

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686125

研究課題名(和文)セルフパワード・ユビキタス制振の高度実現化に向けた研究

研究課題名(英文)Realization of Self-Powered Ubiquitous System for Vibration Control

研究代表者

榎原 幹十郎(MAKIHARA, Kanjuro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60392817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円、(間接経費) 3,540,000円

研究成果の概要(和文)：セルフパワード・ユビキタス振動制御システムの高度実現化に向けた研究開発を行った。外部電源を全く必要とせず、外部制御オーソリティを必要としない、自律系セルフパワード制振システムを発明した。デジタルプロセッサを用いているので、複雑な制御ロジックの実装を可能にしている。格段に柔軟性が高く、汎用性・拡張性に優れている。多入力・多出力の高度な制御システムにも対応可能である。セルフパワード制振実験で強制加振下に於いて劇的な変位振幅低減を実証することが出来た。各種実験に於いて、エネルギー損失の割合の詳細を調べた。

研究成果の概要(英文)：The study reports herein on how we developed our innovative digital self-powered autonomous system for vibration controller using a digital micro-processor. The invented unit is a completely self-powered control system that does not require any external power-supply at all. Nevertheless, this digital, self-directive, and self-powered approach enables the system to be programmable and thus versatile in control scheme. The digital-autonomous controller is much more advanced and progressive than conventional analog-autonomous ones that are clumsy and awkward. This digital system can be implemented in multiple input multiple-output systems to suppress even complicated structural vibrations. This is quite useful for various applications to energy-saving or energy-shortage systems. Experiments demonstrate that displacement is reduced drastically. Energy dissipation in experiments is measured by various cases.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：環境技術 航空宇宙工学 環境対応 宇宙インフラ 知能機械

1. 研究開始当初の背景

宇宙構造物はその重量制限から柔軟構物にならざるを得ないので、振動が起こりやすく、効率良く制振し難い状況が生じる。宇宙構造物の振動は様々なミッションの障害になるため、振動抑制は大きな課題である。受動制振の安定性を保ちつつ制振効果をより向上させようとする準能動制振が提案されたが、一般に準能動制振の制振性能は能動的制振のそれに比べて低い。準能動制振の安定性や外部エネルギーが不要という長所は保持しつつ、その制振性能を能動制振程度までに高める「エネルギー回生準能動制振手法」を提案し、各種実験系に於いて実証してきた。しかし、従来研究は、制御計算機や制御測定器の消費エネルギーを全く考慮しない現実離れした研究開発が主であった。

2. 研究の目的

圧電素子と電気回路を結合することによる振動抑制の研究がなされている。圧電素子は機械振動エネルギーと電気エネルギーを交換できるので、アクチュエータ、センサ、トランスデューサにと幅広く使われている。振動制御に電源を用いることが不便な状況も多いため、アナログ電気素子のみから構成されるアナログ・セルフパワー制振器が提案された。外部電源を必要とせず、外部制御オーソリティも必要としない。しかしながら、アナログ回路システムの実際適用には様々な困難が生じる。アナログ制御回路は、プログラマブルではない為に非常に柔軟性に欠けるからである。アナログ制御器では、実装後にパラメータ変更が要求される場合、アナログ素子の取替え範囲内でしか変更要求に対処できない。また高度な制御演算は事実上不可能である。

上記全ての困難を解消する為に、我々はデジタル・セルフパワーシステムを発明・開発する。本提案システムは、圧電素子と電気・電子回路を組み合わせ、プログラム変更自由なデジタルプロセッサ、エネルギーハーベスタ、圧電トランスデューサ、スイッチング電気回路から構成される。デジタルプロセッサが振動位相を読み取り、振動モード推定演算をする。選択スイッチの切り替えが必要ならば、プロセッサからの電流信号によってスイッチ位置を切り替える。そのスイッチの適切な切り替えによって、エネルギー回生メカニズムが機能する。このメカニズムは、人工衛星の制振実証やキャビン騒音低減などにも広く用いられている。本システムは高度な制振が可能でありながら、振動で圧電素子に生じる電気エネルギーをハーベストしプロセッサ駆動に用いるので、外部エネルギー供給は一切必要ない。

3. 研究の方法

(1) 効果・特徴が分かり易い様、比較的大きな電力が発生する振動実験系にて、考案システムを組み立てる。圧電素子の非線形性をも考慮する為に、非線形モデリング理論をエネルギー回生圧電部材に改変し、制御モデル構築に用いる。

(2) 振動加振器により振動実験系を強制加振させることで、セルフパワー制振実験を行う。考案・製作した制振システムが想定通り機能することを確認する。実験系での単振動抑制実験にて、あらゆる角度から手法・提案の妥当性を確認し、出来る限り性能を高める工夫を施す。

(3) 複数振動モードから成る複雑な振動抑制実験を行い、多視点で評価する制振効果・外部信号のエラーやノイズに対するロバスト性・各素子のエネルギー損失の観点から各種実験を行い、各データを解析する。

(4) 現実的な状況での稼働を保証する目的で、外部信号のエラーやノイズに対するロバスト性を確認する。

(5) 実験だけでは得られないパラメトリックスタディや実験解析補助を目的とし、制振性能解析の為に構造・振動・制御系と電気・電子回路系を結合した数値計算プログラムを作成する。多角的に解析した数値計算結果を更なる性能向上に役立て、システムを更にリファインする。

(6) ファジィ理論などを改変して制御に取り入れ、外乱変化に対して適応性の高い制御を試みる。

4. 研究成果

(1) セルフパワー系の機械部

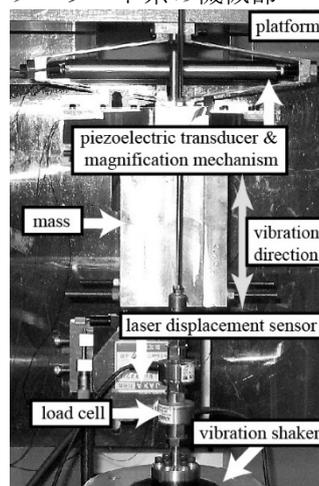


Fig. 1 View of the mechanical part in the single-DOF system

図1に示す実験システムは、圧電トランスデューサ、パンタグラフ型変位拡大機構、圧電センサ、振動加振器、質量、および実験プラ

ットフォームにより構成されている。圧電トランスデューサとパンタグラフ型変位拡大機構は、プラットフォーム上部と質量の間に取り付けられている。

(2) セルフパワー系の電気・電子部

図2にデジタル・セルフパワー制振システムのエネルギーフローと制御流れを示す。ダイオードブリッジにより構成されているエネルギーハーベスタ部は、振動エネルギーから変換された電気エネルギーを蓄える。キャパシタ C_s を内部に有するエネルギーハーベスタは、選択スイッチ部、インダクタ、圧電トランスデューサに繋がっており、振動エネルギーを電気エネルギーに交換している。そのハーベストされた電気エネルギーは、デジタルプロセッサへ供給される。そのハーベストして供給された電気エネルギーはデジタルプロセッサの駆動に用いられるので、外部電源は一切必要ない。

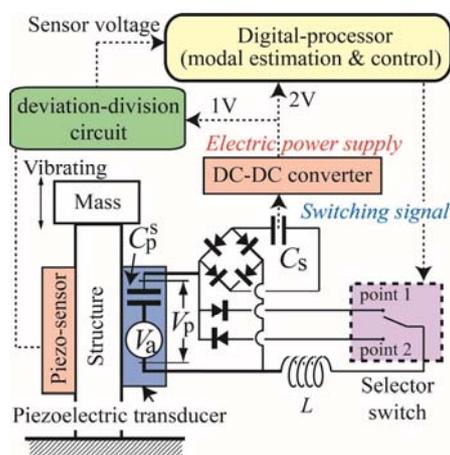


Fig. 2 Energy-flow and control stream of digital self-powered suppression system

無振動の場合ではパワー供給がないので、デジタルプロセッサはスリープ状態にある。振動振幅が大きくなれば、ハーベストされる電気エネルギーが大きくなり、プロセッサが起動する。起動にかかる時間は1秒以下である。起動したプロセッサは予め書き込まれたプログラムに従って、エネルギー回生制振メカニズムを用いて振動レベルを低減する。その結果、振動が十分に小さいレベルに減少すれば、ハーベストされる電気エネルギーが少なくなり、プロセッサへのパワー供給量も減少する。そこで、プロセッサは再びスリープに入り、次の振動増大に備える。上記の振動振幅に応じたセルフパワープロセッサの起動・スリープ挙動は、理に適った妥当なシステム設計と考える。図3にCPUボード内のデジタルプロセッサを示す。プロセッサはプログラム演算ソフトウェア機能のみならず、AD/DAコンバータポートのハードウェア機能をも内蔵している。



Fig. 3 Digital processor inside digital processor board

マイクロプロセッサを使用する本デジタルシステムでは、工夫する点がある。まず、プロセッサの駆動電圧は2.0 Vであるために、蓄電キャパシタンス内のハーベスティング電圧をDC/DCコンバータを用いて正確に2.0 Vに降下する必要がある。また、プロセッサのADポートは非負値しか読み込むことが出来ない。一方、ADポートはプロセッサの駆動電圧以上を計測することは不可能である。まとめると、プロセッサのADポートは0.0 -2.0 Vの範囲しか計測することが出来ない。そこで、圧電センサの電圧を1.0 V中心に電圧偏差し、かつ、0.0 -2.0 Vの範囲に収めるために電圧分圧する必要が生じる。上記の目的を達成するための電圧偏差・分圧回路を作成した。

(3) デジタルプロセッサによる制御

構造物は複数の振動モードを持っているが、効果的なモード推定を行うためにモードトランケーションを行う。ここでは、1自由度(SDOF)系のカルマンフィルタを導出する。エネルギー回生準能動制振のために、後述する切り換え規範を算出する目的でモード速度・変位の推定情報が必要である。

エネルギー回生制御ロジックに倣い、選択スイッチを切り替える基準として切り替え規範が必要である。ここで、セルフパワーシステムの切り替え規範 $S_c \equiv F_{11}\hat{\eta}_1 + F_{12}\hat{\eta}_1$ を導入する。この規範は、モード推定で得られる推定モード速度・変位から構成されている。セルフパワー準能動制振のプログラムでは、この規範を用いて以下のようなスイッチ戦略がその一つとして考えられる。

When $S_c > 0$, switch point 1 is on, and when $S_c < 0$, switch point 2 is on.

(4) デジタル・セルフパワー振動制御システムを用いた制振実験

デジタル・セルフパワー振動制御システムの有効性を実証するために、振動制御実験を行った。振動加振器による一次モード振動励起下でセルフパワー制振実験を行った。非

制御時の減衰比は、 8.15×10^{-3} である。図 4 に、全く制御を行わない場合の変位と圧電トランスデューサ電圧の時間履歴を示す。振動は定常状態に入っている。定常変位振幅は 0.18 mm で、圧電電圧は 90 V である。圧電トランスデューサに繋がれた電気機器の抵抗成分により、圧電位相は変位位相より少しずれている。図 4 から変位と圧電電圧の明瞭な正弦波が確認される。

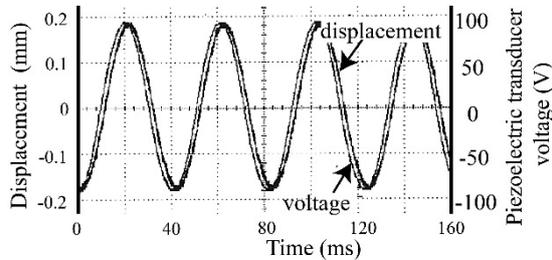


Fig. 4 Experimental result of displacement and piezoelectric voltage (**without** any control)

セルフパワー制振システムのスイッチ指標の決定について述べる。振動制御の観点からは、一般的に、制御に用いる変数としては変位よりも速度がより重要であるので、今回は速度のみを指標生成に用いる。速度のみを使ってフィードバックする一自由度系の制御方法は Direct velocity feedback method と等価である。従って、 F_{11} は 0 となるので、

$S_c = F_{12} \hat{\eta}_1$ となり、一次モード速度のみによるスイッチング制御が行われる。スイッチ指標である S_c の符号だけでスイッチを切り替えるために、 F_{12} の絶対値は意味がなくなり、その符号のみが意味をもつ。本系では、 F_{12} を正值とした。開発したセルフパワー制振システムを使って制振を行った場合の、変位と圧電トランスデューサ電圧の時間履歴を図 5 に示す。図 4 に比べて、変位振幅が 35% に減少していることに注目されたい。セルフパワー制振システムであることを考慮すれば、この 35% という変位振幅低減は非常に大きく、著しい制振効果を挙げている。

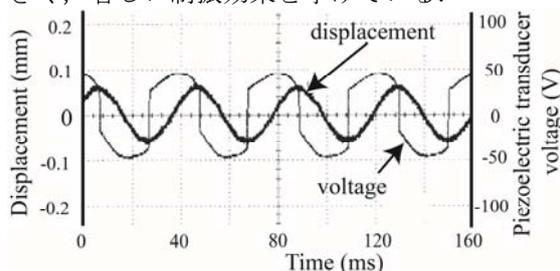


Fig. 5 Experimental result of displacement and piezoelectric voltage (**with self-powered control**)

図 5 の圧電電圧の挙動は、エネルギー回生準能動制振の特徴を表している。スイッチング後に電圧の極性が反転している。変位の頂点付近で電圧が反転していることから、プロセッサの処理手続全てに時間遅延がないことが分かる。反転前後の圧電電圧値の比（電圧オーバーシュート率）は約 75% であり、過去のエネルギー回生実験系の圧電電圧値と比較しても、ほぼ同等の高い値を示している。回路の抵抗値が小さいことが分かる。図 5 の圧電電圧挙動の詳細を見る。圧電電圧の反転後に、圧電電圧の絶対値は圧電効果により上昇する。その後、二つの電気エネルギー要因（エネルギーハーベスタからプロセッサへのパワー供給と電気素子でのエネルギー損失、と圧電効果によるエネルギーハーベスティングによるエネルギー獲得）が釣り合い、圧電電圧は一時一定値になる。その後、選択スイッチ切り替えの準備演算と実際のシグナル電流送信の為に、エネルギー消費が増大し電圧は一気に低下する。スイッチング命令通り、再び圧電電圧が反転し、電圧の正負が入れ替わる。

本セルフパワー制振システムに於けるエネルギー消散比率を図 6 に示す。電気回路内のインダクタの抵抗成分による損失とプロセッサエネルギー消費が相対的に大きい。

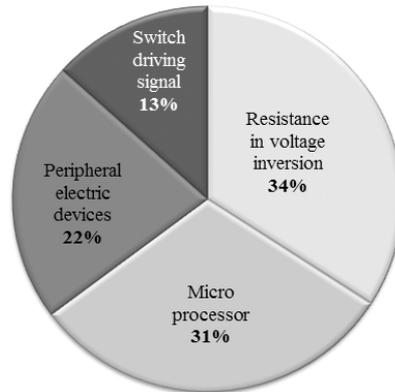


Fig. 6 Energy dissipation ratio in self-powered system

セルフパワー制振システムに於ける変位振幅低下の貢献比率を図 7 に示す。全ての要因の中で、エネルギー回生制振メカニズムが最も大きく変位減少に貢献していることが確認され、本開発プロジェクトにとって最良のシナリオが得られた。

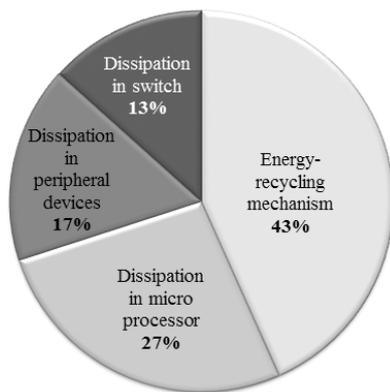


Fig. 7 Contribution ratio of displacement reduction in self-powered system

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 18 件)

- ① Makihara, K., Hirai, H., Yamamoto, Y., and Fukunaga, H., “Self-Reliant Vibration-Powered Generator for Wireless Health Monitoring Based on a Tuned-Mass-Damper Mechanism,” *International Journal of Smart Structures and Systems*, 査読有, 2014, (in press).
- ② Takezawa, A., Makihara, K., Kogiso, N., and Kitamura, M., “Layout Optimization Methodology of Piezoelectric Transducers in Energy-Recycling Semi-Active Vibration Control Systems,” *Journal of Sound and Vibration*, 査読有, Vol. 333, 2014, pp. 327-344
DOI: 10.1016/j.jsv.2013.09.017
- ③ 山本雄大, 鈴木孝宜, 榎原幹十郎, “過渡応答に対するセルフパワード・デジタル振動制御システムの特性,” 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 79, No. 808, 2013, pp. 490-493
DOI: 10.1299/kikaic.79.5015
- ④ 榎原幹十郎, 黒石千香子, 福永久雄, “Mamdani 推論法に基づく複数モード振動のロバスト制御,” 知能と情報, 査読有, Vol. 6, No. 3, 2013, pp. 730-739
DOI: 10.3156/jsoft.25.730
- ⑤ 榎原幹十郎, 下瀬滋, “過渡応答における構造・電気連成系の位相遷移に着目した連成統合制御,” 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 79, No. 801, 2013, pp. 1616-1627
DOI: 10.1299/kikaic.79.1616
- ⑥ Makihara, K., Kuroishi, C, and Fukunaga, H., “Adaptive Multimodal Vibration Suppression using Fuzzy-Based Control with Limited Structural Data,” *Smart Materials and Structures*, 査読有, Vol. 22, 2013, Article No. 075031
DOI: 10.1088/0964-1726/22/7/075031
- ⑦ Shimose, S., Makihara, K., and Onoda, J., “Energy-Harvesting Using an Analog Circuit under Multimodal Vibration,” *Smart Materials Research*, 査読有, Vol. 2013, 2013, Article No. 736487
DOI: 10.1155/2013/736487
- ⑧ Makihara, K., Shimose, S., Takeuchi, S., and Onoda, J., “Development of a Self-Powered Digital System for Vibration Control,” *Journal of System Design and Dynamics*, 査読有, Vol. 6, No. 5, 2012, pp. 583-596
DOI: 10.1299/jsdd.6.583
- ⑨ Makihara, K., “Energy-Efficiency Enhancement and Displacement-Offset Elimination for Hybrid Vibration Control,” *International Journal of Smart Structures and Systems*, 査読有, Vol. 10, No. 3, 2012, pp. 193-207
DOI: 10.12989/sss.2012.10.3.193
- ⑩ Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., and Onoda, J., “Innovative Digital Self-Powered Autonomous System for Multimodal Vibration Suppression,” *AIAA Journal*, 査読有, Vol. 50, No. 9, 2012, pp. 2004-2011
DOI: 10.2514/1.J051560
- ⑪ Makihara, K., and Shimose, S., “Supersonic Flutter Utilization for Effective Energy Harvesting Based on Piezoelectric Switching Control,” *Smart Materials Research*, 査読有, Vol. 2012, 2012, Article No. 181645
DOI: 10.1155/2012/181645
- ⑫ 榎原幹十郎, 下瀬滋, 竹内伸介, 小野田淳次郎, “セルフパワード・デジタル振動制御システムの開発,” 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol. 78, No. 789, 2012, pp. 1440-1450
DOI: 10.1299/kikaic.78.1440
- ⑬ Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., and Onoda, J., “Portable Power Scavenging from Structural Vibrations using Autonomous Self-Powered Device,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 査読有, Vol. 10, No. 28, 2012, pp. 13-18
DOI: 10.2322/tastj.10.Pc_13
- ⑭ 榎原幹十郎, 下瀬滋, 小野田淳次郎, “超高速翼フラッタを用いた圧電スイッチングによる環境発電機構,” 日本風工学会論文集, 査読有, Vol. 37, No. 2, 2012, pp. 35-42
DOI: 10.5359/jwe.37.35
- ⑮ Makihara, K., and Ecker, H., “Electrically-Induced Actuation for Open-Loop Control to Cancel Self-Excitation Vibration,” *International Journal of Smart Structures and Systems*, 査読有, Vol. 9, No. 2, 2012, pp. 189-206
DOI: 10.12989/sss.2012.9.2.189

- ⑫ Shimose, S., Makihara, K., and Onoda, J., "Comparison of Analog and Digital Self-Powered Systems in Multimodal Vibration Suppression," *Smart Materials Research*, 査読有, Vol. 2012, 2012, Article No. 287128
DOI: 10.1155/2012/287128
- ⑬ Takeuchi, S., Makihara, K., and Onoda, J., "Reliable and Evolvable Vibration Suppression by Self-Powered Digital Vibration Control," *Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, 査読有, Vol. 134, No. 2, 2012, Article No. 024502
DOI: 10.1115/1.4005027
- ⑭ Shimose, S., Makihara, K., Minesugi K., and Onoda, J., "Assessment of Electrical Influence of Multiple Piezoelectric Transducers' Connection on Actual Satellite Vibration Suppression," *Smart Materials Research*, 査読有, Vol. 2011, 2011, Article No. 686289
DOI: 10.1155/2011/686289

[学会発表] (計 20 件)

- ① 重田大輔, 山本雄大, 榎原幹十郎, 「グラフ解析法に基づく自家発電型ハーベスタの性能解析」, 日本航空宇宙学会北部支部 2014 年講演会, 2014 年 3 月 10 日, 宮城.
- ② Yamamoto, Y., and Makihara, K., "Smart Energy Harvester using Digitally Autonomous Device." 10th International Conference on Flow Dynamics, 2013 年 11 月 25 日, Sendai, Japan.
- ③ Makihara, K., and Yamamoto, Y., "Digital Energy Harvester for Random or Multimodal Structural Vibrations." ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2013 年 9 月 15 日, Snowbird, USA.
- ④ Yamamoto, Y., Suzuki, T., Shigeta, D., and Makihara, K., "Wireless Vibration Monitoring using Harvested Energy via Self-powered System," 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013 年 6 月 2 日, Nagoya, Japan.
- ⑤ Kawasaki, S., Yoshida, S., Kobayashi, Y., Makihara, K., and Nishikawa, K., "Wireless Sensors and Communication by Energy Harvesting in a Spacecraft," IEEE 2013 International Microwave Symposium, 2013 年 3 月 8 日, Seattle, USA.
- ⑥ Takezawa, A., Makihara, K., Kogiso, N., and Kitamura, M., "An Optimization Methodology for Semi-Active Control Systems of Large Space Truss Structures," 2nd International Conference on Computational Design in Engineering, 2012 年 11 月 13 日, Juju, Korea.
- ⑦ Makihara, K., Kuroishi, C., and Fukunaga,

H., "Fuzzy-Based Adaptive Multi-modal Vibration Control with Imperfect Structural Data," 63rd International Aeronautical Congress, 2012 年 10 月 3 日, Naples, Italy.

- ⑧ Shimose, S., Onoda, J., and Makihara, K., "Enhancement of Energy-Harvesting from Random Vibration by Switched Shunt Circuit," 63rd International Aeronautical Congress, 2012 年 10 月 2 日, Naples, Italy.
- ⑨ Makihara, K., "Eco-Generation of Energy from Flutter Based on Energy-Recycling Mechanism," 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, 2012 年 9 月 5 日, Shanghai, China.
- ⑩ Takezawa, A., Makihara, K., Kogiso, N., and Kitamura, M., "Layout Optimization of Piezoelectric Actuator for Energy-Recycling Semi-Active Vibration Control System," 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2012 年 6 月 18 日, Huangshan, China.
- ⑪ Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., and Onoda, J., "Self-Charging and Self-Directive Vibration Control Unit with Digital Microprocessor," 14th Asia Pacific Vibration Conference, 2011 年 12 月 7 日, Hong Kong, China.
- ⑫ Shimose, S., Makihara, K., Onoda, J., and Takeuchi, S., "Control of Multi Modal Structural Vibration Using Digital Self-Powered Device," 62nd International Aeronautical Congress, 2011 年 10 月 5 日, Cape Town, South Africa.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 断続的電圧反転による効果的な振動発電

発明者: 榎原幹十郎, 坂口仁志, 堀口睦弘

権利者: 榎原幹十郎, 坂口仁志, 堀口睦弘

種類: 特許

番号: 特願 2013-168141

出願年月日: 平成 25 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

榎原 幹十郎 (MAKIHARA, Kanjuro)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60392817