

광선추적 수행중 혼합 음영검사에 관한 연구

(A Hybrid Shadow Testing Scheme During Ray Tracing)

魚 吉 秀,* 慶 宗 旻*

(Kil Su Eo and Chong Min Kyung)

要 約

본 논문은 3차원적 분할공간 환경에서 종래의 음영검사법과 Crow의 음영입체법을 상황에 따라 유리하도록 선택하는 혼합음영검사법을 소개하고 파라메타화를 통하여 그 선택의 최적화를 꾀하였다. 추가적인 선행계산시간이 소요됨에도 불구하고 제안된 혼합음영검사법은 여러가지 예제화면들에 대하여 종래의 방법에 비하여 음영계산시간에 있어서는 50%, 전체모화시간에 있어서는 30%정도씩의 CPU 시간단축효과를 보였다. 그 원인은 음영검사의 선택적 사용을 통하여 그림자영역의 일관성(coherency)을 이용한데에 있다. 연속되는 두 반사점사이에 존재하는 음영다각형의 갯수를 나타내는 N_{th} 라는 파라메타가 음영검사의 효과적 선택을 위한 지표가 되며, 묘화환경의 통계적 수치로부터 이 값을 알아내는 방법이 제안되고 실험적 결과와 비교된다.

Abstract

This paper presents a new shadow testing acceleration scheme for ray tracing called Hybrid Shadow Testing (HST) based on a conditional switching between the conventional shadow testing method and Crow's shadow volume method, where the shadow polygons as well as the object polygons are registered onto the corresponding cells under the 3-D space subdivision environment. Despite the preprocessing time for the generation and registration of the shadow polygons, the total shadow testing time of the proposed algorithm, HST was approximately 50% of that of the conventional shadow testing method for several examples while the total ray tracing time was typically reduced by 30% from the conventional approach. This is due to the selective use of the shadow volume method with a compromise between the maximal utilisation of shadow's spatial coherency and minimising the computational overhead for checking ray intersections with the shadow polygons. A parameter, N_{th} denoting the critical number of shadow polygons between successive reflection points was used as a guideline for switching the shadow testing scheme between the conventional method and shadow volume method. A method for calculating N_{th} from such statistical data as the number of object polygons, average polygon size, average peripheral length of the polygons was proposed, resulting in good agreement with the experimental results.

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日子: 1988年 9月 29日

I. 소 개

주사선 알고리즘에서 사용되는 국부적 조광모델대신 사용함으로써 광선추적의 원리는 3차원 컴퓨터 그

래픽스에서 사실적 묘화를 위하여 널리 쓰여지고 있다. 그러나 광선추적은 계산시간이 너무 길어 현실화가 힘들었는데 대부분의 계산시간이 광선과 물체와의 교차점 계산에 소요된다. 따라서 지금까지 음영 계산 시간을 줄이기 보다는 그 교차점 계산 시간을 줄이는데 더 많은 노력을 기울여 왔다. 대표적인 방법으로는 내포입체법^{1,2,3)}과 공간분할법^{4,5,6)}이 있다. 내포입체법은 장면속에 있는 물체들을 내포하는 내포입체의 계층적인 구조를 이용하여 불필요한 교차점 계산을 사전에 생략한다. 내포입체는 수학적으로 광선과의 교차점 계산이 간단한 것이 좋은데 구, 입방체등이 널리 쓰인다. 공간분할법은 모든 물체를 포함하는 공간을 octree 구조⁷⁾나 균등한 정방체의 3차원적 배열⁸⁾로 나눈다. 광선이 그것과 교차하는 단위공간을 하나씩 하나씩 차례로 방문하여 그 단위공간에 등록된 물체들과의 교차점을 수행하게 됨으로써 비교적 광선의 경로의 가까운 물체들과의 교차점만 계산하게 된다. 디페와 스웬슨은 각 단위공간에 물체들이 균등하게 분포하도록 하기 위해 단위공간의 크기와 모양을 유동적으로 바꾸는 방안을 제안하였다.¹⁴⁾

본 논문에서는 그림자가 사실적인 묘화에 매우 중요하므로 광선 추적중 음영계산 시간을 줄이는 한가지 방법을 설명하고 있다. 음영계산을 빠르게 하는 것은 전체 묘화시간을 줄이는데 필수적이다. 특히 장면중에 광원이 많을 때는 더 그렇다. 왜냐하면 실제로 음영계산이 전체 묘화시간의 절반이상을 차지하는 일은 드문 일이 아니기 때문이다.

광선추적에 있어서 음영계산은 어떤 반사점의 광원으로 부터의 가시성을 결정하는 일에 해당한다. 즉 교차점과 광원사이의 어떤 물체가 가로 놓여 있으면 그 교차점은 그림자속에 있는 것으로 판명된다. 종래의 방법에서는 '음영광선'이라고 불리는 광선을 교차점에서 부터 광원 방향으로 쏘아서 가시성을 검사한다. (그림 1(a)참조) 음영광선은 가리는 물체를 만나거나 (이 때는 그림자가 점) 광원을 만날때까지 (이 때는 그림자가 지지않음) 진행된다. 프로그램의 구현이 간단하지만 종래의 방법은 많은 시간을 소요한다.

헤인즈 등¹⁾은 또 다른 방법을 제안하였는데 '광용기'라고 불리운다. 광용기는 상. 하. 좌. 우. 전. 후의 6면으로 구성되는 입방체이며 그 중심부에 광원이 위치한다. 광용기의 각 면은 스크린처럼 2차원적인 화소의 배열로 되어 있는데 각 화소는 광원과 그 화소-기하학적으로 정사각형-에 의해서 만들어지는 무한 사각뿔에 접하는 물체들을 가지고 있다. 교차점에서

의 음영검사는 음영광선이 지나는 광용기 면상의 화소를 살피는 것으로 시작된다. 만약 그 화소가 비어 있거나 교차점이 일어난 물체만을 가지고 있으면 음영검사는 금방 끝난다. (즉 그 교차점은 그림자속에 있지 않음이 판명된다) 이와같이 함으로써 광용기 방법은 음영검사를 상당히 빠르게 하지만 하나의 근본적인 문제점을 가지고 있다. 즉 광원이 물체들로부터 멀리 떨어져 있으면 있을수록 물체들은 광용기의 특정부분에 집중적으로 등록되게 되어 음영검사에 별로 도움을 주지 못하게 된다는 점이다.

또 다른 음영계산 방안으로는 크로우에 의해서 제안된것으로 주로 추사선 알고리즘에 사용되어온 음영입체의 개념이 있다.¹⁵⁾ 음영입체는 음영다각형으로 구성되며 음영다각형은 물체의 능선이 해당 광원으로 부터 투영되어 만들어지는 다각형으로 정의된다. 능선에는 버제론¹⁶⁾이 정의한대로 두가지 종류가 있다. 즉 개방된 다면체의 종단선분이 그 첫째이고 광원과의 가시성이 다른 두개의 다각형이 공유하는 선분이 그 둘째이다. 하나의 선분이 광원에서 보일때만 이론적으로 능선이 될 수 있지만 그러한 조건을 판별하는 일은 힘이 들기 때문에 위의 두 조건을 만족하기만 하면 능선으로 간주하기로 한다(이것은 계산시간을 길게 할지언정 계산 결과에는 영향을 주지 않는다). 광선추적중 광선이 음영다각형을 뚫고 지나가면 해당광원으로 부터의 가시성은 변하게 될 수 있다. 이 때 현재의 음영의 깊이를 나타내는 숫자, depth count (DC)가 변한다. 즉 광선이 정면음영다각형을 뚫으면 DC는 1만큼 증가하고 배면음영다각형을 뚫으면 1만큼 감소하게 된다. (그림 1(b)참조) 만약 광선의 추적경로상에 아무런 음영다각형이 발견되지 않으면 DC값은 변화가 없게 되어 광선선분의 출발점과 도착점의 음영조건이 같게 되어 추가적인 비용이 들지 않는다. 이러한 잇점은 그림자의 공간적 일관성을 이용한대서 비롯된다.

본 논문은 음영입체 개념을 이용한 광선추적에서의 효과적인 음영검사 알고리즘을 설명하는데, 이를테면, 광선이 단위공간을 방문하면 거기에 등록된 물체 뿐만아니라 음영다각형과의 교차계산도 같이 수행된다. DC값은 광선이 추적될 때마다 갱신된다. 어떤 물체의 표면상에 반사점이 발견되었을 때, 그때의 DC값은 곧 그 점에서의 해당광원에 대한 가시성을 결정해 주게 된다. 이러한 방법에서는 음영광선을 만들 필요가 없다. 그러나, IV장에서도 보이겠지만, 그림자의 공간적 일관성을 이용함에도 불구하고 음영입체에 의한 광선추적은 종래의 방법에 의한 것에 비해 우수한 결과를 보이지 못했다. 그 이유는 음

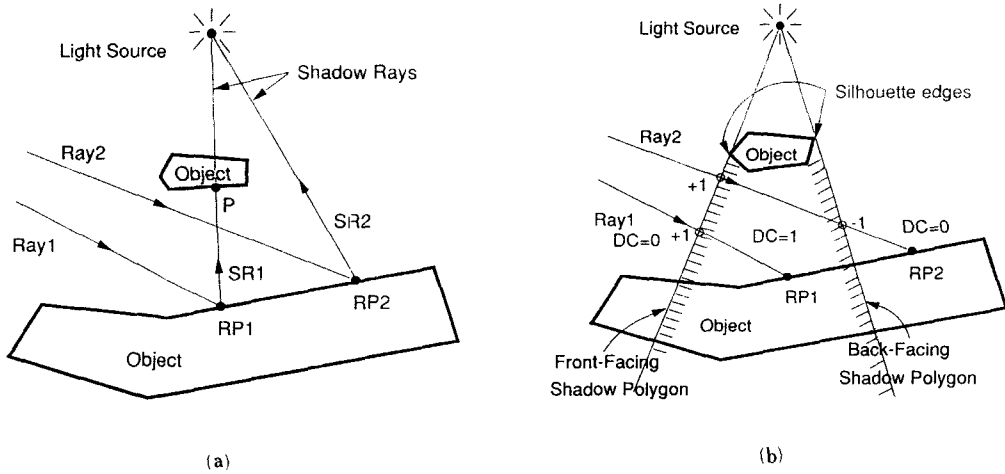


그림 1. 종래의 음영검사법과 음영입체법의 2차원적 설명

- (a) 종래의 방법에서는 반사점에서 광원방향으로 음영광선(SR1과 SR2)을 쏜다. SR1는 점 P에서 물체와 만나므로 반사점 RP1을 그림자속에 있음이 판명되고 반면에 RP2는 그림자속에 있지 않음이 판명된다.
- (b) 똑같은 상황에서 음영입체법에 의한 음영검사이다. Ray1은 정면 음영다각형을 뚫고 지나가서 반사점 RP1을 만나므로 RP1에서의 DC값은 1이 되어 RP1은 그림자속에 있음이 밝혀지는데 반해 Ray2는 정면과 배면의 음영다각형 각각 한번씩 뚫고 지나가므로 DC값은 0이 되어 반사점 RP2가 그림자속에 있지 않음이 밝혀진다.

Fig. 1. The explanation of the conventional shadow testing method and shadow volume method.

- (a) In conventional shadow testing scheme, shadow ray (SR1 and SR2) is traced toward each light source. SR1 meets an object at P so that reflection point RP1 is in shadow, while SR2 reaches the light source without hitting any objects along the way so that RP2 is not in shadow.
- (b) Shadow calculation scheme based on the shadow volume in the same circumstance, Because Ray1 pierces a front-facing shadow polygon and meets a reflection point RP1, the depth count (DC) at RP1 is 1 so that RP1 is in shadow, while Ray2 additionally intersects a back-facing shadow polygon so that the DC at RP2 is decremented to 0. Reflection point RP2 is not in shadow.

영입체와 광선과의 교차점계산 비용이 음영입체의 밀도가 높은 곳에서는 오히려 종래의 방법에 비해 훨씬 많이 든다는 사실에 있음을 알게 되었다.

본 논문에서 제안하는 혼합음영검사(hybrid shadow testing, HST)라고 하는 것은 균등분할공간 환경⁽⁶⁾ 하에서 음영검사의 방법을 상황에 따라 유리하게 종래의 방법과 음영입체법 사이를 오고 갑으로써 음영계산시간을 획기적으로 줄여 보자는데 목적이 있다. II 장에서는 두가지 음영검사법의 비용(CPU 시간)을 분석하고 광선선분이 뚫고 지나간 단위공간에 등록되어 있는 음영다각형의 특정한 개수에 해당하는 N_{th} 라는 파라메타를 유도한다. HST알고리즘에 대한 간

략한 설명이 III 장에서 주어지고 실험결과가 IV 장에서 주어진다.

II. 음영입체법과 종래의 방법의 비용비교

본 장에서는 종래의 음영검사법과 음영입체법에 있어서 음영검사시간에 대한 해석적인 표현을 유도한다. 앞서 언급한대로 물체가 놓여져 있는 전체공간은 3차원의 균등한 단위공간으로 나누어지고 단위공간은 전체 혹은 부분적으로 그것과 접하는 모든 다각형(물체)들의 목록을 가지고 있다.⁽⁶⁾

광선선분이란 그림 2의 점 P1과 P2사이의 선분인데, 즉 2개의 연속적인 반사점이나 눈과 첫번째 반

사점 사이의 선분으로 정의된다. 광선은 P1으로 부터 P2까지의 광선선분에 의해서 뚫어지는 단위공간 을 하나씩 하나씩 방문하게 된다. 각각의 광선선분 은 다각형목록을 저장할 통(bucket)을 가지고 있다. 단위공간에 등록되어 있는 다각형이 그 단위공간에 서는 광선과 교차하지 않거나 그밖의 단위공간에서 교차하게 되더라도 그런 다각형은 더이상 교차점계 산을 하지 않도록 하기 위하여 통속에 저장해 둔다. 이러한 통의 사용은 또한 부동소수점의 정확도(precision) 문제에 의해서 파생되는 반사가 일어난 물체 와의 교차점계산을 하게되는 오류를 피하게 하는데 로 쓰일 수 있다. 비슷한 통메카니즘이 음영다각형 과 광선과의 교차점계산에도 사용되었다.

다음장에서 HST를 설명하기 전에 먼저 종래의 음 영검사법과 음영입체법의 CPU시간 비교를 하고자 한다. 먼저 음영입체법에 대하여 생각해 보자. 음영 입체법을 사용했을때 그림 2의 점 P2의 음영검사 비 용을 C_{sv} 라고 하면

$$C_{sv} = C_s N_s \tag{1}$$

여기서 C_s 는 광선과 음영다각형간의 교차점계산 비

용이며 N_s 는 그 광선선분이 지나간 단위공간에 등록 된 음영다각형의 갯수이다. 즉

$$N_s = \sum_{i \in I} n_s(i) \tag{2}$$

식(2)에서 $n_s(i)$ 는 i 번째 단위공간에 등록되어 있는 음영다각형의 갯수를 나타내며 I 는 광선선분이 지난 단위공간의 첨자(index)의 집합이다. 광선선분에 의 해서 실제로 통과되는 음영다각형의 갯수는 N_s 보다 크지 않음을 주지하라.

한편, 종래의 음영검사법의 비용 (C_{cv})은 i) 음영 광선의 진행에 소요되는 비용과 ii) 광선/물체간의 교 차점계산에 소요되는 비용의 합으로 표현된다. 전자 를 C_{cv1} , 후자를 C_{cv2} 라고 하자. 그리고 장면중의 물 체 다각형들은 균등하게 분포하고 있다고 가정하자. 그러면 C_{cv1} 은 식(3)의 우항의 세가지 요소의 합으 로 표현될 수 있는데 왼쪽으로 부터 각각, 초기화 비용(C_i), 그 반사점이 그림자속에 있음이 판명됐을 때의 비용, 그리고 그림자속에 있지 않음이 판명되 었을 때의 비용을 나타낸다.

$$C_{cv1} = C_i + C_c \sum_{i=1}^{N_c} i q_i + N_c C_c (1-k)^{\alpha} \tag{3}$$

여기서 C_i, C_c 그리고 N_c 의 의미는 다음과 같다.

- C_i : 3DDDA (3-dimensional digital differential anal- yser)에서 방향벡터, 거리, 단위공간의 첨자 등과 같은 광선 따라 파라메타들을 초기화시 키는데 드는 비용
- C_c : 3DDDA에서 광선이 단위공간 하나를 지나가 는데 드는 비용 그리고
- N_c : 반사점과 광원사이의 음영광선이 지나가게 되 는 단위공간의 갯수

식(3)의 우항중 두번째 항은 N_c 개의 단위공간 개 개의 비용분의 합을 뜻하는데 거기서 q_i 는 i 번째 단 위공간에서 음영광선이 물체와의 교차가 일어나 음 영검사가 끝날 확률을 나타낸다.

식(3)우항의 세번째 항으로 가기전에, p 와 α 라는 두가지의 새로운 파라메타를 정의하고자 한다. 광선 이 지나가는 단위공간속에 등록되어 있는 물체가 실 제로 광선과 교차할 평균확률을 p 라 하고 단위공간 에 등록된 물체중에서 새로이 교차점 계산을 수행해 야할 물체의 평균갯수를 α 라고 한다. (일단 한번 교 차점 계산이 행해진 물체는 더이상 계산하지 않는다) 그러면, 음영검사가 하나의 단위공간에서 종료될 확 률(k)는 식(4)와 같이 표현될 수 있다.

$$k = 1 - (1-p)^{\alpha} \tag{4}$$

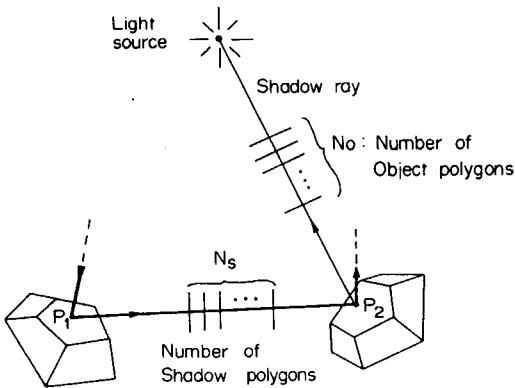


그림 2. N_s 는 연속되는 두 반사점 P_1 과 P_2 를 양 끝 점으로 하는 광선 선분이 통과하는 단위공간 에 등록되어 있는 음영다각형의 갯수를 나 타내고 N_o 는 P_2 로 부터 광원을 향해 발사된 음영광선이 지나가는 단위공간에 등록된 물 체(다각형)의 갯수를 나타낸다.

Fig. 2. N_s denotes the total number of shadow polygons registered onto the cells pierced by the ray segment between P_1 and P_2 , and N_o denotes the total number of object polygon registered onto the cells pierced by the shadow ray shot from P_2 toward the light source.

바뀌 말하면, k 는 한 단위공간에 등록된 물체(다각형)중에서 적어도 1개는 음영광선선분과 교차가 일어날 확률을 나타낸다.

음영검사가 i 번째 단위공간에서 종료될 확률, q_i 의 의미로 돌아가서, 식(5)와 같이 k 를 사용하여 다시 표현하면

$$q_i = k(1-k)^{i-1} \quad (5)$$

그리하여, 식(3)의 두번째 항을 k 를 써서 확장하면

$$\begin{aligned} C_c \sum_{i=1}^{N_c} i q_i &= C_c \sum_{i=1}^{N_c} i k (1-k)^{i-1} \\ &= C_c [k + 2k(1-k) + 3k(1-k)^2 + \dots + \\ &\quad N_c k (1-k)^{N_c-1}] \end{aligned} \quad (6)$$

마지막으로 식(3)의 세번째 항은 N_c 개의 단위공간속의 어떤 물체도 음영광선과 교차가 일어나지 않을 확률, $(1-k)^{N_c}$ 와 그러한 경우의 실제적인 비용 $N_c C_c$ 의 곱이다. 식(6)을 식(3)에 대입하고 식(4)의 관계식을 이용하여 재구성하면

$$\begin{aligned} C_{cv1} &= C_i + C_c^k + 2C_c k(1-k) + 3C_c k(1-k)^2 + \dots + \\ &\quad N_c C_c^k (1-k)^{N_c-1} + N_c C_c (1-k)^{N_c} \\ &= C_i + C_c \frac{1 - (1-k)^{N_c}}{k} \\ &= C_i + C_c \frac{1 - (1-p)^{N_c}}{1 - (1-p)^\alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 한편, C_{cv2} 도 비슷한 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{cv2} &= C_o p + 2C_o p(1-p) + 3C_o p(1-p)^2 + \dots + \\ &\quad N_o C_o p(1-p)^{N_o-1} + N_o C_o (1-p)^{N_o} \\ &= C_o \frac{1 - (1-p)^{N_o}}{p} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 C_o 는 음영광선과 물체(다각형)과의 교차점 계산 비용이며 N_o 는 음영광선에 의해서 관통되는 모든 단위공간에 등록된 물체의 갯수의 합을 나타낸다. 따라서 C_{cv} 는

$$\begin{aligned} C_{cv} &= C_{cv1} + C_{cv2} \\ &= C_i + C_c \frac{1 - (1-p)^{N_c}}{1 - (1-p)^\alpha} + C_o \frac{1 - (1-p)^{N_o}}{p} \end{aligned} \quad (9)$$

이 되고, α 의 정의에 의해

$$N_o = \alpha N_c \quad (10)$$

이므로 식(9)는

$$C_{cv} = C_i + [1 - (1-p)^{N_o}] \left\{ \frac{C_c}{1 - (1-p)^\alpha} + \frac{C_o}{p} \right\} \quad (11)$$

가 된다. 그림 3은 식(11)에 의한 C_{cv} 와 N_o 의 관계를 보인다. 거기서 기계종속적 파라메타인 C_i, C_c , 그리고 C_o 는 각각 2.5msec, 0.2msec, 그리고 2.0msec로 주어졌다. 식(11)에서 α 와 p 는 장면종속적인 통계적인 파라메타들이다. 주어진 장면에 대한 α 와 p 값은 그 장면을 구성하는 다각형의 둘레길이와 면적의 평균치와 갯수, 그리고 단위공간의 갯수로 부터 유도된다.

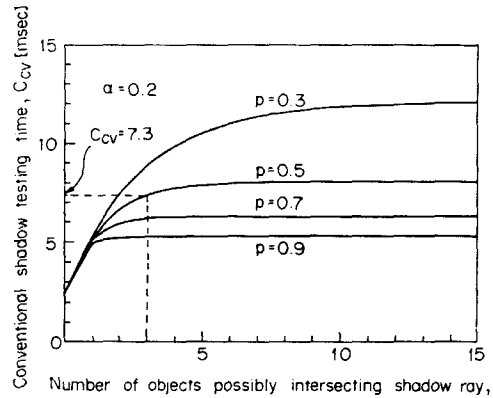


그림 3. 종래의 방법의 비용, C_{cv} 의 곡선
Fig. 3. A plot of C_{cv} , conventional shadow testing time vs. N_o , the total number of objects registered onto the cells pierced by the shadow ray.

III. 혼합음영검사(HST)

전장에서 언급한대로, 음영입체의 개념을 사용하는 음영검사법은 광선과 음영다각형과의 교차점 계산이 많을때는 오히려 불리하다. 그러나 그 반대의 경우에는 유리함을 관찰했을때 우리는 혼합음영검사 방법(HST)을 생각하게 되었다. 제안된 HST에서는 N_s 의 값이 두가지 방법 사이를 오고가는 지표가 된다. 즉 N_s 가 특정한 결정숫자 N_{th} 보다 작으면 음영입체법이 도입되고 그 반대의 경우에는 종래의 방법이 도입된다. N_{th} 값은 식(1)과 (11)의 두 항들을 같게 했을때의 N_s 값으로

$$N_{th} = \frac{1}{C_s} \left\{ C_i + (1 - (1-p)^{N_o}) \left[\frac{C_c}{1 - (1-p)^\alpha} + \frac{C_o}{p} \right] \right\} \quad (12)$$

로 주어진다.

제안된 HST 방법에서는 기본적으로 sustain, self-shadow, conventional 그리고 shadow volume의 네가지의 부수적 방법에 의해서 음영검사를 행하게 된다. (그림 4는 HST의 상태선도를 나타낸다) 그런데 음영입체법에서 종래의 방법으로서의 변화는 자유롭지만 그 반대의 변화는 SC (shadow condition)가 0이거나 DC값이 유효할 때만 허용된다. 왜냐하면 음영입체법은 DC값의 유지를 필요로 하기 때문이다. N_s 가 0인 경우에는 sustain 경우로서 음영조건(SC)이 그전의 반사점과 동일하게 되어 음영계산 비용이 들지 않는다. 또 self-shadow의 경우는 물체자체가 스스로를 그림자지게 하는 경우로 표면벡터(N)와 광벡터(L)의 내적으로 판별할 수 있다. HST 방법의 설명

을 위한 pseudo code는 다음과 같다.

```

For each light source
  if( $N_s$  equals 0) /* Shadow bucket is empty. */
    (Null action);
  else if( $L \cdot N < 0$ ) /*  $L \cdot N < 0$  means self-shadow. */
    shadow_condition-1; /* Shadow_condition of 1 or 0 denotes that the reflection point is in shadow or not, respectively. */
    shadow_depth_flag-0; /* Shadow_depth_flag is 1 when the shadow depth count is valid and 0 otherwise. */
  }
  else if( $N_s \leq N_{th}$  and (shadow_condition equals 0 or shadow_depth_flag equals 1)) {
    shadow_condition=shadow_volume_test( );
    shadow_depth_flag=1;
  }
  else {
    shadow_condition=conventional_shadow_test( );
    shadow_depth_flag=0;
  }
  }
    
```

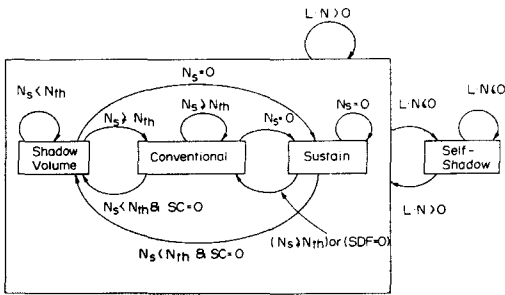


그림 4. 4가지 부수적 방법간의 상태 천이 선도 콘트롤 파라메타로 $L \cdot N$, N_c , SC 및 SDF 등이 쓰인다. 여기서 L은 반사점에서 광원 방향으로의 단위벡터, N은 표면의 수직벡터, SC는 그 전 반사점의 음영조건(0: 밝음, 1: 그림자) 그리고 SDF는 Shadow Depth Flag (1: SD가 유효, 0: SD가 의미없음)를 나타낸다.

Fig. 4. State transition diagram of the hybrid shadow testing (HST) scheme utilizing 4 different subschemes for evaluating the shadow condition depending on the values of the control parameters such as $L \cdot N$, N_s , SC and SDF, where N_s denotes the total number of shadow polygons registered onto the cell pierced by the ray segment, N_{th} , the switching threshold, L, light vector on the reflection point, N, surface normal vector on the reflection point, SC, previous shadow condition (0: no shadow; 1: shadow), and SDF, shadow depth flag (1: shadow depth count value is valid, 0: not valid).

IV. 결과 및 고찰

세가지의 음영검사법(음영입체법, 종래의 방법, 그리고 혼합음영검사법)에 의한 광선추적 프로그램이 C언어로 개발되었다. 기본적 자료구조는 후지모토⁽⁶⁾가 제안한 SEADS에 토대를 두고 있다. 영상자료화 일은 SUN 시스템에서 만들어지고 그림은 8-bit 화소의 그래픽 시스템을 가지는 IBM-PC/AT로 옮겨서 그린다. 4가지 예제 장면으로 "Glasses", "Desk", "S-tars" 그리고 "KAIST"가 만들어져 쓰였으며 그림 5(a), (b), (c) 및 (d)에 각각 나타나있다. 비용 측정을 위한 그림은 512×480의 정밀도를 가지는데 반하여 그림 5에 나타난 그림들은 모두 antialiasing이 수행되고 1024×768 화면에 그려졌다.

구현된 HST 프로그램에서는 N_{th} 가 초기단계에서 일단 결정된 다음 전체 음영검사시에 사용되는데 이는 매 반사점마다 N_{th} 값을 산출하는것을 피하도록 하기 위함이다. 기계종속적인 매개변수 C_s , C_1 , C_c 및 C_o 의 값은 SUN 3/75에서 측정된 값이며 표 1에 보여져 있다. 주어진 장면의 N_{th} 값을 구하기 위한 여러

표 1. 기계종속적 파라메타, C_s , C_1 , C_c 및 C_o 의 측정치

Table 1. Experimental values(in msec) for the machine-dependent parameters, C_s , C_1 , C_c and C_o .

Items	C_s	C_1	C_c	C_o
Time	2.00	2.54	0.23	1.88

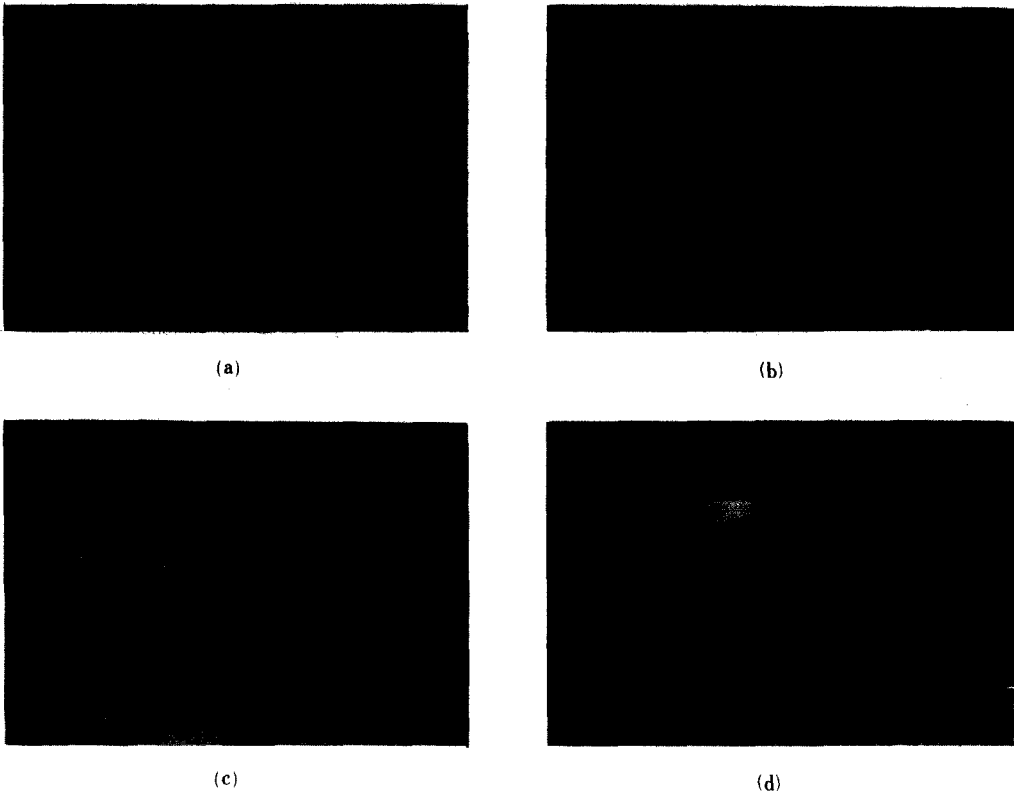


그림 5. (a) 'Glasses' (광원 3개)
 (b) 'Desk' (광원 3개)
 (c) 'Stars' (광원 5개)
 (d) 'KAIST' (광원 4개)

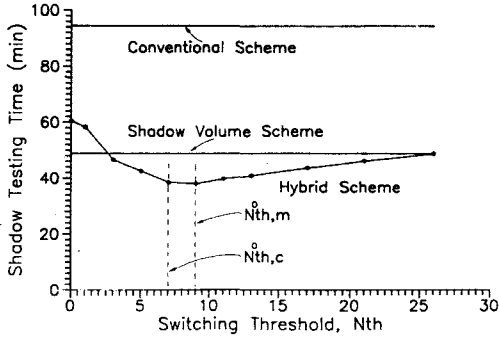
Fig. 5. (a) Image 'Glasses' (three light sources),
 (b) Image 'Desk' (three light sources),
 (c) Image 'Stars' (five light sources),
 (d) Image 'KAIST' (four light sources).

표 2. 각 예제 화면에 대한 각종 장면종속적 파라미터의 측정치

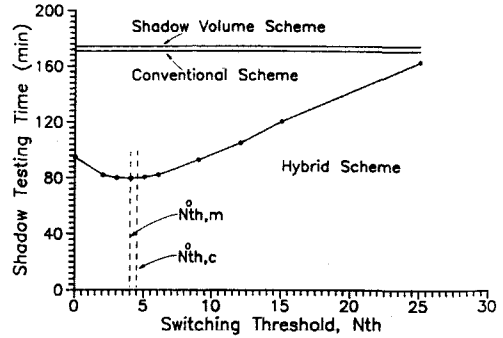
Table 2. Experimental values for various statistical parameters for each of the five test images.

Parameters Images	$A_{avg,P}$	$L_{avg,P}$	n_{or}	N_{ot}	N_{ct}	α	p	N_{th}
Glasses	1.435	3.479	0.229	3781	$74 \times 32 \times 67$	0.115	0.276	7.042
Desk	2.702	6.656	0.332	523	$39 \times 22 \times 32$	0.166	0.430	4.546
Stars	7.285	12.316	0.734	113	$22 \times 14 \times 19$	0.367	0.703	2.924
KAIST	17.704	15.868	0.590	981	$45 \times 17 \times 69$	0.295	0.844	2.657

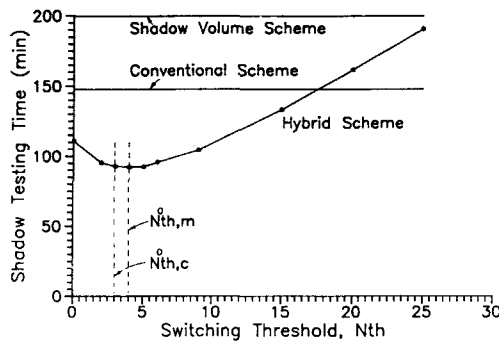
$A_{avg,P}$: 장면속에 있는 물체다각형의 평균면적,
 $L_{avg,P}$: 장면속에 있는 물체다각형의 평균둘레길이,
 n_{or} : 한개의 단위공간에 등록되어 있는 물체다각형의 평균갯수,
 N_{ot} : 장면속에 있는 물체다각형의 총갯수,
 N_{ct} : 단위공간의 전체갯수,
 N_{th} : 예측된 최적 N_{th} 값



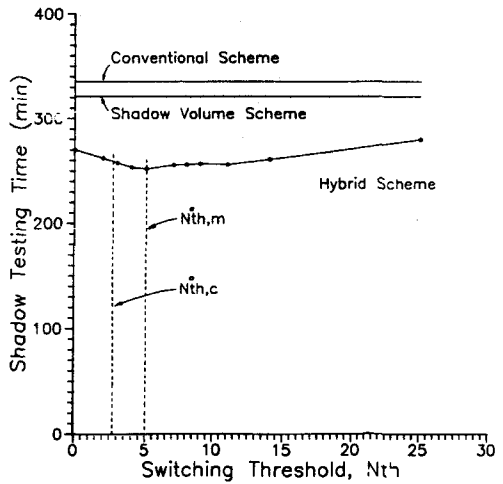
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. (a) 'Glasses', (b) 'Desk', (c) 'Stars' 및 (d) 'KAIST'에 대한 3가지 음영검사법의 음영검사시간. $N_{th,c}^0$ 는 N_{th} 의 계산에 의한 최적치를, $N_{th,m}^0$ 은 측정에 의한 최적치를 나타낸다.

Fig. 6. Shadow testing times by the HST scheme for various switching threshold values (N_{th}), compared with those of the conventional and shadow volume approaches for four example images. $N_{th,c}^0$ denotes the calculated optimal value of N_{th} , and $N_{th,m}^0$ denotes the measured optimal value of N_{th} . (a) 'Glasses', (b) 'Desk', (c) 'Stars', and (d) 'KAIST'.

가지 통계적 매개변수의 값들이 표 2에 주어져 있다. 그림 6은 네가지 예제장면에 대한 3가지 알고리즘의 CPU 시간이 비교되고 있다. 초기단계에서 예측된 N_{th} 값, $N_{th,c}^0$ 는 측정된 최적 N_{th} 값, $N_{th,m}^0$ 와 좋은 일치치를 보이고 있다.

표 3은 각 예제화면에 대한 HST 방법에서의 4가지 부수방법의 빈도수를 측정된 것이다. SUSTAIN 경우가 전체 음영검사 횟수의 30내지 60퍼센트를 차지하고 있다. 그런데 그림 6에서 N_{th} 값이 무한대로

가면 HST 방법은 음영입체법이 됨을 알 수 있다. 표 4는 각 예제화면에 대한 선행계산(preprocessing) 시간, 음영검사시간 그리고 그밖의 시간들의 측정치를 나타낸다. 종래의 방법에 비해 HST 방법에 의한 음영검사시간이 1.3에서 2.5배 정도로 빨라짐을 볼 수 있다.

V. 결 론

혼합음영검사법 (hybrid shadow testing, HST) 라고

표 3. 4 가지 부수적 방법의 사용 빈도수

Table 3. The absolute numbers of the occurrences of each of the four subschemes in the proposed hybrid shadow testing scheme for five test images.

Subschemes Images	SUSTAIN	SELF-SHADOW	SHADOW VOLUME	CONVENTIONAL	Total
Glasses	109266 (47%)	19050 (8%)	79971 (34%)	24279 (11%)	232566 (100%)
Desk	306847 (39%)	108861 (14%)	169977 (23%)	201782 (24%)	787467 (100%)
Stars	259048 (30%)	55152 (6%)	346139 (40%)	207746 (24%)	868085 (100%)
KAIST	204471 (21%)	107532 (11%)	208535 (21%)	472442 (47%)	992980 (100%)

표 4. 측정된 CPU 시간(사용된 기계는 SUN 3/75, 시간은 분단위로 나타냄)

Table 4. A comparison of the CPU times on SUN 3/75(in minutes) among three shadow testing methods for (a) "Glasses", (b) "Desk", (c) "Stars", and (d) "KAIST", respectively.

Steps Schemes	Preprocessings	Shadow testing	Others	Total
Conventional	2.00 (1%)	94.47 (55%)	75.78 (44%)	172.25 (100%)
Shadow volume	6.50 (5%)	48.82 (37%)	75.78 (58%)	131.10 (100%)
HST (N _{th} =9)	6.50 (5%)	37.99 (32%)	75.78 (63%)	120.27 (100%)

(a)

Steps Schemes	Preprocessings	Shadow testing	Others	Total
Conventional	0.42 (0%)	170.83 (52%)	158.00 (48%)	329.25 (100%)
Shadow volume	1.42 (0%)	174.37 (52%)	158.00 (48%)	333.79 (100%)
HST (N _{th} =4)	1.42 (1%)	79.52 (33%)	158.00 (66%)	238.94 (100%)

(b)

Steps Schemes	Preprocessings	Shadow testing	Others	Total
Conventional	0.08 (0%)	147.55 (61%)	94.00 (39%)	241.63 (100%)
Shadow volume	0.52 (0%)	199.58 (68%)	94.00 (32%)	294.10 (100%)
HST (N _{th} =4)	0.52 (0%)	92.13 (50%)	94.00 (50%)	186.65 (100%)

(c)

Steps Schemes	Preprocessings	Shadow testing	Others	Total
Conventional	0.67 (0%)	335.35 (71%)	135.60 (29%)	471.62 (100%)
Shadow volume	3.63 (1%)	321.10 (70%)	135.60 (29%)	460.33 (100%)
HST (N _{th} =5)	3.63 (1%)	252.05 (64%)	135.60 (35%)	391.28 (100%)

(d)

불리는 광선추적시 사용되는 새로운 음영검사법이 제안되었다. HST 알고리즘은 4가지 부수적 방법을 사용하는데 sustain(음영의 일체성 활용), self-shadow(광원에 배면하고 있는 다각형의 음영검사), shadow-volume(음영입체법) 그리고 conventional(종래의 방법) 등이 그것이다. 장면 중속적인 파라메타 p 와 α 로 부터 N_m 를 결정하는 식을 통계적으로 유도하고 그것의 타당성을 실험을 통해 확인하였다. HST 방법은 종래의 방법에 비해 음영계산시간은 50%정도 전체계산시간은 30%정도의 감축효과를 나타냈다.

参 考 文 献

- [1] Whitted, T "An improved illumination model for shaded display," *Comm. of ACM*, vol. 23, no. 6, pp. 343-349, June 1980.
- [2] Rubin, S.M. and Whitted, T "A 3-dimensional representation for fast rendering of complex scenes," *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 79)* vol. 14, no. 3, pp. 110-116, July 1979.
- [3] Kay, T. and Kajiya, J "Ray tracing complex scenes," *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 86)* vol. 20, no. 4, pp. 269-278, 1986.
- [4] Dippe, M. and Swensen, J "An adaptive subdivision algorithm and parallel architecture for realistic image synthesis," *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 84)*, vol. 18, no. 3, pp. 149-158, 1984.
- [5] Glassner, A.S. "Space subdivision for fast ray tracing," *IEEE Computer Graphics and Applications* vol. 4, no. 10, pp. 15-22, Oct. 1984.
- [6] Fujimoto, A, Tanaka, T. and Iwata, K. "ARTS: accelerated ray-tracing system," *IEEE CG&A* vol. 6, no. 4, pp. 16-26, April 1986.
- [7] Haines, E.A. and Greenberg, D "The light buffer: a shadow-testing accelerator," *IEEE CG&A* vol. 6 no. 9, pp. 6-16, Sep. 1986.
- [8] Crow, F. "Shadow algorithm for computer graphics," *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH 77)*, vol. 11, no. 2, pp. 242-248, 1977.
- [9] Bergeron, P "A general version of crow's shadow volumes," *IEEE CG&A* vol. 6 no. 9 pp. 17-28, Sep. 1986. *

著 者 紹 介



魚 吉 秀 (正會員)

1958年 2月 16日生. 1982年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업. 1984年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1989年 2月 한국과학기술원 전기및 전자공학과 공학박사학위 취득. 현재 삼성종합기술원 정보시스템연구소 근무. 주관심분야는 Computer Graphics의 Hardware와 Software Algorithm 등임.

慶 宗 旻 (正會員) 第25卷 第10號 參照

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수