

## 차륜형 이동로봇의 방향각오차를 이용한 오도메트리 정밀보정기법

### Accurate Calibration of Odometry Errors for Wheeled Mobile Robots by using Experimental Orientation Errors

정창배<sup>1</sup>, 정다운<sup>1</sup>, 정우진<sup>1,✉</sup>

Changbae Jung<sup>1</sup>, Daun Jung<sup>1</sup>, and Woojin Chung<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)  
✉ Corresponding author: smartrobot@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3375

Manuscript received: 2013.12.13 / Revised: 2014.3.3 / Accepted: 2014.3.3

*Accurate estimation of the robot's position has an important role in autonomous navigation. Odometry is one of the most widely used techniques for mobile robot positioning. However, odometry has a well-known drawback that the position errors are accumulated when the travel distance increases. The UMBmark method is the conventional odometry calibration scheme for two wheel differential mobile robots. In the UMBmark method, the approximations for small angles are used in order to simplify the calculations. In this paper, we propose the new calibration scheme by using experimental orientation errors. Kinematic parameters can be calculated accurately without approximations by using experimental orientation errors. The numerical simulation and experimental results show that the odometry accuracy can be improved by the proposed method.*

Key Words: Mobile robots (이동로봇), Localization (위치추정), Odometry (오도메트리), Calibration (오차보정)

#### 1. 서론

최근 다양한 자율주행관련 연구가 진행되고 있다.<sup>1-2</sup> 자율주행로봇에서 로봇의 정밀한 위치인식은 중요한 역할을 차지한다. 일반적으로 로봇의 위치인식은 휠 엔코더를 이용한 오도메트리 정보를 기반으로 이루어진다. 그러나 오도메트리는 주행거리가 증가함에 따라 위치오차가 누적된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 주행거리에 비례하여 누적되는 위치오차를 감소시키기 위해 오도메트리 오차를 보정할 필요가 있다.

오도메트리의 오차원인은 크게 시스템적 오차와 비시스템적 오차로 구분된다.<sup>3-5</sup> 시스템적 오차는 로봇의 기구학적 모델링에 관련된 오차로 좌-우 바퀴 직경의 차이, 좌-우 바퀴간 간격 오차 등

이 포함된다. 시스템적 오차는 주행 중에 변하지 않기 때문에 시스템적 오차에 관련된 기구학적 파라미터를 보정함으로써 위치인식 오차를 감소시킬 수 있다. 본 논문에서도 기구학적 파라미터의 보정에 주안점을 두고 있다.

비시스템적 오차는 로봇과 주행환경의 상호작용에 의한 오차로 불균일한 노면, 바닥 장애물, 미끄러짐 등이 포함된다. 비시스템적 오차는 위치오차의 분포로 나타나기 때문에 Thrun<sup>6</sup>와 같이 확률적인 관점에서 접근하기도 한다. 또한 Borenstein,<sup>7</sup> Komoriya<sup>8</sup>는 외장센서와 오도메트리를 함께 사용함으로써 비시스템적 오차를 감소시키는 기법이 제안되었다.

이전의 여러 연구에서 오도메트리 보정기법을 제안하였다. Antonelli<sup>9,10</sup>는 최소자승법을 이용하여

오도메트리 모델의 파라미터를 구하는 기법을 제안하였다. Bostani<sup>11</sup>는 로봇을 직선왕복주행 시킨 뒤 초기위치-방향전환점-최종위치간의 각도를 측정하여 오도메트리를 보정하는 방법을 제안하였다. Ivanjko<sup>12</sup>는 파라미터 최적화를 기반으로 한 보정기법을 제안하였다. Martinelli<sup>13</sup>는 AKF(augmented Kalman filter)와 OF(Observable filter)를 이용하여 로봇이 주행하는 동안 오도메트리 오차를 추정하는 방법을 제안하였다. Roy<sup>14</sup>는 오도메트리를 확률적인 관점에서 모델링하고 로봇이 동작하는 동안 자동적으로 오도메트리 오차를 보정하는 기법을 제시하였다.

본 논문에서는 이륜차동구동형로봇을 대상으로 한다. 이륜차동구동형로봇은 차륜구조가 비교적 단순하며 좌-우 바퀴가 독립적으로 구동되어 주행 성능이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 이륜차동구동형로봇을 대상으로 한 오도메트리 보정기법 중 대표적인 방법은 Borenstein<sup>4</sup>에서 제안한 UMBmark 기법이다. UMBmark 기법은 한 변의 길이가 4m인 정사각형 경로를 시계방향 및 반시계방향으로 주행한 뒤 최종 위치오차를 측정하여 오도메트리를 보정하는 기법이다. UMBmark 기법에서는 오도메트리 오차의 주요원인이 좌-우 바퀴 직경 차이와 좌-우 바퀴 간격이며, 두 가지 오차원인이 상호독립적이라고 가정한다. 그러나 실제로는 좌-우 바퀴 직경 차이와 좌-우 바퀴 간격 오차는 로봇 주행 시 복합적인 영향을 준다. 또한, 위치오차로부터 기구학적 파라미터를 산출하는 과정에서 근사식을 사용하기 때문에 근사식에 의한 오차가 존재한다.

본 논문에서는 Borenstein<sup>4</sup>에서 제안한 기존 기법의 제한사항을 해결할 수 있는 새로운 보정기법을 제안하고자 한다. 본 논문의 첫 번째 목표는 주행시험 후의 최종 방향각오차를 이용하는 보정기법을 제안하는 것이다. 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 최종 방향각오차를 이용함으로써 근사식에 의한 오차가 감소되었음을 보인다.

본 논문의 두 번째 목표는 좌-우 바퀴 직경 차이와 좌-우 바퀴 간격 오차의 복합오차를 고려한 보정기법을 제안하는 것이다. 이전에 진행한 연구인 Lee<sup>15</sup>에서는 최종 위치오차를 이용하여 오도메트리 오차를 보정할 때, 오차원인간의 복합오차를 반영함으로써 보정성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이전 연구 결과를 바탕으로 최종 방향각오차를 이용하는 보정기법에서도 오차원인간의

복합오차를 반영하여 더욱 정밀한 오차보정이 가능함을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 Borenstein<sup>4</sup>에서 제안한 기존 기법을 분석하고, 기존 기법의 제한사항을 해결할 수 있는 새로운 보정기법을 제안한다. 3장에서는 시뮬레이션 결과를 통하여 제안하는 기법이 갖는 장점을 확인한다. 4장에서는 제안하는 기법을 이용함으로써 정밀한 오도메트리 보정이 가능함을 실험을 통하여 보인다.

## 2. 오도메트리 오차 정밀보정기법

### 2.1 기존의 오차 보정기법

Fig. 1은 UMBmark 기법의 실험방법과 주행시험 후의 최종 위치오차를 나타낸다. 기존 기법은 한 변이 4m인 정사각형 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행 후 최종 위치오차를 측정하여 오도메트리 오차를 보정한다. 주행시험 후의 위치오차는 바퀴 직경 오차와 바퀴 간격 오차가 각각 독립적으로 영향을 준다고 가정한다.

Fig. 1(a)는 A 유형 오차를 나타낸다. A 유형 오차는 바퀴 간격 오차에 의해 발생하며, 제자리 회전 시  $\alpha$ 만큼의 방향각오차가 나타나게 된다. A 유형 오차에 관련된 기구학적 파라미터는  $E_b$ 로  $E_b = b_{actual} / b_{nominal}$  와 같이 정의된다. 이때,  $b$ 는 로봇

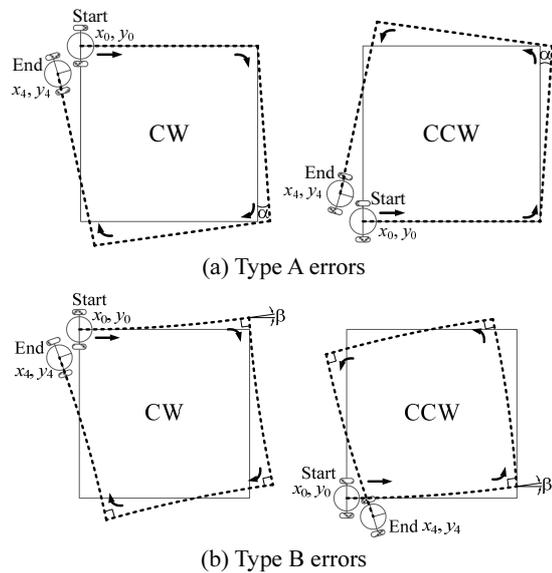


Fig. 1 The calibration experiments and the final position errors in UMBmark method

의 바퀴간 간격을 의미한다. Fig. 1(b)는 B 유형 오차로 좌-우 바퀴의 직경 차이에 의해 발생하는 오차이다. B 유형 오차에 의해 직선 주행 시  $\beta$ 만큼의 방향각오차가 나타난다. B 유형 오차에 관련된 기구학적 파라미터는  $E_d$ 로  $E_d = d_r/d_l$  과 같이 정의된다. 이때,  $d_{r(l)}$ 은 로봇의 우측(또는 좌측) 바퀴 직경을 나타낸다.

A 유형 오차와 B 유형 오차에 의해 주행시험 후 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 최종 위치오차  $x_4, y_4$ 가 발생한다. Borenstein<sup>4</sup>에서는 최종 위치오차  $x_4, y_4$ 로부터 A유형 오차에 의한 방향각 오차  $\alpha$ , B유형 오차에 의한 방향각 오차  $\beta$ 를 계산하기 위하여 삼각함수를 이용한다. 한 변의 길이가  $L$ 인 정사각형 경로를 시계방향으로 주행한 후의 최종 위치오차  $x_4, y_4$ 는 삼각함수를 이용하여 나타내면 식(1), (2)와 같다.

$$x_{4,CW} = L + L \sin \alpha - L \cos 2\alpha - L \sin 3\alpha + L \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) + L \sin \left( \frac{3\beta}{2} \right) - L \cos \left( \frac{5\beta}{2} \right) - L \sin \left( \frac{7\beta}{2} \right) \quad (1)$$

$$y_{4,CW} = -L \cos \alpha - L \sin 2\alpha + L \cos 3\alpha + L \sin \left( \frac{\beta}{2} \right) - L \cos \left( \frac{3\beta}{2} \right) - L \sin \left( \frac{5\beta}{2} \right) + L \cos \left( \frac{7\beta}{2} \right) \quad (2)$$

Borenstein<sup>4</sup>에서는 방향각오차  $\alpha, \beta$ 의 계산을 용이하게 하기 위해 미소각에 대한 근사식  $\sin \gamma \approx \gamma, \cos \gamma \approx 1$ 을 사용한다. 식(1), (2)를 근사식을 사용하여 표현하면 식(3), (4)와 같다.

$$x_{4,CW,approximated} = -2L(\alpha + \beta) \quad (3)$$

$$y_{4,CW,approximated} = -2L(\alpha + \beta) \quad (4)$$

그러나 기존 기법은 미소각에 대한 근사식  $\sin \gamma \approx \gamma, \cos \gamma \approx 1$ 을 사용하기 때문에 로봇이 가지고 있는 오차가 큰 경우에는 근사식에 의한 오차로 인해 보정성능이 저하된다. 즉, 기존 기법은 다양한 수준의 시스템적 오차에 대응하기 어렵다. 뿐만 아니라 실제로는 오차원인간의 복합적 영향이 존재하기 오도메트리 오차원인이 상호 독립적이라는 가정은 엄밀히 말해 적합한 가정이 아니다.

### 2.2 방향각오차를 이용한 오차 정밀보정기법

이륜차동구동형로봇의 운동모델은 다음의 식 (5), (6)과 같이 나타내며, 이로부터 오도메트리 상의 로봇 위치 및 방향각을 계산 할 수 있다.<sup>5</sup>

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + \Delta d \cdot \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2) \\ y_k &= y_{k-1} + \Delta d \cdot \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta/2) \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \Delta\theta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta d = \frac{\Delta d_R + \Delta d_L}{2}, \quad \Delta\theta = \frac{\Delta d_R - \Delta d_L}{b} \quad (6)$$

$x_k$ : Position of the robot in the  $x$ -direction at time  $k$ .

$y_k$ : Position of the robot in the  $y$ -direction at time  $k$ .

$\theta_k$ : Orientation of the robot at time  $k$ .

$\Delta d$ : Incremental displacement of the robot.

$\Delta\theta$ : Incremental orientation of the robot.

본 논문에서 제안하는 보정기법은 최종 방향각 오차를 사용하고자 한다. 최종 방향각오차를 사용하기 때문에 바퀴 간격 오차와 바퀴 직경 오차의 복합적 영향을 반영하기에 용이하다는 장점이 있다. 또한 기구학적 모델링 오차 파라미터를 산출하는 과정에서 근사식을 사용하지 않기 때문에 근사오차를 제거할 수 있다. 따라서 기존 기법에 비해 보다 정밀한 오차 보정이 가능하다. 뿐만 아니라 주행시험 시 최초 방향각과 최종 방향각만 측정하면 되기 때문에 주행시험에 요구되는 실험장비를 간소화 할 수 있다.

Fig. 2는 주행시험 후에 A 유형 오차와 B 유형 오차에 의해 나타나는 로봇의 최종 위치 및 방향각오차를 각각 나타낸다. 주행시험 후의 최종 방향각오차는 A 유형 오차에 의해 나타나는  $\alpha$ 와 B 유형 오차에 나타나는  $\beta$ 를 이용하여 간단하게 계산 가능하다.

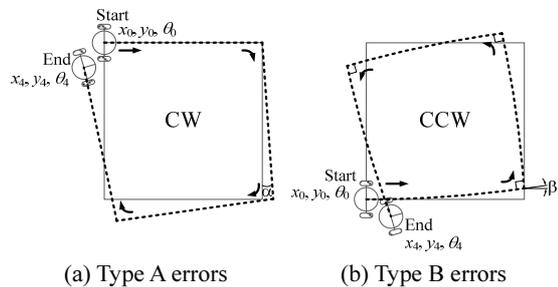


Fig. 2 The final pose errors

$$\begin{aligned} \text{Type A errors : } \theta_{4,CW} &= 4\alpha, \quad \theta_{4,CCW} = -4\alpha \\ \text{Type B errors : } \theta_{4,CW} &= 4\beta, \quad \theta_{4,CCW} = 4\beta \end{aligned} \quad (7)$$

각 오차 유형에 따른 방향각오차를 주행방향별로 합치면 시계 및 반시계방향 주행 시의 최종 방향각오차  $\theta_{c.g.,CW}$ ,  $\theta_{c.g.,CCW}$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{c.g.,CW} &= 4\alpha + 4\beta \\ \theta_{c.g.,CCW} &= -4\alpha + 4\beta \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)로부터 A 유형 오차에 의한 방향각오차  $\alpha$ 와 B 유형 오차에 의한 방향각오차  $\beta$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_{\epsilon_b} = \frac{\theta_{c.g.,CW} - \theta_{c.g.,CCW}}{8} \quad (9)$$

$$\beta_{\epsilon_d} = \frac{\theta_{c.g.,CW} + \theta_{c.g.,CCW}}{8} \quad (10)$$

식(9), (10)에서는 바퀴 간격 오차에 의한 방향각오차, 바퀴 직경 오차에 의한 방향각오차를 표현하기 위하여 각각  $\alpha_{\epsilon_b}$ ,  $\beta_{\epsilon_d}$ 로 표기하였다. 제안하는 기법에서는 Borenstein<sup>4</sup>와는 달리 근사식을 사용하지 않고  $\alpha_{\epsilon_b}$ 와  $\beta_{\epsilon_d}$ 를 계산하기 때문에 더욱 정확한 값을 획득 할 수 있다.

Fig. 3은 반시계방향 주행 시 제자리회전 및 직선주행 후 방향각오차를 나타낸다. Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 실제 로봇이 주행할 때에는 바퀴 간격 오차와 바퀴 직경 오차가 복합적으로 영향을 미친다는 것을 이전 연구를 통해 확인하였다.<sup>15</sup> 오차원인의 복합적 영향을 고려하여 제자리회전 및 직선주행 후의 방향각오차를 다음과 같이 새로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{error,90^\circ turn} &: \alpha = \alpha_{\epsilon_b} + \alpha_{\epsilon_d} \\ \theta_{error,translation} &: \beta = \beta_{\epsilon_b} + \beta_{\epsilon_d} \end{aligned} \quad (11)$$

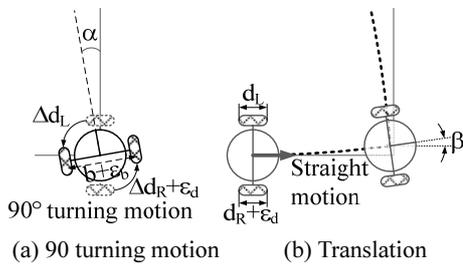


Fig. 3 The orientation errors  $\alpha$  and  $\beta$

식(11)에서 제자리회전 시 바퀴 직경 오차에 의한 방향각오차  $\alpha_{\epsilon_d}$ 는 Lee<sup>15</sup>과 동일한 절차로 계산할 수 있다. Fig. 3(a)는 제자리회전 이전의 로봇의 위치 및 방향각(그림에서 회색)과 제자리회전 이후의 로봇의 위치 및 방향각(그림에서 흑색)을 나타낸다. 제자리회전 후의 방향각은 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{actual} &= \sum_{i=1}^n \frac{((\Delta d_R + \epsilon_d) - (\Delta d_L))}{b + \epsilon_b} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta d_R - \Delta d_L)}{b + \epsilon_b} + \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon_d}{b + \epsilon_b} \\ &= 90^\circ + \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

이때,  $n$ 은 제자리회전을 하는 동안의 엔코더펄스수를 나타낸다.  $\Delta d_R$ 과  $\Delta d_L$ 은 우측 바퀴의 이동거리 증분, 좌측 바퀴의 이동거리 증분을 각각 나타낸다. Fig. 3(b)에서 우측 바퀴 직경이 좌측 바퀴 직경에 비해  $\epsilon_d$ 만큼 클 때, 바퀴 직경 오차에 의해 직선주행 후 방향각오차  $\beta$ 가 발생한다. 방향각오차  $\beta$ 는 식(13)과 같다.

$$\beta = \sum_{i=1}^m \frac{((\Delta d_R + \epsilon_d) - \Delta d_L)}{b} = \sum_{i=1}^m \frac{\epsilon_d}{b} = \frac{\epsilon_d \cdot m}{b} \quad (13)$$

이때,  $m$ 은 직선주행을 하는 동안의 엔코더펄스수를 나타낸다. 식(12), (13)과 유사한 방식으로 오차가 없는 경우의 이동거리  $L_{nominal}$ 과 제자리회전 각도  $\theta_{nominal}$ 은 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} L_{nominal} &= \sum_{i=1}^m \frac{(\Delta d_R + \Delta d_L)}{2} = \Delta d \cdot m \\ \theta_{nominal} &= \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta d_R - \Delta d_L)}{b} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta d - (-\Delta d))}{b} = \frac{2\Delta d \cdot n}{b} \end{aligned} \quad (14)$$

식(11)-(14)를 이용하여 제자리회전 시 바퀴 직경 오차에 의한 방향각오차  $\alpha_{\epsilon_d}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{\epsilon_d} = \frac{\pi b}{4L} \beta_{\epsilon_d} \quad (15)$$

식(9)와 (15)로부터 제자리회전 시 바퀴 간격 오차와 바퀴 직경 오차를 모두 고려하여 방향각오차  $\alpha$ 를 구할 수 있다. 또한 기구학적 파라미터  $E_b$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \alpha_{\epsilon_b} + \alpha_{\epsilon_d} = \frac{\theta_{c.g.,CW} - \theta_{c.g.,CCW}}{8} + \frac{\pi b}{4L} \beta_{\epsilon_d} \quad (16)$$

$$E_b = \frac{90^\circ}{90^\circ - (\alpha_{\epsilon_b} + \alpha_{\epsilon_d})} \quad (17)$$

Fig. 3(b)에서 로봇은 기구학적 모델링오차에 의해 직선이 아닌 곡선으로 주행하며 방향각오차  $\beta$ 가 나타난다. 방향각오차  $\beta$ 에는 바퀴 직경 오차에 의한 방향각오차  $\beta_{ed}$ 뿐만 아니라 바퀴 간격 오차에 의한 방향각오차  $\beta_{eb}$  또한 영향을 미친다. 바퀴 직경 오차 및 바퀴 간격 오차를 고려하여 바퀴 간격에 대한 오차 파라미터는 식(18)과 같이 계산한다. 여기서  $E_b$ 는 식(17)의 계산결과를 이용한다.

$$E_d = \frac{R + \frac{b_{actual}}{2} = \frac{L/2}{\sin(\beta_{\epsilon_d}/2)} + \frac{(E_b \times b_{nominal})}{2}}{R - \frac{b_{actual}}{2} = \frac{L/2}{\sin(\beta_{\epsilon_d}/2)} - \frac{(E_b \times b_{nominal})}{2}} \quad (18)$$

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 기법의 보정성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 먼저 최종 방향각오차와 오차원인간의 복합적 효과를 고려함으로써 제안하는 기법이 기존 기법에 비해 어떤 장점을 갖는지 확인하고자 한다. 두 번째로는 다양한 초기 조건에 대해서도 제안하는 기법의 장점이 동일하게 나타나는지 확인하고자 한다.

시뮬레이션은 시스템적 오차에 초점을 두었다.

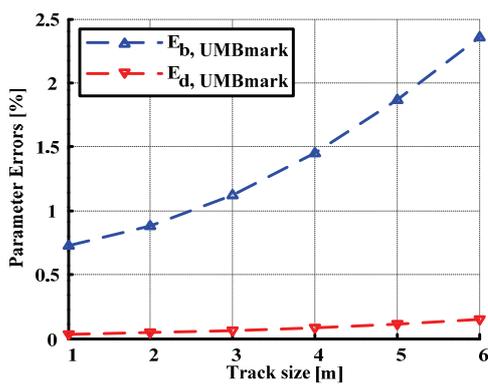


Fig. 4  $E_b$  and  $E_d$  parameter errors when kinematic parameters are calculated by UMBmark method

따라서 비시스템적 오차는 고려되지 않았다. 시뮬레이션에서 로봇의 오차 조건으로 기구학적 파라미터  $E_b$ ,  $E_d$ 를 입력하였으며 이는 로봇이 가지고 있는 시스템적 오차를 의미한다. 오도메트리 보정의 정밀도는 시뮬레이션 조건 대비 각 보정기법을 이용해 산출한 기구학적 파라미터의 오차로 정하고, 시뮬레이션 결과 그래프의 y축에 나타내었다. 따라서 시뮬레이션 결과에서 y축의 값이 작을수록 보정 정밀도가 높다고 판단 할 수 있다.

Fig. 4는 기존 기법을 이용한 경우의 기구학적 파라미터의 오차를 나타낸다. 시뮬레이션의 초기 오차조건은  $E_b = 0.974$ ,  $E_d = 0.987$ 이었다. 시뮬레이션에서의 주행시험경로는 정사각형 경로로 한 번의 길이를 1m부터 6m까지 1m씩 증가시켰다. 시뮬레이션 결과, 주행시험경로가 4m × 4m 정사각형 경로일 때  $E_b$ 에서 1.454%,  $E_d$ 에서 0.086%의 기구학적 파라미터 오차를 보였다. 또한 기존 기법을 사용하였을 때에는 주행시험경로의 길이가 증가함에 따라 기구학적 파라미터의 오차 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존 기법에서는 기구학적 파라미터 산출 과정에 근사식을 포함하고 있어 근사오차가 나타나기 때문이다.

Fig. 5는 방향각오차를 이용하여 기구학적 파라미터를 계산한 경우의 기구학적 파라미터 오차를 나타낸다. 기구학적 파라미터의 계산 과정에서 오차원인간의 복합적 영향을 고려되지 않았다. 시뮬레이션의 초기 오차조건은 Fig. 4와 동일하게  $E_b = 0.974$ ,  $E_d = 0.987$ 이었다. 시뮬레이션에서의 주행시험경로 역시 Fig. 4와 동일하게 정사각형 경로로 한 번의 길이를 1m부터 6m까지 1m씩 증가시켰다.

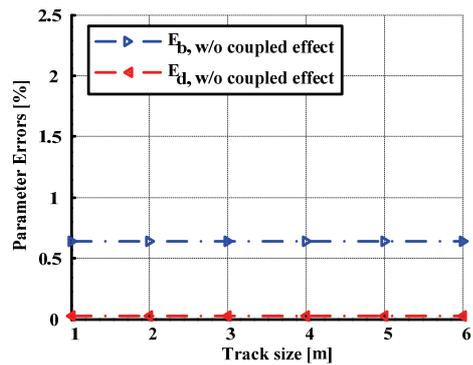


Fig. 5  $E_b$  and  $E_d$  parameter errors when kinematic parameters are calculated by using final orientation errors

시뮬레이션 결과, 주행시험경로가  $4m \times 4m$  정사각형 경로일 때  $E_b$ 에서 0.637%,  $E_d$ 에서 0.025%의 기구학적 파라미터 오차가 나타나 기존 기법에 비해 시뮬레이션 조건에 가까운 값을 산출함을 확인하였다. 또한 기존 기법을 이용한 경우와는 다르게 주행시험경로의 크기가 증가하여도 기구학적 파라미터의 오차가 일정하게 유지되어 근사오차가 제거되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 6는 제안하는 기법을 이용한 경우의 기구학적 파라미터의 오차를 나타낸다. 제안하는 기법에서는 방향각오차를 이용하고 오차원인간의 복합적 영향을 고려하여 기구학적 파라미터를 산출한다. 시뮬레이션의 초기 오차조건은 Fig. 4와 동일하게  $E_b = 0.974$ ,  $E_d = 0.987$ 이었다. 시뮬레이션에서의 주행시험경로 역시 Fig. 4와 동일하게 정사각형 경로로 한 변의 길이를 1m부터 6m까지 1m씩 증가시켰다. 시뮬레이션 결과, 기구학적 파라미터의 오차가 0에 가깝게 나타나 시뮬레이션 조건과 거의 동일한 값을 산출함을 확인하였다. Fig. 5와 비교하여 오차원인간의 복합적 영향을 고려함으로써 오도메트리 보정 정밀도가 향상되었음을 의미한다. 또한 제안하는 기법을 이용하는 경우에는 주행시험경로의 크기가 증가하여도 기구학적 파라미터의 오차

는 일정한 수준으로 유지된다. 이는 방향각오차를 사용함으로써 근사오차가 제거되었음을 의미한다.

Table 1은 시뮬레이션 조건을 변화시킨 후에 기구학적 파라미터 오차를 비교한 결과이다. 주행시험경로는 한 변의 길이가 4m인 정사각형 경로였다. 먼저 Case I에서 시뮬레이션 조건이  $E_b = 1.025$ ,  $E_d = 1.015$ 일 때, 기존 기법을 이용한 경우 산출되는 기구학적 파라미터 오차는  $E_b$ 에서 0.238%,  $E_d$ 에서 0.068%였다. 제안하는 기법을 이용한 경우에는 기구학적 파라미터 오차가  $E_b$ 에서 0.000%,  $E_d$ 에서 0.002%로 기존 기법에 비해 시뮬레이션 조건에 가까운 값을 산출하였음을 확인하였다. 마찬가지로 Case II에서도 시뮬레이션 조건  $E_b = 0.980$ ,  $E_d = 0.985$ 와 비교하여 기존 기법을 이용한 경우에는  $E_b$ 에서 1.681%,  $E_d$ 에서 0.111%의 오차가 나타난 반면 제안하는 기법을 이용한 경우에는 기구학적 파라미터 오차가  $E_b$ 에서 0.000%,  $E_d$ 에서 0.002%로 기존 기법에 비해 시뮬레이션 조건에 가까운 값을 산출하였음을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 제안하는 기법을 이용함으로써 근사오차를 없애고, 오차원인의 복합적 영향을 반영하여 정밀한 오도메트리 보정이 가능함을 확인하였다.

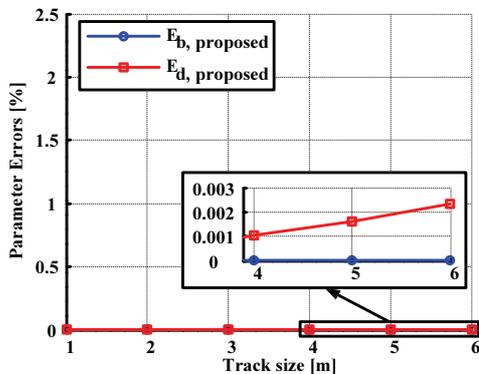


Fig. 6  $E_b$  and  $E_d$  parameter errors when kinematic parameters are calculated by proposed method

Table 1 Comparison of kinematic parameter errors

Error [%]	Case I $E_b = 1.025, E_d = 1.015$		Case II $E_b = 0.980, E_d = 0.985$	
	UMBmark	Proposed method	UMBmark	Proposed method
$E_b$	0.238	0.000	1.681	0.000
$E_d$	0.068	0.002	0.111	0.002

#### 4. 실험 결과

Fig. 7은 실험에 사용된 장비와 환경을 나타낸다. 실험에는 상용 이륜차동구동형로봇인 Tetra DS-II<sup>16</sup>를 이용하였다. 로봇의 주요 제원은 바퀴 직경 0.150m, 바퀴 간격 0.385m, 바퀴 너비 0.030m, 엔코더 해상도 200,000pulses/rev와 같다. 최종 위치 및 방향각오차는 상용 위치인식 센서(STARGAZER<sup>17</sup>)를 이용하여 측정하였다. 측정오차는  $x = 0.17mm$ ,  $y = 0.24mm$ , and  $\theta = 0.37^\circ$ 와 같다. 실험환경은 건물로



Fig. 7 The experimental setup

비로 비교적 평탄한 실내환경이다.

제안하는 기법의 오도메트리 오차 성능 확인을 위하여 실 환경에서 기존 기법과 제안하는 기법을 이용하여 각각 보정실험을 수행하였다. 로봇은 4m × 4m 정사각형 경로를 open-loop 제어로 주행하였다. 비시스템적 오차의 영향을 줄이기 위하여 로봇은 약 0.2m/s로 시험경로를 주행하였다.

Table 2에는 보정 전 주행시험에서 확인한 로봇의 최종 위치 및 방향각오차를 나타내었다. 보정 전 최종 위치 및 방향각오차로부터 오도메트리 오차 보정을 위한 기구학적 파라미터를 기존 기법과 제안하는 기법으로 각각 산출하였다.

Table 3은 보정 전 최종 위치 및 방향각오차로

Table 2 Pose errors before calibration

Pose errors	x	y	θ
CW direction	1.67m	0.69m	-41.8°
CCW direction	-0.99m	2.66m	-53.9°

Table 3 Resultant kinematic parameters

Calibration method	E <sub>b</sub>	E <sub>d</sub>
UMBmark	1.0262	0.9821
Proposed method	1.0065	0.9798

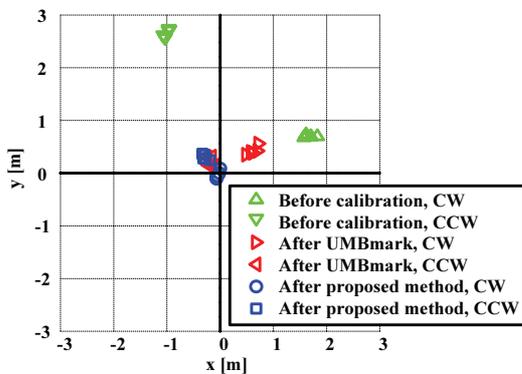


Fig. 8 Comparison of the final position errors for 4m × 4m test track

Table 4 Results of odometry calibration

	Average Position error	Improvement
Before calibration	2.32m	-
UMBmark	0.53m	4.38 folds
Proposed method	0.23m	10.1 folds (2.30 folds)

부터 산출한 기구학적 파라미터를 나타낸다.

Fig. 8과 Table 4에는 각 보정기법을 이용하여 로봇의 오도메트리를 보정 한 후, 동일한 4m × 4m 정사각형 경로를 주행한 결과를 나타내었다. 보정 전 로봇은 4m × 4m 정사각형 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행 시 평균 2.32m의 위치오차를 보였다. 기존 기법을 이용하여 로봇의 오도메트리를 보정 한 후에는 4m × 4m 정사각형 경로를 시계 및 반시계방향으로 주행 시 평균 0.53m의 위치오차를 보여 보정 전에 비해 4.38배 정밀해진 것으로 확인되었다. 제안하는 기법을 이용하여 로봇의 오도메트리를 보정한 후에는 평균 위치오차가 0.23m로 보정 전에 비해 10.1배 오도메트리 정밀도가 향상되었으며, 기존 기법을 이용하여 오도메트리를 보정한 경우와 비교하여도 2.30배 오도메트리 정밀도가 향상된 것을 확인하였다. 이로부터 제안하는 기법을 이용하여 오도메트리 정밀도 향상이 가능하며, 기존 기법과 비교하여도 보정성능이 우수함을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 주행시험 후의 최종 방향각오차를 이용하여 이륜차동구동형로봇에 적용 가능한 새로운 오도메트리 보정기법을 제안하였다. 기존 기법에서 최종 위치오차를 이용한 것과 달리 최종 방향각오차를 이용함으로써 기구학적 파라미터 산출과정에서 근사식을 사용하지 않게 되었다. 그로 인해 근사오차의 영향을 제거할 수 있었다. 또한 오차원인간의 복합적 영향을 고려하여 로봇의 기구학적 파라미터를 정밀하게 산출하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제안된 기법을 이용하여 오도메트리 오차를 정밀하게 보정할 수 있음을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 “융복합형 로봇전문인력 양성사업” (NIPA-2013-H1502-13-1001)의 지원과 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2013-029812).

### REFERENCES

1. Noh, C., Kim, M., and Lee, M., “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, No. 1, pp. 43-50, 2013.
2. Choi, S., Kim, Y., Hwang, Y., Kim, H., and Lee, J., “EKF Based Outdoor Positioning System using Multiple GPS Receivers,” *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 8, No. 2, pp. 129-135, 2013.
  3. Borenstein, J., Everett, H., and Feng, L., “Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning,” *The Univ. of Michigan*, 1996.
  4. Borenstein, J. and Feng, L., “Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, pp. 869-880, 1996.
  5. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., and Scaramuzza, D., “Introduction to Autonomous Mobile Robots,” *The MIT Press*, 2nd ed., pp. 265-367, 2011.
  6. Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D., “Probabilistic robotics,” *The MIT press*, pp. 39-147, 2005.
  7. Borenstein, J. and Feng, L., “Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 423-428, 1996.
  8. Komoriya, K. and Oyama, E., “Position Estimation of a Mobile Robot using Optical Fiber Gyroscope (OFG),” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 143-149, 1994.
  9. Antonelli, G., Chiaverini, S., and Fusco, G., “A Calibration Method for Odometry of Mobile Robots Based on the Least-Squares Technique: Theory and Experimental Validation,” *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, pp. 994-1004, 2005.
  10. Antonelli, G. and Chiaverini, S., “Linear Estimation of the Physical Odometric Parameters for Differential-drive Mobile Robots,” *Autonomous Robots*, Vol. 23, pp. 59-68, 2007.
  11. Bostani, A., Vakili, A., and Denidni, T. A., “A Novel Method to Measure and Correct the Odometry Errors in Mobile Robots,” *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 000897-000900, 2008.
  12. Ivanjko, E., Komsic, I., and Petrovic, I., “Simple Off-Line Odometry Calibration of Differential Drive Mobile Robots,” *Proc. of 16th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-RAAD*, 2007.
  13. Martinelli, A., Tomatis, N., and Siegwart, R., “Simultaneous Localization and Odometry Self Calibration for Mobile Robot,” *Autonomous Robots*, Vol. 22, No. 1, pp. 75-85, 2007.
  14. Roy, N. and Thrun, S., “Online Self-Calibration for Mobile Robots,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2292-2297, 1999.
  15. Lee, K., Jung, C., and Chung, W., “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.
  16. Dongbu Robot Co. Ltd., “Tetra-DS Operation Manual V1.0,” 2009.
  17. Hagisonic Co. Ltd., “StarGazer\_Guide.02.090416,” 2010.