レーザ光の方向転換器を用いた 2 方向走査型レンジセンサ装置

橋本 健太郎^{*1}, 関森 大介^{*2}

Two-directional range sensor device using direction converter of laser beam

Kentaro HASHIMOTO^{*1} and Daisuke SEKIMORI^{*2}^{*1} Department of Mechanical and Electronic System Engineering,
Advanced Course, National Institute of Technology, Akashi College
679-3 Nishioka, Uozumi-cho, Akashi-shi, Hyogo 674-8501, Japan^{*2} Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Akashi College
679-3 Nishioka, Uozumi-cho, Akashi-shi, Hyogo 674-8501, Japan

Received: 14 March 2017; Revised: 16 August 2017; Accepted: 24 October 2017

Abstract

A range sensor is known as one of sensors which are often installed in mobile robots. The range sensor can detect the distance to objects in the environment using laser beam. However, the measurement area of the range sensor is limited because the scanning plane of the sensor is single and parallel to the mounting surface. In this research, we developed a new range sensor capable of scanning in two directions. Using the periodic refraction of laser beam generated by the rotation of two acrylic prisms installed around the range sensor, two-directional scanning is realized. If this range sensor is placed at the front of the mobile robot horizontally, the robot becomes possible to scan both distant area and road surface. In addition, we devised a simple method for the classification and integration of two-directional measurement data based on a model fitting method. In this paper we describe the concept of the range sensor device and explain the method for the classification and integration of two-directional measurement data. Furthermore, we verified the range sensor's effectiveness through object detection experiments.

Keywords : Range sensor, Laser beam, Acrylic prisms, Direction converter

1. 緒 言

移動ロボットのインテリジェント化に有効なセンサとして、レンジセンサが挙げられる。レンジセンサは、レーザ光等を周囲に照射し、反射光との時間差や位相差を測ることによって、周辺の物体までの距離を測定する。また、レンジセンサは、短い周期で広範囲の物体を検出できるため、移動ロボットの障害物回避や自己位置推定、環境地図生成等によく用いられている。一般的なレンジセンサは一平面内を走査するため、複数面の走査や 3 次元的な走査を行う場合には、複数のレンジセンサを配置したり、アクチュエータ等でセンサの姿勢を変化させる必要がある。

複数のレンジセンサによる走査方式として、移動ロボットに 2 個のレンジセンサを取り付け、異なる走査面の情報から実環境の 3 次元地図の作成を行った研究 (中本他, 2006, Yan et al., 2015), 移動ロボットに 3 個のレンジセンサを取り付け、水平面および左右の鉛直面の走査情報から屋内環境の SLAM 問題に取り組んだ研究 (Jung et al., 2015), カートに 4 個のレンジセンサを用いて、前方、地面、天井の走査情報より鉱山の坑道の 3 次元地図の作成を行った研究 (Thrun et al., 2003) などが挙げられる。この走査方式では、複数の走査を高精度でかつ高周期

No.17-00117 [DOI:10.1299/transjsme.17-00117], J-STAGE Advance Publication date : 2 November, 2017

^{*1} 正員, 明石工業高等専門学校 専攻科 機械・電子システム工学専攻 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)
(現 三菱電機 (株))^{*2} 正員, 明石工業高等専門学校 機械工学科
E-mail of corresponding author: sekimori@akashi.ac.jp

で行うことが可能であるが、複数のレンジセンサを使用するため、システムが大型化・複雑化する傾向にある。また、センサ間のキャリブレーション作業が必要であり、各センサの測定値を融合する工夫も必要となる。一方、レンジセンサの姿勢変化による走査方式としては、2次元のレンジセンサをサーボモータでロール軸・ピッチ軸・ヨー軸周りに回転させ、3次元走査を実現した研究 (Wulf and Wagner, 2003)、2自由度フリージナル型の回転式揺動機構にセンサを取り付け、帯状領域の走査を実現した研究 (松本他, 2009)、不整地移動ロボットに搭載された4自由度のロボットアームの先端にセンサを取り付けて、3次元地図生成を行った研究 (Fujita and Yoshida, 2016) などが挙げられる。この走査方式では、1台のセンサで複数面の走査が行えるため、システムが小型になりロボットへの導入が容易になる利点がある。しかし、大きな姿勢変化が伴う場合には、リアルタイム性が低下したり、過大な加速度によるセンサの誤動作や故障等が懸念される。電動車いすや自動車等の移動ロボットの自律走行を考える場合、ロボットの周辺と走行面の状況を優先的にセンシングする必要がある。これをレンジセンサで実現する場合、上述の両走査方式のいずれかが不可欠となるが、どちらも一長一短であり、どちらを採用するかの判断は決め手を欠いている。

そこで、本研究では、2次元走査型のレンジセンサの周囲にプリズムを複数個配置し、それを高速回転させることによって部分的にレーザ光を屈折させ、センサ単体で、高いリアルタイム性を保ったまま、異なる2方向の走査を実現する新しいレンジセンサの開発を行った。このセンサを移動ロボットの前方に配置すれば、ロボットの周辺と走行面の両走査が可能となる。また、実際の測定データとそのモデルを照合することにより、プリズムの位置を意識することなく、簡便に2方向の測定データを分類し、2方向の全方位距離情報を構築する方法も考案した。本研究では、レーザ光を屈折させるプリズムの素材にアクリルを使用している。その理由としては、空気に対するアクリルの屈折率が約1.49で他の透明材料に対して比較的高い値であること、加工が容易であることが挙げられる。また、アクリルは極めて軽量であり、高速回転においても振動や騒音が発生しにくいメリットもある。レンジセンサのレーザ光の方向を変える走査方式として、レンジセンサ内部の小型の鏡にレーザ光を反射させ、鏡を上下に振動させながら回転させることによって3次元走査を実現した研究 (Kimoto et al., 2014)、レンジセンサの周囲に曲面鏡を置き、レーザ光を反射させることによって3次元走査を実現した研究 (松本, 2013) が挙げられる。これらはコンパクトであり、センサ自体を固定しているため姿勢変化に伴う過大加速度の発生はないが、広範囲の3次元空間の走査を目的としたものであり、特定の面の走査にはある程度の時間を要するものと考えられる。

本論文では、レーザ光の方向転換器を用いた2方向走査型レンジセンサ装置について詳述する。以降、第2章ではレンジセンサの概要について述べ、第3章ではレーザ光の方向転換器について説明する。続く、第4章ではレンジセンサで取得した測定データから2方向の全方位距離情報の構築方法について説明し、第5章では製作した2方向走査型レンジセンサによる検証結果について示す。最後に、第6章では本研究のまとめと今後の展望について述べる。

2. レンジセンサ

レンジセンサは周囲空間を走査して物体までの距離を検出する機器である。本研究では、北陽電機等から市販され産業用センサとして数多くの導入実績がある、レーザ光源を利用した2次元走査型のレンジセンサ (Hokuyou, UTM-30LX) を対象とする。図1(a)にレンジセンサの構造 (Kawata et al., 2005) を示す。図のように光源から出たレーザ光は反射鏡を介して物体に照射され、物体表面で反射したレーザ光はレンズで集光されて反射鏡を介して受光素子へ取り込まれる。センサと物体間を往復するレーザ光の飛行時間を測定するタイム・オブ・フライト方式によって距離測定が行われる。また、反射鏡とレンズが回転軸まわりに一定の角速度 ω_r で回転することによって、同図(b)のようにレーザ光による2次元走査が行われ、各方位 ϕ における物体までの距離データ L が順次出力される。

3. レーザ光の方向転換器

レンジセンサから出力されたレーザ光は空間内を直進する。そのためセンサを固定すれば、その走査範囲はレ

レーザー光が掃引する平面内に限定される。本研究では、アクリル製のプリズムでセンサから出力されたレーザー光の一部を仰俯角方向に転換（屈折）させる装置を導入し、センサの走査範囲をレーザー光が直進する方向と屈折する方向（以降、レーザー直進方向とレーザー屈折方向と略す。）の二つに拡張する。以下では開発したレーザー光の方向転換器の構造、プリズムによるレーザー光の屈折、2方向の全方位走査に要する時間について説明する。

3-1 構造

図 2(a)にレーザー光の方向転換器の外観（イメージ図）を示す。方向転換器はベースプレート、回転テーブル、DC モータ、ギア、プリズム等から構成され、その中央部にはレンジセンサが置かれている。ベースプレート上

Fig.1 Concept of a laser range sensor. The sensor measures distances to surrounding objects. The laser beam output from the laser light emitter is reflected by the mirror and arrives to the object as shown in figure (a). Then, the laser beam reflected at the object's surface is concentrated with the lens. Moreover the laser beam is reflected by the mirror and enters the photo detector. The sensor calculates the distance to the object by measuring the time-of-flight of the laser beam. The sensor outputs the azimuth ϕ and the distance L of the object while continuing scanning as shown in figure (b).

Fig. 2 Direction converter of the laser beam and two-directional scanning. The direction converter consists of a base plate, a turntable, a DC motor, gears, two prisms, etc. as shown in figure (a). The range sensor is located in the center space of the converter. Two prisms are placed on the turntable and are turned by the DC motor as shown in figure (b). When sensor scanning and prism rotation work together, straight laser beam and refracted laser beam are generated alternately, and two-directional scanning is realized in all azimuths as shown in figure (c).

にはレンジセンサと DC モータが固定され、ベアリングを介して回転テーブルが置かれている。同図(b)に示すように、回転テーブル上には位相間隔が等しくなるように二つのプリズムが配置され、DC モータによって角速度 ω_p で駆動される。プリズムの角速度とセンサの走査角速度の比 ω_p/ω_s を適切に選択すれば、同図(c)のように、レーザー光が直進する領域と屈折する領域が作られ、全方位にわたって2方向の走査が実現される。なお、角速度比 ω_p/ω_s の設定方法については3・3節にて詳細に述べる。

3・2 プリズムによるレーザー光の屈折

プリズムの形状とレーザー光の屈折角の関係について述べる。図3に本研究で使用したプリズムの断面図およびレーザー光の進路図を示す。プリズムは回転体形状であり、その回転軸はレーザー光の回転軸（センサ内の反射鏡とレンズの回転軸）と一致している。

プリズム斜面部の角度 θ とレーザー光の屈折角 φ の関係を求める。まずレーザー光がプリズムへ入射する場合、光の入射角 $\pi/2 - \theta$ と出射角 θ_1 の間には以下のスネルの法則が成り立つ。

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sin \theta_1} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta_1} \quad (1)$$

ここで、 n は空気に対するプリズムの屈折率を表す。同様にレーザー光がプリズムから出射する場合、光の入射角 θ_2 と出射角 φ の関係は次のように表される。

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta_2} \quad (2)$$

また、幾何的な関係から次の関係が導かれる。

$$\frac{\pi}{2} - \theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (3)$$

式(1)～(3)を連立することによって、斜面部の角度 θ とレーザー光の屈折角 φ は次のように求められる。

$$\varphi = \sin^{-1} \left(n \cos \left(\theta + \sin^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{n} \right) \right) \right) \quad (4)$$

以上の説明ではレーザー光路を線として説明したが、実際のレーザー光は広がりを持っている。本手法で使用して

Fig.3 Cross section of the prism and route of the laser beam, where the θ , θ_1 , θ_2 , and φ indicate the prism angle, the refraction angle(from air to prism), the incidence angle(from prism to air) and the refraction angle(from prism to air). The prism is a solid of revolution, and the rotary axis of the prism accords with the rotary axis of the laser beam output from the range sensor.

いるレンジセンサ (UTM-30LX) の製品カタログ (北陽電機株式会社, 2016) によると, レーザ光の広がり (センサ正面方向 (図 11(c) の $\phi=135[\text{deg}]$ 方向) $30[\text{m}]$ の位置で $400\text{W} \times 80\text{H}[\text{mm}^2]$, センサ側面方向 (図 11(c) の $\phi=45, 225[\text{deg}]$ 方向) $30[\text{m}]$ の位置で $80\text{W} \times 400\text{H}[\text{mm}^2]$) である. これを元に, レーザ光が回転軸位置で点と仮定して, プリズムを透過したレーザ光の広がり (計算すると, レーザ光の方位方向の広がり (変化せず, 仰俯角方向の広がり) は約 80% に減少する結果となった. 結果より, レーザ光がプリズムを透過することによってレーザ光の広がり (大きな変化はないものと考えている. ちなみにセンサ経路が $30[\text{m}]$ になる位置での光の広がり, センサ正面方向で $400\text{W} \times 64.1\text{H}[\text{mm}^2]$, センサ側面方向で $80\text{W} \times 320.5\text{H}[\text{mm}^2]$) である.

3.3 2 方向の全方位走査に要する時間

距離測定のリアルタイム性を重視すると, なるべく短い時間でレンジセンサが全方位にわたって 2 方向 (レーザ直進方向とレーザ屈折方向) の走査を終えることが望ましい. しかし, レーザ光の角速度 (センサの走査角速度) とプリズムの角速度の組み合わせによっては, 走査完了までに長時間を要する場合や走査が完了しない場合 (例えば, レーザ光の角速度とプリズムの角速度が等しければ, 全方位にわたって一方向の走査のみが行われ, 走査が完了しない.). そこで本節では, レーザ光とプリズムの角速度比と 2 方向の全方位走査に必要な時間の関係について述べる. 本手法で使用しているレンジセンサ (UTM-30LX) の走査角速度は固定されているが, 走査角速度が可変なレンジセンサにも適用できることを考慮して, あえて角速度比を用いて説明する.

図 4 のようにレーザ光の方位 (センサの走査方位) を ϕ , レーザ光の角速度を ω_s , プリズムの角速度を ω_p とし, 反時計まわりの回転を正とする. また, 図のようにレーザ光の方位とプリズムの端を合わせた状態を初期状態^{*3} ($\phi=0$) とする. この状態から $\omega_s \neq 0$, $\omega_s \neq \omega_p$ の条件でレーザ光とプリズムを一定速度で回転させると, レーザ光の方位が一定角度進む毎にレーザ直進方向の走査とレーザ屈折方向の走査が入れ替わる. 一例として, 図 5 に $\omega_p/\omega_s = 31/16, 49/64, 1/16, -1/14$ (いずれも $\omega_s > 0$) の場合の走査の推移を示す. 図中の α はレーザ直進方向の走査とレーザ屈折方向の走査範囲を表し, その値は次式を用いて求められる.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{|1 - \omega_p/\omega_s|} \quad (5)$$

続いて, この α を利用して, 2 方向の全方位走査の完了に必要なレーザ光の回転回数 N を求める. α は正の

Fig.4 Initial position of the sensor scanning, where, the ω_p and ω_s indicate angular velocities of the prism and the laser beam, and the ϕ indicates the azimuth of the laser beam. The directions of the laser beam and the prism edge are aligned in the initial position to facilitate understanding.

Fig.5 Scanning patterns in the case of (a),(b),(c) and (d), where the α indicates the range of scanning area by straight beam or refracted beam, and the β indicates the phase difference occurring for each rotation of the laser beam.

^{*3} 理解を容易にするためのものであり, 実際の初期状態では, レーザ光の方位とプリズムの端を合わせる必要はない.

値を取るが、ここでは $\alpha > 2\pi$ の場合と $0 < \alpha \leq 2\pi$ の場合に分けて考える。まず $\alpha > 2\pi$ の場合、図5(b)のような走査の推移となり、レーザ光の回転回数 N は次式で求められる。

$$N = \text{ceiling}\left(\frac{\alpha}{2\pi}\right) + 1 \quad (6)$$

ここで、 $\text{ceiling}(x)$ は天井関数であり、 x 以上の最小の整数と定義される。次に $0 < \alpha \leq 2\pi$ の場合、走査の推移は図5(a),(c),(d)のようになり、レーザ光が1周する毎にプリズムとの位相差 β が生じることが分かる。なお、位相差 β は次式で求められる。

$$\beta = 2 \times |\pi - m\alpha| \quad (7)$$

ただし、

$$m = \text{floor}\left(\frac{\pi}{\alpha} + 0.5\right)$$

である。ここで $\text{floor}(x)$ は床関数であり、 x 以下の最大の整数と定義される。また、 $\text{floor}(y + 0.5)$ は y の小数部を四捨五入して整数値に変換することを意味する。 $\beta \neq 0$ の場合、レーザ光の回転が継続すれば、どの方位においても走査方向の交替（レーザ直進方向からレーザ屈折方向へ、あるいはレーザ屈折方向からレーザ直進方向へ）が必ず起こる。したがって、2方向の全方位走査の完了に必要なレーザ光の回転回数 N は次式で求められる。

$$N = \text{ceiling}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) + 1 \quad (8)$$

図6にレーザ光とプリズムの角速度比 ω_p/ω_s とレーザ光の回転回数 N の関係を示す。図より、 $\omega_p/\omega_s = 0.5k$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)の場合、 N が無限大に近づき2方向の全方位走査が完了しないことが分かる。一方、 $\omega_p/\omega_s = 0.25 + 0.5k$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)の場合、 $N = 2$ となり、最も少ない回転回数で走査が完了することが分かる。以上から、2方向の全方位走査に必要な時間 T は次式で求められる。

Fig 6 Relation between angular velocity ratio ω_p/ω_s and the required number N of laser-beam-rotation for two-directional scanning completion. When ω_p/ω_s is $0.5n$ (n is an integer), two-directional scanning is not completed because N becomes an infinite value. On the other hand, when ω_p/ω_s is $0.25 + 0.5n$ (n is an integer), two-directional scanning is completed at the minimum number of rotations ($N = 2$).

$$T = \frac{2\pi}{\omega_s} N \quad (9)$$

距離測定のリアルタイム性を重視すれば、式(5)～(9)を利用して全走査時間が小さくなるようにレーザ光とプリズムの回転速度を決定すれば良い。その際、装置が高速回転することによる不具合（装置の故障や寿命低下、騒音等）が顕著にならないような配慮も当然必要となる。

4. 2方向の全方位距離情報の構築

レンジセンサから N 回数分の測定データを受け取り、データをレーザ直進方向のものとレーザ屈折方向のものに分類して、2方向の全方位距離情報の構築を行う。レーザ直進方向の全方位距離情報は、同方向の測定データをそのまま統合することによって構築されるが、レーザ屈折方向の全方位距離情報は、同方向の測定データの補正し、さらに物体位置へ変換したものを統合することによって構築される。以下では測定データの分類方法、レーザ屈折方向の測定データの補正と物体位置への変換方法について説明する。

4.1 測定データの分類と統合

レーザ光の方位とプリズムの位置の正確な相対関係を把握できれば、容易に測定データを走査方向別に分類することができる。しかし、レーザ光の方位とプリズムの位置の相対関係を正確に求めるためには、両者の位相合わせや時刻合わせなど手間のかかる作業が別途必要となる。そこで本研究では、簡便な測定データの分類方法として、次の手法を提案する。

本装置の特徴として、レーザ直進方向とレーザ屈折方向の測定データには大きな差が現れる場合が多い。例えば、広い屋内空間や屋外空間などで、本装置を床面（地面）より一定の高さに置き、レーザ直進方向を水平方向、レーザ屈折方向を斜め下方向として距離測定を行った場合、レーザ直進方向の走査では遠方の物体、レーザ屈折方向の走査では床表面を検出し、各方向の測定データの間に明確な差が表れることが予想される。そこで、センサから得られる測定データのモデルを作成し、実際の測定データと照合させることによって、レーザ光の方位とプリズムの位置の相対関係を求める。なお、レンジセンサの方位の分解能を δ とすれば、走査が 2π [rad] 進む毎にセンサは $2\pi/\delta$ 個の測定データを出力する。

まず、図 7(a)のように α/δ 毎に A_H と A_L の値を繰り返すモデル $M_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi(N+1)/\delta)$ を作成する。ここで、

Fig.7 Model data $M_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi(N+1)/\delta)$ and measurement data $L_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi N/\delta)$ of the range sensor, where the δ is the angular resolution of the range sensor. The A_H and the A_L are estimated data of the straight-beam-direction and the refracted-beam-direction. The phase difference γ between the laser beam and the prism is calculated by the fitting process between the model data M_i and the measurement data L_i .

A_H と A_L はそれぞれ水平方向と斜め下方向の測定データの予想値を表す. 続いて, モデル M_i と実際の測定データ $L_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi N/\delta)$ (図 7(b)) を用いて, 次の評価関数 J を最小とする γ を算出する.

$$J = \sum_{i=1}^{2\pi N/\delta} (M_{i+\gamma} - L_i)^2 \quad (10)$$

求まった γ はモデルと測定データの位相差を意味し, この γ を用いて測定データ L_i をレーザ直進方向とレーザ屈折方向に分類する. 表 1 に具体的な分類方法を示す.

測定データの分類の後, 各方向のデータの統合を行う. 統合の方法は図 8 に示すアルゴリズムにより行う. ここで, ${}^S L_j (j = 1, 2, \dots, 2\pi/\delta)$ は統合されたレーザ直進方向のデータ, ${}^R L_j (j = 1, 2, \dots, 2\pi/\delta)$ は統合されたレーザ屈折方向のデータを表す. また, $i \bmod a$ は $i \div a$ の剰余を表す. データの統合においては, ${}^S L_j$ (または ${}^R L_j$) の候補が複数ある場合には, プリズムの端から遠いデータを優先的に採用する. これは, プリズムの端から遠いデータほど正しい方向に分類される確率が高くなるからである.

4.2 レーザ屈折方向の測定データの補正と物体位置への変換

まず, レーザ屈折方向の測定データ ${}^R L_j$ の補正方法について説明する. 図 9 のように, レンジセンサのレーザ

Table 1 Detailed rules for classification of measurement data $L_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi N/\delta)$ into straight-beam-direction data and refracted-beam-direction data

(a) $0 \leq \gamma < \frac{\alpha}{\delta}$		(b) $\frac{\alpha}{\delta} \leq \gamma < \frac{2\alpha}{\delta}$	
Range of i	Direction of L_i	Range of i	Direction of L_i
$1 \leq i \leq \frac{\alpha}{\delta} - \gamma$	Straight-beam -direction	$1 \leq i \leq \frac{2\alpha}{\delta} - \gamma$	Refracted-beam -direction
$\frac{\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{2\alpha}{\delta} - \gamma$	Refracted-beam -direction	$\frac{2\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{3\alpha}{\delta} - \gamma$	Straight-beam -direction
$\frac{2\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{3\alpha}{\delta} - \gamma$	Straight-beam -direction	$\frac{3\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{4\alpha}{\delta} - \gamma$	Refracted-beam -direction
$\frac{3\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{4\alpha}{\delta} - \gamma$	Refracted-beam -direction	$\frac{4\alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{5\alpha}{\delta} - \gamma$	Straight-beam -direction
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\frac{2\pi N - \alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{2\pi N}{\delta} - \gamma$	Refracted-beam -direction	$\frac{2\pi N}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{2\pi N + \alpha}{\delta} - \gamma$	Straight-beam -direction
$\frac{2\pi N}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{2\pi N}{\delta}$	Straight-beam -direction	$\frac{2\pi N + \alpha}{\delta} - \gamma < i \leq \frac{2\pi N}{\delta}$	Refracted-beam -direction

```

a ← 2π/δ
for i=1 to N*a do
  j ← i mod a
  if  $L_i$  is Straight-beam direction then
     ${}^S L_j \leftarrow L_i$ 
  else
     ${}^R L_j \leftarrow L_i$ 
  end if
end for

```

Fig.8 Algorithm for the classification of measurement data $L_i (i = 1, 2, \dots, 2\pi N/\delta)$, where the ${}^S L_j (j = 1, 2, \dots, 2\pi/\delta)$ indicates the straight-beam-direction data, the ${}^R L_j (j = 1, 2, \dots, 2\pi/\delta)$ indicates the refracted-beam-direction data.

Fig.9 Relation between correct measurement data ${}^R L_j^*$ of the refracted-beam-direction and object's position R_j, H_j , where the B is distance from the sensor to the prism, the C is the distance that the laser beam passes the prism, and the D_j is distance from the prism to the object. Because the laser beam passes the prism, measurement data ${}^R L_j$ includes error Δ . Therefore, correct measurement data ${}^R L_j^*$ is determined by equation (12). Furthermore, the measurement data ${}^R L_j$ (or correct measurement data ${}^R L_j^*$) are converted into object's position R_j, H_j by equation (13),(14) and (15).

光はプリズムで2回屈折した後、対象物体へ到達する経路をとる。測定データ ${}^R L_j$ は図中のレーザ光の経路長と一致する必要があるが、レーザ光がプリズムを通過することで速度が低下し、実際の経路より長く測定されてしまう。そこで、本研究では測定データ ${}^R L_j$ に含まれる誤差を求め、それを取り除くことによって補正を行う。まず、レーザ光がプリズム内を通過する距離を C (一定値) とすると、センサの測定データ ${}^R L_j$ に含まれる誤差 Δ は次のように推定される。

$$\Delta = C(n-1) \quad (11)$$

誤差が判明すれば、測定データの補正值 ${}^R L_j^*$ は次式により求められる

$${}^R L_j^* = {}^R L_j - \Delta = {}^R L_j - C(n-1) \quad (12)$$

なお、補正值 ${}^R L_j^*$ はレーザ光の経路長と等しくなる。

続いて、測定データから対象の物体位置への変換方法について説明する。図9のように、レンジセンサのレーザ光の回転軸(プリズムの回転軸)を鉛直線に一致させ、対象物体をセンサから半径方向 R_j 、鉛直方向 H_j に配置する。センサからプリズム入射位置までの距離を B (一定値) とすると、プリズム出射位置から対象物体までの距離 D_j は次式で得ることができる。

$$D_j = {}^R L_j^* - B - C = {}^R L_j - B - nC \quad (13)$$

さらに式(2)と幾何学的な関係を利用すれば、測定データ ${}^R L_j$ から物体の位置 R_j, H_j への変換式は次のように表される。

$$\begin{aligned} R_j &= B + C \cos \theta_2 + D_j \cos \varphi \\ &= B + C \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{n^2}} + ({}^R L_j^* - B - C) \cos \varphi = B + C \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{n^2}} + ({}^R L_j - B - nC) \cos \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} H_j &= C \sin \theta_2 + D_j \sin \varphi \\ &= C \frac{\sin \varphi}{n} + ({}^R L_j^* - B - C) \sin \varphi = C \frac{\sin \varphi}{n} + ({}^R L_j - B - nC) \sin \varphi \end{aligned} \quad (15)$$

5. 検証実験

本研究で提案する2方向走査型レンジセンサ装置を製作し、上の手法を適用して実環境下で検証実験を行った。まず、製作したセンサ装置の概要について説明した後、測定データの分類と統合の実験、レーザ屈折方向の物体位置検出の実験について述べる。

5.1 センサ装置の概要

図10(a)にセンサ装置の外観を示す。装置の回転テーブルの直径は180[mm]、高さは35[mm]であり、テーブルの上部には二つのプリズム、中央部にはレーザ式のレンジセンサが配置されている。レンジセンサには北陽電機のUTM-30LXを用いており、表2にその仕様の一部を示す。また、センサのレーザ光の回転軸（プリズムの回転軸）は鉛直方向、レーザ光の投光位置は床面より550[mm]の高さとなるように、本装置を設置している。これは、本研究の次の段階として、本装置を電動車いすの前部に取り付け、車いすが半径約1000[mm]の周囲の路面を走査しながら自律走行することを想定しているためである。続いて、図10(b)に回転テーブル上のプリズムの断面形状を示す。レーザ光（波長 $\lambda=905[\text{nm}]$ ）に対するアクリルの絶対屈折率は $n_p=1.4831764$ （Kasárova et al., 2007）、空気の絶対屈折率は $n_a=1.0002745$ （Ciddor, 1996）であるため、空気中のアクリルの屈折率は $n=n_p/n_a \approx 1.483$ となった。したがって、プリズムの斜面部角度が $\theta=0.681[\text{rad}] (=39[\text{deg}])$ であるため、レーザ光の屈折角は $\varphi=0.515[\text{rad}] (=29.5[\text{deg}])$ となる。また、CAD図面より、センサからプリズム入射位置までの距離は $B=61.671[\text{mm}]$ 、レーザ光がプリズム内を通過する距離は $C=30.064[\text{mm}]$ となった。プリズムの駆動はDCモータによって行われ、角速度を $\omega_p = -7.62\pi \sim 7.62\pi [\text{rad/s}]$ ($= -229 \sim 229 [\text{rpm}]$) の範囲で設定することが可能になっている。

Fig.10 Overall view of the sensor device and cross-section of the prism. The diameter and the height of the turntable shown in figure (a) are 180[mm] and 35[mm]. The laser-type range sensor (UTM-30LX, Hokuyo) is located in the central part of the turntable. The rotary axis of the laser beam is vertical direction. The height of the laser projector from floor is 550[mm]. The prism angle θ shown in figure (b) is 0.681[rad] ($=39[\text{deg}]$) and the refracting angle φ of the laser beam is 0.515[rad] ($=29.5[\text{deg}]$).

Table 2 Specifications of the range sensor

Manufacturer	Hokuyo Automatic Co., Ltd.
Model No.	UTM-30LX
Light source	Semiconductor laser diode ($\lambda=905[\text{nm}]$), Laser safety class 1(FDA)
Accuracy	0.1 to 10[m]: $\pm 30[\text{mm}]$, 10 to 30[m]: $\pm 50[\text{mm}]$ (White Kent sheet)
Angular resolution	0.25[deg] (360[deg]/1,440[steps])
Scan angle	270[deg]
Scan time (Angular velocity)	25[msec/scan] ($\omega_s = 80\pi [\text{rad/s}]$)

5.2 測定データの分類と統合

4.1 節の手法を用いて、レンジセンサから得られる測定データの分類と統合の実験を行った。図 11 に実験環境を示す。センサ装置の設置場所は明石高専の校内の廊下の中央付近であり、レーザ光の回転軸（プリズムの回転軸）は鉛直方向、レーザ光の投光位置は床面より 550[mm]の高さとした。レーザ光の回転速度は製品仕様である $\omega_s = 80\pi$ [rad/s]、プリズムの回転速度は装置が安定して回転できる $\omega_p = -5.72\pi$ [rad/s]に設定した。これにより、走査範囲 $\alpha = 1.47$ [rad](= 84.0[deg])、レーザ光の走査完了回転回数 $N = 5$ 、全方位走査時間 $T = 0.125$ [s]となる。また、測定データの予測値については $A_L = 1190$ [mm]、 $A_H = 2380$ [mm]に設定した。以上の条件でセンサ装置を動作させ、測定データの分類と統合を行った。また、レンジセンサの走査範囲は 270[deg]であり、レーザ光の方位 ϕ およびデータステップ数 i は図 11(c)のように設定した。

図 12(a)~(e)に測定データを各方向に分類した結果、図 12(f)にレーザ直進方向の測定データを統合した結果、図 12(g)にレーザ屈折方向の測定データを統合した結果を示す。結果より、測定データが概ねレーザ直進方向とレーザ屈折方向に分類されていることが分かる。測定データのレーザ直進方向とレーザ屈折方向の境界において、測定データが正しく分類が行われていない箇所が一部存在する。これはプリズムを駆動するモータの回転数の誤差、プリズムの配置誤差等が影響しているものと考ええる。しかし、図 12(b),(c)に示す各測定データの統合過程においては、プリズムの端から遠い測定データを優先的に採用することにより、分類時の不具合の影響が無くなり、各測定データが正しく構築されていることが確認できる。

本手法によって、レーザ直進方向とレーザ屈折方向の測定データを確実に分類するためには、「レーザ直進方向の全測定データが A_L より大きく、かつレーザ屈折方向の全測定データが A_L 以下である。」という条件が成立すれば良い。ただし、これは十分条件であり、図 12(a)~(e)のようにレーザ直進方向の測定データの一部が A_L より小さくても適切に分類される場合もある。本装置を様々な分野に展開するためには、本手法の適用条件を詳細に示す必要があるが、センサ周囲の物体や床面の凹凸の状況など考慮すべき点が多いため、これについては今後の課題としたい。なお、2 方向の測定データに明確な差がなくデータの分類が困難な場合には、その場で、各測定データの差が大きくなるようにセンサの取り付け高さを変更し、モデルを再構築することによって、ある程度対処できるものと考えている。

本センサ装置では、2 方向の全方位距離情報を 0.125[s]毎に更新することが可能である。センサ装置を電動車いすに搭載して法定最高速度の 6[km/h]で走行させれば、およそ 200[mm]進む毎に 2 方向の全方位距離情報が得られ

Fig.11 Experimental environments and conditions for the classification and integration of measurement data. The sensor device is installed in the center of the corridor of NITAC(National Institute of Technology, Akashi College) as shown in figure (a) and (b). The axis of the laser beam accords with the vertical axis, and the height of the laser projector from floor is 550[mm]. The angular speed ω_s of the laser beam is 80π [rad/s], and the angular speed ω_p of the prism is -5.72π [rad/s]. Therefore, the scanning area α is 1.47[rad](=84.0[deg]), and the required number N of laser-beam-rotation is 5. In addition, estimates A_L and A_H of the measurement data are 1190[mm] and 2380[mm]. The scanning range of the range sensor is 270[deg], and the azimuth ϕ of the laser beam and number of the data steps i are set as shown in figure (c).

Fig.12 Experimental results for classification and integration of measurement data. The measurement data L_i for five times classified in two directions is shown in figure (a) - (e). The red lines indicate measurement data in the straight-beam-direction and the green lines indicate measurement data in the refracted-beam-direction. Furthermore, the integrated data in each direction are shown in figure (f) and (g).

ることから、動的な環境下での自律走行に役立てることは十分可能であると考えられる。

5.3 レーザ屈折方向の物体位置の検出

4.2 節の手法を用いて、レーザ屈折方向の物体位置 R_j, H_j を検出し、その精度の評価を行った。図 13 に実験環境を示す。センサ装置の設置場所は大型定盤 (1500[mm]×1000[mm]) の上であり、レーザ光の回転軸は鉛直方向、レーザ光の投光位置は定盤上面より 550[mm]の高さとした。位置 R_j を検出する実験では、被測定物として、アルミ製角パイプ 14 本 (100[mm]×100[mm]×500[mm]・9 本, 100[mm]×100[mm]×1000[mm]・5 本) を図 13 (a) のように配置した。また、位置 H_j を検出する実験では、被測定物として、アルミ製角パイプ 9 本 (100[mm]×100[mm]×1000[mm]) を図 13 (b) のように配置した。なお、レーザ光が照射されるアルミパイプと床の表面には白ケント紙 (厚さ 0.2[mm]) を張り付けている。これはセンサの仕様に明記されている精度保証条件と同一にするためである。また、その他の条件は 5.2 節の実験と同様とした。図 14 にセンサ装置で検出された角パイプの位置 R_j, H_j とその真値を示す。

結果より、角パイプの検出位置 R_j, H_j とその真値は概ね一致していることが確認できる。また、角パイプのエッジ付近で検出位置 R_j, H_j の誤差がともに大きくなっているが、これは、エッジ付近ではレーザ光の広がりによって手前のパイプと奥のパイプにおける反射が同時に起こり、この合成波がレンジセンサに入光したからである (渡辺他, 2012)。この現象は、プリズムを介さないレーザ直進方向の物体検出においても観察される。

同様の位置検出を 10 回行い、各パイプの検出位置 R_j, H_j と真値との誤差の RMS と最大値を求めた。表 3 にその結果を示す。なお、本装置の測定精度を正しく把握するため、角パイプのエッジ付近 (エッジ方向±0.5[deg]) のデータを除外している。結果より、誤差の RMS はおよそ 9[mm]となった。誤差の発生原因は、現在調査中である。

Fig.13 Experimental environments and conditions for detection of objects' positions R_j and H_j in the refracted-beam-direction. The sensor device is installed on the center of a large surface plate. As objects to be measured, aluminum square pipes are located as shown in figure (a) and (b). In order to conform to the accuracy guarantee conditions of the specification sheet, white Kent papers (thickness 0.2[mm]) are put on the surface of aluminum pipes and the surface plate where laser beams are irradiated. Other conditions are the same as the experiments in section 5・2.

Table 3 The RMS and maximum errors of position R_j and H_j in 10 detections of the square pipes. The errors near the edge direction (edge direction ± 0.5 [deg]) are not included. The maximum errors are smaller than errors shown in the sensor specifications.

	RMS error [mm]	Maximum error [mm]
R_j	8.947	26.805
H_j	8.881	23.487

あるが、センサ装置の各部品形状誤差や組立誤差、センサ装置に対する角パイプの位置誤差、レンジセンサ内のレーザ光軸のずれ（製品カタログに記載）等が挙げられる。また、最大誤差については、レンジセンサの仕様にある最大誤差 30[mm]より小さくなっていることが確認できる。

本装置を電動車いすに導入する場合、予めセンサの測定誤差を考慮した手法（例えば、測定物体の膨張処理、車いすの走行軌道の修正等）を行うことによって、一般的な自律走行には問題なく適用できると考える。本装置の測定誤差の低減には、各部品の加工精度と組立精度の向上、レーザ光軸の校正等が必要である。また、予備実験等を通して、測定データ ${}^R L_j$ から物体の位置 R_j , H_j への変換式の補正を行うことも有効な誤差低減法であると考えられる。

Fig.14 Experimental results for detection of square pipes' position R_j and H_j . The red data points indicate the detected positions R_j and H_j , and the blue lines indicate true positions of square pipes. The R_j and H_j almost agree with the true positions. However, the errors of R_j and H_j become big near edge positions of the pipes. This is because laser beams are not reflected at the edge positions and the range sensor cannot receive enough the laser beam.

最後に本装置のレーザ屈折方向の最大検出距離について述べる．レーザ屈折方向の物体検出では，レーザ光がプリズムを通過することによって光量が減少し，センサの最大検出距離が低下することが予想される．本研究では実験を通してレーザ屈折方向の最大検出距離を求める．図 15 に実験環境を示す．レーザ光の光路が長くなるように，センサのレーザ光の回転軸を鉛直方向に対して $29.5[\text{deg}]$ ，白ケント紙が張られた板を水平方向に対して $29.5[\text{deg}]$ だけ傾斜させた．この状態で，センサ装置と板の距離を変えながら，測定データと受光強度データ^{*4}（北陽電機株式会社, 2009）を取得した．また比較のために，プリズムを介さずにセンサで傾斜板を直接測定した場合の測定データと受光強度データも取得した．図 16 にその結果を示す．

結果より，両測定の受光強度は測定データ値の増加に伴って低下していることが確認できる．安定的に測定できる最大距離は，プリズムを介した場合は $13000[\text{mm}]$ ，プリズムを介さない場合は $18000[\text{mm}]$ であったため，これらを最大検出距離と判断した．本装置のレーザ屈折方向の最大検出距離はプリズムを介すことにより約 28% 低下するが，電動車いすで走行面を観察する用途では十分な性能を持っているものとする．

^{*4} 受光した光の強さを表すセンサ内部のデータであり，通常 $0 \sim 4000$ の値となる．本装置に使用しているレンジセンサ (UTM-30LX) はこの受光強度を出力する機能を持つ．

(a) Overall view

(b) Side view

Fig.15 Experimental environments and conditions for determining the maximum detection distance of the sensor device in the refracted-beam direction. To acquire a wide range of measurement data, the sensor device is installed with its laser beam axis inclined to the vertical axis by $29.5[\text{deg}]$, and a board covered with Kent papers is inclined to the horizontal plane by $29.5[\text{deg}]$ as shown in figure (a) and (b).

Fig.16 Experimental results for determining the maximum distance detection of the sensor device in the refracted-beam direction. Intensity data of both laser beam passing through the prism and direct laser beam decrease along with an increase of the measurement data. The maximum detection distance by the laser beam passing through prism is $13000[\text{mm}]$, and the maximum detection distance by the direct laser beam is $18000[\text{mm}]$.

6. 結 論

本研究では、回転するプリズムでレーザー光を屈折させることにより、2方向の走査が可能なレンジセンサ装置の開発を行った。また、センサから得られる測定データとそのモデルを照合することで、簡便に2方向の測定データを分類し、2方向の全方位距離情報を構築する方法を提案した。さらに、レーザー屈折方向の測定データの補正と物体位置への変換式を導いた。検証実験を通して、短時間で2方向の全方位距離情報の構築が行え、一定の誤差の下で、レーザー屈折方向の物体位置の検出が行えることが確認できた。

今後は、解析や実験を通して測定データの分類方法が適用可能な条件を詳細に求める。また、物体位置の検出誤差の低減ために、各部品の加工精度と組立精度の向上、レーザー光軸の校正、さらには測定データから物体の位置への変換式の補正を行う。さらに、本センサ装置を実際の電動車いすに搭載し、障害物回避や自己位置推定等を実現したいと考える。また、本センサ装置では一種類のプリズムを使用しているが、複数のプリズムを使用することで、多方向走査型レンジセンサについても同様に製作可能であると考えられる。

文 献

- Ciddor, P. E., Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied Optics*, Vol.35, No.9 (1996), pp. 1566–1573.
- Fujita, T. and Kondo, Y., 3D terrain sensing by laser range finder with 4-DOF sensor movable unit based on frontier-based strategies, *Engineering Letters*, Vol. 24, No. 2 (2016), pp. 164–171.
- 北陽電機株式会社, SCIP 2.0 準拠 “URG” シリーズ通信仕様書 (2009), pp. 10, 19.
- 北陽電機株式会社, 測域センサ UTM-30LX/30LX-EW, 製品カタログ,
<https://www.hokuyo-aut.co.jp/dl/Catalog_01_UTM-30LX-EW_1479905187.pdf> (参照日 2016 年 12 月 16 日).
- Jung, J., Yoon, S., Ju, S. and Heo, J., Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM, *Sensors*, Vol. 15, No. 10 (2015), pp. 26430–26456.
- Kasarova, S. N., Sultanova, N. G., Ivanov, C. D. and Nikolov, I. D., Analysis of the dispersion of optical plastic materials, *Optical Materials*, Vol.29, No.11 (2007), pp. 1481–1490.
- Kawata, H., Santosh, W., Mori, T., Ohya, A. and Yuta, S., Development of ultra-small lightweight optical range sensor system, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2005), pp.3277–3282.
- Kimoto, K., Asada, N., Mori, T., Hara, Y., Ohya, A. and Yuta, S., Development of small size 3D LIDAR, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2014), pp.4620–4626.
- 松本光広, 吉田智章, 森利宏, 油田信一, 回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.75, No.760 (2009), pp.3314–3323.
- 松本光広, 回転する曲面鏡を用いた二次元レーザ距離センサの三次元化, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.79, No.802 (2013), pp.242–256.
- 中本琢実, 山下 淳, 金子 透, レーザレンジファインダ搭載移動ロボットによる動的環境の 3 次元地図生成, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.106, No.144 (2006), pp.25–30.
- Thrun, S., Hähnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., Baker, C., Omohundro, Z., Thayer, S. and Whittake, W., A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2003), pp.4270–4275.
- 渡辺敦志, 山本明人, 大矢晃久, 非飽和なアナログ信号処理と受光信号の立ち上がり勾配検出による誤検出の少ない測域センサ信号処理系の検討, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集 (2012), pp.2197–2200.
- Wulf, O. and Wagner, B., Fast 3D scanning methods for laser measurement systems, *Proceedings of the International Conference on Control Systems and Computer Science* (2003), pp. 312–317.
- Yan, R., Wu, J., Lee, J. and Han, C., Representation of 3D environment map using B-spline surface with two mutually perpendicular LRFs, *Mathematical Problem in Engineering*, Vol. 2015 (2015), pp.1–14.

References

- Ciddor, P. E., Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied Optics*, Vol.35, No.9 (1996), pp. 1566–1573.
- Fujita, T. and Kondo, Y., 3D terrain sensing by laser range finder with 4-DOF sensor movable unit based on frontier-based strategies, *Engineering Letters*, Vol. 24, No. 2 (2016), pp. 164–171.
- Hokuyo Automatic Co. LTD., URG series communication protocol specification SCIP-version2.0 (2009), pp. 10, 19 (in Japanese).
- Hokuyo Automatic Co. LTD., Scanning laser range finder UTM-30LX/30LX-EW, Product catalog,
<https://www.hokuyo-aut.co.jp/dl/Catalog_01_UTM-30LX-EW_1479905187.pdf> (accessed on 16 December, 2016) (in Japanese).
- Jung, J., Yoon, S., Ju, S. and Heo, J., Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM, *Sensors*, Vol. 15, No. 10 (2015), pp. 26430–26456.
- Kasarova, S. N., Sultanova, N. G., Ivanov, C. D. and Nikolov, I. D., Analysis of the dispersion of optical plastic materials, *Optical Materials*, Vol.29, No.11 (2007), pp. 1481–1490.
- Kawata, H., Santosh, W., Mori, T., Ohya, A. and Yuta, S., Development of ultra-small lightweight optical range sensor system,

- Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2005), pp.3277-3282.
- Kimoto, K., Asada, N., Mori, T., Hara, Y., Ohya, A. and Yuta, S., Development of small size 3D LIDAR, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2014), pp.4620–4626.
- Matsumoto, M., Yoshida, T., Mori, T. and Yuta, S., 3D SOKUIKI sensor module by roundly swinging mechanism and SCIP-3D command system, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.75, No.760 (2009), pp.3314–3323(in Japanese).
- Matsumoto, M., 3D scanning for 2D laser range sensor by rotating curved mirrors, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.802 (2013), pp.242–256(in Japanese).
- Nakamoto, T., Yamashita, A. and Kaneko, T., 3-D map generation in a dynamic environment by a mobile robot equipped with laser range finders, IEICE technical report, Vol.106, No.144 (2006), pp.25–30(in Japanese).
- Thrun, S., Hähnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., Baker, C., Omohundro, Z., Thayer, S. and Whittake, W., A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2003), pp.4270-4275.
- Watanabe, A., Yamamoto, A. and Ohya, A., Signal processing of LIDAR for reducing false-detection by using non-saturated circuit and ranging with rising slope detection, Proceedings of the SICE System Integration Division Annual Conference (2012), pp.2197-2200(in Japanese).
- Wulf, O. and Wagner, B., Fast 3D scanning methods for laser measurement systems, Proceedings of the International Conference on Control Systems and Computer Science (2003), pp. 312–317.
- Yan, R., Wu, J., Lee, J. and Han, C., Representation of 3D environment map using B-spline surface with two mutually perpendicular LRFs, Mathematical Problem in Engineering, Vol. 2015 (2015), pp.1-14.