

## 小型月面探査ローバ：Micro-5 及び遠隔制御アルゴリズムに関する研究 Shadow Range Finder における影境界探索手法の検討

研究代表者 研究員 國井 康晴（中央大学理工学部）  
 共同研究者 研究員 木下源一郎（中央大学理工学部）  
 共同研究者 客員研究員 久保田 孝（宇宙科学研究所）  
 共同研究者 客員研究員 黒田 洋司（明治大学理工学部）  
 共同研究者 準研究員 多田 興平（中央大学大学院理工学研究科博士後期課程）  
 共同研究者 準研究員 大橋 勇夫（中央大学大学院理工学研究科博士前期課程）

### 1 はじめに

惑星探査ローバ等に搭載されるマニピュレータを用いてサンプル採取を実現する場合、直接操縦し作業を実現することは、通信時間遅れ等の問題により困難である。このため、なんらかの自律機能による実現が求められる。把持の際、もっとも重要な情報は、対象物体の三次元形状情報である。

一方、Bouguet は卓上ライトと影を使った 3 次元計測法を提案している [1]。これは卓上の物体の 3 次元形状取得を目的とし、計測原理に関する議論のため、理想的な白い物体と背景を用いている。また、影領域の境界抽出に関する議論はあまりなされていないが、太陽と影を用いた計測の可能性が示されている。よって、本研究では、惑星表面上のマニピュレーションのため、本方式を応用することを検討し、単眼カメラと影を利用する Shadow Range Finder : SRF を構成する [2]。

本稿では、SRF の精度向上を目的とし、影の境界付近の輝度変化に着目した影領域の推定手法に関し、静止画から推定する手法及び複数画像から動的に推定する手法について検討を行ない、実験によって検証した。

### 2 Shadow Range Finder

太陽光は平行光であり、影も平行に投影される。よって、太陽光をプロジェクタ光としてマニピュレータの影を生成し Fig.1 に示す手順で三次元形状が取得可能である。

測定物体の三次元形状データ  $X, Y, Z$  は、ピンホールカメラモデルおよび影投影モデル [3] から算出する。その際、必要なパラメータは以下の 4 つである。

- 測定点  $P$  のカメラ座標上の位置  $P_c[X_c, Y_c]$
- 光源方向  $S[X_s, Y_s, Z_s]$
- リンク部姿勢  $L[X_l, Y_l, Z_l]$
- リンク部上の一点  $L_0[X_{l0}, Y_{l0}, Z_{l0}]$

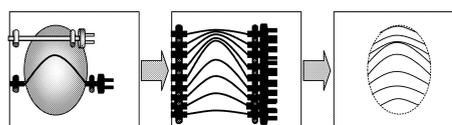


Fig.1 Shadow Range Finder (SRF)

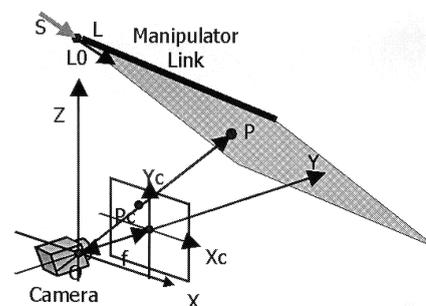


Fig.2 Schematic of Shadow Range Finder

ここで  $S$  は Sun Sensor から、リンク部姿勢  $L$  およびリンク上の一点  $L_0$  はマニピュレータの関節制御センサから取得される。 $S, L, L_0$ 、各パラメータに対する感度解析の結果、測定値への影響は小さく、一方、 $P_c$  の測定誤差に関しては、測定位置に対する影響も大きく、また、カメラ画像から影領域を抽出する必要があるため、誤差が大きい。したがって、画像処理によっていかに特徴点  $P_c$  を適切に抽出するかが、精度の向上にむけての大きな課題となる。

### 3 静止画を用いた影領域探索手法の検討

#### 3.1 2 値化による影領域探索手法

特徴点  $P_c$  を抽出するために、影領域を抽出する必要がある。影は画像中の輝度値の最も低い部分であるので、画像の輝度ヒストグラムを利用して閾値を決定して 2 値化後、影領域を分離する。この手法はモード法と呼ばれる。しかし、影が投影された面の輝度の違いにより、投影された影に輝度差がでる場合がある。よって、局所的に閾値を決定する必要があるため、動的閾値法を導入した。これは元画像 (A) と元画像を平滑化した画像 (B) を用意し、A

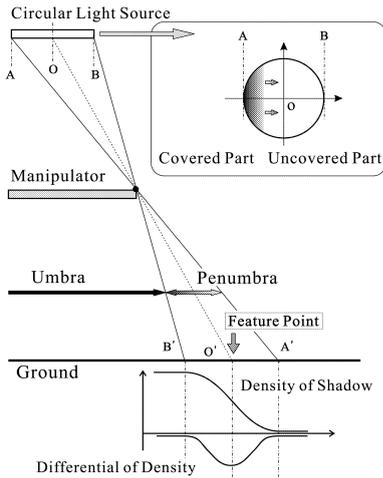


Fig.3 Penumbra and Umbra

と B の同じ座標点の輝度値を比較, (A の画素の輝度値) < (B の画素の輝度値) となる画素を影領域と決定する手法である。

2 値化による影領域の抽出をおこなうには, 影と影以外の輝度値にある一定以上の輝度差が必要となる。しかし実際の影の境界部分に注目してみると, 境界部分の輝度は徐々に変化しており, 境界線がはっきりしていないことがわかる。このような部分では, 2 値化による影領域の判別は困難となる。本来, 特徴点  $P_c$  はこの境界線上の点であるので, これが計測誤差に影響を与え得ると考えられる。よってこの境界線の推定について更に検討を行う。

### 3.2 境界部分の影の濃度変化

影がぼやける原因として, 反射光と半影の影響が挙げられる。反射光によるぼやけは境界付近に限らず影全体をぼやけさせる。一方, 半影とは, 大きさがある光源の一部分によって照射され生成された影が薄くなる現象であるため, 境界付近に強く影響を及ぼす。これに対して完全に光源を遮った黒くはっきりとした影領域を本影という。一般的に言う影とは本影を指す。しかし Fig.3 に示すように, 実際の境界線は半影内にあると考えられる。以下に詳しく述べる。

Fig.3 は, 円形平面光源によってマニピュレータの影が生成される際の模式図である。光源が理想的な点光源であれば, 境界は  $O'$  になるが, 光源が面積を持つ場合,  $A'B'$  間に示す半影領域内に境界が存在する。ここで, 太陽センサは光源の中心点  $O$  の方向を計測するため, 理想的な境界  $O'$  を求める必要がある。しかし, 前章で述べた 2 値化による境界抽出では, 半影の広がり方により,  $O'$  の位置が正確に特定できない。 $O'$  を正確に特定するために半影の輝度分布に着目する。

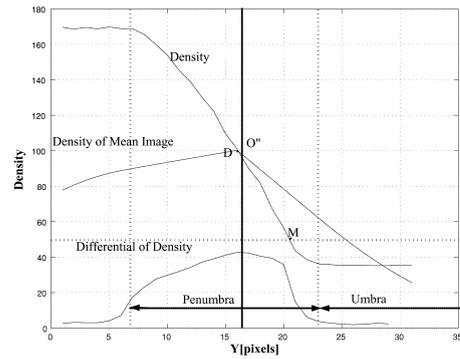


Fig.4 Projected Density and Its Differential curve

半影部分の輝度分布は遮られた光源の面積によって決定される。(Fig.3 右上) したがって, その一次微分値は Fig.3 下部の曲線のように 2 次関数となり極値を持つ。以上により, 半影部分の輝度変化量曲線の極小点はちょうど光源の中心点が遮られた位置  $O'$  と一致することとなる。すなわち, 半影の輝度変化量曲線を微分しその極小値を求めることで本来の影境界である  $O'$  が検出可能である。

### 3.3 検証実験

以下の環境において影を撮影し, 検証を行う。

- 光源 幅 54mm のハコゲンランプ
- マニピュレータリンク部の幅 12mm
- 光源から地面までの距離 885mm
- リンク部から地面までの距離 95mm

このときの影境界付近の輝度分布および, 一次微分値を示したものが, Fig.4 である。Fig.4 における点 M, D,  $O'$  は, それぞれモード法, 動的閾値法, 輝度投影曲線の微分値の極値, によって決定された影境界点である。この結果, 影の投影幅は, 理想的な点光源では 28[pixel] であったのに対し, モード法 19[pixel], 動的閾値法 24[pixel], 輝度曲線の微分値の極値を静止画から取った場合 25[pixel] という結果を得た。

### 4 動的な境界線の推定手法

前述の輝度分布曲線の微分値の極値による探査手法を, 得られた画像にそのまま適用した場合, 測定点 P のテクスチャによって, 輝度変化の状態が変化することがあるため, ある点における輝度の時間的変化を動画を用いて検出することを考える。

画像中の点  $P_k[t_k, x_k, y_k]$  における輝度値の時間的変化を表したものが Fig.5 である。点  $P_k$  上を影が通り過ぎる際, 輝度値は上述の輝度分布曲線同様に 2 次曲線的に変化する。よって, 着目した点  $P_k$  は輝度変化曲線 (Fig.5 下

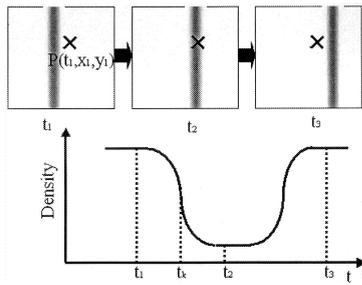
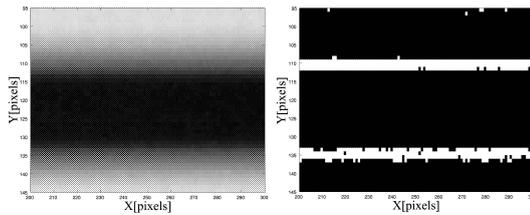


Fig.5 Transition of Shadow



(a) Original Image (b) Binary Image

Fig.6 Edge Estimation of Shadow with movie

図)を微分しその極小値を取る時刻  $t_k$  の時に特徴点と定めることができる。これを全ての画素に適用し、特徴点群を求める。

この手法を用いて、3.3節と同じ条件で影の出現幅を測定したものを Fig.6 に示す。この測定で得られた元画像 (a) 及びエッジの抽出を行った結果 (b) である。このとき影の出現幅は動的閾値法と静止画で輝度曲線の微分値の極値から推定する手法とほぼ同じ 25[pixel] であった。ここで、Fig.6(b) では境界に幅があるがここでは中点を採用した。

Fig.6(b) の境界線の幅は、複数の点で同時刻に輝度変化曲線の微分値が極値をとっていることを示しており、影による走査線の解像度に起因するものである。すなわち、解像度を上げることで除去できる可能性がある。一方で、極値近傍のある幅をもって捕らえることができるため、一点の極値を検索している静止画を用いた手法に比べ、対象点の状態に対する感度が抑えられることが期待できる。よって安定した計測が可能になる可能性があり、今後検討していく。

## 5 まとめ

本稿では、SRF において影境界部分の濃度変化に着目し、影領域抽出の際の推定方法について静止画から得る手法、動的に推定する手法について考察した。

今後は、動画をを用いた手法における必要解像度やロバスト性の議論を行い、本手法の有効性についてさらに検討を進めるとともに、実際に物体を計測したデータに対して誤

差解析を行い、精度向上の面における有効性の検証を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Jean-Yves Bouguet: Weakly structured lightning-Scanning using shadows (カルフォルニア工科大博士論文, 1999)
- [2] 後藤, 辻, 國井: 影の濃度変化を考慮した Shadow Range Finder の精度向上 (第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2003)
- [3] 井口, 斎藤: 三次元画像計測 (昭晃堂, 1990)