

METRO - 레이저 거리계를 장착한 자율 이동로봇

METRO - A Free Ranging Mobile Robot with a Laser Range Finder

차 영 업, 권 대 갑

(Young-Youp Cha and Dae-Gap Gweon)

Abstract : This paper describes the mechanism, guidance, sensor system, and navigation algorithm of METRO, a free ranging mobile robot. METRO is designed for use in structured surroundings or factory environments rather than unstructured natural environments. An overview of the physical configuration of the mobile robot is presented as well as a description of its sensor system, an omnidirectional laser range finder. Except for the global path planning algorithm, a guidance and a navigation algorithm with a local path planning algorithm are used to navigate the mobile robot. In METRO the computer support is divided into a supervisor with image processing and local path planning and a slave with motor control. The free ranging mobile robot is self-controlled and all processing being performed on board.

Keywords : mobile robot, laser range finder, three dimensional vision, calibration, path planning, navigation

I. 서론

1950년대 말에 처음으로 산업용 로봇(industrial robot)이 등장한 이래, 한 위치에 고정된 매니퓰레이터(manipulator)가 자동화의 주역으로 많이 사용되었으나, 이들은 고정된 위치에서만 사용이 가능하므로 작업범위가 상당히 제한적일 수밖에 없다. 현재 산업체에서 사용되고 있는 매니퓰레이터는 기구적으로 두개의 끝점(end point)을 가진 링크의 결합체이다. 그 끝점 중에서 하나는 고정단으로서 작업장의 바닥에 고정되고, 나머지 하나는 자유단으로서 그리퍼나 핸드와 같은 엔드 이펙터(end-effector)가 부착되며, 이 엔드 이펙터는 제어에 따라서 움직인다. 또한 각 링크를 연결하는 조인트에는 센서가 부착되어 있어서 링크사이의 상대 각 변위를 측정할 수 있도록 되어있다. 따라서 엔드 이펙터의 위치는 고정된 기준 좌표계에 대하여 Denavit-Hartenberg 표기와 변환행렬에 의해서 수학적으로 계산된다.

다른 한편으로, 공장내에서 부품상자 등의 자동공급과 반송, 해저탐사, 그리고 원자력 발전소 내부에서의 작업 등, 단순 반복적인 작업이나 위험하면서도 이동이 필요한 작업 환경 하에서 일을 수행하기 위해서는 이전의 매니퓰레이터에 이동기능을 추가시킬 필요가 있었는데, 이러한 요구에 따라서 나타난 것이 이동로봇(mobile robot)이다. 이동로봇은 매니퓰레이터와는 달리, 공간 내의 위치에 고정된 기준 좌표계를 중심으로 그 이동위치가 고정된다.

이러한 이동로봇은 주행형식에 따라 크게 바퀴형(wheeled type), 다리형(legged type), 그리고 크로울형(crawl type)으로 나눌 수 있다. 바퀴형은 다리형에 비하여 에너지 효율이 좋고, 기구가 간단하며, 제어가 용이하고, 이동속도가 빠른 장점을 가지고 있다. 반면에, 작업환경의 표면이 평탄하고 단단해야하는 제한조건이 있으므로 계단과 같은 장애물이 있는 경우에는 사용이 곤란하다. 다리형은 불규칙한 바닥면의 작업환경 하에서도 적응력이 뛰어나지만, 구조가 복잡하고, 제어가 어려우며, 속도가 느리므로 실제 사용에는 아직 어렵다고 할 수 있다. 바퀴형의 빠른 이동속도와 다리형의 불규칙한 지형에 대한 적응력의 장점을 통합한 것이 크로울형이다. 크로울형은 무한궤도 등을 이용하여 장애물의 표면과 접촉하면서 이월하는 형식이다. 따라서 크로울형

은 장애물의 강성이 크지 않으면 장애물에 손상을 입힐 염려가 있으며, 방향 전환시에도 상당한 마찰력이 작용되므로 바닥면이 손상되고 방향조절이 어려운 단점이 있다.

이러한 이동로봇의 자율주행에는 크게 고정궤도(fixed-way) 방식과 자유주행(free-way)방식이 쓰이고 있다. 고정궤도 방식은 이동로봇의 경로상에 매설 와이어(buried wire), 반사 테이프 또는 페인트를 칠해서, 이동로봇이 고정된 궤도만을 따라서 움직이도록 하는 방법이다. 이 방법은 고정 궤도를 감지하면서 이동로봇이 주행하기 때문에 제어가 쉬운 장점이 있지만, 궤도 설치와 변경에 따른 비용, 경로 손상문제, 그리고 우발적 장애물의 회피가 불가능한 단점이 있다. 이와같은 단점을 보완하고 주행에 대한 유연성을 높이기 위한것이 자유주행 방식이다. 이는 원하는 경로를 프로그램에 의해 쉽게 바꿀 수 있으며, 돌발적인 장애물에 대한 충돌회피 기능이 있다. 이러한 자유주행 방식에서는 로봇의 현재위치 인식 및 장애물 판별을 위하여 여러가지 센서가 사용되고 있다. 자유주행 방식에서 사용되는 센서는 크게 상대 위치센서(relative sensor)와 절대 위치센서(absolute sensor)로 나눌 수 있다. 상대 위치센서는 로봇의 현재 위치를 기준좌표계에 대한 로봇의 상대적인 이동거리 및 방향변화 등을 지속적으로 측정하여 산출하는 데드 레코닝(dead reckoning)방식을 이용한다. 이 방법은 로봇의 현재 위치를 연속적으로 얻을 수 있는 장점이 있으나, 구동바퀴와 바닥면 사이의 미끄러짐에 기인한 오차누적 문제가 발생한다.

절대 위치센서는 로봇의 현재 위치를 기준좌표계 상에서 직접 측정하는 방법으로서, 연속적으로 로봇 자신의 현재 위치를 얻을 수는 없지만, 정확한 위치 추정이 가능하고, 센서 종류에 따라서 장애물 인식도 가능하다. 이러한 절대 위치센서는 물체의 3차원 거리정보를 얻는 방법에 따라서, 크게 직접(direct) 측정방법과 간접(indirect) 측정방법으로 나눌 수 있다. 일반적으로 자율 이동로봇은 상대 위치센서와 절대 위치센서를 병행해서 사용하고 있다.

본 연구에서는 바퀴형 자율 이동로봇, METRO, 의 구조, 제어, 센서 시스템, 그리고 항법문제를 다룬다. 바퀴형 이동로봇은 공장 자동화를 위한 무인반송차(AGV; Automated Guided Vehicle)로 사용될 뿐만 아니라, 가정용 청소로봇, 병원에서 환자에게 식사 등을 제공하는 간호로봇, 빌딩내의 사무실에서 문서 등을 전달하는 서비스 로봇, 맹인이나 회

사의 내방객을 위한 안내로봇, 그리고 사람이 접근할 수 없는 원자력 발전소 내부에서 설비보수를 위한 극한작업용 로봇 등으로 사용할 수 있다. 특히 이 로봇의 상대 위치센서로는 구동바퀴에 장착된 휠 엔코더(wheel encoder)를 사용하고, 절대위치 센서로는 전 방향형(omnidirectional type) 레이저 거리계(laser range finder)를 개발하여 사용하였다. 이 레이저 거리계는 로봇 주위의 360° 전 방향에 대하여 3차원 물체의 형상 인식 및 거리측정이 가능하다.

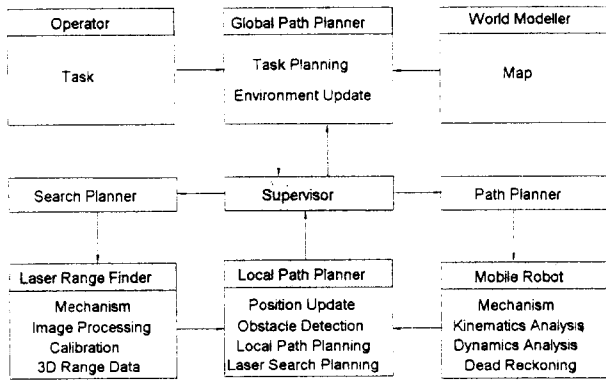


그림 1. 이동로봇의 신호 흐름도.
Fig. 1. Signal flow of mobile robot.

그림 1은 개발된 이동로봇과 레이저 거리계에 기초한 자율 이동로봇, METRO, 의 신호 흐름도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 이와같은 항목 중에서 다음과 같은 사항을 다룬다. 2장에서는 개발된 로봇의 정/역 기구학 해(solution)를 구하고, 이에 따른 경로 추종 제어기를 보여준다. 3장에서는 개발된 전 방향형 레이저 거리계의 구조와 원리, 3차원 물체 형상인식 및 거리 데이터 추출을 위한 간단한 변환수식 유도, 영상처리 알고리즘을 다룬다. 4장에서는 이러한 레이저 거리계의 캘리브레이션(calibration)방법 및 정확한 3차원 거리 데이터 추출 알고리즘을 다룬다. 5장에서는 이러한 레이저 거리계로부터 얻은 거리 데이터와 주위환경 정보를 효과적으로 이용하는 국부 경로계획 알고리즘을 다룬다. 또한 이동로봇의 실시간 항법을 위해 제안된 국부 경로계획 알고리즘의 타당성이 여러가지 복잡한 환경하에서 모의실험과 실제실험을 통하여 보여진다.

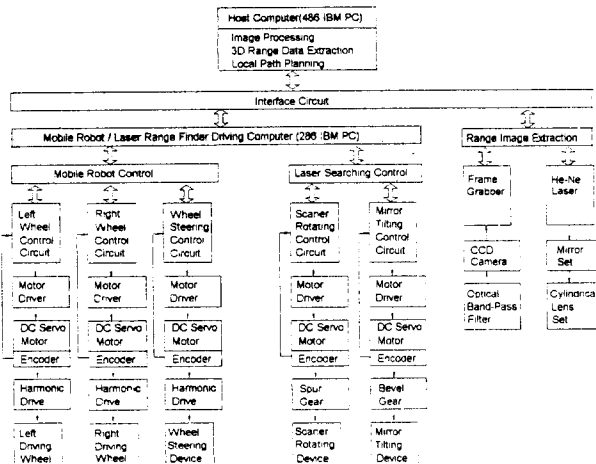


그림 2. 이동로봇의 제어 시스템.
Fig. 2. Control system of mobile robot.

II. METRO의 구조

그림 2는 개발된 자율 이동로봇에 대한 제어 시스템의 하

드웨어 구성을 보여주고 있다. 제어 시스템은 크게 주 컴퓨터(host computer : 486 IBM PC), 서보모터 구동용 컴퓨터(286 IBM PC), 그리고 거리정보 추출을 위한 하드웨어 시스템으로 구성되어있다. 거리정보 추출을 위한 하드웨어 시스템은 He-Ne 레이저 발생장치와 영상 획득장치를 포함한다. 서보모터 구동용 컴퓨터는 이동로봇의 바퀴구동과 스티어링 뿐만 아니라 레이저 거리계의 3차원 측정을 위한 스캐닝 시스템의 서보모터 구동도 담당한다. 이들은 인터페이스 회로를 통하여 주 컴퓨터에 정보를 제공한다. 주 컴퓨터는 거리 데이터 추출을 위한 하드웨어 시스템에서 보내온 영상을 처리하고, 로봇 주위의 3차원 거리 데이터를 얻은 후, 경로계획을 하여 서보모터 구동 시스템과 영상추출 하드웨어 시스템에 명령을 내린다.

이 로봇의 주행부는 좌우 2개의 구동바퀴, 앞뒤 2개의 캐스터(caster) 그리고 구동바퀴를 동시에 스티어링 시켜주기 위한 스티어링 구동부로 되어있다[1]. 따라서 로봇은 서로 독립된 좌우의 구동바퀴에 의해 이동하고, 그 속도 차에 의해 로봇의 몸체가 회전하는 기존의 AGV 운동을 할 수 있을 뿐만 아니라, 2개의 구동바퀴를 같은 회전속도로 구동하고, 동시에 스티어링 시킴으로서 로봇의 몸체가 항상 일정한 방향만 향하도록 하는 병진운동도 가능하다. 여기서는 바퀴의 스티어링이 없이, 두바퀴의 속도 차에 의하여 구동하는 AGV 운동만을 다룬다. 그림 3은 이동로봇의 구동부 각 부분에 대한 좌표계 선정을 보여주고 있는데, 이때 로봇의 위치는 [X,Y]의 2차원 평면의 기준 좌표계에서 정의되고, [x,y]의 국부 좌표계는 y 축이 로봇의 heading 방향과 일치하도록 고정된다. 일반 AGV 형태의 운동인 경우에 구동바퀴의 스티어링 각은 $\theta_{s1} = \theta_{s2} = \theta_s = 0$ 이며, 속도전파(velocity propagation)는 Jacobian 행렬[2]을 사용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

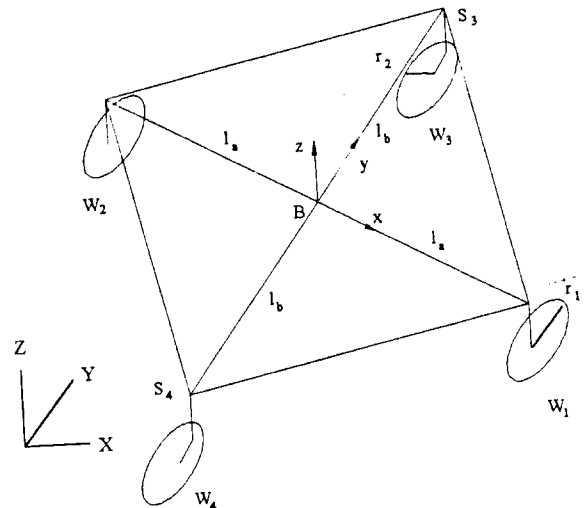


그림 3. 이동로봇에서 구동부의 좌표계.
Fig. 3. Coordinate system of moving part in mobile robot.

$$\dot{P} = J_i \dot{q}_i \quad (i=1,2,3,4) \tag{1}$$

여기서,

$$\dot{P} = [V_{Bx}, V_{By}, \omega_{Bz}]^T \tag{2}$$

$$\dot{q}_i = [\omega_{W_{ix}}, \omega_{W_{iz}}]^T \quad (i=1,2)$$

$$\dot{q}_i = [\omega_{W_{ix}}, \omega_{W_{iz}}, \omega_{si}]^T \quad (i=3,4) \tag{3}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r_1 & -l_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r_1 & l_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -r_2 \sin \theta_{s3} & l_a - l_b \cos \theta_{s3} & -l_a \\ r_2 \cos \theta_{s3} & -l_b \sin \theta_{s3} & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} -r_2 \sin \theta_{s4} & -l_a - l_b \cos \theta_{s4} & l_a \\ r_2 \cos \theta_{s4} & -l_b \sin \theta_{s4} & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

따라서, 미분 역 기구학 해(differential inverse kinematic solution)는

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \omega_{W1x} \\ \omega_{W1z} \\ \omega_{W2x} \\ \omega_{W2z} \end{bmatrix} = \frac{1}{r_1} \begin{bmatrix} 0 & 1 & l_a \\ 0 & 0 & r_1 \\ 0 & 1 & -l_a \\ 0 & 0 & r_1 \end{bmatrix} \dot{P} = T \dot{P} \quad (5)$$

에서 얻을 수 있고, 다시 정리하면

$$\omega_{W1x} = \frac{(V_{By} + l_a \omega_{Bz})}{r_1}$$

$$\omega_{W2x} = \frac{(V_{By} - l_a \omega_{Bz})}{r_1} \quad (6)$$

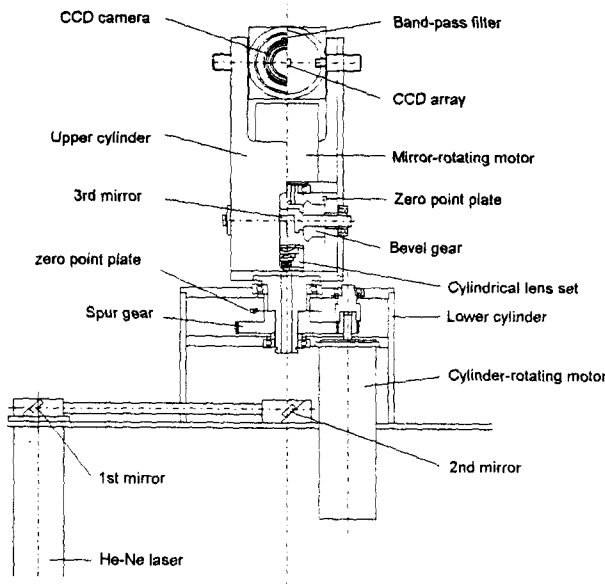


그림 4. 레이저 거리계의 구조.
Fig. 4. Structure of laser range finder.

과 같다. 또한 미분 정 기구학 해(differential forward kinematic solution)는 (5)에서

$$\dot{P} = T^T (T T^T)^{-1} \dot{q} \quad (7)$$

이므로, 다음과 같다.

$$V_{Bx} = 0 \quad V_{By} = \frac{r_1(\omega_{W1x} + \omega_{W2x})}{2} \quad (8)$$

$$\omega_{Bz} = \frac{r_1(\omega_{W1x} - \omega_{W2x})}{2l_a} \quad (9)$$

구동부의 추적 제어기로서, 기준입력으로는 로봇의 위치 P , 과 속도 $\dot{q}_r = (V_r, \omega_r)^T$ 이 주어지고, 출력으로는 데드 레코닝에 의해 현 위치 P 가 얻어진다. 따라서 목표속도

$\dot{q}_u = (V_u, \omega_u)^T$ 를 위한 다음과 같은 제어 물을 사용하였다.

$$V_u = V_r \cos \theta_e + K_x x_e \quad (10)$$

$$\omega_u = \omega_r + V_r (K_y y_e + K_\theta \sin \theta_e) \quad (11)$$

이때 시스템이 안정하기 위한 매개변수 값의 조합은 $K_x = 10/\text{sec}$, $K_y = 6.4 \times 10^{-3}/\text{cm}^2$, $K_\theta = 0.16/\text{cm}$ 이다.

III. 레이저 거리계

그림 4는 이 레이저 거리계의 구조를 보여준다[3]. 전체 구조는 상부 실린더와 하부 실린더로 구성되는데, 상부 실린더에는 CCD카메라, 제3반사경 회전기구 그리고 실린더 형상의 렌즈 세트가 장착되고, 하부 실린더에는 상부 실린더 회전기구가 장착되어 있다. 제1, 제2반사경은 He-Ne 레이저 광원으로부터 나오는 빔을 직각으로 구부린다. 그 레이저 빔은 실린더 형상의 렌즈 세트에 의해서 슬릿 빔으로 바뀌고, 이 슬릿 빔은 제3반사경 회전용 모터와 베벨기어에 의하여 회전하는 제3반사경에 의하여 방향이 꺾인다. 다른 한편으로, 물체(object ; obstacle)면에서 반사된 레이저 빔은 광학 노이즈를 제거하기 위하여 CCD 카메라 앞에 부착된 광학 밴드-패스 필터(optical band-pass filter)를 통과하여 CCD소자에 의해서 검출된다. 결국 발사되는 슬릿 레이저 빔은 상부 실린더 회전용 모터와 제3반사경 회전용 모터에 의해서 좌우로 회전되고 상하로도 움직여질 수 있다. 이들 각 모터의 원점 위치를 지정해 주기 위하여 원점 판(zero-point plate)이 제3반사경 회전용 모터와 상부 실린더 회전용 모터 각각에 연결된 베벨기어와 스퍼어기어에 고정되어 있다.

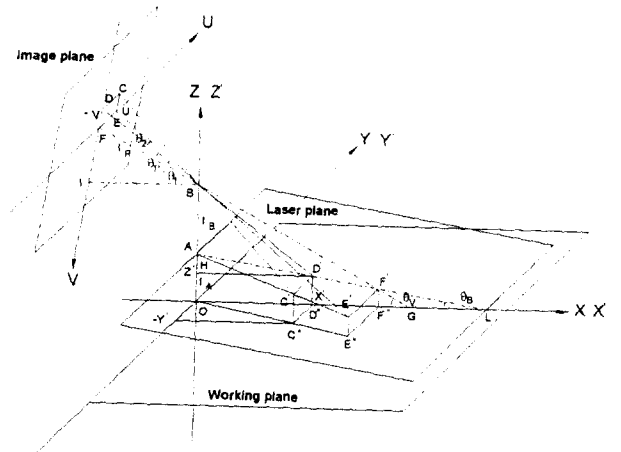


그림 5. 레이저 거리계의 좌표계.
Fig. 5. Coordinate systems of laser range finder.

그림 5는 물체에 의해서 반사된 레이저 슬릿으로부터 3차원 위치를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 이 시스템에는 3개의 좌표계가 있는데, 기준 좌표계 $[X, Y, Z]$, 상대 좌표계 $[X', Y', Z']$, 그리고 카메라 좌표계 $[U, V, W]$ 가 그것이다. 기준 좌표계 $[X, Y, Z]$ 는 작업면의 바닥에 고정되어 있다. 이 좌표계의 Z 축은 작업면(working plane)의 수직 방향과 일치한다. 상대 좌표계 $[X', Y', Z']$ 의 원점은 기준 좌표계의 원점과 일치하고, Z'축은 기준 좌표계의 Z축과 일치한다. 그리고 X'Y'면은 기준 좌표계의 XY면에 상대적으로 회전하고, 그 상대적인 회전각은 θ_R (그림에는 표시되어 있지 않음; X축과 X'축 사이의 각도)이다. 그리고 점 A는 제3반

사경의 중심점이다. 실린더 형상의 렌즈세트에서 만들어진 슬릿레이저 빔은 점 A로부터 나오고, 레이저 슬릿의 레이저 면(laser plane)은 X'Y'면과 함께 회전한다. 제3반사경의 높이(점 O에서 점 A까지 거리)는 l_A 이다. 빔 각도 θ_B 는 작업면과 레이저면 사이의 각도이다. 카메라 좌표계 [U,V,W]의 W축은 CCD 카메라가 향하는 방향(view direction)과 일치한다. CCD 카메라의 렌즈중심은 점 B에 위치하고, CCD 소자는 렌즈의 초점면(UV면), 즉 영상 면(image plane)에 위치한다.

카메라의 경사각도 θ_V 는 W축과 작업면 사이의 각도이다. 카메라 렌즈의 중심과 제3반사경의 중심은 모두 Z축 위에 위치한다고 가정하고, 렌즈 중심위치 B는 제3반사경의 중심으로부터 l_B 만큼 떨어져 있다. 그리고 l_F 는 렌즈의 초점거리이다. 영상면(image plane)에서는 물체에서 반사된 슬릿 레이저 빔이 여기에 모아진다. 영상에서 U축의 값은 반사된 슬릿 레이저 빔의 Y'축의 값을 나타내고, V축 값은 기준 좌표계 중심으로부터 빔까지의 거리 정보를 준다. 수식의 유도를 위하여 그림에서와 같이 $\theta_R=0$ 이라 가정하면, 영상면 [U,V] 위의 점 C로부터 상대 좌표계 [X', Y',Z'] 위의 점 C'로 변환하는 식이 다음과 같이 얻어진다.

$$X' = \frac{l_B}{\tan \theta_V - \frac{V}{l_F}} - \tan \theta_B \quad (12)$$

$$Y' = -X' \frac{U}{l_F \cos \theta_V} \quad (13)$$

$$Z = l_A(1 - X' \frac{\tan \theta_B}{l_A}) \quad (14)$$

앞에서 $\theta_R=0$ 으로 가정했으므로, 상대 좌표계 [X',Y',Z']에서 3차원 위치 데이터는 기준 좌표계 [X,Y,Z]에서의 위치 데이터와 일치한다. 즉, $X=X'$, $Y=Y'$ 그리고 $Z=Z'$ 이다. 만약 $\theta_R \neq 0$ 인 경우에, 상대 좌표계 [X',Y',Z']의 3차원 위치 데이터는 기준 좌표계 [X,Y,Z]의 위치 데이터로 변환되어야 한다. 이는 다음과 같은 간단한 변환 행렬로부터 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & \cos \theta_R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 거론한 간단한 3차원 위치 계산식의 유도과정에서는 다음과 같은 몇 가지의 가정이 사용된다.

- (1) 렌즈왜곡은 무시한다.
- (2) 영상의 수평축에 대한 스케일 팩터(scale factor)를 무시한다.
- (3) CCD 카메라의 렌즈중심이 Z' 축상에 존재한다.
- (4) 레이저 거리계의 설계상수 l_A 와 l_B 가 이미 알려져 있다.

그러나 이러한 가정들은 개발된 전 방향형 레이저 거리계의 간단한 3차원 데이터를 얻는데는 유리하지만, 실제 시스템과 차이가 있기때문에 여기서 얻어지는 3차원 거리 데이터는 오차를 많이 가지고 있을 수밖에 없다. 이러한 오차들은 4장의 캘리브레이션에 의해서 해결될 수 있다.

실제로 CCD 카메라에 잡혀진 반사된 레이저 빔의 영상으로부터 거리 데이터(range data)를 얻을 수 있다. 그 영상 처리는 다음과 같은 다섯 단계로 이루어진다;

- 1) 물체 면에서 반사된 빔으로부터 영상을 받는다.
- 2) 각 화소의 밝기강도 (gray-level intensity) $I(u,v)$ 를 읽는다.
- 3) 각 열(column)에서 최대 밝기강도를 가지는 화소를 찾는다. 즉,

$$V_{\max}(u) = \max_v I(u, v) \quad (16)$$

- 4) 인근 화소와의 상대적인 거리시험 (distance test)에 따라서 노이즈를 제거한다. 즉,

If $|V_{\max}(u) - V_{\max}(u-1)| < \epsilon_1$ or
 $|V_{\max}(u) - V_{\max}(u+1)| < \epsilon_1$
 (여기서, ϵ_1 은 주어지는 값),
 then $V_{\max}(u)$ survives,
 else $V_{\max}(u)$ is removed.

- 5) 남아있는 화소들에 대해서 삼각법에 대한 (12), (13), 그리고 (14)를 적용하여 거리 데이터 $R(x,y)$ 를 계산한다.

IV. 레이저 거리계의 캘리브레이션

물체까지의 정확한 3차원 거리데이터를 얻기 위하여, 레이저 거리계는 캘리브레이션 되어야 한다[4]. 레이저 거리계의 캘리브레이션은 카메라뿐만 아니라 레이저 슬릿 주사장치도 캘리브레이션 되어야 하기 때문에, 일반적인 카메라 캘리브레이션보다 더 복잡하다. 제안된 레이저 거리계의 캘리브레이션은 다음과 같은 순서로 이루어진다. 먼저 핀홀(pin-hole) 카메라 모델에 기초한 CCD카메라의 내부 매개변수를 구하고 [5], 이 매개변수를 이용하여 레이저 슬릿 발생장치의 정확한 설계상수, CCD카메라의 위치와 자세를 구한다. 결국, 이러한 설계상수와 CCD카메라의 외부 매개변수를 이용하여 물체까지의 정확한 3차원 거리 데이터를 구할 수 있다. 간단한 3차원 위치 계산식 유도과정에서 거론한 가정 중에서 첫번째와 두번째 사항은 CCD카메라의 캘리브레이션에서 일반화 시킬 수 있고, 세번째와 네번째 사항은 레이저 거리계의 캘리브레이션에서 일반화시킨다. 마지막으로 이들 캘리브레이션 결과를 이용하여 정확한 3차원 거리 데이터의 계산방법을 얻을 수 있다.

그림 6은 레이저 거리계의 캘리브레이션과 3차원 위치 데이터를 계산하기 위한 좌표계를 보여주고 있다. 간단한 3차원 거리 데이터의 유도를 위한 좌표계 그림 5와 비교해서, CCD 카메라의 렌즈중심이 Z'축 위의 점 B에서 임의의 점 B'로 옮겨졌음을 알 수 있다. 여기서 CCD 카메라의 광축(optical axis)은 점 O_C', B', B, O_C 그리고 H를 지난다. 영상면은 임의의 초점위치 B'로부터 초점거리 $l_f(\overline{B'O_C'})$ 만큼 떨어진 곳에서 O_C' 를 원점으로 하여 역상으로 나타나지만, 실제로 모니터에서 얻어지는 영상은 초점위치 B'로부터 초점거리 $l_f(\overline{B'O_C} = \overline{B'O_C'})$ 만큼 떨어진 곳에서 O_C 를 원점으로 하여 바르게 나타난다. 먼저 작업면 위에서 일정거리 d만큼 떨어져 있는 3개의 레이저 슬릿을 순차적으로 만들 수 있다. 그림에서 보면, 그 레이저 슬릿들은 X'축에 수직하고 점 P, Q, 그리고 R을 지난다. 이들 영상을 컴퓨터의 프레임 메모리에 저장하고, 영상처리를 통하여 v_0, v_1 그리고 v_2 값을 얻을 수 있다. 레이저 슬릿이 발사되는 제3 반사경의 위치인 점 A는 그림 3과 동일하지만, X' 축 위의 점 P, Q, 그리고 R에 슬릿이 놓이기 위하여 회전각 $\theta_{L1}(\angle RAQ)$ 과 $\theta_{L2}(\angle QAP)$ 는 제3 반사경 회전용 모

터의 엔코더(encoder)에 의해서 알 수 있다. 이와 같은 3개의 레이저 슬릿은 CCD카메라의 영상면에서 V 축에 수직하고 점 v_1' , v_0' 그리고 v_2' 를 지나는 선으로 나타난다. 따라서 영상면 위의 점 v_1' , v_0' 그리고 v_2' 는 각각 점 v_1 , v_0 그리고 v_2 로 변환된다. 또한 CCD카메라의 캘리브레이션에서 얻은 유효 초점거리 l_f 에 의해서 초점 B를 기준으로 이들 점들과 이루는 각도 θ_{C1} ($\angle v_0 B v_2$)과 θ_{C2} ($\angle v_0 B v_1$)가 계산된다. 따라서 작업영역 위에서 일정간격으로 나타낸 레이저 슬릿에서 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

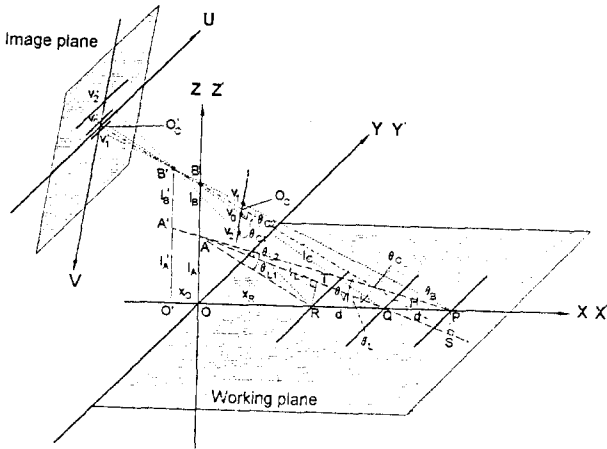


그림 6. 레이저 거리계 캘리브레이션을 위한 좌표계.
Fig. 6. Coordinate system for laser range finder calibration.

$$\tan \theta_{C1} = \frac{v_2 - v_0}{l_f + \frac{v_2 v_0}{l_f}} \quad (17)$$

$$\tan \theta_{C2} = \frac{v_1 - v_0}{l_f + \frac{v_1 v_0}{l_f}} \quad (18)$$

또한, $\triangle APQ$ 와 $\triangle PQS$ 에서 θ_L ($\angle AQQ$)와 l_L ($= \overline{AQ}$)에 대한 다음과 같은 관계식

$$(l_L + d \cos \theta_L) \tan \theta_{L2} = d \sin \theta_L \quad (19)$$

이 구해지고, 같은 방법으로, $\triangle TQR$ 과 $\triangle ART$ 에서

$$(l_L - d \cos \theta_L) \tan \theta_{L1} = d \sin \theta_L \quad (20)$$

을 구할 수 있다. (19)와 (20)로부터, θ_L 과 l_L 에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tan \theta_L = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{L2}} - \frac{1}{\tan \theta_{L1}}} \quad (21)$$

$$l_L = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tan \theta_{L2}} + \frac{1}{\tan \theta_{L1}} \right) \sin \theta_L \quad (22)$$

따라서 l_A ($= \overline{OA}$)는 다음과 같이 구해진다.

$$l_A = l_L \sin \theta_L \quad (23)$$

또한 같은 방법으로, θ_C ($\angle B'QO$)와 l_C ($= \overline{B'Q}$)에 대한 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tan \theta_C = \frac{2}{\frac{1}{\tan \theta_{C2}} - \frac{1}{\tan \theta_{C1}}} \quad (24)$$

$$l_C = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\tan \theta_{C2}} + \frac{1}{\tan \theta_{C1}} \right) \sin \theta_C \quad (25)$$

따라서, 작업면과 카메라 영상면의 법선 벡터 사이의 각 (view angle) θ_V 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_V = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{OC'v_0'}}{l_f} \right) + \theta_C \quad (26)$$

앞에서와 같이 카메라의 내부 매개변수와 레이저 슬릿 주사장치의 정확한 설계변수가 얻어지면, 앞에서 거론한 간단한 3차원 위치 계산식 (12), (13) 그리고 (14)는 수정되어야 한다. 먼저, $x_R = \overline{OR}$ 과 $x_O = \overline{OO'}$ 라 놓으면,

$$x_R = \frac{l_A}{\tan \theta_L} - d \quad (27)$$

$$x_O = l_C \cos \theta_C - x_R - d \quad (28)$$

이다. 제3 반사경의 회전에 의하여, 레이저 슬릿이 바닥면에서 점 P에 있다고 가정하면, 레이저 슬릿의 경사각도 θ_B ($\angle APO$)는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_B = \tan^{-1} \left(\frac{l_A}{x_R + 2d} \right) \quad (29)$$

그림 6을 참고하면, (12), (13) 그리고 (14)에서 l_A 와 l_B 대신에 다음과 같은 l_A' ($= \overline{O'A'}$)와 l_B' ($= \overline{A'B'}$)를 사용한다.

$$l_A' = (x_O + x_R + 2d) \tan \theta_B \quad (30)$$

$$l_B' = l_C \sin \theta_C - l_A' \quad (31)$$

따라서 수정된 3차원 위치 계산식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' - x_O \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (32)$$

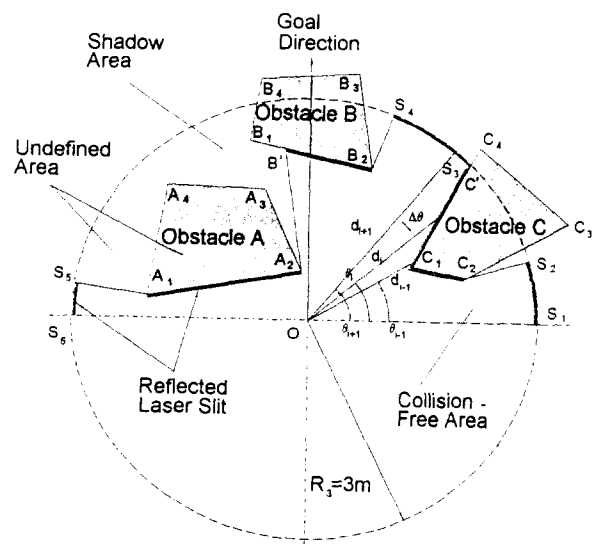


그림 7. 레이저 거리계의 탐색영역.
Fig. 7. Searching area of laser range finder.

V. 경로계획

1. 주변 환경정보 추출

제안된 레이저 거리계의 최대 시야각(maximum view angle)은 약 60° 인데, 이는 레이저 슬릿 발생장치의 하드웨어

어적인 제한과 광각 CCD 카메라 채용에 따른 분해능의 감소에 기인한다. 따라서 레이저 탐색은 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$, 즉 180° 영역을 탐색하기 위해서는 3번의 주사(scanning)가 필요하다. 그리고 각 주사 영역의 거리정보는 삼각법에 의해서 얻을 수 있다. 그림 7은 레이저 거리계의 탐색 예를 보여준다. 레이저 거리계의 탐색영역은 이동로봇의 현재위치 O를 원점으로 하는 반경 $R_3(=3m)$ 인 원에서 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 인 반원의 내부로 제한된다. 그림에서 탐색영역 내에 3개의 장애물(obstacle) A, B 그리고 C가 놓여져 있고, 각 장애물의 꼭지점은 아래 첨자로 표시되어 있다(예로서, 장애물 A의 경우 각 꼭지점은 A_1, A_2, A_3, A_4 로 이루어져 있다). 특히 작업영역의 바닥면에서 반사되는 레이저 슬릿 중에서 점 S_3 는 장애물C의 한 면인 $\overline{C_1C_4}$ 위의 한점 C와 일치한다. 거리정보를 얻을 수 있는, 즉 레이저 슬릿이 반사되는, 면은 장애물의 결면 ($\overline{A_1A_2}, \overline{B_2B'}$, $\overline{C_1C_2}, \overline{C_1C'}$)과 작업영역의 바닥면 ($\overline{S_1S_2}, \overline{S_3S_4}, \overline{S_5S_6}$)이 된다. 이들 면 사이에 레이저 슬릿의 불연속 구간($\overline{A_1S_5}, \overline{A_2B'}$, $\overline{B_2S_4}, \overline{C_2S_2}$)이 존재한다. 이 불연속 구간들은 장애물과 또 다른 장애물, 또는 장애물과 바닥면 사이에 이동로봇이 통과 가능한 통로가 있을 수 있음을 암시한다. 따라서 이동로봇이 통과할 수 있는 구간은 레이저 슬릿이 바닥면 위에서 반사되는 영역과 불연속 구간으로 제한된다. 특히 불연속 구간은 이동로봇의 진행에 따른 레이저 거리계의 탐색위치 변화에 따라 통과 가능 또는 불가능한 통로로 확인된다.

따라서 레이저 거리계의 탐색영역은 이동로봇이 접근할 수 있는 자유영역(collision-free area)과 충돌이 야기될 가능성이 있는 비 확정영역(undefined area)으로 나눌 수 있는데, 이들 영역사이의 경계는 물체에서 반사되는 레이저 슬릿면 구간과 불연속 구간이 된다. 또한 비 확정영역은, 현재 이동로봇의 위치에서는 구분할 수 없지만, 장애물에 의해서 점유된 영역과 이들 장애물에 의해서 가려진 그림자 영역(shadow area)으로 나눌 수 있다.

이와 같이 얻어진 장애물의 연속적인 거리 데이터와 통로의 유무에 대한 정보는 다음절에서 거론할 방향성 가중치 방법에 의한 국부 경로계획에서 사용된다. 특히 물체에서 반사된 레이저 슬릿에 의한 연속적인 거리 데이터는 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 마다 추출한 $N=(180^\circ / \Delta\theta + 1)$ 개의 불연속 거리 데이터로 샘플링 된다. 따라서 이동로봇의 현재위치에서 goal 방향을 중심으로 -90° 를 기준해서 반시계 방향으로 매 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 만큼 불연속적으로 회전한 각도를 θ_i 라 하면,

$$\theta_i = (i-1)\Delta\theta \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (33)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 임의의 θ_i 에서의 샘플링된 거리 데이터 d_i 는 이동로봇의 현재위치에서 θ_i 방향으로 그은 직선이 반사된 레이저 슬릿과 만나는 점까지의 거리가 된다. 그림에서 보면, 점 O에서 θ_i 방향으로 그은 직선이 장애물 C위의 한면 $\overline{C_1C_4}$ 와 만나는 점까지의 거리가 d_i 이다. 또한 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 가 작을수록 샘플링되는 거리 데이터의 갯수가 많아지고, $\Delta\theta$ 가 커질수록 거리 데이터의 수는 적어진다. 여기서 샘플링되는 거리데이터의 갯수가 많아질수록 초기에 레이저 거리계로부터 얻어지는 연속적인 거리 정보에 가까워져서 주위환경을 더 자세히 기술할 수 있으나, 반면에 데이터 처리를 위한 계산량이 많아지는 단점이 있다. 따라서 적당한 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 의 선택이 필요하다.

2. 방향성 가중치 방법

이동로봇이 자율적으로 주행하기 위하여 스스로 전진방향과 속도(또는 샘플링 시간동안 가야 할 이동거리)를 결정해야 한다[6]. 특히 이동로봇의 전진방향은 이미 얻어진 거리 데이터와 통로의 유무에 대한 정보를 이용하여 주위의 장애물과 충돌하지 않으면서 가장 짧은 경로로 목표점에 접근할 수 있는 방향을 선택해야 한다. 이때 2개의 문제가 제기되는데, 그 첫번째는 목표점으로 가장 빠르게 접근할 수 있도록 최단 경로가 되는 전진방향을 선택하는 것이고, 두번째는 선택된 방향으로 이동로봇이 주행할 때 주위의 장애물과 충돌하지 않는지를 collision-free path 시험을 통하여 보장해 주어야 한다. 이 절에서는 첫번째 사항을 다루고, 다음 절에서는 두번째 사항을 다룬다.

먼저 이동로봇의 현재위치에서 레이저 거리계를 이용하여 얻을 수 있는 국부적인 거리 데이터를 가지고, 목표점으로 가장 빠르게 접근할 수 있는 방향을 선택하는 방법으로 방향성 가중치 방법(directional weighting method)을 제안한다. 이동로봇의 현재 위치에서 목표점으로 가장 빠르게 접근하는 전진방향은 현재위치와 목표점을 직선으로 연결한 방향이 될 것이다. 그러나 이 직선상에 장애물이 존재하는 경우 부득이 이를 피해서 가야 하는데, 될 수 있으면 목표점 방향과의 각도 차가 작은방향으로 진행하는 것이 더 경제적이다[7]. 따라서 목표점 방향에서 멀어질수록 가중치가 적어지는 방향성 가중치 함수 $\Phi(x,y)$ 를 도입하여 앞에서 얻은 샘플링된 거리 데이터와 그 방향의 가중치 값을 곱한 결과에서 큰 값을 가지는 방향일수록 목표점에 빨리 도착할 수 있는 가능성이 큰 방향이 된다. 즉 임의의 각도 θ_i 에서의 거리 데이터 d_i 와 그 방향의 가중치 w_i 의 곱을 attractive resultant force R_i 라 하면

$$R_i = w_i d_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (34)$$

가 된다. 그림 8(a)는 레이저 거리계로부터 얻어지는 거리 데이터의 한 예를 보여주고 있다. 여기서 레이저 탐색영역은 로봇의 현재위치를 원점으로 하는 반경 $R_3(=3m)$ 인 원에서 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 로 제한된다. 특히 목표점 방향은 센서좌표계의 +X' 방향과 일치한다. 그림 8(b)는 Archimedes의 spiral 함수에서 얻을 수 있는 방향성 가중치함수의 한 예를 보여준다. 그림에서 보면, 목표점 방향을 중심으로 여기서 멀어질수록 가중치 값이 작아지는 좌우 대칭형 함수임을 알 수 있다. 그림 8(c)는 (34)에 의해 계산된 attractive resultant force의 결과를 보여준다. 여기서 attractive resultant force는 레이저 거리계로부터 얻어지는 샘플링된 거리 데이터와 곱해지는 방향성 가중치 함수의 영향에 의해서 목표점 방향에 가까울수록 과장되어 나타나고, 멀어질수록 축소되어 나타남을 알 수 있다. 다른 한편으로, 샘플링 각도 $\Delta\theta$ 의 크기에 따라 불연속 거리 데이터의 갯수 N이 변화하고 따라서 attractive resultant force 도 N개를 얻을 수 있다. 이 N개의 attractive resultant force 를 가장 큰 것부터 순서대로 나열할 수 있고, 그 순서가 이동로봇이 최단거리로 목표점에 도착할 가능성이 있는 전진방향의 순서가 된다. 그러나 이러한 전진방향으로의 이동로봇의 진행이 장애물과의 충돌회피를 완전히 보장해 주지는 못하므로 이들 방향에 대한 경로의 충돌에 대한 안전성은 다시 시험되어야 하는데, 이는 다음절에서 다룬다.

3. Collision-Free Path

앞 절에서 거론한 방향성 가중치 방법에 따라 attractive resultant force가 구해지고, 그들이 가장 큰 값부터 순서대

로 배열되었다면, 먼저 가장 큰 값을 갖는 attractive resultant force 방향에 대한 collision-free path와 open pathway 시험을 한다.

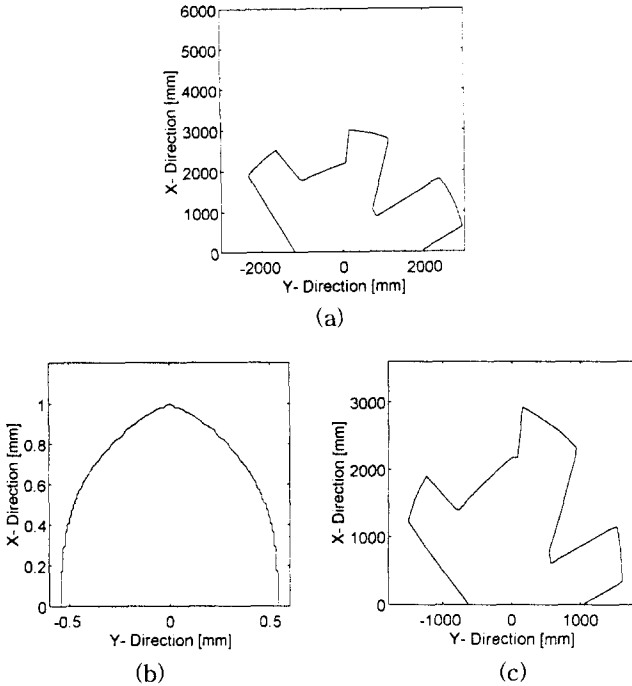


그림 8. (a) 거리 데이터, (b) 방향성 가중치 함수, (c) Attractive resultant force.
 Fig. 8. (a) Range data, (b) Directional weighting function, (c) Attractive resultant force.

거리 $\overline{A_2D}$ 를 계산할 수 있다. 그 수직거리를 W_1 이라 하고 로봇 몸체의 반경을 R_r , 장애물 회피를 위한 안전여유를 W_s 라 하면, collision-free path 시험조건

$$W_1 \geq (R_r + W_s) \quad (35)$$

을 만족하는지를 판별하여 이 조건을 만족하면 다음단계의 open pathway 시험을 수행하고, 만족하지 않으면 그 다음 큰 값을 갖는 attractive resultant force 방향에 대한 collision-free path 시험을 다시 수행한다. 여기서 collision-free path 시험을 반경 $R_1 (=1m)$ 이내로 제한한 것은 이동로봇에 명령이 주어지는 샘플링 시간동안의 최대 전진거리가 약 0.5m이고, 로봇 몸체의 반경이 0.3m, 그리고 진행 방향의 안전여유가 0.2m로 주어지기 때문이다. collision-free path 시험조건을 만족하면 탐색범위 $R_3 (=3m)$ 내에서 attractive resultant force 방향 즉 \overline{OD} 방향으로 이동로봇이 통과 가능한 통로가 있는지를 시험하여야 한다. 이는 \overline{OD} 방향으로 장애물 사이의 최소폭 사이를 이동로봇이 통과할 수 있는지를 시험함으로써 가능하다. 그림에서 장애물 사이의 최소 폭은 $\overline{B_2C'}$ 가 되고 이를 W_2 라 하면, 다음의 open pathway 시험조건

$$W_2 \geq 2(R_r + W_s) \quad (36)$$

을 만족하면 선택된 attractive resultant force 방향이 최종적으로 이동로봇의 다음 스텝(step)의 전진방향이 되고, 만족하지 않으면 그 다음 큰 값을 갖는 attractive resultant force 방향을 선택하여 collision-free path와 open pathway 시험을 다시 수행해서, 이 두 조건을 모두 만족하는 attractive resultant force 방향을 다음 스텝의 전진방향을 결정한다. 이와 같이 결정된 전진방향과 더불어 로봇의 주행에 있어 필요한 것은 속도 또는 샘플링 시간동안 가야 할 거리이다. 앞에서 결정된 전진방향으로의 속도는 장애물의 유무와 통로의 폭에 따라 결정되어야 하지만, 여기서는 로봇이 샘플링 시간동안 일정한 거리를 이동하는 것으로 간주하였다.

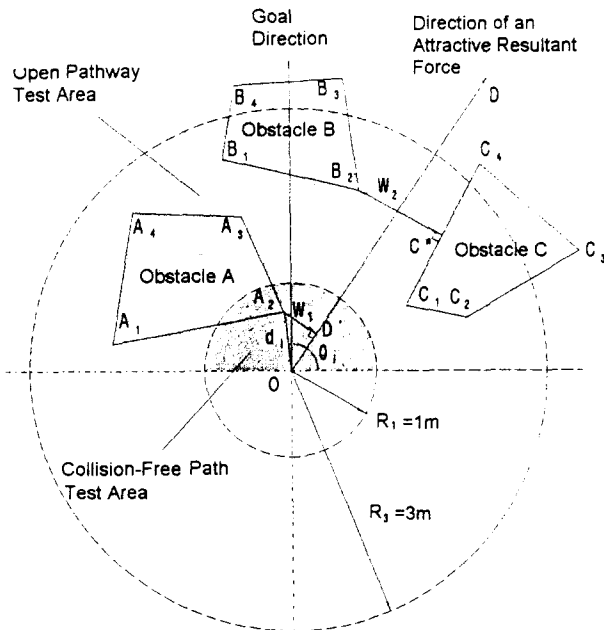


그림 9. 충돌회피 경로와 열린 경로 시험영역.
 Fig. 9. Collision-free path and open pathway test regions.

그림 9는 collision-free path와 open pathway 시험영역을 보여주고 있다. 먼저 collision-free path 시험의 경우, 가장 큰 값을 갖는 attractive resultant force 방향을 \overline{OD} 라 가정하면, 반경 $R_1 (=1m)$ 이내에서 직선 \overline{OD} 와 수직거리가 가장 가까운 거리데이터 d_i 를 찾아내고, 그 수직



그림 10. 이동로봇 METRO-1의 외관.
 Fig. 10. Photograph of mobile robot "METRO-1".

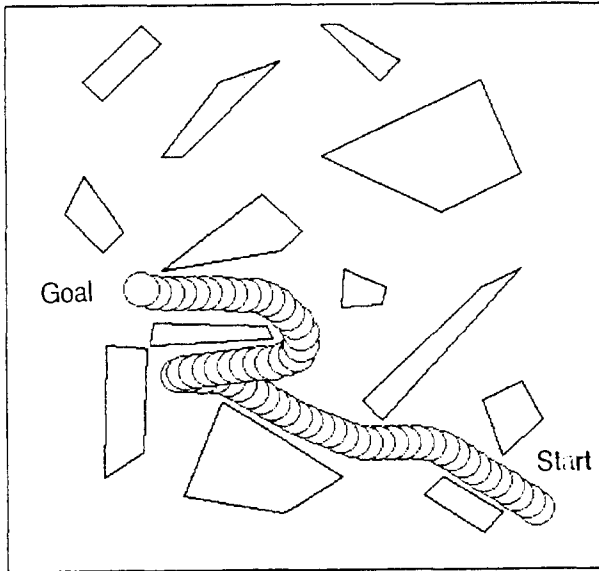


그림 11. 모의실험에 의한 항법결과.
Fig. 11. Navigation result according to computer simulation.

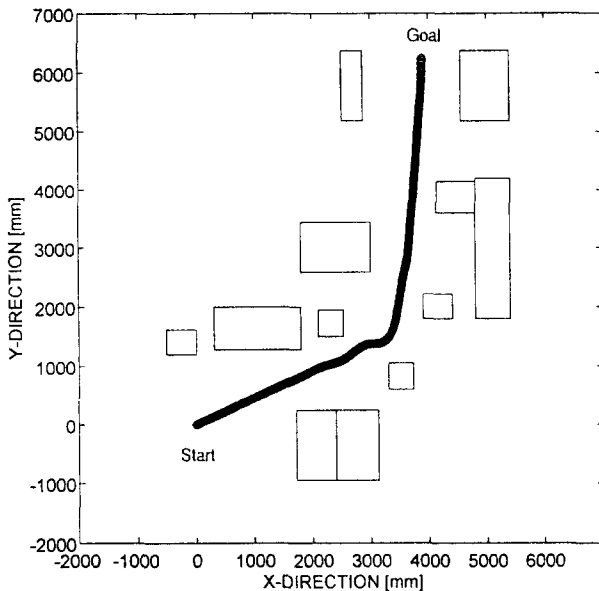


그림 12. 실제실험에 의한 항법결과.
Fig. 12. Navigation result according to real experiment.

VI. 실험

그림 10은 개발된 자율 이동로봇, METRO를 보여주고 있다. 그리고 앞에서 거론한 방향성 가중치방법에 기초한 국부 경로계획 알고리즘의 모의실험(computer simulation)이 IBM-PC(486)에서 이루어 졌고, 그 결과가 그림 11에 나와 있다. 이 그림에서는 벽과 장애물로 이루어진 가상의 실내 환경이 보여진다(가로 15m 와 세로 15m). 그리고 여기서는 두 종류의 센서 데이터가 얻어진다고 가정한다. 그들 중에서 하나는 이동로봇 자신의 위치추정을 위한 것이고, 다른 하나는 장애물을 피하기 위하여 국부적인 주위환경을 인식하기 위한 것이다. 전자의 센서로는 바퀴 회전용 엔코더가 사용되고, 후자의 센서로는 앞질에서 거론한 레이저 거리계가 사용된다고 가정하였다. 이 모의실험에서 로봇의 새로운 전진방향 결정을 위한 샘플링 시간은 3sec로 하였고

(실제로 방향성 가중치 방법만의 계산시간은 약 0.1 sec 이 내), 레이저 거리계의 탐색범위는 반경 3m 인 원에서 목표점 방향을 중심으로 $\pm 90^\circ$ 이내의 영역으로 한정하였다. 여기서 사용된 방향성 가중치 함수는 Archimedes 의 spiral 곡선이다($a=1$). 또한 샘플링 각도 $\Delta\theta = 1^\circ$ 로 하여 181개의 불연속 거리데이터를 사용하였다. 이 모의실험 결과는 매 1 sec마다 이동로봇의 경로를 원으로 표시한 것이다. 일반적으로 안전여유가 클수록 장애물에서 더 멀리 떨어져서 이동하기 때문에 더욱 안전하지만, 목표점까지의 경로가 길어져서 비경제적이다. 그림 12는 실제환경으로 실험실 내에서의 이동로봇의 항법 결과를 보여주고 있다. 여기서 로봇은 목표점에 성공적으로 도달함을 알 수 있다. 결국 이와 같은 결과는 각도와 거리측정에 대한 우수한 분해능을 가지고 있는 레이저 거리계의 거리 데이터와 장애물 유무에 대한 정보를 이용하여, 형상공간 방법과 포텐셜 방법에 기초한 방향성 가중치 방법을 이용한 정교하고 간결한 국부 경로계획 알고리즘에 의해서 얻어질 수 있었다.

VII. 결론

본 연구에서는 개발된 이동로봇, METRO의 정/역 기구학해(solution)를 구하고, 이에 따른 경로 추종 제어기를 제안하였다. 그리고 개발된 전 방향형 레이저 거리계의 구조와 원리, 3차원 물체 형상인식 및 거리 데이터 추출을 위한 간단한 변환수식 유도, 영상처리 알고리즘을 다루었고, 이러한 레이저 거리계의 캘리브레이션(calibration)방법 및 정확한 3차원 거리 데이터 추출 알고리즘을 제안하였다. 끝으로 이러한 레이저 거리계로부터 얻은 거리 데이터와 주위환경 정보를 효과적으로 이용하는 국부 경로계획 알고리즘을 다루었다. 또한 이동로봇의 실시간 항법을 위해 제안된 국부 경로계획 알고리즘의 타당성이 여러 가지 복잡한 환경 하에서 모의실험과 실제실험을 통하여 보여졌다.

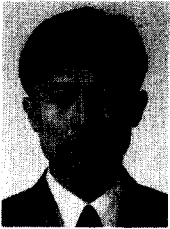
참고문헌

- [1] Y. Y. Cha and D. G. Gweon, "Real-Time control using explicit dynamic solutions of a two-motion-modes Mobile Robot", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of System and Control Engineering*, vol. 208, pp. 157-167, 1994.
- [2] P. F. Muir, "Modeling and control of wheeled mobile robots", *Ph. D Thesis, Dept. of Electrical and Computer Engineering*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA., 1988.
- [3] Y. Y. Cha, D. G. Gweon and D. G. Lee, "An active range sensor for free ranging mobile robot", *Int. Symposium on Robotics and Manufacturing, Maui, USA*, pp. 35-40, August 15-17, 1994.
- [4] Y. Y. Cha and D. G. Gweon, "A laser scanner calibration algorithm for mobile robot", *Autumn Conference of Robotics Society of Japan*, Fukuoka, Japan, pp. 885-888, Nov. 20-22, 1994.
- [5] R. Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision", *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 68-75, 1986.
- [6] Y. Y. Cha and D. G. Gweon, "Local path planning of a free ranging mobile robot using the directional

weighting method”, *Mechatronics*, vol. 6, no. 1, 1996.

[7] J. Borenstein and Y. Koren, “The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots”,

IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 278-298, 1991.



차 영 엽

1961년 11월 18일생. 1984년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사). 1995년 한국과학기술원 정밀공학과 졸업(공학박사). 1987년 3월 ~ 1990년 2월 삼성종합기술원 주임연구원. 1995년

3월 ~ 현재 원광대학교 기계설계공학과 전임강사. 주관심 분야는 이동로봇, 지능제어, 영상처리 등임.



권 대 갑

1952년 4월 1일생. 1975년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1977년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1987년 Univ. Stuttgart 졸업(Dr. Ing). 1987년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수. 주관심분야는 공장자동화, 초정밀 위치제

어, 지능제어 등임.