

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760065

研究課題名(和文) 駆動電圧最小化を目的とした静電駆動型MEMSのトポロジー最適化

研究課題名(英文) Topology optimization for electrostatic Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) which are driven by very low-voltage

研究代表者

山崎 慎太郎 (YAMASAKI, SHINTARO)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70581601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、新しい機能、あるいは高機能を持ち革新的な低電圧駆動を実現する静電駆動型MEMSの構造創成設計を行う事である。この目的を達成するために、静電駆動型MEMSが静電場より静電引力を得る性能と、静電引力により所定の大変形を得る性能を、数値解析手法により同時に評価を行い、その解析結果に基づき、最適構造の創成設計を行う構造最適化法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to realize creative design for electrostatic Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) structures which are driven by very low-voltage. To achieve this objective, I developed a structural optimization method for electrostatic MEMS. In the proposed method, electrostatic force is evaluated on the basis of electrostatic analysis, and large displacement caused by the electrostatic force is also evaluated by the coupled analysis. In this manner, physical phenomena on electrostatic MEMS are accurately evaluated, and structural optimization is appropriately performed.

研究分野：最適設計

キーワード：構造最適化 トポロジー最適化 静電駆動MEMS 低消費電力

1. 研究開始当初の背景

(1) トポロジー最適化は、構造の形状変更だけでなく穴の数の増減などの形態の変更も可能とする最も自由度の高い構造最適化の方法である。トポロジー最適化の特徴は、最適設計問題を材料分布問題へ置き換える点にある。すなわち、材料配置の有無を検討する設計領域を最初に定義し、必要な箇所には材料を与え、不必要な箇所からは削除することにより最適構造を得る。

(2) トポロジー最適化は、現在、自動車産業などの機械産業に広く利用されているが、複数の物理領域の挙動が相互に影響を及ぼし合うマルチフィジクス問題へのトポロジー最適化の適用は、熱アクチュエータ最適設計などの事例があるものの、ごく一部の問題に限られている。マルチフィジクス問題の一つに、静電場と構造の連成問題である静電駆動型 MEMS 設計問題がある。静電駆動型 MEMS は対向する電極間に生じる静電引力によって所定の大変形を得、それにより所定の機能を果たす機械構造物であり、プロジェクターの反射光制御装置であるデジタルミラーデバイス(DMD)の構成素子としても知られている。

(3) 静電駆動型 MEMS の大きな課題の一つが駆動電圧の低減である。静電駆動型 MEMS の駆動電圧が低減すれば、消費電力の低下に伴い発生熱量が低減するため寿命向上に直結する。また、電源に関する制約が小さくなり、駆動回路も単純化されるため、トポロジー最適化により駆動電圧最小化が達成された場合のインパクトは極めて大きい。しかしながら、従来提案されている方法によって静電引力一定と仮定した場合に所定の大変形を得る構造案は得られても、静電引力をも最適化の対象とした構造案を得る事は難しく、革新的な低電圧駆動を実現する静電駆動型 MEMS の構造案を求めるとは、大変形を前提として静電場・構造連成の設計問題を解くトポロジー最適化法の確立が必要不可欠という結論に達した。

2. 研究の目的

本研究では、新しい機能、あるいは高機能を持ち革新的な低電圧駆動を実現する静電駆動型 MEMS の構造創成を目的として、静電引力が発生する電極部、柔軟性により MEMS の大変形を可能にする可動部、電極部と可動部を剛に保持する保持部に関して創成設計を行うトポロジー最適化法を構築する。この方法が確立されれば、数学的および物理学的見地に基づき駆動電圧が画期的に低い静電駆動型 MEMS の構造設計が可能となる。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、以下の事項について開発を行った。

(1) 静電場解析 - 静電引力計算 - 大変形構造解析に対応した、新しいトポロジー最適化の枠組みの開発

本研究では、静電駆動型 MEMS の構造最適化を実現するトポロジー最適化法の構築を目的とするが、従来提案されているトポロジー最適化法では、静電引力を適切に評価できないという問題点があった。これに対し、研究代表者が提案したレベルセット法に基づくトポロジー最適化法[1]は、その数学的性質上、静電引力を適切に評価できると期待されるため、これを静電駆動型 MEMS の構造最適化問題へ適用する事を試みた。さらに、提案法[1]のさらなる解探索効率向上を目指し、従来よりも数理計画法との親和性の高い構造最適化の枠組みの開発を試みた。

(2) 静電駆動型 MEMS の駆動電圧最小化を目的とした、レベルセット法に基づくトポロジー最適化法の開発

(1)にて開発した新しいトポロジー最適化の枠組みに基づき、レベルセット法により静電駆動型 MEMS の構造を表現し、静電駆動型 MEMS の構造変更が静電駆動型 MEMS の諸性能に対して与える影響の評価を試みた。すなわち、感度解析の方法について調査・研究を試みた。そして、得られた感度に基づいて設計変数を更新することにより、所定の性能を最適化する MEMS 構造を創出する、レベルセット法に基づくトポロジー最適化法の開発を試みた。

引用文献

[1] Yamasaki S., Nomura T., Kawamoto A., Sato K., and Nishiwaki S. A level set-based topology optimization method targeting metallic waveguide design problems. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 87, No. 9, pp. 844-868, 2011.

4. 研究成果

「3. 研究の方法」で述べた項目(1), (2)について、研究成果をそれぞれ以下に記す。

(1) 静電場解析 - 静電引力計算 - 大変形構造解析に対応した、新しいトポロジー最適化の枠組みの開発

項目(1)について、研究代表者が提案したレベルセット法に基づくトポロジー最適化法[1]の静電駆動型 MEMS 設計問題への適用については、実際に[1]で提案した方法論に基づいて静電場解析 - 静電引力計算 - 大変形構造解析を行ったところ、十分な計算精度で静電駆動型 MEMS の性能評価が行える事が確認できた。この件単独での研究成果について、論文発表等は行っていないが、ここで得

られた研究成果については、後に静電駆動型 MEMS を対象としたトポロジー最適化法を開発する際の基盤となった。

上記 と並行して、提案法[1]のさらなる解探索効率向上を目指し、従来よりも数理計画法との親和性の高い構造最適化の枠組みを実現した。これにより、探索性能の高い数理計画法を用いて設計解を探索する事が可能となり、静電駆動型 MEMS の最適構造の創出をさらに効率よく行える事が期待できる。本件に関して、計算力学分野におけるトップジャーナルの一つである International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME) に論文が 1 本掲載され、また、構造最適化に関する世界最大級の国際会議である 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO10) にて 1 件の発表を行った。

上記 で実現した方法論は基本的に 2 次元問題を対象としたものであるため、これの 3 次元問題への拡張についても試みた。これについては一定の研究成果は得られているものの、数値計算の安定性にまだ難点が残っている。そのため、方法論の 3 次元問題への拡張については、今後の研究課題とする。本件に関して、国内の学会会議において 1 件の発表を行った。

(2) 静電駆動型 MEMS の駆動電圧最小化を目的とした、レベルセット法に基づくトポロジー最適化法の開発

項目(2)を実現するため、項目(1)の で達成した研究成果に基づき、レベルセット法に基づく構造表現、静電場解析 - 静電引力計算 - 大変形構造解析の実行、所定の性能に対する感度解析の実行、得られた感度に基づく設計変数の更新、を統合した、静電駆動型 MEMS を対象としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化法を開発した。この研究成果により、所定の電圧を印加した際に所望の変形を得る静電駆動型 MEMS の構造を創成設計する事が可能となった。この創成設計法を用いれば、下記のサイクルを繰り返す事により、駆動電圧最小化が実現可能となる。

- (i) 最初に比較的高い印加電圧を設定し、静電駆動型 MEMS の初期構造を適当に与える。
- (ii) 創成設計法を用いて、所望の変形を得る静電駆動型 MEMS の構造を得る。
- (iii) 得られた構造を初期構造として与えなおし、印加電圧をより低い値に設定しなおす。
- (iv) (ii)に戻る。

本件に関して、日本機械学会論文集に論文が 1 本掲載された。

上記 の発展研究として、静電駆動型

MEMS の電極間の駆動力・相対位置のプロファイルを最適化する構造を得ることを目的とする、新たな創成設計法の開発を行った。本件に関して、構造最適化分野の国際学術雑誌 Structural Multidisciplinary Optimization (SMO) に論文が 1 本掲載された。

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 3 件)

小谷高代, 山崎慎太郎, 山田崇恭, 大門真, 泉井一浩, 西脇眞二. レベルセット法に基づく静電アクチュエータの構造最適化. 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 79, No. 805, pp. 3234-3247, 2013.

Kotani T., Yamada T., Yamasaki S., Ohkado M., Izui K., and Nishiwaki S. Driving force profile design in comb drive electrostatic actuators using a level set-based shape optimization method. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 51, No. 2, pp. 369-383, 2015.
DOI: 10.1007/s00158-014-1130-y

Yamasaki S., Kawamoto A., Nomura T., and Fujita K. A consistent grayscale-free topology optimization method using the level-set method and zero-level boundary tracking mesh. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 101, No. 10, pp. 744-773, 2015.
DOI: 10.1002/nme.4826

[学会発表](計 2 件)

Yamasaki S., Kawamoto A., and Nomura T. Level-set and ALE based topology optimization using nonlinear programming. In Proceedings of 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, No. 5190, Orlando, 23 May 2013.

山中誠一郎, 山崎慎太郎, 藤田喜久雄. レベルセット法とゼロレベル境界追跡型メッシュによる 3 次元問題を対象としたグレースケールフリートポロジー最適化. 第 24 回設計工学・システム部門講演会, No. 1106, 徳島, 2014 年 9 月 17 日.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]
特になし。

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 慎太郎 (YAMASAKI, Shintaro)

大阪大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70581601