論文

球面上の再帰性反射材による回折光に関する考察

～映像水中光伝送における位置ずれ検出のための基礎実験～

Study on Diffraction Light from Retro-reflective Sheet on Spherical Surface;

Fundamental Experiment for Localization in Underwater Optical Video Transmission System

学生会員 木村 洋介[†], 学生会員 扇田恵梨菜[†], 正会員 前田 幹夫[†]Yosuke Kimura[†], Erina Ogida[†] and Mikio Maeda[†]

あらまし 提案する映像水中光伝送システムは、潜水艇の近くに中継装置を置き、映像を潜水艇から可視光で中継装置に送り、さらに光ファイバで洋上の船まで伝送する。可視光区間では出射ビームが中継装置に常に当たるよう、光送信器の四隅から正弦波で変調した光ビームを球形の中継装置に送り、表面の再帰性反射材で反射した光強度を4個の受光器を用いて比較することにより位置ずれを検出する。再帰性反射材は入射方向により反射率が異なるので光送信器や中継装置が動くとき検出性能が劣化する恐れがあるが、提案システムを設計するために必要な観測角特性は明らかではない。そこで本論文では再帰性反射材によるフラウンフォーファー回折の解析を行い、多数のLED光源を用いる場合には単一光源と比べて入射角の方向性による影響が緩和されることを明らかにした。また、再帰性反射材をプリズムの配列方向がランダムとなるように球面に貼ることにより、位置ずれ検出性能をさらに改善できる見通しを実験により明らかにした。

キーワード：再帰性反射材、可視光通信、フラウンフォーファー回折、観測角、位置ずれ検出

1. ま え が き

水中では電波の減衰が大きく、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。可視光は音波と同程度に減衰が小さく、LED (Light Emitting Diode) の高出力化を背景に、海底探査¹⁾や原子炉内監視²⁾などの水中ロボットから画像を伝送する研究開発が盛んである³⁾。これらのシステムにおける伝送可能な距離は数十mと考えられる。

本研究の目的は海中を動く潜水艇で撮影した映像を洋上の船を経由してTV生放送をできる伝送技術を開発することである。しかし、潜水艇から洋上の船までの数kmという長い距離を可視光だけ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。可視光の減衰は、水深が浅いところでは季節や場所で大きく変化するが、100mを超える水深では0.2 dB/m程度と小さく、かつ安定であることが知られている⁴⁾。

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、潜水艇で撮影した映像信号を中継装置までの短距離を可視光で伝送し、さらに洋上の船までの長距離を

光ファイバで伝送する中継伝送システムを提案した⁵⁾。類似の中継方式の伝送システムは他にも提案されており⁶⁾、映像信号のライブ伝送を実現する有力な候補と考えられる。

海中で可視光通信をするには、まず中継装置を探し、次に光送信器から中継装置に送る幅の狭い光ビームが常に中継装置に当たるような制御を行う必要がある。このためには位置ずれ検出技術が重要であるが、これらの報告では述べられていない。このような制御を行わずに送信光を広い角度に放射してしまうと、伝送可能な距離が著しく制限されることが知られている⁷⁾。提案システムでは、任意の方向から来る光を受信できるように中継装置を球形とし、表面には再帰性反射材を貼っているため、潜水艇から迅速に探せる特長がある。また、反射光は光源の周囲の狭い範囲に戻る性質を利用して、光送信器の四隅に配置する光源から正弦波を送ることで、位置ずれを高感度に検出をすることができる⁸⁾。これまでに、球の代わりに円板に再帰性反射材を貼った中継装置を試作し、これを光送信器の前方で移動させて、動作原理の検証実験を行い、理論値との良い一致が得られることを報告した⁹⁾。

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。車のヘッドライトから発せられた光は道路標識の再帰性反射材に当たって極めて狭い範囲の角度内に反射するように設計されているため、運転者は遠くからでも標識を認識することができる。しかし、再帰性反射材の反射光が光源の周囲に

2015年7月27日受付, 2015年12月21日再受付, 2016年1月25日採録

[†]工学院大学

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

どの程度、どのように広がるのかというシステム設計上有用な解析は数少ない。Ichikawaは数値解析により、波長の1～100倍の長さの再帰性反射物を密に並べると、屈折よりも低次数の回折が支配的となることを報告している¹⁰⁾。この報告は再帰性反射材の反射光の広がり回折の概念で説明した点で意義がある。しかし、レーザなどコヒーレントな光源を想定した数値解析であり、本システムで扱うLEDのようなインコヒーレントな光源を多数配置して光送信機を構成する場合とは反射光の広がる様子が大きく異なる。

また、再帰性反射材の反射率には入射光の方向依存性があることが知られている。提案システムは潜水艇も中継装置も動くことを前提としているため、入射光の到来方向の変化によって位置ずれ検出性能が劣化する恐れがある。

さらに、再帰性反射材の反射光強度と入射角との関係は、平面については解析されている^{11) 12)}が、提案システムで想定する球面については行われていない。

そこで、本論文ではまず、球面上の再帰性反射材により光源の位置に戻る反射光の電力の理論値について述べる。続いて、再帰性反射材を構成するプリズムの開口面による0次のフラウンフォーファー回折の解析について述べる。さらに、光送信器と再帰性反射材を貼った半球による反射実験を行い、理論値と比較する。最後に、再帰性反射材を構成するプリズムの配置方向をランダム化することと、多数の光源を用いることにより、位置ずれ検出の妨げとなる入射光の方向依存性が大幅に緩和できることについて述べる。

2. 光ビームの位置ずれ検出原理

再帰性反射材（以下反射材と略す）で覆われた中継装置に対する光ビームのずれの方向と程度を検出する原理を図1で説明する。説明を容易にするためLEDの個数を3個、PD (Photo Diode) の個数を2個とし、中央に配置するLED2には映像、音声信号を、両側に配置するLED1とLED3には左側で示すスペクトラムのように正弦波を加え

図1 位置ずれ検出原理

る。LED1およびLED3の放射電力はそれぞれの正面方向で最大となる。図のように中継装置が光ビームよりも左にずれていると、中継装置上での放射電力はA, Bのように差が生じる。反射材からの光は送信したLEDの周囲に戻るの、右図で示すスペクトラムのようにLED1の近くのPD1で受光して得られた正弦波の電力はLED3の近くのPD3で受光して得られた電力よりも大きくなる。両者の電力を比較することで、ずれの方向と程度を検出することができる。

3. 反射光電力の理論

3.1 LEDに戻る反射光の電力

図1の光伝送系の一組のLEDとPDを取出し、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2に示す。

図2 (a) において、送信光電力 P_T のLED（半値半幅 $\theta_{1/2}$ ）の最大放射方向と球の中心とが成す角度 θ （入射角と定義する）の方向の球上で、受光面積 A の電力計で測定したときの受光電力 P_r は放射パターンをLambert型と想定すると式(1)で表すことができる¹³⁾。

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

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、指向性が鋭いほど大きくなる。

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

上り方向を説明する図2 (b) において、半径 r 、表面積 S の球の位置に反射性能 B で、球と等しい半径の円板の反射材を置いたとすると、光送信器のLEDの位置で測定される受光電力 P'_s は式(3)で表すことができる。

$$P'_s = \frac{BS \cos \theta}{4d^2} P_r \quad (3)$$

d は球の半径 r や光送信器のLEDとPD間の距離に比べて十分に大きいと考えられるので、光送信器と中継装置間の

図2 光伝送実験の配置

図3 再帰性反射材の減衰量の入射角依存性

距離 l を d と等しく扱うこととする。また、円板内における受光電力は等しいものとする。反射材が光源と正対する位置 ($\theta=0$) に置かれたときの B の値を B_0 と書くことにすると、 B はプリズムの形状の考察により式 (4)、式 (5) のように表すことができる。

$$B = B_0 f(\theta) \quad (4)$$

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

$$f(\theta) = \frac{4}{3} \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \tan \theta \right) \quad (22^\circ \leq \theta < 39^\circ) \quad (5)$$

式 (5) の $f(\theta)$ を図3に示す。 $f(\theta)$ は反射による減衰率を意味しており、入射角が 22° 以下となる広い範囲で損失が 2 dB 以下と低く保たれているのがわかる。

図2 (b) のように球の反射材を置いた場合には、球上の位置によって反射材への入射角が異なる。そこで、球の表面を平面と近似できるような小さな面積 S_i に分割し、それぞれについて電力和を求めることとする。光送信器のLEDの位置で測定される受光電力 P_s は次式のように表すことができる。

$$P_s = \frac{B_0 \cdot \sum_{i=1}^{250} S_i f(\theta_i) \cos \theta_i}{d^2} P_r \quad (6)$$

ここで、総和の添字 i について説明する。球面を多数の平面に分割するのに図4に示すようなジオデシックドームと呼ばれる構造体を用いた。これは球に内接する正二十面体を考え、さらに辺を等分割して一面を多数の三角形に分

図4 ジオデシックドーム構造による球面の分割

割するもので、球形の建造物に良く見られる。

辺の分割数を十分に滑らかな近似と認められる5に選ぶと、一面を25分割することになり、球全体では500個の三角形に分割することとなる。各三角形の法線と入射光の方向が作る角度 θ_i を式 (4)、式 (5) に適用することで、微小平面からの反射電力を求めることができる。球に光が当たる条件は $-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$ であるので、分割数の半分の250面について和を求める。表面積と半径については以下の関係がある

$$\sum_{i=1}^{250} S_i = 2\pi r^2 = \frac{S}{2} \quad (7)$$

球はどの方向から見ても球なので反射率は入射角によらず、したがって式 (6) は一定となるのに対し、円板は見る方向により見える面積が変化するため式 (3) のように入射角に依存する。 $\theta=0$ の場合には式 (3)、式 (7) の計算により球の反射電力 P_s は半径の等しい円板の反射電力 P'_s よりも 6.9 dB 低くなる。

3.2 1灯LEDによる回折光特性

反射材を構成するプリズムは図5 (a) に示すように立方体を斜めに切った三角錐で、正三角形の切断面の隅を除く75%の領域(有効反射面と呼ぶ)に入射した光はプリズムの中で3回反射して再帰する。この領域は $\triangle ABC$ と反射光を投影した $\triangle A'B'C'$ の共通部分と考えられ、光が $\triangle ABC$ に斜めから入射する場合は図5 (b) のようになり、有効反射面は太線で囲った六角形となる。光が $\triangle ABC$ に垂直に入射する場合は図5 (c) となり、有効反射面が最も広くなる。プリズムは三つの反射面から構成されるが、①→②→③と進む光と③→②→①と進む光は異なる場所から放射されるため、有効反射面を6分割した四角形から放出される

図5 プリズム型反射材の有効反射面

平行光に対して回折を考える．

光は電波と比べると回折の程度は小さいが，開口の大きさが波長の100倍程度に狭くなると回折が観測される．このような小さなプリズムが規則的に配列された反射材シートからの反射光は波長に比べて伝送距離が長いので，低次のフラウンフォーファー回折をすることがレーザ光源を想定した数値解析により報告されている¹⁰⁾．そこでLED光源によるフラウンフォーファー回折を図2(b)で考えることとする．反射点から見た入射光と観測点への回折光との成す角度を観測角と定義し， ϕ と書くこととする．さらに，光送信器の観測角 ϕ の位置における受光電力 P_s を $P_s(\phi)$ ，LED光源の位置における P_s を $P_s(0)$ と書くこととすると， $I(\phi)$ を ϕ 方向の回折強度の分布を表す関数として $P_s(\phi)$ は以下のように表すことができる．

$$P_s(\phi) = I(\phi)P_s(0) \quad (8)$$

関数 $I(\phi)$ は開口面の形状により大きな変化を受ける．形状が矩形と円の場合には，式による表現ができることが知られているが，上記の四角形は複雑な形状をしていて定式化が困難である．しかし，送信光源が多数のLEDから構成され，かつ反射材を球面にランダムな方向に貼ることにより，この四角形の形状と等しい面積を持つ正方形とみなして $I(\phi)$ を求めても実験値と比較的良好一致が得られることがわかっている¹⁴⁾．そこで，以下では開口面の形状を正方形で近似して，理論解析を進めることとする．

一般に矩形波の直交する二組の辺で制限をされた平面波は，送信器上で x および y 方向に回折するので，式(8)における $I(\phi)$ は式(9)で定義する ϕ_x と ϕ_y を用い， C を比例定数として式(10)のように表すことができる．

$$\phi_x = \frac{x}{d} \quad \phi_y = \frac{y}{d} \quad (9)$$

$$I(\phi) = I(\phi_x, \phi_y) = C \text{sinc}^2\left(\frac{a\phi_x}{\lambda}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{a\phi_y}{\lambda}\right) \quad (10)$$

$$\text{sinc}(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \quad (11)$$

ここで， ϕ_x および ϕ_y はそれぞれ，光送信器上のLED光源の位置を原点とした x および y 座標の観測角である．

また， a は正方形の辺の長さで，図5(a)に示すプリズムの高さ p と以下の関係がある．

$$a = p \cdot 3^{\frac{5}{4}} \quad (12)$$

今回用いた反射材の高さ p は約130 μm であるため，開口面の一辺 a は33 μm と波長(0.445 μm)の74倍となり，文献10)に述べられている低次の回折条件と概ね一致する．この反射材を用いて得られる $I(\phi)$ を図6に示す．この図から， x および y 方向には周期的な回折縞が認められる．また，電力は x および y 方向に集まり，円周方向には一様ではないこともわかる．したがって，中継装置が動いて光送信器への反射光の入射方向が変化すると，光源の近傍に置かれ

図6 正方形の開口形状によるフラウンフォーファー回折

図7 複数のLEDの反射電力の合成

る位置ずれ検出用のPDの受光電力が変化してしまうという問題が起こる．

3.3 複数灯LEDによる回折光特性

位置ずれ検出用のLEDを複数灯とする場合を考える．LEDを x 方向に間隔 h_x で M 個， y 方向に間隔 h_y で N 個を配列した場合，光送信の平面上の座標 (x', y') における受光電力を $I_{total}(\phi_x', \phi_y')$ と書くこととすると， $I_{total}(\phi_x', \phi_y')$ は式(10)で求められる $I(\phi_x, \phi_y)$ の電力和をとることで以下のよう求めることができる．

$$I_{total}(\phi_x', \phi_y')_{total} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N I(\phi_{x+h_x k}, \phi_{y+h_y l}) \quad (13)$$

この様子を x 方向について図7で説明する．反射材で反射した光は，それぞれ1から M までのLEDの位置に戻るので，座標 x' では， M 個のLEDの反射電力が合成される．したがって，複数灯のLEDを用いることで回折縞のコントラストは1灯のときと比べて小さくなり，位置ずれ検出に適した滑らかな減衰特性が得られるようになる．

4. 伝送実験

4.1 反射材の反射特性

3.1節で述べたLEDに戻る反射光の電力の測定を行った．測定系統図を図8に，光送信器のパラメータを表1に，光電力計のパラメータを表2に示す．

9 mm × 9 mmの青色の反射型LED256灯から成る光送信器から距離 $d=10$ mの位置に反射材($B_0=500$)を貼った半球

図8 反射光の測定系統図

表1 光送信器のパラメータ

項目	数値
中心波長	445nm(青色)
スペクトラム半値幅	50nm
順方向電流	20mA
出射光電力 P_t	+7dBm
半値半角 $\theta_{1/2}$	3.58度 設計目標値3度
外形	約9mm×9mm (反射型)
配列間隔	横11mm 縦15mm

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 A	$1 \times 10^{-4} (\text{m}^2)$ 10mm×10mm
測定範囲	-50dBm ～ +20dBm
測定確度	±5%

を置き、半球を動かした時の光送信器の中央における反射電力 $P_s(0)$ を測定した。LEDモジュールは反射型であるため、正面方向に鋭い指向性を持っている。光電力計は図8に示すように光送信器と同一平面に置いているので、理論的には光送信器から $\theta=90^\circ$ 方向にある光電力計への放射電力は式(1)からわかるように存在しない。しかし、実際にはLEDチップの支柱等による内部反射によってLEDモジュールの側面からは微弱な光が漏れる。そこで、この漏れ光が光電力計に入って反射光の測定に影響を与えることのないように、光電力計の受光面の周囲には高さ5mmの低い壁を設けて測定を行った。

われわれの実験室では球を安定に動かすことが難しかったため、半球を固定した板を、光送信器に向くように移動させた。直径60cmと90cmの半球について測定した結果を理論値と併せて図9に示す。この図から、位置ずれが±1m以内では測定値は理論値と良く一致していることがわかる。また、直径90cmの半球は60cmと比べて面積比に相当する3.5dB高い電力が得られていることもわかる。位置ずれが±2m以上の領域では測定値が理論値から逸脱していることがわかる。この理由は、この方向からの反射光電力が正面方向

理論値
----- 直径90cm
———— 直径60cm

測定値
● 直径90cm
▲ 直径60cm

図9 球体と平板の反射板による反射特性

よりも40dB以上小さいのに対して、正面方向への放射電力が大きいため、正面方向の壁に暗幕で反射防止する対策をしても正面の壁からの反射電力が反射材からの反射電力を上回るためである。実際の海中では正面方向に反射物はないのでこの逸脱は発生しないと考えられる。

4.2 反射材の回折特性を考慮した設計

位置ずれ検出を行う回折光の観測角の上限を図6における中心から最初の暗点までとするとこの中には回折光の83.8%の電力が含まれる。この観測角は 0.77° で、想定する10mの距離では13.5cmに相当する。この時、位置ずれを検出するのに十分な個数のLEDを密に配列するとすれば、PDは中央に配置するLEDから9cm離れた位置となる。

ところで一般のプリズム型反射材の観測角特性は、光入射方向に対する縦と横の置き方で反射性能が大きく異なることが知られている。複数の文字から成る道路標識に反射材を利用する場合には、文字間に明暗ができないように反射材から文字を切出す方向を揃える注意が払われている¹⁵⁾。このような注意が不要となるように、図10(a)のようにプリズムを一方方向に並べるのではなく、図10(b)のように数mm単位の正方形に切り分けたものを回折方向が複数になるように組合せた反射材が開発されている¹⁶⁾。

この反射材の反射特性を測定し、一般のプリズム型の反射材と比較して図11に示す。横軸は反射材の光軸の周り

(a) 一般の配置

(b) 回折方向を組合せた配置

図10 プリズム型反射材の拡大図

図11 反射材の反射特性

の回転角を示している。また、反射率は最大値を1として規格化している。この図において▲は図10(a)に示した一般のプリズム型の反射材を示しており、1回転の間に、二つの谷があり、その反射率は最低では60%となることがわかる。図6から考えられる谷の数は4つであるのに対し、実際にはその半分の二つになるのは、図5(d)の複雑な四角形の開口形状を正方形に近似したためである。実際の回折の分布は縦と横の比が0.6の楕円として考えることができ、これについては次節で説明する。●は、図10(b)に示した回折方向が複数となるように組合せた反射材を示している。●では回折方向が拡散されるため、▲と比べて反射率の変化が著しく小さくできることがわかる。■は、図10(b)の反射材を図4に示したジオデシックドームを構成する多数の三角形に切断し、回折方向が互いにランダムになるように貼り合わせた場合を示している。このようにすることで反射材の回転に対してさらに均一化が図れ、回折の分布を円形とみなすことが可能となる。

4.1節で述べたLEDとPDの位置を回折の分布に重ねて図12に示す。反射材の回折光はLEDを中心として広がる。青色の実線は■で示した角度無依存の反射材の分布を示しており、半径 $r=13.5\text{ cm}$ の円として描くことができる。一方、

図12 反射材の回折分布

▲で示した一般の反射材は赤色の実線のように長軸 $\alpha=17.4\text{ cm}$ と短軸 $\beta=10.4\text{ cm}$ との比が0.6の楕円として描くことができる。PDはLEDの下方 $\varepsilon=9\text{ cm}$ の位置にあるとする。この時、潜水艇の移動や海流等により反射材が 90° 回転すると一般の反射材は分布が赤色の点線のように変化し、 β と ε の差が小さいため検出に必要な光電力に対する余裕がなくなる。一方で、青色で示した反射材は回転しても変化しないので安定な検出が可能である。伝送距離が10 mよりも短くなると、回折の範囲が狭まって、PDが楕円の外側になってしまうため位置ずれ検出ができなくなることがわかる。したがって、反射材の角度依存性はできる限りなくすることが望ましい。

4.3 1灯のLEDによる回折特性

フラウンフォーファー回折の分布を正確に把握するため、LEDを一灯にして観測を行った。この観測は、想定する10 mの伝送距離では、受光電力が実験室の遮光限界以下となり測定できないため、伝送距離を1.3 mに縮めて行った。反射材と観測面との距離は a^2/λ 以上であればフラウンフォーファー回折領域とみなすことができる。今回の解析ではこの値は3 mm程度であるため、伝送距離を1.3 mに縮めても問題はない。

図11で示した3種類の反射条件を作り、1灯のLEDを正対位置から照射し、光源と同じ平面のスクリーンで反射光を観測する実験を行った。

スクリーンの正面から撮影した写真と光源近傍の反射光電力を等高線で拡大して示した測定結果を上述の3種類の反射条件に対応させて図13(a)～図13(c)に示す。

図13(a)には光源の位置で交わった回折光が十字に伸びているのが認められる。この状態で反射材を貼った平板を回転させると回折光も同期して回転することが確認できた。式(10)の示すように回折光が直交していないのは、図5に示した有効反射面を6分する複雑な格好の四角形を正方形に近似したためと考えられる。また、右図から等高線の形状が楕円とみなせ、縦と横の反射率が大きく異なることもわかる。

図13(b)では、回折方向が数方向に拡散されるため、光源の円周方向の光強度差は図13(a)と比べて小さくなっていることがわかる。

図13(c)では回折方向がさらに拡散されるため、本検出方式が目標とする光強度の入射方向に無依存な回折分布が得られていることがわかる。

4.4 複数LEDによる回折特性

複数のLEDから放射され、反射材で反射した光が送信したLEDの周囲にどのように広がるのかを把握する実験を行った。表1に示すLED64灯を図7の配置に対応させて x 方向に間隔 $h_x=11\text{ mm}$ で8列($M=8$)、 y 方向に間隔 $h_y=15\text{ mm}$ で8行($N=8$)配置した基板を用意し、列単位で点灯させる実験を行った。測定系の俯瞰図を図14に示す。

この基板の10 m前方に図10(c)の反射条件の半球を正対

(a) 一般の反射材を平面に貼った場合

(b) 回折方向を組合せた反射材を平面に貼った場合

(c) 回折方向を組合せた反射材を球面に貼った場合

図13 1灯のLEDによる反射光の回折分布

させ、送信基板を置いた平面上における座標 $(x', 0)$ における反射光電力を測定した。

点灯のさせ方として、(A) $M=1$ の一列8灯、(B) $M=1, 2$ の2列16灯、および (C) $M=1 \sim 8$ の8列64灯の3通りとして実験を行った。図14は $M=2$ の場合を示している。(A), (B), (C) の点灯条件で測定された光電力を理論値と併せてそれぞれ図15 (A) ~ 図15 (C) に示す。

これらの図から灯数が増えるにつれて、原点における光電力は電力和で増加することがわかる。また、原点から離れるにつれて光電力は減少するが、実験値は単調に減少するのに対して、理論値には回折によって生じる明るい部分と暗い部分が認められる。(A) の1列の理論値では原点か

図14 複数LEDによる回折特性の測定系

ら16 cmの場所に暗い部分があるが、(B) の2列になるとそのコントラストが急激に小さくなり、(C) の8列では実験値と近づくこともわかる。

実験値には理論値に見られる受光電力に変動は見られない。この理由は実験では、多数の小さな反射材を回折方向がランダムとなるように配置した球を用いているが、理論値にはそれが考慮されていないためであると考えられる。通常のプリズム型の反射シートをジオデシックドームに回折方向が一定となるように貼った球での実験は行っていないが、球と同じ直径の円板で実験を行ったところ、縦と横の置き方で反射光の強度が図11のように変動することを除けばほぼ同様な特性が得られた。通常のプリズム型の反射シートでも、球面にランダムな方向に貼り合わせることで入射方向の依存性を軽減できることが期待される。

提案システムでは、反射材への入射方向は変動するのを前提とするため、反射光電力が光源から任意の方向に様に単調減少となることは、位置ずれ検出機構の設計を容易にすると考えられる。

5. む す び

今回の反射材による回折の解析および実験によって以下の知見を得た。

- (1) 球面上に反射材を貼った半球を光送信器の前方10 mで水平方向に動かす実験を行い、反射光電力が理論値と良く一致することがわかった。
- (2) プリズム有効反射面を6等分した開口面による回折の解析は観測角の広がりとはほぼ一致する。
- (3) 再帰性反射材をプリズムの配列方向がランダムとなるように球面に貼ることで、光源から任意の方向に単調減少する均整のとれた反射光特性が得られる。

今後は光送信器上の受光器に得られる位置ずれ検出信号を用いた光ビーム制御装置の試作を行い、本論文に述べた解析結果を検証する予定である。

図15 複数のLEDによる反射光電力

本研究は、平成24年度および25年度放送文化基金の助成を受けて行ったものである。光送信器の試作に当たり有益な助言をいただいた本学根岸非常勤講師と、反射材に関する御協力をいただいたAvery Dennison Japan株式会社の下野様に感謝する。

〔文 献〕

- 1) 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)
- 2) I.C. Rust and H.H. Asada: "A Dual Visible Light Approach to Integrated Communication and Localization of Underwater Robots with Application to Non-Destructive Nuclear Reactor Inspection", 2012 Int. Cof. On Robotics and Automation, pp.2445-2450, Saint Paul, USA (2012)
- 3) N. Farr, A. Bowen, J. Ware, C. Pontbriand: "An integrated, underwater optical/acoustic communication system", IEEE OCEANS2010, pp.1-6, Sydney (2010)
- 4) 海洋研究開発機構報道発表: "レーザ式海中距離測定システムの海域基礎試験に成功" (July 4, 2011)
- 5) 前田: "空間光伝送システム", 特開2014-50033 (2014)
- 6) 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)
- 7) G. Baiden, Y. Bissiri, A. Masoti: "Paving the way for future underwater omni-directional wireless optical communication systems", Ocean Engineering, 36, pp.633-640 (2009)
- 8) 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年映情学年次大, 7-4 (2013)
- 9) 扇田, 宮前, 前田: "映像水中光伝送のための光ビームずれ検出に関する基礎実験", 映情学誌, 68, 9, pp.J408-J413 (2014)
- 10) H. Ichikawa: "Numerical analysis of microretroreflectors: transition from reflection to diffraction", J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 6, pp.S121-S127 (2004)
- 11) 大越: "3次元画像工学" pp.101-105, 産業図書 (1972)
- 12) Y. Tan and H. Chen: "Diffraction of transmission light through triangular apertures in array of retro-reflective micropisms", Appl. Opt., 51, 16, pp.3403-3409 (2012)
- 13) J.M. Kahn: "Wireless Infrared Communications", Proc. IEEE, 85, 2, pp.265-298 (1997)
- 14) 扇田, 木村, 原島, 岸本, 上林, 前田: "球面状に貼った再帰性反射材の観測角に関する検討", 映情学技報, BCT2015-27 (2015)
- 15) "Rotational Sensitivity in Traffic Signs", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Sign sheeting specification M 268-13, Section 3 (2013)
- 16) Avery Dennison Corporation: "Rulable multi-directional prism cluster retroreflective sheeting", US Patent 20130107364A1 (2011)

木村 洋介 2015年、工学院大学電気システム工学科卒業。現在、同大学院電気・電子専攻修士課程在学中。映像信号の水中光伝送の研究に従事。学生会員。

扇田 恵梨菜 2014年、工学院大学電気システム工学科卒業。現在、同大学院電気・電子専攻修士課程在学中。映像信号の水中光伝送の研究に従事。学生会員。

前田 幹夫 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』(コロナ社、2013年)。博士(工学)。正会員。