

## 研究の課題名

# 水圧駆動システムのロバスト制御に関する研究

上智大学理工学部 助手

報告者 伊藤 和寿

報告日 2004年(平成16年)4月5日

## 1. 本研究の意義、特色

水圧駆動システムの具体的な研究対象として、水圧サーボ弁を用いた水圧モータの制御を行った。将来、水圧モータを使用した回転角度制御および回転速度制御を行うための基礎研究とするため、まず水圧モータのサーボシステムを構成し、その制御特性および応答性を解析した。油圧サーボ機器に対し、応答性改善を目的とした現代制御理論の適用結果は多数報告されているが、水圧サーボシステムにおいてはこれを適用したものはわずかに適応制御系を応用したものが報告されている程度であり、本研究の価値は大きい。

## 2. 実施した研究の具体的内容、結果

水圧サーボ系における最大の問題点は、システムの数字モデルの構築を困難にしている非線形な“不確かさ”の存在である。これらの不確かさは一般に、シールの摩擦力、物理パラメータの摂動といった非線形な特徴を有するものに代表される。補償器設計では、一般に制御対象の正確な数学記述をその基礎においているため、不確かさを無視した設計は、要求された制御性能を達成する制御入力設計の障害となったり、制御性能を劣化させる原因となったりする。さらに一般的に制御対象には、負荷の急激な変動など、事前に予測することの難しい‘外乱’が影響することも問題となっている。

これらの問題を克服するため、本研究では実機製作後に、具体的に次の点を研究内容とした。

1. 制御対象内の不確かさにロバストな補償器の設計、シミュレーションおよび実験
2. 外乱にロバストな補償器の設計、シミュレーションおよび実験
3. 上記1および2の結果とPID制御の結果・検討

上記3項目の具体的な補償器設計手法としては、申請者が研究を行っている非線形系のロバスト制御の研究結果を適用した。これはリアプノフ設計法に基づいた、不確かさおよび外乱を有する非線形系に対するロバスト制御系の設計手法であり、不確かさの見積もりをもとに事前に制御性能を補償器に反映させることが出来る点が特長である。これらの手法が、制御対象である水圧駆動システムにどの程度有効であるかを定量的に研究した。

まず水圧モータに一定の目標回転角度を与えた際に、従来のPID制御系がどの程度有効に機能するかについて検証した。与えられた設計仕様のもとでオーバーシュートおよび定常偏差をできるだけ小さくするPIDゲインを求め、実験を行った。結果は論文[1]にまとめられている。ここでは速度フィードバックゲインの選択によりオーバーシュートを、積分ゲインの選択により定常偏差を、それぞれ抑制することに成功した一方で、負荷変動には単一のPIDゲインでは対処しきれないほど性能低下が起こることが明らかになった。

また水圧システムにおいても過大な積分ゲインの選択によりワインドアップ現象が発生し、

これが機器に大きなダメージを与える可能性が高いことも明らかとなった。特にモータ軸を急停止させた際に発生する負圧により水圧モータのシールあるいは軸受が破損する危険性があることが分かった。本事項は以後の実験において大きな経験となった。

文献[1]の内容を受け、次にロバストな回転速度制御系の設計を行った。以降は負荷変動だけでなく、粘性摩擦、水圧モータの内部漏れ、水圧バルブの流量ゲイン等、事前に正確な値が入手できない、あるいは稼働中に変動するパラメータに関してロバスト化するために、リアプノフの際設計法とBackstepping手法を組合せ、誤差システムが漸近安定となるような補償器を構成した。これによりモータの回転速度は目標値に漸近的に収束させることができるが、厳密にこれを実現する補償器は符合関数を含むために大きな制御入力が必要とし、一般的に実現が困難となる。従って次善の策としてこの符号関数を非負の分数関数あるいは逆三角関数で近似することで過大な入力を生成するのを抑制する手法を採用し、設計者が予め目標値近傍に誤差の収束範囲を仕様として与え、その集合内に有限時間で収束するような補償器を設計することを目的とした(文献[3])。さらに数学モデルを構築する際、水圧バルブへの入力電圧から負荷圧力までの微分方程式が一般には非線形となるため、これを零点近傍で線形化して制御系を設計する方法も合わせて検討した。この線形化のステップにおいては、電圧ゲインと負荷圧力ゲインが現れるが、これらの変動に対してもロバストな補償器を構成した(文献[2],[4])。

目標回転数を与え、各物理パラメータが時間的に変動するという仮定の下で数値計算も行った。得られたシミュレーション結果は、PID制御結果と比較してこれら提案手法の有効性を示すものである。特にパラメータ変動や負荷変動に対して強い系が構成された。負荷圧力、バルブ変位の単位(Mpa, mm)から発生する可能性のある数値計算上の誤差を小さくするため、スケーリング係数を導入し、積分計算の安定化を図った点も工夫の一つである。また制御対象が機械・電気系の場合の数学モデルにおいては、安定性の鍵となる非対角係数が多い場合負となるため、安定化はそれほど困難でない一方、定値レギュレーションあるいは追値制御においては、一般的に過渡応答はハイゲイン化することで性能向上を図ることが多く、従って入力が大きくなる傾向にある。本研究ではこの点を改善したことに対応する。

十分な数値計算結果を元に次に実機による実験を行う予定であったが、2003年6月に水圧モータが破損した。海外メーカー製のため、修理に非常に時間が掛かることが予想され、実機による実験は断念した。これを受け、さらに水圧シリンダの位置制御系の構成へと制御系の目的を拡張した。水圧シリンダの適応制御は現在までに数編の研究報告があるのみである。今回は離散時間系の適応制御を適用するために、まず水圧サーボ弁から水圧シリンダまでを含む系を同定することから始め、大まかなパラメータが入手された後に適応補償器を構成して数値計算を行った。得られた結果は与えられた位置にシリンダロッド先端を素早く追従させることができることを示しているが、実機への適用の前には、水圧サーボ弁の漏れ流量を積極的に補償する必要があることが分かった。ここまでが本年3月の具体的実験内容である。

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

1. 水圧サーボモータのPID補償器による回転角度制御に関する知見が得られた。実機により基本的な制御性能の検討を行った。
2. 同システムに対し、負荷変動および物理パラメータの変動にロバストな非線形補償器を構築し、数値シミュレーションによりその有効性を確認した。その際、非線形流量方程式を直接取り扱う方法と、線形化後のものを利用する方法の二つについて行った。

### 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 助手  
池尾 茂 上智大学理工学部 教授 (副学長)

### 4. 研究実施時期

平成14年1月から平成16年3月まで

### 5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) D.Terasaka, K.Ito, S.Ikeo: PID-Control of Water Hydraulic Servomotor System, Proceedings of the 5th JFPS International Symposium on Fluid Power, Vol.1, pp.143-148, November 13-15, 2002, Nara, Japan ※
- (2) K.Ito: Robust Velocity Control of Water Hydraulic Servomotor via Linearization Approach, Proceedings of 11th Mediterranean Conference on Control and Automation MED2003, June 18-20, 2003, Rhodos, Greek ※
- (3) K.Ito, and S.Ikeo: Robust Velocity Control of Water Hydraulic Servomotor System, With Parameter Uncertainty SICE Annual Conference 2003 Proceedings, August 4-6, 2003, Fukui, Japan ※
- (4) K.Ito, and S.Ikeo: Robust Speed Control of Water Hydraulic Servomotor System, with Load Fluctuations, Proceedings of the 7th Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization FLUCOME'03, August 25-28, 2003, Sorrento, Italy ※

### 6. 内外における関連研究の状況

国内でも水圧をキーワードにした製品も少しずつ増えているが、関連研究としては理論・応用共にまだそれほど充実していないのが現状であり、この分野において短期に成果を挙げることの難しさが読み取れる。一方ヨーロッパにおいてはドイツ、あるいは北欧の研究グループは政府系基金などが充実しており、制御系設計手法の開発のみにとどまらず機器単体やモジュールの開発も進んでいる。

### 7. 今後の発展に対する希望

今後は実応用に関しての成果を挙げることが最も重要であり、従って性能の良い機器、特に少ない漏れ流量特性あるいは直線性の強い流量・圧力ゲイン特性を有するバルブの開発が期待される。我が国のメーカーにも期待したい。