

2 自由度補償器でのロバストトラッキング問題

(平成 2 年 5 月 29 日 原稿受付)

設計生産工学科(大学院)	下	本	陽	一
設計生産工学科(大学院)	中	江		判
設計生産工学科(大学院)	日	隈	幸	治
設計生産工学科	宮	浦	す	が

The robust tracking problem for the control system with two-degree-of-freedom compensator

by Yoichi SHIMOMOTO
Sadamu NAKAE
Kouji HIGUMA
Suga MIYURA

Abstract

In this paper, we deal with a robust tracking problem with a two-degree-of-freedom compensator. At first, we give a parameterization of the class of two-degree-of-freedom compensator that stabilize a given plant. Secondly, utilizing this parameterization, we consider the class of all compensators which achieve robust tracking with internal stability. Furthermore we show what kind of information about the output is needed to achieve robust tracking. Finally, we find a compensator in the simple numerical example and make sure that robust tracking is achieved.

1. はじめに

ロバストトラッキング問題の目的は、システムの内部安定性とロバストトラッキング特性を満たす補償器を見つけることである。制御系を設計する際、これらの特性に加えて次の2つの点が要求される。1つは、良好な応答特性、もう1つは、満足できるフィードバック特性(感度低減、ロバスト安定性、外乱抑制等)である。これらの目標を同時に達成するには、普通の直結フィードバックシステムよりむしろ、2自由度制御システムが望ましい。^[1]

この論文では、杉江ら^[2]の理論をもとに2自由度制御システムにおけるロバストトラッキング問題を考察する。まず、与えられたプラントの伝達行列に対して上述の制御系を安定化する補償器を考える。次に、この結果

を用いて内部安定性を満たしながらロバストトラッキングを達成する全ての補償器のクラスを明確にする。さらに、ロバストトラッキングを達成するために、出力に関してどのような種類の情報が必要であるかということを示す。最後に、数値例によって実際に補償器を求め、ロバストトラッキングが達成されていることを確かめる。

ここでいくつかの記号の定義をする。

$R_p(s)^{m \times n}$: プロパーな $m \times n$ 行列の集合

$RH_\infty^{m \times n}$: 安定でプロパーな $m \times n$ 実有理行列の集合

$\sigma_+(R)$: $R \in R_p^{m \times n}$ の不安定極の集合

$R_*^{m \times n}$: 極が $\sigma_+(R)$ で互いに素な $m \times n$ 実有理行列の集合

$\|G\|_\infty := \sup_\omega \{\|G(j\omega)\|\} : G \in RH_\infty^{m \times n}$

但し、 $\|\cdot\|$ は最大特異値

2. システムの構成

本稿では、以下に示される線形時不変システム $\Sigma(C, P, R)$ を考察する。

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} u \quad (2.1)$$

$$u = [C_1 \ -C_2] \begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$r = Rr_0 \quad (2.3)$$

但し、制御プラントと設計される補償器は各々

$$P := \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \in R_p(s)^{p \times (m+q)}$$

$$C := [C_1 \ -C_2] \in R_p(s)^{p \times (m+q)}$$

である。 $R \in R_p(s)^{m \times m}$ は、開左半平面上に極を持たない目標値ジェネレータである。ベクトル u, y, z, r は各々、 p 次元の制御入力、 m 次元の制御量、 q 次元の観測出力、 m 次元の目標値である。ベクトル r_0 は目標値の初期条件を与えるインパルス関数である。制御系は図1ようになる。

ここで、 P の RH_∞ 上での右既約分解を

$$P := \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \end{bmatrix} D^{-1}, \quad N_1, N_2, D \in RH_\infty \quad (2.4)$$

とする。

以下の仮定をする。

(A 1) N_2 と D は右既約。即ち、 $XD + YN_2 = I$ を満たす $X, Y \in RH_\infty$ が存在する。

(A 2) 以下の条件を満たす $L \in R_*^{m \times n}$ が存在する。

$$N_1 = LN_2 \quad (2.5)$$

$$\text{rank } L(z_0) = m, \quad \forall z_0 \in \sigma_+(R) \quad (2.6)$$

(A 1) は z のみを用いて P を安定化するために必要である。また、(2.5) 式は z から y への伝達行列 L が存

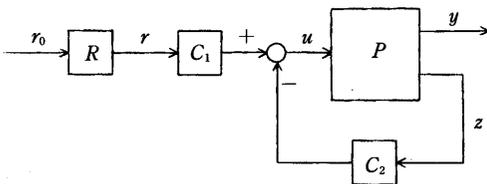


図1 システムの構成

在することを意味する。すなわち $y = Lz$ 。(2.6) 式の $L \in R^{m \times n}$ は、極もしくは零点が特別な場所に位置しないことを意味する。このことはそれほど制約とはならない。 L はプロパーでなくてもよいし、不安定であってもよい。

3. 安定化補償器

本章では、図1の閉ループ系を安定化する補償器について考える。

定義1.

システム $\Sigma(C, P, R)$ において、 $\{r, u, z\}$ を $\{r+d_1, u+d_2, z+d_3\}$ で置き換えた場合、 $\{d_1, d_2, d_3\}$ から $\{u, y\}$ までの全ての伝達関数が RH_∞ に属するならばこのシステムは、内部安定である。ただし、 $\{d_1, d_2, d_3\}$ は P と C の入力チャンネルに挿入された実際の外部入力である。

図1の制御系を改めて図2のように書くと、定義1は図2の制御系に内部安定性を適用したものである。

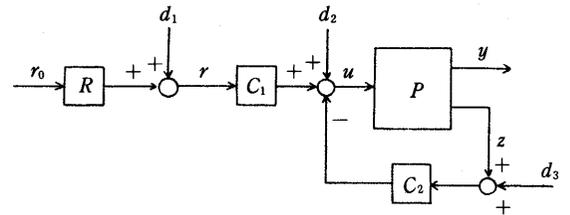


図2 システムの構成

これに基づき、安定化補償器の parameterization を考える。

P_2 と C_2 の二重既約分解を

$$P_2 = N_2 D^{-1} = \tilde{D}^{-1} \tilde{N}_2 \quad (3.1)$$

$$C_2 = N_{c2} D_{c2}^{-1} = \tilde{D}_{c2}^{-1} \tilde{N}_{c2} \quad (3.2)$$

とする。さらに U を

$$U := \tilde{D}_{c2} D + \tilde{N}_{c2} N_2 \quad (3.3)$$

と定義する。このとき以下の結果を得る。

補題 1. ^[3]

システム $\Sigma(C, P, R)$ が内部安定である必要十分条件は

$$U^{-1} \in RH_{\infty} \quad (3.4)$$

$$U^{-1} \tilde{D}_{c2} C_1 \in RH_{\infty} \quad (3.5)$$

を満たすことである。

(3.4)式を満足する全ての C_2 は

$$\begin{aligned} C_2 &= (Y - DS)(X - N_2 S)^{-1} \\ &= (\tilde{X} - S\tilde{N}_2)^{-1}(\tilde{Y} - S\tilde{D}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

で与えられる。但し、 $X, Y, \tilde{X}, \tilde{Y} \in RH_{\infty}$ は以下の行列を満たす解で、 $S \in RH_{\infty}$ は任意のパラメータである。^[4]

$$\begin{bmatrix} \tilde{X} & -\tilde{Y} \\ -\tilde{N}_2 & \tilde{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D & Y \\ N_2 & X \end{bmatrix} = I \quad (3.7)$$

ここで、記号の簡略化のために以下の定義をする。

定義 2.

$A, B \in R_p(s)$ が与えられたとき、 $\tilde{D}_B D_A + \tilde{N}_B N_A$ が RH_{∞} 上で unimodular (逆行列も RH_{∞} に属する行列) ならば、 B は A の閉ループ安定化器という。但し、 $A = N_A D_A^{-1}$, $B = \tilde{D}_B^{-1} \tilde{N}_B$ は、各々 A, B の既約分解である。すべての A の閉ループ安定化器の集合を $\Omega(A)$ で表わす。

この定義を用いると、(3.4) 式を満足する全ての C_2 は

$$C_2 \in \Omega(P_2) \quad (3.8)$$

と書ける。

次に、 $K = U^{-1} \tilde{D}_{c2} C_1$ とすると、(3.5) 式を満足する全ての C_1 は

$$C_1 = (D + C_2 N_2) K, \quad K \in RH_{\infty} \quad (3.9)$$

と表わされる。

結局次の補題を得る。

補題 2.

(2.4) 式によって与えられた P が、仮定 (A 1) を満たすとする。このとき $\Sigma(C, P, R)$ が内部安定であれ

ば、全ての補償器 $C = [C_1 \ -C_2]$ は (3.8), (3.9) 式で与えられる。

以上の結果より、内部安定を達成する C の設計は、(3.8), (3.9) 式に従う K, C_2 の選択に等価であることがわかる。よって今後 $C = C(K, C_2)$ と表わす。また図 1 は図 3 のようにかける。

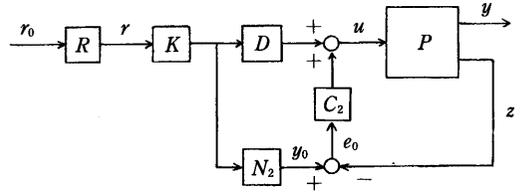


図 3 補償器の構造

図 3 で表わされる補償器の構造は、非常に便利である。なぜならば、 K は目標応答を特徴づけるパラメータで、 C_2 はフィードバック特性を決めるパラメータであり、2 つは独立している。実際、 r から y への伝達行列 G_{yr} は簡単に求めることができる。

$$\begin{aligned} G_{yr} &= P_1(I + C_2 P_2)^{-1} C_1 \\ &= N_1 K = L N_2 K \end{aligned} \quad (3.10)$$

一方、 $e_0 = y_0 - z$ 、即ち C_2 への入力 e_0 は 0 に等しい。これは、プラントのパラメータが変化するか、外乱が入ったときのみ C_2 が働くことを意味する。

4. ロバストトラッキング問題の解

本章では、前章の結果に基づき、ロバストトラッキングを達成する安定化補償器のクラスを明確にする。

仮定より、プラント P は $\{N_1, N_2, D\}$ よりむしろ $\{L, N_2, D\}$ によって決定されることがわかる。本章では、 L は固定されていて、 $P_2 = N_2 D^{-1}$ の摂動のみを考える。

プラントの摂動集合 $\Pi(P_2, L)$ は

$$\begin{aligned} \Pi(P_2, L) := & \left\{ P' = \begin{bmatrix} L N_2' \\ N_2' \end{bmatrix} (D')^{-1} : \left\| \begin{bmatrix} D' - D \\ N_2 - N_2' \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < \varepsilon \right. \\ & \left. \text{subject to } L N_2' \in RH_{\infty} \right\} \quad (4.1) \end{aligned}$$

で定義される。

定義 3.

以下の条件が、 $P' \in \Pi(P_2, L)$ に対して成り立つような $\varepsilon > 0$ が存在するならば、 C はロバストトラッキング補償器であるという。

$$\Sigma(C, P, R) \text{ は内部安定} \quad (4.2)$$

$$(I - G_{vr'})R \in RH_\infty \quad (4.3)$$

但し、 $G_{vr'}$ は $\Sigma(C, P', R)$ における r から y への伝達行列である。

$G_{vr'}$ は、 $P_2' := N_2(D')^{-1}$ とすると

$$G_{vr'} = L(I + P_2 C_2)^{-1} P_2 C_1 \quad (4.4)$$

で得られる。(4.3) 式は $y(t)$ が $r(t)$ に定常偏差なく追従することを意味する。 R の左既約分解を $\tilde{D}_R^{-1} \tilde{N}_R$ とすると、(4.3) 式は

$$(I - G_{vr'}) \tilde{D}_R^{-1} \in RH_\infty \quad (4.5)$$

と等価である。

定理 1.

仮定 (A 1), (A 2) を満たす与えられた $\{P, R\}$ に対して、 $\Sigma(C, P, R)$ は内部安定であると仮定する。このとき $C = C(K, C_2)$ がロバストトラッキング補償器である必要十分条件は

$$(I - LN_2 K) \tilde{D}_R^{-1} \in RH_\infty \quad (4.6)$$

$$LD_{C_2} \phi_R^{-1} \in R_* \quad (4.7)$$

が成り立つことである。但し、 ϕ_R は \tilde{D}_R の最大不変因子である。

(4.6) 式は、公称プラント P でのトラッキング条件で、(4.7) 式は、プラントの摂動に対するロバスト性を保証する条件である。つまり定理 1 は、2 自由度制御システムでのロバストトラッキング問題が、2 つの独立した問題に分けられることを意味している。定理 1 に基づき、ロバストトラッキング問題の完全な解を与える次の 2 つの結果を得る。

定理 2.

仮定 (A 1), (A 2) を満たす与えられた $\{P, R\}$ に対して、ロバストトラッキング補償器 C が存在する必要十分条件は

$$\begin{aligned} \text{rank } N_1(s_0) = \text{rank } LN_2(s_0) = m \\ \text{for all } s_0 \in \sigma_+(R) \end{aligned} \quad (4.8)$$

が成り立つことである。

2 番目の結果を述べる前にいくつかの記号の定義をする。ある $W \in RH_\infty$ に対して

$$N_1 K + W \tilde{D}_R = I \quad (4.9)$$

を満足する $K \in RH_\infty$ の集合を K_{TR} とする。次に $\Phi \in RH_\infty$ を、以下の条件を満足する任意の行列とする。

$$L\Phi\phi_R^{-1} \in R_*, \quad \Phi \sim \Phi_B := \begin{bmatrix} \phi_R I_m & 0 \\ 0 & I_{l-m} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

但し、 \sim は両方の行列が RH_∞ 上で同じ Smith form を持つことを意味する。

(4.10) 式を満足する Φ は $\Phi = V\Phi_B$ によって与えられる。ただし V は

$$LV = (L_1, 0), \quad L_1, L_1^{-1} \in R_*^{m \times m} \quad (4.11)$$

を満たす任意の unimodular 行列である。

定理 3.

仮定を満たす与えられた $\{P, R\}$ に対して (4.8) 式が成り立つとする。このとき全てのロバストトラッキング補償器 $C = C(K, C_2)$ は

$$K \in K_{TR} \quad (4.12)$$

$$C_2 = C_s \Phi^{-1}, \quad C_s \in \Omega(\Phi^{-1} P_2) \quad (4.13)$$

で表される。

定理 3 において、 K は次の 2 つの場合に分けて parameterize される。^[3]

(a) P_2 が正方 ($m = p$) の場合

$$K_{TR} = \{K = Y_1 + Q_1 \tilde{D}_R, \quad Q_1 \in RH_\infty^{m \times m}\} \quad (4.14)$$

但し、 $X_1, Y_1 \in RH_\infty$ は

$$X_1\phi_R D + Y_1 N_1 = I \quad (4.15)$$

を満たす解である。

(b) $\tilde{D}_R = \phi_R I$ のとき, $\phi_R^{-1} N_1$ の右既約分解を $N_0 D_0^{-1}$ とすると K は

$$K_{TR} = \{K = K_{10} + D_0 Q_2, Q_2 \in RH_\infty^{p \times m}\} \quad (4.16)$$

で得られる。ただし, $K_{10}, K_{20} \in RH_\infty$ は

$$N_1 K_{10} + \phi_R K_{20} = I \quad (4.17)$$

を満たす解である。

5. 許容できる摂動と mode readability

本章では, ロバストトラッキング特性を維持する L の摂動クラスを考える。

定理 4.

仮定 (A1), (A2) を満たす与えられた $\{P, R\}$ に対して C は $\Pi(P_2, L)$ に関するロバストトラッキング補償器で, 行列 L' が

$$(A2)' \quad L' \in R_*^{m \times q}, \quad L' N_2 \in RH_\infty \\ \text{rank } L'(z) = m \quad \forall z \in \sigma_+(R)$$

を満足するとき, C が $\Pi(P_2, L)$ のロバストトラッキング補償器でもある必要十分条件は

$$(L-L') N_2 K \tilde{D}_R^{-1} \in RH_\infty \quad (5.1)$$

$$(L-L') D_{c2} \phi^{-1} \in R_* \quad (5.2)$$

定理 4 は L の許容できる摂動を明確にする。しかし条件 (5.1), (5.2) の意味ははっきりしない。そこで意味を明確にする。

定義 4.

Π は P の摂動集合を表わすとする。このとき各々の $P' \in \Pi$ に対する $\Sigma(C, P', R)$ で

$$y(t) - [Lz](t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty) \quad (5.3)$$

が成り立つならば, $\Sigma(C, P, R)$ は Π にとって mode readable という。

(5.3) 式はトラッキングモード (即ち R の極) に関する出力 y の情報が定常状態で z と, 公称な $L \in R_*$ から

得ることができることを意味する。

定理 5.

仮定 (A1), (A2), (A2)' の下で, 与えられたシステム $\Sigma(C, P, R)$ は内部安定であり, $N_2 K$ と \tilde{D}_R は右既約であるとする。このとき $\Sigma(C, P, R)$ が $\Pi(P_2, L)$ にとって mode readable である必要十分条件は (5.1), (5.2) 式が成り立つことである。

定理 5 はシステムが摂動 L' に対して mode readable である必要十分条件が (5.1), (5.2) 式であるということを示す。故にロバストトラッキング特性を維持するプラント摂動クラスは mode readability を保証するクラスと等価であることがわかる。

ロバストトラッキングを達成するためには, 偏差情報 ($e(t) := r(t) - y(t)$) の正確な知識が必要である。 L の構造はトラッキングモードに関して不変でなければいけない。即ち

$$(L-L')\phi_R^{-1} \in R_* \quad (5.4)$$

しかしこれらは十分条件でしかない。ロバストトラッキングに必要なものすべては mode readability であることがわかった。言い替えば, トラッキングモードに関する偏差情報である。mode readability は補償器 C の選択によることに注意しなければならない。

6. 数値例

本章では, 具体的なプラントの伝達行列に対して, 前章までの結果を適用した例を示す。

例題:

プラントと目標値ジェネレータが以下のように与えられている。

$$\begin{bmatrix} y \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{(s+1)(s+2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+1} & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad r = \frac{1}{s} r_0 \quad (6.1)$$

ただし, u_1, u_2, u_3 は制御入力, y は制御量, z_1, z_2 は観測出力である。

R の左既約分解を考えると

$$\tilde{D}_R = s/(s+1) = \phi_R \quad (6.2)$$

P の右既約分解は (2.4) 式において

$$D = I_3 \quad (6.3)$$

$$N_1 = P_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$N_2 = P_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{(s+1)(s+2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+1} & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

また (2.5) 式より

$$L = [s+1 \quad 0] \quad (6.6)$$

R の不安定極は 0 なので

$$\begin{aligned} \text{rank } LN_2(0) &= \text{rank } N_1(0) \\ &= \text{rank } [0.5 \quad 0 \quad 0] = 1 \end{aligned} \quad (6.7)$$

より, (4.8) 式が成り立つので, ロバストトラッキング補償器は存在する。

次に, $\phi_R^{-1}P_1$ の右既約分解は

$$\phi_R P_1 = N_0 D_0^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{s}{s+2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (6.8)$$

(4.17) 式を満たす K_{10}, K_{20} を求める。

$$K_{10} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad K_{20} = \frac{s+1}{s+2} \in RH_\infty \quad (6.9)$$

(4.16), (5.8), (5.9) 式より求める K は

$$K_{TR} = \left\{ K = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{s}{s+2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Q, \quad Q \in RH_\infty^{3 \times 1} \right\} \quad (6.10)$$

$V=1$ とすることにより ϕ は

$$\phi = \begin{bmatrix} \frac{s}{s+1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

で得られる。

$\phi^{-1}P_2$ の右既約分解を $\phi^{-1}P_2 = N_{p2}D_2^{-1} = \tilde{D}_2^{-1}\tilde{N}_{p2}$ とすると

$$N_{p2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(s+1)(s+2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+1} & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} \frac{s}{s+2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$\tilde{D}_2 = \phi, \quad \tilde{N}_{p2} = P_2 \quad (6.13)$$

また, $\tilde{D}_2 X - \tilde{N}_{p2} Y = I$ を満たす $X, Y \in RH_\infty$ は

$$X = \begin{bmatrix} \frac{s+3}{s+2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

(4.12) 式より求める C_2 は

$$C_2 = (Y - D_2 S)(X - N_{p2} S)^{-1} \phi^{-1} \quad (6.15)$$

$S=0$ とすると

$$C_2 = YX^{-1}\phi^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-2(s+1)(s+2)}{s(s+3)} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

(6.10) 式より, $Q=0$ とすると

$$K = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} \frac{2(s^2+3s-2)}{s(s+3)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

ところで, 補償器を加える前の r から y への伝達関数は $1/(s+2)$ であり, 応答曲線は図 4 のようになる。

(6.16), (6.17) 式で得られた補償器を用いると

$$G_{yr} = N_1 K = \frac{2}{s+2}$$

となり, 図 5 に示す応答曲線は, 目標値に追従していることがわかる。

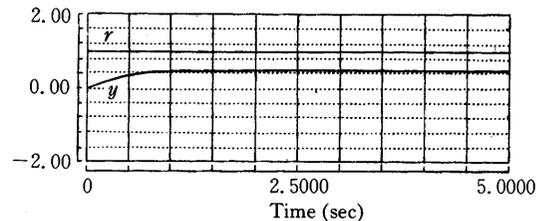


図 4 元の系の応答曲線

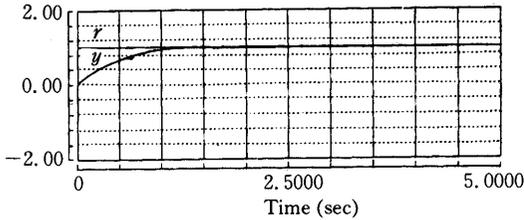


図5 補償器を加えた系の応答曲線

次に、プラントのパラメータが以下のように変化したとする。

$$P_2' = \begin{bmatrix} \frac{-2}{(s+1)(s+2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+1} & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix}$$

$$L' = [1 \quad 0]$$

このとき、 r から y への伝達関数は

$$G_{yr} = \frac{-4(s^2+3s-2)}{(s+1)(s+2)(s^2+3s+4)}$$

となり、図6に示す応答曲線は、目標値に追従していることがわかる。

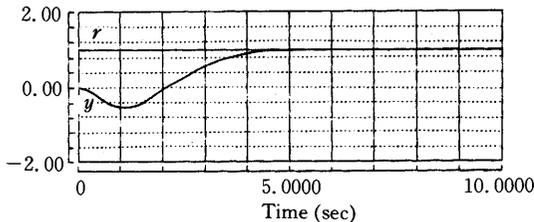


図6 摂動がある場合の応答曲線

7. おわりに

本論文では、2自由度制御システムにおけるロバストトラッキング問題を考察した。まず、2つの独立したパラメータ (K , C_2) による安定化補償器の parameterization を与えた。それは、伝達関数と、ロバスト性を各々特徴付けるものである。次に、内部安定性を満たしながらロバストトラッキングを達成する補償器のクラスを明確にし、問題の定式化を行った。さらに、ロバストトラッキングを維持する本質的な形が、偏差自身よりむしろトラッキングモードに関する偏差情報を得ることができるかどうかであることを示した。そしてこれらの結果を具体的なプラントに適用し、許容できる摂動が加わった場合にも追従していることを確かめた。しかし、用いた例は意味のある系ではない。今後の課題としては実用可能な系に於て、 H_∞ 制御の応用面も考えていきたい。

参考文献

- [1] 小林敏弘, 宮浦すが, 下本陽一, "2自由度補償器での感度問題", 九州工業大学研究報告(工学), 第59号, P.29-34, (1989)
- [2] T. Sugie and M. Vidyasagar, "Further results on the robust tracking problem in two-degree-of-freedom control systems", Systems & Control Letters Vol. 13 101/108 (1989)
- [3] T. Sugie and T. Yoshikawa, "General solution of robust tracking problem in two-degree-of-freedom control systems", IEEE Trans. Automat. Control Vol. 31 552/554 (1986)
- [4] Bruce A. Francis, "A Course in H_∞ Control Theory", Springer-Verlag (1987)