

移動ロボットによるカメラネットワークの自動キャリブレーション — 知能化空間における地図情報による性能向上 —

Automatic Calibration of Camera Network Using Mobile Robot -Performance Improvement by Map information in Intelligent Space-

○正 池 勇勲 (東京大学) 正 山下 淳 (東京大学) 正 浅間 一 (東京大学)

Yonghoon JI, The University of Tokyo, ji@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hajime ASAMA, The University of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Pre-calibration of camera network system consisting of distributed camera sensors (i.e., determining the absolute poses of each camera) is an essential task to construct an intelligent space. This research deals with automatic calibration method of external parameters of distributed cameras by utilizing easily obtainable grid map information of the environment as prior information. The map information help seek a global minimum solution (i.e., camera parameters) within the objective function containing many local minimums. We evaluate the proposed method with a mobile robot in a wireless camera network.

Key Words: Intelligent space, Camera calibration, Mobile robot

1. 序論

図 1 に示すような知能化空間 (iSpace: intelligent space) [1] 内で信頼性のある情報を取得するためには、すべての分散的なセンサに対する非常に面倒なキャリブレーション作業 (絶対位置と姿勢の測定) を事前に行う必要がある。そこで本研究では事前キャリブレーション作業を行わず、ロボット自ら環境内に分散設置されているカメラ (以下、分散カメラ) のパラメータを自動的に同定する手法を提案する。

分散カメラから連続的に観測される環境内の移動物体 (移動ロボットなど) 情報に基づき、キャリブレーションを行う様々な研究が提案されている[2], [3]。これらの研究では分散カメラの観測情報に基づいた目的関数を定義し、最大事後確率推定法を用いてパラメータ最適化を行う。しかし、これらの研究では事前情報を考慮せず観測値のみに依存して目的関数を定義するため、最適解の探索に役立つ拘束条件が不十分であり、初期解の設定によって局所最小解に落ちる場合が多く存在し、探索時間も長くなる問題点がある。

以上の問題をふまえ、本研究では目的関数の事前情報として、図 2(a)に示すような環境の格子地図を用いる方法を提案する。すなわち、環境の地図情報から得られる拘束条件を用いて知能化空間内のカメラネットワークシステムをより効果的にキャリブレーションする手法を提案する。一般にカメラネットワークなどの環境のモニタリングのための分散センサは屋内環境の壁面に設置しなければならない空間上の制約があるため、屋内環境の壁情報が含まれている格子地図情報は目的関数の拘束条件として非常に有用な情報になる。すなわち、すべての分散カメラに対するパラメータ同定を行う際に、格子地図上に表現されている壁の位置情報は各カメラの位置に対するパラメータを壁上に制限する。

2. カメラネットワークの状態定義

本研究では知能化空間におけるカメラネットワークの状態 (すべての分散カメラに対する外部パラメータ) を推定するため、推定対象になるパラメータ θ を次式のように定義する。

$$\theta = [\theta^1]^T \quad [\theta^2]^T \quad \dots \quad [\theta^n]^T]^T \quad (1)$$

$$\theta^k = [x_c^k \quad y_c^k \quad \phi_c^k]^T \quad (2)$$

ここで、 θ^k は k 番目の分散カメラに対する 3 自由度位置と姿勢を意味する状態ベクトルであり、 n は知能化空間内に配置されている分散カメラの数である。一般にカメラは壁面と水平になるように設置するケースが多いため、その場合これらの 3 自由度の状態定義は妥当である。

次式は空間座標系と画像座標系との関係を定義するカメラキャリブレーションモデルである。

$$z = Ax \quad (3)$$

式(2)の分散カメラに対する状態が正しく推定可能であれば、それに対する同次変換行列の逆行列を計算することで式(3)の外部パラメータ行列 T が求まる。したがって、内部パラメータ行列 A が既知であれば、空間座標 x を画像座標 z に変換することができ、分散カメラに対するキャリブレーション作業が可能となる。

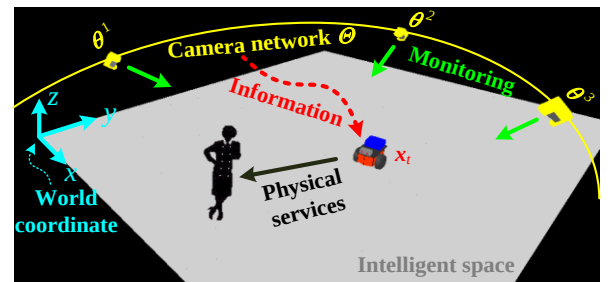


Fig. 1 Concept of intelligent space.

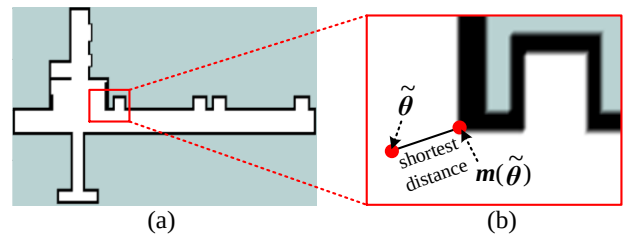


Fig. 2 Grid map information for prior information.

3. 最大事後確率推定法に基づくパラメータ最適化

本研究での推定対象になるすべてのカメラパラメータ θ に対する事後確率分布は次式のように定義される。

$$p(\theta | X, Z, M) \propto p(Z | \theta, X) p(\theta | M) \quad (4)$$

ここで、お互いに独立であると判断可能な確率変数は省略された。 X は知能化空間内を走行した移動ロボットの奇跡であり、正確に推定されていると仮定する。 Z は分散カメラの観測情報の集合であり、 M は本研究で事前知識として用いられる格子地図情報である。また、 $p(Z | \theta, X)$ は分散カメラとロボットの状態がそれぞれ X と θ であると仮定するとき、どんな観測値が得られるかに対する尤度関数であり、 $p(\theta | M)$ は格子地図情報に基づく事前確率分布を意味する。式(4)の事後確率分布に対数を適用して展開すると、最適化問題は次式のように、カメラパラメータ θ に対する非線形最小二乗法問題になる。

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \arg \min_{\theta} [-\log p(Z | \theta, X) p(\theta | M)] \\ &= \arg \min_{\theta} \left[\text{const.} + \frac{1}{2} \sum_{(k,t) \in \mathcal{O}} (z^k - AT^k x_t)^T \sigma_z^2 I (z^k - AT^k x_t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\tilde{\theta}^k - m(\tilde{\theta}^k))^T \sigma_m^2 I (\tilde{\theta}^k - m(\tilde{\theta}^k)) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 x_t は時刻 t における移動ロボットの位置 z^k は k 番目の分散カメラからの観測値である。すなわち、 $\mathcal{O}$ は分散カメラからロボットが観測されたときのカメラ索引 k と時刻 t の集合を意味する。 T^k は k 番目カメラの外部パラメータ行列である。 $\tilde{\theta}^k = [x_c^k \ y_c^k]^T$ はカメラパラメータ θ から姿勢変数を除いた位置ベクトルを意味する。また、関数 $m(\cdot)$ は図2(b)に示すように、位置入力に対して格子地図上での最も近い占有領域(壁領域)の位置を出力する関数である。すなわち、式(5)に示すように、壁に近いパラメータ推定値であるほど、目的関数の値が小さくなるため、関数 $m(\cdot)$ による拘束条件は、最適の推定値を壁の位置に制限する役割をする。 σ_z^2 , σ_m^2 はそれぞれ観測値と地図情報の不確実性を意味するノイズ変数であり、各拘束条件に対する影響力を調節する。

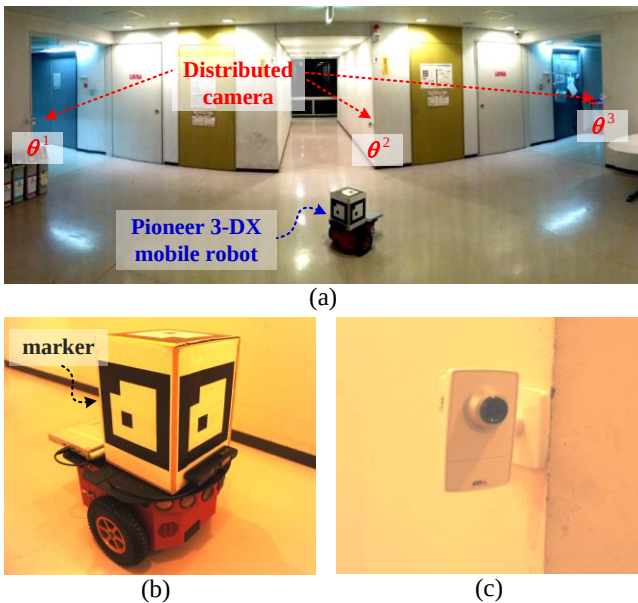


Fig. 3 Experimental setup: (a) experimental environment, (b) Pioneer 3-DX mobile robot, and (c) wireless IP camera.

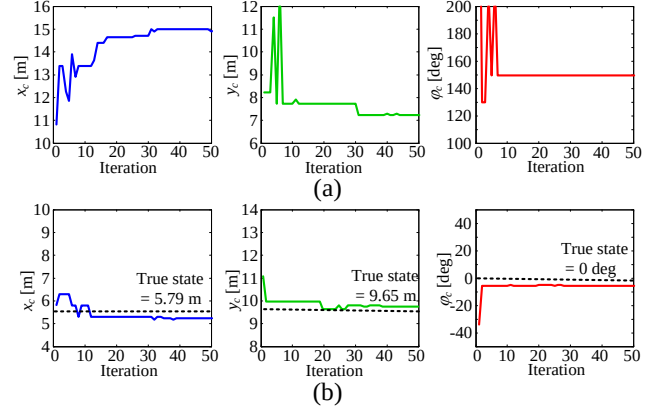


Fig. 4 Experiment result for camera parameter estimation: (a) without using map information, and (b) using map information.

4. 実験結果

提案した自動キャリブレーション手法を検証するため、図3に示すように屋内環境に無線IPカメラ(Axis社のM1004-W)3台でカメラネットワーク構築し、移動ロボット(MobileRobots社のPioneer 3-DX)を用いて実験を行った。ロボットにはマーカーを付着し、カメラからの観測を容易にした。また、環境に配置した各分散カメラに対する内部パラメータのキャリブレーション作業は事前に行った。

最適化アルゴリズムとしてはGA(genetic algorithm)を用いてパラメータ同定を行った。GAは一般的な最適化アルゴリズムでのヤコビ行列の計算を必要としないため、特異点発生などの問題が発生しない利点がある。また、本研究での格子地図を用いた拘束条件のように解の範囲を大幅に制限することが可能な場合、非常に効率的に解を求める。

図4は、分散カメラ θ^k に対して、時間の経過に対する各状態変数の推定値の変化を地図情報を用いた場合と、使用しなかった場合を分けて比較したグラフである。地図情報の拘束を適用しなかった場合は、多くの局部最適解が存在するため、誤ったパラメータが推定された。それに対して地図情報の拘束を適用した場合は、壁の位置情報に関する制限が入り、解の候補になる範囲が大幅に減らされるため、各状態変数が正しい位置に収束し、外部パラメータ同定が完了された。

5. 結論

本研究では知能化空間内に配置された分散カメラに対する外部パラメータを自動的にキャリブレーションする手法を提案した。壁の情報が含まれている格子地図情報に基づく拘束条件を目的関数に追加することで、パラメータ同定の性能を飛躍的に向上させた。実験結果により、高い精度でパラメータ同定が可能であることが証明された。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム(ImPACT)「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた。

文献

- [1] J.-H. Lee and H. Hashimoto, "Intelligent Space—concept and contents," *Advanced Robotics*, vol. 16, no. 3, pp. 265–280, 2002.
- [2] A. Rahimi, B. Dunagan, and T. Darrell, "Simultaneous Calibration and Tracking with a Network of Non-Overlapping Sensors," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 187–194, 2004.
- [3] S. Funiak, C. Guestrin, M. Paskin, and R. Sukthankar, "Distributed Localization of Networked Cameras," *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 34–42, 2006.