弾性部の導入による産業用ロボットの協調作業への適用

大 隅 久*¹ 新 井 民 夫*²

A Method for Introducing Industrial Robots to Cooperative Tasks

Hisashi Osumi*¹ and Tamio Arai*²

This paper proposes a simple method for applying popular PID position-controlled industrial robots to cooperative tasks with force interactions among them. For handling single object by multiple robots, force control using torque controllers is generally used to avoid excessive inner forces, however, a popular industrial robot has a PID position-controller. Thus it is usually very difficult to realize cooperative control with industrial robots. This paper proposes a method to introduce flexible mechanisms at the tips of robots to control forces at the end-effectors. After the installation of flexible mechanisms at the tips of robots, a closed-loop structure including flexible parts is generated. First, the number of degrees of freedom of the closed-loop structure is analyzed by modeling the installed flexibility as virtual joint variables. Next, the minimum number of springs, required to avoid both excessive inner forces and vibrations caused by the installed flexibility, are derived. Finally, the minimum number of actuators to control the object in arbitrary directions of 3 D space is derived for installed robots.

Key Words: Industrial Robot, PID Position Control, Flexible Mechanism, Closed Loop Mechanism, Virtual Joint Model

1. 序 論

人間は2つの腕を利用することにより、片方の腕だけでは持ち上げることのできない重い荷物を持ち上げる、ピンの蓋を開ける、物を持ち替えるといった様々な作業を行なう。ロボットにおいても複数で協調作業を行なうことにより、単体では不可能な重量物ハンドリング、大型対象物のハンドリング等が可能となる。また、組付け対象と部品をそれぞれ別のロボットが把持することで、組立ラインの周辺装置を大幅に削減できるといったことが期待できる。

複数のマニピュレータが同一対象物をハンドリングする協調作業では、対象物とそれを把持するマニピュレータが閉ループ機構を構成する。このため、各マニピュレータがそれぞれ位置制御されると、誤差が発生した際に過大な内力が発生し、対象物を落下、あるいは破損する恐れがある。このため協調作業を実現するには、それぞれのマニピュレータ先端での力制御が必要となる。

このため協調制御系の設計問題においては通常トルク制御系

の利用を前提とし[1]、コンプライアンス制御を応用したもの[2][3]、ハイブリッド制御を利用したもの[4][5]、分解加速度制御を利用したもの等[8]~[11]が提案されている。しかし、一般に普及している既存の産業用ロボットでは関節の摩擦、減速機が存在等によりトルク制御が事実上不可能に近く、これまで提案されてきた研究の成果が市販の産業用ロボットで実用化された例は非常に少ない。[3]では、それぞれのロボットに1型の制御系を構成しておき、コントローラに与える指令値をセンサフィードバックにより修正することでロボットにコンプライアンスを与えている。しかし、ロボットの構造と対象物の剛性が共に高い場合、目標力の誤差を位置指令の修正で補償するには制御サンプリングを極めて短くする必要がある。また[6]では制御システムを並列処理により高速化することにより、トルク制御ベースの協調制御を実現しているが、システムが大掛かりとなり汎用性を考えると実用的とは言い難い。

一方、産業用ロボットは自由空間での位置制御に関してはPID位置制御系の利用により非常に高い性能を有しており、この特性を利用した協調制御手法を確立することは協調制御の実用化のために非常に有効である。PID位置制御系の利用を前提とすると、幾何的な変位により力を制御する必要性から、ロボットへの弾性部の導入が不可欠となる。[12]ではフォロワロボットの手先に導入された力センサが弾性部の役割となって

原稿受付 1993年12月3日

*¹中央大学理工学部

*²東京大学工学部

*¹Faculty of Science and Technology, Chuo University

*²Faculty of Engineering, University of Tokyo

おり、フォロワはたわみが0となるようフィードバック制御されている。[13]では、それぞれのロボット先端に機構的なコンプライアンスを導入し、速度制御系を利用した擬似的な加速度制御によりロボットを制御することで、ロボット間の内力の変動と物体の振動を制御する手法が提案されているが、実験は1自由度方向のみで行われていない。弾性部のたわみを利用して力を制御する場合には、たわみの量自体が制御対象となり、機構の自由度を表す幾何的な変数として取扱う必要がある。しかし、これまで弾性部のたわみを機構の自由度として利用した研究は少ない[14][15]。

本研究は、実用的な立場から産業用ロボットの協調作業への利用を可能とするための手法を確立することを目的とする。まず、機構の持つ弾性部のたわみを自由度としてとらえるため、機構の剛性行列から等価関節モデルを導出する手法を示す。次に位置制御系を有する2台の機構を協調可能とするために導入の必要な弾性機構の条件、弾性機構を内部に含む閉ループ機構の自由度の算出手順、更に対象物を6方向に駆動できる条件をそれぞれ明らかにする。この結果を用いて、剛性行列の既知な一般の機構との協調に産業用ロボットを利用するための弾性機構の配置方法、ロボットに必要となる自由度決定の指針を示す。本研究の指針により、対象物に振動を生じることなく、しかも内力も過大とならない協調系が、位置制御系を有する産業用ロボットにより簡単に実現可能となる。

2. 弾性部のモデル化

2.1 等価関節モデル

2台の位置制御系を有するマニピュレータにより協調制御を実現するためには、マニピュレータ間に弾性機構が存在しなければならない。本章では、機構の弾性によるたわみを等価関節としてモデル化する手順を示す。

一般に、機構の剛性はある方向には柔らかいがその他の方向には固いといった方向性を有している。本論では柔らかい方向に発生するたわみのみを弾性機構の自由度とみなし、このたわみを仮想的な関節（以下等価関節と呼ぶ）とリンクにより表現する。直感的には例えば Fig. 1(a)の平行板バネでは、等価関節としてたわみ方向の直動関節1つを、また Fig. 1(b)の低剛性アームでは3つの回転関節と2つの直動関節を当てはめるこ

(a) Parallel beam

(b) Flexible arm

Fig. 1 Virtual joint and link

とができる。

2.2 剛性行列に基づいた等価関節モデル導出

ある機構の2点間の剛性が、基準座標系において一般的な剛性行列 $K \in R^{6 \times 6}$ で与えられたとする。 K は剛性行列なので実対称行列であり、6つの直交する固有ベクトル u_i ($i=1 \sim 6$) を持つ。よってこれら6つの固有ベクトルを列にもつ 6×6 の直交行列 U を用いることにより、 K を式(1)のように対角化することができる。

$$U^{-1}KU = \Lambda = \text{diag}(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6) \quad (1)$$

ただし λ_i ($i=1 \dots 6$) は K の固有値である。

ここで剛性の定義された点に外力ベクトル f_e が加えられたとすると機構の変位 Δx_0 は

$$\Delta x_0 = K^{-1} f_e \quad (2)$$

となるので、各固有ベクトル方向のたわみ Δx_i を要素に持つたわみベクトル Δx_d は

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= U^{-1} \Delta x_0 = U^{-1} K^{-1} f_e \\ &= \Lambda^{-1} U^{-1} f_e \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで

$$f_i = U^{-1} f_e$$

ただし

$$f_i = [f_{i1} \ f_{i2} \ f_{i3} \ f_{i4} \ f_{i5} \ f_{i6}]^T$$

とすると、 f_{ii} は u_i 方向にかかる力の大きさを表しており、式(3)の各成分は

$$\Delta x_i = \lambda_i^{-1} f_{ii} \quad (4)$$

となる。つまり λ_i は u_i 方向への剛性を表している。従って、固有値の大きさを調べることにより、機構の柔らかい方向、固い方向が決定できる。

機構に力が作用すると、機構の固さに拘らず変位が発生する。しかし、機構のたわみを積極的に自由度として利用する立場からは、変位の大きさが非常に重要な意味を持つ。例えば Fig. 1(b)に示した細長い棒の場合、引張り剛性と横方向の剛性では引張り剛性の方が遙かに剛性が高い。従って、“棒の先端は横方向には動かせるが軸方向には動かすことができない”とみなすのが現実的である。以下の等価関節モデルの導出過程においては、ある一定の固さを表現する値 λ_s を基準として、固有ベクトルを固い方向、柔らかい方向に分離する。

さて、 λ_s より小さい固有値を λ_{fj} ($j=1..m, m \leq 6$)、残りの固有値を λ_{rj} ($j=1..6-m$) とし、それぞれに対応した固有ベクトルを v_{fj}, v_{rj} とする。また V_f, V_r を

$$\begin{aligned} V_f &= [v_{f1} \ \dots \ v_{fm}] \\ V_r &= [v_{r1} \ \dots \ v_{r(6-m)}] \end{aligned} \quad (5)$$

とし V_f の縦ベクトルの張る空間 S_f を弾性体空間、 V_r の縦ベクトルの張る空間 S_r を剛体空間と定義する。なお、 λ_s はマニピュレータが発生できる最大力を加えた時に機構の発生する変位と、自由度として利用したい変位の大きさから決定することができる。

以上で一般の機構の持つ弾性体空間、剛体空間が求まった。以下の議論では、機構は弾性体空間の1組の直交基底方向 (f_m 次元) のみにそれぞれ弾性を有する f_m 個のバネを有するものとする。

3. 位置制御系を有する機構間に必要な弾性機構

2 台のマニピュレータのエンドイフェクタ間に位置決め誤差が発生しても、エンドイフェクタ間に存在するバネのたわみにより誤差を吸収できれば過大な内力が発生することはない。しかし、バネを導入し過ぎると、外乱による振動や対象物の重力によるバネのたわみにより、対象物に位置決め誤差が発生する。それぞれのマニピュレータが位置制御系により制御されても対象物に働く内力が過大とならず、しかもバネの導入に起因した振動や位置決め誤差が発生しないバネの導入法は、定理 1 にまとめることができる。

[定理 1] 先端に弾性を有する 2 つの PID 位置制御機構が同一対象物を把持点において自由度を残さず把持した系を考える。この系において、① 機構間の相対的な位置決め誤差による内力の変動が過大とならず、② 対象物に任意の外力が作用しても弾性に起因した対象物の位置・姿勢誤差が発生しない、ための必要十分条件は、『1 次独立な方向に弾性を有する 6 つのバネが機構間に存在すること』である。

証明) 2 つのマニピュレータ間の相対位置決め誤差を $\Delta x_e \in R^{6 \times 1}$ とする。また、バネが n 本存在すると仮定し、このバネの弾性方向の単位ベクトルをそれぞれ $s_i \in R^{6 \times 1}$ ($i=1 \sim n$)、バネの変位を d_i ($i=1 \sim n$) とする (Fig. 2)。マニピュレータは剛体なので、相対誤差 Δx_e はバネのたわみのみによって実現されると仮定する。従って式 (6) が成立つ。

$$\begin{aligned}\Delta x_e &= d_1 s_1 + d_2 s_2 + \cdots + d_n s_n \\ &= [s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_n] [d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_n]^T \\ &= S d\end{aligned}\quad (6)$$

ただし

$$\begin{aligned}S &= [s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_n] \\ d &= [d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_n]\end{aligned}$$

式 (6) より、過大な内力が発生しない条件、すなわち任意の方向の Δx_e を実現することのできるバネのたわみ d が存在するためには、 S がフルランク、すなわち n 個のバネの中に 6 つの 1 次独立なバネの組が存在する必要がある。逆に S がフルランクであれば、 d により任意の方向の Δx_e が実現できる。

次に 1 次独立なバネが 6 つのみ存在する場合を考える。この時、式 (1) の S は 6×6 の正方行列となり S^{-1} が存在する。従って、 $d \in R^{6 \times 1}$ は

$$d = S^{-1} \Delta x_e \quad (7)$$

として、 Δx_e のみの関数として算出される。つまり、2 つのマニピュレータの相対位置決め誤差が決定されると 6 つのバネのたわみも対象物に作用する力の大きさは独立に一意に決定さ

Fig. 2 Installation of linearly independent springs

れ、外力により与えられる拘束条件によってバネのたわみが変わることはない。(証明終わり)

以上の結果より、産業用ロボットを別の機構との協調制御に利用するためには、ロボット先端と協調相手との間に 6 つの 1 次独立なバネが存在するよう、ロボット先端に弾性部を導入すればよい。2 章の結果より、協調相手の剛性解析によりバネを求める。この結果得られるバネが m 個で、それぞれ $v_{f1} \sim v_{fm}$ 方向に存在したとすると、ロボット先端に導入するバネは $(6-m)$ 個となる。これらのバネが弾性を有する方向ベクトルをそれぞれ $a_1 \sim a_{(6-m)}$ とすると、

$$\text{rank}([v_{f1} \ \cdots \ v_{fm} \ a_1 \ \cdots \ a_{(6-m)}]) = 6 \quad (8)$$

となるようバネを導入すればよい。

4. 弾性部を内部に含む閉ループ系の可動空間

3 章において、位置制御系を有する機構間に必要となる弾性機構の満たすべき条件を明らかにした。これらは位置決め剛性無限大の機構間の相対位置誤差に起因する内力が過大とならないための条件であったが、対象物の運動制御を 3 次元空間の 6 自由度方向で実現するためには対象物の可動空間が 6 となるための条件についての考察が必要となる。

本章では、協調相手となるマニピュレータと、これから導入されるマニピュレータが有しているアクチュエータの持つ自由度を考慮して、対象物の可動空間を算出する。

4.1 幾何的拘束条件と力学的拘束条件

閉ループ系の各関節、等価関節に課せられる幾何的拘束条件を導出するため、一方のマニピュレータのベースをベース、他方のマニピュレータのベースを手先とするマニピュレータを考える。この関節角ベクトルの微小変位とマニピュレータ先端の微小変位の関係を表すヤコビ行列を $J_a \in R^{6 \times (r_1 + f_1 + r_2 + f_2)}$ とする。ただし r_1, r_2 はそれぞれのマニピュレータの本来の関節数を、 f_1, f_2 は先端に付加された弾性機構の等価関節数である。マニピュレータ A の先端はマニピュレータ 2 のベースであるから、固定されている。従って式 (9) が成立つ。

$$J_a \Delta \theta = 0 \quad (9)$$

ただし

$$\Delta \theta = [\theta_1^T \ \theta_{f1}^T \ \theta_2^T \ \theta_{f2}^T]^T$$

で、 $\theta_i \in R^{r_i}$ 、 $\theta_{fi} \in R^{f_i}$ はそれぞれマニピュレータ i の本来の関節角ベクトル、等価関節ベクトルを表す。式 (9) が関節角ベクトルの微小変位に課せられる幾何的拘束条件を表す式である。一方等価関節の値は、力の釣合を満たすようにしか実現できない。Fig. 3 の例では、(a) の場合片方のマニピュレータの位置を動かすことにより、バネの変位 $\Delta \theta_2$ を任意の値に設定できる。これに対して (b) では、ばねは 2 つ存在するが $\Delta \theta_2$ と $\Delta \theta_1$ を独立に設定することができない。即ち等価関節は 2 つあるが独立な関節は 1 つである。このような等価関節変数に課せられる力学的拘束条件は、両方のバネが共に弾性体として存在する空間においてのみ必要となる。重力場においてこの条件は式 (10) で表される。

$$H \Delta \theta = P_2 m g' \quad (10)$$

$$H = [0 \ P_{12} K_1 V_{f1} \ 0 \ P_{12} K_2 V_{f2}]$$

$$P_2 = 2 P_{f1} (P_{f1} + P_{f2})^* P_{f2}$$

Fig. 3 Force constraint

$$P_{fi} = V_{fi} V_{fi}^T \quad (i=1, 2)$$

式(10)は、2つの機構の弾性空間の交わりの空間において、弾性機構が発生する力と重力が釣り合うことを表している。 V_{fi} はマニピュレータ*i*側の弾性体空間の対象物座標系表示による基底ベクトルよりなる行列で、 P_{fi} はマニピュレータ*i*の弾性体空間への直交射影行列を表す。 $\mathbf{g}'$ は重力加速度ベクトルを対象物座標系で表示したものである。また P_{12} は対象物座標系における2つの弾性体空間の交わりの空間への直交射影行列で、 $(P_{f1} + P_{f2})^+$ は $(P_{f1} + P_{f2})$ の擬似逆行列を表す[16]。なお定理1の条件が満たされている場合には $P_{12}=0$ となり、式(10)は不要となる。

4.2 可動空間の算出法

式(9)、(10)で表される幾何的拘束条件、力学的拘束条件をまとめると

$$W\Delta\theta = C \quad (11)$$

ただし

$$W = \begin{bmatrix} J_a \\ H \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{12} m \mathbf{g}' \end{bmatrix}$$

となり、2つの拘束条件を満たしたまま発生し得る関節角空間内の微小変位ベクトル $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = W^+ C + P_d \mathbf{z}, \quad P_d = I - W^+ W \quad (12)$$

と表すことができる。ただし $\mathbf{z}$ は任意ベクトルで、 W^+ は W の擬似逆行列である。式(12)の右辺第1項は重力により発生する弾性部のたわみ、即ち等価関節の変位を表し、定理1が満たされ $P_{12}=0$ となる場合には $\mathbf{0}$ となる。また定理1が満たされていない場合にもその値は現在の姿勢により一意に決定される。これに対し第2項が関節角の制御により能動的に実現できる微小移動ベクトルを表す項である。即ち関節角空間の可動空間 S は P_d の張る空間として、また閉ループ機構の自由度は P_d のランクを調べることで求められる。 P_d のランクを d とすると、 S の基底となり得る $\Delta\theta$ の d 個の要素の組を指定することにより、閉ループ機構の姿勢を一意に決定できる。

ここで関節角座標系と対象物座標系間のヤコビ行列を J_0 とすると、対象物座標系の微小移動ベクトル $\Delta\mathbf{x}_0$ は

$$\Delta\mathbf{x}_0 = J_0 \Delta\theta = J_0 W^+ C + J_0 P_d \mathbf{z} \quad (13)$$

Fig. 4 Conditions satisfying required performance

となる。

以上より、対象物座標系の可動空間は $J_0 P_d$ の張る空間として求まる。このランクが6となれば対象物に任意の位置・姿勢を取らせることが可能となる。

4.3 可動空間が6となる機構的条件

$J_0 P_d$ のランクを6とすることのできる必要最小限の関節数を機構的に考察すると、以下の定理2が導かれる。

[定理2] 必要最小限の関節とバネで対象物の可動空間を6次元とする必要十分条件は以下の①、②を同時に満たすことである。

- ① 各ロボットの等価関節を含めた機構的自由度がそれぞれ6で、ヤコビ行列のランクが6である。
- ② 各々のロボット先端の弾性機構同士が、共通の弾性体空間を持たない。

証明)

十分) ①、②の条件が満たされていると、全12自由度には幾何的な6つの拘束条件しか課せられないので、閉ループ機構の自由度が6となる。つまり、6つの関節角値を設定すると残りの6つの関節角値は一意に決る。この6つの関節角としてロボット1の6関節を選ぶことができるのは①より明らかなので、ロボット1の先端、即ち対象物の位置・姿勢6成分が任意に制御できる。

必要) 対象物を6方向に動かすための必要条件として①は明らかである。②は力学拘束が存在しないことを意味している。関節角ベクトルの可動空間が幾何拘束、力学拘束を共に満たす空間であるから力学拘束は少ないほうが良い。一方十分条件より力学拘束が必要ないことは明らかであり、必要最小限のバネで実現するためには②が必要なことも明らかである。

(証明終わり)

この結果(Fig. 4 参照)を利用すると、例えば3自由度を有する2つのマニピュレータの先に3つずつバネが付加されているような場合にも、お互いのバネが共通空間を持っていないければ、対象物を6自由度方向に動かすことが可能となる。

5. 産業用ロボット導入の指針

5.1 産業用ロボット導入のための弾性機構の設計手順

本章では、産業用ロボットを他の機構(以下協調相手と呼ぶ)と協調させて、対象物を6自由度方向に駆動するシステムを想定する。これまで、3章において2台の位置制御系を有する機

構間に必要となるバネの条件, 4章において対象物の可動空間を6とする条件を明らかにした. ここではこれらの結果をまとめ, 導入する産業用ロボットとして必要最小限の自由度のものを利用し協調を実現するための手順を示す.

手順は以下の通りである.

- 1) 協調相手の機構の剛性を解析し, 相手機構の有する弾性体空間とその次元を求める.
 - 2) 協調相手の機構の剛体空間の次元の数だけ, ロボット先端にバネを導入する. その際両方の弾性体空間の基底を合わせた6つのベクトルが6次元空間の基底となるようにバネを配置する.
 - 3) ロボットに必要となる最低限の自由度が, ロボット先端に導入する弾性機構のバネの数を6から引いた数として求める.
 - 4) ロボットと弾性機構の等価関節を合せた6自由度が退化状態とならないような関節配置となるようロボットの構造を決定する.
- 1)~4)の手順により, 最低限の自由度の産業用ロボットを用いて, 対象物に過大な内力をかけずしかも対象物に振動の発生しない協調系が実現できる.

なお, 本手法は弾性機構の変位も可動空間の基底として利用しており, その可動範囲は考慮していない. 即ち, 対象物を動かす空間は6次元であってもその領域はバネがたわみうる範囲であることを前提としている. 従って, 対象物をバネのたわみ量よりはるかに大きな範囲で動かす必要がある場合には, 6つのバネを確保した上で, 更に, 可動範囲の小さなバネの導入された方向を可動方向とするアクチュエータをロボット側に追加することが必要となる.

5.2 平面内2次元空間の例

Fig. 5に, 平面内2次元空間において2台の1自由度マニピュレータにより質点の運動制御を行う例を示す.

左側のマニピュレータ1はアクチュエータを有する直動関節と, 弾性を有する受動関節を持つ. 受動関節を含むこのマニピュレータのヤコビ行列は, 受動関節を挟む2つのリンクが一直線とならなければランクが2となる. 図では受動関節の角度が45度となっており, この条件が満たされている. この時, マニピュレータ1の弾性体空間の次元は1で, その基底ベクトル v_1 は対象物座標系において

$$v_1 = [1/\sqrt{2} \quad -1/\sqrt{2}]^T$$

である.

これに対して, マニピュレータ1と協調するためのマニピュレータ2には v_1 と一次独立な弾性体空間が必要となる. このような弾性体空間を持ち, 手先でのヤコビ行列が2となる機構としてFig. 5を考えることができる. この時のマニピュレータ2の弾性体空間の基底 a_1 は

$$a_1 = [1/\sqrt{2} \quad 1/\sqrt{2}]^T$$

となるので,

$$\text{rank}([v_1 \ a_1]) = 2$$

となり, マニピュレータ2の手先でのヤコビ行列のランクが2となるのも明らかで, 定理1), 2)の条件が満たされる. 従っ

Fig. 5 Mechanical example in two dimensional space

Fig. 6 Mechanical example in three dimensional space

てこの例では, マニピュレータ1もマニピュレータ2もアクチュエータは共に x 方向にしか存在しないにも拘らず, 対象物を2次元空間で駆動することができる.

5.3 平面内3次元空間の例

次に平面内3自由度空間の例をFig. 6に示す. この例では, マニピュレータ1の弾性空間は2次元で, 基底ベクトル v_{11}, v_{12} として

$$v_{11} = [0 \quad 1 \quad 0]^T$$

$$v_{12} = \alpha [0 \quad L_1 \quad 1]^T$$

ただし

$$\alpha = 1/\sqrt{(1+L_1^2)}$$

を選ぶことができる. また, アクチュエータは x 軸方向の直動関節で, これに対応したヤコビ行列の縦ベクトル j_1 は

$$j_1 = [1 \quad 0 \quad 0]^T$$

となる. 従って, バネ2つを含むマニピュレータ1のヤコビ行列 $[j_1 \ v_{11} \ v_{12}]$ のランクは3となる.

マニピュレータ2の弾性体空間 a_1 は x 軸方向のみで,

$$\text{rank}([v_{11} \ v_{12} \ a_1]) = 3$$

となるので内力が過大となることがない. また, マニピュレータ2のアクチュエータを有する関節は2つで, それぞれに対応するヤコビ行列の縦ベクトル j_{21}, j_{22} はそれぞれ

$$j_{21} = [0 \quad 1 \quad 0]^T$$

$$j_{22} = \beta [0 \quad -L_2 \quad 1]^T, \quad \beta = 1/\sqrt{(1+L_2^2)}$$

となる. よってマニピュレータ2のヤコビ行列 $[j_{21} \ j_{22} \ a_2]$ のランクも3となるので, 定理1), 2)が満たされた.

これより, マニピュレータ1との協調に利用するためのマニピュレータとして2自由度のものとバネを1つ用意すればよいことがわかる.

6. 結 論

先端に弾性機構の付加された2つのマニピュレータが協調して同一対象物をハンドリングする際に構成される機構の運動学的な解析を以下の手順により行なった。

- PID位置制御系を有する産業用ロボットの協調制御において、ロボット間の相対位置決め誤差が発生しても過大な内力が発生せず、かつ対象物を外力に対して剛に保持するためには、6つの一次独立なバネを利用することが必要であることを示した。
 - 弾性機構の持つ剛性の方向性に着目し、機構の剛性行列を基に位置・姿勢の6自由度方向を剛体空間、弾性体空間へ分離した。
 - 弾性体空間に発生するたわみを等価関節変数によりモデル化した。
 - 等価関節変数を含む関節角空間に対し幾何的拘束条件、力学的拘束条件を共に満たす部分空間を算出する方法を示した。
- これらの結果より、
- 1) 弾性機構のたわみを考慮した協調系の機構的な自由度を明らかにした。
 - 2) 三次元空間の位置・姿勢6自由度方向全てに対して対象物の運動が制御可能となる機構的条件を明らかにした。
 - 3) PID位置コントローラを有する一般的な産業用ロボットを協調作業に利用するためのロボットの自由度、導入すべき弾性機構の特性を示した。

参 考 文 献

- [1] 小菅: “複数のマニピュレータによる協調制御”, 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 4, pp. 13-17, 1992.
- [2] 黒野: “一対の人工の手の協調制御”, Journal of the J. S. M. E., vol. 78, no. 682, pp. 804-810, Sept., 1975.

- [3] 小菅, 古賀, 古田, 野先: “仮想内部モデルに基づくロボットアームの協調制御”, 計測自動制御学会論文集, vol. 27, no. 1, 93-100, 1991.
- [4] M. T. Mason: “Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators,” IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, vol. SMC-11, no. 6, 418-432, 1981.
- [5] Uchiyama and Dauchez: “A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 350-356, 1988.
- [6] N. Xi, T. J. Tarn and A. K. Bejczy: “Event-Based Planning and Control for Multi-robot Coordination,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 251-258, 1993.
- [7] C. D. Kopf and T. Yabuta: “Experimental Comparison of Master/Slave and Hybrid Two Arm Position/Force Control,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1633-1637, 1988.
- [8] 中村, 永井, 吉川: “複数のロボット機構による協調的あやつりの力学”, 日本ロボット学会誌, vol. 5, no. 5, pp. 23-32, 1986.
- [9] Tarn, Bejczy and Yun: “Design of dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms Closed Chain Formulation,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 7-13, 1987.
- [10] Zheng and Luh: “Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 344-349, 1988.
- [11] M. Hashimoto and F. Oba: “Dynamic Control Approach for Motion Coordination of Multiple Wheeled Mobile Robots Transporting a Single Object,” Proc. of IROS' 93, pp. 1944-1951, 1993.
- [12] E. Nakano and S. Ozaki: “Cooperational Control of the Anthropomorphic Manipulator 'MELARM,'” Proc. 4th Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 251-260, 1974.
- [13] H. Osumi, T. Arai and E. Yoshida: “Cooperative Control between Multiple Manipulators with Flexibility,” Proc. of IROS' 93, pp. 1935-1940, 1993.
- [14] T. Arai and H. Osumi: “Construction System of Heavy Parts by the Coordinated control between a Crane and a Robot,” Proc. 9th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction, vol. 2, pp. 879-886, 1992.
- [15] 東, 酒田, 鈴木, 伊東: “フレキシブルアームの伸縮動作特性”, 1993年度精密工学会春季大会予稿集, vol. 1, pp. 385-386, 1993.
- [16] 柳井, 竹内: “射影行列・一般逆行列・特値分解”, 東京大学出版会, 1983.

大隅 久 (Hisashi Osumi)

1962年3月5日生。1987年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。1988年東京大学工学部精密機械工学科助手。1991年同学科講師。1993年同学科助教授。1994年中央大学理工学部精密機械工学科助教授。ロボットの機構、制御に関する研究に従事。精密工学会、日本機械学会、計測自動制御学会、IEEE会員。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)

新井民夫 (Tamio Arai)

1947年8月4日生。70年東京大学工学部精密機械工学科卒, 77年同博士課程修了, 工学博士。87年東京大学工学部精密機械工学科教授。79年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立, 移動ロボットなどの研究に従事。精密工学会理事, 自動化

推進協会会長。

(日本ロボット学会正会員)