構造ヘルスマニタリングのための 5 自由度層間変位センサの開発*

松谷 巖^{*1}, 片村 立太^{*2}, 伊庭 美麓^{*3}, 近藤 秀昭^{*3}, 金川 清^{*3}, 畑田 朋彦^{*4}
仁田 佳宏^{*5}, 谷井 孝至^{*3}, 庄子 習一^{*6}, 西谷 章^{*3}, 大泊 巖^{*3}

Development of 5-DOF Relative-Story Displacement Sensor for Structural Health Monitoring

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

^{*1} Nagaoka University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan

We have developed a novel relative-story displacement sensor for structural health monitoring which is capable of measuring the 5-DOF movement of building layers. Three pairs of infrared-light emitting diode arrays and position sensitive detector units were used for simultaneously measuring the relative displacement, the local inclination angle, and the torsion angle between two adjacent layers. For verification, laboratory tests were carried out using a shaking table, a motorized micrometer, and a rotation stage. In the static experiment, it is verified that the local inclination angle and the torsion angle can be measured as well as the relative-story displacement using the sensor system. The resolution of the sensor system in the displacement measurement, that in the inclination angle measurement, and that in the torsion angle measurement were evaluated to be 0.10 mm, 34.4 μ rad, and 14.6 μ rad, respectively. In the dynamic response experiment, the accuracy of the sensor system was experimentally evaluated to be 0.20 mm in the relative-displacement measurement, 110 μ rad in the inclination angle measurement, and 90 μ rad in the torsion angle measurement, respectively. These results indicate that the developed sensor system has a sufficient accuracy for structural health monitoring.

Key Words : Structural Health Monitoring, Relative-Story Displacement, Local Deformation, 5-DOF Measurement, Position Sensitive Detector, PSD

1. 緒 言

近年、地震や自然災害等に対する建築構造物の損傷や破壊などの現象を、センサで計測して評価する技術の確立が強く望まれている⁽¹⁾⁽²⁾。特に、地震力が加わったときの建築構造物は、上下の層が水平にずれる現象（層間変位）が生じ、それを計測することで直接的な損傷の評価が可能となるため、正確な層間変位計測をベースとした新しい損傷評価の枠組みを構築する気運が高まっている⁽³⁾。図 1 に建築構造物の層間に地震力が印加されたときの、5 自由度の挙動を示す。ここで層間変位とは、建築物のある層における床と天井の相対的な変位 (δ_x , δ_y) を指す。正確な層間変位を測定するためには上下の層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

* 原稿受付 2011 年 10 月 17 日

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学工学部機械系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1), (元 早稲田大学理工学術院)

^{*2} 正員, 鹿島建設技術研究所

^{*3} 早稲田大学理工学術院

^{*4} 鹿島技術研究所

^{*5} 足利工業大学工学部建築学科

^{*6} 正員, 早稲田大学理工学術院

E-mail: matsuya@mech.nagaokaut.ac.jp

がある。しかしながら、地震力によって測定器設置点 O は局所的に変形し、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問題である⁽⁴⁾。したがって、正確な層間変位を計測するためには、層間変位 (δ_x, δ_y) だけでなく、センサ設置部のたわみ角 (θ_x, θ_y) および層間のねじれ角度 ψ も同時に計測できるシステムを構築する必要がある。本研究では、測定器設置点 O の対面（図1では天井面）の、 XY 軸周りの回転については無視している。我々のこれまでの研究で、天井面に LED 光源を配置し、床に光位置検出素子（PSD）とレンズを組み合わせたセンサユニットを配置して層間変位計測を行う場合、天井の LED 光源は拡散光源と見なせるため、天井面の XY 軸周りの回転は極めて影響が小さいためである⁽³⁾⁽⁶⁾。なお、 Z 方向の相対的な変位（上下動）が全く発生しないことを仮定している。

地震動による構造物のたわみ角の応答は $DC \sim 20$ 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、上記のたわみ角やねじれ角を検出できない⁽⁵⁾。上下の層に配置した加速度センサや速度センサからのデータを積分することによって得られた変位では、積分時の誤差が大きいことと、建築構造物が損傷を受けたときの 1 mm 以下の微小な非線形挙動を計測できない⁽⁶⁾。また、多自由度の計測技術を層間変位計測に応用している例では、センサ自身の回転角の計測ができないために不動点に設置したセンサの存在が必要不可欠であり、建築物の任意の層のみで測定を完結できないことが弱点となっている⁽⁷⁾。

本研究では、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を3組使用することによって5自由度層間変位センサを構成し、センサ自身が回転しても正確な層間変位計測を実現する。また、5自由度の計測における変位分解能に着目し、実験により各要素の最適な構成について議論する。

Fig. 1 Schematic diagram of the 5-DOF movement of building layers. Here, (δ_x, δ_y) shows the relative-story displacement, ψ shows the torsion angle of the upper layer relative to the lower layer, (θ_x, θ_y) shows the inclination angle of the lower layer.

Fig. 2 Schematic diagram of the 5-DOF relative-story displacement sensor. (a) Birds eye view. (b) Cross-section view.

2. 測定原理とセンサの構成

図2に5自由度層間変位センサの概要図を示す．光位置検出素子（PSD）とレンズを組み合わせたセンサユニットを構造物の原点（0, 0, 0）に固定し，計測ターゲットとしての赤外線 LED 光源を対向面（0, 0, H ）に固定することで水平方向の層間変位を計測する⁽⁸⁾．センサユニット自身の回転角度成分を変位成分から除去するために，さらに2台のセンサユニットを（ l_0 , 0, 0）と（0, l_0 , 0）に追加し，それぞれ X, Y 方向に角度 α で傾斜配置する．また，計測ターゲットの光源を対向面（ $-d_0$, 0, H ）と（0, $-d_0$, H ）に固定する．これら3組のセンサユニットで同時計測したデータを演算することによって，2方向の層間変位（ δ_x , δ_y ），2方向のセンサ設置部の傾斜角度（ θ_x , θ_y ），および鉛直方向のねじれ角度 ψ を導出する．なお，赤外線の信号光から外光を除去するために，各センサユニットに IR-80 フィルタを搭載しており，蛍光灯環境下でも十分な計測精度を維持できることを確認した．以下，式（1），（2）に層間距離 H とレンズ焦点距離 f ，レンズ倍率 b/a の関係を示し，式（3），（4）に3組の PSD 上の光スポットの位置（ X_1 , Y_1 , X_2 , Y_2 , X_3 , Y_3 ）[mm]と各パラメータ（ δ_x , δ_y , θ_x , θ_y , ψ ）の関係を示す⁽⁹⁾．

$$H = a + b = (a' + b') \cos \alpha \quad (1)$$

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

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{a} & \frac{b}{a}H & 0 \\ -\frac{b'}{a'}\cos\alpha & \frac{b'}{a'}(\frac{H}{\cos\alpha} - l_0\sin\alpha) & 0 \\ -\frac{b'}{a'} & \frac{b'}{a'}H & l_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \theta_y \\ \psi \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{a} & -\frac{b}{a}H \\ -\frac{b'}{a'}\cos\alpha & \frac{b'}{a'}(\frac{H}{\cos\alpha} - l_0\sin\alpha) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_y \\ \theta_x \end{pmatrix} \quad (4)$$

3. 実験方法

図3に実験概要図を示す．開発したセンサが高分解能のもとで5自由度の計測を実現できるかどうかを検証するためには，式（3）に示すように，最低限3つのパラメータである，変位 δ_x ，傾斜角度 θ_y ，ねじれ角度 ψ を分離して計測できることを示す必要がある．層間距離 H は 2.7 m，センサ間角度 α は 30°，センサ間距離 l_0 は 120 mm，レンズの焦点距離 f は 100 mm に設定した．小型振動台の上に回転ステージを配置し，その上に連結した3台のセンサユニットを固定した．振動台によって X 方向に変位 δ_x ，回転ステージによってねじれ角度 ψ ，電動マイクロメータによって傾斜角度 θ_y を発生させることができる．参照として，レーザ変位計とオートコロメータを用いた．なお，層間変位の発生を実験室で容易に再現するために，今回は天井面を基準としてセンサユニット側を変位させたが，逆にセンサユニット側を固定して天井に配置した LED 光源側を相対的に変位させても等価である．

最初に，センサに対して静的に，変位 δ_x ，傾斜角度 θ_y ，ねじれ角度 ψ を個別に与えることによって，キャリブレーションを行う．この静的実験において， ± 5 mm の変位 δ_x ， ± 2 mrad の傾斜角度 θ_y ， ± 1.5 mrad のねじれ角度 ψ をセンサに与えて式（3）の関係を求め，ヤコビ行列の解析によって，本構成における変位 δ_x ，傾斜角度 θ_y ，ねじれ角度 ψ の分解能をそれぞれ導出する．

Fig. 3 Photographs of the experimental setup. (a) Arrangement of three pairs of the LED arrays and the PSD units. Although we actually used the infrared LEDs in this experiment, red LEDs are shown in this photograph alternatively. (b) Close-up view of the sensor unit. The rotation stage was hidden under the PSD units.

動的実験では、振動台を用いて振幅 5 mm の変位 δ_x を 0.6 Hz の正弦波として与え、電動マイクロメータを用いて同時に、 ± 2 mrad の傾斜角度 θ_y を 0.4 Hz で与え、回転ステージを用いて、さらに同時に、 ± 1.7 mrad のねじれ角度 ψ を 0.6 Hz で与える。そして、式 (3) の逆行列から各パラメータを独立して算出することによって、センサの動的な応答性を評価する。

最後に、レンズの焦点距離 f や角度 α 、距離 H を変化させたときの変位分解能を算出し、センサの最適な構成について検討する。

4. 結果と考察

4・1 静的実験

静的実験における各 PSD からの電圧出力を図 4 に示す。図 4 (a) は、加振機によってセンサに変位のみを与えたときの出力を示し、図 4 (b) は、電動マイクロメータによってセンサに傾斜角度のみを与えたときの出力を示し、図 4 (c) は、回転ステージによってセンサにねじれ角度のみを与えたときの各 PSD からの出力を示している。いずれのグラフにおいても測定範囲内で良好な線形性を示している。これらの実験結果から直線の傾きを抽出し、行列にまとめたものを式 (5) に示す。

$$\begin{pmatrix} V_{x1} \\ V_{x2} \\ V_{x3} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0790 & 0.2174 & -0.0012 \\ -0.0599 & 0.2073 & -0.0028 \\ -0.0656 & 0.1841 & 0.1000 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \theta_y \\ \psi \end{pmatrix} \quad (5)$$

(V_{x1} , V_{x2} , V_{x3}) は、PSD1~3 の X 方向の電圧出力であり、単位は[V]である。相対変位 δ_x の単位は[mm]、傾斜角度 θ_y の単位は[mrad]、相対的なねじれ角度 ψ の単位は[mrad]である。事前に計測した、PSD 上の光位置に対する PSD1~3 の電圧出力の係数は、それぞれ 1.962 V mm^{-1} , 1.898 V mm^{-1} , 1.937 V mm^{-1} であった。これらの係数を用いて式 (5) を書き換えると、式 (3) の実測値である式 (6) が得られる。

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0403 & 0.1108 & -0.0006 \\ -0.0316 & 0.1092 & -0.0015 \\ -0.0339 & 0.0950 & 0.0516 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \theta_y \\ \psi \end{pmatrix} \quad (6)$$

Fig. 4 Results from the static experiments. (a) Output voltages from PSD units when the PSD units are displaced by δ_x . (b) Output voltages from PSD units when the PSD units are inclined by θ_y . (c) Output voltages from PSD units when the PSD units are rotated by ψ .

ここで、本計測システムの特性を評価する上で最も重要な指標は分解能と考えられるため、センサの構成に対する各パラメータの分解能を導出する。複合的な計測システムの分解能は式 (7), (8) のように表現することができる⁽¹⁰⁾。

$$\begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \end{pmatrix} = J \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \psi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial \delta_x} & \frac{\partial X_1}{\partial \theta_y} & \frac{\partial X_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial X_2}{\partial \delta_x} & \frac{\partial X_2}{\partial \theta_y} & \frac{\partial X_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial X_3}{\partial \delta_x} & \frac{\partial X_3}{\partial \theta_y} & \frac{\partial X_3}{\partial \psi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \psi \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$R_i = \left[\sum_{j=1}^3 (J^{-1}_{ij} \cdot \sigma_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

J はヤコビ行列を示しており、 R_1 は変位計測における分解能を、 R_2 は傾斜角度の計測における分解能を、 R_3 はねじれ角度の計測における分解能を、それぞれ示している。分解能 $R_1 \sim R_3$ はまた、PSD素子そのものの分解能にも依存しており、式(8)における σ_1 、 σ_2 、 σ_3 はそれぞれPSD1～3の分解能を示している。式(6)から、ヤコビ行列 J およびその逆行列 J^{-1} は、以下の式(9)、(10)のように表すことができる。

$$J = \begin{bmatrix} -0.0403 & 0.1108 & -0.0006 \\ -0.0316 & 0.1092 & -0.0015 \\ -0.0339 & 0.0950 & 0.0516 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} -123.1 & 123.0 & 2.145 \\ -35.82 & 44.73 & 0.8839 \\ -14.91 & -1.542 & 19.16 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(8)、(10)によって本計測システムにおける各パラメータの分解能は、以下の式(11)～(13)のように導出することができる。PSD素子の分解能については、データシートの値を用いて $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0.6 \mu\text{m}$ とした。

$$R_1 = \sqrt{(-123.1 \times 0.6)^2 + (123.0 \times 0.6)^2 + (2.145 \times 0.6)^2} = 104.4 [\mu\text{m}] \quad (11)$$

$$R_2 = \sqrt{(-35.82 \times 0.6)^2 + (44.73 \times 0.6)^2 + (0.8839 \times 0.6)^2} = 34.39 [\mu\text{rad}] \quad (12)$$

$$R_3 = \sqrt{(-14.91 \times 0.6)^2 + (-1.542 \times 0.6)^2 + (19.16 \times 0.6)^2} = 14.60 [\mu\text{rad}] \quad (13)$$

構造ヘルスモニタリングで要求される層間変位計測の分解能は0.1 mm程度（建築構造物が損傷を受けたときのクラック幅や残留変位量のオーダー）であり、式(11)に示された本システムの変位分解能は、十分に高いものであると評価できる。式(12)に示された傾斜計測における分解能は、層間距離2.7 mにおいて層間変位に換算すると、 $2.7 \text{ m} \times \tan(34.39 \mu\text{rad}) = 0.093 \text{ mm}$ となるので、十分に高い分解能であると考えられる。式(13)のねじれ角度計測における分解能も、同様に十分に高い分解能であるとして評価できる。

4・2 動の実験

図5に動の実験の結果を示す。この実験では、振動台と電動マイクロメータ、回転ステージを同時に動作させて、3台のPSDユニットによって相対変位 δ_x 、傾斜角度 θ_y 、ねじれ角度 ψ が同時に計測される。図5(a)は各PSDからの電圧出力であり、脈絡の無い波形が示されている。式(5)の逆行列によって以下の式(14)を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} \delta_x \\ \theta_y \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -62.61 & 64.72 & 1.061 \\ -18.19 & 23.51 & 0.4401 \\ -7.578 & -0.8324 & 9.886 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_{x1} \\ V_{x2} \\ V_{x3} \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(14)によって、各PSDからの電圧出力から相対変位 δ_x および傾斜角度 θ_y 、ねじれ角度 ψ を得ることができる。図5(b)、(c)、(d)は、演算による変位 δ_x 、傾斜角度 θ_y 、ねじれ角度 ψ と、参照との比較を示している。参照からの乖離は、それぞれ最大で0.2 mm、0.12 mrad、0.09 mradであり、実用上十分に小さい誤差であるとい

える。これらの結果は、実建物にセンサを設置し、局所的なたわみが発生しても、正確な層間変位計測が可能であることを示している。

Fig. 5 The results from the dynamic response experiment. (a) The output voltages from three PSDs, (b) the calculated displacement δ_x , (c) the calculated inclination angle θ_y , and (d) the calculated torsion angle ψ .

4・3 センサ構成の最適化

センサの分解能は2台のPSDユニット間の角度 α とレンズの焦点距離 f と、層間距離 H によって決まる。したがって、我々は分解能の観点からこれらの最適な組み合わせを決定する必要がある。式(2)、(3)、(8)より、角度 α と焦点距離 f 、層間距離 H を様々に変えたときの、変位計測における理論的な分解能 R_1 を図6に示す。図6(a)は焦点距離 f を100 mmで固定し、角度 α と層間距離 H を変えたときの変位分解能を、図6(b)は層間距離 H を2.7 mに固定し、角度 α を変えたときの変位分解能を、図6(c)は角度 α を 30° に固定し、層間距離 H を変えたときの変位分解能を、それぞれ表している。センサの分解能は、角度 α を小さくしたときは急激に悪化し、層間距離 H を大きくしたときは徐々に悪化する。層間距離 H が決まっているとき、設置スペースを可能な限り小さくするためには、角度 α と焦点距離 f を小さくする必要があるが、変位分解能を上げるためには逆に角度 α と焦点距離 f を大きくする必要がある。また、焦点距離 f を大きくすると、レンズ倍率が大きくなるため、PSD上を動くスポット光の範囲が大きくなり、大面積の素子が必要となってしまう。我々は、構造ヘルスモニタリングで要求される変位分解能として、0.1 mmを想定している。建築構造物での一般的な例として、層間距離 H が2.7 mで焦点距離 f が100 mmの標準的なレンズを選択したとき、変位分解能の要求を満たす角度 α は 30° 以上となる。このため、今回のセンサの構成において角度 α を 30° に設定した。

Fig. 6 Theoretical calculation for the resolution in relative displacement measurement using the 5-DOF relative-story displacement sensor. (a) Resolution in the displacement measurement when the focal length is fixed to be 100 mm. (b) Resolution in the displacement measurement when the distance H is fixed to be 2.7 m. (c) Resolution in the displacement measurement when the angle α is fixed to be 30° .

5. 結 論

建築構造物のヘルスモニタリング用途において正確な層間変位計測を実現するために、層間変位と傾斜角度、ねじれ角度を同時計測可能な5自由度層間変位センサを構築し、静的および動的な実験による検証を行った。また、変位分解能の理論計算から、センサの最適な構成について検討した。静的実験および理論計算により得られた分解能は、変位計測において $104 \mu\text{m}$ 、傾斜角度計測において $34.4 \mu\text{rad}$ 、ねじれ角度計測において $14.6 \mu\text{rad}$ であった。動的実験における参照からのセンサ出力の乖離は、変位計測において $200 \mu\text{m}$ 、傾斜角度計測において $110 \mu\text{rad}$ 、ねじれ角度計測において $90 \mu\text{rad}$ であった。また、変位分解能の理論計算から、センサの最適な構成について検討した。層間距離 2.7 m において一般的な焦点距離 100 mm のレンズを採用したとき、PSD ユニット間の角度を 30° 以上に設定すれば、目標とする変位分解能 0.1 mm を達成できることを示した。これらの結果は、考案した5自由度層間変位センサが、構造ヘルスモニタリングにおいて有効なアプリケーションであることを示している。今後、実建物に本センサを取り付けて加震実験等を行うことによって、センサの有効性と限界についてさらに検証を深めてゆきたい。

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) Nitta, Y., Nishitani, A., and Spencer, Jr., B. F., "Semiactive Control Strategy for Smart Base Isolation Utilizing Absolute Acceleration Information", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol.13 (2006), pp.649-659.
- (2) Lynch, J. P., and Loh, K. J., "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring", *The Shock and Vibration Digest* Vol.38, No.2 (2006), pp.91-128.
- (3) 畑田朋彦, 高橋元一, 鈴木康嗣, 松谷 巖, 金川 清, 仁田佳宏, 西谷 章, "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.
- (4) 松谷 巖, 片村立太, 佐藤摩弥, 近藤秀昭, 伊庭美麗, 金川 清, 仁田佳宏, 谷井孝至, 庄子習一, 西谷 章, 大泊 巖, "局所変形角と相対変位を測定可能な構造ヘルスモニタリング用層間変位センサの開発", 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.777 (2011), pp.736-740.
- (5) Oshima, M., Hayashi, T., Fujioka, S., Inaji, T., Mitani, H., Kajino, J., Ikeda, K., and Komoda, K., "VHS Camcorder with Electronic Image Stabilizer", *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol.35, No.4 (1989), pp.749-758.
- (6) Matsuya, I., Tomishi, R., Sato, M., Kanekawa, K., Nitta, Y., Takahashi, M., Miura, S., Suzuki, Y., Hatada, T., Katamura, R., Tanii, T., Shoji, S., Nishitani, A., and Ohdomari, I., "Development of Lateral Displacement Sensor for Real-Time Detection of Structural Damage", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol.6, No.3 (2011), pp.736-740.
- (7) Jeon, H., Bang, Y., and Myung, H., "A Paired Visual Servoing System for 6-DOF Displacement Measurement of Structures", *Smart Materials and Structures*, Vol.20, No.4 (2011), pp.045019.
- (8) 松谷 巖, 大塩 真, 富士良太, 佐藤摩弥, 金川 清, 高橋元一, 三浦 悟, 鈴木康嗣, 畑田朋彦, 片村立太, 仁田佳宏, 谷井孝至, 庄子習一, 西谷 章, 大泊 巖, "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.
- (9) Matsuya, I., Katamura, R., Sato, M., Iba, M., Kondo, H., Kanekawa, K., Takahashi, M., Hatada, T., Nitta, Y., Tanii, T., Shoji, S., Nishitani, A., and Ohdomari, I., "Measuring Relative-Story Displacement and Local Inclination Angle Using Multiple Position-Sensitive Detectors", *Sensors*, Vol.10, No.11 (2010), pp.9687-9697.
- (10) Kim, J. A., Bae, E. W., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., "Design Methods for Six-Degree-of-Freedom Displacement Measurement Systems Using Cooperative Targets", *Precision Engineering*, Vol.26, No.1 (2002), pp.99-104.