回折光プローブによる 6 自由度位置姿勢計測*

井 上 祐 介*** 石 丸 伊 知 郎**

6-DOF Position and Attitude Measurement Technology by Diffracted Light Probe

Yusuke INOUE and Ichirou ISHIMARU

In this paper, we proposed a six-degree-of-freedom (6-DOF) measurement technology using the first order diffracted light as optical probe which is called “diffracted light probe”. The position of the diffracted light probe which is detected by the CCD camera changes according to the position and attitude of the grating. So, by calculating the optical axis of diffracted light probe, we can know the position and attitude of the grating simultaneously. In this method, the intensity distribution of the diffracted light affects the measuring accuracy. So, we established the design procedure based on the grating equation and by using the annular filter. Based on this procedure, we formed the grating (width of slit: 2μm, span of slits: 10μm, number of slits: 20). In addition, we formed the annular filter whose gap is 200μm by RIE-ICP.

By introducing these products into the optical system, we could obtain the diffracted light probe for the high precision measurement and verified the principle of this proposed method with the good results (position accuracy: 8μm, attitude accuracy: 0.2deg.).

Key words: 6-DOF measurement, grating, diffracted light, annular filter

1. 結 言

近年、6 自由度で計測が可能な小型変位センサの開発が望まれている。例えば、患者の体に開けた小さな穴から細い手術器具を挿入して治療を行う低侵襲外科手術は、肉体的、精神的にも患者への負担が少ない手術として注目されながらも、手術器具の動作自由度が低いという課題を抱えている。そのため、現在柔軟な機構と共に多自由度計測手法の開発が求められている。また、多くの関節を持ちスムーズな動作が可能なロボットは、複雑に入り組んだ場所でも細かく姿勢を変えて自在に作業を行うことができるため開発のニーズは高い。しかしながら、より高い自由度を動作に付加するには、全ての関節部にセンサを設置して制御を行う必要がある。

従来の三角測量方式や共焦点方式などの変位センサは単体では 1 方向の計測しかできず、また位置と姿勢を分離して計測することはできない。そのため、これらの変位センサを用いて多自由度計測を行うには複数のセンサが必要となり、微小領域での計測に適さないだけでなくアライメント精度が計測精度に及ぼす影響を考慮しなければならない。

そこで、我々は回折光を用いた 6 自由度位置姿勢計測手法を提案する^{1)~3)}。本手法は、回折格子にレーザ光を照射した際に生じる 1 次回折光をプローブ光として用いることで、0 次光のみでは不可能である位置と姿勢の同時計測を実現する手法である。光源と回折格子を一体化し、入射角を既知とした照明系を作成することで、回折格子から発生する回折光の方向は照明系の位置姿勢に応じて変化する。そこで、この変化を位置検出素子で検出することにより回折格子の位置姿勢を計測することができ

る。回折格子を用いることで複数のプローブ光を 1 つの光源で同時に作り出すことができるため、小型でありながら単体で 6 自由度の計測が可能となる。本技術を用いた小型の 6 自由度変位センサが実現することで、例えば図 1 に示すような Φ10mm 程度の径を持つ内視鏡の内部に組み込み、先端部のみを多自由度に制御することも可能になると考えられる。

本報では、計測原理及び回折光のプローブ形状の設計手順とその実験結果について述べる。

2. 回折光プローブによる 6 自由度位置姿勢計測手法

等間隔に並べられた複数のスリットで構成される回折格子にレーザ光を照射すると特定の角度に光が強め合い、周期的な強度分布を持った回折光が発生する。本手法では、発生した高次回折光の中でも特に強度が強い 1 次回折光をプローブ光として計測に利用する。我々は、これを回折光プローブと称することとした。1 つの回折格子からは±1 次回折光として 2 つの回折光プローブが発生するため、これらの交点と、2 つの回折光プローブによって形成される平面から、スリットの長手方向を空間の直線として表すことができる。これを格子直線と称することとした。

本手法では、直交するように組み合わせた 2 つの回折格子から発生する回折光プローブを計測して、直交する 2 つの格子直

Fig.1 Example of the use of the multi-degree-of-freedom sensor

* 原稿受付 平成 17 年 6 月 30 日
 ** 正 会 員 香川大学大学院 (高松市林町新町 2217-20)
 *** 学生会員 香川大学大学院

Fig.2 6-DOF measurement by diffracted light probe

線を求め、それらの傾きと交点から回折格子の位置と姿勢を同時に算出することができる。以下にその具体的な手法について述べる。

図 2 に本計測手法の概略図を示す。直交するように組み合わせた回折格子において、図 2(a)に示すような、鉛直方向に製作した回折格子 α から発生する ± 1 次回折光を回折光プローブ A, B とし、図 2(b)に示すような、水平方向に製作した回折格子 β から発生する ± 1 次回折光を回折光プローブ C, D とする。また、ワールド座標系を位置検出素子の座標系とし、受光面水平方向を X 軸、鉛直方向を Y 軸、それらの直交方向を Z 軸とした。

前項で述べたように、本計測手法では、回折格子の位置姿勢を計測するために 2 つの格子直線を求める必要がある。そこで、回折格子 α の格子直線を次の手順で算出する。まず、位置検出素子の初期位置における Z 座標を 0 として回折光プローブ A, B の位置を計測する。次に、位置検出素子を Z 軸方向に精密移動させ、再度回折光プローブの位置を計測する。異なる 2 点からは 1 つの直線が決定されるため、これらの計測点によって回折光プローブ A, B の光軸が求まり、さらに、それらの交点 $P(X_{AB}, Y_{AB}, Z_{AB})$ と、2 つの光軸により形成される平面の法線ベクトル $\vec{n}_{AB}=(a_{AB}, b_{AB}, c_{AB})$ を算出することができる。ここで、レーザ光の回折格子への入射角、すなわちレーザ光の光軸と、回折格子表面の垂線とのずれをワールド座標系の X 軸と Y 軸周りの回転 θ_x と θ_y に置き換えて表すと、次式(1)より回折格子 α の格子直線方向ベクトル $\vec{n}_{\alpha}=(a_{\alpha}, b_{\alpha}, c_{\alpha})$ が求められる。

$$\left. \begin{aligned} a_{\alpha} &= a_{AB} \cos \theta_x \cos \theta_y - b_{AB} \sin \theta_y + c_{AB} \sin \theta_x \cos \theta_y \\ b_{\alpha} &= a_{AB} \cos \theta_x \sin \theta_y + b_{AB} \cos \theta_y + c_{AB} \sin \theta_x \sin \theta_y \\ c_{\alpha} &= c_{AB} \cos \theta_x - a_{AB} \sin \theta_x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

回折格子 α の格子直線は、交点 P を通り $\vec{n}_{\alpha}$ を方向ベクトルとすることから次式(2)で表すことができる。

$$\frac{x - x_{AB}}{a_{\alpha}} = \frac{y - y_{AB}}{b_{\alpha}} = \frac{z - z_{AB}}{c_{\alpha}} \quad (2)$$

同様に、水平方向に製作した回折格子 β の格子直線を算出する。上記に示した手順で回折格子 β から発生する回折光プローブ

C, D の光軸を求め、それらの交点 $Q(x_{CD}, y_{CD}, z_{CD})$ と、2 つの光軸が形成する平面の法線ベクトル $\vec{n}_{CD}=(a_{CD}, b_{CD}, c_{CD})$ から、次式(3)より回折格子 β の格子直線方向ベクトル $\vec{n}_{\beta}=(a_{\beta}, b_{\beta}, c_{\beta})$ を算出する。

$$\left. \begin{aligned} a_{\beta} &= a_{CD} \cos \theta_x \cos \theta_y - b_{CD} \sin \theta_y + c_{CD} \sin \theta_x \cos \theta_y \\ b_{\beta} &= a_{CD} \cos \theta_x \sin \theta_y + b_{CD} \cos \theta_y + c_{CD} \sin \theta_x \sin \theta_y \\ c_{\beta} &= c_{CD} \cos \theta_x - a_{CD} \sin \theta_x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

回折格子 β の格子直線は、交点 Q を通り $\vec{n}_{\beta}$ を方向ベクトルとすることから次式(4)で表すことができる。

$$\frac{x - x_{CD}}{a_{\beta}} = \frac{y - y_{CD}}{b_{\beta}} = \frac{z - z_{CD}}{c_{\beta}} \quad (4)$$

本報では、回折格子 α, β の交差部分、つまり算出した 2 つの格子直線の交点を回折格子全体の位置とするため、その座標は次式(5)で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} x_{\alpha\beta} &= \frac{a_{\alpha}(c_{\beta}x_{CD} - a_{\beta}z_{CD}) - a_{\beta}(c_{\alpha}x_{AB} - a_{\alpha}z_{AB})}{a_{\alpha}c_{\beta} - a_{\beta}c_{\alpha}} \\ y_{\alpha\beta} &= \frac{b_{\alpha}(c_{\beta}y_{CD} - b_{\beta}z_{CD}) - b_{\beta}(c_{\alpha}y_{AB} - b_{\alpha}z_{AB})}{b_{\alpha}c_{\beta} - b_{\beta}c_{\alpha}} \\ z_{\alpha\beta} &= \frac{c_{\alpha}c_{\beta}(x_{CD} - x_{AB}) + a_{\alpha}c_{\beta}z_{AB} - a_{\beta}c_{\alpha}z_{CD}}{a_{\alpha}c_{\beta} - a_{\beta}c_{\alpha}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また、式(2)で求めた回折格子 α の格子直線の方程式は 3 次元の直線式である。そこで、これらの式をワールド座標系の各平面に投影して得られた 2 次元の直線の傾きから、次式(6)より各座標軸を中心とした回転角を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\alpha x} &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{\alpha}}{b_{\alpha}} \right) \\ \theta_{\alpha y} &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{\alpha}}{a_{\alpha}} \right) \\ \theta_{\alpha z} &= \tan^{-1} \left(\frac{b_{\alpha}}{a_{\alpha}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

同様に、式(4)に示す回折格子 β の格子直線をワールド座標系の各平面に投影して得られる、座標軸ごとの回転角は、次式(7)より求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\beta x} &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{\beta}}{b_{\beta}} \right) \\ \theta_{\beta y} &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{\beta}}{a_{\beta}} \right) \\ \theta_{\beta z} &= \tan^{-1} \left(\frac{b_{\beta}}{a_{\beta}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Table1 Specification of 6-DOF measurement

Item	Stroke
Translational movement (X,Y,Z)	1mm
Rotational movement ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)	1deg.

以上より、ワールド座標系の各平面における 2 つの格子直線の角度を求めることで回折格子の姿勢を求めることができる。

3. 回折光プローブの設計手順

3.1 回折格子の設計

本計測手法では、回折光プローブの計測精度が最終的な位置と姿勢の計測精度に反映する。そこで、高精度計測を可能にする回折光プローブを得るために、次のような指標を設けて回折格子の設計を行った。

- 1) プローブ光強度の向上
- 2) プローブ光間隔の確保
- 3) プローブ光の先鋭化

まず、1 つ目の指標について述べる。第 2 章で述べたように、本計測では回折光プローブの光軸を求めるために回折光プローブ上の 2 点を計測する。そこで、回折光プローブである 1 次回折光以外の回折光による外乱の影響を排除するために、回折光全体における 1 次回折光の相対的な強度を大きくする必要がある。

次に、2 つ目の指標について述べる。回折光プローブの計測誤差に起因する光軸交点の算出誤差は、特に奥行き方向に大きく生じる。この算出誤差を抑えるには、回折格子と位置検出素子の間隔を狭めると共に回折光プローブの光軸を求める 2 点の間隔を広げれば良い。また、回折格子と位置検出素子の間隔が一定であれば、0 次光と回折光プローブの間隔をより広げた方が高い計測精度を得ることができる。本報では、より微小領域での計測を重視し、光軸を算出する 2 点の間隔は広げずに、0 次光と回折光プローブの間隔を広げることで回折光プローブの計測誤差の影響を低減させることとした。そのため、可能な限り回折格子と位置検出素子の間隔を狭めた上で 0 次光と回折光プローブの成す角を広げる必要がある。

さらに、3 つ目の指標について述べる。本計測を高精度に行うには、回折光プローブの微小な変位を確実に計測できなければならない。そこで、回折光プローブを先鋭化して微小な変位を高感度に検出する必要がある。

以下に、これらの指標を満たすための具体的な施策を示す。

まず、1 つ目の指標を満たす具体的な施策について述べる。本計測には位置検出素子に 5.0mm×4.4mm の受光サイズを持つ CCD カメラを用いた。2 つ目の指標でも述べたように、計測精度を上げることと微小領域での計測を重視する観点から、回折格子と CCD カメラの間隔は狭いほうが良い。しかしながら、第 4 章で述べる実験装置の構成上 20mm が最短距離となる。そこで、回折格子と CCD カメラの間隔を 20mm とした状態で、0 次光と回折光プローブの成す角度を可能な限り広げることとした。表 1 に示す並進及び回転の計測範囲から、CCD 受光面上における回折光プローブの最大移動量は 1mm となる。そこで、受光面の端から少し余裕を持たせ 1.2mm のクリアランスを設けた。また、計測範囲に関しては上記の様に容易に設計可能であることから、

Fig.3 Elemental function of diffracted light **Fig.4** Design procedure of diffracted light probe

本報の実験では精度評価に比較的重点を置き、0 次光と回折光プローブの間隔をより広く確保しやすい受光面方向 5.0mm を用いた。この条件の下、両端のクリアランス 1.2mm を引いた値より、0 次光と回折光プローブの間隔を 1.3mm とした。そこで、次に示す式(8)⁶⁾を用いて、回折格子を構成するスリットの開口幅、間隔、及び本数の設計を行った。

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi a x}{\lambda R} \right) \left\{ \frac{\sin \left(\frac{N \pi d x}{\lambda R} \right)}{\sin \left(\frac{\pi d x}{\lambda R} \right)} \right\}^2 \quad (8)$$

ここで、式中の I は回折光の強度、 I_0 は比例定数、 x は受光面上の位置、 λ はレーザ光の波長、 R は回折格子から CCD 受光面までの距離、 a はスリットの開口幅、 d はスリットの間隔、 N はスリットの本数を示す。この式(8)は、図 3(a)に示す開口幅 a の単一スリットによる回折効果を表す因子と、図 3(b)に示す間隔 d で並べられた N 本のスリットによる干渉効果を表す因子との掛けあわせで表される。図 4(a)にスリットの開口幅 a を 20 μm 、間隔 d を 30 μm 、スリット本数 N を 5 本とした回折格子から生じる回折光の相対強度分布を示す。0 次光からの距離が 1.3mm の位置における回折光の相対強度は 0.01 となり非常に小さい。これは、図 4(a)に示す波形の構成要素となる 2 つの因子において、単一スリットによる回折を表す因子の相対強度が 0 次光から距離 1.3mm の位置で 0 に近くなるためである。そのため、この位置における回折光プローブ、つまり 1 次回折光の相対強度を大きくするには、図 3(a)に示す相対強度分布を広げることが効果的である。そこで、スリットの開口幅 a に着目した。前述したように、図 3(a)に示す相対強度分布は開口幅 a の単一スリットによる回折効果により生じているため、スリットの開口幅を狭くすることで分布を広げることができる。そこで、図 4(b)に開口幅を 2 μm に狭めた場合の相対強度分布を示す。このように、0 次光と相対的に強度が等しくなる回折光プローブを得られることが分かった。

次に、2 つ目の指標である、0 次光と回折光プローブの間隔を確保するための設計指針について述べる。0 次光と回折光プローブ

ブの間隔を 1.3mm に広げるためには、図 3(b)に示す複スリットの干渉効果に着目すれば良い。これは、間隔 d で配置した N 本のスリットによる干渉縞の強度分布を表すことから、隣り合うスリットとの間隔 d に着目した。例えばヤングの干渉実験より、隣り合う 2 つのスリットを通過する光は光路長差が波長の整数倍となる方向に強めあう。この関係は、レーザ光の波長を λ 、スリット間隔を d 、光が強めあう方向とレーザ光照射面の法線が成す角を θ として次式(9)より求められる。

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

但し、 m は正の整数である。この式(9)から、スリット同士の間隔が狭まるにつれ θ の値は大きくなり、強度のピーク間隔は広がる。そこで、スリット間隔 d を $10\mu\text{m}$ に狭めた場合の相対強度の計算結果を図 4(c)に示す。このように、0 次光と回折光プローブの間隔を目標の値である 1.3mm に広げるには、スリット間隔 d が $10\mu\text{m}$ になるように狭めれば良いことが分かった。

次に、3 つ目の指標であるプローブ光の先鋭化を満たすための設計指針について述べる。回折光プローブを先鋭化するためには、図 3(b)に示す各回折光の幅を狭めれば良い。各回折光の幅は、図 5 に示すようにスリットの本数によって決定されることから、回折格子を構成するスリットの本数 N に着目した。回折光プローブである 1 次回折光は、図 5 中 1 番目のスリットと N 番目のスリットの光路長差が $(N-1)\lambda$ となる θ 方向に生じる。このとき、 θ の変化に対する光路長差の変化量は、図 5 中 1 番目のスリットと N 番目のスリットの間隔が広いほど大きくなる。つまり、受光面での位置が少し異なれば光路長差を生じやすく、回折光強度も変化しやすい。そのため、スリット本数 N が多いほど各回折光の幅は先鋭化される。また、より急峻な回折光プローブを用いる方が計測精度は良いと思われる。しかしながら、本計測手法では CCD 受光面上の輝度データをピクセル単位で重心演算することにより回折光プローブの位置を算出する。そのため、統計上サンプル数の平方根で標本分散が小さくなることから、サブピクセルの重心演算精度を得るには 400 個程度以上のサンプル数で計測を行うことが望ましい。本報において、計測に用いた CCD カメラのピクセルサイズは約 $10\mu\text{m}$ である。そのため、400 個程度以上のサンプル数を得るには、受光面上で $\Phi 200\mu\text{m}$ 程度の大きさを持つ回折光プローブを作成する必要がある。そこで今回、回折格子の本数を 20 本とした結果、図 4(d)のように強度幅を狭めて回折光プローブの半値幅を約 $200\mu\text{m}$ に先鋭化することができた。

この設計指標に基づいて製作した回折格子を図 6 に示す。本回折格子は、ガラス板に光を遮断するクロムをスリット部以外の領域に塗布して製作した。20 本のスリットの配置間隔が $10\mu\text{m}$ であることから、回折格子短手方向の長さは約 0.2mm となる。また、長手方向の長さはレーザ光のビーム径よりも十分に大きい 4mm とした。この回折格子(開口幅: $2\mu\text{m}$ 、間隔: $10\mu\text{m}$ 、本数: 20 本)に He-Ne レーザ($\lambda=632.5\text{nm}$)を照射し発生した回折像(距離: 20mm)を CCD カメラで計測して強度分布を評価した。図 7 に、式(8)で計算した強度分布に相対強度を合わせて分布具合を比較した結果を示す。このように、計算結果とほぼ一致した回折光相対強度分布を得られることが確認できた。

3.2 輪帯フィルタの導入

図 8 に、製作した回折格子に He-Ne レーザ($\lambda=632.5\text{nm}$)を照射して CCD カメラで受光した回折光プローブを示す。図 8(a)に、鉛直方向に製作した回折格子 α から発生した、画面鉛直方向に

Fig.5 Accumination of diffracted light

Fig.6 Grating

Fig.7 Experimental result of intensity distribution of diffracted light probe

Fig.8 Detected image of diffracted light

長い ± 1 次回折光のプローブ光 $\alpha(+1)$ 、 $\alpha(-1)$ を示す。また図 8(b)に、水平方向に製作した回折格子 β から発生した、画面水平方向に長い回折光プローブ $\beta(+1)$ 、 $\beta(-1)$ を示す。図 8(c)は CCD カメラで受光した回折光プローブ全体の画像である。図 8(c)中、途中が切れた楕円状の強度分布を有する光が回折光プローブである。また、中心付近の光は回折格子 α からの 0 次光と回折格子 β からの 0 次光が受光面上で重複したものである。回折光プ

Fig.9 Introduction of annular filter

ロープが双峰性の強度分布を有するのは、回折格子交差部のパターンがクロスハッチになっているため、エッジでの散乱現象により光量の損失が起こるためである。また、形状が楕円であるのは、例えば図 8(a)点線内の回折光プローブ $\alpha(-1)$ の場合、前節において述べた設計手法が楕円短手方向、つまり図中水平方向の分布に関してのみ考慮したものであり、長手方向のスケールは照射されるレーザー光のビーム径を反映して回折格子と無関係に決定されるためである。そのため、単峰性の強度分布を有する $\Phi 200\mu\text{m}$ の回折光プローブを得るには、回折格子交差部での光量損失を防ぐと共に楕円長手方向を先鋭化する必要がある。そこで、我々は $200\mu\text{m}$ のスリット幅を持つ輪帯状のフィルタを用いることとした。

図 9 に示すように、 $200\mu\text{m}$ のスリット幅を持つフィルタを回折格子の前面に設置し、ビームエキスパンダによりビーム径を広げたレーザー光を照射する。本輪帯フィルタを用いて回折格子に照射するレーザー光の幅を $200\mu\text{m}$ に制限することで、図 9(a) に示すように、鉛直方向に製作した回折格子 α からは $\Phi 200\mu\text{m}$ の回折光プローブ $\alpha(+1)$ 、 $\alpha(-1)$ が得られる。レーザー光が輪帯状であることから、回折格子の両端が照射されるため同様の光が図中下側でも発生する。また、図 9(b) に示すように、水平方向に製作した回折格子 β からも $\Phi 200\mu\text{m}$ の大きさを持つ回折光プローブ $\beta(+1)$ 、 $\beta(-1)$ が得られ、同様の光が図中右側でも発生する。さらに、本輪帯フィルタによりレーザー光の中心部分が遮光されるため回折格子交差部での光量の損失を防ぐことができる。

また、前節で述べたように、本計測手法では CCD 受光面上の輝度データをピクセル単位で重心演算することによって回折光プローブの位置を算出する。そのため、得られた回折光プローブの位置を正確に計測するには CCD 受光面上における回折光プローブの重複を防がなければならない。例えば CCD 受光面上において、図 9(a) の回折光プローブ $\alpha(+1)$ を受ける画素と図 9(b) の回折光プローブ $\beta(+1)$ を受ける画素が重複すると、重心演算を用いて 2 つの回折光プローブの正確な位置を計測することができない。第 3 章 1 節で示したように、0 次光と回折光プローブの間隔は 1.3mm である。そこで、回折光プローブの重複を確実に防ぐためにフィルタ中心からスリットの内側までの距離を 1.6mm とした。

図 10 に製作した輪帯フィルタを示す。母材には Si 基板を使用し、ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching : 高密度プラズマエッチング)により、基板中心から距離 1.6mm の位置を内径として、 $200\mu\text{m}$ の幅を持つ輪帯状のスリットを製作した。

図 11(a) に、本輪帯フィルタを導入して得られた 0 次光と回折光プローブを CCD カメラで受光した画像を示す。図中、 $\alpha(+1)$ 、 $\alpha(-1)$ は鉛直方向に製作した回折格子 α から生じた回折光プローブ、 $\beta(+1)$ 、 $\beta(-1)$ は水平方向に製作した回折格子 β から生じた回折光プローブであり、それぞれの回折光プローブの中間に位置する光は 0 次光である。また、図 11(b) に回折光プローブ $\alpha(-1)$

Fig.10 Annular filter

Fig.11 Profile of first order diffracted light

が有する強度分布を 3 次元で計測した結果を示す。このように、フィルタの持つスリットを介して回折格子に照射するレーザー光の幅を $200\mu\text{m}$ に限定することで、単峰性の強度分布を有する $\Phi 200\mu\text{m}$ の回折光プローブを作成した。

また、ビーム径を広げたレーザー光全体から、本輪帯フィルタを用いて均一な強度分布を有する領域を回折格子に照射することで、レーザー光の空間的な強度変動による重心演算の安定性の劣化を低減することができる。

通常、伝播するレーザー光は発振時に強度変動現象を生じ、光軸が一定の状態でも強度のピーク位置が空間的に変化する。そのため、このようなレーザー光を受ける回折格子から発生する回折光プローブが有する強度分布のピーク位置も空間的に変動する。このレーザー光の強度変動は不規則に連続して生じることから、次に示すように本実験に使用する He-Ne レーザの強度変動現象を数値的に確認した。レーザー光を CCD カメラに直接照射し、受光面上における光の位置を重心演算により計測する実験を 50 回行ったところ、レーザー光の位置計測精度は $3\sigma : 9.2\mu\text{m}$ となった。この状態では発生する回折光プローブの重心演算結果は安定せず、最終的な位置姿勢計測を高精度に行うことはできない。しかしながら、本手法ではビームエキスパンダを用いてビーム径を広げたレーザー光から、輪帯フィルタを介して強度的に同程度となる領域を回折格子に照射する。このとき、広げたレーザー光の幅に比べて輪帯フィルタのスリット幅は 2 桁以上小さいため、レーザー光の強度分布が空間的に変動しても輪帯フィルタを通過する光の強度変化量は小さく、ほぼ均一の強度を有する領域を回折格子に照射することができる。本輪帯フィルタを用いて得た回折光プローブに対して 40 回の重心演算を行い、その平均を取る計測を 50 回行った結果、回折光プローブの計測精度は $3\sigma : 0.49\mu\text{m}$ となり、回折光プローブの重心演算の安定性を大幅に上げることができた。

4. 計測精度検証実験

4.1 実験光学系の構成

提案する 6 自由度位置姿勢計測の精度検証を行うために、図 12 に示す装置を用いて実験を行った。He-Ne レーザ($\lambda=632.5\text{nm}$)

Fig.12 Schematic diagram of experimental equipment

を光源とし、輪帯フィルタを用いて照射範囲を限定したレーザー光を回折格子(開口幅: $2\mu\text{m}$, 間隔: $10\mu\text{m}$, 本数: 20 本)に照射する。次に、発生した回折光プローブをステージ上に設置した CCD カメラ(距離: 20mm)で受光する。本光学系では、CCD カメラの移動に高精度ステージ(メーカー: Physik Instrumente 社 型式 F-206.01)を用いており、ストローク: $\pm 6\text{mm}$, $\pm 5\text{deg.}$, 精度: $0.1\mu\text{m}$, 0.0002deg. で、高精度に 6 自由度で CCD カメラを移動させることができる。

また、第 1 章で述べたように、本計測手法を用いてワールド座標系での絶対的な位置姿勢を計測するには、回折格子に照射するレーザー光の入射角を既知とする必要がある。本実験では以下の手順でアライメントを行い、入射角を 0deg. とすることで実験の計算式を簡易化した。

まず、ワールド座標系である CCD カメラの座標軸とステージの移動方向を一致させるため、ステージ上の CCD カメラにレーザー光を照射した状態でステージを光軸方向に移動させ、CCD 受光面で検出されるレーザー光の位置を計測する。光軸とステージの移動方向が非平行であるなら、ステージ移動の前後でレーザー光の位置は変化するため、この変位量を可能な限り 0 に近づけることで光軸とステージの移動方向を平行に合わせた。さらに、ピンホールを介して CCD 受光面からの戻り光をレーザー射出部に返すことで光軸と CCD カメラの Z 軸を平行に合わせた。以上のように、レーザー光を介して CCD カメラの座標軸とステージの移動方向を一致させた。このとき、レーザー光は CCD 受光面に対して垂直に入射する。

次に、回折格子を CCD カメラから 20mm の位置に設置し、照射したレーザー光の戻り光をレーザー射出部に返すことで回折格子面とレーザー光を垂直とした。以上により、回折格子に照射するレーザー光の入射角は 0deg. となる。本実験光学系において、レーザーから CCD までの間隔を 300mm とした。また、第 3 章 2 節で述べたように、CCD カメラに直接照射したレーザー光の位置計測精度は約 $10\mu\text{m}$ である。以上より、レーザー光軸と回折格子に最大傾斜角約 0.002deg. の垂直精度が成り立つ。

4.2 位置計測実験

本手法における位置計測精度を検証するため、図 13 に示すように CCD カメラを 6 自由度の高精度ステージに取り付け、位置の変位計測を行った。本実験では、初期計測時における回折格子の位置姿勢からの相対的な位置変化及び角度変化を計測する。この場合、アライメント精度は計測のオフセット成分となるため相対的な位置姿勢の計測精度とは無関係となり、アライメント精度に依らない計測を行うことができる。

まず、ステージを X 軸方向に $10\mu\text{m}$ ステップで $50\mu\text{m}$ 変位さ

Fig.13 Schematic diagram of position measurement

Fig.14 Experimental result of the position measurement

Fig.15 Schematic diagram of attitude measurement

Fig.16 Experimental result of the attitude measurement

せ各位置の相対的な変位量を計測した。この結果を図 14 に示す。グラフの横軸はステージの変位量を、縦軸は本計測手法により求めた変位量を表しており、計測精度は $8\mu\text{m}$ となった。同等の

精度が X 軸に直交する Y 軸方向への移動に対しても予想できる。

次に、Z 軸方向に対して計測を行った。第 3 章 1 節で述べたように、回折光プローブの計測誤差は光軸交点の算出精度を低下させる。この影響は、回折格子の奥行き方向、つまり図 13 中 Z 軸方向に特に大きく生じ、本実験条件において X, Y 軸方向の計測誤差の約 10 倍のオーダーで現れる。X 軸方向への平行移動精度が $8\mu\text{m}$ であることから、ステージを Z 軸方向に $100\mu\text{m}$ ステップで $500\mu\text{m}$ 変位させ、各位置の相対的な変位量を計測した結果、計測精度は $90\mu\text{m}$ となった。

4.3 姿勢計測実験

姿勢計測精度を検証するため、CCD カメラを取り付けたステージを、各座標軸を回転軸として回転させ、初期計測位置からの相対変位量とステージの移動量を比較した。図 15 に示すように、Y 軸を中心に 0.1deg ステップで 1.0deg 回転させ、各位置において θ_x , θ_y , θ_z を計測した結果を図 16 に示す。 θ_y は線形性を示し、計測精度は 0.15deg となった。このとき θ_x , θ_z の変化は θ_y の変化に比べて非常に小さく、それぞれの平均値からのばらつきは 0.02deg 以内となった。同等の精度が X 軸を中心に回転させた場合にも得られると考えられる。また、同様に Z 軸を中心に回転させて計測を行ったところ、計測精度は 0.15deg となった。これらをまとめて表 2 に示す。

以上の結果から、提案する 6 自由度位置姿勢計測が可能であることを確認した。本手法の計測精度をさらに向上させるには、回折光プローブの光軸交点の算出誤差をより低減できることから、回折格子と CCD カメラの間隔をさらに狭めることが最も効果的である。つまり、光学系を小型化するほど高精度計測が可能となる。

5. 結 言

狭隘な空間での多自由度計測手法として、回折光プローブによる 6 自由度位置姿勢計測手法を提案した。本手法は、回折格子にレーザ光を照射した際に生じる 1 次回折光をプローブ光とすることで、狭隘な空間における位置と姿勢の同時計測を実現する手法である。回折格子を用いることで、複数のプローブ光を 1 つの光源で同時に作り出すことができるため、小型でありながら単体で 6 自由度の計測が可能となる。

本報では、高精度計測を可能とするために回折光プローブの設計手順を示した。また、設けた設計指標に基づいて回折格子と輪帯フィルタの製作を行い、それらを導入した光学系を構築して、提案する 6 自由度位置姿勢計測の原理確認を行った（位

Table2 Experimental results of position and attitude measurement

Item	Accuracy	
	X-axis(Y-axis)	Z-axis
Translational movement (X,Y,Z)	$8\mu\text{m}$	$90\mu\text{m}$
Rotational movement ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)	0.15deg	

置計測精度： $8\mu\text{m}$ ，姿勢計測： 0.15deg 。）。

本手法は、狭隘な空間での 6 自由度位置姿勢計測が可能であることから、微小構造物の制御技術として広範囲に適用できる。例えば、小型変位センサとして内視鏡などの内部に組み込み、先端部のみを高精度に制御することが可能になると考えている。さらに、小型 6 軸荷重センサへの適用も可能になると考えている。

謝 辞

本研究は、産学官連携イノベーション創出事業費補助金（独創的革新技術開発研究提案公募制度）[研究期間：H13～H15 題目：IT デバイス高効率生産のためのナノ異物除去技術に関する研究 課題番号：13103]の助成を受けて行われた。ここに深く感謝の意を表する。

さらに、本研究を進めるに当たり、輪帯フィルタの製作に御協力頂いた香川大学の大平文和教授、橋口原教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Y. Yokomizo, I. Ishimaru, G. Hashiguchi, Y. Mihara: Proposal of Positioning Method for Nano-Particle Manipulator, Proc. of ASME 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation (2002JUSFA), 1 (2002) 363.
- 2) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 小林宏明, 横溝雄一: マイクロマニピュレータの位置姿勢計測技術, 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2003)414.
- 3) Y. Inoue, I. Ishimaru, G. Hashiguchi: Position and Attitude Measurement for Micro Manipulator by Diffracted Light Probe, Proc. of the XVII IMEKO World Congress, (2003)2008.
- 4) 井上祐介, 石丸伊知郎, 橋口原: 回折光プローブによるマイクロマニピュレータの位置姿勢計測技術, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003)477.
- 5) Y. Inoue, I. Ishimaru, Y. Mihara, F. Oohira, G. Hashiguchi, S. Hata: Optimization of diffracted light probe profile of 6-DOF measurement technology for micro manipulator, Optical MEMS 2004, (2004)134.
- 6) 谷田貝豊彦: 光とフーリエ変換, 朝倉書店(1992).