다시점 카메라의 색상 특성 및 교정 기술

+ **호요성** 광주과학기술원(GIST) 교수

❶ 다시점 3차원 영상을 위한 카메라 조정 및 영상 정렬 기술
❷ 다시점 카메라의 색상 특성 및 교정 기술
❸ 영상 보간 및 깊이 영상 업샘플링 기술

서론

최근 2차원 영상에서는 느낄 수 없었던 입체감과 몰입감을 제공하는 3차원 영상에 대한 관심이 뜨거워지고 있다. 특히, 서로 다른 위치에서 촬영된 두 장의 영상을 기반으로 하는 스테레오 비전은 기술적 성숙도가 높아서 영화나 게임, 방송 등 다양한 영역에서 활용되고 있으며, 스테레오 영상 이외에도 다수의 시점에서 촬영된 다시점 영상이나 원하는 시점을 합성하여 자유로운 시점 선택이 가능한 자유시점 영상 등 다양한 포맷의 3차원 영상이 연구되고 있다 [1-3]. 이런 3차원 영상의 가장 큰 특징은 기존 2차원 영상과 달리 같은 장면을 여러 시점에서 촬영한다는 것이다. 이렇게 촬영된 영상을 3차원 디스플레이 장치를 통해 시청하면 뇌의 융합 작용에 의해 입체감을 느낄 수 있다. 3차원 영상에 대한 연구가 진행된 초기에는 한 대의 카메라를 이용하여 물체를 촬영하였다. 즉, 한 대의 카메라로 정지된 객체를 서로 다른 위치에서 번갈아 촬영하는 방식이다. 이 방법을 이용하면 여러 대의 카메라를 구동하기 위한 기술력과 비용 문제를 해결할 수 있지만, 동적인 객체를 촬영할 수 없다는 문제가 발생한다.

카메라 제어 기술이 발달하면서, 두 대 이상의 카메라를 이용하여 동적인 객체를 촬영하는 연구가 시작되었다. 하지만 카메라의 수가 늘어나면서 기존 단

그림 1. 3차원 영상의 색상 불일치 문제

ⓐ race 영상

ⓑ flamenco 영상

일 시점 카메라에서는 나타나지 않은 다양한 문제들이 발생하기 시작했다. 단일 시점 영상의 경우, 영상의 화질이 영상 자체에서 결정되지만, 여러 시점의 영상을 사용하게 되면 각각 영상의 화질은 물론 시점들 사이의 상대적인 화질 또한 중요한 요인으로 작용하게 된다. 즉, 카메라들이 서로 기하학적으로 잘 정렬되어 있는지, 광학적 특성이 서로 일치하는지에 따라서 3차원 영상의 화질이 크게 좌우된다 [4, 5].

일반적으로 동일한 카메라를 이용하여 같은 장면을 촬영하면 모두 동일한 색상 분포를 얻을 수 있다고 생각하기 쉽지만, 조명의 차이, 수광 센서의 전기-광학적 특성 차이, 조리개나 셔터의 기계적인 특성 차이로 인해서 동일한 색상 분포를 갖는 영상을 촬영하는 것은 매우 어렵다.
만약 모든 물체가 입사된 빛을 모든 방향으로 균일하게 반사하는 Lambertian 표면 특성을 갖는다면 조명이나 카메라 위치에 관계없이 동일한 색상을 갖는 영상을 촬영할 수 있지만, 실제로 이런 표면 특성을 갖는 물체는 매우 드물다. 극단적인 예로 유리나 거울 등을 들 수 있으며, 현실 세계의 상당히 많은 물체가 조명의 위치와 보는 위치에 따라서 다른 색을 띄게 된다. 하지만 이 정도의 오차는 뇌에서 보정하기 때문에, 실제로 문제가 되는 오차는 앞서 설명한 대로 카메라의 전기적, 광학적, 기계적 특성 차이에서 기인하는 경우가 많다.

[그림 1]의 다시점 영상은 MPEG(Moving Picture Expert Group)에서 사용하는 다시점 영상들로 같은 종류의 카메라를 통해 촬영된 것이다. 하지만, 시점에 따라서 서로 다른 색상 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 특히 이런 색상 불일치가 존재하는 영상을 장시간 시청하게 되면 두통이나 어지럼증 등 다양한 문제점을 야기할 수 있기 때문에 이를 보정하는 과정이 반드시 필요하다.
또한, 이런 색상 불일치 문제는 영상처리 과정에도 문제를 일으킨다. 특히, 다양한 애플리케이션에서 3차원 영상을 이용한 깊이 정보 예측이나 영상 합성 등의 기술이 사용되는데, 대부분의 알고리즘이 각 시점 사이에 피사체의 색상은 동일하다는 가정(intensity conservation assumption)을 바탕으로 설계되었기 때문에 색상 불일치 문제가 발생할 경우 알고리즘의 성능이 크게 감소하게 된다.

따라서 지금까지 색상 불일치 문제를 해결하기 위해 많은 알고리즘들이 개발되었다. 이번 호에서는 다양한 색상 보정 알고리즘들에 대해서 알아보고, 각각의 장단점을 살펴본다. 구성은 다음과 같다. 2장에서 가장 기본이 되는 색상 차트를 이용한 색상 보정 기술에 대해서 살펴보고, 3장에서 전역적 특성을 기반으로 하는 색상 보정 기술에 대해서 알아본다. 상기한 방법들의 문제점을 알아본 뒤, 최근 가장 활발히 연구되고 있는 대응점 기반의 색상 보정 기술을 4장에서 알아본다. 그리고 마지막으로 5장에서 이번 2회의 결론을 맺는다.

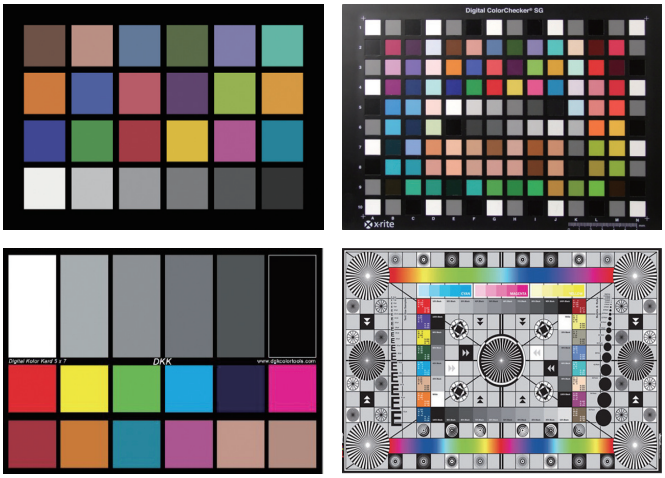


그림 2. 다양한 종류의 색상 차트

색상 차트를 이용한 색상 보정 기술

가장 쉽게 카메라의 색상 차이를 보정할 수 있는 기술은 색상 차트를 이용하는 방법이다. 즉, 미리 색상을 알고 있는 차트를 여러 대의 카메라를 이용하여 촬영하고, 촬영된 차트의 색상 차이를 분석하여 카메라의 특성을 보정하는 방법이다 [6]. [그림 2]는 일반적으로 널리 사용되는 색상 차트를 나타낸다. 좌측 상단의 Macbeth ColorcheckerTM classic은 사람의 피부색과 하늘, 나무 등 영상에 자주 나타나는 18가지 색상과 흑백 6개의 색으로 이뤄져있다. 차트의 표면은 최대한 Lambertian 특성을 따르도록 제작되어 차트나 카메라의 위치에 상관없이 동일한 색을 띄도록 제작되었다. 보다 개선된 차트는 테두리에 흑백 색상을 배치하여 차트에 투사된 조명 색을 보정할 수 있도록 제작되었다. 이 외에도 다양한 형태의 차트가 개발되어 널리 사용되고 있다.

Ilie와 Whelch는 색상 차트를 이용한 카메라 보정 기술을 개발하였다 [7]. 제안된 방법은 카메라 하드웨어를 설정하기 위한 반복적인 캘리브레이션 과정과 소프트웨어 기반의 정제 과정으로 이뤄져 있다. [그림 3]은 카메라를 보정하기 전에 촬영된 색상 차트의 오차를 보여준다. 8대의 카메라로 24개의 색상을 갖는 ColorcheckerTM을 촬영하여 얻은 영상으로부터 획득한 데이터로써, 동일한 종류의 카메라라도 서로 다른 색상 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 좌측의 정육면체 내의 구의 크기는 샘플 내부의 편차를 의미하고, 가운데 하얀색 구는 원래 샘플의 색상을 의미한다. 즉 흰색 구에서 각 카메라의 구가 멀리 떨어져 있을수록 원본과의 오차가 큰 것이며, 각 카메라의 구끼리의 거리는 카메라 간 오차를 의미한다. 그림에서 보는 것과 같이 초기 상태의 카메라는 실제 차트와의 색상은 물론 카메라간 서로 다른 색 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다.

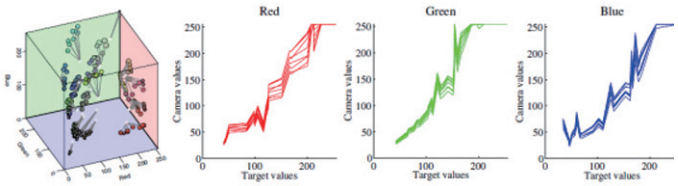


그림 3. 초기 카메라의 3차원 RGB 색공간과 카메라 간 대응 곡선

반복적인 캘리브레이션 과정에서는 카메라의 색상이 원본과 최대한 유사하도록, 또 색상 차트 내의 색상이 균일하게 추출되도록 카메라 내부 레지스터를 조절한다.

$$❶ \quad C = \sum_{s=1}^{NS} \left(w|\vec{I_s} - \vec{T_s}| \, (1-w) V_s \right)$$

상기의 과정은 ❶에 의해서 수행된다. C는 비용값을 의미하고, s는 샘플 번호, NS는 총 샘플의 수를 의미한다. I_s는 실제 카메라로부터 획득된 색상값을 의미하고 T_s는 실제 차트의 색상을 나타낸다. 즉 첫 번째 항은 실제 카메라와 차트의 색상이 서로 유사해지도록 비용값을 조절한다. 두 번째 항의 V_s는 색상 차트에서 추출된 값의 편차를 의미하며, 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$❷ \quad V_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{WS} |\vec{I_{si}} - \vec{I_s}|^2}$$

여기서 I_{si}는 국부 영역 WS내의 색상값을 의미하고, 색상 평균값 I_s와의 제곱 오차로 계산된다. 이렇게 계산된 비 값 C를 최소화하는 카메라 레지스터를 계산하여 카메라를 캘리브레이션한다. [그림 4]는 캘리브레이션된 카메라로 촬영된 영상의 특성을 보여준다. [그림 3]과 달리 카메라 특성이 상대적으로 유사해진 것을 확인할 수 있다.

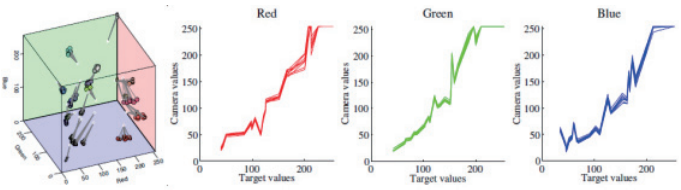


그림 4. 카메라 캘리브레이션 후 3차원 RGB 색공간과 카메라 간 대응 곡선

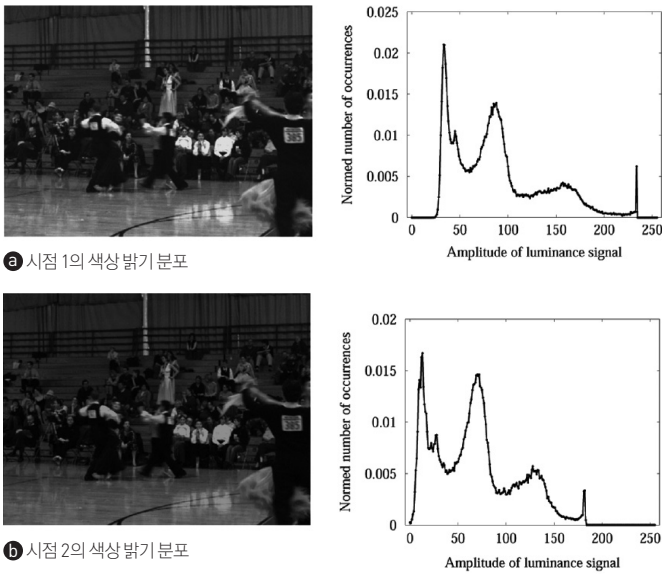
이렇게 1차적으로 하드웨어의 특성을 조절한 뒤, 소프트웨어적인 정제 과정을 수행한다. 이 정제 과정에서는 최소 자승 정합 방법과 3x3 선형 변환 방법, 다항 변환 방법을 제안하였다. 이 방법을 거치면 매우 정확하게 색상이 일치된 영상을 얻을 수 있지만, 이 방법은 색상을 보정하기 위해 색상 차트를 촬영하여 카메라 레지스터를 조절하고 후처리해야하는 과정이 필요하다. 즉, 이미 촬영된 영상에 대해서는 적용할 수 없다는 한계를 갖고 있다.

전역 특성을 고려한 색상 보정

2장에서 살펴본 바와 같이 3차원 영상의 색상을 보정하기 위해서는 영상 간 대응되는 색 관계를 파악하는 것이 중요하다. 2장에서 소개된 기술은 이미 알고 있는 색상 차트를 이용하여 대응 관계를 분석했지만, 색상 차트가 촬영되지 않은 일반적인 영상에서는 이런 대응 관계를 분석하는 것이 매우 어렵다. 따라서 색상의 대응 관계를 상세하게 파악하지 않고 영상의 전역적인 특성을 고려하여 색상을 보정하는 방법들이 제안되었다.

영상의 전역적인 특성은 평균 밝기나 분포도 등 여러 가지가 있을 수 있으나, 색상 보정에서는 히스토그램을 가장 널리 사용하고 있다. 가장 대표적인 히스토그램 기반의 색상 보정 기술은 Frecker와 Chen이 제안한 히스토그램 매칭이다 [8, 9]. 히스토그램은 선형 색상 오차뿐만 아니라 전체 동적 영역에서의 색상 분포를 분석할 수 있기 때문에 색상 보정에 유리하다. [그림 5]는 두 대의 카메라로 촬영된 영상과 히스토그램을 보여준다. 시점 1의 영상이 시점 2보다 밝게 촬영되었고 보다 넓은 동적영역을 갖도록 촬영된 것을 알 수 있다.

그림 5. 촬영된 영상의 시점 별 히스토그램 분포



ⓐ 시점 1의 색상 밝기 분포

ⓑ 시점 2의 색상 밝기 분포

이렇게 서로 다른 히스토그램을 유사한 분포를 갖도록 조절하는 과정을 히스토그램 매칭이라고 한다. 먼저 구한 히스토그램으로부터 ❸을 통해 누적 히스토그램을 구한다.

$$❸ \quad c_R[\upsilon] = \sum_{i=0}^{\upsilon} h_R[i]$$

h_R은 히스토그램을 의미하고 C_R은 누적 히스토그램을 의미한다. 이렇게 획득한 시점별 누적 히스토그램을 중첩해보면 [그림 6]과 같은 차이를 가시적으로 확인할 수 있다. 두 누적 히스토그램 간의 차이가 실제로 두 카메라 사이의 색상 차이를 의미한다.

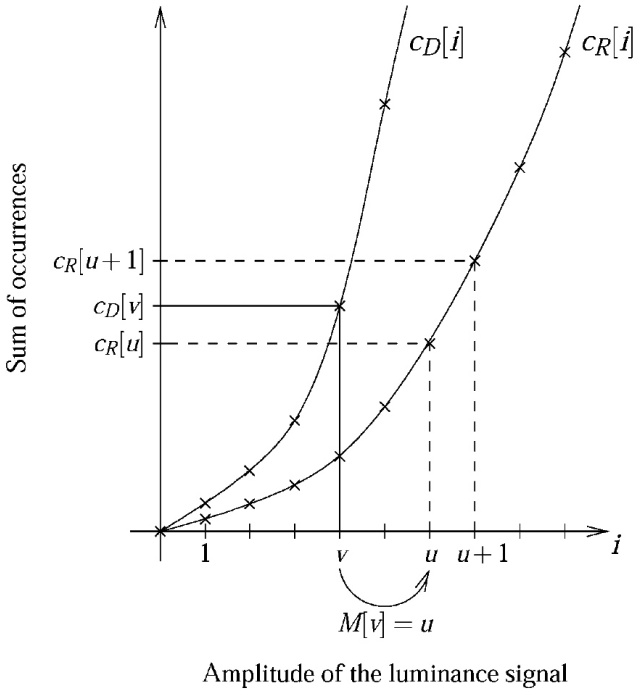


그림 6. 누적 히스토그램 차이와 매칭 과정

두 누적 히스토그램을 매칭하기 위해서는 매핑 함수 M을 계산해야 한다. 이 함수를 계산하기 위해서는 다음과 같이 한 영상의 색상 빈도와 다른 영상의 색상 빈도를 매칭한다.

$$❹ \quad M[\upsilon] = \upsilon \quad \text{with} \quad c_R[\upsilon] \le c_D[\upsilon] < c_R[\upsilon+1]$$

이는 두 영상의 밝기 발생 빈도를 비교하여 서로 일치시키는 과정으로써, 이렇게 얻어진 M을 이용하여 다음과 같이 최종 영상의 색상을 재조정한다.

$$❺ \quad y_C[m,n] = M[y_D[m,n]]$$

이 과정을 거치고 나면 두 영상의 밝기 분포가 서로 유사하게 조절된다. [그림 7]은 보정 전 두 영상의 히스토그램과 히스토그램 매칭으로 보정된 히스토그램 분포의 차이를 보여준다. 붉은색 점선으로 나타난 어둡고 좁은 동적 영역을 갖는 영상이 색상 보정 과정을 통해 밝고 넓은 동적 영역을 갖도록 보정된 것을 확인할 수 있다. 특히, 두 히스토그램의 분포가 유사하게 변경되어 색상 불일치가 감소한 것을 알 수 있다.

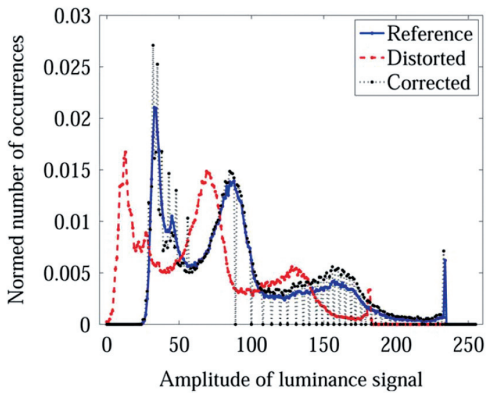


그림 7. 히스토그램 매칭 결과

이와 같이 히스토그램 매칭은 상당히 간단한 과정을 통해 안정적인 색상 보정 효과를 얻을 수 있다. 하지만 전역적인 특성을 이용하게 되면 다른 시점에서 영상이 촬영될 때 발생하는 폐색 영역 때문에 성능이 저하되는 문제점을 가진다. 즉, 히스토그램 매칭이 최고의 성능을 발휘하기 위해서는 두 카메라가 완전히 같은 위치에서 촬영되어야 한다. 이는 양안 시차를 얻기 위해서 서로 다른 위치에서 촬영되는 일반적인 3차원 영상의 특성에 부합되지 못한다. 영상에 폐색 영역이 발생하게 되면 히스토그램의 정확도가 감소하여 색상 보정 결과가 감소하게 된다.

대응 관계를 이용한 색상 보정

3장에서 언급한 바와 같이 전역 특성을 기반으로 하게 되면 폐색 영역에 의한 성능 저하 문제가 발생하게 된다. 폐색 영역을 제외한 값들로 색상 보정을 하기 위해 특징점 기반의 대응점 추출 기술을 이용하여 대응 관계를 분석하고, 이를 통해 색상을 보정하는 기술들이 최근에 널리 개발되고 있다 [10].

대응점 기반으로 추출된 샘플의 수가 매우 많다면, 이를 통해 히스토그램 매칭을 수행하면 되지만 실제로 추출되는 대응점의 수는 히스토그램 매칭을 수행하기에는 매우 부족하다. [그림 8]은 실제로 추출된 대응 관계를 보여준다. 또한, 색상 차트를 통해 대응점을 획득할 때와 달리 부정확한 값들(그림에서 검정색 대응 관계)이 추출되는 경우가 많기 때문에 이를 고려한 색상 보정 과정이 필요하다.

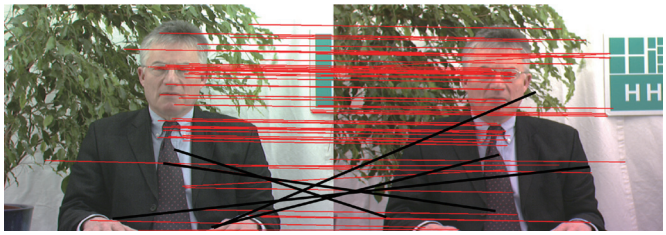


그림 8. 특징점 기반 알고리즘으로 추출한 대응 관계

상기한 문제점들을 해결하기 위해서 Jung et al.은 카메라의 상대적인 특성을 고려한 색상 보정 기술을 제안하였다 [11]. 대응점 추출 결과에 강인한 성능을 얻기 위해서 카메라 간의 상대적인 특성을 모델링하여 색상을 보정한다.

상대적인 카메라 특성이란 두 대의 카메라에 같은 세기의 빛이 입사되었을 때 각각 카메라가 어떠한 세기로 빛을 인식하는지, 그 상대적인 차이를 의미한다. 이런 차이의 원인이 되는 주요 카메라 특성으로는 이득과 오프셋, 감마가 있고, 이를 모두 고려하여 모델링하면 다음과 같은 특성 모델을 얻을 수 있다.

$$❻ \quad P_{ref} = C_{gain}\{P_{tar}/(2^{bitdepth}-1)\}^{C_{gamma}} \times (2^{bitdepth}-1) + C_{offset}$$

여기서 $Pref$는 기준이 되는 시점의 색상 값을 의미하고, $Cgain$, $Coffset$, $Cgamma$는 각각 이득과 오프셋, 감마 특성에 대한 계수를 의미한다. $Ptar$는 보정하고자 하는 영상의 색상 값을 의미한다. 즉, 최종 보정된 색상 값은 세 개의 계수에 의해서 결정되며 각 계수들은 추출된 대응 관계를 통해서 유추된다. 계수를 유추하기 위해서 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하며, 대응점의 이상치를 제거하기 위해서, 계수 유추와 이상치 제거 과정을 반복 수행한다. 즉, 얻어진 대응점으로 계수를 유추하고, 이를 통해 계산된 상대적 카메라 특성 곡선에서 멀리 떨어진 이상치들을 제거한다. 이상치가 제거된 대응점을 바탕으로 계수를 다시 유추하는 과정을 반복적으로 수행하여 최종 특성 곡선을 유추한다.

[그림 9]는 상기한 과정으로 획득된 상대적 카메라 곡선을 나타낸다. 윗쪽은 이상치 제거 과정이 없는 결과로서, 추출된 대응점의 오차로 인해서 곡선이 크게 왜곡된 것을 볼 수 있다. 하지만, 제안된 기술을 이용하면 안정적으로 특성 곡선을 얻을 수 있다.

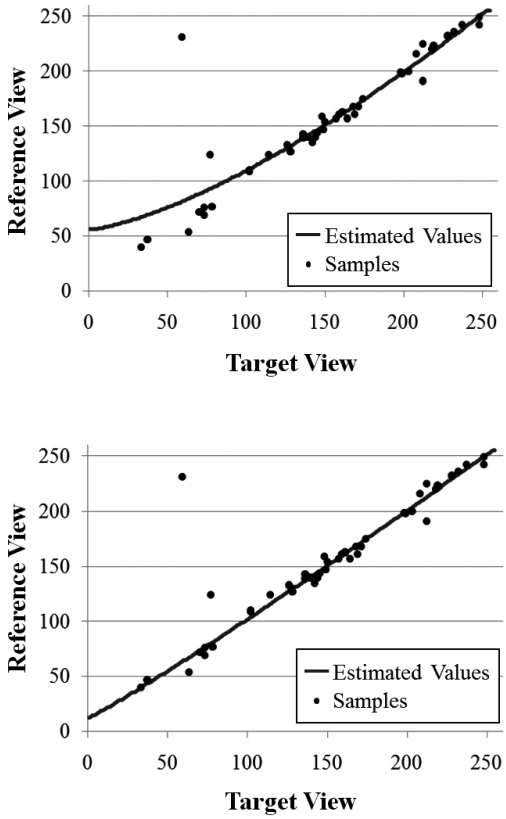


그림 9. 이상치 제거 유무에 따른 카메라 특성 곡선 차이

그림 10. 색상 보정 결과: (a) 원본, (b) 히스토그램 정합, (c) 대응점 기반 색상 보정

[그림 10]은 히스토그램 매칭과 대응점 기반의 색상 보정 결과를 비교한 그림이다. 그림 10(a)는 원본 다시점 영상을 나타내고, 그림 10(b)와 그림 10(c)는 각각 히스토그램 매칭과 대응점 기반 색상 보정 결과를 보여준다. 폐색 영역의 크기와 색상에 따라서 성능이 좌우되는 히스토그램 매칭과 달리 대응점 기반의 알고리즘은 안정적인 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

결론

이번 호에서는 고화질의 3차원 입체 영상을 획득하기 위한 색상 보정 기술에 대해서 알아보았다. 색상 불일치 문제는 시청자에게 시각적 피로감을 유발하는 것은 물론, 다양한 영상 처리 알고리즘의 성능을 저하시킨다. 따라서 색상 차트를 이용한 색상 보정이나 영상의 전역적인 특성을 고려한 색상 보정 기술이 연구되었다. 최근에는 이미 촬영된 영상의 색상을 폐색 영역의 크기나 색상에 상관없이 보정하기 위해서, 대응점 기반의 색상 보정 기술이 활발히 연구되고 있다. 상기한 기술들을 이용하여 여러 시점으로 구성된 3차원 영상의 색상을 보정하게 되면 고화질의 입체 영상을 획득할 수 있다. 오차가 보정된 3차원 영상은 그 자체로도 훌륭한 입체 영상 콘텐츠로 활용될 수 있으며, 깊이 생성 및 중간시점 생성 등 좀 더 심화된 3차원 영상처리 과정에 대해 복잡도를 줄이고 품질을 높이는 역할을 수행할 수 있다.

참고문헌

[1] 호요성, 김성열, 3차원 입체영상 정보처리: 두양사, 2010.
[2] A. Kubota, A. Smolic, M. Magnor, M. Tanimoto, T. Chen, and C. Zhang, "Multi-View Imaging and 3dtv (Special Issue Overview and Introduction)," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 6, pp. 10-21 Nov. 2007.
[3] M. Tanimoto, M. P. Tehrani, T. Fujii, and T. Yendo, "Ftv for 3-D Spatial Communication," Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 4, pp. 905-917, April 2012.
[4] M. Lambooij, M. Fortuin, I. Heynderickx, and W. IJsselsteijn, "Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review," Journal of Imaging Science, vol. 53, no. 3, pp. 30201-30201, 2009.
[5] M. Lambooij, W. IJsselsteijn, and I. Heynderickx, "Visual Discomfort of 3d Tv: Assessment Methods and Modeling," Displays, vol. 32, no. 4, pp. 209-218, 2011.
[6] A. Ilie and G. Welch, "Ensuring Color Consistency across Multiple Cameras," IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1268-1275, Oct. 2005.
[7] N. Joshi, B. Wilburn, V. Vaish, M. Levoy, and M. Howoritz, "Automatic Color Calibration for Large Camera Arrays," UCSD CSE Tech Report CS2005-0821, pp. 1-4, May 2005.
[8] U. Fecker, M. Barkowsky, and A. Kaup, "Histogram-Based Prefiltering for Luminance and Chrominance Compensation of Multiview Video," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 18, no. 9, pp. 1258-1267, Sept. 2008.
[9] C. Doutre and P. Nasiopoulos, "Color Correction Preprocessing for Multiview Video Coding," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 19, no. 9, pp. 1400-1406, Sept. 2009.
[10] K. Yamamoto, M. Kitahara, H. Kimata, T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, S. Shimizu, K. Kamikura, and Y. Yashima, "Multiview Video Coding Using View Interpolation and Color Correction," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 17, no. 11, pp. 1436-1449, Nov. 2007.
[11] J.I. Jung and Y.S. Ho, "Color Correction Algorithm Based on Camera Characteristics for Multi-View Video Coding," Signal, Image and Video Processing, DOI:10.1007/s11760-012-0341-1, pp. 1-12, May 2012.era Arrangement," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 57, no. 3, pp. 1041-1048, Aug. 2011.