



は線形の方程式になる．以上より入力を  $u(t) = [u_1 \ u_2]^T$  とし，状態変数を

$$x(t) = [\epsilon \ \rho \ \lambda \ \dot{\epsilon} \ \dot{\rho} \ \dot{\lambda}]^T$$

とすると，状態空間表現：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + T(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (9)$$

が得られる．ただし，

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ L_{\epsilon s} & \frac{a_{\epsilon} u_1^0}{J_{\epsilon}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_{\lambda} a_{\lambda}}{J_{\lambda}} u_1^0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{L_{\epsilon}}{J_{\epsilon}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{\rho}} \\ \frac{a_{\lambda}}{J_{\lambda}} & 0 \end{pmatrix},$$

$$T = [0 \ 0 \ 0 \ L_{\epsilon c} \ 0 \ 0]^T, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = 0$$

であり，また

$$J_{\epsilon} = M_h L_a^2 + M_w L_w^2, \quad (10)$$

$$J_{\rho} = M_h L_h^2, \quad (11)$$

$$J_{\lambda} = J_{\epsilon}, \quad (12)$$

である．

反動トルクをモデル化したため， $B$  行列の 6 行目が非零になり，水平方向への入力が見られる．そのため，水平方向の運動に対する可制御性を増すことができたのではないかと考えられる．

## 4 制御系設計

文献 [3] を基にして最適サーボ系の設計を行った．制御系設計のための重み行列は試行錯誤により以下のように設定した：

$$Q = \text{diag}[400 \ 1 \ 500 \ 100 \ 1 \ 500 \ 300 \ 500], \quad (13)$$

$$R = \text{diag}[1 \ 1]. \quad (14)$$

上記の制御系を用いて制御対象をホバリングさせた後にトラベル角  $\lambda$  を  $10[\text{deg}]$  に収束させるシミュレーションの結果と，同様の内容を実験機を使って行った結果を図 2，図 3 に示す．ただし，図 2 は反動トルクを考慮した結果，図 3 は反動トルクを考慮していない結果である．そして，図の青の実線は目標値を，緑の点線はシミュレーションの結果を，赤の破線は実験機実験の結果を表す．

図 2，図 3 を見比べると，反動トルクを考慮した場合のほうが実験とシミュレーションでの差が大きいという結果になってしまった．しかし，反動トルクを考慮した場合の実験結果はオーバーシュートを起こした後比較的すぐに目標値に収束するのに対して，反動トルクを考慮していない場合の実験結果は微妙な偏差を残したままなかなか収束しない．これは水平方向に対するモデルの正確さのおかげではないかと考えられる．

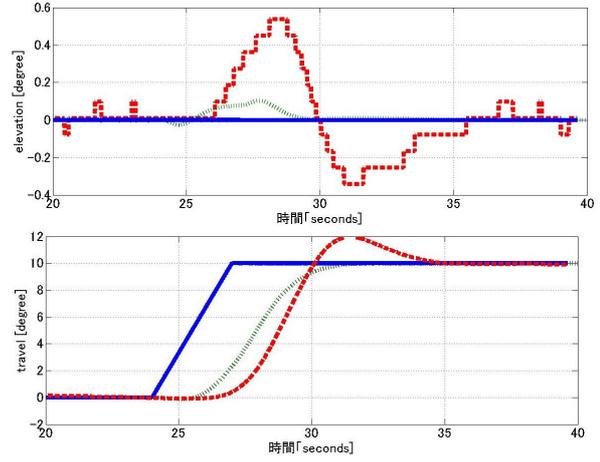


図 2 反動トルクを考慮した場合のシミュレーションと実験結果

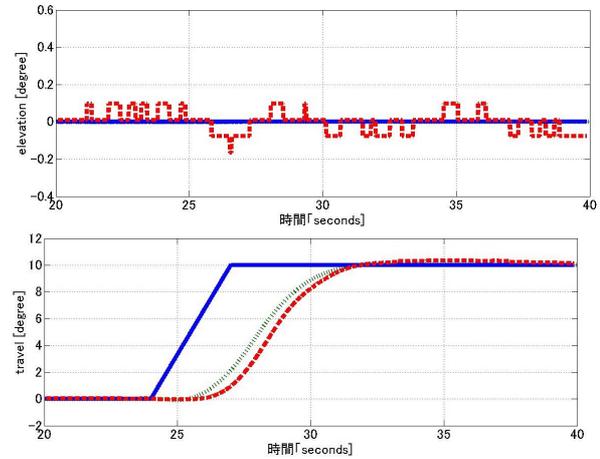


図 3 反動トルクを考慮しない場合のシミュレーションと実験結果

## 5 おわりに

本研究では反動トルクを考慮したモデル化を行い，それを考慮した制御器を設計した．その後，その制御器を用いたシミュレーションを行い，実験機実験を行った．今後の課題は反動トルクを考慮した際のシミュレーション結果と実験機実験の結果との違いを解明することである．原因としては本来線形でない反動トルクを線形化して扱ったことと，実験機に対してのパラメータ同定を行っていないことの 2 つが考えられる．

## 参考文献

- [1] 服部賢仁：「バックステッピング法に基づくツインローターヘリコプターの軌道追従制御」．南山大学 情報理工学部 卒業論文．2013．
- [2] Quaser Inc.: Quanser 3-DOF Helicopter Laboratory Manual. 2011.
- [3] 川田昌克：『MATLAB/Simulink による現代制御入門』．森北出版．東京．2011