

BLE ビーコンを用いた マルチコプターのハイブリッド型航法システム

大門 雅尚¹ 堀川 三好¹ 岡本 東¹

概要: 近年、様々な領域で小型無人マルチコプターが活用されており、自動追尾航法に関する研究も多く進められている。しかし、一般的な追尾手法には、GPS の精度やカメラの性能による影響を受けやすい等の課題がある。本研究では、自動追尾航法として、屋内外等の飛行環境や周囲の照度による影響の小さい、BLE (Bluetooth Low Energy) の受信信号強度を利用した手法を提案し、手動操縦と併用したハイブリッド型航法システムを実現することを目的としている。また、実装した提案航法を用いて、予備実験により距離推定及び方向推定精度の検証を行い、自動追尾精度の評価として、直線、曲線を含む経路において操縦者の追尾が可能であることを報告する。

Hybrid Air Navigation System for Multirotor Aircraft by Use of BLE Beacon

DAIMON MASANAO¹ HORIKAWA MITSUYOSHI¹ OKAMOTO AZUMA¹

1. はじめに

小型無人マルチコプターは回転翼を持つ飛行体であるため、ヘリコプター等と同様に浮力のみでの空中浮揚状態の維持と前後、左右、上下への平行移動が可能である。そのため、近年では防犯 [1] や災害 [2] 分野での利用や、人間の侵入できない区域での情報収集活動 [3] 等、様々な領域で活用されている。一方で、手動による操縦に関しては習熟までに訓練期間を要するため、導入や運用の簡易化を目的とした自律航法や自動追尾航法に関する研究が多く進められている。しかしながら、これらの研究で一般的に利用される GPS やカメラを用いた手法には、十分に GPS 信号を受信できない環境や著しく照度の低い環境、反対に著しく照度の高い環境等での利用が困難となるという課題がある。

本研究では、手動操縦と自動追尾航法を併用した、容易に運用可能なハイブリッド型航法システムを構築することを目的としている。そのため、GPS 信号の受信強度や周囲

の照度に依存しない、BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコン (以後、ビーコン) をマルチコプター (以後、機体) に取り付け、その受信信号強度 (以後、RSSI) を利用した自動追尾航法を提案する。

第 2 章では、移動体の自律制御に関する関連研究と小型無人マルチコプターの自動追尾航法の事例について紹介する。第 3 章では、機体が追尾を行うために操縦者の位置を把握する手法について述べる。第 4 章では、提案する航法システムの概要と機体制御アルゴリズムについて述べる。第 5 章では、予備実験により距離推定及び方向推定精度の検証を行い、自動追尾精度の評価実験として直線、曲線を含む経路における操縦者に対する追尾飛行実験を行う。第 6 章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究・事例

小型無人マルチコプターをはじめとする移動体の自律制御手法として、一般的に用いられる手法には、GPS (Global Positioning System) を用いた手法やカメラを用いた手法がある。例えば小林ら [4] は、GPS による位置情報として予め指定された複数の地点を経由しながら目的地を目指す、

¹ 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科
Iwate Prefectural University Graduate School of Software and Information Science, 152-52, Sugo, Takizawa-shi, Iwate 020-0693, Japan

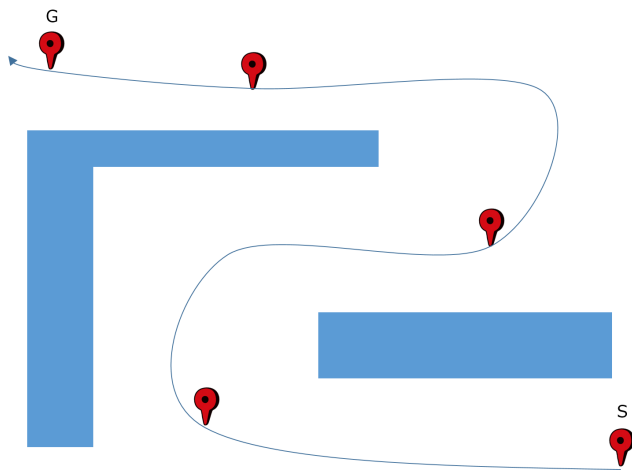


図 1 ウェイポイントナビゲーションシステム

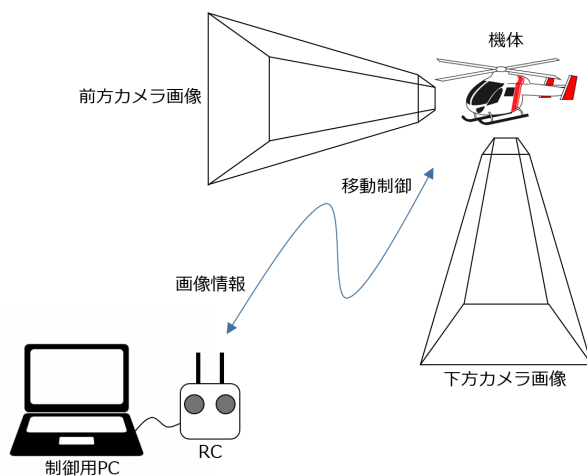


図 2 誘導制御システム

ウェイポイントナビゲーションを想定した運用環境を提案している (図 1)。この研究では、GPS による自己位置推定を基に速度計およびジャイロセンサを補助として利用することで、より高精度な自己位置推定を行なっている。一方、森ら [5] は小型電動 RC ヘリコプタに搭載されたカメラの画像情報を基にした機体の誘導制御手法を提案している (図 2)。この研究では、機体の三次元的な位置情報を求めることなく、二次元画像上の特徴量の変化のみに基づいて機体を制御している。

学術的あるいは技術的な研究においては、これらの手法は個別に扱われることが多い。しかしながら、実運用においてはこの限りではなく、これらの手法を複合的に用いた航法が一般的となっている。その事例の一つとして、DJI 社の製品である Phantom4 に搭載された Active Track 機能がある [6] (図 3)。これは指定した被写体を自動的に認識し、被写体の移動に合わせて追尾する機能となっている [7]。被写体の指定および、認識には Phantom4 に搭載されたカメラによる映像情報を用いる。追尾中には、被写体の位置や大きさから機体の移動方向と移動速度を決定し、

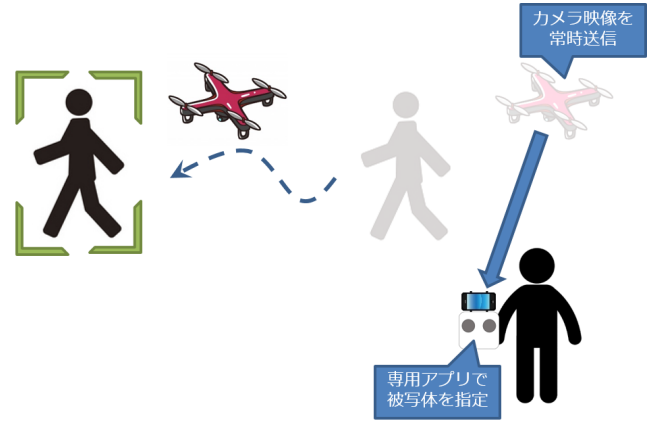


図 3 Active Track イメージ図

GPS によって、位置制御および姿勢制御を行う。

しかしながら、GPS やカメラを用いた手法には周辺環境による影響に依存する課題が残されている。例えば GPS を用いた手法は、信号が十分に受信できない環境やより高精度な測位が求められる環境では利用することができない。一方カメラを用いた手法は、画像や映像情報からの目標物や障害物の検出が困難となる著しく照度の低い環境や高い環境での利用には適しておらず、飛行中には常時景色が変動するため、解像度やフレームレートの高いカメラを用いる必要がある。

3. BLE による位置推定手法

自動追尾航法のための機体と操縦者との位置推定手法として、ビーコンから送信される電波の RSSI を用いた手法を提案する。本手法を用いた場合の航行イメージを図 4 に示す。提案する自動追尾航法では、機体にビーコンを取付け操縦者が受信機を持つ。そして、ビーコンと受信機間の RSSI によって機体と操縦者との位置関係を推定し、一定距離を保つよう制御信号を機体に送信することで、操縦者と自動的に追尾する航法を実現する。

機体と操縦者との位置関係は極座標方式を用いて表現する。極座標方式の要素の内、動径を機体と操縦者との距離として扱い、偏角を機首を 0 [deg] とした場合の操縦者のいる方向として扱う。これによって、位置推定は距離推定と方向推定の二つを組み合わせることで実現できる。

3.1 距離推定手法

屋外環境や周囲に障害物のない環境における、電波の減衰特性を図 5 に示す。この環境において、静止状態の送受信機間の RSSI 特性は二波モデルによって表される。ただし、移動している状態の送受信機間の RSSI 特性では、二波モデルにおける特定の地点で大きく減衰する性質が弱くなる。また、RSSI に対する距離の関係上、一つの RSSI 値から距離を一意に求めることはできない。そのため、二波モデルの近似式として、自由空間における RSSI の減衰特

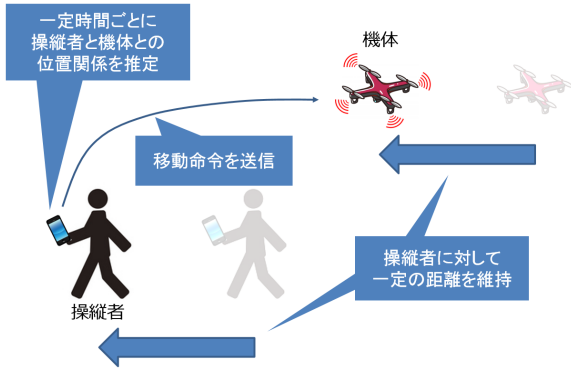


図 4 飛行イメージ

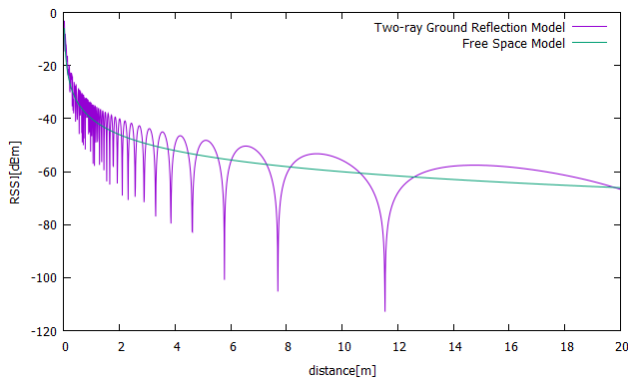


図 5 電波の減衰特性

性を用いて距離を推定する。自由空間における距離に対する RSSI の減衰特性は式 (1) で表される。

$$RSSI = -20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

d [m] : 送受信機間の距離
 λ [m] : 電波の波長

$RSSI$ [dBm] : 距離 d [m] における RSSI

送受信機間の強度利得を考慮しない場合の自由空間においては、式 (1) をそのまま適用できる。しかしながら、実環境では、気温や湿度等の周囲の環境変化や、送受信機による強度利得の個体差が RSSI の減衰特性全体の強さに大きく影響する。そのため、これらの影響による RSSI の変化を定数項の環境係数 C として定義する。環境係数を含めた自由空間における RSSI の減衰特性を式 (2) に示す。

$$RSSI = -20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + C \quad (2)$$

C [dBm] : 環境係数

環境係数は既知な距離から数十秒間の RSSI 計測を行い、その間に取得した RSSI データの平均値と計測時の距離を用いて計算する。以後、環境係数を決定する一連の行為をキャリブレーションと呼ぶ。

3.2 方向推定手法

方向の推定には田澤ら [8] の提案した、3 素子のアレー

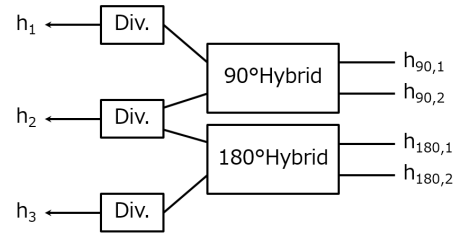


図 6 方向推定用ビーコンの構成

アンテナを搭載した特殊なビーコン装置を用いた手法を利用する。田澤らは、電波の RSSI から DOD (Direction-of-Departure) を計算することで方向を推定している。図 6 に方向推定用ビーコンの構成図を示す。図中の $h_{90,1}$, $h_{90,2}$, $h_{180,1}$, $h_{180,2}$ は装置に接続された 4 つのビーコンの信号を表し、 h_1 , h_2 , h_3 は 3 素子アレーアンテナから送信されるビーコンの信号 (以後、アンテナ信号) を表す。 $h_{90,1}$, $h_{90,2}$, $h_{180,1}$, $h_{180,2}$ には、90 度ハイブリッド回路と 180 度ハイブリッド回路を用いた移相器が接続されている。この移相器により、4 つのビーコン信号の RSSI から 3 つのアンテナ信号の RSSI が計算できる。4 つのビーコン信号と 3 つのアンテナ信号の関係は式 (3) で表される。

$$\begin{pmatrix} |h_{90,1}|^2 & |h_{90,2}|^2 \\ |h_{180,1}|^2 & |h_{180,2}|^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{4} \begin{pmatrix} A - jh_1h_2^* + jh_1^*h_2 & A + jh_1h_2^* - jh_1^*h_2 \\ B + h_2h_3^* + h_2^*h_3 & B - h_2h_3^* - h_2^*h_3 \end{pmatrix}$$

$A : |h_1|^2 + |h_2|^2$
 $B : |h_2|^2 + |h_3|^2$

導出したアンテナ信号の RSSI より、特殊ビーコンと受信機との伝搬チャネルの相関行列 R を求め、この相関行列に対して MUSIC (Multiple Signal Classification) 法を適用することで DOD を推定する。相関行列 R は直接波が支配的であると仮定すると式 (4) で表すことができる。

$$R = \begin{pmatrix} |h_1|^2 & h_1h_2^* & h_1h_3^* \\ h_1^*h_2 & |h_2|^2 & h_2h_3^* \\ h_1^*h_3 & h_2^*h_3 & |h_3|^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\approx \begin{pmatrix} |R_{12}| & |R_{12}|e^{j\alpha} & R_{13} \\ |R_{12}|e^{-j\alpha} & |R_{12}| & |R_{23}|e^{j\beta} \\ R_{13}^* & |R_{23}|e^{-j\beta} & |R_{12}| \end{pmatrix}$$

{ \cdot }^{*} : 複素共役

$$\alpha \approx \sin^{-1} \left(\frac{|h_{90,1}|^2 - |h_{90,2}|^2}{|h_{90,1}|^2 + |h_{90,2}|^2} \right), \quad (5)$$

$$\pi - \sin^{-1} \left(\frac{|h_{90,1}|^2 - |h_{90,2}|^2}{|h_{90,1}|^2 + |h_{90,2}|^2} \right) \quad (6)$$

$$\beta \approx \pm \cos^{-1} \left(\frac{|h_{180,1}|^2 - |h_{180,2}|^2}{|h_{180,1}|^2 + |h_{180,2}|^2} \right) \quad (7)$$

式 (4) において、 α , β はそれぞれ R_{12} , R_{23} の偏角を表

表 1 開発環境

使用機体	DJI Matrice100
使用ビーコン	ERi BLUETUS BLU-250
使用端末	SONY XperiaZ3 Tablet Compact SGP612
動作 OS	Android4.1 以上
開発言語	Java7 系
統合開発環境	Android Studio 2.2.1
使用ライブラリ	BluetusReceiver_BLE_v2.6.1.0 libmusic-v1.0.0
使用 SDK	DJI Mobile-SDK-Android

し、式 (5)、式 (6) および式 (7) で計算される。ただし、偏角は 2 通りずつ計算されるため、 α と β の差を求め、最も小さくなる組み合わせを真の解の組み合わせとして選択する。

4. ハイブリッド航法システム

4.1 提案航法の概要

提案航法では、離着陸等の単純な操作をハイブリッド型航法システムの内の手動操縦で行い、移動や方向転換等の精密な操作を自動追尾で行う。手動操縦に関しては、運用する機体に対応する遠隔操作機器等を用いて容易に実現できるため、本稿では自動追尾航法の開発についてのみ述べる。

本システムの開発環境を表 1 に示す。使用機体の Matrice 100 は DJI 社の開発者向けの製品で、専用の遠隔操作機器を介して、Android 端末や iOS 端末から制御することができる。また、積載容量の範囲内であれば Raspberry PI や Arduino、独自開発の電子回路等の電子機器を搭載することもできる。使用ビーコンの BLUETUS は株式会社 ERi の製品で、送信電力 +4 [dBm]、アドバタイズ間隔 100 [ms] でアドバタイズ数 5 個の BLE 信号を発信する。使用ライブラリや SDK として、ERi 提供の BLUETUS 専用ライブラリ、DJI 提供の DJI 製品専用 SDK を使用する。

4.2 自動追尾航法

図 7 に提案するハイブリッド型航法システムの全体フローチャートを示す。まず、対応する遠隔操作機器等による手動操縦によって機体の離陸を行う。次にキャリブレーションと自動追尾に必要な各システム値の計算を行う。キャリブレーション完了後、機体制御用 API による操作を有効化する。この際、ビーコンの受信開始と機体制御命令の初期化も同時に行い、その後、追尾制御部を動作させる。追尾制御部では、距離推定部および方向推定部、移動制御部と回転制御部から構成される機体制御部がそれぞれ並列に動作する。追尾停止後、API 操作を無効化し同時にビーコンの受信を停止した後、手動操縦による着陸を行う。ここで、受信できるビーコン信号の情報はそれぞれのビーコンに対して固有に設定された識別 ID、観測された

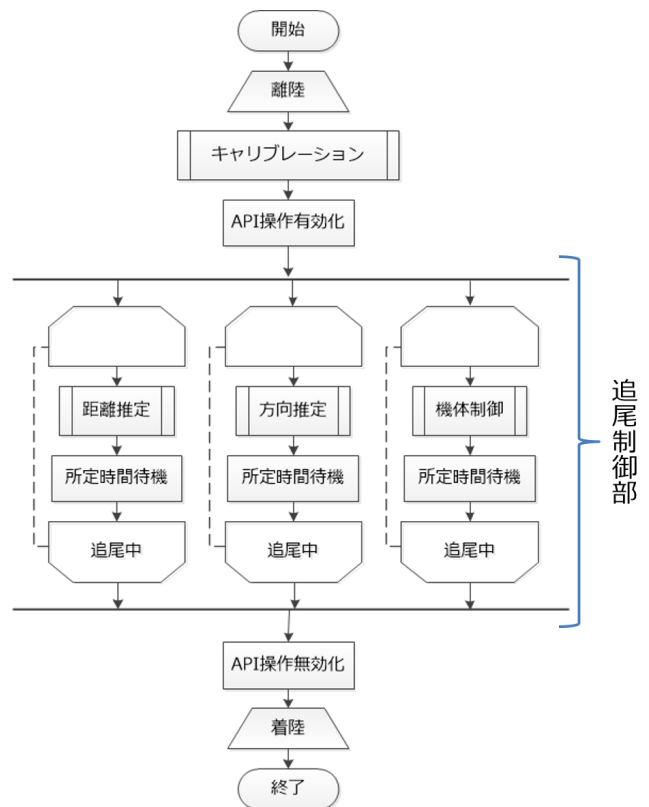


図 7 自動追尾航法全体フローチャート

RSSI、送信に用いられたアドバタイズチャンネルとする。

4.2.1 キャリブレーション

キャリブレーション距離の入力後、ビーコン信号の受信を開始する。受信したビーコン信号は、予め設定した使用するビーコンの識別 ID を用いて蓄積するか否かを判定する。ビーコン信号の蓄積は指定した時間分だけ、所定時間のカウントダウンは Android のタイマー機能を用いて制御する。指定した時間分の信号蓄積が終了した後、ビーコン信号の受信を停止し、それまでに蓄積された信号の RSSI データを取得する。この際、蓄積データの個数が不十分な場合はそれまでの蓄積データを破棄し、再度信号の受信を開始する。蓄積データの個数が十分に存在する場合、それまで蓄積された RSSI データの平均とキャリブレーション距離から環境係数と標準偏差を計算する。環境係数の計算には、式 (2) を C について変形した式 (8) を用いる。この際、使用した平均 RSSI を維持する RSSI とし、入力されたキャリブレーション距離を維持する距離とする。

$$C = RSSI_C + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_C}{\lambda} \right) \quad (8)$$

C [dBm] : 環境係数

$RSSI_C$ [dBm] : 平均 RSSI

d_C [m] : キャリブレーション距離

4.2.2 距離推定

図 8 に距離推定のフローチャートを示す。受信したビーコンの RSSI は等しい距離での送受信であっても厳密に一

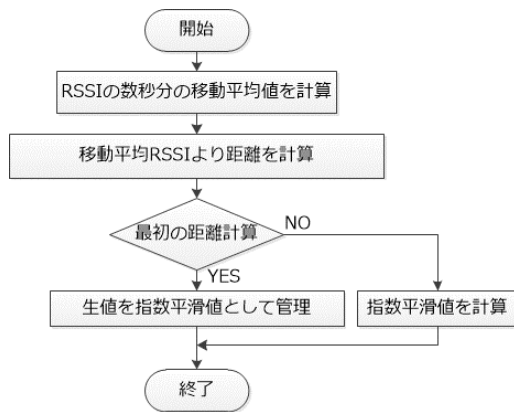


図 8 距離推定のフローチャート

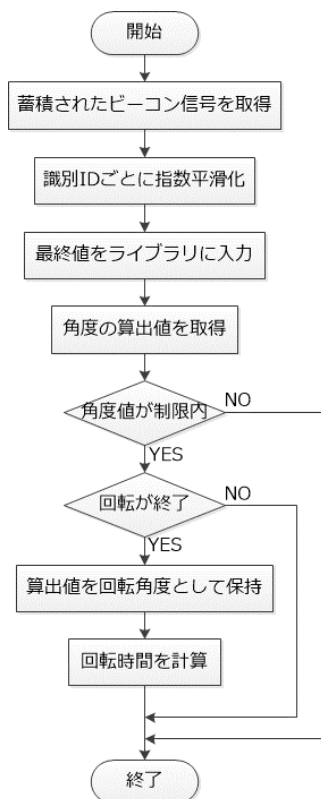


図 9 方向推定のフローチャート

定となることはなく、ばらつきが発生する。そのため、移動平均法を用いて RSSI データの平滑化を行う。移動平均に用いるデータの個数は所定の数秒間の内に受信した信号の個数とする。

4.2.3 方向推定

方向推定部は所定の時間間隔で動作し、その間に受信したビーコン信号を用いて方向を推定する。BLE では送信時のアダプタイズチャンネルの違いが RSSI の強さに大きく影響するため、アダプタイズチャンネル毎に分けてビーコン信号の蓄積を行う、また、蓄積された RSSI のデータは角度の算出に使用された後破棄する。

図 9 に方向推定のフローチャートを示す。方向推定用ライブラリには識別 ID 毎にビーコン信号が入力され、出力

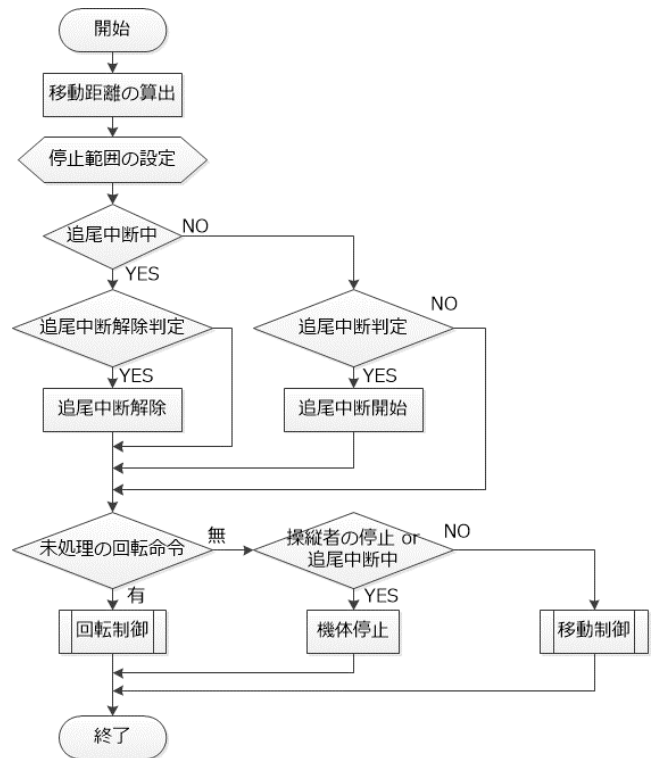


図 10 機体制御のフローチャート

として回転角の値を得る。角度の値は度数法で表現され、 -180 [deg] から $+180$ [deg] の範囲の値を取る。また、回転角の取得後に安全確認を行い、安全が確認できた場合のみそれ以降の処理を実行する。

4.2.4 機体制御

機体制御全体のフローチャートを図 10 に示す。機体制御部では、主に停止範囲の設定と追尾中断判定、制御タスクの選択を行う。

停止範囲は維持する RSSI を基準にキャリブレーション時に計算した標準偏差の値を用いて設定する。具体的な範囲は式 (9) および式 (10) を用いて導出する。

$$\min = \frac{\lambda}{4\pi} \times 10^{-\frac{RSSI_{stop} + RSSI_{stdev} - C}{20}} \quad (9)$$

$$\max = \frac{\lambda}{4\pi} \times 10^{-\frac{RSSI_{stop} - RSSI_{stdev} - C}{20}} \quad (10)$$

\min [m] : 停止範囲下限

\max [m] : 停止範囲上限

$RSSI_{stop}$ [dBm] : 維持する RSSI

$RSSI_{stdev}$ [dBm] : 標準偏差

次に追尾が困難であると予想される場合の判定を行う。追尾中に追尾が困難であると判定された場合は追尾を中断し、追尾中断中に追尾が再開できる状態に戻った場合は追尾の中断を解除する。追尾が困難であると判定される条件は、一定時間以上ビーコン信号が受信できなかった場合と算出された距離が一定以上離れていた場合である。これらの条件の内、どちらか一方が真となった時、追尾を中断する。また、追尾が再開できる状態と判定される条件は算出

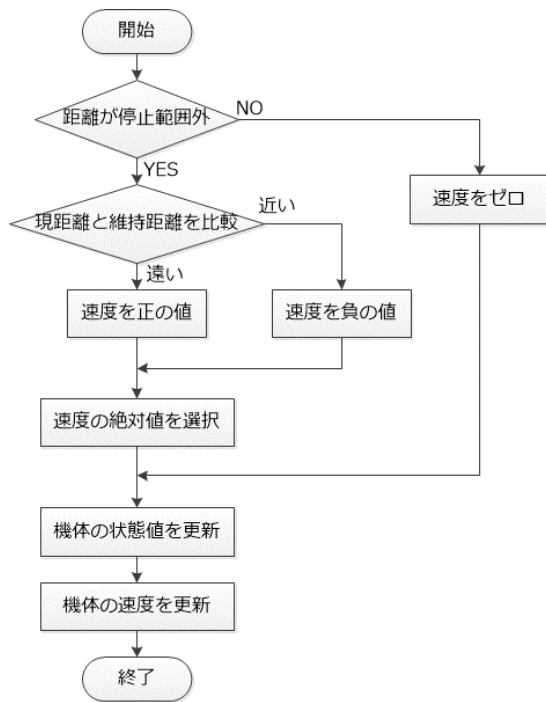


図 11 移動制御のフローチャート

された距離が、一定時間以上停止範囲の上限値よりも近くなっていた場合である。この条件が真となった時、追尾を再開する。

次に移動制御、回転制御、停止制御の三種類の制御タスクの中から、一つの制御タスクを選択する。選択の優先度は移動に関する制御タスクより回転制御タスクを高く設定し、移動に関する制御の中でも停止制御タスクを高く設定する。停止制御タスクに関しては、機体を停止するのみのタスクであるため、次節では移動制御タスクおよび回転制御タスクについてのみ述べる。

(1) 移動制御

図 11 に移動制御のフローチャートを示す。移動方向と速度を決定する前に機体を停止すべきか否かを判定する。

移動方向は維持する距離に対して現在の距離が遠くなっている場合、前方とし、近くなっている場合、後方とする。この際、前提として、操縦者が機体の前方、すなわち機首の方向にいる状態から追尾を開始する。

移動速度の決定は、移動方向が前方となっている場合、後方となっている場合それぞれに対して、三段階分の数値を設定し、維持する距離と現在の距離との差に応じて値を選択することで決定する。移動速度の値は、維持する距離と現在の距離との差が大きいほど速い値を選択し、小さいほど遅い値を選択する。

(2) 回転制御

回転制御部では、機体の回転方向と回転角度の制御を行う。SDK では角速度を入力としているが、提案航法では、角速度を一定とすることで回転時間による制御として扱う。

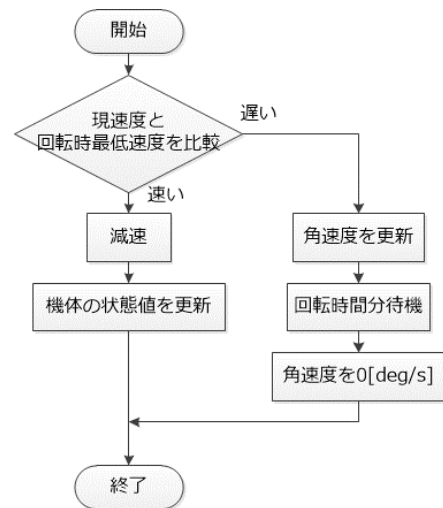


図 12 回転制御のフローチャート

図 12 に回転制御のフローチャートを示す。回転は機体の制御信号を一定値として設定した角速度値に更新することで実行する。また、安全のため回転を実行する前に減速を行う。回転の終了はタイマー制御を用いて行い、回転時間経過後に角速度を 0 [deg/s] に更新することで停止する。

5. 評価実験

5.1 実験目的

提案した航法システムに対して、二つの予備実験と一つの評価実験を行う。一つ目の予備実験では、直線経路における操縦者の移動に対する機体の移動距離および方向を観測することで、距離推定の精度を検証する。二つ目の予備実験では、機体の正面に対して様々な角度から提案手法による方向推定を行うことで、方向推定の精度を検証する。二つの予備実験の検証結果を総合し、位置推定手法の精度検証とする。評価実験では、予め設定した直線、曲線を含む経路を操縦者が歩行し、その際の機体の移動軌跡を計測することで、提案航法システムの追尾精度を評価する。

5.2 実験方法

図 13 に実験に使用した機体と各ビーコンの取り付け位置を示す。各脚には距離推定用のビーコンをそれぞれ 1 個ずつ、合計 4 個取付ける。距離推定精度安定化のため、距離推定時には、これらのビーコンの RSSI の平均値を距離算出に用いる。また、機体上方には特殊ビーコンの本体を取り付け、前方には 3 素子のアレーアンテナを取り付ける。

5.2.1 予備実験

(1) 距離推定精度検証実験

図 14 に距離推定精度検証実験の概要図を示す。この実験では、全長 15 [m] の直線経路を往復し、操縦者が 5 [m] 移動する毎に機体の位置を計測する。次に実験手順につい

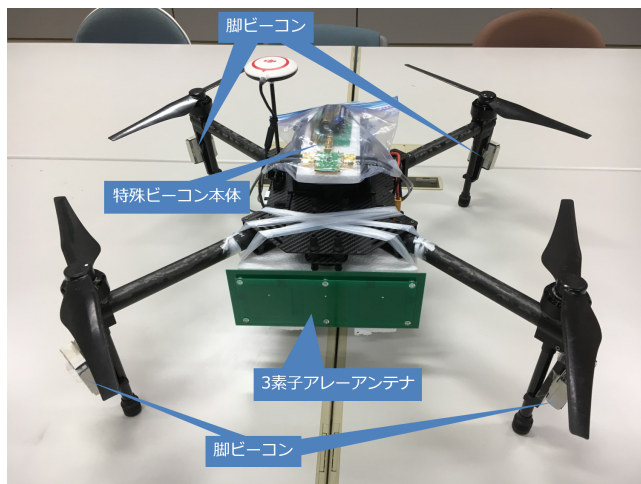


図 13 実験機体の構成

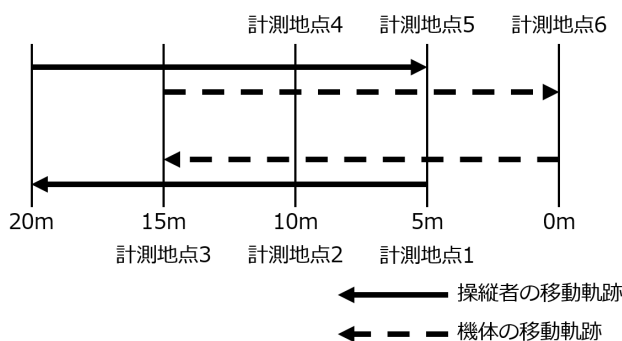


図 14 距離推定精度検証実験の概要

て述べる。まず、機体と操縦者との間に 5 [m] の間隔を取る。操縦者は機体から離れる方向に 5 [m] の地点まで歩行し、一旦停止する。機体が停止するまで待機した後、機体の位置を測定する。操縦者は再び歩行を開始し、10 [m] の地点へ移動後、同様に機体の位置を計測する。15 [m] 地点での計測が完了した後、操縦者は反対方向に歩行し、往きと同様に機体の位置を 5 [m] 毎に計測する。一回の往復を一回の実験とし、この実験を計 5 回行う。

(2) 方向推定精度検証実験

図 15 に方向推定精度検証実験の概要図を示す。この実験では機体の正面に対して、 ± 40 [deg] の範囲内で 10 [deg] 毎に角度を計測する。次に実験手順について述べる。まず、機体と操縦者との間に 5 [m] の間隔を取り、機体の正面に対して -40 [deg] の位置から実験を開始する。操縦者はその位置から 5 分間の角度推定を行う。次に、機体の正面に -30 [deg] の位置に移動し、同様に角度推定を行う。計測する角度を変更する際は、機体と操縦者との間隔が変化しないように行う。10 [deg] 毎に同様の計測を行い、これを $+40$ [deg] の地点まで行う。一つのデータは 30 [s] 間で出力される推定値の最頻値とする。

5.2.2 追尾精度検証実験

この実験では操縦者が 400 [m] の陸上用トラックに沿っ

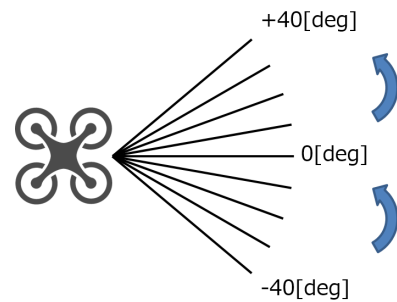


図 15 方向推定精度検証実験の概要

表 2 距離推定精度検証実験の測定値

理論値 [m]	測定値 [m]		誤差平均 [m]		標準偏差 [m]	
	往き	帰り	往き	帰り	往き	帰り
0	0.00	-0.18	0.00	0.18	0.00	1.09
5	3.73	3.86	1.27	1.14	1.51	0.75
10	9.45	9.88	0.55	0.12	1.86	0.82
15	14.46	14.46	0.54	0.54	1.50	1.50
平均			0.59	0.50	1.22	1.04

て一定速度で歩行し、一定間隔で機体の実位置を記録する。機体の実位置の記録は機体の真下にマーカーを配置し、追尾終了後に Google Maps における同位置にプロットすることで行う。

5.3 実験結果

5.3.1 位置推定精度

(1) 距離推定精度

表 2 および図 16 に距離推定精度検証の測定結果を示す。往きの誤差平均の最大値は 5 [m] 地点で 1.27 [m] となり、帰りの誤差平均の最大値は 5 [m] 地点で 1.14 [m] となった。往きと帰り全体での誤差平均はそれぞれ 0.59 [m], 0.50 [m] となり、いずれも 1 [m] 以内に抑えることができた。往きの標準偏差の最大値は 10 [m] 地点で 1.86 [m] となり、帰りの標準偏差の最大値は 15 [m] 地点で 1.50 [m] となった。往きと帰りそれぞれにおける標準偏差の平均値は、それぞれ 1.22 [m], 1.04 [m] となり、往路復路いずれも安定した値が計測できていることが分かる。

(2) 方向推定精度

表 3 および図 17 に方向推定精度検証の測定結果を示す。誤差平均の最大値はプラス側が 20.00 [deg]、マイナス側が 31.90 [deg] で、共に 40 [deg] 地点であった。また、誤差平均と標準偏差の平均値に関しても全体ではそれぞれ、8.36 [deg], 3.69 [deg] であったのに対し、 ± 30 [deg] の範囲に限定した場合は、それぞれ 3.33 [deg], 1.76 [deg] と双方で精度の向上が見られた。

5.3.2 追尾精度

操縦者の軌跡に対する機体の軌跡は図 18 の通りである。この実験では、直線の中央付近、曲線の入口付近、中央付近、出口付近の計八か所にそれぞれチェックポイントを設

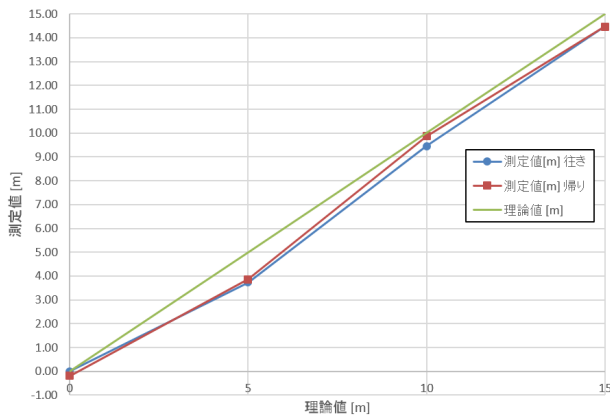


図 16 距離推定精度検証実験の結果

表 3 方向推定精度検証実験の測定値

理論値 [deg]	平均 [deg]	誤差平均 [deg]	標準偏差 [deg]
+40	20.00	20.00	0.00
+30	30.00	0.00	0.00
+20	30.37	10.37	1.89
+10	10.00	0.00	0.00
0	10.00	10.00	0.00
-10	-8.52	1.48	5.24
-20	-19.25	0.75	2.64
-30	-29.29	0.71	2.58
-40	-8.10	31.90	20.84
平均			
± 40 [deg]		8.36	3.69
± 30 [deg]		3.33	1.76

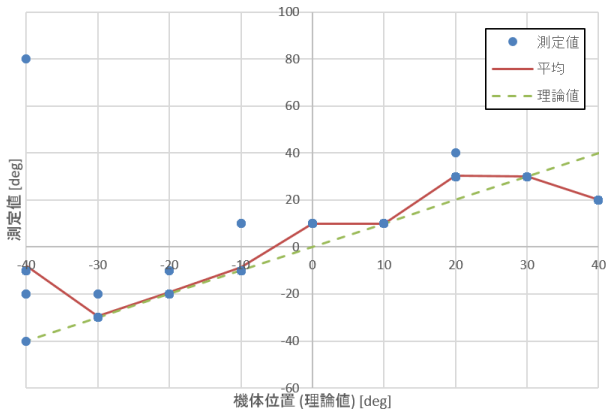


図 17 方向推定精度検証実験の結果

け、その地点における操縦者の軌跡との誤差を計算した。その中でも最大値は曲線部分の出口付近に当たる check4 の地点で 3.3 [m] となり、最小値は曲線部分の中央付近に当たる check3 の地点で 0.0 [m] となった。

6. おわりに

本研究では、手動操縦と自動追尾航法を併用したハイブリッド型航法システムのための自動追尾航法として、BLE

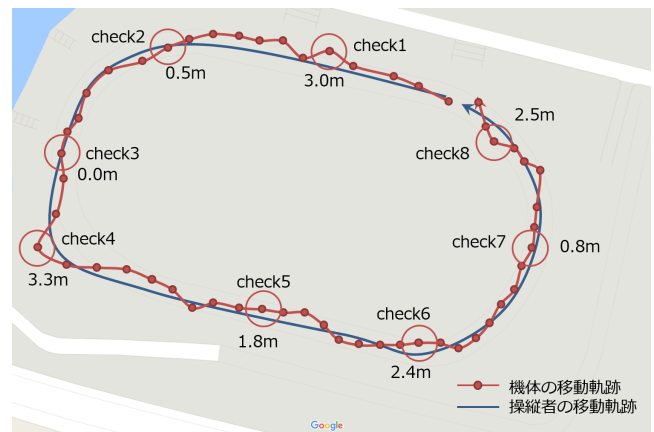


図 18 追尾精度検証実験の結果

ビーコンの RSSI を用いた手法を提案し、実装した。自動追尾航法に用いた位置推定手法の精度は距離推定が誤差 1 [m] 以内、方向推定が誤差 4 [deg] 以内となった。しかしながら、方向推定精度に関しては、30 [deg] 以上の広い角度において、推定精度が著しく低下することも明らかとなった。また、自動追尾航法としては直線、曲線共に追尾可能であることを示し、操縦者の軌跡に対して、誤差 4 [m] 以内となった。

今後の課題としては、真横や真後ろに操縦者が移動した場合の制御を確立することや、Phantom4 の Active Track 機能との比較検証を行うこと、屋内環境における実証実験等が挙げられる。

参考文献

- [1] 岡田薫, 清嶋直樹, 高橋健太郎: モノのインターネットの全貌, 日経コンピュータ, No.904, pp.22-47 (2016)
- [2] 間野直哉, 鈴木太郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一: 災害情報収集のための小型 UAV 搭載シンバルカメラを用いた物体追跡に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2010, pp."1A2-C14(1)"-"1A2-C14(3)" (2010)
- [3] 木下篤彦, 島田徹, 笠原拓造, 林栄明, 名草一成, 小川内良人, 村木広和: 回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査, 砂防学会誌, Vol.66, No.3, pp.51-54 (2013)
- [4] 小林一行, 御園祐介, 渡辺嘉次郎, 大久保友幸, 栗原陽介: 複素カルマンフィルタを用いたウェイポイントナビゲーションの実装, 知能と情報, Vol.21, No.1, pp.90-99 (2009)
- [5] 森亮介, 平田健一, 玉置健, 米澤尚晃: 視覚情報に基づく小型無人ヘリコプタの誘導制御, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.8, pp.905-912 (2008)
- [6] DJI PHANTOM4 — 安全飛行は、空撮の新しい選び方, DJI (オンライン), 入手先 < <http://www.dji.com/jp/phantom-4> >
- [7] DJI PHANTOM4 ユーザーマニュアル, V1.2, pp.81-50 (2016)
- [8] 田澤遼太, 石井知貴, 本間直樹, 三浦淳, 南澤博仁: RSSI による 3 素子アレーを用いた屋内位置推定手法, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.2016, p.B-1-201 (2016)