

倒立振子を利用した望遠鏡姿勢制御方式の開発

○花田英夫・鶴田誠逸・浅利一善・荒木博志
(国立天文台・RISE月惑星探査検討室)
船崎健一・佐藤淳・谷口英夫
(岩手大学・工学部)

倒立振子の制御を応用した望遠鏡鏡筒の鉛直制御方式を提案する。円筒(鏡筒)の底部を円錐形とし、先端部をXY自動ステージ上に置く。一方、鏡筒上部を円環で囲み、3方(または4方)から圧力センサーで支える。円筒が鉛直からずれると、重力により倒そうとするトルクが働き、そのトルクによる力を圧力センサーが検知し、それをゼロにするように、底面のXYステージを微小変位させる。

1. はじめに

国立天文台水沢では、Z項の発見に始まる長年の地球回転研究の流れを背景として、月の自転変動をより詳細に観測して月の流体核の存在を明らかにすることを目的に、月面での月回転観測用の望遠鏡を開発してきた(Hanada 他、2012)。この望遠鏡は、地上観測では所期の精度をほぼ達成できたが(鶴田ほか、2015)、水平面の基準として水銀皿の反射面を組み込んだ特殊な光学系を使用しており、ある程度鏡筒の傾斜を保証できるという利点はあるものの、屈折系の対物レンズを使用しなければならない等、望遠鏡の方式を大きく制約し、小型軽量化、操作性、長期安定性の観点で障害となっていた。望遠鏡による、この種の観測を、火星等の惑星にも応用しようとする、今後のロケットの小型化の流れの中で、大幅な小型軽量化は必須である。

自転の変化をその天体上で観測しようとする場合、望遠鏡の姿勢をその天体の座標系と関係付ける必要がある。よく行われる方法は、水銀面、気泡管、下げ振り等を用いて、重力の方向や水平面に望遠鏡の軸と関係付ける方法である。それぞれ一長一短があり、液体を用いたものは、扱いや長期安定性に、下げ振りは、支点の摩擦抵抗や振り子の自由振動等にそれぞれ問題がある。

ここでは、上記の状況を踏まえて、倒立振子を利用した鏡筒の姿勢の新しい制御方式を提案する。

2. 倒立振子を用いた鏡筒の姿勢制御

倒立振子は重心が支点より上に来る不安定な系で、これを安定に鉛直に保つための制御は、古くから制御工学の代表的な課題の一つとして多くの研究がなされてきた。また、最近では二足歩行ロボットに必要な技術として新たな展開を見せているが、望遠鏡の鉛直の基準として用いるのは初の試みである。

鏡筒自体を倒立振子本体とし、底部を点で支持すると、一見不安定であるが、逆に、鉛直からのズレに対する感度が高いため、適切に制御すれば、高精度の鉛直制御が期待できる。この方式は、水平面の基準を光学系の中に組み込むこと無く、かつ、下げ振りのように入射方向に支点等の構造を置く必要が無いので、望遠鏡の方式にほとんど影響を与えない。したがって、小型の望遠鏡の新しい方式として発展性が期待できる。

今回採用しようとする方式は、円筒(鏡筒)の底部を円錐形とし、先端部をXY自動ステージ上に置く。一方、鏡筒上部を円環で囲み、3方(または4方)から圧力センサーで支える(図1参照)。

円筒が鉛直からずれると、重力により倒そうとするトルクが働き、そのトルクによる力を圧力センサーが検知し、それをゼロにするように、底面のXYステージを微小変位させる。

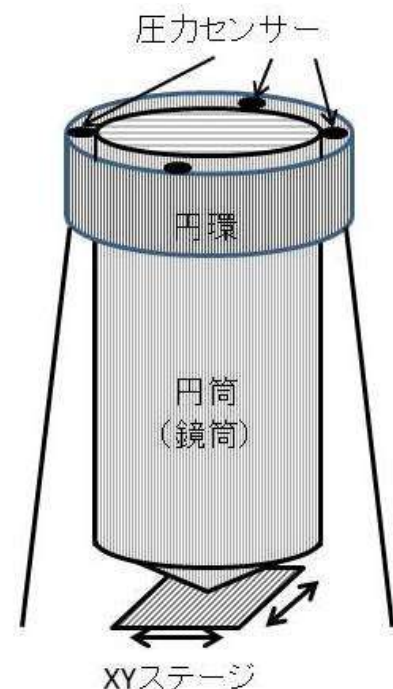


図1. 倒立振子を利用した姿勢制御の原理

3. 期待される精度

おもりの質量 m (kg)の倒立振子が角度 θ 傾いた時に、水平方向にかかる力は

$$P = mg \sin \theta \quad (1)$$

と表される。 $m = 1\text{kg}$ 、 $\theta = 1$ 秒角 ($4.8 \times 10^{-6}\text{rad}$) とすると、 $P = 4.8 \times 10^{-6}\text{N}$ (約 $50 \mu\text{N}$) となる。現在市販の最高感度のセンサーは、分解能が $0.005 \mu\text{N}$ であるので、1秒角傾いた場合の力の1/1,000、すなわち、 1mas (ミリ秒角)の傾きを検出できることに相当する。一方、ダイナミックレンジは分解能の約2万倍あるので、最高感度のセンサーを用いる場合は、姿勢を常に20秒角以内に保つ別の機構が必要である。

また、図3のように、形や大きさが異なっても、質量が同じであれば、鉛直からのズレに対する感度(枠にかかる力)は同じである。これは(1)式に重心までの高さが入っていないことからわかる。これは、小型化にとって有利である。ただし、底部の位置制御の精度は、重心までの高さに依存する。つまり、小型になるほど、頂点の位置制御により精密さが要求される。

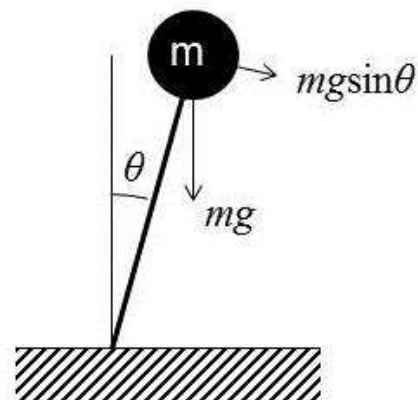


図2. 倒立振子に働く力

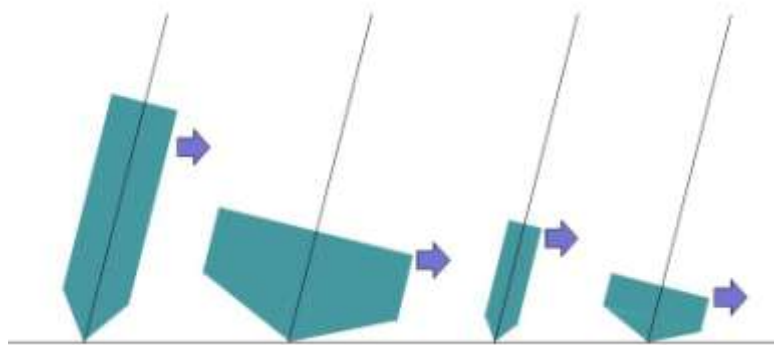


図3. 倒立振子の形と横向き力

4. おわりに

倒立振子の制御については、二足歩行ロボットの関係で制御工学の分野で多くの研究があるが、望遠鏡の姿勢制御に応用しようとする研究は、調べた限りでは初めてであり、望遠鏡の姿勢制御の方式として新しい展開が期待できる。これまでの方法と比較すると、水銀皿の水平面を用いる場合は、水銀の容器等との反応による表面の劣化、変質、軽量化が困難、水銀以外の液体では反射率が低いこと、下げ振りの場合は、支点の劣化、感度不足、開口部に支点が置かれる等の問題があるが、今回提案する方法では、それらの問題点をほぼ解決することが出来る見込みである。

今回提案する制御方式によって、月、惑星探査用の望遠鏡の大幅な小型軽量化による新しい道を開くことが可能である。

参考文献

- Hanada, H., H. Araki, S. Tazawa, S. Tsuruta, H. Noda, K. Asari, S. Sasaki, K. Funazaki, A. Sato, H. Taniguchi, M. Kikuchi, T. Takahashi, A. Yamazaki, J. Ping, N. Kawano, N. Petrova, N. Gouda, T. Yano, Y. Yamada, Y. Niwa, Y. Kono and T. Iwata, Development of a digital zenith telescope for advanced astrometry, Science China (Physics, Mechanics & Astronomy). 55, 723-732, doi: 10.1007/s11433-012-4673-1, 2012.
- 鶴田誠逸, 花田英夫, 浅利一善, 千葉皓太, 横川琳吾, 稲葉健太, 船崎健一, 谷口英夫, 佐藤 淳, 加藤大雅, 菊池 護, 荒木博志, 野田寛大, 鹿島伸悟, ILOM 計画における地上試験観測用望遠鏡の水銀皿を用いた撮像実験、第34回天文学に関する技術シンポジウム2014集録, 78-81, 2015.