論文

映像水中光伝送のための光ビームのずれ検出に関する基礎実験

Fundamental Experiment for Detecting Misalignment of Visible Light Beam used for Underwater Optical Video Transmission System

学生会員 扇田恵梨菜[†], 学生会員 宮前圭輔[†], 正会員 前田幹夫[†]
Erina Ogida[†], Keisuke Miyamae[†] and Mikio Maeda[†]

あらまし 深海の潜水艇からテレビ生中継を実現するための映像の光伝送システムを提案する。潜水艇の近くに中継装置を置き、潜水艇で撮影した映像を青色LEDの光で中継装置に送り、洋上の船まで光ファイバでさらに伝送する。このシステムでは出射ビームが常に中継装置を捉えることができるように光ビームのずれを検出する手法が重要となる。そこで任意の方向からの光を受信できるように中継装置を球形とし、表面に貼った再帰性反射材で反射した光を潜水艇側の複数の受光器で受光し、その強度を比較することでずれの方向を検出する工夫をしている。本論文は、球形の中継装置を試作する前段階として、円板状の再帰性反射材を移動させて光送信装置でずれを検出する基礎実験について述べている。受光電力に関する理論値との比較を行い、良い一致をみた。

キーワード：水中映像伝送、再帰性反射材、青色LED、可視光、位置ずれ検出

1. ま え が き

近年、可視光を使って空間伝送を行う研究開発が盛んであり、映像信号を空気中で数km程度伝送できることが報告されている¹⁾²⁾。

一方、水中では電波の減衰が大きいため、音波による通信が一般的であり、映像のような広帯域な信号の伝送は困難と考えられてきた。可視光は電波より減衰が小さいので、ダイバー同士の会話やインターネットの画像伝送に利用する実験が行われている³⁾。概ね2010年以前の水中光伝送の研究では伝送距離が著しく短かったが、近年、数十m程度の距離を想定した水中光伝送の研究が海外で盛んに報告されている^{4)~6)}。今後もLEDの高出力化、低廉化の進展とともに伝送距離が延びて行くものと期待される。ところで、海中では海流等の外乱を受けても光送受信器間の光ビームが外れないようにするためのトラッキング技術が重要であるが、これらの報告では検討されていない。本論文は、映像信号の伝送用の可視光を活用した光ビームのトラッキング技術について提案している。本技術を用いることにより、移動体間の安定な光通信路を確保できるようになるだけでなく、暗い海のなかでも光受信器を迅速に探せるようになると思われる。

最近の撮像技術には目をみはるものがあり、ダイオウイカのような深海に棲む未知の生物の姿も家庭のテレビで見

ることができるようになった。しかし、伝送技術がないために撮影した映像を記録して持ち帰る必要があり、浮上して再生するまでに多くの時間がかかるという問題がある。

本研究の目的は海中を動き回る潜水艇からテレビ生放送をする伝送技術を開発することである。潜水艇から洋上の船までの長い距離を可視光で伝送することは伝送損失が大きく困難である。潜水艇と船とを光ファイバで結べば、伝送損失の課題を解決できるが、潜水艇の移動性能を損なうばかりでなく、光ケーブルが切れる恐れもある。

映像信号の伝送候補として想定する可視光のなかで青色は外洋では最も損失が小さい。青色レーザ光を用いた実験によると、浅い水深では季節や場所で減衰量は大きく変化するが、100 mを超える水深では0.2 dB/m程度と小さく、かつ安定となる⁷⁾。そこで、潜水艇の移動を妨げないように、潜水艇の近くに中継装置を置き、映像信号を海中で短距離伝送し、さらにこれを洋上の船まで光ファイバを用いて長距離伝送するシステムを提案した⁸⁾。光源にはLD (Laser Diode) と比較して人体に及ぼす危険性が低く、戻り光による電気光変換特性劣化がないLED (Light Emitting Diode) を用いている。これまでに、高い指向性が得られる小型のLEDを多数配置した光送信装置を試作し、FM方式による映像信号の伝送実験を行い、良好な画像を得ることに成功した⁹⁾¹⁰⁾。

このシステムでは潜水艇も中継装置も動くのを前提とするため、中継装置が光を捉え続けられるように、光送信装置が光ビームのずれの方向と程度を知って、出射方向を制御するトラッキング技術が重要となる。

2014年3月25日受付, 2014年6月7日再受付, 2014年6月26日採録
[†]工学院大学

(〒163-8677 新宿区西新宿1-24-2 TEL 03-3340-2764)

従来の光空間伝送システムは固定地点間の長距離伝送用に開発されたものが多く、光ビームを細く絞っている¹¹⁾。これを移動体間伝送に適用しようとすると、トラッキング可能な範囲が狭く、かつ一旦ビームが外れると再度捕捉するのに時間を要するという問題がある。

そこで本論文では、 $\pm 5^\circ$ 程度の広い光ビームを扱うとともに、中継装置の表面を再帰性反射材で覆っておき、光送信装置の放射光の一部を反射させることで、ビーム幅の倍の $\pm 10^\circ$ 程度の広い範囲でずれの方向を検出する手法を提案する。すなわち、本手法のねらいは、伝送距離を10m程度に短くすることによって生じる送受信器間の光電力のマージンを光ビーム幅の拡大に振り替えることにより、外れにくく、再捕捉しやすい安定なトラッキング手法を実現することである。本論文では、中継装置に見立てた再帰性反射材の円板を光送信装置の正対位置から動かし、反射光の電力を測定する基礎実験について述べている。また、理論値と比較を行い、提案手法の妥当性について述べている。

2. 提案システム

提案システムの構成を図1に示す。潜水艇内の送信装置では映像で変調したFM (Frequency Modulation) 信号と音声で変調したPWM (Pulse Width Modulation) 信号を多重して光送信器の青色LEDに加えて光信号に変換する。光送信器は平面上に配置した多数のLEDから構成されるが、この図では説明をわかりやすくするため、LEDは直線上に配置した3個とし、映像、音声は中央のLED2に加えるものとする。

中継装置は任意の方向から到来する光を受信できるように球形とする。表面に多数のPD (Photo Diode) を配置し、光送信器から届いた光をレンズで集光して電気信号に戻す。これらを合成した信号は、LDで光信号に変換されて、洋上の受信装置まで光ファイバで伝送される。受信装置ではFM信号とPWM信号が復調されてそれぞれ映像と音声を得られる。

中継装置はレンズ以外の表面を再帰性反射材で覆うことで暗闇のなかでも容易に発見できるようにしている。再帰性反射材は光の到来方向に光を戻す性質を持たせたシート状の反射材で、道路標識等に用いられている。再帰性反射材の性能評価に用いられる二つの角度について図2で説明する。図2 (a) は、車のヘッドライトが発した光が道路標識の再帰性反射材に当たって運転者に観測される様子を示している。送信光から測った受信光の角度 ϕ は観測角¹²⁾と呼ばれる。再帰性反射材の反射光は極めて狭い観測角の範囲に集められるように設計されており、運転者は他の車からの反射光に幻惑されることなく、遠くからでも標識を認識することができる。

図2 (b) は複数の車線を走る車から発した光が路側の道路標識に当たって各々の車に戻る様子を示している。標識の法線から車に対して測った角度 θ は入射角¹²⁾と呼ばれて

図1 提案する水中光伝送システムの構成

図2 再帰性反射材の角度

いる。再帰性反射材は最もセンターライン寄りの車線を走行する車からでも反射性能が落ちにくいよう、広い入射角に対応できるように設計されている。

再帰性反射材の持つ狭い観測角特性と広い入射角特性という特徴を活かすことにより、光ビームが中継装置に対してどちらにどの程度ずれているかを検出することができる。

図1において、LED2の上下にLED1とPD1、およびLED3とPD3の2組の光送受信器対を配置し、LEDに正弦波を加えて光信号とする。LED1から中継装置に届き、再帰性反射材で反射された光はPD1で受信される。この反射光は狭い観測角内に戻るのでPD3には受信されない。そこでPD1とPD3の正弦波の電力を比較すれば光ビームのどちらにどの程度ずれているかを計算することができる。この結果に基づいて光送信器の向きを制御すればトラッキング動作をさせることができる。

光ビームのずれ検出の原理をさらに詳細に図3で説明する。LED1, LED3から目標距離の10mにおいて光電力計で測定した光強度の分布をそれぞれ赤と青色で示す。中継装置が正対位置から左側に 10° に相当する1.76mずれている状態を示している。再帰性反射材の反射性能は広い入射角にわたって平坦であるとともに、反射光は狭い観測角内だけに戻るので、PD1にはLED1の放射分布で決まる光強度A, PD3にはLED3の放射分布で決まる光強度Bに比例した光電力が受信される。この差からずれの方向と程度を知ることができる。一例として、LED1とLED3の距離を0.5mとすると、想定する $\pm 5^\circ$ の光ビーム幅ではPD1の受光電力はPD3よりも約7dB大きくなる。図3の左側には3個のLEDへの変調信号のスペクトラムを、右側には2個の

図3 光ビームのずれ検出原理

PDの出力スペクトラムを示す。

ところで、無線では搬送波を変調して伝送を行うが、送ろうとする信号に応じた帯域幅を確保しなければならず、帯域幅内の雑音によって伝送特性が制限を受ける。提案する位置ずれ検出用に用いる信号は正弦波すなわち無変調である。したがって、狭い帯域幅のバンドパスフィルタを通過させてから振幅を検波すれば、雑音の影響をあまり受けずに高感度な検出が可能である。正弦波の周波数が安定であれば、バンドパスフィルタの通過帯域幅を狭めるほど高感度化を図ることが可能で、この点が提案方式の大きな特徴である。

3. 伝送理論

実験で用いた光伝送系を下り方向（光送信器から中継装置）、上り方向（中継装置から光送信器）に分けて図4に示す。下り方向を説明する図4(a)において、一つ当たりの送信光電力が、 P_T のLED（半値半幅 $\theta_{1/2}$ ） N 個が光を放射することを考える。光送信器から θ 方向の距離 d の位置で、受光面積 A の電力計を用いて測定した受光電力 P_r は放射パターンをLambert型¹³⁾と想定すると式(1)で表すことができる。

$$P_r = \frac{m+1}{2\pi} \cdot \frac{P_T}{d^2} A \cdot N \cos^m \theta \quad (1)$$

m は指向性を示すパラメータで $\theta_{1/2}$ と式(2)の示すような関係にあり、指向性が鋭いほどは大きくなる。

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (2)$$

図4 光伝送実験の配置

上り方向を説明する図4(b)において、距離 l 、反射性能 B 、面積 S の平面の反射材からの反射光を光送信器の位置で測定した時の受光電力 P_s は式(3)で表すことができる。

$$P_s = \frac{BS \cos \theta}{l^2} P_r \quad (3)$$

ここで式(3)の l は式(1)の d よりも短い、この差が光電力に及ぼす誤差はずれの検出に想定する最大角度 10° においても0.13 dBである。この値はPD1とPD3の電力差7 dBと比べて十分に小さいため、以下では同一のものとして扱い、 d と表記することとする。

B は、入射光に対する反射光の照度比として定義する。再帰性反射材を照らす照度は $P_r \cos \theta / A$ と書くことができる。このとき、 d がずれと比べて十分に大きく、照度が面積 S 内で等しいと見なせる場合には、光送信器上での照度はこれに BS/d^2 を乗じたものとなる。 P_s は P_r と同じ面積 A の受光器の光電力計で測定されるため、式(3)において、 P_s は A によらず、 S が大きいほど増えることがわかる。 $\cos \theta \approx 1$ なので、 $BS > d^2$ であれば、 $P_s > P_r$ とすることができる。

再帰性反射材の反射性能 B は入射角 θ の依存性があることが、平面の反射材について式(4)、式(5)のように解析されている¹⁴⁾。ここに、 B_0 は $\theta=0$ における B の値である。

$$f(\theta) = 1 - 2 \tan^2 \theta \quad (0^\circ \leq \theta < 22^\circ) \quad (4)$$

$$f(\theta) = \frac{4}{3} \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \tan \theta \right) \quad (22^\circ \leq \theta < 39^\circ)$$

$$B = B_0 f(\theta) \quad (5)$$

式(4)を図5に示す。この図より、広い入射角の範囲で減衰は小さく保たれていることがわかる。特に提案システムで想定する入射角が 10° 以下では減衰量はこの図から0.3 dB以内である。この値はPD1とPD3で測られるLED放射特性の差は約7 dBと比べて十分に小さいため、再帰性反射

図5 再帰性反射材の反射性能の入射角依存性

図6 光送信器のLEDの配置

材の入射角の影響は無視することができる。

4. 伝送実験

4.1 LEDの射出特性

図6に光送信器のLEDの配置を示す。表1に示す反射型LEDを基板当たり2 cm 間隔で20 灯配置し、この基板を8 枚並べて160 灯としている。全部を点灯する場合と中央の図6①に配置したLED1 灯だけを点灯する場合の2 通りについて、 $d = 10\text{ m}$ において表2に示す光電力計を用いて、 P_r を測定した。正対位置から水平、垂直方向に離れた位置で測定を行い、結果を図7および図8にそれぞれ2 dB 毎の等高線として示す。

図7から、1 灯での放射パターンは中心部では四角錐のように頂点からほぼ一様に減少することがわかる。0.5 m 以上離れた周辺部では低下の斜度には方向性があり、例えば手前の方向には急峻に低下していることもわかる。一方、図8から、160 灯の放射パターンは任意の方向に1 灯の場合よりも緩やかに低下していることがわかる。このように均整のとれた山型の放射パターンが得られることは、光ビームのずれの方向と程度を正確に検出する上で重要である。

多数のLEDを用いることで放射パターンが滑らかになる理由を図9で説明する。放物線の鏡の焦点に点光源を置く

表1 光送信器のLEDのパラメータ

項目	数値
波長	470nm(青色)
順方向電流	20mA
出射光電力 P_t	+7dBm
半値半角 $\theta_{1/2}$	3度
外形	約9mm×9mm (反射型)

表2 光電力計のパラメータ

項目	数値
測定波長	380nm～450nm (青紫色専用Si-PD)
受光素子面積 S	$1 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$ 10mm×10mm
測定範囲	-50dBm ～ +20dBm
測定確度	±5%

図7 1灯時の受光電力

図8 160灯時の受光電力

と図9 (a) のように平行なビームが得られることが良く知られている。LEDチップは最低でも0.3 mm 以上の長方形をしているため、外形8 mm の鏡の焦点に置いたときに点光源とみなすことができない。そのため図9 (b) のように鏡で反射した光は内側に進む。この結果、半値角が3° 程度に広がるとともに、放射パターンが長方形となる。ここでLEDチップの取り付け位置が図9 (c) のように上にずれた場合には光ビームは下方にずれる。図ではわかりやすいようにLEDチップの大きさを誇張して示している。

また、焦点面上で光軸の回転方向にLEDチップがずれて取り付けられると長方形の放射パターンが回転する。このようにLEDチップが焦点からわずかにランダムにずれて取り付けられた多数のLEDの光を合成すると、各LEDの放射パターンが合成されて周辺部では広がり、中央部では低下するとともに、任意の方向で滑らかに低下する特性となると考えられる。

図7, 図8における水平方向の受光電力を理論値と合わせて図10に示す。1灯の場合には、橙色で示した測定値は点線で示した $\theta_{1/2}=3^\circ$ の理論値と半値半角に相当する ± 0.5 m以内で良い一致をしていることがわかる。0.5 m以上では上で述べた理由により、理論値からの逸脱が認められる。緑色で示した160灯の測定値は点線で示した $\theta_{1/2}=3^\circ$ ではなく実線で示した $\theta_{1/2}=5^\circ$ の理論値とほぼ一致することがわかる。LEDの個数を変化させて実験したところ、概ねLEDが10個以上とすると出射パターンが滑らかになって、 $\theta_{1/2}$ が概ね 5° とみなせるようになることがわかった。そこで以降は $\theta_{1/2}$ を 5° として扱う。

4.2 反射材のずれに対する検出特性

反射材を用いた光ビームずれの検出法の妥当性を検証する実験を行った。提案システムの中継装置は球形であり、本来は再帰性反射材を貼った球で実験するべきである。し

図12 送信器側での受光電力

かし球面状に曲げた反射材からの反射特性の理論解析は行われておらず、実験値との比較が困難なことから、本実験では式(4)のように理論解析が行われている平面の再帰性反射材を用いた。

図6に示したLEDのうち塗りつぶした中央部の36灯を点灯させ、半径0.3 mの円板の反射材を光送信器から10 mの位置で水平方向に移動させた。正対位置から円板の中心までのずれを横軸として光電力計で中継装置側での受光電力を測定し、その結果を図11に示す。測定値は実線で示した理論値と概ね一致していることがわかる。

次に、光電力計を図6②の位置に移して送信器側での受光電力を測定し、その結果を図12に示す。光送信器に戻った光も実線で示した理論値とほぼ一致していることがわかる。

図11と図12を比べると、まず光送信器で光受信器とほぼ等しい受光電力が得られていることがわかる。これは、LEDからの出射光は広がって光受信器に到達するため照度が小さいが、広い面積で反射した光はすべてLED近傍の狭い範囲に絞られて戻るため光送信器側では照度が大きくなるためである。

図13 観測角と送信側における受光電力の関係

次に、図12の測定値は理論値と概ね一致していることがわかる。ずれの最大角度に相当する1.76 mにおいて

前述のPD1とPD3を0.5 m離して配置した場合、PD1には1.51 mのずれに応じた約-32 dBmが、PD3には2.01 mのずれに応じた約-38 dBmの受光電力が測定されている。この差の6 dBは理論値の7 dBより約1 dB小さいが、ずれの方向と程度を知るのには充分であると考えられる。また、ずれが2.25 mと受信器半径0.3 mの7倍となるような大きな場合においてもずれに対して単調減少となっていることからずれの検出には有効であると考えられる。

なお、図12ではずれがない時より0.25 mずれた方の受光電力が高い。この理由は検討中であるが、受光器における受光電力は図11からわかるように、0.25 mだけずれた位置に制御が行われたとしても受光電力の劣化は無視できるものと考えられる。

4.3 反射材の観測角に対する受光特性

反射材からの反射光が、送信したLEDの周囲にどの程度絞られて到達しているのかを把握する実験を行った。図6①にある1灯のLEDだけを点灯させ、10 m前方の反射材と送信器上の光電力計を正対させ、今度は再帰性反射材を動かさずに、点灯しているLEDの基板を矢印で示した水平方向に移動させて、図6②の位置に置いた光電力計で受光電力を測定した。直径45 cmおよび60 cmの2通りの円板の反射材を用いて、横軸を観測角として測定した受光電力を図13に示す。

この図から観測角が0.1°から0.8°まで0.7°増えただけで受光電力が約10 dB減ることがわかる。観測角0.8°は光送信器上では約14 cmに相当する。このことからLEDの出射光は10 m先で広がっても、その反射光は光源の位置の狭い周囲に集光されて戻るということができる。

5. むすび

今回の光ビームの位置ずれ検出に関する基礎実験により、以下の知見を得た。

- (1) 多数の反射型LEDで光送信器を構成することで均整のとれた放射パターンが得られ、安定な位置ずれの

検出が可能となる見通しを得た。

- (2) 中継装置を想定した円形の再帰性反射材を水平方向に移動させる実験を行い、光ビームの中心が半径の7倍以上ずれた場合でもずれの方向と程度を検出できる。

今後は、球面状の再帰性反射材における反射特性の理論解析と実験装置の試作を行い、両者の比較を行う予定である。

本研究は、平成24年度の放送文化基金の助成を受けて行ったものである。

最後に、高指向性LEDを用いた光送信器の試作で御協力いただいた東芝ライテック(株)友定様、FM変復調器について御指導いただいた本学根岸講師に感謝する。

〔文 献〕

- 1) 島田, 武田: “可視光通信の動向とITSへの応用”, 東芝レビュー, 64, 4, pp.27-30 (2009)
- 2) 春山: “可視光通信”信学誌, 94, 12, pp.1055-1059 (2011)
- 3) 中川正雄監修, 可視光通信コンソーシアム編: “可視光通信の世界—LEDで拓く「あかりコミュニケーション」”, ケイブックス (2006)
- 4) H. Brundage: “Designing a wireless underwater optical communication system”, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (2010)
- 5) Z. Ahmad and R. Green: “Link Design for Multi-hop Underwater Optical Wireless Sensor Network”, 7th. Int. Conf. system and Networks communication (ICSNC), pp.65-70 (2012)
- 6) B. Tian, F. Zhang and X. Tan: “Design and Development of an LED-based Optical Communication System for Autonomous Underwater Robots”, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp.1558-1563 (2013)
- 7) 海洋研究開発機構報道発表: “レーザ海中距離測定システムの海域基礎試験に成功” (July 4, 2011)
- 8) 前田: “空間光伝送システム”, 特願2012-193270 (Sep. 2012)
- 9) 宮前, 扇田, 小暮, 小島, 和合, 前田: “可視光を用いた映像音声信号の水中光伝送”, 2013年映像学年次大, 7-4 (Aug. 2013)
- 10) 扇田, 宮前, 小暮, 小島, 和合, 前田: “可視光を用いた映像信号の水中光伝送のための基礎実験”, 映像学技報, 38, 8, BCT2014-33 (Feb. 2014)
- 11) 若森, 林, 北村, 神田, 真島, 星野: “デジタル光FPUの開発”, 映像学誌, 52, 11, pp.1630-1636 (1998)
- 12) 日本規格協会: “再帰性反射材JIS Z 9117 : 2011” (2011)
- 13) J.M. Kahn: “Wireless Infrared Communications”, Proc. IEEE, 85, 2, pp.265-298 (1997)
- 14) 大越: “3次元画像工学” pp.101-105, 産業図書 (1972)

おぎわら りな 2014年, 工学院大学電気システム工学科卒業。現在, 同大学院修士課程在学中。映像信号の水中光伝送の研究に従事。学生会員。

みやま けいすけ 2014年, 工学院大学電気システム工学科卒業。現在, 同大学院修士課程在学中。映像信号の水中光伝送の研究に従事。学生会員。

まえだ けんじ 1981年, 北海道大学修士課程修了。同年, NHK入局。1984年, 放送技術研究所にて, 映像信号の有線伝送システムの研究に従事。2012年より, 工学院大学教授となり, 現在に至る。2004年～2007年, 本会放送技術研究会委員長。2001年, 本会技術振興賞開発賞, 2006年, 船井技術賞, 2007年, 丹羽高柳賞論文賞を受賞。著書に『光・無線伝送技術の基礎と応用』, 博士(工学)。正会員。