

建物内においてロボット位置を瞬時に検出できるシステム 床利用位置検出システム“MIYUKA”の開発

深瀬 勇太郎・木村 真一

近年、警備、介護、搬送、清掃など、屋内において様々なサービスを行うロボットが提案されている。サービスロボットには、自己位置同定の結果を基に適切なルートを割り出し自律的に移動する機能が求められるが、屋内の広い範囲かつ様々な場所で安定的にこれを実現している例は少ない。我々は、この要求機能に対し、ロボットが自己位置同定を行いやすい空間の提供という観点から研究を進めている。本報では、床に画像特徴を配置した空間を施工し、その床の一部をカメラで撮像した画像を処理することで安定かつ高速に位置検出できるシステム“MIYUKA”の研究開発について報告する。

キーワード：屋内位置方向検出、画像処理、星図照合技術、ロボット自律移動、空間情報化

1. はじめに

未来の建物内では、警備、案内、介護、搬送、清掃などのサービスを提供するロボットの活用が期待される。我々は、このようなロボットの活動を支える建物空間（＝“ロボットにやさしい空間”）の実現を目指している。サービスロボットは、屋内を自律移動する機能がベースとなるため、次の二つの基盤機能が不可欠である。一つは、屋内を広範囲に移動できる移動機構であり、もう一つは、ロボットの位置と向きを cm かつ deg オーダーで検出する自己位置検出機能である。

移動機構としては、建物内の階段や段差に対応するため人間と同様な 2 足歩行機構が有効であり研究開発も進んでいる。一方で、建物バリアフリー化に伴い、必ずしも高機能な移動機構を持たなくても簡単な車輪機能で移動できる領域が広がってきており、図らずも“ロボットの移動にやさしい空間”が実現されている。

自己位置検出機能についても様々な取組がなされている。特に近年においては、ロボットに搭載されたステレオカメラやレーザレンジファインダを使ってロボット周辺の建物形状を把握し、自己位置を推定する SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) といわれる手法が盛んに研究¹⁾されており注目を集めている。ただし、この手法は、形状特徴が少ない広い部屋や長い廊下、ガラスの壁や、光沢のある部材が多用されている空間などで検出が困難なケースへの対応が必要となる。我々はバリアフリー化と同様、空間側を工夫することによる位置検出が行いやすい空間を模

索している。ここでは、その一つとして既存の床でもみられるようなランダムな点模様が配置された床を利用して自己位置検出を行うシステムについて紹介する。

2. 位置検出システム

位置検出の基本概念を図-1に示す。自然発生的にランダム発生させた点群模様を有する床を施工する。施工後、カメラ装置により全床をスキャンすることで床上の各点の位置を特定し、点群分布データベースを事前に作成する。位置方向検出の際には、カメラで床の一部を撮像し、取得画像中の点群分布をあらかじめ用意した床全体の点群分布データベースと照合することで、取得画像中の各点が全床上のどの点に相当するかがわかり、そのことによりカメラが床のどの位

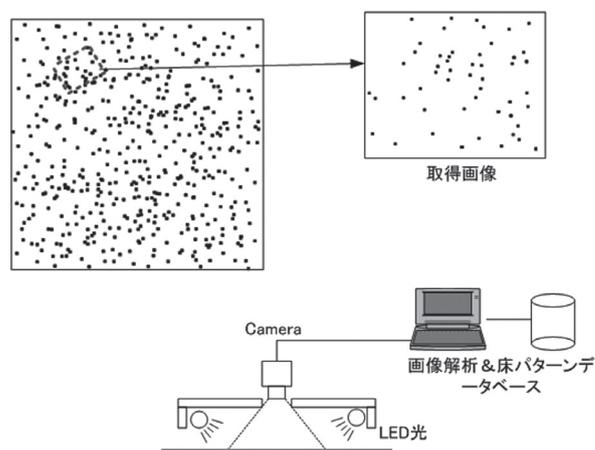
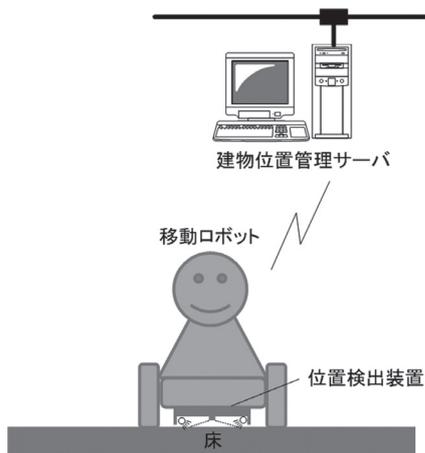


図-1 位置検出の基本概念

置、どの方向で撮像した画像であるか割り出す。

想定する建物内位置検出システム例を図一2に示す。様々な建物、建物内の広い領域への対応を考え、ロボットに搭載された位置検出装置と建物位置管理サーバの連携により自己位置検出を実現することを想定している。建物位置管理サーバには、建物全体の点群分布データベースが蓄積されている。ロボットが取得した床画像を受信し、建物全体の床を対象としてロボットの初期位置検出を行い、ロボット位置周辺のローカルな点群分布データベースをロボットの位置検出装置に送信する。ロボットの位置検出装置は、初期状態では点群分布データベースを持たないが、建物位置管理サーバからロボット周辺のローカルな点群分布データベースを取得するとそれを基に自己位置検出を行う。位置検出装置の点群分布データベースにない隣接する領域に移動する場合には、再度建物位置管理サーバから隣接領域の点群分布データベースを取得することで位置検出を継続する。



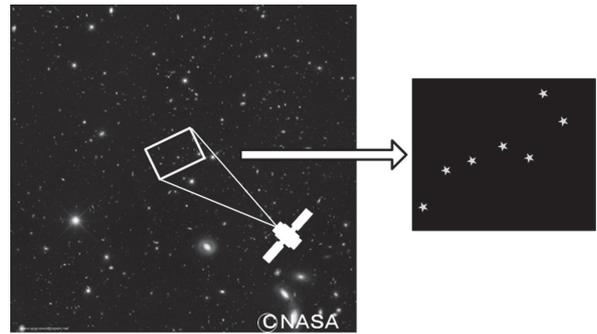
図一2 想定する建物内位置検出システム

3. 基本アルゴリズム

(1) 星図照合技術の利用

床点群照合アルゴリズムには、宇宙空間で人工衛星の姿勢検出（図一3）に使われている星図照合技術を応用した。人工衛星に搭載されたカメラで天空を撮像し、撮像画像中の恒星点群分布を既知の星図と照合することによりカメラの向いている方向（＝人工衛星の姿勢）を特定するセンサー技術である。

このセンサーで使われるカメラ画像中の恒星点群と星図との照合アルゴリズムにポールスターアルゴリズム²⁾がある。画像中の任意の星を中心として規定半径内にある各星までの長さの列（＝照合特徴量）は、中心の星に固有である（図一4）。あらかじめ天空の



図一3 人工衛星の姿勢検出

星について、各星の照合特徴量を求めデータベースとして準備しておく。宇宙空間の人工衛星では画像取得した各星に対して照合特徴量を求め、それぞれに対してデータベース中の星について照合特徴量に含まれる星間長さと一致した星間長さを最も多く有する星を各星に対応する星として照合する。



図一4 照合特徴量

(2) 床への応用における問題点

恒星の光は、無限遠から到達するため、星図照合で扱われる星群間の相対配置は姿勢によらず厳密に変化しない。よって高い画像分解能でポールスター特徴量を構成する各長さを表現することができる。例えば、E.Silaniら²⁾は、0.124 pixelsを単位長として長さを分類している。一方、床に描かれた点群の撮像の場合には、10 cm前後の至近距離にある床平面を撮像する。レンズ歪みに関するカメラ固有のパラメータを厳密に校正しても、光軸が厳密に床面に対して垂直である保障はなく撮像床位置の変化により各点の相対配置は微変動する。変動は後述する実験の結果 ± 2 pixels程度考慮する必要があることがわかっており、前述の星照合アルゴリズムを単純に適用すると、各点が間違っただけに照合するケースが多発する。村澤ら³⁾もこのような位置誤差発生時の対応策の必要性を唱えている。

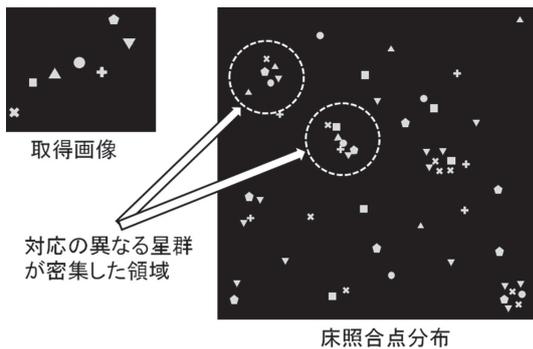
4. 問題解決のためのアルゴリズム改良

(1) 許容誤差の設定

上述の問題点への対応策として、照合特徴量の一致長さに許容誤差を設定することにした。このことにより仮に照合特徴量中の長さが許容誤差内でずれていたとしても、長さが一致するものとして取り扱うことができる。一方、実際にはデータベースと長さが異なるものも一致するものとして取り扱われるため、画像中の一つの点に対して多数の床上の点が照合候補とされてしまう。そのため、多数の照合候補点の中から適切な候補を選ぶ必要が生じる。

(2) 対応点群密集領域による絞込

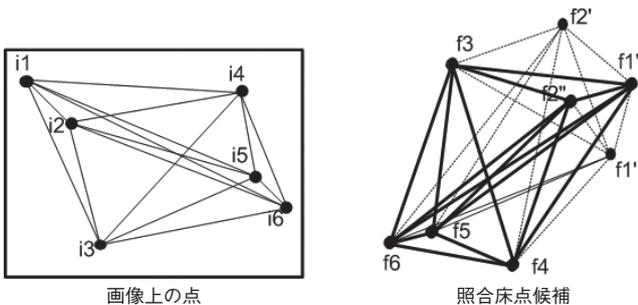
各画像中の点に対して正しく照合する点の組みは、画像視野に対応する面積内に密集している。このことを利用して画像中の異なる点の候補群が密集している床上領域を特定することで、いくつかの照合床候補領域に絞り込む(図一5)。



図一5 対応点群密集領域による絞込のイメージ

(3) 幾何学合同に照合点抽出

(2) にて絞り込まれた各照合床領域について、画像点群と対応する床点候補群の幾何学合同から、正しく対応する点群の組合せを導き出す(図一6)。正しく対応している画像点群と照合床点群の間では、画像中



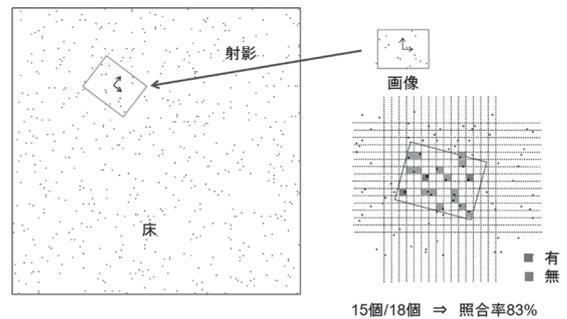
画像点 : [i1, i2, i3, i4, i5, i6]
 照合床点候補 : [f1', f1'', f2', f2'', f3, f4, f5, f6]
 ⇒ 照合床点 : [f1'', f2'', f3, f4, f5, f6]

図一6 幾何学合同絞込のイメージ

の任意の2点間距離とその2点に対応する床上の二つの照合点間距離は一致することを利用して、各照合床領域中の点候補から正しい照合点を抽出する。

(4) 照合率による信頼性確保

(2) で絞り込まれた各照合床領域について、(3)により照合床点を抽出することができる。各照合床領域から最も確からしいものを選択することおよび十分な信頼性を確保することを目的に、画像中の全点を対象に照合率を計算する(図一7)。まず、画像中の点群と床上の対応する照合点群の位置関係から計算される取得画像の床上での位置姿勢を計算する。その計算結果を基に画像中の全点を床上に射影する。画像中の全点に対して床上の点と重なる(あるいは極めて近い所に位置する)点の割合を照合率とする。各照合床領域の照合結果に対して照合率が最も高い領域の点の組合せを検出結果として採用する。照合率の低下は、誤検出または、床上へのゴミの混入に起因する。誤検出の場合、ロボット誤作動などの重大危険要因となることを重視して、照合率に下限を設定し、低い照合率に対しては検出不能としている。



図一7 照合率のイメージ

5. ゴミ、点消失に関する検討

(1) ゴミ、点消失に強いアルゴリズム

床上では、ゴミや、汚れによる点消失などが発生する。このことに対する頑強性は非常に重要である。本システムが基にしている星図照合アルゴリズムは、撮像画像中の無数の恒星に対して明るさの閾値(等級)で選別することにより照合対象とする星数に制約を設けている。このことにより撮像時の条件によっては、明るさ閾値の前後において、照合対象でないのに照合対象として取り扱われる点(床でのゴミに相当)や、照合対象なのに照合対象として漏れてしまう点(床での点消失に相当)が発生する。そのため恒星点の混入や、消失に強いアルゴリズムとなっている。このような特徴に関して実験的検証を行った。

(2) 実験設定

以下に実験設定を示す。

(a) 床パターン設定 (図-8)

対象床広さ：4.5 m × 4.5 m

床上の点数：60,000 点

配置：計算機によるランダムに位置を発生

点の形状：径 2 mm 前後のランダムな多角形

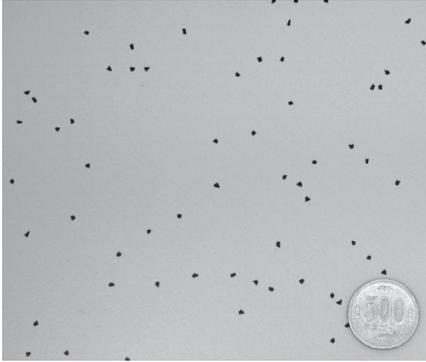


図-8 床パターン

(b) 画像取得設定 (図-9)

カメラ：Lumenera 社 Lu170 (白黒)

レンズ：焦点距離 3.5 mm

視野範囲：9 cm × 9 cm, 240 × 240 pixels

取得画像中の黒点位置は、現画像を輝度により 2 値化し、抽出された黒点位置をレンズの歪み特性により歪み補正した。



図-9 画像取得装置

(3) 許容誤差設定

検証の前提としてまず点の許容誤差を設定した。設定値は現実に発生する各点の相互間距離の誤差を実験により求めた。得られた床画像から黒点を抽出し、レンズ歪み補正処理した点の相互間距離と、データベース中の対応する点の相互間距離との差を求めその分布を調べた。図-10は、その一例である。複数の箇所

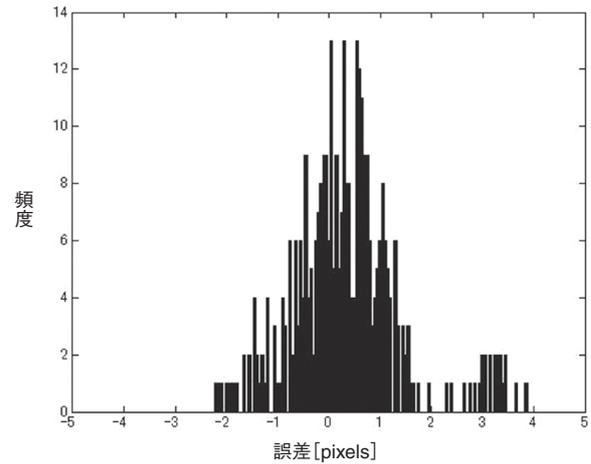


図-10 誤差分布の一例

で同様の分析を行った結果、許容誤差は ± 2 pixels に設定することにした。

(4) 実験による検証

図-11にゴミを混入させた場合の取得画像を示す。丸で囲まれた点は、床上にゴミ点を故意に描いた部分である。このようなケースでも正常な結果が計算できている。図-12では、点消失の例として名刺で画面の一部を覆い隠した。このケースでも正常な計算結果が出力されている。これに類する多くのケースで正常な計算結果が出力されることを確認した。

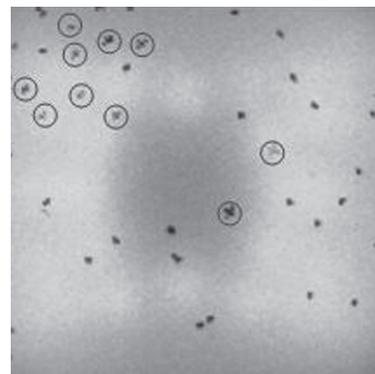


図-11 ゴミの混入例

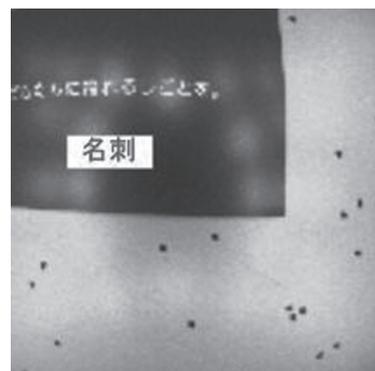


図-12 点の消失例

(5) シミュレーション

上述の実験では、限られたケースしか検討ができないため、コンピュータシミュレーションによりゴミの発生、点消失を模擬する多数の試行を実施した。

(a) 撮像位置方向設定

4.5 m × 4.5 m の床上面にて縦横約 5.6 cm 間隔の格子状の位置 5,776 箇所ランダムな方向にカメラを向けた画像取得を模擬した。

(b) ゴミ混入、点消失設定

ゴミ混入は、得られる画像の中にゴミに相当する点を無作為に加えて模擬した。点の消失は得られた点から点を無作為に削除することで模擬した。

(c) シミュレーション結果 (表—1)

点の消失については、50%の点の消失でも9割以上の割合で検出が成功した。ゴミの発生については、40%のゴミが発生しても9割以上の割合で検出が成功した。非常にゴミや点消失に強い結果となった。

表—1 点の消失・ゴミの混入時の結果

割合	10%	20%	30%	40%	50%
消失	100%	99.9%	99.6%	98.3%	91.6%
ゴミ	99.8%	99.2%	96.8%	92.1%	85.0%

6. 連続計測のためのアルゴリズム改良

我々は移動ロボットのリアルタイム制御への応用を目標としているため、連続計測の高速化とゴミや点消失などが発生した場合でも計測が継続できる性能が必須である。ここでは、そのためのいくつかのアルゴリズム改良と実験装置に実装した結果を示す。

(1) 照合範囲制限による高速化

本研究で対象としている移動ロボットは車輪機構型であり、移動も床平面上を連続的に移動することを前提とできる。よって、初回は全床データベースから照合を行うが、その後は、最新の検出位置周辺に限定することで照合計算を高速化した。なお、限定する範囲は、移動体の最高速度に依存して設定する。

(2) 連続画像による計測継続

本照合手法は比較的ゴミおよび点の消失に強い手法であるが、それでもなお、多くのゴミや点の消失がある場合には、ロボット制御の危険要因である誤検出を防ぐために検出不能とするように設計している。そのような場合には、連続する二つの画像間に共通して写り込んでいる点群を抽出し、その点群間の相対的な位

置関係を割り出すことで画像間の移動差分を計算し、それを積分することで位置を推定することにした。

(3) 実験装置による実証

図—9に示す画像取得装置および画像処理計算機により、床全体からの初期位置とそれ以降の連続的な位置検出のアルゴリズムを実装した。(1)の連続照合範囲制限を直近の検出位置周辺の90 cm × 90 cmの範囲に設定、CPU: Core2Duo1.6 GHz 搭載のノートPCに実装し以下の結果を得ている。

連続計測応答: 約 50 m 秒 (= 20 回/秒)

計測精度: 0.5 mm 以下

1 deg 以内

7. まとめ

星図照合技術のアルゴリズムを床パターン利用位置検出に適用し、ロボット移動のための連続計測に関する改良を施した。現在 2.25 m × 3.15 m の実験床にて図—9のロボット自律移動制御のデモンストレーションを通じてデバッグを繰り返し安定した連続位置検出が実現できるレベルに達している。実用化に向けて床施工法、検出装置の小型組込機器化、建物位置管理システムの構築など様々な課題があるが、一つ一つ解決していきたいと考えている。

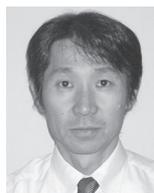
JICMA

《参考文献》

- 1) 友納正裕, 油田信一: “不正確さを許すマップと単眼ビジョンによる物体認識に基づく移動ロボットの屋内ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, 22, 1, pp.83-92, 2004.
- 2) 村澤一樹, 深瀬勇太郎, 竹本喜昭, 木村真一: “床パターンを利用した自己位置検出同定手法に関する検討 (その2)”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 09. 15
- 3) E. Silani and M. Lovera, “Star Identification Algorithms: Novel Approach & Comparison Study”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, VOL. 42, NO. 4, pp. 1275-1288, 2006

【筆者紹介】

深瀬 勇太郎 (ふかせ ゆうたろう)
清水建設
技術研究所
主任研究員



木村 真一 (きむら しんいち)
東京理科大学 理工学部
電気電子情報工学科
准教授

