

解 説

水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する研究*

伊藤 和寿**, 池尾 茂***

* 平成 20 年 6 月 4 日原稿受付

** 鳥取大学大学院工学研究科, 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101

*** 上智大学理工学部, 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

1. はじめに

動力としての水の歴史は水車の利用に始まるが, これは風力に続き古く, 紀元前 1 世紀頃の記録が残っている. その後 18 世紀末頃から水圧動力は一定期間工業的に利用されたことが知られているが, 内燃機関を別にすると産業革命以降の水圧動力は完全に電気, 油圧, 空気圧動力に取って代わられた. しかし近年の材料技術, 加工技術の発展, そして何よりも環境意識の高まりにより, 90 年代後半からは第 4 の駆動源として水圧技術, 水圧システムがさまざまな角度から見直され始めた^{1), 2)}. 一方最近では持続的安定社会という言葉に耳にするが, これは安定な社会を持続してゆくためにはどうすべきかを問うものであり, この言葉の裏にはここに来て今後の持続的発展が疑問視され始めた現代社会の存在がある. 持続が可能であることは, 人間と環境を分けることが意味を持たないことを意識するところから始まるものであり, 行き着くところは結局日々の自らの行為がそのまま我々に還って来ることを正しく自覚できるかどうかの一点に集約されると理解される. この意味でも水圧システムは, 他の動力源よりも一歩進んだ技術であると思われる.

本稿では摩擦や漏れ流量などの非線形性に加えて負荷変動を考慮した水圧サーボモータシステムに対し, 種々のロバスト制御により得られた制御性能³⁾について簡略にまとめる. 具体的にはモータの回転角度制御に対して, 大別してつぎの 2 つの制御手法を適用した結果について比較を行う.

- ・二自由度制御 (H_∞ 制御, 外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御)
- ・適応制御

水圧シリンダの制御についてはすでに多くの研究者が取り組んでおり, 多くの成果が明らかになっているテーマである一方, 水圧モータの制御についての研究成果は, PCM 制御を用いた Laamanen らの論文^{4), 5)}, PI 制御による山科ら⁶⁾ および寺坂ら⁷⁾の論文を除きほとんど得られていない, もしくは公表されていないのが現状である. 非線形性の強い水圧モータシステムに対し, ロバスト制御理論がどこまで有効であるかを明らかにしたいというのが本研究の一つの動機であった. この結果に続いて水圧システムと油圧システムとの比較について簡略に述べる. なお原著論文³⁾では速度制御についても制御系設計および実験を行っているが, 本稿では割愛する.

2. 水圧サーボモータ制御問題の記述

水圧モータ (アキシアルピストン構造, 押しのけ容積 15cc/rev, 最大供給圧力 15MPa) および水圧サーボ弁 (ノズル・フラップ構造, バンド幅 100Hz) により構築した水圧モータサーボシステムを図 1 に示す. 負荷圧力の応答の時定数が十分小さいと仮定すると, 水圧サーボ弁への入力電圧から水圧モータの回転角度 θ の公称値系は, 回転角速度 ω を介した二階の微分方程式で与えられる.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u \quad (1)$$

ここで $\mathbf{x} = [\theta \ \omega]^T$ で, $\mathbf{A}, \mathbf{b}$ はシステムのノミナルパラメータからなる定数行列および定数ベクトル, u はサーボ弁への制御入力電圧である. 実際のシステムには水圧モータおよび弁内の漏れ流量, 摩擦特性および負荷変動 (物理パラメータ変動) が存在するため, これらを許容しながら目標の角度 θ_{ref} に追従させるような制御系を設計することが研究の一つの大きな目的である. 一般に水圧モータの内部漏れおよび摺動部の摩擦による損失トルクは, 数 100rpm 以下の速度領域で油圧の数倍から 10 倍程度であることが知られている⁶⁾.

これは実用上最も応用しやすく、また各制御パラメータの物理的解釈が明らかな PID 制御等の適用が容易でないことを示しており、実際、誤差の大きさに依存して PI ゲインをスケジュールした場合であっても、比較的大きな定常角度偏差が残ることが実験的にも明らかとなっている⁷⁾。

3. いくつかのロバスト補償器による制御性能

定義された問題に対して、冒頭で述べたような補償器による制御結果をまとめ、比較した結果についてまとめる。このうち二自由度制御法とは、不確かさに対するロバスト性を改善するフィードバック経路と、システムの持つ特性を逆手に利用して応答性を改善するフィードフォワード経路の両方を有し、これらの性能がほぼ独立に設計できるという長所を持つ。一方適応制御系は、補償器がシステムのパラメータを時々刻々能動的に推定・補償することで目標値応答を達成するものである。

3. 1 H_∞ 制御手法

1980 年代後半より理論的枠組みが完成し、現在ではさまざまな応用分野を確立した H_∞ 理論は、解くべき制御系設計問題を外乱入力か評価出力までのシステム（一般化プラント）の伝達関数のノルム最小化問題に帰着させる形式をとる^{8), 9)}。本研究の場合にはこの外乱入力が漏れ流量、摩擦および負荷変動に、評価出力が目標値とモータ回転角度との誤差にそれぞれ対応する。設計されたサーボコントローラを二自由度制御系のフィードバック補償器として用いた場合の制御結果を図 2 に示す。水圧源の供給圧力を 5MPa とし、以下ではすべて外部入力として 90° の回転を行う矩形波を与えているが、補償器に対する実際の目標値はこれを理想応答仕様を反映した伝達関数に通した信号として与えていることに注意する。同図より、水圧モータ特有の非線形性および負荷変動が存在しても良好な追従特性が得られていることが分かる。なお、制御開始から 10s および 20s 時点で慣性負荷の値を変えている。

3. 2 外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御手法

切換え平面と呼ばれる状態量において入力をスイッチングすることにより補償器の特性を変えることができるスライディングモード制御は、一般には線形補償器には達成できない高いロバスト性を有する¹⁰⁾。特に摩擦等の非線形不確かさの問題に対しては、油空圧系でも既に多くの応用例が示されている。一方公称値モデルの情報を基に、実際の制御対象に存在する外乱を入出力信号から直接推定してこれを補償する外乱オブザーバは、機械制御においても多くの応用実績が報告され、最終的には Q フィルタと呼ばれるローパスフィルタの設計に帰着される。外乱推定が良好に行われていれば、外乱オブザーバを含む制御対象は理想的には線形系と見なすことができるため、外部に別の制御系を付加することも可能である。実際、本研究でもフィードバック経路に外乱オブザーバを、フィードフォワード経路にスライディングモード制御器を採用した二自由度系を設計した。この補償器による回転角度制御の結果を図 3 に示す。目標値としては H_∞ 制御の場合と同一の実験条件および目標値を与えているが、外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御器による制御結果は H_∞ 制御器の場合よりも良好で、負荷変動に対して立ち上がりおよび整定時間が短い。なお外乱オブザーバのみ、あるいはスライディングモード制御のみのケースについても検討を行ったが、前者では制御開始後に目標値付近で一旦回転が止まるものの、摩擦および内部漏れによるわずかな角度偏差も直接補償しようとするために、その後目標値を中心とする 2° 程度のハンチングが発生して角度制御性能が大幅に劣化する。一方後者では、切換え平面を変化させても非常に大きな角度偏差が解消されない。これは水圧サーボ弁に印加された制御入力が一旦負荷圧力の変化となり、さらにそれが二つの積分動作を介して (Newton の法則) 角度変化となって現れるために、スライディングモード制御の効果の可否を握る、いわゆるマッチング条件（補償したい不確かさと同じダイナミクス中に制御入力の存在を要求）が満たされないことによる。しかし両者を組合せた場合には、目標値付近への制御は外乱オブザーバが機能し、目標値付近でのロバスト制御ではスライディングモード制御が効果を発揮する二自由度制御により、双方のデメリットが補われることで非常に高精度な制御が実現される。

3. 3 適応制御手法

誤差に応じてオンラインで補償器内のパラメータを調整することで所望のレギュレーションあるいは追従性能を実現する適応制御系も、上記のロバスト補償器と同様に機械系、油空圧制御系で応用実績は広い。ただし実応用では不確かさの存在に対する安定性確保を目的として、パラメータの更新則にはさまざまな工夫

が行われている．本研究では水圧サーボモータシステムを線形と仮定して適応制御系を設計し，パラメータ更新則にトレース一定型アルゴリズムを用いることによりどの程度不確かさを補償できるかどうかを実験的に検証した．実験では上記の二つの補償器の場合と実験条件を揃えたが，良好な角度制御性能は得られず，適応パラメータも発散するという結果が得られた（図 4 は目標回転角度を 30° とした場合の結果）．これは制御開始直後の回転方向に対する適応パラメータの更新が摩擦および漏れ流量に打ち勝って良好に行われる一方，その後回転方向が反転した場合には摩擦力の方向も反転するため，制御開始直後よりもはるかに大きな摩擦力を補償しなければならないことによる．この不確かさはパラメータ更新則を工夫するレベルの対応では困難であり，ここにも摩擦および漏れ流量等の非線形特性が強い水圧システムの特徴が現れている．この結果は既に報告されている水圧シリンダの場合¹¹⁾とは異なり，水圧モータにおける非線形不確かさを適応制御手法で補償することが難しいことを示している．

3. 4 制御性能の比較

上記で紹介した三つの制御手法のうち適応制御を除く二つの結果に対し，目標値に対する定常角度偏差を比較した結果を図 5 に示す．ただし図中の凡例は以下のように定義している．

- ・ $H_\infty@5s$: 二自由度 H_∞ 制御手法による結果を制御開始後 5s 時点にて評価した定常角度偏差
- ・ $H_\infty@10s$: 二自由度 H_∞ 制御手法による結果を制御開始後 10s 時点にて評価した定常角度偏差
- ・ SMC-DO@5s : 外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御手法による結果を制御開始後 5s 時点にて評価した定常角度偏差

この結果より，5 秒時点での外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御による定常角度偏差は， H_∞ 制御手法において評価する時間を制御開始後 10s 後とした場合の偏差の数十分の一以下となっており，前者の手法では非常に高精度に目標角度への追従が達成されることがわかる．前述のようにこの手法では外乱オブザーバとスライディングモード制御が相補し，非線形不確かさおよび負荷変動に対するロバスト性が十分に引出せたことが要因である．なお本研究で得られた角度誤差は 0.017° であり，これは実験に用いたエンコーダの分解能とほぼ同等の精度である．

4. 油圧システムとの制御対象としての比較

環境負荷が小さいという点を除き，水圧システムは油圧システムと何が異なるのか，という質問はよくなされる．客観的な制御対象として捉えた場合には，非線形摩擦や漏れ流量が油圧の場合と比較して数倍から 10 倍程度大きいという点が大きな相違であり，また制御弁については油圧の場合に対してバンド幅が狭く，また不感帯がかなり大きいという特徴がある．これらの短所はすべて水道水の持つ比較的低い粘性への対処を前提とする製品化技術の代償であり，水圧システムの性能を油圧システム並みの性能に向上させるためには制御理論がこれに応えるべきであると考えている．比例弁あるいはサーボ弁については，より安価な製品が国内メーカーから開発されることを切に希望する．

5. おわりに

本研究では，環境融和性の点で他の駆動源よりも優れた水圧システムにおける水圧モータの制御にロバスト制御系を構成し，その制御性能を比較した．具体的には H_∞ 制御手法，外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御手法および適応制御手法について非線形摩擦，漏れ流量および負荷変動等の不確かさに対するロバスト性を議論した．その結果，初めの二つについて，特に後者の手法では単体で適用した場合よりもその相補性により制御性能が大幅に改善されることが明らかとなった．水圧モータシステム制御の一解決策として参考になれば幸いである．

なお制御性能の向上と合わせ，駆動源としての水圧システムがどの程度エネルギー回収/回生可能であるかについての研究も必要である．これについては 3 カ年にわたるプロジェクトで日本フルードパワー工業会 (JFPA) がケーススタディにおける数値計算および実験結果を公表しており，今後このテーマにおける研究成果も活発に報告されると思われる^{1,2)}．大いに期待したい．

参考文献

- 1) 浦田, 宮川: 水圧駆動技術入門: アクアドライブシステム, 日刊工業新聞社(2002).
- 2) 宮川: 誰にでも解るアクアドライブシステム(ADS) 入門 (シリーズ連載), 油空圧技術, 日本工業出版(2006.01-2007.02).
- 3) 伊藤, 高橋, 池尾: 水圧サーボモータシステムのロバスト制御に関する性能評価 (第1報-第3報), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.38, No.2, pp.13-20, pp.21-28(2007), Vol.38, No.3, pp.35-40(2007)
- 4) A.Laamanen, M.Nurmia, M.Linjama and K.Koskinen: Velocity control of water hydraulic motor, Proc. of the 5th JFPS Int. Symposium on Fluid Power, Vol.1, pp.167-172, Nara, Japan, 2002
- 5) A.Laamanen, M.Nurmia, M.Linjama and K.Koskinen: Two different control methods for digital flow control unit, The proceedings of the 5th Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'03, May 7-9, Tampere, Finland, 2003
- 6) 望月, 山科: 水圧アキシアルピストンモータのサーボ制御, エバラ時報, Vol.184, 1999-7, pp.17-23(1999)
- 7) D.Terasaka, K.Ito and S.Ikeo: PID-Control of Water Hydraulic Servomotor System, Proc. of the 5th JFPS Int. Symposium on Fluid Power, Vol.1, pp.143-148, Nara, Japan(2002)
- 8) 美多: H_∞ 制御, 昭晃堂(1994)
- 9) 眞田: 水圧駆動樹脂封止プレスのロバスト荷重制御器の設計手法に関する研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.34, No.3, pp.72-78(2003)
- 10) 野波, 田: スライディングモード制御—非線形ロバスト制御の設計理論, コロナ社(1994)
- 11) 大久保, 岩谷, 池尾, 桜井: 水圧サーボシステムの特性, 山梨講演会講演論文集, pp.127-128(1999)
- 12) 機械システム振興協会, 日本フルードパワーシステム学会: 水道配管網圧力を利用した次世代型ユニバーサルアクアドライブシステム (UniADS) の開発に関するフィージビリティスタディ報告書, システム開発 18-F-2(平成 19 年 3 月刊)

著者紹介



いとう かずひろ
伊藤 和寿 君

1995 年上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了, 同年株式会社小松製作所入社. 2001 年上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了, 同年上智大学助手, 2006 年同講師を経て 2007 年より鳥取大学工学部機械工学科准教授. 非線形システムのロバスト制御理論およびその機械系への応用, 環境融和型水道水圧システムの実用化およびロバスト制御に従事. 日本フルードパワーシステム学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 電気学会等の会員. 博士 (工学).

E-mail: kazu-ito@mech.tottori-u.ac.jp

URL: <http://www.mech.tottori-u.ac.jp/mcs/member/kazu-ito/ito.htm>



いけお しげる
池尾 茂 君

1971 年上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程満期退学, 1972 年上智大学助手. 同講師, 同助教授を経て 1990 年より同教授. 日本フルードパワーシステム学会, ターボ機械協会, 日本流体力学会, 可視化情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会等の会員. 工学博士.

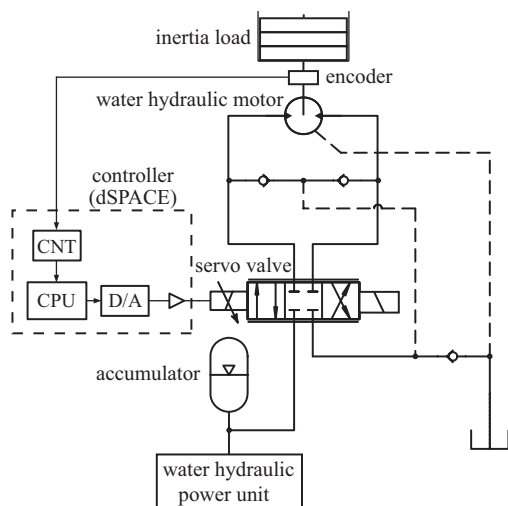


図1 水圧サーボモータシステムの構成図

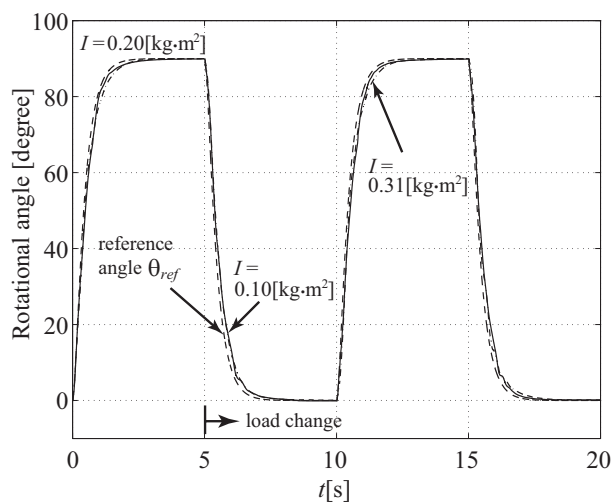
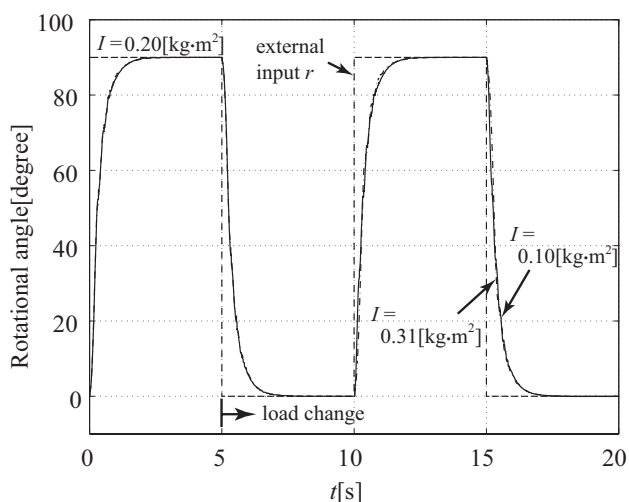
図2 H_∞ 制御手法による回転角度制御実験結果

図3 外乱オブザーバ併用型スライディングモード制御による回転角度制御実験結果

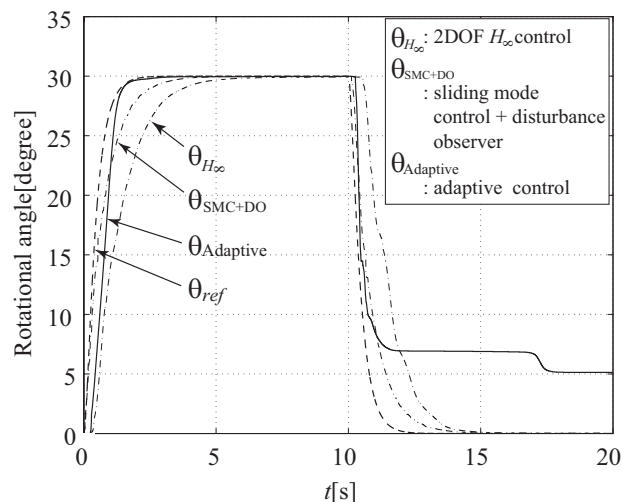
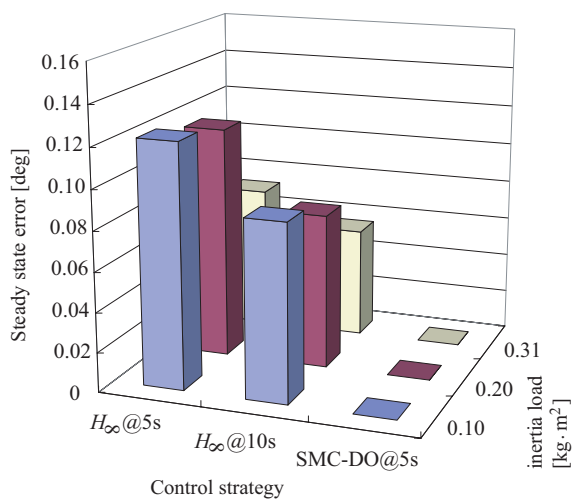
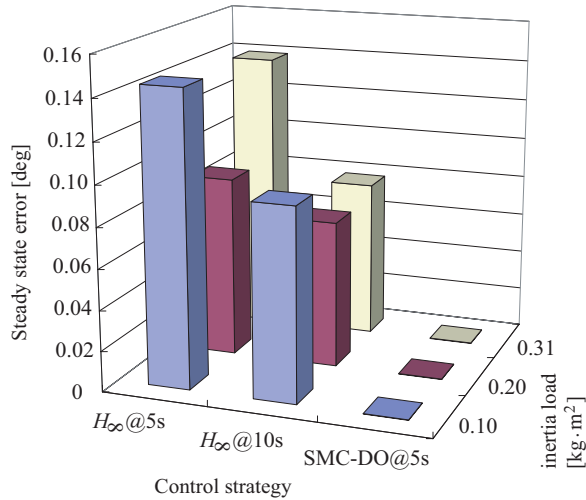


図4 適応制御その他の制御手法による回転角度制御実験結果



(a) 目標角度が30° の場合



(b) 目標角度が90° の場合

図5 制御手法の違いおよび慣性負荷の変化による定常角度偏差量の比較