フィードバック制御を用いた長周期絶対変位センサ

渡部 瞭^{*1}, 背戸 一登^{*2}, 渡辺 亨^{*3}, 岩崎 雄一^{*4}, 宮崎 充^{*5}, 石川 弘二^{*6}

The Absolute Displacement Sensor using Feedback Control

Ryo WATANABE^{*1} and Kazuto SETO^{*2}, Toru WATANABE^{*3}, Yuichi IWASAKI^{*4}, Mitsuru MIYAZAKI^{*5}, Koji ISHIKAWA^{*6}

^{*1} Nihon Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0062 Japan

^{*2} Nihon Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0062 Japan

^{*3} Nihon Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0062 Japan

^{*4} Oiles CORPORATION.
Hakari-tyo 1000, Ashikaga-shi, Tochigi, 320-0327 Japan

^{*5} Oiles CORPORATION.
Konan 1-6-34, Minato-ku, Tokyo, 108-0075 Japan

^{*6} Nihon Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0062 Japan

This paper reports new results for developing absolute displacement sensor in order to measure a long period and large magnitude. Measuring of the absolute displacement of vibration objects, the natural frequency of sensor must be lower than the dominant frequency of the object. Therefore, it is difficult to measure a low frequency vibration below 1 Hz using conventional displacement sensors. In order to be lower the natural frequency, the sensor with the low natural frequency is realized by using feedback control. It has been demonstrated that a developed sensor has a detecting range from about 0.2 Hz to 10Hz for absolute displacement. In addition, the measurement displacement amplitude has been expanded to about 700 times. Moreover, by using the second order lag compensator measuring lower frequency range is expanded to 0.1Hz.

Key Words : Sensor, Vibration Control, Natural Frequency, Analogue Control, Measurement

1. 緒 言

2011年に発生した東日本大震災により都心部の超高層ビルでは、長い時間に渡って大きな揺れが発生した。この様な高層ビルの固有振動数は、1次モードで0.1~0.2Hzとされており揺れを抑えるための制振装置としてパッシブ制振装置とアクティブ制振装置が挙げ考えられる。しかし、それら超高層ビルの揺れは1mを超える大振幅が観測されており、現在、その様な長周期で大振幅の振動変位を直接観測できる絶対変位振動計が存在しないため、超高層ビルを制振する課題が残っている。

現在、多くの超高層ビルは風による過励振に対して揺れをセンサで検出し可動マスの慣性力を利用してビルの揺れを制御するAMD制振装置を備えているが⁽¹⁾⁽²⁾、この装置では主に加速度センサが使用されており、検出された信号を二回積分して絶対変位を得ている。このため、たとえ僅かな直流成分を含んでいても、それを積分することでドリフト問題が発生するので、それを除去するための二段のハイパスフィルタが不可欠である。しかし、

* 原稿受付 2013年7月1日

^{*1} 非正員, 日本大学 大学院 理工学研究科
E-mail: csry13034@g.nihon-u.ac.jp

^{*2} 正員, 背戸振動制御研究所

^{*3} 正員, 日本大学 理工学部

^{*4} 非正員, オイレ工業株式会社

^{*5} 非正員, オイレ工業株式会社

^{*6} 非正員, 日本大学 大学院 理工学研究科

加速度センサはその構造から長周期・大振幅の揺れを観測するには不向きである。

そこで本研究は、フィードバック制御を用いることでドリフト問題を解決し、センサの固有振動数の低下や測定範囲の拡大を実現することで小型かつ長周期振動の測定を可能とする絶対変位振動計の開発を目指すというものである。

2. 提案する絶対変位振動計

2・1 提案する絶対変位振動計の構成

センサボディとフィードバックコントローラ、位相遅れ補償器からなる絶対変位振動計を図1に示す。センサボディは質量 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 のバネによって支持されたバネ部からなるサイズモ型構造であり、可動部にはアクチュエータを有する。速度検出器で検出されたセンサボディの変位 u と可動部質量変位 x 間の相対速度信号 $\dot{u}-\dot{x}$ に比例する相対速度信号電圧 e_v が検出される。さらに、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。

一方、フィードバックコントローラでは相対速度信号をコンデンサ C_D と抵抗 R_D を持つ積分回路を通すことで相対変位信号電圧 e_D 、またコンデンサ C_A と抵抗 R_A を持つ微分回路を通すことで相対加速度信号電圧 e_A が生じる。これらの相対信号にそれぞれ加速度フィードバックゲイン K_A 、速度フィードバックゲイン K_V 、変位フィードバックゲイン K_D を掛けて加減算合成することで制御信号 e_c を得る。この制御信号によってアクチュエータに制御力 f_c が生じ、制御信号 e_c に力係数 K_f を掛けて作られる。

Fig.1 The schematic of proposed sensor

Fig.2 The signal flow diagram of the proposed sensor

図2は、図1に基づいたセンサボディ周りの運動方程式と、フィードバックコントローラ周りの回路方程式を組み合わせて表した信号伝達線図である。

2・2 周波数伝達関数

図2で全てのフィードゲインが正の値を取るとき、変位 u と相対変位信号 e_D 間の周波数伝達関数は

$$\frac{e_D}{u} = \frac{mK_a(T_A s + 1)s^3}{\alpha_0 s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \alpha_0 &= T_D T_A m \\ \alpha_1 &= (T_D T_A)m + T_D T_A c - T_D T_A K_a K_f (K_A + K_V) \\ \alpha_2 &= m + (T_D T_A)c + T_D T_A k - T_A K_a K_f (K_V + K_D + K_A) \\ \alpha_3 &= (T_D + T_A)k + c - K_a K_f (K_D + K_V) \\ \alpha_4 &= k \end{aligned}$$

同様に変位 u と相対変位信号 e_V 間の周波数伝達関数は

$$\frac{e_D}{u} = \frac{mK_a \{T_D T_A s^2 + (T_D + T_A)s + 1\} s^3}{\alpha_0 s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4} \quad (2)$$

ここで $T_A s \ll 1$ という条件で $T_A s + 1 \doteq 1$, $T_D s \gg 1$ という条件で $T_D s + 1 \doteq T_D s$ と置くことができ、微分回路と積分回路では次の近似ができる。

$$G(s) = \frac{T_A s}{T_A s + 1} \Rightarrow G(s) \doteq T_A s \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{1}{T_D s + 1} \Rightarrow G(s) \doteq \frac{1}{T_D s} \quad (4)$$

この近似によって、式(1)は次のように表すことができる。

$$\frac{e_D}{u} = \frac{mT_D s^2}{T_D \alpha_3 s^2 + T_D \alpha_6 s + T_D k - K_a K_f K_D} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \alpha_5 &= m - T_A K_a K_f T_A \\ \alpha_6 &= c - K_a K_f K_V \end{aligned}$$

これは2次形式の伝達関数であり、式(5)より、固有角振動数 ω_n と減衰比 ζ が次のように得られる。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k - \frac{1}{T_D} K_a K_f K_D}{m - T_A K_a K_f K_A}} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{c - K_a K_f K_V}{2 \sqrt{\left(m - T_A K_a K_f K_A\right) \left(k - \frac{1}{T_D} K_a K_f K_D\right)}} \quad (7)$$

2・2 各フィードバックゲインの効果

信号伝達線図から求めた固有角振動数の式(6)及び減衰比の式(7)から各フィードバックゲインの効果が挙げられる。

1. 相対変位フィードバックゲイン K_D

各式は正帰還の符号で表されているので、式 (6) の分子は相対変位フィードバックゲイン K_D が増加することで固有振動数を低下できるが、それによって減衰比は多少増加する。

2. 相対速度フィードバックゲイン K_V

相対速度フィードバックゲイン K_V を負帰還することによって減衰比を大きく、また正帰還することによって小さくできる。そのためこのゲインは減衰比の調整機能を果たすことができる。

3. 相対加速度フィードバックゲイン K_A

相対加速度フィードバックゲイン K_A を負帰還することによって固有振動数を低下できるが、それによって減衰比は多少増加する。それに加えて相対加速度フィードバックゲイン K_A は後述する測定範囲拡大の機能も有する。

2・3 測定レンジの拡大機能

相対加速度フィードバックゲイン K_A でも述べたが、このゲインには測定範囲の拡大機能を有する。ここで測定対象絶対変位 u と検出される相対変位 $u-x$ との周波数伝達関数を式 (8) に示す。

$$\frac{u-x}{u} = \frac{mT_D s^2}{T_D(m-T_A K_a K_f K_A)s^2 + T_D(m-T_A K_a K_f K_A)s + T_D k - K_a K_f K_D} \quad (8)$$

ここで、式 (8) の分子、分母の中で測定可能範囲へ影響がある項は共に s^2 の項であると考えられるので式 (8) の周波数伝達関数は次のよう近似できる。

$$\frac{u-x}{u} = \frac{m}{m-T_A K_a K_f K_A} \quad (9)$$

近似した式 (9) から測定対象絶対変位 u と検出される相対変位 $u-x$ との関係を示すと

$$u-x = \frac{m}{m-T_A K_a K_f K_A} u \quad (10)$$

となり、相対加速度フィードバックゲイン K_A を負帰還することで、このゲインの増加に伴い検出される相対変位は抑圧され測定可能範囲が拡大される。

3. 小型加振器による加振実験

3・1 実験装置

実験に用いたアカシ製センサの諸元を以下のようにになっている。

Table 1 Main dimension of the prototype

Internal weight m [g]	Spring constant k [N/m]	Damping constant c [Ns/m]
25.2	30.1	5.23

図 3 に実験装置の概要図を示す。この実験装置は、センサを小型電磁加振器で加振し、レーザー変位計により測定したセンサボディの変位とフィードバックコントローラによって制御を加えた変位信号を伝達関数解析器に送り周波数応答を解析する構成となっている。この 小型電磁加振器により 0.1~10Hz の正弦波で加振実験を行う。

Fig.3 Measurement system of frequency response for sensor

3・2 実験結果

実験装置により測定した周波数応答を図4に示す。以下の図は、加速度フィードバック及び速度フィードバック制御を加えたものと加えていないものの比較である。

まず固有振動数に関して、フィードバック制御を加えていないものはセンサ可動部の固有振動数が4.3Hz付近であるのに対して、制御を加えたものは0.26Hz付近まで低下している。

次に、振幅倍率ではフィードバック制御を加えていないものに対して、制御を加えたものは57dB低下している。これは $\pm 1\text{mm}$ の可動範囲を持つ振動計で $\pm 700\text{mm}$ の変位が測定できることを意味する。

Fig.4 Measurement frequency response for the sensor

4. 位相遅れ補償器

4・1 シミュレーション

実験結果よりフィードバックゲインにより固有振動数を下げることが可能となった。ここで2次の位相遅れ補償器を用いることでさらに固有振動数を低下させることが可能になる⁴⁾。そこで2次の位相遅れ補償器の周波数伝達関数を式(11)に示す。MATLABによる2次の位相遅れ補償器の周波数応答のシミュレーションを図5に示す。

$$G_c(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \zeta_n &= 0.4 & \omega_n &= 0.04 \times (2\pi) [\text{rad/sec}] \\ \zeta_d &= 1.2 & \omega_d &= 0.22 \times (2\pi) [\text{rad/sec}] \end{aligned}$$

Fig.5 Frequency response of second order of phase lag compensator

次に、2次の位相遅れ補償器を制御回路に用いた時のシミュレーションを図6に示す。図6は、非制御での周波数応答、フィードバック制御を加えた周波数応答、フィードバック制御を加えかつ2次の位相遅れ補償器を用いた時の周波数応答の比較である。このシミュレーションからフィードバック制御を加えたのものに対してフィードバック制御と位相遅れ補償器を用いたものでは、固有振動数が0.2Hzから0.1Hzまで低下出来ることがわかる。

Fig.6 Simulated results of frequency responses with no control, feedback control(FB) and FB+phase lag compensator

4・2 位相遅れ補償器を用いた加振実験

上記のシミュレーション結果により位相遅れ補償器を用いることで測定範囲の拡大が見込めた。そこで、位相遅れ補償器を製作し、フィードバック制御の時と同様に $0.1 \sim 10\text{Hz}$ の周波数領域で加振実験を行った。図 7 は位相遅れ補償器を制御器と直列に挿入した時の実験装置の概要図である。

Fig.7 Measurement system of frequency response for sensor using phase lag compensation

4・3 実験結果

実験装置により測定した周波数応答を図 8 に示す。以下の図は、フィードバック制御を加えたものと加えたものに位相遅れ補償器を用いたものの比較である。

まず固有振動数に関して、フィードバック制御のみはセンサ可動部の固有振動数が 0.26Hz 付近であるのに対して、位相遅れ補償器を用いたものは 0.1Hz 以下まで低下している。

次に振幅倍率では、位相遅れ補償器を用いたものはフィードバック制御のみもので 0.25Hz 付近に発生していたピークが抑えられていたが、 0.2Hz 以下ではシミュレーションで見られなかった振幅倍率の増加が見られる。これは小型電磁加振器で低周波領域の加振を行う際に発生する磁気誘導が原因ではないかと考えられる。

Fig.4 Measured frequency responses of developed sensor with feedback control(FB) and FB+phase lag compensator

5. 大振幅加振実験

5・1 大型油圧式加振器による加振実験

フィードバック制御と位相遅れ補償器により長周期，大振幅の振動を測定することが可能となったのがわかった。そこで次に，大型の油圧加振器で時系列応答の加振実験を行うことでセンサの出力信号の追従性を確認した。今回は大型の油圧加振器により最大振幅±100mm かつ周波数 0.9Hz の正弦波で加振を行った。

5・2 実験結果

大型の油圧加振器による加振実験の測定結果を図 9 に示す。この図は入力加振変位に対してフィードバック制御と位相遅れ補償器を用い，センサによって検出された変位信号との比較を時間応答で示したものである。結果から最大振幅±100mm かつ周波数 0.9Hz の入力加振変位に対してセンサによって検出された変位信号は若干の位相進みが見られるが，振幅に関しては正しく測定されており，可動範囲の 100 倍の波形が観測されている。

Fig.9 Comparison of the ground motion with 0.9Hz frequency and 100mm amplitude and its observed motion

6. 結言

6・1 結論

提案する絶対変位振動計及び 2 次の位相遅れ補償器での理論解析と実証実験を行うことで，次の事が得られた。

- ① フィードバック制御と位相遅れ補償器を組み込むことでセンサの固有振動数が理論解析では 0.1Hz，実証実験でも 0.1Hz 以下まで低下した結果が得られ長周期地震波の測定が可能であることが確認できた。
- ② 加速度フィードバック及び速度フィードバック制御により，非制御のものと比較して−57dB の低下した結果が得られ±1mm の可動範囲を持つセンサで約±700mm の振幅の測定が可能であることが確認できた。
- ③ 大型の油圧加振器による加振実験の結果より，時系列応答によっても長周期・大振幅振動の観測が可能であることが確認できた。

6・2 今後の展望

位相遅れ補償器の実験で得られた小型電磁加振器での振幅倍率の増加に対して電磁誘導の影響を受けない測定方法の提案及び測定を行う。それに加えて目標とする 1mm の可動範囲を持つセンサで 1000mm の振幅の測定実現のために制御回路の調整で対応していきたい。

文 献

- (1) Spencer, B.F. and Sain, M.K., “Controlling Buildings: A new frontier of feedback”, IEEE Control System, vol.17 (1997), No.6, pp.19-35.
- (2) Preumont, A. and Seto, K., 2008. Active Control of Structures, Wiley, Chap. 4, pp. 148–158.

- (3) 背戸 一登, 岩崎 雄一, 伊藤 彰彦, 宮崎 充, 長周期・大振幅の動的計測を目指した絶対変位振動計の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012 -703[2012.9.18-21] USB 論文集
- (4) Kazuto Seto, Akihiko Ito, Yuichi Iwasaki, Mitsuru Miyazaki, "Development of Seismometer-Type Absolute Displacement Sensor Aimed for Detecting Earthquake Waves with Large Magnitude and Long Period", ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference, DSCC2012-MOVIC2012-8821 on CD-ROM, 2012.