〈論 文〉

이동 로봇의 실시간 자세 추정을 위한 센서 시스템의 개발

이상룡* · 권승만**

(1992년 11월 30일 접수)

Development of a Sensor System for Real-Time Posture Measurement of Mobile Robots

Sang-Ryong Lee and Seong-Man Kwon

Key Words: Mobile Robot(이동 로봇), Posture Measurement(자세 측정), Real-Time Measurement(실시간 계측), Vision Sensor(비젼 센서), Image Processing Technique(영상 처리 기법), Binary Image(이진 영상), Camera Calibration(카메라 변수 보정)

Abstract

A sensor system has been developed to measure the posture(position and orientation) of mobile robots working in industrial environments. The proposed sensor system consists of a CCD camera, retro-reflective landmarks, a strobe unit and an image processing board. The proposed hardware system can be built in economic price compared to commercial vision systems. The system has the capability of measuring the posture of mobile robots within 60 msec when a 386 personal computer is used as the host computer. The experimental results demonstrated a remarkable performance of the proposed sensor system in the posture measurement of mobile robots - the average error in position is less than 3 mm and the average error in orientation is less than 1.5.

1. 서 론

다품종 혼류생산 방식의 필요성이 요구됨에 따라 물류 흐름의 자동화를 위하여 무인 반송 시스템, 즉 이동 로봇이 생산 현장에 활발히 도입되고 있다.[1,2] 현재 산업계에서 운용되고 있는 이동 로봇의 대부분은 작업 현장의 바닥에 매설된 주행 유도선 본체에 설치된 센서로 인식하여 주행하는 고정궤도 방식을 사용하고 있지만[3,4] 주행 유도선을 설치하지 않고도 지시된 목적지를 찾아갈 수 있는 자율 주행방식의 이동 로봇의 도입에 대한 요구도 점차 높아지고 있다.[5]

자율 주행 방식의 이동 로봇을 실용화하기 위하여서는 로봇의 주행 자세를 허용오차범위 내에서 실시간으로 측정할 수 있는 센서시스템 개발이 절실히 요구되고 있다.[6] 이동 로봇의 주행 자세를 실시간으로 측정할 수 없으면 목표 장소에 도달하기 위한 제어 행위가 적절히 이루워지지 못하며, 결과적으로 정상적인 운행이 불가능하게 된다.

이동 로봇의 자세 추정은 엔코더, 자이로스코프, 가속계 등의 상대 위치 측정용 센서를 사용하는 방법[7,8]과 레이저 스캐닝 시스템, 비젼센서, 초음파 센서 등의 절대 위치 측정용 센서를 사용하는 방법[9~12]들이 제안되고 있다. 일반적으로 상대위치 측정용 센서시스템을 이용한 이동 로봇의 자세 추정

*정회원, 경북대학교 기계공학과
**경북대학교 기계공학과 대학원

방법은 센서시스템의 구조와 신호처리 방법이 단순하기 때문에 실시간 자세 추정이 가능하나 추정 오차가 이동거리에 따라 누적되는 특성을 가지므로 일정한 영역 내에서만 적용할 수 있다는 제약이 있다. 절대 위치 측정용 센서는 비교적 정확하게 로봇의 자세를 측정할 수 있다는 장점을 가지나 환경변화에 매우 민감하며 실시간 계측을 위하여 고가 시스템이 필요하다는 제약이 있다. 현재 레이저 스캐닝 시스템을 이용한 자세 추정방법을 실용화한 이동 로봇[5]이 소개되고 있으나, 비전 센서를 이동 로봇의 자세추정[13~15]에 이용하여 실용화한 단계에는 이르지 못하고 있다.

본 연구는 비전 센서를 이용하여 이동 로봇의 실시간 자세 계측을 달성할 수 있는 센서 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위하여 우선 위치 정보의 전달성 및 감식성이 우수한 표식을 설계하고, 표식 인식에 필요한 조명을 제공함과 동시에 카메라에 맺힌 표식의 영상과 주변 환경에 의한 잡음을 구별하는 시간을 최소화하기 위해 고광량의 조명시스템을 설계 제작하였다. 또한 표식의 영상 정보로부터 로봇의 자세를 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 본 연구를 통하여 개발된 센서시스템의 성능을 평가하기 위해 0.01 mm의 정밀도를 가지는 3차원 이송 테이블 상에 시스템을 탑재하여 이송 테이블의 제어기에 의해 계측된 이동 로봇의 잔세와 제안된 센서시스템에 의해 계측된 로봇의 자세를 비교하여 추정 오차를 검토하는 실험을 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 제안된 센서시스템을 이동 로봇에 설치할 때의 잘못에 의해 발생되는 오차를 줄이기 위하여 카메라의 변수를 보정하는 실험을 수행하였다.

2. 연구방법

작업장 내를 주행하고 있는 이동 로봇의 자세는 작업장 내의 일정한 장소에 고정된 기준 좌표계에 대하여 표시된다. 이동 로봇의 자세는 기준 좌표계의 원점에 대한 로봇 본체에 설정된 기준점의 좌표값(X_R, Y_R, Z_R)과 각 좌표축에 대한 이동 로봇의 기울기를 표시하는 피치각 Ψ_R, 롤링각 Φ_R, 요잉각 Θ_R 등의 값으로 정의된다. 본 단원에서는 이동 로봇의 자세를 추정하는 방법과 본 연구를 통하여 개발된 센서시스템의 측정 변수 및 이동 로봇의 자세 추정에 응용하는 방법에 대하여 설명하고자 한다.

2.1 이동 로봇의 자세 추정 방법

본 연구에서는 작업장 내를 이동하고 있는 이동 로봇의 자세를 표시하기 위하여 산업용 로봇의 자세 추정에 사용된 경우와 마찬가지로 편의상 다양한 좌표계를 정의하고 있다.[16] Fig. 1은 이동 로봇의 자세를 표시하기 위하여 본 연구에서 도입된 좌표계들을 보여주고 있다. Fig. 1에 표시된 기준좌표계(world frame)은 이동 로봇과 작업장 내에 설치된 표식들의 위치 및 방향각을 표시하기 위한 좌표계이다. 본 좌표계의 원점은 사용자에 의해 작업공간내에 임의의 기준점에 설정되었으며, 작업장의 바닥면을 본 기준 좌표계의 XY 평면으로 설정하였다. 로봇 좌표계(robot frame)는 이동 로봇의 본체상의 일정점에 고정되어 로봇과 같이 움직이는 직각 좌표계이며, 기준 좌표계에 대한 원점의 위치는 이동 로봇의 위치를 표시하며 각 좌표축들의 방향은 로봇의 방향각을 표시한다. 로봇 좌표계의 설정은 로봇의 본체에 설치된 각종 측정용 센서들의 위치를 표시하는데 유용하며, 본 연구에서는 자세 추정용 이미지 센서의 위치를 표시하는데 사용된다. 센서 좌표계(sensor frame)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 로봇에 설치된 CCD 카메라의 광축상에 설정된 직각 좌표계이며, 이미지 센서에 대한 표식들의 자세를 표시하는데 사용된다. 화소 좌표계(pixel frame)는 이미지 센서의 화소 물리적 주소(physical address)값이 (0,0)점에 원점을 설정한 직각 좌표계이며, 화소면에 맺힌 표식 영상들의 도심과 방향각을 표시하기 위하여 유용하게 사용된다. 표식 좌표계(landmark frame)은 표식들의 위치를 표시하기 위하여 표식들의 도심에 원점을 설

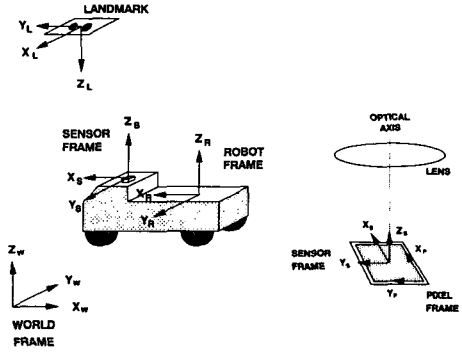


Fig. 1 Various coordinate systems for the posture estimation of mobile robots

정하였으며, 기준 좌표계에 대한 본 표식 좌표계의 원점은 표식의 위치값, 표식 좌표계의 좌표축들의 기울기는 표식의 방향을 표시한다.

기준 좌표계에 대한 로봇 좌표계의 원점 좌표계 값을 (X_R, Y_R, Z_R), 각 좌표축들의 회전각을 $(\Psi_R, \Phi_R, \Theta_R)$의 오일러 각으로 표시하면 이동 로봇의 자세는 식(1)에 표시된 변환 행렬의 형태로 표시할 수 있다.[16]

$$ {}^{W}T_R=\begin{bmatrix} N_x & S_x & O_x & X_R \\ N_y & S_y & O_y & Y_R \\ N_z & S_z & O_z & Y_R \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

첫번째 열벡터 $\vec{N}$은 기준 좌표계의 X-축에 대한 로봇 좌표계 X-축의 회전상태를 표시하며, 두번째 열벡터 $\vec{S}$는 기준 좌표계의 Y-축에 대한 로봇 좌표계 Y-축의 회전 상태를 표시하면, 세번째 열벡터 $\vec{O}$는 기준 좌표계의 Z-축에 대한 로봇 좌표계 Z-축의 회전상태를 표시한다. 그리고, 네번째 열벡터는 기준 좌표계의 원점에 대한 로봇 좌표계의 원점을 표시한다. 그러므로, 식 (1)에 표시된 변환 행렬의 값을 계산하면 이동 로봇의 자세에 대한 정보를 완벽하게 알 수 있다. 이동 로봇이 주행하는 작업장의 바닥 상태가 매우 평탄하며, 주행중에 로봇에 발생하는 요동이 무시할 수 있을 정도로 적다고 가정하면 기준 좌표계와 로봇 좌표계의 XY 평면이 항상 평행하게 되므로 로봇의 기울기를 표시하는 피치각 Ψ_R과 롤링각 Φ_R의 변화는 무시할 수 있으며, Z_R의 값은 항상 일정하다. 그러므로 로봇의 자세는 (X_R, Y_R, Θ_R)의 3자유도로 표시할 수 있으며 이동 로봇의 자세를 표시하는 변환 행렬은 식(2)와 같이 표시된다.

$$ {}^{W}T_R=\begin{bmatrix} \cos(\Theta_R) & -\sin(\Theta_R) & 0 & X_R \\ \sin(\Theta_R) & \cos(\Theta_R) & 0 & Y_R \\ 0 & 0 & 1 & Z_R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

이동 로봇의 자세에 대한 정보를 제공하기 위하여 작업장 내의 천장에 부착되어 있는 표식들의 도심에 설정된 표식 좌표계는 기준 좌표계에 대한 각 표식의 위치 및 방향각을 가리키고 있다. 표식들을 기준 좌표계가 설정된 작업장 바닥면과 평행하게 설치한다고 가정하면 기준 좌표계에 대한 표식 좌표계의 변환 행렬은 식(2)와 같은 형태의 4×4변환 행렬로 표시할 수 있다.

$$ {}^{W}T_L=\begin{bmatrix} \cos(\Theta_L) & -\sin(\Theta_L) & 0 & X_L \\ \sin(\Theta_L) & \cos(\Theta_L) & 0 & Y_L \\ 0 & 0 & 1 & Z_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

식(3)에 표시된 변수 Θ_L의 값은 각 표식이 가리키는 방향각을 표시하며, 기준 좌표계의 X-좌표계에 대한 표식 좌표계의 X-좌표계의 회전각을 시계반대 방향으로 표시한다. 좌표값(X_L, Y_L, Z_L)은 기준 좌표계에 대한 표식들의 설치 위치를 표시하며, 표식 좌표계의 원점의 좌표값에 해당한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 이미지 센서에 설정된 화소 좌표계와 CCD 카메라의 광축상에 설정된 센서 좌표계사이의 관계는 식(4)와 같은 변환 행렬로 표시된다.

$$ {}^{P}T_S=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_xC_x \\ 0 & 1 & 0 & d_yC_Y \\ 0 & 0 & 1 & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서, 상수(C_X, C_Y)는 이미지 센서의 화소면과 카메라의 광축이 교차하는 지점의 좌표계를 표시하며, d_x와 d_y는 각각 단위 화소의 크기를 표시한다. 그리고, S_i는 카메라 렌즈와 화소면간의 거리를 표시한다.

센서 좌표계와 표식 좌표계간의 변환 행렬은 두 좌표계들이 서로 평행하다고 가정하면 식(4)와 같이 회전행렬의 값이 단위 행렬의 형태로 표시되나, CCD 카메라를 로봇 본체에 설치할 때 작업자의 부주의 등의 요인에 의하여 로봇 좌표계와 센서 좌표계 사이에 약간의 기울기가 발생할 수 있다. 그러므로, 두 좌표계간의 변환행렬은 식(5)와 같이 좌표계의 회전상태를 고려한 형태로 표시하여야 한다.

$$ {}^{S}T_L=\begin{bmatrix} & & X_{SL} \\ & {}^{S}R_L & Y_{SL} \\ & & Z_{SL} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

또한 본 연구에서는 기준 좌표계, 표식 좌표계, 로봇 좌표계들의 XY-평면은 서로 평행하다고 가정하였으므로, 센서 좌표계에 대한 표식 좌표계의 3×3 회전 행렬 ${}^{S}R_L$과 로봇 좌표계에 대한 센서 좌표계의 회전 행렬 ${}^{R}T_S$의 관계는 식(6)과 같이

표시된다.

$$^{R}R_S = -^{S}R_L \tag{6}$$

그러므로, 로봇 좌표계에 대한 센서 좌표계의 변환 행렬의 값은 식(7)과 같이 표시할 수 있다.

$$^{R}T_S = \begin{bmatrix} & & X_S \\ & -^{S}R_L & Y_S \\ & & Z_S \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

기준 좌표계에 대한 표식 좌표계의 변환 행렬과 다른 좌표계들의 변환 행렬들간의 관계식은 식(8)과 같이 표시된다.

$$^{W}T_L = {}^{W}T_R\,{}^{R}T_S\,{}^{S}T_L \tag{8}$$

식(8)로부터 기준 좌표계에 대한 이동 로봇의 자세를 계산하면 식(9)와 같이 변형할 수 있다.

$$^{W}T_R = {}^{W}T_L\,({}^{S}T_L)^{-1}\,({}^{R}T_S)^{-1} \tag{9}$$

여기서, 변환 행렬 $^{W}T_L$의 값과 변환 행렬 $^{R}T_S$의 값들 중 센서 좌표계의 원점의 좌표계(X_S, Y_S, Z_S)은 이동 로봇과 작업장의 설계 단계에서 결정할 수 있으며, 변환행렬 $^{S}T_L$를 구성하는 요소들 중 센서 좌표계에 대한 표식 도심의 위치(X_{SL}, Y_{SL})의 좌표계과 표식의 기울기 Θ_{SL}의 값은 본 연구에서 제안하는 센서 시스템을 사용하여 측정하고자 한다. 그리고, 센서 좌표계의 좌표계에 대한 표식 좌표계의 좌표축의 회전상태를 표시하는 회전행렬 $^{S}R_L$의 값은 통상적인 측량 방법으로는 측정하기가 매우 곤란하므로 카메라 보정 방법[17]을 적용하여 추정하고자 한다.

2.2 센서시스템 구성

이동 로봇 자세를 실시간으로 측정하기 위하여 본 연구에서 제안하고 있는 센서시스템은 이동 로봇 본체에 설치된 CCD 카메라를 사용하여 작업장 내의 일정한 장소에 설치된 표식들의 영상을 수집하여 영상처리 과정을 거쳐 로봇에 대한 표식의 자세를 측정한 뒤, 좌표 변환 공식을 사용하여 작업장 내에 설정된 기준 좌표계에 대한 이동 로봇의 자세를 추정할 수 있는 시스템이다. 본 시스템에 사용되는 표식들은 로봇의 위치 및 주행 방향각에 대한 정보를 제공할 수 있는 형상으로 설계되어야 하며, 기준 좌표계에 대한 표식들이 설치 위치 및 방향은 측정되었다고 가정한다. 그리고, 영상처리에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 그레이 영상처리 방법을 사용하지 않고 이진 영상처리 방법을 채택하였으며, 표식들의 영상과 주변 물체들의 영상간의 경계를 선명하게 유지하기 위하여 표식을 고휘도의 재질을 사용하여 제작하였으며, 강력한 조명을 제공하는 스트로보 시스템을 사용하여 영상 잡음을 최대한 제거하고자 시도하였다.

이동 로봇에 대한 표식의 자세를 측정하기 위해 제작된 센서시스템의 실제 모습을 Fig. 2에 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 본 시스템은 표식, 조명 장치, 영상 처리 보드, CCD 카메라, 호스트 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 표식은 정사각형 알루미늄판(크기 200×200 mm, 두께 3 mm) 상에 재귀반사 특성을 가지는 특수한 재질을 사용하여 영상의 찌그러짐이 발생하여도 중심의 변화가 작은 원형 무늬로 설계하였다.[18] 로봇의 자세 측정에 사용되는 표식은 각각 60 mm와 40 mm의 직경을 가지는 두 개의 원형 무늬로 구성되었으며, 두 원형 무늬들 간의 중심거리는 90 mm로 설계하였다. 본 표식의 위치를 표시하는 기준점은 두 원형 무늬의 도심(centroid)으로 선정하였으며, 표식

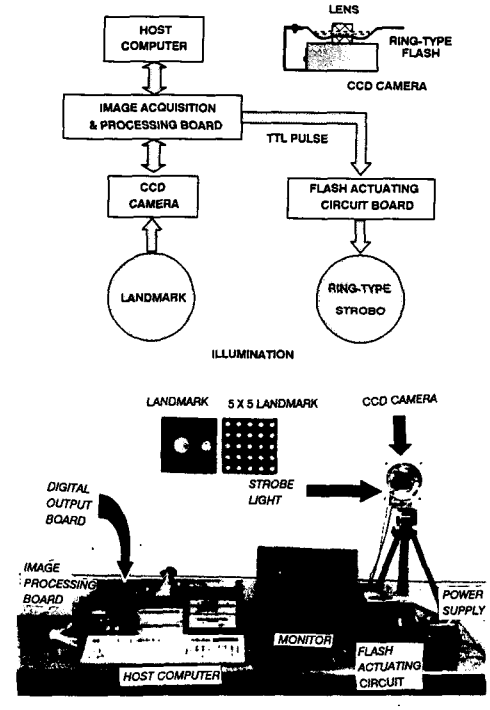


Fig. 2 Picture of the sensor system used for posture measurement

이 가리키는 방향각은 큰 원형 무늬의 중심과 작은 원형 무늬의 중심을 연결하는 직선의 기울기로 정의하였다. Fig. 2에 표시된 직경 20 mm의 원형 무늬들을 5×5의 격자형으로 배열한 표식은 카메라의 변수를 보정하는데 사용된 표식의 형상을 보여주고 있다. 그리고 기하학적 오차를 최대한 줄이기 위하여 실크 스크린 기법을 적용하여 표식들을 제작하였으며, 표식 무늬를 제외한 부분들은 무광택의 검정색 도료를 사용하여 처리하였다.

고 반사률과 재귀 효과를 가지는 특수 테이프를 사용하여 제작된 표식들에 입사되는 광량이 많을수록 이미지 센서에 맺히는 표식의 영상이 선명하게 되므로 고광량의 스트로보 시스템을 설계하여 제작하였다. 본 연구에 사용된 스트로보 시스템은 균일한 크기의 광량을 표식에 제공하기 위한 환형 구조(ring-type)의 방전관, 직류 24V의 입력 전압을 사용하여 방전관의 발광에 필요한 1200V의 전압을 공급하기 위한 승압 회로, TTL 형태의 트리거 신호를 감지하여 스트로보 시스템을 작동시키기 위한 발광 신호 입력부 등으로 구성되어 있다. 본 시스템의 최대 허용 발광 주파수는 영상처리 시간을 고려하여 20 Hz로 설계하였다.

실험에 사용된 CCD 카메라는 192(H)×165(V)의 화소 배열을 가지는 흑백 이미지 센서를 사용하며, 초점 거리 16 mm의 표준 렌즈를 장착하고 있다. 이미지 센서의 화소의 크기는 13.75 μm×16 μm이며, 본 카메라를 사용하여 측정할 수 있는 범위는 피사체와 렌즈 중심간의 거리에 따라 달라지나 표식을 렌즈 중심에서부터 2미터 떨어진 곳에 설치하면 약 330 mm×330 mm 정도의 시야를 가지게 된다.

본 연구에서는 고휘도의 표식 재질과 강력한 스트로보의 사용으로 이미지 센서에 맺히는 표식의 화상이 주변물체들의 화상에 비해 매우 선명하다고 가정하였다. 그러므로 표식의 화상 처리에 소요되는 시간을 최대한 단축하기 위하여 이미지 센서의 영상 출력 신호를 그레이 이미지로 처리하지 않고 이진 영상으로 처리하는 방법을 채택하여 영상 신호 처리 보드를 설계, 제작하였다. Fig. 3은 영상 신호 처리 회로의 개략도를 보여주고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 전체 회로는 80C31 프로세서, 영상처리 알고리즘을 수록한 EPROM, 영상처리 과정의 각종 데이터 저장을 위한 데이터 RAM, 영상 처리에 필요한 각종 기준 신호를 생

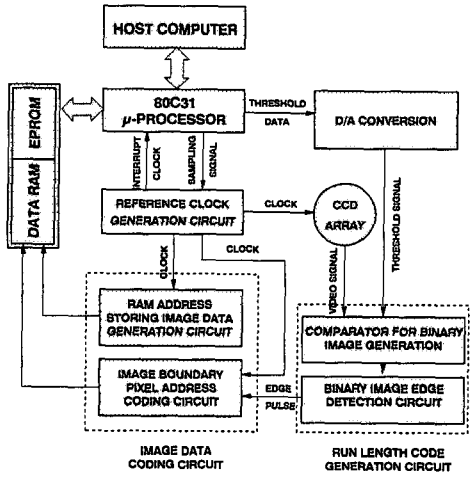


Fig. 3 Schematic structure of the image processing circuits

성하는 클락 발생 회로, 디지털 신호의 형태로 입력된 이진 영상 신호의 임계값을 비교기에 필요한 기준 아날로그 신호로 변화시키기 위한 D/A 변환부, 표식 영상의 경계부에 해당하는 화소들의 주소값을 구하기 위한 런 렝스(run length) 코드 발생부, 영상부의 경계 화소들의 주소값을 데이터 램의 일정한 장소에 기억시키기 위한 이미지 코딩(image coding)부 등으로 구성되어 있다. 중앙 처리 장치인 80C31 프로세서는 호스트 컴퓨터의 명령 해석, 영상처리 회로의 제어, 영상처리 알고리즘의 수행, 호스트 컴퓨터와의 자료 전송 등의 역할을 수행한다. 호스트 컴퓨터로부터의 명령은 인터럽트의 형태로 80C31 프로세서에 접수되며, 호스트 컴퓨터와 80C31 프로세서간의 데이터 입출력은 핸드쉐이크 모드로 수행된다.

2.3 영상처리 알고리즘

앞에서 설명한 센서시스템을 사용하여 표식들의 영상 정보가 수집되면 이미지 센서에 맺힌 표식 영상의 경계부에 해당하는 화소들의 주소값이 데이터 램의 일정한 위치에 저장된다. 표식 영상에 대한 정보수집이 완료되면 80C31 프로세서는 다음과 같은 알고리즘을 수행하여 표식 영상의 도심 위치값과 방향각을 계산한다.

(1) 전술한 바와 같이 표시의 형상은 크기가 다른 두 개의 원형 무늬로 구성되어 있기 때문에 데이터 램에 기록된 경계 화소들의 주소값들은 두 개

의 원형표식에 대한 정보를 같이 수록하고 있다. 그러므로, 데이터 램에 저장된 영상정보를 순차적으로 읽어 화소 좌표계의 수평 방향과 수직 방향으로 서로 인접한 경계 화소들의 주소값들을 비교하여 동일한 표식의 영상에 해당하는지 다른 표식의 영상에 해당하는지의 여부를 조사하여 각각의 원형 표식에 대응하는 영상 정보로 분리하는 작업을 수행한다.

(2) 분리된 영상 정보를 사용하여 두 원형 표식들의 이진 영상에 대한 영상 도심의 좌표계(X_{c1}, Y_{c1}), (X_{c2}, X_{c2})과 영상 면적 A_1, A_2를 화소 좌표계를 사용하여 계산한다.

(3) 표식 무늬의 전체 영상의 화소 좌표계에 대한 도심의 좌표값(X_C, Y_C)을 식 (10)을 사용하여 계산한다.

$$X_c=\frac{X_{c1}A_1+X_{c2}A_2}{A_1+A_2}$$
$$Y_c=\frac{Y_{c1}A_1+Y_{c2}A_2}{A_1+A_2} \tag{10}$$

여기서, (X_{c1}, X_{c1})는 큰 원형 표식의 영상에 대한 도심 좌표값, (X_{c2}, Y_{c2})는 작은 원형 표식의 영상에 대한 도심의 좌표값, A_1과 A_2는 각각 큰 원형 표식과 작은 원형 표식의 영상이 이미지 센서에서 차지하는 면적(화소의 개수)을 표시한다.

(4) 화소 좌표계에서 구한 이진 영상의 도심 좌표값을 센서 좌표계에 대한 좌표값(X_s, Y_s)으로 변환하고 큰 원형의 영상 도심에서 작은 원형의 영상 도심을 연결하는 직선의 기울기 Θ_s의 값을 계산한다. 여기서, 두 도심을 연결하는 직선의 기울기는 표식의 이진 영상의 방향각으로 정의된다.

$$X_s=d_x(X_c-C_x)$$
$$Y_s=d_y(Y_c-C_y)$$
$$\Theta_s=\tan^{-1}\left(\frac{d_y(Y_{c1}-Y_{c2})}{d_x(X_{c1}-X_{c2})}\right) \tag{11}$$

식(11)에 표시된 d_x와 d_y는 각각 단위 화소의 수평, 수직 방향의 크기를 표시하며, 본 연구에 사용된 이미지 센서의 경우에는 $d_x=13.75\,\mu$m, $d_x=16\,\mu$m이다. 그리고 C_X와 C_Y는 화소 좌표계에 대한 센서 좌표계의 원점의 좌표값을 의미한다.

(5) 식(11)로 표시된 화소 좌표계에 대한 표식 영상의 도심 좌표값과 방향각을 센서 좌표계에 대한 실제 표식의 좌표값(X_{SL}, Y_{SL})과 방향각 Θ_{SL}을 계산한다.

$$X_{SL}=X_S(S_0-f)/f$$
$$Y_{SL}=Y_S(S_0-f)/f$$
$$\Theta_{SL}=-\Theta_s \tag{12}$$

여기서, 변수 S_0는 피사체와 카메라 렌즈간의 거리를 표시하며, 변수 f는 사용된 카메라 렌즈의 유효 초점거리를 가리킨다.

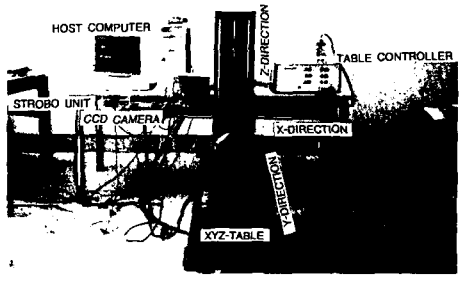
(6) 센서 좌표계에 대한 표식의 자세(X_{SL}, Y_{SL}, Θ_{SL})를 계산한 뒤 식(9)에 대입하여 기준 좌표계에 대한 로봇의 자세를 추정한다.

식(9)~(12)에서 보는 바와 같이 본 센서 시스템을 사용하여 이동 로봇의 자세를 추정하기 위하여서는 이미지 센서의 중심 좌표값 C_X와 C_Y, 렌즈의 유효 초점거리 f, 피사체와 카메라 렌즈간의 거리 S_0, 작업장 벽이나 천장에 설치된 기준 표식의 도심의 좌표값 및 방향각에 대한 정보가 필요하다.

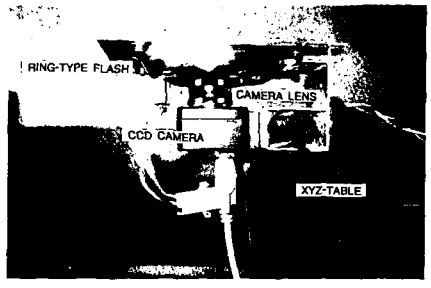
3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치 및 실험 방법

이동 로봇의 자세 추정을 위하여 개발된 센서 시스템의 성능을 조사하기 위하여 영상 실험을 수행하였다. Fig. 4는 실험 장치의 전체 모습과 CCD



(a) Picture of experimental equipments



(b) Picture of stroboscope system

Fig. 4 Picture of experimental equipments (a) and zoomed view of the strobo system

카메라 부분을 확대하여 보여주고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 표식은 실험실의 천장에 설치하였으며, 영상 수집에 사용된 CCD 카메라는 이동 로봇의 본체에 탑재하는 대신에 항상 정밀한 위치 측정이 가능한 3차원 이송 테이블에 설치하여 실험을 수행하였다. 이동 로봇 대용으로 사용된 3차원 이송 테이블은 3개의 독립적인 구동 모터에 의해 직각 좌표계의 X-, Y-, Z-축 방향으로 위치 재현도 0.01 mm의 위치 제어가 가능하며, 이송 테이블이 위치를 표시하는 좌표값이 제어 장치의 문자판에 표시된다. 본 연구에서는 호스트 컴퓨터와 이송 테이블의 제어 장치를 RS-232C 포트로 연결하여 이송 테이블의 위치를 항상 측정할 수 있도록 하였다. 그리고, 영상처리 보드는 호스트 컴퓨터의 슬롯에 장착하여 표식 영상의 수집 및 해석 작업에 사용하였으며, 환형의 방전관은 그림에서 보는 바와 같이 카메라 렌즈 주위에 설치하여 표식에 균일한 관량을 제공하고자 하였다.

Fig. 5는 본 실험에 사용된 각종 좌표계들의 설정 방법을 보여주고 있다. 기준좌표계의 원점은 3차원 이송 테이블의 원점(0, 0, 0)에 설정하였으며, 표식 좌표계의 원점은 천장에 설치된 표식의 도심에 설정하였다. 기준 좌표계에 대한 표식 좌표계의 원점의 좌표값(X_L, Y_L, Z_L)은 215, 215, 3150), 표식의 방향각 Θ_L은 0°로 설정하였다. 단위치 표시에 사용한 단위는 mm이다. 로봇 좌표계와 센서 좌표계의 원점은 동일하게 설정하였으며, CCD 카메라에 설치된 이송 테이블의 본체에 설정하였다. 그러므로, 이송 테이블의 위치값, 즉 제어 장치에 표시된 이송 테이블의 좌표값이 센서 좌표계 및 로봇 좌표계의 원점의 위치에 해당하며, 로봇 좌표계에 대한 센서 좌표계의 변환 행렬은 단위행렬, 즉 ${}^{R}T_S = I$이 된다.

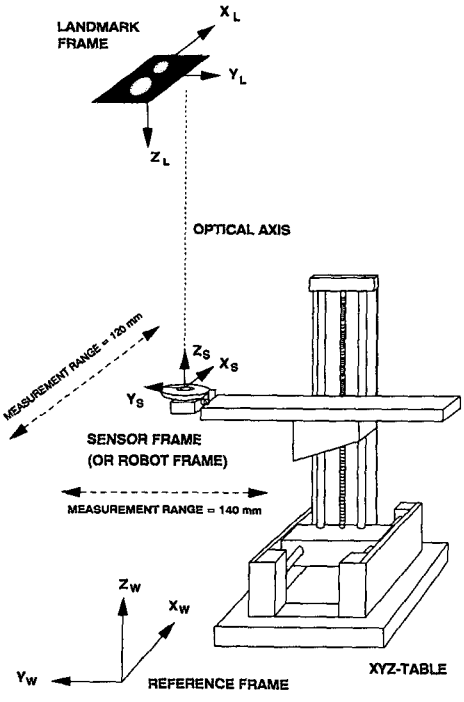


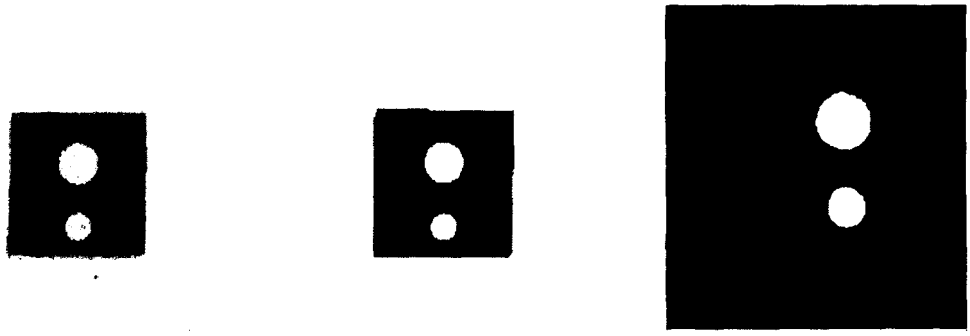
Fig. 5 Coordinate systems used for the experiment

본 연구에서 개발된 센서시스템을 사용하여 수행한 실험은 크게 센서 시스템의 성능을 조사하기 위한 실험, 카메라 변수 보정을 위한 실험, 이동 로봇의 자세 추정실험 등으로 분류할 수 있다. 실험 방법은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 카메라 변수보정에 사용되는 표식이나 로봇의 자세 추정에 사용되는 표식을 실험실 천장에 설치한 뒤, 이송 테이블에 설치된 CCD 카메라의 위치를 적절히 조정하여 표식의 영상을 수집하였다. 그리고, 이미지 센서에 수집된 표식의 영상 정보와 앞서 설명한 영상처리 알고리즘을 적용하여 표식 영상의 상태 및 위치를 계산하였으며, 본 시스템을 사용하였을 때의 오차 특성 등을 조사하였다.

3.2 센서 시스템의 성능 실험

Fig. 6은 표식의 영상을 3가지 방법을 사용하여 수집한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 자연 조명 상태에서 16단계의 그레이 스케일을 사용하여 표식의 영상을 처리한 결과를 보여주며, Fig. 6(b)는 자연 조명 상태에서 이진 영상처리 방법을 사용하여 표식의 영상을 처리한 결과를 보여주며, Fig. 6(c)는 본 센서시스템의 스트로보 시스템을 사용하여 강제 조명 상태에서 수집한 표식의 영상을 이진 영상처리 방법으로 처리한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 6의 실험결과에서 보는 바와 같이 자연 조명 하에서는 이미지 센서의 화상면에 표식과 주변 물체들의 영상이 혼합되어 나타나며, 강제 조명의 경우에는 표식의 영상만을 또렷하게 얻을 수 있다는 사실을 관측할 수 있다. 그러므로, 자연 조명하에서 수집한 영상 정보로부터 표식 도심의 좌표값 및 방향각을 계산하기 위하여서는 이미지 센서의 영상 신호로부터 표식의 영상 정보를 분리할 수 있



(a) Gray image (b) Binary image (c) Binary image

Fig. 6 Image of landmark by natural illumination (a and b) and strobo illumination (c)

는 영상 인식 알고리즘을 사용을 필요로 하며, 이러한 영상처리 알고리즘은 일반적으로 복잡한 계산을 요구하기 때문에 실시간 처리가 요구되는 곳에서는 곤란하다.[19,20] 그러므로, 본 연구에서 제안하고 있는 스트로보 시스템을 이용한 강제 조명 방법은 표식의 영상 수집에 소요되는 시간을 현저히 줄일 수 있을 뿐 아니라 표식 주변의 물체들의 영상 정보가 최종 영상처리 결과에 포함되지 않으므로 표식의 도심 및 방향 각 계산에 필요한 시간을 현저히 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 센서 시스템을 사용하여 표식의 위치를 계산하는데 소요되는 시간은 호스트 컴퓨터의 종류에 따라 달라지나 386급 컴퓨터를 사용하였을 때에는 0.1초 미만의 시간이 소요된다.

본 센서 시스템의 자세 추정 능력에 대한 신뢰성을 조사하기 위하여 로봇의 자세 추정에 사용된 표식의 영상을 대상으로 동일한 조건에서 100번 반복하여 영상 실험을 수행하여 큰 표식과 작은 표식의 영상 면적, 도심의 좌표계, 방향각 등을 계산한 결과르 Table 1에 수록하였다. Table 1은 영상 실험시 관측된 최대값과 최소값, 그리고 평균값과 표준편차를 수록하고 있다. 여기서, 표준편차의 값은 측정 변수들의 측정치에 대한 신뢰 구간의 크기를 표시한다. Table 1에서 보는 바와 같이 본 영상처리 실험을 통하여 측정된 모든 변수들의 값은 [(평균값)±3×(표준편차)]의 구간 내에서 100% 관측되었으며, 영상 중심의 좌표값에 대한 측정 데이터들은 1화소 단위미만의 오차를 가지며 분산하며, 표식 영상의 방향각은 1° 미만의 오차를 가지고 분포하고 있다는 사실을 보여주고 있다. 이러한 실험결과는 이동 로봇의 자세 추정능력에 대한 본 센서 시스템의 높은 신뢰도를 보여주고 있다.

Table 1에 표시된 실험결과는 전체 표식의 영상에 대한 도심의 위치와 방향각을 계산하는 식(11)로부터 예측할 수 있다. 식(13)은 미소 요소들에 대한 2차항들을 무시하여 두 개의 원형 표식의 영상에 대한 면적의 오차 성분과 도심의 오차 성분에 대한 전체 영상의 오차값을 계산한 결과를 보여주고 있다.

$$\delta X_c=\frac{A_1\delta X_{c1}+X_{c1}\delta A_1+A_2\delta X_{c2}+X_{c2}\delta A_2}{(A_1+A_2)(X_{c1}A_1+X_{c2}A_2)}$$

$$\delta Y_c=\frac{A_1\delta Y_{c1}+Y_{c1}\delta A_1+A_2\delta Y_{c2}+Y_{c2}\delta A_2}{(A_1+A_2)(Y_{c1}A_1+Y_{c2}A_2)} \tag{13}$$

$$\Theta_c+\delta\Theta_c=\tan^{-1}\left\{\frac{d_y}{d_x}\frac{[(Y_{c1}+\delta Y_{c1})-(Y_{c2}+\delta Y_{c2})]}{[(X_{c1}+\delta X_{c1})-(X_{c2}+\delta X_{c2})]}\right\}$$

식(13)에서 보는 바와 같이 전체 표식 영상의 도심에 유발되는 오차 성분은 두개의 원형 표식에 δA_1, δA_2, δX_{c1}, δX_{c2}, δY_{c1}, δY_{c2} 등의 오차 성분이 발생하여도 분모의 항이 분자의 항에 비해 월등하게 크기 때문에 δX_c, δY_c의 값이 작아지지만 방향각의 경우에는 도심의 위치 오차에 상당히 민감하게 된다. 그러므로, 표식의 방향각에 대한 정밀도를 향상시키기 위하여서는 현재 사용하고 있는 두 개의 원형 표식외에 여분의 원형 표식들을 추가하여 각 원들의 도심을 연결하는 직선들의 기울기의 평균값을 표식의 방향각으로 채택하는 방법을 고려할 수 있다.

제안된 센서 시스템을 사용하여 이동 로봇의 자세를 실시간으로 추정할 수 있는지의 여부를 조사하기 위하여 20번의 영상처리 실험을 수행하여 각 단계에서 소요된 시간을 측정한 결과를 Table 2에

Table 1 Reliability of proposed sensor system (unit : pixels)

Results / Objects		Mim. Value	Max Value	Average	Standard Deviation
Image analysis of Large landmark	image area	425	440	432.57	4.67
	X-centroid	102.65	102.78	102.70	0.04
	Y-centroid	18.32	19.30	18.58	0.25
Image analysis of Small landmark	image area	181	189	187.20	2.17
	X-centroid	138.61	138.75	138.67	0.04
	Y-centroid	18.03	19.03	18.20	0.27
Image analysis of Total landmark	orientation anlge	-1.08°	-0.34°	-0.70°	0.21°
	X-centroid	113.25	113.75	113.56	0.13
	Y-centroid	18.23	19.18	18.47	0.25

Table 2 Image processing time of sensor system

Image Acquisition & Processing Time	15 msec (standard deviation : ±0.8 msec)
Image Data Transfer Time	35 msec (standard deviation : ±2.3 msec)
Image Center & Orientation Computation Time	Less than 5 msec (386 AT compatible host computer)
Robot Posture Computation Time	Less than 5 msec (386 AT compatible host computer)
Total Processing Time	60 msec(standard deviation : ±2.1 msec)

수록하였다. 이동 로봇의 경우에는 로봇 본체와 부가 화물들의 큰 하중과 관성 때문에 주행기구의 제어를 위하여 빠른 속도의 샘플링 시간을 사용하지 않고 일반적으로 0.1초 주기로 제어 동작을 수행하고 있다.[5,8] 본 센서 시스템을 사용하여 이동 로봇의 자세를 추정하면 약 0.06 초가 소요되므로 0.04 초의 시간을 주행 모터의 운동 제어에 할달할 수 있으므로 이동 로봇의 운동 제어를 원활히 수행할 수 있다.

본 연구에서는 이동 로봇이 주행하는 작업장의 바닥이 편편하다고 가정하고 로봇의 자세 추정을 위한 식(9)를 유도하였다. 그러나, 실제의 작업 환경은 작업장 바닥에 약간의 굴곡이 있으므로 이러한 환경 조건에 대한 본 센서 시스템의 적응성을

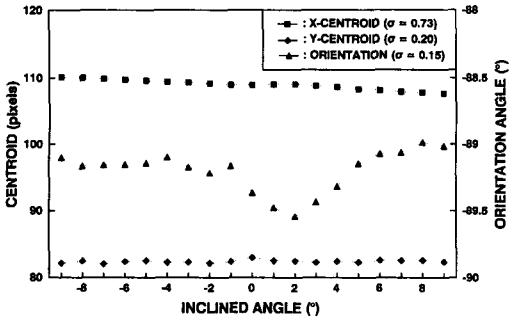


Fig. 7 Performance of the proposed sensor system for inclined angle variation

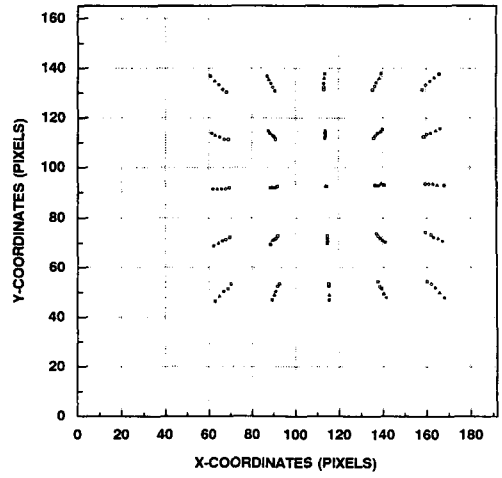


Fig. 8 Centroid of calibration landmark image in the pixel frame

조사할 필요성이 있다. Fig. 7은 표식이 설치된 평면과 CCD 카메라가 설치된 평면간에 경사각이 존재할 때 본 센서 시스템을 사용하여 표식의 도심의 위치 및 방향각을 계산한 결과를 보여주고 있다. 두 평면 사이의 경사각 범위는 $-10°\sim+10°$로 설정하였으며, 그림에 표시한 데이터는 같은 지점에서 동일한 표식에 대하여 10번의 영상실험을 수행하여 계산한 평균값을 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 경사각이 변화에 대한 X-축 방향의 중신의 좌표값의 변화에 대한 표준편차는 0.73 화소 단위, Y-축 방향의 중심의 좌표값의 변화에 대한 표준편차는 0.20 화소단위이며, 표식의 방향각의 변화에 대한 표준편차는 0.15°로 관측되었다. 본 실험결과는 설치 환경조건에 대한 본 센서 시스템의 유연성과 강인성을 보여주고 있다. 본 센서 시스템을 상요하여 로봇의 자세를 측정하기 위하여서는 식(10)~(12)에서 보는 바와 같이 이미지 센서의 중심 좌표값 C_X와 C_Y, 렌즈의 유효 초점거리 f, 센서 좌표계와 표식 좌표계간의 변환 행렬 ${}^{S}T_{L}$의 요소들에 대한 정확한 정보가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 Tsai[17]가 제안한 동일 평면 상에 위치한 기준점들의 영상처리 결과를 잉요한 카메라 변수 보정(camera calibration) 방법을 응용하여 이들 변수들에 대한 정확한 값을 실험적으로 구하고자 하였다. 카메라 변수 보정을 위하여 Fig. 1에 보여준 25개의 원형 무늬를 가지는 표식을 사용하였으며, 변수 보정을 위한 기준점은 각 원형 무늬의 도심으로 설정하였다. 카메라 렌즈의 광축을 따라 75 mm의 간격으로 위치한 5개의 측정 평면에서 보정용 표식의 영상을 수집한 뒤 각 측정 평면에서 계산한 표식 영상들의 위치와 실제 표식이 설치된 위치 사이의 관계식을 이용하여 필요한 변수들의 값들을 계산하였다. 본 카메라 변수 보정 방법의 자세한 설명은 참고문헌[17]에 설명되어 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

Fig. 8은 5개의 측정 평면에서 측정한 표식 영상의 도심의 위치를 화소 좌표계를 사용하여 보여주고 있다. Fig. 8을 살펴보면 표식의 중심부에 위치한 원형 무늬에 대한 영상 도심의 위치값은 거의 변화하지 않는다는 사실을 알 수 있다. 카메라 렌즈의 광축상에 위치한 물체의 영상은 카메라 렌즈와 물체간의 거리와 관계없이 항상 이미지 센서의 중심에 맺히게 되며, 광축에서 떨어진 위치에 놓여져 있는 물체의 영상은 카메라 렌즈와 물체간의 거리에 따라 다른 위치에 맺힌다는 사실을 고려하면 Fig. 8에서 표식 중심부에 위치한 영상의 좌표값을 이미지 센서의 중심 좌표값(즉, $C_X=113.87$, $C_Y=93.5$)으로 결정할 수 있다. 이러한 사실은 이미지 센서의 중심 좌표값은 이미지 센서의 크기(본 연구에서는 192×165)의 중심부에 위치한다는 인식과는 다른 결과이며, 이는 CCD 카메라의 조립과정에서 발생된 잘못에 기인한다고 사료된다. Fig. 8에 나타난 실험 데이터에 카메라 변수보정 방법을 적용한 결과를 Table 3에 보여주고 있다.

Table 3의 변환 행렬의 요소들의 값에 나타난 오차는 유효 숫자의 영향에 의해 나타난 결과이다. Table 3의 카메라 변수 보정결과를 이용하여 계산한 실제 표식의 위치(부호 □로 표시)와 제조 회사

Table 3 The result of camera calibration

	1.00	0.02	-0.03	-187.71
${}^{S}T_{L}$	0.02	-1.00	-0.09	175.88
Transformation matrix	-0.03	-0.09	-1.00	2104.50
	0	0	0	1
Focal Length, f=16.2 mm				
Image Center : C_X=113.87, C_Y=93.5				

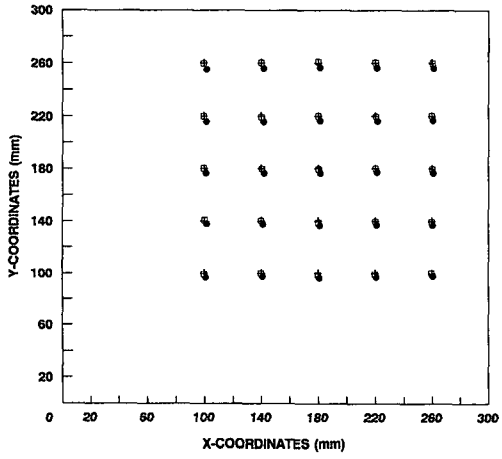


Fig. 9 Effect of the camera calibration method

의 사용을 참조하여 계산한 표식의 위치(부호 ●로 표시)를 비교하여 Fig. 9에 보여주고 있다. Fig. 9에 부호(+)로 표시된 점들은 삼각 측량법에 의해 측정된 표식의 실제 위치를 표시한다. Fig. 9는 카메라 변수 보정방법을 사용하면 표식의 위치에 대한 X-축과 Y-축 방향의 측정 초차값이 보정 전의 1.28 mm, 3.15 mm에서 각각 0.22 mm, 0.42 mm로 줄어든다는 사실을 보여주고 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 카메라 변수 보정 방법의 타당성과 효용성을 보여주고 있다.

3.3 이동 로봇의 자세 추정 실험

본 연구에서 제안한 센서 시스템을 이용하여 이동 로봇의 자세를 추정하는 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 이동 로봇의 대용으로 3차원 이송 테이블을 사용하였으며, 로봇 자세 추정용 표식은 보정용 표식과 동일한 위치에 부착하여 변수 보정실험 결과 얻은 변환 행렬의 값을 사용할 수 있도록 하였으며, 표식 무늬의 방향각은 이송 테이블의

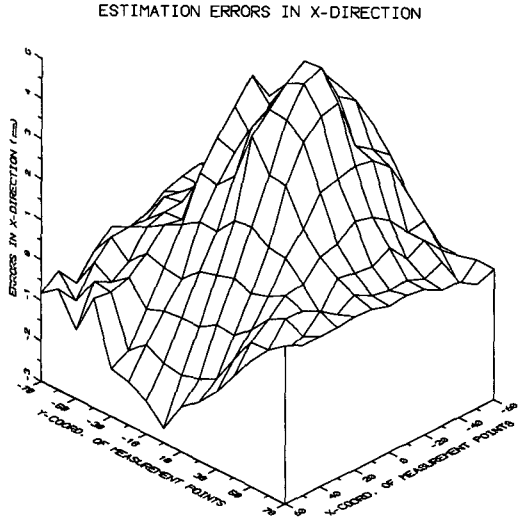


Fig. 10 Distribution of measurement errors in X-direction

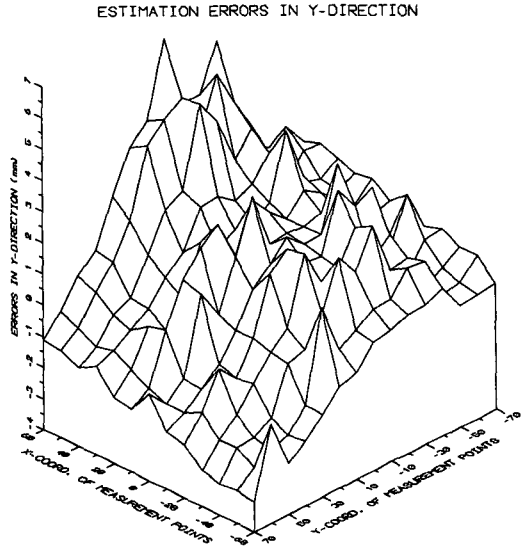


Fig. 11 Distribution of measurement errors in Y-direction

X-축의 방향과 일치하도록 설치하였다. 그리고, 삼차원 이송 장치에 부착된 위치 제어기의 출력을 개인용 컴퓨터에 연결하여 이미지 센서의 실제 위치(즉, 이동 로봇의 실제 위치)를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. 그리고, 이송테이블에 부착된 이미지 센서의화소면에 표식의 영상이 맺힐 수 있는 범위(표식의 도심이 카메라의 광축상에 놓여져

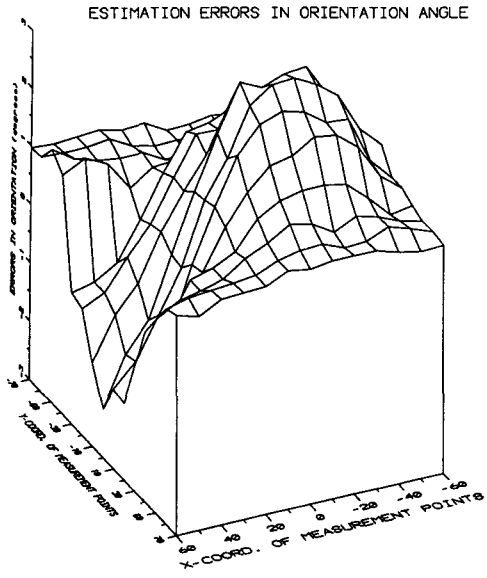


Fig. 12 Distribution of measurement errors in heading angle

있는 상태를 기준으로 X-축 방향으로 ±60 mm, Y-축 방향으로 ±70 mm)내에서 이송 테이블의 X-축과 Y-축을 10 mm 간격으로 격자형으로 이동시키면서 표식의 영상을 수집하여 로봇의 자세(즉, 본 경우에는 카메라의 자세)을 계산하였다.

Fig. 10~12는 본 센서 시스템을 사용하여 실험적으로 측정한 로봇의 자세에 대한 추정 오차를 표시한 그림들이며, Fig. 10은 기준 좌표계의 X-축 방향의 추정오차, Fig. 11은 기준 좌표계의 Y-축 방향의 추정 오차, Fig. 12는 주행 방향각에 대한 추정 오차를 보여주고 있다. 본 연구에서는 정밀한 위치 제어가 가능한 3차원 이송 테이블의 위치 제어기에 의해 측정된 이송 테이블의 실제 위치값을 로봇의 자세로 설정하였다. 또한, Fig. 10~12에 표시된 실험 결과들은 각 측정점에서 이송테이블을 완전히 정지시킨 후 로봇의 자세를 측정한 결과이다.

Fig. 11의 실험결과는 표식의 도심이 광축상에 놓여져 있을 경우 (좌표값 0.0)에 X-축 방향의 추정 오차가 가장크게 나타나며 카메라가 원점에서 멀어질수록 오차가 줄어진다는 사실을 알 수 있다. 이것은 표식과 카메라의 거리가 가까울수록 스트로보에 의해 표식에 입사되는 광량이 많아져 영상의 번짐 현상(blurring)이 두드러져 영상의 왜곡이 심하게 나타나기 때문이다. Fig. 11의 실험 결과는 Y-축 방향의 추정 오차의 분포는 Fig. 10의 경우와 달리 카메라가 표식을 구성하는 두 개의 원형무늬의 중심을 통과하고 있을 때 오차가 두드러진다는 사실을 관측할 수 있다. 이것은 카메라가 각 원의 중심을 통과할 때 강력한 조명에 의해 해당 원형 표식의 영상왜곡 현상이 심하여 Y-방향의 도심 좌표값에 많은 영향을 미치기 때문이다. Fig. 12에 표시된 실험결과는 주행 방향각에 대한 추정 오차는 카메라의 위치가(0, 0)의 위치에 놓여져 있을 때 가장 크게 나타나는 것으로 관측되는데 이는 식(11)에서 보는 바와 같이 두 원형 표식들의 X-방향의 도심 좌표값의 계산이 부정확하면 주행각에 대한 추정 오차의 값이 크게 되는 사실과 일치한다.

이동 로봇의 자세 추정에 대한 본 센서 시스템의 성능 실험 결과 X-방향과 Y-방향의 추정 오차의 절대치에 대한 평균값은 모두 약 3 mm 미만으로 관측되었으며 주행 방향각에 대한 평균 추정 오차값은 1.5°미만으로 관측되었다. 실험 결과 기준표식에 제공되는 조명의 세기가 측정의 정확도에 많은 영향을 미치는 것으로 관측되었으며, 스트로보 시스템에 의해 제공되는 광량의 세기에 대한 제어 행위가 필요하다는 사실을 보여주고 있다. 그러나, 추정 오차의 평균값의 크기를 고려하면 이동 로봇의 자세 추정에 본 센서시스템을 사용하는 방법이 적합하다고 할 수 있다.

Fig. 13~Fig. 15는 이송 테이블을 정지시키지 않고 연속적으로 움직이면서 이송 테이블에 설치된 카메라를 사용하여 로봇의 자세를 추정한 실험 결과를 보여주고 있다. 본 실험은 주행 중인 이동 로봇이 자세를 측정하고자 할 때 운행을 멈추지 않고 주행을 계속하면서도 본 센서 시스템을 사용하여 자세를 측정할 수 있는지의 여부를 조사하기 위해 수행하였다. Fig. 13은 기준 좌표계의 X-축 방향의 추정 오차, Fig. 14는 기준 좌표계의 Y-축 방향의 추정 오차, Fig. 15는 주행 방향각에 대한 추정 오차를 보여주고 있다. Fig. 13에서 Fig. 15까지의 결과에서는 보는 바와 같이 이송 테이블을 격자형으로 이동시키지 않고 표식의 도심 부분을 지나는 경로 상에서만 실험을 수행하였다. 본 실험 결과로부터 X-위치, Y-위치, 주행 방향각에 대한 추정 오차의 평균값을 구하면 각각 2.04 mm, 2.02 mm, 1.62°로 관측되었으며, 각 측정치들의 표준편차는 각각 1.44, 1.75, 0.80으로 관측되었다. 이러한 추정 오차는 이동 로봇이 같은 경로 상의 각

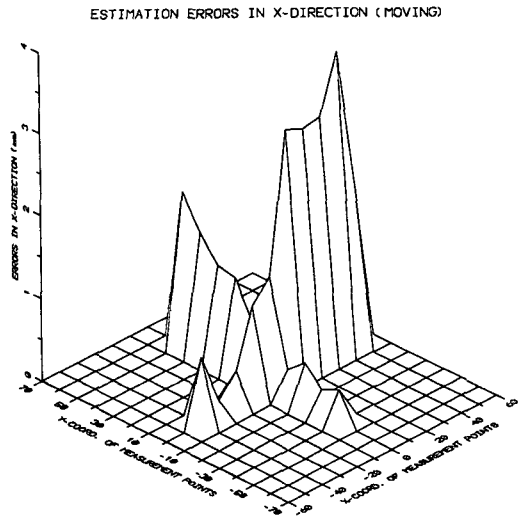


Fig. 13 Distribution of measurment errors in X-direction (measurement during navigation)

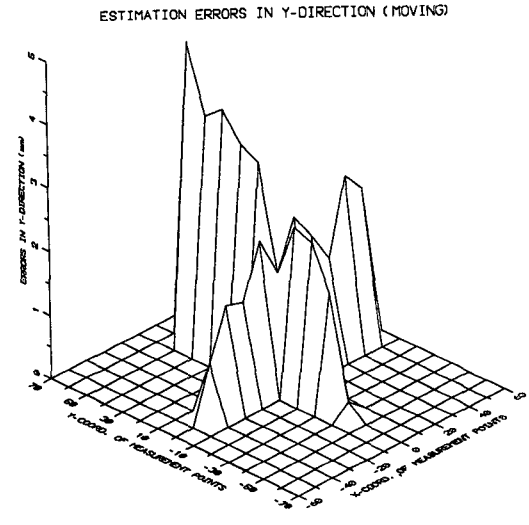


Fig. 14 Distribution of measurement errors in Y-direction (measurement during navigation)

관측점에서 정지하여 자세를 추정하였을 때의 추정 오차들의 평균값(X-위치에서의 평균 오차=1.38 mm, Y-위치에서의 평균 오차=2.40 mm, 주행 방향각에 대한 평균 오차=1.31°)과 거의 비슷한 수준을 유지하고 있으므로 이동 로봇의 운행을 정지시키지 않은 상태에서도 본 센서 시스템을 사용하여 로봇의 자세를 상당히 정확하게 측정할 수 있다고 평가할 수 있다.

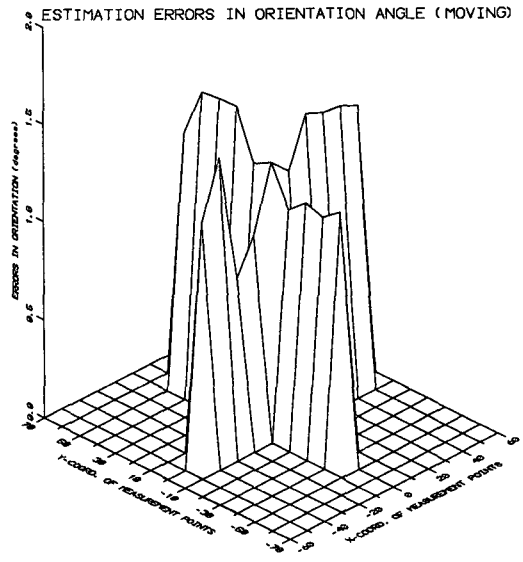


Fig. 15 Distribution of measurement errors in heading angle (measurement during navigation)

4. 결 론

본 연구에서는 물류 흐름의 자동화 공정 등에 보급되고 있는 이동 로봇의 자세(위치 및 방향각)를 실시간으로 측정할 수 있는 센서 시스템을 제안하였다. 본 센서 시스템은 CCD 카메라, 표식, 조명 장치, 영상처리 장치 등으로 구성되어 있으며, 시스템을 구성하는 하드웨어는 기존 상용시스템에 비해 저렴한 가격으로 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 시스템을 사용하여 이동 로봇의 자세 인식에 소요되는 시간은 영상처리 보드를 장착하는 호스트 컴퓨터의 기종에 따라 달라지나 386급 개인용 컴퓨터를 사용하면 약 60 msec 미만에 로봇의 자세를 추정할 수 있다. 본 시스템의 성능 조사 및 이동 로봇에의 적용 여부를 조사하기 위하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 두 개의 원형 무늬로 구성된 표식과 충분한 광량을 제공하는 스트로보 시스템을 사용하면 이진 영상처리 기법을 적용하여도 이동 로봇의 실용화에 요구되는 위치 정밀도를 만족시킬 수 있는 영상 화질을 수집할 수 있다.

(2) 본 센서 시스템을 사용하여 수집한 영상의 신뢰 구간을 조사한 결과 표식 영상의 도심 좌표값의 변화는 ±1 화소 미만, 방향각의 변화는 ±1°미

만으로 관측되었다.

(3) 이동 로봇이 표식이 설치된 평면에 대하여 ±10° 미만의 범위 내에서 기울어져도 본 센서 시스템을 사용하여 측정된 표식 영상의 도심 좌표계의 변화는 1 화소 미만, 방향각의 변화는 0.5° 이내로 관측되었다.

(4) 제안된 센서 시스템을 이용하여 이동 로봇의 자세를 추정하는 실험을 수행한 결과 이동 로봇의 위치에 대한 오차의 평균값은 3 mm미만, 방향각에 대한 오차의 평균값은 1.5°미만으로 관측되었다.

후 기

본 논문은 1990년도 교육부 지원 학술진흥재단의 학술연구 조성비에 의한 자유공모과제로 선정되어 연구되었습니다.

참고문헌

(1) Muller, T., 1983, "Automated Guided Vehicles," IFS Ltd. and Springer-Verlag, pp. 5~26.

(2) Knasel, T.M., 1986, "Mobile Robotics-State of the Art Review," Robotics 2, pp. 149~155.

(3) Schuler, J., 1985, "Tool Supply for Machine Centres with an Inductively Guided Mobile Robot," Int. Conf. on Advanced Robotics, pp. 123~134.

(4) Okawa, Y. and Goto, H., 1985, "An Application of Color Tapes to the Guidance Problem of Robotic Vehicles," Proc. 15TH Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 279~286.

(5) Bohlander, R.A., 1985, "Advances in AGVS technology," Automated Manufacturing Seminar, Challotte, NC.

(6) Harmon, S.Y. 1987, "Robot mobility : Which direction and how far?," Robot 11, 17th Int. Symp. on Industrial Robots.

(7) Tsumura, T. etc., 1982, "A System for Measuring Current Position and/or Heading of Vehcles," Bulletin of the JSME, 25(203), pp. 821~829.

(8) 이상룡, 변증영, 1992, "센서 데이터 융합을 이용한 이동 로봇의 자세 추정," 대한기계학회논문집 16권 11호, pp. 2021~2032.

(9) Ochi, T. 1990, "A positioning system for mobile robots using symmetrical rotating laser beams," Advanced Robotics, Vol. 4, No. 3, pp. 217~222.

(10) Everett, H.R., 1989, "Survey of collision avoidance and ranging sensors for mobile robots," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 5, pp. 5~67.

(11) Abidi, M.A. AND Chandra, T., 1990, "Pose estimation for camera calibration and landmark tracking," IEEE, pp. 420 ; 423.

(12) Teraya, K. 1989, "Determination of the position of a freely moving robot vehicle by means of sensing a mark patten," IEEE/RSJ International Workshop on intelligent robots and systems '89, Sep. 4~6, pp. 220~223.

(13) Faugueras and O.D. and Toscani, G., 1989, "The calibration problem for stereoscopic vision," NATO ASI Series, Vol. F52, PP. 196~207.

(14) Abidi, M.A. and Chandra, T. 1990, "Pose estimation for camera calibration and landmark tracking," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 420~426.

(15) Drake, K.C. Mcvey, E.S. and Inigo, R.M. 1985, "Sensing errpr for mobile robot using line navigation," IEEE Trans. PAMI-7(4), pp. 486~488.

(16) Fu, K.S. Gonzalez, R.C. and Lee, C.S.G., 1987, "Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence," McGRAW-HILL Book Company, pp. 12~51.

(17) Roger Y. Tsai, 1987, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-shelf TV cameras and lenses," IEEE of robotics and automation, Vol. RA-3, No. 4, August, pp. 326~329.

(18) Rosen, C.A. and Gleason, G.J. 1983, "Evaluating Vision System Performance," Robot Vision(edt. A. Pugh), pp. 97~103.

(19) Ballard, D.H. 1982, "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes," IEEE PR-15, pp. 111~122.

(20) Samet, H., 1990, "Region Representation : Quadtress From Boundary Codes," Comm ACM, 23, pp. 163~170.