

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420416

研究課題名(和文)カメラを用いた路面摩擦係数の判別手法

研究課題名(英文) Estimation of Coefficient of Static Friction of Surface by Image-Sensor

研究代表者

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60251584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ロボット前方の床面の静摩擦係数をロボットに搭載したカメラ映像により非接触で推定することを目的とする。映像から抽出した床表面の粗さに関する情報を、機械学習により局所的な画像特徴量として抽出し、摩擦係数の大小に応じたクラス分けを行い、摩擦係数を推定する。前方床面の画像からは詳細なテクスチャ特徴が得られないが、ロボット直下の床画像を用いて推定を行い、直下の床と前方床面が同種かどうか判定させることで実現する。実験の結果、非接触で摩擦係数をロボットの制御に必要な精度で推定でき、ロボットの物体把持や歩行制御などに有用であることが示せた。

研究成果の概要(英文)：I propose an estimation method of coefficient of static friction of a floor surface by the photo image of the floor tile. The image feature used to presume are local image features that are generated by machine learning. And the estimation is performed by classification according to the magnitude of the friction coefficient. Although detailed texture features can not be obtained from the image of the front floor surface, estimation is performed using the floor image under the robot, and determine whether the under floor image of robot and the front floor are the same type. As a result, it was shown that the friction coefficient can be estimated with non-contact, an accuracy of the coefficient is enough to control the robot, and it is useful for robot object grasping and walking control.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：テクスチャ解析 微小形状特徴 摩擦係数 画像計測 ニューラルネットワーク 自動符号化

1. 研究開始当初の背景

精密なロボット制御を実現するには数多くのセンサが必要とされている。多数の接触センサを不要とするために、カメラ等の汎用視覚センサを活用した制御方式が研究されている。また一方、視覚センサによって非接触に前方の地勢情報を取得したり、路面の状態を検知したりすることが行われている。

対して人間は、非接触時においても物体表面のテクスチャなどの視覚的な情報により、すべりやすい、こわれやすいなどの素材の特徴を推定し、それに応じた動作も行っている。もしも人間同様に非接触で摩擦係数を推定できれば緻密なロボット制御に有用な情報を得られる。

まず視覚情報から摩擦係数を推定する場合、撮像画像より得られる特徴のうち摩擦係数の大きさに相関がありそうなものとしては表面の粗さ特徴が考えられる。テクスチャ解析は古く 60 年代から行われ続けてきた画像処理における代表的テーマの 1 つである。

研究者はこれまでに、テクスチャ記述として 9 種の形状特徴要素を提示し、その形状特徴要素を抽出する「形状通過型」フィルタバンクを提案してきた(図 1)。実際に、自然に存在する素材を撮像して得られた自然なテクスチャを、そこから抽出した形状特徴の量を様々な分野に応用してきた。

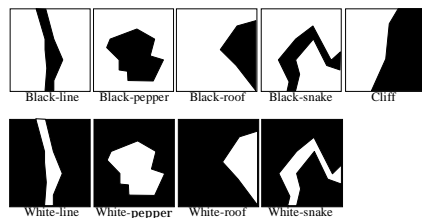


図 1 微小形状特徴

研究開始時でのコンピュータビジョン分野では、Haar 特徴のような局所特徴量を、Adaboost のような機械学習手法に使用することで顔認識や物体識別能力を劇的に向上させてきた。本研究ではオリジナルな局所特徴量である微小形状特徴量を、こうした機械学習手法により摩擦係数の大小によるクラス分けを当初考えていた。

2. 研究の目的

本研究ではロボット前方の路面の推定など、ロボットに搭載する実用に際しての汎用的な環境で、前方数メートル程度の床面・路面の摩擦係数推定を十分な精度で行うことを目標とする。

本研究では、現段階では 9 種×5 サイズの微小な形状特徴と次に説明する微小凹凸特徴から機械学習により静摩擦係数と相関する特徴を選択し、非接触で取得した画像特徴より静摩擦係数の推定を行う。

微小形状特徴だけではなく、床の凹凸構造など摩擦に関する特徴を抽出できないと、例

えば印刷された模様などにより正しく推定ができない。そこで、横方向からの照明を当てた状態での撮像画像と直上照明による撮像画像から抽出した微小形状特徴を比較して微小な凹凸に関する特徴を得る(図 2)。推定は前方数メートル程度の床面・路面に対して行うことを目標とする。前方床面の画像からは詳細なテクスチャ特徴が得られないが、ロボット直下の床画像を用いて推定を行い、直下の床と前方床面が同種かどうか判定させることで実現する。

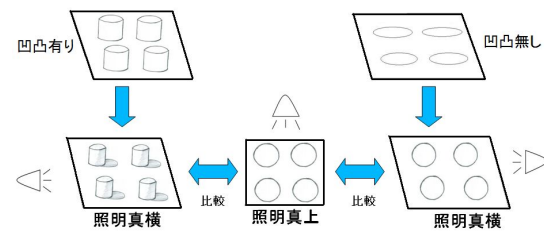


図 2 微小凹凸特徴

3. 研究の方法

(1) 研究開始時点では照明などが良好な状態で鉛直上方から床を撮像した画像を用いた推定を試みる。本研究で用いている微小形状特徴は、均一な方向性のないテクスチャからの特徴抽出のため、ロボット下方の床面 directional な素材だけを対象とする。

(2) すだれ状に一方向への溝が並んでいるような素材など、方向性を有する場合には、そもそも摩擦係数が方向に依存している。このためまずテクスチャ解析で方向性を抽出した上で、方向別の摩擦係数を推定する必要がある。方向性の抽出は古典的なフーリエ・パワースペクトルなどでも検出可能できるか確かめる。

(3) 前方床と下方床画像の同一テクスチャ判定を行う。テクスチャ解析においては均一なテクスチャ画像が前提であるため、そのままではロボットの前方にある床面からの摩擦係数の推定ができない。そこで、下方の床素材で推定を行い、それから前方となる床位置の素材と下方にある床素材が同一素材であるかどうかの判定をすることで、下方の床素材の静摩擦係数の推定値が前方の床に適用できるかどうかを確認できる。

(4) 微小凹凸特徴による推定値の修正を試みる。微小凹凸特徴を用いて推定精度が上がるのかどうか確かめる。

微小凹凸特徴の抽出するために、床面を横から照明する機材の試作も行っており、この改良機を製作する予定である。

(5) 微小凹凸特徴などを通常カメラによる情報だけでなく、ステレオカメラ以外にも特殊なカメラ、例えば赤外線やその他特定スペク

トルを撮像するカメラ(センサー)を利用して、素材自体を判別するための撮像を行うことも考慮し、そのためのコストと性能向上について検討を行うものとする。

仮にこれらの計画が順調に進まないような場合には、摩擦係数が大きい素材、小さい素材などのクラスを分ける判別分析は可能であるため、十分な数のクラス分けを実現することを考える。ロボットの動作に対して十分有効な数のクラス数を判別できれば、当初目標を達成することが可能である。さらに、摩擦係数以外にロボットの制御に有用な情報を推定させることを考え、可能な範囲で計画を修正するものとする。

4. 研究成果

非接触で摩擦係数を推定できれば、ロボットの物体把持や歩行制御などに有用である。すなわち、ロボットに搭載するセンサの数を増やすことなく、路面状況を推定可能とし、実用的なロボット制御が可能となった。

(1) 下方画像での摩擦係数推定の確立

例えば図3のような12種類の床画像を480枚撮影し、本手法で得られた特徴ベクトルを線形回帰によって得られた推定式で推定したところ、静摩擦係数を ± 0.05 の精度で推定することが可能であることを確かめられた。このときの推定値と実測値の散布図を図4に示す。

ただし、これは対象画像が一様かつ方向性がないものに限られる。

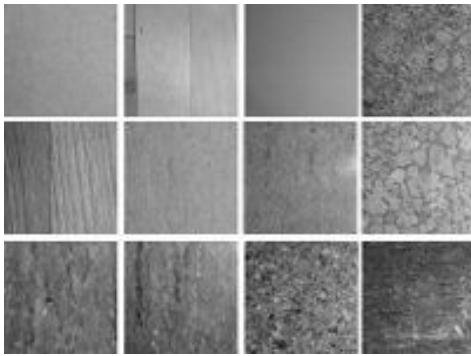


図3 床画像のサンプル

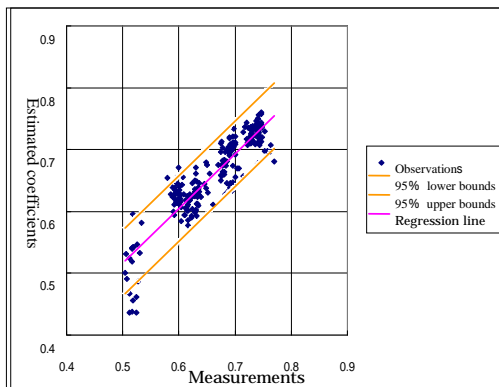


図4 下方画像の推定値散布

(2) 方向性のあるテクスチャの判別

方向性のあるテクスチャに関しては、対象床面画像のフーリエ・パワースペクトル画像を生成し、その縦横比から方向性の有無を判断できることがわかった。縦横比が1:1に近いものは方向性がなく、例えば、すだれ状の溝があるようなものは、その方向へ長いパワースペクトル形状を示す。パワースペクトル画像の例を図5に示す。また、方向別に摩擦係数が推定できることを示した。

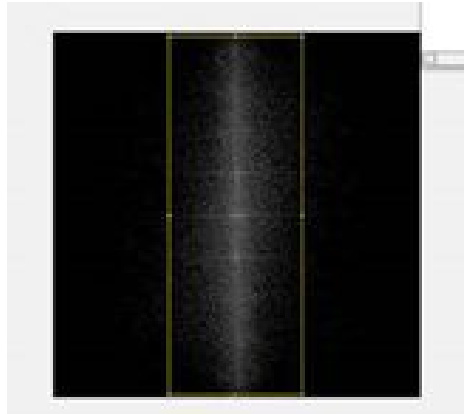


図5 方向性のある対象画像のフーリエ・パワースペクトル画像例

(3) 前方床路面の推定

下方画像ではなく、前方3メートル程度を撮影した状態での推定は、精度が著しく落ちた。対象画像をテクスチャとしたとき、一様ではなくなり、また形状特徴がつぶれてほとんど取得できないことが原因である。

しかし、前方と下方が同種の路面種類かどうかの判別は可能であることを示した。

(4) 微小凹凸特徴による判別精度の向上

本手法は画像特徴から推定を行うため、模様が印刷されたシートと実際に床表面に微小な凹凸がある場合とを原則的には判別できない。

しかし、先の図2に示した微小凹凸特徴を使えば、その判別が可能であることを示した。また、この特徴を通常の推定で用いても、精度向上に寄与することが分かった。

(5) ステレオカメラなど他のセンサを用いた検討

微小な凹凸特徴を抽出するのに、そのほかの機材を検討した。ステレオカメラは一般に高価であり不適である。安価な距離画像センサでは、微小な凹凸をとれるほど精度が出ないことを確かめた。

(6) 機械学習手法の適用

研究開始当初には想定できないほど、研究期間中に急激にコンピュータビジョン分野では機械学習手法が発達した。

本研究でも当初予定していなかったが、ディープラーニングによって作成した8層程度のニューラルネットワーク(NN)や畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を摩擦係数の推定に応用することを試みた。

まず、本研究でこれまで利用してきた微小形状特徴をそのまま使用し、線形回帰によって推定式を構築する代わりに NN を用いてみた。また対象画像を形状特徴を抽出せず、直接 NN によって摩擦係数の推定を試みた。さらに CNN を用いて自動符号化により推定に効果が高い画像の局所特徴を自動で生成した場合との比較を行った。

NN の層の数を変化させたり、形状特徴が自動生成の特徴を使用させたり条件を変化させ、評価用の画像データ群を用いて摩擦係数の推定値の二乗誤差で評価した。

表 1 二乗誤差一覧

使用したモデル	平均二乗誤差
線形回帰(直接)	8.02E-02
線形回帰(形状特徴)	2.69E-02
NN(直接 2 層)	1.65E-02
NN(直接 8 層)	1.69E-02
NN(形状特徴 2 層)	1.98E-02
NN(形状特徴 8 層)	1.65E-02
CNN(2 層, 畳込 9 枚)	1.58E-02
CNN(8 層, 畳込 18 枚)	1.71E-02

以上の実験から、NN や CNN を用いた推定は線形回帰を行う場合よりも誤差が少なく有用な手段であることが確認できた。さらに NN では層の数が増すことにより、形状特徴を用いなくても推定可能であった。また CNN では同程度の精度でありことが確かめられた。

また、NN や CNN では形状特徴よりも高精度に推定できることから、前方路面画像を直接推定することも試みたが、精度は出なかった。

無論前方と下方の路面が同種かどうかの判定は可能である。

最後に、微小凹凸特徴と同様に横方向からの照明を付けた場合、CNN でも同様に精度が向上するか確かめた。表 2 に示したように光源があった方が精度向上することが確かめられた。

表 2 光源の有無による比較

特徴量	決定係数 R^2	平均二乗誤差
光源無	0.7586	5.18E-03
光源有	0.8853	2.46E-03
形状特徴	0.6000	

結果として、微小形状特徴をそのまま用いるよりも NN や CNN を使って微小形状特徴に相当する局所特徴を自動生成させ、さらに横か

らの光源を使って微小凹凸特徴に相当する局所特徴も生成させることで精度が向上することが確かめられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

田村 仁, 神林 靖: Estimation of Coefficient of Static Friction of Surface by Analyzing Photo Images. 8th KES International Conference on Intelligent Decision Technologies 2016 no. SIST57: 15-26, 2016.06. 査読有
 田村 仁, 神林 靖: Development of a Touch Panel Interface that Provides Tactile Feedback Depending on the Surroundings. Communications in Computer and Information Science Vol. 435: 259-263, 2014.06. 査読有
 田村 仁, 神林 靖: Design of Intuitive Interfaces for Electric Wheelchairs to Prevent Accidents. 7th International Conference of Universal Access in Human-Computer Interaction (UAHCI) 2013 Held as Part of HCI International 2013 Lecture Notes in Computer Science(LNCS) no. 8009: 592-601, 2013.07. 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

入江 俊, 田村 仁: ディープラーニングを用いた撮影画像による前方路面状況及び床路面の静摩擦係数の推定. 情報処理学会 第 79 回全国大会, Vol. 79(2): 387-388, 2017.03.16, 名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)
 入江 俊, 田村 仁: 撮影画像による摩擦係数の推定. 第 15 回情報科学技術フォーラム 15(3): 205-209, 2016.09.07, 富山大学五福キャンパス(富山県・富山市)
 入江 俊, 田村 仁: 撮影画像による摩擦係数の推定. 情報処理学会第 78 回全国大会 vol. 78(2): 95-96, 2016.03.10, 慶應義塾大学矢上キャンパス(神奈川県・横浜市)
 櫻野 祐太, 田村 仁: 撮影画像による前方の路面状況の推定. 情報処理学会第 76 回全国大会 76(2): 233-234, 2014.03.11, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都・足立区)
 平井 勝真, 田村 仁: 撮影画像による床路面の方向別の摩擦係数の推定. 情報処理学会 第 76 回全国大会 76(2): 235-236, 2014.03.11, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都・足立区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 仁 (TAMURA, Hitoshi)
 日本工業大学・工学部・准教授
 研究者番号: 60251584