

# 自動巡回ロボットによるひずみ可視化デバイスの撮影と計測誤差原因の撮影角度の算出

○青野 鉄平<sup>1</sup>、高木 健<sup>1</sup> (広島大)、  
大町 正和<sup>2</sup>、梅本 秀二<sup>2</sup> (計測リサーチコンサルタント)

## Shooting of Strain visualization Device by automatic patrol robot and Calculation of shooting angles that cause measurement errors

○Teppei Aono<sup>1</sup>, Takeshi Takaki<sup>1</sup> (Hiroshima Univ.),  
Masakazu Omachi<sup>2</sup>, Shuji Umemoto<sup>2</sup> (keisoku Research Consultant Co.)

Strain visualization devices, which can measure strain by taking pictures with a camera, are suitable for long-term monitoring of building strain. Since it is labor-intensive to take pictures of multiple devices installed in a large building, we aim to automate the process by using a robot. In this study, we report on the results of the automatic patrol of the devices in a simple environment and the calculation of the shooting angles from the LiDAR sensor and camera, which are the cause of errors.

### 1. はじめに

高度経済成長期に建設された建物やトンネル、橋梁などの社会インフラは老朽化の問題を抱えている。これらを長期的にモニタリングするために、重要なメンテナンス項目としてひずみがある。本研究で用いたモアレ縞を応用したひずみ可視化デバイスは、ひずみを低コストかつ電源不要で計測できる特長がある。

ひずみ可視化デバイスのひずみ計測方法は二つある。一つは目視にて表示される文字を読み取る方法で、もう一つはデジタルカメラで撮影した画像を解析する方法である。画像解析用の画像は本デバイスの正面より撮影できることが理想的であるが、正面に対し角度が生じた場合、計測したひずみに誤差が生じる。その誤差は撮影角度により求められることが分かっている[1]。

大きな建造物に複数設置されたひずみ可視化デバイスを撮影するためには人手がかかるため、ロボットによる撮影の自動化を目指す。本稿では簡易的な環境ではあるが自動巡回しひずみ可視化デバイスを撮影できたことおよび、誤差原因となる撮影角度をLiDARセンサとカメラから算出し補正することで、より高精度なひずみを計測できたことを報告する。



図 1 SLAM 中の自動巡回ロボット

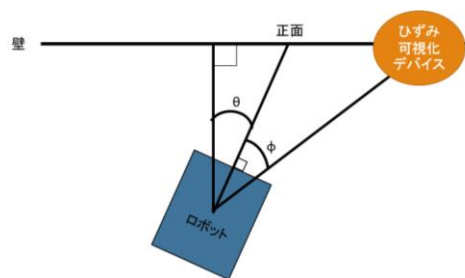


図 2 計測する撮影角度 $\theta$ 、 $\phi$ [°]

### 2. 自動巡回撮影のアルゴリズム

#### 2.1 全体の動作の流れ

事前に図 1 に示す自動巡回ロボットで巡回したい場所の地図をLiDARセンサにて環境を計測しSLAMを用いて作成する。その後、巡回ポイントとひずみ可視化デバイスの位置を設定し、自動で巡回し撮影を行う。

ひずみ可視化デバイスを撮影するときに、図 2 のようにLiDARセンサでロボットの正面と壁との傾き $\theta$ 、カメラでロボットの正面とひずみ可視化デバイスとの傾き $\phi$ を算出する。撮影角度 $\alpha$ [°]は $\theta$ と $\phi$ の合計である。その後、カメラで撮影した画像を画像解析しひずみを算出する。その後、撮影角度より生じる誤差を計算し補正する。

#### 2.2 ロボット正面と壁との傾き $\theta$

ロボットの正面と壁との傾き $\theta$ の測定にはLiDARセンサを用いる。環境とLiDARセンサの中心までの距離を $r$ [m]、計測した方向の角度を $\theta'$ としたとき、計測した環境の座標 $(x, y)$ は下式となる。

$$x = r \cos \theta' \quad (1)$$

$$y = r \sin \theta' \quad (2)$$

座標 $(x, y)$ を最小二乗法にて $y = ax + b$ に近似する。このとき傾き $a$ は下式となる。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

よって、角度 $\theta$ は下式より求まる。

$$\theta = \arctan a \quad (4)$$

### 2.3 ロボット正面と本デバイスとの傾き $\phi$

ロボット正面と本デバイスとの傾き $\phi$ の測定にはカメラを用いる。図3に本デバイスとカメラと視野角 $\beta$ の関係を示す。本デバイスの中心と視野の中心までの画素数を $r[\text{px}]$ とする。このとき、カメラと画像までの距離を $z[\text{px}]$ は、水平方向の画素数を $X$ とすると下式となる。

$$z = \frac{X}{2} \times \frac{1}{\tan \beta/2} \quad (5)$$

よって、傾き $\phi$ は逆正接を用い下式より求まる。

$$\phi = \arctan \frac{r}{z} \quad (6)$$

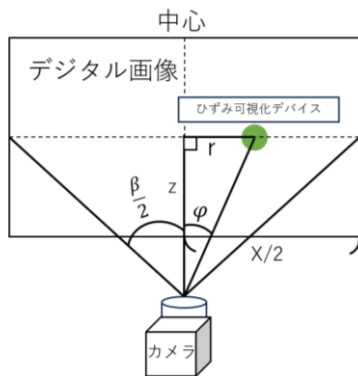


図3 カメラの視野角および角度 $\phi$ の幾何学的関係

### 2.4 撮影角度によるひずみ誤差の算出

ひずみ可視化デバイスはモアレ縞の原理を用いてひずみによって生じた変位を視覚的に拡大している。モアレ縞はピッチの少し異なる直線格子を重ねることで生じさせている。この直線格子は2枚のガラスにフォトマスクの技術を用いて印刷してある。この2枚のガラスを重ねてできる隙間を $d$ とする。 $d$ が0 [mm]であれば、どの角度から撮影しても計測誤差は生じないが、隙間 $d$ がある場合は、撮影角度 $\alpha$ によって計測したひずみに誤差 $\epsilon_{\text{error}}[\mu\epsilon]$ が下式のように生じる[1]。

$$\epsilon_{\text{error}} = \frac{d \cdot \tan \alpha}{L} \quad (7)$$

ただし、 $L[\text{mm}]$ は標点間距離である。 $d$ 、 $L$ は本デバイス製造時に決まる値であるため、撮影角度 $\alpha$ が計測できれば、誤差 $\epsilon_{\text{error}}$ を求めることができる。

## 3. 実験

本実験では生じたひずみを計測するのではなく、ロボットにより本デバイスを自動で撮影し画像よりひずみが適切に算出できるかを検証する。検証方法としては、事前に正面より撮影した画像より解析して得られたひずみを基準として、ロボットによって撮影した画像でも同様にひずみが求められるかを検証する。3.1節では基準となるひずみについて、3.2節でロボットによって撮影した画像より求めたひずみについて述べる。

### 3.1 基準となるひずみ値の計測

基準となるひずみ値を求めるために、事前にほぼ正面から撮影した画像を解析しひずみ値を求めた。図1

のように二箇所の本デバイスを設置し、それぞれ、デバイス1、デバイス2とする。ひずみ値の算出は画像を10枚撮影し、その平均値を用いている。また式(7)から撮影角度 $\alpha$ によって生じたひずみ誤差を求め補正した。これらの結果を表1に示す。

### 3.2 3回の自動撮影の解析ひずみ値の誤差補正

ロボットが本デバイスの前まで自動で移動しデバイス1、デバイス2を交互に計3セット撮影した。このとき、2.2節の述べたようにLiDARセンサを用いて角度 $\theta$ を計測した。また3.1節と同様に10枚の画像を用い、その平均値をひずみ値とした。これらより、撮影角度 $\alpha$ を算出し誤差を補正した。その結果を表2に示す。

表1の基準値と表2の計測値からその差を求め、平均平方二乗誤差を求め、また比較のため補正を加えない場合においても平均平方二乗誤差を求めた結果を表3に示す。補正を加えた方が精度よく計測できている、また補正を加えると誤差は1 $\mu\epsilon$ 程度となっており、開発したロボットによって十分な精度でひずみを計測できることが分かった。

表1 基準となる事前撮影によるひずみ値

	デバイス1	デバイス2
ひずみ解析値 $[\mu\epsilon]$	-106.6	-0.1
撮影角度 $[\circ]$	-0.31	-0.38
誤差補正 $[\mu\epsilon]$	-0.15	-0.21
補正後ひずみ値 $[\mu\epsilon]$	-106.7	-0.1

表2 自動巡回撮影の計測によるひずみ値

	計測回数	デバイス1	デバイス2
ひずみ解析値 $[\mu\epsilon]$	一回目	-101.7	2.0
	二回目	-105.5	2.1
	三回目	-104.9	-1.7
撮影角度 $[\circ]$	一回目	-7.28	-4.45
	二回目	-3.04	-5.47
	三回目	-3.74	-0.38
補正後ひずみ値 $[\mu\epsilon]$	一回目	-105.0	0.0
	二回目	-106.9	-0.4
	三回目	-106.6	-1.9

表3 基準となるひずみ値と自動撮影によるひずみ値との平均平方二乗誤差

	デバイス1	デバイス2
補正前	3.5 $[\mu\epsilon]$	2.0 $[\mu\epsilon]$
補正後	1.0 $[\mu\epsilon]$	1.1 $[\mu\epsilon]$

## 4. おわりに

自動でひずみ可視化デバイスを撮影するロボットを開発し、照明などが十分に整った環境では、計測精度は平均平方二乗誤差で1 $[\mu\epsilon]$ 程度となり、十分な精度で自動巡回し計測できた。

### 参考文献

- [1] 梅本 秀二、高木 健、石井 抱、大町 正和、松尾 恵輔、宮本 則幸、松田 浩：ひずみ可視化デバイスの撮影角度がひずみ算出精度に与える影響、実験力学、20巻、3号、187-193、(2020)