

セミアクティブ制御を用いた圧電素子による 自己給電構造物損傷検出法の開発

東北大学工学研究科 助教 原 勇心

1. はじめに

構造物の安全性を評価するためには、加振入力と振動応答に基づいて構造物の数値モデルを取得し、健全時モデルとのずれを残差として評価する構造ヘルスマニタリングが有効である。しかし、従来の方法ではアクチュエータ、振動センサ、外部電源を別々に必要とし、配線、保守、電源交換が実装上の障壁となった。

本研究では、圧電素子が機械エネルギーと電気エネルギーを相互変換できる点に着目し、単一の圧電素子を用いて、加振、応答計測、自己給電を統合する自己給電型構造物損傷検出法の構築を目指した。観測可能な単一の圧電電圧から、構造応答成分と入力成分を分離し、同定モデルおよび残差生成器を構築するための信号処理法を検討した。

2. 研究計画と成果

申請時には、発電回路を接続した際に構造物モデルと発電回路モデルが混在する問題に対し、構造物ダイナミクスの2次遅れ性と発電回路ダイナミクスの1次遅れ性の差を利用して、両者を分離する方針を示していた。本報告では、当初の方針をそのまま成果として主張するのではなく、研究の進展により得られた解決策「電圧微分値を用いた入力・出力分離」と「ロバストカルマンフィルタに基づく変形成分・電荷成分分離」として整理する。本助成金の援助の元、達成した成果は下記の通りである。

- 1) 単一の圧電素子に発電、励振、観測の3つの役割を担わせる概念を提唱した

- 2) 単一の圧電素子の発生電圧から、ヘルスマニタリング対象の構造物の励振力と振動応答を分離する信号処理手法を提案した
- 3) 約 50 kg の構造物の損傷を質量 2% 削減によって模擬し実験から損傷時刻を検出した
- 4) 研究成果を国際論文にまとめる執筆作業を行っている

3. 研究成果の概要

本研究では、圧電素子を備えた構造物を対象に、構造物自身が発生する電気信号のみを用いたセルフパワード・セルフセンシング異常検知技術の構築を目的とした。センサや電源の設置が制限される環境では、圧電素子から生成される電圧信号を用いた異常検知が有効な手段となる。一方で、圧電電圧は構造変形だけでなく、圧電素子内部の電荷挙動も含む混合信号である。そのため、電圧から変形成分と電荷成分を分離して推定することが本研究の中心課題であった。

本研究では、電圧速度表現、ロバストシステム同定、ゼロ領域を考慮したロバストカルマンフィルタを組み合わせ、圧電変形成分と電荷成分を分離し、データ駆動型残差生成器へ接続する手法を構築した。

3.1. セルフパワード構造加振装置

圧電素子は電荷を流入させると変形する性質を持ち、精密ステージの位置決めなどで広く産業利用されている。パンタグラフなどの変形拡大機構を使うと大型構造物の制御に十分な変形を生成できる。また、圧電素子は変形に応じて電圧が発生するため、圧電素子にバッテリーを接続すると

発電ができ、これは振動発電と呼ばれる。振動発電で充電されたバッテリーの一部のエネルギーでコントローラを駆動させ圧電素子への流入電荷を操作できれば、構造物を外部電源なしで制御できる。これを Fig.1 の通り、自己給電駆動と呼ぶ。コントローラと発電のエネルギー収支が課題である。

一般的な圧電制御では、コントローラとアンプを常時駆動させるため、エネルギー消費が膨大で、エネルギー収支が成立せず、自己給電駆動は困難だった。一方で、申請者の目的は異常検知のために構造物を揺らすことであり、精密な位置決めではない。そこで、回路接続を間欠的に切り替えて、電荷の符号だけを制御する方法^[1]を採用した。間欠的動作なので、エネルギー収支問題が解決される。間欠的な回路切替の周期に応じて、周期的な構造振動を励起できる。また、ランダムに切り替えれば、異常検知に広く利用される広帯域な周波数成分を持つ構造振動が励起^[2]できる。

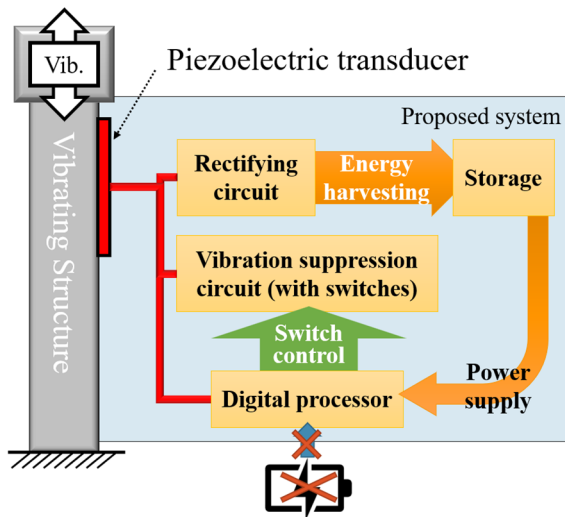


Fig. 1 自己給電型駆動装置の概念図

3.2. 圧電電圧に含まれる変形成分と電荷成分

本研究の基本的な着想は、観測量である圧電電圧を、圧電変形に由来する成分と圧電電荷に由来する成分の和として捉える点にある。圧電素子は

電気機械連成素子であり、その特性は以下の2つの圧電基礎方程式で記述される。

$$f_p = k_p u_p - b_p Q_p,$$

$$V_p = -b_p u_p + C_p^{-1} Q_p \quad \text{Eq.(1)}$$

ただし、 f_p , u_p , Q_p , V_p はそれぞれ、圧電素子が構造物から受ける力、素子の変形、外部回路から素子への流入電荷、素子の発生電圧を示している。 k_p , b_p , C_p はそれぞれ、圧電素子の剛性、圧電係数、静電容量を示している。圧電素子の取り付けられた構造物の運動方程式は以下の通り

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = B_p Q_p + d \quad \text{Eq.(2)}$$

ただし、 M , D , K は、質量、減衰、剛性行列であり、 B_p は圧電素子の取付位置も考慮した圧電係数行列を示す。 x と d はそれぞれ、変位ベクトルと外乱ベクトルを示す。圧電素子は構造物の振動と同調して変形するため以下の関係式が成立する。

$$u_p = L_p x \quad \text{Eq.(3)}$$

ただし、 L_p はアクチュエータ位置行列である。以上より、構造物は圧電素子に流入する電荷に比例する力で加振され、その振動は圧電素子の変形として現れる。また、圧電電圧は変形と電荷の和で記述される。構造物の入力は力、出力は振動である。したがって、単一の圧電電圧 V_p を u_p と Q_p に分離できれば、構造物の入力と出力情報を同時に取得できる。

3.3. 劣決定問題としての圧電セルフセンシング

圧電電圧の信号問題は本質的に劣決定である。

Fig.2 に示す通り、観測できる量は圧電電圧という1つの信号であるが、その中には変形成分と電荷成分という2つの未知量が含まれる。電荷と変形の挙動は時間的に変化し、振動状態や電気的条件にも依存するため、単純な静的関係式や直接的な

逆解析では安定な分離は困難であった。

本研究はカルマンフィルタが備えるノイズ除去の機能を活用し、1つの圧電電圧信号に混在する2つの成分を、信号表現と状態推定により分離するアイデアを提唱する。

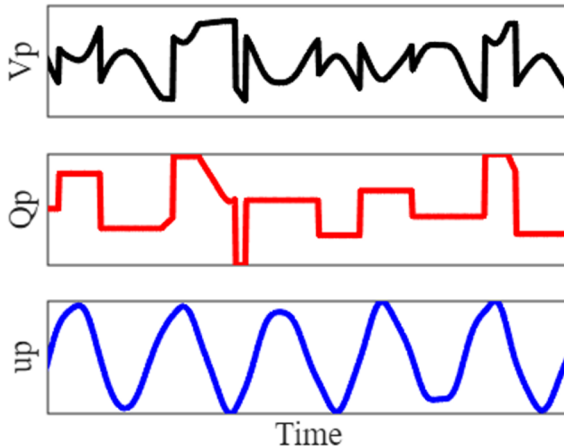


Fig. 2 上から電圧、電荷、変形の波形概念図。電圧は電荷と変形の和で書けるが、分離が難しい。

3.4. 電圧速度表現による問題の変換

圧電電圧ではなく、その時間変化である電圧速度に着目した。Fig.3の通り、電圧速度に変換すると、構造変形に由来する成分は比較的連続的な振動応答として現れ、電荷挙動に由来する成分は局所的・突発的なスパイク状成分として現れる。

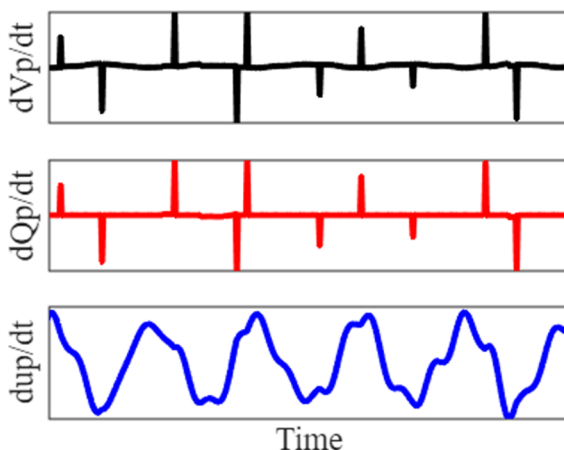


Fig. 3 電圧速度、電荷速度、変形速度の波形概念図。電荷速度を外れ値とみなすと、計測信号から外れ値を除去するデジタル信号処理によって、電圧速度から変形速度が推定できる。

この見方により、元の劣決定問題は「電圧速度信号から、モデルで説明可能な構造変形成分と、モデルから外れる電荷成分を分離する問題」へ変換される。重要な点は、外れ値を不要ノイズとして捨てず、圧電電荷の挙動を反映する有用な情報として再解釈した点にある。

3.5. ロバストカルマンフィルタによる変形速度と電荷速度の分離

この分離を実現するため、本研究ではロバストカルマンフィルタを用いた。カルマンフィルタは、動的モデルによる予測と観測信号を組み合わせで状態を推定する手法である。一般的なカルマンフィルタはノイズがガウス分布に従うと仮定しており、外れ値のような特徴的なノイズを取り除くのは不得意であった。本研究で扱う電圧速度信号には、構造変形成分に加えて、電荷挙動に起因するスパイク成分(外れ値)が含まれる。そこで、モデルで説明できる連続成分を予測出力として抽出し、モデル予測から大きく外れる成分を電荷速度として扱った。

3.6. カルマンフィルタモデルの同定

ロバストカルマンフィルタを構成するためには、電圧速度データから構造応答を表す状態空間モデルを同定する必要がある。そこで、電圧速度データに対して外れ値に強い確率的部分空間同定法^[3]を適用した。通常の部分空間同定法では、電荷由来のスパイク成分が構造モデルの推定を乱す可能性がある。これに対して、ロバスト部分空間同定法はスパイク成分の影響を抑えながら、構造変形に対応する基準モデルを抽出する。これにより、電圧速度のみから、後段のロバストカルマンフィルタに必要な状態空間モデルを取得した。

3.7. ゼロ領域を考慮した予測

本研究では、カルマンフィルタの観測更新に、

観測の有効性判定を導入した。Fig.4 の通り、電圧速度には、変形速度や電荷速度とは別にゼロ近傍に留まる領域がある。この領域は、圧電素子の電荷がバッテリーへ供給されることで生じ、構造物の振動とは関係しない。そのため、ゼロ領域では観測信号を用いず、予測信号のみで推定するカルマンフィルタを提案した。

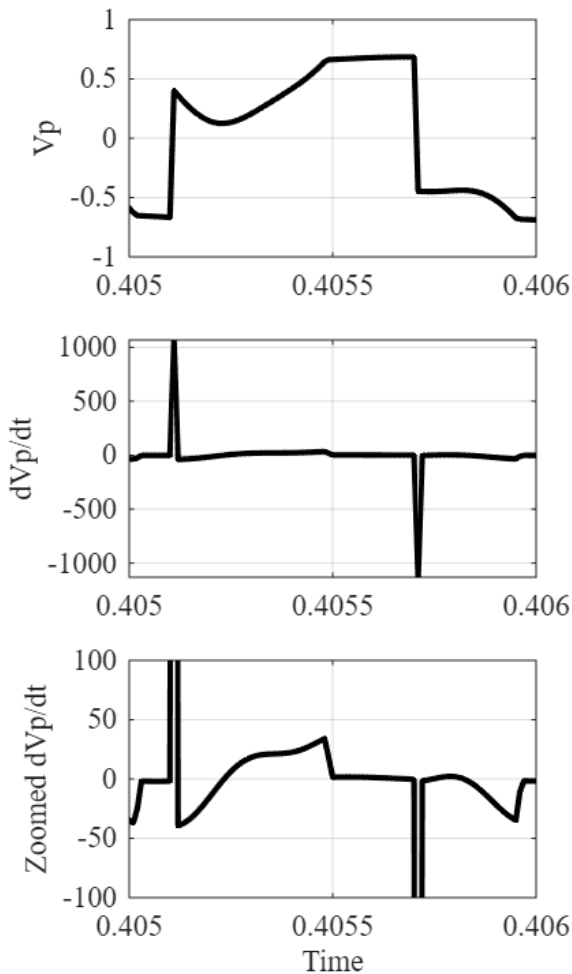


Fig. 4 ゼロ領域を含んだ圧電電圧波形。図中央に顕著。この領域は信号推定の精度を低下させるため、推定に反映しない。

具体的には、観測が有効な情報を含むかを逐次判断し、有効でない場合には観測更新を行わず、モデル予測のみで状態を推定した。ある離散時刻 i における観測の有効確率を γ_i とし、有効率が低い場合は、観測更新を停止する。この処理により、電圧速度がゼロ近傍となる情報欠落区間でも、推

定が破綻しないようにした。

3.8. データ駆動型残差生成器による異常検知

最後に、推定された圧電変形速度を出力、推定された電荷速度を入力に相当する量として用い、データ駆動型の残差生成器^[4]を構成した。正常な構造物では、入力に相当する電荷速度と出力に相当する変形速度の間には、同定された動的モデルに従う一定の関係が存在する。一方、構造物に損傷や異常が発生すると、この入力出力関係が変化し、正常モデルでは説明できないずれが生じる。

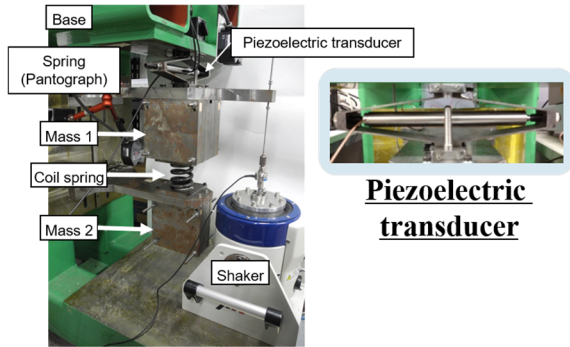
本研究では、このずれを残差として抽出し、異常検知指標として用いた。これにより、単なる電圧振幅の変化ではなく、圧電電荷と構造変形の関係性の破綻を検出できる。すなわち、本手法は圧電電圧そのものの大小ではなく、推定された電荷速度と変形速度の間に正常時の動的関係が保たれているかを評価する。

4. 研究の成果

4.1. 実験装置

Fig.5 に示す圧電素子の接続された実験装置を用いて、提案するセルフパワード・セルフセンシング異常検知手法を評価した。上から固定端、圧電素子の組み込まれたパンタグラフ型ばね、上部パーツ、コイル型ばね、下部パーツで構成されており、二自由度振動構造物としてモデリングできる。加振器は外乱源に相当し、加振器により励起された振動は異常検知に使用されない。圧電素子が励起した振動が異常検知に使用される。総質量は約 50 kg であり、上部に総質量の 2% に当たる 1.0 kg のおもりが設置されている。このおもりを試験開始から 55 秒経過した後に取り外すことで、疑似的な損傷を模擬する。構造物にはレーザー変位計が取り付けられ、圧電素子には変形と電荷を計測するセンサが接続されている。速度は後退差分で事後的に計算した。また、圧電素子には自己

給電型駆動装置を取り付けた。なお、本実験では安定動作のために補助電源を併用した。



Experimental apparatus

Fig. 5 圧電素子を備えた実験装置の写真。圧電素子には補助電源を備えた自己給電型駆動装置が接続されている。

4.2. 実験結果

まず、提案する方法で1つの電圧速度を2つの推定信号に分離できているかを確認する。Fig.5の中段と下段に示す通り、提案手法は計測結果と同等な推定結果を示している。従って、提案手法を用いて、単一の電圧信号から2つの信号、電荷速度と変形速度を推定できることを確認した。

つぎに、付加マス除去前の電荷速度を正常構造物の入力、変形速度を出力として残差生成器を作成した。全時系列データを残差生成器に代入し、残差振幅の変化履歴を出力した。同じ処理を、提案手法で推定された入出力データと、センサで計測された入出力データの2条件で実施した。Fig.6に結果を示す。0~20秒の残差増加はバッテリー充電未完了による過渡応答であり、20秒以降は一定値に収束した。提案手法では53.66秒、従来のセンサデータでは55.32秒で顕著な残差変化が生じた。この変化はおもり除去による疑似損傷に対応する。検出時間差は1.66秒であり、電圧計測のみで異常検知が達成できることを確認した。

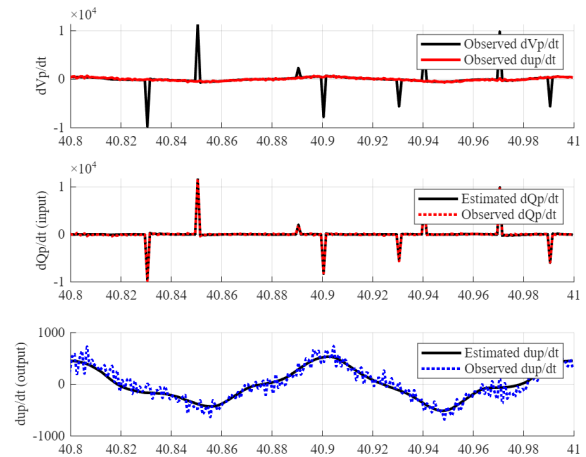


Fig. 6 上は、計測電圧と計測速度。中央の破線は電荷センサ計測結果の後退差分、実線は推定された電荷速度。下部の破線は変位センサの後退差分、実線は推定された変形速度。

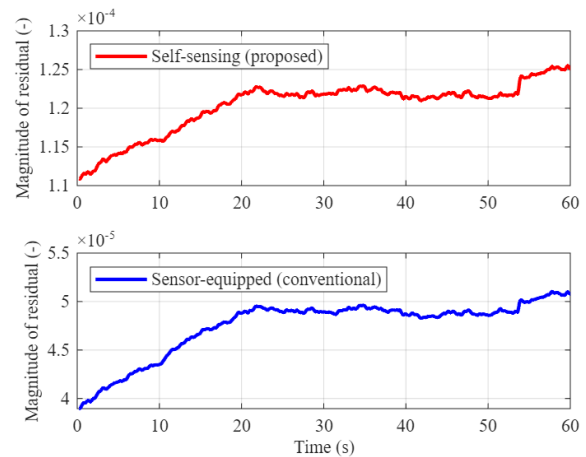


Fig. 7 上は、提案手法で推定された入出力データを用いた残差の時間変化、下は従来通りセンサ計測された入出力データを用いた残差の時間変化。55秒周辺の変化が一致している。

5. 結言

本研究では、単一の圧電素子が発生する電圧信号のみを用いて、加振、応答推定、異常検知を統合するセルフパワー・セルフセンシング異常検知手法を構築した。圧電電圧に含まれる変形成分と電荷成分の分離は、観測量が1つで未知量が2つ存在する劣決定問題であり、従来の直接的な信号処理では困難であった。これに対し、本研究では電圧速度に着目し、構造成形に対応する連続成

分と電荷挙動に対応するスパイク状成分をロバスト状態推定により分離した。実験では、約 50 kg の構造物に対して質量 2% の変化を模擬損傷として与え、推定された電荷速度と変形速度を用いた残差生成器により損傷時刻を検出できることを確認した。以上より、外部電源や追加センサに依存しない構造物異常検知の基盤技術を確立した。

6. 参考文献

- [1] Hara Y., Yamamoto, Y., and Makihara K.; Self-Sensing State Estimation of Switch-Controlled Energy Harvesters, **31** – 20, (2020), pp.2326–2341.
- [2] Hara, Y., Otsuka, K., and Makihara, K.; Low-Energy-Consumption Structural Identification with Switching Piezoelectric Semi-Active Input, *Mechanical Systems and Signal*

Processing, **187**, (2023), p. 109914.

- [3] O’Connell, B., and Rogers T.; A Robust Probabilistic Approach to Stochastic Subspace Identification, *Journal of Sound and Vibration*, **581**, (2024), p. 118381.
- [4] Hara, Y., Tang, T., Li X., Saito H., and Makihara, K.; Sensor-Less Piezoelectric-Based Structural Health Monitoring of Space Structures, *Journal of Evolving Space Activities*, **3**, (2026), p. 237.

7. 謝辞

本研究は島津科学技術振興財団の助成金により実施された。