

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月16日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760199

 研究課題名（和文） 冗長アクチュエータ動的適応最適出力分配による  
システム高故障耐性化の研究

 研究課題名（英文） Realization of a Fail Tolerant System with a Redundant-Number  
Actuators by Adaptive and Optimal Load Distribution Method

研究代表者

星野 洋平（HOSHINO YOHEI）

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90374579

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、除振装置として広く用いられている空気ばねによって支持される除振台のアクティブ制御を対象とする。運動自由度より多数のアクチュエータによって除振台を冗長に支持する場合にアクチュエータが劣化や破損する場合を考え、その冗長性を利用して正常なアクチュエータに出力を再分配することにより、制御系全体の安定性ならびに制御性能を維持する出力再分配法を構築することで、システムの高故障耐性化を行った。

研究成果の概要（英文）：Force redistribution method for compensating actuator-breakdown of vibration isolation tables is investigated in this study. The vibration isolation table is supported by a redundant number of actuators with respect to degrees of freedom of table motion. This study proposed a novel force redistributing method which utilizes redundancy of the actuators. When some of the actuators broke down, their output forces were appropriately re-distributed on the unbroken actuators by the proposed method. So, this study achieved a vibration isolation system with high tolerance to actuator breakdown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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： 機械力学・制御、大規模除振システム、システム冗長化、高故障耐性化

## 1. 研究開始当初の背景

半導体露光装置では、地面から受ける振動を遮断する必要があり除振装置が用いられるが、近年は大型の液晶ディスプレイなどが製造されるようになったため露光装置自体が大型化し、支持重量の増大に伴って除振装置の大規模化が進んでいる。しかし、除振装置を支持するアクチュエータ（支持脚）の大型化には限界があるため、除振装置の運動自由度に対して支持脚を多数配置し、支持脚一つ当たりの負荷重量を軽減することが求められている。この場合、運動の自由度に対してアクチュエータの数が冗長となり、アクチュ

エータ出力が不安定となる問題が生じる。現在広く用いられている除振装置では前述の冗長性による不安定化を避けるために、装置の運動の自由度と同数のアクチュエータで支持する場合が多い。この場合、一つでもアクチュエータが破損すれば、装置の性能を維持できないばかりか、除振台の落下につながり大変危険である。冗長性を利用し、正常なアクチュエータを用いて装置の性能を維持する方法を研究することで、除振性能を維持したまま装置を稼働し続け、さらに破損したアクチュエータを交換することも可能となるが、このような研究は行われていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、運動の自由度を超える冗長なアクチュエータやセンサが配置された除振装置などの動的システムにおいて、一部のアクチュエータやセンサの性能が劣化した際に、各アクチュエータへの最適な出力分配割合を動的に自動調整する方法を明らかにし、動的に制御系を再構築して装置を停止することなく稼働させるための方法を構築することである。

## 3. 研究の方法

- (1) 8脚3自由度除振台を想定したシミュレーションのための数学モデルを構築する。
- (2) 8脚3自由度実験装置を構築する。
- (3) 実験により、構築した数学モデルの妥当性を検証する。
- (4) 提案済みのアクチュエータの出力分配法を発展させ、アクチュエータの特性変化に対して適応的に分配割合を更新できるアクチュエータ出力再分配法を実現する。
- (5) アクチュエータの破損によりシステム全体の入出力特性が急激に変化する場合を考え、破損アクチュエータへの出力を正常なアクチュエータで補完することで、システムを全体としてロバスト化する方法を上述の出力再分配法により実現する。全てのアクチュエータが連動し、システム全体の特性変動を最小限に留めて破損の影響を最小限に抑制する方法を構築する。
- (6) 制御系には一般的に用いられる1型サーボ系を適用し、これに加えて出力再分配法を適用する場合としない場合についてシミュレーションと実験による検証を行う。

## 4. 研究成果

本研究課題では、図1～3に示す8脚3自由度除振台実験装置と数学モデルを構築した。この研究では、除振台の運動は、鉛直方向変位  $z$ 、ならびに  $x$  軸と  $y$  軸周りの傾斜角  $\theta_x$  と  $\theta_y$  の3つの自由度を考え、図2のようなステッピングモータ駆動レギュレータによって、8脚の空気圧アクチュエータの圧力を制御した。図3のような実験装置を構築した。数学モデルのパラメータについては、システム同定法（部分空間法）を用いて決定した。

研究課題達成の鍵となる出力再分配法を、研究代表者がすでに提案済みのアクチュエータの出力分配法に改良を施して導出した。そして、アクチュエータの特性変化に対して分配割合を適応的に更新する方法でアクチュエータ出力を再分配する方法を構築した。構築した出力再分配法を適用した制御系のブロック線図を図4に示す。図中の行列  $W$  はこの研究によって得られた出力再分配法によって導出された行列を表す。

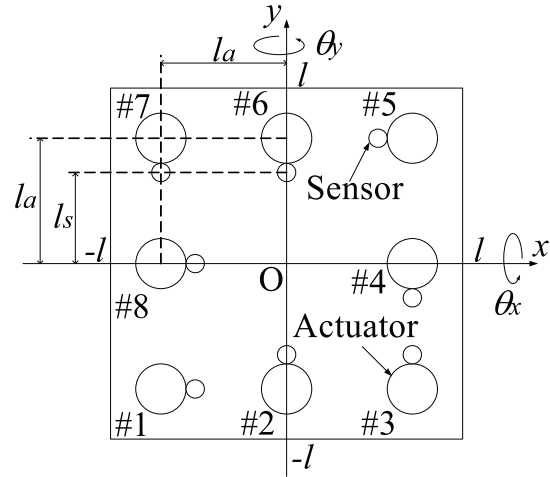


図1 8脚3自由度除振台モデル座標系

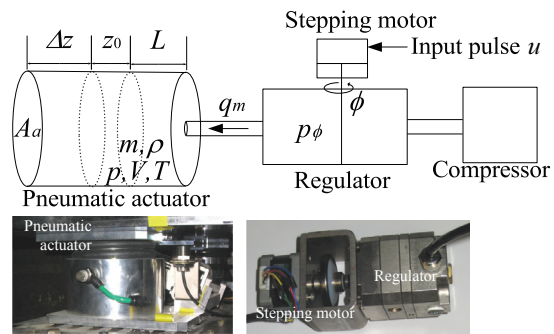


図2 空気圧アクチュエータの構成



図3 構築した8脚3自由度実験装置

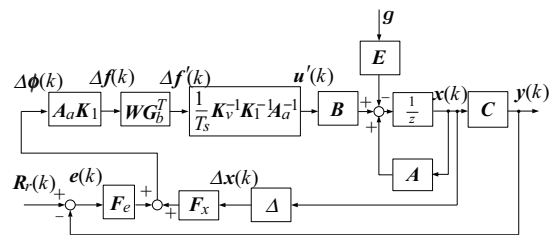


図4 出力再分配法を適用した制御系

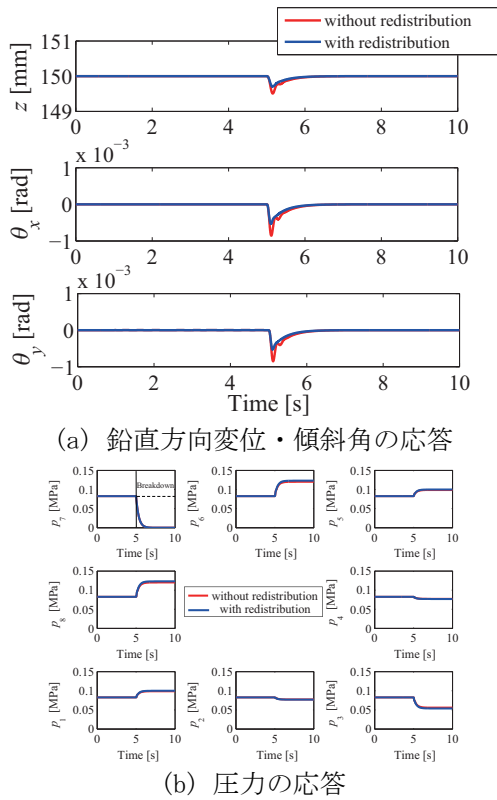


図5 シミュレーション結果(#7 破損時)

図5、図6、図7にシミュレーション結果を示す。出力再分配法を適用した場合と適用しない場合をそれぞれ青色と赤色の実線で示した。

図5はアクチュエータ#7が破損した場合を想定したシミュレーション結果である。出力再分配を行わない場合には、破損が生じた5秒以降で、振動的な挙動が表れているのに対し、出力再分配法を適用した場合は、振動的な挙動は見られず良好な結果が得られていることが分かる。

図6、図7は#3、#6、#7の3つのアクチュエータが同時に破損した場合を想定したシミュレーションの結果である。図6は出力再分配法を適用した場合、図7は適用しない場合の結果である。3つのアクチュエータが破損した場合の結果では、出力再分配法を適用した効果がさらに顕著に表れていることが分かる。図6の出力再分配法の適用時には、アクチュエータの破損後にわずかに変位に応答が表れるがすぐに回復し、振動的な挙動は見られなかったのに対し、図7のように出力再分配法を適用しない場合は、破損が発生した直後から、振動的な挙動が表れ、収束するまでに長い時間を要することが分かる。このことから、出力再分配法により、システムの故障耐性が大きく向上したことが分かる。

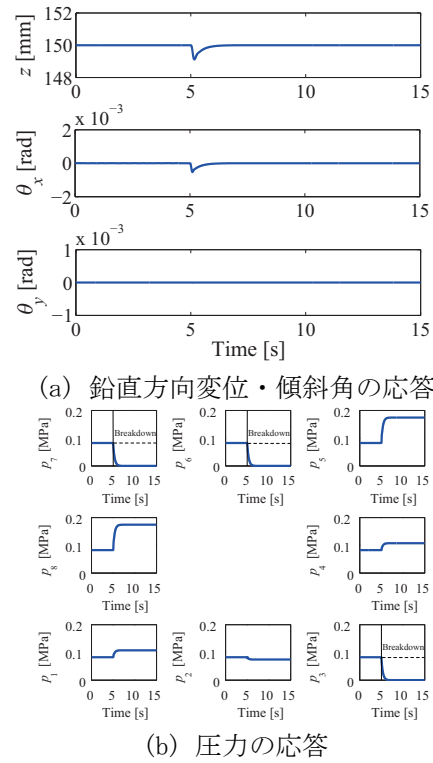


図6 シミュレーション結果(#3, #6, #7 破損時, 再分配法あり)

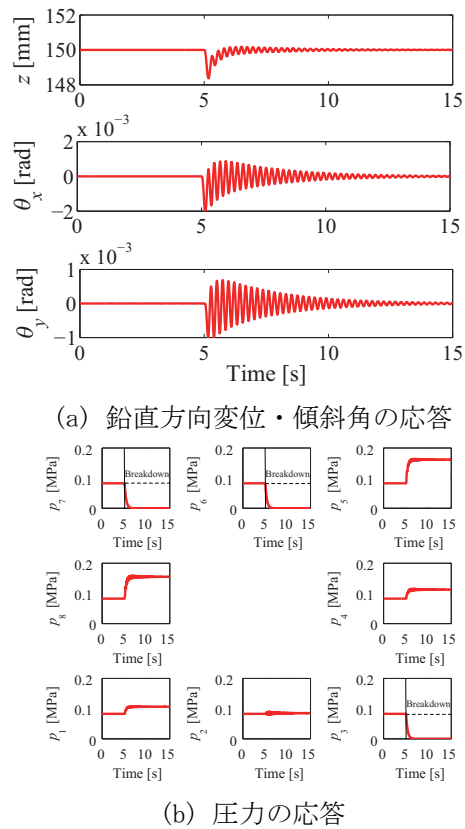


図7 シミュレーション結果(#3, #6, #7 破損時, 再分配法なし)

図8、図9、図10に実験結果を示す。これらの結果は、10秒付近に除振台の鉛直方向変位を2 mm上昇させ、20秒にアクチュエータの故障が生じた場合の実験結果である。出力再分配法を適用した場合と適用しない場合をそれぞれ青色と赤色の実線で示した。アクチュエータの故障は、アクチュエータに供給される圧縮空気を別の空気圧レギュレータで減圧することで模擬した。いずれの実験においても、出力再分配法を適用した場合は、適用しない場合と比べて、アクチュエータの故障に対する変位が素早く回復していることが分かる。特に出力再分配法を適用しない場合には、アクチュエータが荷重を支え切れず、テーブルが浮上していない着座と呼ばれる状態が発生しているのに対し、適用した場合には、破損アクチュエータへの出力が、正常なアクチュエータに再分配されることにより変位が素早く回復し、着座が回避されている。着座の状態では、除振台の除振性能は完全に失われた状態である。また、破損による圧力の変化がさらに速い場合には、台の落下につながる可能性があり危険である。これらの実験からも、システムの故障耐性が向上したことが分かり、この研究で得られた成果の意義は大きい。また、成果として得られた出力再分配法は、数学的には従来の出力分配法をより一般化した方法となっており工学的にも意義のある結果が得られた。

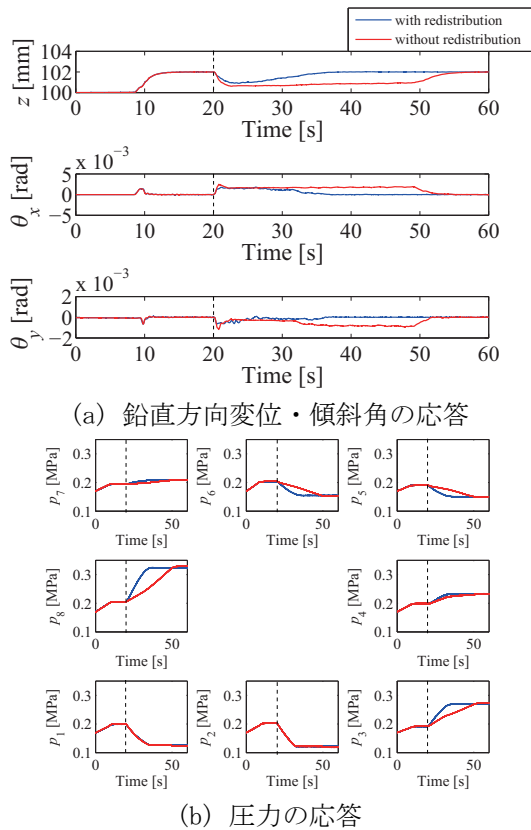


図8 実験結果(#1,#2 破損時)

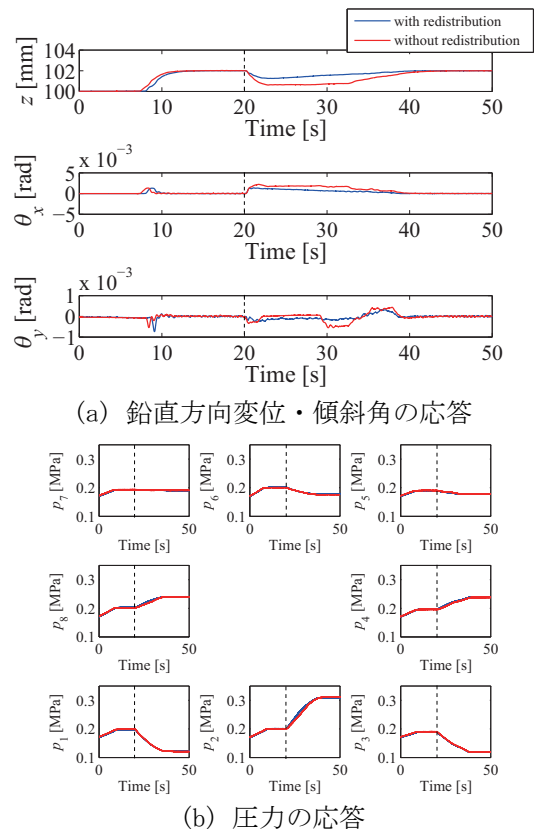


図9 実験結果(#1,#3 破損時)

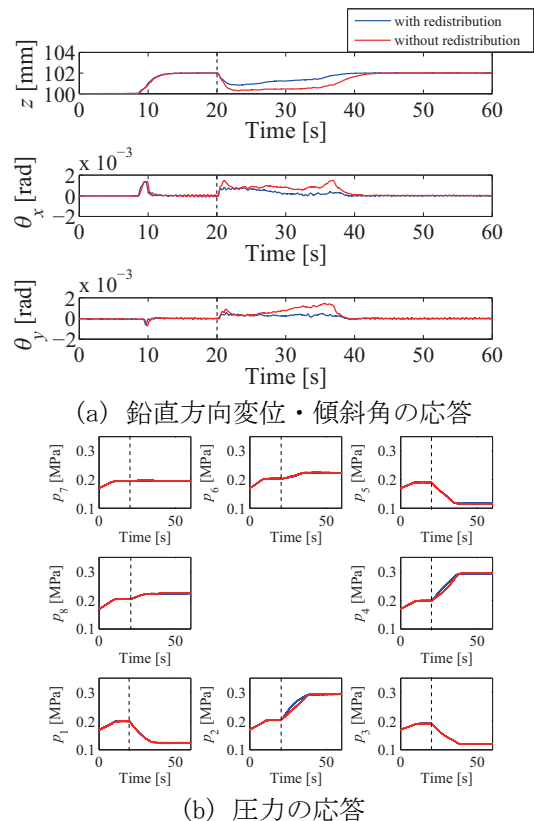


図10 実験結果(#1,#3,#5 破損時)

## 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1件)

(1) 前田拓巳、星野洋平、吉田大輔、小林幸徳、江丸貴紀、アクチュエータ故障に対する冗長支持空気圧除振台の出力再分配法、日本機械学会論文集(C編)、(査読有)、79巻、2013、(掲載可決)

[学会発表] (計3件)

- ① Yohei HOSHINO, Takumi MAEDA, Daisuke YOSHIDA, Yukinori KOBAYASHI and Takanori EMARU, A Vibration Isolation Table Supported by a Redundant Number of Pneumatic Actuators and Force Redistribution for Compensating Broken Actuators, 2012 IEEE / SICE International Symposium on System Integration (SII2012), (査読有), 2012年12月17日, 九州大学(福岡市)
- ② 星野洋平、前田拓巳、吉田大輔、小林幸徳、江丸貴紀、アクチュエータ故障に対する冗長支持空気圧除振台の出力再分配法、日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics and Design Conference 2012、2012年9月19日、慶應義塾大学日吉キャンパス(横浜市)
- ③ 前田拓巳、星野洋平、小林幸徳、江丸貴紀、冗長支持空気圧除振台のアクチュエータ故障に対する出力再分配法、日本機械学会北海道学生会第41回学生員卒業研究発表講演会、2012年3月3日、北海道大学工学部(札幌市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

星野 洋平 (HOSHINO YOHEI)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：90374579

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし