

(44) 距離画像センサを用いた相対位置の推定に関する研究

Research for Estimating Logical Position Using Range Image Sensor

塚田義典¹・北川悦司²・田中成典³・安彦智史⁴・福島佑樹⁴

Tsukada Yoshinori, Kitagawa Etsuji, Tanaka Shigenori, Abiko Satoshi, and Fukushima Yuki

抄録：近年、3次元空間データの構築に関する取り組みが注目されている。代表的な事例としては、MMS やレーザレンジセンサを利用した研究がある。しかし、これらの研究では、GPS の精度が悪い屋内や地下街など限定的に利用できない地域が存在する。GPS を用いない手法では、実空間上の特徴的な物体からの相対的な位置を推定し、移動経路を算出することで3次元空間データを構築するSLAM という手法が提案されている。しかし、SLAM では、学習データを利用しているため、精度が学習データに依存する問題がある。そこで、本研究では、距離画像センサを用いて、GPS や学習データを必要としない相対位置の推定手法を提案する。これにより、撮影環境に依存せずに3次元空間を構築することが可能となる。

キーワード：距離画像センサ、位置推定、位置合わせ、3次元空間データ

Keywords : Range image sensor, Localization, Registration, Three-dimensional data

1. はじめに

近年、国土交通省では、ユニバーサル社会の形成促進を目的として、ICT (Information and Communication Technology) を活用した歩行者の移動支援に関する施策を推進¹⁾している。施策では、カーナビゲーション、景観シミュレーションや歩行者ナビなど様々な用途において利用可能な3次元空間データの構築に関する取り組みが注目されている。しかし、3次元空間データの構築には、膨大な人的コストが掛かるという問題がある。

3次元空間データの構築に関する代表的な事例としては、GPS (Global Positioning System) の位置情報と高い計測精度のレーザースキャナより取得した点群座標データから自動的に3次元空間データを構築²⁾するMMS (Mobile Mapping System) が挙げられる。MMS は、複数台のカメラ、GPS アンテナとレーザースキャナを搭載した専用車両を使用して、周囲の映像を撮影しながら道路を走行することで、道路および道路周辺の地物を計測するシステムであり、3次元地図作成や道路現況調査などの土木・測量分野における様々なサービスへの利用が期待されている。しかし、MMS は、GPS から取得した位置情報に基づきカメラとレーザースキャナの情報を統合することで3次元空間データを構築しているため、GPS の精度が悪い屋内や地下街など限定的に利用できない地域が存在する。また、車両が走行できない地域では利用できないため、適応範囲が道路周辺に限定される。

MMS の利用が困難な歩行通路や屋内環境においては、レーザレンジセンサとカメラを搭載した小型の自律走行ロボットを用いて、走行した範囲における3次元空間データを構築する手法がある。既存研究^{3),4)}では、自律走行ロボットのタイヤの回転数、加速度やジャイロなどのセンサを用いて移動距離を算出し、GPS から取得した位置情報と併用することで、3次元空間データを構築している。しかし、路面環境によっては、車輪の滑りなどが発生して誤差が生じる問題や移動距離の誤差が累積するという問題がある。

これら問題を解決するために、自己位置の推定と3次元空間データの構築を同時に行う手法⁵⁾としてSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) がある。SLAM では、実環境に存在する特徴的な物体 (ランドマーク) との相対的な位置関係を用いて、周囲の3次元空間データを構築⁶⁾する。しかし、ランドマークの形状と3次元的位置の情報を事前知識としてデータベースに登録しておく必要がある。また、登録した物体が常に撮影の対象に含まれている必要があるなど、利用条件の制限が厳しい。

そこで、本研究では、距離画像センサを用いて、GPS や事前知識を必要としない3次元空間データの構築手法を提案する。距離画像センサとは、距離画像と画像をリアルタイムに計測できるデバイスである。距離画像センサは、MMS に比べて安価である。また、持ち運びが容易なため、車両が通行できない屋内においても3次元空間データを構築することが可能である。しかし、距離画像センサでは、撮影した範囲の情報のみ

1 : 非会員 関西大学大学院 総合情報学研究科

(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号, Tel : 072-690-2154, E-mail : tsukada@kansai-labo.co.jp)

2 : 正会員 情博 阪南大学 准教授 経営情報学部 (〒580-8502 大阪府松原市天美東5丁目4番33号)

3 : 正会員 工博 関西大学 教授 総合情報学部 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

4 : 学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究科 (〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町2丁目1番1号)

を3次元化するため、広範囲の情報の3次元化にはこれらのデータを結合することが重要となる。本研究では、距離画像センサから得られる距離画像と画像から衛星測位による3点測量を行うことで、実空間上の静的な物体とセンサの相対的な位置を推定する。本手法により、GPSを使用することなく距離画像センサの位置を高速に推定することが可能となる。また、位置を推定することで、移動距離の算出や3次元データの結合を正確に行うことが可能となり、屋内や地下などにおいても簡単に広範囲の3次元空間データを構築することができる。

2. 研究の概要

本研究では、距離画像センサから得られる距離画像と画像から自己の相対的な位置を推定し、広範囲の3次元空間データを構築するシステムを開発する。本研究における3次元空間データとは、色情報を保持した3次元の点群データから構成されるものとする。本システムの概要を図-1に示す。本システムは、計測データの3次元形状の復元機能、相対位置の推定機能と3次元空間の結合機能から構成される。入力データは、距離画像センサから取得した距離画像と画像のデータ群とする。出力データは、3次元空間データとする。

(1) 3次元形状の復元

本機能では、投影された距離画像の3次元形状を復元する。既存研究⁷⁾では、デジタルビデオカメラで撮影した複数枚の画像を用いて、画像間の対応する特徴点を推定することで3次元形状を復元している。しかし、計算コストが大きく、3次元形状の復元の対象となる空間を異なる視点から撮影する必要があり手間が掛かる。また、色の特徴が乏しい物体や球体・円形状の物体では、特徴点の検出や対応点の推定が困難となり、精度の良い3次元形状の復元ができないという問題がある。

そこで、本研究では、距離画像センサの焦点距離や画素数などのカメラパラメータを用いて、距離画像の各画素を実空間に投影することで3次元形状を復元する。実空間に投影する式を(1)に示す。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x - c_x) * \frac{dist}{f} * ZPPS \\ (y - c_y) * \frac{dist}{f} * ZPPS \\ dist \end{pmatrix} \quad \cdots(1)$$

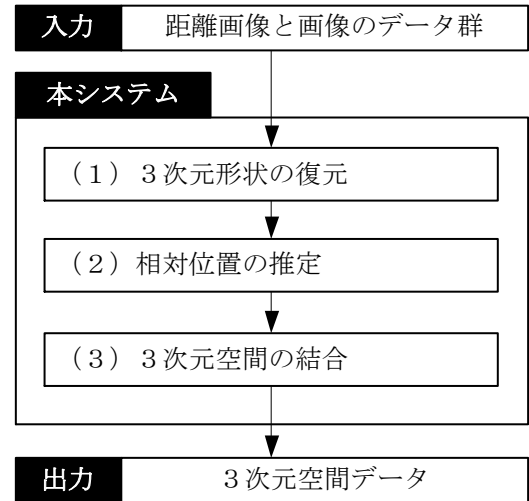


図-1 本システムの概要

ここで、 X 、 Y と Z は3次元空間における座標値、 x と y は距離画像における座標値、 c_x と c_y は、距離画像カメラの x 方向と y 方向の中心座標、 $dist$ は距離値、 f は焦点距離、 $ZPPS$ は距離画像における1ピクセル当たりの実距離である。本手法を用いることで、空間を複数の視点から捉える必要なく、計算コストを抑えた高速な3次元形状の復元が可能となる。

(2) 相対位置の推定

本機能では、距離画像センサから得られる距離画像を用いて、実空間上に存在する物体とセンサ間の相対的な位置関係を推定する。既存研究⁸⁾では、計測した画像中の特徴とあらかじめ用意したテンプレートや地図を比較することで、自己の位置を推定している。しかし、これらの手法では、学習データが必要となるため、限られた範囲での利用には効果的であるが、様々な環境下での利用には適さない。

そこで、本研究では、衛星測位の仕組みを距離画像センサに適用することで、実空間上の物体からの相対的な位置を推定する手法を提案する。具体的な処理としては、まず、距離画像中から3個の特徴点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 、 $B(x_b, y_b, z_b)$ 、 $C(x_c, y_c, z_c)$ を検出し、全ての特徴点を通過する平面を定義する。次に、取得した特徴点の1個を原点とし、原点ともう1個の特徴点を通過する直線を x 軸、定義した平面に対して垂直であり原点を通過する直線を z 軸とする座標系を定義する。このとき、原点となる特徴点を $A'(x'_a, y'_a, z'_a)$ 、原点と直線を引いた際の交点となる特徴点を $B'(x'_b, y'_b, z'_b)$ 、平面上に存在する残りの特徴点を $C'(x'_c, y'_c, z'_c)$ と仮定すると、各特徴点の座標は、三平方の定理と三角関数を用いて、次の式(2)の通りとなる。

$$\begin{aligned}
x_a' &= y_a' = z_a' = 0 \\
x_b' &= \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \\
y_b' &= z_b' = 0 \\
AC &= \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2 + (z_a - z_c)^2} \\
AB &= \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \\
BC &= \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2} \\
\cos A &= \frac{AC^2 + AB^2 - BC^2}{2 \times AC \times AB} \\
\sin A &= \sqrt{1 - \cos^2 A} \\
x_c' &= AC \times \sin A \\
y_c' &= AC \times \cos A \\
z_c' &= 0
\end{aligned} \quad \dots(2)$$

そして、式 (2)により定義した座標系における特徴点 A', B', C' からセンサまでの距離をそれぞれ d_a, d_b, d_c として、定義した座標系におけるセンサ位置を $P(x_p, y_p, z_p)$ とすると次の式 (3)が成立する。

$$\begin{aligned}
d_a^2 &= (x_a' - x_p)^2 + (y_a' - y_p)^2 + (z_a' - z_p)^2 \\
d_b^2 &= (x_b' - x_p)^2 + (y_b' - y_p)^2 + (z_b' - z_p)^2 \\
d_c^2 &= (x_c' - x_p)^2 + (y_c' - y_p)^2 + (z_c' - z_p)^2
\end{aligned} \quad \dots(3)$$

このとき、 d_a, d_b, d_c は、距離画像センサから取得可能な距離値であるため、式(3)の連立方程式の解を算出することで、定義した座標系における自己の位置を推定可能となる。また、本手法を連続するフレームにおいて適応し、検出した特徴点の追跡を行うことで、相対的な移動距離の算出が可能となる。

(3) 3次元空間の結合

本機能では、時刻 t と時刻 t' において復元した3次元の形状を結合することで、3次元空間データを構築する。既存研究^{9), 10)}では、SIFT特徴を利用し、連続するフレーム間における特徴点の対応を算出し、点、線や面の位置や角度を比較して位置合わせを行うことで、3次元空間データを構築している。しかし、これらの手法では、物体を構成する全ての点、線や面を比較する必要があるため、計算量が膨大となる問題がある。また、精度良く位置合わせを行うためには、3次元空間データを構成する点群データの分布が十分に重なるよう計測を密に行なわなければ、誤った対応点が多く含まれてしまい3次元空間データの構築に失敗する。そこで、本研究では、相対位置の推定機能で選出した特徴点に基づいて位置合わせを行うことで、3次元空間データを構築する。

3. システムの実証実験

実証実験では、距離画像センサから取得した距離画像と画像を用いて、3次元形状の復元精度、相対位置の推定精度と3次元空間の結合精度を検証し、本研究の有用性を確認する。

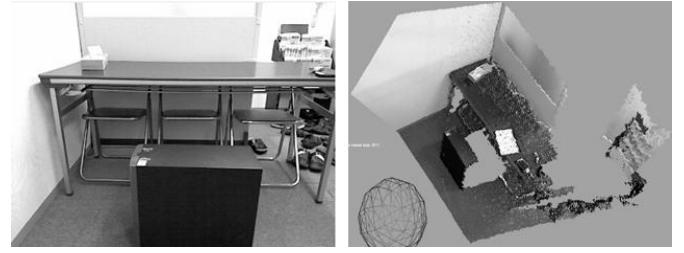


図-2 3次元形状の復元結果

表-1 3次元形状の復元の精度実験結果

測定対象までの 距離範囲 (cm)	計測 データ数	誤差平均 (cm)
100~149	15	0.31
150~199	15	-0.50
200~249	15	0.49
250~299	15	1.23
300~349	15	1.64
350~399	15	1.84

表-2 相対位置の推定の精度実験結果

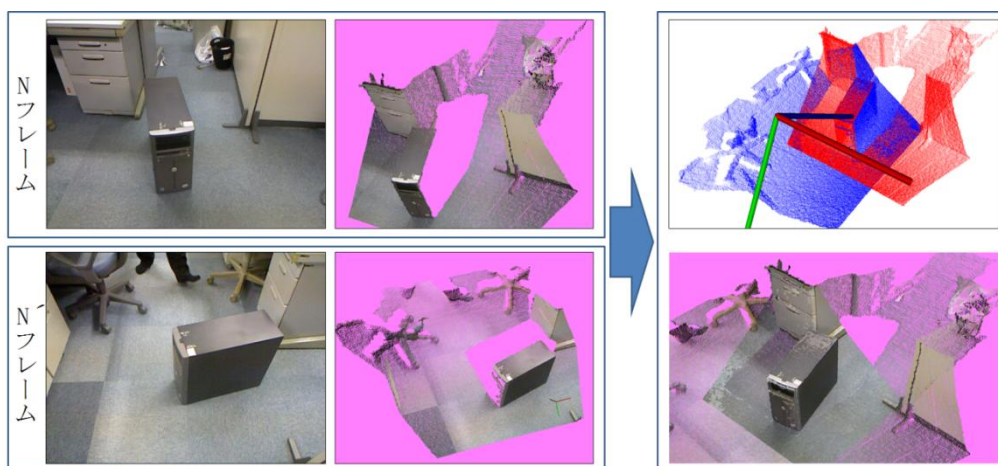
測定対象までの 距離 (cm)	自己位置の推定誤差 (cm)		
	X軸方向	Y軸方向	Z軸方向
100	-0.21	-4.69	-6.62
150	-0.52	-2.92	-7.59
200	-6.19	-8.00	-8.32
250	3.12	-3.80	-4.11
300	3.89	9.43	2.58

(1) 実験内容

本手法の有用性を確認するために、Microsoft社が提供するKinect¹¹⁾から取得した屋内環境の画像と距離画像を用いて、システムの実証実験を行う。まず、3次元形状の復元実験では、実空間に投影した点群データから任意の2点間の距離を算出し、実際の距離と比較することで精度の検証を行う。実験に使用するデータは、大きさの異なる構造物における任意の2点間の距離を用いるものとした。なお、センサと物体間の距離が精度に及ぼす影響を検証するため、測定対象までの距離を徐々に離しながら行った。次に、相対位置の推定実験では、画像中の特徴点3個から定義した平面からのセンサの位置を推定し、実測値と比較することで精度を検証する。そして、相対位置の推定の際に用いた特徴点に基づき、異なる地点で復元した3次元形状を結合し、3次元空間データを構築する。

(2) 結果と考察

3次元形状の復元実験の結果を図-2と表-1に示す。実験結果から、復元した3次元形状の任意の2点間の距離は、本実証実験で用いた距離画像センサの測定範囲内において、誤差0.3cm~2.0cmの精度で算出可



図－３ ３次元空間の結合実験の結果

能であることがわかった。また、測定対象までの距離が大きくなるに従い、計測誤差が大きくなる傾向が見られた。相対位置の推定実験の結果を表－２に示す。結果から、画像中の特徴点に基づき定義した座標系からの３次元位置の推定精度は、各軸方向に誤差 0.2cm～10.0cm の精度で算出可能であることがわかった。これは、特徴点までの距離値のわずかな誤差が相対的な位置推定において大きな影響を及ぼすためであると考えられる。実験で使用した距離画像センサは、1.2m～3.5m の測定範囲において、誤差 2cm 未満の精度を保証していることから、取得した距離値は常に約 2cm 程度の誤差が含まれる可能性があると考えられる。そのため、より誤差の少ない距離画像センサを用いることで、本提案手法による位置推定の精度は向上可能であると推測される。３次元空間の結合実験の結果を図－３に示す。結果から、相対位置の推定実験で選択した特徴点を用いることで、時刻 t と時刻 t' における３次元空間データを精度よく結合できることがわかった。

４．おわりに

本研究では、距離画像センサから得られる３次元空間データの情報から衛星測位による３点測量を行うことで、実空間上の静的な物体とセンサの相対的な位置を推定する手法を提案した。そして、実証実験により、推定精度および結合精度を検証し、その有用性を示した。しかし、本研究では相対位置の推定を目的としていたため、特徴点抽出処理については、一部手動で行っている。そのため、今後の課題は、３次元空間の特徴点の自動取得手法を実現することである。本手法を実現することにより、より低コストに３次元空間の作成を行うことが可能だと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、2010 年度関西大学研究促進費の助成を受けた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 24 年度ユニバーサル社会に対応した歩行者移動支援に関する現地事業、<http://www.mlit.go.jp/rep/ort/press/sogo23_hh_000030.html>、(入手 2012.7.13)。
- 2) 瀧口純一：高精度 GPS 移動計測装置三菱モバイルマッピングシステム、情報処理学会研究報告、情報処理学会、Vol.176-CVIM, No.20, pp.1-5, 2011 年。
- 3) 仲野潤一、西村邦裕、谷川智洋、廣瀬通孝：Visual SLAM と GPS を用いた位置情報付き画像による都市空間記録の研究、電子情報通信学会論文誌、電子情報通信学会、Vol.J98-D, No.6, pp.901-908, 2010 年。
- 4) 荒木天外、竹村憲太郎、怡土順一、松本吉央、高松淳、小笠原司：汎用三次元環境地図を用いた移動ロボットナビゲーションのための地図生成、日本ロボット学会誌、日本ロボット学会、Vol.28, No.1, pp.106-111, 2010 年。
- 5) Smith, R. and Cheeseman, P. : On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty, International Journal on Robotics Research, Vol.5, No.4, pp.56-68, 1986.
- 6) 武富貴史、佐藤智和、横矢直和：拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定、電子情報通信学会論文誌、電子情報通信学会、Vol.J92-D, No.8, pp.1440-1451, 2009 年。
- 7) 北川悦司、田中成典、古田均、杉町敏之：デジタルビデオカメラを用いた３次元モデル自動生成システムの研究開発、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.13, pp.181-188, 2004 年。
- 8) 出村公成、中川祐：全方位カメラを用いたテンプレートマッチングに基づくモンテカルロ位置同定法、日本ロボット学会誌、日本ロボット学会、Vol.27, No.2, pp.249-257, 2009 年。
- 9) Besl, J. and McKay, D. : A Method for Registration of 3-D Shapes, Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- 10) Chen, Y. and Medioni, G. : Object Modeling by Registration of Multiple Range Images, Proceeding on IEEE International Conference, Vol.3, pp.2724-2729, 1991.
- 11) Microsoft : Kinect, <<http://www.xbox.com/ja-JP/kinect/>>、(入手 2012.7.13)。