

シングルロータヘリコプタの自律飛行

The autonomous flight of single rotor helicopter

○ 寫田雄介, 荒井翔悟, 橋本浩一

○ Yusuke Shimada, Shogo Arai, Koichi Hashimoto

東北大学

Tohoku University

キーワード: シングルロータヘリコプタ (single rotor helicopter), 自律飛行 (autonomous flight)

連絡先: 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 情報科学研究科 橋本・荒井/鏡研究室,
TEL 022-795-7021, FAX 022-95-4090,

E-mail: shimada@ic.is.tohoku.ac.jp, arai@ic.is.tohoku.ac.jp, koichi@ic.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年無人ヘリコプタの開発が活発に行われている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。ヘリコプタは、垂直離着陸やホバリングなどの飛行が可能である

したがって、輸送、探査、監視、レスキュー活動など様々な分野での応用が期待されている。

著者らは、カメラを用いたツインロータの自律飛行が可能なることを実験的に示した⁵⁾⁶⁾。ツインロータヘリコプタは互いに反転して回転するメインロータを持ち、シングルロータよりも安定に飛行できることが知られている。ヘリコプタの位置・姿勢の検出にセンサを用いず、外部に設置された複数台のカメラを用いたビジュアルサーボにより自律飛行制御を達成した。

本研究では、シングルロータヘリコプタを導入し、ビジュアルサーボによる自律飛行制御を目標とする。シングルロータヘリコプタは、メインロータによる反トルクをテールロータの推力で打ち消す特徴を持つ。したがってツインロータよりも不安定な機体であり、制御することが

非常に難しい。本論文では、実機を用いた制御を行う前に、シングルロータヘリコプタの運動モデルを構築し⁷⁾、シミュレーションを行った。

2. シミュレーション

本章ではシミュレーション対象であるシングルロータヘリコプタの機構および、運動方程式について述べる。特にホバリング均衡における運動を考えることにする。

2.1 シングルロータヘリコプタの機構

ヘリコプタとは、メインロータを回転させて得られる揚力によって飛行する。従って他の航空機と違い滑走路などを必要とせず、垂直に離着陸をすることができる。そして空中において自重と揚力をつりあうことで、空中のある一点に静止したまま飛び続けるホバリングを可能とする。またロータを回転している面をロータ面と呼ぶ。ホバリング時はこのロータ面は地面と水

平であるため、ロータ面と垂直に発生する揚力は地面と垂直方向に発生している。移動したいときは、進みたい方向へロータ面を傾けることで水平移動することができる。またサイクリックピッチにより、 360° どの方向に対してもロータ面を傾けることができるので、ホバリング時から 360° 水平飛行が可能である。

ロータを回転させると、その反トルクにより機体がロータの回転方向とは逆向きに回転してしまう。この反トルクの制御の仕方によって、ヘリコプタの機構が分かれてくる。本研究で扱うシングルロータヘリコプタは、機体の後部にテールロータを設け、その推進力によって反トルクの制御を行っている。

シングルロータヘリコプタはメインロータとテールロータを制御することで、飛行する。

2.2 運動方程式

まず機体座標系を用いて、ヘリコプタの運動方程式を考える。機体座標系とは、機体の真正面方向を X 軸、真横方向を Y 軸、真下方向を Z 軸とした座標軸であり、航空機などの運動力学系を考える際に非常に適した座標系である。機体座標系の各軸における力、あるいは軸周りのモーメントを考えると、運動方程式は (1) から (6) 式で表される。また Fig.1 はヘリコプタにかかる各力とモーメントを示したものである。

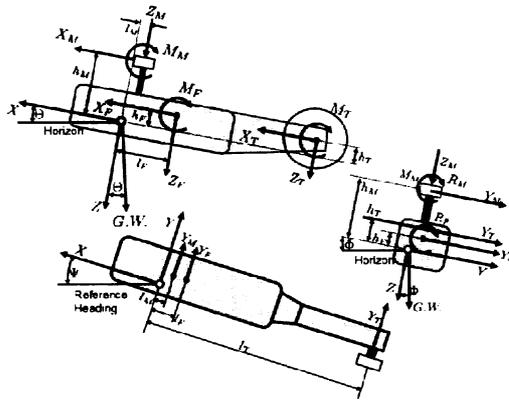


Fig. 1 力及びモーメント

X 軸方向の力

$$X_M + X_T + X_F = G.W. \sin \Theta + \frac{G.W.}{g} (\ddot{x} - \dot{y}r + \dot{z}q) \quad (1)$$

Y 軸方向の力

$$Y_M + Y_T + Y_F = -G.W. \sin \Phi + \frac{G.W.}{g} (\ddot{y} + \dot{x}r - \dot{z}p) \quad (2)$$

Z 軸方向の力

$$Z_M + Z_T + Z_F = -G.W. \cos \Theta + \frac{G.W.}{g} (\ddot{z} - \dot{x}q + \dot{y}p) \quad (3)$$

ロールモーメント

$$R_M + Y_M h_M + Z_M l_M + M_T + Y_T h_T + Y_F h_F + R_F = I_{xx} \dot{p} - qr(I_{yy} - I_{zz}) \quad (4)$$

ピッチモーメント

$$M_M - X_M h_M + Z_M l_M + M_T - X_T h_T + Z_T l_T + M_F + Z_F l_F - X_F h_F = I_{yy} \dot{q} - pr(I_{zz} - I_{xx}) \quad (5)$$

ヨーモーメント

$$N_M - Y_M l_M - Y_T l_T + N_F - Y_F l_F = I_{zz} \dot{r} - pq(I_{xx} - I_{yy}) \quad (6)$$

ここでは X 軸方向の力について説明する。左辺は各部品で生じる X 軸方向の力の和である。添え字がそれぞれメインロータ (Main Rotor)、テールロータ (Tail Rotor)、機体 (Fuselage) を表している。つまり X_M はメインロータで生じる X 方向の力である。右辺は X 軸方向の運動量が表されている。ここで \dot{y} 、 \dot{z} が含まれているのは、回転を考えたとき \dot{y} 、 \dot{z} が X 軸方向に影響するからである。Y 軸、Z 軸についても同様である。

次にロールモーメントについて説明する。左辺は各部品で生じるモーメントの和である、 R_M はメインロータで生じるローリングモーメントである。また各部品で生じる力が中心との距離があるためローリングモーメントに影響する。したがって力と距離の積の項が存在する。1 は X 軸方向の距離、y は Y 軸方向の距離、h は Z 軸方向の距離であり、添え字は各部品を示している。右辺はロール方向の運動量が表されている。ここでピッチとヨー回転が同時に起きたとき、ロール方向の運動量の変化があるので、 q 、 r の積の項が存在する。ピッチ、ヨーについても同様である。

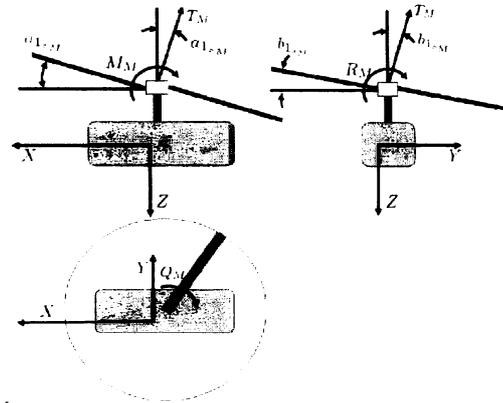


Fig. 2 メインロータ

2.3 メインロータ

メインロータはヘリコプタにおける主要な動力源である。メインロータで生じる力及びモーメントは (7) から (12) 式で表される。Fig.2 はメインロータにおける力及びモーメントを示したものである。

$$X_M = -T_M \sin(a_{1sM}) \quad (7)$$

$$Y_M = T_M \sin(b_{1sM}) \quad (8)$$

$$Z_M = -T_M \cos(a_{1sM}) \quad (9)$$

$$R_M = \left(\frac{dR}{db_{1sM}} \right) b_{1sM} + Q_M \sin(a_{1sM}) \quad (10)$$

$$M_M = \left(\frac{dM}{da_{1sM}} \right) a_{1sM} - Q_M \sin(b_{1sM}) \quad (11)$$

$$N_M = Q_M \cos(a_{1sM}) \cos(b_{1sM}) \quad (12)$$

T_M はメインロータのスラストで、 Q_M はトルクである。 a_{1sM} はロータ面のピッチ方向の傾き、 b_{1sM} はロール方向の傾きである。

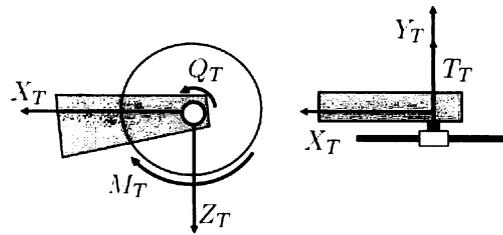


Fig. 3 テールロータ

2.4 テールロータ

テールロータはメインロータによって生じる反トルクを打ち消すように制御している。テールロータで生じる力及びモーメントは (13) から (16) 式で表される。Fig.3 はメインロータにおける力及びモーメントを示したものである。

$$X_T = 0 \quad (13)$$

$$Y_T = T_T \quad (14)$$

$$Z_T = 0 \quad (15)$$

$$M_T = -Q_T \quad (16)$$

T_T はテールロータのスラストで、 Q_T はトルクである。 $H_{a_{1s}=0M}$ はテールロータ面に生じる抵抗である。 b_{1sT} はロール方向の傾きである。

2.5 機体

メインロータが回転するとロータ下部では吹き降ろしの風が発生する。機体ではその吹き降

ろしの風による抗力が発生するので、その力も考慮する必要がある。機体における力及びモーメントは次式で表される。

$$X_F = 0 \quad (17)$$

$$Y_F = 0 \quad (18)$$

$$Z_F = \left(\frac{D_F}{G.W.} \right)_F T_M \quad (19)$$

$$M_F = 0 \quad (20)$$

$$N_F = 0 \quad (21)$$

$$R_F = 0 \quad (22)$$

$\left(\frac{D_F}{G.W.} \right)_F$ は、メインロータの吹き返しによって機体に生じる抗力率である

3. シミュレーション実験

3.1 実験内容

状態 $\mathbf{x}^T = [x \ y \ z \ \Phi \ \Theta \ \Psi \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ p \ q \ r]$ として、前章で述べた運動方程式を用いて、シングルロータヘリコプタのホバリングシミュレーションを行った。計算に MATLAB を使い、状態方程式は $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{u})$ とした。制御入力を $\mathbf{u}^T = [T_M T_T a_{1sM} b_{1sM}]$ とし、制御器には LQ レギュレータを用いた。重み \mathbf{Q} , \mathbf{R} は実験的に求め、それぞれ $\mathbf{Q} = \text{diag}[1, 1, 10, 1, 1, 10, 1, 1, 10, 1, 1, 10]$, $\mathbf{R} = \text{diag}[0.00004, 0.0004, 10000, 10000]$ とした。シミュレーション内容は (0, 0, 0) 付近でホバリングをさせて、横軸を時間として、縦軸に各位置、姿勢をプロットして、結果を考察した。

3.2 シミュレーション結果

Fig.4 から Fig.9 は横軸に時間、縦軸に各位置、姿勢として、プロットしたグラフである。X, Y, ロール, ピッチについては、約 7[s] まで大きく変動したが、7[s] 以降、一定となった。Z, ヨーについては約 15[s] まで変動し、15[s] 以降、一

定となった。一定となったそれぞれの値とホバリング位置 (0,0,0) を比較すると、位置に関しては最大で X 方向の 1 [m]、姿勢については 0.04[rad] と (0,0,0) 付近で姿勢を保ちながらホバリングができていることが確認できた。

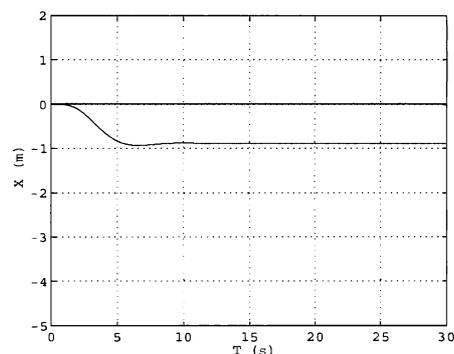


Fig. 4 X軸-T

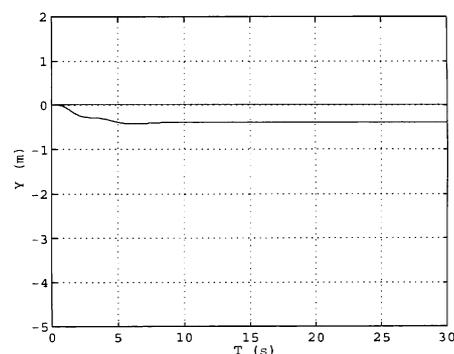


Fig. 5 Y軸-T

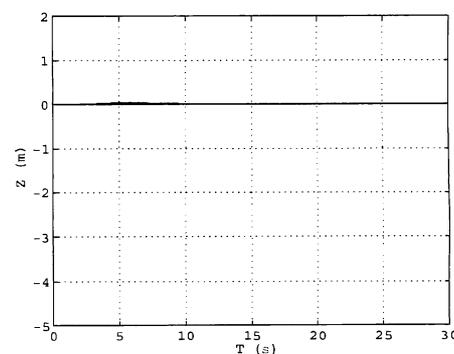


Fig. 6 Z軸-T

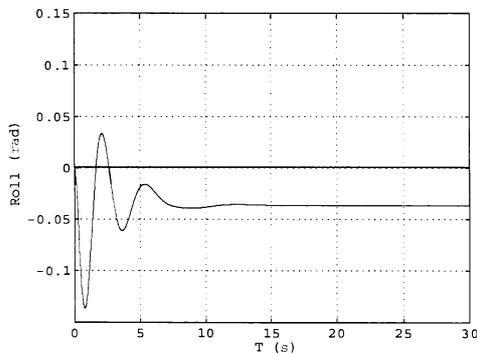


Fig. 7 Roll-T

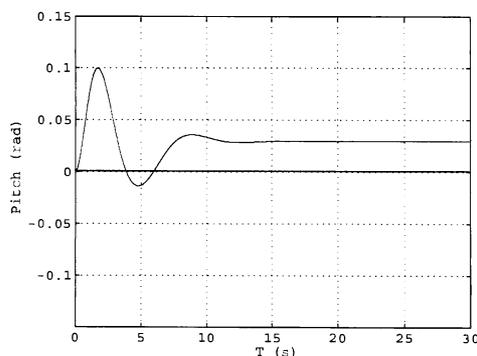


Fig. 8 Pitch-T

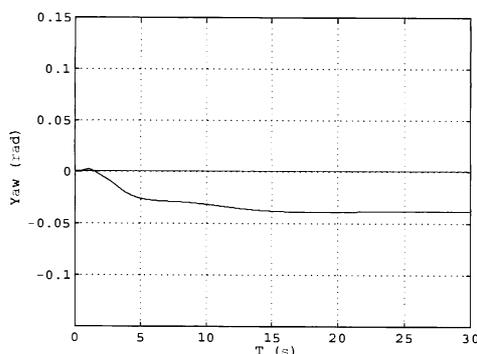


Fig. 9 Yaw-T

4. 結言

本論文では、シングルロータヘリコプタによるシミュレーションを行った。ホバリング時の運動方程式を構築し、それに基づいたシミュレーションをMATLABを用いて行った。シミュレーション結果をプロットし、結果の考察を行った。

4.1 今後の展望

今後の展望としては、ホバリング均衡だけでなく、様々な飛行におけるシミュレーションをできるようにしたい。そして実機を用いたビジュアルサーボによるシングルロータヘリコプタの自律飛行制御を達成したい。またシングルロータヘリコプタはツインロータヘリコプタに比べて安定性が低い一方、バリエーションにとんだ飛行ができる。そこでツインロータヘリコプタでは難しい宙返りなどのアクロバット飛行をビジュアルサーボによって行いたい。宙返りは一度完全に姿勢を崩した状態から、再びホバリングさせる。これを制御することは手動でも難しく、屋内での実験となるととても困難である。しかし高速カメラを用いて毎時刻、位置と姿勢を検出し、制御すれば、十分可能と考えられる。

参考文献

- 1) 野波 健蔵. 回転翼系空中ロボティクス. 日本ロボット学会誌. vol. 24, No. 8, pp. 2-8, 2006.
- 2) Brett Bethke, Mario Valenti, and Jonathan P. How. UAV Task Assignment. IEEE Robotics & Automation Magazine, pp. 39-44, MARCH 2008.
- 3) Jonathan P. How, Brett Bethke, Adrian Frank, Daniel Dale, and John Vian. Real-Time Indoor Autonomous Vehicle Test Environment. IEEE Control System Magazine, pp. 51-64, APRIL 2008.
- 4) 大平 悠多, 王 偉, 野波 健蔵. ステレオビジョンカメラを用いた同軸二重反転式ヘリコプタのモデリングと自律飛行制御. 日本ロボット学会誌. vol. 26, No. 8, pp. 175-182, 2008.
- 5) 松川 隆典. 視覚情報を用いた複数台小型へ

リコプタの編隊飛行制御. 東北大学工学部卒業論文, 2008.

- 6) Y. Iwatani, Kohou, and K. Hashimoto. Multi-camera visual servoing of multiple micro helicopters. In Proc. of SICE Annual Conference 2008, pp. 2432-2435.
- 7) Raymond W. Prouty. Helicopter performance, stability, and control. R.E Krieger Pub. Co. in Malabar, Fla. 1990.