

## 정확한 깊이지도 생성을 위한 가이드 필터기반 비용 최적화 방법

문지훈 호요성

광주과학기술원

{jhm, hoyo}@gist.ac.kr

## Guide Filter based Cost Optimization Method for Accurate Depth Map Generation

Ji-Hun Mun, Yo-Sung Ho

Gwangju Institute of Science and Technology

## 요약

효율적으로 깊이지도를 획득하기 위해 다양한 방법의 지역 기반스테레오 매칭 방법이 사용된다. 일반적인 지역기반 스테레오 매칭에 사용되는 비용값 계산 방법을 통해 깊이지도 생성하게 되면 객체의 경계 영역이 무너지거나, 유사한 텍스처 정보가 연속적으로 나타나는 영역에서 부정확한 깊이값을 얻는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 깊이지도의 정확성을 높이기 위해 2가지 단계를 거쳐 최종 깊이지도를 생성한다. 처음으로, 일반적으로 사용하는 지역기반 스테레오 매칭 비용 함수와 입력 영상의 기울기를 고려한 초기 비용값을 가이드 필터를 이용하여 최적의 비용값을 찾아 초기 변위지도 생성한다. 스테레오매칭을 수행할 경우, 시점의 차이로 인해 보이지 않는 영역에서 정확한 변위값을 찾지 못하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 좌영상과 우영상을 기반으로 획득한 변위지도를 사용하여 교차검사를 함으로써 폐색영역을 찾아낸다. 폐색 영역을 이웃한 화소의 값을 사용하여 채울 경우 실선과 같은 오류가 결과 영상에 나타나게 된다. 이러한 오류 영역을 제거하기 위해 마지막으로 가중치를 적용한 중간값 필터를 적용한다. 실험 결과 제안한 방법을 사용하여 획득한 깊이지도가 기존의 방법보다 정확한 깊이값을 얻는 것을 확인할 수 있었다.

## 1. 서론

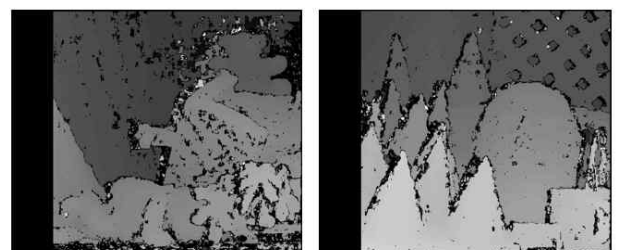
최근 활발한 3차원 영상 디스플레이 장치 개발과 콘텐츠 제작으로 인해 다양한 깊이지도 획득 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 깊이 정보는 깊이카메라를 통해 바로 획득하는 방법과 양안식 영상을 사용해 획득하는 스테레오 매칭 방법이 있다. 영상에 윈도우 커널을 사용하여 깊이지도 획득하는 방법[1]을 지역기반 스테레오 매칭이라고 한다. 지역기반 스테레오 매칭의 경우, 깊이지도 생성하기 위해 각 윈도우 별로 비용값을 계산하여 최종 깊이지도 얻게 된다. 일반적인 스테레오 매칭은 다음과 같이 총 4단계로 이루어져있다: 1)윈도우 기반 초기 비용값 계산; 2)비용값 집적; 3)비용값 최적화; 4)깊이지도 보정.

스테레오 매칭 방법은 지역기반 매칭과 전역기반 매칭으로 나눌 수 있다. 지역기반 매칭 방법의 경우 임의로 지정된 윈도우 크기 내에서 화소값을 고려하여 비용값을 계산한다. 지역기반 매칭의 경우 최소의 비용값을 변위값으로 선택함으로써 비용값 최적화(3단계)를 수행하게 된다. 반면, 전역기반 스테레오 매칭 방법은 윈도우를 사용하지 않고 영상의 모든 화소값을 고려함으로써 각 화소에 해당하는 비용값을 계산한다. 비용값의 최적화를 위해 다양한 알고리즘이 사용되고 있는데, 일반적으로 신뢰확산(Belief Propagation, BP)과 그래프컷(Graph Cuts) 방법을 사용한다. 전역기반 스테레오 매칭은 지역기반 스테레오 매칭보다 높은 정확성을 갖는 변위 지도를 생성할 수 있지만, 상대적으로 높은 시간 복잡도를 가지고 있다.

지역기반 스테레오 매칭의 성능을 높이기 위해 다양한 초기 비용

값 계산(1단계)방법[2]과 비용값 집적(2단계)방법[3]에 대한 연구가 진행되었다. 중간값 필터[4]와 샘플링[5]을 이용한 비용값 계산 알고리즘이 개발되었으며, 가중치를 사용한 중간값 필터링[6]을 적용하여 비용값을 최적화하는 알고리즘도 개발되었다. 비용값을 처리하는 알고리즘 외에, 생성된 초기 변위지도를 개선할 수 있는 필터링 방법(4단계)도 연구되었다.

지역기반 스테레오 매칭과정에서 자주 사용되는 비용값 계산방법으로는 SAD(Sum of Absolute Differences), SSD(Sum of Squared Differences) 그리고 NCC(Normalized Cross Correlation)과 같은 방법이 있다. 이러한 방법을 사용하여 초기 비용값을 계산하게 되면, 그림 1과 같이 영상 내부에 있는 객체의 경계영역의 정보가 부정확해지며 동일(Homogeneous) 색상 영역에서 부적절한 변위값을 얻게 되는 문제가 발생한다.



(a)

(b)

그림 1. SAD를 사용한 초기 비용값 계산 결과

초기 비용값 계산을 효율적으로 수행하기 위해 경계영역을 보존한 양방향 필터를 사용한 알고리즘[7]이 개발되기도 했는데, 이 방법은 가중치 윈도우를 사용하여 비용값을 집계시킨다. 하지만 비용값 집계 과정에서 양방향 필터를 사용하기 때문에 높은 시간 복잡도를 갖게 되어 지역 기반 스테레오 매칭의 장점을 유지하지 못했다.

본 논문에서는 일반적으로 비용값 계산과정에 사용되는 SAD와 입력 영상의 기울기 정보를 고려한 기울기향을 사용하여 초기 비용값에 해당하는 변위지도도를 획득한다. 초기 변위지도에는 많은 오류 정보가 존재하기 때문에 가이드 필터링[7]을 사용하여 최적의 변위값을 찾는다. 스테레오 영상은 좌영상에서 보이는 부분이 우영상에서는 보이지 않는 문제가 있는데 이러한 영역은 변위지도에서 폐색영역(Occlusion)으로 나타난다. 교차검사를 통해 폐색영역을 찾아낸 뒤 이웃한 화소값을 사용하여 폐색영역을 채워준다. 바로 이웃한 화소값을 사용하여 폐색영역을 채웠기 때문에 실선과 같은 오류영역이 변위지도에서 나타나게 된다. 이러한 영역을 제거하고 최종 변위 지도도를 획득하기 위해 가중치를 이용한 중간값 필터를 적용시킨다. 제안하는 방법의 순서도는 그림 2와 같다.

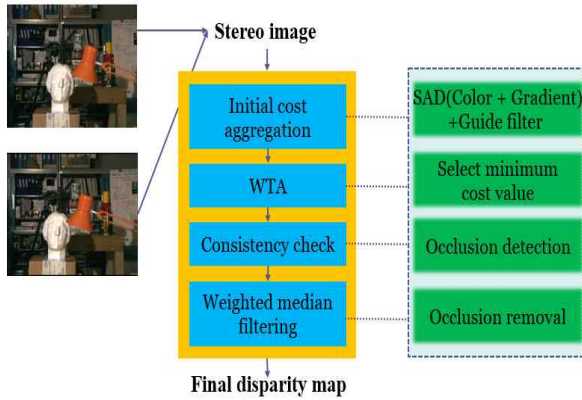


그림 2. 제안한 방법의 순서도

## 2. 초기 변위지도 생성

### 1. 비용값 계산 함수 정의

초기 변위 지도도를 생성하기 위해 지역기반 스테레오 매칭에서 일반적으로 사용되는 SAD와 입력영상의 x, y방향의 기울기 영상을 사용하여 초기 비용값을 획득할 수 있는 식 (1)과 같은 함수를 사용한다.

$$\sum_{k=\min_{\text{disp}}}^{\max_{\text{disp}}} \text{Cost}(k)_{\text{Initial}} = \alpha \cdot \min(|I_i - I_{i-1}|) + (1-\alpha) \cdot \min(|\nabla_{x,y} I_i - \nabla_{x,y} I_{i-1}|) \quad (1)$$

식 (1)에서  $\alpha$ 는 초기 비용값을 획득할 때 사용되는 SAD항과 기울기향의 가중치를 나타내며,  $I$ 와  $I'$ 은 각각 좌영상과 우영상을 의미한다. 비용값 계산을 위해 SAD와 추가적으로 기울기 향을 고려함으로써 영상의 경계영역에 대한 정보를 비용값으로 사용할 수 있게 된다. 비용값을 계산하기 위해서는 최소/최대 변위 영역을 고려하기 때문에 그림 3과 같이 변위 영역별 변위 지도가 생성된다. 정확한 초기 변위 지도도를 획득하기 위해서는 차이가 최소가 되는 영역, 즉 비용값 최적화

과정(3단계)이 필요하다. 본 논문에서는 식 (1)의 비용값을 최적화하기 위해 가이드 필터링을 적용하여 가장 적합한 변위 값을 찾아 초기 변위지도도를 생성한다.

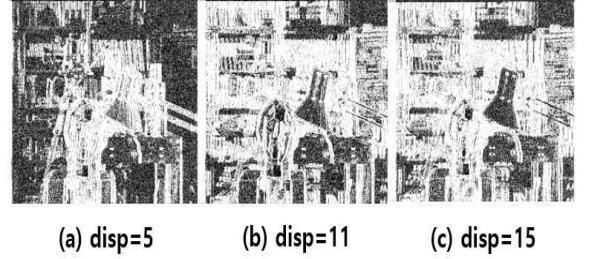


그림 3. 변위 탐색영역에 따른 초기 변위지도

### 2. 가이드 필터링 기반 비용값 최적화

초기 변위지도 영상과 색상 입력 영상을 가이드 필터의 입력 영상으로 사용함으로써 최적의 비용값을 획득할 수 있다. 가이드 필터는 양방향 필터와 동일한 입력 데이터를 사용한다. 하지만 색상 차이와 거리 차이를 계산하는 대신 식 (2)와 같이 가이드 영상(색상 입력 영상)을 선형 모델링을 함으로써 초기 변위 지도도와 차이를 최소화 하는 선형 모델의 계수값을 찾게 된다.

$$\min_{(a,b)} \sum_i (aI_i + b - p_i)^2 + \epsilon a^2 \quad (2)$$

$I_i$  가이드 영상을 나타내며  $a$ 와  $b$ 는 가이드 필터링에서 사용되는 입력영상의 선형모델을 구성하는 계수를 의미한다.  $\epsilon$ 은  $a$ 의 값이 너무 커지지 않도록 사용되는 제어변수이다. 선형 모델의 계수인  $a$ 와  $b$ 는 식 (2)를 선형회귀 방법을 이용하여 해를 구하면 식 (3)과 같은 결과를 얻게 된다.

$$a_k = \frac{\text{cov}_k(I,p)}{\text{var}_k(I) + \epsilon} \quad (3)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a\bar{I}_k$$

식 (3)에서  $\text{cov}$ 와  $\text{var}$ 는 각각 윈도우 내부에서의 공분산과 분산값을 나타낸다.  $\bar{p}$ 는  $\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 를 의미하는데, 이는 윈도우( $\omega$ ) 내에서  $p$ 값의 평균값과 동일하다. 가이드 영상과 선형모델의 관계식으로 이루어진 결과 영상에 대한 함수를 편미분하게 되면 최종적으로 식 (4)와 같이 가이드 필터 가중치를 획득할 수 있다[7].

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \epsilon}\right) \quad (4)$$

$\mu_k$ 는 윈도우 내에서의 평균값을, 그리고  $\sigma$ 는 분산값을 의미한다. 본 논문에서 가이드 필터링을 비용값 최적화 방법에 적용한 이유는 가이드 필터가 경계영역의 정보를 보존할 수 있기 때문이다. 식 (4)에서  $I_i - \mu_k$ 와  $I_j - \mu_k$ 의 부호에 따라 경계영역을 보존할 수 있다. 이는 그림 4의 1차원으로 표현된 영상의 경계영역을 보면 쉽게 알 수 있다.

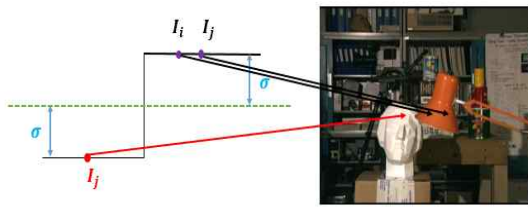


그림 4. 경계영역의 1차원 표현

그림 4와 같이  $I_i$ 와  $I_j$ 가 동일 객체 내부에 있을 때는 같은 부호를 갖게 되어 식 (4)로부터 평균 가중치를 갖게 되지만, 서로 다른 객체에 있을 때는 부호가 다르게 되어 가중치의 향이 매우 작아져 평균값이 아닌 가중치의 향을 얻게 된다. 식 (4)의  $\epsilon$ 은 가이드 필터의 평활화 정도를 조정하는 변수값을 의미하는데,  $\epsilon$ 값에 따른 가이드 필터 비용값 최적화 결과를 그림 5에서 확인할 수 있다.

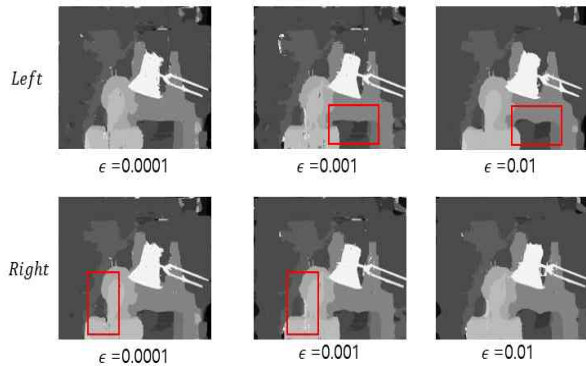


그림 5. 평활화 변수에 따른 가이드 필터링 결과

$\sigma_k^2$  값이  $\epsilon$ 보다 작은 경우 식 (4)는 분자의 값이 매우 작기 때문에  $W_{ij}(I) \approx \frac{1}{|\omega^2|} \sum_{k: (i,j) \in \omega_k} 1$ 와 같이 가중치값이 근사화 된다. 이는 저역 통과 필터와 동일한 기능을 보이는데, 저역 통과 필터는 영상에서 경계 영역이 아닌 부분의 정보를 전송하고 그 외의 영역은 평활화하는 기능을 수행한다. 즉,  $\epsilon$ 값에 따라 가중치 함수가 저역 통과 필터와 같은 동작을 할 수 있기 때문에 적절한  $\epsilon$ 값을 사용하는 것이 중요하다. 너무 큰  $\epsilon$ 값을 사용하게 될 경우, 그림 5와 같이 객체의 경계영역에서 뭉개짐 현상이 많이 나타나고 부정확한 경계영역 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 깊이지도 보정

#### 1. 교차검사 및 폐색영역 처리

가이드 필터링을 이용하여 비용값 계산함수를 통해 획득한 초기 변위지도의 최적화를 수행했다. 하지만 스테레오 영상을 사용하여 매칭을 수행할 경우 폐색영역의 문제는 항상 발생한다. 폐색영역은 시점의 차이에 의해 발생하는 가려진 영역을 의미한다. 폐색영역의 검출은 좌영상과 우영상을 기반으로 획득한 변위지도를 사용하여 교차검사를 수행함으로써 찾을 수 있다. 그림 6은 교차검사를 통해 찾아낸 폐색영역을 나타낸다.



그림 6. 폐색영역 검출 결과

폐색영역은 스테레오 영상에서 비교할 참조값이 없기 때문에 부정확한 값을 사용하여 변위값을 계산하게 된다. 폐색영역을 주변의 이웃한 변위값을 사용하여 제거하게 되면 윈도우를 사용하여 비용값을 비교한 것이 아니기 때문에 부적절한 변위값이 할당되게 된다. 또한 유사 영역의 변위값을 사용하기 때문에 그림 7과 같이 실선과 같은 잡음들이 폐색영역이 제거된 부분에서 나타나게 된다.

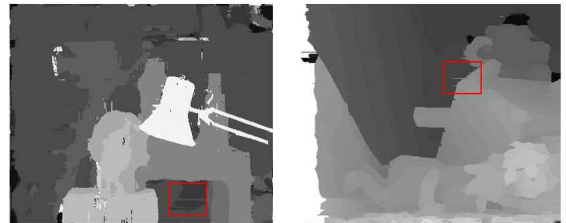


그림 7. 폐색영역 처리 결과 발생하는 잡음

#### 2. 가중치를 이용한 중간값 필터

폐색영역 처리 후 변위지도에서 발생하는 잡음들을 제거하기 위해 가중치를 고려한 중간값 필터를 사용한다. 일반적인 중간값 필터는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(x, i) = \sum_{x' \in N(x)} \delta(V(x') - i) \quad (5)$$

중간값 필터는 사용자가 정의한 윈도우 크기 내의 화소값들에 대한 히스토그램을 생성한 뒤, 그 값들 중 중간에 위치한 값을 최종 윈도우 영역의 값으로 지정하게 된다. 이러한 방법은 동일한 색상 값을 갖는 객체의 내부 영역에서는 효율적으로 잡음이나 부정확한 값들을 수정할 수 있지만, 객체의 경계영역에서는 많은 정보 손실이 발생하게 된다. 일반적인 중간값 필터가 갖는 문제를 해결하기 위해 가중치를 이용하여 기존의 중간값 필터의 단점을 극복할 수 있다. 가중치를 고려한 중간값 필터는 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$h(x, i) = \sum_{x' \in N(x)} \omega(x, x') \delta(V(x') - i) \quad (6)$$

$\omega(x, x')$ 은 중간값 필터에 사용되는 가중치항을 나타내는데, 가중치 항으로 양방향 필터, 가이드 필터, 그리고 영역 변환 필터를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 경계영역의 정보를 보존하고 복잡도가 낮은 양방향 필터를 가중치로 사용한다. 양방향 필터는 잡음이 존재하는 변위

지도들 입력 영상으로 사용하며 각 커널 내부에서 색상 유사도와 화소 간 거리를 고려하여 필터링을 수행한다. 양방향 필터 가중치는 식 (7) 과 같이 정의된다.

$$W_{i,j}^{bf} = \frac{1}{K_i} \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{|I_i - I_j|^2}{\sigma_c^2}\right) \quad (7)$$

$\sigma_s^2$  과  $\sigma_c^2$  은 각각 화소 거리와 색상 차이에 대한 분산값을 의미하고,  $K_i$  는 사용자가 지정한 커널의 크기를 나타낸다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

지역기반 스테레오 매칭에서 깊이지도의 정확도를 높이기 위해 가이드 필터를 이용한 비용값 최적화를 수행하고 가중치를 이용한 중간값 필터를 적용하여 최종 깊이 지도를 생성했다. 제안하는 방법의 성능을 입증하기 위해 Tsukuba, Venus, Teddy, 그리고 Cones와 같이 4가지 Middlebury 시험 영상을 사용했다. 초기 변위지도 생성을 위한 비용값 계산 함수에서 SAD와 기울기항에 사용되는 가중치( $\alpha$ )는 0.4 를 사용했으며, 비용값의 최적화를 수행하기 위해 적용한 가이드 필터링에서 사용되는 평활화 변수( $\epsilon$ )값으로는 0.0001을 사용한다. 폐색영역 처리 후 발생하는 잡음 영역을 제거하기 위해 적용한 양방향 필터의 커널 크기(K)는 15, 색상값 차이( $\sigma_c^2$ )와 화소 거리 차이( $\sigma_s^2$ )를 위한 분산 값으로 각각 0.2와 5로 설정한 뒤 실험을 진행했다. 실험 결과 최종 깊이지도들 그림 8과 같이 얻었다.

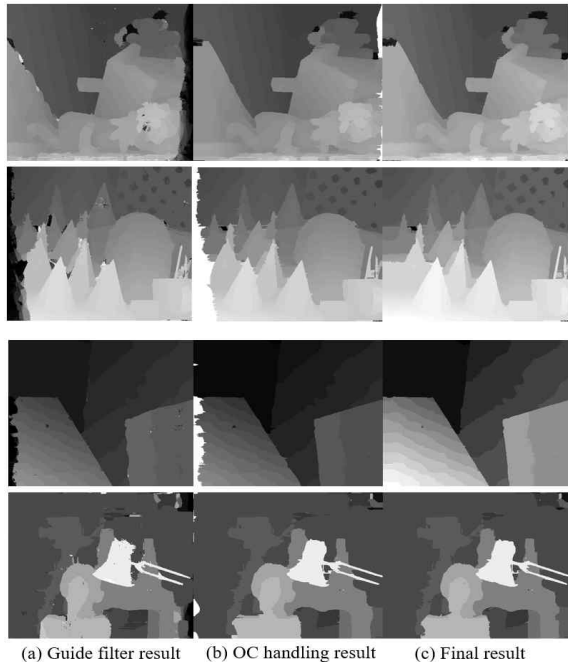


그림 8. 각 단계별 깊이지도 획득 결과

그림 8(a)는 초기 비용값을 가이드 필터링을 사용하여 최적화한 결과를 나타내며, 그림 8(b)는 교차검사를 통해 찾아낸 폐색영역을 처리한 결과를 보인다. 마지막으로 그림 8(c)는 양방향 필터 가중치를 이용하여 중간값 필터링을 통해 획득한 최종 변위지도들을 의미한다.

표 1은 기존의 다양한 가중치 함수를 사용하여 획득한 변위지도와 제안한 방법을 사용하여 획득한 변위지도의 BPR(Bad Pixel Ratio)을

비교한 결과를 나타낸다. 결과에서 확인할 수 있듯이 Venus와 Cones와 같은 비교적 간단한 테스트 영상에서는 제안한 방법의 BPR성능이 우수하지만 객체 영역 간 다양한 색상값을 갖는 영상에서는 기존의 가중치를 이용한 변위지도의 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

표1. 기존 방법과의 BPR 결과 비교

	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones
WMF	8.49	5.22	14.55	16.63
Geodesic Support Weight	5.46	3.68	13.43	16.08
Domain transform	4.13	3.25	10.19	15.13
Proposed	5.33	2.18	13.84	14.41

#### 5. 결론

본 논문은 지역기반 스테레오 매칭 수행시 정확한 변위지도들 획득하기 위해 가이드 필터를 이용한 비용값 함수의 최적화 방법을 사용한다. 시점의 차이로 발생하는 폐색영역을 검출하기 위해 교차 검사를 적용하여 폐색영역을 처리함으로써 초기 변위지도의 정확도를 높인다. 하지만 폐색영역 처리시 발생하는 실선형 잡음들이 발생하게 되는데, 이러한 영역들은 양방향 필터 가중치를 이용한 중간값 필터를 사용함으로써 오류가 제거된 최종 변위 지도들을 획득한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NO. 2011-0030079)

#### 참고문헌

- [1] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithm," *IJCV*, pp. 131-140, Dec. 2001.
- [2] H. Hirschmuller and D. Scharstein, "Evaluation of cost functions for stereo matching," *CVPR*, pp.1-8 June 2007.
- [3] K. Zhang, J. Lu, and G. Lafriut, "Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images," *TCSVT*, pp. 1073-1079, July 2009.
- [4] K. Muhlmann, D. Maier, J. Hesser, and R. Manner, "Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient implementation," *SMBV*, pp. 30-36, Dec. 2001.
- [5] S. Birchfield and C. Tomasi, "A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling," *TPAMI*, pp. 401-406, Apr. 1998.
- [6] L. Yin, R. Yang, M. Gabbouj, and Y. Neuvo, "Weighted median filters: a tutorial," *IEEE Circuit and Systems*, pp.157-192, vol. 43, no.3, Mar. 1996.
- [7] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Guided Image Filtering," *TPAMI*, pp. 1397-1409, Oct. 2012.