

機関番号：11601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560209

研究課題名（和文） 外乱利用型制御系の系統的設計法の開発

研究課題名（英文） Systematic Design of Disturbance Utilization Control Systems

研究代表者

石原 正 (ISHIHARA TADASHI)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：10134016

研究成果の概要（和文）：制御理論における「外乱」は人為的に操作できない外生信号のことを意味するが、必ずしも制御目的に対する障害となるとは限らず、その達成に有益である場合もある。本研究は「外乱利用型制御系」の新しい系統的設計法の開発を目指したものである。外乱消去技法を用いて設計されたコントローラは友好的外乱に対する外乱利用の形態が明確な「外乱利用型コントローラ」とみなせることことに着目し、このクラスのコントローラの設計法について考察した。まず、外乱項を含む非標準的な2次形式評価関数を用いることにより、最適な外乱消去型コントローラを設計できることを明らかにした。このコントローラの系統的な調整法として古典的なループ伝達関数回復法を拡張した手法を提案し、その有効性をいくつかの数値例で確認した。

研究成果の概要（英文）：Disturbances in control theory are exogenous signals that cannot be manipulated artificially. It should be noted that disturbances are not always harmful for control objective. This project aims at developing a new systematic design method for disturbance utilization controllers. It is pointed out that a controller designed by the disturbance cancellation technique can be regarded as a disturbance utilization controller where the usage of the friendly disturbance is apparent. The optimal disturbance cancellation controllers are constructed using a non-standard quadratic performance index which explicitly requires the disturbance cancellation. As a systematic tuning method of the optimal controllers, the extended version of the classical loop transfer recovery method is proposed, the effectiveness of which is confirmed by several design examples.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：外乱利用型制御系，外乱消去型制御系，外乱オブザーバ，ループ伝達関数回復，適合原理

1. 研究開始当初の背景

制御理論における「外乱」は人為的に操作できない外生信号のことを意味するが、制御

目的に対して障害となる外生信号としてのニュアンスが強い。しかし、「外乱」は必ずしも制御目的の障害となるとは限らず、その達

成に有益である場合もある。例えば、飛行中の航空機に対する風を「外乱」と考えた場合、追い風は航空機の飛行時間の短縮に役立つ「外乱」である。また、車両の機械式ブレーキやエレベータ、電車、ハイブリッドカーで用いられている電気式ブレーキはある種の外乱を発生させ、それを利用して制御目的を達成していると見なせる。「外乱利用型制御系」については1970、80年代に米国の研究者(Johnson,1971, Skelton,1988等)により、問題提起と若干の理論的考察が行われている。しかし、研究代表者が知る限り、その後、「外乱利用型制御系」の系統的設計法に関する研究は国内外で報告されていない。

2. 研究の目的

近年、「線形制御理論」は体系化がほぼ完了したと考えられている。その最大の成果であるH無限大最適制御理論で得られるコントローラは「最悪外乱」に対してその影響を最小化するMin-Maxコントローラであることは良く知られている。一方、「最良外乱」に対する制御性能を最大化するコントローラはMin-Minコントローラであり、「外乱利用型制御」の一つと言えよう。しかし、このようなコントローラは外乱に対してあまりに楽観的であり、そのまま工学的問題へ適用するには問題がある。工学的に有用な「外乱利用型制御系」の構成法を既存の制御理論体系の中に見出すことは困難である。本研究では、研究代表者らによる現在までの研究成果を元に、「友好的な外乱」を積極的に利用する「外乱利用型制御系」の系統的設計法を開発し、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者により見出された以下の二つの事実を手がかりとして、「外乱利用型制御系」の系統的設計法を開発する。

- (1) 外乱消去型制御は非標準的なLQG制御として定式化できる。
- (2) 外乱消去型制御は友好的外乱の利用形態が明確な外乱利用型制御の一方式とみなせる。

また、開発した設計法に基づく制御系設計支援システムをワークステーション上に構築し、実際的な問題に対して制御系設計を行う有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 入力外乱に対する外乱消去型制御系

制御対象入力に加わるステップ状の外乱を消去する最適な制御系の構成法について述べる。

① 最適外乱消去コントローラ

外乱を伴う次のような制御対象を考える。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[u(t) + d(t)], \quad y(t) = Cx(t) \quad (1)$$

ここで、 $d(t)$ は外乱ベクトルであり、次の関係を満たす。

$$\dot{d}(t) = 0 \quad (2)$$

また、(1)式の系は次の仮定を満たすものとする。

A1: (A, B, C) は最小実現である。

A2: $s = 0$ に零点を持たない。

上記の設定のもとで、状態 $x(t)$ および外乱 $d(t)$ を推定するオブザーバを以下のように構成できる。まず、(1)、(2)式から次のような拡大系を構成する。

$$\dot{\xi}(t) = \Phi \xi(t) + \Gamma u(t), \quad y(t) = Hx(t) \quad (3)$$

ここで、 $\xi(t) \square [d'(t) \ x'(t)]'$ であり、

$$\Phi \square \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B & A \end{bmatrix}, \quad \Gamma \square \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}, \quad H \square [0 \ C] \quad (4)$$

である。仮定A1, A2のもとで、 (H, Φ) は可観測であることがPBHテストにより、容易に確認できる。明らかに (Φ, Γ) は可安定とはならないことに注意しよう。 (H, Φ) の可観測性により、拡大系(3)式に対する次のようなオブザーバを構成できる。

$$\dot{\hat{\xi}}(t) = \Phi \hat{\xi}(t) + \Gamma u(t) + K[y(t) - H\hat{\xi}(t)] \quad (5)$$

ここで、 $\hat{\xi}(t) \square [\hat{d}'(t) \ \hat{x}'(t)]'$ は $\xi(t)$ の推定値ベクトルであり、 K はオブザーバゲイン行列である。拡大系(3)式に対して、次のような確立モデルを導入し、Kalmanフィルタゲイン行列としてオブザーバゲイン行列 K を決定することができる。

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= \Phi \xi(t) + \Gamma u(t) + \bar{\Gamma} w(t), \\ y(t) &= H \xi(t) + v(t). \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $v(t)$ および $w(t)$ は互いに独立な零平均白色過程であり、共分散行列はそれぞれ $V > 0$ および $\sigma I > 0$ で与えられるものとしよう。(6)式における行列 $\bar{\Gamma}$ を $(\Phi, \bar{\Gamma})$ が可制御となるように選べばRiccati方程式が唯一の正定値解をもつことが保証され、オブザーバゲイン行列 K を一意的に決定できる。

オブザーバにより、外乱 $d(t)$ を推定できることを利用し、外乱を推定値により消去する次のようなコントローラが知られている。

$$u(t) = -F\hat{x}(t) - \hat{d}(t) \quad (7)$$

ここで、 F は制御対象を安定化する適当なフィードバックゲイン行列である。このような制御系を「外乱消去型制御系」と呼ぶことにしよう。

(7)式の外乱消去型コントローラは先験的に与えるのが普通であり、その最適性については議論されていなかったが、(7)式は非標準的なLQG問題の解として得られることを示すことができる。次のような2次形式評価関数を考えよう。

$$J_{id} \square \int_0^{\infty} \{y'(t)Qy(t) + [d(t)+u(t)]'R[d(t)+u(t)]\}dt \quad (8)$$

ここで、 $Q > 0$, $R > 0$ である。(8)式は拡大系の状態ベクトル $\xi(t)$ と制御入力ベクトル $u(t)$ の相互積を含む非標準的な2次形式評価関数である。(8)式の定義から明らかなように、「友好的外乱」に対しては、外乱が制御入力と協力して(制御入力の負担を軽減して)評価関数を最少化することになる。すなわち、「外乱消去型コントローラ」は外乱利用の形態が明確な「外乱利用型コントローラ」と見なすことができる。

評価関数(8)式を最少化する制御則は、以下のように、相互積を含まない標準的な2次形式評価関数に対する結果を利用して求めることができる。

拡大系の状態ベクトル $\xi(t)$ の全ての要素は測定可能であると仮定し、新たな制御入力ベクトルとして

$$\tilde{u}(t) \square u(t) + d(t) \quad (9)$$

を定義しよう。(9)式を用いると、(8)式の評価関数は次のような相互積項を含まないもの書き換えられる。

$$J \square \int_0^{\infty} \{y'(t)Qy(t) + \tilde{u}'(t)R\tilde{u}(t)\}dt \quad (10)$$

また、(9)式を用いると、(3)式の拡大形は次のように書き換えられる。

$$\dot{\xi}(t) = \tilde{\Phi}\xi(t) + \Gamma\tilde{u}(t), \quad y(t) = H\xi(t) \quad (11)$$

ここで、

$$\tilde{\Phi} \square \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \quad (12)$$

である。(10)、(11)、(12)式から、外乱ベクトル $d(t)$ は評価関数と制御対象の動的表現から見かけ上消去されることになる。従って、(12)式を最小化する最適制御ベクトル $\tilde{u}(t)$ は $\dot{x} = Ax + B\tilde{u}$, $y = Cx$ で与えられる制御対象に対して、(11)式の評価関数を最小化する通常のLQ問題の解として、次のように与えられる。

$$\tilde{u}(t) = -F_x x(t) \quad (13)$$

ここで、 F は Riccati 方程式の正定値解を用いて定まる最適フィードバックゲイン行列である。拡大系の状態ベクトルが測定可能であるという仮定の下では、(9)、(13)式から

$$u(t) = -F_x x(t) - d(t) \quad (14)$$

が得られる。分離定理により、出力フィードバックに対する最適制御則は Kalman フィルタによる状態および外乱の推定値を用いて次のように与えられる。

$$u(t) = -F\hat{x}(t) - \hat{d}(t) \quad (15)$$

結局、(7)式で与えられる外乱消去型コントローラは、(8)式の2次形式評価関数を最小化するLQGコントローラと見なせる。

② ループ伝達関数回復手法の適用

通常のLQGコントローラ的设计法あるいは調整法として、ループ伝達関数回復法(Loop Transfer Recovery, LTR)が知られている。この手法は可安定かつ可検出でる拡大系に対するLQG制御系に対しても適用可能であるが、(3)、(4)式で与えられる外乱消去制御系の拡大系は可安定とはならないため、通常のLTR手法を用いることはできない。研究代表者らはこの問題点を解消する手法を見出し(郭, 石原, 竹田, 計測自動制御学会論文集, 1996), その後、非最小位相系への拡張(Ishihara, Guo and Takeda, Automatica, 2005)を報告しているが、これらの報告では「外乱消去型制御系」の最適性については明確に意識されていなかった。本研究期間の間に、①で示したように、最適性を明確化し、無駄時間系への適用を報告した(Ishihara and Guo, IJC, 2008)。さらに、この設計手法を「クリティカル制御系」の2段階設計法として用いることで効率的な設計を行えることを報告している(Ishihara and Ono, IJAC, 2011)。

(2) 出力外乱に対する外乱消去型制御系

制御対象出力に加わるステップ状の外乱を消去する最適な制御系の構成法について簡単に述べる。

① 最適外乱消去コントローラ

外乱を伴う次のような制御対象を考える。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + d(t) \quad (16)$$

ここで、 $d(t)$ は(2)式を満たす外乱ベクトルであり、制御対象は仮定A1, A2を満たすものとする。入力側に外乱が加わる場合の(3)、(4)式と同様、制御対象の状態と外乱を合成した拡大状態変数に対する拡大系を構成できる。この拡大系は可安定ではないが、可観測であり、状態と外乱を推定する(5)式と同様なオブザーバを構成できる。

制御対象出力に加わる外乱に対する最適外乱消去制御則は以下のように与えられる。制御対象の状態および外乱は観測可能と仮定し、次のような2次形式評価関数を導入しよう。

$$J_{od} \square \int_0^{\infty} \{y'(t)Qy(t) + [u(t) - \bar{u}]'R[u(t) - \bar{u}]\}dt \quad (17)$$

ここで、 $Q > 0$, $R > 0$ であり、 \bar{u} は制御入力 $u(t)$ の定常値である。制御則を

$$u(t) = -F_x x(t) - F_d d(t) \quad (18)$$

と仮定し、(17)式で与えられる評価関数を最小化するようにフィードバックゲイン行列 F_x および F_d を決定することを考えよう。この問題の解は、(10)式で与えられる評価関数に対するLQ問題の解として得られる最適フィードバックゲイン行列 F を用いて次のように与えられることを見出している。

$$F_x = F, F_d = [C(-A+BF)^{-1}B]^{-1} \quad (19)$$

分離定理により，出力フィードバックに対する最適制御則は(19)式で与えられるフィードバックゲイン行列と Kalman フィルタによる状態および外乱の推定値を用いて次のように与えられる．

$$u(t) = -F_x \hat{x}(t) - F_d \hat{d}(t) \quad (20)$$

② ループ伝達関数回復手法の適用

通常のループ伝達関数回復法に関する知見によれば，出力側に加わる外乱に対する外乱消去制御系に対してこの手法を適用できない．しかしながら，研究代表者は，この問題に対しては，制御対象出力側に対する通常のループ伝達関数手法と同様な手法を適用可能であることを見出し(Ishihara and Guo, ICMIT, 2009)，非最小位相系への適用について種々の考察 (Ishihara and Guo, SICE, 2010, ASCC, 2011, IFAC, 2011) を行っており，通常設計法とは異なるいくつかの知見が得られている．さらに，より一般的な外乱クラスに対する結果も得られている(例えば，Ishihara and Guo, ICMIT, 2011)．

(3) 今後の課題

ステップ状外乱以外の外乱に対する拡張は一部着手されているが，今後，より一般的な外乱クラスに対する外乱消去型制御系の構成法について考察する必要がある．また，本研究課題で扱ったものよりもより一般的な「外乱構造」についても考察する必要がある．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① T. Ishihara and H.-J. Guo, “LTR design of integral controllers for time-delay plants using disturbance cancellation,” *Int. Journal of Control*, 査読有, 81-7, pp. 1027-1034, 2008.
- ② 小野, 石原 正: 未知入力の先験情報を利用した外乱オブザーバの最適設計, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 75-760, pp.81-87, 2009.
- ③ T. Ishihara and T. Ono, “Two-step design of critical control systems using disturbance cancellation controllers,” *Int. Journal of Automation and computing*, 査読有, 8-1, pp.37-45, 2011.

〔学会発表〕(計9件)

- ① T. Ishihara, L.A. Zheng and H.-J. Guo, “Asymptotic sensitivity properties of Davison type integral controllers for time-delay plants,” *Proceedings of 17th IFAC World Congress*, 査読有, Seoul, July 6-11, pp. 3913-3918, 2008.

- ② T. Ishihara and T. Ono, “Design of critical control systems using disturbance cancellation controllers,” *Proceedings of the UKACC International Conference on Control*, 査読有, University of Manchester, September 2-4, p97.pdf (Th07 -02), 2008.
- ③ 石原 正, 郭: 非最小位相系に対する非標準最適制御問題, 第 51 回自動制御連合講演会, 2008 年 11 月 23 日, 米沢.
- ④ T. Ishihara and H.-J. Guo, “Design of optimal output disturbance cancellation controllers via loop transfer recovery,” *Proc. of ICMIT 2009*, 査読有, pp.321- 322, December 3-5, Gwanju, 2009.
- ⑤ T. Ishihara and H.-J. Guo, “Design of optimal output disturbance cancellation controllers for non-minimum phase plants via loop transfer recovery,” *Proceeding of SICE Annual Conference 2010, Taipei*, August 18-21, pp1380-1384, 2010.
- ⑥ T. Ono and T. Ishihara, “Comparison of estimation performance between single and multiple disturbance observers for LTI systems,” *Proceeding of SICE Annual Conference 2010*, 査読有, Taipei, August 18-21, pp1759-1763, 2010.
- ⑦ T. Ishihara and H.-J. Guo, “Partial LTR design of optimal output disturbance cancellation controllers with sensor delay,” *Proceedings of Asian Control Conference*, 査読有, Kaohsiung, Taiwan, May 17, pp.1129-1134, 2011.
- ⑧ T. Ishihara and H.-J. Guo, “Partial LTR design of optimal output disturbance cancellation controllers for non-minimum phase plant,” Accepted for the presentation in *IFAC World Congress*, 査読有, Milano, Italy, 2011.
- ⑨ T. Ishihara and H.-J. Guo, “Design of optimal output ramp disturbance cancellation controllers via loop transfer recovery,” to be presented in *ICMIT 2011*, 査読有, Shenyang, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 正 (TADASHI ISHIHARA)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：1 0 1 3 4 0 1 6