ロボット・ドローンによる無線ネットワーク管理手法

代表研究者 齋藤 健太郎 鳥取大学 大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻 教授

1 研究概要

本研究では、小型チャネルサウンダを搭載した UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を自律飛行させて無線局 の信号を測定・解析する事で、無線ネットワークの点検を自動化する技術について提案する.本研究の特徴 は、複数の測定点のデータを仮想アレー信号処理により合成する事で電波の到来方向を解析できる点にある. UAV による仮想アレー信号処理を実現する事で、UAV には搭載できないような大きな開口を持つ任意の指向 性アンテナを仮想的に空中に構成する事ができ、電波の到来経路や無線干渉の発信源等、より詳細な電波伝 搬チャネル情報を得る事が可能となる.本技術を実現するため、Total Stationを用いたレーザー計測によ り UAV の自動飛行を制御し、極めて高精度に実際の飛行位置を測位する技術を確立した.また UAV に搭載可 能な小型チャネルサウンダを開発し、上記測位情報を用いて仮想アレー信号処理により無線信号の到来方向 を推定する技術を確立した.本研究成果を用いる事で、無線基地局の送信電波指向性制御の点検・保守や、 電波干渉等を発生させている無線局の位置特定等、適切なネットワーク運用に必要な情報を得る事ができる.

研究内容

本研究は、プリズムを装着した UAV を地上に設置した Total Station で測位・トラッキングを行い、その 飛行座標を制御する UAV 自動制御手法と、上記測位情報と UAV 局に搭載した小型チャネルサウンダによる電 波伝搬データを用いて無線信号の到来方向を推定する仮想アレー信号処理手法からなる.最後に開発した UAV 測定システムを用いて、屋内実験場において 4.8 GHz 帯電波伝搬実験を行った.各取り組み内容につい てそれぞれ説明する.

2-1 UAV 自動制御手法

(1)システム概要

始めに自動操縦システムの全体像を図1に示す.提案するシステムにはドローンやそのコントローラの他, ドローンの位置を正確に測定するためTS(Total Station)を使用する. Total Stationは,目標点に対してレ ーザーを放射し反射し戻ってきたレーザーを解析することで距離と角度を測位する.本研究では目標点を高 さ 30mm のプリズムに設定する.このシステムではTSがドローンに搭載したプリズムを自動追尾しその3次 元座標を測位する.その座標をBluetoothでコントローラに送信し,コントローラは目標点までのフィード バック制御を行う.また取得した座標は電波伝搬解析に使用する.ドローンに搭載されたアンテナのみはソ フトウェア無線機に接続されており周囲の電波状況を観測する.上記の本システムにおける,1 つの目標点 に対する自動操縦プログラムのフローチャートを図2に示す.目標点までの移動には PD 制御を採用し,目 標点から半径 2cm の領域に1秒間いることで到着と定義した.

(2)開発環境とSDK

今回使用するドローンはDJI 社製であり、コントローラからアプリケーション経由でのドローン操作を可 能にする MSDK (Mobile Software Developers Kit)が公開されている.これは同社から販売されている Android ベースのコントローラ (DJI RC Pro, DJI RC Plus)上で動作する SDK である.したがって、自動操縦プログ ラムは MSDK を使用した自作 Android アプリケーション上で動作することとなる. Android アプリケーション の作成には専用の統合開発環境である Android Studio を使用し、開発に使用したソフトウェアの諸元を表1 に示す. MSKD 内にはコントローラのスティックを擬似的に倒しドローンを操作する関数が内包されており、 その引数に指示量を入力することで移動方向やスピードを変更することができる.その結果、ドローンを上 下左右に移動させることができる.



図1自動操縦システムの全体像

図2 自動操縦フローチャート

表1開発環境の諸元

開発環境	
使用ソフトウェア	バージョン
Android Studio	Chipmunk 2021.2.1 Patch 1
Android Gradle Plugin	7. 2. 1
Gradle	7.3.3
ビルド設定	
Kotlin Version	1. 6. 10
Android SDK Version	20 22 22
(Min, Target, Compile)	27, 33, 33

(3) Total Station 座標系から任意座標系への変換

TS が測位するプリズム位置情報は、TS が持つ座標系(TS 座標系(x, y, z): 左手系) で取得されるが、TS を 設置するごとに現場での原点位置が変化するため利便性が悪い.そこで、右手系の任意座標系(ドローン座 標系(u, v, z')) に変換する、原点合わせを行う.原点合わせの手順としては3ステップに分かれる.1つ目に 「原点設定」、2つ目に「x軸方向設定」、3つ目に「z軸オフセット設定」である.この3ステップを通し、ド ローン座標系の原点 $P_o = (x_0, y_0)$ 、ドローン座標系のx軸方向点 $P_x = (x_1, y_1)$ 、Z座標を0に合わせるz軸オフセ ット z_{offset} が得られる.原点合わせにより得られた情報から、次の手順で座標系の変換を行う.

1. x軸とu軸とのなす角 $\theta(-\pi < \theta \leq \pi)$ の計算

$$\boldsymbol{P} = P_x - P_o \tag{1}$$

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{r_x}{|\mathbf{P}|}\right), & y_0 \le y_1 \\ -\cos^{-1}\left(\frac{P_x}{|\mathbf{P}|}\right), & y_0 > y_1 \end{cases}$$
(2)

ここでベクトルPは、ドローン座標系の原点からu軸の方向ベクトルである.

2.TS 座標系の位置(x, y)からPoを減じ、回転行列をかける

3. z'軸の原点合わせ

$$z' = z - z_{offset} \tag{4}$$

TS から逐次送信される測位座標は,式(1)~(4)を通しドローン座標系に変換され処理される.したがって 定義コースはこのドローン座標系を想定し作成することになる.

(4) ドローン指示量の計算

ドローンに与える指示量τは、ドローン座標から目標方向の単位ベクトルe,ゲインをαとしたとき次式で求 まる.またここで、ドローンに与える指示方向と、それに対応するドローン座標系の移動方向とは同一方向 を示すことを仮定する.

$$\tau = \alpha \boldsymbol{e} \tag{5}$$

1.目標方向単位ベクトルeの計算

ドローン座標をQ(t) = (u, v, z'), 目標点を $P_0 = (u_0, v_0, z'_0)$ とする.

$$\mathbf{x}(t) = P_0 - Q(t) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{e} = \frac{\boldsymbol{x}(t)}{|\boldsymbol{x}(t)|} \tag{7}$$

ここで, x(t)は目標方向ベクトルである.

2. ゲインαの計算

比例ゲインK_n,微分ゲインK_dとしたとき,次式で表される.

$$\alpha = K_p |\mathbf{x}(t)| + K_d \frac{d}{dt} |\mathbf{x}(t)|$$
(8)

式(8)はフィードバック制御の PD 制御を参考にしている. 第1項K_p|x(t)|は比例項であり、今回のドローン制御では目標点とドローンとの距離に応じ変化する.離れていれば速く移動し、目標点付近では遅くなる.

第 2 項 $K_d \frac{d}{dt} | \mathbf{x}(t) |$ は微分項であり,目標点を過ぎた際に逆方向に移動させることでブレーキの振る舞いをする.比例項単体ではドローンの持つ慣性に流され,1秒間半径 2cm 以内にいるというシビアな到着判定では目標点付近で振動してしまうため,微分項を導入し PD 制御を採用した.

2-2 UAV による仮想アレー信号処理手法

本章では、UAV による仮想アレー計測に基づくチャネルサウンディングシステムを説明する.本システム では、受信機を搭載した UAV 局を制御し、あらかじめ設定された測定コース上を飛行させ、任意の仮想アレ ーを上空に構成する.測定中、無指向性アンテナを有する受信機は、測定電波を連続的に記録する.測定デ ータと UAV 局が受信した UAV 位置情報を組み合わせ、オフラインでアレー信号処理を行い、電波伝搬路の角 度特性を推定する.

仮想アレー測定のアレー応答モデル[2]を図 3 に示す.ここでは *I*個の UAV 位置で計測されたデータを仮 定する. 仮想アレー計測では, i番目の UAV 位置での伝達関数 $h_i(j)$ を計測データベクトルh(j)のi番目の要素 とみなす.ここで*j*はサブキャリアインデックスである.アレー応答 $\alpha(\tau,\phi,\theta,d) = \alpha_{i,j}(\tau,\phi,\theta,d)$ は,電波源か らの波動ベクトル $k_j(\phi,\theta,d)$ と UAV 位置 x_i で定義される.

$$\boldsymbol{k}_{j}(\phi,\theta,d) = -\frac{2\pi f_{j}}{c} \begin{pmatrix} d\cos(\phi)\cos(\theta) \\ d\sin(\phi)\cos(\theta) \\ d\sin(\theta) \end{pmatrix}$$
(1)
$$\boldsymbol{\alpha}_{i,j}(\tau,\phi,\theta,d)$$
(2)
$$= G(\phi,\theta)\exp(j\boldsymbol{x}_{i}^{T}\boldsymbol{k}_{j}(\phi,\theta,d) - j2\pi f_{j}\tau)$$

ここで、 τ , ϕ , θ は,入射波の伝搬遅延,方位角到達角(AoAazm),共振角到達角(AoAelv)である. dは電波 源からの距離、cは光速、 $G(\phi, \theta)$ はアンテナ放射パターンである.入射波の伝搬パラメータ τ , ϕ , θ , dは、 パワースペクトル $\Psi(\tau, \phi, \theta, d)$ のピーク探索アルゴリズムから推定する.

$$\boldsymbol{\psi}(\tau,\phi,\theta,d) = |\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \overline{\alpha_{i,j}}(\tau,\phi,\theta,d)h_i(j)|^2 \qquad (3)$$
$$(\hat{\tau},\hat{\phi},\hat{\theta},\hat{d}) = \underset{\tau,\phi,\theta,d}{\arg\max}[\boldsymbol{\psi}(\tau,\phi,\theta,d)] \qquad (4)$$

本論文では、伝搬路の方位角特性を示すために、方位角パワースペクトル $\Psi_{AoAazm}(\phi) = \Psi(\tau, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{d})$ を定義する. 伝搬パラメータの推定後、実測データに対する残差信号成分rの比を調べる.

$$s = \frac{\alpha(\hat{\tau}, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{d})^{\mathrm{H}}}{\alpha(\hat{\tau}, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{d})^{\mathrm{H}}\alpha(\hat{\tau}, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{d})}h$$
(5)
$$r = h - \alpha(\hat{\tau}, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{d})s$$
(6)

残差信号成分比 $\gamma = |\mathbf{r}|^2 / |\mathbf{h}|^2$ は、測定データが配列応答モデルによってどれだけ正確に再構成されたかを表す.

開発したチャネルサウンディングシステムの系統図を図4(A)に、送信機(Tx)と受信機(Rx)の写真を図4(B) と(C)に示す.Tx は地上に設置され、4.85GHz 帯のマルチトーン測定信号を連続送信する.受信機は市販の SDR (Software-Defined Radio) プラットフォーム USRP N2901 に実装された.Rx は小型・軽量で、通常は UAV に搭載されるが、本実験では地上に設置し、RF ケーブルで UAV のRx アンテナに接続した.UAV 局は、UAV コ ントローラに実装された自動運転ソフトウェアにより、あらかじめ設定された測定コース上を飛行する.ア レー信号処理では測定データとアレー応答との間の複雑な相関を計算で評価するため、正確な信号位相情報 が必要である.本システムでは、信号の位相誤差は主に UAV の位置誤差に起因するため、位置誤差は電波の 波長よりも十分に小さい必要がある.しかし、4.85GHz では波長が 61mm であるため、UAV の位置をそれほど 正確に制御することは現実的ではない.そこで本提案では、Total Station で実際の UAV 位置を追跡し、UAV 位置誤差を考慮したアレー応答計算を行う.本システムでは、UAV に取り付けたプリズムの位置を Total Station Leica TS16 で波長より十分小さい 3mm 以内の誤差でリアルタイムに追尾している.Total Station は Bluetoothで UAV コントローラに接続され、測位データは UAV の自律飛行制御にも利用される.濃位データを組み合わせて オフラインで実行される.



Signal measurement point: x_i

図3 仮想アレー信号処理におけるアレー応答モデル



図4 提案する UAV による仮想アレーチャネルサウンダ概要 ((A)システムダイアグラム,(B)送信局,(C)受信局)

2-3 屋内実験場における 4.8GHz 帯電波伝搬実験

(1) 実験概要

開発したチャネルサウンディングシステムの性能を検証するため、4.85GHz 帯の屋内作業場スペースで実験を行った.実験環境と測定場所の写真を図5に示す.TxとTotal Station は地上に設置した.Rxの測定コースは4×4のグリッドで、各測定ラインの間隔は0.25m である.アレー信号処理の基準点として、高さ1mの始点が使用された.方位角と仰角はそれぞれ反時計方向と天頂方向に定義した.UAV 局は走行ソフトウェアにより、測定コースに沿って約0.1m/s で飛行するように制御された.TxアンテナとRxアンテナは、ホーンアンテナと無指向性アンテナを使用した.したがって、背後の壁からの直接波と反射波が支配的であると予想された.その他の実験パラメータは表2にまとめた.

性能評価では、開発システムの角度分解能性能を調べるため、測定データから角度パワースペクトル

 $\Psi_{AoAazm}(\phi)$ を算出した.入射波の伝搬パラメータ τ , ϕ , θ , dを推定し,最後に残留成分信号比を評価した.



図54.8GHz 帯電波伝搬実験((A)実験レイアウト, (B)実験写真)

表 2 実	験諸元
-------	-----

Channel sounder specification			
Center frequency	4.85 GHz		
Transmission power	10 dBm		
Signal bandwidth	5 MHz		
Signal waveform	Newman phase multitone signal		
Tx Antennas	Horn antenna (20 dBi)		
Rx Antennas	Omnidirectional antenna (3 dBi)		
Measurement interval	50 ms		
Total station specification			
Wavelength	658 nm		
Maximum radiant power	0.33 mW		
Angular resolution	8.3×10^{-4} deg.		
Distance resolution	3 mm + 1.5 ppm		
Measurement interval	100 ms		

(2) 実験結果

Total Station で計測した UAV の飛行軌跡を図 6(A) に示す.計測点数は 3433 点であった. UAV は決められ た計測コースに沿って飛行したが,実験場の空気の流れにより若干のドリフトも発生した.平均飛行誤差は 0.026 m,最大飛行誤差は 0.125 m であった.これらの誤差はアレー信号処理上無視できるものではないが, 前章で説明した通りアレー応答計算で考慮されている.

実測データと残留信号成分の方位角パワースペクトルを図 6(B)に示す.実測データでは, ϕ = 1.85 deg. に有意なピークがあり、これは直接電波に対応していた.半値電力ビーム幅(HPBW)は 3.2 deg であり、この

周波数帯でUAVに搭載可能な指向性アンテナシステムとしては極めて小さい.推定された入射電波のモデル パラメータを表3にまとめる.方位推定誤差は約0.1 deg.,同仰角推定誤差は約0.8 deg.,距離推定誤差は 約0.01 m.であった.仰角推定誤差が相対的に大きい理由は、今回の実験では仮想アレーが水平面上に構成 されており、仰角推定に適していないためである.全体として、この結果は提案システムの精度を証明する ものであった.残留信号成分の角度パワースペクトルでは直接波のピークが抽出されたが*φ* = 180deg.付近 にピークが観測された.これは後方壁からの反射波と考えられる.残留信号成分比\$gamma\$は0.15 であり、 この伝搬環境では支配的ではなかった.

本実験結果は、入射電波信号成分が適切に分解されていることを示しており、電波伝搬路の更なる詳細な 解析には、期待値最大化や空間交互一般化期待値最大化(EM/SAGE)などの高度なアレー信号処理アルゴリズ ムが適用可能であることを示している.



図6 実験結果((A) UAV 飛行経路, (B) 角度電力スペクトル)

表 3	伝搬パラ	メータ	推定結果
10		/ /	

	True value	Estimation result
AoAazm ϕ	1.97 deg.	1.85 deg.
AoAelv θ	-0.21 deg.	-1.00 deg.
distance d	6.29 m	6.30 m

3 研究成果とまとめ

本研究では、小型チャネルサウンダを搭載した UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を自律飛行させて無線局 の信号を測定し、仮想アレー信号処理により合成する事で電波の伝搬経路・発信源等を推定する技術を確立 した.仮想アレー信号処理を適用するためには、測定電波の波長オーダー以下の精度で信号受信位置を制御 する必要があるが、通常 UAV は風等の外乱により飛行位置にずれが生じており上記のような精密な受信位置 制御を行う事は困難である.本研究では、地上に設置した Total Station からのレーザー計測により UAV の 実際の飛行位置をミリメートル単位で測位・トラッキングし、仮想アレー信号処理の補正値として用いる事 で上記の課題を解決した.UAV と商用 SDR 無線機上に提案システムを実装し、屋内実験場で 4.8GHz 帯電波伝 搬実験を行った.UAV の自動飛行制御により 1m×1m のサイズの仮想アレーを構成し到来方向推定を行った. ビーム指向性の電力半値幅は 3.2 度であり、この周波数帯のアンテナとしては極めて高利得である.送信源 位置の推定に関しては、水平方位角誤差が 0.1 度、距離誤差が 1cm であった.今後は、様々な伝搬環境で実 験を行い,上空における電波伝搬特性を明らかにするとともに,上記情報を用いた無線ネットワークの監視・ 保守技術についても検討を行う予定である.

【参考文献】

- [1] DJI Developer,「DJI Mobile SDK V5」, <u>https://developer.dji.com/mobile-sdk/</u>,2024年1月27日
- [2] K. Saito, P. Hanpinitsak, J.-i. Takada, W. Fan, and G. F. Pedersen, "Frequency dependency analysis of shf band directional propagation channel in indoor environment," in 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), 2018, pp. 1–5.

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Unmanned Aerial Vehicle-based Virtual Array	IFICE ComEV	
Channel Sounding System in 4.8 GHz Band	IEICE COMEX	技情/F (2024.3)
Unmanned Aerial Vehicle-based Virtual Array	IEICE AWAP2024(招待)	2024.6
Channel Sounding System in 4.8 GHz Band		
[依頼講演]UAV チャネルサウンダによる空中伝搬	電子情報通信学会 短距離無	2024.3
チャネル測定	線通信研究会	
無線ネットワーク保守のためのドローン自動制御	電子情報通信学会 短距離無	2024. 3
技術	線通信研究会	
UAV チャネルサウンダによる 4.8 GHz 帯伝搬チャ	電子情報通信学会総合大会	2024.3
ネル測定		

〈発表資料〉