

동적 발란스의 원리를 이용한 수중 잠수정-매니플레이터 시스템의 동역학 시뮬레이션

Dynamic Simulation of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Using Principle of Dynamical Balance

한 종 희¹ · 정 완 균[†]

Jonghui Han¹ · Wan Kyun Chung[†]

Abstract In this paper, two schemes are introduced for dynamic simulation of underwater robotic systems. One is principle of dynamical balance, which is an easy and powerful tool for formulating dynamic equations of composite systems such as underwater vehicle-manipulator system. In the dynamic modeling, this principle gives us the closed-form of dynamic equations on matrix Lie group. The other is geometric integration algorithm, called 4-th order explicit Munthe-Kaas method. By this method, the derived differential equations can be integrated preserving geometric structure. Adopting these two schemes, dynamic simulation of underwater vehicle-manipulator system can be conducted more easily and more reliably.

Keywords: Underwater vehicle-manipulator system, Dynamic simulation

1. 서론

수중 잠수정-매니플레이터 시스템(Underwater Vehicle-Manipulator System, 이하 UVMS)은 수중에서의 작업을 목적으로 수중 로봇에 로봇 팔을 장착한 시스템이다. UVMS가 로봇 팔을 사용하여 작업을 하는 경우 로봇 팔의 움직임은 잠수정에 영향을 주게 되고 이 영향은 잠수정이 원하는 위치로부터 벗어나게 만들 수 있다. 결국 변화된 잠수정의 위치 및 자세는 로봇 팔의 말단 장치의 위치 및 자세를 변화시켜 주어진 작업을 성공적으로 수행하지 못하도록 한다. 이러한 UVMS의 동역학 특성을 이해하기 위해서는 실제 실험이 가장 정확한 방법이나 비용 및 시간 등의 문제로 인해 적절한 방법이라 할 수 없다. 또 파악된 UVMS의 동역학 특성을 바탕으로 개발한 제어기의 테스트를 위해서 실제 실험을 하는 것 역시 효율적이지 못하다. 이 경우 UVMS의 동역

학 모의실험을 할 수 있는 모의실험 환경이 하나의 답이 될 수 있다.

일반적으로 동역학 시뮬레이션은 순동역학(forward dynamics) 단계와 적분 단계의 두 단계로 이루어져 있다. 순동역학 단계에서는 시스템에 힘/모멘트가 주어졌을 때 운동 방정식으로부터 시스템의 가속도 혹은 상태(state)의 시간에 대한 미분 값을 구한다. 그리고 적분 단계에서는 구해진 가속도로부터 속도 및 위치를 계산한다. 따라서 모의실험으로부터 정확한 결과를 얻기 위해서는 시스템의 동역학 모델링을 정확히 수행하고 적분을 정확하게 하는 것이 중요하다.

그러나 UVMS와 같은 다물체 시스템의 경우에는 동역학 방정식이 매우 복잡하기 때문에 구하는 게 쉽지 않다. UVMS의 동역학 모델링을 위해서는 몇 가지 방법이 소개되었는데, Newton-Euler 방법^[1]이나, Lagrange-Euler 방법^[2], 그리고 Kane 방법^[3] 등이 그 예들이다. 그러나 이들 방법을 통해 UVMS의 closed-form의 동역학 방정식은 얻기 힘들기 때문에 Newton-Euler의 재귀적인 방법(iterative Newton-Euler)^[4], articulated body dynamic 알고리즘^[5]이 동역학 시뮬레이션을 효율적으로 하기 위

¹ 포항공과대학교 기계공학과 박사과정(E-mail : paper@postech.ac.kr)

[†] 교신저자 : 포항공과대학교 기계공학과 교수
(E-mail : wkchung@postech.ac.kr)

한 방법으로 제안되었다. 이 방법들은 시스템이 바뀌는 경우, 특히 동역학 모델링이 완료된 로봇 팔이 부착되는 경우에도 잠수정을 베이스로 모델링이 새롭게 수행되어야 한다. 또 closed-form의 동역학 방정식이 아니므로 동역학을 기반으로 제어를 설계하는데도 어려움이 있다.

본 논문에서는 UVMS의 동역학 모델링을 위해 동적 발란스의 원리(principle of dynamical balance)^[6]를 사용하였다. 동적 발란스의 원리는 동역학 모델을 이미 알고 있는 시스템들이 결합하여 하나의 시스템을 이룰 때, 결합된 시스템의 동역학 방정식을 구하는데 유용한 방법이다. 수중 잠수정^[7,8]이나 매니플레이터^[2]에 대한 동역학 모델은 이전 연구에 의해 잘 알려져 있으므로 이 두 시스템이 결합되어 UVMS를 이루는 경우 동적 발란스의 원리를 사용하여 UVMS의 동역학 방정식을 쉽게 구할 수 있다. 더욱이 동적 발란스의 원리는 special Euclidean Group(SE(3))상에서 동역학 모델링을 수행하므로 일반적인 수치 적분법 대신에 Munthe-Kaas 방법^[9]과 같은 SE(3)의 위상 공간 상에서의 적분법을 사용할 수 있다. 위상 공간 상에서의 적분법을 사용하면 수치 적분법에서 발생하는 특이점(singularity)을 회피할 수 있으며, 제약 조건(constraint)을 만족시키기 위한 부가적인 단계가 생략될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 동적 발란스의 원리를 설명한다. 이를 위해 수학적 표현법과 강체의 운동 방정식을 Lie Group상에서 모델링한다. 3장에서는 모델링된 동역학 방정식을 위상 공간상에서 적분하는 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 UVMS의 동역학 시뮬레이션을 위해 동적 발란스의 원리를 사용하여 UVMS의 동역학 모델링을 수행한다. 그리고 5장에서는 소형 UVMS인 PETASUS와 PUM에 적용하여 모델링을 수행하고 모의실험을 수행한 결과를 제시한다. 그리고 5장에서는 결론과 앞으로의 연구 계획에 대해 설명한다.

2. 동적 발란스의 원리

2.1 강체(Rigid body)의 운동 방정식

2.1.1 Lie Group 상의 강체의 기구학 식

일반적으로 3차원 공간상에서 움직이는 강체의 위치 및 자세는 기준 좌표계에 대한 강체 좌표계까지의 거리 벡터 및 회전 행렬(rotational matrix)로 구성되는 동질 변환 행렬에 의해 다음과 같이 표현된다.

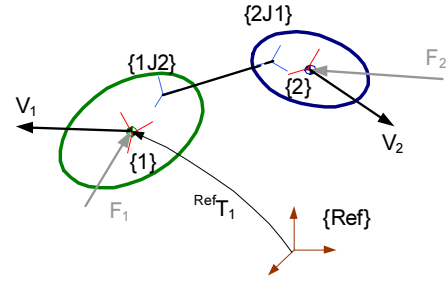


그림 1. 3차원 공간 상의 강체 및 좌표계

$${}^{Ref}T_1 = \begin{bmatrix} {}^{Ref}R_1 & {}^{Ref}r_1 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \in SE(3) \quad (1)$$

위 식에서 위 첨자는 기준이 되는 좌표계를 의미하며, 아래 첨자는 표현하고자 하는 좌표계를 의미한다. 따라서 ${}^{Ref}r_1 \in \mathbb{R}^3$, ${}^{Ref}R_1 \in SO(3)$ 그리고 ${}^{Ref}T_1$ 은 각각 기준 좌표계 {Ref}에 대해 강체 좌표계 {1}의 위치 벡터, 회전 행렬 그리고 동질 변환 행렬을 나타낸다(그림 1).

그리고 강체 {1}의 기준 좌표계에 대한 선형 속도($v_1 \in \mathbb{R}^3$)와 회전 속도($\omega_1 \in \mathbb{R}^3$)를 강체 좌표계에서 표현한 벡터를 바디 트위스트($V_1 \in \mathbb{R}^6$)로 정의한다. 바디 트위스트는 Lie Group의 접선 공간으로 Lie algebra가 된다^[10].

$$V_1 = [v_1^T \ \omega_1^T]^T \quad (2)$$

그리고 바디 트위스트와 동질 변환 행렬 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} [V_1] &= {}^{Ref}T_1^{-1} \dot{{}^{Ref}T_1} \\ &= \begin{bmatrix} [\omega_1] & v_1 \\ 0_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} \in se(3) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $[\omega_1] \in so(3)$ 는 skew-symmetric 행렬로서 $a \times b = [a]b = -[b]a$ 로 정의되며, $[\cdot]$ 에 대해서 바디 트위스트인 경우와 각속도가 사용된 경우에 대해 구분되어야 한다.

2.1.2 강체의 동역학 방정식

3차원에서 움직이는 강체 {1}에 대한 동역학 방정식은 Newton의 2법칙에 기반을 두어 구할 수 있다. 이를 바디 트위스트와 바디 렌치(F_1)를 이용하여 표현하면 식 (4)로 표현될 수 있다^[6].

$$F_1 = A_1 \dot{V}_1 + B_1 V_1 \quad (4)$$

위 식에서 A_1 과 B_1 은 각각 강체 {1}의 관성 행렬과 bias 행렬로 다음의 형태를 갖는다^[6].

$$A_1 = \begin{bmatrix} m_1 I_3 & -m_1 [{}^1r_{cog}] \\ m_1 [{}^1r_{cog}] & I_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} m_1 [\omega_1] & -m_1 [\omega_1] [{}^1r_{cog}] \\ m_1 [{}^1r_{cog}] [\omega_1] & -[I_1 \omega_1] \end{bmatrix}$$

m_1 은 강체 {1}의 질량을, ${}^1r_{cog}$ 은 강체 좌표계 {1}의 원점으로부터 강체의 무게중심까지의 거리를 나타낸 벡터이다. 또 I_1 은 강체 좌표계에서 구해진 관성모멘트 값이며 그리고 I_3 은 3차원의 단위행렬을 나타낸다.

바디 렌치는 강체 좌표의 중심에 작용하는 힘 ($f_1 \in \mathbb{R}^3$)과 모멘트($\tau_1 \in \mathbb{R}^3$)를 강체 좌표에서 표현한 벡터이다.

$$F_1 = [f_1^T \tau_1^T]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (6)$$

2.2 강체의 상대 운동과 관절 모델링

여러 개의 강체로 이루어진 시스템의 경우, 두 강체 간의 바디 트위스트 관계는 다음과 같이 표현된다(그림 1)^[6,10].

$$V_2 = {}^1Ad_2^{-1} V_1 + {}^1V_2 \quad (7)$$

1V_2 는 강체 {1}과 {2} 사이의 상대 바디 트위스트로 좌표계 {2}에서 표현된 벡터이며, 1Ad_2 는 Adjoint 변환 행렬로 두 강체 사이의 3차원 변환 행렬이 1T_2 일 때, 다음과 같이 정의된다^[10].

$${}^1Ad_2 = \begin{bmatrix} {}^1R_2 & [{}^1r_2] {}^1R_2 \\ 0_{3 \times 3} & {}^1R_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 두 강체가 그림 1처럼 조인트에 의해 연결이 된 경우에는 상대 속도가 조인트 축에 대한 회전 각속도만 존재하므로,

$${}^{1/2}V_{2,1} = E \dot{q} \quad (9)$$

가 성립한다. 여기서 \dot{q} 는 관절 변수의 속도이며 E 는 조인트 행렬로서 관절 좌표계에 대한 명명법과 조인트 행렬의 자세한 모델은 참고문헌^[6]에 나와 있다. 이 경우 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_2 = {}^1Ad_2^{-1} V_1 + {}^2Ad_{2,1} E \dot{q} \quad (10)$$

2.3 동적 발란스의 원리^[6]

강체 {1}에 대해 d'Alembertian 렌치를 다음과 같이 정의한다.

$$F_1^* = F_1 - A_1 \dot{V}_1 - B_1 V_1 \quad (11)$$

만약 이 강체가 동역학적으로 평형(dynamical balance)을 이루고 있으면 $F_1^* = 0$ 이 된다. 이는 두 강체가 조인트와 같은 특정 조건에 의해 결합되어 동역학적으로 평형을 이루고 있는 경우로 확장할 수 있다. 다시 말해서, 만약 두 강체가 식 (10)으로 주어진 연결 조건에 의해 결합되었을 경우, 두 강체의 d'Alembertian 렌치 및 토크는 식 (10)의 dual 표현인 다음의 식을 만족한다.

$$F_1^* = -{}^1Ad_2^{-T} F_2^* \quad (12)$$

$$\tau = -E^T {}^2Ad_{2,1}^T F_2^*$$

위 식에 각 강체의 d'Alembertian 렌치(식 (11))를 대입하면 조인트에 의해 연결된 두 강체로 이루어진 시스템의 동역학 방정식을 구할 수 있다.

두 시스템의 두 강체가 결합되었을 때도, 결합 조건의 dual 표현에 의해 정의되는 관계식에 대해 두 시스템의 d'Alembertian 렌치 및 토크가 평형을 이루어야 한다. 이와 같은 방식으로 동적 발란스의 원리를 이용하면 동역학 방정식을 알고 있는 두 시스템이 특정 연결 조건에 의해 결합될 경우 결합된 시스템의 동역학 방정식을 쉽게 구할 수 있다.

동적 발란스의 원리를 이용하여 유도된 k 개의 강체와 l 개의 조인트로 이루어진 다물체 시스템의 동역학 방정식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$WF + L\tau = M \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} V \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

위 식에서 W 와 L 은 각각 렌치/토크 influence 행렬이며 M 과 C 는 각각 전체 시스템의 관성 행렬 및 bias 행렬이다. 또 $F = [F_1^T F_2^T \dots F_k^T]^T$ 는 각각의 강체에 작용하는 렌치이며 $\tau = [\tau_1^T \tau_2^T \dots \tau_l^T]^T$ 는 조인트 토크이다. 얻어진 closed-form 방정식 (13)은 모의실험에도 적용될 수 있을 뿐 아니라 동역학에 기반한 제어기 설계에도 활용될 수 있다.

3. 위상 공간 상에서의 적분법

이 절에서는 동역학 방정식, 즉 미분 방정식을 이용하여 속도와 위치를 얻는 방법에 대해 살펴본다. 일반적으로 모의실험에서는 Euler 방법이나 Runge-Kutta 방법을 통해 수치적으로 적분하는 방법이 널리 쓰이고 있다⁷⁾. 이러한 적분 방법들은 시스템의 위치/자세가 Euler 각도나 단위 쿼터니언(unit quaternion)으로 표현되었을 때 사용되는 방법들로, 특정 각도에서 특이점이 발생한다거나 항상 제약 조건을 만족해야하는 문제점을 가지고 있다.

특히 단위 쿼터니언이 사용되는 경우, 항상 쿼터니언의 크기가 1이어야 하므로 매 적분 후, 구해진 자세 쿼터니언을 단위 쿼터니언으로 만드는 과정(normalization)이 필요하다. 이러한 문제를 회피하기 위해 Fossen은 다음의 방법을 제안하였다⁷⁾.

$$\begin{aligned} \Omega_{k+1} &= \Omega_k + h\dot{\Omega}_k \\ \dot{\Omega}_k &= J_2(\Omega_k)\omega_k + \frac{\gamma}{2}(1 - \Omega_k^T \Omega_k)\Omega_k \end{aligned} \quad (14)$$

Ω_k 는 시간 k 일 때, 잠수정 좌표계의 자세를 나타내는 단위 쿼터니언이며 ω_k 는 그 때의 잠수정의 바디 트 위스트 중 각속도를 나타내는 벡터이다. 그리고 $J_2(\Omega_k)$ 는 ω_k 를 기준 좌표계로 변환하는 행렬로, 즉 $\dot{\Omega}_k = J_2(\Omega_k)\omega_k$ 이다⁷⁾. h 는 시간 간격을 나타내며 γ 는 양수의 계인 값이다. 만약 Ω_k 가 단위 쿼터니언이면 다음의 식은 항상 0이 된다.

$$\frac{d}{dt}(\Omega_k^T \Omega_k) = 2\Omega_k^T \dot{\Omega}_k \quad (15)$$

그러나 식 (14)의 첫 번째 식으로부터 적분 후 Ω_{k+1} 은 단위 쿼터니언이 될 수 없음은 자명하다. 식 (14)의 두 번째 식을 식 (15)에 대입하면,

$$\frac{d}{dt}(\Omega_k^T \Omega_k) = \gamma(1 - \Omega_k^T \Omega_k)\Omega_k^T \Omega_k \quad (16)$$

가 된다. 만약 $\Omega_k^T \Omega_k > 1$ 이면 식 (16)의 값은 음수가 되므로 $\Omega_k^T \Omega_k$ 의 크기를 감소시킨다. 반대의 경우도 마찬가지이므로 결국 $\Omega_k^T \Omega_k$ 는 1에 수렴하게 된다. 그러나 이 과정에서 쿼터니언으로 표시된 각속도는 원래의 값과는 달라지므로 올바른 결과를 기대할 수 없다.

이는 수치적으로 적분하기 때문에 발생하는 문제이므로 이를 Lie Group 상에서 적분하는 방법을 사용하고자 한다. 일반적인 다물체 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{T}(t) &= T(t) [V(t)] \\ \dot{V}(t) &= K_V(t, T, V, q; F, \tau) \\ \dot{q}(t) &= K_q(t, T, V, q; F, \tau) \end{aligned} \quad (17)$$

위 식에서

$$\begin{bmatrix} K_V(\cdot) \\ K_q(\cdot) \end{bmatrix} = M^{-1}(WF + L\tau) - M^{-1}C \begin{bmatrix} V \\ q \end{bmatrix}$$

이다.

Lie Group 상의 미분 방정식인 식 (17)은 위상 적분법 중의 하나인 4차 Munthe-Kaas 적분법⁹⁾에 의해 적분될 수 있다. 4차 Munthe-Kaas 적분법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Theta &= \sum_{i=1}^s h b_i \text{dexp}_{-\Theta^{(i)}}^{-1} V^{(i)} \\ T(t_{k+1}) &= T(t_k) \exp(\Theta) \\ q(t_{k+1}) &= q(t_k) + \sum_{i=1}^s h b_i q^{(i)} \\ V(t_{k+1}) &= V(t_k) + \sum_{i=1}^s h b_i K_V^{(i)} \\ \dot{q} &= \dot{q}(t_k) + \sum_{i=1}^s h b_i K_q^{(i)} \end{aligned} \quad (18)$$

위 식에서 s 는 단계를 나타내며, a_{ij} 와 b_i 는 Butcher-tableau의 값들이다. 각 식의 자세한 항은 참고문헌⁹⁾에 나타나 있다.

그림 2는 위 두 가지 적분 방법에 대한 시뮬레이션 결과이다. 질량이 1kg이고, 관성 행렬이 단위행렬인 3차원 상의 강체가 초기($t=0$)에 z 축에 대해 1 rad/s의 속도를 가지고 움직이고 있으며, 기타 외력은 가해지지 않는 상황에 대한 시뮬레이션 결과이다. 모의실험은 500초간 0.1초의 적분 간격으로 수행되었다. 최종 각도는 표 1과 같다. 표에서 ‘MK4’는 4차 Munthe-Kaas 적분법에 의한 결과를, ‘Fossen’은 식 (14)와 4차 Runge-Kutta 방법에 의한 적분 결과를, 그리고 ‘Ref’는 강체의 동역학 미분방정식에 대해 오일러 각도법을 사용하여 MATLAB의 미분 방정식의 수치적분법(ode45)을 사용한 결과를 나타낸다. 이 경우 z 축에 대해서만 회전하므로 오일러 각도법을 사용하는 경우 특이점과 상관없는 일반적인 수치적분과 같으므로 비교를 위한 기준으로 사용하였다.

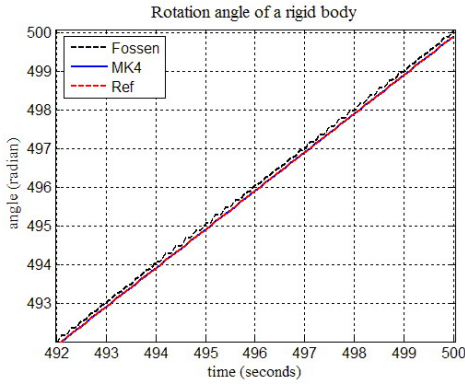


그림 2. 적분 방법에 따른 모의실험 결과

표 1. 적분 방법에 따른 최종 각도

	MK4	Fossen	Ref
yaw 각도(rad)	3.528	3.683	3.528

위 결과에서 볼 수 있듯이 'Fossen' 방법은 다른 두 방법과 차이를 보여주고 있으며, 이 오차는 적분 간격이 더 커지거나 적분 시간이 길어질수록, 혹은 각속도 또는 가해지는 모멘트가 커질수록 더욱 커지게 된다.

따라서 위상 공간에서 적분하는 방법은 특이점과 무관하게 수치 적분과 같은 결과를 주며, 제약 조건을 만족하기 위해 추가적인 방법이 필요하지 않다.

4. UVMS의 동역학 모델링

모의실험을 통해 UVMS의 동역학 특성을 알기 위해서는 UVMS의 동역학 방정식이 필요하다. 또 구해진 동역학 방정식을 통해 얻어진 가속도 값들은 모의실험 과정에서 속도와 위치로 적분이 되어야 한다. 따라서 이 장에서는 수중 잠수정과 매니퓰레이터의 동역학 방정식에 대해서 각각 살펴보고, 이를 동적 발란스의 원리를 이용하여 UVMS의 동역학 모델링을 수행한다.

4.1 수중 잠수정의 기구학 및 동역학 방정식

4.1.1 수중 잠수정의 운동 방정식

수중 잠수정의 위치 및 속도는 3차원 공간상의 강체와 마찬가지로 동질 변환 행렬과 바디 트윈스트로 표현이 가능하다.

$$T_V = \begin{bmatrix} R_V & r_V \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}; [V_V] = T_V^{-1} \dot{T}_V \quad (19)$$

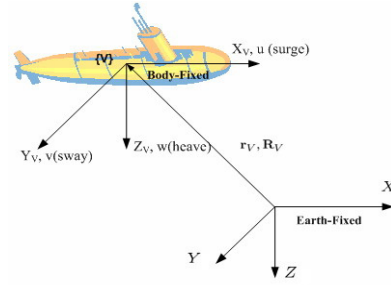


그림 3. 수중 잠수정의 좌표계

수중 잠수정의 동역학은 3차원 공간상에서의 강체 운동 외에 유체와의 마찰이나 가상 질량 등과 같은 유체 역학에 의한 힘이 작용하는 특징이 있으며, 이에 대한 모델링을 위해 많은 연구가 이루어져 왔다^{7,8)}. 일반적으로 수중에서 운동하는 잠수정의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$F_v = A_v \dot{V}_V + B_v V_V \quad (20)$$

위 식에서 A_v , B_v 는 각각 잠수정의 관성 행렬, bias 행렬이다. 이때 잠수정에 작용하는 바디 렌치(F_v)는 다음과 같이 분류된다^{7,8)}.

$$F_v = F_{ADD} + F_{DL} + F_{RES} + F_{TH} + F_{PL} + F_{EXT} \quad (21)$$

위 식에서 F_{ADD} 는 유체의 부가질량(added mass)에 의해 발생하는 렌치를, F_{DL} 은 유체의 항력(drag force/moment)과 양력(lift force/moment)에 의한 렌치이며, 몇 가지 가정에 의해 각각 다음의 모델로 근사될 수 있다⁷⁾.

$$\begin{aligned} F_{ADD} &= A_A \dot{V}_V + B_A V_{V,r} \\ F_{DL} &= D_L V_{V,r} + D_Q V_{V,r} |V_{V,r}| \end{aligned} \quad (22)$$

위 식에서 A_A 와 B_A 는 유체의 가상 질량에 의한 관성 행렬과 bias 행렬이며 D_L 과 D_Q 는 각각 선형 및 이차 댐핑 행렬이다. $V_{V,r}$ 은 잠수정의 유체에 대한 상대 바디 트윈스트로 기준 좌표계에서의 유체 속도가 V_c 일 때 다음과 같이 구해진다.

$$V_{V,r} = V_V - R_V^T V_c \quad (23)$$

F_{RES} 는 중력과 부력에 의해 결정되는 복원력(restoring force/moment)에 의한 렌치를, F_{TH} 는 잠수정에 장착된 추진기(thruster)에 의한 렌치를, F_{PL} 은 잠수

정에 부착된 제어판(rudder, elevator)에 의한 렌치를 나타내며 다음과 같이 정의된다^[7].

$$F_{RES} = \begin{bmatrix} V_{r_{CG}} \\ V_{f_G} + V_{f_B} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$F_{TH} = T_{TCM} \tau_{TH} \quad (25)$$

$V_{r_{CG}}$ 와 $V_{r_{CB}}$ 는 각각 잠수정 좌표계에서 나타낸 잠수정의 무게 중심 및 부력 중심의 위치 벡터이며, V_{f_G} 와 V_{f_B} 는 잠수정 좌표계에서 표현된 잠수정의 중력 및 부력이다. 또 T_{TCM} 은 잠수정의 추진기 배열 행렬(thruster configuration map)로 추진기의 추진력 벡터 τ_{TH} 를 잠수정의 바디 렌치로 변환하는 행렬이다. 개별 추진기의 추력에 대한 모델은 참고문헌^[11] 등에 잘 나와 있다.

그리고 F_{EXT} 는 모델링 되지 않은 기타 외력으로 ROV(Remotely Operated Vehicle)의 경우에 케이블에 의한 외력이나 추진기와 잠수정의 선체와의 상호 영향 등이 포함될 수 있다.

잠수정의 동역학 특성을 정확히 모사하기 위해서는 식 (22)-(25)에 포함된 파라미터 값들을 정확히 알아야 한다. 이러한 변수들은 대개 잠수정의 형태 및 길이 등의 함수로 PMM(Planar Motion Mechanism)을 이용한 실험^[12]이나 비선형 관측기^[13] 등을 통해 추정한다. 특히 어뢰 형상을 가진 잠수정에 대해서는 이론적이나 수치적으로 많은 연구가 이루어져 있으며, 부가 질량에 대해서는 strip 이론^[7,14]을 통해 추정하기도 한다.

결국 식 (20)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_V^* = F_V - A_V \dot{V} - B_V V \quad (26)$$

위 식에서

$$\begin{aligned} F_V &= F_{TH} + F_{RES} + F_{PL} + F_{EXT} + F_{CUR} \\ A_V &= A_v + A_A \\ B_V &= B_v + B_A \end{aligned}$$

이며 F_{CUR} 은 유체 속도가 있을 때 부가적으로 발생하는 항력 및 양력과 관련된 항이다. 그리고 A_V 와 B_V 는 잠수정의 질량 및 관성 모멘트는 물론 유체에 의한 부가 질량이 포함된 행렬이다.

4.2 수중 매니플레이터의 동역학 방정식

수중에서의 움직이는 매니플레이터의 동역학 지배 방

정식을 얻고자 하는 경우에도 잠수정과 마찬가지로 부가 질량 등 유체에 의한 영향을 고려하여 모델링을 할 수 있으며, 식 (27)로 정리된다^[2].

$$\begin{aligned} A_M(q_m) \ddot{q}_m + B_M(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m \\ + D_M(q_m, \dot{q}_m) q_m = \tau_M + F_{RES, M} \end{aligned} \quad (27)$$

이 식에서 $q_m, \tau_M \in \mathbb{R}^n$ 은 매니플레이터의 관절 변수 및 토크 벡터를 나타내며, $A_M, B_M,$ 은 매니플레이터의 관성 행렬, 전향력 및 원심력항이며 유체에 의한 부가질량이 포함된 행렬이다. 또 D_M 은 유체의 항력과 양력에 의한 댐핑 등의 영향을 포함한 행렬이며 $F_{RES, M}$ 은 각 링크에 작용하는 복원력과 관련된 벡터를 나타낸다. 그러나 식 (27)은 베이스가 고정되어 있는 경우에 한정되므로, 비록 정확하게 모델링이 수행되었다고 하더라도 수중 잠수정에 부착되는 경우에 UVMS 전체의 동역학 방정식은 다시 모델링 되어야 한다.

한편 동적 발란스의 원리를 이용하여 베이스가 고정되지 않은 수중 매니플레이터의 동역학 방정식은 2장에서 소개한 강체의 동역학 방정식과 Loading 조건, 그리고 유체 영향으로 인한 부가적인 힘/모멘트를 고려하여 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$W_M F_M + L_M \tau_M = M_M \begin{bmatrix} \dot{V}_M \\ \ddot{q}_m \end{bmatrix} + H_M \begin{bmatrix} V_M \\ q_m \end{bmatrix} \quad (28)$$

식에서 V_M 는 매니플레이터의 베이스의 바디 트위스트이며, 베이스가 고정되어 있는 경우 식 (27)과 같은 형태가 된다. 매니플레이터가 수중에서 동작하는 경우에는 잠수정과 마찬가지로 행렬 F_M, M_M 그리고 H_M 에는 복원력, 부가 질량 등의 유체 역학과 관련된 성분을 포함해야 한다.

4.3 수중 잠수정/매니플레이터 시스템의 동역학

식 (26)과 식 (28), 그리고 동적 발란스의 원리를 이용하여 UVMS 시스템의 동역학을 쉽게 유도해 낼 수 있다. 만약 잠수정과 매니플레이터가 관절에 의해 연결이 된다면 UVMS의 동역학 방정식은 다음과 같이 유도된다.

먼저 두 시스템이 조인트에 의해 연결될 경우, 바디 트위스트의 관계식은 다음과 같다.

$$V_M = {}^V A d_M^{-1} V_V + {}^M A d_{MJV} E \dot{q}_0 \quad (29)$$

식 (29)에 동적 발란스의 원리를 적용하면 잠수정과 로봇팔의 d'Alembertian 렌치와 토크는 다음의 식을 만

족해야 한다.

$$\begin{aligned} F_V^* &= - {}^V A d_M^{-T} F_M^* \\ \tau_0 &= - E^T {}^M A d_{MJV}^T F_M^* \\ \tau_M^* &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

질량이나, 특히 유체와 관련된 값들을 안다고 가정하고 식 (26), (28) 그리고 (29), 그리고 (29)의 미분식을 식 (30)에 대입하여 정리하면 UVMS의 동역학 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$WF + L\tau = M \begin{bmatrix} \dot{V}_V \\ \dot{q} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} V_V \\ q \end{bmatrix} \quad (31)$$

위 식에서 $F = [F_V^T F_M^T]^T$, $\tau = [\tau_0^T \tau_M^T]^T$, $q = [q_0^T q_m^T]^T$ 이며 τ_0 는 잠수정과 매니플레이터를 연결하는 조인트 q_0 에 입력되는 토크다.

5. 수치 실험

4장으로부터 얻은 UVMS의 운동 방정식과 3장의 적분 알고리즘을 사용하여 실제 시스템의 동역학 모의실험을 수행할 수 있다. 이 장에서는 그 예로써, PETASUS와 수중 매니플레이터 시스템^[6]에 적용해보고자 한다.

5.1 PETASUS와 매니플레이터

5.1.1 PETASUS와 매니플레이터

그림 4는 포항공과대학교 로봇 및 의공기전 연구실이 보유하고 있는 수중 잠수정 PETASUS와 그의 매니플레이터 PUM이다. PETASUS는 약 70x70x70cm의 소형의 수중 무인 잠수정으로 천해에서 작업을 위해 설계 및 개발되었으며, 6개의 추진기를 전 방향 구동에 최적화되도록 배열하였다. 이러한 배열로 인해 PETASUS는 작업 시 로봇팔의 움직임에 의해 발생하는 영향이나 유체 등

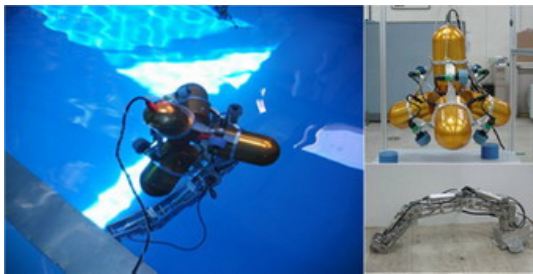


그림 4. PETASUS와 PUM

각종 외란에 효과적으로 대응할 수 있는 장점이 있다.

PUM은 PETASUS에 부착하여 수중에서 작업이 가능하도록 개발되었다. 총 길이는 1.2m이며 5개의 관절을 가지고 있으며, 2-4번 관절은 선형 추진기(linear actuator)를 사용하여 제어되고 있다.

5.1.2 PETASUS와 PUM의 결합

PETASUS와 PUM의 결합 방법은 나사못을 이용한 고정 연결(fixed loading)이며 결합된 시스템은 총 11 자유도를 갖는다. 고정 연결된 두 시스템간의 상대 바디 트위스트는 0이므로 식 (29)는 다음과 같이 단순화된다.

$$V_M = {}^V A d_M^{-1} V_V \quad (32)$$

이 식을 가지고 동적 발란스의 원리를 적용하면,

$$\begin{aligned} F_V^* &= - {}^V A d_M^{-T} F_M^* \\ \tau_M^* &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

가 된다. 따라서 PETASUS와 PUM이 결합된 UVMS의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$WF + L\tau_M = M \begin{bmatrix} \dot{V}_V \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} V_V \\ q_m \end{bmatrix} \quad (34)$$

5.2 모의실험

식 (42)과 3장의 내용을 바탕으로 MATLAB과 VRML을 이용하여 모의실험 환경을 구축하였다. 이 모의실험 환경에서 외력이 없을 때, 선형/각 모멘텀(linear/angular momentum)가 일정하게 유지됨을 확인하였으며 이를 통해 모의실험 결과가 타당함을 알 수 있었다^[5].

이 모의실험 환경을 이용하여 PUM의 두 번째 관절이 50초 동안 45도를 왕복하는 시나리오에 대해 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서 적분은 0.01초의 간격으로 수행되었으며 매니플레이터가 제어되는 동안 잠수정이 제어되는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 수행되었다. 매니플레이터의 관절 제어와 잠수정의 제어를 위해서 PD(proportional derivative) 제어가 사용되었으며, 유체의 흐름이 없는 환경이라 가정하였다.

5.2.1 모의실험 결과

그림 5부터 7까지 모의실험을 통해 얻은 결과들을 나타내었다. 그림 5는 잠수정이 제어되지 않고 있는 경우에 매니플레이터가 움직일 때의 잠수정의 위치 및 자세를 나타낸 그래프이며, 그림 6은 잠수정이 제어되고 있

는 경우에 대한 결과다. 두 그림을 비교했을 때, 제어되지 않은 경우가 제어되는 경우보다 더 큰 움직임을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 곧 그림 7에서처럼 팔의 움직임에 의한 잠수정의 위치 및 자세의 변화는 말단 장치의 오차로 나타나게 된다.

이로부터 UVMS가 작업을 위해 로봇 팔을 움직이는 경우에 이 움직임에 의해 잠수정이 영향을 받는다는 사실을 알 수 있으며, 적절한 제어기를 설계하여 UVMS가 주어진 작업을 성공적으로 수행할 수 있도록 해야함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 수중 잠수정-매니플레이터 시스템의 모의실험에 관하여 언급하였다. 우선, 모의실험 환경을 위해 동적 발란스의 원리를 이용하여 UVMS의 동역학 모델링을 수행하였다. 동역학 방정식을 알고 있는 두 개 혹은 그 이상의 시스템이 특정 연결 조건으로 결합되어 하나의 시스템을 이룰 때 동적 발란스의 원리를 사용하면 전체 시스템의 동역학 방정식은 쉽게 얻을 수 있다.

또한 위상 공간 상에서의 적분법으로서 4차 Munthe-Kaas 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 여타의 수치 적분과는 달리 기하학적 구조를 유지하고 normalization과 같은 부가적인 단계를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다.

이 두 가지 방법을 사용하여 UVMS를 위한 모의실험 환경을 구축하였으며, 간단한 상황에 대한 모의실험을 수행하였다. 이 모의실험 환경은 앞으로 유체 등과 같은 환경에 대한 모사를 포함시켜 좀더 실제와 비슷한 환경을 만들어 모의실험의 결과에 대한 신뢰도를 높이고자 한다.

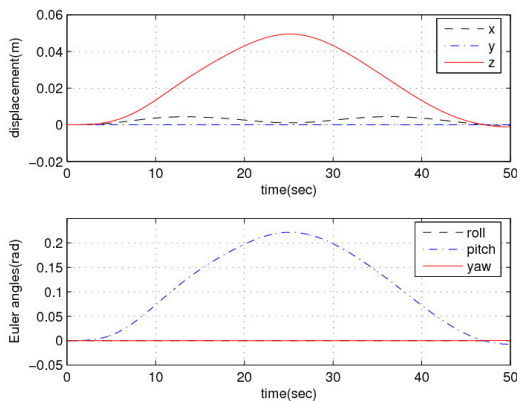


그림 5. 모의실험 결과 : 잠수정 위치(제어되지 않은 경우)

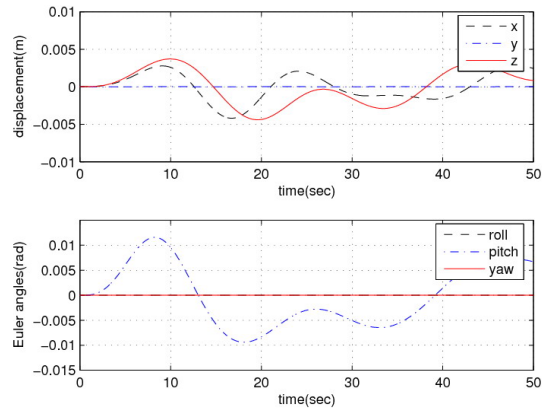


그림 6. 모의실험 결과 : 잠수정 위치(제어되는 경우)

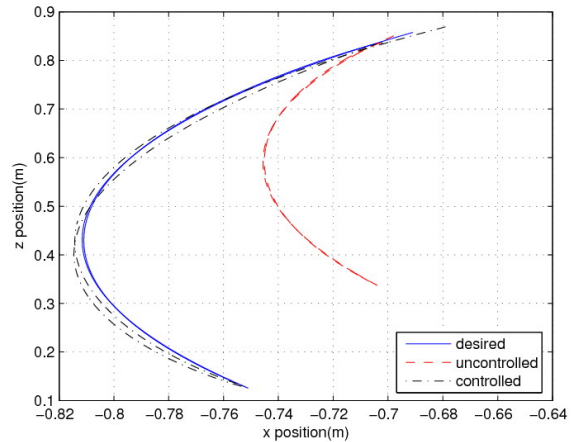


그림 7. 말단 장치의 위치

참고 문헌

- [1] T. McLain, S. M. Rock, M. J. Lee, "Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System", *Autonomous Robots*, vol.3, no.2-3, pp.213-232, June, 1996.
- [2] B. Jun, J. Lee, P. Lee, "Dynamic Modeling and Manipulability Analysis of Underwater Robotic Arms", *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 11, no.8, pp. 688-695, October, 2005.
- [3] T. J. Tarn, G. A. Shoults, S.P. Yang, "A Dynamic Model of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator Using Kane's Method", *Autonomous Robots*, vol. 3, no.2-3, pp269-283, June, 1996.

- [4] G. Antonelli, "Underwater Robots : Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems", Springer, 2003.
- [5] S. McMillan, D. Orin, R. McGhee, "Efficient Dynamic Simulation of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator", IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, vol. 25 no.8, pp.1194-1206, August, 1995.
- [6] J. Park, "Principle of Dynamical Balance for Multibody Systems", Multibody System Dynamics, vol. 14, no.3-4, pp.269-299, November, 2005.
- [7] Thor I. Fossen, Marine Control Systems : Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics, 2002.
- [8] J. Yuh, "Modeling and Control of Underwater Robotic Vehicles", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no.6, pp.1475-1483, December, 1990.
- [9] J. Park and W.K. Chung, "Geometric integration on Euclidean group with application to articulated multi-body systems", IEEE Trans. On Robotics and Automation, vol. 21, no.5, pp.850-863, Oct, 2005.
- [10] R. Murray, Z. Li, S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1994.
- [11] J. Kim and W.K. Chung, "Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles", Ocean Engineering, vol. 33, pp.566-586, April, 2006.
- [12] A. Tiano, M. Carreras, P. Ridao, A. Zirilli, "On the Identification of Nonlinear Models of Unmanned Underwater Vehicle", Proceedings Of the 10th Mediterranean conference on Control and Automation. July, 2002.
- [13] J. Kim, K. Kim, H. Choi, W. Seong, and K. Lee, "Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers", IEEE Journal of Oceanic Engineering. vol. 27, no.4, pp.830-840, October, 2002.
- [14] J. Newman, "Marine Hydrodynamics", The MIT Press, 1977.
- [15] 한중희, 정완균, 박종훈, "Principle of dynamical balance의 수중 로봇 시스템에의 적용", 제1회 한국지능로봇 하계종합 학술대회, June, 2006.
- [16] 한중희, 장재혁, 정완균, 최윤서, 김진현, "수중 작업을 위한 소형 무인 잠수정/매니퓰레이터 시스템의 개발", 국방로봇 기술시범 및 워크샵, 2006.



한 중 희

2003 포항공과대학교 기계공학과(학사)
2005 포항공과대학교 기계공학과(석사)

2005~현재 포항공과대학교 기계공학과 박사과정
관심분야 : Underwater robot



정 완 균

1981 서울대학교 기계설계학과(학사)
1983 한국과학기술원 기계공학과(석사)
1987 한국과학기술원 로봇공학과(박사)

1987~1993 포항공과대학교 기계공학과 조교수
1988 CMU 방문 교수
1995 U.C. Berkeley visiting scholar
1993~2000 포항공과대학교 기계공학과 부교수
1987~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수
관심분야 : SLAM, Navigation, Underwater robots, Robust control