

특징형상기반 다중해상도 모델링의 상세수준 결정기준에 관한 연구

이상현*(국민대 기계자동차공학부), 이규열(서울대 조선해양공학과)

A Study on the Criteria of the Level-Of-Detail in Feature-based Multi-resolution Modeling

S. H. Lee(Kookmn University), K-Y. Lee(Seoul National University)

ABSTRACT

In feature-based multi-resolution modeling, the features are rearranged according to a criterion for the levels of detail (LOD) of multi-resolution models. In this paper, two different LOD criteria are investigated and discussed. The one is the volumes of subtractive features, together with the precedence of additive features over subtractive features. The other is the volumes of features, regardless of whether the feature types are subtractive or additive. In addition, the algorithms to define and extract the LOD models based on the criteria are also described. The criterion of the volumes of features can be used for a wide range of applications in CAD and CAE in virtue of its generality.

Key Words : Multi-resolution (다중해상도), Level of detail (상세수준), Feature (특징형상), Solid model (솔리드모델), Non-manifold (비다양체), Merged set (병합제)

1. 서 론

1.1 연구 목적

최근 기계 분야 제조업체에서는 특징형상 모델링 기법을 바탕으로 한 3 차원 CAD 시스템이 제품 설계에 널리 사용되고 있다. 그런데 설계 단계에서 만들어진 제품 모델이 해석을 포함한 이후 여러 응용 분야에 사용될 때는 상세 형상 모델보다 다양한 상세 수준(level of detail (LOD))으로 단순화되거나 축약된 모델이 훨씬 더 바람직하고 유용한 경우가 많이 있다. 이와 같이 하나의 형상 모델에 대하여 다양한 LOD 에 대응되는 간략화된 특징형상기반 모델을 제공하는 기법을 특징형상기반 다중해상도 모델링(feature-based multi-resolution modeling) 기법이라고 하며, 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다중해상도 모델을 추출하기 위한 LOD 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르다. 기존의 LOD 판단 기준은 감법 특징형상(subtractive feature)에 대한 부피(volume)로서 가장 해상도가 낮은 모델은 모든 가법 특징형상을 합친 모델이 되고, 그 이상의 상세 모델들은 감법 특징형상을 부피가 큰 것부터 차례로 빼나감으로써 얻는다. 그러나 이 방식은 응용 분야가 제한적이고 또한 만일 모델이 가

법 특징형상들만을 사용하여 모델링된 경우나 가법 특징형상들이 감법 특징형상보다 더 큰 경우는 합리적인 해를 제공하지 못하는 문제점을 안고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 특징형상의 유효볼륨 이론에 근거한 다중해상도 모델링 시스템을 구현하였으며, LOD 판단 기준으로서 특징형상의 유형에 상관없이 특징형상의 볼륨 크기에 따라 LOD 모델을 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에서는 최종 부품이나 이전 LOD 모델과 같은 기준 모델에 빠지거나 더해지는 볼륨의 양을 측정함으로써 보다 정확히 최종 부품 형상에 대한 특징형상의 기여도를 측정할 수 있도록 하였다. 이 LOD 판단 조건은 이전의 방법과는 달리 가법과 감법 특징형상을 구분하지 않고 적용될 수 있기 때문에 보다 넓은 범위의 응용분야에 적용될 수 있을 것이다.

1.2 관련 연구

솔리드 모델에 대한 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법의 필요성과 그에 대한 해법은 최초로 이견우 교수 그룹^[1]에서 제안하였으며, 이에 대한 개선 및 확장을 이상현 등^[2, 3], 이재열 등^[4]이 수행하였다. LOD 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르며

최초로 제안된 판단 기준은 감법 특징형상 (subtractive feature)에 대한 부피(volume)로서 이는 주로 솔리드 모델의 렌더링과 스트리밍(streaming)을 위한 목적으로 사용되었다^[1, 4]. 여기서 특기할 점은 어떠한 가법 특징형상(additive feature)도 감법 특징형상에 우선한다는 점과 가장 해상도가 낮은 모델(즉, LOD = 0 인 모델)을 모든 가법 특징형상을 합친 모델로 표현한다는 점이다. LOD 가 1 이상인 모델들은 감법 특징형상을 부피가 큰 것부터 차례로 빼나감으로써 얻는다. 또 다른 LOD 판단 기준으로 제시된 것은 특징형상의 부피 그 자체로서 이 경우에는 특징형상의 유형이 가법인가 감법인가 하는 것을 구별하지 않는다^[2, 3, 5]. 이 방식은 특징형상의 유형에 대한 아무런 제한이 없기 때문에 보다 넓은 범위의 응용 분야에 채택될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선택한 경우에 대하여 소개하며, 제 3 장에서는 가법, 감법과 같은 유형을 구분하지 않은 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선택한 경우에 대하여 소개한다. 제 4 장에서는 적용 예를 소개하고, 제 5 장에서는 결론을 제시한다.

2. 감법 특징형상의 볼륨

LOD 에 대한 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르다. 특징형상의 볼륨은 가장 그럴듯한 LOD 판단 기준 가운데 하나라고 할 수 있다. 과거 대부분의 연구에서는 가법 특징형상이 모든 감법 특징형상보다 우선하고, 그 다음 감법 특징형상들을 볼륨의 내림차순으로 배열하는 방법을 사용하였다^[1, 4]. 따라서 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 모든 가법 특징형상들의 합한 결과이고, 그보다 높은 해상도의 LOD 모델들은 감법 특징형상들의 볼륨을 내림차순으로 차례로 빼면서 구한다. 이 방법은 주로 솔리드 모델의 렌더링이나 스트리밍과 같은 응용 분야에 적용되어 왔다. 본 논문에서 제안한 다중해상도 모델링 방법에서는 특징형상의 임의의 재배열이 가능하므로 당연히 이러한 특징형상 재배열 방식을 지원해 줄 수 있다.

부품 모델이 $n+1$ 개의 특징형상을 적용해서 생성되었으며, 이 가운데 가법 특징형상은 $k+1$ 개 감법 특징형상은 $n-k$ 개라고 가정하자. 감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 채택하는 방식에서는 먼저, 특징형상들을 가법과 감법 유형으로 분류한다. 다음, 가법 특징형상들을 감법 특징형상들의 앞에 위치시킨다. 마지막으로, 가법과 감법 특징형상들을 각 그룹내에서 볼륨이 큰 것부터 작은 것

의 순서로 정렬시킨다. 이러한 규칙을 적용시켜 얻은 특징형상의 재배열은 다음 식(11)로 표현될 수 있다. 여기서 \otimes_i^+ 와 V_i^- 는 각각 특징형상 재배열 후 i 번째 특징형상의 볼리안 작업과 유효영역을 나타낸다.

$$M_n = \prod_{i=0}^n \otimes_i^+ V_i^+ = \left(\prod_{i=0}^k \otimes_i^+ V_i^+ \right) \left(\prod_{i=k+1}^n \otimes_i^+ V_i^+ \right), 0 \leq k \leq n \quad (11)$$

가장 낮은 해상도의 모델 M_0 는 $k+1$ 개의 모든 가법 특징형상들에 대한 합집합의 결과이며, 따라서 LOD 의 수는 $n-k+1$ 개로 줄어든다. 일련의 LOD 모델들 M_0, M_1, \dots, M_{n-k} 는 다음 식들과 같이 얻어질 수 있다.

$$M_0 = \prod_{i=0}^k (\cup V_i^+) \quad (12)$$

$$M_j = M_0 \prod_{i=k+1}^{k+j} (-V_i^-), 1 \leq j \leq n-k \quad (13)$$

만일 [6]의 Fig. 2 의 예제 모델에 이 판단 기준을 적용시킨다면 특징형상들은 $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_4 \rightarrow F_1 \rightarrow F_3$ 의 순서로 재배열된다. 이 경우 다중해상도 특징형상들의 속성값들은 Table 1 에 나타난 것과 같이 된다. 다섯 개 특징형상 가운데 F_0, F_2, F_4 가 가법 특징형상이므로 (즉, $k=2$), 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 이 세 특징형상들을 합한 것이 되며, LOD 의 총 수는 세 개가 된다. 결과적으로 세 개의 LOD 모델들이 다중해상도 마스터 모델로부터 추출될 수 있으며, 이 경우 각 LOD 모델에 대한 볼리안 작업 정의는 $M_0 = V_0 \cup V_2 \cup V_4$, $M_1 = M_0 - (V_1 - V_2 - V_4)$, $M_2 = M_1 - (V_3 - V_4)$ 이 된다. 이들에 대한 결과가 Fig. 1 에 나타나 있다.

Table 1 Reordered multi-resolution feature table for the example solid model in Fig. 2 of Ref.[6]: the level of detail (LOD) criterion is the volume of the feature, together with the precedence of additive features over subtractive features.

No	LOD	Feature Name	Creation Order	Bool	Primitive	Effective Zone	LOD Model
0	*	Base	0	+	V_0	V_0	V_0
1	*	Boss	2	+	V_2	V_2	$V_0 \cup V_2$
2	0	Boss_Pattern	4	+	V_4	V_4	$V_0 \cup V_2 \cup V_4$
3	1	Blind_Hole	1	-	V_1	$V_1 - V_2 - V_4$	$V_0 \cup V_2 \cup V_4 - (V_1 - V_2 - V_4)$
4	2	2CBore_Thru_Hole	3	-	V_3	$V_3 - V_4$	$V_0 \cup V_2 \cup V_4 - (V_1 - V_2 - V_4) - (V_3 - V_4)$

이 방법에 사용된 LOD 판단 기준은 감법 특징형상의 전체 볼륨이다. 그러나 특징형상의 전체 볼륨을 일반적인 LOD 판단 기준으로 사용되기에는 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

- 현재는 가법 특징형상이 모든 감법 특징형상에 우선하여 낮은 LOD 를 갖게 된다. 그러나 경우에 따라서 가법 특징형상이 감법

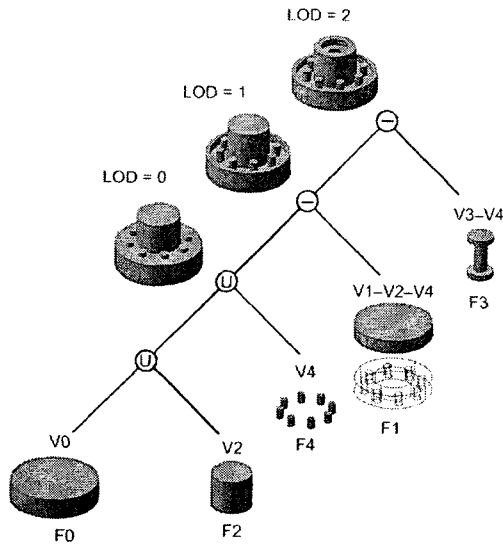


Fig. 1 Three LOD models for the reordered multi-resolution features in Table 1.

특징형상보다 더 작고 상세한 특징형상이 될 수 있다. 이는 가장 낮은 해상도의 모델이 그 보다 높은 해상도의 모델보다 더 상세한 형상을 가질 수 있다는 것으로 이는 LOD 정의 자체를 위반하는 것이 된다.

- 만일 부품이 단지 가법 특징형상들만으로 모델링된다면 이 방식으로는 단지 하나의 LOD 만 가능하게 된다.
- 현재는 감법 특징형상의 전체 볼륨을 LOD 판단 기준으로 하고 있다. 그러나 부품 모델로부터 특징형상을 빼낼 때 감법 특징형상의 전체 볼륨이 사용되지 않을 수도 있다. 실제로는 $V_i \cap (M_0 - M_n)$ 에 해당하는 볼륨만이 불리안 작업 과정에 기여한다. 따라서 이 교차 볼륨이 특징형상 전체 볼륨보다 더 합리적인 LOD 판단 기준이 될 수 있다.

3. 특징형상의 볼륨

감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 채택한 기존 방식의 문제점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 특징형상의 볼륨 자체를 새로운 판단 기준으로 제안하고자 한다. 이 판단 기준은 특징형상이 가법이나 감법이나에 관계없이 적용되므로 보다 일반적인 판단 기준이라고 할 수 있다.

특징형상의 볼륨이라는 LOD 판단 기준은 어떤 볼륨을 측정하느냐에 따라 다양한 기준으로 세분화시킬 수 있다. 가장 간단한 경우는 특징형상의 전체 볼륨을 사용하는 경우이다. 그러나, 앞 절에서

언급한 것과 같이, 그것은 최종 부품 형상에 기여하지 않는 볼륨을 포함할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Algorithm 1에 나타난 것과 같이 기준이 되는 모델과의 볼륨 차이를 판단 기준으로 삼는 방법을 제안하고자 한다.

Algorithm 1은 $\{F_j\}_{j=\ell}^k, \ell \leq j \leq k, 0 \leq \ell, k \leq n$ (즉, ℓ 번째부터 k 번째까지의 특징형상들) 가운데 가장 작은 특징형상을 찾는 작업을 수행한다. 여기서 M_i 는 $\{F_j\}_{j=\ell, j \neq i}^k$ (즉, 특징형상 F_i 를 제외한 나머지 특징형상들)을 적용시켜 얻은 모델을 나타낸다. 만일 M_i 가 기준 모델 M_{ref} 에 가장 가깝다고 하면 특징형상 F_i 가 주어진 범위의 특징형상 $\{F_j\}_{j=\ell}^k$ 중에서 가장 작은 특징형상이라고 할 수 있다. 기준 모델은 원래 부품 모델 $M(=M_n)$ 을 사용할 수도 있으며, 또는 바로 이전에 구한 $LOD=k+1$ 인 모델 M_{k+1} 을 사용할 수도 있다. 여기서는 원래의 부품 M_n 을 기준 모델로 선정하였다.

Algorithm 3. FindLeastSignificantFeature (F, ℓ, k)

1. **Input:** F : the multi-resolution feature
list: $F = \{F_j\}_{j=0}^n$
2. ℓ, k : lower and upper bounds of the feature range
for searching the least significant feature:
 $\{F_j\}_{j=\ell}^k, \ell \leq j \leq k, 0 \leq \ell, k \leq n$.
3. **Output:** returns the position of the feature of minimum volume.
4. // Set the variable $min\Delta V$ to a huge value.
5. $min\Delta V \leftarrow \infty$.
6. **for** $i \leftarrow \ell$ **to** k **do** {
7. $M_i = \prod_{j=\ell, j \neq i}^k \otimes_j V_j$.
8. $\Delta V = \text{VolumeOf}(M_n - M_i)$.
9. **if** $(\Delta V < min\Delta V)$ **then** {
10. $min\Delta V \leftarrow \Delta V$.
11. $min_position \leftarrow i$.
12. }
13. }
14. **return** $min_position$.

만일 이 알고리즘을 [6]의 Fig. 2의 예제에 적용한다면, 특징형상들은 $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_4 \rightarrow F_3$ 의 순으로 재배열될 것이다. Table 2는 재배열되었을 때의 다중해상도 특징형상의 각 속성들의 값을 보여주고 있다. 여기서 특징형상 F_0, F_1, F_2, F_3, F_4 의 유효영역이 각각 $V_0, V_1-V_2, V_2, V_3-V_4, V_4$ 가 됨을 볼 수 있다. Fig. 2에 나타난 것과 같은 다섯개의 LOD 모델들이 이 다중해상도 모델로부터 제

공될 수 있다.

Table 2 Rearranged multi-resolution features for the example solid model in Fig. 2 of Ref.[6], using feature volume as the LOD criterion.

No	LOD	Feature Name	Creation Order	Bool	Primitive	Effective Zone	LOD Model
0	0	Base	0	+	V_0	V_0	V_0
1	1	Boss	2	+	V_2	V_2	V_0+V_2
2	2	Blind_Hole	1	-	V_1	$V_1 - V_2$	$V_0+V_2-(V_1-V_2)$
3	3	Boss_Flatern	4	+	V_4	V_4	$V_0+V_2-(V_1-V_2)+V_4$
4	4	2CBore_Thru_Hole	3	-	V_3	$V_3 - V_4$	$V_0+V_2-(V_1-V_2)+V_4-(V_3 - V_4)$

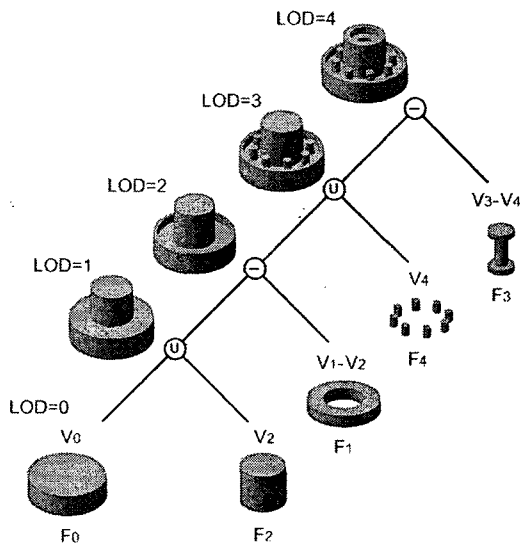


Fig. 2 The LOD models according to the multi-resolution feature table in Table 2.

4. 적용 예

본 논문에서 소개한 다중해상도 모델링 기법을 잘 알려진 ANC-101 시험 부품 모델에 대해서 적용시켜 보도록 하겠다. ANC-101 테스트 파트는 CAM-I의 Advanced Numerical Control (ANC) 프로그램에 의해서 설계된 것으로 기하학적 형상 모델링 능력을 테스트하기 위해서 만들어진 것이다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 초기 부품 모델링 과정은 10개의 특징형상을 순차적으로 적용시키는 것으로 되어있다. Fig. 4는 감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선정했을 때의 결과를 보여주고 있다. 이 경우 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 모든 가법 특징형상들을 합한 것이 된다. Fig. 5은 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선정했을 때의 결과를 보여주고 있다. 이 경우 특징형상의 유형이 감법이냐 가법이냐는 상관없이 볼륨의 크기만을 기준으로

재배열한 것이다.

5. 결론

본 논문에서 소개한 본 연구에서는 특징형상의 유효볼륨 이론에 근거한 다중해상도 모델링 시스템을 구현하였으며, LOD 판단 기준으로서 특징형상의 유형에 상관없이 특징형상의 볼륨 크기에 따라 LOD 모델을 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에서는 최종 부품이나 이전 LOD 모델과 같은 기준 모델에 빠지거나 더해지는 볼륨의 양을 측정함으로써 보다 정확히 최종 부품 형상에 대한 특징형상의 기여도를 측정할 수 있도록 하였다. 이 LOD 판단 조건은 이전의 방법과는 달리 가법과 감법 특징형상을 구분하지 않고 적용될 수 있기 때문에 보다 넓은 범위의 응용분야에 적용될 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제 번호: R01-2002-000-00061-0) 사업의 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. 최동혁, 김태완, 이진우, "특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 7 권 2 호, pp. 121-130, 2002
2. 이상헌, 이강수, 박상근, "선택적 불리안 연산자를 이용한 솔리드 모델의 다중해상도 구현", 한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, KSPE 02S179, pp.833-835, 2002. 5. 17 - 18.
3. 이상헌, 이강수, 박상근, "교환법칙을 만족하는 비다양체 모델의 선택적 불리안 작업의 개발", 한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, KSPE 02S180, pp.836-839, 2002. 5. 17 - 18.
4. 이재열, 이주행, 김현, 김형선, "셀룰러 토폴로지를 이용한 프로그레시브 솔리드 모델 생성 및 전송", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제 9 권 제 2 호, pp. 122-132, 2004.
5. Li, B., Liu, J., "Detail feature recognition and decomposition in solid model", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 5, pp. 405-414, 2002.
6. 이상헌, 이규열, "특징형상기반 솔리드 모델에 대한 다중해상도 모델링 기법", 2005 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, pp. 812-821, 2005. 1. 27~1.29.