

# ロボットタウンの実証的研究

## - 広域分散カメラのロボットによる自動キャリブレーション -

横矢 剛 長谷川 勉 倉爪 亮 村上 剛司  
(九州大学大学院システム情報科学研究所)

### Robot Town Project: Automated Calibration of Distributed Vision Network by Mobile Robots

\*Tsuyoshi Yokoya, Tsutomu Hasegawa, Ryo Kurazume, Kouji Murakami  
(Information Science and Electrical Engineering Kyushu University)

**Abstract**—This paper proposes an automated calibration method of a distributed vision network in a unified world coordinate system. Position, view direction and range of view are the camera parameters of principal importance to be estimated by the proposed method. A set of calibration data for each distributed camera is provided by a group of mobile robots having a cooperative positioning system and visually distinguishable markers mounted on the body of robot itself.

**Key Words:** Distributed Vision, Camera Calibration, Cooperative Mobile Robots

## 1. はじめに

オフィスや病院、道路などの公共空間、あるいは住宅内で人間のために働くロボットの実現に向けた一つの有力なアプローチは環境情報構造化である。人間が共生する環境では、単体のロボットに実装した機能により多種多様な状況に適応して作業を行わせるのは当面困難であることから、環境側に多数の分散型センサや RFID タグ、あるいはアクチュエータを埋め込んで、ロボットを支援しようというものである。我々がすすめている「ロボットタウン」プロジェクトでは、環境側に固定カメラを分散配置し、各視野内のロボットとその他の移動体の位置や運動方向を計測する。そして、その計測結果をロボットに伝えてその行動を支援する。

屋外を含めた環境情報構造化によるロボット行動支援を実用技術にするには、多くの課題があるが、なかでも、広域に分散して配置されたカメラのキャリブレーションは最初に解決すべき問題の一つである。環境内にカメラを設置したのち、全てのカメラを統一の世界座標系でキャリブレーションすること自体困難である。しかも、実環境に配置したカメラは外乱によって位置や姿勢が容易に変化するため、定期的にキャリブレーションを行う必要がある。これに対して、我々は、広域にわたって高精度な測量機能を有するロボット群を開発し、これを用いてカメラを自動的にキャリブレーションする手法を提案する。

## 2. 分散配置カメラの自動キャリブレーション原理

### 2.1 カメラキャリブレーション

カメラ視野内の 6 つ以上の点について、その三次元実空間座標系での位置と画像座標系での位置との対応データが得られれば、そのカメラパラメータを計測できる。

しかし、移動ロボットを支援する目的で環境中に配置されたカメラの視野範囲は、人間やロボットのサイズよりも十分おおいので、その視野内で 6 つ以上の十分な数の計測点を得ること自体、人間が作業したとしても手間がかかり、三次元測量精度の維持も容易でない。

そこで、測量機器を搭載した移動ロボット（親）1 台と、マーカを搭載した移動ロボット（子）を用いて対応データを得る。マーカを搭載した移動ロボットをカメラ視野内で静止させ、画像中のマーカの位置を計測するとともに、三次元実空間でのマーカ位置計測を行い、座標の対応をとる。子ロボットを移動させて計測を繰り返し、十分な数の対応データセットを得る。(Fig.1)

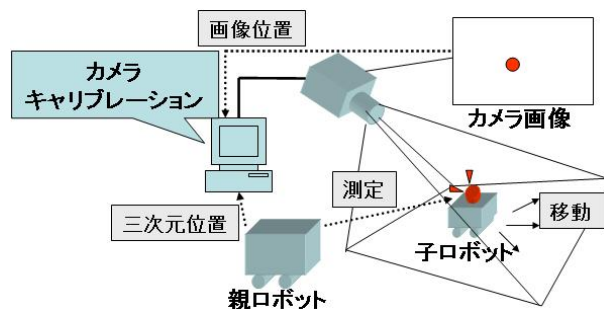


Fig.1 ロボットによるカメラキャリブレーション

### 2.2 協調ポジショニング

広域に分散配置されたカメラについて、その視野範囲の全てを同時に見通すことはできない。実際、親ロボットと子ロボットとの間に障害物があると、子ロボットの位置が測定できない (Fig.2)。広域配置された多数のカメラを順次キャリブレーションするため、親ロボットも、キャリブレーション対象カメラの配置に応じて移動することになる。全てのカメラを統一座標系でキャリブ

レーションするために、親ロボットの移動後の位置・姿勢を正確に計測する必要がある。そこで、親ロボットの移動には、協調ポジショニング法を用いる。

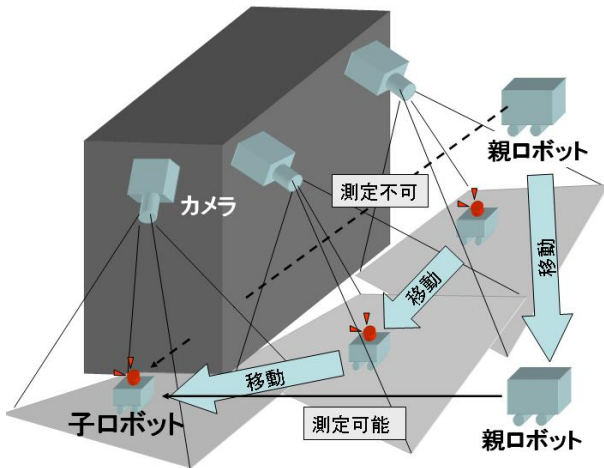


Fig.2 親ロボット移動による広域分散カメラキャリブレーション

協調ポジショニング法は、親ロボットと子ロボットとの協調移動により、相互の位置・姿勢の情報を保持しつつ移動する手法である。親ロボットは移動前の初期位置・姿勢が分かっているものとする。以下の(1)(2)(3)を繰り返すことにより、正確な移動が実現される[1]。

- (1) 2台の子ロボットは親ロボットの移動前後の位置から測定可能であるような適当な位置に移動し、静止する。
- (2) 親ロボットは2台の子ロボットの位置を測定した後、移動する。
- (3) 移動後に再び子ロボット2台の位置を測定する。これらの測定データと移動前の親ロボットの位置・姿勢から、移動後の親ロボットの位置・姿勢が計算される(Fig.3)。

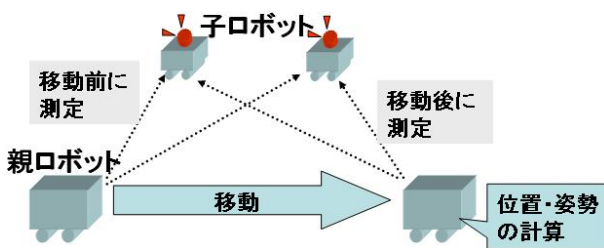


Fig.3 協調ポジショニング法の原理

### 2.2.1 計算方法

親ロボットの姿勢のうち、X軸、Y軸周りの回転角は傾斜角センサにより求める。親ロボットのZ軸を、水平面に対して鉛直上向きの軸としたとき、子ロボット2台の位置を測定して、親ロボットの移動後の座標系から移動前の座標系へのZ軸周りの回転角と並進ベクトル $t$ を計算する。親ロボット移動前の子ロボットの位置をそれぞれ

$$\{X_1, Y_1, Z_1\}^T, \{X_2, Y_2, Z_2\}^T$$

移動後の位置をそれぞれ

$$\{X_1', Y_1', Z_1'\}^T, \{X_2', Y_2', Z_2'\}^T$$

とする。このとき、 $t$ は以下のように求められる。

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_1' - X_2'}{Y_2' - Y_1'}\right) - \arctan\left(\frac{X_1 - X_2}{Y_2 - Y_1}\right)$$

$$t_x = X_1' \cos \theta - Y_1' \sin \theta - X_1$$

$$t_y = X_1' \sin \theta + Y_1' \cos \theta - Y_1$$

$$t_z = Z_1' - Z_1$$

## 3. キャリブレーションシステム

### 3.1 高精度三次元測量

ロボットに搭載したマーカ位置の三次元測量、および協調ポジショニングにおけるロボット位置の計測には、レーザを用いた建設測量機器(TOPCON社製トータルステーションGTS-825A)を用いる。測量対象点にコーナーキューブを配置し、計測レーザの照準をその方向に概略あわせておけば、当該コーナーキューブを自動探索して正確な三次元位置を得ることができる。測定方向はコンピュータ制御され、三次元計測値もコンピュータに読み込まれる。

親ロボットにはこの測量機器を搭載する。また子ロボットには、コーナーキューブと視覚マーカを組み合わせたものを搭載する。これにより、カメラキャリブレーション対応データセットの自動獲得および協調ポジショニングによる広域キャリブレーションが実現される。

測距部	測距範囲	2200m
	測距精度	$\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{距離})$
	表示単位	0.2mm
測角部	測角精度	5
	表示単位	1
自動視準	自動視準範囲	$\pm 5^\circ$

Table 1 トータルステーションGTS-825Aの性能

### 3.2 視覚マーカ・コーナーキューブアセンブリ

子ロボットに搭載する視覚マーカとコーナーキューブの相互配置を示す(Fig.4)。視覚マーカにはLEDを用いる。ロボットは床面を水平移動するだけなので、搭載するLEDマーカが1つだけであると、対応データセットとして同一平面上の点群しか得られないため、カメラパラメータが正しく求まらない。そこで、LEDマーカを高さの異なる複数点に配置している。

移動により子ロボットの姿勢は変化するため、1つのコーナーキューブを測定しただけでは、LEDマーカの三次元位置を得ることはできない。そこで、子ロボットに取り付けるコーナーキューブは3つとし、それら3つの位置を測定する。また、各LEDとコーナーキューブの相対関係は、機械式三次元測定器により別途測定しておく。

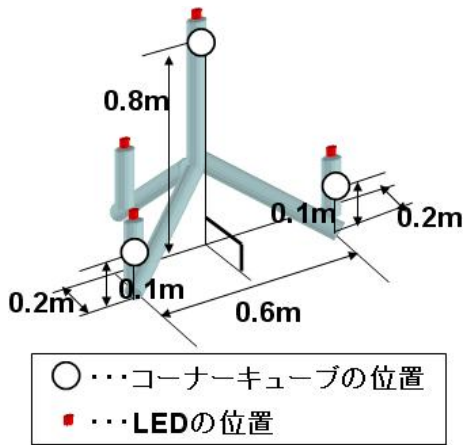


Fig.4 LED とコーナーキューブの配置



Fig.5 LED マーカ・コーナーキューブアセンブリ

### 3.3 LED マーカの三次元位置計測

コーナーキューブ (1),(2),(3) について, (1) から (2) への方向ベクトルを A, (1) から (3) への方向ベクトルを B とする. このとき, 3 つのベクトル A, B,  $A \times B$  を基底とした LED マーカの位置ベクトルは子ロボットの姿勢に依らず一意に決定される (Fig.6).

子ロボットの位置および姿勢は, その車輪の回転数から概算値として得ることができる. 親ロボットは, その値を参考に測量機器をコーナーキューブ (1),(2),(3) の方向へ概略あわせ三次元位置を測定する. LED マーカの三次元位置はそれら測定結果と位置ベクトルとで推定できる.

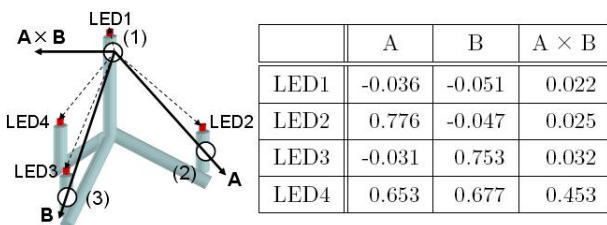


Fig.6 LED マーカの三次元位置推定

### 3.4 LED マーカの画像位置取得

LED マーカの画像位置を検出する方法として, LED 点灯前後の差分画像を用いる. LED の点灯・消灯を複数回繰り返して, 差分画像を複数枚得る. 得られた差分画

像の平均の画像を求め, 雑音の除去を図り, LED マーカの位置を検出しやすくする. 適当な閾値を設定し, LED の特徴を持つ画素の領域を平均差分画像から抽出する. 画素領域の平均の座標を LED マーカの画像位置として取得する. (Fig.7)

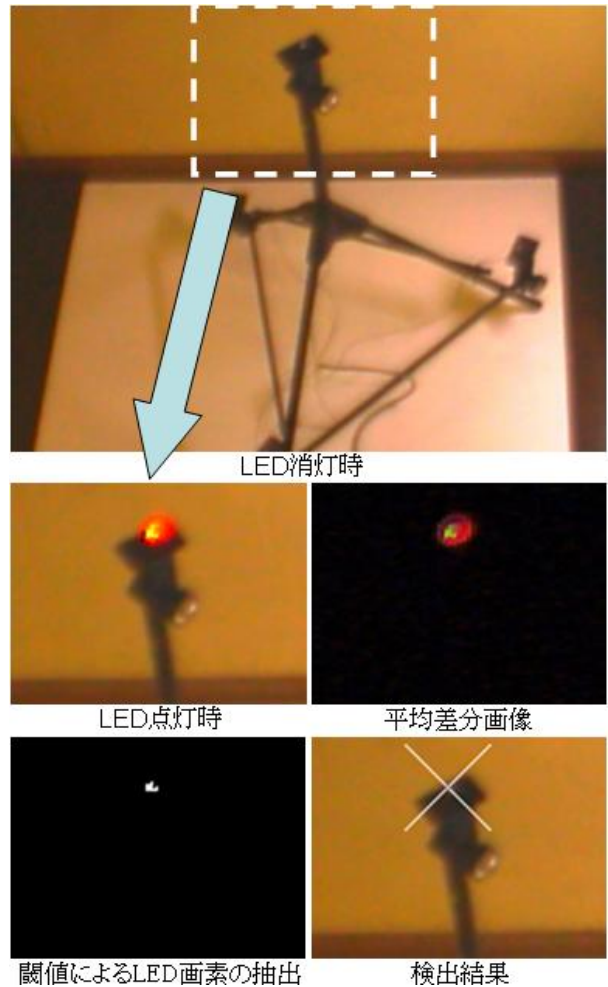


Fig.7 LED マーカの画像位置検出の様子

## 4. 実験

### 4.1 キャリブレーション実験

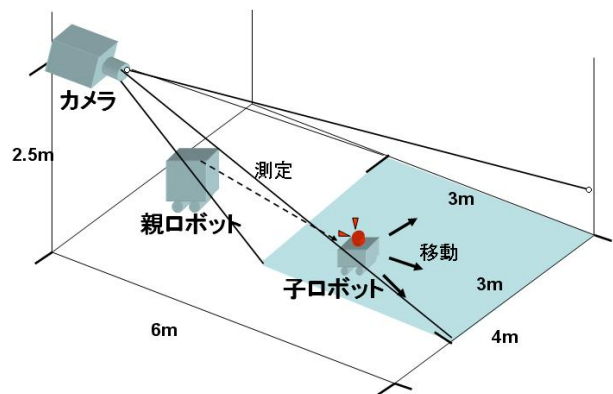


Fig.8 実験環境

実験は 4 m x 6 m x 高さ 3 m の部屋で, 2.5m の高さ

にカメラを設置して行った。子ロボットを十分に分散された位置に配置し、50 点の対応データセットを得たときのキャリブレーション結果を Table 2 へ示す。

ただし、その計算には Tsai によるキャリブレーション方法を用いた [3]。

焦点距離 / ピクセルサイズ	[pix]	771.27	
画像中心	(x 軸)	[pix]	141.33
	(y 軸)	[pix]	109.32
第一歪み補正係数	[1/mm <sup>2</sup> ]	3.48E-07	
並進距離	(X 軸方向)	[mm]	203.82
	(Y 軸方向)	[mm]	1383.77
	(Z 軸方向)	[mm]	2104.17
回転角	(X 軸周り)	[deg]	114.61
	(Y 軸周り)	[deg]	-7.65
	(Z 軸周り)	[deg]	-3.48

Table 2 カメラキャリブレーション結果

キャリブレーション結果は以下のように評価する。得られたカメラパラメータを用いて、LED マーカの三次元位置からその画像位置を計算し、実測された画像位置との差を画素誤差とする。また、カメラ中心と LED マーカの実測画像位置とを通る直線を求め、その直線と LED マーカの三次元位置との距離を三次元誤差とする。結果を Table 3 に示す。

	平均値	最大値
画素誤差 [pix]	0.59	1.22
三次元誤差 [mm]	4.47	9.53

Table 3 キャリブレーションの評価結果

#### 4.2 キャリブレーションデータ数の検討

広域空間内に配置された多数のカメラのキャリブレーションを実行しなければならないので、1 個のカメラキャリブレーションに要する時間は短いほうが望ましい。そこで、何点の対応データセットがあれば、十分なキャリブレーションが可能であるかを調べた。

実験手順を以下に示す。

- (1) LED マーカの対応データを多数用意する。(本実験では 162 点の対応データを用いた)
- (2) 対応データセットのうち、6 点 ~ 100 点をランダムに選ぶ。
- (3) 選んだ点の対応データを用いて、キャリブレーションを行う。
- (4) 得られたカメラパラメータで、各対応データの画素誤差と三次元誤差とを計算する。
- (5) (2) ~ (4) を 10000 回行い、その平均を求める。

結果を Fig.9 に示す。この結果より、対応データは 30 点程あれば、十分にキャリブレーション可能といえる。

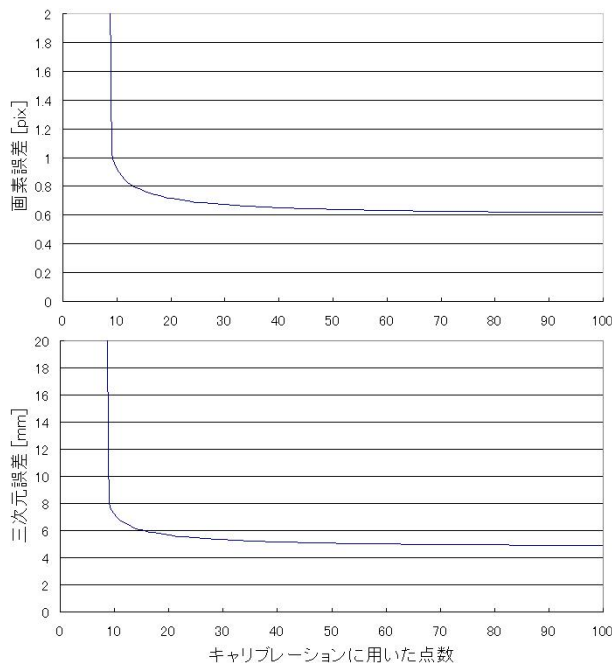


Fig.9 データ点数と誤差

## 5. むすび

広域空間に分散配置されたカメラパラメータを統一座標系でキャリブレーションする手法を提案した。高精度位置測量機能を有するロボット群による自動キャリブレーションシステムの構成を明らかにするとともに、基礎実験により十分な性能が得られる見通しを得た。

実ロボット群は現在試作中であるが、著者中の倉爪が、すでに複数台の移動ロボットを交互に協調して移動させ、相対位置を積算していくことで測量精度で移動ロボットの位置を同定する「協調ポジショニングシステム、CPS」を開発している。屋外実証実験を行い、従来の位置同定手法に比べて桁違いに高精度（移動距離の 0.1-0.5%）な位置同定が実現可能であることを確認している [2]。

本研究の一部は、総合科学技術会議科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進の一環として、(独)科学技術振興機構からの委託により実施中のものであり、また文部科学省科研費補助金基盤 B「ロボット群と環境固定センサ群の相互支援による人間・ロボット共生環境の情報構造化 (18360124)」の助成を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] 広瀬茂男, 倉爪亮, 長田茂美: “群ロボットによる協調ポジショニング法”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, pp.838-845, 1995.
- [2] 倉爪亮, 広瀬茂男: “協調ポジショニングシステムの研究 -第 8 報: CPS-III による長距離移動測定実験-”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.169-170, 1998.
- [3] R.Y. Tsai: “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.364-374, 1986.