局所変形角と相対変位を測定可能な 構造ヘルスマニタリング用層間変位センサの開発*

松谷 巖^{*1}, 片村 立太^{*2}, 佐藤 摩弥^{*3}, 近藤 秀昭^{*3}, 伊庭 美麓^{*3}, 金川 清^{*3}
仁田 佳宏^{*4}, 谷井 孝至^{*3}, 庄子 習一^{*1}, 西谷 章^{*3}, 大泊 巖^{*3}

A Relative-Story Displacement Sensor for Structural Health Monitoring Capable of Measuring the Local Inclination Angle and the Relative Displacement

Iwao MATSUYA^{*1}, Ryuta KATAMURA, Maya SATO, Hideaki KONDO, Miroku IBA,
Kiyoshi KANEKAWA, Yoshihiro NITTA, Takashi TANII, Shuichi SHOJI, Akira NISHITANI and
Iwao OHDOMARI

^{*1} Waseda Univ. Dept. of Electronic and Photonic Systems
Okubo 3-4-1, Shinjyuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

We propose a novel relative-story displacement sensor for structural health monitoring. The sensor is composed of three pairs of position sensitive detector (PSD) units and light emitting diode (LED) arrays, and is capable of measuring both the local inclination angle of the PSD unit and the relative displacement between the PSD unit and the LED array. By immobilizing the LED arrays on the ceiling and the PSD units on the floor, we can accurately measure the relative-story displacement in real time. We have verified the measurement accuracy of the developed sensor using a shaking table and a θ stage, and the accuracy was evaluated to be approximately 0.15 mm in the displacement and 0.1 mrad in the local rotation angle. The results indicate that the developed sensor is applicable to the relative-story displacement measurement for the diagnostics of an actual building.

Key Words : Nondestructive Inspection, Structural Health Monitoring, Damage Evaluation, Relative Story Displacement, Local Inclination Angle, Optical Measurement, Position Sensitive Detector (PSD)

1. 緒 言

高度経済成長期に建設した数多くの重要施設や社会インフラの老朽化に伴い、構造ヘルスマニタリングの重要性が増大している。とりわけ、地震力によって生じる構造物の層間変位を計測できれば、建築物の構造健全性を定量的に評価できる^{(1)~(3)}。図1に構造物が地震動を受けたときの、点A、B間の層間変位 δ を示す。層間変位を測定するためにはA、B点に加速度センサやビデオカメラ等の測定器を設置する必要がある。しかしながら、図1に示されるように、測定器設置点A、Bは地震力によって局所的にたわみ、測定器自身の向きが変えられてしまうため、変位計測に誤差が生じることが報告されている⁽³⁾。正確な層間変位 δ を計測するためには、センサ設置部のたわみ角の影響を除去する必要がある。

地震動による構造物のたわみ角の応答はDC~20 [Hz]と低周波であるため、デジタルカメラの手振れ補正などで用いられるジャイロセンサでは、この角度を検出できない⁽⁴⁾。また、Olaszekは固定点と測定点に参照を設置して、ビデオカメラの上下動の影響を除去した変位計測手法を提案しているが、この手法では検出器自身の回転による誤差は除去できない⁽⁵⁾。また、Parkらは高層ビルを測定対象として、すべての階の床に2台ずつカメラ

* 原稿受付 2010年9月1日

^{*1} 正員, 早稲田大学 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

^{*2} 正員, 鹿島建設技術研究所

^{*3} 早稲田大学

^{*4} 足利工業大学建築学科

E-mail: matsuya@aoni.waseda.jp

を設置して上層階の天井の変位を計測することによって、任意の階の相対変位と傾斜角を測定する手法を提案している。しかしながら、この手法では、地震時でも 1F に設置したカメラが回転しないことを仮定する必要がある。さらに上層階を同時に監視するために吹き抜け構造部にカメラを設置する必要がある⁽⁶⁾。

本研究では、センサ自身が回転しても正確な層間変位測定を行うために、センサ自身の回転角と変位を分離するための新しい方法を提案する。光位置検出素子 (Position sensitive detector : PSD) とレンズ、LED 光源からなる水平変位検出器⁽⁷⁾を 3 組使用することによって、層間変位センサを構成し、実験によって試作センサの実行可能性を検証する。

Fig. 1 Deformation of an actual building structures at the time of earthquake

Fig. 2 Schematic diagram of relative-story displacement sensor

2. 回転角と変位を分離する方法

図 2 (A) に層間変位センサの概観図を、図 2 (B) に XZ 面内の LED 光源とレンズおよび PSD の位置関係を示す。3 つの光源は天井の 3 点 $(0, 0, H)$ $(-d_0, 0, H)$ $(0, -d_0, H)$ に配置する。レンズ付きの PSD ユニット 1 は光源の鉛直下方 $(0, 0, 0)$ に配置され、PSD ユニット 2 と 3 は LED 光を垂直に受光するために角度 α 傾けて、それぞれ X 軸正方向、Y 軸正方向に距離 l_0 隔てて配置する。また PSD ユニット 1~3 は連結固定する。2 点間距離を H とし、光源からレンズまでの距離を a 、レンズから PSD 素子までの距離を b のように内分する。レンズの焦点距離を f とすると、式 (1) の関係式が成り立つ。 b/a は使用するレンズの焦点距離および物体と像の距離によって変わる (縮小) 倍率である。光源と PSD ユニットとの相対的な変位を (δ_x, δ_y) とし、床の局所回転角度は (θ_x, θ_y) とする。また、天井と床の相対的なねじれ (Z 軸回転) 角度を ψ とする。なお、角度の回転方向は、XYZ 軸に対して右ネジを回す方向を正とし、PSD ユニット 1 の原点を回転中心とする。PSD 素子 1~3 上のスポ

ット光の位置 X および Y は、式 (2) ～ (7) のように表すことができる. 式 (6) を除いた 5 元連立方程式から 5 つのパラメータ (δ_x , δ_y , θ_x , θ_y , ψ) を個別に導出することによって, 正確な層間変位 (δ_x , δ_y) を得る.

$$\frac{[(b/a)+1]^2}{(b/a)} \cdot f = H \quad (1)$$

$$X_1 = \frac{b}{a}(-\delta_x + H\theta_y) \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{b'}{a'}[-\cos \alpha \delta_x + (\frac{H}{\cos \alpha} - l_0 \sin \alpha)\theta_y] \quad (3)$$

$$X_3 = \frac{b'}{a'}(-\delta_x + H\theta_y) + l_0\psi \quad (4)$$

$$Y_1 = \frac{b}{a}(-\delta_y - H\theta_x) \quad (5)$$

$$Y_2 = \frac{b'}{a'}(-\delta_y - H\theta_x) - l_0\psi \quad (6)$$

$$Y_3 = \frac{b'}{a'}[-\cos \alpha \delta_y - (\frac{H}{\cos \alpha} - l_0 \sin \alpha)\theta_x] \quad (7)$$

3. 実験方法

本論文では, センサ設置部のたわみ角の影響を除去することを目的としているため, ねじれ角度 $\psi = 0$ を前提とした. 図 3 に示すように, 2 台の PSD ユニットを用いて XZ 面内の相対変位 δ_x と局所回転角 θ_y の同時測定を行う. θ ステージ上に PSD ユニット 1 と 2 を設置し, 床のたわみの影響を仮想的にセンサに与える. 2 つの LED 光源は連結されて振動台によって δ_x 方向に動く. X 方向の振動と θ_y 方向の回転振動を同時に与えたときに PSD1 と PSD2 が出力する電圧を演算することによって, 変位 δ_x と角度 θ_y をリアルタイムに求める. 変位は振動台によって ± 10 [mm], 0.5 [Hz] に制御され, 回転振動は θ ステージによって振幅 ± 1.7 [mrad] (0.1 [°]), 0.9 [Hz] に制御される. 参照としてレーザ変位計とオートコリメータを用いる. 各変数は $\alpha = 30$ [°], $l_0 = 120$ [mm], $H = 3.5$ [m], $f = 100$ [mm] に設定した.

Fig. 3 Experimental setup for measuring the relative-story displacement and the inclination angle using two PSD units.

(a) Front perspective view, and (b) XZ-plane view.

4. 実験結果

図4に変位と角度の測定結果を示す。X方向の水平振動と θ_y 方向の回転振動はいずれも単振動であるにもかかわらず、PSD1および2からの出力は、図4(a)に示すように、複雑な出力波形となっている。この複雑な出力波形は、連立方程式(2)および(3)を解くことによって、変位 δ_x と角度 θ_y に分解することができる。図4(b)と(c)に示すように、計算により得られた相対変位と角度は、参照と良く一致していることがわかる。参照からの乖離は、相対変位では最大で約0.15 [mm]であり、角度では最大で約0.1 [mrad]であった。このことは、検出器自身が回転しても正確な相対変位を得られることを示している。

Fig. 4 The results of the dynamic experiments by using the shaking table and the θ -stage.

(a) The output voltages from PSDs, (b) the calculated displacement δ_x , and (c) the calculated angle θ_y .

5. 結 語

本研究では、正確な層間変位計測を目的として、センサ自身の局所回転角と層間変位とを分離する方法を提案し、実験によって計測精度を検証した。PSD とレンズからなるセンサユニット、および LED 光源から構成される水平変位検出器を 3 組使用することによって、局所回転角と層間変位とを同時に測定できる新しいセンサを開発した。このセンサでは、3 つの PSD ユニットからの出力に基づく 5 元連立方程式が得られ、それを解くことによって正確な相対変位 (δ_x, δ_y) を得る。検証試験では、2 台の PSD ユニットの向きを角度差 30 [°] に設定し、XZ 面内の相対変位 δ_x と局所回転角 θ_y の分解を行った。参照からの乖離は、相対変位では約 0.15 [mm]、角度では約 0.1 [mrad] であった。これらの結果は、床のたわみ角の影響を除去した正確な層間変位計測が可能であることを示している。特に、地震時にも不動である参照点を建築物の内側にも外側にも必要とせず、建築物内部にセンサを設置することで層間変位と局所回転角を測定できることは、このセンサの特筆すべき長所である。今後、実建物に設置して層間変位計測を行い、実用性を向上させたい。

謝 辞

本研究は、早稲田大学グローバル COE プログラム「アンビエント SoC 教育研究の国際拠点」(文部科学省研究拠点形成費補助金) および科研費若手研究 B (21710172)、科研費基盤研究 B (21360271) により助成を受けた。

文 献

- (1) Matsuya, I. et al., “Development of Lateral Displacement Sensor for Real-Time Detection of Structural Damage”, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol.6, No.3 (2011), pp.266-272.
- (2) 畑田朋彦 ほか, “起震機加振実験による非接触型センサを利用した実建物の層間変位計測”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.653 (2010), pp.1257-1264.
- (3) Isawa, T., Ogata, Y. and Fujita, Y., “Proposal of the Displacement Measurement System between Layers with Steel Wire: Part 1: Outline of the Displacement Measurement System between Layers”, *Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. B-2*, (2008), pp.171-172.
- (4) Oshima, M. et al., VHS camcorder with electronic image stabilizer, *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol.35, No.4 (1989), pp.749-758.
- (5) Olaszek, P., Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method, *Measurement*, Vol.25 (1999), pp.227-236.
- (6) Park, J. W., Jung, H. J. and Lee, J. J., Vision-Based Displacement Method for High-Rise Building Structures using Partitioning Approach, *Proceedings of the fifth international workshop on advanced smart structures technology (ANCRiSST)*, (2009), pp.122-129.
- (7) 松谷 巖 ほか, “光位置検出素子を利用した非接触型相対変位計測システム”, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.33 (2010), pp. 469-472.