六軸電気油圧マニピュレータのコンプライアンス制御*

安 耿 寛^{*1}, 横 田 眞 一^{*2}
尾 関 倫 彦^{*3}, 山 本 敏 郎^{*4}

Compliance Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator

Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA,
Tomohiko OZEKI and Toshirou YAMAMOTO

An electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of an electrically driven manipulator. So it is quite difficult to obtain stable control performance. In this report, we have applied a disturbance estimation and compensation type robust control to all the axes in a 6-link electro-hydraulic manipulator. From the results, it was confirmed that the performance of trajectory tracking and attitude regulating was greatly improved by the disturbance observer, the model of which is the same for each axis. On the other hand, for autonomous assembly tasks, it is said that compliance control is one of the most available methods in contact task. Therefore we have proposed a compliance control based on the position control by a disturbance observer for our manipulator system. To realize more stable contact work, the states in the compliance loop are feedback, where not only displacement but also the velocity and acceleration are considered. We have also applied this compliance control to the Peg-in-Hole insertion task and proposed new methods of (1) rotating of the end-effector periodically in order to reduce the friction force, (2) random searching for the center of a hole and (3) trajectory modification to reduce the impact force. As a result of these new methods, it could be experimentally confirmed that the Peg-in-Hole insertion task with a clearance of 0.007 mm could be achieved.

Key Words: Hydraulic Control, Compliance Control, Multi-Link, Manipulator, Disturbance Observer, Robust Control, Peg-in-Hole Task

1. は じ め に

油圧駆動のマニピュレータはその高出力特性から重量物搬送に利用されているが、油圧アクチュエータは外乱の影響を直に受けやすく、また姿勢による慣性モーメントの変化などのパラメータ変動が大きいために安定で高精度な制御は困難であるとされてきていた。このような電気油圧マニピュレータの位置制御に関しては各アクチュエータに対して外乱推定補償法を適用することによって、安定で高精度な制御が実現できることが著者らによりすでに報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、油圧マニピュレータは高出力で絶縁性を容易に高めることができるために、送電を止めずに配電線の補修工事を行う配電工事用マニピュレータなどに利用されている。このようなマニピュレータによって組立作業、接触作業を行う場合、不安定な高所での作業であり、感電などの危険性からマニピュレータの自律

化への要求が高まってきている。このような作業では、マニピュレータが外界と接触する際に発生する力に応じてマニピュレータを柔らかく制御するコンプライアンス制御が有用な手段の一つであるとされているが、高精度な制御が困難な六軸電気油圧マニピュレータに対して実際に応用された例は少ないといえる。

本研究では六軸電気油圧マニピュレータに対して外乱推定補償法を用いることによって精度の高い軌跡制御、姿勢制御を実現するとともに、位置制御をベースとしたコンプライアンス制御の実現を目的とする。またこのコンプライアンス制御を組立作業の代表的な例である Peg-in-Hole 作業に適用し、その有効性について検討を行う。

2. 実 験 装 置

実験に用いる電気油圧マニピュレータの概略を図1に示す。マニピュレータへの供給圧力は 10 MPa である。各軸の制御アルゴリズムは 1 台のマイクロコンピュータ (CPU: Pentium, クロック: 200 MHz) によってサンプリング周波数 2 kHz の 1 周期内で演算され、12 ビットの D/A ボードからサーボアンプを介してサーボ弁を駆動する。各関節軸には位置検出器として 0.0044° の分解能を有するロータリエンコーダを用

* 1997 年 5 月 23 日 春季油空圧講演会において講演、原稿受付 1997 年 7 月 16 日。

^{*1} 准員、東京工業大学大学院 (☎ 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)。

^{*2} 正員、東京工業大学精密工学研究所。

^{*3} 東京工業大学大学院。

^{*4} 古河電工 (株) (☎ 290-8555 市原市八幡海岸通 6)。

Fig. 1 Experimental Apparatus

い、アップダウンカウンタを介して各関節角がコンピュータへ取り込まれる。また、マニピュレータが外界と接触する際に発生する力の検出はマニピュレータ先端に取付けられた六軸の力センサによって行われ、手先の力とモーメントが12ビットのA/Dボードを介してコンピュータに取り込まれる。このような六軸電気油圧マニピュレータに対して軌跡制御、姿勢制御実験を行う。

3. 軌跡制御実験

本実験で用いる外乱推定補償法はシステムの入力と出力を観測し、ノミナルモデルと一致しないものは非線形要素も含めてすべて入力に重畳した外乱と見なし、この外乱を一つの状態変数と見なして外乱オブザーバを用いて推定し補償する制御法である。この外乱推定補償法を用いて六軸電気油圧マニピュレータの手先に半径15 cmの円を描かせる軌跡制御実験を行った。ただし同時に先端の姿勢を x 軸に対して $\pi/6$ radに保つような指令を与えている。これによりマニピュレータ先端は円軌跡に対して垂直となる。また円を描く速度は10 sで一周としている。

関節角度フィードバックのみで制御を行ったときの結果(ロバスト制御なし)と外乱推定補償法を各軸に用いたときの結果(ロバスト制御あり)を図2に示す。この結果を見てもわかるように外乱によって正確な軌跡制御、姿勢制御が困難な六軸電気油圧マニピュレータに対して各軸に外乱推定補償法を応用することによって、きわめて精度が高い軌跡制御、姿勢制御が実現できていることがわかる。4章ではこの外乱推定補償法を用いたシステムに対してコンプライアンス制御を適用する。

Without Robust Control

With Robust Control

Fig. 2 Results of Trajectory Control

(a) Stiffness Model (b) Impedance Model

Fig. 3 Compliance models

4. コンプライアンス制御

4.1 インピーダンス制御 外界からの力の情報を積極的に利用する能動的コンプライアンス制御の最も簡単な考え方は、外部環境との接触によって生じた反力に比例した変位指令を力の方向に与える方法である。ここで外力 f とマニピュレータ先端の変位 x_d の間に図3(a)に示される仮想のばね系を考える。ここで K は仮想ばね定数、すなわちマニピュレータのコンプライアンスの尺度であり、任意に設定することができる。この制御方法は剛性のみを考慮しているのでスティフネス制御と呼ばれる。

しかし、接触作業は急激に発生力が変化しやすいため、単純に力を仮想ばね定数で除することで仮想変位

を求めるスティフネス制御では同じ発生力であっても仮想変位が大きくなるとともに振動的となり、系が不安定になることが三軸電気油圧マニピュレータの実験によって報告されている⁽³⁾。そこで、外部環境との接触によって生じる反力と仮想変位の間の関係を単純なばね系ではなく、図3(b)に示すような仮想ばね K 、仮想ダンパ D 、仮想質量 M を考慮したインピーダンスモデルを考える。このように仮想ばねだけでなく仮想ダンパ、仮想質量も考慮に入れた上で発生力を変位に変換しマニピュレータの挙動に慣性およびダンパ的な効果を持たせようとするものがこのインピーダンス制御である(図4)。

このインピーダンス制御法を用いて図5に示すようにマニピュレータ先端に半径0.15 mの円軌跡を描かせる実験を行った。特にこの円軌跡上には障害物として壁面を設置する。壁面はおよそ $z = -0.40$ mの位置に設置され、手先に対して $\pi/3$ rad 傾いた壁面となっている。このような実験を位置制御のみで行った場合、手先が壁面と接触した時点でマニピュレータの動きは停止してしまうと考えられる。しかし、コンプライアンス制御を用いることで、接触によって生じた力に応じてマニピュレータが柔らかく制御されるためにマニピュレータが壁面に沿って動くような、いわゆるならい作業が実現できることが期待される。仮想ばね定数 $K = 1.0 \times 10^3$ N/m, 仮想質量 $M = 40$ kg, 仮想ダンパ $D = 4.0 \times 10^2$ Ns/mとしたときの実験結果を図6に示す。この結果をみてもわかるように単純にインピーダンスモデルをコンプライアンスループ内に挿入しただけでは接触環境も含めたシステムが不安定になっ

Fig. 4 Impedance Control System

Fig. 5 Experimental setup

てしまい、接触、非接触を繰り返すような挙動を示している。インピーダンス制御を用いて安定な接触作業を実現するためにはコンプライアンスループが安定になるような方法をとる必要があると考えられる。

4.2 状態フィードバックを用いたインピーダンス制御

前述のように単純にインピーダンスモデルをコンプライアンスループ内に挿入しただけでは安定な壁面ならい作業が実現できないことが確認された。そこで仮想変位だけでなく、インピーダンスモデルから求められる仮想速度、仮想加速度の状態フィードバックを行うことによってコンプライアンスループの安定性を高めることを試みる(図7)。実験を行うに先だって、現在の壁面ならい作業におけるコンプライアンスループのモデル化を行う。接触作業の際のコンプライアンスループは外乱推定補償法からマニピュレータの動特性とノミナルのモデルが一致することを仮定するとマニピュレータのモデルとしてノミナルモデル、力センサからの出力に用いるローパスフィルタのモデル、接触する壁面のモデル、マニピュレータのコンプライアンスを決定するインピーダンスモデル、速度と加速度の状態フィードバックループから構成されると考えることができる。各モデルは図8中に示すような式で表されるものとする。

以上のようなコンプライアンスループを考え、接触壁面のモデルを剛性成分のみと考え、ループゲインとして変化させたときの根軌跡を次に示す。図9が状態

Fig. 6 Experimental Results of Impedance Control ($M = 40$ kg, $D = 400$ Ns/m, $K = 1\,000$ N/m)

Fig. 7 Impedance Control System with State Feedback

Fig. 8 Compliance Loop Model

Fig. 9 Root Locus (without State Feedback)

Fig. 10 Root Locus (with State Feedback)

フィードバックを用いない場合の結果である。現在実験で用いている壁面の剛性は 1.5×10^4 N/m 程度であることが確認されていることから、状態フィードバックを用いないインピーダンス制御ではコンプライアンスループの安定性が十分に確保されていないことがわかる。一方、図 10 は $K_{vel}=0.08$, $K_{acc}=0.02$ の状態フィードバックゲインを用いたときの結果である。この結果をみてもわかるように状態フィードバックの効果によってかなり壁面の剛性が高くなるまでコンプライアンスループの安定性が確保され、安定な接触作業の実現が期待できる。そこでこれらのパラメータを用いて壁面接触作業実験を行ったときの結果を図 11 に示す。インピーダンスモデルから求められる仮想速度、仮想加速度の状態フィードバックを用いることによって安定な壁面ならい作業が実現できることが確認できる。しかし接触状態から非接触状態に移移するとき、若干接触面から離れていることがわかる。これはこの図には示していないが実際壁面と離れているところの参照入力を調べると、各軸の応答の時間遅れが原因で

Fig. 11 Experimental Results of Impedance Control ($M=10$ kg, $D=400$ Ns/m, $K=1\,000$ N/m, $K_{vel}=0.08$, $K_{acc}=0.02$)

Fig. 12 Peg and Hole

その時点での参照入力はずでに壁面と離れていることが確認された。

5. コンプライアンス制御を用いた Peg-in-Hole 作業

本章ではコンプライアンス制御を組立作業の代表的な例である丸棒をクリアランスの小さい穴に挿入する Peg-in-Hole 作業に適用し、その応用の可能性について検討する。

本実験では Peg として平均直径が 10.902 mm と 10.995 mm のものを、Hole としては直径 11.009 mm のものを用いることにする。また、Hole の深さは 50 mm である。図 12 の Peg と Hole の直径寸法は 10 mm 間隔で 6 箇所をマイクロメータで計測し平均した結果である。

コンプライアンス制御を用いて Peg-in-Hole 作業を行う場合、挿入作業は図 13 に示すような段階に分けることができる。まず壁面に沿ってならい作業をおこない、かんだ状態で姿勢のコンプライアンス制御を適用することによって Peg の姿勢の誤差を柔らかく吸収し、最後に挿入を完了する。

ここでは壁面に沿ったならい作業時の位置に対する

Fig. 13 Procedure for Assembling Stages

Fig. 14 Reference Trajectory

Fig. 15 Peg-in-Hole Task: Clearance 0.054 mm (without Compliance Control for Top Link Attitude)

コンプライアンス制御は4章の各方向の発生力に対するインピーダンス制御(これを位置のコンプライアンス制御と呼ぶ)によって、挿入時の姿勢に対するコンプライアンス制御は力センサによって測定されるモーメントに対するインピーダンス制御(これを姿勢のコンプライアンス制御と呼ぶ)によって実現することにする。Peg-in-Hole 作業に際しては図14に示すような矩形の参照入力軌跡をあらかじめマニピュレータに与えておくことにする。このような指令により挿入力を実現して壁面に対するならい作業、挿入作業が実現できるものと考えられる。まずPegとして直径10.902 mm, つまりクリアランス0.054 mmのときの実験結果を図15と図16に示す。図15は位置のコンプライアンス制御のみのとき、図16は位置および姿

Fig. 16 Peg-in-Hole Task: Clearance 0.054 mm (with Compliance Control for Top Link Attitude)

勢のコンプライアンス制御を用いたときの結果である。図は上から挿入方向の手先の位置(ただし、ここでは約1.560 mのところでPegがHoleの底に届き挿入作業が完了することになる)、手先の姿勢、各方向の発生力、モーメントをそれぞれ表している。実験の際にはPitch角に初期姿勢の誤差を0.5°与えている。実験結果をみるとわかるように位置のコンプライアンス制御のみの場合はならい作業からかんだ状態になったあとにも初期姿勢誤差をそのままもち、まったく挿入が進まず約1.53 mのところで挿入作業が停止していることがわかる。これは位置のコンプライアンス制御だけでPeg-in-Hole 作業を行おうとしても未知の姿勢誤差のために完全な挿入作業が実現できないことを示す。これに対して図16の場合には、かんだあとにその姿勢の誤差がコンプライアンス制御によって吸収されて挿入作業が実現されていることがわかる。このように姿勢のコンプライアンス制御を用いることによってクリアランス0.05 mm程度ならば十分にPeg-in-Hole 作業を実現することができていることが確認された。また、同じく姿勢のコンプライアンス制御を用いてPegの直径が10.995 mm, つまりクリアランスを0.007 mmとしたときには、すきまが極端に小さくなったために姿勢のコンプライアンス制御を用いているにもかかわらず挿入作業が実現できなかった。このようにより厳しい条件におけるPeg-in-Hole 作業を実現するためには他の手法を新たに用いる必要があると考えられる。

6. Peg-in-Hole 作業の補助手段の提案

6・1 揺動による挿入力の低減 5章で述べたように、たとえ姿勢のコンプライアンス制御を用いたと

してもクリアランスが 0.007 mm になった場合、Peg-in-Hole 作業は実現できないことが確認された。これはクリアランスが極端に小さくなることに伴い、同じ姿勢誤差に対してもっと大きい挿入力が必要になるからである。それでここでは挿入力を低減する方法としてねじをねじ込むように Peg を軸回りに揺動させながら Hole に挿入していく接触摩擦低減法を試みた。この方法の有効性を確かめるために、直径 10.902 mm の Peg を用いて全く同じ実験条件で、Peg を揺動させる場合とさせない場合の挿入力を実験より比較した(図 17)。この結果からみると揺動することにより挿入力が約 25% 減り、かなり効果があることが確認された。

6・2 ランダム Hole 中心探索 6・1 節で述べた Peg-in-Hole 実験を行うとき、問題点として図 14 に示す軌跡上に必ず Hole の中心が位置しなければならないことと、中心を探すのに時間がかかることなどがあげられる。しかし実際の組立作業の環境には、部品の寸法公差や位置決め誤差などが存在することなどから図 14 は実際の Peg-in-Hole 作業には適していない。そこで、Peg 軸の垂直面(ここでは Y-Z 平面)に対してそれぞれランダムな参照入力により迅速に Hole 中心を探索する方法を試みた。提案したランダム中心探索法の一例を図 18 に示す。ここではランダム

Fig. 17 Comparison of Insertion Forces with and without Rotation of Peg

Fig. 18 One Typical of Random Search Trajectories

ム入力の最大変位を 0.015 m 、駆動周波数を 50 Hz 、Hole の中心に対して Peg の最初の位置誤差を $(y, z) = (-2\text{ mm}, 0.5\text{ mm})$ としたときの結果である。図 18 の場合、Hole 中心探索時間は 1.83 s であった。これは Hole 中心の位置誤差が約 2 mm 程度なら十分克服できる極めて効果的な手段であるといえる。

6・3 衝撃力の低減のための参照軌跡の修正 今までの Peg-in-Hole 実験のとき、挿入最初の段階で大きい衝撃力が発生してしまう。これは図 15 をみてもわかるように約 20 s の挿入のはじめの段階で約 70 N の大きな衝撃力が発生していることからわかる。この現象は実際の挿入作業のとき、部品同士に損傷を与える可能性もあり、かつコンプライアンス制御という概念からみてもはじめることになる。これに対する解決案として参照軌跡の修正を試みた。提案した参照軌跡の一例を図 19 の上段部に示す。この参照軌跡をみてもわかるように Hole の中心を探索したあと、順々に参照入力軌跡を修正し挿入力を小さくすることによって衝撃力がかなり低減していくことがわかる。

6・4 補助手段による Peg-in-Hole 実験結果

前述の三つの補助手段を全部用いたときの Peg-in-Hole 実験結果を図 20 に示す。実験結果をみるとまず Peg の揺動により摩擦力を低減させクリアランス 0.007 mm の場合の Peg-in-Hole 作業を実現できていることがわかる。それとランダム Hole 中心探索法により Hole 中心探索時間を約 2 s 以内で収めることができた。最後に挿入最初の段階で発生する衝撃力も約 30 N 以内に抑えることもできた。これらの手法は、人間がクリアランスが非常に小さい場合の組立作業を行う際にも無意識のうちにやっている方法であり、かつマニピュレータに行わせる際にも特に複雑な制御を必要とせず、極めて効果的な手段であるといえる。

Fig. 19 Comparison of Impact Force Before and After Trajectory Modification

Fig. 20 Peg-in-Hole Task: Clearance 0.007 mm (Compliance Control for Top Link Attitude and with Proposed Algorithms)

7. 終わりに

外乱推定補償法を各軸に用いて高精度な制御が実現できるようになった六軸電気油圧マニピュレータに対して、位置制御をベースとしたコンプライアンス制御を適用し、壁面ならい作業によってその効果を検討した。その結果、仮想ばね、仮想ダンパ、仮想質量だけ考慮したインピーダンス制御ではコンプライアンスループの安定性が確保できずに接触、非接触を繰返すよ

うな結果となった。そこでインピーダンスモデルから求める仮想速度、仮想加速度の状態フィードバックによりコンプライアンスループの安定性を確保することによって、安定的な壁面ならい作業が実現できることを実験的に確認した。

また六軸電気油圧マニピュレータのコンプライアンス制御法を組立作業の代表例である Peg-in-Hole 作業に応用し、揺動挿入法とランダム Hole 中心探索法および参照軌跡の修正による挿入補助手法によってクリアランス 0.007 mm の Peg-in-Hole 作業を実現できることを実験的に確認した。

文 献

- (1) 横田真一・三橋真人・虎谷智明・山本敏郎, 配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度制御第2報, 油圧と空気圧, **25-6**(1994), 746-752.
- (2) 山本敏郎・横田真一・田村尉, 配電工事用電気油圧マニピュレータの高精度制御第3報, 油圧と空気圧, **26-7**(1995), 896-902.
- (3) 横田真一・篠原潤・田村尉・山本敏郎, 電気油圧マニピュレータのコンプライアンス制御, 平成8年春期油空圧講演会講演論文集, (1996), 93-96.
- (4) Hogan, N., Impedance Control: An Approach to Manipulation Part2 - Implementation, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, Vol. 107(1985), 8-16.
- (5) Whitney, D. E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, Vol. 104(1982), 66-77.