

ファン浮上機械のホバリング制御

堂田周治郎・松下 尚史・沼本 健二*

岡山理科大学工学部機械工学科

*岡山理科大学大学院工学研究科

(1992年9月30日 受理)

1. 緒 言

最近、農業、林業、建設作業、極限作業、保守・点検作業等の多種多様な方面で、空中を自由に移動できる空中作業ロボット^{1),2)}や浮上機械³⁾の開発が強く望まれている。現在、離着陸に広い場所を要しない、ホバリング（空中静止）ができることなどからヘリコプタが広く実用化されているが、大きなロータと空気力学的な効果により地上に接近した状態で行う作業には適していない。また、小型で遠隔操作が可能なラジコンヘリコプタ⁴⁾は高い機動性を有するが、歩行ロボットなどと同様に動的に不安定なシステムであるため操縦方法の修得には十分な場所と時間を必要とする。このような小型浮上機械の制御装置の開発や制御方法の確立が望まれているのが現状である。空中作業ロボットに確実な作業を行わせるためには、まずホバリング制御方法を確立することが重要である。

本研究は、空中作業ロボットの基礎となるファン浮上機械のホバリング制御方法の確立を目的としたものである。本論文では、まず制御対象であるファン浮上機械のモデル化を行い、姿勢角が小さいとしてホバリング時の基礎式を導き、それに基づいた制御法を提案

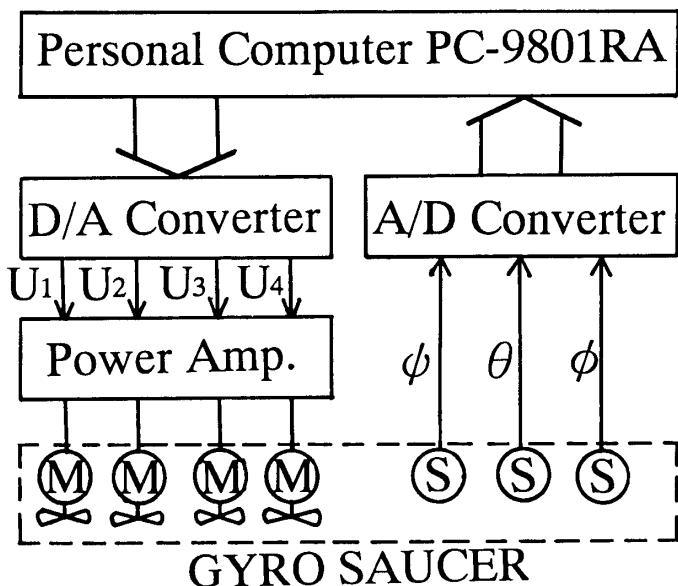


Fig. 1 Schematic diagram of control system

する。次に、市販の模型を利用したホバリング制御系を試作し、ファン推力等の基本特性を調べシステムパラメータの同定を行う。そして、PID 制御による空中静止を目標とするホバリング制御実験を試み、三次元姿勢計測装置⁵⁾を使用して三軸姿勢制御が可能であることを示す。また、PID 制御等に比べて速応性に優れていると期待できるファジィ制御則のホバリング制御への適用も試みる。

2. 制御システムの構成

本研究で用いた姿勢制御システムの構成図を Fig. 1 に示す。機体は(株)キーエンス社製の GYRO SAUCER E-170を改造したものであり、機体ロール、ピッチ角を機体内にある姿勢角センサで、ヨー角を Fig. 2 に示す三次元姿勢計測装置のポテンショメータで検出し、A/D 変換器を介して、パーソナルコンピュータ (NEC 製 : PC-9801RA) に入力し、D/A 変換器・アンプ・DC モータを介してファン回転数を変え、機体の姿勢制御を行う。なお、姿勢角センサ及びポテンショメータによる角度検出の分解能は A/D 変換器を含めてピッチ角0.0132(deg.)、ロール角0.0195(deg.)、ヨー角0.178(deg.)である。

3. 基礎式の導出とシステムパラメータの同定

3.1 制御対象のモデル化

Fig. 3 に座標系と解析モデルを示す。図の機体座標系 o-xyz は基準静止座標系 O-XYZ

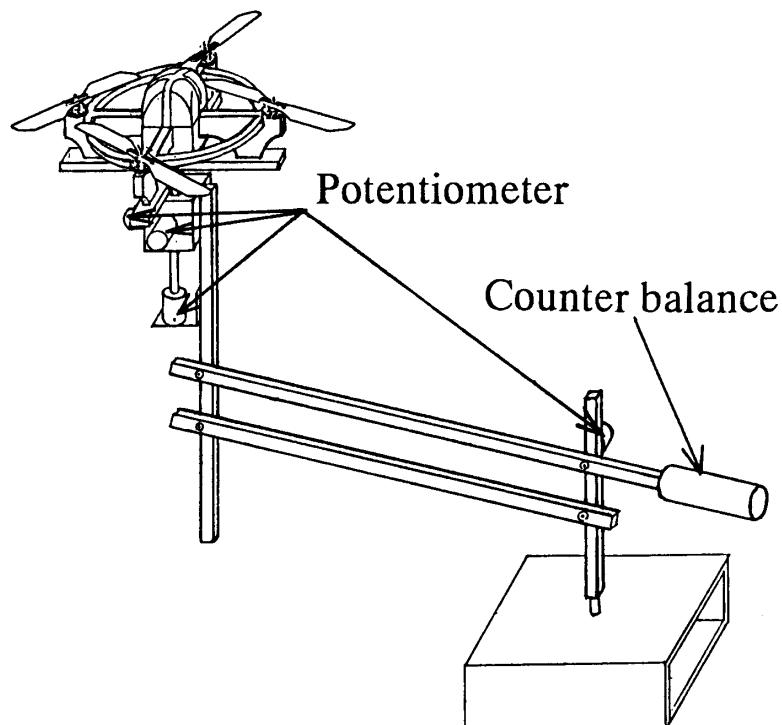


Fig. 2 Attitude measuring system for a hovering machine

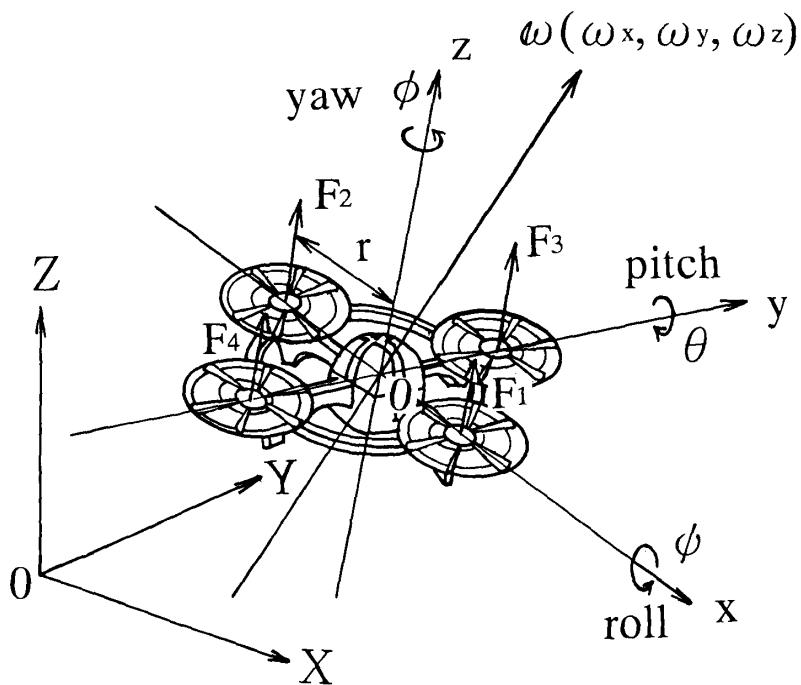


Fig. 3 Analytical model of a multifan hovering machine

から並進運動させ、 z 軸回りに ϕ (ヨ一角) 回転し、新しくできた y' 軸回りに θ (ピッチ角) 回転し、さらに新しくできた x'' 軸回りに ψ (ロール角) 回転して得られたものである。 ψ が通常のオイラーアングルと異なるが、これは機体内にある姿勢角センサを考慮したためである。

ここで次の仮定を設ける。1) 機体は剛体である。2) その重心は機体座標原点にある。3) ホバリング高度は高く地面効果は無視できる。これらの仮定と機体の重心回りの角運動量保存則及び重心の並進運動より、以下の運動方程式を得る⁶⁾。

$$I_x \cdot \dot{\omega}_x = (I_y - I_z)\omega_y\omega_z + (F_3 - F_4)r - B_x \cdot \omega_x \quad (1)$$

$$I_y \cdot \dot{\omega}_y = (I_z - I_x)\omega_z\omega_x + (F_2 - F_1)r - B_y \cdot \omega_y \quad (2)$$

$$I_z \cdot \dot{\omega}_z = (I_x - I_y)\omega_x\omega_y + (F_3 + F_4 - F_1 - F_2)r\lambda - B_z \cdot \omega_z \quad (3)$$

$$m \cdot \ddot{X} = F_0(\cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\theta) - C_x \cdot \dot{X} \quad (4)$$

$$m \cdot \ddot{Y} = F_0(\cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi) - C_y \cdot \dot{Y} \quad (5)$$

$$m \cdot \ddot{Z} = F_0\cos\psi\sin\theta - C_z \cdot \dot{Z} - mg \quad (6)$$

ここで、 I_i ：各軸回りの慣性モーメント、 ω_i ：機体角速度、 F_i ：ファン推力、 λ ：反動トルク係数、 B_i 、 C_i ：粘性抵抗係数、 g ：重力加速度、 m ：機体質量、 $F_0 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$ で

ある。

モータ及びファンによる推力 F_i の発生が一次遅れで表される¹⁾とすると、

$$\tau \cdot \dot{F}_i + F_i = a_i \cdot u_i \quad (7)$$

となる。ここで、 τ ：時定数、 a_i ：利得係数、 u_i ：制御入力電圧である。

なお、角速度 ω_i と $\dot{\psi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\phi}$ の関係は次式で与えられる。

$$\omega_x = \dot{\psi} - \dot{\phi} \sin \theta \quad (8)$$

$$\omega_y = \dot{\theta} \cos \psi + \dot{\phi} \sin \psi \cos \theta \quad (9)$$

$$\omega_z = -\dot{\theta} \sin \psi + \dot{\phi} \cos \psi \cos \theta \quad (10)$$

3.2 ホバリング基礎式と制御方法

ホバリング時の基礎式を得るために、さらに以下の仮定を追加する。4) 各軸回りのロール角 ψ , ピッチ角 θ , ヨー角 ϕ は小さい, 5) ヨーイング角速度 $\dot{\phi}$ は小さい, 6) 粘性抵抗は無視できる。7) Fig. 3 に示す X 軸, Y 軸回りの慣性モーメントは等しい。ファン推力 F_i を改めて平衡状態からの変化分とし、これらの仮定と(1)～(10)式から以下のホバリング時の運動方程式が得られる。

$$I_x \cdot \ddot{\psi} = (F_3 - F_4) \cdot r \quad (11)$$

$$I_y \cdot \ddot{\theta} = (F_2 - F_1) \cdot r \quad (12)$$

$$I_z \cdot \ddot{\phi} = (F_3 + F_4 - F_1 - F_2) \cdot r \cdot \lambda \quad (13)$$

$$m \cdot \ddot{X} = F_0 \cdot \theta \quad (14)$$

$$m \cdot \ddot{Y} = -F_0 \cdot \psi \quad (15)$$

$$m \cdot \ddot{Z} = F_0 \quad (16)$$

(11)～(13)式に基づき、以下のようなホバリング制御を行う。ロール角 ψ はファン推力 $F_3 - F_4$, ピッチ角 θ は $F_1 - F_2$ により独立に制御する。ヨー角 ϕ はファンの反動トルクを利用する。すなわち、 $F_3 + F_4$ と $F_1 + F_2$ の差で制御する。いずれの場合も、推力の和 F_0 を常に 0 に保つようにすると、(14)～(16)式を見てわかるように X, Y, Z 方向にほとんど移動しないことになる。

3.3 システムパラメータの同定

試作した姿勢制御系のシステムパラメータの値を Table 1 に示す。機体質量 m , 機体半径 r は容易に計測できる。

Table 1 System parameters

機体質量	m	0.122	(kg)
機体半径	r	0.103	(m)
慣性モーメント	I_x	0.000172	(kg·m ²)
"	I_y	0.000177	(kg·m ²)
"	I_z	0.000235	(kg·m ²)
利得係数	a_1	0.419	(N/V)
"	a_2	0.373	(N/V)
"	a_3	0.475	(N/V)
"	a_4	0.691	(N/V)
時定数	τ	0.065	(s)
反動トルク係数	λ	0.155	

機体の x , y , z 軸回りの慣性モーメント I_x , I_y , I_z は回転軸を重心からずらした自由減衰振動実験から周期 T_i を測定し、次式によって求めた。

$$I_i = m \cdot L \cdot g \cdot T_i^2 / (4\pi^2) - m \cdot L^2 \quad (17)$$

ここで、 m ：機体質量 (0.122kg), L ：回転軸－重心間距離 (0.025m), g ：重力加速度である。

利得係数 a_i は、長さ約0.4m の棒の一端にモータ及びファンを、そして、他端に固定したバネ秤 (0~1kgf) を取り付け、モータへの入力電圧を変えたときのファン推力を測定することにより求めた。

ファン推力の時定数 τ は、以下のようにして求めた。機体をロール軸回りで回転するようにし、機体の一端にコイルばねを取り付け床に固定する。そして、ファン回転数を一定で回転させた後、1秒後にさらに高い入力電圧を加えることによって推力を変え、ロール角 ψ の時間変化を記録する。その結果と数値シミュレーション結果を一致させるように τ を選んだ。

反動トルク係数 λ は、以下のようにして求めた。滑らかに回転する台の上に機体を置き、機体の中心から距離 L (0.04m) 離れた位置に糸を取り付け、電子式秤でファン推力を測定する。得られたファン推力－入力電圧特性の傾き A と以下の式から反動トルク係数 λ を計算することができる。

$$\lambda = A \cdot L / a_i \cdot r \quad (18)$$

ここで、 a_i ：利得係数、 r ：機体半径である。

4. PID 制御則とファジィ制御則

PID 制御は、以下の離散時間系 PID 制御則⁷⁾を用いて行う。すなわち、時刻 k における操作量 $u(k)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} u(k) = & u(k-1) + K_p \{y(k-1) - y(k)\} + K_i \{r(k) - y(k)\} \\ & + K_d \{2y(k-1) - y(k-2) - y(k)\} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $y(k)$ ：出力角度、 $r(k)$ ：目標値(ホバリング制御の場合は 0)、 K_p ：比例ゲイン、 K_i ：積分ゲイン、 K_d ：微分ゲインである。

次に、ファジィ制御は以下のようなファジィ制御則^{8),9)}を用いた。時刻 k におけるピッチ角偏差 e 、偏差の変化分 de 、及び操作量の変化分 du を ± 6 に規格化する。

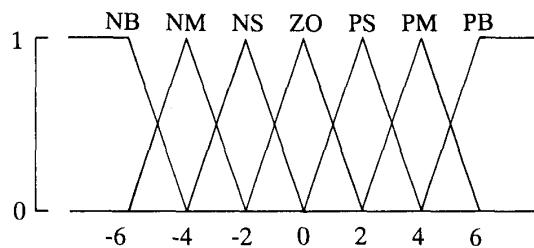


Fig. 4 Fuzzy sets

Table 2 Fuzzy rule

	N B	N M	N S	d e Z O	P S	P M	P B
N B	P B	P B	P B	P B	P M	P S	Z O
N M	P B	P B	P B	P M	P S	Z O	N S
N S	P B	P B	P M	P S	Z O	N S	N M
e Z O	P B	P M	P S	Z O	N S	N M	N B
P S	P M	P S	Z O	N S	N M	N B	N B
P M	P S	Z O	N S	N M	N B	N B	N B
P B	Z O	N S	N M	N B	N B	N B	N B

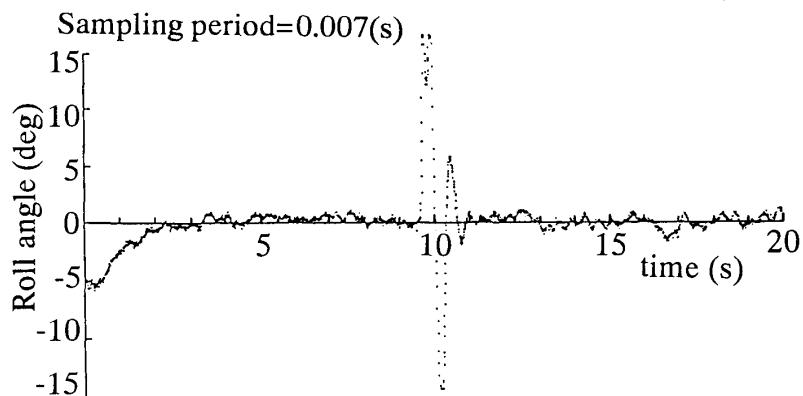


Fig. 5 Transient response of roll angle

$$e = 6 \cdot E(k) / E_{\max} \quad (20)$$

$$de = 6 \cdot \{E(k) - E(k-1)\} / dE_{\max} \quad (21)$$

$$du = 6 \cdot \{U(k) - U(k-1)\} / dU_{\max} \quad (22)$$

ここで, $E(k)$: 出力偏差 ($\equiv \theta - 0$), $E(k-1)$: 1つ前の出力偏差, E_{\max} , dE_{\max} , dU_{\max} : システム調整用パラメータである。また, 定性的な言葉を量子化するために各段階を 7 段階 (PB : Positive Big, PM : Positive Midium, PS : Positive Small, ZO : Zero, NS : Negative Small, NM : Negative Midium, NB : Negative Big) に分けて定義する。この時, 各段階の代表点は, $-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6$ の整数値をとるものとし, メンバーシップ関数は Fig. 4 に示すように, 高さ 1, 底辺の幅 4 の二等辺三角形を用いる。ファジィ規則は, 入力変数 e と de の組合せに応じた du を与える。従って, 制御規則は 49通り存在し, Table 2 のように常識的に定めた。 e , de から du を求める推論法には, 「Min-Max 合成法」⁸⁾を用い, 操作量の非ファジィ化には「高さ法」⁸⁾を用いた。

5. 制御結果及び考察

以下の PID 制御による一軸, 二軸及び三軸姿勢制御実験はいずれも地面効果の影響を少なくするため床から約 0.2(m) (ファン半径の 3 倍) の高さで行っている。そして, それぞれ制御開始時から約 10 秒後にロール軸方向から約 0.8(m/s) の風を外乱として与えた。

5. 1 PID 制御結果

一軸姿勢制御実験はピッチ軸またはロール軸を回転軸とし, 姿勢角検出器として機体内にある姿勢角センサを用い, $\theta = -5(\text{deg.})$ または $\psi = -5(\text{deg.})$ 傾けた位置から行った。サンプリング周期 0.007(s), 限界感度法から PID 制御の比例, 積分, 微分ゲインはそれぞれ $5.24 \times 10^{-3}, 8.73 \times 10^{-5}, 4.36 \times 10^{-2} (\text{V}/\text{deg.})$ に選んだ。最大入力電圧幅は 0.15(V) である。ロール角の時間変化を Fig. 5 に示す。二軸姿勢制御実験は三次元姿勢計測装置を用いて,

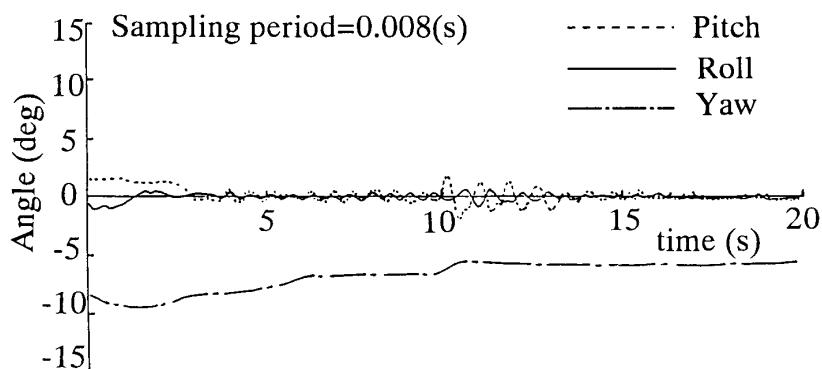


Fig. 6 Transient responses of roll and pitch angle

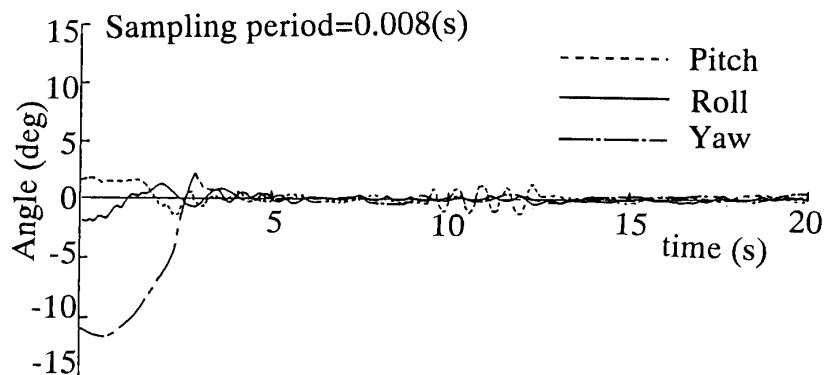


Fig. 7 Transient responses of roll, pitch and yaw angle

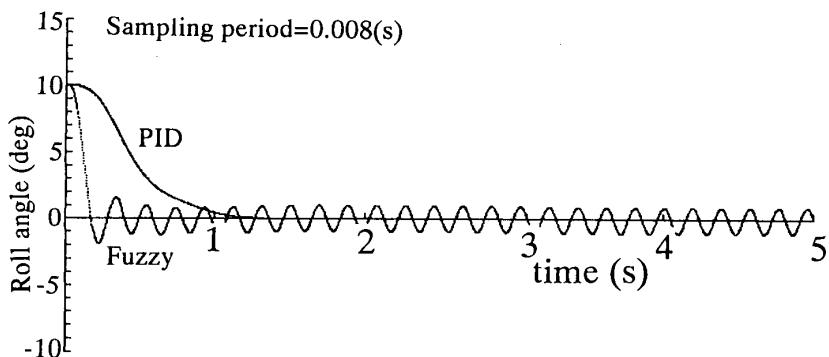


Fig. 8 Simulation of fuzzy and PID roll angle control

姿勢角検出器としてポテンショメータを用いて行った。サンプリング周期0.008(s), PID制御の比例, 積分, 微分ゲインはピッチ角制御では 6.98×10^{-2} , 1.05×10^{-3} , 7.24×10^{-1} (V/deg.), ロール角制御では 6.98×10^{-2} , 1.05×10^{-3} , 5.50×10^{-1} (V/deg.), 最大入力電圧幅は0.35(V)である。その結果をFig. 6に示す。三軸姿勢制御実験は二軸の場合と同様に、三次元姿勢計測装置を用いて行った。その結果をFig. 7に示す。サンプリング周期, ピッチ角, ロール角制御のPIDゲイン及び最大入力電圧幅はそれぞれ二軸姿勢制御実験の時と同じ値を用いた。ヨー角制御での比例, 積分, 微分ゲインは 3.49×10^{-2} , 5.24×10^{-4} , 2.62×10^{-1} (V/deg.)である。いずれの場合も応答が3(s)以内, 定常偏差が0(deg.)付近であり, 外乱に対しても良好な制御が得られていることから, PID制御による三軸姿勢制御の有効性が確認できる。しかし, 機体内的姿勢角センサを用いると, 安定した姿勢制御が得られなかった。これはモータへの入力電圧による姿勢角センサのノイズやセンサのドリフトによる影響が原因であると考えられる。

5.2 ファジィ制御結果

ファジィ制御パラメータ E_{max} , dE_{max} , dU_{max} はピッチ角 θ の応答が最も速く, 行き過ぎ量が小さく, かつ定常偏差が小さくなるように試行錯誤的に定めた。その結果, $E_{max} =$

$8.88(\text{deg.})$, $dE_{\max} = 0.143(\text{deg.})$, $dU_{\max} = 0.8(\text{V})$ が得られた。PID 制御の比例、積分、微分ゲインも同様に選び、 5.24×10^{-3} , 8.73×10^{-5} , $1.22 \times 10^{-1}(\text{V}/\text{deg.})$ とした。最大入力電圧幅はいずれも $0.15(\text{V})$ とした。 $\theta = 10(\text{deg.})$ の初期角度における制御シミュレーション結果を Fig. 8 に示す。この図から、ファジィ制御則を用いた場合、PID 制御則を用いた場合よりはるかに応答は速い。しかし、定常状態においてはファジィ制御の場合、目標値付近でハンチング（定常振動）現象が生じていることがわかる。また、同様のパラメータを用いて実機のピッチ軸を回転軸とした状態で一軸姿勢制御実験を行った。その制御結果の一例を Fig. 9 に示す。PID 制御による一軸姿勢制御実験結果 (Fig. 6) と比較すると立ち上がり時間が $1/10$ と短く速応性が改善されており、定常振動振幅も $3(\text{deg.})$ 程度で大きくないことから、ファジィ制御則の有効性が実機による実験からも確認できる。

PID 制御則による姿勢制御実験では制御入力が飽和しない比較的小さい値のゲインを用いて実験を行っていた。しかし、それらのゲインをそれぞれ $1.22, 1.05 \times 10^{-1}, 5.24(\text{V}/\text{deg.})$ のようにハイゲインにするとファジィ制御則を用いた場合と同じような速応性が得られ、定常特性においてはむしろ良好な結果が得られた。さらに、ファジィ制御則と同様に外乱

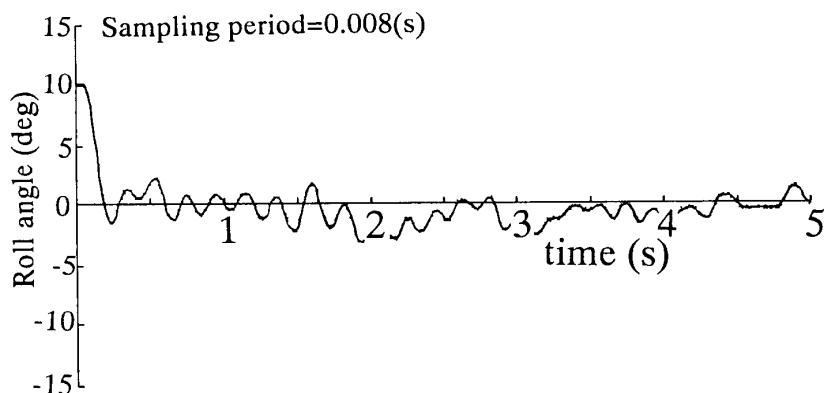


Fig. 9 Transient response of roll angle in fuzzy control

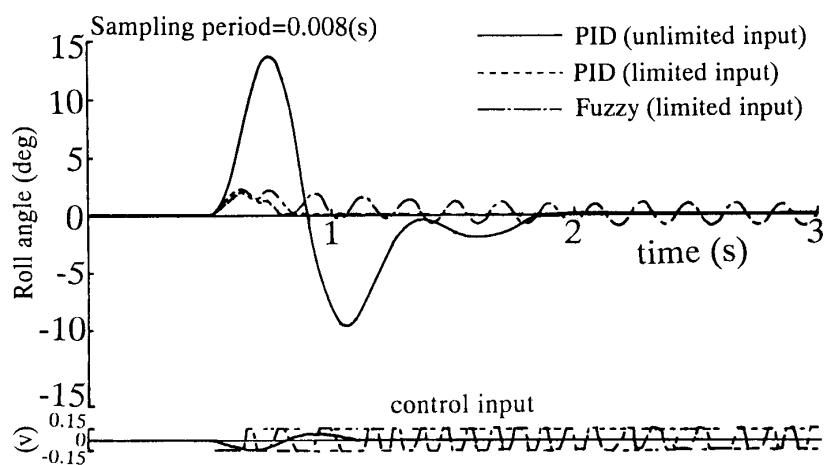


Fig. 10 Response of roll angle for pulse disturbance

に対しても強いことが確認された。これを Fig. 10 に示す。これは、各制御則に対して 0.5 秒後に外乱トルク 0.003 (N·m) を加えた場合のシミュレーション結果である。このようなハイゲイン制御の場合、制御系が不安定となるため、ファジィ制御則の場合と同様に、制御入力電圧に制限を設けなければならないという欠点がある。

6. 結 言

ファン浮上機械のホバリング制御方法の確立を目的とした本研究は以下のように要約できる。

- 1) ファン浮上機械のホバリング制御系を試作し、パラメータの同定を行った。
- 2) 制御対象のモデル化を行い、ホバリング時の基礎式を導いた。この式に基づき各軸を独立に制御する方法を提案した。
- 3) PID 制御則を用い、各軸を独立に制御することにより三軸同時姿勢制御が実現できた。
- 4) ファジィ制御則のホバリング制御への適用を試みた。その結果、PID 制御でハイゲインにした場合と同様に外乱に強いという利点がある反面、制御入力に制限を設けなければ制御できないという欠点を持っていることが確認された。

最後に、本実験に協力された本学大学院修了生の中山享一良氏（現在、株松下電工に勤務）に対して厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Tatsuya Nakamura : Control Characteristics of a Multifan Hovering Mechanism, IEEE Control Systems Magazine, 10, 15/19 (1986)
- 2) 福田敏夫、細貝英実、小林 宏：三次元フライングロボットの基礎的研究、日本機械学会論文集（C編）、第57巻、第553号、222/229 (1991)
- 3) 丹波昌平、杉浦一郎：VTOL 実験機とその制御、計測と制御、第25巻、第8号、109/115 (1985)
- 4) 大山康弘、山野 修、古田勝久：ラジコンヘリコプターのモデリングと制御、計測自動制御学会論文集、第20巻、第4号、350/355 (1984)
- 5) 中山享一良：ファン浮上機械のホバリング制御、岡山理科大学大学院工学研究科修士論文、(1992)
- 6) 原島 鮮：力学、裳華房、117/188 (1973)
- 7) 高橋安人：ディジタル制御、岩波書店、88/89 (1985)
- 8) 水本雅晴：わかりやすいファジィ理論III、コンピュートロール、No.28、34/45 (1989)
- 9) 爰島義昭、清水 順、矢野博之他：任意の重力負荷荷重を受ける空気圧サーボ系のファジィ制御、日本機械学会ロボ・メカ講演会'90講演論文集、271/274 (1990)
- 10) 中山享一良、堂田周治郎、高野安正：ファン浮上機械のホバリング制御、SICE 中国支部シンポジウム・学術講演会予稿集、138/139 (1991)

Control of a Multifan Hovering Machine

Shujiro DOHTA, Hisashi MATSUSHITA and Kenji NUMOTO*

Department of Mechanical Engineering,

**Graduate School of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1, Ridai-cho, Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1992)

It is strongly desired to develop a flying robot which can travel in the air freely to do field works such as construction, agriculture, forestry or the maintenance of power lines. The multifan hovering machine tested here is a kind of such a flying robot. This hovering machine has four fans which are driven by DC motors controlled by changing rotational speed.

The purpose of this study is to establish the hovering control scheme and is to investigate its control characteristics. The tested control system consists of a scale model with four fans, electric motors, angle sensors, A/D converter, D/A converter and a personal computer PC-9801RA.

The results obtained can be summarized as follows :

- 1) The digital control system of a multifan hovering machine was constructed using a scale model and its system parameters were measured.
- 2) The mathematical model of the hovering machine was formulated and the fundamental equations were derived for hovering control. Based on these equations, the control method that pitch, roll and yaw angle were controlled independently, was proposed.
- 3) The attitude control of the machine can be realized by controlling three angles independently with PID control scheme.
- 4) The application of a fuzzy control scheme to the hovering control was tested. The fuzzy control showed good disturbance suppression as well as the high-gain PID control. On the other hand, it showed the disadvantage that control input had to be limited to stabilize the control system.