한국정밀공학회지 제 25 권 제 3 호 (2008 년 3 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 3, March 2008

셀 분할을 이용한 거리장의 효율적 계산

유동진#

Efficient Calculation of Distance Fields Using Cell Subdivision

Dong-Jin Yoo#

ABSTRACT

A new approach based on cone prism intersection method combined with sorting algorithm is proposed for the fast and robust signed distance field computation. In the method, the space bounding the geometric model composed of triangular net is divided into multiple smaller cells. For the efficient calculation of distance fields, valid points among the triangular net which will generate minimum distances with current cell are selected by checking the intersection between current cell and cone prism generated at each point. The method is simple to implement and able to achieve an order of magnitude improvement in the computation time as compared to earlier approaches. Further the method is robust in handling the traditional sign problems. The validity of the suggested method was demonstrated by providing numerous examples including Boolean operation, shape deformation and morphing of complex geometric models.

Key Words : Distance fields (거리장), Triangular net (삼각망), Boolean operation (불리언 연산), Shape deformation (형상변형), Morphing (모핑)

기호설명

$\mathbf{r}_i$ = Position vectors of corner points of a cell
$\mathbf{r}$ = Position vector of the projected point
$\mathbf{U}_j$= Unit vector perpendicular to the side planes of a cone prism
P = Perpendicular distance between the origin and a side plane of the cone prism
$\mathbf{C}_{cell}$=Position vector of the center point of a cell
$\mathbf{P}_{min}$=Position vector of a point which has minimum distance with the center point of a cell
$\mathbf{P}_i$=Position vector of a point of triangular net
dist(A)=Distance fields of model A
dist(B)=Distance fields of model B
dist(A ∪ B)=Union of model A and model B
dist(A - B)=Subtraction of model B from model A
dist(A ∩ B)=Intersection of model A and model B
$dist_{initial}$=Distance fields of initial model
$dist_{mid}$=Distance fields of intermediate model
$dist_{final}$=Distance fields of final target model
u=Parameter for the linear interpolation of distance fields
f(r)=Control function for shape deformation
k=Control coefficient for shape deformation
C=Center point for the modification of distance fields
X=Position vector of a grid point
r=Distance between a grid point and the center point **C**

☞ 접수일: 2007 년 6 월 27 일; 게재승인일: 2007 년 12 월 11 일
교신저자: 대진대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과
E-mail: djyoo@daejin.ac.kr Tel. (031) 539-2031

1. 서론

거리장은 형상모델을 둘러싸고 있는 공간상의 모든 점에서 형상까지의 최소거리를 구해 스칼라장(scalar field)형태로 정의해 놓은 것으로 CAD 와 CG 및 RP 등의 분야에서 폴리곤 모델의 편집 및 해석과 관련된 여러 작업에 널리 사용 되어 왔다. 모델간의 간섭여부 검토와 불리언 연산(Boolean operation) 및 형상간의 모핑(morphing)등 여러 분야에서의 응용 가능성은 여러 연구가들에 의하여 언급되어 왔으나 수 십만 또는 수 백만 개에 달하는 삼각형으로 구성된 대형 폴리곤 모델에 대한 구체적인 적용사례는 아직까지 보고된 바가 없었다. 대형모델에의 적용에 있어 가장 큰 걸림돌은 거리장 계산에 너무 많은 시간이 소요된다는 것이다. 수 백만 혹은 수 천만 개의 그리드(grid) 격자점과 수 십만 또는 수 백만 개에 달하는 삼각망과의 최소거리를 계산한다는 것은 현재의 컴퓨터 성능을 감안해 보더라도 사용하는 알고리즘이 효율적이지 못할 경우에는 수 십 시간 내지는 수 일이 소요 될지도 모르는 막대한 계산량의 문제가 될 수도 있다.

이런 문제점을 해결하기 위하여 거리장 계산을 위한 여러 알고리즘들이 제안되어 왔는데 그 중에서도 스캔 변환방법(scan conversion method)에 기초한 알고리즘들이 거리장 계산에 널리 사용되고 있다.

Mauch[1] 는 삼각망을 구성하고 있는 면과 절점 및 모서리에서 프리즘(prism)과 콘(cone)및 웨지(wedge)등의 특징형상들을 생성 시킨 후 이 형상들을 층별로 스캔하면서 현재의 층 내부에 포함된 격자점들에 대하여 최소거리를 계산해 나아가는 방법을 제안하였다. 같은 특징형상 내부에 존재하는 격자점들은 같은 특징형상에 대하여 최소거리를 갖게 된다는 개념에서 출발한 알고리즘으로서 다루고자 하는 모델의 삼각형의 개수 및 그리드 격자점의 개수등 여러 계산시간과 관련된 변수들을 다양하게 변화시켜가며 제안한 방법의 효용성을 입증하고자 하였다. 그러나 거리값의 부호를 판별하는 방법에 대해서는 언급하지 않았다.

Sigg[2] 등은 Mauch 의 방법을 약간 수정하여 면에 대해서만 특징형상을 생성하고 최종 스캔변환은 그래픽 하드웨어에서 이루어지도록 한 prism scan 방법을 제안하여 계산시간의 단축을 시도하였다. 그러나 역시 이 연구에서도 거리값의 부호 판별에 있어 많은 문제점이 지적되었다.

거리값의 정확한 부호 판별을 위하여 Barentzen[3] 등은 각 절점에서 법선벡터(normal vector)를 구할 때 절점과 연결되어 있는 삼각형들의 모서리들이 이루고 있는 각도를 가중치로 하는 angle weighted pseudo-normal 개념을 제안하고 대형 모델에 적용하여 제안한 부호 판별 방법의 정확성 및 타당성을 검증하고자 하였다.

Gueziec[4] 은 효율적인 거리장 계산을 위하여 형상모델을 이루고 있는 삼각망 데이터를 계층적으로 표현하는 방법과 이와 관련한 여러 탐색 알고리즘을 제안하여 거리장 계산시간의 단축을 시도하였다. 그러나 수 천, 수 만 개의 삼각형으로 이루어진 중소형 모델에 대한 응용 예만 언급 하였고 대형 모델에 대한 적용은 시도 하지 않았다.

Sud[5] 등은 형상 모델을 이루고 있는 primitive 에 대한 Voronoi region 을 구하여 이를 거리장 계산에 사용하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 층(slice) 별로 거리장을 계산하였는데 현재의 층 내부의 격자점에서의 거리장 계산에 영향을 줄 수 있는 primitive 의 선별시 Voronoi region 을 이용하여 계산시간의 단축을 시도하였다.

이 외에도 Frisken[6] 등에 의한 adaptive distance fields 및 Huang[7]등에 의한 complete distance fields 등 거리장 계산과 관련한 많은 연구가 수행되어 왔으나 형상의 정밀도를 위하여 그리드 간격을 다소 조밀하게 할 경우 생성될 수도 있는 수 천만 개에 달하는 격자점들과 수 백만 개의 삼각형으로 이루어진 대형모델과의 거리장 계산을 시도한 연구는 아직 없었다.

본 연구에서는 이런 대형 모델에 대한 거리장 계산이 수 분 내지는 수 십분내에 수행되는 것이 가능하게 하기 위하여 형상모델을 에워싸고 있는 3 차원 공간을 다수의 셀(cell)로 분할하여 계산하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 각 셀 내부의 격자점들과 최소거리를 생성할 가능성이 있는 삼각망 모델중의 절점들을 효율적으로 선별하여 셀 단위로 거리장을 계산하는 방법이다. 제안하고자 하는 방법의 가장 큰 강점은 지금까지 보고된 다른 방법들에 비하여 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있다는 것이며 아울러 대부분의 주요 알고리즘들이 간단한 벡터 연산으로 이루어져 있어 계산의 강건성 또한 크게 향상된다는 것이다.

2. 거리장의 효율적 계산 알고리즘

삼각망으로부터 거리장을 계산한다는 것은 형상모델을 포함하고 있는 3 차원 공간을 수많은 그리드(grid)로 분할한 후 그리드의 각 격자점에서 형상모델까지의 최소거리를 구해 스칼라장(scalar field)을 구성한다는 것을 의미한다. 저자의 선행연구결과를 통하여 보고된 거리장을 이용한 삼각망의 옵셋방법[8]에서는 형상 모델을 포함하는 3 차원 공간을 다수의 셀로 분할한 후 제안한 여러 판별식들에 의하여 옵셋곡면의 일부분이 될 가능성이 없는 셀들은 고려 대상에서 사전에 배제 시킴으로써 계산시간의 단축을 시도한 바 있다. 그러나 모델간의 불리언 연산(Boolean operation), 형상변형(shape deformation), 모핑(morphing)등의 작업에 거리장을 응용할 때에는 선행연구에서 제안한 여러 판별식들을 더 이상 사용할 수 없게 된다. 옵셋문제에서는 옵셋거리에 의하여 유효 셀을 효율적으로 선별할 수 있었지만 불리언 연산, 형상변형, 모핑등의 문제에서는 어떤 셀이 유효 셀로 남게 될는지 판단하기가 쉽지 않다. 결국 다양한 작업에 거리장을 이용하기 위해서는 모든 셀에 대하여 거리장 계산을 수행해야 한다.

따라서 좀 더 체계적이고 효율적인 거리장 계산 알고리즘의 고안이 필요하게 되었는데 본 연구에서는 삼각망 모델의 각 절점에서 인접한 삼각형들로부터 생성된 콘 프리즘(cone prism)과 특정 셀과의 교차여부를 판단하여 셀 내부의 격자점들에 대하여 최소거리를 생성할 가능성이 있는 절점들만을 선별해 내는 새로운 방법을 제안하고자 한다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 삼각망 모델의 각 절점에서 절점과 연결되어 있는 삼각형들에 수직한 콘 형태의 프리즘을 생성한 후 현재의 특정 셀과 이 프리즘의 모든 측면들과의 교차여부를 검토해 보면 특정 셀에 대하여 최소거리를 생성할 가능성이 있는 절점들만을 정확히 선별해 낼 수 있다. 절점 1 에서의 콘프리즘은 모든 셀의 외부에 존재하므로 절점 1 에 연결된 삼각형(2 차원에서는 직선) i 와 j 는 모든 셀에 대하여 최소거리를 생성할 가능성이 없게 되며 절점 2 에서의 콘프리즘은 A 와 B 셀을 통과하므로 삼각형 j 와 k 는 셀 A 와 셀 B 에 대하여 최소거리를 생성할 수 있게 된다. 절점 3 에서의 콘프리즘은 셀 C 를 통과하므로 삼각형 k 와 l 은 셀 C 에 대하여 최소거리를 생성할 수 있는 유효 삼각형들이 될 수 있다. 즉 삼각형 i 는 셀 A, B, C 의 거리장 계산에 전혀 필요가 없음을 알 수 있으며 삼각형 j 는 셀 A 와 셀 B 의 거리장 계산에 삼각형 k 는 셀 A, B, C 의 거리장 계산에 삼각형 l 은 셀 C 의 거리장 계산에 사용 될 수 있음을 사전에 판단할 수 있다. Fig. 2 는 이런 개념을 3 차원적으로 나타낸 것으로 특정셀과 콘프리즘과의 교차 여부는 다음과 같은 판별식을 이용하여 판단할 수 있다.

$$(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_j \geq 0 (1 \leq i \leq 8) \tag{1}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_i + (p - \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{u}_j)\mathbf{u}_j \tag{2}$$

식(2)에서 $\mathbf{u}_j$ 는 콘프리즘의 한 측면에 수직인 단위벡터를 p 는 이 측면과 좌표계 원점과의 수직거리를 의미한다. 특정셀의 8 개의 구석점들이 적어도 콘프리즘의 한 측면과 식(1)의 관계를 만족한다면 특정셀과 현재의 콘프리즘과는 교차하지 않는다는 것을 뜻하며 모든 측면에 대하여 식(1)의 관계가 성립하지 않는다면 셀과 콘프리즘은 교차하고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 특정셀과 각 절점에서의 콘프리즘과의 교차여부를 판단하여 최소거리의 계산에 영향을 줄 절점들을 선별해 내고 최종적으로 선별된 절점들에 연결되어 있는 삼각형들과 각 삼각형들을 구성하고 있는 모서리들에 대하여 최소거리 계산을 수행하게 된다. 셀 내부의 한 격자점과 삼각망과의 최소거리 계산 과정은 본 단락의 끝 부분에서 설명하도록 한다.

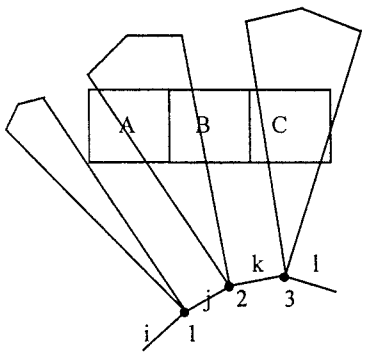


Fig. 1 Simplified two dimensional view of cone prism generated at each vertex

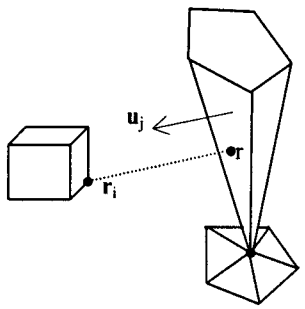


Fig. 2 Three dimensional view of cone prism generated at one vertex

Fig. 3 은 본 연구에서 제안한 거리장 계산 알고리즘의 전체 수행 과정을 보여주고 있다. 형상모델이 입력되면 형상모델이 차지 하고 있는 x, y, z 방향의 최대 범위를 계산한 후 형상을 에워싸고 있는 직육면체 형태의 공간을 복수개의 셀로 분할한다. 이렇게 분할된 각 셀의 중심점과 모든 절점들과의 거리를 구해서 거리의 크기 순서로 절점들을 정렬(sorting)한 후 셀의 크기를 고려하여 일차적으로 선택된 절점들에 대하여 제안한 콘 프리즘 교차알고리즘을 수행하게 된다. 최종적으로 셀을 원하는 허용오차를 고려하여 그리드 형태로 분할한 후 그리드의 각 격자점들과 선별된 삼각망과의 최소거리를 계산함으로써 전 과정이 종료된다. 수십만 또는 수 백만 개에 달하는 많은 수의 절점들을 다루어야 하는 대형 폴리곤 모델의 경우 모든 셀에 대하여 모든 절점들과의 교차 계산을 수행한다는 것은 계산시간 측면에서 볼 때 매우 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 콘 프리즘 교차 알고리즘을 수행하기 전에 셀의 크기를 고려하여 최소거리 생성이 가능한 절점들만을 일차적으로 추려내는 방법을 고안하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 현재 셀의 중심점과의 거리가 최소가 되는 절점 $\mathbf{P}_{min}$ 을 찾아내 그 절점까지의 거리 $distance_{min}$ 을 구하고 셀의 중심점과의 거리가 $distance_{min}$ 에 셀 크기를 더한 거리값보다 작은 절점들만을 찾아내는 방법이다. 즉 어떤 절점 $\mathbf{P}_i$ 가 식(3)의 판별식을 만족한다면 이 절점은 현재 셀의 격자점들과 최소거리를 생성할 수 있는 유효 절점으로 간주된다.

$$\left|\mathbf{C}_{cell} - \mathbf{P}_i\right| \le \left|\mathbf{C}_{cell} - \mathbf{P}_{\min}\right| + cell_size \qquad (3)$$

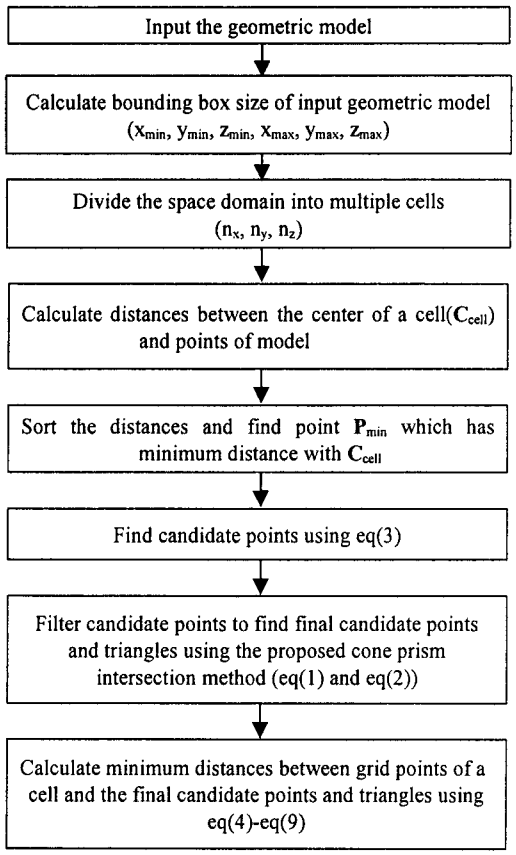


Fig. 3 Flowchart showing the procedures for the calculation of distance fields

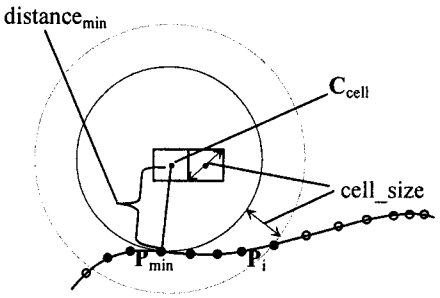


Fig. 4 Extraction of candidate points

셀 내부의 한 격자점과 삼각망과의 최소거리 계산과정은 저자의 선행연구 [8] 에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 간략히 설명하도록 한다. 셀 내부의 한 격자점과 삼각망과의 최소거리를 구하기 위해서는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 삼각형

의 세 절점과 모서리 및 삼각 평면과의 최소거리를 구해서 그 중 가장 작은 값을 선택하면 된다.

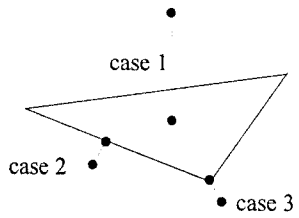


Fig. 5 Three cases for the calculation of minimum distance from a point to a triangle

한 점 $\mathbf{r}_1$ 과 삼각형과의 수직투영점 $\mathbf{r}$ 은 식(4)와 같은 벡터방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 + (\mathbf{p} - \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{u})\mathbf{u} \tag{4}$$

식(4)에서 $\mathbf{u}$ 는 삼각형에 수직인 단위벡터를 p 는 삼각형과 좌표계 원점과의 수직거리를 의미한다. 수직투영점이 현재의 삼각형 내부에 포함되는지의 여부는 Fig. 6 에 나타나 있는 벡터들 간의 다음과 같은 판별식을 이용하여 판단할 수 있다.

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{d}) \cdot \mathbf{u} \geq 0 \tag{5}$$

$$(\mathbf{b} \times \mathbf{e}) \cdot \mathbf{u} \geq 0 \tag{6}$$

$$(\mathbf{c} \times \mathbf{f}) \cdot \mathbf{u} \geq 0 \tag{7}$$

모든 판별식이 만족되면 수직투영점 $\mathbf{r}$ 은 현재의 삼각형 안에 있다는 것을 뜻한다. 한 점 $\mathbf{r}_1$ 과 두 점 $\mathbf{r}_a$, $\mathbf{r}_b$ 로 구성된 직선과의 수직투영점 $\mathbf{r}$ 은 식(8)과 식(9)와 같은 벡터방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda = (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_a) \cdot \frac{\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a}{|\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a|} \tag{8}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_a + \lambda \frac{\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a}{|\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a|} \tag{9}$$

λ 가 0 와 $|\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a|$ 사이에 있으면 투영점이 직선상에 존재한다는 것을 의미한다. 한 점과 삼각형들의 각 꼭지점들과의 최소거리는 점들과의 거리를 구해 최소가 되는 거리를 선택하면 된다.

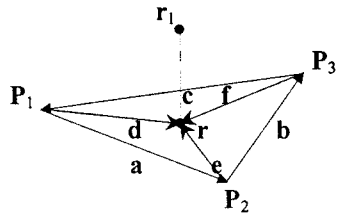


Fig. 6 Perpendicular projection of a point onto a triangle

3. 거리장의 응용

3.1 거리장을 이용한 형상간의 불리언 연산

일단 형상모델들에 대한 거리장이 계산되면 형상모델간의 불리언 연산이 용이해진다. 두 모델간의 합 과 차 및 교차 계산들이 거리장의 간단한 조작에 의하여 수행될 수 있다. 두 모델 A 와 B 간의 합성은 식(10)과 같이 두 모델의 각 격자점에서 거리값을 비교하여 큰 값으로 대체한 후 거리가 0 인 면을 마칭큐브알고리즘 [9,10] 에 의하여 재생성 하면 된다.

$$dist(A \cup B) = \max(dist(A), dist(B)) \tag{10}$$

A 모델에서 B 모델을 빼내는 작업은 식(11)과 같이 두 모델의 각 격자점에서 A 모델의 거리값과 B 모델의 음의 거리값을 비교하여 작은 값으로 대체하면 되고 두 모델간의 교차 모델을 생성하는 작업도 식(12)와 같은 거리장의 간단한 수정으로 이루어진다.

$$dist(A - B) = \min(dist(A), -dist(B)) \tag{11}$$

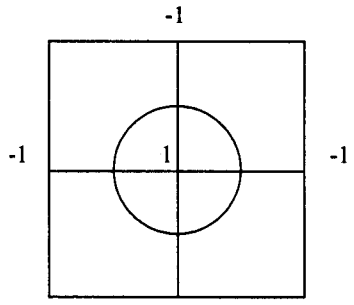
$$dist(A \cap B) = \min(dist(A), dist(B)) \tag{12}$$

3.2 거리장을 이용한 형상모델의 변형

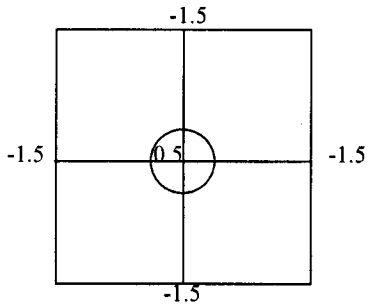
거리장은 형상 모델링의 여러 분야에 적용될 수 있는데 특히 형상모델의 전체적 또는 국부적 형상변형에 유용하게 이용될 수 있다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이 격자점에서의 거리장 값을 변화시킴으로써 기존의 형상을 자유자재로 변형시킬 수 있다. Fig. 7(b)에서와 같이 균일하게 축소시키고 Fig. 7(c) 에서와 같이 불 균일하게 변형시키는 것도 거리장의 간단한 조작에 의하여 가능해진다.

변화된 격자점에서의 거리장 값에 대하여 거리

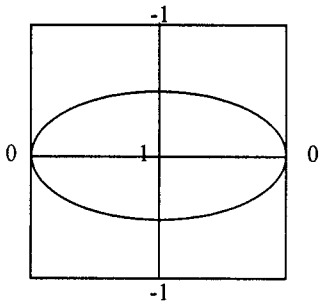
값이 0 인 선을 가시화 해 보면 원래의 원은 축소도 되고 타원처럼 변형되기도 한다. 간단한 변형은 기존의 그래픽 좌표 변환기법에 의해서도 가능하지만 원하는 변형형태가 복잡해지면 좌표 변환 기법만으로는 해결이 불가능해 진다.



(a) Original model



(b) Uniform deformation



(c) Non-uniform deformation

Fig. 7 Shape deformation using distance fields

3.3 거리장을 이용한 형상모핑

거리장은 형상 모델링의 주요분야중의 하나인 형상간의 모핑작업에 이용될 수 있는데 식(13)에서와 같이 초기모델에서 목표모델로 변화하는 과정중의 중간형태의 모델을 두 모델의 거리장에 관한 간단한 선형방정식으로부터 구할 수 있다.

$$dist_{mid} = (1-u)\cdot dist_{initial} + u \cdot dist_{final} \qquad (13)$$

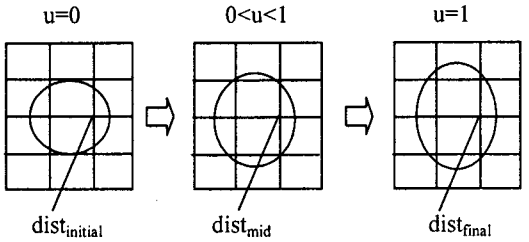


Fig. 8 Morphing using distance fields

Fig. 8 에서 보는 바와 같이 모든 격자점에서 초기모델의 거리값과 목표모델의 거리값을 선형 보간함으로써 중간단계의 모델들을 연속적으로 구할 수 있다.

4. 적용 및 결과

Fig. 9 는 구와 Armadillo 모델에 대한 불리언 연산결과를 보여주고 있다. 기존의 Armadillo 모델에 구 형상을 더하고 빼는 작업이 복잡한 교차선 계산에 의한 기존 모델들의 수정 없이 거리장의 간단한 조작에 의하여 가능함을 확인하였다.

Fig. 10 은 61 만여개의 삼각망으로 구성된 남성 모델과 49 만여개의 삼각망으로 구성된 여성모델을 합한 후 15mm 옵셋 한 후의 결과를 보여 주고 있다. 110 만여개의 삼각망 모델에 대하여 공간을 17 x 7 x 58 의 셀로 분할하고 다시 각 셀을 18 x 17 x 18 의 그리드로 분할하여 약 3,800 만여개의 격자점에 대하여 거리장 계산을 수행하였다. 110 만여개의 삼각망으로 구성된 대형모델에 대해서도 거리장 계산에 소요되는 시간이 40 여분 밖에 소요되지 않을 정도로 계산시간 측면에 있어서 매우 효율적임을 확인할 수 있었다. 옵셋 곡면은 거리장이 15mm 인 면을 마칭큐브 알고리즘에 의하여 가시화 하였다.[8]

Fig. 11 은 Armadillo 모델에 국부적 변형을 가한 후의 결과들을 보여주고 있다. 본 연구에서는 기존모델에 변형을 주기 위하여 식(14)와 식(15)와 같은 어떤 중심점 **C** 로부터 현재의 격자점 **X** 까지의 거리 r 에 관한 함수를 사용하였다.

$$f(r) = \frac{k}{r^2} \quad \text{or} \quad f(r) = \frac{k}{r^3} \tag{14}$$

$$r = |\mathbf{X} - \mathbf{C}| \tag{15}$$

Fig. 11 의 위의 그림들은 중심점 **C** 를 몸체의 중앙부분에 위치시킨 후 비례상수 k 값을 변화시켜 가며 형상을 연속적으로 변형시킨 후의 결과를 보여주고 있다. 격자점 **X** 에서의 거리값을 현재의 거리값에서 식(14)와 식(15)에 의하여 계산된 f(r) 값을 뺀 값으로 대체하면 거리의 제곱에 반비례되게 거리값을 연속적으로 변화시킬 수 있으며 이는 결과에서 보는 바와 같이 형상의 연속적인 변형을 가능하게 한다. Fig. 11 의 아래의 그림들은 중심점 **C** 를 머리부분에 위치시킨 경우의 변형결과를 보여주고 있다. 이와 같이 변형중심점의 위치와 거리값 수정함수 및 비례상수 등의 조절에 의하여 사용자가 요구하는 다양한 목표형상을 구현할 수 있다.

Fig. 12 는 같은 방법으로 남성모델에 변형을 가한 예로서 중심점을 복부 근처에 두고 k 값을 변화시켜 가며 변형시킨 후의 결과를 보여주고 있다. 이 예에서는 r 의 세제곱에 반비례 되게 거리값을 수정하였다. 61 만여개의 삼각망 모델에 대하여 공간을 17 x 7 x 29 의 셀로 분할하고 다시 각 셀을 18 x 17 x 18 의 그리드로 분할하여 약 1,900 만여개의 격자점에 대하여 거리장 계산을 수행하였다.

Fig. 13 은 구가 Armadillo 모델로 변화해 가는 모핑과정을 식(13)의 두 모델의 거리장에 관한 선형방정식을 이용하여 계산해 본 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 거리장의 선형 보간에 의하여 자연스럽게 변화해 가는 중간모델들의 생성이 가능함을 확인할 수 있었다. 44 만여개의 삼각망 모델에 대하여 공간을 15 x 8 x 25 의 셀로 분할하고 다시 각 셀을 16 x 16 x 16 의 그리드로 분할하여 약 1,200 만여개의 격자점에 대하여 거리장 계산을 수행하였다.

Table 1 은 본 연구에서 다루었던 모든 적용예제에 대한 계산시간을 정리해 놓은 것이다. Table 1 에서 보는 바와 같이 일단 거리장이 계산되면 불리언 연산과 형상변형 및 모핑등에 소요되는 시간은 거리장 계산에 비하여 매우 작음을 알 수 있다.

Table 2 는 지금까지 보고된 다른 방법들과 본 연구에서 제안한 방법의 계산시간을 비교 정리해 놓은 것이다. 지금까지 보고된 다른 연구들에 있어서는 30 여만개의 삼각형으로 구성된 모델이 가장 큰 모델이었고 각 방법들에서 다루었던 모델의 형상 및 위상정보 또한 크게 다르기 때문에 정확한 비교는 힘들 것으로 판단되었다. 따라서 계산시간은 삼각형의 수와 격자점수에 비례한다는 가정하에 본 연구에서 다루었던 61 만개의 삼각형으로 구성된 남성모델에 대한 계산시간을 1 로 보고 이에 대한 상대적인 비율로 표시하였다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 적게는 수 배에서 많게는 수 백배에 이를 정도로 계산시간이 크게 단축되었음을 확인할 수 있었다.

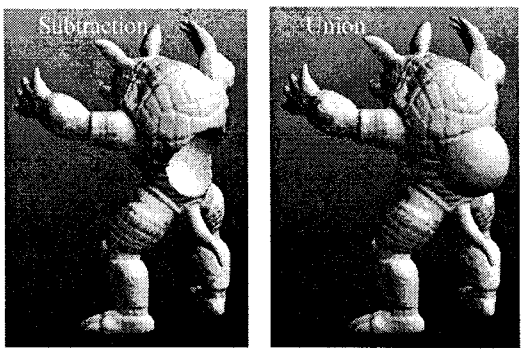


Fig. 9 Boolean operations between a sphere and Armadillo model

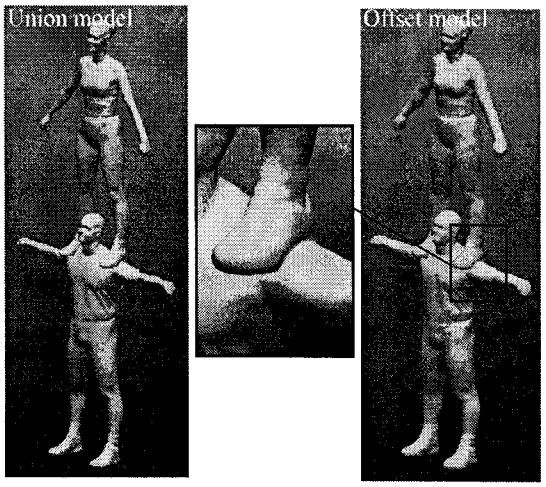


Fig. 10 Offsetting of union model of a man and an woman

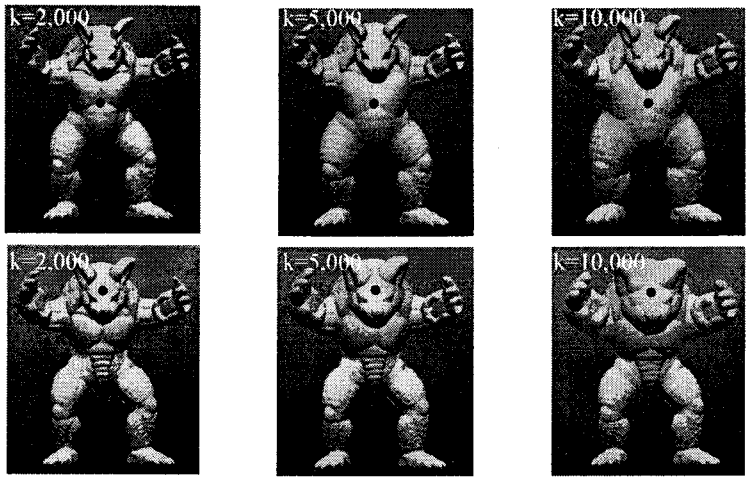


Fig. 11 Shape deformation of Armadillo model

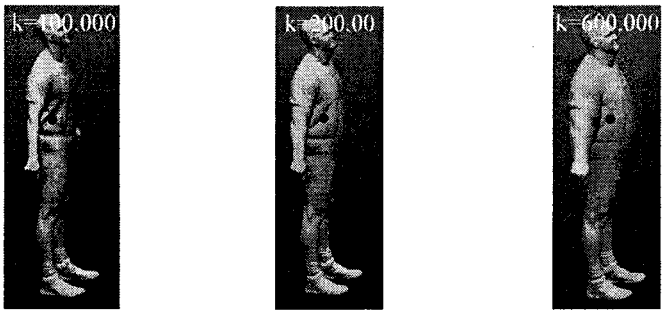


Fig. 12 Shape deformation of human model

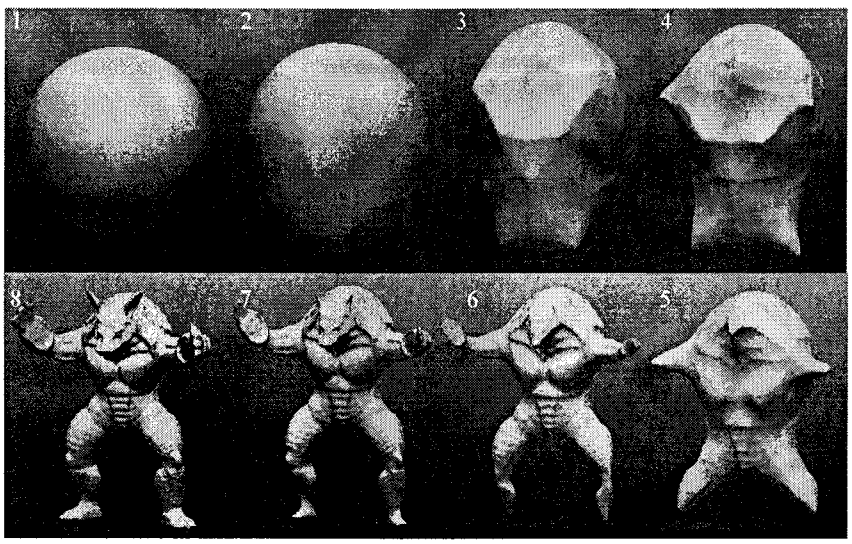


Fig. 13 The morphing results from a sphere to Armadillo

Table 1 Computational results

(H/W : Pentium Ⅳ, 3 GHz CPU, 512MB RAM)

Process	Case	Number of triangles of deformed model		Time(sec)	
				Calculation of process	Calculation of distance fields
Boolean operation	Union	466,734		34	497
	Subtraction	461,707		33	
Shape deformation	Armadillo Model (upper)	k=2,000	501,223	36	327
		k=5,000	612,371	42	
		k=10,000	723,443	50	
	Human model	k=100,000	620,541	109	830
		k=200,000	715,643	113	
		k=600,000	820,320	118	
Morphing	1	39,152		5	497
	5	235,286		16	
	8	452,397		32	
Offsetting	Union model of man and woman	1,408,398		210	2,412

Table 2 Comparison of running time with earlier methods

Methods	Model	Triangles	Resolution	Time(sec)	Time ratio
Mauch[1]	Head	21,764	78 x 105 x 128 (1,048,320)	201.12	123.3
Sigg et al.[2]	Head	21,764	78 x 105 x 128 (1,048,320)	16.76	10.3
Sud et al.[5]	Head	21,764	78 x 105 x 128 (1,048,320)	4.98	3.1
Barantzen et al.[3]	Dragon	276,680	128 x 128 x 128 (2,097,152)	244.19	5.9
Gueziec[4]	Bart	9,000	64 x 64 x 64 (262,144)	167	182.0
Suggested method	Man	610,848	306 x 119 x 522 (19,008,108)	830	1.0

5. 결론

거리장을 생성하고자 하는 삼각망 모델의 각 절점에서 콘 형태의 프리즘과 특정셀의 교차여부 판단을 통하여 현재 셀의 격자점들과 최소거리를 생성할 가능성이 있는 유효절점들만을 효율적으로 선별해 내는 방법을 제안하여 대형 모델에 대한 거리장의 응용이 가능하도록 계산시간을 단축시켰다. 아울러 형상모델간의 불리언 연산과 기존모델의 변형 및 형상간의 모핑등 다양한 응용분야에 적용하여 본 연구에서 제안한 제반 알고리즘의 효용성 및 타당성을 검증하였다.

참고문헌

1. Mauch, S., "Efficient algorithms for solving static hamilton jacobi eguations," Ph. Dr. thesis, Caltech, 2003.
2. Sigg, C., Peikert, R. and Gross, M., "Signed distance transform using graphics hardware," In Proceedings of 14th IEEE Visualization, IEEE Computer Society Press , pp. 83-90, 2003.
3. Barentzen, J. A. and Aanas, H., "Signed distance computation using the angle weighted pseudo-normal," Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 11, No. 3, pp. 243-253, 2005.
4. Gueziec, A., "Meshsweeper : Dynamic point-to-polygonal mesh distance and applications," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 7, No. 1, pp. 47-60, 2001.
5. Sud, A., Otaduy, M. A. and Manocha, D., "DiFi : Fast 3D distance field computation using graphics hardware," In Proc. of Euro-graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 557-566, 2004.
6. Frisken, S. F., Perry, R. N., Rockwood, A. P. and Jones, T. R., "Adaptively sampled distance fields : a general representation of shape for computer graphics," In Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer graphics and Interactive Techniques, pp. 249-254, 2000.
7. Huang, J., Li, Y., Crawfis, R., Lu, S.C. and Liou, S. Y., "A complete distance field representation," In Proceedings of Visualization, pp. 247-254, 2001.
8. Yoo, D. J., "Offsetting of triangular net using distance fields," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 148-157, 2007.
9. Yoo, D. J., "A Study on Filling Holes of Large Polygon Model using Implicit Surface Scheme and Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 174-184, 2006.
10. Yoo, D. J., "Shape Reconstruction from Unorganized Cloud of Point using Adaptive Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 89-99, 2006.