

解 説

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*

北川 能** 呉 春男***

*平成 19 年 6 月 18 日原稿受付

**東京工業大学大学院理工学研究科，〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

***住友重機械工業株式会社技術開発センター，〒237-8555 神奈川県横須賀市夏島町 19

1. はじめに

本稿では、位置・力およびコンプライアンス制御を行う油圧制御システムの簡素化と小形化を目的とし、小形・高出力で機械的柔軟性を有し、全体を一体構造にした油圧アクチュエータとして提案した「DiThCo シリンダ」¹⁾⁻³⁾について述べる。DiThCo (ディスコと呼ぶ)とは、「Di = Displacement (変位)」、「Th = Thrust (推力)」、「Co = Compliance (柔軟性)」の略称であり、DiThCo シリンダとは、位置・力制御およびコンプライアンス制御機能を内蔵した油圧アクチュエータシステムを意味し、つぎのような特徴を持っているものである。すなわち、提案する DiThCo シリンダはサーボ弁や力センサを使用せずに小形ステッピングモータで駆動される制御弁と油圧シリンダを一体化したもので、これに加えて位置制御のための機械的位置フィードバック機構および圧力フィードバックを受けるばね支持の可動スリーブを制御弁内に内蔵しており、自由長とばね定数が自由に設定できるばねのように機能し、位置だけでなく力およびコンプライアンス制御を一つのシステムで簡単に実現できるようになっている。このように DiThCo シリンダを用いることによって、従来の煩雑な位置と力およびコンプライアンス制御を行う油圧制御システムの簡素化と小形化が簡単に実現するものである。また、複数 DiThCo シリンダを用いると、多自由度挙動を行うロボットの場合にも、使いやすいアクチュエータとなるので、制御系の煩雑さが増す問題が解決できると考えられる。

2. DiThCo シリンダの位置・力複合制御機能

DiThCo シリンダの概念図を図 1 に示す。DiThCo シリンダはステッピングモータ、スプールならびにばね支持の可動スリーブで構成された制御弁、シリンダ、機械的位置および圧力フィードバック機構で構成されている。機械的位置フィードバック機構は、ステッピングモータ、スプール弁、シリンダおよびスチールベルトからなっている。DiThCo シリンダの機械的圧力フィードバック機構は、ステッピングモータ、スプール、可動スリーブおよび可動スリーブ両端を支えるばねから構成される。ステッピングモータ本体とピストンロッド、ステッピングモータ軸とスプールはそれぞれ別のスチールベルトで結ばれている。油圧回路は、差動回路となっており、シリンダのピストン両側の受圧面積比と可動スリーブ両側の受圧面積比は、いずれも 2 : 1 となっている。

定常状態でのピストン推力 f は次式のように求められる。

$$f = K_s(R\theta - y) \quad \text{ただし, } K_s = 2k \left(\frac{A}{A_f} \right) \left(\frac{r}{R} \right) \quad (1)$$

である。ここで、 K_s は DiThCo シリンダ固有のシステムばね定数である。

DiThCo シリンダのピストンが位置に関する拘束を受けず、自由に移動できる場合は、機械的位置フィードバック機構によって、ステッピングモータ軸の回転角 θ に比例して変位する。図 1 のようにスプールが中立位置にあるとき、ステッピングモータにパルスを与えると、モータ軸の回転 θ によりスプールが移動して絞り口②が開き、油がシリンダに流入してピストンが移動する。ピストンの移動はスチールベルトによってステッピングモータ本体を軸とは逆方向に回転させる。その結果、スプールが中立位置に復帰すると、スプールの絞り口②が閉じてピストンが停止し、位置決めされることになる。

この場合、ピストン変位 y は次式で表される。

$$y = R\theta \quad (2)$$

DiThCo シリンダが変位しないように強制的に固定した場合、機械的圧力フィードバック機構によって、ステッピングモータ軸の回転角 θ に比例したピストン推力を発生する。この場合、絞り口②が開いて油がシリンダに流入してもピストンは移動できないため、シリンダ室①の圧力が上昇し、その圧力がフィードバック通路③を介して可動スリーブの圧力室④に伝わり、ばね支持の可動スリーブに作用するため、可動スリーブはシリンダピストン側圧力 p_1 に比例して変位する。そしてスプールと可動スリーブの移動量が等しくなったところでスプールの絞り口②が閉じ、スプールの移動量に比例した圧力 p_1 すなわちピストン推力 f が発生することになる。この場合、ピストン推力 f は次式で表される。

$$f = K_s R\theta \quad (3)$$

逆にシリンダピストンが外力 F によって押し込まれた場合も上記と同様な過程で、ピストンの押し込み量 y に比例したピストン推力 f が発生する。すなわち、この油圧シリンダはばね特性を有するアクチュエータとして作動する。この場合、ピストン推力 f は次式で表される。

$$f = -K_s y \quad (4)$$

一般の場合は式 (1) で表されるように、DiThCo シリンダは外力 F がない場合のピストン変位目標値 $R\theta$ と実際のピストン変位 y の差に比例した推力 f を出力する。その比例定数は固有のシステムばね定数 K_s である。すなわち、ここでは DiThCo シリンダは自由長 ($R\theta$) が任意に設定でき、一定のばね特性を持った機械的柔軟性を有するアクチュエータとして動作している。

DiThCo シリンダの位置と力の複合制御における基本特性を図 2 に示す。DiThCo シリンダのピストンが移動して固定壁に突き当たるまでは、ピストンはステップ状に変位する。この場合、ピストンの変位に関する環境からの拘束がないので、式(2)に示すように、DiThCo シリンダはステッピングモータ軸の回転角 θ に比例して変位することがわかる。時刻 26[s] でピストン変位が $y_m = 13[\text{mm}]$ となり、DiThCo シリンダのピストンは固定壁に突き当たって動かなくなる。これ以後、DiThCo シリンダは固定壁に対する推力をステップ状に発生する。この場合のピストンの推力は $f = K_s (R\theta - y_m)$ で表される。図 2 から、ピストンの推力はステッピングモータ軸の回転角 θ の変化量に比例して増加していることがわかる。時刻 31[s] 以後は、ステッピングモータを逆方向に回転させている。

以上より、DiThCo シリンダは位置と力の複合制御機能を内蔵したアクチュエータとして動作可能なことが分かる。

3. DiThCo シリンダの動特性の改善

DiThCo シリンダのピストン推力 f の動特性を改善するため、図 3(a), (b) に示すように、フィードバック通路③にスリーブ調整絞りを設け、可動スリーブ変位 w の応答を調整することとした。スリーブ調整絞りの開口面積 A_s の 3 段階の値に対するシミュレーション結果を図 3(c) に示す。スリーブ調整絞りの開口面積を少し絞って中程度 (図中の **medium**) にすると、ピストン推力 f の立ち上がりが速くなり、応答性が良くなることがわかる。しかし、スリーブ調整絞りを小さくしすぎる (図中の **small**) と、ピストン推力 f にオーバーシュートが生じて大きくなり、応答がかえって悪くなるので、適当な値に調整する必要がある。スリーブ調整絞りの効果を位置拘束推力特性の実験によって調べた。その結果を図 3(d) に示す。スリーブ調整絞りをを用いることにより、ピストン推力 f の応答性が良くなっている。これは、図 3(c) のシミュレーション結果の傾向とほぼ一致している。従って、スリーブ調整絞りによって、ピストン推力の応答性の調整が可能であることが検証できた。

DiThCo シリンダのピストン変位 y の動特性を改善するため、図 4(a) に示すように、シリンダロッド側に通じる油路に新たにシリンダ調整絞りを設け、速度フィードバックと同様の減衰効果を与えることにした。シリンダ調整絞りの開口面積 A_c の 3 段階の値に対するピストン変位 y のステップ応答のシミュレーション結果を図 4(b) に示す。シリンダ調整絞りの開口面積 A_c が大きい場合に比べて中程度 (図中の **medium**) では、ピストン変位 y のオーバーシュートが改善されている。以上のように、速度フィードバックと同様の減衰効果を持つシリンダ調整絞りによって、ピストン変位 y のオーバーシュートの

改善すなわちシステムの安定性につながる減衰特性の調整が可能であることが確認できた。しかし、シリンダ調整絞りを小さくしすぎる（図中の small）と、逆にピストン変位 y の立ち上がりが遅くなり応答性が低下するので、適当な値に調整する必要がある。シリンダ調整絞りの効果を実験によって調べた。その結果を図 4(c) に示す。シリンダ調整絞りを調整することにより、ピストン変位 y のオーバーシュートが改善されている。これは、図 4(b) に示すシミュレーション結果の傾向とよく一致している。

最後に、スリーブ調整絞りとシリンダ調整絞りを共に調整した場合の効果について調べた。そのシミュレーション結果を図 5(a), (b) に示す。まず図 5(a) のようにスリーブ調整絞りでピストン推力 f の応答を最適な値になるように調整する。その際のピストン変位 y のオーバーシュートは図 5(b) のようにあまり変っていない。つぎにシリンダ調整絞りの調整を行う。シリンダ調整絞りの調整によりピストン変位 y のオーバーシュートは著しく改善されているが、一方、シリンダ調整絞りはピストン推力 f の応答にはまったく影響を与えていない。このように、スリーブ調整絞りでピストン推力 f の応答性を調整し、シリンダ調整絞りでピストン変位 y の安定性を調整すれば、両者の動特性向上を効果的に進めることがわかった。スリーブ調整絞りとシリンダ調整絞りを共に調整した場合の効果を実験によって調べた。その結果を図 5(c), (d) に示す。実験結果は、図 5(a), (b) に示すシミュレーション結果の傾向とよく一致している。

以上のように、スリーブ調整絞りとシリンダ調整絞りを併用することによりピストン変位と推力の動特性が共に良好になるように調整可能であることが確認できた。

4. DiThCo シリンダのコンプライアンス制御機能

式(1)より、DiThCo シリンダは外力がない場合のピストン変位目標値 $R\theta$ と実際のピストン変位 y の差に比例した推力 f を出力する。外力 F はこれと等しい。ここで、ピストン変位 $y = R\phi$ であるので、式(1)は、

$$f = F = K_s(R\theta - y) = K_s R(\theta - \phi) \quad (5)$$

となる。すなわち、ピストン推力 f とピストン変位 y を θ と ϕ を用いて表すことができる。そこで、ステッピングモータ軸回転角 θ とモータ本体の回転角 ϕ のフィードバック重みを n および m に設定し、ステッピングモータにフィードバックすることによって、DiThCo シリンダのコンプライアンスを調整することを考える。その原理を図 6 に示す。

定常状態では、 $\theta_r - \theta n - \phi m = 0$ であり、 θ はつぎのように求められる。

$$\theta = \frac{\theta_r - \phi m}{n} = \frac{R\theta_r - ym}{Rn} \quad (6)$$

ここで、 $R\theta_r$ は外力が作用しないときのピストン変位の目標値である。

式(6)を式(5)に代入すると、DiThCo シリンダの推力 f は次式で表すことができる。

$$f = F = K'_s \left(\frac{R}{m+n} \theta_r - y \right) \quad \text{ただし、} \quad K'_s = \left(1 + \frac{m}{n} \right) K_s \quad \left(-1 \leq \frac{m}{n} \leq \infty \right) \quad (7)$$

である。ここで、 K'_s は DiThCo シリンダの仮想ばね定数と考えることができる。また $R\theta_r/(m+n)$ は外力が作用しないときのピストン変位の目標値である。フィードバック重み m と n を調節することで、仮想ばね定数 K'_s が任意に設定でき、コンプライアンス制御が可能となる。

$m/n = -1$ に設定すると、 $f = \frac{K_s}{n} R\theta_r$ 、 $K'_s = 0$ となり、DiThCo シリンダのピストン推力はピストン変位と関係なく、DiThCo シリンダは入力 θ_r に比例して推力を発生する力制御系となる。この場合、仮想ばね定数 K'_s は零になり、力制御はコンプライアンスが無限大（非常に低い剛性）になることを意味している。

$-1 < m/n < \infty$ に設定すると、コンプライアンスが可変な位置と力の複合制御系すなわちコンプライアンス制御系となる。そして、 $m/n = 0$ のとき、DiThCo シリンダはシステムばね定数 K_s を有する位置および

力の複合制御系になる。

$m/n = \infty$ のとき、 $n = 0 (m \neq 0)$ の場合に相当するので、 $y = \frac{R}{m} \theta_r$ 、 $K'_s = \infty$ となり、外力 F によらず、入力 θ_r に比例して変位する位置制御系となる。この場合、仮想ばね定数 K'_s は無限大になり、位置制御はコンプライアンスが零（非常に高い剛性）になることを意味している。

以上のように、定常状態での DiThCo シリンダのコンプライアンス制御の基本式が導出された。また位置制御と力制御はコンプライアンス制御の極限の場合であることも確認できた。このような m と n の設定範囲による DiThCo シリンダの位置制御・力制御およびコンプライアンス制御特性をまとめると図 7 のようになる。すなわち、パラメータ m/n を調節するだけで、力制御・コンプライアンス制御・位置制御が連続的に切り換えられるコンプライアンスの設定が可能となり、DiThCo シリンダは位置・力複合制御機能を有するアクチュエータとして動作できる。

5. DiThCo シリンダによる球体の掴み上げ実験

DiThCo シリンダの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う。その実験装置を図 8(a), (b) に示す。

実験装置は DiThCo シリンダ、電動スライダ、 $\alpha = 5^\circ$ 傾斜した固定壁と球体から構成されている。球体として質量が 0.08[kg]、直径が 35[mm] の中空の鉄球を使用している。球体の掴み上げ制御実験は以下の手順で行う。

図 8(a) に示すように右側の電動スライダに球体を載せる。まず位置制御により球体にピストンを近付ける。そして球体に近いところで、位置制御から力制御に切り換え、DiThCo シリンダと傾斜壁の間で球体を掴むようにピストン推力を制御する。

つぎに、電動スライダを下げると、DiThCo シリンダが球体を掴み上げたと同じ状態になる。このとき、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によって球体は落ちない。つぎに、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、図 8(b) に示すように電動スライダでピストンに掴まれた球体を強制的に下方にゆっくり移動させる。このとき、球体は傾斜した固定壁に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。

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、逆に球体は落ちやすいので、DiThCo シリンダのコンプライアンス制御効果が確認できる。

球体掴み上げの実験結果を図 8(c) に示す。図 8(c) 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 $m = 1$ 、 $n = 0$ とし、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わかる。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] のところから、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。その結果を図 8(d) 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_s' の計算値に近いことがわかる。すなわち、 m が大きいほど仮想ばね定数 K_s' 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。

6. おわりに

本研究では、小形・高出力で機械的柔軟性を有し、自由長とばね定数が自由に設定できるばねのように機能する油圧アクチュエータとして「DiThCo シリンダ (ディスコシリンダ)」を開発した。そして、DiThCo シリンダはサーボ弁や力センサを使用せず全体を一体構造化することで簡素化した位置と力の複合制御機能を内蔵した新しい油圧シリンダであり、これが有する固有のシステムばね定数 K_s を制御によって仮想的に変化させることによりコンプライアンス制御も可能となることを確認した。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) 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).
- 2) 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).
- 3) 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 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), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 36-5, 135/142 (2005).

著者紹介



きたがわ あとう
北川 能 君

東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授, 流体制御, 流体駆動ロボット, 生体協調流体システム等の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会・日本機械学会・計測自動制御学会等の会員, 工学博士。

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



ご しゅんだん
呉 春男 君

2005 年 東京工業大学大学院博士後期課程修了。同年住友重機械工業株式会社入社, 現在に至る。日本フルードパワーシステム学会の会員, 博士 (工学)。

E-mail: chunnan_wu@shi.co.jp

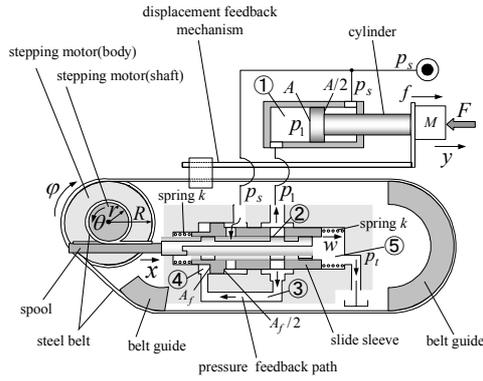
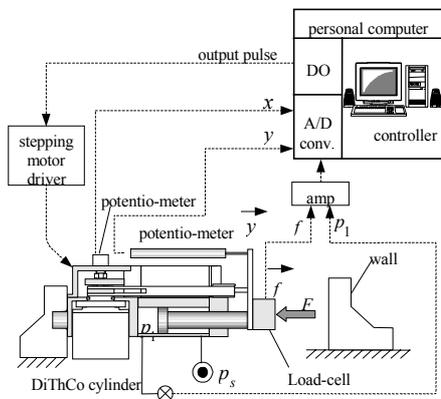
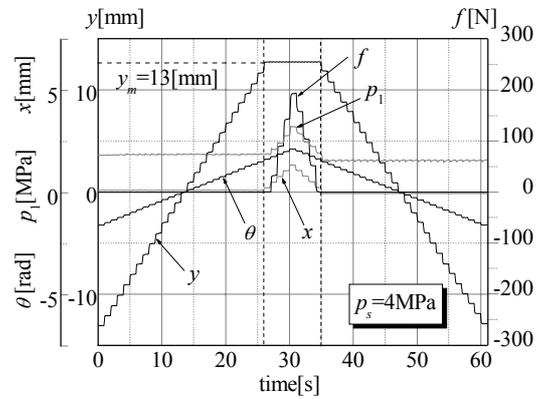


図1 DiThCo シリンダの構成と作動原理

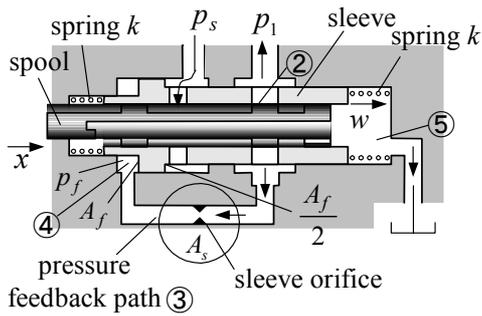


(a) 実験装置

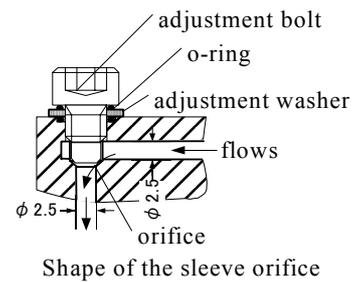


(b) 実験結果

図2 DiThCo シリンダの基本特性



(a) スリーブ調整絞り



(b) スリーブ調整絞りの構造

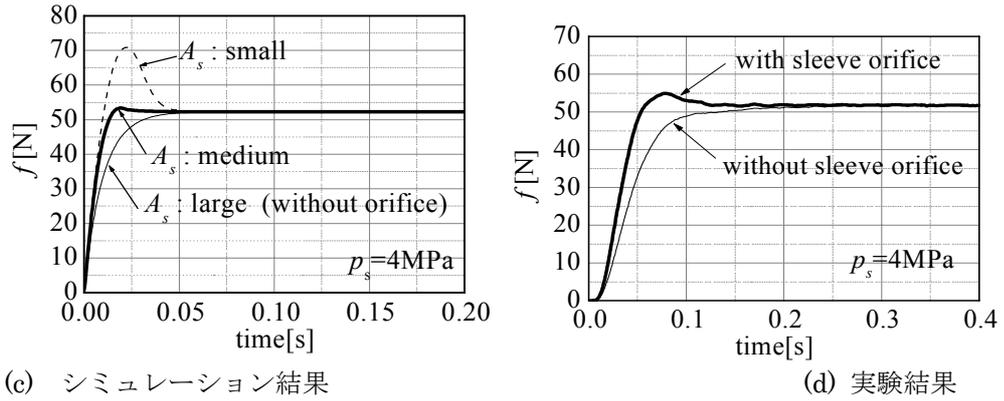
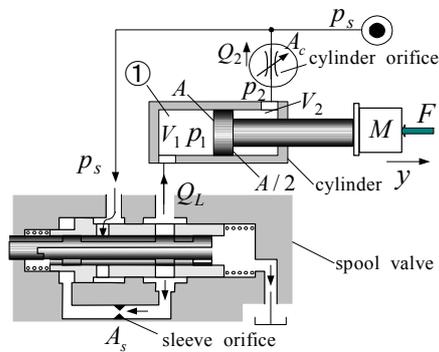


図3 スリーブ調整絞りによるピストン推力 f の動特性調整



(a) シリンダ調整絞り

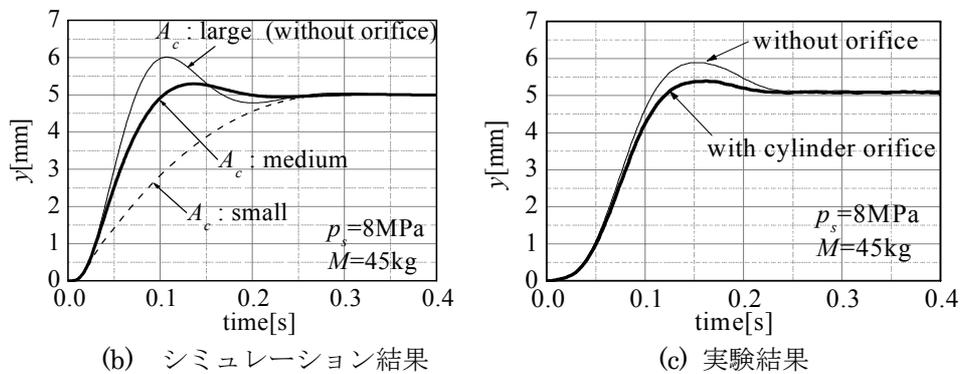


図4 シリンダ調整絞りによるピストン変位 y の動特性調整

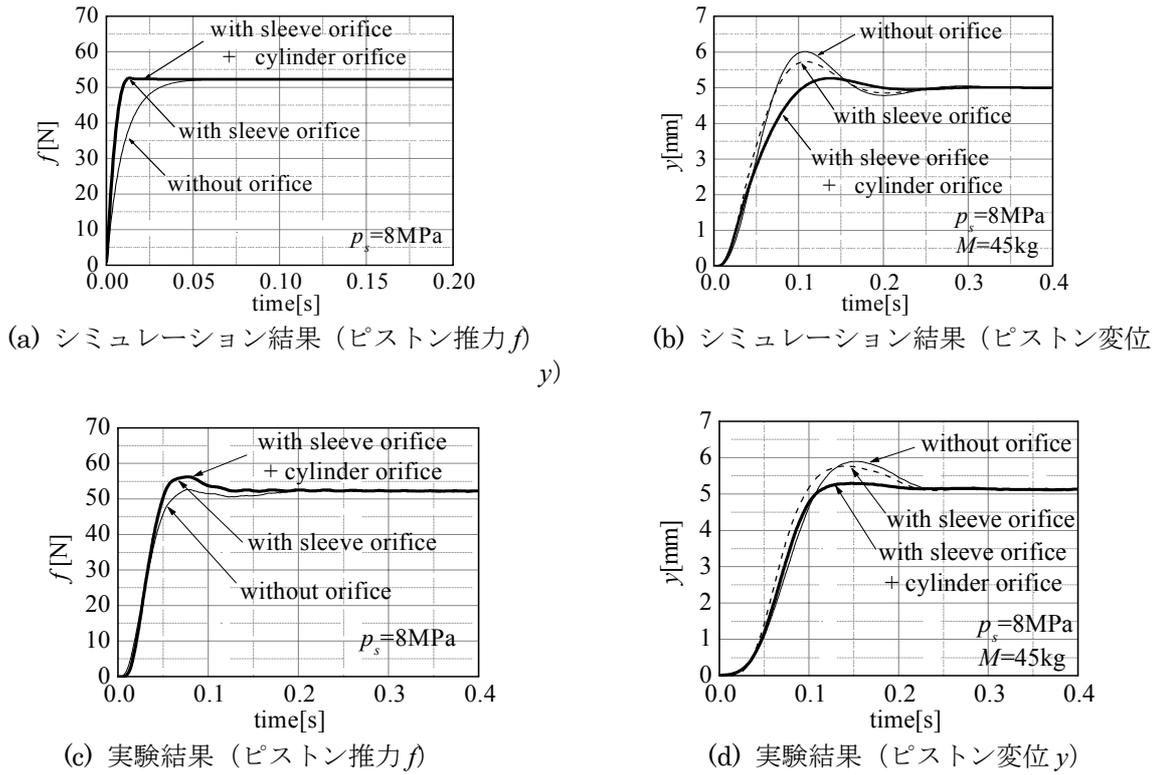


図5 スリーブ調整絞りとシリンダ調整絞りを共に調整した場合の動特性改善

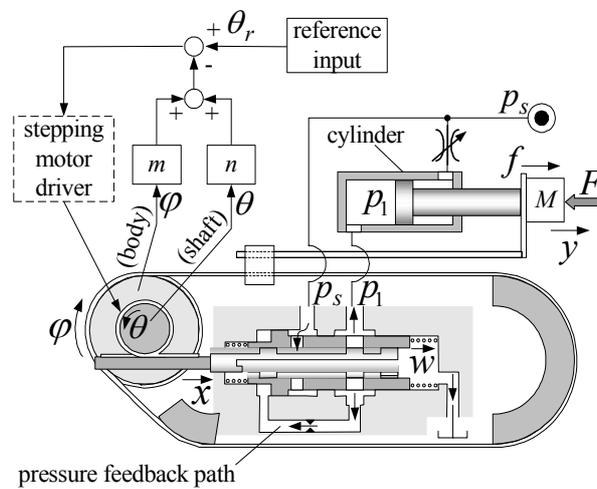


図6 DiThCo シリンダのコンプライアンス制御原理

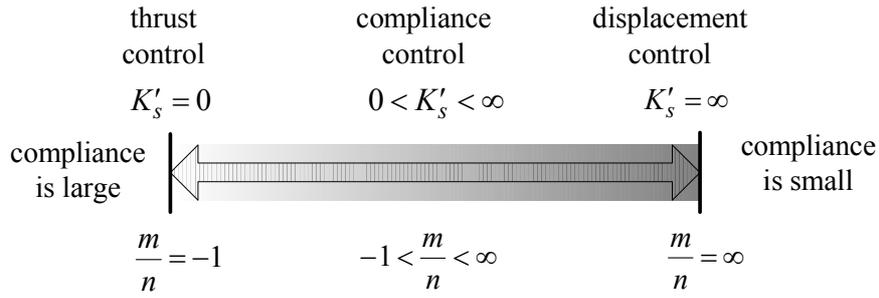


図7 m/n の設定範囲による DiThCo シリンダの位置制御・力制御およびコンプライアンス制御特性

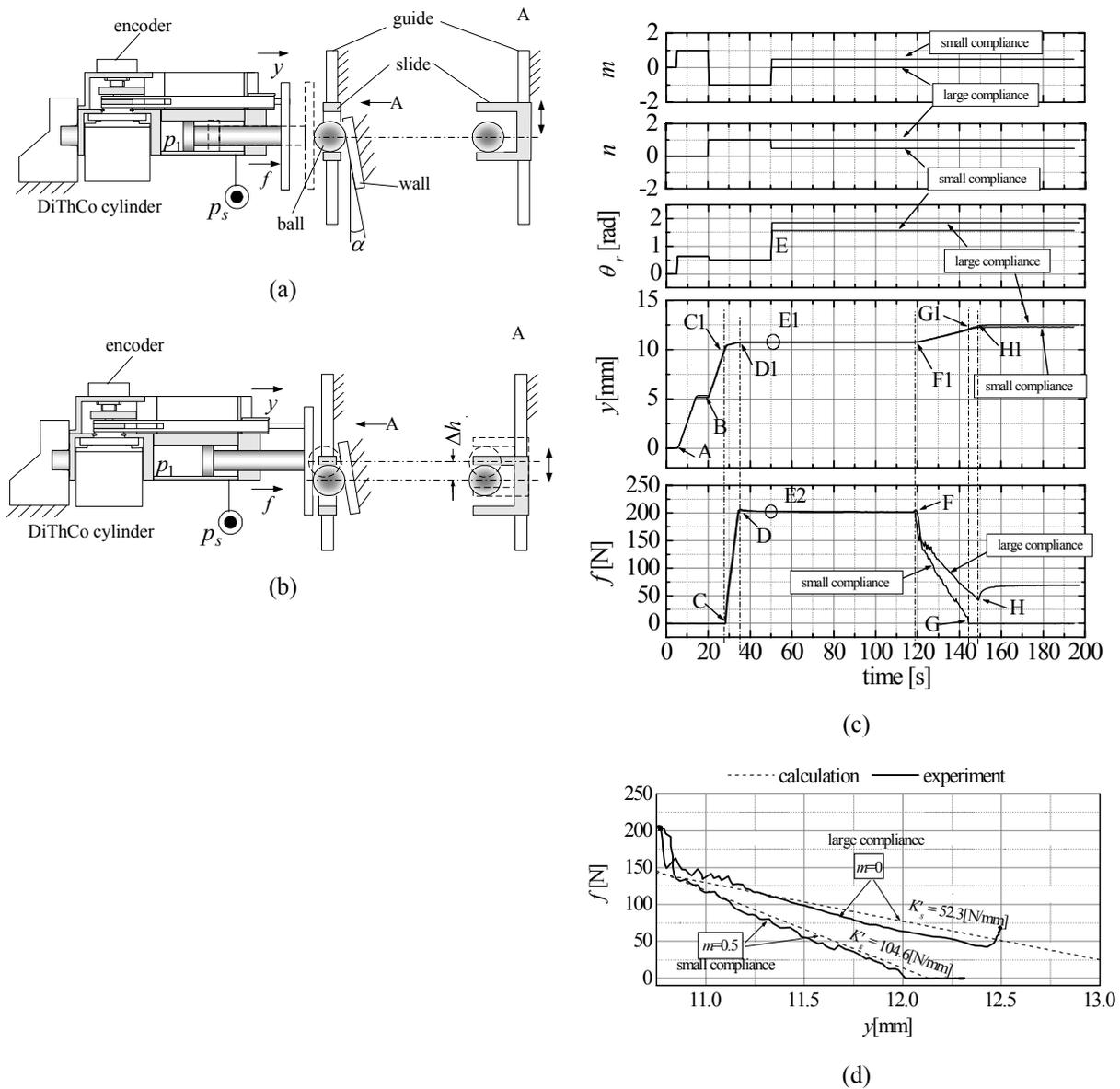


図8 DiThCo シリンダによる球体の掴み上げ制御実験