

수중 잠수정-매니퓰레이터 시스템의 복원력 최소화를 위한 여유 자유도 해석 및 강인 제어

Redundancy Resolution and Robust Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems with Minimizing Restoring Moments

한 종 회, 정 완 균*

(Jonghui Han and Wan Kyun Chung)

Abstract : In this paper, redundancy resolution of UVMS (underwater vehicle-manipulator system) is addressed. In general, UVMS has redundant DOFs (degrees of freedom) as many as DOFs of manipulator and these redundant DOFs can be used to optimize the configuration of UVMS while satisfying given tasks. We propose a performance index for redundancy resolution which minimizes the restoring moments of UVMS. The restoring moment can cause unintentional change of poses of UVMS. If the restoring moments remain small, control effort for keeping the poses of UVMS decreases. This means that energy consumption can be reduced by minimizing the restoring moments during conducting tasks. Proposed performance measure is optimized by gradient projection method. Generated trajectories by this redundancy resolution are tracked by robust PID controller. Numerical simulations are presented to demonstrate performance of the proposed algorithm.

Keywords : underwater vehicle-manipulator system, redundancy resolution

I 서론

수중 무인 잠수정-매니퓰레이터 시스템 (UVMS: Underwater Vehicle-Manipulator System)은 해저 생물 채집이나 광물 채취, 또는 수중 구조물의 유지 및 보수를 위해 사용되는 시스템이다. 그리고 일반적으로 UVMS의 잠수정은 호버링(hovering)에 유리하고 외란에 효과적으로 대응할 수 있도록 6자유도에 대해 제어가 가능하도록 설계된다. 이 경우, UVMS는 최소한 매니퓰레이터의 자유도(degrees of freedom)만큼 여유 자유도를 갖게 된다. 이 여유 자유도는 주어진 작업(task)을 위반하지 않은 채로 잠수정 및 로봇팔의 형태(configuration)를 바꾸는데 사용될 수 있으며, 특히 작업 조작성(manipulability)와 같은 성능 지수(performance measure)를 최적화하는데 사용될 수 있다[1].

그러나 현재 대부분의 UVMS는 여유 자유도를 이용하지 않은 채 잠수정과 매니퓰레이터의 움직임의 할당(coordination)한다. 즉, 작업을 하는 경우에 잠수정은 대개 로봇팔이 작업 영역(workspace)을 벗어나지 않는 한, 주어진 위치를 고수(station-keeping)하도록 제어가 이루어진다[2]. 그러나 작업 영역을 벗어나게 되는 경우에는 잠수정과 매니퓰레이터의 움직임을 재 정의하는 알고리즘이 필요하며 이런 점에서 여유 자유도 해석(redundancy resolution)을 통해 움직임을 할당하는 것이 유리하다.

여유 자유도 해석은 로봇 매니퓰레이터 분야에서 많은

연구가 이루어졌다. 이들 연구에서는 여유 자유도를 특이점(singularity) 회피[3]와 작업 우선도(task priority)[4]에 이용하였다. 또 매니퓰레이터의 동역학 방정식을 이용하여 관절 토크(torque) 최소화[5]를 위해 가속도 수준에서 여유 자유도 해석이 수행되었다.

UVMS 분야에서도 여유 자유도 해석에 관한 연구가 이루어졌는데, Antonelli[6]는 퍼지를 사용하여 여유 자유도를 작업 우선도를 고려한 잠수정과 매니퓰레이터 사이의 움직임 할당에 사용하였다. 또한 Sarkar와 Podder[7]는 여유자유도를 이용하여 유체 항력(drag force)을 최소화함으로써 에너지 소모를 줄이고자 하였다. 그러나 이를 위해서는 항력 계수와 유체의 속도 및 방향 등을 알아야 하나 실제 상황에서는 정확히 값을 예측하기 힘들다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 UVMS의 여유 자유도 해석을 위한 새로운 성능 지수를 제안한다. 제안된 성능 지수는 UVMS의 복원력 모멘트(restoring moment)를 최소화할 수 있도록 고안되었다. 복원력은 수중의 물체에 작용하는 중력 및 부력에 의해 발생한 힘과 모멘트로 UVMS가 제어되지 않는 경우에도 의도하지 않은 위치 및 자세 변경을 유발할 수 있다. 따라서 복원력 모멘트를 최소화할 수 있다면 UVMS가 자세를 유지하기 위한 제어 입력을 줄일 수 있으며 이는 동일 작업에 대해 요구되는 에너지를 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 이를 위해 본 논문에서는 UVMS의 무게 중심과 부력 중심 사이의 거리를 성능 지수로 정의하였다. 제안된 성능 지수는 GPM (Gradient Projection Method)에 의해 최적화되며, 가중 의사역행렬(weighted pseudo-inverse matrix)을 이용하여 잠수정과 로봇팔의 관절 각도를 구하였다. 그 결과로서, UVMS가 생성된 궤적(trajjectory)을 추종(tracking)하기 위해 필요한 힘/모멘트/토크가 감소하였다.

또 제안된 성능 지수를 최적화하여 얻은 궤적을 추종하

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 10. 23., 채택확정 : 2008. 12. 19.

한종회, 정완균 : 포항공과대학교 기계공학과

(paper@postech.ac.kr/wkchung@postech.ac.kr)

* 본 논문은 한국 보건 복지부의 한국건강 21 연구 개발과제(A020603), 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소, 교육과학기술부와 한국과학재단의 도약 연구 지원 프로그램에서 지원하여 연구하였음.

기 위해 PID 제어를 사용하였다[8]. 사용된 PID 제어기는 H_∞ 성능 지수를 최적화하므로, 외란(disturbance)에 대한 강인성(robustness)이 보장된 제어기라고 할 수 있다. 수중의 작업 환경은 불확실하고 해류 등에 의한 외란이 심한 환경이므로 강인한 PID 제어기를 사용함으로써 UVMS의 제어 성능을 보장할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 우선 2장에서는 UVMS의 기구학 및 동역학 모델링을 수행하여 로봇팔의 말단 장치(end-effector)의 위치/각도를 잠수정의 위치/각도, 그리고 로봇팔의 관절 각도로 표현하였다. 3장에서는 여유 자유도와 관련된 이론을 간단히 살펴보고, 여유 자유도 해석을 위한 성능 지수를 제안한다. 5장에서는 제안된 성능 지수 및 PID 제어기의 성능을 검증하기 위한 모의실험 결과를 제시한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론과 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

II. UVMS의 모델링

1. 기구학 모델링

n 개의 관절을 갖고 있는 UVMS에 그림 1과 같이 좌표계를 부여할 수 있다. 그림에서 Σ_0 , Σ_V 그리고 Σ_E 는 각각 관성 좌표계(inertial frame), 잠수정 좌표계 그리고 말단 장치에 부착된 좌표계이다. 이 때 잠수정의 위치/자세 벡터, 0p_V 는 관성 좌표계에 대해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$${}^0p_V = \begin{bmatrix} {}^0r_V \\ {}^0\Omega_V \end{bmatrix}; {}^0T_V = \begin{bmatrix} {}^0R_V({}^0\Omega_V) & {}^0r_V \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

여기서 ${}^0r_V, {}^0\Omega_V \in R^3$ 는 각각 관성 좌표계에 대한 잠수정 좌표계의 위치 벡터와 각도 벡터이며, 동차 변환 행렬(homogeneous transformation matrix), 0T_V 로 나타낼 수 있다. 자세 벡터는 대개 오일러 각도(Euler angles)로 나타내어지고, 회전 행렬(rotation matrix), ${}^0R_V \in SO(3)$ 로 표현될 수 있다.

이와 비슷하게 잠수정 좌표계에 대한 말단 장치의 위치 및 자세는 다음의 벡터 및 동차 변환 행렬로 표현이 가능하다.

$${}^Vp_E = \begin{bmatrix} {}^Vr_E \\ {}^V\Omega_E \end{bmatrix}; {}^VT_E = \begin{bmatrix} {}^VR_E({}^V\Omega_E) & {}^Vr_E \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

${}^Vr_E, {}^V\Omega_E \in R^3$ 는 각각 잠수정 좌표계에 대한 말단 장치의

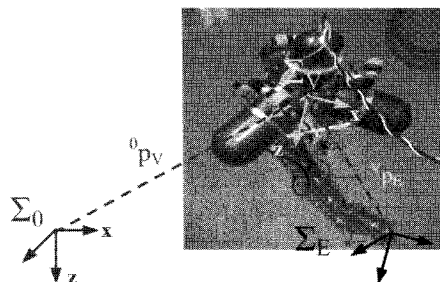


그림 1. UVMS의 좌표계.

Fig. 1. Coordinate systems of UVMS.

위치 및 자세 벡터이다. 여기서 말단 장치의 위치 및 자세는 매니퓰레이터의 관절 변수(joint variable), $q \in R^n$ 로 표현이 가능하다. 즉 ${}^VT_E({}^Vr_E, {}^V\Omega_E) = {}^VT_E(q)$ 이다.

(1)과 (2)로부터 관성 좌표계에 대한 말단 장치의 위치 및 자세를 동차 변환 행렬의 곱으로부터 구할 수 있다.

$${}^0T_E = {}^0T_V {}^VT_E = \begin{bmatrix} {}^0R_E & {}^0r_E \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)으로부터 말단 장치의 위치와 잠수정의 위치 및 로봇팔의 관절과의 관계는 비선형 관계임을 알 수 있다. 반면에 관성 좌표계에 대한 말단 장치의 속도는 (3)의 위치 및 자세를 미분함으로써 얻어질 수 있으며 다음의 선형 관계식으로 표현될 수 있다[9].

$$\begin{aligned} {}^0\dot{p}_E &= \begin{bmatrix} {}^0\dot{r}_E \\ {}^0\dot{\Omega}_E \end{bmatrix} = J({}^0r_V, {}^0\Omega_V, q) \begin{bmatrix} {}^0\dot{r}_V \\ {}^0\dot{\Omega}_V \\ \dot{q} \end{bmatrix} \\ &= J(\zeta)\dot{\zeta} \end{aligned} \quad (4)$$

ζ 는 $[{}^0r_V^T, {}^0\Omega_V^T, q^T]^T \in R^{6+n}$ 로 관성 좌표계에서 표현된 잠수정의 위치, 자세 그리고 매니퓰레이터의 관절 변수로 정의된 벡터이다.

2. 동역학 모델링

일반적으로 잠수정 좌표계에 대해, UVMS의 동역학 방정식은 다음과 같이 표현된다[6].

$$M(\zeta)\ddot{\zeta} + C(\zeta, \dot{\zeta}) + D(\zeta, \dot{\zeta}) + g(\zeta) = \tau \quad (5)$$

위 식에서 $M(\zeta)$ 는 유체의 부가 질량(added mass)을 포함한 질량 및 관성 행렬(mass and inertia matrix)이며 $C(\zeta, \dot{\zeta})$ 는 전향력 및 원심력 행렬(Coriolis and Centripetal matrix), $D(\zeta, \dot{\zeta})$ 는 유체 항력과 관련된 행렬, $g(\zeta)$ 는 복원력과 관련된 벡터이며 $\tau = [\tau_f^T, \tau_m^T, \tau_t^T]^T$ 는 잠수정 및 매니퓰레이터에 들어가는 제어 입력으로 각각 힘, 모멘트, 관절 토크 입력을 나타낸다.

3. 추진기(thruster) 모델링

잠수정의 제어에 주로 사용되는 추진기는 비선형적인 특성을 가지고 있기 때문에 UVMS의 제어 특성에 큰 영향을 끼치므로 정확한 모델링이 필요하다. 본 논문에서는 Kim 외[10]의 추진기 모델이 사용되었다.

j 번째 추진기에서 발생하는 추력(thrust force)을 $f_{T,j}$ 라고 하면,

$$\begin{aligned} f_{T,j} &= K_T^a \rho H^4 \Omega |\Omega| \\ \Omega &= k_{f1} \Omega + k_{f0} \text{sign}(\Omega) + k_t V_{in} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 모델링 될 수 있다. 여기서 ρ , H , Ω 는 각각 유체의 밀도, 추진기의 직경, 추진기 모터의 회전 속도이며, K_T^a 는 추진력 계수(thrust coefficient)로 추진기로 유입되는 유체의 속도, 각도, 추진기의 직경 및 회전 속도로 결정되는 상수이다. 또한 k_{f0} , k_{f1} , k_t 는 모터의 방정식과 관련된 상수이며 V_{in} 은 입력되는 전압이다.

따라서 여러 개의 추진기에 의해 잠수정에 작용하는 힘/모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \tau_f \\ \tau_m \end{bmatrix} = J_{TCM} f_T \quad (7)$$

J_{TCM} 은 추진기 배열 행렬(thruster configuration matrix)이다.

III. UVMS의 여유 자유도 해석 및 제어

일반적으로 UVMS를 이용하여 수중에서 작업을 하는 경우, 관성 좌표계에 대해 말단 장치의 경로가 주어진다. 이 경우에 역기구학(inverse kinematics)을 풀어서 작업을 위한 잠수정의 위치/각도와 매니플레이터의 관절 각도를 구해야 한다. 그러나 UVMS의 경우 매니플레이터의 자유도만큼의 여유 자유도를 가지고 있으므로, 주어진 말단 장치의 위치를 만족시키는 잠수정 및 로봇팔의 관절 각도는 무수히 존재한다. 따라서 이 여유 자유도는 특정한 성능 변수를 최적화하는 관절 변수를 구하는데 사용될 수 있다.

일반적으로 여유 자유도 로봇의 역기구학은 속도 수준에서 수행되는데, 이는 말단 장치의 속도와 잠수정 및 매니플레이터의 관절 속도는 (4)와 같이 선형 관계로 표현되기 때문이다. 그러나 $J(\zeta) \in R^{6 \times (6+n)}$ 는 일반적으로 역행렬이 존재하지 않으므로, 대신 가중 의사역행렬을 이용하여 다음과 같이 말단 장치의 속도에 대해 잠수정 속도 및 관절 속도를 구할 수 있다[11].

$$\dot{\zeta} = J^{W\dagger} \dot{p}_E + (I_{6+n} - J^{W\dagger} J) z \quad (8)$$

여기서 z 는 임의의 벡터이며 $J^{W\dagger}$ 는 가중 의사역행렬로

$$J^{W\dagger} = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^T)^{-1}$$

로 정의된다. W 는 가중치 행렬(weight matrix)로서, 대칭(symmetric)이며 양의 정부호(positive definite) 행렬이다. 가중치 행렬이 단위행렬(identity matrix)인 경우에는 Moore-Penrose 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)이 된다.

그리고 $(I_{6+n} - J^{W\dagger} J)$ 는 J 의 영공간(null space)으로 투영(projection)하는 행렬이므로 (8)의 두 번째 항은 말단 장치의 속도에 영향을 주지 않은 채 잠수정 및 매니플레이터의 형태를 바꿀 수 있다. 따라서 이를 이용하여 z 를 적절하게 정의함으로써 최적의 해를 구할 수 있다.

1. GPM

UVMS를 이용하여 작업을 하면서 $\phi(\zeta)$ 를 최적화하고자 하는 양의 함수라고 정의하자. 이 함수를 최적화하기 위해서 가장 널리 사용되는 방법이 GPM이며, 이 방법을 이용할 때 z 는 다음과 같은 형태를 갖는다[12].

$$z = \kappa W^{-1} \nabla \phi \quad (9)$$

여기서 κ 는 그레디언트(gradient) 게인(gain)으로 $\phi(\zeta)$ 를 최대화하고자 할 때는 양수가, 최소화하고자 할 때는 음수가 사용된다. 그리고 $\nabla \phi$ 는 $\phi(\zeta)$ 의 그레디언트로 다음과 같이 계산된다.

$$\nabla \phi_j = \frac{\partial \phi}{\partial \zeta_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n+6$$

2. 여유 자유도 활용을 위한 성능 지수

2.1 복원력 모멘트

UVMS를 하나의 강체로 가정할 때, 관성 좌표계에서 표현된 UVMS의 복원력 벡터는 다음과 같이 표현된다[13].

$${}^0g(\zeta) = - \begin{bmatrix} G+B \\ {}^0r_g \times G + {}^0r_b \times B \end{bmatrix} \quad (10)$$

위 식에서

$$G = [0 \ 0 \ M_g]^T, \quad M_g = \sum_{i=1}^{n+1} m_i g$$

$$B = [0 \ 0 \ B_g]^T, \quad B_g = \sum_{i=1}^{n+1} B_i$$

$${}^0r_g = \frac{1}{M_g} \sum_{i=1}^{n+1} m_i g, \quad {}^0r_b = \frac{1}{B_g} \sum_{i=1}^{n+1} B_i$$

이며, $m_i, B_i, {}^0r_{g,i}, {}^0r_{b,i}$ 는 각각 i 번째 링크의 질량, 부력, 무게 중심, 그리고 부력 중심의 위치 벡터이다. $G, B, {}^0r_g, {}^0r_b$ 는 UVMS 전체의 중력, 부력, 무게 중심, 그리고 부력 중심의 위치 벡터를 나타내며 g 는 중력 가속도이다.

일반적으로 대부분의 UVMS는 제어 성능을 높이고 에너지 소비를 줄이기 위해 중성 부력(neutral buoyancy)이 되도록 설계된다. 따라서 복원력 벡터 중 힘 성분은 0이라고 해도 무리가 없다. 즉, $G+B=0_{3 \times 1}$ 이다. 물론 잠수정이나 로봇팔의 개별 관절이 모두 중성 부력일 필요는 없다. 이 경우, (10)은

$${}^0g(\zeta) = - \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ ({}^0r_g - {}^0r_b) \times G \end{bmatrix} \quad (11)$$

로 다시 쓸 수 있다.

복원력 모멘트는 무게 중심과 부력 중심이 동일 수직선 상에 있지 않으면 항상 UVMS에 작용되는 힘으로, 이 경우 UVMS의 위치 및 자세를 유지하기 위해서는 추가적인 제어 입력, 즉 에너지가 필요하게 된다. 따라서 작업 중인 UVMS의 복원력을 줄일 수 있다면 자세 유지 또는 궤적 추종 제어를 위한 에너지 또한 줄일 수 있다. 그러므로 UVMS의 여유 자유도를 사용하여 복원력을 최소화하는 역기구학의 해를 구하고자 한다.

2.2 복원력 최소화를 위한 성능 지수

(11)에 의해, 복원력은 UVMS의 무게 및 무게 중심과 부력 중심의 차이 벡터에 의해 결정되므로 이를 최소화하기 위해서는 무게 중심과 부력 중심 사이의 거리를 줄여야 한다. 따라서 최적화를 위한 함수로 무게 중심과 부력 중심 사이의 거리를 제안하고자 한다.

$$\phi(\zeta) = \frac{1}{2} \| {}^0r_g - {}^0r_b \|^2 \quad (12)$$

물론 이 함수는 GPM에 의해 최소화되어야 하므로 그레디언트 게인은 음수가 되어야 한다.

제안된 지수 (12)를 최적화하는 것은 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫 번째, 이 함수에 사용된 변수들은 비교적 쉽

고 정확하게 구할 수 있다. 사용된 변수는 잠수정 및 로봇팔의 각 링크들의 질량, 부력, 무게 중심, 그리고 부력 중심으로 이들은 상용 CAD 소프트웨어에 의해 쉽게 계산될 수 있으며, 혹은 간단한 실험으로 정확하게 구할 수 있다. 반면에 Sarkar와 Podder[7]가 제안한 함수는 유체 항력의 이차 함수로 여기에 사용된 변수들은 복잡한 실험에 의해 구해지며 구해진 값들도 정확도를 보장할 수 없다. 또한 이 방법을 위해서는 작업하는 도중 주위 유체의 속도를 알아야 한다. 유체 속도를 측정하기 위해서는 잠수정 및 매니플레이터에 외부 센서를 부착하여야 하며, 설사 부착된다 하여도 정확한 속도를 구하는 것은 쉽지 않다.

두 번째, 속도 수준에서 여유 자유도 해석이 이루어졌음에도 불구하고, 제안된 성능 지수를 최적화함으로써 작업에 필요한 에너지를 줄일 수 있다. 일반적으로 제어 입력 또는 관절 토크를 최소화하기 위해서는 동역학 방정식이 사용되어야 하고, 이에 필요한 가속도를 구하기 위해서 가속도 수준에서 여유 자유도를 해석한다[5,7]. 그러나 제안된 성능 지수는 임무 수행을 위해 필요한 궤적을 얻기 위해 동역학식을 이용하지 않으며 여유 자유도 해석을 수행할 수 있다.

3. 강인 PID 제어기

수중 작업 환경의 특성상 UVMS의 동역학 모델링은 정확히 이루어지기 힘들며, 파라미터 값들 역시 정확히 구하기 어렵다. 또한 모델링 되지 않은 동역학이나 외란 등에 의한 외력이 작용할 수 있다. 이러한 환경에서 UVMS의 궤적 추종 제어 성능을 보장하기 위해서는 강인한 제어기가 필요하다.

이 논문에서는 UVMS를 위한 강인 제어기로서 다음의 PID 제어기를 사용하였다[8].

$$\tau = \left(K + \frac{1}{\gamma^2} I \right) \left(\dot{e} + K_p e + K_I \int e \right), \quad (13)$$

$e = \zeta_d - \zeta$ 는 시스템의 추종 오차이며, K, K_p, K_I 는 다음의 조건을 만족하는 대각 행렬(diagonal matrix)이다.

$$K, K_p, K_I > 0$$

$$K_p^2 > 2K_I$$

또한 $\gamma (> 0)$ 는 L_2 게인이다. (13)으로 주어진 PID 제어기는 H_∞ 성능 지수를 최적화하며, γ 의 크기에 의해 외란에 대한 제어기의 강인성이 결정된다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

제안한 지수의 성능을 확인하기 위해 포항공과대학교 로보틱스 연구실의 UVMS인 PETASUS 시스템을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. PETASUS 시스템은 잠수정인 PETASUS와 매니플레이터인 PUM이 그림 2와 같이 결합된 UVMS이다. PETASUS는 수중 작업 시 들어올 수 있는 각종 외란에 효율적으로 반응할 수 있도록 6개의 추진기(thruster)가 전방향 구동(omni-directional motion)에 적합하도록 배열되어 있다. PUM은 5 자유도를 가진 약 1.2m 길이의 로봇팔이다[14].

1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션에서 PETASUS 시스템의 말단 장치는 15초 동안 초기 위치로부터 (1m, 1m, -0.1m)만큼 직선을 따라 이동하도록 명령을 받게 된다. 역기구학을 풀기 위해 사용된 가중치 행렬은 단위 행렬을 사용하였다.

시뮬레이션에 사용된 주요 값들은 표 1에 정리되었으며, 유체 역학과 관련된 변수는 임의로 할당하였다. 예를 들어 유체의 가상 질량은 강체 질량의 10% 값을 사용하였으며, 유체 항력은 선형 및 2차 항력만을 고려하였다.

2. 시뮬레이션 결과

2.1 성능 지수 최적화에 따른 제어 입력 변화

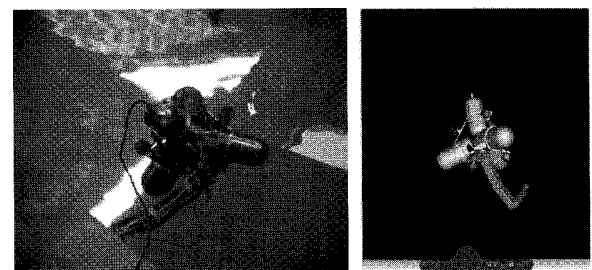
제안된 성능 지수 중 복원력 최소화를 위한 성능 지수 (12)를 최적화함으로써 잠수정의 자세 제어에 필요한 제어 입력의 변화를 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

우선 동일한 작업에 대해, (8), (9), (12)를 사용하여 복원력을 최소화한 경우(min(RM))와 그렇지 않은 경우(PI only), 즉 의사 역행렬만을 사용하여 역기구학의 해를 구한 경우에 대해 수행하였다. 즉,

$$\text{PI only} : \dot{\zeta} = J^+ \dot{p}_E \quad (14)$$

이다.

시뮬레이션 결과는 그림 3부터 그림 5에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 최적화한 경우에는 시뮬레이션 하는 동안 제안된 성능 지수가 감소함을 볼 수 있다. 그림 4는 두 가지 경우에 대해 생성된 경로를 비교한 그래프로, 이로부터 잠수정의 위치(그림 4(a))는 차이가 크지 않은 반면, 잠수정의 자세(그림 4(b))나 매니플레이터의 관절각도



(a) in pool (b) in simulation

그림 2. PETASUS 시스템.

Fig. 2. UVMS of PETASUS and PUM.

표 1. PETASUS 시스템의 주요 파라미터.

Table 1. Parameters of PETASUS system.

		중력	부력
PETASUS		445.77 N	523.60 N
PUM	링크 1	47.91 N	38.70 N
	링크 2	19.46 N	12.63 N
	링크 3	35.32 N	15.70 N
	링크 4	30.41 N	13.73 N
	링크 5	22.56 N	9.81 N
	링크 6	16.68 N	3.92 N

(그림 4(c))의 차이는 상대적으로 크을 알 수 있다. 이는 잠수정의 위치가 복원력 모멘트에 큰 영향을 주지 않기 때문이며, 잠수정의 자세와 로봇팔의 관절 각도를 변화시킴으로써 제안된 성능 지수가 최적화됨을 의미한다. 성능 지수를 최적화함으로써 얻게 되는 잠수정의 자세 및 관절 각도는 그림 5에서와 같이 잠수정 제어에 필요한 모멘트를 감소시킨다.

UVMS가 역기구학에 의해 생성된 궤적을 추종하는데 필요한 힘과 모멘트, 그리고 관절 토크의 크기를 다음과 같이 계산하여 표 2에 정리하였다.

$$\begin{aligned} \tau_{f,tot} &= \int_0^{t_f} \|\tau_f\| dt \\ \tau_{m,tot} &= \int_0^{t_f} \|\tau_m\| dt \\ \tau_{t,tot} &= \int_0^{t_f} \|\tau_t\| dt \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\|\cdot\|$ 는 유클리디언 절대값 (Euclidean norm)을 의미하며, τ_f 와 τ_m 그리고 τ_t 는 다음의 CTC (Computed Torque Control)에 의해 계산되었다.

$$\tau = M(\zeta)\ddot{\zeta}_{ref} + C(\zeta, \dot{\zeta}) + D(\zeta, \dot{\zeta}) + g(\zeta) \quad (16)$$

위 식에서 $\ddot{\zeta}_{ref} = \ddot{\zeta}_d + k_v \dot{e} + k_p e$ 이며, k_v 와 k_p 는 양의 게인이다. 또한 (16)의 동역학 변수들은 모두 정확한 값을 알고 있는 것으로 가정하였다.

표 2에서 볼 수 있듯이 추종 제어를 위해 잠수정에 필요한 제어 입력은 최적화를 한 경우에 그렇지 않은 경우에 비해 전반적으로 감소했음을 볼 수 있으며, 특히 모멘트의

표 2. 추종 제어에 필요한 잠수정의 힘/모멘트.
Table 2. Required force/moment for tracking control of vehicle.

	$\tau_{f,tot}$	$\tau_{m,tot}$	$\tau_{t,tot}$
성능 지수를 최적화하지 않은 경우 (PI only)	18.36	410.69	508.53
성능 지수를 최적화한 경우 (min(RM))	18.83	367.94	483.73

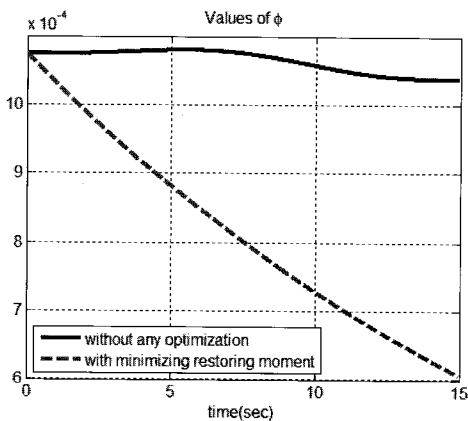
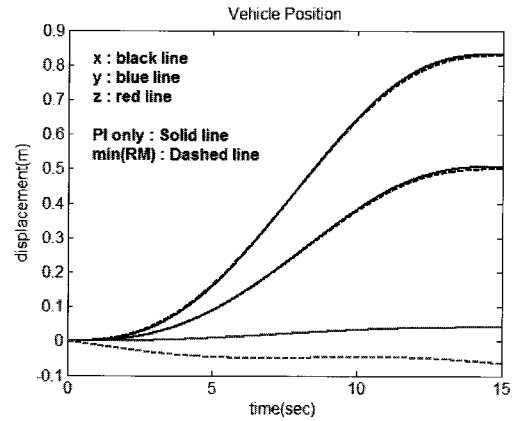


그림 3. 제안된 성능 지수 값의 변화.
Fig. 3. Proposed performance index during simulation.

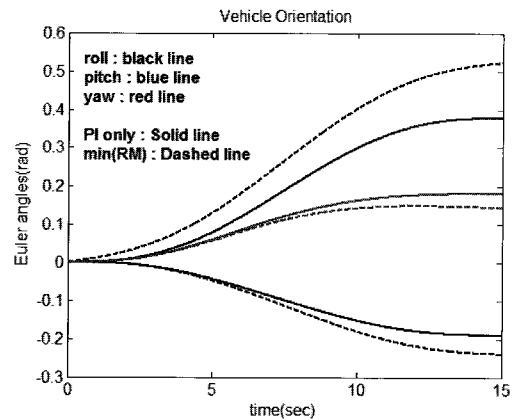
경우 약 10% 정도의 제어 입력이 감소하였다. 이는 곧 같은 작업을 함에 있어서 필요한 에너지가 적게 소모된다는 것을 의미한다.

2.2 PID 제어기를 사용한 UVMS의 제어

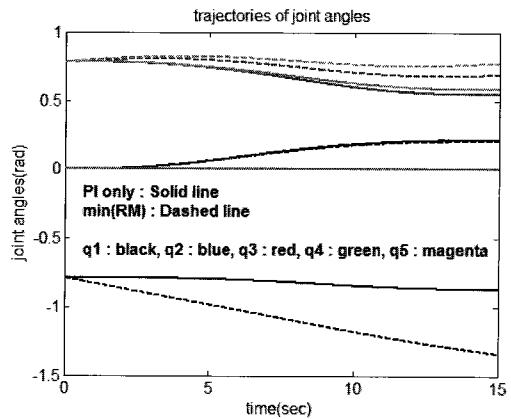
앞 장에서 소개된 PID 제어기를 사용하여 UVMS의 제어 성능을 검증하였다. 이 시뮬레이션에서는 (6)과 (7)의 추진기 모델이 사용되었으며, PID 제어기의 강인성을 확인하기 위해 시뮬레이션 동안에 UVMS의 잠수정에 임의의 외란을



(a) Trajectory comparison of vehicle position



(b) Trajectory comparison of vehicle orientation



(c) Trajectory comparison of joint angles

그림 4. 생성된 경로의 비교.
Fig. 4. Comparison of generated trajectories.

적용하였다. 또한 외부 유체가 x축을 따라 0.5m/s의 속도로 흐르는 상황을 가정하였으며, 그림 6부터 그림 8까지 결과를 나타내었다.

추진기 모델이 적용되어 제어 입력이 그림 8에서와 같이 시간 지연(time delay)을 가지고 적용됨을 볼 수 있으나 그림 6과 그림 7에서 확인할 수 있듯이 PID 제어기는 외란에 대해 강인한 성능을 보여주고 있다. 그림 6에서 초반의 커다란 오차는 주로 UVMS의 복원력 벡터에 의해 나타난 현상으로 이로부터 복원력 벡터에 의해 원하지 않는 위치 및 자세 변경이 일어날 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결과 고찰

3.1 제안된 성능 지수의 단순화

제안된 성능 지수를 실제 시스템에 적용함에 있어서 z 축 성분은 무시될 수 있다. 즉 무게중심과 부력중심이 동일 수직선상에 위치하도록 성능 지수를 정의해도 유사한 결과를 얻을 수 있는데, 이는 (11)에서 중력 가속도 벡터 G 가 z 축 성분만을 가지고 있기 때문에 실제 무게중심과 부력중심의 수직선 상의 거리는 복원력 모멘트에 영향을 주지 못한다.

3.2 제안된 성능 지수 최적화에 의한 현상

본 논문에서 제안된 성능 지수는 이상적으로는 복원력 모멘트가 0까지 줄어들 수 있는데 이때는 잠수정의 자세 및 로봇팔의 관절 각도는 고정된 채 잠수정의 위치만 변화

도록 제어 입력이 유도된다. 따라서 최적화가 되어감에 따라 제어에 필요한 모멘트와 관절 토크는 줄어하나 힘은 증가하는 경향이 있으며 이는 표 2에서도 확인할 수 있다. 그러나 이 경우 말단 장치의 위치를 고수해야 하는 임무에 대해서는 에너지가 필요하지 않게 된다.

3.3 실제 적용시 고려 사항

일반적으로 제안된 성능 지수가 최소화되는 경우에 로봇 팔은 잠수정 쪽으로 접히는 경향이 있으며 이때 로봇팔은 관절 제한에 걸릴 수 있다. 이는 관절 제한을 회피하는 성능 지수[5]를 도입하거나, Antonelli[6]가 제안한 것처럼 가중 행렬 W 를 활용하여 잠수정과 로봇팔 사이의 움직임의 크기를 배분하는 것도 방법이 될 수 있다.

한편 일부 수중 시스템은 중동요각(pitch)이나 횡동요각(roll) 등 일부를 수동(passive) 자유도로 취급하여 제어한다 [15]. 일견 수동인 자유도에 대한 제어 입력이 필요하지 않으므로 에너지 소모가 적을 것으로 예상될 수 있으나 안정적인 작업 수행을 위한 추가적인 제어 입력이 필요할 수 있으므로 본 논문에서 제안된 방법과 직접적인 비교는 불가능하다. 반면 본 논문에서 제안된 방법은 수동 자유도를 가진 시스템이어도 여유 자유도를 가지고 있다면 적용하여 소모되는 에너지를 줄이는 것이 가능하다.

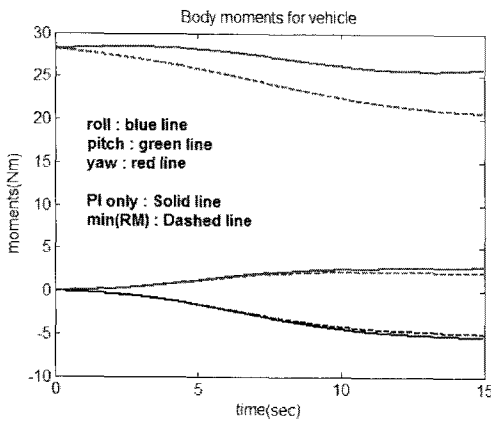


그림 5. 추종 제어에 필요한 모멘트.
Fig. 5. Required moment for tracking control.

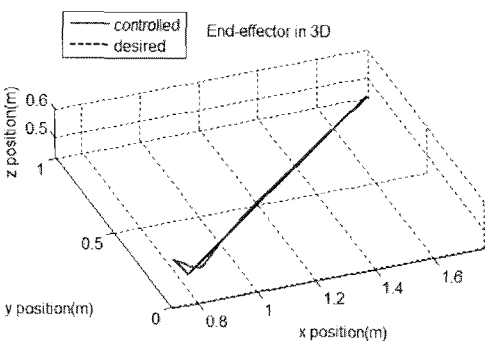


그림 6. PID 제어기에 의한 말단 장치의 3차원 궤적.
Fig. 6. Trajectory of end-effector of UVMS by PID control.

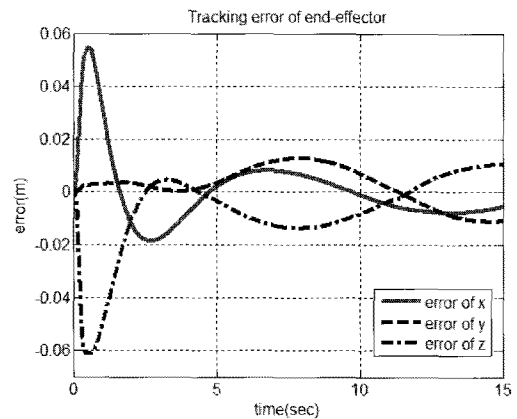


그림 7. PID 제어기에 의한 말단 장치의 추종 오차.
Fig. 7. Tracking error of end-effector of UVMS.

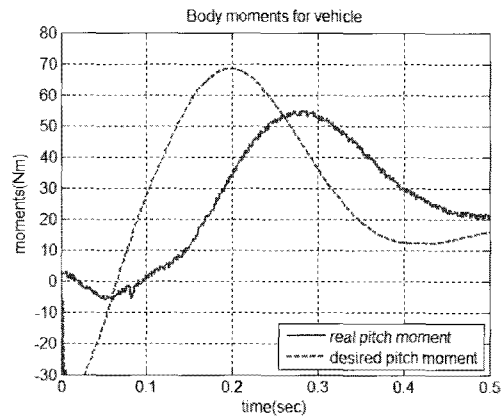


그림 8. 추진기 동역학 적용의 영향.
Fig. 8. Effect of thruster dynamics on simulation.

V. 결론

본 논문에서는 수중 무인 잠수정-매니퓰레이터 시스템의 여유 자유도를 활용하여 수중 작업 시에 에너지 소비를 줄일 수 있는 성능 지수를 제안하였다. 제안된 성능 지수의 최적화를 통해 UVMS가 제적 추종 제어를 함에 있어서 필요한 힘/모멘트가 줄어들음을 확인할 수 있었다. 또한 불확실하고 외란이 많은 수중 환경에서의 성공적인 작업을 위해 PID 제어기를 사용함으로써 외란이나 추진기의 한계를 극복할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

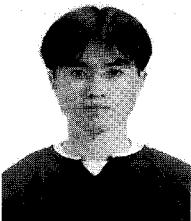
본 논문에서 제안된 UVMS의 여유 자유도 제어 기법은 추후 실제 PETASUS UVMS에 적용되어 실험을 통해 검증될 예정이다. 또한 잠수정과 로봇팔의 응답 속도 차이 등과 같은 UVMS의 동특성을 고려하여 정교한 제어 기법을 개발할 예정이다.

참고문헌

- [1] J. Park, W. K. Chung, and Y. Youm, "Computation of gradient of manipulability for kinematically redundant manipulators including dual manipulators system," *The Institute of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 8-15, June 1999.
- [2] G. Marini, S. K. Choi, and J. Yuh, "Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 15-23, 2009.
- [3] J. Kim, G. Marani, W. K. Chung, and J. Yuh, "Task reconstruction method for real-time singularity avoidance for robotic manipulators," *Advanced Robotics*, vol. 20, no. 4, pp. 453-481, 2006.
- [4] S. Chiaverini, "Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 3, pp. 398-410, June 1997.
- [5] J. Hollerbach and K. Suh, "Redundancy resolution of manipulators through torque optimization," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 308-316, Aug 1987.
- [6] G. Antonelli, *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, Springer, 2003.
- [7] N. Sarkar and T. Podder, "Coordinated motion planning and control of autonomous underwater vehicle - manipulator systems subject to drag optimization," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 228-239, Apr. 2001.
- [8] Y. Choi and W. K. Chung, *PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems*, Springer, 2004.
- [9] J. Han and W. K. Chung, "Redundancy resolution for underwater vehicle-manipulator systems with minimizing restoring moments," *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3522-3527, 2007.
- [10] J. Kim, J. Han, W. K. Chung, and J. Yuh, "Accurate thruster modeling with non-parallel ambient flow for underwater vehicles," *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1737-1742, 2005.
- [11] J. Park, W. K. Chung, and Y. Youm, "Unified motion specification and control of kinematically redundant manipulators," *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3945-3951, 2000.
- [12] B. Nemeč and L. Zlajpah, "Implementation of force control on redundant robot," *Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1314-1319, 1998.
- [13] T. Fossen, *Marine Control Systems : Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Marine Cybernetics, 2002.
- [14] J. Jang, J. Han, Y. Choi, and W. K. Chung, "Development of a small underwater vehicle-manipulator system for tasks in shallow water," *the 13th Intl Conf. on Advanced Robotics*, pp. 320-325, 2007.
- [15] A. Healey and D. Lienard, "Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles," *IEEE Journal of Oceanic engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 327-339, July 1993.

한 종 희

2003년 포항공과대학교 기계공학과 졸업. 2005년 동 대학원 석사. 2005년~현재 포항공과대학교 기계공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 수중 로봇 및 강인 제어.



정 완 균

1981년 서울대 기계설계학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1987년 동 대학원 박사. 1987년~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 모빌 로봇의 SLAM, 수중 로봇과 로봇의 강인 제어.

