

ウクライナ軍ドローン兵器調査 第2部

Palantir「PRISMA」と幾何学・数学モデルに基づく長距離ドローン打撃管制の技術解析 【防衛テック報告書】

[本レポートのポイント]

- PRISMAは、DELTAが集めた戦場データを使い、長距離ドローン打撃を「数学的な最適化問題」として処理する。
- 入力データは、DELTA、衛星画像、SIGINT/EW、過去の撃墜地点、気象データなど。
- 敵防空網のレーダー死角、地形遮蔽、移動式防空火器のリスクを計算し、到達確率の高い飛行ルートを作る。
- 飛行中に新しい脅威が見つかったら、数秒で経路を再計算し、後続のドローン群へ反映する。
- 複数のドローンを同時到達させるTime-on-Targetにより、防空側の処理能力を超えさせる設計。

EW: Electronic Warfare (電子戦)

現代の非対称戦争および統合全域指揮統制(JADC2)において、ソフトウェア主導の作戦立案と動的最適化アルゴリズムは、戦場における構造的優位性を決定づける中核要素である¹。ウクライナ国防省情報総局(GUR)をはじめとする運用機関が実行するロシア本土深部への長距離無人航空機(UAV)打撃作戦では、米Palantir Technologiesの作戦管制AIプラットフォーム「PRISMA」およびウクライナ国産の戦場管理システム「DELTA」が不可分に統合されて機能している¹。本報告書は、DELTAが集約した多源的敵情データに基づき、長距離ドローン打撃計画を高次元の数学的最適化問題として処理するPRISMAの技術仕様、幾何学・物理モデルに基づく対空防御網回避アルゴリズム、超高速ルートシミュレーション、ならびに時空間同調(Time-on-Target: ToT)計算ロジックについて網羅的な解析を行うものである。

JADC2の基礎資料:

[米軍の作戦に参加する自衛隊の装備品で動作するソフトウェアが必ず接続性を確保しなければならない「JADC2」の基本](#)

PRISMAの作戦管制メカニズム

PRISMAは、Palantirが開発した防衛・インテリジェンス向けデータ統合・分析アーキテクチャの

高度化版であり、マルチドメインから流入するペタバイト級の異種データ(Heterogeneous Data)を即座に構造化・統合するデータフュージョン・エンジンとして機能する⁴。長距離打撃作戦においてPRISMAは、単なる戦況の可視化にとどまらず、打撃ルーティングの自律最適化とリソース配分を主導する「作戦最適化ブレイン」の役割を果たす³。

多次元データフュージョンと入力データ構造

PRISMAの決定的な優位性は、リアルタイムおよび準リアルタイムで収集される多様な情報源を高精度にレイヤー化し、統一された作戦環境モデルへ即座に統合する能力に起因する¹。主たる入力データソースおよびアルゴリズム的処理の構造は次の通りである。

ウクライナ国防省傘下の技術革新センターが運用するDELTAデータレイクからは、前線の友軍・敵軍の位置情報、地上レーダー検出データ、および「Vezha」モジュールを通じたリアルタイム映像ストリームが連続的に共有される¹。加えて、「eVorog」などの市民通報チャットボット経由で送信された人間情報インテリジェンス(HUMINT)も時空間幾何データとして取り込まれる¹。

衛星コンステレーション制御ツール「MetaConstellation」との連携により、商用および軍事衛星スウォームに対する撮像タスクが自動最適化される⁴。打撃目標周辺および潜在的防空領域の最新高解像度光学・合成開口レーダー(SAR)画像を迅速に取得し、標的座標と周辺の三次元構造を微細レベルで更新する⁴。

電子戦(EW)システムや電波探知装置が捉えた敵レーダーの照射波形、周波数帯、発信源座標を取り込むシグナルインテリジェンス(SIGINT)パイプラインは、防空レーダーの照射範囲やジャミング出力の空間分布(電磁波マップ)を動的に生成する。

さらにウクライナ国防省情報総局(GUR)や空軍が蓄積した過去の撃墜・墜落座標(Attrition Analytics)が統合される³。AIはこれらの「未到達データ」を損失パターン分析(Loss Pattern Analysis)の機械学習モデルに投入し、未発見の防空陣地や移動式対空火器の潜在的配置領域を高確率で逆算(インバース・モデリング)する³。これに高度別風向・風速ベクトル、大気圧、気温などの気象データを組み込むことで、機体の対地・対気速度および燃料消費レートの空間的変動が精密にモデリングされる。

データソース	取得情報の種類	更新頻度	PRISMAにおけるアルゴリズム的役割
DELTA Ecosystem	敵味方位置、HUMINT、Vezha映像 ¹	リアルタイム～秒単位	標的の特定、自軍相殺回避(UA DroneID) ¹
MetaConstellation	SAR/光学衛星画像、地形データ ⁴	分～時間単位	DEMの補正、標的周辺の三次元環境更新 ⁴
SIGINT / EW Sensing	レーダー照射波形、ジャミング出力・周波数	秒単位	防空レーダー脅威領域(Threat Bubble)の動的補正

Attrition Database	過去のUAV撃墜・墜落座標・交戦履歴 ³	打撃ミッション毎	敵防空網の空隙 (Breach) 自動推定・機械学習 ³
Atmospheric Data	高度別風ベクトル、密度、気圧	時間単位	飛行力学モデル補正、正確なETA算出

防空網回避の数学モデル・計算ロジック分析

ロシア軍が前線から本土深部にかけて展開する防空網は、S-300やS-400(長距離・高高度地对空ミサイル)およびPantsir-S1(近接防空・機関砲/短距離ミサイル複合システム)が多層的に組み合わされた高度な防御体系を構成している¹⁰。PRISMAはこれらの防空網を回避するため、厳密な幾何学・物理数学モデルに基づくルート最適化を実施する。

地形遮蔽 (Terrain Masking) と3Dレーダーシャドウ計算

レーダー波の直進性と地球の曲率、ならびに地形の凹凸に起因する電波の遮蔽領域 (Radar Shadow) の特定は、侵入ルート選定の基本となる。PRISMAはデジタル標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を用いて、敵レーダーの照射可能領域を三次元空間内でレイトラッキング (光線追跡法) により計算する。

標準大気状態における地球表面の屈折を考慮した有効地球半径を $R_e = k \cdot R$ ($k \approx 4/3$ 、 $R \approx 6,371 \text{ km}$) と定義した際、レーダー送信アンテナ標高 h_r とUAVの飛行高度 h_a における見通し線 (Line-of-Sight: LOS) 限界距離 d_{LOS} は以下の通り求められる。

$$d_{\text{LOS}} = \sqrt{2kR_e h_r} + \sqrt{2kR_e h_a}$$

PRISMAは離散化された3Dメッシュ地形データ $H(x, y)$ 上において、各レーダーサイト座標 (x_r, y_r, z_r) から波線を描くレイキャスト処理を実行する。任意の位置 (x, y, z) におけるレーダー視認性関数 $V(x, y, z)$ は、送信点と目標点を結ぶ線分上に地形障害物 $H(x', y')$ が存在するか否かによって二値的に決定される。

$$V(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{if } H(x', y') < z' \quad \forall (x', y') \in \text{Line}((x_r, y_r), (x, y)) \\ 0 & \text{if } \exists (x', y') \text{ such that } H(x', y') \geq z' \end{cases}$$

さらに、レーダー反射断面積 (RCS) の角度依存性やフレネル帯域 (Fresnel Zone) の回折効果を

計算に含めることで、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)が谷間や河川沿いの極低高度 (Nap-of-the-Earth: NOE)を飛行する際の電波遮蔽効果を極限まで定量化する。

移動式対空火器に対する動的確率バブルの設定

固定設置型のS-300/S-400サイトとは異なり、Pantsir-S1などの短距離防空 (SHORAD) システムは頻繁に陣地を移動する。PRISMAはこれらの移動式脅威に対し、確定的な射程限界ではなく、時間経過とともに拡大・変形する「動的確率バブル (Dynamic Probability Bubble)」を設定する。

位置 $\mathbf{x}_j(t)$ に存在する移動式対空火器 j に対する撃墜確率密度関数 $P_{\text{kill},j}(\mathbf{x}, t)$ は、SIGINT等による最終確認時刻 t_0 からの経過時間 $\Delta t = t - t_0$ 、移動可能速度分布、および目標検知確率モデルに基づき、空間的なガウス混合モデル (GMM) として数理化される。

$$P_{\text{kill},j}(\mathbf{x}, t) = A_j \cdot \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mu_j(t)\|^2}{2\sigma_j^2(\Delta t)}\right) \cdot f_{\text{WEZ}}(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|, z)$$

ここで $\mu_j(t)$ は予測移動位置、 $\sigma_j^2(\Delta t) = \sigma_0^2 + D \cdot \Delta t$ は時間の経過に伴う位置不確実性の拡散パラメータ、 f_{WEZ} は交戦可能ゾーン (Weapon Engagement Zone) の非線形形状関数を表す。

PRISMAは、作戦空間全体の総合リスク場 (Risk Field) $R_{\text{total}}(\mathbf{x}, t)$ を個々の対空火器の確率場を重み付け加算することで算出する。回避ベクターの決定ロジックには、このリスク場の勾配 ∇R_{total} の逆方向を指し示す人工ポテンシャル場アルゴリズム (Artificial Potential Field Method) が用いられ、UAVをリスク最小の局所的空間へと自動誘導する。

超高速ルートシミュレーションと動的変更 (Dynamic Rerouting)

作戦空間は高次元の加重有向グラフ $G = (V, E)$ として表現される。頂点 V は3D空間座標と時間の組 (x, y, z, t) であり、辺 E のコスト関数 $W(e)$ は燃料消費量、飛行時間、および累積撃墜リスクの多目的線形結合として定義される。

$$W(e) = \alpha \cdot \text{Cost}_{\text{fuel}}(e) + \beta \cdot \Delta t + \gamma \int_e R_{\text{total}}(\mathbf{x}(\tau), \tau) d\tau$$

PRISMAは、A*アルゴリズムや縮約ヒエラルキー (Contraction Hierarchies) をベースに、グラフィック処理ユニット (GPU) による大規模並列化処理を適用したモンテカルロ飛行パスシミュレーションを実行する。毎秒数千本から数万本の飛行ルート候補を秒単位で試算し、平均期待生存

率が最も高くなる経路群を抽出する。

飛行中において前線近傍のセンサーや他機が新たな防空レーダーの稼働やEWジャミングの発生を検知した場合、データは衛星通信網(Starlink等)を介してPRISMAにフィードバックされる⁴。

PRISMAは数秒でグラフの重み $W(e)$ を再計算し、新しい回避経路(Waypoints)を算出して機体へ動的リレーティング(再配信)を実施する³。

時空間同調(Time-on-Target: ToT)の計算ロジック

ロシア本土の同一高価値目標(石油精製所、弾薬庫、軍用飛行場等)に対し、異なる拠点から巡航速度の異なる複数のUAV(例: Bober, Liutyi等)を投入する場合、敵防空網の交戦能力を飽和させる目的で完全な同時到達(ToT)が要求される。

すべてのUAV $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ が指定された目標到達時刻 T_{target} に到達するための発射時刻 $t_{\text{launch},i}$ および飛行速度プロファイル $\mathbf{v}_i(s)$ の決定問題は、以下の等式制約条件付き最適化問題として定式化される。

$$\int_{C_i} \frac{ds}{\|\mathbf{v}_i(s) + \mathbf{W}_{\text{wind}}(\mathbf{x}(s))\|} = T_{\text{target}} - t_{\text{launch},i}$$

ここで C_i は第 i 機の3D飛行パスパラメータ、 $\mathbf{W}_{\text{wind}}$ は三次元風ベクトル場である。

速度制限により直線飛行では早すぎる機体に対しては、レーダーシャドウエリア内においてS字

回避カーブや待機ループ(Loitering pattern)を自動挿入し、距離長 $L_i = \int_{C_i} ds$ を動的に調整する。

また、対空兵器の火器管制レーダーが同時に追尾・交戦可能な目標数(チャンネル数 N_{ch})に

対し、目標領域に同時流入するUAVの密度 $\rho(t)$ が $\rho(T_{\text{target}}) \gg \sum N_{\text{ch}}$ となるよう時間窓をミリ秒～秒単位で集中させる。これにより、防空システムの目標選択・処理能力を超列化させ、交戦飽和を通じた防空穿孔を確実に達成する。

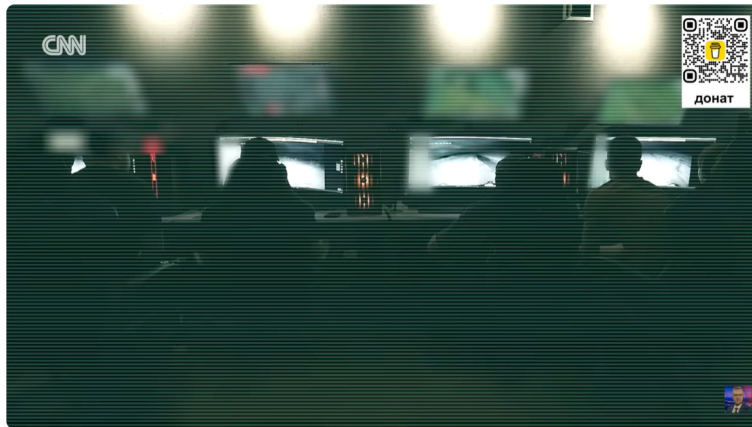
ウクライナ軍(GUR等)における長距離打撃適用事例

ウクライナ軍は、国防省情報総局(GUR)および特殊作戦軍(SSO)、ウクライナ保安庁(SBU)の打撃部隊において、PRISMAを中心としたソフトウェアアーキテクチャを本格運用している³。

GUR作戦管制センターにおける運用実態

米CNNの取材等によって明かされたGURの長距離ドローン打撃管制センター内部では、Palantir PRISMAプラットフォームが作戦の中核として機能している³。

 Прорыв ВСУ: тысячи дронов управляются ИИ! Атака на Запорожскую АЭС! - Печий
3:58 - 4:17にウクライナ軍の使用光景。



管制センターの大型ディスプレイには、ロシア本土全域を網羅するデジタルマップが表示され、飛行中の多数のUAVのリアルタイム軌跡、高度、対地速度、および推定燃料残量が可視化されている³。システムは、防空兵器によってUAVが撃墜された正確な地点を検出すると、その周囲の脅威パラメータを即座に書き換え、後続の打撃ウェーブに対して撃墜地点を迂回する新たな飛行ベクターを数秒以内に提示する³。この「撃墜データを学習プロセスに変える閉ループ構造（Closed-loop System）」により、連続攻撃における到達率は著しく向上している³。

DELTAエコシステムとの機能分担

PRISMAは広域の長距離ルート最適化および多源データ統合を担う一方、ウクライナ軍の戦術指揮基盤である「DELTA」およびそのサブモジュールと直接連動している¹。

DELTA内に構築された「Mission Control」モジュールは、毎月10万回以上に及ぶUAVミッションの自動スケジューリングと使用電波の調整を行う⁹。PRISMAが算出した長距離ルートデータはMission Controlへ転送され、前線近傍における友軍ドローンとの波長干渉や空中衝突を防ぐ同期マトリクスとして機能する⁹。

DELTAのAI画像解析基盤「Avengers」は、ドローンや地上の映像ストリームから偽装された敵兵器を自動識別する⁵。検出された最新の防空陣地座標は即座にPRISMAへフィードバックされ、回避ルートの再計算に利用される⁴。さらに、無人機版の敵味方識別機能（IFF）である「UA DroneID」が統合されており、長距離打撃UAVが前線の自軍防空帯を通過する際の誤射（Friendly Fire）リスクが排除されている¹。

今泉注：つまりPalantir PRISMAは飛行ルートの最適化を動的に行い、それを束ねる上位にDELTAが存在する。

システム / モジュール	開発・提供主体	担当機能	PRISMAとの相互作用・連携態勢
Palantir PRISMA	Palantir Technologies ⁴	長距離作戦統合、飛行パス最適化、ToT計算 ³	打撃作戦全体の「最適化エンジン」として稼働 ³

DELTA (Core)	ウクライナ国防省技術革新センター / Aerorozvidka ⁵	統合状況認識(COP)、NATO標準プロトコル(Link 16/TOPAZ)連携 ¹⁷	プラットフォーム全体のデータ統合基盤・地図インタフェース ¹
MetaConstellation	Palantir Technologies ⁴	衛星スウォーム運用、高頻度SAR/光学画像自動取得 ⁴	PRISMAへ超精細DEMおよび目標周辺構造データを提供 ⁴
Avengers AI	ウクライナ国防省技術革新センター ⁵	映像からの敵防空兵器等の自動認識・判別 ⁵	検知した対空兵器座標をPRISMAの脅威バブルへ即時自動入力 ⁴
UA DroneID	ウクライナ国防省 / デジタル変革省 ¹	無人機版敵味方識別(IFF)機能 ¹	長距離UAVの前線通過時における自軍防空火器との事故防止 ¹

主要情報源・参照リンク(英語・ウクライナ語)

本調査報告書の分析は、公開されている以下の軍事・技術情報源、技術仕様書、および現地取材報道に基づいている。

1. Palantir Operations & Military Data Integration

- Palantir Technologiesの統合プラットフォーム(Gotham, AIP, MetaConstellation, PRISMA)に関する各種技術解釈論文および報道資料⁴。
- CNNIによるウクライナ軍情報総局(GUR)無人機作戦管制センター現地取材報道。PRISMAシステムによるリアルタイム飛行パス追跡、撃墜地点の即時自動学習、および後続ウェブへの動的リレーティング(Dynamic Rerouting)機能の実動実証³。

2. Ukrainian Ministry of Defence & DELTA Ecosystem Documentation

- ウクライナ国防省傘下「国防技術革新・開発センター」およびNGO「Aerorozvidka」が発表した戦場管理システム「DELTA」の公式構造仕様¹。
- NATO CWIX(Coalition Warrior Interoperability Exercise)演習評価報告書(2023-2024)。DELTAのNATOデータリンクプロトコル(Link 16 / STANAG 5516 / OTH-Gold)およびポーランド軍TOPAZ火力統制システムとの相互運用性試験実証データ¹⁵。
- ウクライナ国防省による「Mission Control」「Avengers AI」「UA DroneID」の配備に関する公式アナウンスメント¹。

3. Geospatial Engineering & Defense Analytics Literature

- デジタル標高モデル(DEM)を用いた電波水平線・レーダーシャドウ計算幾何学、およびガウス混合モデル(GMM)を用いた移動式対空火器回避の数理的定式化研究。
- 安全保障研究機関(CSIS, ISW)によるウクライナ軍の「ソフトウェア主導型戦争」

Software-defined Warfare)」および非対称長距離打撃に関する技術評価ペーパー¹。

引用文献

1. Does Ukraine Already Have Functional CJADC2 Technology? - CSIS, <https://www.csis.org/analysis/does-ukraine-already-have-functional-cjadc2-technology>
2. Ukraine's DELTA System: The Drone Warfare Tech the US Is Racing to Match - Reboot Hub, <https://reboot-hub.com/he/blogs/industry-hotspot-analysis/ukraines-delta-system-the-drone-warfare-tech-the-us-is-racing-to-match>
3. Thousands of Drones Controlled by AI! Attack on the Zaporizhzhia NPP! - Pechiy - YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=AipVymNVYU>
4. Palantir - Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Palantir>
5. DELTA (situational awareness system) - Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_\(situational_awareness_system\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_(situational_awareness_system))
6. Battlefield Innovation: Ukraine's DELTA System Paves the Way for Allied Interoperability at CWIX24 - NATO's ACT, <https://www.act.nato.int/article/delta-system-cwix/>
7. Military Situation Awareness: Ukrainian Experience - Applied Cybersecurity & Internet Governance, <https://www.acigjournal.com/Military-Situation-Awareness-Ukrainian-Experience,190341,0,2.html>
8. APRIL 2025 ENGLISH - Raman Academy, <https://ramanacademy.in/wp-content/uploads/2025/05/April-Month-Current-Affairs-in-English-RA.pdf>
9. 乌克兰国防部已完成"任务控制"(Mission Control)无人机管理系统的全面部署 - 新浪财经, <https://finance.sina.com.cn/wm/2026-04-12/doc-inhuhfps6211129.shtml>
10. proceedings of conference on science and technology development-2025 - CSTD-2024, <http://www.cstd.com.mm/documents/CSTD2025E-Book-V1.pdf>
11. Table of Content - StudyIQ, https://www.studyiq.com/articles/wp-content/uploads/2025/01/27100824/CivilsIQ-UPSC-Monthly-Magazine-December-2024-250118_234638.pdf
12. Russia's Quest to Intensify BAI Against Ukraine's Logistics | ISW, <https://understandingwar.org/research/russia-ukraine/russias-quest-to-intensify-the-theater-wide-battlefield-air-interdiction-campaign-against-ukraines-logistics/>
13. CNN demonstrated the work of the Ukrainian air attack control center GUR. At the heart of this whole system is the American.. 2026 | ВКонтакте, https://vk.ru/wall-232565972_10283
14. The Heart of War: Ukraine's Key Drone Battlefield System - CEPA, <https://cepa.org/article/the-heart-of-war-ukraines-key-battlefield-system/>
15. ウクライナは既に機能する「統合全ドメイン指揮・統制(CJADC2)」技術を有しているのか? (CSIS), <https://milterm.com/archives/4823>
16. The Ukrainian Way of Digital Warfighting: Volunteers, Applications, and

Intelligence Sharing Platforms - CSS/ETH Zürich,
<https://css.ethz.ch/en/center/CSS-news/2024/07/the-ukrainian-way-of-digital-warfighting-volunteers-applications-and-intelligence-sharing-platforms.html>

17. DELTA system has proven its compatibility with Link 16,
<https://militarnyi.com/en/news/delta-system-has-proven-its-compatibility-with-link-16/>
18. Ukrainian DELTA System Successfully integrated with the Polish TOPAZ,
<https://militarnyi.com/en/news/ukrainian-delta-system-successfully-integrated-with-the-polish-topaz/>
19. Link 16 and tactical data links: software integration guide - Corvus Intelligence,
<https://corvusintell.com/blog/interoperability/link-16-tactical-data-links/>
20. Interoperability at the Edge: The Strategic Imperative for NATO in an Era of Complex Threats,
<https://hadean.com/blog/interoperability-at-the-edge-the-strategic-imperative-for-nato-in-an-era-of-complex-threats/>

