2 入力冗長プラントを対象とした 入力冗長性を利用した耐故障適応制御と故障検知*

川口 夏樹[†]・荒木 望[†]・佐藤 孝雄[†]・小西 康夫[†]

A Fault-Tolerant Adaptive Control Design and Fault Detection with Input Redundancy for a 2-input Redundant Plant*

Natsuki KAWAGUCHI[†], Nozomu ARAKI[†], Takao SATO[†] and Yasuo KONISHI[†]

In this paper, we propose an active fault detection scheme with input redundancy of the plant. The proposed active fault detection scheme aims at quickly detecting of the occurrence of actuator sticking under steady state. In addition, a new fault tolerant control (FTC) design is developed to implement the active fault detection scheme for input redundant 2-input 1-output plant. Finally, the effectiveness of the proposed FTC and the applicability of the proposed active fault detection scheme are verified through several experiments.

1. はじめに

自動機械の運転中に生じた故障を直ちに検知し、報知することは、システムの維持・管理の観点から重要である [1]。機械システムは機械的な受動要素、アクチュエータ、センサ、コンピュータなどから構成されるが、その中でもアクチュエータはシステムへ物理的に作用できる重要な要素である [2]。そのためアクチュエータは物理的な動作部分をもつことが多く、システムの運転中に故障する恐れがある。一方で、近年の工学の発展とともに、機械製品に対する信頼性や機能性に対する要求が高まり、冗長なアクチュエータ構成を採用したシステムが開発されている。たとえば、電気自動車 [3,4] やハイブリッド自動車、ドローン [5,6] などが挙げられる。こうした入力冗長システムは、非冗長システムに比べて高い性能を有しており、これからさらに重要になっていくと考えられる。

システムの動作中に生じるアクチュエータの故障検知問題に取り組む研究は数多く存在する [7–13]。故障検知の現在の主流な方法は、制御入力やプラント出力などの観測可能な信号を観察し異常を見つける、いわば受動的な方法である。たとえば残差法（文献 [7,12] など）では、

観測したプラント入出力と正常なモデルの入出力の差異を評価することで故障を検知できる。しかしながら、観測可能な信号上に故障の症状が表れない場合もある。たとえば機械システムを運用するうえで、定常状態を長時間維持する場合を考える。ここでアクチュエータ出力の固着が生じると、固着したアクチュエータは故障発生後も一定の制御力を生成し続ける。この場合、固着故障の発生前後で各信号は変わらず一定値を示し続けるため、観察している信号上に固着故障の症状は表れない。このように、受動的な方法では故障検知の即時性や正確性が対象システムの運転状態に依存してしまう。それに対して、システムに試験信号を印加し、その反応を観察することで故障を調べる積極的な故障検知法も存在する。これはアクティブ故障検知とよばれるが、この手法について論じている文献は受動的な方法と比べて非常に少ない [14–16]。高橋は冗長アクチュエータを有するシステムに対して、微小な試験信号を印加することで故障を検知するアルゴリズムを提案している [17]。このような積極的な方法ではオペレータが任意の信号をシステムに印加できることから、受動的な方法に比べて即時性が高く、より詳細な診断が可能である。その一方で、試験信号がシステムに対して外乱のように作用し、正常時の制御性能を悪化させるという問題がある。

そこで本論文では、プラントの入力冗長性を利用することで、正常時のプラント出力に影響を与えないアクティブ故障検知の考え方を提案する。また提案するアクティブ故障検知を実現するために、モデル規範適応制御

* 原稿受付 2016年9月28日

[†] 兵庫県立大学 大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, University of Hyogo; 2167, Shosha, Himeji, Hyogo 671-2201, JAPAN

Key Words: fault tolerant systems, active fault detection, adaptive control, input redundant systems, actuator sticking.

Fig. 1 Schematic of passive fault detection which based on the observation of plant inputs and output for 2-input 1-output plant; (A) fault-free case, (B) case of Act.1 stuck

の手法を用いて、2入力冗長プラントに対する耐故障制御 (FTC) システムを設計する。本論文の最後に、冗長な二つのアクチュエータをもつ機械装置 [18] を用いて実験を行い、アクティブ故障検知の適用可能性と提案する FTC システムの耐故障性を確認する。

2. 入力冗長性を利用した故障検知と制御

Fig. 1(A) に示す 2 入力 1 出力のプラントにおける故障検知問題を考える。このプラント内部には二つのアクチュエータ (Act.1, 2) があり、それぞれが入力信号 u_1, u_2 に応じた制御力 E_1, E_2 を生成する (Fig. 1(A)-b)。そして、それらの合成制御力 E (Fig. 1(A)-c) がプラントの内部状態 (出力) x を駆動する (Fig. 1(A)-d)。

プラントの入出力信号の観察に基づいた受動的な故障検知法では、観測された入出力信号をプラントのモデルなどに照らして妥当であるか評価する。そのため、システムの運転状態に依存して、故障の発生を直ちに検知できない場合がある。たとえば Fig. 1(B) に示すような、制御入力に一定の定常状態下において生じるアクチュエータ出力の固着故障である。Fig. 1(B) では、ある時刻 T_f で Act.1 の出力が固着する故障が生じている。この故障はプラントの入出力が定常状態にある間に生じているた

Fig. 2 Schematic of proposed active fault detection using test signal τ and allocator α ; (A) fault-free case, (B) case of Act.1 stuck

め、故障発生後もプラント入出力信号は一定の値を維持している (Fig. 1(B)-a,d)。これらの信号を観察すれば、プラントの入力-出力信号の対応関係は妥当であることから、故障の発生を検知できないことになる。

そこでわれわれは微弱な周期信号 (試験信号) を用いて常に制御入力を振動させておくことで、アクチュエータの固着を直ちに検知することを考えた。ただし試験信号をそのまま印加すれば、システムに対して外乱のように作用し制御性能を悪化させる。そこで、プラントのもつ入力冗長性を利用する。入力冗長プラントに対しては、理論的にプラントの内部状態に一切影響を与えることなく、任意の有界な信号を印加できることが知られている [18–20]。この性質を利用することでプラント出力に影響を与えずに試験信号を印加できる。

われわれの提案するアクティブ故障検知の考え方を Fig. 2 を例に説明する。Fig. 2(A) はプラント内に故障のない場合を示している。Fig. 2(A)-a に示す適当な制御器出力 u_{c1}, u_{c2} に対して、分配器 α を通して振動的な試験信号 τ を印加する。その結果、同図 (A)-b に示すようにプラント入力 u_1, u_2 は振動する。振動的な信号 u_1, u_2 に対応して、プラント内では冗長アクチュエータが振動的な制御力 E_1, E_2 をそれぞれ生成する (同図 (A)-c)。ただし、それらが合成されるときに、分配器 α を通して印加

された試験信号の成分が打ち消される (同図 (A)-d). 結果として, 同図 (A)-e のプラント出力上には試験信号の影響は表れない.

Fig. 2(B) に, Fig. 1(B) と同様に, ある時刻 T_f において Act.1 が固着する場合の例を示す. Fig. 2(B)-b に示すように, 正常時には振動的な制御力を生成していた Act.1 が固着発生以後では一定の制御力を出力し続ける. その結果, 残る正常な Act.2 が出力する振動的な制御力 E_2 が打ち消されなくなり (Fig. 2(B)-c), 振動的な制御力 E がプラント出力 x を振動させる (Fig. 2(B)-d). こうした故障発生に起因するプラント出力の変化があれば, 既存の受動的な故障検知法などにより故障発生を検知することが可能になると考える. 以上が入力冗長性を利用したアクティブ故障検知の概要である.

しかしながら, プラント内で打ち消されるように試験信号を印加するためには, 対象プラントのアクチュエータに関する詳細な情報が必要となる. そのうえ, 印加する試験信号は正常時の制御性能に影響を与えないが, 故障発生時にはプラントを不安定にする恐れがある.

これらの課題を踏まえて, 本論文では 2 入力冗長プラントに対する耐故障制御設計法を提案する. ここではアクチュエータ故障を含む制御対象のパラメータは未知であり, またアクティブ故障検知のためにシステムに対して任意の有界な外部信号を印加できるようにする. 同一分野の先行研究として, Boskovic が提案している, 冗長アクチュエータ出力を用いて試験信号の影響を補償する適応制御法がある [16]. ただし文献 [16] ではアクチュエータの出力が観測できることを前提としているため, センサの数が増えシステムが複雑化してしまう. またわれわれの提案法では試験信号の分配器を陽な形でシステムに組み込んでおり, その点で Boskovic の研究とは異なっている.

3. 制御対象プラントと故障の表現

次の線形プラントを考える.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

ここで $x(t) \in \mathbb{R}$, $u(t) \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれプラント出力, プラント入力である. パラメータ A, B はそれぞれスカラーおよび 2 次元ベクトルである. また (1) 式において, プラントの出力 $x(t)$ を駆動する力を制御力 $E := Bu$ とよぶこととする.

3.1 アクチュエータ故障の表現

本研究では, 劣化型および固着型の 2 種類のアクチュエータ故障を考える. これらの故障を表現するために, (1) 式をつぎのように書き換える.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + BAu(t) + E_f, \\ A &= \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで A および $E_f \in \mathbb{R}$ は, 故障の種類とその程度に依存する未知の行列およびベクトルである. これら故障パラメータの詳細は後述する. 本論文では, 故障は一つのアクチュエータにのみ生じ, 残るアクチュエータは正常であるとする.

(1) 劣化型故障の表現

劣化型故障は, アクチュエータの有効性が低下する, もしくは完全に損失する故障とし, (2) 式のパラメータを用いて次式で表現する.

$$\lambda_i(t) = \begin{cases} 1 & (t < t_f) \\ d & (t \geq t_f) \end{cases}, \quad E_f = 0 \quad (3)$$

ここで λ の添字 $i \in \{1, 2\}$ は故障したアクチュエータを指しており, $t_f (> 0) \in \mathbb{R}$ は未知の故障発生時刻である. また定数 $d, (0 \leq d < 1)$ は故障の程度を表す未知の定数である.

(2) 固着型故障の表現

固着型故障も同様に, (2) 式のパラメータを用いて次式で表現する.

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= \begin{cases} 1 & (t < t_f) \\ 0 & (t \geq t_f) \end{cases} \\ E_f(t) &= \begin{cases} 0 & (t < t_f) \\ b_i u_i(t_f) & (t \geq t_f) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで b_i は行列 B の i 列目の要素スカラー, u_i は入力ベクトル u の i 番目の要素スカラーである. また劣化型故障と同様に, $i \in \{1, 2\}$ は故障したアクチュエータを表す添字であり, $t_f (> 0) \in \mathbb{R}$ は未知の故障発生時刻である. 定数ベクトル $b_i u_i(t_f)$ は固着型故障発生以後にプラントに加わる一定の制御力を意味する.

4. アクティブ故障検知のための耐故障適応制御設計

試験信号を印加可能な, (2) 式のプラントを対象とした耐故障適応制御システムを開発する. ここでの制御目的はステップ状信号への漸近追従制御とする.

4.1 制御系の構造

Fig. 3 に提案する耐故障適応制御系の概略図を示す. 図上部が安定な規範モデルであり, 下部は制御対象プラントとそれに接続された適応制御器である.

規範モデルとして, つぎの安定な 1 次系を考える.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (5)$$

ここで $x_m \in \mathbb{R}$, $r \in \mathbb{R}$ はそれぞれ規範モデルの出力, 参照入力である. パラメータ A_m および B_m は安定である ($A_m < 0$) 任意の定数とする.

前提としてプラントと故障のパラメータ A, B, A および E_f は未知であるが, ベクトル B の各要素の符号はわかっているものとする. また参照入力 r として有界な

Fig. 3 Structure of proposed FTC system

任意のステップ状信号を仮定する。

プラント入力 u を次の適応制御器により生成する。

$$u(t) = L_1 \gamma(t) x(t) + L_2 \eta(t) r(t) + \alpha(\theta_a(t)) \tau(t), \quad (6)$$

$$\alpha(\theta_a(t)) = \begin{bmatrix} \cos \theta_a(t) \\ \sin \theta_a(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで $\tau(t) \in \mathbb{R}$ は有界な試験信号であり、設計者が任意に決定できる。(6)式右辺のベクトル $L_1, L_2 \in \mathbb{R}^2$ および $\alpha(\theta_a(t)) \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれプラント出力 x 、参照入力 r および試験信号 τ の係数ベクトルである。ただしベクトル L_1 および L_2 は定数ベクトルであり、2次元平面上でベクトル B と同一象限内に存在するように選ぶ (Fig. 4)。この前提と (3), (4) 式の故障パラメータ A よりつぎの条件が満たされる。

$$B_f L_1 > 0 \quad \text{and} \quad B_f L_2 > 0, \quad (8)$$

$$B_f := B \Lambda$$

また (6) 式で γ, η および θ_a は適応パラメータである。適応パラメータベクトル α とプラントの故障ベクトル B_f^T との関係を Fig. 5 に示す。ここで Fig. 5 中の $N(B_f)$ はベクトル B_f^T の零空間を表している。また Fig. 5 より $\theta_a(t)$ は2次元平面上のベクトル α の角度を表していることがわかる。

4.2 適応則の導出

出力追従誤差 $e = x_m - x$ を定義する。(2), (5), (6) 式より e の時間微分に対するつぎの式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}_m - \dot{x} \\ &= A_m x_m + B_m r \\ &\quad - [A x + B_f \{L_1 \gamma x + L_2 \eta r + \alpha(\theta_a) \tau\} + E_f] \\ &= A_m(e + x) - (A + B_f L_1 \gamma) x + (B_m - B_f L_2 \eta) r \\ &\quad - B_f \alpha \tau - E_f \end{aligned} \quad (9)$$

いま、Fig. 5 に示したベクトル B_f^T と α の間の角度 θ を用いれば、内積 $B_f \alpha$ を $B_f \alpha = \|B_f^T\| \|\alpha\| \cos \theta =$

Fig. 4 Relation between vector B of controlled plant and coefficient vectors L_1, L_2 Fig. 5 Relation between vector B_f of controlled plant and adaptive vector $\alpha(\theta_a, t)$

$\|B_f^T\| \cos \theta$ と表現することができる。この表現を用いて (9) 式はつぎのように書ける。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + \{(A_m - A) - B_f L_1 \gamma\} x \\ &\quad + (B_m - B_f L_2 \eta - E_f / r) r - (\|B_f^T\| \cos \theta) \tau \end{aligned} \quad (10)$$

ここで $\Delta A, \Delta B$ および $\Delta \theta$ をつぎのように定義する。

$$\begin{aligned} \Delta A &= \{(A_m - A) - B_f L_1 \gamma\} / B_f L_1 \\ \Delta B &= (B_m - B_f L_2 \eta - E_f / r) / B_f L_2 \\ \Delta \theta &= \pi / 2 - \theta \end{aligned} \quad (11)$$

上式の $\Delta \theta$ の定義を用いると、 $\cos \theta = \sin \Delta \theta$ と書ける。これと (11) 式を用いて (10) 式を書き直す。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + B_f L_1 \Delta A x + B_f L_2 \Delta B r \\ &\quad - (\|B_f^T\| \sin \Delta \theta) \tau \\ &= A_m e + Y^T \Omega \Phi - \|B_f^T\| \sin \Delta \theta \tau, \end{aligned} \quad (12)$$

$$Y = [x \quad r]^T, \quad \Omega = \text{diag}\{B_f L_1, B_f L_2\},$$

$$\Phi = [\Delta A \quad \Delta B]^T$$

つぎのスカラー関数 $V(t)$ を定義する。

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} \Phi^T \Gamma^{-1} \Omega \Phi \\ &\quad + \frac{2}{\gamma_3} \|B_f^T\| \sin^2 \left(\frac{\Delta \theta}{2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2\}$ は任意の正定対称行列、 γ_3 もまた任意の正の定数とする。(13) 式の $V(t)$ はどんな e, Φ および $\Delta \theta$ に対しても常に $V \geq 0$ を満たし、等号が成立するのは $e = 0, \Phi = 0$ および $\Delta \theta = k\pi, (k \in \mathbb{Z})$ がすべて

成り立つときのみである。式 $\Delta\theta = k\pi$ が成立するとき、(11) 式の定義と Fig. 5 より、適応ベクトル $\alpha(\theta_a)$ はプラントの入力係数ベクトル B_f^T と直交することがわかる。

(13) 式を時間微分する。

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= e\dot{e} + \dot{\Phi}^T \Gamma^{-1} \Omega \Phi \\ &\quad + \frac{2}{\gamma_3} \|B_f^T\| \cdot 2 \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \cdot \frac{\Delta\dot{\theta}}{2} \\ &= e\dot{e} + \dot{\Phi}^T \Gamma^{-1} \Omega \Phi + \frac{1}{\gamma_3} \Delta\dot{\theta} \|B_f^T\| \sin \Delta\theta \quad (14)\end{aligned}$$

(12) 式を (14) 式に代入する。

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= e \{ A_m e + Y^T \Omega \Phi - \|B_f^T\| \sin \Delta\theta \tau \} \\ &\quad + \dot{\Phi}^T \Gamma^{-1} \Omega \Phi + \frac{1}{\gamma_3} \Delta\dot{\theta} \|B_f^T\| \sin \Delta\theta \\ &= A_m e^2 + (e Y^T + \dot{\Phi}^T \Gamma^{-1}) \Omega \Phi \\ &\quad + (-e\tau + \frac{1}{\gamma_3} \Delta\dot{\theta}) \|B_f^T\| \sin \Delta\theta \quad (15)\end{aligned}$$

適応パラメータ γ , η および θ_a を次式にしたがって調整するとする。

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}^T &= -e Y^T \Gamma \\ [\dot{\gamma}(t) \quad \dot{\eta}(t)] &= [\gamma_1 e(t) x(t) \quad \gamma_2 e(t) r(t)] \quad (16)\end{aligned}$$

$$\Delta\dot{\theta} = -\dot{\theta}_a(t) = \gamma_3 e(t) \tau(t) \quad (17)$$

(16), (17) 式を (15) 式に代入すると次の結果が得られる。

$$\dot{V} = A_m e^2 \quad (18)$$

ここで $A_m < 0$ の前提より $\dot{V}(t) \leq 0$ であることから、 $V(t)$ は半正定でかつ時間に対して非増加関数である。したがって (18) 式より、 $\int_0^\infty \dot{V}(t) dt = \int_0^\infty \{A_m e^2(t)\} dt = V(\infty) - V(0)$ が存在して有限値となることから、 $e \in \mathcal{L}^2$ である。また (13), (18) 式より $e(t)$ は有界であり、安定な規範モデル出力 $x_m(t)$ が有界であることから、プラント出力 $x(t)$ もまた有界となる。さらに適応パラメータ $\gamma(t)$, $\eta(t)$ および θ_a はそれぞれ有界であることから $\dot{e}(t)$ は有界となる。以上のことから、時間の関数 e が $\mathcal{L}^2$ かつ有界で、その微分値 $\dot{e}$ が有界なので、Barbalat の定理より $t \rightarrow \infty$ で $e \rightarrow 0$ となる。

ここまでで提案したモデル規範適応制御系では、追従誤差 e の漸近安定性は信号 τ の選択に依存しない。したがって、制御目的を達成しつつ第2章で提案したアクティブ故障検知のための試験信号を印加することができる。試験信号は有界であればどのような信号でもよいが、第2章で述べた方法で故障を検知するために、本論文では以下の条件を満たす試験信号を用いる。

(1) プラント入力を常に揺動させる

(2) 故障発生時にプラント出力上に現れる

前者は試験信号として周期信号を選ぶことで容易に達成できる。そのうえで、後者の条件を満たすために、制御

Fig. 6 Schematic of input-redundant experimental plant

Table 1 Specifications of experimental plant

構成要素	仕様	
第一 アクチュエータ	モータ	Maxon DCmotor RE40
	アンプ	Maxon ESCON50/5
第二 アクチュエータ	モータ	Maxon DCmotor RE25
	アンプ	Maxon ESCON50/5
センサ	エンコーダ	MUTOH UN-1000

対象プラントを通った場合に減衰しにくい周波数をもつ周期信号を選ぶ。

5. 実験プラントへの適用

Fig. 6 に2入力1出力の実験プラントを示す。ここでは、一つの回転主軸が二つのアクチュエータからのトルクを受けて回転する。二つのアクチュエータはそれぞれ DC モータとモータアンプから構成されており、個々の指令電圧に応じたトルクを出力する。Table 1 に実験プラントの諸元を示す。(2) 式の表現におけるプラント入力は指令値電圧ベクトル $u_p = [u_{p1} \quad u_{p2}]^T$ に対応し、プラント出力 x は主軸の回転速度に対応する。

5.1 実験条件と結果

実験ではつぎの規範モデルを用いる。

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= -0.4 x_m(t) + 20 r(t), \\ r(t) &= 1 \quad (\forall t \geq 0)\end{aligned} \quad (19)$$

(6) 式の適応制御器における各定数および試験信号はつぎのものを用いる。

$$\begin{aligned}L_1 &= L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.25 \end{bmatrix}^T, \\ \tau(t) &= \begin{cases} 0 & \text{(実験1)} \\ 0.15 * (\sin(0.4\pi t) + \sin(\pi t)) & \text{(実験2,3)} \end{cases}\end{aligned}$$

適応則のゲインはそれぞれ、

$$\gamma_1 = 0.2 \times 10^{-1}, \quad \gamma_2 = 0.1 \times 10^{-2}, \quad \gamma_3 = 1.0 \quad (20)$$

また適応パラメータの初期値として、

$$\gamma(0) = 2.0, \quad \eta(0) = 2.8, \quad \theta_a(0) = 0.6\pi \quad (21)$$

をそれぞれ用いる。

以下では紙面の都合上、各実験においては一つ目のアクチュエータが故障する場合の結果のみを示す。一つ目のアクチュエータが故障する場合、(6) 式の制御器出力

Fig. 7 Experimental results for sticking-type fault without test signal

$u = [u_1 \ u_2]^T$ に対して、実際にプラントへ入力する指令値を $u_p = [u_{p1} \ u_{p2}]^T$ とし、各故障はつぎのように再現する.

<劣化型故障: 実験 2>

$$u_{p1}(t) = \begin{cases} u_1(t) & (t < t_f) \\ 0.9 u_1(t) & (t \geq t_f) \end{cases} \quad (22)$$

<固着型故障: 実験 1,3>

$$u_{p1}(t) = \begin{cases} u_1(t) & (t < t_f) \\ u_1(t_f) & (t \geq t_f) \end{cases} \quad (23)$$

また各実験の全体時間は 100 秒間であり、故障発生時刻は実験開始から 50 秒後、つまり $T_f = 50$ とする.

(1) 実験 1: 試験信号のない場合の固着故障実験

試験信号を印加しない場合の固着型故障に対する制御実験の結果を Fig. 7 に示す. 図中の (a) がプラント出力 x と規範モデル出力 x_m を, (b) がプラントへの入力指令値 u_{p1}, u_{p2} をそれぞれ示している. 実験開始からおおよそ 15 秒で規範モデル出力への追従を達成しており, その後プラント出力・入力ともに一定の定常状態へと移行している. そして実験開始から 50 秒後に一つ目のアクチュエータへの指令値 u_{p1} が固着する. 固着故障が定常状態で生じているため, 故障の発生前後でのプラント入力の変化はみられない. そのため, 故障発生後もプラント出力のモデル規範追従が維持され続けているものの, 故障の発生をプラント入出力信号から直ちに検知することは困難である.

(2) 実験 2,3: 試験信号による故障発生時の出力変化

試験信号を印加した場合の劣化型故障, 固着型故障に対する制御実験結果をそれぞれ Fig. 8 と Fig. 9 に示す. 各実験において故障は実験開始から 50 秒後に生じる. Figs. 8, 9 の (a) をみれば, プラント出力ははじめの過渡状態において実験 1 より振動的になり, また定常状態に到達するまでにより多くの時間を要している. これは試験信号の影響であると考えられる. 各図 (b) より, プラ

Fig. 8 Experimental results for degradation-type fault ($\lambda_1 = 0.9$) in first actuator

Fig. 9 Experimental results for sticking-type fault in first actuator

ント出力が定常状態に移したあともプラント入力は試験信号 τ により互いに振動していることがわかる. そして劣化型, 固着型のいずれの場合でも故障発生の直後にプラント出力が振動しており, 第 2 章で述べたような故障発生の症状が明確にプラント出力上で確認できる. このプラント出力の変化を観測することで, 既存の故障検知手法により故障が検知可能であると考えられる.

5.2 適応パラメータを用いた故障診断の可能性

実験 2, 3 のいずれの場合も, 故障発生直後に生じるプラント出力の振動は一時的なものであり, その後プラント出力は発散することなく規範モデル出力への追従状態へ回復している. このことは, 提案する耐故障適応制御システムが二つの異なる故障状態へ適応できることを示すと同時に, 適応によりプラント出力上の故障の症状が失われることを意味する. したがって, もし故障状態への適応がより速やかに達成されれば, プラント出力の変化を捉えることが難しくなることが予想される. この問題への対策としては, プラント出力に加えて適応パラメータの変化を故障検知に利用することが考えられる. 参考までに実験 2, 3 における適応パラメータ θ_a の挙動

Fig. 10 Adaptive parameter θ_a : (a) Case of degradation-type fault, (b) Case of sticking-type fault

をFig. 10に示す。図より、実験2, 3ではいずれも θ_a が故障の生じる50秒の瞬間に変動している。また実験3に関しては故障の発生前後で θ_a の収束値も大きく変化していることから、 θ_a は故障の検知や分離に利用できる可能性がある。プラント出力や適応パラメータを用いた故障検知機構については今後取り組みたいと考えている。

6. おわりに

本論文では、定常状態において生じるアクチュエータの故障をすばやく検知可能にすることを目的として、以下に示すことを行った。

- (1) プラントの入力冗長性を利用したアクティブ故障検知の考え方を示した。
- (2) モデル規範適応制御の手法を用いることにより、2入力冗長プラントを対象とした、アクティブ故障検知を実現できるFTC設計手法を提案した。
- (3) 二つの冗長アクチュエータを持つ実験装置を構成して提案するFTCを適用した。故障発生を模した実験を通じて、提案したFTC手法の有効性およびアクティブ故障検知の適用可能性を確認した。

また本論文では制御対象を2入力1出力の1次系に限定しているため、現状では提案法の適用範囲は限られている。ただし本論文の結果を用いれば、提案した理論を多変数系へ拡張することは十分可能であると考えられる。この点に関しては今後の課題としたい。

参考文献

- [1] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri : A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods; *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 313–326 (2003)
- [2] R. Isermann and U. Raab: Intelligent actuators-ways to autonomous actuating systems; *Automatica*, Vol. 29, No. 5, pp. 1315–1331 (1993)
- [3] R. Wang, Y. Chen, D. Feng, X. Huang and J. Wang: Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors; *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 8, pp. 3962–3971 (2010)
- [4] R. Wang and J. Wang: Fault-tolerant control for electric ground vehicles with independently-actuated in-wheel motors; *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 134, Mar (2012)
- [5] M. Ryll, H. H. Bulthoff and P. R. Giordano: Modeling and control of a quadrotor UAV with tilting propellers; *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (2012)
- [6] M. Ryll, H. H. Bulthoff and P. R. Giordano: A novel overactuated quadrotor unmanned aerial vehicle: modeling, control, and experimental validation; *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 540–556 (2015)
- [7] S. X. Ding: *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools* (1st ed., Berlin, Germany), Springer (2008)
- [8] R. Isermann: *Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Springer (2011)
- [9] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim and C. E. Seah: A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods; *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 636–653 (2010)
- [10] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy and S. N. Kavuri: A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies; *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 313–326 (2003)
- [11] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri and K. Yin: A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods; *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 327–346 (2003)
- [12] H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin and D. Theilliol: Fault-tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine; *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 34–49, Feb (2000)
- [13] N. Meskin and K. Khorasani: Fault detection and isolation of actuator faults in overactuated systems; *2007 American Control Conference*, pp. 2527–2532 (2007)
- [14] G. J. J. Ducard and H. P. Geering: SMAC-FDI : New active fault detection and isolation scheme with high computational efficiency; *2010 Conference on Control and Fault Tolerant Systems*, pp. 30–37 (2010)
- [15] G. J. J. Ducard: *Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems -Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles*, Springer (2009)
- [16] J. D. Boskovic, J. Redding and R. K. Mehra: Sta-

ble adaptive reconfigurable flight control with self-diagnostics; *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pp. 5765–5770 (2007)

- [17] 高橋: アクチュエータの切り替えによる自己修復制御; 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 9, pp. 782–787 (2007)
- [18] N. Kawaguchi, T. Sato, N. Araki and Y. Konishi: Experimental study for control allocation method based on strong input redundancy; *Proceedings of IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control* (2015)
- [19] M. Elgersma, D. Enns and S. Shald: Parameter identification for systems with redundant actuators; *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, pp. 109–117 (1998)
- [20] L. Zaccarian: Dynamic allocation for input redundant control systems; *Automatica*, Vol. 45, pp. 1431–1438 (2009)

著者略歴

かわ ぐち なつ き
川 口 夏 樹

2015年3月兵庫県立大学大学院工学研究科機械系工学専攻博士前期課程修了, 同年4月より同大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程に在学中. 機械システムにおける故障検知および耐故障制御の研究に従事.

あら き のぞむ
荒 木 望

2007年3月兵庫県立大学大学院博士後期課程修了. 同年4月兵庫県立大学大学院工学研究科助教, 2016年10月より兵庫県立大学大学院准教授. 制御工学やKalmanフィルタ, 画像処理などの応用, 医用工学に関する研究に従事. 博士(工学). 日本機械学会, 計測自動制御学会, 精密工学会などの各会員.

さ とう たか へい (正会員)
佐 藤 孝 雄

2002年3月岡山大学大学院自然科学研究科知能開発科学専攻修了. 2001年10月～2002年3月新エネルギー・産業技術総合開発機構ジュニアフェロー. 同年4月姫路工業大学(現, 兵庫県立大学)大学院助手, 2008年10月より兵庫県立大学大学院准教授. 主としてPID制御, マルチレート制御系, またそれらのメカトロニクスへの応用に関する研究に従事. 博士(工学). 2013年9月English International Conference on Innovative Computing Information and Control, Best Paper Award受賞. 計測自動制御学会, 電気学会などの各会員.

こ にし やす お
小 西 康 夫 (正会員)

1959年4月11日生. 1983年3月慶應義塾大学工学部卒業, 1989年3月慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程修了. 同年4月姫路工業大学(現, 兵庫県立大学)助手, 2009年7月より兵庫県立大学大学院教授. 現在, 機械システムの知能化, 最適化, 制御理論の応用についての研究に従事している. 工学博士.