

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32665  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K11875  
研究課題名（和文）スマートメーター無線デバイスを用いた小型無人機移動の最適経路制御方式の確立

研究課題名（英文）Establishment of Optimal Route Control System for Small Unmanned Aircraft Movement using Smart Meter Wireless Devices

研究代表者  
上田 清志（UEDA, Kiyoshi）  
日本大学・工学部・教授

研究者番号：00738429  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ドローン等の小型移動機による宅配の航空保安無線施設として、無線デバイスを利用し、住宅が密集した危険な地区の上空（住宅密集地）を極力避けた安全で効率的な航行経路をマッピングした仮想的無線マルチホップネットワークを構築する最適経路制御方式を確立した。各ノードが自らの危険度を他ノードとの相互作用で自律的に判定する論理や学習方法や、小型移動機の衝突回避や経路上のノード・リンク異常に対する迂回経路構築法を確立した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義、社会的意義は、無線マルチホップネットワークにおいて、物質の移動へスコープを広げ、従来にない安全性の評価尺度に着目した経路構築技術の確立にある。これは、全家屋の無線デバイスノードによる膨大なネットワーク規模でありスケーラブルな分散処理方式でなければならない。さらに、各ノードの安全性推定にむけて自律分散的に無線ネットワーク情報から危険度を自動判定する機械学習アルゴリズムや、各ノードが複数の小型移動機位置から衝突予測し動的に経路制御するアルゴリズムを新たに確立した。本研究成果により、多数の小型移動機が安全に航行し、小型移動機による宅配を全国各地へ普及できる。

研究成果の概要（英文）：As air radio facility for home deliveries by UAVs, optimum routing methods were established that uses radio devices to construct a virtual wireless multi-hop network with mapped safe and efficient navigation routes, avoiding as far as possible dangerous areas over densely populated areas. Logic and learning methods were established for each node to autonomously determine its own danger level through interaction with other nodes, as well as a diversion route construction method to avoid collisions of UAVs and to deal with node and link anomalies on the route.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：重み付けダイクストラ法 経路ロック方式 輻輳抑制航行制御分散管理手法 多階層ネットワーク構築方式 無線ジオフェンス飛行禁止領域回避軌道制御手法 ノード自律危険度評価方式 複数経路探索法 中継機能配置ノード選択アルゴリズム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

アマゾンによるドローン等の小型移動機の目視外飛行による宅配検討の公表を皮切りに、ウォルマート、グーグル、国内では楽天やヤマト運輸などが実現に向けた研究や実験を進めている。アマゾンはドローン配送サービス「Prime Air」がFAA(米連邦航空局)から認可を受け米国上空でドローン配送のトライアルを始めている。現状は移動機数も少ないので、許可された空域を各機体がGPSにて現在位置の緯度経度を把握しつつ宛先位置への設定されたルートを行飛行している。全国各地に普及するために、全国各家屋に随時実施されても安全に航行できるよう、さらなる運行管理システムや衝突回避技術の高度化・知能化が求められている。今後、数多くの移動機が運航されるためには、航空機の通常の航空路のように航空保安無線施設を結んだ経路を航行することが想定される。

上記問題点の解決方法として、申請者は、電力量情報を無線マルチホップで電力会社へ転送するために全国に設置され確実に相互通信できる「次世代電力量計」スマートメーターの無線デバイスを、小型移動機の航空保安無線施設として用い、それを小型移動機がたどることを考えた。しかし、この方法で経路ナビゲーションネットワークを構築すると、従来のMANET技術では最短経路が構築され、航行の安全性が考慮されなくなる。従って、住宅が密集した危険な地区の上空(住宅密集地)を極力避けた安全で効率的な無線マルチホップネットワークを構築する最適経路制御方式の確立が必須である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、図1の実線で示した、航行経路をマッピングした仮想的無線マルチホップネットワークを構築し、それを小型移動機がたどるよう、最適経路制御方式を確立することである。

#### (1) MANETをベースにした最適経路構築法

MANETのリアクティブ型プロトコルの代表例であるAODVとプロアクティブ型プロトコルの代表例であるOLSRをベースに、住宅が密集した危険な地区の上空(住宅密集地)を極力避けた安全で効率的な経路を構築する。

#### (2) 各ノードの機能高度化により最適経路構築効率の向上

各ノードが自律的にその危険度を判定する方式、多段階の危険度を定義することによる複雑な実環境への適用、中継機能の起動ノード選択による経路構築メッセージトラフィック効率化など、各ノードの機能高度化により、より効率的な経路構築法を確立する。

#### (3) 様々なサービスへの展開

宅配等の運搬の経路構築のみならず無線デバイスが設置された環境での様々なサービスへも適用できる方式も目指す。

### 3. 研究の方法

小型移動機が安全に航行できる経路となる、住宅密集地外ノード間をつなぐ転送ネットワークと、各住宅密集地内ノードから転送ネットワークへの最短ルートのアクセスネットワークを構築する、多階層ネットワーク構築手順を明らかにする。構築されたネットワーク上の小型移動機の位置制御法を確立する。宅配経路の無線マルチホップネットワーク構築の基本方式を確立する。

各ノードが、相互通信によりノード間距離、近隣ノード密度、経路利用履歴等から住宅密集地内の一般ノード、住宅密集地外の転送ノード、複数段階の危険度を判定する分散アルゴリズムを明らかにする。危険度の段階数や各段階の判定閾値は各地域によって異なると考えられるため、地域別に住宅密集地情報などを学習し判定論理を最適化する方法を考案する。これにより、他ノードとの相互作用で自律的に各ノードが自らの危険度を認識する判定論理や学習方法を確立する。各ノードの自律分散動作によって構築する経路制御プロトコルが実際に動作するか検証する。

小型移動機のネットワーク上の位置から両機が自律動作で衝突回避経路を探索するアルゴリズムや、無線接続不安定などにより経路上のノード・リンク故障発生時、小型移動機が到達しているノードから新たに宛先家屋ノードへのルートリクエストを行い、最適経路を再構築する方法を考案する。小型移動機の衝突回避や経路上のノード・リンク異常発生に対応する迂回経路構築も可能な経路制御方式を確立する。

### 4. 研究成果

#### (1) MANETをベースにした最適経路構築法に関する研究成果

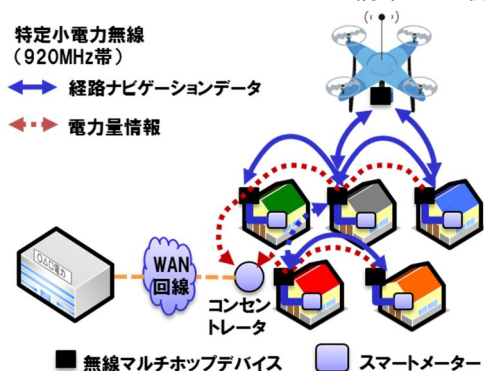


図1. 無線マルチホップネットワークによる経路ナビゲーションイメージ

無線マルチホップネットワークで最短ルートを構築するルーティングプロトコルの代表例であるリアクティブ型の AODV をベースに、図 2 に示す最短距離と住宅集中地区ノード経由数から最適 RREQ を選択する方法と、プロアクティブ型の OLSR をベースに、図 3 に示す住宅密集地にあるリンクのコストを高めた重み付けダイクストラ法を用いることにより危険な住宅密集地を極力避けつつ極力距離の短い経路が構築できる無人移動機宅配経路構築法を確立した。

複数の移動機で経路構築を行うと、同じノードやノード間のリンクを使用されることで移動機同士が衝突する危険がある。そのため、プロアクティブ型の OLSR をベースに、同じノードを使用しない経路を構築する経路ロック方式と同じリンクを使用しない経路を構築する方式を確立した。同じノードを使用しない、同じリンクを使用しない経路構築方式では、試用できるノード・リンクが減少し経路構築失敗する確率が上がってしまう。そこで、航行高度の多階層ネットワーク構築方式を確立した。AODV をベースにしたプロトコルにも、リンクをロックする RK メッセージを追加し、多階層の仮想リンクを各ノードが管理する方式を確立した。ネットワークシミュレータにて提案プロトコルの有効性を評価確認した。

さらに、線形計画法により、最適経路の厳密解を求める方式を確立し、AODV や OLSR をベースにしたルーティングプロトコルによる提案方式での経路の特性を明らかにした。

### (2) 各ノードの機能高度化により最適経路構築効率の向上に関する研究成果

図 4 に示すように、各ノードが、相互通信によりノード間距離、近隣ノード密度、経路利用履歴等から住宅密集地内の一般ノード、住宅密集地外の転送ノード、複数段階の危険度を判定する分散アルゴリズムの基本方式を確立した。さらに、近隣ノード数に依存して各ノードの危険度を複数段階に判定し、多段階の危険度をもとにして、より安全で効率的な航行経路を構築する最適経路制御方式を確立した。

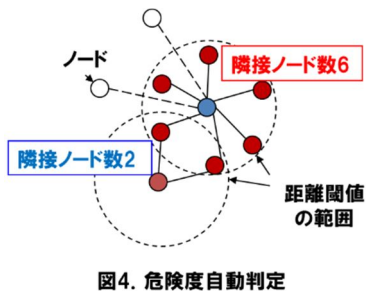


図4. 危険度自動判定

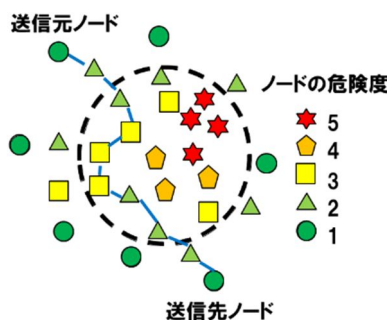


図5. 多段階危険度による最適経路構築

高密度に無人移動機が飛び交う環境において、無人移動機の輻輳を抑制し、航行品質を保証するため、多数の無人移動機が無線マルチホップネットワーク上に流入した際、各中継ノードの待ちキューのフロー制御から、無人移動機の輻輳を抑制し、航行品質を保証するための航行制御分散管理手法を確立した。

宅配サービスの要件を満たしつつ複数経路から最適経路の選択が可能となるように、無人移動機の移動時間と安全性を考慮した AODV ベースの複数経路構築法を確立した。具体的には、RREQ メッセージを移動時間と安全性とで評価し複数保存し、評価前に不必要な RREQ メッセージをフィルタリングする方式により実用的な方式を確立した。

### (3) 様々なサービスへの展開に関する研究成果

危険な飛行禁止区域を無人移動機が航行することがないように、経路構築以外にも無線ジオフェンスを活用することも発案し、無線ジオフェンスによる飛行禁止領域回避のための無人移動機の軌道制御手法を確立した。

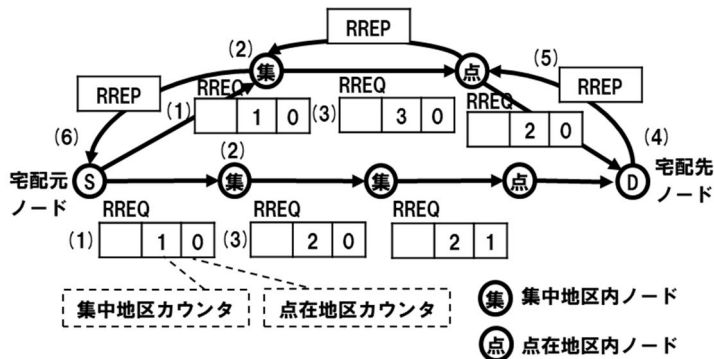


図2. AODVベースの最適経路構築法

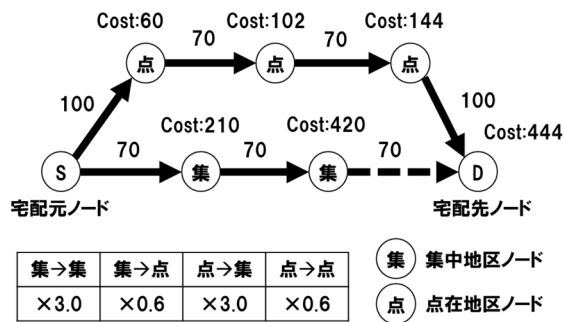


図3. OLSRベースの経路構築法

無人移動機経路構築する無線マルチホップネットワークの中継機能をすべてのノードにもたせるのではなく、OLSR の MPR 集合方法を応用した選定手法を確立した。

また、Docker を用いたユーザ PC コンピューティングシステムによる無線マルチホップネットワークシミュレーションの効率的実行方法に着手した。

さらに、無線デバイスでリアルタイムに FingerPrint を更新する室内の位置測定方式を確立した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Kokubun Yuto, Yamazaki Taku, Yamamoto Ryo, Miyoshi Takumi, Ueda Kiyoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 AODV-based routing methods for UAVs travel time and safety	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 157 ~ 163
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0196	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 -
1. 著者名 Gunji Haruki, Yamazaki Taku, Yamamoto Ryo, Miyoshi Takumi, Ueda Kiyoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Methods for constructing collision avoidance route for multiple unmanned aerial vehicles using OLSR-based link hierarchization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 7 ~ 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0133	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 -
1. 著者名 Gunji Haruki, Yamazaki Taku, Yamamoto Ryo, Miyoshi Takumi, Ueda Kiyoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Proactive route construction for UAV delivery considering distance and safety using wireless multi-hop network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 411 ~ 416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0053	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 -
1. 著者名 Kokubun Yuto, Yamazaki Taku, Yamamoto Ryo, Miyoshi Takumi, Ueda Kiyoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Reactive route construction for UAV delivery considering travel time and safety using wireless multi-hop network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 405 ~ 410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0054	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23件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 大川 柁音, 山崎 託, 山本 嶺, 三好 匠, 上田 清志
2. 発表標題 リンク階層化を用いたAODVベースの複数無人移動機衝突回避経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原口 隆彦, 片田 寛志, 山崎 託, 三好 匠, 山本 嶺, 上田 清志
2. 発表標題 空域の混雑と利用者の公平性を考慮したUAV分散管理手法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shuto Ohkawa, Kiyoshi Ueda, Takumi Miyoshi, Taku Yamazaki, Ryo Yamamoto
2. 発表標題 Selecting Nodes to Operate Relay Function for UAV Routing in Wireless Multi-Hop Network
3. 学会等名 IEEE, ICCE2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shuto Ohkawa, Taku Yamazaki, Ryo Yamamoto, Takumi Miyoshi, Kiyoshi Ueda
2. 発表標題 Method for Constructing Collision Avoidance Route for Multiple UAVs Using AODV-Based Link Hierarchization
3. 学会等名 IEEE, ICCE-Asia2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 范 哲宣、三好 匠、山崎 託、上田 清志
2. 発表標題 無線信号源探索を用いた被災者発見のためのUAV動的ルーティング手法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原口 隆彦、片田 寛志、山崎 託、三好 匠、山本 嶺、上田 清志
2. 発表標題 ネットワーク技術を応用したUAV分散管理手法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國分 悠斗、山崎 託、山本 嶺、三好 匠、上田 清志
2. 発表標題 無人移動機の移動時間と安全性を考慮した複数経路構築法の多様なノード配置による評価
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 郡司 遥輝、山崎 託、山本 嶺、三好 匠、上田 清志
2. 発表標題 無線マルチホップネットワークを用いた無人移動機経路構築における中継ノードの選定手法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 郡司 遥輝、舩曳 信生、Hein Htet、Lynn Htet Aung、山崎 託、山本 嶺、三好 匠、上田 清志
2. 発表標題 Dockerを用いたユーザPCコンピューティングシステムによる無線マルチホップネットワークシミュレーションの効率的実行
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 郡司 遥輝、上田 清志、三好 匠、山崎 託、山本 嶺
2. 発表標題 リンク階層化を用いたOLSRベースの複数無人移動機経路構築法の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國分 悠斗、上田 清志、三好 匠、山崎 託、山本 嶺
2. 発表標題 無人移動機の移動時間と安全性を考慮したAODVベースの複数経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原口 隆彦、片田 寛志、山崎 託、三好 匠、山本 嶺、上田 清志
2. 発表標題 ネットワーク技術を応用したUAV分散管理手法の性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Haruki Gunji、Kiyoshi Ueda、Takumi Miyoshi、Taku Yamazaki、Ryo Yamamoto
2. 発表標題 Method for Constructing Collision Avoidance Route for Multiple UAVs Using OLSR-Based Link Hierarchization
3. 学会等名 ACM, ICCCM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國分 悠斗、上田 清志、三好 匠、山崎 託、山本 嶺
2. 発表標題 無人移動機の移動時間と安全性を考慮したAODVベースの経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郡司 遥輝、上田 清志、三好 匠、山崎 託、山本 嶺
2. 発表標題 リンク階層化を用いたOLSRベースの複数無人移動機衝突回避経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsumi Nagai、Kiyoshi Ueda、Takumi Miyoshi、Taku Yamazaki、Ryo Yamamoto
2. 発表標題 Indoor Positioning Using BLE Beacons for Care History Collection
3. 学会等名 IEEE, ICIET2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩本 怜子, 三好 匠, 山崎 託, シルバーストン トーマス, 山本 嶺, 上田 清志
2. 発表標題 災害時における事前取得位置情報に基づいたUAV移動基地局の経路決定法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原口 隆彦, 片田 寛志, 山崎 託, 三好 匠, シルバーストン トーマス, 山本 嶺, 上田 清志
2. 発表標題 高密度UAV環境における地上ビーコンを用いた分散管理手法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百枝 和哉, 三好 匠, 山崎 託, シルバーストン トーマス, 山本 嶺, 上田 清志
2. 発表標題 無線ジオフェンスによる飛行禁止領域回避のためのUAV軌道制御手法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Kokubun, Kiyoshi Ueda
2. 発表標題 Route Construction Method Considering Travel Time and Safety of UAV Using Wireless Multi-Hop Network
3. 学会等名 STSS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruki Gunji, Kiyoshi Ueda
2. 発表標題 Route Construction Method Considering Distance and Safety of UAV Home Delivery Using Smart Meter Wireless Device
3. 学会等名 STSS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國分 悠斗, 上田 清志
2. 発表標題 無線マルチホップネットワークを利用した無人移動機の移動時間と安全性を考慮した経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 郡司 遥輝, 上田 清志
2. 発表標題 無線マルチホップネットワークによるOLSRベースの無人移動機宅配経路構築法
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021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
研究 分担 者	三好 匠	芝浦工業大学・システム理工学部・教授	
	(Miyoshi Takumi)		
	(40318861)	(32619)	

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
---------	---------