

〈論 文〉

센서 데이터 융합을 이용한 이동 로봇의 자세 추정

이상룡* · 배준영**

(1992년 3월 3일 접수)

The Posture Estimation of Mobile Robots Using Sensor Data Fusion Algorithm

Sang-Ryong Lee and Joon-Young Bae

Key Words : Mobile Robot(이동 로봇), Gyro Sensor(자이로센서), Posture(자세), Fusion Algorithm(융합 알고리즘), Dead Reckoning(추측항법), Maximum Likelihood Estimation(최대우도추정), Redundant Sensor System(복수센서시스템)

Abstract

A redundant sensor system, which consists of two incremental encoders and a gyro sensor, has been proposed for the estimation of the posture of mobile robots. A hardware system was built for estimating the heading angle change of the mobile robot from outputs of the gyro sensor. The proposed hardware system of the gyro sensor produced an accurate estimate for the heading angle change of the robot. A sensor data fusion algorithm has been developed to find the optimal estimates of the heading angle change based on the stochastic measurement equations of our redundant sensor system. The maximum likelihood estimation method is applied to combine the noisy measurement data from both encoders and gyro sensor. The proposed fusion algorithm demonstrated a satisfactory performance, showing significantly reduced estimation error compared to the conventional method, in various navigation experiments.

1. 서 론

일반적으로 바퀴를 구동장치로 하는 이동 로봇의 자세(posture)는 지면의 작업장의 일정한 장소에 설정된 직각좌표계의 좌표값(X, Y)과 주행방향각(θ)의 3차 유도로 정의된다. 이동 로봇의 자세에 관한 연구는 작업자에 의해 지시된 위치를 정확하게 찾아가는 문제와 각종 측정센서에 의해 추정된 로봇의 자세와 로봇의 실제 자세와의 오차를 줄이는 문제로 분류할 수 있다. 첫번째 문제는 이동 로봇의 운동제어에 관련되는 내용으로 로봇의 동특성해석 및 최적제어기 설계방법의 개

발에 중점을 두고 있으며,^(1,2) 두번째 문제는 이동 로봇의 자세추정에 사용되는 측정센서들의 성능에 관련되는 내용으로 적절한 측정변수와 작은 측정오차를 가지는 센서의 개발, 측정방정식 및 측정오차의 해석방법의 개발에 중점을 두고 있다.^(3,4) 본 연구에서 다루는 내용은 두번째 문제인 이동 로봇의 자세추정오차를 주관심을 두고 있다.

이동 로봇의 자세를 측정하기 위하여 현재까지 개발된 각종센서들은 측정변수들의 특성에 따라 일정시간동안 주행하고 있는 로봇의 운동변화량을 측정하여 추측항법(dead reckoning) 방법을 적용하여 로봇의 자세를 추정하는 종류와 작업장내에 설치된 기준표식들에 대한 로봇의 운동상태를 포착하여 로봇의 자세를 추정하는 종류로 분류할 수 있다.⁽⁵⁾ 엔코더,^(6,7) 자이로센서⁽⁸⁾ 등이 전자에

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**경북대학교 기계공학과 대학원

속하는 센서들이며, 이동 로봇의 운동변화를 즉각 감지할 수 있으며 추측항법에 의한 위치추정 알고리즘이 단순하여 실시간적용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 측정과정에서 발생한 오차들이 위치추정값에 연속적으로 누적되므로 원거리 주행시의 위치추정에 무리가 따른다. 시각센서,^(9,10) 광학센서,^(11,12) 초음파센서^(13,14) 등은 후자에 속하는 센서들이며, 적절한 운용환경하에서는 이동 로봇의 자세에 대한 정보를 정확하게 얻을 수 있으나 기준표식들이 반드시 사용센서들의 측정가능영역내에 놓여있어야 위치추정이 가능하므로 로봇의 작업영역이 광범위한 장소에는 기준표식의 설치에 많은 어려움이 따른다는 점이 실용화를 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

최근에는 위에서 언급한 두 종류의 센서들을 함께 사용하여 각 센서들간의 단점을 상호보완할 수 있는 복수센서 시스템(redundant sensor system)이 제안되고 있다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 그러나 이러한 복수센서 시스템도 주행중인 로봇의 완벽한 실시간 자세추정에는 미흡하며 또한 사용센서들의 모순된 측정데이터들을 효율적으로 융합할 수 있는 알고리즘의 개발이 새로운 연구과제로 부각되고 있다.⁽¹⁸⁾

본 연구에서는 이동 로봇의 구동모터들의 회전수를 측정하는 두 개의 엔코더와 로봇의 회전각속도를 측정하는 자이로센서를 결합하여 주행중인 로봇의 자세를 정확하게 추정할 수 있는 복수센서 시스템의 신호처리회로 및 알고리즘을 개발하고 자이로센서의 측정방정식을 모델링하기 위하여 성능시험을 수행하였다. 그리고 확률이론을 유도된 측정방정식에 적용하여 본 복수센서 시스템의 출력신호들을 효율적으로 융합할 수 있는 센서데이터 융합알고리즘을 개발하여 사용된 측정센서들에 내재하는 측정오차의 영향을 최소화 줄이고자 하였다. 제안된 융합알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 주행실험을 수행하여 이동 로봇의 실제자세와 본 융합알고리즘의 결과를 비교하였다.

2. 이동 로봇의 구조

본 연구에서 사용된 이동로봇의 구조는 로봇의 뒷편에 2개의 바퀴가 설치되어 있으며 앞쪽에는 1개의 캐스터가 설치되어 있다. 로봇의 각 후륜의 회전축은 50 : 1의 감속비를 가지는 기어박스를 통하여 직류 서보모터의 회전축과 연결되어 있다.

각 후륜의 회전속도는 독립적인 두 개의 구동회로로부터 각 서보모터로 공급되는 PWM 신호의 평균전압의 크기에 의해 제어하고 있으며, 각 바퀴의 회전속도비에 의해 이동로봇의 주행운동의 형태-직선운동, 곡선운동, 회전운동등을 결정하게 된다. Fig. 1은 본 이동로봇의 구조를 보여주고 있다.

두 개의 후륜에 연결된 직류 서보모터의 회전축에는 각각 증분식 엔코더를 설치하여 후륜의 회전각을 측정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 증분식 엔코더는 동심원상으로 16개의 구멍을 뚫은 알루미늄 원판과 광학센서를 사용하여 제작하였으며, 본 엔코더를 사용하면 후륜의 회전방향과 회전각을 검출할 수 있으며 후륜의 회전각은 0.1125°의 분해능을 가지고 측정할 수 있다. 그리고 이동로봇의 본체 중앙부에 자이로센서를 설치하여 주행중인 이동로봇의 회전각속도를 측정하였으며 본 자이로 센서는 0.02°/sec의 분해능을 가지고 로봇의 회전속도를 측정할 수 있다.

본 이동로봇의 운동을 제어하기 위한 제어장치

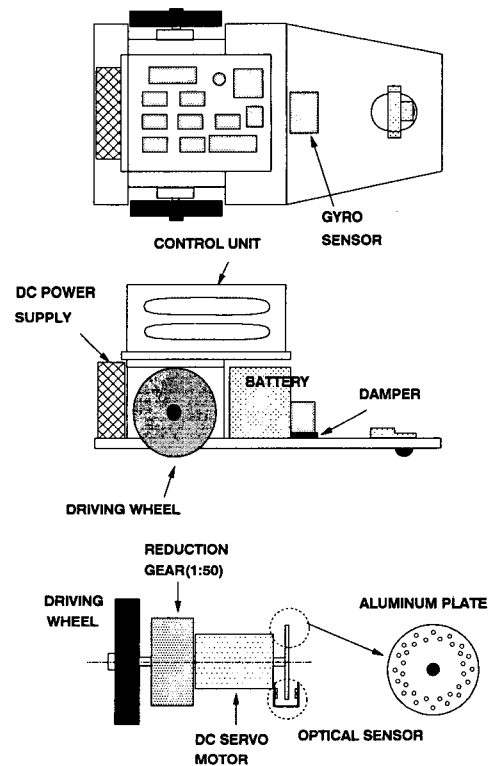


Fig. 1 Architecture of a mobile robot

는 엔코더와 자이로센서의 출력신호를 처리하기 위한 센서신호 처리부, 직류모터의 운동에 필요한 동력을 공급하기 위한 서보모터 구동 회로부, 직류 24 V의 축전기 전원으로부터 모터, 센서, 제어회로등의 구동에 필요한 전원(±5 V, ±12 V)을 공급하기 위한 전압 변환부, 이동로봇과 외부 컴퓨터간의 자료 전송 및 정보교환을 위한 데이터 전송부등의 모듈들과 프로그램에 의해 각 모듈들간의 신호전송을 제어하기 위한 중앙 처리부등으로 구성되어 있다. 중앙처리부는 MC 68000과 주변장치들로 구성되어 있다.

Fig. 2는 센서신호 처리부의 기능을 블록선도의 형태로 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 각 센서들의 신호 수집 및 처리는 Z80 CPU를 사용하여 수행하고 있다. Z80 CPU는 엔코더의 출력신호를 매 0.1초마다 받아들이며 자이로 센서의 신호의 경우에는 1228.8 Hz의 속도로 A/D 변환기를 통하여 받아들여 연속적으로 적분을 하여 매 0.1 초마다의 이동 로봇의 회전각도를 계산하고 있다. Z80 CPU에 의해 수집된 센서들의 신호는 매 0.1 초마다 중앙 처리부의 68000 MPU에 전송하게 된다.

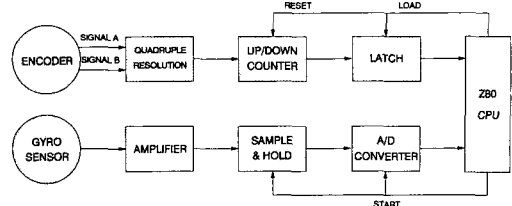


Fig. 2 Block diagram of the sensor signal processing circuit

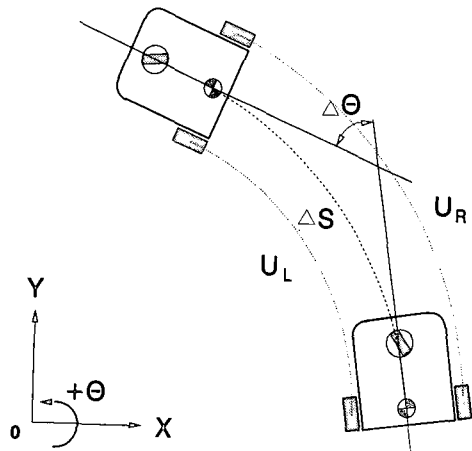


Fig. 3 Relationship of the trajectory moved by each rear wheel and the posture change of the mobile robot

2.1 엔코더의 측정변수

이동로봇의 후륜에 연결된 증분식 엔코더의 출력은 단위 샘플링시간당 광학센서에 의해 감지된 구멍이 수로 표시되므로 좌측과 우측후륜에 의해 측정된 엔코더의 신호를 각각 N_L 과 N_R 로 표시하면 이동 로봇의 좌측과 우측후륜이 이동한 거리 U_L 과 U_R 은 식(1)로 표시된다.

$$U_R = \frac{2\pi \cdot R_R \cdot N_R}{N_e \cdot G}$$

$$U_L = \frac{2\pi \cdot R_L \cdot N_L}{N_e \cdot G} \quad (1)$$

식(1)에서 상수 G 는 서보모터와 후륜사이에 설치된 기어박스의 감속비(=50)이며, 상수 N_e 는 엔코더의 분해능과 엔코더 출력신호의 처리부의 성능을 고려한 상수(=64)이다. 그리고 변수 R_R 과 R_L 은 각각 우측 및 좌측후륜의 반지름을 표시하며 본 로봇의 경우에는 각각 5.965 cm와 5.950 cm로 정해졌다.

Fig. 3은 이동로봇의 각 후륜의 궤적(U_L 및 U_R)과 이동 로봇의 자세변화량과의 관계를 표시

하고 있다. Fig. 3에서 $\Delta\theta$ 는 이동 로봇의 주행 방향각의 변화량을 표시하며, ΔS 는 이동 로봇의 기준점의 이동궤적을 표시한다. Fig. 3에서 이동 로봇의 주행방향각 변화량이 작다면 각 변수들간의 관계식은 식 (2)와 같이 표시될 수 있다.

$$\Delta\theta = \frac{U_R - U_L}{TREAD}$$

$$\Delta S = \frac{U_R + U_L}{2} \quad (2)$$

식 (2)에 표시된 변수 TREAD는 두 후륜사이의 거리를 표시하는 상수이며 본 로봇의 경우에는 32.40 cm이다.

2.2 자이로 센서의 측정변수

자이로 센서는 이동 로봇의 회전각속도에 대응하는 신호를 출력하고 있으므로 본 연구에서 필요한 주행방향각의 변화량에 대한 정보를 얻기 위하여서는 식 (3)과 같이 자이로 센서의 출력신호 ω

(t)를 연속적으로 적분하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 적분을 수행하지 않고 수치해석 방법을 동원하여 식 (3)과 같이 특정 샘플링시간동안의 주행방향각의 변화량을 계산하였다. 여기서 N 은 이동로봇의 단위 샘플링시간($T=0.1$ 초) 동안에 Z80 CPU가 읽어들이는 자이로 센서의 샘플링 수(=122개)이며 ω_i 는 각 샘플링 주파수(=1228.8 Hz)에서 관측된 자이로 센서의 출력신호값을 표시한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \int_{(k-1)T}^{kT} K_C \cdot \omega(t) dt = K_C \cdot \int_{(k-1)T}^{kT} \omega(t) dt \quad (3) \\ &= K_C T \sum_{i=1}^N \omega_i = K_C \Phi \end{aligned}$$

식 (3)에 표시된 계수 K_C 는 자이로 센서의 변환상수(단위: $^{\circ}/\text{digit}$)이며 일반적으로 제조회사에서 제공하는 값을 사용할 수 있다.

3. 센서 데이터 융합 알고리즘

일반적으로 이동 로봇의 구동 후륜에 연결되어 있는 두 개의 증분식 엔코더의 출력으로부터 식 (2)과 같이 단위 샘플링 시간동안 로봇이 이동한 거리 ΔS 와 주행 방향각의 변화량 $\Delta\theta$ 를 계산하여 로봇의 자세를 추정할 수 있다. 그러나 엔코더만을 사용하여 이동 로봇의 운동량을 측정하는 방법은 바퀴의 미끄러짐, 구동륜의 마모등의 영향에 의해 이동 로봇의 위치 추정시 많은 오차를 유발시킨다고 알려져 있다. 그러므로 이동 로봇의 위치를 정확히 평가하기 위하여서는 엔코더 시스템을 보완할 수 있는 여분의 센서시스템을 도입하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 사용하고 있는 자야로 센서는 로봇의 주행방향각 변화량에 대한 추정정밀도를 높이기 위하여 도입되었다. 엔코더 시스템 및 자이로 센서의 측정변수들에 대하여 식 (1)에서 식 (3)을 정리하면 다음과 같은 식 (4)가 유도된다.

$$\begin{aligned} N_R &= \frac{N_E G}{2\pi R_R} \left(\Delta S + \frac{\text{TREAD}}{2} \Delta\theta \right) + V_1 \\ N_L &= \frac{N_E G}{2\pi R_L} \left(\Delta S - \frac{\text{TREAD}}{2} \Delta\theta \right) + V_2 \quad (4) \\ \Phi &= \Delta\theta / K_C + V_3 \end{aligned}$$

측정벡터 $Z = [N_R \ N_L \ \Phi]^T$, 시스템변수 벡터 $U = [\Delta S \ \Delta\theta]^T$, 측정오차 벡터 $V = [V_1 \ V_2 \ V_3]^T$ 로

정의하여 식 (4)을 행렬-벡터방정식의 형태로 정리하면 식 (5)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} Z &= HU + V \quad (5) \\ H &= \begin{bmatrix} \frac{N_E G}{2\pi R_R} & \frac{N_E G \text{TREAD}}{4\pi R_R} \\ \frac{N_E G}{2\pi R_L} & -\frac{N_E G \text{TREAD}}{4\pi R_L} \\ 0 & 1/K_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (4)과 (5)에서 보는 바와 같이 엔코더 및 자야로 센서의 측정시에 발생하는 오차성분들을 각각 $V_i (i=1, 2, 3)$ 로 고려하여 센서의 측정방정식을 모델링하였다. 이들 오차성분들의 발생기구들은 여러 가지 요인들이 복합적으로 결합되어 나타난 결과이므로 정량적으로 표시하기가 상당히 어려우나 본 연구에서는 본 오차성분들의 확률적 분포가 일반적인 물리현상에 많이 적용되고 있는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 측정오차 벡터의 확률밀도함수(PDF)의 형태는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$f_V(v) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p |R|}} e^{-0.5v^T R^{-1}v} \quad (6)$$

식 (6)에 표시된 R 행렬은 측정오차 변수들의 공분산행렬(covariance matrix)을 표시한다. 식 (5)에서 보는 바와 같이 본 센서시스템은 두 개의 시스템변수들($\Delta S, \Delta\theta$)을 추정하는데 세 개의 측정변수들(N_R, N_L, Φ)을 사용하는 복수센서시스템을 구성하고 있다. 복수센서시스템에서 시스템변수를 추정하기 위한 많은 방법들이 제안되고 있으나 특정 방법을 선택하기 위하여서는 복수센서시스템의 변수들의 특성을 고려하여야 한다. 본 시스템의 경우에는 시스템변수들은 확정변수(deterministic variables)들로 그리고 측정변수들은 추정변수들(stochastic variables)로 간주할 수 있으므로 최대우도추정(maximum likelihood estimation) 방법을 적용한다.

측정변수 벡터 Z 가 주어졌을때 우도함수 $f_{Z|U}(z/u)$ 를 극대화시킬 수 있는 시스템변수 벡터 U 의 값, 즉 최대우도 추정치 U_{ML} 은 식 (7)와 같이 얻을 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$U_{ML} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z \quad (7)$$

식 (7)을 사용하여 계산된 ΔS 과 $\Delta\theta$ 에 대한 최대우도 추정치에 포함된 추정오차에 대한 오차 공

분산행렬은 식 (8)와 같이 계산된다.

$$P_{ML} = (H^T R^{-1} H)^{-1} \quad (8)$$

행렬 P_{ML} 의 첫번째 대각선 요소 P_{11} 는 ΔS 에 대한 추정값에 대한 신뢰구간을 두번째 대각선요소 P_{22} 는 $\Delta\theta$ 에 대한 최대우도 추정값의 신뢰구간을 표시한다.

식 (7)와 (8)에서 보는 바와같이 최대우도추정방법을 사용하여 이동로봇의 이동거리 및 주행방향각의 변화량에 대한 추정치를 구하기 위하여서는 각 센서들의 측정오차에 대한 공분산행렬 R 의 각 요소들의 값들을 알아야 한다. 본 연구에서 사용되고 있는 엔코더들과 자이로센서의 측정변수들은 서로 독립적이므로 행렬 R 은 대각선행렬로 간주한다. 행렬 R 의 첫번째 대각선요소는 우측 구동모터에 연결된 엔코더의 측정오차, 두번째 대각선 요소는 좌측 구동 모터에 연결된 엔코더의 측정오차, 세번째 대각선요소는 자이로센서의 측정오차의 특성으로부터 결정되며 일반적으로 실험을 통해 시행착오방법으로 결정한다. 그리고, 행렬 R 의 대각선요소들이 결정되면 식 (7)에 표시된 $(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$ 의 값과 식(8)의 P_{ML} 의 값은 미리 계산된다. 그러면 이동 로봇에 탑재된 프로그램 상에서는 한번의 행렬곱 연산만을 수행하므로 위에 열거된 복잡한 행렬연산과정을 생략하고 최대우도 추정치 U_{ML} 을 쉽게 계산할 수 있으므로 실시간 처리를 가능케한다는 장점이 있다.

본 연구에서는 이동 로봇의 자세를 표시하기 위하여 작업장의 일정점에 설정된 월드 좌표계를 사용하고 있다. 이동 로봇의 자세는 이 월드 좌표계의 원점을 기준으로 로봇의 기준점(두 구동후륜사이의 중심점)의 위치값(X 및 Y 좌표값)과 로봇이 진행하고 있는 방향각을 월드 좌표계의 양의 X -축을 기준으로 반시계 방향으로 측정한 주행 방향각으로 정의된다. 또한, 이동 로봇의 운동을 기술하기 위하여 이동 로봇의 기준점에 로봇 좌표계를 설정하였다. 이때, 양의 X 축은 로봇의 주행방향을 따라 설정하고, 양의 Y 축은 로봇의 왼쪽 구동륜의 회전 중심축을 따라 설정하였다. Fig. 4은 본연구에서 사용하고 있는 좌표계 시스템들과 단위 샘플링 시간동안 변화된 이동 로봇의 위치를 보여주고 있다.

일반적으로 단위 샘플링 시간동안의 이동 로봇의 자세변화량은 로봇의 크기에 비해 작으므로

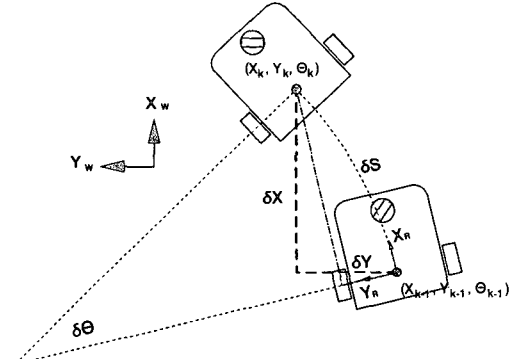


Fig. 4 Kinematic relationship of robot posture change

Fig. 4에 표시된 원호 모양의 로봇의 이동궤적을 직선으로 근사화 하여 식 (9)과 같이 이동 로봇의 자세를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_k &= X_{k-1} + \Delta S_k \cos(\theta_{k-1} + \Delta\theta_k/2) \\ Y_k &= Y_{k-1} + \Delta S_k \sin(\theta_{k-1} + \Delta\theta_k/2) \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \Delta\theta_k \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, X_k, Y_k, θ_k 는 각각 k -번째 샘플링시간에서 계산된 이동 로봇의 좌표값 및 주행 방향각을 표시한다. 그리고, ΔS_k 와 $\Delta\theta_k$ 는 해당 샘플링시간 구간에서 식 (7)를 사용하여 계산된 벡터 U_{ML} 의 성분이며 편의상 하부첨자 “ ML ”은 생략하였다.

4. 자이로 센서의 특성 실험

이동 로봇의 주행방향각의 변화를 측정하기 위하여 사용된 자이로 센서는 일본 송하전기회사에서 개발된 壓電效果를 이용한 雙音叉振動型的 각속도 측정센서이며 기존의 자이로센서들에 비해 크기가 소형, 경량이고 소모전력이 낮다고 알려져 있다. 본 센서를 실제 이동 로봇의 본체에 설치하여 응용하기 위하여 본 센서의 정적 및 동적 특성을 조사하였다.

본 자이로센서의 출력신호는 회전체의 각속도에 비례하는 전압의 형태로 나타난다. 그러므로 출력신호를 마이크로프로세서를 사용하여 처리하고자 할 때에는 A/D 변환기를 사용하여 아날로그형태의 출력신호를 디지털신호로 변환할 필요성이 대두된다. 일반적으로 아날로그신호를 디지털신호로 변환할 때에는 아날로그신호를 일정한 속도 이상으로 변환을 해 주어야 측정량에 대한 정확한 정보를 추

Table 1 Effects of sampling frequency on the gyro sensor performance

True Rotation Angle	Gyro measurement (sampling frequency)			
	50 Hz	100 Hz	500 Hz	1000 Hz
10.90°	11.02°	11.01°	10.94°	10.94°
17.75°	17.61°	17.62°	17.64°	17.64°
26.98°	27.16°	27.15°	27.09°	27.09°
34.28°	34.28°	34.30°	34.27°	34.28°
46.93°	47.28°	47.19°	47.19°	47.18°
58.71°	58.45°	58.57°	58.58°	58.58°
60.91°	60.76°	60.89°	60.93°	60.92°
67.50°	67.28°	67.24°	67.29°	67.29°
82.00°	82.44°	82.00°	82.01°	82.00°
90.62°	90.49°	90.56°	90.56°	90.58°

출할 수 있다. Table 1은 여러가지의 변환속도를 사용하여 자이로센서의 출력신호를 샘플링하였을 때의 결과를 보여주고 있다. Table 1의 첫번째 열에 표시된 값들은 회전체의 실제 회전각을 표시하고 있으며 이 값들은 4096 펄스의 분해능을 가지는 증분식 엔코더(0.088°의 각도정밀도)를 사용하여 측정된 결과이며, 다른 열들에 나타난 수치들은 첫번째 행에 표시된 변환주파수로 자이로센서의 출력신호를 검출하여 측정된 회전체의 회전각을 표시한다. Table 1에서 보는바와 같이 500 Hz 이상의 변환속도를 사용하여 자이로센서의 출력신호를 검출하면 상당히 정확한 값들을 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있다. 본 연구에서는 자이로 센서의 출력신호 처리를 위하여 사용된 하드웨어의 특성을 고려하여 1228.8 Hz의 변환주파수를 사용하였다.

본 자이로 센서는 회전운동을 받으면 회전속도에 비례하는 크기의 전압을 출력하게 된다. 그러므로 역으로 출력전압의 크기로부터 자이로 센서가 설치된 물체의 회전속도를 측정할 수 있다. Fig. 5는 정지상태의 물체에 설치된 자이로센서의 출력전압을 측정된 결과를 보여주고 있다. Fig. 5에서 보는 바와같이 본 자이로센서는 회전운동을 경험하지 않더라도 일정한 전압(offset 값)을 출력하며 또한 어느 정도 시간이 경과하면 출력전압의 값이 일정한 폭을 가지고 진동(脈動)을 하는 경향을 가진다는 사실을 알 수 있다. 그리고 본 자이로센서의 오프셋값과 脈動의 폭이 항상 일정한 값을 유지하지 않고 실험을 수행할 때마다 다르게 나온다는 사실이

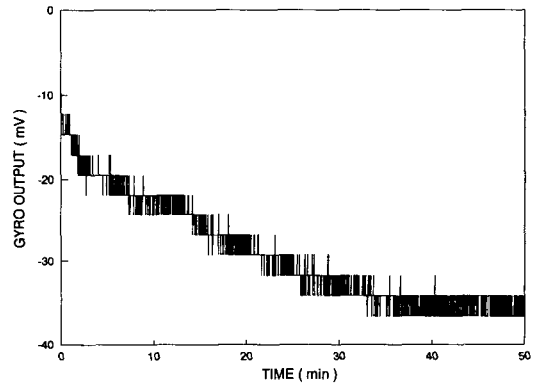


Fig. 5 Fluctuation of the gyro output installed on the fixed object

관측되어 전기적 회로의 설계에 의존하여 자이로센서의 출력으로부터 이러한 오프셋과 맥동을 제거하는 방법을 사용할 수 없었다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 6와 같은 알고리즘을 사용하여 본 자이로의 출력전압값으로부터 회전속도를 정확하게 예측하는 방법을 사용하였다.

즉 자이로 센서에 전원을 공급하고 출력전압의 값이 어느정도 안정화되기를 기다린 후 이동 로봇이 완전히 정지하고 있는 상태에서 2초동안 1228.8 Hz의 변환속도로 출력전압을 측정하여 이 값들의 평균값을 계산하여 오프셋값을 결정하였다. 이동 로봇의 주행방향각을 계산할때는 측정된 자이로의 전압값에서 앞서 계산한 오프셋값을 빼주어 오프셋값에 대한 영향을 배제하였다. 실험을 통하

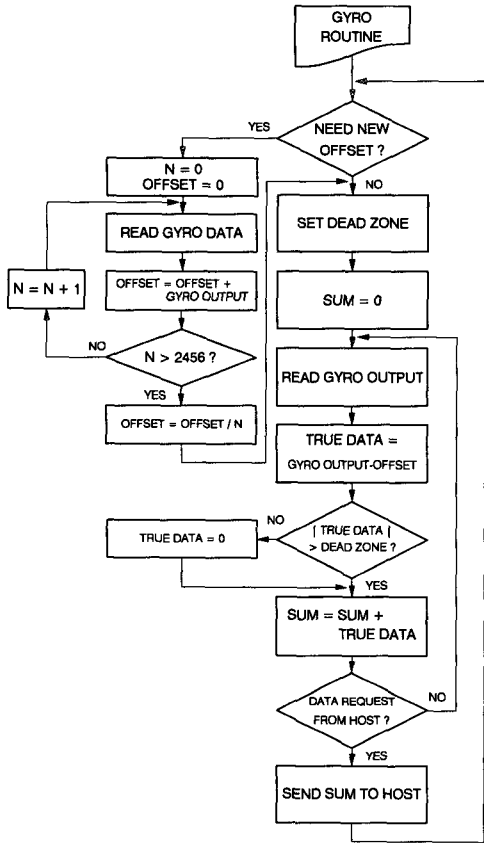


Fig. 6 Processing algorithm of the gyro sensor signal

여 맥동의 변동폭이 대략 10 mV 이내로 관측되었으며 이러한 출력전압의 변동폭은 자이로 센서를 짧은 시간동안만 사용하는 경우에는 회전각의 계산에 큰 영향을 주지 않으나 이동 로봇의 주행 방향각 측정과 같이 장시간에 걸쳐 사용하여야 하는 경우에는 누적되는 오차의 영향이 크게 나타난다. 그러므로 맥동의 영향을 제거하기 위하여 일정한 폭의 dead zone을 설정하여 실제 자이로센서의 출력전압에서 오프셋을 뺀 전압의 크기가 설정된 dead zone보다 작으면 본 신호를 무시하고 큰 경우에만 주행방향각의 변화를 표시하는 출력신호로 간주하는 방법을 도입하였다.

Fig. 7은 Fig. 6에 표시된 알고리즘을 사용하여 자이로 센서의 출력신호를 처리하여 회전각을 계산한 결과이다. Fig. 7에서 보는바와 같이 자이로센서가 설치된 물체의 실제 회전각은 -94.39° 로 0.088°의 정밀도를 가지는 엔코더를 사용하여 측정하였다. 곡선 (A), (B), (C)는 자이로센서의 출력

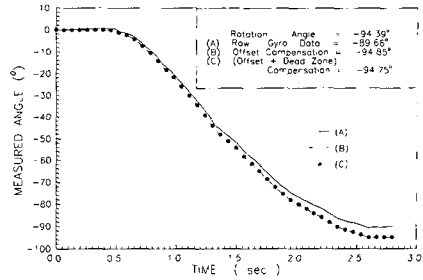


Fig. 7 Measurement of rotation angle using the gyro sensor

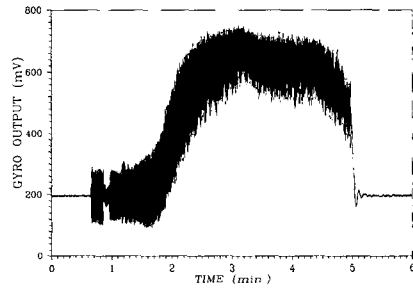


Fig. 8 The gyro output contaminated by the external vibration

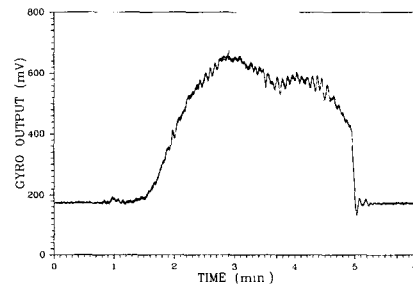


Fig. 9 The gyro output when the external vibration is absorbed by the damper

전압으로부터 회전각을 측정한 결과를 표시하고 있다. 곡선 (A)는 오프셋과 맥동의 영향을 고려하지 않고 계산한 결과이며, 곡선 (B)는 오프셋만을 고려하여 계산한 결과이며, 곡선 (C)는 오프셋과 맥동의 변동폭을 고려하여 회전각을 계산한 결과이다. 곡선 (A)의 경우에는 최종회전각이 -89.66° 로 관측되었으며, 곡선 (B)와 (C)의 경우에는 자이로센서의 사용시간이 짧아 두 곡선들간의 차이가 두드러지지 않으나 최종회전각은 각각 -94.85° 및 -94.75° 로 관측되었다. 본 실험결과에서 보는 바

와같이 본 연구에서 제안된 자이로 센서의 신호 처리 알고리즘이 타당하다는 사실을 알 수 있다.

이동 로봇의 구동모터 및 기어박스등의 동력전달장치에서 발생하는 진동과 로봇의 바퀴와 지면과의 상호간섭에 의해 가진되는 진동등은 자이로 센서의 오동작을 유도하는 요인이 된다. Fig. 8은 회전운동을 수행하고 있는 이동로봇의 본체에 설치된 자이로센서의 출력파형을 도시한 그림이다. 여기에서 보는바와 같이 자이로센서의 회전운동을 반영하는 출력과 로봇의 구동장치등에 의한 진동에 의한 오신호가 동시에 복합적으로 나타나서 정확한 회전각을 검출할 수 없게 된다. 이러한 외부 진동의 영향을 줄이기 위하여 미국 쓰리엠 회사에서 시판하는 점탄성 고분자(viscoelastic polymer) 소재를 사용하여 자이로센서와 이동 로봇의 본체 사이에 완충장치를 설치하였다. Fig. 9는 완충장치를 설치한 후에 관측된 자이로센서의 출력파형을 보여주고 있다. 여기서 보는바와 같이 이동로봇의 동력전달장치 및 구동바퀴에서 유발되고 있는 진동이 본 완충장치에 의해 상당히 제거되어 자이로의 출력파형이 상당히 안정화되었다는 사실을 관측할 수 있다.

자이로센서를 이동 로봇의 본체에 탑재하여 자이로의 변환계수 K_C 의 값을 실험적으로 구한 결과 회전방향에 따라 서로 다른 값들이 관측되었다. 즉 자이로센서의 회전축을 중심으로 시계방향으로 회전할 때에는 K_C 의 값이 $7514.28^\circ/\text{digit}$, 반시계방향의 회전 운동시에는 $7452.64^\circ/\text{digit}$ 가 되었다.

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 센서데이터 융합알고리즘을 이동 로봇의 제어기에 탑재하여 주행시험을 실시하였다. 이동 로봇의 주행시험은 회전운동 (spin motion), 직진운동, 주행운동의 세 유형에 대하여 실시하여 자이로센서와 엔코더의 출력을 제안된 방법으로 융합하여 이동 로봇의 위치 및 주

행방향각를 계산하여 엔코더의 출력값만을 사용하는 기존의 추측항법의 결과와 비교하였다.

제3장에서 제안된 센서 데이터 융합 방법을 사용하기 위하여서는 식 (7)과 (8)에서 보는 바와 같이 측정 센서들의 신뢰도를 표시하는 공분산(covariance)값에 대한 정량화가 필요한데 본 연구에서는 Table 2에 수록된 값들을 사용하였다. 자이로센서의 경우에는 변환계수의 값과 마찬가지로 회전운동의 방향에 따라 다른 측정오차 공분산값들이 사용되었다.

그리고 이동 로봇의 실제자세에 대한 측정은 삼각측량법을 사용하였다. Fig. 10과 같은 이동 로봇의 본체에 4개의 기준점을 설정하여 출발점과 종착점에서의 각 기준점들의 위치를 지면에 표시하여 각 기준점들이 두 점사이에서 이동한 거리(그림 10에 표시된 S_1, S_2, S_3 , 및 S_4 등)를 측정하였다. 그리고 각 기준점을 연결하는 삼각형(Fig. 10에 표시된 $\triangle ABC$ 와 $\triangle ABD$ 등)을 그려 꼭지점에서의 각도를 삼각법을 적용하여 계산한다. 각 기준점들과 이동 로봇의 중심점사이의 상대위치는 정의되어 있으므로 좌표변환공식을 사용하여 출발점에 대한 이동 로봇의 정지자세를 계산할 수 있다. 본 연

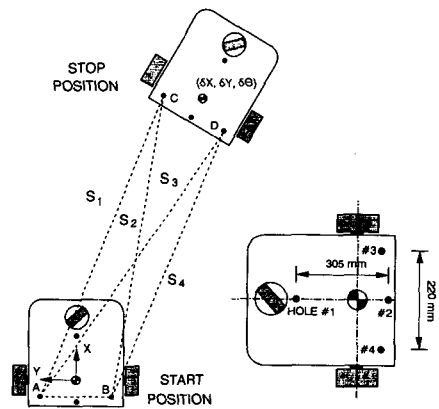


Fig. 10 Triangulation method used for the posture measurement of mobile robots

Table 2 Error covariance of sensor noise

SENSOR TYPE	LEFT ENCODER	RIGHT ENCODER	GYRO SENSOR	
			CW	CCW
COVARIANCE	1.333	1.333	24800	20100

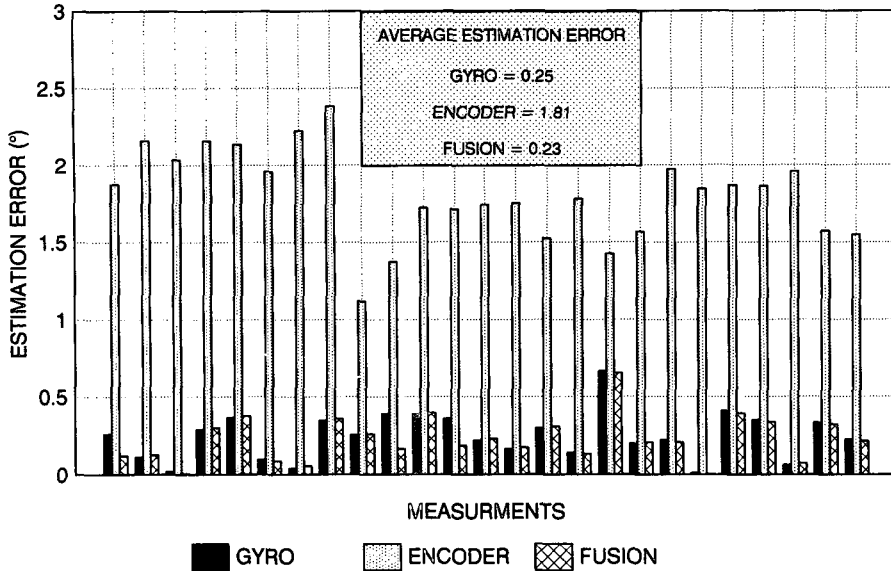


Fig. 11 Estimation error of heading angle for the left spin motion

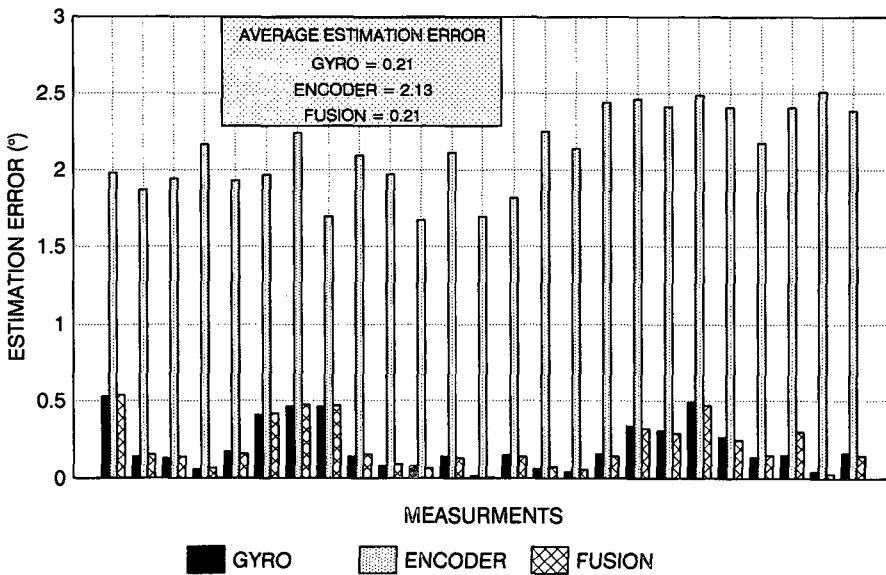


Fig. 12 Estimation error of heading angle for the right spin motion

구에서 사용하는 기준점은 4개이므로 위의 방법을 사용하면 이동 로봇의 정지자세에 대한 정보를 모두 8번 얻을 수 있으므로 이들값들의 평균값을 이동 로봇의 정지자세(δX , δY , $\delta \theta$)로 간주하였다. 본 방법을 사용하여 계산된 로봇의 정지자세는 X축과 Y축 방향으로 ± 1 cm, 주행방향각은 $\pm 0.1^\circ$ 의 정밀도를 가진다.

이동 로봇이 회전운동의 명령을 수행한 뒤의 주행방향각의 변화량은 자이로센서의 출력신호, 엔코더들의 출력신호 그리고 두 센서들의 출력신호를 융합한 센서데이터 융합알고리즘의 세가지 방법으로 추정할 수 있다. 이때 이동 로봇의 실제 방향각 변화량은 전술한 삼각측량법을 사용하여 계산된 결과로 정의하여 위의 세가지 방법들의 추정오차를

계산하였다. Fig. 11은 이동 로봇트가 “반시계방향으로 90° 회전운동”의 명령을 수행한 뒤의 실험결과를 보여주고 있으며, Fig. 12는 “시계방향으로 90° 회전운동”의 명령을 수행한 뒤의 실험결과를 보여주고 있다. 본 실험결과에는 회전운동의 경우 이동 로봇트의 구동바퀴들에 유발된 미끄럼의 영향때문에 엔코더의 출력신호는 로봇트의 실제 회전운동을 충분히 반영할 수 없다는 사실을 보여주고 있다. 그리고 자이로센서를 도입한 본 센서시스템의 유용성은 엔코더를 사용한 경우에 비해 주행방향각에 대한 추정오차값이 현저히 감소되었다는 사실로부터 명백히 알 수 있다. 이동 로봇트가 회전운동을 할 경우에는 자이로센서와 본 융합알고리즘에 의한 주행방향각의 추정오차는 거의 비슷한 수준을 유지하고 있다는 사실을 관측할 수 있다.

직진주행시험은 10 meter 정도의 직선경로를 따라 움직인 이동 로봇트의 정지자세를 삼각측량법을 이용하여 측정하여 엔코더와 자이로센서로부터 출력된 신호들을 융합한 결과와 비교하였다. 또한 본 융합알고리즘의 우수성을 검증하기 위하여 이동 로봇트의 정지자세를 엔코더 데이터만을 사용하여 계산한 결과와 비교하였다. Fig. 13은 직진주행시험을 20회 반복시행하여 얻은 결과를 추정오차의 함으로 표시하고 있다. 추정오차는 정지자세에 대한 실측치와 두 방법에 의해 계산된 로봇트의 정지자세의 추정치들을 뺀 값으로 정의된다. Table 3은 Fig. 13에 표시된 추정오차들의 평균값과 표준편차를 보여주고 있다. 본 실험결과에서 보는바와 같이 제안된 센서융합 알고리즘의 사용은 엔코더 출력값만을 사용하는 종래의 추측방법보다 이동 로봇트의 실제자세에 대한 추정을 더욱 정확하게 할 수 있다는 결과를 얻었다. 그리고 실험결과에서 X 축방향의 추정오차 보정정도가 Y 축방향이나 θ 축방향의

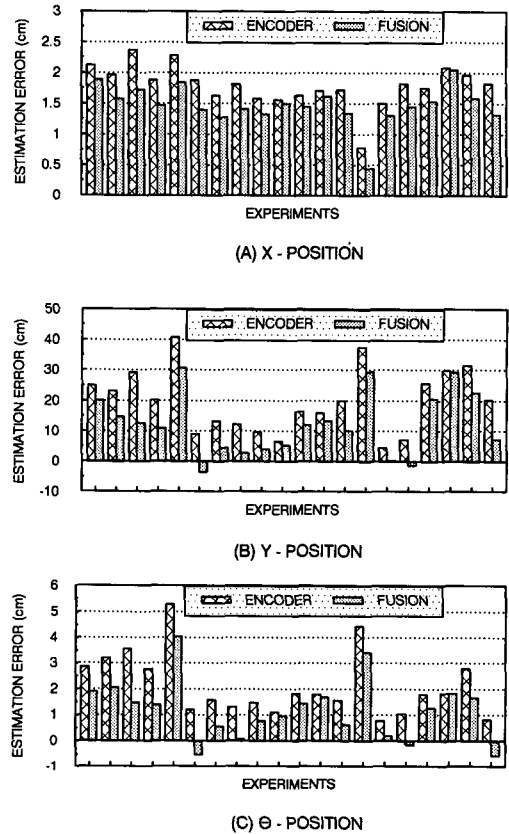


Fig. 13 Distributions of estimation error for straight motion

추정오차 보정정도보다 낮게 나타난 이유는 자이로센서의 출력이 로봇트의 주행방향각에 대한 정보만을 포함하며 로봇트의 이동거리에 대한 정보를 가지 못하기 때문이다.

이동 로봇트의 주행시험은 직진운동과 회전운동이 복합적으로 일어날 수 있도록 설계된 주행경로를 따라 『출발점 → 직진 → ①정지 → 90° 우회전 →

Table 3 Average and standard deviation of estimation error for straight motion

	ESTIMATION ERROR OF FUSION ALGORITHM			ESTIMATION ERROR OF DEAD RECKONING		
	X	Y	θ	X	Y	θ
AVERAGE	1.48	12.8	1.33	1.79	20.0	2.16
STANDARD DEVIATION	0.31	9.49	1.33	0.33	10.2	1.19

(UNIT : X-&-Y ERROR=cm, θ -ERROR=DEGREE)

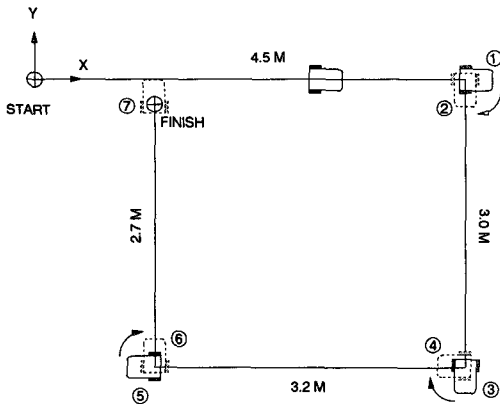


Fig. 14 Commanded trajectory of the mobile robot

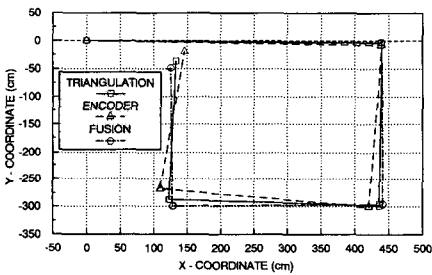


Fig. 15 Position estimation of the robot following predetermined guidepath

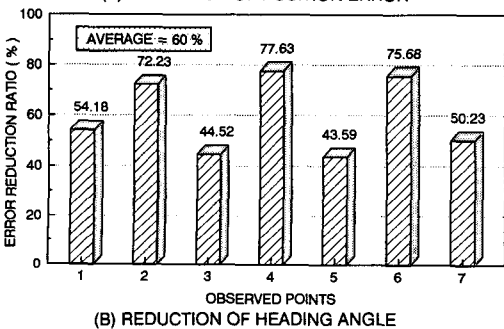
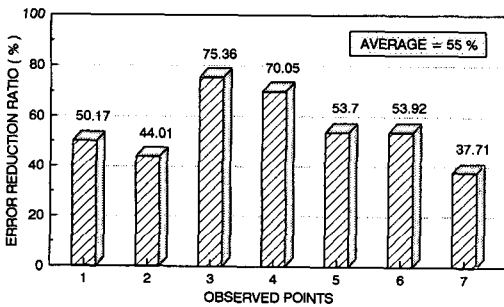


Fig. 16 Reduction Ratio of Estimation Errors Along the Guidepath

②정지 → 직진 → ③정지 → 90° 우회전 → ④정지 → 직진 → ⑤정지 → 90° 우회전 → ⑥정지 → 직진 → ⑦정지』의 운동을 실시하여 이동 로봇의 자세를 측정하였다. Fig. 14는 이동 로봇에 명령된 주행경로를 표시하고 있다. 이동 로봇의 자세는 출발점에 설정된 기준좌표계를 사용하여 Fig. 14에 표시된 정지상태의 이동 로봇의 자세를 삼각측량법, 융합알고리즘, 기존의 추측방법으로 계산하였다.

Fig. 15는 이동 로봇이 Fig. 14에 표시된 경로를 실제로 주행하였을때 각 정지 장소에서 실측된 로봇의 위치(기호 □), 융합알고리즘에 의해 추정된 로봇의 위치(기호 ○), 엔코더 출력값만을 사용하여 추측방법으로 추정된 로봇의 위치(기호 △)를 표시하고 있다. 그리고 그림에 표시된 기호들을 연결한 직선들은 이동 로봇의 이동체적을 표시하는 것이 아니고 두 정지위치들을 직선으로 보간한 것이다. 본 실험 결과는 상대위치 측정센서의 사용은 로봇의 이동거리가 길어질수록 오차가 누적된다는 사실과 본 융합알고리즘의 효용성을 명백하게 보여주고 있다.

Fig. 16은 위의 주행시험을 10회 반복시행하여 얻은 실험결과를 바탕으로 추정오차를 분석한 것으로 엔코더 출력값만을 사용하는 기존 추측방법의 자세추정 성능에 비해 향상된 본 융합알고리즘의 성능을 표시하고 있다. Fig. 16의 종축들은 본 융합알고리즘의 보상비(융합알고리즘에 의한 추정오차/추측방법에 의한 추정오차)를 표시하고 횡축은 추정오차를 산출한 정지점들의 장소(Fig. 14 참조)를 표시하고 있다. 그리고 그림 (A)는 위치추정오차들의 비를 표시하고 그림 (B)는 주행방향각의 추정오차비를 표시하고 있다. 본 그림의 결과에서 보는 바와같이 본 융합알고리즘은 엔코더 출력값만을 사용하여 이동 로봇의 자세를 추정하는 기존의 추측방법방법보다 약 55%~60% 정도 추정오차를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

6. 결 론

이동 로봇의 구동륜의 회전수를 측정하는 엔코더들과 로봇의 주행각속도를 측정하는 자이로센서를 조합한 센서시스템을 사용하여 로봇의 자세를 추정한 결과 상당히 정확한 정보를 얻을 수 있었다. 또한 자이로 센서의 출력신호로부터 이동 로봇의 주행방향각에 대한 정보를 얻기위하여 본

연구를 통해 설계된 회로 및 알고리즘의 방법을 제시하였으며 우수한 성능을 가진다는 사실을 실험을 통하여 보여주었다.

그리고 잡음이 포함된 각 센서의 출력신호를 융합하여 이동 로봇의 운동변화량을 추정하기 위하여 최대우도 추정방법을 제안하였으며 본 알고리즘을 이동 로봇의 주제어기에 탑재하여 주행실험을 한 결과 로봇의 주행방향각의 변화량에 대한 추정정도를 향상시킴으로 결과적으로 로봇의 자세에 대한 추정능력을 현저하게 향상시키는 것으로 나타났다.

7. 참고문헌

- (1) Borenstein, J. and Koren, Y., 1987, "Motion Control Analysis of a Mobile Robot," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 109, pp. 73~79.
- (2) Lin, H.S. and Marsh, E.L., 1972, "Analysis of Morgantown Vehicle Steering Control," *JPL Quarterly Technical Review*, Vol. 2, No. 1, pp. 58~71.
- (3) 이상룡, "Extended Kalman Filter 방법을 이용한 자유주행 무인반송차의 위치평가," *대한전기학회논문집*, 1989년 12월
- (4) Y.S. Harmon, "Robot Mobility : Which Direction and How Far?," *Robot 11, 17th Int. Symp. on Industrial Robots*, 1987, pp. 1~11.
- (5) Dowling, K.J., 1986, "Sensing and Guidance Technologies for Autonomous Vehicles," *Japan U.S.A. Symposium on Flexible Automation*, pp. 317~320.
- (6) Tsumura, T., et al, "A System for Measuring Current Position and/or Heading of Vehicles," *Bulletin of the JSME*, 25(203), May. 1982, pp. 821~829.
- (7) Hongo, T., et al, "An Automatic Guidance System of a Self-Controlled Vehicle," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, IE-34(1), Feb. 1987, pp. 5~10.
- (8) Fujiwara, K., et al, "Development of Guideless Robot Vehicle," *Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robots*, Oct. 1981, pp. 203~210.
- (9) Kabuka, M.R. and Arenas, A.E., 1987, "Position Verification of a Mobile Robot Using Standard Pattern," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 6, pp. 505~516.
- (10) Krotkov, E., 1987, "Mobile Robot Localization Using a Single Image," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 978~983.
- (11) McGillem, C.D. and Rappaport, T.S., 1989, "A Beacon Navigation Method for Autonomous Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 132~139.
- (12) Cox, i.J., 1991, "Blanche — An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 2, pp.193~204.
- (13) Loon, N.K., Hwee, K.K. Mong, K.L. and San, A.A., 1991, "A Navigation System Which Uses Ultrasonic Transponders," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1087~1091.
- (14) Kleeman, L., 1989, "Ultrasonic Autonomous Robot Localisation System," *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 212~219.
- (15) Julliere, M., Marce, L. and Place, H., 1983, "A Guidance System for a Mobile Robot," *Proceedings of 13th International Symposium on Industrial Robots*, pp. 58~68.
- (16) Tsumura, T., Hashimoto, M. and Fujiwara, N., 1985, "New Method for Position and Heading Compensation," *ICAR*, pp. 429~436.
- (17) Komatsu, N. and Nakano, K., 1987, "Dead Reckoning Guidance Combined with Guide Path Method for AGVs," *Proceedings of 5th International Conference Automated Guided Vehicle Systems*, pp. 123~136.
- (18) Sang Ryong Lee, "Position Estimation of Industrial Wheeled Vehicles," *Ph.D Dissertation*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1989.
- (19) Franklin, L. Lewis, "Optimal Estimation," *John Wiley & Sons, Inc.* 1986