

小型ながら長周期・大振幅振動を測定できる絶対変位計の開発

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

○二井聡史¹, 背戸一登², 渡辺亭³, 渡部瞭⁴, 原顕宏¹*Satoshi Futai¹, Kazuto Seto², Toru Watanabe³, Ryo Watanabe⁴, Akihiro Hara¹

This paper proposes a new type of active seismometer measuring vibration possessing 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 10[Hz], while the dynamic range of that is expanded up to 40[dB], namely vibrations that possess 100times larger amplitude than the maximum stroke of the sensor.

1. 緒言

ビルの 1 次モードの固有振動数は 100 階建てで概ね 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を起こしてしまう. 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何らかの方策が必要である. その方策の一つにアクティブ制振法があるが, 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事が難しい.

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期 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 Figure 1 に示す.

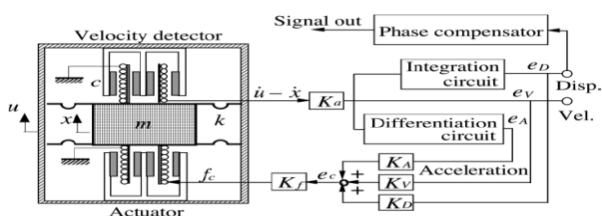


Figure 1. Structure of absolute displacement sensor

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 $\dot{u} - \dot{x}$ 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って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 を得ている. 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_D はフィードバックループの外にある 3 次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¹⁾.

3. 3 次位相遅れ補償を組み合わせさせたシミュレーション

実験に用いたセンサボディの諸元は以下のようになっている.

$$m=25.2[\text{g}], c=5.23[\text{Ns/m}], k=30.1[\text{N/m}]$$

Figure 2 は破線が非制御時の周波数応答, 点線が主に加速度フィードバックを与えた時の周波数応答特性のシミュレーション結果である. この結果では, フィードバック制御によって, 元の固有振動数 5.5Hz が 0.53Hz に低下され, 閉ループゲインが 40dB 低下された事が分かった. しかし, 周期 5~6 秒程度の長周期の地震波の測定には不十分である. そこで 3 次位相遅れ補償器を用いることで更なる遮断周波数の低下を試みた²⁾. Figure 2 の実線がフィードバックコントローラにさらに, 3 次の位相遅れ系を追加したときの周波数

応答特性のシミュレーション結果である。

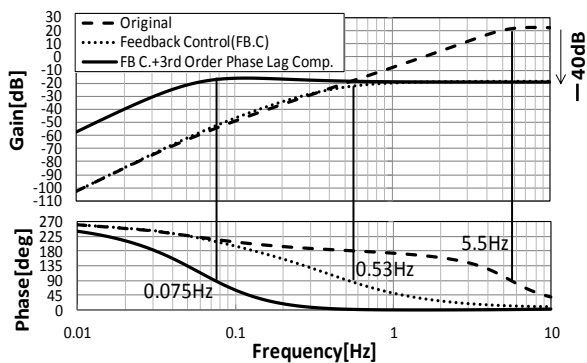


Figure 2. Simulated frequency response of sensor with phase lag compensation

これより 3 次の位相遅れ補償器により遮断周波数は、更に 0.075Hz に低下している事が分かる。閉ループゲインの低下は -40 dB に維持されており、原理的には 100 倍の変位振幅が測定できる事が分かる。

4. 実験

4.1 実験装置

Figure 3 は本研究で使用した実験装置の構成図である。

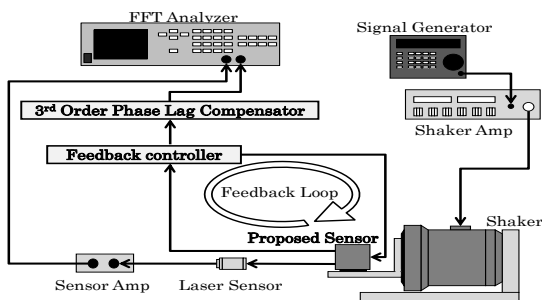


Figure 3. Measurement system of frequency response for the sensor

4.2 周波数特性実験

フィードバックコントローラに 3 次位相遅れ補償器を加えた時の周波数特性をシミュレーション結果と測定結果とで比較したものが Fig. 4 である。

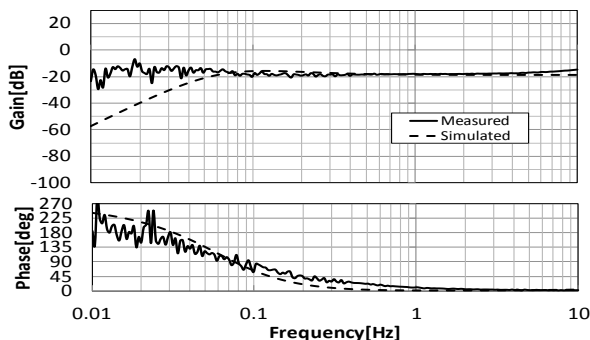


Figure 4. Comparison of result of simulation and practice

図よりシミュレーションの結果に近い実験結果が得られている事が分かる。

4.3 模擬地震波の加振実験

周波数特性実験の結果から長周期の振動の観測が可能となる見込みが実験的に得られたので、模擬地震波による加振実験を行った。

Figure 5 は模擬八戸波で研究中のセンサを加振した時の変位応答の時刻歴応答波形である。

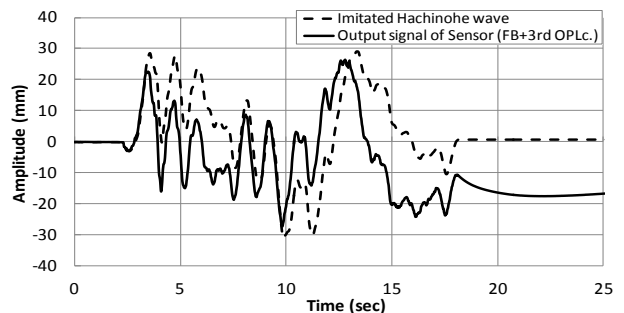


Figure 5. Measured output signal of the sensor under the imitated Hachinohe earthquake wave

図より、研究中のセンサの結果にうねりがある事が確認出来る。この原因は現在、位相遅れ補償器に用いているアナログ回路にあると推定された。

5. 結言

フィードバック制御により、ゲインが 40dB 低下し、測定可能範囲が 100 倍となる事が確認できた。これは 1mm の可動範囲を持つ振動計で 100mm の変位が測定可能となる事を意味する。また、フィードバックコントローラと 3 次位相遅れ補償器を用いることにより遮断周波数を 0.075Hz まで低下させる事が確認された。しかし時刻歴応答において確認されたうねりを除去するためデジタル回路による位相遅れ補償器の設計及び実証実験による効果の検討が今年度の課題である。

6. 参考文献

[1] Kazuto Seto, Akihiko Ito, Yuichi Iwasaki, Mitsuru Miyazaki : “DEVELOPMENT OF SEISMOMETER-TYPE ABSOLUTE DISPLACEMENT SENSOR AIMED FORETECTING EARTHQUAKE WAVES WITH LARGE MAGNITUDE AND LONG PERIOD”, DSCC2012-MOVIC2012-8821
 [2] 渡部 瞭, 背戸 一登, 渡辺 亨, 岩崎 雄一, 宮崎 充, 石川 弘二 : 「フィードバック制御を用いた長周期絶対変位センサ」, 日本機械学会 MOVIC 2011