

수중 구조물 검사로봇의 기구학적 관계를 이용한 확장 칼만 필터 기반의 위치추정

Extended Kalman Filter-based Localization with Kinematic Relationship of Underwater Structure Inspection Robots

허영진, 이기현, 김진현*
(Young-Jin Heo¹, Gi-Hyeon Lee¹, and Jinhyun Kim¹)
¹Seoul National University of Science and Technology

Abstract: In this paper, we research the localization problem of the crawler-type inspection robot for underwater structure which travels an outer wall of underwater structure. Since various factors of the underwater environment affect an encoder odometer, it is hard to localize robot itself using only on-board sensors. So in this research we used a depth sensor and an IMU to compensate odometer which has extreme error in the underwater environment through using Extended Kalman Filter(EKF) which is normally used in mobile robotics. To acquire valid measurements, we implemented precision sensor modeling after assuming specific situation that robot travels underwater structure. The depth sensor acquires a vertical position of robot and compensates one of the robot pose, and IMU is used to compensate a bearing. But horizontal position of robot can't be compensated by using only on-board sensors. So we proposed a localization algorithm which makes horizontal direction error bounded by using kinematics relationship. Also we implemented computer simulations and experiments in underwater environment to verify the algorithm performance.

Keywords: extended Kalman filter, localization, underwater environment, depth sensor, IMU sensor

1. 서론

수중에 설치된 항만구조물이나 교량과 같은 수중 구조물은 안전을 위해 구조물의 이상유무에 대한 정기적인 검사와 진단이 요구된다. 현재 이러한 검사, 진단작업은 잠수부에 의해 수행되고 있으며, 잠수부는 카메라로 구조물 전면을 촬영한 뒤 전문 검사관이 녹화된 화면을 보면서 구조물의 이상유무를 확인한다. 이러한 방법은 비용과 시간 등의 면에서 상당히 비효율적이며 장시간 잠수하는 잠수부의 안전에 대한 문제도 제기되고 있다. 이러한 배경으로 인해 수중 구조물 검사로봇에 대한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 이와 같은 구조물 검사 로봇은 이상진단 지점의 위치를 파악하기 위해 수중에서의 위치추정(localization)이 필수적이다. 지상에서는 GPS와 각종 센서를 이용하여 정밀한 위치추정을 할 수 있는 다양한 방법이 존재 하지만 수중에서는 센서 사용의 어려움, 통신의 어려움 등으로 인해 위치추정이 쉽지 않다[3,4].

본 논문은 로봇 본체의 상단에 설치된 펌프와 바퀴를 이용하여 수중 구조물의 벽면에 달라붙어 주행하는 크롤러 타입(crawler type)의 항만 구조물 검사 로봇을 제안하고(그림 1), 이 시스템의 위치추정 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다[5]. 이러한 크롤러 타입의 로봇은 UUV (Unmanned Underwater Vehicle)와 달리 바퀴 엔코더의 누적거리(odometer)를 이용한 추측항법(dead-reckoning)을 통해 위치추정을 할 수 있다는 장

점이 있다. 하지만 수중 구조물의 경우 벽면에는 띠개비, 홈과 같은 수중생물체들이 붙어있을 뿐만 아니라 철골구조물로 인한 요철 등이 존재하여 매우 불규칙한 환경이다. 이러한 환경에서는 누적거리의 오차가 상당히 커서 위치추정의 신뢰도가 떨어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추가적인 센서를 이용해야 하는데, 바퀴 엔코더의 누적거리를 이용하는 지상 모바일 로봇의 경우 레이저 스캐너[6][7], 초음파 센서[8]와 같은 거리감지센서를 이용한 동시적 위치추정 및 지도작성(SLAM: Simultaneous Localization and Mapping) 기법을 이용하거나, 주변환경의 특징점(landmark)을 이용하여 오도메트리(odometry)를 특정 상황에서 갱신 및 교합한다[9]. 그러나 이러한 방법은 수중 구조물의 벽면과 같은 환경에서는 벽면의 특징점을 추출해 내거나, 거리감지 센서를 통한 지도작성이 어렵다. 그 외에 수중에서 UUV의 위치추정에는 초음파 센서를 이용하여 거리, 각도를 계산하여 위치를 추적하는 LBL (Long Base Line), USBL (Ultra Short Base Line) 등의 초음파

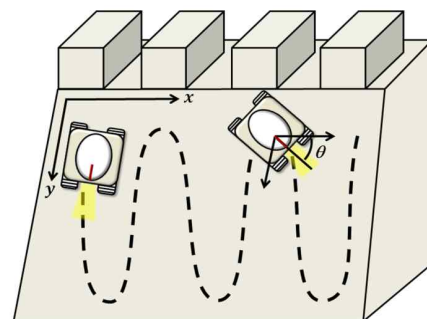


그림 1. 수중 구조물 검사로봇[5].

Fig. 1. Underwater structure inspection robot [5].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 10. 20., 수정: 2013. 3. 1., 채택확정: 2013. 3. 12.

허영진, 이기현, 김진현: 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과
(heodede@gmail.com/tomrzang@gmail.com/jinhyun@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국해양과학기술진흥원에서 위탁시행한 '항만시설물 점검용 장비 기술개발' 연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

방법이 주로 이용된다[10-14]. 하지만 이러한 센서 시스템은 넓은 범위에서의 전역 위치추정(global localization)에 적합하며 제한하는 검사로봇의 경우 제한된 벽면에서만 운용되고 항만과 같은 해안 환경에서는 이러한 센서 시스템을 적절히 구축하기 쉽지 않다. 또한 오차가 큰 엔코더의 누적거리는 짧은 시간이라도 보정을 하지 않을 경우 추정 값이 발산하게 되므로 갱신주기가 긴 초음파 센서는 적절하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 내부 센서이면서 매 샘플링 타임(sampling time) 마다 센서 값을 통한 보정작업이 가능한 수압센서 (pressure or depth sensor)와 IMU (Inertia Measurement Unit)에 대한 정밀한 모델링을 한 뒤 두 센서를 혼합하여 엔코더 오차를 보정하는 확장 칼만 필터 기반의 위치추정(extended Kalman filter-based localization)을 수행하였다. 수압 센서는 수압을 측정 후 그 값을 수면에서의 깊이로 환산하여 로봇의 수직방향 절대위치를 얻을 수 있으며, IMU는 로봇의 방향각 (heading angle)을 측정할 수 있다. 그러나 수평방향에 대한 정보는 추가적인 센서를 통해서만 측정이 가능한데, 본 논문에서는 수평방향에 대한 추가적인 센서 측정을 통한 보정 없이 기구학적 관계(kinematic relationship)를 이용하여 수평방향에 대한 오차가 누적되지 않도록 하는 위치추정 알고리즘을 제안한다. II 장에서는 센서 실험에서 얻은 데이터를 통해 수압 센서와 IMU에 대한 모델링을 수행하였고, III 장에서는 모델링 된 두 센서를 이용하여 제안하는 기구학적 관계를 이용한 확장 칼만 필터 기반의 위치추정 알고리즘에 대해 설명하였다. IV 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하였고, 검사로봇의 주행패턴에 대해 제안하였다. V 장에서는 실제 수조에서의 실험을 통해 제안하는 알고리즘을 통한 실시간 위치추정의 가능성을 확인하였다.

II. 센서 모델링

1. 수압 센서

수압 센서는 깊이에 따라 0.5v의 전압 값을 출력하며 이를 수면에서부터의 깊이 값으로 매핑(mapping)하여 수심을 측정할 수 있다. 본 연구에서 사용되는 수압 센서는 COPAL ELECTRONICS [17]의 PA-500-352G-06로 정격압력범위(rated pressure range)는 343kPa, 최대 허용 압력(maximum pressure)은 686kPa, 선형성(Linearity)는 ± 0.5%F.S, 응답시간은 약 1ms이며 수면에서부터 5m 깊이까지 0.1m 간격으로 센서 값을 측정 한 데이터를 최소제곱법(least square method)을 이용하여 센서 모델을 도출하였다. 보정(calibration) 된 데이터는 센서 잡음(sensor noise) 제거를 위해 저주파 통과필터(low-pass filter)를 통한 후처리 과정을 거친 후 로봇의 수직방향 절대위치를 나타낸다. 측정된 값은 확장 칼만 필터의 보정 과정(updating stage)에서 로봇 상태(robot state) 중 수직위치를 나타내는 y 좌표를 보정하는데 이용된다.

2. IMU

본 연구에서는 3축 가속도계, 3축 자이로, 3축 지자기가 결합된 9축 AHRS (Attitude Heading Reference System)를 관성 센서로 사용하였으며 V 장의 실험에 사용된 IMU는 E2BOX [18]의 EBIMU-9DOF로 롤(roll)의 정적 정확도(Static accuracy)는 0.5°, 동적 정확도(Dynamic accuracy)는 2°, 각도 분해능(Angular resolution)은 0.01° 이다. 이를 통해 의미 있는 센서

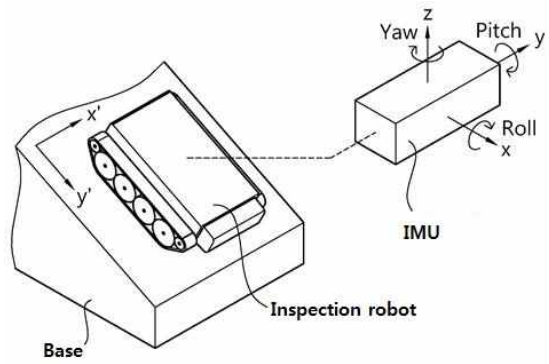


그림 2. IMU센서와 로봇의 좌표계.

Fig. 2. The coordinate system of IMU and robot.

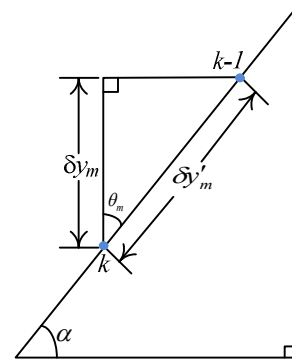


그림 3. 주행 평면에서의 실제 거리와 센서 측정 값 사이의 매핑.

Fig. 3. Mapping process between real distance of navigation plane and sensor measurements.

정보를 측정하기 위해 주행평면 좌표계와 로봇 좌표계, 센서 좌표계를 고려하여 로봇에 센서를 부착하였다. 그림 2에서 절대 좌표계를 로봇의 주행벽면의 평면 좌표계 x'-y'으로 하였을 때, 우선 그림과 같이 센서 좌표계의 z 축을 주행벽면의 y' 좌표와 일치하도록 센서를 로봇에 부착한다. 즉, 로봇의 전방(heading)이 센서 좌표계의 z축과 일치되고 로봇의 측 방향은 센서 좌표계의 y 축이 된다. 이와 같이 센서를 로봇에 부착하였을 때 IMU를 통해 연산된 센서의 롤(roll) 값을 이용하여 로봇의 방향각을 측정 할 수 있다. 이를 통해 얻어지는 각도는 로봇의 방향각 보정에 이용된다.

3. Slope projection

수중 구조물이 수직벽면(α = 90°)일 경우 수압 센서에서 측정된 값은 주행평면상의 y' 축 절대좌표로 활용 될 수 있다. 하지만 수직벽면이 아닐 경우 수압 센서의 값은 주행평면상의 y' 축 상의 값으로 매핑되어야 한다(그림 3). α는 벽면의 기울기를 나타내며 θ_m은 IMU에 의해 측정된 피치(pitch) 값을 나타낸다. 로봇이 주행평면의 y' 축 방향으로 δy'_m 만큼 이동하였을 때 수압센서에서 측정된 값의 변화량은 δy_m이다. 측정 값의 변화량과 y'축 주행을 통해 변한 양은 식 (1)의 slope projection을 통해 일치시킬 수 있다.

$$\delta y'_m = \frac{\delta y_m}{\cos \theta_m} \tag{1}$$

III. 수압센서, IMU의 보정을 이용한 수중로봇의 위치추정

확장 칼만 필터 기반의 위치추정은 예측 과정을 통해 로봇의 상태를 사전 추정한 후 추가적인 센서를 통해 측정된 값을 이용한 보정 과정을 거친다. 본 논문에서 제안하는 수중 구조물의 외벽을 주행하는 로봇은 수중 구조물의 특성상 예측과정에 이용되는 오도미터가 여러 가지 환경적 요인에 영향을 받기 때문에 이를 통해 추정된 사전추정 상태(priori estimated state)는 실내 주행용 모바일 로봇에 비해 더 큰 위치 추정 오차를 가지기 때문에 보정단계의 센서 측정값에 더 큰 비중을 두도록 공분산 행렬을 설정해 주어야 한다. 또한 수압 센서와 IMU는 센서 모델링 과정만 거친 후 로봇의 수직위치와 방향을 보정할 수 있지만 x 축 방향에 대한 보정이 없으면 수평방향으로의 오차가 누적되어 위치 추정값은 결국 발산하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 x 축 방향으로 오차가 누적되지 않도록 기구학적 관계를 이용한 확장 칼만 필터 기반의 위치추정 방법에 대해 제안한다.

1. 예측 단계(prediction stage)

예측 단계는 바퀴의 오도미터를 이용한 추측항법 기법을 이용하여 재귀적으로 로봇의 위치를 추정한다. 본 연구에서는 누적거리 위치인식(odometric localization) 기법 중 2차 룬게-쿠타 방법(2nd order Runge-Kutta method)를 이용하여 로봇의 위치를 추정하였다[15]. 로봇의 위치 및 방향을 나타내는 상태벡터(state vector)는 식 (2)와 같으며 입력벡터(input vector) **u**에 대한 차륜구동형식(differential wheeled type)의 동작모델(motion model)은 식 (3)과 같다[16].

$$\mathbf{X} = [x \quad y \quad \theta]^T \tag{2}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{2} \Delta T \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \\ \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{2} \Delta T \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \\ \frac{R(\omega_r - \omega_l)}{b} \Delta T \end{bmatrix} \tag{3}$$

이를 통해 예측된 추정 공분산 행렬(covariance matrix)과 사전 상태 추정치는 아래 식과 같다.

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) = \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} + \mathbf{g}(\mathbf{u}_{k-1}) \tag{4}$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{W}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{W}_k^T \tag{5}$$

여기서 **A**는 상태벡터 **X**에 대한 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며 **W**는 입력벡터 **u**에 대한 자코비안 행렬을 나타낸다. 그리고 **Q**는 바퀴의 이동량에 대한 공분산 행렬을 나타내며 각각의 행렬과 벡터는 식 (6)-(9)와 같다.

$$\mathbf{A}_k = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{u}=\mathbf{u}_{k-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{R(\omega_r + \omega_l)}{2} \Delta T \sin(\theta_v) \\ 0 & 1 & \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{2} \Delta T \cos(\theta_v) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{W}_k = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{u}=\mathbf{u}_{k-1}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos(\theta_v) - \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{4b} \sin(\theta_v) & \frac{1}{2} \cos(\theta_v) + \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{4b} \sin(\theta_v) \\ \frac{1}{2} \sin(\theta_v) + \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{4b} \cos(\theta_v) & \frac{1}{2} \sin(\theta_v) - \frac{R(\omega_r + \omega_l)}{4b} \cos(\theta_v) \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{u}_{k-1} = \begin{bmatrix} R\omega_r \Delta T \\ R\omega_l \Delta T \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{Q}_{k-1} = \begin{bmatrix} k_r |R\omega_r \Delta T| & 0 \\ 0 & k_l |R\omega_l \Delta T| \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서 ω_b, ω_r 은 각각 좌우 바퀴의 각속도를 나타내며 *R*은 바퀴의 반경, *b*는 두 바퀴 사이의 거리(wheel base), ΔT 는 제어 샘플링 타임, 그리고 k_r, k_l 은 각각 좌우 바퀴의 에러 상수를 나타내며 $\theta_v = \theta + \Delta\theta/2$ 이다.

2. 기구학적 관계를 이용한 보정 단계(update stage)

보정 단계는 센서 측정 값을 통해 얻은 칼만 게인(Kalman gain)을 이용하여 예측 단계에서 추정된 사전 추정 상태를 사후추정 상태(posteriori estimated state)로 보정한다. 모델링을 거친 수압 센서는 저주파 통과 필터를 통해 잡음을 제거 한 후 IMU 센서의 피치 값에 따라 slope projection(1)을 거친 뒤 y-state를 보정한다. 또한 IMU의 롤 값은 θ -state에 대한 측정값으로 이용된다. y와 θ -state에 대한 보정은 이와 같이 수행하고 x-state에 대한 보정은 기구학적 관계를 통해 보정모델을 도출해 낸다.

그림 4에서 보는 바와 같이 로봇이 *k-1* 스텝에서 *k* 스텝으로 이동 하였을 때 x 방향으로의 변화량을 기구학적 관계를 이용하여 도출하면 식 (10)과 같다.

$$\delta x_m = \delta y_m \cot \theta_{avg} \tag{10}$$

$$\theta_{avg} = \frac{\theta_{m,k-1} + \theta_{m,k}}{2} \approx \theta_{m,k-1}$$

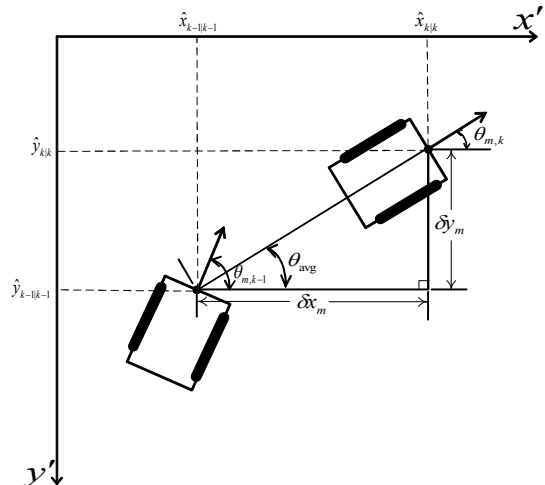


그림 4. 기구학적 관계를 이용한 보정모델 도출.
Fig. 4. Draw an updating model using kinematic relationship.

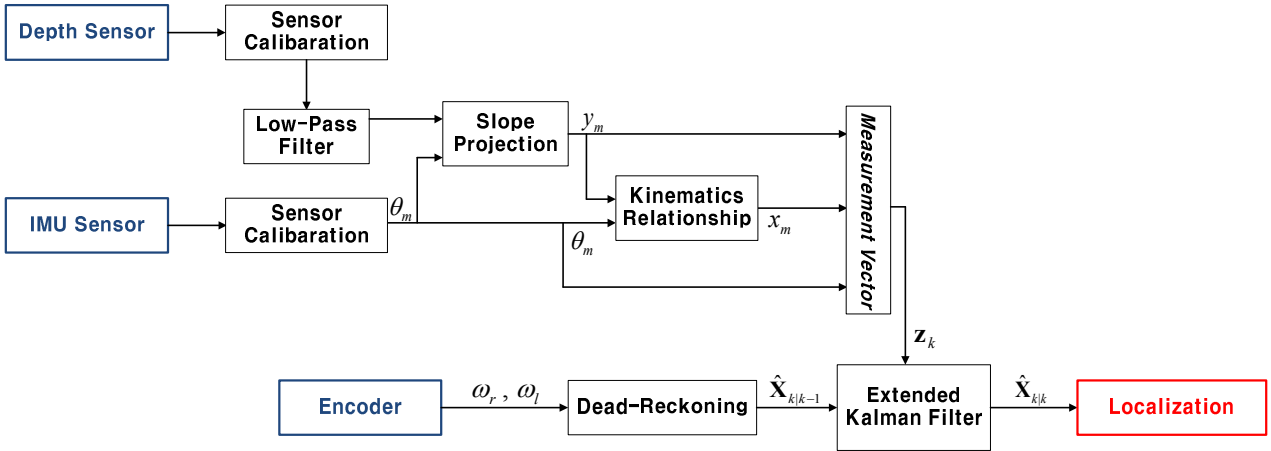


그림 5. 센서 모델링과 기구학적 관계를 이용한 수중 구조물 검사로봇의 위치추정 알고리즘 블록도.

Fig. 5. Block diagram of the underwater structure inspection robot localization algorithm using sensor modeling and kinematic relationship.

여기서 평균 진행방향 θ_{avg} 는 $k-1$ 스텝에서의 측정값으로 가정하였으며, 이를 통해 도출된 x -state의 측정모델은 식 (11)과 같다.

$$x_{m,k} = x_{m,k-1} + (y_{m,k} - y_{m,k-1}) \frac{\cos \theta_{m,k-1}}{\sin \theta_{m,k-1}} \quad (11)$$

여기서 $\theta = 0$ 일 때 특이점(singularity)이 발생하게 되는데, 이는 로봇이 수평방향으로만 진행 시 수압 센서와 IMU만을 이용해서 수평방향 이동량을 측정 할 수 없기 때문이다. 따라서 안정적으로 EKF를 동작시키기 위해서는 특이점이 발생하는 지점에서 x -state에 대한 보정을 수행하지 않고 사전추정치들 사후추정치로 사용해 주어야 한다. 또한 수압 센서에 의해 측정된 수직방향 절대위치를 y_m , IMU를 통해 측정된 로봇의 방향을 θ_m 이라고 하였을 때 측정벡터는 식 (12)와 같고 칼만 게인은 식 (13)과 같다.

$$z_k = [x_{m,k} \quad y_{m,k} \quad \theta_{m,k}]^T \quad (12)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (13)$$

if $\theta_{m,k} \approx 0$, then $K_{1j,k} = 0$

H 는 상태 공간을 관측 공간으로 매핑하는 측정 모델이며 $I_{3 \times 3}$ 이다. 여기서 $K_{1j,k}$ 는 k 스텝에서 칼만 게인 행렬의 1행을 나타내는 행 벡터이다. 이를 통해 특이점이 발생하는 지점 근처에서는 x -state는 보정되지 않는다. 측정벡터의 $x_{m,k}$ 은 식 (11)과 같으며 이를 통해 사후 추정된 로봇의 상태와 오차 공분산 행렬은 식 (14), (15)과 같다.

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K(z_k - \hat{X}_{k|k-1}) \quad (14)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k) P_{k|k-1} \quad (15)$$

본 절에서 기술한 전체 알고리즘의 블록도는 그림 5와 같으며 제안하는 위치추정 알고리즘의 성능에 대해 IV 장에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한 수평방향으로만 이동 시 x 축 방향으로의 오차가 누적되는 것을 고려하여 이를 회피하는 적절한 주행 경로계획법을 제안한다. V 장에서는 수조실험을 통해 위치추정 성능을 확인하였다.

IV. 모의 실험

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시 하였다. 엔코더에는 평균이 0이고 0.03° 의 분산을 가지는 임의의 가우시안 잡음(Gaussian random noise)을 매 샘플링 타임에 인가하여 추측항법만을 사용한 위치추정이 불가능한 상황을 가정하였다(그림 6, 7). 수압 센서와 IMU에도 각각 $0.1m$ 와 0.1° 의 가우시안 잡음을 매 샘플링 타임 인가하였고 이는 엔코더 잡음에 비해 비교적 작은 값을 가정한 것이다. 장시간 주행에도 추정값이 발산하지 않음을 확인하기 위해 약 5분간 0.05 초의 샘플링타임으로 시뮬레이션을 수행하였다.

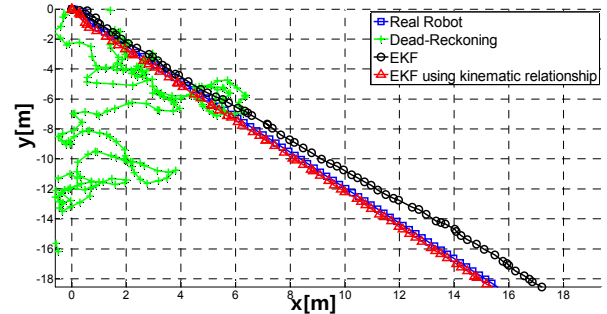


그림 6. 모의실험을 통한 위치추정 결과.

Fig. 6. Localization result from simulation.

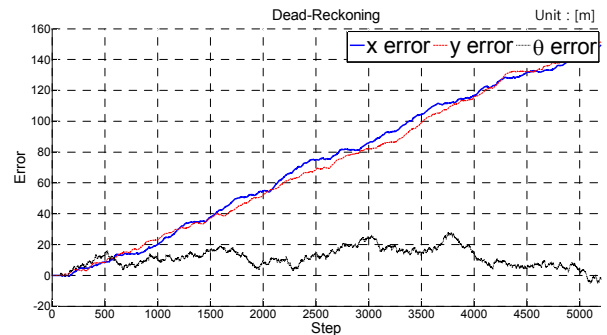


그림 7. 추측항법만 이용했을 때의 추정오차.

Fig. 7. Estimation error using dead-reckoning only.

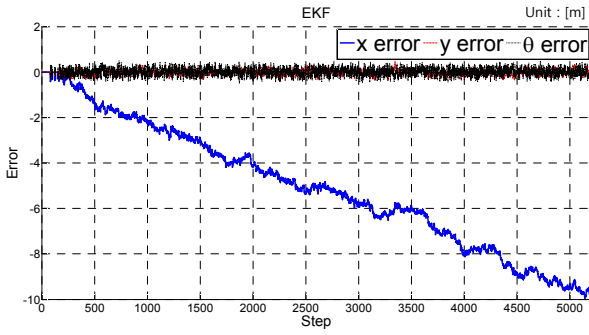


그림 8. y 와 θ 상태만 보정해 주었을 때의 추정오차.
Fig. 8. Estimation error where only y and θ -state are updated.

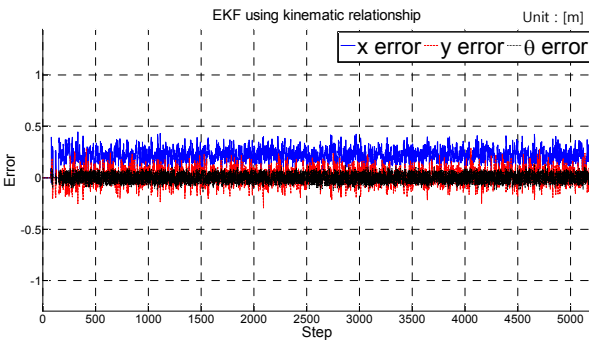


그림 9. 기구학적 관계를 이용한 보정을 이용했을 때의 추정 오차.
Fig. 9. Estimation error where kinematic relationship is used.

그림 6-9은 (0,0) 좌표를 시작점으로 하여 오른쪽 아래 방향으로 α 의 각도로 주행하였을 때의 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 6은 약 1000 스텝 동안의 추정위치를 나타낸다. 그림 7은 추측항법만 사용하였을 때, 그림 8은 EKF를 이용하여 y 와 θ -state만 보정해 주었을 때, 그림 9는 기구학적 관계를 이용한 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하였을 때 전 구간에서의 상태벡터 각각의 오차를 나타낸다. 시뮬레이션의 가정대로 추측항법만 사용 할 경우 엔코더의 누적오차와 주변환경의 영향에 의해 위치추정이 불가능한 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 8에서 보는 바와 같이 EKF를 이용하여 수직방향과 로봇의 방향각만을 보정해 주었을 경우 시간이 지남에 따라 수평 방향으로의 오차가 누적되어 추정치가 발산하는 것을 확인할 수 있다. 반면 기구학적 관계를 이용하여 수평 방향에 대한 보정모델을 사용하였을 때에는 장시간 주행에도 수평방향의 추정 값이 발산하지 않음을 확인할 수 있다(그림 9). 이는 추가적인 센서 없이 기구학적 관계를 이용하여 제한된 조건에서 보정해준 효과이며 시뮬레이션에서는 α 가 45°의 각도를 나타낸다. 반면 α 가 0°에 가까워지는 수평방향으로 주행할 경우 수압 센서와 IMU의 계측 값을 통한 수평 방향 이동량에 대한 측정 값을 기구학적 관계로 추정할 수 없어서 그림 8과 같이 수평방향 오차가 누적된다. 이와 같이 α 가 특정 임계각도(χ) 이하로 주행 시 센서 잡음의 영향으로 인해 식 (11)의 특이점이 발생하는 구간($|\alpha| \leq \chi$)을 지나게 되어 기구학적 관계를 통한 수평보정이 불가능하며 임계각도는 식 (11)의 분모 항에 근거하여 IMU의 잡음크기

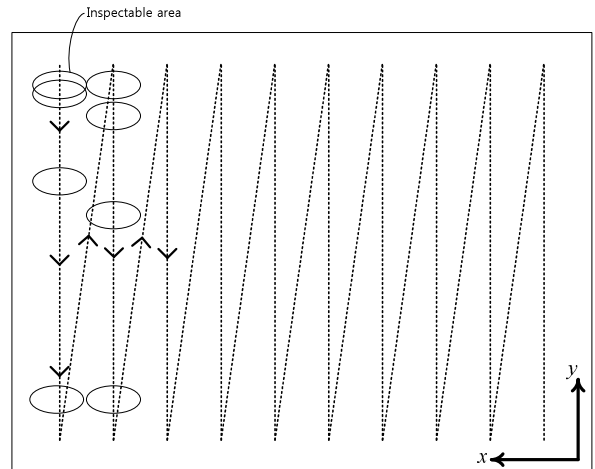


그림 10. 수평방향 주행을 회피한 주행경로.
Fig. 10. Navigation path which evades horizontal drive.

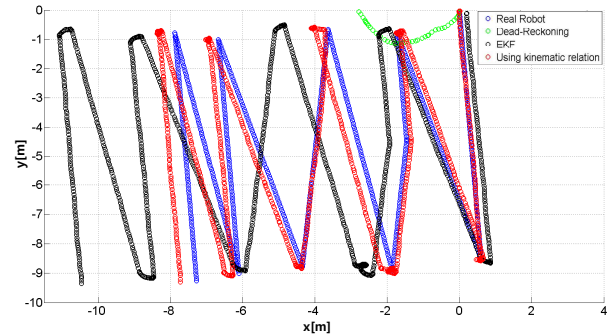


그림 11. 제안된 주행경로에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 11. Simulation result of proposed navigation path.

에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 IMU의 잡음이 w 라고 하였을 때 임계각도는 식 (17)과 같이 근사식으로 가정 할 수 있다.

$$w \sim N(0, \sigma^2) \tag{16}$$

$$\chi \approx 2\sigma \tag{17}$$

또한 수평방향($|\alpha| \leq \chi$)으로 진행 할 때마다 오차가 누적되므로 장시간 주행 시 추가적인 수평방향 위치를 획득할 수 있는 센서가 없는 경우에는 제안하는 임계각도 보다 큰 방향각을 가진 상태에서만 주행을 해야 한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 검사 로봇의 경우 추가적인 수평위치를 획득하는 센서를 이용하지 않고 기구학적 관계를 이용할 경우 그림 10과 같이 수평방향 주행을 최소화 하는 주행경로가 안정적으로 전체 추정 값이 발산하지 않는 경로계획이라 할 수 있다. 실제 크롤러 타입 로봇을 항만구조물에 주행시켰을 때 수직방향 주행 시 부력의 영향으로 인한 바퀴 미끄럼(sliping)이 크고 수평방향 주행 시에는 미끄럼이 상대적으로 적어 오차가 큰 수직방향 주행은 정밀한 수압 센서가 보정해 주고 수평방향은 최소한의 주행을 통해 누적거리와 기구학적 관계를 이용하여 추정 값이 발산하지 않게 할 수 있다. 따라서 이러한 주행패턴을 가질 경우 장시간 운용 시에도 추정 값이 발산하지 않음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다(그림 11).

V. 실험

본 절에서는 제안하는 위치추정 알고리즘(그림 5)을 실제 수중에서의 실험을 통해 검증하였다. 실험은 한국로봇융합연구원(KIRO)에 있는 7m 깊이의 인공수조에서 수행하였으며(그림 12), 펌프가 내장된 Smart Pool사의 수영장 청소로봇(그림 12)에 자기 방식 엔코더(magnetic encoder), 수압 센서, IMU를 내장하여 매뉴얼 컨트롤을 통해 실험을 수행하였다. 사용된 자기 방식 엔코더는 RLS [19]의 RM44-IE-00-08B-10-F-2-F-10로 해상도는 256 CPR (Counts Per Revolution) 정확도는 $\pm 0.7\text{deg}$, 히스테리시스 오차(Hysteresis error)는 0.45deg 이다. 사용된 Magnetic actuator는 RMA06A2A00이고, 최대 512 CPR 까지 사용 가능하다.

실험은 총 1분간 진행 되었으며 최초 시작점을 기준으로 아래방향으로 4m, 수평방향 0.5m 주행하였고 최종적으로 시작점에서 수평방향으로 1m 떨어진 지점에 도착하도록 U자형 주행을 하였다. 실제 로봇의 주행경로를 확인하기 위해 주행벽면 반대편에서 카메라로 로봇이 구동하는 영상을 촬영 하였으며(그림 14) 이후 이를 추정결과와 비교하였다. 그림 13은 이러한 실험 결과를 나타내며 그림 13에서 보는 바와 같이 추측항법을 통한 위치추정(연두색)은 모의 실험에서



그림 12. 수조환경에서의 위치추정 실험.
Fig. 12. Localization experiment in the pool environment.

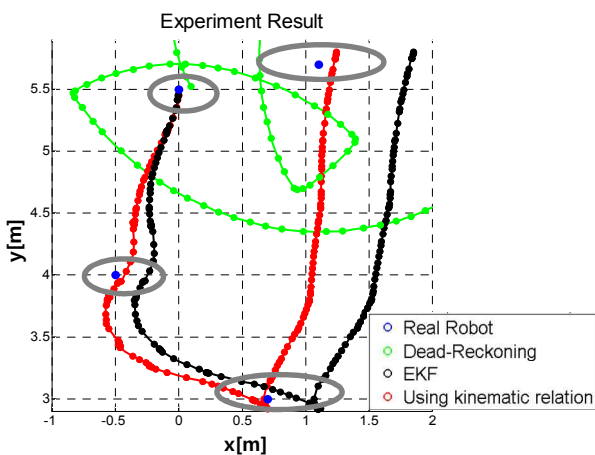


그림 13. 실시간 위치추정 실험 결과. 추측항법(연두색), EKF (검은색), 기구학적 관계를 이용한 EKF(빨강색).
Fig. 13. Experiment result of real time localization. Dead-reckoning (yellow-green), EKF (black), EKF using kinematic relationship (red).

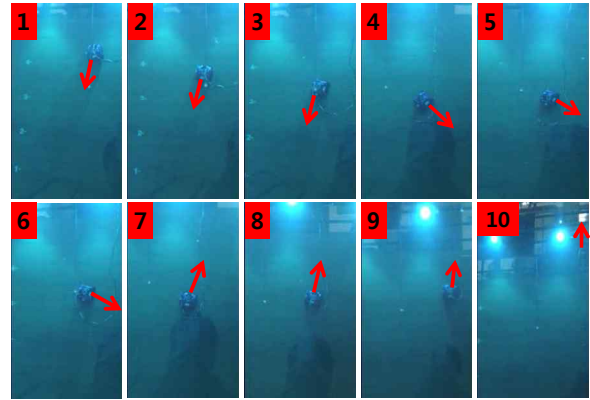


그림 14. 실제 주행실험 영상 비디오 캡처.
Fig. 14. Captures of the navigation experiment video.

표 1. 임의의 3개 지점에서의 수평방향 위치오차.

Table 1. The horizontal position errors in the arbitrary three points.

Real Position	EKF Position (relative error)	EKF using K.R Position (relative error)
(-0.3,4)	-0.2412 (51.76 %)	-0.4253 (14.94 %)
(0.7,3)	0.9882 (42.2 %)	0.6013 (14.1 %)
(1.1,5.7)	1.8513 (68.3 %)	1.2424 (12.9 %)

의 가정과 같이 벽면에서의 바퀴 미끄럼과 오도미터의 누적 오차와 같은 요인들로 인해 추정이 불가능한 것을 확인할 수 있다. 수압센서와 IMU를 이용하여 수직위치와 로봇방향을 EKF를 통해 보정한 경우(검은색) 실제 위치와 비슷한 경향성을 보이지만 수평방향 위치 오차가 누적되는 것을 확인할 수 있다. 반면 제안하는 기구학적 수평 추정모델을 사용한 경우(빨간색) 위치추정 성능이 향상되고 수평방향 오차가 누적되지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 14는 실제 로봇의 주행경로와 실제위치를 알기 위해 로봇 주행 영상의 특정 프레임들을 임의로 캡처한 그림이며 표 1은 그림 13의 회색 타원 지점에서의 위치추정 상대 오차를 나타낸다.

실험결과를 통해 본 논문에서 제안하는 기구학적 방법을 이용한 수평방향 위치 보정을 이용 하였을 때 앞 절의 시뮬레이션과 마찬가지로 수평방향 위치추정 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 수중 구조물의 외벽을 주행하는 구조물 검사로봇에 대한 위치추정 알고리즘에 대해 연구하였다. 제안하는 로봇은 주변 환경의 영향으로 인해 오차가 큰 오도미터를 보정하기 위해 내부센서인 수압 센서와 IMU를 이용하여 EKF 알고리즘을 통해 로봇의 수직방향과 방향각을 보정하고, 수평방향의 오차가 누적되지 않도록 기구학적 관계를 이용한 수평방향 보정모델을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하였으며, 실제 수조에서의 실험을 통해 실시간 위치추정이 가능함을 검증하였다. 제안하는 위치추정 방법은 수중에서 주로 이용되는 고가의 외부센서 네트워크를 이용하지 않고 상대적으로 저가인 내부센서만을 이용하였으며 내부센서는 매 샘플링 시간마다 계측 값을 획득 할 수 있기 때문에 EKF를 이용한 추정성능

이 안정적이고 정밀함을 확인 할 수 있었다. 수평방향에 대한 보정은 기구학적 관계를 이용하였는데, 이는 칼만 필터의 반복 갱신(iteration) 효과로서 독립적인 다른 측정값을 활용하여 수평방향을 나타내는 x 상태(x -state)에 대한 반복적 갱신을 통해 발산하는 것을 방지한 것이다. 그러나 수평방향에 대한 정밀한 추정 값을 얻고 실시간으로 장시간 운용하기 위해서는 추가적으로 수평방향을 보정할 수 있는 센서가 필요하며 향후 연구를 통해 이를 보완할 계획이다. 또한 실험결과에 대한 타당성을 높이기 위해 실제 위치를 정밀하게 확인할 수 있는 실험환경에서 추가적인 실험이 요구된다.

참고문헌

- [1] J.-K. Choi, H. Sakai, and T. Tanaka, "Autonomous towed vehicle for underwater inspection in a port area," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, pp. 189-194, 2005.
- [2] J. Choi, T. Shiraishi, and T. Tanaka, "Safe breakwater-following control of an autonomous underwater vehicle with non-zero forward velocity," *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 778-786, 2007.
- [3] V. Chandrasekhar, W. K. Seah, Y. S. Chao, and H. V. Ee, "Localization in underwater sensor networks - survey and challenges," *Proc. First ACM Int'l Workshop Underwater Networks (WUWNET)*, pp. 33-40, Sep. 2006.
- [4] J. C. Kinsey, R. M. Eustice, and L. L. Whitcomb, "A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges," in *Proc. 7th IFAC Conf. Manoeuvring Control Mar. Craft*, Lisbon, Portugal, Sep. 20-22, 2006.
- [5] Y. J. Heo, D.-J. Won, H.-K. Jung, and J. H. Kim, "EKF-based localization in underwater environment using pressure and gyro sensors," *Korea Robotics Society Annual Conference (KROC 2012)*, Gang-Neung, Korea, pp. 659-662, Jun. 2012.
- [6] M. Montemerlo and S. Thrun, "Simultaneous localization and mapping with unknown data association using FastSLAM," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1985-1991, 2003.
- [7] Y.-H. Ji, J.-B. Song, J.-H. Baek, and J.-K. Ryu, "Hausdorff distance matching for elevation map-based global localization of an outdoor mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 9, pp. 916-921, 2011.
- [8] H. F. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: part 1," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, 2006.
- [9] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*, MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [10] H. Singh, M. Bowen, F. Hover, P. LeBas, and D. Yoerger, "Intelligent docking for an autonomous ocean sampling network," *Oceans1997*, pp. 1126-1131, Oct. 1997.
- [11] H. Singh, J. G. Bellingham, F. Hover, S. Lerner, B. A. Moran, K. von der Heydt, and D. Yoerger, "Docking for an autonomous ocean sampling," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 498-514, Oct. 2001.
- [12] T. Fukasawa, T. Noguchi, and T. Kawasaki, "MARINE BIRD, a new experimental AUV with underwater docking and recharging system," *Oceans2003*, vol. 4, pp. 2195-2200, 2003.
- [13] B. H. Jun, P. M. Lee, and Y. K. Lim, "Trends in the cruising-type AUVs technologies," *Korean Society for Precision Engineering (in Korean)*, vol. 26, no. 5, pp. 14-22, May 2009.
- [14] G.-H. Lee and J. Kim, "Docking system for unmanned underwater vehicle using reduced signal strength indicator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 9, pp. 830-836, 2012.
- [15] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robot*, The MIT Press, 2004.
- [16] Y.-J. Heo, J.-H. Lim, and S.-J. Lee, "EKF-based SLAM using sonar salient feature and line feature for mobile robots," 2011 *Journal of the Korean Society for Precision Engineering (in Korean)*, vol. 28, no. 10, pp. 1174-1180.
- [17] NIDEC COPAL ELECTRONICS Co. Homepage, <http://www.copal-electronics.com>
- [18] E2BOX Homepage, <http://www.e2box.co.kr>
- [19] Rotary and Linear Motion Sensors Co. Homepage, <http://www.rls.si>



허영진

2013년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 관심분야는 Underwater robots.



이기현

2012년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2012년~현재 동 대학원 석사과정 재학중. 관심분야는 Underwater robots.



김진현

1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 조교수. 관심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.