

스테레오영상의 가상의 탐뷰변환과 동적계획법에 의한 도로상의 장애물 검출

Generic Obstacle Detection on Roads by Dynamic Programming and Remapping of Stereo Images to a Virtual Top-View

이 기 용, 이 준 웅*
(Ki Yong Lee and Joon Woong Lee)

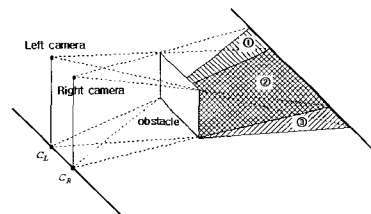
Abstract : In this paper, a novel algorithm capable of detecting generic obstacles on a flat surface is proposed. The algorithm fundamentally exploits a distortion phenomena taken place in remapping process of original stereo images to a virtual top-view. Based on the distortion phenomena, we construct stereo polar histograms of edge maps, detect peaks on them, and search for matched peaks on both histograms using a Dynamic Programming (DP). Eventually, the searched corresponding peaks lead to estimate obstacles' positions. The advantages of the proposed algorithm are that it is not largely affected by an intensity difference between a pair of stereo images and does not depend on the typical stereo matching methodologies. Furthermore, the algorithm identifies the obstacles' positions quite robustly.

Keywords : stereo vision, dynamic programming, polar histogram, peak joining

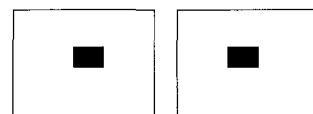
I. 서론

자동차의 안전에 대한 관심이 날로 높아지면서 인간의 시각 및 지각의 한계를 보완해 줄 수 있는 지능형시스템의 출현이 기대되고 있다. 자차량(ego vehicle)과 전방 차량사이의 거리계측은 이러한 지능형시스템의 중요한 연구 분야이다. 본 논문은 스테레오비전을 이용한 전방 차량까지의 거리계측 문제를 다루고 있다. 스테레오비전은 서로 다른 위치의 카메라로부터 획득한 두 장 이상의 영상을 이용하여 3차원 깊이정보를 얻는 컴퓨터비전의 대표적인 이론 가운데 하나이다[1]. 그림 1(a)는 카메라와 장애물간의 거리계측을 위한 두 대의 카메라와 노면상의 장애물과의 관계를 표현하고 있다. 그림의 C_L 과 C_R 은 좌·우 카메라의 초점이 노면에 수직 투영된 위치이다. 만약 그림 1(a)의 장애물이 검정색 사각형이라고 한다면, 좌·우 카메라로부터 그림 1(b)와 같은 스테레오영상을 얻을 수 있으며, 이때의 원근영상을 원영상(original image)이라고 명명한다. 일반적으로 스테레오비전을 이용한 장애물까지의 거리계측 방법은 카메라로부터 입력받은 스테레오영상으로부터 대응점 탐색을 통해 이루어진다[2]. 이와 달리 그림 1(b)의 원영상을 카메라와 노면사이의 기하학적인 관계를 이용하여 가상의 탐뷰(top-view)로 변환된 그림 1(c)와 같은 영상을 얻을 수 있다. 그림 1(b)의 원영상으로부터 변환된 영상은 직접 하늘에서 내려다보고 획득한 실제영상과 다르게 왜곡현상이 나타난다. 이는 변환영상이 장애물에 의해 가려져 이미 일부 노면의 밝기정보가 손실된 원영상으로부터 얻어지기 때문이다.

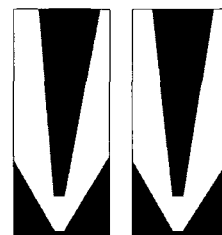
본 논문의 접근방법은 변환영상의 이러한 왜곡현상을 이용하여 장애물까지의 거리를 계측한다. 본 논문의 접근방법과 유사한 대표적인 연구사례는 1998년 M. Bertozzi와 A. Broggi가 발표한 GOLD (Generic Obstacle and Lane Detection)가 있다[3].



(a) Pictorial description of a stereo vision



(b) Original images(left · right perspective images)



(c) Remapped images to a virtual top-view

그림 1. 스테레오비전의 개념도와 변환영상.

Fig. 1. Pictorial description of a stereo vision and remapped images.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 8. 30., 채택확정 : 2004. 12. 29.

이기용, 이준웅 : 전남대학교 산업공학과

(01710402@hanmail.net/joonlee@chonnam.ac.kr)

※ 본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R05-2004-000-16067-0)지원으로 연구하였음.

GOLD는 변환된 스테레오영상의 차분을 통해 그림 1(a)의 좌측카메라에서는 보이지만 우측카메라에서는 보이지 않는 영역 ①과 우측카메라에서는 보이지만 좌측카메라에서는 보이지 않는 영역 ③을 추출하여 장애물을 분리하고 거리를 계측하고 있다. 그러나 실제 도로영상에서는 장애물과 노면이 하나의 동일한 밝기를 가지지 않기 때문에 영역 ①, ③과 같은 폐쇄(occlusion)영역과 영역 ②가 뚜렷하게 구분되지 않으며, 이로 인해 장애물의 분리가 어렵고, 장애물까지의 거리계측에 있어 실험적 임계값에 민감하다.

본 논문은 이러한 단점을 극복하고 임계값의 영향을 최소화했으며, 넓은 계측거리를 갖도록 설계되었다.

II. 제안한 접근 방법

1. 기본개요

그림 2(a)는 그림 1(a)의 그림에 본 논문에서 제안한 장애물까지의 거리계측방법의 설명에 필요한 파라미터들을 표기한 것이다. 그림 2(a)의 장애물의 경계와 노면이 만나는 위치 P_1 은 좌·우 카메라 초점의 위치 C_L 과 C_R 을 지나는 직선 l_1 과 l_2 가 만나는 교점으로, 직선 l_1 은 영역 ②의 좌측 경계와 접하고, 직선 l_2 는 영역 ①의 좌측경계와 접한다. 이러한 직선 l_1 과 l_2 는 직선 $\overline{C_L C_R}$ 과 l_1, l_2 가 이루는 각도 r_1 과 r_2 그리고 카메라 초점의 위치 C_L 과 C_R 에 의해 표현된다. 따라서 C_L 과 C_R 은 카메라 캘리브레이션[6]에 알려지므로, 각도 r_1 과 r_2 만 찾아내면 P_1 은 결정된다.

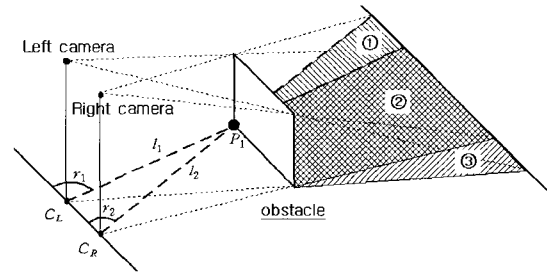
그림 2(b)는 그림 1(c)의 좌·우 변환영상의 수직에지성분으로 장애물의 위치 P_1 을 결정하는 그림 2(a)의 두 직선 l_1 과 l_2 를 찾는 단초가 된다.

좌·우 카메라 초점을 변환영상의 좌표로 변환하고, 이를 중심으로 그림 2(c)와 같이 각도를 변화시키면서 각각의 각도를 기울기로 하는 스캔라인(scanline)을 정의하고, 이 스캔라인상에 위치하는 에지픽셀의 크기의 합을 구하면, 그림 2(e)에 나타난 폴라히스토그램(polar histogram)이 얻어진다. 이때 그림 2(b)의 두 직선 l_1 과 l_2 는 그림 2(d)와 같이 두 카메라 초점을 잇는 직선 $\overline{C_L C_R}$ 과 이루는 각도가 r_1 과 r_2 인 스캔라인과 일치하며, 폴라히스토그램의 값은 r_1 과 r_2 에서 이웃하는 값들보다 절대치가 큰 값을 갖는다. 여기에서 폴라히스토그램에서 이웃하는 값들보다 절대치가 큰 위치를 피크(peak)라 정의한다. 장애물의 위치 P_1 은 좌측 폴라히스토그램에서의 피크 r_1 과 우측 폴라히스토그램에서의 피크 r_2 가 쌍을 이루므로써 결정되며, r_1 과 r_2 가 서로 대응되는 사실을 밝혀내는 과정을 피크연결(peak joining)이라 한다.

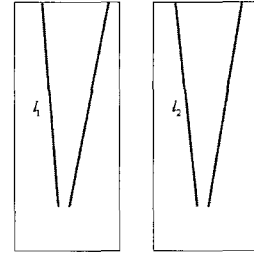
피크연결은 유사성(similarity), 유일성(uniqueness), 연속성(continuity), 순서성(ordering) 제약을 이용한 최적화문제로 볼 수 있으며, 본 논문에서는 동적계획법을 사용하여 모형화한다. 이러한 접근방법은 장애물까지의 거리계측을 위한 2차원 영상에서의 대응점 탐색문제를 1차원 폴라히스토그램에서의 대응되는 피크연결문제로 단순화한 것이다.

2. 폴라히스토그램

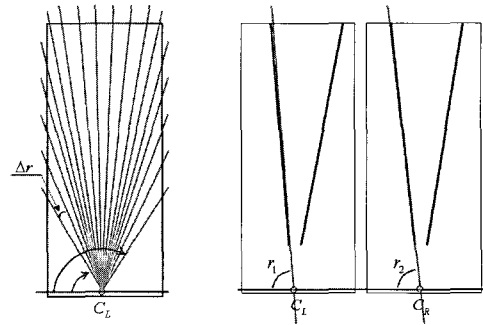
변환영상에서 추출된 수직에지[4]로부터 장애물 경계의 에지를 부각시키기 위해 필터링 과정을 거친다. 임의의 에



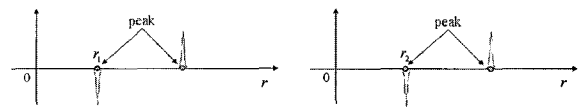
(a) Parameter description



(b) Vertical edges of Fig. 1(c)



(c) Def. of scanlines (d) Vertical edges and a scanline



(e) Polar histograms and peaks

그림 2. 제안한 접근방법.

Fig. 2. The concept of the proposed approach.

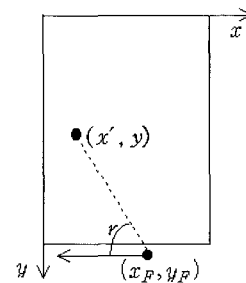


그림 3. 폴라히스토그램 구축을 위한 좌표계산.

Fig. 3. Coordinate calculation to obtain a polar histogram.

지픽셀을 $a(x, y)$ 라 하고, 에지의 절대치의 평균과 표준편차를 \bar{a} σ 라고 하면, 필터링된 에지는 다음과 같이 표현한다.

$$e(x, y) = \begin{cases} e(x, y), & |e(x, y)| > \bar{e} + \sigma \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (1)$$

필터링된 예지로부터 플라히스토그램 구축 과정은 다음과 같다.

- 1) 카메라 초점의 위치를 (x_f, y_f) 라 하자.
- 2) 그림 3과 같이 카메라 초점을 통과하는 각도 r 로 정의된 스캔라인 상에 존재하면서 변환영상의 임의의 y 좌표 상에 있는 점 (x', y) 의 x' 좌표를 다음 식으로 계산한다.

$$x' = x_f - \frac{y_f - y}{\tan r} \quad (2)$$

- 3) 플라히스토그램을 $p(r)$ 이라 하고, 변환영상의 y 축방향의 픽셀의 수를 row 라 하면, 다음과 같이 정의된다.

$$p(r) = \sum_{y=1}^{row} e'(x', y), \quad \forall r \quad (3)$$

$$e'(x', y) = (1 - \beta)e[x', y] + \beta e[x' + 1, y]$$

여기서, $\beta = x' - [x']$ 이며, $[\]$ 는 가우스기호이다.

r 의 탐색범위는 렌즈의 화각에 의해 결정되며, 각도의 변화량 Δr 는 계측거리의 정밀도와 관련된 파라미터로 시스템의 계측거리에 따라 실험적으로 결정된다.

3. 피크연결

구축된 좌·우 플라히스토그램에서 이웃하는 값들보다 절대치가 큰 값을 갖는 피크들을 추출하고, 장애물의 위치를 결정하기 위해 피크연결을 수행한다.

피크연결은 대응점탐색에서 일치성의 모호성을 줄이기 위해 제약조건을 사용하는 것과 같이 몇 가지 제약조건을 부여하여 최적화 문제로 모형화한다. 이러한 제약조건으로는 동일한 장애물의 경계에 의한 피크의 크기는 유사하다는 유사성(similarity), 각각의 피크는 일대일 대응관계를 갖는 유일성(uniqueness), 장애물의 위치가 연속적으로 변함을 의미하는 연속성(continuity)과 임의의 i 번째 피크가 j 번째 피크와 연결된 경우, $i+1$ 번째 피크는 j 번째 이후의 피크와 연결됨을 의미하는 순서성(ordering)제약이 그것이다.

그림 4는 수평축은 좌측 플라히스토그램으로, 수직축은 우측 플라히스토그램으로 하는 2차원 탐색평면이다. 2차원 탐색평면에서의 좌·우 플라히스토그램의 피크들에 의해 수직, 수평으로 그어진 선분들의 교점을 노드(node)라 한다. 피크연결문제는 노드 $(0, 0)$ 에서 (M, N) 까지의 최소비용을 갖는 경로(path)탐색문제로 동적계획법을 이용하여 모형화한다[5].

동적계획법은 최적화 문제를 푸는 기법의 하나로 의사결정상황을 시간적·공간적으로 여러 단계로 나누어 취급하며, 문제의 상황에 따라 적합한 모형을 만들어야 한다. 최소비용을 갖는 경로탐색문제는 동적계획법을 이용한 대표적인 문제이며, 피크연결에 사용되는 제약조건들을 고려한 모형화가 가능하다.

피크연결문제에서의 최적경로는 부분경로 (primitive path)라 부르는 노드들을 연결하는 직선들로 구성되며, 최적경로가 노드 (m, n) 을 지나면, 우측 플라히스토그램의 피크 m 과

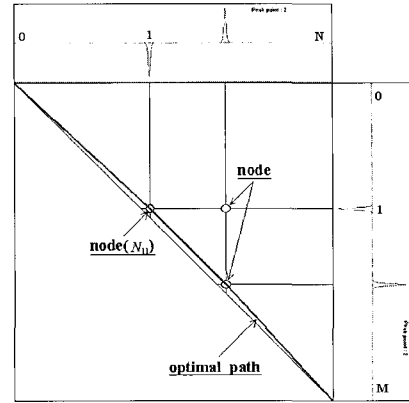


그림 4. 2차원 탐색평면.

Fig. 4. A 2D search plan.

좌측 플라히스토그램의 피크 n 이 대응됨을 의미한다.

부분경로의 비용 $d(N_{mm}, N_{jj})$ 는 노드 N_{jj} 에서 노드 N_{mm} 으로 오는 비용이고, 최적경로의 비용 $D(N_{mm}, N_{jj})$ 는 노드 N_{jj} 에서 노드 N_{mm} 까지의 최소비용이며, 부분경로들의 비용의 합으로 표현된다. 동적계획법으로 모형화된 피크 연결문제의 재귀방정식(recursive equation)은 다음 수식과 같이 표현된다.

$$D(N_{mm}, N_{00}) = \min_{ij} \{d(N_{mm}, N_{ij}) + D(N_{ij}, N_{00})\} \quad (4)$$

$$D(N_{00}, N_{00}) = 0, \quad 0 \leq i < m, 0 \leq j < n$$

지금까지 설명한 것과 같이 동적계획법을 이용한 피크연결은 부분경로(primitive path)의 비용에 기초하며, 좌·우 플라히스토그램을 $p_L(r)$, $p_R(r)$ 이라 하면, 본 논문에서 부분경로의 비용은 다음과 같이 정의된다.

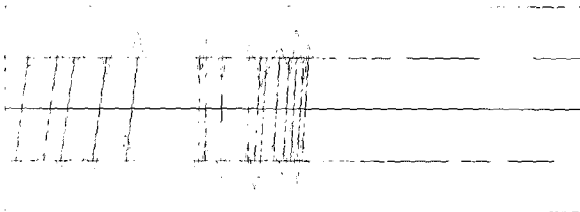
$$\begin{aligned} d(N_{mm}, N_{jj}) &= w_1(C_1 \times C_2) + w_2(C_3 + C_4) \\ C_1 &= |(m_r - n_r) - (i_r - j_r)| + 1 \\ C_2 &= (p_L(n_r) - p_R(m_r))^2 \\ C_3 &= \begin{cases} \sum_{k=i+1}^{m-1} p_R(k_r)^2, & \text{if } (m) > i+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ C_4 &= \begin{cases} \sum_{k=j+1}^{n-1} p_L(k_r)^2, & \text{if } (n) > j+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 w_1, w_2 는 가중치이며, m_r 은 m 번째 피크에 해당하는 플라히스토그램의 각도정보를 의미한다.

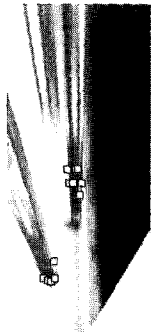
위와 같은 피크연결을 위한 동적계획법을 이용한 모형은 피크연결의 일치성의 모호성을 줄이기 위해 사용된 제약조건들을 내포한다. 먼저 재귀방정식의 변수 i 와 j 의 범위 설정은 유일성과 순서성제약조건을 만족시키며, 부분경로의 비용함수에서 C_1 은 연속성제약조건, C_2 는 유사성제약조건을 비용함수로 모형화한 것이다. 부분경로의 비용함수의 C_3 와 C_4 는 피크가 존재함에도 연결되지 않은 경우의 벌칙비용을 나타낸다.

III. 실험결과

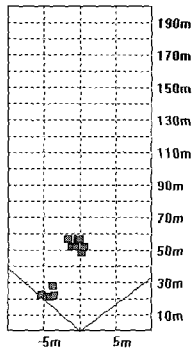
본 논문에서는 Tsai의 캘리브레이션 방법을 이용하여 카메라와 노면의 기하학적인 관계를 표현하는 캘리브레이션 파라미터를 추출하였다[6]. 그림 5는 제안한 방법을 실제 도로영상에 적용한 경우로 (a)는 좌·우 폴라히스토그램과 피크연결 결과를 나타낸다.



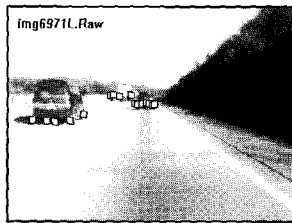
(a) Polar histograms and peak-joining results



(b) Obstacle detection



(c) Detected distances



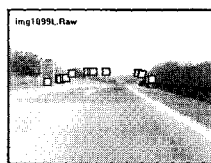
(d) Representation in an original image

그림 5. 도로영상에서의 장애물 위치 검출.

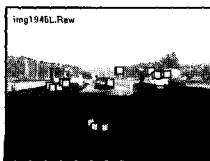
Fig. 5. Detection obstacles' position.



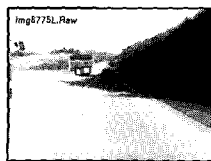
(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4

그림 6. 잘못된 장애물의 위치 검출 예.

Fig. 6. Examples of erroneous detection.

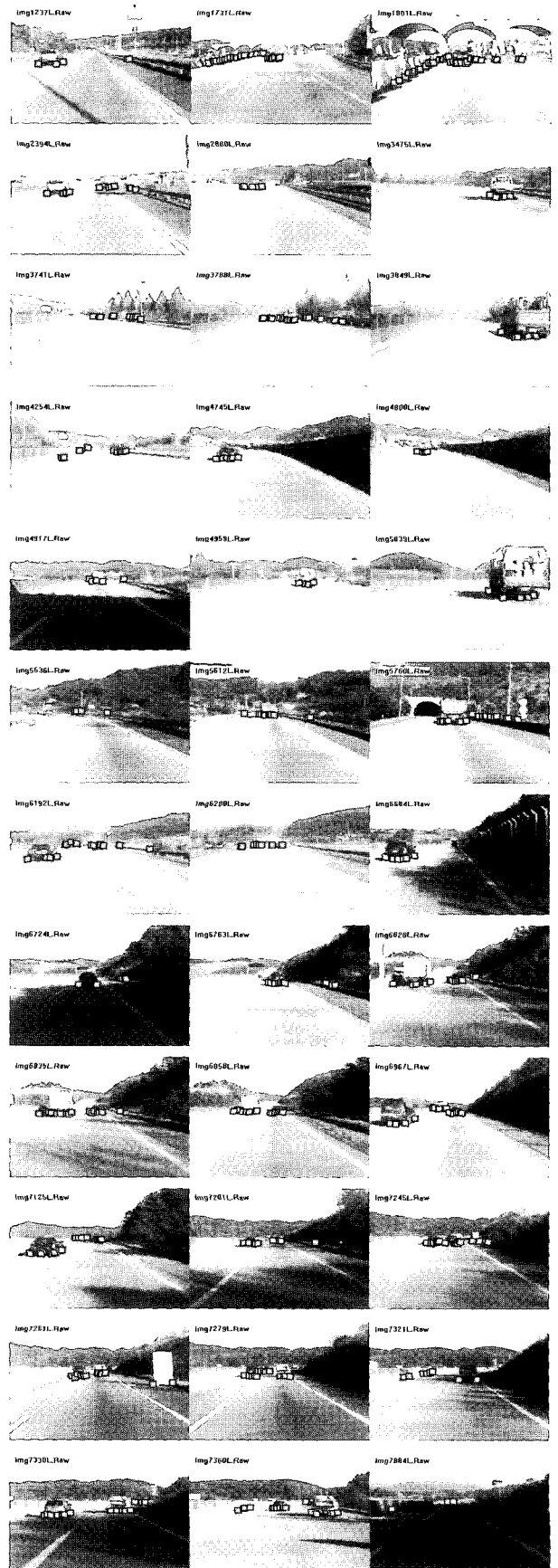


그림 7. 다양한 도로영상에서의 실험결과.

Fig. 7. Experimental results on various situations.

피크연결 결과 작지어진 좌·우 폴라히스토그램의 피크는 3차원상의 한 점을 나타내며, 이를 피크연결점이라고 명명한다. 그림 5(b)와 (d)는 이러한 피크연결점들을 변환영상과 원영상에 나타낸 것이며, 그림 5(c)는 좌측카메라의 초점과 검출된 장애물사이의 거리를 나타내고 있다.

그림 5의 도로영상에서의 피크연결점은 모두 16개이며, 그림 5(b)와 (c)는 관심영역에서 벗어난 4개의 피크연결점을 제외한 12개의 피크연결 결과를 나타내고 있다.

그림 6은 잘못된 장애물의 위치를 검출한 경우들로, 크게 4가지 요인을 들 수 있다.

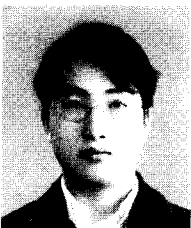
- 경우 1 : 영상변환의 기본 가정인 “전방의 노면은 평탄하다”는 가정이 성립하지 않는다.
- 경우 2 : 장애물이 존재하지 않음에도 휩 차선표식에 의해 장애물이 있는 것으로 판정한다.
- 경우 3 : 잘못된 피크연결의 결과로 잘못된 거리정보를 나타낸다.
- 경우 4 : 배경과 장애물의 밝기차가 작은 경우에 장애물의 위치를 검출하지 못한다.

그림 7은 다양한 도로영상에서의 장애물의 위치 검출 결과로 장애물이 하나 혹은 그 이상이거나 도로면에 차선표식이나 안내선, 그림자 등이 존재하는 경우 등의 다양한 도로 환경에서도 양호한 검출결과를 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 스테레오비전을 이용한 자차량 전방의 장애물 검출 문제를 가상의 탐부로의 영상변환을 통하여 풀고자 하였다. 일반적인 스테레오비전이 외부세계의 3차원 복원을 목표로 한다면, 도로상의 장애물 검출을 위한 스테레오비전은 자차량의 안전한 주행공간의 확보를 목표로 한다. 이는 도로상에 존재하는 장애물의 위치만을 찾아냄으로서 일반적인 스테레오비전보다 복원의 정도는 단순하지만, 달리는 자동차의 안전기술로 빠른 처리속도와 높은 신뢰성을 요구하며, 다양한 도로환경과 조명조건에 강인해야 한다. 제안된 방법은 서로 다른 위치에서 획득한 스테레오영상을 동일한 도메인에서 해석함으로써 문제 해결을 용이하게 한다.

본 논문에서는 스테레오 변환영상에서 장애물에 의해 왜곡된 폐쇄영역의 경계를 이용하여 장애물을 검출하였다.



이 기 용

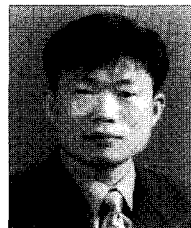
2002년 전남대학교 산업공학과 졸업.
2004년 전남대학교 산업공학과 석사.
2004년 현재 전남대학교 산업공학과 박사과정. 관심분야는 컴퓨터비전, ITS 및 지능형 자동차.

이를 위해 각각의 변환영상으로부터 수직에지를 추출하고, 폴라히스토그램을 구축한 후, 각각의 폴라히스토그램에서 피크를 추출하고, 장애물의 위치를 결정하기 위한 피크연결을 동적계획법을 이용한 최적화 문제로 모형화하였다. 이러한 접근 방법은 장애물에 의해 왜곡된 변환영상에서 수직에지를 추출하고 이를 누적함으로써 다양한 조명조건에서도 강인성을 확보할 수 있었으며, 폴라히스토그램 구축을 통해 도로면의 차선표식이나 안내선, 그림자 등의 영향을 최소화하였다. 또한 2차원 대응점탐색 문제를 1차원의 피크연결 문제로 단순화시켜 12 frame/sec의 처리속도를 보였으며, 기존의 대응점 탐색을 통한 거리계측보다 조밀한 거리계측의 정밀도를 보였다.

향후 잘못된 장애물 위치검출의 경우에 대한 해결방안 모색과 클러스터링(clustering)을 통한 각각의 장애물의 분리와 연속프레임에서의 장애물의 추적에 관한 연구가 계속 진행될 것이다.

참고문헌

- [1] O. Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision A Geometric Viewpoint*, The MIT Press, 1993.
- [2] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, "Vision-based intelligent vehicles: state of the art and perspectives", *Robotics and Autonomous System*, vol. 32, pp. 1-16, 2000.
- [3] M. Bertozzi and A. Broggi, "GOLD: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection", *IEEE Trans. on Image Procession*, vol. 7, no. 1, pp. 62-81, 1998.
- [4] R. G. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1992.
- [5] Y. Ohta and T. Kanade, "Stereo by intra-and inter-scanline search using dynamic programming", *IEEE Trans. PAMI*, vol. 7, no. 2, pp. 139-154, 1985.
- [6] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-Shelf TV cameras and lenses", *IEEE Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.



이 준 응

1984년 2월 전남대학교 산업공학과 졸업. 1986년 2월 한국과학기술원 산업공학과 석사. 1997년 2월 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 박사. 2000년 6월~현재 전남대학교 산업공학과 교수. 관심분야는 컴퓨터비전, ITS 및 지능형

자동차.