ファジィモデルによる飛行ビークル制御 と安定性の検討

山 口 亨* 栗 山 和 信** 美 多 勉***

Flying Vehicle Control with Fuzzy Model and Its Stabilization Study

Toru YAMAGUCHI Kazunobu KURIYAMA Tutomu MITA

We propose a flying vehicle hovering control method using fuzzy model rule which is made by human's control knowledge. We solve the stabilizable condition of this fuzzy controller, and we use this stabilizable condition to realize the learning control. This learning control simulates human's training steps. The control knowledge is shown as the pair of "the condition (for example the upper flying or the lower flying)" and "the operation (controller)". At the learning, each operation is individually trained under its flying condition. We show the actual hovering experimentation results to show the usefulness of this control method and its stabilization study.

Key Words : Fuzzy Model, Fuzzy Control, Stabilization, Flying Vehicle, Learning Control.

1. は じ め に

ヘリコプターに代表される VTOL 型の飛行ビークルは、3次元空間を自由に移動できることからその有用性が知られている。しかし、自由な空間移動に伴い、低空飛行時の地面効果の影響や大傾斜時の操縦性悪化の影響など多くの特性の変動要因が内在するため¹⁾、操縦は容易ではない。小型の模型飛行ビークルも実機と同様な特性の変動要因を持つが、操縦者はビークルの特性変動の「状況」と各変動状況に対する個別の「操作」を訓練により獲得し安定的な操縦を実現する。この操縦者の知識獲得の過程は以下の3つのステップで模擬できる。1) 初期知識による操縦：ビークルの特性を想定し多くの「状況」に対応できるロバストで消極的な「操作モデル」で操縦する、2) ビークル特性の把握：特徴的な「状況（低空飛行、上空飛行など）」に対し個別の「参照モデル」

を抽出する、3) 状況別の操作の把握：前述の状況別の参照モデルに対し個別の「操作モデル」を訓練により獲得する。

本稿では、ビークルの安定性を考慮した操縦知識の抽出と知識の洗練を工学的に実現することを目的とする。操縦者の持つ知識のアウトラインを「状況」と「操作モデル（制御器）」からなるファジィモデル型のファジィルール²⁾で初期的に抽出し、経験からの学習でそのファジィルールを洗練する手法は、ファジィルールの人間への親和性の高さや経験による学習の高速性から有効な手法である³⁾。しかし、ファジィモデルに基づくファジィ制御系の安定性の考慮が必要であるが、十分な研究がなされていない。本稿では、飛行ビークルのホバリング（空中停止）制御をファジィモデルに基づくファジィ制御器で実現し、従来は不足している安定性の検討の明確化を目的にファジィ制御器の定式化を行い制御理論⁴⁾⁵⁾により安定化制御器の条件を得るための方針を示す。特に、多くのファジィ制御システムへの適用を考慮し、汎用的な表現を用いてこの方針を示す。本稿で提案の方針を用いて、1) 操縦者から抽出した操作モデル（制御器の構

原稿受付 1991年9月5日

* 国際ファジィ工学研究所

** 千葉大学大学院工学研究科

*** 千葉大学工学部

造やパラメータ) が特性変動を伴うビークルを安定化する条件や, 2) 経験からの学習で洗練した操作モデル(制御器のパラメータ) がビークルを安定化する条件を得る. さらに, この条件を用いて模型の小型飛行ビークルのホバリング制御実験を行い, 安定性を考慮したファジモデルに基づく学習制御の有効性を確認する.

以下では, まず飛行ビークル実験システムの構成を示し, 次にその操縦のためのファジールールの抽出とファジィ制御器の安定性の検討を示す. 最後に, 本手法の有効性を示すため, ファジィ制御器の安定性を考慮した学習実験の結果を示す.

2. 飛行ビークル制御実験システム

4つのファンで3次元空間を自由に飛行する VTOL 型のビークルは, ある種の3次元空間移動ロボットである. 本稿では3次元空間移動の基礎となるホバリング制御を実現する. **Fig. 1** にその実験システムを, また上方にビークルの形状を示す. 実験システムは, 制御用 32 bit マイクロコンピュータ J 3100 SGT, 16 bit-AD/DA 入出力インタフェースボード, 2つの2次元 PSD カメラ, カメラ信号用フィルタ, 操作量を飛行ビークルへ伝えるラジオコントロール送信器, 赤外線 LED 付き飛行ビークルで構成される. **Fig. 2** に, 実験システムの各部を示す. 1) は制御用コンピュータとシステム的全景, 2) は PSD カメラ, 3) はカメラ用フィルタ, 4) は送信器と飛行中のビークル, 5) はホバリング中のビークルを拡大したものである. ビークル内にはジャイロがあり, 傾き (**Fig. 1** の $\theta_x \theta_y$) や回転角速度 (ω) に対しローカルに制御を行なう. また, PSD カメラで位置を計測するため LED を4つのファンの下方に取り

Fig. 1 The flying vehicle experimental system

付ける. 4) の送信器では制御用マイクロコンピュータからの操作量を送るためにインターフェースを取り付けている. カメラ用フィルタ回路では, PSD カメラ信号を変換しビークルの4つのファンの下方に取り付けた LED の位置信号として制御用コンピュータへ送る. 制御用コンピュータは, デジタルフィルタを用いて入力された LED の位置信号から以下の制御量を得る. これらは, ビークルの位置 (x : 前後軸, y : 左右軸, z : 上下軸), 速度 (位置の微分値), 回転角 (θ), 回転角速度 (ω : 回転角の微分値) である.

この前後, 左右, 上下, 回転の4つの操作系は飛行ビークル内の処理回路で非干渉化されるため, 4つの操作系に独立した制御系を構成する. (本稿の以下では, 特に前後操作系についてのみ説明を行なうが, 各軸についても同様な制御系を構成する.) この制御用コンピュータの処理を **Fig. 3** に示す. 位置と速度を制御量に用いてファジィモデルに基づくファジィ制御器により操作量

1) The complete view.

2) PSD-camera.

3) The filter.

4) RC-transmitter and vehicle.

5) The flying vehicle with LEDs.

Fig. 2 Photos of the experimental system.

Fig. 3 The computer processing diagram

を得る。制御周期は 100msec とする。実験結果からの学習でファジィルールの洗練を行なうため、コンピュータは操縦者による操作の修正信号や各処理部のデータを保存する。

この実験システムの構成は、操縦者が目でビークルの位置を観測し送信器のスティックで操作を行なう系を模倣する。目の代わりに PSD カメラを用いてビークルを観測しファジィルールで表現した操縦者の知識を用いて操縦を行なう。さらに操縦の結果を用いてファジィルートを洗練する。実機ビークルへ同様な構成を組み込むことで自律型の 3 次元空間移動ロボットの実現が可能である。

3. 飛行ビークル制御のファジィルールの抽出

操縦者は、上空飛行や低空飛行、大きく機体が傾いた場合など状況に応じて特性が大きく変動することを知る。本稿では機体の傾きが少ない場合の高度による特性の変動に着目する。「上空」や「低空」などの状況による特性の変動をファジィモデルを用いてモデル化する。また、ファジィモデルに基づいて操縦に関する初期的な知識を抽出する。

3.1 飛行ビークルのファジィモデル

操縦者のビークルの動特性に関する知識を基に、上空飛行や低空飛行などの異なった状況におけるパラメータの変動を表現するモデルを実現する。同型の飛行ビークルのブロック線図を参考にモデルの構造を決め、ステップ応答等の各種同定試験を行いビークルの特性を近似する。ビークルの近似特性は 4 次の伝達関数 P_v となる。

$$P_v = \frac{ke_0(s^2 + kd_3s + kd_2)s}{ke_0(s^2 + kd_3s + kd_2)s^2} \quad (1)$$

Table 1 The vehicle system parameters.

e_0	652.4	k	$0.029(k_3) \sim 0.052(k_2)$
d_2	313.7	d_3	15.68

Fig. 4 Membership functions of vehicle fuzzy model

ここに、 k は変動パラメータ ($k_2 \geq k \geq k_3$)、 e_i , d_i , k_i は正の係数である。低空飛行では地面からの地面効果がはたつき、操縦の感度が高くなる。 $(k=k_2)$ の状況 また、地面からの乱流で外乱が増す。上空飛行では地面効果が減り操縦の感度が低くなる。 $(k=k_3)$ の状況 式 (1) のパラメータ値を Table 1 に示す。操縦者は、ビークルが 2 つの特徴的なモデル (参照モデル) 持つことを得る。低空の参照モデルを P_2 、上空の参照モデルを P_3 とする。

ファジィモデルの考え方をを用いて変動のプラントモデルを次式で定義する。

$$P_1 = \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 \quad (2)$$

ただし、 $0 \leq \alpha_i \leq 1$, $\alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 、また、式 (2) は 2 つの参照モデル P_2 , P_3 のパラメータ値の内挿を意味する。同一の状態をもつ一つのプラントである。 P_1 は変動点における P_v の線形近似モデルで、変動の全域を示す。 α_i が変動したプラントと参照モデルとの同定信号に対する応答特性の類似度を、Fig. 4 に示す高度 h からのメンバシップ値を用いて評価する。

3.2 ファジィモデルに基づくファジィ制御器

上空と低空の 2 つの参照モデルを持つビークルに対し、操縦者は、はじめは両方のモデルを操縦できる一つのロボバストで消極的な操作モデルで操縦を行なう。この全域 P_1 に対応するロボバストな操作モデル (制御器) を f_1 とする。操縦者は訓練を重ね、 f_1 を洗練し各状況 (上空飛行、低空飛行) に対応する専用の操作モデルを得る。低空のモデル P_2 、上空のモデル P_3 に対応する操作モデルをそれぞれ f_2 , f_3 とする。以上の操縦に関する知識のアウトラインをファジィモデル形式で表現したものが式 (3) である。

- Rule1: If h is P_1 ,
then $u = f_1(y)$ with Cu_1 .
- Rule2: If h is P_2 ,
then $u = f_2(y)$ with Cu_2 .
- Rule 3: If h is P_3 ,
then $u = f_3(y)$ with Cu_3 . (3)

ここに、 h はルールへの入力で機体の高度、 y は機体の目標点からの変位、 u は操作量、 P_i は各状況に対応。

するファジィ集合で、 P_1 は「全域」、 P_2 は「低空」、 P_3 は「上空」を代表するメンバシップ関数、また、 f_i は P_i に対応する操作モデル（制御器）である。 Cu_1 は操作モデルの関連度⁹⁾を示す。ファジィルールへの学習性を考慮し関連度 Cu_i を用いる。関連度は、現在の f_i と理想の f_i^* との関連を示し、理想に近い程1に近い値となる。関連度 Cu_i が高くなるとその状況における操作モデルの寄与する割合が増加する。関連度 Cu_i を用いた連想型のファジィ推論⁹⁾を用いて各操作モデルの寄与度 r_i を得る。ファジィ制御器による得られる操作量 u^* は寄与度 r_i により、次式となる。

$$u^* = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot f_i(y) \quad (4)$$

式(3)で、操縦に関する初期知識としては、低空の操作モデル f_2 や上空の操作モデル f_3 を獲得していないため、全域の操作モデル f_1 を仮に f_2, f_3 に設定する。このため関連度 Cu_2, Cu_3 は低い値となる。訓練の初期には全域に対応する保守的な操作モデル f_1 を操縦に用いる。

操縦者は、全域に対する操作 f_1 に機体の変位と機体の移動速度を用いる。これらの変位と速度(変位の微分)のフィードバックゲインを h_{10}, h_{11} とする。操縦者の変位、速度に対する比率の知識と保存の操作データ値を用いてフィードバックゲイン h_{10}, h_{11} を得る。 $(h_{10}=0.0095, h_{11}=0.0085)$ 。さらに、操縦者の各状況に応じた修正信号を用い対応した操作モデル f_2, f_3 を学習により洗練する。最終的には特徴的な状況 P_2, P_3 に対し洗練後の操作モデル f_2, f_3 による操縦へ移行する。

4. ファジィ制御器の定式化と安定性の検討

操縦者から抽出した知識によるファジィ制御器や、学習後の知識によるファジィ制御器がビークルを安定化させるかの検討を行なう。このため、ファジィ制御器を定式化する。

4.1 ファジィ制御器の定式化

ファジィモデルに基づくファジィ制御器では、次に示す形式のファジィルールを用いて制御器を実現する。制御対象の変動に対する制御知識を、“if [(変動の状況を代表する参照モデルを示す) ファジィ条件命題], then [(状況を代表する参照モデルに対応する操作モデルの) 入出力関数]”のファジィルールの知識表現を用いて制御器を実現する。参照モデルをifのファジィ条件命題で区分化し特徴付ける。thenの入出力関数にはその参照モデルに対応する操作モデルを記述する。この構成をFig. 5に示す。Fig. 5で μP_i はプラント P_i に対するメンバシップ関数である。 μP_i は P_i を特徴づける

ファジィ集合であり、制御対象の特性変動を模擬する空間上への写像である。この空間では、制御対象の特性変動が観測する特徴量へ影響する割合のメジャーを取るため、この量を特性類似度と呼ぶ。観測された制御対象の特徴量は特性の変動を模擬する空間上へ写像される⁷⁾。ビークル制御のルールでは、if部の高度 h に対するメンバシップ関数が特性類似度を評価する。プラント P_i を、変動を模擬する空間へ写像したファジィ集合を μP_i とする。Fig. 5では3つの特徴的な参照モデル P_1, P_2, P_3 がゆっくりとパラメータ変動するプラント P_0 を代表する例である。 P_0 の時刻 t の線形近似モデルを P_t とし、変動を考慮した拡大系の状態空間表現のマトリクスを $[A, B, C, D]$ で表現するとき P_t は次式で近似できると仮定する。

$$P_t = [A, B, C, D] \\ = \sum_{i=1}^3 \alpha_i [A_i, B_i, C_i, D_i] \quad \left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \right) \quad (5)$$

ただし、 $\sum \alpha_i = 1$ で、 $[A_i, B_i, C_i, D_i]$ は参照モデル P_i の状態空間表現のマトリクスとする。式(5)は制御対象のパラメータの合成を示す。ファジィ制御器は、特徴量を観測し各参照モデル P_i への特徴類似度を用いたファジィ推論により、操作モデル C_i の寄与度 r_i を決める。制御器の操作量 u^* は次式となる。

$$u^* = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot C_i(y) \quad \left(\sum_{i=1}^3 r_i = 1 \right) \quad (6)$$

ただし、操作モデル C_i は P_i に対応し設計された補償器、 y は観測された制御量である。ここで、式(6)のファジィ制御器は次の2つの形態を持つ。

1) 補償器 C_i の内部に状態を持たない場合は補償器のパラメータを調整する単一の適応制御器となる。この場合、式(6)の r_i で合成した補償器を C^* とする。

2) 補償器 C_i の内部に個別の状態を持つ場合(個別のオブザーバを持つ場合など)は複数の補償器の合成となる。

Fig. 5 The fuzzy controller construction

以下に、制御理論で用いられている安定有理関数行列による分解表現にもとづく方法⁴⁾⁵⁾を利用してこの安定化補償器のクラスを求める方針を導く。

単一の適応制御器 C^* を用いる場合は、補償器 C_i は、以下の「条件1かつ条件2」、または、「条件1かつ条件3」が十分条件である。ここでは P_i を参照モデルの伝達関数、 C_i を補償器の伝達関数とする。また、 C^* をファジィ制御器の伝達関数、ファジィ制御器の仮定する制御対象の伝達関数を P^* とする。

1) 条件1: C_i は P_i のある種の最適制御器である。また μP_i の定義から C_i は P_i と特性類似度の近い (μP_i 内の) プラントをすべて安定化する補償器である。

2) 条件2: C^* は P^* を安定化すると同時に、 P_i を安定化する。言い替えると、 C^* は、 P^* と P_i を同時安定化する。(ただし良好なファジィ推論では P^* と P_i の特性類似度は十分に近いため、条件2は条件1に含まれる。)

さらに、条件2の必要条件として条件3を得る。

3) 条件3: C_i は P_i を安定化すると同時に特性類似度の近い別の参照モデル P_j (および μP_i 内のプラント) を同時安定化する。

条件1は通常の補償器の条件である。条件2と条件3は「同時安定化問題」として定式化する。さらに、複数の個別の補償器 C_i を用いる場合は次の条件4の制約が加わる。

4) 条件4: 補償器 C_i と、(C_i の参照モデル P_i と別の特性類似度の近い参照モデル P_j に対応する) 補償器 C_j の凸結合もプラント P_i を安定化する。

この条件4を「凸結合多重補償器問題」として定式化する。本稿では、ファジィモデルに基づくファジィ制御器を上述の「同時安定化問題」と「凸結合多重補償器問題」として定式化する。制御理論で用いられている安定有理関数行列の分解表現にもとづく方法を利用し、安定化補償器のクラスを求めることを試みる。その第1ステップとして、問題を簡易化し次の2つの問題に分け補償器のクラスを明確化する方針を導く。

1) 同時安定化問題: 制御対象を複数の線形モデルで表現しそれらのモデルを同時に安定化する補償器のクラスを求める問題。

2) 凸結合型多重補償器問題: 一つの制御対象に対し複数の補償器を凸結合し制御する場合の安定化可能な補償器のクラスを求める問題。

4.2 同時安定化問題

ここでは制御対象が P_1, P_2 の2個の場合の安定化補償器 C_1 のクラスを求める⁴⁾⁵⁾。Fig. 6 にこの同時安定化問題を示す。 P_1 と特性類似度の近い P_2 があり、変

Fig. 6 The simultaneous stabilization problem

動により P_1 から P_2 、 P_2 から P_1 へ切り替わる。ここで、 Rp, S, U を以下のように定義する。

Rp : プロパーな有理関数行列の集合。

S : 安定でプロパーな有理関数行列の集合。

U : ユニモジュラ ($G \in S$ & $G^{-1} \in S$ の伝達関数行列) な有理関数行列の集合。

プラント $P_1, P_2 \in Rp$ を重既約分解で表現する。安定な有理関数による分解表現の次式となる。

$$P_i = N_i D_i^{-1} = \tilde{D}_i^{-1} \tilde{N}_i, \quad i=1, 2 \quad (7a)$$

$$\begin{bmatrix} Y_i & X_i \\ -\tilde{N}_i & \tilde{D}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_i & -\tilde{X}_i \\ N_i & \tilde{Y}_i \end{bmatrix} = I, \quad i=1, 2 \quad (7b)$$

ただし、(7a) 式の $N_i, D_i \in S$ は右既約、

$\tilde{N}_i, \tilde{D}_i \in S$ は左既約である。さらに、(7b) 式は重既約分解における Bezout 等式で、 $Y_i, X_i, \tilde{Y}_i, \tilde{X}_i \in S$ となる。ここで、 P_i に対する補償器 C_i のクラスは、Youla パラメトリゼーションより、

$$C_i = (Y_i - R_i \tilde{N}_i)^{-1} (X_i + R_i \tilde{D}_i) \quad (8)$$

となる。さらに、

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} Y_1 & X_1 \\ -\tilde{N}_1 & \tilde{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

により $A, B \in S$ を定義すると、以下に P_1, P_2 を同時安定化する必要十分条件を得る。

(同時安定化の必要十分条件)

式(8)の制御器 C_1 の Youla パラメトリゼーションより、

$$\begin{aligned} C_1 &= (Y_1 - R_1 \tilde{N}_1)^{-1} (X_1 + R_1 \tilde{D}_1) \\ &= (Y_2 - R_2 \tilde{N}_2)^{-1} (X_2 + R_2 \tilde{D}_2) \end{aligned} \quad (10)$$

を満たす $R_1, R_2 \in S$ が存在することである。また、この条件は、

$$A + RB \in U \quad (11)$$

を満たす $R \in S$ が存在することと等価である。(ただし、 A, B は右既約である。)

これらの証明について本稿ではふれず文献4, 5にゆだねる。この同時安定化条件を満たす制御器のパラメトリゼーションについては文献8に示されており、ここでは省略する。

式(10)または式(11)は変動プラント間の同時安定

化可能性を示しており、この条件はファジィモデルに基づくファジィ制御器を構成する上で重要な条件となる。

4.3 凸結合型多重補償器問題

ファジィ制御器が個別の複数の制御器 C_i を合成する場合、安定性のための制約が加わる。1つのプラント P_1 に対し2つの補償器 C_1, C_2 の凸結合の場合を想定し安定化補償器のクラスを求める。この条件は凸結合型多重補償器の制約となる。Fig. 7 に凸結合型多重補償器問題の構成を示す。プラントにパラメータ変動が観測された場合は、ファジィ推論で C_1, C_2 の凸結合を行い適応的に制御器を調整する。調整された操作量 u^* は次式となる。

$$\begin{aligned} u^* &= \gamma_1 \cdot C_1 \cdot y + \gamma_2 \cdot C_2 \cdot y \\ &= (\gamma_1 \cdot C_1 + (1 - \gamma_1) C_2) y \end{aligned} \quad (12a)$$

式 (12a) から補償器 C は、

$$C := \gamma_1 \cdot C_1 + (1 - \gamma_1) C_2 \quad (12b)$$

で定義される。ここで、 P_1 を強安定化可能と仮定し、その安定な安定化補償器の1つを C_1 とする。 P_1 の重既約分解から、

$$P_1 = N_1 D_1^{-1} = \tilde{D}_1^{-1} \tilde{N}_1 \quad (13a)$$

$$\begin{bmatrix} I & C_1 \\ -\tilde{N}_1 & \tilde{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 & -C_1 \\ N_1 & I \end{bmatrix} = I \quad (13b)$$

を満たすものが存在する。ただし、式 (13a) の $N_1, D_1 \in S$ は右既約、 $\tilde{N}_1, \tilde{D}_1 \in S$ は左既約である。ここで P_1 を安定する C_2 を Youla パラメトリゼーションで表現すると次式となる。

$$C_2 = (C_1 + D_1 R)(I - N_1 R)^{-1} \quad (14)$$

ここで、 $R \in S$ は自由パラメータである。補償器 C が P_1 を安定化する必要十分条件を以下に示す。

(凸結合安定化補償器の必要十分条件)

R が $-\gamma_1 \tilde{N}_1$ の安定化補償器であることが、凸結合補償器 C が P_1 を安定化する必要十分条件である。

(証明)

凸結合補償器 C を定義する式 (12b) を変形し次式を得る。

$$C = (C_1 + D_1 R - \gamma_1 R)(I - N_1 R)^{-1} \quad (15)$$

一方、任意の $\gamma_1 \in [0, 1]$ に対し P_1 を C が安定化する必要十分条件は、各々の γ_1 に対して次式を満たす $Q \in S$ が存在することである。

$$C = (I - Q \tilde{N}_1)^{-1} (C_1 + Q \tilde{D}_1) \quad (16)$$

(15), (16) 式を等式で結び変形し次式を得る。

$$Q(I - \gamma_1 \tilde{N}_1 R) = (1 - \gamma_1) R \quad (17)$$

ここで、 P_1 を C が安定化する条件は、 $Q \in S$ を満たす Q が存在することである。

この条件は式 (17) より $(I - \gamma_1 \tilde{N}_1 R) \in U$ となる。さらに、この条件は R が $-\gamma_1 \tilde{N}_1$ を安定化する条件と

Fig. 7 The multi-compensator convex combination configuration problem

等価である。以上で証明を終る。

特に、 $\|\gamma_1 \tilde{N}_1 R\|_\infty \leq \|\tilde{N}_1 R\|_\infty$ の関係 ($\|\cdot\|_\infty$ は H_∞ ノルムを示す。) から、スモールゲイン定理を用いて次の十分条件を得る。

(凸結合安定化補償の十分条件)

$\|\tilde{N}_1 R\|_\infty < 1$ であれば P_1 を補償器 C が任意の $\gamma_1 \in [0, 1]$ に対し安定化する。

4.4 ファジィ制御器の安定性の検討

ファジィモデルに基づく制御器の定式化から得た安定性検討の方針を用いて、ピークルのファジィ制御器の安定性の検討を行なう。

(操作モデルの構造に関する検討)

3.2 で操縦者から初期的に抽出した操作モデルが、特性変動を伴うピークルを安定化するかを検討する。はじめに、操作モデルの構造を検討する。初期的な操作モデルは1つの制御器であり、制御対象のピークルは式(1)で示す様に変動パラメータ k をもつ。このため、前述の同時安定化問題として、その補償器の構造の検討を行なう。式(1)のヘリコプターの伝達関数を既約分解し次式を得る。

$$P_v = \tilde{D}_v^{-1} \cdot \tilde{N}_v \quad (18)$$

ただし、

$$\tilde{D}_v = \begin{bmatrix} s/(s+1) & 0 \\ 0 & s^2/(s+2)(s+3) \end{bmatrix} \in S$$

$$\tilde{N}_v = \begin{bmatrix} G_v/(s+2) \\ G_v/(s+1)(s+3) \end{bmatrix} \in S$$

$$G_v = k e_0 / (s^2 + k d_3 s + k d_2) \in S$$

とする。ここで、 G_v は機体の本体の伝達関数で、本体内のジャイロフィードバックにより、 k の変動に対しても常に安定な有理関数である。ここで、 k の変動範囲内の任意の2つのプラントを P_i, P_j とし、式(10)の添え字1, 2と式(18)の添え字 v をプラントに対応した i, j にかえる。さらに、式(10)の同時安定化の条件式へ、

$$R_i = \begin{bmatrix} G_j/G_i & 0 \\ 0 & G_j/G_i \end{bmatrix} \in S$$

$$R_j = \begin{bmatrix} G_i/G_j & 0 \\ 0 & G_i/G_j \end{bmatrix} \in S$$

$$Y_i = Y_j = 0 \in S$$

$$X_i = \begin{bmatrix} (h_1 G_j G_i - G_j s^2)/G_i(s+2)(s+3), & 0 \\ 0, & (h_0 G_j G_i - G_j s)/G_i(s+1) \end{bmatrix} \in S$$

$$X_j = \begin{bmatrix} (h_1 G_i G_j - G_i s^2)/G_j(s+2)(s+3), & 0 \\ 0, & (h_0 G_i G_j - G_i s)/G_j(s+1) \end{bmatrix} \in S$$

に示す $R_i, R_j, X_i, X_j, Y_i, Y_j$ を代入する．代入の結果から，式 (10) の同時安定化可能性の条件を満たし，

$$C_i = \begin{bmatrix} h_i, & 0 \\ 0, & h_0 \end{bmatrix} \in S \quad (19)$$

の同時安定化補償器 C_i を得る．ここに， h_0, h_1 は安定な有理関数である．以上のことから，この制御対象は，パラメータの変動範囲内の任意の2つのプラントに対し，式 (19) のシンプルな出力フィードバック型の制御器で同時安定化が可能である．操縦者の行なっている操作モデル f_1 の構造で特性の変動する制御対象を安定化可能である．

(操作モデルのパラメータの検討)

前述の構造の単一の制御器を用いる場合の安定化のパラメータの条件を求める．ここで，操縦者の変位と速度(変位の微分)のフィードバックゲインを h_{10}, h_{11} とする．式 (1) よりこの操作モデル f_1 による閉ループ伝達関数 P_{C_0} は次式となる．

$$P_{C_0} = k e_0 / (s^4 + k d_3 s^3 + k d_2 s^2 + k e_0 h_{11} s + k e_0 h_{10}) \quad (20)$$

飛行ビークルでは変動パラメータ k が1つで，かつ，制御器の構造がシンプルであるため，式 (20) の特性方程式からラウス・フルビッツの安定条件⁹⁾を用いて安定化のパラメータの条件式を得る．条件式は，

$$\begin{aligned} k &> e_0 h_{11} / d_2 d_3 \quad \& \\ k &> e_0 h_{11}^2 / d_3 (d_2 h_{11} - d_3 h_{10}) \end{aligned} \quad (21)$$

となる．操縦者から抽出した操作モデル f_1 は条件式を満たし，低空から上空までの全域の同時安定化補償器である．

ここで，初期の操作モデル f_1 と操縦者の修正信号から操作モデル f_2, f_3 を獲得していく学習時の安定性の検討を行なう． f_2, f_3 の構造を f_1 と同一としそのパラメータ値 (h_{10}, h_{11}) へ対応するパラメータ値をそれぞれ (h_{20}, h_{21})，(h_{30}, h_{31}) とする場合は，式 (4) のファジィ制御器は，それぞれのパラメータの凸結合を行なう単一の適応制御器となる．さらに，この場合は4.3に示す凸結合型多重補償器問題の制約を考慮する必要がなくなり，安定化補償器のクラスが広がる．

また，ファジィ制御器はパラメータの凸結合となることから，学習で得た安定化補償器のパラメータ (h_{20}, h_{21})，(h_{30}, h_{31}) の十分条件は，式 (21) のパラメータ

(h_{10}, h_{11}) の条件と等しくなる．学習時の安定化の制御パラメータの十分条件を以下に示す．

$$\begin{aligned} k &> e_0 h_{21} / d_2 d_3 \quad \& \\ k &> e_0 h_{21}^2 / d_3 (d_2 h_{21} - d_3 h_{20}) \quad \& \\ k &> e_0 h_{31} / d_2 d_3 \quad \& \\ k &> e_0 h_{31}^2 / d_3 (d_2 h_{31} - d_3 h_{30}) \end{aligned} \quad (22)$$

学習後， k の変動に対し式 (22) を満たすパラメータのみを採用する．

5. ファジィルールの学習とその飛行実験結果

飛行実験中の操縦者の修正信号に基づく学習により，初期的に抽出したファジィルールを洗練する．個々の状況 P_i に対応する操作モデル f_i を個別に学習するため，学習の効率化が図れ，学習後の知識の抽出が容易である．

5.1 ファジィルールの学習

この操作モデル f_i の制御パラメータ (h_{i0}, h_{i1}) の学習に操縦者の修正信号を教師信号として用いる教師有りの学習法を用いる．2乗誤差を最小にする誤差逆伝播法の基礎である Widrow-Hoff の学習則¹⁰⁾を用いる．

操縦者の修正信号を Δu ，操作モデル f_1 の変位 y のフィードバックゲインの修正値を Δh_{10} ，速度(変位の微分)に関するフィードバックゲインの修正値を Δh_{11} とする．学習で求めるフィードバックゲインの修正値は，

$$E = \sum_{t=1}^T (\Delta u_t - \Delta h_{10} y_t - \Delta h_{11} \dot{y}_t)^2 \rightarrow \min \quad (23)$$

の誤差 E を最小化するものである．ここに，添え字 t は 100 msec のサンプリングタイムの時刻を示す．式 (23) から，

$$\begin{aligned} dE/dh_{10} \\ = \sum_{t=1}^T (\Delta u_t - \Delta h_{10} y_t - \Delta h_{11} \dot{y}_t) (-y_t) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

を得る．式 (24) を変形し，近似の学習式として，

$$\Delta h_{10} = - \frac{\sum_{t=1}^T \Delta u_t y_t}{\sum_{t=1}^T y_t^2} \quad (25)$$

を得る．同様に，

$$\Delta h_{11} = - \frac{\sum_{t=1}^T \Delta u_t \dot{y}_t}{\sum_{t=1}^T \dot{y}_t^2} \quad (26)$$

を得る．さらに，学習により，得た制御パラメータが式 (22) の条件を満たすかを確認する．

操作モデル f_i が式 (25) と式 (26) の学習で洗練されるに従って対応する関連度 C_{ui} を1へ近付ける．学習を考慮した連想型のファジィ推論では，状況にマッチしかつ関連度が高くよく洗練された操作モデルを想起する．このため，学習後は操作の寄与度 r_i が初期の操作モデル f_1 から各状況別の操作モデル f_2 (低空飛行の操作) や操作モデル f_3 (上空飛行の操作) へ移行する．学習後の高度 h による (通常ファジィ推論の真理値に

Fig. 8 The inference results at well-trained

あたる) 寄与度 γ_i の想起結果を Fig. 8 に示す. 低空では f_2 , 上空では f_3 が制御へ寄与することがわかる.

学習により得られた操作モデルの制御パラメータは,

$$h_{2i} > h_{1i} > h_{3i} \quad (i=0, 1)$$

であった. また, これらの操作モデルが式 (22) の同時安定化の条件を満足した.

5.2 ホバリング実験の結果と考察

ホバリング実験の学習前後の観測結果を Fig. 9 に示す. 横軸が時間で縦軸が中心からの前後の変位を示すセンサ出力 (0.083 倍で変位となる) である. 高度 h は低空から上空, 上空から低空へと 0 から 30 cm の範囲で一定の変化率で推移させる. 図中の微動は, ブレードから発生する乱流の外乱による. ここで, 学習後の変位積分の平均は約 8% 向上した.

飛行ビークルの特性は低空では地面効果で外乱が増加し, かつ, 操縦の感度が増加する. 学習で得た低空用の操作モデル f_2 は初期の f_1 に比較して外乱に対し強い傾向となる. さらに, 操縦感度の増加へ対応し制御ゲインの低下が見られた. 逆に上空用の制御パラメータは操縦感度の低下に伴い, 制御ゲインの増加があった. また,

上空では地面効果が減少し高周波外乱も減少する. この影響で速度に対する制御ゲインの増加が見られた.

以上のように, 本実験では各状況の参照モデルの特徴に応じた操作モデルを学習で獲得できた. ファジィ知識表現を用いることで学習をそれぞれの特徴的な参照モデル別に行うことができ, 学習の高速化が図れるとともに獲得した知識を抽出することが容易であった.

6. おわりに

3次元空間を自由に移動する知的な飛行ビークルの実現を目指し, 本稿では, 学習性や安定性を考慮したファジィモデルに基づく制御器を用いてビークルのホバリング制御を実現した. この制御器のファジィルールは, 操縦者の操作知識の抽出により得た. また, ホバリング実験時の操縦者の修正信号による学習でファジィルールの洗練を行なった. さらに, 安定性の検討では, ファジィモデルに基づくファジィ制御器の定式化を行い, 安定性の条件を導く方針を示した. 飛行ビークルのファジィルールの学習では, この安定性の条件が有効に利用できた.

ファジィモデルに基づくファジィ制御器の定式化と安定性の条件を得るための方針は, 専門家から抽出したファジィルールの安定性の検討や, そのファジィルールの学習時の安定性の検討へ有効に利用できる. しかし, ファジィルールを利用する一般システムの安定条件の導出は難しい. 今後, 自律的な3次元移動ロボットの学習機能の実現を目指し, システム構造を有効に利用した安定条件の導出を行なう.

参考文献

- 1) 杉浦, 他: “フライングフラットベットの制御(第2報)”, 第23回計測自動制御学会学術講演会, pp. 425-428, 1983
- 2) Takagi, T. and Sugeno, M.: “Fuzzy Identification of

1) Before the learning of controllers.

2) After the learning of controllers.

Fig. 9 The results of hovering experimentations.

Systems and Its Applications to Modelling and Control", IEEE Trans. SMC 15-1, pp. 116-132, 1985

- 3) 山口, 後藤, 吉田, 美多: "ファジィ連想記憶システムを用いた円盤型ヘリの学習制御", 日本ファジィ学会第7回ファジィシステムシンポジウム, pp. 29-33, 1991
- 4) Vidyasagar, M.: "Control System Synthesis", MIT Press, Cambridge, 1985
- 5) 山口, 栗山, 美多: "ファジィ適応制御における安定化補償器問題", 第33回自動制御連合講演会, pp. 155-158, 1991
- 6) 山口, 高木, 銅谷: "連想記憶システムを用いたファジィ推論", 日本ファジィ学会, 第6回ファジィシステムシンポジウム, pp. 93-96, 1990
- 7) 山口, 田鍋, 村上, 後藤: "ファジィ連想記憶システム

を用いた適応制御", 電気学会論文誌C, 111巻, 1号, pp. 40-46, 1991

- 8) Obinata, G. and Moore, J.B.: "Characterization of controllers in simultaneous stabilization", System & Control Letters 10, North-Holland, pp. 333-340, 1988
- 9) 中野, 美多: "制御基礎論", 昭晃堂, 1982
- 10) Widrow, B. and Hoff, M.E.: "Adaptive switching circuits", WESCON conv. Rec., 4, 1960.

山口 亨

(Toru YAMAGUCHI)

1956年8月25日生。1981年3月千葉大学大学院工学研究科電気専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。1989年4月から国際ファジィ工学研究所へ出向。現在、(株)東芝、システムソフトウェア技術研究所

で、ファジィとニューラルネットの融合に関する研究開発に従事。計測自動制御学会, 日本ファジィ学会, 電気学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

栗山和信

(Kazunobu KURIYAMA)

1963年4月15日生。1992年千葉大学大学院工学研究科修了。現在千葉大学大学院自然科学研究科(博士課程)在学中。

美多 勉 (Tsutomu MITA)

1975年東京工業大学博士課程修了。千葉大学講師, 助教授を経て1990年3月教授, 現在, オーストラリア大学客員教授。制御理論, ロボット工学, 電力工学などの研究・教育に従事, 平成元年電気学会論文賞受賞, 1990年システム制御情報学会榎本記念論文賞受賞。

(日本ロボット学会正会員)