

함께 주어진 경로를 수행하기 위하여 시각 감지 장치를 이용한 항법 시스템이 제안되었다. 특히 본 논문에서는 이동 로봇의 주행 작업공간에 관한 전비적인 환경조건이 world map으로 알려져 있고 이 map상에 로봇이 이동 경로 및 시각 감지 장치로 인식될 수 있는 특징점으로서 가이드 마크들의 위치가 주어졌을 때, 이동 로봇이 주어진 경로를 수행, 목표점에 도달할 수 있도록 하기 위하여, 불확실성을 갖는 이동 로봇의 구동-주행을 모델링하는 한편, 시각센서를 이용하여 얻어진 데이터에 근거하여 로봇 자신의 현재 위치를 추정하고 다음 sub-goal까지의 고정된 경로를 발생시키는 알고리즘을 제안하였다. 자율적 항법을 위해서, 이동 로봇 자신의 위치와 방향을 추정할 때 하나의 카메라를 사용하는 경우 세 쌍의 가이드 마크 시스템이 효과적임을 보였다. 항법 시스템은 실험실 환경하에서 하나의 카메라가 장착된 이동 로봇 HERO-1을 통하여 시험되었다. 좀더 융통성을 갖는 항법을 가지려면 가이드 마크가 1개 혹은 2개가 보일 때에는 측정된 로봇 자신의 불확실한 운동량을 어떻게 극복하면서 항법을 할 것인가가 추후 과제로 남는다. 또한 좀더 지능적인 항법을 위해서는 물체(장애물) 자체의 특징을 인식하는 항법기능이 필요하다.

## 참 고 문 헌

[1] 변중남 외, 시각장치 및 보조센서를 이용한 Feedback Controller 및 인공지능을 갖는 관리 제어 시스템 개발, 과학기술처, 1988.  
 [2] 이철화, "A Study on the Mobile Robot Navigation Using on Ultrasonic Sensor," M. S. Thesis, KAIST, 1988.  
 [3] N.J. Nilsson, "A Mobile Automation: An Application of Artificial Intelligence Techniques," *Proc. 1st Int. Joint Conf. AI.*, May, 1969.  
 [4] A.M. Thompson, "The Navigation System of the JPL Robot," *Proc. 5th Int. Joint Conf. AI.*, 1977.  
 [5] G. Giralt, et al, "A multilevel planning and navigation system for a mobile robot : A first

approach to HILARE," *Proc. 6th Int. Joint conf. AI*, 1979.  
 [6] T. Lozano-Perez, and M.A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision Free Paths Among Polyhedral Obstacles," *Comm. ACM.* 22(10), 1979.  
 [7] R.A. Brooks, "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space," *IEEE Trans. Sys. Man. Cyber.*, SMC-13(3), 1983.  
 [8] H.P. Moravec, "Rover Visual Obstacle Avoidance," *Proc. 7th Int. Joint Conf. AI.*, 1981.  
 [9] R. Chattergy, "Some Heuristics for the Navigation of a Robot," *Int. J. Robotics Research*, vol. 4, no. 1, Spring 1985.  
 [10] T. Tsumura, "Survey of Automated Guided Vehicle in Japanese Factory," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Autom.*, 1985, pp. 1392-1334.  
 [11] R.M. Hiralick, "Using Perspective Transformations in Scene Analysis," *CGIP*, 13, 1980.  
 [12] I. Fukui, "TV Image Processing to Determine the Position of a Robot Vehicle," *Pattern Recognition*, 14, 1981, 101-109.  
 [13] M. J. Magee, and J.K. Aggarwal, "Determining the Position of a Robot using a Single Calibration Object," *Proc. 1984, IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1984, 122, -129.  
 [14] Y. Hung, P. -S. Yeh, and D. Harwood, "Passive Ranging to Known Planar Point set," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1985, 80 -85.  
 [15] T. Takeda, A. Kato, T. Suzuki, and M. Hosoi, "Automated Vehicle Guidance using Spotmark," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1986, 1349-1353.  
 [16] J.J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, Addison-Wesley, 1986, pp. 15-53.  
 [17] P. Mansbach, "Calibration of a Camera and Light Source by Fitting to a Physical Model," *Computer Vision Graphics Image Processing*, vol. 35, 1986.

# Extended Kalman Filter 방법을 이용한 자유주행 무인반송차의 위치 평가

## Position Estimation of Free-Ranging AGV Systems Using the Extended Kalman Filter Technique

李 相 龍\*  
(Sang-Ryong Lee)

### 요 약

과자유도를 갖는 엔코더 시스템과 임의의 측정 변수를 갖는 절대 위치 측정용 센서 시스템을 갖추고 있는 자유 주행 무인 반송차의 위치 인식 알고리즘이 본 연구에서 제시되었다. 본 위치 인식 알고리즘은 엔코더 시스템의 측정값들을 Maximum Likelihood방법을 응용하여 무인 반송차의 운동 변화량을 평가하여 dead reckoning방법에 의해 AGV 위치 값들을 융합하여 최적위치를 인식할 수 있다. 시뮬레이션의 결과는 본 알고리즘의 우수성을 입증해 주었다.

**Abstract-** An integrating position estimation algorithm has been developed for the navigation system of a free-ranging AGV system. The navigation system focused in this research work consists of redundant wheel encoders for the relative position measurement and a vision sensor for the absolute position measurement. A maximum likelihood method and an extended Kalman filter are implemented for enhancing the performance of the position estimator. The maximum likelihood estimator processes noisy, redundant wheel encoder measurements and yields efficient estimates for the AGV motion between each sampling interval. The extended Kalman filter fuses inharmonious positional data from the dead-reckoner and the vision sensor and computes the optimal position estimate. The simulation results show that the proposed position estimator solves a generalized estimation problem for locating the vehicle accurately in  $(x,y,\theta)$  space.

### 1. 서 론

최근 FA, FMS의 개념이 산업현장에 확산되어 다품종소량 생산체제로 생산개념이 전환됨에 따라 작업현장내 작업물, 부품 및 공구의 운반경로가 다양해지고 또한 복잡해지고 있는 추세이므로, 콘베이어, 벨트, 로울러등과 같은 기존 이송 방법으

로는 동적으로 변화하는 작업물 이송 수요에 효율적으로 대처할 수 없는 실정이다. 그러므로, 공장 자동화에 대한 기술 개발의 일환으로써 작업 현장내의 작업물 운반 및 관리를 효율적으로 처리할 수 있는 무인 반송차(AGV: Automated Guided Vehicle)에 대한 연구가 필요하다.

AGV는 주행 방식에 따라 일정한 경로만을 따라 이동하는 고정경로방식[1, 2]과 스스로 경로를 찾아 이동하는 자유주행방식[3, 4]으로 분류할 수 있다. 현재 산업계에 응용되고 있는 대부분의

\*正 會 員 : 慶北大 工大 機械工學科 助教授 · 工博  
接受日字 : 1989年 8月 14日  
1次修正 : 1989年 10月 30日

AGV는 고정 경로 방식을 채택하고 있지만, 설치의 간편함, 주행경로 변경의 용이함, 장애물 회피 능력등의 장점때문에 자유주행 AGV에 대한 선호도가 높아지고 있다.

자유주행 AGV는 주행 경로 및 행선지를 센서 시스템을 사용하여 찾아야 하므로 원활한 작업 수행을 위하여서는 정확한 위치 인식이 요구되고 있다. 일반적으로 AGV의 위치는 6자유도(3개의 공간 좌표값과 3개의 회전각)로 표시되어야 하지만, 작업장 바닥의 굴곡이 심하지 않다고 가정하면 그림 1에서 표시한 바와 같이 작업장 바닥의 일정지점에 고정된 평면 직각 좌표계에 대한 좌표값( $x, y$ )와 AGV의 주행 방향각  $\theta$ 로 표시된다. 여기서, 편의상 평면 직각 좌표계의  $+y$ 축을 기준으로 시계반대 방향의  $\theta$ 값을 양의 방향으로 표시한다.

자유 주행 무인 반송차의 위치측정을 위한 센서들을 상대 위치 측정용 센서(relative position measurement sensor)와 절대 위치 측정용 센서(absolute position measurement sensor)로 분류할 수 있다.

상대 센서(즉, 상대 위치 측정용 센서)는 AGV가 작업장 내의 두 점사이를 이동할 때 AGV의 이동 궤적에 대한 측정을 통하여 위치를 계산하며, 주행계(wheel encoder system), 관성 장치(inertia sensor system)등이 이에 속한다. Dead reckoning시스템은 자유 주행 AGV의 위치 측정을 위한 보편화된 방법이지만, [5-7] 외부교란(external disturbance)의 영향때문에 측정 오차가 누적되는 특성을 갖고 있어, AGV의 주행 거리가 길어지면 위치 측정값에 대한 신뢰도가 급격히 떨어지므로 주기적으로 다른 방법에 의해 누적된 오차를 제거해 주어야 한다는 단점이 있다. [8, 9]

절대 센서(즉, 절대 위치 측정용 센서)는 AGV의 활동 지역내의 일정한 지점에 표식(landmark)

을 설치하여 표식까지의 거리, 각도, 상대 위치등을 측정하여 작업장에서의 AGV의 절대 위치를 계산하는데 이용된다. [10-12] 절대 센서의 사용은 작업장 상태·바퀴의 마모등과 같은 외란의 영향에 둔감하기 때문에 위치 인식을 정확하게 할 수 있다는 장점이 있으나 절대 센서의 측정 범위 내에 표식이 위치하여야 측정이 가능하다. 일반적으로 센서의 측정 범위는 제약을 받으므로 절대 센서만으로는 위치를 연속적으로 측정할 수 없는 경우가 발생한다.

최근에는 자유 주행 AGV의 위치에 대한 정확하고 신뢰성있는 정보를 얻기 위하여 상대 센서와 절대 센서를 조합한 복합 센서 시스템에 대한 연구가 시도되고 있다. [13-15] 복합 센서 시스템에서는 외란에 의해 부정확한 측정값을 보여주고 있는 각 센서의 데이터를 일관성있게 처리하여 최적값을 찾을 수 있는 센서 데이터 융합 방법(sensor data fusion technique)의 개발이 매우 중요한 문제점으로 대두하고 있다.

본 논문에서는 복합 센서 시스템을 채택하고 있는 자유 주행 AGV의 위치의 최적값을 산출할 수 있는 센서 데이터 융합 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성 및 범용성을 조사하였다.

## 2. 자유 주행 AGV의 위치 인식

그림 2는 본 논문에서 사용된 AGV의 기하학적 모델을 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 AGV는 3륜으로 구성되었으며, 전륜에 의해 구동(tracton) 및 조향(steering)을 동시에 조정할 수 있다. AGV의 위치 측정을 위해 각 바퀴에 상대 위치 측정용 센서인 엔코더(encoder)를 설치하였으며, 그림 2에서 표시한 AGV의 기준점(두 후

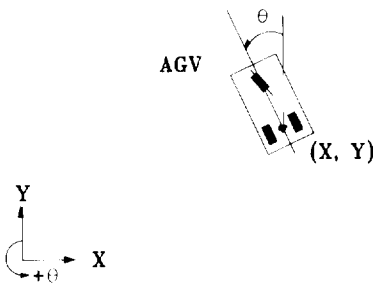


그림 1 3자유도로 표현되는 AGV의 위치  
Fig. 1 Position of AGV systems with 3 degree-of-freedom

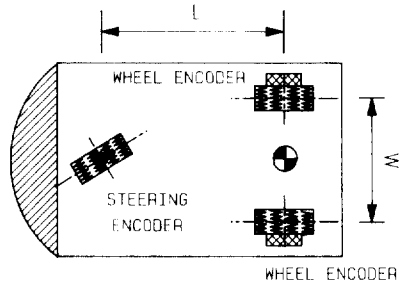


그림 2 3륜 바퀴 및 3 엔코더를 가진 AGV 모델  
Fig. 2 Tricycle AGV model with three-encoder system

류사이의 중심점)에 AGV의 작업 공간내에서의 절대 위치 측정을 위해 비전 센서를 설치하였다. 후륜의 회전수를 측정하여 바퀴의 이동 거리를 산출하기 위하여 증분식 엔코더(incremental encoder)를, 전륜의 조향각 측정을 위해 절대식 엔코더(absolute encoder)를 사용하였다. 비전 센서의 측정 변수는 AGV와 표식(landmark)간의 상대 위치로 가정하였다.

그림 2에 표시한 "L"은 전륜 중심축과 후륜 중심축과의 수직 거리, "W"는 두 후륜사이의 간격으로 표시한다.

**2.1 Dead Reckoning 방법**

Dead Reckoning(DR) 방법은 어느 순간에서의 AGV의 위치  $(X_k, Y_k, \theta_k)$ 를 출발점에서의 위치값  $(X_{k-1}, Y_{k-1}, \theta_{k-1})$ 과 엔코더로 측정된 AGV의 이동 거리 및 주행 방향 변화량으로 추측하는 방법이다. 그림 3에 단위 검출 시간동안의 AGV의 운동 변화와 엔코더 측정값과의 기하학적 관계를 표시한다. 여기서  $U_1$ 은 AGV의 이동 거리,  $U_2$ 는 주행 방향의 변화량 (즉,  $\theta_k - \theta_{k-1}$ )을 표시한다.  $S_{1m}$ 과  $S_{2m}$ 은 각각 증분식 엔코더에 의해 측정된 오른쪽 바퀴 및 왼쪽 바퀴의 이동거리를 표시하며,  $S_{3m}$ 은 절대식 엔코더에 의해 측정된 오른쪽 바퀴 및 왼쪽 바퀴의 이동거리를 표시하며  $S_{3m}$ 은 절대식 엔코더에 의해 측정된 조향각을 표시한다. 여기서 하부 첨자(subscript) "m"은 측정량을 의미한다.

엔코더의 측정 잡음(measurement noise)을 고려하여  $U_i(i=1, 2)$ 와  $S_{im}(i=1, 2, 3)$ 의 관계식을 유도하면 식(1)과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} S_{1m} &= U_1 + W \cdot U_2 / 2 + e_1 \\ S_{2m} &= U_1 - W \cdot U_2 + e_2 \\ S_{3m} &= \tan^{-1}(L \cdot U_2 / U_1) + e_3 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $e_i(i=1, 2, 3)$ 는 각 엔코더의 측정값에 포함된 측정 잡음을 표시한다. 엔코더의 측정 오차에 영향을 미치는 주요한 외란들로 작업장 바닥의 굴곡도(roughness), 바퀴의 변형 및 미끄러짐 등을 예로 들 수 있다. 작업장 바닥의 굴곡도에 의한 측정 잡음은 평균값  $E\{e_i\}=0$ , covariance  $E\{e_i^2\}=\sigma_i^2$ 의 Gaussian random error로 모델링할 수 있으며, 바퀴의 미끄러짐에 의한 측정방법은 Bias형태의 에러로 모델링할 수 있다. 바퀴의 미끄러짐에 의한 Bias형태의 오차는 적응 평가 알고리즘(adaptive estimation algorithm)에 의해 탐

지 및 보상될 수 있으며, [16] 또한 AGV의 주행 속도를 적절히 조절함으로써 바퀴의 미끄러짐을 예방할 수 있기 때문에 본 논문에서는 Gaussian random error에 의한 영향만을 고려하기로 한다.

식 (1)은 3개의 엔코더 측정값으로부터 2개의 미지 변수,  $U_1$ 과  $U_2$ 를 계산하여야 한다. 그러나, 특성이 다른 측정 오차때문에 각 측정값이 가리키는 미지 변수의 값이 일치하지 않으므로 통계학적 방법을 동원하여 문제 해결에 접근 하여야 한다.

식 (1)을 벡터 표기법을 사용하여 정리하면 식 (2)와 같이 비선형 stochastic방정식으로 표현된다.

$$\underline{S}_m = \underline{g}(\underline{U}) + \underline{e} \tag{2}$$

여기서  $\underline{S}_m = [S_{1m} \ S_{2m} \ S_{3m}]^T$ ,  $\underline{U} = [U_1 \ U_2]^T$ ,  $\underline{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 이며  $\underline{g}(\cdot)$ 는  $\underline{S}_m$ 과  $\underline{U}$ 와의 비선형 관계를 표시하는  $3 \times 1$  벡터이다.

식 (2)에서 보는 바와 같이  $\underline{U}$ 은 확정 변수(deterministic variable),  $\underline{S}_m$ 은 stochastic변수이므로  $\underline{U}$ 의 평가를 위하여 비선형 Maximum Likelihood(ML)평가 기법을 응용할 수 있다.

식 (2)에서 비선형 ML방법을 적용하면 결국 비선형 연립 방정식의 근을 계산하는 문제로 변형이 되어 미지 변수 벡터의 ML값은 반복 계산(iteration)의 결과로 구하여 진다. [17] 반복 계산에 의한 방법은 실시간 응용에는 부적합하므로, 본 논문에서는 비선형방정식을 선형화한 후, 선형 ML방법을 적용하여  $\underline{U}$ 을 평가하는 선형화(linearized) ML평가 기법을 제안한다.

선형화 ML방법이 타당성을 가지기 위해서는 선형화를 위한  $\underline{U}$ 의 기준값,  $\underline{U}^0$ 을 정확하게 예측하여야 한다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 앞의 두 식에서는  $S_{1m}, S_{2m}$ 과  $U_1, U_2$ 의 관계가 선형적으로 표시된다. 측정 오차의 크기가 실제 측정값에 비해 작다는 사실을 고려하면, 이들 두 식으로 부터 식 (2)의 선형화를 위한  $\underline{U}^0$ 를 계산할 수 있다.

$$\underline{U}^0 = \begin{bmatrix} 1 & W/2 \\ 1 & -W/2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} S_{1m} \\ S_{2m} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

식 (3)의  $\underline{U}^0$ 를 이용하여 식(2)를 선형화 하면

$$\underline{S}_m = \underline{g}(\underline{U}^0) + \frac{\partial \underline{g}(\underline{U})}{\partial \underline{U}^T} \Big|_{\underline{U}=\underline{U}^0} (\underline{U} - \underline{U}^0) + \underline{e} \tag{4}$$

식 (4)를 정리하면

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} S_{1m} \\ S_{2m} \\ S_{3m} - \tan^{-1}\left(L \cdot \frac{U_2^0}{U_1^0}\right) + C_2 U_1^0 + C_3 U_2^0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & W/2 \\ 1 & -W/2 \\ C_2 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 벡터-행렬식으로 간단히 표시하면

$$\underline{S}_m^D = T \cdot \underline{U} + \underline{e}$$

여기서,

$$C_2 = -L \cdot U_2^0 / (U_1^{0^2} + L^2 U_2^{0^2})$$

$$C_3 = L \cdot U_1^0 / (U_1^{0^2} + L^2 U_2^{0^2})$$

$T$  = 선형화 과정에서 얻어진 상수행렬이다.

선형 ML 방법에 대한 이론 및 유도 방법은 참고 문헌(18)에 상세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

식 (5)에 대한 선형 ML방법을 적용한 결과 유도된  $\underline{U}$ 에 대한 ML평가값,  $\underline{U}_{ML}$  및  $\underline{U}_{ML}$ 의 오차 covariance행렬,  $P_{ML}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ML} &= \{T^T R^{-1} T\}^{-1} T^T R^{-1} \underline{S}_m^D \\ P_{ML} &= \{T^T R^{-1} T\}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $3 \times 3$  행렬  $R$ 은 측정 잡음 벡터의  $\underline{e}$ 의 covariance 행렬이며, 일반적으로 실험적 방법 및

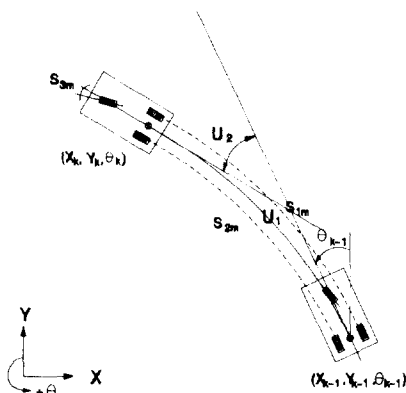


그림 3 AGV 위치와 주행계 측정치와의 기하학적 관계

Fig. 3 Geometric relationship of the AGV position and the wheel encoder measurements

해석적 방법을 병행하여 계산한다.

단위 검출 시간당 AGV의 이동거리가 AGV의 사이즈에 비해 작다고 하면 그림 3에 표시된 원호 모양의 이동 궤적을 직선으로 근사할 수 있다. 이러한 가정하에서  $(X_k, Y_k, \theta_k)$ 를 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_k &= X_{k-1} - U_1 \sin(\theta_{k-1} + U_{2k}/2) + V_{1k} \\ Y_k &= Y_{k-1} \cos(\theta_{k-1} + U_{2k}/2) + V_{2k} \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + U_{2k} + V_{3k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 하부 첨자 " $k$ "는 검출 시간 지수(index)를 표시한다.  $U_{1k}$ 와  $U_{2k}$ 는  $k$ 번째 검출 시간에 ML방법에 의해 평가된  $\underline{U}_{ML}$ 의 성분이며 편의상 하부 첨자 " $ML$ "은 생략하였다.  $V_{ik}$  ( $i=1, 2, 3$ )는 시스템 잡음이며, 이 경우에는  $\underline{U}_{ML}$ 에 포함된 평가 오차에 의해 유도된  $(X_k, Y_k, \theta_k)$ 의 오차 성분을 가리킨다. 시스템 잡음  $V_{1k}, V_{2k}, V_{3k}$ 의 covariance 행렬  $Q_k$ 와  $P_{ML}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{ML} &= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} \end{bmatrix} & Q_k &= \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} \end{bmatrix} \\ Q_{11} &= A_2^2 P_{11} + A_1^2 U_{1k}^2 P_{22} + 2A_1 A_2 U_{1k} P_{12} \\ Q_{22} &= A_1^2 P_{11} + A_2^2 U_{1k}^2 P_{22} - 2A_1 A_2 U_{1k} P_{12} \\ Q_{33} &= 4 P_{22} \\ Q_{12} &= -A_1 A_2 P_{11} + A_1 A_2 U_{1k}^2 P_{22} \\ Q_{13} &= -2 A_2 P_{12} - 2 A_1 U_{1k} P_{22} \\ Q_{23} &= 2 A_1 P_{12} - 2 A_2 U_{1k} P_{22} \\ A_1 &= \cos(\theta_{k-1} + U_{2k}/2), \\ A_2 &= \sin(\theta_{k-1} + U_{2k}/2) \end{aligned} \quad (8)$$

위치 벡터  $\underline{X}_k = [X_k \ Y_k \ \theta_k]^T$ , 입력 벡터  $\underline{U}_k = [U_{1k} \ U_{2k}]^T$ , 잡음 벡터  $\underline{V}_k = [V_{1k} \ V_{2k} \ V_{3k}]^T$ 로 정의하여 식 (7)의 상태 방정식으로 정리하면

$$\underline{X}_k = f(\underline{X}_{k-1}, \underline{U}_k) + \underline{V}_k \quad (9)$$

와 같이 비선형 Gaussian-Markov 방정식으로 표시된다.

식 (9)로 계산되는 DR방법에 의한 AGV의 위치값을 구하는 방법은 3장에서 설명한다.

### 2.2 절대 위치 측정 방법

비전 센서(vision sensor)를 사용하면 AGV의 현 위치에 대한 특수가 기하학적 형상을 가지는 표식의 상대 위치를 측정할 수 있다. 여기서, 작

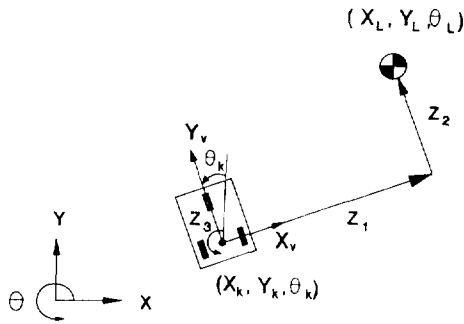


그림 4 AGV와 표식과의 상대위치를 측정하는 절대 센서의 측정변수

Fig. 4 Measurement parameters observed by an absolute sensor measuring the relative position of the AGV to a landmark

업장 내의 임의의 장소에 설정된 절대 좌표계의 원점에 대한 표식의 위치  $(X_L, Y_L)$  및 절대 좌표계의  $+Y$ 축에 대한 표식의 회전각  $\theta_L$ 에 대한 정보는 미리 확보되어 있어야 하며, 그림 4에 표시된 측정 변수들( $Z_1, Z_2$  및  $Z_3$ )의 측정을 위해서는 표식이 작업장 천장에 위치하여야 한다. [19] 그림 4에 표시된 측정 변수  $Z_1$  및  $Z_2$ 는 AGV의 기준점에 설정된 차체 좌표계의  $X_v$  및  $Y_v$ 축에 대한 표식의 좌표값, 측정 변수  $Z_3$ 는 AGV의 주행 방향에 대한 표식의 상대 회전각을 의미한다.

비전 센서가 그림 4와 같이 AGV의 기준점에 위치할 때 센서의 측정 잡음을 고려한 측정 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_2 &= (X_L - X_k) \cos \theta_k + (Y_L - Y_k) \sin \theta_k + W_1 \\ Z_2 &= -(X_L - X_k) \sin \theta_k + (Y_L - Y_k) \cos \theta_k \\ &\quad + W_2 \quad (10) \\ Z_3 &= \theta_L - \theta_k + Y_3 \end{aligned}$$

여기서  $W_i$  ( $i=1, 2, 3$ )는 비전 센서의 측정 잡음을 표시하며, 일반적으로 Gaussian 분포 특성을 가진다고 가정한다.

AGV의 작업장 내에서의 위치  $(X_k, Y_k, \theta_k)$ 는 일반적으로 식 (10)에서 측정 잡음을 무시하고 좌표계 변환(coordinate transformation) 방법을 응용하여 계산하나, 본 연구에서는 절대 센서의 수학적 모델을 식 (10)과 같이 식 (7)에 대한 측정 방정식의 형태로 유도하였다.

식 (10)에서와 보는 바와 같이 절대 센서에 의한 측정 방정식의 일반적인 형태는 비선형 stochastic 방정식으로 표기할 수 있다.

$$Z_k = h(X_k) + W_k \quad (11)$$

$Z_k$ 는 절대 센서에 의해 결정되는 측정 변수 벡터,  $X_k$ 는 AGV의 위치 벡터,  $W_k$ 는 측정 잡음을 표시한다. 여기서 측정 잡음 벡터를 기대값  $E\{W_k\} = \{0\}$ , covariance  $E\{W_k W_k^T\} = R_k$ 의 Gaussian 분포 특성을 가진다고 가정한다.

### 3. Extended Kalman Filter

상대 센서와 절대 센서를 동시에 사용하여 AGV의 위치를 계산하면 식 (9)와 식 (11)에서 보는 바와 같이 외란에 의한 잡음의 영향으로 각 센서에 의해 예측된 위치값이 일치하지 않게 된다. 그러므로, 각 센서 시스템의 잡음 특성을 고려하여 두개의 모순된 위치값을 통계학적 방법으로 통합하여 최적 위치값을 평가할 수 있는 알고리즘을 개발하여야 한다.

본 논문에서 유도한 DR방정식이 비선형 Gaussian-Markov process로 유도되는 반면, 절대 센서에 의한 측정은 DR방정식의 상태 변수  $X_k$ 에 대한 측정 방정식의 형태로 유도될 수 있다는 사실을 이용하여 식 (12)와 같은 위치 평가 시스템을 구성할 수 있다.

시스템방정식 :

$$\underline{X}_k = f(\underline{X}_{k-1}, \underline{U}_k) + \underline{V}_k \quad (12)$$

측정방정식 :

$$Z_k = h(\underline{X}_k) + W_k$$

식 (12)의 형태로 표현되는 시스템의 상태 변수  $X_k$ 의 최적값(optimal estimate)은 Extended Kalman Filter(EKF) 평가 방법을 도입하여 계산할 수 있다. EKF 평가 방법은 비선형 시스템 방정식 및 측정 방정식을 선형화시켜, 시스템 상태 변수에 대한 최적값을 구할 수 있는 효율적인 평가방법으로 알려져 있다. EKF에 대하여 이론 및 유도 과정은 참고 문헌 (20)에 상세하게 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

상대 센서 및 절대 센서를 동시에 사용했을 때의 상태 변수  $X_k$ 에 대한 최적값,  $X_k$  및 평가 오차의 covasriance 행렬  $P_k$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\underline{X}_k^- = f(\underline{X}_{k-1}, \underline{U}_k) + E\{\underline{V}_k\} \quad (13)$$

$$M_k = F_k P_{k-1} F_k + Q_k \quad (14)$$

$$K_k = M_k H_k^T [H_k M_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (15)$$

$$\underline{X}_k = \underline{X}_k^- + K_k [Z_k - h(\underline{X}_k^-)] \quad (16)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] M_k [I - K_k H_k]^T K_k R_k K_k^T \quad (17)$$

여기서,

$\underline{X}_k$  = EKF 방법에 의해 평가된 AGV의 최적 위치값

$\underline{X}_k^-$  = DR 방법에 의한 위치 평가값

$M_k = \underline{X}_k^-$ 의 평가 오차 covariance행렬

$F_k = f(\underline{X}_{k-1}, \underline{U}_k)$ 를  $\underline{X}_{k-1} = \underline{X}_{k-1}^-$ 에 대하여 선형화시킨 상수 행렬

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -U_{1k} \cos(\theta_{k-1} + U_{2k}/2) \\ 0 & 1 & -U_{1k} \sin(\theta_{k-1} + U_{2k}/2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$Q_k$  = 시스템 잡음의 covariance 행렬

$K_k$  = Kalman 이득(gain)

$H_k = h(\underline{X}_k)$ 를  $\underline{X}_k = \underline{X}_k^-$ 에 대하여 선형화시킨 상수 행렬

$$H_k = \begin{bmatrix} -\cos \theta_k^- & -\sin \theta_k^- \\ -\sin \theta_k^- & -\cos \theta_k^- \\ 0 & 0 \\ -(X_L - X_k^-) \sin \theta_k^- + (Y_L - Y_k) \cos \theta_k^- \\ -(X_L - X_k^-) \cos \theta_k^- + (Y_L - Y_k) \sin \theta_k^- \\ -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$R_k$  = 측정 잡음  $\underline{W}_k$ 의 covariance 행렬

$I = 3 \times 3$ 단위 행렬이다.

식 (13)~식 (17)은 상대 센서와 절대 센서가 동시에 사용되었을 때에만 최적 위치값을 평가할 수 있는 식들이다.

실제 응용에서는 절대 센서의 측정 범위가 동시에 사용되었을 때에만 최적 위치를 평가해야할 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 다음 식들을 사용하여 DR방법에 의한 위치 평가값,  $\underline{X}_k$ 와 평가 오차 covariance행렬,  $P_k$ 를 계산한다.

$$\underline{X}_k = f(\underline{X}_{k-1}, \underline{U}_k) + E\{\underline{V}_k\} \quad (20)$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (21)$$

여기서  $F_k$ 는 식 (18)과 동일하다.

위의 결과를 유도하는 과정에서 측정 변수의 종류를 제한하지 않았기 때문에 어떠한 형태의 절대 센서에도 본 결과를 적용할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안된 센서 측정값 통합 방법(sensor data fusion technique)의 타당성을 검토하기 위하여 선형화 ML 방법 및 EKF 평가 방법의 성능을 시뮬레이션을 통해 조사하였다.

그림 5은 시뮬레이션의 흐름도를 보여주고 있다. 시뮬레이션에서는 엔코더 출력 및 절대 센서의 출력에 포함된 측정 잡음을 발생시키기 위해 IMSLIB의 Gaussian random number 발생 프로그램인 GGNML(...)을 변형시켜 사용하였다.

시뮬레이션에 사용함 AGV의 사양은 Georgia Tech.의 MHRC AGV의 실제 사양이며, 표 1에 열거하였다.

##### 4.1 ML평가 결과

선형화 ML 방법에 의해 평가된  $U_1$ 과  $U_2$ 의 결과는 DR 방법의 성능, 즉 위치값의 정확도(accuracy) 및 신뢰도(reliability)에 직접적인 영향을 미치므로, 최종 위치값의 오차에 대한 해석 대신에 ML평가 방법에 대해 조사하였다. ML 평가의 성능 시뮬레이션에서는 직경 4m의 원주 경로를 따라서 1m/sec의 속도로 이동하는 AGV의 경우를 가정하였다. 이 경우 단위 검출 시간당  $U_1$ 의 실제값은 약 10cm,  $U_2$ 의 실제값은 8°, 전륜 조향각은 약 22°가 된다. 시뮬레이션에 사용된 엔코더는 측정 오차 범위가  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$ ,  $\pm 20\%$ 인 4가지 경우를 고려하였으며, 총 125개의 검출 데이터로부터  $U_1$ 과  $U_2$ 의 r.m.s. 오차를 계산하여 그림 6에 표시하였다.

그림 6의 횡축은 시뮬레이션에 사용된 엔코더의 측정 오차범위를 나타내며, 종축은 정규화된(normalized) r.m.s. 오차를 표시한다. 정규화를 위하여 두 개의 후륜 엔코더만을 사용하여 측정된  $U_1$ 과  $U_2$ 의 r.m.s. 오차값을 기준점으로 채택하였으며 정규화된 r.m.s. 오차는 3축 엔코더 시스템에 의해 평가된  $U_1$  혹은  $U_2$ 의 r.m.s. 오차와 2축 엔코더 시스템에 의해 평가된  $U_1$  혹은  $U_2$ 의 r.m.s. 오차의 비(ratio)로 정의된다. 그림 6(A)는  $U_1$ 의 정규화된 r.m.s. 오차, 그림 6(B)는  $U_2$ 의 정규화된 r.m.s. 오차를 보여준다.

그림 6의 결과는 과자유도 엔코더 시스템

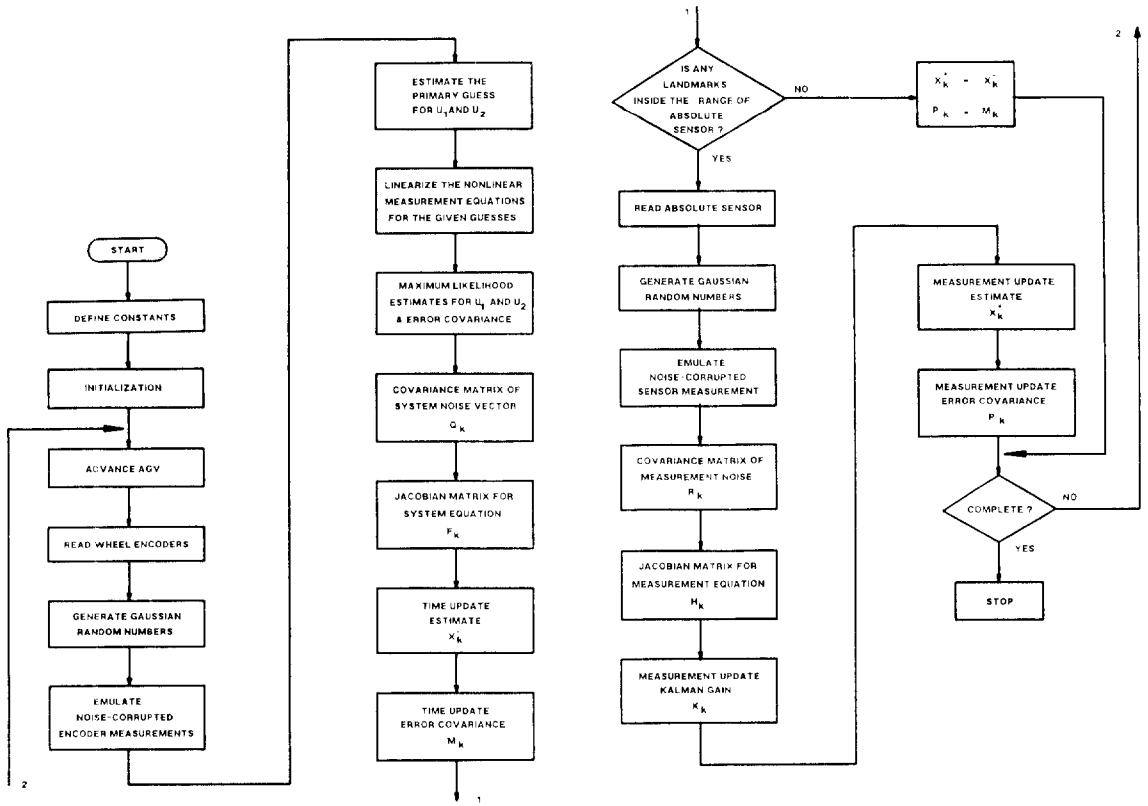


그림 5 시뮬레이션 프로그램의 흐름도  
 Fig. 5 Flow chart of the simulation program

표 1 시뮬레이션에 사용된 AGV 모델의 사양

Table 1 Specification of the AGV model used for the simulation

Rear Wheel Spacing, W	0.436 m
Wheel Base, L	0.81 m
Wheel Diameter	0.254 m
Resolution of Incremental Encoder	12 bits
Resolution of Absolute Encoder	10 bits
Sampling Frequency of Encoders	10 Hz

(redundant encoder system)의 필요성 및 선형화 ML 평가 방법의 상대 센서 데이터 융합 능력을 명확하게 보여주고 있다. 또한, 조향각의 측정은  $U_2$ 에 대한 정보를 추가로 공급해 주므로  $U_2$ 에 대한 평가를 정확하게 할 수 있다는 사실을 보여주

고 있다.

3엔코더로 시스템에서 조향각의 측정을 위한 전륜 엔코더의 성능의 저하하면  $U_1$ 과  $U_2$ 의 평가 과정에서 전륜 엔코더 측정치의 가중치를 낮추고, 후륜 엔코더들의 측정치에 큰 가중치를 부여하여 효율적인 평가를 ML방법은 할 수 있어야 한다. 그림 7은 전륜 엔코더의 측정 오차 범위의 크기에 대한 ML방법에 의한  $U_1$ 과  $U_2$ 평가값의 정규화된 r.m.s. 오차의 변화를 표시한다.

그림 7에서 보는 바와 같이 전륜 엔코더의 성능이 저하함에 따라 ML평가값은 후륜 엔코더의 측정값에 의존하게 되어, 궁극적으로는 2엔코더 시스템의 평가값에 수렴하게 된다.

그림 6과 7에 나타난 결과를 종합하면 본 연구에서 제안된 선형화 ML평가 방법은 과자유도를 가지는 엔코더 시스템에서 단위 샘플 시간당 AGV의 움직임(즉  $U_1$ 과  $U_2$ )을 효율적으로 평가할 수 있는 도구라는 결론을 내릴 수 있다. 자유주행 AGV의 대부분은 주행계를 위치 측정용 센서로 채택하고 있다는 사실을 고려하면, ML기법



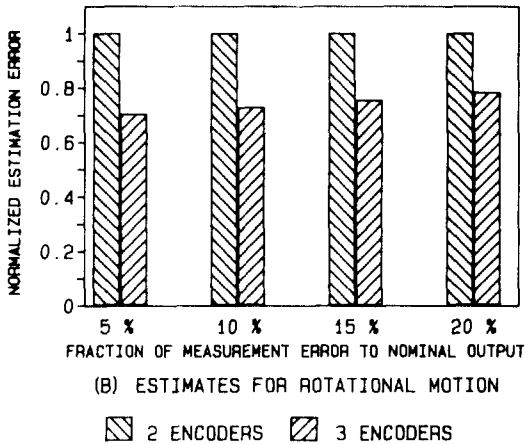
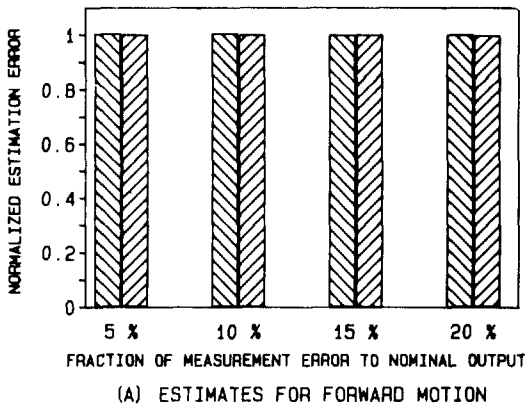


그림 6 3엔코더 시스템에 대한 ML 평가 방법의 성능  
 Fig. 6 Performance of the Maximum Likelihood estimation for three-encoder system

의 응용은 DR 방법의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

4.2 Extended Kalman Filter의 성능

EKF 평가 방법의 성능을 조사하기 위하여 시뮬레이션을 행하여 DR방법 및 절대 센서 측정 방법에 의해 결정된 AGV 위치를 EKF방법에 의해 평가된 위치와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 AGV에 사용된 실제 주행 경로는 그림 8에 표시한 타원형 경로(oval path)로 가정 하였다. 이 타원형 경로는 길이 10m의 직선부와 반경 3.2m의 반원부(원주 길이 : 약 10m)로 구성되어 있다. 타원형 경로를 따라서 총 4개의 표식들이 그림 8에서 보는 바와 같이 설치되었으며, 본 시뮬레이션에서는 AGV가 그림 8에 표시된 1, 2, 3, 4의 지점을 통과할 때에만 절대 센서가 표식을 인식하여

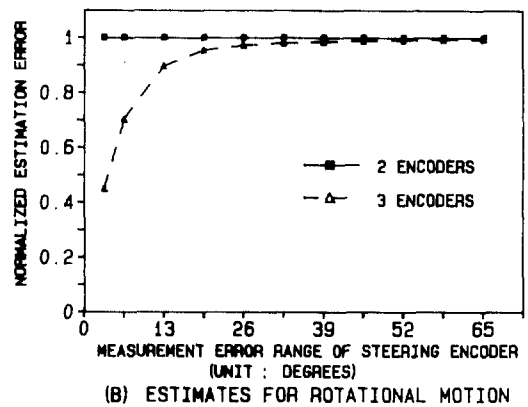
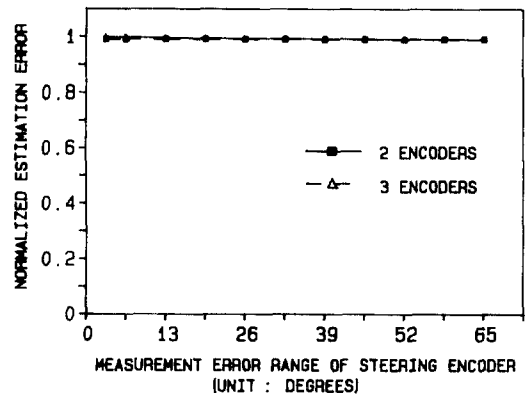


그림 7 조향각 측정 엔코더의 측정오차 변화에 따른 ML 방법의 성능  
 Fig. 7 Performance variation of the ML estimations as the function of the measurement error range of the steering encoder

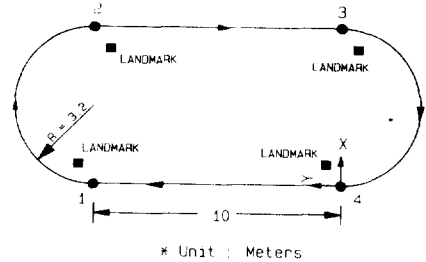


그림 8 Extended Kalman Filter 성능 시뮬레이션에 사용된 AGV 주행 경로  
 Fig. 8 AGV guidepath used for the simulation of the Extended Kalman Filter

표식과의 상대 위치를 측정한다고 가정 한다. 절대 센서의 측정 방정식은 식 (10)의 형태로 주어

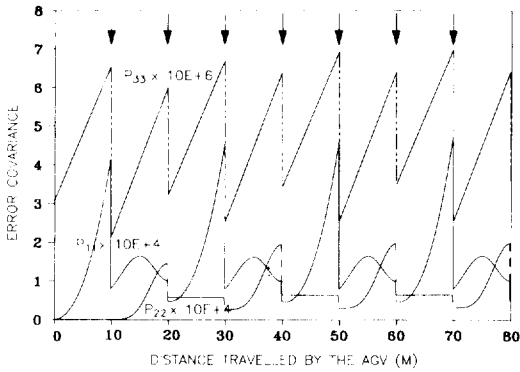


그림 9 AGV주행거리의 변화에 따른 위치 평가 오차의 covariance

Fig. 9 Error covariance of the estimated position as the function of the travelled distance of the AGV

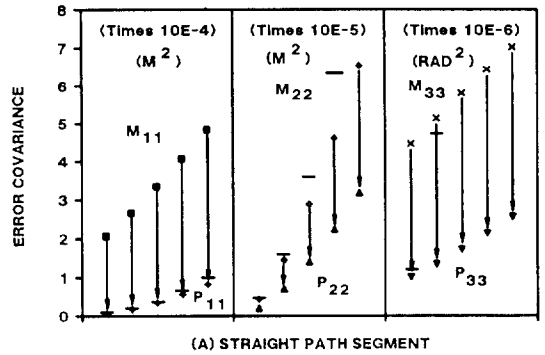
진다.

엔코더의 검출 주파수는 10Hz이며, AGV의 주행 속도는 1m/sec로 가정하였다. 작업 바닥의 굴곡에 의한 엔코더 측정 잡음의 표준 편차는 후륜 엔코더의 경우에는  $1.265 \times 10^{-8}$  m, 전륜 엔코더의 경우에는  $3.137 \times 10^{-6}$  rad<sup>2</sup>의 값을 시뮬레이션에서 고려하였다.

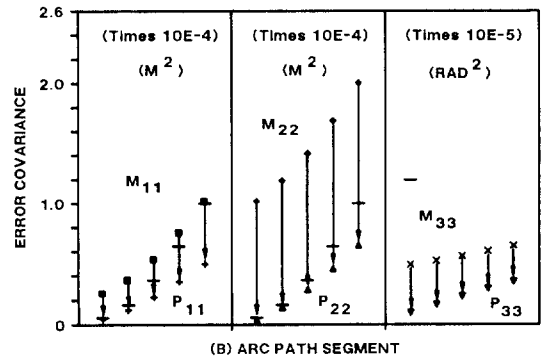
시뮬레이션에 사용된 절대 센서의 측정 오차의 범위는 ( $\pm 2$ mm,  $\pm 2$ mm,  $\pm 0.2^\circ$ ), ( $\pm 4$ mm,  $\pm 4$ mm,  $\pm 0.4^\circ$ ), ( $\pm 6$ mm,  $\pm 6$ mm,  $\pm 0.6^\circ$ ) 및 ( $\pm 1$ cm,  $\pm 1$ cm,  $\pm 1^\circ$ )의 5경우이다. 여기서 궤호안의 양은 각각 x-, y- 및  $\theta$ - 방향의 측정 오차를 가리킨다.

그림 9은 주행 거리에 따른 AGV 위치 평가값의 오차 covariance( $P_{ii}$ )의 변화를 보여주고 있다.  $P_{ii}$ 는 x-,  $P_{22}$ 는 y-,  $P_{33}$ 는  $\theta$ -방향의 오차 covariance를 표시한다.

그림 9에서는 절대 센서의 측정 오차 범위가 ( $\pm 1$ cm,  $\pm 1$ cm,  $\pm 1^\circ$ )의 경우에 대한 결과만을 표시하였지만, 다른 오차 특성을 갖는 절대 센서의 경우에서도 비슷한 경향을 보여 주었다. 그림 9에 표시된 화살표는 AGV의 위치에 관한 측정이 상대 센서 및 절대 센서에 의해 동시에 행하여져 EKF방법으로 위치 평가를 한 순간을 표시하며, 그 밖의 구간에서는 위치 평가가 전적으로 DR방법에 의하여 행하여졌다. DR방법의 경우, AGV의 주행 거리가 길어짐에 따라 위치 평가값에 대한 신뢰도가 급격히 떨어지므로, 평가 오차를 감소시키기 위해서는 절대 센서에 의한 위치 측정이 주기적일 행하여져야 한다는 사실을 그림 9를 통



(A) STRAIGHT PATH SEGMENT



(B) ARC PATH SEGMENT

그림 10 DR방법, 절대 센서 측정, EKF 방법에 의한 AGV 위치값의 오차 covariance 비교

Fig. 10 Comparison of the error covariances of the AGV position estimated by the Dead-Reckoning method, the absolute sensor measurement, and the Extended Kalman Filter technique

하여 알 수 있다. 또한, 주기적인 절대 센서의 사용에 의해 평가 오차 covariance의 크기가 일정한 곡선 형태를 유지하며 정상 상태로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 AGV가 직선부를 주행한 경우와 반원부를 주행한 경우의 오차 covariance 변화 곡선의 형태는 틀리지만 주행 경로의 형상이 같을 때에는 일치한다는 것을 알 수 있다. 오차 covariance의 이러한 정상 상태로의 수렴은 본 시뮬레이션에 사용된 절대 센서에 의해 관측된 측정 변수들이 AGV의 위치(x, y,  $\theta$ )를 평가하기에 적절하다는 것을 증명한다. DR방법 ( $M_{ii}$ 로 표시), 절대 센서의 측정 ("—"로 표시), EKF 방법( $P_{ii}$ )방법( $P_{ii}$ 로 표시)의 신뢰도를 정상 상태에서의 평가 오차 covariance의 크기로 표시하여 그림 10에서 비교하였다.

그림 10에서 절대 센서의 평가 오차 covariance 값("—"로 표시)이 나타나 있지 않은 경우는 종축

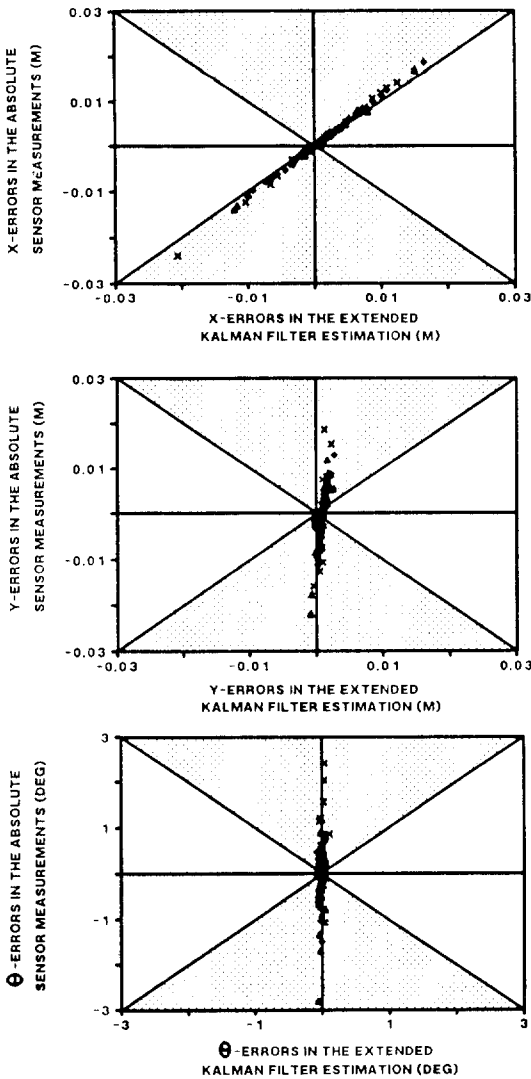


그림 11 직선 주행 경로 통과 직후의 절대 센서 측정 오차의 EKF 평가 오차 비교  
 Fig. 11 Comparison of the estimation errors in the absolute sensor measurement and in the EKF estimation just after passing through the straight path segments

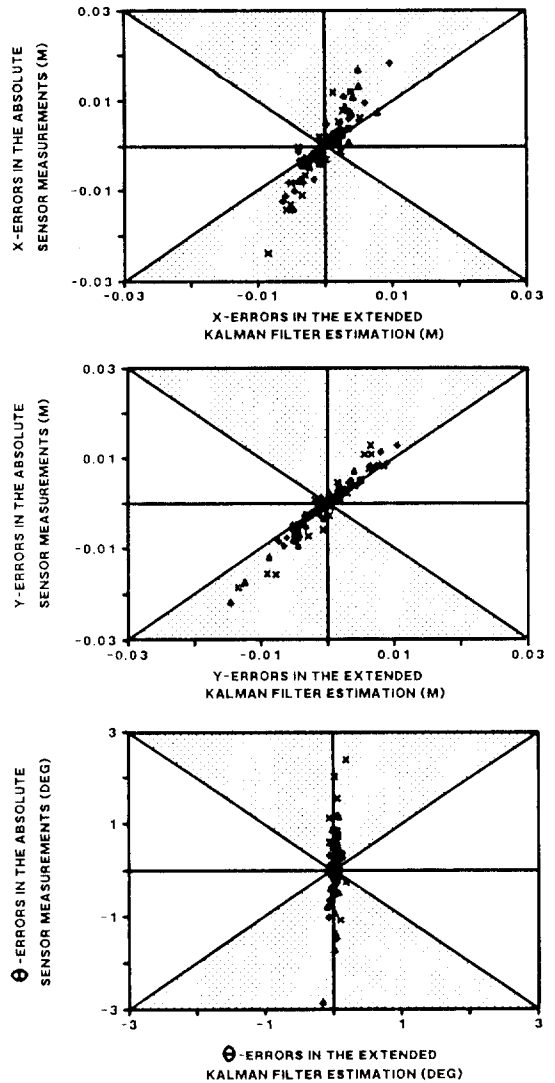


그림 12 반원 주행 경로 통과 직후의 절대 센서 측정 오차와 EKF 평가 오차 비교  
 Fig. 12 Comparison of the estimation errors in the absolute sensor measurement and in the EKF estimation just after passing through the circular path segments

의 최대 눈금의 크기보다 이 값이 크기 때문에 그림 상에 표시될 수 없다는 것을 의미한다. 그림 10(A)는 AGV가 직선부를 통과한 직후 (지점 1, 3)의 오차 covariance값을, 그림 10(B)는 반원부를 통과한 직후 (지점 2, 4)의 평가 오차 covariance값을 표시하였다. 그림 10에서 오차 covariance의 크기는 종축의 눈금값에 그림에 표시된 상수를 곱한 값이다. 예를 들면 그림 10(A)

의  $M_{33}$ ,  $P_{33}$ 에 대한 종축의 단위 눈금당 크기는  $10^{-6} \text{rad}^2$ 이 된다. 그림 10에서 EKF 방법의 위치 오차 covariance값은 DR 방법이나 절대 센서의 측정치에 포함된 위치 오차 covariance값에 비해 월등히 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 EKF 방법의 우수성을 증명해 주고 있다.

그림 11와 12에 EKF 방법과 절대 센서에 의해 획득된 위치값의 실제 오차를 비교하여 표시하였다.

그림 11는 AGV가 직선부를 통과한 직후의 시뮬레이션 결과이며 그림 12은 AGV가 반원부를 통과한 직후의 시뮬레이션 결과이다. 이들 그림에서 데이터 점이 어두운 영역(shadowed region)에 위치하면 EKF 방법에 의한 평가 오차가 절대 센서로 측정된 위치값에 포함된 오차보다 작다는 것을 표시한다. 그림에서 보는 바와 같이 EKF 방법에 의한 오차 성분의 크기는 실제 측정치에 포함된 측정 오차보다 감소한다는 사실을 알 수 있다.

앞의 시뮬레이션 결과를 종합하면, EKF 방법은 상대 센서와 절대 센서에 의해 관측된 AGV의 위치값들을 융합하여 최적 위치값을 평가할 수 있으며, 최적 위치값에 포함된 오차 성분은 각 센서 시스템에 의해 관측된 위치값들에 포함된 오차 성분들의 크기에 비해 현저하게 감소되었다는 결론을 내릴 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 엔코더 시스템과 비전 센서 시스템을 갖춘 자유 주행 AGV의 정확한 위치 인식을 위한 위치 평가 알고리즘의 개발에 중점을 두었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. ML 방법은 작업장 바닥의 굴곡, 센서 잡음 등 외란의 영향을 받는 엔코더 시스템의 측정값들을 융합하여 단위 검출 시간당 AGV의 이동 거리 및 주행 방향 변화량을 효율적으로 평가할 수 있다.

2. 엔코더에 의한 위치 평가의 정확도를 향상시키기 위하여 DR 시스템에 대한 stochastic 모델을 유도하였다.

3. EKF 방법은 측정 오차를 가지는 상대 센서(엔코더 시스템)와 절대 센서(비전 센서)의 측정치들을 효율적으로 융합하여 AGV의 현 위치에 대한 최적치를 평가할 수 있다.

본 연구에서 제시된 위치 인식 알고리즘은 과자유도 엔코더 시스템 및 절대 센서를 조합한 복합 센서 시스템에 적용할 수 있으며, AGV의 위치  $(X, Y, \theta)$ 를 정확히 예측함으로써 자유 주행 AGV의 시스템의 위치 인식 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

[1] M. Tajima, "Computer Controlled Wire Guided Vehicle in FMS," Proc. 1st Int. Conf. on AGVS, pp. 1-10, 1981.

[2] D. Elbracht and W. Polum, "Wire Guided Flexible Manufacturing Line Systems in Europe, USA and Japan," Proc. 2nd Int. Conf. on AGVS, pp. 129-146, 1983.

[3] R.A. Bohlander, "Advances in AGVS Technology," Automated Manufacture Seminar, Charlotte, NC, 1985.

[4] T. Tsumura, "Survey of Automated Guided Vehicle in Japanese Factory," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1329-1334, April 1986.

[5] T. Tsumura, et al. "An Experimental System for Automatic Guidance of Roboted Vehicle Following the Robots Stored in Memory," Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 187-194, Oct, 1981.

[6] T. Tsumura, et. al., "System for Measuring Current Position and/or Heading of Vehicles," Eulletin of the JSME, 25(203), pp. 821-829, May 1982.

[7] K. Fujwara, et al. "Development of Guideless Robot Vehicle," Proc. Proc. 11th Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 203-210, Oct. 1981.

[8] R.A. Cohlander, "Cnderstanding AGVS Today," AGVS '86 Seminar, Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Oct. 1986.

[9] S.Y. Harmon, "Robot Mubility : Which Direction and How Far?" Robot 11, 17th Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 17-1-17-11, 1987.

[10] N. Nimrod, et al, "A Laser-Based Scnning Range Finder for Robotic Applications," Proc. 2nd It. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp. 241-252, Nov. 1982.

[11] M.P. Case, "Single landmark navigation by mobili robots," Proc. of SPIE, Mobile Robots, vol. 727, pp. 231-237, 1986.

[12] S.A. Walter, "The Sonar Ring: Obstacle Detection for a Mobili Robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1574-1579, April 1987.

[13] Larry. Banta, "Advanced Dead Rekuning Navigation For Mobilie Robots," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1987.

[14] T. Hongo, et al, "An Automatic Guidance

- System of a Self-Controlled Vehicle," IEEE Trans. on Industrial Electronics, IE-34, (1), pp. 5-10, Feb. 1987.
- [15] Y.T. Ren and S.P. Walker, "Position Determination of Automatically Guided Vehicles," Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 1(5), pp. 45-53, 1986.
- [16] Sang Ryong Lee, D. Lapkin, S. Dickerson, "AGV Guidance: Position Estimation, Control, Adaptation," MHRC Fall Monitor's Meeting, Omni International Hotel, Atlanta, Ga, Oct. 1988.
- [17] Sang Ryong Lee, "Position Estimation of Industrial Wheeled Vehicles," Technical Report, MHRC-TD-88-12, Material Handling Research Center, G.I.T. Atlanta, Ga, 1989.
- [18] Frank L. Lewis, "Optimal Estimation," John Wiley & Sons, 1986, pp. 19-23.
- [19] W. McKinney, "A Low Cost Vision System for Landmark Tracking," Master's Thesis Georgia Tech., Atlanta, Georgia, Jan. 1987.
- [20] Arthur E. Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho, "Applied Optimal Control," John Wiley & Sons, 1975, pp. 373-377.
- [21] Sang Ryong Lee, "Position Estimation of Industrial Wheeled Vehicles," Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1989.