

옥트리 알고리즘을 이용한 절삭 시뮬레이션 시스템의 개발

김용현*, 고성림**

Development of a Cutting Simulation System using Octree Algorithm

Kim, Y.-H.* and Ko, S.-L.**

ABSTRACT

Octree-based algorithm is developed for machining simulation. Most of commercial machining simulators are based on Z map model, which have several limitations to get a high precision in 5 axis machining simulation. Octree representation is three dimensional decomposition method. So it is expected that these limitations be overcome by using octree based algorithm. By using the octree model, storage requirement is reduced. And also recursive subdivision was processed in the boundaries, which reduces useless computation. The supersampling method is the most common form of the anti-aliasing and usually used with polygon mesh rendering in computer graphics. Supersampling technique is applied for advancing its efficiency of the octree algorithm.

Key words : CAM(캠), NC Verification(NC 코드 검증), Machining simulation(모의 가공), Z map(Z 맵), Octree(옥트리), Antialiasing(안티앨리어싱), Supersampling(수퍼샘플링)

1. 서 론

CAM 소프트웨어에서 생성되는 NC Code에 존재하는 잠재적인 오류가능성은 제품의 생산성, 품질, 비용 등에 손실을 가져오게 된다. 특히 최근 가공 기술의 발달로 널리 행하여지고 있는 고속가공은 고속 회전 고속 이송으로 소재를 제거하기 때문에 급작스러운 절삭력의 변화는 제품 뿐만 아니라 공작 기계에도 치명적인 결과를 초래하게 된다. 따라서 소재 제거율(Material Removal Rate)을 일정하게 유지하면서 가공을 진행하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 CAM 시스템에서 모의 가공을 수행하고, NC Code의 여러 유무를 검증하는 기능의 중요성이 점점 더 커지고 있는 실정이다.

NC 데이터의 검증과 가공 시뮬레이션에 이용되는 대표적인 모델로 Chappel^[1]에 의하여 제안된 Vector Clipping 기법이 있다. 이 방식은 5축 가공 시뮬레이션이 가능하고 vector의 최종 길이로부터 과절삭, 미

절삭 부위의 탐색이 가능하다는 장점이 있지만 최종 부품 형상의 Solid Model 생성이 불가능하고 표면의 normal vector 방향이 급속하게 변하는 부품 가공에는 적절하지 못하다는 한계성을 갖는다. Vector clipping 기법은 Jerard^[2], Norrie^[3] 등에 의하여 그 기능이 확장되었다.

가공중의 절삭거동을 보다 정확하게 예측하기 위한 수단으로 CSG나 B-Rep에 기초한 Solid modeling 기반의 시뮬레이션 시스템이 시도되고 있으나 부품 형상이 복잡할수록 계산 시간과 메모리의 사용량이 급격히 증가하여 오류가 발생하기 쉽다는 단점이 있다^[4].

Anderson^[6]에 의해 제안된 Z map은 대부분의 상용 CAM System의 NC Code 검증 및 시뮬레이션에 사용되고 있다. Z map은 자료구조의 단순성과 완결성으로 인하여 계산 속도가 빠르고 오류 발생의 가능성이 상대적으로 낮다는 장점을 갖고 있다. 그러나 메모리 구조의 특성상 정밀도를 높이기 어렵기 때문에 측벽 가공이나 고속가공과 같이 가공량이 매우 작은 경우에는 큰 오차가 발생한다는 한계가 존재한다. 또한 5축 가공 시뮬레이션 등 3차원 공간상의 불체를 표현하는 데에도 많은 제약이 따른다.

이러한 Z map에 존재하는 구조적인 단점을 보완하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Wang^[7]은 Z

*학생회원, 건국대학교 기계설계학과
**건국대학교 기계항공공, Center for Advanced E-System
Integration Technology
- 논문투고일: 2004. 07. 15
- 심사완료일: 2004. 10. 20

축으로 여러개의 값을 갖는 것을 허용하는 Extended Z map을 제안하였다. 따라서 3차원 공간상의 복잡한 형상의 표현, 5축 가공 시뮬레이션 등을 가능하게 하였다. Van Hook^[8]는 Wang의 모델을 발전시켰다. 특히, Lee^[9] 등이 제안한 Enhanced Z map 모델은 그래픽 시뮬레이션에 주로 사용되는 antialiasing 방법을 적용하여 메모리 사용량을 늘리지 않고서도 정밀도의 향상을 가능하게 하였다.

Z map 모델이 갖는 한계에 대한 대안으로 Voxel, Octree와 같은 3차원 Decomposition 모델을 사용할 수 있다. Decomposition 모델은 공간상의 3차원 물체를 cubic의 집합으로 표현하는 방식으로, 어떠한 복잡한 형상의 object도 근사적으로 표현 가능하다는 장점을 갖는다. Voxel^[10]이 동일한 크기의 cubic으로 object를 표현하는 방식이라면, Octree는 공간 분할 방식을 달리함으로써 상대적으로 Object에 필요한 메모리를 줄였다. 또한 3차원 물체의 계층적 묘사가 가능하기 때문에 트리 탐색을 활용하여 계산적인 면에서도 효율성을 높일 수 있다. 따라서 Octree는 컴퓨터 그래픽스의 응용분야, CAD, 의학분야 등 매우 다양한 분야에서 3차원 물체의 효율적 표현기법으로 활용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 절삭 영역 탐색에 Octree 알고리즘을 적용해 보았다. Octree 알고리즘을 적용한 가공 시뮬레이터를 Visual C++를 이용하여 개발하고, 절삭 영역 예측을 수행하였다. 정밀도의 향상과 계산시간의 단축을 위하여 Octree 모델에 antialiasing 기법을 적용한 모델을 개발하고, 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다. 또한 기존 2차원 방식인 Z map과 Z map에 antialiasing 기법을 적용한 Enhanced Z map 모델과의 비교를 통하여 그 성능을 검증해 보았다.

2. Octree 알고리즘

2.1 개요

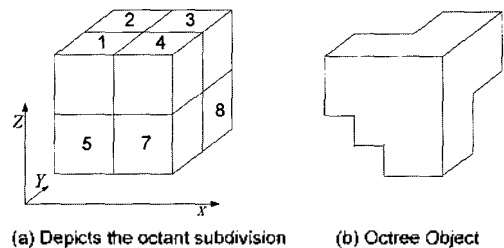
Voxel과 같은 공간 분할 기법(Space Subdivision Technique)은 3차원 공간상의 물체를 동일한 크기의 셀(cell)들의 집합으로 모델링하는 것이다. 표현하려는 물체가 곡면 경계를 갖고 있다면 모델의 정확도는 셀의 크기에 따라서 결정되므로, 셀의 크기가 작을수록 보다 높은 정밀도를 갖게 된다. 그러나 정밀도를 높이기 위해서 셀의 크기를 줄이게되면 계산시간과 메모리 소모량이 증가하게 된다는 단점이 함께 존재한다^[11].

Octree 표현법은 이러한 단점을 극복하기 위하여 모델을 각각 다른 크기의 셀로 구성하여 표현하는 방식

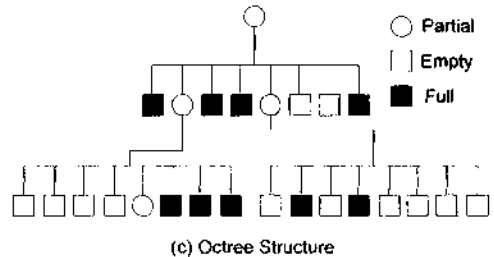
이다. 즉 표현하고자 하는 물체의 경계에서 재귀적으로 분할하는 계층적 구조를 갖게 된다. 따라서 voxel과 비교하여 적은 메모리 소모와 계산 시간으로 높은 정밀도를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

2.2 Octree의 정의와 분할 알고리즘

Octree를 구성하기 위해서는 Fig. 1(a)와 같이 표현하고자 하는 물체를 완전히 둘러싸는 정육면체를 정의한다. 이 정육면체를 Root Octree라 한다. Root Octree를 8개의 동일한 크기의 정육면체로 분할한다. 이 8개의 동일한 크기의 정육면체를 Octant라 한다^[12].



(a) Depicts the octant subdivision (b) Octree Object



(c) Octree Structure

Fig. 1. Octree representation.

Octree의 노드는 3가지 type으로 분류한다 : Black(Full), White(Empty) 그리고 Gray(Partial) 노드. 한번의 분할이 수행되면 각각의 노드를 검사하여 표현하고자 하는 object가 노드를 완전히 점유하고 있으면 Black(full)로, 점유하고 있지 않으면 White(empty)로 object가 부분적으로 점유하고 있다면 Gray로 설정한다. 이 중 Object가 부분적으로 노드를 점유하고 있는 gray node에서만 재귀적으로 분할이 진행되게 된다.

분할 종료조건은 2가지 경우가 있다. 하나는 노드가 object에 의해 완전히 점유될 때까지 즉 Black node가 되는 경우 분할이 종료되고, 다른 하나는 최소 허용 셀크기보다 octant의 크기가 작아지는 경우 분할이 종료된다.

모든 분할이 종료되면 Fig. 1(c)와 같은 트리 구조를 갖게 되는데, 이 트리를 child node의 개수가 8개이기 때문에 octree라 한다.

3. Antialiasing 이론

3.1 픽셀 표현방식에서의 aliasing 효과

컴퓨터 모니터와 같은 픽셀 표현방식에서는 이산화 된 개개의 픽셀들의 집합으로 연속적인 도형을 표현 한다. 각각의 픽셀들은 Fig. 2에서와 같이 일정한 간 격을 두고서 위치하고 있다. 픽셀 표현법에서 도형은 각 픽셀의 중앙에서만 검출하게 된다. 즉, 표현하고자 하는 물체에 픽셀의 중심이 위치할 때에만 도형을 표현하기 때문에 물체를 근사적으로 표현할 수 밖에 없다. 이러한 픽셀 표현법에서 발생하는 오차를 Fig. 2 는 잘 보여준다. 실제의 물체는 Fig. 2의 그래프에서 점선으로 나타나지만, 픽셀 표현방식에서 검출되는 물 체는 계단형으로 오차가 발생하게 된다. 이때 정밀도 를 증가시키기 위해서는 픽셀 사이즈를 감소시켜야 하는데 Fig. 2(b),(c)에서 보듯이 정밀도가 2배, 4배 증가할 때 픽셀의 개수는 4배, 16배로 기하급수적으 로 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 픽셀사이 즈의 증가는 메모리의 사용과 계산 시간의 증가를 의 미한다.

픽셀 표현 방법에서 수평 정밀도는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 항상 $gridsize/2$ 의 최대 오차를 갖게 되며, 이러한 문제가 발생하는 근본 원인은 하나의 픽셀에 단 하나의 검출점이 존재하기 때문에 발생하는 aliasing 효과에 기인한다.

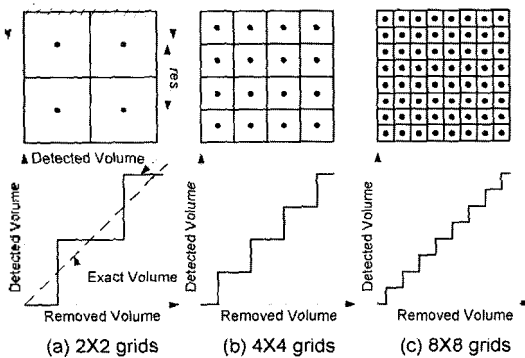


Fig. 2. Relations between resolution of Boolean operation and grid size in conventional Z map model.

3.2 Supersampling 기법

아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어줄 때 낮은 주파수로 샘플링을 하면 신호 왜곡 현상이 나타나는데 이러한 현상을 aliasing이라고 한다. 이미지의 경우에는 가장자리가 톱나바퀴처럼 들쭉날쭉 계단과 같은

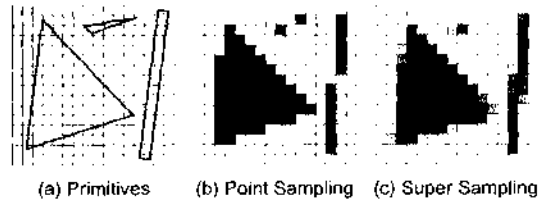


Fig. 3. Comparison between aliased and antialiased image. Note that the square area represents each pixel.

효과가 나타나는 것을 뜻한다.

컴퓨터의 모니터, 비트맵 그래픽 방식 모두 이산화 된 작은 사각형(픽셀)들의 집합으로 도형을 표현하게 된다. 이러한 픽셀들을 모아서 곡선이나 이미지를 표현하는 데에는 원래의 이미지를 오차없이 표현하기가 불가능하다. 즉, Fig. 3(b)에서 보여지는 바와 같이 테 두리 부분에서 거친 계단 현상이 나타난다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 방안이 제시되었는데, 기본적인 아이디어는 도형을 픽셀의 중심에서만 검출하는 대신에 각 픽셀의 면적에 대하여 도형이얼마나 넓게 분포하고 있는지 계산하여 그 영향을 전체 픽셀에 평균값으로 반영하는 것이다^{[3],[4]}. 이러한 기법을 Supersampling이라 한다. 즉, 배경색과 이미지 색상의 중간 색상을 경계선에 단계적으로 채 워줌으로써 경계선을 부드럽게 만들어 주는 기능이다.

Fig. 4는 일반적인 픽셀 표현법인 point sampling 방식과 Supersampling 방식을 보여주고 있다. 만약 물체

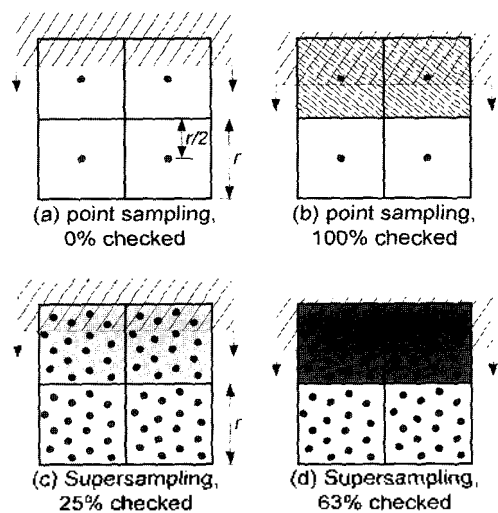


Fig. 4. Increase of resolution at each pixel by supersampling algorithm. Note that the square area represents one pixel ($r = grid\ size$).

가 Fig. 4(a)와 같이 놓여있다면 point sampling 방식에서는 물체가 검출되지 않는다. 물체가 검출점의 외부에 존재하기 때문이다. 반면에 Fig. 4(b)와 같은 위치에 놓여있는 경우에는 그 픽셀을 전부 점유하고 있는 형태로 나타나게 된다. Fig. 4(c),(d)는 supersampling을 적용했을 때의 표현 방식을 보여주고 있다. 즉, 하나의 픽셀에 두개 이상의 검출점을 배치하여 물체를 검출하고, 검출된 계산치의 평균값을 각 픽셀에 퍼센트로 반영해주는 것이다. 이러한 supersampling 기법을 적용하면 테두리가 불분명해지고 실제 도형보다 확장되어 보인다는 단점이 있지만, 도형의 형상이 픽셀에 미치는 영향이 고려되고 시각적으로도 훨씬 비러하기 때문에 현재 대부분의 graphic library와 video adapter에 기본적인 화면 개선 알고리즘으로 표준화되어 장착되어 있다^[15]. Fig. 3(c)는 supersampling을 적용하여 표현된 도형의 예를 보여주고 있다.

3.3 Octree with Supersampling 모델

Octree 모델은 decomposition 방식으로서 픽셀 표현 방식과 동일한 한계점이 존재한다. 즉, 높은 정밀도를 얻기 위해서는 계산시간과 메모리 소모가 급격하게 증가한다. 또한 경계부분에서 aliasing의 문제가 존재하여 정확한 절삭영역 예측에 한계가 존재한다.

이러한 decomposition 모델의 문제점을 해결하기 위하여 Lee^[7]는 Z map model에 supersampling 방식을 적용한 Enhanced Z-map 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 Octree 모델에 supersampling 기법을 적용하였다. 즉 object의 경계에 대해서만 보다 많은 수의 검출점을 배치하여 검출된 점의 갯수를 절삭영역의 예측에 반영하였다.

4. 적 용

Octree 알고리즘을 이용한 절삭 영역 예측 모델의 검증을 위하여 절삭 시뮬레이션 프로그램을 Visual C++를 이용하여 수행하였다. 개발된 프로그램은 NC Code로 부터 공구의 envelope를 추출한 후, 절삭 영역에 대한 재귀 분할을 수행한다. 시뮬레이션 결과를 그래픽으로 보여주기 위하여 open inventor를 사용하였다. Fig. 5는 간단한 측벽 가공과 홈가공을 평앤드밀과 볼앤드밀을 사용하여 가공한 결과를 보여주고 있다.

개발된 Octree 알고리즘의 검증을 위하여 $\phi 4$ 평앤드밀과 볼앤드밀을 이용한 홈 가공 시뮬레이션을 수

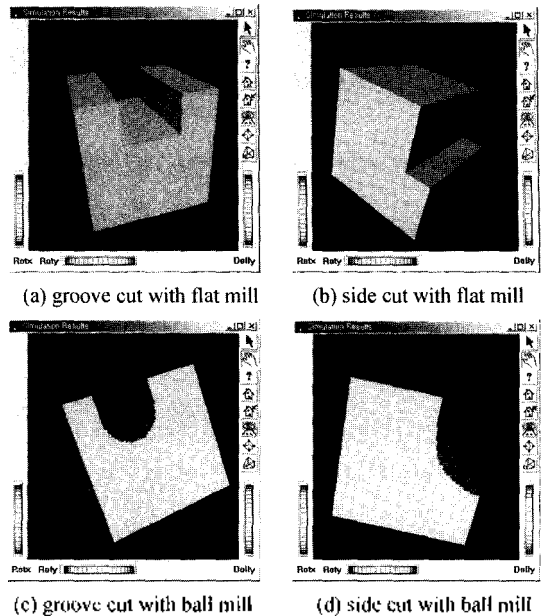


Fig. 5. Simulations with various conditions.

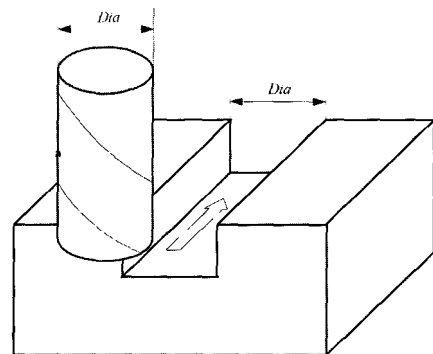


Fig. 6. Scheme of Simulation.

행하였다. Fig. 6은 수행한 시뮬레이션의 개략도를 보여준다. 다양한 cell 크기에서의 절삭영역 예측 결과의 비교를 위해서 0.5 mm, 0.3 mm 그리고 0.1 mm의 세 가지 경우에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 더욱 향상된 결과를 위하여 경계영역에 대해서만 supersampling 기법을 적용하였다.

Octree 모델은 3차원 모델링 기법이다. 상용 소프트웨어에 널리 사용되고있는 2차원 모델링 기법인 Z map과의 성능을 비교하기 위해서 일반적인 Z map 모델과 Z map에 supersampling 기법을 적용한 Enhanced Z map 모델과의 비교를 수행하였다. Table 1에 수행한 시뮬레이션 조건이 나타나 있다.

Table 1. Simulation condition

Tool	φ4 Flat Endmill, φ4 Ball Endmill
Grid Size	0.5 mm, 0.3 mm, 0.1 mm
Applied model	Conventional Z map
	Enhanced Z map
	Classical Octree
	Advanced Octree

Fig. 7, 8은 단위 길이당 소재 제거율(MRR)의 정확해와 Table 1에 나타나 있는 4개의 모델에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 또한 Fig. 9는 실제 가공 영역과 예측 결과와의 오차를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터, 평엔드밀과 볼엔드밀 모두 더 작은 셀크기에서 보다 높은 예측 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 특히 Octree 모델은 셀크기의 변화에 따라 예측결과가 크게 차이가 난다. 0.5 mm와 0.3 mm에서는 다른 모델에 비하여 큰 오차를 보여주지만, 0.1 mm에서는 거의 정확해에 가까운 결과를 얻었다. 또한 Octree 모델에 supersampling 기법을 적용한 경우는 주목할만한 결과가 얻어졌다. 즉, 셀크기와는 무관하게 거의 정확한 예측결과를 얻을 수 있었다.

같은 셀크기에서의 각각의 모델들의 예측 결과를 비교해보면, Octree with supersampling 모델이 평엔드밀과 볼엔드밀 모두에서 우수한 결과가 얻어졌다. 특히 Octree with supersampling 모델이 셀크기와 무

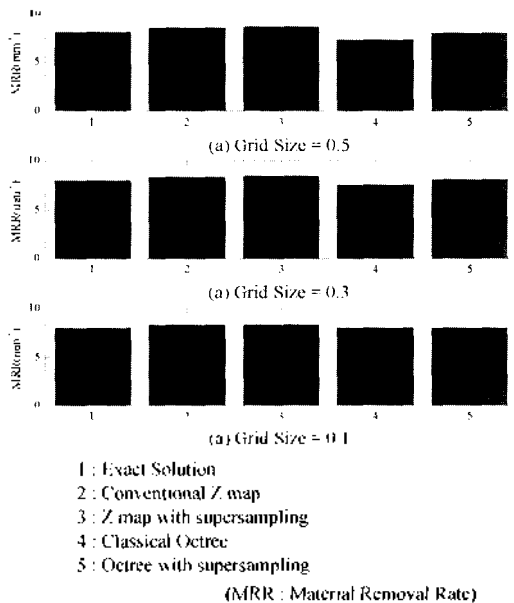


Fig. 7. Prediction of Material Removal Volume with φ4 Flat Endmill.

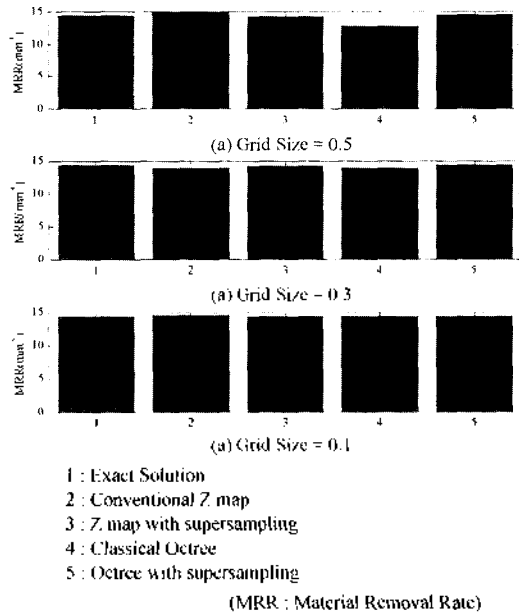


Fig. 8. Prediction of Material Removal Volume with φ4 Ball Endmill.

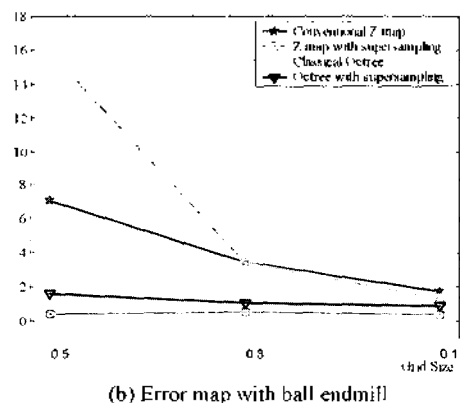
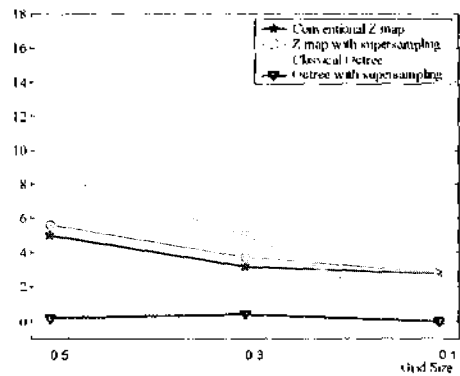


Fig. 9. Error map with Simulation results.

Table 2. Comparison of computation time in simulating by octree model without and with supersampling

			Grid Size (mm)		
			0.5	0.3	0.1
Flat E/M	Without supersamp.	Time	351	3107	22979
		Error	8.59	5.018	0.034
	With supersamp.	Time	380	2823	2164
		Error	0.221	0.473	0.016
Ball E/M	Without supersamp.	Time	531	4844	39570
		Error	15.88	3.43	1.33
	With supersamp.	Time	656	5365	39635
		Error	1.626	1.064	0.918

(Time : millisecond)

관하게 우수한 결과가 얻어졌다고 하는 것은 이 방법이 가공 시뮬레이션에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주는 결과라 하겠다.

Octree 모델과 Octree with supersampling 모델의 계산 시간과 셀크기와의 관계를 비교해 보았다. Table 2는 다양한 셀크기에서 각각 모델의 계산 소요 시간과 예측 결과를 보여주고 있다. 같은 셀크기에서 supersampling을 적용한 Octree 모델이 좀더 많은 계산 시간이 소요되었지만, 그 차이는 크지 않다. 반면, 오차의 경우는 매우 큰 차이를 보여주고 있다. 셀크기 0.5 mm에서 supersampling을 적용한 모델은 10~40배 더 정밀한 예측 결과를 보여주고 있다. 0.1 mm 셀크기에서도 supersampling을 적용한 Octree 모델이 보다 나은 예측 결과를 보여주고 있지만 0.5 mm에서와 같이 커다란 차이는 아니다. 이 결과로 부터 supersampling을 적용한 Octree 모델은 계산시간의 소요없이 보다 큰 셀크기에서도 비교적 정확한 예측결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Octrec 알고리즘을 가공 시뮬레이션에 적용해 보았다. Octrec는 3차원 모델링 방법으로서 2차원 모델링 방법이 갖고있는 복잡한 형상의 표현하는데 따르는 문제 등의 한계성을 극복할 수 있다. 또한 Octree 모델은 경계 부분에서만 분할이 재귀적으로 진행되기 때문에 계산시간과 메모리 사용량의 낭비를 줄이면서 높은 정밀도의 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 정밀도의 향상을 위해서 supersampling 기법을 Octrec 모델에 적용하였다.

4가지 종류의 모델 - Z map, Enhanced Z map,

Octree, Octree with supersampling - 에 대한 시뮬레이션을 다양한 cell 크기에서 수행하였다. Octree 모델은 0.1 mm cell에서는 기존의 Z map, Enhanced Z map보다 정밀한 결과가 얻어졌다. 그러나 보다 큰 셀크기에서는 더 낮은 정밀도가 얻어졌다. 따라서 Octree 모델을 이용하여 정밀한 결과를 얻기 위해서는 충분한 계산시간과 메모리가 소요되어야 함을 알 수 있다.

Supersampling을 적용한 Octree 모델은 셀크기에 무관하게 좋은 예측 결과를 보여주고 있다. Octree with supersampling 모델은 0.5 mm 셀크기에서 Octree 모델과 거의 유사한 계산시간에 10~40배 정도의 정밀한 예측결과를 보여주고 있다.

Decomposition model에 있어서 문제점은 높은 정밀도를 얻기 위해서는 셀크기를 줄여야 한다는 것이었다. 따라서 많은 계산시간과 메모리 소모가 필요했다. 제안된 octree with supersampling 모델은 이러한 한계점에 대한 대안을 제시한다. 이 방식은 보다 적은 메모리 소모와 계산시간으로 높은 정밀도를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단 선도연구자 과제(D00480) 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

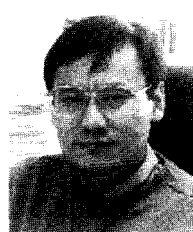
1. Chappel, I. T., The Use of Vectors to Simulate Material Removed by Numerically Controlled Milling, *Computer-Aided Design*, Vol. 15, No. 3, May, pp. 156-158, 1983.
2. Jerard, R. B., Drysdale, R. L., Hauck, K. and Schaudt, B., Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces, *IEEE Computer Graphics & Applications*, January, 1989, pp. 29-39.
3. Norrie, D., Roy, G., Fauvel, R. and Guo, D., Micro-computer Simulation of CNC Machining Center and Its Application. *Computer Modeling and Simulation of Manufacturing Process*. The Winter Annual Meeting of ASME, Dallas, Texas, November, 1990, pp 67-76.
4. Volecker, H. B. and Hunt, W. A., "The Role of Solid Modeling in Machining-process Modeling and NC Verification", SAE Technical paper, pp. 810-195.
5. El-Mounayri, H., Elbestawi, M. A., Spence, A. D. and Bedi, S., "General Geometric Modeling Approach for Machining Process Simulation", *Int. J. Adv. Manuf.*

- Technol.*, Vol. 13, pp. 237-247, 1997.
6. Anderson, R. O., "Detecting and Eliminating Collisions in NC Machining", *Computer Aided Design*, Vol. 10, No. 4, pp. 231-237, 1978.
 7. Wang, W. P. and Wang, K. K., Real-time Verification of Multiaxis NC Programs with Raster Graphics, Proceedings of the IEEE Intl Conf on Robotics and Automation, San Francisco, 7-10 April, pp. 166-171, 1986.
 8. Van Hook, T., Real-time Shaded NC Milling Display, *Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH)*, Aug., Vol. 20, No. 4, pp. 255-68, 1986.
 9. Lee, S. K. and Ko, S. L., "Optimization of Cutting Conditions Using Enhanced Z. map Model", *Annals of CIRP*, Vol. 51, pp. 1004-1007, 2002.
 10. Walstra, W. H., Bronsvort, W. F. and Vergeest, J. S. M., "Interactive Simulation of Robot Milling for Rapid Shape Prototyping", *Computer & Graphics*, Vol. 18, No. 6, pp. 861-871, 1994.
 11. Menon, J. P. and Robinson, D. M., "Advanced NC Veriication via Massively Parallel Raycasting", *Manufacturing Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 141-154, 1993.
 12. Martti, Mantyla, "An Introduction to Solid Modeling".
 13. Crow, F. C., "The Aliasing Problem in Computer Generated Shaded Images", *Comm. ACM*, Vol. 20/11, pp. 799-805, 1977.
 14. Cook, R. L., "Stochastic Sampling in Computer Graphics", *ACM Trans. on Graphics*, Vol. 5/1, pp. 51-72, 1986.
 15. Anthony C. Barkans, "Hardware Assited Polygon Anti-aliasing", *IEEE CG & A*, Jan, pp. 80-88, 1991.



김 용 현

1997년 건국대학교 기계설계학과 학사
 2000년 건국대학교 기계설계학과 석사
 2005년 건국대학교 기계설계학과 박사



고 성 립

1980년 서울대학교 기계공학과 학사
 1983년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1989년 University of California, Berkeley 박사
 1990년 University of California, Berkeley, Post Doc.
 1995년 대한중석 (주) 종합기술연구소 수석연구원
 1995년~현재 건국대학교 기계설계학과 부교수