過渡応答に対する完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの特性*

山本 雄大^{*1}, 鈴木 孝宜^{*2}, 槇原 幹十朗^{*3}

Transient Response of Self-Powered Digital System for Vibration Control

Yuta YAMAMOTO^{*1}, Takayoshi SUZUKI and Kanjuro MAKIHARA^{*1} Tohoku University Department of Aerospace Engineering
6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba Aoba-Ward, Sendai, 980-8579 Japan

In the previous report, we presented a self-powered digital system for vibration control. The self-powered system automatically measures the displacement of vibrating structure and digitally calculates the vibration state. Then it regulates its electric switches and achieves effective vibration suppression. Especially, it harvests electrical energy from structural vibration and utilizes the energy for activating itself. Some experiments with the self-powered digital system were reported in the previous report, which showed good results only in the steady-state condition. In this note, we demonstrate how the system works in the transient-state. These experiments clearly show the processor's transition between the wake-up and the sleep modes according to the vibration amplitude.

Key Words : Self-Powered System, Autonomous, Piezoelectric, Self-Directive Vibration Control

1. 緒 言

本稿は、先に著者らが報告した完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの開発に対する技術的な追加報告ノートとして執筆する。先の論文⁽¹⁾で、著者らは外部パワー供給を必要としない完全なセルフパワード（自家発電）で駆動する振動制御システム「完全セルフパワード・デジタル振動制御システム」を提示した。この振動制御システムは、内蔵デジタルプロセッサを制御器として搭載しているため、複雑な制御ロジックの実装・実行が容易であるという特徴を持つ。また、実装後の制御ロジックの改変も可能であるため、柔軟性に欠ける従来のアナログ・セルフパワード装置に比べ、遥かに高度で汎用性・拡張性に優れる。そのため、宇宙構造物において複雑な多モード振動を抑制するような、多入力多出力系制御の適用が可能である。本システムはプロセッサを含むすべての駆動エネルギーを自ら賄い、また外部オーソリティを必要としない自律系制御システムであるため、将来的なユビキタスシステムの構築において活用が期待できる。

既報⁽¹⁾においては、振動振幅が一定となりシステムが安定に駆動した定常状態において実験結果の報告および考察を行った。しかし、本振動制御システムはセルフパワードのデジタルプロセッサによってコントロールされており、構造物に振動がない状態ではシステムはスリープ状態にある。構造に振動が励起されるとシステム内部の受動ハーベスタが電気エネルギーを獲得し、このエネルギーをプロセッサの駆動電力として供給することでシステムが起動する。このシステム起動時の電力状態は、振動から得られるハーベストエネルギーとプロセッサの消費エネルギーのバランスにおいて、システムの駆動条件の中で最もシビアな場面である。したがって、振動が励起してからシステムが安定して起動するまでの応答の解明が必要不可欠である。また、実際に本振動制御システムを利用するためには、振動が励起してからどれくらいの速度でシステムが立ち上がるのか、その応答速度についても調査の必要がある。本研究では、振動の励起時と合わせて振動の減衰時について、完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの過渡応答を検証することとする。

* 原稿受付 2013 年 8 月 30 日

^{*1} 学生員, 東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)^{*2} 東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻^{*3} 正員, 東北大学 航空宇宙工学専攻

E-mail: yamamoto@ssl.mech.tohoku.ac.jp

本研究の目的は、構造振動の過渡応答において、デジタルプロセッサを中心とした本振動制御システムの駆動状態を明らかにすることである。振動開始からのプロセッサの駆動開始時間、プロセッサが駆動してから状態推定の後信号を正しく出力するまでの時間を確かめ、システムの応答速度として実用にたるものかの検証を行う。実験には、既報⁽¹⁾で構築した完全セルフパワード・デジタル振動制御システムおよび振動実験装置を用いる。構造に振動が励起する状態を再現するため、加振器を停止した状態から計測を始める。振動開始から構造振動の定常状態に陥るまでの構造振動と圧電素子電圧を測定することで、システムの過渡応答を調査する。またデジタルプロセッサの駆動状態を推察するために、プロセッサの信号出力を計測する。始めに、振動が加振力により励起され増大し始めてから、システムが起動、安定に駆動し始めるまでの振動加振時の実験を行う。続いて、構造物の振動が十分に抑制され、システムが駆動する電力以下のエネルギー状態に陥るまでの、振動抑制時の実験を行う。

2. 完全セルフパワード振動制御システムを用いた過渡応答試験

2・1 デジタル・セルフパワードユニット実験概要

実験に用いるデジタル・セルフパワードユニットの構成については既報⁽¹⁾に記されている。そのため、本実験に関する箇所のみを簡潔にまとめる。構成の図や詳細は既報⁽¹⁾を参照されたい。本実験において振動する構造物は、加振器によって加振される。加振周波数は構造物の固有振動数に等しい。振動電気変換の要となる圧電素子は振動と共に伸縮するよう取り付けられており、振動によりその両端子に交流電圧を発生する。

圧電素子の両端子はスイッチ付きの電気回路に接続される。回路内のキャパシタに電気エネルギーがハーベスティングされ、蓄積される。蓄積されたエネルギーはデジタルプロセッサへ供給される。デジタルプロセッサはこのハーベスティングされたエネルギーのみで駆動するので、外部電源は一切必要ない。初期状態ではパワー供給がないので、プロセッサはスリープ状態にある。振動振幅が増幅し、蓄積電圧が一定値を超えると、プロセッサが起動する。起動したプロセッサはあらかじめ書き込まれたプログラムに従って、電気回路内のスイッチを駆動し、エネルギー回生メカニズム⁽¹⁾を用いて振動レベルを低減する。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ため再びスリープ状態に戻る。

本実験では、このデジタル・セルフパワードユニットを予め構造物に設置した状態で実験を開始する。初めに構造物が静止している状態から、加振力により振動が励起される振動励起の実験を行う。ユニットがスリープ状態から定常駆動状態に移移するまでの構造振動、回路内電圧、シグナル出力の様子を調べる。次に、励起されていた構造振動が、完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの効果により十分に抑制され、振動が減衰していく振動抑制時の実験を行う。ユニットが駆動状態からスリープ状態に移行するまでのシグナル出力の様子を調べる。完全セルフパワード・デジタル振動制御システムとの比較のため構造振動に対して一切の制御を行わない非制御系についても同条件において比較実験を行う。本システムはプロセッサなどの電子デバイスを複数含んでいるため、作動範囲の電氣的条件が存在する。具体的な条件は、ハーベストした電力を安定な電圧に変換するため、DC/DCコンバータの要求電圧（5 V）以上の電圧を入力する事が必要である。電子デバイスすべてを起動するのに十分な電圧を発生させるため、構造振動の大きさが片側振幅 0.1 mm 以上となるように加振を行う。

2・2 実験結果

非制御系の振動励起時における構造変位と圧電電圧の関係を図 1 に示す。非制御系では、圧電電圧は変位と比例関係にあり、最大電圧は変位の上昇につれ上昇し、定常振動状態になると一定値となっている。一方、完全セルフパワード・デジタル振動制御システムを用いた場合の振動励起時における圧電電圧と変位の関係を図 2 に示す。本制御システムでは振動励起時から振動変位は非制御系と同等に増加するが、圧電電圧の増加は小さい。デジタルプロセッサの駆動のために電気エネルギーが消費されているためである。また、グラフを見ると振動開始から約 0.3 秒を境に振動変位は減少し、圧電電圧は大きく増加していることがわかる。デジタルプロセッサが十分な電気エネルギーを得て安定して駆動を始めたためである。デジタルプロセッサが駆動することで、エネルギー回生が行われ、圧電素子電圧が増幅し制振能力が向上する。その後、完全セルフパワード・デジタル振動制御システムが正常に機能した状態で、加振条件との釣り合いから振動振幅および圧電電圧の振幅が一定の定常状態となる。エネルギー回生メカニズムでは、電圧の反転は正から負へ、また負から正へジャンプしているように見える。この

反転は既報⁽¹⁾にも述べられているように振動変位の頂点（つまり速度がゼロ）で起こるべきである。本実験結果においても、電圧反転の挙動が確かめられる。

非制御系と完全セルフパワーード・デジタル振動制御システムの圧電電圧および変位を比較する。振動開始直後は、振動振幅は共に増大していく。比較すると振動制御システムを用いた場合の方がやや振幅が小さい。またこの時の圧電素子電圧は非制御系に比べ振動制御システムを用いた方が小さくなっている。圧電素子の両端子が回路によって短絡されているために、回路上での消費が起こり系全体のエネルギーが散逸しているためであると考えられる。振動エネルギーを電氣的消費により散逸させているためにこの条件でも振動制御システムの方が振動を小さく抑えていることがわかる。

非制御系では振動開始から約 0.4 秒で振動振幅および圧電電圧は定常状態に達している。一方で、振動制御システムでは振動励起から約 0.3 秒後からエネルギー回生メカニズムが機能し始めたと考えられる。これにより制振効果が増大し、振幅は極端に減少している。振動振幅が減少すると同時に圧電素子電圧は増加する。その後、振動開始から約 0.7 秒で、エネルギー回生による振動抑制力が働いた状態で振動振幅と圧電電圧は定常状態に達する。

本制御システムを用いた場合、システムが駆動するまでにかかる時間は約 0.3 秒であり、突発的に励起される振動を抑制するために十分な速度を持っていると考えられる。また、システム駆動以前の振動振幅も非制御系と比較して小さいので、振動抑制のために本システムを導入するデメリットはない。システム駆動後は振動抑制能力が大きく向上し、定常状態において 65%の振幅低減となる制振効果が得られた。

Fig. 1 Piezoelectric voltage and vibration displacement of non-controlled system

Fig. 2 Piezoelectric voltage and vibration displacement of self-powered digital system

次に、本振動制御システムにおけるデジタルプロセッサのスイッチング信号出力状況について検討する。このシグナル出力はエネルギー回生の達成のために必須であり、構造物の振動に合わせて正確に出力される必要がある。振動が励起された後の振動増大時と、振動が十分に抑制される振動減衰時のシグナル出力の様子を図 3 および図 4 に示す。構造振動の変位速度がゼロになるたびに、交互にシグナル 1 とシグナル 2 にパルス電圧を出力するようにプログラムされている。シグナル 1 とシグナル 2 は回路内のスイッチを切り替えるための信号である。シグナル 1 は変位最大時に圧電電圧が負から正へ反転するための信号であり、シグナル 2 は変位最小時に圧電電圧が正から負へ反転するための信号である。両シグナルが変位の頂点付近で発せられている事が正しい挙動を示している。つまり、振幅の頂点で交互にパルスが出力される波形が正確なシグナル出力として望ましい。

振動増大時のデジタルプロセッサのシグナル出力を見ると、振動開始から 0.1 秒以内に出力を始める。しかし、この時の出力は変位振動に対して正しいタイミングで出力されていない。プロセッサはその後、数周期の振動の間に構造変位に対する推定を自ら修正し、正しい変位を得る。その結果、振動開始から 0.3 秒を経た後にはプログラム通りに正しいタイミングでシグナル出力を行う。

振動が十分小さくなり構造物が静止する振動抑制時のシグナル出力は、プロセッサがスリープ状態に入る直前にわずかに出力の乱れがあるが、振動の減衰に対して大きな影響は見られない。実験により完全セルフパワーード・

デジタル振動制御システムは過渡応答において、短い時間ではあるもののシグナル出力のエラーが発生することが分かった。このようなエラーは、電池やバッテリーなどのエネルギー源を用いて外部からエネルギーを注入して制振を行うアクティブ制御においては、エネルギーの発散を招き構造物を余計に加振してしまう可能性があり危険である。しかし、本振動制御で用いているエネルギー回生手法は外部から振動系にエネルギーを一切注入しないセミアクティブ手法である。したがって、制御エラーが発生しても入力エネルギーの増大という不安定現象は起こりえない。実際に実験においても構造振幅が大きくなるような事態は起こらなかった。

以上の実験により完全セルフパワード・デジタル振動制御システムは過渡応答においては起動直後に制振効果が低い状態が存在するものの、振動開始から約 0.3 秒と十分に早い時間で制振効果が高めることが可能であることが分かった。また、変位の推定が完了するまでの間シグナル出力にエラーが出ることもあるが、振動を増幅する効果はなく、短い時間で修正を行い正しくシグナル出力を行えるということが分かった。以上により、本振動制御システムは過渡応答において、自家発電型システムとして十分に機能し、振動の励起・抑制によりスリープと起動が繰り返されるより現実的な振動環境下においても、正確に駆動する信頼性にたるシステムであることが確かめられた。

Fig. 3 Switching signal on the increase in vibration amplitude

Fig. 4 Switching signal on the decrease in vibration amplitude

3. 結 言

本論文では既報の定常振動における完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの続報として、振動の励起・減衰時における、デジタルプロセッサを中心としたシステムの過渡応答を明らかにした。過渡応答試験により、本システムは振動開始から約 0.1 秒でプロセッサの要求電力を振動からハーベストし、駆動を維持するだけの電力を供給できることが実証された。また、プロセッサは振動励起時から約 0.3 秒、すなわち電力が供給されてから約 0.2 秒で構造振動の状態推定を終え、正確な信号出力を始めることが確かめられた。この結果、エネルギー回生法による振動抑制を開始し、振動振幅が非制御時のピークに達する前に制振効果により振動振幅のピーク値を低減させることに成功した。本稿の追加実験によって、完全セルフパワード・デジタル振動制御システムの高い信頼性が新たに確かめられ、実用に向けた開発システムの有用性を示した。

文 献

- (1) 榎原幹十郎, 下瀬滋, 竹内伸介, 小野田淳次郎, “完全セルフパワード・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, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 136-146.
- (2) Niederberger, D., and Morari, M., “An Autonomous Shunt Circuit for Vibration Damping”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 2(2006), pp. 359-364.
- (3) Lallart, M., and Guyomar D., “An Optimized Self-Powered Switching Circuit for Non-Linear Energy Harvesting with Low Voltage Output”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 3(2008), Article No. 035030.