

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トシステムは、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ーであり、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ーとなる。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トシステムからなる。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イメージセンサーを中心に構築され

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ト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、周囲の照明によるピクセル強度に対する、レーザプロジェクトの照明によるピク



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トとカメラから構成される(b)。

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ェアで構成されている。ソフトウェアは、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、レーザプロジェクト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。

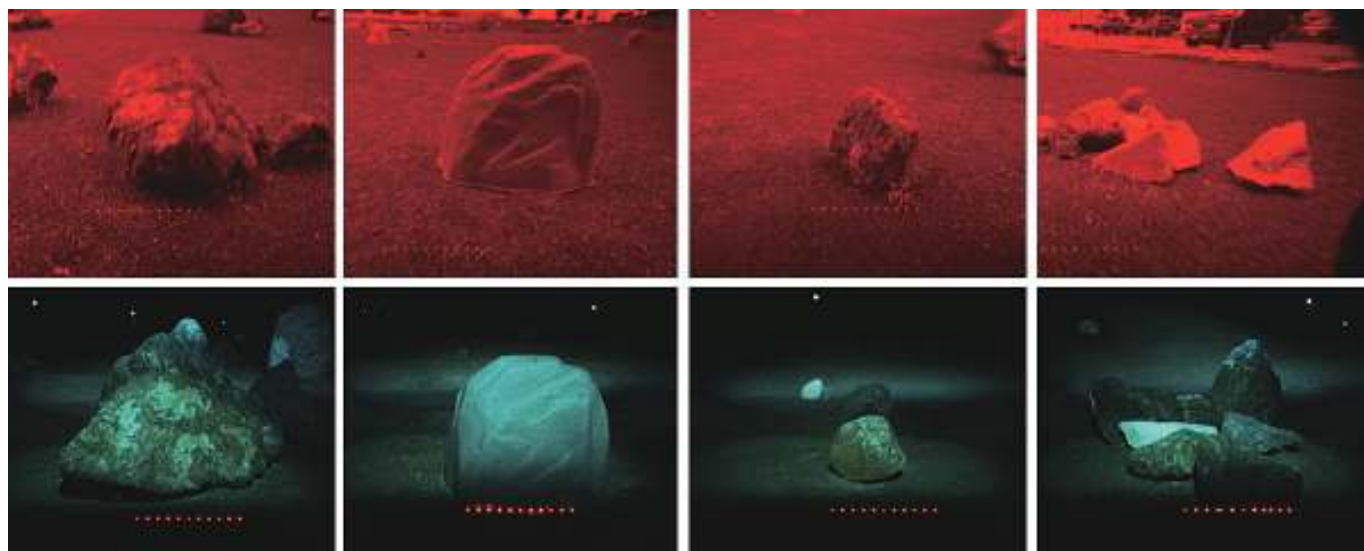


図2 昼と夜のテストで使用された岩のタイプは、(左から順に)大きな角ばった岩、噴出塊、小さな角ばった岩、複雑な複数の岩からなる集合体である。

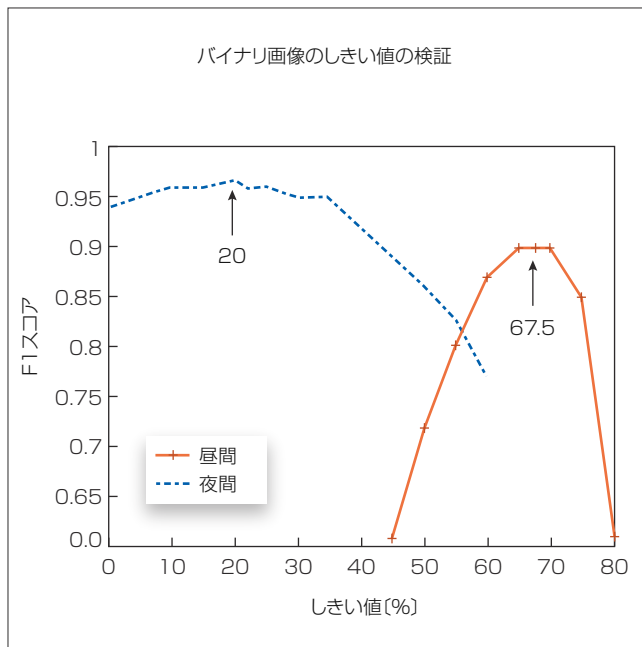


図3 グラフは、測定基準としてF1スコアを使用したバイナリ画像のしきい値の選択を示している。周囲の照明の自然な変化と、カメラ設定の人為的な変化により、昼と夜の間でデータに広がりが出てくる。

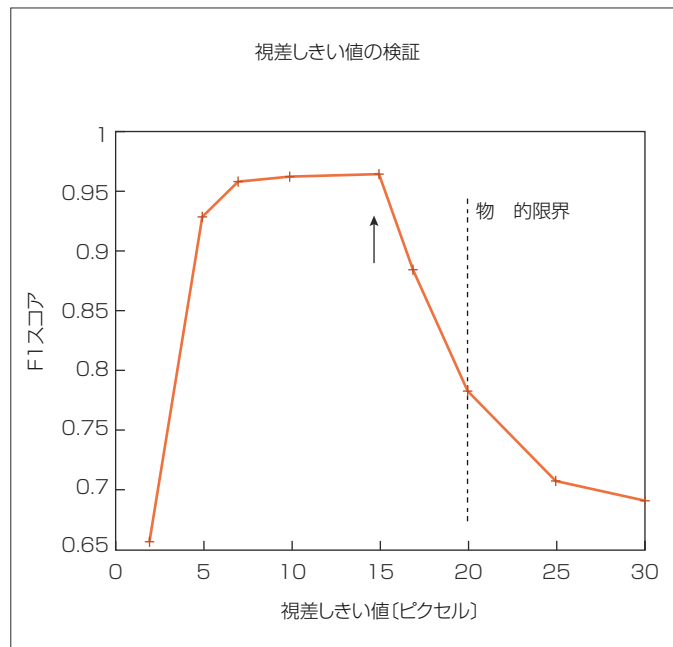


図4 実験データにおいて障害物を検出するための、最小視差しきい値パラメータの検証をプロットした。実験的に見出された15ピクセルという値は、解析的な理想値である15.9ピクセルに近い。

検出アルゴリズムは、ROI内のレーザー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ー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ー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とレーザー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。

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は遭遇する障害物の主な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ける(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ェ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

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果

ターゲットまでの距離	昼間		夜間
	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
偽陰性	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		

るかに小さければ、単一のしきい値が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 $h=10\text{cm}$ 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ピクセルのニュ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、ソフトウェ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いはない。ただし、誤警報率(実際に

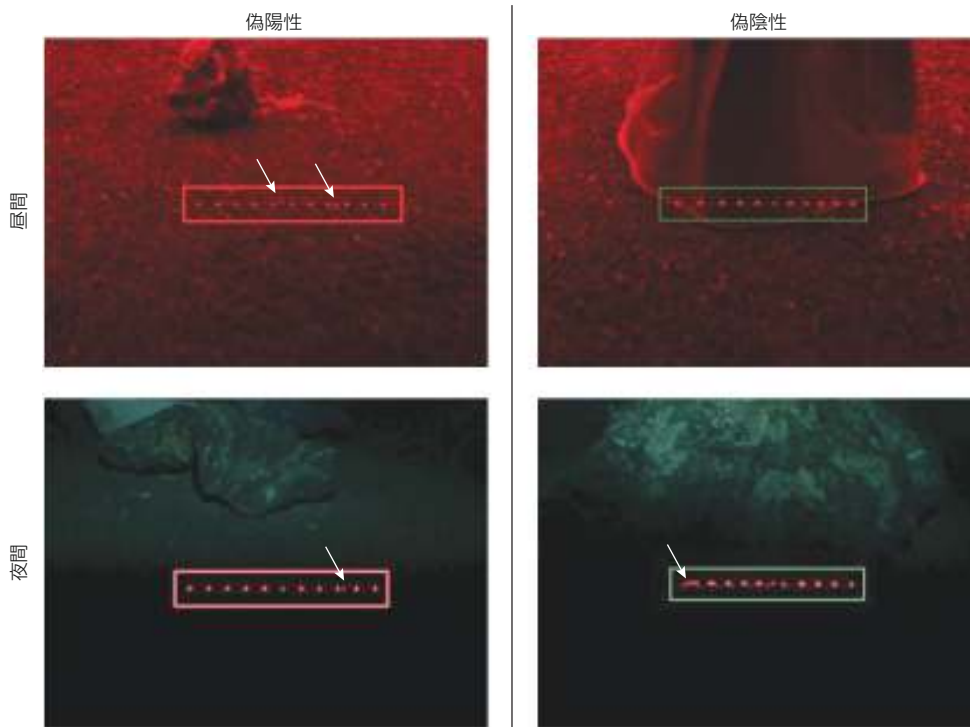


図5 昼間と夜間のテストのエラ一例を示す。偽陽性は地形の外観の多様さに起因し、偽陰性は障害物と障害物のない地面の間の遷移領域の不確実なラベル付けに起因する。被写体ぶれも夜間の画像で偽陰性を引き起こした。

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。エピソードに沿って十分に移動したドットは検出をもたらしはすが、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。当時はカメラの入手性により避けられなかった

が、これは速い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。

著者紹介

アラ・ネフィアン(Ara Nefian)は、米スティンガー・ガフリアン社(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。