

室内における赤外 LED を用いた 移動ロボットの位置・姿勢推定手法

○土方俊介（中央大）、梅田和昇（中央大）

Indoor Self-localization of a Mobile Robot using Infrared LEDs

○Shunsuke Hijikata (Chuo Univ.), Kazunori Umeda (Chuo Univ.)

Abstract: This paper proposes a simple and robust method for indoor self-localization. Infrared LEDs are used as landmarks. They are set at known positions, and a CCD camera on a mobile robot observes them and self-localization is carried out. Acquisition of the position and orientation of the robot with two or more LEDs is formulated. The nonlinear least squares method is applied. Experiments with a constructed experimental system evaluate the proposed method. For four parameters, observation of two LEDs gives a good localization, and for six parameters, four LEDs.

Key Words: Indoor Self-Localization, Infrared LED, Nonlinear Least Squares Method, Mobile Robot

1. はじめに

ロボットが実世界で自律的に行動するためには自己位置同定をする必要がある。そのためロボットや物体の位置を推定する手法が様々提案されてきた。

屋外で人や物の位置を推定するものに GPS がある。しかし室内では衛星からの電波が遮断され、また精度も不十分である。そこで室内での自己位置同定手法が提案されている。一つの手法として GPS を拡張した自己位置同定手法がある[1][2]。また、超音波を使った手法も提案されている[3]。この原理は GPS の原理と似ている。いくつかの超音波ビーコンを既知の位置に設置し、ロボットに取り付けた受信機でビーコンとの距離を求める。そして幾何学的にロボットの位置・姿勢を推定している。

上記以外にも自己位置同定の研究では CCD カメラから得られる画像情報を用いて位置・姿勢を推定する手法が広く研究されている。一つの手法として View-based approach がある[4][5]。これは様々な位置でのカメラの画像をあらかじめ記憶しておき、取得画像とのマッチングによって自己位置同定をする手法である。よりロボストで高精度な手法としてランドマークを利用した Model-based approach がある[6][7]。複数個のランドマークを環境内に設置する。画像処理によってランドマークを検出・処理し、ロボットの位置・姿勢を求める手法である。この手法ではランドマークによって自己位置同定の精度が変わるので様々なランドマークが提案されている。ID 化するために 2 次元パターン[8][9]を用いた研究や赤外光をランドマークとした研究がされている。中里ら[10]は天井に再規性反射

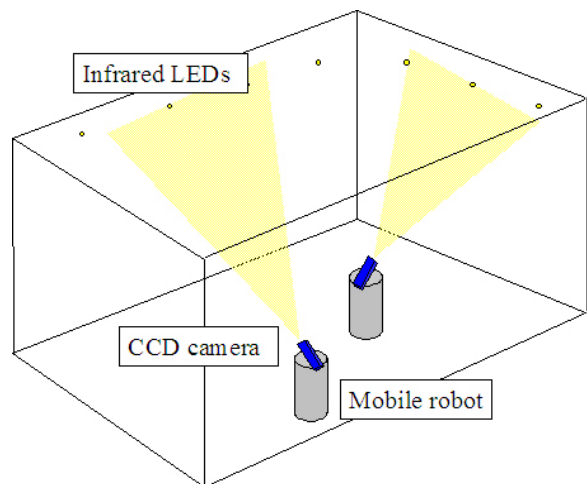


Fig.1 Indoor self-localization using infrared LEDs

マーカを貼り付け、赤外光を照射することでマーカのみを検出し自己位置を特定している。また、壁に赤外プロジェクタを設置し、天井に赤外光を投影する。そしてロボットに搭載したカメラの画像から自己位置を特定する装置も開発されている[11]。Arai ら[12]は赤外 LED をロボットに取り付け 2 体のロボットの相対的な位置・姿勢を求めている。Welch ら [13]は 3000 個もの赤外 LED を天井に貼り付けて、6 面のフォトダイオードからなるセンサで高精度な自己位置同定を実現している。

赤外光は人には不可視である。赤外光以下の波長をカットすることでロボストな観測が可能になるという利点を持つ。そこで本研究では赤外 LED をランドマークとして用いる[14]。使用する LED は Welch のように多数ではなく数個である。赤外 LED の取得画像から非線形最小二乗法により自己位置同定を行う。

2. 自己位置同定手法

2.1 問題設定

本研究の自己位置同定手法の概要を Fig.1 に示す. 赤外 LED は室内の既知の位置に設置されているとする. 移動ロボットは赤外透過フィルタ付きの CCD カメラで LED を観測し, 自己位置同定を行う. 各座標系とロボットの位置 (x,y,z) と姿勢 (α,β,θ) の関係を Fig.2 に示す. これらは世界座標系から見たカメラ座標系のパラメータを示している. カメラ座標系の原点は CCD カメラのレンズ中心に一致させる. そして y 軸を光軸と対応させる. 求めるロボットのパラメータは与えられた状況によって変わる. 環境の床平面が平らでロボットが車輪式ならば未知パラメータは2次元平面 (x,y) と z 軸周りの回転角 θ の3成分で十分である. しかし地面が平らでないときは微小な変位として回転角 (α,β) を加えた5成分が必要である. また, 歩行ロボットでは位置 (x,y,z) と姿勢 (θ,α,β) の6成分全てのパラメータを求める必要がある.

Fig.3 にカメラ座標系と画像座標系の関係を示す. 既知の位置 (x_i,y_i,z_i) に設置した LED は画像平面上に (a_i,b_i) として観測される. そして観測された (a_i,b_i) から未知パラメータを求める.

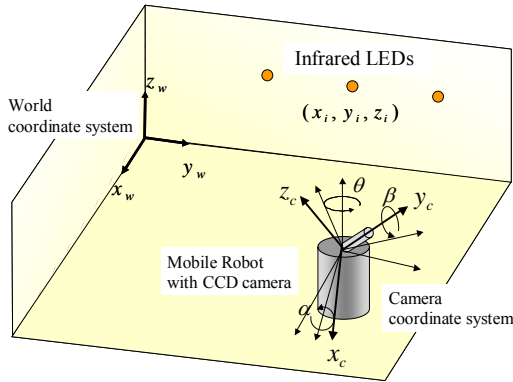


Fig.2 World and camera coordinate systems

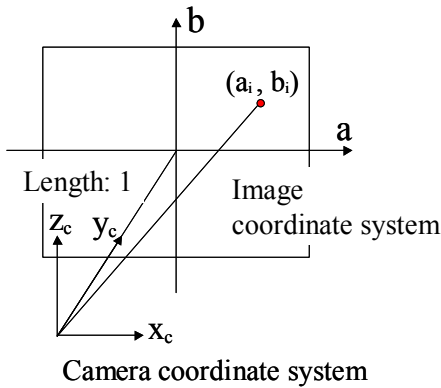


Fig.3 Camera and image coordinate systems

2.2 定式化

カメラ座標系の姿勢は (x,y,z) 軸周りの回転角 (α,β,θ) を用いて以下の式(1)で表される.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

カメラ座標系の原点から i 番目の LED へのベクトルは $[x_i-x, y_i-y, z_i-z]^T$ で表される. またカメラ座標系の原点から画像平面上の LED への方向ベクトルは $[a_i, b_i]^T$ と表すことができる. この2つのベクトルは平行であるから

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} // R^{-1} \begin{bmatrix} x_i - x \\ y_i - y \\ z_i - z \end{bmatrix} \quad (2)$$

が成り立つ. 式(2)から (a_i, b_i) が以下のように表される.

$$a_i = \frac{1}{A} \{ (x_i - x)(\cos \theta \cos \beta - \sin \theta \sin \alpha \sin \beta) + (y_i - y)(\sin \theta \cos \beta + \cos \theta \sin \alpha \sin \beta) - (z_i - z) \cos \alpha \sin \beta \} \quad (3)$$

$$b_i = \frac{1}{A} \{ (x_i - x)(\cos \theta \sin \beta - \sin \theta \sin \alpha \cos \beta) + (y_i - y)(\sin \theta \sin \beta + \cos \theta \sin \alpha \cos \beta) + (z_i - z) \cos \alpha \cos \beta \} \quad (4)$$

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

式(3),(4)の左辺は測定値であり, 右辺には最多で6個の未知パラメータ $(x,y,z,\alpha,\beta,\theta)$ が含まれている. この未知パラメータは非線形最小二乗法により求める. 1個の LED が観測されると式(3),(4)の2個の拘束式が成り立つので未知パラメータ数の半分以上の LED を観測する必要がある.

3. LED の配置問題

2章で述べたように自己位置同定を行うためには複数個の LED を同時に観測する必要がある. それに加え, LED が指向性を有する場合に

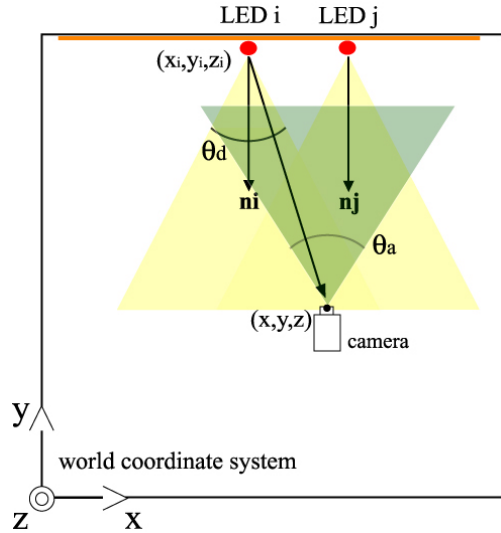


Fig.4 Directivity of LED and camera's field of view

はロボットが指向角内に位置していなければならない(Fig.4 参照).

ここで指向角を円錐と近似する. ロボットが指向角内(指向角 θ_a)に存在する位置 \mathbf{x} は

$$\frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{\|\mathbf{n}_i\| \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|} \geq \cos \frac{\theta_d}{2} \quad (5)$$

で表される. \mathbf{n}_i はLEDの方向ベクトルである. また, カメラの画角が $\theta_a \times \theta_b$ であるときにロボットがLEDを観測できるためには

$$|a_i| \geq \tan \frac{\theta_a}{2} \quad (6)$$

$$|b_i| \geq \tan \frac{\theta_b}{2} \quad (7)$$

を満たす必要がある. 式(5)-(7)の拘束式を用いて LED の配置についてシミュレーションを行った. 6[m]×6[m]の室内を想定し, LED を高さ 1.5[m], 間隔 1[m]として配置する. カメラの画角を 90[deg]×60[deg]とし, LED の指向性は無いものとする. このとき, ロボットを任意の姿勢にしたとき LED を 2 個以上観測できるロボットの位置を Fig.5 に示す. LED から 1[m]程度距離が離れていれば自己位置同定が可能である.

4. 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, 940[nm])を用いた. CCD カメラには XC-77(SONY)を使用し, 焦点距離 8[mm]のレンズと波長 800[nm]以上の赤外線を透過す

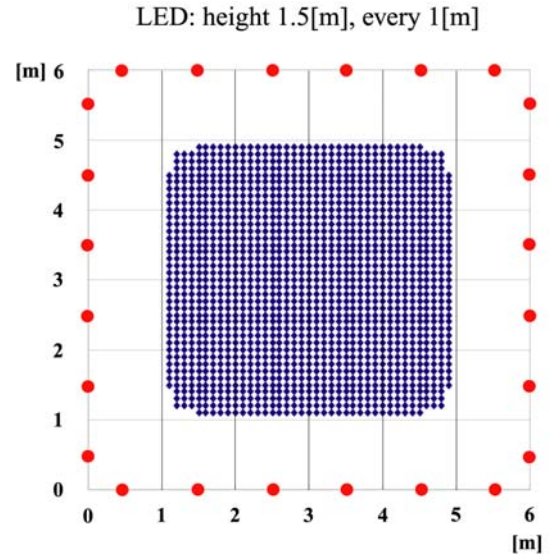


Fig.5 Simulation result for the robot position

る赤外透過フィルタ IR-80(Kenko)を装着した. 画角は 56.4[deg]×42.6[deg]である. PC には Pentium4, 1.4GHz 使用のもの(Dell), 画像処理ボードには 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. Fig.6 に実際の実験環境 (6.96[m]×7.76[m])を示す. また, 実験中の赤外 LED を Fig.7 に示す.

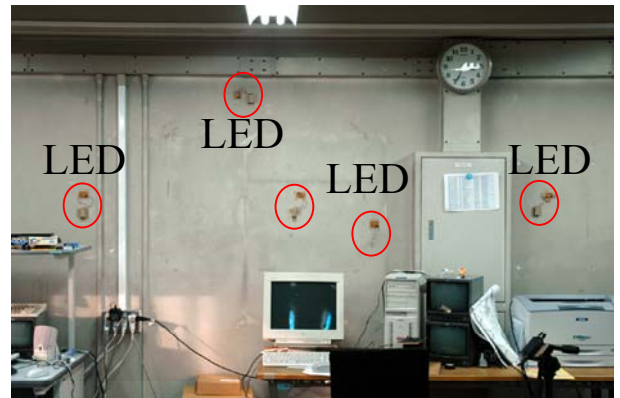


Fig.6 Experimental environment with LEDs on wall

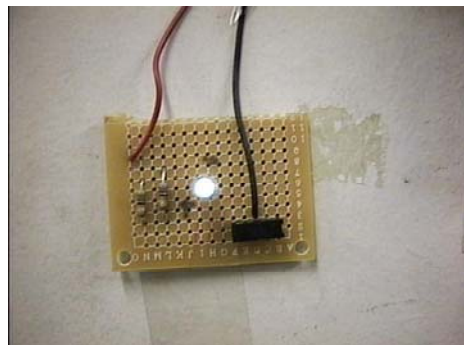


Fig.7 Infrared LED

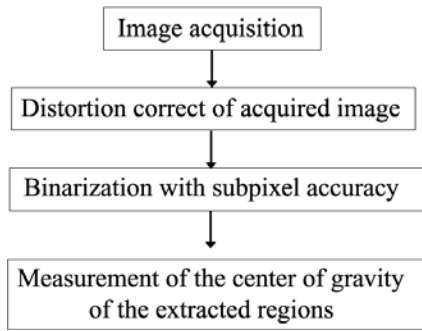


Fig.8 Flow of image processing to detect LEDs

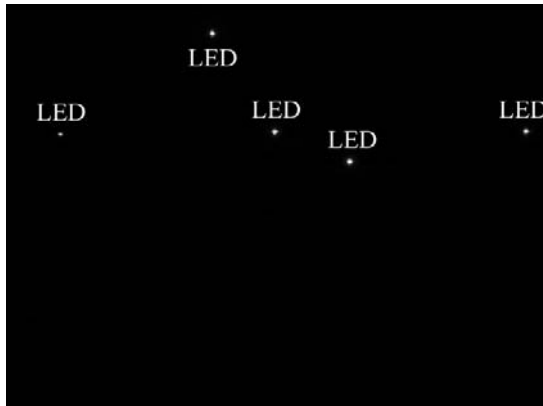


Fig.9 Image of LEDs with IR-80 optical filter

5. 赤外 LED の検出

5.1 画像処理

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 Fig.8 に示す。また Fig.9 に赤外 LED 検出の様子を示す。赤外透過フィルタにより赤外領域の光以外はカットされているので単純な画像処理だけで LED だけを抽出することが可能である。LED 以外に蛍光灯が観測される場合があるが、形状を限定して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。

5.2 LED 検出の精度

LED が計測される位置は誤差を持っている。そこで LED 検出の精度を実験により求めた。まず、カメラを固定した状態で LED の検出精度を求めた。LED を 20 回観測して標準偏差を求めた。その結果を Table 1 に示す。

Table 1
Standard deviation of LED with a fixed camera

	Standard deviation [pixel]
a (horizontal)	0.017
b (vertical)	0.006

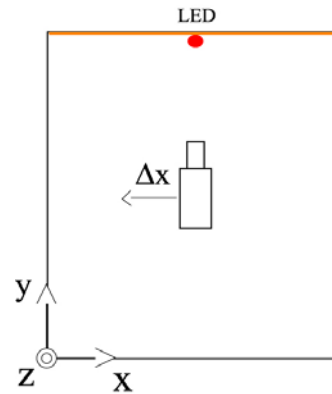


Fig.10 Camera shift for error of LED detection

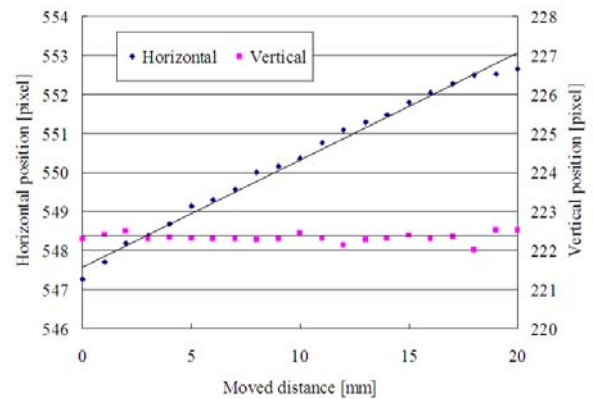


Fig.11 Detected LED positions with camera shift

この結果を見ると標準偏差が小さすぎる。これはカメラを固定したためと考えられる。そこで、カメラを水平方向に移動させて LED を観測した。その様子を Fig.10 に示す。カメラを 1[mm] ずつ移動させて 20 回観測した。Fig.11 に観測結果を示す。カメラを水平方向に動かしたので観測値の水平方向だけが比例して変化している。水平及び鉛直方向の観測値に直線を当てはめ、直線と観測値の差の標準偏差を求めた。その値を Table 2 に示す。これらの値はサブピクセル精度で妥当な値になっている。

Table 2
Standard deviation of LED with camera shifts

	Standard deviation [pixel]
a (horizontal)	0.169
b (vertical)	0.117

6. 自己位置同定実験

2 章で示した手法を実際に用いて実験を行った。ロボットにカメラを搭載せずにカメラ単体のみで実験を行い、カメラの位置・姿勢を推定した。2 章でも示したように得られるパラメータは観測する LED の数によって変わってくる。

そこで、Table 3 に示す 5 種類の実験を行った。

Table 3 Five experimental conditions

	LED No.	Unknown parameters
Ex.1	2	(x,y,α,θ)
Ex.2	3	(x,y,α,θ)
Ex.3	3	$(x,y,\alpha,\beta,\theta)$
Ex.4	4	$(x,y,\alpha,\beta,\theta)$
Ex.5	4	$(x,y,z,\alpha,\beta,\theta)$

実験 1~3 の LED の配置を Fig.12(a), 実験 4,5 の LED の配置を Fig.12(b)に示す. 実験 1 では 3 個の LED から 2 個選んで実験をし, 3 つの組み合わせの平均をその実験値とした. 実験 1~4 では高さは $z=0.96[m]$ とした. 同様に実験 1,2 では $\beta=0[deg]$ とした. 実験方法を以下に示す.

- 1)カメラを適当な位置 (x,y) ・姿勢 (α,θ) にして LED を観測する. 位置 x の範囲は $1.8[m]\sim 4.2[m]$, y は $2.0[m]\sim 5.1[m]$, α は $-5[deg]\sim 25[deg]$, θ は $-25[deg]\sim 25[deg]$ の範囲で移動させる.
- 2)カメラで観測した LED から本推定手法によって未知パラメータを求める.

実験は 1~5 それぞれ 10 回行い, 計測誤差と標準偏差を求めた. その結果を Fig.13 に示す. この結果から全体的に誤差が小さく抑えられている. また, LED の数が増えるにつれて誤差が小さくなっている. それぞれの実験についての詳細な考察を以下に示す.

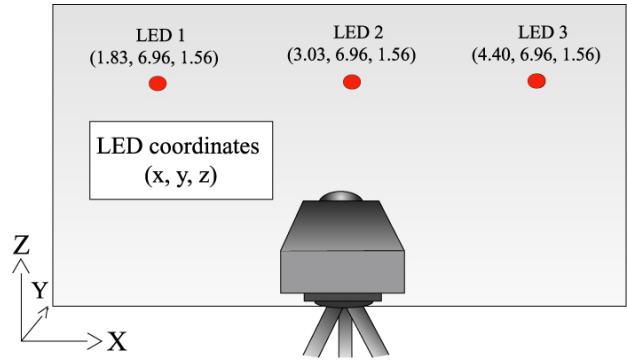
Ex.1 : LED から得られる式と未知パラメータの数が同じなので厳密解が得られる. 比較的誤差が大きい理由として観測誤差が直接的にパラメータに影響したためと考えられる.

Ex.2 : 実験 1 に LED を 1 個加えて実験を行った. その結果, 誤差が小さくなった. これは LED を 1 個増やしてシステムを冗長にしたためと考えられる.

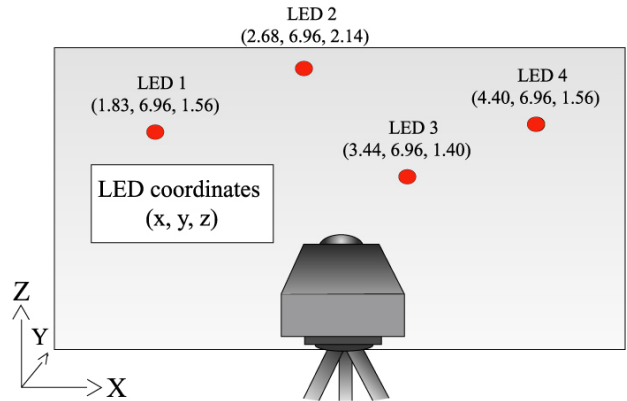
Ex.3 : 実験 2 に未知パラメータを 1 個増やして実験を行った. その結果, 誤差が大きくなってしまった. これは x,θ,α,β の標準偏差が大きいことから収束過程で局所的最小値に陥ってしまったためと考えられる.

Ex.4 : 実験 3 に LED を 1 個加えて実験を行った. その結果, 誤差・標準偏差共に小さく抑えることができた.

Ex.5 : 実験 4 に未知パラメータを加え, カメラの位置・姿勢全てのパラメータを未知と

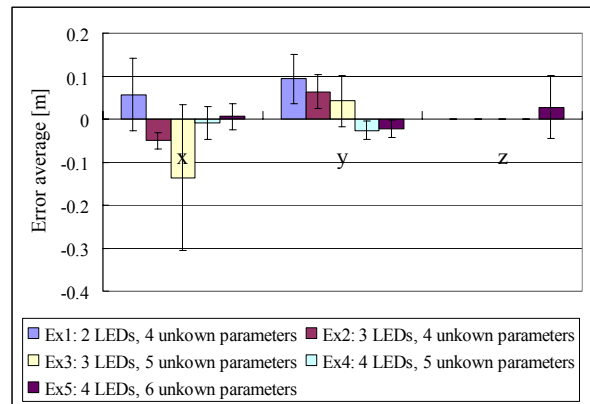


(a) Ex1, Ex2 and Ex3

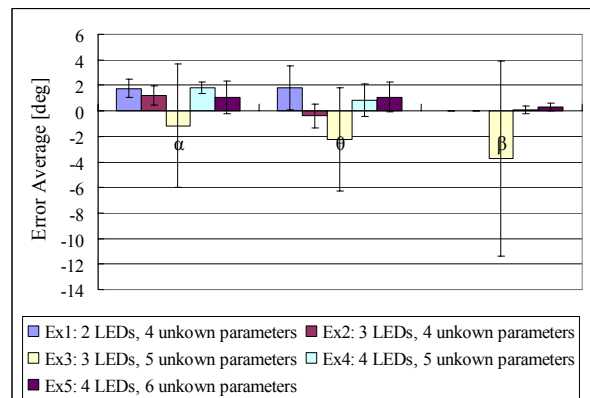


(b) Ex4 and Ex5

Fig.12 Positions of infrared LEDs



(a) Position



(b) Orientation

Fig.13 Results of self-localization

して実験を行った。その結果、未知パラメータを増やしたにも関わらず x, y, θ, β の誤差はそれほど変わらなかった。また、 z と α の標準偏差が若干大きな値となった。そこで z と α の誤差の相関を調べたところ相関値が 0.95 あった。これは並進と回転の区別が難しいことを示している。

7. 結論

本論では複数の赤外 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ロボットの位置・姿勢を推定する手法を提案した。未知パラメータ数の半分以上の LED を観測したときに非線形最小二乗法を用いてパラメータを推定した。実験では赤外 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 個観測す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。

本研究の手法では既知の位置の赤外 LED を観測することでロボットの位置・姿勢を求めている。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] J. Wang, "Pseudolite Application in Positioning and Navigation: Progress and Problems," *Journal of Global Positioning Systems*, Vol.1, No.1, pp.48-56, 2002.
- [2] S. Kang and D. Tesar, "Indoor GPS Metrology System with 3D Probe for Precision Applications," *American Society of Precision Engineering*, 19th Annual Meeting, Orlando, Florida, 2004.
- [3] H. Seki, Y. Tanaka, M. Takano and K. Sasaki, "Positioning System for Indoor Mobile Robot Using Active Ultrasonic Beacons," *Proc. 3rd IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Vol.2, pp.681-686, 1998.
- [4] 松本吉央, 稲葉雅幸, 井上博允, "ビューベーストアプローチに基づく移動ロボットナビゲーション", *日本ロボット学会誌*, Vol.20, No.5, pp.506-514, 2002.
- [5] S. Se, D. Lowe, J. Little, "Vision-based Mobile Robot Localization And Mapping Using Scale-Invariant Features," *Proc IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2001.
- [6] M. Betke, L. Gurvits, "Mobile Robot Localization Using Landmarks," *Proc. IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997.
- [7] J. M. Armingol, L. Moreno, A. de la Escalera and M. A. Salichs, "Landmark Perception Planning for Mobile Robot Localization," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1998.
- [8] Y. Ogawa, J. Lee, S. Mori, A. Takagi, C. Lasuga, H. Hashimoto, "The Positioning System Using the Digital Mark Pattern - The Method of Measurement of a Horizontal Distance -," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'99)*, 1999.
- [9] R. Katsuki, J. Ota, T. Mizuta, T. Kito, T. Arai, T. Ueyama and T. Nishiyama, "Design of an Artificial Mark to Determine 3D Pose By Monocular Vision," *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.995-1000, 2003.
- [10] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和, "不可視マーカを用いたウェアラブルARシステムの実環境における実証実験", *電子情報通信学会技術研究報告*, PRMU2004-135, pp.7-12, 2004.
- [11] *Evolution Robotics*
<http://www.evolution.com/-products/northstar/>
- [12] T. Arai, H. Kimura, J. Ota and D. Kurabayashi, "Real-Time Measuring System of Relative Position on Mobile Robot System," *Proc. Int. Symp. Ind. Robots*, pp.931-938, 1993.
- [13] G. Welch, G. Bishop, L. Vieei, S. Brumback, and D. Colucci, "High-performance wide-area optical tracking the hiball tracking system" *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.10, No.1, pp.1-21, 2001.
- [14] 土方俊介, 梅田和昇, "赤外 LED を用いた移動ロボットの自己位置同定", *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集*, 1A1-S-040, 2005.