

보행로봇의 이동경로 인식을 위한 스테레오카메라 기반의 평면영역 추출방법

A Stereo Camera Based Method of Plane Detection for Path Finding of Walking Robot

강 동 중*

(Dong-Joong Kang)

Abstract : This paper presents a method to recognize the plane regions for movement of walking robots. When the autonomous agencies using stereo camera or laser scanning sensor is under unknown 3D environment, the mobile agency has to detect the plane regions to decide the moving direction and perform the given tasks. In this paper, we propose a very fast method for plane detection using normal vector of a triangle by 3 vertices defined on a small circular region. To reduce the effect of noises and outliers, the triangle rotates with respect to the center position of the circular region and generates a series of triangles with different normal vectors based on different three points on the boundary of the circular region. The vectors for several triangles are normalized and then median direction of the normal vectors is used to test the planarity of the circular region. The method is very fast and we prove the performance of algorithm for real range data obtained from a stereo camera system.

Keywords : plane recognition, obstacle detection, range data, stereo sensor, biped walking robot

1. 서론

3차원의 미지공간에서 동작하는 로봇이나 자율이동체는 필요한 작업을 위해 로봇을 둘러싸는 3차원 공간을 인식해야 한다. 최근 소형, 저가의 연산장치 발전과 함께 빠른 속도로 3차원 공간을 측정하는 센서장치가 연구되고 있으며 실시간으로 3차원 깊이(depth) 정보를 발생시키는 많은 센싱시스템들이 개발되어 이들 중 몇몇은 상업용으로 팔리고 있다[1-4]. 3차원 측정을 수행하는 센서의 발전과 더불어 센서 측정데이터를 이용하여 이를 미지 공간에서의 주행에 사용하기 위한 방법의 개발 또한 필수적이며 센서 개발과 동시에 연구되어야 하는 분야이다. 다리를 가진 보행형 로봇은 장애물(obstacles)을 인식할 수 있어야 하며 또한 이동을 위해 검출된 장애물을 피하거나 높이가 높지 않은 경우 넘어서서 주행할 수 있어야 한다. 계단이 있다면 계단의 평면들을 인식하여 계단보행이 가능하여야 한다. 이동체가 넘어지지 않고 미지의 3차원 공간을 주행하기 위해서는 측정된 3차원 깊이 정보를 이용하여 주행할 방향에서 장애물이 존재하지 않으면서 넘어지지 않고 이동할 수 있는 평탄한 영역(planar regions)을 찾아내어야 한다[5,6].

평면공간 인식은 많은 응용분야를 가질 수 있다. 예를 들면, 실내에서 이동하는 로봇은 주행을 위해 평평한 마루바닥(floor)을 인식할 수 있어야 한다. 중력방향에 상대적으로 너무 기울어지지 않은 평면은 로봇이 움직일 수 있는 경로(moving path)가 될 수 있다. 또한 장애물인 벽(wall)을 인식하거나 실내 작업 중의 하나로 물잔이나 물건이 놓일 수 있는 테이블(table)이나 책상 면을 인식할 수도 있다. 자율이동 차량의 스테레오카메라나 레이저스캐너에서 측정된 데이터

로부터 평면영역 추출을 통해 이동체가 스스로 주행해야 하는 길의 중심위치를 찾을 수도 있다. 또는 휴머노이드타입의 이족보행로봇(biped robot)에 있어 계단 면(평면)의 인식은 이동을 위한 중요한 응용예의 하나이다.

3차원 거리정보의 측정은 레이저 스캐너(laser scanner)나 구조화된 조명 패턴(structured lighting pattern) 조사와 같은 능동 센싱(active sensing) 방법, 스테레오카메라 시스템 등의 다중 카메라에 의해 획득되는 수동적 방법이 있으며, 기존에는 3차원 거리데이터인 정확한 레인지 정보(range data)를 얻기 위해 레이저 스캐너나 구조화된 조명을 이용하여 데이터를 획득하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 이 방법들은 상대적으로 정확한 레인지 데이터를 제공하나 거리정보를 실시간으로 얻기가 어려워 보행 로봇과 같은 이동체에 직접 적용하기가 어려운 문제점이 있었다. 최근, 컴퓨터 처리 용량 및 속도 증가와 저가, 고성능의 스테레오 카메라시스템의 개발과 함께 고속으로 3차원 거리정보를 제공하는 영상처리 시스템이 상용화되어 판매되고 있으며 레인지데이터의 질적 수준은 능동적 방법보다 떨어지나 고속으로 거리 정보를 제공할 수 있는 장점으로 인해 이동로봇에 적용이 되고 있는 추세이다.

기존 연구는 주로 레인지데이터를 파라메트릭 방법(parametric methods)을 이용하여 분할(segmentation)하는데 집중되어 왔으며 레인지 데이터를 평면(planes), 구(spheres), 실린더(cylinders), 원뿔(cones) 등의 큰 카테고리 분류하고 측정 데이터를 이러한 기본 기하타입에 피팅(fitting)하여 대응되는 파라미터를 구함에 의해 관심 영역의 분할을 수행하여 왔다[7-10]. 이 방법들은 레인지 데이터에 기반하여 정확한 기하 형상들을 분할할 수 있으나 과도한 실행시간의 요구와 정밀한 측정 데이터의 필요성 등으로 인해 실시간 처리(real-time processing)가 중요한 로봇과 같은 이동체에 적용하기는 쉽지 않은 문제점을 가진다.

최근, 하프변환(Hough transform)에 기반하여 이동로봇의 주

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 4. 6., 채택확정 : 2008. 1. 2.

강동중 : 부산대학교 기계공학부(djkang@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

행을 위해 실시간으로 평면영역을 추출하는 방법이 제안되었고 Honda자동차의 ASIMO와 같은 2족 보행 로봇에 적용되어 계단주행과 장애물 회피 등에 성공적으로 적용된 사례가 있다[5]. 하프면환은 3차원 공간에서 X-Y-Z 데이터를 원점에서의 수직거리와 평면의 회전각을 나타내는 $\rho-\theta-\phi$ 의 또 다른 파라미터 공간으로 바꾸어 보팅(voting)하고 보팅 공간에서 최대값(peaks)을 검출함에 의해 대응되는 평면을 추출하는 방법을 사용한다. 이 방법은 잡음이 많고 복잡한 많은 평면이 존재하는 레인지 데이터에 대해서도 비교적 좋은 결과를 보이나 보팅을 위한 과도한 메모리 요구와 보팅 공간의 피크위치 선정문제 및 컴퓨터 처리 속도를 개선하기 위해 많은 부가적인 처리가 필요한 단점을 가지고 있다[11].

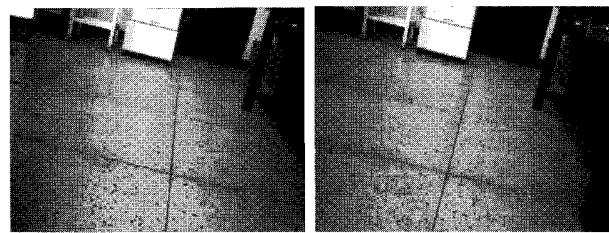
본 논문에서는 이러한 기 방법의 문제점을 피하기 위해 원호 기반의 삼각영역 노말 벡터 추출을 이용한 방법을 제안한다. 3차원 거리 데이터의 평면성을 검증하기 위해 공간 내 어떤 표면의 관심점 주위에 일정한 반경을 가진 원호를 설정 후 원호상의 3점을 추출하여 삼각평면을 구성하고 이 삼각평면의 직교벡터를 계산함에 의해 평면도를 측정한다. 삼각평면은 원호상에서 회전하면서 일련의 직교벡터를 계산해 내고 여러 개의 직교벡터를 확률적으로 평가함으로써 잡음에 영향 받지 않고 데이터가 균일하지 않은 영역의 평면도 추출하거나 검증할 수 있도록 해준다. 제안된 방법은 삼각평면을 구성하기 위해 LOOKUP 테이블을 사용함으로써 고속으로 평면 영역을 추출하거나 검증할 수 있으므로 이동체의 실시간 주행이나 파지 작업을 위해 적당하다.

상기한 방법에 의해 정확하고 빠르게 스테레오비전이나 레이저센서 출력정보인 3D 깊이 정보를 이용하여 평면영역을 고속으로 추출하는 것이 가능하며, 실제 레인지데이터를 사용하는 몇 가지 실험을 통해 평면추출장치의 적용 예를 보임에 의해 제안된 알고리즘을 검증한다.

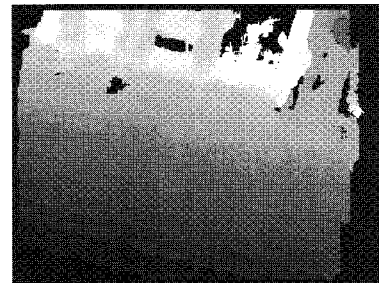
II. 평면 영역의 검출

1. 평면 인식 셀

그림 1은 스테레오 카메라센서를 이용하여 얻어진 3차원 거리 데이터를 보여준다. 그림 1(a), (b)는 왼쪽과 오른쪽의 입력된 두 영상(original image)들이고 교정된 스테레오 카메라에 의해 획득된 것이다. 이 두 영상 사이의 수평 거리차(disparity) 정보는 카메라 축에 상대적인 3차원 공간의 좌표 정보를 제공하게 되고 이 정보가 3차원 거리정보인 그림 1(c)인 레인지데이터가 된다. 3차원 공간에 대한 좌표는 로봇의 주행을 위해 대단히 유용한 정보지만 이 정보자체가 3차원 공간의 인식을 의미하지는 않으며 레인지 데이터를 가공하여 로봇의 주행이나 작업에 대한 정보를 추출하거나 인식하는 일이 필요하다. 그림 1(c)는 카메라에서 가까운 영역은 어둡게 나타나고 밝은 영역일수록 카메라에서 멀리 떨어진 위치를 보여주고 있다. 능동센서에 의해 획득된 영상보다 레인지 데이터의 질적 수준은 떨어지나 데스크탑 PC에서 실시간에 가깝게 데이터를 얻을 수 있다. 영상의 양쪽 부분에 벽(wall)에 의한 장애물이 놓여져 있으므로 이동하는 로봇은 장애물이 없는 바닥 영역(floor region)과 양 옆의 충돌(collision) 영역을 인식해야 하며 평평한 바닥 방향으로 주행 위치를 결정해야 한다.



(a) 왼쪽 영상 (b) 오른쪽 영상



(c) 오른쪽 카메라 좌표를 기준으로 한 3차원 거리 정보

그림 1. 스테레오카메라에서 얻어진 좌, 우 두 영상과 3차원 거리 데이터.

Fig. 1. Range data obtained from a stereo camera system.

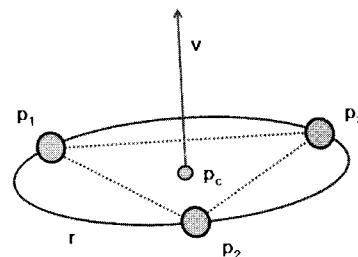


그림 2. 평면 추출기의 개념도.

Fig. 2. Schematic diagram of plane detector.

본 논문은 이러한 3차원 공간 좌표에 대한 데이터를 이용하여 로봇의 주행이나 작업에 필요한 평면 영역을 고속으로 추출하는 방법에 대한 것이다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 평면 추출기의 개념도를 보여준다. 그림 2의 p_c 점은 레인지 데이터의 해당 위치가 평면인지 아닌지를 판별할 영상상의 중심좌표를 가리킨다. r 의 원호 부분은 p_c 를 중심으로 일정한 크기의 반경을 가진 원을 보여주고 이 원호상에 존재하는 3개의 좌표점 p_1, p_2, p_3 를 추출하면 이 세 점은 레인지 데이터 각각에 대응하는 3차원 좌표정보를 가지고 있으며 이 좌표 값을 이용하여 3점의 공간 좌표가 만드는 삼각영역 $p_1-p_2-p_3$ 에 수직인 방향 벡터 v 를 얻는 것이 가능하다.

세 개의 공간 좌표점에 의해 얻어지는 평면에 수직하는 직교(normal) 방향벡터 v 는 다음과 같이 계산된다.

$$v = (p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1). \tag{1}$$

방향벡터 v 는 공간상의 세 개의 점에 의해 이루어지는 영역의 직교벡터를 나타내고 이 직교벡터를 (2)와 같이 정규화한 방향벡터 n 를 계산하면 이 방향벡터가 p_c 점을 중심으로 하는 작은 부분 영역의 방향을 의미하게 된다.

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} \quad (2)$$

스테레오 카메라나 레이저 스캐닝 센서에 의해 얻어진 실제 3차원 공간의 좌표정보는 여러 가지 오차발생 요인에 의해 항상 잡음이 발생하며 평면도가 높은 사무실 바닥과 같은 표면(surface)상에서 얻어진 레인지 정보라 할지라도 얻어진 실제 3차원 공간좌표는 그림 2의 중심좌표를 둘러싸는 원호 r 상에서 얻어진 임의의 세 점에 대해 항상 동일한 노말 방향을 갖지는 않는다. 원호 상에 존재하는 임의의 세 점에 대한 노말 방향은 임의의 오차를 가지고 발생하며 외란(outlier)들이 언제든 존재할 수 있기 때문에 어떤 방향 근방에서 특정한 확률적 분포를 가지고 발생한다고 가정할 수 없다.

본 논문에서는 이러한 오차요인에 의한 노말 방향의 임의성을 극복하기 위해 그림 2의 원호 r 을 균등한 간격으로 3 등분하고 이 삼등분한 꼭지점을 세 개의 점으로 취해 삼각형을 구성하고 이 삼각형의 직교방향을 면의 방향으로 가정한다. 이러한 삼각형은 평면 위의 동일반경 격자점(grid points) 상에서 아주 많이 발생하게 되고 그림 3(a)처럼 세 개의 격자점을 각각 인접한 격자점으로 회전시키면 원호상의 일련의 회전된 삼각형을 발생시키는 것이 가능하다. 만일 현재 시험중인 원호 영역이 사무실 바닥과 같은 평면영역이라면 각각의 삼각형은 서로 다른, 그러나 비슷한 방향의 노말 방향을 나타내게 된다. 또한 그림 3(b)에 보여진 바와 같이 다른 크기의 반경에 대해 동일한 삼각형 영역 구축과 회전을 통해 관심 셀 내의 많은 부분 영역에 대한 노말 방향의 추출이 가능하다.

관심 셀(cell)이 평면인지 아닌지 결정하는 방법은 outlier들의 영향을 배제하기 위해 측정된 여러 값들의 중간값(median value)을 이용한다. 동일반경의 원호상에서 만들어진 삼각형을 회전하면서 얻어진 각각의 삼각 평면영역이 만드는 노말 방향을 $\mathbf{d}_i (i=1, \dots, l)$ 라 하고, \mathbf{d}_i 값의 정렬(sorting)을 통해 얻어진 중간 방향 벡터를 \mathbf{d}_m 이라 하면 (3)을 설정할 수 있다.

$$\mathbf{d}_m \cdot \mathbf{d}_i = \cos(\theta_i) > \cos(\theta_c) = t_c \quad (3)$$

만일 평면에 가까운 영역에서 삼각형영역들이 추출되었다면 (3)의 벡터 내적(inner product) 대부분의 값들이 사잇각이 0에

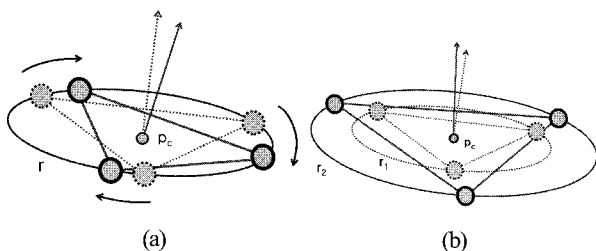


그림 3. 원호상의 일련의 세 점을 취해 여러 개의 삼각형영역을 발생시키는 방법. (a) 세 점의 인접하는 또 다른 세 점을 각각 취해 회전된 삼각형영역을 구성할 수 있음, (b) p_c 를 중심으로 반경이 서로 다른 두 동심원을 구성하여 각각의 원호 상에서 취한 세 점으로 삼각형영역을 구성하여 직교방향을 계산.

Fig. 3. Generation of a series of triangles on a circular region.

가까우므로 $\cos \theta_i$ 값은 1에 가까운 값들이 추출될 것이다. 평면이 아니거나 물체 경계 근방에서 원호영역이 설정되었다면 내적 값의 많은 부분에서 큰 각도로 인해 1보다 작은 값이 나타날 것이다. 따라서 실험적으로 결정된 임계 각도값 θ_c 에 의한 t_c 값보다 큰 내적 값의 횟수를 세어 전체 발생영역의 횟수에 대해 (3)을 만족하는 영역 개수의 비로써 평면성의 결정이 가능하다.

2. 이동을 위한 주행방향 결정

로봇이나 자율이동체가 사무실이나 야지 환경 아래에서 로봇이 주행할 평면상에 놓여있다면 중력방향이나 로봇 작업공간에서의 설정방향을 얻을 수 있으며 이 방향을 \mathbf{g} 라 가정하자. 이 때 평면검출기 상의 임의의 관심 원호영역에서 얻어진 평면의 노말 방향을 \mathbf{n}_i 라 한다면 이 두 벡터 사이의 각의 크기는 다음과 같다:

$$\theta_i = \cos^{-1}(\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_i) \quad (4)$$

두 벡터의 각도가 0일 경우, 중력방향과 평면방향이 잘 일치하므로 로봇은 넘어지지 않고 주행할 수 있다. 만일 각도 값이 커진다면 평면이 아니거나 물체 경계일 가능성이 높아 지므로 장애물의 영역일 가능성이 높아진다. 이러한 영역들은 로봇의 주행방향에서 배제시켜야 한다.

즉, 영역이 평면영역이고 중력 방향 \mathbf{g} 와 잘 일치한다면 이 영역은 이동체가 진행해야 할 방향이고 장애물이 아닌 것이 된다. 벽과 같은 장애물은 평면이지만 노말 방향이 중력 방향과 90도를 이루게 되므로 주행을 피해야 할 방향이 된다.

계단과 같은 구조물은 서로 다른 높이를 가진 여러 개의 평면이 차례로 놓여 있는 경우로 계단면의 직교벡터 방향은 계단면 모두에 대해 같은 방향이 된다. 노말 방향이 같은 계단의 각 평면을 구별하기 위해서는 평면과 원점 사이의 수직 거리를 이용할 수 있다. 그림 4는 공간상에 존재하는 임의의 한 평면의 좌표원점에 대한 표현을 보여주며, 원점과의 수직 거리 ρ 와 두 축에 대한 각도 $\theta - \phi$ 에 대한 표현을 보여준다. 2.1절에서 삼각평면의 직교방향을 구한 방법으로 계산한 평면의 노말벡터는 단위 벡터인 \mathbf{n} , 이므로 평면 방정식은 (5)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{x} + d = 0 \quad (5)$$

(5)에서 \mathbf{x} 는 평면상에 존재하는 임의의 한 점의 좌표값이고 이 때 d 는 평면과 좌표원점 사이의 수직거리 ρ 와 (6)에

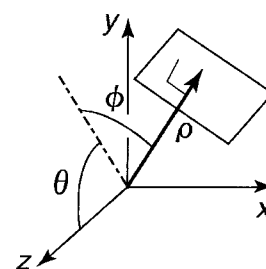


그림 4. 좌표 원점과의 직교거리와 회전각도에 의한 평면 표현.

Fig. 4. Coordinate system of a plane in 3D space.

서처럼 같다. 이것은 (6)에서

$$\rho = \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{x} + d}{\sqrt{\|\mathbf{n}_i\|^2}} = \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{0} + d = d \quad (6)$$

원점의 좌표 (0,0,0)를 \mathbf{x} 에 대입하면 $\rho = d$ 가 성립함을 알 수 있다. 따라서 좌표의 각 축과 노말 벡터의 사이각은 물론 원점과 평면 사이의 거리 d 도 계산 가능하므로 동일한 노말 방향을 가지는 계단과 같은 서로 다른 여러 평면의 추출도 가능하다.

3. 룩업 테이블을 이용한 고속 연산

룩업(LOOKUP: LUT) 테이블은 알고리즘의 고속 실시간 처리를 위해 필요하다. 평면상의 3점에 대해 삼각영역을 구성하고 이 평면에 대해 노말 방향을 계산한다. 이 때, 관심점 \mathbf{p}_i 를 둘러싸는 일정한 반경을 가진 원호상에서 3개의 점을 추출하여 삼각형을 구성하게 되나, 알고리즘이 수행도중 \mathbf{p}_i 위치와 반경 r 정보를 입력 받아 그때 마다 3점의 위치를 계산한다면 실행시간(run time)에 삼각함수의 호출을 포함하는 많은 연산량이 요구되게 된다. 실시간 처리가 가능한 고속 평면 추출기를 구성하기 위해 반경 r 과 삼각형의 회전각도 입력에 대해 중심점에 상대적인 세 점의 위치를 미리 계산하여 LUT 테이블에 저장해 놓고 알고리즘 실행 중에 저장된 값을 호출하여 사용한다면 고속으로 연산이 가능하다. LUT 테이블의 저장을 위해 추가적 메모리 요구가 필요하나 LUT 사용유무에 따른 계산량의 차이는 매우 크므로 알고리즘의 실시간 처리를 위해 반드시 필요하다.

그림 5는 논문에서 제안된 보행로봇의 주행과 작업을 위한 평면 영역 추출기의 블록도를 보여주고 있다. 먼저 제안된 방법에 사용할 각종 파라미터를 설정하기 위한 시스템 초기화부가 있다.

LUT작성부의 원호 중심점 위치, 회전각, 반경 크기 등에 대해 삼각영역의 세 점을 계산해 주는 LUT를 작성하는 모듈이다. LUT작성에 의해 고속 실시간 처리가 가능하다. 레인지 데이터 입력부는 스테레오 카메라나 레이저스캐너로부터 3차원 거리정보를 입력 받는 부분이다. 적용할 응용분야에 따라 데이터입력 시스템은 달라질 수 있으나 본 논문에서 사용하는 데이터는 스테레오카메라에 의한 3차원 레인지 데이터이다.

삼각평면 추출부는 입력된 세 점을 이용하여 삼각평면을 구축하는 모듈로 원주를 균등하게 삼등분한 세 점을 회전시키면서 일련의 삼각평면을 추출하게 된다. 얻어진 삼각평면

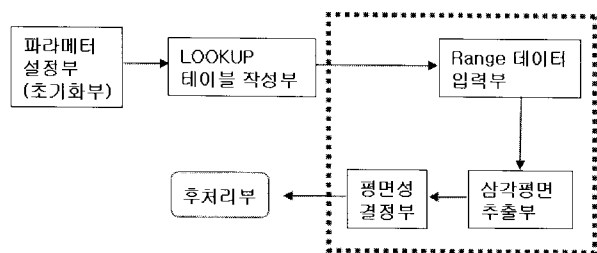


그림 5. 평면 추출기의 블록도.
Fig. 5. Block diagram of the plane detector.

의 세 꼭지점의 3차원 좌표를 입력하여 해당 평면의 직교방향 벡터를 추출한다.

평면성 결정부는 중심점을 둘러싸는 원호에서 추출된 여러 삼각평면의 방향이 일정한지를 평가하는 부분으로 2.1절의 중간값 평가를 이용한다.

마지막으로 후처리부에서는 이렇게 얻어진 특정 영역의 평면성을 로봇의 주행 또는 정해진 작업을 위해 사용하거나 가공하는 부분으로 응용하는 분야에 따라 달라질 수 있다. 그림 5에서 점선박스로 표시된 부분은 입력된 데이터를 반복해서 실행시간에 처리하는 부분을 나타낸다.

III. 실험

그림 6은 PointGray사의 Bumble-B 스테레오카메라에서 획득한 3차원 거리 정보인 레인지데이터를 보여준다[6]. 레인지 데이터의 좌표원점은 오른쪽 카메라축의 원점에 맞추어져 있고 모든 레인지 데이터의 3차원 좌표값은 카메라축의 원점에 상대적으로 주어진다. Bumble-B카메라는 IEEE1394인터페이스를 가진 스테레오 카메라로 PC에 연결하여 사용할 수 있다. 12cm크기의 Baseline길이를 가지고 있으며 640x480 및 320x240픽셀 해상도에서 영상페어(image pair)를 제공한다. 레

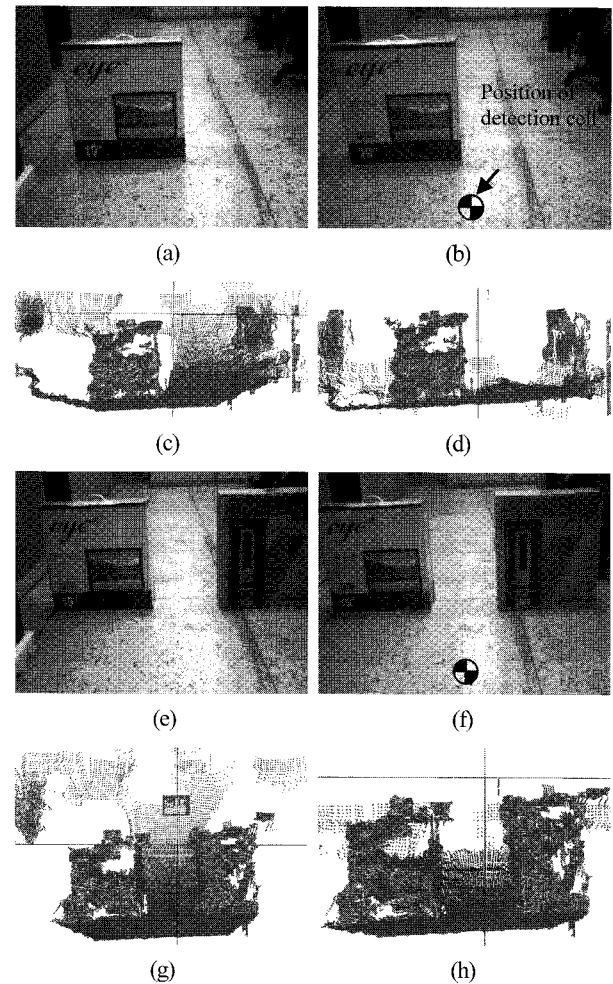


그림 6. 두 입력영상에 의한 레인지데이터. (a) 장애물이 하나인 샘플영상 (b) 장애물이 두 군데에 존재하는 영상.
Fig. 6. Views of range data and image pairs of stereo camera.

인지 데이터는 초당 약 20frame 정도로 고속 계산이 가능하나 레이저스캐닝이나 능동패턴조사 방법에 비해 데이터의 정밀도가 떨어지는 단점을 가진다.

그림 6(a), (b)는 스테레오카메라시스템의 왼쪽, 오른쪽 두 영상을 나타내고 그림 6(c), (d)는 측정된 3차원 레인지데이터를 OpenGL를 이용하여 화면에 출력한 결과로 측정된 데이터를 관찰 각(viewing angle)을 달리하면서 출력한 것이다. 사무실 내의 평면 바닥 위에 박스 장애물이 하나 놓여 있으며 로봇은 장애물에 충돌하지 않고 바닥 면을 인식하여 주행하여야 한다. 그림 6(e)-(h)는 장애물 영역이 두 부분에서 존재하는 또 다른 경우에 대한 스테레오 영상페어와 레인지데이터를 보여주고 있다.

그림 7(a)(b), (c)(d)는 각각 그림 6의 두 레인지 데이터에서 로봇이 주행할 바로 직전영역(그림 6(b), (f)에 표시위치)에 하나의 원호 영역(unit cell)을 설정하여 평면을 검출한 예를 보여주고 있다. 사무실 바닥 면에 대응되는 평면을 레인지데이터에 겹쳐서 보여주고 있으며, 그림 7(b)와 (d)에서 추출된 평면이 바닥 면의 레인지데이터와 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 수평방향으로 뻗은 직선은 추출한 평면데이터이며 레인지데이터의 바닥면과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

그림 7(a), (b)에서 추출 평면의 카메라 좌표원점에 대한 바닥면의 수직거리는 약 0.7m이다. 이동체가 주행을 위해서는 평면도가 높으면서 중력방향 벡터와 평면 노말 벡터의 사이 각이 작은 영역을 검출하면 되므로 바닥영역이 주행 가능한 방향이 되고 중력방향과 90를 이루는 박스는 장애물 평면이므로 이동체가 피해나가야 할 물체가 된다. 그림 7(e), (f)는 중력방향의 벡터와 각 평면추출 셀의 노말 방향벡터 사이의 내적에 의한 장애물 영역 검출의 결과를 보여준다. 두 그림에서처럼 장애물 영역은 중력방향과 다른 사이각으로 인해 검은 색으로 나타나고 중력방향과 잘 일치하는 바닥면은 밝은 색으로 표시되었다. 로봇은 밝은색의 영역을 찾아 경로를 설계하여 주행하여야 한다. 그림 7(f)의 경우, 두 장애물을 피해 중간 영역이 주행영역으로 추출되고 있음을 알 수 있다. 로봇은 이 사이로 주행해야 한다.

흥미로운 부분은 바닥과 박스 면의 경계에서 중심점을 취해 셀을 구성하면 원호상의 세 점에 의한 삼각평면의 노말 방향이 물체 경계상의 여러 삼각영역에 대해 균일하지 않고 임의의 방향으로 흩어져 집중된 하나의 방향을 나타내지 않게 되고 2.1절의 평면평가의 결과가 만족되지 않게 된다. 이러한 결과는 논문의 평면추출 셀을 이용하여 물체 경계의 추출도 가능함을 보여준다.

평면도 검출 시간은 Pentium Dual-Core PC 2GHz에서 320x240픽셀 해상도의 레인지데이터에 대해 0.02sec 이내에 모든 과정을 처리하였다. 표 1은 평면 검출용 셀의 연산시간과 영상의 모든 영역에 셀 연산 적용에 의한 장애물 영역 추출에 관련된 계산량을 보여준다. 단위 셀 영역의 반경을 달리하면서 셀의 평면 정보와 이 셀을 사용하여 레인지 영상전체에서 장애물 영역을 검출하는 속도를 보여준다. 단위 셀 각각에는 평면데이터의 모든 정보, 즉 평면 노말 벡터의 방향, 원점에서의 수직거리 및 셀 영역이 평면인지 아닌지의 여부를 포함한다. 표에서 볼 수 있는 것처럼 단위 셀 연산은 매우 빠르

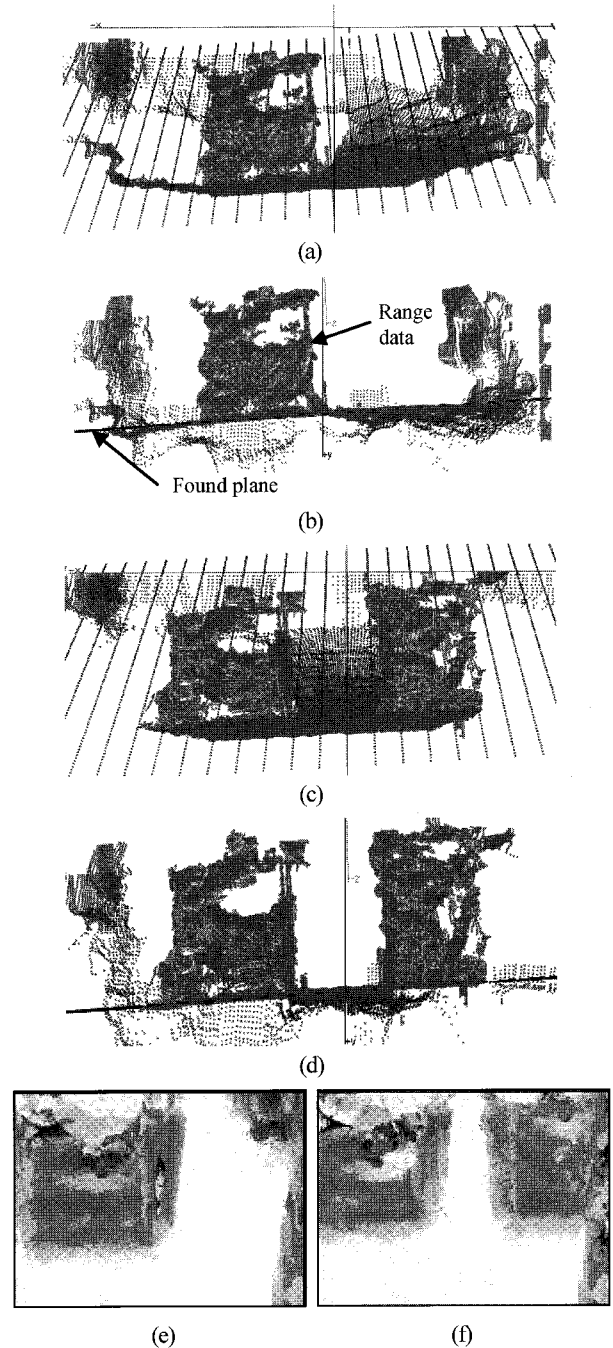


그림 7. 추출 평면과 장애물 영역 결정. (a)-(d) 추출 평면을 레인지데이터에 겹쳐서 출력한 예, (e) 각각의 평면에 대한 평면도 추출 결과, (e), (f) 장애물에 대한 주행 가능 영역 결정 결과.

Fig. 7. Decision of plane, path, and obstacle regions.

표 1. 단위셀 검출과 판정에 대한 계산시간.

Table 1. Computing times for plane and obstacle detection.

radius (pixels)	unit cell (single plane detection)	obstacles decision (3,869 cells)
15	3.9 μ sec	15 msec
20	4.1 μ sec	16 msec
30	4.1 μ sec	16 msec

게 수행되며 단위 셀의 노말 벡터와 중력방향 벡터의 내적에 의한 장애물영역의 결정도 초당 30프레임이상의 실시간 처리가 가능하다. 장애물 판정을 위해 레인지 영상의 약 3,869 점에서 셀 연산이 수행되었다.

레인지 데이터에서의 평면성 평가는 3D 데이터의 추출 정확성에 의존하게 된다. 만일, 스테레오카메라의 두 영상에서 대응점(corresponding points)을 계산시 박스 면의 텍스춰(texture)가 작아 정합 오류가 발생하여 일관적인 대응점을 얻을 수 없다면 거리데이터를 측정할 수 없다. 물론 박스면 위에서 충분한 텍스춰가 존재하는 경우 평면도가 계산될 수 있다. 본 논문에서는 평면검출을 위해 스테레오카메라(Bumble-B)에서 얻어진 깊이데이터 만을 사용하기 때문에 주변반사광에 의한 스테레오 영상에서의 정합오류는 잘못된 깊이 정보를 제공하게 되고 이러한 영향으로 평면이 장애물로 나타날 수도 있다. 이러한 오류를 개선하기 위해서는 레인지데이터의 추출속도와 함께 데이터품질의 개선은 제안된 알고리즘의 성능을 더욱 높이기 위해 반드시 수행되어야 하는 과제임을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 3차원 거리 측정 데이터에서 평면영역을 추출하거나 검증하는 방법에 대한 것이다.

3차원 거리 데이터에서 평면영역 추출은 이동로봇이 마루 바닥이나 벽, 테이블, 천장 등을 인식하거나 테이블이나 바닥면으로부터 장애물을 인식하는데 사용할 수 있다. 또한 보행로봇이 계단을 오르내리기 위해 다른 높이를 가진 계단 면을 인식하는데도 사용할 수 있다. 사무실 밖 야지에서 이동체가 야지 지형의 평면도를 평가함에 의해 스스로 이동방향을 결정하려 할 때 지표의 노말 벡터를 빠르고 정확하게 구할 수 있는 방법에 적용할 수 있다.

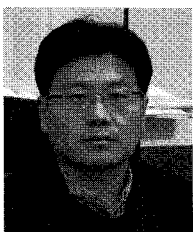
기존 방법이 주로 하프변환(Hough transform)의 직접 또는 간접적인 응용법에 기반하여 평면영역을 추출하나 하프 변환법이 과도한 계산량과 큰 메모리 공간, 복잡한 부가처리 등의 요구에 대한 문제점을 가진 것을 해결하기 위해 본 논문에서는 원호 기반의 삼각영역 노말 벡터 추출을 이용한 방법을 제안하였다. 3차원 거리 데이터의 평면성을 검증하기

위해 공간 내 특정 표면상의 관심점 주위에 일정한 반경을 가진 원호를 설정 후 원호상의 3점을 추출하여 삼각평면을 구성하고 이 삼각평면의 직교벡터를 계산함에 의해 평면도를 측정한다. 삼각평면은 원호상에서 회전하면서 일련의 직교벡터를 계산해 내고 여러 개의 직교벡터를 중간값을 이용한 확률적 평가에 의해 잡음 발생으로 균일하지 않은 평면도 추출하거나 검증할 수 있다.

평면도 평가 대상이 되는 특정 위치 주위에서 삼각형을 구성하는데 있어 고속으로 삼각위치를 추출하기 위해 일련의 회전된 삼각형의 세 좌표를 미리 LUT테이블을 사용하여 계산해 놓은 후, 실제 거리 데이터의 입력에서는 삼각영역 추출에 재계산 없이 고속으로 삼각평면의 노말 방향을 계산하는 방법을 제안하였다.

참고문헌

- [1] PointGray company page, <http://www.pointgray.com>
- [2] VidereDesign company page, <http://www.videre.com>
- [3] Sick company page, <http://www.sick.com>
- [4] 3DV Systems company page, <http://www.3dvsystems.com>
- [5] K. Okada, S. Kagami, J. Inaba, and H. Inoue, Plane Segment Finder: Algorithm, Implementation and Applications, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 2120-2125, 2001.
- [6] J. Gutmann, M. Fukuchi, and M. Fujita, A modular architecture for humanoid robot navigation, *Proc. 5th IEEE-RAS Conf. on Humanoid Robots*, pp. 26-31, 2005.
- [7] P. J. Besl and R. C. Jain, Segmentation through variable-order surface fitting, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no. 2, pp. 167-192, 1988.
- [8] T. Fan, G. Medioni, and R. Nevatia, Segmented descriptions of 3-d surfaces, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 527-538, 1987.
- [9] R. M. Haralick, L. T. Watson, and T. J. Laffey, The topographic primal sketch, *Int. J. of Robotics Research*, vol. 2, no. 1, pp. 50-72, 1983.
- [10] A. Hoover et al, An experimental comparison of range image segmentation algorithms, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, no. 7, pp. 673-689, 1996.
- [11] M. Nixon and A. Aguado, *Feature Extraction and Image Processing*, Elsevier, pp. 173-214, 2002.



강 동 중

1988년 부산대학교 정밀공학과 졸업.
1990년 KAIST 기계공학과 공학석사.
1999년 KAIST 자동화 및 설계공학과 공학박사. 1990년~1992년 현대전자 산전연구소 연구원. 1997년~1999년 삼성종합기술원 신호처리연구실 선임연구

원. 2004년 미국 Cornell Univ. 방문연구원. 2000년~2005년 동명대학교 메카트로닉스공학과 조교수. 2006년~현재 부산대학교 기계공학부 조교수. 관심분야는 머신비전, 이동로봇, 영상기반 검사시스템개발.