

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

冗長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 Redundant Manipulators

Toshio TSUJII*, Toshiaki TAKAHASHI* and Koji ITO*

Compliance control is one of the most effective control methods for manipulators in contact with their environments. In the present paper, we argue that kinematic redundancy of the manipulators should be positively utilized in terms of the compliance control. Although it is widely recognized that redundancy represents a key towards design, control and task planning of more versatile manipulators, no previous investigations of the compliance control have taken account of advantages of kinematic redundancy.

This paper proposes a new method called multi-point compliance control which is able to regulate the compliance of several points on the manipulator's links as well as the end-point compliance utilizing kinematic redundancy. First of all, we define those points on the manipulator's links as virtual end-points, and formalize kinematic relationships between the joint compliance and the virtual end-point compliance. We then point out that the joint redundancy of the manipulator decreases as the number of the virtual end-points is increased, and the manipulator finally becomes over-constrained. The method presented here can give the optimal solution for both the redundant and over-constrained cases and can assign the order of priority to each end-point according to the given task. Finally, it is shown that the multi-point compliance control can regulate compliance of the virtual end-points for obstacle avoidance while controlling the actual end-point compliance for the given task.

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

1. ま え が き

組立作業やばり取り、ドアの開閉などのように外部からの拘束に従いながら作業を行う場合には、マニピュレータの手先のかたさ、やわらかさを調節する方法が有効である。従来からこのようなマニピュレータの手先コンプライアンス制御に対して、位置や力などのフィードバックを用いたソフトウェアサーボによる方法^{1)~6)}が提案されている。特に Salisbury が提案した能動的剛性制御²⁾は、手先の目標コンプライアン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、最も一般的である。

しかしながら、これらの方法はいずれも手先コンプライアンスの設定問題に終始している。これに対してわれわれは、冗長マニピュレータを対象として、冗長な関節自由度を積極的に利用したコンプライアンス制御法の開発を行っている。マニピュレータは作業を行うのに必要とされる自由度以上の関節自由度を有する場合が多い。このようなマニピュレータの冗長性は、障害物・特異姿勢回避など運動制御の汎用性、融通性を高める効果をもち、特に逆運動学問題に関して活発に研究されている^{7)~10)}。この冗長自由度の観点からコンプライアンス制御をとらえると、手先で対象とする作業に応じたコンプライアンス制御を行いながら、同時に冗長な自由度を利用してサブタスクを行わせることが考えられる。われわれは先に、手先コンプライアンス制御のサブタスクとして、関節コンプライアンスの調節を取り上げ、手先コンプライアンスを満足する範囲内で関節コンプライアンスを与えられた目標値に近づける方法を示した¹¹⁾。この方法は、マニピュレータの機構的な制約のため関節コンプライアンスをある範囲内の値に抑えたい場合や、ある関節を固定(コンプライアンスを零にする)してマニピュレータの見かけの関節自由度を減らしたい場合など目標とする関

* 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

(Received March 9, 1990)

(Revised July 10, 1990)

節コンプライアンスをサブタスクに応じて指定できるときに有効で、目標手先コンプライアンスを満足しながら望ましい関節コンプライアンスに最も近いコンプライアンスを実現することができる。

これに対して本論文では、手先コンプライアンス制御のサブタスクとして、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同時に制御する問題を取り上げる。たとえば障害物により作業範囲が限られている場合には、外部からの力やトルクによってマニピュレータの姿勢が変化し、障害物に衝突してしまう場合がある。また、手先だけでなく途中のリンクも物体と接触している場合には、物体との接触力を調節する必要がある。このような状況では、サブタスクを目標関節コンプライアンスの形で簡単に表現することはできない。作業空間上で表現されるサブタスクを関節空間に変換する必要を生じるからである。そこで本論文では、障害物に接近しているアーム上の点や物体との接触点に仮想の手先を設定し、この仮想手先のコンプライアンスを調節することを考える。すなわち、手先コンプライアンス制御を行いながら、同時にいくつかの仮想手先のコンプライアンスを制御するのである。アーム上に仮想手先を設定することにより、アーム全体と環境との関係を作業空間で表現することが可能となり、関節空間で目標コンプライアンスを計画する必要がなくなる。

ここではこのようなコンプライアンス制御問題を多点コンプライアンス制御と呼ぶことにし、複数の手先の目標コンプライアンスから、それを実現する関節コンプライアンスを求める問題を考察する。要求される目標コンプライアンスの数が増加するとマニピュレータは冗長でなくなり、逆に過拘束状態となる。本論文で示す方法は、このような場合でも最小2乗の意味で最もよい近似解を求めることができ、また各目標コンプライアンスの優先順位を指定することも可能である。以下、2章ではまず本論文で取り扱う多点コンプライアンス制御に関する基礎方程式を示す。3章では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方法を示し、その一般解を導出するとともに、関節剛性行列を考えることにより計算量を削減できることを示す。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. 問題の提起

たとえば、Fig. 1(a)のような m 自由度マニピュレータを考えよう。マニピュレータは障害物の穴を通して手先でコンプライアンス作業を行っている。も

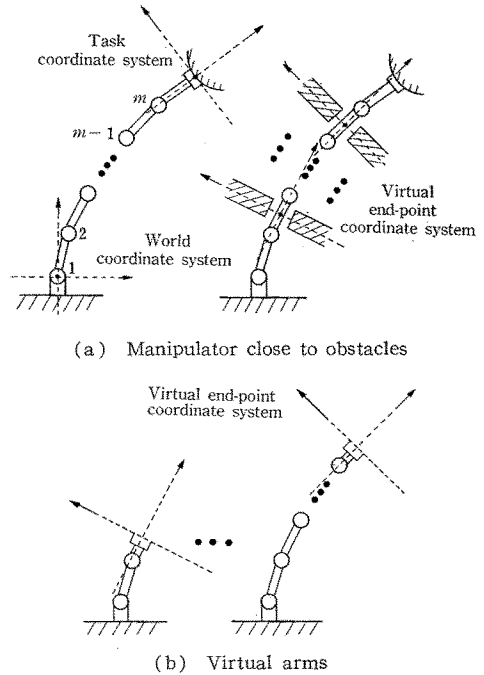


Fig. 1 Actual arm and virtual arms

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、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 (Fig. 1(b))。この仮想アームの手先コンプライアンスを障害物に応じて調節できれば、あらかじめ障害物とアームとの干渉を考慮することができる。たとえば、障害物との接触を回避したい場合には、仮想手先を障害物の存在する方向にできるだけかたく設定すればよい。また、障害物との接触によって発生する力を小さくしたい場合には、仮想手先をやわらかく設定すればよい。このように、仮想的な手先を考えることにより、作業環境とアーム全体との干渉をコンプライアンス制御の枠組みで考えることが可能になる。ただし、本論文ではアームが作業対象物などの外部環境に拘束されていない場合のみを取り扱うことにする。

このような場合のコンプライアンス制御を考えるために、Fig. 1 に示すような座標系を定義する。絶対座標系は対象とするマニピュレータ (以下、実アームと呼ぶ) のベースを原点とし、作業座標系は実アームの手先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。ここでは、一般に $n-1$ 個の仮想手先を定義する。いま、関節変位を表わすベクトルを $d\theta = (d\theta_1, d\theta_2, \dots, d\theta_m)^T$ 、関節トルクを表わすベクトルを $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots,$

$c_m)^T$ とする. 一方, 対象とする作業が l 自由度で表わされるものとし, 作業座標系における位置・姿勢のベクトルを $dX=(dX_1, dX_2, \dots, dX_l)^T$, 力・モーメントのベクトルを $F=(F_1, F_2, \dots, F_l)^T$ とする. 冗長マニピュレータでは, $m>l$ である. このとき, 手先に外力 F が作用する場合を考え, 実アームの手先コンプライアンス (作業座標系) $C_e \in R^{l \times l}$, 関節コンプライアンス $C_j \in R^{m \times m}$ を,

$$dX = C_e F \tag{1}$$

$$d\theta = C_j \tau \tag{2}$$

と定義する. 実アームの手先コンプライアンスと関節コンプライアンスの関係は,

$$C_e = R_0 J_0 C_j J_0^T R_0^T \tag{3}$$

と表わすことができる. ただし, $J_0 \in R^{l \times m}$ は絶対座標系に関するヤコビ行列で, $R_0 \in R^{l \times l}$ は絶対座標系から作業座標系への回転変換行列である. 一方, 仮想アーム i ($i=1, \dots, n-1$) に関して, 仮想手先コンプライアンス (仮想手先座標系) を $C_{vi} \in R^{l \times l}$ とおくと,

$$C_{vi} = R_i J_i C_j J_i^T R_i^T \tag{4}$$

となる. $J_i \in R^{l \times m}$ は i 番目の仮想手先に関するヤコビ行列で, $R_i \in R^{l \times l}$ は絶対座標系から i 番目の仮想手先座標系への回転変換行列である. たとえば, 仮想アーム i が実アームの $r+1$ 番目の関節上に手先をもつ場合, ヤコビ行列 J_i は,

$$J_i = J_0 \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$\begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in R^{m \times m}, I_r: r \text{ 次の単位行列}$

のような構造となる.

(3)式は, 実アームの手先で行っている作業に関するコンプライアンスの関係式で, (4)式は仮想手先に関するコンプライアンス関係式を表わしている. したがって, (3), (4)式を満足するような関節コンプライアンス行列 C_j を求めることができれば, 実アームの手先コンプライアンス C_e だけでなく, 仮想手先コンプライアンス C_{vi} も同時に調節することが可能になる.

3. 多点コンプライアンス制御

3.1 一般解の導出

手先で作業を行うための目標手先コンプライアンスと障害物回避などのサブタスクを行うための目標仮想手先コンプライアンスが与えられたとき, (3), (4)式を満足するような関節コンプライアンスを求めることを考える.

まず, (3), (4)式をまとめて,

$$C = J C_j J^T \tag{6}$$

とおく. ただし, $C \in R^{l \times n \times l \times n}$, $J \in R^{l \times m}$ は,

$$C = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & \dots & C_{0n-1} \\ C_{10} & C_{11} & \dots & C_{1n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n-10} & C_{n-11} & \dots & C_{n-1n-1} \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} R_0 J_0 \\ R_1 J_1 \\ \vdots \\ R_{n-1} J_{n-1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

で $C_{00} \triangleq C_e$, $C_{ii} \triangleq C_{vi}$, C_{jk} は仮想アーム間のクロスコンプライアンスを表わす. 問題は目標コンプライアンスが与えられたとき, (6)式を満たす行列 C_j を求めることになる. この問題は, 実アームの関節自由度と仮想アームの設定条件によって三つの場合に分類できる. ただし, 以下の議論では, 目標コンプライアンスは正定行列として与えられ, また実アームは特異姿勢にはないものとする.

Fig. 2 にこの3種類の場合の例を示す. 実アームは, 7リンク平面アーム ($m=7$) で手先の自由度は回転を含めて $l=3$ であるから, このアームは冗長自由度をもつ. Fig. 2(a) は第4リンク上に仮想手先を設定した場合 ($n=2$) である. このとき, 目標コンプライアンスは仮想手先と実アームの手先を合せて6自由度であるから, このアームにはまだ冗長性が残っている ($l \cdot n < m$). すなわち, (6)式の行列 J は, 行に関してフルランク ($\text{rank } J = l \cdot n$) となり, (6)式のマトリクス方程式は不定となる. Fig. 2(b) は5カ所に仮想手先を設定した場合 ($n=6$) である. 目標コンプライアンスは18自由度となり, アームは過拘束状態となっている ($l \cdot n > m$) ことがわかる. このとき, 行列 J ((6)式) は列に関してフルランク ($\text{rank } J = m$) となり, (6)式の解は存在しない. 一方, Fig. 2(c) は第6リンク上に仮想手先を設定した場合 ($n=2$) である. 目標コンプライアンスの自由度は Fig. 2(a) の場合と同様に6自由度となり, 一見, (6)式の解が存在するように見える. しかしながら, この場合は仮想アームの手先と実アームの手先との間に関節が一つしか存在しないため, 仮想アームと実アームの手先コ

● Virtual end-point

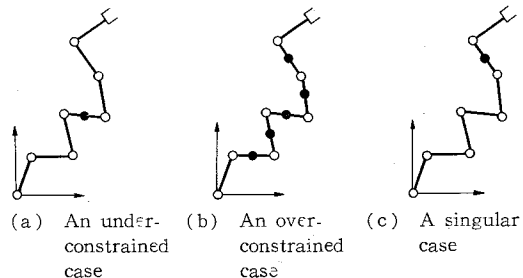


Fig. 2 Three cases of virtual arms

ンプライアンスを同時に実現することはできない。このとき、行列 J ((6)式) は行、列のいずれに関してもフルランクでなくなる。このように(6)式の解の存在条件は、行列 J のランクに応じて、①冗長な場合、②過拘束な場合、③冗長な部分と過拘束な部分を合せもつ場合の三つに分類できることがわかる。

これら3種類の場合を取り扱うため、行列 J をあらかじめ最大階数分解し、

$$J = J_a J_b \quad (8)$$

とおく。ただし、 $J_a \in R^{l \times n \times p}$ 、 $J_b \in R^{p \times m}$ で、 $\text{rank } J = \text{rank } J_a = \text{rank } J_b = p$ である。上式を(6)式に代入すると、

$$C = J_a J_b C_j J_b^T J_a^T \quad (9)$$

となる。 J_a は行列 J のうち過拘束な部分を、 J_b は行列 J のうち冗長な部分を表現している。

まず、(9)式を $J_b C_j J_b^T$ に関して解くことを考えよう。

$$C_{j_b} = J_b C_j J_b^T \quad (10)$$

とおくと、(9)式は、

$$C = J_a C_{j_b} J_a^T \quad (11)$$

と書ける。行列 J_a は列に関してフルランクであるから、一般に(11)式を満たす解 C_{j_b} は存在せず、近似解を求めることになる。そこで、評価関数、

$$G(C_{j_b}) = \|W(C^* - C)W^T\| \\ = \|W(C^* - J_a C_{j_b} J_a^T)W^T\| \quad (12)$$

を導入し、この評価関数を最小にする行列 C_{j_b} を求めることを考える。ここで、 C^* は目標コンプライアンス、 $\|A\|$ は行列 A のマトリクスノルムを表わし、

$$\|A\| \triangleq \{\text{tr}[A^T A]\}^{1/2} \quad (13)$$

と定義する。 $\text{tr}[A^T A]$ は行列 $A^T A$ のトレースである。また行列 $W \in R^{l \times n \times l \times n}$ は重み行列で、正定な対角行列とする。作業によっては手先コンプライアンスよりも仮想手先コンプライアンスのほうが優先される場合や、逆に、手先コンプライアンスを第一に考えなければならない場合がある。この重み行列 W を適切に設定することにより、さまざまな状況に対して自由に優先順位を指定することが可能になる。

この問題は最小2乗法により解くことができる。最適解に関する必要条件は、

$$\partial G(C_{j_b}) / \partial C_{j_b} = 0 \quad (14)$$

が成立することであるから、(12)式を(14)式に代入し、トレースの微分公式¹²⁾を用いて展開すると、

$$(WJ_a)^T WJ_a C_{j_b} (WJ_a)^T WJ_a \\ = (WJ_a)^T W C^* W^T WJ_a \quad (15)$$

を得る。行列 J_a のランクは p であるから、行列 $(WJ_a)^T WJ_a$ の逆行列が存在し、結局、

$$C_{j_b} = (WJ_a)^* W C^* W^T \{(WJ_a)^*\}^T \quad (16)$$

$$(WJ_a)^* \triangleq \{(WJ_a)^T WJ_a\}^{-1} (WJ_a)^T \quad (17)$$

となる。上式は(11)式のマトリクス方程式の評価関数 $G(C_{j_b})$ に関する最小2乗解を与える。したがって、(12)式の評価のもとで目標コンプライアンス C^* に最も近い解を求めることができる。

このようにして行列 C_{j_b} が求まると、つぎに(10)式を解き関節コンプライアンス C_j を求めればよい。

(10)式に含まれる行列 J_b は行に関してフルランクであるから、(10)式の解は必ず存在する。 J_b の擬似逆行列を用いて、関節コンプライアンス C_j を求めると¹³⁾、

$$C_j = J_b^+ C_{j_b} (J_b^+)^T + [Z - J_b^+ J_b Z (J_b^+ J_b)^T] \quad (18)$$

となる。ただし、 $J_b^+ = J_b^T (J_b J_b^T)^{-1} \in R^{m \times p}$ は J_b の擬似逆行列、 $Z \in R^{m \times m}$ は任意の行列である。この行列 Z を用いて別のサブタスクを行うことも可能である¹³⁾。

以上のように、目標コンプライアンス C^* が与えられると(16)、(18)式を用いて最適な関節コンプライアンスを求めることができる。この方法は、Fig. 2 に示した3種類の場合のいずれにも適用することができる。たとえば、Fig. 2(a)のように冗長な場合は、 $J_a = I_n$ ($l \cdot n$ 次の単位行列)、 $J_b = J$ であるから、 $C_{j_b} = C^*$ となり、関節コンプライアンス C_j は(18)式より、

$$C_j = J^+ C^* (J^+)^T + [Z - J^+ J Z (J^+ J)^T] \quad (19)$$

で与えられる。このとき、実現される手先コンプライアンスは目標コンプライアンス C^* に一致し正定行列となるから、各手先は外力が取り除かれると必ず元の位置に復元することになる。一方、過拘束な場合 (Fig. 2(b)) では、 $J_a = J$ 、 $J_b = I_m$ であるから、 $C_{j_b} = C_j$ となり、関節コンプライアンス C_j は(16)式より、

$$C_j = (WJ)^* W C^* W^T \{(WJ)^*\}^T \quad (20)$$

となる。ここで行列 C_j は正定行列となり、冗長な場合と同様、外力が取り除かれるとアームは必ず元の姿勢に復元する。もちろん、冗長な部分と過拘束な部分を合せもつ場合 (Fig. 2(c)) には、(16)、(18)式をそのまま用いればよい。

3.2 関節剛性行列への変換

前節で示した手法を実際に用いる際に問題となる点の一つとして、疑似逆行列による計算量の大きさがあげられる。そこで本節では関節剛性制御を用いて多点コンプライアンス制御を実現することを考え、前節で導出した関節コンプライアンス行列の一般解 ((16)、(18)式) から疑似逆行列計算を含まない形の関節剛性行列を導出できることを示す。

実アームの関節剛性行列 $K_j \in R^{m \times m}$ を,

$$\tau = K_j d\theta \tag{21}$$

$$K_j \triangleq C_j^+ \tag{22}$$

と定義する. 一方, (18)式の関節コンプライアンス行列の一般解において $Z=0$ とおくと,

$$C_j = J_b^+ C_{j_b} (J_b^+)^+ \tag{23}$$

となる. このことは, 実アームの手先と仮想手先のコンプライアンス制御を行ってもまだ実アームの関節自由度に冗長性が残っている場合, 関節コンプライアンスの最小ノルム解を選択することを意味している¹²⁾.

ここで, $C_{j_b} \in R^{p \times p}$ は正則行列で, $\text{rank } J_b = \text{rank } J_b^+ = p$ であるから,

$$K_j = C_j^+ = J_b^+ K_{j_b} J_b \tag{24}$$

となる. ただし, $K_{j_b} \triangleq C_{j_b}^{-1}$ である.

つぎに(16), (17)式で導出した C_{j_b} の逆行列を考える. (17)式の行列 $(WJ_a)^T WJ_a \in R^{p \times p}$ は正則, また $\text{rank } J_a = p$ であるから, 目標コンプライアンス行列 C^* が正定行列であれば,

$$K_{j_b} = C_{j_b}^{-1} = (J_w^T J_w)(J_w^T W C^* W^T J_w)^{-1} (J_w^T J_w) \tag{25}$$

$$J_w \triangleq WJ_a \tag{26}$$

が成立する. 以上より, 実アームの手先と仮想手先のコンプライアンス制御以外のサブタスクを必要としない場合には, (24), (25)式から関節剛性行列 K_j を算出することができ, 疑似逆行列を計算する必要がなくなる.

特に, Fig. 2(a)のように冗長な場合は, $J_a = I_m$, $J_b = J$ であるから $C_{j_b} = C^*$ となり, (19)式に対応する

$$K_j = J^T (C^*)^{-1} J \tag{27}$$

を計算するだけでよい. 上式は Salisbury の能動的剛性制御²⁾に対応している. 同様に, 過拘束な場合 (Fig. 2(b)) では, $J_a = J$, $J_b = I_m$ であるから $K_j = K_{j_b}$ となり, (20)式に対応する

$$K_j = (J_w^T J_w)(J_w^T W C^* W^T J_w)^{-1} (J_w^T J_w) \tag{28}$$

$$J_w = WJ \tag{29}$$

を用いればよく, (16), (18)式に比べて大幅に計算量を削減することができる.

4. 障害物回避問題への適用

本手法の有効性を検討するため, Fig. 3 に示す平面6リンクマニピュレータを対象として多点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. なお, 3次元空間を扱う場合は, マニピュレータの重力は完全に補償されている必要がある.

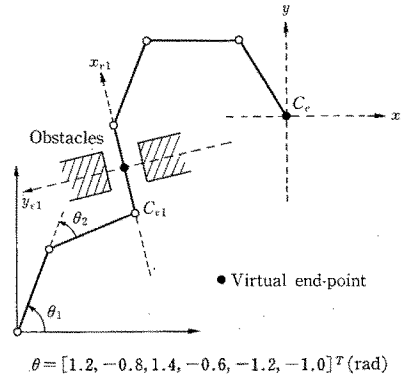


Fig. 3 A six-link planar manipulator close to the obstacles (a non-singular case)

マニピュレータの手先は作業座標系の x 方向にはやわらかく (0.005 m/N), y 方向, 手先の回転方向にはかたく (それぞれ 0.001 m/N, 0.001 rad/Nm) して作業を行っている. また, 第3リンクは障害物にはさまれている. そこで, 障害物との接触を回避するために第3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) するような, 目標仮想手先コンプライアンスを実現することを考える. すなわち, 目標コンプライアンス C^* は,

$C^* = \text{diag} [0.005 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.005 \ 0.001 \ 0.001]$ のようになる. ただし, $\text{diag} [\]$ は対角行列を表わす. この場合, 目標コンプライアンスは二つの手先に各3自由度, 計6自由度で, 関節自由度は6であるから(7)式の行列 J は正則となり, (27)式と(28)式は一致する.

以上の条件のもとで, マニピュレータの関節駆動トルク τ を, (27)式から求めた関節剛性行列 K_j を用いて,

$$\tau = K_j d\theta + B_j \dot{\theta} \tag{30}$$

のように制御し, 外部からアームに力 f が加わったときのアームの姿勢変化を求めた. ここで $B_j \in R^{m \times m}$ は正定な粘性摩擦行列である. なお, アームの動力学計算にはアッペル法を用い¹³⁾, 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.

Table 1 Link parameters

	Link i ($i=1, \dots, 6$)
Length (m)	0.2
Mass (kg)	1.57
Center of mass (m)	0.1
Moment of inertia (kg·m ²)	10.0

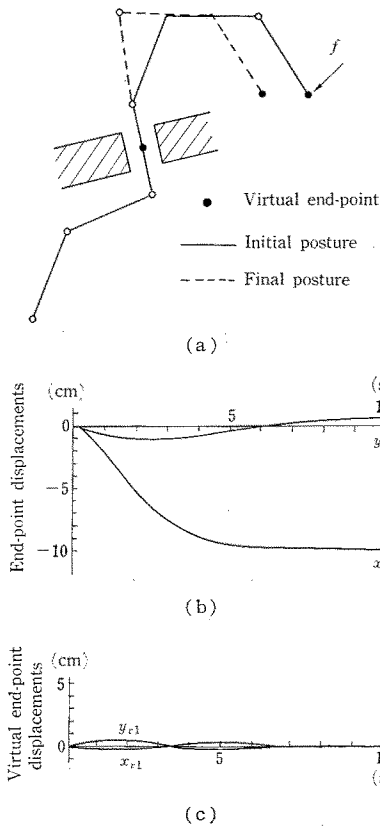


Fig. 4 The Response of the manipulator for disturbance force using the multi-point compliance control

Fig. 4 は実アームの手先に $f = [-20, -20, 0]^T$ (N) (作業座標系) の外力が加わった場合のアームの応答である。Fig. 4(a)はアームの初期姿勢と最終姿勢を、Fig. 4(b), (c)はそれぞれ実アームの手先変位と仮想手先変位の時間変化を表わしている。一方、Fig. 5 は目標コンプライアンスを実アームの手先だけに限定して能動的剛性制御を適用した結果である。実アームの手先の動きは、Fig. 4, Fig. 5 とほぼ一致しているが、Fig. 5 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る。関節自由度の増加に伴い、各関節の剛性が小さくなる現象是能動的剛性制御の特徴である。これに対して、本論文で提案した多点コンプライアンス制御を用いると (Fig. 4), 仮想手先のコンプライアンスが調節可能になるため、アームは障害物方向にはほとんど変位していない。実アームの関節自由度の冗長性を有効に利用できることがわかる。

つぎに Fig. 3 と同じマニピュレータを対象にして障害物の数を増加させてみる。Fig. 6 に示すように

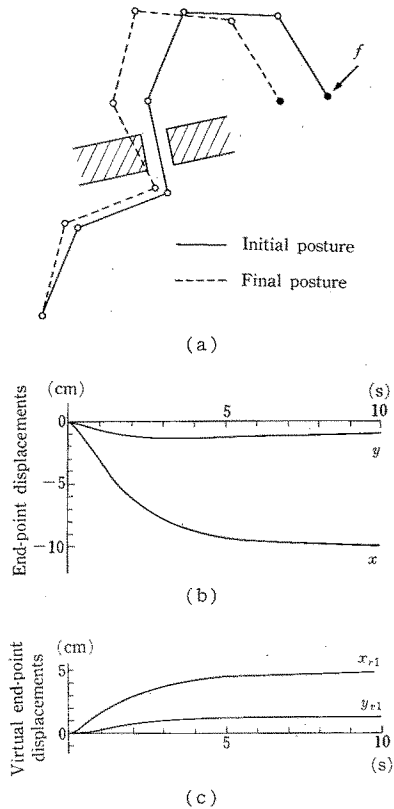
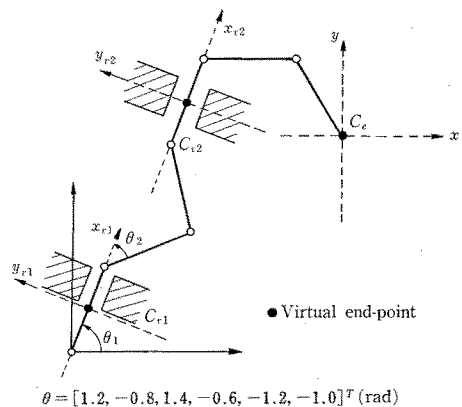


Fig. 5 The Response of the manipulator for disturbance force using the active stiffness control



$$\theta = [1.2, -0.8, 1.4, -0.6, -1.2, -1.0]^T \text{ (rad)}$$

Fig. 6 A six-link planar manipulator close to the obstacles (an over-constrained case)

今度は第1リンクと第4リンクが障害物にはさまれている。そこで第1リンクの中間と第4リンクの中間に仮想手先を設け、Fig. 3 と同じ目標仮想手先コンプライアンスを与えた。このとき、目標コンプライアンスは9自由度、関節自由度は6であるから過拘束問題

Table 2 Compliance matrices

	Desired values	Computed values (using Eq. (6))
Actual end-point Compliance, C_e	$\begin{bmatrix} 0.005 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.001 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00496 & -0.00000 & -0.02947 \\ -0.00000 & 0.00100 & -0.00000 \\ 0.02947 & -0.00000 & 0.22906 \end{bmatrix}$
Virtual end-point Compliance, C_{v1}	$\begin{bmatrix} 0.005 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.001 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00001 & 0.00010 \\ 0.00000 & 0.00010 & 0.00099 \end{bmatrix}$
Virtual end-point Compliance, C_{v2}	$\begin{bmatrix} 0.005 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.001 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.00500 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00100 & -0.00000 \\ 0.00000 & -0.00000 & 0.00100 \end{bmatrix}$
Joint compliance, C_j (using Eq. (20))		
$\begin{bmatrix} 0.00099 & -0.00156 & -0.00015 & 0.00072 & 0.00000 & -0.00000 \\ -0.00156 & 0.09842 & -0.15921 & 0.06206 & -0.08661 & 0.05763 \\ -0.00015 & -0.15921 & 0.29882 & -0.13953 & 0.13159 & -0.04444 \\ 0.00072 & 0.06206 & -0.13953 & 0.07811 & -0.04645 & -0.01216 \\ 0.00000 & -0.08661 & 0.13159 & -0.04645 & 0.16262 & -0.24556 \\ -0.00000 & 0.05763 & -0.04444 & -0.01216 & -0.24556 & 0.55745 \end{bmatrix}$		

となる。

Table 2 に(20)式から求めた関節コンプライアンス行列 C_j 、および(6)式から求めた実際に各手先に実現されるコンプライアンス行列 C_e 、 C_{v1} 、 C_{v2} を示す。(20)式に含まれる重み行列 W には

$$W = \text{diag} [100, 10, 1, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000]^T$$

を用い、仮想手先コンプライアンス、実アーム手先の x, y 方向を優先するような解を求めた。表より第4リンクに設定した仮想手先のコンプライアンス C_{v2} 、実アーム手先の x, y 方向のコンプライアンスは目標値にほぼ一致しており、重み行列 W がうまく働いていることがわかる。なお、第1リンクに設定した仮想手先コンプライアンスは回転方向以外は目標に一致していないが、これはこの仮想アームの関節自由度が1しかないためである。

Fig. 7 は第4リンクに設定した仮想手先に外力 $f = [-10, 10, 0]^T$ (N) (仮想手先座標系) が作用した場合のアームの姿勢変化である。障害物方向への仮想手先の変位は小さく、他の方向への動きによって外力に応答していることがわかる。このようなアームの動きは能動的剛性制御では実現することはできない。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ス動作を要求されるような作業に有効である。

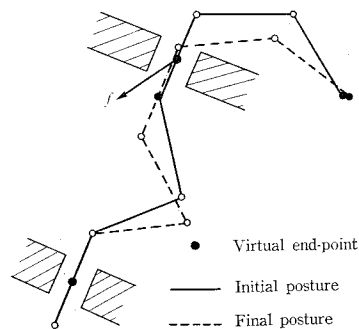


Fig. 7 The Response of the manipulator for disturbance force using the multi-point compliance control (an over-constrained case)

5. まとめ

本論文では関節自由度の冗長性を積極的に利用して、マニピュレータの手先のコンプライアンスだけでなく、仮想的に設定した手先のコンプライアンスをも同時に調節できる多点コンプライアンス制御法を提案した。この方法は仮想手先の設定に伴うさまざまな運動学的な状況に対応することができ、障害物などにより作業範囲が限られているような場合や手先だけでなく途中のリンクにも作業が要求されるような場合に有効である。このような作業状況は、化学プラントなどの製造現場や特殊環境などでよく見られ、非常に興味深い。

なお、本論文ではマニピュレータの手先や仮想手先が対象物などの外部環境に拘束されている場合は取り

扱わなかった。このような場合、仮想手先のコンプライアンスは、(6)式で表現される仮想アームの関節コンプライアンスだけでなく、残りの関節コンプライアンスや対象物のもつコンプライアンスにも影響される。すなわち、仮想手先から見たアームの構造は多指ハンドのようなパラレルリンク構造となり、本論文で考察したようなシリアルリンク構造としての取り扱いができなくなる。今後、このような手先拘束が存在する場合の多点コンプライアンス制御や作業目的、作業環境に応じた目標コンプライアンスの設定法などを明らかにするとともに、関節コンプライアンス行列の正定値性、インピーダンス制御への拡張などについて考察する必要があると考えている。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(62460142, 01750399)の研究助成によるもので、ここに改めて謝意を表します。

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) 末広, 高瀬: 直接計算方式による作業座標サーボに基づくマニピュレーションシステム, 日本ロボット学会誌, **3-2**, 95/105 (1984)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) A. Liegeois: Automatic Supervisory Control of Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-7-12**, 861/871 (1977)
- 9) J. M. Hollerbach and K. C. Suh: Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE J. of Robotics and Automation, **RA-3-4**, 308/314 (1984)
- 10) M. Vukobratovic and M. Kircanski: A Dynamic Approach to Normal Trajectory Synthesis for Redundant Manipulators, IEEE Trans., **SMC-14-4**, 580/586 (1984)
- 11) 辻, 高橋, 伊藤: 冗長性を利用したマニピュレータの関節コンプライアンス調節, 計測自動制御学会論文集, **26-5**, 557/563 (1990)
- 12) 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)
- 13) 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)