

小型月着陸機 SLIM の誘導制御システムの開発



© JAXA/NHK

坂東信尚 (ISAS/JAXA)、上野誠也、樋口丈浩 (横浜国大)、澤井秀次郎 (IASA/JAXA)、
坂井真一郎 (IASA/JAXA)、福田盛介、中谷幸司 (IASA/JAXA)、SLIM 検討 WG

現在検討が進められている SLIM WG における誘導制御システムの開発状況について報告する。SLIM(Smart Lander for Investigating Moon)は将来の月惑星探査に必要なピンポイント着陸技術を実証するための実験機として、小型科学衛星シリーズ3号機を目指して提案準備中である。

着陸シーケンス SLIM ではピンポイント着陸を目的としているため、月表面に対する高精度な相対航法そしてピンポイント着陸を目的とした誘導制御が必要となる(画像照合航法については、本シンポジウム P2-162/P2-163/P2-164 にて)。SLIM では、重量リソースが厳しいことから、画像航法に用いるカメラにはジンバルを設置する余裕がない。また、探査機が月表面に降下するに伴って、OME(Orbital Maneuvering Engine)の必要推力方向が変わってくるために、探査機に固定設置された画像航法用のカメラはいつでも探査機直下を視ているわけではない。そこで、SLIM では以下のようなシーケンスにより探査機をピンポイント着陸させることを考えている。

減速を目的とした動力降下フェーズ

月表面上のクレータ / 隆起物などのランドマークに対して画像照合航法を数回行い(撮像のために探査機の姿勢を変更する)、位置推定誤差から軌道再計算、誘導則の再計算を探査機上のオンボードで行い、推力として推力方向を調整しながら、着陸地点上空への誘導を実現させる。

障害物回避を目的とした垂直降下フェーズ

着陸地点上空から、着陸地点周辺での障害物回避・安全な降下 / 減速を実現させる。

動力降下フェーズに適した誘導則

動力降下フェーズでは、着陸地点上空への確実な誘導が必要な一方、減速に必要な燃料が少なければ少ないほど、探査機のドライ質量を大きくすることができる。SLIM 誘導制御分科会では、下記に挙げるような誘導則の比較を行い、よりピンポイント性能が高い誘導制御則を採用する予定である。

案 1: 慣性誘導サブモード + LOS 誘導サブモード

推力を最小化する最適誘導制御計算を用いて慣性誘導制御を行った後で、動力降下フェーズの後半で着陸地点上空で確実に水平速度 0 になる LOS(Line of Sight)誘導により探査機を誘導する手法である。

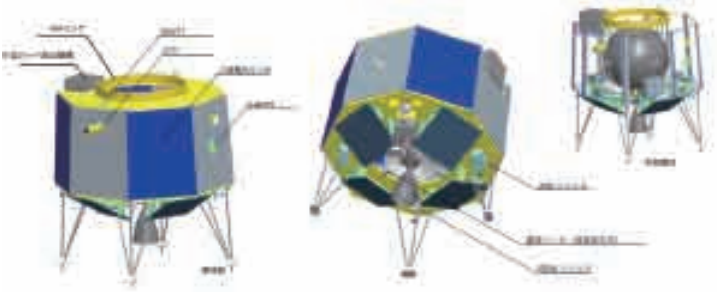
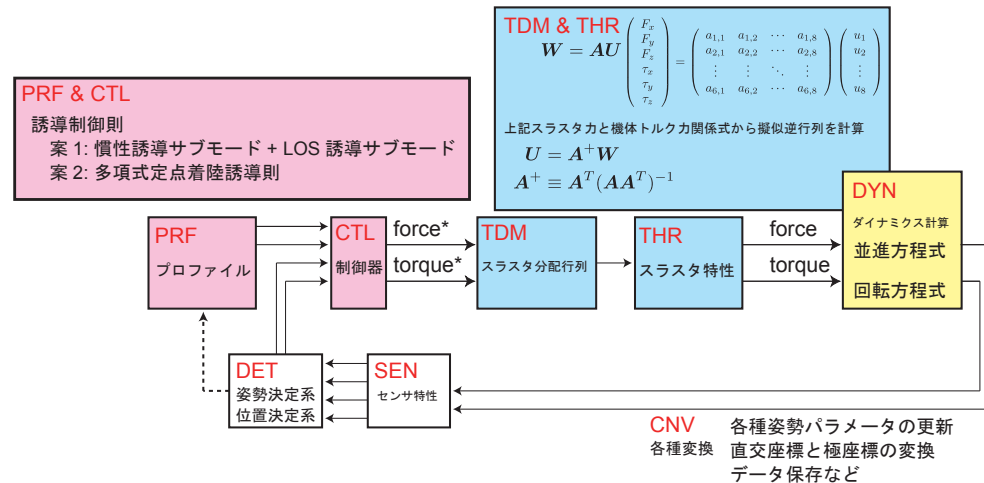
案 2: 多項式定点着陸誘導則

上野、樋口らが提案している多項式定点着陸誘導則を用いることで、燃料を最小化するような最適軌道に近い軌道で、さらに降下フェーズ中であつたとしても、画像照合航法結果を速やかに誘導則に取り入れることができる手法である。

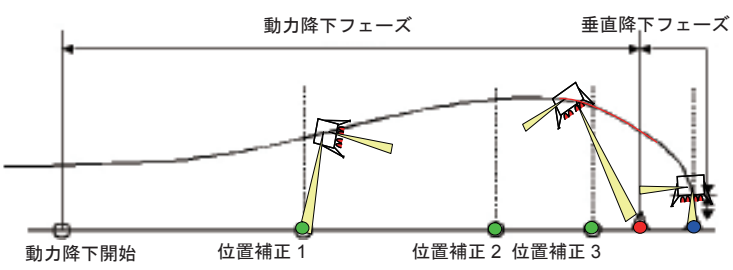
※上野誠也、樋口丈浩、河崎玄志:”月探査機の着陸軌道のための最適誘導則”
第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012.

シミュレータ開発と誘導則比較検討

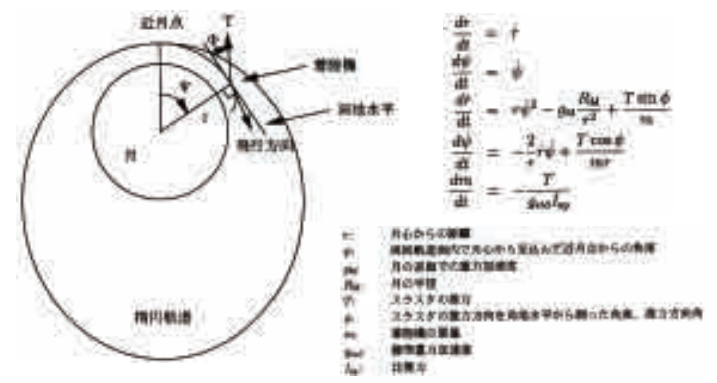
SLIM の目的であるピンポイント着陸性能を評価するために以下に示すようなシミュレータ開発を行っている。現在、各誘導則比較を進めると共に、探査機の機器構成、センサ / スラスタ特性へのロバスト性の確認、また将来的には、画像照合航法と組みあせたシミュレータ開発を計画している。



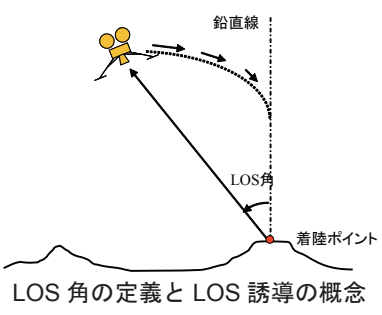
現在検討されている機体構成の一例



月面への着陸シーケンス図



最適誘導制御計算の定式化



LOS 角の定義と LOS 誘導の概念

DYN

並進方程式

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_V \sin(\theta) \cos(\phi) \\ m\ddot{y} &= F_V \sin(\theta) \sin(\phi) \\ m\ddot{z} &= F_V \cos(\theta) \end{aligned}$$

回転方程式

$$I \frac{dw}{dt} = M - w \times H$$

但し、 F_V は下式の重力ポテンシャルで表される力を示す。

$$U(r, \lambda, \phi) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{l_{max}} \left(\frac{a_l}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l \bar{P}_{l,m}(\sin \phi) \cdot (C_{l,m} \cos m\lambda + S_{l,m} \sin m\lambda)$$

SLIM 誘導制御検討のためのシミュレータブロック線図