

RoboCopterのシステム同定と位置制御系設計

System Identification and Positioning Controller Design of the RoboCopter

宮森 剛
Gou MIYAMORI

川田工業(株)航空・機械事業部製品開発部

中村 優
Masaru NAKAMURA

川田工業(株)航空・機械事業部製品開発部
課長

鈴木 利明
Toshiaki SUZUKI

川田工業(株)航空・機械事業部製品開発部

本研究では産業用大型無人ヘリコプタであるRoboCopter 300 (以下, RoboCopter) の自律飛行制御を実現することを目的として, 制御システムの開発を行っている。

自律飛行制御系の設計にあたっては, シミュレーションを行うための数学モデルが不可欠である。ここでは, ヘリコプタの入出力関係を物理的な知識から大雑把に把握したうえでモデル構造を決定し, 実験によりパラメータを決定していく。ヘリコプタは速度や高度変化により特性が変化してしまうため扱いが非常に難しいが, ホバリング周りの特性を求め制御系を設計することに限定すれば, 線形近似が適用でき扱いが簡単になることから, ここではホバリング周りの同定を行った。

さらにそのモデルを用いた位置制御コントローラを設計し, 一部を実際の機体の実装し試験を行った。

ここでは, 同定結果と制御コントローラの飛行試験結果について報告する。

本研究は宇都宮大学工学部足立研究室との共同研究成果の一部である。

キーワード: ロボコプタ, 飛行試験, システム同定, ロバスト制御

1. 研究の背景

近年, 無人ヘリコプタが農薬散布, 空中撮影の現場で多くの実績を上げるなか, 先頃の有珠山噴火に代表される災害現場での活躍が大いに脚光を浴びている。無人ヘリコプタは, これまでオペレータの有視界内での運航に限定されていたが, 近年のGPS/GIS (Global Positioning System/ Geographical Information System) のめざましい発展により, 有視界外での自律運航が可能になる基盤ができてきた。無人ヘリコプタが自律飛行制御を行えば, これまでの活躍の場に加えてより広範囲な監視活動など様々な応用分野を見出すことが可能になる。

本研究では産業用大型無人ヘリコプタであるRoboCopter 300 (以下, RoboCopter) の自律飛行制御を実現することを目的として, 制御システムの開発を行っている。

自律飛行制御系の設計にあたっては, シミュレーションを行うための数学モデルが不可欠である。ここでは, ヘリコプタの入出力関係を物理的な知識から大雑把に把握したうえでモデル構造を決定し, 実験によりパラメータを決定していく。ヘリコプタは速度や高度変化により特性が変化してしまうため扱いが非常に難しいが, ホバリング周りの特性を求め制御系を設計することに限定すれば, 線形近似が適用でき扱いが簡単になることから, ここではホバリング周りの同定を行った。

さらにそのモデルを用いた位置制御コントローラを設計し, 一部を実際の機体の実装し試験を行った。

ここでは, 同定結果と制御コントローラの飛行試験結果について報告する。

本研究は宇都宮大学工学部足立研究室との共同研究成果の一部である。

2. 記号および座標系

図1にヘリコプタの座標系を示す。図中および文中の

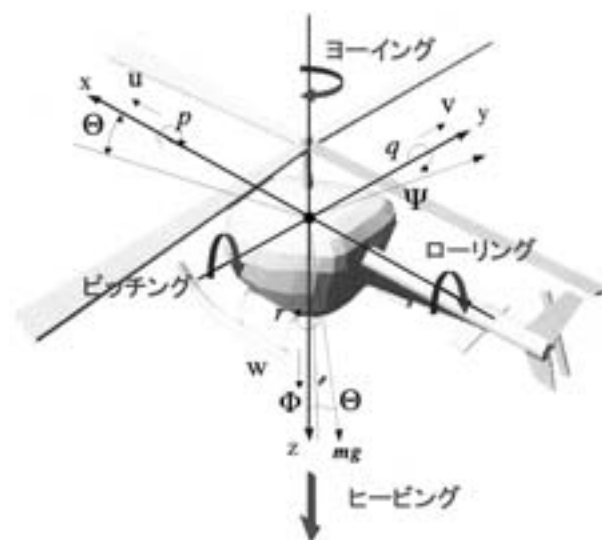


図1 ヘリコプタの座標系

各記号の意味は下記の通りである。

- x, y, z : 機体固定軸
- p, q, r : x, y, z 軸周りの角速度 [rad/sec]
- X, Y, Z : x, y, z 軸方向の位置 [m]
- u, v, w : x, y, z 軸方向の速度 [m/sec]
- ϕ, θ, ψ : 機体のオイラー姿勢角 [rad]
- θ_{0M} : メインロータコレクティブピッチ角 [degree]
- θ_c : メインロータ横サイクリックピッチ角 [degree]
- θ_s : メインロータ縦サイクリックピッチ角 [degree]
- θ_{0T} : テイルロータピッチ角 [degree]
- δ_{0M} : ヒーピング運動駆動同定信号 [Volt]
- δ_c : ローリング運動駆動同定信号 [Volt]
- δ_s : ピッチング運動駆動同定信号 [Volt]
- δ_{0T} : ヨーイング運動駆動同定信号 [Volt]
- m : 機体質量 [kg]
- g : 重力加速度 [m/sec²]
- ローリング: x 軸周りの回転運動(右まわりを正)。主として θ_c により誘起される。
- ピッチング: y 軸周りの回転運動(頭上げを正)。主として θ_s により誘起される。
- ヨーイング: z 軸周りの回転運動(右回頭を正)。主として θ_{0T} により誘起される。
- ヒーピング: 上下運動。主として θ_{0M} により誘起される。

(なお、以上の4つの運動モードは、それぞれ他軸入力に対しても誘起される、カップリング特性を有している。)

3. 同定試験

(1) 試験システム

図2にRoboCopterの試験システム図を示す。

機体は通常、ラジコン電波により遠隔操縦される。機上には姿勢安定用のSASが搭載されており、自機位置検出用にGPSが搭載されている。GPSは基地局からの補正信号により誤差を相殺することが可能なDGPSを採用した。機上には制御用コンピュータが搭載されている。遠隔操縦者と制御コンピュータとの間の操縦権の切り替えは、遠隔操縦者が任意に選択できる。基地局から機上制御コンピュータへの指令を特定小電力無線で行う。

(2) 同定用信号

図3に同定対象であるRoboCopterのブ

ロック線図を示す。この図においてHelicopter Dynamicsに直接同定入力を行うような同定試験は飛行安全上困難であるため、同定はこの閉ループとなった系に対して行う。機上制御コンピュータにより生成された入力信号に遠隔操縦者による修正舵信号が加わったものが姿勢制御用のSASコントローラに入力される。この入力信号を同定用入力信号として採用する($\delta_{0M}, \delta_c, \delta_s, \delta_{0T}$)。また、出力信号は、慣性測定装置により計測される $p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 、GPSにより計測される u, v, w, X, Y, Z 、およびレーザー高度計により計測される Z である。このうち、制御系設計に関連すると思われる $p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ を同定用出力信号として採用する。

(3) 試験方法

ロール、ピッチ、ヨー、ヒーブの各運動モードはカップリング特性を有しているため、ここでは $\theta_{0M}, \theta_c, \theta_s, \theta_{0T}$ の各軸を別々に加振した。加振したい軸にはM系列信号を、その他の3軸には一定値の信号を入力した。サンプリング周期は0.02sec、周期31のM系列信号をサンプリング時間の20倍のクロック周期(0.4sec)にして用いた。実験時間は約40secであった。

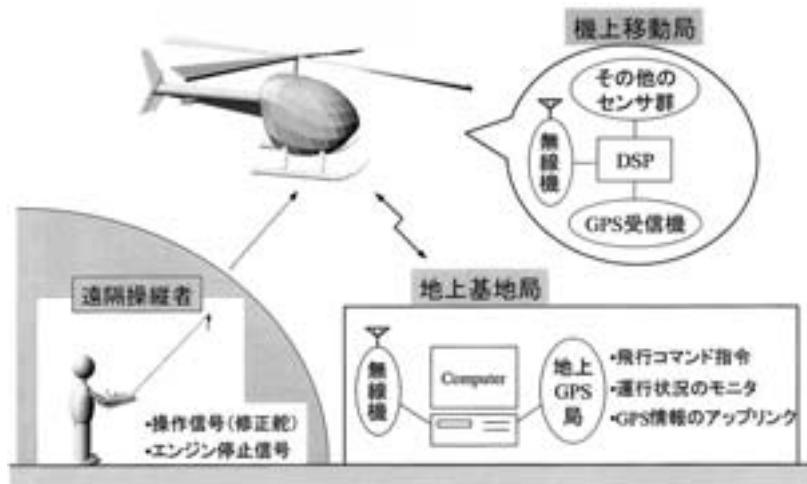


図2 試験システム

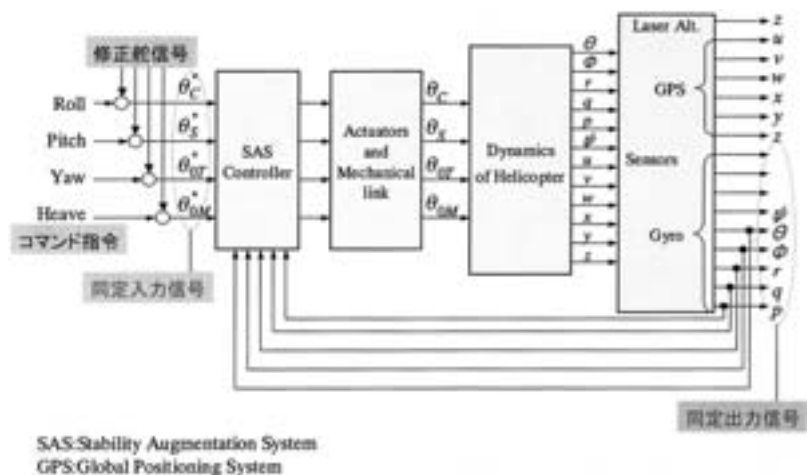


図3 同定対象のブロック線図

(4) 同定結果

ここでは、紙面の都合からヨー軸に関する閉ループ同定の結果を示す。図4、図5にヨー軸加振時の入出力波形を示す。ここで図4はSASに対する各軸の指令電圧であるため、単位はVoltになっている。この図からヨー軸加振時には、修正舵による影響はあるものの、入力としては $\dot{\theta}_{or}$ 以外は一定値であることが確認できる。また、出力はヨー運動に関する特性である $\dot{\theta}_{or}$ から r への伝達特性が支配的であること、 \dot{v} への干渉があることがわかる。

ここで、同定入力による加振がどの程度行われたかを定量的に把握する指数として下記のようなコヒーレンスを定義する。

$$C_{yy}(\omega) = \frac{|P_{yy}(\omega)|^2}{P_{uu}(\omega)P_{yy}(\omega)} \quad (1)$$

ここで、 $P_{uu}(\omega)$ を入力のパワースペクトル密度、 $P_{yy}(\omega)$ を出力のパワースペクトル密度、 $P_{uy}(\omega)$ をクロススペクトル密度とよぶ。コヒーレンスが1のとき、出力における周波数成分が入力の同一周波数成分に依存していることを意味し、その周波数帯域における同定精度が高いことを表す。図6にヨー軸加振入力に対する各同定出力のコヒーレンスを示す。

図6(c),(i)よりヨー軸加振入力 $\dot{\theta}_{or}$ に対して、ヨー軸出力である r と ψ は制御周波数帯域(約3Hz)まではコヒーレンスが高く、よい同定結果が得られるものと考えられる。また、その他の軸の出力については、コヒーレンスが制御周波数帯域であまり高くないことから、カップリング項の同定は難しいものと考えられる。図7に1入力1出力系としてヨー軸運動特性の同定を行った結果を示す。図7の(a),(b)はそれぞれ $\dot{\theta}_{or}$ から r への伝達特性(ゲイン線

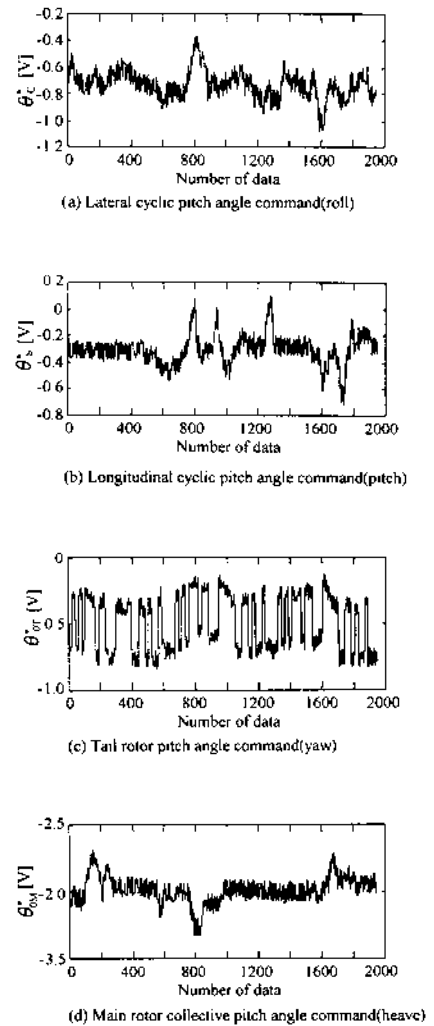


図4 ヨー軸加振時の同定入力信号

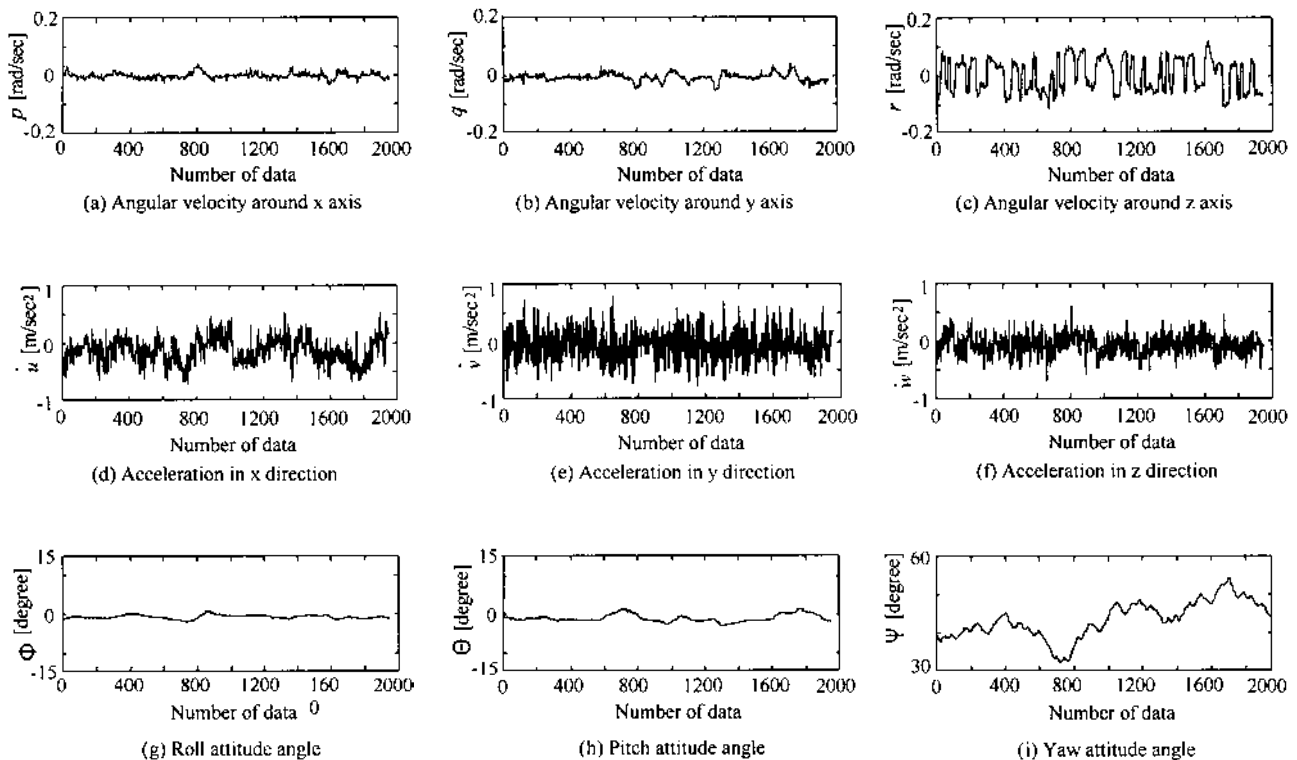


図5 ヨー軸加振時の同定出力

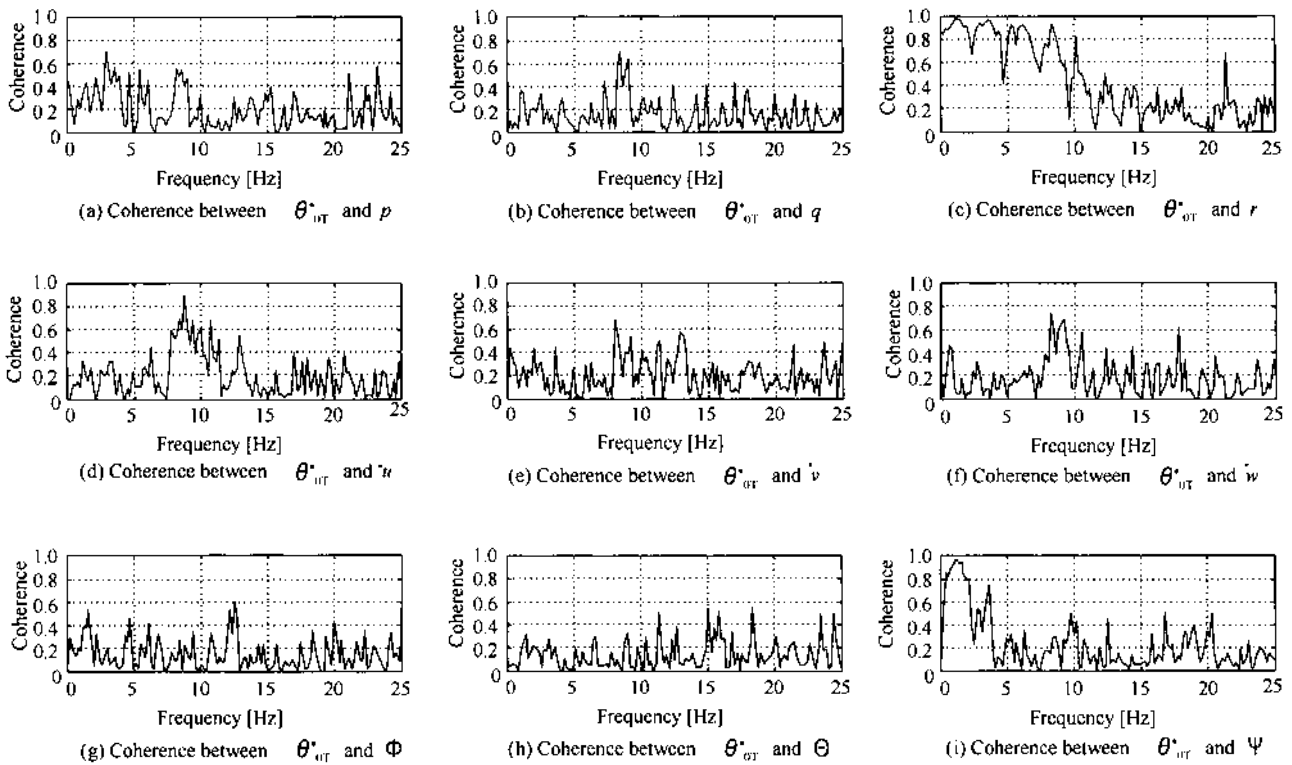
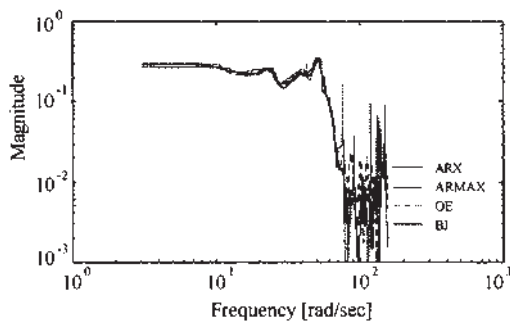
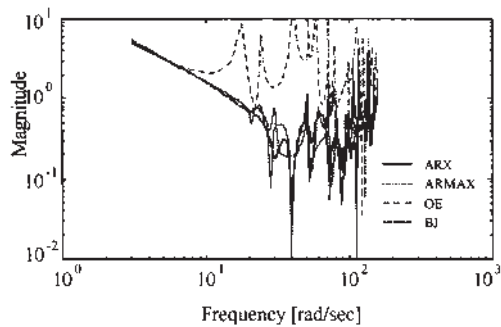


図6 ヨー軸加振入力に対する同定出力のコヒーレンス

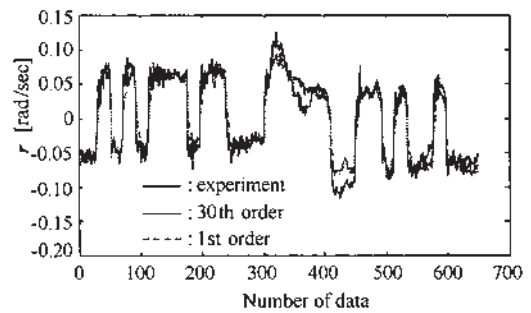


(a) Gain plots from θ_{OT}^* to r

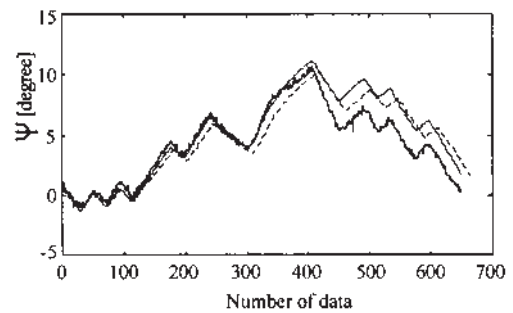


(b) Gain plots from θ_{OT}^* to Ψ

図7 ヨー軸モデル同定結果(周波数特性)



(a) Time responses of r



(b) Time responses of Ψ

図8 ヨー軸同定モデルの時間応答の比較

図)を表している。ここでは同定モデルとしてARX, ARMAX, OE, BJモデルを用いた。モデル次数は30次, むだ時間は2とした。同定は最小2乗法に基づいて行い, 総データ数1650のうち1100個を同定用に, 550個を検証用に用いた。図7(a)においては, どのモデルにおいても制御周波数帯域(20 rad/sec)まではゲインがよく一

致しており, 精度よく同定できていると思われる。図7(b)においては, OEモデルを除いて, やはりよく一致している。OEモデルは出力誤差(時系列誤差)を最小にする特徴を持っており, 周波数特性に対して弱いという特徴があるため他のモデルとは異なる結果となったと考えられる。次に同定したARXモデル(θ_{OT}^*)に対

して検証用の入力信号を加えた時の出力信号および実験で得られた出力信号を図8に示す。ここでは、実験結果と30次モデルでの同定結果および1次モデルでの同定結果について示す。30次モデル、1次モデルともモデル出力が実験の出力によく一致していることから、同定対象は積分特性が支配的であるといえる。また、この得られた結果とSASおよび機械系の既知の伝達関数を用いることにより、図3におけるHelicopter Dynamicsの同定も行うことが可能である。

4. 制御系設計および実験結果

次に同定されたモデルを用いて制御系の設計を行い、実験結果と比較検討する。なお、ここではSASも含めた閉ループを制御対象としたコントローラの設計を行うため、用いたモデルは閉ループのモデルを用いた。実験を行うにあたり最も安全であるヨー軸に関して方位制御を行うコントローラの設計および実験を行ったので報告する。

(1) 方位制御のためのモデル

図9に方位制御のための制御系ブロック線図を示す。方位は絶対方位としてジャイロから得られるものを用いる。このとき、ヨー軸入力から方位出力までの伝達関数Pは、前節で同定したARXモデルを用いる。

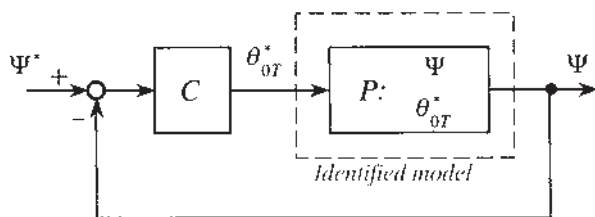


図9 方位制御系ブロック線図

(2) H_∞ 制御に基づく制御系設計

ここでは、H_∞ 制御に基づきヨー軸ロバストコントローラを設計する。制御周波数帯域は20rad/secであるため、前節で求めた1次のモデルをノミナルモデルとし、同じく前節で求めた30次のモデルを制御対象の真のモデルであるとする。ノミナルモデル(1次)に対してコントローラを設計することによりコントローラの低次元化をはかる。ここで、制御系の低感度化とロバスト安定化の混合感度問題を考え、ノミナルモデル(低次)が30次(高次)のARXモデルとの間に乗法的な不確かさ(非構造的変動)をもっているとすると、一般化プラントは図10のようになる。ここで、重み関数 W_T は乗法的な不確かさに対して安定化(ロバスト安定)をはかるよう調整され、 W_S は外乱に対して低感度化をはかるよう調整される。この一般化プラントに対してH_∞ を設計した。式(2),(3),(4)に重み関数 W_T , W_S , コントローラを示す。また、図11にコントローラのボード線図を示す。ここでは、保守的に

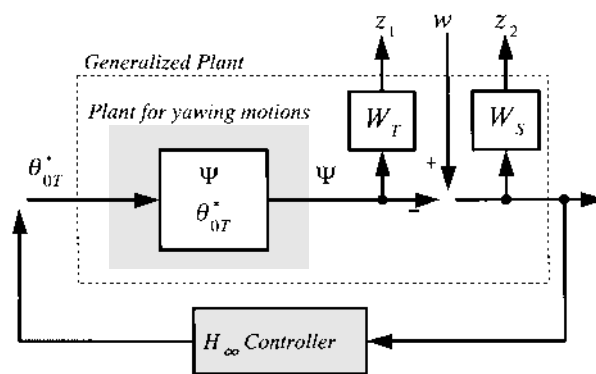


図10 一般化プラント

設計を行ったため、ゲイン余裕138dB、位相余裕89degとなっている。

$$W_T = \frac{20s + 1}{10} \quad (2)$$

$$W_S = \frac{0.5}{s} \quad (3)$$

$$C = \frac{323}{s + 170} \quad (4)$$

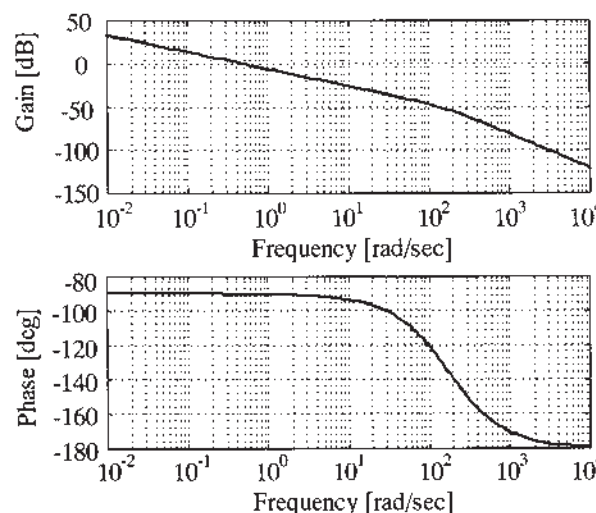


図11 ボード線図

(3) シミュレーション結果と実験結果の比較

図12に設計したコントローラのシミュレーション結果と実験結果との比較を示す。ここでは、方位入力として90deg/5secのランプ入力を行った。実験結果は、約10degの定常偏差が残り外乱による影響があるものと考えられる。今後、コントローラの次数をあげ、積分特性を持たせることにより改善されることが期待できる。

5. まとめ、および今後の課題

本研究では、RoboCopterの自律制御を目的としたモデルの同定および方位制御系設計を行った。モデルの同定結果は実験結果と精度よく一致を示したが、方位制御系設計については定常残差が残るなどシミュレーション結

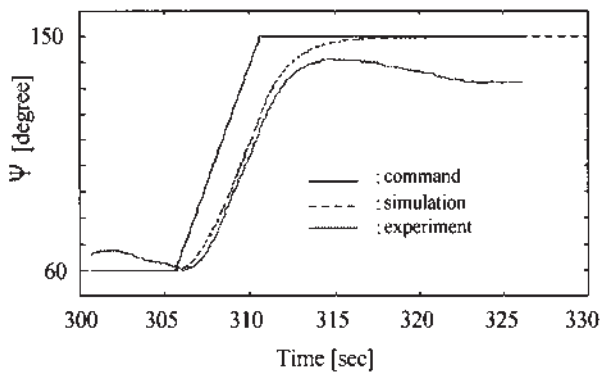


図12 シミュレーション結果と実験結果の比較

果と食い違う点を確認された。今後、実験を通して方位制御系を改良していくとともに、他軸についても制御系の開発を進めていく。

謝 辞

本研究は、宇都宮大学工学部足立研究室との共同研究成果の一部であるため、宇都宮大学工学部足立助教授および足立研究室の学生諸君に多大なる助言、ご指導をいただいた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 足立：MATLABによる制御のためのシステム同定，東京電気大学出版局，1996.
- 2) 橋本・小川・瀬川・足立・譚・宮森：大型無人ヘリコプタのシステム同定実験，電気学会研究発表会資料，1999，pp.7-12.
- 3) 瀬川：無人ヘリコプタの自律飛行制御系の構成システム同定実験とロバスト制御系設計，宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業論文，2000.