研究論文

位置・力複合制御機能を内蔵した油圧シリンダに関する研究*

(第3報 DiThCoシリンダのコンプライアンス制御機能とその応用)

呉 春 男**, 北 川 能**

A Study on Hydraulic Cylinder with Built-in Compound Control Function of Displacement and Thrust

(3rd Report: Compliance Control Function of DiThCo Cylinder and its Applications)

ChunNan WU, Ato KITAGAWA

Compliance control by a novel hydraulic actuator with built-in compound control function of displacement and thrust, and its applications have been studied. It was realized by measuring the rotational angles of stepping motor shaft and body, and adjusting their feedback weight parameters separately. The explanation of the compliance control function and analysis of static and dynamic characteristics were conducted. Through the preliminary experiments, it is confirmed that the actuator is very effective in the compliance control. Furthermore, as an application, experiment of grasping and lifting a ball was conducted. It was clear that the actuator can be used for the control of displacement, thrust and compliance.

Key Words : Hydraulic Cylinder, Compliance Control, Position Control, Force Control, Compound Control

1. 緒 論

ロボットによる把持、運搬、挿入などの作業では、人間の手のような運動中の接触力に順応するコンプライアンスが必要であり、この順応機能を与える一つの手法としてコンプライアンス制御¹⁾が提案されている。コンプライアンスを実現する制御手法は、能動的なコンプライアンス制御法(アクティブ法)^{3)~5)}と受動的なコンプライアンス制御法(パッシブ法)^{6)~9)}に区分できる²⁾。従来の能動的なコンプライアンス制御の最も簡単な方法は、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ものであり、物体に接触したときに、それ以上無理に押さずに外力に順応して変位することにより、間接的に力を制御する方法である。ところが、接触作業で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ことで仮想変位を求める方法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、系が不安定になりやすい⁴⁾。そこで、外部環境との接触によって生じた反力と仮想変位との関係を単純なばね系ではなく、ばね—質量—ダンパでモデル化するインピーダンス制御法が提案された。しかし、この手法にも環境の剛性に起因する系の不

安定発生の問題点がAnら⁵⁾によって指摘された。結局、系の安定化のためには環境の剛性に応じた速度、加速度フィードバックを用いる必要があり、この場合も環境の剛性が既知でなければならないという問題がある。すなわち、このような能動的なコンプライアンス制御には、安定的な制御を実現するための複雑な制御手法が必要となり、その結果、制御器の負荷も大きくなる。そこで、能動的なコンプライアンス制御方式ではなく、受動的なコンプライアンス制御方式、すなわち機械的柔軟性を持つ機構の研究も行われている。機械的柔軟性を持つ機構として、牧野⁶⁾はSCARAロボットを、Whitneyら⁷⁾はRCCハンドを、Xuら⁸⁾はICW(Instrumented Compliance Wrist)を提案している。しかし、それらはハーモニックドライブやゴム弾性を利用してコンプライアンスを実現するため、その粘弾性を独立に調整し難く、特定の作業を対象としたものに限られている。一方、橋本ら⁹⁾は優れた安定性、応答性、簡易性を有する機械要素による受動的コンプライアンス制御法を提案し、力フィードバック系を構成することなく、位置制御のみを用いて柔軟リストのコンプライアンス制御を実現した。この柔軟リストは、ばね、ダンパにより構成された緩衝器を利用してコンプライアンス制御を実現しているものの、緩衝器のばね定数の調整ができないので、制御範囲は限られている。

以上のことを踏まえ、本研究では、ばね定数の調整が可能な受動的なコンプライアンス制御を実現するため、DiThCoシリンダ(DiThCoは、「Di=Displacement(変位)」、「Th=Thrust(推力)」、「Co=Compliance(柔軟性)」

*平成17年3月23日 原稿受付

**東京工業大学大学院理工学研究科

(所在地 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-S5-16)

E-mail kitagawa@cm.ctrl.titech.ac.jp

重み m と n を調節することで、仮想ばね定数 K' が任意に設定でき、コンプライアンスの調整が可能となる。

(i) $m/n = -1$ のとき：力制御（コンプライアンスが無
大）

$m/n = -1$ に設定すると, 式(5), (6)は

$$f = \frac{K_s}{n} R \theta_r \quad (7)$$

$$G_{f\theta}(s) = \frac{\hat{f}}{\hat{\theta}} = \frac{G_{f\theta}(s)}{T_{cs} + n} \quad (15)$$

入力 θ_r からピストンの変位 y までの伝達関数 $G_{y\theta}(s)$ は、次式で表される。

$$G_{y\theta}(s) = \frac{\hat{y}}{\hat{\theta}} = \frac{G_{y\theta}(s)}{T_{cs} + n + \frac{m}{R} G_{y\theta}(s)} \quad (16)$$

DiThCo シリンダのピストンが外力 F によって押し込まれたときの外力 F とピストンの変位 y に関する式(17)のような伝達関数を $G_{yF}(s)$ と置く。

$$G_{yF}(s) = (-K_s') \frac{\hat{y}}{\hat{F}} = \frac{(-K_s') G_{yF}(s)}{1 + G_{y\theta}(s) \left[\frac{1}{T_{cs} + n} \right] \frac{m}{R}} \quad (17)$$

ここで、ステッピングモータの回転角 θ からピストンの推力 f までの伝達関数 $G_{f\theta}(s)$ とステッピングモータの回転角 θ からピストンの変位 y までの伝達関数 $G_{y\theta}(s)$ および外力 F からピストンの変位 y までの伝達関数 $G_{yF}(s)$ は、それぞれ次のようになる¹¹⁾。

$$G_{f\theta}(s) = \frac{\hat{f}}{\hat{\theta}} = \frac{k_1 k_b A r}{V_1 s + K_b k_2 + K_b G_2(s) A_r (A_s + k_1)} \quad (18)$$

$$G_{y\theta}(s) = \frac{\hat{y}}{\hat{\theta}} = \frac{G_{f\theta}(s) G_1(s)}{1 + G_{f\theta}(s) G_1(s) \left[\frac{A}{r k_1} s + \frac{1}{R} \right]} \quad (19)$$

$$G_{yF}(s) = \frac{\hat{y}}{\hat{F}} = - \frac{G_1(s)}{1 + G_{f\theta}(s) G_1(s) \left[\frac{A}{r k_1} s + \frac{1}{R} \right]} \quad (20)$$

ここで、 $G_1(s) = 1/(Ms^2 + Bs)$ はピストンの動特性を表す伝達関数であり、 $G_2(s) = 1/(Ms^2 + Bs + 2k)$ は可動スリーブの動特性を表す伝達関数である。

Table 1 Designed parameters of the DiThCo cylinder

Spool valve	$A_r = 40.6 \text{ mm}^2$, $d = 5 \text{ mm}$, $M_f = 0.05 \text{ kg}$	$B_f = 5 \text{ kg/s}$ $k = 22.6 \text{ N/mm}$
Cylinder	$A = 188 \text{ mm}^2$, $M = 5 \sim 45 \text{ kg}$	$B = 400 \text{ kg/s}$ $V_1 = 7.52 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Other parameters	$C_d = 0.6$, $K_s = 52.3 \text{ N/mm}$, $R = 8 \text{ mm}$, $\rho = 870 \text{ kg/m}^3$	$K_b = 0.5 \times 10^3 \text{ MPa}$ $p_s = 4 \sim 10 \text{ MPa}$ $r = 2 \text{ mm}$

式(17)はDiThCoシリンダのコンプライアンス特性を表している。そこで、コンプライアンス制御の動特性を調べるため、式(17)の伝達関数を用いて、Table 1の条件でシミュレーションを行った。その結果をFig. 4に示す。まず、式(17)のステップ応答特性をFig. 4(a)に示す。ピストンに作用する外力が $F = 52.3 \text{ [N]}$ のとき、 m/n を調整することによってDiThCoシリンダのピストン変位 y が変わることが分かる。すなわち、 m/n が大きいほどコンプライアンスが小さくなり、 m/n が小さいほどコンプライアンスが大きくなることを確認できる。全体的にピストン変位 y のステップ応答は良好な応答性と安定性を示している。次に、式(17)

(a) Step response of piston displacement y when DiThCo cylinder is displaced compulsorily by external force F

(b) Frequency response of $G_{yF_r}(s)$

Fig. 4 Simulation results of compliance control

の周波数特性をFig. 4(b)に示す。 m/n が大きなコンプライアンスが小さいシステムほど周波数帯域が広がっている。

以上のシミュレーション結果から、 m と n の調整によるDiThCoシリンダの安定なコンプライアンス制御が実現可能であることが確認できた。

3. 3 実験装置

試作したDiThCoシリンダのコンプライアンス制御特性を確認するためにFig. 5に示す実験装置を構成した。右側の油圧シリンダでDiThCoシリンダを強制的に変位させると、DiThCoシリンダは変位に応じて推力を発生する。ここで、ステッピングモータ軸回転角 θ はステッピングモータの入力パルスでカウントする方法で取得し、ステッピングモータ本体の回転角 ϕ はこの θ からステッピングモータ軸に固定されたエンコーダの測定値 $\theta - \phi$ を引くことで求められる。実験を記録するため、ポテンショメータでピストン変位 y を測定し、ロードセルでピストン推力 f を測定する。試作したDiThCoシリンダをFig. 6に示す。

3. 4 コンプライアンス制御実験結果

Fig. 5に示す右側の油圧シリンダでDiThCoシリンダのピストンを強制的に押し込みながら、ピストン変位 y の変化に応じたピストン推力 f の変化を測定し、仮想ばね定数を求めた。Fig. 7はフィードバック重み m および n ($= 1 -$

沿って下方に移動するので、DiThCoシリンダのばね特性によってピストンが伸び、球体を掴むピストン推力 f は逆に減少する。そして、ピストン推力 f によって生ずる球体とピストン間の摩擦力が球体の重力より小さいところまで球体を移動させると、球体は落ちてしまう。

Fig. 8 Experimental apparatus to grasp and lift a ball

電動スライダで球体を下方に Δh 移動させる過程で、ピストン変位 y とピストン推力 f の変化は、DiThCoシリンダのコンプライアンスの大きさによって変わる。すなわち、コンプライアンスを大きく設定した場合は、ピストン変位 y の伸びに対する球体を掴むピストン推力 f の減少が少ないので球体は落ち難く、コンプライアンスを小さく設定した場合は、逆に球体は落ち易いので、DiThCoシリンダのコンプライアンス制御効果が確認できる。

4.2 滑らかな切り換え制御

力制御からコンプライアンス制御への切り換えと、コンプライアンス制御での仮想ばね定数の切り換えの際に、球体を掴むピストン推力とピストン変位が変化しないことが要求される。

まず力制御からコンプライアンス制御への切り換えについて検討する。ここで、力制御段階の入力 θ_{r1} 、フィードバック重み m_1 、 n_1 、ピストン変位 y_1 は既知である。この場合、ピストン推力 f_1 は次式で表される。

$$f_1 = \frac{K_s}{n_1} R \theta_{r1} \quad (21)$$

コンプライアンス制御段階のフィードバック重み m_2 、 n_2 が既知とすると、ピストン推力 f_2 は次式で表される。

$$f_2 = K'_s (R \theta_{r2} - y_2) = \frac{K_s}{n_2} (R \theta_{r2} - y_2) \quad (22)$$

ここで、 θ_{r2} 、 y_2 はそれぞれコンプライアンス制御段階の入力とピストン変位を表す。

力制御からコンプライアンス制御へ滑らかに切り換える条件として、次式が成り立つ。

$$f_1 = f_2 \quad (23)$$

$$y_1 = y_2 \quad (24)$$

式(21)～式(24)より、 θ_{r2} を求めると、次式となる。

$$\theta_{r2} = \frac{n_2}{n_1} \theta_{r1} + \frac{y_1}{R} \quad (25)$$

式(25)より力制御からコンプライアンス制御へ滑らかに切り換える際のコンプライアンス制御の入力 θ_{r2} が求められる。

つぎに、コンプライアンス制御におけるフィードバック重み m_1 、 n_1 から m_2 、 n_2 への切り換えについて検討する。この場合、ピストン推力が変化しない条件より次式が成り立つ。

$$\frac{K_s}{n_1} (R \theta_{r1} - y_1) = \frac{K_s}{n_2} (R \theta_{r2} - y_2) \quad (26)$$

ここで、 θ_{r1} 、 y_1 はそれぞれフィードバック重みが m_1 、 n_1 のときの入力とピストン変位を表し、既知である。 θ_{r2} 、 y_2 はそれぞれフィードバック重みが m_2 、 n_2 のときの入力とピストン変位を表す。

またピストン変位が変化しない条件より $y_1 = y_2$ として、式(26)から θ_{r2} を求めると、次式となる。

$$\theta_{r2} = \frac{n_2}{n_1} \theta_{r1} + \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) y_1 \quad (27)$$

式(27)よりコンプライアンス制御においてフィードバック重みを m_1 、 n_1 から m_2 、 n_2 へ滑らかに切り換える際の入力 θ_{r2} が求められる。

4.3 球体の掴み上げ実験

球体掴み上げの実験結果をFig. 9(a)に示す。Fig. 9(a)は上段から、フィードバック重み m と n 、入力 θ_r 、ピストンの変位 y およびピストン推力 f である。図中のA点で位置制御が開始され、球体に近いところまで接近する。このときのフィードバック重みは $m = 1$ 、 $n = 0$ に、ピストン変位 y の目標値は5 [mm]とした。これはDiThCoシリンダの正確な位置制御を示している。

図中のB点でフィードバック重みを $m = -1$ 、 $n = 1$ に変更し、位置制御から球体を掴む力制御に切り換える。なお、球体へのピストンの高速での衝突を避けるため力制御では一定の最大速度を越えないようにした。ピストンが球体に接触する前は、ピストン変位のみ増加するが、C1点すなわちピストン変位 y が10.4 [mm]のところでピストンが球体に接触すると、ピストン変位 y に代って推力 f が徐々に増加する。そして、D1点すなわちピストン変位 y が10.7 [mm]のところで安定し、ピストンの推力 f も目標値200 [N]に収束している。これはDiThCoシリンダの滑らかな力制御を示している。

つぎに、球体を載せた電動スライダを下げ、球体を掴み上げたのと同じ状態にする。そして図中のE点で、

DiThCoシリンダを力制御からコンプライアンス制御に切り換える．ここからは，コンプライアンスが比較的大きい $m = 0$ とコンプライアンスが比較的小さい $m = 0.5$ の場合に分けて実験を行った．いずれの場合も，図中のE1点でのピストン変位 y とE2点でのピストン推力 f に変動が見られないことが分かる．これは力制御からコンプライアンス制御へ滑らかに切り換えたことを示している．

図中のF点すなわちピストン変位 y が10.7 [mm] のところで，ピストンに掴まれた球体を電動スライダで強制的に下方にゆっくり移動させる． $m = 0$ のコンプライアンスが比較的大きい場合は，ピストン変位 y の伸びに対するピストン推力 f の減少が少ないので，図中のH点すなわちピストン変位 y が12.5 [mm] のところで球体に与えるピストン推力 f は42 [N] までしか減少せず球体は落ちない． $m = 0.5$

のコンプライアンスが比較的小さい場合は，ピストン変位 y の伸びに対するピストン推力 f の減少が大きいため，図中のG点すなわちピストン変位 y が12 [mm] のところで球体は落ちてしまう．ここで，ピストン変位 y の変化に応じたピストン推力 f の変化を求めてみた．その結果をFig. 9(b)に示す． $m = 0$ と $m = 0.5$ のいずれの場合も，ピストン推力 f は摩擦力に応じた分だけまず低下するがその後の変化はピストン変位 y の変化に比例する線形特性を表しており，その傾きはそれぞれの仮想ばね定数 K' の計算値に近いことが分かる．すなわち， m が大きいほど仮想ばね定数 K' が大きく，コンプライアンスが小さいというDiThCoシリンダのコンプライアンス制御効果が示されている．

以上の球体掴み上げ実験より，DiThCoシリンダの位置・力およびコンプライアンスの3つの制御機能，ならびに m と n を調整することで，これらの3つの制御機能を連続的に滑らかに切り換えられることが確認できた．

5. 結 論

本研究ではDiThCoシリンダ固有のシステムばね定数を仮想的に変化させるコンプライアンス制御法を提案した．すなわち，ステッピングモータ軸と本体の回転角に各々重みをつけてフィードバックすることによりシステムばね定数が仮想的に変化するという基本原理を説明し，仮想ばね定数と重みとの関係を明らかにした．そして，仮想ばね定数がゼロの力制御系，無限大の位置制御系，その中間値のコンプライアンス制御系が，各々のフィードバック重みの設定によって自由に実現できることを示した．次に，数値シミュレーションと試作機を用いた実験により提案したDiThCoシリンダのコンプライアンス制御法の有効性を確認した．さらに，コンプライアンス制御機能の応用例として，球体の掴み上げ制御実験を行い，DiThCoシリンダが位置・力およびコンプライアンス制御に適用可能なアクチュエータであることを確認した．

参 考 文 献

- 1) Michael. B, John. M.H, Timothy. L.J, Tomas. L. -P, Matthew. T.M.: ロボット・モーションⅢ: コンプライアンス編, 花房秀郎等訳, HBJ出版局, 9/29 (1982).
- 2) 宋在晟, 平井慎一, 小野里雅彦, 岩田一明: 組立作業のためのパッシブコンプライアンスの設計, 日本機械学会論文集 (C編), 64-620, 1464/1471 (1998).
- 3) Whitney. D.E.: Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2, 262/268 (1985).
- 4) 安歌寛, 横田真一, 尾関倫彦, 山本敏郎: 6軸電気油圧マニピュレータのコンプライアンス制御, 日本機械学会論文集 (C編), 64-624, 3019/3025 (1998).
- 5) An. H.C., Hollerbach. J.M.: Dynamic Stability Issues in

(a)

(b)

Fig. 9 Experimental result to grasp and lift a ball

- Force Control of Manipulators, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 890/896 (1987).
- 6) 牧野洋, 村田誠, 古屋信幸: SCARAロボットの開発, 精密機械, **48**-3, 378/383 (1982).
- 7) Whiteny. D.E., Rourke. J.M.: Mechanical Behavior and Design Equations for Elastomer Shear Pad Remote Center Compliances, *Trans. ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, **108**, 223/232 (1986).
- 8) Xu. Y., Paul. R.P.: A Robot Compliant Wrist System For Automated Assembly, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1750/1755 (1990).
- 9) 橋本稔, 今村裕一: マニピュレータに使用される受動的柔軟リストのための3自由度パラレルメカニズムの運動学解析と機構設計, 日本機械学会論文集 (C編), **67**-622, 2116/2123 (1998).
- 10) 呉春男, 北川能: 位置・力複合制御機能を内蔵した油圧シリンダに関する研究 (第1報 DiThCoシリンダの開発とその基本特性), 日本フルードパワーシステム学会論文集, **35**-4, 70/76 (2004).
- 11) 呉春男, 北川能: 位置・力複合制御機能を内蔵した油圧シリンダに関する研究 (第2報 DiThCoシリンダの動特性とその調整), 日本フルードパワーシステム学会論文集, **36**-1, 22/30 (2005).