

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14351

研究課題名（和文）不確実環境下でのサイバー攻撃に対して頑強な無人航空機の確率最適制御法の確立

研究課題名（英文）Stochastic Optimal Control of Unmanned Aerial Vehicles Against Cyber Attacks in the Presence of Uncertainty

研究代表者

松野 賀宣（Matsuno, Yoshinori）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：70800845

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、不確実性を考慮した確率最適制御手法を構築した。不確実性として主に時空間相関のある風速誤差を考慮し、不確実性が航空機の飛行軌道に与える影響（飛行軌道の期待値や共分散）を制御する共分散制御手法を提案した。確率制約を含む共分散制御問題を凸計画問題として定式化し、数値シミュレーションを通して、提案手法の有効性を評価した。提案する最適制御手法により不確実性の制御を行うことができ、様々な状態制約に対して適切な最適軌道を生成できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、無人航空機の安全かつ効率的な運航を実現するため、コリドーと呼ばれる専用空域を設定し、不確実環境下においてあらかじめ設定されたコリドー内に留まるように飛行する最適制御手法を構築した。実際の誤差に相当する相関のある誤差を考慮した不確実環境下において、適切な最適軌道を生成できることを示した。本研究成果は、実環境における無人航空機システムの応用において、不確実性管理を強化することができ、無人航空機システムの信頼性と安全性の向上に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we develop a stochastic optimal control method with significant practical implications for effectively managing uncertainty. The primary uncertainty we address is wind error, known for its spatiotemporal correlation. We propose a practical covariance control method to handle the impact of this uncertainty on the trajectory (expected value and covariance of the trajectory). The covariance control problem, incorporating stochastic constraints, is formulated as a convex programming problem. Through extensive numerical simulations, we demonstrate the effectiveness of our proposed method. The results highlight the potential of the stochastic optimal control method to manage uncertainty and generate optimal trajectories that adhere to various state constraints.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：確率最適制御 不確実性 飛行制御

1. 研究開始当初の背景

無人航空機システム(Uncrewed Aircraft Systems: UAS)の多くは、衛星測位システム(Global Navigation Satellite System: GNSS)を利用した航法に依存しており、GNSSからの測位用信号を用いて自己位置を推定する。しかし、意図的に虚偽情報を混入した信号を本来のGNSS信号になりすましてUASに受信させることで、UASの位置情報が実際と異なる位置情報に改ざんされる危険性がある。非GNSS環境下の航法技術として用いられる光学センサ等についても同様の脅威が潜在している。このような虚偽情報混入に代表されるサイバー攻撃により、意図的にUASが飛行経路から逸脱させられ、誤誘導される危険性がある。特に、風や航法誤差といった不確実環境下では、不確実性の範囲内に攻撃が潜み易く、攻撃を検出することが難しい。そこで、不確実環境下において安全な飛行経路を生成する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、航空機運航の安全性を向上することを目的とする。UASの運航では、安全かつ効率的な高密度運航を実現するため、コリドーと呼ばれる専用の空域を設定し、他機と干渉することなく飛行することが検討されている。しかし、UASは不確実環境下を飛行しており、あらかじめ設定されたコリドーを逸脱し飛行する恐れがある。本研究では、不確実性の影響を受けるUASが、あらかじめ設定されたコリドー内に留まるように飛行する確率最適制御手法を確立し、不確実環境下を飛行する実環境のUASへの適用を目指す。

3. 研究の方法

移動体の経路計画問題は、盛んに研究されており、不確実性下での経路計画問題を解くために、高速探索ランダムツリーや混合整数計画法等の手法が提案されている。これらの手法は、不確実性をシステムダイナミクスの外因性外乱として考えており、状態量共分散の開ループダイナミクスのみを考慮している。そのため、共分散自体を制御することはできず、時間経過と共に外乱によって状態量共分散が増大する。その結果、保守的な経路計画となることが課題である。そこで、外乱を対処し不確実性の影響を低減するために、状態量共分散の開ループダイナミクスを考慮する経路計画問題が近年研究されており、状態量共分散を制御する共分散制御(共分散ステアリングとも呼ばれる)が提案されている。不確実性の影響によりシステムの状態量は確率変数となるが、共分散制御を適用することで、状態量の確率分布の時間変化が望ましい分布形状となるようなフィードバック制御則を設計することが可能となる。共分散制御では、状態量がガウス分布の場合、状態量共分散を制御するフィードバックゲインの最適化問題を凸計画問題として定式化することができる。しかし、共分散制御に関する既存研究は、主に無相関の不確実性の影響を受けるシステムを扱っている。しかし、UASに影響を与える主な不確実性である風速誤差は、時空間相関があることが知られている。そこで本研究では、相関のある不確実性を考慮した共分散制御を定式化し、相関のある不確実性の影響を受けるシステムに対して、状態量の平均と共分散を制御する確率最適制御手法を構築する。そして、数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示す。

4. 研究成果

風速誤差は時空間相関があることが知られている。文献に基づき、ガウシアンカーネル関数を用いた共分散行列をもつ誤差を仮定すると、時間間隔が短いほど相関が強く、時間間隔が長いほど相関が弱くなる。図1は、相関のある誤差(相関ノイズ)と無相関の誤差(無相関ノイズ)の例である。無相関ノイズは各タイムステップで独立であり、ノイズの大きさは各タイムステップで異なる。しかし、相関ノイズは各タイムステップで相関があるため、各タイムステップでのノイズの大きさの変動は、無相関の場合に比べて小さくなる。

本研究では、UASのダイナミクスを線形システムとして考慮し、二次元のxy平面上でのUASの経路計画問題を扱う。位置と速度を状態量とし、加速度を制御入力とする二重積分器としてモデル化する。但し、無次元量であることに注意されたい。また、共分散制御の定式化についての詳細は文献及びを参照されたい。図2に問題設定を示す。プラス記号は初期状態と終端状態における位置の平均を示し、円は初期状態と終端状態における位置の標準偏差の3倍を示している。また、直線はcase1及び2の状態制約を示している。UASは、線内の領域において初期状態から終端状態まで飛行し、目標とする終端状態の分布に収まる必要がある。

数値シミュレーションにより相関ノイズの影響を明らかにするため、相関ノイズを考慮した共分散制御と無相関ノイズを考慮した共分散制御の2つの制御則を比較する。ここでは case 1 の状態制約を考える。図3に2つの制御則のシミュレーション結果として、初期状態とノイズを変えた50回のモンテカルロシミュレーション結果を示す。各実線は共分散制御を行った場合の軌跡を表している。実際のノイズは相関ノイズであると仮定し、相関ノイズを考慮した共分散制御、無相関ノイズを考慮した共分散制御共に、モンテカルロシミュレーションで与えるノイズは相関ノイズとする。図1に示した例のように、相関ノイズは各タイムステップにおけるノイズの大きさの変動が小さくなることから、相関ノイズを考慮した場合の状態量の変動は大きくなる。そのため、相関ノイズを考慮した場合、状態制約を満たすには、線内の領域中央に近い軌道が必要となり、軌道はより湾曲することになる。また、相関ノイズを考慮した共分散制御では、軌道が状態制約の線内に留まり、終端状態がその標準偏差の3倍を表す円内に存在していることがわかる。しかし、無相関ノイズを考慮した共分散制御では、軌道が線内の領域から逸脱し、終端状態が円内に収まらない場合があることがわかる。したがって、相関ノイズを考慮した共分散制御を行うことで、実環境において制約条件を適切に満たす軌道を生成することができる。

次に、異なる状態制約である case 2 を考える。ここでは、相関ノイズを考慮した共分散制御を用い、シミュレーションで与えるノイズは相関ノイズとする。図4は初期状態とノイズを変えた50回のモンテカルロシミュレーション結果である。図4から明らかなように、状態制約を満たす軌道が適切に生成されている。Case 1 に比べて厳しい状態制約条件下でも、制約を満足する軌道を生成することができる。したがって、共分散制御では、case 1 及び2のような様々な制約条件下において、制約条件を満足する適切な軌道を生成することができる。共分散制御はフィードバック制御則であり、制約条件を満たしながら不確実性を制御することができる。

本研究では、2次元平面上のUAS経路計画問題の数値シミュレーションを通して、2つの共分散制御則(相関ノイズを考慮した共分散制御及び無相関ノイズを考慮した共分散制御)を比較した。相関ノイズを考慮した共分散制御則により、様々な制約条件下において、制約条件を満足する適切な軌道を生成することができた。また、相関ノイズが共分散制御則に与える影響を明らかにすることができ、相関ノイズを考慮した共分散制御の有効性を示すことができた。提案する共分散制御により不確実性を制御することができる。本研究成果は、実環境におけるUASの応用において、不確実性管理を強化することができ、UASの信頼性と安全性の向上に貢献することが期待される。

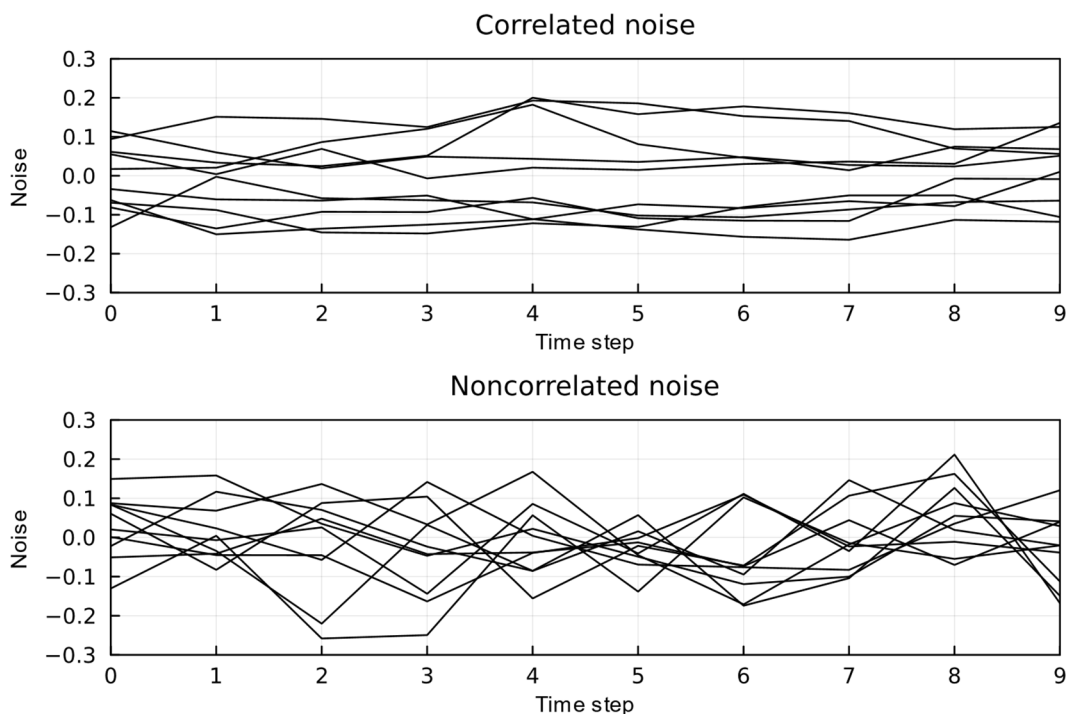


図1 相関ノイズと無相関ノイズの例(10回の実現例)

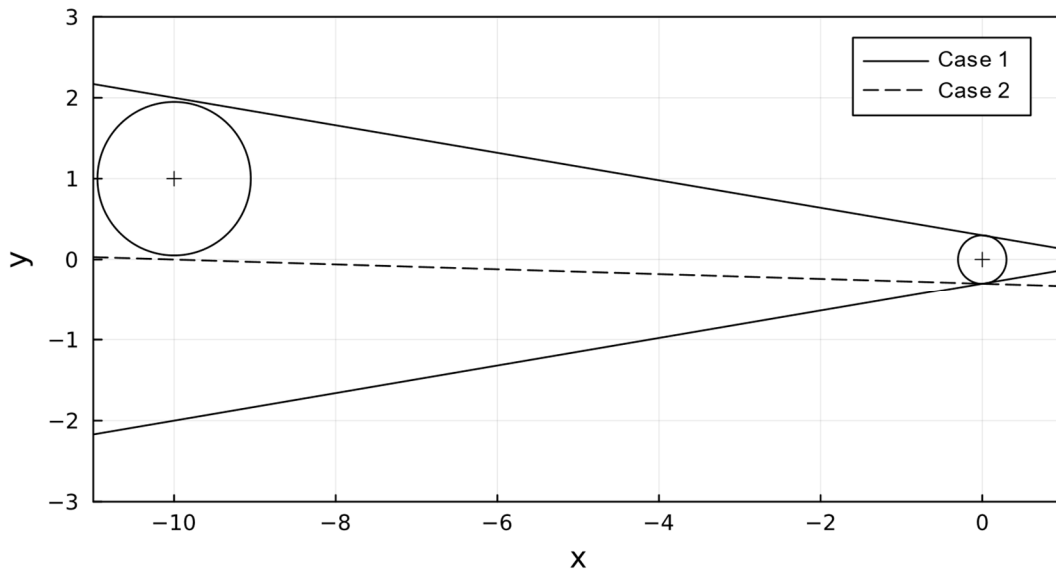
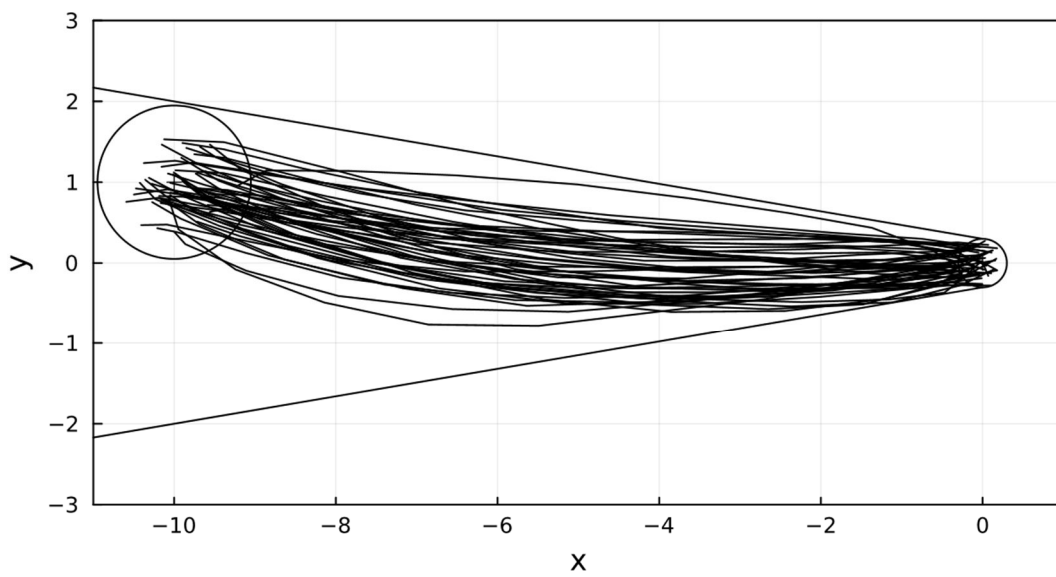
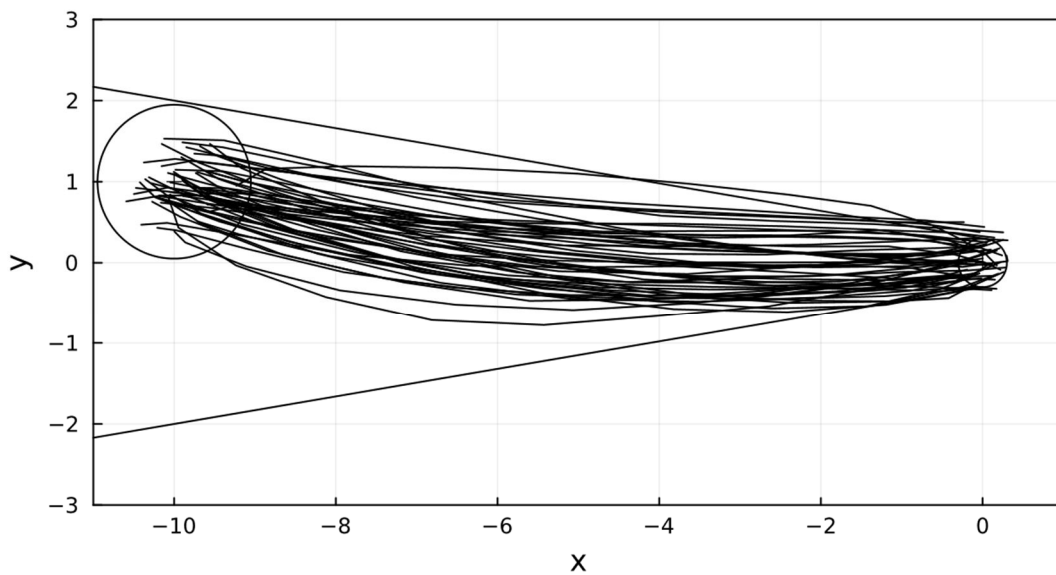


図2 問題設定



(a) Correlated noise



(b) Noncorrelated noise

図3 Case 1 の共分散制御結果 (50 回のモンテカルロシミュレーション結果)

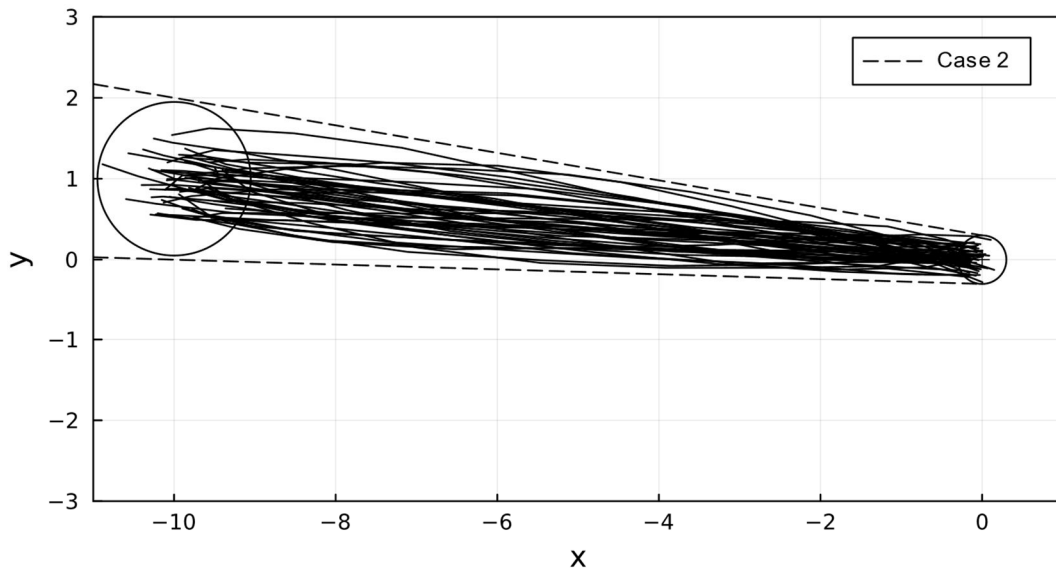


図4 Case 2 の共分散制御結果 (50 回のモンテカルロシミュレーション結果)

<引用文献>

- Chaloulos G., Lygeros J., Effect of Wind Correlation on Aircraft Conflict Probability, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, 2007, 1742-1752
- 松野 賀宣, 不確実環境下における無人航空機の共分散制御, 日本機械学会 第32回 交通・物流部門大会, 2023
- Matsuno Y., Covariance Control for Uncrewed Aircraft Systems Under Correlated Uncertainty, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2024 (査読中)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松野 賀宣
2. 発表標題 不確定環境下における無人航空機の共分散制御
3. 学会等名 日本機械学会 第32回 交通・物流部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinori Matsuno and Haruki Matsuda
2. 発表標題 Vertical Flight Profile Optimization Using Ensemble Weather Forecasting and Statistical Aircraft Performance Model
3. 学会等名 2023 AIAA AVIATION Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinori Matsuno and Adriana Andreeva-Mori
2. 発表標題 Unmanned Aerial Vehicle Routing Problem for Integrated Manned and Unmanned Aircraft Operations
3. 学会等名 2023 AIAA AVIATION Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------