スラスト駆動式水中回転弾性アームの
位置決め制御*川 島 豪^{*1}Position Control of a Flexible Rotating Arm
with a Thruster in Water

Takeshi KAWASHIMA

Stress is applied to an underwater manipulator driven by a DC motor by fluid forces due to the added mass and the drag. Especially, the stress at the clamped end of manipulator with the motor shaft is very large. To suppress the stress, this study proposes the manipulation of the arm driven by a thruster installed at the tip of the arm, and develops a position control system of the underwater flexible rotating arm with a thruster using the optimal control theory. A model of an underwater flexible rotating arm driven by a thruster is made and control experiments are carried out. Using this model, the performance of the developed control system is evaluated. Using experiments and computer simulations, it is clarified that the maximum stress of the arm driven by a thruster is under 20% compared to that by a DC motor.

Key Words: Positioning, Manipulator, Flexible Structure, Optimal Control, Thruster, Underwater Robot

1. 緒 言

海洋や宇宙など地球上と異なる特殊な環境で作業を行うロボットを開発する場合、その環境の特徴を生かした設計が重要な課題となる。海洋ロボットの開発では、水中における特徴である浮力による重力の減少に加え、付加質量による質量の増加、流体抗力による非線形な減衰力を考慮しなければならない。マニピュレータの位置決め一つをとっても、浮力による重力の減少によりマニピュレータの剛性を下げられるが付加質量や速度の二乗に比例する流体抗力により先端ほど大きな抵抗が作用し、一般的なモータにより回転軸を回してマニピュレータを回転させる回転軸駆動方式ではマニピュレータの根元に大きな曲げ応力を生じさせてしまう。この問題を解決する一つの方法は、巨大宇宙構造物への適用を前提に開発が進められているテンドン方式を用いることである。これはマニピュレータと平行に取付けられた細いワイヤにより回転軸上に設置されたモータのトルクをマニピュレータ先端に伝える方法で、マニピュレータに生ずる応力を抑えてマニピュレータを回転させることができる。しかし、水中で

は細いワイヤであっても大きな抵抗となったりカルマン渦の発生源と成り得る。そこで重力と釣り合った浮力を有するスラストをマニピュレータ先端付近に取付けることによりマニピュレータに生ずる応力を抑えてマニピュレータを回転させる方法を提案する。本研究ではハンド部分は考えずにマニピュレータを弾性アームとし、先端に取付けられたスラストにより駆動される水中回転弾性アームを位置決めさせるデジタル制御システムの設計手法を確立する。そして、その制御システムの有効性を模型実験および計算機シミュレーションにより確認する。

水中におけるマニピュレータ等に関する研究としては、小笠原らの気泡による流体力低減に関する研究⁽¹⁾、福田らの水中ロボットマニピュレータの運動制御に関する研究⁽²⁾、五百井らのモデリングとシミュレーションに関する研究⁽³⁾、水流による動揺外乱補償形位置・力ハイブリッド制御に関する研究⁽⁴⁾、相良らによる水中クレーンの適応制御に関する研究⁽⁵⁾、著者らの浮遊式水中アームの位置決め制御に関する研究⁽⁶⁾等がある。また、著者により回転軸駆動式による水中における回転弾性アームの位置決め制御に関する研究⁽⁷⁾、ハンドにより先端につかんだ物体の質量を推定しそれをもとに位置決め制御を行う物体を把握した水中回転弾

* 原稿受付 平成5年8月20日。

*¹ 正員, 神奈川工科大学 (〒243-02 厚木市下荻野 1030)。

性アームの位置決め制御システムに関する研究⁽⁹⁾がなされているが、スラスト駆動による水中回転弾性アームの位置決め制御に関する研究は見あたらない。

本論文では、まず弾性アームを両端単純支持はりとして運動方程式を導き、モード分離、線形化を行い最適制御理論を用いてスラスト駆動式水中回転弾性アームの位置決め制御システムの設計手法を確立する。次にスラスト模型を製作し、パーソナルコンピュータを中心に構成したデジタル制御系により位置決め制御実験を行い、開発された位置決め制御システムの有効性を確認する。そしてスラスト駆動式が回転軸駆動式に比べてどの程度アームに生ずる最大応力を軽減することができるか検討する。

2. 解析モデル

2-1 運動方程式 先端にスラストを有する水中で水平に回転する弾性アームのモデル図を図1に、アームの座標系を図2に示す。アームは両端単純支持のオイラー・ベルヌーイはりで一般的な円形断面を有する

図1 スラスト駆動式水中回転弾性アーム

図2 回転弾性アームの座標系

ものとし、スラストの重力は浮力と釣合っているものとして水平面内の運動のみを考える。またスラストの推力は先端に集中的に作用するものとし、アームのたわみによる推力方向の変化は小さいものとして無視する。以上の仮定のもとにアームの回転中心回りのモーメントの釣合い式およびアームの微小な部分に作用する力の釣合い式を導くと次のようになる。

$$\begin{aligned} & J_s \left\{ \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x \partial t^2} \right\} \Big|_{x=0} \\ & + \rho_p \int_0^L \left\{ x \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \right\} x dx \\ & + mL^2 \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \\ & + C_s \left\{ \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x \partial t} \right\} \Big|_{x=0} \\ & + \frac{C_D}{2} \rho_w d \int_0^L \left\{ x \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right\} \\ & \times \left| x \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right| x dx \\ & + \frac{C_D}{2} \rho_w SL^3 \frac{d\theta(t)}{dt} \left| \frac{d\theta(t)}{dt} \right| \\ & = LF(t) \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho_p \left\{ x \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \right\} \\ & + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + CI \frac{\partial^5 y(x, t)}{\partial x^4 \partial t} \\ & + \frac{C_D}{2} \rho_w d \left\{ x \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right\} \\ & \times \left| x \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right| \\ & + \delta(x-L) \left\{ mL \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \right. \\ & \left. + \frac{C_D}{2} \rho_w SL^2 \frac{d\theta(t)}{dt} \left| \frac{d\theta(t)}{dt} \right| \right\} \\ & = \delta(x-L) F(t) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

また境界条件は次式となる。

$$\begin{aligned} 0 &= y(0, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \\ &= y(L, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 ρ_p , L , d , C_D , EI , CI はおのこのアームの線密度、長さ、直径、流体抗力係数、剛性係数、内部減衰係数、 m , C_D , S , $F(t)$ はおのこのスラストの付加質量を含む質量、流体抗力係数、投影面積、推力、 J_s , C_s は回転軸の慣性モーメント、減衰係数であり、 ρ_w は水の密度、 $\delta(x-L)$ はデルタ関数である。

式(1)の左辺の各項は順に回転軸、アーム、スラストの慣性力によるモーメント、回転軸軸受の減衰力によるモーメント、アーム、スラストに作用する流体抗力によるモーメント、そして右辺はスラストの推力に

よるモーメントである。また、式(2)の各項は順にアームの微小な部分における慣性力、曲げによる復原力と減衰力、流体抗力、スラストの慣性力、流体抗力および推力である。

2.2 モード分離 次式で表される単純な両端単純支持はり

$$\rho_p \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

が式(3)の境界条件をもつとき、固有関数と振動数方程式は次のようになり、

$$X_i(x) = \sin(\lambda_i x/L) \dots\dots\dots (5)$$

$$0 = \sin \lambda_i \dots\dots\dots (6)$$

固有値は $\lambda_i = i\pi$ となる。

この固有関数を用いて変数 $y(x, t)$ を

$$y(x, t) = L \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) T_i(t) \dots\dots\dots (7)$$

と変数分離し、運動方程式(1)、(2)を積分変換によりモード分離する。そして、代表質量を $\rho_p L$ 、代表長さを L 、代表時間を $1/\omega_{n1}$ (ω_{n1} : 単純な両端単純支持はりにおける一次の固有振動数)として無次元化すると式(1)、(2)は次のようになる。ただし、 $\xi = x/L$ 、 $\tau = t\omega_{n1}$ とする。

$$\begin{aligned} & \left(J' + \frac{1}{3} + m' \right) \frac{d^2 \theta(\tau)}{d\tau^2} \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left(J' \lambda_i - \frac{\cos \lambda_i}{\lambda_i} \right) \frac{d^2 T_i(\tau)}{d\tau^2} \\ & + C' \left\{ \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \right\} \\ & + \frac{C_D}{2} \rho'_w d' \int_0^1 \left\{ \xi \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \sum_{i=1}^{\infty} X_i(\xi) \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \right\} \\ & \times \left| \xi \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \sum_{i=1}^{\infty} X_i(\xi) \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \right| \xi d\xi \\ & + \frac{C_D}{2} \rho'_w S' \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} \left| \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} \right| \\ & = F'_m u(\tau) \dots\dots\dots (8) \\ & - \frac{\cos \lambda_j}{\lambda_j} \frac{d^2 \theta(\tau)}{d\tau^2} + \frac{1}{2} \frac{d^2 T_j(\tau)}{d\tau^2} \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_{nj}}{\omega_{n1}} \right)^2 T_j(\tau) + \zeta_j \left(\frac{\omega_{nj}}{\omega_{n1}} \right) \frac{dT_j(\tau)}{d\tau} \\ & + \frac{C_D}{2} \rho'_w d' \int_0^1 \left\{ \xi \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \sum_{i=1}^{\infty} X_i(\xi) \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \right\} \\ & \times \left| \xi \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \sum_{i=1}^{\infty} X_i(\xi) \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \right| X_j(\xi) d\xi \\ & = 0 \quad (j=1, 2, \dots) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで、

$$C' = C_s / (\rho_p L^3 \omega_{n1}),$$

$$d' = d/L,$$

$$F'_m = F_{\max} / (\rho_p L^2 \omega_{n1}^2),$$

$F_{\max}$: スラストの最大推力、

$$J' = J_s / (\rho_p L^3),$$

$$m' = m / (\rho_p L),$$

$$S' = S/L^2,$$

$$u(\tau) = F(t)/F_{\max}: \text{制御入力},$$

$\zeta_i = C I \lambda_i^4 / (2 \omega_{ni} \rho_p L^4)$: 単純な両端単純支持はりにおける i 次の内部減衰比、

$$\rho'_w = \rho_w L^2 / \rho_p,$$

$\omega_{ni} = \{EI \lambda_i^4 / (\rho_p L^4)\}^{1/2}$: 単純な両端単純支持はりにおける i 次の固有振動数である。

3. 最適制御則

3.1 線形状態方程式 導かれた運動方程式には速度の二乗に比例する流体抗力の項が含まれており、最適制御理論を適用するためには線形化が必要となる。流体抗力の線形化は目標値付近の制御性能に注目して行われるべきことが過去の研究⁽⁷⁾により明らかにされている。そこで円柱形であるアームの流体抗力は、レイノルズ数の小さな範囲で有効なオゼン近似を行いさらに対数項を省略して得られた次の係数を用いて線形化する。

$$C_D = 8\pi / (2.002 Re) \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 Re はレイノルズ数である。

またスラストは短い円筒の両端に半球が取り付けられた形をしていると考え、球の流体抗力係数を用いることにする。そこでスラストの流体抗力は、レイノルズ数の小さな範囲で有効なストークス近似により求められた次の係数を用いて線形化する。

$$C_D = 24/Re \dots\dots\dots (11)$$

回転弾性アームのモデル誤差を小さくするにはモードの打ち切り次数を大きくすればよいのであるが、必要なセンサの数が多くなるなど実用的でなくなる。さらに、水中では速度の二乗に比例する流体抗力により高次モードの減衰は大きく、アームは先端程速度が大きくなり大きな抗力を受けて変形が大きくなる。そこで本研究では、はりの弾性変形を固有振動数が最も小さく、先端ほどたわみが大きくなる一次モードのみで表せるものとして制御システムを構築する。

はりのモードを一次の有限な項で打ち切り、状態ベクトルを

$$\{x(\tau)\} = \{\theta(\tau), T_1(\tau), d\theta(\tau)/d\tau, dT_1(\tau)/d\tau\}^T \dots\dots\dots (12)$$

と選ぶことにより、線形モデルは次のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} & [M'] d\{x(\tau)\}/d\tau \\ & = [A'] \{x(\tau)\} + \{B'\} u(\tau) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
M'_{11} &= 1, M'_{22} = 1, \\
M'_{33} &= J' + 1/3 + m', M'_{34} = J' \pi + 1/\pi, \\
M'_{43} &= 1/\pi, M'_{44} = 1/2, \\
A'_{13} &= 1, A'_{24} = 1, \\
A'_{33} &= -C' - C_f/3 - C'_f, \\
A'_{34} &= -C' \pi - C_f/\pi, \\
A'_{42} &= -1/2, \\
A'_{43} &= -C_f/\pi, A'_{44} = -\zeta_1 - C_f/2, \\
B'_3 &= F'_m, \\
C_f &= 4\pi\nu\rho_w/(2.002\rho_p\omega_{n1}), \\
C'_f &= 3\pi\nu\rho_w D/(\rho_p L\omega_{n1}),
\end{aligned}$$

(ν : 流体の動粘性係数, D : スラストの直径)

そのほかの要素は零である。

さらに, 式(13)の左から $[M']^{-1}$ を両辺にかけることにより次の線形状態方程式が導かれる。

$$d\{x(\tau)\}/d\tau = [A]\{x(\tau)\} + \{B\}u(\tau) \quad \cdots \cdots (14)$$

ただし,

$$[A] = [M']^{-1}[A'], \{B\} = [M']^{-1}\{B'\}$$

である。

また, システムの状態は図1に示すように回転軸に取付けられたロータリエンコーダおよびアームの中央付近 ($x_c = L\xi_c$) に貼られたひずみゲージにより測定される。回転軸の角度 $\theta_0(\tau)$, アーム中央付近でのひずみ $\varepsilon(\tau)$ と状態変数 $\theta(\tau)$ および $T_1(\tau)$ との関係は内部減衰による影響が小さいとすると次のようになる。

$$\theta_0(\tau) = \theta(\tau) + \pi T_1(\tau) \quad \cdots \cdots (15)$$

$$\varepsilon(\tau) = 0.5d'\pi^2 \sin(\pi\xi_c) T_1(\tau) \quad \cdots \cdots (16)$$

したがって, 出力を

$$\{y(\tau)\} = \{\theta_0(\tau), \varepsilon(\tau)\}^T \quad \cdots \cdots (17)$$

とすると次の出力方程式が得られる。

$$\{y(\tau)\} = [C]\{x(\tau)\} \quad \cdots \cdots (18)$$

ただし各要素は,

$$\begin{aligned}
C_{11} &= 1, C_{12} = \pi, C_{13} = 0, C_{14} = 0, \\
C_{21} &= 0, C_{22} = 0.5d'\pi^2 \sin(\pi\xi_c), \\
C_{23} &= 0, C_{24} = 0
\end{aligned}$$

である。

次に, デジタル制御を行わせるため, 式(14)の状態方程式および式(18)の出力方程式をサンプリング周期 T の間はスラストへの入力が一一定であるという条件のもとに離散化近似すると次のようになる。

$$\{x\}_{k+1} = [\Phi]\{x\}_k + \{\Gamma\}u_k \quad \cdots \cdots (19)$$

$$\{y\}_{k+1} = [C]\{x\}_{k+1} \quad \cdots \cdots (20)$$

ここで,

$$[\Phi] = \exp([A]T),$$

$$\{\Gamma\} = \int_0^T \exp([A]\tau) d\tau \{B\}$$

である。

3.2 状態フィードバック 本研究では, 目標位置からの二乗誤差をアーム全体にわたって積分した量を目的関数とし, アームの曲げ応力をアーム全体にわたって積分した量とスラストの推力を制御の制約条件とする次の二次形式評価関数を用いる。

$$\begin{aligned}
J = \int_0^\infty & \left[\alpha \int_0^1 \{ \xi \theta(\tau) + \sin(\pi\xi) T_1(\tau) \}^2 d\xi \right. \\
& + \beta \int_0^1 \left\{ \frac{d'E}{2\rho_p\omega_{n1}^2} \pi^2 \sin(\pi\xi) T_1(\tau) \right. \\
& + \left. \frac{d'C}{2\rho_p\omega_{n1}} \pi^2 \sin(\pi\xi) \frac{dT_1(\tau)}{d\tau} \right\}^2 d\xi \\
& \left. + Ru(\tau)^2 \right] d\tau \quad \cdots \cdots (21)
\end{aligned}$$

ここで, α, β, R は評価関数の重みである。この評価関数を式(12)の状態ベクトルを用いて書き直し, 離散化すると次のようにまとめられる。

$$J = \sum_{k=0}^\infty (\{x\}_k^T [Q] \{x\}_k + Ru_k^2) \quad \cdots \cdots (22)$$

ただし行列 $[Q]$ の各要素は,

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \alpha/3, Q_{12} = Q_{21} = \alpha/\pi, \\
Q_{22} &= \alpha/2 + \beta \{ (d'\pi^2/2) E / (\rho_p\omega_{n1}^2) \}^2 / 2, \\
Q_{24} &= Q_{42} = \beta \{ (d'\pi^2/2) E / (\rho_p\omega_{n1}^2) \} \\
& \quad \times \{ (d'\pi^2/2) C / (\rho_p\omega_{n1}) \} / 2, \\
Q_{44} &= \beta \{ (d'\pi^2/2) C / (\rho_p\omega_{n1}) \}^2 / 2,
\end{aligned}$$

そのほかの要素は零である。

この評価関数を最小にする線形状態フィードバックは, 状態量 $\{x\}_{k+1}$ の推定値を $\{\hat{x}\}_{k+1}$ とすると次式で与えられる。

$$u_{k+1} = -\{F\}\{\hat{x}\}_{k+1} \quad \cdots \cdots (23)$$

また, この式に含まれているフィードバックゲイン $\{F\}$ は, リカッチ方程式

$$\begin{aligned}
[S] &= [Q] + [\Phi]^T [S] [\Phi] - [\Phi]^T [S] [\Gamma] \\
& \quad \times (R + \{\Gamma\}^T [S] \{\Gamma\})^{-1} \{\Gamma\}^T [S] [\Phi] \quad \cdots \cdots (24)
\end{aligned}$$

の解 $[S]$ を用いて次のように得られる。

$$\begin{aligned}
\{F\} &= (R + \{\Gamma\}^T [S] \{\Gamma\})^{-1} \{\Gamma\}^T [S] [\Phi] \\
& \quad \cdots \cdots (25)
\end{aligned}$$

3.3 オブザーバ 本研究では観測される出力から状態量を推定するのにカルマンフィルタを用いる。カルマンフィルタによる状態量の推定値 $\{\hat{x}\}_{k+1}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
\{\hat{x}\}_{k+1} &= [\Phi]\{\hat{x}\}_k + \{\Gamma\}u_k \\
& \quad + [K](\{y\}_k - [C]\{\hat{x}\}_k) \quad \cdots \cdots (26)
\end{aligned}$$

この式に含まれているフィルタのゲイン $[K]$ は, システムノイズの分散行列を $[V]$ (半正定対角行列), 観測ノイズの分散行列を $[W]$ (正定対角行列) とするリカッチ方程式

$$[\Sigma] = [V] + [\Phi][\Sigma][\Phi]^T - [\Phi][\Sigma][C]^T \\ \times ([W] + [C][\Sigma][C]^T)^{-1} [C][\Sigma][\Phi]^T \dots (27)$$

の解 $[\Sigma]$ を用いて次のように得られる。

$$[K] = [\Phi][\Sigma][C]^T ([W] + [C][\Sigma][C]^T)^{-1} \dots (28)$$

したがって、式(25)のフィードバックゲイン、式(28)のカルマンフィルタのゲインを計算し、式(26)の状態量の推定および式(23)の状態フィードバックを実現するデジタル制御系を構成することによりスラスト駆動式水中回転弾性アームの位置決め制御システムを構築することができる。

4. 制 御 実 験

4.1 実験方法 開発された制御システムの有効性を確認するため、図3に示す実験装置を製作し、制御実験を行った。図4に示すスラストは直径50 mm、長さ200 mmで互いに逆向きに配置したスクリー2基をおのおの減速比4:1の遊星ギアを介して2台のDCモータ(マブチ、RS-380PH)により駆動するもので、最大 ± 8 Nの推力を発生する。先端にスラストが取り付けられたアームは長さ825 mm、外径19 mm、内径17 mmのアルミニウム製パイプで、回転軸下端に水平に回転するように固定されている。アームには水平面内のアームの変形が検出できるよう回転中心から416 mmのところにはひずみゲージが貼られている。回転軸はジュラルミン製で架台の軸受で支えられ、上端がロータリエンコーダと連結されている($J_s = 3.42 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$)。そしてこのスラスト駆動式回転弾性アーム模型が、直径2 m、深さ80 cmの水槽に沈められている。

ディジタル制御系は、パーソナルコンピュータ(NEC, PC-9801DA)に内蔵されたA/D変換器、アップダウンカウンタにより動ひずみ計で変換されたひずみ信号およびロータリエンコーダからの角度信号がコンピュータに取込まれ、内蔵のD/A変換器によりコンピュータで処理された制御信号がスラスト用電流増幅型パワーアンプへ出力されるよう構成されている。

まずアームのヤング率 E を決定するために、アームの両端を単純支持し中央をばねばかりで水平に引張りながらアーム中央に生ずるひずみを測定した。いろいろな荷重で測定した結果、ヤング率は $E = 6.33 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と求められた。

次に回転軸の減衰係数 C_s を決定するために、回転軸に巻付けられたワイヤをばねばかりを介して一定の力で引張り、そのときの回転数をロータリエンコーダにより測定した。いろいろな力で引張り測定した結果、

図3 実験装置概略図

図4 スラスト模型

$C_s = 1.40 \times 10^{-2} \text{ Nms}$ と求められた。

制御実験は、まず式(25)によりフィードバックゲインおよび式(28)によりカルマンフィルタのゲインを計算し、サンプリング周期5 msで出力を観測して式(26)により状態量を推定し式(23)により状態フィードバックを行い、その値に基づいてスラストを駆動することによりアームが目標位置に位置決めされるようプログラミングされた制御プログラムにより行われた。

4.2 実験結果 評価関数の重み、カルマンフィルタのシステムノイズや観測ノイズの分散をいろいろと変えて実験を行った。最も速やかにアームが目標位置に収束した場合の結果を図5に示す。横軸が時間 t 、縦軸がアームの回転角 $\theta(t)$ 、アームのたわみ $T_1(t)$ 、スラストの推力 $F(t)$ であり、初期角度90度から零度にアームを位置決めさせた場合である。このときの評価関数の重みは $\alpha = 10^2$ 、 $\beta = 10^{-6}$ 、 $R = 1$ であり、カルマンフィルタのシステムノイズの分散は $V_{11} = V_{22} = V_{33} = V_{44} = 10^{-2}$ 、観測ノイズの分散は $W_{11} = 1$ 、 $W_{22} = 500$ である。この図より、水中回転弾性アームはスラストの最大推力で加速され、その後目標値付近できめ細かな推力制御を受けて1.3秒程度でスピルオーバーもなく目標位置に収束しており、流体抗力の線形化、高次モードの打ち切り等の近似の妥当性および開発された制御システムの有効性が確認できる。

図5 制御実験結果

図6 シミュレーション結果(スラスト駆動式)

5. 検 討

スラスト駆動式によりどの程度アームに生ずる最大曲げ応力が軽減されたか検討する。

5・1 実験結果の比較 回転軸駆動式の場合、著者がほぼ同じアームで制御実験を行った結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾をもとにアームに生ずる最大曲げ応力を推定する。文献(7)の図5、文献(8)の図6の先端物体を有していないアームの制御実験結果よりアーム先端でのたわみの最大値が $y_{\max}=0.041\text{ m}$ と読取れる。したがってアーム根元に生ずる最大曲げ応力は $\sigma_{\max}=1.4\times 10^8\text{ N/m}^2$ と計算できる。ただしアームが0.6秒程度で目標値に収束する場合の結果である。そこで最大たわみはアームの回転速度がほぼ一定のときに生じていることに注目し、流体抗力がたわみの主な原因であると考え、最大曲げ応力を収束時間の比の二乗で補正することにする。その結果、アームが約1.3秒で収束する場合の最大曲げ応力は $\sigma_{\max}=3.0\times 10^7\text{ N/m}^2$ と求められる。

一方スラスト駆動式の場合、図5の制御実験結果より最大たわみが $T_{1\max}=5.0\times 10^{-4}$ と読取れるのでアーム中央に生ずる最大曲げ応力は $\sigma_{\max}=3.6\times 10^6\text{ N/m}^2$ と計算できる。したがって、回転軸駆動式に比べスラスト駆動式の最大曲げ応力は12%程度に軽減されていることがわかる。

5・2 シミュレーションによる比較 図5の制御実験を計算機シミュレーションした結果を図6に示す。このシミュレーションではアームの弾性は5次モードまで考慮されている。図6中のアームのたわみ $T_1(t)$ は制御実験と同じように5次モードまで考慮して計算されたたわみから1次モードのみでたわんでいると仮定して求められたたわみである。シミュレーション結果は、制御開始後急に最大推力が作用したためたわみ $T_1(t)$ に若干の振動がみられるほかは実験結果とほぼ一致している。制御実験においてたわみにこの振動がみられなかったのはスラストの動特性(サンプリング周期に比べれば無視できる程度)により推力が

図7 シミュレーション結果(回転軸駆動式)

滑らかに作用したためと考えられる。この結果より最大たわみが $T_{\max}=5.0 \times 10^{-4}$ と読取れるのでアーム中央に生ずる最大曲げ応力は $\sigma_{\max}=3.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ と計算できる。

一方、回転軸駆動式により同じアームをスラスト駆動式とほぼ同じ制御時間 1.2 s で位置決めさせた場合の計算機シミュレーション結果を図7に示す。横軸が時間 t 、縦軸がそれぞれアームの回転角 $\theta(t)$ 、アーム先端でのたわみ $y(t)$ 、DC モータのトルク $T(t)$ であり、アームの弾性は5次モードまで考慮されている。この結果よりアーム先端での最大たわみが $y_{\max}=6.1 \times$

10^{-3} m と読取れるのでアーム根元に生ずる最大曲げ応力は $\sigma_{\max}=1.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ と計算できる。したがって、スラスト駆動式のアームに生ずる最大曲げ応力は回転軸駆動式に比べ 19% 程度に軽減されていることがわかる。

以上の結果より、水中回転弾性アームをスラスト駆動式にすることによりアームに生ずる最大曲げ応力を回転軸駆動式に比べ 20% 以下に軽減できることが確認された。さらにアーム先端に物体が把握された場合には、スラスト駆動式では先端に把握された物体とスラストの位置が近いのでアームに生ずる曲げ応力はほとんど変化しないが、回転軸駆動式の場合には先端物体に作用する慣性力や流体抗力によるモーメントによりアーム根元にさらに大きな曲げ応力が生じることになり、この面からもスラスト駆動式の曲げ応力に関する優越性が窺える。

6. 結 言

水中回転アームにおいて、一般的なモータにより回転軸を回してアームを駆動させる方式ではアーム根元に大きな曲げ応力が生じてしまう。本研究ではこの問題点を解決するために、アーム先端付近に取付けられたスラストによる水中回転アームの駆動を提案し、スラスト駆動式水中回転弾性アームを速やかに位置決めさせるデジタル制御システムの設計手法を確立した。そして模型実験を行い、開発されたシステムの有効性を確認した。また制御実験および計算機シミュレーションにより、スラスト駆動式の場合、アームに生ずる最大曲げ応力を収束時間がほぼ同じ回転軸駆動式の場合の 20% 以下に抑えられることを確認した。

文 献

- (1) 小笠原・原, 機論, 54-503, C(1988), 1504.
- (2) 福田・原, 機論, 54-507, C(1988), 2702.
- (3) 五百井・伊藤, 日本ロボット学会誌, 6-2(1988), 72.
- (4) 五百井・石見・伊藤, 日本ロボット学会誌, 7-4(1989), 31.
- (5) 相良・大川, 機論, 56-526, C(1990), 1494.
- (6) 川島・下郷, 機論, 58-552, C(1992), 2586.
- (7) 川島, 機論, 56-529, C(1990), 2421.
- (8) 川島, 機論, 59-562, C(1993), 1771.