Integration Insights

惑星表面ナビゲーションの危険を検出する 構造化照明システム

アラ・ネフィアン

マシンビジョンでのカメラキャリブレーションとマルチドットレーザプロジェ クターシステムは、惑星ローバーに仮想バンパーを提供する。

惑星ローバーのナビゲーションには、 搭載された計算資源と電力の制約、現 地の地形や照明条件などの詳細な情報 の欠如といった制約がある。月や水星、 小惑星のような空気のない環境におけ る画像の取得も、明るい太陽光や暗い 影による高いダイナミックレンジに関連 する極端なイメージング条件のため、 同様に困難を伴う。このような環境で の使用に適応するためには、自律ロー バーや半自律ローバーをビジョンシステ ムと共に展開して、周囲の環境を確認 できるようにすることが必要である。

そのようなシステムの例の1つが、 こういった環境で障害物を回避するた めの仮想バンパーシステムである。仮 想バンパーは非接触型の接近保護セン サであり、ローバーの危険検出におけ る最後の砦として機能する。完全に暗 い領域を走行している間は、電力を考 慮して、通常このシステムが唯一常時 オンのナビゲーションセンサとなる。 従ってこのシステムは、惑星探査ミッ ションの制約要件内で、障害物を迅速 かつ確実に検出する必要がある。

本稿で紹介する、このようなタスク のためにNASAの科学者のチームが特 別に設計した、構造化照明システムは、 キャリブレーションされたカメラとレ ーザドットプロジェクターシステムか らなる。このシステムは、画像中にあ る投影されたドットの位置を検出し、 三角測量プロセスを通じて、潜在的な 危険を検出する。

チームが開発したこのシステムは、 ソニーの1388×1038ピクセル ICX267 CCDイメージセンサを中心に構築され た、独アライド・ビジョン社 (Allied Vision)のG-146 GigE Visionカメラ1台 からなる。カメラはフル解像度でほぼ 18fpsに達し、Power over Ethernet 規格である。独ツァイス社(Zeiss)の Cマウントレンズと、加オセラ社 (Osela)のStreamlineシリーズのレー ザの波長に調整された狭帯域フィルタ を使用する。フィルタはレーザプロジ ェクターの波長帯以外の太陽光を遮断 する。カメラとレーザはラップトップ に接続して処理する。

この工業用グレードのレーザは、ドッ ト間の均一性が高く高効率の、正確に 角度間隔を空けたドットの列を投影す る。カメラはモノクロレーザによって投 影されたドットを単一の画像から検出 する。投影されたドットがシーン内の他 のすべての照明よりも明るいことだけ が必要である。これは、周囲の照明に



図1 実験はNASAのK-REX2ローバーを使用して行われた。ここでは、ローバースケープでの夜間テストを示している(a)。仮想バンパーのセット アップは、ローバーの前縁に取り付けられたマルチドットレーザプロジェクターとカメラから構成される(b)。



図2 昼と夜のテストで使用された岩のタイプは、(左から順に)大きな角ばった岩、噴出塊、小さな角ばった岩、複雑な複数の岩からなる集合体である。

よるピクセル強度に対する、レーザプ ロジェクターの照明によるピクセル強度 の比率が、一定のしきい値よりも大き くなるようにすることで実現される。

ハザード検出

NASAのハザード検出システムは、 OpenCVライブラリと専用ソフトウエ アで構成されている。ソフトウエアは、 投影されたレーザドットを利用し、ロ ーバーの進路の潜在的な障害物を特定 する。このシステムでは、投影された すべてのドットは同じエピポーラ線上 に整列し、カメラの前の障害物は、レ ーザ照射されたピクセルの水平方向の 位置のシフトのみを決定する。ドット の垂直方向の位置は、画像の同じ行に 残る。このような設計により、レーザ ドットの位置の検索が単一の画像ライ ンだけでよくなるため、画像の取得及 び処理の時間が大幅に短縮される。

同じカメラ姿勢及び照明条件におけ るレーザ投影ドットの有無にかかわら ずでキャプチャされた2つの画像があ る場合、これらの2つの画像間の違い により、主に強度の低い画像ノイズと 共にレーザで照明されたピクセルが選 択される。このソリューションでは、 ローバーが停止して、同じカメラ姿勢 から2つの画像がキャプチャされるこ とを確認する必要がある。

しきい値は次のように選択される。

$$\frac{L_{laser}}{L_{noise}} > T$$

投影されたレーザドットを表示する 単一の画像を使用すると、次のような 固定しきい値Tを使用して、レーザプ ロジェクターによって照明されるすべ てのピクセルを選択できる。

$$\frac{L_{laser}}{L_{sun}} > T$$

この場合、さまざまな傾斜やアルベ ド値といった地形特徴が、投影された レーザビームと混同されないように、 レーザ投影出力を大幅に高くする必要 がある。あるいは地形特徴が緩やかに 変化することを前提として、背景の関 心領域(Region Of Interest:ROI)を使 用できる。背景のROIは、投影された レーザドットを含むROIと同じ幅、高 さ、左水平ピクセルの値を持ち、決め られたピクセル値だけ垂直方向にシフ トする。背景のROIは、背景画像が利 用できない場合に背景画像の外観を近 似し、この場合のしきい値Tは次のよ うに選択できる。

$$\frac{L_{laser}}{L_{noise}} > T$$

そうすることで連続的なローバーの操 作とレーザ出力強度の低減が可能にな るが、これはゆっくりと変化する地形特 徴を前提としている。この処理段階の 出力は、しきい値処理によって取得さ れたROIサイズのバイナリイメージであ る。T値を超える強度値を持つピクセ ルは1に設定される。他のすべてのピ クセルは0に設定され、破棄される。

バイナリイメージのピクセルは、連結 成分アルゴリズムを使用して、いくつか のクラスタにグループ化される。各クラ スタの重心は、クラスタに属するすべ てのピクセルの位置の平均化によって



図3 グラフは、測定基準としてF1スコアを使用したバイナリ画像の しきい値の選択を示している。周囲の照明の自然な変化と、カメラ設 定の人為的な変化により、昼と夜の間でデータに広がりがでている。

計算される。一定のしきい値を下回る 数ピクセルのクラスタは削除される。

検出アルゴリズムは、ROI内のレー ザドットの数とそれらの相対位置を決 定する。ROIで検出された重心の数が レーザビームの数より少ない場合、ア ルゴリズムは障害物を検出する。これ は、指定された許容範囲の障害物の最 大ピクセル視差に対する画像のROIの サイズが原因である。このケースは、 ピクセルの視差以上にすべてのレーザ ドットを水平方向にシフトさせるオクル ージョン、幅のある障害物の検出(正ま たは負)、地形傾斜の検出に対応する。

検出されたドットの数がレーザビー ムの数と等しい場合、ピクセルの順序 に基づく単純な対応関係が、平面上で 予想されるドットの位置と、検出され た位置との間で確立される。予想され るドット位置と検出されたドット位置 の間の水平方向の距離が、ドットのピ クセル視差よりも大きな場合、アルゴ リズムは障害物を検出する。このケー スは、すべてのドットの位置に影響を 与えるのではなく、それらのサブセッ トにのみ影響を与える、幅の狭い障害 物(正または負)に対応する。

テストのセットアップ

NASAのK-REX2ローバーでの仮想 バンパーの物理実験は、設計に負荷を かけ、月関連の環境におけるパラメー タやパフォーマンスについて学ぶことが 目的だった(図1)。テストはNASAエ イムズリサーチセンター (NASA Ames Research Center)のローバースケープ (Roverscape)施設で行われた。この施 設は2エーカーの屋外の惑星の類似ア ナログ地形で、月のレゴリス(https:// bit.ly/rogolith)と同様にボルダー分布 と平均表面アルベド(8%)を備えてい る。直射日光と影になったクレーター の内部でそれぞれの照明条件を再現す るため、昼と夜のテストが行われた。 昼間の照度分布とスペクトルは、大気 のない月とは完全に一致しないが、晴 天日を利用して、全入射照度と主要な 指向性が同じになるようにしてある。



図4 実験データにおいて障害物を検出するための、最小視差しきい値パ ラメータの検証をプロットした。実験的に見出された15ピクセルという 値は、解析的な理想値である15.9ピクセルに近い。

> 障害物のテストケースは、月の極域 のクレーターに存在しそうな、幾何学 的な可能性を反映している。図2は遭 遇する障害の主な4つのタイプの例を、 それらの相対的なサイズと反射率とと もに示している。極表面エリアにみら れる大きな角ばった岩、クレーターに みられる噴出塊、小さな角ばった岩、 そして多数の小さな障害物からなる複 雑な集合体である。障害物のアルベド の範囲は10%未満から33%で、一般 的な地形表面のアルベドとは異なっ た。この設計により、レゴリスの集積 のない障害物における入射面について テストすることができる。本稿でとり あげたすべての実験の障害物は正(岩) であり、サイズの危険区域において、 岩に対するクレーターとギャップ(負) の存在率を反映している。

> NASAのK-REX2ローバーはローバ ースケープにおいて、岩対クレーター と仮想バンパーがスキャンする間ずっ と手動で操縦された。テストにおける 速度は0~20cm/秒の範囲で、主に

10cm/秒であった。手動操縦により、 ローバーはループ内のナビゲーション ソフトウエアで結果にバイアスを掛け ることなく、障害物間をスムーズに行 き来し、障害物から後退することがで きた。画像はミッション要件を反映し て0.5Hzの速度で撮影され、タイムス タンプが記録され、オフラインで処理 された。障害物は、障害物に遭遇した ことを通知するタイムスタンプからの 助言とともに、画像に手動でラベル付 けされた。

カメラはf/5.6口径、焦点距離3.5mm、 ISO400相当のゲインでロックされ、 昼夜のテストでそれぞれ別のシャッタ ースピードが選択された。これらの固 定シャッター値は、結果として得られ る画像で、レーザドットの90%が飽和 するように手動で調整された。理想的 には、すべての条件で単一のシャッタ ースピードを使用し、暗い影の存在す る明るい場所でシステムを使用できれ ばよい。しかし、カメラのダイナミッ クレンジの制限があるため、さほど重 要ではない操作の詳細を導入するので はなく、クリーンなデータを収集する ことに決定した。他の光学設定は、良 好な被写界深度と低ピクセルノイズを 反映するように選択された。

画像のしきい値は、ピクセルがレー ザドットで照射されている場合に受け 入れる輝度レベルを制御する(図3)。 総暴露量が異なることから、夜と昼そ れぞれに最適な2つのしきい値が存在 する。実験に基づいたこれらの値の間 の大きな広がり(50%)は、異なるシャ ッタースピードを使用するという決定 と、周囲の照明の変化の両方に起因す る。NASAのチームは、後者の理由に より2つの最適なしきい値が存在する と考えている一方で、その広がりがは るかに小さければ、単一のしきい値が

表1 ローバースケープにおける仮想バンパーのテスト結	課
----------------------------	---

	昼間		夜間
ターケットまでの距離	0.7m	1.2m	1.2m
画像合計	529	629	1544
障害物の数	119	147	444
障害物のない経路の数	410	482	1100
真陽性	117	139	431
真陰性	395	462	1081
偽陽性	15	20	19
	2	8	13
障害物の精度(%)	98	95	97
誤警報率(%)	3.6	4.1	1.7
F1 スコア	0.93	0.91	0.96
昼間画像合計	1158		
昼間の平均F1	0.92		

夜間と昼間の画像で適切に機能すると 考えている。

最小ピクセル視差しきい値は、各レ ーザドットが、エピポーラ線に沿った ドットと、理想的な平坦な地面だった 場合のドットの位置との距離に基づい て、障害物を検出したかどうかを決定 する。高さh=10cmにおけるシステム パラメータと障害物のピクセル視差の 解析値は15.9ピクセルである。システ ムはレーザドット間に20ピクセルのニ ユートラル間隔で設計されているた め、隣接したもの同士のずれたドット を識別できない状態において、視差の 上限がある(そのため粒状の障害物の 検出能力が失われる)。そうはいうも のの、ソフトウエアはそのような値も 認める。検証データに基づいて、15の しきい値(理想的な間隔の75%)が、 精度と感度に対して最適なバランスに なると実験的に決定された(図4)。

結論

表1は、ローバースケープでの仮想 バンパーのテスト結果を示している。 仮想バンパーの評価に使用されたの は、2セットにわたる1158の昼間の画 像と1544の夜間の画像である。画像 の30%から40%は障害物があり、残 りは障害物のない経路だった。さまざ まなターゲット距離に対して検出を最 適化する機械構成で、2つの昼間のテ ストが実行された。2番目の0.7m構成 を利用したテストは、背景の地形上の レーザドットの見かけの明るさが予想 よりはるかに低いことが分かった時に 実施された。ターゲット距離が近づく と、距離の2乗に比例する照明の減衰 が低減され、垂直方向に沿って地形に 対する入射角が変化するため、認識可 能なレーザドットの明るさが増した。

仮想バンパーの正の障害物検出精度 は約97%で、昼と夜の画像で大きな違

Integration Insights



図5 昼間と夜間のテストのエラー を示す。偽 性は地形の外観の多 さに起因し、偽陰性は障害物と障 害物のない地面の間の遷移 域の不 確実なラベル付けに起因する。被写 体ぶれも夜間の画像で偽陰性を引き 起こした。

いはない。ただし、誤警報率(実際に 経路がはっきりしている時の障害物の 検出)は、夜間の1.7%から、最悪のテ ストでは4.1%と大きく異なる。これは、 単色レーザと狭帯域フィルタの使用に もかかわらず、ドットを日光の下で知 覚することは困難であるという視覚的 観察と一致した。昼間の画像の平均 F1スコア(テストの精度の測定)は、 夜間の0.96に対して0.92である。

図5は、昼と夜のテストにおける典型的な誤分類を表す画像である。昼と夜の画像で最も一般的な偽陽性のエラーは、ローバーが障害物のない地形の上を走行した時に斑点があったか、明るい地形のスポット(昼間のみ)によってROIに新しい点が導入されたことである。これらの誤差の主な原因は、理想的な反射率モデルで表されていない地球要因によるものである。これらの要因には、月を覆う細かい粉末状のレゴリスと比較して、粒状の玉砂利に覆われていたことがあった。これらの粒

は共に巨視的に均一な材料で作られて いないため、小さな遮蔽物として機能 し、地形に多様さをもたらす。

全体的な効果は、表面地形の反射率 の変動性が、時々レーザ照明の寄与よ りも大きく、ドットが画像に斑点を生 じさせるようなものだった。昼間と夜 間の画像では、障害物のない地形と岩 石の障害物との間の遷移におけるラベ ル付けから、多くの偽陽性のエラーが 発生した。これらのラベルには大きな 不確実性があり、ラインスキャン画像 の連続性を利用する可能性があるた め、これらの領域における優れた性能 は重要ではない。これらの遷移画像を 破棄すると、正の障害物の精度は99% を超える。夜間の画像に固有の偽陰性 エラーの原因は、長い露光時間による 被写体ブレによるドットの乱れである。 エピポーラ線に沿って十分に移動した ドットは検出をもたらすはずだが、被 写体ブレは、重心が視差許容範囲にあ る細長い点を生成する。当時はカメラ

の可用性により避けられなかったが、 これはシャッター速度の高速化の重要 性を高めた。

システムの最も重要な目的は、致命 的な失敗を引き起こす可能性のある障 害物を、正しく識別することだと言え る。このことに関して言えば、仮想バ ンパーは問題なく機能し、暗いクレー ターでの最後の砦を提供できた。月面 ローバーは、断続的なステレオ写真撮 影とフラッシュ照明にほとんどの時間 を費やすことになる。本稿で取り上げ た暗黒での運用実績は、このニッチな目 的のための仮想バンパーの価値を強調 している。今後の開発では、より現実 的な反射率の環境が重視され、より高 出力のレーザ技術が研究されるだろう。

参著者紹介

アラ・ネフィアン (Ara Nefian)は、米スティ ンガー・ガファリアン社 (Stinger Ghaffarian Technologies:SGT)の上級科学者、及び NASAのエイムズ研究センター (Ames Research Center)のインテリジェントロボッ ト工学グループに所属。