

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年8月5日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350450

研究課題名(和文) 自律無人飛行体を用いた遭難者救助支援システムの研究・開発

研究課題名(英文) Research and Development of UAV-based Search and Rescue Support System

研究代表者

金岡秀(Kim, Kangsoo)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・グループ長

研究者番号：30396907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では山岳や海上における遭難事故を想定し、遭難者を迅速に発見することで捜索救助を支援する自律無人飛行体の実用化に向け、試験機としてのテストベッドシステムの開発および最良の捜索飛行を実現する誘導・航法・制御について研究・開発を行った。スマートフォンやタブレット等の移動型無線情報端末から発せられる電波は発信源を中心とする球面上に等電界面を形成する。こうした条件から端末の存在が識別できる閾値以上の等電界面群で構成される搜索域を最短時間でカバーする飛行体の航法として、地形に適応する最小高度飛行誘導法を開発し、飛行試験に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、自律無人飛行体による遭難者の早期発見に向け、最小高度飛行により最短時間で全搜索域をカバーする最適誘導航法を開発した。本最適誘導航法は山岳地域など急峻な地形の上空でも地面との衝突を回避しながら、最小高度で飛行できる航路点を導出する新しい概念の誘導航法である。こうした誘導航法を実装した自律無人飛行体による遭難者搜索は、より迅速な遭難者の発見につながり、遭難事故から大切な命を守る救難活動への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed a testbed system for UAV-based search and rescue application. Not only hardware platform, but also guidance, navigation, and control strategies for our system in order to realize the optimal aerial survey have been derived. Roughly speaking, a radio wave emitted from a mobile information terminal such as smartphone or tablet PC forms a spherical isoelectric surface centered on that terminal. Therefore, area to be searched is determined as the superposed region of all possible individual isoelectric surfaces. In order to cover a given search region in the shortest flight time, a UAV has to fly over the region as low altitude as possible. In our research, we developed a simulation-based optimal guidance for the UAV flight with minimal altitude and actually applied it to a flight test using our testbed.

研究分野：制御、航法、最適化、機械力学

キーワード：自律無人飛行体 誘導・航法・制御 最短時間 最小高度 地形 遭難 搜索

### 1. 研究開始当初の背景

(1) スマートフォン、携帯電話やタブレットなど移動型無線情報端末の近年の普及は驚異的とも言えるもので、もはや一人一台の時代を迎えたと言っても過言ではない。移動型無線情報端末は時空間の制約を受けない通信手段であることから、災害、遭難、事故や事件など、非常時の緊急通信・通報手段として重要な役割を担っている。一方、近年、山岳遭難事故は増加の傾向にあり、毎年数百人規模の犠牲者が出ている。

(2) 前述のように遭難事故において移動型無線情報端末は現在、有力な緊急通信・通報手段となっており、実際に遭難者自らの通報で救難活動が実現した事例は少なくない。ところが、移動型無線情報端末による通信は、無線通信を中継する基地局を経由してこそ成立するもので、基地局からの通信電波の届かない圏外域では、通信手段としての機能を失ってしまう。遭難事故の現場となる山岳地域は、圏外域の代表例である。

(3) こうした問題の解決に向け、本課題では山岳地域等の遭難現場に空中から容易に接近できる自律無人飛行体(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)をプラットフォームとした遭難者救助支援システムの研究・開発を行った。

### 2. 研究の目的

(1) スマートフォン、携帯電話やタブレットなど移動型無線情報端末は常に持ち主に携帯される特徴があり、遭難事故において移動型無線情報端末の所在位置を検出すれば、遭難者の発見につながる可能性が非常に大きい。本課題では、山岳地域で発生した遭難事故に対し、遭難者を速やかに発見することで遭難者の命を守る救助活動の実現に向け、移動型無線情報端末からの発信電波を受信し、その所在位置を検出する自律無人飛行体の試験機システムを研究・開発する。

(2) 山岳遭難はその発生現場が遭難者の身の安全に極めて過酷な環境であり、遭難者の命を守るためには遭難者の所在位置検出から始まる速やかな救難活動が不可欠である。本研究では空中捜索による迅速な遭難者発見の実現に向け、捜索域の地形に最良の方策で対応することで、最短時間で捜索飛行を完了する飛行体誘導航法を開発し、その制御に適用する。

### 3. 研究の方法

(1) 前述のように遭難者の早期発見は救難活動の成否を分ける最重要課題の一つである。遭難事故現場に投入される自律無人飛行体は全捜索域を‘スキャンする’ようにカバーし、遭難者の所持している移動型無線情報端末から発せられる電波の受信を試みる。多くの移動型無線情報端末には現在ギガヘル

ツ帯域の電波が使われているが、この帯域の電波に地形による回折の影響は限定的で、任意の空中定点における電界強度は自由空間減衰に支配される。従って、こうした移動型無線情報端末を発信源として発せられた電波は、発信源を中心とする球面上に等電界面を形成する。電波受信により端末の存在を識別するためには受信位置での電界強度がある閾値以上でなければならないが、上記の物理・環境条件から任意の空中定点における電界強度は発信源からの距離のみの関数となる。端末の存在が識別可能な電界強度閾値に対応する発信源からの距離を  $d_0$  とすれば、任意の空中定点がカバーする地上の可識別域は図1に示すような領域となる。本研究の提案手法、すなわち飛行体による電波受信で遭難者捜索を行う場合、最短時間で捜索を完了するためには可識別域を最大限確保する飛行を行う必要があるが、それはなるべく地面に接近する低高度飛行で実現する。本研究では地形情報と飛行体ダイナミクスをもとに、任意の高度制約条件を満たしながら最小飛行高度で地面を追従できる飛行体誘導航法を開発した。最急降下法(steepest descent method)のアルゴリズムをベースとする本誘導航法の適用で最適の航路点(waypoint)が導出されるが、この航路点を目標(reference)として飛行体を制御することで、上記の最小高度飛行が実現する。

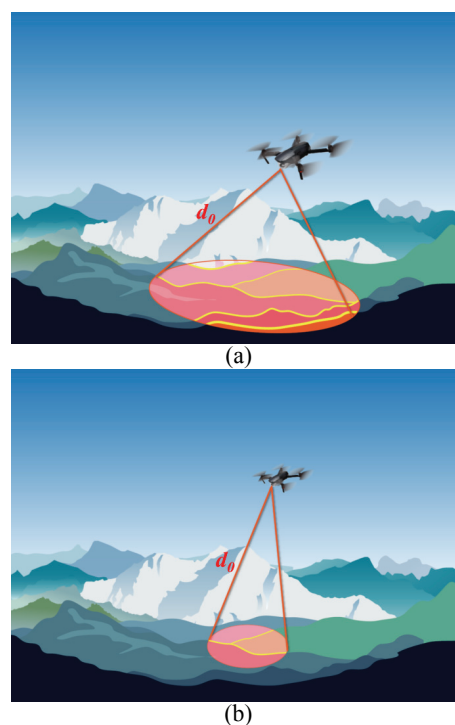


図1. 飛行高度による端末所在の可識別域:  
(a) 低高度 (b) 高高度

(2) 本課題では研究・開発成果の実用化に向けたフェージビリティ・スタディの一環として、自律無人飛行体の試験機システムを開発した。機体の型式としては、構造が単純でペイロード収納に有利であることを最優先に考慮し、移動速度、機体制御、搭載重量の面

で最も適すると考えられるクワッドコプター(quadcopter)を選定した(図2)。特定のミッションを想定した飛行体システムを開発する際、機体開発はミッションの遂行に必要な十分な機能を備えるよう設計から始めるのが一般的なアプローチである。ところが、こうしたアプローチは費用やエフォートに大きな負担を伴うため、限られた予算枠と可用エフォート内での実施が要求される本課題には適切でない。こうした事情から、本課題では市販のクワッドコプタープラットフォームを導入し、装着センサー等の改造を経て試験機システムを開発した。

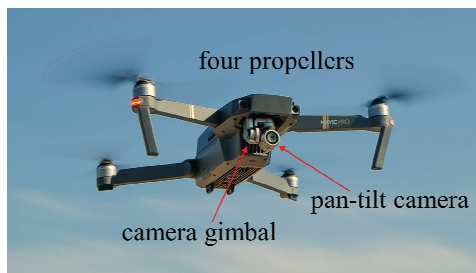


図2. 試験機システムプラットフォームとして導入したクワッドコプター及び搭載装置

(3) 所在位置特定手法の開発: 当初、本課題では端末発信電波の受信による遭難者の所在位置特定、すなわち発信源定位の方法として、GPSと非GPS測位の両方で検討を行った。ところが、移動型無線情報端末によるGPS測位の情報は個人情報に該当するため、警察など公安当局の許可がなければその開示は原則法律で禁じられている。こうした事情から、本課題では非GPS測位のみを対象として絞り、更に精度は高くないが比較的単純な機構の装置でも所在位置の推定が可能な電界強度計測による位置推定を、遭難者の所在位置特定手法として採択した。

#### 4. 研究成果

(1) 最適誘導航法による搜索飛行: 空中搜索による遭難者の早期発見に向け、最短時間で全搜索域をカバーする最適誘導航法を開発した。前述のようにこうした飛行体による最短時間搜索は、最小高度飛行で実現する。平野部のように平らな地形の場合、安定した高度制御により、例えば1m以下の超低高度で自律無人飛行体を飛行させることはさほど難しくない。ところが、山や谷などが形成する起伏に富んだ地形の上空では、急峻な地形を飛行体が追従しきれず、低高度飛行は地面との衝突を引き起こす可能性が高い。自律無人飛行体の飛行はラジコン等による人間の操縦に頼らない自動飛行を基本とする。自動飛行の際には予め飛行経路を入力しておく必要があるが、飛行経路の定義に最も一般的に使われるのが、飛行体が通過すべき地球固定座標系上の座標点、いわゆる航路点(waypoint)である。航路点は三つの座標で定義されるが、一般に水平面内の緯度、経度に加え、鉛直方

向におけるある基準位置からの距離、すなわち高度が使われる。飛行体が実際に描く飛行軌道は航路点の拘束をもとに飛行体の動力学的特性により決まる。従って、自動制御装置で動作する自律無人飛行体の場合、飛行軌道は事実上航路点により全て決まることになる。本研究で開発した最適誘導航法は地形情報と飛行体ダイナミクスの数値モデルを用い、山岳地域など急峻な地形の上空でも地面との衝突を回避しながら、最小高度で飛行できる航路点を生成する。図3に最適航路点生成アルゴリズムを示す。

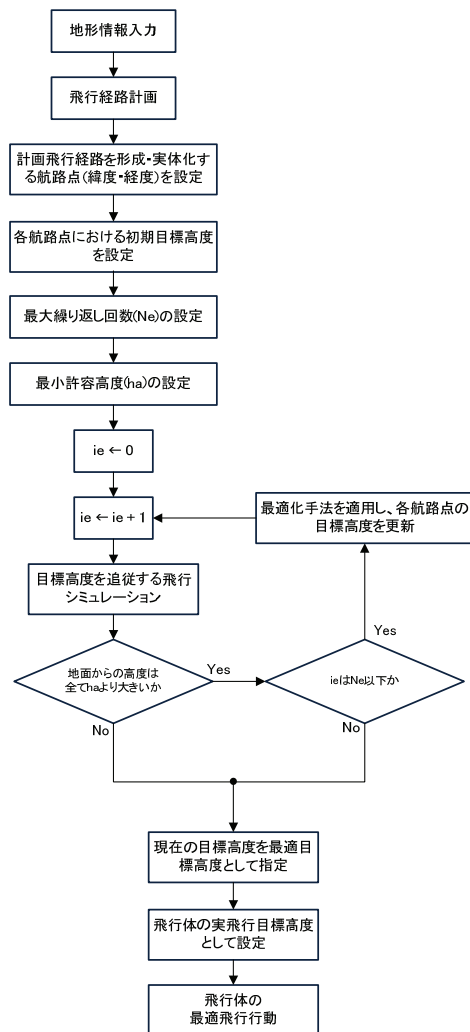


図3. 最適航路点生成アルゴリズム

図4に本研究で開発した最適誘導航法により導出した最適航路点の一例を示す。約1.6mの高低差のある地形に対し、許容最小高度0.6mの制約条件を守りながら、最小飛行高度で地形を追従できる航路点を導出した。最適化は各航路点区間に対して行われ、任意の初期高度に設定された航路点は最急降下法により繰り返し更新され、最適航路点に収束する。本最適誘導航法の適用においては、対象の飛行体が前後移動のない上昇・下降は行わず、上下移動は必ず巡航状態で行うことと仮定し、制約条件として加えた。図4で初期航路点は最上部に位置する薄い緑の丸印で表示

されていて、最急降下法により更新されるにつれ航路点は濃い緑、紫へと徐々に色が変わって行く表示となっている。最下部に位置する赤の丸印は収束解として得られた最適航路点を表す。

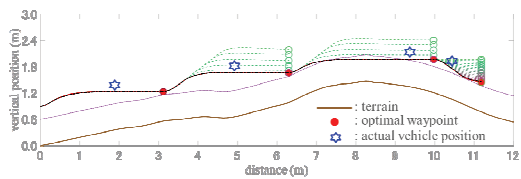


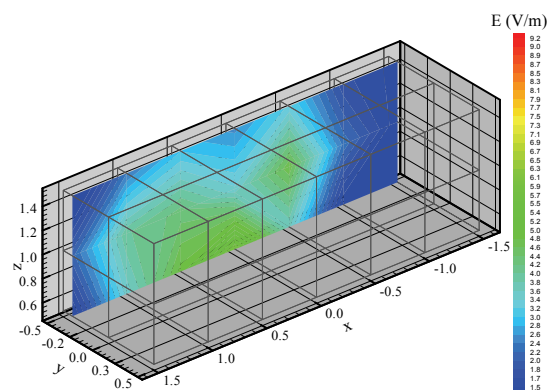
図 4. 最適誘導航法から導出した最適航路点および試験機の飛行中空中位置

図 5 に試験機システムを用いた飛行試験の様子を示す。最適誘導航法による飛行シミュレーションから得た最適航路点を適用した飛行試験では、設定した 0.6 m の許容最小高度条件を満たし、試験機が地面との衝突を回避しながら最小高度で地形に対応する超低高度飛行を行うことを確認した。音響測距とジャイロ情報から得られた試験機の飛行中の空中位置 (星印) を、図 4 に表示する。



図 5. 飛行試験の様子: 最適航路点を追従し、0.6 m の許容最小高度で斜面を越えている

**(2) 電界強度による所在位置推定:** 図 6 に実測により得られたスマートフォン端末から発せられる電波の空間電界強度を示す。発信源、すなわちスマートフォンが置いてある位置が原点となる。前述のとおり本研究では移動型無線情報端末の所在位置推定に代表的な非 GPS 測位手法の一つである電界強度計測による発信源定位を用いる。図 6 から発信源の付近では電界強度が著しく増加しており、その範囲が約 2.0 m 前後であることが分かる。従って 2.0 m 前後の距離で電界強度が高精度で計測されれば、発信源、すなわち移動型無線情報端末の所在位置を比較的正確に割り出すことができる。しかし、一方、これは有力な所在位置情報を確実につかむためには 2.0 m 前後の近距離まで飛行体が発信源に接近する必要があることを意味し、超低高度飛行を可能にする高度な誘導航法技術が本課題の目標を実現する核心要素技術であることが分かる。



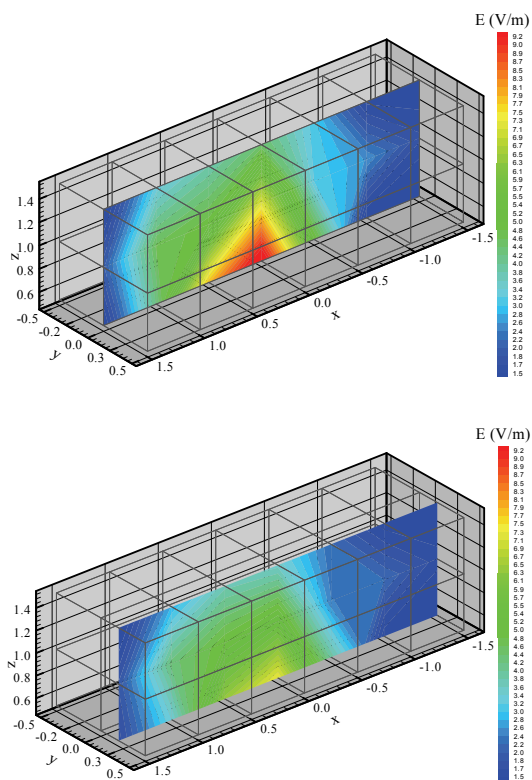


図 6. スマートフォン端末による空間電界強度

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① Kangsoo Kim and Tamaki Ura, "Navigation strategies of a cruising AUV for near-bottom survey of a steep terrain," IFAC-Papers Online, 査読有, vol. 49, issue 15, 2016, pp. 75 - 80.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.712>

② Kangsoo Kim and Tamaki Ura, "Longitudinal motion instability of a cruising AUV flying over a steep terrain," IFAC-Papers Online, 査読有, vol. 48, issue 2, 2015, pp. 56 - 63.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.010>

③ Chie Honscho, Tamaki Ura, Akira Asada, Kangsoo Kim and Kenji Nagahashi, "High-resolution acoustic mapping to understand the ore deposit in the Bayonnaise knoll caldera, Izu-Ogasawara arc," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, American Geophysical Union (AGU), 査読有, vol. 120, 2015, pp. 2070 - 2092  
DOI: 10.1002/2014JB011569

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

名称: 水中航走体の管制方法及び水中航走体の管制システム  
発明者: 金岡秀, 大和裕幸  
権利者: 同上  
種別: 特許

番号: 特許願 2017-071896 号  
出願年月日: 平成 29 年 3 月 31 日  
国内外の別: 国内

名称: 複数の水中航走体の運用方法及び複数の水中航走体の運用システム  
発明者: 金岡秀, 大和裕幸  
権利者: 同上  
種別: 特許  
番号: 特許願 2017-071965 号  
出願年月日: 平成 29 年 3 月 31 日  
国内外別: 国内

名称: 複数の水中航走体の投入方法、揚収方法、及び複数の水中航走体の投入・揚収システム  
発明者: 金岡秀, 大和裕幸  
権利者: 同上  
種別: 特許  
番号: 特許願 2017-072283 号  
出願年月日: 平成 29 年 3 月 31 日  
国内外別: 国内

名称: 水中航走体の経路設定方法、それを用いた水中航走体の最適制御方法及び、水中航走体並びに移動体の経路設定方法  
発明者: 金岡秀  
権利者: 同上  
種別: 特許  
番号: PCT / JP2016 / 086723  
出願年月日: 平成 28 年 12 月 9 日  
国内外別: 外国

名称: 水中航走体の経路設定方法、それを用いた水中航走体の最適制御方法及び、水中航走体並びに移動体の経路設定方法  
発明者: 金岡秀  
権利者: 同上  
種別: 特許  
番号: 特願 2015-240252 号  
出願年月日: 平成 27 年 12 月 9 日  
国内外別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 岡 秀 (KIM, Kangsoo)  
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・グループ長  
研究者番号: 30396907