

足圧布センサを用いた路面形状判別の検討

大橋 勇介^{1,a)} 榎堀 優^{1,b)} 間瀬 健二^{1,c)}

概要: 我々は路面の形状を足裏で感知し、さまざまな状況判断に利用している。例えば、砂利道では歩行に注意を払い、駅プラットフォームの端のブロックでは周囲を警戒する。こういった路面形状の変化は我々が日常的に利用している重要な判断基準である。本研究では路面形状の変化をコンテキストとして認識することを目的とする。路面形状は足圧布センサを用いて計測した足裏にかかる圧力から判別を行う。センサの解像度を考慮し、視覚障害者誘導用の点ブロックと線ブロック、平面の3種類の路面の形状の判別を行った。被験者5名分の立位時のデータに対して提案手法による路面形状の判別を行った結果、平均78.2%の識別率を得た。

キーワード: ウェアラブルセンサ, 足圧, 路面形状

Road Surface Detection Using the Foot Pressure Cloth Sensor

OHASHI YUSUKE^{1,a)} ENOKIBORI YU^{1,b)} MASE KENJI^{1,c)}

Abstract: We determine that situation using the road surface. For example, we pay attention to walking in the gravel road and the block at the end of the station platform. The purpose of this study was to detect road surface using the foot pressure cloth sensor for recognition of the context of road surface. We had the experiment that detect road surface that are flat, dots block and lines block to verify the usefulness of proposed methods. As a result, the proposed method achieved a recognition rate had 78.2%.

Keywords: wearable sensor, foot pressure, road surface

1. はじめに

我々は路面の形状を足裏で感知し、さまざまな状況判断に利用している。例えば、砂利道では、その路面の凹凸と不均一から歩行に注意を払う。また、駅プラットフォームの端や階段の手前に設けられた凹凸はその周囲に対して警戒させることで、転落防止に役立っている。そこで、路面形状をコンテキストとして認識できれば普段生活している路面の転倒リスク判断や、スマートフォンを見ながら歩いていて周囲に対して注意を払っていない時に警告を出すことで転落事故の防止に役立てることができると考えられる。

路面形状を計測する方法として、GoogleGlassなどにより撮影した主観映像を用いた画像解析によるものやスマートフォンなどから取得できる加速度を用いた計測が考えられる。しかし、主観映像を用いた計測には人混みや自身の足により路面が隠れてしまう場合に、その形状を取得することが困難である。加速度センサを用いた計測は歩行時など移動している場合は路面形状を計測できる。しかし、例えば電車を待っている時や交差点で信号待ちしている時、人混みの中などで立ち止まっている時には路面による変化が起こらないために路面形状を計測することができない。このように、主観映像や加速度センサを用いた路面形状の計測では、常には路面形状を認識することができない。

そこで、我々は人が路面の形状を判別する場合と同様に足裏の圧力(足圧)を用いた足下の路面形状判別を検討している。本研究では、足圧を足圧布センサで計測し、路面形

¹ 名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University
a) ohashi@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp
b) enokibori@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp
c) mase@nagoya-u.ac.jp

状を判別することで路面のコンテキストを認識することを目的とする。本稿では、足圧布センサを用いた路面形状の判別アルゴリズムについて提案し、5人の被験者、3種類の路面形状に対して行った判別実験の結果について述べる。

以降2章で、関連研究について述べる。3章では本研究で用いる足圧布センサと圧力分布を用いた路面形状判別アルゴリズムについて述べる。4章では判別実験に用いるデータの取得方法と、提案した判別アルゴリズムを用いた路面形状の判別実験について述べる。最後に、5章で、本稿についてまとめる。

2. 関連研究

カメラ画像を用いた路面コンテキストの認識を行っている研究として、山口ら [1] の白線検出や野田ら [2] の路面標識の認識がある。山口らは画像中からハフ変換を用いて白線を高精度に検出している。また、野田らは画像中から道路表面に存在する路面表示を HoG 特徴を用いて識別を行っている。しかし、これらの研究を歩行者が利用することを考えた場合に、人混みや自身の足などにより路面が隠れてしまう状況では、路面形状を得ることが困難である。

加速度を用いた路面コンテキストの認識を行っている研究として、花塚ら [3] は自動車の加速度センサを埋め込んだタイヤを用いて路面が乾いているか湿っているかといった路面状況を認識している。タイヤが路面との接触している時の加速度データに対して HMM を用いて路面状況の予測を行い、高精度に予測している。しかし、歩行者が利用することを考えた場合に、そのアルゴリズムから移動時の路面状況しか認識できず、立位時などでは路面状況を認識することができない。

足圧を用いたコンテキスト識別の研究として、堀江ら [4] の圧力中心を用いた行動認識や、大島ら [5] の足圧と加速度を用いた路面認識がある。堀江らは足圧中心の軌跡や歩行1ステップの接地位置などを用いて階段昇降や坂道昇降など合計7種類の行動を識別している。しかし、階段や坂道といった道の種類の識別は高精度に識別しているが路面の凹凸といった同じ道の中に存在する路面形状の意味を識別しているわけではない。大島らは歩行時の圧力・加速度の変化をもとに平面、階段、坂道、芝生の4種類の路面状況に対して分析を行っている。しかし、路面の材質の違いや道の種類による差は分析しているが、堀江らと同様に路面形状の意味を識別しているわけではない。

路面形状の識別を行っている研究として、伊藤ら [6] のレンジセンサによる路面損傷箇所の識別や大滝ら [7] の白杖を用いた点字ブロックの認識がある。伊藤らはレンジセンサで計測した路面データに対して、平面に対する高低差で路面形状を計測し、路面の損傷の検出に応用している。しかし、個々人がレンジセンサを用いて路面形状を計測することはレンジセンサ自体が移動してしまうため平面のと

の距離が一定でないこと、人混みなどでは正確に路面の形状を計測できないことから難しい。大滝らは白杖の先端にセンサを取り付け路面の色を計測し、点字ブロックの認識を行っている。しかし、大滝らが利用している白杖は健常者が普段用いるものではなく、同等の使い方をする常備器具もないため、健常者向けのシステムとして利用することは難しい。

これらをふまえて、本研究では従来研究では触れられていない路面の凹凸に着目し、人混みや停止時でも利用可能な路面形状判別手法として足圧布センサを用いた手法を提案する。

3. 足圧分布を用いた路面形状判別手法

本章では足圧布センサから得られた各時刻のデータを圧力分布とみなして圧力値の高低差から路面形状を判別する。3.1節では本研究で用いる足圧布センサの性能と特性について述べる。3.2節で取得した圧力分布から路面形状を判別する方法について述べる。

3.1 足圧布センサ

足圧を計測するデバイスとして本研究では図1の足圧布センサを用いる。足圧布センサは、自由に折り曲げることができるため靴下状にすることで普段の生活でも手軽に身につけることができる。また、靴下にできることは靴を脱ぐ習慣のある日本に適している。

センサには14行5列の格子状(図1の灰色の位置)に計測点が配置されている。サンプリング周波数33Hzで70か所の計測点の圧力を測定し、計測時刻情報(タイムスタンプ)と共にBluetooth通信を用いてデータを送信する。なお、本稿ではセンサの損傷を防ぐため、センサを薄く柔らかなカバーで保護したものをを用いた(図2)。

本センサは導電糸を使った織物であり、縦糸と横糸の導電糸の交点での導電糸間の距離の変移をコンデンサの原理で測定し、圧力を計測する。しかし、静電容量は導電糸間の距離だけでなく湿度によっても変化する。そのため、同じ出力値を示している場合でも常に同じ圧力値であるとは限らない。そこで、加圧していない状態からの増加量を圧力相当値として扱った。また、本センサの構造上、各計測点は、格子状にコンデンサが並列接続された回路と考えら



図1 足圧布センサ

Fig. 1 The foot pressure cloth sensor

れることから、ある格子点の静電容量が変化した場合、その近傍の格子点の静電容量も変化してしまう。そこで、取得したデータに対して各計測点の正確な圧力値の推定を行い、各計測点の周囲への影響を補正した。

3.2 判別アルゴリズム

提案手法では、足圧布センサで計測した14×5の圧力データ(圧力分布)に対して分散を用いて平面かどうか判別し、平面以外の形状はテンプレートマッチングで判別を行う。提案手法のフローチャートを図3に示す。

まず入力データの圧力分布に対して、平面の圧力分布のテンプレートとの差 P_{sub} を計算する。路面形状が平面であるならばセンサを装着している足にかかる圧力の差によらず P_{sub} の分散は小さい値を取ると考えられる。そこで、 P_{sub} の分散を求め、その値が閾値よりも小さい場合は平面だと判別する。

細かな圧力差による凹凸を除去し、路面形状の変化による圧力差のみが残るように P_{sub} の値を丸めて P_{disc} を得る。次に、常に同じ位置に同じ路面形状が出現するわけではないことから路面形状が特徴的に現れている部分の抽出を行う。路面形状が特徴的に現れている領域は路面形状による圧力差が顕著に現れている領域であり、路面の凹凸が多く含まれているほどその路面形状をよく表現している。



図2 カバーで保護された足圧布センサ

Fig. 2 The foot pressure cloth sensor protected by the cover

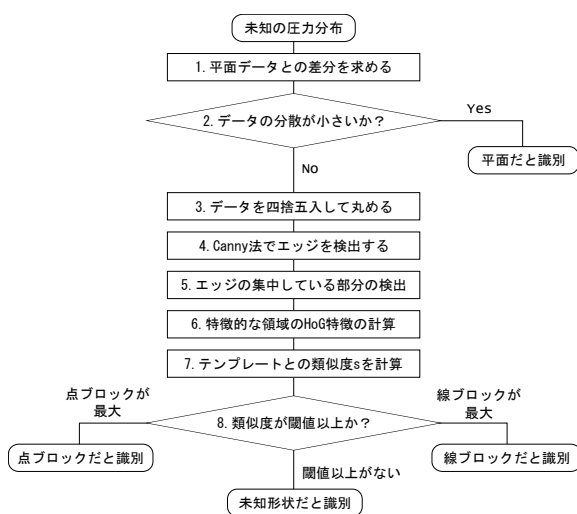


図3 提案手法の識別アルゴリズム

Fig. 3 Algorithm of proposed method

圧力分布の圧力差が顕著な部分は画像として見た場合のエッジに相当すると考えられる。そこで、 P_{disc} に対してCanny法を用いてエッジを検出し、特定領域内に含まれるエッジが最大になる領域を路面形状が特徴的に現れている領域 P_{unique} として抽出する。 P_{unique} の大きさはセンサに対する中足骨やかかとといった圧力が強くかかりやすい部分の大きさを考慮し、設定した。

次に、 P_{unique} に対してHoG特徴を計算し特徴ベクトル F_{IN} を生成する。既知の路面形状のテンプレートの特徴ベクトル F_t と F_{IN} に対して式(3.2)により類似度 $s(F_{IN}, F_t)$ を計算する。

$$s(F_{IN}, F_t) = \frac{\sum_{i=1}^n \min(F_{IN}(i), F_t(i))}{\max(\sum F_{IN}, \sum F_t)}$$

なお、既知の路面形状に対するテンプレートと特徴ベクトル F_t は事前に作成しておくものとする。

$s(F_{IN}, F_t)$ に対して0.5以上である場合にはその路面形状であると判別する。 $s(F_{IN}, F_t)$ が0.5以上の路面が複数ある場合には類似度が最大となる路面形状 t と同じ路面形状だと判別する。どの路面形状に対しても類似度が0.5以下である場合にはどの路面形状とも異なる未知の路面形状だと判別する。

4. 路面形状判別実験

3章で提案した判別手法を用いて、日常生活中で頻繁に遭遇する3種類の路面形状に対して判別実験を行った。4.1節で判別実験に用いたデータの取得方法とデータの種類、データの前処理について述べる。4.2節では、4.1節で取得したデータに対して行った路面形状の判別実験について述べる。

4.1 路面形状データの取得

4.1.1 取得方法

成人男性5名を被験者として、路面形状のデータを取得した。各被験者の年齢、身長、体重を表1に示す。取得した路面形状は日常生活中で頻繁に遭遇する平面、点ブロック、線ブロックの3種類とした。実験に使用した点ブロック、線ブロックを図4に示す。

被験者は靴を履き、その上から足圧布センサを足首と中足骨の部分でそれぞれ固定して装着した(図5)。なお、細かな砂利によりセンサが傷つくことを防ぐため、薄く柔らか

表1 被験者の年齢・身長・体重

Table 1 Age, height and weight of each subject

	年齢	身長 (cm)	体重 (kg)
被験者 1	22	171	65
被験者 2	23	178	60
被験者 3	21	173	75
被験者 4	21	170	65
被験者 5	21	167	65

かな布でセンサ表面を覆った (図 6)。このとき、布により路面形状を正確に捉えられなくなることを防ぐため布はしわのないように広げた状態で接地するように固定した。

キャリブレーション用データを取得するため、被験者にセンサにかかる圧力が 0 になるように片足立ちを 5 秒間行うよう指示した。同様に逆の足での片足立ちを行い、他方の足のキャリブレーション用データを取得した。両足のキャリブレーション用データを取得した後、各路面上に 30 秒間直立するよう指示し、各路面形状に直立したデータを取得した。これらの動作を各路面に対して、2 回繰り返してデータを取得した。なお、点ブロック、線ブロックについては接地位置のずれによる路面形状の見かけの変化を無くすため、それぞれ図 7 の四角形の部分でセンサが接地するように指示した。

4.1.2 取得データの前処理

取得したデータに対して、外れ値の除去や、3.1 節で述べた圧力の計測原理による影響の補正を行うため、取得データに対して前処理を行った。取得したデータから外れ値を除去するため、各計測点の時系列データに対して時間方向

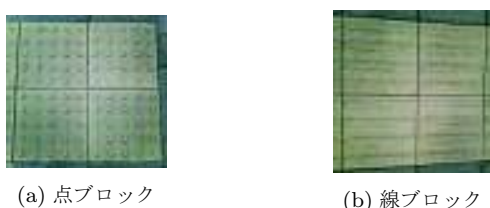


図 4 データを取得した路面形状

Fig. 4 The road surface that we got data



図 5 足圧布センサ装着図

Fig. 5 Example of a foot that was attached the foot pressure cloth sensor



図 6 保護用布装着図

Fig. 6 Example of a foot that was covered with a cloth



図 7 路面に対する足の位置

Fig. 7 Position of the foot for the road surface

に幅を 1 秒としてガウス平滑化を行った。

3.1 節で述べたように、出力値はデータ取得時の湿度により変化する。そこで、加圧されていない場合の出力値を基準値とし、基準値からの増加量を圧力相当値として扱うことで湿度の影響を除去した。基準値は、キャリブレーション用のデータのうち 3 秒分のデータから計算し、各計測点の平均+標準偏差 $\times 2$ の値とした。このとき、負の圧力は発生しないものとして、計測中に基準値以下の値が出た場合はノイズとして扱い、基準値と同値として扱った。

3.1 節で述べたように、ある計測点への加圧は周辺の計測点の出力値に対して影響を与える。そこで、各計測点の出力値から周辺の計測点の影響を除去した本来加圧されていたと考えられる圧力値を Nelder-Mead 法を用いて推定した。推定は各時刻に対して行ったため、時間を考慮した場合の外れ値を除去するために推定したデータに対して再度時間方向に幅を 1 秒としてガウス平滑化を行った。

各計測点間に加圧されていた圧力値を補間するため、データを縦横それぞれ 3 倍に拡大し、空間方向に 3×3 のガウス平滑化を行った。実際に取得したデータのうち、各路面に対する左足の前処理を行った後の圧力分布の例を図 8 から図 10 に示す。それぞれの図において、図の右側がかかるとにあたる。

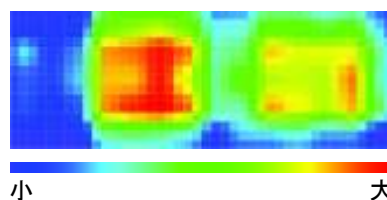


図 8 平面の圧力分布

Fig. 8 Example of the pressure distribution at flat

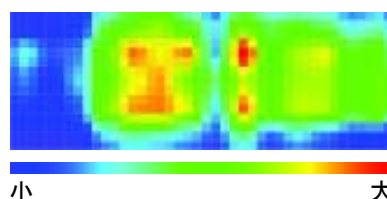


図 9 点ブロックの圧力分布

Fig. 9 Example of the pressure distribution at dots block

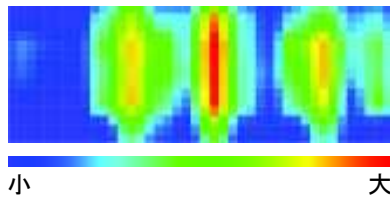


図 10 線ブロックの圧力分布

Fig. 10 Example of the pressure distribution at lines block

4.2 路面形状判別実験

4.2.1 実験設定

4.1 節で取得した左足のデータに対して被験者ごとに leave-one-out 法を用いて路面形状の判別実験を行った。取得した 2 回分のデータのうち、一方のデータを各路面形状の圧力分布のテンプレート作成、他方のデータをテストデータに用いた。各路面形状の圧力分布のテンプレートはその路面に立っているデータ 4 秒分の平均とした。テストデータは各路面形状に立っているデータ 4 秒分とした。なお、実験時に利用した各設定値は表 2 に示すとおりである。

4.2.2 実験結果と考察

路面形状の判別結果の平均を表 3 から表 7 に示す。各被験者の識別率は 83.7%, 53.7%, 78.7%, 95.3%, 95.0% であり、全体としては $78.2 \pm 17.0\%$ の識別率で判別に成功した。各平面の識別率は平面 $97.2 \pm 5.7\%$ 、点ブロック $71.3 \pm 23.4\%$ 、線ブロック $75.3 \pm 31.5\%$ であり、平面についてはどの被験者も高精度に判別出来ていた。点ブロック

表 2 提案手法の値設定

Table 2 Setting value of proposed method

平面か判断する分散の閾値		100
特徴的な領域のサイズ		15*15
HoG	分割数	9
	セルサイズ	15*15
	ブロックサイズ	1*1

表 3 被験者 1 の識別結果

Table 3 Result of subject 1

		識別結果			
		平面	点	線	未知
正解	平面	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	点	12.5%	67.0%	12.5%	8.0%
	線	0.0%	0.0%	84.0%	16.0%

表 4 被験者 2 の識別結果

Table 4 Result of subject 2

		識別結果			
		平面	点	線	未知
正解	平面	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	点	10.5%	38.5%	39.5%	11.5%
	線	26.0%	28.5%	22.5%	23.0%

表 5 被験者 3 の識別結果

Table 5 Result of subject 3

		識別結果			
		平面	点	線	未知
正解	平面	87.0%	13.0%	0.0%	0.0%
	点	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
	線	0.0%	1.0%	99.0%	0.0%

表 6 被験者 4 の識別結果

Table 6 Result of subject 4

		識別結果			
		平面	点	線	未知
正解	平面	100.0%	0%	0.0%	0.0%
	点	0.0%	86.5%	10.0%	3.5%
	線	0.0%	0.0%	98.5%	1.5%

表 7 被験者 5 の識別結果

Table 7 Result of subject 5

		識別結果			
		平面	点	線	未知
正解	平面	99.0%	1.0%	0.0%	0.0%
	点	0.0%	64.5%	32.0%	3.5%
	線	0.0%	25.0%	72.5%	2.5%

と線ブロックについては被験者 2 のみが極めて低い識別率であったが、他の被験者については少なくとも 60% 以上の識別率を得た。平面、点ブロック、線ブロックの各路面について全体で 2.8%, 28.7%, 22.7% の誤識別があった。

平面のデータを誤識別した原因として、立ち方の差異によって足にかかる重量が異なった事が考えられる。例として、1 回目、2 回目のデータにおいて足にかかる重量差が体重の 10% である場合を考える。この場合、1 回目をテンプレートとして差を求めた場合に、圧力がかかっている部分では体重の 10% に相当する圧力差が生じる。しかし、靴と接触していない計測点ではほとんど差が生じず 0 に近い値が得られる。このようにセンサにかかる重量が変化した場合に、出力値が変化しない点により分散が大きくなったため誤識別したと考えられる。足にかかる重量の違いによる誤識別を避けるためには平面データのテンプレートから足下にある計測点を算出し、それらを用いて分散を計算することで体重差による分散の上昇を防ぐことができると考えられる。

また、足にかかる重量差による圧力差は足の縁においては靴と接触していない計測点との間に圧力差が生じる。その結果、平面以外の路面形状かどうかを判別する際にエッジとして検出されてしまうため、特徴的な領域の算出時に悪影響を与えることが考えられる。この悪影響も足下にある計測点が算出できれば、その部分の隣接している計測点との間のエッジは取り除けるため平面以外の路面形状の判別も改善されるのではないかと考えられる。

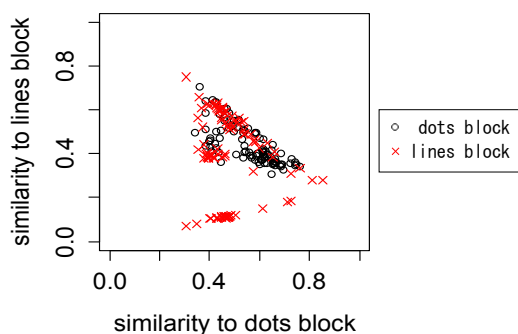


図 11 各路面形状との類似度
Fig. 11 Similarity to each road surface

点ブロック，線ブロックのデータに対してそれぞれを誤識別しているデータの多かった被験者 2 のデータに着目する。点ブロック，線ブロックの圧力分布のテンプレートとの類似度をプロットしたものを図 11 に示す。図 11 の x 軸は点ブロックとの類似度，y 軸は線ブロックとの類似度である。図 11 の直線は点ブロックと線ブロックの識別境界となっている。各路面形状のデータはそれぞれに集中せずにプロットされていることから，的確に特徴を抽出出来ていなかったために誤識別されたデータが多かったと考えられる。

的確に特徴を抽出できていなかった原因として，特徴的な領域の算出が的確ではない場合が考えられる。テストデータとして用いた各路面形状のデータは時間的に連続であるため，同じ路面形状のデータ間での分散は小さいと考えられる。しかし，実際には二つの路面形状との類似度は路面形状ごとに集中していない。これは特徴的な領域として算出した領域がデータごとに大きく異なっていたために二つの路面形状との類似度が類似した値を取らなかったのではないかと考えられる。

5. まとめ

普段，無意識に状況判断に利用している路面形状の変化をコンテキストとして認識することを目的として足圧布センサを用いた路面形状の判別手法を提案した。提案手法は，足圧布センサから得られる圧力分布に対して，平面時の圧力分布との差分に対して分散を用いた平面判別と，HoG 特徴を用いた，テンプレートマッチングによる形状判別を行った。5 人の被験者，3 種類の路面形状のデータを取得し，そのデータを用いて路面形状の判別実験を行った結果，平均 78.2% の識別率を得た。

今後の課題として，特徴的な領域の抽出方法の再検討や，今回判別した 3 種類の路面形状が回転し，見かけの様相が変化した路面や砂利などの一定の形状を取らない路面形状の判別，歩行などの立位以外の行動時の路面形状の判別が挙げられる。

謝辞 本研究は「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト

トの支援による。

参考文献

- [1] 山口直人, 田森信行, 塩見彰睦. 適応エッジ保存平滑化を用いた白線検出手法 (画像処理・解析, 特集: 画像の認識・理解論文). 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 88, No. 8, pp.1421-1431, 2005.
- [2] 野田雅文, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋, 小島祥子, 内藤貴志. 位置依存型識別器を用いた車載カメラ画像からの路面標示検出. 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 4, pp.466-474, 2011.
- [3] 花塚泰史, 樋口知之, 松井知子. HMM に基づくタイヤ振動波形解析による路面状態判別 (パターン認識, 特集: 学生論文). 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 95, No. 3, pp. 570-577, 2012.
- [4] 堀江直正, 満田隆, 川村貞夫. 足圧情報による歩行状態の推定法. 生体医工学: 日本エム・イー学会誌, Vol. 44, No. 4, pp. 621-627, 2006.
- [5] Kazumasa Oshima, Yasuyuki Ishida, Shinichi Konomi, Niwat Thepvilojanapong, and Yoshito Tobe. Integrating Pressure Sensors and Accelerometers for Footwear-Based Human Probes. In Proc. of the Asian Workshop on Sensing and Visualization of City-Human Interaction (AWSVCI 2009), 2009.
- [6] 伊藤猛, 大矢晃久. 移動ロボットに搭載した測域センサによる路面損傷箇所の検出. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 5, 2012.
- [7] 大滝秀政, 門井裕紀, 琴坂信哉, 長坂保美. 点字ブロックの存在を手のひらに振動で伝達する白杖の研究 (機械要素, 潤滑, 工作, 生産管理など). 日本機械学会論文集. C 編. Vol. 72, No. 724, pp. 3962-3968, 2006.