

静止衛星ニアミス回避のための軌道上監視について

川 瀬 成一郎*¹

On-Board Image Monitoring for Satellite Near-Miss Warning

By

Seiichiro KAWASE*¹

Abstract: Assuming two communication satellites operating in close proximity each other in geosynchronous orbits, we consider satellite near-miss warning based on image monitoring on-board one satellite as to track the other. The warning will be effective if direction and range is monitored, as the predicted approaching trajectory has its best accuracy at the time of closest approach.

Keywords: Geosynchronous orbit, Satellite near-miss, Orbit estimation, Orbit prediction

概 要

静止軌道上で通信衛星どうしが近接しているとき、衛星上での画像監視に基づいて衛星間ニアミスの発生を事前に予測することの可能性について検討した。画像から割り出す方向と距離に基づいて相手衛星の進入コースを予測すると、予測の精度は最接近の時点において最も良くなる。よってニアミスの事前予測および回避行動の要否判断に適した監視が可能との結論を得た。

1. は じ め に

静止軌道上の同じ公称位置において二つ以上の衛星が運用を続け、それにともない衛星間のニアミス懸念するケースがみられるようになった。その観測事例として、図1は電波干渉計[1]で測定した衛星の経度を示す（公称位置からの偏差）、2衛星の経度が互いに交差するため、潜在的なニアミスのリスクがある。図2は光学観測[2]による緯度・経度の測定例で、縦横の1区画は緯度経度の0.1度を表す。2衛星のニアミスに準じた状態が矢印のところに生じている。軌道上の通信衛星の数が今後さらに増していくならば、このようなニアミスの懸念も増していくであろう。

通信衛星が用いる軌道位置については、ITUによる調整のルールがあるが、その調整はもっぱら電波の干渉を防ぐ周波数調整として行われる。その調整は、複数の衛星を同じ軌道位置に割り当てることを禁じていない。調整に従った結果、同じ位置に複数の衛星が割り当てられ、しかも衛星の所属や国が各々異なっていたならば、たとえニアミスの発生を防ごうとしても軌道の管制を常時たがいに調整するのは難しいであろう。上記の事例は、こういう事情のもとでの運用を余儀なくされた衛星とおもわれる。

同じ軌道位置にある衛星どうしが、ニアミスを通りこして衝突にまで至るリスクは、理論検討によれば数百年に一度の割合とされている[3]。もしも衛星の形式や管制方針が共通しているなら（例えば両衛星ともスピン型で太陽指向離心率制御を行う等）、衝突リスクは高くなって百年に一度程度、と数値シミュレーションにより報告されている[4]。これらのリスクは、火急を要するほど高くはないが、さりとて全く無視できるほど小さくはない。その対策としては、簡易でローコス

* 1 NICT

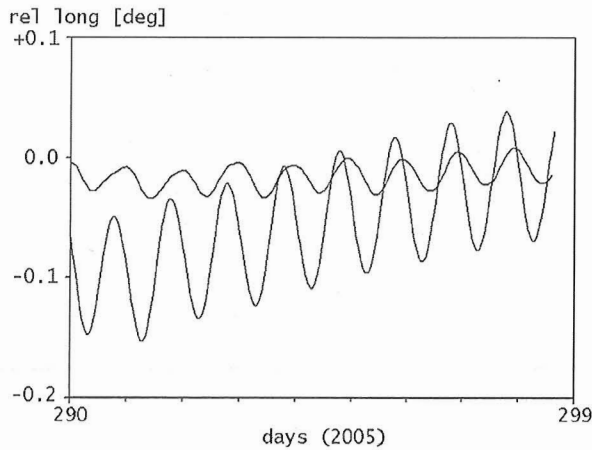


図1 経度が交差する2衛星

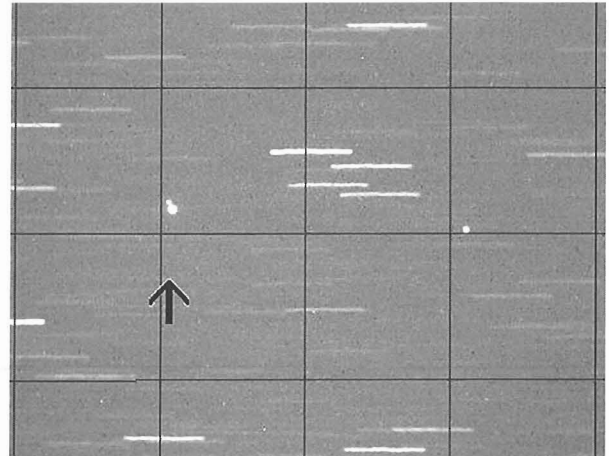


図2 2衛星の準ニアミス

トな手段によりリスクを低減できるなら意味をもつであろう。

本報告では、考えられる対策手段の一つとして、衛星上での画像監視を検討する。画像から相手方の衛星の方向と距離を割り出し、その軌道を予測したとき、それがリスク回避にどのような効用をもつか明らかにする。

2. 衛星上監視のモデル

図3に描くように、一方の衛星上に画像センサを設けて、相手方の衛星の像を捉えるものとする。像の位置から、相手方の方向を2自由度（方位・仰角相当）で測る。通信衛星は普通0.1度より良い精度に姿勢保持されているから、方向測定としては例えば0.2度の精度を仮定してよいであろう。あわせて像の大小から、距離を割り出すものとする。距離の分解能は、相手方の衛星が遠いほど低下する。ここでは分解能として、衛星間距離の10分の1まで割り出し可能と仮定する。通信衛星は、軌道投入後にアンテナの展開を監視する画像センサを持つことがあり、それをニアミス監視と共用すればコストを抑えることができる。

ニアミスに至る典型的な進入コースを図4に描く。原点に我々の衛星があり、軌道接線の進行逆向きに L 軸を、地球から衛星に至る半径に沿って R 軸をとり、 Z 軸は北を指す。隣接衛星は L 軸の正方向から進入してくるとするが、ここでは進入コースが LR 面上にあると仮定した。隣接衛星は A 点に来た時点で我々の衛星によって捉えられ、その後、ループを描きながら接近してニアミスに至る。ループを描くことは、図1にて衛星経度が1日周期の振動をとまなうことに対応する。

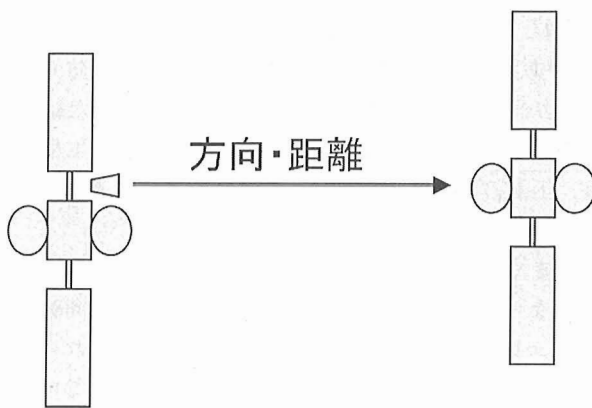


図3 衛星上での画像監視

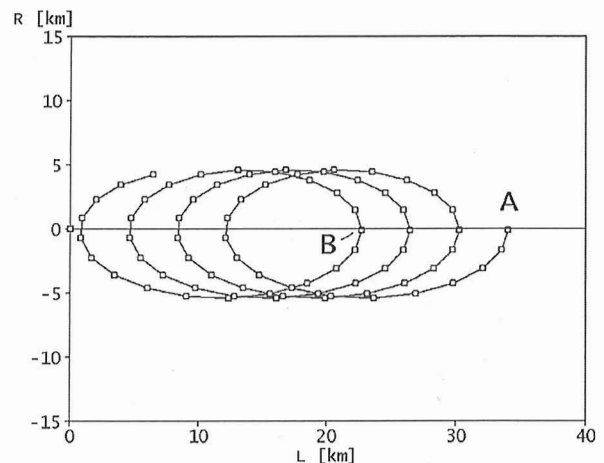


図4 ニアミスへの進入コース

以上の仮定のもとで、我々の衛星から見た隣接衛星の相対運動を推定するものとする。推定はカルマンフィルタにより行い、その要点を以下に記す。状態ベクトルは成分 $L, R, Z, \dot{L}, \dot{R}, \dot{Z}$ を持ち、時間の経過 T を地球回転の角度増分によって測るものとして、 $c = \cos T, s = \sin T$ とおけば、状態遷移行列は次のように与えられる[5]。

$$\Phi(T) = \begin{bmatrix} 1 & 6T - 6s & 0 & -3T + 4s & 2 - 2c & 0 \\ 0 & 4 - 3c & 0 & -2 + 2c & s & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 & 0 & s \\ 0 & 6 - 6c & 0 & -3 + 4c & 2s & 0 \\ 0 & 3s & 0 & -2s & c & 0 \\ 0 & 0 & -s & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

観測のモデルは

$$\text{距離: } D = \sqrt{L^2 + R^2 + Z^2} \quad \text{方位: } A = \tan^{-1} \frac{R}{L} \quad \text{仰角: } E = \sin^{-1} \frac{Z}{D}$$

となつて、偏微分行列は解析的に求められる。観測ノイズレベルは、 D に対しては $D/10$ を与え、 A, E に対しては一定値 0.2 度とする。フィルタリングにともなう推定誤差の共分散行列を参照することによって、位置 L, R, Z の誤差を評価することとした。

3. 軌道推定の誤差評価

上記による誤差評価の結果を以下に示す。隣接衛星が、図4でA点から始まるループの第1周にあるとき、位置推定の95%誤差楕円を図5に描く。楕円はそれぞれ、毎時1回の観測を行う度に逐次推定した位置の誤差範囲を表すもので、大きさを10倍に拡大し、 LR 面と LZ 面への投影として、逐次の衛星位置に重ねて描いた。以下同様に、ループの周回が進む順にあわせて誤差評価を図6、図7に描く。

観測が進むにつれて誤差楕円は小さくなるが、とくに、衛星間の視線に沿って楕円の伸縮が著しく、衛星間が近いときに誤差楕円が小さくなる。これは、衛星間が近ければ距離分解能が良いのだから自然な結果といえる。

さて、隣接衛星が図4のB点に来た時点において、それ以後の衛星の動きを一括して予測したとしよう。その目的は、最接近における危険度を前もって見きわめることにある。予測にともなう誤差楕円を図8に描く。観測更新による逐次推定ではなく、一括予測をおこなった場合であっても、上記の「衛星間が近いときに誤差楕円が小さい」というパターンは

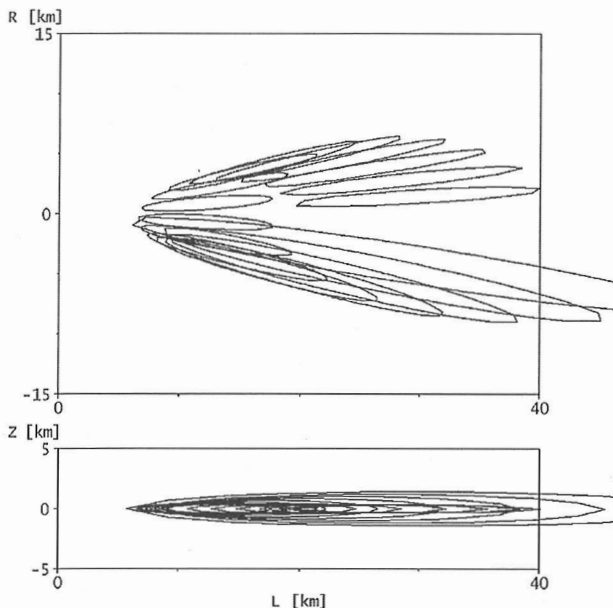


図5 位置推定の誤差 (第1周)

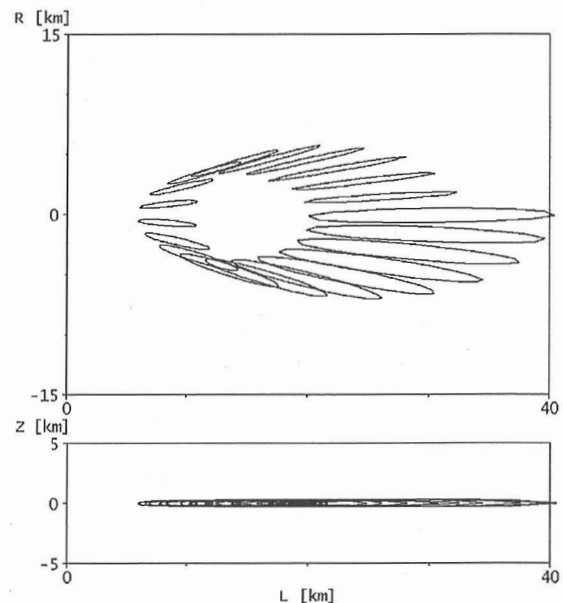


図6 位置推定の誤差 (第2周)

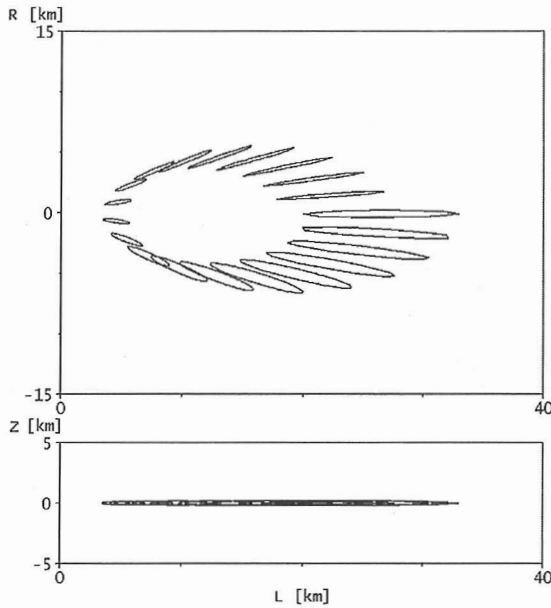


図7 位置推定の誤差 (第3周)

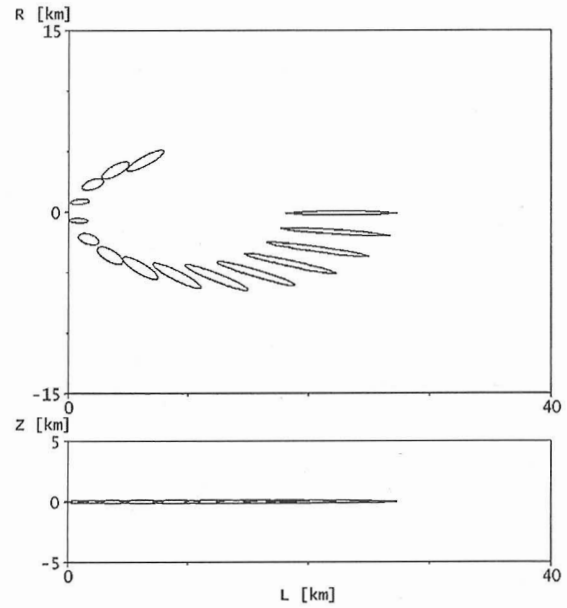


図8 位置予測の誤差 (第4周)

変わらずに保たれる。位置予測の誤差は最接近時に最も小さくなって、ここでは100 m以内の精度を期待できる。通信衛星は数十 μ m (例えば30 μ m~40 μ m等)のサイズをもつから、この精度のもとで衝突の可能性を調べるのは意味があり、回避行動をとる必要の有無を見きわめることができよう。B時点から最接近までには12時間あるから、かりに必要と判断された際には回避行動を準備する余裕がある。

位置予測の誤差が、最接近時に最小になるという好ましいパターンが現れるのは、観測している間にニアミス進入コースが数周回のループを描くことに負う。そのループは、軌道の離心率が零でないことによって現れる。定常的に軌道運用している通信衛星では普通、離心率は零でない値をもつから、上記の好ましいパターンは普通に現れるものと考えてよい。

4. ま と め

衛星上での画像監視に基づいてニアミスの発生を予測するための、軌道予測の精度を評価した。予測精度の振る舞いには特徴があって、衛星の最接近時に最も良くなり、その精度によれば衝突の危険度の判断が可能になる。このことは、ニアミスに際しての危険度を事前に見きわめ、回避行動の要否を判断する上で都合が良い。画像センサとしては、アンテナ展開監視に用いたものを隣接衛星監視に流用することで、付加コストを抑えた監視システムが可能になる。衛星上監視は、静止軌道におけるニアミスリスク対策の候補手段として検討に値するとおもわれる。

参 考 文 献

- [1] 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” 信学論 B, Vol.J 89-B, No. 7, pp. 1104-1111 July 2006.
- [2] 高橋正昭 “静止衛星の光学観測3 (2005年)” 信学技報 SANE 2005-47, August 2005, pp. 7-11.
- [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, No. 5, pp. 895-899, November 1994.
- [4] Sawada, F. and Kawase, S. “Near-miss analysis for uncoordinatedly co-located geosynchronous satellites” 12 th International Symposium on Space Flight Dynamics, Darmstadt, Germany, June 1997.
- [5] Prussing, J. E. and Conway, B. A. *Orbital Mechanics*, Oxford University Press, 1993, pp. 139-149.