K4-49

## 小型ながら長周期・大振幅を測定できる絶対変位計の開発 (3次の位相遅れ補償器の必要性と設計法)

Development of Compact Absolute Displacement Sensor that is measurable Vibration Possessing Long Period and

Large Amplitude

(Necessity and design of third order phase-lag compensator)

渡辺亭<sup>1</sup>, 背戸一登<sup>2</sup>, 原顕宏<sup>3</sup>, 二井聡史<sup>3</sup>, ○原田功大<sup>4</sup> Toru Watanabe<sup>1</sup>, Kazuto Seto<sup>2</sup>, Akihiro Hara<sup>3</sup>, Satoshi Futai<sup>3</sup>, \*Koudai Harada<sup>4</sup>

This paper proposes a new type of active seismometer in order to measure vibration with long period and wide dynamic range. In order to lower the natural frequency and expand the detectable amplitude, the sensor with the low natural frequency is realized by using feedback control. Moreover, to compensate phase-delay, third order phase-lag compensator is added to shape measured output. It has been demonstrated that the detectable frequency range of the sensor is extended from 0.1[Hz] to 5.4[Hz], while the dynamic range of that is expanded up to 40[dB].

1. 緒言

ビルの 1 次モードの固有振動数は 100 階建で概ね 0.1Hz, 30 階建てで 0.2Hz とされており,周期 5~6 秒 の長周期の地震波により共振が発生する.このような 揺れを速やかに止めるには,ビルの内部減衰を高める 方法が必要になる.その方法の一つにアクティブ制振 法がある.しかし,この方法では,ビルの状態量をセ ンサで検出する必要がある.特に変位の測定では,測 定可能な振動の周波数がセンサの固有振動数以上に限 られるため,1Hz 以下の長周期の地震波を測定するこ とが難しい.

そこで本研究では、フィードバック理論を用いて 1mmの可動範囲を持つ絶対変位振動計で周波数 0.1Hz, 振幅 1mの揺れを測定可能な絶対変位計の開発を目指 す.

2. 提案する絶対変位振動計

センサボディと制御回路,位相遅れ補償器からなる 提案する絶対変位振動計の基本構成をFigure1に示す.



**Figure 1.** Structure of absolute displacement sensor センサボディ内は質量*m*を有する可動部とそれを一 方向に可動できるようにバネ定数*k*のバネで支持され ているバネ部からなるサイズモ型構造であり,可動部

はアクチュエータによって駆動される.その動きは速 度検出器によってセンサボディの変位 u と可動部の変 位 x 間の相対速度u - xに比例する相対速度信号電圧  $e_v$ として検出される.可動部の動きに伴い減衰係数 c を 有する減衰力が発生する.制御回路からの制御電圧  $e_c$ によってアクチュエータには制御力  $f_c$ が発生する.制 御回路内では相対速度信号電圧  $e_v$ を積分回路に通す事 によって相対変位信号電圧  $e_D$ ,微分回路に通す事によ り,相対加速度信号電圧  $e_A$ を発生させる.これら3つ の相対信号に各々変位フィードバックゲイン  $K_D$ ,速度 フィードバックゲイン  $K_v$ ,加速度フィードバックゲイ ン  $K_A$ を掛けて,更に3つの信号を合成することにより 制御信号  $e_c$ を得る.制御力  $f_c$ は制御信号  $e_c$ に力係数  $K_f$ を掛けて作られる.

制御回路により検出された相対変位信号電圧 e<sub>D</sub>はフ ィードバックループの外にある位相遅れ補償器を通し て絶対変位信号として出力される.

## 3. 周波数応答の測定結果

非制御時のセンサと、全フィードバック制御を掛け た時の周波数応答の測定結果を Figure 2 に示す. Figure 2 に示すように、全フィードバック制御を掛けること により、ゲインを 52dB 低下させ、固有振動数を 0.81Hz にまで下げることができる. しかし、本研究では、周 波数 0.1Hz の揺れを測定することを目標にしているの で、固有振動数をさらに下げる必要がある. そのため、 全フィードバック制御に 3 次の位相遅れ補償器を追加 することにより、低周波での位相を遅らせ、固有振動 数を下げることを試みた.

1:日大理工・教員・機械 2:背戸振動制御研究所 3:日大理工・院(前)・機械 4:日大理工・学部・機械



Figure 2. Measured frequency response of sensor

## 4. 3次の位相遅れ補償器の設計方法

3次の位相遅れ補償器は2次と1次の位相遅れ補償 器を組み合わせることで設計できる.これらの補償器 をアナログ回路で設計すると Figure 3 のようになる.



**Figure 3.** second order phase-lag compensator and first order phase-lag compensator

これらの回路はオペアンプと抵抗,コンデンサを用い て作ることができる.

5. 3次の位相遅れ補償器単体時と、センサに組み 合わせた時のシミュレーション結果

3 次の位相遅れ補償器単体時での周波数応答のシミュ レーション結果を Figure 4 に,センサに 3 次の位相遅 れ補償器を組み合わせた時の周波数応答のシミュレー ション結果を Figure 5 に示す.



**Figure 4.** Simulated frequency response of third order phase-lag compensation



**Figure 5.** Simulated frequency response of sensor with third order phase-lag compensation in addition to feedback control approach

Figure 5 に示すように, Figure 4 に示す 3 次の位相遅 れ補償器を全フィードバック制御に追加することで, ゲインを 40dB 低下させ,固有振動数を 0.1Hz にまで下 げられることが予測できる.

3次の位相遅れ補償器の周波数応答の測定結果
3次の位相遅れ補償器の周波数応答の測定結果を
Figure 6に示す.



**Figure 6.** Measured frequency response of third order phase-lag compensation

Figure 6 より測定結果は, Figure 4 に示すシミュレー ション結果に近い値になったことがわかる.

7. 結言

センサに全フィードバック制御と3次の位相遅れ補 償器を掛けることで,固有振動数を0.1Hzにまで下げ られることをシミュレーションで確認することができ た.これは,目標とする周波数0.1Hzの揺れを測定で きる見込みが立ったことを意味する.以上の結果を踏 まえ,今年度は実験的に検証を行う.

8. 参考文献

[1] 背戸 一登,渡辺 亨:「フィードバック制御の基礎 と応用」,コロナ社,(2013)

 [2] 岩崎 雄一,伊藤 彰彦,背戸 一登,宮崎 充:「長 周期・大振幅地震動の測定を目指した小型絶対変位振 動計の開発研究」,日本機械学会論文集,81(824), 14-00556,(2015)