産業用ロボットにおける ハイブリッド・コンプライアンス/力制御の適用

桂 川 敬 史* 五百井 清* 久保田 伸 幸* 野 呂 治*

Application of Hybrid Compliance/Force Control for Industrial Robot

Takashi Katsuragawa*, Kiyoshi Ioi*, Nobuyuki Kubota* and Osamu Noro*

In order to execute various contacting tasks, a robot must be controlled contacting force or contacting resistance. In the former case, a force-control is available, and in the latter case, an impedance-control and a compliance-control are useful.

In this paper, we propose a Hybrid Compliance/Force Control (H.C.C.) which is a combination of a Hybrid Position/Force Control and a compliance-control. In this method, a position-control, a force-control, and a compliance-control can be switched for any direction of a given task. Moreover we compose typical 2 types of H.C.C. (torque-based and position-based), and both methods are installed in a 6-D.O.F. industrial robot.

This study shows compositions of 2 types of H.C.C. and their experimental results.

Key Words: Contacting task, Hybrid Position/Force control, Compliance control, Industrial robot

1. は じ め に

産業用ロボットは工場へ大量投入されることによって、従来は人間が行わざるを得なかった単調な繰り返し作業や重量物のハンドリング作業を代行するようになった。さらに近年の制御技術の発達で、より人間の腕に近い動作が可能になってきており、人間が近づけない危険箇所への適用も徐々に広がりつつある。

しかし、現実にはその稼働場所は工場など整えられた環境内に限られ、未だ一般人の目に触れることの少ない「専用機」としての役割しか担っていないのが実情である。これはロボットコントローラが位置や速度などの内界センサ情報だけしか取り扱わず、外的な環境情報を自らの行動情報として有効に処理、活用する手段を有していないことが主因と考えられる。本文では、外界情報センサとして力覚センサを使用したロボットアーム制御系の構成法を述べ、6軸産業用電動ロボットにおいて適用試験を実施した結果について報告を行う。

2. ハイブリッド・コンプライアンス/力制御

力覚情報を利用する代表的な手法として、作業対象への押し付け力そのものを制御する位置/力ハイブリッド制御[1]と、対象物体に対する接触抵抗を制御するコンプライアンス制御や

インピーダンス制御[2]がある。前者は主として対象物体への強い動作（例：研磨作業・バリ取り作業など）、後者は柔軟な動作が必要とされる動作（例：組立作業・歩行動作など）に向いていると考えられる。それらの動作を制御の立場から見ると、ハイブリッド制御では接触時の力覚情報を直接制御量としているのに対し、コンプライアンス制御では力覚情報によって接触応答の粘性や剛性を制御しているともいえる。インピーダンス制御では接触応答の慣性も制御の対象とする。

これらの制御系は作業内容や接触対象物との拘束条件によって、作業単位あるいは自由度単位で切り替えることが必要となる場合がある。例えば Fig. 1 のようにトルクレンチを用いたボルト締め付け作業では、レンチの回転方向は円軌道を描くように位置制御、回転方向と垂直な方向はガタや誤差の吸収のためにコンプライアンス制御を行う。そして最後の締め付け時には一定力でボルトを留めるために回転方向に力制御を行う。

さらに、作業対象物体の物性（粘弾性など）によって、コンプライアンス/力制御パラメータも変化させる必要がある。

そこで我々はコンプライアンス制御系と力制御系のそれぞれの特長を生かすために、ハイブリッド・コンプライアンス/力制御(H.C.C.)を提案してきた[3]。H.C.C.はロボットの6自由度の各自由度単位で位置/コンプライアンス/力制御をハイブリッド化した制御系となっている。

本稿ではH.C.C.制御系の構成法[4][5]として関節トルク指令型[6]と関節位置指令型[7]の2手法について示し、さらにそれらを6軸産業用電動ロボットへ適用したので、その試験

原稿受付 1993年8月26日

*川崎重工業株式会社

*Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

Fig. 1 Example of Constrained Work

結果を示し、特性比較を行う。

2.1 基礎式の記述

H. C. C. は次式で示す目標応答を実現することにより達成される。ただし、以下では力とはトルクも含めたものとする。

$$M_x \ddot{x} + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + SK_d(x - x_d) = SF + (E - S)K_f(F - F_d) \quad (1)$$

$x, \dot{x}, \ddot{x}$: ロボットアーム手先関心点の位置, 速度, 加速度
(6×1)

M_x : ロボットアームの実慣性行列 (6×6)

$x_d, \dot{x}_d, F_d$: 目標位置, 速度, 力 (6×1)

B_d, K_d, K_f : 目標粘性, 目標剛性, カフィードバックゲイン (6×6)

F : 手先に作用する外力 (6×1)

S, E : 対角スイッチ行列, 単位行列 (6×6)

$S = E$ のとき: 全方向コンプライアンス制御系

$S = 0$ のとき: 全方向力制御系

ここでスイッチ行列 S の対角要素を 0 か 1 で選択することにより, コンプライアンス制御と力制御をロボットアームの動作自由度ごとに混合した制御がなされる。特にコンプライアンス制御系において, 低コンプライアンス設定にすると位置制御系が実現できる。したがって式(1)により位置/コンプライアンス/力制御がロボットアーム動作自由度ごとにハイブリッド化される。

2.2 関節トルク指令型 H. C. C. の構成

ロボットアームの作業座標系での運動方程式が次式で表されるものとする。ただし $\theta, \dot{\theta}$ はそれぞれ関節角度, 関節角速度とする。

$$M_x \ddot{x} + H_x(\dot{\theta}, \theta) + G_x(\theta) = J^{-1}(\tau - \tau_f) + F \quad (2)$$

$H_x(\dot{\theta}, \theta)$: 遠心コリオリ項 (6×1)

$G_x(\theta)$: 重力項 (6×1)

τ : 関節駆動トルク (6×1)

τ_f : 関節摩擦トルク (6×1)

J : 作業座標系でのヤコビ行列 (6×6)

式(1)(2)から実慣性項 M_x を消去して, 駆動トルク τ を表現すると,

Fig. 2 Block Diagram of Torque Based H. C. C.

Fig. 3 Block Diagram of Work Oriented Torque Based H. C. C.

$$\tau = J[B_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + SK_d(x_d - x) + (E - S) \cdot \{K_f(F - F_d) - F\} + H_x(\dot{\theta}, \theta) + G_x(\theta)] + \tau_f \quad (3)$$

式(3)が関節トルク指令型 H. C. C. の基礎式となる。当制御系を実際にロボットへ組み込む際にはフィードフォワードとして重力項だけを補償し, 応答改善のため各軸速度サーボ系の追加を行っている (Fig. 2)。ここで K_q は関節軸トルクからモータ電流指令値 I_{cmd} への変換係数である。また Fig. 2 で追加された各軸速度サーボ系は, 関節速度フィードバックゲイン K_v を十分に上げることで, 関節角レベルでの摩擦や他軸の動的干渉などの外乱項を補償する役割を果たすが, これによって目標粘性の設定に制約が生じる。

2.3 作業座標系 H. C. C. の構成

コンプライアンス/力制御を実現するに当たって, 作業対象によってはそれらのパラメータ (B_d, K_d, K_f, F_d) の設定座標系を作業対象の座標系や移動座標系に取りねばならない場合がある。このとき, 上記の各パラメータやヤコビ転置行列, 逆行列について座標変換を施すのではなく, 力覚信号を座標変換して容易に作業座標系 H. C. C. を実現する手法を実装した (Fig. 3)。

左上添字 B : ロボットベース座標系表現

左上添字 W : ロボット作業座標系表現

C_{BW} : 作業座標系からベース座標系への座標変換行列

C_{WB} : ベース座標系から作業座標系への座標変換行列

本手法を用いれば座標変換は最小限で, ユーザが自由に設定する作業座標系でコンプライアンス/力制御系を実現できる。

2.4 関節位置指令型 H. C. C. の構成

トルク指令型 H. C. C. と同様に実慣性項を消去して, 式(1)

Fig. 4 Block Diagram of Position Based H. C. C.

がある位置からの微小応答の式とみなし、線形化してラプラス変換すると、次式となる (s はラプラス演算子)。

$$\dot{x} = x_d + (sB_d + SK_d)^{-1} \{SF + (E - S)K_f(F - F_d)\} \quad (4)$$

通常、産業用ロボットは関節軸ごとに高速のサーボ補償がなされていることに着目し、式(4)を関節変位指令型に変換する。また、コンプライアンス制御時($S=E$)にも力目標値 F_d を入力できるように次式のようにする。

$$\theta = \theta_d + J^{-1}(sB_d + SK_d)^{-1} \{S + (E - S)K_f\}(F - F_d) \quad (5)$$

式(4)から式(5)への展開の際には近似を用いているが、サンプリング周期が十分速いのであまり問題はない。全体的な構成としては、コンプライアンス/力制御系のフィードバックラインが従来ロボットの独立関節軸 PID 制御系の上位階層に配置される系となっている。

位置指令型でも作業座標系 H. C. C. を実現できるように次式の構成とした。

$$\theta = \theta_d + {}^B J^{-1} C_{BW} (s {}^W B_d + S {}^W K_d)^{-1} \cdot \{S + (E - S) {}^W K_f\} (C_{WB} {}^B F - {}^W F_d) \quad (6)$$

力制御とコンプライアンス制御はトルク指令型と同様にスイッチ行列 S によって作業座標系の自由度単位で切り替えることができる。また、通常的位置制御はある自由度に対して行いたければその方向のコンプライアンス/力補償値を零にすればよい。

本制御則の構成ブロック図を Fig. 4 に示す。スイッチ S_w が S_c 側のときコンプライアンス制御、 S_f 側のとき力制御、中立位置のときには力フィードバックがなくなり位置制御となる。また力制御ブロックには力制御性能の向上のため力比例ゲイン K_h を追加してある。

3. ハードウェア構成

ロボット本体は、当社製 6 軸電動ロボット Js-10 (可搬重量 10[kgf]) を使用している。ロボットコントローラ系は、ロボット OS 及びロボット言語処理用 MPU 68020 搭載ボード 1 枚、TMS 320 C 25 搭載のサーボ用 DSP ボード 2 枚が VME バス結合されている。位置指令型 H. C. C. における構成図を Fig. 5 に示す。位置指令型 H. C. C. では力覚フィードバック系を従来の関節軸 PID サーボ系の外側に構成しているので、力覚フィードバックがない場合の位置、速度特性は市販機のそれを継承しつつ、かつコンプライアンス/力制御機能を容易に

Fig. 5 Composition of Position Based H. C. C.

Fig. 6 Robot Coordinate

追加できるという点に利点がある。

また 6 軸力覚センサは当社製で、定格荷重は 30[kgf]/300[kgf cm] である。本センサはアンプをセンサ本体に内蔵するため安価であり、複合荷重に対してキャリブレーションを行っているので一般の力覚センサよりも複合荷重精度が向上している。

4. 計算機シミュレーション

H. C. C. で作業する際にはロボットの機構や制御系の構成、作業対象によって目標コンプライアンスの設定可能範囲が制限される。したがって実機で作業を行う前に計算機シミュレーションなどによってそれらを検討しておくことは事前の性能把握のために非常に重要である。

そこで我々は、できるだけ実機に近いシミュレーションを行うために、すでに開発したロボット機構制御設計 CAE ソフトウェア [8] を用いて、以下の項目を考慮した機構、制御モデルを作成し、目標コンプライアンスの安定領域と、応答特性について検討を行った。

- 駆動ジョイント 6 自由度
- 駆動伝達部に集中弾性部 3 自由度
- 各関節部に摩擦特性
- コマンド系、制御系遅れ
- デジタルホールド要素
- 各軸制御系の補償要素
- モータ電流飽和
- 接触対象物は高剛性バネ

なお、シミュレーションモデルと実機のロボット座標系を

Fig. 7 Simulation Results of Force Control ($F_{dy} : 1[\text{kgf}]$)

Fig. 8 Experimental Results of Torque Based H. C. C.

Fig. 6 に示す。本シミュレータを利用して、位置指令型 H. C. C. で Y 方向力制御を行った例を Fig. 7 に示す。ここでは $K_f = 1.0$, $K_h = 0.0$ などとして、ロボット手先を高剛性バネ ($10^5[\text{kgf/m}]$) の壁面に衝突させ、そのときの手先に発生する力のステップ応答を調べた。目標粘性 B_d が $250[\text{kgf sec/m}]$ のときはやや発振気味であるが、 B_d を大きくするに従い安定な接触となっていく。これらのシミュレーションを繰り返しながら目標コンプライアンス設定範囲を絞り込み、そのデータを参考として実機適用試験を行った。

5. 実証試験結果

5.1 トルク指令型 H. C. C. 試験結果

ロボットアーム手先の目標剛性 K_{dx} (ロボットベース座標系の X 軸方向) を $4.6[\text{kgf/m}]$ に設定してその方向に手で押したときの変位と力応答を Fig. 8 に示す。試験結果から読み取れる剛性は、 $4.0[\text{kgf/m}]$ でほぼ目標通りの剛性となっているが、目標剛性とのずれは関節軸剛性やガタ、アーム剛性などの

Fig. 9 Experimental Results of Assembly Operation

Fig. 10 Experimental Results of Position Based H. C. C.

制御系で補償されていない機構伝達系によるものであると考えられる。

適用試験として、四つのガイドピンを有する物体をガイドのあるホールへ挿入する試験を実施した (Fig. 9)。挿入直前にミス・アライメントがある場合を想定し、故意に $15[\text{mm}]$ 程度の誤差を与えてから挿入した。実線は挿入作業に成功した例、破線は目標剛性を高く設定したために過大な拘束力が発生して試験を中止せざるを得なかった例である。

5.2 位置指令型 H. C. C. 試験結果

ロボットアーム手先に目標剛性、目標粘性を設定して力を定期的にかけてそのコンプライアンスを計測した結果を Fig. 10 に示す。また計算機シミュレーションとの対比を Fig. 11 に示す。添付した図からも分かるように目標コンプライアンスと実測コンプライアンスは非常によく合致しており、さらにトルク指令型と比較して力応答性においては位置・姿勢や、目標コン

Fig. 11 Comparison of the Experimental Results with the Simulation Results

Fig. 13 Overview of Testbed

Fig. 12 Experimental Results of Force Control for Position Based H.C.C. ($F_{dz} : 1[\text{kgf}]$)

プライアンス方向の影響が小さいことも分かった。

次に力制御性能を確認するために、一定力押し付け試験を行った例を Fig. 12 に示す。接触対象物は押し付け台が SS 41, ロボットのツールが SUS 304 である。Fig. 12(a) は高目標粘

性設定で目標力通りの押し付け力を実現している例で、Fig. 12(b) では目標粘性を低く設定したところ、持続振動を生じた例である。同様の試験を作業座標系全 6 軸において実施し、やはり良好な結果を得ることができた。

5.3 位置指令型とトルク指令型の定性的な比較

今回 H.C.C. を適用したロボットは、関節軸に高減速機を有する電動ロボットであったため、トルク指令型を適用した場合、非常に高い目標コンプライアンスを実現できたものの、産業用としては実用的な位置剛性を得ることが難しかった。また、力やトルク外乱の影響を受けやすいため、所望のコンプライアンスを実現するためには何らかの補償が必要となる。

一方、位置指令型の場合、位置剛性は一般産業用ロボットそのものの性能を有しているが、比較的高いコンプライアンスの設定が困難となった。しかしながら各種の適用試験の結果、はめ合い作業や押し付け作業を実行するには十分なコンプライアンスは確保できることを確認できた。また、従来型の独立関節軸 PID 制御系で関節軸レベルの外乱をある程度補償しているので、ほぼ目標通りのコンプライアンスを実現できた。

以上の結果より、DD モータなどトルクを直接制御する関節軸を有するロボットではトルクレベルの補償さえ行えばトルク指令型、産業用電動ロボットのような高減速比の減速機を有するロボットでは位置指令型の方が実用性が高いと思われる。

6. おわりに

H.C.C. の構成法としてトルク指令型と位置指令型の 2 手法について示し、実際に産業用ロボットへ適用して各種実証試験を通じてその特性比較を行った。以上の結果より H.C.C. は搭載するロボットに応じて最適な構成を取れば、汎用的なコンプライアンス/力制御を実現する手段として有効であることが確

認できた。

位置指令型 H. C. C. は電動ロボットで有効な構成法であるが、目標コンプライアンスの設定範囲がトルク指令型と比較すると限定される。これは力フィードバックの時間遅れ[4]や各軸 PID 制御性能の向上によって改善させることが可能である[5]。

また現在位置指令型 H. C. C. については、視覚センサやグラフィック・ワークステーションなどと組み合わせたテストベッドを構築し (Fig. 13), オペレータとロボットとの間に通信遅れがある系への適用の研究を行っている。また一般産業用ロボットだけではなく、宇宙ロボット技術[3][9]やパラレルリンク・マニピュレータへの適用も実施中である。

参 考 文 献

- [1] M.H.Raibert and J.J.Craig: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 103-2, pp 126-133, 1981.
- [2] N.Hogan: "Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I, II, III," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107-1, pp 1-24, 1985.
- [3] 久保田, 五百井, 桂川ら: "On the Manipulation Control of Space Robot," i-SAIRAS '90 PROCEEDINGS, pp 287-290, 1990.
- [4] D. A. Lawrence: "Impedance Control Stability Properties in Common Implementations," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1185-1190, 1988.
- [5] 金子, 梅野, 堀: "2 自由度ロボタサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御", 日本ロボット学会誌, vol. 9-7, pp 830-840, 1991.
- [6] 桂川, 五百井, 野呂ら: "ハイブリッド・コンプライアンス/力制御による組み立て作業", 日本ロボット学会第 9 回学術講演会予稿集, pp 43-44, 1991.
- [7] 桂川, 五百井, 野呂ら: "位置指令型ハイブリッド・コンプライアンス/力制御の構成とその適用試験", 日本ロボット学会第 10 回学術講演会予稿集, pp 637-638, 1992.
- [8] 野呂, 五百井, 永田ら: "ロボットアーム機構/制御設計支援 CAE (RINDA) の開発", 第 36 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp 299-300, 1992.
- [9] N. Muroi, N. Kubota et al.: "Research and Development of Sensing and Manipulation Techniques for Space Robotics on a Testbed," Proc. AIAA 31st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1993.

桂川敬史 (Takashi Katsuragawa)

1965 年 9 月 30 日生。1989 年九州大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月川崎重工業 (株) 入社。現在, システム技術開発センター所属。主としてロボットの機構と制御の研究開発に従事。日本機械学会会員。(日本ロボット学会正会員)

久保田伸幸 (Nobuyuki Kubota)

1962 年 4 月 2 日生。1984 年九州大学工学部航空工学科卒業。1986 年同大学院修士課程修了。同年川崎重工業 (株) 入社。現在, 航空宇宙技術本部所属。主として宇宙ロボットの研究に従事。日本航空宇宙学会会員。(日本ロボット学会正会員)

五百井清 (Kiyoshi Ioi)

1955 年 9 月 26 日生。1979 年京都大学工学部数理工学科卒業。1981 年 3 月同大学院数理工学専攻修了。同年 4 月川崎重工業 (株) 入社。現在, システム技術開発センター所属。主としてロボットの機構と制御の研究開発に従事。1991 年 1 月京都大学工学博士。日本機械学会, 日本応用数理学会会員。(日本ロボット学会正会員)

野呂 治 (Osamu Noro)

1949 年 3 月 30 日生。1972 年京都大学工学部数理工学科卒業。1974 年 3 月同大学院数理工学専攻修了。同年 4 月川崎重工業 (株) 入社。現在システム技術研修所所属。システム技術の教育に従事。日本機械学会, 日本応用数理学会会員。