

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760094

研究課題名 (和文) 非分割型光電変換素子による超高感度高分解能ナノラジアン角度センサに関する研究

研究課題名 (英文) Development of a high sensitive and resolution angle sensor using single-cell photodiodes

研究代表者

荒井 義和 (ARAI YOSHIKAZU)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20455801

研究成果の概要 (和文)：本研究は、角度計測において一般的に応用されているオートコリメーション法における角度検出感度を向上させるためスポットサイズを小さくすると、光スポットの強度分布の最も強い中心部分が分割型PD隙間に埋もれてしまう事によるS/Nの低下が起こる従来技術の欠点を解消するため、非分割型光電変換素子を用いることによって微小角度変位量の測定が可能な角度センサを提供し、その能力を実証した。

研究成果の概要 (英文)：This research proposes an angle sensor using single-cell photodiodes to measure small tilt angles. This sensor can overcome a weakness in conventional technology. The weakness is decrease of S/N ratio because of the influence by the insensitive gap between the photodiode cells of multi-cell photodiode. In autocollimation method, when a light spot size is reduced to improve the sensitivity of angle sensor, the strongest central signal of the light spot intensity distribution decreases. The performance of the developed sensor is demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：角度計測、非分割型光電変換素子、オートコリメーション法、多自由度

1. 研究開始当初の背景

物体の形状や運動を構成する上で長さや角度は欠かすことのできない要素である。また、精密加工・測定装置や半導体製造装置に代表される産業技術においてもそれらの要素は重要な要素である。年々高まる光学部品や半導体素子の高精度化への要求に伴い、それらを製造するための工作機械や半導体製造装置に用いられている精密ステージに対する高速かつ高精度な位置決め技術の確立

が求められている。精密な部品を加工・測定するためにはナノメートルオーダーでの位置決めが要求されるため、位置を決定するためのセンサは必要不可欠である。

三次元におけるナノメートルオーダーでの位置決めにおいては、従来から主に測定されている微小位置検出のみならず、多自由度測定におけるセンサのサイズなどの都合による各測定点のずれなどを考慮し、微小角度検出が必要とされている。微小角度変化は精密

部品の加工・測定において装置の構成次第では無視することのできない誤差を生む原因となる。従って、精密機械に対してこのような誤差成分をダイナミックに測定し補正するための高速かつ高感度、高分解能微小角度検出センサの開発が望まれている。精密ステージの微小角度検出やその補正の他にもディスク記憶装置の回転振れ測定、走査型の形状計測などにおいても微小な角度変化検出のさらなる高精度・高分解能化の要求は高い。

2. 研究の目的

本研究は、角度計測において一般的に応用されているオートコリメーション法における角度検出感度を向上させるためスポットサイズを小さくすると、光スポットの強度分布の最も強い中心部分が分割型 PD 隙間に埋もれてしまう事による S/N の低下が起こる従来技術の欠点を解消するため、非分割型光電変換素子を用いることによって微小角度変位量の測定が可能な超高感度高分解能小型多自由度角度センサを提供し、その能力を実証する事を目的としている。

本研究の角度センサが実現すれば、従来分割型の位置検出素子を用いた場合に潜在的に問題であった、S/N の低下を解決する事ができ、かつ素子間の隙間サイズに無関係にスポットサイズを選定する事が可能であるため、従来の分割型 PD を用いた場合の角度センサよりも高感度な角度センサを構成できる。また、簡便な光学系でありながら、精密ステージの運動により生じる微小な角度変化を検出でき、超精密加工機や半導体製造装置の加工精度向上に大きく貢献できることが見込まれる。

3. 研究の方法

角度検出における従来技術としてレーザ干渉計などを複数組用いて差動を取ることで角度変化を検出する方法などが用いられているが、光路の増加に伴う誤差要因の増加やシステム全体の拡大、煩雑化などの問題が挙げられている。その他の従来技術としてオートコリメーション法を利用したオートコリメータが用いられている。図1に示すような光を用いた角度検出法の一つであるオートコリメーション法は、測定対象である鏡面体と、光源、レンズ、位置検出素子の組み合わせからなる。鏡面体の角度変化に伴って反射光のレンズ焦点面上におけるスポットの位置が変化するため、そのスポットの移動量を位置検出素子で検出する事により角度変化が測定できる。鏡面体が光軸に対して $\Delta\theta_z/2$ 傾斜した場合、 $\Delta\theta_z$ が十分小さいとすると対物レンズの焦点距離を f 、焦点面上における光スポットが焦点からの位置変位量を d とすれば次式のように表すことができ

る。

$$\Delta\theta_z = d/f \quad (1)$$

この検出法は、その光学系の単純さ故に角度計測において有用な検出方法である。オートコリメータは古くから精密ステージの角度誤差検査や定盤などの表面形状計測に用いられてきた。

しかし、従来のオートコリメータは位置検出素子に CCD を用いているため応答速度が遅く、用途が静的または比較的速度の遅い対象の微小角度測定に限られてしまい、ダイナミックな測定には適していない。また、センササイズが大型であるため、工作機械などへの組み込みには不向きである。この検出法において、位置検出素子に CCD の代替として分割型 PD (フォトダイオード) を用いる事で、高感度な角度センサが開発されている。このレーザオートコリメータは従来のオートコリメータと比較すると応答速度が速くダイナミックな計測に適している利点がある。このタイプの角度センサの場合、分割型の PD には通常数 μm ~数十 μm の隙間が存在しているため、焦点面上のスポットサイズがこの隙間のサイズよりも大きい必要がある。

このタイプの PD を角度検出に用いた場合には、スポットの大きさや角度検出感度との関係が反比例する事が分かっている。スポットサイズは小さいほどに角度検出感度が向

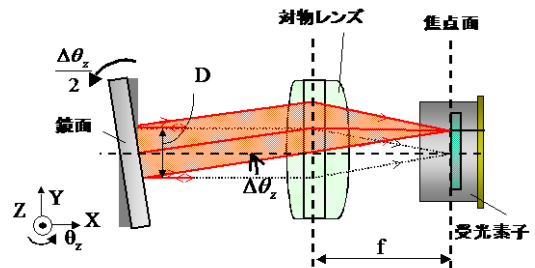


図1 オートコリメーション法による角度計測

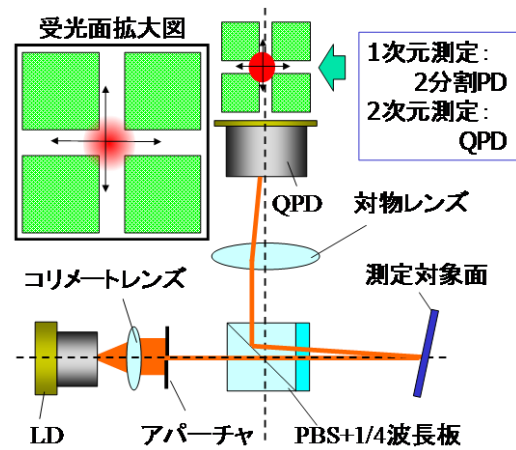


図2 従来技術の問題点

上するため、より微小角度を高感度に検出可能である事がわかっている。このため、高感度角度センサを構成するにあたり、図2に示す光スポットの強度分布の最も強い中心部分が分割型 PD 隙間に埋もれてしまう事による S/N の低下が起こり、検出感度とのトレードオフが問題となっている。このため、スポットの位置を正しく検出するためには、スポットサイズは隙間のサイズよりも大きい必要があり、これが角度センサの検出感度の向上を妨げていた。

従来技術の欠点を解消する光学系を図3に提案する。基本的な光学系の配置は従来のオートコリメーション法に従うが、試料面からの反射光をビームスプリッタなどによりビームを分割する。光検出素子には、1対の非分割型の単素子 PD を用いて、一方の単素子 PD は、その受光面の一部に光スポットが入射するように、分割された一方の光ビームにより定義される光軸から PD 受光面の長さ以下のオフセット量を与えて配置する。そして、測定対象面が姿勢変化すると鏡面体からの反射光がその変位に応じて変化する。従って、この単素子 PD 上の光スポットの位置が変化する事により、単素子 PD 上に入射している光スポットの面積が変化する。この入射光スポットの面積変化に比例する単素子 PD からの出力の変化量を検出する事により、角度の検出が可能である。スポットの半分以上が単素子 PD の一部に入射するように配置した場合、多分割型の PD を用いる場合に比較して、隙間サイズが原理的に関係なくなるために、例えば回折限界まで絞った非常に小さなスポットを用いた高感度角度検出が可能となる。また、スポットの強度分布の最も強い中心部分の大部分を利用する事ができるため、S/N も向上する事が期待される。

他方の単素子 PD は、位置の変化による光強度変化量の検出用として光スポットの大きさよりも十分に大きな素子サイズを有し、分割された他方のビームにより規定される光軸に沿って配置され、光強度変化の正規化のための光量モニタリング用として設けられている。モニタ用 PD1 の出力を γ 、角度検出用 PD2 の出力を α とすると下記(2)式を用いることにより光源や光路中における光強度の影響を排除できる。

$$\alpha / \gamma \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

また、この検出原理を用いて多自由度の角度検出を行う事も可能である。上記検出原理は基本的に一軸の角度検出を行うものであるため、鏡面体により反射した光を2つに分割し、それぞれの光に上記原理を適用する事により、2軸角度検出を行う角度センサを構成可能である。

4. 研究成果

まず始めにモニタ用 PD の効果を確認するために基礎実験を行った。作製した角度センサから射出されたビームは、微小な角度を走査することのできるピエゾ傾斜ステージ上に固定されている測定対象面に入射する。また、ピエゾ傾斜ステージには角度検出の参照値として用いる市販のオートコリメータ用の反射鏡も搭載されている。ピエゾ傾斜ステージに信号を与えたときの角度センサおよびオートコリメータの出力を同時に取得する。図4に測定対象面の角度を±50秒程度変化させた時の光量モニタリング用 PD1 および角度検出用 PD2 の出力を示す。図中の数字は作為的に変化させた入射光強度である。横軸は参照用のオートコリメータの出力を、縦軸は角度センサの各 PD の出力値を表している。図5は PD1 の出力を用いて正規化した PD2 の

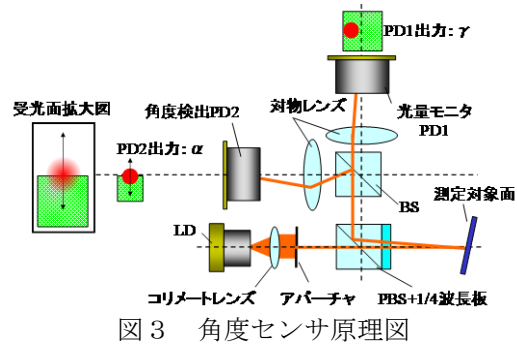


図3 角度センサ原理図

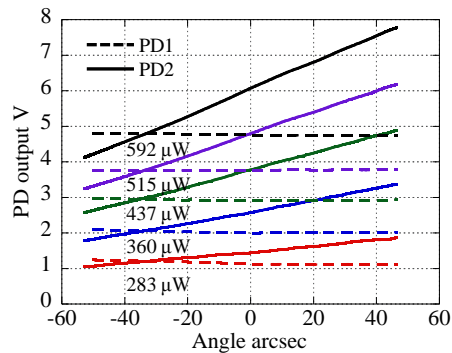


図4 入射光強度変化による角度検出結果

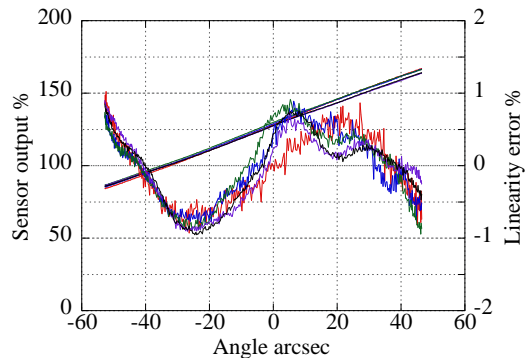


図5 正規化後の角度検出結果

出力結果を示している。図の測定範囲において大きく変化した入射光強度によらず、理想的な線形出力が得られていることがわかる。この測定範囲におけるそれぞれの平均感度の平均値および平均感度からの差は $0.82 \pm 0.03 \text{ \%/arcsec}$ となり、光源の強度変化の影響を取り除きながら角度検出可能である。図にはあわせて線形誤差を示す。線形誤差は $\pm 1\%$ 程度であり、各出力の傾向も一致していることが確認できた。モニタ用 PD の出力を用いて感度の補正が可能であるならば、線形誤差に 3 次の近似多項式による校正曲線を当てはめた際の残差はノイズレベルであることも確認できた。

原理の有効性が確認できた後、検出角度を 2 次元に拡張し作製した角度センサの写真を図 6 に示す。図 7 には製作した 2 軸角度センサの安定性の結果を示す。図より、ヨーイング、ピッチング共に $\pm 0.03 \text{ arcsec}$ まで読み取れる事がわかる。次に製作した 2 軸角度センサの特性評価実験を行った。ビーム直径 5 mm 、焦点面上のスポット径を $2.5 \mu\text{m}$ として、その時のオートコリメータ及び 2 軸角度センサの出力変化を得た。得られた 2 軸角度センサの特性曲線を図 8 に示す。これよりこの測定範囲におけるヨーイングの平均感度は、 3.44 \%/arcsec 、線形誤差は $\pm 8.2 \%$ 、ピッチングの平均感度は 3.19 \%/arcsec 、線形誤差は $\pm 9.6 \%$ である事がわかる。

今後の展望として、従来までの角度センサを用いた形状および運動誤差測定の改良、並びにさらなる多自由度センサへの拡張などが挙げられる。

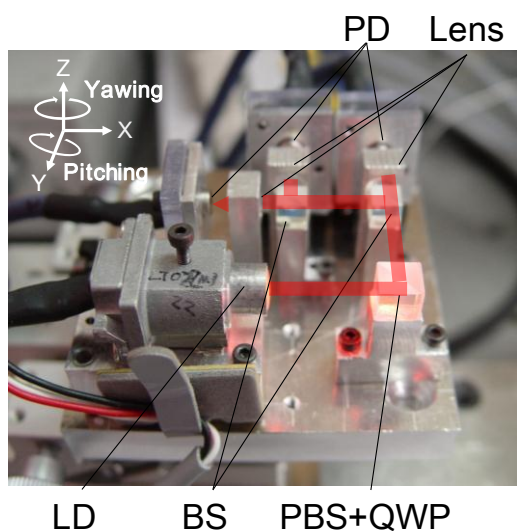


図 6 2 軸角度センサの写真

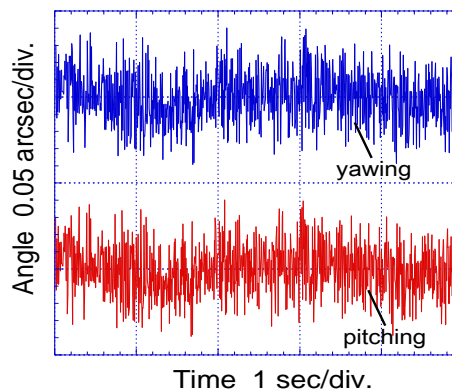
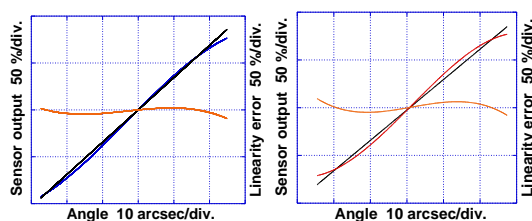


図 7 安定性



(a) Yawing (b) Pitching

図 8 校正曲線評価結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- 菅野哲生, 高偉, 荒井義和, シングルセル PD を用いた角度センサに関する研究, 2010 年度精密工学会東北支部講演会, 2010 年 11 月 27 日, 岩手県工業技術センター, 盛岡市
- Tetsuo Sugeno, Hiroshi Muto, Yoshikazu Arai, Wei Gao, A laser Autocollimator of using Single-cell Photodiodes, The 4th International Conference on Positioning Technology 2010, 2010 年 11 月 25 日, 釜山, 大韓民国
- T. Suzuki, Y. Saito, Y. Arai and W. Gao, Development of a highly sensitive angle sensor by using single-cell photodiodes, The 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2009 年 11 月 11 日, 北九州市
- 鈴木達郎, 齋藤悠佑, 荒井義和, 高偉, 非分割型 PD を用いた高感度角度センサに関する研究, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009 年 9 月 16 日, 盛岡市

5. 荒井義和, 鈴木達郎, 齋藤悠佑, 高偉, 非分割型受光素子を用いた高感度高分解能角度センサの開発 - 原理および光学系 -, 2009 年度砥粒加工学会学術講演会, 2009 年 9 月 3 日, 行田市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 義和 (ARAI YOSHIKAZU)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 20455801

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携者研究者

()

研究者番号 :