

リアルタイム静止軌道推定の実用化試験

川瀬成一郎*¹

Real-Time Estimation of Geosynchronous Orbit: Performance Test

By

Sei-ichiro Kawase*¹

Abstract : Real-time orbit estimation has proved practical for a satellite that uses electric thrusts twice a day for geosynchronous station keeping. Range data are collected at two ground stations and are input to a Kalman filter to estimate the longitude/latitude position of the satellite. The filter shows a transitional residual over a hundred meters after each thrusting and then converges quickly. This residual provides the monitoring of thruster actions. Orbit estimation results agree with optical observations to a few milli-degrees, thus proving sufficient accuracy for geosynchronous orbits.

Key words : Communication satellite, Electric propulsion, Overcrowded orbit, Kalman filter

概 要

電気推進を1日に2回作動させて静止軌道を保持している衛星を対象に、リアルタイム軌道推定を試みた結果、実用可能との判断を得た。2か所の地球局において測距データを毎時間取得し、カルマンフィルタ処理により衛星の現在緯度経度を推定する。衛星が推力を発生した後に100m台の残差を過渡的に示すことを除いてフィルタは安定しており、過渡的残差は推力が発生したことの確認情報として働く。軌道推定の結果を校正用の光学観測と比較したところ、1千分の数度で一致がみられ、静止衛星の軌道推定として十分な精度であることが確認できた。

1. はじめに

静止軌道で運用する衛星は、摂動力のはたらきによって徐々に軌道が変化するので、その変化を元に戻して所定の軌道位置を保つように、定期的に軌道を修正しなければならない。軌道を修正するためには事前に軌道推定が必須で、静止衛星の軌道推定における在来的な手法としては、地球局での測距データを1日ないし2日にわたって収集し、それを一括処理して軌道要素を求めるのが標準的であった [1]。

ところが静止衛星のなかに、電気推進を用いて軌道修正をおこなうものが見られるようになった。電気推進は推力が小さいから、軌道の修正を頻繁におこなわなければならない。その結果、測距データを収集している1日ないし2日の間に軌道修正が何度も発生するようになると、在来的な一括処理形式による軌道推定はむずかしくなる。この問題に対処するには、軌道推定を一括処理から逐次処理の形式に改めるのがよい。具体的には軌道推

*¹ 情報通信研究機構 (NICT)

定をフィルタリングによってリアルタイムにおこなうことになる [2].

リアルタイムな軌道推定には別の効用がある。静止軌道で運用する衛星の多くは通信衛星であるが、通信衛星の数は年々増え続けていて、軌道が混雑する傾向にある。その結果、衛星どうしが互いに隣接して運用するようになれば、軌道の修正や保持を適切におこなわないと衛星どうしが接近しすぎる恐れがある [3]。衛星の軌道をいつでもリアルタイムに推定できるなら、そのような問題の緩和に役立つ。

電気推進には衛星を長寿命にするという利点があることから、静止衛星への導入が進んでいくであろう。また、軌道の混雑化はさらに進むと予想される。従って今後、リアルタイムな静止軌道推定には二重の意味で需要がある。このような背景のもとで、リアルタイム軌道推定について試験をおこない、実用的な観点から評価した結果について以下に報告する。

2. 試験の環境

軌道推定の対象としたのは商用放送衛星 MBSAT で、衛星は東経144度付近に静止して、地上の移動体に向けた放送サービスをおこなっている。衛星は電気推進を用いて 1 日に 2 回、軌道修正のための速度変更 (ΔV) を発生する。1 回の ΔV は 1 時間ないし 1.5 時間のあいだ継続し、NS および EW の修正をおこなう。

衛星の管制局は茨城県と山口県に置かれ、各局では継続的に毎時 1 回の割合で測距をおこなう。測距は標準的なトーン測距によるもので、1 回の測距は 5 分間をかけて 10 点のデータを取得する。それを平滑化して 1 点に集約したデータを逐次、軌道推定フィルタに入力することによって、リアルタイム推定を試みた。各局での測距は互いに重ならないようにタイミングを違えてあるので、測距データは平均して 30 分に 1 点の割合で取得される。測距データの実例を図 1 に示す。

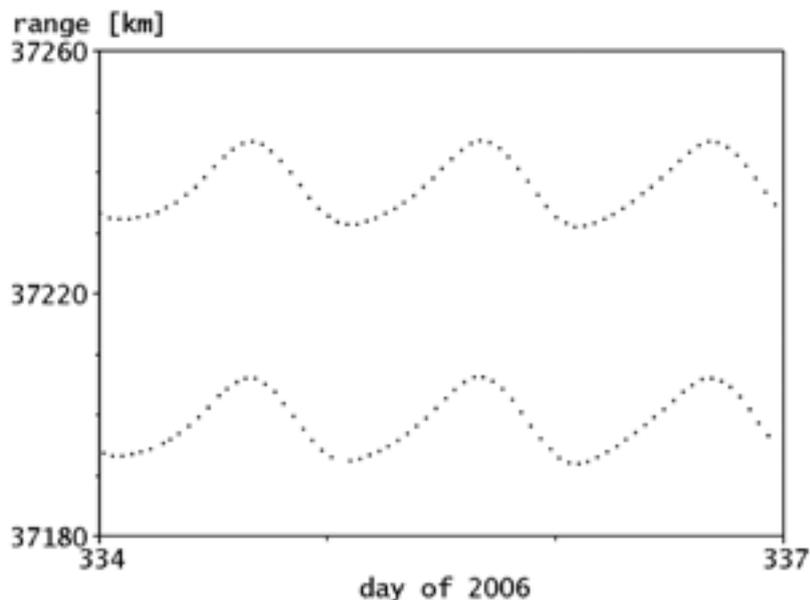


図 1 測距データ例。2 局での測距を 1 点ずつ交互に表す。

MBSAT 衛星はモバイル放送株式会社が所有し、測距を含む運用管制は宇宙通信株式会社が実施し、軌道推定フィルタは独立行政法人情報通信研究機構が試作した。リアルタイム軌道推定の試験は以上 3 者による共同研究として実施された。

3. 軌道推定フィルタ

図1に示した測距データの1点が取得される都度、推定フィルタはそれを受け付けて、その時点での軌道を推定する。フィルタは以下のように構成した。

衛星の軌道運動を表す力学モデルには、月と太陽の引力、12次までの地球重力ポテンシャル、および太陽輻射圧力を考慮する。太陽輻射に関しては衛星を等方的な球状と仮定し、質量対断面積比を未知パラメータとおく。推定すべき状態量は、慣性座標における衛星の位置と速度、および質量対断面積比を合わせた7次元ベクトルになる。状態ベクトルの伝搬は上記の力学モデルによって数値的におこなうが、その内、2体問題に相当する部分はケプラー解析解を採用し、摂動部分だけを数値積分する Encke の方法を用いた。状態遷移に関連する偏微分行列を得るためには、2体問題部分に関しては Shepperd アルゴリズム [4] を用い、太陽輻射圧パラメータに関する部分については数値積分を用いた。観測量は30分ごとに受け付ける測距データ、すなわちスカラー量となる。観測モデルは、各地球局の座標にもとづいて幾何学的に算出する距離として定め、その距離を衛星の位置座標で偏微分したものを観測行列とする。このように、フィルタを構成する各要素は標準的な定め方にならう。

さて、衛星による ΔV の発生について、ここでは次のように対応する。 ΔV を予定する時間帯には衛星の加速度にランダムなノイズが発生すると想定することによって、 ΔV の発生を考慮する。具体的には、状態推定誤差の共分散行列 P を更新する際に、加速度ノイズを表す共分散行列 Q を加算することによって、衛星の速度に変化が生じ得るものと想定する。しかし状態ベクトルを伝搬させるさいに、 ΔV による軌道変化を計算に入れることはしない。つまり ΔV の効果をプロセスノイズとして扱うこととした。行列 Q の対角要素は発生する ΔV の大きさに対応するので、NS 成分に対応する $Q_{6,6}$ を大きく、EW 成分に対応する $Q_{4,4}$ と $Q_{5,5}$ を小さく与え、それ以外の要素は零とする。具体的な $Q_{4,4}$ 、 $Q_{5,5}$ 、 $Q_{6,6}$ の値については、フィルタリング実行時に調整して与えるのがよい。

上記のように、力学モデルに ΔV の効果を入れないとの方針をとれば、フィルタには ΔV の予定時間帯を与えるだけでよく、 ΔV の計画値を逐一入力する煩雑さが省かれて、フィルタコードも簡略にすむという利点がある。この利点のほかに、より積極的な利点があるが、それは後で改めて示す。

フィルタリングのための状態更新および観測更新は非線型をとまなうから、推定フィルタは拡張カルマンフィルタとして構成され、UD 分解アルゴリズム [5] にならってコード化した。フィルタリング開始時の初期状態は、衛星が理想的な静止軌道にある状態とする。本フィルタのコードは開発済みの軌道推定フィルタ [6] と共通する部分が多い。

4. 軌道推定の実行例

リアルタイム推定を実行して得られた衛星の位置を、地球上における経度・緯度に換算して、図2と図3に示す(図中の“ranging/KF”)。あわせてフィルタリングにおける残差を図4に示す。フィルタリングを開始してから0.5日までの間は残差が大きいが、それはフィルタが収束するまでの初期応答を表す。図2と図3では、初期応答を除去して表示を見やすくするように、開始後0.5日の時点でフィルタを初期までいったん戻してから再実行した結果を表示した。衛星が1日に2回、 ΔV を発生して軌道を変えた後には、残差が一時的に増大し、それに伴ってフィルタは軌道の変化に追従する。プロセスノイズを与えることによって、 ΔV の発生後にはフィルタが真の状態に追従しやすくなり、実際に ΔV 発生から2時間以内にフィルタは収束する。このような追従性を得るように、 ΔV の発生を予定する時間帯である1.5時間の間には、観測更新サイクルの30分間に RMS で 1 m/s の速度変化が NS 方向に生じ得るものとして $Q_{6,6}$ の値を与え、また RMS で 0.1 m/s の速度変化が EW 方向に生じ得るものとして $Q_{4,4}$ 、 $Q_{5,5}$ の値を与えた。これらの値は、フィルタの追従応答をみながら調整した結果、衛星が実際に発生する ΔV の値に比べて大きく与えられている。

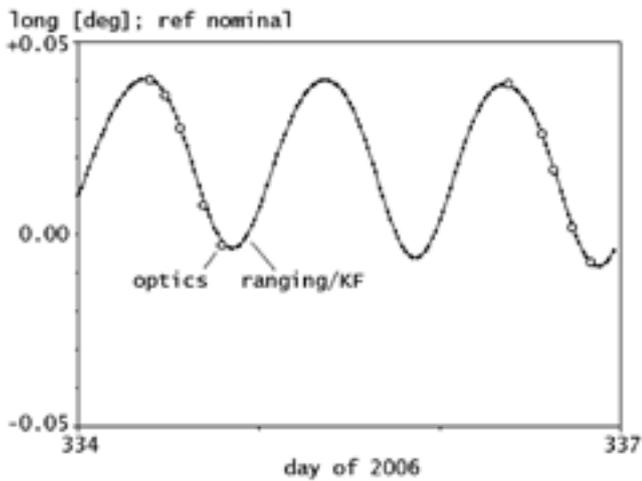


図2 衛星経度の推定 (公称経度を基準)

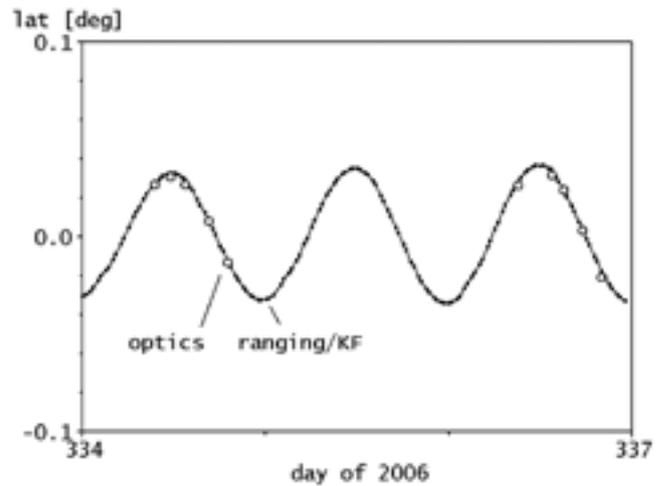


図3 衛星緯度の推定

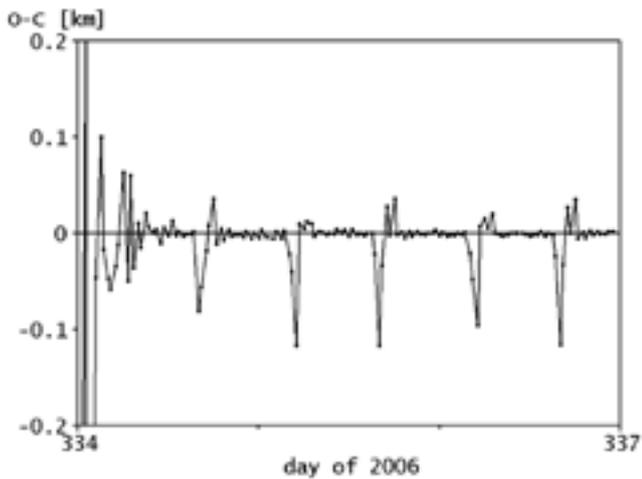


図4 フィルタリング残差

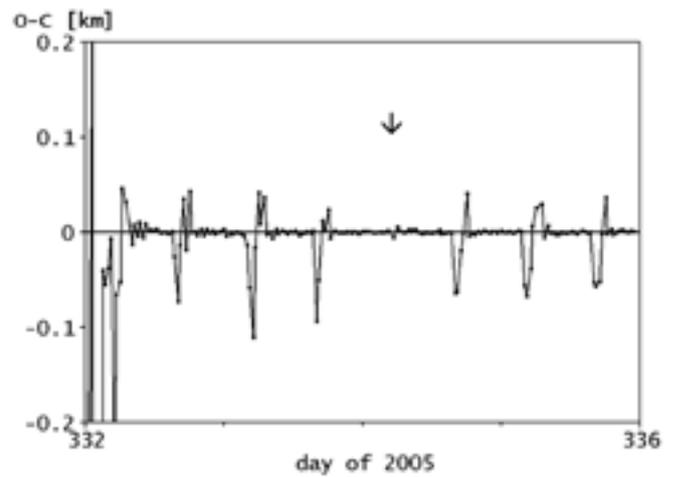


図5 フィルタリング残差

図5に示したのは別の時期における軌道推定の例で、ここでは図中の「↓」の箇所で予定を変えて ΔV を休止した。このとき残差の一時的増大は現れない。このように残差を見ることで、実際に ΔV が発生したか否かを判定できる。これに対し、もしも状態ベクトルの伝搬において ΔV による軌道変化を計算にいれていたなら、残差は違った現れ方を示す。 ΔV を休止したときは一時増大が現れるし、 ΔV を実行したときでもなにかしらの残差増大が現れるであろう。したがって ΔV の発生について明確な判定はできなくなる。 ΔV の実行状況は当然ながらテレメトリによって監視されるべきものだが、 ΔV 発生による効果を図4、図5のように軌道力学にもとづいてただちに監視できることは、衛星の管制運用において実用的な価値がある。

5. 推定精度の検証

測距データの取得期間中に、並行して光学観測をおこなったので、それを参照比較することで軌道推定の精度を検証した。光学観測は図4に示す望遠鏡によって衛星をとらえ、その視位置を背景の恒星に準拠して求める。図5は観測画像の例で、衛星を地球上に投影したときの緯度・経度がグリッド状に表示され、精度0.001度で衛



図4 口径35cm 望遠鏡
(NICT 鹿島宇宙技術センター)

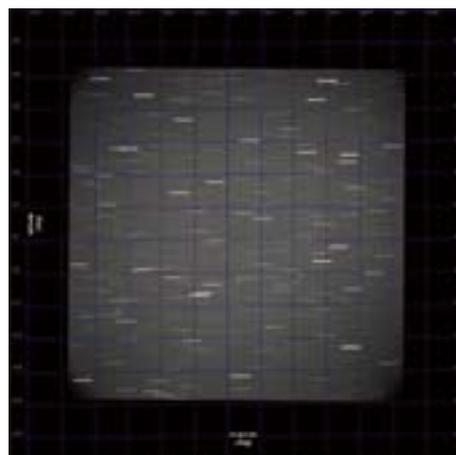


図5 光学観測画像例

星位置を直読できる [7]. 光学観測による衛星の緯度経度を、図2および図3に記入して比較したところ（図中の“optics”）、1千分の数度まで一致した。図4において、 ΔV の発生後に生じる過渡現象の時間帯、つまり残差が一時的に増大している時間帯を読みとって、その時間帯における光学とフィルタリングの一致度を図2と図3にて確かめると、一致度に特別な差はみられない。つまり ΔV の発生にともなうフィルタの過渡応答が、推定の精度を低下させることはないとしてよい。静止衛星の軌道位置保持という観点からみると、軌道推定フィルタリングは十分な精度をもつことが確認された。

6. むすび

2か所の地球局による測距をカルマンフィルタ処理することで、静止軌道上の衛星位置を十分な精度でリアルタイム推定できることが示された。あらかじめフィルタに与える情報は ΔV の予定時間帯だけでよく、 ΔV の計画値を逐一与える必要はない。フィルタリングの残差は ΔV 発生の際的な力学的な確認情報として働く。電気推進によれば、頻繁な ΔV の実行にともなう管制運用の緊張を避けられないが、 ΔV の実行後ただちに力学的な確認情報が得られることは、その緊張を緩和する効果があろう。軌道の混雑化にともなう管制運用の緊張についてもまた、リアルタイム軌道推定によって緩和される効果があろう。

謝 辞

本試験研究は、モバイル放送株式会社、宇宙通信株式会社、独立行政法人情報通信研究機構の共同研究として実施しているもので、共同研究の実施に尽力いただいた関係各位に感謝します。精度検証用の光学観測データを提供いただいた情報通信研究機構 高橋正昭研究員に感謝します。

参考文献

- [1] Soop, E.M.: Handbook of Geostationary Orbits, Kluwer, Dordrecht, 1994, Chapter 8.
- [2] Pocha, J.J.: An Introduction to Mission Design for Geostationary Satellites, Reidel, Dordrecht, 1987, pp. 190-196.
- [3] Chobotov, V.A. and Johnson, C.G. “Effects of satellite bunching on the probability of collision in geosynchronous orbit”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.31, pp.895-899, 1994.

- [4] Shepperd, S.W. "Universal Keplerian state transition matrix", *Celestial Mechanics*, Vol.35, pp.129-144, 1985.
- [5] 片山 徹, 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 東京, p.133, 1989.
- [6] 川瀬成一郎, "電波干渉計による静止衛星追尾と軌道推定フィルタリングの開発", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J89-B, pp.1104-1111, 2006.
- [7] 高橋正昭, 梅原広明, 川瀬成一郎, "静止衛星の光学観測 1", 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会技報 SANE2003-111, pp.23-26, 2004.