

移動ロボットによる統一座標系での広域分散カメラキャリブレーション

Automated Calibration of Distributed Vision Network in Global Coordinate System
by Mobile Robots

○ 横矢 剛 (九大) 長谷川 勉 (九大)
倉爪 亮 (九大) 村上 剛司 (九大)

Tsuyoshi YOKOYA, Kyushu University, yokoya@irvs.is.kyushu-u.ac.jp
Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University
Ryo KURAZUME, Kyushu University
Kouji MURAKAMI, Kyushu University

This paper proposes an automated calibration method of a distributed vision network in a unified world coordinate system. The vision network system is conceived to support a robot working in our daily human life environment: the system provides with visual observation of the dynamically changing situation surrounding the robot. Vision cameras are rather sparsely distributed to cover a wide area such as a quarter of a town. 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 function and visually distinguishable markers mounted on the body of the robot. Through distributed camera calibration experiment, we confirmed the validity.

Key Words: Camera Calibration, Distributed Vision, Cooperative Positioning System

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は、作業対象だけでなく、周囲の状況を正確に把握できなければならない。人間と共生する環境は、人や車といった移動物体の存在や、物体の配置変化によって、動的に変化する。このような環境を認識するため、従来は単体のロボットに搭載されたセンサを用いて、周囲情報を取得する手法がとられている。しかし、ロボット自体の移動に伴う搭載センサの姿勢変化やCPUの処理能力不足など、ロボット単体の機能のみで多種多様な状況に応じた環境認識を行わせるのは当面困難である。

そこで、共生型ロボットの実現に向けた一つの有力なアプローチとして環境情報構造化を行う。これは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固定配置して、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(図1)。

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。そこで我々は、広域にわたって高精度な測量機能を有する移動ロボット群を開発し、(1)カメラのキャリブレーションを自動的に行うことと、(2)その結果を統一の座標系で表現することの2つを実現する[1]。

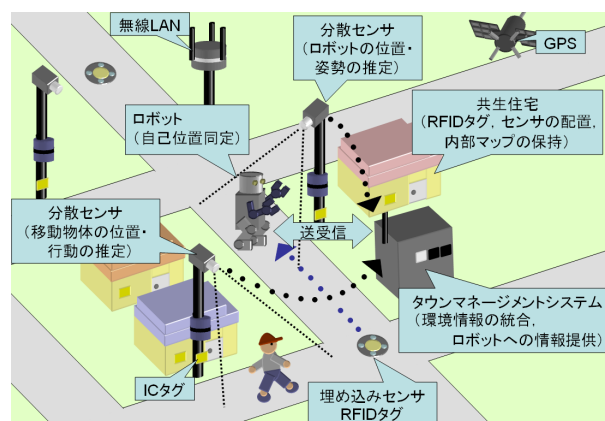


Fig.1 Concept Image of the Robot Town

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7つ以上の点について、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7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、カメラで識別容易なマーカを搭載した移動ロボット(子ロボット)と、測量機器を搭載して子ロボットの三次元位置を測定できる移動ロボット(親ロボット)とを用いて自動的に対応データを得る。子ロボットがカメラ視野内の分散位置へ移動し、カメラがマーカの画像位置を取得するとともに、親ロボットがマーカの三次元位置計測を行い、

十分数の対応データセットを得る (図 2) .

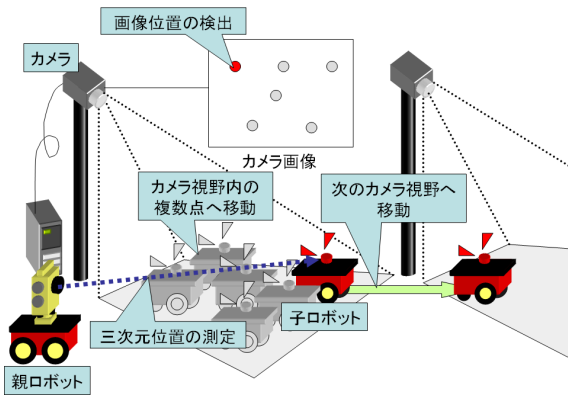


Fig.2 Automated Camera Calibration by Robots

2.2 協調ポジショニング法

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遮蔽物があると、子ロボットの位置が測定できない (図 3) . したがって、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 [2] を用いる。

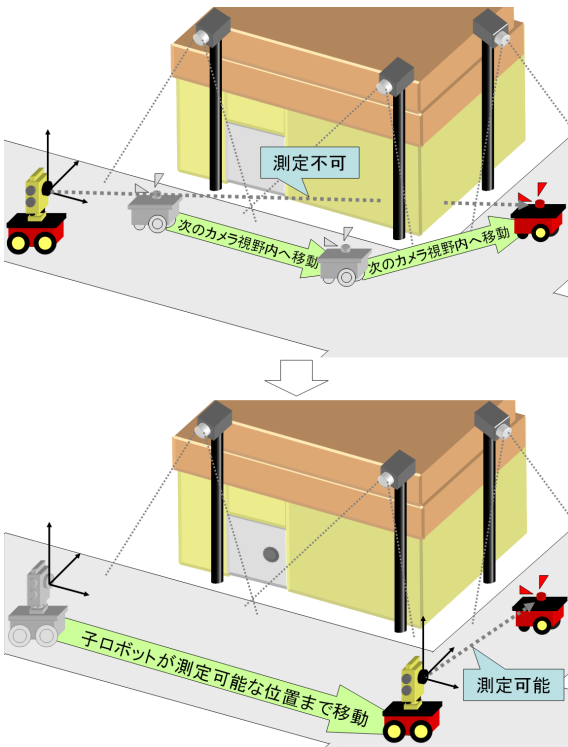


Fig.3 Movement of Parent robot to avoid occlusion

協調ポジショニング法とは、2つのロボット群が互いの三次元位置測定と移動を交互に行い、それぞれの位置・姿勢を同定しながら

移動するシステムである。親ロボットと子ロボット2台を用いた協調ポジショニング法は、親ロボットの初期位置・姿勢が既知であるとき、以下の動作で実現される (図 4) .

- (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。
- (4) 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。

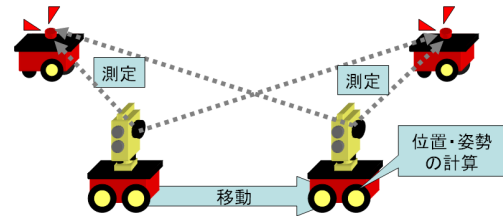


Fig.4 Principle of Cooperative Positioning System

2.2.1 計算方法

同定する親ロボットの位置・姿勢のうち、重力方向に対する車体の傾きを2軸の傾斜角センサで取得する。この傾斜角検出結果を測量機器の計測結果に反映させると、親ロボットの測定座標系をZ軸が水平面に対して鉛直上向きであると仮定して計算を行える。また、残りの1軸周りの姿勢角と三次元位置は、以下のように算出する。

親ロボット移動前に測定した子ロボットの世界座標系での位置を $[{}^W X_1 \quad {}^W Y_1 \quad {}^W Z_1]^T, [{}^W X_2 \quad {}^W Y_2 \quad {}^W Z_2]^T$ とし、親ロボット移動後の子ロボット位置の測定結果を $[{}^M X_1 \quad {}^M Y_1 \quad {}^M Z_1]^T, [{}^M X_2 \quad {}^M Y_2 \quad {}^M Z_2]^T$ とすると、親ロボットのZ軸周りの姿勢角 ${}^W \phi_p$ と、親ロボット位置 $[{}^W X_p \quad {}^W Y_p \quad {}^W Z_p]^T$ は以下の式より求まる。

$${}^W \phi_p = \arctan \frac{{}^W X_1 - {}^W X_2}{{}^W Y_2 - {}^W Y_1} - \arctan \frac{{}^M X_1 - {}^M X_2}{{}^M Y_2 - {}^M Y_1}$$

$${}^W X_p = {}^W X_1 - {}^M X_1 \cos {}^W \phi_{pZ} + {}^M Y_1 \sin {}^W \phi_p$$

$${}^W Y_p = {}^W Y_1 - {}^M X_1 \sin {}^W \phi_{pZ} - {}^M Y_1 \cos {}^W \phi_p$$

$${}^W Z_p = {}^W Z_1 - {}^M Z_1$$

3 キャリブレーションシステム

3.1 高精度三次元測量機器

子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子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。親ロボットにはこの測量機器を搭載する。

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 Specification of Measuring machine

3.2 視覚マーカ・コーナーキューブアセンブリ

子ロボットには、視覚マーカとして使用する高輝度 LED とコーナーキューブとを図 5 に示すように配置した視覚マーカ・コーナーキューブアセンブリを搭載する。

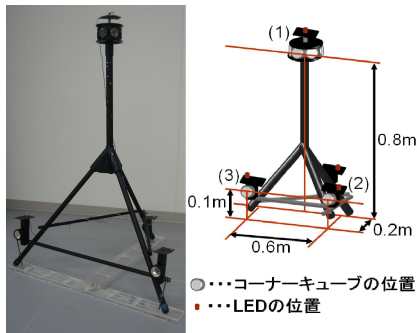


Fig.5 Assembly of Vision markers and Corner cubes

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。これら LED マーカの画像位置は LED 点灯前後の差分画像による画像処理で取得する。

また、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、子ロボットにはコーナーキューブを図 5 における (1), (2), (3) の 3 箇所取り付け、各 LED マーカとコーナーキューブとの相対関係を、測量機器により別途測定しておく。

(1) から (2) へ方向ベクトルを A 、(1) から (3) へ方向ベクトルを 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。よって、LED マーカの三次元位置は、親ロボットによるコーナーキューブ (1), (2), (3) の測定結果と、そのときの親ロボットの位置・姿勢より、求められる。

実際にキャリブレーションシステムに用いた親ロボット、子ロボットを図 6, 7 に示す。

4 広域分散カメラのキャリブレーション

実際にカメラを広域に分散配置して、キャリブレーションを行う。実験環境を図 8, 9 に示す。

実験を行った環境は、奥行き 60m、幅 15m の空間である。図 8 における灰色の領域は、視野をさえぎる構造物を表す。カメラは高さ 2.5m の位置に 3 台設置し、親ロボットが 3 台のカメラ視野内



Fig.6 Parent robot



Fig.7 Child robot

を全て見通せる位置は存在しない。

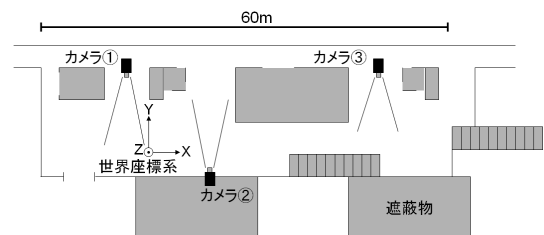


Fig.8 Experiment Setup

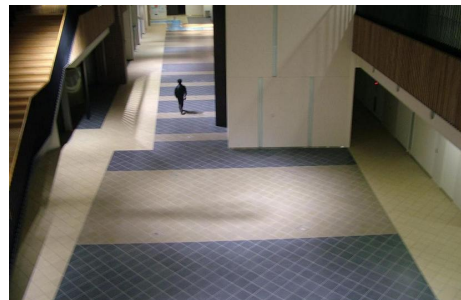


Fig.9 Experiment Space

親ロボットは協調ポジショニング法により位置決めしながら建物内を 1 周して、設置されたカメラ 3 台を順次キャリブレーションする。ただし、そのうち 2 台のカメラは、半周するうちに 1 回、もう半周中に 1 回の計 2 回キャリブレーションする (図 10)。

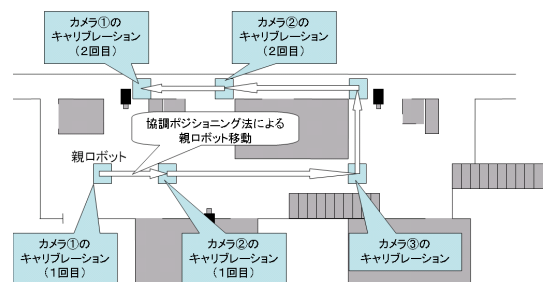


Fig.10 Experiment sequence of cooperative positioning and data acquisition for camera calibration

まず、親ロボット初期位置での測量機器の座標系を世界座標系

とする。そこから1ステップ移動した位置でカメラ①のキャリブレーション(実測点数は約50点)を行う。次に、1ステップずつ親ロボットが移動し、カメラ②とカメラ③のキャリブレーションを行う。その後、移動方向を変え、カメラ②、カメラ①の順で、再びキャリブレーションを行っていく。実際のカメラ台数は3台であるが、この実験手順を用いると、親ロボット移動距離85m内に設置された5台のカメラをキャリブレーションしたことに等しい結果が得られる。

4.1 実験結果

キャリブレーションにより得られたカメラパラメータを表2に示す。ただしカメラ①(j),カメラ②(j)は、カメラ①,カメラ②の2回行うキャリブレーションのうち、j回目のキャリブレーション結果を表す。

	カメラ①(1)	カメラ②(1)	カメラ③	カメラ②(2)	カメラ①(2)	
焦点距離 / ピクセルサイズ [pix]	770.33	761.79	754.22	770.36	763.93	
画像中心	(x 軸) [pix]	159.98	170.32	159.89	142.61	154.72
	(y 軸) [pix]	120.05	109.07	119.97	111.88	115.39
第一歪み補正係数 [1/mm ²]	4.33E-7	8.08E-8	7.02E-7	1.98E-7	2.82E-7	
位置	(X 軸方向) [mm]	-3355.12	12506.58	42900.60	12545.57	-3318.40
	(Y 軸方向) [mm]	10625.53	-1101.09	9298.21	-1125.66	10644.38
	(Z 軸方向) [mm]	2117.42	2079.23	2075.56	2068.67	2116.34
姿勢	(X 軸周り) [deg]	-115.46	112.41	123.48	112.58	-115.64
	(Y 軸周り) [deg]	2.88	-2.87	-2.56	-0.71	2.68
	(Z 軸周り) [deg]	-178.23	1.61	173.50	1.66	-178.06

Table 2 Calibrated parameters of the Cameras

4.2 実験結果の評価

カメラ①,カメラ②のキャリブレーション結果を、世界座標系からみた誤差と、個々のキャリブレーション時の測量機器座標系からみた誤差とを比較して、評価する。ただし誤差は、対応データ位置とカメラパラメータから算出された位置との距離とし、世界座標系での対応データ(各カメラ視野毎に、約70点)は、親ロボット初期位置で取得しておく。世界座標系での対応データを用いた結果と、キャリブレーションの際に実測した対応データを用いた結果を表3に示す。

	カメラ①(1)	カメラ②(1)	カメラ②(2)	カメラ①(2)	
世界座標系データ	画素誤差平均 [pix]	1.02	1.33	4.04	8.54
	三次元誤差平均 [mm]	7.53	11.47	32.35	60.24
キャリブレーションデータ	画素誤差平均 [pix]	0.62	0.81	0.75	0.66
	三次元誤差平均 [mm]	4.39	6.54	6.20	4.69

Table 3 Evaluation of camera error

協調ポジショニング法では、親ロボットと子ロボットの移動を交互に繰り返す、広域の移動をおこなうため、移動距離が大きくなればなるほどその蓄積誤差は大きくなる。したがってカメラの位置・姿勢の世界座標系での誤差は、表3で示されるように、カメラ①(1)では画素誤差1.02pix,三次元誤差7.53mmと高精度なキャリブレーション結果であるが、カメラ①(2)では8.54pix,60.24mmと、キャリブレーション開始位置より遠方にあるカメラほど大きくなる。

一方、個々のカメラのキャリブレーションは、それぞれのカメラの視野内近傍に固定位置決めした親ロボットに搭載した測量器を用いておこなうので、その測量器に固定された座標系からみれば、誤差がカメラ①(1)では0.62pix,4.39mm,カメラ①(2)でも

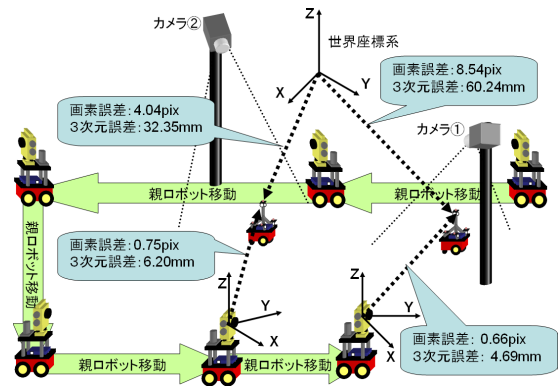


Fig.11 Evaluation of Parameters

0.66pix,4.69mmと、いずれも高精度のキャリブレーションが実現されることが実験結果で示された。すなわち、同一カメラ視野内のロボットや物体の相互の位置計測は協調ポジショニング法の蓄積誤差に影響されない。

さらに、親ロボット初期位置からの移動距離が小さい位置でのキャリブレーション評価結果に注目すると、世界座標系からみた誤差はカメラ①(1)では1.02pix,7.53mm,カメラ②(1)でも1.33pix,11.47mmと小さい。このように、親ロボット移動距離が小さいとき、その移動先の位置でキャリブレーションされたカメラの位置と姿勢の移動元の測量機器座標系からみた誤差は小さい。すなわち、近傍の2つのカメラ間の相対誤差は小さいといえる。

実アプリケーションでのロボットは、分散配置固定カメラの視野内を順次たどりつつ、目標に到達することになる。このとき固定カメラによる視覚処理の支援を受けて、自らの位置・姿勢、あるいは近傍の他物体の位置を知り、それに基づいて行動制御する。本研究で実現されるキャリブレーションの誤差は、分散カメラの使用目的には全く支障がないといえる。

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。また、実際に広域分散位置に配置したカメラのキャリブレーションを行い、本システムの有効性を示した。

文献

- [1] 横矢 剛,長谷川 勉,倉爪 亮,村上 剛司 “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-”,第24回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集,2N14,2006-9.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.