



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



複数無人航空機による同時観測を可能とする高応答 追尾アンテナ制御システムの性能評価

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2016-06-27 キーワード (Ja): 追尾アンテナ, 2自由度制御, 高応答, 無人航空機(UAV) キーワード (En): Tracking antenna, 2 DOF control, Highly responsive, Unmanned air vehicle 作成者: 上羽, 正純, 高久, 雄一, 樋口, 健 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10258/00008942 |

複数無人航空機による同時観測を可能とする高応答 追尾アンテナ制御システムの性能評価

| | |
|--------------------|---|
| その他（別言語等） のタイトル | Study on highly responsive tracking antenna control system for simultaneous observations by unmanned air vehicles |
| 著者 | 上羽 正純, 高久 雄一, 樋口 健 |
| 雑誌名 | 電子情報通信学会技術研究報告 |
| 巻 | 115 |
| 号 | 448 |
| ページ | 17-21 |
| 発行年 | 2016-02-16 |
| URL | http://hdl.handle.net/10258/00008942 |

複数無人航空機による同時観測を可能とする高応答追尾アンテナ 制御システムの性能評価

上羽 正純† 高久 雄一† 樋口 健†

†室蘭工業大学大学院 〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1

E-mail: {ueba, y.takaku, higuchi}@mmm.muroran-it.ac.jp

あらまし 近年、マルチコプターを始めとする無人航空機の観測利用が試みられている。しかしながら、災害時の被災エリアあるいは大型建造物を迅速にかつリアルタイムで観測するといった場合、複数の無人航空機と追尾アンテナを有する複数の地上局を用いて、それらが追尾する無人航空機の切替も含めて、途絶が可能な限りない通信リンクを確保する必要がある。筆者らはこれまで定常飛行する無人航空機を高精度で追尾し、かつ、対象となる無人航空機を切り替える場合、高応答な追尾アンテナ制御システムを提案し、高応答のため2自由度制御系への提供により切替え時間が短縮できることを確認した。本検討は、実際に追尾アンテナ制御システムを製作し、2自由度制御系の性能を評価した結果を報告する。

キーワード 追尾アンテナ, 2自由度制御, 高応答, 無人航空機(UAV)

Study on highly responsive tracking antenna control system for simultaneous observations by unmanned air vehicles

Masazumi UEBA† Yuichi TAKAKU† and Ken Higuchi†

† Muroan Institute of Technology 27-1 Mizumoto-cho Muroran-city, Hokkaido, 050-8585, Japan

E-mail: {ueba, y.takaku, higuchi}@mmm.muroran-it.ac.jp

Abstract Recently technologies for unmanned air vehicle(UAV) itself as well as its application to observation are widely studied. However, in order to observe the large disaster area or large damaged buildings by unmanned air vehicle in real time, it is necessary to use several UAVs and several tracking antenna systems which constitute wireless communication link without intermittence. To realize the communication link, authors have proposed highly accurate and highly responsive tracking antenna control system and confirmed that the control system with 2 degrees of freedom was effective in reducing switching time. This study describes the trial product of the tracking antenna system made and evaluation results of the highly responsive control performance.

Keywords Tracking antenna, 2 DOF control, Highly responsive, Unmanned air vehicle

1. はじめに

近年、無人航空機 (Unmanned Air Vehicle: 以下 UAV と称す。)そのものについては航空宇宙関連の研究機関及び大学において自律飛行技術の実証を目的に、また、無人航空機の用途拡大については観測ミッション・通信中継に関する技術を目的に盛んに研究開発が推進されている。このような UAV の飛行技術及びそれを用いた利用技術の確立には、UAV の飛行状態・搭載機器の状態を確実に把握する遠隔監視制御系の運用や、搭載機器により観測したデータを送信するためのブロードバンドワイヤレスシステムが必須である。

一般に UAV の飛行技術としては、自律飛行させるた

めの技術に加えて、UAV が飛行状態を把握するためにはテレメトリ通信回線が、更にはその飛行状態に応じて飛行モード等、あるいは緊急事態地上からのコマンドを送信するためのコマンド通信が途絶することなく確立されていることが不可欠である。

さらに、被災地域の状況を広域で、あるいは大型建造物の状況を詳細にリアルタイムで観測するといった場合には、図1に示すような複数 UAV 及び複数地上局を用いた観測システム^[1]が有効であると考えている。

従って、複数の UAV を使用して、UAV を地上局アンテナで高精度に追尾する制御技術、飛行に伴う複数 UAV と追尾アンテナ間の通信状況の変化や建物の影

に入ることによる通信リンクの切断に対応し、追尾対象を高速に切り替えるといった高応答な制御技術が必要である。

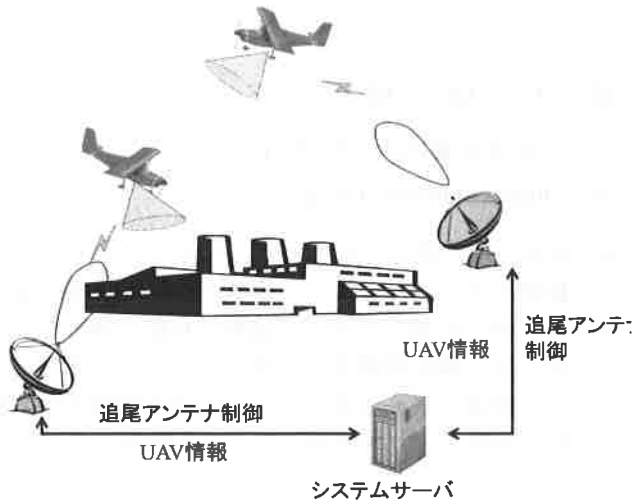


図1 複数 UAV および複数追尾アンテナによる観測システム

本報告では、上記のシステムの実現に向けて、追尾アンテナ制御システムを試作し、必要とされる性能のうち、応答性について確認した結果を報告する。

2. 提案追尾アンテナシステム

2.1. システム概要

図2に提案追尾アンテナ制御系を示す。地上局追尾アンテナ、追尾カメラで構成される。

追尾カメラにより広角で UAV の映像を捉え、大まかな角度情報を取得する。この角度範囲内（角度範囲 90° 、分解能約 0.15° ）にある UAV を捕捉した後は、追尾アンテナを駆動し、カメラ画面中心等に UAV が来るように追尾する。次に UAV から搭載されている慣性航法装置により計測された位置・速度情報がテレメトリ回線を通じて追尾アンテナに送信されている。こ

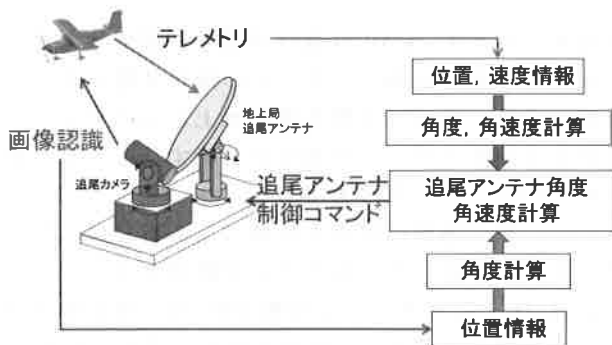


図2 提案追尾アンテナ制御系

の情報をを用いて、画像での UAV 捕捉ののち、確実にテレメトリ回線並びに観測したデータを送信するための無線通信回線を確保する。送信される UAV の位置・速度情報は追尾角速度・角度のコマンドとして使用する^[2]。追尾アンテナ制御に求められる追尾制御精度は追尾アンテナの通信回線のリンクバジェットより、対象 UAV を切り替える時の応答性はステップ応答の整定時間により決定される。

2.2. 追尾目標性能

追尾アンテナ制御システムに求められる制御性能は、本システムの使用方法によって異なる。即ち、a) カメラにより取得した UAV の画像により捕捉・追尾する場合、b) UAV に搭載された慣性航法装置で計装された位置・速度情報を基に定常追尾する場合、c) 追尾する UAV を切り替える場合の3つに分類される。

a) カメラ取得画像による捕捉・追尾

本捕捉・追尾は、UAV からのテレメトリ情報が得られない初期段階において、カメラで取得した UAV の画像により捕捉する、また、これはテレメトリ情報途絶の場合においても追尾可能にする機能である。

そのため、精度は劣化するものの、計測範囲を重視する。表1に示すような性能のカメラ及び画像取得装置を使用する。取得した画像より UAV を認識し、周期 20ms で UAV の画面上の位置情報 (X, Y 座標) が送出される

表1 カメラ及び画像装置処理性能

| | |
|----------|------------------------------|
| FOV | $60^\circ \times 45^\circ$ |
| 画素数 | 640 pixel \times 480 pixel |
| 計測及び処理周期 | 20ms |

画像中心位置が 10 ピクセル程度変動すると仮定して、捕捉追尾誤差は約 1° とした。なお、UAV の認識は、UAV に搭載した LED と背景との輝度値の差を利用して行う^[4]。

b) 定常追尾時

全体の目標指向方向精度をビーム幅の 20 分の 1 とし、ビーム幅約 9° のアンテナを用いると想定し、約 0.5° とした^[3]。

これに基づくと表2に示すように指向方向精度の内訳は追尾制御自身の制御誤差と位置の不確か性である。GPS の位置精度を 2m、追尾対象位置までの距離を 400m 程度とすれば角度誤差で 0.3° となり、これにより UAV 搭載の慣性航法装置よりテレメトリ回線を通して得られる位置・速度情報を用いた追尾アンテナ制御精度としては 0.4° が目標値とした。

表 2 目標指向方向誤差

| | |
|--------------|-----|
| GPS 不確定性(°) | 0.3 |
| アンテナ追尾制御(°) | 0.4 |
| 提案追尾制御系全体(°) | 0.5 |

c) 切替制御時

1km 四方の 4 隅に追尾アンテナを有する地上局が配備され、その中心点から半径 350 m の円周上を 3 機の UAV が等間隔で飛行する状況を想定する。この場合、UAV が円の 4 分の 1 を飛行する時間は、最速で 16.5 秒程度であり、この時間間隔で 1 回の切替が発生する。切替による物理的な回線断時間をその 1% とすると 0.165 秒以下の時間で追尾アンテナを駆動、整定させる必要がある。よって、約 0.16 秒を高応答制御の整定時間の目標値とする。また、異なる UAV への切替するためには所望の角度範囲を動作することが必要である。これらをまとめると表 3 のようになる。

表 3 高応答制御系への要求性能

| | |
|-------|--------------------------------|
| 方位角範囲 | -45° ~ +45° (コーナーから中心点方向基準) |
| 迎角範囲 | 0~60° (水平面基準) |
| 整定時間 | 0.16 秒 |

3. 追尾アンテナ制御系構成

a) 定常追尾用制御系

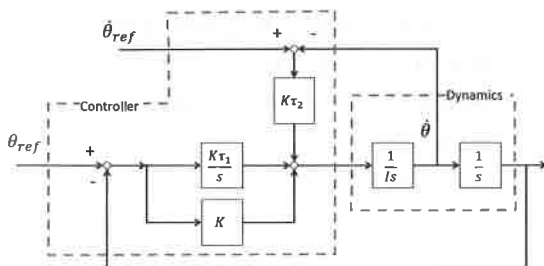


図 3 定常追尾用制御系

図 3 に UAV を定常的に追尾する制御系構成を示す。本制御系は、画像による UAV 追尾時、UAV に搭載した慣性航法装置により計測、テレメトリ回線により送信される位置、速度を追尾アンテナへの角度コマンド θ_{ref} 、角速度コマンド $\dot{\theta}_{ref}$ として用いる。制御器としては PID 要素を使用している。

b) 高応答制御系

切替え時間を短くするには、追尾アンテナを素早く応答させ、次に対象とする UAV がある角度方向に向け、

整定させる必要がある。一般的にはフィードバック制御において制御帯域のみを上げていくと、素早く応答するものの、オーバーシュートが大きくなり、残留振動により定時間が長くなる傾向がある。そのため、2つの要求を満たすための手法として、フィードバック制御による目標値への安定的な収束に加えて、フィードフォワード制御ループを付加する図 4 に示すような 2 自由度制御系^[5]を構成することが有用である。

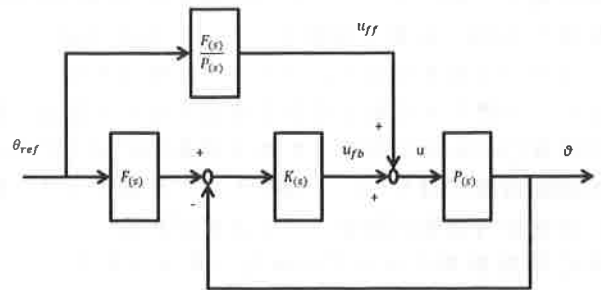


図 4 高応答制御系

図 4 において $F(s)$ は、所望の応答を表す伝達関数である。2 自由度制御系においては下記の 2 つの条件を満たす必要がある。

- $F(s)/P(s)$ はプロパーかつ、分母の解の実数部が負。
- フィードバック制御系が内部安定、即ち特性方程式の解の実数部が負であること。

上記 2 つの制御系については、シミュレーションによる制御性能の評価の結果、定常追尾制御系については、追尾制御誤差が $\pm 0.2^\circ$ 程度であること、高応答制御系については、整定時間が、従来の PID 制御系をの 0.33 秒、2 自由度制御系を用いることにより 0.095 秒であることを確認している^[6]。

4. 製作追尾アンテナ制御システム

図 5 に示すように 2 軸ジンバル構成の雲台を用いた追尾アンテナ制御システムの製作を行った。目標性能より必要とされる要求性能と、それを実現するために使用したハードウェア性能ならびに構成及びインターフェイスについて述べる。

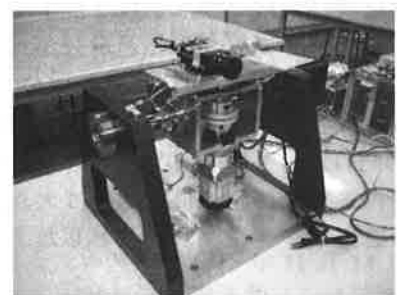


図 5 製作追尾アンテナ制御システム

4.1. 要求性能

2. で述べた制御精度ならびに切替時間を達成するために必要なハードウェアの性能としては、エンコーダーの分解能ならびに、駆動モーターの最大回転速度・発生トルクである。

目標指向方向精度のうち、追尾アンテナ制御に求められる誤差は 0.4° であることから、雲台のジンバル回転角計測のためのエンコーダーの精度は、その 10 分の 1 程度の 0.04° を要求性能とした。これは 360° で 1 万パルス以上発生するエンコーダーに相当する。

また、目標とする聖定時間を達成するためには、取付治具及びその上に設置したカメラ及びアンテナからなる回転対象に対して、十分なトルクを発生させ、瞬時に大きな角速度に到達させる必要がある。

高応答制御系について行ったステップ応答シミュレーション結果より、その時の角速度、角加速度は図 6 のようなになる。ステップ応答の目標角度としては、

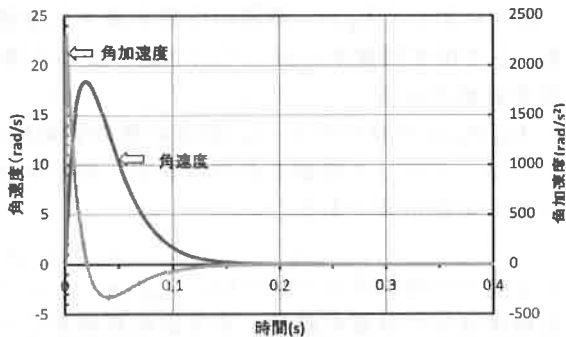


図 6 高応答制御系の角速度、角加速度プロフィール

1 rad (約 57°) を用いた。

角度範囲の大きい方位角については、最大角速度 18 rad/s, 最大角加速度 2280 rad/s^2 となる。搭載物込みの回転対象の慣性性能率 $I=4.0 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ に対して搭載物の変化及び余裕の観点から 2 倍までを想定し、18.2Nm のトルクが必要となることが分かった。

仰角については、切替対象の UAV の高度位置に依存するものの同一円周上に存在する UAV からの切替では、仰角は $10 \sim 30^\circ$ 以内の変化とした。しかしながら、後述のように仰角の慣性性能率は大きくなるため、同程度の必要トルクを要求性能とした。

4.2. ハードウェア諸元

4.1 の結果に基づき構築した 2 軸ジンバル雲台の性能を表 4 に示す。ジンバル駆動用のモーターとしてサーボモーターとハーモニックギアを組み合わせ、必要な角速度及びトルクを確保した。

表 4 雲台用エンコーダー及びモーター性能

| | | |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|
| 角度分解能 | $4 \times 10^{-4} \text{ }^\circ$ | |
| 最大角速度 | 仰角 | $360^\circ / \text{s}$ |
| | 方位角 | $1632^\circ / \text{s}$ |
| 最大駆動トルク | 仰角 | 24 Nm |
| | 方位角 | 21 Nm |

雲台のジンバル構成については、短時間で切替が必要な方位角回りの駆動慣性性能率が小さくなるように方位角軸を内側にし、仰角軸を外側に配置する構成とした。これは通常の 2 軸ジンバルと逆の構成である。これにより、方位角軸回りの慣性性能率小さくなったものの、逆に仰角を実現する軸を通すために、仰角回りの慣性性能率が増大している。なお、本雲台に使用したモーターにおいては、電圧指定によるトルク制御モード及び速度制御モードの設定が可能である。

4.3. 構成及びインターフェイス

2.2 で規定した 3 つの機能 (捕捉, 定常追尾, 切替) を実現する制御則計算ならびにそのために必要なセンサデータ及びモーター駆動コマンドを送出するために図 7 に示すように構成ハードウェア間を必要なインターフェイスにより接続している。カメラで取得した UAV 画像は、画像処理装置でもある図心配信サーバより、LAN にて制御用 PC に送られる。また、UAV より送信されてくる位置、速度情報は制御用 PC に UART にて接続された無線通信モジュールにて取得される。駆動モーターでは、計測された回転角度がドライバーを介して制御用 PC に送られるとともに、同 PC からは電圧にて速度或いはトルク指令が送出される。この他、同 PC には図 1 のシステムサーバーからのコマンドを受けて切替えるためのインターフェイス (LAN) が用意されている。

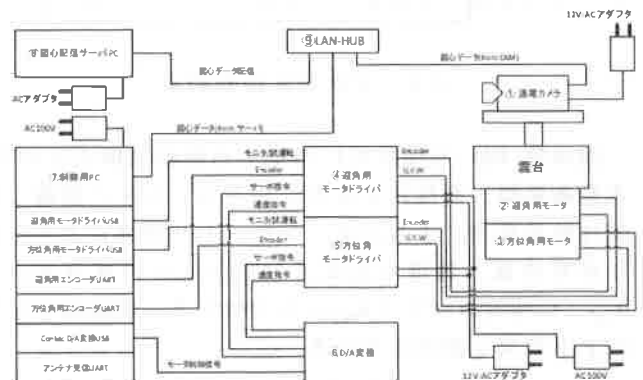


図 7 ハードウェア構成及びインターフェイス

5. 高応答制御性能確認

追尾アンテナ制御システムについて3.で述べた制御性能を確認する。なお、現時点では回転摩擦の特性が不明であるため、雲台を駆動する場合の電圧指定は、トルク指定ではなく、上位レベルの速度指定とする。これにより、所望の回転速度の確保が可能である。但し、この場合単純な回転体としての制御対象と異なり、速度制御ループが入ってくる、これにより伝達関数としては位相が数度程度変動するものの、制御系上問題ないことを確認している。

高応答性は、外部コマンドとして目標角度を与え、その整定時間を確認する。今回は高応答性が最も必要とされる方位角のみを対象とし、目標角度の大きさは安全を考慮して 10° 、搭載物を含む慣性性能率は想定 $I=4.0 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$ とした。本条件にて実際の駆動により、従来のPID制御、2自由度制御それぞれの場合の整定時間を確認した。

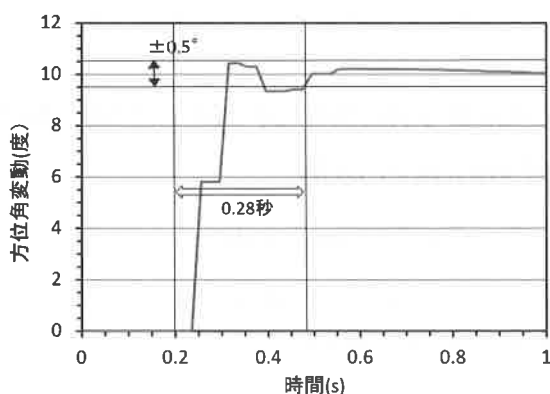


図8 PID制御による応答性

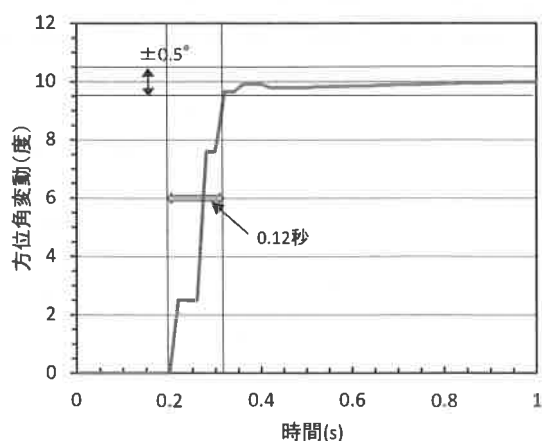


図9 2自由度制御による応答性

従来のPID制御の場合、図8よりシミュレーションで得られた整定時間と同等の0.3秒程度になることが確認された。

一方、提案の2自由度制御を適用した場合、シミュ

レーションで得られた整定時間0.095秒に対して、0.12秒程度となることが確認された。シミュレーションは連続系での解析であるが、ハードウェアでは20msで制御計算を行っているため、0.12秒程度は許容範囲であり同程度と考えられる。さらに、PID制御の場合と比して2分の1以下の整定時間であることも確認できた。しかしながら応答曲線において取得エンコーダ角度の更新及びコマンド発生タイミングの遅れが見られる等の課題が明らかとなった。

6. まとめ

複数の無人航空機を追尾するための追尾アンテナ制御システムを設計・構築し、要求性能の最も厳しい切替え時の高応答制御系について整定時間の性能評価を行った。その結果、従来技術のPID制御ではシミュレーションと同程度の0.3秒程度、2自由度制御についてはシミュレーションの0.1秒に対して0.12秒であり、かつ、PID制御系に比して2分の1であることを確認し、2自由度制御の有効性が検証された。現時点では雲台の最大能力を利用していないため、今後最大能力を使用しての検証を進めるとともに、発生した課題について対策を講じる予定である。

謝辞

本研究は総務省SCOPE「能動的3次元通信エリア制御を用いた複数無人航空機による同時観測技術の研究開発」により実施した。

文献

- [1] 戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の平成26年度研究開発課題の公募の結果 http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000091.htm.
- [2] 竹内, 上羽, ワイヤレス通信による飛行情報を用いた無人航空機向追尾アンテナ制御技術の研究, 第57自動制御連合講演会プログラム・講演集, 群馬, 2014 Oct.
- [3] 川上, 中川, 上野, 服部, 衛星搭載用アンテナ指向方向制御システム, 日本航空宇宙学会誌, 第36巻, 第409号, 1988.
- [4] 高久, 上羽, 樋口, 屋外を飛行する無人航空機の画像処理による高精度指向方向検出法の検討, 第58回自動制御連合講演会, 神戸市, 2015年11月14日
- [5] 杉江, 藤田, フィードバック制御入門 (システム工学制御シリーズ, コロナ社, 1999)
- [6] 上羽, 竹内, 樋口, 複数無人航空機による同時観測を可能とする高精度・高応答追尾アンテナ制御技術の検討, 電子情報通信学会衛星通信研究会, 那覇市, 2015年2月18-19日