

高感度微小傾斜角検出器の性能向上に関する研究

室蘭工業大学 機械システム工学科

○三品 博達, 中南 智哉, 相津 佳永, 湯浅 友典

要旨

半導体レーザーと4分割フォトダイオードで簡易に構成した傾斜角検出器は、地殻の微小な変動を水準面からの傾斜角として検出するもので、精密機械産業や地球物理学的分野に応用可能である。この検出器の分解能向上の方法としてレーザー光の集光レンズ焦点距離延長を行いその効果を確認した。また長期安定性向上のため検出器の恒温制御を行い温度変化による外乱の影響を低減した。

1. はじめに

地球の地盤は地殻変動、潮汐の影響で絶え間なく変動しており、近い将来先端的な精密生産技術において要求される精度の加工を得るには、工作機械自身の精度向上は勿論ではあるが、工作機械の設置環境も考慮に入れる必要がある。この工作機械の設置環境の一つに水準面からの傾斜角が挙げられる。そこで本研究では微小な傾斜角を検出できる小型で軽量のセンサの開発、性能向上を行っている。

本論文では、傾斜角検出器の検出感度を向上させる方法とその効果についての報告と、長期安定性向上のための恒温制御の効果についての報告を行う。

2. 検出原理

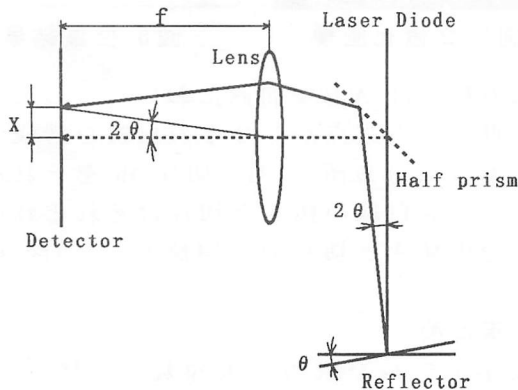


Fig.1 Principle of Detection

Fig.1 は傾斜角検出原理を示している。ここではレーザーの直進性と反射法則を利用しておりレーザー光が平行光束であるとする、傾斜角  $\theta$  はスポット像移動量  $X$  とレンズ焦点距離  $f$  を用いて次のような関係が得られる。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{X}{f} \right) \quad (1)$$

(1) 式より、受光面上における光のスポット像の移動量を検出することで傾斜角を測定することができる。またレンズ焦点距離  $f$  を長くするとスポット像移動量  $X$  が大きくなることになり、検出感度を向上させることができるといえる。

受光素子には4分割フォトダイオード(QPD)を用い、4つの素子からの出力を加減算することでスポット像の2方向の変位を同時に取得できるので、傾斜角をベクトル量として測定できる。

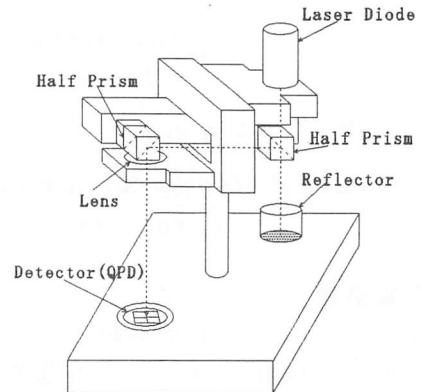


Fig.2 Tiltmeter

Fig.2 はこの検出原理に基づいて構成した傾斜角検出器の外観図である。光源より発せられたレーザー光は水銀を用いた反射面で反射しハーフプリズム、集光レンズを経てQPDに照射される。

3. 傾斜角発生装置と駆動システム

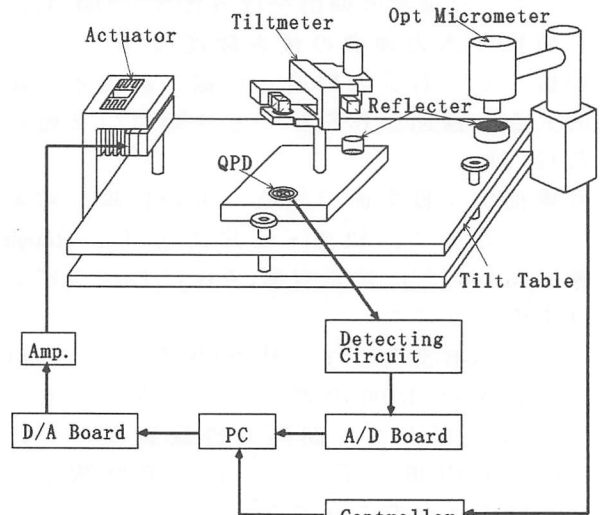


Fig.3 Experimental Setup

傾斜角発生装置は傾斜角検出器の性能検定を行うための装置である。Fig.3 は傾斜角発生装置に傾斜角検出器を乗せた外観とその駆動システムである。傾斜角発生装置は金属棒の熱伸縮を用いて微小な変位を発生させる。熱の供給源にはペルチェ素子を用い、発生した熱は金属棒を挟んでいるアルミブロックに伝わり熱伸縮させる。その伸縮が傾斜テーブルを傾けさせる形式となっている。一般的に熱伝導系は高次の遅れ系であり、その緩やかな傾斜角発生を任意の時間間隔で内挿することで、極めて小さい角度が得られる。

4. レンズ焦点距離延長による感度向上試験

(1) 式より、レンズ焦点距離  $f$  を大きくすると同じ傾斜角に対してのすばっと像移動量  $x$  も大きくなり検出感度を向上させることができる。そこで焦点距離 50 と 80[mm] (レンズ径はそれぞれ 10,15[mm]) で検定した結果を比較する。

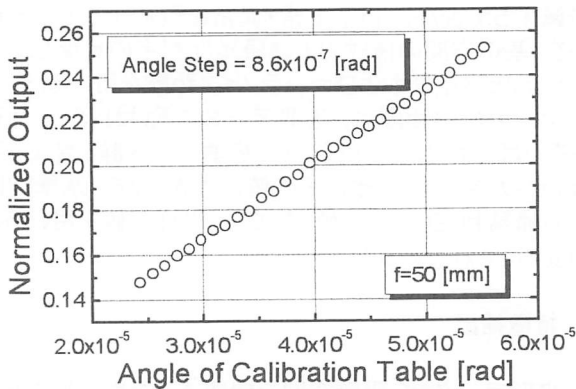


Fig.4 Sensitivity of Tiltmeter

Fig.4 は、 $f=50$ [mm]の性能評価を行ったグラフである。傾斜角度と検出器出力の間には直線性があり、このグラフを内挿することで分解能を求める。ここで検出器出力を正規化した値の隣り合う差分の平均値  $\delta$  を、最小2乗近似直線からのずれを用いて求めた標準偏差  $\sigma$  で割った値を用いて、95.5%以上での保証を直線性の目安とした。このとき  $\delta/\sigma$  の値は4以上となる。

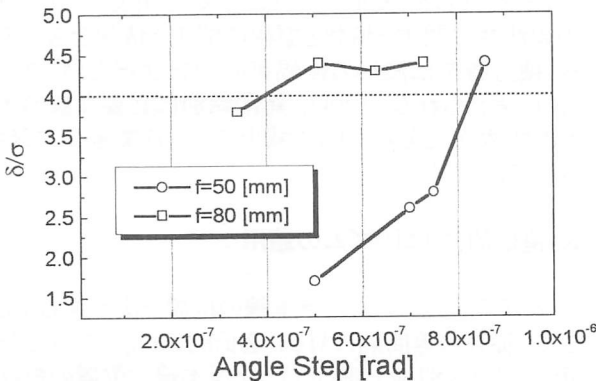


Fig.5 Effect of Extending Focal length

Fig.5 は、 $f=50,80$ [mm]の複数の検定結果を分解能と

$\delta/\sigma$  の関係で表したものであり、角度が小さくなるにつれて  $\delta/\sigma$  の値、つまり直線性が崩れていく様子が伺える。 $f=80$ [mm]では約  $5.1 \times 10^{-7}$ [rad]の分解能まで確認でき、焦点距離延長が性能向上の手段として認められたが、小型軽量の傾斜角検出器の開発という本研究の主眼を考えると必ずしも有効な手段とは言い切れない。

5. 恒温制御による安定性向上試験

この傾斜角検出器には出力の変動がある。変動原因として第一に考えられるのは検出器周囲の温度変化である。温度変化は半導体レーザーからの出力変動や検出器を構成する部品の熱膨張を引き起こす。この影響を除去するために恒温制御された恒温槽の中に検出器全体を収め、その上で先ほどと同様に検出器分解能を検定した。Fig.6 に示す結果は焦点距離 80[mm]について自然温度下と温度制御下とを比較したものである。恒温槽を使用することで検出器の分解能を 2/5 に向上させることが確認できた。従って検出分解能と安定性には密接な関係があり、これらを一連の性能向上として位置付けなければならないといえる。

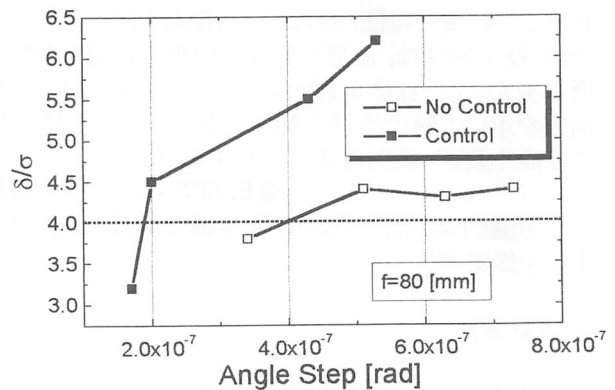


Fig.6 Effect of Temperature Bath

6. おわりに

本研究の結論と今後の課題を以下にまとめる。  
 ○焦点距離延長試験では、理論どおりの感度向上が確認できた。現段階における検出器は  $f=50$ [mm]で約  $8.6 \times 10^{-7}$ [rad],  $f=80$ [mm]で約  $5.1 \times 10^{-7}$ [rad]の分解能がある。また検出分解能を 1/10 にしたければ焦点距離を 10 倍にしなければならず、そうすると装置全体の寸法が大きくなってしまい焦点距離延長が必ずしも検出感度向上の有効な手段であるとは言い切れないが、検出器の形や寸法が許す範囲で比較的容易に感度が向上できる方法として有用となり得るだろう。  
 ○検出器出力の変動は恒温制御を行うことで、最高で約  $2.0 \times 10^{-7}$ [rad]に向上した。しかし、出力の変動は完全に除去できてはおらず、今後はその他、振動、剛性、雑音等の安定性悪化要因を除去することが検出器の感度向上につながると考えられる。