

暗い天体を対象とした高指向安定度観測衛星用 Tip-Tilt Mirror 制御系へのマルチレート制御の適用

47-136071 野内 敬太

(指導教員 坂井 真一郎 准教授)

Key Words :Tip-Tilt Mirror, Image stabilizer, Low sampling rate, Multirate control, Disturbance rejection

1 はじめに

宇宙ミッションの高度化に伴い、観測衛星に対する指向精度・安定度の要求は年々厳しくなっている。要求精度・安定度を達成する上で様々な課題が存在するが、中でも擾乱の影響対策は最大の技術課題のひとつである。擾乱とは衛星内部に不可避に生じる微小振動のことであり、リアクションホイールや冷凍機などの稼働により発生する。擾乱により衛星本体やミッション機器の内部に微小振動が発生し、光学センサや望遠鏡の指向軸の微小なブレを引き起こす。このように、観測精度にダイレクトに影響を与えることに加えて、近年の観測精度向上の要求も相まって擾乱問題は宇宙分野において特にクローズアップされている技術課題のひとつだと言える。

衛星の姿勢制御系で取りきれない微小振動への対策としては過去に太陽観測衛星「ひので」において Tip-Tilt Mirror(TTM) が使用されている。TTM とはピエゾ素子で駆動し、高速で制御が可能な可動鏡であり、相関追跡装置 (Correlation Tracker: CT) と組み合わせて使用することにより望遠鏡の焦点面画像を安定化させる。

SPICA (SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) は 2022 年度に打ち上げが予定されている赤外線観測衛星である。SPICA は今までにない高感度な観測の実現が期待されているため指向安定度の要求も厳しく、擾乱対策として TTM の採用が検討されている。しかし、観測対象天体が暗く天体画像検出系のサンプリングレートを上げることができない問題を現在抱えている。太陽が観測対象であった「ひので」と SPICA のサンプリングレートを比較すると、「ひので」の 580 Hz に対して SPICA は 10 Hz 程度が限度だと試算されている。一方、アクチュエータである TTM は高帯域で制御が可能である。また、サンプリングレートの低下に従い、画像処理などにより生じるむだ時間が制御系に与える影響が無視できなくなると考えられる。むだ時間補償は連続時間系では無限次元系となり取り扱いが難しい。他方、離散時間系で 1 サンプル遅らせ

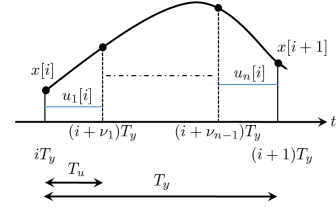


図 1: マルチレート制御に用いるタイムチャート

たオブザーバを構築する事により有限時間でむだ時間に対応出来ることが知られている。そこで、この画像検出系とアクチュエータの制御周期の差とむだ時間に対し、本研究では 1 サンプル周期中に複数回外乱の影響を完全に零にできるマルチレート制御と離散時間オブザーバの適用を提案する。

2 マルチレート制御

マルチレート制御によるサンプル点間完全外乱抑圧の流れを簡単に説明する。図 1 にマルチレート制御に用いるタイムチャートを示す。まず、制御系を制御入力周期 T_u で離散化した状態方程式を基にマルチレートサンプリング制御における離散化を施す。これによりサンプル点間の状態変数 $\mathbf{x}(i + \nu_k)T_y$ をサンプル点上の状態変数 $\mathbf{x}[i]$ を用いて記述する。そして制御系の入出力からオブザーバを利用しサンプル点間状態変数 $\mathbf{x}(i + \nu_k)T_y$ を推定する。次に推定されたサンプル点間状態変数を用いてフィードバックゲイン \mathbf{F} を決定するが、その際にサンプル点上の外乱の状態変数 $\mathbf{x}_d[i]$ からサンプル点間の出力への伝達関数を零にするようにフィードバックゲイン \mathbf{F} を選定することによりサンプル点間外乱抑圧が達成される。

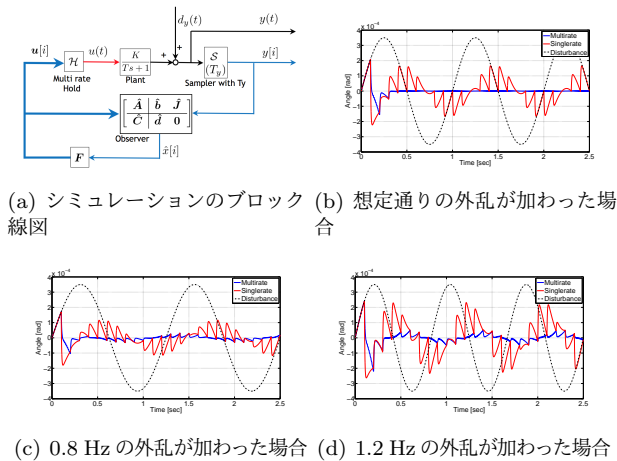


図 2: シミュレーション結果の一例

3 シミュレーション

提案法の有用性を確認するためにシミュレーションを行った。図 2(a) にシミュレーションに用いたブロック線図を示す。サンプリング周期毎に外乱の影響をゼロにするシングルレート制御系を設計し、閉ループ極を一致させた条件の下で出力端外乱に対する外乱抑圧特性の比較を行った。

設計時の想定通りの 1 Hz の外乱が加わった場合のシミュレーション結果を図 2(b) に示す。シングルレート制御系はサンプリング周期毎にしか外乱の影響を零にできていない。一方、マルチレート制御系ではサンプリング周期中に入力多重度の回数だけ外乱の影響を零にできていることが図より見て取れる。加えて、指向安定度を誤差の大ききとすると、シングルレート制御系に対しマルチレート制御系の方が相対的に指向安定度が高いこともわかる。

今回提案する制御系設計法では、設計段階で外乱の周波数を既知としてその情報を利用している。しかし、実際に人工衛星が運用される状況を地球上の試験で完全に模擬することは不可能であるため、どのような周波数の外乱が発生するかを精確に予測するのは難しい。そこで、設計時の想定と異なる周波数の外乱が加わった場合におけるシングルレート制御系とマルチレート制御系の外乱抑圧特性の変化をシミュレーションにより調べた。

0.8 Hz の外乱が加わった場合の応答を図 2(c) に、1.2 Hz の外乱が加わった場合の応答を図 2(d) にそれぞれ示す。想定とは異なる周波数の外乱が与えられると外乱抑圧性能は悪化するが、マルチレート制御系はシングルレート制御系に比較して外乱抑圧性能の悪化が小さいことが図 2(c),(d) から読み取れる。

この他にもむだ時間補償を施した場合の各シミュレーションも行った。

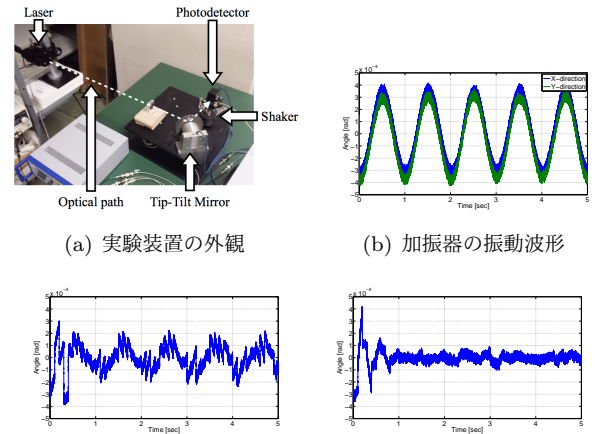


図 3: 実験結果の一例

4 実験による提案法の評価

実験環境を整え、TTM 制御系の外乱抑圧実験を行った。実験装置の外観を図 3(a) に示す。実験装置は光源系と検出系から構成され、それぞれ天体と望遠鏡を模擬している。加振器により検出系に外乱振動を与え、その外乱の影響を抑制するよう TTM を制御する。

実験に用いた加振器の振動波形を図 3(b) に、実験結果の一例を図 3(c),(d) に示す。図 3(c) はシングルレート制御系の実験結果を示す。サンプル周期毎に外乱の影響を零にするよう動作していることがわかる。図 3(d) はマルチレート制御系の実験結果を示す。一部シミュレーションとは異なる波形に見えるが、これはオブザーバの推定誤差が出力に影響を与えていることが理由として挙げられる。しかし、シングルレート制御系をマルチレート化することにより相対的に指向安定度が向上することが示された。

上記の実験以外にも、制御用 PC 上で仮想的に外乱を与える実験、制御系にむだ時間を含む場合の実験も行った。

5 まとめ

宇宙望遠鏡に搭載されることを想定した低サンプリングレートな TTM の制御法としてマルチレート制御と離散時間オブザーバによるむだ時間補償の適用を提案し、シミュレーションによりその有意性を示し、実験により実際のハードウェア上での再現性も確認した。