2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの外乱補償制御*

田村正和^{*1}, 相良慎一^{*2}
矢藤孝^{*3}, 田川善彦^{*2}Disturbance Compensation Control of an Underwater Robot
with 2 Link ManipulatorMasakazu TAMURA, Shinichi SAGARA^{**4},
Takashi YATOH and Yoshihiko TAGAWA^{**4} Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

Since Underwater Vehicle-Manipulator Systems (UVMS) are necessary for ocean exploration, many studies have been done about UVMS. However, as there are only a few experimental studies, we have proposed Resolved Acceleration Control (RAC) methods for UVMS. The effectiveness of the proposed methods have been verified by experiments using an underwater robot with 2 dimensional and vertical planar 2-link manipulator. Since the proposed methods have position and velocity feedbacks, the influence of an inaccurate hydrodynamic model can be reduced. To obtain higher control performance, we propose a continuous time RAC method with disturbance compensation. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Underwater Robot, Manipulator, Resolved Acceleration Control, Motion Control, Disturbance Observer

1. はじめに

海洋調査などを目的とした水中ヴィークルの研究開発がこれまで数多く行われている⁽¹⁾。また近年は、作業可能なマニピュレータを搭載した自律型水中ロボットシステム (UVMS; Underwater Vehicle-Manipulator System) のモデリングと制御に関する研究も行われている^{(2)~(8)}。しかしながら、UVMS のモデリングと制御に関する研究のほとんどはシミュレーションしか行われておらず、実験による検証は、著者らの知る限り、McLain らの 1 リンクアームを搭載した水中ロボットを用いた研究⁽⁴⁾ 以外見受けられない。

水中で運動する物体に作用する流体力である付加慣性力と流体抗力は、物体の運動により変動する付加質量・付加慣性モーメントと流体抗力係数を用いて表現されるが、水中ロボットの制御では、一般に付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数は、ロボットの構成要素の形状に依存した一定値が用いられる⁽¹⁰⁾。したがって、水中ロボットの制御系は流体力のモデル化

Fig. 1 Underwater robot

誤差の影響を考慮して構成しなければならない。

著者らは、UVMS に対する連続および離散時間分解加速度制御法を提案するとともに、流体力の影響を大きく受ける角柱形 2 リンクマニピュレータを搭載し、垂直 2 次元内で運動する、図 1 の水中ロボットを用いたシミュレーションおよび実験により、提案制御法の有用性を確認している^{(11)~(16)}。

本論文では、流体力のモデル化誤差を外乱として扱い、連続時間分解加速度制御法に外乱補償を付加した制御系を構成するとともに、図 1 の水中ロボットを用いた実験により、提案制御法の有用性を示す。

* 原稿受付 2006 年 6 月 19 日。

^{*1} 正員, 九州工業大学大学院工学研究科 (〒804-8550 北九州
市戸畑区仙水町 1-1)。^{*2} 正員, 九州工業大学工学部。^{*3} 九州工業大学大学院工学研究科。

E-mail: sagara@cmtl.kyutech.ac.jp

2. モデリング

ここでは、図1の水中ロボットに対して、ロボット本体（ベース）および回転関節を持つ2リンクマニピュレータからなり、 $x-y$ 鉛直平面内でのみ運動する図2のモデルを設定し、その運動学および動力学の定式化を行う。なお、付加質量と付加慣性モーメントの値は、ベースおよびリンクの運動方向に対する形状に依存するため、テンソルとして取扱う必要があり⁽¹⁷⁾、ベースとリンクの形状を直方体として3次元空間で定式化を行う。

本論文で使用する仮定と記号は以下のとおりである。

[仮定]

- A1: ロボットを構成する要素はすべて剛体とする。
 A2: 重力と浮力はロボット本体（ベース）および各リンク単体ではつり合っていないが、系全体ではつり合っているものとする。
 A3: 周囲の流体は静止しているものとする。

[記号]

- Σ_I : 地上などに固定した基準座標系
 Σ_0 : ベース重心を原点とし、ベースに固定した座標系
 Σ_i : 第 i 関節を原点とし、第 i リンクに固定した座標系 ($i = 1, 2$)
 iR_j : Σ_j から Σ_i への回転変換行列
 p_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先の位置ベクトル ($= [p_{ex}, p_{ey}, p_{ez}]^T$)
 p_i : Σ_I に関する第 i 関節の位置ベクトル
 r_0 : Σ_I に関するベース重心位置ベクトル ($= [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$)
 r_i : Σ_I に関する第 i リンク重心位置ベクトル
 ω_i : Σ_I に関する第 i リンクの角速度ベクトル
 ω_e : Σ_I に関する手先の角速度ベクトル
 ϕ_i : 第 i 関節の相対角度
 ϕ : 相対関節角度ベクトル ($= [\phi_1, \phi_2]^T$)
 k_i : Σ_I に関する第 i 関節の回転軸方向を示す単位ベクトル
 m_i : 第 i リンクの質量
 M_{a_i} : Σ_i に関する第 i リンクの付加質量テンソル
 I_i : Σ_i に関する第 i リンクの慣性テンソル
 I_{a_i} : Σ_i に関する第 i リンクの付加慣性テンソル
 l_i : 第 i リンクの長さ
 V_i : 第 i リンクの体積
 E : 単位行列
 ρ : 流体密度
 C_{D_i} : 第 i リンクの流体抗力係数
 F_j : スラスト推力 ($j = 1, 2, 3$)

Fig. 2 Underwater robot model

R : Σ_0 原点からスラストまでの距離

また、ベクトル $a = [x, y, z]^T$ に対して、 $\tilde{a}$ を次式で定義する。

$$\tilde{a} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$$

2.1 運動学関係式

まず、ベースと手先の作業変数ベクトルを、それぞれ $\nu_0 = [\dot{r}_0^T, \omega_0^T]^T$ と $\nu_e = [\dot{p}_e^T, \omega_e^T]^T$ とすると、図2の幾何学的関係より次式を得る⁽¹⁸⁾。

$$\nu_e = A\nu_0 + B\dot{\phi} \quad (1)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} E & -(\tilde{p}_e - \tilde{r}_0) \\ 0 & E \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tilde{k}_1 p_{e1} & \tilde{k}_2 p_{e2} \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

であり、また、 $p_{ei} = p_e - p_i$ ($i = 1, 2$) である。

つぎに、流体中で物体が運動することにより生じる付加質量と付加慣性モーメントを含んだ、水中ロボット重心の並進運動量 η およびベース重心まわりの角運動量 μ は、それぞれ次式となる⁽¹⁷⁾。

$$\eta = [\eta_x, \eta_y, \eta_z]^T = \sum_{i=0}^2 M_{T_i} \dot{r}_i \quad (3)$$

$$\mu = [\mu_x, \mu_y, \mu_z]^T = \sum_{i=0}^2 I_{T_i} \omega_i + \tilde{r}_{0i} M_{T_i} \dot{r}_i \quad (4)$$

ただし、

$$M_{T_i} = m_i E + {}^I R_i M_{a_i} {}^I R_i$$

$$I_{T_i} = {}^I R_i (I_i + I_{a_i}) {}^I R_i$$

$$r_{0i} = r_i - r_0$$

である。また、第 i リンク重心の並進速度と角速度は、それぞれ次式となる⁽¹⁸⁾。

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_0 + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_0 \mathbf{r}_{0i} + \mathbf{J}_{v_i} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{J}_{\omega_i} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{J}_{v_1} = [\tilde{\mathbf{k}}_1(\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_1) \quad \mathbf{0}], \quad \mathbf{J}_{\omega_1} = [\mathbf{k}_1 \quad \mathbf{0}]$$

$$\mathbf{J}_{v_2} = [\tilde{\mathbf{k}}_1(\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_1) \quad \tilde{\mathbf{k}}_2(\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_2)], \quad \mathbf{J}_{\omega_2} = [\mathbf{k}_1 \quad \mathbf{k}_2]$$

である。

式 (3)~(6) より運動量に関する関係式

$$\mathbf{s} = [\boldsymbol{\eta}^T \quad \boldsymbol{\mu}^T]^T = \mathbf{C}\mathbf{v}_0 + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (7)$$

が得られる。ただし、

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^2 \mathbf{M}_{T_i} & -\sum_{i=1}^2 \mathbf{M}_{T_i} \tilde{\mathbf{r}}_{0i} \\ \sum_{i=1}^2 \tilde{\mathbf{r}}_{0i} \mathbf{M}_{T_i} & \sum_{i=0}^2 \mathbf{I}_{T_i} - \sum_{i=1}^2 \tilde{\mathbf{r}}_{0i}^T \mathbf{M}_{T_i} \tilde{\mathbf{r}}_{0i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}, \quad d_{1i} = \sum_{j=i}^2 \mathbf{M}_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i(\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i)$$

$$d_{2i} = \sum_{j=i}^2 \{ \mathbf{I}_{T_j} \mathbf{k}_i + \tilde{\mathbf{r}}_{0j} \mathbf{M}_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i(\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i) \}$$

である。

2.2 流体抗力と浮力 図 3 に示すように、リンク座標系 $\Sigma_i(x_i, y_i, z_i)$ において、 x_i, y_i, z_i 軸方向長さが $l_{i*} = l_{i*1} + l_{i*2}$ ($* = x, y, z$) である第 i リンクに作用する、 Σ_i に関する流体抗力と浮力を求める。

まず、図 3 において、流体抗力の x_i 軸方向成分 ${}^i f_x$ が作用するリンク表面の位置 $\mathbf{s}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ にある、面積 $dy_i dz_i$ の微小面 dS に加わる x_i 軸方向の力 $d {}^i f_x$ 、および $d {}^i f_x$ により生じる抗力モーメント $d {}^i \boldsymbol{\tau}_{f_x}$ は、それぞれ

$$d {}^i f_x = \frac{\rho}{2} C_{D_i} w_{ix} |w_{ix}| dy_i dz_i \quad (8)$$

$$d {}^i \boldsymbol{\tau}_{f_x} = \tilde{\mathbf{s}}_i \begin{bmatrix} d {}^i f_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_i \\ -y_i \end{bmatrix} d {}^i f_x \quad (9)$$

となる⁽¹⁹⁾。ただし、

$$\mathbf{w}_i = [w_{ix}, w_{iy}, w_{iz}]^T = {}^i \dot{\mathbf{p}}_i + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{s}_i$$

$${}^i \dot{\mathbf{p}}_i = {}^i \mathbf{R}_I \dot{\mathbf{p}}_i, \quad \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i = {}^i \mathbf{R}_I \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i$$

であり、 ${}^i \dot{\mathbf{p}}_i$ と $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_i$ は Σ_i に関する Σ_i 原点の並進速度と角速度である。

Fig. 3 Drag force on i th link

式 (8) と (9) より、第 i リンクに作用する流体抗力の x_i 軸方向成分 ${}^i f_x$ 、および ${}^i f_x$ により生ずる抗力モーメント ${}^i \mathbf{n}_{f_x}$ は次式となる。

$${}^i f_x = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} w_{ix} |w_{ix}| dy_i dz_i \quad (10)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_x} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \begin{bmatrix} 0 \\ z_i \\ -y_i \end{bmatrix} w_{ix} |w_{ix}| dy_i dz_i \quad (11)$$

同様にして、リンクに作用する流体抗力の y_i と z_i 軸方向成分 ${}^i f_y$ と ${}^i f_z$ 、および ${}^i f_y$ と ${}^i f_z$ により生じる抗力モーメント ${}^i \mathbf{n}_{f_y}$ と ${}^i \mathbf{n}_{f_z}$ は、それぞれ次式となる。

$${}^i f_y = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} w_{iy} |w_{iy}| dz_i dx_i \quad (12)$$

$${}^i f_z = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} w_{iz} |w_{iz}| dx_i dy_i \quad (13)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_y} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \begin{bmatrix} -z_i \\ 0 \\ x_i \end{bmatrix} w_{iy} |w_{iy}| dz_i dx_i \quad (14)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_z} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \begin{bmatrix} y_i \\ -x_i \\ 0 \end{bmatrix} w_{iz} |w_{iz}| dx_i dy_i \quad (15)$$

したがって、式 (10)~(15) より、第 i リンクに作用する Σ_i に関する抗力および抗力モーメントは

$$\mathbf{f}_{d_i} = [{}^i f_x, {}^i f_y, {}^i f_z]^T \quad (16)$$

$${}^i \mathbf{n}_{d_i} = {}^i \mathbf{n}_{f_x} + {}^i \mathbf{n}_{f_y} + {}^i \mathbf{n}_{f_z} \quad (17)$$

となる。

また、第 i リンクに作用する重力と浮力によって第 i 関節に加わる力およびトルクは、それぞれ

$${}^i \mathbf{f}_{g_i} = {}^i \mathbf{R}_I (\rho V_i - m_i) \mathbf{g} \quad (18)$$

$${}^i \mathbf{n}_{g_i} = {}^i \mathbf{R}_I (\tilde{\mathbf{b}}_i \rho V_i - \tilde{\mathbf{a}}_i m_i) \mathbf{g} \quad (19)$$

となる。ただし、 $\mathbf{a}_i$ と $\mathbf{b}_i$ は、それぞれ第 i 関節から第 i リンクの重心と浮心までの位置ベクトルである。

2.3 運動方程式 流体力を考慮した水中ロボットの運動方程式を、漸化的ニュートン・オイラー法を用いて求める⁽²⁰⁾。

まず、境界条件を ${}^0\omega_0 = {}^0k_0\dot{\phi}_0$, ${}^0\dot{\omega}_0 = {}^0k_0\ddot{\phi}_0$, ${}^0\dot{p}_0 = {}^0\dot{r}_0 = {}^iR_I\dot{r}_0$ として、

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_i &= {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + {}^i\dot{k}_i\dot{\phi}_i \\ \dot{\omega}_i &= {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + {}^i\dot{k}_i\ddot{\phi}_i + \dot{\omega}_i \times {}^i\dot{k}_i\dot{\phi}_i \\ {}^i\dot{p}_i &= {}^iR_{i-1} \{ {}^{i-1}\dot{p}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}l_{i-1} \\ &\quad + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times ({}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} {}^{i-1}l_{i-1}) \} \\ {}^i\dot{r}_i &= {}^i\dot{p}_i + \dot{\omega}_i \times {}^i\dot{r}_i + \dot{\omega}_i \times (\dot{\omega}_i \times {}^i\dot{r}_i) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

を $i = 1, 2$ で逐次計算し、つぎに、境界条件を ${}^2R_3 = 0$, ${}^3f_3 = 0$, ${}^3n_3 = 0$ として

$$\left. \begin{aligned} \hat{f}_i &= (m_i E + M_{a_i}) {}^i\dot{r}_i \\ {}^i\hat{n}_i &= (I_i + I_{a_i}) \dot{\omega}_i + \dot{\omega}_i \times \{ (I_i + I_{a_i}) \dot{\omega}_i \} \\ {}^i\hat{f}_i &= {}^iR_{i+1} {}^{i+1}f_{i+1} + {}^i\hat{f}_i + {}^i\hat{f}_{d_i} + {}^i\hat{f}_{g_i} \\ {}^i\hat{n}_i &= {}^iR_{i+1} {}^{i+1}n_{i+1} + {}^i\hat{n}_i \\ &\quad + \dot{l}_i \times ({}^iR_{i+1} {}^{i+1}f_{i+1}) + {}^i\dot{r}_i \times {}^i\hat{f}_i \\ &\quad + {}^i\dot{n}_{d_i} + {}^i\dot{n}_{g_i} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

を $i = 2$ から 0 まで順々に求めると、

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= [f_{0x}, f_{0y}, f_{0z}]^T = {}^IR_0 {}^0f_0 \\ n_0 &= [n_{0x}, n_{0y}, n_{0z}]^T = {}^IR_0 {}^0n_0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

より Σ_I に関するベースの力とトルク、また、

$$\tau_i = ({}^i\dot{k}_i)^T {}^i\hat{n}_i \quad (i = 1, 2) \quad (23)$$

より、マニピュレータ関節トルクが得られる。なお、式 (20)~(23) におけるベクトルの左肩の添字 i は、ベクトルの Σ_i 座標系に関する成分表示を意味する。

上記漸化的ニュートン・オイラー法より、次の運動方程式が得られる。

$$M(q)\dot{\zeta} + N(q, \zeta)\zeta + f = u \quad (24)$$

ただし、 $q = [\phi_0, \phi^T]^T$, $\zeta = [\nu_0^T, \dot{\phi}^T]^T$ であり、 $M(q)$ は付加質量と付加慣性モーメントを含んだ慣性行列、 $N(q, \zeta)$ は遠心力・コリオリ力項、 f は流体抗力・浮力項、また、 $u = [f_0^T, n_0^T, \tau_1, \tau_2]^T$ である。

3. 制御系の構成

ここでは、図 2 のロボットに対して、流体力に関するモデル化誤差を外乱とみなし、外乱補償を付加した分解加速度制御系の構成法を示す。

3.1 分解加速度制御 まず、図 2 のロボットの運動は $x-y$ 平面内に限定されるので、並進に関するベクトルの第 3 要素と回転に関するベクトルの第 1, 2

要素はいずれも 0 となる。そこで、運動学関係式 (1)、運動量方程式 (7) および運動方程式 (24) は、それぞれ

$$\dot{x}_e = A_s \dot{x}_0 + B_s \dot{\phi} \quad (25)$$

$$s_s = C_s \dot{x}_0 + D_s \dot{\phi} \quad (26)$$

$$M_s(q)\ddot{\chi} + N_s(q, \dot{\chi})\dot{\chi} + f_s = u_s \quad (27)$$

と低次元化できる。ただし、 $x_e = [p_{ex}, p_{ey}]^T$, $x_0 = [r_{0x}, r_{0y}, \phi_0]^T$, $s_s = [\eta_x, \eta_y, \mu_z]^T$, $\chi = [x_0^T, \phi^T]^T$, $u_s = [f_{0x}, f_{0y}, n_{0z}, \tau_1, \tau_2]^T$ であり、また、 $A_s \in R^{2 \times 3}$, $B_s \in R^{2 \times 2}$, $C_s \in R^{2 \times 3}$, $D_s \in R^{2 \times 2}$, $M_s \in R^{5 \times 5}$, $N_s \in R^{5 \times 5}$ と $f_s \in R^{5 \times 1}$ は、それぞれ A , B , C , D , M , N と f から適切な行や列を除いてできる行列およびベクトルである。

さらに、ベース入力 $u_B = [f_{0x}, f_{0y}, n_{0z}]^T$ と関節入力 u_M に関して、運動方程式 (27) の係数行列とベクトルをブロック行列

$$M_s = \begin{bmatrix} M_{BB} & M_{BM} \\ M_{MB} & M_{MM} \end{bmatrix}, \quad N_s = \begin{bmatrix} N_{BB} & N_{BM} \\ N_{MB} & N_{MM} \end{bmatrix}$$

$$f_s = [f_B^T, f_M^T]^T, \quad u_s = [u_B^T, u_M^T]^T$$

で表現すると、次式のベースの運動方程式を得る。

$$M_{BB}\ddot{x}_0 + M_{BM}\ddot{\phi} + N_{BB}\dot{x}_0 + N_{BM}\dot{\phi} + f_B = u_B \quad (28)$$

さて、式 (25) と (26) を時間微分して整理すると

$$\begin{bmatrix} C_s + E & D_s \\ A_s & B_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$z_1 = \dot{C}_s \dot{x}_0 + \dot{D}_s \dot{\phi} - \dot{s}_s \quad (30)$$

$$z_2 = \dot{A}_s \dot{x}_0 + \dot{B}_s \dot{\phi} \quad (31)$$

が得られるので、 x_0 と x_e の目標値 x_0^{des} と x_e^{des} に対して、次式の分解加速度制御則によりベース加速度 $\ddot{x}_0$ と関節加速度 $\ddot{\phi}$ の目標値 $\ddot{x}_0^{\text{ref}}$ と $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ を決定する⁽¹¹⁾。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0^{\text{ref}} \\ \ddot{\phi}^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s + E & D_s \\ A_s & B_s \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_0^{\text{ref}} \\ x_e^{\text{ref}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \right) \quad (32)$$

ただし、

$$x_{0e}^{\text{ref}} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_0^{\text{des}} \\ \ddot{x}_e^{\text{des}} \end{bmatrix} + K_v \begin{bmatrix} \dot{x}_0^{\text{des}} - \dot{x}_0 \\ \dot{x}_e^{\text{des}} - \dot{x}_e \end{bmatrix} + K_p \begin{bmatrix} x_0^{\text{des}} - x_0 \\ x_e^{\text{des}} - x_e \end{bmatrix}$$

であり、また、 $K_p = \text{diag}\{k_{p_i}\}$ と $K_v = \text{diag}\{k_{v_i}\}$ ($i = 1, \dots, 5$) はフィードバックゲイン行列で、その要素は $k_{p_i} > 0$ と $k_{v_i} > 0$ に選定する。

図 1 のマニピュレータ関節は速度型サーボ機構により駆動されるので、制御則 (32) で得られた $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ を時間積分してサーボ機構に入力する。また、ベースの運

Fig. 4 Disturbance compensation

動方程式 (28) の $\ddot{x}_0$ と $\ddot{\phi}$ をベースと関節の目標加速度 $\ddot{x}_0^{ref}$ と $\ddot{\phi}^{ref}$ で置換することにより、ベース制御入力を得られる。

なお、制御則 (32) の z_1 および z_2 の係数行列とベクトルは、以下のように求めることができる。まず、 z_1 については式 (30) より、 $\dot{C}_s$ 、 $\dot{D}_s$ と $\dot{s}_s$ の値が必要であるが、式 (26) より

$$\dot{s}_s = C_s \ddot{x}_0 + D_s \ddot{\phi} + \dot{C}_s \dot{x}_0 + \dot{D}_s \dot{\phi} \quad (33)$$

となるので、式 (28) と (33) より $C_s = M_{BB}$ 、 $D_s = M_{BM}$ 、 $\dot{C}_s = N_{BB}$ 、 $\dot{D}_s = N_{BM}$ 、 $\dot{s}_s = u_B - f_B$ の関係が得られる。したがって、 $\dot{C}_s$ 、 $\dot{D}_s$ と $\dot{s}_s$ 、さらには C_s と D_s も運動方程式 (28) から得ることができる。

また、 z_2 については式 (31) より、 $\dot{A}_s$ と $\dot{B}_s$ の値が必要であるが、式 (2) より

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} 0 & -(\dot{p}_e - \ddot{r}_0) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \dot{B} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ \omega_1 \times k_1 & \omega_2 \times k_2 \end{bmatrix}$$

$$b_i = (\omega_i \times k_i) \times (p_e - p_i) + \dot{k}_i (\dot{p}_e - \dot{p}_i)$$

が得られるので、 $\dot{A}_s$ と $\dot{B}_s$ も簡単に求められる。

3.2 ベース外乱補償 水中ロボットでは、付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数は、ロボットの構成要素の形状に基づいた一定値が用いられる⁽¹⁰⁾。一定値の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を用いた場合、3.1 項の分解加速度制御法はモデル化誤差の影響を受けるが、ベースと手先の位置および速度誤差フィードバックによりモデル化誤差の影響を抑制可能である。

速度型関節サーボ機構を有するマニピュレータ関節は、制御則 (32) で得られる目標関節角加速度 $\ddot{\phi}^{ref}$ の積分値、すなわち目標関節角速度 $\dot{\phi}^{ref}$ を実現する。一方、ベース制御入力の力とトルクは、制御則で得られ

る目標加速度 $\ddot{x}_0^{ref}$ および $\ddot{\phi}^{ref}$ と、付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値としたベース運動方程式より求めるため、この運動方程式のモデル化誤差の影響を軽減できれば、制御系の制御性能が向上すると考えられる。そこで、このモデル化誤差を外乱として取扱い、外乱オブザーバを用いた外乱補償を行う。

ベース運動方程式 (28) において、 M_{BB} の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値としたベースの公称慣性モデルを $\bar{M}_{BB}$ とする。まず、公称モデルによる慣性力 $\bar{M}_{BB} \ddot{x}_0$ 以外によって発生する力をすべて外乱 f_L とみなすと、その推定値は時定数 T の 1 次フィルタ $F(s) = 1/(Ts + 1)$ を用いて

$$\hat{f}_L = F(s) (u_B - \bar{M}_{BB} \ddot{x}_0) \quad (34)$$

で求められる⁽²¹⁾。また、ベース目標加速度 $\ddot{x}_0^{ref}$ に対して、外乱を補償したベースの制御入力 u_B は

$$u_B = \bar{M}_{BB} \ddot{x}_0^{ref} + \hat{f}_L \quad (35)$$

となり、ベース外乱補償の基本構成は図 4(a) となる。つぎに、流体力に関するモデル化誤差の推定値は

$$\hat{f}_E = F(s) (u_B - \bar{M}_{BB} \ddot{x}_0 - f_t) \quad (36)$$

で求められる。ただし、

$$f_t = \bar{M}_{BM} \ddot{\phi}^{ref} + \bar{N}_{BB} \ddot{x}_0 + \bar{N}_{BM} \dot{\phi} + \bar{f}_B \quad (37)$$

であり、 $\bar{M}_{BM}$ 、 $\bar{N}_{BB}$ 、 $\bar{N}_{BM}$ と $\bar{f}_B$ は、それぞれ運動方程式 (28) の M_{BM} 、 N_{BB} 、 N_{BM} と f_B の付加質量、付加慣性モーメントおよび流体抗力係数を一定値とした要素である。また、ベースの制御入力 u_B は

$$u_B = \bar{M}_{BB} \ddot{x}_0^{ref} + f_t + \hat{f}_E \quad (38)$$

となり、図 4(a) の外乱補償の構成は図 4(b) となる。

4. 実験

ここでは、3 節の制御法の有用性を、図 1 の水中ロボットを用いた実験により検証する。

まず、実験で用いた図 1 の水中ロボットの物理パラメータを表 1 に示す。ロボットは、ベースの位置・姿勢制御用スラスタを水平方向と垂直方向に 2 基ずつベース重心から等距離 ($R = 0.3\text{m}$) に配置したベースと、関節速度型サーボ機構を有する 2 リンクマニピュレータからなり、鉛直平面内で運動する。ベースとマニピュレータには、ロボット全体に作用する重力と浮力が釣り合うよう浮力材を取付けている。なお、表 1 の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数の値は、リンク形状に基づき設定した⁽¹⁰⁾。

Table 1 Physical parameters

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	26.04	4.25	1.23
Moment of inertia [kg m ²]	1.33	0.19	0.012
Link length (x_i) [m]	0.2	0.25	0.25
Link length (y_i) [m]	0.81	0.04	0.04
Link width [m]	0.42	0.12	0.12
Added mass (x_i) [kg]	72.7	1.31	0.1
Added mass (y_i) [kg]	6.28	3.57	2.83
Added moment of inertia [kg m ²]	1.05	0.11	0.06
Drag coefficient (x_i)	1.2	0	0
Drag coefficient (y_i)	1.2	1.2	1.2

つぎに、図 5 に実験システムの構成を示す。縦 2m、横 4m、高さ 2m の実験用水槽は、ガラス張りの計測面よりロボットの挙動を確認できる。その計測面を介して CCD カメラと処理速度 1/60 s の XY トラッカにより得られる、ベースに取付けた 2 つの光点位置情報と、マニピュレータ関節サーボ機構に内蔵されたインクリメンタル型エンコーダからの信号をカウンタボードで取込んだ角度情報より、コンピュータでベース位置・姿勢と手先位置、およびそれらの速度を得る。また、得られたロボットの位置・速度をもとに制御入力を決出し、D/A ボードを介してスラストドライバとモータドライバに与え、ロボットを駆動する。

なお、スラストドライバへの入力電圧 v V は、スラスト特性実験⁽¹¹⁾により得られたスラスト推力 F N との関係は線形範囲で 2 次近似 (平均誤差 0.033 N ($v > 0$), 0.023 N ($v < 0$)) した

$$F = \begin{cases} 1.341v^2 - 1.363v - 0.026 & (1 \leq v \leq 4) \\ -0.763v^2 - 0.835v + 0.019 & (-4 \leq v \leq -1) \end{cases} \quad (39)$$

に基づいて求め、スラストドライバに入力する。また、ベース制御入力と図 2 のスラスト推力の関係は

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & C_0 & -S_0 \\ S_0 & S_0 & C_0 \\ -R & R & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

となる。ただし、 $C_0 = \cos \phi_0$, $S_0 = \sin \phi_0$ であり、 F_3 N は 2 基の水平方向スラストの合力となるので、水平方向スラスト 1 基の推力は $F_3/2$ N となる。

実験は、以下の条件で、外乱補償ありの場合となしの場合について行った。ベースは初期状態を保ち、手先は初期位置から x 方向に -0.6 m, y 方向に 0.15 m 離れたターゲットまで直線軌道で移動させる。位置と速度のフィードバックゲインは、それぞ

Fig. 5 Configuration of the experimental system

れ $K_p = \text{diag}\{100, 100, 100, 100, 100\}$ と $K_v = \text{diag}\{10, 10, 10, 20, 20\}$ に設定した。また、外乱補償で用いたフィルタの時定数は $T = 1$ s である。

外乱補償ありの場合となしの場合の実験結果を、それぞれ図 6 と 7 に示す。なお、いずれの図も上から手先希望加速度、手先位置誤差、関節角速度入力、ベース位置・姿勢誤差、ベース入力を示している。また、外乱補償ありの場合の推定値の時間履歴とロボットの挙動を、それぞれ図 8 と 9 に示す。

まず、図 9 からわかるように、実験開始時点にベース変動が生じるようロボットの初期状態を設定しているため、ベース位置・姿勢誤差は図 6 と 7 のいずれも実験開始直後若干大きくなっているが、その後初期状態を保持するよう制御されていることがわかる。つぎに、外乱補償ありの場合はなしの場合よりベースの位置・姿勢誤差が小さく、すなわちベース変動が抑制されており、その結果手先位置誤差も小さくなっているのが図 6 と 7 より読取れる。また、外乱補償ありの場合は、図 4(b) よりベース加速度が必要であり、実験では位置・姿勢角の 2 階後退差分近似を用いている。しかしながら、2 階後退差分近似に起因する加速度情報のノイズの影響も外乱補償のフィルタにより十分抑制できていると考えられる。

以上より、UVMS に対して外乱補償を付加した分解加速度制御法が有用であることが確認できる。

5. お わ り に

本論文では、流体力のモデル化誤差の影響を抑制可能な、UVMS に対する外乱補償を付加した分解加速度制御法を提案するとともに、2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットへの適用実験により、提案制御法の有用性を確認した。また、提案制御法はベ

Fig. 6 Experimental result with disturbance observer

Fig. 7 Experimental result without disturbance observer

スの加速度情報が必要であるが、位置・姿勢角の2階後退差分近似を用いているにもかかわらず、その影響も十分抑制できる。なお、ロボット本体の姿勢計測システム、および海底などに固定された作業対象との相対的位置・姿勢を計測可能なステレオビジョンシステムを搭載し、3次元空間で運動する水中ロボットを現在製作中である。このロボットを用いた結果について

は別の機会に報告したい。

文 献

- (1) Yuh, J. ed., *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, (1995), pp.1-12, TSI Press
- (2) Maheshi, H. et al., A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator, *Journal of Robotic Systems*, Vol.8, No.3 (1991), pp.339 - 370

Fig. 8 Estimated disturbance

Fig. 9 Robot motion

- (3) McMillan, S. et al., Efficient Dynamic Simulation of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.25, No.8 (1995), pp.1194-1206
- (4) McLain, T. W. et al., Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System, *Autonomous Robots 3*, (1996), pp. 213 - 232, Kluwer Academic Publishers
- (5) Tarn, T. J. et al., A Dynamic Model of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator, *Autonomous Robots 3*, (1996), pp.269 - 283, Kluwer Academic Publishers
- (6) Cui, Y. et al., Impedance Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems (UVMS), *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1999), pp.148 - 153
- (7) Antonelli, G. et al., Tracking Control for Underwater Vehicle-Manipulator Systems with Velocity Estimation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.25, No.3 (2000), pp.399 - 413
- (8) Sarkar, N., Podder, T. K., Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Optimization, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.26, No.2 (2001), pp.228 - 239
- (9) Cui, Y., Yuh, J., A unified adaptive force control of underwater vehicle-manipulator systems (UVMS), *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2003), pp.553 - 558
- (10) Fossen, T. I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons (1995), pp.431-452
- (11) Yamada, S., Sagara, S., Resolved Acceleration Control of an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator, *Proceedings of the 7th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (2002), pp.230 - 233
- (12) Yamada, S. et al. Experiment of Resolved Acceleration Control for an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator, *Proceedings of 2002 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2002), 1A1-A07
- (13) Sagara, S., Digital Control of an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator, *Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (2003), pp.524 - 527
- (14) Shimizu, H. et al., Digital Type Resolved Acceleration Control of Underwater Robots with Vertical Planar 2-Link Manipulator, *Proceedings of 2003 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2003), 2A1-2F-A2
- (15) Sagara, S. et al., Digital Control of Underwater Robots with Vertical Planar 2-Link Manipulator, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2004), 2A1-L2-21
- (16) Sagara, S. et al., Analog and Digital Resolved Acceleration Control Methods of UVMS, *Proceedings of 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2005), 2P1-S-011
- (17) Adachi, Y., Yoshida, K., Workspace and Dynamic Manipulability of Unconstrained Robot Manipulator in Water, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.12, No.6 (1994), pp.863-871
- (18) Umetani, Y., Yoshida, K., Resolved Motion Rate Control of Space Robotic Manipulators with Generalized Jacobian Matrix, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.7, No.4 (1989), pp.63-73
- (19) Lévesque, B., Richard, M. J., Dynamic Analysis of a Manipulator in a Fluid Environment, *International Journal of Robotics Research*, Vol.13, No.3 (1994), pp.221-231
- (20) Antonelli, G., *Underwater Robots*, (2003), pp.17-20, Springer
- (21) Arai, H. et al., Disturbance Compensation Control of a Space Robot, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.10, No.4 (1992), pp.481-489