

研究課題別評価

1 研究課題名： 環境とのインタラクションによる空間構造の獲得

2 研究者氏名： 友納 正裕

3 研究の狙い：

(1) 背景と目的

近年、人間の生活環境で活動するロボットへの期待が高まっている。このようなロボットが実現されれば、人間を支援する様々な応用が生まれ、産業や社会の発展に大きく貢献すると期待される。ロボットが環境内を自律的に移動して人間を支援する作業を行うには、その環境の構造を記した地図が不可欠である。地図作成には多大な工数がかかるため、ロボット自身に地図を構築させる研究が盛んに行われている。従来の研究は、ロボットが安全に移動できる領域を記すことが主目的であり、個々の物体まで識別できるような構造化された地図を構築する研究は行われていない。しかし、物体の操作・運搬を伴う作業をする場合には、ロボットが個々の物体を認識して、その位置姿勢を知る必要がある。多くの場合、対象物体の置き場所も机や棚など別の物体であるので、これらの物体も認識できる必要がある。ロボットがこのような作業を自律的に行うには、物体単位に構造化された環境地図(物体マップと呼ぶ)をもつことが望ましい。

本研究は、ロボットが環境内の物体を認識して、3次元物体マップを構築することを目的とする。本研究期間においては、対象環境をオフィスや家庭などの屋内とし、家具などの比較的大きな物体から構成された物体マップの構築を目標とする。

(2) 解決すべき問題点

物体マップ構築における課題は大きく3つある。1つは環境の探索である。物体マップを構築するには、ロボットは環境内を移動して物体のセンシングデータ(カメラ画像)を集める必要がある。このとき、未知環境の中で安全に移動しつつ、物体がありそうな領域を見つけてうまく画像に撮影することが課題となる。次に、画像に写った物体を認識して、その3次元位置姿勢を推定することが物体マップ構築に不可欠な課題である。さらに、物体認識を行うには、ロボットが物体のモデルをもつ必要があるが、この物体モデルをどう作るかも大きな課題の1つである。物体モデルは、物体マップの構成部品としても重要である。

(3) 問題解決へのアプローチ

これらの問題を解決するために、レーザレンジファインダによる地図構築技術と単眼カメラを用いたロボットビジョン技術を統合したアプローチをとる。まず、レーザレンジファインダにより迅速に2次元地図を構築しながら環境探索を行い、この2次元地図を利用して物体を撮影する。物体モデルはあらかじめ作成しておくが、このモデルは3次元の密な形状情報をもつとともに、認識用の特徴も有する。この物体モデルを用いて画像から物体を認識し、その3次元位置姿勢を推定する。得られた物体の位置姿勢に基づいて物体モデルを3次元空間に配置することで、物体マップを構築する。

4 研究成果

4.1 概要

物体マップは、ロボットが自律的に構築する3次元環境地図であり、3次元物体モデルを空間中に配置した構造をもつ。前節で述べたように、物体マップを構築するには、環境探索、物体認識、物体モデル作成の3つの課題がある。本研究では、レーザレンジファインダと単眼カメラを用いて、これらの課題に次のように対処して、物体マップを構築する。

(1) 環境探索

対象とする環境では、ロボットにとって物体の種類(物体モデル)だけが既知であり、それ以外は未知である。このため、未知環境を安全に走行しつつ、物体マップに必要なセンサデータをくまなく集めることが必要である。このために、レーザレンジファインダを用いたロボスタで迅速な2次元地図構築方式を開発した。(4.2節)

(2) 物体認識

収集したセンサデータから物体モデルを用いて物体を認識し、その3次元位置姿勢を推定することが必要である。実環境で多様な物体をロボスタに認識できる必要がある。このために、画像特徴によるロボスタな認識手法を3次元物体モデルに適用する方式を開発した。(4.3節)

(3) 物体モデル作成

物体モデルを手で作成すると、多大な工数がかかるうえ、複雑な形状の物体に対処できない。ロボット自身が物体モデルを作成できることが望ましい。このために、カメラで撮影した画像列から物体形状を復元して密な3次元モデルを生成する方式を開発した。(4.4節)

4.2 レーザレンジファインダによる環境探索

ロボットが未知環境を安全に走行するには、周辺の地図をその場で作成する必要がある。このためには、広範囲の領域を迅速かつ精度よくセンシングできるレーザレンジファインダ(LRF)が有用である。本研究項目では、LRFを用いて、ロボットが走行しながら2次元地図を構築する技術を開発した。

LRFのデータ(スキャンと呼ぶ)は、ロボットから周囲の物体までの距離を点列で表したものである。1つのスキャンで、たとえば、距離8m、方位-90度~90度の範囲をセンシングできる。このスキャンをロボットの走行に合わせて次々とつなぎ合わせていくことで、環境全体の2次元地図をリアルタイムで作成することができる。このつなぎ合わせの技術はスキャンマッチングと呼ばれる。本研究では、従来にない特長をもつ新しいスキャンマッチング方式を開発した。本方式は、並進・回転に不変な特徴量を用いてマッチングを行うことで、従来方式では困難だった複雑な形状のスキャンを地図全域で大域的にマッチングすることを可能にした。これにより、ロボットの自己位置推定や2次元地図構築をよりロボスタに行うことが可能になった。

このスキャンマッチング方式を用いて作成した2次元地図を図1に示す。(a)は実験室、(b)は全長400mの廊下である。実験室のような複雑な形状の環境も、廊下のような大規模な環境もうまく2次元地図が作成できている。

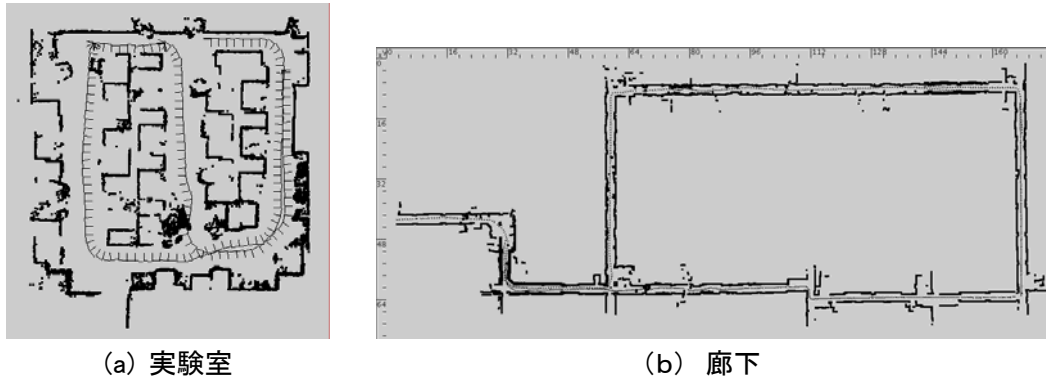


図1 スキャンマッチングによる2次元地図構築の例

次に、この2次元地図を用いて、カメラ画像の撮影領域を求める。まず、物体テンプレートを地図にマッチングして、主要物体の候補を検出する。物体テンプレートにはカメラ注視点が設定されており、それに基づいて自動的にカメラ視線が生成される。物体テンプレートがマッチングしない領域には、スキャン点の存在箇所に定期的にカメラ視線を張る。このようにして設定したカメラ視線の位置に着くと、ロボットはパンチルトカメラをカメラ視線の方向に向けて画像を撮影する。図2に実験例を示す。(a)はスキャンマッチングで得た地図にカメラ視線を設定した結果であり、赤い太線がロボット経路、赤い図形が物体テンプレート、青い線がカメラ視線である。(b)は、生成したカメラ視線にしたがって、ロボットが画像を撮影している様子である。



図2 2次元地図を用いたカメラ画像の撮影

4.3 物体認識

前節のようにして撮影した画像から物体を認識する。多様な物体を認識するには、画像特徴量を用いたアピランスベースの物体認識手法が有効である。しかし、この場合、2つの問題がある。1つは、机など多くの家具はテクスチャが少なく、また、単色であることが多いため、従来使われていた画像特徴点を十分に抽出しにくいことである。もう1つの問題は、アピランスベースの認識は画像同士のマッチングによるため、得られる結果は2次元であり、物体マップに用いるような3次元の位置姿勢推定はできないことである。本研究では、これらの問題に対処する物体認識方式を開発した。第1の問題に対しては、画像エッジ点を用いることでテクスチャの少ない物体でも十

分な量の特徴点を確保し、安定に認識できるようにした。第2の問題に対しては、画像特徴点を物体形状モデルの3次元点とリンクさせて、画像レベルの認識結果を物体形状モデルに渡し、物体の3次元位置姿勢を推定できるようにした。

図3に実験例を示す。(a)は画像特徴点とリンクされた3次元エッジモデルである。(b)は入力画像であり、これを多数のモデル画像が登録されている画像データベースに対してマッチングを行った。(c)は、画像認識結果から(a)の3次元エッジモデルの位置姿勢を推定して、画像に重ね合わせた結果である。画像と物体モデルが一致しているのがわかる。図4に他の認識例を示す。



図3 机の認識例

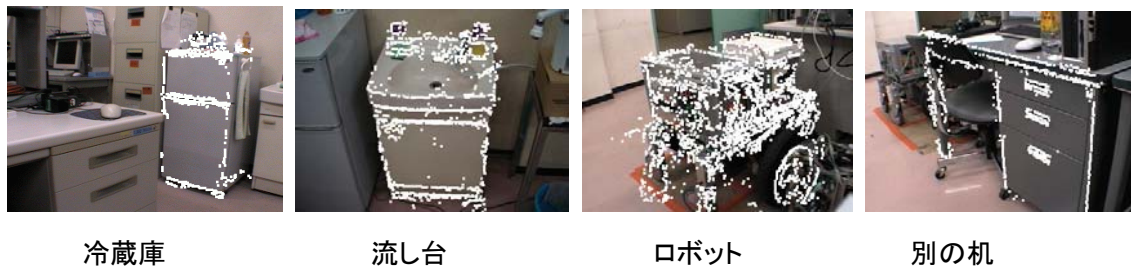


図4 他の物体の認識例

4.4 物体モデル構築

物体モデルには、物体認識用の特徴としての役割と、物体マップの構成要素としての役割がある。前者は4.3節で述べたようにエッジ点で構成されたモデルであるが、後者は面情報を含んだ密な形状が必要である。このようなモデルを手で作成するのは、多大な工数がかかるうえ、複雑な形状の物体には対処できないという問題がある。そこで、単眼カメラで撮影した画像列からステレオ視の原理を用いて3次元の物体形状を復元するアプローチをとる。まず、カメラ運動と疎な物体形状を Structure-from-motion 技術を用いて推定し、次に、画像間で各エッジ点の対応づけを行って、エッジ線分まで含めた形状復元を行う。さらに、エッジ線分から3次元平面を復元し、面を構成する各点に画像から抽出した色を付加することで、面や色を含んだ密な形状モデルを構築する。これにより、認識用の3次元エッジモデルと、物体マップ用の面情報モデルを作成する。なお、モデル構築時に対象物体を画像から切り出す作業は、人間が GUI ツールを用いて行う。

図5および図6に実験例を示す。図6は30枚の画像列から生成した机のモデルであり、(a)は入力画像の一部、(b)は生成した3次元エッジモデル、(c)は面情報モデルである。図6は、種々の物体に対してモデルを生成した例である。撮影した画像の視点が限られているため、物体の前半分

だけのモデルが多いが、ロボットが行動するための地図には、この程度のモデルでも役に立つ。



図5 物体モデルの構築例

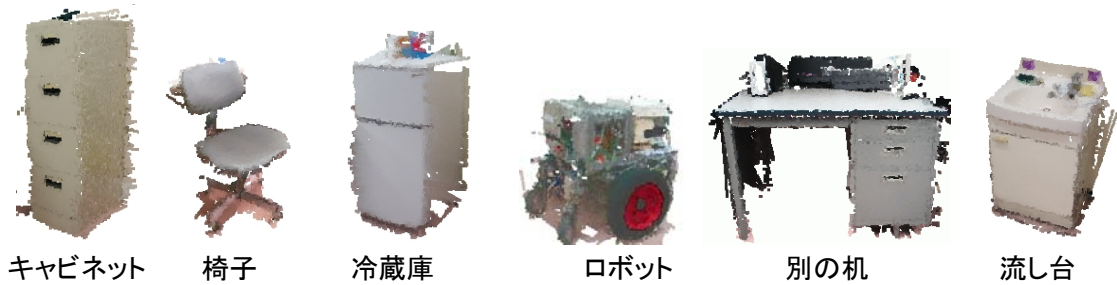


図6 作成した物体モデルの例

4.5 物体マップの構築

上記技術を統合して、物体マップを構築する。まず、LRFにより2次元地図を作りながらロボットを走行させる。この時、ロボットの走行軌跡も得られる。その2次元地図から図2のようにカメラ視線を生成し、得られた走行軌跡に沿ってロボットをもう一度走らせて画像を撮影する。その各画像に対して物体認識を行い、物体が見つかった場合は、物体の推定位置姿勢とロボットの位置姿勢に基づいて物体モデルを配置して物体マップを構成する。図7に実験に使用したロボットと、生成された物体マップを示す。

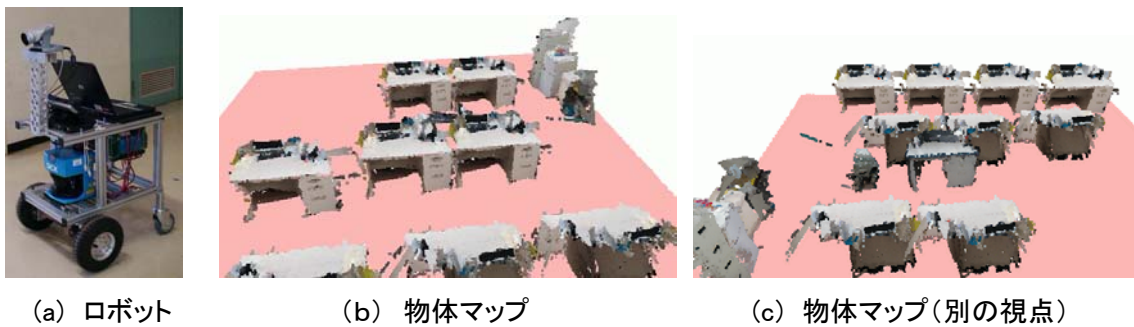


図7 3次元物体マップ構築の例

5 自己評価

環境形状が個々の物体に分割された地図をロボット自身が構築する研究は例がなく、本研究で実現した物体マップ構築は、きわめて先進的な成果と考える。構築した物体マップはロボット自身が利用するが、マップ内の物体モデルを用いて環境内の物体を認識できるので、従来の環境地図よりも実環境とマップの対応づけを緊密に行える。これにより、物体の操作・運搬などの作業が効率よく行えるようになると期待される。

また、大域スキャンマッチング方式、画像特徴量から認識と3次元位置姿勢推定を行う物体認識方式、形状情報と認識特徴を統合した物体モデル構成方式、画像列からの密な物体形状復元方式など、有用性の高い要素技術を開発したことも大きな成果である。それぞれまだ改良の余地はあるが、一次試作として価値は大きく、今後も磨きをかけて完成度を高めていきたい。

一方、残された課題も多い。現在のシステムでは、物体モデル作成、物体認識の成否判定、ロボット走行制御などに人間が介在する部分が残し、完全に自律ではない。物体モデル作成の完全自動化は本質的に困難であるが、それ以外については、各システムの完成度を高めることでかなり対処することが可能であり、今後も改良を続けたい。

また、研究当初に立てた副目標の中には実現できないものもあった。前述の環境探索、物体認識、物体モデル作成の他に、マニピュレータによる物体操作への応用、および、記号と物体の対応づけ、という副目標を掲げたが、3年の研究期間内には実現できなかった。マニピュレータへの応用は、本研究の有用性を示す重要な事例となるので、今後、機会を見て実現したい。記号と物体の対応づけは、ロボットに一種の言語能力を付与し、その知能を高度化するためのきわめて重要な研究テーマであると考えている。本研究の次の段階として取り組んでいきたい。

6 研究総括の見解

本研究は、ロボットが環境を物体単位に認識して、3次元の空間構造を記した環境地図を構築することを目的とする。このための実現技術として、大域スキャンマッチング方式、画像特徴量から認識と3次元位置姿勢推定を行う物体認識方式、形状情報と認識特徴を統合した物体モデル構成方式、画像列からの密な物体形状復元方式など、独創性、有用性の高い要素技術を開発したことは大きな成果である。さらに、これらの技術を統合して、レーザスキャナと単眼カメラを用いて3次元物体地図を構築することに成功したことも大きな成果であり、高く評価できる。

将来的には、物体に関するさまざまな知識を付加することで、ロボットの動作を飛躍的に高度化する基盤になると期待される。

7 主な論文等

論文

1. 友納正裕：“ユークリッド変換に不変な特徴量を用いた2次元大域スキャンマッチング方式”、日本ロボット学会誌、(投稿中)。
2. 友納正裕：“エッジ情報を利用した単眼カメラ画像列からの密な3次元物体モデルの構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。

3. 友納正裕: “形状情報と認識特徴を統合した物体モデルによる3次元物体認識”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。
4. 友納正裕: “レーザレンジファインダと単眼カメラを用いた3次元物体マップの構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。
5. 友納正裕: “スキャンマッチングによる大域自己位置推定機能を備えたロバストな2次元マップ構築”、日本ロボット学会誌、(投稿予定)。

国際会議発表論文

1. M. Tomono: “Planning a Path for Finding Targets under Spatial Uncertainties using a Weighted Voronoi Graph and Visibility Measure”, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp. 124–129, 2003.
2. M. Tomono: “A Scan Matching Method using Euclidean Invariant Signature for Global Localization and Map Building”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp. 866–871, 2004.
3. M. Tomono: “Building an Object Map for Mobile Robots using LRF Scan Matching and Vision-based Object Recognition”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp.3765–3770, 2004.
4. M. Tomono: “Robust Robot Localization and Map Building using a Global Scan Matching Method”, Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), pp. 1059–1064, 2004.
5. M. Tomono: “3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp. 3353–3358, 2005.

国内会議発表論文

1. 友納正裕: “移動ロボットによる目標物体探索のための経路計画”、日本ロボット学会 第21回学術講演会予稿集, 2003.
2. 友納正裕: “スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定”、第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 32–37, 2004.
3. 友納正裕: “大域スキャンマッチングと複数仮説追跡を用いたロバストな自己位置推定”、日本ロボット学会 第22回学術講演会予稿集, 2004.
4. 友納正裕: “基線長選択機能を備えた形状復元に基づく単眼カメラ画像列からの3次元マップの構築”、第10回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 159–164, 2005.
5. 友納正裕: “画像列からの密な物体モデル生成のためのエッジの3次元復元”、日本ロボット学会 第23回学術講演会予稿集, 2005.

総説・解説

1. 友納正裕、油田信一: “移動探査ロボットによる環境地図の生成”、日本機械学会誌、Vol. 106, No. 1019, pp. 53–56, 2003.

特許出願

1. 友納正裕: 移動ロボット用地図作成システム [2003.3.14 出願](特許公開 2004–276168)
2. 友納正裕: 移動ロボット用経路計画システム [2003.7.11 出願](特許公開 2005–032196)
3. 友納正裕: 線図形マッチング方法 [2003.12.12 出願](特許出願 2003–414498)

4. 友納正裕：カメラ運動及び物体形状の復元システム[2005.3.11 出願](特許出願 2005-069118)
5. 友納正裕：3次元物体認識システム [出願中]
6. 友納正裕：3次元形状モデル生成システム [出願中]

受賞

1. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 [部門奨励賞]「ループ制約と幾何学的な事前知識を用いた移動ロボットの自己位置推定とマップ構築」(2003年12月)
2. 第9回ロボティクスシンポジウム [最優秀論文賞]「スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定」(2004年3月)
3. 第5回計測自動制御学会 SI 部門講演会 [ベストセッション講演賞]「複数仮説追跡を用いた単眼カメラによる移動ロボットの3次元自己位置推定とマップ構築」(2004年12月)