楕円リフレクタの傾斜転動を利用したレーザの2次元走査*

島岡敬一** 青柳 勲*** 浜口香苗*** 井口紘子*** 尾崎貴志***
藤塚徳夫*** 野々村裕† 明石照久***

Two-Dimensional Laser Scanning Utilizing Inclined Rolling of an Ellipsoidal Reflector

Keiichi SHIMAOKA, Isao AOYAGI, Kanae HAMAGUCHI, Hiroko IGUCHI, Takashi OZAKI, Norio FUJITSUKA,
Yutaka NONOMURA and Teruhisa AKASHI

Compact light detection and ranging (LIDAR) with wide scanning angle is required for the environment monitoring of automobile. We have developed a two-dimensional (2D) laser scanner for the LIDAR system with the horizontal scanning angle of 360 degrees. The scanner is composed of an inclined rolling ellipsoidal reflector equipped with a permanent magnet at the center, a ferromagnetic steel pillar, and six electromagnets. The reflector is attached on top of the pillar by magnetic force; the reflector is translationally-fixed but free in rotational motion. The electromagnets are arranged in a circular pattern under the reflector. Applying current pulses to the electromagnets subsequently, the reflector is rotated by the electromagnetic force. The maximum rotational speed of 85 rps (revolutions per second) was achieved with an elliptical reflector (major axis: 22 mm, minor axis: 18.2 mm, thickness: 0.2 mm) and a permanent magnet (diameter: 4 mm, thickness: 2 mm) at an applied current 28 mA to the electromagnets. We successfully demonstrated 2D laser scan with the horizontal scanning angles of 360 degrees, the vertical scanning angle of 18 degrees, and the rotational speed of 70 rps.

Key words: two-dimensional laser scanning, inclined rolling, ellipsoidal reflector, permanent magnet, electromagnet

1. 緒 言

近年、レーザ光を2次元走査して、自動車と周囲物体との距離を計測する Light detection and ranging (LIDAR) を用いた自動運転、運転支援、駐車支援のシステム開発が行われている^{1)~3)}。LIDAR は、監視範囲にレーザパルスを照射し、対象物体で反射されたパルスを検出するまでの飛行時間 (TOF: Time of flight) の原理を用いて距離を計測する⁴⁾。レーザ光を2次元走査する方法としては、複数のレーザ送受信機から構成されたセンサ自体が回転する方法⁵⁾⁶⁾、1個のレーザ光源とポリゴンミラーや Micro electro mechanical systems (MEMS) スキャナを組み合わせた方法がある^{7)~11)}。我々は、これらの2次元走査法と異なる方法として、1個の楕円リフレクタの傾斜転動 (以下、傾転と記す) により、1本のレーザ光を水平方向に360°、鉛直方向に20°、走査させる傾転ミラーの開発を進めている。この傾転ミラーをドアミラーに組み込んだ場合の自動車周辺の監視範囲を図1に示す。自動車側の監視範囲外に照射されるレーザ光を利用し、受光までに要する時間および鉛直方向の位置をフォトダイオードアレイ等により検出する。その情報に基づいて監視範囲に照射されるレーザ光の軌道を推定することができるので、検出物体の正確な3次元位置情報が得られる。

本稿では、傾転ミラーの構成と目標仕様、楕円リフレクタに永久磁石を吸着させた回転体の傾転動作法と回転特性、レーザ走査特性について報告する。

Fig. 1 Target monitoring area

2. 傾転ミラーの構成と目標仕様

傾転ミラーの構成を図2に示す。光学定盤に設置したZ軸可動ステージに炭素工具鋼鋼材の支柱がネジ留めにより固定されている。この支柱の先端形状は、半径0.2mmの球状である。支柱の周りに位置する6個の電磁石は、プリント基板に半田付けされており、金属製のスペーサを介して光学定盤に固定されている。電磁石上には、ポリカーボネートの基板が両面テープで接着されている。冷間圧延鋼板

* 原稿受付 平成31年2月20日

掲載決定 令和元年6月19日

** 正会員 (株)豊田中央研究所 (愛知県長久手市横道41-1)

*** (株)豊田中央研究所 (愛知県長久手市横道41-1)

† (株)豊田中央研究所 (現、名城大学 理工学部; 愛知県名古屋市中区塩釜口1-501)

製の楕円リフレクタ（以下、リフレクタと記す）の下側中央部に端面が平坦で、厚さ方向に磁化された円柱型のNd-Fe-B系永久磁石（以下、磁石と記す）を磁力のみで吸着させた回転体が支柱上に載置されている。支柱と磁石も磁力のみによって吸着されている。磁石端面の中心には、支柱の先端に引き寄せられる磁力が働く。そのため、支柱の先端に磁石端面の中心が保持される。

傾転ミラーの目標仕様を表1に示す。傾転ミラーを用いたLIDARは、5m遠方の緑色等を検出するため、鉛直走査角度の分解能は 2° （5m遠方で17.5cmに相当）とした。回転体に要求される回転速度は、LIDARのフレームレートと1フレーム中の回転数の積で決定される。フレームレートは、10とした。また、1フレーム中の回転数は、鉛直走査角度 20° を鉛直走査の角度分解能 2° で除した10回転とした。これらにより、回転体の回転速度の目標値は、100rps (rps: revolutions per second) とした。

3. 回転体の傾転動作法

提案する構造によって、支柱上の上方から照射されるレーザ光の2次元走査がいかんして実現されるかを説明する。まず、図3を用いて磁力によるリフレクタの動作について説明する。コイル①に電流を流すとその電磁力によってリフレクタが引き込まれ、コイル①側に傾いた状態となる（図3(a)）。続いて、隣のコイル②に電流を流すと、リフレクタがコイル②に引き込まれてその傾き方向もコイル②側へ移動する。さらに、電流を流すコイルを③から⑥に順番に切り替えると、リフレクタの傾き方向を右回りに移動させていくことができる（図3(b)～(f)）。以上の操作を繰り返せば、リフレクタは基板表面を転がりながら回転し続ける。次に、水平走査について説明する。リフレクタの傾き角度が 45° になる寸法とする。そのときリフレクタに上方（Z軸方向）からレーザ光を照射すれば、反射光は水平（XY平面）に近い角度に照射される。さらに、上述の回転動作を行うことで、図3(g)のように水平方向に反射光の走査が実現できる。

Table 1 Target specifications of the inclination rolling mirror

Items	Target values
Horizontal scanning angle of the laser beam	360 degrees
Horizontal scanning angle resolution	2 degrees
Vertical scanning angle of the laser beam	20 degrees
Vertical scanning angle resolution	2 degrees
Rotational speed of the rotator	100 rps

rps: revolutions per second

次に、鉛直走査について説明する。図4にリフレクタの動作に係わる座標と寸法の定義を示す。原点からリフレクタと基板の接触点（以下では単に、接触点と記す）に向かう方向をX'軸とする（図4(a)）。X軸とX'軸の角度を θ とする。 θ は、レーザ光の水平反射方向となるため、水平走査角度とみなすこともできる。Y'軸方向から見た状態を図4(b)に、さらに、その拡大図を図4(c)に示す。リフレクタと基板の角度を ϕ とすれば、リフレクタに反射されたレーザ光のX'軸に対する照射角度 ϕ は、 $\pi/2 - 2\phi$ より得ることができる。 ϕ は、式(1)で表される。

$$\phi = \phi' + \phi_0 \quad (1)$$

ただし、 ϕ' は接触点から支柱頂点を結ぶ直線とX-Yのなす角度である。また、 ϕ_0 は、支柱頂点から接触点を結ぶ直線と、リフレクタ表面のなす角度である。磁石厚さ t_m を用いて、 ϕ_0 は、 $\phi_0 = \arctan(t_m/R(\alpha))$ として求められる。リフレクタ上から見たときの接触点の位置をリフレクタ中心から見た角度 α で定義する（図4(b)右上の投影図）。また、その位置におけるリフレクタ半径を $R(\alpha)$ と定義する。リフレクタの長軸半径と短軸半径をそれぞれ R_1 、 R_2 すれば、 $R(\alpha) = \sqrt{(R_1 \cos \alpha)^2 + (R_2 \sin \alpha)^2}$ である。さらに、支柱頂点と接触点の距離を $\tilde{R}(\alpha)$ とおく。このとき、 ϕ' は、式(2)で与えられる。

Fig. 2 Configuration of the inclination rolling mirror

$$\phi' = \arcsin \frac{h}{\tilde{R}(\alpha)} \quad (2)$$

とめると ϕ は、 α の関数として、式(3)で表される。

$$\phi(\alpha) = \arcsin \frac{h}{\sqrt{R(\alpha)^2 + t_m^2}} + \arctan \frac{t_m}{R(\alpha)} \quad (3)$$

ただし、 h は、支柱高さ。 $\tilde{R}(\alpha) = \sqrt{R(\alpha)^2 + t_m^2}$ なので、ま

Fig. 3 Rotation principle of proposed the inclination rolling mirror. (a)-(f): step-by-step schematics of the rotation, and (g): horizontal scan by the rotating reflector

Fig. 4 Coordinates and dimensions of the inclination rolling mirror. (a) Top view, (b) side-view, and (c) its close-up image

また、反射光の鉛直照射角度 φ は、式(4)のようになる。

$$\varphi(\alpha) = \frac{\pi}{2} - 2 \left(\arcsin \frac{h}{\sqrt{R(\alpha)^2 + t_m^2}} + \arctan \frac{t_m}{R(\alpha)} \right) \quad (4)$$

式(4)は、 $0 < R(\alpha) < \sqrt{h^2 - t_m^2}$ の範囲で有意であり、この範囲では、 $R(\alpha)$ に対して単調増加関数である。上述のリフレクタ回転動作時(図3)に、リフレクタと基板に滑りが無いと仮定すれば、回転動作に伴って接触点の位置 α も変化していくと考えられる。つまり、長軸上に接触点に来たときは、 $R(\alpha)$ が大きくなり、その結果、 φ も増加して反射光は、より上に照射されることになる。短軸上に来たときには、逆に $R(\alpha)$ は小さくなり、 φ も減少する。このようにして、レーザ光の鉛直方向走査が実現される。

以上の水平走査と鉛直走査を組み合わせることで、水平・鉛直の2次元走査を行うというのが、本スキナーのコンセプトである。次に、この原理によるレーザ照射角度の軌跡 (θ, φ) の理論式を導出し、その軌跡を調べる。接触点の位置 α が微小量 $d\alpha$ だけ移動し、同時に傾き方向 θ も $d\theta$ だけ変化した場合を考える。このとき、リフレクタ縁上の接触点の移動距離 dr は、式(5)で表される。

$$dr = \sqrt{dR^2 + (Rd\alpha)^2} \quad (5)$$

また、基板上の接触点の移動距離 dl は、式(6)で表される。

$$dl = \sqrt{d(\tilde{R} \cos \phi')^2 + (\tilde{R} \cos \phi' d\theta)^2} \quad (6)$$

リフレクタと基板の間に滑りが無いとすれば、 $dr = dl$ なので、式(7)のようになる。

$$\sqrt{dR^2 + (Rd\alpha)^2} = \sqrt{d(\tilde{R} \cos \phi')^2 + (\tilde{R} \cos \phi' d\theta)^2} \quad (7)$$

式(7)を辺々2乗し、 $dR = R'(\alpha)d\alpha$ 、 $d(\tilde{R} \cos \phi') = d/d\alpha(\tilde{R} \cos \phi') \cdot d\alpha$ を用いて整理すれば式(8)が得られる。

Fig. 5 Motion characteristics of proposed scanner with a typical design. (a) $d\theta/d\alpha$, (b) trajectory of (θ, φ) with seven rotations

$$\frac{d\theta}{d\alpha} = \frac{\sqrt{R'^2 + R^2 - \left[\frac{d}{d\alpha}(\tilde{R} \cos \phi') \right]^2}}{\tilde{R} \cos \phi'} \quad (8)$$

よって、初期状態を $\theta = \alpha = 0$ とすれば、 θ は、 α の関数として、式(9)のように求められる。

$$\theta(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{\sqrt{R'^2 + R^2 - \left[\frac{d}{d\alpha}(\tilde{R} \cos \phi') \right]^2}}{\tilde{R} \cos \phi'} d\alpha \quad (9)$$

φ も式(4)において、 α の関数として導出されているので、式(4)と式(9)から媒介変数 α によって照射角度の軌跡 (θ, φ) が求められる。例として、今回、設計・試作した寸法である、 $R_1 = 11\text{mm}$ 、 $R_2 = 9.1\text{mm}$ 、 $h = 5.6\text{mm}$ 、 $t_m = 2\text{mm}$ の場合の $d\theta/d\alpha$ と軌跡を図5に示す。図5(a)より、この設計寸法では、 θ は α に対して平均1.17倍程度早く増加することが分かる。つまり、水平走査を1周する毎にリフレクタは、基板に対して $360^\circ \times (1 - 1.17^{-1}) \approx 52^\circ$ 回転する。この回転によって、軌跡は1周毎にずれてゆく。その結果、図5(b)のように稠密な2次元走査が実現できる。

4. 傾斜ミラーの特性評価

回転体の重さや磁石の磁力、電磁石の駆動力が傾斜動作に及ぼす影響について調査するため、磁石直径、コイル印加電流を変化させた場合の回転体の回転特性を測定した。

表2に実験条件を示す。リフレクタの長軸半径(R_1)11mmと短軸半径(R_2)9.1mm、支柱高さ(h)5.6mm、磁石厚さ(t_m)2mmの組み合わせにおいて、回転体の傾き角度は、 ϕ_{min} が 40.4° 、 ϕ_{max} が 49.3° となり、レーザ光の鉛直走査角度は、 17.8° となる。レーザ光の鉛直走査角度の目標(20°)は満たさないが、今回は、傾斜動作の課題を明らかにすることを目的としているので、表2の組み合わせにより実験を行った。

4.1 回転体の回転特性

4.1.1 実験方法

傾斜ミラーの駆動系は、直流電源と電流を印加する電磁石を切り替えるスイッチ回路とスイッチ回路を駆動するField Programmable Gate Array (FPGA) 基板で構成した。

Table 2 Experimental parameters

Items		Values
Reflector size	Major axis radius (R_1)	11 mm
	Minor axis radius (R_2)	9.1 mm
	Thickness	0.2 mm
Pillar height (h)		5.6 mm
Magnet size	Diameter	3, 4, 5, 6, 7, 8 mm
	Thickness (t_m)	2 mm
Current applied to the coil		12, 19, 22, 25, 28 mA

図6に各電磁石のコイルに印加する電流(12mAの印加例)の切り換えパターンを示す。電流パルスは、矩形波である。電流パルスの周波数 f (Hz)の逆数が1回転に要する時間となり、 f の値が回転速度(rps)となる。コイル①～⑥に流す電流パルスの幅 p と f を同時に変更することによって、回転体の回転速度を変化させることができる。実験の流れは、まず、厚さ0.2mmのリフレクタの中央に直径3mmの磁石を吸着させ、コイル印加電流を12mAに設定し、回転体を回転させる。そして、回転速度を1rpsずつ増加させ、回転が停止した直前の回転速度を上限回転速度として記録した。続いて、コイル印加電流を19, 22, 25, 28mAの順に増加し、回転体の駆動力を変化させた場合の上限回転速度の測定を行った。この流れで、直径4, 5, 6, 7, 8mmの磁石を用いた回転体の順に測定を行った。表3に各直径の磁石の表面磁束密度と吸着力を示す¹²⁾。実験では、同一のリフレクタを使用し、各直径の磁石を着脱して測定を行った。各磁石直径については、3個の測定を行った。次項の実験結果では、3個の磁石を、それぞれA, B, Cと呼び、例えば、直径3mmの磁石を用いた回転体No.は、3A, 3B, 3Cと記した。

4.1.2 実験結果

図7に直径3mm、厚さ2mmの磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。コイル印加電流12mAにおける回転体No. 3A, 3B, 3Cの回転は、それぞれ45rps, 42rps, 40rpsで停止した。これは、コイル印加電流12mAにおける回転体の駆動力では、電磁石の回転駆動信号に回転体が追従できなかったためである。コイル印加電流を増加すると、回転体の上限回転速度は28mAまで、ほぼ直線的に増加した。これは、回転体の駆動力が増加し、電磁石の回転駆動信号に回転体が追従し易くなったことが要因である。コイル印加電流28mAにおける回転体No. 3A, 3B, 3Cの上限回転速度は、それぞれ77rps, 79rps, 78rpsであった。

図8に直径4mm、厚さ2mmの磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。コイル印加電流25mAまでは、3個の回転体の上限回転速度は、ほぼ直線的に増加した。コイル印加電流25mAにおいて、回転体No. 4A, 4Bは、80rps, 84rpsで回転は停止した。回転体No. 4Cは、85rpsで支柱から外れて飛んだ。さらに、コイル印加電流を28mAに上げると、回転体No. 4A, 4B, 4Cは、それぞれ81rps, 86rps, 85rpsで、支柱から外れて飛んだ。この原因は、回転体の重心と回転中心(図2-b参照)が離れていることにより、回転中の回転体に発生する遠心力が支柱と磁石の吸着力よりも大きくなったためであると推定される。図8におけるコイル印加電流25mAと28mAの上限回転速度は、回転体が支柱から外れて飛ぶ直前の値をプロットした。図9に直

Table 3 The surface magnetic flux density and adsorption force of each magnet diameter (magnet thickness: 2mm constant)

Magnet diameter mm	Surface magnetic flux density mT	Adsorption force kg
3	380	0.29
4	353	0.37
5	333	0.46
6	308	0.56
7	268	0.60
8	261	0.78

Fig. 6 Switching pattern of current applied to the coil of each electromagnet

Fig. 7 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 3 mm, magnet thickness: 2 mm)

Fig. 8 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 4 mm, magnet thickness: 2 mm)

径5mm、厚さ2mmの磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。コイル印加電流12mAにおける回転体No. 5A, 5B, 5Cの上限回転速度は、それぞれ

62rps, 62rps, 61rps であった。コイル印加電流を 19mA に上げると、回転体 No. 5A, 5B, 5C の上限回転速度は、10～13rps 増加し、それぞれ 73rps, 72rps, 74rps となった。さらに、コイル印加電流を 22mA に上げると、回転体 No. 5B の上限回転速度は、僅かに 2rps 増加し、74rps となった。しかし、回転体 No. 5A, 5C は、75rps, 76rps においてビビリ音（以下、異音と記す）が発生した。これは、回転数の増加により、上述した遠心力が大きくなるので、回転中心であった磁石中心が支柱からずれる。これにより、磁石と支柱の接点が磁石中心周りを移動して回転体が回転するため、支柱と磁石が擦れて発生する異音と推定される。上述した直径 4mm の磁石を用いた回転体の場合、支柱と磁石の吸着力よりも遠心力が大きかったため、回転体が支柱から外れて飛んだ。しかし、直径 5mm の磁石を用いた回転体では、75rps 程度の回転で発生する遠心力よりも支柱と磁石の吸着力が大きいため、回転体が飛ぶことなく、磁石中心周りで回転したと考えられる。コイル印加電流 25mA と 28mA において、回転体 No. 5A, 5B, 5C は、それぞれ 77rps, 75rps, 76rps で、異音が発生した。異音の発生は、正常な回転ではないので、25mA と 28mA のコイル印加電流における上限回転速度は、異音が発生した直前の値をプロットした。以降の実験結果についても異音が発生した場合は、同様にプロットした。

図 10 に直径 6mm、厚さ 2mm の磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。コイル印加電流 12mA における回転体 No. 6A, 6B, 6C の上限回転速度は、

Fig. 9 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 5 mm, magnet thickness: 2 mm)

Fig. 10 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 6 mm, magnet thickness: 2 mm)

それぞれ 63rps, 62rps, 61rps であった。コイル印加電流を 19mA に上げると、回転体 No. 6A, 6B, 6C の上限回転速度は、僅かに 1～3rps 増加し、3 個の回転体は全て 64rps となった。コイル印加電流 22mA 以上では、3 個の回転体は、65～68rps の間で異音が発生した。

図 11 に直径 7mm、厚さ 2mm の磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。回転体 No. 7A の上限回転速度は、コイル印加電流 12mA, 19mA において、共に 56rps であった。コイル印加電流 22mA 以上では、57rps あるいは 58rps で異音が発生した。回転体 No. 7B は、コイル印加電流 12～28mA において、57rps で異音が発生した。一方、回転体 No. 7C は、コイル印加電流 12～28mA において、異音は発生せず、コイル印加電流 12～25mA の範囲での上限回転速度は、55rps であった。この結果は、55rps を超える電磁石の回転駆動信号に回転体が追従できなかったことを意味する。なお、コイル印加電流 28mA では、57rps で回転体が支柱から外れて飛んだ。

図 12 に直径 8mm、厚さ 2mm の磁石を用いた回転体の上限回転速度とコイル印加電流の関係を示す。回転体 No. 8A は、コイル印加電流 12～28mA において、異音は発生しなかった。コイル印加電流 12mA において、上限回転速度は 58rps であり、コイル印加電流を 28mA に上げて上限回転速度は 60rps と、僅かに 2rps の増加に止まった。この結果は、60rps を超える電磁石の回転駆動信号に回転体が追従できなかったことを意味する。回転体 No. 8B は、コイル印加電流 12～28mA において、45rps で異音が発生した。回転体

Fig. 11 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 7 mm, magnet thickness: 2 mm)

Fig. 12 Relationship between upper limit rotation speed of the rotator and applied current (magnet diameter: 8 mm, magnet thickness: 2 mm)

No. 8C は、コイル印加電流 12~28mA において、全て 43rps で異音が発生した。本実験における 3 個の回転体の上限回転速度には、ばらつきが見られた。この原因については、磁石の真円度、支柱と接触する磁石の表面状態および磁石とリフレクタを吸着させた際の中心ずれ等の違いが考えられるが、明らかではない。

表 4 に各直径の磁石を用いた回転体の上限回転速度の最高値と重量を示す。上限回転速度の最高値は、各磁石直径における 3 個の回転体の平均値である。磁石直径が 4mm を超えると、磁石直径の増大に伴い回転体の上限回転速度が低下した。この原因は、回転体の重量増加に伴い支柱と磁石およびリフレクタ周縁と基板の接触部の摩擦力が増加するため、回転体の回転動作を妨げていると考えられる。また、磁石直径が大きくなると、電磁石との距離が近くなり、磁石と電磁石の吸引力が増加するため、回転体が電磁石に引き寄せられる力が強くなり、磁石と支柱の接点が磁石中心からずれ易くなる。これらにより、磁石直径が大きくなるほど、低い回転速度での回転の停止や異音が発生したと推定される。今回、回転特性を測定した回転体の中では、直径 4mm の磁石を用いた回転体 No.4B が 85rps と最も高い上限回転速度となった。そこで、この回転体を用いて、レーザ光の 2 次元走査の動作確認を試みた。

4.2 レーザ走査特性

4.2.1 実験方法

図 13 にレーザ走査特性の評価系を示す。傾転ミラーの支柱を中心にして半径 246mm、高さ 200mm のアクリル製の円筒スクリーンを設置した。円筒スクリーンの内側には、レーザ光の走査幅を計測するための方眼紙を貼り付けた。レーザ光源には半導体レーザ（波長 655nm、出力 1mW、クラス 2）を使用した。レーザ光を傾転ミラーの直上から照射すると、リフレクタで反射したレーザ光の軌道が円筒スクリーン上に映し出される。鉛直走査角度 φ_S は、式 (10) により算出できる。

$$\varphi_S = 2 \tan^{-1} \frac{W}{2L} \quad (10)$$

ここで、 L は、支柱から円筒スクリーンまでの距離 (246mm)、 W は、円筒スクリーンに投影されたレーザ光の鉛直方向の走査幅である。

4.2.2 実験結果

回転速度を 30, 50, 70, 80rps に変えた場合のレーザ光の軌道を撮影した写真を図 14 に示す。撮影露光時間は、1 秒である。図 14 (a)~(c) に示した 30rps から 70rps までの回転速度において、回転体が 1 周回転する毎のレーザ光の水平方向のずれ量は、一定であり、鉛直方向のレーザ光の走査幅は 78mm であることが確認できた。この走査幅は、鉛直走査角度 18° に相当し、表 2 に示した傾転ミラーを構成する各部材の寸法から求めた鉛直走査角度 (17.8°) とほぼ一致した。一方、図 14 (d) に示した 80rps の回転速度においては、レーザ光の水平方向のずれ量は、不規則であった。また、鉛直方向のレーザ光の走査幅は、30rps から 70rps までの回転速度の結果に比べ、上端側で 11mm 広がっていることがわかった。これは、磁石中心が支柱から 0.68mm ずれて

Table 4 The highest upper limit rotation speed and weight of the rotator with magnets of each diameter. The highest upper limit rotation speed is the average value of the three rotators in each magnet diameter

Magnet diameter mm	Highest upper limit rotation speed rps	Rotator weight g
3	78	2.07
4	83	2.16
5	75	2.26
6	66	2.39
7	56	2.54
8	48	2.71

(a) Exterior photograph of evaluation system

(b) Enlarged photograph of a inclination rolling mirror

Fig. 13 Evaluation system for laser scanning characteristics

回転体の傾き角度 θ_{min} が 39.1° になったためであると考えられる。

この結果より、回転体が回転中に支柱から外れて飛んだ、異音が発生した回転速度よりも前に磁石と支柱の接点が磁石中心周りを移動して回転体が回転していることがわかった。

5. 結 言

自動車の自動運転、運転支援、駐車支援への応用に向けて、レーザ光を 2 次元走査する傾転ミラーを考案し、諸特性を測定した。まず、磁石を楕円リフレクタに吸着させた回転体の回転速度に及ぼす磁石直径、駆動力依存性を測定した。その結果、直径 4mm、厚さ 2mm の磁石を用いた回転体は、コイル印加電流 28mA において、測定した中では最も高い回転速度 85rps が得られた。次に、この回転体を用いてレーザ光の走査を行った結果、回転速度 70rps において、水平 360° 、鉛直 18° の 2 次元走査を達成した。しかし、回転速度 80rps において、レーザ走査の軌道が不規則になっ

Fig. 14 Result of 2D laser scan at each rotational speed using the rotator of 4A

た. この原因は, 回転中の回転体に発生する遠心力により, 磁石中心が支柱からずれて磁石と支柱の接点が磁石中心周りを移動して回転体が回転したためである. 今後は, 回転中の回転体に発生する遠心力を低減させる回転体構造を提案し, 回転速度の増加を図る.

参考文献

- 1) 松ヶ谷和沖: 自動車を支えるセンシング技術, デンソーテクニカルレビュー, **21** (2016) 13.
- 2) R. Thakur: Scanning LIDAR in advanced driver assistance systems and beyond, IEEE Cosum. Electron. Mag., **5**, 3 (2016) 48.
- 3) 青木啓二: 自動運転車の開発動向と技術課題 2020 年の自動化実現を目指して, 情報処理, **60**, 4 (2017) 229.
- 4) C. Niclass et al.: A 100-m range 10-frame/s 340×96-pixel time-of-flight depth sensor in 0.18- μ m CMOS, IEEE J. Solid-State Circuits, **48**, 2 (2013) 559.
- 5) 大前学, 菅沼直樹, 清水浩: レーザレーダーを用いた自動車のインテリジェント化と自動運転, レーザ研究, **38**, 8 (2010) 565.
- 6) 加藤晋: 走路環境認識と経路計画, 国際交通安全学会誌, **40**, 2 (2015) 41.
- 7) T. Ogawa et al.: Pedestrian detection and tracking using in-vehicle lidar for automotive application, in proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium (2011), TuPoster2T1.23.
- 8) N. Quack, J. B. Chou and M. C. Wu: Self-aligned VCSEL-microlens scanner with large scan range, MEMS2012, Paris, FRANCE (2012) 656.
- 9) S. T. S. Holmstrom, U. Baran and H. Urey: MEMS laser scanners: a review, J. Microelectromech. Syst., **23**, 2 (2014) 259.
- 10) X. Lee and C. Wang: optical design for uniform scanning in (MEMS)-based 3D imaging lidar, Appl. Opt., **54**, 9 (2015) 2219.
- 11) G. Kim and Y. Park: LIDAR pulse coding for high resolution range imaging at improved refresh rate, Opt. Express, **24**, 21 (2016) 23810.
- 12) https://www.neomag.jp/products_navi/ndfeb/ndfeb_magdir.html