測域センサを応用した複数ランドマークの認識による大域的自己位置推定

Global Positioning Based on Detecting Multiple Landmarks by Using "SOKUIKI" Sensor

堀田 大輔 (筑波大) ○ 川田 浩彦 (筑波大)
正 大矢 晃久 (筑波大) 正 油田 信一 (筑波大)

Daisuke Hotta, Univ. of Tsukuba, htt@roboken.cs.tsukuba.ac.jp
Hirohiko KAWATA, Univ. of Tsukuba, hiro-kwt@roboken.cs.tsukuba.ac.jp
Akihisa OHYA, Univ. of Tsukuba, ohya@cs.tsukuba.ac.jp
Shin'ichi YUTA, Univ. of Tsukuba, yuta@esys.tsukuba.ac.jp

Position estimation is very important theme for autonomous mobile robots. In this paper we propose new global positioning sensor system. Its feature is that the system is structured by only one ultra small-sized Laser Range Finder (laser based SOKUIKI sensor) and the sensor detects only plural reflectors which are installed in environment. The sensor compares the map data, which is memorized in the sensor with detected data, then it estimates its own global position for output data. For this purpose we considered algorithm and confirmed its validity by computer simulation and experiment in real indoor environment.

Key Words: Positioning, Multiple Landmarks, SOKUIKI sensor

1. はじめに

本研究では自己位置推定機能を組み込んだ小型レーザ式測域センサ^[1]の開発を目的とする。

自己位置推定はロボットが自律移動する上において非常に重要な要素であり、古くから研究されてきた。中でも予め環境地図が与えられたロボットがセンサデータを用いて自己位置推定を行う大域的自己位置推定は最も広く研究されてきた手法である^{[2][4]}。しかしながら、これらの研究はいずれも、外界センサの他に PC などの演算処理装置との組み合わせによって実現されたものであり、単体の小型のセンサにその一切の機能を組み込むことは難しい。一方で、ロボットが研究室から一般の環境に進出しつつある今、金額だけでなくサイズや重さなど様々な面でのコスト削減要求はますます厳しくなるものと思われる。こういった要求に対して、小型のセンサ単体でロボットの移動に必要な自己位置推定機能を提供することは1つの重要な回答になりうると我々は考えている。

上記の目的のため、本稿では屋内環境にランドマークを設置し、それらを認識することでロボットの自己位置を推定する手法を提案する。またシミュレータにより手法の有効性について検証した。さらに実際の環境を構築し、その環境上でシステムの有効性を検証した。

2. センサシステムの構成

我々が目指すシステムは、自律移動ロボットの移動環境に複数のランドマークを設置し、その位置関係と予め与えられた地図データとを照合することで自己位置を推定する機能を単体のセンサに組み込んだセンサシステムである。本章ではその構成について述べる。

Table 1 Specification of SOKUIKI sensor unit for this research

光源	近赤外レーザ($\lambda=785\text{nm}$)
距離演算	位相差方式
検出対象物	再帰反射素材
検出距離	20-11,000[mm]
検出角度・分解能	240° (0.35°)
スキャン速度	36Hz

Fig.1 Rapid-URG

(a) Environment

(b) Result

Fig.2 Rapid-URG Test

2.1 リフレクタ専用測域センサ

本研究で使用している測域センサを図1に示し、表1にその仕様を示す。このセンサは、北陽電機(株)^[5]が同社の製品ラインナップの1つである Rapid-URG (UBG-04LX-F01)をベースにして、その受光素子を感度の高い Avalanche Photo Diode(APD)から感度の低い Pin Photo Diode に換装した特別版である。この換装によって、通常の屋内環境下にあるほとんどの物質は検知ができなくなる一方、リフレクタとして用いられる再帰性反射素材などの強反射物体だけは安定して検出し、距離を計測できる特徴を得ている。

センサの正面に2枚のリフレクタと、表面が鏡面状態のアルミ板を置き、センシングを行ったところ、図2に示すようにリフレクタのみが安定して検出されていることが分かる。

Fig.3 Structure of the proposed sensor system

2.2 ランドマーク素材

測域センサはその光源としてレーザ光を用いているため、再帰性の反射素材であっても正反射を起こすことがある。したがって、安定検出のために、ランドマークとして用いるリフレクタは高い反射性能を持つことが求められる。一方で屋内環境下に設置することから、素材的には柔軟性と取扱いの容易さも必要である。ランドマーク用の素材として、住友スリーエム(株)^[6]のダイヤモンドグレード反射シート 4090 シリーズを用いた。これはシート内部にフルキューブ素子が敷き詰められており、これをプラスチックフィルムで覆っているタイプで、内部にガラスビーズなどを密に配置したタイプのリフレクタよりも反射効率がよく、その反射性能は反射シートでは最高とされている。また、反射シートであるため柔軟性・加工性にも優れており、環境への設置も容易である。

2.3 システムの構成

本センサシステムは、環境中に設置された複数のランドマークと、その位置が記された地図データを持つ演算装置に、その演算装置と接続された測域センサで構成される。測域センサは環境中にあって、周辺にあるランドマークを発見すると、その相対位置座標を演算装置に送る。演算装置は送られてきた位置座標と自分が持つ地図データとを比較して測域センサの現在位置を推定する。図3に構成のイメージを示す。

3. 位置推定アルゴリズム

本章では、位置推定アルゴリズムの基本原理と実現手法について述べる。

3.1 ランドマークの対応探索

3.1.1 アルゴリズムの原理

センサが発見したランドマークの数を N とし、そのセンサから見た2次元位置ベクトルを $L_1, \dots, L_N$ とする。発見されたランドマークの各々に地図上のランドマークを1つ対応させる。次に、発見したランドマークの2点全ての組み合わせについて、それら2点間の距離と2点に対応する地図上のランドマーク2点間の距離の差の二乗を求め、求まった値の総和

$$J = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^{i-1} (|L_i - L_j| - |M_i - M_j|)^2 \quad (1)$$

を、その組み合わせの評価値とする。

ここで、

Fig.4 Landmarks Correspondence Search

J : 評価値

N : 発見したランドマークの個数

$L_1, \dots, L_N$: 発見したランドマークのセンサから見た位置を表す二次元ベクトル

$M_1, \dots, M_N$: $L_1, \dots, L_N$ への対応候補とした地図上のランドマークの位置を表す二次元ベクトル

この評価値が最小になるよう発見したランドマークと地図上のランドマークの対応を探索する。探索は木構造による深さ優先探索を用い、全ての対応の組み合わせの中で評価値が最小の対応を正しい対応と判定する。

この手法は、図4に示すようにランドマーク同士を直線で結んでできる図形の幾何学的合同性を比較するものである。

本提案手法の利点は以下が挙げられる。

1. ランドマークのみを検知するので、環境の形状や材質に依存せず影響も受けにくい
2. 発見されたランドマークのみについて、それらの相対位置の関係のみで探索を行うので、隠蔽や外乱によるランドマークの発見漏れがあっても影響がない

これらの利点は、本アルゴリズムがセンサの利用が想定される人が行き交う現実の一般環境に適していることを示している。

3.1.2 探索の効率化

3.1.1 で述べたアルゴリズムでは、各ランドマークの数が増えるとその計算量が膨大となる。また、単体のセンサへ機能を組み込むにあたって、メモリの消費量はできる限り小さくすることが求められる。そのため、効率化手法について検討を行った。

本アルゴリズムでは、探求には木構造を用い、木構造の各階層を1つのランドマークと対応づけるが、その階層毎に評価値を求めることが可能である。したがって、この評価値により探索のある階層で打ち切れば、その先の演算を省き、演算量を減らすことができる。そこで、正しい解においてこれ以上の評価値にはならないという最大評価値を、木構造探索終了のためのしきい値とすることとした。評価式から分かる通り誤対応の場合の評価値はそうでないものと比べはるかに大きくなるため、探索効率が向上する。

3.1.3 センサの位置推定

ランドマークの対応が決まれば、次にセンサの位置と角度の推定を行う。ランドマークからセンサまでの距離は分かっており、また原理的には各ランドマークを中心とした距離を半径とする全ての円の光点がセンサの位置となる。そこで、最小二乗法で各々の円までの距離が最小となる点を求めることとした。すなわち、

Fig.5 Failure Landmarks Correspondence

Fig.6 Estimation result on simulator (1)

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - r_i^2 \right)^2 \quad (2)$$

ここで、

N : 発見したランドマークの個数

(x_i, y_i) : 発見したランドマークの地図上の座標

(x, y) : センサ位置候補点の地図上の座標

r_i : ランドマークからセンサ位置候補点までの距離

ここでは $f(x, y)$ が最も小さくなる点をニュートン法で求めることとした。その際の初期値としては、発見したランドマークから適当に2つを選んで、それぞれを中心としセンサまでの距離を半径とする円の交点を求める。求まった2つの交点の中で、もう1つ選んだランドマークまでの距離が、そのランドマークまでの距離の測定値に近い方を選び、これを初期値とすることとした。

3.2 誤対応対策

前節で考案したアルゴリズムは、発見したランドマークの相対位置関係から得られる幾何学的特徴と地図上のそれとの同一性に依存している。そのため、いくつかの誤対応発生の可能性が考えられる。以下、その対策について述べる。

3.2.1 幾何学的合同

図5(a)に幾何学的合同による誤対応のシミュレーション例を示す。ここで、緑色が正しい位置、赤色が誤った位置である。前節の手法では、このように極めて似通った幾何学的特徴を持つ両者の正誤を判断することができない。他にも、推定された自己位置から見えるランドマークが裏を向いていて本来検出不可能な場合であっても、それを判断できない。

この誤対応への対策としては、ランドマークの角度を考慮した対応探索法が考えられる。すなわち、ランドマークの対応探索の最後に、現在の対応におけるセンサの位置を推定し、推定位置から見えるランドマークの向きを評価に加えることで、誤対応が検出できる。具体的には、ランドマークの面に垂直で表面方向の向きを持つベクトルと、センサからランドマークへの向きを持つベクトルのなす角 θ が $[-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ]$ であれば、これを誤対応と判断できる。

(a) First estimation

(b) Second estimation

(c) Third estimation

(d) Fourth estimation

(e) Fifth estimation

(f) Sixth estimation

Fig.7 Estimation result on simulator (2)

3.2.2 左右対称形

図5(b)に左右対称形による誤対応のシミュレーション例を示す。この種の誤対応は、センサの正面方向のベクトルと地図上のランドマークとのなす角、および自己位置上のランドマークとのなす角の比較を行うことによって検出する。すなわち、前者の角度が θ_i である時に、後者の角度が $-\theta_i$ に近ければ、それは誤対応であると判断できる。

3.2.3 直線上に並んだランドマーク

発見したランドマークがほぼ直線上に並んでいる場合、その直線を挟んで全く逆側の誤った位置を推定してしまう可能性がある。この種の誤対応についても、上記の対策が有効である。

3.2.4 複数仮説追跡による曖昧さ解消

ここで述べた様々な対策を行ったとしても誤対応の可能性を完全に排除することはできない。実際、1回の計測データから誤りと判別できない複数候補が得られる場合もある。この場合、最も評価値の小さい候補が必ずしも正解とは限らない。そこで、正解である可能性のある候補が複数ある場合は、これらを全て保持しておき、次にセンサが移動した時に再び自己位置推定を行って、前回の候補に近いもののみを正しい対応と考えることにする。これを繰り返して、解の候補を絞っていくと、最終的に1つの解が得られる。

文 献

- [1] H. Kawata, W. Santosh, T. Mori, A. Ohya and S. Yuta, "Development of ultra-small lightweight optical range sensor system," *Proceedings 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3277-3282, 2005.
- [2] Y. Chen and G. Medioni, "Object modeling by registration of multiple range images," *IVC*, Vol. 10, No. 3, pp. 145-155, 1992.
- [3] S. Thrun, D. Fox, W. Burgard and F. Dellaert, "Robust Monte Carlo localization for mobile robots," *Artificial Intelligence* 128, pp. 99-141, 2001.
- [4] 原祥亮, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一, "測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットのための環境マップ構築," 第12回ロボティクスシンポジウム, 5A2, pp.480-485, 2007.
- [5] 北陽電機(株) <http://www.hokuyo-aut.co.jp>
- [6] 住友スリーエム(株) http://solutions.3m.com/ja_JP/WW/Country/

(a) Environment (b) Given map

Fig.8 Experiment in real environment

4. 実証実験

以上のアルゴリズムの検証を行うため, シミュレータを作成しシミュレーションを行った. また, 簡単な実機実験も行った. 本章ではその結果について述べる.

4.1 シミュレーション実験

4.1.1 理想環境での検証

まず, アルゴリズムの基本的な有効性を検証するため, 環境モデルと地図データが完全に一致する理想的環境下でのシミュレーションを行った. その時のシミュレータからの出力結果を図6(a)に示す. シミュレータではセンサの実位置とその位置から発見できるランドマークまでを緑色で, 自己位置推定結果を赤色でそれぞれ表示している. シミュレータ上の複数の位置で位置推定を行ったところ, ランドマークが3点以上発見できた場合は確実に正確な位置推定が行えることを確認された.

4.1.2 誤差を含む現実環境での検証

次に, ランドマークの位置座標にそれぞれに最大 $\pm 100\text{mm}$ の誤差を持たせた地図と理想的センサモデルを用いてシミュレーションを行った. その様子を図6(b)に示す. この様に実際のセンサの位置とは多少のずれは見られるが, 位置推定は成功していると考えられる.

図7は複数仮説追跡の実行結果である. 初めは複数ある候補点がセンサ移動に伴って1つに定まっていく様子がわかる.

4.2 実機実験

図8にあるように, 室内の8カ所にランドマークとして反射シート($5 \times 5 \text{ cm}$)を貼付け, その間を移動ロボット Beego に搭載した測域センサを移動させて自己位置推定を行った. 図9に位置推定結果の推移を示す. この様に, 単純な環境ではあるが, 安定した結果が得られた.

5 考察と今後の展開

シミュレーション実験において, 前章で述べたように誤差を含む地図データを用いても期待通りの結果が得られ, 提案したアルゴリズムの有効性が確認できた. 実環境下での検証実験においても同様の結論を得ることができた.

一方で, 図9に示される通り, 本試作システムではランドマークの発見率が十分でない. ランドマークへのレーザ光の入射角が浅い角度である場合や, 正面であっても距離が離れると検出できていない. これらへの対策としては, ランドマークの選択について更に検討する必要がある.

今後, これらの問題を解決して, 次に地図データを自動生成する機能の追加なを検討したい.

謝辞

特別仕様の Rapid-URG をご提供いただいた北陽電機(株)技術本部長 森利宏氏に感謝いたします.

Fig.9 Estimation result in real environment