ROV의 운동이 고려된 수중 로봇팔의 동적 작업공간 구동 제어

Dynamic Workspace Control of Underwater Manipulator Considering ROV Motion

심 형 원*, 전 봉 환, 이 판 묵
(Hyungwon Shim¹, Bong-Huan Jun¹, and Pan-Mook Lee¹)

¹Korea Ocean Research & Development Institute

Abstract: This paper presents a dynamic workspace control method of underwater manipulator considering a floating ROV (Remotely Operated vehicle) motion caused by sea wave. This method is necessary for the underwater work required linear motion control of a manipulator's end-effector mounted on a floating ROV in undersea. In the proposed method, the motion of ROV is modeled as nonlinear first-order differential equation excluded dynamic elements. For online manipulator control achievement, we develop the position tracking method based on sensor data and EKF (Extended Kalman Filter) and the input velocity compensation method. The dynamic workspace control method is established by applying these methods to differential inverse kinematics solution. For verification of the proposed method, experimental data based test of ROV position tracking and simulation of the proposed control method are performed, which is based on the specification of the KORDI deep-sea ROV Hemire.

Keywords: dynamic workspace control, underwater manipulator, remotely operated vehicle, extended Kalman filter

1. 서론

최근, 심해저의 화산, 지진, 열수분출 및 해저 생태 등 해양과학에 대한 관심과 생물자원 및 해저광물 등 해양자원의 활용에 대한 관심이 날로 높아짐에 따라 해저탐사 및 자원 채집 장비개발에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구에 따라 현재 해양 탐사 및 작업을 위해 유인잠수정, 자율무인잠수정, 원격무인잠수정(ROV: Remotely Operated Vehicle) 등과 해저 무한궤도차량, 수중 보행로봇 등이 세계 각국에서 개발되고 있으며, 실용화 단계로 접어들고 있다. 이중 해저탐사 및 자원 채집을 위해 개발된 대부분의 ROV들은 원격지에서 수중의 비디오 영상을 바탕으로 조작자가 로봇팔의 모든 관절을 직접 제어해야 하는 마스터/슬레이브 구조를 갖는 로봇팔 시스템을 탑재하고 있다[14]. 이러한 시스템은 로봇팔의 운동에 대한 예측과 조작이 용이하지만, 제어의 정밀성에 있어서는 전적으로 운용자의 숙련도에 의존하기 때문에 작업의 정밀성과 효율성을 높이기 위한 수중 로봇팔 제어에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구들[5-10]은 공통적으로 수중 환경을 극복하기 위한 명확한 방법을 제시하지 못하고 있다는 취약점으로 인해 현재 로봇팔을 이용한 수중 작업의 대부분은 작업의 안정성을 고려해 ROV가 해저면에 안착한 뒤 원격 조종기에 의한 수동 제어를 통해 이루어지고 있다. 잠수정에 장착된 로봇팔을 이용한 수중 작업에 있어, 해저면의 불규칙한 형상으로 인하여 잠수정이 해저면에 안착하기 힘든 경우, 또는 작업 대상이 해저면에서

멀리 떨어져 있어 부득이하게 수중에서 부유한 채 작업을 해야 하는 경우에는 유체의 영향과 로봇팔의 운동으로 인하여 발생하는 동적 영향으로 잠수정의 위치와 자세가 시간에 따라 변하게 되어 기존 제어기만으로는 로봇팔을 제어하는데 어려움이 있다. 또한, 수중 작업 대상이 해저면이나 수중의 일정한 지점에 고정되어 있어 작업 시 해저면의 고정 좌표계를 기준으로 로봇팔 끝의 선형 운동을 정밀하게 제어해야 하는 경우 더욱 제어가 힘들며 조작자의 부담을 증가시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 잠수정의 운동 보상 기반 로봇팔 제어에 관한 연구는 로봇팔 제어 기법에 치중하기 보다는 로봇팔 제어 시 안정성을 확보하기 위한 잠수정의 위치 보정에 치중한 연구들이 대부분이며, 잠수정의 위치 추종에 대한 연구는 항법 센서 퓨전 기법에 기반한 위치 추종[11], 유체를 고려한 잠수정-로봇팔 시스템의 동적 모델을 기반으로 칼만 필터를 이용한 잠수정 및 로봇팔의 위치 추종[10,12,13], 등, 항법과 관련되어 이루어졌다. 그러나 이 연구들은 실제 잠수정에 장착된 센서의 정밀도와 수중 환경의 영향, 로봇팔 제어 시 안정성 문제로 인해 로봇팔 제어에 실제로 활용되지 못하고 있다. 특히, 잠수정-로봇팔 시스템의 동적 모델을 기반으로 하여 잠수정 및 로봇팔의 위치를 추정하고 이를 로봇팔 제어에 적용하는 연구는 유체를 고려한 동적 모델링의 어려움으로 인하여 모델을 간략화시키고 잠수정 및 로봇팔의 자유도를 제약함으로써 실제 시스템에의 활용성 가능성이 매우 낮은 실정이다. 이러한 현실을 고려하여 본 논문에서는 수중 작업의 범위를 해저면의 고정된 공간에서 수중 전체 공간으로 넓히고, 실제 잠수정-로봇팔 시스템에 활용될 수 있도록 ROV의 운동 보상이 고려된 로봇팔 제어에 관한 연구를 다루고자 한다.

본 논문에서 제안하는 제어 기법은 크게 잠수정의 운동 보상을 위한 확장형 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter) 기

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

심형원, 전봉환, 이판묵: 한국해양연구원 해양시스템연구부

(hwshim@moeri.re.kr/bhjeon@moeri.re.kr/pmlee@moeri.re.kr)

* 본 연구는 국토해양부 지원으로 수행되는 차세대 심해용 무인잠수정 개발 사업과 다관절 복합이동 해저로봇 개발 사업의 일환으로 연구되었음.

반 위치 추정 방법, 작업공간 구동 제어(로봇팔의 베이스 좌표계 또는 로봇팔 끝 좌표계에서 정의되는 로봇팔의 운동을 미분역기구학 방법을 통해 제어[14]) 시 잠수정의 위치 변화에 능동적으로 대처하기 위한 입력 속도 보상 방법, 그리고, 이 보상된 입력 속도를 활용한 작업공간 구동 제어 방법으로 구성된 동적 작업공간 구동 기법을 제안한다. 제안된 구동 기법의 실험적 증명 및 활용 가능성을 제시하기 위해 본 논문에서는 한국해양연구원에서 개발한 6,000m급 ROV ‘해미레’[14]의 동해 탐사 시 획득한 항법 데이터를 이용한 시험과 해미레에 장착된 항법 센서 및 ORION 로봇팔[15]의 제원을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 같은 방법을 통해 논문의 타당성을 제시한 이유는 실제 ROV를 이용한 실험이 안정성 문제 및 시험에 필요한 추가 장비, 인력, 예산 등의 부족으로 인해 수행 자체가 어렵기 때문이다.

본 논문은 잠수정 운동을 고려한 동적 작업공간 구동 제어를 구현하기 위해 II 장에서 EKF를 이용한 잠수정의 위치 추정 방법을 제시하고, III 장에서는 입력 속도 보상 기법 및 미분역기구학을 이용한 작업공간 구동 제어기 설계 방법을 소개한다. 그리고, IV 장에서는 ROV의 실험적 항법 센서 데이터를 이용하여 EKF를 이용한 잠수정 위치 추정 기법의 성능을 검증하고, V 장에서는 WCS 기반의 동적 작업공간 구동 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증함으로써 본 논문의 타당성을 제시하였다.

II. 잠수정 위치 추정

수중에 부유한 채 잠수정이 작업을 수행해야 할 경우나 해저면의 표층이 굴곡이 심해 내려앉아 작업을 수행하지 못할 시 잠수정은 부력, 양력, 조류, 로봇팔의 운동에 따른 유체저항력 및 전향력 등으로 인하여 위치 및 자세 유지를 위한 제어를 하고 있다 하더라도 정확한 위치 및 자세를 유지하기 어렵다. 따라서 작업공간 구동 제어를 이용하여 WCS (World Coordinate System), 즉 GPS 좌표계의 East 방향을 X축으로, North 방향을 Y축으로, 지구 중심에서 지상으로 향하는 축을 Z축으로 하는 Cartesian coordinate system에서 로봇팔 끝의 선형 운동을 제어해야 할 경우 WCS 상에서 잠수정의 정

확한 위치를 추정하는 것이 필요하다. 이에 본 장에서는 잠수정의 센서값들로부터 잠수정의 정확한 위치를 추정하기 위한 방법을 제시한다.

1. 잠수정 운동 모델링

수중 로봇 시스템에 있어 유체의 영향과 잠수정-로봇팔 시스템에 대한 동적 모델은 잠수정의 위치 추정에 중요한 요소라 할 수 있다. 그러나 유체의 특성과 잠수정-로봇팔 시스템의 복잡한 형상, 잠수정과 로봇팔의 동적 커플링 등을 고려할 때 정확한 모델을 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서, 본 논문에서는 문제를 보다 간소화시키기 위해 잠수정의 위치 및 자세에 관련된 센서 데이터로부터 잠수정의 위치를 추정하는 일종의 센서 기반 위치 추정 기법을 사용한다. 일반적으로 심해 무인잠수정에는 절대 위치 및 자세 센서와 상대 속도와 각속도를 검출하는 정밀도가 높은 고가의 센서들이 사용된다. 그러나 이 센서들은 정밀도와 샘플링 주기 등의 특성이 다르기 때문에 이 센서들을 이용하여 보다 정확한 데이터를 획득하기 위해서는 업데이트 주기가 다른 센서들을 적절히 융합할 수 있는 퓨전 기법과 센서의 정밀성을 떨어뜨리는 노이즈에 대한 필터링이 필요하다. 이 점을 고려하여 본 논문에서는 이 두 가지 문제를 동시에 해결할 뿐만 아니라, 비선형 시스템에 적용이 용이한 Extended Kalman Filter(EKF)를 이용하여 기존 연구들[10,12,13]과는 달리 실시간 위치 추정을 위해 연산 시간을 단축시킬 수 있는 잠수정 위치 추정 기법을 제안한다.

WCS의 기준점에 대한 잠수정의 위치를 $P=[x, y, z, \psi, \gamma, \phi]^T$, 센서로부터 올라온 속도를 $u=[u_x, u_z, u_z, u_\psi, u_\gamma, u_\phi]^T$ 라 정의하고 상태변수를 다음과 같이 정의하였다.

$$s(t)=[x(t) \ y(t) \ z(t) \ \psi(t) \ \gamma(t) \ \phi(t)]^T \quad (1)$$

잠수정의 선형 속도와 각 축 방향의 회전각 및 각속도를 측정할 수 있다고 하면, 3차원 회전 행렬 ($R_{\phi, \gamma, \psi}$)에 의해 상태방정식과 관측방정식을 (2)-(4)와 같이 각각 정리할 수 있다.

$$\dot{s}(t)=\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ \dot{\gamma}(t) \\ \dot{\phi}(t) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_{\phi, \gamma, \psi} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \\ u_\psi \\ u_\gamma \\ u_\phi \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ u_\psi \\ u_\gamma \\ u_\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{\phi, \gamma, \psi}=\begin{bmatrix} C\phi C\gamma & C\phi S\gamma S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\gamma C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\gamma & S\phi S\gamma S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\gamma C\psi - C\phi S\psi \\ -S\gamma & C\gamma S\psi & C\gamma C\psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$h(t)=[x(t) \ y(t) \ z(t) \ \psi(t) \ \gamma(t) \ \phi(t)]^T \quad (4)$$

2. 확장형 칼만 필터 적용

위 상태변수들로부터 비선형 시스템의 이산화된 상태방정식을 다음과 같이 정의하였다.

$$s(k+1)=f(s(k), k)+w(k) \quad (5)$$

$$h(k)=Hs(k)+v(k) \quad (6)$$

그림 1. 잠수정 운동 모델링을 위한 좌표계.

Fig. 1. Coordinate systems for modeling of ROV motion.

$$H = I_6 \quad (7)$$

여기서 $I_6 \in R^{6 \times 6}$ 는 단위행렬이며, $s(k)$ 는 상태 변수, $w(k) \sim N(0, Q(k))$ 는 프로세스 노이즈, $v(k) \sim N(0, R(k))$ 는 측정 노이즈이다. 식 (5)의 시스템 비선형 함수는 식 (8)과 같다.

$$f(s(k), k) = s(k) + \delta t \dot{s}(k) \quad (8)$$

여기서 δt 는 샘플링 시간간격이다. 프로세스 잡음 공분산과 측정잡음 공분산을 각각 $Q(k)$, $R(k)$ 로 정의하고 시스템의 비선형 함수를 추정치에 대해 테일러 확장을 적용하여 선형화하였다.

$$f(s(k), k) \approx f(\hat{s}(k|k), k) + F(k, k-1)(s(k) - \hat{s}(k|k)) \quad (9)$$

선형화된 시스템 함수의 $F(k, k-1)$ 행렬은 다음과 같이 계산한다.

$$F(k+1, k) = \left. \frac{\partial f(s(k), k)}{\partial s} \right|_{s(k) = \hat{s}(k|k)} = I + \delta t \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & A \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)의 행렬 $A \in R^{3 \times 3}$ 의 각 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{11} &= u_y (c\phi(k)s\gamma(k)c\psi(k) + s\phi(k)s\psi(k)) \\ &\quad - u_z (c\phi(k)s\gamma(k)s\psi(k) + s\phi(k)c\psi(k)) \\ A_{12} &= -u_x c\phi(k)s\gamma(k) + u_y c\phi(k)c\gamma(k)s\psi(k) \\ &\quad + u_z c\phi(k)c\gamma(k)c\psi(k) \\ A_{13} &= -u_x s\phi(k)c\gamma(k) - u_y (s\phi(k)s\gamma(k)s\psi(k) + c\phi(k)c\psi(k)) \\ &\quad - u_z (s\phi(k)s\gamma(k)c\psi(k) - c\phi(k)s\psi(k)) \\ A_{21} &= u_y (s\phi(k)s\gamma(k)c\psi(k) - c\phi(k)s\psi(k)) \\ &\quad - u_z (s\phi(k)s\gamma(k)s\psi(k) + c\phi(k)c\psi(k)) \\ A_{22} &= -u_x s\phi(k)s\gamma(k) + u_y s\phi(k)c\gamma(k)s\psi(k) \\ &\quad + u_z s\phi(k)c\gamma(k)c\psi(k) \\ A_{23} &= u_x c\phi(k)c\gamma(k) + u_y (c\phi(k)s\gamma(k)s\psi(k) - s\phi(k)c\psi(k)) \\ &\quad + u_z (c\phi(k)s\gamma(k)c\psi(k) + s\phi(k)s\psi(k)) \\ A_{31} &= u_y c\gamma(k)c\psi(k) - u_z c\gamma(k)s\psi(k) \\ A_{32} &= -u_x c\gamma(k) - u_y s\gamma(k)s\psi(k) - u_z s\gamma(k)c\psi(k) \\ A_{33} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10)을 이용하여 선형화된 상태방정식을 다시 전개하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} s(k+1) &= F(k, k-1)s(k) + f(\hat{s}(k|k), k) \\ &\quad - F(k, k-1)\hat{s}(k|k) + w(k) \end{aligned} \quad (12)$$

이산화된 시스템에 대하여 EKF를 적용하여 잠수정의 위치 추정 알고리즘을 구성할 수 있다. k 번째 시간 스텝에서의 상태 변수는 $k-1$ 번째 시간 스텝의 상태변수에 대한 비선형 시스템 함수를 이용하여 추정하고, 선형화된 시스템을 이용하여 오차 공분산을 추정한다.

$$\hat{s}(k|k-1) = f(s(k-1), k-1) \quad (13)$$

$$P(k|k-1) = F(k, k-1)P(k-1|k-1)F^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (14)$$

잠수정의 센서 정보를 이용하여 Kalman 계인을 계산하며, 추정변수와 오차 공분산을 보정한다.

$$K(k) = P(k|k-1)H^T [HP(k|k-1)H^T + R(k)]^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{s}(k|k) = \hat{s}(k|k-1) + K(k)[h(k) - H\hat{s}(k|k-1)] \quad (16)$$

$$P(k|k) = P(k-1|k-1) - K(k)[HP(k|k-1)H^T + R(k)]K^T(k) \quad (17)$$

이 때, 초기화 상태추정치와 초기오차 공분산은 식 (18)과 (19)로 계산한다.

$$\hat{s}(0|0) = E[s(0)] \quad (18)$$

$$P(0|0) = E[(s(0) - E[s(0)])(s(0) - E[s(0)])^T] \quad (19)$$

III. 작업공간 구동 제어기

WCS (World Coordinate System)을 기반으로 하는 로봇팔의 작업공간 구동 제어기는 WCS 상에서 잠수정의 위치와 자세로부터 WCS 상에서의 로봇팔의 베이스의 위치와 자세를 추정하여 로봇팔 끝의 운동이 WCS를 기준으로 정의될 수 있도록 로봇팔의 관절각을 제어하는 알고리즘이 필요하다. 이에 본 장에서는 WCS 상에서 추정된 잠수정의 위치와 자세를 기반으로 로봇팔 끝의 위치와 자세를 추정하고, 추정된 로봇팔 끝의 위치와 자세로부터 입력 속도를 보상하여 WCS 상에서 로봇팔 끝을 제어하는 작업공간 구동 제어 방법을 제시한다.

1. 잠수정의 위치를 고려한 로봇팔 끝의 위치 추정

로봇팔 끝의 위치를 추정하기 위해 잠수정과 로봇팔의 베이스, 그리고 로봇팔 끝의 위치에 대한 파라미터를 다음과 같이 정의한다.

$$P_R = \begin{bmatrix} r_R \\ n_R \end{bmatrix}, \quad P_B = \begin{bmatrix} r_B \\ n_B \end{bmatrix}, \quad P_E = \begin{bmatrix} r_E \\ n_E \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (20)은 WCS 상에서의 잠수정의 위치 ($r_R = [x_R \ y_R \ z_R]^T$)와 자세 ($n_R = [\psi_R \ \gamma_R \ \phi_R]^T$), 로봇팔 베이스의 위치와 자세, 로봇팔 끝의 위치와 자세를 나타낸다.

EKF를 통해 구해진 WCS 상에서 추정된 k 번째 상태의 잠수정의 위치를 이용하여 WCS 상에서의 로봇팔 베이스의 위치를 추정하면 다음과 같다.

$$P_R(k) = \hat{s}(k) \quad (21)$$

$$P_B(k) = P_R(k) + \begin{bmatrix} R_R(\psi_R(k), \gamma_R(k), \phi_R(k))r_B^R \\ n_B^R(k) \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서 $R_R(\psi_R(k), \gamma_R(k), \phi_R(k))$ 는 잠수정의 자세를 이용하여 잠수정 중심 좌표계에서 정의된 로봇팔 베이스의 위치 r_B^R 을 WCS 상에서 정의되는 위치로 변환하기 위한 3차원 회전행렬이며, $n_B^R(k)$ 는 잠수정 중심 좌표계 상에서의 로봇팔 베이스의 자세이다.

로봇팔의 관절각으로부터 로봇팔 베이스 좌표계 상에서의

로봇팔 끝의 위치와 자세는 로봇팔의 D-H 파라미터를 이용한 변환 행렬과 식 (3)의 회전 행렬을 이용한 순기구학/역기구학적 방법[14,16]으로부터 구해진다. 로봇팔 베이스 좌표계로 정의되는 로봇팔 끝의 위치는 식 (23)과 같이 정의한다.

$$P_E^B(k) = \begin{bmatrix} r_E^B(k) \\ n_E^B(k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

WCS 상에서의 로봇팔 끝의 위치와 자세는 WCS 상의 로봇팔 베이스의 위치와 자세, 잠수정의 자세와 잠수정 중심 좌표계에서의 로봇팔 베이스의 자세를 이용한 회전 행렬, 그리고 식 (23)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$P_E(k) = P_B(k) + \begin{bmatrix} R_R(k)R_B^R r_E^B(k) \\ n_B^R(k) + n_E^B(k) \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 R_B^R 는 잠수정 중심 좌표계에서 표현되는 로봇팔 베이스의 자세를 이용한 회전행렬이다. 식 (24)에 식 (22)를 대입하면 잠수정 위치로부터 WCS 상에서의 로봇팔 끝의 위치를 구하는 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_E(k) = P_R(k) + \begin{bmatrix} R_R(k)(r_B^R + R_B^R r_E^B(k)) \\ n_B^R(k) + n_E^B(k) \end{bmatrix} \quad (25)$$

2. 로봇팔 끝의 위치 오차로부터 제어 입력 속도 보정

미분역기구학을 기반으로 하는 작업공간 구동 제어[14]는 로봇팔 끝의 속도를 입력으로 받아 제어하는 방법이다. 따라서, 수중에서 부유하는 잠수정의 위치와 자세는 시간에 따라 계속 변화하기 때문에 WCS 상에서 로봇팔 끝을 제어하기 위해서는 주어진 WCS 상의 로봇팔 끝 속도 명령이 잠수정이 변하는 위치를 고려하여 보정되어야 한다.

입력 속도 보상을 위해 우선적으로 $k+1$ 상태에서의 잠수정의 위치 추정이 필요하다. $k+1$ 상태에서는 잠수정의 위치에 대한 센서 정보가 없기 때문에 k 상태에서의 속도 센서 정보를 이용하여 위치를 추정한다.

$$\tilde{P}_R(k+1) = H\tilde{S}(k+1|k) \quad (26)$$

식 (26)을 이용해 추정된 잠수정의 위치와 k 상태의 로봇팔 끝의 위치를 이용하여 $k+1$ 상태에서 입력 속도가 없을 때 로봇팔 끝의 위치를 추정하면 다음과 같다.

$$\tilde{P}_E(k+1) = \tilde{P}_R(k+1) + \begin{bmatrix} R_R(k+1)(r_B^R + R_B^R r_E^B(k)) \\ \tilde{n}_B^R(k+1) + n_E^B(k) \end{bmatrix} \quad (27)$$

k 상태에서의 로봇팔 끝 입력 속도 보정을 위해 주어진 입력 속도부터 계산된 $k+1$ 상태의 로봇팔 끝 목표 위치와 식 (27)을 이용한다. 식 (28)은 $k+1$ 상태의 로봇팔 끝 목표 위치를 나타내며, 식 (29)는 보정된 입력 속도를 나타낸다.

$$P_E^d(k+1) = P_E^d(k) + V^I(k)\Delta t \quad (28)$$

$$V(k) = (P_E^d(k+1) - \tilde{P}_E(k+1))/\Delta t \quad (29)$$

식 (29)로부터 구해진 WCS 기반의 보정 입력 속도는 작업공간구동 제어를 위해 로봇팔 베이스 좌표계 상에서의 입력

속도로 변환되어야 한다. WCS 상에서의 입력 속도를 베이스 좌표계 상에서의 입력으로 표현하면 다음과 같다.

$$V(k) = \begin{bmatrix} \dot{r}(k) \\ \dot{n}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_R(k)R_B^R \dot{r}_E^B(k) \\ \dot{n}_E^B(k) \end{bmatrix} \quad (30)$$

식 (30)의 역변환을 통해 로봇팔 베이스 좌표계 상에서의 입력 속도를 구하면 다음과 같다.

$$V_E^B(k) = \begin{bmatrix} (R_R(k)R_B^R)^{-1} \dot{r}(k) \\ \dot{n}(k) \end{bmatrix} \quad (31)$$

3. 작업공간 구동 제어를 위한 미분역기구학

베이스 좌표계에서 로봇팔 끝의 위치를 제어하기 위해서는 제어하고자 하는 로봇팔 끝의 위치로부터 로봇팔의 관절각을 산출할 수 있어야 한다. 그러나 주어진 로봇팔 끝의 위치를 이용하여 직접 관절각을 구하기 위해서는 수치해석적 방법을 적용해야 하기 때문에 기존의 연구[14]는 식 (32)와 같은 미분역기구학식을 이용하여 이 문제를 해결하였다.

$$\dot{q}_i = J_i^{-1}(q_i)V_i \quad (32)$$

식 (32)에서 q_i 는 로봇팔의 관절각 벡터를, $\dot{q}_i$ 는 관절각 속도 벡터를 나타낸다. $J_i^{-1}(q_i)$ 는 로봇팔의 관절 공간과 베이스 좌표계를 기반으로 하는 작업공간 간의 선형 매핑(mapping) 관계를 나타내는 Jacobian 행렬이고, V_i 는 로봇팔 끝의 선형 및 회전 속도를 나타내는 벡터이다.

$$q_{i+1} = q_i + \dot{q}_i \Delta t \quad (33)$$

로봇팔 끝의 속도를 이용하여 작업공간 구동에 필요한 관절각을 구하는 식은 식 (32)와 (33)으로부터 식 (34)와 같이 표현된다.

$$q_{i+1} = q_i + J_i^{-1}(q_i)V_i \Delta t \quad (34)$$

본 논문에서 제안하는 동적 작업공간 구동 제어는 식 (34)를 기반으로 식 (31)과 같이 보정된 로봇팔 끝의 속도를 입력으로 받아 로봇팔 끝의 운동이 WCS 상에서 정의되도록 하는 로봇팔의 관절각을 산출하여 로봇팔을 제어하는 방법이다.

IV. 항법 데이터 기반 잠수정 위치 추정 기법 검증

본 장에서는 II장에서 제안된 잠수정 위치 추정 기법의 타당성을 입증하기 위해 수행한 실제 항법 데이터 기반 시험을 수행하였다. 잠수정의 위치 추정 알고리즘 검증을 위해 해미래 ROV의 2009년6월 4일 동해 위도 36°05.88'N, 경도 130°04.73'E 부근에서 탐사를 수행한 항법 센서 데이터를 이용하였다. ROV에 장착된 항법 센서의 개요는 표 1과 같다.

USBL(수중 음향 위치 추적 장치)는 모선의 USBL과의 수중 음향 신호를 통해 모선의 GPS 값으로부터 ROV의 절대 위치를 추정하는 센서로 8초의 주기로 GPS 좌표계 기준의 위치를 업데이트하며, 수심 1m 당 ±0.003m 오차 범위를 갖는다. DVL(수중 초음파 센서)은 해저면에 네 방향으로 초음파를 발산하여 ROV의 선형 속도를 측정하는 센서로 5Hz의 주

기로 ROV의 상대 속도를 업데이트한다. OCTAN(IMU : 관성항법 센서)은 ROV의 회전각과 회전 각속도를 계측하는 센서로 100Hz의 주기로 센서값을 업데이트한다. CTD 센서는 수심 계측 센서로 1초에 한번씩 데이터를 업데이트 한다. ROV가 동해를 탐사하는 동안 얻은 센서 데이터는 그림 2~5와 같다.

USBL 센서 데이터를 살펴보면 센서의 오차 범위를 크게 벗어나는 아웃라이어 발생됨을 볼 수 있다. 이 값들은 EKF를 통한 ROV의 위치 추정 성능을 크게 저하시킴으로 다음과 같은 간단한 필터를 통해 아웃라이어를 제거하였다.

$$|U(k) - U(k-1)| \leq \mu B_{err}(k), \quad U(k) = [x(k) \ y(k)]^T \quad (35)$$

여기서 $B_{err}(k)$ 는 k 상태의 수심에 따른 센서 오차의 최대값을 나타내며, μ 는 센서 노이즈를 고려하여 최대 오차의 스케일을 증가시키는 계수이다.

표 1. 해미래 ROV의 센서 제원.

Table 1. Sensor specification of Hemire ROV.

Sensors	Specification
OCTAN (FOG, AHRS)	IMU(Orientation & Angle Rate Sensor) - Heading Accuracy: 0.1 deg - Roll, Pitch Accuracy: 0.01 deg - Update rate : 100Hz
CTD	Depth Sensor - Temperature: 1e-4 °C - Conductivity: 5e-5 S/m - Resolution: 14 cm (0.002% of F.S.) - Update rate : 1Hz
USBL	Absolute Position Sensor - Freq.: 7.5-18 kHz - Accuracy : 0.3% of slant range - Update periods : 4~8 sec.
DVL	Velocity Sensor - Freq.: 1,200 kHz, - Bottom lock range: 0.5m~30m - Accuracy: +/- 0.2% - Altimeter Freq.: 500 kHz, Range: 50 m - Update rate : 5Hz

그림 2. USBL 및 CTD 센서로부터 측정된 위치 데이터.
Fig. 2. Measured position by USBL and CTD during exploration.

그림 3. OCTAN 센서로부터 측정된 방위각 데이터.
Fig. 3. Measured orientation by OCTAN during exploration.

그림 4. DVL 센서로부터 측정된 속도 데이터.
Fig. 4. Measured velocity by DVL during exploration.

그림 5. OCTAN 센서로부터 측정된 각 속도 데이터.
Fig. 5. Measured angle rates by OCTAN during exploration.

EKF를 이용한 잠수정 위치 추정의 업데이트 주기는 속도 센서 중 주기가 가장 긴 DVL의 업데이트 주기 5Hz로 설정하였다. EKF를 사용하여 USBL의 낮은 위치 업데이트율을 보완하면서 ROV의 최적 위치 추정을 위해 USBL 센서와, OCTAN 센서의 ROV 위치 데이터를 다음과 같이 정의하고, 위치 센서값이 업데이트되지 않는 구간에서는 식 (38)과 같이 속도 센서를 통한 위치 추정값으로 위치 센서값을 대체하였다.

$$r_v(k) = [x_v(k) \ y_v(k) \ z_v(k)]^T \quad (36)$$

$$n_o(k) = [\psi_o(k) \ \gamma_o(k) \ \phi_o(k)]^T \quad (37)$$

$$h(k) = \begin{cases} H_r \hat{s}(k|k-1) \\ n_o(k) \end{cases} \quad \text{if no USBL signal} \quad (38)$$

$$H_r = [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3}] \quad (39)$$

$$h(k) = \begin{cases} r_v(k) \\ n_o(k) \end{cases} \quad \text{if USBL signal} \quad (40)$$

그림 6~9는 EKF를 이용하여 ROV의 위치와 자세를 추정 한 결과를 센서값과 Dead Reckoning(DR) 방법을 이용하여 추정한 위치를 비교한 결과이다. 이 시험에 사용된 프로세스 잡음 공분산과 측정잡음 공분산은 각각 $Q(k) = I_6$ 와 $R(k) = 0.01 \times I_6$ 이다.

다음 결과로부터 EKF를 이용한 ROV의 위치 추정의 정확도를 측정하기는 힘들지만, DR의 의한 위치 추정 결과는 절대 위치 센서값들이 분포되어 있는 영역의 외각을 따라 추정하는 반면 EKF를 이용한 결과는 영역의 중심을 따라 잘 추정하고 있음을 볼 때, 본 논문에서 제안하는 EKF를 이용한 ROV의 위치 추정 결과가 어느 정도 타당성을 지님을 확인할 수 있다. 특히 ROV의 고도를 추정하는 결과(그림 8)를 살펴보면, EKF를 이용한 경우 CTD 센서값의 중심을 잘 추종하는 반면, DR의 결과는 CTD 센서값과 큰 오차를 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이는 해저면의 불규칙한 고도로 인해 DVL 센서의 고도에 대한 속도값이 불안정해지면서 오차가 지속적으로 누적되어 발생한 결과로 판단된다. 이런 경우에 있어서도, 본 논문에서 제안하는 EKF를 이용한 방법이 잠수정의 위치 추정에 효과적인 성능을 보임을 확인할 수 있으며, 이 결과들로부터 수중에서 부유하는 ROV 로봇팔의 작업공간 구동 제어를 위해 제안된 방법이 활용될 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 또한, 10,378초 동안 기록된 총 51,888 세트의 센서 데이터를 이용한 EKF ROV 위치 추정 알고리즘 실험에 소요된 시간은 인텔 펜티엄 CPU 3GHz, 메모리 2GB의 PC 환경에서 약 205초가 소요되었다. 즉, EKF ROV 위치 추정 알고리즘의 한 스텝을 연산하는데 걸리는 시간은 약 4ms로 연산 시간이 짧아 실제 실험에 활용 가능한 알고리즘이라 할 수 있다. 그러나 실제 실험을 위해서는 ROV의 센서 정밀도 개선이 필요하며, 안정된 실험을 위해 ROV의 위치 및 자세 유지 제어가 갖춰져야 한다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 타당성을 제시하고자 하였다. 이에 대한 자세한 내용은 V장에서 다루기로 한다.

그림 6. USBL, DR, EKF를 이용한 ROV 동쪽 위치 추정.

Fig. 6. ROV east position tracking by using USBL, DR and EKF.

그림 7. USBL, DR, EKF를 이용한 ROV 북쪽 위치 추정.

Fig. 7. ROV north position tracking by using USBL, DR and EKF.

그림 8. CTD, DR, EKF를 이용한 ROV 고도 추정.

Fig. 8. ROV altitude tracking by using CTD, DR and EKF.

그림 9. OCTAN, DR, EKF를 이용한 ROV 자세 추정.

Fig. 9. ROV orientation tracking by using OCTAN, DR and EKF.

V. 작업공간 구동 시뮬레이션

수중에서 ROV의 운동 보상이 고려된 작업공간 구동의 안정된 시험을 위해서는 ROV에 현재 위치와 자세를 유지하기 위한 제어시스템이 갖추어져야 한다. 이를 위해서는 무엇보다 정밀도가 높은 센서가 ROV에 장착되어야 하며, 실험을 수행하기 위한 모션과 인력 등이 갖추어져야 한다. 그러나 현재 해미레 ROV에 장착된 센서의 정밀도가 본 논문에서 제안된 작업공간 구동 제어 방법을 시험하기에는 다소 떨어지는 면이 있으며, ROV의 위치 및 자세 유지 제어가 갖추어져 있지 않아 시험을 수행하기에는 시스템의 안정성이 떨어진다. 이점을 고려하여, 본 논문에서는 각 센서를 모델링한 후, 이를 이용하여 시뮬레이션을 통해 잠수정의 위치를 추정하고, 이를 작업공간 구동 제어기에 적용하여 제안된 방법의 타당성을 입증하고자 하였다.

1. ROV 센서 오차 모델링

본 논문에서는 실제 Hemire ROV에 적용 가능한 로봇팔 작업공간 구동 제어를 구현하기 위해 Hemire에 장착된 센서를 모델링하여 ROV의 위치를 추정하는 시뮬레이션을 수행하였다. 각 센서에 대한 모델은 ROV의 임의로 설정한 운동에 대해 각 센서의 오차 모델을 적용하여 형성하였다. 각 센서의 오차 모델은 다음과 같다.

1.1 ROV 센서 오차 모델링

USBL은 모션과 ROV에 각각 장착되어 음향 신호의 도달 시간차를 이용해 ROV의 거리와 경사각을 산출한 후, 모션의 GPS 위치 데이터를 이용하여 GPS 좌표계 상의 ROV의 위치를 계산하여 전달하는 센서이다. USBL은 불규칙한 바이어스 오차를 가지고 있어 랜덤상수로 모델링이 가능하며, USBL의 측정 시 발생하는 잡음은 백색 잡음(white noise)으로 모델링될 수 있다. USBL의 출력 오차 δu_{SBL} 는 식 (41)과 같이 랜덤 상수 ∇ 와 백색잡음 $w_u(t)$ 의 합으로 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \delta u_{SBL}(t) &= \nabla + w_u(t), \quad w_u(t) \sim N(0, Q_{u,2}) \\ \dot{\nabla} &= 0, \quad \nabla = [\nabla_x \quad \nabla_y]^T, \quad \nabla(0) \sim N(0, P_{u,2}) \end{aligned} \quad (41)$$

1.2 CTD (Conductivity, Temperature and Depth) 센서 오차 모델링

CTD는 전기 전도도와 수온, 수심(수압)을 측정하는 장치로써, 수압을 이용해 수심을 측정하는 센서이다. CDT 센서의 수심 측정 정밀도는 압력계의 계측 범위와 정밀도에 의해 좌우되기 때문에 최대 측정 수심이 클수록 압력계의 계측 범위가 늘어나 정밀도는 떨어지게 된다. Hemire ROV에 장착되어 있는 CTD는 심해 6,000m 급으로 14cm의 정밀도를 갖는다. CDT는 압력계를 사용하는 센서로 불규칙한 바이어스 오차를 가지고 있어 랜덤상수로 모델링이 가능하며, 계측 시 발생하는 잡음은 백색잡음으로 모델링될 수 있다. CDT의 출력 오차 δf_{CTD} 는 식 (42)와 이 랜덤 상수 α 와 백색잡음 $w_f(t)$ 의 합으로 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \delta f_{CTD}(t) &= \alpha + w_f(t), \quad w_f(t) \sim N(0, Q_f) \\ \dot{\alpha} &= 0, \quad \alpha(0) \sim N(0, P_f) \end{aligned} \quad (42)$$

1.3 DVL 센서 오차 모델링

음파의 도플러효과를 이용하여 상대 속도를 계측하는 DVL은 계측 범위 내에 해저면이 있어야 하며, 해저면이 지나치게 요철이 심하거나 무인잠수정의 고도가 높아서 계측 범위를 벗어나면 정확한 절대속도를 얻을 수 없으며 해수중의 부유물에 대한 상대속도 밖에는 계측할 수 없게 된다. 또한 수온의 변화가 계층별로 일어나게 되면 음속의 추정이 부정확하여 오차를 갖게 될 수 있다. 이 모든 것을 고려하여 센서를 모델링하는 것은 다소 무리가 있음으로 도플러효과에 따른 불규칙한 바이어스 오차를 랜덤상수로 모델링하고, 해저면의 불규칙성에 따른 오차를 진폭과 주기가 변하는 sine 함수로 모델링하였다. 그리고 속도 계측 시 발생하는 잡음은 백색잡음으로 모델링하였다. DVL의 출력 오차 δd_{DVL} 는 식 (43)과 같이 랜덤 상수 β 와 해저면 모델에 따른 세팅 상수 λ, γ 로 정의되는 sine 함수, 그리고 백색잡음 $w_\lambda(t)$ 의 합으로 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \delta d_{DVL}(t) &= \beta + \lambda \sin(\gamma t) + w_\lambda(t), \quad w_\lambda(t) \sim N(0, \dot{Q}_r) \\ \dot{\beta} &= 0, \quad \beta = [\beta_x \quad \beta_y \quad \beta_z]^T, \quad \beta(0) \sim N(0, P_r) \end{aligned} \quad (43)$$

1.4 IMU 센서 오차 모델링

IMU 센서는 관성항법 센서로 가속도계와 자이로를 이용하여 상대 속도와 자세를 측정하는 센서로 본 논문에서는 가속도계를 이용한 상대 속도는 오차 누적이 심하여 사용하지 않았다. Hemire ROV에 장착된 IMU 센서는 FOG(Fiber Optic Gyroscope)를 이용하여 회전 각속도를 계측하고, 계측된 각속도를 적분하여 현재 자세를 산출해내는 센서로 회전 각속도에 대한 오차 모델은 출력 오차 δg_{IMU} 는 식 (44)와 같이 랜덤 상수 ε 와 백색잡음 $w_g(t)$ 의 합으로 모델링하였다. 그리고 현재 자세에 대한 오차 모델은 식 (44)를 적용한 회전 각속도 오차 모델을 샘플링 타임 Δt 에 대해 적분하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} \delta g_{IMU}(t) &= \varepsilon + w_g(t), \quad w_g(t) \sim N(0, \dot{Q}_n) \\ \dot{\varepsilon} &= 0, \quad \varepsilon = [\varepsilon_\psi \quad \varepsilon_\theta \quad \varepsilon_\phi]^T, \quad \varepsilon(0) \sim N(0, P_n) \end{aligned} \quad (44)$$

2. ROV 운동 경로 설정 및 센서 모델링

ROV의 운동 경로는 ROV가 수중에서 위치 및 자세 제어를 하고 있다는 가정하에 sine 함수를 이용하여 일정 위치에서 진동하고 있는 형상으로 설정하였다. ROV의 경로 모델은 다음과 같다.

$$P_R^{Path}(t) = P_R^{base} + A \sin(Bt + C) \quad (45)$$

$$P_R^{base} = [x_b \quad y_b \quad z_b \quad \psi_b \quad \theta_b \quad \phi_b]^T \quad (46)$$

$$A = \text{diag}[A_x \quad A_y \quad A_z \quad A_\psi \quad A_\theta \quad A_\phi] \quad (47)$$

$$B = [B_x \quad B_y \quad B_z \quad B_\psi \quad B_\theta \quad B_\phi]^T \quad (48)$$

$$C = [C_x \quad C_y \quad C_z \quad C_\psi \quad C_\theta \quad C_\phi]^T \quad (49)$$

여기서 P_R^{base} 는 WCS에서 ROV의 위치 제어를 위한 목표 기준 위치이며, A 는 진폭을, B 는 진동 주기를, C 는 위상차를 나타내는 행렬과 벡터이다.

이 모델을 이용하여 각 센서의 오차 모델로부터 센서 모델

을 구하면 다음과 같다.

$$P_{USBL}(t) = S_U P_R^{path}(t) + \delta u_{USBL}(t) \quad (50)$$

$$S_U = [I_2 \quad 0_{2 \times 4}]$$

$$P_{CTD}(t) = S_C P_R^{path}(t) + \delta f_{CTD}(t) \quad (51)$$

$$S_C = [0_{1 \times 2} \quad 1 \quad 0_{1 \times 3}]$$

$$V_{DVL}(t) = R_R^{-1}(t) S_D \dot{P}_R^{path}(t) + \delta d_{DVL}(t) \quad (52)$$

$$= R_R^{-1}(t) S_D (diag(AB) \cos(Bt + C)) + \delta d_{DVL}(t)$$

$$S_D = [I_3 \quad 0_{3 \times 3}]$$

$$V_{IMU}(t) = S_I \dot{P}_R^{path}(t) + \delta g_{IMU}(t) \quad (53)$$

$$= S_I (diag(AB) \cos(Bt + C)) + \delta g_{IMU}(t)$$

$$S_I = [0_{3 \times 3} \quad I_3]$$

$$P_{IMU}(t) = \int_{t-\Delta t}^t V_{IMU}(t) dt = P_{IMU}(t - \Delta t) + V_{IMU}(t - \Delta t) \Delta t \quad (54)$$

3. 시뮬레이션

동적 작업공간 구동 제어의 성능 검증을 위한 시뮬레이션은 실험 환경에서 고려하여 해저면과 평행한 수중 조류가 있고 ROV가 이를 극복하기 위해 위치 제어를 하고 있다는 가정하에 ROV가 Y 축 방향으로 진동하면서, Yaw 진동(Z 축 회전 진동)이 있는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 ROV의 운동 경로와 센서 모델값, 그리고 ROV의 위치 추정 결과를 제시하며, 작업공간 구동 제어 성능 평가를 위해 Dead reckoning과 EKF 방법을 통한 작업공간 구동 제어 성능을 비교하였다. 시뮬레이션에 활용된 로봇팔의 기구학적 파라미터는 표 2와 같은 한국해양연구원에서 개발된 해미래 ROV에 장착된 6자유도ORION 매니퓰레이터 [14]의 제원을 활용하였다.

3.1 ROV 센서 모델

현재 ROV에 장착된 센서들의 특성이 시뮬레이션을 수행하기에 취약한 부분이 있으므로, 모델링된 각 센서의 설정 데이터는 다음 같은 시뮬레이션 환경 제약 조건에 따라 그 범위가 한정되었다.

- 1) USBL 센서의 기준의 되는 GPS의 오차는 없다고 가정하고 현재 가장 성능이 좋은 USBL 센서(오차 : 수심 1m 당 0.0003m)를 고려하여 수심 100m 이내의 천해역 실험을 전제로 한다.
- 2) 모델링된 모든 센서 데이터는 Outlier(센서의 오차 범위를 크게 벗어나는 데이터)가 제거된 상태이다.
- 3) DVL 센서의 특성상 해저면에서 30m 이내 부유하고 있으

표 2. ORION 매니퓰레이터의 D-H 파라미터.

Table2. D-H parameters of ORION manipulator.

Joint	Standard reach manipulator				
	a_i (mm)	d_i (mm)	θ_i (deg.)	α_i (deg.)	limit(deg.)
1	69.9	78.8	θ_1	90	-60~60
2	567.2	0	θ_2	0	-32~90
3	135.4	0	θ_3	90	-75~60
4	0	500.6	θ_4	-90	-135~135
5	0	0	θ_5	90	-26~94
6	0	411.8	θ_6	0	.

며, 해저면의 고저차는 0.005m 이내로 설정한다.

- 4) 모든 센서는 ROV의 중심에 위치하고 있으며, ROV 중심 좌표계의 Z 축 선상에 위치하고 있다.

Y축 방향 진동과 Yaw 진동을 고려한 ROV 운동 경로 설정을 위해 식 (45)의 기준 위치를 $P_R^{base} = [10 \quad 10 \quad 10 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T m$ (위도 $36^\circ 05.88'N$, 경도 $130^\circ 04.73'E$, 수심 100m 지점을 WCS의 원점으로 설정), 계수를 $A_y = 0.2m$, $A_\phi = 5^\circ$, $B_{y,\phi} = 0.04\pi$ 로 설정하고, 각 센서의 최대 오차 범위(표 1 참조)로부터 랜덤 상수의 범위를 결정하였다. 백색잡음은 White Gaussian Noise로 설정하여 Matlab®의 wgn() 함수로부터 값을 추출하여 사용하였다. 그림 10은 시뮬레이션을 위해 설정된 ROV의 경로를 각 성분 별로 나타낸 그림이다. 그림 11~14는 그림 10의 경로와 센서 모델로부터 구해진 센서 데이터들이다.

3.2 ROV 위치 추정 시뮬레이션

다음은 그림 11~14에서 형성된 ROV 센서값들을 이용하여 Dead Reckoning 기법과 EKF를 통해 ROV의 위치를 추정한 데이터들이다.

그림 10. 시뮬레이션을 위한 ROV 경로.

Fig. 10. ROV path for simulation.

그림 11. USBL, CTD 모델로부터 구해진 ROV 위치 데이터.

Fig. 11. ROV position data of USBL, CTD model.

그림 12. IMU 모델로부터 구해진 ROV 자세 데이터.

Fig. 12. ROV orientation data of IMU model.

그림 13. DVL 모델로부터 구해진 ROV 속도 데이터.

Fig. 13. ROV velocity data of DVL model.

그림 14. IMU 모델로부터 구해진 ROV 회전각속도 데이터.

Fig. 14. ROV angle rate data of IMU model.

그림 15. DR과 EKF를 이용한 ROV 위치 추정.

Fig. 15. ROV position tracking by using DR and EKF.

그림 16. DR과 EKF를 이용한 ROV 자세 추정.

Fig. 16. ROV orientation tracking by using DR and EKF.

그림 17. ROV 위치 및 자세 추정 오차.

Fig. 17. Errors of ROV position and orientation tracking.

ROV 위치 추정 결과에 대한 오차는 다음과 같다.

그림 17에서 보는 바와 같이 위치가 변하지 않는 X, Z 축에 대한 추정 오차는 DR과 EKF가 비슷한 수준을 나타냄을 볼 수 있으며, Y 축과 같이 위치가 변하는 방향에 대해서는 시간에 따라 오차가 누적되는 DR보다 EKF가 위치를 더 잘 추종함을 볼 수 있다. Roll, Pitch, Yaw에 대해서는 DR보다 EKF가 더 잘 추종함을 알 수 있다. 이 결과를 종합적으로 분석해 볼 때 DR 보다 EKF가 ROV의 위치를 더 잘 추정하며, EKF를 통한 위치 추정 알고리즘이 어느 정도 타당성을 갖음을 확인할 수 있다.

3.3 동적 작업공간 구동 제어 시뮬레이션

본 절에서는 3.2절의 보정된 ROV의 위치를 이용하여 WCS에서 로봇팔 동적 작업공간 구동 제어를 시뮬레이션하였다. 이 시뮬레이션은 DR과 EKF를 이용한 ROV 위치 추정에 대해 WCS에서 로봇팔 작업공간 구동 제어에 대한 시뮬레이션이다. 시뮬레이션은 EKF를 이용하여 ROV의 위치를 추정된 후 로봇팔에 대한 작업공간 구동 제어를 하였을 때, 성능이 얼마나 향상되는지를 DR을 통한 ROV 위치 추정을 통해 제어한 결과와 비교하기 위한 것으로 본 논문의 타당성을 제시하는 결과를 보여주기 위한 시뮬레이션이다. 그림 18은 DR과 EKF를 이용하여 추정된 ROV의 위치를 WCS 상의 작업공간 구동 제어에 적용한 후 로봇팔 끝의 궤적을 초기 설정된 ROV의 실제 위치를 기반으로 표현한 그림이다.

그림 19, 20의 결과는 그림 18의 로봇팔 끝 위치와 자세에 대한 오차를 보여준다. EKF를 이용한 경우 최대 약 $\pm 2.3\text{cm}$ 의 위치 오차를 갖는데 반해, DR을 이용한 경우는 최대 약 $\pm 5\text{cm}$ 의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 자세에 대한 오차는 그림 20에서와 같이 EKF를 이용한 경우 최대 약 $\pm 5^\circ$ 이내 인 반면 DR을 이용한 경우는 최대 약 $\pm 15^\circ$ 의 오차를 보이고 있다. 이 결과들은 EKF를 이용한 제어가 더 높은 제어 정밀도를 갖는다는 사실을 입증하며, 본 논문에서 제안한 잠수정 운동 보상이 고려된 WCS에서의 작업공간 구동 제어 알고리즘의 타당성을 뒷받침해준다.

그림 18. 동적 작업공간 구동 시 로봇 팔 끝 궤적.

Fig. 18. End-effector trajectories during dynamic workspace operations.

그림 19. 그림 18의 로봇팔 끝 위치 오차.

Fig. 19. Errors of end-effector's position of Fig 18.

그림 20. 그림 18의 로봇팔 끝 자세 오차.

Fig. 20. Errors of end-effector's orientation of Fig 18.

VI. 결론

본 논문에서는 잠수정의 운동을 고려한 수중 로봇팔의 동적 작업공간 구동 제어 기법을 확립하기 위해 센서 기반의 잠수정 위치 추정 기법, 작업공간 구동 제어기의 입력 속도 보상 기법을 포함하는 작업공간 구동 기법을 제시하였다. 또한, 실제 항법 데이터 기반의 실험과 시뮬레이션을 통해 제안된 기법이 수중에서 부유한 채 이루어지는 ROV 로봇팔을 이용한 작업에 대하여 기존 연구들의 공통 취약점인 실제 시스템에의 적용 가능성을 높일 수 있고, 조작자의 부담 감소 및 작업의 정밀도 향상에 기여할 수 있다는 사실을 입증하였다. 추후 본 논문의 실험적 증명을 위해 제안된 기법을 해미래 ROV에 실제 적용하여 실험하기 위한 환경을 구축하고, 좀더 정밀한 위치 추정 기법을 확립하는 한편, 실험을 통하여 본 연구의 신뢰성 및 타당성, 활용성 등을 입증할 계획이다.

참고문헌

- [1] L. L. Whitcomb, J. Kinsey, D. Yoerger, C. Taylor, A. Bowen, B. Walden, and D. Fornari, "Navigation upgrades to the national deep submergence facility vehicles D.S.V. Alvin, Jason 2, and the DSL-120A," *Eos Trans. AGU*, vol. 84, no. 46, 2003.
- [2] P.-M. Sarradin, K. Olu Leroy, H. Ondréas, M. Sibuet, M. Klages, Y. Fouquet, B. Savoye, J.-F. Drogou, and J.-L. Michel, "Evaluation of the 1st year of scientific use of the french ROV VICTOR 6000," *Proc. of Underwater Technology*, Tokyo, Japan, pp. 11-16, 2002.
- [3] T. Murashima, H. Nakajoh, H. Yamauchi, and H. Sezoko, "7000m class ROV KAIKO7000," *Proc. of MTS/IEEE Oceans'04*, Kobe, vol. 2, pp. 812-817, 2004.
- [4] P. Lee, C. Lee, B. Jun, H. Choi, J. Li, S. Kim, K. Kim, Y. Lim, S. Yang, S. Hong, S. Han, B. Gu, S. Lee, Y. Seo, T. Aoki, and A. Bowen, "System design and development of a deep-sea unmanned underwater vehicle 'HEMIRE' for oceanographic research," *Proc. of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, San Francisco, vol. 2, pp. 205-212, May-June 2006.
- [5] B. H. Jun, P. M. Lee, and J. Lee, "Manipulability analysis of underwater robotic arms on ROV and application to task-oriented joint configuration," *Proc. of MTS/IEEE/TECHNO-OCEAN*, Nov. 2004.
- [6] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini, and L. Villani, "Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 399-413, 2000.
- [7] N. Sarkar and T. K. 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, 2001.
- [8] M. Hildebrandt, J. Albiez, and F. Kirchner, "Computer-based control of deep-sea manipulators," *Proc. of OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, April 2008.
- [9] M. Hildebrandt, L. Christensen, J. Kerdels, J. Albiez, and F. Kirchner, "Realtime motion compensation for ro-v-based teleoperated underwater manipulators," *OCEANS 2009 EUROPE*, May 2009.
- [10] J. Koseeyaporn and P. Koseeyaporn, "Kalman filtering adaptive stabilization of robot manipulator under sea wave interference," *Proc. of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems 2005*, pp. 689-692, 2005.
- [11] D.-C. Seo, Y.-H. Lee, and G.-N. Jo, "A fusion positioning system of long baseline and pressure sensor for ship and harbor inspection ROV," *Journal of ship and ocean technology*, vol. 11, no. 1, pp. 36-46, 2007.
- [12] D. M. Steinke and B. J. Buckham, "A Kalman filter for the navigation of remotely operated vehicles," *Proc. of MTS/IEEE OCEANS 2005*, vol. 1, pp. 581-588, 2005.
- [13] Y.-S. Ha and T.-H. Ngo, "A Tilt and heading estimation system for ROVs using Kalman filters," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 7, pp. 1068-1079, 2008.
- [14] H. W. Shim, B. H. Jun, P. M. Lee, H. Baek, and J. H. Lee, "Workspace control system of underwater tele-operated manipulators on an ROV," *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 11-12, 2010.
- [15] R. Schilling, *Orion7P Technical Manual*, 1st Ed. Davis, CA, Schilling Robotics, 2007.
- [16] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, Singapore, 1987.

심형원

2003년 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사). 2005년 동대학원 메카트로닉스공학과(공학석사). 2010년 동대학원 메카트로닉스공학과(공학박사). 2008년~현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템연구부 선임연구원.

관심분야는 수중 로봇 제어, 로봇틱스, 지능제어.

전봉환

1996년 부경대학교 기계공학과(공학사). 1998년 동대학원 기계공학과(공학석사). 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학박사). 1996년~현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템연구부 책임연구원, 관심분야는 수중

로봇 개발, 무인잠수정 개발, 로봇틱스, 및 응용.

이판목

1983년 한양대학교 기계공학과(공학사). 1985년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 1985년~현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템연구부 부장(책임연구원). 관심분야

는 무인잠수정 개발, 수중 복합항법 기술 개발, 해양시스템공학 기술.