

電波干渉回避機能をもつ ドローン通信システム

瀬戸 翼 渡部 智宏
筒井 英夫 山崎 譲

インフラの維持管理や防災、物流などの用途で普及が加速するドローンなどの小型無人航空機には、都市部上空など有人地帯での無人安全飛行が求められ、有人地帯での目視外飛行によるドローンの安全な利用の取組みが官民一体となって進められている¹⁾。しかし、ドローンで使用される電波の同一・隣接帯域にはさまざまな電波利用が混在し、これらが電波干渉を起こすことで飛行の安全が脅かされるリスクが存在する。電波干渉を回避するためには、電波を特定の方向へ向けて送信、または特定の方向から受信することで、所望の通信相手からの電波のみを抽出し、妨害となる干渉波を除去する必要がある。この場合、電波発信源の方向を特定する到来方向推定が重要な技術となる。

そこで、OKIでは電波干渉を回避する機能をもつドローン通信システムを構築するための試作装置を開発した。

本稿では、開発した試作装置を実際にドローンに搭載し、電波干渉を回避するために重要となる電波到来方向推定技術のドローン搭載環境での精度確認と、飛行時の揺動に対する追従性を確認した結果を紹介する。

電波到来方向推定技術

電波到来方向推定は、アレイアンテナにより受信された電波がどの方向から発信されたかを推定する技術である。アレイアンテナとは、複数のアンテナ素子がある一定の規則で配列したものである。例えば図1のような N 個の素子を等間隔 d で一直線に並べたアレイアンテナを考える。

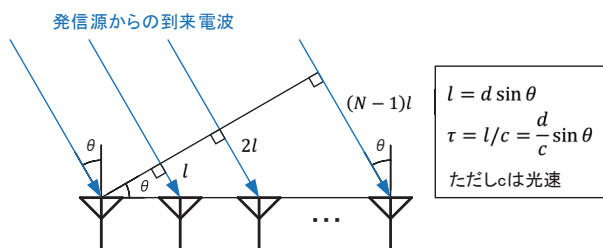


図1 アレイアンテナと受信信号

図1ではアレイアンテナに θ 方向からの電波が到来している。電波の発信源とアレイアンテナの距離が十分離れて

いれば到来電波は平面波と考えることができ、電波の経路差は $d \sin \theta$ の整数倍で表すことができる。経路差は受信信号の遅延 τ として現れるため、各素子で受信される電波の遅延量が分かれば θ を推定することができる。

電波到来方向の推定精度

写真1に示すドローン通信試作装置に前述の原理を応用した高精度到来方向推定方式であるMUSIC法²⁾を実装し、電波暗室で推定精度を確認した。

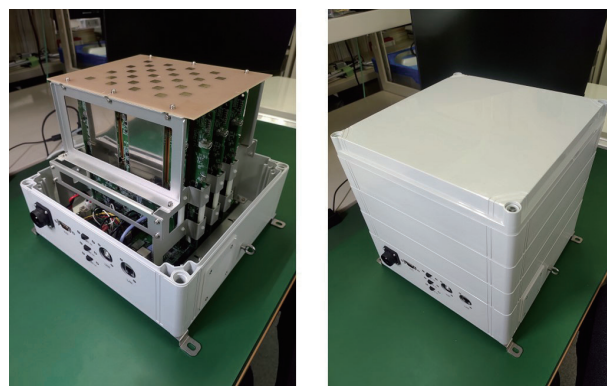


写真1 試作装置内観(左)と外観(右)

表1に電波暗室での実験条件を示す。

表1 電波暗室実験条件

項目	仕様	備考
送信周波数	5705MHz	無変調連続波
受信周波数	5703.8MHz	送信周波数-1.2MHz
アンテナ素子数	28素子	4×7平面アンテナ
スナップショット数	2048	サンプリング周波数 38.4MHz

図2は電波暗室での測定系である。試作装置の受信アンテナ面をターンテーブルの中央と一致するよう設置し、送信アンテナ面と受信アンテナ面が正対する方向を0度とした。試作装置は垂直・水平の軸を90度回転させることができるよ

う三脚に取り付け、垂直方向を軸にした場合は方位角を、水平方向を軸にした場合は仰角を回転させることができる。

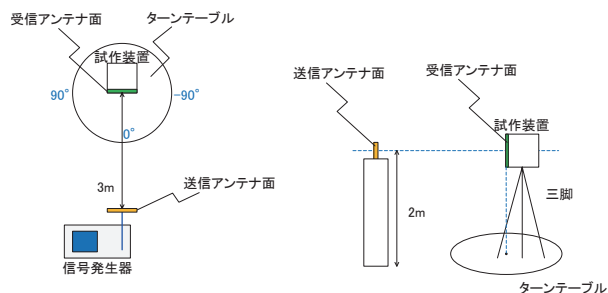


図2 電波暗室測定系

図3は方位角を回転させた場合の、図4は仰角を回転させた場合の実験結果である。図3の横軸は方位角の真の到来方向であり、図4の横軸は仰角の真の到来方向である。縦軸はそれぞれ到来方向推定結果の真の到来方向からの誤差とした。

暗室実験では、垂直・水平軸どちらで測定した場合でも到来方向が -50 度 ~ 50 度の範囲では期待値からの誤差が -1 度 ~ 1 度という結果になった。これにより試作装置の到来方向推定精度は方位角・仰角どちらも -50 度 ~ 50 度の範囲で 1 度以内と考えられる。

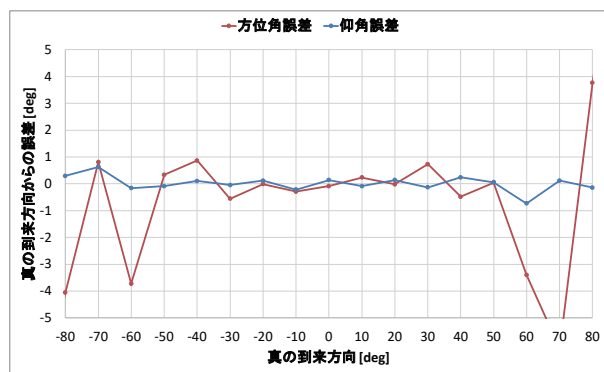


図3 方位角回転時の到来方向推定誤差

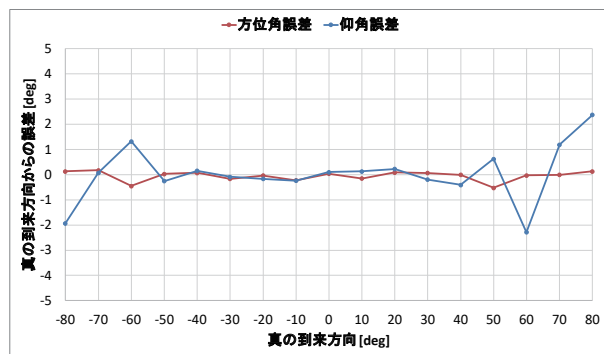


図4 仰角回転時の到来方向推定誤差

屋外飛行実験

図5のように試作装置をドローンへ搭載し、ドローンをおよそ5m上空へ飛行させ、地上からの電波発射に対する到来方向推定精度を実験で確認した。

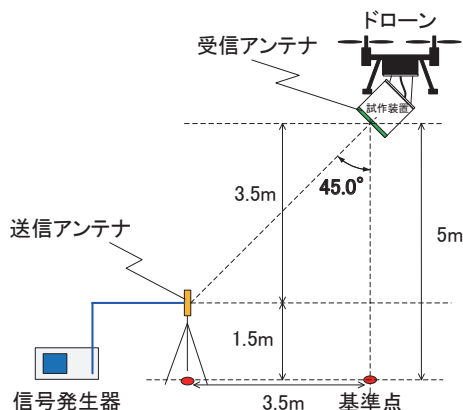


図5 送信アンテナと試作装置の位置関係

飛行実験時のドローンの様子を写真2に示す。

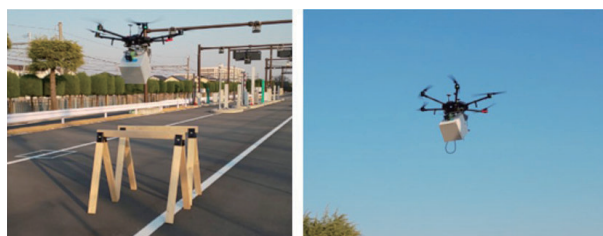


写真2 飛行実験時のドローンと試作装置

5m上空での飛行時の電波到来方向推定結果を図6に示す。横軸は時間であり、およそ1分間空中で静止した状態で測定を実施した。縦軸は到来方向の推定値であり、方位角 (ϕ) と仰角 (θ) の結果をそれぞれ示している。完全に静止した場合の真値は方位角・仰角共に 0 度であるので、大きな誤差が生じていることが確認できる。

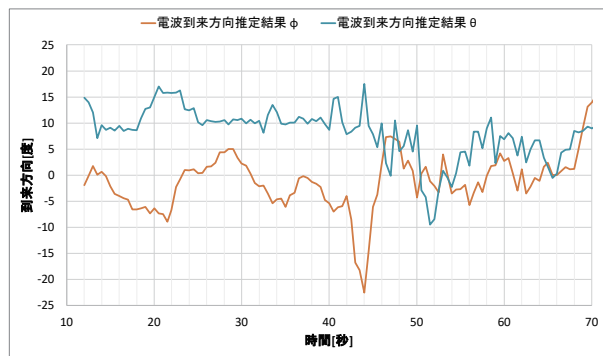


図6 到来方向推定結果

誤差が生じる原因として、風の影響などでドローンの位置や姿勢が変化することによって、受信アンテナの方向が変化すると考えられる。これらの変化を把握するため、ドローンにカメラを搭載して撮影した。撮影した画像の解析により、受信アンテナの正面方向(画像中心)に対する送信アンテナの方向を算出した。実際にドローンから撮影した画像を写真3に示す。

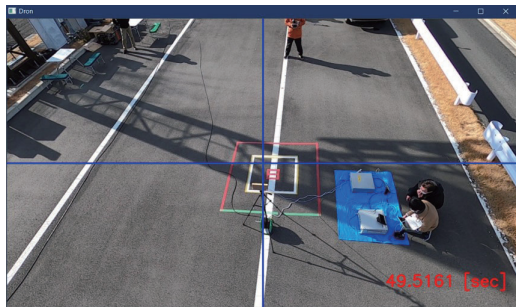


写真3 ドローンから撮影した画像

撮影した画像を解析し、送信アンテナの方向を求めた結果を図7に示す。到来方向推定結果と同様、正面方向から大きな誤差が生じていることが確認できる。

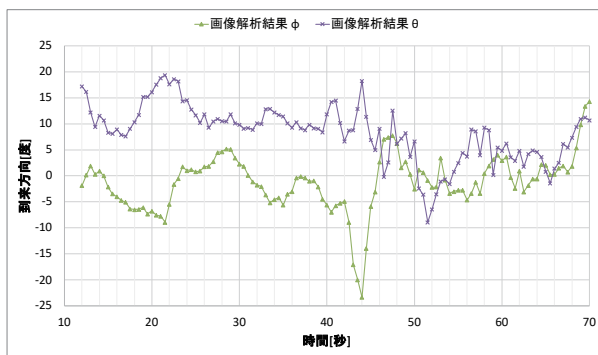


図7 画像解析結果

到来方向推定と画像解析の結果を重ね合わせると図8のようになる。結果が重なることから、ドローンの姿勢の変化に追従して到来方向推定ができていていることが確認できる。

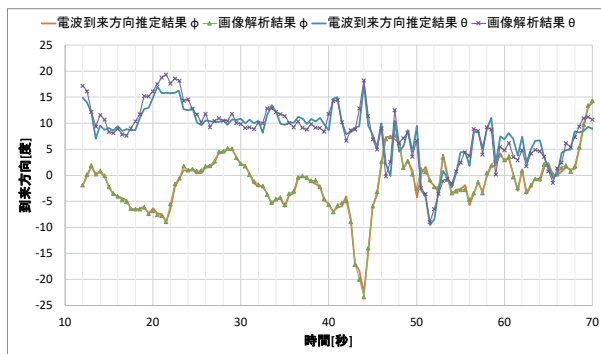


図8 到来方向推定と画像解析結果の比較

到来方向推定の精度を考察するために、誤差の累積分布を取った結果を図9及び図10に示す。方位角では93%の確率で誤差1度以内となり、高い精度で到来方向推定できることを確認した。一方で、仰俯角の到来方向推定精度では、方位角の推定と比較すると精度の劣化が見られたが、46%の確率で誤差1度以内、80%の確率で誤差2度以内となり、こちらも高い精度で到来方向推定できることを確認した。

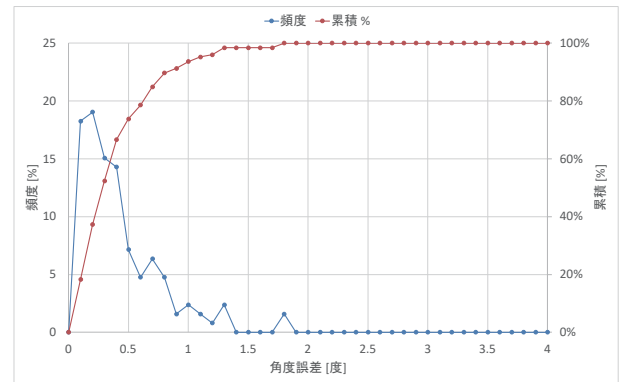


図9 方位角推定誤差の累積分布

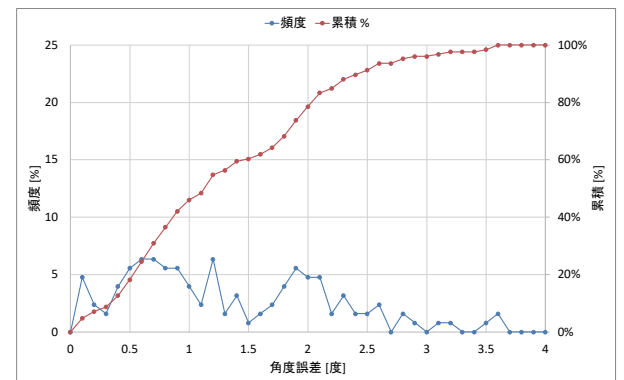


図10 仰角推定誤差の累積分布

仰角方向で精度が劣化しているのは、図11のように受信アンテナ中心とカメラレンズ位置の関係により $\Delta\theta$ の視差が生じているためと推測している。これを補正するためには複雑な情報が必要になるため、今後の検討では方位角・仰角でカメラを二つ別々に用いるなどの対策を実施する予定である。

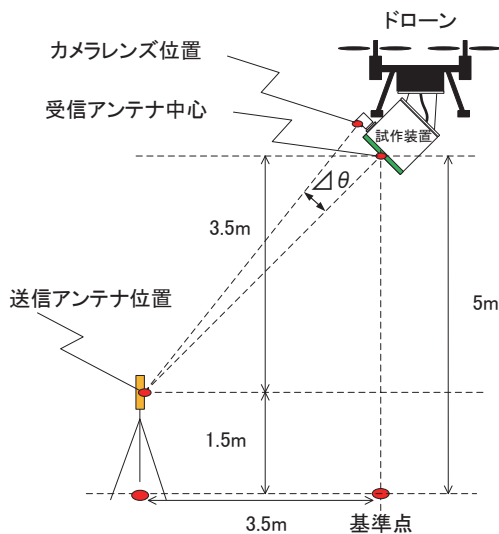


図11 位置関係による視差

まとめ

試作装置をドローンへ搭載し、およそ5m上空へ飛行させて検証した結果、地上からの電波発射に対し、その到来方向を高い精度で推定できることを確認した。また、ドローンの揺れなどによる姿勢の変化にも追従できていることを確認した。

本稿では所望の通信を想定した1波を推定の対象としたが、今後は所望の通信に加えて干渉電波を想定した2波以上での確認を実施していく計画である。

また、動的にアンテナ指向性を成型するビームフォーミング技術を用いてドローンの使用電波が他のシステムに干渉を与えないように制御し、かつドローンとコントローラー間を正常に通信する技術を開発し、実運用シーンを想定した実証実験を行い、ドローンの安全飛行を実現する機器の開発と社会実装を目指していく予定である。

謝辞

本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」によって実施した成果を含みます。◆◆

参考文献

- 1) 国土交通省:無人航空機の目視外飛行に関する要件
<https://www.mlit.go.jp/common/001227438.pdf>
- 2) 菊間信良:アダプティブアンテナ技術、第1版、p122-164、2003年 オーム社

● 筆者紹介

瀬戸翼:Tsubasa Seto. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 コンポーネント開発第二部
 渡部智宏:Tomohiro Watanabe. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 コンポーネント開発第二部

筒井英夫:Hideo Tsutsui. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 ビジネス開発部

山崎譲:Yuzuru Yamazaki. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 コンポーネント開発第二部

TIP 【基本用語解説】

目視外飛行

目視(直接肉眼による)できない範囲を飛行させること。

ビームフォーミング技術

電波(または音波、超音波)を特定の方向に向けて送信、または特定の方向から受信する技術。