

宇宙機の光学航法センサ信号処理の実例と ニューロモーフィック技術への期待

福田 盛介

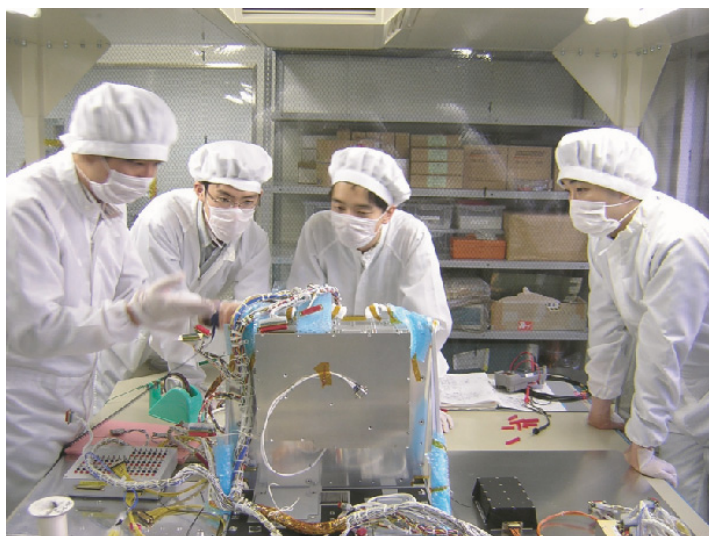
宇宙航空研究開発機構(JAXA)
宇宙科学研究所(ISAS)

自己紹介

名前: 福田 盛介(ふくだ せいすけ)

所属: 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究所(ISAS) 教授
東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授(兼任)

専門: 合成開口レーダに関する研究で学位を取得(2000年)
宇宙研に助手として任官後、一貫して宇宙機システムや搭載機器の研究開発に従事
複数の科学衛星プロジェクトにおいてバス・システムを担当し、
2024年1月に月面着陸に成功した月着陸実証機SLIMでは、
システムマネージャを務めたほか、画像航法や着陸レーダなどの研究開発を遂行した



れいめい(INDEX)の開発風景



ひさき(SPRINT-A)



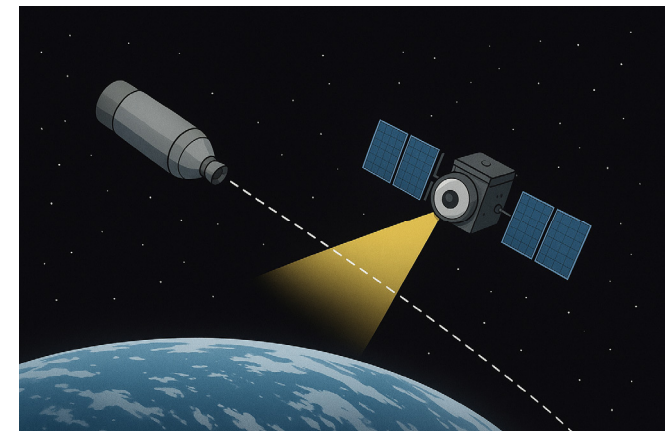
あらせ(ERG)

宇宙機の光学航法

- 宇宙機の位置・速度・姿勢などの情報を光学センサを用いて取得する方式
- 光学画像を用いるもの = 画像航法
- 姿勢については、星の配置(スタートラッカ)や、太陽や地球の方向(太陽センサ、地球センサ)を取得する画像センサを用いるのが一般的となっている
- 位置については、通常の衛星運用では、地上局との通信による電波航法が用いられる(軌道決定)
- 天体への着陸や対象物への接近など、高い精度が必要なミッションでは画像情報を用いた特殊な航法処理が行われる



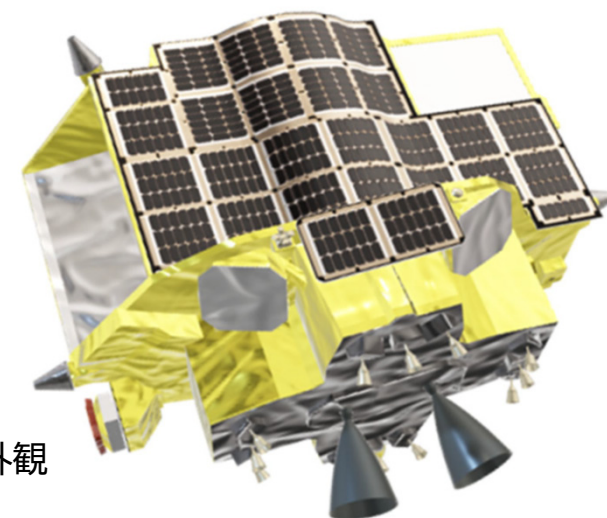
はやぶさ2の航法カメラが撮像した小惑星Ryuguの表面



スペースデブリに対する光学航法(イメージ)

小型月着陸実証機(SLIM)

- 月への高精度着陸技術の実証と、軽量な月惑星探査機システムの実現を目的としたJAXAのプロジェクト
- 質量は推薬なしで約200kg
(推薬込みの打上時の質量は730kg超)
- 2023年9月打上げ、2024年1月20日未明(日本時間)に着陸
- 100m以内のピンポイント月面着陸に世界で初めて成功
- 光学画像を用いた地形照合航法をオンボードで自律的に実施
- 着陸後には、月面の過酷な温度環境(-170~+100度超)で3回の「越夜」を達成

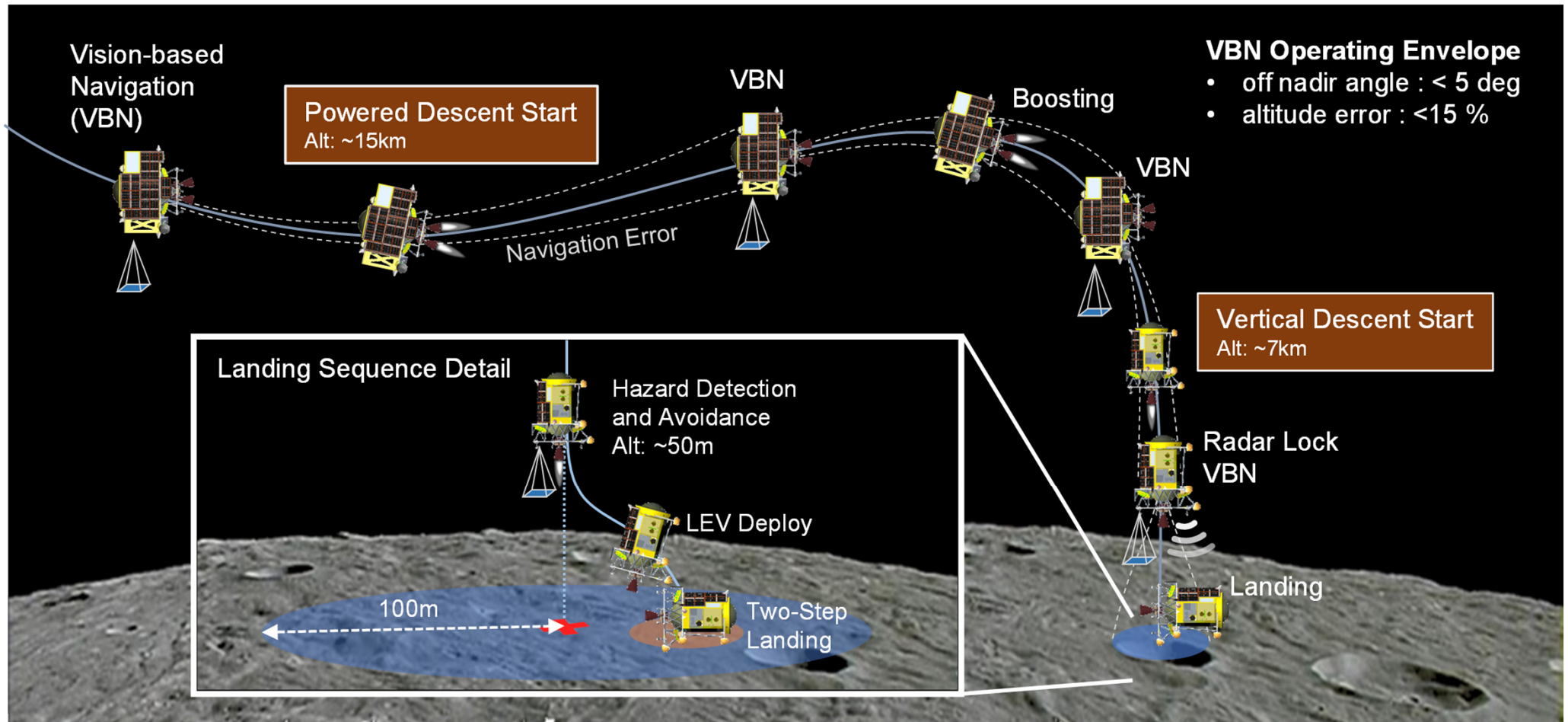


SLIMの外観



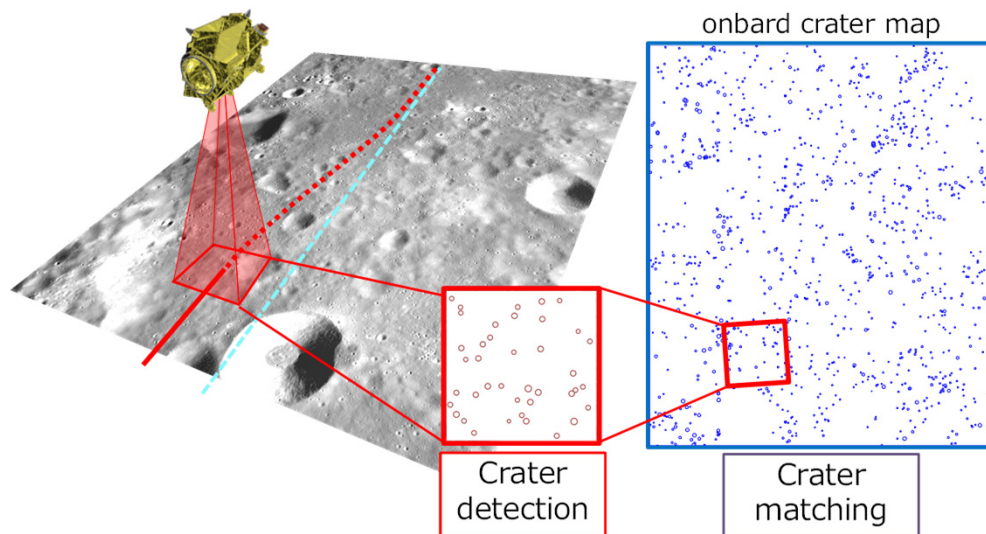
月面着陸後のSLIM(分離放出した小型ロボットが撮像した実画像)

SLIMの着陸シーケンス



- ・ 着陸降下中、計7か所で画像航法を実施
- ・ 高度50m地点で最終ホバリングを行い、着陸の妨げとなる障害物(岩やボルダーなど)を画像処理により検知(最終着陸地点を決定)

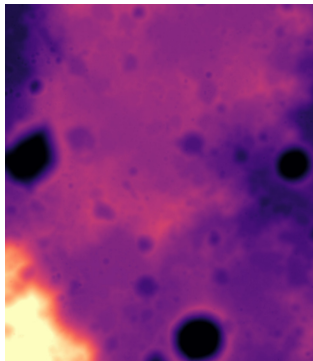
クレータベースの画像照合航法



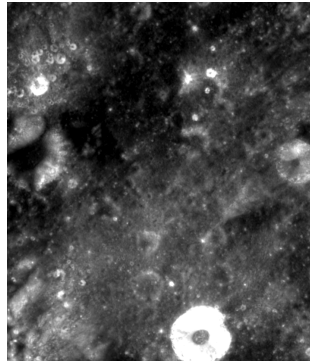
- 主成分分析を用いたクレータ抽出処理と、クレータの位置を点群として扱うクレータマッチングにより構成
- 関係の大学(※)と共同で性能と搭載性のバランスが取れたアルゴリズムを開発
※明治大学 鎌田研究室、電気通信大学 高玉研究室
- 特徴量ベースの手法(AKAZEなど)は計算負荷の観点で搭載系には採用せず、別途、地上の支援システムで使用した

画像照合航法に用いるクレータマップ(地図)

- 過去の月周回衛星で得られた月面地形標高データ(DEM)およびアルベド(反射率)の分布から、着陸日時における太陽条件を模擬したCG(月面模擬画像)を作成
- あらかじめ月面模擬画像からクレータを抽出、特徴量を計算し搭載計算機に保存しておく
- 様々な条件で作成した1万枚以上の月面模擬画像をアルゴリズム検証に供し、ロバスト性を確認した



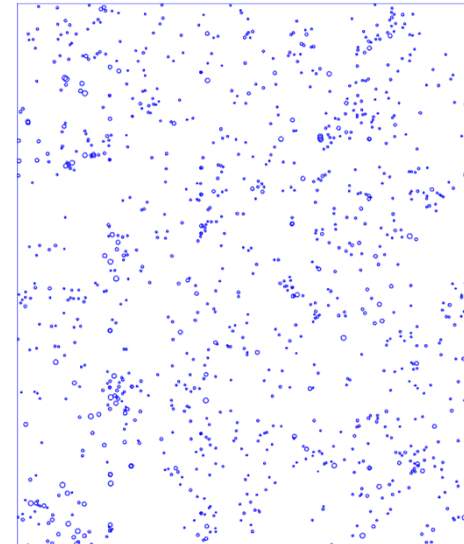
標高データ



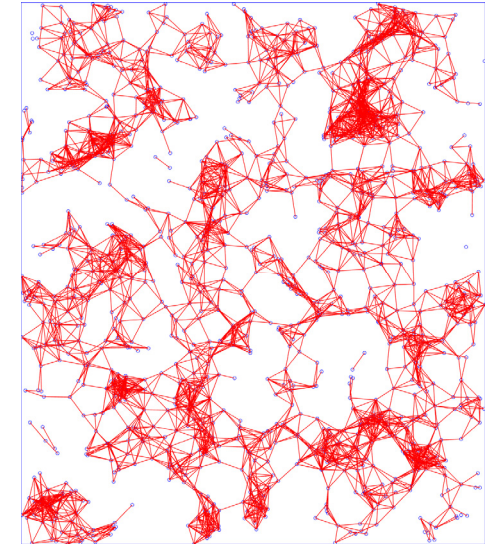
反射率分布



月面模擬画像



クレータマップ

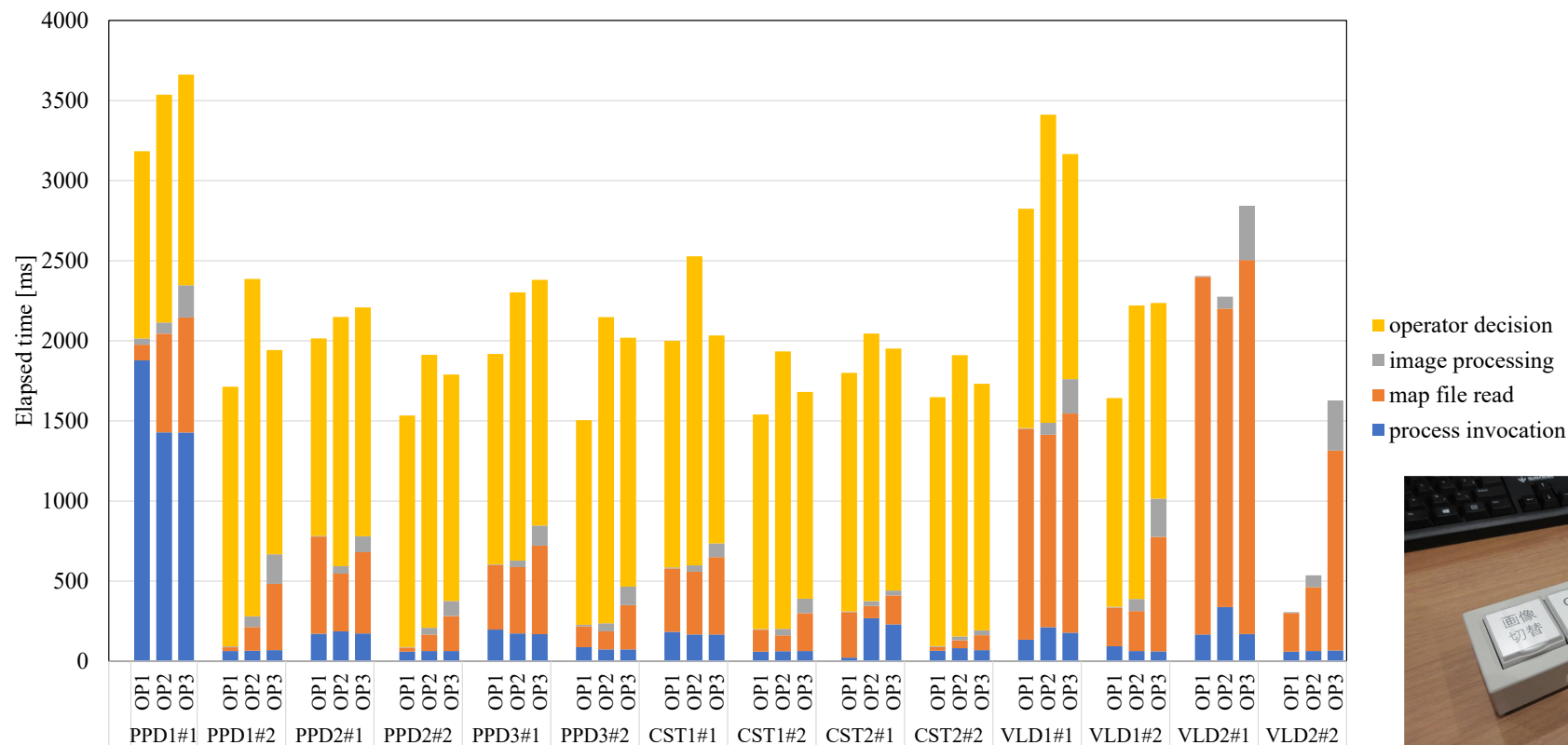


クレータの空間的パターン

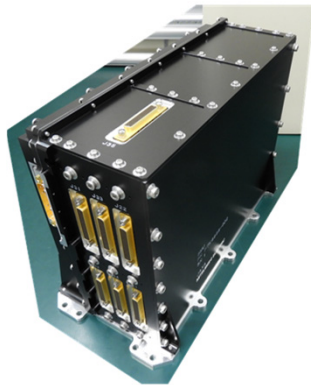
画像情報ではなく、クレータの位置情報(と付随する特徴量)のみ保存することで、メモリリソースの限られた宇宙機にも適用可能

画像航法支援システム(地上系)

- ・ 搭載系の画像航法が失敗した場合に備え、特徴量ベースのアルゴリズムを地上で実行
- ・ ダウンリンクのリアルタイム性を確保するために圧縮処理が施された画像を地上で処理
- ・ 画像取得後、要すれば5秒以内に緊急コマンドを送出するシステムを構築
(監視オペレータを複数人で分担)



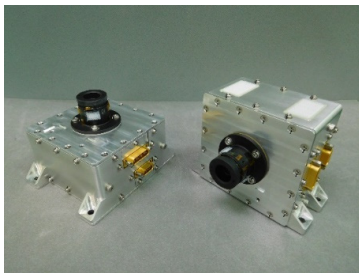
画像航法関連の搭載機器



統合化計算機(SMU)

SLIMを制御するための全ての演算機能を担う統合化計算機です。通常の衛星・探査機では別々の装置で行われるデータ処理系と航法誘導制御系の演算が、SMU内の単一のMPUで処理されるのが特徴です。自己位置推定のための画像処理も、SMU内のFPGA上で実施されます。

- 画像照合航法の演算には、低リソースな搭載計算機を考慮してチューンナップしたSLIMのアルゴリズムであっても、MPUで動作させるには能力不足であった。したがって、SLIMの開発が本格化したちょうど同じ時期にリリースされたフラッシュメモリタイプの耐放射線大容量FPGAを採用した。



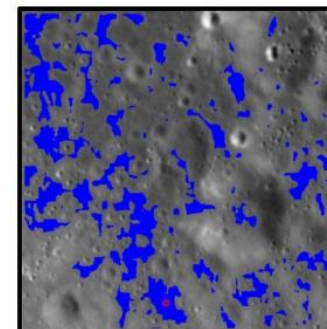
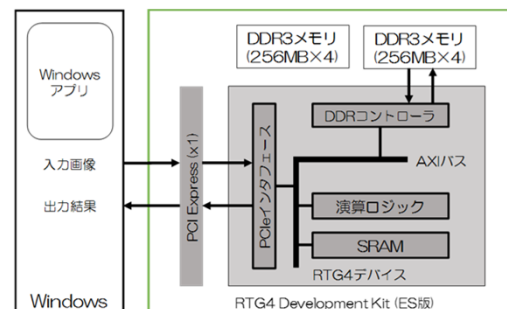
航法カメラ

着陸フェーズにおいて月面を撮像するための小型軽量のカメラです。画像照合航法に使う非圧縮画像とダウンリンク用の圧縮画像を同時に出力することができます。2台が異なる向きで搭載されており、動力降下・垂直降下各フェーズでそれぞれ使用します。

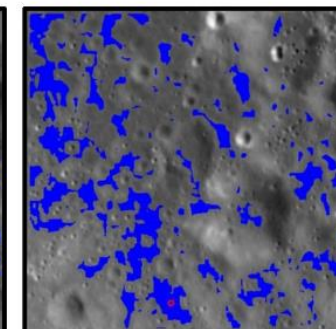
- 動力降下開始時のSLIMの軌道速度は1.7km/sにも及ぶため、航法カメラの撮像素子にはグローバルシャッター機能が必須であった。このため、民生品のCMOSイメージセンサに対して、アップスクリーニングや放射線耐性の確認、パッケージ評価を実施して搭載した。

画像照合航法論理のFPGA実装

- SLIMでは、画像照合航法アルゴリズムをFPGA 1チップで動作させる方針としたが、JAXA内でのアーリーフェーズの検討段階から、画像処理アルゴリズムをハードウェア記述言語(HDL)により都度スクラッチで記述・検証していくことは開発の見通しが悪いため、国産の高位合成ツールベンダと協働し、FPGA実装性の検討・評価を円滑に進めることを目指した。
- そこでは、搭載用のFPGAと同一品が搭載された評価基板を、汎用のPCに接続した検証環境を構築した。
- この環境により、同一の画像に対する同一のアルゴリズムについて、片やC言語ベースの実装を汎用CPU上においてGHz級のクロックで処理させつつ、同時にFPGA上で搭載を意識した周波数で動作させて比較する、などといった自在な検証が可能となった。



①C レベルの処理結果



②FPGA 実機の処理結果

①C レベルの処理結果
X 座標 = 231
Y 座標 = 47

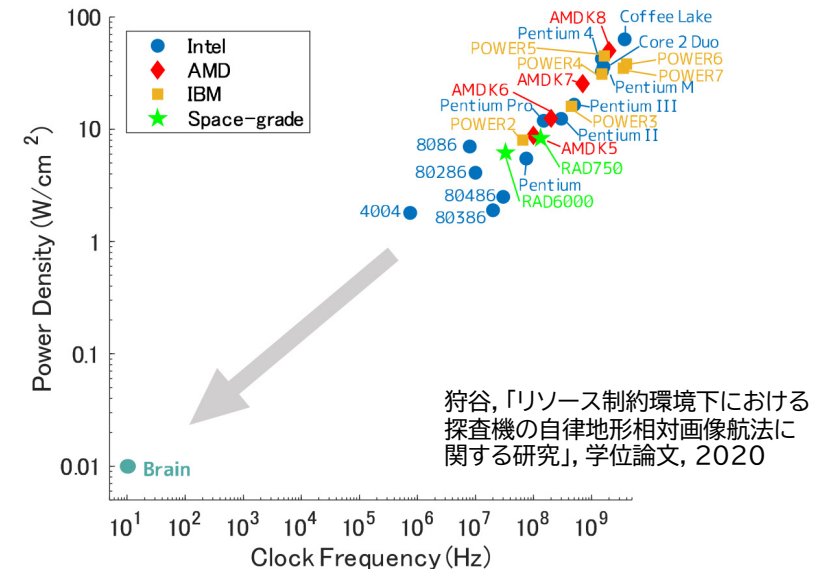
②FPGA 実機の処理結果
X 座標 = 231
Y 座標 = 47

処理時間 : 0.722[s]

照合結果 : 安全領域分布と
着陸座標が一致

ニューロモーフィック技術の必要性と期待

- ・ 無人機での太陽系探査における宇宙工学の目標は、「より遠くへ、より自在に」
- ・ 現状の我が国の探査機の電力は、太陽光発電をベースとしており、遠方探査では電力リソースが厳しくなる。一方で、通信遅延を考えると、自律性(及び必要な演算の高機能化)への要求は高くなる
- ・ この逆センスの関係に対するブレイクスルーやパラダイムシフトのためのキー技術として、生物的な機能を再現あるいは模倣するニューロモーフィック技術が注目されつつある
- ・ ニューロモーフィック技術は非宇宙分野での研究開発が先行しているが、そこで開発されたチップ(Intel Loihiなど)のキューブサットへの搭載が試行されている状況(例:TechEdSat)
- ・ 宇宙機への適用に向けては、低消費電力性のほかに、生物の高速応答性の模倣も応用のモチベーション(ハエの視神経~200Hz)

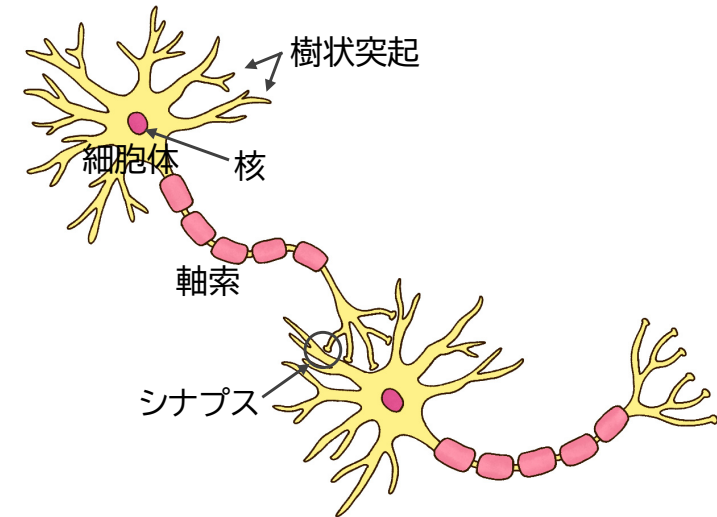


TechEdSat-13

<https://www.nasa.gov/blogs/smallsatellites/2022/01/13/nasa-satellites-launch-aboard-virgin-orbits-launcherone/>

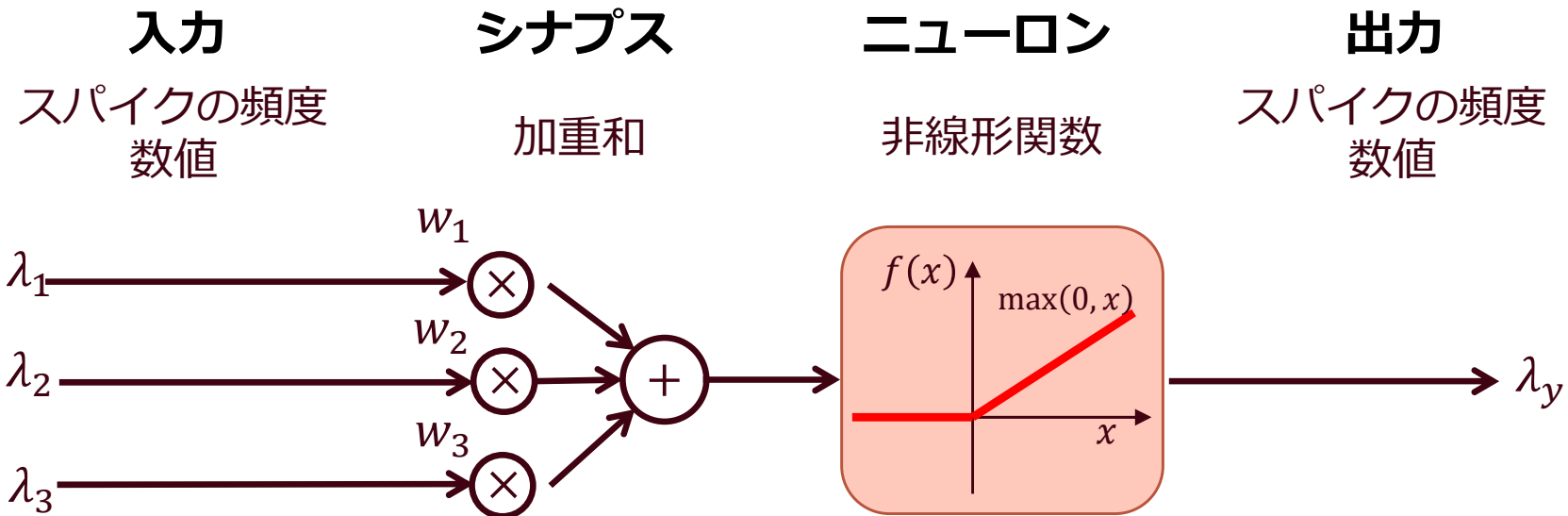
ニューロンとネットワークのモデル

- 生体のニューロン(神経細胞)間の信号伝達は、接合部であるシナプスで行われる
- ニューロン間で伝搬する信号は短い電気パルス(スパイク)。スパイク列の頻度やタイミングにより、情報が符号化される
- スパイクがニューロンに到達すると、細胞体の膜電位が変化。膜電位が特定のしきい値を超えると新たなスパイクが発火し(後段のニューロンに伝搬)、膜電位はリセットされる
- ニューロモρφフィックプロセッサの実装では、ニューロンのダイナミクスをモデル化。膜電位を入力電流の積分(充電)と抵抗を介した電荷の漏れ(放電)で表現したLeaky Integrate-and-Fire(LIF)モデルなどがよく用いられる
- シナプス部分のハードウェア実装は、過去のスパイクの影響を指数関数で減衰させつつ足し合わせ、結合の強さを表現する「シナプス重み」を乗じた電流を後段に入力。後段のニューロンへの入力電流は、接続された前段の複数のニューロンからの電流の総和で表現される

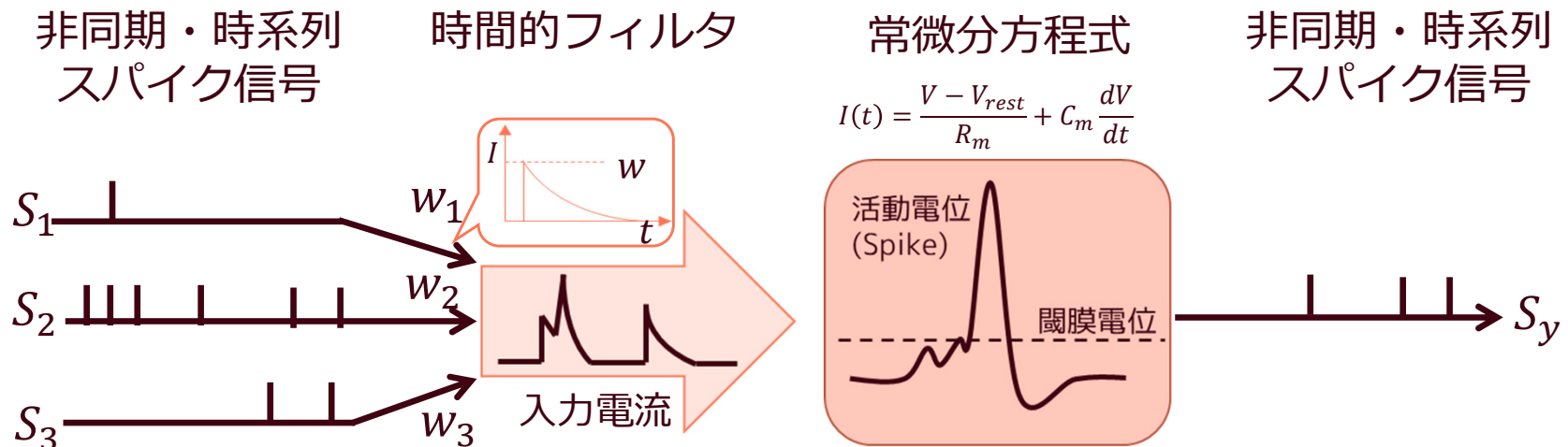


スパイキングニューラルネットワーク(SNN)

人工ニューロン



スパイキングニューロン



SNNの学習方法

① 人工ニューラルネットワーク(ANN)の学習結果の重みを変換する方法

ANNの出力は正負いずれの値も取り得るが、SNNの発火率は常に正の値であることなどに対する対処が必要(ANNの活性化関数の工夫など)

② 誤差逆伝搬法を近似する方法

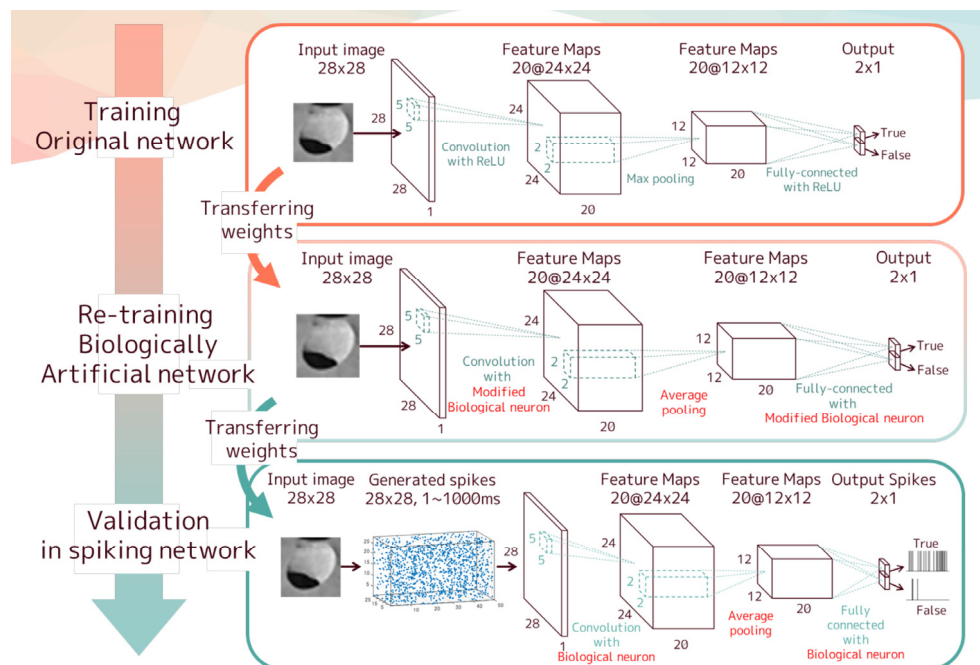
SNNではスパイクの発火タイミングによりニューロン間で情報を伝達しているため、損失関数の微分を用いるANNの強力な学習手法である誤差逆伝搬法を使用できない。これに対し、発火の式に含まれるデルタ関数を、勾配計算時に微分可能な関数(シグモイドなど)で代替する手法などが提案されている(代理勾配法)

③ SNNに特有な学習則による方法

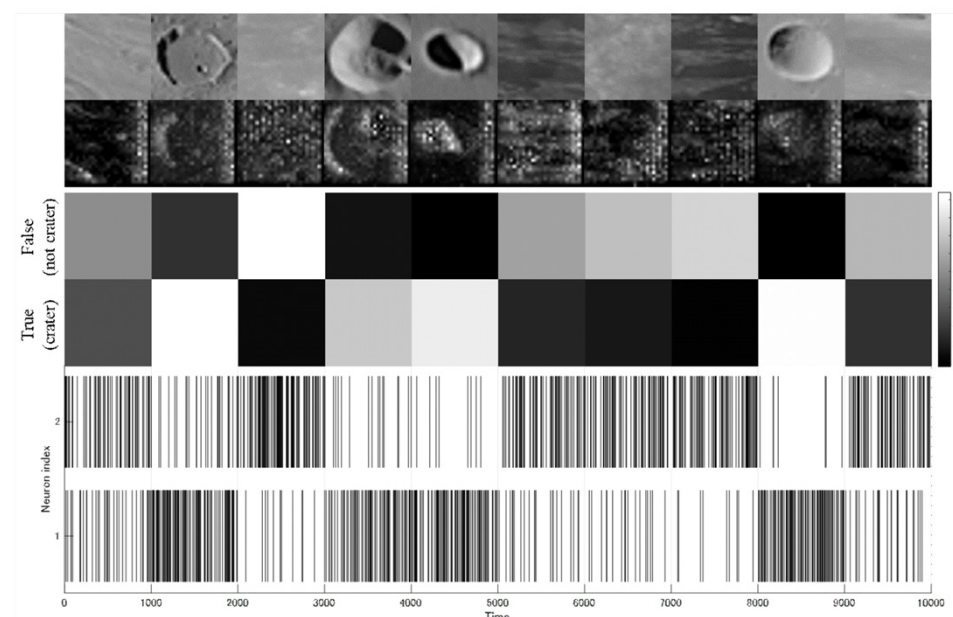
二つのニューロンの発火タイミング(時刻差)によって、その間の結合のシナプス重みの更新量を変化させる「スパイクタイミング依存可塑性」(Spike-Timing-Dependent Plasticity: STDP)と呼ばれる規則により学習を行う方法

SNNによるクレータ検出

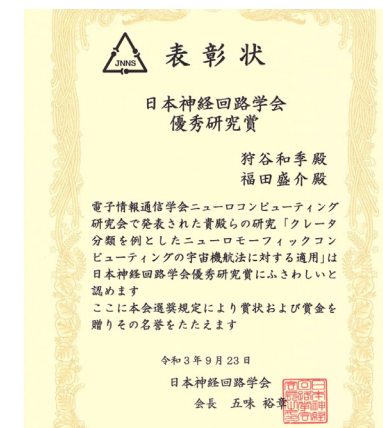
■ANNによる重みの転移による学習



■クレータの検出結果



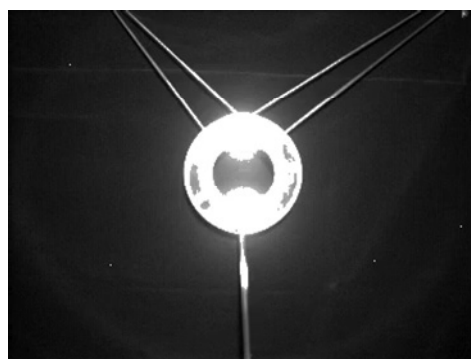
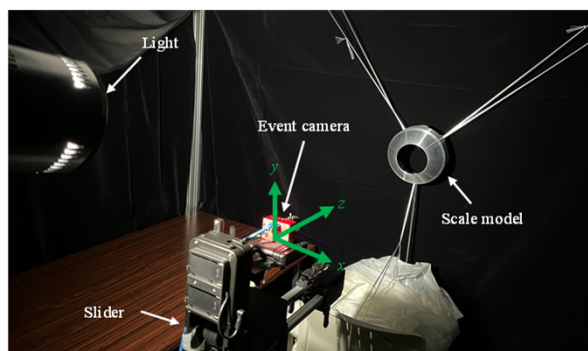
- 分類精度はオリジナルのANNが99.4%であるのに対し、96.2%を確保
 - チップメーカーから公開されているスパイク毎の消費エネルギーから換算すると、1画像あたり約10mWの消費電力で実行可能(IBM社TrueNorthを想定)
- ※画像の入力部等は含まない見積



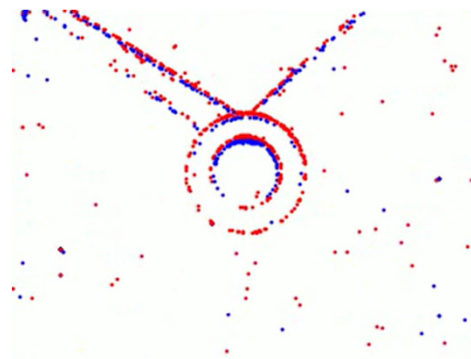
イベントカメラとSNNによる障害物検知

■イベントベースカメラ(イベントカメラ)

- ・ 視神経を模倣したニューロモフィックセンサ
- ・ 各画素ごとに対数輝度値の変化が任意のしきい値を超えたタイミングで、非同期にイベントデータを出力(正負)



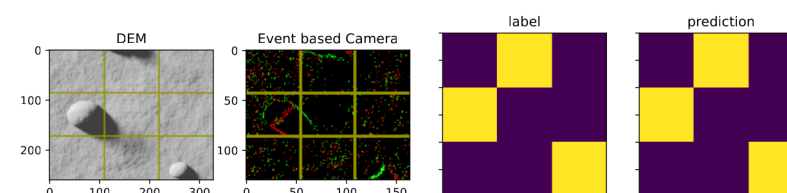
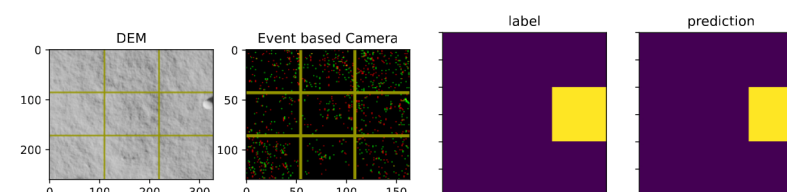
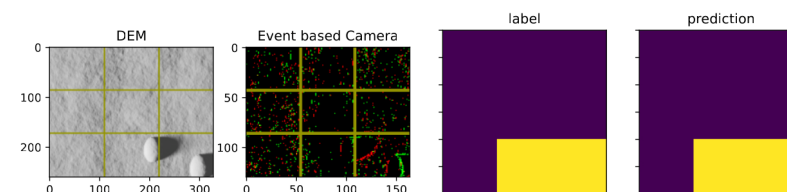
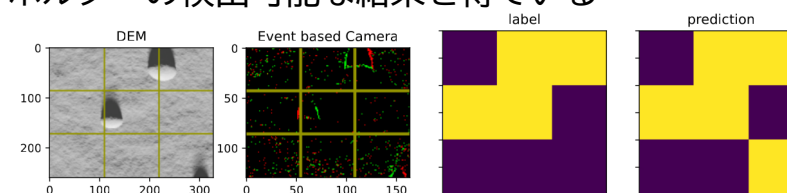
フレーム出力



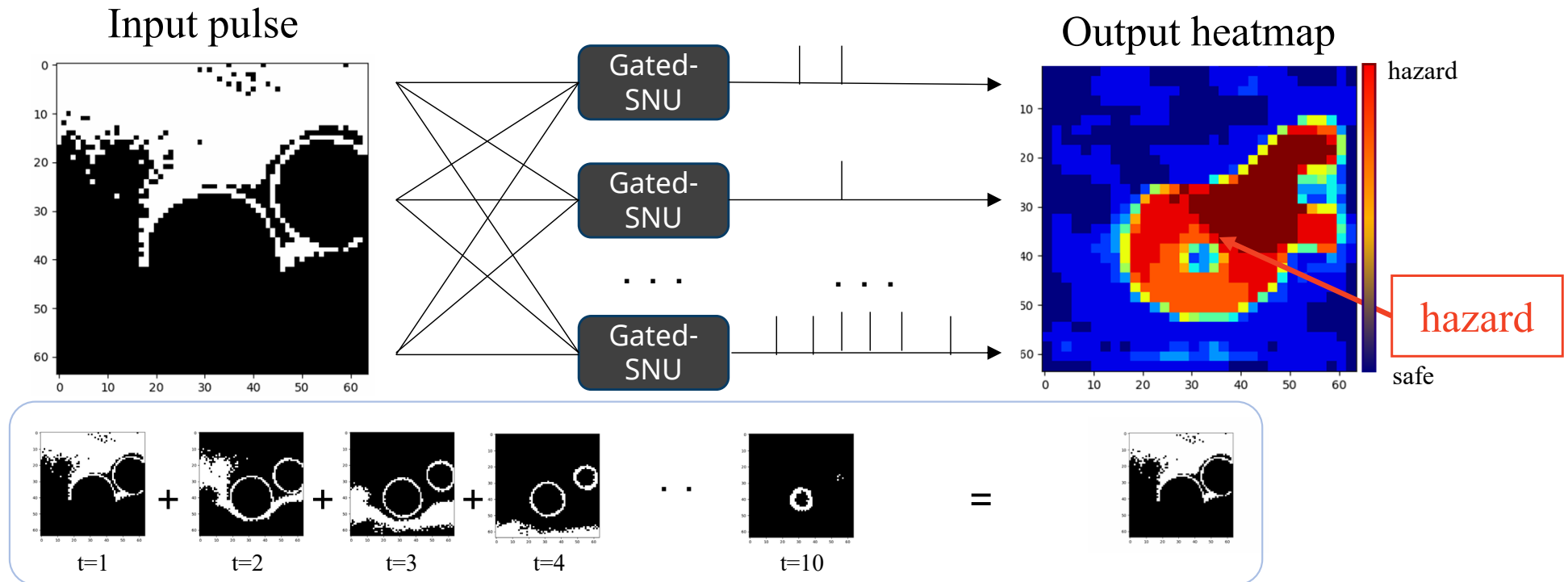
イベント出力

■障害物の検出結果

- ・ 学習は代理勾配法を使用
- ・ 着陸直前の使用を想定し、低レイテンシ(<250ms)でボルダーの検出可能な結果を得ている



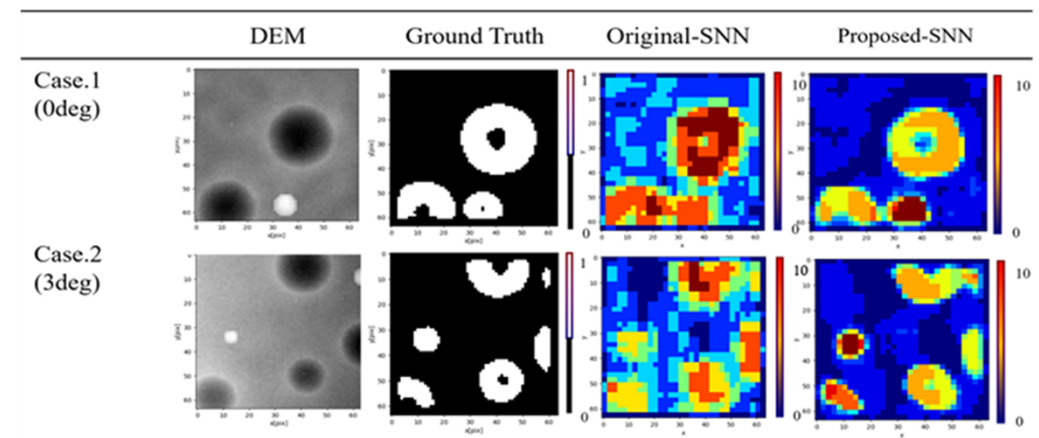
LidarとSNNによる安全領域推定



Gated-SNU (Spiking Neural Unit) により、ネットワークに再帰的な要素を導入しつつ、近傍画素の入力と発火の情報により膜電位の減衰量や再入力電流を調整

→ 時空間情報の把握性能を向上

安全領域の推定結果



- 木下英明, 「スパイクニューラルネットワークを用いた宇宙機の着陸における障害物検知 手法」, 修士論文, 2022

SNNの信頼性

宇宙機にニューロモーフィック技術を適用するためには、信頼性に関する検討が不可欠であるが、例えば非同期なスパイクパルスにより情報を伝達するSNNなどのニューロモーフィックコンピューティングは、従来のノイマン型のコンピュータと比べて、放射線に対してロバストか否かなどについては、まだ必ずしも明らかになっていない

■ デジタル実装におけるソフトエラーの影響評価

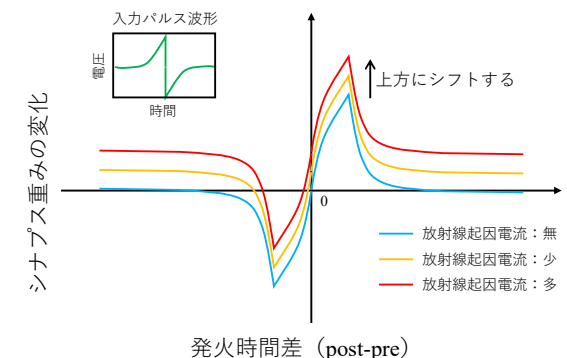
- 膜電位のリセット機能の異常は、SNNの性能にクリティカルな影響あり
- シナプス重みを格納したレジスタのビット反転は、重みが増加するケースで性能低下

R. V. W. Putra, M. A. Hanif and M. Shafique, "SoftSNN: Low-cost fault tolerance for spiking neural network accelerators under soft errors," 59th ACM/IEEE Design Automation Conference, 2022.

■ メモリスタへの放射線入射の影響

- アナログ実装やハイブリッド実装の研究も盛んで、メモリアレー内で積和演算を行うインメモリコンピューティングなどが注目されている
- 電流の履歴により抵抗が変化するデバイス(メモリスタなど)をシナプスとして利用
- 二酸化チタンの薄膜を用いたメモリスタの放射線照射試験では、デバイスのコンダクタンスが上昇し、スパイクタイミング可塑性(STDP)を用いた学習などにおいては影響がある

S. G. Dahl, R. C. Ivans, and K. D. Cantley, "Effects of memristive synapse radiation interactions on learning in spiking neural networks," SN Applied Sciences, 2021.



おわりに(今後の研究の方向性)

- 本発表では、前半では月着陸機SLIMで実証した光学画像航法を紹介し、後半ではニューロモーフィック技術の宇宙機への適用に関する萌芽的な研究例について述べた
- 今後の研究の方向性としては、低エネルギーリソースや低レイテンシという利点をフルに活かし、ニューロモーフィックでなければ実現できない適用例を追求していくことが重要
- 例えば、イベントカメラとSNNを組み合わせた系では、現状はイベントデータを所定の時間内で積算して使用するケースが多いが、非同期イベントをそのままSNNで処理することによる、超低レイテンシなアプリケーションの実現が期待される
- 一方、エネルギーリソースの観点では、もっぱらセンサデータ処理(検知系など)にSNNを使用する研究例は多いが、制御系に従来の計算機を使用する場合は、トータルの消費電力の低減効果は限定的になる。この観点で、SNNにEnd-to-Endの演算を担わせるアーキテクチャは、一つの研究のトレンドになると考えられる