電気油圧サーボ系のロバスト制御に関する性能評価 (第2報)

-各種パラメータ変動に対する実験的比較-

正員 中村 太郎 (秋田県立大)

正員 佐々木 芳宏 (秋田大)

正員 嵯峨 宣彦 (秋田県立大)

非会員 高橋 義雄 (秋田県立大)

Study of Performance Evaluation of Robust Control for Electrical Hydraulic Servo System (2nd Report)

-Experimental Comparisons with Several Parameter Variations -

Taro NAKAMURA, Member (AKITA Prefectural University), Yoshihiro SASAKI, Member (AKITA University)

Norihiko SAGA, Member, Yoshio TAKAHASHI, Non-member (AKITA Prefectural University)

Hydraulic control systems are used in most industries where heavy objects are manipulated or large forces are exerted on their surroundings. Recently, a positioning control of electrical hydraulic servo system is been applying a robust control theory which is strong for parameter variations or nonlinear elements, instead of as usual a PID control used in widely industries. The purpose of this research is to evaluate several robust control performances and investigate their aptitude for the oil hydraulic system.

In the first paper, we proposed several evaluation methods and standard of designs considering a characteristic of the electrical hydraulic system, and decided system parameters for three kinds of robust control systems which are a Disturbance Observer, a Sliding Mode Control (SMC) and a H_∞ control, according to the several standard of designs. Next, we applied them to the actual electrical hydraulic servo system, and evaluated the difference of the control performance from the point of view of a robustness for load variations as the parameter variations, a characteristic of disturbance cancellation and a control input.

In this paper, the control performance of the robust control systems is evaluated, when they are applied to the positioning control of the electrical hydraulic servo system included of the several parameter variations or the nonlinear elements, which are not only the load variations, but also a oil temperature variations, a pressure variations, and a desired value variations. As a result, all of them have shown good robustness in the load variations, the oil temperature variations, the pressure variations, but the H_∞ control has shown better performance in the desired value variations than other control systems. Further, the SMC has shown good performance in the control input, because it has been smaller than other control systems in the control input.

キーワード：油圧シリンダ，位置制御，ロバスト制御，性能評価，パラメータ変動

1. まえがき

最近の油圧システムにおける制御技術は、従来の PID 制御を代表とした古典制御に代わり、パラメータ変動や非線型要素に頑健なロバスト制御理論が適用されつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このような状況の中、油圧システムに種々のロバスト制御系を適用する際、油圧システムの特性や適性を考慮に入れた上でそれぞれの制御系の制御性能を体系的・総合的に評価検討する必要がある。前報⁽⁴⁾では、各制御系に対する設計基準を定義した上で、ロバスト制御系として、外乱オブザーバ系、 H_∞ 制御系、スライディングモード制御系（以

下、SMC）をそれぞれ実機である油圧システムの位置制御に適用した。さらにその制御性能に関して、パラメータ変動（負荷変動）に対するロバスト性、制御入力、外乱抑圧特性等を評価項目とし、実験的に比較することで各ロバスト制御系の基本的な性能評価に関する検討を行った。

本報では、各制御系の特性をさらに明らかにするため、種々のパラメータ変動に対するロバスト性に関する評価項目に着目して、前報に基づいて設計された制御系に、負荷変動だけでなく、作動油温度や供給圧力の変化、微小入力時のステップ応答による各種パラメータ変動に対してのロ

表1 パラメータ変動の数値的評価
Table1. Numerical evaluation of parameter variation.

		K	ω_n	ζ
ノミナルモデル		1.00	14.7	3.76
実モデル		0.94	14.7	3.76
負荷変動	1.0MPa	0.90 (-10.0%)	14.1 (-3.4%)	4.10 (+9.0%)
	1.5MPa	0.89 (-11.0%)	13.9 (-5.8%)	4.65 (+23.8%)
作動油 温度変化	20℃	0.90 (-10.0%)	13.7 (-6.7%)	3.50 (-6.9%)
	60℃	0.95 (-5.0%)	13.5 (-8.0%)	3.90 (+3.7%)
供給 圧力変化	2.0MPa	0.91 (-9.0%)	13.7 (-6.7%)	4.60 (+22.3%)
	5.0MPa	0.95 (-5.0%)	13.5 (-8.0%)	3.90 (+3.7%)

※ 括弧内は各パラメータのノミナルモデルに対する変動率

えられるとともに、これらの制御系を適用する際、種々のパラメータ変動によって引き起こされる現象がシステムに何らかの影響を及ぼす可能性がある。例えば表1において、作動油温度の変化が60℃時の各パラメータの値と供給圧力の変化が5.0MPa時の値では、その変動率は数値的に同等であることが確認できるが、これらのパラメータ変動を引き起こした物理的要因や制御系を適用した際のシステムの挙動には違いが生じると考えられる。よってこれらのパラメータ変動に対して、実験的に検証する必要がある。

4. ロバスト制御系の実験比較

外乱オブザーバ系、 H_∞ 制御系、SMCのロバスト制御系を、前節のようなパラメータ変動を有した油圧システムに適用し、ロバスト性および制御入力等に関するシステムへの影響を検討する。ここで各制御系における設計基準、各ロバスト制御系における制御系設計手法およびループゲインは、前報と同様である。

<4.1> 負荷変動 図2に3.2節に示した実験条件にしたがって、一定負荷を与えた時の各制御系のステップ応答を示す。この図から(a)のシリンダ変位において、外乱オブザーバ系、 H_∞ 制御系、SMCの各ロバスト制御系はほぼ目標値応答に追従し、定常特性および過渡特性ともに優れたロバスト性を示していることがわかる。しかし(b)の制御入力において、 H_∞ 制御系は負荷変動が増加するに従って制御入力の立ち上がりが大きくなっていることがわかる。ここで各制御系における制御入力の最大値をプロットした図を図3に示す。この図から、外乱オブザーバは負荷の増加に伴い、制御入力の立ち上がりにそれほど大きな上昇は確認されないのに対して、 H_∞ 制御系は他の制御系に比べその立ち上がりが大きく上昇する傾向を示している。これは、同等のロバスト性を備えながらも、そのロバスト性の維持により多くの制御入力を有していることを意味しており、入出力比の大きい油圧システムにとって、無視することのできない特性であると考えられる。

<4.2> 作動油温度の変化 図4にそれぞれ作動油温度を3.2節の実験条件に従って変化させたときの各ロバスト

図2 各制御系のステップ応答 (負荷変動)
Fig.2. Experimental results of step response with load variations.

図3 制御入力の最大値(負荷変動)
Fig.3. Maximum of control input (Load variations).

制御系のステップ応答を示す。これらの図から各制御系は、温度変化によるパラメータ変動に対して、優れたロバスト性を示していることがわかる。これは、油圧システムを長時間にわたって運転するような場合、その温度変化⁽⁶⁾に対して一定の補償を行うことが可能であることを示している。

<4.3> 供給圧力の変化 図5にそれぞれ供給圧力を3.2節の実験条件に従って変化させたときの各ロバスト制御系のステップ応答を示す。まず(a)のシリンダ変位は、負荷変動や作動油温度同様、各制御系は優れたロバスト性を

図4 各制御系のステップ応答 (作動油温度の変化)

Fig.2. Experimental results of step response with oil temperature variation.

示した。

次に(b)の制御入力における検討に際し、図6に各制御系における制御入力の最大値を示す。 H_∞ 制御系、SMCは、供給圧力の上昇に伴う体積流量の増加に対し、スプールがシリンダ変位のロバスト性を維持するための必要流量に制御され、スプール変位を支配する制御入力の最大値も次第に小さく抑えられている。それに対し外乱オブザーバは、体積流量の増加に対し、制御入力の最大値が比較的高い値で一定に推移しているため、その制御入力波形がより鋭角的な立ち上がりになっていることがわかる。これは結果的に、高圧化を伴う油圧システムにおいてサージ圧を引き起こす原因となりうるため、油圧機器の破損につながる危険性を含む現象であるといえる。

<4.4> 微小入力時のステップ応答 次に微小入力時によるステップ応答に対する各制御系のロバスト性を検討する。微小入力下では、制御入力に関するループゲインが小さくなることから、相対的にモデル化誤差や非線型な不確かさに対する影響が大きくなる。ここで本油圧システムで考えられる不確かさとして、シリンダのシール部分や弁内での内部摩擦およびスティックスリップ等による非線型摩

図5 各制御系のステップ応答 (供給圧力の変化)

Fig.5. Experimental results of step response with pressure variation.

図6 制御入力の最大値 (供給圧力の変化)

Fig.6. Maximum of control input (Pressure variation).

擦がある。微小入力時におけるステップ応答として以下のような実験条件を示す。

[微小入力時のステップ応答]

- ・ 入力波形 : ステップ入力(目標値 5mm)
- ・ 供給圧力 : 3.8 MPa
- ・ 作動油温度 : 40 °C
- ・ 負荷変動 : 0.0 MPa

図7に、それぞれ微小入力時における外乱オブザーバ系、 H_∞ 制御系、SMCのステップ応答を示す。この図から、す

図7 微小入力時のステップ応答
Fig.7. Experimental results of step response
with desirable value (5mm).

すべての制御系は目標値に整定することが確認されたが、その過渡特性において、(a)の外乱オブザーバは目標値応答に対して遅れが生じ、(c)のSMCに関しては目標値応答をややオーバーするような応答が得られた。しかし、(b)の H_∞ 制御系は目標値応答に対して遅れることなく追従していることから微小入力によって引き起こされると考えられる摩擦等の非線型要素による影響の増大に対して優れたロバスト性を示すことがわかる。これは位置ベース型インピーダンス制御⁷⁾等の微小入力に対するシリンダ変位の過渡特性を重視するような制御システムにおいて有効であると考えられる。

5. 各ロバスト制御系の性能評価

以上より種々のパラメータ変動に対する各ロバスト制御系の性能評価について、ロバスト性と制御入力に関する検討を行う。

<5.1> 外乱オブザーバ系 ロバスト性に関しては、負荷変動や作動油温度の変化、および供給圧力の変化に対するパラメータ変動に対しては全般的に優れた制御性能を示した。しかし微小入力時のステップ応答において目標値応答に遅れが生じた。これは外乱オブザーバが2自由度制御

系における外乱抑圧特性としてのモデルマッチング性能が低下したためと考えられる。つまり外乱オブザーバは、制御系のロバスト安定性という点から考えた場合、安定性が損なわれないように制御系のゲインを十分下げて安定性を確保するため、 H_∞ 制御系に比べロバスト安定性を陽に扱った制御手法ではないことから、微小入力に対する過渡特性に対して十分な制御入力を得る事ができなかつたと考えられる。

次に制御入力において、外乱オブザーバは負荷の増加にかかわらず、その立ち上がりの最大値がほぼ一定に推移し安定した制御入力の挙動を示したものの、供給圧力の変化に対するそれは比較的高い値でほぼ一定に推移し、その制御入力波形も鋭角的な挙動を示した。これはつまり、種々のパラメータ変動に対して制御入力の立ち上がりがほぼ一定であるため、プラントの内部ゲインが減少したとき制御入力を比較的小さく押さえる事ができるが、逆に内部ゲインが上昇したとき、制御入力の立ち上がりは相対的に大きくなると考えられる。

<5.2> H_∞ 制御系 種々のパラメータ変動に対するロバスト性は全般的に優れており、特に微小入力時のステップ応答に対して目標値応答に遅れることなく追従した。これは他の制御系に比べ、パラメータ変動に対するロバスト安定性を積極的に考慮する事で、制御系のゲインを比較的大きく確保することができるためであると考えられる。

しかしその反面、制御入力という観点から検討すると、負荷変動における制御入力は他の制御系に比べ大きい事が確認された。これは H_∞ 制御器を設計する際、ロバスト安定化に関するモデル化誤差を重み関数等により余剰に考慮してしまった場合、外乱抑圧に対する制御入力の応答が過敏となり、パラメータ変動に対するロバスト性の維持に比較的大きな制御入力を要する事が原因であると考えられる。

<5.3> SMC SMCは、負荷変動、作動油温度の変化、供給圧力の変化に対するパラメータ変動については優れたロバスト性能を示した。しかし、微小入力時のステップ応答に関しては目標値応答をややオーバーするような挙動を示しその動特性にわずかな劣化が確認された。この原因としてまず状態の超平面への拘束力が低下したためと考えられる。つまり前報で示したように、不確かさがマッチング条件を満たさない場合、制御入力にディザ補償ゲインが必要となるが、このディザ補償ゲインが微小入力時のステップ応答に対してスライディングモード到達条件を十分に満たしていなかったことが要因の一つであるといえる。さらにSMCは非線形制御であるため、一般に初期値や目標値の変化によりその動特性が大きく異なる可能性⁸⁾があり、微小入力による目標値の変化に対して、非スライディングモード領域における切換線への到達挙動に多少の変化が生じたものと考えられる。

また制御入力の大きさは他の制御系に比べ適度であり、SMC特有のチャタリング現象も加速率到達則を用いて小さく押さえる事が可能となり、パラメータ変動等を有する油圧システムに対しては比較的適した制御系であると考え

られる。

6. まとめ

本論文では、外乱オブザーバ系、 H_∞ 制御系、SMC の各ロバスト制御系を実プラントである電気油圧サーボ系に適用し、さらに負荷変動、作動油温度の変化、供給圧力の変化、微小入力時のステップ応答等のパラメータ変動が生じた場合について、その制御性能に関する実験比較および評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 制御側シリンダに一定負荷を与えたときのステップ応答試験を行った。その結果、各制御系は優れたロバスト性を示した。しかし制御入力において、外乱オブザーバは負荷の増加に伴い、制御入力の立ち上がりによりそれほど大きな上昇は確認されないのに対して、 H_∞ 制御系は他の制御系に比べその立ち上がりが大きく上昇する傾向を示し、負荷変動に対するロバスト性の維持に比較的多くの制御入力を有していることが明らかになった。
- (2) 油圧システムの作動油温度が変化したときのステップ応答試験を行った。その結果各ロバスト制御系は優れたロバスト性を示した。よって温度変化に対するパラメータ変動に対してどの制御系も一定の補償が可能であることが明らかとなった。
- (3) 制御側の供給圧力を変化させたときのステップ応答試験を行った。その結果、各制御系ともに優れたロバスト性を示した。しかし制御入力において H_∞ 制御系、SMC は、供給圧力の上昇に伴う体積流量の増加に適応し、スプール変位を支配する制御入力の最大値も小さく抑えられているものの、外乱オブザーバ系は制御入力の最大値が比較的高い値で一定に推移しており、体積流量の増加に対して、最大スプール変位が常に一定であることが明らかになった。
- (4) 制御入力に関するループゲインを小さくすることにより、モデル化誤差や非線型な不確かさに対する影響を検討するため、微小入力時のステップ応答試験を行った。その結果 H_∞ 制御系は目標値応答に追従したものの、外乱オブザーバ系は目標値応答に対して遅れが生じ、SMC は目標値応答をややオーバーするような応答が得られた。これより、 H_∞ 制御系は摩擦等の非線型要素による影響の増大に対して優れたロバスト性を示すこと明らかになった。

(平成 11 年 8 月 11 日受付, 平成 12 年 1 月 17 日再受付)

文 献

- (1) 山本・横田:「6 軸油圧マニピュレータのロバスト制御に関する研究 (各ロバスト制御手法の実験比較)」機学論 Vol.64, No.620, pp.1312-1319, (1998)
- (2) 中村・佐々木・高橋:「比例・油圧シリンダ系の位置制御 (外乱推定補償を用いたスライディングモード制御系の適用)」, 計測自動制御学会第 169 回研究集会, No.169-6, (1997)
- (3) 中村・佐々木・高橋:「電気油圧サーボ系のロバスト制御系設計」, フルイドパワーシステム講演論文集, pp.73-75, (1998)
- (4) 中村・佐々木・嵯峨・高橋:「電気油圧サーボ系のロバスト制御に関する性能評価 (第 1 報)-ロバスト性・制御入力・外乱抑圧特性に対する

実験的比較-」, 電学論 D, Vol.120, No.3, pp423-429, (2000)

- (5) 「油空圧便覧 (日本油空圧協会編)」, オーム社, (1975)
- (6) 高橋・佐々木・高橋:「気泡を含む油圧システム内作動油の温度上昇」, 日本機械学会東北支部秋田地方講演会講演論文集, No.981-2, pp163-164, (1998)
- (7) B.Heinrichs, N.Sepehri・Thornton-Trump:「Position-Based Impedance control of an Industrial Hydraulic Manipulator」, Proc.IEEE, Int.Conf.Rob.Autom, pp284-290, (1996)
- (8) 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)

中村 太郎

(正員) 1975 年 1 月 11 日生まれ。99 年 3 月秋田大学大学院博士前期課程修了。同年 4 月より秋田県立大学機械知能システム学科助手。現在、フルイドパワーシステム及び機能性流体等の制御に関する研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、日本油空圧学会の会員。

佐々木 芳宏

(正員) 1966 年 12 月 7 日生まれ。92 年秋田大学大学院鉱山学研究科修了。同年秋田大学鉱山学部機械工学科助手。現在に至る。油圧駆動システムの計測・流体制御の研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会、日本油空圧学会等の会員。

嵯峨 宣彦

(正員) 1962 年 2 月 9 日生まれ。86 年 3 月秋田大学生産機械工学科卒業。同年三菱電機㈱入社。ハイブリッド電気自動車の開発等を担当。この間、96 年 3 月信州大学工学系研究科博士課程修了。99 年 4 月より秋田県立大学機械知能システム学科助教授。振動・騒音および制御に関する研究に従事。工学博士。日本機械学会等の会員。

高橋 義雄

(非会員) 1920 年 8 月 27 日生まれ。57 年 3 月秋田大学鉱山学部卒業。同年日本炭磁㈱入社。64 年秋田大学鉱山学部教務職員、78 年同教授、99 年 4 月より秋田県立大学教授および秋田大学名誉教授。工学博士。主として土木建設機械の開発、油空圧制御工学の研究に従事。資源・素材学会、日本機械学会、日本油空圧学会等の会員。