

## 21. 全方位カメラを用いた建設機械の位置推定システム

日本工業大学

施工技術総合研究所

○ 住吉 耀  
石川 貴一郎  
岩渕 裕  
藤島 崇

### 1. はじめに

i-Construction 推進における建機の自動化において、高精度な位置推定は重要な技術の一つである。位置推定手法に関する研究は数多くなされており、GNSS (Global Navigation Satellite System) や SLAM (Simulation Localization And Mapping), TS (Total Station) による自動追尾による位置計測などがある。

屋外環境下における代表的な位置推定手法では GNSS と慣性航法装置を融合した GNSS/IMU 複合航法がある。GNSS/IMU 複合航法は Mobile Mapping System<sup>1)</sup>などの移動体計測の位置推定手法として採用されているが、屋内や山間部などの GNSS 不可視環境下においては、GNSS による観測更新ができず、慣性航法のみによる位置推定となるため、計測精度が低下する。SLAM は、位置推定と地図構築を同時に行う手法であり、屋内外において使用されている<sup>2)</sup>。

SLAM は移動ロボットの位置推定で用いられることが多いが、レーザ SLAM ではレーザスキャナを用いて、時系列に取得された形状をマッチングして移動距離、姿勢を推定するため、周囲に形状の特徴物がないと距離の圧縮が起きるといった課題がある。またカメラによる SLAM もあるが、ロバスト性が低いという課題と画像特徴が少ないとレーザ SLAM と同様に位置推定に失敗するという課題がある。また、移動ロボットの分野では、事前に作成した地図に対して位置を推定するマップマッチングによる位置推定手法がよく使われるが、事前に高精度な地図を作る必要があることと、時々刻々と環境が変化する施工現場にあっては地図の更新を高頻度に必要とするため、建設機械の位置推定手法としては向いていない。さらに、これらのシステムの多くは、高精度な位置推定が可能であるものの、高価なセンサを必要とするという課題がある。

そこで本研究では安価なカメラシステムを用いた位置推定手法について検討を行うことを目的とする。

カメラを用いた位置推定手法も多数研究されており、例えば倉爪ら<sup>3)</sup>は、屋内向けの全方位カメラによる位置推定を利用したデッドレコニング情報の補正手法を提案している。また、瀧口ら<sup>4)</sup>は赤外線全方位カメラと赤外 LED から構成される位置標定システムを提案し、太陽光下においても 27.7mm の精度をロバストに達成しているが、赤外発光のシステムが複雑になっている。

### 2. 提案手法

#### 2.1 システム概要

本研究で用いる手法は、位置が既知のランドマークを最低三つ使用する位置推定手法<sup>4)</sup>を基本としており、ランドマークの中心位置は事前に TS により計測する。ランドマークには AR マーカを貼り付け、それぞれに固有の ID を付与している。そのため、認識された AR マーカの ID からランドマークの位置を呼び出すことができる。そのため作業範囲が広範囲になる場合においては、ランドマークの個数を増やすことで、作業範囲を広げることが可能である。また、作業範囲内においては、すべてのランドマークが同時に撮像される必要があるため、ロバストな位置推定を行うためにはランドマークの個数を増やす必要がある。

カメラによる位置推定システムでは、ミラーや魚眼レンズを使用した全周カメラが用いられることが多いが、一画素当たりの解像度が低くなるため、AR マーカまでの距離が遠いとマーカ認識率が低下する恐れがある。そこで、本研究では、解像度を高めるため、Web カメラを 6 台使用し全周を撮像するシステムを構築した。使用したカメラは、UVC(USB Video Class)に準拠した Logicool C615 を使用した。カメラは USB により PC に接続される。PC は、CPU Core-i7 3.6GHz、メモリ 16GB、GPU GeForce GTX1060、OS Ubuntu 16.04 を使用し、ROS(Robot Operating System) kinetic がインストールされている。



図-1 複数台の Web カメラによる全周囲撮像システム

図 3 にシステム系統図を示す。各カメラは、ROS で公開されているパッケージ `usb_cam` を使用した。またカメラは事前に ROS の `camera_calibration` パッケージを用いてキャリブレーションを行った。

撮影データは、カメラ事出力され、それぞれに対し、AR マーカの認識を行い、その方位角に基づいて自作した Localization node でリアルタイムに位置推定を行う。

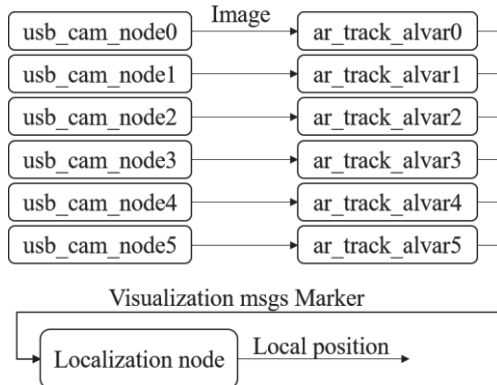


図-2 システム系統図

## 2.2 ランドマークの認識

本システムでは、カメラから見た AR マーカの撮影角度から計測座標を推定する。各ランドマークに貼り付けられた AR マーカをそれぞれ個別に認識するため、ROS の `ar_track_alvar` を利用した。`ar_track_alvar` はあらかじめ ID が割り振られたマーカを印刷し、カメラでマーカを撮影することで、各マーカとカメラとの相対位置を 3 次元座標で推定するものである。マーカのサイズを拡大することで、遠距離からの計測を行うことが可能となる。図 3 にマーカの例を示す。今回は実験的にマーカのサイズを 200mm とした。認識可能な距離はカメラとの組み合わせにより変化するが、今回認識が可能な距離は 14m であった。この時のマーカは画像上で 21×21pixel で撮影されていた。認識可能距離を延ばすためには、マーカサイズを大きくするか、カメラ解像度を上げる必要がある。



図-3 使用した AR マーカ

## 2.3 自己位置推定アルゴリズム

AR マーカ観測時のランドマークおよびカメラの位置関係を図 4 に示す。`ar_track_alvar` からの出力は、各カメラの座標系で推定されたマーカの位置と向きであり、位置推定の演算には、この位置から算出した、カメラからのマーカ方位角を用いる。またランドマークの位置はあらかじめ TS などで計測しておき、座標を既知しておく必要がある。

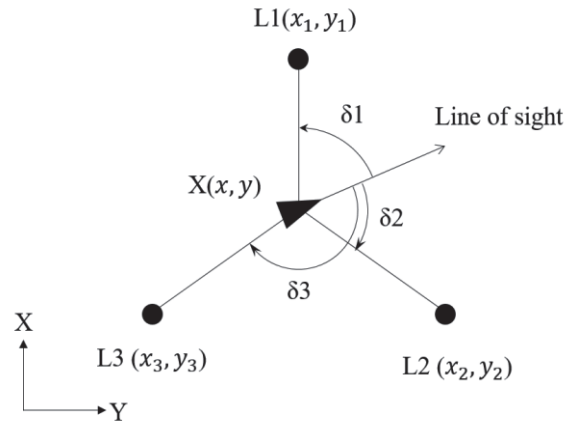


図-4 ランドマークとカメラの位置関係

カメラ位置を  $(x, y)$ 、各ランドマークの座標を  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, 3$  とし、ターゲットの観測方位を  $\delta_i$  とすると、下記の式で表される。

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{x_1 - x}{y_1 - y} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \tan^{-1} \frac{x_2 - x}{y_2 - y} \quad (2)$$

$$\delta_3 = \tan^{-1} \frac{x_3 - x}{y_3 - y} \quad (3)$$

ターゲット  $i, j$  の観測方位間の角度  $\varphi_{i,j}$  は、

$$\varphi_{i,j} = \tan(\delta_j - \delta_i) = \frac{\frac{x_j - x}{y_j - y} - \frac{x_i - x}{y_i - y}}{1 + \frac{x_j - x}{y_j - y} \frac{x_i - x}{y_i - y}} \quad (4)$$

となり、この式を整理すると、式(5)が得られる。

$$x^2 - \alpha_{i,j}x + y^2 - \beta_{i,j}y + \gamma_{i,j} = 0 \quad (5)$$

ここで、

$$\alpha_{i,j} = x_i + x_j + \frac{y_j - y_i}{\varphi_{i,j}} \quad (6)$$

$$\beta_{i,j} = y_i + y_j - \frac{x_j - x_i}{\varphi_{i,j}} \quad (7)$$

$$\gamma_{i,j} = x_i x_j + y_i y_j - \frac{x_j y_i - x_i y_j}{\varphi_{i,j}} \quad (8)$$

このとき、自己位置座標(x,y)は、式(9)、(10)で表される。

$$x = \frac{1}{D} [(\beta_{3,1} - \beta_{2,3})(\gamma_{2,3} - \gamma_{1,2}) - (\beta_{2,3} - \beta_{1,2})(\gamma_{3,1} - \gamma_{2,3})] \quad (9)$$

$$y = -\frac{1}{D} [(\alpha_{3,1} - \alpha_{2,3})(\gamma_{2,3} - \gamma_{1,2}) - (\alpha_{2,3} - \alpha_{1,2})(\gamma_{3,1} - \gamma_{2,3})] \quad (10)$$

$$D = (\alpha_{2,3} - \alpha_{1,2})(\beta_{3,1} - \beta_{2,3}) - (\alpha_{3,1} - \alpha_{2,3})(\beta_{2,3} - \beta_{1,2}) \quad (11)$$

姿勢角  $\delta_1$  はこれらを式(1)に代入することで得る。

### 3. 評価試験

作成した位置推定システムの性能確認のため、精度検証を行った。精度検証では、カメラを移動させた場合の移動距離の相対精度検証、AR マーカー内で大きく移動させた場合の位置推定精度の検証を行った。

#### 3.1 移動距離の相対精度検証

Mitutoyo SD-100E デジタルスケールを取り付けた長さ1mのリニアシャフト上部にカメラシステムを設置し、リニアシャフト上で中央を原点とし、カメラを0.1mごとに0~0.5m動かしたときのカメラの位置精度を検証した。使用した機材の外観を図5に示す。SD-100Eは器差0.07mm 繰り返し精度0.01mmで計測可能である。また実験環境の写真を図6にランドマークとの位置関係を図7に示す。図7の黄色プロットは、それぞれ移動させたカメラの位置を示す。

図6、7に示したように、スライドの設置位置は、ランドマークの中央付近とした。また、環境光の影響を軽減するため、実験は屋内で行った。図8に結果を示す。図中の横軸は、デジタルスケール上での移動距離、縦軸は本手法で得た移動量とデジタルスケールとの誤差である。移動距離が大きくなるほど、誤差が増大する傾向が見取れる。最大誤差は500mmの移動で約30mmであった。



図5 リニアスライドに取り付けたカメラシステム



図6 相対精度検証環境

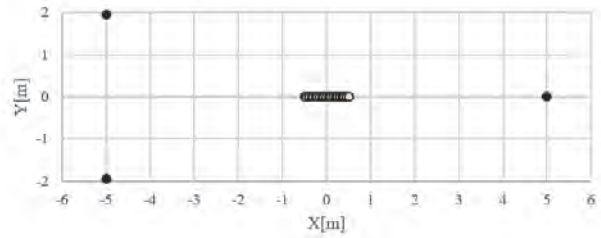


図7 システム設置関係図

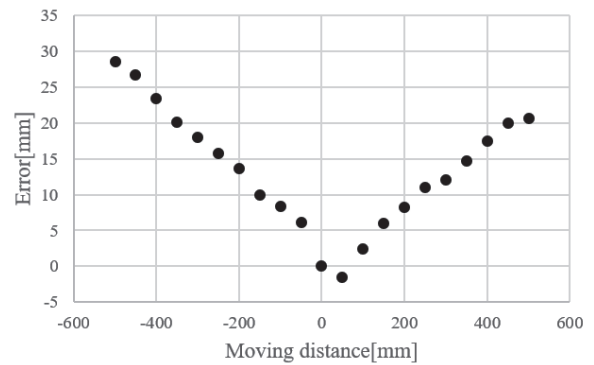


図8 移動量に対する誤差

#### 3.2 屋外環境における位置推定精度

前節では、ランドマーク中央付近に置いた場合のカメラ移動量の相対精度について評価した。本節では、ランドマーク内を移動させたときの座標値をTSによる計測結果と比較する。使用したTSはTopcon GT、測距精度は $2+2\text{ppm} \cdot D$  mmである。ランドマークは、各辺が約10mの正三角形と

なるように配置した。実験では、このランドマークで囲われた正三角形の中でカメラシステムを移動し、各点においてカメラによる位置推定とTSによる計測を同時に行った。

位置推定結果を図10に示す。3点のランドマークの中心付近では誤差は約0.06mであったが、カメラシステムが中央から外れるに従い誤差が大きくなり、その最大誤差は1.05mであった。

ランドマークの中央付近においては、十分な精度であるが、ランドマークが作る3辺に近づくと精度が悪化している。特に計測精度が悪化しているAの箇所では、ランドマークの画像上の位置が画面端に撮影されており、カメラの収差補正などのキャリブレーションが不足していることが計測誤差の要因として考えられる。



図-9 実験環境

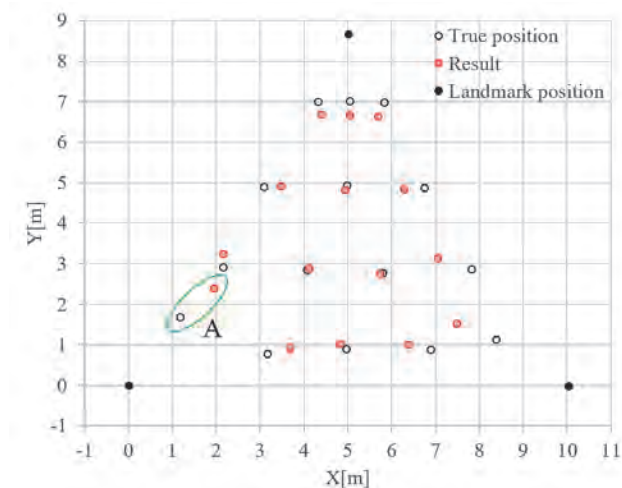


図-10 屋外環境時観測結果

#### 4. 考察

本システムはランドマークの方位をカメラで観測することで位置推定を行っている。そのため、観測された方位角に誤差があれば、推定結果に影響を及ぼす。そこで本節では、方位角に誤差があった場合の影響についてのシミュレーションした結果を示す。方位角に誤差が生じる要因には、カメラシステムのキャリブレーション不足、ARマーカ認識時におけるマーカ中心位置のズレが

考えられる。どちらも、観測値としてはピクセル値のズレとなる。図11に方位角誤差が1°の時の位置推定のシミュレーション結果を示す。図に示すように中央部では精度が高いことがわかるが、ランドマークが作る三角形の辺に近づくと精度が低下することがわかる。またその時の誤差は最大で0.3mであり、今回の評価試験では、それ以上の角度誤差が生じていたことが示唆される。以上から、より高精度な位置推定を行うためには、カメラキャリブレーションの精度向上が必要であると考えられる。

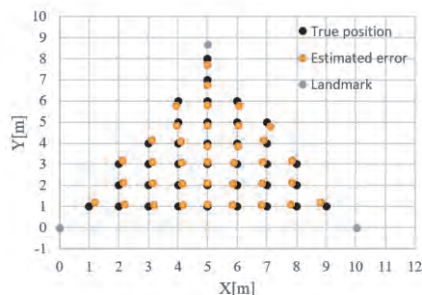


図-11 シミュレーションによる誤差評価結果

#### 5. まとめ

本論文では、Webカメラと位置が既知のランドマークによる安価な位置推定システムの可能性についてシステムを構築し、評価試験を行った。その結果、3点のランドマークの中央付近では、TSと比較して誤差が0.06mと十分な精度が出ることを確認したが、外側では精度が不十分な結果となった。誤差要因として、カメラの相互キャリブレーション不足によるが考えられる。今後はキャリブレーション手法の構築による性能向上と、安価な魚眼カメラなどとの性能の比較を行っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡, モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング, 計測自動制御学会産業論文集 Vol.8, No.17, pp.132-139, 2009.
- 2) 大野和則・竹内栄二郎・永谷圭司・田所諭・小柳栄次・吉田智章, レーザスキャナと移動ロボットを用いた被災空間の密な三次元計測, 情報処理学会研究報告, 176巻・19号, pp.1-8, 2011
- 3) 倉爪 亮・本村 暁・山口 祐規・松岡 毅・山本 元司・長谷川 勉, 全方位カメラとドッドレコニング機能を有するサッカーロボットのロバスタな自己位置同定手法, 日本ロボット学会誌, 22巻・3号, pp.343-352, 2004
- 4) 瀧口純一, 竹家 章仁, 西口 憲一, 矢野 寛, 伊豫田真, 橋詰 匠全方位視覚情報に基づいた自己位置標定システム, 日本機械学会論文集 C編, 68 巻 673号, pp. 2722-2729, 2002