

절차적 범프 매핑을 이용한 직물표면의 사실적 렌더링*

강영민
 동명대학교 게임공학과
 ymkang@tu.ac.kr

Realistic Rendering of Woven Surface using Procedural Bump Mapping

Young-Min Kang
 Tongmyong University

요 약

본 논문에서는 직물을 사실적으로 렌더링할 수 있는 절차적 접근법을 제안한다. 가상 직물을 렌더링하기 위한 기존의 절차적인 기법들은 결과의 사실성이 부족하다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 제안된 예제-기반 접근법은 렌더링의 사실성을 매우 높였지만, 다양한 재질의 반사를 표현하기 위해서는 대용량의 저장 공간이 필요하다는 단점을 가진다. 본 논문에서 제안되는 기법은 미세면(microfacet) 모델을 이용하여 직물을 표현한다. 미세면 모델은 이방성 반사 특성을 갖도록 하였으며, 씨실과 날실은 이러한 이방성 반사 특성을 수직으로 교차하여 표현할 수 있다. 이와 함께 본 논문은 실을 더욱 사실적으로 표현하기 위해 직조물을 구성하는 실의 굴곡을 절차적으로 모델링하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 데이터를 사용하지 않고도 매우 사실적인 직물 렌더링이 가능하다.

ABSTRACT

In this paper, an procedural approach to photorealistic rendering of woven fabric material is proposed. Previously proposed procedural approaches to fabric rendering have the disadvantage that the rendering result is not sufficiently realistic. In order to enhance the realism, researchers employed example-based approaches. However, those methods have serious disadvantage that they require huge amount of storage for the various reflectance properties of diverse materials. The proposed method can express the reflectance on weft and warp yarns by alternating the anisotropic reflectance on yarns. In addition, we propose the proposed method procedurally models the bumpy yarn structure of woven fabric to obtain plausible rendering results. The proposed method can efficiently reproduce realistic virtual fabric without any reflectance data sets.

Keyword : Photorealistic rendering, woven fabric, alternating anisotropy.

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

※ 본 연구는 정보통신연구진흥원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구[2006-S-045-1]를 바탕으로, 지식 경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음 [NIPA-2010(C-1090-1021-0006)]

1. 서론

물리 기반 렌더링의 목표는 사실적인 이미지를 생성하는 것이다. 이러한 목표는 가상 객체의 표면 반사를 모델링함으로써 달성할 수 있다. 본 논문에서는 직조 의류의 사실적인 렌더링을 가능하게 하는 절차적 기법을 제안한다. 제안된 기법은 [그림 1]과 같은 사실적인 렌더링 결과를 생성할 수 있다.



[그림 1] 제안된 기법을 통해 생성된 렌더링 결과

본 논문에서 제안되는 기법은 미세면 모델(microfacet model)을 이용하여 직물을 표현한다. 미세면 모델은 이방성 반사 특성을 갖도록 하였으며, 씨실과 날실은 이러한 이방성 반사 특성을 수직으로 교차하여 표현할 수 있다. 이와 함께 본 논문은 실을 더욱 사실적으로 표현하기 위해 직조물을 구성하는 실의 굴곡을 벡터 조작을 통해 절차적으로 모델링하는 기법을 제안한다.

빛이 실을 통과하여 흩어지는 표하산란은 고려되지 않았으나, 실의 틈새를 통해 통과하는 빛이 자연스럽게 표하산란 효과를 보인다.

2. 관련 연구

천은 뜨개질로 만들어진 니트(knit)와 직조를 통해 얻어지는 직물로 크게 구분할 수 있다. 뜨개질로

만들어진 니트(knit) 소재를 사실적으로 그려내기 위한 다양한 노력이 있었다[1,2,3,4,5,6]. 그러나 이러한 기법들은 니트 섬유 특유의 질감이나 뜨개질로 엮힌 실의 구조를 모델링하는 데에 집중하였기 때문에 직물의 렌더링에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 미세면(microfacet) 모델을 이용하여 직물의 반사 표면을 모델링한다. 미세면 모델은 Torrance와 Sparrow가 최초로 제안하였고[7], Cook과 Torrance에 의해 그래픽스 분야에 소개되었다[8]. Ashikhmin은 미세면 모델에 기반한 BRDF(양방향 반사 분포 함수)를 다음과 같이 모델링하였고[9], 본 논문의 기법도 이러한 미세면 모델을 사용하였다.

Yasuda 등은 이방성 반사를 실의 방향에 따라 적용하여 직조물의 음영을 렌더링하는 기법을 제안하였다[10]. 이 방법은 사실적 직물 렌더링을 위한 절차적 기법의 초기 접근법으로 Blinn과 Newell이 [11]에서 제안한 미세면 모델을 활용하였다. 이 기법은 직조 패턴을 기반으로 반사 특성을 결정하는 최초의 모델이지만, 직조 패턴이 시각적으로 감지될 수 있는 근거리 렌더링에서도 직조 패턴의 모습이 나타나지 않는다는 단점을 가진다.

Adabala 등은 직조물의 렌더링을 위해 근거리 렌더링과 원거리 렌더링을 구분하는 접근법을 사용하였다[12,13]. 이 기법 역시 미세면 모델을 기반으로 하였으며, 적용된 미세면 모델은 Ashikhmin 등이 제안한 기법[9,14]이며, Sloan 등이 제안한 지평 맵(horizon map)도 활용하였다[15]. 이 기법의 장점은 다양한 직조 패턴을 표현할 수 있다는 것이지만, 실의 표면 반사 자체는 다소 가볍게 다뤄졌다는 단점을 가지고 있다.

직조물의 사실적인 렌더링을 위해서는 공간적으로 변화하는 이방성 반사 모델이 필요하다. 이를 위해 직물 표면의 공간 가변 BRDF(SVBRDF)를 직접 측정하려는 시도가 있었다[16,17,18]. 일반적으로 SVBRDF를 측정하는 일은 매우 고가의 장비와 많은 용량의 저장 공간이 필요하다.

Wang 등은 SVBRDF를 하나의 시점에서 측정

할 수 있는 기법을 제안하였다[21]. 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 [16]에서 제안한 양방향 텍스처 함수(bidirectional texture function, BTF)를 이용하여 직조물을 렌더링하였다[19]. 그러나 이 방법 역시 일반적인 데이터 기반 기법의 한계를 그대로 갖고 있다.

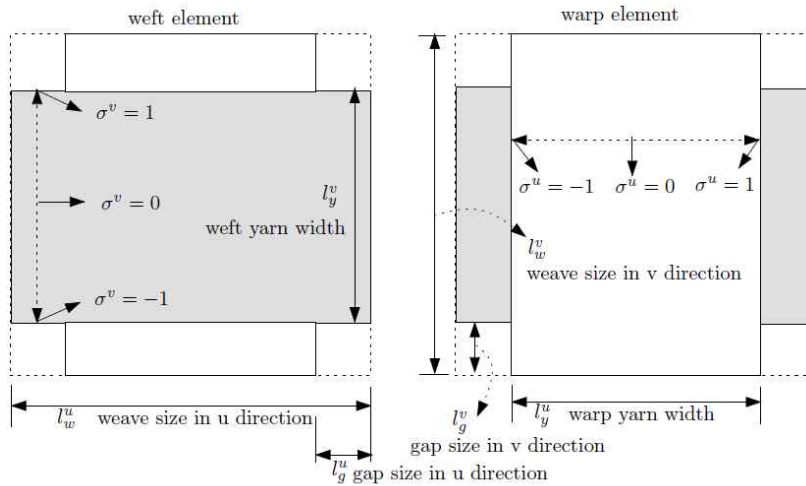
Zinke와 Weber는 양방향 섬유 산란 분포 함수, 즉 BFSDF를 절차적으로 모델링하였으며, 다루기 힘든 8차원 BFSDF를 근사하여 차원을 줄이는 기법도 같이 제안하였다. 이 기법의 문제점은 섬유를 표현하기 위한 명시적인 기하구조가 필요하기 때문에 직조물을 표현하기 위해서는 지나치게 높은 기하 복잡도가 요구된다는 것이다.

3. 직조 기반 범프 매핑

이방성 반사 특성을 실의 방향에 따라 적용하는 것만으로는 사실적인 직물 표현을 얻을 수 있다. 이 장에서는 실의 굴곡을 표현하여 사실적인 직물 렌더링이 가능한 직조 기반의 범프 매핑 기법을 설명한다.

3.1 실의 방향 결정

본 논문에서 제안하는 기법은 의류 객체의 표면의 굴곡을 표현하기 위한 것이다. 이를 위해서는 직조 패턴을 모델링하는 것이 필요한데, 직조 패턴은 직조 요소를 어떻게 배열하는가에 따라 결정되도록 하였다. 직조 요소는 [그림 2]와 같이 씨실 요소와 날실 요소로 나뉜다. 이때 하나의 직조 요소 크기는 u 방향으로 l_w^u 이고 v 방향으로 l_w^v 가 된다. 씨실의 굵기는 l_y^v , 날실의 굵기는 l_y^u 로 표현하자. 씨실과 날실이 교차하여 만드는 틈새의 크기 역시 u 방향과 v 방향으로 각각 l_g^u 와 l_g^v 로 표현할 수 있다. 굴곡을 생성하는 데에 있어 중요한 정보는 렌더링을 하려는 지점이 실의 중심에서 떨어



(a) 씨실 요소

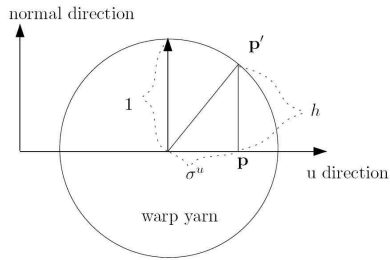
(b) 날실 요소

[그림 2] 직조 요소의 종류 및 요소 구성 정보 표기

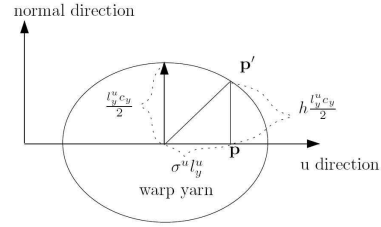
져 있는 정도이다. 이 오프셋(offset) 값은 씨실의 경우 σ^v 로, 날실의 경우 σ^u 로 표현된다. 이 오프셋 값의 범위는 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 범위 $[-1,1]$ 사이의 값이 된다. 다음으로 중요한 정보는 직조 요소 내부 좌표인 (u_w, v_w) 이다. 표면의 위치는 표면 좌표 (u, v) 로 정의된다. 직조에 의해 생기는 굴곡은 [그림 2]의 직조 요소 내부에서 완전히 정의되기 때문에 하나의 직조 요소 내부에서 어느 위치에 있는지만 알면 된다. 따라서 하나의 직조 요소를 $(0,0)$ 에서 $(1,1)$ 까지의 공간으로 보고 특정 표면 좌표 (u, v) 는 언제나 자신이 속한 직조 요소 내의 정규화된 좌표 (u_w, v_w) 로 다음과 같이 변경될 수 있다.

$$(u_w, v_w) = \left(\frac{u - l_w^u \left\lfloor \frac{u}{l_w^u} \right\rfloor}{l_w^u}, \frac{v - l_w^v \left\lfloor \frac{v}{l_w^v} \right\rfloor}{l_w^v} \right) \quad (\text{식 1})$$

우리가 렌더링하려고 하는 기하 객체의 표면 좌표 (u, v) 이면 (식 1)을 통해 특정 직조 요소 내부에서 어떤 위치에 놓이는지를 알 수 있으며, 이를 통해 해당 지점이 씨실 위인지 혹은 날실 위인지를 판단할 수 있다.



(a) 정규화된 날실의 단면



(b) 변형된 날실의 단면
[그림 3] 실의 단면

3.2 실 표면의 방향 도함수

[그림 3]은 직조물을 구성하는 실들 가운데 날실의 단면을 보이고 있다. [그림 3]의 (a)는 정규화된 날실이며, (b)는 실제 날실의 폭 l_y^u 와 곡률 제어 파라미터인 c_y 를 통해 변형된 실의 단면이다. 이때 c_y 가 0이면 평평한 실이 되며, c_y 가 1의 값을 가지면 정규화된 상태에서 단면이 원이 된다.

주어진 메시(mesh) 위의 특정한 지점 \mathbf{p} 는 직조 패턴에 따라 이뤄지는 본 논문의 절차적 범프 매핑 기법에 따라 \mathbf{p}' 에 있는 것으로 간주된다. \mathbf{p} 에서의 법선 벡터를 \mathbf{n} 이라고 하자. 옮겨지는 정도는 이 법선 벡터 방향으로 h 만큼이다. 자연스러운 굴곡 표현을 위해서는 옮겨진 점 \mathbf{p}' 에서의 방향 미분인 $\partial \mathbf{p}' / \partial u$ 와 $\partial \mathbf{p}' / \partial v$ 를 계산하여 이 두 벡터의 외적을 이용하여 \mathbf{p}' 에서의 법선 \mathbf{n}' 를 계산해야 한다.

우선 정규화된 실에서 \mathbf{p} 와 \mathbf{p}' 의 관계가 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}' &= \mathbf{p} + h\mathbf{n} \\ h &= \sqrt{1 - (\sigma^u)^2} \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

변형된 실의 구조에서 둘 사이의 관계 역시 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}' &= \mathbf{p} + \frac{c_y l_y^u}{2} h \mathbf{n} \\ &= \mathbf{p} + \left(\frac{c_y l_y^u}{2} \sqrt{1 - (\sigma^u)^2} \right) \mathbf{n} \end{aligned} \quad (\text{식 3})$$

따라서 $\partial \mathbf{p}' / \partial u$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial u} - \left(\frac{c_y l_y \sigma^u}{2 \sqrt{1 - (\sigma^u)^2}} \frac{\partial \sigma^u}{\partial u} \right) \mathbf{n} \quad (\text{식 4})$$

(식 4)에 나타난 $\partial \sigma^u / \partial u$ 를 풀기 위해서는 σ^u 를 u 의 함수로 표현해야 한다. 이를 위해서 우선 σ^u 를 u_w 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma^u(u_w) = \frac{2}{1 - 2r_g} u_w - \frac{1}{1 - 2r_g} \quad (\text{식 5})$$

이때 r_g 는 직조요소 크기 대비 틈새의 크기 비인 $l_g^u / l_w^u (= l_g^v / l_w^v)$ 이다. (식 1)을 살펴보면 $\partial u_w / \partial u$ 가 $1 / l_w^u$ 임을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 $\partial \sigma^u / \partial u$ 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma^u}{\partial u} = \frac{2}{1 - 2r_g} \frac{\partial u_w}{\partial u} = \frac{2}{(1 - 2r_g) l_w^u} \quad (\text{식 6})$$

(식 4)와 (식 6)를 고려하면 범프 매핑을 수행한 뒤 날실 위의 점에서 u 방향으로의 미분 $\partial \mathbf{p}' / \partial u$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial u} - \left(\frac{c_y l_y \sigma^u}{(1 - 2r_g) l_w^u \sqrt{1 - (\sigma^u)^2}} \right) \mathbf{n} \quad (\text{식 7})$$

v 방향으로의 방향 미분 $\partial \mathbf{p}' / \partial v$ 는 $\partial \mathbf{p} / \partial v$ 와 동일하다.

(식 7)은 실이 단섬유인 경우를 의미한다. 실제 직물은 다양한 종류의 방적사(紡績絲)로 구성된다. 사실적인 직물을 표현하기 위해서는 방적사에 나타나는 섬유의 꼬임도 표현해야 한다. θ_f 를 꼬임각이라고 하자, c_f 는 실을 구성하는 꼬인 섬유의 곡률을 제어하는 파라미터이다. 계산을 용이하게 하기

위해 $2\theta_f / \pi$ 를 s_f 로 표현하자. s_f 는 0에서 1사이의 값이 된다. 실을 구성하는 섬유들은 c_f 값이 0일 때 평평하고 c_f 값이 커지면 곡률도 커진다. 하나의 직조 요소 내에 있는 씨실 혹은 날실 구간에서 꼬임이 몇 차례 있는지를 제어하는 파라미터를 N_t 라고 하자. 꼬인 실의 울퉁불퉁함은 [그림 3]의 절단면을 가진 실 위에 실이 진행되는 방향으로 다음과 같이 꼬인 섬유에 의해 나타나는 변위를 추가함으로써 모델링할 수 있다.

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p} + \left(\frac{c_y l_y^u}{2} \sqrt{1 - (\sigma^u)^2} \right) \mathbf{n} + c_f l_w^v \left| \sin \left(v_w - \frac{s_f \sigma^u}{2} \right) N_t \pi \right| \mathbf{n} \quad (\text{식 8})$$

$|\sin x|$ 의 미분은 $\sin x \cos x / |\sin x|$ 로 표현할 수 있다. 그러나 이러한 미분은 $\sin x = 0$ 인 지점에서 정의되지 않으며 실제 계산 시에는 심각한 수치적 오류를 발생시킬 수 있다. 따라서 우리는 $|\sin x|$ 의 미분으로 $(-1)^{\lfloor x/\pi \rfloor} \cos x$ 를 사용하였다. 이 함수는 모든 구간에서 연속은 아니지만 모든 실수 x 에 대해 정의된다.

계산의 용이성을 위해 $(u_w - 0.5s_f \sigma^v) N_t \pi$ 를 θ_u 로, $(v_w - 0.5s_f \sigma^u) N_t \pi$ 를 θ_v 로 표현하자. 이제 방향 미분 $\partial \mathbf{p}' / \partial u$ 와 $\partial \mathbf{p}' / \partial v$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} &= \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial u} - \left(\frac{c_y l_y \sigma^u}{(1 - 2r_g) l_w^u \sqrt{1 - (\sigma^u)^2}} \right) \mathbf{n} \\ &\quad - \frac{c_f s_f N_t l_w^v \pi}{(1 - 2r_g) l_w^u} (-1)^{\lfloor \theta_v / \pi \rfloor} \cos \theta_v \mathbf{n} \\ \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial v} &= \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial v} + c_f N_t \pi (-1)^{\lfloor \theta_v / \pi \rfloor} \cos \theta_v \mathbf{n} \end{aligned} \quad (\text{식 9})$$

지금까지 논의된 미분은 날실에만 적용되는 것이다. 씨실에는 다음과 같은 방향 미분이 얻어진다.

$$\frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial u} + c_f N_t \pi (-1)^{\lfloor \theta_u / \pi \rfloor} \cos \theta_u \mathbf{n} \quad (\text{식 } 10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial v} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial v} - & \left(\frac{c_y l_y^v \sigma^v}{(1-2r_g) l_w^v \sqrt{1-(\sigma^v)^2}} \right) \mathbf{n} \\ & - \frac{c_f s_f N_t l_w^u \pi}{(1-2r_g) l_w^v} (-1)^{\lfloor \theta_u / \pi \rfloor} \cos \theta_u \mathbf{n} \end{aligned}$$

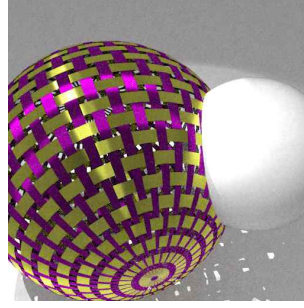
$\partial \mathbf{p}' / \partial u$ 와 $\partial \mathbf{p}' / \partial v$ 가 구해지면 \mathbf{n}' 는 다음과 같이 두 벡터의 외적을 정규화하여 쉽게 구할 수 있다.

$$\mathbf{n}' = \frac{\frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial v}}{\left| \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{p}'}{\partial v} \right|} \quad (\text{식 } 11)$$

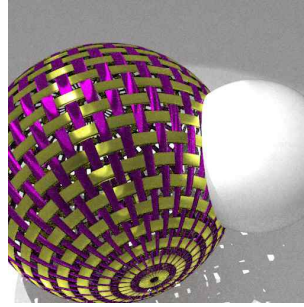
렌더링을 수행할 때 (식 11)의 법선 벡터를 적용함으로써 사실적인 직조물 표면을 얻을 수가 있다.

4. 실험 결과

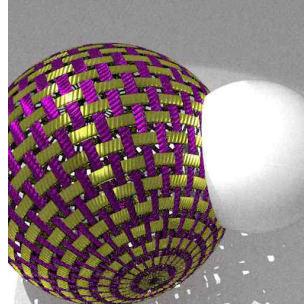
본 논문의 기법을 실험하기 위해 한국전자통신 연구원의 전역조명 렌더러인 GirlRender를 활용하였다. [그림 4]는 본 논문에서 제안한 직조 기반 범프 매핑에서 실의 곡률을 제어하는 c_y 와 c_f 파라미터가 어떤 역할을 하는지를 보이는 결과이다. 그림에 나타는 구(球)는 직조를 표현하는 기하정보 없이 입력된 데이터이다. 직조 패턴은 기하와 무관한 방식으로 사용자가 제어할 수 있으며, 사용자가 정의한 직조 패턴에 따라 자연스러운 직물 느낌이 나도록 원래의 기하 표면 위에 굴곡이 형성된다.



(a) $c_y = 0$



(b) $c_y = 1, c_f = 0$



(c) $c_y = 1, c_f = 0.1, N_t = 5$

[그림 4] 직조 기반 범프 매핑의 효과: (a) 범프 매핑 적용 없음, (b) 실 위의 곡면만 고려한 필라멘트 실 표현, (c) 섬유의 꼬임을 고려한 방적사 표현

[그림 5]는 직조물을 다양한 거리에서 관찰한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 기법은 다양한 거리에서 관찰한 직조물을 자연스럽게 렌더링할 수 있다.



[그림 5] 다양한 거리에서 관찰한 직조물 표면



(a) 측정 BRDF

(b) 제안된 기법

[그림 6] 측정 BRDF와 제안된 기법의 결과 비교

[그림 6]은 측정 BRDF와 제안된 기법의 렌더링 결과를 비교하고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 기법이 직조에 의해 발생하는 복잡한 반사 특성을 더욱 잘 나타내고 있으며, 실과 실 사이의 틈새로 천을 뚫는 빛도 같이 표현할 수 있다. 이 장면을 생성하기 위해서 주기억장치 용량 2G 바이트를 가진 펜티엄 4 3GHz에서 7의 (b)를 렌더링할 때에는 초당 4436회의 샘플링이 이루어졌다.

[표 1]은 기존의 기법과 제안된 기법의 차이를 분석한 것이다. 비교는 Blinn의 미세면, 측정된 직물의 BRDF, BTF, 그리고 제안된 기법이다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 기법은 공간가변 BRDF를 데이터 없이 생성할 수 있으며, 그 결과도 매우 사실적이다. 측정 BRDF와 BTF의 경우 하나의 재질을 표현하기 위해 표에 나타난 크기의 데이터가 필요하며, 다른 재질을 위해서 또 다른 데이터가 추가로 요구된다.

[표 1] 제안된 기법과 기존 기법의 비교

	Blinn	추정 BRDF	BTF	제안기법
공간가변 BRDF	×	×	지원	지원
데이터 크기	불필요	34Mb	320Mb	불필요
사실성	낮음	낮음	중간	높음

5. 결 론

본 논문에서는 직조물을 사실적으로 렌더링하기 위해 필요한 자연스러운 표면 굴곡 표현 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 직조 패턴을 고려한 절차적 범프 매핑 기법으로서 직조물을 구성하는 가상의 실이 가지는 울퉁불퉁한 법선 벡터를 계산하여 조명 계산에 적용하는 것이다. 이러한 법선 벡터 조작을 통해 생성된 렌더링 결과는 실험 결과 매우 사실적인 가상 직조물을 표현할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 기법은 사실적인 직조물 느낌을 표현하는 다양한 종류의 콘텐츠에 폭넓게 사용될 수 있을 것이다.

본 논문의 기법은 현재 전역 조명 렌더링 기법을 구현한 오프라인 렌더러에서 구현되어 있다. 그러나 범프 매핑을 위해 활용하는 정보가 표면 좌표와 직조 패턴 정의 관련 파라미터들이기 때문에 매우 간단히 GPU에서 처리 가능한 형태로 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 GPU 버전으로 개선되고 적절한 의류 시뮬레이션 엔진과 결합된다면 제안된 기법을 이용하여 게임이나 가상현실과 같은 실시간 응용 소프트웨어에서도 극도의 사실성이 보장된 의류 애니메이션을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 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.

- [2] K. Daubert and H.-P. Seidel. Hardwarebased volumetric knitwear. *Computer Graphics Forum (Eurographics 2002 Proceedings)*, 21:575–584, 2002.
- [3] E. Gröller, R. Rau, and W. Strasser. Modeling and visualization of knitwear. In *IEEE Transactions on Visualization and Compute Graphics*, pages 302–310, 1995.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 57(9), 1967.
- [8] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *Computer Graphics (ACMSiggraph '81 Conference Proceedings)*, 15(3):307–316, 1981.
- [9] M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley. A microfacet-based brdf generator. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pages 65–74, 2000.
- [10] 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.
- [11] Blinn J. and Newell M. Texture and reflection in computer generated images. *Communication of ACM*, 19(10):542–547, 1976.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] M. Ashikhmin and P. Shirley. An anisotropic phong brdf model. Journal of Graphics Tools, 5(2):25-32, 2002.
- [15] P.-P. Sloan and M. F. Cohen. Interactive horizon mapping. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2000, pages 281-286, 2000.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] K. Perlin. An image synthesizer. Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings), 19:287-296, 1985.
- [21] 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.



강 영 민 (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