

# GPS 信号を用いた月測位衛星の自律的な軌道決定およびクロックバイアス推定

## Autonomous Orbit and Clock Bias Estimation of Lunar Navigation Satellites Using GPS Signals

飯山敬大 川端洋輔 船瀬龍  
Keidai Iiyama Yosuke Kawabata Ryu Funase

東京大学  
The University of Tokyo

### 1. はじめに

月面における広範囲での有人宇宙活動などの次世代の月探査ミッションに向けて、地球・月圏におけるナビゲーションインフラの整備が不可欠である。NASA は、LunaNet と呼ばれる拡張可能でスケーラブルな月圏での通信およびナビゲーション・アーキテクチャの開発を目標としている。システムの柔軟性と堅牢性を高めるために、このアーキテクチャは自律的かつ分散的に運用できることが望ましい。本研究では、GNSS 受信機、小型原子時計 (CSAC)、衛星間通信用のステアリングアンテナを搭載し、測位・航法・時刻同期サービスを提供する小型衛星群のための自律分散型の状態推定アルゴリズムを提案する。本研究の概念図を図 1 に示す。

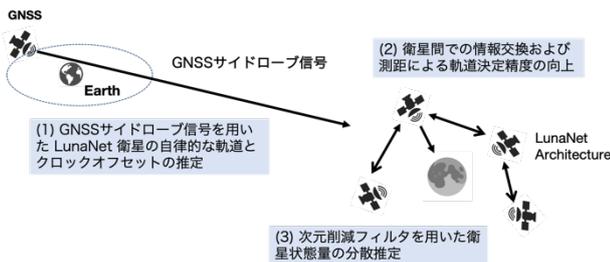


図 1 本研究の概念図

### 2. 手法

LunaNet を構成する各衛星は、位置、速度、クロックバイアス、クロックドリフトレート の 8 の状態量を推定する。観測量として用いるのは、深宇宙へと漏れ出る GPS サイドローブ信号の情報と、衛星間での測距情報である。各衛星はコンステレーションを構成する他衛星の状態推定誤差を考慮に入れながら逐次的に自身の状態量を推定する、分散型の Schmidt Extended Kalman Filter を用いて推定を行う。月圏での微弱な GPS 信号を捕捉するためのレーザの諸元は、文献[1]を参考に設定した。GPS 衛星のアンテナパターンについては、文献[2]のデータを用いた。

また本研究では、極域と月の裏側のカバレッジに優れ、月周回軌道に比べてより少ない燃料で投入可能なハロー軌道上の衛星 4 機と、より月面に近く長期的に安定な月凍結軌道上の衛星 1 機の計 5 機を用いたコンステレーションを想定してシミュレーションを行った (図 2)。

シミュレーションは、NASA ゴダード宇宙センターが開発した Orbit Determination Toolbox (ODTBX) を拡張した自作の軌道決定シミュレータを用いて行った。解析条件や結果の詳細については発表時に紹介する。

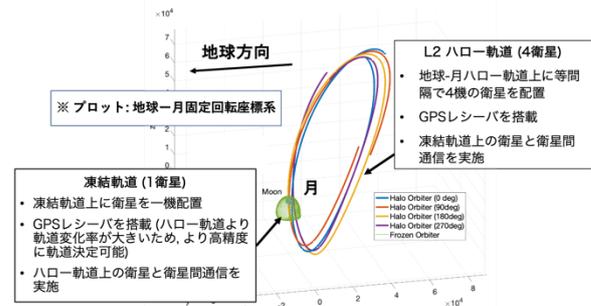


図 2 凍結軌道とハロー軌道の混成コンステレーション

### 3. シミュレーション

GPS のみ、および GPS と衛星間測距 (凍結軌道-ハロー軌道間) を組み合わせた際の状態推定精度を以下に示す。凍結軌道の衛星の方がより高い推定精度が得られた。また衛星間測距を組み合わせることで推定精度の向上が見られた。

表 1 軌道決定誤差 (RMS, m)

|                | GPS のみ     | GPS + 衛星間測距 |
|----------------|------------|-------------|
| Halo Orbiter   | 130.73 [m] | 103.45 [m]  |
| Frozen Orbiter | 24.61 [m]  | 16.24 [m]   |

表 2 クロックバイアス推定誤差 (秒)

|                | GPS のみ       | GPS+衛星間測距     |
|----------------|--------------|---------------|
| Halo Orbiter   | 3.54E-07 [s] | 2.74 E-07 [s] |
| Frozen Orbiter | 0.84E-07 [s] | 0.70 E-07 [s] |

### 4. まとめ

本研究では小型原子時計を搭載した月測位衛星群が、GPS 信号を用いて位置速度およびクロックバイアスを自律的かつ分散的に推定する手法を提案した。GPS サイドローブ信号と衛星間測距の測定値は、分散型の Schmidt Extended Kalman Filter を用いて処理した。凍結軌道とハロー軌道の混成コンステレーションについて達成可能な軌道決定誤差とクロックバイアス推定誤差を分析し、衛星間測距の使用により状態推定誤差を低減できることを示した。

### 5. 参考文献

- [1] A. Deléput, et al. "Use of GNSS for lunar missions and plans for lunar in-orbit development," *Advances in Space Research*, vol. 66, pp. 2739–2756, 2020
- [2] J. E. Donaldson, et al., "Characterization of on-orbit GPS transmit antenna patterns for space users," *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, vol. 67, no. 2, pp. 411–438, 2020.