

고주파 조명패턴을 사용한 직접광과 간접광의 분리성능 향상 기법

조미리나[†], 박동규^{**}

요 약

컴퓨터 그래픽스 분야에서는 사실적인 3차원 렌더링을 위해 조명에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 우리가 보는 장면은 어떤 장면내에서 한 점에 들어오는 빛과 그 빛에 의한 레디언스에 의하여 인지된다. 한 장면에서 카메라로 들어오는 빛의 성분을 직접광과 간접광으로 구분할 수 있는데, 직접광은 한 객체의 표면에 닿은 광원을 객체의 속성에 의해서 직접 반사시킨 빛 성분이고, 간접광은 복잡한 기하학적 요소간의 상호반사에 객체로부터 반사된 빛 성분이다. 이 논문은 고주파 조명 패턴을 활용하여 임의의 장면내에 있는 빛을 직접광과 간접광 성분으로 분리시킬 때의 부정확성을 개선하여 정확성을 높이는 방법에 관한 것이다. 이를 위하여 물체의 속성에 따른 빛이 비취지지 않은 영역에서 반사된 빛의 값을 측정하는 방법을 제안하고 이 방법을 통하여 장면에서 직접광과 간접광 성분의 분리의 정확도를 높일 수 있었다. 그리고 분리된 이미지의 간접광 성분을 특성을 이용하여, 육안으로 보이지 않는 장면에서의 이미지를 추출하는 향상된 방법을 제안하고 구현하였다.

An Enhancement Technique for Separation of Direct Light and Global Light Using High Frequency Illumination pattern

Jo MiRiNa[†], Park DongGyu^{**}

ABSTRACT

In computer graphics, there exist many studies about illumination and radiance for a realistic description of the 3D modeling and rendering. When we see a scene, the scene is lit by a source of light and the radiance of the points by a source in the scene. The radiance has direct light and glight component. The direct light gets lights directly from light source, but the global light gets lights indirectly by interreflections among complicated geometrical components. In this paper, we studied a method for increasing the accuracy of separating direct light and global light components from a scene by using high frequency illumination pattern. For experiments, we applied the separating method of Nayar's and found the best configurations for the separation through the experiments. We improved the separation accuracy of direct and global light by measuring the value of unilluminated area, which depends on the characteristics of object. Furthermore, we enhanced invisible scene of the global light by applying the image filtering technique.

Key words: Direct Light(직접광), Global Light(간접광), High Frequency Illumination Pattern(고주파 조명 패턴), Separation of Direct Light and Global Light(직접광과 간접광 분리)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 박동규, 주소 : 경남 창원시 사림동 9번지(641-773), 전화 : 055)213-3834, FAX : 055)213-3839, E-mail : dongupak@gmail.com
접수일 : 2009년 4월 20일, 수정일 : 2009년 7월 1일

완료일 : 2009년 7월 6일

[†] 준회원, 창원대학교 정보시각화연구실 연구원
(E-mail : mirina0918@gmail.com)

^{**} 종신회원, 창원대학교 정보통신공학과 부교수

1. 서 론

일상생활에서 보여지는 장면은 광원으로부터 나야간 빛이 물체들에 부딪힌 후 반사되어 우리의 시신경에 의하여 인식되어 나타나지는 것이다. 우리 눈에 보이는 빛과 광원과의 관계를 모방하여 특정 조명에서 나오는 색상, 광도, 방향을 컴퓨터에서 모델링하는 것은 정확하고 사실적인 렌더링의 가장 기본적인 부분이다. 일반적으로 컴퓨터 그래픽스 분야에서 장면을 렌더링 할 때 사용하는 주된 조명은 효율성을 위하여 주변광(ambient), 난반사광(diffuse), 정반사광(specular)으로 단순화시키고 이 광원과 오브젝트 표면과의 관계로 렌더링을 한다[1]. 실세계에서 물체와 빛과의 관계는 이보다 더 복잡한데, 그 이유는 표면에서의 빛의 반사 외에 다른 물체에 의해 반사되거나 투과, 굴절되어 들어오는 빛과 같은 여러 가지 간접조명이 존재하기 때문이다. 3차원 모델링 시에는 이러한 간접조명을 적용할 경우 더욱 사실적인 표현이 가능하다. 그러나 오브젝트 간에 주고받는 빛의 영향을 모두 고려하여 렌더링하려면 시간이 많이 걸리고, 또한 많은 시간에 걸쳐 렌더링을 하더라도 표면내부 산란효과와 같은 복잡한 간접 조명 효과를 표현하기 어렵다. 따라서 컴퓨터 그래픽스에서 3차원 공간의 사실적 장면표현을 위해 조명효과를 적용하는 다양한 방법들이 개발되고 있다[2-6].

3차원 모델링의 조명처리뿐만 아니라 이미지 처리 분야에서도 2차원 장면을 정반사(specular) 성분과 난반사(diffuse) 성분으로 분리하는 기법에 대한 연구가 이루어졌다. 이 방법들 중에는 편미분방정식(PDE: Partial Differential Equation) 접근방법을 이용하여 정반사 성분을 제거하는 기법[7], 단일이미지

의 색도 강도 공간에서 정반사와 난반사를 분배하는 기법[8], 명도, 채도, 색조로 구성된 3차원공간으로 정반사와 난반사를 정의하는 기법[9], 이미지기반의 고주파 조명을 이용한 정반사와 난반사를 분리하는 기법[10] 등이 있다. 이런 기법들을 통해 정반사 성분이 제거된 난반사 텍스처 맵을 이미지 기반 3차원 모델링에서 사용할 수 있다. 그리고 이미지 편집에서 각 성분을 독립적으로 처리하고 결합할 수 있다[7].

조명에서 정반사와 난반사는 물체 표면에서의 반사성분만을 고려하였지만 실세계에서 빛의 반사는 표면에서의 반사뿐만 아니라 표면 내부에서 반사, 매질에 의한 빛의 산란 등을 포함한다. Nayar 등은 고주파 조명 패턴을 사용하여 물체와 광원간의 다양한 상호작용을 고려하여, 2차원 장면을 구성하는 빛을 직접광과 간접광 성분으로 빠르게 분리하는 기법을 제안하였다[11].

직접광 성분은 광원에 의하여 나온 빛이 장면내의 한 점에 직접 비추어서 만들어지는 성분이며, 간접광 성분은 장면내의 기하학적 요소에 의하여 반사되어 만들어내는 성분을 말한다. 광원의 간접광 성분은 다양한 매질에 의한 복잡한 빛의 상호작용을 나타내므로 사실적 렌더링이 어렵다. 따라서 직접광과 간접광 성분의 분리는 더욱 효율적인 렌더링 알고리즘 개발을 촉진하고, 물리 법칙적으로 더 정확한 이미지 조작의 새로운 방법을 가능하게 한다.

본 논문에서는 Nayar가 제안한 고주파 조명 패턴을 이용하여 그림 1과 같이 장면의 직접광과 간접광 성분을 분리하였다. 그러나 직접광과 간접광의 분리 결과를 결합한 장면과 백색 조명을 비추어 촬영한 장면을 비교할 때 밝기 차이가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 직접광과 간접광 성분의 정확한 분리를

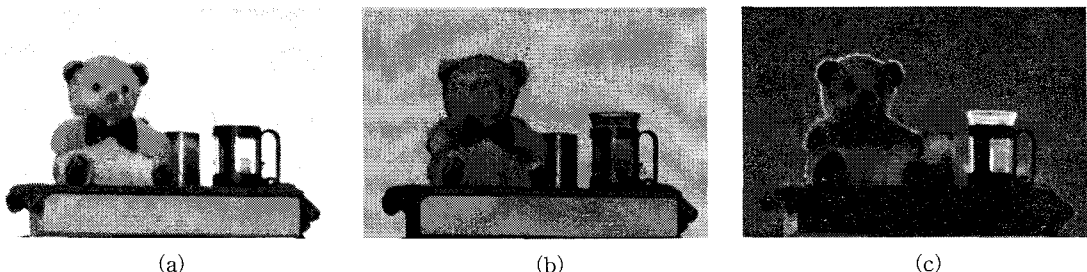


그림 1. 고주파 조명 패턴을 사용하여 한 장면에서 직접광과 간접광을 분리한 실험 결과. (a) 직접광과 간접광 성분이 결합된 일반적인 장면 (b) 그림 (a)의 장면에서 직접광과 간접광 성분만을 추출한 장면 (c) 그림(a)의 장면에서 간접광 성분만을 추출한 장면

위해서 이러한 장면에 대한 밝기의 오차를 줄이는 것이 필요한데, 이를 위하여 컴퓨터 그래픽스에서 자주 사용되는 개체들의 밝기 오차를 줄이기 위한 간접광 성분 비율을 구하는 방법을 제시한다. 이 방법은 고주파 조명 패턴을 사용할 때 물체의 속성에 따라서 직접광이 비춰지지 않은 영역에 존재하는 간접광 성분이 전체에 미치는 영향을 측정하여, 물체의 재질과 속성에 맞는 값을 설정함으로써 직접광과 간접광 성분을 분리결과의 정밀도를 높이는 방법이다. 이와 같이 장면에서의 광원 분리 방법을 응용하여, 포장으로 쓰이는 내부가 보이지 않는 반투명한 비닐커버에 가려진 물체 형태를 간접광 성분으로 추출하였으며, 여기에 몇 가지 이미지 향상 기법을 적용하여 커버내부의 물체의 형태를 좀 더 정확히 나타낼 수 있었다.

이와 같은 연구는 컴퓨터 비전, 이미지 처리, 웹 카메라의 성능개선과 BRDF함수의 성능개선 등 다양한 분야에서 활발하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 관련연구

2.1 광원의 유형과 장면에서의 빛

보통 빛이란 수많은 전자기파 중에서 인간의 눈으로 지각되는 범위를 말하는 것으로, 파장이 0.4~0.75 μm 인 영역에서 방사된다. 일반적으로 파장이 긴 쪽은 붉은색으로 보이고 짧은 쪽이 푸른색으로 보인다. 전자기파는 모두 물결과 같이 진동하면서 나아가는데 빛은 음파나 무선용 전파에 비하여 파장이 짧아 직진하는 선으로 볼 수 있다. 광학적으로 균일한 매질 내에서의 빛은 직진하지만, 서로 다른 매질의 경계면에서는 빛의 반사와 굴절이 일어난다. 따라서 색(color)은 형상과 질감 등과 같이 모든 사물이 지니고 있는 고유한 시각적 특성으로 빛에 의해 어떠한 파장이 흡수되고 반사되어 각각의 색이 나타내게 된다 [12,13].

빛을 발생하는 광원의 유형을 컴퓨터 그래픽스에서는 방향광(directional light), 점광(point light), 집중 조명광(spot light)등으로 나누어 렌더링한다. 방향광은 그 광선이 비춰지는 물체로부터 무한히 멀리 떨어진 곳에 위치하는 것으로 대표적인 예가 태양광이다. 점광은 모든 방향으로 균일하게 광선을 방출하

는 것으로 백열전구가 이에 속한다. 집중조명 광은 플래시 불빛과 같이 광선방향과 cut-off 각에 의해 정의되는 볼륨 영역 내에서 광선을 방출한다. 점광원과 집중조명은 공간상에서 자기 위치를 가지고 있기 때문에 “위치가 정해진 광원”이라고 한다. 3가지 광원들은 모두 빛의 강도를 가지며, 특정한 색상(RGB)을 가지기도 한다[1].

이러한 광원에 의해 장면에 빛이 비춰질 때 빛의 성분을 직접광(direct light)과 간접광(indirect light)으로 나눌 수 있다. 직접광은 광원에 의해 비춰진 빛이 표면에 직접 닿는 빛으로 표면에서의 난반사와 정반사 성분의 일부이다. 난반사는 물체의 표면이 고르지 않고 울퉁불퉁한 상태에서 빛이 비춰져서 반사되는 빛들이 다양한 방향으로 반사되어 나가는 것이고, 정반사는 매끈한 면을 경계로 일정한 방향으로 반사되어 나가는 것을 말한다. 따라서 물체 표면의 거칠기에 따라 난반사와 정반사 성분을 구분할 수 있다. 간접광 성분은 광원에 의한 빛이 장면 내에서 다른 여러 환경적인 성분에 의해 상호 반사되어 들어오는 빛이다. 예를 들어 방안에서 조명기구에 의해 빛이 비춰질 때 벽이나 천장 등에 반사되거나 투명한 물체에 부딪쳐 산란되어 들어오는 빛을 말한다[14]. 컴퓨터 그래픽스에서 직접광의 정확한 값은 표면에서의 양방향 반사도 분포함수(BRDF: Bidirectional reflectance distribution function)에 의해 설명되고, 간접광은 양방향 표면 산란 분포함수(BSSRDF: Bidirectional surface scattering reflectance distribution function)와 양방향 투과 분포함수(BTDF: Bidirectional transmittance distribution function)로 나타낼 수 있다[15].

그림 2는 한 장면에서 점 P 위치에서의 직접광과 간접광 성분을 나타낸다. A는 직접광 성분으로 난반사(diffuse)와 정반사(specular)를 포함한다. B, C, D, E는 간접광 성분을 보여주고 있다. 이 때 B는 장면내의 다른 표면들 사이에 작용하는 상호 반사(interreflection)이며, C는 표면 내부 산란(subsurface scattering)으로 표면에 부딪힌 빛이 물체의 내부에서 산란되어 일부가 반사되어 나타나는 효과이다. D는 체적산란효과(volumetric scattering)로 유리나 물, 연기 또는 안개와 같은 반투과 물질(participating medium)을 통과하여 산란된 빛이 표면 P에 도달하는 것이며, E는 투명한 물체를 통과한

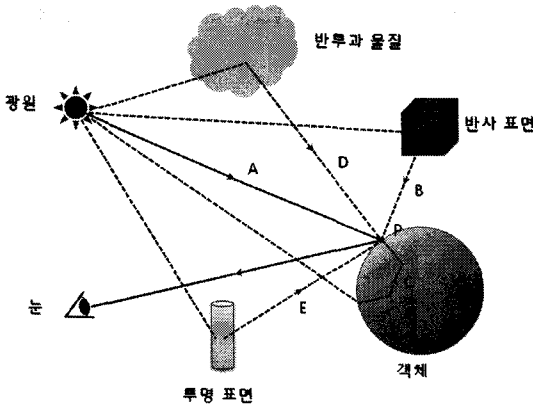


그림 2. 광원으로부터 점 P에 직접 조명된 A는 직접광 성분이고, 간접광 성분은 장면내의 다른 점에서 들어오는 빛으로 다른 표면에 의한 상호반사(B), 표면내부 산란효과(C), 체적 산란효과(D)와 투명한 표면을 통과한 빛의 산란(E)이 있다.

빛이 산란되어 나타나는 효과를 말한다[11]. 따라서 위와 같은 다양한 빛의 반사의 합으로 장면의 밝기를 나타낸다[16].

2.2 고주파 조명 패턴을 이용한 분리 기법

직접광과 간접광의 성분은 하나의 광원과 카메라에 의해 측정되는데, 광원에 의해 적어도 한번은 장면에서의 각 포인트에 직접적으로 조명되어야 한다.

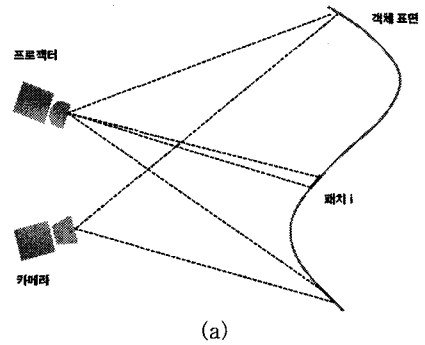
그림 3 (a)와 같이 단일 광원에 의해 비춰진 장면을 카메라로 찍었을 때, 이 장면의 전체 밝기 (radiance) L 은 식 (1)과 같이 직접광 L_d 와 간접광 L_g 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$L = L_d + L_g \tag{1}$$

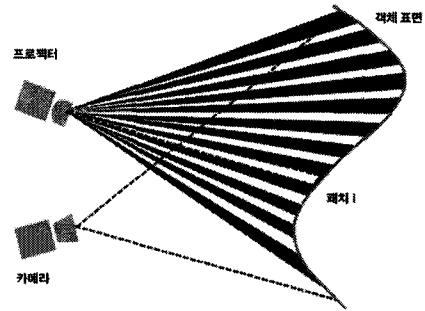
장면을 총 N 개의 패치로 나누어 광원을 직접적으로 받는 M 개의 패치를 가지는 고주파 조명 패턴을 사용할 때 카메라 c 로 측정된 패치 i 의 밝기는 $L[c, i] = L_d[c, i] + L_g[c, i]$ 이다. i 를 제외한 모든 패치로부터의 상호반사로 인한 간접광 성분 $L_g[c, i]$ 는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_g[c, i] = \sum_{j \in P} A[i, j] L[i, j] \tag{2}$$

장면 위의 한 점 $P = \{i | 1 \leq j \leq N, j \neq i\}$ 에서의 $L[i, j]$ 는 패치 방향에서의 패치 j 의 밝기이고, $A[i, j]$ 는 두 패치의 기하학적 구성에 관계된 i 의 양방향 반사도 분포함수(BRDF)이다. 양방향 반사도 분포함수는 빛



(a)



(b)

그림 3. (a) 광원에 의하여 반사된 빛이 모든 표면에 재반사되어 패치 i 의 밝기가 결정된다. (b) 고주파 이진 조명패턴에 의하여 빛이 비춰진 부분의 패치는 직접광과 간접광 성분을 가지고, 빛이 비춰지지 않은 패치는 간접광 성분만이 존재한다.

이 불투명한 표면에서 어떤 방식으로 반사되는지를 정의하기 위한 4차원 함수이며, 이 함수는 빛이 표면에 들어오는 방향(보통 ω_i 로 표기)과 표면에서 나가는 방향(보통 ω_o 로 표기)으로의 분포함수로 표현한다. 즉 두 패치사이에서 빛이 어떻게 들어와서 반사되는지에 대한 함수가 $A[i, j]$ 가 되는 것으로, 이 패치들 사이의 관계를 모두 알 경우 간접광성분의 값을 알 수 있게 된다.

간접광성분과 직접광성분은 하나의 장면내에서 일반적인 카메라 촬영으로는 분리하기가 매우 어려우므로, 흑백의 패턴을 생성하여 이 패턴을 이용하여 빛이 객체에 닿아서 반사되는 성분의 합을 조합하는 방식으로 얻을 수 있다. 이 실험을 위해서는 빛을 생성하는 프로젝터와 객체, 객체에 반사된 이진 조명을 얻는 카메라가 필요하다.

그림 3(b)에서와 같이 장면의 일부(α)만 빛이 활성화될 때, 조명패치의 설정은 $Q = \{k | k \in N \text{ and } lit(k) = 1\}$ 가 되고, 패치에 조명이 비춰지는지 아닌지를 나타내는 기능을 한다. 직접광 성분은 빛이 활성화된 영역

에 존재하고, 간접광 성분은 빛의 상호작용에 의해 발생하므로 장면의 모든 영역에서 존재한다. 따라서 간접광은 빛이 활성화된 영역에서 들어온 빛과, 활성화되지 않은 영역에 들어온 빛으로 나누게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{gd}^+[c,i] = \sum_{j \in Q} A[i,j]L_d[i,j], L_{gg}^+[c,i] = \sum_{j \in P} A[i,j]L_g[i,j] \quad (3)$$

우리주변에 전역광성분이 존재하지 않는다고 가정하면 이진조명이 객체에 비추어질 경우, 빛이 닿지 않는 영역에서는 완전한 흑색의 이미지만이 보여질 것이다. 하지만 빛이 직접적으로 닿지 않는 영역에서도 빛이 닿는 부분에서 반사되는 빛들이 도달하기 때문에 흐릿하기는 하지만 물체의 모양을 인식할 수 있게 된다. 이렇게 흐릿하게 밝은 성분은 간접광성분의이며, 빛이 직접 도달하는 영역의 밝기는 직접광성분과 간접광성분이 혼합되어서 나타나는 밝기이다.

식 (3)에서 $L_{gd}^+[c,i]$ 는 직접광에 의해 반사되어 들어오는 간접광 성분이고, $L_{gg}^+[c,i]$ 는 간접광으로부터 빛이 재반사 또는 산란되어 들어오는 간접광 성분이다. 고주파 조명 패턴과 그 역 패턴에 의해 촬영된 이미지에서 빛이 활성화된 영역(α)에서의 밝기 L^+ 와 비활성화된 영역($1-\alpha$)의 밝기 L^- 는 다음과 같다.

$$L^+[c,i] = L_d[c,i] + \alpha L_g[c,i], L^-[c,i] = (1-\alpha)L_g[c,i] \quad (4)$$

식 (4)는 빛이 닿는 장면은(L^+)은 직접광 성분(L_d)와 빛이 활성화된 영역(α)에서의 간접광 조명(L_g)의 합으로 구성되며, 빛이 닿지 않는 장면(L^-)은 비활성화된 영역($1-\alpha$)에서의 간접광 조명(L_g)의 합으로 이루어진다는 의미이다.

이론적으로는 식 (4)가 성립하지만 실제 실험에서는 빛이 비활성화된 영역에서의 간접광 성분이 직접광이 닿는 영역과 간접광 영역에 영향을 주는데 이러한 영향은 매우 작기는 하지만 분명히 존재한다. 이때 이 성분을 b 라고 하면, b 는 $0 \leq b \leq 1$ 이고, 위의 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L^+[c,i] = L_d[c,i] + \alpha L_g[c,i] + b(1-\alpha)L_g[c,i], \quad (5)$$

$$L^-[c,i] = bL_d[c,i] + (1-\alpha)L_g[c,i] + \alpha bL_g[c,i]$$

위의 식에서 $b(1-\alpha)L_g[c,i]$ 는 조명이 비활성화된 영역에서의 밝기 $(1-\alpha)L_g[c,i]$ 가 전체 장면의 밝기에 영향을 b 만큼 주는 것을 의미한다. 즉 조명이 비활성화되어 있으므로 이 영역에는 간접광성분인 L_g 만 영

향을 주게 되는 것이다. 다음으로 나타나는 식에서 $\alpha bL_g[c,i]$ 는 위에서 본것과 같이 간접광성분인 L_g 가 다른 영역에 미치는 영향을 계산한 식이다.

Nayar의 실험에서는 빛이 활성화된 영역과 비활성화된 영역의 비율이 동일할 경우, 즉 $\alpha = \frac{1}{2}$ 일 때 가장 좋은 결과가 나왔음을 알 수 있으며, 따라서 $\alpha = \frac{1}{2}$ 를 식 (5)에 적용하면 장면에서 빛이 활성화된 영역과 비활성화된 영역의 밝기는 다음과 같다.

$$L^+[c,i] = L_d[c,i] + (1+b)\frac{L_g[c,i]}{2},$$

$$L^-[c,i] = bL_d[c,i] + (1+b)\frac{L_g[c,i]}{2} \quad (6)$$

여기에서 L^+ 는 장면에서 빛의 밝기가 최대값인 L_{max} 이 되고 L^- 는 최소값인 L_{min} 이 된다[11]. Nayar는 계산의 편의성을 위하여 비교적 적은 값인 b 성분을 0으로 두고 직접광과 간접광을 분리시키는 알고리즘을 채택하였다.

3. 직접광과 간접광의 분리

3.1 체커보드 조명 패턴을 이용한 분리 방법

Nayar 등이 제안한 고주파 조명을 이용하면 장면의 직접광과 간접광 성분을 빠르게 분리할 수 있다. 고주파 조명에는 빔 프로젝터를 이용하여 체커보드 모양이나 세로 줄 패턴으로 조명을 주는 방법이 있고, 태양광에 막대나 그물 모양의 빛 차단기에 의한 그림자를 이용하는 방법이 있다[11].

본 연구에서는 인위적인 고주파 조명 패턴을 얻기 위하여 빔 프로젝터의 체커보드 패턴 조명을 이용하여 실험하였다. 빔 프로젝터는 패턴 경계부분에서 빛 누설이 발생하기 때문에 한 장의 이미지만으로 흑백의 경계를 뚜렷이 얻기 힘들다. 게다가 프로젝터의 제한된 시야 깊이로 인해 초점이 맞춰진 영역을 벗어난 부분은 이미지가 흐려진다. 빔 프로젝터의 특성을 고려하여 이론상 필요한 두 장의 이미지보다 많은 수의 이미지를 사용해야 한다[11].

체커보드 조명 패턴의 체커 크기가 작을수록 간접광 성분의 측정이 정확해지므로 빔 프로젝터의 픽셀 경계부분의 빛 누설을 고려하여 체커 크기를 5*5픽셀로 설정하였다. 전체 체커보드 조명패턴의 해상도는 1024*768이고, 체커의 개수는 가로 205개, 세로

153개 이다. 총 25개의 패턴을 만들기 위해 두 픽셀씩 상하 좌우로 이동시켰다. 그림 4와 같은 체커보드 패턴에서 흰색 영역은 빛이 활성화되는 부분이고, 검은색 영역은 비활성화되는 부분이 된다.

그림 5은 본 연구의 실험 환경을 보여준다. 체커보드 패턴 조명을 주기 위해 본 연구에서는 Hustem MVP-S40 LCD 프로젝터를 사용하였다. 프로젝터 사양은 밝기가 4000ANSI Lumens, 명암비는 1000:1 이고, 해상도는 1024*768이다. 장면의 빛을 얻기 위하여 그림 6과 같이 25개의 조명을 이동시키면서 캐논 EOS 400D 디지털 카메라로 장면을 촬영하였다. 카메라는 어두운 영역이 밝은 영역보다 많을 경우 빛을 더 많이 받아들이기 때문에 장면의 밝기가 일정하게 측정되도록 카메라 설정을 메뉴얼 모드에서 조리개 값은 F11로 두고 셔터속도를 수동으로 조절하였다. ISO감도는 노이즈를 줄이기 위해 100으로 설정하였고, 측광방식은 중앙중점 평균측광방식으로 촬영하였다.

직접광과 간접광 성분을 분리하기 위해 그림 6과 같은 25장의 촬영된 이미지에서 각 픽셀의 최대밝기 (L_{max})와 최소밝기(L_{min})를 측정한다. 그림 7의 왼쪽 그림은 최대밝기 이미지(L_{max})로 그림 6의 각 픽셀에

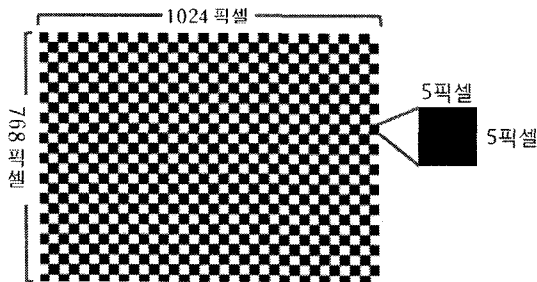


그림 4. 실험을 위하여 사용한 5*5 크기의 체커보드 조명 패턴

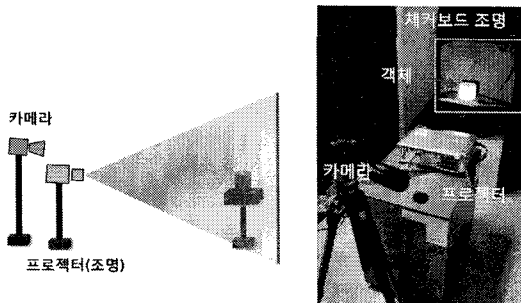


그림 5. 체커보드 패턴을 얻기 위한 실험 환경(암실)

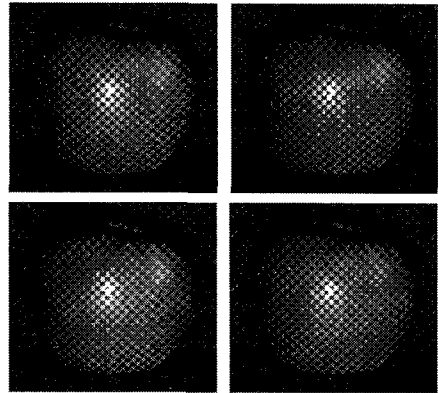


그림 6. 체커보드 조명을 이동시키면서 촬영한 이미지(전체 25장)

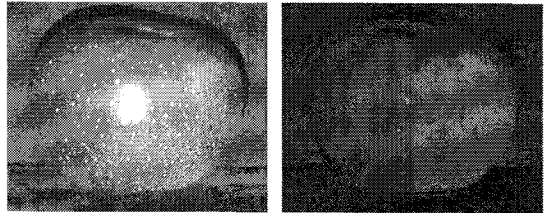


그림 7. 그림 6의 이미지로부터 추출한 장면의 최대밝기 (L_{max})와 최소밝기(L_{min}) 값을 가지는 이미지

서 가장 밝은 값을 추출하여 얻은 것이고, 오른쪽 그림은 최소밝기 이미지(L_{min})로 그림 6의 각 픽셀에서 가장 어두운 값을 추출하여 얻은 이미지이다.

3.2 분리 알고리즘

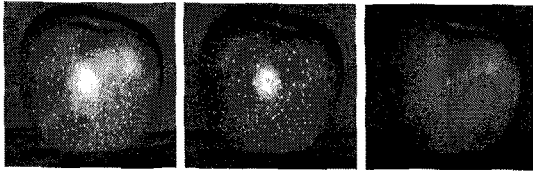
3.1절에서 측정한 최대밝기와 최소밝기 값을 가지는 두 장의 이미지는 직접광과 간접광을 분리하는데 사용한다. 2장의 식 (6)에 의하여 직접광(L_d)과 간접광(L_g)을 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_d[c,i] = \frac{L^+[c,i] - L^-[c,i]}{(1+b)}, L_g[c,i] = \frac{2L^-[c,i]}{(1+b)} \quad (7)$$

식 (7)과 같이 체커보드 조명패턴에 의해 촬영된 이미지에서 빛이 활성화된 영역에서 가장 밝은 값을 추출하여 $L^+(L_{max})$ 를 얻었고, 빛이 활성화되지 않은 영역에서의 가장 어두운 값을 추출하여 $L^-(L_{min})$ 를 얻은 다음 이를 이용하여 L_d 와 L_g 를 측정하였다.

3.3 실험 결과

그림 8은 $b=0$ 일 때, 다양한 장면의 분리 결과를



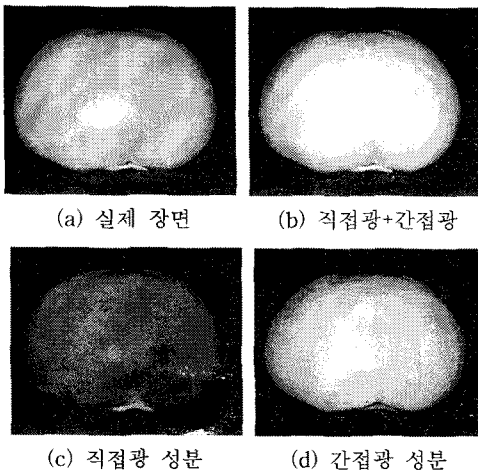
(a) 직접광+간접광 (b) 직접광 성분 (c) 간접광 성분
 그림 8. 장면의 직접광 성분과 간접광 성분을 분리한 결과

보여준다. (a)는 주로 간접광 이미지에서 사과의 표면내부 산란효과를 관찰할 수 있고, 직접광 이미지에서는 정반사 하이라이트를 보여준다.

4. 분리 성능의 향상과 이미지 처리의 응용

고주파 조명에서 빛이 비활성화된 영역에서도 약간의 빛이 존재한다고 할 때 이 영역에서의 빛의 세기를 분리 알고리즘에서는 b 로 설정하였다. 이 값은 실제상황에서 매우 작은 값이기 때문에 무시하기도 하지만, 이를 무시할 경우 직접광과 간접광의 결합된 장면이 백색 조명을 준 실제 장면보다 밝게 보인다. 그림 9는 $b=0$ 으로 설정하였을 때의 분리결과이고, 백색 조명을 주어 촬영한 실제 장면과 직접광과 간접광을 결합한 장면을 비교하였을 때 밝기차이가 발생함을 보여준다.

본 연구에서는 실제장면과 직접광과 간접광의 결합장면이 동일함을 보증하기 위하여 물체의 속성에



(a) 실제 장면 (b) 직접광+간접광
 (c) 직접광 성분 (d) 간접광 성분
 그림 9. $b=0$ 로 두고 감을 직접광과 간접광 성분으로 분리시킨 결과와 실제장면, 이론상으로 실제장면과 직접광과 간접광의 결합장면은 동일하여야 함.

따라 서로 다른 b 값을 구하는 방법을 제안하고, 물체 표면의 거칠기와 재질에 따른 b 의 변화도를 조사하였다.

4.1 빛이 활성화 되지 않은 영역에서의 직접광 성분 (b) 설정 방법

실제 장면의 밝기와 직접광 성분(L_d)과 간접광 성분(L_g)을 결합한 장면의 밝기 차이가 적을수록 분리 결과의 정확도는 높아진다. 직접광과 간접광 성분의 값은 빛이 활성화되지 않은 영역에서의 직접광 성분의 비율 b 에 따라 달라지며, 이것은 $0 \leq b \leq 1$ 사이의 값으로 사용자가 임의로 설정할 수 있다. b 는 물체의 속성에 따라 다르므로, 정확한 값을 설정하기 위한 과정은 다음과 같다.

고주파 패턴을 사용하지 않고 카메라로 촬영한 장면의 실제 밝기를 L_s 라고 할 때, 두 성분의 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s[c, i] = L_d[c, i] + L_g[c, i] \quad (8)$$

b 를 구하기 위해서 식 (6)에서 고주파 패턴조명을 사용하여 얻은 $L^+[c, i]$ 와 $L^-[c, i]$ 를 합하면,

$$L^+[c, i] + L^-[c, i] = (1+b)L_d[c, i] + (1+b)L_g[c, i] \\ = (1+b)(L_d[c, i] + L_g[c, i]) \quad (9)$$

가 된다. 식 (8)에 의하여 식 (9)는 다음과 같다.

$$L^+[c, i] + L^-[c, i] = (1+b)L_s[c, i] \quad (10)$$

식 (10)에 의하여 b 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$b = \frac{L^+[c, i] + L^-[c, i]}{L_s[c, i]} - 1 \quad (11)$$

본 연구에서는 위의 식을 이용하여 b 값을 미리 얻은 후에 이를 식 (7)에 적용하여 직접광과 간접광을 분리시켰다. 이를 위하여 $L^+[c, i]$ 와 $L^-[c, i]$ 를 얻은 다음 동일한 조건에서 고주파 조명이 아닌 빔프로젝트의 조명을 사용하여 L_s 를 얻었으며, 이 영상을 이용하여 b 값을 계산하였다.

그림 10은 이렇게 계산된 b 를 이용하여 직접광과 간접광을 분리하여 결합한 실험이 $b=0$ 로 두고 무시한 경우보다 실제 장면과의 밝기 차이가 줄어들었음을 보여준다. 이론적으로는 그림 10의 두 번째 장면은 실제 장면과의 밝기차이가 0%가 되어야 하지만,

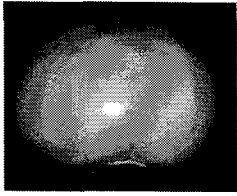
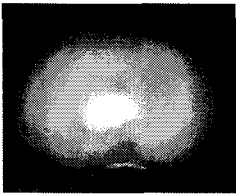
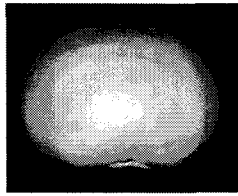
실제 장면	직접광+간접광 ($b=0.2319$)	직접광+간접광 ($b=0$)
		
	실제 장면과의 밝기 차이: 15(%)	실제 장면과의 밝기 차이: 23(%)

그림 10. 백색 조명을 준 장면과 측정된 b 에 의한 직접광과 간접광의 결합 장면의 밝기 차이

고주파 조명패턴을 사용하여 얻은 이미지 $L^+[c,i]$ 와 $L^-[c,i]$ 는 완벽하게 외부 조명이 차단된 실험환경에서 얻은 이미지가 아니므로 밝기차이가 발생하였다.

4.2 물체 표면의 거칠기에 따른 b 값 설정

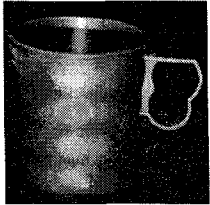
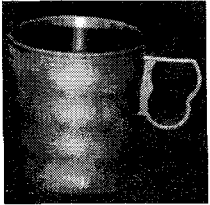
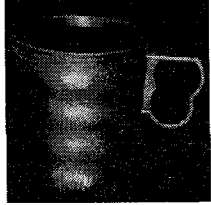
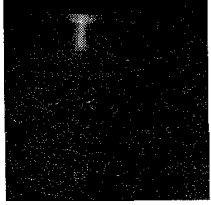
식 (11)의 b 값은 모든 물체에 대하여 동일하지 않은데, 물체 표면이 매끈할수록 정반사가 많이 일어나고 빛의 방향에 따른 하이라이트 효과가 강하게 나타나기 때문이다. 반면에 물체의 표면이 거칠 경우 간접광 성분이 전체장면에 미치는 영향력이 증가하게 된다. 심지어 동일한 재질의 물체라 하더라도 거칠기에 따라서 b 값의 차이가 발생한다.

이에 따라 본 연구에서는 물체 표면의 거칠기에 따른 b 의 변화도를 측정하였다. 그림 11 (a)는 약간



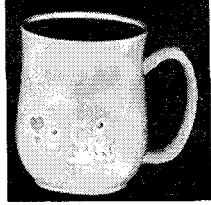
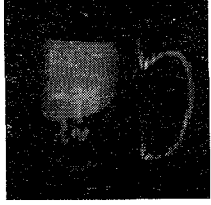
거친 표면을 가지는 플라스틱 컵으로 표면의 난반사에 의한 빛의 상호작용과 표면 내부 산란으로 간접광 성분이 강하게 나타난다. (b)는 매끈한 표면을 가지는 플라스틱 컵으로 직접광 성분과 간접광 성분이 고르게 값을 가진다. 각각의 분리 결과를 비교해 볼 때, 거친 표면이 간접광의 영향을 많이 받았으며, b 는 매끈한 표면보다 크게 측정됨을 알 수 있다.

4.3 재질에 따른 b 값 설정

빛은 물체의 재질에 따라 물체 표면에서 반응하는 정도가 달라진다. 컴퓨터 그래픽스의 3D 모델링에서는 BRDF 등에 의해 측정된다. BRDF는 빛이 어떻게 표면으로 반사되는지를 설명하는 함수로 물체의 성질을 설명하는데 사용된다. 4.2절에서 살펴본 바와

실제 장면	직접광+간접광	직접광 성분	간접광 성분
			

(a) 거친 표면: $b=0.1748$

			
---	---	---	--

(b) 매끈한 표면: $b=0.1702$

그림 11. 표면 거칠기에 따른 b 와 직접광과 간접광 성분 분리

같이 물체의 성질에 따라 빛이 표면에서 반사되는 방향이 결정되므로 본 연구에서는 다양한 재질에 따른 b 값의 변화를 측정하고 이를 이용하여 직접광과 간접광 성분을 분리하였다. 다양한 물체의 재질 중 컴퓨터 그래픽스에서 자주 사용되는 물질인 천, 나무, 양초, 유리, 피부 등에 대한 실험을 수행하였다. 그림 12는 실제 장면과 직접광 성분, 간접광 성분

의 장면을 이용하여 b 를 측정된 결과이다. 실험에 의하여 b 값은 피부, 양초, 유리, 천, 나무의 순으로 감소하였음을 알 수 있었다. 실험결과에서는 주로 나무와 같이 직접광 성분이 클수록 b 값은 줄어들고, 사람 피부와 같이 간접광 성분의 작용이 클수록 b 값은 크게 측정되었다. 표 1은 재질에 따른 b 와 실제 장면에서 간접광 성분의 비율을 나타낸다. 이 비율은 전체장면

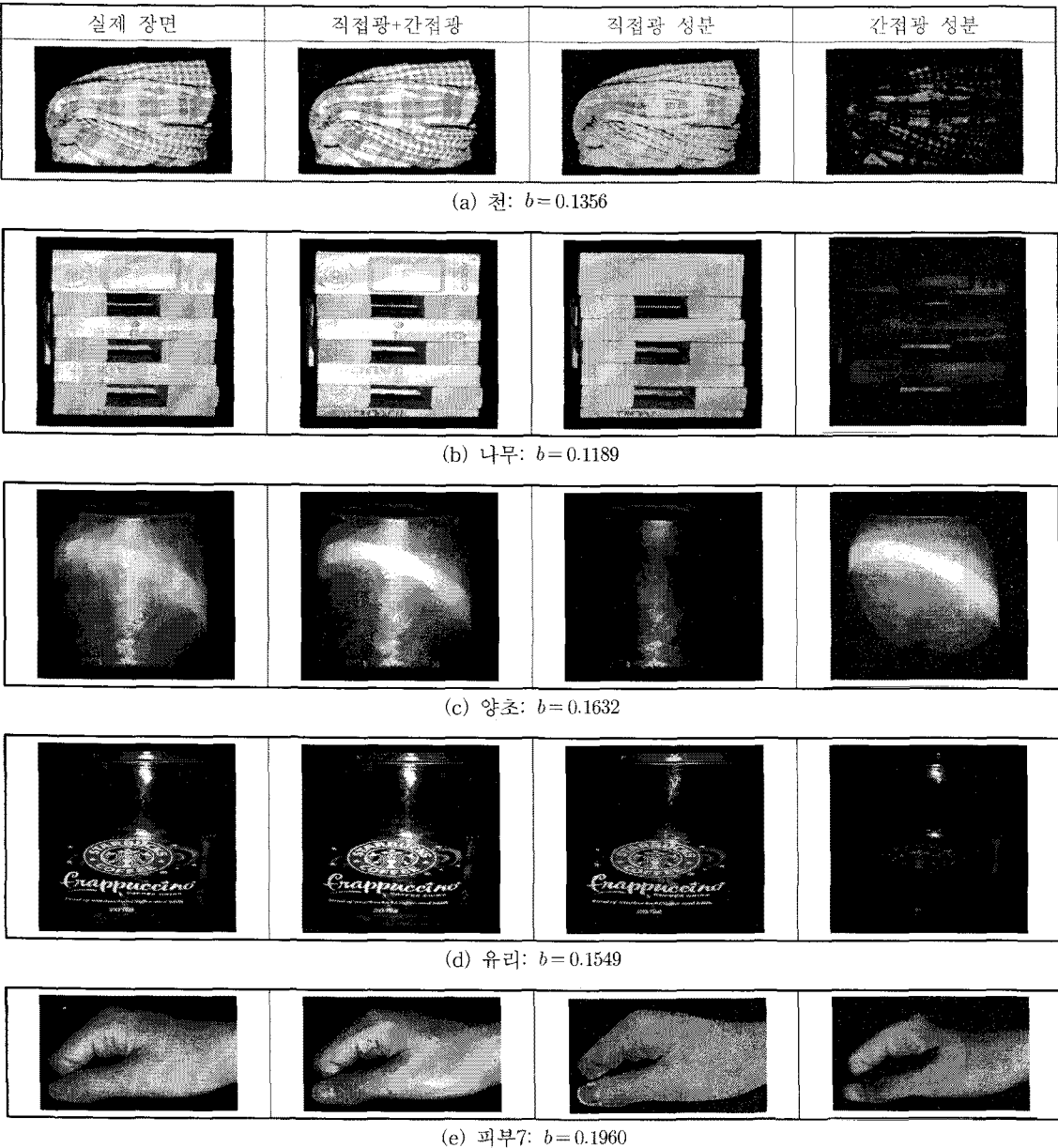


그림 12. 재질에 따른 b 와 직접광과 간접광 성분 분리

표 1. 재질에 따른 b값과 실제 장면에서 간접광 성분이 차지하는 비율

재질	나무	천	유리	양초	피부
b 값	0.1189	0.1356	0.1549	0.1632	0.1960
비율(%)	28	36	47	62	76

에서 간접광 성분이 차지하는 비율을 나타내고 있다. 장면의 간접광 성분의 비율이 높을수록 b가 커지는데, 이것은 빛이 활성화되지 않은 영역에서의 직접광 성분의 크기가 장면의 간접광 성분에 영향을 받음을 나타낸다.

실험의 결과를 표 1과 비교하여 분석하자면 그림 12 나무성분에서 간접광이 차지하는 비율이 피부가 차지하는 비율에 비하여 매우 낮음을 알 수 있다. 즉 카메라에 들어오는 양초의 색상과 피부색은 대부분 간접광에 의한 색상임을 실험 결과에서 쉽게 알 수 있다.

4.4 이미지 처리의 응용

장면의 직접광과 간접광의 분리기법을 이용하면 다양한 이미지 조작이 가능하다. 간단하게는 간접광 성분의 색조를 변경하여 직접광 성분의 이미지를 결합하므로 자연스러운 이미지 색상의 변경이 가능하다. 또한 직접광나 간접광 성분의 비율을 조절하여 새로운 이미지를 만들 수 있다. 그리고 이 방법은 눈으로 분리하기 힘든 간접광 성분만을 따로 추출할 수 있기 때문에 가려진 물체의 내부를 효과적으로 볼 수 있다.

그림 13은 간접광 이미지의 특성을 활용하여, 반투명한 포장용지 내부의 물체의 형태를 추출한 분리 결과이고, 그림 14는 MATLAB 함수를 이용하여 간접광 성분의 이미지를 인식하기 쉽게 선명하게 만든 결과이다. 첫번째 장면은 밝기조절함수(imadjust)로 처리된 장면이고, 가운데 장면은 이미지 대비 값을 향상시키는 함수(adapthisteq)를 적용한 것이다. 마

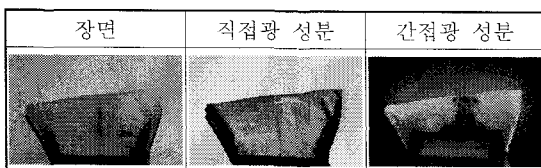


그림 13. 포장 용지로 가려진 장면의 분리 결과

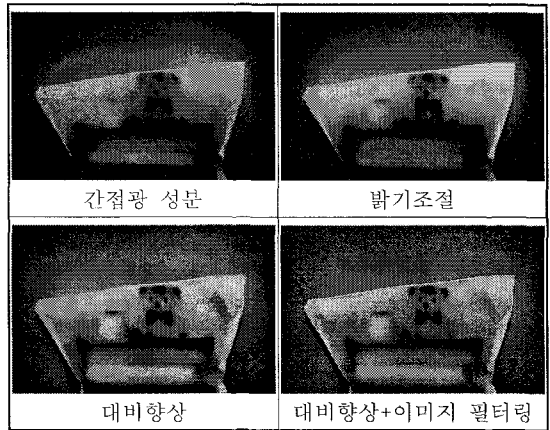


그림 14. 간접광 성분에 여러 가지 MATLAB 함수를 적용하여 이미지를 선명하게 만든 결과

지막 장면은 두번째 결과에 이미지를 날카롭게 하는 기능(unsharp)을 적용한 것으로 간단한 이미지 필터링을 통하여 이미지를 품질을 향상시킴으로 보이지 않는 포장용지 내부의 이미지를 형태를 효과적으로 추출하였다.

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 고주파 체커보드 조명 패턴을 이용하여 직접광과 간접광을 분리할 때 분리결과의 오차를 최대한 줄이는 방법을 찾는 실험을 수행하였다. 이를 위하여 물체의 속성에 따라 서로 다르게 나타나는 빛이 비취지지 않는 영역에서의 반사되는 빛의 값(간접광 성분)을 측정하여 직접광과 간접광의 성분을 분리하였다. 측정된 값은 물체의 속성에 따라 각각 다르게 나왔으며, 한 장면에서 물체의 거칠기에 따라 서로 다르게 나타나는 간접광 성분의 비율이 클수록 그 값도 점점 크게 나왔다. 실험을 통하여 물체의 속성에 따른 빛이 비활성화된 영역의 직접광 성분의 값을 설정함으로 좀 더 정확한 직접광과 간접광 분리가 가능하였다. 그리고 간접광 성분의 특성을 활용하여, 반투명한 포장용지 내부의 물체의 형태를 추출하고, 선명도를 높일 수 있음을 보였다.

이 방법에서는 체커보드 조명패턴을 활용하여 장면을 분리하기 때문에 많은 수의 이미지가 필요하고, 이에 따라 이미지 처리시간이 길어지는 문제가 발생한다. 향후에는 고주파 조명패턴이 가지는 한계점을 고려하여 이미지 수를 줄여 처리 시간을 단축시키고,

정반사 성분이 강한 재질에서의 직접광과 간접광의 분리 방법에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다. 이미지 응용부분에서 간접광원을 이용하여 이미지의 인식률을 더욱 향상시키는 방법에 관한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] T. Akenine-moller and E. Haines, "Real-time Rendering," Second Edition, A K Peters, LTD, Aug. 2006.

[2] B. Sun, R. Ramamoorthi, S. G. Narasimhan, and S. K. Nayar, "A practical analytic single scattering model for real time rendering," *ACM Trans. on Graph*, Vol. 24, No. 3, pp. 1040-1049, 2005.

[3] 장호욱, 이인호, "실제 장면 표현을 위한 렌더링 기술 동향," 전자통신동향분석, 제20권, 제 6호, pp. 97-109, 2005. 12.

[4] 이근일, 송규동, "조명가시화 시뮬레이션에 적용되는 최신 3D 렌더링 기술의 비교연구," 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 23권, 제 2호, pp. 933-936, 2003. 10.

[5] 기현우, 오경수, "광원 트리를 사용한 간접 조명의 실시간 렌더링," 정보과학회논문지: 시스템 및 이론, 제 34권, 제 4호, pp. 158-167, 2007. 4.

[6] 황용호, 홍현기, "동적 조명 환경에서 영상합성을 위한 재조명 방법," HCI2005, pp. 1017-1022, 2005. 1.

[7] S. P. Mallick, T. Zickler, P. N. Belhumeur, and D. J. Kriegman, "Specularity removal in images and videos: A PDE approach," *InProc. of ECCV. 2006*, pp. 550-563, 2006.

[8] R. T. Tan, K. Nishino, and K. Ikeuchi, "Separating Reflection Components based on Chromaticity and Noise Analysis," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, Vol. 26, pp. 1373-1379, 2004.

[9] R. Bajscy, S.W. Lee, and A. Leonardis, "Detection of diffuse and specular interface reflections by color image segmentation," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 17, No.3, pp. 249-272, 1996.

[10] B. Lamond, P. Peers, and P. Debevec, "Fast Image-base Separation of Diffuse and Specular Reflections," ICT-TR-02.2007, 2007.

[11] S. K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination," *ACM Trans. on Graphics*, Jul. 2006.

[12] <http://jasu.tistory.com/category/Photograph/Etc, Programming, 2009>.

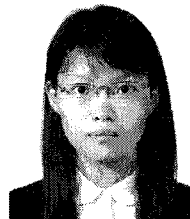
[13] 오희선, 김숙희, "재미있는 색 이야기," 교학연구사, 2007. 2.

[14] http://www.schorsch.com/kbase/glossary/d_i_lighting.html, "Lighting Design Glossary," Architectural Lighting Design Software, 2009.

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Bidirectional_scattering_distribution_function, Bidirectional scattering distribution function, 2009.

[16] S. Seitz, Y. Matsushita, and K. Kutulakos, "A theory of inverse light transport," *InProc. of ICCV*, Vol. 2, pp. 1440-1447, Oct. 2005.

조미리나



2003년 창원대학교 정보통신공학과 입학
2007년~2009년 창원대학교 정보시각화연구소 연구원
관심분야: 실시간 렌더링, 이미지 처리, 컴퓨터 그래픽스

박 동 규



1993년 부산대학교 전자계산학과(이학사)
1996년 부산대학교 전자계산학과(이학석사)
1999년 부산대학교 전자계산학과(이학박사)
2000년~2002년 영산대학교 멀티미디어 공학과 전임강사
2002년~현재 창원대학교 정보통신공학과 부교수
관심분야: 모바일 스캔틀, 물리기반 모델링, 컴퓨터 그래픽스