

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870010

研究課題名(和文)冗長アクチュエータ系の自己最適化によるスケーラビリティ獲得の研究

研究課題名(英文) Realization of scalability on a system with a redundant number of actuators by a self-optimization technique

研究代表者

星野 洋平 (HOSHINO, Yohei)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90374579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：この研究の目的は、冗長性を有するアクティブ除振装置を連続的に稼動しながら必要に応じてアクチュエータの数を増減する能力つまりスケーラビリティを獲得し、自動的に各アクチュエータに対して最適に負荷を分散する方法を構築することである。これにより劣化したアクチュエータを交換しながら連続的に運用したり、除振台が支持する負荷に合わせて数を増減することが可能となる。最適出力分配法を改良することで、アクチュエータ数を滑らかに増減することを可能とする、より一般的な動的最適出力分配法を構築し、スケーラビリティの獲得を実現する方法を示した。

研究成果の概要(英文)：This study has investigated a method to realize an ability for increasing/decreasing actuators continuously and smoothly in operation on a vibration-isolation table supported with a redundant number actuators, and a method for autonomously and optimally redistributing the required load on actuators. This ability is named scalability, and these methods enable to realize a scalable vibration-isolation table in which the actuators supporting the table can be added or removed smoothly according to the load demanded. The static-version force-redistribution method has been expanded to dynamic optimal force redistribution method, and the method for realizing scalability has been achieved.

研究分野：工学

キーワード：振動制御 大規模除振システム スケーラビリティ 冗長系 動的出力再分配

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、アクチュエータ(支持脚)の大型化には限界があるため、装置の運動自由度に対して支持脚を多数配置することが求められている。この場合、運動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図 1 に示すように不安定となる問題が生じる(図 1、合力は 0 だが個々の出力が増大する)。

研究代表者はこれまでに、空気圧除振台の冗長アクチュエータ系に対する最適出力分配法(図 2)ならびに低次元システム同定法について研究を行い、アクチュエータ数が冗長な場合に、出力を多数のアクチュエータに合理的に分配する方法ならびにシステム同定法を提示した。さらに、系の持つ冗長性を利用し、アクチュエータが故障した場合にも、故障していないアクチュエータに出力を再分配して制御性能を回復する方法を提案し

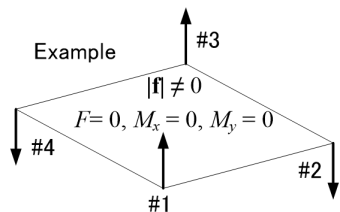


図 1 冗長性による不安定化

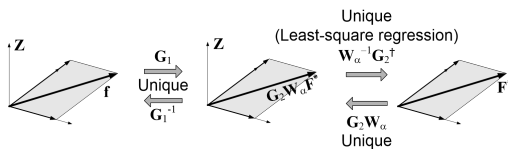


図 2 最適出力分配法の概念図

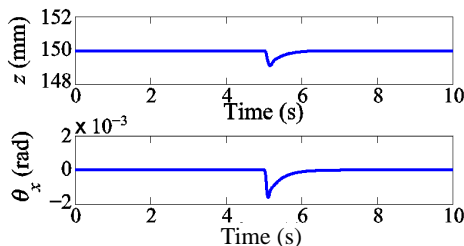


図 3 提案再分配法あり

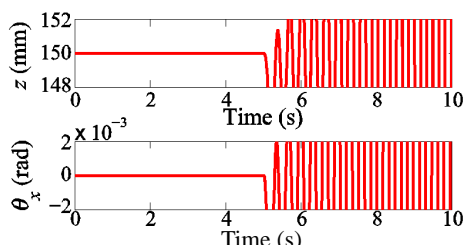


図 4 提案再分配法なし

(図 3、図 4) 冗長性を持つ除振台に提案法を適用することで、アクチュエータ破損時に残りのアクチュエータに負荷を適切に分配することが可能となり、制御系の安定性を回復して維持できるといった大きなメリットが得られることを示してきた。

この方法を一般化して発展させ、装置の稼動中に、制御性能を維持したままアクチュエータを増減する方法を構築すれば、性能劣化の生じるアクチュエータを交換しながらの連続的な運用や、負荷に応じたアクチュエータ数の増減が可能となる。しかし、冗長で大規模な系では、アクチュエータの配置やセンサの調整は互いに複雑に影響し、実際には容易ではない。これらの配置を自動的に推定して校正を行うことができれば、大規模な装置の構築が簡素化でき、精度の向上にもつながる。これらを実現するために、アクチュエータの配置を自動的に同定し、負荷を分散して協調動作させる必要がある。このような手法が実現できれば、装置を稼動したまま、負荷に応じて、アクチュエータの数を増減して最適負荷分散を行うスケラブル制御系の実現が可能となる。応用例としては、複数の小さな重機やロボット等が負荷を分散することで大きな荷重を操作する場合などへの応用が考えられる。さらに冗長数のアクチュエータが協調動作して、負荷を最適分散し、大きな荷重を精度よく操作することを可能とするための方法の基礎となり得る方法であり、応用範囲は広範に渡る。さらには、これまでは実現できなかったような大きな荷重・負荷の操作を可能とする手法の基礎となり得る点でも独創性があり、工学的にも社会基盤的にも大きな意義を持つ。

2. 研究の目的

- (1) 冗長なアクチュエータに自動的に負荷を最適に分配して協調動作させ、装置を連続的に稼動しながら必要に応じてアクチュエータを増減する能力つまりスケラビリティーを獲得する。
- (2) 最適な負荷分配のために、アクチュエータの配置を自動的に正確に把握する必要があり、配置の自己同定法を確立する。
- (3) 大規模な除振装置において、アクチュエータの冗長性を考慮して自動的に協調動作させてスケラビリティーを獲得する方法を明らかにする。そして、各アクチュエータが自律的に出力を最適化する方法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 図 5 は所有する 8 脚 3 自由度実験装置のモデル図であり、初めにアクチュエータの増減時の挙動を再現できるシミュレーションのための数学モデルを構築する。

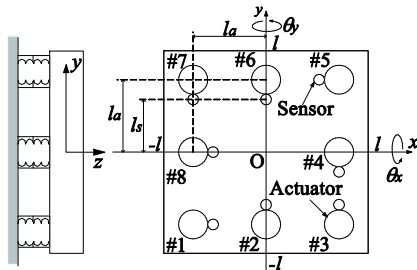


図 5 所有の 8 脚 3 自由度除振台

- (2) 基礎的な冗長システム自己最適化法を構築し、自動的に配置を同定して静的な定常状態における最適な出力分配割合を導出する方法の基礎的な研究を行う。
- (3) 研究代表者らが提案した出力再分配法に関する評価関数は、一般性を考慮して  $N$  脚の除振台を対象とすると

$$\begin{aligned}
 J = & \frac{1}{2} \alpha_x (M_x - M_x^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_y (M_y - M_y^*)^2 \\
 & + \frac{1}{2} \alpha_r (F - F^*)^2 + \frac{1}{2} \alpha_A \sum_{j=1}^N \left( f_j - \frac{F}{N} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \gamma_j f_j^2 \\
 & \dots \quad (\text{式 1})
 \end{aligned}$$

で与えられる。この式の下線の項にはアクチュエータの配置位置が陽に含まれ、最適な出力分配割合の導出のためにアクチュエータの位置を正確に把握する必要があり、各アクチュエータが自動的に自己位置を推定し、評価関数を再構築することで最適な出力分配割合を自動的に導出する方法を確立する。

- (4) 除振装置を稼働したままアクチュエータを増減するスケラビリティの獲得方法の研究を遂行する。具体的にはアクチュエータの数を増減した場合に、最適性を保ったまま動的に出力の分配割合を変更し、さらに制御系を滑らかに切り替える手法を構築する。
- (5) アクチュエータを増減して、特定のアクチュエータをシステム稼働中に交換することで、除振装置を連続稼働する実例を示す。

#### 4. 研究成果

初めに冗長数あるアクチュエータの位置ならびに力学的なパラメータを制御系が自動的に推定する方法を構築した。アクチュエータ数を増やして冗長化する場合には制御系が急激に複雑となるが、これに対する一つのアプローチを示した点で有用な成果が得られた。また、出力分配割合の更新方法として静的な最適出力分配法を動的な最適出力分配法に拡張することで、アクチュエータの



(a) 増加手順

(b) 減少手順

図 6 アクチュエータ数の変更手順

出力分配割合を滑らかに更新し、加えて制御系を稼働したまま振動などの不安定な挙動を生じることなくアクチュエータ数を滑らかに増減する方法を構築した。この研究で得られた方法は冗長数のアクチュエータを持つシステムの出力分配割合を稼働中に最適かつ動的に変更するための一般的な手法となっており工学的のみならず学術的にも大きな意義を持つ。この中で、(式 1)の評価関数の重み  $\gamma_i$  を変化させると最適な分配割合が維持された状態で個々のアクチュエータの出力分配割合が急激に変化する領域が存在する事が分かり、この現象は matrix determinant lemma と関連していることを発見した。急激な変動が生じるにもかかわらず、最適な出力分配割合は保たれるが、逆関数を用いて急激な変化を抑制することも可能であることも分かった。この成果は、アクチュエータの応答性を考慮する場合に重要な成果であり、本研究課題で得られた方法を実際のシステムにおいて有効に機能させるうえで実用上重要な成果と言える。

提案する手法の実用例として、7 個のアクチュエータにより支持された除振台が最適一型デジタルサーボ系によりアクティブ制御される場合に、連続的にアクチュエータ数を増減させる場合の時刻歴応答を示す。つまり、アクチュエータ数を 7 個から 8 個に増加させ(図 6(a))、続いてアクチュエータ数を 8 個から 7 個に減少させる(図 6(b))場合の制御系の切り替えを行う。なお増加、減少させるアクチュエータは図 5 に示す #8 アクチュエータとする。

アクチュエータを増加させるために、時刻 1 s において、追加する #8 アクチュエータを加えた制御系 ( $N = 8$ ) を構築して準備する(重み係数  $\gamma_8$  を大きな値として、出力の分配割合を 0 とした状態で、制御系 ( $N = 8$ ) に制御系を切り替える)。そして 2 s ~ 8 s において、重み係数  $\gamma_8$  を徐々に小さくして出力分配割合を徐々に変化させ、制御系 ( $N = 8$ ) に完全に切り替えていく。さらにアクチュエータを減少させるために、時刻 10 s ~ 16 s において、取り除く #8 アクチュエータの重み係数  $\gamma_8$  を徐々に大きくして出力分配割合を徐々に

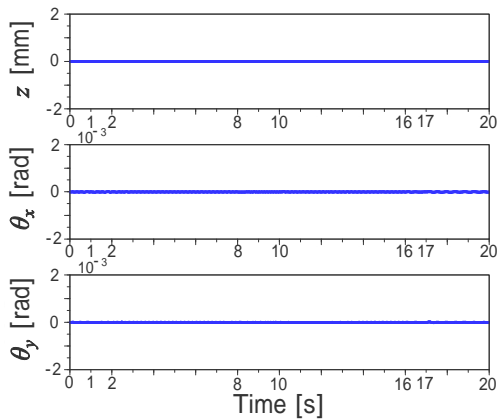


図 7 変位  $z$  と姿勢 ( $\theta_x, \theta_y$ ) の時刻歴応答

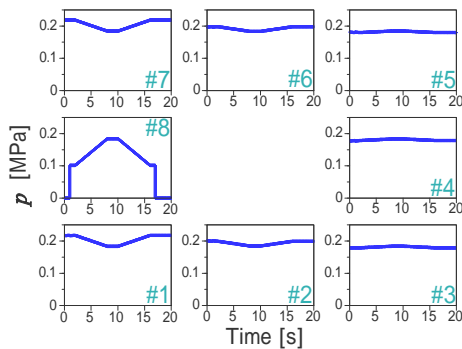


図 8 アクチュエータ圧力の時刻歴応答

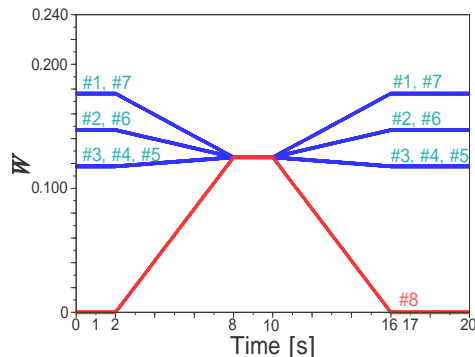


図 9 出力分配割合の変化

変化させ、17 s に制御系 ( $N = 7$ ) への切り替えを行う。結果を図 7 ~ 図 9 に示す。

除振台のテーブル姿勢の時間応答を図 7 に示す。垂直方向変位  $z$ 、 $x$  軸及び  $y$  軸周りの傾斜角  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  において、1 s ( $N = 7 \rightarrow N = 8$ )、17 s ( $N = 8 \rightarrow N = 7$ ) の制御系の切り替え前後で制御系の切り替えによる顕著な振動は生じていないことが分かる。さらに、2 s ~ 8 s で #8 アクチュエータに対応する重み係数  $\gamma_8$  を徐々に減少させている区間や、10 s ~ 16 s で #8 アクチュエータに対応する重み係数  $\gamma_8$  を徐々に増加させている区間においても振動は生じておらず、安定的な応答を示していることが分かる。

各アクチュエータの発生圧力の時刻歴応答を図 8 に示す。#8 アクチュエータを追加する場合において、重み係数  $\gamma_8$  を 2 s ~ 8 s

にかけて 1000 から 0 まで徐々に減少させることによって、出力再分配が行われ、圧力が増加していることが分かる。それに応じて #1 ~ #7 アクチュエータの圧力が適切な割合に減少 (#1、#2、#6、#7)、または増加 (#3、#4、#5) していることも分かる。#8 アクチュエータを減少させる場合においても、重み係数  $\gamma_8$  を 10 s ~ 16 s にかけて 0 から 1000 まで徐々に増加していくことによって出力再分配が行われ、圧力が減少していることが分かる。それに応じて #1 ~ #7 アクチュエータの圧力が適切な割合に増加 (#1、#2、#6、#7)、または減少 (#3、#4、#5) していることも分かる。また、大気圧  $p_s = 0.1013$  MPa との差圧がアクチュエータの出力となるため、16 s には #8 アクチュエータの出力が 0 N となっており、17 s に制御系 ( $N = 7$ ) を切り替えても大きな振動が見られず、滑らかな応答が得られている。

各アクチュエータへの出力分配割合 (行列  $W$  の 1 列目の各要素) を図 9 に示す。#8 アクチュエータを増加させる場合 (2 s ~ 8 s) において、重み係数  $\gamma_8$  を 1000 から 0 の値まで、徐々に減少させることによって、#8 アクチュエータへの分配割合が増加していることが分かる。それに応じて各アクチュエータに対し適切に出力再分配が行われていることが分かる。また #8 アクチュエータを減少させる場合 (10 s ~ 16 s) においても、重み係数  $\gamma_8$  を 0 から 1000 の値まで、徐々に増加させることによって、#8 アクチュエータへの分配割合が減少していることが分かり、各アクチュエータに対して適切に出力再分配が行われていることが分かる。

加えて、アクチュエータの破損を自己検出し、他のアクチュエータに負荷を引き継ぐ方法についても研究を遂行し、制御性能を維持したまま破損したアクチュエータを取り除く方法についても研究成果が得られた。

## 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 2 件)

Yohei HOSHINO, Soichiro SUZUKI, Kenji TAKAGI, and Yukinori KOBAYASHI, "Self-identification method of arrangement and effective pressure areas for a vibration-isolation table supported with a redundant number of pneumatic actuators", JSME Mechanical Engineering Journal, (査読有), Vol.2, No.3, (2015), p.14-00552 (pp.1-11). DOI:10.1299/mej.14-00552

Takumi MAEDA, Yohei HOSHINO, Daisuke YOSHIDA, Yukinori KOBAYASHI and Takanori EMARU, "Force



Redistribution Method for Compensating Actuator-Breakdown of Vibration-Isolation Tables Supported with a Redundant Number of Pneumatic Actuators”, Journal of System Design and Dynamics, (査読有), Vol.7, No.4, (2013), pp.355-366.  
DOI:10.1299/jsdd.7.355

[学会発表](計 9 件)

廣瀬 遼, 星野洋平, 鈴木聡一郎, 曹 羸, 楊 亮亮, “冗長支持空気圧除振台の最適出力分配に基づく連続的アクチュエータ増減法”, 第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 (2016年2月29日 北海道大学(北海道, 札幌市)).

星野洋平, 廣瀬 遼, 鈴木聡一郎, “冗長支持空気圧アクティブ除振台のスケラビリティ獲得と長時間連続稼働の実現法”, 日本機械学会2015年度年次大会 (2015年9月14日 北海道大学(北海道, 札幌市)).

Yohei HOSHINO, Yukinori KOBAYASHI, Daisuke YOSHIDA, Takumi MAEDA and Soichiro SUZUKI, “Suppression of Competitive Pressure Modes in a Redundant Actuators for a Vibration-Isolation Table”, The 10th Asian Control Conference 2015 (ASCC2015) (2015年6月3日 Kota Kinabalu (Sabah, Malaysia)).  
DOI:10.1109/ASCC.2015.7244516

廣瀬 遼, 星野洋平, 鈴木聡一郎, “冗長支持アクティブ除振台の出力再分配法によるスケラビリティの実現法”, 第47回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 (2015年3月9日 北海道大学(北海道, 札幌市)).

廣瀬 遼, 星野洋平, 鈴木聡一郎, “冗長支持アクティブ除振台のアクチュエータ出力再分配法によるスケラビリティ獲得と長時間連続稼働法”, 日本機械学会北海道学生会 第44回学生員卒業研究発表講演会 (2015年3月7日 北海道科学大学(北海道, 札幌市)).

星野洋平, 前田拓巳, 小林幸徳, 江丸貴紀, “冗長支持空気圧除振台における故障アクチュエータ検知法と出力再分配による制御系の安定性回復”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014 (2014年8月28日 上智大学 四谷キャンパス(東京都, 千代田区)).  
NAID:110009980028

Yohei HOSHINO, Soichiro SUZUKI, Kenji TAKAGI and Yukinori KOBAYASHI, “Self-Identification Method of Arrangement and Effective Pressure Areas for a Vibration-Isolation Table Supported with a Redundant Number of Pneumatic Actuators”, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control (Movic2014) (2014年8月6日 札幌コンベンションセンター(北海道, 札幌市)).  
NAID:110009976642

高木健司, 星野洋平, 鈴木聡一郎, “冗長支持アクティブ除振台のアクチュエータ配置逆推定による最適出力分配”, 日本機械学会北海道学生会 第43回学生員卒業研究発表講演会 (2014年3月8日 釧路工業高等専門学校(北海道, 釧路市)), [日本機械学会北海道学生会 第43回学生員卒業研究発表講演会 ベストプレゼンテーション賞受賞]

Yohei HOSHINO, Daisuke YOSHIDA, Takumi MAEDA, Yukinori KOBAYASHI and Takanori EMARU, “Competitive Pressure Modes in a Vibration-Isolation Table Supported by a Redundant Number of Pneumatic Actuators and its Stabilization Method”, The 15th Asia Pacific Vibration Conference (APVC2013) (2013年7月5日 Seogwipo, Jeju (Korea)).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

星野 洋平 (HOSHINO, Yohei)  
北見工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90374579

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし