

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420077

研究課題名(和文)高精度方位角検出器を用いた大型対象物の高精度形状評価

研究課題名(英文) Large-scale profile evaluation by using a precision angle detector

研究代表者

久米 達哉 (Kume, Tatsuya)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・講師

研究者番号：40353362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：角度検出に基づく形状評価法は、形状基準の精度に影響されないことから、古来、高精度形状評価に用いられる一方で、形状基準を用意することの難しい大型対象物の評価にも有効と考えられる。本研究では、傾斜計では検出できない水平面内の評価ができ、オートコリメータのように測定光による評価範囲の制限を受けない、ジャイロを角度検出器に用いた形状評価法の実現を目指した。これまでに、回転するジャイロから得られる角度信号の2階差分値から、差分測定原理に基づき角度信号の時間変化の影響を除去し、互いに反対方向に回転するジャイロを用いて、地球自転軸に対する回転軸の方位角を導出する方法を考案し、その有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：Profile shape evaluation by detecting tangential angles of the profile has been adopted for precise evaluation, because it is not affected by accuracy of the shape reference. It is considered to be also competent for evaluating large objects, because it inherently requires no shape references, which become difficult to be defined enough accurately as the object becomes large. Here, a gyro is used for detecting the angles. It can evaluate profiles in a horizontal plane, which cannot be evaluated by an inclinometer. Moreover, there is no limitation in its measurement distance, while that of an autocollimator is limited by its measurement beam range. Fluctuation of angular signal of the gyro is eliminated by obtaining second difference of the angular signal from the rotating gyro based on reversal measurement. The angle of the gyro rotating axis against the axis of the earth rotation can be derived by using two gyros rotating inversely with each other without affected by the fluctuations.

研究分野：精密形状測定

キーワード：形状評価 角度検出 ジャイロ レートオフセット 反転測定 地球自転

1. 研究開始当初の背景

科学,工学の発展に従い大型かつ高精度な機器や施設が造られるようになり,これらの寸法,形状,アライメント(相対位置)などの高精度な評価が行われるようになった。

現在これらの用途には,主としてレーザートラックやトータルステーションなどに代表される光学式の精密測距測角器が用いられている。これらを用いてサブ mm 程度の高精度な評価を行う場合,空気揺らぎの影響などから,評価範囲は数十 m 程度となる。より広範囲における評価には,複数の評価結果を接続する測量網の手法が用いられ, GPS を組み合わせることで,数 km 規模の評価が行われる例もある。

測量網の精度を上げるためには,ある程度遠方の多方向から測定対象を見渡す必要がある。しかし一般的に,大規模かつ高精度な機器や施設は,環境変動の影響を緩和するために,地下や堅牢な建物中の比較的狭隘な空間に設置されることが多い。このような環境では,測量網の精度が上げられず,往々にして GPS も使用できない。このような理由から,環境に制約されない高精度な形状評価法の実現が,大規模な形状評価において望まれている。

角度検出に基づく形状評価は,形状基準が不要であることから,一般的な形状基準と同程度かそれ以上の精度が望まれる。定盤や光学表面など高精度形状評価に古来用いられている。同時にこの方法は,形状基準を用意することの難しい大型対象物の高精度形状評価にも有効と考えられる。

研究代表者らは,傾斜計を用いた形状評価法を,地下トンネル内に設置された直線型粒子加速器の真直度評価に適用することで,全長 71 m の真直度を 49 μm 以下の標準偏差で評価し,最長 206 m の真直度評価を実現した。さらに,評価長に対する誤差増加に着目し,角度検出に基づく形状評価の誤差増加は,現在主流となる測量網を用いる方法よりも小さくなること示された。

このように,角度検出に基づく形状評価は,大型対象物の形状評価に対して優れた素性を持つことが示された。しかし,重力方向を基準とする傾斜計を用いる方法は,水平面内の形状評価に適用できず,100 m を超えるような大型の対象物では,地球丸みの影響が無視できなくなる。一方,光学式の角度検出器であるオートコリメータを用いる方法には,そのような制約はないが,測定光の到達範囲により,評価範囲が 100 m 程度に制限される。

2. 研究の目的

角度検出に基づく形状評価は,大型対象物形状評価に対し優れた素性を持つことから,従来の角度検出器の欠点を克服することで,従来に無い優れた形状評価が実現できるものと期待される。

本研究では,傾斜計では無視することので

きない,地球丸みの影響を受けることなく,水平面内にも適用可能な形状評価を,オートコリメータよりも広い 100 m を超える評価範囲において実現するため,新たな角度検出法を実現することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では,重力方向やビーム方向を基準とすることなく,比較的高い分解能で角度検出が可能なジャイロを用いる。

ジャイロによる角度検出では,検出される角度信号の時間変化が最大の問題となる。

本研究では,ジャイロをその角度検出軸に対して直交する軸周りに回転させながら,得られる角度信号の二階差分値を用いることで,連続的な反転測定を実現し,検出される角度信号の時間変化の影響を除去,抑制する。

さらに,互いに反対方向に回転する 2 つのジャイロの角度信号をもとに,ジャイロ回転軸の地球自転軸に対する方位角を導出し,その角度をもととした形状評価を行う。

4. 研究成果

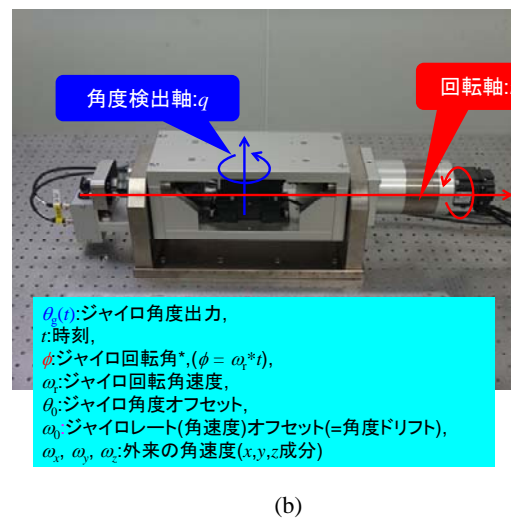
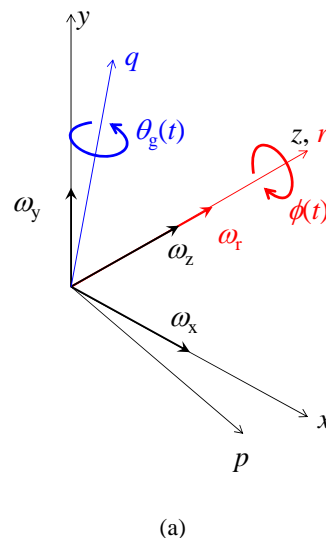


図1. (a).回転するジャイロのモデルと,(b).実験装置の概要

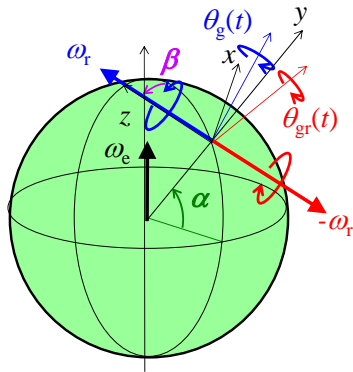


図2. 地球上にて互いに反対方向に回転するジャイロ

回転するジャイロのモデルを図 1(a)に, 実際には作成した実験装置を(b)に示す. ジャイロは, その角度検出軸 q と直交する r 軸周りに一定の回転速度 ω_r で回転する. 実験装置では, 市販の光ファイバジャイロ(FOG)ユニット, 多摩川精機 TA4265N1510(大きさ, 65 mm × 130 mm × 85 mm; 質量, 1.5 kg; 測定範囲, ±180°; 演算サイクル, 100 Hz; ドリフト, 3 °/h-rms)を回転機構で回転させながら信号を得ている. 装置は, 23 ± 1.0 °C に空調された恒温室内の石定盤上に, 回転軸 r が水平になるように設置した.

図 1 の構成を 2 組用い, 地球上において, 回転軸を同一として互いに反対方向に回転するモデルを図 2 に示す. このとき, 正/逆回転するジャイロから得られる角度信号の二階差分値は, それぞれ(1), (2)式のように示される. ここで, α はジャイロ設置位置の緯度, β はジャイロ回転軸の北からの方位角で, 地球自转角速度, ω_e は, ジャイロ回転角速度, ω_r と比較して十分に小さいものとする.

$$\Delta^2 \theta_g(t) \equiv \theta_g \left(t + \frac{2\pi}{\omega_r} \right) - 2\theta_g \left(t + \frac{\pi}{\omega_r} \right) + \theta_g(t), \quad (1)$$

$$\approx \frac{4\omega_e}{\omega_r} (\sin \alpha \cdot \sin \omega_r t - \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega_r t)$$

$$\Delta^2 \theta_{gr}(t) \equiv \theta_{gr} \left(t + \frac{2\pi}{\omega_r} \right) - 2\theta_{gr} \left(t + \frac{\pi}{\omega_r} \right) + \theta_{gr}(t). \quad (2)$$

$$\approx \frac{4\omega_e}{\omega_r} (\sin \alpha \cdot \sin \omega_r t + \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega_r t)$$

これらから, 以下の 2 式が得られる

$$\Delta^2 \theta_g(t) + \Delta^2 \theta_{gr}(t) \approx \frac{8\omega_e}{\omega_r} \sin \alpha \cdot \sin \omega_r t, \quad (3)$$

$$-\Delta^2 \theta_g(t) + \Delta^2 \theta_{gr}(t) \approx \frac{8\omega_e}{\omega_r} \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega_r t. \quad (4)$$

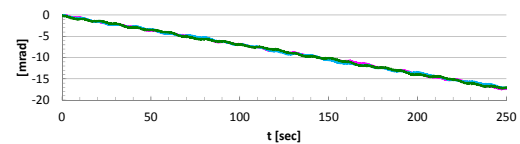
このとき(3)式から得られる正弦波, $\sin \omega_r t$ の振幅からジャイロ回転軸, r の方位角 α を, (4)式から得られる余弦波, $\cos \omega_r t$ の振幅から, r のもう一方の方位角 β を, ジャイロの角度オフセット, θ_0 , および, レートオフセット, ω_0 の影響を受けることなく, それぞれ求めることができる. これが, 本研究において考案し, 提案する方位角検出法となる.

ジャイロの回転速度 $\omega_r = 0.1$ rps とした場合に得られる角度信号の 3 回の繰返し測定結果を図 3(a), その非線形成分を(b), (a)の二階差分値を(c)に示す. (a)に見られる直線成分は, レートオフセットによるもの, (b)に見られるジャイロ回転速度に同期した変動成分は, (1), (2)式の右辺に示されるジャイロ回転で変調された地球自転運動に起因するもので, 最終的に検出すべき信号, それ以外は, 除去すべき時間変化である. このとき(c)より, ジャイロ角度信号の時間変化は, 高周波ノイズ成分を除き, その二階差分値を取ることで除去されることがわかる.

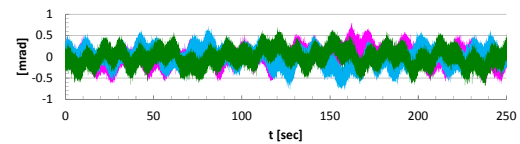
図 4(a), (b)に, 互いに反対方向に回転するジャイロ角度信号の二階差分値の和と差を示す. これらは(3), (4)式の右辺に示されるように, ジャイロの回転周波数成分を持つ正弦波と余弦波になっている.

図 5(a), (b)に, 得られた方位角を示す. それぞれ, 実験条件から推定される期待値と比較して, 5° 程度オフセットを持った方位角が検出されている. 緯度 α については, ジャイロのスケールファクタ(倍率誤差)やノイズの影響, 方位角 β については, 方位角定義時のオフセットに起因するものと考えられる. 実際にジャイロ回転軸を北東, および, 北西の 2 方向に向けた場合に得られた 2 つの方位角の差は, 87.7° となっている. ここで, 実験室の緯度 α は, 約 36° である.

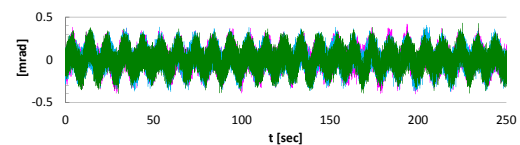
当該研究を遂行するにあたり, ジャイロの連続反転測定によるレートオフセットおよび地球自転の影響除去に関する検討についての講演予稿論文が, The 15th International Conference on Precision Engineering (ICPE2014) において, Best Paper Award の表彰を受けた.



(a).

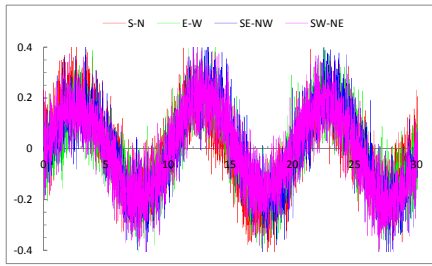


(b).

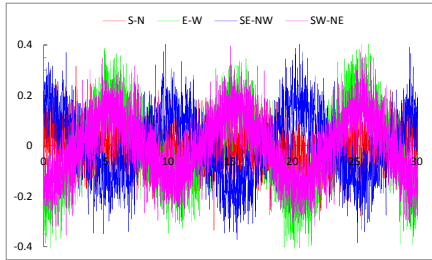


(c).

図 3 (a). 回転するジャイロから得られた角度信号, (b). (a)の直線成分以外の成分, (c). (a)の二階差分値



(a).



(b).

図4(a), 互いに反対方向に回転する2つのジャイロから得られる角度信号2階差分値の和(a),および差(b)の例, S-N,E-W, SE-NW, SW-NE はそれぞれ,ジャイロ回転軸を,南/北,東/西,南東/北西,南西/北東に向けた場合の値を示す

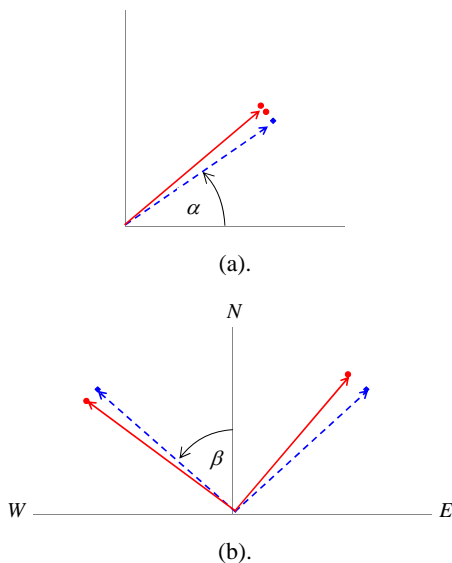


図5. 導出された方位角,赤色が実測値,青色が実験条件から推定された期待値(理論値)

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)

[雑誌論文] (計1件)

①Tatsuya Kume, Masanori Satoh, Tsuyoshi Suwada, Kazuro Furukawa and Eiki Okuyama, “Elimination of Gyro Drift by Using Reversal Measurement,” *Int. J. of Automation Technology*, Vol.9, No.4, pp. 381- 386 (2015), 査読あり.

[学会発表] (計10件)

①久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価(第6報)-地球自転軸を基準とした方位角検出,” “2016年度精密工学会春季大会, 東京理科大(千葉県・野田市), Mar. 16, (2016).

②久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価(第5報)-地球自転の角速度を用いたジャイロ角度出力の検証,” “2015年度精密工学会秋季大会, 東北大(宮城県・仙台市), Sep. 5, (2015).

③久米 達哉, “ジャイロを用いた大型対象物の高精度形状評価法の検討-回転機構を用いたジャイロ角速度オフセットの除去,” 第16回高エネ研メカワークショップ, KEK(茨城県・つくば市), Apr. 10, (2015).

④Tatsuya Kume, “Elimination of gyro rate offset by using a rotating mechanism for large scale straightness evaluation,” “38th International MATADOR Conference, Huwei(Taiwan), Mar. 30, (2015).

⑤久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価(第4報)-回転機構を用いた反転測定に基づく角度検出,” “2015年度精密工学会春季大会, 東洋大(東京都・文京区), Mar. 18, (2015).

⑥久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価(第3報)-連続回転するジャイロの角度信号を用いたジャイロレートオフセットの除去,” “2014年度精密工学会秋季大会, 鳥取大(鳥取県・鳥取市), Sep. 16, (2014).

⑦Tatsuya Kume, “Large scale straightness evaluation using a gyro - Reversal measurement for eliminating gyro drift,” “The 15th International Conference on Precision Engineering, Kanazawa(Japan), July 25, (2014).

⑧久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度加速器アライメント方法の検討-連続反転測定によるジャイロドリフトの抑制,” 第15回高エネ研メカワークショップ, KEK(茨城県・つくば市), Apr. 11, (2014).

⑨久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価(第2報)-光ファイバジャイロの反転測定,” “2014年度精密工学会春季大会, 東京大(東京都・文京区), Mar. 20, (2014).

⑩久米 達哉, “ジャイロを用いた高精度形状評価-ジャイロドリフト除去方法の検討,” “2013年度精密工学会秋季大会, 関西大(大阪府・吹田市), Sep. 12, (2013).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

①名称: ジャイロレートオフセット除去方法

発明者: 久米 達哉

権利者: 高エネルギー加速器研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2015-39708

出願年月日：2015年2月28日

国内外の別：国内

②名称：ジャイロレートオフセット除去方法

発明者：久米 達哉

権利者：高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

番号：特願 2014-39939

出願年月日：2014年2月28日

国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

①<http://www-mec.kek.jp/kousaku/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久米 達哉 (KUME TATSUYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・機械工学センター・講師

研究者番号：40353362