

K7-91

タンブリング衛星の運動推定

-画像情報を用いたカルマンフィルタによる運動推定の定式化-

Motion Estimation of Tumbling Satellites

-Formulation of Estimation by Kalman Filter and Image Information-

○小岩希¹, 佐々修一², 安部明雄²Nozomu Koiwa¹, Shuichi Sasa² and Akio Abe²

Abstract: Defective satellites become an obstacle of other satellites. To prevent such an accident by capturing an uncontrolled satellite, chaser satellites must be synchronized to the motion of the object. In general, uncontrolled satellites cause a complicated rotational motion called “Tumbling”. In order to capture the uncontrolled satellite, first, it is necessary to accurately estimate the motion of the target from image information. For this problem, this paper presents a formulation and an algorithm for the motion estimation by use of Kalman filter and image information. The kinematics of the target is described with the Quaternion to avoid the singular point. In the numerical simulation, by the proposed method, it is attempted to estimate the motion of the target by characteristic point. Moreover, the simulation is also performed in the case of disappearance of the characteristic point.

1. 研究背景

故障により制御不能となった人工衛星などは、軌道上を周回しているため、他の人工衛星に衝突し多大な被害を及ぼす恐れがある。このような事態を防ぐためには、チェーサー衛星という回収用の衛星を対象となる故障衛星に接近させ、二つの衛星間の運動を同期し、それらを捕捉・回収する必要がある。ただし、故障衛星は一般的にはタンブリングという複雑な回転運動をしているため、捕捉・回収には対象衛星の運動の様子を正しく推定することが重要となる。

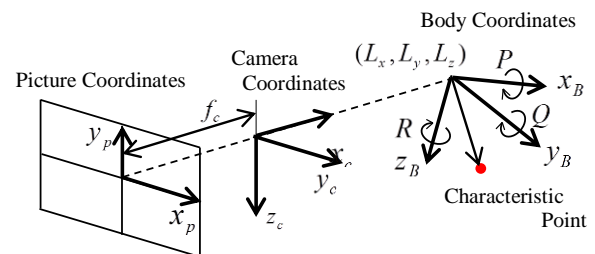
タンブリング衛星の運動推定においては画像情報を用いた推定手法が研究されているが、この手法の問題点として、特徴点が物体の裏に隠れることによる推定精度の低下が挙げられる。そこで本研究では、衛星運動と衛星画像の関係を定式化し、ノイズが含まれるモデルに対しても最適な状態推定値を得ることが出来、かつオンライン処理に適した離散時間カルマンフィルタを用いて運動推定を行い、特徴点観測の有無による推定精度の低下を確認する。

2. 状態空間モデル

本稿で使用する座標系とその位置関係を Figure 1 のように定義する。^[1] カメラには焦点距離 f_c のピンホールモデルを使用する。

衛星の姿勢表現には、3-2-1 系のオイラー角 (ψ, θ, φ) を用いる。運動の特性上、 $\theta = \pm 90[\text{deg}]$ で特異点が生じ推定が不可能となる。この問題を回避するため、本研究ではクォータニオンを導入する。スカラー部及びベクトル部を次式で定義する。

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k} = [q_0 \ \bar{\mathbf{q}}]^T \quad (1)$$

Figure 1. Coordinate System^[1]

対象となる衛星は剛体であり、チェーサー衛星と相対的並進運動はないと仮定すれば、クォータニオンによるキネマティクス方程式及び衛星の運動方程式は次式で表される。^[2]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_0 \\ \bar{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\omega}^T \\ \boldsymbol{\omega} & -\tilde{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ \bar{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{J}^{-1}(-\tilde{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{M}) \quad (3)$$

\mathbf{J} は慣性行列、 $\boldsymbol{\omega}$ は衛星の角速度ベクトル、 $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ は外積行列、 \mathbf{M} は衛星に働くモーメントである。慣性乗積を零、モーメントを微小なシステムノイズ \mathbf{v} と仮定し、角速度ベクトルとクォータニオンを縦に並べたものを状態量 \mathbf{x} と定義すれば、非線形連続状態方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (4)$$

が得られる。

カメラ座標系 $\Phi_c(x_c, y_c, z_c)$ から機体座標系 $\Phi_B(x_B, y_B, z_B)$ へのクォータニオンによる変換行列を $\mathbf{C}_{b/c}$ とする。原点間の関係がカメラ座標系における並進ベクトル $[L_x \ L_y \ L_z]^T$ で与えられるとき、二つの座標間の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \Phi_c = C_{b/c}^{-1} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \Phi_B + \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \Phi_c \quad (5)$$

また、撮像面座標系 $\Phi(x_p, y_p)$ とカメラ座標系 $\Phi_c(x_c, y_c, z_c)$ の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \Phi_p = \frac{f_c}{x_c} \begin{bmatrix} y_c \\ -z_c \end{bmatrix} \Phi_c \quad (6)$$

画像情報を用いる場合、画像処理を施すことが必要となる。本稿では式(6)に対して観測ノイズ w を付加することで画像処理によるノイズを模擬する。画像上の特徴点座標を観測値 y とすれば、非線形観測方程式 $y = h(x) + w$ (7) が得られる。

3. 運動推定

本研究では、非線形システムに対して適用される拡張カルマンフィルタ (EKF) を用いて運動の推定を行う。EKF ではテイラー展開による線形近似が含まれるため厳密には最適な推定値を得ることはできない。しかし、ヤコビ行列を解析的に求めることが可能である場合は線形カルマンフィルタのアルゴリズムが適用でき、小さな計算負荷で済むため、本研究での運動推定においては有効な手段であるといえる。状態推定値は以下の式により決定される。^[3]

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + G_k \{y_k - h_k(\tilde{x}_k)\} \quad (8)$$

$$\tilde{x}_k = f_k(\hat{x}_{k-1}) \quad (9)$$

\hat{x}_k, \tilde{x}_k は事後・事前状態推定値であり、 G_k はカルマンゲインである。 G_k の更新式は文献[3]に従うものとする。

(8)式の右辺第2,3項は、事前状態推定値の逐次修正項を意味する。この修正項は現時刻における観測値を得ることで動作するが、画像上で特徴点が消失すると観測値が得られないためシミュレーションが停止してしまう。そこで本研究では、観測値が数値として得られない状況を簡易的に作成し、カルマンゲイン G_k を強制的に零に変更することで、状態推定値更新式を $x_k = \tilde{x}_k = f_k(\hat{x}_{k-1})$ (10)

としてシミュレーションの停止を防ぎ、特徴点消失を模擬する。

EKF によってクォータニオンの推定値を得、その値で $C_{b/c}$ を逐次計算し、その要素 $\hat{C}_{11} \sim \hat{C}_{33}$ を用いてオイラー角の推定値に逐次変換する。

4. シミュレーション結果

物体が透明であるという仮定のもとで特徴点が全領域で観測できる場合(赤線)と、実際に特徴点の消失が起こる場合(青線)について、特徴点の機体座標系における座標は既知として同一条件下でシミュレーションを行った。以下に、ロールレート P とオイラー角 ϕ についての結果を示す。

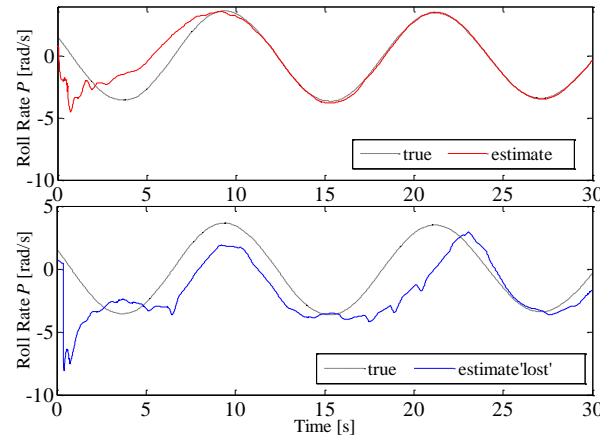


Figure 2. Estimated result of Roll Rate P

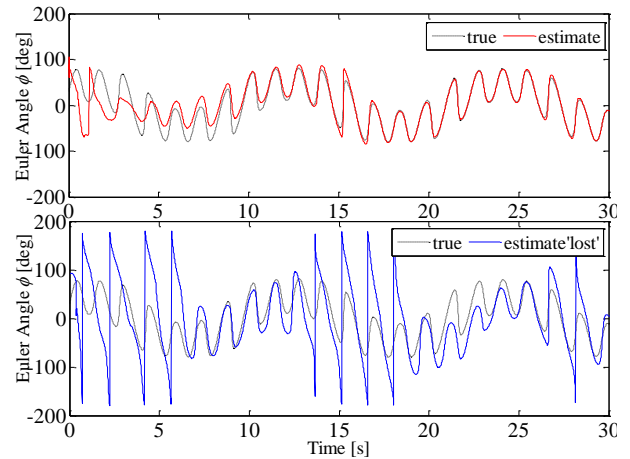


Figure 3. Estimated result of Euler Angle ϕ

5. 結論

本稿では、衛星運動と衛星画像の関係を定式化し、拡張カルマンフィルタを用いて特徴点観測の有無について運動推定を行った。特徴点が出現・消失を繰り返す場合、推定値は真値に対して完全には追従しないものの、ある程度の特徴を捉えていることが確認された。対象となる衛星には特徴点は多数存在し、全ての特徴点が隠れることは考え難いため、出現中の特徴点による推定値を尊重するような運動推定手法が構築できれば精度良い推定値が得られると考えられる。

6. 参考文献

- [1] 佐々修一, 五味広美 他:「滑走路画像を用いた航空機の姿勢位置の推定と飛行実験結果」, 航空宇宙技術研究所報告 1411 号, pp.3-5, 2000 年
- [2] 木田隆:「スペースクラフトの制御」, pp.57-60, 1999 年
- [3] 足立修一 丸太一郎:「カルマンフィルタの基礎」, pp.95-100, pp.152-157, 2012 年