

차륜형 이동로봇의 오도메트리 보정을 위한 실험적 주행시험경로 설계

Design of Experimental Test Tracks for Odometry Calibration of Wheeled Mobile Robots

정 창 배¹, 문 창 배², 정 다 운³, 정 우 진[†]

Jung Changbae¹, Moon Changbae², Jung Daun², Chung Woojin[†]

Abstract Odometry using wheel encoder is a common relative positioning technique for wheeled mobile robots. The major drawback of odometry is that the kinematic modeling errors are accumulated when the travel distance increases. Therefore, accurate calibration of odometry is required. In several related works, various schemes for odometry calibration are proposed. However, design guidelines of test tracks for odometry calibration were not considered. More accurate odometry calibration results can be achieved by using appropriate test track because the position and orientation errors after the test are affected by the test track. In this paper, we propose the design guidelines of test tracks for odometry calibration schemes using experimental heading errors. Numerical simulations and experiments clearly demonstrate that the proposed design guidelines result in more accurate calibration results.

Keywords: Calibration, Localization, Mobile robots, Odometry, Systematic error

1. 서 론

최근 이동로봇의 자율주행과 관련하여 다양한 연구가 진행되고 있다^{1,2}. 이동로봇의 자율주행을 위해 필요한 기술 중 한 가지는 정밀한 위치인식이다. 로봇 위치인식에 사용되는 일반적인 방법의 하나는 로봇의 구동부에 내장된 휠 엔코더를 이용하는 오도메트리이다. 그러나 오도메트리는 주행거리가 증가함에 따라 오도메트리 상의 로봇 위치와 실제 로봇 위치 간의 오차가 증가한다는 잘 알려진 단점을 가지고 있다. 따라서 주행거리에 따라 증가하는

오차를 감소시키기 위해 오도메트리 보정이 필요하다. 정밀한 오도메트리는 외장센서의 설치, 보수 등에 관련된 운용비용을 감소시킬 수 있다. 또한, 날씨나 주행환경 등 주행조건에 의해 외장 센서의 사용이 제한될 경우에도 비교적 정밀한 위치인식이 가능하게 한다.

오도메트리의 오차 원인은 크게 시스템적 오차와 비시스템적 오차 두 가지로 구분된다^{3,4}. 시스템적 오차는 로봇 자체에서 기인하는 고유한 오차로, 주행하는 동안 변하지 않는다. 따라서 기구학적 파라미터를 보정함으로써 시스템적 오차를 감소시킬 수 있다. 대표적인 시스템적 오차는 좌우 휠 직경 차이와 좌우 휠 간격 오차이다.

비시스템적 오차는 로봇과 주행환경 사이의 상호작용에 기인하는 오차이다. 불균일한 바닥, 바닥 장애물, 급격한 가속, 외력 등에 의한 미끄러짐이 비시스템적 오차에 포함된다. 비시스템적 오차는 항상 일정하게 발생하는 것

Received : Feb. 27. 2014; Reviewed : Jun. 12. 2014; Accepted : Jul. 16. 2014

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (2013-029812).

¹ Mechanical Engineering, Korea University(roka0102@korea.ac.kr)

² Mechanical Engineering, Korea University(lunar97@korea.ac.kr)

³ Mechanical Engineering, Korea University(id-taewoong@korea.ac.kr)

[†] Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Anam-Ro, Seongbuk-Gu, Seoul, Korea (smartrobot@korea.ac.kr)

이 아니라 확률적으로 발생하는 오차이다. 따라서 Thrun의 오도메트리 모델^[6]과 같이 오도메트리를 확률 모델로 표현하기도 한다.

기존의 여러 연구에서 다양한 오도메트리의 시스템적 오차 보정기법이 제안되었다. Borenstein^[4]은 이륜차동구동형 로봇의 오도메트리 보정에 유용한 기법인 UMBmark 기법을 제안하였다. UMBmark 기법은 $4m \times 4m$ 정사각형 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행하고 최종 위치 오차를 측정하여 휠 직경 오차와 휠 간격 오차를 보정한다. Abbas^[7]는 정사각형 경로가 아니라 원형 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행하고, 주행 경로의 반경을 측정하여 오차를 보정하는 BCPT(Bi-directional Circular Path Test)를 제안하였다. Martinelli^[8]는 싱크로구동형 로봇의 오도메트리 오차를 시스템적 오차 및 비시스템적 오차를 나타내는 4개의 파라미터(병진 및 회전)로 모델링하고 평가하는 방법을 제안하였다. Martinelli^[9]는 AKF(augmented Kalman filter)와 OF(Observable filter)를 기반으로 로봇이 주행하는 동안 오도메트리 오차를 추정하는 방법을 제안하였다. Antonelli^[10]는 최소자승법을 이용한 오도메트리 보정기법을 제안하였다. 오도메트리는 4개의 파라미터를 이용하여 모델링 되었으며, 미지의 파라미터와 센서 측정값 간의 선형관계를 보임으로써 최소자승법이 오도메트리 보정이 유효하게 사용될 수 있음을 보였다. 이후 Antonelli^[11]는 추가적인 연구를 통해 오도메트리 모델을 3개의 파라미터로 모델링하고 보정하는 기법을 제안하였다. 최근에는 Censi^[12], Antonelli^[13]가 오도메트리와 로봇프레임에 대한 센서의 위치를 동시에 보정하는 기법을 제안하였다.

비시스템적 오차와 관련해서는 Borenstein^[4]과 Komoriya^[15]와 같이 오도메트리와 자이로 센서를 함께 사용함으로써 비시스템적 오차에 대응하고 위치인식의 불확실성을 감소시키는 방법이 제안되기도 하였다. Chong^[16]은 로봇의 주행 경로를 원호로 나누고 오차 공분산 행렬을 표현하는 방법을 제안하였다. 오차 공분산 행렬을 계산하기 데 필요한 운동 불확실성에 대한 파라미터, 즉 비시스템적 오차 파라미터를 $10m$ 직선 경로를 왕복 주행한 결과로부터 계산하는 실험방법 또한 함께 제안하였다.

이전의 연구에서는 이륜차동구동형로봇에 대해 오차원 인간의 복합효과를 고려한 정밀한 오도메트리 보정기법^[17]

을 제안하고 적절한 주행시험경로 설계를 통한 보정성능 향상^[18]을 보였다. 또한, 최종 방향각 오차를 이용하는 새로운 오도메트리 보정기법^[19]을 제안하였다. 새로운 보정기법은 최종 위치 오차가 아닌 최종 방향각 오차를 보정과정에 이용함으로써 근사식 사용에 의한 오차를 제거하여 보정성능을 향상시켰다. 또한, 자이로 센서만으로도 오차 보정이 가능하여 시험환경에 별도의 절대 위치센서를 설치할 필요가 없으며, 실외에서도 보정실험이 가능하였다.

이전 연구의 과정 및 결과에서 주행시험경로 설계가 오도메트리 보정성능의 영향을 미치는 중요한 요소임을 확인하였다. 그러나 기존 문헌에서는 주행시험경로 설계에 대한 내용은 중요하게 다루어지지 않았다.

본 논문에서는 오도메트리 보정성능 향상을 위한 주행 시험경로 설계기법에 대해 다루고자 한다. 주행시험경로는 여러 가지 오도메트리 오차 원인의 영향을 주행시험 후 나타나는 최종 위치 및 방향각 오차에 투영할 수 있어야 하며, 보정기법의 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 적절한 주행시험경로를 사용함으로써 오도메트리 보정 정밀도의 향상을 기대할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 오도메트리 오차 모델에 대해서 다룬다. 3장에서는 주행시험경로 설계 간 고려사항을 언급하고 주행시험경로 설계기법을 제안한다. 4장과 5장에서는 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제안하는 설계기법의 장점을 확인한다.

2. 오도메트리 오차 모델

2.1 시스템적 오차

Fig. 1은 이륜차동구동형로봇의 속도운동모델을 나타낸다. 시간 t 에서의 로봇의 위치 및 방향각은 (x_b, y_b, θ) 와 같다. 시간 t 에서의 병진속도 및 회전속도는 각각 v_t 와 ω 이다. 시스템적 오차에 있어 주된 오차 원인 두 가지는 휠 직경 오차와 휠 간격 오차이다. 좌우 휠에 각각 $\varepsilon_R, \varepsilon_L$ 만큼의 반경 오차가 있고, 휠 간격에 ε_b 만큼의 오차가 있다고 할 때, 이륜차동구동형로봇의 속도운동모델은 다음의 식 (1) - (2)와 같이 표현된다.

$$v_t = \frac{v_R + v_L}{2} = \frac{(r_R + \varepsilon_{r_R}) \cdot \omega_R + (r_L + \varepsilon_{r_L}) \cdot \omega_L}{2} \quad (1)$$

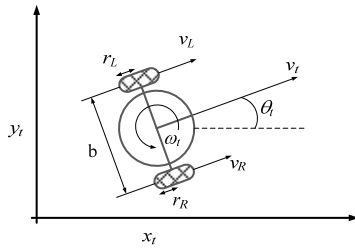


Fig. 1. The velocity motion model and parameters of a two-wheel differential mobile robot.

$$\omega_i = \frac{v_R - v_L}{b} = \frac{(r_R + \epsilon_{rR}) \cdot \omega_R - (r_L + \epsilon_{rL}) \cdot \omega_L}{b_{nominal} + \epsilon_b} \quad (2)$$

이때, v_R 은 우측 휠의 선속도를, v_L 은 좌측 휠의 선속도를, ω_R 은 우측 휠의 각속도를, ω_L 은 좌측 휠의 각속도를 각각 나타낸다.

식 (1) - (2)를 이용하여 전역좌표계에서 x, y, θ 는 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_i \cdot \cos \theta \\ \dot{y} &= v_i \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega_i \end{aligned} \quad (3)$$

오도메트리의 시스템적 오차는 기 정의된 주행시험경로를 오픈-루프 제어로 주행한 후 최종 포즈(위치 및 방향각) 오차를 측정함으로써 보정된다. 주행시험경로는 휠 직경 오차의 영향과 휠 간격 오차의 영향을 모두 포함하기 위하여 직선주행과 제자리회전을 포함하며, 오차측정을 용이하게 하기 위해 출발점과 도착점을 동일하게 설정한다. 위 조건을 만족하는 주행시험경로는 Fig 2와 같이 정다각형으로 일반화될 수 있다. Fig 2에서 L 은 직선 경로의 길이를, ϕ 는 이웃한 직선 경로 사이의 각도를 나타낸다.

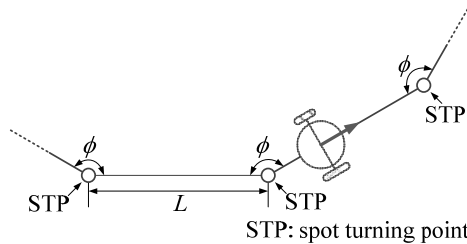


Fig. 2. Generalized test track design in a regular polygon.

Fig. 2와 같은 주행시험경로를 주행한 후, 기구학적 오차 $\epsilon_R, \epsilon_L, \epsilon_b$ 에 의해 발생한 최종 포즈오차(x_e, y_e, θ_e)는 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_b} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_{rR}} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_{rL}} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_b} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_{rR}} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_{rL}} \\ \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_b} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_{rR}} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_{rL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_b \\ \epsilon_{rR} \\ \epsilon_{rL} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_b} \epsilon_b + \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_{rR}} \epsilon_{rR} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial \epsilon_{rL}} \epsilon_{rL} \\ &= \left(v_i \cdot \sin \theta \cdot \frac{\theta}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_b + \left(\frac{\omega_R}{2} \cdot \cos \theta - v_i \cdot \sin \theta \cdot \frac{\omega_R}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rR} \\ &\quad + \left(\frac{\omega_L}{2} \cdot \cos \theta + v_i \cdot \sin \theta \cdot \frac{\omega_L}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rL} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_b} \epsilon_b + \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_{rR}} \epsilon_{rR} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial \epsilon_{rL}} \epsilon_{rL} \\ &= \left(-v_i \cdot \cos \theta \cdot \frac{\theta}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_b + \left(\frac{\omega_R}{2} \cdot \sin \theta + v_i \cdot \cos \theta \cdot \frac{\omega_R}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rR} \\ &\quad + \left(\frac{\omega_L}{2} \cdot \sin \theta - v_i \cdot \cos \theta \cdot \frac{\omega_L}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rL} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_e &= \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_b} \epsilon_b + \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_{rR}} \epsilon_{rR} + \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \epsilon_{rL}} \epsilon_{rL} \\ &= \left(-\frac{\omega_i}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_b + \left(\frac{\omega_R}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rR} + \left(-\frac{\omega_L}{b + \epsilon_b} \right) \cdot \epsilon_{rL} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 직선주행 및 제자리회전으로 이루어진 주행시험경로에서 최종 방향각 오차는 주행거리와 회전각도에 비례하여 증가한다는 점을 나타낸다. 즉, 동일한 주행거리와 회전각도가 동일하면 주행시험경로의 형상에 관계없이 방향각 오차가 동일하게 나타나게 된다.

2.2 비시스템적 오차

실제 오도메트리를 사용할 때에는 식 (3)을 불연속식으로 변환하여 사용한다.

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= f(x_t, u_t, t) \\ x_{t+1} &= \begin{bmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \\ \theta_{t+1} \end{bmatrix}, f(x_t, u_t, t) = \begin{bmatrix} x_t + \Delta s \cdot \cos(\theta_t + \Delta\theta / 2) \\ y_t + \Delta s \cdot \sin(\theta_t + \Delta\theta / 2) \\ \theta_t + \Delta\theta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta s = \frac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2}, \quad \Delta\theta = \frac{\Delta s_r - \Delta s_l}{b}$$

식 (8)에서 Δs 는 로봇의 이동거리, $\Delta\theta$ 는 회전각도, Δs_r 우측 휠의 이동거리, Δs_l 은 좌측 휠의 이동거리, b 는 휠 간격을 나타낸다.

비시스템적 오차는 공분산 행렬을 이용해 나타내며, 식 (9)와 같다⁵⁾.

$$\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_t \mathbf{F}_t^T + \nabla_u \mathbf{f} \cdot \Sigma_u \cdot \nabla_u \mathbf{f}^T \quad (9)$$

이때, \mathbf{F}_t 와 $\nabla_u \mathbf{f}$ 는 식 (8)의 로봇 위치추정함수 $f(x_t, u_t, t)$ 의 자코비안을 의미한다.

공분산 행렬 \mathbf{P}_{t+1} 은 로봇과 노면간의 상호작용에 의한 비시스템적 오차를 나타낸다. 또한, 식 (9)에서 첫 번째 항은 추정된 위치의 불확실성, 두 번째 항은 로봇 운동의 불확실성에 각각 관련된다. 두 번째 항에서 좌우 휠의 운동에 대해 공분산 행렬 Σ_u 는 다음 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\Sigma_u = \begin{bmatrix} k_r |\Delta s_r| & 0 \\ 0 & k_l |\Delta s_l| \end{bmatrix} \quad (10)$$

이때, k_r 과 k_l 은 로봇과 노면간의 상호작용에 대한 확률적 파라미터 즉, 비시스템적 오차 파라미터를 의미한다. 비시스템적 오차 파라미터는 Chong¹⁶⁾의 기법 등을 이용하여 실험적으로 확인할 수 있다. Chong¹⁶⁾의 기법에서는 10m 직선경로를 왕복 주행하고 최종 포즈 오차를 측정하고 최종 포즈 오차의 분포를 모델링하였다.

3. 주행시험경로 설계

3.1 주행시험경로 설계시 고려사항

본 논문의 목표는 로봇의 시스템적 오차를 충분히 반영할 수 있는 주행시험경로 설계기법을 제안하는 것이다. 오도메트리 보정기법으로는 선행연구에서 제안한 Jung¹⁹⁾의 기법을 사용한다.

Jung¹⁹⁾의 기법에서는 로봇의 주요 오차 원인을 휠 직경 차이와 휠 간격 오차로 가정하고 있기 때문에 주행시험경로는 직선주행과 제자리회전을 모두 포함하여야 한다. 또한 최종 포즈 오차의 측정을 용이하기 하기 위해 시험경로의 출발점과 도착점을 동일하게 설정하여야 한다. 이때, 로봇의 최종 방향각 오차는 식 (7)에서 보인 것과 같이 같

이 주행시험 경로의 총 주행거리와 회전각도가 동일하다면 동일한 수준으로 나타난다. 따라서 주행시험경로의 형상은 Fig. 2에 나타난 것과 같은 정다각형 형태가 될 수 있다. 본 논문에서는 정사각형 형태가 사용되었다.

식 (4) - (7)에는 휠 직경 및 간격오차에 의한 최종 포즈 오차 변화를 나타내었다. 시스템적 오차에 의한 최종 포즈 오차는 식 (4) - (7)에 나타난 것과 같이 주행시험경로의 크기에 비례하여 변화한다. 따라서 주행시험경로의 크기는 비시스템적 오차에 의한 최종 포즈 오차와 비교하여 시스템적 오차에 의한 최종 포즈 오차를 최대로 할 수 있는 크기이어야 한다. Jung¹⁹⁾의 기법에서 로봇의 방향각 오차가 근사식 없이 계산된다. 하지만 주행시험경로가 지나치게 클 경우에는 요구되는 실험공간이 증가할 뿐만 아니라 다양한 비시스템적 오차 원인의 영향을 받기 때문에 보정 성능의 향상을 보장할 수는 없다. 반면, 주행시험경로가 지나치게 작을 경우에는 최종 포즈 오차가 매우 작게 나타나게 되는데, 이는 오차 보정결과가 로봇 포즈의 측정 정밀도에 민감하게 된다는 것을 의미한다.

3.2 주행시험경로 설계기법

3.1절의 고려사항을 반영하여 제안하는 주행시험경로 설계기법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 직선주행과 제자리회전을 포함하도록 주행시험경로의 형상을 결정한다.
- 2) 기 정의된 주행시험경로를 주행하여 시스템적 오차를 확인한다.
- 3) 비시스템적 오차를 실험적으로 확인한다. Chong¹⁶⁾의 기법 등이 사용될 수 있다.
- 4) 시스템적 오차와 비시스템적 오차를 반영하여 주행시물레이션을 수행한다.
- 5) 주행시물레이션 결과를 바탕으로 주행시험경로의 최소 크기를 정한다.

이때, 주행시물레이션은 2) - 3)에서 확인한 시스템적 오차와 비시스템적 오차 조건에서 주행시험경로의 크기를 변화시키며 해당 크기에서의 기구학적 파라미터를 산출하는 단계와 산출된 기구학적 파라미터를 이용하여 로봇을 보정한 후의 위치 오차를 산출하는 단계로 나누어진다. 주행시험경로 크기의 결정은 보정 후 위치 오차를 비교하여 정한다.

4. 시뮬레이션 결과

제안하는 주행시험경로 설계기법을 이용하여 주행시험 경로의 설계조건을 획득하는 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 로봇은 상용 이륜차동구동형로봇(TETRA-DS II)^[20]를 참고하였으며, 주요 제원은 휠 직경 0.15m, 휠 간격 0.385m, 휠 너비 0.03m이다. 시뮬레이션에서 로봇의 위치와 방향각은 기구학적 모델링 오차를 고려한 로봇 기구학을 통해 계산되었다.

휠의 기구학적 모델링 오차는 파라미터 값을 설정하여 시뮬레이션에 반영하였으며, 기구학적 오차 파라미터는 E_b 와 E_d 로 Borenstein^[4]의 연구에서 정의한 것과 같다.

$$E_b = \frac{b_{actual}}{b_{nominal}}, E_d = \frac{D_R}{D_L} \quad (11)$$

이때, b_{actual} 은 실제 휠 간격, $b_{nominal}$ 은 로봇 제원 상의 휠 간격을, D_R 은 실제 우측 휠 직경을, D_L 은 실제 좌측 휠 직경을 의미한다.

비시스템적 오차는 식 (10)의 공분산 행렬에 나타난 비시스템적 오차 파라미터 k_r, k_f 를 이용하여 반영한다.

시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 시스템적 오차 조건은 $E_b = 1.025, E_d = 0.999$, 비시스템적 오차 조건은 $k_r = k_f = 1.00 \times 10^6 m$ 이었다. 주행시험경로의 크기는 정사각형 경로의 한 변의 길이가 $L \leq 10m$ 인 범위를 고려하였다.

Fig. 3은 주행시험경로 중 직선 경로에서 시스템적 오차에 의한 방향각 오차와 비시스템적 오차에 의한 방향각 오차를 비교한 결과이다. x-축은 주행시험경로의 한 변의

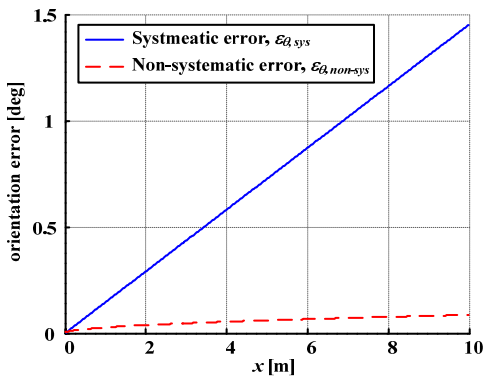


Fig. 3. The orientation error caused by systematic errors and non-systematic errors of the straight test tracks.

길이를 나타낸다. Fig. 3에서는 주행거리가 증가함에 따라 방향각 오차 또한 증가함을 확인할 수 있다.

실제 오도메트리 보정과정에서는 주행시험 후 전체 방향각 오차 중에서 시스템적 오차에 의한 방향각 오차가 지배적인 것이 유리하다. 이때, 전체 방향각 오차는 시스템적 오차에 의한 방향각 오차와 비시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 합을 의미한다. 전체 방향각 오차 중에서 시스템적 오차에 의한 방향각 오차가 지배적이라는 것은 주행시험을 통해 오도메트리를 보정한 결과가 비시스템적 오차에 덜 민감하다는 것을 의미하기 때문이다. 따라서 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적 크기를 확인할 필요가 있다.

Fig. 4에는 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적인 크기를 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 Fig. 3의 조건과 동일하다. Fig 4에서는 주행거리가 증가함에 따라 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적 크기 또한 증가함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 조건에서는 한 변의 길이가 4m일 때 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적인 크기가 약 91%이었다.

Fig. 5는 오도메트리 보정 시뮬레이션 후의 평균 위치오차를 나타낸다. 오도메트리 보정 시뮬레이션은 정사각형 경로의 한 변의 길이를 0.5m부터 10m까지 변화시키며 각각의 주행시험경로에서 기구학적 파라미터를 산출한 후, 산출한 기구학적 파라미터를 반영하여 동일한 경로(4m×4m 정사각형 경로)에서 보정 후 위치 오차를 비교하는 방식으로 진행되었다. 시스템적 오차 조건은 $E_b = 1.028, E_d =$

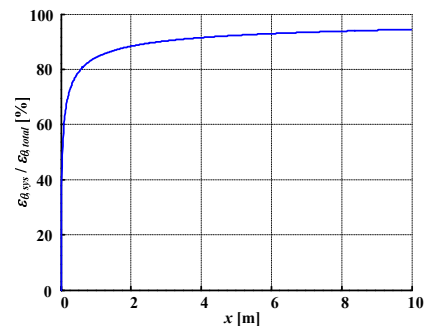


Fig. 4. The relative magnitudes of orientation errors caused by systematic errors compared with total orientation error of the straight line path in test tracks.

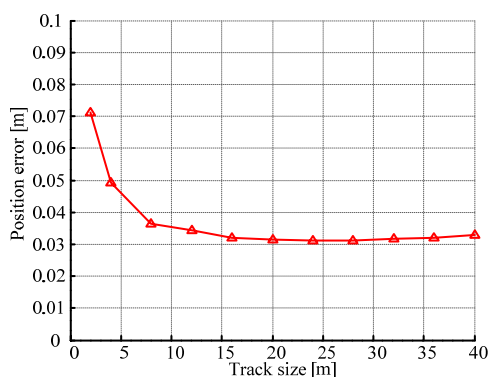


Fig. 5. The final position error during simulation. The robot is driven along same $4m \times 4m$ square path after calibrations. Calibrations were carried out under square shape test track that has different sizes represented in x -axis.

0.999, 비시스템적 오차 조건은 $k_r = k_l = 1.69 \times 10^6 m$ 이었으며, 오도메트리 보정 시뮬레이션은 800회 반복하였다. 시뮬레이션 결과, 보정 후의 위치 오차는 주행시험경로의 크기에 영향을 받는 것으로 확인되었다. Fig 5에서 $0.5m \times 0.5m$ 경로를 사용한 경우(주행거리가 $2m$)의 보정 후 위치 오차가 가장 큰 것으로 나타났다. 보정 후 위치 오차는 $4m \times 4m$ 경로(주행거리가 $16m$)까지 감소하며, 이후 두드러지는 변화가 나타나지 않았다. 따라서 시뮬레이션 조건에서 $4m \times 4m$ 경로, 즉 최소 주행거리 $16m$ 가 적절한 주행시험경로의 크기가 된다.

Fig. 6은 또한 오도메트리 보정 시뮬레이션 후의 평균 위치 오차를 나타낸다. 오차 조건은 Fig. 5와 동일하다. 대신

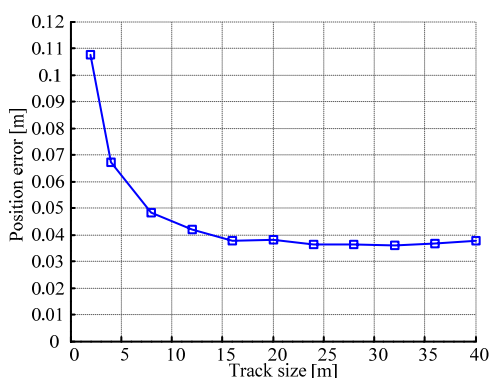


Fig. 6. The final position error during simulation. The robot is driven along same $4m \times 4m$ square path after calibrations. Calibrations were carried out under octagon shape test track that has different sizes represented in x -axis.

보정에 사용되는 주행시험경로는 정팔각형 경로를 사용하였다. 시뮬레이션 결과, Fig. 5와 유사한 경향성을 보였다. 주행거리가 $2m$ (Fig. 5의 $0.5m \times 0.5m$ 경로에 대응)인 경우 위치 오차가 가장 크게 나타났으며, 주행거리가 $16m$ (Fig. 5의 $4m \times 4m$ 경로에 대응)이 될 때까지 위치오차가 감소하였다. 이후에는 위치 오차의 두드러진 변화가 나타나지 않았다. 따라서 주행시험경로의 형상에 무관하게 최소 주행거리 $16m$ 는 유효한 설계조건임을 알 수 있다.

5. 실험 결과

Fig. 7은 실험 장비와 환경을 나타낸다. 로봇은 상용 이륜차동구동형로봇인 TETRA-DS II^[20]를 사용하였다. 또한, 로봇의 위치 및 방향각을 측정하기 위해 상용절대위치인식센서인 STARGAZER^[21]를 로봇에 설치하였다. 주행환경은 비교적 평탄한 실내환경이었다.

주행시험경로 설계 시뮬레이션의 초기조건을 획득하기 위하여 예비실험을 수행하였다. 시스템적 오차 조건은 $4m \times 4m$ 정사각형 경로를 오픈루프 제어로 주행시킨 후 최종 포즈 오차를 측정하여 기구학적 파라미터를 확인하였다. 비시스템적 오차 조건은 Chong^[16]의 기법을 이용하여 확인하였다. 예비실험을 통해 확인한 오차 조건은 시스템적 오차 $E_b = 1.0255$, $E_d = 1.0017$, 비시스템적 오차 $k_r = k_l = 2.89 \times 10^6 m$ 이었다.

Fig. 8은 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적인 크기를 나타낸다. 예비실험에서 확인한 시스템적 오차 및 비시스템적 오차를 반영하였을 때, $4m \times 4m$ 경로에서 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적인 크기가 약 91.5%이었다.



Fig. 7. Experimental setup.

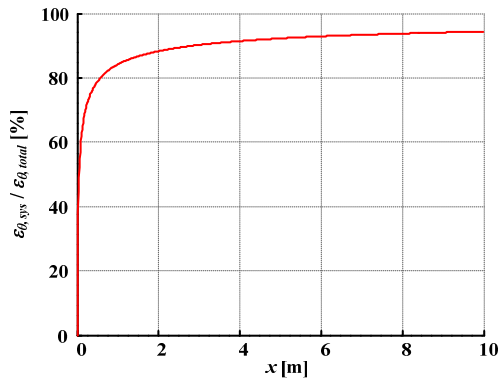


Fig. 8. The relative size of orientation errors caused by systematic errors compared with total orientation error of the straight line path in test track.

Fig. 9는 예비실험에서 확인한 오차 조건을 반영하여 오도메트리 보정 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Fig 8에서 $0.5m \times 0.5m$ 경로를 사용한 경우의 보정 후 위치 오차가 가장 큰 것으로 나타났다. 보정 후 위치 오차는 $4m \times 4m$ 경로까지 감소하며, 이후 한 변의 길이가 $4m - 10m$ 일 때에는 두드러지는 변화가 나타나지 않았다. 따라서 실험 조건에서는 $4m \times 4m$ 경로, 즉 최소 주행거리 $16m$ 가 적절한 주행시험경로의 크기가 된다.

오도메트리 보정 시뮬레이션을 통해 확인한 주행시험경로의 조건이 실제로 유용한지 확인하기 위하여 세 가지 다른 주행시험경로를 이용하여 각각 오도메트리 보정을 수행하였다. 로봇을 $2m \times 2m$ 경로, $4m \times 4m$ 경로, $6m \times 6m$ 경로를 따라 각각 오픈-루프 제어로 주행시킨 후 기구학적

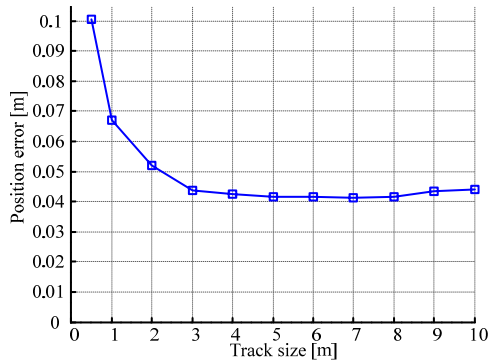


Fig. 9. The final position error during simulation. The robot is driven along same $4m \times 4m$ square path after calibrations. Calibration were carried out under different test track dimensions that are represented in x -axis.

파라미터를 산출하였다. 로봇은 각 주행 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행하였으며, 비시스템적 오차의 영향을 고려하여 주행방향별로 5회씩 하고, 평균값을 오차 보정에 사용하였다. Table 1은 각 주행시험경로에서 획득한 기구학적 파라미터를 나타낸다.

Fig. 10은 Table 1의 기구학적 파라미터를 이용하여 오도메트리를 보정한 후의 위치 오차를 나타낸다. 보정 후의 로봇은 $4m \times 4m$ 정사각형 경로를 반시계방향으로 주행하였다. $2m \times 2m$ 경로를 사용하여 오도메트리를 보정한 경우에는 위치 오차가 평균 $1.69m$ 로 나타났다. $4m \times 4m$ 경로를 사용하여 오도메트리를 보정한 경우에는 위치 오차가 평균 $0.14m$ 로 $2m \times 2m$ 경로에서 보정한 경우와 비교하여 오차가 감소하였다. $6m \times 6m$ 경로에서 보정한 경우에는 위치 오차가 평균 $0.09m$ 로 $4m \times 4m$ 경로에서 보정한 결과와 비교적 유사한 수준의 오차를 보였다.

Fig. 11은 Table 1의 기구학적 파라미터를 이용하여 오도메트리를 보정한 후의 위치 오차를 나타낸다. 보정 후의 로봇은 한 변의 길이가 $5m$ 인 정삼각형 경로를 시계방향으로 주행하였다. $2m \times 2m$ 경로에서 오도메트리를 보정한 경우에는 위치 오차가 평균 $2.28m$ 로 나타났다. $4m \times 4m$ 경로를 사용하여 오도메트리를 보정한 경우에는 위치 오차가

Table 1. Calibrated Kinematic parameters

Error parameters	$2m \times 2m$	$4m \times 4m$	$6m \times 6m$
E_b	1.1370	1.0247	1.0213
E_d	1.0025	1.0016	1.0015

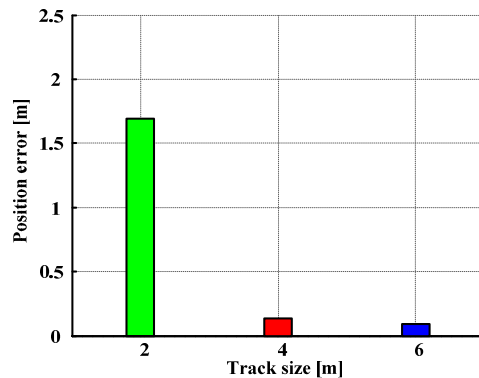


Fig. 10. Experimental final position errors after calibration. The robot was driven along same $4m \times 4m$ square path in CCW direction.

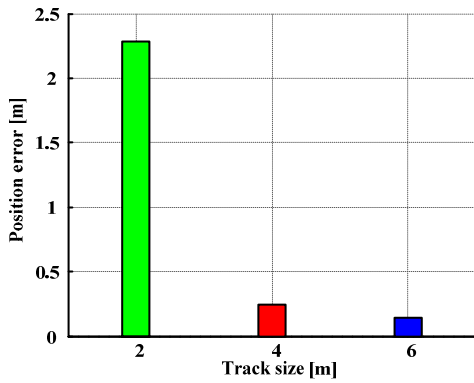


Fig. 11. Experimental final position errors after calibration. The robot was driven along same regular triangular path with 5m edge in CW direction.

평균 0.24m로 2m×2m 경로에서 보정한 경우와 비교하여 오차가 감소하였다. 6m×6m 경로에서 보정한 경우에는 위치 오차가 평균 0.14m로 4m×4m 경로에서 보정한 결과와 비교적 유사한 수준의 오차를 보였다.

Fig. 10-11에 나타난 주행시험경로 별 위치 오차의 차이가 통계적으로 의미가 있는지 확인하기 위하여 독립 표본 t -검정^[22]을 수행하였다.

Table 2는 Fig 10에 나타난 주행시험경로 별 위치 오차를 독립 표본 t -검정으로 분석한 결과이다. 독립 표본 t -검정에서 유의확률 p 가 0.05 이하이면 두 집단의 평균은 통계적으로 다른 값이라고 해석할 수 있다. 먼저 2m×2m 경로와 4m×4m 경로를 비교한 결과, 두 경우의 위치 오차는 유의

Table 2. Results of independent samples t-tests for equality of means of the proposed track size against different track sizes.

CCW direction	t -value	Degree of freedom	p	Mean difference
2m×2m vs. 4m×4m	26.855	8	0.000	1.553
6m×6m vs. 4m×4m	-0.873	8	0.408	-0.046

Table 3. Results of independent samples t-tests for equality of means of the proposed track size against different track sizes.

CW direction	t -value	Degree of freedom	p	Mean difference
2m×2m vs. 4m×4m	30.327	8	0.000	2.038
6m×6m vs. 4m×4m	-1.734	8	0.121	-0.105

확률 p 가 0.05 이하로 통계적으로 다른 값이라는 결과를 얻었다. 반면 6m×6m 경로와 4m×4m 경로를 비교한 결과, 두 경우의 위치 오차는 유의확률 p 가 0.408로 통계적으로 차이가 있는 값은 아니었다.

Table 3는 Fig. 11에 나타난 주행시험경로 별 위치 오차를 독립 표본 t -검정으로 분석한 결과이다. 먼저 2m×2m 경로와 4m×4m 경로를 비교한 결과, 두 경우의 위치 오차는 유의확률 p 가 0.05 이하로 통계적으로 다른 값이라는 결과를 얻었다. 반면 6m×6m 경로와 4m×4m 경로를 비교한 결과, 두 경우의 위치 오차는 유의확률 p 가 0.121로 통계적으로 차이가 있는 값은 아니었다. 따라서 제안하는 주행시험경로 설계기법을 이용하여 얻은 4m×4m 경로, 즉 최소 주행거리 16m는 주행시험경로로서 적합함을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 오도메트리 보정실험을 위한 주행시험경로 설계기법을 제안하였다. 로봇 오도메트리의 시스템적 오차는 주행시험 후 최종 포즈 오차에 반영되어 나타나기 때문에 최종 포즈 오차에 영향을 미치는 주행시험경로의 형상과 크기는 오도메트리 보정 정밀도에 중대한 영향을 미친다. 주행시험경로는 로봇의 크기, 보정기법, 시스템적 오차 및 비시스템적 오차를 고려하여 신중하게 결정되어야 한다. 주행시험경로 설계간 고려사항을 반영하여 본 논문에서는 주행시험경로의 형상으로서 정다각형 형태를 제안하였다. 또한, 주행시험경로의 최소크기를 결정하기 위하여 주행시뮬레이션을 통해 전체 방향각 오차 대비 시스템적 오차에 의한 방향각 오차의 상대적 크기와 보정 후 위치 오차를 비교하였다. 제안하는 주행시험설계기법은 시뮬레이션과 실험을 통해 증명되었다.

References

- [1] S.-H. Choi, Y.-K. Kim, Y.-S. Hwang, H.-W. Kim, and J.-M. Lee, "EKF Based Outdoor Positioning System using Multiple GPS Receivers " Journal of Korea Robotics Society, vol. 8, pp. 129-135, 2013.
- [2] C.-B. Noh, M.-H. Kim, and M.-C. Lee, "Path Planning for the Shortest Driving Time Considering UGV Driving

- Characteristic and Driving Time and Its Driving Algorithm," Journal of Korea Robotics Society, vol. 8, pp. 43-50, 2013.
- [3] J. Borenstein, H. Everett and L. Feng, Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning, University of Michigan, 1996.
- [4] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, 1996.
- [5] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh and D. Scaramuzza, Introduction to autonomous mobile robots, The MIT Press, 2011.
- [6] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, Probabilistic robotics, The MIT press, 2005.
- [7] T. Abbas, M. Arif, and W. Ahmed, "Measurement and correction of systematic odometry errors caused by kinematics imperfections in mobile robots," SICE-ICASE International Joint Conference, pp. 2073-2078, 2006.
- [8] A. Martinelli, "The odometry error of a mobile robot with a synchronous drive system," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 3, pp. 399-405, 2002.
- [9] A. Martinelli, N. Tomatis and R. Siegwart, "Simultaneous localization and odometry self calibration for mobile robot," Autonomous Robots, Vol. 22, No. 1, pp. 75-85, 2007.
- [10] G. Antonelli, S. Chiaverini and G. Fusco, "A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 5, pp. 994-1004, 2005.
- [11] G. Antonelli and S. Chiaverini, "Linear estimation of the physical odometric parameters for differential-drive mobile robots," Autonomous Robots, Vol. 23, No. pp. 59-68, 2007.
- [12] A. Censi, L. Marchionni and G. Oriolo, "Simultaneous maximum-likelihood calibration of odometry and sensor parameters," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2098-2103, 2008.
- [13] G. Antonelli, F. Caccavale, F. Grossi and A. Marino, "A non-iterative and effective procedure for simultaneous odometry and camera calibration for a differential drive mobile robot based on the singular value decomposition," Intelligent Service Robotics, Vol. 3, No. 3, pp. 163-173, 2010.
- [14] J. Borenstein, and L. Feng, "Gyrodometry: A new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 423-428, 1996.
- [15] K. Komoriya, and E. Oyama, "Position estimation of a mobile robot using optical fiber gyroscope (OFG)," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 143-149, 1994.
- [16] K.S. Chong and L. Kleeman, "Accurate odometry and error modelling for a mobile robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2783-2788, 1997.
- [17] K. Lee, C. Jung and W. Chung, "Accurate calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots," Journal of mechanical science and technology, Vol. 25, No. 6, pp. 1603-1611, 2011.
- [18] C. Jung, and W. Chung, "Design of Test Tracks for Odometry Calibration of Wheeled Mobile Robots," International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 8, No. 4, pp 1-9, 2011.
- [19] C. Jung and W. Chung, "Accurate calibration of two wheel differential mobile robots by using experimental heading errors," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4533-4538, 2012.
- [20] Dongbu Robot Co. Ltd., Available: <http://www.dongburobot.com>
- [21] HAGISONIC Co. Ltd., Available: <http://www.hagisonic.com>
- [22] Peck, R., Olsen, C. and Devore, J. L., 2011, Introduction to Statistics and Data Analysis, Cengage Learning.



정창배

1999 육군사관학교 기계공학과 (공학사)

2005 북경과학기술대학교 기계공학과 (공학석사)

2013 고려대학교 기계공학과 (공학박사)

2013~현재 육군본부
관심분야: 이동로봇 오도메트리 보정



문 창 배

- 2006 고려대학교 기계공학과 (공학사)
- 2008 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012 고려대학교 기계공학과 (공학박사)

2012~현재 고려대학교 기계공학부 연구교수
관심분야: 이동로봇 주행, 이산시스템, 물체추적



정 우 진

- 1993 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1995 도쿄대학 기계정보공학과(공학석사)
- 1998 도쿄대학 기계정보공학과 (공학박사)

1998~2005 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원
2005~현재 고려대학교 기계공학부 교수
관심분야: 이동로봇의 자율주행, 경로생성 및 운동 제어, 위치추정



정 다 운

- 2010 고려대학교 기계공학과 (공학사)
 - 2012~현재 고려대학교 기계공학과 석사과정
- 관심분야: 이동로봇 위치추정, 오도메트리 보정