

〈논 문〉

수중운동체의 조종제어기 설계 연구

양승윤* · 이만형**

(1995년 4월 3일 접수)

A Study on the Design of a Maneuvering Controller for Submersible Vehicles

Seung Yun Yang and Man Hyung Lee

Key Words : Submersible Vehicles(수중운동체), Maneuvering Control(조종제어), Variable Structure Control(가변구조제어), Maneuvering Simulator(조종시뮬레이터).

Abstract

This paper considers a sliding mode controller for a depth and course control of a class of submersible Vehicles. Since the vehicle used here shows complex dynamic characteristics sensitive to speed variation and buoyancy, robustness in control of vertical and horizontal plane motions of the vehicle is achieved by using the sliding mode controller of which a structure varies according to a pre-designed principle, so called the variable structure control. To compare this controller with another in robustness, PID controller for the same model of vehicle is designed. From various simulations for two controllers, it is shown that the sliding mode controller is the more robust against to modeling errors and disturbances.

기 호 설 명

X_{nm}, Y_{nm}, Z_{nm} : x, y, z 축에 따른 유체의 힘성분을 표현하는데 사용되는 무차원계수

K_{nm}, M_{nm}, N_{nm} : x, y, z 축에 따른 유체의 모멘트성분을 표현하는데 사용되는 무차원계수

u, v, w : 수중운동체 고정 좌표계 원점의 선속도

p, q, r : x, y, z 축에 대한 각속도

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$: 속도 u, v, w 의 시간변화율(가속도)

$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$: 각속도 p, q, r 의 시간변화율(각가속도)

x_G, y_G, z_G : x, y, z 축에서 무게중심의 좌표

x_B, y_B, z_B : x, y, z 축에서 부력중심의 좌표

m : 수중운동체의 질량

W : 수중운동체의 무게

B : 수중운동체의 부력

I_x, I_y, I_z : x, y, z 축에서 수중운동체의 관성모멘트

I_{xy}, I_{yz}, I_{zx} : x, y, z 축에서의 관성적

l : 수중운동체의 총길이

$$\eta = \frac{U_c}{U_r}$$

U_c : 수중운동체의 속도

U_r : 명령속도

1. 서 론

수중운동체에 있어서 일정한 심도와 피치각을 유지하며 운항하는 심도유지 항해는 매우 중요하고 필수적인 기능이다. 특히 현대 수중운동체의 중요한 기능인 수면 바로 아래에서 항해를 수행하기 위해서는 정확한 심도제어가 반드시 이루어져야 한다. 그러나 특정 해상상태에서는 수동조종에 의한 심도제어가 불가능하다. 또한 심해 항해시라도 장시간 수동조종을 수행함으로써 승조원의 피로가 가

*국방과학연구소

**회원, 부산대학교 제어기계공학과 및 기계기술연구소

중되므로 정확한 자동 심도 및 방향 제어시스템이 필요하게 된다. 수중운동체의 운동특성은 제어판이 몸체에 비교하여 크기가 작고, 운항속도가 느려 제어력이 약하기 때문에 합의 외부형상에 지배적인 영향을 받는다. 또한 외부형상의 상하 비대칭으로 인한 유체역학적인 특성때문에 심도제어 영역인 연직면 운동은 특히 복잡한 연성효과 및 강한 비선형 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인하여 정확한 시스템 모델링 및 관련 유체계수(hydrodynamic coefficients) 추정이 어려우므로 모델링 오차로 인해 제어기 설계를 어렵게 하고 있다. 특히 수중운동체에 응용되고 있는 대부분의 제어기들, 즉 비례-적분-미분제어, 최적제어 등은 플랜트 모델에 기본하여 설계되므로 시스템의 모델과 유체계수가 정확하고, 외란의 특성이 잘 알려져 있을 때 비로소 좋은 제어성능을 얻을 수가 있다. 따라서 현재 수중운동체의 정확한 심도 및 방향 제어기 설계를 위해, 첫째로 정확한 시스템 모델구조와 유체계수를 찾기위한 시스템 식별기법(system identification)에 관한 연구⁽¹⁾가 진행되고 있으며, 둘째로 시스템의 모델오차나 외란에 강인한 슬라이딩모드제어기,⁽²⁾ H[∞]제어기,⁽³⁾ 적응제어기⁽⁴⁾ 등에 관한 설계연구가 활발히 수행되고 있다. 또한 모델링의 문제를 극복하기 위한 방법으로 숙련된 전문가의 경험이나 시스템에 대한 지식베이스로부터 제어기를 설계하는 퍼지제어기법⁽⁵⁾도 많이 연구되고 있다.

본 연구에서는 Utkin과 Itkis 등에 의하여 연구된 가변구조 시스템 이론, 즉 시스템의 제어구조를 고정시키지 않고 원하는 제어성능을 얻기 위하여 제어구조를 미리 정한 법칙에 따라 의도적으로 가변시키는 것을 기본개념으로 하는 슬라이딩모드제어기로 모델링 오차나 외란에 강인한 수중운동체의 심도와 방향을 제어하는 제어기를 설계하였다. 또한 비례-적분-미분 제어이론으로 제어기를 구성하여 시뮬레이션과 시뮬레이터 실험을 통하여 두 제어기의 제어성능을 비교분석함으로써 슬라이딩모드 제어기가 모델오차에 강인함을 제시하였다.

본 논문의 구성은 1장 서론에 이어서 2장에서는 수중운동체의 연직면과 수평면에 대한 선형 운동방정식을 유도하고 정리하였다. 3장에서는 비례-적분-미분 제어와 슬라이딩모드제어기로 수중운동체의 심도 및 방향제어를 설계하였으며, 4장에서는 설계된 조종제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이터에 대하여 개략적으로 기술하였다. 시뮬레이션 결과 및 고

찰은 5장에 나타나 있으며, 6장에서는 본 연구의 결과와 앞으로의 수행 연구방향을 제시하였다.

2. 수중운동체의 운동방정식

수중운동체의 운동방정식은 각 나라의 각 기관마다 조금씩 다른 형태를 사용하고 있고, 또한 운동체의 종류에 따라 다른 운동방정식을 사용하고 있어서 통일된 방정식은 없는 상태이나 대부분의 방정식은 거의 유사한 형태를 가지고 있다. 여기서는 Abkowitz가 체계적으로 정리한 방법인 비선형힘을 테일러(Taylor) 급수를 이용하여 표기하는 방식⁽⁶⁾을 기초로 하고, 수중운동체의 특성과 맞도록 변형하여 사용하는 방법을 따른다.

2.1 수중운동체의 비선형 운동방정식

수중운동체의 운동을 완전히 묘사하기 위해서는 6자유도 비선형 운동방정식이 필요하다. 이 방정식은 뉴톤의 제 2운동법칙에서 유도된다. 즉, 운동체에 작용하는 모든 외력의 합은 운동체 운동량의 변화량과 같아야 하고, 운동체에 작용하는 외부 모멘트의 합은 각운동량의 변화량과 같아야 한다. 여기서 수중운동체에 작용하는 힘, F 와 모멘트, M 의 관계식은 다음과 같다.

$$[F, M]^T = f(X, U, t) \quad (1)$$

여기서, 상태변수 X 및 입력 U 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X &= [x, y, z, \phi, \theta, \psi, u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \\ &\quad \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}]^T \\ U &= [\delta s, \delta b, \delta r]^T \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)을 X 및 U 에 대하여 테일러 급수로 전개하면, 식 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} [F, M]^T &= f(X_0, U_0, t) + \frac{\partial f}{\partial X}(X - X_0) \\ &\quad + \frac{\partial f}{\partial U}(U - U_0) + H. O. T \end{aligned} \quad (3)$$

이 물리적 법칙은 6자유도를 가지는 수중운동체에 대하여 12개의 상태변수를 사용하여 아래와 같이 비선형 미분방정식으로 간략히 나타낼 수 있다

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_c(q^2 + r^2) + y_c(pq - \dot{r}) \\ + z_c(pr + \dot{q})] = \Sigma X \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m[\dot{v} - w\dot{p} + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) \\
& + x_G(q\dot{p} + \dot{r})] = \Sigma Y \\
& m[\dot{w} - v\dot{q} + v\dot{p} - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) \\
& + y_G(r\dot{q} + \dot{p})] = \Sigma Z \\
& I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + p\dot{q})I_{zx} + (r^2 - q^2)I_{yz} \\
& + (pr - \dot{q})I_{xy} = \Sigma K \\
& I_y\dot{q} + (I_x - I_z)r\dot{p} - (\dot{p} + q\dot{r})I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} \\
& + (qp - \dot{r})I_{yz} = \Sigma M \\
& I_z\dot{r} + (I_y - I_x)p\dot{q} - (\dot{q} + r\dot{p})I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} \\
& + (rq - \dot{p})I_{zx} = \Sigma N
\end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서 ΣX , ΣY 및 ΣZ 는 운동체에 작용하는 힘벡터의 각 방향성분을 ΣK , ΣM 및 ΣN 는 운동체에 작용하는 모멘트벡터의 각 방향성분을 나타내는 것으로서 힘과 모멘트의 합을 나타내는 이 항들은 유체역학적인 항, 부력과 중력에 의한 항, 프로펠러에 기인하는 항 등으로 구성되어 있다. 수중운동체의 운동방정식은 참고문헌에 잘 나타나 있다^(7,8)

2.2 선형 운동방정식 유도

제어시스템의 설계와 종합분석을 위해서는 복잡한 6자유도 비선형 방정식 대신에 단순화된 선형 운동방정식을 필요로 한다. 6자유도 운동방정식의 선형화 연구⁽⁹⁾는 이전에 많이 이루어졌다. 6자유도 비선형 운동방정식에 아래와 같은 적절한 가정을 설정하므로써 선형화된 운동방정식을 유도할 수 있다.

- 동체좌표계 x, y, z축의 원점은 무게중심에 설정한다.
- x, y, z축을 운동체의 관성주축으로 하면 관성상승적(cross-product of inertia)은 무시될 수 있다.
- 연직면에 대하여 기하학적으로 대칭을 가지는 수중운동체라면 부력중심 y_B 는 0이 되므로 이에 관련된 항들은 무시된다.
- 전진방향의 속도는 일정한 것으로 가정한다.
- 롤각(roll angle)이 아주 작은 것으로 가정한다.
- 수중운동체는 중성부력을 유지한다.
- 6자유도 운동은 연직면운동과 수평면운동으로 분리된다.

2.2.1 연직면에서의 선형 운동방정식

6자유도 비선형 운동방정식에 앞에서 설정한 가

정을 적용시키면 선형화된 2자유도 연직면 운동방정식을 얻을 수 있다.

히브(Heave) 방정식 :

$$\begin{aligned}
m\dot{w} - umq &= \frac{1}{2}\rho l^4 Z'_q \dot{q} \\
& + \frac{1}{2}\rho l^3 (Z'_w \dot{w} + Z'_q uq) \\
& + \frac{1}{2}\rho l^2 Z'_w u w + u^2 (Z'_{\delta\delta} \delta + Z'_{\delta b} \delta b)
\end{aligned} \quad (5)$$

피치(Pitch) 방정식 :

$$\begin{aligned}
I_y \dot{q} &= \frac{1}{2}\rho l^5 M'_q \dot{q} \\
& + \frac{1}{2}\rho l^4 (M'_q u q + M'_w \dot{w}) \\
& + \frac{1}{2}\rho l^3 (M'_w u w + u^2 (M'_{\delta\delta} \delta + M'_{\delta b} \delta b) + Bz_B \theta)
\end{aligned} \quad (6)$$

2.2.2 수평면에서의 선형 운동방정식

수평면 운동도 연직면에서와 마찬가지로 6자유도 비선형 운동방정식에 앞에서 설정한 가정을 적용시키면 선형화된 2자유도 수평면 운동방정식을 얻을 수 있다.

스웨이(Sway) 방정식 :

$$\begin{aligned}
m\dot{v} + mur &= \frac{1}{2}\rho l^4 Y'_r \dot{r} \\
& + \frac{1}{2}\rho l^3 (Y'_v \dot{v} + Y'_r ur) \\
& + \frac{1}{2}\rho l^2 (Y'_v uv + u^2 Y'_{\delta r} \delta r)
\end{aligned} \quad (7)$$

요(Yaw) 방정식 :

$$\begin{aligned}
I_z \dot{r} &= \frac{1}{2}\rho l^5 N'_r \dot{r} \\
& + \frac{1}{2}\rho l^4 (N'_r ur + N'_v v) \\
& + \frac{1}{2}\rho l^2 (Y'_{v uv} + u^2 N'_{\delta r} \delta r)
\end{aligned} \quad (8)$$

3. 수중운동체의 심도 및 방향 제어기 설계

수중운동체의 동적특성은 불확실한 모델과 모델링하기 어려운 외란을 가진 매우 비선형성이 높은 시스템으로 나타난다. 이러한 시스템의 정밀한 심도와 방향 제어를 위하여 가변구조 시스템 이론 연구⁽¹⁰⁾에 기초를 한 슬라이딩모드제어로 강인한 제어기를 설계한다.

3.1 슬라이딩모드 이론 고찰

3.1.1 슬라이딩모드제어 방정식

제어기 설계는 표준 상태공간 방정식으로 나타난 선형화된 운동방정식으로 시작한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{9}$$

여기서, $x \in R^n$ 는 상태변수
 $u \in R^m$ 는 제어입력벡터

$A \in R^{n \times n}$
 $B \in R^{n \times m}$
 n 는 상태변수의 개수
 m 은 제어입력의 개수

시스템 식 (9)를 위한 슬라이딩모드제어입력은 식 (10)과 같이 형성된다.

$$u = \hat{u} + \bar{u} \tag{10}$$

식 (10)에서 \hat{u} 는 선형모델 식 (9)를 기초로 하는 선형제한 제어입력이고, \bar{u} 는 절환평면, 즉 $\sigma(x) = S^T x = 0$, $S \in R^{n \times m}$, $\sigma \in R^m$ 에 관하여 시스템의 위치에 따라서 부호를 절환하는 비선형 제한이다.

3.1.2 Liapunov 함수

Liapunov 함수의 정의에 의하여

$$V(x) = \frac{1}{2} [\sigma(x)^2] \\ = \frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2) \tag{11}$$

만약 $\dot{V}(x)$ 이 음의 한정함수이면, 절환평면식의 점근적 안정성이 보장된다.

$$\dot{V}(x) = \sigma_1 \dot{\sigma}_1 + \sigma_2 \dot{\sigma}_2 + \dots + \sigma_m \dot{\sigma}_m < 0 \tag{12}$$

식 (13)이 사실이라면,

$$\sigma_1 \dot{\sigma}_1 < 0, \sigma_2 \dot{\sigma}_2 < 0, \dots, \sigma_m \dot{\sigma}_m < 0 \tag{13}$$

아래 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\sigma}_1 = -\eta_1^2 \text{sign}(\sigma_1)$$

$$\dot{\sigma}_2 = -\eta_2^2 \text{sign}(\sigma_2) \\ \vdots \\ \dot{\sigma}_m = -\eta_m^2 \text{sign}(\sigma_m) \tag{14}$$

3.1.3 제어입력의 결정

운동방정식과 절환평면식을 이용하여 식 (14)에 적용하면 결과식은 다음과 같다.

$$S^T(Ax + Bu) = -K_n \\ K_n = [\eta_1^2 \text{sign}(\sigma_1), \eta_2^2 \text{sign}(\sigma_2), \dots, \eta_m^2 \text{sign}(\sigma_m)]^T \tag{15}$$

여기서,

$$u = (S^T B)^{-1} S^T A x - (S^T B)^{-1} K_n \tag{16}$$

이것은 식 (10)과 똑같은 형태를 가진다. 즉,

$$\hat{u} = -(S^T B)^{-1} S^T A x \tag{17}$$

$$\bar{u} = -(S^T B)^{-1} K_n \tag{18}$$

식 (17)을 시스템 식 (9)에 적용시키면

$$\dot{x} = [A - B(S^T B)^{-1} S^T A] x \tag{19}$$

이것은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = (A - BK) x, K = (S^T B)^{-1} S^T A \tag{20}$$

이득행렬 K 는 극점배치(pole placement)기법이나 LQR방법으로 찾을 수 있다.

3.1.4 슬라이딩 평면의 결정

A_c 와 K 로 S 를 결정할 수 있다. 식 (20)을 이용하여 A_c 의 표현식으로 새로이 유도하면 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$S^T A_c = 0, A_c = A - BK \tag{21}$$

3.2 심도제어기 설계

3.2.1 비례-적분-미분제어를 이용한 심도제어기 Ziegler와 Nichols가 개발한 방법⁽¹¹⁾으로 심도와

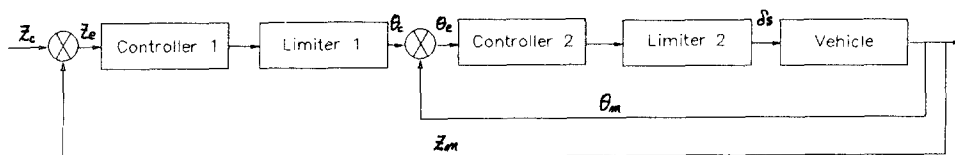


Fig. 1 Block diagram of depth control for submersible Vehicles

Table 1 Gains for depth control

	Controller 1			Controller 2		
	K _{p1}	K _{i1}	K _{d1}	K _{p2}	K _{i2}	K _{d2}
Max	0.03528	0.004	0.0285	24.94	0.44345	25.42
Min.	0.5158	1.0	0.0	0.67	1.0	0.0

방향제어 알고리즘을 설계하였다. 수중운동체의 심도제어를 위한 블록선도를 나타내면 Fig. 1과 같다.

블록선도에서 Z_c 는 명령심도, Z_m 은 측정심도, Z_e 는 심도오차를 나타낸다. 또한 θ_c , θ_m , θ_e 는 각각 피치각에 대한 명령, 측정치, 오차를 나타내고, δs 는 제어판의 크기를 나타낸다. 제어기 1, 2는 심도와 피치각 제어기로서 기본구조는 비례-적분-미분 제어 형태를 가진다. 외부회로는 심도를 제어하기 위한 제어기로서 식 (22)와 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \theta_c = & -K_{p1}(Z_c - Z_m) - K_{d1}u \sin \theta_m \\ & - K_{i1} \int (Z_c - Z_m) dt \end{aligned} \quad (22)$$

피치각 제어를 위한 내부회로 제어기는 식 (23)과 같다.

$$\delta s = K_{p2}(\theta_c - \theta_m) - K_{d2}\dot{\theta}_m + K_{i2} \int (\theta_c - \theta_m) dt \quad (23)$$

Limitter 1은 안전 조종제어를 위하여 최대 피치각을 제한하기 위한 것으로 수중운동체의 운항조건에 따라 가변할 수 있는 것으로 공칭 최대피치각은 $\pm 8^\circ$ 로 설정하였다. 그리고 Limitter 2는 제어판의 각도를 제한하는 것으로 선수타는 $\pm 45^\circ$, 선미타는 $\pm 25^\circ$ 로 한계치를 설정하였다. 시뮬레이션에 사용한 제어이득은 Table 1과 같다.

3.2.2 슬라이딩모드제어를 이용한 심도제어기

슬라이딩 평면과 제어입력을 결정하기 위하여 시스템을 속도 8Kts에서 선형화를 하였다. 선형화된 상태공간 방정식을 유도하면 식 (24)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0354 & 1.1461 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0022 & -0.1132 & -0.0063 & 0.0 \\ 0.00 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & -4.112 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.008 & -0.0797 \\ 0.0018 & -0.0089 \\ 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta b \\ \delta s \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (24)는 다음과 같이 분리하여 표현할 수 있다.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -0.0354 & 1.1461 \\ 0.0022 & -0.1132 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \\ -0.0063 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \\ -4.112 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -0.0080 & -0.0797 \\ 0.0018 & -0.0089 \end{bmatrix}$$

$$y_1 = [w, g]^T, \quad y_2 = [\theta, z]^T, \quad u = [\delta b, \delta s]^T \quad (25)$$

슬라이딩모드제어기는 이 선형시스템을 기초로 한다. 슬라이딩 평면과 제어입력은 극점배치기법을 이용하여 설계한다. 극점배치기법으로 먼저 C_2^T 를 결정하기 위하여 슬라이딩 평면위에서 시스템의 극점을 위치시킨다.

$$\text{Poleplace}[A_{22} - A_{21}C_2^T] \quad (26)$$

두 극점을 선정하면 C_2^T 를 결정할 수 있다.

$$C_2^T = \begin{bmatrix} 0.264 & -0.008 \\ 0.528 & -0.016 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식 (27)을 슬라이딩 평면식에 대입하여 슬라이딩 평면을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= w + 0.264\theta - 0.008(z - z_c) \\ \sigma_2 &= q + 0.528\theta - 0.016(z - z_c) \end{aligned} \quad (28)$$

슬라이딩 평면이 계산되면 제어입력은 식 (16)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta b &= 3.3189w - 95.1095\dot{\theta} - 20.6584\theta \\ &+ 41.4698\eta^2 \text{satsgn}(\sigma_1) \\ &- 370.2799\eta^2 \text{satsgn}(\sigma_2) \\ \delta s &= -0.8778w + 27.2577\dot{\theta} + 2.4885\theta \\ &+ 8.3872\eta^2 \text{satsgn}(\sigma_1) + 37.2019\eta^2 \text{satsgn}(\sigma_2) \end{aligned} \quad (29)$$

3.3 방향제어기 설계

3.3.1 비례-적분-미분제어를 이용한 방향제어기 수중운동체의 방향제어를 위한 블록선도를 간단

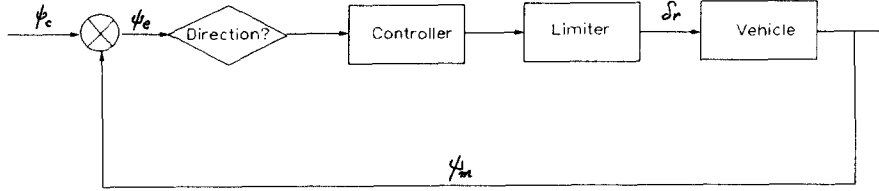


Fig. 2 Block diagram of course control for submersible Vehicles

히 표현하면 Fig. 2와 같다.

위의 블록선도에서 ψ_c 는 명령방향각, ψ_m 은 측정 방향각, ψ_e 는 방향각오차를 나타낸다. 또한 δr 은 방향타각의 크기를 나타낸다. 방향각을 제어하기 위한 제어기는 심도제어와 마찬가지로 비례-적분-미분제어 형태로 설계되었고, 구성식은 다음과 같다.

$$\delta r = -K_p \psi_{BACK} - K_{d1} \delta r + K_{de} \frac{d\psi_{BACK}}{dt} - K_i \int \psi_{BACK} dt \quad (30)$$

여기서, $\psi_{BACK}(t) = \psi_{BACK}(t-dt)e^{-\frac{dt}{\tau_a}} + (\psi_c(t) - \psi_m(t))(1 - e^{-\frac{dt}{\tau_a}})$ 의 관계가 있고, δr 은 실제 측정 방향타각을 나타낸다. 또한 Fig. 2에서 방향결정 블록은 명령방향각으로 수중운동체가 움직일때 명령값과 초기측정치의 차이가 180° 보다 작은 경우에는 시계 방향으로, 반대의 경우에는 반시계방향으로 운동을 하도록 판단하는 것이다. 시뮬레이션에 사용된 제어이득은 Table 2와 같다.

3.3.2 슬라이딩모드제어를 이용한 방향제어기

방향제어기 설계를 위한 시스템 모델은 식 (7), (8)을 이용하여 식 (31)과 같이 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.160 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.006 \\ 0.0 \end{bmatrix} \delta r \quad (31)$$

슬라이딩 평면 방정식은 식 (32)와 같은 형태로 구성할 수 있다.

$$\sigma(x) = S^T x = 0$$

Table 2 Gains for course control

	K_p	K_i	K_{d1}	K_{d2}
Max.	0.75	0.01	-0.112	0.0
Min.	0.0	0.0	0.0	0.0

$$\text{여기서, } S^T = [1, s_2]^T \quad (32)$$

슬라이딩 평면 식 (32)를 상태변수와 슬라이딩 평면계수로 표현하면 식 (33)과 같이 된다.

$$\sigma(x) = r + S_2 \psi \quad (33)$$

등가제어방법을 사용하면 선형모델의 폐회로방정식은 식 (34)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A - B(S^T B)^{-1} S^T A]x \\ \text{또는, } \dot{x} &= (A - BK)x \end{aligned} \quad (34)$$

여기서, 이득벡터 K 는 표준 극점배치방법으로 구할 수 있다. 극점배치방법으로 K 를 계산하고 나면 식 (34)를 이용하여 슬라이딩 평면 행렬을 구할 수 있다.

$$S^T(A - BK) = 0 \quad (35)$$

즉, 슬라이딩 평면은 식 (36)과 같이 나타난다.

$$\sigma(x) = r + 0.5(\psi - \psi_c) \quad (36)$$

이제 슬라이딩모드제어 입력을 결정하기 위하여 먼저 Liapunov 함수를 정의하면

$$V(x) = \frac{1}{2}(\sigma(x))^2$$

$$\text{여기서, } \sigma(x) = r + 0.5(\psi - \psi_c) \quad (37)$$

슬라이딩 평면위에서 수중운동체의 점근적 안정성이 보장되기 위해서는 $\dot{V}(x)$ 가 음의 한정함수라야 한다. 즉,

$$\begin{aligned} \sigma(x) \dot{\sigma}(x) &= -\eta^2 \text{abs}(\sigma(x)) \\ \text{또는, } \dot{\sigma}(x) &= -\eta^2 \text{sign}(\sigma(x)) \end{aligned} \quad (38)$$

식 (38)을 이용하여 식 (32)를 새로이 정리하면 식 (39)와 같이 표현된다.

$$S^T(Ax + Bu) = -\eta^2 \text{sign}(\sigma(x)) \quad (39)$$

식 (39)에서 등가제어입력 u 에 대하여 전개하면

$$u = -(S^T B)^{-1} S^T A x - (S^T B)^{-1} \eta^2 \text{sign}(\sigma) \quad (40)$$

즉, 수중운동체의 방향제어를 위한 슬라이딩모드 제어입력은 다음과 같이 유도된다.

$$\delta r = 56.667r + 83.35 \text{sign}(\sigma) \quad (41)$$

4. 수중운동체 조종 시뮬레이터

수중운동체의 조종제어 알고리즘을 설계하여 실선에 설치, 운용하기 전에 개발된 제어기의 검증, 제어성능의 사전예측 및 실선운용시 예상되는 위험을 사전에 예측하여 대책을 수립하기위해 육상에서 실시간처리 조종 시뮬레이터의 실험을 수행하였다. 시뮬레이터는 수중운동체의 조종제어 와 각종상태 전시기능을 가진 조종 제어기 및 전시, ⁽¹²⁾ 유압실린더 기구를 이용하여 공간상의 물체가 6자유도 운동을 할수 있게 하는 운동재현기 및 실시간처리 능력을 갖춘 병렬연산장치⁽¹³⁾ 와의 전기적, 기계적 인터페이스로 구성되어 있다.

4.1 조종제어기 및 전시장치

조종제어기는 트랜스퓨터(Transputer) 모듈, Tram 모듈, 주전산기, 그래픽(Graphic) 모듈 및 조종간으로 구성이 되고, 하드웨어 구성은 Fig. 4와 같다.

4.1.1 트랜스퓨터 모듈

T800 32bit 프로세스들로 구성이 되어 있고, 주

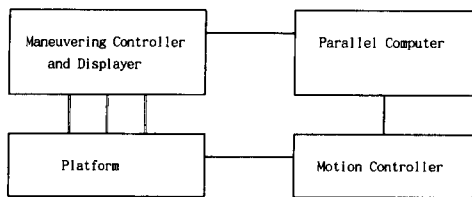


Fig. 3 Configuration of maneuvering simulator

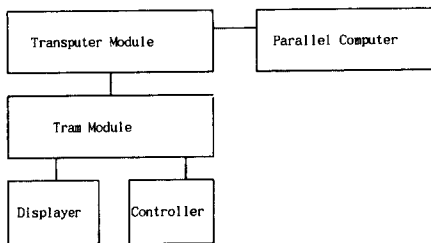


Fig. 4 Configuration of maneuvering controller and displayer

전산기로부터 프로그램을 로딩 (loading) 하여 제어 프로그램을 수행한다. 또한 Tram 모듈의 램프 (Lamp) 전시, Key 입력, A/D 및 D/A 변환보드 그리고 그래픽 모듈의 주모니터와 보조모니터를 제어한다. 병렬연산장치와는 RS-422로 인터페이스 되어있다.

4.1.2 Tram 모듈

T222 bit 프로세스들로 구성되어 있고, Tram 모듈은 병렬연산장치로부터 입력된 수중운동체의 상태에 대한 전시제어와 전시판넬 스위치 및 Key 입력에 따라 표시되는 각종 램프들을 제어하는 램프 전시제어, Key 입력, A/D 및 D/A 변환보드로 이루어져 있다.

4.1.3 주전산기

프로그램 작성 및 수정 그리고 제어 프로그램을 트랜스퓨터 모듈로 연결부팅 (down loading) 하는 기능을 한다.

4.1.4 그래픽 모듈

주모니터와 보조모니터의 그래픽 처리를 위한 전용 프로세스 GDSII (T805 32bit 프로세스, G300 제어기, 2M Video RAM) 가 사용되었다.

4.2 운동재현기

운동재현기는 유압공급원, 유압운동기구, 센서, 전기전자회로, 제어기들로 구성되어 있으며 기능별로 분류하면 플랫폼 (Platform), 유압공급원, 제어기로 구분될 수 있다. 전체적인 구성도는 다음과 같다.

4.2.1 유압공급원

유압공급원은 전동모터, 유압펌프, 릴리프밸브, 솔레노이드 (Solenoid), 레벨게이지, 온도계, 오일

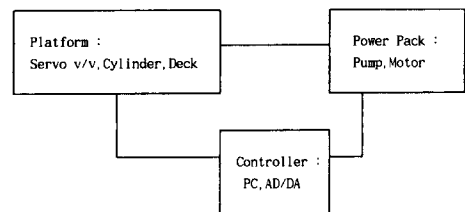


Fig. 5 Configuration of motion simulator

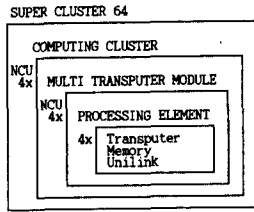


Fig. 6 Configuration of super cluster (Model-64)

필터, 필터센서, 압력계, 전류계 등으로 구성되어 있다.

4.2.2 플랫폼

플랫폼은 부하중량을 싣고 움직이는데 필요한 부분으로 Deck, 실린더, 서보밸브, 축압기 등으로 이루어져 있다.

4.2.3 제어기

제어기는 유압공급원과 플랫폼으로부터 정보를 받아들이고 또한 명령을 내려서 원하는 운동을 제어하는 부분이다. 이것은 제어판넬, AD/DA변환기와 PLC로 이루어져 있다.

4.3 병렬처리 연산기

4.3.1 Super Cluster (Model-64)

조종 시뮬레이터 구성에 사용한 병렬연산장치인 SC-64는 4개의 고성능 컴퓨팅 클러스터(computing cluster)와 6개의 NCU(Network Configuration Unit)로 구성된다.

4.3.2 병렬처리 운동 프로그램 구조

수중운동체의 운동방정식 프로그램은 일련의 알고리즘으로 구성되기가 어렵고 각각 독립적으로 수행되면서 통신을 통하여 정보교환을 해야하므로 전체적으로는 Tree형의 구조를 가지며, 부분적으로 Ring형 구조도 가지는 복합형의 Network로 구성되었다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 가변구조 제어기의 타당성을 분석하기 위하여 전산 시뮬레이션과 시뮬레이터를 이용하여 실험을 수행하였으며 또한 비례-적분-미분 제어기와

의 성능비교를 통하여 가변구조 제어기의 불확실한 모델, 즉 모델오차에 따른 강인한 제어성능을 고찰하였다. 수중운동체 운동방정식은 병렬연산처리장치에서 Runge-Kutta 방법으로 계산하였으며 미분시간은 0.01초로, 적용언어는 C언어를 사용하였다.

5.1 1심도제어기 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 심도제어기의 성능분석을 위한 시뮬레이션 조건은 함속도를 8 kts로 하여 초기심도 50m에서 명령심도 70 m로 심도변화를 하게 하였다. 심도, 피치각, 선미타각에 대한 비례-적분-미분제어 결과는 Fig. 7~Fig. 9에, 그리고 슬라이딩모드제어 결과는 Fig. 10~Fig. 12에 나타나 있다.

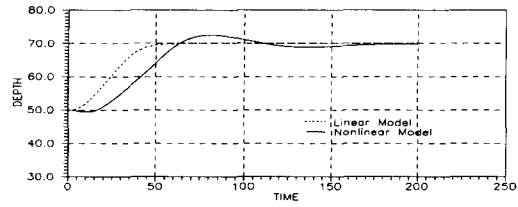


Fig. 7 Results of depth control

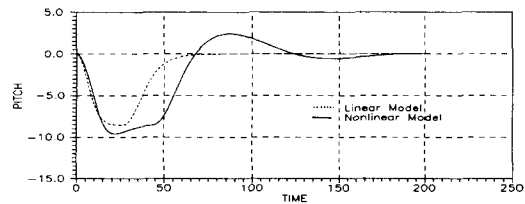


Fig. 8 Results of pitch angle control

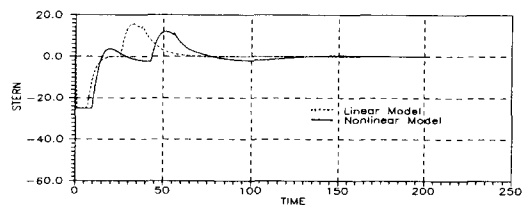


Fig. 9 Stern plane deflections

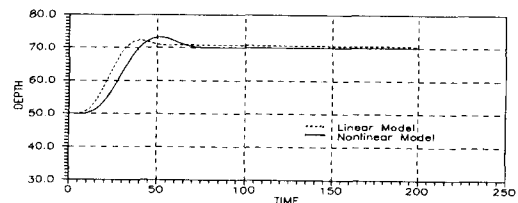


Fig. 10 Results of depth control

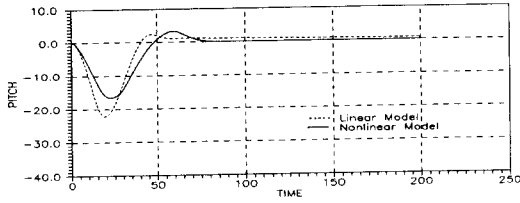


Fig. 11 Results of pitch angle control

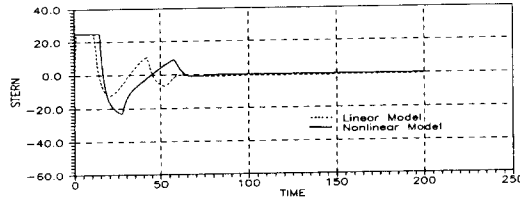


Fig. 12 Stern plane deflections

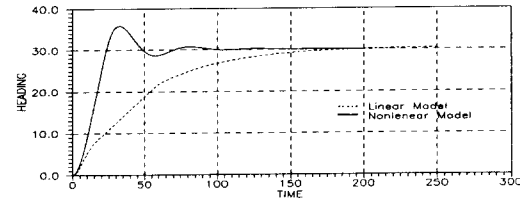


Fig. 13 Results of course control

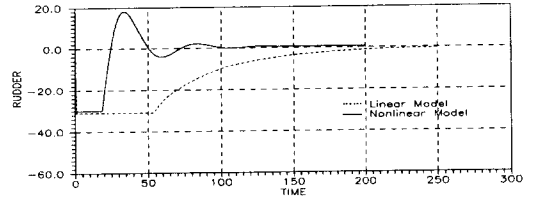


Fig. 14 Rudder deflections

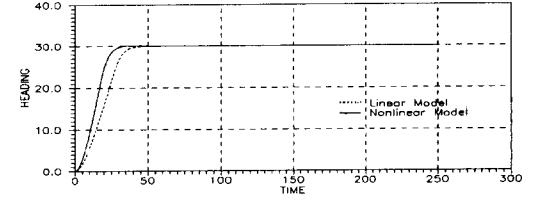


Fig. 15 Results of course control

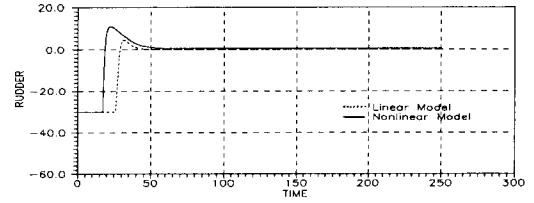


Fig. 16 Rudder deflections

5.1.1 비례-적분-미분제어를 이용한 심도제어

설계된 비례-적분-미분제어의 경우에 비선형 모델 시뮬레이션시 시스템의 비선형 특성으로 인하여 오버슈트가 크게 발생하였고, 상승시간과 정상상태 도달시간도 비교적 크게 나타났다.

5.1.2 슬라이딩모드제어를 이용한 심도제어

슬라이딩모드제어의 경우에 시스템의 비선형 특성으로 인하여 약간의 오버슈트가 발생하나 비례-적분-미분제어와 비교하여 양호한 과도응답특성을 나타내었고, 정상상태 도달시간도 빠르게 나타났다. 따라서 슬라이딩모드제어기는 모델오차에 강인함을 알 수 있다.

5.2 방향제어기 시뮬레이션 결과 및 고찰

설계된 방향제어기의 성능분석을 위한 시뮬레이션 조건은 함속도를 8 kts로 하여 초기 방향각 0도에서 명령방향각 30도로 방향변화를 하게 하였다. 방향각, 방향타각에 대한 비례-적분-미분제어의 시뮬레이션 결과는 Fig. 13, Fig. 14, 슬라이딩모드 제어 결과는 Fig. 15, Fig. 16에 나타나 있다.

5.2.1 비례-적분-미분제어를 이용한 방향제어

설계된 비례-적분-미분제어의 경우에 시스템의 모델오차로 인하여 심한 오버슈트가 발생하였고, 정상상태 도달시간도 매우 크게 나타났다.

5.2.2 슬라이딩모드제어를 이용한 방향제어

슬라이딩모드제어의 경우에 시스템의 비선형 특성에도 대해서도 오버슈트가 발생하지 않고 상승시간도 빠른 양호한 과도응답 특성을 나타내었다.

6. 결 론

운항속도 및 부력상태에 따라 동적특성이 매우 복잡하게 나타나며, 또한 외부형상이 기하학적 상하비대칭으로 인한 유체역학적인 특성때문에 심한 연성효과 및 비선형 특성을 가지는 수중운동체에 대하여 슬라이딩모드제어로 모델링 오차나 외란에 강인한 심도 및 방향을 제어하는 제어기를 설계하였다. 또한 비례-적분-미분제어기 론으로 제어기를 구성하여 시뮬레이션과 시뮬레이터 실험을 통하여 두 제어기의 제어성능(상승시간, 오버슈트, 정상상

태 도달시간, 정상상태 오차 등)을 비교분석하여 슬라이딩모드 제어가 모델오차에 강인함을 보여 주었다. 본 연구에서 개발된 수중운동체의 자동조종 제어시스템은 기존의 비례-적분-미분제어기보다 우수한 제어성능을 나타내므로 실선 적용시에도 양호한 심도 및 방향 제어능력을 보여 주리라 기대되고 유사한 수중운동체의 조종제어 시스템에 활용이 가능할 것으로 예상된다. 현재 설계된 제어시스템은 방향제어의 경우에 있으서는 매우 우수한 제어성능을 보여주나 심도제어의 경우에 있으서는 약간의 오버슈트가 발생한다. 앞으로 심도제어의 성능 개선을 위하여 다변수 슬라이딩모드제어기 설계에 대한 좀더 보완연구가 있어야 될 것으로 생각되고, 또한 수중운동체의 제어기 설계를 위해 최근에 많이 연구되고 있는 인공지능(퍼지, 신경망회로, 유전 알고리즘 등) 제어분야에 관한 적용연구도 연구 검토되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 양승윤, 1992, "확장칼만필터를 이용한 수중운동체의 유체계수 식별기법 연구," NSRD-517-92322, 국방과학연구소.
- (2) Cristi R., Papoulias, F. A. and Healey, A. J. 1990, "Adaptive Sliding Mode Control of Autonomous Underwater Vehicle in the Dive Plane," *IEEE J. of Ocean Eng.*, Vol. 15, No. 3, pp. 152~160.
- (3) Marshfield, W. B., 1991, "Submarine Periscoping-Depth Keeping Using an H-Infinity Controller Together with Sea Noise Reduction Notch Filter," *Trans. Inst. MC.*, Vol. 13, pp. 233~240.
- (4) Michael H. Davis, 1989, "Real Time Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle," Master Thesis, Naval Postgraduate School.
- (5) 이동익, 양승윤, 최종락, 김홍열, 1991, "퍼지 제어를 이용한 수중운동체의 심도제어," '91 한국 퍼지 시스템 학회 논문집, Vol. 1, No. 2, pp. 80~92.
- (6) Abkowitz, M. A., 1969, *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*, MIT Press.
- (7) Morton Gertler and Grant R. Hagen, 1967, "Standard Equations of Motion for Submarine Simulation," *Research and Development Report*

2510, Naval Ship R. &D. Center, Washington, D. C.

- (8) Feldman, J., 1979, "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equation of Motion," *DTNSRDC/SPD-0393-09*, 1979.
- (9) Romero, E., 1972, "Mathematical Models and Computer Solution for the Equation of Motion of Surface Ships and Submarine," Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- (10) Utkin, Vadim I., 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Tran. on Automatic Control*, Vol. AC-22, No. 2.
- (11) Karl Johan Astrom and Tore Hagglund, 1988, *Automatic Tuning of PID Controller*, Instrument Society of America.
- (12) 양승윤 등, 1993, "조종제어기 및 전시장치설계," NSRD-513-931064, 국방과학연구소.
- (13) 이경중 등, 1993, "조종시뮬레이터 설계연구 (II)," NWS-513-931065, 국방과학연구소.
- (14) Itkis, U., 1976 *Control Systems of Variable Structure*, John Wiley & Sons.

부 록

6자유도 운동방정식

Axial force

$$\begin{aligned}
 & m[\dot{u} - vr + wq - x_c(q^2 + r^2) + y_c(pq - r) \\
 & + z_c(pr + q)] = \\
 & + \frac{\rho}{2} l^4 [X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rp}rp] \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 [X_u \dot{u} + X_{vr}vr + X_{wq}wq] \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 [X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2] \\
 & + \frac{\rho}{2} l^2 [X_{vv}, v^2 + X_{ww}, w^2] (\eta - 1)
 \end{aligned}$$

Lateral force

$$\begin{aligned}
 & m[\dot{v} - wp + ur - y_c(r^2 + p^2) + z_c(qr - p) \\
 & + x_c(qp + r)] = \\
 & + \frac{\rho}{2} l^4 [Y_r \dot{r} + Y_p p + Y_{p|p}|p|] \\
 & + Y_{pq}pq + Y_{qr}qr \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 [Y_v \dot{v} + Y_{vq}vq + Y_{wp}wp + Y_{wr}wr] \\
 & + \frac{\rho}{2} l^3 [Y_r ur + Y_p up + Y_{v|v}|v|] (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} |r|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\rho}{2} l^2 [Y_* u^2 + Y_v uv + Y_{v|v}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] + Y_{vw} uv \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 Y_{r\eta} ur (\eta - 1) + \frac{\rho}{2} l^2 [Y_{r\eta} uv \\
& + Y_{v|v|\eta}| + v|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] (\eta - 1)
\end{aligned}$$

Normal force

$$\begin{aligned}
& m[\dot{w} - uq + vp - z_c(b^2 + q^2) + x_c(rp - q) \\
& + y_c(rq + p)] = \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [Z_q \dot{q} + Z_{pp} p^2 + Z_{rr} r^2 + Z_{rp} rp] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [Z_w \dot{w} + Z_{vr} vr + Z_{vp} vp] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [Z_q uq + Z_{w|q}| \frac{w}{|w|} |(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| |q|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^2 [Z_* u^2 + Z_w uw + Z_{w|w}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 Z_{q\eta} uq (\eta - 1) + \frac{\rho}{2} l^2 [Z_{w\eta} uw \\
& + Z_{w|w|\eta}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] (\eta - 1)
\end{aligned}$$

Rolling moment

$$\begin{aligned}
& I_x p + (I_z - I_y) qr - (\dot{r} + pq) I_{xz} + (pr - q) I_{xy} \\
& + m[y_c(\dot{w} - uq + vp) - z_c(\dot{v} - wp + ur)] = \\
& + \frac{\rho}{2} l^5 [K_p p + K_r \dot{r} + K_{qr} qr + K_{pq} pq + K_{p|p}|p|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [K_p up + K_r ur + K_v v] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [K_{vq} vq + K_{wp} wp + K_{wr} wr] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [K_* u^2 + K_v uv + K_{vv} v(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 K_{vw} uv + \frac{\rho}{2} l^3 K_{*\eta} u^2 (\eta - 1)
\end{aligned}$$

Pitching moment

$$\begin{aligned}
& I_y q + (I_x - I_z) rp - (p + qr) I_{xy} + (p^2 - r^2) I_{zx} \\
& + (qp - r) I_{yz} + m[z_c(\dot{u} - vr + wq) \\
& - x_c(\dot{w} - uq + vp)] = \\
& + \frac{\rho}{2} l^5 [M_q \dot{q} + M_{pp} p^2 + M_{rr} r^2 + M_{rp} rp + M_{q|q}|q|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [M_w \dot{w} + M_{vr} vr + M_{vp} vp] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [M_q uq + M_{w|q}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| |q|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [M_* u^2 + M_w uw + M_{w|w}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 M_{vv} v^2 + \frac{\rho}{2} l^4 M_{q\eta} uq (\eta - 1) \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [M_{w\eta} uw + M_{w|w|\eta}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] (\eta - 1)
\end{aligned}$$

Yawing moment

$$\begin{aligned}
& I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq - (\dot{q} + rp) I_{yz} + (q^2 - p^2) I_{xy} \\
& + (rq - p) I_{xz} + m[x_c(\dot{v} - wp + ur) - y_c(\dot{w} - vr \\
& + uq)] = \\
& + \frac{\rho}{2} l^5 [N_r \dot{r} + N_p p + N_{pq} pq + N_{qr} qr + N_{r|r}|r|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [N_v \dot{v} + N_{wr} wr + N_{wp} wp + N_{vq} vq] \\
& + \frac{\rho}{2} l^4 [N_p up + N_r ur + N_{v|r}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}| |r|] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [N_* u^2 + N_v uv + N_{v|v}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 N_{vw} uv + \frac{\rho}{2} l^4 N_{r\eta} ur (\eta - 1) \\
& + \frac{\rho}{2} l^3 [N_{v\eta} uv + N_{v|v|\eta}|(v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}}] (\eta - 1)
\end{aligned}$$