

다중해상도 개념을 이용한 기계 부품의 유사성 비교

홍태식*, 이건우**, 김성찬***

Similarity Comparison of Mechanical Parts

Hong, T.S.*, Lee, K.W.** and Kim, S.C.***

ABSTRACT

It is very often necessary to search for similar parts during designing a new product because its parts are often easily designed by modifying existing similar parts. In this way, the design time and cost can be reduced. Thus it would be nice to have an efficient similarity comparison algorithm that can be used anytime in the design process. There have been many approaches to compare shape similarity between two solids. In this paper, two parts represented in B-Rep is compared in two steps: one for overall appearances and the other for detail features. In the first step, geometric information is used in low level of detail for easy and fast pre-classification by the overall appearance. In the second step, feature information is used to compare the detail shape in high level of detail to find more similar design. To realize the idea above, a multi resolution algorithm is proposed so that a given solid is described by an overall appearance in a low resolution and by detail features in high resolution. Using this multi-resolution representation, parts can be compared based on the overall appearance first so that the number of parts to be compared in high resolution is reduced, and then detail features are investigated to retrieve the most similar part. In this way, computational time can be reduced by the fast classification in the first step while reliability can be preserved by detail comparison in the second step.

Key words : Similarity comparison, Level of detail, Multi resolution

1. 서 론

산업 현장에서 많은 새로운 기계부품(mechanical part)들은 기존의 부품을 수정함으로써 얻어질 수 있다. 기초부터 완전히 새로 만들어지는 부품은 드물다. 만약 새로운 부품이 기존의 유사한 부품을 참고하지 않은 채 처음부터 다시 설계 된다면 많은 시간과 노력이 낭비될 것이다. 그러므로 많은 경우에 설계자들은 새로운 부품의 설계 과정에서 기존 부품의 설계 자료를 이용하고자 한다. 현재 대부분의 기계 설계자들은 부품 설계 시에 형상 기반 3차원 모델링 시스템을 사용하고 있다. 이 시스템에서는 기존 부품의 구속 조건들을 변화시킴으로써 전체적으로 다시 설계하지

않고도 새로운 부품을 생성하는 것이 가능하다. 그러므로 만약 설계자들이 기존의 데이터베이스에서 원하는 형태의 부품을 효과적으로 검색하는 방법을 가지고 있다면 시간과 비용을 절약할 수 있다.

그러나 지금까지 제안된 대부분의 유사성 비교 방법은 부품의 제조 공정의 유사성에 초점이 맞춰져 있었고 가공형상(machining feature)을 유사성 판단의 기준으로 사용하였다. 예를 들어 Group Technology와 같은 방법에서는 사람이 부품의 형상, 재질, 가공 공정 등에 따라 적절한 코드를 부여하고 그 코드에 따라 부품들을 분류하였다. 이 방법은 공정에 초점을 맞추었기므로 설계 단계에서 매우 중요하게 고려해야 할 실제 형상에 대한 구분에는 한계가 있다. 코드 중에 형상을 나타내는 부분은 한 자리 정도의 정수이므로 다양한 형상을 나타내는 것이 어렵기 때문이다. 또한 부품들을 분류할 때 분류 기준이 자의적이 되거나 코드를 부여하는 사람의 주관에 개입될 가능성이 크다. 그러므로 부품의 형상 측면을 제대로 다루기 어려울

*교신저자, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

**중신회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

***학생회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

- 논문투고일: 2005. 07. 20

- 심사완료일: 2006. 05. 22

뿐만 아니라 분류 및 검색 과정을 자동화하기도 어렵다. 따라서 이러한 방법을 그대로 설계 단계의 유사성 판단에 도입하는 것은 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 설계 단계에서 효과적으로 유사성을 비교하는 방법이 제안될 것이다. 이와 관련된 기존의 유사성 비교 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 부품의 전체적인 형상(geometry)을 비교하는 것이고 두 번째 방법은 미리 정의된 특징 형상들을 비교하는 방법이다. 전자는 형태 자체를 비교하는 것이므로 어떠한 입력 형식도 처리가 가능하다. 그러나 만약 부품이 복잡해지면 이 방법은 시간이 매우 오래 걸리며 결과의 신뢰성도 낮아진다. 후자는 관통구멍이나 fillet 등의 특징 형상을 추출하여 비교하므로 전자에 비하여 더 많은 정보를 필요로 한다. 비록 이 방법이 더 많은 정보를 필요로 하지만 전자에 비하여 상대적으로 계산량이 적으며 부품이 복잡한 경우 더 신뢰성 있는 결과를 제공한다. 또한 비교를 위한 특징 형상정보가 부품의 B-rep 정보로부터 쉽게 얻어질 수 있다면 입력 형태의 일반성도 그다지 중요한 문제가 되지 않는다. 그러나 특징 형상 기반의 유사성 비교 방법은 한 가지 단점을 가지고 있다. 만약 비교 대상이 될 부품들이 원래부터 아주 간단하거나 어떠한 목적을 위해 단순화 되었다면 비교할 만한 특징 형상이 존재하지 않을 수도 있기 때문이다. 그러므로 이러한 경우에는 전체적인 형상을 직접 비교하는 방법을 취할 수 밖에 없다.

일반적인 검색법에서는 데이터베이스의 신속한 검색을 위하여 그룹화를 실시한다. 만약 데이터베이스가 적절히 그룹화되어 있고, 그룹들 간의 유사성을 비교하는 효과적인 방법이 있다면 필요 없는 그룹들을 비교에서 제외할 수 있으므로 계산시간을 크게 줄일 수 있다. 물론 실제적으로 시간을 절약하려면 그룹화 방법과 비교 방법이 간단해야 한다.

이러한 개념을 실제 검색 과정에 다음과 같이 적용한다. 비교대상이 되는 부품들의 다중해상도 표현을 이용하여 해상도가 가장 낮은 상태에서 전체적인 형태에 따라 그룹화한다. 만약 한 그룹의 전체적인 형태가 검색하고자 하는 부품과 크게 다르다면 더 이상의 세부 비교는 필요 없으며 그 그룹은 비교 대상에서 제외된다. 반면에 전체적인 형태가 비슷한 것으로 판정되면 그 그룹 내부의 부품들과 검색하고자 하는 부품 간의 세부 형상의 비교가 이루어지게 된다. 전체적인 형태의 비교를 위하여 부품 모델링 파일들은 특징 형상들을 추가하거나 제거하는 방식을 통하여 단순화된다. 이런 방식으로 단순화된 상태에서는 비교 대상이

될만한 특징 형상들이 부족하기 때문에 특징 형상 기반 비교 방법으로 유사성을 비교할 수가 없다. 그러므로 전체적인 형상을 비교하는 방법을 사용한다. 이 방법을 사용할 경우 부품이 복잡하면 계산 시간이 오래 걸린다. 그러나 단순화된 부품 모델을 사용하면 형상 데이터의 샘플링 개수를 줄일 수 있으므로 계산 시간을 크게 줄일 수 있다.

일단 전체적인 형태가 비슷한 부품들이 선택되면 상세도를 높여가면서 특징 형상들을 비교한다. 같은 타입이면서 크기가 비슷한 형상들이 얼마나 많이 존재하는가가 비교의 기준이 된다. 특징 형상 정보들은 부품의 단순화 과정에서 얻을 수 있다. 왜냐하면 어떤 형상이 제거되려면 그 전에 먼저 인식되어야 하기 때문이다. 이 세부 형상의 비교를 통하여 전체적인 형태는 비슷하지만 세부 형상이 다른 부품들이 제외된다.

이와 같은 과정을 거쳐 주어진 부품과 전체적인 형태 및 세부 형상이 가장 유사한 파트를 데이터베이스로부터 찾아낼 수 있다.

2. 관련연구

2.1 유사성비교

형상을 기반으로 한 유사성 비교에는 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 전체적인 형상(geometry) 자체를 비교하는 방법이고 다른 하나는 파트의 특징 형상들을 비교하는 방법이다. 전자는 물체의 포인트 데이터만을 이용하는 방법이므로 입력 형식에 구애 받지 않는다. 후자는 파트의 특징 형상 정보를 이용하는 방법으로 효과적이지만 포인트 데이터 이외의 정보들을 더 필요로 한다. 그 외에 토폴로지(topology) 정보를 이용한 방법과 convex decomposition을 이용한 방법 등이 있다.

2.1.1 전체 형상 기반 비교

기계 공학, 컴퓨터 그래픽스, 생체 역학 등 많은 분야에서 여러 종류의 3차원 모델이 사용되고 있으며 각 분야마다 3차원 모델을 저장하기 위하여 그 분야의 목적에 적합한 각기 다른 데이터 구조를 사용한다. 기계 분야 중 CAD 시스템에서는 B-rep 구조가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 B-rep 구조 역시 CAD 시스템에 따라 조금씩 다른 것이 사실이다.

이런 이유로 인해 많은 형상 비교 알고리즘이 입력 형태의 일반성을 유지하기 위하여 mesh 데이터를 비교의 기준으로 사용하고 있다. 이 방법은 전체적인 형상 자체를 비교하기 때문에 어떠한 형태의 입력도 처

리가 가능하기 때문이다.

Osada^[9]는 비교의 수단으로 shape distribution graph를 사용하였다. 이 방법에서는 우선 비교될 모델의 표면에서 일정 개수의 포인트를 추출한 뒤 추출한 모든 포인트 쌍에 대하여 두 포인트 사이의 거리를 구한다. 그런 다음 거리 값에 대한 포인트 쌍의 개수로 분포도를 그리고 그 분포도의 유사성을 비교하여 모델의 유사성을 판단하게 한다. Chuk Yip Ip^[10]은 Osada의 방법을 개선하였다. 개선된 방법에서는 shape distribution graph를 3가지로 세분화하여 결과의 신뢰성을 높였다. Ohbuchi^[10]는 관성 모멘트를 사용하였다. 중심 회전축으로부터의 물체 표면까지의 평균 거리와 거리값의 변화를 이용하여 유사성을 판단하였다.

비록 이 방법들은 입력 형태의 일반성은 유지할 수 있으나 모든 모델에 대하여 동일한 복잡도의 계산을 수행해야 하므로 모델이 간단한 경우에도 여전히 계산이 복잡하다. 샘플링 포인트의 개수를 수동으로 줄여 주어야만 계산량이 줄어들기 때문이다.

2.1.2 특징 형상 기반 비교

특징 형상 기반 비교 방법은 주로 모델이 어떠한 형상들의 조합으로 구성되어 있는지에 초점이 맞추어져 특히 가공형상(machining feature)이 기준이 되는 경우가 많다. 그러므로 모델들은 관통구멍이나 pocket, fillet 등의 가공형상을 기준으로 그룹화 된다. Elinson^[11]과 McWherter^[12]가 이 방법에 대하여 설명하였다.

이러한 특징 형상들이 복잡한 세부 형상의 비교에 사용되면 전체적인 형상을 직접 비교하는 것보다 계산량을 줄이는데 효과적이다. 그러나 본 연구에서 사용된 형상들은 설계 단계에서 중요한 의미를 가지는 것으로 가공형상과는 다소 차이가 있다.

특징 형상 기반 비교법은 파트의 복잡도를 판단하여 계산량을 조절할 수 있다. 특징 형상의 개수는 파트의 복잡도와 비례한다고 볼 수 있기 때문이다. 그러므로 파트의 복잡성에 따라 서로 다른 판정 기준을 세울 수 있으므로 쓸데없는 계산을 막을 수 있다. 그러나 파트가 너무 단순하여 비교할 만한 형상을 추출하지 못할 경우 이 방법은 제대로 작동하지 않을 수도 있다.

2.1.3 토폴로지(topology) 구조를 이용한 비교

그 외의 방법으로 토폴로지 구조를 이용한 비교가 있다. 토폴로지 구조란 모델의 꼭지점과 모서리, 면들의 연결관계를 계층적으로 나타낸 것을 말한다. 이 방

법에서는 토폴로지 구조가 비슷한 파트들을 서로 유사한 것으로 분류한다. Hilga^[6]와 Shokoufandeh^[2]가 이 방법에 대하여 설명하였다. 그러나 토폴로지 구조의 유사성이 형태의 유사성을 보장하지는 않는다는 것이 이 방법의 가장 큰 단점이다. 구와 torus의 경우에서처럼 꼭지점, 모서리, 면의 연결관계가 같더라도 외형은 전혀 다를 수도 있기 때문이다.

2.1.4 Convex Decomposition을 이용한 방법

Mukai^[11]가 이 방법에 대하여 연구하였다. 이 방법에서는 우선 주어진 물체를 볼록(convex)한 요소들로 분해한 다음 이 요소들을 트리 구조로 배열한다. 그리고 나서 먼저 그 트리 구조의 유사성을 비교한다. 그런 다음 트리 구조가 유사한 경우에 한하여 세부 형상과 자세 등을 비교한다. 이 방법 역시 토폴로지 구조 비교에서와 마찬가지로 트리 구조를 우선적으로 비교하게 되므로 형태가 비슷한 모델의 경우에도 트리 구조가 다르면 형상과 자세의 유사성을 따지기도 전에 비교 대상에서 제외될 위험성이 있다.

2.2 다중 해상도 구현을 위한 모델 단순화

형상 비교 시 계산량을 현저히 줄이기 위해서는 모델의 단순화가 매우 중요하다. 만약 단순화 방법을 잘못 선택하게 되면 신뢰성을 잃을 수도 있기 때문이다. 단순화에 관한 몇 가지 방법을 아래에 정리하였다.

2.2.1 표면(Surface) 단순화

모델들을 신뢰성을 유지하면서 효과적으로 비교하려면 목적에 맞는 단순화 방법을 사용해야 한다. 모델을 단순화시키는 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째 방법이 다면체 메시(polygonal mesh)를 조절하여 표면을 단순화시키는 것이다. 계산량을 줄이기 위하여 해당 detail을 표현 가능한 최소 개수의 메시만을 사용하여 나타내는 것이다. 이 방법에서는 각 detail level에 따라 원래 모델의 표면을 구사하여 나타낸다. Kim^[13]과 Garland^[14]가 다중 해상도를 구현하기 위하여 이 방법을 사용하였다. 컴퓨터 그래픽이나 생체 역학 분야의 단순화에서는 이 방법이 적절하다. 그러나 기계분야, 특히 CAD 시스템에서는 표면의 근사가 그다지 좋은 방법이 아니다. 왜냐하면 낮은 detail level에서 원래 모델의 형태가 심각하게 왜곡될 우려가 있기 때문이다.

2.2.2 형상 기반 단순화

본 연구에서는 효율성을 제고하기 위하여 형상 기

반 단순화 기법을 채용하였다. Zhu와 Menq^[13]가 모델에서 복잡한 형상을 제거하거나 복원함으로써 다중 해상도를 구현하는 방법에 대하여 설명하였다. 이것은 본 연구에 적용된 LOD개념과 매우 유사하다. LOD에 대해서는 나중에 다시 설명하기로 한다. 이렇게 함으로써 모델은 본 연구의 목적에 알맞게 단순화될 수 있다. Zhu와 Menq은 각 단계에서 fillet과 round만을 제거함으로써 모델을 단순화시켰다. Kim^[12]은 모따기 형상과 관통구멍, concave region, smooth out feature 등을 제거하는 방법을 제안하였다

2.3 솔리드 모델의 Indexing과 그룹화

유사성 비교 방법과 모델 단순화 방법이 결정되고 나면 검색을 위하여 데이터베이스 내에서 파트를 indexing하고 그룹화하는 방법도 고려되어야 한다. McWherter^[4]와 Peabody^[18]가 CAD 모델을 위한 데이터베이스의 indexing과 그룹화 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 우선 모델의 토폴로지 정보를 이용하여 model signature graph를 그린 후 이것을 기준으로 각 파트에 index를 부여한다. 그 다음 total square error가 최소가 되도록 'k'개의 그룹으로 분류한다. 그룹의 개수 'k'는 사용자가 지정하도록 한다. 비록 본 연구에서는 topology 정보를 사용하지 않지만 데이터베이스를 그룹화하는 측면에서 위 논문들을 참고하였다.

3. 기본개념

3.1 상세화 정도(Level of Detail, LOD)

요즘 들어 컴퓨터 하드웨어가 발달하면서 그래픽 장치의 성능도 엄청나게 향상되었다. 그럼에도 불구하고 복잡한 개체들을 화면상에 표시할 때는 매우 많은 요소들이 표현되어야 하며 복잡한 행렬 계산이 수반되므로 적지 않은 시간이 걸린다. 예를 들어 가상현실을 구현하려면 단순히 개체를 표시하는 것뿐만 아니라 그것의 변화를 실시간으로 반영할 수 있어야 한다. 이러한 작업은 많은 메모리를 필요로 하므로 현대의 컴퓨터 시스템에서도 실시간으로 구현하기가 쉽지 않다. 그러므로 복잡한 계산을 줄이면서 효과적으로 표시하는 방법이 필요하다.

이를 위하여 LOD 개념이 사용된다. LOD는 'level of detail'을 말하며 이것은 목적에 따라 그에 적합한 상세화 레벨을 사용함을 뜻한다. 예를 들어 '기어' 자체를 화면상에 표시한다면 기어의 치면들을 포함하여 모든 세부 형상을 다 표현해야 한다. 그러나 단지 기

어의 대략적인 크기만 알고 싶다면 기어를 실린더 형상으로 단순화하여 표현하는 것만으로도 충분할 것이다. 상세화 레벨이 낮아질수록 출력을 위한 계산량은 줄어든다. 따라서 이 방법을 이용하면 메모리 사용량과 계산량을 각 목적에 맞게 조절할 수 있다.

LOD를 구현하는 데는 크게 두 가지 방법이 있다. 컴퓨터 그래픽 분야에서는 표면을 나타내는 삼각형(facet)의 개수를 줄이는 방법이 가장 널리 사용된다. 예를 들어 원래 모델을 표현하기 위하여 10000개의 삼각형을 사용하였다고 하면 레벨이 낮아질수록 점차 사용하는 삼각형의 개수를 줄여나가는 것이다. 이 방법을 사용하여 계산량을 줄일 수 있다. 기계 공학, 특히 CAD분야에도 이와 비슷한 방법이 있다. 형상을 단순화하여 데이터의 복잡성을 줄이는 것이다. 예를 들어 어떤 파트가 B-rep 데이터 구조로 저장되어 있다면 토폴로지 정보와 형상 정보를 동시에 가지고 있다. 이 때 형상 정보를 좀더 자세하게 저장하게 되면 화면 출력 시 좀더 세밀한 표현이 가능해진다. 반대로 형상 정보를 줄여서 저장하면 상세화 정도를 낮출 수 있으며 그에 따라 출력을 위한 계산량도 줄어든다. 그러나 모델을 단순화하기 위하여 이런 방법을 사용하게 되면 레벨이 낮아질수록 원래의 형상이 심하게 왜곡되며 심한 경우 원래의 형상으로 복원하는 것이 불가능할 수도 있다. 게다가 이 방법을 사용하면 데이터베이스 내의 모델들을 분류하기가 어려워진다. 모든 모델들이 가장 낮은 레벨로 단순화된 경우 각 모델 간의 차이가 불분명해지기 쉽기 때문이다. 따라서 유사성 비교의 측면에서 이 방법은 좋지 않다고 볼 수 있다.

LOD를 구현하는 또 다른 방법이 있다. 원래의 모델에서 특정 부분을 더하거나 뺌으로써 복잡도를 조절하는 것이다. 더하거나 빼는 부분은 모델의 전체적인 형태에 영향을 미치게 되므로 임의로 정할 수는 없다. 일반적으로 관통구멍, 모따기, 블렌딩 형상 등이 제거 혹은 복원의 대상이 된다. 왜냐하면 이러한 형상들은 모델의 특성을 나타내는 정보가 될 수 있고 또한 이런 형상들이 제거되거나 복원될 때 상대적으로 전체 모델의 형상이 크게 변화하지 않기 때문이다. 또한 이 형상들은 데이터베이스 내의 모델들을 그룹화하는 단서가 될 수도 있다. 본 연구의 목적은 원하는 파트를 검색하기 위하여 데이터베이스를 그룹화하고 각 파트에 index를 부여하는 것이다. 따라서 두 번째 LOD 방법을 사용하는 것이 목적에 부합한다고 볼 수 있다.

두 가지 LOD 방법을 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1. LOD를 구현하는 두 가지 방법.

3.2 다중 해상도 알고리즘

본 연구에서는 LOD를 구현하기 위하여 파트의 형상들을 더하거나 뺀다. 이러한 방법을 “다중 해상도 (Multi Resolution)”라고 부르기로 한다. 이 방법은 “Wrap-around”와 “Smooth out”이라는 두 가지 operation으로 구현된다. 이 operation들은 Kim^[12]의 논문에 잘 설명되어 있다.

Wrap-around operation은 B-rep에서 모델을 복잡하게 만드는 것으로 간주되는 블렌딩, 모따기, 관통구멍, 오목 형상 등을 제거하는 역할을 한다. 이러한 형상들이 제거되고 나면 주변의 면들이 확장되어 빈자리를 메우게 되며 토폴로지 정보와 형상 정보도 그에 따라 변하게 된다. 이 과정을 Fig. 2(a)에 나타내었다.

Smooth out operation은 Fig. 2(b)와 같이 작은 boss나 rib 등의 돌출 형상을 제거하는 것이다. 제거되는 형상들은 전체 모델에 비하여 상대적으로 부피가 매우 작다. 이러한 형상들이 제거되고 나면 좀더 부드러운 형상이 나타나고 Wrap-around나 기타 다른 단순화 방법을 사용하기가 용이해진다.



Fig. 2. Multi Resolution Operation.

두 operation은 모두 제거된 형상들을 sheet body의 형태로 저장해 두기 때문에 이 sheet body를 이용하여 sectioning이나 union operation을 함으로써 원래의 모델로 복원할 수 있다. 또 각 형상들은 그것을 구성하는 face-set의 넓이가 작은 것부터 큰 것의 순서로 제거된다. 왜냐하면 직관적으로 생각했을 때 face-set의 넓이가 작을수록 전체 파트에 미치는 영향이 작음을 알 수 있기 때문이다. 제거나 복원의 대상이 되는 특정 형상들은 다음과 같다.

3.2.1 오목 형상(concave feature)

오목 형상은 오목 모서리(concave edge)를 갖고 있는 형상을 말한다. 어떤 모서리를 매개로 만나는 두

면이 이루는 내각이 180도 보다 큰 경우 그 모서리를 오목 모서리라고 한다. 실제 모델에서 오목 형상은 오목 모서리들로 연결된 여러 개의 면들로 이루어진다. 이 경우 최초로 검색된 concave face로부터 연결 관계를 따라가면서 반복적으로 concave 영역 전체를 찾아 나가게 된다.

3.2.2 블렌딩 형상(blending feature)

Fillet은 오목 모서리에 round는 볼록 모서리에 위치한다.

3.2.3 관통구멍 형상(passage feature)

관통구멍 형상은 모델을 관통하는 형상을 말한다. 본 연구에서 사용한 알고리즘은 단순 관통구멍뿐만 아니라 여러 면에 걸쳐 있는 관통 형상 역시 제거와 복원이 가능하다.

3.2.4 모따기 형상(chamfer feature)

모따기 형상을 이루는 면을 모따기 면(chamfer face)이라고 부른다. 모따기 면은 특정 모서리에 삽입되어 그 모서리의 내각을 증가시키는 역할을 한다.

3.2.5 Smooth out feature

Smooth out operation 과정에서 제거되는 형상으로 rib나 boss 등과 같이 돌출된 부분이다. 전체 모델에 비하여 부피가 매우 작다.

각 형상의 예시를 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 3. Concave, blend, passage, chamfer, smooth out.

4. 유사성 비교 알고리즘

4.1 전체 과정

앞서 언급한 바와 같이 유사성을 비교하는 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 외형 자체를 비교하는 것이고 두 번째 방법은 특징적인 정보를 추출하여 비교하는 것이다. 두 방법은 모두 장단점을 가지고 있음도 언급하였다. 본 연구에서는 두 가지 방법의 장점을 취하는 절충안을 제안하여 더 좋은 결과를 얻는 것을 목표로 한다.

본 연구의 목적은 새로 디자인 하려는 파트와 가장 비슷한 파트를 검색해내는 것이다. 그러므로 먼저 디

자인 과정에서 유사성의 의미를 확실히 정의하여야 한다. 요즘 대부분의 기계 파트들은 형상 기반 모델링 시스템을 이용하여 설계된다. 이 모델링 시스템에서 설계자는 미리 정의된 여러 가지 형상들의 치수와 구속조건을 변화시키고 그것들을 적절히 조합함으로써 원하는 파트들을 만들어낸다. 예를 들어 Fig. 4(a)는 원래의 파트이고 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 수정된 파트이다. 여기서 원래 파트는 하나의 기반 형상(base feature)과 몇 개의 세부 형상(sub-feature)으로 구성되어 있다. 기반 형상은 열쇠구멍 모양의 돌출 형상이며 그 위에 타원의 위아래를 잘라낸 모양의 돌출 형상이 더해진 후 두 개의 관통 구멍이 추가되어 있다.

이 파트는 두 가지 형태로 수정된다. 우선 Fig. 4(b)와 같이 기반 형상의 치수나 구속조건을 수정하는 방법이 있다. 또 Fig. 4(c)처럼 세부 형상을 수정하거나 추가 혹은 제거하는 방법이 있다.

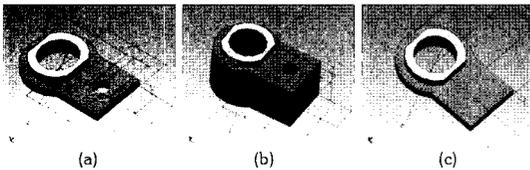


Fig. 4. Feature based modeling (SolidWorks™ 2003).

그러므로 설계자가 유사한 파트를 검색할 때는 두 가지 조건이 고려되어야 한다. 우선 기반 형상이 새로 설계하려는 제품과 유사하여야 한다. 왜냐하면 세부 형상들이 아무리 유사하다고 해도 기반 형상이 전혀 다르다면 이것부터 다시 설계해야 하고 그렇게 되면 그것에 종속된 세부 형상들도 잃게 될 가능성이 높기 때문이다. 실제로 대부분의 형상 기반 모델러에서 그러한 현상이 발생한다.

일단 기반 형상이 새 제품의 컨셉과 유사하다면 그 다음에는 유사한 세부 형상들을 많이 가지고 있는 것이 유리하다. 세부 형상들을 새로 만드는데 드는 시간을 줄일 수 있기 때문이다.

이러한 특성을 감안하여, 두 단계의 비교가 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 기반 형상 즉 전체 형상을 기준으로 파트들을 분류하기 위하여 전체적인 형상 정보가 이용된다. 그 다음 B-rep 정보를 이용하여 유사한 세부 형상들을 찾아내게 된다.

4.2 그룹화

만약 두 파트의 기반 형상이 유사하다면 그들의 전체적인 외형도 비슷할 것이다. 전체적인 외형은

Osada⁹⁾가 제안한 shape distribution graph를 이용하여 비교된다. 그의 연구에서 Osada는 정해진 개수의 포인트를 파트 표면에서 샘플링한 후 모든 포인트 쌍에 대하여 Euclidian 거리를 구하였다. 그런 다음 그 거리에 대한 포인트 쌍의 개수로 분포도를 그렸다. 그 분포도는 파트의 전체 형상에 따라 일정한 경향성을 가지고 나타난다. 그러므로 전체적인 형상의 유사성은 이 그래프를 이용하여 비교가 가능하고 그에 따라 몇 개의 그룹으로 나누는 것이 가능해진다. 예를 들면 Fig. 5와 같다.

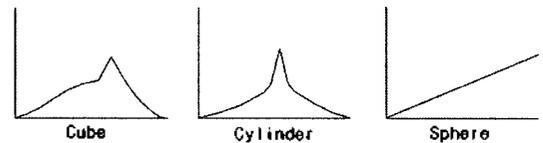


Fig. 5. Shape distribution graphs.

Osada의 방법은 계산이 매우 간단하며 파트의 자세나 좌표계를 일치시킬 필요가 없는 장점이 있다. 그러나 역시 몇 가지의 단점도 존재한다. 우선 너무 적은 개수의 샘플링 포인트를 사용하면 신뢰성이 떨어진다. 또한 샘플링 포인트의 개수를 늘릴수록 그래프를 그리는데 훨씬 더 많은 시간이 걸린다. 다음으로 파트의 형상이 복잡해지면 대부분의 파트에서 shape distribution graph가 정규 분포 형태를 띠게 되어 구분이 어려워진다. Osada의 연구에서는 각 파트당 1024개의 샘플이 분포도를 그리는데 사용되었다. 이것은 그의 연구 목적에는 적합한 숫자이겠지만 본 연구에서는 상대적으로 더 큰 데이터베이스를 대상으로 적용하기 때문에 너무 큰 숫자이다. 따라서 본 연구에서는 각 파트당 300개의 샘플만이 사용된다. 왜냐하면 이 정도의 샘플 만으로도 충분한 경향성을 가진 그래프를 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 만약 비교 대상이 복잡하다면 300개의 샘플은 부족할 수도 있다. 그러므로 제안된 방법에서는 일단 대상을 단순화시켜 적은 수의 샘플로도 비교가 가능하도록 만든 후 shape distribution graph를 이용하여 비교하도록 한다.

4.3 세부 비교

일단 전체 형상에 따라 데이터베이스의 그룹화가 끝나게 되면 query 파트를 데이터베이스 내에 reference 파트들과 비교한다.

많은 유사성 비교 방법에서 형상 벡터(feature vector)를 이용한다. 형상 벡터란 일종의 행렬로서 행렬의 각 원소는 파트내의 각 형상들의 특징을 나타낸

다. 본 연구에서도 모든 파트에 형상 벡터가 부여되며 비교 대상이 되는 두 파트의 형상 벡터를 이용하여 유사성 지수(similarity index, SI)를 산출하게 된다. 유사성 지수는 한 파트가 다른 파트와 얼마나 유사한 지를 나타내는 지수이다.

본 연구에서 사용된 형상 벡터는 세 가지 원소로 구성된다. 첫 번째 원소는 그 파트가 속한 그룹의 정보이다. 두 번째는 완전히 단순화된 파트의 부피이다. 세 번째 원소는 세부 비교 대상이 되는 형상들의 정보이다. 이때 세 번째 원소는 관통구멍, 모따기, 블렌딩, 오목형상, smooth out feature의 개수와 delta volume을 나타내야 하므로 몇 개의 하위 행렬을 가질 수 있다. Delta Volume이란 파트로부터 어떤 형상이 추가되거나 제거될 때 발생하는 부피 변화의 절대값을 말한다. 첫 번째 원소는 그룹화에만 이용되고 유사성 지수의 계산에는 두 번째와 세 번째 원소가 이용된다.

$$\text{유사성 지수(SI)} = \frac{1}{\sum \text{deviation of detailed features}}$$

유사성 지수가 클수록 두 파트가 더 유사함을 나타낸다. 자세한 식은 다음과 같다.

$$SI = \frac{1}{\sum_{n=1}^5 \left[\sum_{k=1}^{I_n} \left\{ \left(\frac{DV_{k,n,q}}{V_{Q,simplified}} - \frac{DV_{k,n,r}}{V_{R,simplified}} \right)^2 \times VR \times FND \right\} \right]} \quad (1)$$

식 (1)에 사용된 각 변수의 정의는 다음과 같다.

$DV_{k,n,q}$: query 파트에 존재하는 'k'번째 'n' 타입 형상의 delta volume ($n=1, 2, 3, 4, 5$ 이며 k는 'n' 타입 형상의 총 개수에 따라 변한다.) 5가지 타입의 형상이 비교 대상이 된다. n이 '1'일 경우 관통구멍, '2'일 경우 모따기, '3'일 경우 blend, '4'일 경우 concave 형상, 그리고 '5'일 경우 smooth-out 형상을 나타낸다.

$V_{Q,simplified}$: query 파트가 최대한 단순화 되었을 때의 부피.

$DV_{k,n,r}$: reference 파트에 존재하는 'k'번째 'n' 타입 형상의 delta volume ($n=1, 2, 3, 4, 5$ 이며 k는 'n' 타입 형상의 총 개수에 따라 변한다.) 5가지 타입은 $DV_{k,n,q}$ 의 경우와 동일하다.

$V_{R,simplified}$: reference 파트가 최대한 단순화 되었을 때의 부피.

'VR'은 $DV_{k,n,q}/V_{Q,simplified}$ 를 기본값으로 가진다. 만약 query 파트에 존재하는 특징 형상의 개수가

reference 파트에 존재하는 동일 형태의 형상 개수보다 작다면 VR은 $DV_{k,n,q}/V_{R,simplified}$ 로 대체된다. 예를 들어 query 파트에 3개의 관통구멍이 존재하고 reference 파트에 4개가 존재할 경우, k가 1에서 3까지의 값을 가질 때는 $VR = DV_{k,n,q}/V_{Q,simplified}$ 이 되고 k가 4이면 $VR = DV_{k,n,r}/V_{R,simplified}$ 이 된다. VR을 이러한 방식으로 변화시키는 이유는 query 파트가 비교의 주체이므로 query 파트 내에 존재하는 형상이 전체 형상에 얼마만큼 영향을 미치는 가를 반영하기 위해서이다. 그러나 만약 query 파트 내에 더 이상 비교 대상이 될 형상이 없을 경우, reference 파트에서의 delta volume이 커질수록 query 파트와의 차이가 크다고 생각할 수 있다. 이미 query 파트 내에는 해당 delta volume을 가진 형상과 비교할 대상조차 없는 상태이기 때문이다.

본문의 가장 마지막에 나오는 'FND' 항은 비교 대상이 되는 형상들 간의 면의 개수의 차이를 나타낸다. 이 항은 형상의 형태를 고려하기 위하여 사용된다. 비록 면의 개수를 가지고 형상의 형태를 완벽하게 알아낼 수는 없지만 대략적인 형태는 가능할 수 있다. Fig. 6의 예를 보면 알 수 있다. 그러므로 형상들 간의 면의 개수의 차이를 하나의 비교 기준으로 사용하는 것이 가능하다. FND는 아래와 같은 방법으로 계산된다. 값이 0이 되지 않도록 하기 위하여 1을 더한다.

$FND = \text{두 형상의 면의 개수 차의 절대값} + 1$



Fig. 6. Calculation of FND.

I_n 은 query와 reference 파트에 존재하는 특징 형상 중 더 많은 쪽의 개수를 나타낸다. 예를 들어 만약 query 파트 내의 blend 형상의 개수가 7이고 reference 파트 내의 개수가 5라면 I_n 은 7이 된다. 이 경우 $DV_{6,3}$ 과 $DV_{7,3,r}$ 은 0으로 한다. 이렇게 함으로써 delta volume의 편차뿐만 아니라 형상 개수의 차이도 고려할 수 있다.

식 (1)을 계산할 때는 비교대상이 되는 파트들에 존재하는 형상 중에서 delta volume이 비슷한 것끼리 짝을 지워서 계산해야 한다. 만약 형상의 크기가 무시된다면 결과의 신뢰성도 보장받을 수 없다. Fig. 7에 나타난 예를 보도록 한다. 만약 식 (1)을 Fig. 7(b)와 같이 잘못된 순서로 계산하게 되면 식 (1)의 분모

가 증가하게 되고 결과적으로 두 개의 파트가 유사함에도 불구하고 유사성 지수가 작아져 비슷하지 않은 것으로 분류될 수 있다.

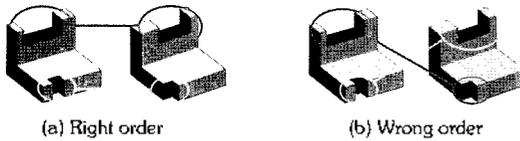


Fig. 7. Calculation order.

비교에 delta volume이 사용되는 이유는 전체 파트에서 해당 형상의 영향력을 가장 잘 나타내 줄 수 있는 값이기 때문이다. Delta volume을 대신할 값으로 해당 형상을 구성하는 face-set의 면적을 생각할 수 있다. 이 값은 많은 경우에 delta volume을 대체하여 좋은 결과를 줄 수 있다. 그러나 어떤 경우에는 면적으로는 형상이 가지는 중요성을 제대로 반영할 수 없을 수도 있다. Fig. 8의 예를 살펴보자. 만약 중앙에 위치한 관통구멍을 대표하는 값으로 면적을 사용한다면 그 값이 상대적으로 너무 작아서 관통구멍의 중요성이 간과될 위험이 있다. 그러나 실제로 이 관통구멍은 전체 형상에 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 문제는 delta volume을 사용함으로써 해결될 수 있다.

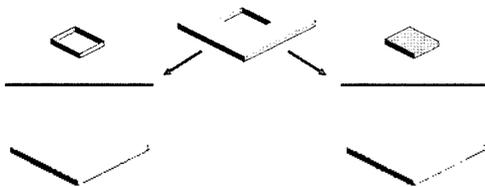


Fig. 8. Face set and delta volume.

또한 delta volume은 정규화를 위하여 원래의 파트가 아니라 최대한 단순화된 파트의 부피로 나누어져야 한다. 만약 원래 파트의 부피로 나눌 경우 특정 형상의 delta volume이 매우 크다면 나누어진 값이 1보다 커질 수도 있기 때문이다. 이 경우 그 형상이 전체 모델에서 차지하는 비중에 대한 혼동이 올 수 있다. 부분을 전체로 나눌 값이 1보다 크다는 것은 더 이상 그 형상을 전체 모델의 부분이라고 보기 어렵다는 것을 의미하기 때문이다.

이제 유사성 지수를 계산하는 간단한 예를 보이도록 한다. Fig. 9(a)는 query 파트, Fig. 9(b)는 reference 파트이며 Fig. 9(c)는 두 파트가 최대한 단순화된 모

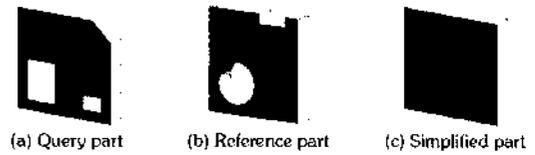


Fig. 9. Example parts.

습이다. 두 파트는 모두 같은 형태로 단순화 되었지만 크기는 서로 다르다. 단순화된 query 파트의 부피는 200이고 reference 파트의 부피는 200000이다. Query 파트에는 두 개의 관통구멍과 하나의 모따기 형상이 존재한다. 상대적으로 큰 관통구멍의 delta volume은 24이고 작은 관통구멍의 delta volume은 6이다. 모따기 형상의 delta volume은 4이다. Reference 파트는 하나의 관통구멍과 하나의 concave 영역을 가진다. 관통구멍의 delta volume은 26101이고 concave의 delta volume은 6000이다. 따라서 $V_{Q, simplified}$ 는 200, $V_{R, simplified}$ 는 200000, $DV_{1,1,q}$ 는 24, $DV_{2,1,q}$ 는 6, $DV_{1,2,q}$ 는 4, $DV_{1,1,r}$ 는 26101 그리고 $DV_{1,1,r}$ 는 6000이 된다. 이 값들을 이용하여 유사성 지수는 다음과 같이 계산된다.

$$SI = \frac{1}{\left[\left(\frac{24}{200} - \frac{26101}{200000} \right)^2 \times \frac{24}{200} \times 4 \right] + \left[\left(\frac{6}{200} \right)^2 \times \frac{6}{200} \right] + \left[\left(\frac{4}{200} \right)^2 \times \frac{4}{200} \right] + \left[\left(\frac{6000}{200000} \right)^2 \times \frac{6000}{200000} \right]} = 8694.1$$

5. 실행 결과

174개의 기계 파트에 대하여 제안된 방법을 적용하였다. 비교에 사용된 파트들은 “www.proccentral.com”에서 수집되었다.

5.1 그룹화

만약 파트들이 여러 개의 작은 그룹으로 분류되어 있다면 세부 비교의 횟수를 줄일 수 있을 것이고 그렇게 되면 계산 시간도 줄어들 것이다. 그러나 그룹의 개수가 너무 많아지면 그룹 사이의 차이가 명확하지 않아 질 수도 있다. 그러므로 적당한 개수의 그룹으로 나누는 것이 중요하다. 계산시간과 비교의 신뢰성을 동시에 고려하여 shape distribution graph에 따라 주어진 파트들을 8개의 하위 그룹으로 나누었다. 그래프의 형태가 분류의 기준이 되었다. 모든 파트들은 그룹화를 위하여 단순화된 상태이다. 분류 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

No	Parts
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Fig. 10. Classification result.

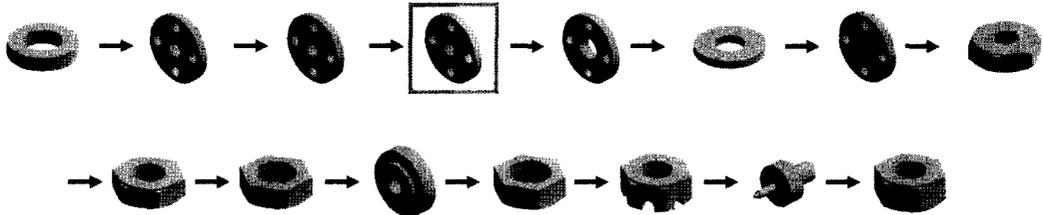


Fig. 11. Retrieval result 1.

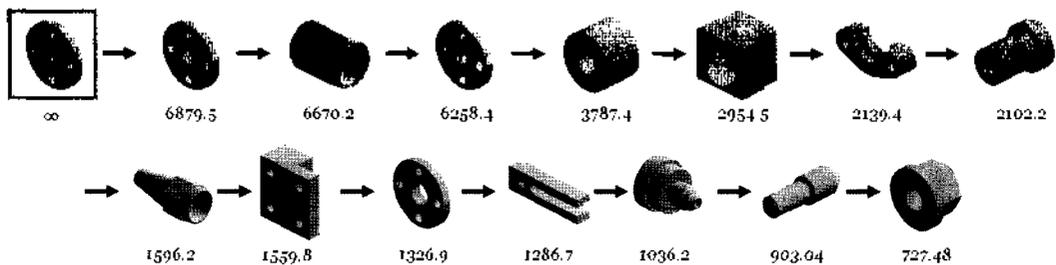


Fig. 12. Retrieval result 2.

5.2 파트의 검색

주어진 query 파트에 대하여 서로 다른 세가지 방법으로 테스트해 보았다. query 파트는 Fig. 10의 그룹 5에서 선택한 것이다. Fig. 11부터 Fig. 13까지 붉은색 사각형으로 둘러싸여 있는 것이 query 파트이다. 각각의 테스트 결과 중 유사성이 가장 큰 것부터 15개를 차례로 나열하였다.

가장 먼저 분류된 그룹을 무시하고 전체 데이터 베이스에 대하여 shape distribution graph만을 이용하여 유사성을 비교해 보았다. 결과는 Fig. 11과 같다. 이

테스트에도 가장 단순화된 파트의 shape distribution graph가 사용되었다. 검색이 전체 데이터 베이스에 대하여 이루어졌음에도 불구하고 가장 유사한 것으로 판정된 15개의 파트는 모두 그룹 5에 속하는 것을 볼 수 있다. 이것은 그룹화가 잘 이루어졌음을 말해준다. 그러나 유사성의 순서는 그다지 좋지 못하다. query 파트 자신조차 4번째로 유사한 것으로 되어 있다. 또한 shape distribution graph는 파트 표면의 임의의 점을 샘플링 하여 그리게 되므로 전체적인 모양은 비슷하게 나오지만 때면 그럴 때마다 세세한

모양이 조금씩 달라져 검색 결과에 영향을 미칠 수도 있다.

이제 Fig. 12의 결과를 살펴보도록 한다. 이것은 오직 형상 정보만을 가지고 비교한 것이다. 각각의 파트 아래에 있는 값들은 query 파트에 대한 유사성 지수이다. 이 경우 가장 유사한 파트의 유사성 지수가 무한대로 나타나는 이유는 형상 정보가 정확히 일치할 경우 식 (1)의 분모가 0이 되기 때문이다. 이것은 그 파트가 query 파트 자신임을 나타낸다. 그리고 검색의 결과는 몇 번을 반복하여도 동일하다. 그러나 검색 결과 속에는 query 파트와 전혀 다른 모양의 파트들도 존재한다. 왜냐하면 이 방법에서는 오직 형상의 타입과 delta volume만을 비교하기 때문이다.

마지막으로 본 연구에서 제안된 방법을 사용하였다. 형상 정보를 이용한 구체적인 검색은 query 파트와 가장 유사한 것으로 판정된 그룹 내에서만 이루어졌다. 이 예시의 경우 Fig. 10의 그룹 5가 된다. 검색 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 전체 형상의 측면에서나 세부 형상의 측면에서 모두 만족할만한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 따라서 제안된 방법이 보다 빠르고 신뢰성 있는 결과를 준다고 말할 수 있다.

6. 결 론

이 논문의 주된 목적은 디자인 단계에서 기존 파트의 재사용을 위하여 원하는 concept과 가장 유사한 파트를 찾아내는 것이다. 기존의 유사성 비교 방법은 일반적으로 두 가지 범주로 나누어진다. 전체 형상 정보를 이용하는 방법과 B-rep으로부터 얻어낸 특징 형상 정보를 이용하는 것이 그것이다. 두 방법은 모두 장단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 두 방법의 단점을 보완하면서 장점을 살릴 수 있는 방법이 제시되었다. 전체 형상 정보를 이용하여 전체적인 형태를 비교하고 특징 형상 정보를 이용하여 세부 형상을 비교하는 방법을 사용한다. 이를 위하여 다중 해상도 기법이 도입되었다. 낮은 해상도에서 전체 형태를 쉽게 비교할 수 있고 높은 해상도에서는 세부 형상의 비교가 가능하다. 이 다중해상도 기법을 이용하여 전체형상의 비교를 빠르게 수행할 수 있고 세부 비교를 위한 특징 형상들을 효과적으로 추출할 수 있다.

제안된 비교 방법에서 다중 해상도 알고리즘의 신뢰성은 매우 중요하다. 만약 파트가 제대로 단순화되지 못한다면 전체 형태의 비교가 제대로 이루어지기 어렵다. 또한 특징 형상들이 제대로 인식되지 못한다면 세부 형상의 비교가 제대로 이루어질 수 없다. 사

실 본 연구에서 사용된 다중해상도 알고리즘은 제안된 특징 형상을 100% 인식하지는 못한다. 또한 인식된 형상들을 모두 제거하는 것도 어려운 것이 사실이다. 그러므로 이 알고리즘을 좀더 일반적이고 신뢰성 있게 개선하는 것이 매우 중요한 과제이다.

전체 형상의 비교를 위해 shape distribution graph를 사용한 이유는 계산이 매우 간단하기 때문이다. 그러나 이 방법이 비록 빠르고 간편하긴 하지만 임의의 샘플을 대상으로 하기 때문에 종종 분류 결과가 좋지 않은 경우도 있다. 따라서 간단하면서도 좀더 신뢰성 높은 전체 형상 비교 방법을 찾아내는 것도 중요한 과제라 할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 대한민국 과학기술부 국가지정연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Alexei Elinson, Dana S. Nau, and William C. Regli, "Feature-based Similarity Assessment of Solid Models", In *Fourth Symposium on Solid Modeling and Applications*, C. Hoffman and W. Bronsvoort, Eds., ACM, ACM Press, pp. 297-310. Atlanta, GA.
2. Ali Shokoufandeh, Sven J. Dickinson, Kaleem Siddiqi, and Steven W. Zucker, "Indexing using a spectral encoding of topological structure", In *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 491-497, IEEE, 1999.
3. Cheuk Yiu Ip, Daniel Lapadat, Leonard Sieger, and William C. Regli, "Using Shape Distributions to Compare Solid Models", *Proceedings of the Seventh ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Saarbrücken, Germany, pp. 273-280, 2002.
4. David McWherter, Mitchell Peabody, Ali Shokoufandeh, and William C. Regli, "Database Techniques for Archival of Solid Models", *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 78-87, 2001.
5. Zhu, H. and Menq, C. H., "B-Rep Model Simplification by Automatic Fillet/round Suppressing for Efficient Automatic Feature Recognition", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, Issue 2, pp. 109-123, February 2002.
6. Masaki Hilaga, Yoshihisa Shinagawa, Taku Kohmura Toshiyasu L. Kunii, "Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes", In *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 203-212, 2001.
7. Michael Garland, and Paul S. Heckbert, "Surface

- Simplification Using Quadric Error Metrics”, *Proc. SIGGRAPH*, pp. 209-216, 1997.
8. Mitchell Peabody William C. Regli, “Clustering Technique for Databases of CAD Models”, Department of Mathematics and Computer Science Drexel University Philadelphia, PA 19104, June 2001.
 9. Robert Osada, Thomas Funkhouser, Bernard Chazelle, David Dobkin, “Matching 3D Models with Shape Distributions”, *Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications*, p. 154, May 07-11, 2001.
 10. Ryutarou Ohbuchi, Tomo Otagiri, Masatoshi Ibatō, and Tsuyoshi Takei, “Shape-Similarity Search of Three-Dimensional Models Using Parameterized Statistics”, in *Proceedings of the Pacific Graphics 2002*, pp. 265-274, October 9-11, 2002.
 11. Shinji Mukai, Susumu Furukawa, Mitsuru Kuroda. “An Algorithm for Deciding Similarities of 3-D objects”, *Proceedings of the Seventh ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 367-375, 2002.
 12. Kim, S. C., Lee, K. W., Hong, T. S., Kim, M. C., Jung, M. K. and Song, Y. J., “An Integrated Approach to Realize Multi-resolution of B-rep Model”, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications 2005*, submitted, 2004.
 13. Kim, S.-J., Kim, C.-H. and David Levin, “Surface Simplification Using a Discrete Curvature Norm”, In *Proceedings of 3rd Korea Israel Bi-National Conference on GMCG 2001*, pp. 151-157, Korea, October 2001.



홍 태 식

2004년 서울대학교 기계항공공학부 학사
 2006년 서울대학교 기계항공공학부 석사
 관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Multi-resolution Modeling, Human Modeling & Analysis



김 성 찬

1999년 서울대학교 기계항공공학부 학사
 2006년 서울대학교 기계항공공학부 박사
 2006년~현재 삼성전자 기술총괄 연구원
 관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Plastic Injection Mold Design, Multi-resolution Modeling



이 건 우

1978년 서울대학교 기계공학과 학사
 1981년 M.I.T. 기계공학과 석사
 1984년 M.I.T. 기계공학과 박사
 1984년~1986년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수
 1992년~1993년 M.I.T. 기계공학과 객원 부교수

2002년~2003년 Stanford 기계공학과 객원 부교수
 1986년~현재 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수
 관심분야: CAD, Assembly Modeling, Multi-resolution Modeling, Rapid Prototyping, Medical Device, Human Modeling & Analysis