

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330305

研究課題名(和文) 実際の行動経験を反映した画像特徴にもとづく屋外環境認識法

研究課題名(英文) Outdoor environment recognition reflecting actual motion experience based on image features

研究代表者

小林 祐一 (Kobayashi, Yuichi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：60373304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットには、ロボットのために整備された場所とは異なる環境での活躍が求められている。そのためには、活動する環境を想定・限定してプログラムを事前に準備するのではなく、未経験の環境にも自律的に対処できるようになる技術が求められる。本研究では、ロボットが自身に搭載された加速度センサの情報を用いて路面の走りにくさを評価できる方法を実装し、実機移動ロボットにより検証を行った。画像で得られた情報をもとに走行時の振動を推定可能であることを確認した。また、ロボットの移動速度に依存した走りにくさを考慮した運動計画法を提案し、適切な速度調整を行いながら目標位置に到達させるナビゲーションを行うことに成功した。

研究成果の概要(英文)：Autonomous robots are required to be able to act in environments which are not structured specifically for them. To meet the requirement, it is important to develop a technology which allows to adapt to unexperienced environment autonomously, instead of relying on human designers' preparation under assumption or restriction of environment. In this research, an experience-based method for prediction of motion feature obtained by acceleration sensor was developed. The method was implemented on an outdoor autonomous robot and verified through experiment with uneven outdoor terrains. It was confirmed that it was possible to predict motion features based on information obtained by cameras attached to the robot. In addition, a motion planning scheme which allows consideration of velocity-dependent traversability assessment was proposed. We realized a navigation of a mobile robot to reach a destination while appropriately adjusting its velocity so as to avoid excessive accelerations.

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット ナビゲーション 屋外不整地 環境認識

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットには、災害現場など、ロボットののために整備された（生産現場などの）場所とは異なる環境での活躍が求められている。そのためには、活動する環境を想定・限定してプログラムを事前に準備するのではなく、未経験の環境にも自律的に対処できるようになる技術が求められる。自律移動ロボットに関する国内研究では、遊歩道でのコンテストを通じてロボットを人の活動する環境で動かすことを目指した研究（つくばチャレンジなど）がなされており、国外では DARPA Grand Challenge, Urban Challenge など実世界環境での自律的なナビゲーションや作業が活発に研究されている。これら関連の研究は、センサ情報処理と車両の制御とを分離した問題として扱っているものが多い。「実際にどのように走行したか」というロボットがその場で経験した情報を反映した認識を行わせることで、より幅広い環境に適応可能な技術の発展が期待されるが、そのような研究は充分になされていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、ロボット自身が運動して得た情報にもとづいた画像情報からの特徴抽出にもとづく柔軟な環境認識法を提案する。カメラを搭載した自律移動ロボットのナビゲーション問題において、距離計測にもとづく3次元形状認識では識別しにくい走路上の障害物を、画像特徴と走行経験の相関抽出にもとづいて認識する方法を提案する。これにより、「走りやすいかどうか」「どのように走行すれば走りやすいか」を識別・判断しながら賢く移動できるロボットを実現する。

具体的な目標として、以下を設定する。

- (1)形状識別困難な障害の画像による識別：草木・段差・がれき・溝・石など。
- (2)実際の走行経験を反映した画像認識：走ってみて揺れた場所（障害）を記憶し、以後の走行時に画像から揺れを推測する。
- (3)走行困難場所の器用な自律走行：走行容易な方向からのアプローチ・回避などにより走破する。

研究には、カメラ等を搭載した移動ロボットを用い、未知の環境での目的地までの自律的なナビゲーションを行う。人や車が通ることのみ想定されている環境（具体例としては大学キャンパス内、公園・歩道など）を実験環境とする。草地・段差・溝や石・砂利など、整備が不完全なために存在している「走破可能性のある障害物」を10~20種類程度識別する。

その場所を走行した時の揺動・速度変化等の情報から「走りにくさ」を評価し、その視覚的特徴量と関連付ける統計的学習を行う。また、走りにくい場所での走行経験から、ど

のような走り方が揺れを低減できるかを動作計画の枠組みにもとづいて解決する。これにより、走りやすさを評価した環境認識とそれにもとづいた柔軟なナビゲーションを実現する。

### 3. 研究の方法

図1に実験に利用する移動ロボットを示す。屋外不整地環境を走行可能な4輪駆動型のプラットフォームに加速度センサを搭載し、走行時の加速度を計測可能である。カメラは単眼カメラとステレオカメラの2通りの実装を行った。単眼カメラでは、2次元画像から画像中の局所領域についてテクスチャを表現する特徴量を抽出する方法と、SfM (Structure from Motion) により移動しながら撮影した複数フレームの画像を利用した3次元像構築を利用する方法の実装した。ステレオカメラの実装については、SGM (Semi-Global matching) を用いた3次元再構成を実装し、屋外環境での照明条件の変化に強い3次元像再構成を行い、段差など3次元情報を利用可能な環境認識に利用する。

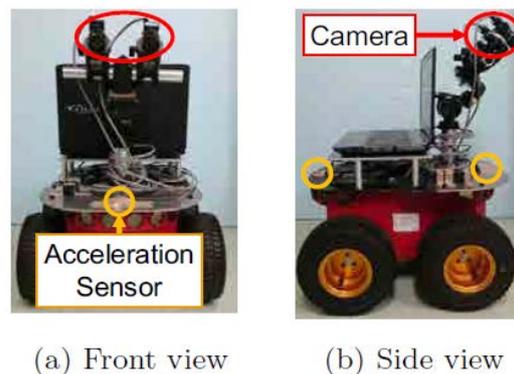


図1 カメラと加速度センサを搭載した移動ロボット

図2に路面認識法の概略を示す。オフラインで収集したデータをもとに予測器を構成し、オンライン時に利用する。収集するデータは、走行する実空間領域に対応する画像中の局所領域の特徴量と、走行時に得られる運動に関する特徴量の組である。

予測器の入力には、画像の局所領域から抽出したテクスチャ特徴量を用いる。テクスチャ情報を反映した画像特徴量として、SFTA (Segmentation-based Fractal Texture Analysis) を用いる。予測には、非線形関数近似器としてGP (Gaussian Process) を用いる。運動特徴量として、加速度センサにより計測される加速度の最大-最小差を用いる。

上記の基本的な画像特徴-運動特徴の入力関係の学習に加えて、対応範囲の拡大を考慮して、入力に速度情報を加える、画像特徴入力の代わりに3次元再構成情報にもとづいた段差の高さ情報および向き情報を加え

る、などの拡張・変更を行った。

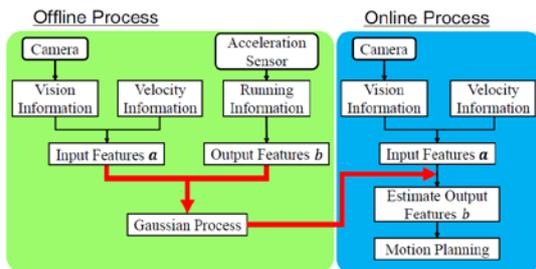


図 2 提案する路面認識法の概略

#### 4. 研究成果

屋外環境で収集した不整地路面の例を図 3 に示す。図上側は自然の路面、下側は道路など人工の路面である。下記のような石・砂の他、草地、木の根、ひび割れのあるアスファルトなど、自然の路面と人工の路面を両方含めて 30 種類程度のデータ収集を行った。訓練用サンプル数は 1208、テスト用サンプル数は 109 である。



図 3 データ収集を行った路面の例

これらの路面を走行して得られた運動特徴（加速度の最大-最小差）の関係を図 4 に示す。SFTA 特徴ベクトルを主成分分析により 2 次元に圧縮し可視化している。異なる種類の路面が 2 次元空間中の異なる場所にまとまってマッピングされていることから、本研究で用いた SFTA 特徴ベクトルが、路面のテクスチャの違いを表現できていることが確認された。GP による予測によって、テスト用サ

ンプルについて 70%が  $1\sigma$  信頼区間に収まる予測ができることが確認された。

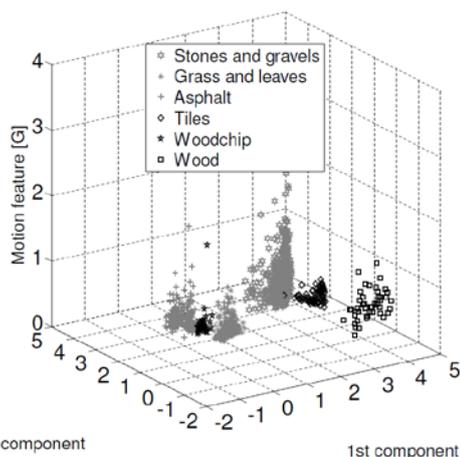


図 4 SFTA 画像特徴と運動情報

移動ロボットに搭載したカメラの複数フレーム画像を利用した SfM の処理例を図 5 に示す。上の 4 つの画像は移動しながら撮影した画像、下の画像は 3 次元再構成により得られた像を示す。木の根に相当する個所において、路面の隆起が再構成されていることが確認される。この段差の高さと運動時に得られた加速度最大-最小差の間の関係を関数近似により推定した。実装した GP の比較対象として、VHGP（入力依存の分散を表現可能な Gaussian Process）、LSCDE の比較を通じて、VHGP が最も良い近似性能を得られることが確認された。

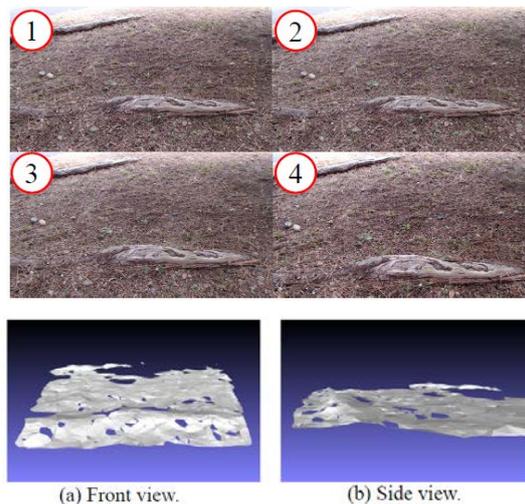


図 5 複数フレーム画像を用いた SfM による 3 次元再構成結果の例

VHGP により得られた関数近似器による運動特徴の推定結果の例を図 6 に示す。段差の高さの違いに対応して、運動特徴（振動の大きさ）を概ね予測可能であることが確認された。また、提案する運動予測の性能を評価する追加実験を行った。

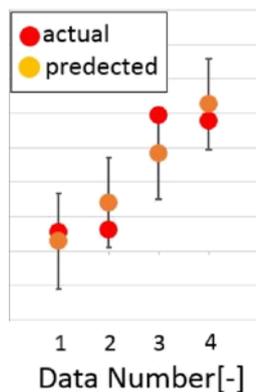


図6 段差高さ情報を利用した運動の予測

追加実験においては、段差の高さ情報に加えて車両の速度、段差の向きを変更してサンプルを増やし、運動予測性能の検証を行った。移動ロボットの速度が増加すると加速度変化が大きくなる傾向と、段差へのロボットの進入角度が直角から離れると加速度変動が大きくなる傾向が確認された。

さらに、上記の加速度予測を反映した自律移動ロボットの運動計画として、RASMO と呼ばれる移動コストを考慮した最適経路の生成可能な方法を用いた運動計画を行った。段差に侵入する速度の違いにより生じる運動が異なることを反映し、高い段差の前で減速することで大きな振動を回避しながら目標位置に到達可能であることが確認された。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

①松村和紀, ステレオビジョンと走行経験にもとづく自律移動車両の軌道計画, 第 43 回知能システムシンポジウム, 2016 年 3 月 10 日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市)

②Kazuki Matsumura, Prediction of motion over traversable obstacles for autonomous mobile robot based on 3D reconstruction and running information, the 6th International Conference on Advanced Mechatronics, 2015 年 12 月 6 日, 早稲田大学(東京都新宿区大久保)

③M. A. Bekhti, Prediction of Vibration as a Measure of Terrain Traversability in Outdoor Structured and Natural Environment, 7th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology, 2015 年 11 月 26 日, University of Auckland, Auckland, New Zealand

④松永翔, 速度項を考慮した RASMO による無人車両のための最適経路計画, 第 21 回創発システムシンポジウム, 2015 年 8 月 30 日,

諏訪東京理科大学(長野県諏訪市)

⑤松村 和紀, 画像認識と走行経験に基づく車両型移動ロボットのための走破可能な障害物の認識, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015 年 5 月 18 日, 京都市勧業館(京都市左京区岡崎成勝寺町)

⑥松永翔, 車両ダイナミクスを考慮した RASMO による無人車両のための最適経路計画, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015 年 5 月 18 日, 京都市勧業館(京都市左京区岡崎成勝寺町)

⑦M. A. Bekhti, 移動ロボットナビゲーションのための視覚にもとづいた路面走行可能性の推定, 第 27 回自律分散システム・シンポジウム, 2015 年 1 月 22 日, 東京理科大学神楽坂キャンパス(東京都新宿区神楽坂)

⑧ M. A. Bekhti, Terrain Traversability Analysis using multi-sensor correlation by a mobile robot, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2014 年 12 月 13 日, 中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区春日)

〔図書〕(計 1 件)

①Thomas Braunl, Brendan McCane, Mariano Rivera, Xinguo Yu (Eds.), Springer, Image Technology, 2016 年, 総ページ 793, pp. 282-294. (Selected papers from PSIVT 2015)

〔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

[http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous\\_research/research\\_j.html](http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~koba/previous_research/research_j.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 祐一 (KOBAYASHI, Yuichi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 60373304

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

金子 透 (KANEKO, Toru)

静岡大学・工学部・名誉教授

研究者番号: 50293600

(4) 研究協力者

ベクティ モハメド アブデウサマド

(BEKHTI, Mohammed Abdessamad)

松村 和紀 (MATSUMURA, Kazuki)

松永 翔 (MATSUNAGA, Sho)