

移動ロボットと測域センサを用いた路面損傷箇所検出システム —測定路面情報による計測位置姿勢の推定—

○ 伊藤 猛 (筑波大), 正 大矢 晃久 (筑波大)

Detection System of Damage Points on a Road using a Mobile Robot and a SOKUIKI Sensor

—Estimating Measurement Position and Orientations due to Information of Measured Road Surface—

○ Takeru ITO (University of Tsukuba), Akihisa OHYA (University of Tsukuba)

Abstract: We propose a system which detects damage points on a road by measuring its form using a mobile robot with a SOKUIKI sensor. Our system can compensate some errors of measurement and detection by estimating measurement position and orientations from sensor data. We could get valid result of measurement and detection by applying it to some damage roads.

1. 緒言

道路を快適に利用するには、普段から変形・損傷した路面を調査し、迅速に舗装作業が行われる必要がある。しかし現状では作業員が直接現地に赴いて調査するため、広域への対応は人手が多く必要となり、膨大な負担となっている。

本研究は、路面調査作業を自動化することで、調査作業を効率化し、かつ作業員の負担を軽減することを目的として、移動ロボットと測域センサを用いて路面を測定し、かつ自動で損傷箇所を検出するシステムの開発に取り組んでいる。

本稿はまず、これまでに開発した路面損傷箇所検出システムの有効性を、実験結果から評価する。次に走行する路面の影響によりセンサの計測位置と姿勢が変化することで、測定・検出結果に誤差が発生してしまうこれまでの手法の問題に対応するため提案した、測定路面情報から計測位置姿勢を推定する手法について紹介する。最後にその推定システムの有効性を、実験結果から評価する構成となっている。

2. 路面損傷箇所検出システム

本研究ではこれまでにセンサの計測距離値から路面の3次元形状を取得する手法と、グリッド状に統合化した測定データの高低差を比較することで、損傷箇所のデータを抽出する手法を開発し、数種類の異なる損傷路面から損傷箇所を検出することを実現した^[1]。

Table.1 the performance of UTM-30LX

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

2.1 路面の測定と損傷箇所の検出手法

本システムのハードウェアは、図1に示す屋外走行用ロボットに、測域センサとして表1の性能を有する北陽電機製のUTM-30LXを、路面から約1mの高さに鉛直下向きに取り付けることで構成される。

路面の座標系を (x, y, z) で表すと、これらの値は予め設定したセンサの取り付け角度と位置を回転行列の角度成分と平行移動行列に反映して、計測距離値に3次元座標変換を施し、さらに変換後のデータを計測時刻におけるロボットの自己位置を反映して再変換することで得られる。そして変換した各測定データを x, y 座標から配置することで、路面の3次元形状が測定できる。

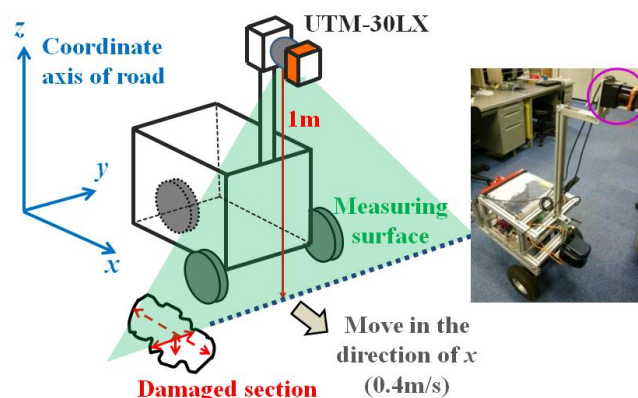


Fig.1 sensing method using mobile robot and UTM-30LX

ただし測定データにはノイズが含まれ、さらにこの測定システムではデータ量が膨大になる問題がある。そこで図2のように測定データを5cm四方のグリッドに統合化し、z座標はグリッド毎に平均値をとらせる処理を検出処理の前に施す。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検出処理の低コスト化が可能となる。

そしてグリッド処理を施したデータを基に、路面を平面の集合体と仮定し、高低差にあたるz座標を平面毎に比較して損傷箇所と見なすデータを抽出することで、損傷箇所を検出する。具体的には図3に示すように、まずランダムに抽出した3点のグリッドデータから平面の方程式を算出する。次にデータ毎にx,y座標を平面の方程式に代入して得られるz座標と、データ自体が有するz座標を比較し、差が5mm以上あるデータを損傷箇所候補として判定数を1加算する。そして2000パターンの平面と比較するまでこれらの処理を繰り返した結果、累積した判定値が1800回以上となったデータを損傷箇所のデータと見なして抽出する。[1]

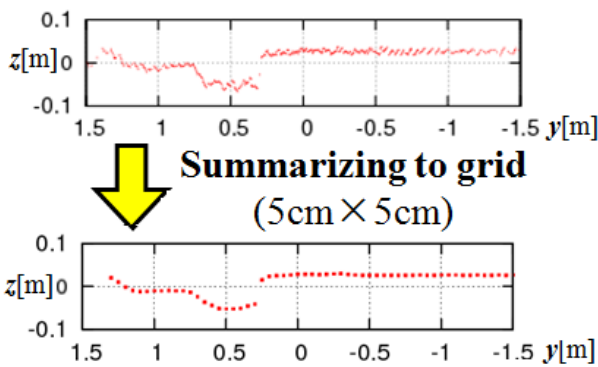


Fig.2 the result of applying a pre-processing of detection

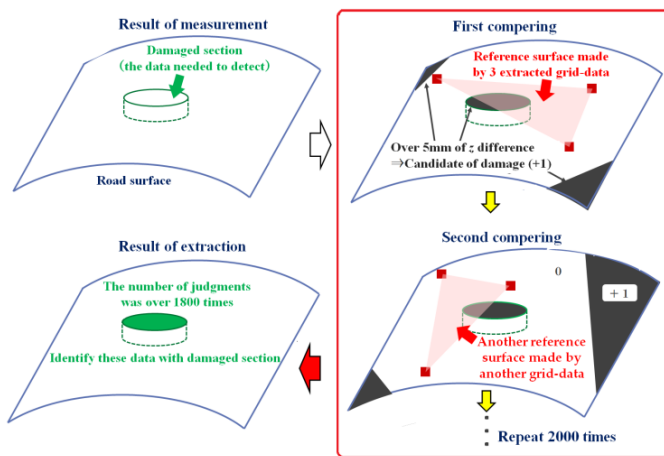


Fig.3 extraction method of damaged data

2.2 路面損傷箇所検出システムの有効性評価

これまでに構築した路面損傷箇所検出システムを、「穴」・「段差」・「瓦礫」の3種類の損傷箇所に対して適用した結果を図4に示す。図4は上から「各損傷路面パターンの写真（矢印は駆動輪の走行軌跡）」・「路面に対してz軸方向から見た測定結果（y-x平面、色はz座標）」・「2000パターンの平面との比較で累積された判定数の表示結果」・「測定結果から累積判定数が1800回以上のデータを抽出した結果」を表す。検出したい損傷箇所は、それぞれ次のような特徴を有する。

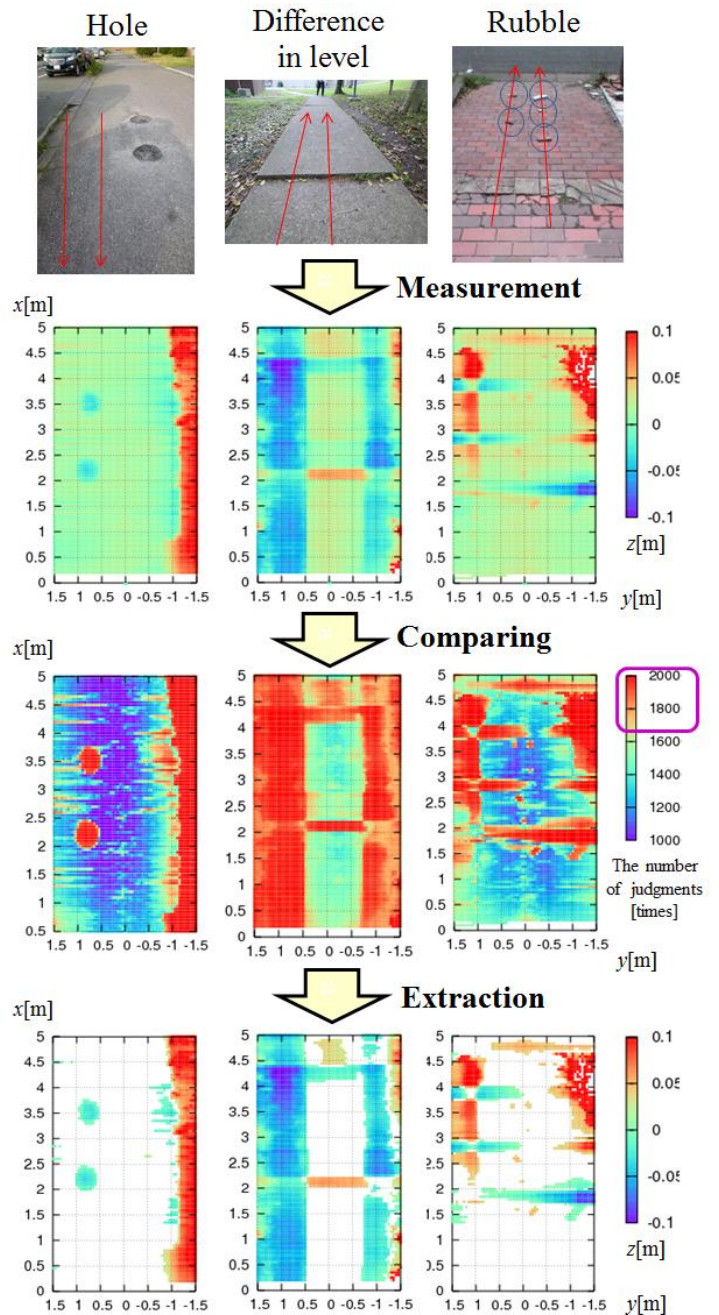


Fig.4 the result of applying the detection system of road surface damage

穴) 2~3cm 程度の深さを持つ穴が2箇所あり、
 ロボットが走行する路面は砂利道となっている。
 段差) 2~4m 先までが測定開始位置より3cm 高い
 瓦礫) ○で示した5箇所の位置に厚さ2cm 程度の
 タイルの瓦礫があり、ロボットは全ての瓦礫を
 駆動輪が乗り上げながら走行する。

この結果から、本システムによって“穴”は正確に検出
 することが実現できたが、“段差”と“瓦礫”に関しては測
 定結果が本来の路面形状と大きく異なり、損傷箇所が
 検出されず反対に損傷箇所ではない所が検出される誤
 検出が発生してしまう問題が確認できた。

2.3 路面損傷箇所検出システムの問題

“段差”と“瓦礫”に関して測定誤差が発生した原因は、
 3次元座標変換を施す際反映するセンサの計測位置と
 姿勢、すなわちセンサを搭載するロボットの高さと姿
 勢が、予め設定された固定値を用いていることにある。
 本システムではロボットが姿勢を把握できる機能が備
 わっていないため、路面の影響によりロボットが走行
 すると姿勢が変化する。これにより計測距離値の3次
 元座標変換に誤差が発生し、本来の路面形状とは大き
 く異なる結果となる。

図4に例を示した“段差”では、路面の高さが変化する
 付近でロボットが前後に傾く。また段差を登った状態
 では、測定開始位置よりも高い位置から路面を測定し
 ている。“瓦礫”では、タイヤが瓦礫に乗り上げる状
 態で前後左右の傾きが一時的に変化する。これらの測
 定条件では計測位置姿勢が変化するため、本システム
 では誤差が発生する。一方で“穴”に関しては、砂利
 道で振動するものの、路面が平坦でロボットの位置姿
 勢が大きく変化しなかったため、誤差の影響を受けな
 かったと考えられる。

このような問題の解決手法としては、ロボットにジ
 ャイロセンサや複数の外界センサを搭載し、姿勢や路
 面パターンを把握して対応する手法が既に研究されて
 いる^{[2][3][4]}。一方でこの問題は、測定した路面情報から
 センサの計測位置と姿勢を推定するアルゴリズムを構
 築することで、ハードウェアを追加せずに解決でき
 ると考えられる。そこで本研究ではこの推定手法を用
 いることで、計測距離値の3次元座標変換を補正す
 ることを試みた。以下本稿は、測定路面情報による計
 測位置姿勢の推定手法についての説明と、実験による有
 効性の評価について紹介する。

3. 計測位置姿勢の推定アルゴリズムの提案

本研究で用いるロボットは図1で示したように、ロ
 ボットの軸位置から左右0.215mの位置にある駆動輪と
 0.5m後方の位置にあるキャスターの計3つのタイヤで
 位置姿勢を構成する。

そこで本手法では、まず各タイヤの路面との接地点
 を、路面及びタイヤの形状から計算し、タイヤの高さ
 情報を表すz座標を求める。次に3つのタイヤ軸の
 3次元座標から、ロボットの位置姿勢を表すロボットの
 高さとならば法線ベクトルを算出する。そして基準の法線ベ
 クトルから算出した法線ベクトルへ回転するためのロー
 ル角とピッチ角を求める。これらロール角・ピッチ
 角・ロボットの高さの3点を、その計測時刻における
 センサの計測位置姿勢の推定値として反映する手法を
 提案する。以下に各タイヤ高さの計算手法及び計測位
 置姿勢の推定手法について説明する。

3.1 測定路面情報からの各タイヤの高さ計算手法

図5にタイヤが段差に接触して乗り上げている状態
 の例を示す。

- Step1) タイヤの径を1cm毎に分割し、各分割領域に
 タイヤ中心の高さから円弧までの距離値 $r(i)$
 (i は分割位置)及び領域周辺に含まれる測定
 データのz座標の平均値 $Z(i)$ を求める。
- Step2) タイヤの接地点とは、 $r(i)$ と $Z(i)$ の間隔が最も
 小さい位置であり、 $r(i)$ と $Z(i)$ の和はタイヤ
 中心の高さを表す。そこで各領域の $r(i)$ と $Z(i)$
 の和を比較し、最大値となる領域を求める。
- Step3) 最大値 $\max\{r(i) + Z(i)\}$ から半径を減算する
 ことで、タイヤのz座標が求まる。

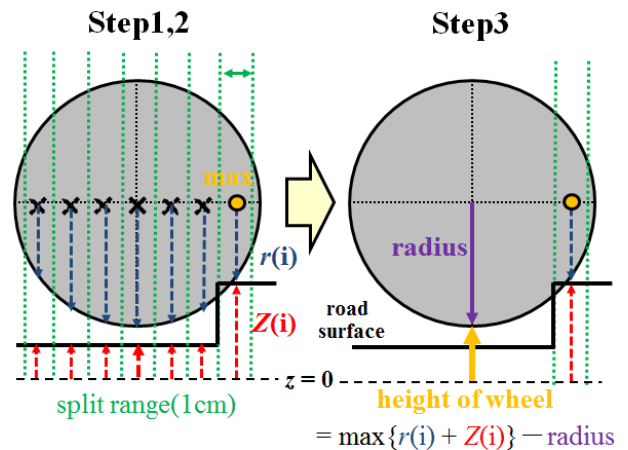


Fig.5 calculation method of wheel height

3.2 計測位置姿勢の推定手法

図 6 に路面の影響で、ロボットが推定開始時の高い位置かつ前方右側に傾斜した状態から、さらに高い位置かつ前方左側に傾斜した状態の例を示す。

- Step1) 各タイヤの 3 次元座標から、キャスターから左駆動輪までのベクトルと、キャスターから右駆動輪までのベクトルを求める。
- Step2) Step1 で算出したベクトルを外積して法線ベクトル (a,b,c) を求める。また左右駆動輪の z 座標の平均値から、センサの高さを表すロボットの高さ $h[m]$ を算出する。
- Step3) z 軸方向のベクトル $(0,0,1)$ から算出した法線ベクトルへ回転するためのロール角 $r[\text{rad}]$ とピッチ角 $p[\text{rad}]$ を以下の関係から求める。

$$r = \sin^{-1}\left(\frac{-b}{D}\right), \quad p = \sin^{-1}\left(\frac{a}{D\cos(r)}\right)$$

$$\text{ただし } D = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

- Step4) r, p, h と初期値 r', p', h' との差を、センサの計測位置姿勢の推定値に用いる。すなわち次式で求められるロール角・ピッチ角・センサの高さの推定値 R, P, H を、3 次元座標変換に反映する。

$$R = r - r', P = p - p', H = h - h'$$

推定開始時に得られるロール角・ピッチ角・センサの高さを、その測定作業における基準値として設定し、その基準値からの変化量を推定値として反映する。

また屋外では路面に微小の凸凹があるため、常に位置姿勢の変化が発生する。よってこの手法では平坦な路面に対して推定値が振動して不安定になるため、図 4 に例を示した“穴”のような測定条件では逆効果になることが考えられる。そこで R と P は $\pm 0.26 \text{ rad}$

(約 1.5°), H は $\pm 1.5 \text{ cm}$ 以内であれば反映しないこととする。この推定システムをセンサが計測する毎に実行することで、計測時の位置姿勢を考慮した 3 次元座標変換を実現できると考える。

4. 推定システムの有効性評価

昨年度のシステムでは有効性を示さなかった“段差”と“瓦礫”に対し、提案する推定システムを適用することで有効性を評価した。適用結果を図 7 に示す。図は上から「計測位置姿勢を推定しながら 3 次元座標変換を施した時の測定結果」・「ロボットの自己位置 (x 座標) における位置姿勢の推定値 R (赤), P (青), H (緑) を表示した結果」・「推定値から補正して変換した場合 (赤) と、補正しないまま変換した場合 (青) の右駆動輪の位置における 3 次元座標 ($x-z$ 平面) を表示した結果」・「補正を加えた測定結果から累積判定数が 1800 回以上のデータを抽出した結果」を表す。

これらの結果から、提案手法によって推定した R, P, H が、2.2 節で述べた計測位置姿勢の変化を表現している。これにより“段差”と“瓦礫”共に本来の路面形状に近い測定結果を得ることができ、それと同時に損傷箇所の誤検出も大幅に減らすことが出来た。ただし細部を見ると測定を解析したことで推定した本来の位置姿勢を忠実に再現できたわけではなく、推定システムの誤差により“瓦礫”の $x = 2, 3, 4 \text{ m}$ の位置など推定の精度が低い箇所も見られる。

よって提案した推定システムにより、“段差”と“瓦礫”に関して、損傷箇所によって計測位置姿勢に変化が生じた場合でも、ある程度有効な路面の測定結果と損傷箇所の検出結果を示すことが出来た。

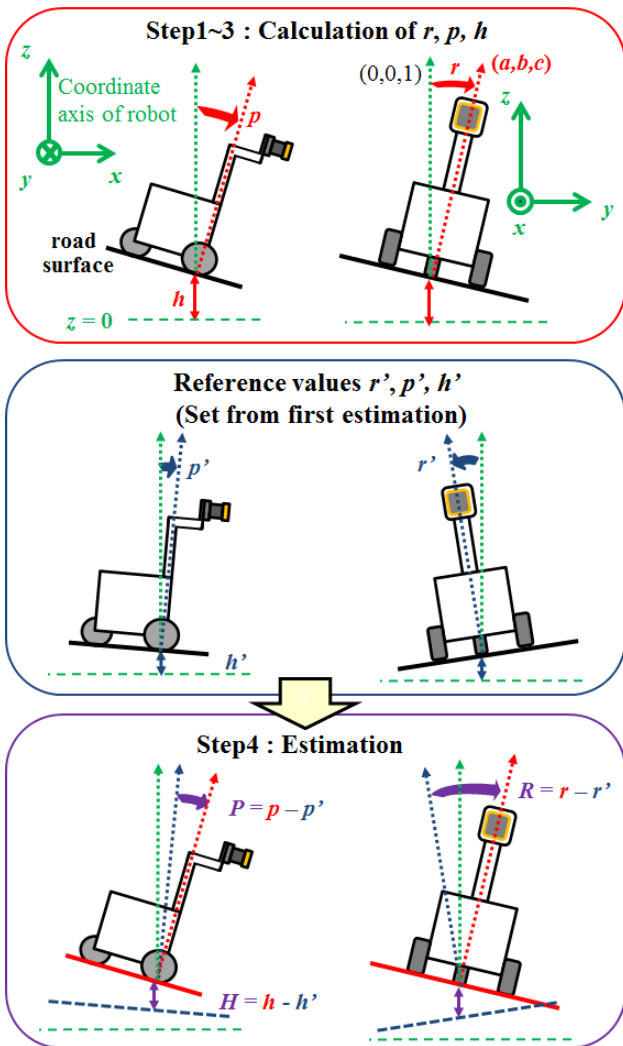


Fig.6 Estimating method of measurement position and orientation

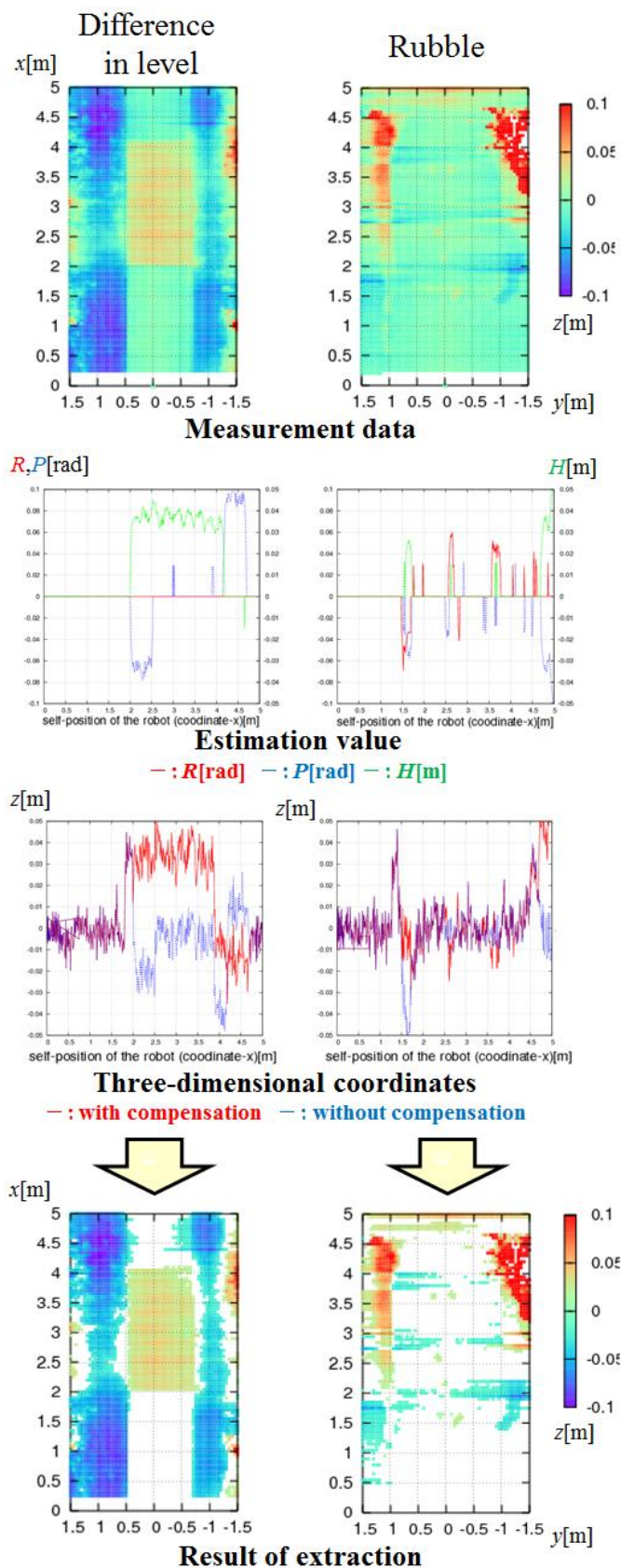


Fig.7 the result of applying the estimation system

5. 結言

本稿は路面調査作業の自動化に向けた路面の測定と損傷箇所の検出を行うシステムの開発について、これまで開発したシステムの問題から、路面の測定データからセンサの計測位置姿勢を推定するシステムを提案した。

具体的には3つのタイヤ高さを路面との接地位置から求め、3次元座標からロール角・ピッチ角・センサの高さを算出し、それらを推定値として反映することで計測距離値の3次元座標変換を補正する手法を紹介した。そしてこれまでのシステムで有効性を示すことが出来なかった2種類の損傷路面に対して行った実験から、提案した推定システムは概ね有効な評価を得ることが出来た。

ただし損傷路面は本稿で取り上げた他にも、“起伏”など様々なパターンがある。システムの有効性を検証するには、それらに対しても評価する課題が残されている。そこで今後は、推定システムの精度を向上させる手法を検討すると共に、他の損傷路面に対する有効性を評価することに取り組む予定である。

参考文献

- [1] 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, ロボティクス・メカトロニクス講演会, vol.12-3, no1A1-A06, 2012
- [2] 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
- [3] 尾花伸昭,板垣幸英,小棚木隆史,坪田浩志,鳥毛明: 屋外自律移動型ロボットの開発—周辺環境に応じた移動アルゴリズム—, ロボティクス・メカトロニクス講演会, , no1P1-K08, 2011
- [4] 永野顕法,岩本太郎: 傾斜角センサを用いた複合傾斜路における路面の判別, 第28回日本ロボット学会学術講演会, no3H1-3, 2010