

UAV フォッグコンピューティングのディペンダビリティ評価手法

代表研究者

町田 文雄

筑波大学 システム情報系 准教授

1 研究の目的

都市における交通量のモニタリングや環境保全のためのモニタリング、災害救助や僻地への配達など、様々な分野でUncrewed Aerial Vehicle (UAV) を活用した情報通信システムの活用が期待されている。UAV で実世界を認識するため、カメラで撮影した映像のリアルタイムな解析 (AI 処理) が行われるが、UAV に搭載できる計算機資源やバッテリー容量には限度があるため、資源不足やバッテリー不足で性能や信頼性が低下する問題がある。

そこで、UAV における AI 処理をネットワークに接続された別の計算機や別の UAV にオフロードし、適材適所で実行する UAV フォッグコンピューティングが注目されている。UAV フォッグコンピューティングは UAV の動作環境や負荷状態によってシステムの処理形態を変更できる柔軟性に利点がある反面、その性能や信頼性の推定や評価が難しいという問題がある。例えば、オフロードを実行せずに UAV 上で AI 処理を実行し続ける場合と、地上の計算ノードへ処理をオフロードした場合とでは性能と信頼性を同じように評価することはできない。動作環境の不確実性に伴って計算処理形態が変化する計算基盤システムに対する体系的なディペンダビリティ評価手法は知られておらず、UAV フォッグコンピューティングの設計において大きな課題である。本研究ではディペンダブルな UAV フォッグコンピューティングを実現するための体系的な品質評価手法を確立することを目的とする。

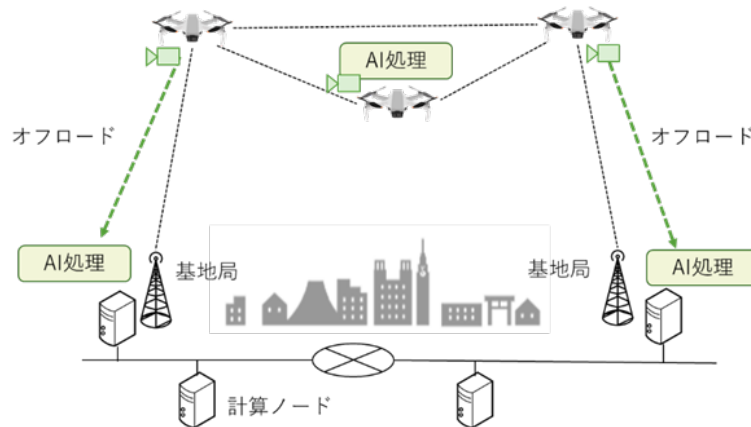


図 1 UAV フォッグコンピューティングシステムの構成

2 関連技術の動向

UAV システムの品質に関する研究は近年盛んに行われている。これまで UAV 間の通信ネットワーク、ルート制御、障害物回避などを含む機体の制御など UAV の基本的な動作に関する研究が中心であったが、近年では UAV で動作するソフトウェアやサービスの品質も議論され始めている。例えば、災害救助などのミッションクリティカルな応用シナリオではシステムとしての高い信頼性や安全性が要求される[1]。ArduPilot や PX4 といった UAV のソフトウェアの信頼性を調査した研究や、GPS ジャミングなどの攻撃から UAV システムを守る手法の研究などが進められている。

UAV システムをモデル化してその品質を分析し、設計に生かす研究も近年盛んに進められている。申請者の研究では確率報酬ネットワークを用いた UAV システムのモデル化により適応的に画像処理をオフローディングする手法の有効性を示している[2]。清華大学の研究ではドローン群を使って構成されるフォッグコンピューティング環境で最適にタスク割り当てを行うためのタスク実行時間と信頼性の評価モデルを定義している[3]。また故障木やマルコフ連鎖モデルを用いて UAV システムの信頼性評価を試みた事例もある[4]。これらのモデルベースの品質評価はシステム開発の初期段階で様々な環境やリスクを想定して品質設計の根拠を

示することができるが、現実のシステムで測定した結果で検証していないため、現実とのギャップの分析が不十分であった。

3 提案手法

本研究では、シミュレーターと実計算機を用いた性能測定と確率モデルによる理論的解析を統合した新たな評価手法を提案した。提案手法の全体像を図2に示す。UAVの様々な動作シナリオをシステム設計の早い段階で実環境で評価することは困難である。そこで、近年性能が大幅に向上した仮想環境シミュレーターを活用した。シミュレーターで想定するUAVの活用シーンを仮想環境として実現し、UAVを飛行させてテスト用の動画を撮影する。この動画に対するAI処理を評価用計算機上で実行すれば、その際の性能や消費電力を詳細に測定できる。計算機上のAI処理やオフロードの際の情報通信処理をシミュレーターで完全に再現することは困難であるため、実機での性能測定を組み合わせることでシステムの基本的な性能特性を捉える。さらに、UAVの動作環境の変化や負荷変動、プロセス故障等の不確実要因の影響を考慮するため、システムの構成や振る舞いを確率モデルでモデル化する。実験による測定結果から推定されたパラメータ値と確率モデルに基づくシステム品質の解析を組み合わせることにより、実験による測定ではカバーできない不確実性を考慮した体系的な品質評価を可能にする。

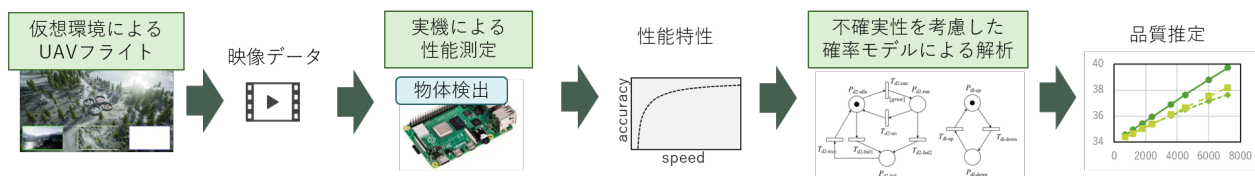


図2 提案手法の全体像

3-1 研究の進め方

UAV フォッグコンピューティングの具体的な応用シナリオとして、UAV でリアルタイムに物体検出を実行する環境モニタリングシステムの評価に取り組んだ。提案手法により物体検出の精度や処理性能（スループットやレイテンシ）、可用性、消費電力、継続稼働可能時間の定量的な見積もりを得、それらの品質指標の最適トレードオフを取るオフロードポリシーを設計する。具体的に次の手順で研究を進めた。

（1）物体検出システムの性能プロファイリング

UAVのための仮想環境シミュレーションプラットフォームとしてAirSimを用いた。AirSimで生成された3D仮想環境内でUAVを飛行させ、UAVから撮影した稼働環境内の映像を録画する。この録画データを評価用の入力データとし、物体検出システムの性能を測定する。UAV上の計算機で物体検出処理することを想定し、評価用計算機上で物体検出アルゴリズム（YOLOv5）を実行し、異なる解像度の入力データを与えた際の検出精度と処理性能、および消費電力を測定する。

（2）UAV フォッグコンピューティングの確率モデル解析

AI処理プロセスの負荷や故障、UAV移動先のネットワークの品質などの不確実性を考慮した品質評価を可能とするため、不確実要因を捉えた品質評価のための確率モデルを設計する。オフロード処理では複数の計算ノードが連携して動作するため、これらの振る舞いをモデル化できる確率報酬ネットを用いる。従来の確率モデルを用いた評価手法の課題であった現実とのギャップの問題に対処するため、性能プロファイリングで測定した結果に基づいて状態遷移時間の確率分布を推定する。この結果に基づいてモデルを精緻化し、故障率が性能や信頼性に与える影響を解析評価する。

（3）最適なオフロードポリシーの設計と評価

提案する品質評価手法に基づいて最適なオフロードポリシーを設計する。オフロードポリシーは、どのような条件下でどのノードに計算処理をオフロードするか判断基準を与える。オフロードポリシーによってシステム全体の品質が左右される。異なるオフロードポリシーによる環境モニタリングシステムの検出精度、処理性能、消費電力、継続稼働可能時間、可用性の推定値を比較評価し、与えられた条件を満たす最適なオフロードポリシーを探索する。

4 研究成果

4-1 UAV フォッグコンピューティングシステムの品質評価手法の確立

本研究を通じて UAV フォッグコンピューティングシステムの品質評価手法をフレームワークとして実現し、論文を Future Generation Computer Systems (Q1 Journal, Impact Factor 5.9) で発表した。本論文で発表した品質評価フレームワーク SPADE (Simulator-assisted Performability Design) の概要を図 3 に示す。

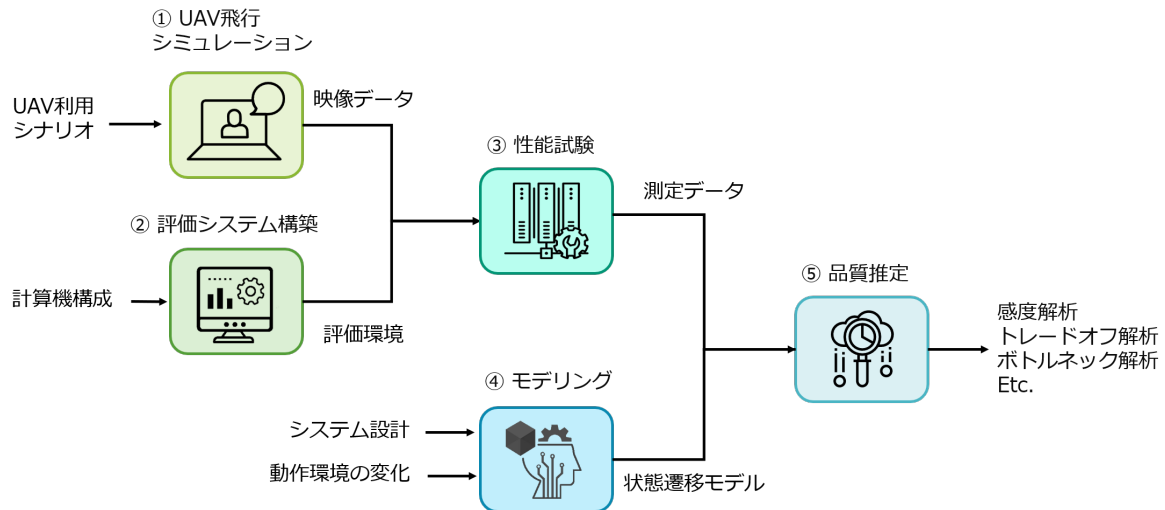


図 3 品質評価フレームワーク SPADE (Simulator-assisted Performability Design)

SPADE では、評価する UAV の利用シナリオを仮想的に実現する UAV 飛行シミュレーションと、実機を用いた AI 処理の性能試験、システムの設計を反映した状態遷移モデルに基づく品質推定で構成されている。UAV 飛行シミュレーションを用いることで、実際に UAV を飛行させることなく、具体的な利用シーンにおいて想定される負荷変動や障害を考慮し、詳細かつより正確な品質設計を早期に実行できることが特長である。

本研究ではケーススタディとして、自然環境に生息する野生動物の UAV にモニタリングシステムの設計例を挙げている。UAV による生態のモニタリングでは、個体検出の精度、映像処理の処理速度、稼働率、消費電力などの品質指標が重要であり、現実に近い動作環境を想定して品質指標を正確に見積もり、設計に反映させる必要がある。

SPADE による評価では、まず UAV を利用する環境を仮想環境としてシミュレーターで実現する。本研究では AirSim を用いて 3 万平方メートルの森林地帯に鹿と狼を配置し、UAV で一帯を飛行させた際の動画を撮影した。仮想環境で実装しているため、動物の種類や数を自由に変更できるだけでなく、UAV の飛行ルート、速度、高度などを変えて様々な動画を撮影できる。図 4 に AirSim で撮影した画像のサンプルを示す。

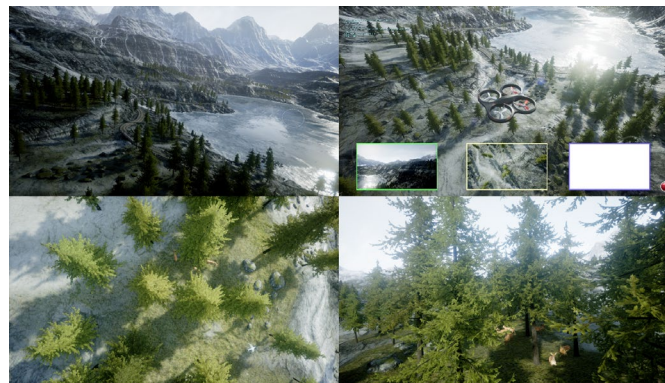


図 4 AirSim で撮影した画像のサンプル

仮想環境の UAV では撮影した画像を計算機でリアルタイムに解析しているわけではない。AI による画像処理の性能を分析するためには現実の計算機を用いた評価が必要である。そこで次のステップでは、UAV に搭載することを想定した Raspberry Pi の実機を用い、リアルタイム物体検出を行う AI モデルである YOLOv5 の性能を評価する。ここで入力映像として仮想環境で撮影した録画データを用いる。Raspberry Pi は実際に UAV に搭載されているわけではないが、現実の UAV 上でリアルタイムに物体検出を実行する際の計算処理を疑似的に再現する。実機による性能評価ではシステムの構成やパラメータを変えて性能の変化を実験的に確かめることができる。例えば、YOLOv5 による物体検出では入力画像の解像度によって処理性能や検出精度が変わる。同じ入力映像を異なる解像度で処理した場合の性能評価の結果を表 1 に示す。

表 1 入力画像の解像度を変えた場合の性能測定結果

Resolutions	FPS	Accuracy	Energy [W]	Latency [s]
FHD	0.228	0.565	6	24.636
HD	0.299	0.665	5.8	4.119
qHD	0.520	0.745	6.6	2.412
nHD	0.732	0.768	7.2	2.186
HVGA	0.825	0.777	7	1.668

解像度が高いほど処理量は多くなるためフレームレート (FPS) は低下する傾向が見られる。最も解像度が低い HVGA (480×270) の場合に FPS は最も高く (0.825)、レイテンシも最も小さかった (1.668)。解像度が低いほど検出の精度は劣化することが想定されたが、予想に反して検出精度も HVGA の場合が最も高い (0.777) という結果であった。これは物体検出モデルの処理過程や学習データの分布にも起因していると考えられ、単純な理屈では説明が難しく、実機を用いた性能測定の重要性を示す一例として示される。

実験評価では現実的な性能測定を行えるメリットがある一方、信頼性やバッテリー駆動時間予測など、長時間稼働時の品質指標の評価には向かない。評価に使える時間やコストは有限であるため、長時間にわたる性能測定を統計的に有意な結果が出るまで繰り返す実施することは困難である。長時間稼働時の品質評価指標を推定するため、SPADE では状態遷移モデルによる品質推定を行う。本研究では状態遷移モデルとして確率報酬ネットを用いた。確率報酬ネットは確率ペトリネットを拡張したモデルで報酬関数を定義することでモデル化した対象の性能指標を定量的に評価することを可能にする。本研究でモデル化した UAV 上での物体検出処理プロセスの状態遷移モデルを図 5 に示す。

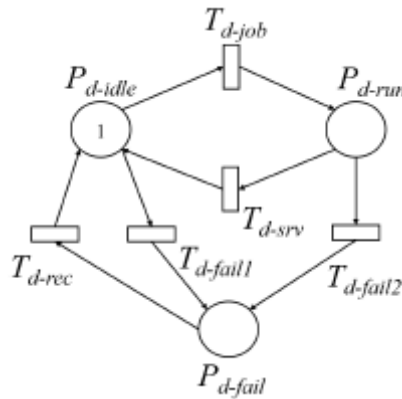


図 5 UAV で物体検出処理を実行する際の状態遷移モデル

P_{d-idle} にトークンが置かれている状態は、UAV がアイドル状態にあることを表しており、トランジション T_{d-job} が発火すると物体検出処理の実行が開始され、トランジション $T_{d-fail1}$ が発火するとプロセスが故障することが表現されている。この確率報酬ネットを数値解析することで、定常状態において P_{d-idle} や P_{d-run} にトークンが置かれている確率を求めることができる。この確率をそれぞれ π_{idle} 、 π_{run} とし、各状態で消費する平均電力を P_i 、 P_p で表すと、単位時間あたりの期待消費電力は以下の式で表すことができる。

$$E[P_i] = P_i \cdot \pi_{idle} + P_p \cdot \pi_{run}$$

UAV の計算機で利用するバッテリーの容量を C 、出力電力を V とすると、平均バッテリー駆動時間 (MTTOB) は次式で表される。

$$MTTOB = \frac{C \cdot V}{E[P_i]}$$

実験評価で測定された FPS の値に基づいて状態遷移率を推定し、確率報酬ネットの数値解析で定常状態確率を求め、物体検出処理実行中の推定消費電力 P_p と MTTOB を計算した結果を表 2 に示す。

表 2 入力画像の解像度を変えた場合の消費電力 P_p と MTTOB 推定値

Resolution	Edge	
	P_p	MTTOB
FHD	5.8	3.33
HD	5.5	3.44
nHD	6.4	3.03
qHD	7.1	2.78
HVGA	6.9	2.86

入力画像の解像度によって、物体検出処理時の消費電力も MTTOB も影響を受けることが確認できる。全体的な傾向としては解像度が低いほど単位時間あたりの消費電力が大きく、MTTOB も短くなることが読み取れる。

さらに、確率報酬ネットの定常状態解析結果からサービスの可用性 (Availability)、スループットを評価することができる。これらの評価はプロセスの故障率に影響を受けるが、モデルに基づく解析のため、パラメータの影響を感度解析で分析できる。サービス可用性とスループットの感度解析の結果を図 6 に示す。

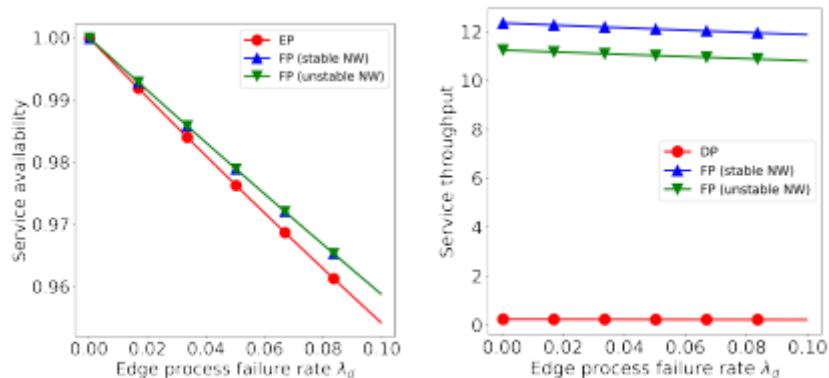


図 6 サービス可用性とスループットの感度解析の結果

サービス可用性はプロセス故障率の増加に伴って減少するがスループットは大きな影響を受けないことが読み取れる。

SPADE により UAV システムの品質を多角的に評価し、システム的设计に生かすことができる。例えば、リアルタイムな物体検出処理を UAV 上で実行するか、フォグコンピューティングの別の計算ノードにオフロードして実行するかを選択は重要な設計事項の一つである。UAV 処理では、よりリアルタイム性の高い処理を実現できる半面、負荷増加に伴う信頼性の低下やバッテリー消費が課題になる。一方、オフロード処理では、より安定した物体検出処理が期待できるが、ネットワークの品質やリアルタイム性の低下が懸念される。品質指標のトレードオフは入力画像の解像度にも影響を受ける。SPADE では実験評価を組み合わせることで解像度の影響を考慮した分析を可能にする。図 7 に結果の一部を示す。

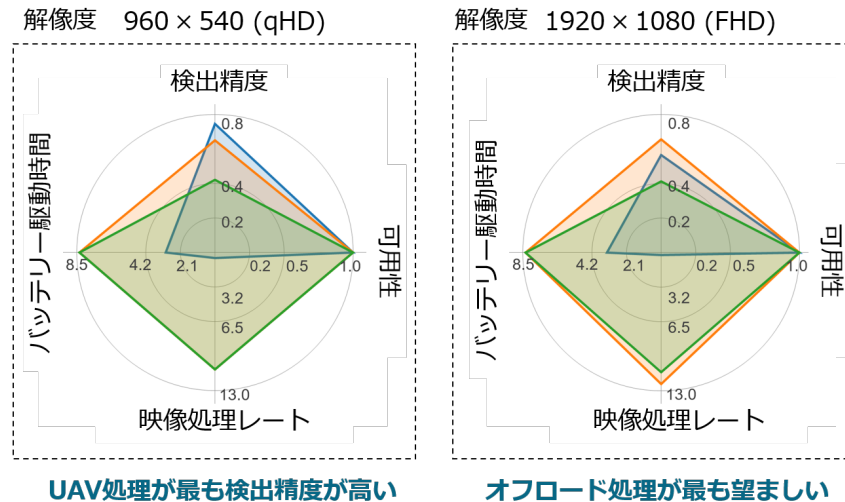


図 7 入力画像の解像度を変えた場合の品質推定値の比較評価

入力映像の解像度が qHD の場合、最も高い検出精度を達成するのは UAV 処理である。一方、入力画像の解像度を FHD に変えると、オフロードでデータ処理した場合の方が全ての品質指標において有利になる。ただし、UAV が高品質なネットワークを利用できるかどうかで、システムの品質が変わる点に注意が必要である。

(まとめ) SPADE の開発を通じて、本研究の目的である、ディペンダブルな UAV フォッグコンピューティングを実現するための体系的な品質評価手法を確立した。SPADE は UAV シミュレーターと、実機を用いた性能測定、状態遷移モデルの解析による品質推定を統合することにより、UAV システムの品質を効率的かつ正確に評価することを可能にした。UAV シミュレーターでは生態環境モニタリングや交通量モニタリングや災害救助など、様々なシーンを仮想的に再現できるため、多様なシステムの品質設計に応用できる。また、実機を用いた性能測定では、異なる AI モデルやハードウェアでの性能の違いを調べることができる。さらに、状態遷移モデルを拡張することで異なる障害リスクや負荷状態を考慮した性能推定が可能になる。応用が広がる UAV システムの体系的な品質評価および設計手法として今後の活用が期待される。

4-2 オフロード処理の分散最適化方式の実現

SPADE の開発成果に基づき、複数の UAV で都市の交通状況をモニタリングする UAV システムのオフロードポリシーの設計の研究を実施した。本研究では、UAV フォッグコンピューティングシステムの品質にシミュレーターと確率モデルを用いるだけでなく、UAV 同士が互いに局所的な情報だけを用いて全体最適なオフロードポリシー (どの UAV がどのフォッグノードへオフロードするか) を探索する分散制約最適化アルゴリズムを用いた。局所的な情報のみを用いるヒューリスティックな方式と比較し、分散制約最適化アルゴリズムは平均的な処理性能と可用性を共に高めることができることを明らかにした。本研究成果は国際会議 International Conference on Agents and Artificial Intelligence で論文が採択され (採択率 18%)、2026 年 3 月に論文を発表した。

本研究ではマルチ UAV による都市の交通量モニタリングシステムを評価対象とした。図 8 に想定するシステムの構成を示す。各 UAV は割り当てられた地域の交通量をカメラで撮影した画像の解析によって継続的にモニタリングする。交通状況の解析は各 UAV に搭載された計算機上で実行するが、交通量の増加に伴って処理負荷が高まるため、UAV での処理性能が劣化する。そこで、高負荷時には計算機資源やバッテリー消費を節約するため、計算処理をフォッグコンピューティングの計算に転送してオフロード実行する。ただし、フォッグノードは複数の UAV で共有して使われるため、全ての UAV のオフロード処理を受け入れると逆に性能が低下してしまう。フォッグノードでの処理ボトルネックを回避するためには、UAV 同士が協調してオフロードを実行するかどうかを判断する必要がある。

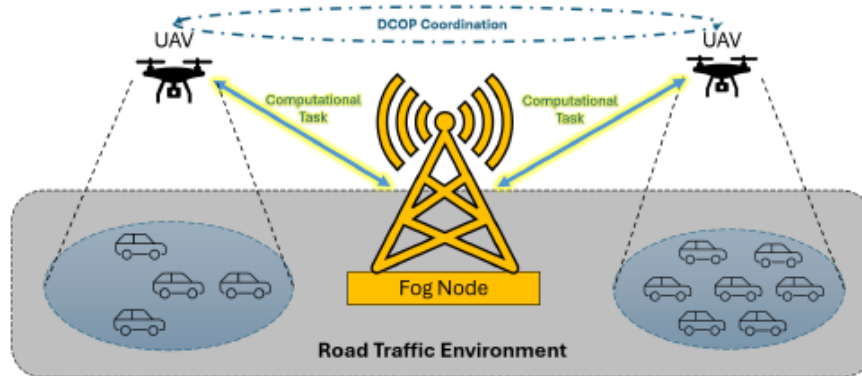


図 8 マルチ UAV による都市の交通量モニタリングシステムの構成図

全ての情報が集約できる集中システムでは全体を見た最適化が可能だが、モニタリング範囲が広域に渡り、UAV 間が地域に分かれて自律的に実行する環境では、通信コストや接続性の点で限界がある。そこで、各 UAV が近隣の UAV のみとの情報交換によって、部分最適なオフロードポリシーを決定する分散制約最適化が有望なアプローチとなる。本研究では性能と可用性を最大化するマルチ UAV 環境のオフロードポリシー最適化を分散制約最適化問題として定式化し、ヒューリスティックアルゴリズムで問題を解くことでオフロードポリシーを決定する方式を提案した。

定式化した分散制約最適化問題の概要を述べる。各 UAV i は計算処理を実行する場所の選択肢として UAV 上の計算機 (local) とネットワークで接続可能なフォグノード n へのオフロード実行 (off_n) がある。処理モードの選択は、UAV による交通量解析の性能と可用性に影響を与える。これを UAV i の効用関数 f_i として定義する。本研究では性能と可用性を統合した性能可用性を効用関数の値として用いた。性能可用性は SPADE で用いた確率報酬ネットの解析によって求める。分散制約最適化の目的関数はシステムを構成する UAV の効用関数の総和で定義され、最適化の問題は各 UAV i の計算処理実行場所の決定問題に帰着される。

分散制約最適化問題に対する様々な解決アルゴリズムが知られており、本研究では最適解を求める同期型分岐限定法 (SyncBB)、代表的な近似アルゴリズム DSA、Max-Sum アルゴリズムを比較評価した。評価環境は SPADE の評価手法に従い、Urban traffic simulator を用いて仮想的な交通トラフィックの動画を生成し、確率報酬ネットを用いて UAV 上で交通量解析を実行する場合と、フォグノードにオフロードした場合の性能可用性を推定した。4 つの UAV で構成されるシナリオで、各アルゴリズムに基づいてオフロードポリシーを決定した場合のシステム全体の性能可用性を図 9 に示す。

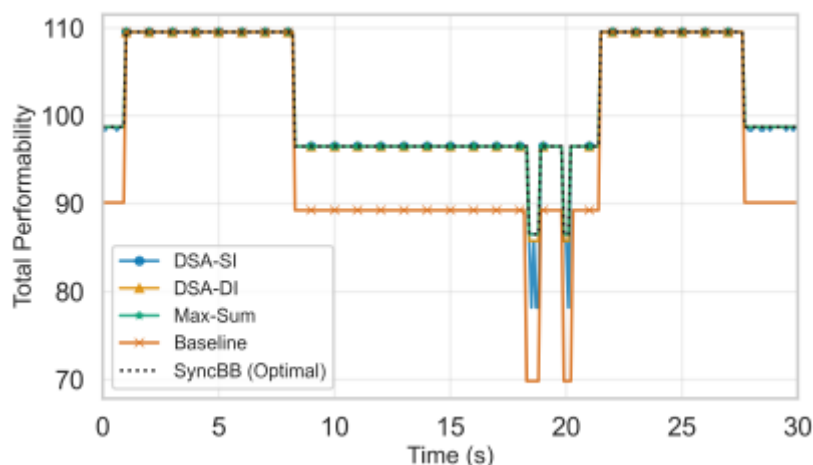


図 9 4UAV の評価シナリオにおけるオフロードポリシーの性能評価結果

ベースラインとして UAV が協調動作をせずにそれぞれ独立に負荷状況に応じてオフロードを決定した場合

の結果も比較評価した (Baseline)。分散制約最適化を用いたオフロード決定方式では一貫してベースラインより高い性能可用性を達成できることが確認された。採用したアルゴリズムの中では、Max-Sum が常に SyncBB による最適解と一致する結果を出しており、単純なヒューリスティックで最適なオフロードポリシーを導き出せることが明らかになった。UAV を 12 台に増やした実験でも同様な結果が得られており、分散制約最適化を介したオフロードポリシーの設計の有効性を確かめることができた。

5 今後の展望

近年 UAV システムの品質評価の研究は益々注目されている。我々の実施した包括的な文献調査では、2015 年に発表された関連文献はたった 3 件だったが、2024 年には 7 ヶ月間で 109 件もの関連文献が発表されていた [5]。UAV の実活用も徐々に広がりを見せており、品質設計や最適化の研究はこれからも重要な課題である。

本研究で開発した UAV システムの体系的な品質評価手法に基づき、より正確で効率的に評価を実現するための技術開発に研究を発展させている。UAV システムの品質評価では、実システムでの包括的な実験評価が難しいため、提案手法では仮想環境や確率モデルによる近似的な推定評価を統合している。したがって、評価のために導入した仮想環境やモデル化のために設定した前提と現実とのギャップを最小化することが本質的な課題である。このギャップを埋めるために次のような研究に取り組んでいる。

5-1 確率モデルの精緻化

品質推定に用いる確率モデルをより現実に近い精緻なモデルに拡張することを目指す。本研究では長期的な性能指標の評価のために確率ペトリネットの一種である確率報酬ネットを用いていた。標準的な確率ペトリネットは、状態遷移にかかる時間が全て指数分布に従うことを前提としている。指数分布を仮定することでモデルの解析が容易になる利点があるが、実際のシステムの状態遷移は指数分布できれいにモデル化できるわけではない。例えば、画像分類の推論処理時間は対数正規分布の方がより適切に状態遷移時間を近似できることなどを確認している [6]。確率ペトリネットの指数分布の仮定を緩和するモデル化手法や解析手法については多くの従来研究があるが、何れもモデル化や解析のコスト、スケーラビリティなどとトレードオフの関係がある。UAV システムで想定する状態遷移の特徴を踏まえ、解析において重要な状態遷移を選択的に精緻化するアプローチが有効と考えられる。

5-2 通信品質の正確な評価

実際に UAV を飛行させた場合の通信品質の影響を調査する研究に取り組んでいる。ペルナンブーコ農村連邦大学との共同研究により、UAV を飛行させた際のデータを解析し、品質評価に影響を与える要因の分析を進めている。例えば、ネットワークの接続状況や通信品質は UAV の移動によって非常に大きな影響を受ける場合があり、通信可能な距離の制約にもばらつきがある。UAV 上で実行する AI タスクをネットワークを通じてオフロードする際には、通信の安定性が性能や信頼性に大きな影響を与えるため、評価において考慮が必要である。提案する評価手法で利用する仮想環境において UAV を飛行させた場合の通信品質の安定性を以下に正確に評価に取り込むかは今後の研究課題の一つである。

5-3 天候リスクの評価と対処

UAV システムは屋外で利用されるため、荒天や強風、温度や湿度など、天候の影響は無視できない。UAV 自体を強靱化する技術開発は今後も進むことが想定されるが、UAV で動作する計算処理、および、その結果生じる UAV ミッションへの影響については十分に議論されておらず、大きな課題である。例えば、UAV でリアルタイムに撮影した画像に基づいて都市の交通状況や森林保護地帯のモニタリングするシステムでは、天候によってカメラで撮影される映像の品質が大きく劣化する。雨天の場合や濃霧の場合など、ほとんど想定した画像認識処理が正しく実行できず、UAV としてのミッションを完遂できない可能性もある。このような天候リスクの影響の調査と分析は UAV システムの品質評価において重要な課題の一つである。我々は天候リスクと UAV システムの品質指標、および、UAV ミッションの関係をシステムダイナミクスでモデル化して評価するアプローチを提案し、シミュレーション評価結果を発表している [7]。さらに仮想環境で悪天候などの状況を仮想的に生成して品質評価に反映させ、画像鮮明化技術やセンサーヒュージョンによって天候リスクに対処する手法の有効性評価の研究を進めている。

【参考文献】

- [1] B. Mishra, D. Garg, P. Narang, V. Mishra, Drone surveillance for search and rescue in natural disaster, Computer Communication. vol. 156, pp. 1-10, 2020.
- [2] F. Machida, Q. Zhang, and E. Andrade, Performability analysis of adaptive drone computation offloading with fog computing, Future Generation Computer Systems, vol. 145, pp. 121-135, 2023.
- [3] X. Hou, Z. Ren, J. Wang, S. Zheng, W. Cheng, and H. Zhang, Distributed Fog Computing for Latency and Reliability Guaranteed Swarm of Drones, IEEE Access, vol. 8, pp. 7117-7130, 2020.
- [4] R. Abdallah, Reliability approaches in networked systems: Application on unmanned aerial vehicles, 2019.
- [5] Q. Zhang, M. Furqan, T. Nuzhat, F. Machida, and E. Andrade, Dependability of UAV-Based Networks and Computing Systems: A Survey, arXiv:2506.16786, 2025.
- [6] K. Wakigami, F. Machida, T. Phung-Duc, Empirical architecture comparison of two-input machine learning systems for vision tasks, Formal Aspects of Computing, vol. 36, no. 4, pp. 1-19, 2024.
- [7] T. Nuzhat, F. Machida, and E. Andrade, Weather Impact Analysis for UAV-based Deforestation Monitoring Systems, The DSN Workshop on Environment-System Symbiosis, pp.224-230, 2025.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
SPADE: Simulator-assisted Performability Design for UAV-based monitoring systems	Future Generation Computer Systems	2026 年 1 月
Distributed Performability Optimization for Multi-UAV Road Traffic Monitoring	The 18th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	2026 年 3 月
Weather Impact Analysis for UAV-based Deforestation Monitoring Systems	The DSN Workshop on Environment-System Symbiosis	2025 年 6 月
Vehicle Density-Aware Adaptive Offloading for UAV-Based Road Traffic Monitoring	The 9th IEEE International Conference on Fog and Edge Computing	2025 年 5 月
Energy Bugs in Object Detection Software on Battery-Powered Devices	The 35th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops	2024 年 10 月
Performability Modeling and Analysis for Real-Time Object Detection on UAV Systems	The 48th IEEE International Conference on Computers, Software, and Applications	2024 年 7 月