

## 重心移動機構を搭載した飛翔ロボットにおける水平方向加速度算出システムの実装

東京電機大学 ○江田涼司、今井雄一、堀内 敏行

### 要 旨

災害現場などの狭い屋内空間の情報収集に飛翔ロボットが活用できると考えられる。本研究室では、操縦の負担や接触による破壊のリスクを低減するため、機体の重心移動によって水平位置を補正し静止維持させるシステムを開発中である。本報では、従来の加速度センサによるシステムが原理的に対応できない場合でも制御を可能にするため、ジャイロセンサも組み合わせた水平方向のみの加速度を算出するシステムを開発・実装し、性能の向上を図った。

### 1. 背景と目的

災害や事故により倒壊したり、放射能や有毒ガスなどに汚染されたりした、人間が入るのに危険を伴う空間での写真撮影や環境情報の収集に、小型飛翔ロボットを活用することが期待されている。屋外ではなく、狭い屋内でそのような作業を実現するには、ロボットの空中機動を精密に制御し、移動や障害物回避をする能力が不可欠である。

従来の研究では、ロボットの操作を簡便化する目的で、加速度センサのみを用いて水平位置を自動維持するシステムを開発してきた<sup>1)</sup>。しかし、このシステムには機体の姿勢の変化を伴わない移動を検知できないという欠点があった。

本報では、この問題を解決するため、加速度センサに加えジャイロセンサを搭載した飛翔ロボットを製作して実験を行った。この機体は、新式の4モータ駆動系<sup>2)</sup>を備えた二重反転式メインロータと2枚の補助翼、および加速度センサと重心移動機構を装備している。マイコン回路を用いた自動制御により $\pm 20\text{cm}$ の範囲内に1min以上静止させることを目標に検討した。

### 2. 重心移動機構を搭載したロボットの改良

従来のロボットは二重反転回転翼（メインロータ）を上翼、下翼に各1個ずつ合計2個のブラシレスモータで駆動する機構であった。しかし、この機構では1個のモータに対する負荷が大きいため、約77sで使用限界温度(85°C)に到達し、動作不能となる問題があった。そのため、上下のメインロータを各々2個のモータで駆動し、揚力・ペイロードを大幅に向上して、横ずれ補正用の重心移動機構を使用できる新しい機体を製作した。

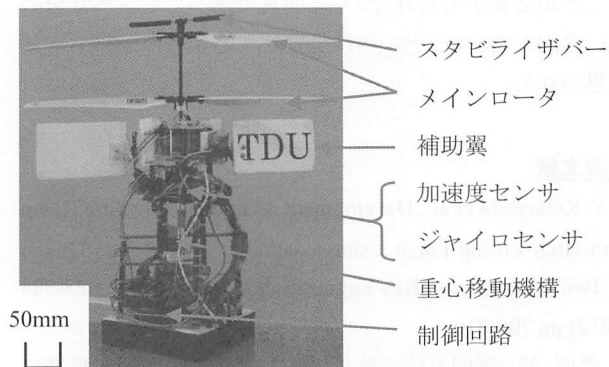


図1 製作した機体

しかし、機体重量が365gfから580gflに増加したため、メインロータの高速回転が必要になり、上下の翼が接触し折れる現象が発生した。そのため、上下翼間の距離が長いメインロータに交換したが、このメインロータは衝撃に弱く着陸時に破損する問題が発生した。そこで機体の底に衝撃吸収材であるスポンジを搭載した。しかし、スポンジは旧機体の底に搭載していたスチレンボードに比べて摩擦力が大きく離陸時に機体が倒れる問題が発生した。そこでスポンジの底に紙を貼り摩擦力を軽減した。

新機体が目標とする120s以上飛翔できるかを調べるため、機体を机に固定し、機体が実際に飛翔する回転数である3000rpmに出力を保持し、熱電対を使用してモータ温度を測定した。新機体では180sを経ても、モータ温度は57°Cであった。バッテリー容量を増せば、さらに長い時間の飛翔を期待できる。

### 3. 加速度に基づいた水平位置制御

水平位置を維持する制御は、移動をセンサで検知し、その移動と反対方向に動かすという一連の動作を繰り返すことで行う。水平移動は、搭載したサーボモータによる重心移動を利用し、メインロータ先端通過面（TPP：Tip Pass Plane）を傾斜させることによって行う。

従来のシステムは、機体の移動を検知するためにメインロータシャフトの鉛直方向に対する傾斜角を加速度センサで検出していた。しかしこのシステムでは、横風を受けるなどしてメインロータが傾斜することなく生じた移動を検知することができないという問題があった。

そこで新たに、加速度センサとジャイロセンサを組み合わせ、機体の水平方向の加速度を検知できるシステムを開発した。

### 4. 水平方向加速度算出システム

加速度センサの水平方向に向けた軸からの出力電圧は、水平面となす角度による重力加速度の成分と、水平方向の加速度が含まれている。そこで、水平方向の加速度のみを検出するため、ジャイロセンサを用いて検出した機体の傾斜角を用い、加速度センサ出力電圧の重力加速度成分を除去することにした。

図2に加速度センサを水平面に対して角度 $\theta[\text{deg}]$ だけ傾

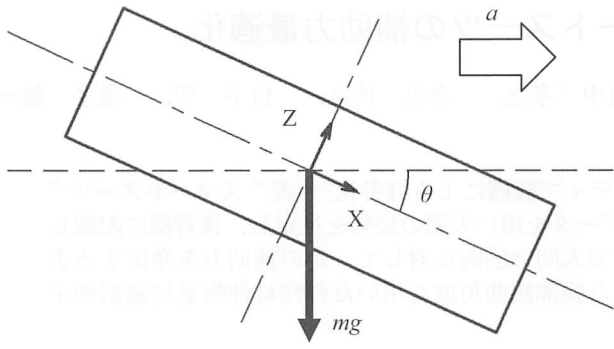


図2 傾けた加速度センサ

け、水平方向の加速度 $a[m/s^2]$ を与えた時の様子を示す。  
このときの X 軸出力電圧は次式で求められる。

$$\text{出力電圧}[V]=2.5+\frac{a \cos \theta}{9.8}+\sin \theta \dots\dots(1)$$

2.5[V]は加速度 0 のときの出力電圧であり、この式を変形すると水平方向の真の加速度 $a[m/s^2]$ は

$$a[m/s^2]=\frac{(\text{出力電圧}-2.5-\sin \theta) \times 9.8}{\cos \theta} \dots\dots(2)$$

となる。したがって、機体の飛行中の角度を検知すれば加速度の修正ができる。

角度検知には角速度を測定する圧電振動ジャイロを採用した。角速度を時間で積分すれば角度が求められる。ジャイロセンサに角速度 $\omega[\text{deg/s}]$ を与えた時の出力電圧[V]は、使用したセンサの静止時の出力 1.35V と感度 0.67mV/(deg/sec)から次の式で求められる。

$$\text{出力電圧}[V]=1.35+0.67 \omega \times 10^{-3} \dots\dots(3)$$

この式を変形すると角速度 $\omega[\text{deg/s}]$ が得られる。

$$\omega[\text{deg/s}]=\frac{\text{出力電圧}-1.35}{0.67} \times 10^3 \dots\dots(4)$$

(2)式に(4)式の積分値である角度を代入すれば、水平方向の正確な加速度を検知できる。

5. 実装したシステムを用いた飛行実験

開発したシステムを評価するために、製作した機体に実装して飛行実験を行った。メインロータ回転数と補助翼動作角を手動で操作し、機体の高度と方位をできるだけ一定に維持した。その際、機体姿勢や水平面内の移動速度・方向および変位を観察し、重心移動機構動作角と動作角維持時間の最適組み合わせを調べた。

床に敷いた4m四方の座標シートの中央を原点として機体を飛行させ、機体底面に搭載したレーザーポインタによる光点の軌跡をデジタルカメラで動画撮影した。またその際、無線データ通信を行いパソコン上で各センサ出力値と補正值、および重心移動機構動作角を観察した。撮影した映像から1sごとに静止画を抜き出し、光点の座標を記録しグラフを作成した。

図3に重心移動機構動作角 $\pm 9\text{deg}$ 、動作角維持時間 2s の場合の飛行軌跡を示す。3 回試みいずれの飛行でも時計回りの旋回を伴いながら移動速度 10cm/s~100cm/s で X 軸負方向へ進む傾向を示し、再現性があった。しかし、 $\pm 20\text{cm}$  の範囲には 1~5s しか静止できておらず、旋回と X 軸負方向への移動が起こらない制御パラメータを見出す必要がある。また、長い動作角維持時間が機体の振り子運動を誘発し移動が大きくなると考えており、時間を短くする改良を試みたい。

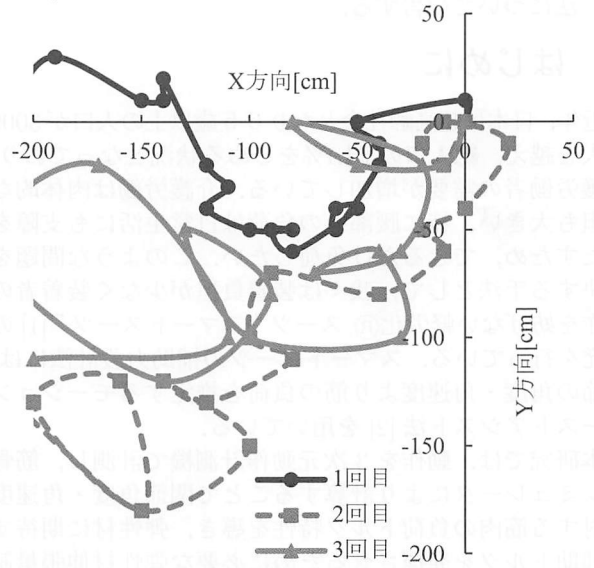


図3 飛行軌跡

6. 結論

加速度センサとジャイロセンサを組み合わせることにより、飛行中の水平方向のみの加速度を算出するシステムを開発した。これにより重心移動機構を用いた空中静止維持の実験を行い、性能を確認した。

現状では十分に空中静止維持の性能を向上できていないが、機体の姿勢に依存せずに移動を検知できるシステムを開発できたので、今後機体の改良や制御パラメータの調整を行えば将来的に水平面内の空中静止能力を向上できると考えている。今後は、より機械的性能の高い機体の設計と機体姿勢や高度の情報を組み合わせた制御アルゴリズムを開発することで水平位置制御の性能を総合的に向上させていきたい。

参考文献

- 1) 江田涼司, 今井雄一, 板橋 努, 小澤惇史, 堀内敏行: 重心移動機構を搭載した飛行ロボットにおける水平位置補正システムの改善, 2012 年度精密工学会北海道支部学術講演会論文集, 67-68, 2012
- 2) Y. Kobayashi, K. Kanamori, Y. Imai, R. Eda, T. Horiuchi: Development of a Small Hovering Robot with High Lifting Force Using Coaxial Double Rotors Driven by Twin Motor Pairs, Key Engineering Materials Vols.523-524(2012)