

論文95-32B-10-3

이동 로봇의 계단 승월을 위한 계단 크기 인식 기법에 관한 연구

(A Study on the Recognition Method of the Stair Size for the Climbing Mobile Robot)

金承範*, 李應赫**, 金秉秀***, 金承鎬***,
閔弘基****, 洪勝弘*

(S.B. Kim, E.H. Lee, B.S. Kim, S.H. Kim, H.K. Min, S.H. Hong)

요약

이동 로봇이 원자력 발전소 내부의 주요 시설을 점검하기 위해서는 계단이나 불규칙한 장애물이 존재하는 지역을 자유자재로 주행할 수 있어야 한다. 계단을 자유롭게 승월하기 위해서는 이동 로봇의 주행 경로상에 존재하는 계단에 대한 정보(높이와 폭)를 획득하여야 한다. 본 연구에서는 이동 로봇 전방에 존재하는 계단의 크기를 계측하기 위하여 계단의 높이 측정용으로 초음파 센서를 사용하고, 폭 측정용으로는 초음파 센서와 CCD 카메라를 결합하여 사용하는 계단 크기 인식 유닛을 설계하였다. 또한 초음파 센서 데이터의 신뢰성을 높이고 정확한 계단의 측정을 위하여 수평 유지 센싱 방법을 제안하였다. 로봇이 일정한 궤적을 그리며 계단을 승월한다는 가정하에 계단의 폭과 높이를 구하는 과정을 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 수평 유지 센싱 방법의 적합성을 확인하였고, 제작된 계단 인식 유닛을 실제 이동 로봇에 부착하여 실험한 결과 높이 측정에 약 $\pm 3\text{mm}$, 폭 측정에서 약 $\pm 5\text{mm}$ 정도의 오차를 나타내었다.

Abstract

A mobile robot in a nuclear power plant is usually needed to equip the ability of going up and down stairs for a some kind of inspection. For this purpose, it is necessary for the mobile robot to figure out the size of stairs laid on a navigation path to gurantee robot's moving freely. In this paper, to measure the size of stairs existing in front of a mobile robot we designed the stair size recognition unit which can measure the stair's height and width using an ultrasonic sensor and/or a CCD camera. Also to obtain higher reliability of ultrasonic sensing data we proposed the horizontal sensing method. On the assumptions that the mobile robot generates a trajectory while ascending stairs, we simulated it on a IBM compatible computer. The result showed that the suggested method satisfied our purpose. In a stair size estimation, the detected stair's height error was about $\pm 3\text{mm}$, and width was about $\pm 5\text{mm}$.

* 正會員, 仁荷大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Inha Univ.)

** 正會員, 建陽大學校 컴퓨터工學科

(Dept. of Computer Eng. Konyang Univ.)

*** 正會員, 韓國原子力研究所

(Korea Atomic Energy Research Institute)

**** 正會員, 仁川大學校 情報通信工學科

(Dept. of Information and Telecommunication Eng.)

接受日字: 1994年12月21日, 수정완료일: 1995年10月6日

I. 서론

원자력 발전소와 같은 특수환경내에서 이동 로봇이 다양한 기능의 작업을 수행하기 위해서는 계단이나 불규칙한 장애물이 존재하는 지역을 자유자재로 주행할 수 있는 이동기능이 요구된다^[1]. 계단 및 장애물 승월을 위하여 유성 차륜방식을 채택한 로봇 시스템은 1980년대부터 활발한 연구가 시작되어 TO-ROVER, SMOOTHY, AIMARS 등이 개발되어 있다.^[2]
¹ 이들 자율 승월 로봇은 이동중에 계단이 감지되면 단순히 유성차륜을 120° 회전하여 승월하도록 되어

있어 크기가 일정하지 않은 실제 계단에 적용할 때 안전성과 조작성에 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 국내에서 개발된 계단 승월용 로봇(KAE-ROT)에서는 전후 유성차륜내 소차륜들의 이동 위치를 계단의 형태에 따라 안정된 경로를 계획하여 계단을 자동으로 승월하는 방식을 사용하였다.^[3] 이 방식은 기본적으로 계단의 유무와 크기의 인식이 요구되는데 이동 로봇트가 필요로 하는 계단에 관한 정보는 바퀴의 미끄러짐, 바퀴의 재질, 센서의 오차등 여러 가지 오차 요인으로 인하여 계단 승월전에 미리 측정된 데이터에 의존하기 어렵다. 따라서 이동 로봇트가 자동으로 계단을 승월하기 위해서는 실시간으로 다음 이동 위치의 계단 크기를 측정해야 하며, 계단의 실측 크기는 계단 승월 메카니즘을 고려할 때 허용 오차가 $\pm 5\text{mm}$ 이내 이어야 한다. 이러한 요구를 만족하기 위하여 이동 로봇트가 계단을 오르면서 실시간으로 계단의 크기를 측정할 수 있어야 하며, 이에 적합한 비접촉식 센서로는 초음파 센서, CCD 카메라, 레이저 센서 등이 이용될 수 있다.

초음파 센서는 하드웨어 구현이 쉽고 값도 저렴하다는 장점이 있어 이동 로봇트 분야에서 거리 및 위치 인식과 물체의 형태, 유무 판별 등에 유용하게 사용되어 왔다^{[4][5]}. 초음파 센서로 물체 인식을 하기 위하여 초음파 스캔 방식이 주로 사용되며, 이 방식은 센서를 90° 나 180° 의 검색 각도 내에서 일정한 각도로 회전시켜 감지되는 거리 데이터로 주위 환경을 인식하는 방식이다. 그러나 로봇트가 계단을 오르며 계단 크기를 측정하고자 하는 목적으로 스캔 방식을 사용하기에는 크게 두 가지 문제점이 있다. 첫번째 문제는 스캔 시간이다. 초음파 센서가 거리를 한번 측정하는데 약 50msec(약 9m 측정) 정도의 시간이 걸리므로 1° 씩 90° 를 스캔한다면 4.5초가 소요된다. 그러므로 로봇트가 이동중에는 데이터 처리가 어렵다는 단점이 있으며 이동중 스캔하여 얻은 데이터를 처리하려면 로봇트 이동 속도에 대한 보정이 필요하다. 두번째는 스캔하는 동안 감지되는 데이터에는 초음파의 지향각을 벗어났을 때 검출되는 의미없는 데이터도 포함되어 있어 이를 제거하기 위해서는 또다른 처리 프로그램이 필요하기 때문에 시스템 증가를 가져오는 단점이 있다.

카메라는 일정거리에 있는 물체 크기 인식등에 사용되고 있으나, 이동 로봇트와 같은 이동체에서 카메라를 이용하여 물체를 인식하고자 할 때는 거리의 유동성으

로 인하여 문제가 발생한다. 이를 해결하고자 거리 측정을 위해 스테레오 비전 기법^[6]을 사용하는데 이는 영상처리 시간이 길어지고 복잡한 수학적 해석을 요하는 단점이 있다.

본 연구에서는 이상과 같이 하나의 센서를 채택함으로써 인해 발생하는 단점을 극복하기 위하여 계단의 높이 측정용으로는 초음파 센서, 폭 측정용으로는 초음파 센서와 CCD 카메라를 결합한 센서 구조를 사용하는 계단 크기 인식 기법을 제안하였다. 계단의 높이를 측정하는 방법으로는 시간과 시스템의 증가를 가져오는 스캔 감지 방법 대신에 수평 유지 감지 방법을 사용하였다. 이 방법은 초음파 센서가 항상 바닥면과 수평을 유지하게 하는 방식으로 음파가 수직으로 입사하고 반사하는 형태를 갖도록 하여 초음파 센서 사용으로 발생하는 오차 요인을 최소로 줄여 데이터의 신뢰성을 높일 수 있으며, 감지되는 거리 데이터를 특별한 처리 없이 직접 이용함으로써 시스템을 간소화할 수 있다. 그러나 이 방법은 계단의 높이를 구하는데 유효하지만, 이동 로봇트가 계단을 오를때 이동 속도가 일정하지 않기 때문에 초음파 센서만 사용해서는 계단의 폭을 구하기가 불가능하다. 그러므로 계단의 폭을 측정하기 위한 센서로 카메라를 도입하였다. 하나의 카메라를 사용하여 물체의 크기를 측정하기 위해서는 측정 물체와의 거리를 미리 알아야 하므로 계단의 영상을 카메라로 획득한 후 초음파 센서로 측정된 거리 데이터를 이용하여 계단의 크기를 구하였다.

또한 설계된 계단 인식 유니트를 로봇트 전단부에 부착하고 경사각 센서로 로봇트가 계단을 승월하는 경사각도 만큼 보정하여 항상 바닥면과 수평을 유지하도록 제어하며 계단 승월 실험을 하였으며, 제안한 방식의 적합성을 검토하기 위해 좌표계를 도입하여 시물레이션을 행하였다.

II. 계단 크기 인식 기법

이동 로봇트가 계단을 승월하기 위해서는 실시간으로 다음 이동 위치 계단의 폭과 높이가 측정되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 계단면과 항상 수평을 유지하는 계단 인식 유니트를 이용하여 이동 로봇트가 이동을 하면서 계단면과의 거리를 감지하는 수평 유지 감지 방법을 사용하여 계단의 폭과 높이를 측정하였다. 그림 1은 이동 로봇트에 본 연구에서 제안한 계단 인

식 유닛을 부착한 모습이다.

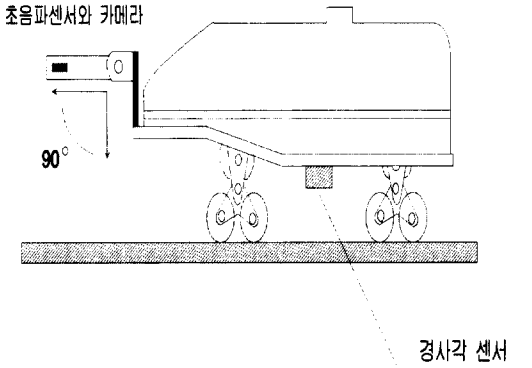


그림 1. 계단 인식 유닛을 장착한 이동 로봇
Fig. 1. Mobile robot equipped with stair size recognition unit.

계단 인식 유닛은 그림 1과 같이 이동 로봇의 앞단에 초음파 센서와 카메라를 부착하였고, 하단부에 경사각 센서를 부착하였다. 이로 인해 로봇이 계단을 오를때 경사각도가 변화하더라도 계단 인식 유닛과 계단면이 항상 수평을 유지할 수 있도록 하였다.

1. 높이 측정 기법

계단의 높이 측정에는 초음파 센서를 사용하였다. 그러나 초음파 센서를 사용할 경우에는 초음파 센서의 고유문제인 지향성, 미러효과(mirror effect), 데이터 판독 오차(erroneous readings)등에 의해 오차가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 실시간 처리를 구현하고 회로의 구성을 간단하게 위한 수평 유지 감지 방법을 제안한다. 그리고 이 방법의 적합성을 알아보기 위해 로봇의 계단승월 과정을 좌표계를 도입하여 2차원적으로 모델링하였다.

1) 지향각 오차 개선 방법

초음파 사용에 있어서 고려되어야 할 성질중 하나가 지향각이다. 초음파의 빔폭으로 인해 약 25° 정도의 지향각이 존재하므로 초음파 센서는 이 범위내에 존재하는 최단거리 물체와의 거리를 감지하게 된다. 그러므로 물체의 반사점이 불분명하게 되고 이로 인해 판독 데이터의 오차가 발생하게 된다. 그림 2는 이러한 오차 발생 요인을 개선하기 위해서 본 논문에서 제안한 수평 유지 감지 방법으로 계단의 높이를 측정하는 모습을 나타낸 것이다.

그림 2에서 알 수 있듯이 계단면에서는 초음파가

상 수직으로 입사 및 반사현상이 일어나므로 반사점이 분명하게 된다. 그러나 계단의 에지가 초음파 센서의 지향각내에 존재할 경우 반사점이 불분명해지는 문제가 발생한다. 이 경우 초음파 센서가 감지할 것으로 예측한 계단면과의 거리 d_1 대신 d_2 의 값을 감지하게 된다. 이를 개선하는 방법으로는 이전 데이터와의 변화량을 살펴서 일정시간 동안 같은 값을 갖는 데이터를 그 물체와의 거리로 생각하는 데이터 수렴 방법이 있다. 이 방법을 사용함으로써 거리 d_2 는 무시되고 d_1 값 다음에 정확히 d_3 값을 획득할 수 있다.

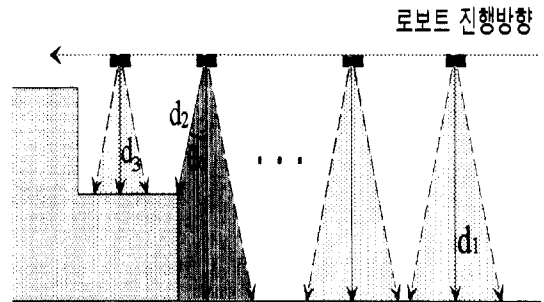


그림 2. 계단 에지에서 초음파의 반사
Fig. 2. Reflection from edge of stairs.

2) 로봇의 계단승월 과정 모델링

로봇이 계단을 오르내릴 때 로봇의 움직임에 의해 궤적이 발생한다. 그림3은 발생된 궤적에 대하여 제안된 수평 유지 감지 방법의 적합성을 알아보기 위해 2차원 좌표계를 도입하여 모델링하는 과정을 나타낸다. 여기서 이동 로봇의 계단승월 과정은 유성 차륜이 계단에 접촉하는 구조에 따라 x, y 평면의 수직 방향인 z 축이 회전하는 것으로 나타내어진다. 또한 점 $A(X_a, Y_a, \theta_a)$ 는 로봇 중심점의 좌표, 점 $B(X_b, Y_b, \theta_b)$ 는 초음파 센서의 좌표, θ_a, θ_b 는 A, B 점에서 x 축과의 각도를 각각 나타낸다.

로봇의 중심점 A 가 변화하면서 감지하는 계단의 바닥면과의 거리는 실제적 B 점의 초음파 센서 위치에서 측정이 되므로 A 점과 B 점과의 상관 관계를 구해야 한다.

그림 3에서 로봇의 중심점 좌표 점 A 는 원점에 대해서 z 축을 중심으로 θ_a 만큼 회전이 되었으므로 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$${}^0T_A = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a & X_a \\ \sin \theta_a & \cos \theta_a & Y_a \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

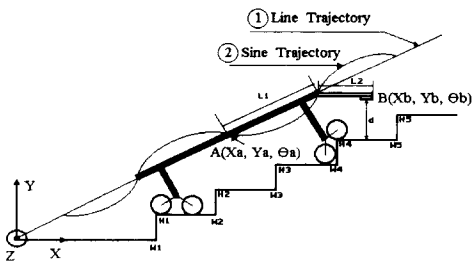


그림 3. 계단 오를때 로봇의 이동 궤적
Fig. 3. Trajectory of robot when it goes up stairs.

전단부에 위치한 초음파 센서의 좌표 B 는 로봇이 θ_a 만큼 기울어졌으므로 수평을 유지하기 위해 $-\theta_a$ 로 회전하게 되어 식 (2)와 같이 표현된다.

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_a) & -\sin(-\theta_a) & 0 \\ \sin(-\theta_a) & \cos(-\theta_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 l_1 은 로봇 전체길이의 1/2이고, l_2 는 로봇의 전단부에서부터 초음파 센서까지의 거리이다. 따라서 원점에 대한 B 점의 좌표는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} {}^0 T_B &= {}^0 T_A \cdot {}^A T_B \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_2 + l_1 \cos(\theta_a) + X_a \\ 0 & 1 & l_1 \sin(\theta_a) + Y_a \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

결국 B 점의 위치는

$$\begin{aligned} X_b &= l_2 + l_1 \cos(\theta_a) + X_a \\ Y_b &= l_1 \sin(\theta_a) + Y_a \\ \theta_b &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다.

각각의 계단의 높이(H_k)와 폭(W_k)이 주어지면, X_b 값의 범위가 식 (5)와 같이 제한될 때 센서와 계단면까지의 거리 d_k 는 k 번째 계단에서 식 (6)과 같이 구해진다. 식 (5)에서 $W_{k-1,0}$ 와 $W_{k,0}$ 는 각각 원점에 대한 $k-1, k$ 번째 계단의 x 좌표이다.

$$W_{k-1,0} \leq X_b < W_{k,0} \quad (5)$$

$$d_k = Y_b - kh \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

로봇이 하나의 계단을 승월하면서 구해진 거리 d_k

를 이용하면 계단의 높이(H_k)와 폭(W_k)은 식 (7)과 같이 구해진다.

$$H_k = d_{kmax} - d_{kmin}$$

$$W_k = X_b(d_{(k+1)max}) - X_b(d_{kmin}) \quad (7)$$

2. 폭 측정 기법

계단의 폭을 측정하기 위해 초음파 센서와 CCD카메라를 사용하였으며, 초음파 센서로는 계단과의 거리를 측정하기 위한 수단으로 사용하여 영상이 획득되었을 때의 기준 거리로 삼아 실제 영상에서 계단의 폭을 구하기 위한 지표로 사용하였다.

로봇이 계단을 오르는 동안 받아지는 영상의 종류는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫번째로 영상내에 계단 폭의 에지중 하나가 영상 상단반부에 들어오는 경우와 두번째로 두 에지가 모두 영상내에 들어온 경우(그림 4), 그리고 세번째로 하나의 에지가 영상 하단부에 들어오는 경우로 분류된다.

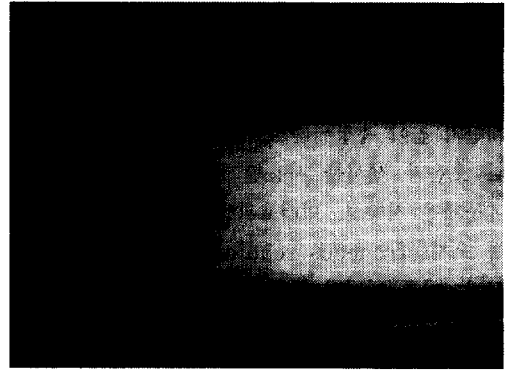


그림 4. 화면내 두 에지
Fig. 4. Two edges in image.

계단폭은 그림 4와 같이 두 에지가 모두 영상내에 들어온 경우에 에지 사이의 픽셀수로 계산할 수 있다. 이러한 영상처리 과정은 윈도우 설정, 에지 추출 및 룩업 테이블(look-up table) 작성의 3 단계로 나누어진다. 윈도우 설정은 계단의 두 에지가 존재할 수 있는 영역을 실험적으로 계산해 윈도우 창을 설정하여 그 부분만 이미지 그래픽에서 읽고 처리하는 과정이다. 이 방법으로 필요 없는 연산을 줄이므로 영상처리시간을 줄일 수가 있다. 에지를 추출하기 위해서 많은 방법이 있으나 계단의 에지와 같이 수평 성분 에지의 추출에 효과적인 소벨 연산을 사용하였다. 룩업 테이블은 화면

상에서 픽셀간의 거리를 계산하기 위해 표준 패턴을 이용하여 작성하였다. 표준 패턴은 두 직선사이가 203 mm 크기로 설계하였고, 카메라와 계단면이 위치할 수 있는 높이 546 ~ 738 mm 을 약 5mm 간격으로 표준 영상을 만든 후 나머지 거리에 대해서는 보간법을 사용하여 한 픽셀당 크기를 구할 수 있도록 하였다.

Ⅲ. 시스템 구성 및 소프트웨어

1. 계단 인식 유니트 구조

계단의 크기를 측정하기 위해 고안한 계단 인식 유니트의 구조는 그림 5와 같이 계단 크기 측정용의 CCD 카메라와 초음파 센서, 계단면과의 수평 유지용의 스텝 모터로 구성되어 있다. 또한 이동 로봇의 경사도를 알기 위해 경사각 센서가 그림 1과 같이 로봇 본체에 별도로 부착되어 있다.

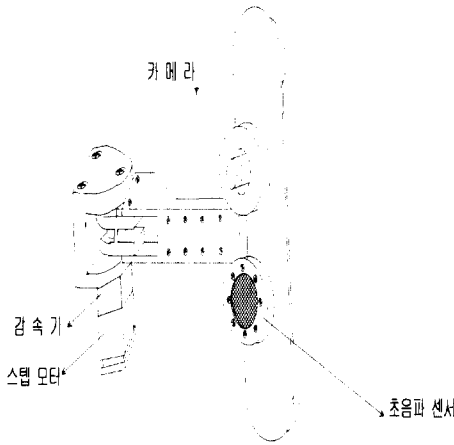


그림 5. 계단 인식 유니트의 구조.
Fig. 5. Stair size recognition unit.

2. 시스템 하드웨어

본 연구에서 제작한 시스템은 그림 6과 같이 각 기능별로 모듈화 설계하였으며, 메인모듈, 거리측정 모듈, 모터구동 모듈, 영상 모듈로 구성된다.

메인모듈은 전체 시스템의 제어를 담당하는 부분으로 거리측정 모듈과 스텝 모터 구동 모듈을 제어하고 시리얼 통신 채널을 통해 영상처리 모듈인 컴퓨터와의 통신을 담당한다.

거리측정 모듈에서는 초음파 센서를 구동하여 계단면과의 거리를 측정한다. 사용된 센서의 구동주파수는 50 kHz이고, 초음파의 지향성은 약 25° 정도의 특성을 갖는다^[7].

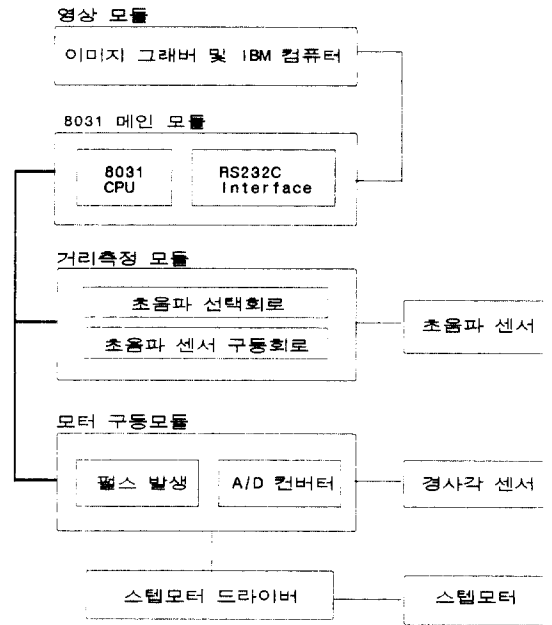


그림 6. 시스템 블록도
Fig. 6. System block diagram.

모터구동 모듈은 경사각 센서로부터 들어오는 경사도에 따라 스텝 모터를 구동시켜 계단 인식 유니트가 항상 계단면과 수평을 유지하도록 설계되어 있다.

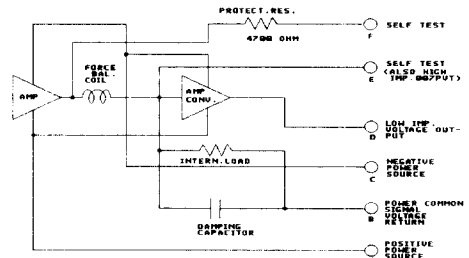


그림 7. 경사각 센서의 내부 구조
Fig. 7. Inner structure of inclinometer.

로봇의 경사각도를 구하기 위해서 본 연구에서는 LUCAS사의 LSOC-90 경사각 센서를 사용하였다. 이의 내부 구성은 그림 7과 같고, 경사도 +90° ~ -90° 에 대한 출력 전압이 +5V ~ -5V 이고, 오차 정도는 전체 범위의 +0.05 % 이다. 경사각 센서의 인터페이스를 위해 12 bit 분해능을 갖는 A/D 변환기 (AD574)를 사용하였고, 계단 인식 유니트의 자세 보정을 위해 5상 스텝 모터를 사용하였다.

영상 모듈은 CCD 카메라로부터 들어오는 영상 데이터를 처리하고 거리측정 모듈에서 측정된 거리 데이터를 이용하여 계단의 폭을 측정하는 역할을 담당한다.

3. 시스템 소프트웨어

그림 8은 초음파 센서에서 측정된 거리 데이터를 이용하여 높이를 측정하는 과정을 나타내고, 그림 9는 영상처리를 통해 계단의 폭을 구하는 과정을 나타낸다. 두 과정은 각각 독립적으로 실행되다가 필요한 데이터를 시리얼 통신하여 서로 교환하도록 되어 있다.

시스템이 기동되면 메인모듈은 시리얼 통신을 위한 레지스터들의 값과 스텝 모터 구동, 초음파 거리측정을 위한 각 부분을 초기화하고, 영상 모듈에서는 이미지 그래버의 레지스터들을 초기화한다.

그후 메인모듈은 초음파 센서를 구동시키고 계단의 에지에서 나타나는 데이터의 변동 여부를 확인한다. 이전 데이터와 새로운 데이터와의 차이가 문턱치를 넘지 않을 경우 경사각의 변화 여부에 따라 스텝 모터를 구동시킨다. 만약 데이터의 차이가 문턱치 값을 넘는 경우 계단의 에지로 판단하고 이전 데이터를 최대값으로 저장한 다음 새로운 거리 데이터가 일정한 값으로 수렴하도록 하는 루프를 수행한다. 이 과정이 초음파 센서의 지향각으로 인한 오차를 줄이기 위해 수평 유지 감지 방법을 구현한 것이다. 이러한 과정을 거쳐 수렴값이 찾아지면 저장하였던 최대값과 수렴값의 차이를 시리얼 통신 채널을 통해 영상 모듈인 IBM 컴퓨터로 전송한다.

면 RS232C를 통하여 초음파 센서로 측정된 거리 데이터를 입력받고 계단의 에지를 추출한 다음 거리에 대한 픽셀간의 거리 데이터 값이 들어있는 룩 업 테이블을 참조하여 계단의 폭을 계산한다.

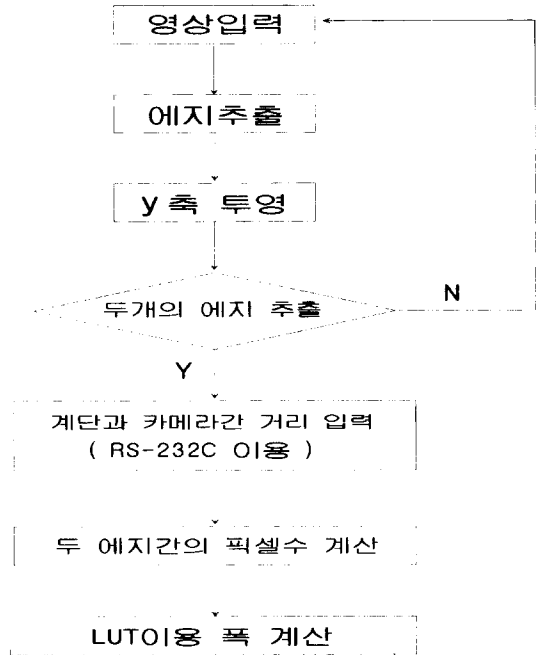


그림 9. 폭 측정 흐름도
Fig. 9. Flowchart of width measure.

IV. 실험결과

제안한 초음파 센서 감지 방법의 적합성을 검토하기 위하여 로봇이 계단을 오를때 로봇의 움직임이 일정한 궤적을 그린다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 수평을 유지하도록 제작한 계단 인식 유니트를 계단 승월용 로봇에 장착하고 실험하였다.

1. 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 계단의 높이(H)를 20cm로 넓이(W)를 30cm로 가정하였다.

1) 직선 궤적에 의한 시뮬레이션

이동 로봇이 그림 3의 ①번과 같은 직선운동을 하면서 계단을 승월한다면 $Y_a = \tan(\theta_a)X_a$ 의 직선식을 식 (4)에 대입하여서 계단면과의 거리 d_k 를 구할 수 있다. 경사각도 θ_a 는 30° 로 가정하였을때 그 결과를 그림 10에 나타냈다. x축은 초음파 감지 횡수이고 y축은 계단면과의 거리로 단위는 cm이다.

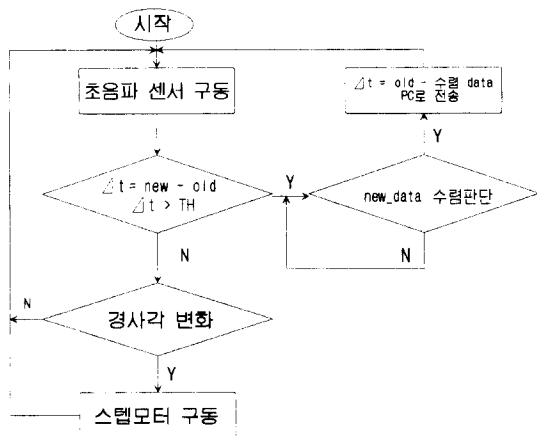


그림 8. 높이 측정 흐름도
Fig. 8. Flowchart of height measure.

영상 모듈에서는 하나의 계단 폭이 영상내에 들어오

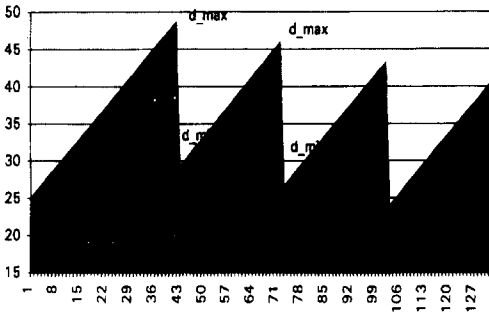


그림 10. 직선 궤적에 의한 거리 변화
Fig. 10. Distance change between sensor and stairs by line trajectory.

하나의 계단을 승월할때 마다 거리 데이터의 최대값과 최소값이 계단의 에지에서 나타난다. 최대값과 최소값의 차이가 앞으로 올라갈 계단의 높이가 되고, 각각의 차이는 정확히 20cm가 됨을 알 수 있다. 만약 로봇의 이동 속도가 0.2m/sec로 일정하고 초음파 감지 시간이 50msec이라면 그림 10에서 최소값과 다음번 최대값사이의 감지 횟수를 구하여 폭을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{폭} &= \text{이동 속도} \times \text{감지 횟수} \times 50\text{msec} \\ &= 0.2 \times 30 \times 50 \times 10^{-3} = 0.3\text{m} \end{aligned}$$

2) 사인파 궤적에 의한 시뮬레이션
이동 로봇트가 그림 3의 ②번과 같은 사인파 궤적을 그리면서 승월한다면 로봇트의 중심점 X_a, Y_a 는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

우선 $Y = A \sin \omega x$ 의 일반적인 사인파 함수가 θ_s 만큼 회전한다면

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 0 \\ \sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ A \sin \omega x \\ 1 \end{bmatrix}$$

이 되고 사인파 궤적의 각점에서 기울기 θ_a 는 회전각도 θ_s 와 궤적의 기울기를 더한값이된다.

$$\theta_a = \theta_s + A \omega \cos \omega x$$

결국 X_a, Y_a 의 좌표는

$$X_a = x \cos(\theta_s) - A \sin \omega x \sin(\theta_s)$$

$$Y_a = x \sin(\theta_s) + A \sin \omega x \cos(\theta_s)$$

이 된다. 직선 궤적의 경우와 마찬가지로 식 (4)에 의해 d_k 를 구하였고 주기 T를 40sec, 진폭 A를 2로 θ_s

를 30° 로 가정하였을때의 시뮬레이션 결과를 그림 11에 나타내었다. x축은 초음파 감지 횟수이고 y축은 계단면과의 거리로 단위는 cm이다.

직선 궤적에 의한 모의 실험 결과와 마찬가지로 계단 에지에서 발생하는 최대값과 최소값 사이에서 계단의 높이를 측정할 수 있고 로봇트의 이동 속도가 일정하다면 직선 궤적에서와 같이 계단의 폭도 구할 수 있다.

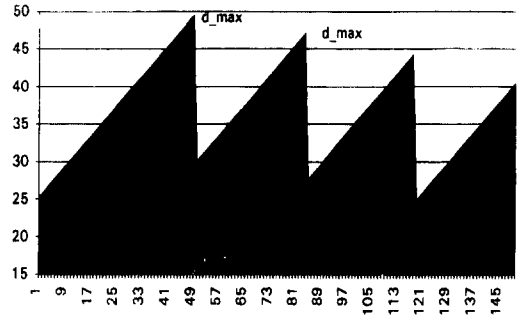


그림 11. 사인파 궤적에 의한 거리 변화
Fig. 11. Distance change by sine trajectory.

2. 계단승월 실험 결과

기존에 개발된 계단승월용 이동 로봇트의 유성 차륜은 고무로 되어 있어 계단과 접촉할 시에 2-8 mm정도 눌러져서 미리 주어진 계단을 승월할 경우 에라의 요인으로 작용하고, 바퀴의 미끄러짐이나 센서의 오차등도 에라의 요인으로 작용하였다¹³⁾. 또한 로봇트가 계단을 따라 안전하게 승월하기 위해서는 계단과 수직 방향으로 진입하여야 하는 문제점도 가지고 있었다.

본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 높이 측정에는 초음파 센서를 사용하고 폭 측정에는 CCD카메라와 초음파 센서를 결합한 계단 인식 유니트를 설계·제작하여 로봇트에 장착하여 실험하였다. 그 결과 계단승월 과정에서 미리 주어진 계단 데이터를 사용하지 않고 실측된 계단 데이터를 사용함으로써 바퀴 재질 및 미끄러짐에 대한 오차를 개선할 수 있었으며, 카메라를 사용함으로써 계단 진입시 자세를 교정할 수 있었다.

그림 12는 설계·제작된 계단 인식 유니트를 장착하고 계단을 오르는 모습을 나타내고 있으며, 계단 인식 유니트는 카메라로 하나의 계단 폭을 잡기 위하여 로봇트의 전단부 40 cm높이에 위치하고 있다. 또한 그림 13은 본 실험에서 사용한 실제 계단의 형상을 나타내며, 계단은 3개로 되어 있다.

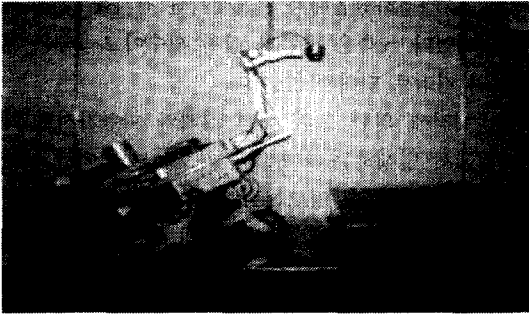


그림 12. 계단을 오르는 이동 로봇
Fig. 12. Mobile robot going up stairs.

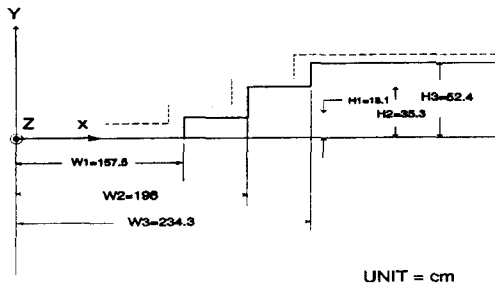


그림 13. 실험에 사용된 계단
Fig. 13. Stairs for experiments.

1) 높이 측정

이동 로봇이 실제 계단을 오르면서 초음파 센서에 의해 측정된 거리 데이터를 x축은 초음파 감지 횟수, y축은 계단면과의 거리 (단위는 mm)로 하여 그림 14에 나타내었다.

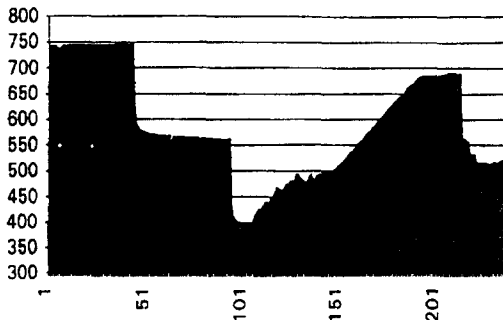


그림 14. 실제 실험에 의한 거리 변화
Fig. 14. Distance change for real experiment.

그림 14에서 x축의 처음부터 약 50까지는 첫번째 계단, 약 48부터 95까지는 두번째 계단이 감지된 것을 나타내고 있으며, 세번째 계단에 비해 계단의 높이가

뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 계단 인식 유닛이 이동 로봇의 전단부에 위치하여 미리 승월할 계단의 크기를 인식하는 구조로 되어 있어 계단을 오르지 않고 정속으로 주행하는 상태에서 계단을 인식할 수 있기 때문이다.

x축의 약 96부터는 계단의 승월 과정을 나타내고 있으며, 여기서는 수렴값이 나타나지 않기 때문에 계단의 높이로는 인식되지 않는다. 그리고 x축의 약 180부터 210까지는 최대값으로 수렴된 값이 나타나 이는 세번째 계단의 시작을 알리고, 215 근방에서는 최소값으로 또하나의 계단이 감지된 것을 나타내고 있다. 여기서 감지거리(y축)의 최대값과 최소값의 차이가 계단의 높이를 나타내고 있다. 그림 14에서 알 수 있듯이 초음파 센서만을 사용하여 계단의 높이를 측정하는 것은 가능하였으나, 이동 로봇의 계단승월 속도가 일정하지 않기 때문에 폭 측정은 가능하지 않았다. 그러므로 폭 측정에는 초음파 센서와 CCD 카메라를 결합하여 사용하였다.

표 1에 실측 계단 크기와 초음파 데이터의 계단 크기를 비교하였고, 오차를 나타내었다.

표 1. 계단 높이 측정 결과

Table 1. Result of stair height measurement (단위 : mm)

	실측	1 회	2 회	3 회	4 회	평균	오차
첫번째 계단	181	149	118	140	146	138	-43
두번째 계단	172	151	131	143	148	143	-29
세번째 계단	171	155	107	127	111	125	-60

표 1은 계단의 에지에서 나타나는 최대값과 바로 다음값의 차이를 계단의 높이로 간주한 것이다. 모의 실험과는 달리 -4 ~ -6 cm 오차가 발생하였다. 오차 원인은 초음파 센서의 넓은 지향성이므로 이를 개선하기 위해서 2.1.1절에 소개한 수평 유지 감지 방식을 적용하여 수렴값을 구하고, 이 수렴값을 이용하여 계단의 높이 측정 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 개선된 높이 측정 결과

Table 2. Improved result of stair height measurement (단위 : mm)

	실측	1 회	2 회	3 회	4 회	평균	오차
첫번째 계단	181	178	180	178	177	178	-3
두번째 계단	172	173	167	170	167	169	-3
세번째 계단	171	170	175	171	176	173	+2

표 2에서 알 수 있듯이 수렴값의 사용으로 인한 계단 높이 측정의 오차는 $\pm 3\text{mm}$ 이내로 줄어들었다.

2) 폭 측정

계단폭 측정은 계단의 두 에지가 모두 영상내에 들어온 경우에 에지사이의 픽셀수로 계산할 수 있다. 우선 영상처리 시간을 줄이고자 계단의 두 에지가 있을 수 있는 윈도우 창을 설정하여 그림 15와 같이 에지가 모두 있는 경우만 입력 신호를 받도록 하였다.

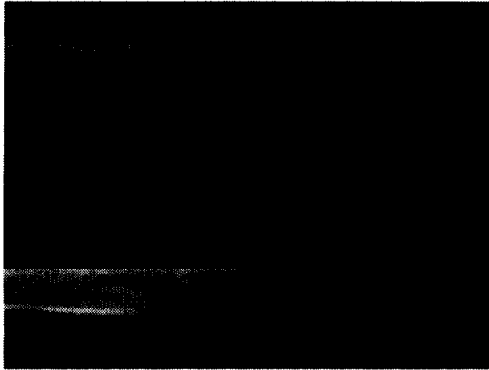


그림 15. 영상 입력
Fig. 15. Image input.

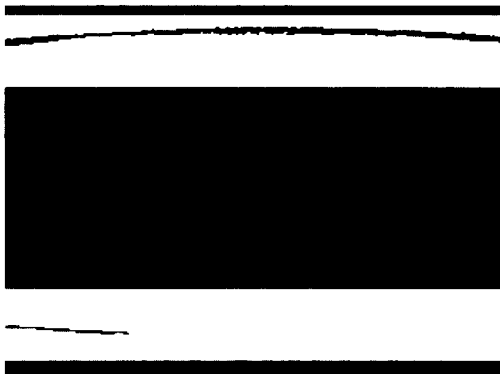


그림 16. 에지 추출
Fig. 16. Edge detection.

에지 추출에는 소벨 연산을 사용하였으며 소벨 연산 후 이치화된 영상을 그림 16에 나타내었다. 그리고 이치화된 영상에서 직선 성분을 찾기 위하여 y축에 투영을 하였다. y축 투영을 한 영상을 그림 17에 나타내었다.

투영된 데이터로부터 두개의 직선성분을 찾기 위하여 두개의 피크값을 선택했다. 만약 두개의 윈도우내에 모두 일정값을 넘는 피크값이 존재할 경우만 두 직

선사이의 픽셀수를 계산하였고 그렇지 않은 경우에는 다시 영상을 입력받도록 하였다.

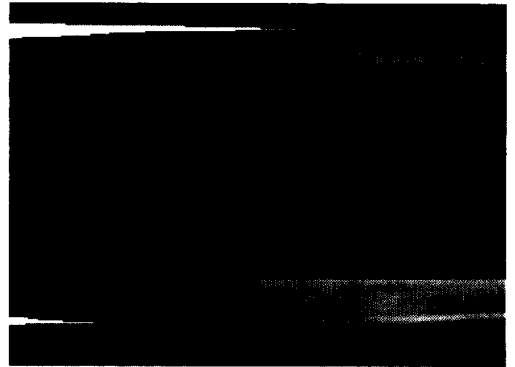


그림 17. y축 투영
Fig. 17. Projection of y axis.

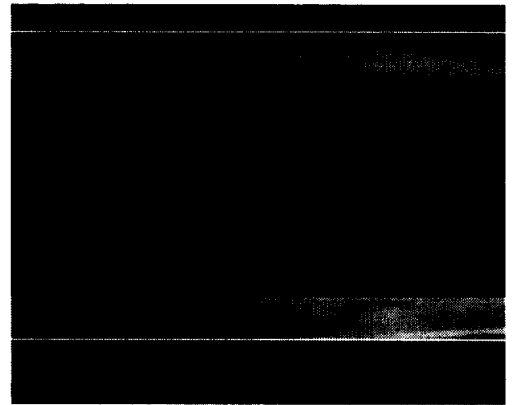


그림 18. 계단 에지 검출
Fig. 18. Stair edge detection.

그림 18에는 두개의 피크값으로 계단의 에지를 검출한 결과를 나타내었다. 화면상의 두 직선사이 거리를 계산하기 위해 거리 측정 모듈에서 측정된 거리 데이터를 전송 받아 미리 작성된 룩 업 테이블내의 표준 패턴을 참조하여 화면상에서 검출된 두 에지 사이의 픽셀수를 실제 거리로 환산한다. 위의 예에서 입력된 영상은 카메라로부터 568mm 떨어진 거리였다. 568mm에 대한 픽셀 크기는 룩 업 테이블에서 찾은 (1.91mm) 영상처리를 통해 계산한 두 직선 사이의 픽셀수가 199이므로 계단 폭은 380mm로 실측과는 -5mm 차가 있었다.

로보트의 진동 등을 고려하지 않은 정지영상을 이용하여 실험한 결과를 표 3에 나타내었다. 이때의 오차는 $\pm 5\text{mm}$ 이내 이었다.

표 3. 계단 폭 계산 결과

Table 3. Result of stair width measurement. (단위 mm)

	실측	1회	2회	3회	4회	평균	오차
첫 번째 계단	385	379	380	383	382	381	-4
두 번째 계단	383	377	377	380	376	378	-5

V. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소와 같은 특수환경내의 이동 로봇트가 계단 또는 장애물의 승월에 필요한 계단 크기 인식에 가장 적합한 감지 방법으로 초음파 센서와 카메라를 사용한 수평 유지 감지 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 장점은 계단면과 항상 수평을 유지하므로 초음파 오차 요인을 최소화 하여 계단의 높이를 구할 수 있으며 별도의 연산없이 데이터를 직접 이용하여 시스템을 간소화할 수 있다는 점이다. 또한 카메라의 사용으로 계단폭의 측정 뿐 아니라 이동 로봇트가 계단을 진입할 때 자세를 교정할 수 있는 부가적인 이점도 얻을 수 있었다.

로봇트의 계단 승월시 초음파 센서가 항상 계단면과 수평을 유지할 수 있도록 경사각 센서와 스텝 모터를 사용하여 계단 인식 유니트를 설계·제작하였다. 이를 이동 로봇트에 장착하여 실제 계단승월을 실험한 결과 계단의 높이와 폭의 오차는 각각 $\pm 3\text{mm}$, $\pm 5\text{mm}$ 이내에서 측정이 가능하며, 원래 이동 메카니즘에서 요구되는 한계오차인 $\pm 5\text{mm}$ 이내 오차를 만족시킬 수 있었다. 현재까지는 계단의 폭을 구할 때 로봇트가 잠시 정지한 상태에서 영상을 획득하였으나, 앞으로의 연구

에서는 로봇트가 연속적으로 이동하면서 발생하는 진동과 조명등의 영향이 고려되어야 할 것이다.

※ 이 논문은 과기처에서 주관하는 원자력 중장기 연구개발의 위탁과제로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 이동형 경작업로봇트 기술개발, 한국원자력연구소, KAERI/TR-377/93
- [2] 原子力施設에서의 로봇트 應用 技術 開發, 한국 원자력연구소, KAERI/ RR-952/90
- [3] 김병수, 김창희, 황석용, 김승호, 이종민, "장애물 승월이 가능한 원자력 시설용 이동 로봇트에 관한 연구," 대한전자공학회지 28B-1 호, pp.46-52, 1991
- [4] J. Leonard, F. Durrant-Whyte, "Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot", The Int. Jour. of Robotics Research, Vol. 11, No. 4, pp. 286-298, 1992.
- [5] Ömür Bozma and Roman Kuc, "Building a Sonar Map in a Specular Environment Using a Single Mobile Sensor", IEEE trans.on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.12, December 1991.
- [6] Toshifumi Tsukiyama, Thomas S.Huang, "Motion Stereo for Navigation of Autonomous Vehicle in Man-made Environments", Pattern Recognition Vol. 20, No 1, pp.105-113, 1987.
- [7] Polaroid Corp., Ultrasonic Ranging System. Cambridge, MA., 1982.

— 저 자 소 개 —



金承範(正會員)

1967년 7월 8일생. 1987년 3월 ~ 1993년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사). 1993년 3월 ~ 1995년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학석사). 1995년 1월 ~ 현재 LG전자 영상 ME-

DIA연구소 연구원. 주관심분야는 신호처리, DSP 응용, 컴퓨터응용등임.



李應赫(正會員)

1962년 11월 25일생. 1981년 3월 ~ 1985년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사). 1985년 3월 ~ 1987년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학석사). 1992년 9월 ~ 현재 인하대학교 전자공학과 (박사과정 수료). 1987년 1월 ~ 1987년 10월 (주)한국컴퓨터 연구원. 1987년 10월 ~ 1992년 4월 대우중공업 (주) 중앙연구소 주임연구원. 1995년 3월 ~ 현재 건양대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 주관심분야는 재활공학, 센서신호처리, 로보틱스, 컴퓨터응용등임.

정 수료). 1987년 1월 ~ 1987년 10월 (주)한국컴퓨터 연구원. 1987년 10월 ~ 1992년 4월 대우중공업 (주) 중앙연구소 주임연구원. 1995년 3월 ~ 현재 건양대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 주관심분야는 재활공학, 센서신호처리, 로보틱스, 컴퓨터응용등임.

金乘秀(正會員) 第 28卷 B編 第 1號 參照

현재 한국원자력연구소 원자력 산업용 로봇 개발팀 선임연구원

金承鎬(正會員) 第 28卷 B編 第 1號 參照

현재 한국원자력연구소 원자력 산업용 로봇 개발팀 책임연구원 팀장



閔弘基(正會員)

1953년 5월 5일생. 1972년 3월 ~ 1979년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사). 1979년 3월 ~ 1981년 8월 인하대학교 전자공학과 (공학석사). 1982년 8월 ~ 1990년 8월 인하대학교

전자공학과 (공학박사). 1985년 10월 ~ 1991년 7월 한국과학기술연구원 선임연구원. 1991년 8월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 부교수. 1993년 8월 ~ 1994년 7월 미국 Delaware대학 객원교수. 주관심분야는 생체신호처리, 재활공학, AAC등임

洪勝弘(正會員) 第 32卷 B編 第 7號 參照

현재 인하대학교 전자공학과 교수