作業位置の自動決定機構を有する双腕協調制御アルゴリズム*

杉内 肇^{*1}, 高田 昌稔^{*2}, 宮本 義久^{*3}A Dual Arm Cooperative Task Control Algorithm
with Working Position Determination Mechanism

Hajime SUGIUCHI, Masanori TAKATA and Yoshihisa MIYAMOTO

What kinds of functions the dual arm cooperative task controller must have is considered and concluded as followings. The controller must be able to control the relative movement of both hands and the working position of task, and autonomously determine the working position by choosing one criterion from at least two criteria that conflict each other. It is expected that the trajectories of the arms are continuous even if the controller change the criterion. Additionally, the working position need not be strictly optimal. The previously presented papers have not satisfied all conditions shown above. In this paper, the new controller that can accept the desired trajectory of relative movement of both hands and autonomously determine the working position in real time is proposed. It is shown that the proposed controller satisfies such conditions and works effectively by the experiment in which the dual arm robot holds, bends and breaks a wooden chopstick.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Measurement and Control, Robot, Working Position, Dual Arm, Cooperative Task

1. ま え が き

本論文は、2台の多関節型マニピュレータ（双腕マニピュレータ）に協調作業を行わせる場合の作業位置決定問題を扱ったものである。

双腕マニピュレータで実行できる協調作業には、手先の相対的な位置関係を指定するだけで実現できる作業（例えば、容器を手にとってふたを開閉する作業）が多数存在する。このような場合、作業プログラムでは相対的な位置関係のみを指定すれば十分であるが、手先の相対的な位置関係の指定だけでは2台のマニピュレータの関節角を決定するには不十分であるため、さらに作業を行う位置も指定する必要がある。しかし、作業位置の指定は、ロボット操作者の負担になるばかりではなく、適切な作業位置は2台のマニピュレータの設置位置や機種により異なるため、作業プログラムの汎用性を損なう結果になりかねない。なぜなら、作業位置決定問題は各マニピュレータ固有の情報を必要とするのに対し、作業遂行のためのプログラムは作業位置に無関係に記述できる場合があるからである。

したがって、複数のマニピュレータの協調作業を実現するためには手先の相対位置と作業位置を独立に指定できる制御系を構築する必要があり、さらに、作業

位置を自律的に決定する作業位置の目標軌道生成機構を付加することによって作業オリエンティッドな協調制御系を実現することができる。このような要請を受けて、手先の相対位置と作業位置を独立に制御できる協調制御系として、位置と力のハイブリッド制御を用いたもの⁽¹⁾やコンプライアンス制御を用いたもの⁽²⁾⁽³⁾が各種提案されている。これらの制御系は作業位置目標が外部から与えられるという前提で設計されており、作業位置の指定方法などは取り扱っていない。

一方、協調作業の軌道計画問題では、双腕マニピュレータを冗長自由度を有するシステムとして取り扱い、作業実現条件を拘束条件としてマニピュレータの運動性能に関する評価関数を最大にする関節角目標軌道を計画する問題として定式化され、その厳密解を数値的に求める方法が種々論じられているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、作業位置と手先相対運動は別個のものとしては論じられていない。

また、マニピュレータの運転に先立って軌道を計画するという方針も実際の協調作業の性質に適合しない部分がある。協調作業においては手先間に拘束が存在するため、相対的な位置だけではなく力も制御する必要があるから、作業位置の決定に際しても両手先の相対位置と内力を考慮しなければならない。したがって、作業位置の最適性の基準は少なくとも作業速度を重視する場合と操作力を重視する場合の二通りを用意し、作業の進行に応じてこの互いに矛盾する二つの判断基準を切り換えるべきである。しかも、実際の作業では最適基準は作業の進行に応じて変化する場合があり、この場合には性能評価基準を作業の進行に応じて切り換える必要が生じるが、切り換えのタイミングを作業実行前に正確に予測するのは困難である。例えば、容

* 原稿受付 1996年5月20日。

*¹ 正員、横浜国立大学工学部（〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）。*² NKK総合設計（〒230 横浜市鶴見区弁天町3）。*³ 日本エアシステム(株)（〒105 東京都港区虎ノ門3-5-1）。

器のふたを開ける作業で、ねじ式のふたを想定してみよう。この場合、作業初期においては、ふたの締め付けトルクはほとんど必要がないため迅速に作業を実行することが要求されるが、最後にふたをしっかりと閉めるためには十分な締め付けトルクが要求される。

一般にマニピュレータの手先の運動の高速性と大きな力の発生は相反する要求であり、両方を同時に満たすことは困難である。このため、この作業においては作業開始当初は速度優先で作業軌道を計画し、作業終了時においては手先力優先で作業軌道を計画する必要がある。しかも、この二つの相反する評価基準に基づいて計画された軌道は滑らかであることが望ましく、評価基準を切り換えるタイミングは作業の進行状況に依存する。さらに、実際の作業においては不測の事態により切り換えタイミングが変化することもあり得るから、作業に先立って行った軌道計画どおりに運用するのは困難である。しかし、その一方、作業位置に対する制約は緩やかな場合が多く、必ずしも厳密な最適性を追求する必要はない。

以上の考察を踏まえ、本研究では、双腕ロボットの協調作業を作業位置に関する要請と作業実行目標軌道（具体的には、両腕手先の相対位置・姿勢）に分離し、この二つを別々に受け取る協調制御系を構成した上で、この系に運動性能を評価する機構をもつ作業位置制御器を付加し、作業を遂行しながら同時に作業しやすい位置に自動的に移動する制御系を開発した。

本システムは、下記の特徴を有している。

(1) 作業位置の評価、作業位置指令の生成がオンラインで行われるため、作業中に作業位置の評価基準を随時、容易に変更でき、作業状況の変化に柔軟に対応できる。

(2) 作業位置指令は速度指令の形で出力されるため、目標軌道の連続性も確保される。

2台の6自由度多関節型産業用マニピュレータからなるシステムを用いた実験を行った。その結果、本システムでは、マニピュレータは作業しやすい位置に向かってゆるやかに移動しながら作業を遂行し、必ずしも最適な位置で作業を行うわけではないが、作業位置制御機構の付加により、運動性能評価値は改善されており、本機構が有効に機能していることが確認された。

2. 運動性能の評価指標

先に述べたように作業位置の決定には操作性の評価が必要である。操作性の評価の研究としては、マニピュレータ単体の可操作性楕円体⁽⁶⁾から協調作業の操作性評価値を求める方法⁽⁷⁾や、作業性を評価するに当たって、厳密には、マニピュレータに与えられる動作の性質を考慮すべきであるとの指摘⁽⁸⁾、また、マニピュレータの動特性を考慮したもの⁽⁹⁾などがある。本論文では、

(1) 操作性の評価計算をオンラインで行う必要があることや(2) あまり厳密な計算は不要であるとの観点から、両手先の相対速度に着目した相対可操作度を定義し、これを指標として用いることとした。

2・1 相対ヤコビ行列 2台のロボット1, 2

を用いて協調作業を行う場合の運動学について考える。それぞれのロボットの手先速度ベクトル v_1 , v_2 と関節角速度ベクトル θ_1 , θ_2 の関係は、ヤコビ行列 J_1, J_2 を用いて

$$v_1 = J_1 \dot{\theta}_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_2 = J_2 \dot{\theta}_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここで、ロボットの手先速度ベクトル v_1 , v_2 は、並進速度ベクトル v と角速度ベクトル ω からなる6次元ベクトルである。

ロボット1から見たロボット2の手先の相対速度 v_e は、

$$v_e = v_1 - v_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表され、これに式(1), (2)の関係をを用いると、

$$v_e = J_e \dot{\theta}_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$J_e = [-J_1 \quad J_2] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{\theta}_a = [\dot{\theta}_1^T \quad \dot{\theta}_2^T]^T \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、2台のロボットの手先間に発生する内力 f_i と関節トルク τ_1 , τ_2 の関係は、ロボット手先に発生する力を f_1 , f_2 とし、外力がかからずに内力が釣り合っている場合を考えると、

$$f_1 = f_2 = -f_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_1 = J_1^T f_1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_2 = J_2^T f_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される。式(5), (7), (8), (9)より、

$$\tau_a = J_e^T f_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

が成立する。ただし

$$\tau_a = [\tau_1^T \quad \tau_2^T]^T \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(4), (10)が示すように、 J_e 行列は、(1) 2台のロボットの関節角速度と手先相対速度を、また、(2) 手先内力と関節トルクを結び付けるものであり、ヤコビ行列と類似している。このため本論文では、この J_e を相対ヤコビ行列と呼ぶ。

2・2 相対可操作度と相対操作力度 二つの別々の作業位置A, Bでロボットを動かした場合、作業位置Aのほうが作業位置Bより、同じ関節角速度で

大きな手先速度を発生できるならば、AはBより操作性がよいと考えられる。また同様に、同じ関節トルクで、BのほうがAよりも大きな手先力を発生できるなら、BはAより力の操作性がよいと考えられる。

1台のロボットの操作性を定量化する指標として、速度に関しては可操作度がすでに定義されている⁽⁶⁾。本論文では、式(4),(10)を用いて、2台のロボットの手先相対速度と手先内力に関して、相対可操作度 W_v と相対操作力度 W_f を次式で定義し、作業位置の評価に用いる。

$$W_v = \sqrt{\det(J_e J_e^T)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$W_f = \frac{1}{\sqrt{\det(J_e J_e^T)}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

3. 双腕協調コンプライアンス制御

2台のロボットに協調作業を行わせる場合、作業位置の制御と手先の相対運動の制御を同時に行う必要がある。さらに、手先の相対運動の制御においては、手先間の拘束が発生するため、位置と力のハイブリッド制御⁽¹⁾またはコンプライアンス制御⁽²⁾⁽³⁾を行う必要がある。本研究では、相対運動の制御にコンプライアンス制御を用い、コンプライアンス制御装置から出力され

る相対速度指令と作業位置制御器の出力から2台のロボットの関節角速度目標値を生成し、この関節角速度目標値を各関節ごとに独立の速度制御ループで実現する構成を採用した。制御系のブロック線図を図1に示す。

3・1 相対運動の制御 1台のロボットのコンプライアンス制御をもとにして、2台のロボットで可動部を有する物体を操るための仮想的コンプライアンスを次のように手先間に設定する。

$$M a_e + C v_e + K x_e = f_i \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 a_e は両腕手先の相対加速度ベクトルであり、 x_e は両腕手先の相対運動に対して設定された仮想的コンプライアンスの釣り合い位置からの偏差である。 f_i は両腕手先間に働く内力とモーメントを表す6次元ベクトルである。 M, C, K は作業内容に応じて設定する 6×6 の仮想的なコンプライアンス係数行列で、それぞれ、質量行列、ダンピング行列、剛性行列に対応する。

ロボット1, 2それぞれの手先に直交座標系を設定し、ロボット2に対するロボット1の相対的な位置と姿勢を、ロボット2の座標系から見た、ロボット1の座標系の原点の位置ベクトル p と各軸に平行な単位ベクトル x, y, z で表す。いま手先の釣り合い位置・姿勢が

Fig. 1 Block diagram of dual arm cooperative compliance controller

p_0, x_0, y_0, z_0 であり、実際の相対位置・姿勢が p, x, y, z であるなら、 x_e は次のようになる⁽¹⁰⁾。

$$x_e = \begin{pmatrix} \Delta\phi e \\ \Delta p \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta p = p_0 - p \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$e = \frac{x_0 \times x + y_0 \times y + z_0 \times z}{|x_0 \times x + y_0 \times y + z_0 \times z|} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta\phi = 2 \tan^{-1} \frac{x^T(e \times x_0)}{x^T x_0 - 2(e^T x_0)^2 + 1} \quad \dots\dots\dots (18)$$

実際に相対速度 v_e ，手先相対位置偏差 x_e ，内力 f_i が発生している状態で、ロボットにこのモデルに従った動きをさせるためには、

$$a_e = M^{-1}(f_i - C v_e - K x_e) \quad \dots\dots\dots (19)$$

で与えられる加速度 a_e を発生させる必要がある。離散時間制御を前提として、近似的にこの加速度を実現するためには、 T をサンプリング周期とすると、時刻 kT では、次式の相対速度目標値 $v_{ed}(k)$ をロボットに与えればよい⁽¹⁰⁾。

$$v_{ed}(k) = v_e(k) + a_e(k)T \quad \dots\dots\dots (20)$$

3・2 関節角目標値の生成 式(20)で与えられた手先相対速度目標値 $v_{ed}(k)$ を実現する関節角速度目標値 $\dot{\theta}_{ad}$ は、相対ヤコビ行列 J_e を用いて次式⁽¹¹⁾で表される。

$$\dot{\theta}_{ad} = J_e^+ v_{ed} + (I - J_e^+ J_e) \alpha \quad \dots\dots\dots (21)$$

ただし、 J_e^+ は相対ヤコビ行列 J_e の擬似逆行列 (12×6)， α は12次元任意ベクトルである。

式(21)は双腕マニピュレータの協調制御問題が相対ヤコビ行列により二つのサブタスク（すなわち、手先

の相対運動の制御と作業位置の制御）に分割されることを示している。2台のロボットは合計12の自由度をもつが制御すべき相対運動は6自由度しかないため冗長な自由度が存在し、それが α の任意性となって現れているわけである。したがって、2・2節に述べた評価値が大きくなるように α を決めてやれば所望の相対運動を実現しながら作業性のよい位置に自動的に移動する制御系を構成できる。

3・3 作業位置の制御 2台のロボットの関節角 θ_a の関数として表される評価値 $W(\theta_a)$ を大きくするには式(21)の α ベクトルを次式に従って求めればよい⁽¹⁾。

$$\alpha = h \xi \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\xi = \frac{\partial W}{\partial \theta_a} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 h は正の定数であり、 $\dot{\theta}_{ad}$ が過大にならず、かつなるべく速やかに W を大きくするように選ぶ必要がある。 W には、操作速度を優先する場合には式(12)の W_v を、操作力を優先する場合には式(13)の W_f を使用すればよく、 W_v ， W_f 以外の評価関数も2台のロボットの関節角 θ_a の関数として表される連続関数であれば使用可能である。また、式(21)は、2台のロボットの関節角速度目標値 $\dot{\theta}_{ad}$ を与えるからロボットの関節角 θ_{ad} の連続性はつねに保たれ、評価値 W を作業の進行に応じて順次適切なものに切り換えることも可能である。実際、後述する実験においては、内力 f_i のx軸回りのトルク成分 τ_x の大きさに対して閾値 ($f_{ith} = 0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$) を設定し、 f_{ith} 未満の場合には W_v を、それ以外では W_f を作業位置の評価に用いている。ただし、この方法を用いた場合、切り換えによって、ロボットに与えられる速度指令値が不連続になり、滑らかな軌道が生成されなくなるので注意が必要であ

Fig. 2 Arrangement of two robots

る。

3・4 双腕協調コンプライアンス制御系の構成

図1に示す本制御系は二つの部分に別れ、それぞれ、本制御系で実行すべき二つのサブタスク、作業実現タスク（手先相対運動の制御）と作業位置制御タスクに対応している。この二つのタスクは、リアルタイムシステム上に別々のプロセスとして実装されている。作業実現タスク用プロセスの実行優先度を高くしたり、 α の更新周期を長くとったりすることにより二つのタスク間の優先度を調整できる。

Fig. 3 Relative manipulability index W_v

Fig. 4 Relative orientation of both hands (rotational angle α_x around x axis)

Fig. 5 Internal torque τ_x around x axis

また、本制御系は、ロボットに対する最終的な指令値を速度で与えているため、作業中に評価値を切り換えた場合でも、ロボットの運動軌道の連続性は保たれる。さらに、ここで用いたコンプライアンス制御系は、各ロボットの関節角速度目標値を生成する方式をとっているため、市販されている産業用ロボット（市販品は、一般に、各関節を駆動するモータはドライバにより速度制御されている）との整合性がよい。

4. 実験結果

本研究では、開発した制御則の有効性を調べる目的で、2台のロボット（安川電機製 K3S）を図2に示すように配置し、左腕に持たせた割りばしを右腕のツールの穴に挿入した後、ひねり動作で折る実験を行った。2台のロボットには6軸力センサ（ビー・エル・オートテック製）を装備し内力の検出に用いた。

本制御則の実現にはかなりの計算量を必要とするため、制御用計算機にはトランスペュータT-800(INMOS社製)4個を使用し、サンプリング周期の短縮を図った。作業位置の制御では15ms、コンプライアンス制御では3msのサンプリング周期を達成している。内力と左右手先の相対運動を関連づける式(14)のコンプライアンス設定は、試行錯誤により決定し、

$$M = \text{diag}[2.0 \ 2.0 \ 10 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]$$

$$C = \text{diag}[189 \ 189 \ 2513 \ 47 \ 47 \ 47]$$

$$K = \text{diag}[1970 \ 1970 \ 39478 \ 493 \ 493 \ 493]$$

を用いた。 z 方向の設定値が大きくなっているのは、割りばしの挿入方向を z 軸に合わせたからである。実験結果の一例として、(a)評価値を切り換えた場合、(b)評価値に W_v を用いた場合、(c)評価値を使用しなかった場合の作業中の評価値（相対可操作度 W_v ）の変化を図3に、相対姿勢の変化（ x 軸回りの回転角 α_x ）を図4に、 x 軸回りに働く内力トルク τ_x N・mを図5に示す。

図6は、評価値 W_v が極大になった(b)の場合における実験開始後約4秒の時点(図3のA点)でのロボットの姿勢を示している。作業位置は、図2の初期位置(図6では破線で示した)に対して、 x 方向にはほとんど移動していないが、 z 方向に約20cm上昇し、図からはわからないが、 y 方向に-30cmほど移動している。図4、5に示されるように、相対姿勢、内力とも良好に制御されている。図4で評価値の切り換えにより誤差を生じているが、支障なく作業を遂行している。図5で τ_x の値にばらつきがあるのは、実験に用いた割りばしの特性によるものである。図3からは、作業位置制御により、同じ初期位置に対して、評価値に W_v を用いた場合には作業開始とともに相対可操作度が増加する方向に作業位置が移動し、評価値を切り換えた場合には、相対可操作度が上昇する方向に作業位置を移動しながら、割りばしを穴に挿入し、割りばしを折る動作を開始して内力が閾値(0.5N・m)を越えたところで、相対可操作度が減少する方向に移動し、はしが折れた

Fig. 6 Configuration of robots at point A

後は、再び自動的に増加する方向に移動していることがわかる。すなわち、作業位置目標生成機構の付加により、手先の相対運動制御には作業の遂行に支障をきたすような悪影響を及ぼすことなく、運動性能評価値が改善されており、本機構が有効に機能している。

5. 結 論

本論文の主要な結果は次のとおりである。

(1) 2台のロボットに外力が働かない環境で協調作業を行わせる場合に制御系が有すべき機能と特性について考察し、(a) 制御系は作業遂行動作と作業位置移動動作を別々に制御できることが必要であること、(b) 作業位置は制御系が自律的に決定すべきであること、(c) 作業位置の評価基準には少なくとも相矛盾する二種類の評価基準があること、(d) 作業位置の評価基準は作業の進行に応じて変化する場合があり、作業位置決定機構はこの変化に対応できる必要があること、(e) 評価基準切り換え時にもマニピュレータの軌道は滑らかに変化するのが望ましいこと、(f) 作業位置に関する最適性は必ずしも厳密でなくてよいことを指摘し、従来提案されている方式は、以上の条件を部分的に満たしてはいるもののすべての要件を満たしてはならず、不十分であることを示した。

(2) これらの要件を満たす制御系として、作業位置指令と作業実行目標軌道を別々に指定できる協調制御系に、(a) 作業位置の評価と(b) 作業位置指令の生成とをオンラインで行う作業位置制御器を付加する制御アルゴリズムを提案した。これにより、作業位置に関する要請は双腕協調動作を記述するロボットプログラムから分離され、プログラムは純粋に作業動作のみを記述すればよくなるため、双腕協調作業を実行するロボットプログラムの記述が容易になるだけでなく、プログラムにポータビリティを付与できる。

(3) 2台の6自由度多関節型ロボットを用いて、割りばしを折る作業を行わせたところ、作業位置制御を行わない場合と比較し、作業中の運動性能を表す評価指標の値が大きくなった。これにより、本論文で提

案した制御アルゴリズムの有効性が示された。

おわりに、日ごろご指導いただいている横浜国立大学工学部 藤堂 勇雄教授、知能機械システム(日立) 寄附講座 沢野 進 元客員教授に感謝いたします。なお、本研究は、(財)メカトロニクス技術高度化財団研究助成金を受けて行われたものであることを付記する。

文 献

- (1) 内山 勝・ピエール ドシェ, 両手ロボットの対称型運動学と非マスタースレーブ協調制御, 日本ロボット学会誌, 7-1 (1989), 19-30.
- (2) 黒野 繁, 一対の人工の手の協調制御, 機誌, 78-682 (1975), 804-810.
- (3) 小菅一弘・古賀雅伸・古田勝久・野先景春, 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, 27-1(1991), 93-100.
- (4) 山本元司・黒田創明・毛利 彰, 複数台ロボットによる協調作業経路計画, 日本ロボット学会誌, 11-2(1993), 217-226.
- (5) 劉 雲輝・有本 卓, 協調作業を行なう複数マニピュレータの関節トルクの最適化, 第9回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, (1991-11), 493-496.
- (6) 吉川恒夫, ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, 2-1(1984), 63.
- (7) Lee, S., Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-Oriented Dual Arm Manipulability, IEEE Trans. Robotics Autom., 5-1(1989), 78-97.
- (8) 田所 諭・高森 年, マニピュレータ動作の加速度の偏りを考慮した動的可操作性の評価法, 計測自動制御学会論文集, 29-4(1993), 419-428.
- (9) 鄭 心知・友近信行・吉川恒夫, 複数のロボット機構による協調的操り時の動的可操作性, 日本ロボット学会誌, 11-6(1993), 892-900.
- (10) 杉本浩一, ロボットアームのカフィードバック制御, 計測と制御, 25-1(1986), 45-50.
- (11) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, (1988), 211, コロナ社.