

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4133435号  
(P4133435)

(45) 発行日 平成20年8月13日(2008.8.13)

(24) 登録日 平成20年6月6日(2008.6.6)

(51) Int.Cl.		F I	
<b>B 6 4 C</b>	<b>13/20</b>	<b>(2006.01)</b>	B 6 4 C 13/20 Z
<b>B 6 4 C</b>	<b>27/04</b>	<b>(2006.01)</b>	B 6 4 C 27/04
<b>B 6 4 C</b>	<b>39/02</b>	<b>(2006.01)</b>	B 6 4 C 39/02
<b>G 0 5 B</b>	<b>13/04</b>	<b>(2006.01)</b>	G 0 5 B 13/04
<b>G 0 5 D</b>	<b>1/08</b>	<b>(2006.01)</b>	G 0 5 D 1/08 Z

請求項の数 11 (全 28 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2003-49570 (P2003-49570)  
 (22) 出願日 平成15年2月26日(2003.2.26)  
 (65) 公開番号 特開2004-256022 (P2004-256022A)  
 (43) 公開日 平成16年9月16日(2004.9.16)  
 審査請求日 平成18年2月6日(2006.2.6)

(73) 特許権者 599176735  
 野波 健蔵  
 東京都町田市つくし野1-33-7  
 (73) 特許権者 503077280  
 辛 振玉  
 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉  
 大学工学部電子機械工学科内  
 (73) 特許権者 503077305  
 藤原 大悟  
 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉  
 大学工学部電子機械工学科内  
 (73) 特許権者 503077316  
 羽沢 健作  
 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉  
 大学工学部電子機械工学科内  
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 小型無人ヘリコプタの自律制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

【数 1】

$$G_{\theta}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\theta} \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_{ns}^2)(T_{\theta} s + 1)s}$$

$G_{\theta}(s)$ : エレベータサーボ入力からピッチ軸姿勢角度  $\theta$  までの伝達関数表現

$e^{-Ls}$ : むだ時間要素

$\frac{\omega_{ns}^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_{ns}^2}$ : 2次遅れ系

$\frac{1}{s}$ : 積分器

$K_{\theta}$ : モデルゲイン (実験とシミュレーション結果を基に決定した値)

$\omega_{ns}$ : 固有角振動数 (部分空間同定法により決定した値)

$\zeta_s$ : 減衰比 (部分空間同定法により決定した値)

$T_{\theta}$ : 時定数 (実験とシミュレーション結果を基に決定した値)

$s$ : ラプラス演算子

10

20

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御のエレベータ操縦入力からピッチ軸姿勢角度までの伝達関数表現を表す上記【数1】の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項2】

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

30

【数 2】

$$G_{\phi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\phi} \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2)(T_{\phi} s + 1)s}$$

$G_{\phi}(s)$ : エルロンサーボ入力からロール軸姿勢角度 $\phi$ までの伝達関数表現

$e^{-Ls}$ : むだ時間要素

$\frac{\omega_{ns}^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2}$ : 2次遅れ系

$\frac{1}{s}$ : 積分器

$K_{\phi}$ : モデルゲイン (実験とシミュレーション結果を基に決定した値)

$\omega_{ns}$ : 固有角振動数 (部分空間同定法により決定した値)

$\zeta_s$ : 減衰比 (部分空間同定法により決定した値)

$T_{\phi}$ : 時定数 (実験とシミュレーション結果を基に決定した値)

$s$ : ラプラス演算子

10

20

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御のエルロン操縦入力からロール軸姿勢角度までの伝達関数表現を表す上記【数2】の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項3】

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

30

【数3】

$$G_{\psi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\psi} \omega_{n\psi c}^2}{(s^2 + 2\zeta_{\psi c} \omega_{n\psi c} s + \omega_{n\psi c}^2) s}$$

$G_{\psi}(s)$ : ラダー操作入力からヨー軸姿勢角度 $\psi$ までの伝達関数表現

$e^{-Ls}$ : むだ時間要素

$\frac{\omega_{n\psi c}^2}{s^2 + 2\zeta_{\psi c} \omega_{n\psi c} s + \omega_{n\psi c}^2}$ : 2次遅れ系

$\frac{1}{s}$ : 積分器

$K_{\psi}$ : モデルゲイン (実験とシミュレーション結果を基に決定した値)

$\omega_{n\psi c}$ : 固有角振動数 (部分空間同定法により決定した値)

$\zeta_{\psi c}$ : 減衰比 (部分空間同定法により決定した値)

$s$ : ラプラス演算子

10

20

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御のラダー操縦入力からヨー軸姿勢角度までの伝達関数表現を表す上記【数3】の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項4】

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

【数4】

$$Vx = g \frac{T}{s+T} \frac{a}{s-a} (-\Theta)$$

$Vx$ : ピッチ軸姿勢角度 $\Theta$ から前後速度までの伝達関数表現

$g$ : 重力加速度

$T$ : 時定数

$s$ : ラプラス演算子

$a$ : 加速度

40

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの並進運動制御のピッチ軸姿勢角度から前後速度までの伝達関数表現を表す上記【数4】の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項5】

50

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

【数 5】

$$V_y = g \frac{T}{s+T} \frac{a}{s-a} \Phi$$

10

$V_y$ ：ロール軸姿勢角度 $\Phi$ から左右速度までの伝達関数表現

$g$ ：重力加速度

$T$ ：時定数

$s$ ：ラプラス演算子

$a$ ：加速度

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの並進運動制御のロール軸姿勢角度から左右速度までの伝達関数表現を表す上記 [ 数 5 ] の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

20

【請求項 6】

小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位をセンサにより検知し、

地上局から設定される位置または速度の目標値と前記センサで検知される前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を、主演算部により演算する小型無人ヘリコプタの自律制御方法であって、

30

【数 6】

$$V_z = \frac{k}{s} \Theta_p$$

$V_z$ ：コレクティブピッチ操作入力から上下速度の伝達関数表現

$k$ ：Z方向のゲイン

$\Theta_p$ ：コレクティブピッチ

$s$ ：ラプラス演算子

$a$ ：加速度

40

前記主演算部は、システム同定法に基づいて導出された、小型無人ヘリコプタの並進運動制御のコレクティブピッチ操作入力から上下速度の伝達関数表現を表す上記 [ 数 6 ] の数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて演算を行う小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項 7】

小型無人ヘリコプタの舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を求めるに当たり、前記主演算部は、前記小型無人ヘリコプタの6つの物理量である、前記ピッチ軸姿勢角度、前記ロール軸姿勢角度、前記ヨー軸姿勢角度、前記前後速度、前記左右速度、前記上下速度の動特性について、それぞれ独立した前記自律制御アルゴリ

50

ズムを用いて演算を行って前記小型無人ヘリコプタを自律制御することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項 8】

前記小型無人ヘリコプタのそれぞれの物理量を、任意の目標値へ定常偏差が 0 となるように、それぞれの前記自律制御アルゴリズムを 1 型のサーボ系として構成し、前記小型無人ヘリコプタを自律制御することを特徴とする請求項 7 記載の小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項 9】

1 型のサーボ系として構成された自律制御アルゴリズムについて、それぞれの自律制御アルゴリズムを連成がない伝達関数表現の数式モデルに基づいて、LQG 制御理論 (Linear Quadratic Gaussian) または、LQI 制御理論 (Linear Quadratic Integral) を適用し、前記小型無人ヘリコプタを自律制御することを特徴とする請求項 8 記載の小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項 10】

小型無人ヘリコプタの舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を求めるに当たり、前後速度、左右速度の動特性が夫々ピッチ軸姿勢角度、ロール軸姿勢角度を入力とする数式モデルによって表し、任意の前後および左右方向の速度を実現するために必要な夫々の姿勢角度を算出することによって前記小型無人ヘリコプタを自律制御することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【請求項 11】

小型無人ヘリコプタの舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を求めるに当たり、前記小型無人ヘリコプタの位置を任意の位置に移動させるために、前後速度目標値と左右速度目標値と上下速度目標値を、前後速度目標値については、

【数 7】

$$V_{xref} = \alpha(P_{xref} - P_x)$$

$V_{xref}$ : X 方向 (前後方向) の速度目標値

$\alpha$ : 任意定数

$P_{xref}$ : X 方向の位置目標値

$P_x$ : X 方向の位置

左右速度目標値については、

【数 8】

$$V_{yref} = \alpha(P_{yref} - P_y)$$

$V_{yref}$ : Y 方向 (左右方向) の速度目標値

$\alpha$ : 任意定数

$P_{yref}$ : Y 方向の位置目標値

$P_y$ : Y 方向の位置

上下速度目標値については、

10

20

30

40

【数 9】

$$V_{zref} = \beta(P_{zref} - P_z)$$

$V_{zref}$ : Z方向(上下方向)の速度目標値

$\beta$ : 任意定数

$P_{zref}$ : Z方向の位置目標値

$P_z$ : Z方向の位置

10

として、これらをシステム同定法により導出し、前記小型無人ヘリコプタを自律制御することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の小型無人ヘリコプタの自律制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、設定する位置または速度の目標値に向けて小型無人ヘリコプタを自律制御させる自律制御方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

20

ヘリコプタは前後、左右、上下方向の運動や空中停止といった飛行機には見られない行動範囲を持つ飛行体であり、様々な局面に対して柔軟に対応できるという特長がある。この特長を生かしてヘリコプタを無人でかつ小型とし、送電線の点検のような高所で行う作業、または災害救助や地雷探知といった、有人で作業を実施するには困難または危険を伴う場所での活用が期待されている。従来、農薬散布用途で使用されている無人ヘリコプタを用いた自律制御システムが下記の特許文献 1 に記載されている。

【0003】

【特許文献 1】

特開 2000 - 118498

【0004】

30

はじめに、ヘリコプタを自律制御させるしくみを論理的に説明する。ヘリコプタは制御の対象であり、サーボモータの動作によって姿勢を変えたり、3次元的に移動したりできる飛行体である。自律制御による飛行はヘリコプタを位置や速度の目標値にしたがって移動させることを目的とし、その操縦は演算用のコンピュータの演算結果に従うものである。コンピュータにヘリコプタの操縦を代替させるには、演算用コンピュータにセンシング機能及びアクチュエーション機能を持たせる必要がある。ヘリコプタの各種飛行状態をセンシングする機能を持つ装置をセンサと呼び、また、コンピュータの演算結果により制御指令値を決定し、それを信号に変換した自律制御信号を受けてヘリコプタの舵を動かすアクチュエータをサーボモータと呼ぶ。そして、[ <センサ>・・・<演算用コンピュータ>・・・<サーボモータ>・・・<ヘリコプタ> (図 17 参照) ] を結ぶフィードバック制御

40

【0005】

続いて、図 18 を用いて特許文献 1 に記載の小型無人ヘリコプタの自律制御システムについて説明する。システムはヘリコプタを含む移動局と地上局とに分けられる。移動局には、ヘリコプタ機体 101 と、ヘリコプタ機体 101 の現在位置及び姿勢角を検知するセンサ 102 と、ヘリコプタ機体 101 の舵を動かすサーボモータ 103 と、バックアップ用送信機 110 からの手動操縦信号を受信するバックアップ用受信機 104 と、地上局との通信を行う無線モデム 105 と、地上局の無線モデム 111 から送られる制御指令値を信号に変換して発生させる制御信号発生装置 106 とが搭載されている。センサ 102 にはヘリコプタ機体 101 の現在位置を検知する GPS センサ 1021 やヘリコプタ機体 10

50

1の3軸の姿勢角を検知する3軸姿勢センサ1022が用いられる。一方、地上局には速度の目標値を入力する目標値入力用コンピュータ108と、内部演算用コンピュータ109と、ヘリコプタ機体101の状況をモニタで監視する監視装置112を備えた地上局ホストコンピュータ107と、危険時に操縦者が手動操縦するためのバックアップ用送信機110と、移動局との通信を行う無線モデム111とが設置されている。内部演算用コンピュータ109は、速度の目標値から位置や姿勢角の目標値を演算し、センサ102から得られる現在の位置、速度及び姿勢角と比較し、これに基づいて目標値に近づける制御指令値を演算する。そして、[<センサ102>・・・<内部演算用コンピュータ109>・・・<サーボモータ103>・・・<ヘリコプタ機体101>(介在部は省略)]を結ぶフィードバック制御ループにより、ヘリコプタを目標値に向けて自律制御させることができる。

10

#### 【0006】

以下、動作について説明する。操縦者は前後、左右、上下及び回転の4種類の速度指令値( $V_x^*$ 、 $V_y^*$ 、 $V_z^*$ 、 $\dot{\theta}^*$ )を目標値入力用コンピュータ108で設定する。設定した速度指令値は内部演算用コンピュータ109で時間積分して前後方向の目標位置 $X^*$ 、左右方向の目標位置 $Y^*$ 、上下方向の目標位置 $Z^*$ 、及び回転方向の目標位置(ヨーイング角) $\theta^*$ を演算し、同じく4種類の速度指令値( $V_x^*$ 、 $V_y^*$ 、 $V_z^*$ 、 $\dot{\theta}^*$ )を微分して係数を掛けることにより、目標ピッチング角 $\theta^*$ 、目標ローリング角 $\phi^*$ を演算する。一方、ヘリコプタ機体101に搭載されたGPSセンサや3軸姿勢センサのセンサ102は、ヘリコプタ機体101の現在位置と現在速度( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ )及び現在の姿勢角( $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\psi$ )を検出する。そして、内部演算用コンピュータ109にて予め設定される各目標値とセンサで検知される各検出値との差分を以下のようにして演算する。

20

$$\begin{aligned} X &= X^* - X \\ Y &= Y^* - Y \\ Z &= Z^* - Z \\ V_x &= V_x^* - V_x \\ V_y &= V_y^* - V_y \\ V_z &= V_z^* - V_z \\ &= \dot{X}^* - \dot{X} \\ &= \dot{Y}^* - \dot{Y} \\ &= \dot{Z}^* - \dot{Z} \\ &= \dot{\theta}^* - \dot{\theta} \end{aligned}$$

30

#### 【0007】

これらの差分(誤差)を基にして内部演算用コンピュータ109ではヘリコプタ機体101のそれぞれの舵を動かす各サーボモータ103の制御指令値を演算する。演算する制御指令値には、エレベータサーボ(前後方向)指令、エルロンサーボ(左右方向)指令、コレクティブサーボ(上下方向)指令、ラダーサーボ(回転方向)指令の4種類の制御指令値がある。4種類の制御指令値を演算した後、これを各サーボモータ103に与え、全ての差分が0(ゼロ)になるように内部演算用コンピュータ109でフィードバック制御している。

40

#### 【0008】

##### 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記自律制御システムにおいては、地上局と移動局との間でフィードバック制御ループを形成しており、フィードバックループ内には無線通信区間が存在するため、何らかの影響により無線通信が断絶したときには制御システムの論理構造が崩れる恐れがあり、航行中の安全性の観点から見て望ましくない。上記自律制御システムで用いているヘリコプタは元々農薬散布を目的としたもので、その最大積載重量はおよそ30kgであり、上記自律制御システムのセンサや演算部の大きさや重量は大きい、これらを搭載しても十分飛行可能である。しかし、ヘリコプタの空虚重量はおよそ60kgで、全備重

50



量はおよそ90kgにも達する。このため携帯は不便であり、また、システムを利用するときにはヘリコプタの飛行領域を実際のヘリコプタのサイズよりも十分広く取らなければならないので利用範囲が制限されるという問題もある。有人が作業を実施する上では狭い場所もあり、上記従来型ヘリコプタでは進入できない所もある。一方、本発明で扱う小型無人ヘリコプタとは、ホビー用として市販されている小型ラジコンヘリコプタ程度の大きさおよび重量のヘリコプタでかつこれと互換性のあるヘリコプタを指し、このようなヘリコプタを自律制御させることで上記の問題は解決できるが、ヘリコプタの制御は重量が小さければ小さいほど難しくなる。すなわち、装置などの最大積載重量が著しく減少し、自律制御装置の小型化が必要となり、演算装置やセンサなどにおいては、重量面や電源面はもちろんのこと、性能にも厳しい制約が生じるため、前記従来型自律制御システムにおける自律制御のための装置を前記小型無人ヘリコプタにそのまま搭載することは不可能である。また、ヘリコプタが小型であるため、ヘリコプタの動力学的特性がより不安定となり、前記従来型自律制御システムの自律制御アルゴリズムを前記小型無人ヘリコプタにそのまま適用しても制御性能は保証されない。そのため、前記小型無人ヘリコプタに合わせた自律制御アルゴリズムを開発する必要があり、その自律制御アルゴリズムの設計には前記小型無人ヘリコプタの動力学的特性をより高精度に反映した数式モデルが必要であるが、一般に数式モデルが高精度化すればするほど、それに基づいて設計された自律制御アルゴリズムは複雑化し、本来なら従来型自律制御システムで用いる高性能な演算コンピュータよりもさらに高性能な演算装置が必要とされるところであるが、前述の通り、演算装置の性能には厳しい制約が生じ、さらには自律制御プログラムの容量にも厳しい制約が生じるため、これらは明らかに相反する課題となる。ホビー用として市販されている小型ラジコンヘリコプタ程度の大きさおよび重量のヘリコプタまたはこれと互換性のあるヘリコプタを設定する位置または速度の目標値に向けて自律制御させる自律制御装置及びプログラムの需要性は高いが、開発成功例はない。そこで、本発明は、ホビー用クラスの小型無人ヘリコプタを設定する位置または速度の目標値に向けて自律制御させる小型無人ヘリコプタの自律制御方法を提供することを目的とする。

#### 【0009】

また、手動操縦は、本来自律制御と独立なものであり、自律制御とは一切関係ないものであるとも考えられる。しかし、自律制御アルゴリズムの設計の過程では、手動操縦信号の計測が必要とされる場合がある。本発明における数式モデルの作製に当たっては、前記小型無人ヘリコプタの前記夫々のサーボモータの入力信号と、前記自律制御装置に実装されたセンサにより計測される前記小型無人ヘリコプタの飛行状態である出力信号とを対応付けて解析することにより数式モデルを得る、システム同定と呼ばれる手法を用いている。このシステム同定は前記小型無人ヘリコプタを飛行させた状態で入出力データを採取する必要があり、これを同定実験と呼ぶ。同定実験を行うには、システム同定に適した同定入力信号で前記夫々のサーボモータを駆動する必要があるが、このとき、同定入力のみであると前記小型無人ヘリコプタの姿勢が大きく傾いたり急加速したりすることがあり、事故を招く可能性がある。そこで、このようなことが起こらないよう手動操縦により補正舵を打つことで前記小型無人ヘリコプタの運動を安定化する必要がある。ただ、この補正舵も同定入力の一部とみなされるため、システム同定の際には前記手動操縦信号も計測データとして得ておかなければならない。

#### 【0010】

前述の通り、本発明では、前記自律制御装置を手動操縦の補助装置すなわち操縦者アシスト装置として利用することも考えている。操縦補助の目的および手法として、例えば、手動操縦信号を前記自律制御アルゴリズムの目標値入力信号に対応付け、実際前記夫々のサーボモータへ出力される駆動信号はすべて前記自律制御アルゴリズムによる演算結果である自律制御信号とする方式が考えられる。言い換えれば、人間は自分で操縦しているつもりであるが、実際には人間は前記自律小型無人ヘリコプタに対して目標値である移動命令を与えているだけであり、その目標値を受けて前記自律制御アルゴリズムが演算され、自律制御されている、という方式である。この方式には、前記地上局のコンピュータを使わ

10

20

30

40

50

ずとも前記自律制御アルゴリズムに目標値を与えられるため、コンピュータの操作に不慣れな人でも自律制御の恩恵にあずかった安全な前記小型無人ヘリコプタの飛行を行えるという大きなメリットがある。この場合、前記手動操縦信号を目標値に対応付けるための新たな手法が必要となる。

【0011】

前記小型無人ヘリコプタを自律制御する自律制御アルゴリズムを開発するには、その動特性を記述する数式モデルが必要である。数式モデルを用いることにより、近年発達し、その有効性が十分に認められたさまざまな制御理論を自律制御アルゴリズム開発に適用することが可能となり、前記小型無人ヘリコプタを自律制御する場合の飛行性能の向上が期待できる。しかし、ヘリコプタの動特性は力学的作用、流体力学的作用などが複雑に影響し合い、その解析は困難を極めるものである。有人ヘリコプタの詳細な動特性の解析は、現在までに積極的に行なわれてきたが、本発明で扱うサイズのヘリコプタに関する詳細な解析は行なわれていない。また、前記サーボモータの動特性に関する解析例も報告されていない。

10

【0012】

たとえ前記小型無人ヘリコプタの動特性を詳細に記述する数式モデルが得られたとしても、その数式モデルが非常に複雑なものであれば、自律制御アルゴリズムの開発も困難になる。また、複雑な数式モデルに基づいて開発された自律制御アルゴリズムは一般に複雑となり、重量の制約から演算性能に厳しい制約があるコンピュータによる実行を考えると、必ずしも適当であるとは言えない。

20

【0013】

理論的解析を避け、物理システムの入出力関係からその動特性を推測するシステム同定手法が存在する。システム同定には、広い帯域の周波数成分を含む信号を物理システムに入力する必要があるが、そのような信号を前記小型無人ヘリコプタへ入力するには危険性が伴う。また、前記入出力信号を計測する装置、および計測システムが必要となる。本発明で対象としているクラスの小型無人ヘリコプタに対して、システム同定を実行し、得られた同定モデルの妥当性を検証した例はない。

【0014】

本発明は、小型無人ヘリコプタの自律制御に適したモデル式を導出し、モデル式に基いた自律制御アルゴリズムを設計し、自律制御アルゴリズムを演算することにより、設定する位置や速度の目標値に向けて小型無人ヘリコプタを自律制御させる自律制御方法を提供することを目的とする。

30

【0015】

【課題を解決するための手段】

本発明の小型無人ヘリコプタの自律制御方法は、小型無人ヘリコプタの現在位置、姿勢角、対地高度、及び機首絶対方位を検知し、地上局から位置または速度の目標値を設定し、前記センサで検知された前記小型無人ヘリコプタの現在位置および姿勢角とからヘリコプタの複数の舵を動かす夫々のサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を求め、前記演算処理結果に基づいて小型無人ヘリコプタの並進運動制御及び3軸姿勢制御を行なわせ、また、前記小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御のエレベータ操縦入力からピッチ軸姿勢角度までの伝達関数表現の数式モデルを

40

【数16】

$$G_{\theta}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\theta} \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_{ns}^2)(T_{\theta} s + 1)s}$$

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

50

【 0 0 1 6 】

また、前記小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御におけるエルロン操縦入力からロール軸姿勢角度までの伝達関数表現の数式モデルを、

【 数 1 7 】

$$G_{\phi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\phi} \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2)(T_{\phi} s + 1)s}$$

10

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

【 0 0 1 7 】

また、前記小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御におけるラダー操縦入力からヨー軸姿勢角度までの伝達関数表現の数式モデルを、

【 数 1 8 】

$$G_{\psi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\psi} \omega_{n\psi c}^2}{(s^2 + 2\zeta_{\psi c} \omega_{n\psi c} s + \omega_{n\psi c}^2)s}$$

20

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

【 0 0 1 8 】

また、前記小型無人ヘリコプタの3軸姿勢制御におけるピッチ軸姿勢角度から前後速度までの伝達関数表現の数式モデルを、

【 数 1 9 】

$$Vx = g \frac{T}{s + T} \frac{a}{s - a} (-\Theta)$$

30

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

【 0 0 1 9 】

また、前記小型無人ヘリコプタの並進運動制御におけるロール軸姿勢角度から左右速度までの伝達関数表現の数式モデルを、

【 数 2 0 】

$$Vy = g \frac{T}{s + T} \frac{a}{s - a} \Phi$$

40

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

【 0 0 2 0 】

また、前記小型無人ヘリコプタの並進運動制御におけるコレクティブピッチ操作入力から上下速度の伝達関数表現の数式モデルを、

50

【数 2 1】

$$V_z = \frac{k}{s} \Theta_t$$

とし、前記モデル式に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを用いて前記主演算部にサーボモータを駆動させるための最適な制御指令値を演算させるものである。

【0021】

本発明の小型無人ヘリコプタの自律制御方法により、設定する位置や速度の目標値に従って小型無人ヘリコプタを自律制御させることができる。また、この方法に使用される自律制御装置をヘリコプタ機体に搭載して自律制御システムを実現するとともに、自律制御信号と手動操縦信号との混合または切り替えるサーボパルス混合/切替装置や、手動操縦送信機が受け付けることのできるパルス信号に変換するパルスジェネレータ装置、および小型無人ヘリコプタの自律制御に適した自律制御アルゴリズムを開発したので、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタほどの小型無人ヘリコプタを、目標値に従って自律制御させることができる。これにより、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタで完全自律制御が実施できるので、携帯に便利であり、従来の無人ヘリコプタの自律制御では実施できなかった、有人で作業を実施するには困難な狭い場所にも適応でき、その用途を拡大させることができる。

10

20

【0022】

【発明の実施の形態】

本発明においては、自律制御のためのハードウェア設計から自律制御アルゴリズムの開発まで、一貫して研究を進め、前記自律制御装置と、前記パルスジェネレータ装置と、前記サーボパルス混合/切替装置のハードウェアおよびソフトウェアを新規独自開発した。さらに、本発明では、前記数式モデルを同定する飛行実験を行い、その実験結果から数式モデルを導き、この数式モデルを用いて小型無人ヘリコプタの自律制御アルゴリズムを開発した。この自律制御システムを用いることにより、空虚重量およそ9kgの小型なヘリコプタ機体を目標値に従って完全自律制御させることに成功した。

【0023】

以下、小型無人ヘリコプタと、小型無人ヘリコプタの自律制御のためのハードウェアと、自律制御のフィードバック制御ループについて論理的に説明し、次に、ヘリコプタ機体の3軸姿勢制御および航行速度位置制御の自律制御アルゴリズムの研究成果について記述する。

30

【0024】

ヘリコプタ機体は、ホビー用として市販されている小型ラジコンヘリコプタの程度の大きさおよび重量のヘリコプタでかつこれと互換性のあるヘリコプタを用いる。空虚重量はおよそ9kgである。この小型無人ヘリコプタを用いることにより、送電線の点検のような高所で行う作業、または災害救助や地雷探知、または有人が作業を実施する上で困難または危険を伴う狭い場所での作業にも適用できる。この小型ヘリコプタが制御の対象であり、5つのサーボモータを駆動させることによって姿勢を変えたり、空中停止したり、前後、左右、上下に3次元的に移動したりできる飛行体である。

40

【0025】

自律制御による飛行は上記従来技術と同じようにヘリコプタを位置や速度の目標値にしたがって移動させることを目的とし、その操縦は、本発明が開発した数式モデルに基づいて設計された自律制御アルゴリズムに従うもので、前記自律制御アルゴリズムは本発明が開発した自律制御装置の演算用コンピュータに実装され、前記演算用コンピュータの演算結果が夫々のサーボモータへの制御信号となる。

【0026】

コンピュータにヘリコプタの操縦を代替させるには、前記演算用コンピュータにセンシ

50

グ機能及びアクチュエーション機能を持たせる必要がある。ヘリコプタの各種飛行状態をセンシングする機能を持つ装置をセンサと呼び、また、コンピュータの演算結果により制御指令値を決定し、それを信号に変換した自律制御信号を受けてヘリコプタの舵を動かすアクチュエータをサーボモータと呼ぶ。そして、これらにより構成される自律制御装置を製作し、ヘリコプタ機体に搭載することで、[ <センサ>・・・<演算用コンピュータ>・・・<サーボモータ>・・・<ヘリコプタ> (図17参照) ]を結ぶフィードバック制御ループにより、ヘリコプタを目標値に向けて自律制御させることができる。

#### 【0027】

本発明では、前記小型無人ヘリコプタを自律制御させるためのプラットフォームとしてのハードウェアである自律制御装置の開発を行った。自律制御システムを構成するハードウェアのうち、前記サーボモータは前記小型無人ヘリコプタの機体に組みつけられているため、前記自律制御装置にはセンサ類と演算装置類が内蔵される。前記センサとして、従来型自律制御システムではヘリコプタの姿勢を検知する3軸姿勢センサとヘリコプタの現在位置を検知するGPS(Global Positioning System = 全地球測位システム)等が搭載されているが、本発明の自律制御装置には新たに前記小型無人ヘリコプタの機体と地面との距離を検知する対地高度センサを新たに搭載し、前記小型無人ヘリコプタの対地高度をリアルタイムに直接計測することが可能となり、対地高度をセンサ情報として利用する、例えば、地面との距離を一定に保つ制御や、自動離着陸制御などの自律制御アルゴリズムの利用が可能となった。また、自律制御アルゴリズムの実装と演算に用いる演算用CPUである主演算部と、前記センサからのデータの収集および処理や前記演算結果の制御信号への変換を行うCPUである副演算部とを搭載した。本自律制御装置の小型化と軽量化に伴い演算部にも機能や演算速度に厳しい制約が生じるという問題がある。そこで、演算部を主演算部と副演算部に分離し、副演算部に自律制御アルゴリズムの演算以外のほとんどすべての役割を持たせ、主演算部を自律制御アルゴリズムの演算に専念させることで、自律制御装置の小型化や軽量化に伴う演算用コンピュータの機能低下や演算速度の遅延化を極力抑えることが可能となり、この問題を解決した。この他、本自律制御装置には、前記センサや前記演算部に必要な電圧の電源を出力する電源供給装置、および地上局との通信を行う無線モデムを内蔵している。前記電源供給装置は、1つの正電圧の直流電源を入力とし、負電圧を含む3種類の電圧の電源を供給できる。前記無線モデムは2組あり、1つは地上局ホストコンピュータとの制御情報の交換に使用し、もう1つはGPSの現在位置情報の精度を向上させるための補正情報の通信用に用いる。

#### 【0028】

本発明の自律制御装置は、前記小型無人ヘリコプタへの搭載を前提としているため、必然的に小型化や軽量化が求められる。本発明における前記小型無人ヘリコプタの最大積載重量はおよそ5kgしかない。そこで、本発明では、本自律制御装置の制作にあたり、大きさや重量の増加につながる余計な部品を一切排除した。その上で、大きさがW190×D290×H110mmの小型フレームボックスに前記センサ、前記演算装置、前記電源供給装置、および前記無線モデムをアSEMBリし、重量およそ2.9kgの自律制御装置の開発に成功した。バッテリーには、重量およそ700gの市販のノートパソコン用大容量リチウムイオンバッテリーを採用し、満充電時約1時間の連続動作時間を確保した。本自律制御装置の前記小型無人ヘリコプタへの取り付け用ステー等の付属部品を含めても、前記最大積載重量未満の重量まで軽量化を達成した。これにより、本発明で用いているホビー用と同程度のサイズの小型無人ヘリコプタに搭載して飛行することが可能となった。

#### 【0029】

本発明の前記自律制御装置のみでも十分な自律制御アルゴリズムの演算性能を有するが、将来的により複雑で前記自律制御装置の前記主演算部では演算性能が不足するほどの自律制御アルゴリズムを適用したくなった場合などに備え、本発明では、前記主演算部よりもはるかに高性能なコンピュータを利用できるよう、地上局のコンピュータにおいても自律制御アルゴリズムの演算を行えるようにし、これを前記主演算部と同時併用して演算に用いるか、もしくはいずれか一方を単独で演算に用いる、いずれの形態でも利用できるハイ

10

20

30

40

50

ブリッド型の自律制御システムを構築した。すなわち、すべての自律制御アルゴリズムを前記地上局のコンピュータに実装するような形態はもちろん、例えば、姿勢制御を前記自律制御装置の前記主演算部に実装しそれ以外は前記地上局のコンピュータに実装するという形態や、一部のサーボモータに係る自律制御アルゴリズムのみ前記自律制御装置の前記主演算部に実装しそれ以外のサーボモータに係る自律制御アルゴリズムは前記地上局のコンピュータに実装するという形態をその場に応じて柔軟にとることが可能となり、前記自律制御装置および前記自律制御システムの拡張性と柔軟性が大きく向上した。

#### 【0030】

前述の通り、ホビー用自動操縦送信機には、本来初心操縦者の操縦練習（トレーニング）を目的として、外部操縦信号を受け付ける機能が備わっている。本発明では、地上局のコンピュータが制御演算して出力した自律制御信号を前記外部操縦信号として前記自動操縦送信機に入力して前記夫々のサーボモータを駆動するというフィードバック制御ループの形態を新たに考案した。これにより、前記小型無人ヘリコプタの機体の調整段階において前記自動操縦送信機に入力され記憶された、例えば前記夫々のサーボモータの駆動範囲や中心位置などの設定情報を通して前記自律制御信号を前記夫々のサーボモータに送ってこれを駆動させることができるようになった。したがって、前記自律制御アルゴリズムの実装時に、前記設定情報を前記自律制御アルゴリズム内に組み込まなくても済むようになり、自律制御アルゴリズムの設計開発段階において実装作業を大幅に省力化することが可能となった。

#### 【0031】

前記地上局のコンピュータが制御演算して出力した数値としての演算結果を前記外部操縦信号として前記自動操縦送信機に入力する場合は、前もって、前記自動操縦送信機が受け付けることのできる特殊なパルス信号の形式に変換しなくてはならない。このため、本発明では、前記地上局のコンピュータから出力される数値としての演算結果を前記特殊なパルス信号の形式に変換するための、ジェネレータ装置を開発し、これにより、前記外部操縦信号の利用が可能となった（図16参照）。本装置は、その入力側にコンピュータのデータ通信の一般的な手法で、汎用インターフェースとして普及しているRS-232C方式シリアル通信方式を採用し、現存のほとんどのコンピュータで利用可能である。また、本装置の電源として前記自動操縦送信機から供給されるものをを用いるようにし、本装置の動作のために特別な電源を改めて用意する必要をなくし、取り扱いを容易にした。この他、前記パルスジェネレータ装置には、前記自動操縦送信機の操縦操作量やスイッチ状態などを前記地上局のコンピュータに取り込むための機能も搭載した。

#### 【0032】

本発明では、自律制御中の緊急事態発生時に自動操縦に切り替えて前記小型無人ヘリコプタを安全に飛行させることができるようにするため、サーボパルス混合/切替装置を開発した。図14により、前記サーボパルス混合/切替装置の仕組みを説明する。サーボパルス混合/切替装置7は、当該装置に内蔵されているパルス処理演算用CPU71により自動操縦受信機6や自律制御装置の副演算部42から送られてくる夫々のパルス信号を処理し、夫々のサーボモータ3に出力されるべきサーボパルス信号を生成するものである。自動操縦受信機6からサーボパルス混合/切替装置7に入力されるパルス信号は、自動操縦信号と、自動操縦モードと自律制御モードの切り替え指令信号と、自動操縦と自律制御の信号の混合比率指令信号である。一方、自律制御装置の副演算部42からサーボパルス混合/切替装置7に入力されるパルス信号は自律制御信号である。サーボパルス混合/切替装置7は、切り替え指令信号および混合比率指令信号の信号を認識し、それに従い自動操縦信号と副演算部42で生成される自律制御信号を任意の割合で混合し、それに基づいてサーボパルス信号を生成し、前記夫々のサーボモータ3に出力することができる。このようにサーボパルス混合/切替装置3を構成することで、飛行中に自動操縦信号と自律制御信号とを随時動的に切り替えることが可能となった。なお、前記自律制御装置と同様、本装置についても小型化および軽量化が必須であることを考慮し、最終的に重量わずか250gの軽量化を達成した。

## 【 0 0 3 3 】

本発明では、前記サーボパルス混合／切替装置 7 に、手動操縦信号と自律制御信号とを任意の割合で混合できる機能を備えた。図 1 4 により説明する。手動操縦信号と自律制御信号の混合を行うには、その混合比率を与える混合比率指令信号も本装置に入力する。図から明らかな通り、混合比率指令信号も手動操縦送信機から与えることができる。パルス処理演算用 CPU 7 1 は混合比率指令信号を認識し、混合比率を決定し、それに従い手動操縦信号と自律制御信号を混合する計算を行い、前記サーボパルス信号を生成し、前記夫々のサーボモータ 3 を駆動させることができる。これにより、本発明では、前記自律制御装置を手動操縦の補助装置として利用し、手動操縦の段階的上達のための機能を持たせることを可能とした。特に、任意の割合で混合できるため、ラジコンヘリコプタの操縦に慣れないというちは自律制御と手動操縦の信号の比重を自律制御側に置くことにより、操縦者が下手な操縦をしても自律制御信号がリカバリすることによりヘリコプタが墜落しないように制御され、ラジコンヘリコプタの操縦に慣れるにつれ比重を手動操縦側に置くことにより、ラジコンヘリコプタの手動操縦を徐々に上達させることが可能となった。

10

## 【 0 0 3 4 】

本発明では、前記サーボパルス混合／切替装置について、その電源を、手動操縦システムの電源から共用してとることができるような仕組みとした。図 1 4 において、手動操縦システムの電源はバッテリー 6 1 であり、手動操縦送信機 8 から前記サーボパルス混合／切替装置 7 に入力される手動操縦信号、もしくは切り替え指令もしくは、混合比率指令の信号線の内を  
通って、前記サーボパルス混合／切替装置 7 に電源が供給される。さらに、前記夫々のサー  
ボモータ 3 に対しては、前記サーボパルス混合／切替装置 7 の本体内部を通りぬけて電  
源が供給される。これにより、バッテリーの数を余計に増やす必要がなくなり、バッテリーの  
消耗を見落としたり、電源スイッチを入れ忘れて、配線の複雑化により配線ミスをした  
りするなどの人的ミス未然に防止し、前記小型無人ヘリコプタの自律制御システムの実  
用上の安全性を高めることができた。また、電源の共有について、前記自律制御装置側の  
電源ではなく、前記手動操縦システムの電源と共用することにしたのにも根拠がある。これは  
、前記手動操縦システムの電源が消耗すれば、前記夫々のサーボモータ 3 も駆動しなくなるた  
め、自律制御装置に電源が供給されていても前記小型無人ヘリコプタは操縦不能に陥るた  
めであることと、小型無人ヘリコプタがホビー用ラジコンヘリコプタとの互換性を維持す  
るため、自律制御装置の電源を切った状態でも手動操縦のみは可能とする必要があったた  
めであることによる。

20

30

## 【 0 0 3 5 】

また、本発明では、前記サーボパルス混合／切替装置の手動操縦システムへの導入によっても手動操縦システムの信頼性を維持するため、前記サーボパルス混合／切替装置の根幹であるパルス処理演算用 CPU 7 1 が動作異常を起こした際にそれを自動的に検知し、自動的に復帰させることで元の動作状態に即座に復帰させる仕組みを、前記サーボパルス混合／切替装置 7 に取り入れた。前記パルス処理演算用 CPU 7 1 には、前記パルス処理演算用 CPU 7 1 をリセットする機能を持つタイマ装置 7 2 が内蔵されており、これを活用した。前記サーボパルス混合／切替装置 7 に書き込まれているパルス処理演算プログラムは、通常動作時、前記タイマ装置 7 2 に動作が正常に行われていることを通知する正常動作通知信号を  
一定時間おきに入力する。もし、前記パルス処理演算用 CPU 7 1 が異常動作を起こすと  
、前記正常動作通知信号が前記タイマ装置 7 2 に入力されない状態となり、このままある  
時間が経過すると、前記タイマ装置 7 2 は前記パルス処理演算用 CPU 7 1 へ自動的にリセ  
ット信号を入力し、電源投入時と同様のプロセスを経て復帰させる。本機能を確実に動作  
させるには、前記パルス処理演算プログラムの処理構造を、本機能の利用を前提として開  
発しなければならない。具体的には、優先度が高くパルス処理演算用 CPU 7 1 が異常動  
作している最中でも呼び出される可能性のあるパルス入出力処理の部分から、正常動作通  
知信号を前記タイマ装置 7 2 に送信する処理部分を完全に分離する構造のソフトウェアを  
開発した。これにより、パルス処理演算用 CPU 7 1 の異常動作状態を確実に検出できる  
ようにした。なお、異常動作を起こしてからリセット信号を発行するまでの時間は、前記

40

50

パルス処理演算プログラム中で指定することができる。また、リセット信号が入ってから復帰までは全て自動的に行われ、その時間は一瞬である。これにより、異常動作が起こってから、わずか数十ミリ秒～百ミリ秒前後の間に前記パルス処理演算用 CPU 7 1 を復帰させることが可能となり、ソフトウェア面における常時正常動作を保證したことで、前記サーボパルス混合 / 切替装置の安全性および信頼性が確保された。

【 0 0 3 6 】

また、本発明では、前記サーボパルス混合 / 切替装置について、前記サーボパルス混合 / 切替装置 7 へ接続される信号線の手動操縦信号、切り替え指令信号、混合比率指令信号、および自律制御信号の結線状態、および、これらの信号線を伝達して前記サーボパルス混合 / 切替装置に入力される夫々のパルス信号の有無を自動認識する機能、および、その状態に応じて適切なサーボパルス信号を生成する機能を開発した。パルス処理演算用 CPU 7 1 は、入力される前記夫々のパルス信号の手動操縦信号、切り替え指令信号、混合比率指令信号、および自律制御信号を常時計測している。パルス処理演算ソフトウェアの中では、これらパルス信号の計測値が異常値を示した場合、そのパルス信号に対応する信号線の結線が外れたか、もしくはパルス信号が消滅したと判断する仕組みとした。具体的には、切り替え指令信号が供給されない場合は全サーボモータが強制的に手動操縦モードとなるようにし、自律制御信号が供給されない場合は当該サーボモータ 3 が強制的に手動操縦モードとなるようにし、混合比率指令信号が供給されない場合は任意の割合での混合を行わず切り替え機能のみ動作するものとし、手動操縦信号が供給されない場合は当該サーボモータが強制的に自律制御モードとなるようにし、いずれの信号も供給されなくなった場合は前記夫々のサーボモータが最後の動作状態を保つようプログラムした。これにより、例えば前記自律制御装置の電源が入っていない状態、すなわち自律制御信号が供給されない状態であっても、手動操縦システムの電源のみ供給されればホビーの場合と同様に手動操縦が実施できるようになった。また、前記自律制御装置により自律制御している最中に万が一前記自律制御装置の電源バッテリーが消耗してしまい自律制御信号が供給できなくなった場合でも、自律制御信号の消滅を瞬時に認識し手動操縦に切り替えるため、オペレータの手動操縦により墜落事故を防ぐことができる。すなわち、手動操縦システムは自律制御システムの有無に依存せず、また、自律制御システムは手動操縦システムに何ら影響を与えない。本機能を利用することで、安全な両信号システムの分離を実現できた。

【 0 0 3 7 】

また、本発明では、前記サーボパルス混合 / 切替装置に、手動操縦受信機 6 からサーボパルス混合 / 切替装置 7 へ入力される信号の手動操縦信号、切り替え指令信号、および混合比率指令信号のパルス計測データを数値データに変換して前記自律制御装置へ出力する機能（図において手動操縦信号（舵）の数値データ）を備えた。前記サーボパルス混合 / 切替装置 7 のパルス処理演算用 CPU 7 1 では、常時手動操縦信号、切り替え指令信号、および混合比率指令信号を計測している。これらの計測データを数値データとして、汎用インターフェースである RS-232C シリアル通信により前記自律制御装置へ向かって出力する仕組みを備えた。数値出力できるデータは前記のものに限らず、前記サーボパルス混合 / 切替装置 7 の入力信号もしくは出力信号であれば、いずれも可能である。前記自律制御装置では、このデータは他のセンサのデータと同様に扱われる。本機能により、前記手動操縦信号などを、他のセンサのデータと同様記録、保存することが可能となり、手動操縦の補正舵を利用した安全なシステム同定実験の実施、およびそのシステム同定実験により得られた入出力データに基づくシステム同定を可能とした。

【 0 0 3 8 】

また、本発明では、手動操縦送信機 8 から、前記自律制御装置の前記主演算部に実装されている前記自律制御アルゴリズムに対して目標値を与えることができる機能を考案し、前記主演算部に実装した。図 1 5 により説明する。前記サーボパルス混合 / 切替装置 7 が備える、手動操縦信号を数値計測データとして前記自律制御装置に出力する機能を利用し、手動操縦信号に比例定数を乗じて目標値を生成し、前記小型無人ヘリコプタを自律制御させることができるようにした。なお、前記比例定数の部分は、定数でなくてもよく、手動

10

20

30

40

50



操縦信号と目標値を対応付けるものであればよい。このようにすることで、手動操縦送信機 8 を自律制御アルゴリズムの目標値信号入力装置として使うことが可能となった。オペレータは手動操縦送信機 8 を用いることで、前記小型無人ヘリコプタに対して移動方向やその速度などの目標値を直感的に指示することができ、あたかも手動でヘリコプタを操縦しているような感覚でヘリコプタを安全に操作しながら所定の目的を達成することができる。この方法では、オペレータは手動操縦しているつもりであっても実際には自律制御アルゴリズムにより前記夫々のサーボモータ 3 に与えられる自律制御信号が演算されており、  
 <自律制御アルゴリズム> <自律制御信号> <サーボパルス混合/切替装置 7>  
 <サーボモータ 3> <小型無人ヘリコプタ 1> <センサデータ> <自律制御アルゴリズム>のフィードバック制御ループが働いていることにより前記小型無人ヘリコプタの安定性が常時保証されるため、非常に安全な飛行を実現できるものである。

10

【 0 0 3 9 】

以下、ヘリコプタ機体の 3 軸姿勢制御および航行速度位置制御の自律制御アルゴリズムの研究成果について記述する。

( 3 軸姿勢制御 )

はじめに、小型無人ヘリコプタの制御装置を用いた 3 軸姿勢制御について説明する。座標系を図 2 のように定義する。姿勢角度  $\theta$ 、 $\phi$  はそれぞれ、ピッチング角、ローリング角、ヨーイング角である。なお、座標系は、Xの正を機体前方方向、Yの正を機体右方向、Zの正を機体下方とする。

20

【 0 0 4 0 】

(サーボモータのモデリング)

ヘリコプタ機体のアクチュエータには、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタと同様のサーボモータを採用する。入力パルス幅がサーボモータの回転角度になっている。そこで、入力から出力角度までのサーボモータの特性を伝達関数で式 ( 1 ) のように仮定し、M系列信号をパルス幅としてサーボモータへ入力することにより、パラメータ  $\zeta_s$  と  $\omega_{ns}$  を部分空間同定法により決めた。

【数 2 2】

$$G_s(s) = \frac{\omega_{ns}^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2}$$

30

・・・ (1)

【 0 0 4 1 】

(ピッチング・ローリングモデル)

本発明で使用する自律制御システムには、センサのむだ時間、無線空間のむだ時間が含まれている。そのむだ時間は制御サンプリングタイムの 3 倍にあたる。そこでむだ時間、アクチュエータの特性を考慮した、エレベータサーボ ( 前後方向 ) 指令からピッチ軸姿勢角度  $\theta$  までの伝達関数表現は式 ( 2 ) のように、エルロンサーボ ( 左右方向 ) 指令からロール軸姿勢角度  $\phi$  までの伝達関数式 ( 3 ) のようになる。

40

【 0 0 4 2 】

【数 2 3】

$$G_\theta(s) = e^{-Ls} \frac{K_\theta \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2)(T_\theta s + 1)s}$$

50

・・・ (2)

【数 2 4】

$$G_{\phi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\phi} \omega_{ns}^2}{(s^2 + 2\zeta \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2)(T_{\phi} s + 1)s}$$

・・・ (3)

10

【0043】

(ヨーイングモデル)

ヨー軸角速度安定化用レートジャイロ装置としては、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタで用いられているものと同じのものが装着されている。それは入力をヨー軸の回転角速度として制御を行っている。本実施の形態で用いられているヘリコプタ機体にも角速度ジャイロセンサーを利用した角速度サーボコントローラが搭載されている。それを2次遅れ系として仮定する。したがって、ヨー軸の回転運動モデルは式(4)のようにむだ時間、2次遅れ系と積分器1個を持つシステムになる。

【数 2 5】

$$G_{\psi}(s) = e^{-Ls} \frac{K_{\psi} \omega_{n\psi c}^2}{(s^2 + 2\zeta_{\psi c} \omega_{n\psi c} s + \omega_{n\psi c}^2)s}$$

・・・ (4)

20

【0044】

ここで、モデルゲイン( $K_{\phi}$ ,  $K_{\psi}$ ,  $K_{\theta}$ )と時定数( $T_{\phi}$ ,  $T_{\psi}$ )は実験とシミュレーション結果を比較し、2つの数値データが一致するように調整、決定されたものである。上記3つのモデルによるシミュレーション結果と、実験結果の比較を図3乃至5に示す。本実施の形態では、上記の3つの数式モデルに対して、LQG(Linear Quadratic Gaussian)制御理論を適用し自律制御アルゴリズムを設計する。また、定常偏差をなくす(ゼロにする)ため1次サーボ系を構成した。ピッチング角、ローリング角、ヨーイング角をそれぞれSISO(Single-Input Single-Output)系、また連成がないシステムと仮定し最適フィードバックゲインを求める。得られた制御器による実験結果を図6に示す。

30

【0045】

(並進運動制御)

次に、小型無人ヘリコプタの制御装置を用いた並進運動制御について説明する。

40

(前後左右運動モデル)

簡単な力学解析により、機体左右速度 $Y$ については以下の式が得られる。

【数 2 6】

$$Vy = g \frac{1}{s} \Phi$$

・・・ (5)

50

【 0 0 4 6 】

ここで  $g$  は重力加速度、 $\Theta$  は機体ロール姿勢角度である。式 ( 5 ) の導出においては、機体高度が一定かつ  $\dot{\Theta} = 1$  という仮定を用いている。また、図 7 に示す実験データより、機体姿勢角と実際の加速度の間には何らかの動特性が存在することがわかる。そして、この特性を 1 次遅れで近似し、さらに実験結果とシミュレーションを比較することにより不安定極 1 つを式 ( 5 ) に加え、以下に示す伝達関数表現の数式モデルを最終的に制御系設計に使用した。なお、機体前後速度についても同様の数式モデルを用いている。また、 $\Phi$  は機体ピッチ姿勢角度である。

【数 2 7】

$$Vy = g \frac{T}{s+T} \frac{a}{s-a} \Phi$$

10

・・・ (6)

【数 2 8】

$$Vx = g \frac{T}{s+T} \frac{a}{s-a} (-\Theta)$$

20

・・・ (7)

上記のモデルによるシミュレーション結果と、実験結果の比較を図 8 に示す。

【 0 0 4 7 】

(上下運動モデル)

ヘリコプタは、ブレードコレタティブピッチを変化させることにより、ロータの揚力を変化させ、上下運動を可能にしている。よく知られたブレード翼素理論によれば、ロータによる揚力は、

30

【数 2 9】

$$T = \frac{b}{4} \rho a \Omega^2 R^3 (\theta_t + \phi_t) c$$

・・・ (8)

となる。ここで、 $b$  はブレード枚数、 $\rho$  は空気密度、 $a$  は 2 次元揚力傾斜、 $\Omega$  はロー回転数、 $R$  はロータ半径、 $\theta_t$  はコレクティブピッチ、 $\phi_t$  は流入角、 $c$  は翼弦長である。ここで、 $\theta_t$  以外はすべて定数と考えると、Z 方向速度の伝達関数表現の数式モデルは以下となる。

40

【 0 0 4 8 】

【数 3 0】

$$Z = \frac{k}{s} \Theta_t$$

・・・ (9)

【 0 0 4 9 】

( X-Y方向自律制御アルゴリズム )

式 ( 6 )、式 ( 7 ) のモデルに対して、 X、 Y、 Z方向にそれぞれ独立した速度制御アルゴリズムを L Q I 制御理論に基づき設計した。 X、 Y 位置制御ループの全体像を図 9 に示す。 X-Y方向に対する速度制御アルゴリズムとは、それぞれのある目標機体速度が与えられたとき、その機体速度を実現するために必要な機体姿勢角度を算出する演算アルゴリズムである。機体位置を任意の目標位置へ移動させるために、各々の速度目標値を以下の式により算出する。

10

【 0 0 5 0 】

【数 3 1】

$$V_{xref} = \alpha (P_{xref} - P_x)$$

・・・ (10)

【数 3 2】

20

$$V_{yref} = \alpha (P_{yref} - P_y)$$

・・・ (11)

【 0 0 5 1 】

ここで、 $V_{xref}$ 、 $V_{yref}$ はそれぞれX、Y方向の速度目標値、 $P_{xref}$ 、 $P_{yref}$ はそれぞれX、Y方向の位置目標値、 $P_x$ 、 $P_y$ はそれぞれ機体のX、Y座標、 $\alpha$ は任意定数である。制御ループは姿勢制御器、速度制御器、位置制御器をそれぞれ直列に配置した構造となっている。こうすることにより、単一の制御器と比較して以下の長所を有する。 1 姿勢角を安全な範囲に制限が可能。 2 速度リミッタをかけることで、位置制御のオーバーシュートを改善。 3 制御器の内部状態が位置座標に依存しない。 3つ目の長所によって、任意座標においてヨーイング角を変化させる場合、座標変換による不都合を複雑なアルゴリズムなしに回避できる。各軸の位置、速度情報は高精度 R T K - D G P S によって観測可能であるため、式 ( 6 ) 及び ( 7 ) における 3 次モデルの内 1 つの状態量を最小次元オブザーバにより推定している。姿勢サーボ系のダイナミクスは、並進運動に比べて十分に速いとみなし、制御系設計においてはその特性を考慮していない。

30

【 0 0 5 2 】

40

( z 方向自律制御アルゴリズム )

実験とシミュレーション結果を比較し、2つの数値データが一致するように式 ( 9 ) の  $k$  を調整、決定し、その値を用いて LQI 制御理論により Z 方向の速度制御アルゴリズムを設計した。Z 方向に対する速度制御アルゴリズムとは、Z 方向のある速度目標値が与えられたとき、その機体速度を実現するために必要なコレクティブピッチ入力を算出する演算アルゴリズムである。機体位置を任意の目標位置へ移動させるために、Z 方向の速度目標値を以下の式により算出する。

【数 3 3】

$$V_{zref} = \beta(P_{zref} - P_z)$$

・・・ (12)

ここで、 $V_{zref}$ はZ方向の速度目標値、 $P_{zref}$ はZ方向の位置目標値、 $P_z$ 機体のZ座標、 $\beta$ は任意定数である。

【0053】

以上の制御アルゴリズムにより実現された軌道追従制御の実験結果を図10に、定点ホバリング制御の実験結果を図11に、前後左右速度制御の実験結果を図12に、高度制御の実験結果を図13に示す。前記自律制御装置、前記サーボパルス混合/切替装置、前記ジェネレータ装置、及び前記数式モデルに基づく自律制御アルゴリズムを前記小型無人ヘリコプタに実装した前記小型無人ヘリコプタの自律制御システムの一実施形態について説明する。図1に示すようにシステムの構成は、大きく分けると前記自律制御装置及び前記サーボパルス混合/切替装置7を前記小型無人ヘリコプタ1に搭載した移動局と、前記パルスジェネレータ装置11を装備し、自律制御の状態の監視や目標値の入力等を行うための地上局とに分けられる。移動局には、ヘリコプタ機体1と、ヘリコプタ機体1の現在位置及び姿勢角を検知するセンサ2と、ヘリコプタ機体1の5つの舵を動かす夫々のサーボモータ3と、センサ2から得られるヘリコプタの現在の飛行状態と、地上局から設定される目標値とから前記自律制御アルゴリズムを用いてサーボモータ3の夫々の最適な運動と方向の制御指令値を独立に演算するCPU4と、地上局との通信を行う無線モデム5と、手動操縦送信機8からの手動操縦信号を受信する手動操縦受信機6と、サーボパルス混合/切替装置7とが搭載されている。センサ2及びCPU4及び無線モデム5から前記自律制御装置が作製されている。なお、CPU4には演算機能を行う主演算部41の他にも、センサ2から得られるセンサ情報を地上局で監視させることや、地上局から設定される目標値を入力させるために、無線モデム5との間で信号を入出力制御させる副演算部42も備えている。また、センサ2にはヘリコプタ機体1の位置を検知するGPSセンサ21や3軸の姿勢状態を検知する3軸姿勢センサ22、ヘリコプタ機体の高度を計測する対地高度計23、及び方位を計測する磁気方位計24が用いられる。また、サーボパルス混合/切替装置7は、手動操縦信号と自律制御信号の切り替えや手動操縦信号と自律制御信号の任意の割合での混合を行うことができるものである。例えば、ヘリコプタの自律制御システムが航行中何らかのトラブルにより、CPU4が故障してヘリコプタ機体の自律制御できなくなった場合に、前記サーボパルス混合/切替装置7は自動的に手動操縦モードに切り替え、ヘリコプタの墜落を未然に防ぐことができる。また、前記サーボパルス混合/切替装置7を備えることにより、自律制御された前記小型無人ヘリコプタをラジコンヘリコプタのトレーニング用として利用することができる。ラジコンヘリコプタの操縦に慣れないうちは、自律制御と手動制御の信号の比率を9:1や8:2のように自律制御側に比重を置くことにより、操縦者が下手な操縦をしてもCPU4から発信される自律制御信号がリカバリすることによりヘリコプタが墜落しないように制御される。そして、ラジコンヘリコプタの操縦に慣れるにつれ比重を手動制御側に置くことにより、ラジコンヘリコプタの手動操縦を上達させることができるというものである。

【0054】

一方、地上局には、操縦者が手動操縦するための手動操縦送信機8と、位置または速度の目標値を入力する目標値入力装置91とヘリコプタ機体1の状態を監視する監視装置92とを設置したCPU9と、移動局との通信を行う無線モデム10とが備えられている。また、制御信号を生成するためのパルスジェネレータ装置11が設置されている。

【0055】

以下、システムの動作について説明する。操縦者は、地上局のCPU9から位置または速

10

20

30

40

50

度の目標値を入力する。目標値は無線モデム 10、5 を介して演算を行う CPU 4 に入力される。CPU 4 では入力された目標値とセンサ 2 から得られるヘリコプタ機体 1 の現在の飛行状態とから、前記数式モデル (2)、(3)、(4)、(6)、(7)、及び(9)に基づいて設計された自律制御アルゴリズムが CPU 4 の主演算部 41 で演算され、その演算結果からサーボモータ 3 の夫々の最適な運動と方向の 5 種類の制御指令値が決定される。完全自律制御を行っている場合にはサーボパルス混合 / 切替装置 7 では、手動操縦信号の影響は受けずに、演算された制御指令値の制御信号に基づいて夫々のサーボモータ 3 が制御され、これにより、目標値に従ってヘリコプタ機体 1 の舵の運動が完全自律制御される。一方、サーボパルス混合 / 切替装置 7 で手動操縦信号を混合する場合には、設定された割合により混合された制御信号がサーボモータ 3 に送られる。

10

#### 【0056】

以上、本実施形態の小型無人ヘリコプタの自律制御装置によれば、上記数式モデル (2)、(3)、(4)、(6)、(7)、及び(9)に基づいて設計された自律制御アルゴリズムを CPU 4、センサ 2 及びサーボモータ 3 とともに、ホビー用のヘリコプタ機体 1 に実装、搭載することにより、ヘリコプタ機体 1 に搭載したセンサ 2 から取得する現在の飛行状態、及び与えられた位置や速度の目標値から前記自律制御アルゴリズムを用いて、対応する夫々のサーボモータ 3 の最適な運動と方向を指令する制御指令値を演算して、ヘリコプタ機体 1 を目標値に従って完全自律制御させることができる。

#### 【0057】

なお、別の態様として、CPU 4 と同様の演算を行う演算部 93 を地上局に設置しても同じように前記小型無人ヘリコプタを自律制御させることはできる。ただし、この場合には形成するフィードバック制御ループ内に、無線モデムと手動操縦用送受信機の 2 箇所の無線区間が存在するので、無線通信が断絶したときには制御システムの論理構造が崩れ、前記小型無人ヘリコプタの飛行を不安定化する恐れもある。航行中の安全性の観点から見てすべての前記自律制御アルゴリズムを地上局に設置されたホストコンピュータに実装するのは望ましくない。このような場合は、前記サーボパルス混合 / 切替装置 7 と前記パルスジェネレータ装置 11 の組み合わせにより実現される CPU 4 と前記地上局ホストコンピュータ 9 との制御演算の併用機能を用いるという手段もある。

20

#### 【0058】

#### 【発明の効果】

以上、本発明の自律制御方法によれば、設定する位置や速度の目標値に従って小型無人ヘリコプタを自律制御させることができる。また、この方法に使用される自律制御装置をヘリコプタ機体 1 に搭載して自律制御システムを実現するとともに、自律制御信号と手動操縦信号との混合または切り替えるサーボパルス混合 / 切替装置や、手動操縦送信機が受け付けることのできるパルス信号に変換するパルスジェネレータ装置、および小型無人ヘリコプタの自律制御に適した自律制御アルゴリズムを開発したので、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタほどの小型無人ヘリコプタを、目標値に従って自律制御させることができる。これにより、ホビー用の小型ラジコンヘリコプタで完全自律制御が実施できるので、携帯に便利であり、従来の無人ヘリコプタの自律制御では実施できなかった、有人で作業を実施するには困難な狭い場所にも適応でき、その用途を拡大させることができる。

30

40

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の小型無人ヘリコプタの自律制御装置を用いた自律制御システムを示す構成図

【図 2】本発明の小型無人ヘリコプタの座標系を示す図

【図 3】本発明のピッチ軸のシミュレーション結果を示す図

【図 4】本発明のロール軸のシミュレーション結果を示す図

【図 5】本発明のヨー軸のシミュレーション結果を示す図

【図 6】本発明のピッチング角、ローリング角、及びヨーイング角を制御する実験を行った結果を示す図

【図 7】姿勢角度と機体加速度との関係を示す図

50

- 【図 8】シミュレーションと実験結果との対比を示す図
- 【図 9】X、Y 位置制御ループの全体像を示す図
- 【図 10】制御アルゴリズムにより実現された軌道追従制御の実験結果を示す図
- 【図 11】定点ホバリング制御の実験結果を示す図
- 【図 12】前後左右速度制御の実験結果を示す図
- 【図 13】高度制御の実験結果を示す図
- 【図 14】サーボパルス混合 / 切替装置の内部構造を示す図
- 【図 15】手動操縦送信機を目標値入力装置として使用した場合の様子を示す図
- 【図 16】パルスジェネレータ装置により制御指令値を制御信号に変換する様子を示す図
- 【図 17】フィードバック制御ループを示す図
- 【図 18】従来の無人ヘリコプタを自律制御させる自律制御システムの構成図

10

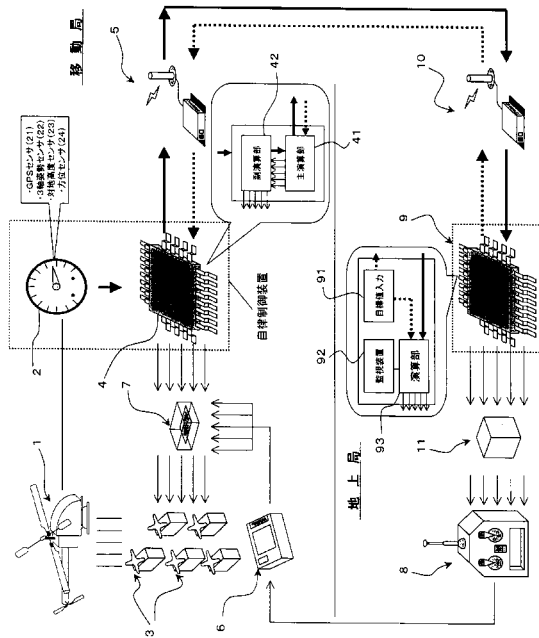
## 【符号の説明】

- 1 ヘリコプタ機体 ( 小型無人ヘリコプタ )
- 2 センサ
  - 2 1 G P S
  - 2 2 3 軸姿勢センサ
  - 2 3 対地高度センサ
  - 2 4 方位センサ
- 3 サーボモータ
- 4 C P U ( 演算用コンピュータ )
- 5 無線モデム
- 6 手動操縦受信機
- 7 サーボパルス混合 / 切替装置
- 8 手動操縦送信機
- 9 C P U ( 地上局コンピュータ )
- 1 0 無線モデム
- 1 1 パルスジェネレータ装置
- 4 1 主演算部
- 4 2 副演算部
- 6 1 バッテリ
- 7 1 パルス処理演算用 C P U
- 7 2 リセット機能付タイマ
- 9 1 目標値入力部
- 9 2 監視部
- 9 3 演算部

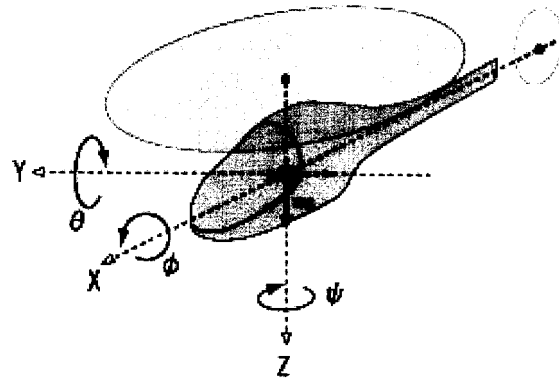
20

30

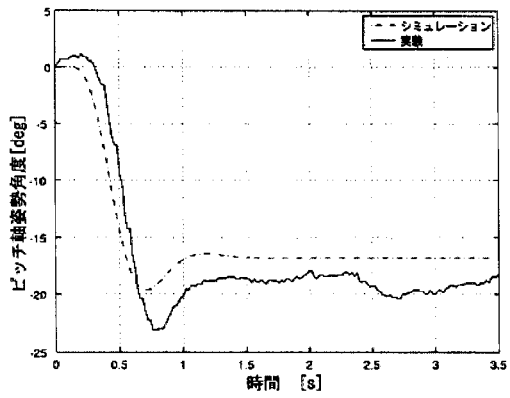
【図1】



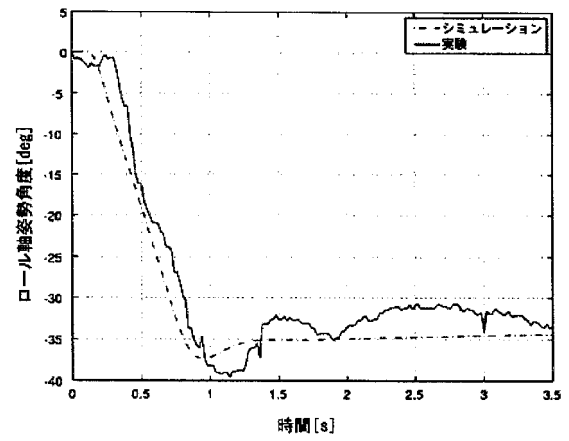
【図2】



【図3】

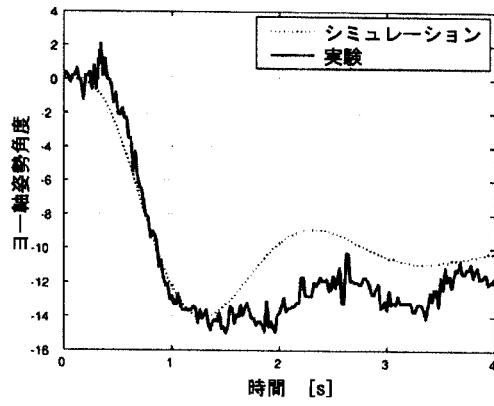


【図4】

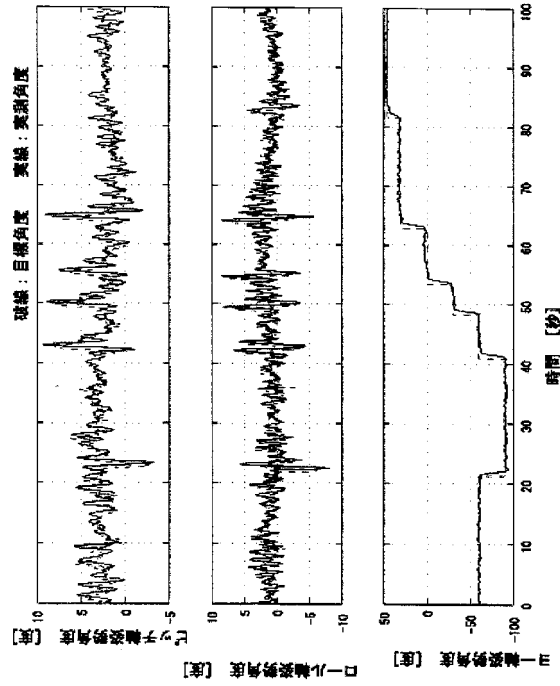




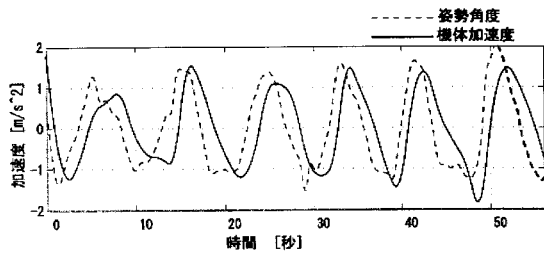
【 図 5 】



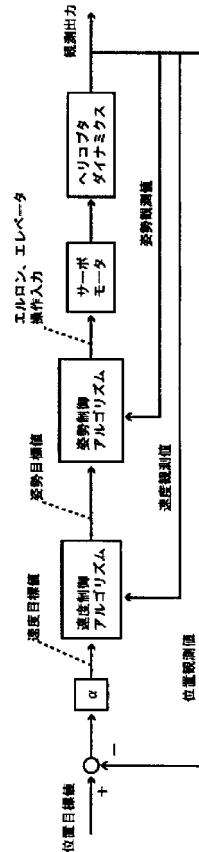
【 図 6 】



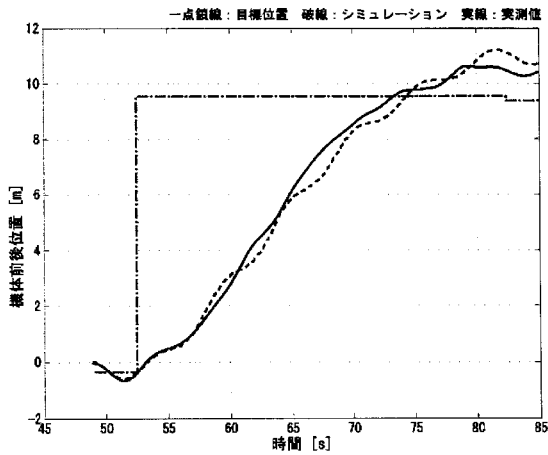
【 図 7 】



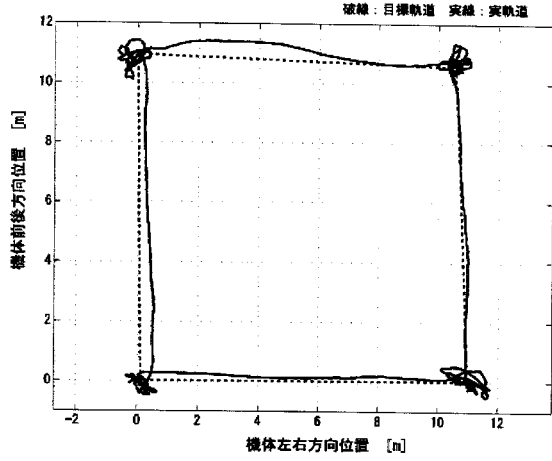
【 図 9 】



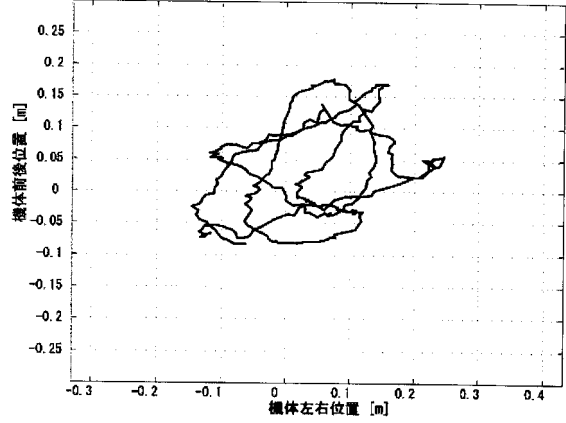
【 図 8 】



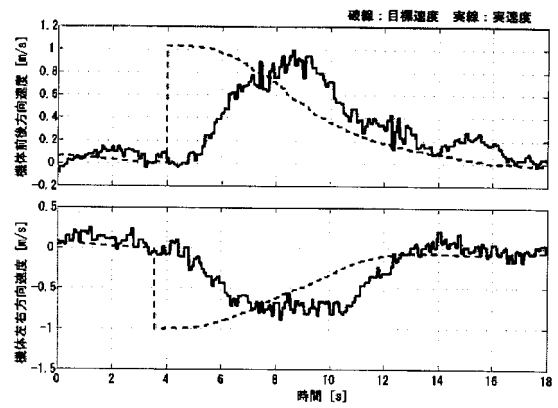
【図10】



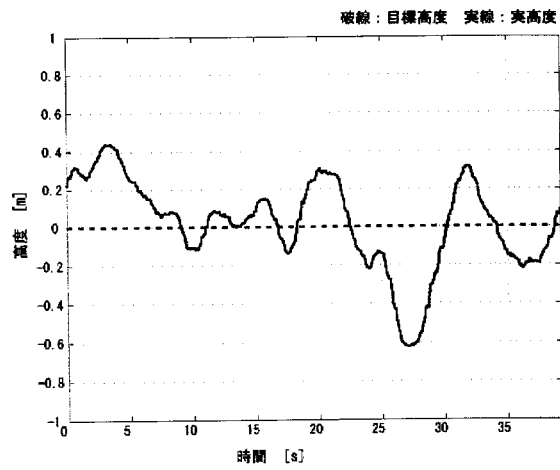
【図11】



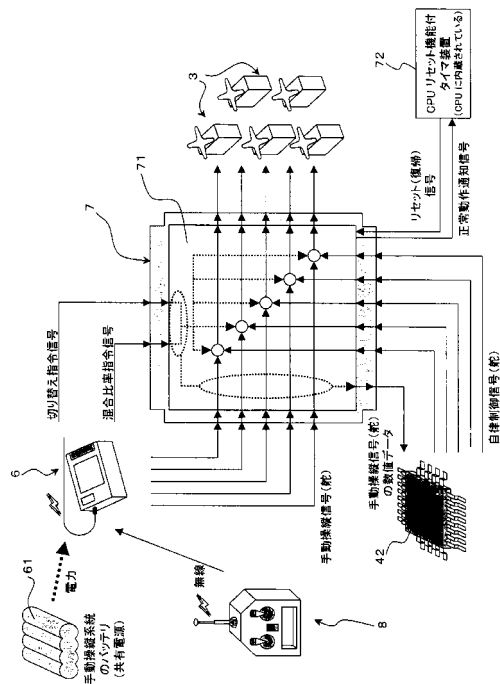
【図12】



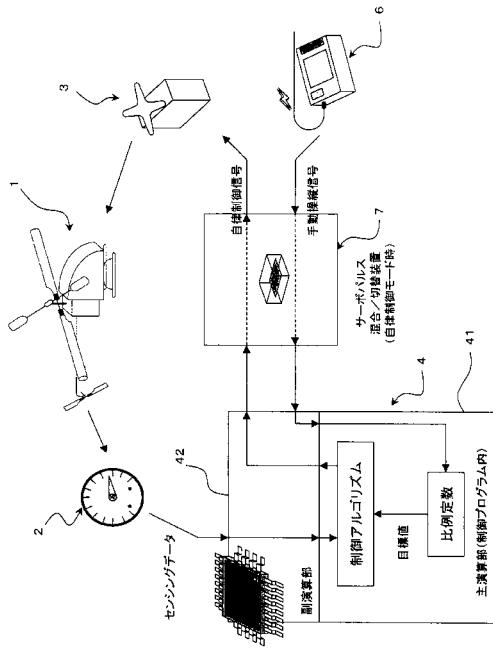
【図13】



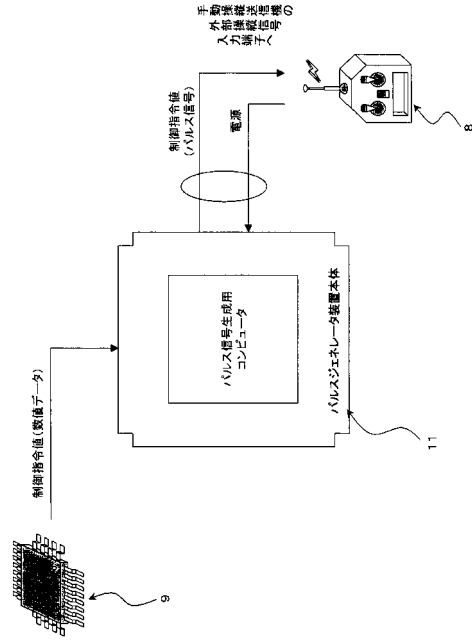
【図14】



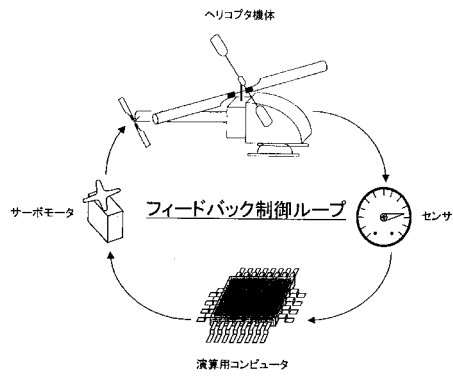
【図15】



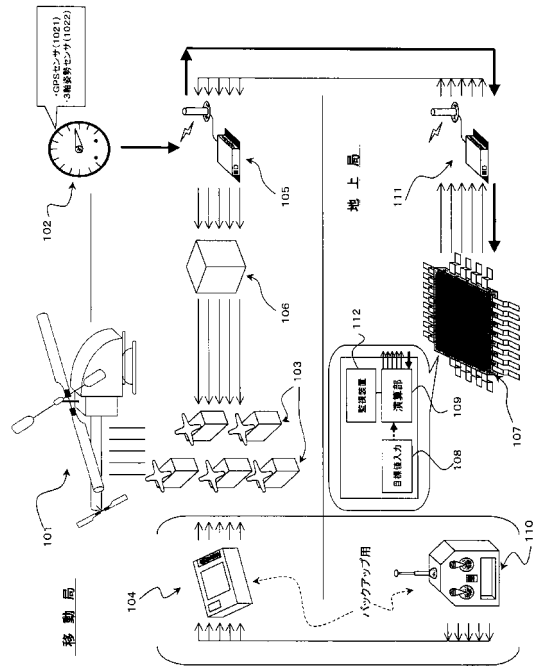
【図16】



【図17】



【図18】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I  
**G 0 5 D 1/12 (2006.01)** G 0 5 D 1/12 A

(73)特許権者 592079398

ヒロボー株式会社  
 広島県府中市本山町530番地の214

(74)代理人 100081514

弁理士 酒井 一

(74)代理人 100082692

弁理士 蔵合 正博

(72)発明者 野波 健蔵

東京都町田市つくし野1-33-7

(72)発明者 辛 振玉

千葉県稲毛区弥生町1-33 千葉大学工学部電子機械工学科内

(72)発明者 藤原 大悟

千葉県稲毛区弥生町1-33 千葉大学工学部電子機械工学科内

(72)発明者 羽沢 健作

千葉県稲毛区弥生町1-33 千葉大学工学部電子機械工学科内

(72)発明者 松坂 敬太郎

広島県府中市本山町530-214 ヒロボー株式会社内

審査官 杉山 悟史

(56)参考文献 特開2001-306144(JP,A)

特開2000-118498(JP,A)

特開平09-146606(JP,A)

特開平07-277286(JP,A)

特開平07-234722(JP,A)

特開平04-325185(JP,A)

特開平04-318608(JP,A)

特開平02-161295(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B64C 13/00 - 13/50

B64C 27/00 - 27/82

B64C 39/00 - 39/12

G05B 13/00 - 13/04

G05D 1/00 - 1/12