

복합다양체 솔리드모델러의 자료구조 비교

*최국헌, 한순홍
한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

요약

솔리드 모델의 새로운 분야인 복합다양체 모델을 지원하는 자료구조중 Radial-edge 자료구조, Vertex-Based 자료구조, 부분면 자료구조에 대하여, 각각의 위상요소들을 살펴보고 그들의 차이점을 비교 검토하였다. 그 결과 각 자료 구조들은 각각 독특한 장점을 갖고 있음을 알수 있었다. 즉 Radial-edge 자료구조는 자료의 저장성 및 알고리즘의 복잡성 등에서 무난한 편이며, 부분면 자료구조는 자료 저장공간 측면에서 유리하고, Vertex-based 자료구조는 꼭지점에서의 복합다양체 상황 표현이 가장 명확히 됨을 알수 있었다. 이와 같은 복합다양체를 지원하는 자료구조들의 특징과 차이점의 분석을 통하여 복합다양체 모델의 개발을 위한 기초를 마련하였다.

1. 개요

형상모델의 한 표현 방법인 B-Rep (Boundary Representation)의 데이터 구조는 그들이 표현할수 있는 물체의 기하학적 차원에 따라 다양체 모델과 복합다양체 모델로 구분되며, 복합다양체 모델을 이용하면 설계의 초기단계인 개념설계 단계에서도 불완전한 형상의 표현이 가능하며, 그 밖에도 많은 장점이 있어 근래에 관련 데이터 구조에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이글은 복합다양체 모델러들중 널리 알려진 Radial-edge 자료구조[3], Vertex-based 자료구조[6], 부분면 자료구조[10]를 비교 검토하여 향후 관련 연구를 위한 기초를 마련하는 것이 목적이다.

2. 다양체와 복합다양체의 자료 구조

어떤 솔리드 모델의 경계 (Boundary)의 모든 점이 오픈 디스크 (Open Disk)에 동상 (Homeomorphic)

이면 그 솔리드는 다양체 구조라 한다[2, 5, 12]. 여기서 다양체란 2차원 다양체 (2-manifold)를 말한다.

다양체 모델은 Regularization 등의 방법에 의하지 않고는 불리언 작업이 단혀져 있지 않다. 즉, 불리언 작업의 결과물이 다양체가 아닌 경우가 발생한다. 뿐만아니라 다양체 구조는 낮은 차원의 위상요소를 포함하고 있지 않다. 이는 곧 와이어 프레임이나 면과 같은 요소들이 다양체 모델에는 단독으로 표현될수 없음을 말한다. 복합다양체 모델은 솔리드 모델뿐만 아니라 면, 와이어 프레임, 점 등을 하나의 통합된 자료구조를 사용하여 표현할 수 있다. 복합다양체 모델은 다양체 모델의 영역을 확장하여 일반화한 것으로 말할 수 있다. 복합다양체는 모델링 영역의 확장에 따라 다음과 같은 장점을 갖는다. 즉,

- 와이어프레임, 면, 솔리드 등이 혼합된 물체의 표현이 가능하다.

- 물체의 중심축, 절단면 등의 표현이 가능하다.

- 다양체 모델에서는 표현불가능한 설계의 중간 단계에 있는 물체 표현이 가능하다.

반면 복합다양체 모델은 자료구조가 복잡하고, 알고리즘 구현이 어려우며, 저장공간을 많이 차지하는 단점이 있다.

복합다양체는 한 모서리에 2개 이상의 면이 인접한 경우가 발생되며, 이러한 복잡 형상을 표현하기 위하여 Weiler는 'face, loop, edge, vertex'에 "use"의 개념을 도입하였다. Weiler의 자료구조는 근본적으로 모서리에 근거한 자료구조로서 꼭지점에서의 다양체 상황을 표현하는데 미비점이 있다. Choi는 Vertex-Based 자료구조를 제안하여 이를 보완하였다 [6, 8]. 한편 Lee는 이전의 복합다양체 자료구조들이 저장공간을 많이 차지하는 점을 해소하기 위하여 부분면 자료구조를 제안하였다[10].

3. 복합다양체 자료구조의 공통 위상요소

복합다양체 모델의 위상 자료구조를 검토하기 위하여, 우선 기존의 제안된 자료구조들이 공통적으로 가지고 있는 공통 위상요소들을 검토한후, 다음절에서 상이한 위상요소에 대하여 검토하고자 한다.

그림 1~3는 각각 Radial-edge, Vertex-based 그리고 부분면 자료구조를 보여준다. 이들 자료구조에서 공통적으로 나타나는 위상요소는 다음의 7개와 같다. 표1은 이들 공통 위상요소들의 포인터를 정리한 것이다.

- 모델 (Model) : 3 차원 위상 모델링 공간이며, 엄밀한 의미에서 위상요소가 아니라 위상요소들의 저장소 역할을 한다. 형상모델링 시스템에서 조작하는 대상이 된다.

- 영역 (Region) : 3차원 공간의 요소로서, 하나의 모델안에는 하나 이상의 영역이 존재한다. 무한대의 영역을 포함한 모든 영역은 하나의 바깥쪽 셀을 가지며, 내부에 다른 영역이 있는 경우에는 안쪽 셀을 갖는다. 무한대 영역의 바깥쪽 셀은 무한대에 위치한 가상의 셀이다.

- 셸 (Shell) : 셸은 영역의 경계곡면이다. 영역이 닫힌 곡면으로 둘러 싸이면 셸은 일반적으로 방향성을 갖는다. 홀로 있는 꼭지점이나, 순수 와이어 프레임 모서리도 셸을 구성하나 방향성은 없다. 어떤 면의 양측면이 그 면을 뚫지 않고 방문할수 있으면 그 양측면은 같은 셸에 속한다.

- 면 (Face) : 2차원 요소로서, 하나 또는 그 이상의 꼭지점과 0 또는 그 이상의 모서리로서 구성되며, 경계는 포함하지 않는다. 다음에 설명되는 루프에 의해 경계지워지며, 적어도 하나의 바깥 루프를 갖는다. 내부에 구멍이 있으면 안쪽 루프를 갖는다. 면은 자신의 기하학적 정보인 곡면의 법선방향을 기준으로 하여 루프의 방향을 결정한다.

- 루프 (Loop) : 방향성을 갖는 면의 연결된 경계를 말한다. 바깥쪽 루프 (peripheral loop)는 곡면의 법선방향에서 볼때 반시계방향, 안쪽 루프 (hole loop)는 시계방향이고, 홀로 있는 꼭지점이면 방향성이 없다. 엄밀한 의미에서 루프는 Radial-edge 자료구조와 Vertex-based 자료구조에서는 다음절에서 설명될 상이 위상요소 face_use (wall)의 경계이며, 부분면 자료구조에서는 face의 경계이다.

- 모서리 (Edge) : 2개의 꼭지점으로 정의되는 1 차원 요소이다. 꼭지점은 포함하지 않는다. 경계는 시작과 끝 꼭지점이 된다.

- 꼭지점 (Vertex) : 0차원 요소로서 유클리드 공간내의 한점을 말한다.

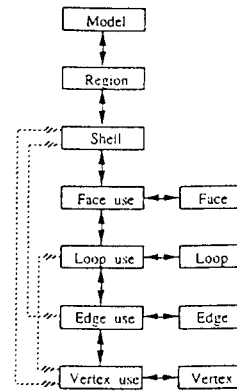


그림 1. Radial-edge 자료구조

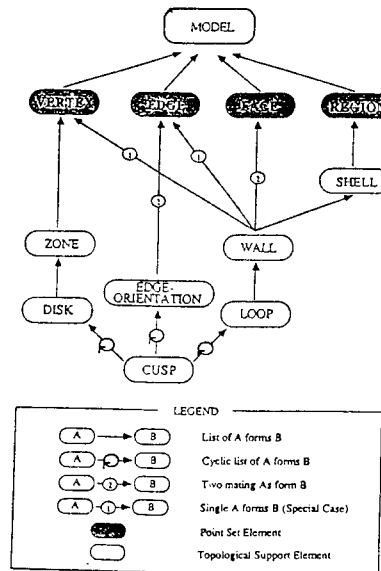


그림 2. Vertex-based 자료구조

4. 상이 위상요소의 검토

다음은 각 자료구조에서 서로 다르게 정의하여 사용하고 있는 위상요소들의 의미이다. 표2는 이들 상이 위상요소들에 대한 포인터를 정리한 것이다.

4.1 Radial-edge 자료구조

Radial-edge 자료구조[3]에는 11개의 위상요소들이 있으며 그중 7개는 앞에서 설명한 바와 같으며 나머지 4가지는 다음과 같다.

• face_use: 면을 이루는 양측면을 말하며, 셀에 의해 사용된다. face_use의 경계는 loop_use가 된다. face_use는 loop_use와 face에 대한 포인터를 갖는다. 일반적으로 면의 갯수의 2배 만큼 존재한다.

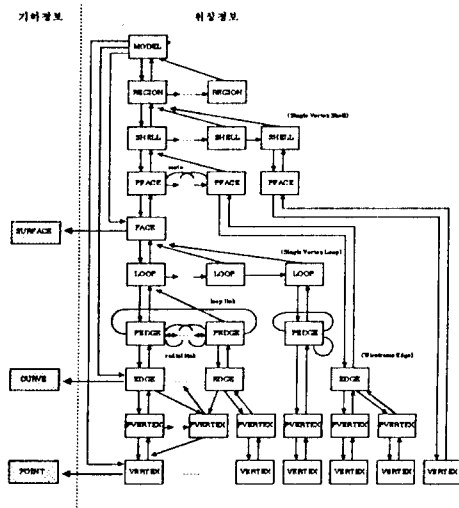


그림 3. 부분면 자료구조

표 1. 공통위상 요소들의 포인터

위상요소	Radial-edge	Vertex-Based	부분면자료구조
1. Model	next region	vertex face edge region	next region
2. Region	model next shell	model zone shell next_of_models	model next shell
3. Shell	region next downptr	region wall(downptr) next_of_regions	region next pface
4. Face	faceuse surface	model fore_wall back_wall next_of_models	pface loop surface
5. Loop	loopuse	wall cusp metaloop next_of_walls	next face pface
6. Edge	edgeuse curve	model fore_EO back_EO next_of_models	parent pvertex[2] curve
7. Vertex	vertexuse point	model zone cusp next_of_models	parent point

• loop_use: face_use의 경계로서 edge_use의 리스트에 대한 포인터를 갖는다. 만약 홀로 있는 꼭지점 루프이면 하나의 vertex_use에 대한 포인터를 갖는다.

• edge_use: loop_use의 구성요소로서 한 모서리에 대해 인접 loop_use 갯수 만큼 존재한다.

• vertex_use: 주어진 꼭지점에 연결된 edge_use의 갯수 만큼 존재한다.

4.2 Vertex-based 자료구조

총 12개의 위상요소로서 구성되며[6] 상이 위상 요소의 의미는 다음과 같다.

• Wall: shell을 형성하는 요소로서, 면의 양측면중 하나이다. 임의의 면의 한쪽 wall은 그 면의 방향과 일치하며, 다른쪽 wall은 그 반대이다. wall의 경계는 loop이다. wall은 하나 또는 그 이상의 loop로 정의되고, 소속된 면과 짝을 이루는 wall에 대한 포인터를 가진다. 와이어프레임 도서리나 홀로 있는 꼭지점은 방향성이 없으며, 하나의 루프로 구성된다.

• Zone: zone은 영역 (region)의 국소적인 의미로 해석할수 있다. zone은 꼭지점 주위의 미소 3차원 영역이다. vertex는 몇개의 zone과 관련이 있는데, 이들 zone의 집합은 그 꼭지점 주위에 미소 구를 형성한다. 즉, zone은 꼭지점 주위의 작은 구의 내부를 구성하는 부분집합이 된다.

• Disk: zone의 경계로서 셸 (shell)의 국소적인 의미로서 생각할수 있다. 꼭지점 주위에서 위상학적으로 오픈 디스크를 형성하는, face와 연관된 wall의 집합이다.

• EO (Edge Orientation): 모서리의 두 방향중의 하나이다. 5.4절에 설명될 방향형 순환을 포함한다.

• Cusp: cusp은 꼭지점과 모서리의 사용방법을 결정하는 요소이다. cusp은 vertex와 짝을 이루는 cusp에 대한 포인터를 갖는다. cusp은 또한 EO, disk, loop에 대한 포인터를 갖는다. EO는 cusp의 플러스 또는 마이너스 방향의 순환 리스트이다. disk는 꼭지점 주위의 연속된 surface를 결정하는 cusp의 리스트를 말한다. loop는 임의의 면에서의 cusp의 순환 리스트이다.

4.3 부분면 자료구조

이 자료구조는 복합다양체 모델의 자료저장 효율성에 중점은 두고 개발되었다. 앞에서 설명한 7개

의 공통위상요소 외에 3개의 보조위상요소를 사용하고 있는데, 그들은 각각 다음과 같은 의미를 갖는다.

- 부분면: 면의 양측면 가운데 하나로써 소속면에 대한 포인터와 방향을 갖는다. 자신의 경계인 loop와 이웃 부분면과의 관계를 저장하지 않고, 필요할때 마다 소속면의 인접정보로부터 유도해 낸다.
- 부분모서리: 면을 경계짓는 loop의 구성요소로서, 인접면의 갯수 만큼 존재하며, 방사형순환(radial cycle)에서 앞뒤 모서리 포인터와, 루프순환(loop cycle)내의 앞뒤 모서리 포인터를 갖는다.
- 부분꼭지점: 꼭지점에 연결된 모서리들의 갯수에 대하여 하나씩 존재하며, 자신이 속한 꼭지점과 하나의 모서리에 대한 포인터를 저장한다.

표 2. 상이(相異) 위상요소의 포인터

Radial-edge		Vertex-based		부분면자료구조	
위상요소	포인터	위상요소	포인터	위상요소	포인터
faceuse	shell next mate loopuse face	wall	shell loop root(V, E, F) atewall next_of_shells	부분면	next shell child(f, e, v) mate
loopuse	faceuse next mate domplr(eu, vu) loop	EO	vertex edge mateEO cusps	부분 모서리	loop child(e, pv) next_in_loop radial_next
edgeuse	loopuse loopedgeuse radialedgeuse mate edge vertexuse	zone	vertex region disk next_of_vertex next_of_regions	부분 꼭지점	next parent(pv, pf) vertex
vertexuse	upptr next vertex	disk	zone cusp next_of_zones		
			vertex disk loop eo matecusp next_of_vertices next_of_disks next_of_loops next_of_eos		

5. 복합다양체 자료구조의 비교

이 절에서는 복합다양체 자료구조에 대하여 속도, 메모리의 사용, 그리고 순환의 포함정도 등을 비교 검토해 보기로 한다.

5.1 위상 요소들의 비교

부분면 자료구조는 Radial-edge 자료구조의 위상 요소들과 유사한 점이 많이 있다. 부분면은 face_use와 유사하나, loop를 포함하지 않는 점이 다르다. 부분모서리는 edge_use와 유사하나, edge_use 가 face_use를 경계짓는 loop_use의 구성요소인 반면, 부분모서리는 face를 경계짓는 loop의 구성요소이다. 부분꼭지점의 vertex_use와 유사하나, 부분모서리의 양 끝을 구성하므로 edge_use를 구성하는 vertex_use와 차이점이 있다.

Vertex-based 자료구조의 Wall은 Radial-edge 자료구조의 face_use에 해당한다.

5.2 인접정보 획득 용이성

자료구조상의 인접 위상정보 획득은 공통 위상정보 획득 용이성과, 상이 위상정보 획득 용이성으로 분류될수 있다.

7가지의 공통 위상요소에서 모델을 제외한 6가지 요소에 대한 인접관계는 모두 $6 \times 6 = 36$ 가지의 인접 관계를 가질 수 있으나, 자료구조의 효율성을 위하여 일부 인접관계만을 저장하고, 저장되지 않은 나머지 요소들의 인접관계는 저장된 인접 정보로부터 유도하여 사용한다. Radial-edge 자료구조와 부분면 자료구조는 거의 같은 공통요소의 인접관계를 저장하고 있으므로, 저장된 이들 인접관계 추출에는 비슷한 시간이 소요될 것이다. 그러나 유도하여야 할 인접관계는 자료구조에 따라 각각 차이가 있을 것이며, 이것은 상이 위상요소에 따라 결정된다.

상이 위상요소의 인접관계 용이성을 알아보기 위하여, 가장 많이 쓰이는 함수이면서 각 자료구조에 비교적 독립적인 함수를 선정하여 비교의 대상으로 한다. 이러한 함수의 대표적인 것이 face_use (또는 wall, 또는 부분면)에서 인접 face_use로 찾아가는 경우이다. 이는 새로운 면을 추가시켰을때, 새 영역이 생성될지 여부를 판단하기 위하여, 오일러 작업시 빈번히 사용되는 경우이다. 임의의 face_use의 다음 face_use를 찾아가는 과정을 살펴보면, Radial-edge 자료구조와 Vertex-based 자료구조에서는 별다른 절차 없이 저장된 정보를 이용하여 쉽게 찾을수 있다.

그러나 부분면 자료구조에서는 부분면이 모서리에 대한 정보를 갖고 있지 않으므로, 다음면을 찾아가자면 별도의 처리 과정이 필요하다. 이 과정은 Vertex-based 자료구조에서 다음 wall을 찾아가는 과정을 모방한 것인데, 가상 edge-use (부분모서리

에 대한 포인터와 방향 플래그(flag)를 가짐) 개념을 도입한 후 다음 부분면을 찾아간다. 따라서 부분면 자료구조는 인접 부분면을 찾아가는데 있어 다른 자료 구조에 비하여 비교적 시간이 많이 소요된다 [10].

새로운 면을 추가하여 새 영역을 생성하려면 최초 하나였던 셀이 2개의 셀로 재구성되어야 하는데, 이때의 알고리즘은, Radial-edge 자료구조의 경우 모서리의 Radial 정보를 이용하여 간단히 영역의 윗타리를 찾을수 있다. 그러나 꼭지점에 복합다양체 상황이 존재하는 경우 기하학적 계산이 필요하다. 부분면 자료구조도 이와 같은 단점을 지니고 있어 별도의 처리 알고리즘을 채택하고 있다[10]. 그러나 Vertex-based 자료구조는 zone과 disk의 정보를 이용하여 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 명확히 표현하고 있으므로, 단일화된 알고리즘으로 셀을 찾을 수 있다.

결과적으로 부분면 자료구조는 위상정보 추출에 상대적으로 많은 시간이 걸릴 것이며, Vertex-based 자료구조는 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 가장 잘 표현할수 있음을 알수 있다.

5.3 자료 저장 공간의 사용량

다양체 자료구조 비교 방식인 Wilson의 비교 방식[4]을 통하여 비교한 자료구조 비교 결과[10]는 표3과 같다. 이 때 사용된 가정은 다음과 같다.

(가정) ① 꼭 필요하지 않은 필드는 무시한다.

② 모든 필드들은 동일한 크기의 포인터를 저장한다.

③ 단일 연결 리스트 구조.

④ 플래그(flag)는 한 비트 이므로 무시한다.

여기서 보면 부분면 자료구조가 저장 공간을 가장 적게 사용하며, 그 다음이 Radial-edge 자료구조이다.

표3. 기억 장소 사용량 비교

	Radial-edge	Vertex-based	부분면
기억장소 사용량(부분면 자료 구조를 1로 볼 때)	2.4	3.4	1.0

5.4 순환의 포함여부

복합다양체의 인접관계를 저장하기 위하여 3가지 순환이 사용될수 있다[6, 9]. 다음은 이들 3가지 순환의 정의이다.

• 루프순환 (Loop cycle): 면 주위의 루프에 대한 순환.

• 방사형순환 (Radial cycle 또는 edge Orientation cycle): 모서리 주위의 면들에 대한 순환.

• 디스크순환 (Disk cycle): 꼭지점 주위의 면들에 대한 순환.

자료구조의 인접관계 추출 용이성을 보기 위하여 이들 순환의 포함여부를 비교하면 표4와 같다. Radial-edge 자료구조는 edge_use에 루프순환과 방사형순환에 대한 정보를 갖고 있다. Vertex-based 자료구조는 cusp에 3가지 순환 정보를 모두 저장하고 있다. 부분면 자료구조는 부분모서리에 루프순환과 방사형순환 정보를 저장하고 있다. 결과적으로 Vertex-Based 자료 구조가 디스크 순환을 포함하고 있어, 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 가장 잘 표현할 수 있음을 알수 있다.

표4. 순환의 포함 여부.

	Radial-edge	Vertex-based	부분면
루프 순환	○	○	○
방사형 순환	○	○	○
디스크 순환		○	

6. 결론

이 글을 통하여 복합다양체 모델인 radial-edge 자료구조, vertex-based 자료구조 및 부분면 자료구조의 공통 위상요소와 상이 위상요소에 대한 특성을 살펴보았으며, 또한 각 자료구조들의 인접 정보 획득 용이성, 자료저장 공간의 사용량, 그리고 Robustness에 대하여 비교하였다. 그 결과 검토된 각 자료구조들은 각각 독특한 장점이 있었다. 즉 Radial-edge 자료구조는 자료 저장 효율성 및 알고리즘 구현이 무난한 편이고, 부분면 자료구조는 자료저장 공간 측면에서 유리하고, Vertex-based 자료구조는 꼭지점에서의 복합다양체 상황 표현이 가장 명확히 됨을 알수 있었다.

이와 같은 복합다양체를 지원하는 자료구조들의 특징과 차이점에 대한 분석은, 앞으로 복합다양체 모델러 개발을 위한 기반을 제공한다.

7. 참고문헌

1. B. G. Baumgart, "Geometric Modeling for Computer Vision", Technical Report, Report STAN-CS-74-463, Stanford Univ.: Stanford Artificial Intelligence Laboratory, 1974
2. J. R. Munkres, *Topology: A First Course*, Prentice-Hall, 1975.
3. K. Weller, "Topological Structures for Geometric Modeling", PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986
4. P. R. Wilson, "Data Transfer and Solid Modeling", in M. J. Wozny, H. W. McLaughlin, J. I. Encarnacao (eds), *Geometric Modeling for CAD Applications*, Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1988, pp. 217 - 254
5. M. Mantyla, *An Introduction To Solid Modeling*, Computer Science Press, 1988
6. Y. Choi, "Vertex-based Boundary Representation of Non-manifold Geometric Models", PhD. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, August 1989
7. K. Weiler, D. McLachlan, "Generalized Sweep Operations in the Non-Manifold Environment", in M. J. Wozny, J. U. Turner, K. Preiss (Eds), 'Geometric Modeling for Product Engineering, Elsevier', 1990, pp. 87 -106
8. E. Levent Gursoz, Y. Choi, F. B. Frinz, "Vertex Based Representation of Non-Manifold Boundaries", in M. J. Wozny, J. U. Turner, K. Preiss (Eds), 'Geometric Modeling for Product Engineering', Elsevier, 1990, pp. 107 -130
9. Y. Yamaguchi, K. Kobayachi, F. Kimura, "Geometric Modeling with Generalized Topology and Geometry for Product Engineering", in J. Turner, J. pegna, M. Wozny (Eds), "Product Modeling for Computer-Aided Design and Manufacturing", IFIP TC5/WG5.2 Working Conference, North-Holland, 1991, pp. 97 - 115
10. 이상헌, "사출성형제품의 설계 및 해석의 통합 환경을 제공하기 위한 특징형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발", 박사학위 논문, 서울대 기계설계학과, 1993년 8월
11. J. Rossignac, "Representing Solids and Geometric Structures", in S. Kodiyalam, M. Saxena (Eds), 'Geometry and Optimization Techniques for Structural Design', Elsevier, 1994, pp. 1 - 44
12. I. Zeid, "Non-manifold Geometric Modeling: an Overview", in S. Kodiyalam, M. Saxena (Eds), 'Geometry and Optimization Techniques for Structural Design', Elsevier, 1994, pp. 45 - 68
13. 한순홍, 이현찬, 김재정, 박준영, "개방형 구조를 갖는 객체 지향적 형상모델러의 개발", 특정연구 과제 제1차 중간 보고서, 과학재단, 1994년 6월