地図作成・位置同定用コンポーネントの開発と実環境での評価

Development of Map-building and Pose Estimation Component and Evaluation in Actual Environment

松本高斉[†], 槇修一^{††}, 正木良三^{††}, 高橋一郎^{††}
Kohsei Matsumoto[†], Shuichi Maki[†], Ryoso Masaki^{††} and Ichiro Takahashi^{††}

あらまし レーザ距離センサによる幾何形状データのマッチングに基づく地図作成・位置同定技術は、産業分野においては、特に無人搬送車の走行制御や物品の所在管理などへの応用が期待されている。しかし、これらの技術は、システムへの組み込みが容易な形で提供されていないことなどから、産業応用はあまり進んでいない状況にある。これを踏まえ、筆者らは、システムへの組み込みの簡単化を目的として、地図作成・位置同定用コンポーネントの開発を行った。同コンポーネントは、環境変化時の位置同定誤りの原因となる、レーザ距離センサ周辺の計測点の重みを減らすマッチング、また、幾何的特徴を保持しながら低解像度化した地図による Coarse to Fine ベースの高速処理などを特徴とする。本稿では、実用化に向けて生じた課題と対処、想定利用分野に合わせて策定した運用フローなどについて述べ、また、製造現場への適用を通してコンポーネントの有効性を示す。

キーワード：SLAM, 地図作成, 位置推定, レーザ距離センサ, マッチング, センシング

1. ま え が き

物体の位置・姿勢の推定（以下、位置同定）技術は、無人搬送車の走行制御や物品の位置管理、監視など、広く応用が期待されている。このようなニーズを背景に、位置同定技術については、これまで多くの研究がなされてきた。特に屋内環境については、屋外環境での GPS のようなインフラが整備されていないことから、さまざまな手法が提案されている。例えば、磁気テープや RFID 等のマーカを用いる手法¹⁾、カメラを用いた環境特徴量の検出にもとづく位置推定手法²⁾、環境側に多数設置したカメラを用いる手法³⁾、無線 LAN の電波強度計測にもとづく方法⁴⁾などが挙げられるが、マーカや無線 LAN 基地局等のインフラ設置コスト、さらには頑健性や位置同定精度などが課題となっている。

これに対し、環境内にて位置同定を行いつつ、その場で地図を生成する技術として、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる技術の研究が、ロボット分野を中心に進められている。一般にレーザ距離センサやステレオカメラ等、環境の幾何形状の計測が可能なセンサが用いられ、同センサより得られる時系列の幾何形状データの変化よりセンサ自身の移動量（位置・姿勢の変化量）を推定し、その結果をもとに幾何形状データを同一座標系に統合していくことで環境の地図を生成する技術で

ある^{5)～7)}。

この SLAM を用いることにより、前述のインフラ設置等なしでの位置同定が可能となる。一方、実用に際しては SLAM による地図の扱い・確認が重要となる。より詳しくは、SLAM で一般に生じ得る地図の歪みが、SLAM の誤差によるものか、実際の現場環境の歪みに因むものか（つまりは SLAM で歪んだ地図か、歪んだ環境を計測して得られた正しい地図なのか）を検証した上での利用が必要となる。

この検証は、現場の環境に関する知識（例えば、環境の概形、通路のグラフ構造の情報等）が十分に得られない状況では困難である。さらに、この歪みの検証を行わない場合、位置同定誤りが生じ得ることから、製造現場等への実用の観点からは、現場のユーザが地図を確認の上、位置同定に用いることが現実的と考えられる。

以上の SLAM の特性と現場で許容される運用を鑑み、筆者らは、地図をオフラインの SLAM で作成し、ユーザによる地図の確認を経て、地図を用いた位置同定を行う運用とすることで、SLAM の枠組みにもとづいた、インフラ設置等が不要な位置同定の実用化を図ることとした。この方針のもと、これまでに SLAM を用いた位置同定技術の実用化が進んでいない要因として、①運用の規定が進んでいない、②一般に高速性・頑健性の両立が困難、③利用が容易な形での機能の部品化（コンポーネント化）が進んでいない点に着目、対処することとした。本稿ではこれらを考慮した地図作成・位置同定機能のコンポーネント化、ならびに実際の製造現場での評価について述べる。

2014 年 5 月 16 日受付, 2014 年 5 月 30 日採録

[†] 株式会社日立製作所 中央研究所

(〒185-0014 国分寺市東恋ヶ窪1丁目280, TEL 042-323-1111)

^{††} 株式会社日立産機システム

(〒275-8611 習志野市東習志野7-1-1, TEL 047-477-1111)

2. コンセプトと運用・実装方針

コンポーネントのコンセプトを図1に示す。コンポーネント(同図左上)の主な役割は、レーザ距離センサから得られる幾何形状データを用いて位置同定を行い、その結果を、アプリケーションを担うシステムに提供することである。このコンポーネントをシステムに組込むことで、例えば、無人搬送車では、磁気テープ等なしでの位置同定とこれにもとづく走行制御(図1右上)、あるいは、コンポーネントによる位置同定結果とバーコードリーダの読取り結果を紐付けることでの物品の在庫・位置管理等への応用を想定する(図1右下)。

以上がコンポーネントのコンセプトとなるが、このコンポーネントを搭載したシステムの運用としては前章での検討を踏まえ、以下の流れを想定するものとした。

- (1) 環境計測：センサとコンポーネントを搭載したシステム(無人搬送車やカート等)を手動で移動させながら環境を計測した際の幾何形状データの収集
- (2) 地図作成：オフラインでのSLAM(幾何形状データの逐次的なマッチングによる統合)にもとづく地図の生成
- (3) システムの実稼働：コンポーネント上での幾何形状データと地図とのマッチングによる位置同定とその位置同定結果のシステム側での利用

上記運用において、地図作成機能についてはソフトウェアとして、位置同定機能についてはハードウェアによるコンポーネントとして実装する。地図作成機能については、地図上での無人搬送車等の経路設定、地図をもとにした建屋図面の作成などでPC上の他のソフトウェアとの密な連携が求められることから、PC上で動作するソフトウェアとして実装するものとした。また、位置同定機能については、A) 無人搬送車等に搭載した際に車両側で生じた不具合の位置同定機能への影響の回避、B) 位置同定用計算リソースの確保の観点からハードウェアとして実装するものとした。

また、利用するセンサとしては、幾何形状データが得られるセンサであれば、基本的に地図作成・位置同定に使用可能である。例えば、赤外光の照射にもとづく3Dカメラ⁸⁾、あるいはステレオカメラによる例⁹⁾が見られるが、ここでは平面を走査する方式のレーザ距離センサを用いるものとした。これは、レーザ距離センサがカメラと比べて一般に、①計測角度範囲が広く、②照明条件の影響を受けにくく、③環境の模様等がなくても安定な計測が行えること、さらには、センサがすでに普及しており、安定な供給が見込まれることなどによる。

また、SLAMの枠組みで位置同定・地図作成を行う際には、レーザ距離センサとオドメトリを併用する例が多くみられる。これはレーザ距離センサの計測範囲に物体が存在しないオープンエリアにおいて、つまりはレーザ距離センサのみでの位置同定が行えない環境において有効である。

図1 コンポーネントのコンセプト

しかし、コンポーネントの適用先として想定するシステムの運用環境を調査したところ、オープンエリアが環境に占める割合が比較的少なかったこと、加えて、オドメトリの利用を前提とした場合、コンポーネントを適用可能なシステムに限られてしまうことから、ここではオドメトリが必要となるオープンエリアでの運用は想定しないものとし、むしろオドメトリを前提としないことでコンポーネントとしての汎用性を確保する方針とした。

3. 地図作成・位置同定手法

3.1 地図作成

地図作成は、①センサの移動量(位置・姿勢)の算出と、②得られたセンサの位置・姿勢にもとづく幾何形状データのマッピングの二つの手順からなる。

まず、手順①では、すでに得られている幾何形状データに対し、次の時点で得られる幾何形状データのマッチングを行う。ここでのマッチングとは幾何形状データ同士を重ね合わせたときに、重なる割合が最大となる位置・姿勢の探索処理を指し、これにより、幾何形状データのフレーム間での位置・姿勢の変化量を求める。さらに、この変化量の積算により、最初の幾何形状データを基準としたときの各フレームでの幾何形状データの位置・姿勢を求める。

次に手順②では、手順①での位置・姿勢にもとづき幾何形状データを同一の座標系に記録(マッピング)することで、地図生成を行う。ここで、地図としては、占有格子地図を用いる⁵⁾。これは、物体の存在確率を記録した格子によって環境の幾何形状を表現するもので、ここでは特に、画素値に物体の存在確率(幾何形状データの投票頻度)を記録したビットマップ画像を想定する。手順①②の処理の繰り返しにより、得られた幾何形状データは統合され、地図が自動生成される。

また、地図は、最初の幾何形状データを基準に追記する形で生成されていき、歪みが生じ得るが、前述の通り、これがマッチング誤差の累積によるものか、環境の実際の歪みによるものかの判別は、環境についての知識がない場合

は困難である。これを踏まえ、ここでは環境の知識として、現場の建屋等のCAD図面が利用可能な場合は、これを基準の地図として、幾何形状データをマッチング・統合することで、マッチング誤差による歪みの低減を図ることとした。また、このとき、レーザ距離センサの誤差を考慮してCAD図面を太線化しておくことで、マッチング誤りの防止を図ることとした。

3.2 位置同定

位置同定は、幾何形状データの地図へのマッチングによって行われる^{10) 11)}。ここでのマッチングは基本的には地図生成でのマッチングと同様に、幾何形状データと地図とが重なる割合が最大となる位置・姿勢の探索処理によって行われるが、一方で、位置同定を無人搬送車等への適用を想定した場合、特に処理速度と環境変化への頑健性が課題となる。

これを踏まえ、処理速度については、Coarse to Fineの枠組みにしたがって高速化を図るものとした。処理の流れを図2に示す。まず、位置同定開始前に、地図作成で得られた高解像度な地図から低解像度な地図を生成しておく。続いて、位置同定において、この低解像度地図への幾何形状データのマッチングによって、大まかな位置・姿勢を算出し、続いて、より高解像度な地図のうち、すでに得られている大まかな位置を含む範囲のみを対象としてマッチングを行う。この一連の処理によって、高解像度な地図での探索処理を削減し、高速化を図る。

一方、この手法では、特に低解像度地図でのマッチング誤りが生じ易くなり得る。これは低解像度化に伴う、環境中の幾何的特徴の消失が要因である。したがって、対策として、低解像度地図の生成時に、隣接する4画素のうち、物体の存在確率が最大の画素を残すこととした。これにより、マッチングの手がかりとなるエッジ等の幾何的特徴の消失を抑えることとした(図3)。

また、位置同定は、地図と幾何形状データのマッチングにより行われるが、環境変化が生じ、幾何形状データ全体に対して、地図と異なる計測点の割合が増えると位置同定誤りが生じ得る。特に、センサヘッドを回しながら、各方位の距離計測を行うレーザ距離センサでは、センサに近い計

図3 Coarse to Fine用地図の生成

測点の密度が高くなるが、これは、位置同定が、センサに近い範囲の環境変化の影響を特に受け易いことを意味する。

今、図4左の地図(グレー)に対応する環境(黒の破線)において、環境中の物体の一部が移動したとする。この状態で図4左の計測位置で計測を行った場合、図中のような幾何形状データが得られる。マッチングではこの幾何形状データと地図が重なる割合を評価基準として位置・姿勢を探索することから、ここでは図4右のような誤った位置同定結果となり得る。これは、センサに近い範囲の計測点が、地図中の一部の格子に集中することで、いわば重みとなり、期待される位置同定結果(図4左の計測位置)からずらすように働くことによる。以上のような、レーザ距離センサに近い距離での環境変化のマッチングへの影響を考慮し、マッチングの評価値を以下とした。

$$PI = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} w[i] \cdot v[i]}{D \cdot N}$$

$$w[i] = \begin{cases} 0, & f(p_x[i], p_y[i]) \neq 0 \\ 1, & f(p_x[i], p_y[i]) = 0 \end{cases}$$

PI : 幾何形状データのある位置・姿勢でのマッチング評価値

D : ビットマップの最大値

N : 計測点数

$w[i]$: i 番目の計測点の重み

$v[i]$: i 番目の計測点が一致した格子のビットマップ値

$p_x[i], p_y[i]$: i 番目の計測点の位置

f : i 番目の計測点が一致する格子に対し、他に一致する計測点の有無を返す関数

PI の分子は地図上で幾何形状データがある位置・姿勢のときの物体の存在確率の総和に相当し、 PI が大きい程、よく一致している(幾何形状データと地図とがずれなく重なり合っている)ものと見なす。ここで、 w は、幾何形状データをなす点群のうち、センサに近い計測点と同じ格子に集中し、センサに近い範囲の地図に合わせ込み過ぎることによって生じる位置同定誤りを低減するためのものである。ま

図2 Coarse to Fineにもとづくマッチング

図4 環境変化の位置同定への影響

た、関数 f は幾何形状データをなす i 番目の点に一致する格子に、すでに一致した点があったか否かを返す関数であり、一致した格子がすでにあった場合はそれ以上に評価値が大きくなるように働く。

なお、特に低解像度な地図において、センサに近い計測点と同じ格子に特に集中しやすいことから、実装としては、上記をより単純化し、低解像度地図でのマッチングの際に、センサに近い計測点を間引くことで、同じ格子に集中する計測点の影響を抑えることとした。

4. コンポーネント化

前述の地図作成機能・位置同定機能をコンポーネントとして実装した。表1に主な仕様を示す。位置同定精度については、想定適用分野で許容される精度を調査した結果、無人搬送車の経路追従制御時で $\pm 50\text{ mm}$ 、物品等の位置管理で少なくとも $\pm 500\text{ mm}$ の精度が要求されることがわかったため、位置精度 $\pm 50\text{ mm}$ 、姿勢精度 $\pm 3\text{deg}$ と設定した。また、位置同定周期については、無人搬送車やピッキングカート等の速度が概ね 2 m/s 以下であること、想定するセンサの計測周期などを踏まえ、 25 ms とした。地図については、 $50 \times 50\text{ m}$ の広さまでの自動作成に対応するものとし、この地図の切替えにより、広域での位置同定についても対応するものとした。

レーザ距離センサとしては、計測角度範囲 180deg 程度の機種が特に普及しているが、計測角度範囲が広い方が、特

表1 コンポーネントの仕様

分類	項目	仕様
地図作成	提供形態	ソフトウェア
	地図作成	自動
	範囲	50x50m
位置同定	提供形態	ハードウェア (CPU 1.6GHz メモリ 1GB 有線 LANx2)
	動作モード	位置同定, 環境計測
	位置同定精度	$\pm 50\text{mm}$, $\pm 3\text{deg}$
	位置同定周期	25msec
共通仕様	センサ仕様	距離範囲 30m 角度範囲 270deg

図5 位置同定コンポーネント

図6 運用フェーズ毎のシステム構成と主な通信

定方向への位置同定誤りが生じにくくなることから、ここでは計測角度範囲 270deg のセンサを選定した。

位置同定コンポーネントの外観を図5に示す。コンポーネントには二つのLANポートが備えられており、レーザ距離センサとユーザー側システムに接続・通信している。運用フェーズ毎の機器の構成と主な通信の流れを図6に示す。2章で提案した運用が行えるように、ハード・ソフトが構成されており、これらがUDP通信を行うことで、環境計測・地図作成・位置同定の一連の運用が可能となっている。

5. 基本性能の評価

5.1 基準環境での位置同定精度検証

コンポーネントの評価を目的として、①位置同定精度・処理速度検証試験、②一般環境での地図作成・位置同定の動作確認試験を行った。

①の試験においては、高精度レーザ距離計を用いた三角測量により求めた位置を基準とし、この基準に対する、コンポーネントによる位置同定結果のずれ量より、位置同定精度を評価することとした。

試験を行った環境と位置同定結果の例を図7に示す。基準環境は約 $23 \times 13\text{ m}$ の矩形の環境で、この環境内の9箇所

図7 基準環境と位置同定結果の例

図8 計測台車（左）と計測の様子（右）

ずれ量は20 mm以内、繰り返し精度 $3\sigma < 10$ mmとなり、位置同定精度の仕様を満たすことが確認できた。

また、別途、位置同定の平均処理時間の計測試験を行ったところ、Coarse to Fine未使用時の処理時間は約7.6 s、また、使用時の処理時間は25 ms以内であった。これより、Coarse to Fineの効果は非常に高く、また実用に必要な速度を満たすことが確認できた。

5.2 一般環境での地図作成・位置同定確認

続いて、より複雑な環境での地図作成・位置同定の動作確認試験を行った。ここでは環境として、製品展示ロビー（約19×19 m）を使用した。同ロビーには、展示製品の他、打ち合わせ用の机・椅子、一面がガラスのエントランスなどが含まれており、前節の試験環境に比べて、複雑な環境となっている。

この環境にて、計測台車（図8左）を用いて試験を行った。計測台車には、コンポーネントとバッテリー、レーザー距離センサ、ノートPCが搭載されており、環境計測・地図作成・位置同定の一連の作業がその場で容易に行えるようになっている。この計測台車を手押しで移動させながら（図8右）、環境の幾何形状データを収集し、開発した地図作成ソフトウェアにより地図を作成した。

作成した地図とその地図を用いた位置同定の例を図9に示す。環境計測・地図作成に要した時間は約10分であった。

図9 地図と位置同定の様子

この時間はほぼ計測時間で占められており、地図作成処理そのものに要した時間は、約1分であった。また、作成した地図上での壁間の距離を、高精度レーザー距離計で実測した壁間距離と比較したところ、誤差は20 mm程度であり、地図が高精度に作成されていることが確認できた。以上により、図で示される複雑な環境においても、安定して位置・姿勢が求められることが確認できた。

6. 製造現場への応用

6.1 台車の位置管理システム

前章の基本性能の評価により、目標仕様を満たすことが確認できたことから、実際の製造現場のシステムに適用・評価するものとした。具体的には、搬送ロボットが牽引する部品搬送用の台車に、コンポーネントとレーザー距離センサ等を載せ、台車位置を管理するシステムを構築するものとした。

ここで用いる搬送ロボットを図10に示す。このロボット（以下、Lapi）は、差動二輪による移動機構と、レーザー距離センサによる位置同定機能を備えており、指定された経路に沿った自律移動が可能となっている¹²⁾。加えて、予め設定した駐車エリアに停められた空台車の発見・自動接続機能などを備える。また、台車は、荷の積み下ろしに際して、Lapiから切り離されるが、この切り離し後の位置も、コンポーネントにより管理するものとした。

6.2 現場環境での評価

Lapiに牽引され、荷積み・荷降ろし地点周辺で切り離された台車を、現場の運用に沿って人手で動かした際の動線を図11に示す。収集した動線を分析したところ、往復の移動距離は約270 mであった。この動線のうち、台車がLapiから切り離されている荷積み・荷降ろし地点周辺を確認したところ、台車を人手で動かした際の動線が図のように確認できた。また、これらの計測は製造現場が作業時間中に行っており、現場作業者の横切りや仮置き物品の移動などによる環境変化の影響もなく、動線が安定して計測可能なことが確認できた。

また、地図を1×1 mの格子で分割し、格子毎の台車の滞在時間を統計処理したところ、図中の丸印で示される地点が台車の滞在時間が長い地点として検出できた。滞留地

図10 製造現場(左)と搬送ロボットLapi(右)

図11 現場地図と台車の動線

点を現場で確認したところ、その地点では台車の仮置きや台車の接続・切り離しが行われていることがわかった。以上より、コンポーネントにより、台車の位置管理が容易に実現可能なこと、加えて、滞留地点とその要因のような現場改善につながる分析が可能なが確認できた。

7. むすび

本稿では、レーザ距離センサを用いた環境の地図作成機能・位置同定機能のコンポーネント化を目的として、コンポーネントのコンセプト、実装のキーとなるマッチング部の改良と実装、実環境での評価等について述べた。

このうち、マッチングについては、幾何的特徴を強調した低解像度地図を用いたCoarse to Fineにより、マッチング誤りの低減と高速化を図った。また、幾何形状データのうち、センサに近い距離の物体の計測点の重みを下げることで、環境変化時の頑健性の向上を図った。以上の特徴を備えるコンポーネントを開発し、評価を行ったところ、繰り返し精度は $3\sigma < 10\text{ mm}$ であり、高精度な位置同定が可能ながこと、また実際の環境にて、容易かつ迅速に地図作成可能ながことが確認できた。また、製造現場における台車の位置管理システムにコンポーネントを適用し、動線や滞留位置等の検出に有効なことを示した。

本コンポーネントは、製品化されており、さまざまなシステムで利用されている。今後は、異種センサの併用による初期位置同定の高速化などを進める。

〔文 献〕

- 1) X. Wu, P. Lou, K. Shen, G. Peng, D. Tang: "Precise Transshipment Control of An Automated Magnetic-Guided Vehicle Using Optics Positioning", Int. Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 7, 1, pp.48-71 (2014)
- 2) S. Se, D. Lowe and J. Little: "Vision-based Mobile Robot Localization and Mapping using Scale-Invariant Features", Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.2051-2058 (2001)
- 3) T. Sogo, H. Ishiguro and T. Ishida: "Mobile Robot Navigation by a Distributed Vision System", New Generation Comput., 19, 2, pp.121-138 (2001)
- 4) J. Biswas and M. Veloso: "WiFi Localization and Navigation for Autonomous Indoor Mobile Robots", Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.4379-4384 (2010)
- 5) S. Thrun, D. Fox, W. Burgard and F. Dellaert: "Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots", Artificial Intelligence, 128, 1-2, pp.99-141 (2000)
- 6) M. Tomono: "Robust 3D SLAM with a stereo camera based on an edge-point ICP algorithm", Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.4306-4311 (2009)
- 7) D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin and M. Philipose: "Mapping and Localization with RFID Technology", Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.1015-1020 (2004)
- 8) 鄭龍振, 石橋正教, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉: "4台のKinectを搭載した全方向計測ロボットによる環境計測", 第29回日本ロボット学会学術講演会, 103-4 (2011)
- 9) M. Garcia and A. Solanas: "3D Simultaneous Localization and Modeling from Stereo Vision", Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.847-853 (2004)
- 10) 榎修一, 松本高斉, 正木良三, 谷口素也: "位置同定コンポーネントの開発と自律移動ロボットLapiへの適用", 電子情報通信学会技術研究報告, 111, 366, pp.15-19 (2011)
- 11) 榎修一, 松本高斉, 正木良三: "位置同定コンポーネントの開発と精度評価", Robomec2013 (2013)
- 12) 白根一登, 中拓久哉, 松本高斉, 榎修一: "知能型ロジスティクス支援ロボットLapiの開発: 工場内搬送自動化システムへの適用", 日本ロボット工業会機関紙「ロボット」, 207, pp.16-20 (2012)

松本 高斉 1997年, 筑波大学第三学群工学システム学類卒業。1999年, 同大学院修士課程修了。2003年, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。同年, (株)日立製作所入社。現在に至る。搬送ロボットの研究・開発に従事。

榎 修一 2001年, 岡山大学工学部電気電子工学科卒業。2007年, 同大学院博士後期課程退学。同年, (株)日立産機システム入社。現在に至る。自律移動ロボットの研究・開発に従事。博士(工学)。

正木 良三 1982年, 長岡技術科学大学大学院修士課程修了。同年, (株)日立製作所入社。2004年, (株)日立産機システム入社。現在に至る。モータおよびその制御, 移動ロボット技術の研究・開発に従事。

高橋 一郎 1981年, 東京大学大学院修士課程修了。同年, (株)日立製作所入社。現在, (株)日立産機システム所属。ロボットシステム, 産業用通信システム等の開発に従事。