

## 研究の課題名

### 定圧力源油圧トランスフォーマによるシリンダのロバスト制御に関する研究

報告者 鳥取大学工学部機械工学科・准教授  
伊藤 和寿  
(申請時 上智大学理工学部機械工学科・助手)  
報告日 2007年(平成19年)5月25日

#### 1. 本研究の意義・特色

定圧力源油圧トランスフォーマによるシリンダ制御システムにおいて、位置、速度および圧力制御を目的としたロバスト制御の実験的研究を行うことで、同システムにおける制御性の改善ならびに制御系設計の知見を得ることが本研究のねらいである。トランスフォーマは絞り損失が非常に小さい上にエネルギーの回収が可能である一方、その制御性は未解明な部分が多く、省エネルギーシステムの構築のための意義は大きい。

#### 2. 実施した研究の具体的内容、結果

油圧トランスフォーマ制御における大きな問題点は、システムの正確な数学モデルの構築を困難にしている"不確かさ"の存在である。具体的にはこれらの不確かさは、シールの摩擦力、ポンプ内部の漏れ流量あるいは負荷変動等の非線形特性を有するものに代表されるが、これらの特性は数学モデル上は物理パラメータ特性および外乱特性として捉えることができる。しかしこれらは一般に事前に入手することが困難でありまた同時に正確な数学的記述を得ることも難しく、システムの性能に直接的に影響を及ぼす因子であるために制御系設計の段階でロバストに補償する必要がある。

本研究ではプレス機に油圧トランスフォーマを応用した場合を想定し、シリンダ制御系の設計において以下の手法による制御精度を検討することとした。

- (1) PI 制御手法
- (2) フィードバック補償型 2 自由度制御手法
- (3) Minimal Control Synthesis (MCS) による制御手法
- (4) スライディングモード制御手法
- (5) 上記の組合せ手法

プレス機におけるシリンダの位置および圧力は、製品の品質を左右する重要な量である。本研究における実験装置では、初期位置からワークまでの距離は 161mm、圧力制御の目標値は 4.5MPa とした(図 1 参照)。また設定したシリンダ駆動パターンを図 2 に示す。

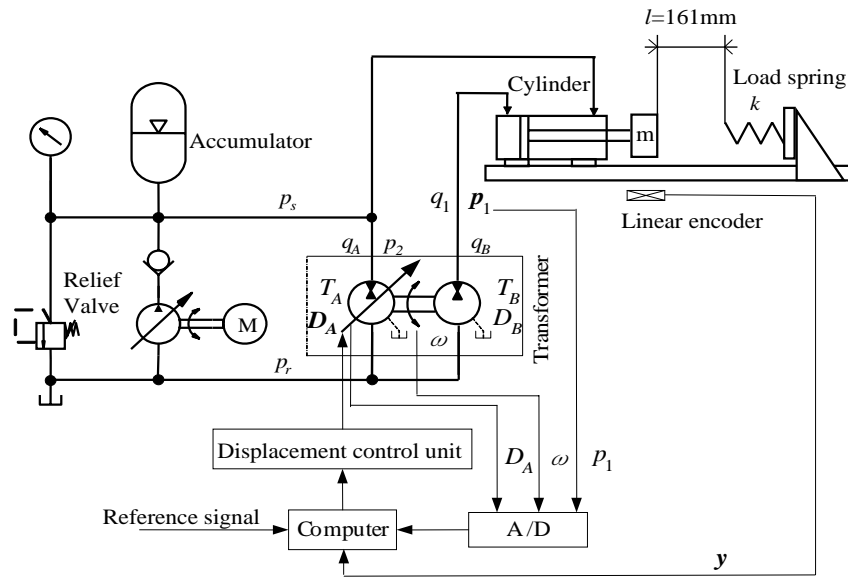


図 1 定圧力源油圧トランスフォーマシステム構成図

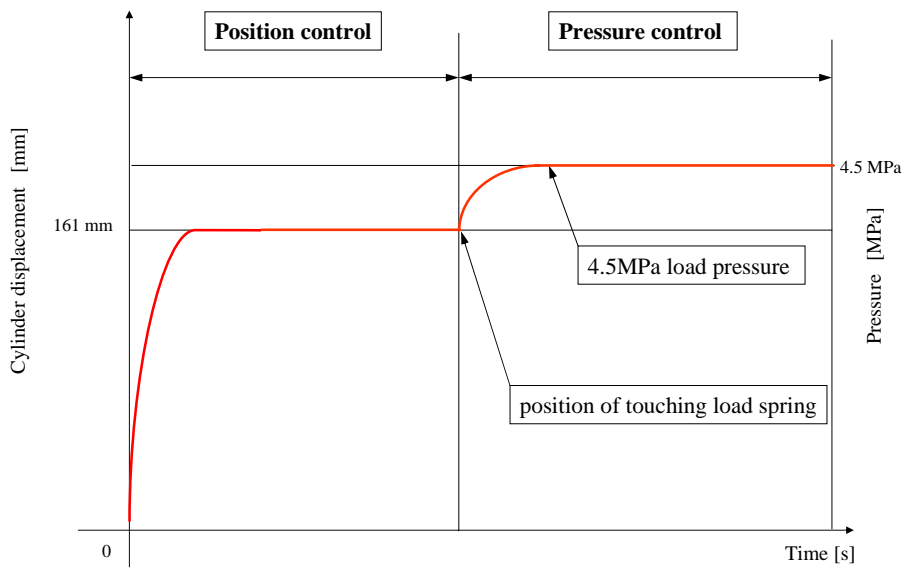


図 2 シリンダ駆動パターン

以下、各手法についての概略と成果を述べる。なお実用を意識し、位置制御および圧力制御は、シリンダ変位が 161mm に到達した時に補償器を切替えることにより連続的に行った。

(1) PI 制御

制御対象は、位置制御および圧力制御ともに積分器を一つ組み込むことでステップ状目標値に対する定常偏差をキャンセルできることが数学モデルから導かれる。従ってこれらの PI パラメータを

調整することで性能を向上させることが可能である。ただし漏れ流量あるいはシリンダの非線形摩擦等により、位置制御から圧力制御への切換えには 7.5 秒程度、圧力の整定には 5 秒程度の時間がそれぞれ掛かっており、良好な制御結果であるとは言えない。なお PI ゲインを過大に選ぶことによる積分ワインドアップ問題は、補償器内に不感帯を導入することにより回避している。

#### (2) フィードバック補償型 2 自由度制御

2 自由度制御は、目標値応答特性とロバスト性能をある程度独立に指定できることから広く応用されており、本設計手法でも Q-フィルタと規範モデル伝達関数を適切に選ぶことによる性能向上を図った。その結果、補償器の切換えには 10.5 秒程度の時間が必要な一方で圧力の整定時間は 3 秒程度に短縮された。切換えに時間が掛かっているのは、位置制御のモデルが 2 階のシステムとなるため、応答が若干鈍くなるためと考えられる。油温変化あるいは非線形漏れ流量や摩擦は良好に補償されており、2 自由度設計法の有効性が確認できる。

#### (3) Minimal Control Synthesis 制御

Minimal Control Synthesis (以下、MCS) 制御は、適応制御系の一つとして考えることができるが、補償器パラメータ更新の際の計算量が大きく抑えられることに加えて高いロバスト性を有するために油空圧制御系においても応用実績が報告されている。本手法では規範モデルに 1 階のシステムを採用したことにより、補償器の切換えは 5 秒程度と最も早くなっている。ただし誤差信号を元に補償器パラメータを調整するため、圧力制御においては微小な目標値変化等に対してもオーバーシュートが現れる傾向がある。実用に照らした場合には、有用性が高いとは言えない結果が得られた。

#### (4) スライディングモード制御

設計超平面と呼ばれる平面状に状態を固定し、その平面状を滑らせることで目標値への収束性を確保しようとするスライディングモード制御は、高いロバスト性を有することが特長で、機械制御では盛んに応用されている。本研究では、非線形摩擦に相当する入力外乱を推定してこれを補償し、位置誤差と速度誤差の状態量を設計超平面に拘束するような制御を組合せて設計した。これにより補償器の切換え、すなわち 161mm までの位置制御は 3 秒程度に短縮されたが、圧力制御は負荷に対してイールドしており、この原因は現在検討中である。

#### (5) 組合せ制御

以上 4 つの制御手法に対し、微小な目標値変化（位置制御の場合には 20mm、圧力制御の場合には 0.68 kN）、油温変化（30℃および 40℃）、供給圧力変動（7MPa から 5MPa へ減圧）に対するロバスト性を評価し、各々の変動を受けた際の誤差の絶対積分を同一の時間区間で評価を行った。その結果、位置制御に関してはスライディングモード制御手法が、圧力制御に関しては 2 自由度制御手法がそれぞれ最も良好なロバスト性を有することが実験結果より確認されたため、これらの組合せによるシリンダ制御実験を行った。実験結果を図 3 に示す。位置制御から圧力制御へは 6 秒程度で切り替わっており、その後の圧力制御も非常に良好である。

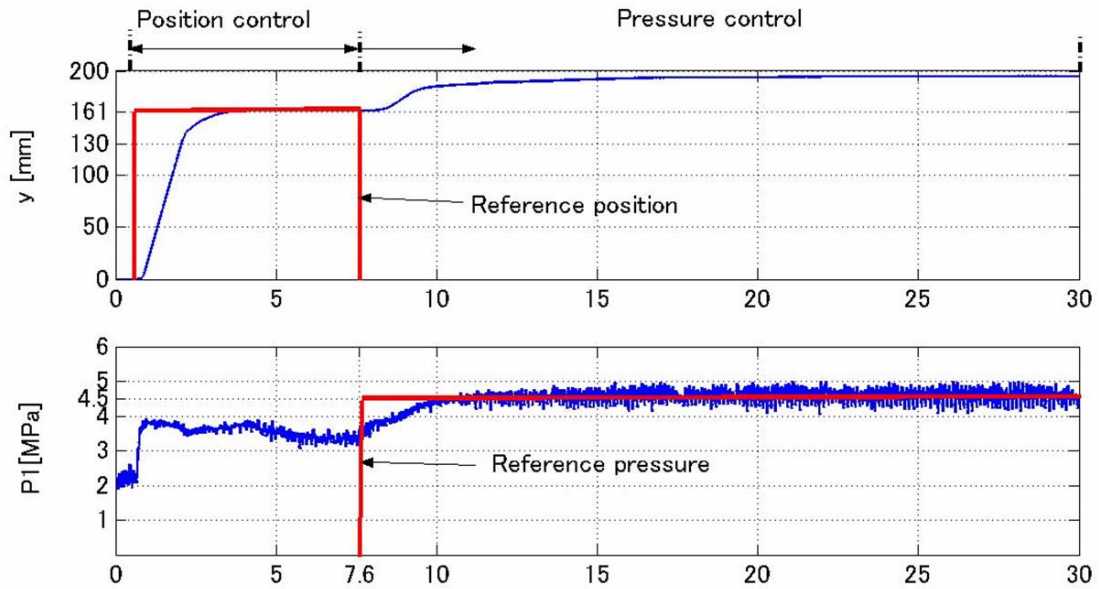


図3 スライディングモード制御（位置制御）および2自由度制御（圧力制御）を組み合わせた場合のシリンダ制御実験結果

本研究では、定圧源油圧トランスフォーマを用いたシリンダ制御系に対するロバスト制御の有効性の検証およびそれらの比較を行った。具体的には、2自由度制御、MCS手法、スライディングモード制御手法である。これらの制御系に対し、目標値のわずかな変化に対する応答、油温変化による非線形漏れ流量の影響および供給圧力変動に対するロバスト性を定量的に評価した。その結果、本制御対象では位置制御にスライディングモード制御を、圧力制御に2自由度制御を採用した場合が最も性能が高いという結論が得られた。

### 3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

伊藤 和寿      上智大学理工学部機械工学科 助手  
池尾 茂        上智大学理工学部機械工学科 教授（副学長）

### 4. 研究実施時期

2005年（平成17年）1月23日から 2007年（平成19年）3月31日

### 5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] 上野智弘, 伊藤和寿, 馬 衛東, 池尾 茂: 油圧トランスフォーマを用いたシリンダのロバスト位置・力制御, 平成17年春季フルードパワーシステム講演会論文集, pp.38-40 (2005年5月25-27日, 東京)
- [2] 伊藤和寿, 池尾 茂, 上野智弘, 高橋浩爾: 油圧トランスフォーマの位置・圧力制御系の設計, 平成18年春季フルードパワーシステム講演会論文集, pp.151-153 (2006年6月8-9日, 札幌)

- [3] T.Ueno, K.Ito and S.Ikeo : A Robust Design of Velocity/Force Controller for Cylinder Using Hydraulic Transformer, The 9th Scandinavian International Conference on Fluid Power (June 1st-3rd, 2005, Linkoping, Sweden)
- [4] T.Ueno, K.Ito, W.Ma and S.Ikeo : Design of Robust Position/Pressure Controller for Cylinder Using Hydraulic Transformer, Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, TSUKUBA 2005, pp.414-419 (November 7-10, 2005, Tsukuba, Japan)

## 6. 内外における関連研究の状況

国外ではトランスフォーマの研究が Innas 社（オランダ）にて精力的に進められていることを除き、ここ数年は国内でもほとんど関連する研究の成果報告が行われていない。機器単体で見ると負荷のエネルギー回収が可能な非常に魅力的な研究対象であるが、トランスフォーマでなければならないという応用例がまだ少なく、同時に同一軸にポンプ/モータ二台を内部結合した構造となっているために現在ではまだコスト的に不利な状況にあるのがその原因と推察される。

## 7. 今後の発展に対する希望

液圧回路におけるエネルギー回収という観点では、しばらく下火であったアキュムレータの利用も近年見直されてきてはいるが、定圧力源を効率良く利用するという観点からは、絞り損失が非常に小さいトランスフォーマは理論上・応用上ともに大変有効である。先に触れた Innas 社からは本研究で用いた FFC 型とは全く異なる構造を持つトランスフォーマが開発され、日本でもこれに類する研究を始めたメーカーもあると聞いている。いずれにせよ一社だけの研究開発では性能向上やコスト低減が進みにくいため、省エネルギーシステムの開発を追い風に、トランスフォーマの開発が盛り上がることを祈りたい。

以上