

# 자동차 전면유리 와이퍼 패턴의 회절 렌더링\*

김영욱<sup>o</sup> 김강태 이성길  
성균관대학교 컴퓨터공학과

ywkim91@skku.edu, sonata@skku.edu, sungkil@skku.edu

## Diffraction Rendering of Irregular Windshield Patterns

Younguk Kim<sup>o</sup> Kangtae Kim Sungkil Lee

Dept. of Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### 요 약

컴퓨터그래픽스에서는 일반적으로 빛의 입자성에 기반한 렌더링을 추구하나, 빛의 파동성에 의한 현상도 최근에 연구되기 시작되고 있다. 본 논문에서는 이러한 회절 시뮬레이션의 예로 자동차 전면 유리에서 일어나는 회절을 렌더링하는 방법을 제안한다. 자동차 내부에서 보았을 때 전면 유리에 와이퍼에 의한 줄무늬 패턴이 있는 경우, 줄무늬 패턴에 수직으로 길게 늘어지는 회절패턴이 관측된다. 이러한 줄무늬 패턴에 의해 일어나는 회절을 일반적인 Fourier Transform을 적용하는 Far Field 모델을 이용하여 근사할 수 있다. 본 논문에는 입사/출사 평면이 평행한 Far Field 회절 모델보다 정확한 시뮬레이션을 위하여, 기울어진 전면 유리에서의 입사각과 굴절각을 고려하여 보다 정확한 렌더링 알고리즘을 제안한다.

### 1. 서론

컴퓨터 그래픽스에서 빛을 시뮬레이션 하려면 빛의 특성인 입자성과 파동성을 고려해야 한다. 빛의 입자성을 이용하여 시뮬레이션 하는 연구는 상당히 많이 진행되어 있으나, 파동성의 경우에는 많은 어려움이 있다. 파동성과 관련하여 여러 가지 현상이 있는데, 대표적으로 회절이 있다. 회절이란 “직선 경로에서 반사나 굴절로 해석될 수 없는 모든 방향의 광선”이라 한다[1].

회절을 시뮬레이션 함에 있어서 주요 문제점은 파동 광학의 복잡한 계산을 사용으로 계산 비용이 크고 정밀도 한계가 있다는 것이다. 또한, 많은 변수(공기의 온도 및 밀도, 광원 간의 상호작용, 매질의 물질적 특성)들이 회절된 빛의 형태에 영향을 미친다는 것이다. 이들을 시뮬레이션 시스템에서 인자로 간주할 수 있지만, 이들의 값을 정하는 것은 또 다른 어려운 문제점이다.

본 논문에서는 비평면 표면에서 방해물(얼룩, 먼지)로 인한 회절 렌더링 알고리즘을 제안한다. 그리고 접근 방법의 유효성을 검증하기 위해 특수한 경우를 가정한다. 그림 1과 같이 자동차 안에서 불규칙적인 패턴이 묻어 있는 전면유리를 통해 밖을 바라본다. 즉, 불규칙 패턴이 묻어 있는 렌즈를 통해서 사진을 찍는 경우를 고려한다.

추가적으로 본 논문에서는 빛의 전파 시뮬레이션과 전면유리에서의 회절 결과에 영향을 주는 요소(예를 들면, 온도에 따른 공기의 굴절률)들을 고려하였다.

### 2. 관련연구

회절 렌더링의 일반적인 접근은 선행계산 모델(precomputed model)이나 근사 방법을 사용하는 것이다. 회절을 물리적으로 정확하게 계산하기 위해서 호이겐스-프레넬 원리(Huygens-Fresnel principle)를 사용하는데, 복잡한 계산이나 이중적분, 많은 소수점연산으로 인해 계산이 오래 걸리고 실용적이지 않다.

Eihachiro et al.은 운전 시뮬레이터를 위한 빛 모델을 제안했다 [2]. 도로 표면의 반사모델뿐만 아니라 빛의 회절과 굴절까지 고려하여, photorealism 관점에서 좋은 결과를 보여준다. 그러나 이 접근은 파동광학(wave optics) 기준에서 빛의 정확한 회절 계산을 수행하지 않는다. 상세하게, 회절 계산이 입사 광선과 회절 광선 사이의 거리인 오프셋 계산으로 대체된다.

회절 패턴의 유명한 예시는 강한 빛에서 빛줄기가 나타나는 것이다. Tobias 등은 밝은 광원을 바라볼 때 눈에서 빛의 분산에 의해서 발생하는 glare를 회절을 이용하여 모델링하였다[3].

회절을 이용하는 다른 방식 중에 컴퓨터 생성 홀로그래피(computer-generated holography; CGH)가 있다. CGH는 파동광학에 기반한 표현 기법 중 하나이다. CGH에서는 광학 기록을 위해 2가지 광선이 사용된다. 하나는 물체로 전파되는 것이고, 다른 것은 반사자(reflector)에게 전파되는 것이다. 기록평면(예로, CCD)에서 이들의



그림 1. 전면유리에서 회절의 예시

\* 본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 중견연구자, <실감교류 인체감응솔루션> 글로벌프론티어사업의 지원으로 수행되었음(2012R1A2A2A01045719, 2012M3A6A3055695)

간섭 기록에 의해서, 홀로그램이 생성되는데, 회절 원리의 기본은 Rayleigh-Sommerfeld 회절 적분이다. 이는 복잡한 계산을 가지고 있기 때문에, 실질적으로 근사된 방법을 사용한다(예, 프레넬 방법 및 Convolution 방법)[4].

### 3. 호이겐스 회절

호이겐스 회절은 빛의 회절 특성을 설명하는 바탕 이론이다. 호이겐스 회절에서 파면의 각 점들이 2차 파형의 source가 되고, 2차 파형들의 조합이 퍼지는 방향의 새로운 파면을 형성한다. 호이겐스 회절에서는 기존의 파면과 새로운 파면 사이의 기하적 차이를 표현한다.

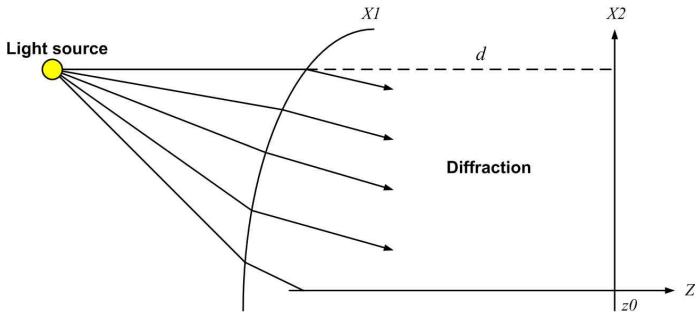


그림 2. 광원에서 임의의 표면을 지나 평면도착표면까지 파동이 전파되는 회절 계산

주어진 광원과 도착표면이 있을 때, 회절 패턴의 계산은 다음과 같이 정의한다[5], [1].

$$u_2(X_2) = \frac{1}{j\lambda} \iint u_1(X_1) \frac{\exp(jkr)}{r} \cos\theta dX_1 \quad (1)$$

식 (1)에서  $u_1$ 과  $u_2$ 는 광원과 도착표면이고,  $X_1$ 과  $X_2$ 는 광원과 도착 표면에서의 위치 벡터이다.  $\lambda$  는 400 nm부터 700 nm 사이의 상수 값인 파장이고,  $k$  값은 파수(wave number)로,  $\frac{2\pi}{\lambda}$  값을 가진다.  $r$ 은 표면의 점과 평면의 도착표면 사이의 거리로, 다음과 같이 계산한다.

$$r = \sqrt{|X_2 - X_1|^2 + d^2} \quad (2)$$

식 (2)에서  $d$ 값은 광선이 평면  $u_1$ 과  $u_2$ 에서 상호작용하는 점 사이의 거리를 나타낸다(예로,  $u_1(X_1)$ 과  $u_2(X_2)$  사이의 거리). 그리고  $\cos\theta$  는 다음과 같이 계산한다.

$$\cos\theta = \frac{d}{r} \quad (3)$$

많은 경우에, 외향수직벡터(outward normal vector)와  $u_1(X_1)$ 부터  $u_2(X_2)$ 로의 벡터 사이에 각도가 0이므로,  $\cos\theta$  값은 1을 가진다.

이 계산은 컴퓨터생성홀로그램에서 주로 사용된다. 보편적인 접근 방법은 프레넬 방법을 사용하는 것으로, 제곱근의 이항전개를 사용하여  $r$ 을 근사시킨다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같고,  $x_1$ ,  $y_1$ 는 평면  $u(X_1)$ 의 좌표를 나타낸다.

$$r \simeq d \left[ 1 + \frac{(x_2 - x_1)^2}{2d} + \frac{(y_2 - y_1)^2}{2d} \right] \quad (4)$$

### 4. 알고리즘

자동차 내에서 관측할 수 있는 빛의 회절 결과를 시뮬레이션 하는 알고리즘을 제안한다. 이는 자동차 전면유리의 와이퍼로 인해 생성되는 패턴의 모델링 및 빛을 시뮬레이션 하는 렌더링 과정을 포함한다.

#### 4.1 시스템 모델링

본 시스템에서는 외부의 먼지와 와이퍼의 움직임으로 인해서 전면 유리에 불규칙 패턴이 생긴다. 이러한 패턴을 가진 전면유리가 광원의 회절을 일으킨다고 가정한다.

##### 4.1.1 자동차 전면유리

일반적인 자동차 전면유리의 곡률은 다양하기 때문에, 본 시스템에서는 전면유리를 구의 일부분으로 간주한다. 정밀도를 높이기 위해서는 실제 자동차 전면유리의 특성을 사용하는 것이 더 낫지만, 구 모델을 통해서 광선과 전면유리의 교점을 쉽게 구할 수 있다.

대부분 입사 광선은 이미지 평면에 직교한다. 그러나 전면유리에서의 회절로 인하여 광선의 방향이 변경되며, 광선이 전파되는 동안 안과 밖에서 2번 굴절이 된다.

##### 4.1.2 와이퍼

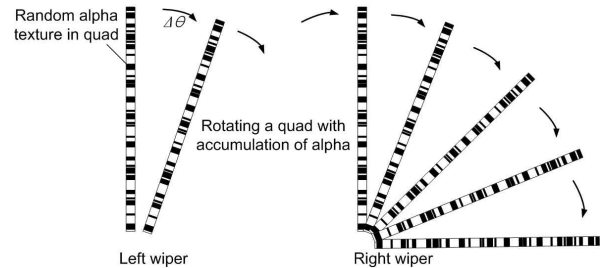


그림 3. 와이퍼 모델

와이퍼는 전면유리에 호 형태를 나타내는 불규칙 패턴을 생성한다. 불규칙 패턴으로 인하여 광선이 회절하고 빛의 불규칙한 모양이 생성된다. 이 패턴을 만들기 위해 와이퍼를 모델링 하였다. 사각 와이퍼에 임의의 알파 값을 가지는 텍스처를 붙이고, 와이퍼를 회전시키면서 알파 값을 누적하여 불규칙 패턴을 렌더링 했다. (그림 3)

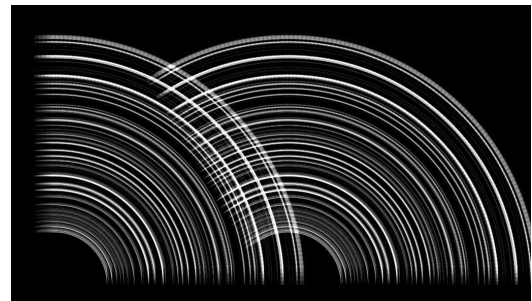


그림 4. 와이퍼 패턴

하지만 완전 무작위 알파 값을 사용하면, 불규칙 패턴에 자연스럽게 못한 모양이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해, 회전 단계마다 각 변위와 누적 알파 값을 고려하여 알파 값의 범위를 정하였다. 본 논문에서는 자동차의 왼쪽과 오른쪽 와이퍼의 움직임을 디자인한 패턴들을 사용하였다. (그림 4)

## 4.2 렌더링

회절을 렌더링하는 것은 호이겐스 회절 원리를 기반으로 이를 시뮬레이션한다. 본 시스템에서는 source 평면에 대해서 균일 샘플링을 수행한다. 추가적으로 파장이 호이겐스 회절의 계산 결과에 영향을 미친다. 시스템에서 정밀도를 높이기 위해, 광학 물질의 특성을 나타내는 프라운호퍼 d-line을 사용한다. 본 논문에서는 노랑 헬륨 d-line의 파장 값인 587.5618 nm를 광선의 파장으로 사용하였다.

### 4.2.1 구면에서는 균일 샘플링

자동차 전면유리를 모델링한 구면에서 샘플들을 얻기 위한 여러 방법들이 존재한다(예로, 포아송-원판 샘플링). 본 논문에서는 적은 샘플 수를 사용하기 때문에, 샘플 수가 일관성에 덜 의존하는 샘플링 방법인 나선 샘플링(spiral sampling)을 사용하였다[6].

### 4.2.2 회절 시뮬레이션

본 회절 렌더링 알고리즘은 컴퓨터생성홀로그래피에서 사용되는 호이겐스 원리의 프레넬 근사(fresnel approximation)를 따른다. 보편적으로 사용되는 far-field 회절은 입사각이 이미지 평면과 거의 수직이므로 cos 값이 1로 가정되는데, 본 방법에서는 수직하지 않기 때문에, 프레넬 근사를 사용한 회절 수식은 다음과 같다.

$$u_2(x_2, y_2) = K \iint U(x_1, y_1) \exp\left(\frac{-j2\pi(x_2x_1 + y_2y_1)}{d\lambda}\right) dx_1 dy_1 \quad (5)$$

$$K = \frac{\exp(jdk)}{j\lambda d} \exp\left(\frac{jk(x_2^2 + y_2^2)}{2d}\right) \quad (6)$$

$$U(x_1, y_1) = u_1(x_1, y_1) \exp\left(\frac{jk(x_1^2 + y_1^2)}{2d}\right) \quad (7)$$

식 (5)는  $U(x_1, y_1)$ 의 푸리에 변환으로 표현할 수 있으므로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_2(x_2, y_2) = K |F\{U(x_p, y_p)\}| \quad (8)$$

여기에서 빛의 radiance를 고려하면 되므로, 위상은 고려하지 않고 평면  $u_2$ 에서 power spectrum의 계산 결과가 회절의 결과이다.

## 5. 결과

본 논문의 알고리즘을 사용한 결과는 그림 5과 같다. 그림 5는 전면유리 유무에 따른 빛의 회절을 렌더링한 결과를 제시한다. 좌측 그림은 구형 전면유리 모델 없이 슬릿에 의한 회절만을 렌더링한 결과이고, 우측 그림은 구형 전면유리 모델을 적용하여, 이에 의한 굴절 현상이 포함된 렌더링 결과이다.

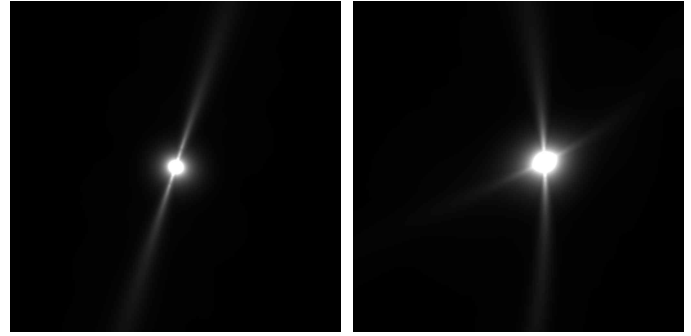


그림 5. 구현 결과: (좌) 단순 패턴에 의한 회절 결과, (우) 구형 전면유리 모델을 적용한 회절 결과.

본 알고리즘은 Intel i7-3770, NVIDIA GTX780Ti, DX10 API 환경에서 구현되었으며, 768×768 해상도에서 35 FPS(28.6 ms)의 인터랙티브한 성능을 보여준다.

## 6. 결론

본 논문에서는 구형 모양의 전면유리 모델을 사용한 빛의 회절 결과를 렌더링하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 근사된 방법에서 빛의 입사각과 굴절각을 고려하여 보다 정확한 빛의 회절 결과를 렌더링한다.

향후 연구로는 복잡한 모양의 표면에 대한 회절을 시뮬레이션 하기 위한 알고리즘 개발을 진행할 것이고, 실시간 성능을 달성하기 위한 알고리즘 개선을 연구할 계획이다.

## 참고문헌

- [1] GOODMAN, J. W., "Introduction to Fourier optics", Roberts and Company Publishers, 2005.
- [2] NAKAMAE, E., KANEDA, K., OKAMOTO, T., AND NISHITA, T., "A lighting model aiming at drive simulators", In ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 24, ACM, 395-404, 1990.
- [3] RITSCHHEL, T., IHRKE, M., FRISVAD, J. R., COPPENS, J., MYSZKOWSKI, K., AND SEIDEL, H.-P., "Temporal glare: Real-time dynamic simulation of the scattering in the human eye", In Computer Graphics Forum, vol. 28, Wiley Online Library, 183.192, 2009.
- [4] SKOTHEIM, O., "Hologvision: a software package for reconstruction and analysis of digitally sampled holograms", In Speckle Metrology 2003, International Society for Optics and Photonics, 311-316, 2003.
- [5] SHIMOBABA, T., MASUDA, N., AND ITO, T., "Arbitrary shape surface fresnel diffraction", Optics express 20, 8, 9335-9340, 2012.
- [6] O'ROURKE, J., "Computational Geometry in C, 2nd ed.", Cambridge University Press, New York, NY, USA, <http://cs.smith.edu/orourke/Code/>, 1998.