

이방성 반사의 변형을 통한 실시간 옷감 렌더링

강영민

동명대학교 게임공학과

ymkang@tu.ac.kr

Realtime Fabric Rendering with Deformed Anisotropic Reflectance

Young-Min Kang

Tongmyong University

요 약

본 논문에서는 측정된 양방향 반사 분포 함수(BRDF)와 같은 데이터 없이 사실적인 직물 표면 렌더링이 가능한 효율적인 방법을 제안한다. 제안된 기법은 광선 추적 기반의 오프라인 렌더러와 게임과 같은 실시간 응용에 모두 적용할 수 있다. 제안된 기법은 교호적(alternating) 이방성 반사와 변형된 미세면 분포 함수를 이용하여 직조 표면을 표현한다. 실에 대한 절차적 모델링은 직물의 표면을 효과적이며 효율적으로 표현할 수 있게 한다. 실험결과는 제안된 기법을 통해 상호작용적 응용에서도 다양한 직조물 표면을 사실적으로 렌더링할 수 있음을 보이고 있다.

ABSTRACT

In this paper, an efficient method is proposed to produce photorealistic images of woven fabrics without empirical data such as the measured BRDFs(bidirectional reflectance distribution functions). The proposed method is applicable both to ray tracer based offline renderers and to realtime applications such as games. The proposed method models the reflectance properties of woven fabric with alternating anisotropy and deformed MDF(microfacet distribution function). The procedural modeling of the yarn structure effectively and efficiently reproduces plausible rendering of woven fabric. The experimental results show the proposed method can be successfully applied to photorealistic rendering of diverse woven fabric materials even in interactive applications.

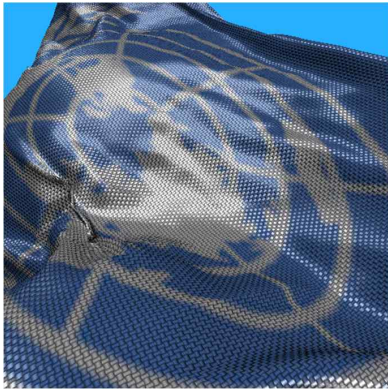
Keyword : Photorealistic rendering, woven fabric, alternating anisotropy.

접수일자 : 2010년 02월 17일 일차수정 : 2010년 03월 30일 심사완료 : 2010년 04월 14일

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음[NIPA-2010(C-1090-1021-0006)]

1. 서 론

본 논문에서는 그림 1과 같은 사실적인 직물 표면을 실시간에 렌더링할 수 있는 절차적 기법을 제안한다. 옷감과 같은 직물을 가상 환경에서 표현하려는 다양한 노력은 주로 물리적 동작을 효율적으로 처리하는 데에 집중되었다. 비록 실시간 동작 계산이 가상현실이나 게임 등에서 직물 표현의 사실성을 높이는 하였으나, 아직까지 직물 표면의 재질감을 실시간에 처리하는 기술은 잘 알려져 있지 않은 상태이다.



[그림 1] 제안된 기법을 통한 실시간 직물 렌더링

본 논문의 목표는 측정된 BRDF와 같은 실험적 데이터의 도움 없이 사실적인 직물 표면을 비실시간 렌더러 뿐만 아니라 실시간 렌더러에서도 가능하게 하는 것이다. 본 논문에서 제안된 기법은 가상 직물 객체의 사실적인 렌더링을 위하여 직물 표면의 교호적 이방성 반사를 절차적으로 모델링하고, 반사특성을 결정하는 미세표면 분포 함수(MDF, microfacet distribution function)를 변형하는 기법을 사용한다.

강영민은 미세표면 모델을 개선하여 절차적 범프 매핑을 이용한 직물표면의 사실적 렌더링을 수행하는 기법을 제안하였다[1]. 그러나 이 기법은 직조 방사(紡絲) 구조를 고려한 표면 굴곡의 계산에만 집중하여 실시간 렌더링 가능성은 고려하지 않았다. 본 논문은 이러한 한계를 극복하고 실시간

환경에서도 사실적인 직물 렌더링이 가능한 기법을 제안한다.

뜨개질로 만들어진 니트(knit) 표면을 표현하기 위한 다양한 연구들이 있었다[2,3,4,5,6,7]. 그러나 이러한 기법들은 니트 특유의 질감과 구조를 표현하는 데에 집중하여 직조물 렌더링에는 적합하지 않다.

직물이 아닌 일반적인 재질을 표현하기 위해 다양한 미세면 모델들이 제안되었다[8,9,10]. 본 논문은 이러한 미세면 모델을 적절히 변형하여 직물 재질을 효율적으로 표현하는 것을 목표로 한다.

Yasuda 등은 Blinn과 Newell이 제안한 이방성 반사[11]를 교호적으로 적용하여 직조물의 음영을 렌더링하는 기법을 제안하였다[12]. 이 기법은 직조를 고려한 최초의 절차적 렌더링 기법이지만, 직조 패턴이 시각적으로 감지되지 않는다는 단점을 가진다. Adabala 등도 교호적 이방성을 이용하여 직조물의 반사특성을 표현하는 기법을 제안하였다[13,14]. 이 기법은 미세면 모델[10,15]과 함께 Sloan 등이 [16]에서 제안한 지평맵(horizon map)도 활용하였다. 이 기법은 다양한 직조 패턴을 표현할 수 있지만 실의 표면 반사 자체는 다소 가볍게 다뤄졌다는 단점을 가지고 있다.

직조물의 사실적인 렌더링을 위해 직물 표면의 공간 가변 BRDF(SVBRDF)를 직접 측정하려는 시도가 있었다[17,18,19]. 이러한 방법들은 고가의 장비와 대규모 저장공간을 요구한다. Wang 등은 이러한 문제를 개선하는 효율적 기법을 제안하였다[22]. 이 기법은 SVBRDF를 저가의 측정 장비로 측정할 수 있도록 하였으며, 측정된 부분적 정보를 합성하여 전체적으로 온전한 데이터를 얻도록 하였다. 비록 이 방법을 통해 SVBRDF 측정의 비용을 낮출 수 있지만, 여전히 많은 저장 공간과 장비를 요구한다. Sattler 등은 Dana 등이 [17]에서 제안한 양방향 텍스처 함수(bidirectional texture function, BTF)를 이용하여 직조물을 렌더링하였다[20]. 그러나 이 방법 역시 일반적인 데이터 기반 기법의 한계를 그대로 갖고 있다.

Zinke와 Weber는 양방향 섬유 산란 분포 함수,



[그림 2] 교호적 이방성 반사를 이용한 재질 표현 결과

즉 8차원 BFSDF를 절차적으로 모델링하고 이를 낮은 차원으로 근사하는 기법을 제안하였으나, 섬유를 표현하기 위한 명시적인 기하구조가 필요하기 때문에 직조물을 표현하기 위해서는 지나치게 높은 기하 복잡도가 요구된다는 것이다.

2. 직물 렌더링 기법

이 장에서는 직물의 표면 반사를 표현하는 절차적 기법을 소개할 것이다. 제안된 기법은 미세표면 모델을 기반으로 하고 있으며, 직물의 특수한 반사 특성을 표현하기 위해 MDF를 변형하는 방법을 사용한다.

2.1 교호적 이방성과 직조 제어

미세면 모델의 반사 특성은 MDF인 $D(\omega_h)$ 에 의해 결정된다. 이 함수는 미세면의 법선 벡터가 ω_h 와 일치할 확률을 반환하는 함수이다. Ashikhmin 등은 [9]에서 다음과 같은 MDF를 통해 이방성 반사 특성을 표현하였다.

$$D(\omega_h) = \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (\omega_h \cdot \mathbf{n})^{e_x \cos^2 \phi + e_y \sin^2 \phi} \quad (\text{식 1})$$

이때 ω_h 는 광원벡터와 시선벡터의 중간 벡터이

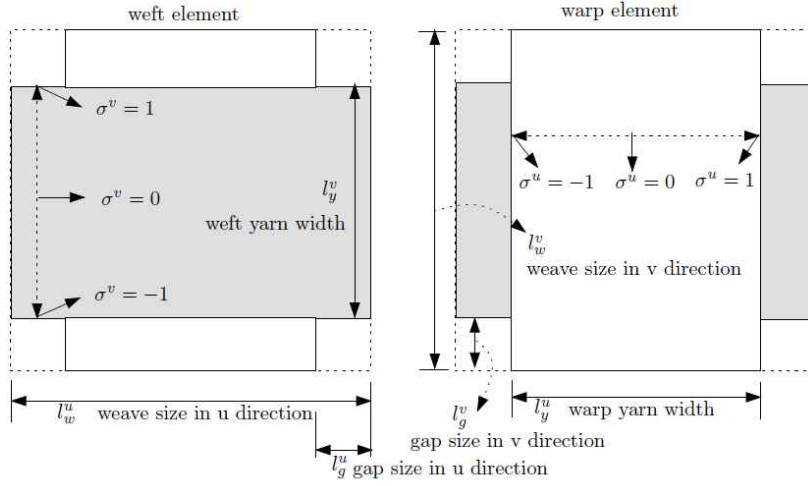
며, e_x 와 e_y 는 반사의 이방성을 제어하는 MDF의 지수이며, ϕ 는 ω_h 의 방위각을 나타낸다. e_x 와 e_y 를 이용하여 반사의 이방성을 쉽게 제어할 수 있다. ω_h 가 단위 벡터이기 때문에 이 벡터는 $(\omega_{hx}, \omega_{hy}, \sqrt{1-\omega_{hx}^2-\omega_{hy}^2})$ 로 표현할 수 있다.

직물은 씨실과 날실로 구성된다. 실이 서로 다른 방향으로 교차하며 드러나기 때문에 반사의 이방성은 균일하지 않고 표면에 드러난 실에 따라 교호적(交互的)으로 나타나게 된다. 이러한 교호성은 e_x 와 e_y 의 값을 상호교환함으로써 쉽게 구현할 수 있다. 씨실과 날실이 가진 MDF를 각각 D_{wefl} 와 D_{warp} 로 표현하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{wefl}(\omega_h) &= \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (\omega_h \cdot \mathbf{n})^{e_x \cos^2 \phi + e_y \sin^2 \phi} \\ D_{warp}(\omega_h) &= \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (\omega_h \cdot \mathbf{n})^{e_y \cos^2 \phi + e_x \sin^2 \phi} \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

[그림 2]는 교호적 이방성 반사의 효과를 보이고 있다. MDF는 [그림 2]의 (a)와 같이 2차원 공간에 쉽게 가시화될 수 있으며, 이러한 이방성 반사 특성을 가진 표면을 렌더링하면 [그림 2]의 (b)와 같은 결과가 생성된다. 직조 패턴을 고려하여 표면을 씨실 영역과 날실 영역으로 구분하여 (식 2)의 교호적 이방성 반사를 적용하면 [그림 2]의 (c)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서 제안된 기법은 직조 패턴에 의해



(a) 씨실 요소 (b) 날실 요소
[그림 3] 직조 요소의 종류 및 요소 구성 정보 표기([1]의 모델)

결정되는 이방성을 기반으로 한다. 따라서 직조패턴을 정의하고 렌더링을 위해 샘플링된 지점이 씨실인지 날실인지를 판단하는 것이 매우 중요하다. [그림 3]은 [1]에서 소개된 모델로 두 종류의 직조 요소를 보이고 있다. 각각의 직조 요소는 u 방향의 크기인 l_w^u 와 v 방향 크기인 l_y^v 를 가지며, 씨실과 날실의 굵기는 각각 l_y^u 와 l_y^v 로 표현된다. 실 사이의 틈새 크기는 각 축 방향으로 l_g^u 와 l_g^v 로 표현된다. 렌더링되는 지점이 씨실이나 날실의 중심에서 얼마나 떨어져 있는지는 각각 상대적 거리 σ^v 와 σ^u 로 표현하며, 범위는 $[-1,1]$ 이 된다. 샘플링된 지점이 씨실의 중심축 위에 놓인다면 $\sigma^v=0$ 이 되며, 실의 가장자리에서 -1 혹은 1 이 된다.

샘플링된 지점의 직조 요소는 직조 패턴이 정의되어야 판정된다. 직조 패턴을 정의하기 위해서는 n_w , n_π , n_σ 의 세 파라미터를 사용하는데, n_w 는 연속되는 씨실 요소의 개수이며, n_π 는 씨실 요소들 다음에 이어지는 날실 요소의 개수이다. n_σ 는 하나의 씨실 행에 이어지는 다음 씨실 행에서 패턴이 얼마나 옆으로 이동하는지를 직조요소 단위로

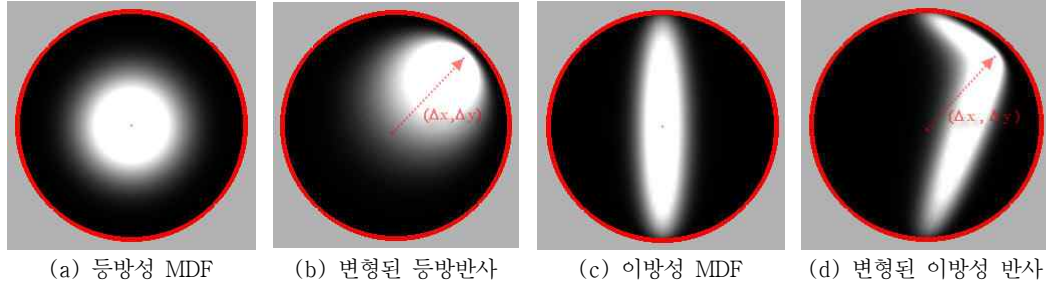
나타내는 값이다. 어떤 지점이 씨실요소에 속하는지 날실요소에 속하는지는 다음과 같은 판별식을 구해 판정할 수 있다.

$$d = \left\{ \left\lfloor \frac{u}{l_w^u} \right\rfloor \% n_w + n_\sigma \left(\left\lfloor \frac{v}{l_y^v} \right\rfloor \% n_\pi \right) \right\} \% (n_w + n_\pi) \quad (\text{식 3})$$

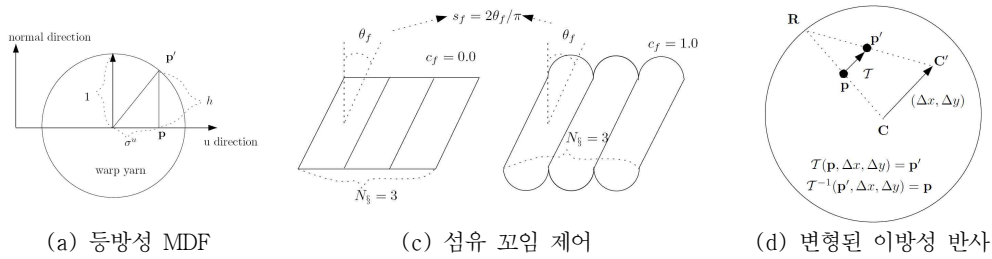
이때 $\%$ 는 모듈러 연산자이며, d 값이 n_w 보다 작은 값이면 씨실 요소이며, 그렇지 않으면 날실 요소가 된다. 샘플링된 지점이 실제로 날실인지 씨실인지는 틈새의 크기 l_g^u 와 l_g^v 를 고려하여 쉽게 판정할 수 있으며, 이를 이용하여 (식 2)의 함수 가운데 적절한 MDF를 사용하면 된다.

2.2 직물표면 표현을 위한 MDF 변형

교호적 이방성은 효율적이며 효과적으로 직물의 반사를 표현할 수 있다. 그러나, 교호적 이방성만으로는 직물의 울퉁불퉁한 표면을 제대로 표현할 수 없다. 사실적인 직물 표면을 표현하기 위해서 (식 2)의 MDF를 그대로 사용하지 않고 변형하는 방법을 제안한다. (식 2)에 나타난 두 개의 MDF



[그림 4] MDF 변형의 가시화



[그림 5] 직물 표면의 굴곡 표현 모델 및 반사 변형 개념

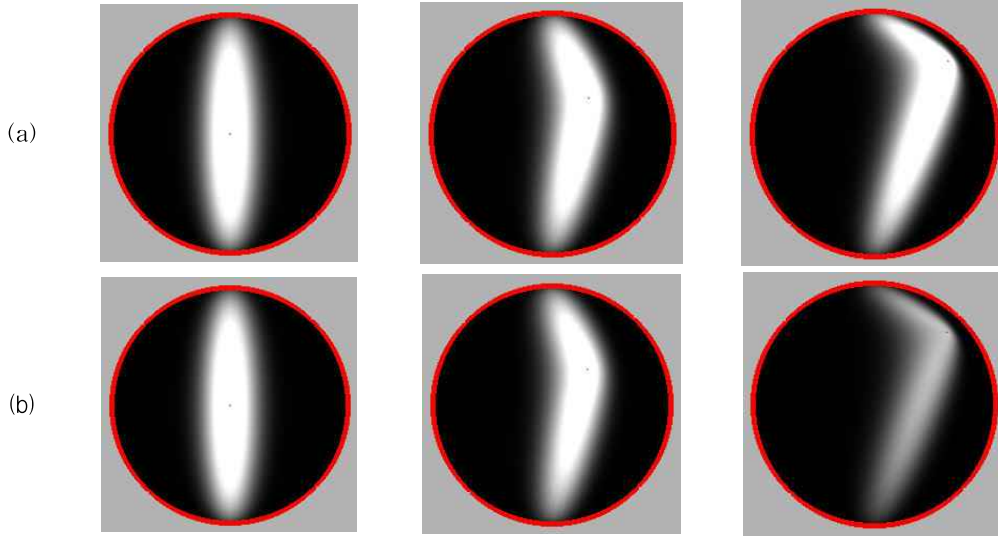
는 사실 90도로 회전한 동일한 MDF라고 할 수 있다. 분포 함수를 회전할 수 있다면 울퉁불퉁한 표면을 표현하기 위해 함수를 변형하는 것도 가능하다.

[그림 4]의 (a)에 나타난 결과는 샘플링된 지점에서 가장 가능성 높은 법선의 방향이 메시(mesh)로 주어진 기하구조에 의해 정의되는 법선 벡터와 정확히 일치할 때의 결과이다. 우리의 목표는 울퉁불퉁한 표면을 생성하는 것이므로 주어진 직조 패턴에 따라 이 법선 벡터를 적절히 흔들어주어야 한다. 메시에 의해 주어진 법선을 \mathbf{N} 이라고 하고, 곡면을 표현하기 위해 흔들린 법선을 $\tilde{\mathbf{N}}$ 이라고 하자. 표면의 좌표 공간, 즉 탄젠트 공간에서 \mathbf{N} 은 언제나 $(0,0,1)$ 의 값을 가진다. 따라서 섭동된 법선 $\tilde{\mathbf{N}}$ 은 $(\Delta x, \Delta y, \sqrt{1 - \Delta x^2 - \Delta y^2})$ 으로 표현할 수 있다. z 성분은 x 와 y 성분에 종속적이므로 섭동된 법선 $\tilde{\mathbf{N}}$ 은 간단히 2차원 벡터인 $(\Delta x, \Delta y)$ 로 표현할 수 있으며, 이 값은 MDF의 중심이 이동한 변위라고 할 수 있다. [그림 4]는

변형된 MDF의 개념을 보이고 있다. [그림 4]의 (a)와 (c)는 기본 MDF의 예를 보이고 있으며, (b)와 (d)는 기본 MDF를 $(\Delta x, \Delta y)$ 만큼 중심을 이용한 변형 MDF를 보이고 있다.

[그림 5]의 (a)는 완벽히 원형이 날실의 절단면을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 샘플링된 지점 \mathbf{p} 는 가상의 직물 곡면에 의해 \mathbf{p}' 에 있는 것처럼 렌더링 되어야 한다. 법선 벡터는 원의 중심에서 \mathbf{p}' 로 향하는 벡터이며, 이 벡터의 x 성분은 σ^u 와 동일하며 실의 곡률과 무관하게 σ^u 가 증가하면 법선 벡터의 x 성분이 증가한다. 따라서 날실 위의 한 점을 렌더링할 때 MDF는 $(c_y \sigma^u, 0)$ 만큼 변형되어야 한다. 이때 c_y 는 실의 절단면 곡률을 제어하는 변수이다. 씨실에 대해서는 비슷하게 $(0, c_y \sigma^v)$ 만큼 변형하면 된다는 것을 알 수 있다.

하나의 실 가닥은 다수 섬유를 꼬아 만들 수 있다. [그림 5] (b)는 이러한 꼬임에 의해 달라지는 실의 반사를 제어하는 파라미터를 보이고 있다. θ_f



[그림 6] 주변광 가림(ambient occlusion) 근사를 적용한 MDF 변형:
(a) 단순한 MDF 변형 (b) 주변광 가림의 어려움을 적용한 결과

는 꼬임 각도이며, c_f 는 꼬인 섬유들의 곡률을 제어하는 파라미터이다. 간단히 $2\theta_f/\pi$ 를 s_f 로 나타내면, s_f 는 0에서 1사이의 값이 된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 꼬인 섬유는 c_f 가 0일 때 평평하고 값이 증가하면 울퉁불퉁함이 증가하게 된다. N_s 는 하나의 직조 요소 내에 꼬임이 몇 번 일어나는지를 제어하는 파라미터이다. 날실의 경우 섬유 꼬임은 MDF 변형의 y 축 성분에 영향을 줌을 쉽게 알 수 있으며, 씨실의 경우에는 x 축 성분에 영향을 준다. 날실의 경우 꼬임에 의해 생기는 울퉁불퉁한 굴곡은 $(0, c_f(2\text{fract}(N_s(v_w - s_f\sigma^v)) - 1))$ 로 모델링할 수 있다. 씨실의 경우도 비슷하게 x 성분 변형을 모델링할 수 있으므로, 씨실과 날실에 대한 MDF 변형은 이제 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &(\Delta x, \Delta y) \\ &\text{for } weft: (c_f(2\text{fract}(N_s(u_w - s_f\sigma^u)) - 1), c_y\sigma^v) \\ &\text{for } warp: (s_y\sigma^u, c_f(2\text{fract}(N_s(v_w - s_f\sigma^v)) - 1)) \end{aligned} \quad (\text{식 4})$$

렌더링을 수행할 때, 모든 샘플링 지점에 대하여

(식 4)에 의한 변형 MDF를 구한다는 것은 매우 비효율적인 일이다. 실제 렌더링 기법을 구현할 때에는 원래의 기본 MDF인 (식 2)의 $D(\omega)$ 를 그대로 사용하면서, 변환된 좌표를 입력으로 사용한다. [그림 5]의 (c)는 MDF 변형의 개념을 보이고 있다. 위치 \mathbf{p} 는 변형된 MDF에서는 \mathbf{p}' 로 이동할 것이다. 이러한 변환을 T 라고 정의하자. 그러면 간단히 역변환 T^{-1} 을 정의할 수 있다. \mathbf{R} 을 변형된 MDF의 원점 \mathbf{C}' 에서 시작해 \mathbf{p}' 를 지나는 반직선이 MDF 외곽선과 교차하는 지점이라고 하자. T 에 의해 변환되는 \mathbf{p} 와 \mathbf{p}' 의 관계는 다음과 같이 쉽게 표현된다.

$$T^{-1}(\mathbf{p}', \Delta x, \Delta y) = \mathbf{p}' - \frac{|\mathbf{R} - \mathbf{p}'|}{|\mathbf{R} - \mathbf{C}'|}(\Delta x, \Delta y) \quad (\text{식 5})$$

이제 법선 벡터가 $(\Delta x, \Delta y)$ 만큼 섭동된 지점의 광반사 강도를 계산하기 위해서는 간단히 MDF를 $D(T^{-1}(\omega_h, \Delta x, \Delta y))$ 와 같이 사용하면 된다.

변형된 MDF가 샘플링된 지점의 반사 특성을 효과적으로 변형하지만, 샘플링된 지점은 여전히



(a) 단섬유 모델



(b) 방적사 모델



(c) 주변광 가림 적용



(d) 잡음 추가

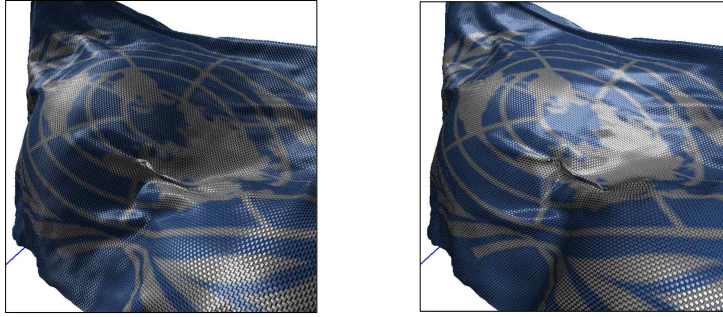
[그림 7] 제안된 기법을 활용한 렌더링 결과(오프라인 렌더러에 적용): (a) 실린더 형태의 단섬유를 고려한 MDF 변형 결과 (b) 섬유의 꼬임을 고려한 방적사 모델 (c) 주변광 가림 어림치를 적용한 결과 (d) 잡음을 통해 사실성을 증대시킨 결과

평면에 있다. 따라서 울퉁불퉁한 곡면에 의해 만들어진 그림자 등은 고려되지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 우리는 주변광 가림(ambient occlusion)을 근사적으로 적용하는 방법을 사용하였다. 표면에서 모든 방향으로 광선을 캐스팅하는 방법을 사용하지 않고, MDF 변형의 정도를 주변광 가림의 어림치로 가정하였다. 따라서 반사광의 강도는 $(1 - \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2})$ 의 값이 곱해져서 결정된다. 그림 6은 이러한 주변광 가림 어림치를 적용했을 때, MDF의 강도가 어떻게 변화하는지를 보이고 있다. (a) 행은 주변광 가림이 고려되지 않은 것이며, (b) 행은 주변광 가림이 고려된 것이다.

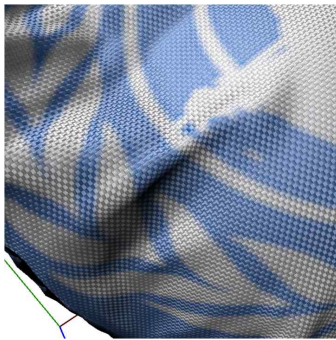
3. 실험 결과

제안된 기법은 물리 기반 렌더러와 실시간 응용 프로그램 모두에 구현되었다. 물리 기반 렌더러는 Lux Render를 활용하여 구현되었으며, [그림 7]은 제안된 기법을 광선 추적 기반 렌더러에 적용했을 때의 결과를 보이고 있다. [그림 7]의 (a)는 실린더 형태의 필라멘트 섬유를 표현하는 MDF 변형을 적용한 결과이며, (b)는 섬유의 꼬임을 동시에 고려한 것이다. 꼬임이 있는 방적사 모델에서 정반사 성분이 흩어짐을 알 수 있다. [그림 7]의 (c)는 주변광 가림을 고려하여 현실감을 높인 것이며, (d)는 각 씨실과 날실 행 별로 잡음을 추가하여 사실성을 더욱 높인 결과이다.

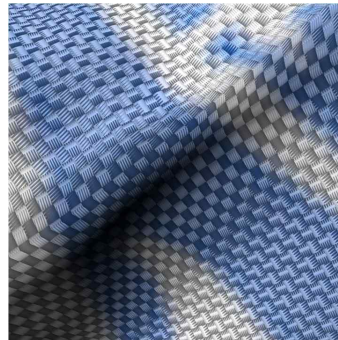
[그림 8]은 제안된 기법을 OpenGL 셰이딩 언어인 GLSL을 사용하여 구현한 결과이다. 실시간 응용에서도 사실적인 직물 표면을 효과적으로 렌더링



[그림 8] 실시간 렌더링 환경에서 광원의 위치 변화에 따라 변화하는 반사 특성



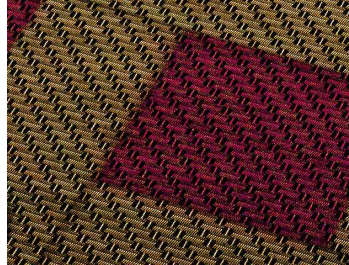
(a) 실시간 렌더링 결과



(b) 실시간 렌더링 환경에서의 근접 관찰



(c) 전역 조명 렌더링 결과



(d) 전역 조명 환경에서의 근접 관찰

[그림 9] 다양한 관찰 거리에서의 렌더링 결과: (a), (b) 실시간 렌더링 결과 (c), (d) 전역 조명 렌더링



(a) 주자직 표현 결과



(b) 능직 표현 결과

[그림 10] 직조 패턴 변경을 통한 반사 제어: (a) 주자직 ($n_w = \infty$) (b) 능직 ($n_w = 2$, $n_\pi = 1$, $n_\sigma = 1$)

할 수 있었다. 2.26 GHz 인텔 코어 2 듀오를 CPU로 사용하고 2G 1067 MHz DDR3 램을 장착한 Mac OS X 환경에서 실험을 하였으며, 성능은 OpenGL의 기본 렌더링 방법인 구로(Gouraud) 셰이딩의 렌더링 시간을 1로 설정하여 비교하였다. 실험 결과는 [표 1]에 나타나 있다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 픽셀별로 풍(Phong) 셰이딩을 적용했을 경우 구로 셰이딩의 1.41배의 렌더링 시간이 소요되었으며, 이방성 반사만 적용했을 경우 1.785배의 시간이 소요되었다. 제안된 기법은 1.846배의 시간이 소요되어 다른 기법에 비해 느리기는 하지만 실시간 렌더링에 적용하는 데에는 큰 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

[그림 9]는 관찰 위치를 변경하여 직물과의 거리를 다양하게 조정할 경우에도 사실적인 직물 렌더링이 가능함을 보이고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 제안된 기법은 임의의 위치에서 사실적 렌더링을 수행할 수 있다.

[그림 10]은 직조 패턴을 변경했을 때 나타나는 효과를 보이고 있다. [그림 10]의 (a)는 주자직(satin) 직물을 표현하고 있으며 (b)는 능직(twill) 재질의 직물을 표현하고 있다.

[표 1] 제안기법의 성능

	구로 셰이딩	픽셀별 셰이딩	이방성 반사	제안기법
렌더링 시간	1	1.415	1.785	1.846

4. 결 론

본 논문에서는 게임이나 가상현실과 같은 실시간 응용에서 활용할 수 있는 사실적인 직물 렌더링 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 직물의 자연스러운 반사 특성을 교호적 이방성으로 표현하였다. 또한 제안된 기법은 미세면 분포 함수인 MDF를 적절히 변형하는 방법을 통해 직물 표면의 울퉁불퉁한 느낌을 사실적으로 재현할 수 있다. 제안

된 기법은 직조 패턴과 방적사의 섬유 꼬임 등을 고려하여 렌더링 품질을 극도로 높일 수 있다.

실험 결과를 통해 제안된 기법이 상호작용적 응용에서 성공적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 제안된 기법은 GLSL을 이용하여 성공적으로 구현되었으며 일반적인 개인용 컴퓨터에 장착되어 있는 그래픽 하드웨어를 활용하여 실시간 직물 렌더링이 가능하였다.

직물 표면의 반사 특성을 절차적으로 모델링했기 때문에 제안된 기법은 임의의 관찰 거리에서 직물을 자연스럽게 렌더링할 수 있다.

제안된 기법의 효율성과 절차적 특성은 게임과 같은 상호작용적 응용에서도 사실적인 직조물을 표현할 수 있게 하여 게임이나 가상현실의 품질을 향상하는 데에 적극적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 강영민. 절차적 범프 매핑을 이용한 직물표면의 사실적 렌더링. 한국게임학회 논문지 10(6): 103-111, 2010. 6.
- [2] K. Daubert, H. P. A. Lensch, W. Heindrich, and H.-P. Seidel. Efficient cloth modeling and rendering. In Rendering Techniques 2001: Proc. 12th Eurographics Workshop on Rendering, pages 63 - 70, 2001.
- [3] K. Daubert and H.-P. Seidel. Hardwarebased volumetric knitwear. Computer Graphics Forum (Eurographics 2002 Proceedings), 21:575 - 584, 2002.
- [4] E. Gröller, R. Rau, and W. Strasser. Modeling and visualization of knitwear. In IEEE Transactions on Visualization and Compute Graphics, pages 302 - 310, 1995.
- [5] E. Gröller, R. Rau, and W. Strasser. Modeling textile as three dimensional texture. In Rendering Techniques 1996: Proc. 7th Eurographics Workshop on Rendering, pages 205 - 214, 1996.
- [6] M. Meissner and B. Eberhardt. The art of knitted fabrics, realistic and physically based modeling of knitted patterns. Computer

- Graphics Forum (Eurographics 1998 Proceedings), pages 355 - 362, 1998.
- [7] Y. Xu, Y. C. S. Lin, H. Zhong, E. Wu, B. Guo, and H. Shum. Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice. In Proceedings of SIGGRAPH 2001, pages 391 - 398, 2001.
- [8] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. Journal of Optical Society of America, 57(9), 1967.
- [9] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. Computer Graphics (ACMSiggraph '81 Conference Proceedings), 15(3):307 - 316, 1981.
- [10] M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley. A microfacet-based brdf generator. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pages 65 - 74, 2000.
- [11] Blinn J. and Newell M. Texture and reflection in computer generated images. Communication of ACM, 19(10):542 - 547, 1976.
- [12] T. Yasuda, Yokoi S., Toriwaki J., and Inagaki K. A shading model for cloth objects. IEEE Computer Graphics and Applications, 12(6):15 - 24, 1992.
- [13] N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, and G. Fei. Visualization of woven cloth. In Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering (ACM International Conference Proceeding Series), 44:178 - 185, 2003.
- [14] N. Adabala, N. Magnenat-Thalmann, and G. Fei. Real-time rendering of woven clothes. In Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pages 41 - 47, 2003.
- [15] M. Ashikhmin and P. Shirley. An anisotropic phong brdf model. Journal of Graphics Tools, 5(2):25 - 32, 2002.
- [16] P.-P. Sloan and M. F. Cohen. Interactive horizon mapping. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000, pages 281 - 286, 2000.
- [17] K. J. Dana, S. K. Nayar, B. Van Ginneken, and J. J. Koenderink. Reflectance and texture of real-world surfaces. ACM Transactions on Graphics, 18(1):1 - 34, 1999.
- [18] J. Lawrence, A. Ben-Artzi, C. Decoro, W. Matusik, H. Pfister, R. Ramamoorthi, and S. Rusinkiewicz. Inverse shade trees for nonparametric material representation and editing. ACM Transactions on Graphics, 25(3):735 - 745, 2006.
- [19] D. K. McAllister, A. A. Lastra, and W. Heidrich. Efficient rendering of spatial bidirectional reflectance distribution functions. In Proceedings of the 17th Eurographics/SIGGRAPH workshop on graphics hardware (EGGH-02), pages 79 - 88, 2002.
- [20] M. Sattler, R. Sarlette, and R. Klein. Efficient and realistic visualization of cloth. EGRW '03: Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, pages 167 - 177, 2003.
- [21] K. Perlin. An image synthesizer. Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings), 19:287 - 296, 1985.
- [22] J. Wang J, S. Zhao, X. Tong, J. Synder and B. Guo. Modeling anisotropic surface reflectance with example-based microfacet synthesis. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2008), 27(3):41:1 - 41:9, 2008.



강영민 (Young-Min Kang)

1996년 부산대학교 전산학과 이학사
1999년 부산대학교 전산학과 이학석사
2003년 부산대학교 전산학과 이학박사
2003년~2005년 한국전자통신연구원
2005년~현재 동명대학교 게임공학과 조교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 게임 프로그래밍