

I-23 垂直度判定センサの開発と写真測量への応用

Development of Perpendicular Sensor and Its Application for Photogrammetry

郭福会¹ 湊淳² Ravindra Jayasekara³ 桑原祐史⁴ 小澤哲² 土田寛⁵

Fuhui Guo, Atsushi Minato, Ravindra Jayasekara, Yuji Kuwahara, Satoru Ozawa, Hiroshi Tsuchida

抄録: 垂直度判定センサの開発, および LED を取り付け付けたポールを用いた写真測量手法について報告する. 垂直度判定センサは鉛直方向に LED, 気泡管, フォトトランジスタから構成される. センサが傾くことによりフォトトランジスタの受光量が変化し, 167 (mV/deg)の感度で垂直度の判定ができる. 今回提案する写真測量では, ポールに 2 個の LED を設置し, ポールが垂直のときに LED が点灯するように設定する. このポールをデジタルカメラで撮影する. LED の間隔が既知であればポールの位置を測定することが可能である. 実験の結果 30m 程度の距離範囲において距離方向の精度が 23cm, 縦および横方向の精度が 5cm 程度で測量が可能であることが明らかになった.

Abstract: We proposed a method to detect perpendicular and photogrammetry method. Developed perpendicular sensor consists of a bubble tube, an IR LED, and a phototransistor. When the sensor inclines, the bubble moves and the received photo-signal changes. The sensitivity of the system was experimentally evaluated. The sensitivity was 167 mV/deg which is enough for perpendicular detection. Our photogrammetry method uses a pole with two visible LEDs. If the pole is perpendicular and the image of pole is obtained by a perpendicular camera, the position of the pole is measured easily. Fundamental experiments were carried out. It was found that the accuracy of distance between LED and camera is approximately 23 cm, the accuracy of position in a vertical and transverse directions are 5 cm in the measurement of up to 30 m.

キーワード: 測量, 垂直, センサ, 写真測量, デジタルカメラ

Keywords : measurement, perpendicular, sensor, photogrammetry, digital camera

1. はじめに

災害地などにおいて短時間に測量を行い, 現状を把握することは非常に重要である. 測量の精度が多少悪くても, 迅速性, 安全性, 簡便性などが重視される場合がある.

トータルステーションは, トランシットと光学測距儀の機能を併せ持つ測量機器で高い精度が得られるが, 価格が高いため, 発展途上国における災害地の測量などで利用するのは難しい.

災害地などにおける測量では, 公共測量などに要求される高い精度¹⁾よりも, 簡易な機材による短時間の測量が要求される場合がある. 例えば桑原らは, マーシャル諸島やスマトラにおける調査を行っている^{2,3)}. 島嶼国では日本で設置されていた三角点または水準点のような既知点が配置されていない場合が多い. このため, 既知点を用いて計測値の是非を確認する精度測

量は難しい. このため計測値の平均値を最確値とするデータの扱いを通常行うが, 災害調査や環境調査など広領域を対象とし, 作業時間制約がある場合, そして安全確保が重要な場合には, 往復計測や複数回計測を省略し速報的な計測値で代替する場合もある.

本論文では, 垂直度判定センサの開発と, 垂直に立てた LED 搭載ポールによる簡易型写真測量手法について報告する. 災害地などにおける測量では, 簡単な機材を利用できることが有利である. 地表面の凹凸が顕著なため, 間接的な距離計測が有利である. このため速報的な計測情報として提案方法を用いることが考えられるとともに, 迅速な測量のミスを確認するために, スタジア測量結果に確認をかける利用方法が確実に望める利用分野だと考えられる.

一般に測量ではトランシットでスタッフを目視するが, この際スタッフを垂直に立てる必要がある. スタッフに気泡管を付けて, 目視によりスタッフの垂直を

1 : 学生員 茨城大学大学院理工学研究科応用粒子線科学専攻
(〒316-0034 日立市東成沢町 3-14-9-8, Tel :090-9372-6300, E-mail : gfhibri@hotmail.co.jp)
2 : 非会員 茨城大学大学院理工学研究科応用粒子線科学専攻
3 : 非会員 日立製作所
4 : 会員 茨城大学工学部都市システム工学科
5 : 非会員 有限会社 ジオテック

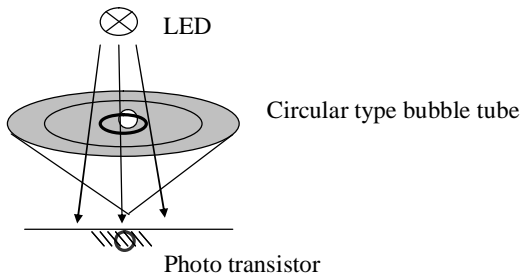


図 - 1 : 気泡管を用いた垂直判定センサの概念図

確認する。しかしトランシット側では、本当にスタッフ
が垂直であるか知ることができない。そこで筆者ら
は気泡管に赤外線を送受信回路を組み合わせた垂直度
判定センサを開発した^{4,5)}。開発したセンサを使えば、
気泡から目視で垂直度を判定すると同時に、自動的
に垂直度を判定し LED などトランシット側に知ら
せることもできる。

デジタルカメラを用いた写真測量では、ステレオカ
メラによる測量方法などがよく用いられる。ステレオ
カメラによる測量では、カメラが2台以上必要であり、
それぞれのカメラの位置を固定する必要がある。本研
究では、1台のカメラで簡単に対象物の座標を計測す
る方法を提案する。1台のデジタルカメラを固定して、
測定対象となるスタッフまたはポールに先の垂直度判
定センサと2個のLEDを設置し、装置が垂直のときに
LEDが点灯するように設定する。LEDの間隔が既知で
あれば、簡単な幾何学的関係により、装置の位置を導
出することができる。

本手法は、例えば災害地などで迅速に災害の状況
を把握したいような場合、つまり高い精度は要求され
ないが短時間に測量を行いたいような目的に効果を発
揮すると考えられる。

2. 気泡管を用いた垂直判定センサの開発

図-1に気泡管を用いた垂直判定センサの概念図を
示す。赤外LED、気泡管、フォトトランジスタを鉛直
方向に配置する。赤外LEDから出た光は、気泡管を透
過してフォトトランジスタで受光される。フォトラン
ジスタに直列につないだ抵抗の電圧はフォトラン
ジスタに入る光量に比例するので、フォトトランジ
スタの受光量が測定できる。気泡管内部の気泡は液体に
比べ屈折率が小さいので、気泡は凹レンズと同じ働き
をする。赤外LEDから出た光は気泡によって拡散され
るので気泡下部には影ができる。このため、センサが
垂直の状態、つまり気泡が中心部にあるとき、フォト
トランジスタに入る光量は小さくフォトトランジスタ
に直列につないだ抵抗の電圧は小さい。センサが傾い
て、気泡が中心からずれば、フォトトランジスタに

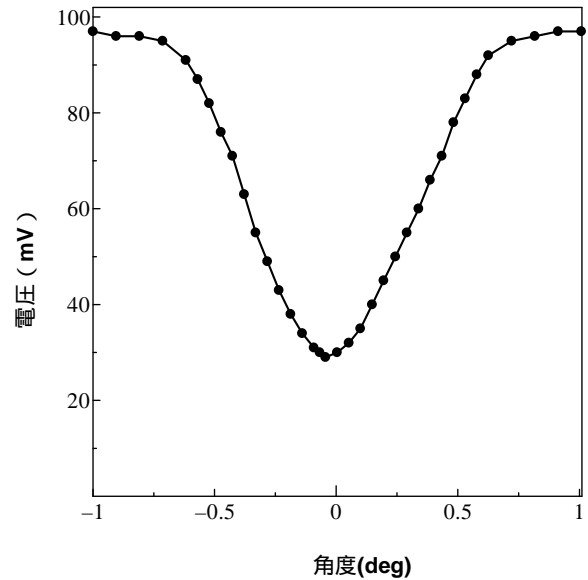


図 - 2 : フォトトランジスタの電圧の変化

入る光量は増大する。フォトトランジスタの受光径が
気泡よりも十分に小さければ、影の移動から装置の垂
直を高感度で感知することができる。

感度 30'の気泡管を使い、センサを傾けながら受信信
号の評価を行った。赤外LEDにはEL23C(Kodenshi)、
フォトトランジスタにはPT480F(Sharp)を使用した。
フォトトランジスタの口径は1mmである。可視光の
LEDでも同様の原理で垂直判定は可能であるが、外部
からの可視光が測定の際、誤差の要因となる。このた
め赤外LEDと可視光をカットするフィルタ付きのフ
ォトトランジスタを用いた。図-2に示すように2度の
範囲でセンサを傾けたところ、フォトトランジスタに
直列につないだ抵抗の電圧が変化した。本装置は基準
電圧との比較から、垂直かどうかを判定することがで
きる。0.5度(30')におけるグラフの傾き、すなわち装
置の傾斜に対する感度は167(mV/deg)である。

傾斜角の測定には、MEMS(Micro Electro Mechanical
Systems)型の加速度センサもよく用いられる。比較の
ために、安くて汎用のMEMS型加速度センサADXL202E
の感度を調べた。ADXL202EはX,Yの2軸の加速度を
求められるが、感度は5mV/deg程度であり、本論文で
提案した垂直判定センサよりも感度が低くポールの垂
直判定に利用することは難しい。

図-3に開発した垂直判定センサを示す。垂直判定セ
ンサはAD変換機能を持つワンチップマイコンATMEL
のATTiny26を使い、赤外LEDの点滅、フォトラン
ジスタの電圧の測定、垂直の判定、表示用可視LEDの
点灯などの処理を全て行う。また外部の光の影響を除
くため、赤外LEDを1kHzで点滅させ、LEDが光っ
ている場合と光っていない場合の信号の差から受光量
を求める。



図 - 3 : 開発した垂直判定センサ

3 . 垂直判定センサを用いた写真測量の原理

続いてポールに2個のLEDを設置し,デジタルカメラで撮影することによりポールの測量を行う方法について説明する.本手法では垂直に設置した2個のLEDから距離を求めるので,LEDが設置できればスタッフでもポールでも構わない.図-4に,本手法の原理を示す.まずデジタルカメラを垂直に設置する.測定対象となるポールには2個のLEDを設置し,ポールが垂直のときにLEDが点灯するように設定する.

デジタルカメラとポールが垂直で,LEDの間隔が既知であれば,以下の幾何学的関係により,ポールの位置を導出することができる.

まずカメラの座標系を(X,Y,Z)とし,Zをカメラの光軸方向にとる.投影変換^{6,7)}により,(X,Y,Z)座標上にある点と撮影画像上の点の座標(u,v)は以下の関係がある.

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[Rt]\tilde{m} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & -\alpha_u \cot \theta & U_0 \\ 0 & \alpha_v \sin \theta & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1000 \\ 0100 \\ 0010 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

はスカラー値である.θはカメラの横軸と縦軸がなす角度である.α_u, α_v, U₀, V₀, θはカメラの内部変数と呼ばれる.

理想的なカメラではα_u = α_v = α, またθ = π/2である.このとき(X,Y,Z)と(u,v)の関係は次のようになる.

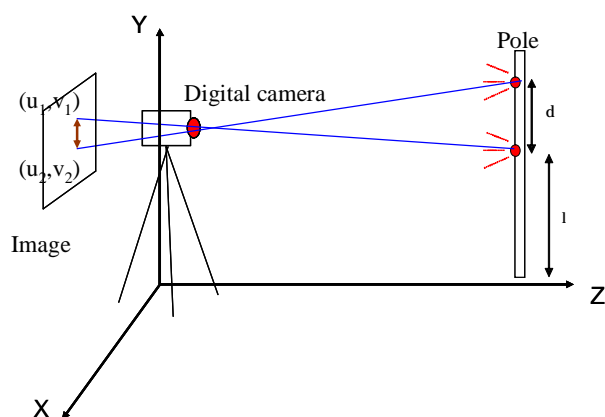


図 - 4 : 垂直判定センサを用いた写真測量の原理

$$\begin{bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha X + U_0 Z \\ \alpha Y + V_0 Z \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここでλを消去する.

$$u = \frac{\alpha X}{Z} + U_0 Z \quad (4)$$

$$v = \frac{\alpha Y}{Z} + V_0 Z \quad (5)$$

2つのLEDのうち下のLEDの座標を(X,Y,Z)とすれば,下のLEDの撮影画像上の座標(u₁,v₁)は次のようになる.

$$(u_1, v_1) = \left(\frac{\alpha X}{Z} + U_0, \frac{\alpha Y}{Z} + V_0 \right) \quad (6)$$

また2個のLEDの間隔をdとすれば,上のLEDの撮影画像上の座標(u₂,v₂)は次のようになる.

$$(u_2, v_2) = \left(\frac{\alpha X}{Z} + U_0, \frac{\alpha Y}{Z} + \frac{ad}{Z} + V_0 \right) \quad (7)$$

(u₁,v₁)と(u₂,v₂)からX方向,Y方向,Z方向に相当する値が求められる.

$$X = \frac{d}{v_2 - v_1} \left(\frac{u_2 + u_1}{2} - U_0 \right) \quad (8)$$

$$Y = \frac{d}{v_2 - v_1} \left(\frac{v_1 + v_2}{2} - V_0 \right) - \frac{d}{2} \quad (9)$$

$$Z = \frac{\alpha d}{v_2 - v_1} \quad (10)$$

図5に撮影したポールの写真の例を示す.画像上のLEDの中心の座標は画像処理ソフトなどで求められる.

本手法を実際の測量に使う場合には以下の手順で測定と解析を行えばよい.

- (1) 気泡管などを用いてカメラを垂直に固定する.
- (2) 最初はカメラとポールとの距離をメジャーなどで測定し,座標が既知の点(X₀,Y₀,Z₀)のポールの画像

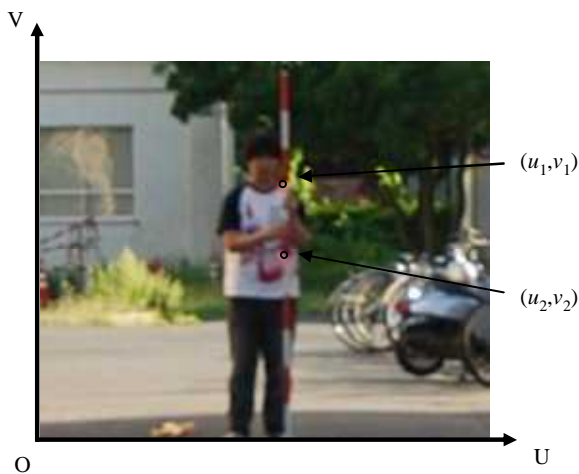


図 - 5 : 写真の例

を撮影する．これにより係数 α, U_0, V_0 を決定することができる．

(3) 続いてカメラの視野の範囲内にポールを順次置いて撮影を行う．各画像の (u_1, v_1) と (u_2, v_2) から式(8), (9), (10)によりポールの座標が求められる．

(4) カメラの視野の範囲内の測量点の撮影を終えたら, カメラを移動しまた測量を続ける．測量の間, 焦点距離は固定しておく．

4 . 垂直判定センサを用いた写真測量の検証実験

実験にはカメラ D80 (Nikon) とレンズ AF-S DX VR 18-200G (Nikon) を使用した．カメラの画素数は 3872×2592 ピクセルとした．レンズの焦点距離は 35mm に設定した．カメラには 30' の感度の気泡管を取り付けてカメラの垂直を確認した．また 2 個の赤色 LED (TLSH180P, 10000mcd) を用い 40cm 間隔で設置した．

まずはカメラの光軸方向, すなわち Z 方向の距離測定精度の評価を行った．通常トランシットを用いた測量では, 30m 程度の範囲で測量を行なう場合が多いので, 0-30m の範囲でポールを移動し撮影を行った．実際の距離はスチールメジャーによって測定した．結果を図-6 に示す．横軸が実際の距離で, 縦軸が計測データの処理によって求められた計測距離である．図-6 に対して線形の近似直線を引き, 近似直線と各点の差の二乗和平均から距離方法の誤差を推定した結果, 誤差は 22.6cm となった．距離が遠いほど, 撮影画像上の LED の上下間隔が小さくなるため, 誤差が大きくなる．0-50m の範囲で同様の測量を行なった場合には, 誤差が 44.3cm となった．

次にカメラの横方向の距離測定精度の評価を行った．カメラから 30m 離れた場所で, 横方向にポールを 18m の範囲で移動して撮影を行った．結果を図-7 に示す．

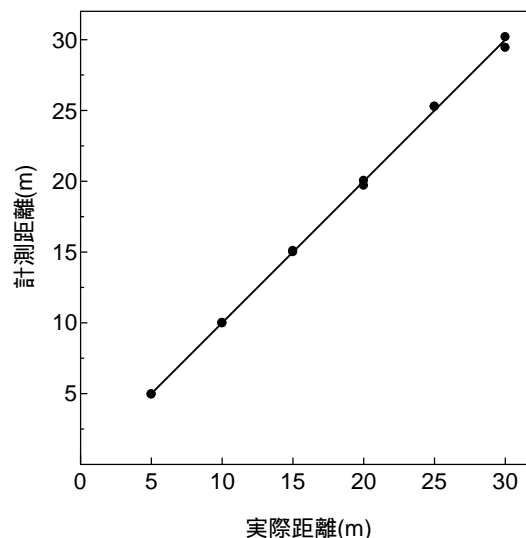


図 - 6 : Z 方向の実験結果

近似直線と各点の差の二乗和平均から横方向の誤差を推定した結果, 誤差は 5.12cm となった．

またカメラの高さ方向の距離測定精度の評価を行った．カメラから 30m 離れた場所 (Z=30m) で, 高さ方向にポールを移動して撮影を行った．結果を図-8 に示す．近似直線と各点の差の二乗和平均から高さ方向の誤差を推定した結果, 誤差は 0.48cm となった．

5 . 写真測量の誤差評価

本手法において測定精度に関わる要因としては以下のようなものが考えられる．

- (1) カメラおよびポールの垂直からのずれ
- (2) 撮影画像のレンズ歪み
- (3) 撮影画像の解像度

これらに関して検討を行った．

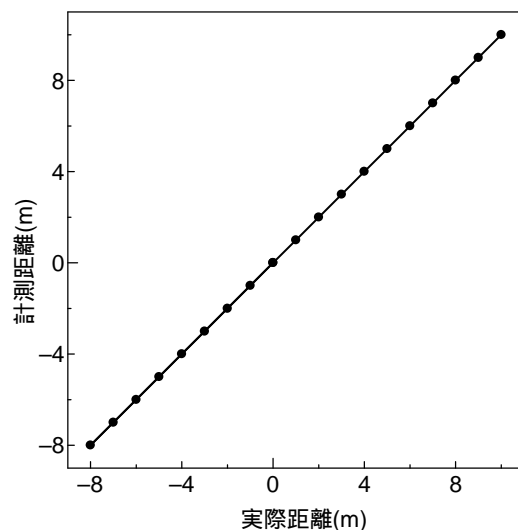


図 - 7 : X 方向の実験結果(1)

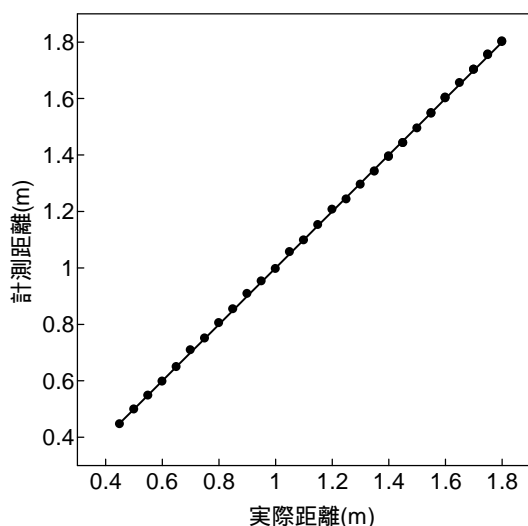


図 - 8 : Y 方向の実験結果(1)

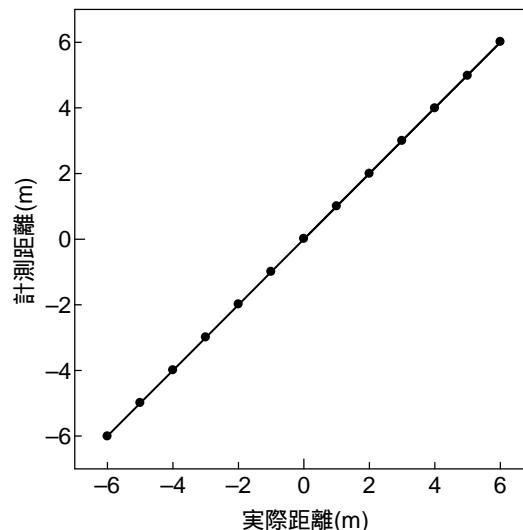


図 - 10 : Y 方向の実験結果(2)

(1) カメラおよびボールの垂直からのずれ

ポールは垂直から $\pm 30'$ の範囲内でLEDを点灯するように設定する。ポールが垂直からカメラ方向に角度 θ だけ傾いた場合、LEDの間隔はカメラの視野内で小さくなり、以下のように推定される距離 Z が大きくなり距離方向の誤差 ΔZ が生じる。

$$\Delta Z = Z(1 - \cos \theta) \cong Z\theta \quad (11)$$

カメラとポールの間隔が30mで θ が $30'$ のとき誤差は約26cmとなる。これに対して、ポールが倒れることによる縦および高さ方向の誤差はLEDの高さと角度 θ の積程度の値となる。LEDの高さが1mで、 θ が $30'$ のとき誤差は約9mmとなる。

カメラの垂直からのずれも誤差の要因となる。カメラが垂直から角度 θ だけ傾いたとき、高さ方向に $Z\theta$ の系統的な誤差を生じる。カメラとポールの間隔が30mで、 θ が $30'$ のとき誤差は約26cmとなる。

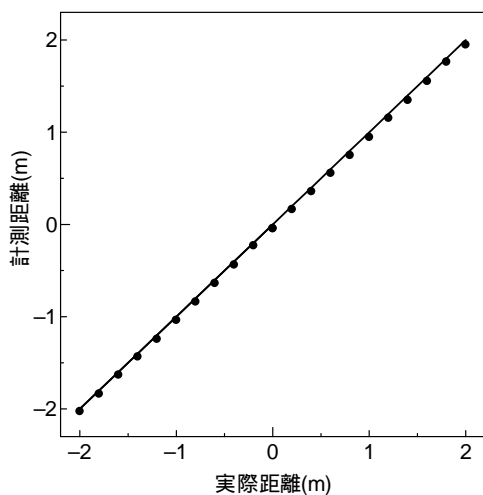


図 - 9 : X 方向の実験結果(2)

(2) 撮影画像のレンズ歪み

一般にカメラの画像には歪みが生じる。画像歪みは、レンズの歪曲係数で定義され樽型、糸巻型などの歪みを生じ、画像の中心から外れるほど歪みは大きくなる。通常正確な写真測量を行うためには、カメラの歪曲係数を求めて校正を行う必要がある。今回の実験では、カメラの歪曲係数の補正などは行っていない。

ポールが撮影画像の周辺部にある場合は、ポールが中心部にある場合に比べて、歪みの影響を受けて誤差が大きくなることが予想される。ポールを画像の中心部で移動させた場合と、画像の全領域で移動させた場合の誤差の比較を行った。

図-7は、撮影画像のフレーム全体の領域でポールを移動して、撮影を行っている。実際には30m離れた場所で横方向にポールを18m移動させている。図-7の測定と同じ条件で、撮影画像のフレーム中心部分で4mの範囲でポールを横方向に動かした結果を図-9に示す。このときの誤差は4.07cmとなり図-7の実験の誤差5.12cmよりも小さな値になっている。

撮影画像のフレーム全体の領域でポールを高さ方向に移動するのは不可能なので、カメラを縦に90度傾けて、フレームの左端から右端までの領域で横方向にポールを移動して撮影を行った結果を図-10に示す。このときの誤差は1.2cmとなった。この誤差はカメラを高さ方向に1.4m移動させた図-8の実験より大きな値になっている。

つまり画像の中心部だけで測定を行うよりも、画像の全領域で測定を行なった場合に、歪みの影響を受けて誤差が大きくなっている。このことは、画像データの補正により測定精度が向上することを意味している。

(3) 撮影画像の解像度

本手法では、撮影画像のLEDの位置から距離計測を行うので、撮影画像の解像度も測定精度を決める要因

となる。今回のカメラの設定ではカメラから 30m 離れた場所で横方向に 20m の範囲が撮影可能である。この範囲を 3872 ピクセルでカバーしているので、1 ピクセルが 5.2mm に相当する。図 5 は 30m 離れた場所の撮影画像の中心部を拡大したものである。LED が数ピクセルの広がりを持つ輝点となっている。輝点の中心部を求める際に生じる誤差は、上記の他の要因による誤差より十分に小さい値である。

6. まとめ

本研究ではまず垂直度判定手法を提案し実験による評価を行った。鉛直方向に LED、気泡管、フォトトランジスタを配置した。鉛直を判定するのに十分な感度 167 (mV/deg) が得られた。

続いて垂直に立てたポールに取り付けた LED を用いた写真測量手法を提案し測量の基礎実験を行った。ポールに 2 個の LED を設置し、ポールが垂直のときに LED が点灯するように設定する。このポールを垂直に立てたデジタルカメラで撮影を行う。

実際の測量に合わせて 0-30m の範囲で、距離方向、横方向、高さ方向の測定実験を行った。距離方向の精度は 23cm 程度で、横方向、高さ方向の精度は 5cm 程度であった。トランシットなどを使った一般の測量に比べて悪いが、ポールを立てて撮影するだけで測量ができるので、測定時間の大幅な短縮が期待できる。

災害時の迅速な状況把握などのように、余り精度は必要ないが迅速に測定を行いたいような目的には十分利用可能である。

今回の実験では、レンズ歪みの補正などの処理は行っていない。実際の測量で精度を上げたい場合には、レンズ歪みの補正などの処理によって、精度の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 大木正喜: 測量学, 森北出版, 1998.
- 2) 桑原祐史, 横木裕宗, 佐藤大作, 三村信男: (社)土木学会情報利用技術論文集, マジック環境を対象とした国土防護のための沿岸域ゾーニングプロセス, 16, pp91-98, 2007.
- 3) 茨城大学津波調査団: タイ西海岸津波被害調査報告書, 2005.
- 4) 特許公開番号 2009-025276.
- 5) Ravindra Jayasekara, Atsushi Minato, Satoru Ozawa, Masanori itaba. : Development of perpendicular detection device and application to land survey, *Proceedings of The 4th International Student Conference at Ibaraki University*, pp.235-238, 2008.
- 6) 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- 7) David A.Forsyth, Jean Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*, Pearson Education, 2003.