

赤外 LED を用いた移動ロボットの自己位置同定

Self-localization of a mobile robot using infrared LEDs

○学 土方俊介(中央大) 正 梅田和昇(中央大)

*Shunsuke HIJIKATA, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University

Abstract – This paper proposes a robust method for indoor self-localization of a mobile robot. Infrared LEDs are used as landmarks. They are invisible and thus do not irritate a human. They are set at known positions, and a CCD camera on a mobile robot observes them and self-localization is carried out. A method to obtain position and orientation in two-dimensional plane with two or more LEDs is formulated. The nonlinear least squares method is applied. Experiments with a constructed experimental system show high precision of self-localization: errors of 30mm for position and 1deg for orientation.

Key Words: Self-localization, Mobile Robot, Infrared LED

1. 序 論

ロボットが自律して行動するためには、ロボット自身の位置を知ることが重要である。これまでにランドマークを用いた自己位置同定手法が種々提案されている[1][2][3]。その一手法として赤外 LED をランドマークとして室内の壁に複数個設置して、移動ロボットに搭載した赤外透過フィルタ付きの CCD カメラで検出することによって自己位置を同定するシステムが考案されている[3]。

この手法では位置 2, 姿勢 1 の 3 成分のみを未知パラメータとしていたため地面の微小な凹凸によってカメラの姿勢に誤差が生じ、その結果ロボットの自己位置同定の精度が悪くなる。そこで本研究では地面の微小な変化も考慮にいれて、求める未知パラメータを 4 ないし 5 成分としてより精度の高い自己位置の同定を行う。Fig.1 に本論の自己位置同定システムの概念図を示す。

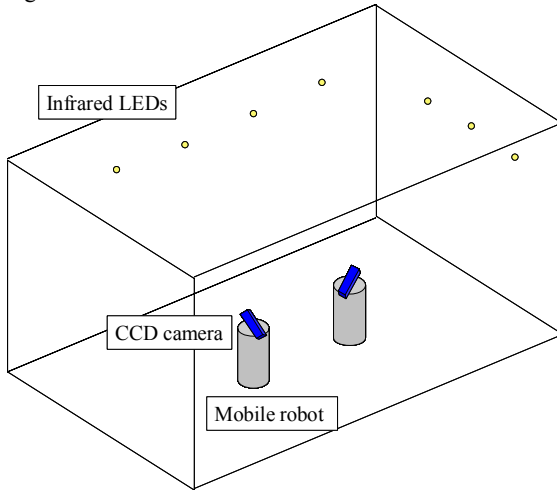


Fig.1 Indoor self-localization using infrared LEDs

2. 自己位置同定手法

2.1 問題設定

設定した座標系を図 2.3 に示す。ロボットは 2 次元平面内を移動すると仮定する。よってロボットの高さ z は一定の既知の値とする。また、カメラは斜め上を向いているとする。

ここでロボットの自己位置同定で知りたいパラメータは位置 (x,y) と床面に垂直な軸回りの θ であるが、序論でも述べたように地面の微小な凹凸によって姿勢に誤差が生じ、その結果、ロボット

の自己位置同定の精度が悪くなる。よって地面の微小な凹凸を考慮にいれて x 軸回りのカメラの仰角 α と y 軸回りの回転角 β も未知パラメータとする。求める未知パラメータはロボットの位置 (x,y) とロボット座標系の各軸回りの回転角 (θ, α, β) の計 5 パラメータとする。

既知の位置 (x_i, y_i, z_i) に設置された LED が画像上で (a_i, b_i) に観測されたとする。このとき未知パラメータ $(x, y, \theta, \alpha, \beta)$ を求める。

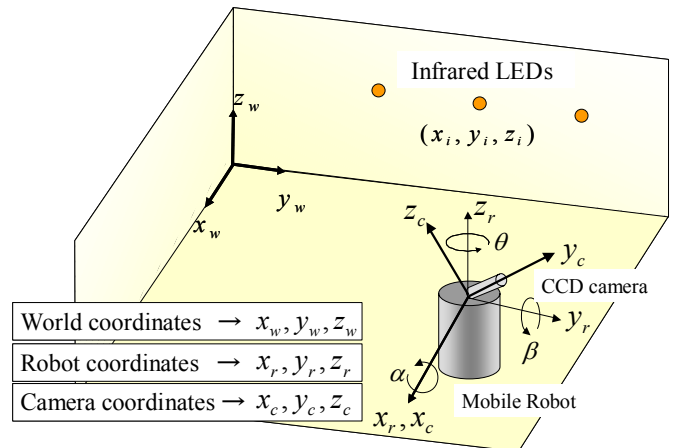


Fig.2 World, robot and camera coordinate systems

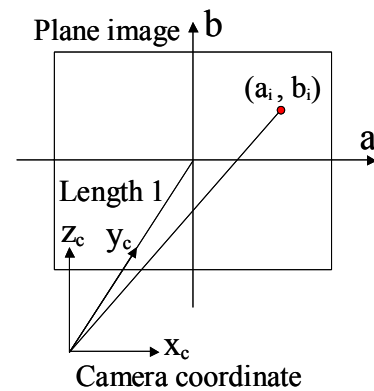


Fig.3 Relation between camera and image coordinate systems

2.2 提案手法

画像中に観測される赤外LEDの位置 (a_i, b_i) は式(1),(2)で表される.

$$a_i = \frac{1}{A} \{ (x_i - x) \cos \theta + (y_i - y) \sin \theta - \beta (z_i - z) \} \quad (1)$$

$$b_i = \frac{1}{A} \{ (x_i - x) (\sin \alpha \sin \theta + \beta \cos \alpha \cos \theta) + (y_i - y) (\beta \cos \alpha \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta) + (z_i - z) \cos \alpha \} \quad (2)$$

$$A = \{ (x_i - x) (\beta \sin \alpha \cos \theta - \cos \alpha \sin \theta) + (y_i - y) (\cos \alpha \cos \theta + \beta \sin \alpha \sin \theta) + (z_i - z) \sin \alpha \}$$

式(1),(2)の左辺は画像上で測定される測定値であり, 右辺には未知パラメータ $(x, y, \theta, \alpha, \beta)$ が含まれる. 式(1),(2)を多次元ニュートン法, 非線形最小二乗法を用いて解き, 未知パラメータを求める.

多次元ニュートン法は測定値と未知パラメータの数が同じ場合に用いられる. 赤外LEDを1個観測すると上記の2個の式が成り立つので, 赤外LEDを2個観測し, β を0と仮定することで, 4成分の未知パラメータ (x, y, θ, α) を求める. また, 非線形最小二乗法では多次元ニュートン法と比較するための (x, y, θ, α) の4成分の場合と, ピッチ角 β も含めた未知パラメータ $(x, y, \theta, \alpha, \beta)$ の5成分の場合との両方を求める.

3. 実験システムの構成

赤外LEDに赤外線リモコン用のEL-117(光電子工業研究所, 波長940nm)を用いた. またCCDカメラにはXC-77(SONY)を使用し, 焦点距離8mmのレンズと波長800nm以上の赤外線透過する赤外透過フィルタIR-80(Kenko)を装着した. 画角は56.4deg×42.6degである. PCにはPentium4 1.4GHz(Dell), 画像入力ボードにはPicPort-Color (Leutron Vision)を使用し, 画像処理ソフトHalcon(MVTec)を用いて画像処理を行った. 図4に実験環境(6.961m×7.761m)を示す. この部屋に赤外LEDを設置して実験を行った. 実験中のCCDカメラ, 赤外LEDをそれぞれ図5と図6に示す.

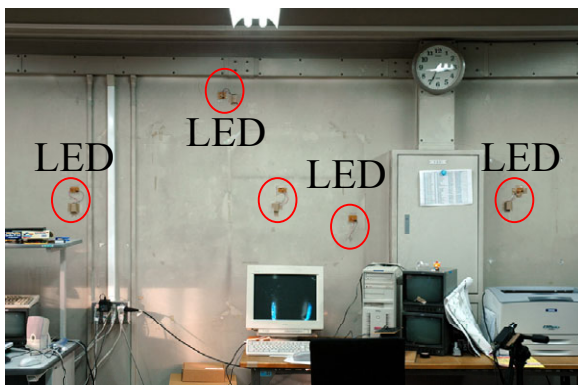


Fig. 4 Experimental environment

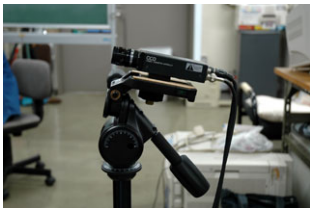


Fig. 5 CCD camera

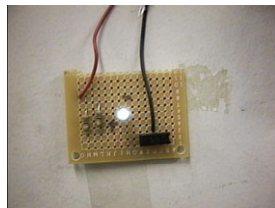


Fig. 6 Infrared LED

4. 赤外LEDの検出

画像処理によって壁に設置された赤外LEDを検出し重心座標を得るまでの処理を図7に示す. また図8に赤外LEDの重心位置検出の様子を示す. 赤外透過フィルタにより赤外光以外はカットされている. 赤外LED以外に蛍光灯が観測されるが, 形状を限定し, 絞りを調節することで赤外LEDだけを抽出でき, ロバストな検出が可能である.

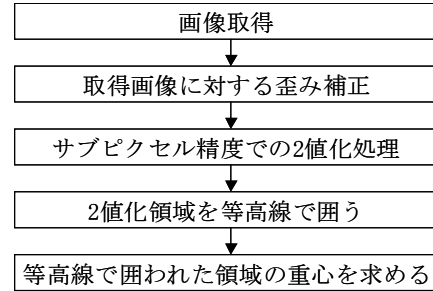


Fig. 7 Flow of image processing

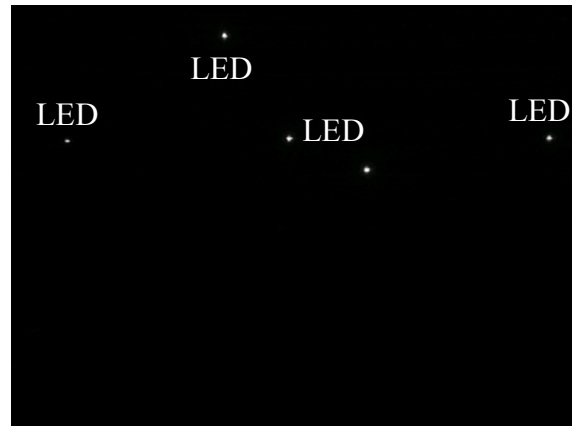


Fig. 8 Detected LEDs

5. カメラ位置・姿勢の計測実験

5.1 多次元ニュートン法と非線形最小二乗法を用いた実験

図9に赤外LEDの位置とカメラの高さを示す. 多次元ニュートン法と非線形最小二乗法を用いて環境内でのカメラの位置・姿勢を求めた. 赤外LEDは計測距離20mで30deg, 10mで35degまで検出できる. また, 正面から赤外LEDを観測したときにレンズの絞り4以上で35mまでの距離が計測可能である[3]. これを考慮に入れて実験を行った. まず, 以下の仮定を置く.

- カメラの絞りは4とする.
- 赤外LEDは複数個観測する. 赤外LEDからカメラまでの距離すなわち計測距離はカメラから一番遠い赤外LEDで10m以下とする.
- 多次元ニュートン法では図9に示したLED1, LED2の2個, 非線形最小二乗法ではLED1, LED2, LED3の3個を観測する.

次に実験方法を以下に示す.

- カメラを環境内の任意の既知の位置に置く. 赤外LEDは上記で述べた指向性を有する. よってカメラの姿勢 θ は赤外

LED を十分に観測できる $\pm 30\text{deg}$ 以内で複数の赤外 LED をすべて観測できるように角度を設定する。カメラの仰角 α は赤外 LED が観測できるように -5deg から 25deg の値に設定する。

- 2) 設置したカメラで赤外 LED を観測して多次元ニュートン法・非線形最小二乗法を用いてカメラの位置・姿勢を求め、実測値との誤差を求める。
- 3) これを 10 回行い、誤差の平均値を求める。

結果を図 10,11 に示す。図 10 は求めるパラメータが (x,y,θ,α) の 4 成分で、多次元ニュートン法と非線形最小二乗法を用いた場合の比較である。図 11 は非線形最小二乗法を用いて求めるパラメータが (x,y,θ,α) の 4 成分の場合と $(x,y,\theta,\alpha,\beta)$ の 5 成分の場合との比較である。各図は測定値の誤差の絶対値の平均と標準偏差を表している。

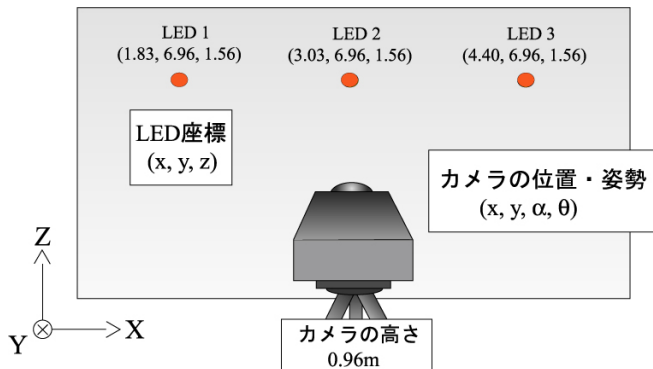
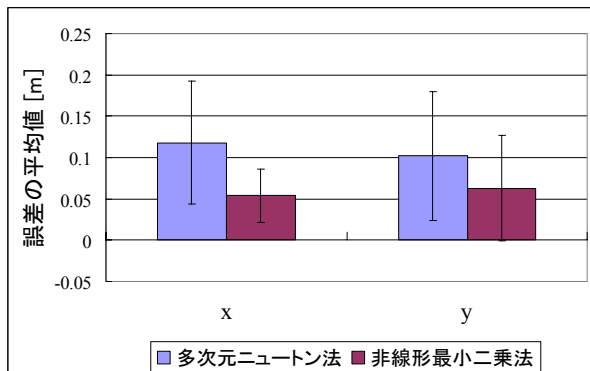
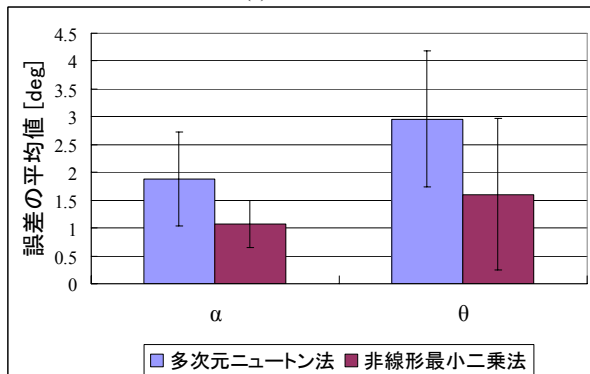


Fig.9 Position of infrared LEDs

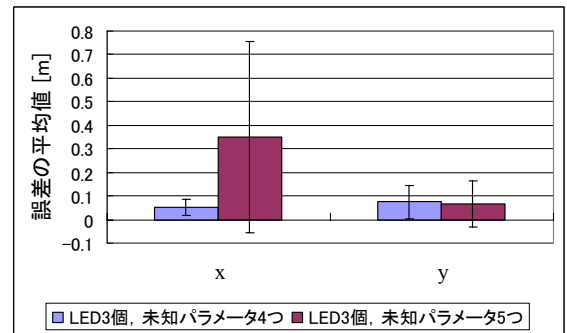


(a) Position

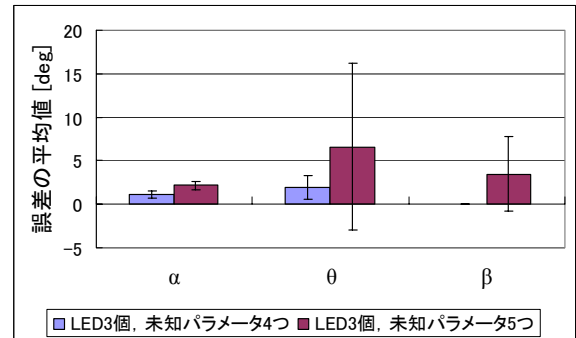


(b) Orientation

Fig.10 Measurement result: Comparison of Newton method and nonlinear least squares method



(a) Position



(b) Orientation

Fig.11 Measurement result: Comparison of the number of parameters using nonlinear least squares method

図 10 から非線形最小二乗法の方が精度が高いことがわかる。これは多次元ニュートン法と非線形最小二乗法では非線形最小二乗法の方が赤外 LED を 1 個多く観測しているためだと考えられる。図 11 の非線形最小二乗法を用いて未知パラメータが (x,y,θ,α) の 4 個の場合と $(x,y,\theta,\alpha,\beta)$ の 5 個の場合の実験では β を 0 と仮定したが実験の結果、大きな値になり精度が悪くなった。

5.2 LED を増やしたときの実験

そこで次に赤外 LED の数を増やして、赤外 LED を 4 個観測させたときの実験を行った。図 12 に赤外 LED の位置・カメラの高さを示す。仮定や実験方法は 5.1 節と同じにした。ただし、この実験では多次元ニュートン法は用いずに非線形最小二乗法のみを用いた。結果を図 13 に示す。図 13 はカメラの位置・姿勢の測定値の誤差の絶対値の平均と標準偏差を示している。実験結果は 5.1 節の赤外 LED を 3 個観測させて未知パラメータを 5 個求めた場合の実験結果と比較させている。赤外 LED を 3 個観測させた場合に β が大きな値になりカメラの位置・姿勢の精度が悪くなっていたが、赤外 LED を 4 個観測させることで β を小さく抑えることができた。

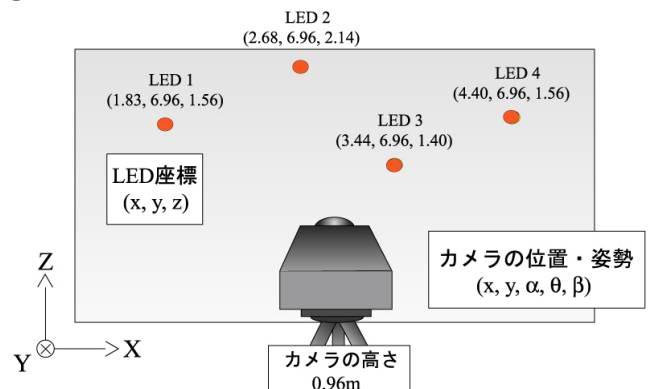
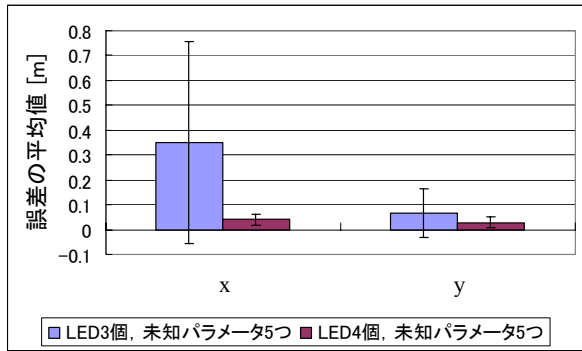
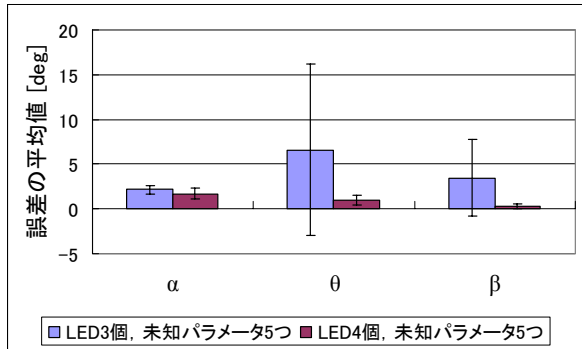


Fig.12 Position of four infrared LEDs



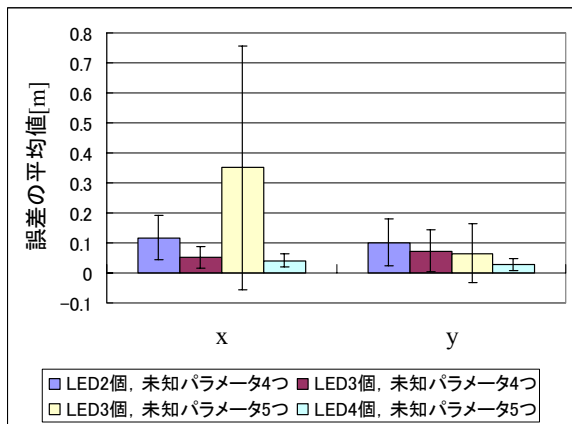
(a) Position



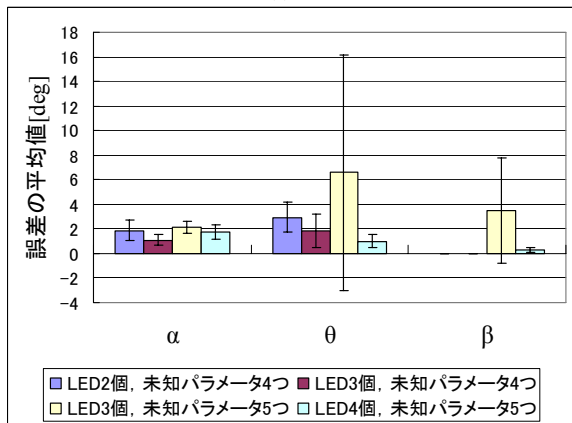
(b) Orientation

Fig.13 Measurement result: Comparison of the number of LEDs

非線形最小二乗法による実験結果を図 14 にまとめた. 赤外 LED を増やすことで精度が高くなっていることがわかる.



(a) Position



(b) Orientation

Fig.14 measurement result:
Comparison of the number of LEDs and parameters

6. 結 論

複数の赤外 LED を室内の壁に設置して CCD カメラで観察することによってカメラの位置・姿勢を求める手法を提案した. 2 次元平面内での位置・姿勢の 4 ないし 5 成分を未知パラメータとして求めた. 赤外 LED の数を増やすことにより, 精度が高くなることを示した. 赤外 LED を 4 個観測させることでカメラの位置計測誤差を $\pm 30\text{mm}$, 姿勢計測誤差を $\pm 1\text{deg}$ に収めることができた.

今後はロボットに搭載してリアルタイムでの計測を目指す. また, 本研究の手法では既知の位置の赤外 LED を観測することで 2 次元平面内での位置・姿勢を未知パラメータとして求めている. しかし, ロボットが動き回するには室内の様々な場所に赤外 LED を設置する必要がある. そのときの赤外 LED の位置を知るためにロボットの現在の位置・姿勢から赤外 LED の位置を求めることが有用であると考えられる.

参 考 文 献

- [1] 春日智恵: “デジタル標識パターンを用いた自己位置同定法”, 日本ロボット学会誌, 12, 6, pp.857-862, 1994.
- [2] 美馬一博, 金森哉史, 梶谷誠, 明愛国: “偏向フィルタを用いた移動ロボット用ランドマークシステムの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.4, pp.518-526, 1998.
- [3] 梅田和昇, 獅子倉充, 手島淳慈: “赤外 LED を用いた室内での自己位置同定の一手法”, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2A18, 2004.
- [4] 中川 徹, 小柳義夫: “最小二乗法による実験データ解析”, 東京大学出版会, 1982.