

# 光リンクセンサーネットワークのための自動光軸追尾システムの改良

新木 智博\* 香川 直己\*

Improvement of Laser-tracking for sensor network with Free Space Optics

Tomohiro SHINKI\* Naoki KAGAWA\*

## ABSTRACT

We study the automatic tracking function for the optical axis of a beam. This system can be used for movable nodes for sensor network with Free Space Optics. However, there was a problem that the beam was not recognized correctly, so we improved the image processing. To make a receive-node move along the trajectory of the arc, we combined translational and rotational motion. As a result, a receive-node was able to track the optical axis along the arc centering on a emit-node without being off image sensor. In this paper, we discuss the detail of the above study.

キーワード：光軸追尾，画像処理，円弧移動，センサーネットワーク，光自由空間

**Keywords: Optical axis tracking, Image processing, Arc motion, Sensor network, FSO**

## 1. まえがき

大気中の二酸化炭素，メタンガス等の温室効果ガス濃度を赤外光線の共鳴吸収による分光分析を用いたリアルタイムでの測定と，情報通信を同時に行うためのセンサーネットワークシステムの研究を継続的に続けている[1]。屋外での運用にあたって，ネットワークのノードを移動しながらの通信，測定を想定している。リンクがノードから外れないように，自動でビームの軸(光軸)を追尾するシステムを開発している。先行研究では，実機を想定した実験で並進移動と円弧移動が可能となった[2]。しかし，自動光軸追尾システムの再現にあたり，ビームの移動方向とは逆の方向に装置が移動し，光軸から外れてしまう異常動作が見られた[3]。光軸追尾に関しては，特定の曲率に沿って円弧移動するため，ノード間距離が変化に対応できない問題があった。本論文では，光軸が外れる異常動作の原因究明し，ノード間距離の変化に対応した自動光軸追尾システムの開発と性能評価を行ったので報告する。

## 2. 光リンクセンサーネットワーク

### 2. 1 提案システムの全体像

提案システム(図 1)は，ノードの役割を持つ移動ロボットを 2 つ以上で構成することを考えている。ノードは，光空間通信用の半導体レーザを搭載した移動ロボットである。このノードから，別のノードに向けて光空間通信用に変調したレーザ光線を放射し，別のノードが受光し，復調することによってノード間を光でリンクし，ネットワークが構築され，さらにノードを可動化させる。これにより，データを通信するだけでなく，ノード間の空間上にあるメタンガスや二酸化炭素等の温室効果ガスの濃度を広い範囲で計測可能となる。このシステムは，臨時回線の構築，人命救助，土砂災害予測への適用を考えている。自動光軸追尾システムを導入する目的は，ノードが移動時に，光リンクが外れかけてしまう，各ノードの位置角度を自動制御することで，通信の途絶を防ぐためである。

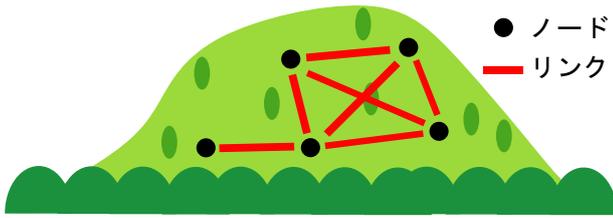


図1 光リンクセンサーネットワークの全体図

Fig.1 Overall view of sensor network with FSO.

## 2. 2 LAS 法によるガス濃度測定原理

ガスの共鳴吸収現象は、レーザー光  $\nu[\text{cm}^{-1}] (=1/\lambda)$ , 規格出力射出光パワー  $P_o(\nu)$ , 規格化受信光パワー  $P_T(\nu)$  とすると,

$$P_T(\nu) = P_o(\nu) \exp[-x(\nu)] \quad (1)$$

で表されるランベルト・ベールの法則に従うことが知られている.  $\exp[-x(\nu)]$ の項はガスによる減衰に相当し,  $x(\nu)$ は絶対吸収量と呼ばれ, ガス濃度に依存する量である.  $x(\nu)$ を陽とするため, 両辺に対数を取り移行すると,

$$x(\nu) = \ln P_o - \ln P_T \quad (2)$$

となる.

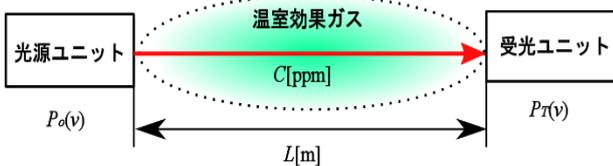
この絶対吸収量  $x(\nu)$ はガス固有の吸収係数  $\alpha(\nu)[(\text{ppm} \cdot \text{m})^{-1}]$ , ガス計測濃度  $C[\text{ppm}]$ , 光路長  $L[\text{m}]$ とすると,

$$x(\nu) = \alpha(\nu)CL \quad (3)$$

の関係にあり, 絶対吸収量はガスのカラム濃度に比例する. ガスのカラム濃度とは大気中に存在するガス濃度とレーザー光線の伝播光路長の積である(図2).

## 2. 3 通信原理

本システムは BPSK 方式を用いる. BPSK 変調による符号通信では, 2 値の符号に対して, 相互に逆位相の変調信号を割り当てることになる. 符号通信と濃度計測を同時に行う原理の模式図を図3に示す. ベースラインが基本波で, 吸収線が基本波の2倍の周波数で復調される. 変調信号が逆位相に変容した場合, ベースラインに対する波形は, 位相の変容信号がそのまま復調され, 吸収線の場合は2倍の周波数で位相によらずに変容前と同じ波形が復調される. そのため, 符号通信をベースラインで, 絶対吸収量を吸収線で検出することができる.



$$\text{カラム濃度} = C \times L [\text{ppm} \cdot \text{m}]$$

図2 濃度光路長積

Fig.2 The concept of product of concentration and optical path length.

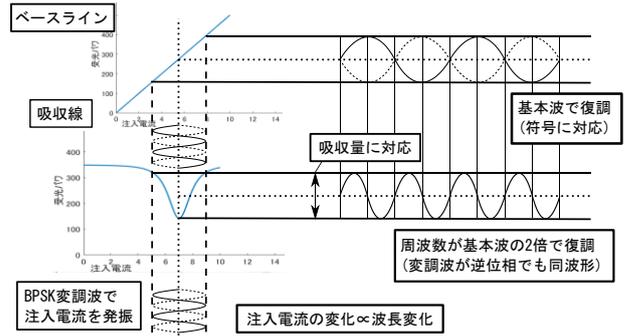


図3 濃度計測と通信を同時に行うための模式図

Fig.3 Schematic diagram of the system to operate.

## 3. ビーム領域の抽出方法の改良

### 3. 1 ビーム中心座標算出方法

ビーム中心座標算出には, 画像処理, 画像解析の機能を持つライブラリである OpenCV を用いたソフトウェアを使用した. 取得した画像の HSV 情報に対して二値化処理を行い, 取り出した領域を基に中心座標を算出する. 図4に理想モデルを示す. 図4-(a)の元の画像から, 図4-(b)のように二値化処理で抽出し, 図4-(c)のようにビーム中心座標を算出する.

### 3. 2 ビーム中心座標の異常検知について

先行研究では, HSV 情報の緑の色相を抽出している [2]. 緑の色相を抽出する理由は, 撮像素子に強い光が入射する際, 撮像素子の取り込める光が飽和して黒ずんでしまい, その領域の色相が緑色となるためである. 一方で, 抽出した画像から求めた重心がビームの内側を示さない異常検知が見られる場合があり, 光軸が移動する向きとは逆の方に追尾してしまう問題点があった. 図5-(a)は, 異常検知が生じたときに撮影した画像であり, 緑の点は画像処理によるビームの中心の出力結果である. ビームが入射している領域を抽出していない所が見られる.

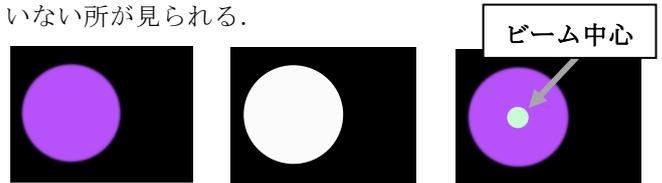
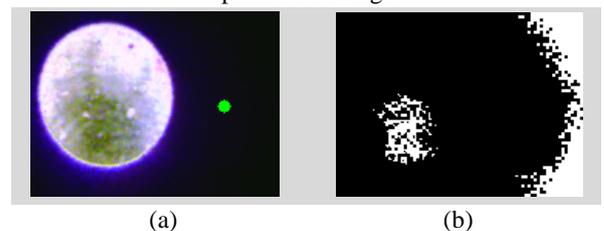


図4 (a)元の画像 (b)二値化後画像 (c)出力画像

Fig.4 (a)Cross section. (b)Binary image. (c) Post-processed image.



(a)

(b)

図5 (a)撮影画像 (b)二値化後画像

Fig.5 (a)Cross-section (b) Binary image

### 3. 3 画像処理の改良

図 5-(a)の持つ HSV 情報となる色相, 彩度, 明度の 3 つの各パラメータ分布を図 6 に示す. 先行研究で使われた HSV 情報の抽出パターンは色相:30~55, 彩度:85~250, 明度:15~152 である[1]. 色相のデータ(図 6-(a))を見ると, ビーム境界面の外側の画角右端の黒い領域が抽出パターンを満たしていたため, 誤って検出されていた. しかし, この領域の色相のビーム境界面の内側と先ほどの領域を明度(図 6-(c))で比較した時, ビームの内側の方が大きい. そこで, ビーム径の内側の明度を満たすように範囲を変えることで, ビーム径の外側の領域を抽出しないようにすることができる. また, 図 5-(a), (b)を比較した時, 二値化後の画像は, ビーム径の大部分を抽出していないため, ビーム径内側の領域を全体的に抽出する為に, ビーム径内の色相を大きく 3 種類の組み合わせ(表 1)に分けて抽出し(図 7-(a)~(c)), 抽出した 3 つの領域を 1 つに統合した(図 7-(d)). 設定した組み合わせを表 1 に示す. 抽出したい色は, 図 6-(a)のビーム内の領域の色相を指している.

### 3. 4 比較結果

#### 3. 4. 1 光軸静止時の中心の測定

波長 405nm の可視光レーザのビームが撮像素子内で結像し, 且つ, 静止させ, 従来と新しく開発した本研究の画像処理の 2 つのアルゴリズムが内蔵するプログラムを起動させた. その時のそれぞれの経過時間と中心座標の特性を求めて比較した. 図 8 の結果から従来と本研究の画像処理は, 中心座標の安定性の差が出ており, 表 2 より従来に比べて, 本研究の画像処理の方が分散は小さいことが判る.

表 1 抽出する HSV のパラメータ範囲

Table.1 Parameter range of HSV to extract.

組み合わせ	色相 (0~180)	彩度 (0~255)	明度 (0~255)
①黄~黄緑	24~45	0~255	118~196
②緑	50~100	0~255	101~255
③青~赤	122~179	0~100	189~255

表 2 ビーム中心の分散

Table.2 Variance of Calculated beam center.

従来		本研究	
x 座標[-]	y 座標[-]	x 座標[-]	y 座標[-]
2.2	1.4	0.084	0.003

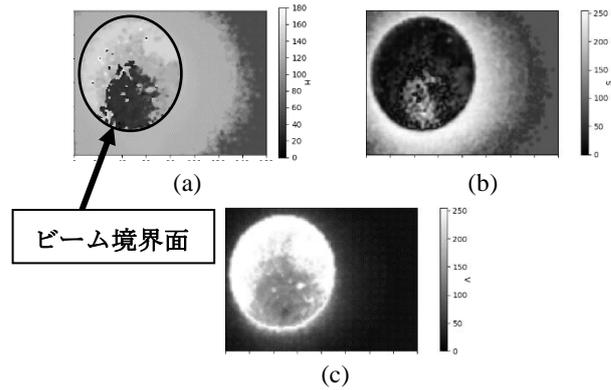


図 6 HSV カラーデータ分布 (a)色相 (b)彩度 (c)明度

Fig.6 Distribution of HSV color data.

(a)Hue (b)Saturation (c) value

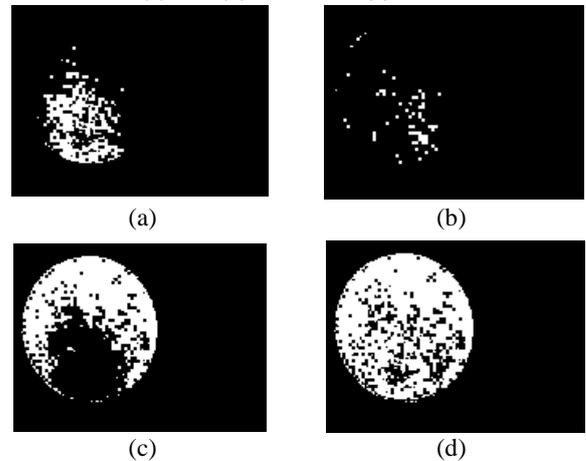
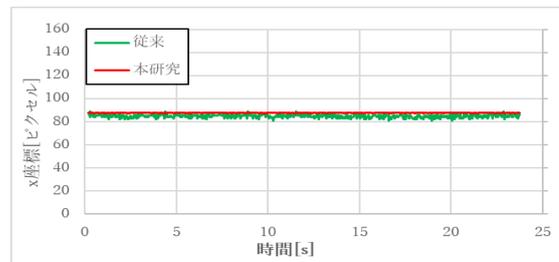
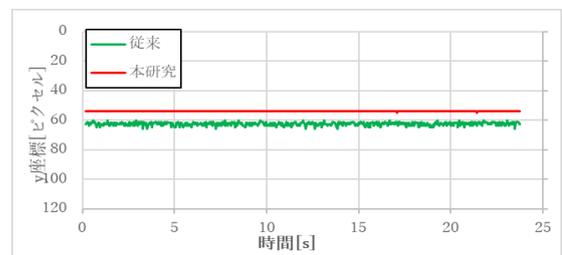


図 7 (a)色相① (b)色相② (c)色相③ (d)合成画像

Fig.7 (a)Hue① (b)Hue② (c)Hue③ (d)Combined image



(a)



(b)

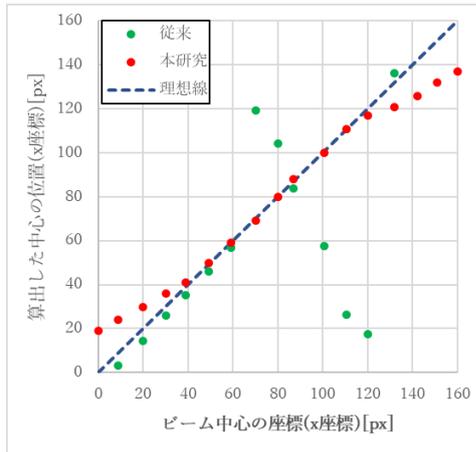
図 8 光軸静止時のビームの中心の時間変化

(a)x 座標 (b)y 座標

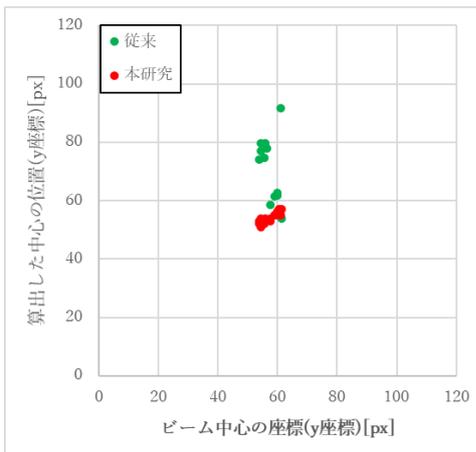
Fig.8 Temporal change of the center of the beam when the optical axis is stationary. (a) x axis (b) y axis

### 3. 4. 2 光軸水平移動時の中心の測定

3.4.1 の測定で使用した可視光レーザを用いる。撮像素子に結像するビームの中心が、画角の右端から左端まで  $x$  軸方向に 10 ピクセル毎に移動した時の中心座標を測定した。図 9-(a)より、中心の  $x$  座標における従来の画像処理では、ビームの中心が画角の端付近の時は、中心の位置は理想線に沿っているが、ビームの中心が画面の中央付近の時に、中心の位置は理想線から外れており、ビームが移動する方向とは逆方向に追尾している。一方、本研究の画像処理は、ビームの中心が画角の端付近の時には、中心の  $x$  座標は、理想線から外れているものの、概ね理想線に沿っており、ビームが移動する方向と同じ方向に追尾している。図 9-(b)より、中心の  $y$  座標において従来の画像処理に比べて、本研究の画像処理は、実際のビーム中心  $y$  座標に近いデータが得られていることが分かる。



(a)



(b)

図 9 光軸水平移動時の実際のビーム中心座標と算出した中心座標 (a)  $x$  座標 (b)  $y$  座標

Fig.9 The center coordinates of Actual beam and calculated beam when the optical axis moves horizontally.

### 3. 5 考察

本研究での画像処理は、図 7-(d)のように、ビーム径の形を抽出しているため、その領域の真ん中にビーム中心が置かれる。抽出の増減による中心座標への影響が小さく、安定している。従来の画像処理では、図 5-(b)のように、2つの抽出した領域が呈しており、これらの領域がお互いを引っ張り合い、中心座標がばらついたと考えられる。このことから、3.4.1 の測定結果(図 8)のような結果が得られたと考えられる。次に、3.4.2 の測定結果(図 9)から、ビームが画角の中心付近に来た時に、従来の画像処理ではビームが動く方向と逆の方向に追尾している。これは、ビームが画角の中心付近に来た時に、カメラゲインが小さくなり、図 5-(b)と図 9-(a)から、画角の縁の部分抽出してしまい、中心が引っ張られてしまうためだと考えられる。以上から、新しく適用した本研究の画像処理は、従来の画像処理と比較して、安定した中心座標が出力されており、移動する光軸が画角から外れるまで追尾可能となったと考える。

## 4. 光軸追尾アルゴリズムの改良

### 4. 1 光軸追尾のための光軸検知方法

レーザ光線を最も効率よく受光するためには、光軸と撮像素子面の法線が一致し、且つ、光軸と撮像素子の中心が一致することである。法線が一致しているかどうかは、ビームの楕円情報から、光軸と撮像素子の中心が一致しているかどうかは、ビーム中心座標からそれぞれ自動で計算する。また、撮像素子がビームを取りこむ量の評価に、ビームの面積を用いる。楕円情報、ビーム中心、ビーム面積の情報を得るために画像処理を用いる色情報は、HSV とグレースケールを採用した。図 10-(a)はビーム断面を示している。HSV 情報から、表 1 のパラメータを用いて二値化した画像が図 10-(b)である。この画像から、ビームの中心座標と、図 10-(c)のような楕円情報を算出する。グレースケール情報から二値化した画像からは、ビーム面積を算出する。



図 10 (a)元の画像 (b)二値化後画像 (c)出力画像

Fig.10 (a) Cross section (b) Binary image

(c) Post-processed image

#### 4. 2 光軸追尾アルゴリズムの詳細

光軸追尾アルゴリズムの振る舞いは、①～④の処理を繰り返す。

① グレースケール情報と HSV 情報の両方を使用して画像を二値化する。ビーム断面は、二値化データが特定の条件を満たす領域によって定義される。グレースケール及び HSV 情報を使用して二値化された領域は、それぞれ領域 A、領域 B とする。

② モーメント処理によって、領域 A の面積と、領域 B の中心座標を算出する。

③ 領域 B の輪郭を検出し、輪郭から楕円を求める。図 10-(c)は求めた楕円を描画したものを示す。楕円算出で、長軸と短軸を出力するため、この二つのデータから楕円の長軸と短軸の比を求める。

④ 楕円の長軸と短軸の比が、設定値より小さい場合、並進移動で光軸を追尾し、設定値以上の場合、回転移動で光軸を追尾する。

図 11 に光軸の追尾方法を示す。並進移動では、光軸追尾システムの運動ベクトルは撮像素子の法線ベクトルに対して垂直に移動する。移動の方向は、領域 A の面積が増加する方向へ移動する。回転移動では、光軸追尾システムの静止軸を中心に回転する。回転方向は、領域 B の中心座標が撮像素子の中心に一致する方向へ移動する。ビームが撮像素子から外れないようにビーム出射側ノードが回転する。このとき、受光側ノードは図 12 の通りに移動する。直線の矢印は並進移動、円弧状の矢印は回転移動を表しており、並進移動と回転移動を交互に行っている。この一連の動作により、円弧移動が可能となり、受光面は光軸に垂直な位置を維持する。出射側ノードの回転軸を中心に、出射側ノードと受光側ノードとの間の距離と等しい曲率半径を維持したまま、円弧の軌跡に沿って移動することができると考えられる。先行研究では、ビームが撮像素子から外れた時に円弧移動をする。一方、本研究ではビームを捕捉しながら円弧移動するため、光軸と撮像素子面の法線が調整可能である。

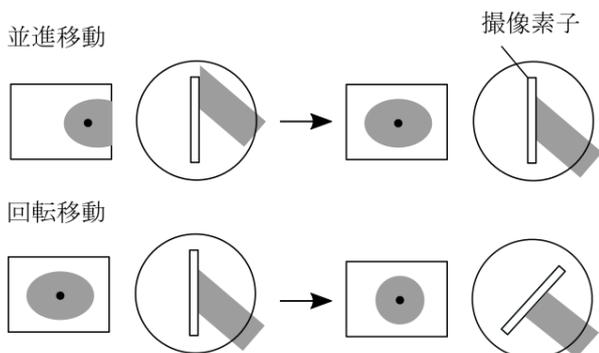


図 11 光軸追尾システムの並進移動と回転移動

Fig.11 Translational and rotational motions of tracking system.

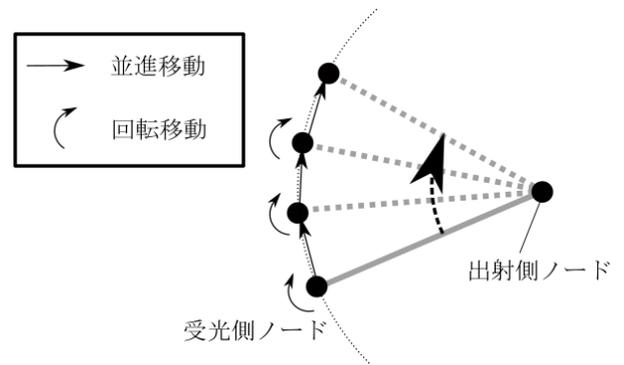


図 12 光軸追尾システムの受光側の円弧移動の方法

Fig.12 Motion of receive-nodes.

#### 4. 3 光軸追尾の性能評価

##### 4. 3. 1 実験装置

光源は波長 405nm の可視光レーザを用いた。出射側ノードには、超音波モータを使用した回転ステージが置かれ、その上に可視光レーザとビームエキスパンダが搭載されている(図 13-(a))。ビームエキスパンダを用い、且つ、可視光レーザの波長が短いものを使用することで、ビームの広がりを抑えつつ伝搬することができる。受光側ノードには、三輪駆動のオムニホイールロボットが置かれ、その上に集光用のレンズと撮像素子が搭載されている。性能評価に用いた受光側ノードの移動体は、オムニホイールロボットプラットフォーム(15001B)にモータ制御ユニットと画像認識用ユニットを搭載したもの(図 13-(b))を使用した。各 DC モータの駆動には、モータドライバ(TA7291P)を使用している。モータドライバの制御には、Arduino nano を用いる。移動体の回転軸上に凸レンズを設置する。伝搬したビームは凸レンズを通り、撮像素子面上に結像される。

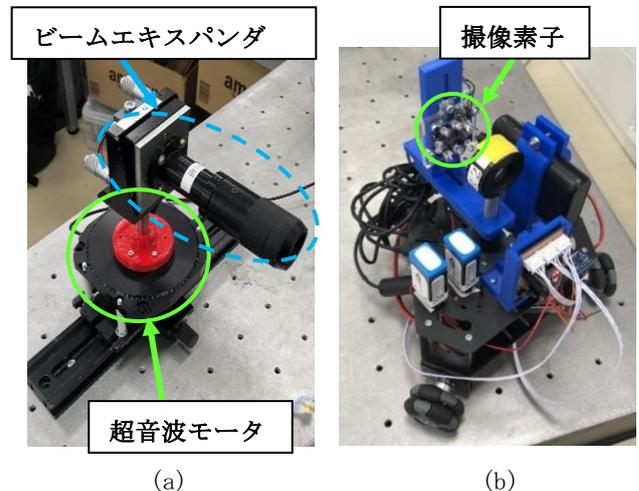


図 13 (a)出射側ノード (b)受光側ノード

Fig.13 (a) Device of emit-node (b) Device of receive-node

### 4. 3. 2 実験方法

実験方法は、図 14 のように出射側ノードと受光側ノードが距離  $R$ [m] 離れて向かい合わせになるように移動体を光軸上に設置し、光軸トラッキングのプログラムを実行した。その後、光軸の向きは回転ステージ(PI 社 U-651.03)を用いて  $8.72 \times 10^{-4}$ [rad] 間隔で振幅  $\theta$ [rad] の 1 往復で左右に動かした。この時、受光側ノードの真上に取り付けたカメラから算出した重心座標の軌跡を測定した。

### 4. 3. 3 実験結果

図 15 には、受光側ノードの軌道の測定結果を示す。半径方向に対する変動誤差は、 $R=2.75\text{m}$  の時は  $3.65 \times 10^{-4}$ ,  $R=0.35\text{m}$  の時は  $5.23 \times 10^{-3}$  である。図 16 は、図 15 の  $x$  軸と出射側ノードと受光側ノードを通る線とのなす角の時間変化を示す。理想線は、出射側ノードの回転角度を表している。実際の角度と理想角度との間の標準偏差は  $R=2.75\text{m}$  の時は  $3.48 \times 10^{-3}$ ,  $R=0.35\text{m}$  の時は  $1.46 \times 10^{-2}$  である。以上から、追尾精度の誤差の原因には、回転移動が影響していると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、提案しているセンサーネットワークに搭載する光軸追尾機能の概要について説明し、光軸を検出するための画像処理の改良、光軸を追尾するための光軸追尾アルゴリズムの改良を行った。光軸検出の改良により、実際のビームが静止時でもビームの中心を安定して算出することが可能となり、実際のビームの中心を撮像素子の端から反対側の端まで水平方向に移動してもビームの中心を補足することができた。光軸追尾アルゴリズムの改良により、出射側ノードのビームの向きがその場で回転した時、受光側ノードは概ね出射側ノードと中心とした円弧に沿って光軸を追尾可能となったが、出射側ノードと受光側ノードとの間の距離が短い時の理想円弧における半径方向の変動誤差と追尾精度の誤差が大きいことが分かった。今後は、ピッチ方向への光軸追尾を可能にし、光軸を全方位で追尾可能にすることを考えている。

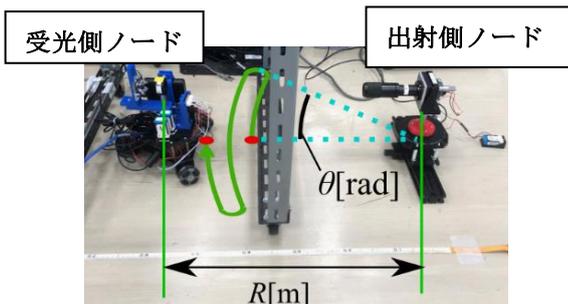
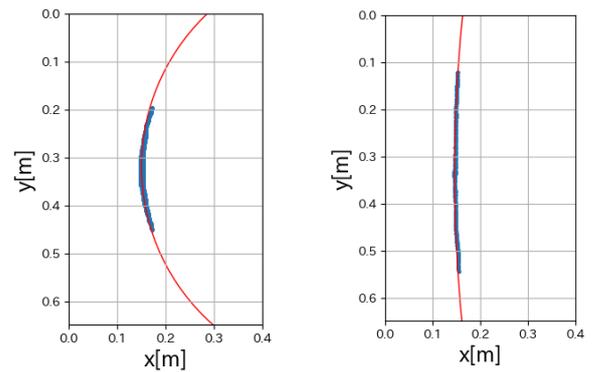


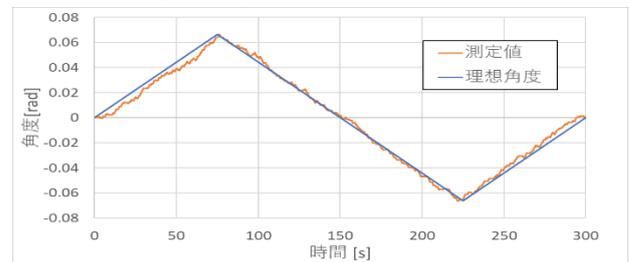
図 14 受光側ノードの軌跡の測定  
Fig.14 Measuring trajectory of receive-nodes.



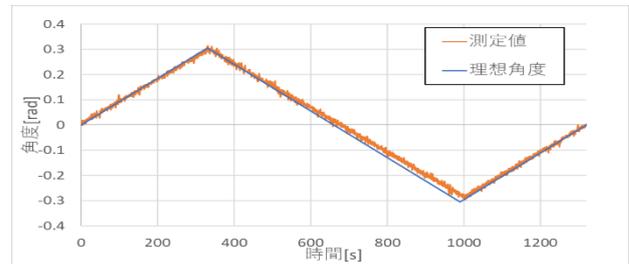
(a)  $R=2.75\text{m}$   $\theta=6.63 \times 10^{-2}\text{rad}$  (b)  $R=0.35\text{m}$   $\theta=3.05 \times 10^{-1}\text{rad}$

図 15 受光側ノードの軌道

Fig.15 Trajectory of receive-nodes.



(a)  $R=2.75\text{m}$   $\theta=6.63 \times 10^{-2}\text{rad}$



(b)  $R=0.35\text{m}$   $\theta=3.05 \times 10^{-1}\text{rad}$

図 16 出射側ノードと受光側ノードを通る線と図 15 の  $x$  軸とのなす角の時間変化

Fig.16 Temporal change of angles between the line connected to an emit-node with a receive-node and the  $x$ -axis in Fig.15.

## 参考文献

- [1] N. Okumoto, N. Kagawa “Development and Test of a Spectrometer with FSO” The Paper of Technical Meeting on “Instrumentation and Measurement”, IEE JapanIM-16-051, pp.7-12(2016)
- [2] 新木 智博, 香川 直己 “光リンクセンサーネットワークのためのビームトラッキングシステムの開発”, 第 37 回レーザーセンシングシンポジウム, P-16 (2019)
- [3] N. Kagawa, T. Shinki “Development of Laser-tracking System for Spectral sensing with FSO” The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, p.459 (2020)