

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 24 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560256

研究課題名(和文) 臨界角近傍の光分布を用いたナノラジアンの高感度を持つ極微小角度の変位測定

研究課題名(英文) The high sensitivity tilt measurement using the optical distribution at the vicinity of critical angle

研究代表者

田代 発造 (Tashiro, Hatsuzo)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：80179689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：光がプリズム内から空中に斜めに射出するとき、その角度によって透過光と反射光の強度がわずかに変化する。本研究ではこれらの光強度およびその光強度分布を使って微小な角度変化を測定することを目的としている。

研究過程で、透過光の代わりに全体光と反射光の差を用いることや、レーザー光により生じる干渉縞のような不要な雑音を避けるために、普通の光を用いるという改善を加えた。また、光強度分布を使わずに光強度による同様の原理に基づく測定装置を作った。その結果、50ナノラジアンという極めて小さな角度変位を測定することができた。

研究成果の概要(英文)：When a light is emitted into the air through a prism, the intensity of transmitted light and reflected light slightly changes according to the angle of incidence. The purpose of this study, therefore, is to measure the minute changes of the angle using the intensity of these lights as well as the intensity of the distribution.

In the process of our study, we considered the difference between the actual light and the reflected light as transmitted light. We also used natural light instead of laser beams in order to avoid unnecessary noise such as interference fringes, which could be produced by laser beams. Meanwhile, we developed a measurement device not by using intensity distribution, but by using intensity, based on the principle mentioned above.

As a result, we succeeded in measuring such minute changes of the angle as 50 nanoradians.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：微小角度変位計測 光計測 臨界角 ナノラジアン 角度センサ 計測工学

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ加工に代表される微細加工が行われ、加工するための装置においては、サブナノメートル単位の変位およびナノラジアン程度の角度変位の測定が必要になってくると考えられる。また、IC製造過程において、シリコン基板の傾きが線画の焦点外れの原因となる。現在はマイクロラジアン程度の傾きで問題ないが、将来においてナノラジアンの角度測定が必要になる。現在、角度変位の測定においてはCCDセンサによる光てこ式で、数マイクロラジアン程度の感度であり、大きな装置であるオートコリメーション法を利用した測定ではサブマイクロラジアン程度の測定感度を有している。

マイクロラジアンおよびナノラジアン程度の測定は非接触であることが必要で、光を使うのはその理由である。微小角度変位の測定に関して、本方法の原理は臨界角(図1)近辺における透過光量と反射光量の急激な変化を捕らえるものである。先行研究(図2)として1本のレーザビームを使った方法で、マイクロラジアン程度の測定感度を得ることができた。この研究を発展させ、より高い感度で角度測定を行うにはさらに工夫を加える必要がある。それはレーザ平行光を使ったもので、透過光と反射光の分布まで考慮する方法であり、光の分布を見ることによって情報量を増やし、測定の感度を向上させるというものである。

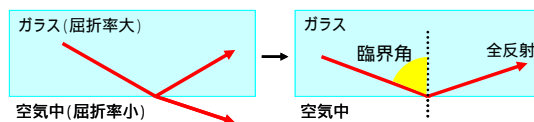


図1. 透過光と反射光

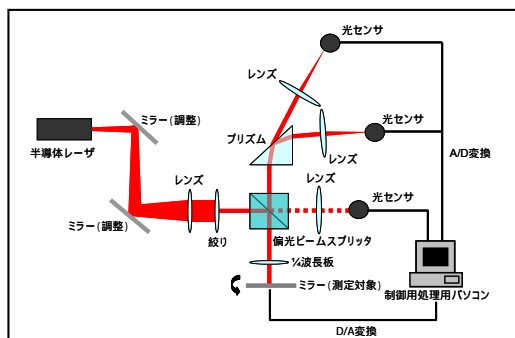


図2. レーザビームを使った微小角変位測定

### 2. 研究の目的

本研究ではナノラジアンの感度を持つ微小角度の変位測定手法の検討と感度向上を目的とする。既にマイクロラジアン程度の感度の測定に成功し、さらに測定感度を高めるためにCCDセンサを用いて多数の測定データを取得することによりナノラジアンの感度で角度測定を行う。

ナノラジアンの角度測定を可能にするためには、理論的および実験的な問題がある。理論的には、透過光量と反射光量の急激な変化による測定理論だけではナノラジアンの感度には至らないと考えられることである。また、実験的には、ナノラジアンで確実に回転する装置が無いことである。

具体的な目的を以下に列記する。

(1)透過光の分布および反射光の分布を画像で観測する光学系を作成する。

(2)微小回転装置を新たに製作し、その性能を明らかにする。

(3)得られた画像データを処理するプログラムを作り、実験を通して、微小回転角度測定装置の特性を評価する。

(4)本研究の基本である2つのセンサを用いる方法に改良を加える。(研究過程で追加した目的)

### 3. 研究の方法

(1)透過光の分布および反射光の分布を画像で観測する光学系を作成する。:これまでの光学系では透過光と反射光の2つのデータを処理するものであり、測定精度は測定データを時間的に複数回取得することで可能になるが、測定感度の向上は望めない。そこで、平行なレーザ光(ただし、僅かに平行でない)を使い、その強度分布を観測できる光学系を作成する。また、専用の頂角と反射防止膜等を施したプリズムの使用により、迷光による悪影響を軽減する。第1号機では、透過光が楕円になり、その度合いも大きく、解析が困難と予想された。そこで、第2号機として透過光の分布を使わずに、臨界角用プリズムに入る前の全光の分布から反射光の分布を引くというアイデアが生まれた。さらに、干渉性の良いレーザ光に特有の干渉縞や回折模様が画像に生じ、それらが雑音となって測定結果に悪影響があることが分かった。そこで、第3号機として干渉性の低い光源に代えることにした。さらに小型化することで、測定結果の安定性を高める。

(2)微小回転装置を新たに製作し、その性能を明らかにする。:これは目指している微小な回転を与えられる装置が無いため、実験の精度や評価に不可欠なものである。目指しているナノラジアンの精度で回転する装置を作らなければならない。PZTの駆動による平行ばねとそれに連動した微小回転変位装置を製作した。また、エレクトロストリクティブアクチュエータを使う予定であったが、調査の結果それに匹敵する装置が開発されたので、それを購入して実験に使用することにした。これは50nrad.のステップで回転させることができる。

それらを組み合わせた装置にし、正確に回転するかどうかなどを確認する。回転装置が

正しく動いていることを確認しなければ、実験やその評価を行えないため、予めその性能を確認しておく必要がある。製作した微小回転装置に取り付けられたミラーの変位をレーザ測長で測定し、被測定ミラーの回転角がナノラジアンで制御可能であることを検証する。

(3)得られた画像データを処理するプログラムを作り、実験を通して、微小回転角度測定装置の特性を評価する。：プリズムの臨界角付近で反射する光に強度分布が生じる。これはレーザ光が僅かに平行ではないので、プリズム射出面で光の入射角が場所により異なるためである。この画像をいくつかの領域に分け、領域内の光強度の和を使って重み付き平均により角度変位を求める。そのため、その感度および精度がより高くなると考えられる。本研究では、画像データの中から必要な情報を取り出し、角度を計算するプログラムを作る。同時に適した分布が得られるように光学系を調整、あるいは工夫する。

一定の角度を与える実験を行い、測定装置の精度や感度、測定範囲、直線性などの特性を明らかにする。

(4)本研究の基本である2つのセンサを用いる方法に改良を加える。(研究過程で追加した目的)：研究過程において、追加すべき研究目的が生じた。それは測定感度の向上が目標以下であったことに加え、回転角と解析値の係数が装置により変動するという問題を解決するために、基本的原理に戻って、解決法を検討した。角度による反射光と透過光の割合は理論的に計算することができるので、その理論値に合う実験結果となるためには、光量と電気的な信号が比例しなければならない。そのような電気回路を製作し、それを使った実験を行う。

#### 4. 研究成果

(1)透過光の分布および反射光の分布を画像で観測する光学系を作成する。：第2号機として透過光の分布を使わずに、臨界角用プリズムに入る前の全光の分布から、反射光の分布を引くための光学系を考え装置にした。これを加えた特許の出願を行った。その光学系および装置を図3に示す。

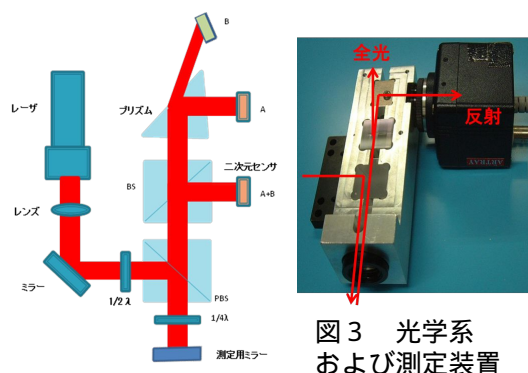


図3 光学系および測定装置

(2)微小回転装置を新たに製作し、その性能を明らかにする。：自作の微小回転装置を製作した。PZTへの電圧に応じて、平行バネを通して点Bが変位し、ミラーAが微小回転する装置である。測定対象のミラーAとは別に回転変位を与えるために直線運動するミラーBの移動量を干渉測定により行い、PZTへの電圧に対する回転量を求めた(光学系図4)。その結果を図5に示す。ミラーBの直線変位はPZTおよびバネ機構などにより、ヒステリシスがあり、伸びと縮みによりその変化量が異なる。平均するとPZTへの電圧1Vで15nmの直線変位がある。これはミラーAの回転に換算すると1Vで170nradの回転変位となることがわかった。

自作回転装置に市販の回転装置(50nrad.単位で回転)を組合せ、粗動と微動を可能にし、逆方向へ50nrad.動かすことで、元に戻ることを確認した。

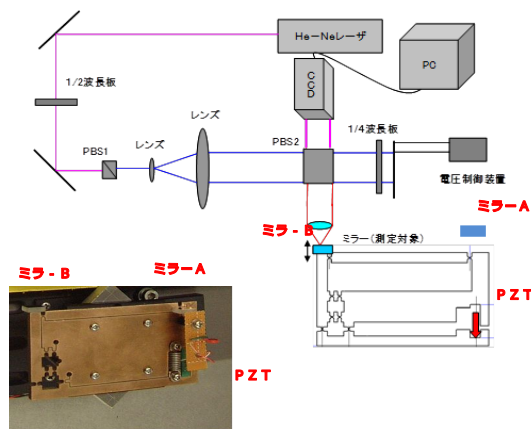


図4 微小回転装置と回転量測定光学系

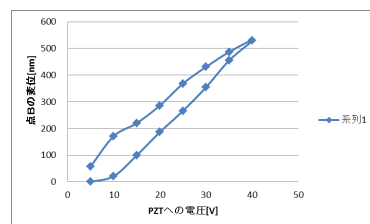


図5 PZTへの電圧に対する点Bの変位

(3)得られた画像データを処理するプログラムを作る。：測定装置の第2号機により得られた反射光および全光の分布画像を図6に示す。これを8領域に分けて、各領域の光強度の和を求める。

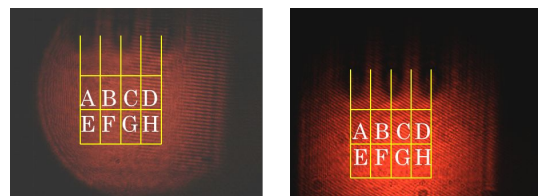


図6 強度分布と領域分割

透過光量 = 全光量 - 反射光量  
 であり、全光量の変化による影響を無くすために 解析値  $y = ( \text{透過光量} - \text{反射光量} ) / \text{全光量}$  を計算するプログラムを作った。その結果を図7に示す。領域により解析値  $y$  の値が異なるが、 $10 \mu\text{rad}$  の変位を確認することができる。これらから標準偏差による重み付き平均を行うことで、より精度の高い結果を得た。

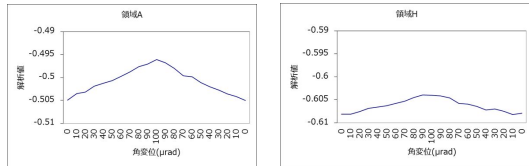


図7 領域による解析値  $y$  (2号機)

干渉性の低い光源に代えた第3号機の結果、 $10 \mu\text{rad}$  の測定が行えたが、数  $\mu\text{rad}$  程度の変動があり、目標とする  $\text{nrad}$  単位までは及ばなかった。その原因は実験室の振動などの外乱があるが、二次元センサの明るさに対する分解能の不足と、暗電流による光量と電流の直線性の問題がある。

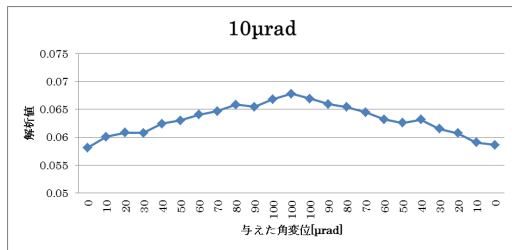


図8 解析値  $y$  (3号機) 数  $\mu\text{rad}$ .

(4)本研究の基本である2つのセンサを用いる方法に改良を加える。(研究過程で追加した目的): 二次元センサによる方法では、目標とする  $\text{nrad}$  単位までは及ばなかったこと、実際の回転量と解析値(無次元)の関係は直線性があるものの、その係数はキャリブレーションが必要であった。そこで本研究の基本である2つのセンサを用いる方法において、キャリブレーションすることなく、理論通りの係数になるようにするとともに、光量とセンサからの電流の直線性など高めるためや、操作性を高めるためのオフセット電流など電気回路を改良した。(図9参照)

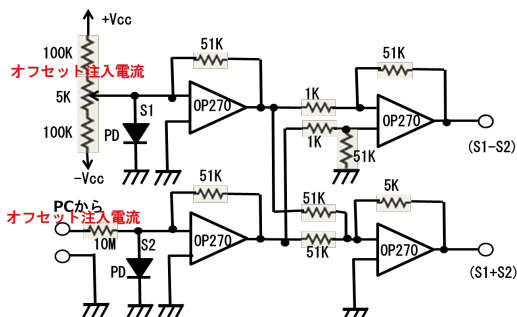


図9 適した電気回路への改良

その結果、図10のように完全ではないものの、理論で示される係数に近い値が得られるようになり、 $50 \text{nrad}$  ( $0.05 \mu\text{rad}$ ) の測定が行えた。また、 $50 \text{nrad}$  程度の誤差が存在した。それを学会で発表した。

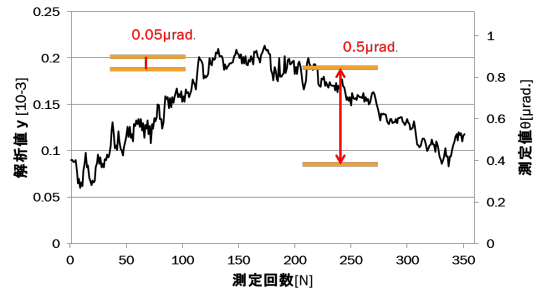


図10 2つのセンサによる方法の改良結果

最終25年度で残された問題に対しては、今後継続する研究によって補う予定である。

### 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 4 件)

・田代発造、三原毅、柴田幹、松本宗宏: 臨界角での光強度を用いた微小角変位の測定: 2013年度精密工学会春季大会、2014年3月19日、東京大学.

・田代発造、江本寛之、三原毅: 臨界角における光強度分布を用いた傾きの測定: 2012年度精密工学会秋季大会、2012年9月16日、九州工業大学.

・江本寛之、田代発造、三原毅: 臨界角付近を使った微小角変位測定装置の精度向上に関する研究: 平成24年度電気関係学会北陸支部連合大会、2012年9月1日、富山県立大学.

・江本寛之、田代発造、三原毅、吉田洋樹: 臨界角付近を使った微小角変位測定装置の精度向上に関する研究: 平成23年度電気関係学会北陸支部連合大会、2011年9月17日、福井大学.

### [産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 微小角変位測定方法と装置

発明者: 田代発造

権利者: 国立大学法人富山大学

種類: 特許

番号: 得願 2012-26902

出願年月日: 2012年02月10日

国内外の別: 国内

### 6. 研究組織

(1)研究代表者

田代発造 (タシロ ハツゾウ)

大学院理工学研究部(工学)准教授

研究者番号: 80179689