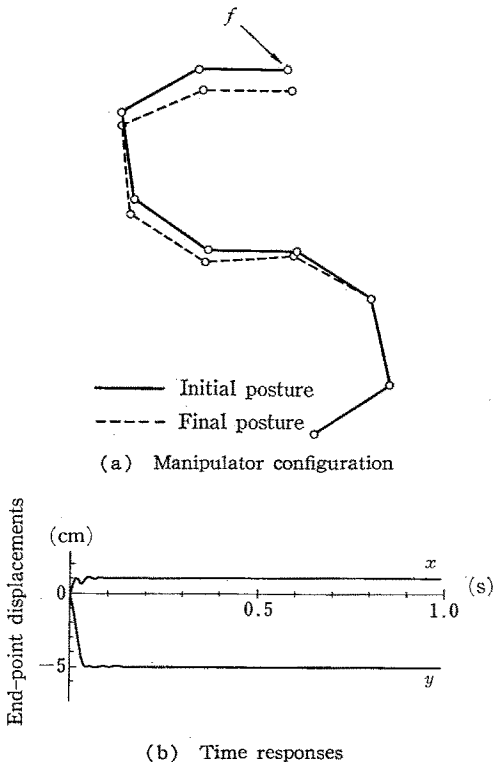


Fig. 4 A motion profile for a disturbance force under the contact point compliance control without consideration of the obstacles

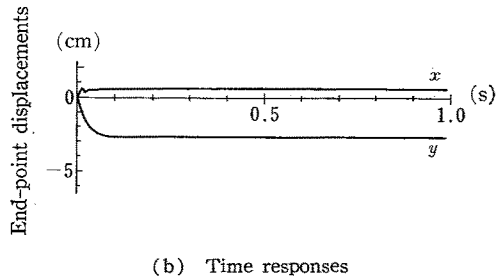
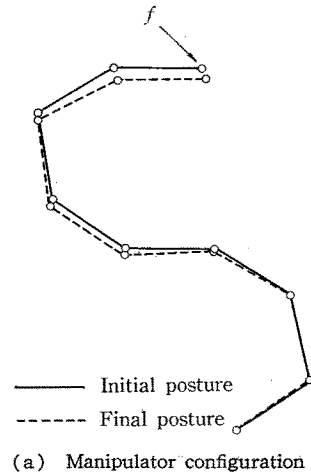


Fig. 5 A motion profile for a disturbance force under the active stiffness control without consideration of the obstacles

タの手先コンプライアンスだけでなく、対象物コンプライアンスにも影響されるためである。

つぎに、障害物との衝突を回避するため、第4リンクの中間に仮想手先を設け、障害物方向と回転方向をかたく (それぞれ、0.001 m/N, 0.001 rad/Nm) することを考える。このとき、目標コンプライアンス C^* は

$$C^* = \text{diag}[0.001, 0.001, 0.001, 0.005, 0.001, 0.001]$$

とした。目標コンプライアンスは2つの手先に各3自由度、計6自由度で、関節自由度は8であるから (25) 式の解は存在する。

Fig. 6 は仮想手先に $f = [-10, -10, 0]^T$ (N) (仮想手先座標系) の外力を加えたときのマニピュレータの応答である。Fig. 6(a) はマニピュレータの初期姿勢と最終姿勢を、Fig. 6(b), (c) はそれぞれ接触点と仮想手先の時間変化を表わしている。一方、Fig. 7 は Fig. 5 と同じ能動的剛性制御を適用した結果である。Fig. 7 の能動的剛性制御では仮想手先が外力によって大きく変化してしまい、障害物に衝突してい

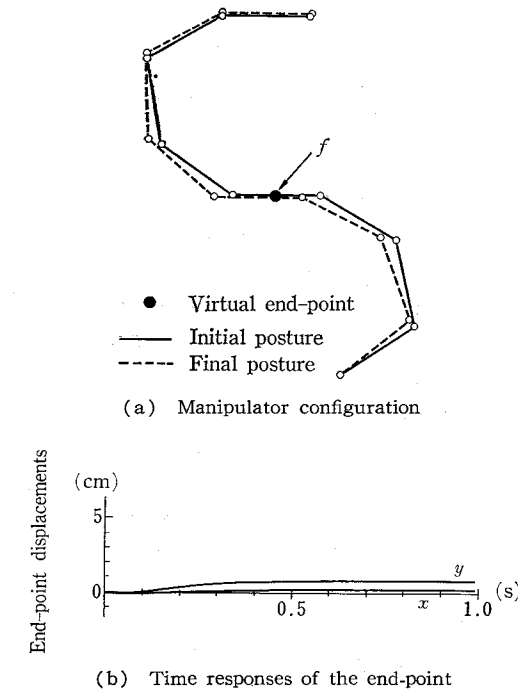


Fig. 6 A motion profile for a disturbance force under the multi-point compliance control with consideration of the obstacles

る。これに対して、本手法を用いると (Fig. 6), 仮想手先のコンプライアンスが調節可能になるため、マニピュレータは障害物方向にはほとんど変位していない。このように本手法では、手先拘束を考慮した接触点コンプライアンスが調節できるだけでなく、マニピュレータの関節自由度の冗長性を利用することによって、仮想手先のコンプライアンスも同時に調節することができる。この多点コンプライアンス制御では任意の外力に対するアームの姿勢変化を、あらかじめ目標コンプライアンスの形で考慮することができ、障害物に接近した状態で手先のコンプライアント動作を要求されるような作業に有効である。

5. まとめ

本論文では、手先が拘束されたマニピュレータに適用可能な多点コンプライアンス制御法を提案した。ま

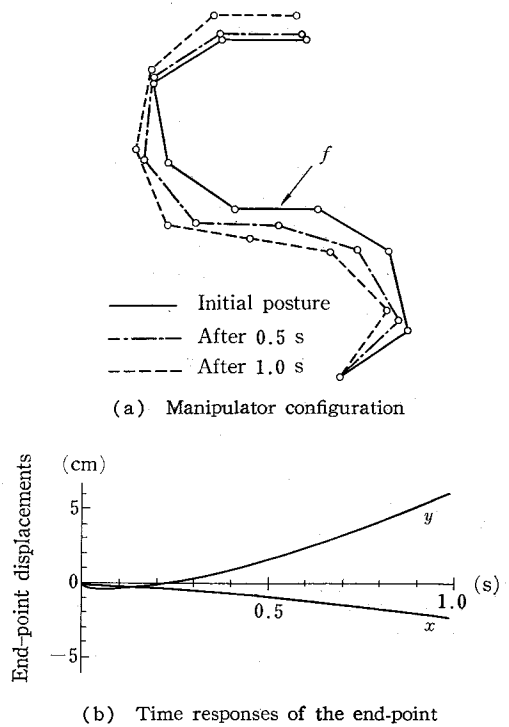


Fig. 7 A motion profile for a disturbance force under the active stiffness control

ず、1台の多関節マニピュレータを、コンプライアンスを調節したい部位で2台の仮想的なアームに分割し、ベース側からの仮想アームと対象物側からの仮想アーム (対象物の特性を含んでいる) がその部位で接続しているものとしてマニピュレータと対象物をモデル化した。このとき、接続点から見たアームの構造は平行リンク構造となり、接続点でのスティフネスを2本の仮想アームの手先スティフネスの和として表現することにより、関節スティフネスが接続点のスティフネスに与える影響を定式化することができた。その結果、手先拘束のあるマニピュレータの仮想手先および接続点の目標コンプライアンスから関節コンプラ

イアンスを求める問題は、この変換式を関節スティフネスに関して解くことに帰着し、評価関数を用いて最適解を導出する方法で示した。

本論文で示したコンプライアンス制御法は、パラレルリンク構造のコンプライアンス制御にも適用可能であると考えられる。今後は、接触点での拘束自由度を考慮してパラレルリンク構造のコンプライアンス制御法を確立するとともに、高速計算法、目標コンプライアンスの設定法などの問題を考察する必要があると考えている。

参考文献

- 1) R.P. Paul and B. Shimano: Compliance and Control, Proc. Joint Automatic Control Conference, 694/699 (1976)
- 2) J.K. Salisbury: Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, The 19th IEEE Conf. Decision and Control, 95/100 (1980)
- 3) 平本, 杉本, 荒井, 坂上: 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, 22-3, 343/350 (1986)
- 4) 金子, 横井, 谷江: シリアルリンクのダイレクトコンプライアンス制御, 日本機械学会論文集, 54-C-503, 1510/1514 (1988)
- 5) 横井, 金子, 谷江: パラレルリンクのダイレクトコンプライアンス制御, 日本機械学会論文集, 54-C-505, 2131/2139 (1988)
- 6) 辻, 高橋, 伊藤: 冗長マニピュレータの多点コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, 26-12, 1406/1413 (1990)
- 7) M.R. Cutkosky and I. Kao: Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 5-2, 151/165 (1989)
- 8) 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 (1974)
- 9) 横山, 辻, 伊藤: 身体運動解析システムによる拘束動作の解析, 信学技報, MBE 89-45, 29/36 (1989)

《付録 関節スティフネスの最小2乗解》

(26)式より, 評価関数 $G(\mathbf{K}_j)$ は,

$$\begin{aligned} G(\mathbf{K}_j) &= \|\mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}_j^T \mathbf{K}_j \mathbf{J}_j) \mathbf{W}^T\| \\ &= \{\text{tr}[\{\mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}_j^T \mathbf{K}_j \mathbf{J}_j) \mathbf{W}^T\}^T \\ &\quad \cdot \mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}_j^T \mathbf{K}_j \mathbf{J}_j) \mathbf{W}^T]\}^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

となる。問題は、 $G(\mathbf{K}_j)$ を最小にする行列 \mathbf{K}_j を求めることである。ここで、行列 \mathbf{J}_j はマニピュレータの関節自由度 m , 作業空間自由度 l , 仮想手先の数 n および仮想手先の設定位置に依存して、行、列に関して

ともにフルランクでない場合が存在する⁶⁾。そこで、行列 \mathbf{J}_j を最大階数分解し、

$$\mathbf{J}_j = \mathbf{T}\mathbf{U} \quad (\text{A.2})$$

とおく。ただし、 $\mathbf{T} \in R^{m \times s}$, $\mathbf{U} \in R^{s \times l}$ ($ln \geq s \leq m$) で、 $\text{rank } \mathbf{J}_j = \text{rank } \mathbf{T} = \text{rank } \mathbf{U} = s$ を満たす。このとき(A.2)式より、

$$\mathbf{J}_j^T \mathbf{K}_j \mathbf{J}_j = \mathbf{U}^T \mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T}\mathbf{U} \quad (\text{A.3})$$

となる。行列 \mathbf{T} は(A.3)式のうち冗長な部分を、行列 \mathbf{U} は過拘束な部分を表現している⁶⁾。

そこでまず、(25)式を行列 $\mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T}$ に関して解くことを考えよう。(A.1)式を最小にする解 $\mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T}$ に関する必要条件は、

$$\partial G(\mathbf{K}_j) / \partial \mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (\text{A.4})$$

であるから、(A.1)式を(A.4)式に代入し、展開すると、

$$\begin{aligned} &(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \mathbf{W}\mathbf{U}^T \mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T} (\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \mathbf{W}\mathbf{U}^T \\ &= (\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0) \mathbf{W}^T \mathbf{W}\mathbf{U}^T \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となる。ただし、トレースの微分公式⁹⁾,

$$\partial \text{tr}[\mathbf{A}\mathbf{X}] / \partial \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \quad (\text{A.6})$$

$$\partial \text{tr}[\mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{B}] / \partial \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{B}^T \quad (\text{A.7})$$

$$\partial \text{tr}[\mathbf{X}^T \mathbf{X}] / \partial \mathbf{X} = 2\mathbf{X} \quad (\text{A.8})$$

$$\partial \text{tr}[\mathbf{A}\mathbf{X}^T \mathbf{B}\mathbf{X}\mathbf{C}] / \partial \mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{X}\mathbf{C}\mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{X}\mathbf{A}^T \mathbf{C}^T \quad (\text{A.9})$$

および擬似逆行列に関する性質、 $(\mathbf{A}^* \mathbf{A})^T = \mathbf{A}^* \mathbf{A}$, $(\mathbf{A}^* \mathbf{A})^T (\mathbf{A}^* \mathbf{A}) = \mathbf{A}^* \mathbf{A}$ を用いた。ただし、 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{X} は任意の行列である。

重み行列 \mathbf{W} は正則であるから、 $(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \mathbf{W}\mathbf{U}^T \in R^{s \times s}$ は正則行列となり、(A.5)式は

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T} &= (\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^* \mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0) \mathbf{W}^T \\ &\quad \cdot \{(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^*\}^T \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^* = \{(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \mathbf{W}\mathbf{U}^T\}^{-1} (\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^T \quad (\text{A.11})$$

となる。上式は、(A.1)式の評価関数を最小にする行列 $\mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T}$ を与える。

一方、行列 \mathbf{T} は列に関してフルランクであるから、(A.10)式を満たす行列 \mathbf{K}_j は必ず存在する。ここでは最小ノルム解を選ぶことにすると、(A.10)式は、結局、

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_j &= (\mathbf{T}^T)^+ (\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^* \mathbf{W}(\mathbf{K}^* - \mathbf{J}_0^T \mathbf{K}_0 \mathbf{J}_0) \mathbf{W}^T \\ &\quad \cdot \{(\mathbf{W}\mathbf{U}^T)^*\}^T \mathbf{T}^+ \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

となる。上式はスティフネス関係式((25)式)の評価関数 $G(\mathbf{K}_j)$ ((26)式)に関する最小2乗解を与える。