

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11491

研究課題名（和文）Blockchain技術を用いた分散型UTMによる空域シェアと衝突回避

研究課題名（英文）Distributed Unmanned Traffic Management System for Collision Avoidance and
Airspace Sharing using Blockchain

研究代表者

矢口 勇一（Yaguchi, Yuichi）

会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：00609109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、一般的に中央集権型で作成される無人航空機の航空管制・予約システム（UTM）に対して、分散型のUTMの構築を目指して実施され、Blockchain技術を用いて運航予約を行うシステムを構築し、提案した。また、それに伴い、予約に漏れた航路を再計算し、動的に再予約するシステムを構築した。加えて、航空管制のための動態監視のための機構として、LoRaを用いた放送型のテレメトリ共有システムを提案し、それらが機能することを前提とした衝突回避アルゴリズムも構築した。結果として、予約に関しては、1000トランザクションを1秒で処理可能なシステムを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

UTMは現在、世界的に検討され、標準化されようとしている分野である。既にアーキテクチャ等は決定され、現在仕様の要求やユースケース等の議論が進んでいる所である。また、UTMの導入される背景としては、各国で進めようとしている有人地帯上空の目視外飛行、または空飛ぶクルマのための管制システムであるが、情報量の多さや、既存の航空機と比べてはるかに多い量の機体を動的に管理する必要があるため、自動化が必要である。その中で、分散化させ、情報を一元的にグローバルに所持しないモデルは有用であり、研究が始まった段階である。その先駆けとして、学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research constructs a decentralized UTM, as opposed to the air traffic control and reservation systems (UTMs) for unmanned aerial vehicles, which are generally created in a centralized manner. A system for making flight reservations using Blockchain technology was constructed and proposed. In conjunction with this, a system to recalculate and dynamically rebook missed routes was also constructed. In addition, we proposed a broadcast-type telemetry sharing system using LoRa as a mechanism for dynamic monitoring for air traffic control and constructed a collision avoidance algorithm based on the assumption that the system works. As a result, we were able to build a system that can process 1000 transactions in 1 second as far as reservations are concerned.

研究分野：無人航空機

キーワード：無人航空管制 ブロックチェーン 経路計画 セキュリティ 航路監視

1. 研究開始当初の背景

2017 年末時点の UAS の研究開発段階では、確固とした UTM は存在しておらず、ようやく 2016 年末頃に Global UTM Association が設立され、2017 年度初頭に通リ一遍の UTM アーキテクチャが公表された段階であった。日本においても、2017 年より NEDO DRESS PROJECT として、UTM 周りの研究が行われ、2019 年には一定の実装が行われており、100 台程度の機体位置把握・動態把握を行う能力が確認されている。しかしながら、こうしたアーキテクチャの下敷きは、2016 年頃に公表されている米国 FAA と NASA の研究[]を下敷きにした中央集権的な UTM の構成であり、国単位のフライトデータを一元的に扱おうとすると、非常に大規模なシステムになることが既に予想されていた。実際、NEDO DRESS PROJECT 内での試算では、2030 年頃の実装では年間数十テラバイトのデータをやり取りする大規模なシステムになることが予測されている。また、セキュリティの問題も多くあるため、『分散システム』としての UTM が求められ始めていた。

2. 研究の目的

本研究では、大規模なシステムを敷かず、個別のシステムを繋げて UTM とする、分散データベースを用いた Blockchain 型の合意形成を持つ UTM システムのアルゴリズムを開発することである。Blockchain 技術は、Bitcoin 等に利用される分散台帳型の合意形成アルゴリズムとそれをサポートする P2P 通信技術である。Bitcoin 等では仮想通貨が台帳上のやり取りの対象となる資源であるが、UTM では空域がその対象となる。また、Bitcoin 等では、合意形成は直前までの取引を遡る形で整合性を保証するが、UTM ではドローンの位置経過やそのドローンが正しく経路を辿ったこと、またその合意形成の通り飛翔したかどうかをベースにして信頼性を保証する。特にこのバックトラックによる合意の保証は、来るべき複数台ドローンが同一空域で飛翔する場合のセキュリティ確保にもつながる物である。一方で、Blockchain 技術は、合意形成のためのバックトラックによる保証のために、小さいシステムであれば 1 秒程度、大規模になれば 10 秒程度の合意形成の時間が必要である。これは、動作中のドローンの空域シェアに対しては非常に長く、GPS の取得間隔で 1 秒以内、少なくとも 0.1 秒程度のタイミングで合意形成ができなければ、無尾翼機で時速 80km/h 程度で飛翔する場合に 1 秒で 22m 以上も進むことから、衝突回避等に用いることが不可能である。本研究では、特に合意形成アルゴリズムをドローンの空域シェアに適用できるようにするために、任意の空域に存在する近しいドローンと、飛翔させる前にあらかじめ合意形成をしており、実際に飛翔中では、空域をシェアするための航行予測域の共有と、占有されている空域への侵入の回避を高速に行えるアルゴリズムとプロトコルを作成する。航行予測域については、ドローンが自律航行中であることを踏まえて、既に登録されているルートからある一定のマージンをもって航行予測域とし、それらを Blockchain のプロトコルを用いて他の機体に承認を求める。他の機体は、自身の航空予測域と時間ベースの予測位置から、可能かどうかの承認をし、返送する。承認が得られれば予約されたものとして、そのまま飛翔させるが、不可能であれば、ルートプランを変更し(遅延または回避)再度承認を得るようにする。これらの過程を踏まえながら、1 秒毎に合意形成を繰り返すことで、あらかじめ空域を分割する形での衝突回避を行う。

3. 研究の方法

研究当初、本研究で明らかにすべきこととして設定した問題は、以下の 3 点である。

1. 10ms 以内に飛行する空域の合意形成を行うリアルタイムな分散合意形成アルゴリズムと通信環境の構築
2. Blockchain 技術を応用した空域の売買を行う形の分散型飛行計画共有システムの構築
3. Blockchain より情報を集約する形の、地域利用サイズのドローン航行集中管理・監視システムの構築

1 および 3 の項目については、特に情報の伝搬に対して、少なくとも 1 秒以内には全体に情報が伝搬できるようにすることが一つの目標点となる。このために、ローカルな合意形成では、通信路を P2P で接続することを想定している。なお、この時のブロックは空域であり、飛行予定と航路のバックをブロックとして連結化する。また、2 および 3 の航行範囲の設定については、特にリアルタイム性は必要ないと考えられるため、Blockchain 技術をそのまま応用して構築を進める予定である。また、本研究では、実証試験を段階的に進める。項目 1 に対して、大学内の空間を用いて、複数ドローン飛行の空域シェアの合意形成を行う研究を実施する。その上で、項目 2 および 3 のようなユースケースの時に、実際に利用可能かどうかを調査する。

実際に本研究で明らかにした項目は、以下のとおりである。

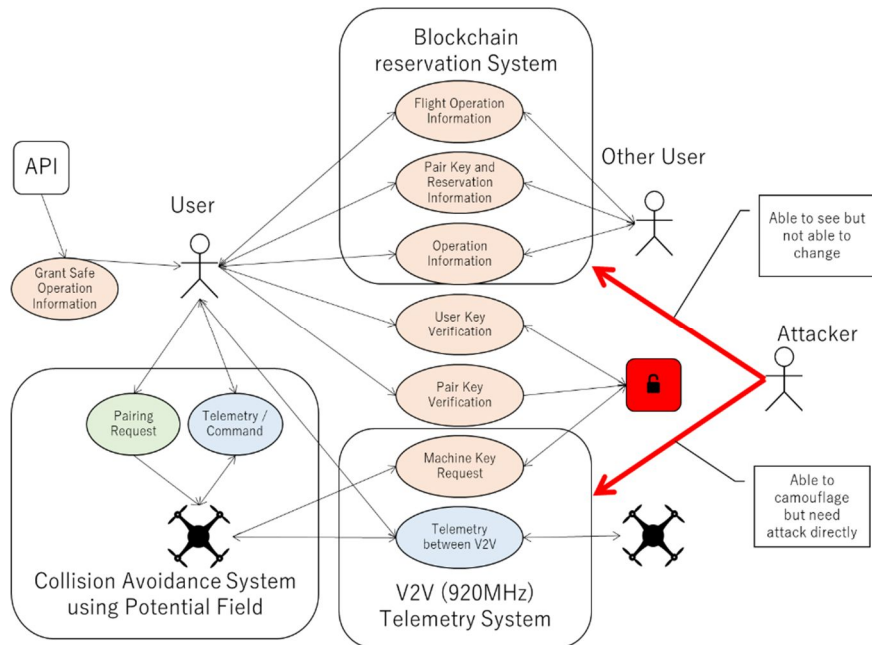


Figure 1. Our proposal for the design and use case of server-less distributed UTM

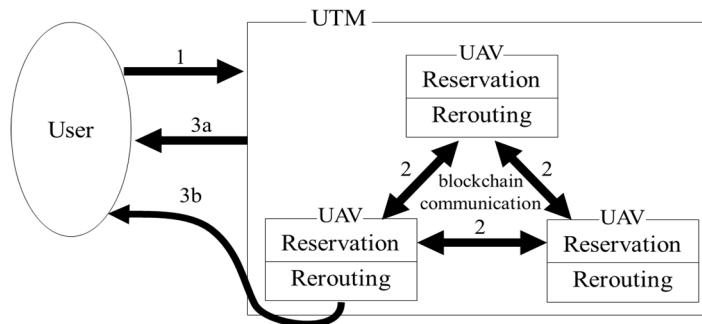


Figure 2. System architecture.

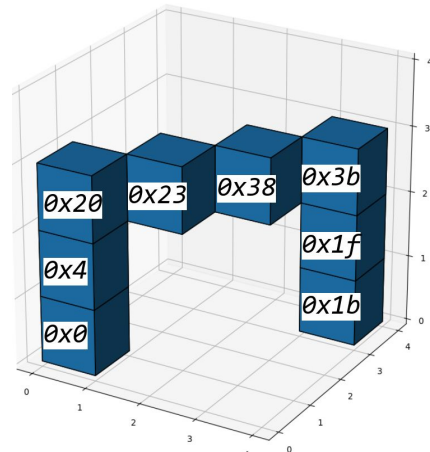
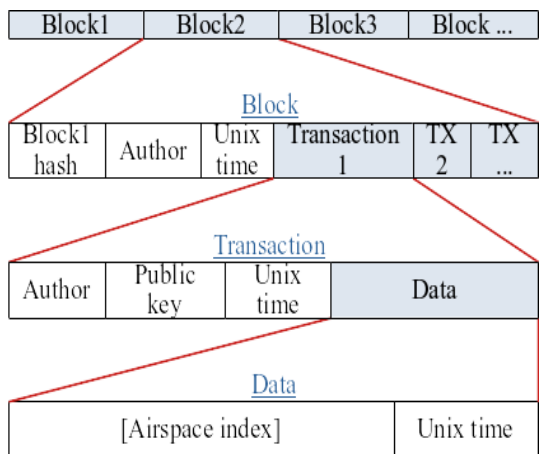


Figure 4. Example of reserved routes and encoded data.

Figure 3. Blockchain data structure.

1. 予約時点における空域の合意形成を 1 秒間に 1000 トランザクションとして設定し、それを充足する予約システムの構築
2. Blockchain 技術を応用した空域の売買を行う形の飛行計画共有システムの構築
3. Blockchain により共有されたデータを用いた、Reject された経路の自律再構築・予約システムの構築

これらのシステムが構築可能か、実用可能かの検証を行った。

4. 研究成果

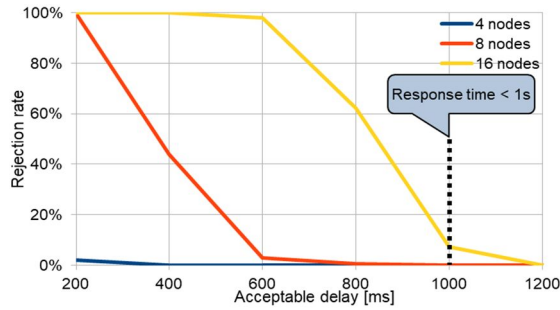


Figure 5. Rejection rate of the evaluation of the reservation system.

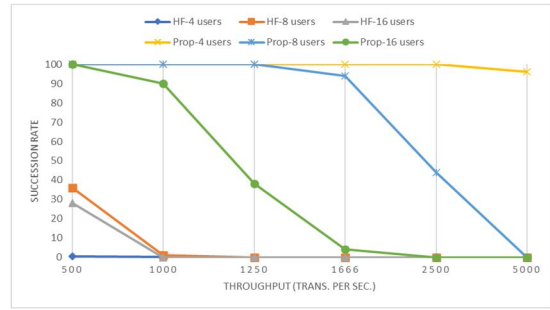


Figure 6. Comparison between Hyperledger and our original blockchain implementation

研究成果として、研究の方法に挙げている3つの項目すべてを充足したシステムを構築し、シミュレーションによる実験を行った。

Figure1は今回の構成で構築した予約システムのパートの位置を上部に、また、動態監視のための部分として、それぞれ下部の2つの部分をそれぞれ別システムとして構築している。Figure 2は我々の予約システムの大枠の構成である。Figure 3. はBlockchainでやり取りされるデータの構造、Figure 4. は空域の共有の形として、占有格子とOcTreeを用いてバイナリ化した図を示す。2018年の研究では、BlockchainのAPIとしてHyperledgerを使用して構築した。この時点では、スループットは1秒辺り10件程度であった。2020年発表時点では、Raspberry Pi上にRust言語を用いて独自実装を行い、1秒辺り1000件のトランザクションを処理することができることを確認した。(Figure 5, 6)また、空域利用がOcTreeを用いた3D占有格子の形で共有されていることから、これを用いた経路の再構築を実装し、3秒程度で再度予約し直すことができることを可能とした。これは、実際の利用シーンにおいて、特定のスタートからゴールまでの経路を予約しに行ったときに、10秒以内で予約が完了できることを意味するため、十分に実用に足ることを実証した。

また、その他の場所においても、動的管理のための通信システムの実装やCollision Avoidance等を行う手法の提案を当該研究で行い、動態管理を含めたUTMとしてのシステム構築を行うことができた。

本研究は、ICUAS2018、ICUAS2021のそれぞれの国際会議で成果を発表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yaguchi Yuichi, Tamagawa Kyota | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 A waypoint navigation method with collision avoidance using an artificial potential method on random priority | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics | 6. 最初と最後の頁 278 ~ 285 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-020-00583-w | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichi Yaguchi |
| 2. 発表標題 A Design of Server-less Distributed UTM System |
| 3. 学会等名 ICIUS2019（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kyota Tamagawa, Yuichi Yaguchi |
| 2. 発表標題 Waypoint Correction Method for Collision Avoidance with Artificial Potential Method on Random Priority |
| 3. 学会等名 ISAROB2018（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 玉川 京汰, 矢口 勇一, 井上 千徳 |
| 2. 発表標題 ポテンシャル法を用いた衝突を回避する Waypoint の補正法, |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuichi Yaguchi |
| 2. 発表標題 Flight Plan Management System for Unmanned Aircraft Vehicles Using Blockchain |
| 3. 学会等名 ICUAS2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 中野 冠 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 NTS | 5. 総ページ数 290 |
| 3. 書名 空飛ぶクルマ 空のモビリティ革命に向けた開発最前線 | |

〔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 |
|---------|---------|
|---------|---------|