特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」 小型探査プローブ搭載の複数広角カメラを用いた 縦孔側壁の3次元再構成

榎田 直紘¹, 宮内 貴大¹, 石上 玄也¹

2020年6月30日受領, 査読を経て2020年10月29日受理

(要旨)本論文では、月縦孔降下中の探査プローブが撮像した複数の時系列画像を用いて、月縦孔側 壁形状を3次元再構成することを目的とする。3次元再構成では、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)の技術を援用し、探査プローブの自由落下運動条件をSLAMの各処理過程に組 み込むことによって、カメラの回転に頑強なSLAMへと改良した。提案SLAMのシミュレーション検証 において、3次元再構成の精度向上を確認した。さらに、探査プローブ搭載カメラの性能の違いによる 3次元再構成への影響の検証も実施し、本研究で得られた検証結果から、ミッションシナリオと探査プ ローブの運動要件、カメラ性能に関する議論を行った。

1. はじめに

月面探査において、縦孔およびそこからつなが る地下空洞の探査が注目を集めている.2009 年 に、日本の月周回衛星かぐやに搭載された地形カメ ラの画像データによって月のMarius Hills Hole (MHH) に通常のクレータとは異なる直径,深さ共 に50 m の縦孔が発見された.また、2009 年に打ち 上げられた米国の月周回探査機によるカメラ観測に よって、その縦孔の底には水平方向に数10 m 以上 の空間が広がっていることが確認され、地下空洞の 存在が期待された.また2017 年には、JAXA がか ぐや搭載の電波レーダ、月レーダサウンダーで取得し たデータを解析し、月の火山地域の地下数10 m か ら数100 m の深さに、複数の空洞の存在を確認し た.その中の1 つは縦孔から数10 km 続く未崩 壊の地下空洞があることを報告している[1].

このように月の縦孔探査が注目を集めているの は、縦孔探査には多くの価値があるためである. 探 査によって縦孔の壁に見られる層序を取得すること からつながる地下空洞は,月面と異なり隕石によって 破壊されていないため,月に磁場があった証拠や水 のような揮発性物質が見つかる可能性があるなど, 様々な科学的課題の解決が期待できるとされてい る.加えて,地下空洞は微隕石の衝突や強い放射線 などの,月面の厳しい環境から機器や人を守り,温 度が比較的安定しているなどの利点から,有人基地 建設に最適と言われている[2]. 月火星の縦孔・地下空洞直接探査(UZUME)計

で月の地層の状態を知ることができる。また、縦孔

画では、本格的探査の前に縦孔側壁の3 次元再構成を行うミッションが想定されている[3,4]. 3 次元 再構成とは、2 次元平面に投影された複数の画像情報から、対象物体の3 次元構造を取得することである.縦孔を3 次元再構成することで、理学的には縦 孔の壁に見られる層序を知ることができ、また、工学的にはその後の探査の際にどの壁面から降下することが好ましいか、探査経路の検討に活用されることが期待される.このように縦孔探査において3 次元 再構成のミッションを達成することは、探査全体に大きな影響を与える.

縦孔側壁再構成のミッションシナリオとして,小型

1.慶應義塾大学 taka0427@keio.jp



図1: 小型プローブ.

探査プローブを縦孔内に投下して側壁を撮像すると ともに、同画像を着陸機経由で地上局へ送信し、地 上局にて同データをもとに3次元構成するシナリオ が検討されている[4].本論文において想定する小 型探査プローブを図1に示す.総重量1kg程度、カ プセル両端に広角カメラを搭載し、金蒸着バイザー で保護されており、外装はMLIによる断熱とし、 搭載機器は一部宇宙実証済みのものを積極的に活 用している.なお、この小型プローブは、NASA/ JPL が検討しているMoon Diver 計画[5]におけ るAxel ローバ[6]への搭載を想定したものである. 同ローバへの搭載寸法の制約、プローブ展開方法な らびにミッション要求などから、小型プローブの形状 ならびにカメラ配置が決定されている.

本論文では、この小型プローブに搭載された 2 つの広角カメラを用いた縦孔の3 次元再構成に ついて、ロボット工学分野において確立している Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)を援用し、縦孔側壁の3 次元再構成シナ リオに特化した改良を行うとともに、その手法のシ ミュレーション検証、ミッションシナリオについて検 討する.

SLAM 手法概要と 従来手法の検証

2.1 SLAM 概要

SLAM を用いた3次元再構成では,連続画像を 対象とした再構成において局所的にバンドル調整を 行って最適化を行う.バンドル調整とは,一方の画像 の対応点を位置関係を用いて,もう一方の画像へ投 影した際に生じる再投影誤差の総和が小さくなるよ うに,相対的位置関係と物体の3次元位置を最適化 することをいう[7,8]. SLAM では、1 タイムステッ プ前のカメラ姿勢に基づいて推定した現在のカメラ 姿勢を最適化することで、リアルタイムに自己位置推 定と地図生成を可能にする. SLAM は以下の処理に よって自己位置推定と地図生成を同時に行っている.

- Initialization:2 つの画像間の対応点から相 対的な位置関係と初期マップを生成する.
- 2. Tracking:画像上での特徴点を追跡し、入力フレームのカメラ位置と姿勢を推定する.
- 3. Mapping:位置関係と点群をバンドル調整に よって最適化し、点群の生成・更新を行う.
- Loop Closing: 周回経路を検出し、閉じること で蓄積誤差を削減する.

レーザ測距やRGB-D カメラのような深度測定方 式は、重量やサイズ、消費電力、宇宙環境での未実 証などの点において小型プローブへの搭載が困難で あり、また、より広範囲の画像情報を取得することを 主眼として、本研究では複数の魚眼カメラを用いる こととした.さらに、従来のダイレクトSLAM(LSD-SLAM など)ではなく、Urban らによって提案され た複数の魚眼カメラ対応のMultiCol-SLAM を援 用する[9]. MultiCol-SLAM は、特徴点ベースで 基準となっているORB-SLAM[10,11] を複数台の 魚眼カメラに使用できるように拡張したものである. もととなっているORB-SLAM は重度の乱れに対 して頑強であるため、落下運動においても3 次元再 構成が可能であること、またオープンソースのため、 これをもとに改良できることがメリットである.

2.2 SLAM の予備検証

本研究においてSLAM を改良するにあたって, 実際の縦孔内形状の真値が未観測であるため,縦 孔の3 次元形状を模したランダムな表面凹凸を持つ 中空円筒をCG ソフトウェア3ds max を用いて作 成した. さらにCG 空間内に魚眼カメラを2 台搭載 した小型プローブを作成し中空円筒内を自由落下さ せ,そのカメラ映像を任意のフレームレートで出力 し,プローブ自由落下時の連続画像を獲得した.こ れら画像をもとにMultiCol-SLAM を用いて3 次 元再構成を行った.本節では,従来のMultiColSLAM を用いた際の課題を明確にし、次節においてSLAM の改良を行う.

(1) 前提条件

CG ソフトウェアにより作成した縦孔は,鉛直方向 の深さが約100 m,入り口付近の直径が約50 mの 円筒形状を想定しており,アスペクト比1:2 で作成し た(図2).縦孔内がどのようなテクスチャになってい るかは不明のため,層序はあるがはっきりとした特 徴のない画像を基本のテクスチャとした.

プローブの落下運動は自由落下,かつ空気抵抗が 微小で無視できるため,本体の角速度一定,鉛直方 向に等加速度運動,水平方向に等速運動という運 動法則に従う.月における重力加速度は地球の6分 の1であるため,100mの落下には11.06秒かかる.

プローブ搭載カメラは視野角180 度とし、プロー ブ両端にそれぞれ1 つずつ設置した.カメラの最大 フレームレートを20 fps と想定し、縦孔開口部から の落下の場合、縦孔底部までの到達の間に、220 枚 の画像が作成されるよう設定し、またカメラ画素数 ははやぶさ2 搭載のカメラを参考に800 px とした. CG 空間内にチェッカーボードを作成し、魚眼カメ ラの一般的なモデル[12]に基づいてカメラキャリブ レーションも実施した.画像中心と平均ピクセル誤 差を表1 に示す.

本研究では、運動速度とフレームレートの差異に よって発生するモーションブラーを除いている.これ は、モーションブラーによって3次元再構成が一切 できなくなると、他の要素の影響の検証が困難にな るためである.また、プローブの落下方法はプローブ 長手方向の並進運動のみの場合と、並進運動に加 えカメラの中心方向を軸として姿勢安定のスピン回 転をする場合を想定する.回転に関しては、鉛直方 向を軸として角速度ω = 60°/sとした.なお、プ ローブを長手方向に落下させる理由として、プローブ の2台のカメラのうち1台を常に縦孔開口部に向け ることにより、縦孔開口部と月面上空との境界部分 においてSLAM処理に必要な特徴点ならびに明確 な特徴量が検出されると期待されるためである.

(2) SLAM 検証:並進運動の場合

SLAM の初期化において、カメラフレーム間に

発生する視差の調整が結果に影響を及ぼすことが ある. 視差角の閾値を1.0°, 2.0°, 3.0° と変更して SLAM を行った. 代表として閾値1.0°の結果を 図3 に示す。 以降のグラフも含め、 リセットを含む SLAM によるトラッキング開始点をグラフの原点と している。またプローブの移動量については、カメラ フレームごとにトラッキングできた相対的な移動量を Frame position として無次元量でプロットしてい る. 実移動量への変換に必要なスケールファクタに ついては今回は同定せず、本研究では、各種条件に おいて特徴点の継続的なトラッキングが可能であっ たかどうかを検証するのみとする. 閾値を1.0° に設 定した場合,初期化で1つの点を生成する際,2視 点からのベクトルがなす角が1.0°を上回った場合 のみ初期マップに登録される。3次元の再構成結果 で見えている側面は、図2 と同様の面である、回転 が無い場合。3次元再構成によって視差に関係なく おおよそ縦孔の外形の再現ができていた.

問題点として、z 方向について、100 フレーム以前 では、自由落下に相当する放物線形状の自由落下軌 跡が確認されるが、それ以降は直線状となっている。 この軌跡は等速で落下していることと同義であり、 実際のプローブの運動とは一致しない、さらに、水平 方向にも初期段階では直線あるいは放物線の位置 推移を示しているが,特にy 方向については放物線 形状を示し、等加速度運動をしていることとなり、実 際の運動とは一致しない. これに対する1 つの要因 として、小型プローブの2 つが180°正対させて配置 したことが、SLAM の計算に対して不適当であった ためである. SLAM 計算時に三角関数を用いるた め,180°の入力があった場合,数学的にゼロ除算が 発生しSLAM の計算が停止してしまうことが確認 された、よって、ゼロ除算を避けるため、実際のSLAM 計算時には、2つのカメラの相対角度を180°に限りな く近い値として設定した. つまり. CG 空間内ではカ メラ相対角度が180°であるのに対し、SLAM 計算 時ではこの角度を180°に限りなく近い値としている ため、経路と縦孔の湾曲が生じていると考えられる.

また,カメラキャリブレーションの影響も大きい. 表1にまとめたように,画像中心が50pxほど離れ ている.このため鉛直方向に落下しているにもかか わらず,水平方向にも小さい加速度がかかっている

表1: キャリブレーション結果.

Parameters	Value
x_c	442.49 px
y_c	377.30 px
$error_{calib}$	2.59 px



図2: 縦孔CG 画像.

と誤推定したと考えられる.

(3) SLAM 検証:並進回転運動の場合

同様にして、初期化における視差の閾値を1.0°, 2.0°, 3.0°と変更して、プローブが並進回転運動 をする際のSLAM を行った.代表として視差閾値 が1.0°の結果を図4 に示す.なお、図4の原点は、 前述のとおりトラッキング開始点を原点としているた め、図3の原点とは一致していない.回転が加わった 場合、精度が著しく下がったことが確認できる.

視差が1.0°の場合,図4のように本来の経路から 大きく逸脱し,その間一切回転しない経路を生成す ることが起きた.これは視差1.0°の場合に多く発生 し、2.0°,3.0°ではほとんど発生しなかった.

これより視差の設定が回転の推定と関わっている と推測することができる. 視差を小さく設定した場 合,画像上であまり動いていない点も初期マップに 追加される. 視差が小さい点とは,カメラ位置から 遠方に位置する点であり,この点はプローブから常 に観測できる点となるため,位置推定に失敗すると 正しい3次元再構成が困難になる.また視差に関係 なく,プローブの経路推定が開始できるカメラフレー





図4: 回転:改良前SLAM (視差閾値1.0°).

ム数が遅いことがある. これは初期化でマップを生成したとしても、Trackingで正しい姿勢を推定できずにリセットを繰り返すためである. 以上より、初期化の精度とともに、回転でも正しく姿勢を推定できるTracking に改良する必要があると言える.

2.3 SLAM 手法改良の要点

上記の検証結果より、改善すべき点としては、以 下のものがある.まず第1 に回転への対応である. これには初期化とTracking の改良が必要になる. Tracking可能な初期化を早い段階で作成すること と、回転がある場合でも安定してTracking できる ようにすることが、再構成の成功と失敗を決める.

また従来のSLAM ではLoop Closing, すなわ ち同じ場所を通過する際にループが構成され, その 情報をもとに最適化を行う技法があるが, 本研究で は, プローブが鉛直に落下するのみの運動であるた め, この技法を適用できない. よって, 再構成ができ たうえで, 経路と点群を本来の運動法則に合った形 にするため, Loop Closing に代わる全体最適化手 法を考案すべきであると考える.

3. 縦孔降下プローブに特化した SLAM 手法と検証

3.1 改良SLAM

予備実験で判明した課題を解決するため, SLAM 手法の改良を行う. プローブ落下は,1度の 自由落下というSLAM にとって特殊なケースになる ため,その運動に特化したSLAM へと変更する.回 転の対応のために初期化の改善と運動モデルの変 更を行い,全体最適化のためにスムージングと運動 法則の適応を行う.

本研究ではプローブ落下実験に特化したSLAM を作成するため、以下の4 ステップの改良を行う.

(1) 初期化の改善

本研究では繰り返し計算による初期化アルゴリズ ムを追加し,下記のステップに基づいて,画像ペアに おける一致度を比較して優秀なペアを使用する.

- 回転量推定:画像やプローブ搭載の慣性センサの値から、あらかじめおおよそのプローブの姿勢角度・回転量を推定する。
- ノイズ付加:最適な値を計算するため、回転量と 並進移動量を少しずつ変更し、相対的位置関係 とする.
- 3. 初期マップ生成:相対的位置関係を使って初期 マップの生成を行う.
- 繰り返し計算による最適化:回転量と並進移動 量に与えるノイズを変更し1から3を繰り返し 計算.再構成できた点群の数が最も大きいもの を初期化の結果とする.

(2) 運動モデルの変更

Tracking において失敗しやすい回転量の推定 を,連続画像や慣性センサの値から推測された一定 値を用いて行うことで,前回の値に依存しない推定 を可能にする.以下Tracking の流れである.

1. 運動モデル固定:1 ステップ前の計算において Trackingに成功した場合,あらかじめ推測さ れた運動モデルによってカメラ姿勢を推定する.

- 対応点の探索:前回観測された点群を,推定された姿勢に基づいて現在のフレーム画像に投影し、その付近で対応点を探索する.
- 最適化:カメラ姿勢を対応点に基づいて MotiononlyBundle Adjustment (BA) で 最適化する.
- ノイズ付加:回転量にノイズを付加し、1から3 を繰り返し計算により最適化.最も精度が高い ものをカメラ姿勢とする.

Motion-only BA とは点を固定した状態でカメ ラ姿勢のみをバンドル調整で最適化することであ る.本研究ではその調整時に慣性センサの誤差分の 幅を与えて繰り返し計算させることで,前回の状態 に依存することなく真値付近での最適解の探索を可 能にし,現在の姿勢推定を可能にする.

(3) スムージング

Tracking 内の局所最適化によってブレを持つ 経路を, 球面線形補間と最小二乗法により滑らかに し, その変化量に合わせてマップを修正する. 視点 が1 点の場合, カメラの姿勢を修正した分だけ周囲 のマップも移動すれば良い. しかし複数視点になる と1 つのマップポイントが複数の視点から見られる ことがあり, 多くの視点から見られた点ほど大きく動 いてしまう.

これを解決するため, 複数フレームにTracking されたマップポイントについては, それらフレームの 修正量の平均によって更新を行う.1 つの点につい て,以下の処理を行う.

- フレームを記憶:SLAM が実行されている間, 点をTracking したフレームを記憶する.
- 平均修正量を算出:点をTracking した全フレームの,修正量の平均を球面線形補間によって算出する.
- マップの更新:平均修正量を点の座標にかける ことでマップを更新する.これを全ての点に対し て繰り返すことで、マップの更新を行う.

(4) 運動法則の適応

物体の落下軌跡が実際の運動法則に従うように 修正し、本研究では、z軸を鉛直方向とし、鉛直方 向には等加速度運動、水平方向には等速運動をする ようにカメラ位置を変化させ、その変化量に合わせ てマップを修正する.

3.2 改良SLAM による シミュレーション検証結果

本節では改良したSLAM 手法を用いて縦孔の3 次元再構成を行う.まず,前節の予備実験で用いた CG 映像を用いて3 次元再構成を行い,改良の評価 を行う.

予備実験と同様のCG 画像を用いて,改良SLAM による3次元再構成を行った.予備実験において,す でに並進は3次元再構成が行うことができたため, ここでは改善が顕著に見られた回転について評価を 行う.図5に各改良ステップの効果を図示する.図5 からも,大きく広がってしまっていた縦孔底部の点群 が,運動法則の適応によって円筒に近い形に修正さ れていることがわかる.また,図6に各フレーム間で Tracking に成功した対応点の数であるScore of Tracking の推移を図示する.同図より改良SLAM によりTracking 数が向上していることが分かる.

一方で、経路のスムージングと運動法則の適応に よって推定経路が改善するのは当然であるといえ る.したがって、経路の修正によって位置が更新さ れたマップ形状を比較することでスムージングと運 動法則の適応の効果を評価する.図5 中段より、ス ムージングによって縦孔のv 正方向への曲がりが解 消され、外側へ拡散していた点群が集約された分布 へと改善されたことがわかる。以上より、初期化と Tracking である程度の3 次元再構成ができてい れば、全体最適手法であるスムージングと運動法則 の適応は一定の効果があるといえる. なお、CG 画 像の多面体形状とSLAM から得られる点群の位置 関係から3次元再構成の精度を定量評価すべきで あるが、多面体形状と点群との位置合わせにおいて も繰り返し計算が発生してしまい、各手法における 正当な評価ができない. よって今後は適切な評価指 標の導入も必要となる.

4. 実ミッションを想定した検証

4.1 カメラや運動の影響の検証

SLAM による3 次元再構成に対して、プローブ 自体の運動やカメラの性能、環境が要因となって精 度が低下することが考えられる.本研究では、プロー ブの初速、角速度、縦孔壁面のテクスチャ、カメラフ レームレート、カメラ画像ノイズを変更し、SLAM の 検証を行った.このうち、本論文では、特に3 次元再 構成への影響が大きかった要因であるプローブ角速 度とカメラフレームレートについて述べる.またそれ ぞれの要因の影響を検証するため、全体最適化は行 わずに3 次元再構成のみを実施する.これは全体最 適化により経路が修正され、それぞれの要因による 影響が見えなくなってしまうためである.

(1) 角速度による影響

角速度を変更して、SLAM の精度への影響を検 証した.角速度は 60° /s、 120° /s、 180° /s の3 パ ターンで行ったところ、結果として、 $\omega = 180^{\circ}$ /s で は初期化ができず、Tracking も開始しなかった. 図7 には、 60° /s、 120° /s、のみの結果を示す.同図 より角速度が大きくなるにつれて、Tracking してい る特徴点の個数が少なくなることが確認された.

角速度が大きくなるにつれ、1 フレームレートあた りのカメラ画像が大きく動くため、キャリブレーショ ンや再構成における誤差の影響が顕著に現れる. 角速度が60°/s、120°/s、180°/s のとき、フレーム レートが20 fpsのため、毎フレームごとにそれぞれ 3.0°, 6.0°, 9.0° ずつ回転している.また、初期化で は推定した一定の回転量からそれぞれの軸方向に 2°分の幅を与えて最適化を行っている.よって、最 適化計算のための2°という幅が、各角速度に対して 異なった割合となってしまい、結果として最適化計算 が十分ではなく、大きな角度変化に対応できていな いと推測することができる.120°/sや180°/s のよう な角速度が大きい場合に、初期化での最適化の計 算回数を増やすことで初期化の精度向上ができる可 能性がある.



図5: 改良後SLAM による3 次元再構成(上段:3 次元再構成,下段:推定経路).



(2) フレームレートによる影響

宇宙空間で使用されるカメラはフレームレートが 一般的に低い.例えばはやぶさ2 で使用された分離 カメラは5 fps である.よって、ここでは20 fps を実 現できない場合を想定し、プローブの垂直落下にお いて姿勢回転(60°/s) がある場合で、10 fps と5 fps で検証を行った.その結果、図8 に示すように、フ レームレートが下がるほど3 次元再構成が困難で あった.フレームレートが小さいことは画像間の対応 点の低下を招き、理論上最も再構成が困難になる条 件といえる.これに加えて、3 次元再構成が困難にな る原因として、カメラキャリブレーションによるピクセ ルの誤差の影響が考えられる.姿勢回転が加わるこ とで、キャリブレーションでの画像中心と実際の中 心との位置関係に変化が生まれ、1 タイムステップ あたりの点群運動の推定が困難になる可能性があ る.よって、カメラキャリブレーションによって画像中 心がイメージ上の中央に来るような、低歪のレンズを 搭載したカメラを使用することが、3 次元再構成の 精度を上げると推測される.

4.2 全体最適化を含めたSLAM 適応性の 検証

前述の検証によって判明した3次元再構成の精 度を悪化させる要因を、全体最適化を含めて再度 3次元再構成し、本研究において改良したSLAM の適用性を検証する.SLAMの処理において、 Trackingの繰り返し回数を増やし、さらに解の探 索範囲を広げる調整を実施し、前述の再構成不可能 であった、角速度180°/s、フレームレート20 fpsの ケースと、角速度60°/s、フレームレート5 fpsでの 再構成を実施した.また対応点が少ないため、まず は初期化を完了させるため初期化における視差の閾 値を下げ、点の数を増やす処理を追加した.



図7: 異なる角速度でのSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推 移:下段:トラッキング数).

(1) 角速度に対する全体最適化による改善

図9(a) より, SLAMの設定を変更する前では一切 マップが生成できなかったが, 220 フレームのうちお よそ100 フレームはTracking ができている. 探索 範囲の拡大が3 次元再構成を可能にしたことが分 かる. しかしながら同図(a) 中段より, 初期化付近で 経路が大きく歪み, 位置推定が正しく行えていない. 回転の作用が大きくなると並進の推定が正しく行え なくなっていると考えられる. 運動を一切考慮せず に探索範囲を拡大すると、本来の姿勢ではなくても 良い一致度が出ることがあることも考えられ, 実際 の運動を考慮して探索範囲を拡大することが重要で あると考えられる.

(2) フレームレートに対する全体最適化による 改善

図9(b) より,対応点の数は少ないが,Tracking Lostを起こすことなく3次元再構成を行うことがで



図8: 異なるfps でのSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推移: 下段:トラッキング数).

きている.これは、Trackingの解の探索範囲を広 げたためである.フレームレートが下がると、画像自 体の対応点が少なくなるため、画像間での対応点も 少なくなっている.しかし、その推移は安定している ことがわかる.このことは、本研究で行った改良が 低フレームレートのカメラに対応できることを示して いる.フレームレートが高いほど対応点が多くなるた め、再構成の点群の密度が上がりTracking もしや すいが、対応点を原理上Tracking できる範囲のフ レームレートであれば、計算の試行回数の増加によ る探索範囲の拡大によって3次元再構成が可能で あるといえる.このことから本研究で行った改良は、 フレームレートに対して一定の適応性を有することが 確認された.

4.3 ミッションシナリオでの検討事項

前述において得られた各要因の影響をもとに,本 研究において提案する改良SLAM を用いたミッ ションシナリオでの検討事項を議論する.

215

(1) 角速度について

プローブの角速度が小さいほど3次元再構成の 精度は高くなるため、プローブ放出時には角速度は 極力与えないほうが好ましいと言える.一方で、改良 SLAMにより、ある程度の角速度であれば3次元再 構成が可能となっている.本研究の手法を探索範囲 を広げて行うことで、角速度が大きい場合でも精度 の良い3次元再構成を実現できる可能性がある.

プローブへ角速度を与える必要がある場合,モー ションブラーの影響も考慮する必要がある。モー ションブラーの大きさによる影響の違いは定量的 に検証できていないが,一般的に考えてモーショ ンブラーが大きくなるほど特徴点が少なくなり, Tracking が困難になると予測される。モーション ブラーの影響検証はさらに深める必要があると考え る.

(2) カメラ性能について

自由落下においてフレームレートが小さくなること は、時系列画像間でのプローブの落下速度が大きく なることと同義である.フレーム間の変位が大きくな ると、対応点の数が下がり、物体が回転する場合、 フレームレートが下がることは角速度が上がること と等しいため、さらに3次元再構成を困難にする. Tracking や初期化での探索範囲を広げることで、 あるレベルまでの精度を出すことはできるが、対応点 が少ないことは3次元再構成において致命的な要素 となる.よって、可能な限り高いフレームレートのカメ ラを用いることが好ましい.

4.4 今後の課題:アルゴリズムおよび精度評価

一般的に、SLAMにおける3次元再構成自体は Trackingした特徴点に依存するため、縦孔の模様 にほとんど変化が無い場合や、縦孔内の明るさが特 徴点を得るには不十分な場合は、再構成が困難に なるという課題がある.よって今後の課題として、カ メラキャリブレーションの影響による経路湾曲を修 正すべく、キャリブレーション手法の改良、あるいは カメラ自体の設定変更などが挙げられる.また、カ メラの回転成分のみを最適化する手法[13]を取り 入れたL-infinity SLAM[14]も近年発表されてい



図9: 全体最適化によるSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推 移:下段:トラッキング数).

る.同手法は、カメラ回転にロバストかつBundle Adjustment が不要なSLAM であり、同手法が 適用可能かを今後検討していく.さらに、SLAM自 体の精度評価においても、再構成された3 次元点 群データと真値との比較についても検討が必要であ る.前述のとおり、真値との比較において繰り返し計 算が発生してしまうことを解決すべく、より解像度の 高いCG生成ならびにMultiCol-SLAM の処理時 間向上が必要である.また、推定されたプローブの 運動経路に関しても精度評価が必要となる.

5. まとめ

本研究では、従来SLAM における初期化の改善 と運動モデルの変更、ならびに球面線形補間を用 いたスムージングを実装することによって、プローブ 回転動作条件下でのSLAM においてもTracking Lost が発生することなく、3 次元再構成が可能で あることを示した.この改良によって、3 次元再構 成の結果に致命的な影響を及ぼす要素、すなわちプ ローブの回転角速度やカメラのフレームレートなどを 定量的に特定することが可能になった.

実ミッションを想定したシミュレーション検証で は、プローブの鉛直軸周りの角速度が60°/s、カ メラフレームレート5 fps の条件下においても、 Tracking Lost を生じることなく、3 次元構成が可 能であることを示した.今後は、フレームレートや画 素数といったカメラ性能によっても再構成に用いる ことができる情報量が変わるため、理学的要求とカ メラ性能ならびに3 次元再構成精度とのトレードオ フ検討、さらには、地上の縦孔を使用した実地実験 など、実ミッションに向けての改良と検証を行うこと が必要となる.

謝辞

本論文の執筆ならびに修正にあたっては,国立研 究開発法人産業技術総合研究所 有隅仁博士に多 大なるご指摘とご助力を頂きました.この場を借りて 深く御礼申し上げます.

参考文献

- Kaku, T. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 44, 10155.
- [2] Haruyama, J. et al., 2012, Moon (ed. V. Badescu), 139.
- [3] 春山純一他, 2019, 第 63 回宇宙科学技術連合講 演会, 3C01.
- [4] 石上玄也他, 2019, 第 63 回宇宙科学技術連合講 演会, 3C09.
- [5] Kerber, L. et al., 2019, 50th Lunar and Planetary Science Conference, No.1163.
- [6] Nesnas, I. et al., 2012, Journal of Field Robotics 29, 663.
- [7] Hartley, R. and Zisserman, A., 2003, Multiple view geometry in computer vision, Cambridge University Press.
- [8] Caruso, D. et al., 2008, International Journal of Computer Vision 80, 189.
- [9] Urban, S. and Hinz, S., 2016, arXiv:1610.07336.
- [10] Mur-Artal, R. et al., 2015, IEEE Transactions on

Robotics 31, 1147.

- [11] Mur-Artal, R. et al., 2017, IEEE Transactions on Robotics 33, 1255.
- [12] Scaramuzza, D. et al., 2006, Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5695.
- [13] Chatterjee, A. and Govindu, V. M., 2013, Proc. of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, 521.
- [14] Bustos, Á. P. et al, 2019, Proc. of the 2019 International Conference on Robotics and Automation, 2385.