

스테레오 카메라 기반의 적응적인 공간좌표 검출 기법을 이용한 자율 이동로봇 시스템

정희원 고 정 환*, 김 성 일**, 종신회원 김 은 수*

Autonomous Mobile Robot System Using Adaptive Spatial Coordinates Detection Scheme based on Stereo Camera

Jung-Hwan Ko*, Sung-Il Kim** *Regular Members*, Eun-Soo Kim* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 지능적인 경로 계획을 위한 스테레오 카메라 기반의 공간좌표 검출 기법을 이용한 자율 이동 로봇 시스템을 제안하였다. 우선 스테레오 카메라로부터 입력된 영상 중 좌 영상에 YCbCr 컬러 모델 및 무게 중심법을 이용하여 이동중인 보행자의 얼굴 영역과 중심좌표를 검출하고, 검출된 좌표 값에 따라 스테레오 카메라의 능동적인 로봇 제어를 통해 이동하는 보행자를 실시간적으로 검출하게 된다. 다음으로, 로봇구동에 의해 추적 제어된 스테레오 카메라의 좌, 우 영상간의 시차정보와 스테레오 카메라 내부 변환관계를 통해 깊이 정보를 검출한 후, 검출된 깊이 지도로부터 각 열에 존재하는 최소값을 이용한 2차원 공간좌표를 검출하여 이동 로봇과 보행자간의 거리와 위치좌표는 물론 다른 물체들과의 상대 거리를 산출하게 되며, 산출된 위치 좌표를 토대로 이동 로봇의 지능적인 경로 추정 및 판단에 따라 자율적인 주행을 수행하게 된다. 실시간적으로 입력되는 240 프레임의 스테레오 영상을 사용한 실험결과, 이동 로봇과 전방에 존재하는 장애물간의 거리 및 보행자와 장애물간 상대거리의 계산치와 측정치간의 오차가 평균 2.19%와 1.52%이하로 각각 유지됨으로써 경로 계획을 위한 공간좌표 검출에 기반을 둔 실질적인 이동 로봇 시스템의 구현 가능성을 제시하였다.

Key Words : mobile robot, stereo vision, stereo camera, disparity, spatial map

ABSTRACT

In this paper, an automatic mobile robot system for a intelligent path planning using the detection scheme of the spatial coordinates based on stereo camera is proposed. In the proposed system, face area of a moving person is detected from a left image among the stereo image pairs by using the YCbCr color model and its center coordinates are computed by using the centroid method and then using these data, the stereo camera embedded on the mobile robot can be controlled for tracking the moving target in real-time. Moreover, using the disparity map obtained from the left and right images captured by the tracking-controlled stereo camera system and the perspective transformation between a 3-D scene and an image plane, depth information can be detected. Finally, based-on the analysis of these calculated coordinates, a mobile robot system is derived as a intelligent path planning and a estimation. From some experiments on robot driving with 240 frames of the stereo images, it is analyzed that error ratio between the calculated and measured

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.(IITA-2005-C1090-0502-0038)

* 광운대학교 차세대 3D 디스플레이 연구센터 (misagie@kw.ac.kr, eskim@daisy.kw.ac.kr)

** 경원대학교 전자공학과 (ksi@mail.kyungwon.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-11-463, 접수일자 : 2005년 11월 14일

values of the distance between the mobile robot and the objects, and relative distance between the other objects is found to be very low value of 2.19% and 1.52% on average, respectably.

I. 서론

영상 기술이 첨단화 되어 고도의 기술 집적이 이루어지면서 카메라 자동 추적 시스템을 기반으로 한 자율 이동로봇의 연구 개발이 널리 진행되고 있다. 특히, 이동물체의 출현이 그다지 많지 않은 환경에서 동체의 존재를 자동으로 감지하고 이를 추적함으로써 인간의 역할을 대신하며, 전방 시야에 존재하는 특정 장애물 또는 보행자의 움직임을 판단하고 3차원적 위치정보를 검출함으로써 이동 로봇의 경로 설정 및 판단의 효율을 더욱 증가시킬 수 있는 응용으로서, 이른바 지능적인 판단 능력이 겸비된 인공지능의 기능을 수행할 수 있다는 점에서 높이 평가되고 있다¹⁻².

일반적으로, 자율 이동로봇 시스템에서 경로 계획과 주행제어를 위해 차량 시스템의 전방 시야에 존재하는 지형지물을 판독하기 위한 표적 물체의 위치 검출은 필수적이다. 즉, 주어진 환경에서 주행 중인 무인 차량 시스템은 전방에 존재하는 물체들 간의 상대적인 위치 검출을 통해 충돌 없이 장애물을 피해서 이동해야 하며, 특히 보행자가 나타났을 경우 경보음을 통해 목적지까지 안전한 주행이 될 수 있는 경로를 찾아내야 한다. 즉, 이동 로봇 시스템의 시각성능을 극대화하기 위해서는, 표적의 이동 경로를 추적하기 위한 표적의 3차원적 위치정보와 표적의 정확한 인식을 위한 표적과의 거리정보의 검출을 통해 로봇에 장착된 카메라로부터 받아들이는 영상의 자체적인 분석은 물론 인식과 추적이 가능한 로봇 시스템을 위한 비전 기술이 필요하고 결과적으로 이를 위한 지능형 카메라 시각 시스템의 구현이 요구된다. 또한, 로봇의 유연성을 증가시키기 위해 다양한 환경에서 물체를 인식할 수 있는 신뢰도나 명료성, 획득된 영상에 대한 처리속도 그리고 조명의 용이성이 요구되어 이러한 요구조건을 충족하기 위해 많은 방법이 연구되었으나 낮은 해상도의 이진 영상처리(binary image processing), 구조적 조명과 같은 개발 초기의 방법들은 현재의 복잡한 산업계에 적용하기에는 그 한계점에 이르렀다. 즉, 배경 영상이 복잡하거나 시간에 따라 변하는 경우 물체인식을 보다 어렵게 하며, 동일한 물체일지라도 배경에 따라 물체의 상대적 명암이 바뀔 수 있고, 다른 물체에 의해 가려질 수 있기 때문이다. 따라

서, 인식하고자 하는 물체가 배경 잡음뿐만 아니라 전경 잡음에 의해 왜곡되거나 신호 대 잡음비(SNR)가 극히 작을 경우에도 매우 높은 물체인식 성능이 필요하다. 따라서 시각을 산업용 로봇에 응용하기 위해서는, 복잡한 주변 환경을 인식하거나 물체를 완전하게 재구성하기 보다는 목적에 적합한 물체의 3차원 위치, 크기 및 방향 등과 같은 간단한 3차원 정보를 빨리 알아내는 일이 필요하다³⁻⁵.

따라서, 본 논문에서는 스테레오 비전의 양안시차 원리를 이용하여 정상적인 조명하의 다양한 환경에서도 전방에 존재하는 보행자 및 지형지물의 인식을 통해 자율 이동로봇의 적응적인 경로 탐색이 가능한 2차원 공간좌표 검출 기법을 제안하였다. 즉, 1단계에서는 실시간으로 입력되는 좌, 우 영상 중 좌 영상에서 YCbCr 컬러 모델 및 무게 중심법을 이용하여 움직이는 보행자의 얼굴 영역과 중심좌표를 검출하여, 검출된 위치좌표에 따라 이동로봇에 장착된 스테레오 카메라의 능동적인 제어를 통해 보행자의 얼굴을 카메라 시야(FOV; field of view)의 중앙으로 놓기 위한 추적 제어가 이루어진다. 2단계에서는 스테레오 카메라에 의해 추적 제어된 좌, 우 영상의 시차지도 및 깊이 정보가 검출되고, 검출된 깊이 정보와 스테레오 카메라의 기하학적인 관계를 이용하여 실제 좌표에 대한 2차원 공간좌표를 구성하게 되며, 이를 바탕으로 이동 로봇의 장애물 회피를 통한 경로 설정의 판단 기준 및 주행 경로를 추정하는데 이용된다. 실시간으로 이동하는 로봇 시스템의 전방시야에 2단계에 걸친 장애물을 설치하여 스테레오 카메라로 부터 입력되는 240 프레임의 스테레오 영상을 사용한 실험결과, 스테레오 카메라 시스템과 보행자간의 거리 및 보행자의 좌, 우 폭의 계산치와 측정치간의 오차가 평균 2.19%와 1.52%이하로 각각 유지됨으로써 경로 계획을 위한 공간좌표 검출에 기반을 둔 실질적인 지상용 무인차량의 구현 가능성을 제시하였다.

II. 제안된 보행자 검출 기법

그림 1은 본 논문에서 제안한 스테레오 카메라 기반의 적응적인 공간좌표 검출 기법을 이용한 자율 이동로봇 시스템의 흐름도를 나타낸 것이다. 즉, 1단계에서는 스테레오 입력 영상 중 좌측 영상에

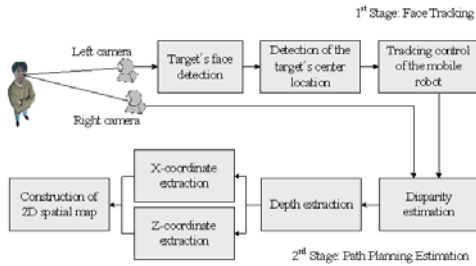


그림 1. 스테레오 카메라 기반의 자율 이동로봇 시스템의 흐름도
 Fig. 1. Flowchart of the stereo camera-based Autonomous Mobile Robot System

YCbCr 컬러 모델과 무게 중심법을 이용하여 보행자의 얼굴 영역에 대한 위치좌표를 검출한 다음, 스테레오 카메라 시야(FOV : field of view)의 중앙으로 놓기 위한 추적 제어를 통해 이동하는 보행자를 실시간으로 추적하게 되며, 2단계에서는 이동 로봇에 장착된 스테레오 카메라에 의해 추적 제어된 좌, 우 영상간의 시차지도 검출 및 카메라 좌표계와 영상 좌표계간의 원근 변환을 이용하여 깊이 정보 검출 및 3차원적 실제 좌표에 대한 산출이 이루어지며, 검출된 얼굴 영역의 깊이 정보에 대한 임계값 할당을 통해 보행자 영역만을 분할함으로써 보행자의 전체 폭을 추정하게 된다. 또한, 동시에 검출된 영상 전체의 깊이 지도의 각각의 열(column) 마다 최소값을 검출하여 무인 차량 전방에 존재하는 모든 물체들과의 상대위치 관계를 분석할 수 있는 2차원 공간좌표를 산출함으로써 주행 경로를 추정하게 된다.

2.1 보행자의 얼굴좌표 검출 및 추적 제어(1단계)

본 논문에서는 그림 2와 같이 1차적으로 YCbCr 컬러모델을 통해 얼굴 피부색으로 간주되는 모든 영역을 검출한 뒤, 상대적으로 움직임이 가장 많이 존재하는 영역만을 보행자의 얼굴 영역으로 간주하였다.

따라서 정지된 배경 영역을 포함한 검출된 모든 피부색 영역을 토대로 영상 차분필터와 논리곱 연산(AND operation)을 이용하여 공통된 움직임을 추출함으로써 보행자로 판단하게 되며, 이에 따라 추출된 얼굴 영역의 중심좌표를 스테레오 카메라가 탑재된 이동로봇 시스템의 응용 가능한 각도 값으로 변환하여 추적을 수행하게 된다. 따라서, 두 사람 이상의 보행자가 출현하였을 경우에도 얼굴 피부색 검출과 움직임 추정을 통해 적응적으로 위치

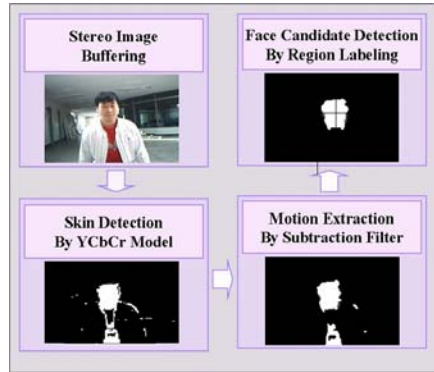


그림 2. 보행자의 얼굴 검출을 위한 흐름도
 Fig. 2. Flowchart for the face detection of pedestrian

검출이 가능하게 되며, 본 논문에서는 스테레오 카메라로부터 처음 획득된 영상을 중심으로 이동 로봇 시스템을 구동하여 보행자 검출 및 추적 기능을 수행하였다. 여기서, 이동하는 보행자를 추적하기 위한 위치 제어 값은 식 (1)과 같이 무게 중심법을 이용하여 분할된 얼굴 영역의 중심좌표로 검출하게 되며, 검출된 중심 좌표값은 스테레오 카메라가 탑재된 이동 로봇의 좌우 회전각을 능동적으로 제어하여 얼굴 영역에 대한 적응적인 추적을 수행하게 된다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{n_x} x_i}{n_x}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{j=0}^{n_y} y_j}{n_y} \tag{1}$$

식 (1)은 검출된 움직임 성분의 얼굴 후보영역을 각각 n_x , y 화소로 나눈 값으로 얼굴영역의 무게 중심값을 정의할 수 있으며, 이는 보행자 얼굴 영상의 중심좌표로 설정하여 스테레오 카메라 시야(FOV : field of view)의 중심으로 이동시키는 이동 로봇의 추적 제어값으로 변환된다.

그림 3은 검출된 이동 중인 보행자의 얼굴 좌표에 따라 카메라 시야의 중앙에 놓기 위한 이동 로봇의 추적 제어 과정을 수평이동과 수직이동에 따라 각각 나타낸 것이다.

즉, 보행자의 수평 이동의 경우 이동 로봇의 좌, 우 방향제어가 가능하지만, 보행자의 수직 이동일 경우에는 획득된 스테레오 영상의 깊이 정보 검출을 통한 임계값 설정에 따라 이동 로봇의 수직 이동을 통해 추적 제어를 수행하게 된다. 따라서, 이동 로봇의 수평이동의 경우, 표적 이동에 따른 회전 제어각도 산출이 필수적이며, 수직 이동의 경우는 정확한 깊이 정보 검출이 필수적이다.

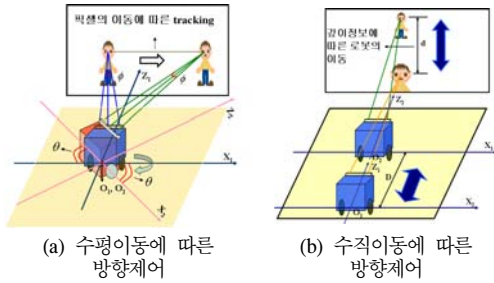


그림 3. 표적 이동에 따른 이동로봇의 방향 제어
Fig. 3. Direction control of the mobile robot

본 논문에서는 Kanatani의 영상보정 알고리즘^[6]을 응용하여 2차원 영상평면에서 검출된 보행자 얼굴 좌표값을 이동 로봇의 제어각도로 변환하였다. 즉, 2차원 영상 평면에 투영되는 현재 영상과 이전 영상에서의 점을 각각 $P_c(x_t, y_t)$ 와 $P_c(x_{t-1}, y_{t-1})$, 그리고 팬/틸트 시스템의 초기 각도를 α 라고 하면, Murray의 배정정합 알고리즘^[6]에 의해 식 (2)와 (3)으로 표현될 수 있다.

$$x_{t-1} = f \frac{x_t + \theta \sin \alpha y_t + f \theta \cos \alpha}{-\theta \cos \alpha x_t + \phi y_t + f} \quad (2)$$

$$y_{t-1} = f \frac{y_t - \phi \sin \alpha x_t + f \theta}{-\phi \cos \alpha x_t + \theta y_t + f} \quad (3)$$

따라서 식 (2)와 (3)은 스테레오 카메라의 상하, 좌우 회전 각도와 카메라의 초점 거리(focal length) f 를 알면 시간 t 에서의 좌표점 x_t 로부터 시간 $t-1$ 에서의 좌표점 x_{t-1} 을 복원할 있다는 것을 알 수 있다. 결국 이전영상과 현재 영상간의 표적영상의 이동변이에 따라 제어될 카메라 각도는 식 (2)와 (3)을 식 (4)와 (5)와 같이 θ 와 ϕ 에 대해 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{\phi x_t x_{t-1} + f(x_{t-1} - x_t)}{x_{t-1} x_t \cos \alpha + f(y_t \sin \alpha + f \cos \alpha)} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\theta x_t (f \sin \alpha - y_{t-1} \cos \alpha) + f(y_{t-1} - y_t)}{f^2 - y_{t-1} y_t} \quad (5)$$

그러나 본 논문에서 사용한 스테레오 카메라 탑재형 이동 로봇의 경우, 수평 방향의 방향 제어만이 존재하고 수직적인 제어를 수반하지 않기에 식 (4)와 같이 수평방향의 θ 값만을 산출하여 제어각도로 이용하였다. 따라서 식 (4)를 카메라 렌즈의 초점거리 f , 이전영상과 현재영상의 위치 좌표값으로 표현

하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 스테레오 영상의 이전영상과 현재영상의 2차원 화소값으로 구성된 위치값을 검출하면 식 (6)을 통해 스테레오 카메라의 제어 각도가 산출되고 이는 이동 로봇의 엔코더를 통해 최종적으로 모터의 제어각도로 구동될 수 있다.

$$\theta = \frac{fx_{t-1}y_t(y_{t-1}-y_t) + f(f^2 - y_{t-1}y_t)(x_{t-1}-x_t)}{f(y_t \sin \alpha - f \cos \alpha) + x_{t-1}x_t(y_{t-1}y_t \cos \alpha - y_t \sin \alpha + \cos \alpha)} \quad (6)$$

따라서, 추적대상의 표적 물체를 카메라 시야(FOV)의 수평축 중앙에 놓이게 하기 위한 이동 로봇 시스템은 카메라 영상 평면의 원점 (0, 0)을 중심으로 2차원 영상 평면에 사상된 표적물체의 위치 변이 Δx 를 이동 로봇의 제어값인 각도값으로 환산하여 보행자 검출 기능을 수행하게 된다.

2.2 이동로봇의 경로 계획을 위한 2차원 공간 좌표(X, Z) 검출 (2단계)

일반적으로, 인간의 시각 시스템(HVS; human visual system)은 대부분 수평시차에 의해 물체의 원근을 감지하게 되므로, 본 논문에서는 이상적으로 수직시차가 거의 없고 수평시차만이 존재하는 평행식 스테레오 카메라를 사용하였다. 또한, 일반적으로 스테레오 영상은 좌, 우 카메라의 이격 거리가 현격이 떨어지지 않는 한 거의 유사하므로, 한쪽 영상에서 표적물체를 추출하여 카메라 시야의 중앙으로 이동시키는 추적 제어를 수행한 뒤, 시차 검출 연산을 수행하였다. 따라서, 이동 로봇에 의해 x축 상으로 추적 제어된 스테레오 카메라의 좌, 우 영상은 식 (7)과 같이 SAD(sum of absolute difference) 비용 함수를 이용하여 블록 간의 정합 과정을 수행한 뒤, 시차지도를 검출하게 된다.

$$\min_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} |I_L[x+i][y+j] - I_R[x+i+d][y+j]| \quad (7)$$

여기서, I_L 과 I_R 은 각각 좌, 우 영상을 나타낸 것이고, $\frac{m}{2}$ 은 각 블록간의 크기를 나타낸 것이다. 또한, d_{\max} 와 d_{\min} 은 각 블록 간 탐색할 수 있는 시차의 최대, 최소 범위를 나타낸 것이다. 한편, 식 (7)과 같이 검출된 시차정보는 그림 4와 같이 카메라 좌표계 (X, Y, Z)와 영상 좌표계 (x, y)간의 원근 변환을 통해 스테레오 카메라와 표적 물체간의 깊이 정보를 산출하는데 이용된다.

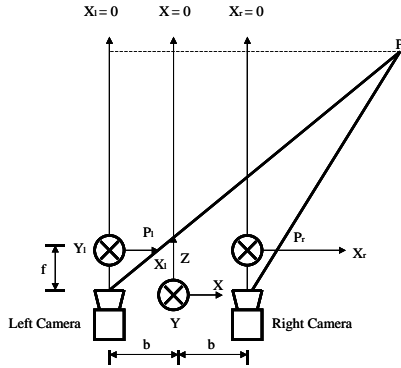


그림 4. 평행식 카메라 좌표계
Fig. 4. Parallel stereo camera coordinates

그림 4는 평행식 카메라에 대한 영상 기하학을 나타낸 것이다. 일반적으로 본 논문에서 사용한 평행식 카메라는 카메라 교정(calibration) 과정과 깊이(depth) 정보의 결정 과정을 단순화 하기위해 양쪽 카메라의 수평 주사선이 기준선과 평행한 카메라를 의미한다.

그림 4에서, 3차원 공간상의 물체점 $P=(X_p, Y_p, Z_p)$ 가 스테레오 카메라의 좌, 우측 영상에 투영된 영상점을 각각 $P_l=(x_l, y_l)$, $P_r=(x_r, y_r)$ 라고 하고, 영상 평면내의 대응하는 점 P_l 과 P_r 사이의 시차를 $d_p = x_l - y_l$ 이라 정의하면, d_p 는 식 (8)과 같이 3차원 공간상의 물체점 P 의 깊이 정보인 Z_p 에 반비례함을 알 수 있으며, 깊이정보 Z_p 는 스테레오 영상으로부터 시차가 결정됨에 따라 식 (9)를 통해 쉽게 산출될 수 있다.

$$d_p = x_l - x_r = \frac{2bf}{Z_p} \quad (8)$$

$$Z_p = \frac{2bf}{d_p} = \frac{2bf}{x_l - x_r} \quad (9)$$

또한, 3차원 공간상의 물체점 P 의 좌표, X_p 와 Y_p 는 x_l, y_l 과 거리 Z_p 로부터 식 (10)과 (11)로 나타낼 수 있으며, 이는 이동 로봇의 전방 시야에 존재하는 보행자는 물론 장애물의 실제 3차원적 위치 좌표를 검출하는데 이용된다.

$$X_p = \frac{Z_p}{f} x_l - b \quad (10)$$

$$Y_p = \frac{Z_p}{f} y_l \quad (11)$$

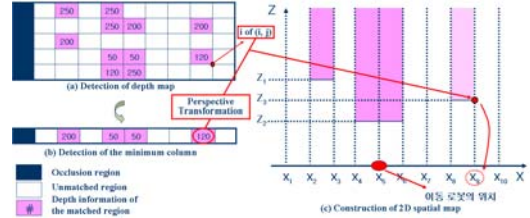


그림 5. 2차원(X, Z) 공간좌표의 검출 과정에 대한 도식화
Fig. 5. Detection of 2D(X-Z) spatial map

그림 5는 이동 로봇 전방에 존재하는 모든 물체들과의 상대위치 관계를 분석하기 위해 2.2.1에서 검출된 전체 깊이지도의 각각의 열에 존재하는 최소값의 검출을 통해 구성된 2차원 공간좌표(X, Z)의 검출과정을 나타낸 것이다.

즉, 그림 5 (a)와 같이 검출된 깊이 지도의 각각의 열에 존재하는 최소값을 그림 5 (b)와 같이 그 열의 대표값으로 검출한 뒤, 이에 대응하는 X좌표로의 사상(mapping)을 통해 이동 로봇 전방에 존재하는 물체들과의 상대위치 관계를 분석하기 위한 2차원 공간좌표(X, Z)를 구성하게 된다.

따라서, 그림 5를 통해 구성된 2차원 공간좌표는 검출된 보행자를 중심으로 한 2차원 공간좌표와의 관계를 통해 이동 로봇과 전방에 존재하는 보행자를 포함한 다른 장애물들 사이의 거리 검출은 물론 식 (10)과 (11)을 통해 보행자와 물체들 상호간의 상대적인 거리까지도 분석이 가능함으로써 이동 로봇 시스템의 충돌위험을 조기에 대처할 수 있는 효율적인 주행 경로 계획(path planning)을 추정할 수 있다.

III. 실험 및 결과분석

본 실험에서는 그림 6과 같이 평행식 스테레오 카메라 시스템이 탑재된 자율 이동 로봇을 자체 제작하였으며, 이를 위한 이동 로봇으로는 Activ Media Inc의 Pioneer-3 DX위에 평행식 스테레오 카메라인 Point Grey Inc.의 Bumblebee와 512MB 메모리와 펜티엄 2.6GHz의 CPU로 구성된 개인용 컴퓨터를 탑재하여 640×480 픽셀의 해상도와 30 frame/sec의 촬영속도를 가지고 실험을 수행하였다. 특히, 이동 로봇으로 사용된 Pioneer3-DX는 자체 배터리 3개(각 12V)로 구동되고 있으며, 전체적인 시스템을 구동시키기 위해 12V에 400W를 가지고 있는 자체 배터리를 가지고 실험에 사용하였다.

본 논문에서 제안된 알고리즘의 효율성을 분석하

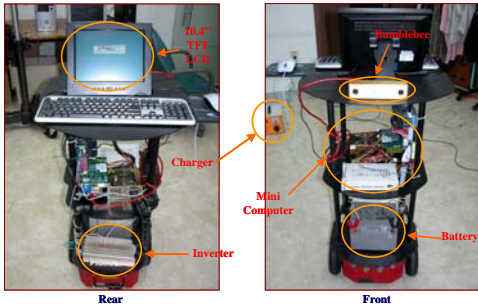


그림 6. 이동 로봇 시스템
Fig. 6. Experimental setup for navigation of the mobile robot

기 위한 실험 시나리오는 평행식 스테레오 카메라가 장착된 자율 이동로봇 시스템을 이용하여 로봇 시스템을 중심으로 카메라 시야에 나타나는 보행자 및 측면에 존재하는 장애물 각각의 절대좌표 및 상대좌표 검출을 통해 로봇의 충돌 위기를 조기에 대처하며, 적응적인 경로 계획의 수립을 목적으로 하는 것이다.

그림 7은 본 논문에서 구현된 이동 로봇의 경로 추정을 위한 실험 환경과 사용자 인터페이스를 위한 가상 시스템으로 그래픽 카드로 입력되는 스테레오 영상 시퀀스에 대해 실시간으로 이동 로봇의 제어를 수행하게 되며, 보행자 및 장애물에 대한 3차원 좌표 검출 및 주행 경로를 추정할 수 있다.

그림 7 (b)의 로봇 인터페이스에서 1은 현재 입력되는 좌, 우 스테레오 입력영상에 대해 주시각이 제어된 상태의 화면과 그 영상에 따른 깊이지도 및 깊이지도에서의 최소 열 검출과 그에 따라 검출된 2차원 공간좌표(X, Z)를 보여주고 있다. 또한, 2에서는 보행자 및 각각의 object들의 하단 양 끝점의 실제 좌표값을 나타내고 있으며, 3은 stereo camera의 ON/OFF, 4는 로봇과 미니컴과의 연결 ON/

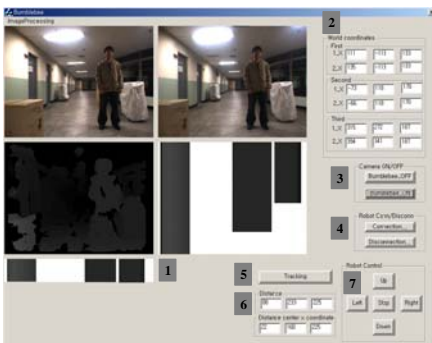


그림 7. 제안된 경로추정기법을 위한 사용자 인터페이스
Fig. 7. User interface for the proposed path planning

OFF를 해주는 버튼이며, 5는 stereo camera가 얼굴을 추적하는 동시에 작동하도록 해주는 버튼이다. 6은 보행자 및 각각의 object와 카메라 사이의 거리, 그리고 보행자와 object들 사이의 거리의 중심 좌표를 나타내어준다. 마지막 7은 로봇을 수동으로 제어할 수 있는 버튼을 나타낸 것이다.

3.1 얼굴 검출 및 시차정보를 이용한 3차원 공간좌표 검출 실험

본 논문에서는 실시간으로 획득되는 스테레오 입력영상 시퀀스에 대해 장애물 검출 및 경로 추정 성능을 검증하기 위해 두 사람의 보행자를 중심으로 640×480 픽셀의 해상도를 갖는 스테레오 입력영상을 초당 15 프레임의 속도로 처리하여 총 240 프레임의 테스트 영상을 가지고 실험을 수행하였다. 그림 8은 전체 240 프레임의 테스트 실험영상 중 이동 로봇의 1, 2차 주행 통과 실험을 위한 초기 프레임에 대한 좌, 우 스테레오 입력영상 샘플을 나타낸 것이다.

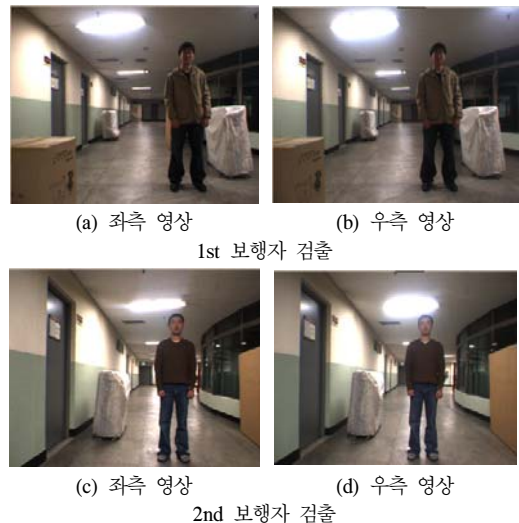


그림 8. 실험에 사용된 스테레오 입력영상
Fig. 8. Examples of the captured stereo image pairs

그림 9는 실시간으로 입력된 스테레오 영상 중 좌 영상을 중심으로 YCbCr 컬러 모델과 무게 중심법을 이용하여 보행자의 얼굴 영역과 중심좌표를 검출한 후, 식 (6)의 제어 각도 변환 식을 이용하여 추적 제어된 영상과 검출된 시차지도도를 나타낸 것이다. 그림 9 (c)와 (d)에서, 시차의 세기 분포는 시차가 클 경우 그레이 레벨(gray level)값이 0(흰색)으로 표시되며, 작을 경우는 255(검정색)로 표시된다.

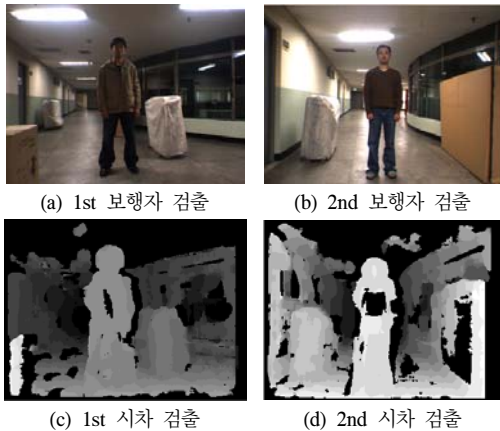


그림 9. 이동 로봇의 추적 제어된 영상과 시차 지도
 Fig. 9. The tracking controlled image and disparity map of mobile robot

즉, 배경 부분의 검정 부분은 이동 로봇으로부터 멀리 떨어져 있음으로 인해 시차가 적게 나타남을 알 수 있고, 보행자와 좌, 우에 위치한 장애물의 경우 상대적으로 큰 시차가 나타남을 볼 수 있다. 따라서 시차의 크기 여부에 따라 식 (9)와 같이 상대적으로 반비례 관계인 깊이정보를 예측할 수 있으며, 검출된 깊이정보는 이동 로봇의 경로 추정을 위한 전방시야의 2차원 공간좌표 검출에 이용된다.

그림 10은 그림 9에서 검출된 시차지도 및 식 (9)를 통해 검출된 깊이 지도와 깊이 지도를 중심으로 각각의 열에 존재하는 최소값의 검출을 통해 이동 로봇과 보행자 및 장애물간의 위치 관계를 분석할 수 있는 2차원 공간 좌표를 각각 나타낸 것이다.

특히, 식 (9)에서 요구되는 초점 거리(f)와 기준선(b)은 본 실험에서 평행식 스테레오 카메라로 사용된 Bumblebee의 자체 사양인 4mm의 초점거리(fo-

cal length)와 120mm의 기준선(baseline)을 적용하여 깊이 정보검출에 이용하였다. 그림 10의 (a)와 (d)는 그림 9 (c)와 (d)의 시차지도와 식 (9)를 통해 검출된 깊이지도로 그 깊이 정도에 따라 그레이 레벨로 나타낸 것이다. 즉, 이동 로봇으로부터 거리가 가까울 경우 그레이 레벨 값이 0(흰색)으로 표시되며, 멀 경우에는 255(검정색)로 표시된다. 검출된 깊이지도에 따라 이동 로봇의 전방 시야에 존재하는 장애물의 위치 판별이 선행되어야 하므로 가까운 물체부터 먼 거리의 물체까지의 거리 검출이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 그림 10 (b), (e)와 같이 검출된 깊이지도의 각각의 열에 존재하는 최소 깊이 값을 이용하여 이동 로봇으로부터 떨어진 장애물의 거리 산출을 수행하였으며, 깊이 정보의 값이 갑자기 커지거나 작아지는 경우엔 이전 프레임간의 픽셀 값을 이용하여 보간(interpolation)을 수행하였다. 그림 10 (b), (e)에서 이동 로봇으로부터 가장 가까운 거리에 존재한 장애물의 경우 흰색으로 표현된 95cm이었으며, 가장 먼 거리에 있는 장애물의 경우, 3m로 검출되었음을 알 수 있으며, 3m를 초과하는 경우에는 현재 프레임에서 결정할 수 없는 배경영상으로 간주하여, 현재 프레임의 장애물 통과 후 검출 대상 영역으로 설정하였다. 따라서, 검출된 깊이지도의 최소열에 있는 값을 그 점에서의 수직 거리로 간주하여 식 (10)과 같이 이에 해당되는 X 좌표의 산출을 유도할 수 있으며, 이는 보행자 및 장애물의 실제 좌, 우 폭을 산출하고 각각의 장애물간의 거리를 산출하는데 이용된다.

표 1과 2는 그림 10에서 검출된 Z값과 식 (10)을 이용하여 실험에 이용된 보행자 및 좌, 우측에 존재하는 장애물의 좌, 우 폭(X)과 이동 로봇부터의 수직거리(Z)를 알 수 있는 2차원 공간상의 실제 좌표(X, Z)를 실제 측정된 좌표 값과 각각 비교하여 나타낸 것이다.

즉, 이동 로봇의 초기 설정에서 획득된 스테레오 영상으로부터 시차 및 깊이 정보를 검출하여, 그에 따른 카메라 내부 변환관계를 통해 전방에 존재하는 보행자까지의 수직거리는 물론, 장애물 상호간의 상대거리까지도 검출할 수 있으며, 이는 최종적인 이동 로봇의 경로 계획에 이용된다.

또한, 표 3은 그림 10의 (b), (e)를 통해 이동 로봇의 지능적인 주행 경로를 판단할 수 있는 보행자와 장애물간의 상대 거리를 나타낸 것이다. 즉, 초기 설정된 이동 로봇 전방에는 그림 7 (a)와 같이 보행자를 중심으로 좌, 우측에 장애물이 존재하고

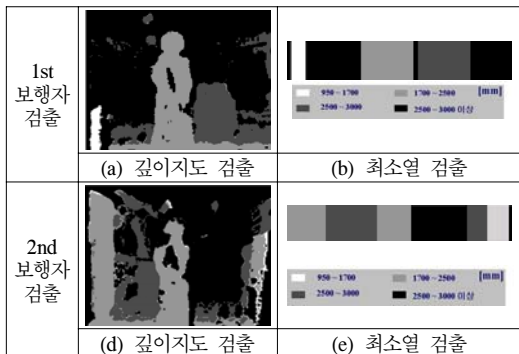


그림 10. 로봇의 경로 계획을 위한 깊이지도 및 공간좌표 검출
 Fig. 10. Extraction of the depth map and 2D spatial map for driving of the mobile robot

표 1. 검출된 보행자 및 장애물의 2차원 공간좌표

Table 1. 2D spatial coordinates of the detected pedestrian and the objects

Frame		Coordinates of World (X, Z)	
		Calculation [cm]	Measurement [cm]
1st frame	Pedestrian	(47,251), (92,251)	(48.24, 248), (93.89, 248)
	Object 1	(-72,135), (-122,135)	(-73.31, 137), (-123.85, 135)
	Object 2	(114, 302), (149, 302)	(116.44, 293), (151.93, 293)
2nd frame	Pedestrian	(62, 266), (98, 266)	(62.77, 270), (98.36, 150)
	Object 1	(75, 154), (102, 154)	(77.55, 150), (105.38, 150)
	Object 2	(99, 333), (122, 333)	(100.53, 318), (122.53, 329)

표 2. 검출된 보행자와 장애물간의 폭

Table 2. Width between the detected pedestrian and the objects

Frame		Width[cm]	Width[cm]	Error ratio [%]	Average [%]
1st frame	Pedestrian	45.00	45.65	1.43	2.17
	Object 1	50.00	50.54	1.07	
	Object 2	35.00	35.49	1.39	
2nd frame	Pedestrian	36.00	36.59	1.62	
	Object 1	27.00	27.83	2.98	
	Object 2	23.00	22.0	4.54	

표 3. 보행자와 장애물간 상대거리에 대한 계산치와 측정치

Table 3. Calculation and measurement of distance between the pedestrian and the objects

Frame		Width(cm)		Error ratio(%)	Average[%]
		Calculation	Measurement		
1st frame	Pedestrian ~ Object 1	93.00	92.32	0.73	1.52
	Pedestrian ~ Object 2	38.00	38.89	2.29	
2nd frame	Pedestrian ~ Object 1	44.00	44.58	1.31	
	Pedestrian ~ Object 2	60.00	61.08	1.76	

있으며, 충돌 없는 주행을 위해서는 각 물체간의 이격 거리 검출이 필수적이다.

따라서, 표 1, 2와 같이 보행자 및 각 장애물의 넓이 산출이 진행되며, 표 3과 같이 보행자를 중심으로 각 장애물간의 이격거리를 검출함으로써 장애물 사이를 통과할 수 있는 지능적인 판단 기준이 설정되고 이에 따라 이동 로봇의 안전한 주행을 위한 경로 추정이 이루어지게 된다.

표 1, 2와 표 3에서보면, 본 논문에서 제안한 깊이정보와 카메라 내부 변환관계를 통해 검출된 2차원 공간지도의 오차는 평균 2% 미만의 작은 오차가 존재함을 알 수 있는 데, 이는 불규칙한 조명, 동일하지 않은 영상밝기 및 좌, 우 영상 간에 존재하는 폐색영역에 따른 오류를 감안할 때, 우수한 실험결과로 분석된다.

그림 11은 최종적으로 표 1과 표 2에서 검출된 전방 시야의 보행자와 장애물에 대한 좌, 우 폭을

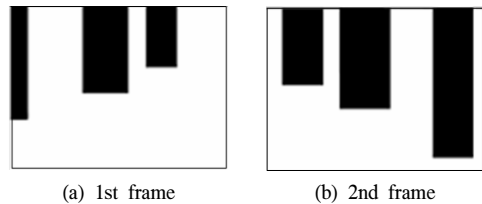


그림 11. 이동 로봇의 경로 계획을 위한 2차원(X, Z) 공간 지도

Fig. 11. 2-D spatial map construction for path planning of mobile robot

의미하는 X좌표와 이동 로봇으로부터의 수직거리의 의미하는 Z좌표로 구성된 2차원 공간 지도를 구성함으로써 장애물과의 충돌 없이 안전한 주행을 위한 판단 근거로 이용된다. 즉, 표 1과 표 2, 그림 11을 보면, 이동 로봇 전방에 첫 번째 프레임과 같은 보행자 및 장애물이 있을 경우, 이동 로봇은 각 장애물에 대해 좌측부터 수직거리 135cm, 251cm,

302cm를 각각 검출하게 되고, 장애물 상호간 93.36cm, 38.14cm을 검출하게 된다. 따라서 자체 45cm의 폭을 가진 이동 로봇은 로봇 자체 넓이와 검출된 장애물 상호간의 통과 가능한 경로를 비교, 판단하여 주행할 경로를 선택하게 된다.

이상의 실험결과, 본 논문에서 새로이 제시된 평행식 스테레오 카메라 기반의 이동 로봇 시스템 역시 전방 시야에 존재하는 물체들의 적응적인 인식 및 낮은 오차율의 3차원 위치 좌표 검출을 통해 효율적인 주행을 위한 경로 추정이 가능함을 분석하게 되었고, 이를 통해 본 논문에서 제안한 3차원 물체 인식을 위한 스테레오 카메라 기반의 이동 로봇 시스템의 구현 가능성을 제시하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 자율 이동 로봇의 보다 지능적인 경로 계획을 위한 평행식 스테레오 카메라에 기반을 둔 새로운 공간좌표 검출 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 통해 산출된 2차원 공간좌표는 검출된 보행자의 위치좌표와의 관계를 통해 이동 로봇 시스템과 전방에 존재하는 장애물간의 거리 및 보행자와 장애물간 상대거리의 계산치와 측정치간의 오차가 평균 2.19%와 1.52%이하로 각각 유지되었으며, 보행자와 물체들 상호간의 상대적인 거리까지도 분석이 가능하고, 무인 차량 시스템의 충돌위험을 조기에 대처할 수 있는 효율적인 주행 경로 계획을 추정함으로써 공간좌표 검출에 기반을 둔 실질적인 지상용 무인차량의 구현 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano, and M. Tanaka, "A stereo machine for video-rate dense depth mapping and its new applications", *Proc. of IEEE CVPR '96*, pp. 196-202, 1996.

[2] James Black, Tim Ellis, "Multi-camera image measurement and correspondence", *Measurement*, vol. 32, pp.61-71, 2002.

[3] Douglas Chai, "Face segmentation using skin-color map in videophone applications," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.9, no.4, pp.551-564,

1999.

[4] J. S. Lee, C. W. Seo, E. S. Kim, "Implementation of opto-digital stereo object tracking system", *Optics Communications*, vol. 200, pp.73-85, 2001.

[5] S. B. Gokturk, J. Y. Bouguet, R. Grzeszczuk, "A data-driven model for monocular face tracking", *International Conference on Computer Vision*, vol.2, pp.701-708, 2001.

[6] D. Murray and Anuo Basu "Motion tracking with an active camera", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 5, pp. 449-459, 1994.

[7] K. Fujimoto, H. Muro, N. Shimomura, T. Oki, K. Maeda, Y. Kishi and M. Hagino, "A study on pedestrian detection technology using stereo images", *JASE Review*, vol.1, pp.1-3, 2002.

[8] J. S. Lee, J. H. Ko, E. S. Kim, "Real-time stereo object tracking system by using block matching algorithm and optical binary phase extraction joint transform correlator", *Optics Communication*, vol. 191, pp.191-202, 2001.

[9] T. Darrell, G. Gordon, M. Harville, J. Woodfill, "Integrated person tracking using stereo, color, and pattern detection," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 601-608, 1998.

[10] D. Tzovaras, N. Grmmaidis and M. G. Strintzis, "Three-dimensional camera motion estimation and foreground/background separation for stereoscopic image sequences", *Optical Engineering*, vol.36, no.2, pp.574-579, 1997.

[11] K. H. Bae, J. S. Koo, E. S. Kim, "A New Stereo Object Tracking System using Disparity Motion Vector", *Optics Communications*, vol.221, no 13, pp.23-35, 2003.

[12] 박창주, 고정환, 김은수, "스테레오 영상 보정 알고리즘에 기반한 새로운 중간시점 영상합성 기법", *한국 통신학회 논문지*, vol.29, no.5C, pp.632~641, 2004

고 정 환 (Jung-Hwan Ko)

정회원



1999년 2월 광운대학교 제어계
측공학과 학사

2001년 8월 광운대학교 전자공
학과 석사

2005년 2월 광운대학교 전자공
학과 박사

2005년 3월~현재 광운대학교
차세대 3D 디스플레이 연구센

터 연구교수

<관심분야> 3D 로봇비전, 스테레오 카메라, 영상 통
신

김 성 일 (Sung-Il kim)

정회원

경원대학교 전자공학과 교수

김 은 수 (Eun-Soo Kim)

종신회원

광운대학교 차세대 3D 디스플레이 연구센터

(<http://3DRC.org>)

한국통신학회지 Vol.29, No. 4c 참조