スラストの動特性を考慮した
中立浮力式水中アームの位置決め制御*川 島 豪^{*1}Positioning of Floating Arm in Water
Considering Thruster Dynamics

Takeshi KAWASHIMA

For a small underwater robot floating in water, arm positioning requires cooperation between arm actuators and thrusters installed on the body for mobility and attitude control, because the robot can be moved by fluid drag force and inertial force acting on the arm. The body of an underwater robot is approximately spherical. The thrusters require high power due to weak resistance to body rotation, and rapid positioning also requires high power. When the thrusters become powerful, the dynamics cannot be ignored. In this study, the thruster dynamics is investigated, a thruster model is proposed, and the arm positioning system of the underwater robot floating in water is developed based on the optimal control theory considering the thruster dynamics. Then a linearization method appropriate to the optimal control is examined by computer simulations. The performance of the developed control system is confirmed with the experimental models.

Key Words: Ocean Engineering, Manipulator, Positioning, Motion Control, Optimal Control, Underwater Robot, Neutral Buoyancy, Thruster Dynamics

1. は じ め に

海洋開発の進展に伴い人間の入り込むことが難しい海洋での環境や資源の調査、海洋構造物の設置や補修のために浮力を利用した中立浮力式の水中ロボットの利用が考えられている。しかし中立浮力式水中ロボットの場合、浮遊しているので行動範囲は広いが作業用のマニピュレータを速く動かすとその反力によりロボット自身が動いてしまい、マニピュレータのアクチュエータのみではマニピュレータの正確な位置決めができないという問題がある。特に比較的小形の水中ロボットでは、マニピュレータに働く非線形な流体抗力や慣性力などのためにロボット本体が大きく動いてしまう。そこで著者らは、マニピュレータを動かすアクチュエータと本体の移動や姿勢制御に用いるスラストを同時に制御して正確で速やかなマニピュレータの位置決めを行う制御システムを最適制御理論を用いて開発した⁽¹⁾。しかし本体の形状が球形に近い場合は、回転に対する抵抗が少なく大きなスラスト推力を必要とする。また、さらに速やかな位置決めを目指す場合にも大きなスラスト推力が必要となる。スラストが大きく

なるとスラストの動特性が無視できなくなる。そこで本研究では、スラストの動特性を調べ、スラストモデルを構築し、スラストの動特性を考慮した中立浮力式水中アームの位置決め制御システムを最適制御理論を用いて開発する。そして計算機シミュレーションにより最適制御理論に適したスラストモデルの線形化手法を明らかにし、模型による制御実験により制御システムの有効性を確認する。

中立浮力式水中ロボットの研究に関しては、移動や運動の制御に関する研究は多くあるが、マニピュレータの制御に関する研究は、小菅らの水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御に関する研究⁽²⁾、著者らのロボット周囲の流れを抑えるためスラストの代わりにカウンタアームとリアクションホイールを用いた中立浮力式水中ロボットのマニピュレータの制御に関する研究⁽³⁾ などがある程度である。

2. スラストの特性

2・1 特性実験 図1にスラストの静特性および動特性を調べるための実験装置の概略図を示す。スラストが1基装備された水中ロボット模型の一部がビーム力計(定格荷重:2 kgf)に固定され、重力と浮力が釣り合う位置に沈められている。スラストは、両端に

* 原稿受付 1994 年 9 月 26 日。

*1 正員, 神奈川工科大学 (〒243-02 厚木市下荻野 1030)。

図1 スラスト特性実験用装置概略図

図3 スクリュー角速度 ω とスラスト推力 F の関係 図2 スクリュー角速度 ω と入力電流 i の関係 図4 入力電流 i とスラスト推力 F の関係

ラジコンボート用のスクリーンが取り付けられたシャフトをベベルギアを介してタコジェネ付DCモータ(maxon: 20 W コアレスモータ)により駆動する構造である。スラストはD/Aコンバータ、電流増幅アンプを介してパーソナルコンピュータ(NEC, PC 9801 DA)により駆動される。動ひずみ計で変換された力計からの信号とタコジェネからの信号はA/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに集められる。

実験は静止しているスラストに電流をステップ状に加え、1秒前から3秒後までのモータ角速度とスラスト推力を0.2 msごとに計測することで行った。この測定をいろいろな電流値について行い、静特性および動特性を調べた。また、スラストが作動している状態から電流をステップ状に変化させる実験も行った。

2・2 静特性 本装置の静止状態からのステップ応答は、実験結果より0.2秒程度で安定することが明らかになった。そこでスラストの静特性を求めるため、定常状態とみなせる1秒後から3秒後までのモータ角速度とスラスト推力のデータを平均し、入力電流とスクリーン角速度、スラスト推力の関係をまとめた。

図2にスクリーン角速度 ω と入力電流 i の関係を○印で示す。この図よりスクリーン角速度 ω と入力電流 i の関係は次の二次式で表せることがわかる。

$$K_T(i - i_0) = C_T |\omega| \omega \quad (1)$$

ここで、 K_T はモータのトルク定数、 i_0 はモータの無負荷電流に駆動系の摩擦の影響を加えたスラストの無負荷電流であり、 C_T はスクリーンの抗力係数と考えることができる。 K_T は一般に既知であるので最小二乗法により係数 C_T と i_0 を決定することができる。最小二乗法により得られた関係を図2に実線で示す。

図3にスクリーン角速度 ω とスラスト推力 F の関係を○印で示す。この図よりスクリーン角速度 ω とスラスト推力 F の関係は次の二次式で表せることがわかる。

$$F = A_s |\omega| \omega \quad (2)$$

流速がスクリーンの角速度に比例すると考えれば、この式は運動量の法則より導かれるスクリーンの推力と通過する流れの関係式に対応する。係数 A_s は最小二

乗法により決定することができる。最小二乗法により得られた関係を図3に実線で示す。

図4に入力電流 i とスラスト推力 F の関係を○印で示す。この図および上記の関係より入力電流 i とスラスト推力 F の関係は次の二次式で表せることがわかる。

$$F = A_s K_T / C_T \cdot (i - i_0) \quad \cdots \cdots (3)$$

係数 $A_s K_T / C_T$ および i_0 は最小二乗法により決定することができる。図4に最小二乗法により得られた関係を実線で、上で得られた式(1)、(2)の係数より計算された関係を破線で示す。両者はよく一致しており、各関係式の信頼性が確認できる。

2・3 動特性 スラストの動特性モデルとして、式(1)に駆動系の慣性モーメントおよびスクリー周りの付加質量による慣性項を付加した次式を提案する。

$$I \frac{d\omega}{dt} + C_T |\omega| \omega = K_T \{i - i_0 \operatorname{sgn}(\omega)\} \quad \cdots \cdots (4\cdot a)$$

$$F = A_s |\omega| \omega \quad \cdots \cdots (4\cdot b)$$

ここで、 I は慣性モーメントに相当する係数、 t は時間であり、 $\operatorname{sgn}()$ は符号関数である。係数 C_T , K_T , i_0 , A_s は静特性より求められているので I のみが未知である。そこで係数 I を決定するため、式(4・a)のステップ応答を考える。初期条件を静止状態として式(4・a)のステップ応答を導くと次式となる。

$$\omega = \omega_s \tanh(t/\tau) \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、

$$\omega_s = \{K_T(i - i_0)/C_T\}^{1/2},$$

$$\tau = I/\{K_T(i - i_0)C_T\}^{1/2}$$

であり、 ω_s は定常状態におけるスクリー角速度、 τ は時定数に相当する係数である。したがって、スクリー角速度 ω が $\omega_s \tanh(1) = 0.7616\omega_s$ となるまでの立上がり時間 τ を求めることにより係数 I を決定できる。このようにして求められた係数 I の入力電流 i

に対する変化を表1に示す。係数 I は入力電流 i に関係なくほぼ一定であり、本手法の妥当性が確認できる。

以上の手順によりスラストの動特性モデルを決定することができる。確認のため、図5、6にスクリー角速度 ω のステップ応答と逆転させたときの応答の測定値(太線)および動特性モデルによる計算値(細線)例を示す。計算値が測定値の中にうもれ、両者が非常によく一致していることがわかる。また、図7、8にスラスト推力 F のステップ応答と逆転させたときの応答の測定値(太線)および動特性モデルによる計算値(細線)例を示す。実験装置の剛性不足のため測定値が振動しているが、その平均値は計算値とほぼ一致している。これらの図より動特性モデル式(4・a)、(4・b)は実験結果をよく表していることがわかる。ただし、図8において推力の非常に小さいところで実験値が直線的に変化しているのに対し、計算値は曲線状に変化している。これは、推力が非常に小さい場合、スクリー角速度 ω と推力 F の関係[式(2)、式(4・b)]が流体抗力のように二乗の関係から線形の関係へと変化しているためと推測できる。しかし、このことは推力の非常に小さいところでの問題であり、制御系の設計においては無視できるものと考えられる。

2・4 線形化 最適制御理論によりスラストの動

図5 スクリュー角速度 ω のステップ応答

図6 スクリュー角速度 ω の応答(+→-)

表1 入力電流 i と係数 I の関係

i (A)	I ($\times 10^{-6} \text{ kg m}^2$)
0. 3 1	1. 5 5 9
0. 4 6	1. 4 9 0
0. 6 2	1. 5 0 0
0. 7 7	1. 5 0 1
0. 9 2	1. 4 7 2
1. 0 7	1. 4 5 4
1. 2 3	1. 4 2 5
1. 3 8	1. 4 4 8
1. 5 2	1. 4 1 0
Average	1. 4 7 3

図7 スラスト推力 F のステップ応答 図8 スラスト推力 F の応答(+→-)

特性を考慮した制御系の設計を行うには動特性モデルを線形化する必要がある。式(4・a), (4・b)の動特性モデルにおけるスクリュウ角速度 ω の二乗の項および符号関数の項が非線形である。そこで線形化係数 α を導入し、式(4・a), (4・b)を次のように線形化する。

$$I \frac{d\omega}{dt} + C_{T\alpha}\omega = K_T i' \quad \dots\dots\dots (6\cdot a)$$

$$F = A_s \alpha \omega \quad \dots\dots\dots (6\cdot b)$$

ただし、 $i' = i - i_0 \operatorname{sgn}(\omega)$ とする。実際の制御では、状態フィードバックにより i' を計算し、スラストへ出力するときに i に補正するものとする。

線形化係数 α はスクリュウ角速度に相当する係数である。角速度 α におけるスラスト推力 F_c を導入すると、 $\alpha = (F_c/A_s)^{1/2}$ と整理できる。そこで、3章で説明するスラストの動特性を考慮した中立浮力式水中アームの非線形運動方程式をルンゲ・クッタ法により解いてアーム位置決めシミュレーションを行い、最適制御に適した係数 F_c を調べた。その結果、 F_c を大きくすると収束が遅く、小さくしていくに従い収束は速くなるが制御入力である電流の変化が激しくなることが明らかになった。そこで、入力が穏やかに変化しかつ速やかにアームを収束させることを目的に $F_c = F_{\max}/2$ ($F_{\max}$: スラストの最大推力)、すなわち $\alpha = (F_{\max}/2/A_s)^{1/2}$ と設定する。

図9 中立浮力式水中アームモデル

3. 制御系の設計

3・1 状態方程式 水平面内の運動のみを考えた1リンク形の中立浮力式水中アームのモデル図を図9に示す。文献(1)に従い、本体とアームの密度は流体と同じとし、アームに作用する軸方向の流体力は小さいものとして線形状態方程式を導く。

まず、独立変数を本体の中心位置 X, Y 、本体中心の回転角 θ 、本体とアームの相対角 ϕ とし、アクチュエータに向かって左側、後ろ側、右側のスラスト推力を F_L, F_T, F_R 、アクチュエータのトルクを N とし、 x および y 方向の力の釣合い、本体およびアームのモーメントの釣合いより中立浮力式水中アームの運動方程式を導く。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、幾何学的な非線形項そして遠心力等の非線形項が含まれているので最適制御理論を適用するため線形化する。流体抗力は、目標値付近の制御に注目してレイノルズ数の小さな範囲で有効なオゼーン近似を行い、さらに対数項を省略することにより線形化する。また、幾何学的な非線形項や遠心力等の非線形項に関しては、各変数を目標値からの微小な変動 $\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta, \Delta \phi$ を用いて

$$X = X_0 + \Delta X, \quad Y = Y_0 + \Delta Y,$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta \theta, \quad \phi = \phi_0 + \Delta \phi$$

と表し、制御入力 F_L, F_T, F_R, N を微小として2次以上の微小項を省略することにより線形化する。

そして最適制御理論を適用するため、各スラストの角速度 $\omega_L, \omega_T, \omega_R$ を加えて状態ベクトルを

$$\{x\} = \{\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta, \Delta \phi,$$

$$\frac{d\Delta X}{dt}, \frac{d\Delta Y}{dt}, \frac{d\Delta \theta}{dt}, \frac{d\Delta \phi}{dt}, \omega_L, \omega_T, \omega_R\}^T$$

制御入力を

$$\{u\} = \{u_L, u_T, u_R, u_1\}^T$$

$$=\{i_L/i_{L\max}, i_T/i_{T\max}, i_R/i_{R\max}, N/N_{\max}\}^T$$

と選ぶ。ここで、 $i_{L\max}$, $i_{T\max}$, $i_{R\max}$ は各スラストへの最大入力電流, $N_{\max}$ はアームアクチュエータの最大トルクである。

線形化された運動方程式および各スラストの動特性を表す式(6・a), (6・b)をまとめると次式となる。

$$[M]\frac{d\{x\}}{dt}=[A]\{x\}+[B]\{u\} \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここで,

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_{22} = M_{33} = M_{44} = 1, \\ M_{55} &= m_0 + m_a + m'_a \sin^2(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{56} &= -m'_a \sin(\theta_0 + \phi_0) \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{57} &= -m_a(R \sin \theta_0 + a \sin(\theta_0 + \phi_0)) \\ &\quad - m'_a \sin(\theta_0 + \phi_0)(R \cos \phi_0 + a), \\ M_{58} &= -(m_a + m'_a)a \sin(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{65} &= -m'_a \sin(\theta_0 + \phi_0) \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{66} &= m_0 + m_a + m'_a \cos^2(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{67} &= m_a(R \cos \theta_0 + a \cos(\theta_0 + \phi_0)) \\ &\quad + m'_a \cos(\theta_0 + \phi_0)(R \cos \phi_0 + a), \\ M_{68} &= (m_a + m'_a)a \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{75} &= m_0 R \sin \theta_0, \quad M_{76} = -m_0 R \cos \theta_0, \\ M_{77} &= I_0, \quad M_{78} = -I_M, \\ M_{85} &= m_0 a \sin(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{86} &= -m_0 a \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ M_{87} &= I_a, \quad M_{88} = I_a + I_M, \\ M_{99} &= I_L, \quad M_{1010} = I_T, \quad M_{1111} = I_R, \\ A_{15} &= A_{26} = A_{37} = A_{48} = 1, \\ A_{55} &= -C_{Db} - C_{Da} \sin^2(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{56} &= C_{Da} \sin(\theta_0 + \phi_0) \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{57} &= C_{Da}\{R \cos \phi_0 + (a+b)/2\} \sin(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{58} &= C_{Da}(a+b)/2 \cdot \sin(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{65} &= C_{Da} \sin(\theta_0 + \phi_0) \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{66} &= -C_{Db} - C_{Da} \cos^2(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{67} &= -C_{Da}\{R \cos \phi_0 + (a+b)/2\} \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{68} &= -C_{Da}(a+b)/2 \cdot \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{75} &= -C_{Db} R \sin \theta_0, \quad A_{76} = C_{Db} R \cos \theta_0, \\ A_{78} &= D_M, \\ A_{85} &= -\{C_{Db}a - C_{Da}(b-a)/2\} \sin(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{86} &= \{C_{Db}a - C_{Da}(b-a)/2\} \cos(\theta_0 + \phi_0), \\ A_{87} &= -C_{Da}\{R(b-a)/2 \cdot \cos \phi_0 \\ &\quad + (a+b)(2b-a)/6\}, \\ A_{88} &= -D_M - C_{Da}(a+b)(2b-a)/6, \\ A_{59} &= -A_{sL}\alpha_L \cos \theta_0, \quad A_{510} = A_{sT}\alpha_T \sin \theta_0, \\ A_{511} &= A_{sR}\alpha_R \cos \theta_0, \quad A_{69} = -A_{sL}\alpha_L \sin \theta_0, \\ A_{610} &= -A_{sT}\alpha_T \cos \theta_0, \quad A_{611} = A_{sR}\alpha_R \sin \theta_0, \\ A_{79} &= RA_{sL}\alpha_L, \quad A_{710} = 2RA_{sT}\alpha_T, \end{aligned}$$

$$A_{711} = RA_{sR}\alpha_R, \quad A_{89} = -aA_{sL}\alpha_L \sin \phi_0,$$

$$A_{810} = aA_{sT}\alpha_T \cos \phi_0,$$

$$A_{811} = aA_{sR}\alpha_R \sin \phi_0, \quad A_{99} = -C_{TL}\alpha_L,$$

$$A_{1010} = -C_{TT}\alpha_T, \quad A_{1111} = -C_{TR}\alpha_R,$$

$$B_{74} = -N_{\max}, \quad B_{84} = N_{\max}, \quad B_{91} = K_T i'_{L\max},$$

$$B_{102} = K_T i'_{T\max}, \quad B_{113} = K_T i'_{R\max},$$

A_{sL} , A_{sT} , A_{sR} : 各スラストの推力係数

a : アームの回転中心から重心までの距離

B : 本体の厚さ

b : アームの重心から先端までの距離

$$C_{Da} = (4\pi/2.002)\rho_w \nu(a+b)$$

$$C_{Db} = (4\pi/2.002)\rho_w \nu B$$

C_{TL} , C_{TT} , C_{TR} : 各スラストにおける抗力係数

D_M : アーム駆動系の減衰係数

I_0 : 本体の重心をとる鉛直軸まわりの慣性モーメント

I_a : 付加質量を含むアームの重心をとる鉛直軸まわりの慣性モーメント

I_L , I_T , I_R : 各スラストにおける駆動系の慣性モーメントに相当する係数

I_M : アーム駆動系の等価慣性モーメント

K_T : スラスト用モータのトルク定数

m_0 : 付加質量を含む本体の質量

m_a : アームの質量

m'_a : アームの付加質量

R : 本体中心から各アクチュエータまでの距離

α_L , α_T , α_R : 各スラストにおける線形化係数

ν : 流体の動粘性係数

ρ_w : 流体の密度

であり, そのほかの要素は零である。

式(7)の両辺に $[M]^{-1}$ を左からかけることにより次の線形状態方程式が得られる。

$$\frac{d\{x\}}{dt}=[A']\{x\}+[B']\{u\} \cdots \cdots \cdots (8)$$

ただし,

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

さらに, デジタル制御を行わせるため, 状態方程式(8)をサンプリングタイム T の間は制御入力が一様であるという条件のもとに次のように離散化する。

$$\{x\}_{k+1}=[\Phi]\{x\}_k+[F']\{u\}_k \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここで,

$$[\Phi]=\exp([A']T),$$

$$[F']=\int_0^T \exp([A']\tau) d\tau [B']$$

である。

3・2 状態フィードバック 本体の位置と角度お

よびアームの角度を速やかにかつ少ない制御量で制御することを考え、次の二次形式の評価関数を設定する。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\{x\}_k^T [Q] \{x\}_k + \{u\}_k^T [R] \{u\}_k] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $[Q]$ 、 $[R]$ は評価関数の重み行列であり、対角要素のみの対角行列である。この評価関数を最小にする線形状態フィードバックは1 サンプルタイムの演算時間遅れを考慮すると次のように与えられる。

$$\{u\}_{k+1} = -[F]([\Phi]\{x\}_k + [\Gamma]\{u\}_k) \quad \dots\dots\dots (11)$$

この式に含まれているフィードバックゲイン行列 $[F]$ は、リカッチ方程式

$$\begin{aligned} [S] &= [Q] + [\Phi]^T [S] [\Phi] - [\Phi]^T [S] [\Gamma] \\ &\quad \times ([R] + [\Gamma]^T [S] [\Gamma])^{-1} [\Gamma]^T [S] [\Phi] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の解 $[S]$ を用いて次のように得られる。

$$[F] = ([R] + [\Gamma]^T [S] [\Gamma])^{-1} [\Gamma]^T [S] [\Phi] \quad \dots\dots\dots (13)$$

したがって、式(10)の評価関数を設定して式(13)のフィードバックゲインを計算し、式(11)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中立浮力式水中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。ただし、状態方程式(8)の係数行列に目標値 X_0 、 Y_0 、 θ_0 、 ϕ_0 が含まれているため目標値が変わるごとにリカッチ方程式を解いてフィードバックゲイン行列を計算しなくてはならない。そこで一つのフィードバックゲイン行列によりすべての位置決めができるようにするため、状態方程式の係数行列に含まれる目標値を座標原点 $X_0 = Y_0 = \theta_0 = \phi_0 = 0$ に近似して制御システムを構築する。目標値までのアームの操作量が大い場合にはスラストにより本体を回転させることもできるので、目標値を座標原点に設定しても大きな制約にはならないと考えられる。

4. 模型実験

4.1 実験装置 スラストの動特性を考慮した中立浮力式水中アーム用位置決め制御システムの有効性を確認するため、水中アーム模型を製作し、制御実験を行った。実験装置の概略図を図10、水中アーム模型を図11に示す。水中アーム模型は、外径318 mm、厚さ46 mmの薄い円柱形で、90° 間隔にアームアクチュエータと3台のスラストが配置されている。胴は10 mm 厚の塩ビ製円筒、上ぶたは3 mm 厚の透明アクリル板、下ぶたは3 mm 厚のアルミニウム板で、中立浮力に近づけるため中央に鉛が入れられている。しかし

図10 実験装置概略図

図11 水中アーム模型

完全な中立浮力を実現することは難しいので、水中アーム模型は水面下10 cmの深さになるよう約2 mの高さよりワイヤでつるされている。また、模型本体のX、Y方向変位および回転角 θ を約20 cm上方のほりに固定されたPSDカメラにより測定するため、模型本体上面中央と60 mm後方にはLEDを取付けた高さ180 mmのアルミニウムパイプがたてられている。中央のパイプはコード類の引出し用にも使われている。アームは外径20 mm、長さ306.5 mmのアルミニウムパイプで、ベベルギアおよびバックラッシュの少ない50:1のハーモニックドライブ減速器を介してロータリエンコーダ付きDCモータ(8 W)により駆動される。

一方制御システムは、PSDおよびスラストのタコジェネからの信号がA/Dコンバータを介して、ロータリエンコーダからの信号がU/Dカウンタを介してパーソナルコンピュータに取込まれるよう配線されている。また、パーソナルコンピュータで計算された制御入力により3台のスラストおよびアームアクチュエータが駆動されるようD/Aコンバータ、電流アンプ

図 12 制御実験結果(スラストの動特性を考慮した場合)

を介して各 DC モータとパーソナルコンピュータが結線されている。

4.2 制御実験 まず水中アーム模型の各パラメータを計測、計算した。次に、2 個の LED を交互に点滅させその位置を PSD カメラにより計測することで模型本体の X, Y 方向変位および角変位 θ を、ロータリエンコーダからの信号によりアームの相対角変位 ϕ 、タコジェネからの信号より各スラストの角速度 $\omega_L, \omega_T, \omega_R$ を計算し、それら状態量をもとに制御入力を計算する線形状態フィードバック式(11)をプログラミングした。本実験装置では本体の速度、角速度およびアームの相対角速度を測定できないので、これらの速度を推定するためのカルマンフィルタもプログラミングした。使用したパラメータを次に示す。

$$\begin{aligned} a &= 0.1306 \text{ m}, \quad b = 0.1759 \text{ m}, \quad D_M = 0.0167 \text{ Nms}, \\ I_0 &= 44.67 \text{ gm}^2, \quad I_a = 2.138 \text{ gm}^2, \quad I_m = 3.700 \text{ gm}^2, \\ m_0 &= 7.329 \text{ kg}, \quad m_a = 0.1340 \text{ kg}, \quad m'_a = 0.0941 \text{ kg}, \\ R &= 0.152 \text{ m}, \quad A_{sL} = 1.129 \text{ gcm}, \quad A_{sT} = 1.371 \text{ gcm}, \\ A_{sR} &= 1.163 \text{ gcm}, \quad C_{TL} = 0.8318 \text{ gcm}^2, \\ C_{TT} &= 0.9985 \text{ gcm}^2, \quad C_{TR} = 0.8516 \text{ gcm}^2, \\ I_L &= 13.69 \text{ gcm}^2, \quad I_T = 14.70 \text{ gcm}^2, \\ I_R &= 14.26 \text{ gcm}^2, \quad K_T = 4.38 \text{ Ncm/A}, \end{aligned}$$

また、スラストの最大推力およびアームアクチュエータの最大トルクは、次の値に設定した。

$$\begin{aligned} F_{\max} &= 8.1 \text{ N} (i'_{\max} = F_{\max} / (A_s K_T / C_T) \cong 1.5 \text{ A}), \\ N_{\max} &= 1.4 \text{ Nm}. \end{aligned}$$

評価関数の重み係数をいろいろと変えてフィードバックゲイン行列 $[F]$ を求め、制御実験を行った。その結果、サンプリングタイム $T = 0.01 \text{ s}$ 、評価関数の重み係数を

$$\begin{aligned} Q_{11}R^2 &= Q_{22}R^2 = 10^3, \quad Q_{33} = Q_{44} = 10^2, \\ Q_{55}(\nu/R)^2 &= Q_{66}(\nu/R)^2 = 10^{-8}, \\ Q_{77}(\nu/R^2)^2 &= 10^{-10}, \quad Q_{88}(\nu/R^2)^2 = 10^{-11}, \\ Q_{99}(\nu/R^2)^2 &= Q_{1010}(\nu/R^2)^2 = Q_{1111}(\nu/R^2)^2 = 0, \\ R_{11} &= R_{22} = R_{33} = 1, \quad R_{44} = 2 \end{aligned}$$

として求めた一つのフィードバックゲインにより $\pm 30^\circ$ の範囲内の任意の角度に速やかにアームを位置決めさせることができた。アームの運動がこの範囲に制約された原因は、防水の目的でアーム根元に取り付けられたカバーが水圧によりつぶされたことによる。本体の目標位置を現在位置としアームのみを $+30^\circ$ から -30° に位置決めさせた実験結果を図 12 に示す。横軸は時間 t 、縦軸は順に本体の変位 X, Y 、角変位 θ 、本体とアームの相対角変位 ϕ 、制御入力 u_L, u_T, u_R, u_I 、スラストの角速度 $\omega_L, \omega_T, \omega_R$ である。また比較のため、スラストの動特性を考慮せずに制御システムを構築し、アームの位置決めを行った場合の実験結果を図 13 に示す。

図 13 制御実験結果(スラストの動特性を無視した場合)

5. 考 察

図 12 より, アームのトルクを抑えるため本体が一時的に回転するが 0.7 秒程度で元の角度に戻りアームも目標位置に収束している。このとき本体の並進運動も生じているが 1.5 秒程度で元の位置に戻っている。模型実験では波や電源コードなどの外乱を受けているにもかかわらず 3 台のスラストとアームアクチュエータが協調して本体とアームを速やかに位置決めしており, スラストの動特性を考慮した中立浮力式水中アーム用位置決め制御システムの有効性が確認できる。

またスラストへの入力電流 u_L, u_T, u_R , および角速度 $\omega_L, \omega_T, \omega_R$ ともに比較的安定しており, スラストの動特性モデルおよびその線形化手法の妥当性が確認できる。

スラストの動特性を考慮した図 12 に比べ, 無視した図 13 では, X, Y 方向変位の収束が遅く, 周期的な動きが残っている。また本体回転角 θ もいったんは収束するものの X, Y 方向変位に影響されて 1 秒後より周期的な動きを始めている。さらに, アーム収束後のスラストの角速度 $\omega_L, \omega_T, \omega_R$ にも周期的な変動がみられる。これらは, スラストの動特性を考慮していないため, 入力電流に対してスラストの角速度および推力が遅れて変化していくことを制御システムが予測

できずに不足している推力を補おうとして制御入力を大きく変化させてしまうことによる。

これらの結果より, スラストの動特性を考慮して制御システムを開発することにより, より正確で速やかな位置決めを達成できることがわかる。

6. 結 論

中立浮力式水中ロボットでは, 浮遊しているため作業アームの位置決めの際にアームアクチュエータとスラストを同時に制御する必要がある。水中ロボットの本体が球形に近い場合やより速やかな位置決めを目指す場合, 推力の大きなスラストが必要となり, スラストの動特性が無視できなくなる。本研究では, スラストの動特性を調べ, スラストモデルを構築し, スラストの動特性を考慮した中立浮力式水中アームの位置決め制御システムを最適制御理論を用いて開発した。そして計算機シミュレーションにより最適制御に適したスラストモデルの線形化手法を明らかにし, 模型による制御実験により開発された位置決め制御システムの有効性を確認した。

文 献

- (1) 川島・下郷, 機論, 58-552, C(1992), 2586.
- (2) 小菅・ほか 4 名, 機論, 58-551, C(1992), 2144.
- (3) 川島・下郷, 機論, 60-575, C(1994), 2316.