

Filtering-Based Method and Hardware Architecture for Drivable Area Detection in Road Environment Including Vegetation

Younghyeon Kim[†] · Jiseok Ha^{††} · Cheol-Ho Choi^{††} · Byungin Moon^{†††}

ABSTRACT

Drivable area detection, one of the main functions of advanced driver assistance systems, means detecting an area where a vehicle can safely drive. The drivable area detection is closely related to the safety of the driver and it requires high accuracy with real-time operation. To satisfy these conditions, V-disparity-based method is widely used to detect a drivable area by calculating the road disparity value in each row of an image. However, the V-disparity-based method can falsely detect a non-road area as a road when the disparity value is not accurate or the disparity value of the object is equal to the disparity value of the road. In a road environment including vegetation, such as a highway and a country road, the vegetation area may be falsely detected as the drivable area because the disparity characteristics of the vegetation are similar to those of the road. Therefore, this paper proposes a drivable area detection method and hardware architecture with a high accuracy in road environments including vegetation areas by reducing the number of false detections caused by V-disparity characteristic. When 289 images provided by KITTI road dataset are used to evaluate the road detection performance of the proposed method, it shows an accuracy of 90.12% and a recall of 97.96%. In addition, when the proposed hardware architecture is implemented on the FPGA platform, it uses 8925 slice registers and 7066 slice LUTs.

Keywords : Road Detection, Vegetation Removal, Disparity, Stereo Vision

초목을 포함한 도로 환경에서 주행 가능 영역 검출을 위한 필터링 기반 방법 및 하드웨어 구조

김 영 현[†] · 하 지 석^{††} · 최 철 호^{††} · 문 병 인^{†††}

요 약

첨단 운전자 보조 시스템(advanced driver assistance system)의 주요 기능 중 하나인 주행 가능 영역 검출은 차량이 안전하게 주행할 수 있는 영역을 검출하는 것을 의미한다. 주행 가능 영역 검출은 운전자의 안전과 밀접한 연관이 있으며 실시간 동작과 높은 정확도 성능을 요구한다. 이러한 조건들을 충족하기 위해, 영상의 각 행에서 도로 시차 값을 계산하여 주행 가능 영역을 검출하는 V-시차 기반 방법이 폭넓게 사용된다. 그러나 V-시차 기반 방법은 시차 값이 정확하지 않거나 객체의 시차 값이 도로의 시차 값과 동일한 경우, 도로가 아닌 영역을 도로로 오검출할 수 있다. 또한, 고속도로 및 시골길과 같이, 초목을 포함한 도로 환경에서 초목의 시차는 도로의 시차 특성과 매우 유사하기 때문에 초목 영역이 주행 가능 영역으로 오검출될 수 있다. 이에 본 논문에서는 V-시차의 특성으로 인한 오검출 횟수를 감소시킴으로써 초목 영역을 포함한 도로 환경에서 높은 정확도를 갖는 주행 가능 영역 검출 방법 및 하드웨어 구조를 제안한다. 제안하는 방법의 성능을 평가하기 위해 KITTI road dataset의 289장 영상을 사용하였을 때, 제안하는 방법은 90.12%의 정확도와 97.96%의 재현율을 보인다. 또한, 제안하는 하드웨어 구조를 FPGA 플랫폼에 구현하였을 때, 제안하는 하드웨어 구조는 8925개의 slice registers와 7066개의 slice LUTs를 사용한다.

키워드 : 도로 검출, 초목 제거, 시차, 스테레오 비전

※ 이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B01015379)의 연구결과임.

※ 본 연구는 IDEC에서 EDA Tool을 지원받아 수행하였음.

※ 이 논문은 2021년 한국정보처리학회 춘계학술발표대회의 우수논문으로 "초목을 포함한 도로 환경에서의 필터링 기반 주행 가능 영역 검출 방법 및 하드웨어 구조"의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임.

† 준 회 원 : 경북대학교 전자전기공학부 박사과정

†† 비 회 원 : 경북대학교 전자전기공학부 석사과정

††† 종신회원 : 경북대학교 전자공학부/대학원 전자전기공학부 교수

Manuscript Received : June 25, 2021

First Revision : August 27, 2021

Accepted : August 31, 2021

* Corresponding Author : Byungin Moon(bihmoon@knu.ac.kr)

1. 서 론

최근 자율주행 시장의 급격한 성장에 따라 운전자에게 편의를 제공하기 위한 기술인 첨단 운전자 보조 시스템(advanced driver assistance system)과 관련된 연구가 진행되고 있다[1]. 첨단 운전자 보조 시스템 기술에는 적응형 순항 제어(adaptive cruise control), 전방 충돌 방지 보조(forward collision avoidance assist), 차로 유지 보조(lane following assist) 등 다양한 기술이 존재하며, 이러한 기술

들을 구현하기 위해서는 차량이 주행 가능한 영역을 실시간으로 정확하게 인지하는 것이 중요하다[2]. 또한, 주행 가능 영역의 검출을 위해서는 정확한 거리 정보의 획득이 필수적이며, 이를 위해 다양한 센서 기술이 사용된다[2]. 거리 정보 획득을 위해 주로 활용되는 센서는 카메라(camera), 라이다(lidar), 레이더(radar) 센서로 분류될 수 있다. 이 중에서 카메라는 가격이 저렴하다는 장점뿐만 아니라 카메라 센서를 통해 생성된 데이터의 색상 정보를 통해 거리 정보 획득은 물론 객체 인식 또한 가능하다는 장점이 있다. 이에 카메라 센서를 활용하여 실시간으로 주행 가능 영역을 검출하기 위해 V-시차(V-disparity) 또는 U-V 시차(U-V disparity) 기반 방법을 하드웨어로 구현하기 위한 연구가 진행되고 있다[3, 4].

V-시차 기반 도로 검출 방법은 도로를 표현하는 직선을 검출하고, 검출된 직선에서 도로의 시차를 탐색하여 주행 가능 영역을 검출한다. V-시차 기반 방법에서는 주로 허프 변환(Hough transform) 또는 RANSAC(RANdom SAmple Consensus)을 활용하여 직선을 검출한다. V-시차 기반 방법의 주행 가능 영역 검출 성능은 직선 검출 알고리즘 및 도로 위에 존재하는 객체에 의해 큰 영향을 받는다[5, 6]. 또한, 도로 주변에 초목(vegetation)이 존재할 경우, 초목의 시차는 도로의 시차와 특성이 유사하므로 초목 영역이 주행 가능 영역으로 오검출될 수 있다. 이에 초목을 포함한 환경에서의 주행 가능 영역 검출 성능을 향상시키기 위해 Sobel 필터를 적용한 V-시차 기반 방법이 제안되었다[7]. 이는 RGB 색 공간을 CIELAB 색 공간으로 변환하여 초목을 검출하고, Sobel 필터를 통해 객체 성분을 제거한 뒤 V-시차를 계산하여 주행 가능 영역을 검출한다. 그러나, Sobel 필터를 적용한 V-시차 영상에서 검출된 도로의 시차 값이 정확하지 않거나, 객체의 시차 값이 도로의 시차 값과 동일할 경우 객체 영역의 일부를 도로로 오인할 수 있다. 이에 본 논문에서는 이러한 문제로 인해 발생하는 오검출을 감소시킴으로써 초목을 포함한 도로 환경에서 높은 정확도를 갖는 필터링 기반 방법 및 하드웨어 구조를 제안한다. 본 논문은 학술대회 논문[8]에서 제시된 연구 내용을 확장하였으며, 주행 가능 영역 검출을 위한 과정 및 실험 결과 내용을 구체적으로 명시하였다.

2. 제안하는 방법

제안하는 방법은 Fig. 1B와 같은 역 래스터 스캔(inverse raster scan) 방법을 기반으로 카메라를 통해 입력되는 시차 및 색상 정보를 즉각적으로 처리하여 도로 환경 영상에서의 주행 가능 영역을 검출한다. Fig. 1A와 같이, 일반적인 래스터 스캔 방법은 카메라의 클럭(clock) 입력에 따라 좌 상단 좌표부터 우 하단 좌표까지 순차적으로 입력되는 방법을 의미한다[9]. 일반적으로 주행 가능 영역은 영상의 하단부에 위치하기 때문에 주행 가능 영역의 좌표를 효율적으로 검출하기 위해 본 논문에서는 Fig. 1B와 같은 역 래스터 스캔 방법을 활용한다. 역 래스터 스캔 방법은 래스터 스캔 방법 기반

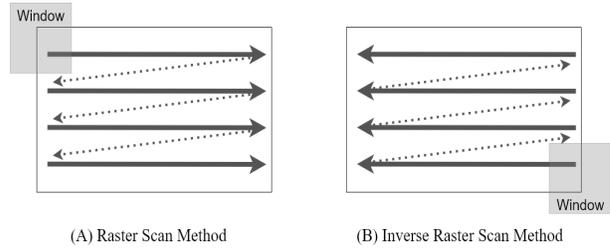


Fig. 1. Raster Scan and Inverse Raster Scan Method

의 카메라를 180° 회전시킴으로써 간단하게 구현할 수 있다.

일반적으로 도로의 시차 값은 시차 영상의 세로축인 v 축 좌표에 따라 증가하며, 객체의 시차 값은 v 축 좌표가 증가하더라도 특정한 값을 갖는 경향성을 보인다[7]. 이러한 특성에 기반하여 특정 시차를 기준으로 상·하단에 위치한 시차 값의 차이를 계산하여 해당 좌표가 도로 영역 혹은 객체 영역에 속해있는지를 파악할 수 있다. 도로 영역의 경우 시차의 차이 값이 크며, 반대로 객체 영역의 경우 시차의 차이 값이 작다. 이러한 경향을 파악하여 시차 영상 내 특정 좌표가 도로 영역 혹은 객체 영역에 포함되는지 판단할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 특성을 활용한 필터링 연산을 수행하여 주행 가능 영역을 검출하는 방법을 제안한다.

제안하는 방법은 시차 값의 경향성을 분석하기 위해 수직 윈도우(window)를 활용하며, 윈도우 내 중심 픽셀을 기준으로 상·하단으로 대칭인 두 픽셀의 차이 값을 계산한다. 연산을 통해 산출된 차이 값은 전달 함수(transfer function)를 통해 변환 및 누적되며, 이를 통해 도로 여부를 판단한다. 따라서 제안하는 방법은 V-시차 혹은 U-V 시차 방법과 같은 추가 연산 없이 필터링 연산만으로 도로 영역을 검출할 수 있다.

제안하는 방법을 활용하여 영상 내 주행 가능 영역을 검출하기 위한 순서도는 Fig. 2와 같다. 제안하는 방법은 Vertical Symmetric Difference Filter (VSDF) 연산, 초목 검출(Vegetation Detection), 병합(Merge), 잡음 제거(Noise Removal)와 경계 좌표 탐색(Boundary Coordinates Detection) 연산으로 구성된다. VSDF 연산은 본 논문에서 새롭게 제안하는 연산으로서, 시차 영상을 기반으로 객체와 도로가 구분된 VSD image (VSDI)를 산출한다. 초목 검출 연산은 RGB 색 공간을 갖는 원본 영상을 Hue, Saturation, Value (HSV) 색 공간으로 변환한 후 초목 영역을 검출한다. 병합 연산은 HSV 색 공간에서 검출한 초목 영상과 VSDI를 병합한다. 잡음 제거 연산은 병합된 영상에서 시차 영상의 오류와 초목 검출 영상에서 발생할 수 있는 잡음 성분을 1차원 가로형 및 세로형 메디안(median) 필터 연산을 통해 제거한다. 경계 좌표 탐색 연산은 병합 및 잡음이 제거된 영상의 각 열(column) 좌표에서 VSDI 값이 사전에 설정된 임계 값(threshold value)을 처음으로 초과하는 행 좌표를 탐색한다. 또한, 경계 좌표 탐색 연산을 통해 출력되는 v 축 좌표가 잡음으로 인해 오검출되는 경우가 있으므로 1차원 메디안 필터를 통해 이를 보간한다.

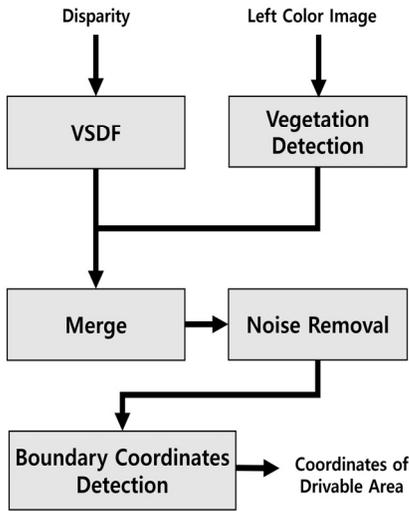


Fig. 2. Flowchart of the Proposed Drivable Area Detection Method

VSDf의 결과 값인 VSDI는 Equation (1)을 통해 계산된다.

$$VSDI = \sum_{i=-(w_h-1)/2}^{(w_h-1)/2} \sum_{j=1}^{(w_v-1)/2} \exp\left(-\frac{1}{2}(d(u+i,v+j) - d(u+i,v-j))^2\right) \quad (1)$$

Equation (1)에서, $d(u,v)$, w_h , w_v 는 각각 윈도우 내 중심 좌표의 시차 값, 윈도우의 가로 및 세로 방향 크기를 의미한다. Equation (1)과 같이, 수직 윈도우에서 참조하는 두 값은 서로 대칭이기 때문에, 시차가 점진적으로 증가하는 도로 영역에서는 대칭되는 두 픽셀의 좌표 거리가 멀어질수록 시차의 차이가 더욱 크다. 반면에, 시차가 일정한 객체 영역에서는 두 시차 값의 차이가 크지 않다. 이와 같이 대칭되는 두 픽셀을 참조하기 때문에 시차가 갖는 경향성을 더 크게 반영할 수 있다. 수직 윈도우 연산 이후, 산출되는 값은 Equation (1)에서 지수 함수 형태의 전달 함수를 통해 변환된다. 변환된 값은 두 시차의 차이가 0에 수렴할수록 큰 값을 가지는 특징이 있다.

도로 영역의 일부가 객체 영역으로 오검출될 경우, 주행 가능 영역 검출 성능이 크게 하락할 수 있다. 따라서, 도로 검출을 위해서는 도로와 객체 영역을 명확하게 구분하여야 한다. 기존의 Sobel 또는 Prewitt 필터[10]에서 활용하는 1차원 미분 필터는 영상에서 경계가 명확한 지점을 검출하기에 적합한 필터이므로 입력되는 시차 영상의 잡음 성분에게 큰 영향을 받는다. 그러나 본 논문에서 제안하는 VSDf는 윈도우 내 중심 시차를 기준으로 상·하단으로 대칭인 두 시차의 차이를 각각 하나의 연산 요소로 반영하고, 이를 전달 함수를 통해 변환 및 누적하므로 시차 영상에서 도로 영역에 존재하는 잡음에 의한 영향을 최소화할 수 있으며 도로와 객체의 경향을 명확하게 구분할 수 있다.

Fig. 3A, 3B와 3C는 각각 좌 RGB 컬러 영상, 시차 영상, VSDf 연산을 통해 출력되는 결과 영상을 나타낸다. Fig. 3C

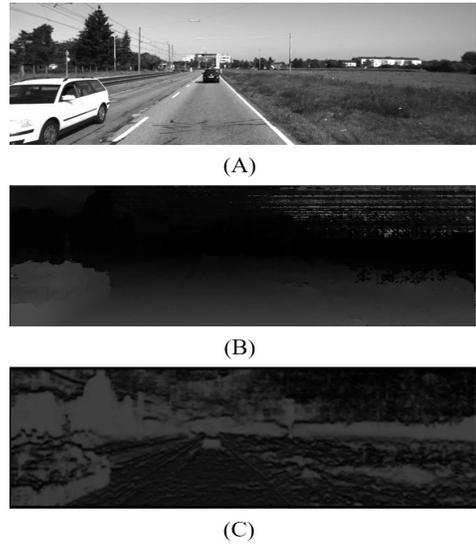


Fig. 3. Process of the VSDf Calculation; (A) Left RGB Image, (B) Disparity Map, (C) VSDf Result Image

와 같이, Fig. 3B의 시차 영상에서 도로와 객체 영역이 구분된 것을 확인할 수 있다.

초목 영역은 주행 가능한 도로 영역과 유사하게 시차 영상의 행이 증가함에 따라 시차 값이 증가하는 경향이 있다. 이로 인해 주행 가능한 도로 영역을 검출하는 과정에서 초목 영역이 주행 가능 영역으로 오검출될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 초목 영역이 주행 가능 영역으로 오검출되는 경우를 감소시키기 위해 HSV 색 공간을 토대로 초목을 검출한다. 초목 검출을 위한 hue, saturation, value의 범위를 산정하기 위해, KITTI vision benchmark suite에서 제공하는 시맨틱 분할(semantic segmentation) ground truth (GT)[11]를 참조하여 임의의 영상에 대한 초목에 해당하는 픽셀의 hue, saturation, value의 히스토그램 분포를 추출하였다. 또한, 도로 영역이 초목 영역으로 오검출되는 것을 방지하기 위해 GT에서 도로 영역에 해당하는 픽셀의 hue, saturation, value의 히스토그램 분포를 추출하였다. 추출된 히스토그램 분포의 차이를 계산하여, 도로 영역보다 초목 영역에서 더 큰 값을 갖는 hue, saturation, value의 범위를 추출하였다. Equation (2)는 선정된 hue, saturation, value의 범위를 보여주며, 연산을 통해 초목 검출과 동시에 VSDf 결과와 병합된다.

$$VSDI_{merged} = \begin{cases} VSDI_{max} & \text{if } 28 < \text{hue} < 162, \\ & 38 < \text{saturation} < 128, \\ & 12 < \text{value} \\ VSDI & \text{, otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Equation (2)에서, $VSDI_{merged}$, $VSDI_{max}$, $VSDI$ 는 각각 VSDf와 초목 검출의 결과가 병합된 값, $VSDI_{max}$ 가 가질 수 있는 최댓값, 현재 좌표에서의 $VSDI$ 값을 나타내며, hue, saturation, value는 각각 HSV 색 공간으로 변환된 현재 좌표의 색상, 채도, 명도 값을 나타낸다.

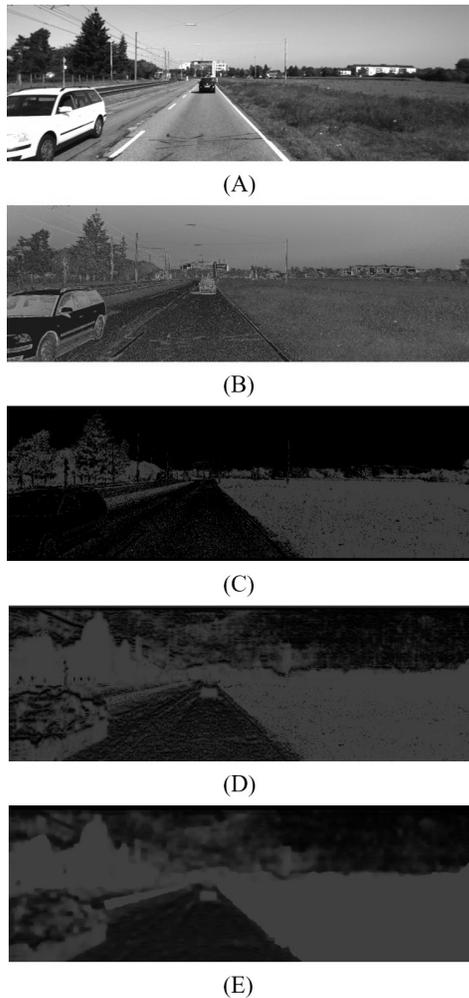


Fig. 4. Process of the Vegetation Detection and Merge; (A) Left RGB Image, (B) Converted HSV Image, (C) Vegetation Detection, (D) Merged Image, (E) Refined Result of Merged Image by Median Filter

Fig. 4는 HSV 색 공간을 활용한 초목 검출 결과 및 VSDI와 병합된 영상을 보여준다. Fig. 4A, 4B, 4C, 4D 및 4E는 각각 좌 RGB 컬러 영상, HSV 컬러 영상, HSV 컬러 영상을 통한 초목 검출 결과, VSDI와 초목 검출 결과를 병합한 영상, 메디안 필터를 통해 잡음이 제거된 영상을 보여준다. Fig. 4B 및 4C에서 볼 수 있듯이, HSV 색 공간에서 초목 영역을 정확하게 검출할 수 있다. Fig. 4D는 HSV를 통해 검출된 초목 영역과 VSDI 영상을 병합한 결과를 보여준다. Fig. 4D에서 보이듯이, 영상의 객체 영역 및 초목 영역에서 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. VSDF 연산 및 초목 검출 연산은 필터 연산 및 픽셀 단위 연산의 특성상 지역적 연산만을 수행할 수 있으므로, 입력되는 시차 값이 정확하지 않거나 도로 영역 내 일부 픽셀의 색상이 초목과 유사할 경우에는 도로 영역에 국부적인 잡음이 발생할 수 있다. 이로 인한 오검출을 최소화하기 위해 본 논문에서는 메디안 필터를 활용하여 잡음 성분을 최소화하였으며, 그 결과는 Fig. 4E와 같다.

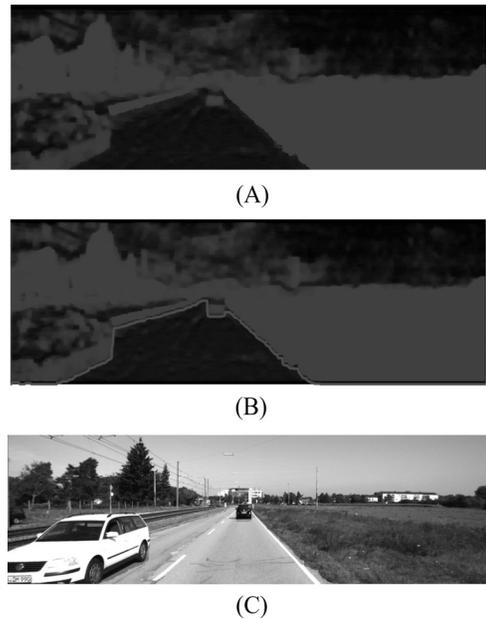


Fig. 5. Process of Road Boundary Coordinates Detection; (A) Refined Result of Merged Image by Median Filter, (B) Result of the Proposed Road Boundary Coordinates Detection Method, (C) Result of the Proposed Drivable Area Detection Method

도로 경계 좌표 탐색 연산은 픽셀 단위로 각각 초목 검출, VSDF 연산을 수행 및 병합하고, 잡음을 제거한 후 각 열의 좌표에서 $VSDI_{merged}$ 가 처음으로 임계 값을 초과하는 행 좌표를 탐색한다. 도로 좌표의 검출이 완료되면, 검출된 좌표에서 필터 연산 및 초목 검출 연산으로 인해 발생하는 오검출을 최소화하기 위해 1차원 메디안 필터를 적용하여 오검출된 좌표를 보간한다. 보간이 완료되면 메디안 필터의 결과를 출력한다. Fig. 5A, 5B 및 5C는 각각 잡음이 제거된 $VSDI_{merged}$ 영상, 도로 경계 좌표 탐색 결과와 제안하는 주행 가능 영역 검출 결과를 보여준다. Fig. 5C와 같이, 영상에서 초목 영역이 주행 가능 영역으로 검출되지 않았으며, 객체와 도로의 경계부 좌표가 이상 없이 검출된 것을 확인할 수 있다.

3. 제안하는 하드웨어 구조

제안하는 방법의 전체 하드웨어 구조는 Fig. 6과 같다. 제안하는 하드웨어 구조는 Address Generator, Window Generator, RGB to HSV Converter, VSDF, Vertical Median Filter (VMF), Horizontal Median Filter (HMF), Road Segmentation Module (RSM), 후처리를 위한 HMF로 구성된다. Address Generator는 연산이 수행되는 시점의 좌표 정보를 생성한다. Window Generator는 VSDF에 사용될 윈도우를 구성한다. RGB to HSV Converter는 현재 좌표의 RGB 픽셀을 HSV 색 공간으로 변환한다. VSDF는 윈도우를 입력받아 VSDI를 계산한다. 또한, 변환된 HSV 값을 통해 초목을 검출하고, VSDI와 병합하여 $VSDI_{merged}$ 를 출

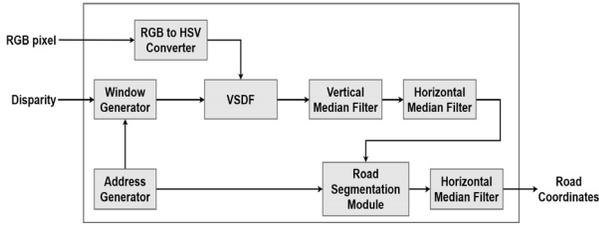


Fig. 6. Overall Hardware Architecture of the Proposed Method

력한다. VMF 및 HMF는 주행 가능 영역에서의 잡음을 제거하기 위해 세로축 및 가로축 방향에 대해 각각 1차원 메디안 필터 연산을 수행한다. RSM은 메디안 필터를 통해 잡음이 제거된 $VSDI_{merged}$ 를 임계 값과 비교하여 윈도우의 중심 좌표가 도로인지 아닌지 판단한다. 해당 좌표가 도로의 경계 좌표로 판단될 경우, 해당 좌표의 행 좌표를 저장한다. 이후, 한 프레임의 영상이 모두 입력되고 나면 각 열에 저장된 행 좌표를 출력한다. 후처리를 위한 HMF는 출력되는 행 좌표 값을 보간하여 최종 결과 값인 도로 경계부에 해당하는 행 좌표를 출력한다.

Fig. 7은 VSDF의 하드웨어 구조를 보여준다. Window Generator에 의해 구성된 수직 윈도우를 입력받아 중심 픽셀 $d(u,v)$ 를 기준으로 서로 대칭인 두 픽셀의 차를 각각 계산한다. 서로 대칭인 두 픽셀의 차이 값을 각각 계산한 후, look-up table (LUT)을 통해 Equation (1)의 지수함수 결과 값을 출력한다. 지수함수의 결과 값은 6 비트 고정 소수점 (fixed-point) 포맷으로 설정하였다. LUT의 입력 및 출력 값은 Table 1과 같다. LUT를 통해 모든 차이 값이 지수함수 결과 값으로 변환되면, Adder Tree를 통해 모두 더해진다. 각 열의 Adder Tree 결과는 윈도우의 행 크기만큼 모두 합산된다. RGB to HSV Converter를 통해 변환된 hue, saturation, value 값은 초목 검출을 위한 범위에 해당되는지 각각 비교되며, 현재 좌표가 초목 영역에 해당될 경우 $VSDI_{merged}$ 는 $VSDI$ 가 가질 수 있는 최댓값으로, 그렇지 않을 경우 $VSDI_{merged}$ 는 현재 연산이 완료된 $VSDI$ 로 출력된다.

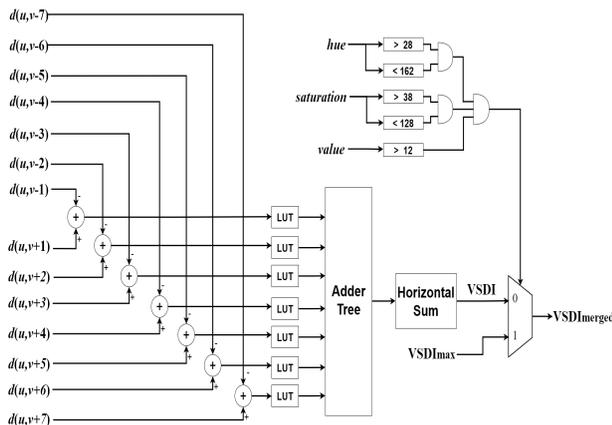


Fig. 7. Hardware Architecture of the Proposed VSDF

Table 1. Input and Output Values of LUT

Input		Output	
-2 ₍₁₀₎	11111110 ₍₂₎	0.015625 ₍₁₀₎	0000001 ₍₂₎
-1 ₍₁₀₎	11111111 ₍₂₎	0.609375 ₍₁₀₎	0100111 ₍₂₎
0 ₍₁₀₎	00000000 ₍₂₎	1.000000 ₍₁₀₎	1000000 ₍₂₎
1 ₍₁₀₎	00000001 ₍₂₎	0.609375 ₍₁₀₎	0100111 ₍₂₎
2 ₍₁₀₎	00000010 ₍₂₎	0.015625 ₍₁₀₎	0000001 ₍₂₎
others		0.000000 ₍₁₀₎	0000000 ₍₂₎

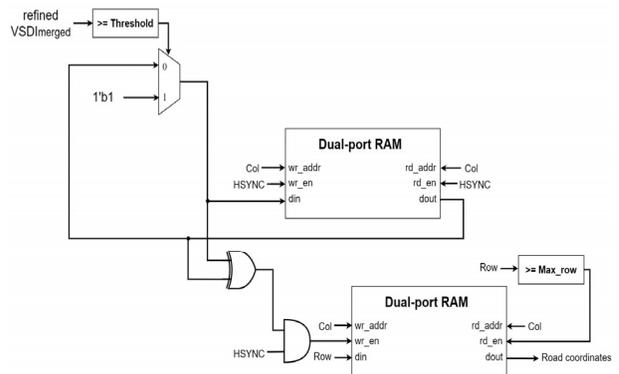


Fig. 8. Hardware Architecture of the Proposed Road Segmentation Module

Fig. 8은 RSM의 하드웨어 구조를 보여준다. Fig. 8과 같이, RSM은 두 개의 dual-port RAM을 사용한다. 상단의 dual-port RAM은 도로 상단 좌표 탐색을 위해 활용되며, 하단의 dual-port RAM은 탐색된 도로 상단 좌표를 저장하기 위해 사용된다. VMF 및 HMF를 통해 잡음 성분이 제거된 refined $VSDI_{merged}$, 영상의 행 좌표 및 열 좌표는 RSM로 입력된다. 각 열에서 refined $VSDI_{merged}$ 가 처음으로 기존 설정한 임계 값을 초과하는 행 좌표를 도로의 상단 경계 좌표로 인식하고, 이 경우에 상단의 dual-port RAM에 1 bit의 high 신호가 저장된다. 또한, 하단의 dual-port RAM의 쓰기(write) 신호가 활성화되어 해당 순간의 행 좌표가 하단의 dual-port RAM에 저장된다. 이후 임계 값보다 큰 refined $VSDI_{merged}$ 값이 재입력되더라도 Fig. 8에서의 Multiplexer, XOR 및 AND 게이트에 의해 하단 dual-port RAM의 쓰기 신호가 활성화되지 않는다. 이와 같은 구조를 통해 영상 내 모든 열에 해당하는 도로 상단 경계부 좌표를 하단 dual-port RAM에 저장하고, v 축 좌표가 영상의 행 길이에 도달하면 최종적으로 저장된 도로 상단부 좌표를 출력한다.

4. 실험 결과

제안하는 방법의 주행 가능 영역 검출 성능을 평가하기 위해 제안하는 방법의 재현율(recall) 및 정확도(accuracy)를 측정하였으며 종래 방법[7]과 비교하였다. 재현율 및 정확도는 Equation (3, 4)를 통해 계산된다.

$$\text{재현율 (Recall)} = \frac{tp}{tp + fn} \quad (3)$$

$$\text{정확도 (Accuracy)} = \frac{tp + tn}{tp + tn + fp + fn} \quad (4)$$

Equation (3, 4)에서 tp , tn , fp , fn 는 각각 참 양성(true positive), 참 음성(true negative), 거짓 양성(false positive), 거짓 음성(false negative)을 나타낸다. 본 논문에서 재현율과 정확도를 평가 지표로 사용한 이유는 도로 환경에서 차량이 주행 가능한 영역을 검출한 비율 산출과 도로 및 도로가 아닌 영역을 포함한 모든 영역에서의 주행 가능 영역 검출 정확도를 동시에 확인하기 위함이다. 재현율은 Equation (3)와 같이 참 양성과 거짓 음성을 기준으로 산출된 결과로써, 실제 주행 가능 영역에 대해 정확하게 검출된 비율만을 의미하며 정밀도(precision)와 트레이드오프(trade-off) 관계를 갖는다[12]. 반면에, 정확도는 Equation (4)와 같이 정확하게 검출된 모든 경우의 수와 오검출된 모든 경우의 수를 합산하여 계산되며, 이를 통해 오차율(error rate)을 계산할 수 있다[13]. 따라서, 정확도는 주행 가능 영역 및 초목 영역과 같은 주행 불가능 영역을 정확하게 구분하여 검출한 비율을 의미한다.

제안하는 주행 가능 영역 검출 성능을 평가 및 비교하기 위해 MATLAB R2021a를 통해 제안하는 방법을 구현 및 실험하였다. 또한, 주행 가능 영역 검출 성능 평가를 위해KITTI vision benchmark suite에서 제공하는 289장의 도로 영상 [14]을 활용하였다. 제안하는 방법에서의 VSDF, VMF 및 HMF의 윈도우 크기는 각각 5×15 , 1×15 , 15×1 로 설정하였고, 정확도 향상을 위해 후처리로 사용한 HMF의 윈도우의 크기는 23×1 로 설정하였다. Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 289장의 영상에 대해 제안하는 방법의 재현율 및 정확도를 보여준다. Fig. 9 및 Fig. 10과 같이, 제안하는 방법의 재현율은 최소 74.48%에서 최대 100%의 범위를 가지며, 정확도는 최소 70.26%에서 최대 99.02%의 범위를 갖는다. Table 2는 289장의 도로 영상에 대해 제안하는 방법과 종래 방법의 평균 검출 성능을 보여준다. V-시차 기반 방법[7]과 비교하였을 때, 제안하는 방법의 재현율은 0.23%p 감소하였으나, 정확도는 4.46%p 증가하였다. 제안하는 방법의 재현율이 종래 방법에 비해 크게 감소하지 않았으므로 제안하는 방법이 주행 가능 영역에 대해 정확하게 검출한 비율은 종래 방법과 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 방법의 정확도가 종래 방법에 비해 크게 향상되었으므로, 주행 가능 영역과 주행 불가능 영역을 포함한 모든 경우에서 제안하는 방법의 검출 성능은 종래 방법보다 우수하다는 것을 입증한다.

Table 3은 Table 2에서 사용한 289장의 도로 영상 중 초목 영역이 존재하는 95장의 영상에 대해 제안하는 방법과 종래 방법들의 성능을 보여준다. 제안하는 방법은 V-시차 기반 방법[7] 대비 재현율이 1.05%p 감소하였지만, 정확도가 7.25%p 향상되었다. 따라서, 기존 도로 검출 성능은 유지하

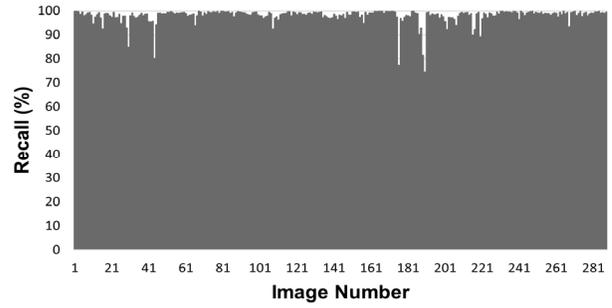


Fig. 9. Recall of the Proposed Method with 289 Images

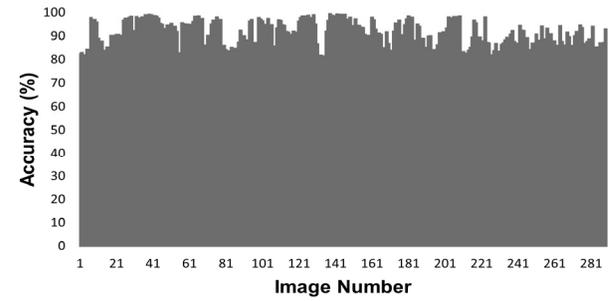


Fig. 10. Accuracy of the Proposed Method with 289 Images

Table 2. Comparison of Detection Performance using 289 Images between the Conventional Method and the Proposed Method

Method	Accuracy (%)	Recall (%)
Conventional [7]	85.66	98.19
Proposed	90.12	97.96

Table 3. Comparison of Detection Performance using 95 Images between the Conventional Methods and the Proposed Method

Method	Accuracy (%)	Recall (%)
Lee. et al [7]	87.90	98.10
Kim. et al [8]	93.08	-
Proposed	95.15	97.05

면서 주행 불가능 영역에 대한 오검출 횟수가 줄었음을 보여준다. 또한, 제안하는 방법은 학술대회 논문[8] 대비 정확도가 2.07%p 향상되어 오검출 횟수가 감소하였음을 보여준다. 따라서, 제안하는 방법의 재현율이 다소 감소하였지만, 정확도가 종래 방법 대비 크게 향상되었으므로 제안하는 방법은 종래 방법보다 높은 주행 가능 영역 검출 성능을 갖는다.

제안하는 방법의 주행 가능 영역 검출 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11A는 초목 검출을 수행하지 않고 VSDF 방법만을 활용하여 주행 가능 영역을 검출한 결과를 보여주고, Fig. 11B는 초목 검출을 포함한 제안하는 방법의 주행 가능 영역 검출 결과를 보여준다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 초목 검출 연산이 포함될 경우, VSDF 방법만 활용하였을 때보다 초목이 포함된 도로 환경에서 주행 가능 영역 검출 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

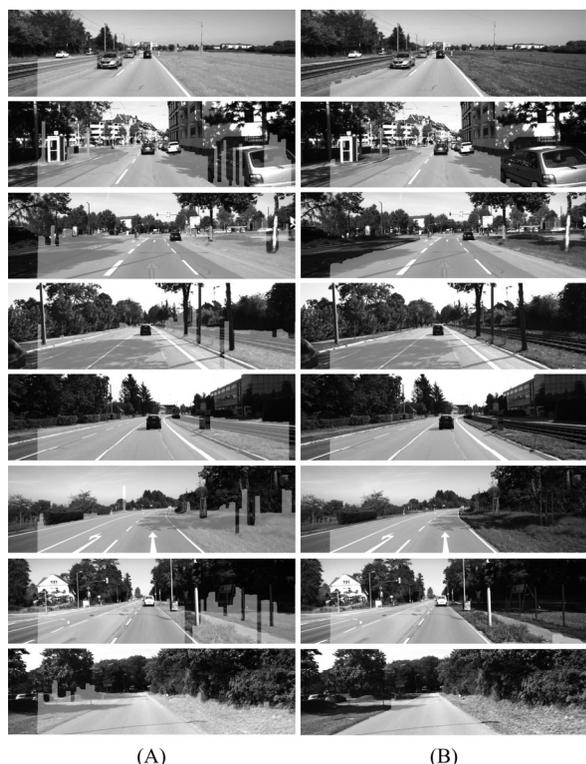


Fig. 11. Results of the Proposed Method; (A) Proposed Method without Vegetation Removal, (B) Proposed Method

제안하는 하드웨어 구조의 성능 분석을 위해 Xilinx사의 Vivado 2020.2 버전에서 Virtex-7 XC7V2000T-FLG1925-2 FPGA를 타겟으로 하드웨어 구조를 합성하였다. 시스템 클럭 주파수는 픽셀 클럭과 동일한 37.125 MHz이며, 영상의 해상도는 1280×720로 설정하였다. VSDF, VMF 및 HMF의 윈도우 크기는 각각 5×15, 1×15, 15×1이며, 보간을 위해 사용한 HMF의 크기는 23×1이다. Table 4는 V-시차 기반 방법[7]과 제안하는 방법의 하드웨어 자원 사용량을 비교한 결과를 보여준다. 제안하는 하드웨어 구조는 종래 방법 대비 각각 12.33%, 50.14% 감소한 slice registers와 slice LUTs를 사용한다. 합성 결과, 소모 전력은 0.72 W이며, setup time 및 hold time에서 worst slack은 각각 7.22 ns, 0.08 ns이다. 제안하는 하드웨어의 최대 동작 주파수는 50.67 MHz이며, 카메라 주파수인 37.125 MHz에서 제안하는 하드웨어는 최대 40.28 fps로 동작할 수 있으므로 실시간 처리가 가능하다.

Table 4. Comparison of Hardware Resource Usage between the Conventional Method and the Proposed Method

	Conventional [7]		Proposed	
	Utilization	Available	Utilization	Available
Slice Registers	10180 (0.42 %)	2443200	8925 (0.37 %)	2443200
Slice LUTs	14173 (1.16 %)	1221600	7066 (0.58 %)	1221600

5. 결 론

본 논문에서는 초목을 포함한 도로 환경에서 초목 영역을 효율적으로 제거함으로써 높은 정확도를 갖는 실시간 주행 가능 영역 검출 방법 및 하드웨어 구조를 제안하였다. 제안하는 방법은 일반 도로 영상에서 V-시차 기반 방법에 비해 4.46 %p 향상된 정확도를 갖는다. 초목 영역이 포함된 도로 영상을 추출하여 비교하였을 때, 제안하는 방법은 V-시차 기반 방법 대비 7.25 %p 향상된 정확도를 갖는다. 또한, 제안하는 방법을 FPGA 플랫폼에 구현하였을 때, 제안하는 하드웨어 구조는 V-시차 기반 방법 대비 각각 12.33%, 50.14% 감소한 slice registers와 slice LUTs를 사용한다. 따라서, 제안하는 방법 및 하드웨어 구조는 도로 환경에서 주행 가능 영역을 검출하기 위한 저비용 및 정확한 데이터를 요구하는 다양한 임베디드 시스템에 활용될 수 있다.

References

- [1] C. Nocera, G. Papotto, A. Cavarra, E. Ragonese, and G. Palmisano, "A 13.5-dBm 1-V power amplifier for W-Band automotive radar application in 28-nm FD-SOI CMOS technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.69, No.3, pp.1654-1660, 2021.
- [2] E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo, and K. Takeda, "A survey of autonomous driving: Common practices and emerging technology," *IEEE Access*, Vol.8, pp.58443-58469, 2020.
- [3] I. Benacer, A. Hamissi, and A. Khouas, "Hardware design and FPGA implementation for road plane extraction based on V-disparity approach," in *Proceeding of 2015 IEEE International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS)*, Lisbon, pp.2053-2056, 2015.
- [4] M. Grinberg and B. Ruf, "UAV use case: Real-time obstacle avoidance system for unmanned aerial vehicles based on stereo vision," *Towards Ubiquitous Low-power Image Processing Platforms*, Cham, Springer, pp.139-149, 2021.
- [5] J. K. Suhr and H. G. Jung, "Enhancement of uv-disparity-based obstacle detection in urban environments," *KSAE 2011 Annual Conference*, pp.1293-1298, 2011.
- [6] Z. Hu and K. Uchimura, "U-V-disparity: An efficient algorithm for stereovision based scene analysis," *IEEE Proceedings Intelligent Vehicles Symposium*, pp.48-54, 2005.
- [7] S. Lee, J. Hyun, Y. S. Kwon, J. H. Shim, and B. Moon, "Vision-sensor-based drivable area detection technique for environments with changes in road elevation and vegetation," *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol.28, No.2, pp.94-100, 2019.
- [8] Y. Kim, J. Ha, C.-H. Choi, and B. Moon, "A method and hardware architecture of drivable area detection based on filtering in road environment including vegetation," *The KIPS Spring Conference 2021*, pp.536-539, 2021.

[9] J. Zhang, S. Sclaroff, Z. Lin, X. Shen, B. Price, and R. Mech, "Minimum barrier salient object detection at 80 FPS," in *Proceeding of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp.1404-1412, 2015.

[10] P. Sharma, G. Singh, and A. Kaur, "Different techniques of edge detection in digital image processing," *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol.3, No.3, pp.458-461, 2013.

[11] H. Alhaija, S. Mustikovela, L. Mescheder, A. Geiger, and C. Rother, "Augmented reality meets computer vision: Efficient data generation for urban driving scenes," *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol.126, pp.961-972, 2018.

[12] S. Alvares, "An exact analytical relation among recall, precision, and classification accuracy in information retrieval," Boston College, Boston Technical Report BCCS-02-01, pp. 1-22, 2002.

[13] M. Junker, R. Hoch, and A. Dengel, "On the evaluation of document analysis components by recall, precision, and accuracy," in *Proceeding of the Fifth International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR '99* (Cat. No.PR00318), pp.713-716, 1999.

[14] J. Fritsch, T. Kühnl, and A. Geiger, "A new performance measure and evaluation benchmark for road detection algorithms," in *Proceeding of 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC)*, pp.1693-1700, 2013.



김영현

<https://orcid.org/0000-0002-6004-9960>
 e-mail : young1993@knu.ac.kr
 2019년 동의대학교 메카트로닉스공학과 (학사)
 2021년 경북대학교 모바일통신공학과 (석사)

2021년~현재 경북대학교 전자전기공학부 박사과정
 관심분야: SoC, 디지털 VLSI, 컴퓨터 비전



하지석

<https://orcid.org/0000-0002-3178-0359>
 e-mail : jsh02016@knu.ac.kr
 2021년 금오공과대학교 전자공학부(학사)
 2021년~현재 경북대학교
 전자전기공학부 석사과정
 관심분야: SoC, 디지털 VLSI, 컴퓨터 비전



최철호

<https://orcid.org/0000-0002-2836-395X>
 e-mail : qwe0725@knu.ac.kr
 2020년 영남대학교 전자공학과(학사)
 2020년~현재 경북대학교
 전자전기공학부 석사과정
 관심분야: SoC, 디지털 VLSI, 컴퓨터 비전



문병인

<https://orcid.org/0000-0002-8102-4818>
 e-mail : bihmoon@knu.ac.kr
 1995년 연세대학교 전자공학과(학사)
 1997년 연세대학교 전자공학과(석사)
 2002년 연세대학교 전기전자공학과(박사)
 2002년~2004년 하이닉스반도체
 선임연구원

2004년~2005년 연세대학교 연구교수
 2005년~현재 경북대학교 전자공학부/대학원 전자전기공학부
 교수
 관심분야: SoC, 컴퓨터 구조, 비전 프로세서