

Hazy Particle Map 기반 실시간 처리 가능한 자동화 안개 제거방법의 하드웨어 구현

Hardware implementation of automated haze removal method capable of real-time processing based on Hazy Particle Map

심 휘 보*, 강 봉 순**

Hwi-Bo Sim*, Bong-Soon Kang**

Abstract

Recently, image processing technology for autonomous driving by recognizing objects and lanes through camera images to realize autonomous vehicles is being studied. Haze reduces the visibility of images captured by the camera and causes malfunctions of autonomous vehicles. To solve this, it is necessary to apply the haze removal function that can be processed in real time to the camera. Therefore, in this paper, the fog removal method of Sim with excellent performance is implemented with hardware capable of real-time processing. The proposed hardware was designed using Verilog HDL, and FPGA was implemented by setting Xilinx's xc7z045-2ffg900 as the target device. As a result of logic synthesis using Xilinx Vivado program, it has a maximum operating frequency of 276.932MHz and a maximum processing speed of 31.279fps in a 4K (4096×2160) high-resolution environment, thus satisfying the real-time processing standard.

요 약

최근 자율주행 자동차를 구현하기 위해 카메라 영상을 통해 객체 및 차선을 인식하여 자율주행하는 영상처리 기술이 연구되고 있다. 안개는 카메라 촬영 영상의 가시성을 떨어뜨리기 때문에 자율주행 자동차 오작동의 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 카메라에 실시간 처리가 가능한 안개 제거 기능을 적용하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 성능이 우수한 Sim의 안개 제거방법을 실시간 처리가 가능한 하드웨어로 구현한다. 제안하는 하드웨어는 Verilog HDL을 사용하여 설계하였고, Xilinx사의 xc7z045-2ffg900을 Target device로 설정하여 FPGA 구현하였다. Xilinx Vivado 프로그램을 이용한 논리합성 결과 4K(4096×2160) 고해상도 환경에서 최대 동작 주파수 276.932MHz, 최대 처리 속도 31.279fps를 가짐으로써 실시간 처리 기준을 만족한다.

Key words : hardware implementation, haze removal, Real-time processing, 2-split multiplier, 3-split multiplier

* Dept. of Electronics Engineering, Dong-A University

★ Corresponding author

E-mail : bongsoon@dau.ac.kr, Tel : +82-51-200-7703

※ Acknowledgment

This paper was supported by research funds from Dong-A University.

Manuscript received Aug. 26, 2022; revised Sep. 9, 2022; accepted Sep. 22, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 자율주행 자동차 구현을 위해서 카메라 영상을 통해 객체 및 차선을 인식하여 자율주행하는 영상처리 기술이 연구되고 있다. 카메라 영상은 안개와 같은 악조건 날씨에서 빛의 산란과 흡수로 인해 영상의 가시성이 저하되기 때문에, 객체 인식률이 낮아져 오작동의 원인이 된다. 자율주행 자동차의 오작동은 인명 피해로 이어지므로 기술의 안정성이 중요하다. 따라서 실시간 처리가 가능한 안개 제거 기능을 카메라에 적용하는 것이 필요하다. 안개 제거 기술은 소프트웨어로 실시간 처리가 어렵다[1]. 실시간 처리를 위한 효율적인 대안으로 안개 제거 기술의 하드웨어 구현 연구가 이루어지고 있다 [1-3]. 본 논문에서는 안개 제거 알고리즘을 실시간 처리 가능한 하드웨어로 구현한다.

안개 제거 알고리즘으로 가장 많이 알려진 방법은 He가 제안한 DCP(Dark Channel Prior)[4] 방법이다. DCP는 안개가 없는 영역의 경우 RGB 채널 중에서 적어도 한 채널은 명도가 낮다는 가정을 통해 대기 산란광 및 대기 투과율을 추정하여 안개를 제거한다. 하지만 하늘 영역과 같이 모든 RGB 채널에 고휘도 밝은 픽셀이 존재하는 경우 위의 가정이 성립하지 않아 대기 산란광 및 대기 투과율 추정이 어려우므로 halo artifact가 발생하는 문제가 있다. He는 이를 해결하기 위해 soft matting[5] 연산을 사용하여 halo artifact 발생을 줄였지만, DCP의 안개 제거 처리시간이 매우 느려졌다. He 안개 제거방법의 단점을 해결하기 위해 Kim은 mHMF(modifier Hybrid Median Filter)를 통해 추정된 Hazy Particle Map을 사용하여 안개를 제거하는 방법을 제안하였다[6]. Kim의 안개 제거방법은 연산이 간단하고 처리시간이 가장 빠른 알고리즘이다[1]. 하지만 Kim의 안개 제거방법은 입력 영상의 안개가 짙거나 얇음을 고려하지 않고 일괄적으로 입력 영상에서 Hazy Particle Map을 빼주어 안개를 제거하므로 과도하게 안개가 제거되는 경향이 있다. Sim은 Kim의 단점을 보완하기 위해 Kim의 안개 제거방법에 안개 밀도 정량화 알고리즘인 흐릿함 정도 평가기(Haziness Degree Evaluator, HDE) [7]를 적용하여 입력 영상의 안개 밀도 정도에 따라서 안개 제거량을 조절하는 자동화 단일 영상 안개 제거방법을 제안하였다. Sim의 안개 제거방법은 Kim의 안개 제거방법보다 정성적, 정량적 결과에서 우수하였다[8].

Table 1. Processing time in seconds of haze removal algorithms.

표 1. 안개 제거 알고리즘의 처리시간(sec) 및 fps.

Image Size	He[4]	Kim[6]	Sim[8]
320 × 240	4.11(≈0.24fps)	0.08(=12.5fps)	0.10(=10fps)
640 × 480	17.83(≈0.06fps)	0.35(≈2.86fps)	0.40(≈2.5fps)
1024 × 768	46.82(≈0.02fps)	0.96(≈1.04fps)	1.07(≈0.93fps)
1920 × 1080	143.86(≈0.01fps)	2.25(≈0.44fps)	2.54(≈0.39fps)
4096 × 2160	-	11.09(≈0.09fps)	12.28(≈0.08fps)

표 1은 영상 크기 별 안개 제거 알고리즘의 CPU 처리 시간을 나타낸다. 모두 16GB RAM이 장착된 Core i7-6700 CPU(3.4GHz)에서 테스트하였다. 4K 표준의 경우, He의 안개 제거방법은 RAM 부족하여 처리시간 측정이 불가능하였다. 자율주행과 같은 고급 기술은 최소 1초에 30장 이상을 처리해야 한다. 따라서, 표 1은 안개 제거 알고리즘이 CPU 환경에서 실시간 처리가 불가능하다는 것을 시사한다. 실시간 처리를 위한 다른 대안은 GPU를 사용하는 것이다. 하지만 GPU의 가격이 비싸므로 비용 측면에서 비효율적이다. 실시간 처리를 위한 효율적인 대안은 안개 제거 알고리즘의 전용 하드웨어를 구현하는 것이다.

본 논문에서는 성능이 우수한 Sim의 안개 제거 알고리즘을 실시간 처리가 가능한 하드웨어로 구현한다. 하드웨어 구현 시 큰 비트 수 간의 곱셈은 속도 저하를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 큰 비트 수 간의 곱셈을 2-split multiplier와 3-split multiplier를 사용함으로써 속도를 향상하여 30fps 이상의 속도를 구현하였다. 제안하는 하드웨어는 Verilog HDL을 사용하여 설계하였고, Xilinx사의 xc7z045ffg900-2을 Target device로 설정하여 FPGA(Field-Programmable Gate Arrays) 구현하였다. Xilinx Vivado 프로그램을 이용한 논리합성 결과 4K(4096×2160) 고해상도 환경에서 최대 동작 주파수 276.932MHz, 최대 처리 속도 31.279fps를 가짐으로써 실시간 처리 기준을 만족한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 대기 산란 모델과 Sim의 안개 제거방법, 3장에서는 제안하는 하드웨어 구조를 설명한다. 그리고 4장에서는 Xilinx 사의 Vivado 프로그램을 통해 제안한 설계의 합성 결과를 제시하여 실시간 처리 가능성을 보인다. 또한, 알고리즘과 제안하는 하드웨어의 정량적 수치를 비교 평가한다. 마지막으로 5장에서 결론을 서술하였다.

II. 배경 이론

1. 대기 산란 모델

안개는 물체로부터 반사된 빛이 대기에 의해 일부 손실된 빛과 태양 등 주변 광원으로부터 대기에 반사되어 함께 시야에 들어오는 대기 산란광이 섞임으로 인해 발생한다. 대기 산란 모델(Atmospheric scattering model) [9]은 안개 영상을 모델링한 식으로 안개 제거 알고리즘에 사용할 수 있다.

$$I(x,y) = J(x,y)t(x,y) + A(1 - t(x,y)) \quad (1)$$

수식(1)에서 $I(x,y)$ 는 안개 영상, $J(x,y)$ 는 안개가 없는 영상, x 와 y 는 영상의 픽셀 좌표이다. 그리고 t 는 대기 투과율, A 는 대기 산란광이고 모든 요소는 0~1사이의 값을 가진다. 따라서, 대기 투과율 t 가 1에 가까울수록 안개가 없는 깨끗한 영상이 나온다. 대기 산란광 A 는 일반적으로 1에 가까운 값을 가진다.

2. SIM의 안개 제거 알고리즘

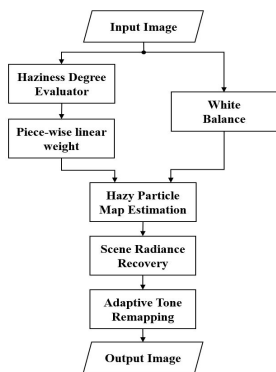


Fig. 1. Flowchart of Fog Removal Algorithm.
그림 1. 안개 제거 알고리즘의 흐름도

Sim의 안개 제거 알고리즘은 입력 영상의 안개 밀도 정도에 따라서 안개 제거량을 조절하는 자동화 단일 영상 안개 제거방법이다. Fig. 1는 Sim의 안개 제거 알고리즘의 흐름도이다.

$$\hat{I}(x,y) = wb(I(x,y)) = J(x,y)t(x,y) + 1 - t(x,y) \quad (2)$$

$$HDW = \begin{cases} 0, & HDE \leq \Gamma_1 \\ \frac{1}{\Gamma_2 - \Gamma_1}(HDE - \Gamma_1), & \Gamma_1 < HDE \leq \Gamma_2 \\ 1, & HDE > \Gamma_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$H(x,y) = 1 - t(x,y) \quad (4)$$

$$\hat{H}(x,y) = HDW \times k_h \cdot mhmf(\min_{RGB}(\hat{I}(x,y))) \quad (5)$$

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - \hat{H}(x,y)}{1 - \hat{H}(x,y)} \quad (6)$$

수식 (2)~(6)은 Sim이 제안한 안개 제거방법의 안개 제거 영상 도출을 위한 수식들이다. 입력 영상이 들어오면 그림 1의 White Balance 단계에서 수식(2)을 수행한다. 수식(2)에서 \hat{I} 는 화이트 밸런스 이미지이며, $wb(\cdot)$ 는 화이트 밸런스 처리를 나타내는 연산자이다. 화이트 밸런스 처리는 안개를 완전한 흰색으로 보이도록 처리한다 [10]. 이는 대기 산란광 A 를 1로 설정할 수 있음을 의미한다. 따라서, 수식(1)은 수식(2)으로 표현할 수 있다. 그리고 Hazziness Degree Evaluator 단계에서 입력 영상의 HDE 수치가 정해지면 Pice-wise linear weight 단계에서 수식(3)의 과정을 수행한다. 수식(3)에서 $\Gamma_1 = 0.8811$, $\Gamma_2 = 0.9344$ 는 Ngo에 의해 결정된 임계값이다. $HDE \leq \Gamma_1$ 이면 안개 없음(Haze-free), $\Gamma_1 \leq HDE \leq \Gamma_2$ 이면 적당한 안개(Moderate haze), $HDE > \Gamma_2$ 이면 짙은 안개(Dense haze)로 분류하고 수식(3)에 맞는 입력 영상의 안개 밀도 가중치(Hazy Density Weight, HDW)를 출력한다. HDW는 0~1사이의 값을 가진다. 수식(4)에서 H 는 Hazy Particle Map을 의미한다. 그리고 Hazy Particle Map Estimation 단계에서 수식(5)을 수행하여 Hazy Particle Map을 추정한다. 수식(5)에서 \hat{H} 는 Hazy Particle Map의 추정값, $mhmf(\cdot)$ 는 mHMF의 연산자, $\min_{RGB}(\cdot)$ 는 각 픽셀의 최소값을 선택하는 연산자를 의미한다. k_h 는 Hazy Particle Map의 사용자 정의 가중치로 0.9를 사용한다. 다음으로, Scene Radiance Recovery 단계에서 Hazy Particle Map과 입력 영상을 입력으로 받아 수식(6)을 수행하여 안개 제거된 영상을 얻는다. 수식(1)~(5)를 종합하여 안개 제거 영상을 구하는 수식(6)을 도출할 수 있다.

안개 제거된 영상은 일반적으로 복원 과정의 산술 연산을 거치면서 오버플로 및 언더플로 발생으로 인해 장면 광도의 동적 범위가 감소하는 경향이 있다. 따라서 안개 제거된 영상의 가시성을 향상하기 위해 적응형 톤 리맵핑(Adaptive Tone Remapping)[11] 후처리 과정을 수행한다. 이 과정에서 휘도 향상과 색상 강조를 수행하여 가시성을 향상시킨다. 수식(7), (8)은 휘도 향상과 색상 강조 수식이다.

$$EL(x,y) = L(x,y) + G_L(x,y) W_L(x,y) \times HDW \quad (7)$$

$$EC(x,y) = C(x,y) + G_C(x,y) W_C(x,y) \times HDW + 0.5 \quad (8)$$

EL 은 확장된 휘도, L 은 입력 휘도, G_L 은 휘도 이득, W_L 은 적응 휘도 가중치, EC 는 향상된 색상, C 는 입력 색상, G_C 는 색상 이득, W_C 는 적응 색상 가중치이다. 상수 0.5는 정규화된 범위로 변환하기 위한 오프셋을 나타낸다. 안개가 없는 영상에 대해서는 후처리 과정을 수행할 필요가 없으므로 후처리 과정에도 HDW 를 적용한다. 마지막 후처리 과정을 통과하면 가시성이 향상된 안개 제거 영상이 출력된다.

III. 하드웨어 설계

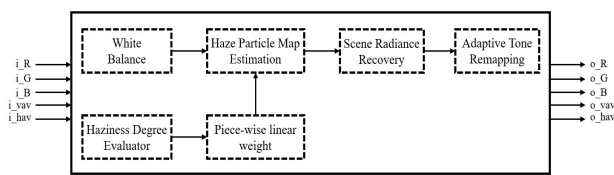


Fig. 3. Block diagram of the proposed hardware.
그림 3. 제안하는 하드웨어의 블록다이어그램

그림 3은 제안하는 하드웨어의 블록다이어그램이다. 총 6개의 모듈 White Balance, Haziness Degree Evaluator, Piece-wise linear weight, Haze Particle Map Estimation, Scene Radiance Recovery, Adaptive Tone Remapping으로 알고리즘 흐름도 단계와 동일하게 모듈을 구성하였다. 입력으로 영상의 RGB 채널과 영상의 행과 프레임을 의미하는 i_{hav} , i_{vav} 가 들어온다. 먼저, 영상이 입력되면 White Balance 모듈과 Haziness Degree Evaluator 모듈에 동시에 입력된다. White Balance 모듈은 화이트 밸런스 처리된 영상을 출력하고, Haziness Degree Evaluator 모듈에서 입력 영상의 HDE 수치를 출력한다.

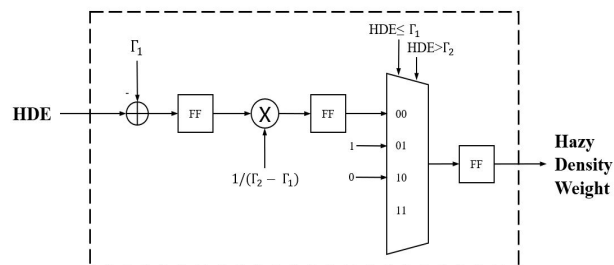


Fig. 4. Circuit of Piece-wise linear weight.
그림 4. Piece-wise linear weight의 회로

그림 4는 Piece-wise linear weight의 회로이다. Piece-wise linear weight의 모듈에서는 수식(3)의 과

정을 수행한다. HDE 수치는 Piece-wise linear weight 모듈의 입력으로 들어가 입력 영상의 HDE 값에 따른 입력 영상의 안개 밀도 가중치가 구해진다.

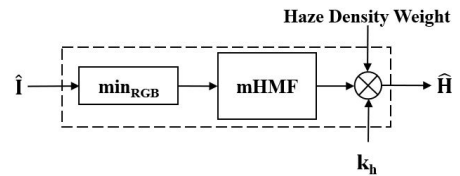


Fig. 5. Circuit of Hazy Particle Map Estimation.
그림 5. Hazy Particle Map Estimation의 회로

그림 5는 Hazy Particle Map Estimation의 회로이다. 화이트 밸런스 처리된 영상과 영상의 안개 밀도 가중치가 Hazy Particle Map Estimation 모듈의 입력으로 들어가 수식(5)를 수행하여 Hazy Particle Map을 추정한다. 다음으로, Scene Radiance Recovery 모듈에서 입력 영상과 추정한 Hazy Particle Map을 입력으로 받아 수식 (6) 과정을 수행하여 안개 제거된 영상을 출력한다. 마지막으로, 안개 제거된 영상을 입력으로 받아 Adaptive Tone Remapping 모듈을 통해 가시성이 향상된 안개 제거된 영상을 출력한다.

본 논문의 하드웨어 구현 목표는 자율주행과 같은 고급 기술에 적용하기 위해 최소 30fps 이상의 속도를 가지는 실시간 처리 가능한 하드웨어의 구현이다. 하드웨어 구현 시 큰 비트 수 간의 곱셈은 속도 저하 및 Critical path를 발생시킨다. 이러한 문제를 방지하기 위해 본 논문에서는 큰 비트 수를 가지는 변수 간의 곱셈을 2-split multiplier와 3-split multiplier를 사용하여 속도를 향상하였다. 그림 6과 7는 2-split multiplier와 3-split multiplier의 Data-Path이다.

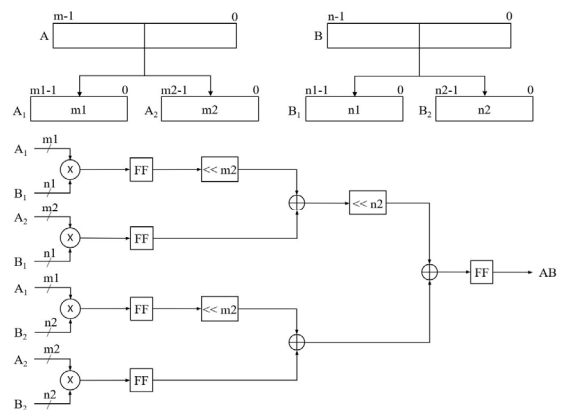


Fig. 6. Data-Path of 2-split multiplier.
그림 6. 2-split 곱셈기의 데이터 패스.

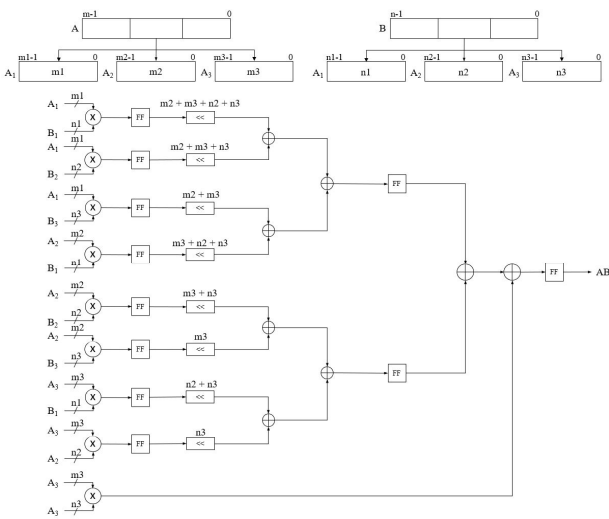


Fig. 7. Data-Path of 3-split multiplier.
그림 7. 3-split 곱셈기의 데이터 패스.

2-split multiplier와 3-split multiplier는 승수와 피승수의 비트 구간을 나눠 따로 곱셈 연산을 한 후, 각각의 결과를 모두 비트 자리에 맞게 더하는 방식이다.

IV. 하드웨어 구현 결과 및 성능 평가

본 논문에서 제안한 하드웨어 설계는 Verilog HDL로 작성하였고, ModelSim 프로그램을 통해 검증하였다. 제안하는 하드웨어가 4K DCI 표준(4096×2160) 환경에서 실시간 처리가 가능한지 확인하기 위해 XILINX사의 Vivado 프로그램을 이용하여 논리합성을 진행하였다. Target Device는 xc7z045-2ffg900으로 설정하였다.

Table 2. Summary of Xilinx Synthetic Result.

표 2. Xilinx 합성 결과표

Xilinx Design Analyzer					
Device	xc7z045-2ffg900				
Design	Previous HW		Proposal HW		
Logic Utilization	Available	Used	Util.	Used	Util.
Register (#)	437,200	66,682	15.25%	67,112	15.35%
LUT (#)	218,600	53,835	24.63%	55,285	27.17%
Min. period (ns)	4.431		3.611		
Max Freq. (MHz)	225.683		276.932		

* The EDA tool was supported by the IC Design Education Center.

표 2는 2-split, 3-split multiplier 사용 전, 후 하드웨어의 회로합성 결과표이다. 2-split, 3-split multiplier

를 사용함으로써 Register와 LUT의 수가 다소 증가하지만, 최대 동작 주파수를 향상하여 실시간 처리 기준을 만족하였다. 제안하는 하드웨어의 Register와 LUT의 수와 점유율은 각각 67,112개(15.35%), 55,285개(27.17%)이며, 하드웨어 동작의 최소 주기는 3.611ns, 최대 동작 주파수는 276.932MHz이다.

$$MPS = \frac{f_{max}}{(W+HB)(H+VB)} \quad (7)$$

수식(7)은 하드웨어 구현에서 추가적인 수평 및 수직 공백을 고려한 fps 단위의 최대 처리 속도(Maximum Processing Speed, MPS)이다. 여기서 f_{max} 는 최대 동작 주파수, W 는 입력 영상 넓이, HB 는 수평 공백, H 입력 영상 높이, VB 는 수직 공백을 의미한다. 본 연구에서 제안한 설계는 HB, VB 가 하나씩 필요하였다. DCI 4K 영상 표준인 4096×2160 영상을 처리하는데 필요한 클럭 사이클 수는 8,853,617(=4097×2161)이었고, 제안한 하드웨어는 최대 31.279fps(=276.932×10⁶/8,853,617)를 처리할 수 있다. 이는 최소 30fps를 처리해야 하는 실시간 처리 기준을 만족한다.

Table 3. Comparison of performance loss compared to existing algorithm due to hardware design.

표 3. 하드웨어 설계로 인한 기존 알고리즘 대비 성능 손실 비교

Dataset	Input	Method	MSE	SSIM	FSIMc	TMQI
O-HAZY	Hazy(45)	Ours	0.0255	0.7329	0.8036	0.8696
	Hazefree(45)		0.0000	1.0000	1.0000	0.9324
	Hazy(45)	Sim	0.0226	0.7178	0.7874	0.8588
	Hazefree(45)		0.0000	1.0000	1.0000	0.9327
I-HAZE	Hazy(30)	Ours	0.0268	0.7592	0.8442	0.7769
	Hazefree(30)		0.0000	0.9997	0.9999	0.8958
	Hazy(30)	Sim	0.0254	0.7502	0.8337	0.7675
	Hazefree(30)		0.0001	0.9997	0.9999	0.8955
D-HAZE	Hazy(23)	Ours	0.0783	0.7586	0.8665	0.7651
	Hazefree(23)		0.0032	0.9845	0.9898	0.9111
	Hazy(23)	Sim	0.0591	0.7760	0.8700	0.7879
	Hazefree(23)		0.0046	0.9832	0.9899	0.9154

표 3은 하드웨어 설계로 인한 기존 알고리즘 대비 성능 손실 비교표이다. 정량적 수치평가 기준은 안개 제거 영상 품질평가에 쓰이는 MSE(Mean Square Error), SSIM(Structural SIMilarity Index)[12], TMQI(Tone

Mapped Image Quality Index)[13]를 사용하였다. MSE는 원본 및 결과 영상 사이의 픽셀값의 차이를 측정하는 것으로 수치가 낮을수록 좋다. SSIM, TMQI, FSIMc는 각각 구조적 유사성, 영상품질 척도 및 색도에 대한 영상 평가 수치이며 높을수록 좋다. 또한, 수치평가 항목 모두 0~1사이의 값을 가진다. 또한, dataset은 O-HAZY[14] 90장, I-HAZY[15] 60장, D-HAZY[16] 46장을 사용하였다. Sim의 안개 제거 알고리즘을 작고 빠른 하드웨어 설계를 달성하기 위해 신호들의 비트 폭을 제한하기 때문에 $\pm 0.5\text{LSB}$ (Least significant Bit) 이내의 오차가 발생한다. 따라서, 표 3과 같이 평가 수치에서 약간의 성능 손실이 발생한다.

V. 결론

본 논문에서는 Sim이 제안한 입력 영상의 안개 밀도 정도에 따라서 안개 제거량을 조절하는 자동화 단일 영상 안개 제거방법 실시간 처리가 가능한 하드웨어로 구현하였다. 실시간 처리가 가능하도록 구현하기 위해 큰 비트 수를 가지는 변수 간의 곱셈을 2-Split Multiplier와 3-Split Multiplier를 사용하여 속도를 향상하였다. 제안하는 하드웨어 설계는 Verilog HDL로 작성하였고 Xilinx사의 xc7z045-2ffg900을 Target device로 설정하여 Vivado 프로그램을 통해 합성한 결과 Slice Register와 Slice LUT의 수와 점유율은 각각 각각 67,112개(15.35%), 55,285개(27.17%)이며, 하드웨어 동작의 최소 주기는 3.611ns, 최대 동작 주파수는 276.932MHz이다. 또한, MPS가 31.279fps로 최소 실시간 처리 기준인 30fps 이상이므로 실시간 처리가 가능함을 보인다.

References

[1] D. Ngo, G. D. Lee and B. Kang, "A 4K-Capable FPGA Implementation of Single Image Haze Removal Using Hazy Particle Maps," *Applied Sciences*, Vol.9, No.17, pp.3443-3457, 2019. DOI: 10.3390/app9173443

[2] D. Ngo, S. Lee, U. J. Kang, T. M. Ngo, G. D. Lee and B. Kang, "Adapting a Dehazing System to Haze Conditions by Piece-Wisely Linearizing a Depth Estimator," *Applied Sciences*, Vol.22, No.5, pp.1957-1981, 2022. DOI: 10.3390/s22051957

[3] D. Ngo, S. Lee, Q. H. Nguyen, T. M. Ngo, G. D.

Lee and B. Kang, "Single Image Haze Removal from Image Enhancement Perspective for Real-Time Vision-Based Systems," *Sensors*, Vol.20, No.18, pp.5170-5190, 2020. DOI: 10.3390/s20185170

[4] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.33, No.12, pp.2341-2353, 2011. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168

[5] A. Levin, D. Lischinski and Y. Weiss, "A Closed-Form Solution to Natural Image Matting," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.30, No.2, pp.228-242, 2008. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1177

[6] G. J. Kim, S. Lee, and B. Kang, "Single Image Haze Removal Using Hazy Particle Maps," *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.* Vol.E101-A, No.11, pp.1999-2002, 2018. DOI: 10.1587/transfun.E101.A.1999

[7] D. Ngo, G. D. Lee and B. Kang, "Haziness degree evaluator: A knowledge-driven approach for haze density estimation," *Sensors*, Vol.21, No.11, pp. 3896-3927, 2021. DOI: 10.3390/s21113896

[8] H. SIM and B. Kang "Hazy Particle Map-based automated fog removal method with Haziness Evaluator applied," *Journal of Korea Multimedia Society*, 'in press'

[9] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Vision and the Atmosphere," *International Journal of Computer Vision*, Vol.8, No.3, pp.233-254, 2002. DOI: 10.1023/A:1016328200723

[10] J. Tarel and N. Hautière, "Fast visibility restoration from a single color or gray level image," *2009 IEEE 12th International onference on Computer Vision*, pp. 2201-2208, 2009. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459251

[11] H. Cho, G. J. Kim, K. Jang, S. Lee and B. Kang, "Color Image Enhancement Based on Adaptive Nonlinear Curves of Luminance Features," *J. Semicond. Technol. Sci.*, Vol.15, No.1, pp.60-67. 2015. DOI: 10.5573/JSTS.2015.15.1.060

[12] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image Quality Assessment: from Error

Visibility Tostructural Similarity,” *IEEE Transactions on Image Process.* Vol.13, No.4, pp.600-612, 2014.
DOI: 10.1109/TIP.2003.819861

[13] L. Zhang, X. Mou, and D. Zhang, “FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment,” *IEEE Transactions on Image Process.* Vol.20, No.8, pp.2378-2386, 2011.
DOI: 10.1109/TIP.2011.2109730

[14] H. Yeganeh and Z. Wang, “Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images,” *IEEE Transactions on Image Process.* Vol.22, No.2, pp. 657-667, 2013. DOI: 10.1109/TIP.2012.2221725

[15] C. Ancuti, C. O. Ancuti, R. Timofte, and C. De Vleeschouwer, “I-HAZE: A Dehazing Benchmark with Real Hazy and Haze-Free Indoor Images,” *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, pp.620-631, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1804.05091

[16] C. Ancuti, C. O. Ancuti and C. De Vleeschouwer, “D-HAZY: A dataset to evaluate quantitatively dehazing algorithms,” *In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp.2226-2230, 2016.
DOI: 10.1109/ICIP.2016.7532754

Bong-soon Kang (Member)



1985 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1987 : MS degree in Electrical Engineering, University of Pennsylvania.
1990 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Drexel University.

1989~1999 : Senior Staff Researcher, Samsung Electronics.

1999~ : Prof. of Dept. Electronic Engineering, Dong-A University.

BIOGRAPHY

Hwi-Bo Sim (Member)



2020 : BS degree in Electronic Engineering, Dong-A University.
2020~ : MS degree in Electronic Engineering, Dong-A University.