

자동차 스타일링을 위한 반사선의 실시간 생성 및 표현 알고리즘

강 주 업* · 이 건 우**
(1999년 3월 4일 접수)

Efficient Algorithm for the Real-time Generation of Reflection Lines

Juyup Kang and Kunwoo Lee

Key Words : Surface Interrogation(곡면 평가), Reflection Line(반사선), Contouring Algorithm(컨투어링 알고리즘), Reflection Mapping.(반사매핑)

Abstract

Depending upon the method of the surface generation and the quality of the boundary curves provided, the resulting surfaces may have global or local irregularities in many cases. Thus it would be necessary for the designer to evaluate the surface quality and to modify the surface. This capability is very important because the defect of the surface requires the rework of the dies that causes a big loss in cost and delivery time. To simulate the reflection line test in the actual production line, a faster generation algorithm is presented. Among various surface interrogation methods using reflection lines, Blinn-Newell type of reflection mapping is applied to generate reflection lines on the trimmed NURBS surface. The generation of reflection lines is formulated as a surface-plane intersection problem, and solved by surface-contouring techniques. In addition, a modified reflection map is proposed to eliminate the discontinuity of reflection lines due to the configuration of the reflection map. A fast reflection line algorithm is developed utilizing an efficient traced contouring technique, and proved to be well suited for real-time quality-assessment task.

1. 서 론

대부분의 자동차 회사에서는 자동차 외관 설계 과정에서 곡면 데이터를 얻기 위하여 스타일리스트(stylist)의 디자인이 적용된 점토 모델(clay model)로부터 얻어진 3차원 점들을 보간법(interpolation)과 근사법(data fitting) 등을 이용하여 곡선을 만들고 이를 다시 곡면으로 생성한다. 이렇게 생성된 곡면은 곡면의 생성 방법이나 점토 모델 측정시의 오차에 의하여 전체적인 혹은 국부적인 형상 결함이 나타날 수 있는데, 이러한 결함이 실제 금형 제작 후 시작 단계에서 발견될 경우에는 재설계를 위한 많은 시간적, 경제적 손실이 발생한다. 따라서 실제 곡면이 제작되기 전에 이

러한 결함을 찾아내기 위하여 컴퓨터 화면 상에서 곡면 검사를 해보는 것은 이제 필수적인 일이 되었고, 이것이 실제 검사를 얼마나 정확하게 재현할 수 있는가도 중요한 문제가 되었다. 가상적으로 곡면을 평가하고 수정하는 과정에서는 특정 곡선들의 가시화⁽¹⁾를 통하여 곡면을 분석하는 방법이 가장 널리 연구되고 적용되고 있다.

또한 최근에는 이러한 과정을 보다 효율적으로 개선하여 개발 과정을 단축하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 점 집합(point cloud)으로부터 곡선을 거치지 않고 바로 곡면을 생성하는 기능이라든지 곡면 평가와 수정을 실시간으로 수행할 수 있는 기능을 가진 소프트웨어들의 개발 노력은 이러한 추세를 반영하는 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 곡면 평가 시에 이동하면서 관찰하는 상황을 재현하기 위해서 반사선의 생성은 물론 광원과 관찰자의 시선의 변화에 따라 즉각적으로 반사선의 이동을 확인할 수 있는 효율적이고 빠른 알고리즘을 개발하였다. 곡면의 질을 평가하

* 서울대학교 대학원

** 회원, 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

E-mail : kunwoo@cad.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7141 FAX : (02)883-8061

는 수단으로써 물리적인 개념을 충분히 반영하고 실제 생산 현장에서의 검사를 모사할 수 있는 반사선을 이용하였고, 자동차 설계에서 가장 널리 사용되는 CATIA 파일의 트림곡면(Trimmed surface)을 대상으로 하였다. 반사선 생성시의 속도 향상을 위하여, 반사 매핑의 결과로부터 얻어진 노드들의 값으로 곡면을 만들어 이 곡면을 평면과 교차시킴으로써 곡면-평면간 교차 문제로 구성하였다. 곡면-평면간 교차 문제는 컨투어링 알고리즘(contouring algorithm)을 이용하여 해결할 수 있는데, 이는 안정적이고 효율적인 수치적 방법으로써 이 방법을 사용하면 전처리 작업에서 얻어진 각 트림곡면의 메쉬 정보로부터 반사선을 빠르게 생성할 수 있다. 따라서 이동하면서 관찰하는 실제 반사선 검사를 재현할 수 있기 때문에 생산 현장에서의 곡면 평가에 보다 가까운 상황을 구현하여 실제 생산 단계에서 초래될 수 있는 손실을 막을 수 있다.

2. 반사선을 이용한 곡면의 평가

곡면의 기하학적인 성질들을 가시화하여 곡면을 평가하는 방법은 여러 가지가 있는데, 그 중 반사선을 이용한 곡면 평가 방법은 생산 현장에서 자동차 실제 모델의 품질을 검사하기 위하여 수행하는 반사선 검사를 모사하는 것으로서 반사선이 곡면의 질에 크게 영향을 미치는 곡면의 곡률과 법선 벡터들의 상태와 직접적인 관계를 가지기 때문에 곡면검사에 유용하게 사용될 수 있다.

이러한 반사선의 생성 기법은 반사선의 정의와 이를 구현하기 위한 방법에서 차이가 있다. Klass⁽²⁾는 선광원과 시선의 위치가 주어졌을 때 선광원들을 점광원들의 집합으로 근사화한 다음 각각의 점광원들에 대하여 곡면상의 반사점의 위치를 수치해석을 이용하여 구한 후 이들을 연결하여 반사선을 생성하였다. 이 방법은 반사선의 물리적인 의미를 잘 반영하고 있는 반면 주어진 모든 점광원들에 대하여 반사점을 수치 해석적으로 구하는 데는 한계가 있다. Kaufmann et al.⁽³⁾은 관찰자나 광원의 위치를 고려하지 않고, 평행한 평면군과 곡면을 교차시키거나 곡면상에서 하나의 매개변수 값을 일정하게 놓아서 얻을 수 있는 일련의 C^2 스플라인(spline) 곡선에 대하여 반사선을 정의했다. 이 방법은 계산 효율적인 측면에서는 장점이 있지만 여기에서 사용된 반사선의 정의가 물리적인 반사선의 정의를 반영하지 못한다는 단점이 있다. Farin⁽⁴⁾은 음함수 형태의 곡면에 대하여 계산효율을

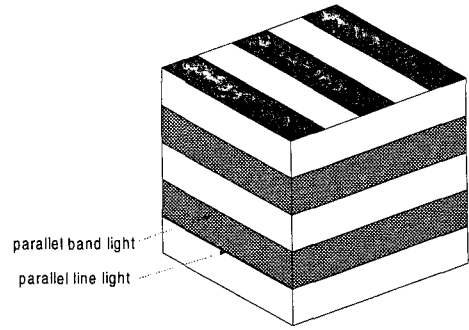


Fig. 1 Reflection map

향상시키기 위하여 반사선을 빛의 진행방향에 대한 곡면의 방향 도함수(directional derivative)의 등고선으로 정의하였다. 이 경우에는 광원의 위치와 관찰자의 위치가 제한되어 있으므로 실제 현장에서의 반사선 검사를 모사하기에는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 반사 매핑을 이용하여 반사선을 구현하였다. 반사 매핑이란 기존의 레이 트레이싱(ray tracing)과 같은 렌더링 기법에서 문제가 되는 계산효율 문제를 해결하기 위하여 Blinn⁽⁶⁾이 제안한 방법으로서, 대상체의 주변환경을 반사맵으로 간략화 한 후 물리적인 반사개념을 이용한 매핑(mapping)관계를 이용하여 주변환경을 대상체에 투영시키는 것이다.

최인진⁽⁷⁾은 반사선 생성을 위한 선광원을 제공해야 한다는 점과 매핑을 위한 계산이 간단해야 한다는 두 가지 측면을 고려하여 Fig. 1과 같이 곡면을 둘러싸는 가상의 육면체에 색 띠를 배치하여 반사맵을 구성하고 반사선을 생성하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 반사선 생성과는 달리 주어진 시선의 위치와 곡면상의 반사점으로부터 역으로 광원의 위치를 추적하는데, 계산상의 효율은 물론 물리적인 개념을 충실히 반영한다는 장점이 있다.

반사 매핑을 이용한 반사선의 구현 과정은 다음과 같다. 자동차 설계 과정에서 실제 모델에 대하여 일정한 간격으로 배열된 선광원들을 투사하여 곡면을 평가하는 상황을 모사하기 위하여 곡면을 둘러싸는 가상의 육면체에 색 띠를 배치하여 반사맵을 구성한다. 이 선광원은 이상적인 경우이고 실제로는 띠광원이다. 반사맵이 구성되었으면 전처리 과정에서 생성된 곡면상의 노드들에 대하여 반사 벡터들을 구해야 한다. Fig. 2와 같이 곡면상의 반사점(P)이 주어졌을 때 이 점에서의 법선 벡터(N)와 시선 벡터(E)로 정의되는 평면 내에서 사 벡터가 구해지면 곡면상의 주어진 점을 지나고

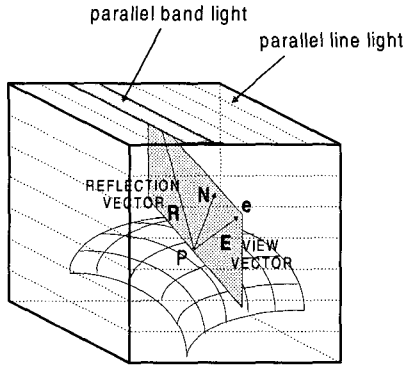


Fig. 2 Reflection mapping

반사 벡터를 방향 벡터로 하는 직선 방정식을 구할 수 있다. 이 직선이 반사맵 상에서 만나는 점의 좌표로부터 각 노드들이 어느 색 띠에 속하는지를 알 수 있게 된다. 이 과정은 직선과 평면 사이의 간단한 교점 계산만을 필요로 하므로 계산상의 효율 및 안정성이 보장된다.

이러한 반사 매핑을 삼각형 메쉬에 대해 수행하는 데 있어서 일련의 전처리 작업이 필요하게 되는데 이를 정리하면 다음과 같다. 우선 트림곡면(trimmed surface)의 경계를 매개변수 영역(parametric domain)에서 직선 세그먼트(segment)로 나누고 이 직선들과 등매개변수선으로부터 u, v 영역상에 노드를 생성한다. 등간격으로 생성된 초기 노드들은 곡면의 기하학적 형상을 반영하지 못하여 곡률의 변화가 심한 영역에서 문제가 될 수 있지만 이것은 삼각형을 분할함으로써 해결한다. 노드 각각의 색을 반사 매핑 계산에 의하여 결정하고 각각의 삼각형을 구성하는 노드들의 색이 모두 다를 경우 삼각형의 중점에 새로운 노드를 생성하여 분할을 하게 된다. 이러한 분할 과정을 반복하여 모든 삼각형이 최소한 두 개의 노드에서 같은 색이 되도록 하고, 두 개의 같은 색을 갖는 삼각형 내부에 선형 보간에 의해 반사면 상의 색띠의 경계에 해당되는 선을 구하고 이에 의해 삼각형을 분할한다. 이러한 분할 과정은 사용자가 정하는 수준까지 반복적으로 수행된다. 이렇게 생성된 삼각형들의 변들은 반사맵 상의 색띠의 경계에 위치하는지 확인 과정을 거쳐서 경계에 있다고 판단되는 선분들만을 이어 반사선을 생성하게 된다.

3. 반사선의 생성 기법

3.1 적용 배경

최인진은 삼각형 메쉬의 각 변들에 대하여 이

것이 반사맵 상에 있는 색 띠들의 경계인지를 검사해서 반사선을 찾았는데, 이러한 검사 과정과 위에서 언급했던 삼각형들을 재분할하는 것이 계산 시간적인 측면에서 효율을 떨어뜨리게 된다. 이러한 과정을 없애고 이미 구성된 메쉬 정보로부터 한 번에 반사선을 찾기 위하여 이용되는 컨투어링 알고리즘은 계산 시간이 아주 빠르기 때문에 시선의 위치 변화와 반사맵의 재구성을 즉각적으로 반영하여 보다 역동적인 반사선의 관찰을 가능하게 한다.

컨투어링 알고리즘은 임의의 함수에 의해 정의되는 곡면에 대하여 일정한 높이에 위치하는 곡선을 찾을 때 사용된다. 이 곡면은 메쉬를 구성하는 노드들이 취하는 각각의 값들로부터 구성될 수도 있다. 즉 매개변수 영역에서의 노드마다 각각의 값을 가지고 있는 경우에 이를 곡면으로 구성하여, 일정한 기준값으로 이루어진 평면과의 교차 문제로 해결하는 것이다. 따라서 색 띠들의 경계를 찾는 대신에 반사 매핑의 결과로 얻어지는 반사맵 상의 교차점의 좌표로부터 각 노드들의 오프셋(offset) 값을 계산하여 이를 곡면으로 생성하고, 반사맵 상의 경계를 나타내는 교차점의 좌표에 해당하는 오프셋 평면과 이 곡면을 교차시키면 한 번에 반사선을 생성할 수 있다.

3.2 관련 연구

Beier⁽⁸⁾는 곡면의 하이라이트선(highlight-line)을 찾는 문제를 주어진 매개변수 영역(u, v domain) 상의 함수(single-valued function)에 대하여 곡면-평면 교차 문제로 바꾸어 해결하는 방법을 제시하였다. 이러한 곡면-평면 교차 문제는 구성된 평면에 대하여 컨투어링 알고리즘을 이용하여 원하는 기준값에 해당하는 컨투어선(contour-line)을 찾을 수 있다. 이 논문이 다루고 있는 하이라이트선의 경우의 예를 들면 다음과 같다.

매개변수 곡면에 대해서 하이라이트띠의 경계(highlight-band boundary)는 곡면의 법선벡터와 선 광원의 수직 거리(perpendicular distance) $d(u, v)$ 가 c 가 되는 연속함수로 정의된다. 매개변수 영역(u, v domain) 상의 하나의 값이 대응되는 함수이므로 이것은 Fig. 3 와 같은 오프셋 곡면으로 나타난다. 이 곡면과 $d = c$ 가 되는 평면과의 교차되는 부분은 매개변수 영역(u, v domain) 상에서 Fig. 4 의 H_{uv} 와 같이 나타난다. 이 교차곡선 H_{uv} 를 3 차원 영역으로 매핑시키면 Fig. 5 과 같이 원하는 하이라이트띠의 경계를 얻을 수 있다. 이 과정에서 평면-곡면 교차 문제를 수치적으로 해결하기 위하여 컨투어링 알고리즘이 사용된다.

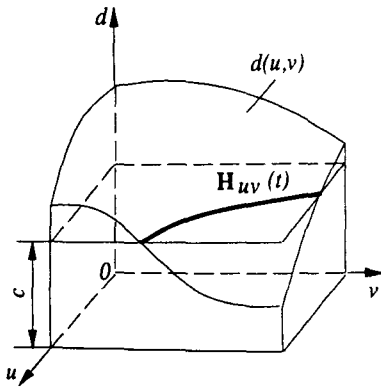


Fig. 3 Offset surface⁽⁸⁾

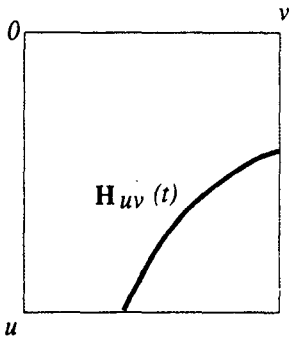


Fig. 4 Contour-line in u, v domain⁽⁸⁾

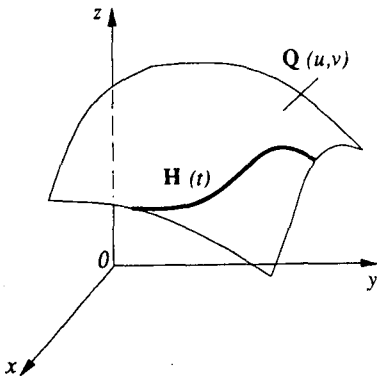


Fig. 5 Contour-line in real domain⁽⁸⁾

여기서 사용된 하이라이트선은 간략화 된 반사 모델로써 시선의 위치가 배제되어 있으므로 뷰잉 (viewing) 작용과 실제 생성되는 하이라이트선의 변화가 상관이 없게 된다. 따라서 물리적인 반사 개념을 반영할 수 없고, 평행한 선광원으로부터 생성되는 것이므로 실제 반사선 검사의 상황을 묘사할 수 없다는 단점이 있다.

3.3 제안된 알고리즘

본 연구에서는 실제 반사선 검사를 재현할 수 있는 수준의 속도를 얻도록 계산 효율을 높이기 위하여 다음과 같은 방법을 구상하였다. 반사 매핑 계산은 노드들에 대해서 수행되므로 노드들에 대하여 반사맵 상의 교차점을 구한 후 이를 교차점의 위치에 의해 정의되는 함수로 구성하고, 이 결과로부터 컨투어링 방법(contouring method)을 이용하여 한 번에 반사선을 생성하였다. 이렇게 하면 기존의 방법에 비해 반사선 생성 과정에서 삼각형 메쉬를 재분할하는 과정이 필요 없게 되고 삼각형 메쉬의 각 변들로부터 반사선을 생성하는 것이 아니라, 각 띠광원들의 경계를 직접 곡면상에서 반사선으로 나타낼 수 있게 때문에 보다 빠르게 반사선이 생성된다. 국부적인 형상 변화를 반영할 수 있도록 하기 위하여 노드의 생성은 곡면의 형상에 따라 우선적으로 구성된 각 메쉬에 대해서 평면도 검사(flatness test)를 통해 메쉬를 재분할하는 방법을 취한다. 전처리 과정은 다음과 같다.

모든 과정은 현재 자동차 업계에서 가장 많이 사용하는 CAD 시스템인 CATIA 환경에서 이루어 지는데, 우선 트림 곡면이 있는 CATIA 모델 파일로부터 NURB 곡면 정보를 얻어내는 작업이 필요하다. 트림 곡면을 정의하기 위해서는 기저 곡면에 대한 정보와 각각의 경계 곡선에 대한 정보가 필요하지만, CATGEO 함수를 이용하면 곡면의 포인터로부터 메쉬를 생성할 수 있으므로 곡면에 대한 정보만 있으면 된다. 곡면 정보를 얻은 후에는 반사 매핑 계산과 컨투어링 알고리즘을 위한 입력 값들을 준비하는 단계가 필요하다.

일단 CATGEO 함수를 이용하여 곡면의 삼각형화를 수행한다. 이것은 등대개변수상에 노드를 생성하는 것이므로 곡면의 기하학적 형상을 충분히 반영하지 못한다. 따라서 각각의 패치에 대해 곡률 변화가 심한 부분을 재분할하기 위해 간단한 평면도 검사(flatness test)를 수행하게 된다. 이는 각 삼각형 패치의 중점과 곡면과의 최소거리를 일정한 공차와 비교하는 것이다. 삼각형의 세 꼭지점 부근의 형상이 거의 평면에 가깝다면 이 거리는 거의 0에 가까울 것이고, 그렇지 않다면 큰 값을 가지게 될 것이다. 문제가 있다고 판단되는 삼각형에 대해서는 삼각형 각 변의 중점에 새로운 노드를 생성하고 이로부터 새로운 네 개의 삼각형을 생성한다. 이 각각의 삼각형에 대해서 다시 검사를 해서 컨투어링 알고리즘으로 반사선을 생성하는 데에 적합한 크기의 메쉬가 생성될 때까지 검사를 계속하게 된다. 이렇게 삼각형 패치가 구

성되면 이 결과로써 반사 매핑 계산을 수행하게 될 노드들이 얻어지게 된다. 이렇게 노드가 생성 되면 반사 매핑 계산을 하여 각 노드들에 대해 해당되는 반사맵 상의 교차점의 좌표를 저장하고, 컨투어링 알고리즘을 위한 패치 정보와 노드 정보를 저장한다. 반사선 생성을 위한 전체적인 흐름도는 Fig. 6 과 같다.

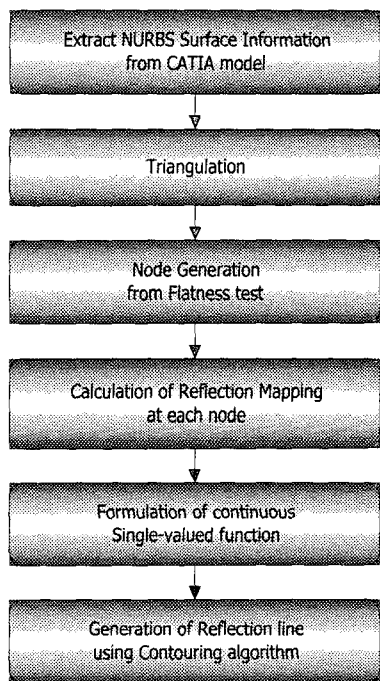


Fig. 6 Flow chart of proposed algorithm

3.4 반사맵의 수정

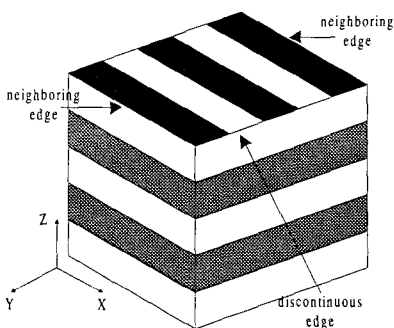


Fig. 7 Edges where discontinuities occur in reflection map

반사선이 곡면 평가를 위한 수단으로 사용되는 것은 반사선이 끊어지거나 부드럽게 이어지지 않

은 부분에서 곡면의 형상 결함이 있다고 판단하기 위험인데, 반사맵의 구성으로 인하여 반사선의 불연속이 나타난다면 곡면의 형상 결함으로 인한 불연속과 구별하기 어려워 곡면 평가 결과의 타당성을 잃게 된다. 이렇게 생성 기법으로 인한 반사선의 불연속을 없애기 위하여 반사맵의 수정이 필요하게 된다.

반사맵의 수정은 컨투어링에 사용할 곡면 구성과도 밀접한 관련이 있다. 반사선을 생성할 때 컨투어링 방법을 적용하려면 매쉬의 노드들의 값으로부터 곡면을 구성하여야 하는데, 이는 각 노드마다 반사 매핑 계산의 결과로 얻어지는 반사 벡터와 반사맵 상의 평면들 간의 교점의 좌표를 이용하면 된다. Fig. 7에서 4개의 옆면의 경우에는 z 좌표만이 색 띠를 구별하는 정보를 가지고 있고, 윗면과 아래면의 경우에는 y 좌표값만 알면 어느 색 띠에 속하는 지를 판단할 수 있으므로 이를 이용하여 함수를 구성할 수 있다. 하지만 노드들이 취하는 오프셋 값이 모든 매개변수 영역에서 연속이 되어야 한다는 조건을 만족시켜야 한다. 우선 Fig. 7의 윗면과 옆면 사이의 불연속 모서리(discontinuous edge)에서는 값을 연속으로 만들 수가 없다. 또한 그림에 표시한 인접 모서리(neighboring edge)에서도 두 모서리를 동시에 옆면의 값들과 연속으로 만들 수는 없다. 이를 자세히 설명하면 다음과 같다.

옆면의 경우는 교차점의 z 방향 좌표를 그대로 오프셋 값으로 하면 되지만, 윗면과 아래면의 경우에는 교차점의 y 좌표 값을 조정하여 옆면과 오프셋 값이 연속이 되도록 해야 한다. 즉, 윗면에서는 옆면에서의 z 방향 최대값에 인접 모서리(neighboring edge)에서부터 y 방향으로 떨어진 값을 더하여 오프셋 값으로 하고, 아래면의 경우는 옆면에서의 z 방향 최소값에 인접 모서리로부터 y 방향으로 떨어진 값을 빼서 오프셋 값으로 한다. 그런데 두 개의 인접 모서리 중 하나의 모서리는 최대의 오프셋 값을 갖도록 하여야 윗면에 위치하는 각각의 색 띠에 대해서 서로 다른 값을 갖게 되므로 최대의 오프셋 값을 갖는 모서리에서는 윗면과 옆면 사이의 값을 연속으로 할 수 없다는 문제가 생기게 된다. 아래면에 대해서도 최소의 오프셋 값을 갖는 인접 모서리에서는 불연속이 생기게 된다. 불연속 모서리에서는 반사맵 구성상 오프셋 값을 연속으로 할 수 없고, 최대의 오프셋 값을 갖는 모서리와 최소의 오프셋 값을 갖는 모서리에서는 옆면과 인접함에도 불구하고 오프셋 값의 시작과 끝이기 때문에 연속이 보장될 수

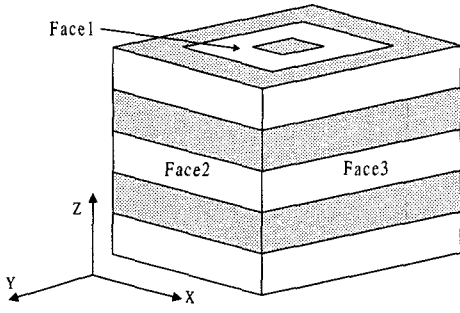


Fig. 8 Modified reflection map for offset surface

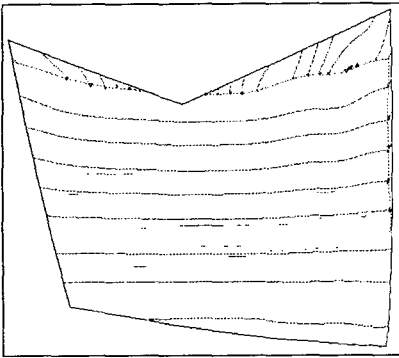


Fig. 9 Reflection lines generated by original reflection map

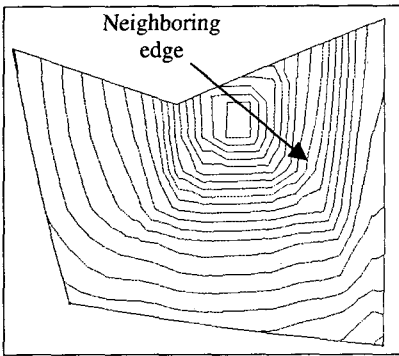


Fig. 10 Reflection lines generated by modified reflection map

없다.

따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 Fig. 8 과 같은 변형된 반사맵을 제안하였다. 이렇게 하면 옆면과 윗면과의 모든 인접 모서리에서 값들을 연속으로 만들 수 있다. 또한 주어진 트림 곡면을 완전히 둘러싸는 반사맵을 정육면체로 구성하여 윗면과 옆면의 색 띠의 크기를 같게 함으로써 일관성 있는 반사맵의 재구성이 가능하다.

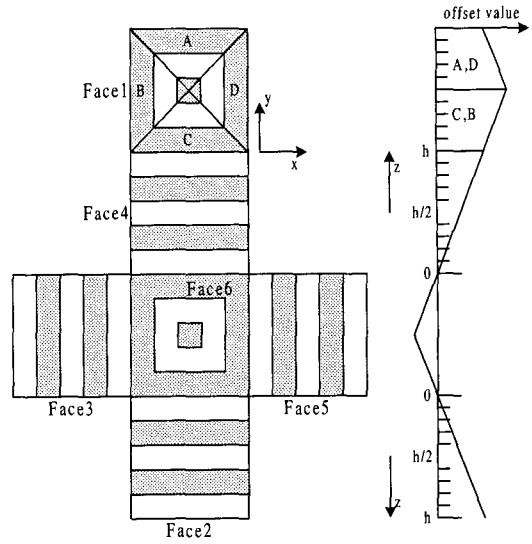


Fig. 11 Expanded view of reflection map box

Fig. 9 는 기존의 반사맵을 적용하여 반사선을 생성한 결과이다. Fig. 7 의 불연속 모서리를 경계로 반사선이 끊어진 모습을 확인할 수 있다. 곡면 구성을 위하여 변형된 반사맵을 적용한 결과가 Fig. 10 에 나타나 있는데, 중간에 화살표로 표시한 부분은 윗면과 옆면 사이의 인접 모서리로 인접 모서리를 경계로 양쪽의 반사선이 자연스럽게 분포된 것을 확인할 수 있다.

3.5 곡면 구성

컨투어링 방법을 적용하기 위해서는 곡면을 구성하는 함수가 각각의 색 띠에 대해서 서로 다른 값을 가져야 하고, 반사맵 상의 각 면의 경계에서 연속이 되어야 하는데 이러한 조건들은 수정된 반사맵을 사용하여 만족시킬 수 있다.

Fig. 11 의 전개도는 곡면 구성을 위해서 어떤 오프셋 값을 취했는지를 설명하고 있다. 4 개의 옆면(Face2, Face3, Face4, Face5)의 경우는 교차점의 z 방향 좌표를 그대로 오프셋 값으로 하고, 윗면(Face1)과 아래면(Face6)의 경우에는 교차점이 옆면과의 인접 모서리로부터 얼마만큼 떨어졌는가에 따라 값을 정하게 된다. z 값이 0 부터 h 까지 변환 다면 윗면과 옆면사이의 인접 모서리에 있는 값을 h로 하고, 윗면에서는 이 모서리로부터 떨어진 값을 더하여 오프셋 값으로 취함으로써 옆면과 윗면에서의 값이 연속이 되게 할 수 있다. Fig. 11 에서 윗면의 A 와 C 부분은 인접 모서리로부터 y 축 방향으로 떨어진 값에 h 값을 더하여 오프셋 값으로 하고, B 와 D 부분은 x 축 방향으로 떨어진 값에 h 값 만큼을 더하여 오프셋 값으로 한다. 이것은 각

각 A 영역에서는 Face2, C 영역에서는 Face4, 그리고 B 영역에서는 Face3, D 영역에서는 Face5와 서로 인접하면서 값이 연속이 된다고 생각할 수 있다. 아래면의 경우는 똑같은 방법으로 하되 인접 모서리로부터 떨어진 값을 0 으로부터 빼서 오프셋 값으로 한다. 오프셋 값이 각각의 면으로부터 어떻게 변하는 지가 오른쪽 그래프에 나타나 있다.

3.6 컨투어링 알고리즘(contouring algorithm)

수치적인 계산 방법인 컨투어링 알고리즘은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 자주 사용되는 것으로 많은 방법들이 소개되어 있다. 이에는 piecewise contour-line algorithm 과 traced contour-line algorithm 의 두 가지가 있는데, 전자는 순서가 없는 점들의 집합만을 제공하고, 후자는 추적 과정까지 포함되어 바로 원하는 컨투어선을 얻을 수 있다. 매개변수 표현에 있어서는 후자가 바람직하다. 또한 이것은 삼각형 메쉬뿐만 아니라 사각형에도 적용되므로 보다 자유로운 메쉬 생성이 가능하다. Traced contour-line algorithm 중의 하나로 미시간 대학에서 제안된 NISO 라는 알고리즘에 대해 간략히 소개하면 다음과 같다.

각 노드마다의 해당되는 값으로부터 곡면이 구성되면 컨투어선의 경로를 효율적으로 생성해내기 위해서 이 알고리즘은 상호관계를 가지는 다음과 같은 테이블을 구성한다. Vertex Table 에는 모든 노드의 u, v 좌표값과 오프셋 값을 저장하고, Edge Table 에는 모든 메쉬들의 모서리들의 정보를 저장하게 된다. 각 모서리들은 시작점과 끝점의 포인터와 모서리가 속해 있는 양면(삼각형 혹은 사각형)의 Face Table 의 포인터들로 정의된다. Edge Table 의 ISDT 항목은 각 모서리에서의 교차가 일어나는지를 나타내는데, 초기값은 0 으로 주어지고 경로 추적 과정에서 사용되게 된다. Face Table 은 모든 면들에 대해서 면을 둘러싸는 모서리들의 포인터들로 정의된다.

이렇게 각각의 테이블이 구성되면 주어진 값을 가지고 컨투어선을 찾아내게 되는데 이는 다음의 두 과정으로 요약될 수 있다.

Step 1 : Edge Table 에 있는 모든 모서리에 대해 주어진 값을 가지는 평면과의 교차를 확인한다. 교차가 일어나면 Intersection Table 에 교차점의 좌표와 교차가 발생한 모서리의 포인터를 저장한다. 이 때 Edge Table 의 ISDT 항목에는 역으로 Intersection Table 의 포인터가 저장된다.

Step 2 : 이렇게 찾아진 교차점 간의 연결성을 찾기 위해서 추적 알고리즘(tracing algorithm)이 사용되는데, 이는 결과로 컨투어선의 경로를 제시하

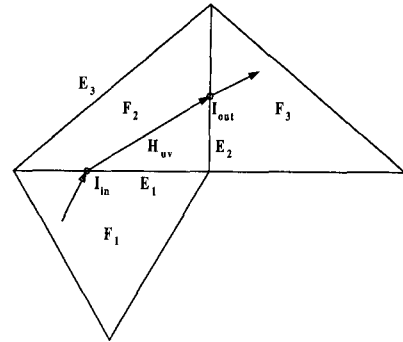


Fig. 12 Tracing process

는 일련의 점들을 넘겨주게 된다.

추적 알고리즘(tracing algorithm)의 원리는 Fig. 12 에 설명되어 있다. 모서리 E_1 상의 교차점 I_{in} 은 면 F_1 에서 F_2 로 가는 컨투어선을 안내한다. 이것은 Edge Table 의 포인터 F_{left} 과 F_{right} 로부터 알 수 있다. 그 다음의 교차점을 찾기 위해서 F_2 의 나머지 모서리들에 대해서 교차가 일어나는지 확인하게 된다. Face Table 은 이 나머지 세 개의 모서리들의 포인터를 제공한다. 여기서 I_{out} 이 위치되게 되면 이 I_{out} 이 I_{in} 역할을 하여 F_3 에 대해서 똑같은 과정이 수행되게 된다.

각각의 테이블들만 미리 구성해 놓으면 과정 1 과 과정 2 자체는 수행 속도가 빠르고 효율적이다. Edge Table 과 Face Table 은 메쉬 정보만 가지고 있으므로 노드가 생성된 직후에 미리 구성해 놓고, 실제 계산을 수행할 때는 기준 오프셋 값만을 적용하면 되기 때문에 시선의 변화나 광원의 움직임에 따라 충분히 빠른 결과를 얻을 수 있다. 전처리 작업에서 필요한 모든 테이블을 구성해 놓았다면, 반사 매핑의 결과로부터 모든 노드에서의 오프셋 값을 구하고 반사맵 상에서의 색 띠들의 배치에 따라 기준 오프셋 값을 적용하여 반사선을 생성하게 되는 것이다.

4. 결 과

Fig. 13 은 자동차의 펜더를 구성하는 곡면에 대해서 반사선을 구한 결과이다. 이 곡면은 모두 6 개의 트림곡면으로 이루어져 있는데, 아래 확대된 Fig. 15 의 반사선이 끊어진 것으로부터 곡면간의 연속성이 좋지 않다는 것을 확인할 수 있다. 또한 반사선간의 간격은 그 영역에서의 곡면의 곡률의 전반적인 크기를 나타낸다. 즉 간격이 넓은 곳에서는 비교적 곡률이 작고, 간격이 좁은 곳에서는 비교적 곡률이 크다는 사실을 나타낸다.

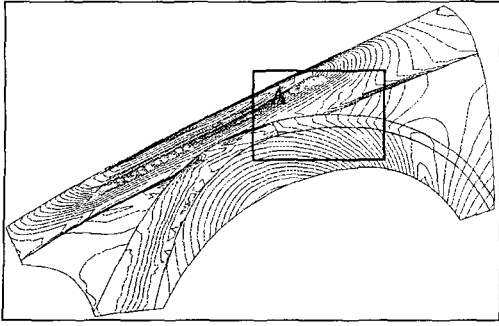


Fig. 13 Reflection lines on surfaces constituting fender

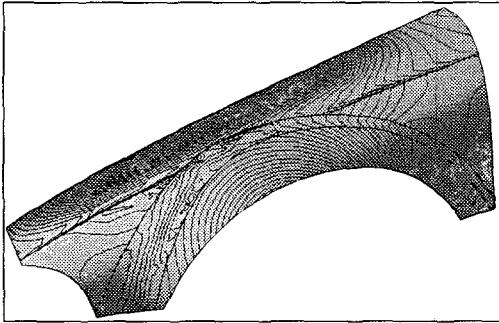


Fig. 14 Reflection lines in shaded image

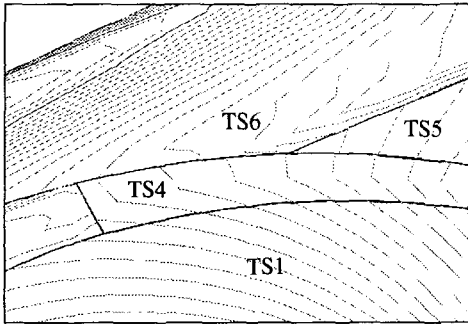


Fig. 15 Magnified view of region A in Fig. 13

Fig. 15는 Fig. 13의 A 부분을 확대한 것으로 각 트림 곡면간의 연결 부위에서 연결 상태가 좋지 않은 부분을 나타내고 있다. 특히 TS5와 TS6, TS4와 TS5간의 연결 부위에서 반사선들이 끊어진 것으로부터 이 트림 곡면간의 연속성이 좋지 않다는 것을 알 수 있다. 반사선이 곡면의 법선 벡터와 밀접한 관계가 있으므로 곡면간의 인접 부위에서 반사선이 C¹연속을 만족한다는 것은 곡면은 C²연속을 만족한다는 것을 말한다.

본 알고리즘은 실리콘 그래픽스(Silicon Graphics)사의 Indigo2 워크스테이션(R10000, Maximum

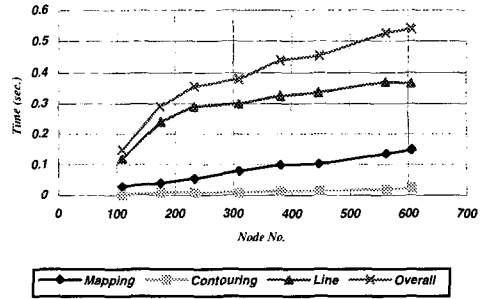


Fig. 16 Wall clock time of each algorithm

Impact)에서 구현되었다. 각각의 트림 곡면에 대해서 노드들을 생성하고 컨투어링 알고리즘을 사용하기 위한 각각의 테이블을 구성하는 전처리 과정이 필요하게 되지만, 시선벡터의 변화와 반사맵의 재구성, 즉 오프셋 값간의 간격 조정으로부터 반사선을 재생성해내는 시간은 약 2000개의 노드로 이루어진 곡면들에 대해서 2초 정도의 시간이 걸리게 되어 실제 관찰자의 위치 이동을 모사할 수 있었다. Fig. 16은 예제로 든 펜더 모델의 한 개의 트림 곡면에 대해서 노드의 수를 변화 시켜 가면서 각 알고리즘이 수행되는 시간을 구분하여 나타낸 것이다. Mapping이라고 표시되어 있는 부분의 시간은 준비된 노드와 삼각형 패치 정보를 파일로부터 읽어들이는 시간과 반사 매핑 계산 과정이 포함되어 있기 때문에 노드의 수에 따라 선형적인 시간의 변화를 나타냈고, Contouring이라고 표시된 부분은 컨투어링 알고리즘에 걸리는 시간을 나타내고 있다. 컨투어링에 걸리는 시간이 다른 과정에 비해 노드 수의 증가에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있고, 이것은 컨투어링 알고리즘의 선택이 현명하였음을 보여 준다. Line이라고 표시된 부분은 교차점의 좌표와 코드 값을 바탕으로 반사선을 생성하는 단계이다.

5. 결론

본 연구에서는 곡면 평가 방법으로 유용하게 사용되는 반사선에 대해서 실제 생산 현장에서의 검사를 모사할 수 있도록 속도가 향상된 알고리즘을 제시하였다. 반사 매핑을 이용한 반사선의 생성은 반사맵을 사용함으로써 주어진 곡면과 시선 위치에 대하여 곡면 상에 투영되는 광원을 역으로 추적함으로써 계산상의 효율을 향상시킬 수 있고, 그 과정에서 수반되는 연산으로 직선과 평면의 교점을 구하는 간단한 계산만이 필요하게 되어 안정

성을 보장할 수 있다. 또한 반사선을 이용한 곡면 평가 결과의 타당성을 높이기 위하여 반사맵의 구성으로 인한 반사선의 불연속을 제거할 수 있도록 수정된 반사맵을 적용하였다.

반사선 생성을 위한 기법으로는 곡면-평면 교차 문제로 구성하여 수치적으로 컨투어선을 찾아내는 알고리즘을 적용하였다. 이것은 그다지 많지 않은 메쉬로부터 충분히 만족스러운 결과를 얻을 수 있다는 장점도 가지고 있다. 기존의 반사 맵핑을 이용한 반사선 생성 방법에서의 삼각형의 분할 과정을 없애고, 컨투어링 알고리즘을 사용하여 반사맵 상의 띠 광원들 사이의 경계를 직접 추적하여 찾아내는 방법으로 속도를 향상시켰다.

또한 전세계적으로 자동차 회사에서 가장 많이 사용하는 CATIA 를 기반으로 하여 개발되었기 때문에, 별다른 데이터 교환 없이 실제 설계 현장에서 직접 적용할 수 있다.

사용한 컨투어링 알고리즘의 특성상 점들의 추적과정으로 얻어진 점들로부터 반사선만을 빠르게 찾아낼 수 있는데, 좀더 현실에 근접한 반사선 검사를 재현하기 위해서는 렌더링 기법에 관한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

또한 이 연구에서 NISO 알고리즘을 적용할 수 있도록 도와주신 미시간 대학의 Beier 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Holger Theisel and Gerald Farin, 1997, "The Curvature of Characteristic Curves on Surfaces," *IEEE Computer Graphics and Application*, Vol. 17, No.6, pp.88~96.
- (2) Klass, R., 1980, "Correction of Local Surface Irregularities Using Reflection Lines," *Computer Aided Design*, Vol. 12, pp.73~77.
- (3) Kaufmann, E. and Klass, R., 1988, "Smoothing Surfaces Using reflection Lines for Families of Splines," *Computer Aided Design*, Vol.20, No. 6, pp.312~316.
- (4) Farin, G. A., 1985, "A Modified Clough-Tocher Interpolant," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 2, pp.19~27.
- (5) Blinn, J.F., and M.E. Newell, "Texture and Reflection in Computer Generated Images," *CACM*, 19(10), pp.542~547.
- (6) 최인진, 이건우, 1996.6 "반사맵핑을 이용한 자동차 외형 설계 곡면의 검사," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, Vol.1 pp. 369~374.
- (7) Klaus-Peter Beier and Yifan Chen, 1994, "Highlight-Line Algorithm for Real-Time Surface-Quality Assessment," *Computer Aided Design*, Vol. 26, No.4, pp.268~277.
- (8) 전용태, 이숙진, 최재봉, 박세형, 1993, "곡면모델러에서의 트리밍곡면의 생성," 대한기계학회 논문집 제 17 권 제 6 호.
- (9) CATIA Application Programming Interface Reference Manual.