

위치별 산란특성을 반영한 측정기반 얼굴 렌더링*

박선용[○], 오경수*

송실대학교 미디어학과^{○*}

aknyong@ssu.ac.kr, oks@ssu.ac.kr

Measurement-based Face Rendering reflecting Positional Scattering Properties

Sunyoung Park[○], Kyoungsu Oh*

Dept. of Media, Soongsil University

요 약

이 논문은 피하산란의 정도가 다를 것으로 예상되는 얼굴의 6개의 부위를 촬영하여 각각의 산란특성을 추출하고 렌더링에 반영하여 얼굴의 사실감 있는 표현이 가능한 방법을 제안한다. 각 부위별 산란이미지는 프로젝터로부터 피부에 입사된 단위광선이 내부 산란을 거쳐 밖으로 드러나는 모양을 여러 노출로 촬영하여 HDR 이미지로 합성하고, 비선형 최소제곱합의 해법 중 Sequential Quadratic Programming을 이용하여 광선의 입사지점을 지나는 단면이 이루는 곡선에 '가우스 함수의 선형결합'을 적합한다. 가우스 함수는 산란곡선을 잘 근사하면서 필터로서 적용이 쉬운 장점을 가진다. 우리는 최소제곱합의 해가 지역 해에 빠지는 양도록 유전알고리즘을 이용해 초기 값을 설정한다. 근사된 식의 각 가우스 항은 얼굴에 입사되는 복사조도를 렌더링한 텍스처에 가우스 필터로 적용되어 피하산란효과를 표현. 이 논문에서는 최대 12회의 가우스 필터링을 효율적으로 처리하기 위해 쿠다의 병렬처리능력을 활용하였다.

ABSTRACT

This paper predicts 6 facial regions that may have sharply different scattering properties, rendering the face more realistically based on their diffusion profiles. The scattering properties are acquired in the form of high dynamic range by photographing the pattern formed around an unit ray incident on facial skin. The acquired data are fitted to a 'linear combination of Gaussian functions', which well approximates the original diffusion profile of skin and has good characteristics as the filter. During the process, to prevent its solutions from converging into local minima, we take advantage of the genetic algorithm to set up the initial value. Each Gaussian term is applied to the irradiance map as a filter, expressing subsurface scattering effect. In this paper, to efficiently handle the maximum 12 Gaussian filterings, we make use of the parallel capacity of CUDA.

Keyword : Sequential Quadratic Programming (SQP), Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function (BSSRDF), Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

접수일자 : 2009년 08월 07일

심사완료 : 2009년 09월 03일

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [200911730248, 다시점 영상기반의 삼차원 형상복원기술 개발]

1. 서 론

고성능 그래픽하드웨어의 발전과 함께 게임이나 가상현실 등의 사용자들은 게임이나 가상현실 등에서 실제와 동등한 혹은 그 이상의 영상을 요구하고 있다.

반투명성(translucency)은 세상에 존재하는 대부분의 재질들이 가지고 있는 기본적인 특성으로 사실감에 결정적인 기여를 한다. 이 논문에서는 대표적인 반투명 재질의 하나인 사람의 피부를 측정된 데이터에 근거하여 사실적으로 표현하는 방법에 대해 기술한다. 사람의 피부는 그것의 복잡한 다층 구조와 그에 따른 많은 계산량으로 표현이 매우 어려우며, 특히 얼굴의 피부는 인종, 건강 및 심리 상태 등의 전반적인 상태를 반영하기 때문에 작은 변화도 때에 따라 전혀 다른 느낌을 줄 수 있다. 피부는 서로 다른 광학적 특성을 가지는 몇 개의 층 구조로 되어 있으며, 일반적으로 컴퓨터 그래픽스 측면에서 다룰 때 기름층(oily layer), 표피(epidermis), 진피(dermis), 피부밑조직(subcutaneous)의 4개 층으로 구분한다.

Jensen et al.[1]은 균일한(homogeneous) 재질의 등방성(isotropic)¹⁾산란프로파일을 '두개의 광원(Dipole light sources)식'에 근사하고(Dipole Diffusion Approximation) 근사된 산란프로파일을 이차원 필터로 사용하여 각 픽셀 값 결정하였다. Donner et al.[2]는 위 이차원 필터를 주파수 공간에서 Kubelka-Munk 방법에 의해 해석하여 다층구조 모델로 확장하였다[2]. 하지만 측정된 데이터에 수학적 모델을 근사하는 과정이 복잡하고 최종적으로 2차원 필터를 구성하여 컨볼루션(convolution)을 수행하기 때문에 피부와 같이 다층구조를 가지는 재질의 경우 실시간 효과를 기대하기 어렵다.

위에서 소개한 방법들은 피부에 입사된 빛이 내부에서 퍼져 나가는 형태(산란 프로파일)가 위치별로 모두 동일하다고 가정하였으며, 기미, 주근깨, 점, 문신 등에 의한 반사율의 변화는 통합된 하나의 텍스처(albedo map)로 표현하였다.

이 논문에서는 얼굴의 각 위치별 산란특성의 차

이가 두드러지는 부위마다 측정을 통해 다른 산란 프로파일을 적용하여 얼굴의 피부를 더욱 사실감 있게 표현하는 방법을 제안한다.

산란프로파일은 1) 프로젝터를 이용하여 얼굴의 6개 부위에 단위광선을 투사하여 빛이 산란하는 모양을 카메라로 촬영하고, 2) 입사지점을 지나는 단면(cross section)이 이루는 곡선에 Kautz J. et al.[4]가 제안한 '가우스 함수의 선형 결합식'[식 1]을 적합한다²⁾. [식 1]은 4~6개의 다른 분산 값을 가지는 가우스 함수들로 구성되며 다층구조를 가지는 피부의 산란곡선을 비교적 정확히 근사할 수 있고, 각항을 2차원 필터로 적용시 분리성에 의해 가로 및 세로방향 2개의 1차원 필터로 나누어 텍스처 접근횟수를 $O(n^2) \rightarrow O(2n)$ 으로 줄일 수 있다.

이 논문에서는 관련된 연구들[1,2,4,10]에서와 같이 산란프로파일은 모든 방향으로 동일한 형태를 가지며(등방성), 광선의 입사방향의 변화에 따른 영향은 무시할만한 것으로 가정한다.

이 논문은 1) 얼굴의 부위별 산란프로파일을 측정하여 적용함으로써 반사특성의 공간적 변화를 반영하였으며, '가우스 함수들의 선형결합식'을 측정된 데이터에 적합시 2) 최소제곱식(Least Square Equation)이 지역적 해에 수렴하지 않도록 유전알고리즘을 이용, 대략적인 초기 값을 설정하였다. 3) 마지막으로 피하산란효과를 위한 가우스 필터링 과정을 CUDA의 병렬처리 능력을 이용하여 전체적인 렌더링을 효율적으로 처리 하였다.

본 논문의 범위는 피하산란효과의 측정과 적용에 국한되며, 표면반사는 토런스-스패로우(Torrance-Sparrow) 모델을 적절히 적용하였다³⁾.

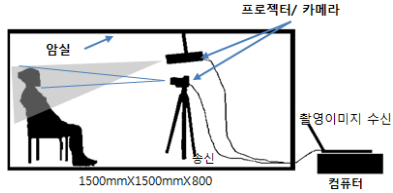
논문의 2장에서는 데이터 획득/ 적합, 3장은 렌더링, 4~5장에서는 최종결과와 결론을 언급한다.

1) 산란프로파일(Diffusion Profile) : 재질에 입사된 빛이 내부에서 확산되어 나가는 모양, 일반적으로 입사지점을 중심으로 주변으로 갈수록 감쇄되는 종형태를 나타낸다.

2) 비선형 최소자승법(Nonlinear Least Square Algorithm)의 하나인 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 이용하였다.

3) 거칠기 계수(σ)와 반사율(ρ_s)은 각각 평균적인 수치로 0.35와 0.25의 값을 사용하였다.

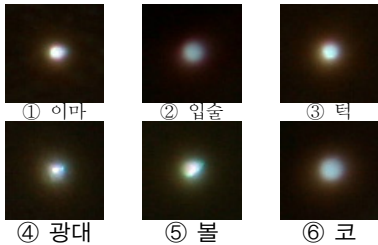
2. 데이터 획득/ 가우스 적합



(a) 촬영시스템



(b) 촬영장면



(c) 측정된 산란프로파일(HDR)

[그림 1] 촬영시스템 및 촬영장면, 산란이미지

산란프로파일의 측정은 Canon EOS 5D 카메라와 Optoma EP 780 DLP프로젝터 등 상용 장비를 이용하였다[그림 1]. 프로젝터로부터 1개 픽셀 크기의 광선을 얼굴의 6개 지점(이마, 입술, 턱, 광대, 볼, 코 등)에 입사시켜 촬영하여 HDR로 획득한다. 획득된 이미지는 중앙에 입사된 빛이 피하산란을 통해 주변으로 전달되어 표면으로 발산되는 산란프로파일이 된다. [그림 1](c)는 측정된 결과 중 하나를 보여준다. 1절에서 언급한 바와 같이 중앙에 입사된 빛이 주변으로 갈수록 감쇄되는 것을 볼 수 있다. [그림 1](c)④⑤에서 나타나는 다소 불규칙한 형태는 얼굴표면의 모근 등에 의한 것으로 이 경우 재촬영을 통해 완전한 이미지를 획득하였다.

산란프로파일을 가우스 함수의 선형결합으로 표현하기 위해 이미지의 중심(입사지점)을 통과하는 단면에 포함된 픽셀(pi)값들과 [식 1]과의 차의 제

곱이 최소가 되는 분산값(vi)들과 가중치(wi)들을 구한다. 이 논문에서는 여러 비선형 최소화법의 해결방법 중 제한조건을 지정할 수 있는 4)SQP를 이용하였다. SQP 알고리즘이 국지적 최소 값(local minima)에 수렴하는 것을 막고, 적절한 해에 빠르게 수렴하도록 초기 값 설정에는 유전알고리즘을 이용하였다. 약 40회 반복으로 의미 있는 초기 값 획득이 가능하다[그림 2]. 추정된 결과가 [그림 3]에 제시되어 있다. 그래프에서 입사지점을 중심으로 0.20~0.22mm(9~12번째 픽셀, 수직실선)까지는 직접 및 단일산란에 의한 것으로, 이 후는 다중산란에 의한 것으로 추정하였다. 5)

가우스함수의 선형결합:

$$f = \sum_{i=0}^k \omega_i G(v_i), \omega_i \geq 0, \sum_{i=0}^k \omega_i = 1.$$

[식 1] 가우스 선형결합

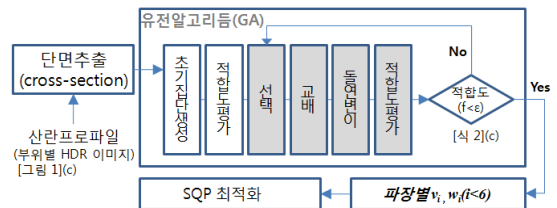
적합을 통해 분산(vi) 및 가중치(wi)가 결정되면 각 가우스 함수(Gi)들은 2차원 필터로 적용되어 피부로 입사된 빛을 주변으로 산란시키는 효과를 준다. 이 때 가우스 함수의 분리성을 이용하여 u, v 방향 1차원 필터링을 통해 효율성을 제고 하였다.

$$\text{목적함수: } O = \sum_{i=2}^n \left[p_i - \sum_{j=0}^k \omega_j G(v_j, r_i) \right]^2 \Delta r \quad (a)$$

$$\text{제한조건: } \sum_{i=0}^k \omega_i = 1 \text{ and } \forall \omega_i \geq 0 \quad (b)$$

$$\text{적합도: } f = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n r \times \left[p_i - \sum_{j=0}^k \omega_j G(v_j, r_i) \right]^2 \Delta r}}{\sqrt{r \times \left\{ \sum_{j=0}^k \omega_j G(v_j, r_i) \right\}^2 \Delta r}} \quad (c)$$

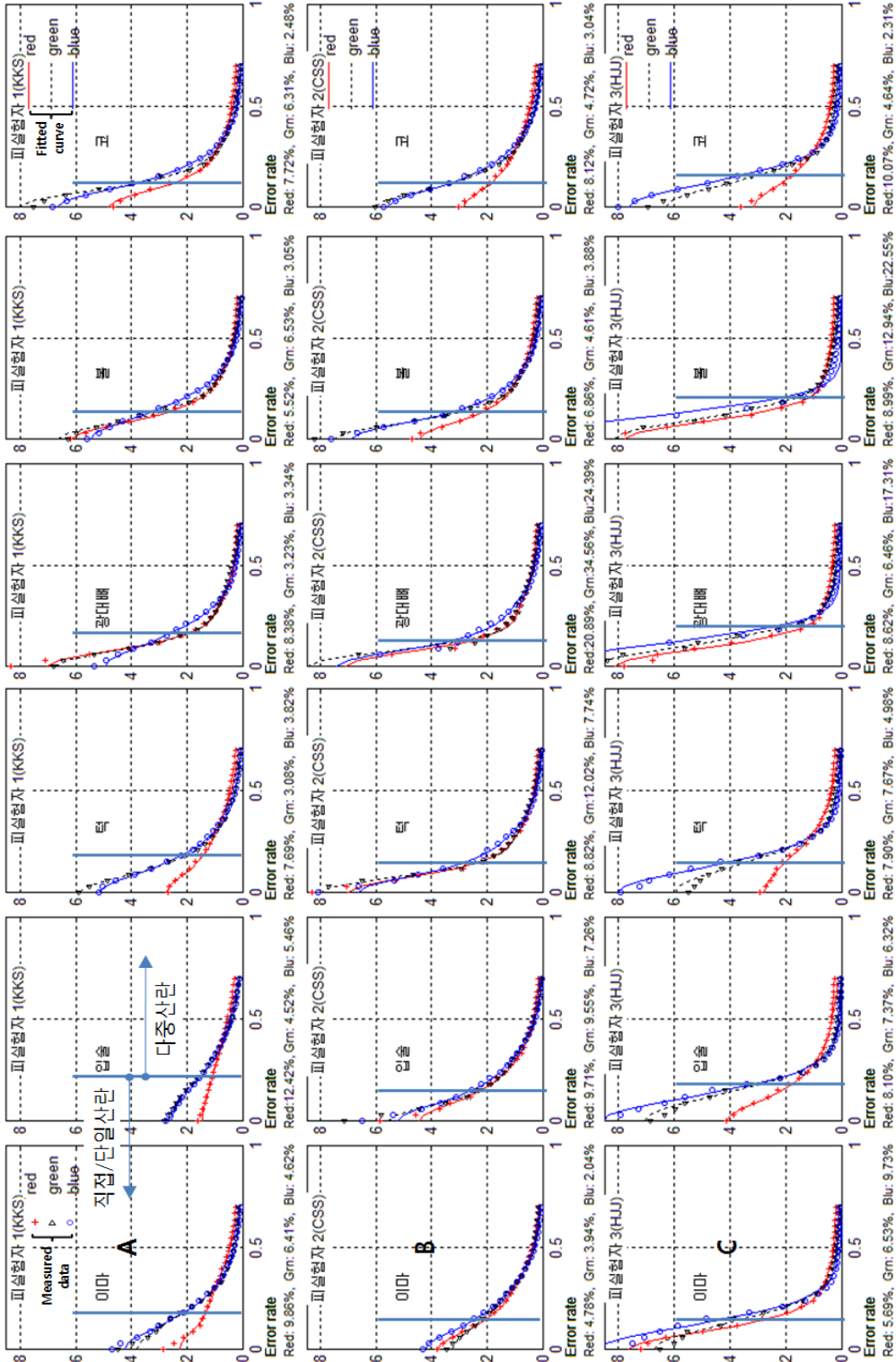
[식 2] 에러의 최소화/ 평가식



[그림 2] 가우스 매개변수의 추정(유전알고리즘, SQP)

4) SQP(Sequential Quadratic Programming)는 매트랩의 fmincon 함수를 이용하여 매트랩 루틴으로 작성하였다.

5) 대략 곡선의 변곡점을 전후로 하여 빛의 강도가 강한 부분은 직접 또는 단일산란에 의한 것으로 볼 수 있다.

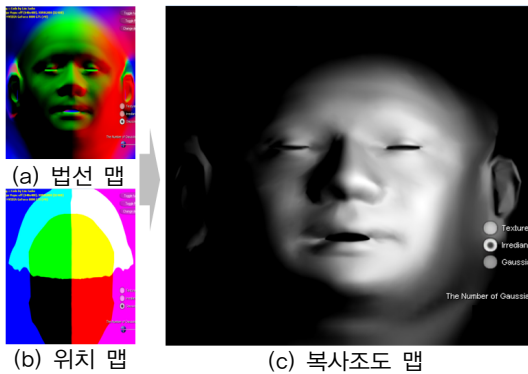


[그림 3] 얼굴 부위별 측정된 산란프로파일(파장별)에 가우시안 선행 결함식을 적용한 결과 및 에러율(기호: 측정치, 실선: 적합된 곡선), 곡선의 변곡점을 기준(수직실선: 좌측 1/5지점)으로 각각 다중산란/단일산란 또는 직접입사)에 의한 결과로 추정하였다. 피부의 특성에 따라 차이를 보인다.

3. 렌더링

렌더링은 마지막 패스(메시렌더링 및 텍스처 매핑)를 제외한 모든 패스가 펼쳐진 메시의 텍스처(unwrapped texture)를 렌더타겟으로 하여 진행된다. 렌더링 과정은 ‘기본 맵 생성/ 처리 → 가우스 필터링 → 최종 렌더링(텍스처 매핑)’으로 구성된다.

3.1 기본 맵 생성/ 처리



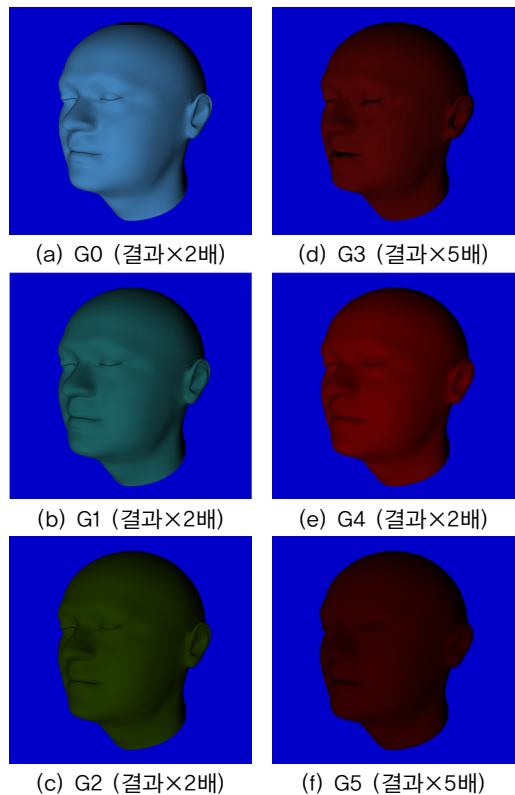
[그림 4] Deferred shading을 위한 기본적인 맵들

렌더링의 도입부에서는 표면에 입사되는 빛의 강도를 펼쳐진 텍스처(복사조도 맵, map)에 저장한다. 먼저 각 텍셀에서의 3차원 위치와 법선을 동일한 해상도의 텍스처에 렌더링 한다. 입사되는 빛은 텍셀 단위로 풍 셰이딩의 난반사(diffuse) 항만을 적용하며, 정반사는 최종 렌더링 시 토런-스페로우 모델을 적용한다.

복사조도 맵 [식 1]의 각 항에 해당하는 가우스 필터들에 의해 블러링 되어 피부내부를 통과해 밖으로 드러나는 현상을 표현한다. 이렇게 처리된 텍스처는 최종적으로 피부의 컬러 텍스처와 함께 메시에 매핑 되는데, 실제 인접해 있지만 텍스처 공간에서 떨어져 있는 경계부분에서 접합부가 갈라져 보이게 된다. 이와 같은 현상은 펼친 메시의 경계부분을 주변으로 2~3 텍셀을 팽창(dilation)시켜 해결하였다.

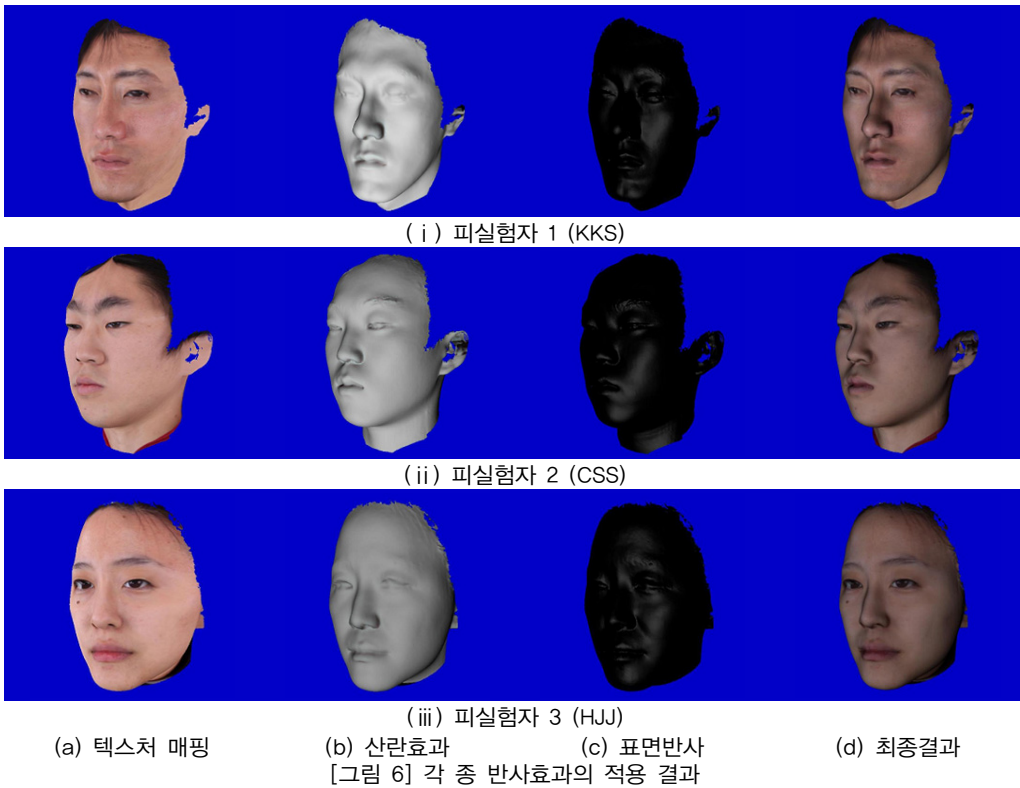
4. 피하산란효과의 적용

피부표면의 한 지점에 입사된 빛이 피하산란을 통해 주변의 다른 위치에서 발산되어 나타나는 피하산란효과는 [식 2](a)를 구성하는 가우스 함수 각각을 3.1절의 복사휘도맵에 필터로 적용하여 얻는다. 2차원 가우스 필터는 가우스 함수의 분리성에 의해 가로/ 세로방향의 2회 1차원 가우스 필터 적용으로 텍스처 접근회수를 $O(n^2) \rightarrow O(2n)$ 으로 개선할 수 있다. 본 논문에서는 최대 6개의 2차원 가우스필터 적용 시 12회의 렌더링 패스가 소요되는 단점을 개선하기 위해 쿼다의 병렬처리 능력을



구분	G0		G1		G2		G3		G4		G5	
	V ₀	W ₀	V ₁	W ₁	V ₂	W ₂	V ₃	W ₃	V ₄	W ₄	V ₅	W ₅
R	0.0075	0.2717	0.0280	0.1025	0.0610	0.1001	0.1200	0.1256	1.8000	0.3300	7.4100	0.0701
G	0.0100	0.1017	0.0150	0.4005	0.0310	0.3784	0.1200	0.2019	1.8000	0.0101	7.4100	0
B	0.0125	0.6749	0.0290	0.2810	0.0680	0	0.1200	0.0441	1.8000	0	7.4100	0

[그림 5] 이마를 측정한 데이터로 렌더링한 결과



활용하였다. [그림 5]는 [식 1]의 각각의 가우스 함수에 대응하는 가우스 필터가 적용된 결과이다. 분산 값이 커질수록 입사지점으로부터 먼 곳의 색상에 영향을 주며, 빛의 파장이 길수록 멀리 도달하기 때문에 색상이 Blue → Green → Red로 변하는 것을 알 수 있다.

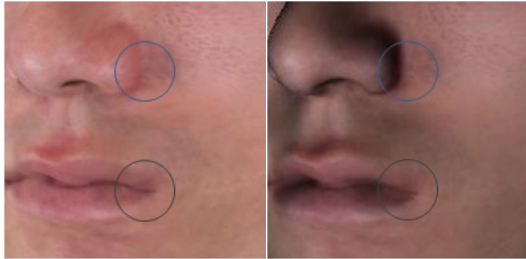
5. 결 과

[그림 6]은 실제 인물로부터 획득한 피하산란 정보를 적용 렌더링한 결과를 보여준다. 총 3명의 피실험자는 남성 2, 여성 1명으로 구성되며, 남성 2명은 각각 지성과 건성에 가까운 피부를 가지도록 하였다. [그림 6]의 각 열은 좌측으로부터 (a) 텍스처 매핑, (b) 산란효과, (c) 표면반사효과, 그리고 (d)는 표면 및 산란효과를 포함한 최종결과

를 보여준다. [그림 7](원으로 표시한 부분)은 피하산란에 의한 칼라블리딩 효과를 일반적인 텍스처 매핑의 경우와 비교하고 있다. 한 지점의 색이 주변으로 블리딩 되어 좀 더 자연스러워 보인다.

건성피부인 피실험자2(d)의 경우 피실험자1(d)에 비해 피부내부로 입사되는 빛이 상대적으로 많기 때문에 피부의 톤이 전반적으로 밝게 보인다. 이에 반해 피실험자1은 피실험자2에 비해 피부의 세부기하구조가 드러난다. 이러한 현상은 [그림 3]의 그래프(A, B)에서 그 원인을 분석할 수 있다. 입사되는 에너지의 많은 부분이 직접/ 단일산란(0.2mm부근의 수직한 실선 이전 부분)에 의해 표면에서 반사되어 빠져 나가기 때문에 실제 다중산란을 통해 멀리까지 전달되는 빛의 양은 적다.

에너지 보존의 관점에서 표면에서 반사되는 빛은 BRDF 모델 중 토런-스페로우 모델을 적용하여 빛의 총량을 보정하였다[그림 6](c).



(a) 텍스처 매핑 (b) 피하산란 적용
[그림 7] 피하산란에 의한 컬러 블리딩

6. 결 론

이 논문은 피부의 각 부위별 피하산란정보를 간단한 장비를 이용하여 측정한 후 결과를 분석하고 그것을 피부 렌더링에 이용하여 사실감을 높이는 데 그 목적을 두었다. 모든 산란이미지는 정보손실을 최소화하기 위해 HDR로 합성하였다. 측정 간 피실험자의 생리적 변화 또는 움직임에 의한 잡음을 최소화하기 위하여 재촬영을 통해 완전한 산란 프로파일을 획득하였으며, 획득한 산란프로파일을 파장별 가우스 함수의 선형결합으로 표현하고 각 항을 가우스 필터로 사용하여 피하산란에 의한 칼라블리딩 등의 효과를 보다 효율적으로 쉽게 처리하였다. 다만, CUDA에 대한 문헌과 예제가 부족하여 가우스 필터링을 CUDA로 처리하는 과정에서 많은 부분 시행착오를 거치고 일부는 미해결된 상태로 진행하였다.

국내에서는 얼굴의 메시와 텍스처 획득시 정점 단위로 정확히 매핑을 보장할만한 얼굴전용 스캐너(facial scanner)의 확보가 힘들어, 이 논문에서 사용한 메시와 텍스처에서는 실제 위치와 정확히 1:1로 일치하지 않는다. 이로 인해 피실험자의 피부를 그대로 재현하는 것을 목표로 하지 못하였다. 전문 스캐너를 사용하지 않아도 여러 각도에서의 촬영을 통해 메시의 각 정점에 실제와 정확히 일치하는 텍스처 좌표가 할당되도록 하는 방법에 대하여 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] Jensen H. W., Marschner S. R., Levoy M., Hanrahan P., A practical model for subsurface light transport. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, pp. 511-518.
- [2] Donner C., Jnsen H. W., Light diffusion in multi-layered translucent materials. ACM Trans. Graph. 24, 3 (2005), 1032-1039.
- [3] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D., and Raskar, R. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. In SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006, ACM, New York, NY, USA, 935 - 44 2006.
- [4] Kautz J., Pattanaik. S., Efficient Rendering of Human Skin. In Eurographics Symposium on Rendering 2007, pp. 1727-3463
- [5] Dachsbacher C., Stamminger M., Translucent shadow maps. In Rendering Techniques 2003 (Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering)(2003), pp. 197 - 201.
- [6] Ki. K., Oh K., Real-Time Approximate Subsurface Scattering on Graphics Hardware. PG '07: Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Application, 2007, pp. 403-406.
- [7] Hanrahan, P. and Krueger, W., 1993. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 1999, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, Computer Graphics Proceedings, 164-174.
- [8] Contini, D., Martelli, F., and Zaccanti, G. 1997. Photon migration through a turbid slab described by a model based on diffusion approximation. I. Theory. Appl. Opt. 36, 19, 4587 - 4599.
- [9] Wang, L. V. 1998. Rapid modeling of diffuse reflectance of light in turbid slabs. J. Opt. Soc. Am. A 15, 4, 936 - 944.
- [10] Donner C., JENSEN H. W., A spectral BSSRDF for shading human skin. In Rendering Techniques 2006 (Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering), pp. 409 - 418.

- [11] Debevec C., Hawkins T., Tchou C., Duiker H., Sarokin W. and Sagar M., Acquiring the reflectance field of a human face. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques 2000. pp. 145-156.
- [12] Ki H. and Oh K., A GPU-Based Light Hierarchy for Real-Time Approximate Illumination, The Visual Computer, vol. 24, 7-9, July, 2008. pp 649-658.
- [13] Weyrich T., Matusik W., Pfister H., BICKEL B., Donner C., TU C., Mcandless J., Lee J., Ngan A., Jensen H. W., Gross M., Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. ACM Trans. Graph. 25, 3 (2006), 1013 - 1024.
- [14] Ngan, A, Durand, F., and Matusik, W., Experimental analysis of brdf models. In Eurographics Symposium on Rendering(2005.), 117-126.

박 선 용(Park, Sun yong)



1995년 동국대학교 컴퓨터공학 학사
2006년 연세대학교 경영정보전공 석사
2008년 숭실대학교 미디어학부 박사과정 수료

관심분야 : 실시간 렌더링, 증강현실, 시각화

오 경 수(Oh, Kyoung su)



1994년 서울대학교 계산통계학과 학사
1996년 서울대학교 전산학과 석사
2001년 서울대학교 전기 컴퓨터 공학부 박사
2001년~2002년 (주) 조이먼트 개발팀장
2003년~현재 숭실대학교 미디어학부 부교수

관심분야 : 실시간 컴퓨터 그래픽스, 게임
