

깊이 카메라로부터 획득한 깊이 정보와 스테레오 정합 기술을 이용한 고화질 깊이맵 생성

이은경*, 김성열*, 정영기**, 호요성*

*광주과학기술원 정보통신공학과, **호남대학교 컴퓨터공학과
{eklee78 sykim75, hoyo}@gist.ac.kr, {yjkjung}@honam.ac.kr

요약

본 논문은 표준화질 (standard definition, SD) 깊이 카메라와 고화질 (high definition, HD) 스테레오 카메라를 이용하여 고화질 깊이맵을 생성하는 새로운 방법을 제안한다. 우선 표준화질 깊이 카메라로 획득한 깊이 정보에 3차원 워핑(warping)을 적용하여, 고화질 좌영상의 초기 깊이 정보를 측정한다. 그 뒤, 측정된 초기 깊이 정보를 고화질 좌영상의 초기 변이(initial disparity) 정보로 변환하고, 변환한 초기 변이 정보의 주변 영역을 고화질 우영상에서 탐색하여 최적의 깊이 정보를 계산한다. 마지막으로, 3차원 경계 조각 정보를 이용하여 깊이맵을 정제한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 스테레오 정합을 수행하는 동안 깊이 카메라에서 획득한 정확한 깊이 정보를 고려하여 깊이 정보를 측정하기 때문에, 기존의 스테레오 방법만 이용하여 생성한 깊이맵보다 화질이 향상된 깊이맵을 얻을 수 있다.

1. 서론

최근에 MPEG에서는 깊이 정보를 포함한 다시점 비디오 (multi-view video with depth)를 3차원 비디오로 간주하여 자유시점 TV (free-viewpoint TV, FTV)에 활용하려는 표준화 활동이 진행되고 있다 [1]. 현재 FTV와 관련하여 정확한 깊이 정보를 측정하기 위한 여러 방법들이 제안되고 있다 [2, 3].

깊이맵을 생성하는 방법은 크게 능동적 깊이센서 방식 (active depth sensors)과 수동적 깊이센서 방식 (passive depth sensors)으로 나눈다. 능동적 깊이센서 방식은 레이저 센서, 적외선 센서, 패턴 센서를 이용하여 실물의 3차원 깊이 정보를 직접 획득하는 방법이다. 능동적 깊이센서 방식은 저해상도의 깊이맵을 제공하고 큰 비용이 든다는 단점이 있지만, 정확한 깊이 정보를 획득한다.

반면에, 수동적 깊이센서 방식은 다시점 및 스테레오 영상으로부터 간접적으로 3차원 깊이 정보를 획득하는 방법이다. 수동적 깊이센서 방식은 폐색 영역과 단색 색상 영역에서 부정확한 깊이 정보를 제공하는 단점이 있지만, 고해상도의 깊이맵을 제공하고, 능동적 깊이센서 방식에 비해 적은 비용으로 깊이맵을 생성할 수 있다.

좀 더 정확한 3차원 깊이 정보를 획득하고자 능동적 깊이센서 방식과 수동적 깊이센서 방식의 장점을 결합한 복합형 방법이 연구되었다. 대부분의 복합형 방식은 실물을 3차원 스캐너로 초기 3차원 모델링한 후, 카메라로 획득한 영상 정보로 초기 3

차원 모델을 보정한다 [4, 5]. 그러나 3차원 스캐너는 움직이는 물체에서 깊이 정보를 측정하는데 제약이 있고, 3차원 모델링을 하기 위해 많은 노력과 시간이 필요하다.

최근 한국전자통신원(ETRI)에서는 3차원 스캐너 대신 깊이 카메라를 이용한 복합형 방법을 소개하였다 [6]. 깊이 카메라는 3차원 스캐너와 달리 실시간으로 실물의 깊이 정보를 제공한다. 그러나 ETRI의 복합형 방법은 깊이 카메라를 이용하여 고품질의 깊이맵을 생성할 수 있지만, 깊이 카메라에 의존하여 깊이 정보를 측정하기 때문에, 깊이 카메라가 제공하는 저해상도의 깊이맵을 생성했다.

본 논문은 표준화질 (standard definition, SD) 깊이 카메라와 고화질 (high definition, HD) 스테레오 카메라를 결합하여 고화질 깊이맵을 생성하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 깊이 카메라에서 획득한 깊이 정보를 3차원 워핑(warping)하여 스테레오 카메라의 좌영상에 대한 초기 깊이 정보를 예측하고, 스테레오 정합을 수행하는 동안 초기 깊이 정보를 고려하여 깊이 정보를 측정한다.

제안한 방법으로 얻어진 깊이맵의 해상도는 기존의 복합형 방법과 달리 스테레오 카메라에 의존하기 때문에, 스테레오 카메라 해상도와 같다. 또한, 스테레오 정합과 같은 영역 기반 정합 방법은 폐색영역에서 잘못된 깊이 정보를 예측한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 3차원 경계 조각 (edge segment)을 계산한 후, 특징 기반 정합 방법을 이용하여 경계영역의 깊이 정보를 정제한다.

깊이 카메라로부터 획득한 깊이 정보와 스테레오 정합 기술을 이용한 고화질 깊이맵 생성

이은경^{*}, 김성열^{*}, 정영기^{**}, 호요성^{*}

^{*}광주과학기술원 정보통신공학과, ^{**}호남대학교 컴퓨터공학과

{eklee78 sykim75, hoyo}@gist.ac.kr, {ykjung}@honam.ac.kr

요약

본 논문은 표준화질 (standard definition, SD) 깊이 카메라와 고화질 (high definition, HD) 스테레오 카메라를 이용하여 고화질 깊이맵을 생성하는 새로운 방법을 제안한다. 우선 표준화질 깊이 카메라로 획득한 깊이 정보에 3차원 워핑(warping)을 적용하여, 고화질 좌영상의 초기 깊이 정보를 측정한다. 그 뒤, 측정된 초기 깊이 정보를 고화질 좌영상의 초기 변이(initial disparity) 정보로 변환하고, 변환한 초기 변이 정보의 주변 영역을 고화질 우영상에서 탐색하여 최적의 깊이 정보를 계산한다. 마지막으로, 3차원 경계 조각 정보를 이용하여 깊이맵을 정제한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 스테레오 정합을 수행하는 동안 깊이 카메라에서 획득한 정확한 깊이 정보를 고려하여 깊이 정보를 측정하기 때문에, 기존의 스테레오 방법만 이용하여 생성한 깊이맵보다 화질이 향상된 깊이맵을 얻을 수 있다.

1. 서론

최근에 MPEG에서는 깊이 정보를 포함한 다시점 비디오 (multi-view video with depth)를 3차원 비디오로 간주하여 자유시점 TV (free-viewpoint TV, FTV)에 활용하려는 표준화 활동이 진행되고 있다 [1]. 현재 FTV와 관련하여 정확한 깊이 정보를 측정하기 위한 여러 방법들이 제안되고 있다 [2, 3].

깊이맵을 생성하는 방법은 크게 능동적 깊이센서 방식 (active depth sensors)과 수동적 깊이센서 방식 (passive depth sensors)으로 나눈다. 능동적 깊이센서 방식은 레이저 센서, 적외선 센서, 패턴 센서를 이용하여 실물의 3차원 깊이 정보를 직접 획득하는 방법이다. 능동적 깊이센서 방식은 저해상도의 깊이맵을 제공하고 큰 비용이 든다는 단점이 있지만, 정확한 깊이 정보를 획득한다.

반면에, 수동적 깊이센서 방식은 다시점 및 스테레오 영상으로부터 간접적으로 3차원 깊이 정보를 획득하는 방법이다. 수동적 깊이센서 방식은 폐색 영역과 단색 색상 영역에서 부정확한 깊이 정보를 제공하는 단점이 있지만, 고해상도의 깊이맵을 제공하고, 능동적 깊이센서 방식에 비해 적은 비용으로 깊이맵을 생성할 수 있다.

좀 더 정확한 3차원 깊이 정보를 획득하고자 능동적 깊이센서 방식과 수동적 깊이센서 방식의 장점을 결합한 하이브리드 방법이 연구되었다. 대부분의 하이브리드 방식은 실물을 3차원 스캐너로 초기 3차원 모델링한 후, 카메라로 획득한 영상 정

보로 초기 3차원 모델을 보정한다 [4, 5]. 그러나 3차원 스캐너는 움직이는 물체에서 깊이 정보를 측정하는데 제약이 있고, 3차원 모델링을 하기 위해 많은 노력과 시간이 필요하다.

2005년 한국전자통신원(ETRI)에서는 3차원 스캐너 대신 깊이 카메라를 이용한 하이브리드 방법을 소개하였다 [6]. 깊이 카메라는 3차원 스캐너와 달리 실시간으로 실물의 깊이 정보를 제공한다. 그러나 ETRI의 하이브리드 방법은 깊이 카메라를 이용하여 고품질의 깊이맵을 생성할 수 있지만, 깊이 카메라에 의존하여 깊이 정보를 측정하였기 때문에, 깊이 카메라가 제공하는 저해상도의 깊이맵을 생성하였다.

본 논문은 표준화질 (standard definition, SD) 깊이 카메라와 고화질 (high definition, HD) 스테레오 카메라를 결합하여 고화질 깊이맵을 생성하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 깊이 카메라에서 획득한 깊이 정보를 3차원 워핑(warping)하여 스테레오 카메라의 좌영상에 대한 초기 깊이 정보를 예측하고, 스테레오 정합을 수행하는 동안 초기 깊이 정보를 고려하여 깊이 정보를 측정한다.

제안한 방법으로 얻어진 깊이맵의 해상도는 기존의 하이브리드 방법과 달리 스테레오 카메라에 의존하기 때문에, 스테레오 카메라 해상도와 같다. 또한, 스테레오 정합과 같은 영역 기반 정합 방법은 폐색영역에서 잘못된 깊이 정보를 예측한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 3차원 경계 조각 (edge segment)을 계산한 후, 특징 기반 정합 방법을 이용하여 경계영역의 깊이 정보를 정제한다.

2. 제안하는 하이브리드 카메라 시스템

2.1 하이브리드 카메라 구성

본 논문은 제안하는 하이브리드 카메라 시스템을 이용하여 좌측 카메라의 고화질 깊이맵을 생성한다. 그림 1은 하이브리드 카메라 시스템의 구성을 보여준다. 하이브리드 카메라 시스템은 기본적으로 고화질 스테레오 카메라와 표준화질 깊이 카메라로 이루어진다. 또한, 모든 카메라에 동기화 신호를 연속적으로 보내기 위해, 동기화 신호 재생기가 카메라에 연결된다.

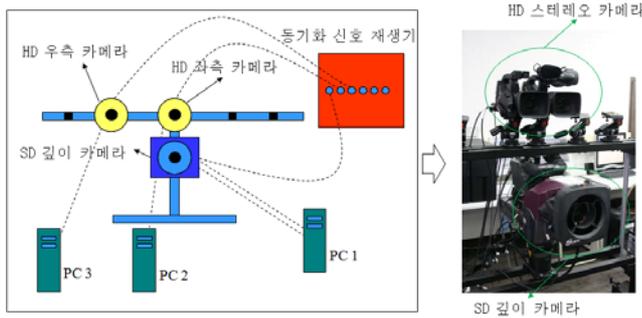


그림 1 하이브리드 카메라 시스템

제안하는 하이브리드 카메라 시스템은 매 프레임마다 스테레오 카메라에서 획득한 좌우 영상과 깊이 카메라로부터 획득한 색상 영상 및 깊이맵을 제공한다. 그림 2는 하이브리드 카메라로 획득한 네 종류의 영상을 보여준다.

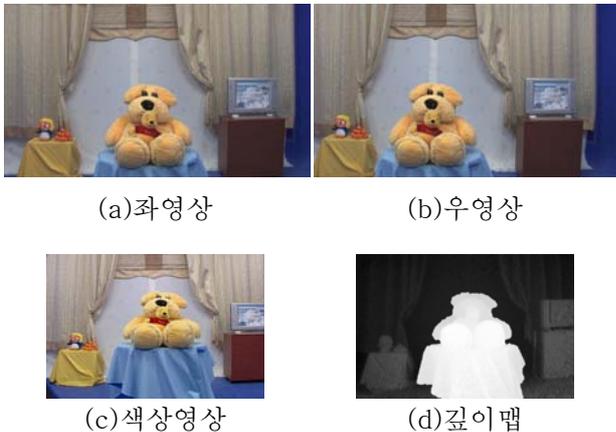


그림 2 입력영상

2.2 깊이맵 보정

일반적인 깊이 카메라의 깊이 정보 측정거리는 약 0.5~7m이다. 그러나 실제 응용에서 측정 가능한 깊이 정보 측정거리는 보통 약 2~4m 정도이다. 더욱이, 깊이 정보 측정거리를 넓게 하면 할수록 깊이 정보의 정확도가 떨어진다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하고 깊이 카메라로부터 고품질의 입력 깊이맵을 생성하기 위

해, 그림 3(a)와 그림 3(b)와 같이, 깊이 카메라를 이용하여 전경과 배경의 깊이 정보를 독립적으로 획득한다. 그런 다음, 전경의 최소 거리부터 배경의 최대 거리까지의 깊이 정보를 0부터 255사이 값으로 양자화하고 두 깊이맵을 합성한다. 그림 3(c)는 보정된 깊이맵을 보여준다.

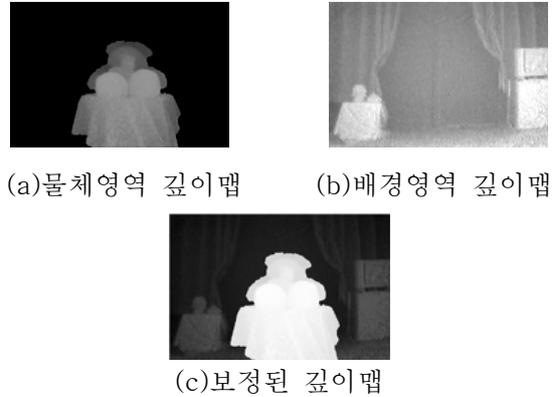


그림 3 깊이맵 보정

3. 고화질 깊이맵 생성

3.1 3차원 워핑을 통한 초기 변이값 생성

본 논문은 깊이 카메라로 획득한 깊이 정보를 좌영상의 초기 깊이 정보로 간주한다. 좌영상의 색상 정보와 상응하는 깊이 정보를 정합하기 위해, 좌측 카메라와 깊이 카메라를 독립적으로 카메라 보정 (camera calibration)한다. 결과적으로 깊이 카메라와 좌측 카메라의 투영 행렬인 P_s 과 P_l 을 식 (1)과 같이 얻는다.

$$P_s = K_s [R_s | t_s] = \begin{bmatrix} K_{s_x} & 0 & P_{s_x} \\ 0 & K_{s_y} & P_{s_y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{s_0} & R_{s_1} & R_{s_2} & t_{s_x} \\ R_{s_3} & R_{s_4} & R_{s_5} & t_{s_y} \\ R_{s_6} & R_{s_7} & R_{s_8} & t_{s_z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_l = K_l [R_l | t_l] = \begin{bmatrix} K_{l_x} & 0 & P_{l_x} \\ 0 & K_{l_y} & P_{l_y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{l_0} & R_{l_1} & R_{l_2} & t_{l_x} \\ R_{l_3} & R_{l_4} & R_{l_5} & t_{l_y} \\ R_{l_6} & R_{l_7} & R_{l_8} & t_{l_z} \end{bmatrix}$$

여기서, K_s , R_s , t_s 는 깊이 카메라의 내부 및 외부 인수 행렬이고, K_l , R_l , t_l 은 좌측 카메라의 내부 및 외부 인수 행렬이다.

깊이 카메라와 좌측 카메라의 상대적인 위치 관계를 계산하기 위해, 깊이 카메라의 위치를 기준으로 좌측 카메라의 위치를 결정한다. 먼저, 식 (2)를 이용하여, 깊이 카메라의 회전 행렬 R_s 를 단위 행렬 I 로, 이동 행렬 t_s 를 영행렬 O 으로 변환한다.

$$R'_{ori} = R_s \cdot R_s^{-1} = I \quad (2)$$

$$t'_{ori} = t_s - t_s = O$$

그런 다음, 식 (3)과 같이, 깊이 카메라의 회전 행렬 R_s 의 역행렬 R_s^{-1} 를 좌측 카메라의 회전행렬 R_l

에 곱하고, 깊이 카메라의 이동 행렬 t_s 를 좌측 카메라의 이동 행렬 t_l 에서 빼준다. 결과적으로, 깊이 카메라에 대한 좌측 카메라의 상대적 위치인 회전 행렬 R'_l 과 이동 행렬 t'_l 를 결정한다.

$$R'_l = R_l \cdot R_s^{-1} \tag{3}$$

$$t'_l = t_l - t_s$$

마지막으로, 깊이 카메라의 색상 영상의 화소 위치 (p_{sx}, p_{sy}) 와 상응하는 깊이맵의 화소값이 $D_s(p_{sx}, p_{sy})$ 일 때, 3차원 화소 $p_s = (p_{sx}, p_{sy}, D_s(p_{sx}, p_{sy}))$ 를 식 (4)에서 계산한 투영 행렬 P'_l 을 이용하여 식 (5)와 같이 3차원 워핑을 수행한다.

$$P'_l = K_l [R'_l | t'_l] \tag{4}$$

$$p_l = P'_l \cdot P_s^{-1} \cdot p_s \tag{5}$$

여기서, $p_l = (p_{lx}, p_{ly}, 1)$ 은 p_s 에 상응하는 좌영상의 위치 정보 (p_{lx}, p_{ly}) 를 포함한다. 또한, p_l 에서의 깊이 정보 $D_l(p_{lx}, p_{ly})$ 는 식 (6)과 같다.

$$D(p_{lx}, p_{ly}) = (t_{lx} - t_{sx}) + D_s(p_{sx}, p_{sy}) \tag{6}$$

그림 4는 3차원 워핑을 통해 얻어진 좌영상의 초기 깊이맵을 보여준다.



그림 4 초기 깊이맵

3.2 색상 분할에 기반으로 한 스테레오 정합

본 논문은 스테레오 정합을 수행하는 동안 3차원 워핑하여 생성한 초기 깊이 정보를 고려하여 좌영상의 정확한 깊이 정보를 측정한다. 제안하는 방법은 색상 분할에 기반으로 한 스테레오 정합 [9]을 기본으로 하여 깊이맵을 생성한다. 그림 5는 좌우영상의 색상 분할 결과를 보여준다.



(a) 좌영상 (b) 색상 분할

그림 5 색상 분할

색상 분할을 수행하기 전에, 좌우영상에 양측성 필터(bilateral filter)를 적용하여 영상 잡음

을 제거한다. 그런 다음, 그래프 기반의 색상 분할 방법[10]을 이용하여 좌우영상을 색상 분할한다.

색상 분할에 기반으로 한 스테레오 정합에서 일반 자연 영상은 비슷한 변이(disparity)를 가지는 영역으로 분할되고, 색상 조각은 하나의 변이를 가진다고 가정한다. 각 색상 조각에 초기 변이를 설정하기 위해서, 우선 식 (7)을 이용하여 초기 깊이맵의 깊이 정보를 변이 정보로 변환한다.

$$d(p_{kx}, p_{ky}) = \frac{K_{lx} \cdot B}{D(p_{kx}, p_{ky})} \tag{7}$$

여기서, $d_i(p_{lx}, p_{ly})$ 는 초기 깊이맵 위치 (p_{lx}, p_{ly}) 의 깊이 정보 $D_i(p_{lx}, p_{ly})$ 의 변환된 변이이다. B는 기존 선 거리로서, 우측과 좌측 카메라 사이의 거리이다. K_{lx} 는 좌측 카메라의 초점 거리이다.

색상 조각 s_i 의 초기 변이 $d(s_i)$ 는 식 (8)과 같이, 색상 조각 s_i 가 포함하고 있는 영역에 존재하는 초기 깊이 정보의 평균값으로 결정한다.

$$d(s_i) = \frac{1}{n(A(s_i))} \sum_{j=1}^{n(A(s_i))} d_j(A(s_i)) \tag{8}$$

여기서, $n(A(s_i))$ 는 색상 조각 s_i 에 포함된 초기 깊이맵 영역 $A(s_i)$ 의 화소 수이고, $d_j(A(s_i))$ 는 초기 깊이맵 영역 $A(s_i)$ 에 있는 j번째 변이를 의미한다.

색상 분할에 기반으로 한 스테레오 정합은 색상 조각의 초기 변이를 이용해 우영상에서 같은 색상 조각을 찾아 변이를 결정한다. 각 색상 조각에 대한 최종 변이를 결정하기 위해, 히스토그램 기반의 변이 공간 분포(disparity space distribution, DSD)를 이용한다. 즉, DSD에서 최대값을 가지는 변이가 그 조각에 대한 변이로 결정된다.

식 (9)은 색상 조각에 대한 히스토그램 기반의 매칭함수이다. dim_j 는 영상 내의 각 조각의 화소 개수의 제곱근이고, $d(s_i)$ 는 해당 색상 조각에 대한 초기 변이값이다. 또한, h_l 은 히스토그램에서 l번째 빈(bin)을 의미한다. 매칭 함수는 비교 대상이 되는 두 개의 영상의 색상 값의 히스토그램 비율에 따른 색상의 유사도를 이용한다.

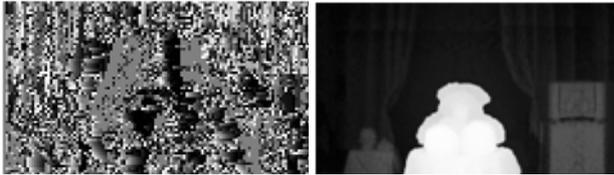
$$m_{\#}(d) = \max(h_{l-1} + h_l + h_{l+1} + \frac{\lambda \cdot dim_{\#}}{|d(s_i) - d| + 1}) \tag{9}$$

3.3 깊이맵 정제

스테레오 정합과 같은 영역 기반 정합 방법으로 깊이 정보를 획득할 경우, 폐색영역과 같은 불연속적인 영역에서 부정확한 깊이 정보를 예측한다. 본 논문은 계위 공간(scale space)를 이용해 좌우영상의 경계 정보를 생성하고 [11], 이 경계 정보를 스테레오 정합하여 3차원 경계 조각을 추출한다. 그런 다음, 경계 조각을 특징 기반 정합 방법을 적용하여 경계 영역의 깊이 정보를 정제한다.

4. 실험 결과 및 분석

제안한 깊이맵 생성 방법을 평가하기 위해, Canon HD 카메라 2대와 깊이 카메라인 Zcam을 이용하여 하이브리드 카메라 시스템을 구성하였다. 그림 6은 일반적인 스테레오 정합방법을 통해 생성한 깊이맵 결과와 제안하는 방법을 통해 생성한 깊이맵 결과를 보여준다.



(a) 스테레오 정합 (b) 제안한 방법

그림 6 고화질 깊이맵 결과

제안한 방법으로 생성한 깊이맵의 객관적인 평가를 위해, 본 논문은 3차원 스캐너를 이용하여 동일한 장면의 3차원 정보를 획득하고 기준 깊이맵을 생성하였다. 그림 7은 스캐너를 통해 획득한 3차원 장면 모델링 결과와 기준 깊이맵이다.



(a) 3차원 장면 모델링 (b) 기준 깊이맵

그림 7 고화질 깊이맵 결과

제안한 깊이맵 생성 방법은 표 1에 표시된 품질 측정 방법[8]에 의해 객관적으로 검증했다. 품질 측정은 기존의 스테레오 정합과 제안한 방법으로 얻은 깊이맵을 기준 깊이맵과 비교했다. 기본 깊이맵의 깊이 정보과 다르게 매칭된 화소들의 비율을 비폐색 영역 B_0 , 텍스처 없는 영역 B_T , 깊이 정보의 불연속 영역 B_D 으로 나누어 평가한다. 표 2는 품질 측정 결과이다.

표 1. 제안한 방법의 품질 측정

비폐색 영역	$B_0 = \sum_{s \in \Omega} (d_L(s) - d_R(s) > \delta) \cdot \omega$
텍스처 없는 영역	$B_T = \sum_{s \in \Omega_T} (d_L(s) - d_R(s) > \delta) \cdot \omega$
불연속 영역	$B_D = \sum_{s \in \Omega_D} (d_L(s) - d_R(s) > \delta) \cdot \omega$

표 2. 제안한 방법의 품질 측정

구분	B_0	B_T	B_D
스테레오 정합	1.25	1.62	6.68
제안한 방법	0.88	1.29	4.76

5. 결론

본 논문은 표준화질 깊이 카메라로부터 획득한 깊이 정보를 이용하여 고화질 깊이맵을 생성하는 방법을 제안했다. 깊이맵의 정확도를 객관적으로 평가를 위해 3차원 장면 모델링 정보를 이용하여 기준 깊이맵을 생성하고, 제안한 방법으로 생성한 깊이맵과 비교하였다. 실험 결과에서 보듯이, 기존의 스테레오 매칭 방법을 이용하는 경우보다 향상된 화질의 깊이맵을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원(GIST) 실감방송연구센터(RBRC)를 통한 정보통신대학 IT연구센터(ITRC)의 지원과 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2007-000-20330-0)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N8944, "Preliminary FTV model and requirements," 2007.
- [2] Y. Kim, J. Kim, and K. Sohn, "Fast disparity and motion estimation for multi-view video coding," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 2, pp 712-719, 2007.
- [3] 3DV systems, <http://www.3dvssystems.com/>, 2005.
- [4] I. Stamos, P. Allen, "3-D model construction using range and image data," *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 531-536, June 2000.
- [5] P. Dias, V. Sequeira, F. Vaz, and J. Goncalves, "Registration and fusion of intensity and range data for 3D modeling of real world scenes," *Proceedings of 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 418-425, 2003.
- [6] G. Um, K. Kim, C. Ahn, and K. Lee, "Three-dimensional scene reconstruction using multi-view images and depth camera," *Proc. of SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII*, vol. 5664, pp. 271-280, 2005.
- [7] W. Grimson, "Computational experiments with feature based stereo algorithm," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 7, no.1, pp. 17-34, 1985.
- [8] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, no 1, pp. 7-42, 2002.