

# 走行路面に関する測域センサの受光強度分布を用いた 自律移動ロボットの経路追従方法の検討

鈴木 頌梧<sup>†1</sup>, 大矢 晃久<sup>†1</sup>

## A path tracking method for autonomous mobile robot using light intensity pattern received by SOKUIKI sensor

Shogo SUZUKI<sup>‡1</sup>, Akihisa OHYA<sup>‡1</sup>

**Abstract**— Examples of mobile robot's autonomous navigation include teaching and playing-back scheme. This paper presents a method of detecting the positional difference for autonomous navigation by teaching and playing-back scheme. For the detection of the position difference, use record of robot's motion and light intensity pattern received by SOKUIKI laser sensor.

**Keywords:** SOKUIKI Laser Sensor, Received Light Intensity, Teaching and playing-back, Autonomous Mobile Robot

### 1. はじめに

近年、案内や搬送などの作業をロボットに代行させるためには、目的地までロボットが自律的に走行する機能が不可欠であるため、この機能を持つ自律移動ロボットに関する研究が盛んに行われている。例えばつくば市では、実環境での自律走行を行うロボットの技術開発を目的とするつくばチャレンジ [1] が毎年開催されている。

人間が目的地に向かう際に、目を使って周囲の環境を認識しながら移動するように、ロボットもセンサを用いて環境を認識し、自己位置を判断する必要がある。環境を認識する手段として、カメラがよく用いられてきたが、本研究ではレーザー走査の測域センサから得られる受光強度を用いた手法を提案する。このタイプの測域センサは測定対象の形状情報と受光強度を取得できる。受光強度とは測定対象の色や材質、距離、レーザーの入射角によって大きさが変化する、レーザーの反射光の強度である。また、環境光の影響を受けにくいことから屋内外、昼夜問わず利用できる利点があるため、自律移動ロボットに適したセンサである。

ロボットの自律走行を実現する手法として、教示再生法 [2] がある。教示再生法は、人間の手で走行させたい経路を教示する教示走行と、教示走行で記録した運動を再現する再生走行から成る、自律走行の手法である。車輪型のロボットの場合、教示走行では、車輪の回転角から走行位置を計算して記録するが、計算における累積誤差やタイヤ系などのパラメータ誤差、タイヤの滑りによる誤差要因から、教示通りの再生走行が難しいため、普通はセンサを用いて走行位置のずれを検出し、修正しながら再生走行を行う。

本研究では、教示再生法による自律走行を前提とした、走行位置のずれ検出の方法について提案する。具体的には、測域センサを路面に向けることで測定できる、路面の受光強度のパターン（受光強度分布と呼ぶ）を用いて、走行位置のずれを認識する手法を提案する。尚、以後は走行位置のずれを相対的な自己位置と呼ぶことにする。

### 2. 関連研究

自己位置の認識のための手法として、測域センサ以外ではカメラを使った手法 [3] [4] が多く提案されている。カメラを使った手法の問題点としては、環境光の影響を受けやすいことや、計算コストが高いことが挙げられる。GPS を使った手法 [5] は電波の届かない屋内環境や、建造物周辺などの受信強度が弱くなる環境では適応できない。磁気センサを使った手法 [6] も提案されているが、環境中の障害物の変化に弱く、ロバストな自己位置の認識を行うためには他のセンサによる補助が必要である。

測域センサを使った自律走行 [7] はよく提案されてきたが、自己位置推定には距離情報を使うことが多く、受光強度はあまり使われない。受光強度を用いる研究として、形状の分散や受光強度の大きさを特徴量とした路面を識別する研究 [8] や、受光強度の大きさから芝生とアスファルトを分類し、予めその情報を地図にしてマッチングに使うことで自己位置を認識する手法 [9]、環境マップ構築に受光強度を含めることで、幾何形状の乏しい場所でも有用なマップを構築する研究 [10] などが行われてきた。受光強度の大きさと測定対象までの距離の関係は非線形 [11] であり、材質や表面の光沢、レーザーの入射角によっても受光強度の大きさが変わることから、受光強度の値のみで、測定対象の細かい特徴を判断するのは困難である。従って、従来受光強度は測定対象の大まかな識別や、マップ構築における特徴の付加などに使われて来た。

自己位置の認識手法として様々なセンサが使われ提案されているが、どの手法でも必ず課題点がある。自己位置を認識する手段が増えると、ロボットの自律走行ができる環境の拡大が期待できる。従って本研究では、路面から得られる細かい受光強度のパターンをマッチングに利用し、相対的な自己位置の認識を行う手法を提案する。

### 3. 受光強度を用いた自己位置の認識

#### 3.1 自己位置の認識方法

Fig. 1 に示すように、測域センサの測定面が地面に対して垂直になるように取り付けることで路面の受光強度を得ることができる。ロボットが静止状態だと、Fig. 1 のスキャンライン上の受光強度しか取得することができないため、Fig. 2 のように、ロボットを走行させることで路面の受光強度のパターンを得る。これを受光強度分布と呼ぶ。

<sup>†1</sup> 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

<sup>‡1</sup> Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba

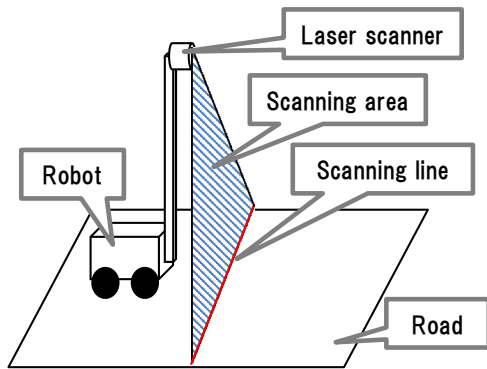


Fig. 1 Road surface measuring method

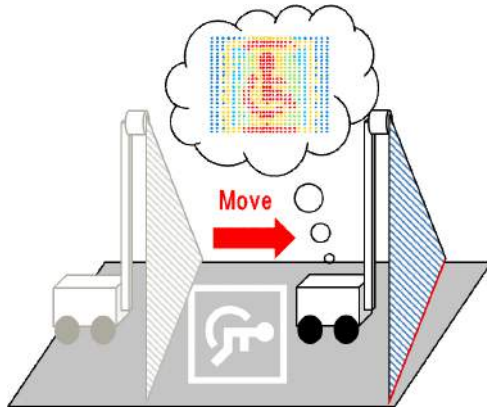


Fig. 2 Road surface pattern measuring method

Fig. 3(a) に Fig. 3(b) の場所でロボットを走行させて得られた受光強度分布の例を示す．Fig. 3(b) に示した走行ルートをロボットに走行させ、URG から得られた受光強度値と走行位置を用いて、2次元の直交座標系にプロットした．受光強度の大きさをヒートマップで表しているため、赤いほど受光強度が大きい．

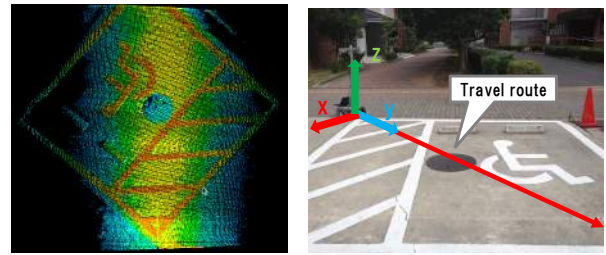
Fig. 3(a) の白線の受光強度分布に注目すると、同じ白線でもロボットの走行位置から離れた白線に対する受光強度が、小さく現れていることがわかる．前述のように、スキャン時の対象までの距離やレーザの入射角などの影響によって、色や材質が同じものでも異なる受光強度となる．

更に、環境光の影響もわずかに受ける．Fig. 4(a) と Fig. 4(b) はそれぞれ、昼と夜に Fig. 5 の場所で測定した受光強度分布である．同じような受光強度分布を測定できているが、夜に測定した結果のほうが、全体的に受光強度が強めに現れていることがわかる．

以上のような受光強度の特性から、受光強度の値を比較して相対的な自己位置を認識するのは困難である．そこで、本認識手法では受光強度の相対的な値に注目する．

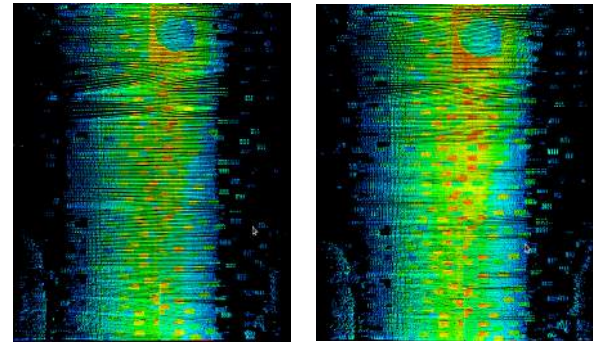
受光強度の相対的な値に注目するために、受光強度分布を2値化処理する．2値化処理を施した受光強度分布を2値化受光強度分布と呼ぶ．Fig. 6 に2値化処理の手順の概略図を示す．具体的には、以下のような処理を行う．

1. 受光強度分布をグリッド分割する．
2. 1. で分割した各グリッド内の受光強度の平均値を、そのグリッドの値とする．
3. 1.2. の処理を施した受光強度分布を画像と見立てて、縦方向と横方向の微分フィルタを適応させる．



(a) Measurement result (b) Experimental environment

Fig. 3 Measurement of received light intensity pattern



(a) Road measurement result(daytime) (b) Road measurement result(nighttime)

Fig. 4 Influence of sunlight



Fig. 5 Experimental environment

4. 微分フィルタ適応後の値が閾値以上であれば、その要素の値を「1」、閾値以下であれば「0」に置き換え2値化する．
5. 縦方向と横方向の2つ結果に対して論理和を取る．

例外処理として、差分を取る際にどちらかの配列に値が入っていない場合は差分を取らずに無視する．Fig. 7(a) は Fig. 3(a) を分割処理・平均化処理し、配列に格納された受光強度の値の大きさをヒートマップで表したものである．Fig. 7(b) は Fig. 7(a) を2値化処理した結果である．Fig. 4(a) と Fig. 4(b) を2値化処理した結果はそれぞれ Fig. 8(a) , Fig. 8(b) に示す．

2値化受光強度分布のパターンを自己位置の認識に利用することで、スキャン位置によって変化する受光強度の影響を受けないロバストな自己位置認識手法となる．

### 3.2 自己位置の認識実験

#### 3.2.1 実験装置

本研究では、Fig. 9 に示す北陽電機製の測域センサである URG-04LX(以降 URG と記述する) を使用する．Table 1 に測

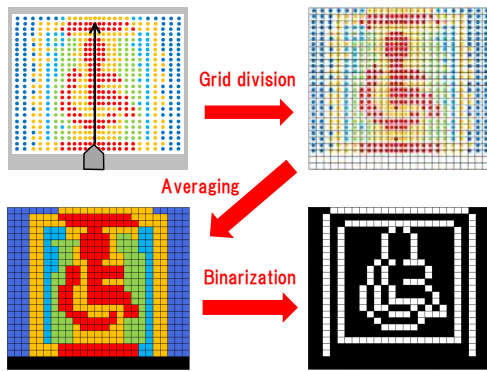


Fig. 6 Binarization method

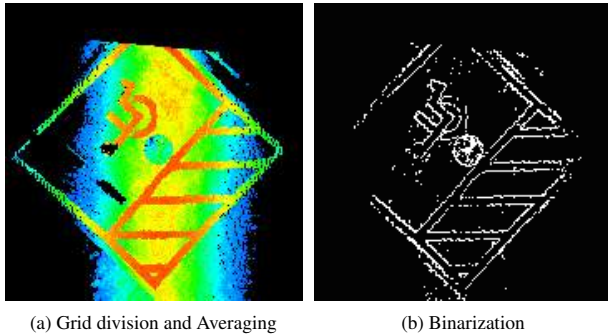


Fig. 7 Result of parking lot experiment

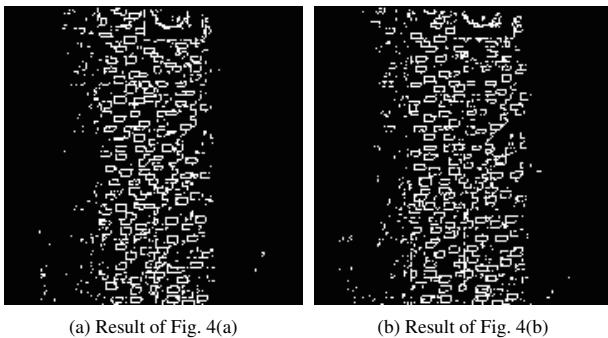


Fig. 8 Binarization result

Table 1 Specification of URG-04LX

形式	程度
測距範囲	距離:0.06 ~ 4 [m], 角度:240 [deg]
測距精度	0.06 ~ 1 [m]: $\pm 10$ [mm], 1 ~ 4 [m]: 距離の 1 [%]
角度分解能	約 0.72 [deg](360 [deg]/512 分割)
走査時間	100 [ms/scan]
受光強度の値域	0 ~ 10000 程

域センサの仕様の詳細を示す。URG は 2 次元平面上の検出体までの距離と方向を検出できる。検出結果として各ステップ毎の距離データを出力するため、センサ周辺の 2 次元的な環境認識に利用できる。加えて、URG は光センサにより、レーザーの反射光の振幅を見ることで、測定対象の受光強度が取得できる。

Fig. 10(b) に Fig. 10(a) のような実験環境で行った、URG の受光強度の測定実験の結果を示す。Fig. 10(a) から壁の色の違いが受光強度の差として現れていることがわかる。

Fig. 11 にロボットの外観を示す。URG は高さ 1.3 [m] の位置で測定平面が地面に対して垂直になるように取り付けられた。



Fig. 9 URG-04LX

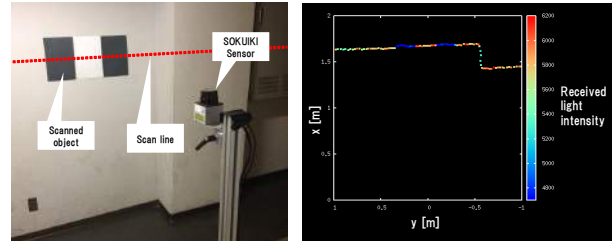


Fig. 10 Received light intensity measurement

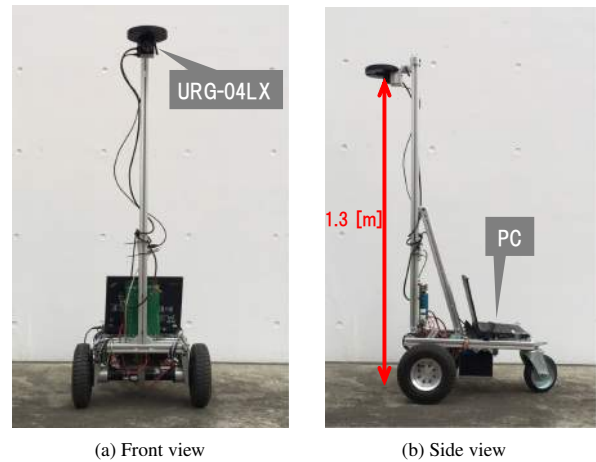


Fig. 11 Mobile robot

### 3.2.2 実験内容

2 値化受光強度分布を記録しパターンマッチングをすることで、相対的な自己位置の認識ができるか検証する実験を行った。Fig. 12 に実験場所とロボットの走行ルートを示す。2 値化受光強度分布生成のために走行したルートと自律走行ルートを 15 [cm] ずらし、その走行位置のずれを検出できるか検証した。生成された 2 値化受光強度分布は Fig. 8(b) である。時間帯による影響を受けないか検証するために夜に生成した 2 値化受光強度分布を用いることにした。

以下のような手順で相対的な自己位置の認識をする。

1. ロボットを走行させることで生成される 2 値化済み受光強度分布のパターンを予めロボットに記憶させる。更に Fig. 13 に示すように、パターンの内容をシフト・回転させたものも記憶させる。
2. Fig. 14 に示すように記憶したパターンと自律走行で得たパターンについて、対応する 2 つの配列に対して論理積をとる。
3. 論理積の結果が「1」になった配列の数を評価値とする。
4. シフト・回転させたパターンに対しても同様の評価値算



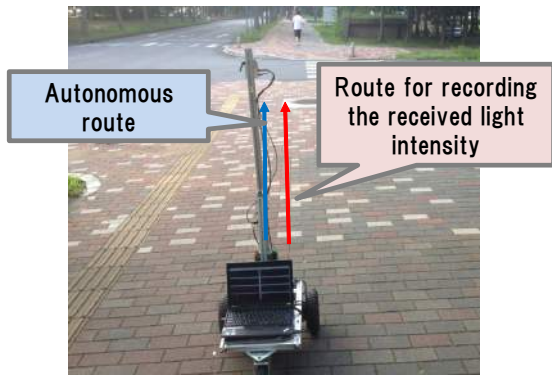


Fig. 12 Experimental environment

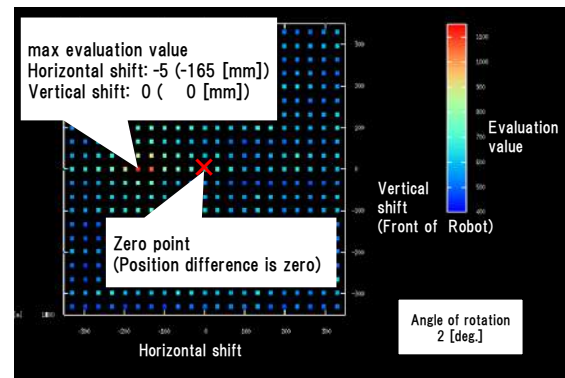


Fig. 15 Position difference calculation result

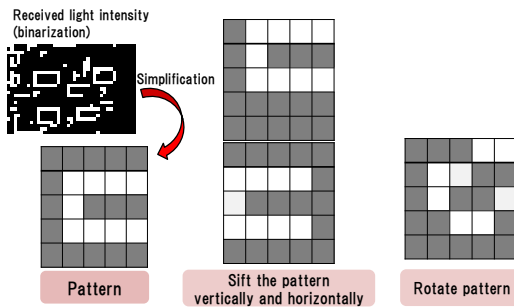


Fig. 13 Record of the binarized received light intensity pattern

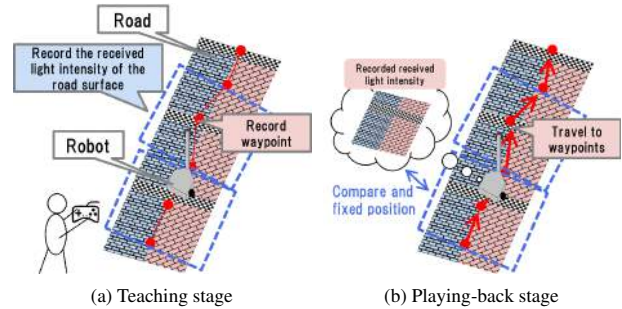


Fig. 16 Autonomous navigation method

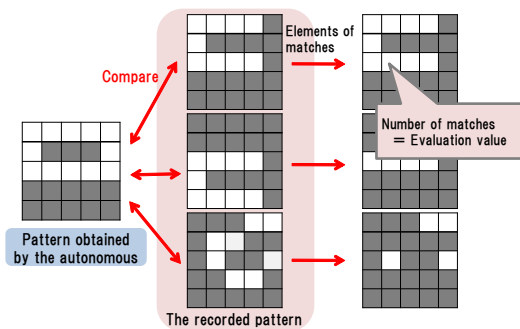


Fig. 14 Evaluation value calculation method

出を行う。

5. 評価値が一番大きいシフト・回転量が、パターンを生成したときの走行位置からのずれを表す。

走行距離は 6 [m]、地図のシフト量は行・列共に-10~10、回転量は 1 [deg.] 刻みで-10~10 [deg.] である。また、6 [m] を 180 でグリッド分割したため、2 つの配列間の距離は 33 [mm] となる。

### 3.2.3 実験結果

自己位置の推定結果を Fig. 15 に示す。縦軸と横軸はそれぞれシフト量を表している。色は評価値の大きさを表す。評価値が最大のときの回転量が 2 [deg.] だったため、回転量 2 [deg.] の結果を示している。推定の結果は想定していた走行位置から 165 [mm] 走行位置がずれていることを表す結果になった。配列間の距離が 33 [mm] であることを考慮すると、ロボットの走行位置をずらした量と近い結果になったと言える。従って、本手法での相対的な自己位置の認識が実現できることが証明できた。

## 4. 自己位置認識手法を用いた自律走行

### 4.1 実験方法

提案した自己位置認識手法を用いたロボットの自律走行を行った。Fig. 16 に本自己位置の認識手法を用いた自律走行手法の概略図を示す。自律走行は教示再生法を用いた。具体的には、まず Fig. 16(a) のように、コントローラを用いてロボットに自律走行させたい経路を教示走行させる。次に Fig. 16(b) のように、教示の経路に追従するように再生走行を行う。再生走行時の自己位置の推定には提案手法を用いた。

### 4.2 自律走行の結果

Fig. 17 に実験環境を示す。この実験環境で約 50 [m] の区間を自律走行する実験を行った。Fig. 18(a) と Fig. 18(b) に示すように、再生走行では教示走行での初期位置から 15 [cm] 水平方向に移動させた位置から走行を開始した。また、ロボットの再生時の初期姿勢は、教示時の初期姿勢から 5 [deg] 程度ヨー方向に回転させた。自己位置の認識は 5 [m] おきに行い、教示時の経路に追従させた。Fig. 18(c) と Fig. 18(d) に教示走行と再生走行の到着地点を示す。Fig. 18(c) と Fig. 18(d) に示すように、提案手法を用いた再生走行により、教示走行時の到着地点から約 10 [cm] の位置に到着できた。

## 5. おわりに

本研究では、教示再生法による自律走行のための、受光強度分布を利用した相対的な自己位置の認識手法を提案した。受光強度の相対的な値に注目することで、複雑な要因で変化する受光強度のパターンから、路面の特徴的なパターンを抽出できることを示した。受光強度の分布から特徴的なパターンを抽出したものをを用いて、相対的な自己位置認識に利用できることを実験によって示し、設定した約 50 [m] の区間において教示再生による自律走行が実現できた。



Fig. 17 Experimental environment

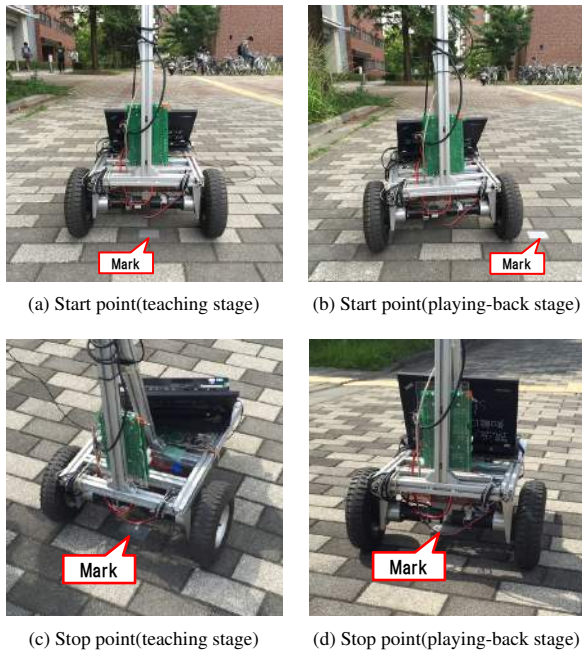


Fig. 18 Autonomous navigation results

本研究で提案した手法の特徴は、路面における受光強度のパターンを使って位置差を検出するため、形状情報の乏しい屋外環境でも、路面に特徴のある場所であればロボットの自律走行も実現できる点である。また、センサの特性により環境光の影響が小さいため、昼夜関係なく同じような測定結果を得ることができる。更に、本研究では取り扱っていないが、測域センサから3次元の形状情報も得られるため、従来手法のような形状情報を用いたロボットの自己位置認識も同時にできる利点もある。これは形状情報の豊富な屋内環境において有用な特徴である。

今後は、様々な場所で実験をすることで、本手法の適応できる場所の条件を明らかにすることが必要である。更に地図のシフト・回転量や、自律走行での自己位置を認識する間隔などの試行錯誤で定めたパラメータを精査し、自己位置の認識ができるパラメータの条件を明らかにすることも今後の課題として挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 油田 信一: “つくばチャレンジ 2014 - 結果と成果 -”, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), pp. 0425-0430, 2014.
- [2] 唐立新, 油田 信一: “全方位画像列と移動量の記録による移動ロボットの

教示再生ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, vol.21, No.8, pp. 883-892, 2003.

- [3] 山崎 俊太郎: “一人称ビジョンシステムのための自己位置推定手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, 2010.
- [4] 岩田 啓明, 実吉 敬二: “ステレオカメラによるビジュアルオドメトリおよび自己位置認識”, 第 11 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp. 2174-2177, 2010.
- [5] 大野 和則, 坪内 孝司 et al.: “大学構内の歩道環境における自律移動ロボットの屋外ナビゲーション-R T K-G P S の試用と経路地図の作成-”, 第 7 回ロボティクスシンポジウム, 2001.
- [6] 鹿内 佳人, 尾崎 功一: “環境地場に基づいた移動ロボットの自律走行”, 計測自動制御学会論文集, vol. 47, no. 3, pp. 166-172, 2011.
- [7] 山口 智也, 油田 信一: “筑波大学ループ道路歩道 3.5km における移動ロボットの屋外長距離自律走行の試み”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 77, no. 779, pp. 2782-2794, 2011.
- [8] 熊田 大輔: “レーザーキャナで取得した受光強度と局所形状を特徴量とした路面属性認識”, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), pp. 0442-0445, 2014.
- [9] 伊達 央, 大川 真弥 et al.: “地表面の反射輝度を活用した自律移動ロボットの高精度自己位置推定”, 日本機械学会論文集, pp. 3389-3398, 2013.
- [10] 原 祥亮, 川田 浩彦 et al.: “測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットのための環境マップ構築構築”, 第 12 回ロボティクスシンポジウム, 2007.
- [11] 宮地 晃平, 原 祥亮 et al.: “測域センサの受光強度の応用に関する研究 - AGC 情報を用いた強度の復元 -”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, “1P1-L02(1)”-“1P1-L02(4)”2007.