PID 位置制御系を有する 2 台の産業用ロボットの協調システム*

大 隅 久^{*1}, 加 賀 谷 学^{*2}
藤 林 充 幸^{*2}, 小 野 学^{*2}

Cooperative System of Two Industrial Robots with PID Position Controllers

Hisashi OSUMI^{*3}, Manabu KAGATANI,
Misuyuki FUJIBAYASHI and Manabu ONO^{*3} Chuo University, Dept. of Precision Mechanics, 1-13-27, Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan

We propose a strategy for cooperation of multiple PID position-controlled manipulators. Free joint mechanisms are installed at the tip of each manipulator to avoid excessive inner forces due to mutual positioning errors of manipulators. Since the cooperative system has kinematic redundancy due to additional passive joints for cooperation, a way to exploit the redundant degrees of freedom is proposed based on the kinematic analysis of the cooperative system. A cooperative mechanism consisting of four passive joints with electro-magnetic brakes is developed and the effectiveness of proposed algorithm is verified by experiments using two industrial robots.

Key Words: Manipulator, Industrial Robot, Positioning, Passive Joint, Cooperation, Redundancy

1. は じ め に

複数のロボットが同一対象物を同時に把持すると、そこには閉ループ機構が構成される。このため、市販の産業用ロボットのようにロボットがPID制御系により位置制御される場合、ロボット間に発生する相対位置決め誤差により対象物に過大な内力が発生する。この問題に対しこれまでの多くの研究では、マニピュレータの関節がトルク制御系により制御されることを前提とした制御系が設計されている⁽¹⁾。このため、現在工場等において一般に利用されている産業用ロボットのユーザがすぐに利用できる方法ではなく、実用化された例は少ない^{(2)~(5)}。以上のような背景を基に、著者らはこれまでばねや受動関節等の機構コンプライアンスを利用した任意台数の位置制御型ロボットの協調手法を提案し⁽⁶⁾、クレーンとロボットの協調システム⁽⁷⁾⁽⁸⁾、2台の移動ロボットの協調⁽⁹⁾に適用している。これらの研究において位置制御系を用いても協調制御システムが簡単に実現可能であることが検証された。

しかし、それらのシステムで利用された制御方法は単純なマスタ・スレーブ方式であり、機構コンプライアンスの導入に伴い発生する運動学的な冗長自由度を有効に利用するための議論は十分に行われていない。このため、一般の産業用ロボット同士の協調に従来の提案手法をそのまま適用しようとする、対象物の可動空間が非常に狭くなったり、片方のロボットに負荷が集中するといった問題が発生することが予想される。よって本研究では、PID制御系により位置制御される2台の産業用ロボットを用いた協調制御システムの開発を目的とし、受動関節を冗長に導入することを提案し、これにより新たに発生する冗長自由度の利用方法を提案する⁽¹⁰⁾。受動関節を内部に含む協調系の解析や制御系設計はKobayashi⁽¹¹⁾やその他の研究者によっても扱われているが⁽¹²⁾⁽¹³⁾、これらはロボットと対象物の把持部に残された自由度、あるいは両腕で把持した物体の可動部を受動関節としてモデル化したもので、協調のために設計されたものではない。このため、受動関節の設計方法、位置制御系を利用した協調系の条件は考慮されていない。本研究では、位置制御系の利用を前提として導入された受動関節の利用方法の検討を通じ、実用的な産業用ロボットの協調への利用法を提案するものである。

* 原稿受付 1998年3月5日。

^{*1} 正員, 中央大学理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)。^{*2} 中央大学大学院。

E-mail: osumi@mech.chuo-u.ac.jp

2. 機構モデルの定式化

2.1 協調系の機構モデル 図 1 は本研究で対象とする機構モデルである。各ロボット先端には受動関節が導入され、対象物は受動関節を介してロボットに把持されるものとする。以下では各ロボットのエンドイフェクタと対象物の間に存在する受動関節部を各ロボットの受動関節機構と呼ぶ。ロボットは 2 台で、ロボット i ($i=1, 2$) の受動関節機構に含まれる関節数を m_i とする。アクチュエータの導入されたロボット i の関節角からなるベクトルを θ_{ai} 、導入された受動関節の関節角からなるベクトルを θ_{pi} と置く。また、本モデルでは受動関節機構先端のハンドは対象物を rigid に把持しているものとする。

2.2 協調に必要な受動関節 位置制御系を用いた 2 台のロボットで同一対象物を把持した際、ロボット間に相対誤差が発生しても過大な内力が発生せず、しかも 2 台のロボットの固定により対象物を外力に対して剛に保持できるためには、一次独立な可動方向をもつ六つの受動関節が 2 台のロボット間に存在することが必要である⁽⁹⁾。これらは、協調システムを位置制御系で実現するために受動関節機構に求められる必要最小限の条件とみなすことができる。

しかし、実際にシステムを運用する上で、導入される受動関節機構には位置制御系の協調への利用条件だけでなく、作業に応じて要求される性能を満足させることが求められる。例えば受動関節の導入により対象物の可動空間が極端に減少したり、その結果作業を実現する場所が受動関節機構の特異姿勢近傍になってしまう恐れがある。また受動関節の構造と対象物の目標位置・姿勢が決定されると、各ロボットへの負荷配分が一意に定まるため、実現可能な可動領域が力学的にも大きな制約を受ける可能性がある。

そこで本研究では必要最小限の数だけ受動関節を導入するのではなく、冗長な数の受動関節を導入してお

き、協調のための機構条件が成り立つように冗長な関節を固定して、これを動的に切り替える方法を提案する。これにより、

(1) 必要最小限の受動関節のみを導入した協調系より対象物可動範囲を大きくすることができる。

(2) 1 台のロボットへの負荷の集中等がある程度回避することが可能となる。

といった利点が生まれる。図 2 に平面 3 自由度におけるモデルを示す。平面 3 自由度の場合、最小限必要な受動関節数は 3 個であるが、図 2(b) のモデルでは 4 個の受動関節を導入している。固定すべき一つの関節を動的に選択することで、対象物の鉛直方向の可動領域を増大できることがわかる。

2.3 運動学的冗長自由度の定式化 2.2 節では、導入する受動関節を冗長にしておくことが望ましいことを述べたが、実際の動作時には冗長関節を固定しておくことが必要となる。そこでまず必要最小限の受動関節を導入した場合のシステムの定式化を行い、3 章において冗長な受動関節の利用法を述べる。

受動関節角の値は 2 台のロボット先端の相対位置・姿勢で決定されるので、ロボットのアクチュエータ関節の微小角度変位 $\Delta\theta_a$ と受動関節の微小角度変位 $\Delta\theta_p$ との関係は、

$$\Delta\theta_p = J_p \Delta\theta_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\theta_p = [\theta_{p1}^T \quad \theta_{p2}^T]^T, \quad \theta_a = [\theta_{a1}^T \quad \theta_{a2}^T]^T$$

と表される。ここで J_p はロボット関節の微小変位と受動関節の微小変位との関係を表すヤコビ行列である。 $\Delta\theta_a$ と対象物位置・姿勢の微小変位 Δx_o との関係は、

$$\Delta x_o = J_{o1} \Delta\theta_1 = J_{o1} [\Delta\theta_{a1}^T \quad \Delta\theta_{p1}^T]^T \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 1 Kinematic model of cooperative system with passive joints

(a) Cooperative system without redundant passive joints

(b) Cooperative system with redundant passive joints

Fig. 2 Working space of cooperative system

$$=J_{o1}[\Delta\theta_{a1}^T \quad J_p\Delta\theta_a^T]^T=J_o\Delta\theta_a$$

と表すことができる。\$J_{o1}\$ は \$\Delta x_o\$ とロボット 1 の全関節角との間のヤコビ行列で、\$J_p\$ は \$J_p\$ の中の \$\Delta\theta_{p1}\$ に対応した行を抜き出した行列である。なお、

$$\theta_a=[\theta_{a1}^T \quad \theta_{p1}^T]^T$$

で、\$J_o\$ はロボット関節の微小変位と対象物の微小変位との関係を表すヤコビ行列である。式(1)、(2)より、ロボットのアクチュエータの微小変位と対象物位置・姿勢の微小変位との関係は、

$$\Delta\theta_a=J_o^+\Delta x_o+(I-J_o^+J_o)h\cdots\cdots\cdots(3)$$

と求まる。ここで \$J_o^+\$ は \$J_o\$ の疑似逆行列、\$h\$ は任意ベクトルである。右辺第一項は \$\Delta x_o\$ を実現するための最小ノルム解で、第 2 項は運動学的冗長自由度を表す。

3. システムの冗長自由度の決定法

3.1 システムの冗長性 本章では、本システムのもつ冗長性の利用方法について示す。システムの性能向上を目指し冗長な受動関節機構を導入した本システムでは、まず導入された受動関節のうち六つを除いた残りを何らかの方法で固定する必要がある。すなわち、本システムは、

(1) 固定関節の選び方

(2) 冗長な受動関節を固定した後に残る式(3)の冗長自由度

の 2 とおりの冗長性を有している。以下ではこれらの利用方法について検討する。

3.2 冗長自由度の利用法 本研究ではシステム設計に一般性をもたせるため、各ロボットに同じ機構をもつ受動関節を導入することとする。導入する冗長関節数は多ければ多いほどその利用効果が高まることが期待できるが、一方で機構が大掛かりとなったり固定すべき関節の決定に演算時間を要することとなる。よって本研究では、基礎的な解析を行うためのシステムとして、導入する冗長自由度をできるだけ少なくし、それぞれのロボットに 4 関節の受動関節数を導入した。図 3 にこのモデルを示す。各受動関節には図のように番号をつけておく。

Fig. 3 Cooperative system between two manipulator with passive joint mechanisms

このシステムでは 8 個の受動関節のうち 2 個を固定する必要がある。この固定関節の選び方としては、残りの 6 個の受動関節が一次独立であればよいわけであるが、この条件だけでは対象物の荷重が一方のロボットだけに集中してしまったり、対象物の動作範囲を狭めたりする恐れがある。そこで本研究では固定する関節の選択方法として、

①対象物を挟んだ受動関節部分を独立した仮想のマニピュレータ(図 4)と見なして、このマニピュレータの手先の可操作度が最大になるように、固定する関節の組合せを選択する。

②それぞれのマニピュレータ先端に伝達される対象物の重力の二乗和を最小とする。

の 2 とおりの評価基準を設定し、固定する関節の選択をリアルタイムで行うこととした。①を利用することで、より大きなロボット間の相対位置誤差にも対応することが可能となり、②を利用することで、より小形のロボットの利用が可能となる。

さて、受動関節 \$i, j\$ を固定した場合の、①で利用する可操作度を表す評価関数 \$H_{ij}\$ は次式によって与えられる。

$$H_{ij}=\sqrt{\det(J'_{pij}(\theta'_{pij})^T J'_{pij}(\theta'_{pij}))}\cdots\cdots\cdots(4)$$

ここで \$J'_{pij}\$ は仮想マニピュレータのヤコビ行列、\$\theta'_{pij}\$ は固定した第 \$i, j\$ 番めの関節以外の関節角からなるベクトルである。

次に、以上の方法で固定関節を決定した後の、式(3)の運動学的冗長自由度の利用方法について検討する。式(3)で用いられているヤコビ行列 \$J_o\$ に含まれる各関節は、どの関節を固定するかにより不連続に変化する。式(3)の第 2 項の利用により最適化を図る評価関数は通常、システムの関節角ベクトルにより定義されるが、このベクトルの要素自身も不連続に変化することになり、最適化を図る評価関数として何を用いればよいかが非常にわかりにくい。このため本研究では、ロボットの関節角動作に関して明確な意味をもつ第 1 項の最小ノルム解のみを利用することとする。以上、対象物の目標微小移動量 \$\Delta x_o\$ が与えられてからロボットの関節角変位の指令 \$\Delta\theta_a\$ が算出されるまで

Fig. 4 Virtual manipulator model of passive joints

Fig. 5 Sequence of exploiting kinematic redundancy

Fig. 6 Simulation model

の手順を整理すると図 5 となる。以降のシミュレーションと実験においては、この手順が利用される。

4. 協調搬送シミュレーション

シミュレーションは平面内において、2 台の三自由度マニピュレータによる協調搬送について行った。図 6 にシミュレーションモデルを示す。なお、このモデルは図 3 の系を xz 平面のみで搬送する場合と等価で、関節 (1) または (8) のどちらかの受動関節を固定した際に残る冗長性を表している。また、図 6 中のパラメータも実機に基づくものである。座標系原点は図に示す位置で、搬送開始位置は $(x, y, z) = (0, 0, 0.05)$ とする。

このモデルでは受動関節が 1 個多いため、いずれか一つの関節をロックする必要がある。図 6 中の番号は受動関節の番号である。シミュレーションでは次の 2 種類の協調搬送について行うこととする。

(1) 特定の関節のみを固定した状態での協調搬送。

(2) ステップごとに可操作度が最大になるように、固定関節を動的に切り替えながらの協調搬送。

シミュレーションでは、 x 軸方向に 100 mm、 z 軸方向に 100 mm、それぞれ協調搬送させた。図 7 にシミュレーション結果を示す。縦軸は式 (4) から計算される可操作度を表し、横軸は対象物の移動距離を表

(a) Transferring in x direction

(b) Transferring in z direction

(c) Transferring in rotational direction about y axis

Fig. 7 Simulation results

す。図 7(a) は x 軸方向、(b) は z 軸方向、(c) は y 軸回りの回転方向への搬送を行った結果である。

式 (3) を基に最小ノルム解でロボット動作を行わせる際のロボット動作指令は、そのときの固定関節がどれであるかに依存しており、固定関節が異なればその後のロボット動作も異なったものとなる。このため、図 7 に示された結果は、対象物が同じ位置・姿勢となっても、ロボットおよび受動関節の姿勢はすべて異なっている。

図 7 の結果より、動的切り替えを行った場合、 z 方向への協調搬送では常に可操作度が最大になっているのに対し、残りの 2 方向への搬送では、途中までは切り替えアルゴリズムを使用しても可操作度が最大にはなっていないことがわかる。これは本手法が局所的な最適化を図っていることに起因する。しかし図 7(c) からわかるように、受動関節の切り替えにより、可操作度の極端な減少を回避できる。以上より、固定関節の動的切り替えにより、特異姿勢を回避し可動範囲を増大できることが示された。なお、グラフからはわからないが、 x 方向および z 方向の搬送では固定関節の

切り替えが制御サンプリングごとに絶えず行われている。一方 y 軸回りの回転方向では対象物が約 26° 傾いた所で 1 回だけ切り替えが行われている。

また、本システムにおいては、搬送の初期姿勢近傍ではロボットに伝わる対象物重量が固定関節にあまり依存しないと考えられ、評価関数②を用いた場合のシミュレーションを行った結果、 x 方向では搬送距離 40 mm を越えた当りから若干の効果が見られたが、 z 軸方向および回転方向に関しては固定関節の切り替えアルゴリズムの効果はほとんど見られなかった。

5. 協調搬送実験

実験により本提案手法の有効性を検証する。本研究で開発した受動関節機構を図 8 に示す。図中の数値の単位は mm である。機構は四つの回転関節からなり、それぞれの関節には電磁ブレーキ、ポテンシオメータが取り付けられている。ポテンシオメータの値を 12 bit/A/D コンバータで読み取ることで各受動関節角値が計測できる。なお分解能は 0.147° である。電磁ブレーキはコンピュータからの司令により自由に ON, OFF 動作させることができるので、すべての関節を固定することによりロボットの単独動作も全く問題なく実現できる。ハンド部には電磁石を用い、これにより対象物を保持している。

図 9 に協調システムの構成を示す。ロボットには三菱電機社製ムーブマスタ RV-E2 (六自由度多関節形、可搬重量 2 kg)、制御用コンピュータには NEC 製 PC 9801 RA (CPU : 80386, 20 MHz) を使用している。ロボットコントローラとコンピュータは RS-232C で接続され、コンピュータからロボットコントローラへは六つの関節の目標関節角が送られる。搬送対象物は金属製の箱 ($154 \times 100 \times 50$ mm) で重さ約 300 g である。実験はシミュレーションと同様の条件で行った。

ロボットコントローラへは目標関節角しか送ることができず、しかも実際の関節角データはコントローラからコンピュータへは出力されないため、コントロー

ラへの指令はシミュレーションで算出された関節角軌道を細かく分割して微小時間ごとに与えていった。分割方法として、手先を目標軌道に沿って 1 mm 刻みで移動させた場合の関節角値を計算し、このデータ列をコントローラに送り続けた。そして 1 mm の移動が終了しロボットコントローラとの通信が完了する度に受動関節角の値を読み取り、リアルタイムで固定する関節を選択した。固定関節の選択方法として、3 章で示した二つの評価基準を用いて、それぞれ実験を行った。

まず評価基準①を用いた実験結果を図 10 に示す。図 10(a) は x 軸方向への協調搬送時のグラフ、(b) は z 軸方向への搬送時のグラフである。搬送はいずれの方向にもスムーズに行われた。 z 軸方向への搬送では、実験結果に多少のばらつきが見られるが、ほぼシミュレーションと一致した結果が得られた。しかし x 軸方向への搬送では大きな差が出ている。これは実機で動的切り替えを行う際、切り替えの瞬間にわずかなタイミングのずれによって、全関節がフリーとなる

Fig. 9 Schematic view of the cooperative system

(a) Transferring in x direction

(b) Transferring in z direction

Fig. 10 Experimental results with criterion ①

Fig. 8 Passive joint mechanism

Fig. 11 Experimental result with criterion ②

状態ができてしまい、このときに対象物が初期状態に近い姿勢に動いてしまったためである。タイミングのずれにより全関節がロック状態となるよう切り替え信号を送ることも考えられるが、瞬間的に内力が過大となる恐れもあり、実験では実施していない。この問題はコンピュータからの指令に対するブレーキの応答をより正確に調べ、切り替えのタイミングをより厳密にすることで解決できると考えられる。なお、切り替えを行わなかった場合の実験結果についてはシミュレーションとほぼ同じとなることが確認されているが掲載は省略した。

次に、評価基準②を用いた実験結果を図 11 に示す。グラフは z 軸方向に協調搬送させた場合で、横軸は搬送距離、縦軸はマニピュレータ先端にかかる力の二乗和をそれぞれ表している。グラフ中で、(1) は評価関数①で固定関節を選んだ場合、(2) は評価関数②で固定関節を選んだ場合である。また、 F_1, F_2 はそれぞれのロボット手先にかかる力・モーメントベクトルである。

評価基準②を用いることによって、マニピュレータ先端にかかる力が軽減されていることが確認された。

以上の 2 種類のアルゴリズムを用いた実験から、対象物可動空間内で長い距離を搬送する時は可操作度を評価し、重量物を搬送するときには手先にかかる力を評価するといった、作業や対象物に応じた評価関数の選択が有効であることが確認できた。

またシミュレーションと同様に切り替えを行わずに搬送を行った場合には、ハンド部の磁石がはずれ、対象物がたびたび落下した。これは、切り替えを行わない場合には受動関節角が特異点に近づくため、両腕への荷重配分が大きく異なる事に起因すると思われる。このことから、協調搬送において固定関節の動的切り替えは有効な手段であるといえる。

6. 結 論

2 台の位置制御される産業用ロボットで同一対象物のハンドリングを行うため、各ロボットの手先に冗長

な数の受動関節を導入したシステムを開発した。

- ・各ロボットの手先に導入すべき受動関節数を冗長としておくことの利点を示した。
- ・冗長な数の受動関節が導入されたシステムの冗長自由度の利用法として、ロボット間の相対位置誤差への適応性の向上、および各ロボットに掛かる力の最小化への利用方法を示した。
- ・各関節に電磁ブレーキ、およびポテンショメータの導入された受動関節機構の開発を行った。
- ・2 台の産業用ロボットと付属の位置コントローラを利用した協調搬送実験結果より、本研究の提案手法の有効性を検証した。

文 献

- (1) 例えば, Hsu, P., Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems, *IEEE Trans. Robotics Autom.*, (1993), 400-410.
- (2) 藤森潤・ほか 4 名, 複数ロボットによる力協調制御手法の提案と検討 (第 2 報), 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), 781-782.
- (3) 小菅一弘・ほか 5 名, インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御, *日本ロボット学会誌*, 13-3(1995), 404-410.
- (4) Osumi, H., ほか 4 名, Cooperative Control of Two Industrial Robots with Force Control Devices, *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Systems*, 3(1995), 550-555.
- (5) Khatib, O., ほか 5 名, Vehicle/Arm Coordination and Multiple Mobile Manipulator Decentralized Cooperation, *Proc. 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Systems*, 2(1996), 546-553.
- (6) 大隅久・新井民夫, 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, *日本ロボット学会誌*, 12-8(1994), 1192-1197.
- (7) Osumi, H. and Arai, T., Cooperative Control between Two Position-Controlled Manipulators, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1994), 1509-1514.
- (8) 大隅久・ほか 5 名, 3 本のワイヤを有する 7 自由度クレーンとロボットの協調制御システム, *機論*, 63-609, C (1997), 1649-1655.
- (9) 太田順・ほか 4 名, 2 台の移動ロボットの協調による搬送制御, *日本ロボット学会誌*, 14-2(1996), 263-270.
- (10) Osumi, H., ほか 3 名, Cooperative System for Multiple Position-controlled Robots with Free Joint Mechanisms, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 1484-1489.
- (11) Kobayashi, H., Control and Geometrical Considerations for an Articulated Robot Hand, *Int. J. Robotics Research*, 4-1(1985), 3-12.
- (12) Yeo, H. J., ほか 4 名, A Closed-Chain Jacobian-Based Hybrid Control for Two Cooperating Arms with a Passive Joint: An Application to Sawing Task, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 1793-1800.
- (13) Liu, Y. H. and Xu, Y., Cooperation of Multiple Manipulators with Passive Joints, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1997), 1478-1483.