

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06122

研究課題名(和文) 複数の無人航空機を用いたユーザ位置検出手法の研究

研究課題名(英文) Method for Detecting User Positions with Unmanned Aerial Vehicles based on Doppler shifts

研究代表者

石川 博康 (ISHIKAWA, Hiroyasu)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：20536495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) - 地上端末間で観測されるドップラーシフトを用いたユーザ位置検出手法を新たに提案すると共に、様々な飛行モデルや条件下において、ユーザ位置検出精度をドップラーシフト分布や計算機シミュレーションにより評価すると共に、UAVの飛行条件とユーザとの位置関係が位置検出精度に与える影響を表す測位精度指標として、複数のドップラーシフト観測値により形成される双曲面上のユーザ位置における勾配ベクトルの内積の余弦の絶対値を利用することを提案し、その有効性を確認している。

研究成果の概要(英文)：In the unmanned aircraft systems (UASs), several unmanned aerial vehicles (UAVs) are used to provide services over a large area. Here, the carrier frequencies of the transmitted and received signals experience Doppler shifts due to the variations in the line-of-sight velocity between the UAV and the terrestrial terminal. Thus, by observing multiple Doppler shifts from different UAVs, it is possible to detect the position of a user. This study aims to present a methodology for position detection based on the least-squares method to the Doppler shift frequencies. Further, a positioning accuracy index is newly proposed, which can be used as an index for measuring the position accurately. A computer simulation was conducted for flight route models to confirm the applicability of the proposed positioning method and the positioning accuracy index. The simulation results confirm that the parameters, such as the flight route can be optimized by using the proposed positioning accuracy index.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無人航空機システム 無人航空機 ドップラシフト 最小2乗法 ユーザ位置検出 位置検出精度 測位精度指標

1. 研究開始当初の背景

(1) 無人航空機システム

近年、世界各国で無人航空機システム (UAS: Unmanned Aerial system) の研究・開発が積極的に進められている [1]-[2]。UAS は、GPS やモニタリング用の各種センサ、コンピュータや無線通信リンクを搭載した自律飛行を行う無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) と地上装置などからなるシステムの総称であり、日本では、東日本大震災における福島原子力発電所の被害状況の撮影や放射線等の調査に際して UAV が利用され、UAS の災害時における有効性が示されている。また最近では、UAV を用いた大規模災害時の情報収集や一時的な無線ネットワーク機能の提供など、耐災害通信システムを構築するツールとして UAS が期待されており、その周波数帯として 2~5GHz の利用が想定されている [1]。

(2) 無人航空機による無線中継

UAS では、時速 40~100km/h で高度 150~1,000m の上空を旋回することを想定しているため、通信機能を搭載した UAV と地上の通信用端末との間では、送受信信号の搬送波周波数にドップラーシフトが生じる。このドップラーシフトの大きさや変化量を観測することにより、UAV と地上端末の位置関係を検出することができる。ここで、一般に携帯電話やスマートフォンには GPS 機能が搭載されており、携帯電話システム独自の位置検出機能も併用して精度の高い端末位置の特定が可能であるが、地震や災害等で基地局機能がダウンした場合、端末を保有するユーザの位置検出をネットワーク側から行うことは不可能となる。

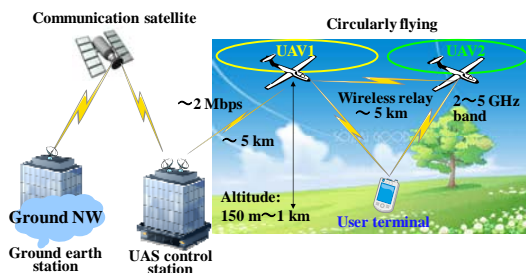


図1 UAVを用いた位置検出システム

2. 研究の目的

(1) UAV を用いた位置検出手法の提案

前述した UAS において、通信機能が搭載された端末をユーザが保有していれば、例えばトーン周波数 (CW 波) を端末から UAV に送信することにより、UAS の地上局側で通信回線に含まれるドップラーシフト及びその変化量を複数の UAV 経由で取得することによって、災害発生時や遭難時などの非常事態においても、端末位置の検出を行うことが可能となる。なお、ユーザの位置検出手法としては、周回衛星を用いた GPS などの衛星測位システム

ム、携帯基地局や無線 LAN のアクセスポイントからの信号を用いた測位方式等が実用化されているが、何れも測定距離に基づく手法であり、ドップラーシフトを用いた位置検出手法は検討されていなかった。そこで本研究では、災害時や緊急時、山岳地域などにおける遭難時など、携帯電話等の通常の通信手段の利用が困難な状況を念頭に置き、人命救助を目的とした UAS を利用したユーザ位置検出手法を提案するとともに、その有効性を検証することを研究の目的と位置づけた。

(2) 測位精度指標の提案及び有効性検証

GPS では衛星配置の良好性を表す指標として精度劣化指数 (DOP: Dilution of Precision) が存在し、測位演算実行の判断基準や測位演算に用いる衛星の選択基準として利用されているが、ドップラーシフトに基づく位置検出手法では、UAV の配置だけでなく飛行方向 (速度ベクトル) が測位精度に多大な影響を与える。そのため、GPS のように UAV の配置指標のみを判断基準とすることができない。そこで、UAV の飛行条件とユーザの位置関係が測位精度に与える影響を表す新たな指標を考案すると共に、その有効性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) N 機飛行モデルへの拡張

まず、ドップラーシフト量を用いた位置検出手法の拡張を目的として、N 機の UAV を対象とした最小 2 乗法に基づく演算アルゴリズムを検討し、その性能検証を目的とするシミュレーションプログラムを計算機上に構築した。次に、①最小構成である 1 機の UAV を用いて異なる時刻にドップラーシフトを複数回観測することによりユーザの位置検出を行う手法、②基本となる 2 機の UAV を用いた位置検出手法、③冗長性を持たせた 3 機の UAV を用いた位置検出手法、の 3 通りについて、計算機シミュレーションにより位置検出特性を順次評価し、それらの特性比較を行う方法を採用した。

(2) 各種誤差要因を考慮した特性評価

計算機シミュレーションに基づく特性評価において、実用上課題になる UAV の航行位置の制御誤差やドップラーシフト量の測定誤差の影響を考慮し、位置検出精度や位置検出確率、必要測定時間等について評価した。これにより、UAV の機数やドップラーシフトの観測時間と位置検出精度の相関関係を解析し、測位システムとしての必要構成の明確化を図った。その際、UAV の高度や航行速度、UAV の初期配置や飛行モデルをパラメータとして、ユーザとの位置関係を変化させながら、提案手法の有効性を検証した。

(3) 測位精度指標の考案と特性評価比較

当初計画では、ドップラーシフト量の検出精

度を向上する送受信技術に関する研究を行うことを目的とし、ソフトウェア無線ベースの送受信機にドップラーシフトの検出機能をプログラム実装し、高周波部を含めたハードウェアとしての性能評価を電波暗室で行うことを想定していた。しかしながら、最小2乗法に基づく計算機シミュレーションの結果、UAVの初期配置や飛行モデル、ユーザとの位置関係、並びに、飛行制御誤差等によって位置検出誤差特性が変化することが明らかになり、より厳密な特性解析が必要となったことから、汎用性のある測位精度指標の考案と性能解析に重点を置き、ドップラーシフトの検出機能に関する検討については送受信用SDRプラットフォーム間の有線接続による基礎検討に留めることとした。

4. 研究成果

(1) 円旋回飛行する1機のUAVを用いた位置検出手法の特性評価

1機のUAVを用いて異なる時間にドップラーシフトを観測して最小2乗法により位置検出を行う手法を新規に検討すると共に、UAVの航行制御誤差が位置検出精度に与える影響について計算機シミュレーションにより評価した。具体的には、UAVが一定の高度で同じ場所を中心とした等速円運動を行っているものと想定し、簡易的なモデルとしてUAVの旋回半径に一定の誤差が生じているものとした。シミュレーションの結果、UAVとユーザの位置関係や航行制御誤差の大きさに応じて位置検出精度が変化することを確認した。

(2) 平行飛行する2機のUAVを用いた位置検出手法の特性評価

山岳地域等での遭難者探索を目的として、平行飛行する2機のUAVを用いた位置検出システムを想定し、UAVの飛行位置誤差が位置検出精度に与える影響を計算機シミュレーションにより評価すると共に、測位対象とするエリア内で測位精度が最良となるUAV間距離を検討した。その結果、4km四方のエリアを対象として高度200mを時速100km/hで2機のUAVが飛行する場合、その間隔を2,000~4,000mで設定することが望ましいことが明らかになった。さらに、2機のUAVの最適な位置関係の検討を行い、飛行方向と2機のUAVを結ぶ直線のなす角が約45°となるときに位置検出精度が最良となることを明らかにした。

(3) 円旋回飛行する3機のUAVを用いた位置検出手法の特性評価

UAVの機数をN機に拡張した最小2乗法の計算アルゴリズムを明らかにするとともに、最大N=3機までのシミュレーション評価を円旋回飛行モデルで行った。また、N=1~3機の範囲でUAVの飛行位置誤差やUAVの初期配置、ユーザとの位置関係が位置検出精度に与

える影響を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、UAVの機数や配置モデル、UAV-ユーザ端末間の位置関係により位置検出精度が変化することを明らかにした。さらに、その原因を解析するためにドップラーシフト分布を新たに導出し、位置検出精度が劣化するUAVの配置やユーザとの位置関係を定性的に明らかにした。

(4) 測位精度指標の考案と特性評価

UAVの飛行条件とユーザとの位置関係が位置検出精度に与える影響を表す測位精度指標として、ドップラーシフトの観測値により形成される双曲面上のユーザ位置における勾配ベクトルの内積の余弦の絶対値を利用することを新規に提案し、評価対象エリア(8km四方)内における分布特性を解析し、計算機シミュレーションに基づく位置検出精度との相関関係を明らかにした。具体的には、2機のUAVを利用する位置検出手法において、①円旋回飛行モデル、②8の字飛行モデル、③直線飛行モデルを対象とするシミュレーション評価を行い、提案した測位精度指標を用いることにより、UAVの適切な初期配置モデルを明らかにした。

(5) シミュレーション評価結果：位置検出誤差分布特性

図2は、時刻 $t=0s$ 、 $\Delta\theta=0^\circ$ における周回飛行する2機のUAVを用いた場合の位置検出誤差分布特性の一例を表しており、高精度に位置検出が行えるエリアと、精度が極端に劣化するエリアが生じることが確認できる。なお、位置検出誤差=1000mは1000m以上の誤差が発生している、あるいは、最小2乗法で収束せずに発散している状態を表している。また、UAV2の周回方向に $\Delta\theta=5^\circ$ に相当する飛行位置誤差が常時生じているものと仮定している。図2より、2機のUAVを結ぶ直線上、並びに、各UAVの進行方向ベクトルを含む直線上の領域で位置検出精度が大きく劣化していることがわかる。

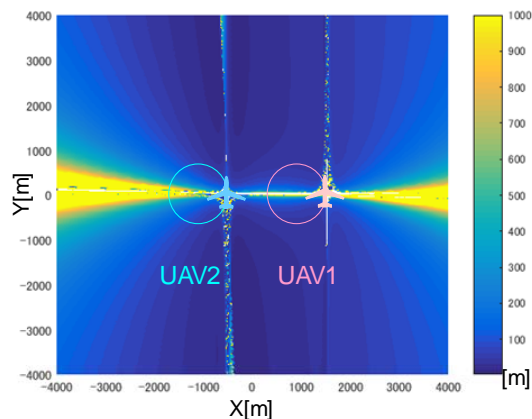


図2 位置検出誤差の面的分布特性
(円旋回モデル： $t=0s$ 、 $\Delta\theta=0^\circ$ の場合)

(6) ドップラーシフト分布に基づく位置検出

精度特性の考察

図3は、図2と同じ条件下で2機のUAVで描かれるドップラーシフトの分布と位置検出精度の関係を模式的に表しており、実線と破線の交点がユーザ位置を表すことになる。によるドップラーシフトの分布が類似（平行）しており、交点が得られにくいことがわかる。また、UAVの速度ベクトルを含む一点鎖線で表される直線上でも、双曲線の頂点との交点となるため解が得られにくいことが確認できる。

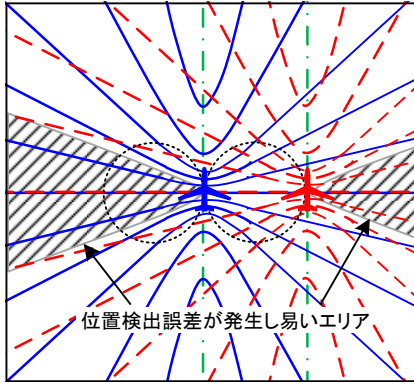


図3 ドップラーシフト分布と位置検出精度の関係
(円旋回モデル： $t=0s$ 、 $\Delta\theta=0^\circ$ の場合)

(7) 測位精度指標の面的分布特性

図4は、図2、図3と同じ条件下における測位精度指標 $|\cos\phi_{12}|$ の分布特性を示しており、深い赤色に近いほど $|\cos\phi_{12}| \simeq 1$ （双曲線が平行）、青色に近いほど $|\cos\phi_{12}| \simeq 0$ （双曲線が直交）であることを表している。図4より、図2、図3で位置検出精度が劣化する領域で $|\cos\phi_{12}| \simeq 1$ となることが分かる。すなわち、UAV1とUAV2により観測されるドップラーシフトの勾配ベクトルの内積の余弦の絶対値 $|\cos\phi_{12}|$ が測位精度を表す指標として利用可能であることが分かる。

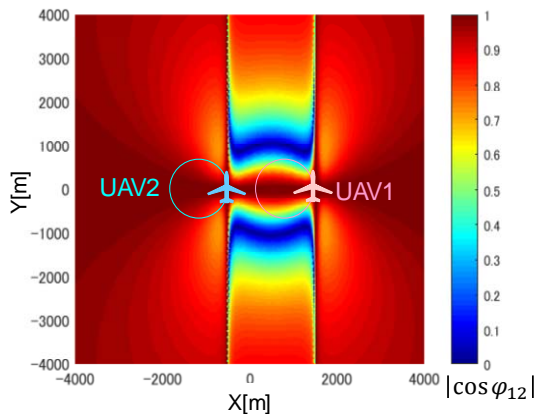


図4 勾配ベクトルの内積の余弦分布特性
(円旋回モデル： $t=0s$ 、 $\Delta\theta=0^\circ$ の場合)

(8) 最適飛行モデルの検討

UAVの飛行経路や位置関係、さらにはユーザ端末とUAVの位置関係によって測位精度が変

化することから、評価対象となるサービスエリアにおいて特性が良好となるUAVの飛行経路や位置関係を検討し、設計方針を明らかにする必要がある。そこで、2機のUAVによる8の字飛行モデルと円旋回飛行モデルについて、評価対象エリア内の約64万地点を対象とした累積分布特性を導出し、各モデルにおける適切なUAVの初期配置を解析的に比較・検討した。その結果を図5及び図6に示す。図より、8の字飛行モデル、円旋回飛行モデルの何れにおいても $\Delta\theta=90^\circ$ と設定することにより、 $|\cos\phi_{12}|$ の分布が評価対象エリア全体で平均的に良好となることを確認した。この結果は、これまでに行った位置検出誤差特性のシミュレーション結果とも概ね一致していることを確認した。

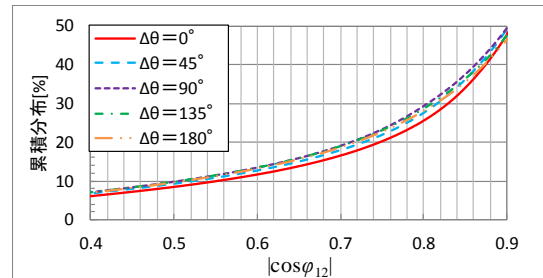


図5 $|\cos\phi_{12}|$ の累積分布（8の字飛行モデル）

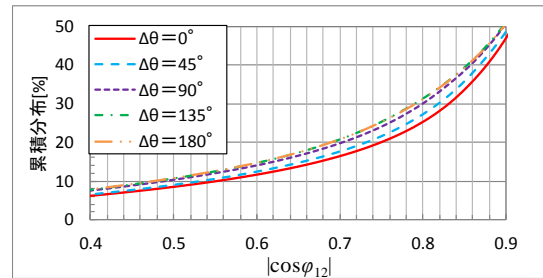


図6 $|\cos\phi_{12}|$ の累積分布（円旋回飛行モデル）

(9) 最小2乗法の初期値選定手法の考案

最小2乗法の初期値候補として、ドップラーシフトにより描かれる2つの双曲線の交点を直線近似で求め、それらをドップラーシフトの正負で判別するアルゴリズムを新規に考案し、特許化を図ると共に、モンテカルロシミュレーションによる基本特性評価を行った。その結果、提案アルゴリズムが有効に動作し、位置検出の自動化を高精度に実現できるめどをつけた。

<引用文献>

- ① 三浦、滝沢、鈴木、辻、井上、大和田、小型無人航空機を用いた無線中継の検討、信学技報、SAT2012-4、pp.17-21、2012-05
- ② 滝沢、辻、鈴木、三浦、災害に強いネットワーク構築における無人航空機の利用、信学技報、SANE2012-44、pp.19-24、2012-07

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計15件）

- ① 大貫 紘季、石川 博康、無人航空機を用いた位置検出手法の測位精度指標に基づく特性比較、電子情報通信学会、2018年総合大会、2018/03/23
- ② 齊藤 祐貴、石川 博康、無人航空機を用いたユーザ位置検出手法の初期値選択アルゴリズム、電子情報通信学会 2018年総合大会、2018/03/23
- ③ 石川 博康、大貫 紘季、無人航空機を用いたユーザ位置検出手法の測位精度指標に基づく特性比較、電子情報通信学会、ワイドバンドシステム研究会、2018/03/09
- ④ Hiroyasu Ishikawa、Hiroki Onuki、Yuki Saito、A Doppler-Shift-Based User Position Detection Method using Unmanned Aerial Vehicles、JC-SAT2017、2017/10/27
- ⑤ 大貫 紘季、石川 博康、8の字飛行を行う無人航空機を用いた位置検出手法の測位精度特性、電子情報通信学会、2017年ソサイエティ大会、2017/09/13
- ⑥ 石川 博康、大貫 紘季、8の字飛行を行う無人航空機を用いた位置検出手法の測位精度指標、電子情報通信学会、2017年ソサイエティ大会、2017/09/13
- ⑦ 石川 博康、無人航空機によるユーザ位置検出法における測位精度指標を用いた飛行経路評価、電子情報通信学会、衛星通信研究会、2017/08/17
- ⑧ 石川 博康、無人航空機を用いたユーザ位置検出手法における測位精度指標に関する検討、電子情報通信学会、衛星通信研究会、2017/05/25
- ⑨ 大貫 紘季、石川 博康、複数の無人航空機を用いた位置検出手法の特性比較、電子情報通信学会、2017年総合大会、2017/03/22
- ⑩ 渡辺 凌、石川 博康、平行飛行する無人航空機を用いた位置検出法における最適配置検討、電子情報通信学会、2017年総合大会、2017/03/22
- ⑪ 石川 博康、大貫 紘季、複数の無人航空機を用いた位置検出法における飛行経路に関する検討、電子情報通信学会、衛星通信研究会、2017/02/23
- ⑫ 石川 博康、無人航空機を用いたユーザ位置検出手法、電子情報通信学会、2016年ソサイエティ大会、依頼シンポジウム「最新UAV技術」、2016/09/23
- ⑬ 石川 博康、大貫 紘季、無人航空機を用いた位置検出法における測位精度の特性評価、電子情報通信学会、衛星通信研究会、2016/08/18
- ⑭ 石川 博康、1機の無人航空機を利用したユーザ位置検出手法の提案、電子情報通信学会、2015年ソサイエティ大会、

2015/09/10

- ⑮ 石川 博康、1機の無人航空機を利用したユーザ位置検出手法の検討、電子情報通信学会、衛星通信研究会、2015/08/18

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：位置検出装置、及び位置検出システム
発明者：石川 博康、齋藤 祐貴
権利者：日本大学
種類：特許
番号：特願 2017-236177
出願年月日：2018年12月8日
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 博康 (ISHIKAWA, Hiroyasu)
日本大学・工学部・教授
研究者番号：20536495