

機関番号：13401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21700221

研究課題名（和文） 移動ロボットによる高次元視覚センサを用いた大規模地図生成

研究課題名（英文）

Large-scale Map Building by a Mobile Robot Using High-dimensional Visual Sensors

研究代表者

田中 完爾（TANAKA KANJI）

福井大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30325899

研究成果の概要（和文）：本研究は、自律移動ロボットの SLAM（環境地図と自己位置の同時推定）問題を研究し、複雑かつ多様な雑音分布を持つ高次元センサ（視覚センサ等）の SLAM 技術を確立することを目的とした。具体的に、普遍性およびコンパクト性を有する新しいランドマーク（視覚特徴）認識手法、視覚特徴データベース、“マップマッチング SLAM”の開発を行い、屋内外大規模環境において、本技術の有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：The problem of SLAM (simultaneous localization and mapping) has been approached from a novel perspective of “high-dimensional sensor” (e.g. visual sensor) in this study. Several building blocks of the novel technique, including a universal and compact landmark (visual feature), visual feature database, as well as “map-matching SLAM” have been developed, united into a novel framework and evaluated via experiments in both indoor and outdoor environments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報処理・知能ロボティクス

キーワード：行動環境認識、SLAM、地図生成、視覚センサ

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始するまで、研究代表者は、SLAM（環境地図と自己位置の同時推定）技術の研究開発を行ってきた。SLAM 技術は、移動ロボットのセンサデータ群をもとに、作業環境のランドマーク地図をリアルタイムに生成することを目的とする。本技術は、

2000 年頃より、大きく進展し、大規模な環境地図を高速に生成する手法が整備されてきた。その一方で、複雑かつ多様な雑音分布を持つ高次元センサ（視覚センサ等）の SLAM 問題は、依然として、未踏に近い研究領域であった。この、高次元視覚センサの SLAM 技術を確立することを本研究の基本的な目的とした。本研究成果により、SLAM

技術は、センサ次元の面で制約が緩和され、応用可能性が大きく拡がることが期待される。

視覚特性が天候・季節に左右されやすい自然環境において、有効なランドマークを定義することは従来難しいと考えられてきたが、2000年頃より、自然風景物の色・模様・形状を記述する高次視覚ランドマーク（SIFT等）が相次いで発表され、近年、この高次視覚ランドマークをSLAM問題へと応用する研究潮流が出来つつあった。この、高次視覚ランドマークを用いる新しい認識手法について、研究代表者は、視覚特徴データベースと呼ぶ、精確・高速な方法を研究開発してきた。

視覚センサは、複雑・多様な雑音分布を持ち、大きな課題となっていた。SLAM技術において、雑音分布が複雑・多様な視覚センサをモデリングする有効な方法は確立されていない。これに起因して、実際とモデルとの乖離によるモデル化誤差が生じ、さらに、誤差の蓄積・伝播、地図歪みなどの原因となっていた。こうしたなか、研究代表者は、低信頼度の小規模地図（サブマップ）を複数位置合せ・統合し、高信頼度の大規模地図を生成する、大規模環境に有効な、新しいSLAM技術（マップマッチングSLAM）を研究開発してきた。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえた上で、本研究では、高次元視覚センサのSLAM技術を実現することを目的とする。そのために、研究代表者が研究開発してきた、視覚特徴データベース技術、および、マップマッチングSLAM技術を開発・統合する。具体的に、汎用の高次元視覚センサを用いる大規模地図生成システムを開発する。

## 3. 研究の方法

具体的に、以下の研究開発を行った。

### (1) 視覚特徴データベースの開発

大規模地図に有効な視覚特徴データベースの開発を行った。まず、視覚ランドマークの開発を目的として、SLAM技術において既に有効性が確認されている視覚特徴、および、コンピュータビジョンや機械学習などの関連分野の視覚特徴の各種手法を実装し、既存の視覚センサを用いて性能検証を行い、理論的・実験的に比較を行った。つぎに、認識手法の開発を目的として、データベースや機械

学習などの関連分野の各種データベースを実装し、同様に、性能検証・比較を行った。また、視覚ランドマーク、視覚データベース、および、SLAM手法を集約し、一つの地図生成システムを実装し、性能検証を行った。

### (2) マップマッチングSLAMの開発

高次元視覚センサに有効なマップマッチングSLAMの開発を行った。まず、monoSLAMやPTAMなどの既存の視覚SLAM技術を用いて、小規模のランドマーク地図を生成する手法を実装し、基本的な有効性を確認した。また、小規模地図（3D点群地図）を位置合せ・統合する三次元マップマッチング手法の研究開発を行った。屋内環境の3Dエッジ線分地図を対象として、性能検証を行った。さらに、マップマッチングを高速化するために、三次元視覚特徴を利用した視覚検索技術の研究開発を行った。

## 4. 研究成果

大規模地図に有効な、高速・精確な視覚特徴データベースを実現した。上記の性能検証・比較の結果、Gistシーン特徴と呼ぶ視覚ランドマークが有効であることを確認した。本技術は、ヒトのシーン知覚特性に着想を得たGistシーン記述子に基づく。Gistシーン記述子は、近年、画像補完や画像検索などの大規模検索応用において、有効性が確認されている。本研究において、Gistシーン特徴を自動車ロボットに実装し、2つの異なるデータセット（福井市データセット、Oxfordデータセット）を用いて、有効性を検証した。本実験において、普遍性および軽量性の面で、Gistシーン特徴が既存の視覚特徴と比較して有効であることを確認した。次に、機械学習およびデータベースという2つの異なる研究

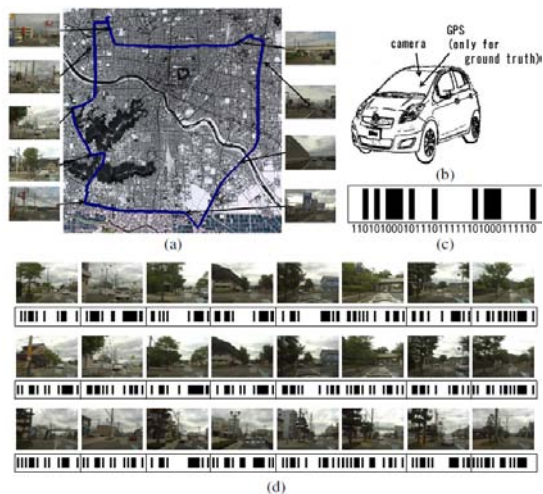


図1. 視覚特徴データベース. (a)屋外大規模環境. (b)自動車ロボット. (c)ランドマーク（視覚特徴）. (d)ランドマーク認識.

分野から、最新のデータベース技術を実装し、性能検証・比較を行った。機械学習の分野においては、セマンティックハッシングと呼ぶ、多層ニューラルネットワークに基づくデータベース技術が、軽量性・高速性の面で有効であることを確認した。データベースの分野において、Google 等においても採用されている Bag-Of-Features(BOF)検索技術を拡張した、packing BOF および top-down BOF と呼ぶ2つの手法を結合し、軽量性・識別性に優れたデータベース技術を実現した。

大規模地図に有効な、マップマッチング SLAM 技術を実現した。まず、視覚センサに基づく三次元再構築技術を開発した。具体的には、monoSLAM などの既存の三次元 SLAM 技術の実装・性能検証、および、事前知識に基づく三次元 SLAM 技術の研究開発を行った。前者の結果、シーン中に近接する視覚特徴が十分多数存在し、さらに、互いに識別可能な場合には、カメラの移動距離が数メートルの範囲内で、安定して地図生成が可能であることが分かった。また、後者の研究開発では、屋内や人工環境に有効な、マンハッタン世界仮定に基づく、三次元 SLAM 技術を開発した。具体的には、カメラ画像からのエッジ線分の検出、面法線の推定、および、マンハッタン世界仮説の生成・検証の方法を開発した。その結果、壁や床などの各面を互いに識別可能な場合には、安定して地図生成が可能であることが分かった。つぎに、上記の方法により取得される、三次元エッジ線分群 (サブマップ) を用いた、大規模地図生成

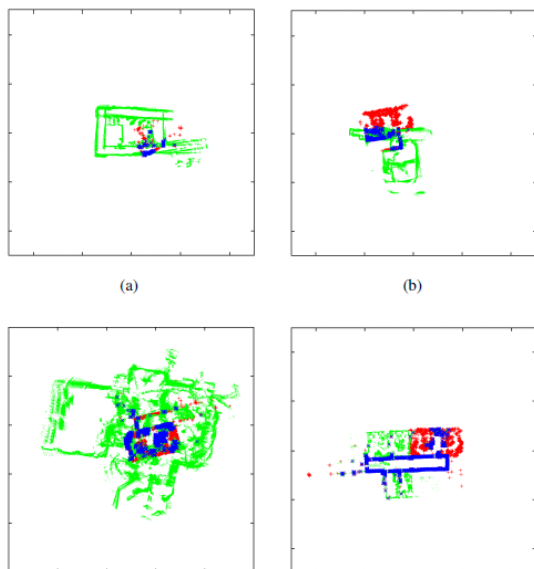


図2. マップマッチング SLAM

手法を開発した。具体的には、複数のサブマップを互いに位置合せ・統合する三次元マップマッチング技術 (図2)、および、マップマッチングを高速化する視覚検索技術の研究開発を行った。前者の研究開発では、最終的に、福井大学総合研究棟13階 (福井大学データセット) の大規模地図生成を行った。この結果、対象環境が小規模な場合には、精確にマップマッチングを行えるものの、大規模環境においては、誤差累積が生じ、大規模マップマッチングを達成するには至っていない。この大規模マップマッチングについては、本研究の今後の課題とし、現在、研究開発を継続している。また、後者の研究開発では、三次元ポールスターと呼ぶ、新規な識別的・軽量の視覚検索技術を開発した。本技術は、上記の福井大学データセットを対象とした検証実験により、基本的な有効性を確認した。

以上の成果を、国際会議などで速やかに口頭発表するとともに、雑誌投稿に向けて準備を行っている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Tomomi Nagasaka, Kanji Tanaka, Tetsuya Ishimaru, Ikuyo Uesaka, Robot Self-localization Using Simulated Experience, IEEE Int. Conf. Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration, 2010.
- ② Tetsuya Ishimaru, Kanji Tanaka, Ken-ichi Saeki, Takehiro Daito, Map Building by 3D Map Matching, Proc. IEEE Int. Conf. Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration, 2010.
- ③ Kouichirou Ikeda, Kanji Tanaka, Visual Robot Localization Using Compact Binary Landmarks, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2010, pp.4397-4403.
- ④ Kensuke Kondo, Kanji Tanaka, Multi-scale Bag-Of-Features for Large-size Map Retrieval, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 2010, pp.961-966.
- ⑤ Tomomi Nagasaka, Kanji Tanaka, Dictionary-based Map Compression Using Modified RANSAC Map-Matching, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 2010, pp.980-985.
- ⑥ Takeshi Ueda, Kanji Tanaka, Scalable Robot Localization Using Incremental

Map-Matching Techniques, Journal of Computational Science and Technology, vol. 4, 2010.

⑦ Kanji Tanaka, Ken-ichi Saeki, Mamoru Minami, Takeshi Ueda, LSH-RANSAC: Incremental Matching of Large-Size Maps, IEICE Transactions on Information and Systems, vol. 2, 2010, pp.326-334.

⑧ Ken-ichi Saeki, Kanji Tanaka, Takeshi Ueda, LSH-RANSAC: An incremental scheme for scalable localization, Proc. 2009 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2009, pp.159-166.

〔学会発表〕（計0件）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中完爾 (TANAKA KANJI)

福井大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30325899