

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04176

研究課題名(和文) 電磁アクチュエータ群の開発と内部・外観の同時検査を可能とする計測システムの実現

研究課題名(英文) Development of electromagnetic actuator group and realization of measurement system capable of simultaneous inspection of inside and outside

研究代表者

矢口 博之 (Yaguchi, Hiroyuki)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：70192383

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)：巨大橋梁において、計測が困難な斜張橋の主塔部の検査を目的とし、2個の同一諸元を有する往復移動型アクチュエータと柔軟なシリコンゴム材、磁気車輪を組み合わせた電磁アクチュエータシステムを試作した。実機試験では、推進特性および段差走行特性を、形状が大小異なる2モデルについて検証した。大型のシステムにおいて、アクチュエータシステム中央部に自動打音装置(質量250g)よりも重い1300gの負荷質量を搭載し、1800gの質量を搭載しても5mm/sの速度で上昇移動が可能であることが示された。更に25mmの段差走行も可能で、電力増幅器と信号発生器のみで構造物の外観検査を可能とすることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋梁の多くは高度成長期時代に建設され、今日の生活基盤を支えているものの建設から数十年を経て、補修・補強もしくは更新が必要な要監視期間に突入している。膨大な橋梁すべてについて補修補強を実施することは困難であることから劣化リスクを的確に診断し、不測の事態を回避することが必要である。本研究における計測システムの提案と実現は、豊かな生活環境を構築の実現に極めて大きな貢献をもたらすと考えられる。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of inspecting the main tower of a cable-stayed bridge, which is difficult to measure in a huge bridge, an electromagnetic actuator system combining two reciprocating movable actuators, flexible silicon rubber material, and magnetic wheels was prototyped. In the actual machine test, the propulsion characteristics and the step movement characteristics were verified for two models with different shapes. In a large actuator system, a load mass of 300 g, which is heavier than an automatic tapping device (mass 250 g), is mounted in the center of the system, and even if a mass of 1800 g is mounted, it can move up at a speed of 5 mm / s. This system is also capable of movement on steps of 25 mm. It was clarified that the appearance inspection of the structure is possible only with the power amplifier and the signal generator.

研究分野：機械力学

キーワード：計測システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2008年現在、日本各地に建設された長さが15 m以上の橋梁数は15万を超え、現在も建設が行われている。さらに、近年の交通量の増加により橋梁も巨大化している。巨大橋梁の中で特に問題となるのが、斜張橋に使用され、高さが200 m以上にもおよぶ主塔最上部におけるケーブル接合部の検査である。現在は、高所作業車を組み合わせた望遠目視による点検が行われているが、外観の大きな損傷以外は確認できない。これまでに、永久磁石の吸引力を利用して走行するローラ型のロボットや、吸盤および空気圧を制御し壁面上に吸着して走行するロボットが提案されてきた。しかし、これらの壁面移動ロボットでは、駆動源として電磁モータが用いられているため、モータとメカ部との間に減速機を介して発生トルクを増大させる必要が有ることや、吸着や脱着に多大の装置を必要とすることから必然的に重量は増加し、走行特性の改善はあまり期待できない。よってロボットによる目視技術は、未だ確立されていない。さて、電磁力と振動を組み合わせることで開発されたアクチュエータは、圧電素子と振動の結合型に比べて少ない。しかし製造コストや製作のし易さおよび最近の永久磁石の高性能化を考えると、新たな電磁-振動型アクチュエータの開発は興味深い試みと考え、振動エネルギーの有効利用についてチャレンジを繰り返した。申請者は、電磁力とメカニカルな共振を組み合わせる独自のアクチュエータを提案した。試作された実機は、磁性材料で構成されている構造物であれば平面形に限らず円筒形でも走行可能で、自重の20倍を超える牽引力が発生できることを示した。アクチュエータの電磁推進部の磁気回路を改良すれば、走行特性を大幅に改善できる可能性がある。このため、動作原理を拡張して、新たな電磁振動型アクチュエータを開発し、検査用デバイスを統合することで、巨大構造物を検査可能な計測システムが実現できれば、インフラの維持・管理に関わる危険リスクと検査コストの低減が期待され、安全で快適な社会の継続に貢献することができると考え、本研究を着想した。本申請で得られる新たな知見を進展させることで、電線を必要としないケーブルレス型の計測システムやメンテナンスを行う作業用ロボットへの応用が考えられる。ただし、走行原理を完全に確立させたうえで、高さが200 mを超える鋼鉄製の巨大橋梁の主塔面を走行し、主塔およびケーブル接合部の損傷状態をモニターできる新たな検査システムを構築する必要がある。

2. 研究の目的

申請者が提案したアクチュエータの動作原理を拡張することで、本研究では全方向に移動できる電磁振動型アクチュエータ群を開発し、自動打音装置とCCDカメラなどのデバイスを統合することで、継手などの形状を有する巨大橋梁において、特に計測が困難なケーブル接合箇所を内部と外観から同時検査が可能な社会インフラ維持・管理用の計測システムを構築することを目的とする。本研究で得られた知見を活かし、検査用デバイスが統合された計測システムを実現させ、将来的には実用化することで、社会基盤整備の分野における点検・診断のための新技術を確立し、社会に還元することができる。

3. 研究の方法

新たな計測システムを実現するため、現在、2方向移動に留まっているアクチュエータを全方向へ自在に走行できるように、アクチュエータ保持部の構造を改良する。また、自動打音装置を搭載しながら約225 mの長距離にわたり複数本のケーブルを牽引できるように、推進部の磁気回路の改良、発生磁界の活用方法およびアクチュエータの群化についての検討を行い、推進特性の改善をはかる。最終的には、段差走行を可能とする電磁車輪が搭載されたアクチュエータ群と2つの検査デバイスが統合された計測システムを構築することで、巨大構造物の内部と外観の同時検査を試みる予定である。実施する研究内容は、以下の4項目である。

- アクチュエータの推進特性と走行安定性の向上
- 発生磁界の活用方法による推進特性の改善と高効率化
- 全方向への自在走行
- 電磁車輪の試案による段差走行への対応と検査用デバイスの統合

4. 研究成果

検査用アクチュエータシステムに、複数の振動体を搭載すると、合計18本の電線が必要となる。高さが200 m以上の斜張橋の主塔を検査するには、電線の摩擦力などを考慮して約12 N以上の牽引力が要求される。2018年度は、上述の問題を解決するため、実験と数値シミュレーションによる磁場解析を行い、最適な推進部を設計する検討を行った。しかし、リング型永久磁石とボビン鉄心型の電磁石を組み合わせる新たな磁気回路では、振動型アクチュエータの推進特性に大幅な向上が望めなかった。このため、構成する電磁力系の体積を、等倍、2倍、3倍、5倍と増加した磁気アクチュエータを合計4種類試作した。保持力を2.3 Nとした場合、等倍型アクチュエータに150 gの負荷質量を搭載しても、23.9 mm/sの速度で上昇移動可能である。また、100 gの負荷質量を搭載した場合の自走効率は、27.1%であることが確かめられた。一方、2倍型アクチュエータについては、保持力を11.5 Nとした場合、850 gの負荷質量を搭載しても9.1 mm/sの速度で牽引可能であることが確かめられた。また、アクチュエータの保持力が小の場合は、高速・低推進型の、保持力が大の場合は低速・高推進型の特性を示すこ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

とが解明された。更に5倍型のアクチュエータにおいて、保持力を46Nに設定した場合、3500g(約35N)の負荷質量を牽引可能であるが、最大効率は2.4%に留まった。牽引力については、アクチュエータが大型化するにつれて飛躍的に増加するが、逆に最大効率は2次関数的に低下することが明らかにされた。2018年度において得られた成果は、海外雑誌2編、国内発表2件としてまとめた。

2019年度は、最初に形状記憶合金ばねと振動コンポーネントが組み合わされた往復移動が可能な磁気アクチュエータを設計した。実機試験において、アクチュエータの移動方向についての検討が行われ、高効率な往復型アクチュエータが作製された。測定結果より、磁気アクチュエータの最大効率は28.1%で、最大牽引力は1.5Nであることが示された。更に、柔軟なシリコンゴム材上に2個の磁気アクチュエータが配置され、ゴム材の両端に磁気車輪が結合されたアクチュエータシステムが試作された。実験では、磁気車輪の外径と吸引力、振動体部の吸引力、シリコンゴム材の剛性をパラメータとして、段差走行特性および推進特性についての検討が行われ、両特性を満足する磁気車輪とゴム材の寸法および諸元が確立された。本アクチュエータシステムにおいて、振動体部および磁気車輪部の吸引力を3.7Nおよび0.5Nとした場合、200gの負荷質量を搭載しても24mm/sの速度で牽引可能である。本システムは、段差高さ25mmの段差高さを有する鉄製構造物内を18mm/sの速度で垂直上昇移動が可能であることが確かめられた。更に、水平面内では、48mmの段差高さまで20mm/s以上の速度で走行可能である。

更に2019年度は、往復移動型アクチュエータシステムに対して、更に1個の振動コンポーネントが直交配置されたシステムを試作し、システムの回転移動制御についての検討が行われた。実機試験では、アクチュエータシステム内のシリコンゴム上に直交配置された1個の振動コンポーネントを取付け、振動コンポーネント間の位相差を変化させて、回転速度を計測した。これより、振動コンポーネント間の位相差を0度あるいは180度と調整することで、本アクチュエータシステムは、水平および垂直面内において、約20度/sの速度で、時計あるいは反時計回りに回転できることが確かめられた。これより、本システムは360度の角度にわたり鉄製構造物内を自在に回転移動ができることが示された。2019年度において得られた成果は、海外における国際会議論文3編としてまとめた。

2020年度は、2個の同一諸元を有する往復移動型アクチュエータ、磁気車輪および柔軟なシリコンゴム材を組み合わせた電磁アクチュエータシステムの寸法に関する最適設計を行い、形状が大小異なる2モデルを試作し、推進特性および段差走行特性を測定した。小型アクチュエータシステムの全長は、305mm、高さ58mm、全質量は67gであり、磁気車輪の外径は25mmである。本アクチュエータシステムにおいて、220gの付加質量を搭載した場合、垂直上昇速度は23mm/sである。各振動体に0.2Wの電力を入力した場合、垂直面上に配置された25mmの段差を、18mm/sの速度で上昇移動できることを示した。更に、4個の振動型アクチュエータを直列に配置した大型のアクチュエータシステムを試作した。本システムの全長は、715mm、高さ75mm、全質量は250gであり、磁気車輪の外径は50mmである。アクチュエータ単体への入力電力が6Wの場合、アクチュエータシステム中央部に自動打音装置(質量250g)よりも重い300gの負荷質量をシステム中央部に搭載し、かつ1800gの質量を搭載しても5mm/sの速度で上昇移動が可能であることを示した。また、システム中央部に300gの負荷質量を搭載すると、走行可能な最大段差高さは25mmとなるが、これは申請書に記載した目標値を達成している。しかし、大型のアクチュエータシステムにおいて、保持部の強度不足のため、往復移動を実現できなかった。このため、今後は2019年度に試作した振動体を直交配置し、振動の位相差を利用した移動の動作原理を完全確立したうえで、アクチュエータシステムに搭載したいと考えている。2020年度において得られた成果は、海外における査読付き論文2編、国際会議論文3編としてまとめた。

科学研究費交付期間である2018年4月から2021年3月までの3年間において得られた結果は、海外雑誌4、国際会議論文5、国内発表2として纏めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hiroyuki Yaguchi	4. 巻 77
2. 論文標題 A new type of electromagnetically propelled vibration actuator for appearance inspection of iron structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 69-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.77.6234	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Yaguchi, Izuru Kimura and Shun Sakuma	4. 巻 9
2. 論文標題 A new type of rotary magnetic actuator system using electromagnetic vibration and wheel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Actuator	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act8010004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Yaguchi, Izuru Kimura and Shun Sakuma	4. 巻 Vol. 8
2. 論文標題 A Novel Actuator System Combining Mechanical Vibration and Magnetic Wheels Capable of Rotational Motion Using Shape Memory Alloy Coils	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Actuator	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act8010004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroyuki Yaguchi and Yusuke Itoh	4. 巻 Vol. 8
2. 論文標題 Influence of Similarity Law on Movement Characteristics of Vibration Actuator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Research	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5539/mer.v8n2p1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi and Yusuke Itoh
2. 発表標題 A novel magnetic actuator system for appearance inspection of complex iron structures
3. 学会等名 The 2021 IEEE International Magnetics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi
2. 発表標題 A new type of actuator for appearance inspection of iron structure
3. 学会等名 The Sixth International Conference on Structure, Engineering & Environment (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi, Izuru Kimura and Shun Sakuma
2. 発表標題 A new type of rotary magnetic actuator system using electromagnetic vibration
3. 学会等名 The 2020 IEEE International Magnetics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi
2. 発表標題 Appearance inspection of structures by vibration-type actuator with shape memory alloy material
3. 学会等名 6th World Congress of Smart Materials-2020 Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi
2. 発表標題 Inspection of structure by electromagnetic and vibration type actuator
3. 学会等名 2019 The International Conference on Energy, Materials and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Yaguchi
2. 発表標題 A new type of magnetic actuator combining electromagnetic vibration and magnetic wheel
3. 学会等名 2019 The International Conference on Energy, Materials and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 佑介, 矢口 博之
2. 発表標題 磁気アクチュエータの走行特性におよぼす相似則の影響
3. 学会等名 日本機械学会北海道支部第56回講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 佑介, 矢口 博之
2. 発表標題 電磁 - 振動型アクチュエータの走行特性におよぼす保持力の影響
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第54期秋季講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------