

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560220

研究課題名（和文） データ欠損を考慮した遠隔制御系設計

研究課題名（英文） A Synthesis Method of Fault-Tolerant Remote Control Systems

研究代表者

不破 勝彦 (FUWA KATSUHIKO)

大同大学・情報学部・准教授

研究者番号：70324481

研究成果の概要（和文）：深海ロボットや宇宙ロボットなど人的介入が困難な状況下では、遠隔制御系の構築が必要不可欠となっている。一般には、制御仕様が複雑化することによって通信容量も増大するため、データ欠損が機器に与える影響はより深刻なものとなる。本研究では、入力空間の自由度を使って状態空間の上三角化が実現できれば、データ欠損が存在しても制御性能が劣化しないことを明らかにした。実現アルゴリズムを導出するとともに、実験による検証を行なった。

研究成果の概要（英文）： The adoption of remote control technology is indispensable for us to use robots in harsh environments including aerospace or deep-sea where human activity is extremely restricted. It is very important for the purpose to set reliable control specifications, since a single break in the network cables will cause serious damage to the system control. In this work we discuss a feedback method of synthesizing fault-tolerant control systems, and it is revealed that the feedback control scheme can be implemented if control system descriptions are translated into upper-triangular forms by using the freedom of control inputs. An algorithm is proposed for applying this approach, and its usefulness is experimentally verified in this work.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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：動的設計・制御系設計・データ欠損・空間分割・零点配置・外乱抑制・振動抑制

## 1. 研究開始当初の背景

深海ロボットや宇宙ロボットでは遠隔制御系の構築が必要不可欠となる。一般には、制御仕様が複雑化するにつれて通信容量も増大するため、輻輳に伴うデータ欠損が生じると情報の流れが遮断され、制御性能を著しく劣化させる恐れがある。申請者らは不可制御な状態空間を設計することで外因性信号の悪影響を抑制する制御法について研究してきた。データ欠損を外因性信号として定式化できれば、上記遠隔制御の問題を解決することができるものと考え、研究を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究では、データ欠損が存在してもその影響を受けない遠隔制御系の実現を目的としている。具体的には

- (1)データ欠損が発生するチャンネル
- (2)データ欠損に対して不感にするため、制御対象に課せられる条件
- (3)制御系を実現するための手続き
- (4)実験による制御系の有効性を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

制御系設計に関する理論的研究とその検証を行なう実験的研究に大別される。理論では、データ欠損の影響が制御量に現れないようにするため

- (1)チャンネルの分割・非干渉化が達成される入力空間および状態空間の構築
- (2)制御則の導出
- (3)実現アルゴリズムの開発を行なう。実験では
- (3)遠隔を模擬した制御系による振動制御実験システムの構築
- (4)データ欠損に伴う制御性能への影響の積みもりを行なう。

## 4. 研究成果

研究の目的である「データ欠損が存在してもその影響を受けない遠隔制御系の実現」に対して、その成果を以下に記述する。

### (1)入力空間および状態空間の構築

データ欠損がどのチャンネルに生じるかを明らかにして、欠損の影響が制御系に現れないようにするために、入力自由度を使って状態空間を再構築することを連携研究者と議論した。その役割の担い手となるものは、システム固有のパラメータである零点であり、それが欠損チャンネルと対応して変化するためには、状態空間の上三角化構造を実現する必要がある。状態空間のシステム行列が上

三角行列で記述できるための必要十分条件は、システム行列・入力行列に依存する複合行列と入力空間の自由度で記述できることが明らかとなった。このように

- ①データ欠損に伴う影響度を零点の値によって定量的に評価できるようになった
- ②制御対象のパラメータ行列と入力自由度を使って、空間分割の条件を明らかにした

成果は、国内外の研究においてインテグリティやフォルトトレランスの分野に貢献できるものと考え、この分野で零点を対象とした研究は類を見ない。また、零点配置に関しては、非干渉化、出力零化、外乱局所化など様々な理想制御系を実現するものであるため、得られた条件を応用してこれらの制御系の実現も視野に入れた展開を行なうことが期待できる。

### (2)制御則の導出

空間を分割するための制御則は、分割の個数、次元そして零点を指定することで求められた。この制御則は状態フィードバック制御をベースにしたものであるため、状態変数が測定できない場合には空間を分割することができなくなる。実用性を睨んだ場合、出力フィードバック制御でしかもできるだけ簡便な制御則となることが望ましい。そこで、産業機器で多用されているPID制御則で実現することを検討し、極および零点が配置できるPIDゲインを導出する設計法を確立した。この結果より

- ①制御器の次数は2となるため、制御装置に実装する上において、コストや計算負荷の軽減の点で有効となる。
- ②産業機器の多くにPID制御が用いられていることから、既存の制御装置におけるPIDゲインを今回導出した手続きに従って再設計するだけで、容易にデータ欠損を考慮した制御システムが構築できる可能性がある。

これらの成果は、国内外の研究において古くから研究がなされてきたPID制御系設計の分野に一石を投じるものであり、また極零点配置との関連からすればその研究は類を見ない。また、極と零点を同時に配置することができるため、モデルマッチングによる理想的な制御系を実現するものであり、データ欠損に強い制御系であれば、産業応用上の有効性を高めるものと考えられる。

### (3)実現アルゴリズムの開発

空間を分割するための制御則を求めるアルゴリズムを開発した。空間分割が可能であ

るための必要十分条件は値域空間で記述されているため具体的に値域を求めるアルゴリズムや、条件を満足できなかった場合に入力結線を入れ替えるための変換行列を求めるアルゴリズムを新たに開発した。その後、制御則を求めるアルゴリズムを求め、すべてのアルゴリズムを統合した。完成したアルゴリズムからプログラムのコーディングを行ない、リアルタイムシミュレータに実装した。このように

- ①空間の包含関係が既成の制御系設計ソフトウェアで表現できた
- ②空間分割ができるための条件を満足しない制御対象に対しては、入力結線を入れ替えることでその条件を満足できるように作り替えができること、そしてそのため変換行列を新たに実現アルゴリズムに盛り込めた

成果は、①では既成のソフトウェアが制御系設計において多用されており、国内外の研究において、幾何学的アプローチによる制御系設計の分野に貢献できるものとする。また、②では国内外の研究において、構造系と制御系の同時設計の分野に貢献できるものとするが、制御のしやすさの点では、受動性や最小位相の性質がよく議論されるものの、入力の入れ替えで条件を満足させる考察はほとんど行なわれていない。今回は空間分割の条件についての考察のみであるが、一般的に入力の入れ替えが制御系にどのような効果を齎すのかを検討することは意義があるものとする。なお、この考え方を応用して、制御系の解析において重要となる「可制御標準形」「可観測標準形」「対角標準形」に変換するための統一的なアルゴリズムが得られたことは特記しておきたい。

#### (4) 制御系実現のための周辺技術開発

実験装置のモデルに基づき、実現アルゴリズムを適用して制御器の設計を行ない、リアルタイム制御システムに実装して、データ欠損の影響が柔軟構造物に振動として現れないことを評価する。制御系の実現においては、様々な補償をする必要に迫られたため、新しく開発された周辺技術について記述する。

##### ① 外乱抑制制御器の開発

実験装置には様々な予期しない外乱が混入するので、まずはその処理を行なわなければならない。リアルタイム制御システムのヒープ領域の制限や、離散化に伴う数値的安定性の点で、付帯である外乱抑制制御器はできるだけ低次元で実現されなければならない。そこで、実験装置のモデルに対して最小の次数で実現できる外乱抑制制御器を開発した。基本的なアイデアは、モデルと同一次数で外乱抑制制御器が設計できる従来法を改良し、状態変数の推定は最小次元状態推

定機構で、外乱の推定は出力推定機構で各々対応させる着想に基づく。この結果より

- 1) ハード的なデバックを行なう際に必要となる外乱や状態変数の推定量に基づくモニタリングが可能となり、またその推定にかかる計算負荷を軽減することができた。
- 2) 従来法では、推定器の安定性から積分器のような原点極を有する補償要素を推定器内部に構成することは不可能であった。提案法では、状態変数の推定機構と外乱の推定機構を分割することで、このような補償要素を構成することが可能となった。そのため、外乱推定ならびに外乱抑制性能が改善されるものとなった。
- 3) 従来法では、状態推定精度は外乱推定誤差に依存する。提案法では、ある条件が満足される制御対象であれば、外乱推定誤差の影響を全く受けずに状態推定は可能となる。そのため、状態推定性能においても改善が見込まれる。

これらの成果は、国内外の研究において産業機器、とりわけモーションコントロールや振動制御において精力的に研究がなされてきた外乱抑制制御系設計の分野に一石を投じるものであり、また状態推定と外乱推定の機構を分割する設計条件やおのおの推定量の精度が改善できることを明らかにした研究は類を見ない。これらの推定精度が向上すれば、理想的な制御系を容易に実現することができる点で、産業応用上有効であるとする。ただし、現実には外乱が混入する箇所はほとんど不明であるため、構造系と制御系の設計を融合するシステム作りが求められる。

##### ② 振動抑制制御器の開発

実験装置は、柔軟梁に発生する振動制御を行なうものである。①の推定器を使ってモニタリングを行なったところ、実験装置のモデルには誤差が存在することがわかった。誤差が存在するモデルで本研究課題を遂行することは、データ欠損で振動が励起するのか、モデル化誤差で振動が励起しているのか、判断に迷うため、困難である。そこで、モデル化誤差が存在しても振動を励起しない補償を行なうため、振動抑制制御器を開発することとした。リアルタイム制御システムの実装上の観点から、できるだけ低次元で実現できることが望ましいので、主共振モードのみを有するモデルで制御器を設計し、他の高次振動モードをフィルタで除去する手法を用いることとした。しかしながら、従来法ではフィルタの特性を任意に指定すると制御系の最適化を図ることが困難であった。良好な制御性能を実現するためには、モデル化誤差に起因する振動を抑制するだけでなく、制御系の最適化を図ることが重要である。そこで、フィルタの特性を指定可能な最適制御器を開発した。基本的なアイデアは、フィルタの

特性が反映された制御系の特性方程式から最適性を評価する重み要素を決定し、それによって最適化問題を解くものである。この結果より

1) 従来ほとんど知られてこなかったフィルタの特性係数と重み要素との関係を明らかにできた。これにより希望のフィルタ特性をもたせる重み要素の選定だけでなく、最適性と制約から指定できないフィルタの集合についても解明できた。

2) 最適設計のためには、ある4次の行列方程式を解かねばならない。一般に4次の行列方程式を解く問題は10元連立2次方程式を解く問題となる。数値安定性の観点からできるだけ計算にかかる負荷を軽減することが好ましく、4次の行列方程式を解く問題を4次の代数方程式を解く問題に帰着するアルゴリズムを開発した。代数方程式に帰着できたことで、計算負荷の軽減だけでなく、解析解が得られる場合フィルタやモデルのパラメータと制御器のパラメータとの関係が明らかになり、設計の見通しがつきやすくなるものとする。

これらの成果は、国内外の研究においてスピンオーバー対策を必要とする柔軟構造物の振動制御の分野に一石を投じるものであり、とくに最適性を評価する重み要素にフィルタの特性を反映できる試みは類を見ない。また、フィルタを含めた最適制御問題のための行列方程式を解く問題が代数方程式を解く問題に帰着できたため、計算負荷の軽減だけでなく解析的に設計の見通しが立てられることは有効であるとする。最適制御は学部授業科目である「現代制御理論」の一単元であるが、行列方程式の解法問題を代数方程式の解法問題に帰着する方法は殆どの教科書で触れられていない。後進育成のためにも広報されることが求められる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計14件)

①不破勝彦、成清辰生、計測不可能な入力の推定機能をもつ最小次元状態推定器による外乱抑制制御、電気学会論文誌C、査読有、132巻、2012、1904—1912

DOI:10.1541/ieejieiss.132.1904

②不破勝彦、神谷高章、清水貴広、前野泰浩、内部安定性を考慮した外乱推定器設計、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、35巻、2012、31—33

DOIおよびURLなし(紙媒体のみ)

③不破勝彦、リアプノフ方程式の解法からみた現代制御理論と古典制御理論との融合に関する一考察、計測自動制御学会中部支部教

育工学論文集、査読有、35巻、2012、34—36  
DOIおよびURLなし(紙媒体のみ)

④不破勝彦、成清辰生、大羽達志、速度型PID制御則を用いた多入力系の極零点配置に関する一考察、計測自動制御学会論文集、査読有、48巻、2012、214—223

DOI:10.9746/sicetr.48.214

⑤不破勝彦、安達吉孝、田中秀和、座標変換行列の導出法と教育効果、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、34巻、2011、28—31

DOIおよびURLなし(紙媒体のみ)

⑥不破勝彦、成清辰生、大羽達志、位置型PID制御則を用いた多入力系の極零点配置に関する一考察、電気学会論文誌C、査読有、130巻、2010、2106—2117

DOI:10.1541/ieejieiss.130.2106

[学会発表] (計27件)

①不破勝彦、成清辰生、大羽達志、断線を考慮した零点配置の一考察、平成24年度電気関係学会東海支部連合大会、2012年9月24日、豊橋技術科学大学(愛知県)

②不破勝彦、村山聡、指定された高域遮断特性を有する最適レギュレータを用いた振動抑制制御、平成24年度電気関係学会東海支部連合大会、2012年9月24日、豊橋技術科学大学(愛知県)

③不破勝彦、成清辰生、大羽達志、速度型PID制御則による零点配置の一考察、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、2011年9月26日、三重大学(三重県)

④不破勝彦、村山聡、指定された高域遮断特性を有する最適レギュレータ、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、2011年9月26日、三重大学(三重県)

⑤不破勝彦、神谷高章、計測不可能な入力の推定機能における推定精度を考慮した状態推定、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、2011年9月26日、三重大学(三重県)

⑥不破勝彦、成清辰生、藤井隆雄、計測不可能な入力の推定機能をもつ最小次元状態推定器による外乱抑制制御、平成22年度電気関係学会東海支部連合大会、2010年8月30日、中部大学(愛知県)

[図書] (計1件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu.daido-it.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

不破 勝彦 (FUWA KATSUHIKO)

大同大学・情報学部・准教授

研究者番号：70324481

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

成清 辰生 (NARIKIYO TATSUO)

豊田工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70231496

大羽 達志 (OOBA TATSUSHI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90233254