

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

Detection of road surface damage due to SOKUIKI sensor mounted on a mobile robot

伊藤 猛 (筑波大) 正 大矢 晃久 (筑波大)

Takeru ITO, University of Tsukuba Akihisa OYA, University of Tsukuba

In this paper, We describe our research aiming to automatically detect damaged sections of sidewalk using SOKUIKI sensor mounted on a mobile robot. We consider the problem of sidewalk survey and purpose of our research to solve that. First, we consider sensing method using a mobile robot equipped with UTM-30LX, which can get three demention value. Next we consider identification method of damaged data compering all data within a certain range with some reference planes. They are made by three points of grid data that are extracted to random in the range of conditions. Finally, we verificate these devised methods to apply five patterns of sidewalk. In the result, all of them can be identified damaged sections that are similar to result of the goal, so we think that devised methods are varid to detect damaged sections of sidewalk.

Keywords: Feature Point Extraction, Outdoor Travel, SOKUIKI Sensor

1. 緒言

1.1 研究背景と目的

我々が普段利用している道路の路面は、舗装素材の劣化・高荷重による過度の交通・舗装構造の不備・路床や路盤の経年変化による支持力低下・軟弱地盤地など様々な要因により、容易に変形・損傷する特徴を持つ [1][2]。変形・損傷した路面は快適な通行を妨げるだけでなく、事故につながる危険性もあるため、迅速な舗装が求められる。そして迅速な舗装を行うためには、普段から路面を調査するシステムが必要と考える。

しかし現状の路面調査はスケッチによる手作業で行われるため、広域な路面を調査することは膨大な負担となる。特に歩道は車道に比べて優先度が低く、歩道の調査は後回しにされる場合が多い。そこで本研究は、移動しながら歩道の3次元形状を測定し、路面の損傷箇所を自動で検出するシステムを構築することを目的とする。

1.2 研究概要

本研究では通行中事故を起こす危険性の高い箇所を「路面損傷箇所」と呼称する。本システムは歩道を移動しながら路面の3次元形状を測定し、損傷箇所の位置と形状を検出する [3]。検出結果は道路管理者に報告することで、本システムは活用される。これにより路面調査作業の効率化かつ負担軽減が期待され、結果舗装作業の促進に貢献できると考える。

本稿はまずセンシング（測定）方法について述べ、次に損傷箇所の検出方法について説明する。そして考案手法を主な歩道の損傷路面に適用し、目標とする損傷箇所検出結果が得られるか検証することで、考案手法の有効性と今後の課題について考察する構成となっている。

2. センシング方法

本システムは移動手段として屋外走行用ロボット、路面形状の測定機器として測域センサ（LRF）を一機使用する。測域センサとは赤外線レーザー光を周囲に走査し、反射光を受光することで対象との距離値を計測する環境認識用センサである [4]。測域センサはトンネルの形状計測の研究などで活用されている [5] が、本

Table 1 The performance of UTM-30LX

measurement range[m]	30
measurement accuracy[mm]	±30
measurement period[ms/scan]	25
angular resolution[deg]	0.25

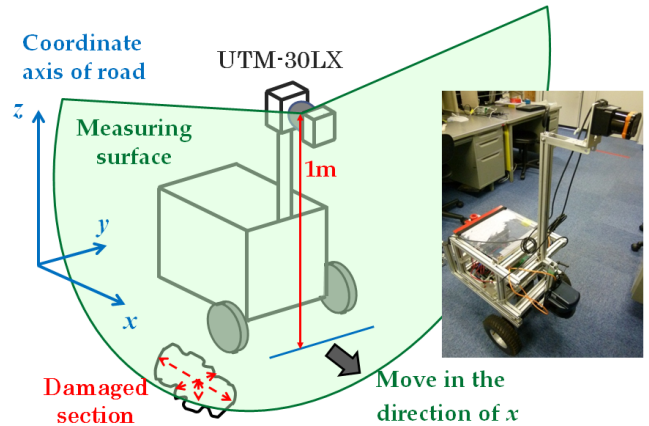


Fig. 1 Sensing method using mobile robot equipped with UTM-30LX

研究では路面形状を測定し、さらに損傷箇所を検出する点が、他の測域センサを用いた研究とは異なる。

使用する屋外走行用ロボットは縦 60cm × 横 50cm × 高さ 55cm の大きさを有する。測域センサは表 1 の性能を有する北陽電機製の UTM-30LX を使用する。本研究では起伏や凹凸が多い歩道を測定対象とするため、測定範囲よりも測定データの誤差を抑制することを重視し、測域センサは図 1 に示すように路面から約 1m の高さに鉛直下向きに取り付ける [6]。

路面の座標系を (x, y, z) とすると、センサが $y-z$ 平面上にレーザー光を走査しつつ、ロボットが測定対象の近辺を x （測定面に対して垂直）方向に移動することで、測定範囲内の路面の3次元形状を測定する。3次元形状は x, y, z 値で表されるが、これらの値はセンサの取り付け角度と高さ、及び測定を行った時刻におけるロボットの自己位置の3点を反映して、測定データの距離値を3次元座標変換することで得られる。

ただしこのセンシング方法では測定データにノイズが含まれる

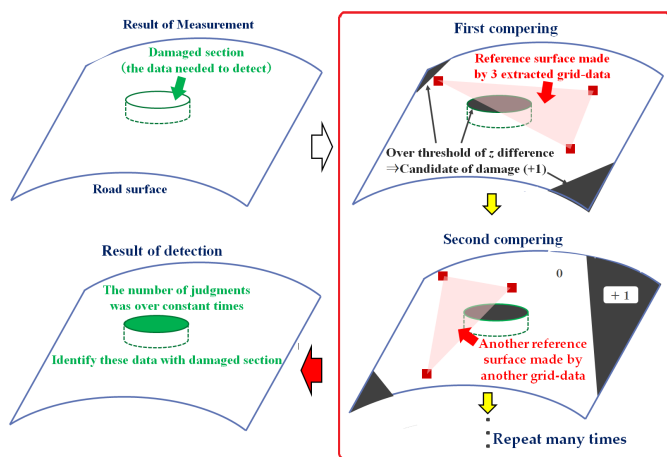


Fig. 2 Identification process of damaged section

ことや、データ量が膨大になることが考えられる。そこで本研究では後述する損傷箇所の検出処理を行う前に、測定データ自体にメディアンフィルタ処理とグリッド状の統合化による事前処理を施す。これによりノイズ除去を含む平滑化と、データ量削減に伴う損傷箇所検出処理の低コスト化が期待できる。

3. 損傷箇所の検出処理

本研究における「損傷箇所の検出処理」とは、「事前処理を施したデータの特徴（差異）を利用して、損傷箇所に該当する測定データを識別する処理」を意味する。データの特徴に関して、路面の高低差に当たる z 値が、損傷箇所と未損傷箇所でも最も明確な差が見られる。よって各グリッドデータの z 値を何らかの「基準データ」に対して差が一定値以上ある場合注目するデータを損傷箇所と識別する方法が有効と考える。そこで本研究では基準データとして平面状の「基準面」を形成し、比較する判定処理を繰り返し行うことで、損傷箇所を識別する処理を考案する。具体的には図2で示される以下の処理を行う。

- step1** 一定領域内のグリッドデータからランダムに3点を抽出し、各データの x, y, z 値から平面の方程式 $ax + by + cz + d = 0$ の a, b, c, d を導出することで、基準面を形成する。
- step2** 全データの x, y 値を基準面の方程式 $z_{ref} = -(ax + by + d)/c$ に代入し、算出される z 値 z_{ref} とグリッドデータ自体が有する z 値を比較する。
- step3** 算出値とデータ値の差 $|z_{ref} - z|$ が閾値以上の場合、比較したデータを損傷箇所候補として判定数を1加算する。
- step4** step1~3を一回分の判定処理として、判定処理を複数回繰り返す。
- step5** 複数回繰り返すことで累積された損傷箇所候補数に対して、一定数以上判定された箇所を損傷箇所として識別する。

step1で3点をランダムに抽出して平面を形成することに関して、なるべく有効な平面を形成したいと考える。そこで以下の3つの条件を満たすグリッドデータのみを抽出する。

- 条件1 選択されたデータの z 値が、一定の範囲内であること。
- 条件2 選択されたデータの z 値と隣接するデータの z' 値 z_{cir} との差 $|z - z_{cir}|$ が、一定の範囲内であること。

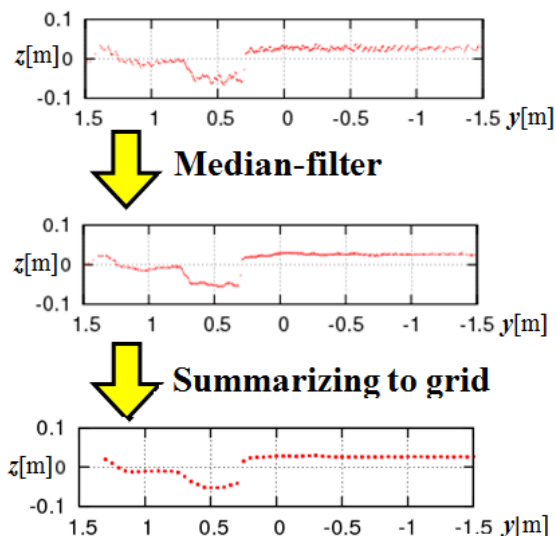


Fig. 3 Effect of pre-processing for measurement data

条件3 2点目,3点目の抽出に関して、他の抽出点との間隔が一定の範囲内であること。

一回の判定処理に関して、基準面は平面で形成されるため、図2のような曲面状の路面に対しては未損傷箇所も判定されてしまう場合が多く、判定結果にはバラツキがあるという問題点がある。そこで判定処理を十分繰り返すことで、ランダムから生じるバラツキを軽減し、損傷箇所と未損傷箇所の判定数の差を明確にすることを試みる。判定数の閾値と組み合わせることで、最終的に損傷箇所のみを正確に識別出来ると考える。

4. 考案手法の検証

4.1 各設定値の検討

考案手法を検証することに関して、前述した処理の閾値などを具体的に設定する必要がある。まず事前処理であるメディアンフィルタ処理とグリッド化について、処理性能と形状の再現精度のバランスを考慮した結果、メディアンフィルタ処理の比較点数を15点、グリッド一辺の長さを5cmとする。図3に示すような $y-z$ 平面上に表示した測定データに対して、前述した値で事前処理を施すと、メディアンフィルタ処理によって平滑化され、グリッド化によってデータ量が削減されている。さらに形状の再現精度もほとんど低下していないため、考案した事前処理と設定値は有効であることがわかる。

次に識別処理について、step3の損傷箇所候補と判定するための閾値を5mm以上、step4の判定処理の繰り返し回数を2000回、step5の損傷箇所と識別するための閾値を1800回以上とする。

最後に3点を抽出するための条件について、条件1の範囲値を-2~3cm、条件2の閾値を1cm未満、条件3の範囲値を1~2mとする。一般的な歩道の幅が2m前後であることと、間隔が1m未満のデータから平面を形成すると有効な判定結果が得られないことから、条件3の範囲値を1~2mと設定している。参考に図3に示すのグリッド化まで施したデータに対して、抽出条件を適用した結果を図4に示す。条件1で一般的な歩道の高低差の範囲以外が除外され、条件2で除外されたデータの周辺データも信頼できないデータとして除外する。そして条件3では、例え

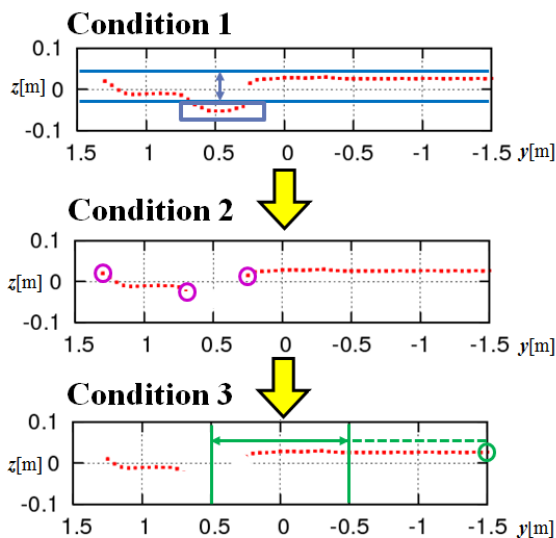


Fig. 4 Effect of extraction conditions

ば y 値が -1.5m のデータを抽出した場合、2 点目以降の抽出データは $-0.5 \sim 0.5\text{m}$ の範囲内となる。この 3 つの条件により、判定処理で信頼できる平面が形成できると考える。

4.2 検証結果の考察

考案手法を実際の損傷路面に対して適用することで、有効な検出結果が得られるか検証する。歩道は多様な形状パターンを持ち、さらに損傷にも様々な種類があるため、これら全てに対して有効な結果が得られない限り、考案手法は有効ではないと考える。そこで図 5 に示すように、歩道の主な損傷路面である 5 種類の損傷路面に対して検証を試みる。図 5 は左から「損傷路面」・「考案したセンシング方法により、矢印にそって移動しながら損傷路面を測定した結果 (z 軸方向から $y-x$ 平面を見た天面図)」・「測定結果に対して考案した識別処理の step4 までを適用した結果 (累積された損傷箇所候補判定数の表示結果)」・「識別処理の step5 を適用した結果 (損傷箇所識別結果)」・「目標とする損傷箇所識別結果 (損傷箇所の形状を基に手作業で作成したもの)」を表す。それぞれの損傷路面に対して考案手法を適用した結果について、以下を考察する。

- 1 段目 曲面状の路面に対して、ポットホールと呼ばれる深い穴が 2 箇所見られる。考案手法を適用した結果を目標結果と比較すると、若干の識別ミスはあるものの、損傷箇所自体は正確に識別できていることがわかる。
- 2 段目 平面状の路面に対して、タイルが部分的に剥がれている。ポットホールに比べ高低差が無い場合、識別が困難なことが予想されるものの、考案手法により判定数で損傷箇所が明確になり、目標に近い識別結果を得る。また識別された右端の赤い部分は壁である。こちらは損傷箇所ではないため識別されるべきではないものの、路面とは明らかに高低差が異なるため z 値の範囲指定で除外できる。
- 3 段目 曲面状の路面に対して、亀裂を境に右側が通常より高くなっている。考案手法を適用した結果、高い部分の判定数が増加し、目標より 2 回りほど小さいものの明らかに損傷箇所と認識できる結果が得られる。ただし両サイドの歩道ではない部分で識別ミスが見られるため、歩道の幅にあわせて処理

範囲を限定することが課題となる。

4 段目 土台の形状変化によりタイルが部分的に傾斜している。考案手法では目標に近い結果が得られるものの、本来の損傷箇所の形状とは明らかに異なる識別結果を示す。これは識別処理ではなく、ゆがんだタイル上を移動しながら測定したことによる測定結果のミスと考える。このような不安定な路面に対して正確な測定ができなければ、識別処理も無効となるため、対策を検討することが課題となる。また識別された右側の青い部分は車道であり、2 段目の壁と同様 z 値の範囲指定で除外できる。

5 段目 木の根が土台を隆起させたことで、タイル全体が盛り上がっている。考案手法はこの複雑な路面形状に対しても目標に近い識別結果を得ることができるとは、4 段目と同様不安定かつ起伏のある路面上を移動したため、測定ミスが見られる。また右側は歩道と車道の間に傾斜した未舗装部分があり、4 段目と比べて容易に除外できないため、別の区別方法を検討する必要がある。

以上の検証結果をまとめると、考案手法と設定した値は全ての路面で有効な損傷箇所識別結果を示すため、歩道の損傷箇所検出に対して有効な性能を有すると考える。しかしより目標に近い識別結果を得るには、起伏などの不安定な路面上を移動する際に生じる測定作業の影響への対策と、歩道の領域で識別対象を区別する方法の検討が今後の課題と考える。

5. 結言

本稿は歩道の路面調査を効率化するために、屋外走行用ロボットに搭載した測域センサを用いて路面の 3 次元形状を測定し、測定データの特徴から損傷箇所を検出する研究について述べた。具体的には 3 次元座標変換を用いたセンシング方法と、基準面を形成して損傷箇所候補を判定する処理を繰り返し行い、損傷箇所の識別するを考案した。そして複数の損傷路面に考案手法を適用することで有効性を検証した。結果考案手法は目標に近い識別結果を示したため、歩道の損傷箇所検出に対して有効であることが分かった。今後は起伏などの不安定な路面上を移動する際に生じる測定作業の影響への対策と、歩道の領域で識別対象を区別する方法について検討することを予定している。

参考文献

- [1] 日本道路協会：舗装設計施工指針
- [2] 日本道路協会：舗装設計便覧
- [3] T.YAMAGUCHI and S.YUTA : "A Trial of Autonomous Long-Distance Outdoor Navigation at 3.5km Side-Walk in University of Tsukuba", The Japan Society of Mechanical Engineers, vol.77, no 779, pp.217-229, 2011
- [4] 川田浩彦：移動ロボット用小型軽量測域センサの開発, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.1, pp.76-77, 2007
- [5] 川末紀功仁：二つのレーザースキャナを用いた管状構造物の三次元計測, SI2011, pp.1907-1910, 2011
- [6] 高須賀直一：測域センサを用いた不整地移動ロボットの傾きを考慮した自己位置推定, 第 3 回 RSJ-HRT 学術講演会, 2011

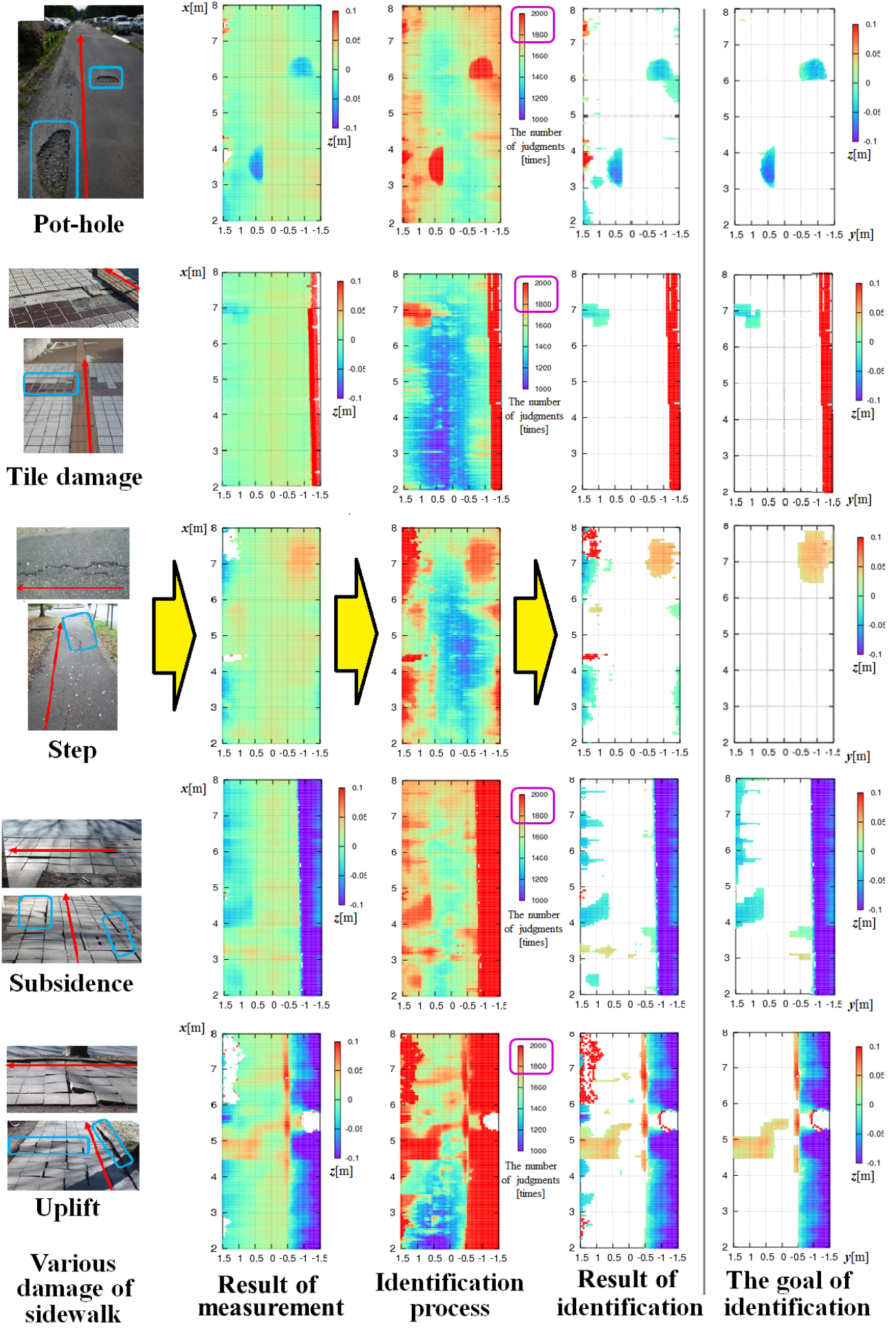


Fig. 5 The result of applying devised method