

스테레오비전 기반의 도로의 기울기 추정과 자유주행공간 검출

Stereo-Vision Based Road Slope Estimation and Free Space Detection on Road

이 기 용, 이 준 웅*
(Ki-yong Lee¹ and Joon-woong Lee¹)
¹Chonnam National University

Abstract: This paper presents an algorithm capable of detecting free space for the autonomous vehicle navigation. The algorithm consists of two main steps: 1) estimation of longitudinal profile of road, 2) detection of free space. The estimation of longitudinal profile of road is detection of v-line in v-disparity image which is corresponded to road slope, using v-disparity image and hough transform, Dijkstra algorithm. To detect free space, we detect u-line in u-disparity image which is a boundary line between free space and obstacle's region, using u-disparity image and dynamic programming. Free space is decided by detected v-line and u-line. The proposed algorithm is proven to be successful through experiments under various traffic scenarios.

Keywords: stereo-vision, free space, longitudinal profile of road, v-disparity image, u-disparity image, dynamic programming

I. 서론

본 논문에서는 무인자동차의 자율주행을 위해 스테레오 비전을 이용하여 자동차 전방의 자유주행공간(free space)을 검출하는 알고리즘을 제안한다. 여기서 자유주행공간이란 자동차가 장애물의 충돌 없이 자유롭게 주행이 가능한 공간을 말한다. 본 논문의 자유주행공간 검출은 그림 1과 같이 차량에 장착된 카메라로부터 입력된 도로영상에서 장애물이 존재하지 않는 노면영역을 분리하는 것이다.

지능형안전자동차 분야에서 스테레오비전은 장애물 검출에 주로 사용되어 왔다[1]. 그리고 대부분이 시차맵(disparity map)을 기반으로 하고 있으며 본 논문 또한 시차맵을 기반으로 자유주행공간을 검출한다. 시차맵은 대응점탐색을 통해 얻어지며 깊이정보를 함축하고 있어 3차원복원이 가능하다. 그러나 대응점탐색은 많은 연산시간을 필요로 하기 때문에 실시간 처리가 요구되는 문제에서 연산시간은 중요한 제약이 된다. 또한 대응점탐색은 관공(觀孔)의 문제(aperture problem)와 차폐현상(occlusion)에 의해 정확한 시차맵을 얻기 어렵다. 이와 같은 대응점탐색이 갖는 어려움들 때문에 시차맵이 아닌 가상의 탐부영상을 사용한 접근방법이 발표되었다[1,11]. 탐부영상 기반의 접근방법들은 “도로는 평탄하다.”는 제약조건을 사용하여 도로영상을 탐부영상으로 변환한다. 그리고 변환된 탐부영상에서 장애물에 의한 차폐영역을 검출함으로써 장애물을 검출하고, 장애물까지의 거리를 예측한다. 그러나 “도로는 평탄하다.”는



그림 1. 자유주행공간.

Fig. 1. Free space.

제약조건이 깨지는 오르막이나 내리막도로와 같이 평탄하지 않은 도로에서는 장애물 검출에 오류가 발생하며, 도로의 기울기 변화와 차량의 피치모션(pitch motion)에 민감하다.

자유주행공간 검출은 장애물 검출과 유사하지만 검출하고자 하는 대상에서 차이를 보인다. 관련 논문들을 살펴보면 장애물 검출의 경우 차량이나 보행자와 같이 그 대상이 확실하며, 대상 장애물의 특징들을 적극적으로 사용하기도 한다[1,3,5,6,8,10,11]. 그러나 자유주행공간 검출에서는 장애물은 자동차의 이동에 방해가 되는 모든 것으로, 매우 포괄적이다. 그리고 검출하고자 하는 대상은 차량의 주행이 가능한 노면영역이다[2,4,9].

본 논문에서는 시차맵으로부터 자유주행공간을 검출하기 위해 먼저 도로의 기울기를 추정한다. 추정된 도로의 기울기 정보는 시차맵으로부터 노면에 해당하는 화소들을 제거하는 기준이 된다. 실제 도로의 기울기는 매우 다양하기 때문에 정확한 기울기를 추정하는 것은 어렵다. 따라서 도로

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 15., 수정: 2010. 12. 5., 채택확정: 2010. 12. 20.
이기용, 이준웅: 전남대학교 산업공학과(시스템자동화연구소)
(01710402@hanmail.net/joonlee@chonnam.ac.kr)

의 기울기를 평면으로 가정하거나 주로 카메라 광축방향(종방향)의 기울기만을 고려한다. 도로의 기울기를 추정하는 방법은 호모그래피행렬(homograph matrix)을 계산하는 방법[5], 유클리디안 공간상에서 완화곡선(clothoid fuction), 3차 다항식이나 B-스플라인(B-spline)등을 사용하여 기울기를 추정하는 방법[6,9,10], 그리고 v-시차영상(v-dispairty image)을 활용하는 방법[7]이 있다.

v-시차영상의 v는 흔히 디지털영상좌표표를 (u, v)로 표기하는 것에서 기인하며, 디지털영상좌표표의 행을 뜻한다. v-시차영상은 시차맵의 모든 행에 대해서 각 행별로 시차(disparity)의 빈도(frequency)를 계산하여 이를 영상으로 나타낸 것이다. 일반적으로 도로영상에서의 소실점은 영상의 중앙에 위치하고, 아래로 내려갈수록 카메라와 노면사이의 거리는 짧아진다. 시차맵 측면에서 살펴보면 소실점으로 갈수록 시차는 0에 수렴하고, 맵의 아래로 내려갈수록 시차는 점점 커진다. v-시차영상은 이와 같은 특징을 잘 표현한다. 그러므로 본 논문에서는 v-시차영상을 이용하여 도로의 기울기를 추정한다. 이를 위해 v-시차영상에서 도로의 기울기를 나타내는 5개의 직선을 찾고, 5개의 직선과 직선들의 교점을 이용하여 네트워크문제로 모형화한다. 그리고 다익스트라 알고리즘을 사용하여 최적경로를 탐색한다.

추정된 도로의 기울기정보는 시차맵에서 자동차의 주행 공간안에 위치하는 장애물들을 선별하는 중요한 기준이 되고, 이렇게 선별된 장애물의 시차맵으로부터 u-시차영상을 얻는다. u-시차영상은 해당 시차맵의 모든 열에 대해서 시차의 빈도를 계산한 것이다. 자유주행공간 검출은 u-시차영상에서 장애물과 노면영역을 분리하는 경계선을 찾는 것으로, 여기서는 동적계획법을 사용하여 모형화한다.

본 논문은 II 장에서 도로의 기울기 추정 과정을 상세히 기술하며 III 장에서는 자유주행공간을 검출하는 과정을 설명한다. 그리고 IV 장은 다양한 도로영상에서의 실험결과를 보여주며, 마지막 V 장 결론으로 구성된다.

II. 도로의 기울기 추정

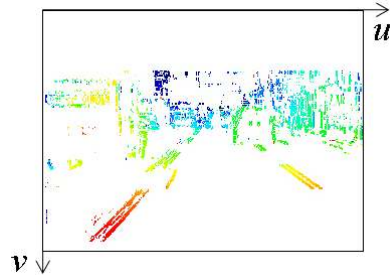
1. 시차맵 생성

대응점탐색은 스테레오비전의 목적을 달성하는데 있어서 핵심이 되는 과정이다. 더욱이 실시간 처리가 요구되는 곳에서는 특히 그렇다. 제한한 알고리즘에서는 카메라들로부터 입력된 스테레오영상을 레티피케이션[13]을 통해 보정하고, 보정된 스테레오영상에서 대응점을 탐색한다.

그림 2(a)와 같이 일반적으로 도로영상의 많은 부분이 텍스처가 없는 노면이나 하늘영역으로 구성된다. 텍스처가 없는 영역에서 대응점을 찾는 것은 어렵고, 잘못된 결과를 야기하기도 한다. 그러므로 본 논문에서는 대응점탐색에 사용될 후보들을 수직에지성분이 강한 화소들로 제한한다. 그 결과 대응점탐색을 통해 얻어지는 시차맵은 그림 2(b)와 같이 밀도가 낮은(sparse) 시차맵이다. 밀도가 낮은 시차맵은 높은(dense) 시차맵보다 포함하는 정보는 부족하지만 계산 시간의 감소, 잘못된 대응점탐색의 최소화라는 두 가지 장점을 갖는다. 그림 2(b)에서 흰색영역은 텍스처가 없는 영역으로, 시차(disparity)가 존재하지 않는 영역이다.



(a) Stereo images (left · right image).



(b) Disparity map.

그림 2. 스테레오영상과 시차맵.

Fig. 2. A pair of stereo images and its DM.

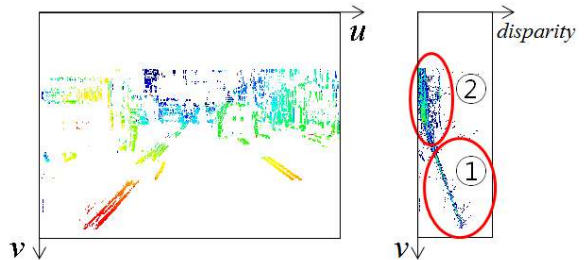
2. v-시차영상

v-시차영상은 앞서 언급한 것과 같이 도로의 기울기를 추정하는 좋은 방법들 중 하나이다. 따라서 본 논문에서도 v-시차영상을 이용하여 도로의 기울기를 추정한다.

v-시차영상은 시차맵의 모든 행에 대해서 각 행별로 시차의 빈도를 계산하여 이를 영상으로 나타낸 것으로, v-시차영상을 $H_v(d, v)$, 시차맵을 $D(u, v)$ 라 하면 수식 (1)과 같이 얻어진다.

$$H_v(d, v) = \sum_{k=0}^{Col-1} \delta(D(k, v), d) \tag{1}$$

여기서 δ 는 크로네커 델타함수이고, Col은 시차맵의 행방향 화소 수, d는 시차를 나타낸다. 그리고 v는 수직축의 색인을 나타내며, $D(k, v)$ 는 시차맵상의 (k, v)에 위치한 화소 값, 즉 시차를 나타낸다. 그림 3은 그림 2(b)의 시차맵으로부터 얻어진 v-시차영상을 나타낸다. 그림에서 흰색은 빈도가 0인 곳이며, 파란색, 녹색, 빨간색의 순으로 빈도가 커진다.



(a) Disparity map.

(b) v-disparity image.

그림 3. v-시차영상.

Fig. 3. v-disparity image.

3. v-시차영상의 선별

v-시차영상에서 도로의 기울기를 추정하기에 앞서 도로와 관련된 정보들을 선별하는 과정이 필요하다. 왜냐하면 v-시차영상은 도로뿐 아니라 장애물, 그리고 잘못된 대응점 탐색에 의한 잡음들이 함께 포함되어 있기 때문이다. v-시차영상에서 도로와 관련된 화소들을 선별하기 위해 해당 거리(시차)에 장애물이 있는 경우와 없는 경우로 나뉘어 고려해 본다.

① 장애물이 없는 경우: 오직 도로만 존재한다. 그러므로 그림 3의 영역 ①과 같이 v-시차영상의 해당 열에서 도로는 가장 큰 값을 갖는 위치다.

② 장애물이 있는 경우: 장애물은 항상 도로위에 있다. 그러므로 v-시차영상의 해당 열에서 도로에 해당하는 곳은 다른 화소들보다 상대적으로 아래쪽에 위치한다. 그림 3의 영역 ②는 장애물과 도로가 뒤섞여 있는 영역으로, 도로는 영역 ②의 하단에 위치한다.

이 같은 사실을 바탕으로 v-시차영상의 각 열별로 가장 큰 값을 갖는 화소와 상대적으로 하단부에 속하는 화소들을 남기고 그 외의 화소들은 모두 제거한다. 이를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$F_1(d,v) = \begin{cases} 1 & \text{if } \arg \max_i (H_v(d,i)) = v \text{ for } 0 \leq i \leq \text{Row} - 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$F_2(d,v) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{j=0}^v H_v(d,j) / \sum_{j=0}^{\text{Row}-1} H_v(d,j) > .9 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 Row는 v-시차영상의 수직방향 화소수이다. 선별된 v-시차영상을 $H_v^f(d,v)$ 라 하면 수식 (2)와 (3)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_v^f(d,v) = \begin{cases} 1 & \text{if } (F_1(d,v) = 1 \text{ or } F_2(d,v) = 1) \text{ and } H_v(d,v) \geq 3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 조건 $H_v(d,v) \geq 3$ 은 잡음의 영향을 줄이기 위한 것이다. 수식 (3)과 (4)에서 사용된 상수 0.9와 3은 실험적으로 결정된 값들이다. 그림 4는 그림 3의 v-시차영상으로부터 수식 (4)에 의해 도로관련 화소들만을 선별한 v-시차영상이다.

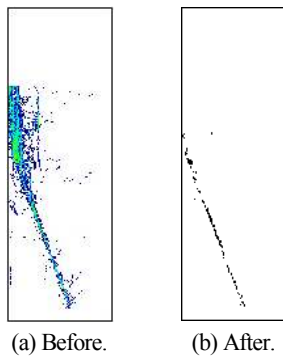


그림 4. 도로관련 화소들만 선별한 v-시차영상.
Fig. 4. Filtered v-disparity image.

4. 도로의 기울기 추정

Labayrade et al [7]는 도로의 기울기를 두 직선의 결합으로 나타냈다. 본 논문에서는 여러 직선의 결합으로 표현하며, 이를 v-라인이라 명명한다. v-라인을 추정하기 위해 앞서 선별된 v-시차영상을 수평축(시차)을 기준으로 그림 5와 같이 4개의 영역으로 나누고, 하프변환을 이용하여 각 영역을 대표하는 직선 L_1, L_2, L_3, L_4 을 검출한다. 이때 영역들의 범위는 실험적으로 결정된다. 여기에 카메라 파라미터로부터 계산된 직선 L_0 을 추가하여 도로의 기울기 후보가 될 5개의 직선을 검출한다. 그림 5는 L_1, L_2, L_3, L_4 을 검출한 4개의 영역(빨간색 사각형)과 5개의 기울기 후보들을 나타낸다.

검출된 5개의 직선은 서로 간에 최대 10개의 교점을 갖고, 그림 6과 같이 v-시차영상의 좌측 경계와 5개의 교점, 아래쪽 경계와 5개의 교점을 합쳐 총 20개의 교점을 얻을 수 있다. 각각의 교점은 네트워크상의 노드가 되고, 각각의 교점을 연결하는 선분들은 노드와 노드를 연결하는 경로가 된다. 이와 같이 도로의 기울기를 추정하는 문제는 5개의 직선과 직선들의 교점을 이용하여 네트워크문제로 모형화된다. 이때 노드를 연결하는 경로의 비용은 v-시차영상에서 해당 경로와 중첩되는 화소들 중 0이 아닌 화소의 수를 사용한다. 주어진 네트워크문제는 잘 알려진 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘을 이용하여 최적해를 구한다. 그림 7은 그림 4의 v-시차영상에서 검출한 5개의 직선과 이로부터 얻어진 최적경로(빨간선), 즉 v-라인을 나타낸다.

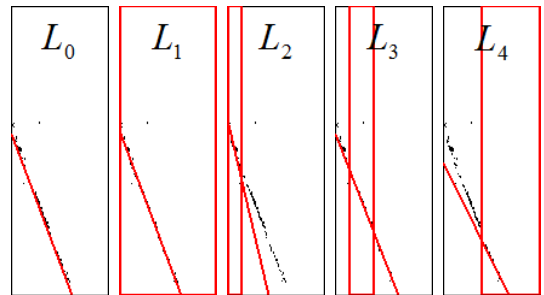


그림 5. 선별된 v-시차영상의 네 영역과 5개의 직선.
Fig. 5. Division of filtered v-disparity and five lines.

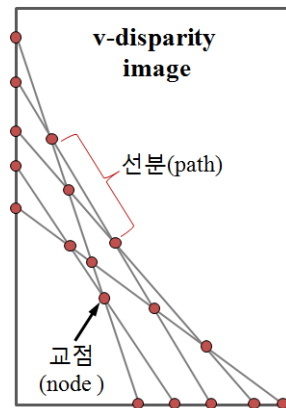


그림 6. 5개의 직선에 의한 교점(노드)과 호(경로).
Fig. 6. Intersections(nodes) and arc(path) by five lines.

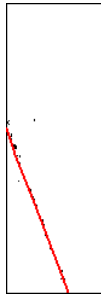


그림 7. 최적경로 (v라인).
Fig. 7. Optimum path (v-line).

III. 자유주행공간 검출

1. 장애물 시차맵

시차맵은 자동차 전방의 장애물들과 도로 모두를 포함하고 있다. 그러므로 자유주행공간 검출을 위해 먼저 시차맵에서 자동차의 주행과 무관한 화소들을 제거해야 한다. 그림 8은 차량의 주행공간과 장애물들을 나타낸다. 그림에서 칼라콘은 차량의 주행에 방해가 된다. 하지만 차량의 높이보다 높은 곳에 위치하고 있는 신호등이나 노면에 그려진 표식들은 차량의 주행과는 무관한 것들이다. 자유주행공간 검출을 위해 시차맵에서 차량의 주행과 무관한 화소를 제거한 후 남은 시차맵을 장애물 시차맵이라 명명한다.

시차맵에서 차량의 주행과 무관한 화소를 제거하기 위해 앞서 추정한 도로의 기울기 정보와 차량의 높이에 대응되는 거리별 영상에서의 화소 수를 이용한다. 이때 거리별 영상에서의 화소 수는 카메라 파라미터로부터 계산된다. 그림 9는 장애물 시차맵을 얻기 위한 영상에서의 차량의 주행공간을 나타낸다. (a)에서 v-라인은 거리별 영상에서의 도로의 위치를 나타내고, h는 차량의 높이에 해당하는 영상에서의 높이로 거리에 따라 높이가 달라진다. 영상에서 차량의 주행공간은 v-라인과 h에 의해 결정되며, (b)는 시차별 영상에서의 주행공간을 나타낸다. 그림 10은 그림 3의 시차맵으로부터 얻어진 장애물 시차맵이다.

2. u-시차영상

장애물 시차맵은 자유주행공간을 검출하는 중요한 단초가 된다. 장애물 시차맵에서 값을 갖는 화소들은 장애물에 속하는 것들로 값을 갖는 화소와 그렇지 않은 화소들을 나눠 자유주행공간을 검출할 수 있다. 그러나 이와 같은 방법은 잡음에 민감하게 반응한다는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 u-시차영상을 사용한다. u-시차영상은 해당 시

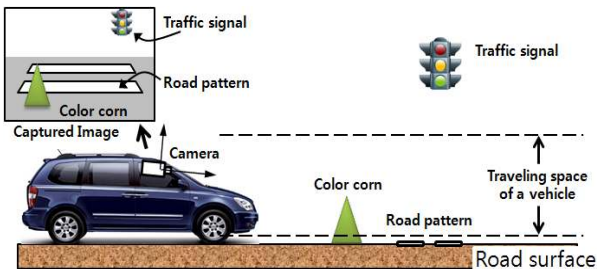
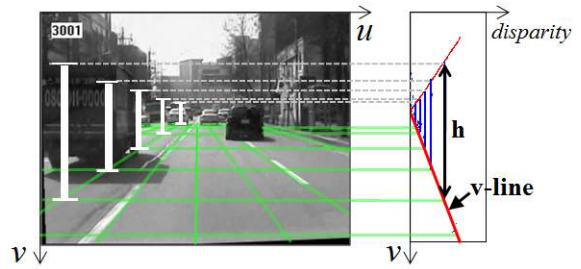


그림 8. 차량의 주행공간.
Fig. 8. Traveling space of a vehicle.

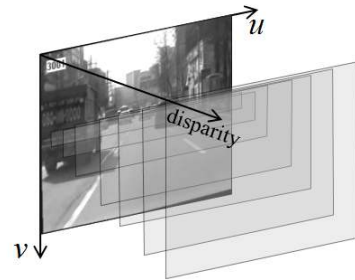
차맵의 모든 열에 대해서 시차의 빈도를 계산한 것으로, 장애물 시차맵 $D_o(u,v)$ 으로부터 u-시차영상 $H_u(u,d)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$H_u(u,d) = \sum_{k=0}^{Row-1} \delta(D_o(u,k),d) \tag{5}$$

여기서 δ 는 크로네커 델타함수이고, Row는 장애물 시차맵의 열방향 화소 수, d는 시차를 나타낸다. 그리고 $D_o(u,k)$ 는 장애물 시차맵상의 (u,k)에 위치한 시차를 나타낸다. 그림 11은 그림 10의 장애물 시차맵으로부터 얻어진 u-시차영상이다.



(a) Traveling space and v-line.



(b) Traveling space in image.

그림 9. 영상에서의 주행공간.

Fig. 9. Traveling space in image.

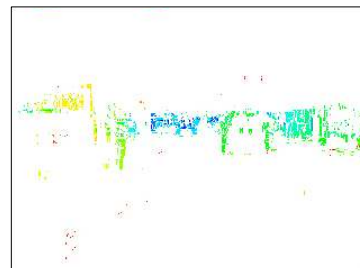


그림 10. 장애물 시차맵.

Fig. 10. Obstacle disparity map.

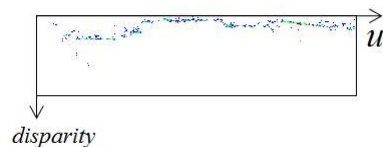


그림 11. u 시차영상.

Fig. 11. u-disparity image.

3. 자유주행공간 검출

장애물은 유사한 시차를 갖기 때문에 u -시차영상에서 일정기준 이상의 값을 갖는 화소들을 형성한다. 그러므로 자유주행공간 검출에 앞서 잡음에 의한 영향을 줄이기 위해서 u -시차영상에서 일정기준보다 작은 값을 갖는 화소들을 제거한다. 이때 기준이 되는 값은 실험적으로 결정한다.

본 논문에서 자유주행공간 검출은 도로영상에서 장애물이 존재하지 않는 노면영역을 분리하는 것이다. 다시 말해 이것은 u -시차영상에서 장애물영역과 노면영역을 분리하는 것으로, 두 영역을 분리하는 경계선을 u -라인이라 명명한다.

u -라인 검출은 u -시차영상을 2차원 탐색평면으로 보고, 화소는 노드, 화소의 값은 비용으로 하는 최적경로탐색문제로 모형화한다. 이때 최적경로는 u -시차영상의 좌측 끝에서 우측 끝까지 가장 큰 비용을 갖는 경로로, 동적계획법을 이용하여 최적경로를 찾는다. 이때 찾아진 최적경로는 u -라인이 된다. 그림 12는 u -시차영상과 u -라인을 나타낸다.

자유주행공간의 결정은 앞서 얻어진 v -라인과 u -라인으로부터 얻어지며, 그림 13은 그 과정을 나타낸다. 먼저 영상에서 임의의 열 u' 을 선정하고, u -시차영상의 u -라인에서 열 u' 일 때의 시차 d' 을 찾는다. 그리고 v -시차영상의 v -라인에서 시차가 d' 일 때의 행 v' 을 계산한다. 영상의 모든 열에 대해 위 과정을 반복하면 그림 13과 같이 장애물과 노면이 만나는 경계를 검출할 수 있으며, 이 경계의 아래쪽 영역이 자유주행공간이 된다.

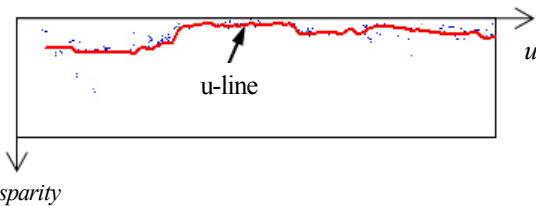


그림 12. u -시차영상과 u -라인(빨간선).
Fig. 12. u -disparity image and u -line (red line).

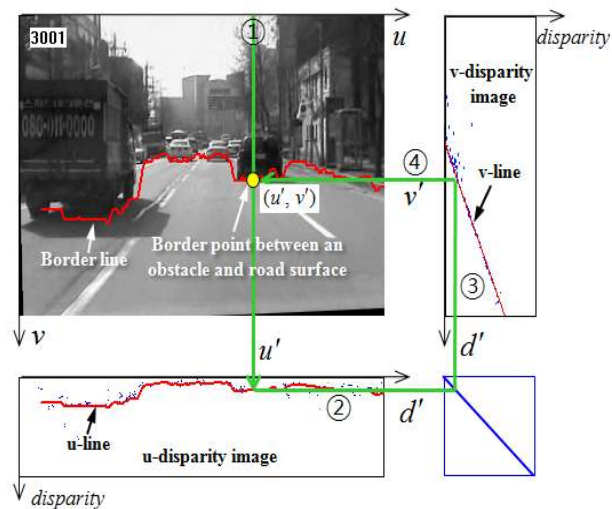


그림 13. 자유주행공간 검출.
Fig. 13. Free space detection.

IV. 실험

차량에 설치된 스테레오카메라로부터 얻어진 다양한 도로영상을 대상으로 제안한 알고리즘의 성능을 평가하였다. 이때 사용된 영상은 320×240 크기의 흑백영상이다.

먼저 실제 도로의 기울기와 앞서 추정된 v -라인이 얼마나 일치하는지를 알아보기 위해 도로영상을 v -라인을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우로 나눠 가상의 탐부영상으로 변환한다. 그림 14는 도로영상을 가상의 탐부영상으로 변환한 결과이다. 그림에서 두 번째 열은 v -라인을 적용하지 않고 캘리브레이션 정보로부터 얻어진 도로의 기울기를 사용하여 얻어진 탐부영상이고, 세 번째 열은 추정된 v -라인을 적용하여 얻어진 탐부영상이다. 탐부영상에서 추정된 v -라인이 도로의 기울기를 잘 나타내고 있는지를 평가하는 방법은 차선표식의 평행성을 살펴보면 된다. 만약 v -라인이 도로의 기울기와 일치한다면 가상의 탐부영상에서 차선표식들은 서로 평행할 것이고, 그렇지 않을 경우 차선표식의 평행성은 깨질 것이다.

그림 14의 각 행별 차량의 주행상황을 살펴보면, 첫 번째 행은 비교적 평탄한 도로를 주행하고 있는 경우이고, 두 번째 행은 교차로에서 브레이크를 밟아 차량의 피치모션(pitch motion)이 발생한 경우이다. 그리고 세 번째와 네 번째 행은 오르막과 내리막도로를 주행하는 경우이다. v -라인을 적용하지 않은 경우를 보면 비교적 평탄한 도로에서는

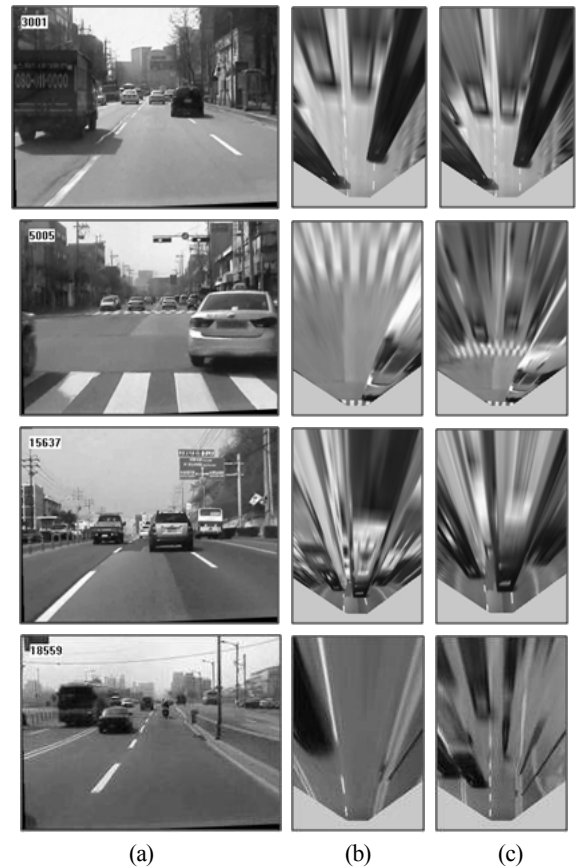


그림 14. 도로의 종방향 프로파일을 고려한 가상의 탐부영상.
Fig. 14. Top-view image considered of longitudinal profile of road.

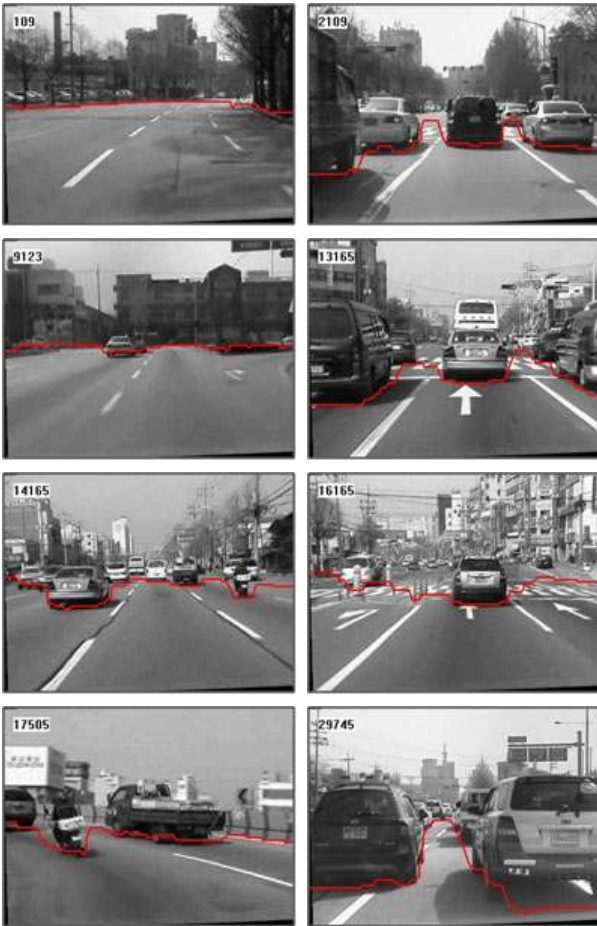


그림 15. 자유주행공간 검출결과.
Fig. 15. Results of free space detection.

차선표식의 평행성이 어느 정도 유지되지만 차량의 피치모션(pitch motion)이 발생하거나 경사진 도로에서는 평행성이 깨진다. 그러나 v-라인을 적용한 가상의 탐뷰영상에서는 차선표식의 평행성이 유지된다.

그림 15는 본 논문의 최종목표인 자유주행공간을 검출한 결과이다. 그림에서 빨간색 선은 자유주행공간과 장애물영역의 경계를 나타낸다. 실험결과 제안한 알고리즘은 장애물의 형태나 수에 상관없이 자유주행공간을 검출하고 있음을 보여준다.

그림 16은 자유주행공간 검출에 실패한 경우들로 그림에서 점선의 타원은 검출에 실패한 곳을 나타낸다. 이와 같은 실패의 가장 큰 원인은 대응점탐색에 있다. 본 논문에서 빠른 연산과 텍스처가 없는 영역에서의 잘못된 탐색결과를 피하기 위해 대응점탐색에 사용될 후보를 수직에지가 강한 화소들로 제한한 것이 그 이유이다. 그림 16에서 측면에 위치한 콘크리트 분리대(a, d, f)나 화단(c), 차량들(b)은 배경과의 밝기차가 크지 않아 대응점탐색과정에서 해당 장애물의 정보가 손실된 경우이다. 그리고 잘못된 v-라인과 u-라인 검출결과에 의해 오류가 발생하기도 한다. 그림 16(h)는 잘못된 v-라인 검출에 의해 지평선의 위치가 실제 위치보다 낮게 검출된 경우이고, (d)와 (g)는 u-라인을 검출하는 과정에서 발생한 오류들이다. 그리고 이와 같은 문제들은

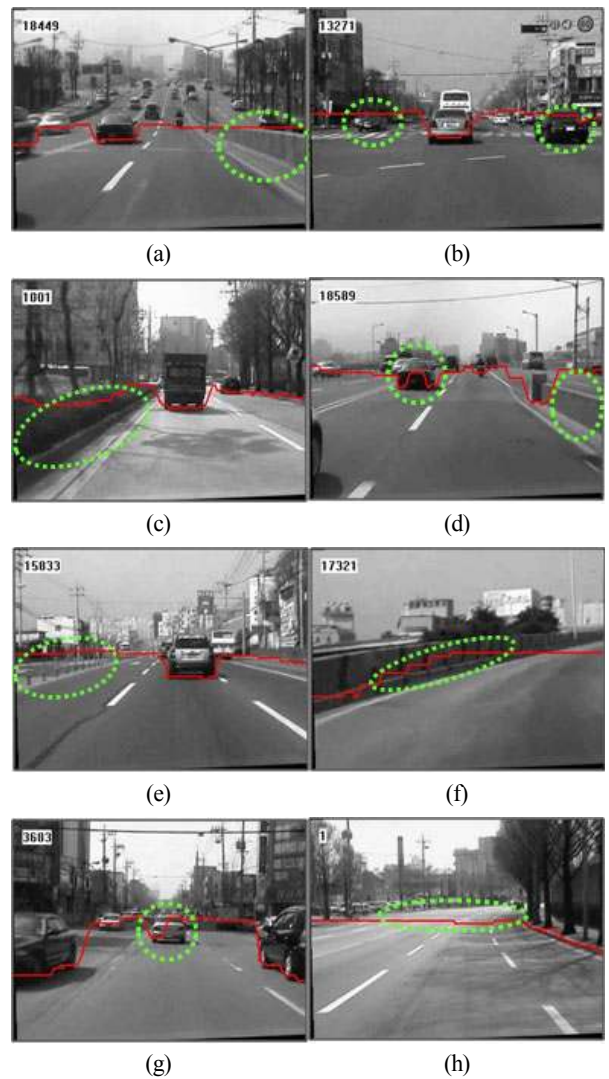


그림 16. 자유주행공간 검출에 실패한 경우들.
Fig. 16. Errors in detection of free space.

복합적으로 나타난다. 그림 16(e)에서 영상의 좌측에는 중앙선 폴대가 설치되어 있다. 하지만 폴대와 배경의 밝기차가 작고, 폴대의 크기가 작아 장애물임에도 불구하고 자유주행공간으로 검출한다.

V. 결론

본 논문에서는 무인자율주행자동차를 위한 스테레오비전 기반의 자유주행공간 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 도로의 기울기 추정과 자유주행공간 검출로 나뉜다. 도로의 기울기 추정은 v-시차영상과 하프변환, 다익스트라 알고리즘을 사용하여 도로의 기울기와 대응되는 v-라인을 검출한다. Labayrade등은 두 직선의 조합으로 노면의 기울기를 정의한다. 이는 다양한 노면의 기울기를 표현하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 5개의 기울기 후보들의 조합을 통해 다양한 기울기를 나타내고, 다익스트라 알고리즘을 이용해 빠르게 노면의 기울기를 추정한다.

자유주행공간 검출은 u-시차영상과 동적계획법을 사용하여 u-시차영상에서 자유주행공간의 경계를 나타내는 u-라인

을 검출한다. 그리고 앞서 검출한 v-라인과 u-라인을 이용하여 자유주행공간을 결정한다. 따라서 장애물 검출을 위한 군집화과정이 필요 없으며, 장애물과 노면의 경계선을 찾는 최적화문제로 모형화되어 장애물의 수, 크기, 형태에 상관없이 자유주행공간을 검출한다. 그리고 펜티엄4 컴퓨터에서 320×240의 흑백영상을 기준으로 초당 14프레임의 빠른 처리속도를 갖는다.

제안한 알고리즘은 다양한 도로영상에서의 실험에서 대응점탐색의 후보를 수직에지성분이 강한 화소로 한정지음으로써 장애물과 배경의 밝기차가 작은 경우에 오류가 발생하고, 장애물의 크기가 작고, 근거리에 위치할 경우 자유주행공간으로 잘못 인식하기도 한다. 하지만 대부분의 도로 교통영상에서 장애물의 수, 크기, 형태에 상관없이 빠르게 자유주행공간을 검출한다.

참고문헌

- [1] K. Y. Lee, J. W. Lee, and N. Houshang, "A stereo matching algorithm based on top-view transformation and dynamic programming for road-vehicle detection," *Int. J. of Control, Automation, and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 221-231, 2009.
- [2] H. Badino, R. Mester, T. Vaudrey, and U. Franke, "Stereo-based free space computation in complex traffic scenarios," *IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, pp. 189-192, 2008.
- [3] N. Suganuma, M. Shimoyama, and N. Fujiwara, "Obstacle detection using virtual disparity image for non-flat road," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 596-601, 2008.
- [4] S. Kubota, T. Nakano, and Y. Okamoto, "A global optimization algorithm for real-time on-board stereo obstacle detection systems," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 7-12, 2007.
- [5] A. Seki and M. Okutomi, "Robust obstacle detection in general road environment based on road extraction and pose estimation," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 437-444, 2006.
- [6] S. Nedeveschi, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol, T. Graf, and R. Schmidt, "High accuracy stereovision approach for obstacle detection on non-planar roads," *IEEE Intelligent Engineering Systems (INES)*, pp. 221-216, 2004.
- [7] R. Labayrade, D. Aubert, and J. P. Tarel, "Real time

obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "V-disparity" representation," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 646-651, 2002.

- [8] C. Caraffi, S. Cattani, and P. Grisleri, "Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision," *IEEE Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 607-618, 2007.
- [9] A. Wedel, U. Franke, H. Badino, and D. Cremers, "B-spline modeling of road surfaces for free space estimation," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 828-833, 2008.
- [10] F. Oniga, S. Nedeveschi, M. M. Meinecke, and T. B. To, "Road surface and obstacle detection based on elevation maps from dense stereo," *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 859-865, 2007.
- [11] M. Bertozzi and A. Broggi, "GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection," *IEEE Trans.on Image Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 62-81, 1998.
- [12] F. S. Hillier, *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill, 2006.
- [13] A. Fusiello, E. Trucco, and A. Verri, "A compact algorithm for rectification of stereo pairs," *Machine Vision and Applications*, vol. 12, pp. 16-22, 2000.



이 기 용

2002년 전남대 산업공학과 졸업. 2004년 동 대학원 석사. 2011년 동 대학원 박사. 관심분야는 지능형안전자동차, 영상처리, 컴퓨터비전.



이 준 응

1984년 전남대 산업공학과 졸업. 1986년 KAIST 산업공학과 석사. 1997년 KAIST 자동차 및 설계공학과 박사. 1986년~2000년 기아자동차연구소 및 현대·기아 연구개발본부 전자개발센터 근무. 2000년~현재 전남대 산업공학과 교수. 관심분야는 지능형안전자동차, 차량자율주행, 컴퓨터비전, 센서퓨전.