

특징 형상 인식 연구의 현주소

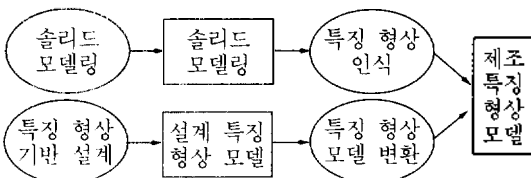
한 정 현

성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부

1960년대 초 미국 MIT의 Ivan Sutherland가 Sketchpad 시스템을 발표한 이래 컴퓨터 그래픽스는 빠른 속도로 발전을 이룩하여 왔는데, 이의 첫 응용 분야중 하나는 CAD였다. 초기의 CAD 시스템은 2차원 도면을 그리는데 한정되었지만, 1970년대부터 본격적으로 연구되기 시작한 솔리드 모델링의 발전에 힘입어 현재는 상당수의 3차원 CAD 시스템이 상용화되어 있다. 반면 1950년대 수치제어기계가 개발된 이래 CAM 역시 꾸준히 발전되어왔고, 현재 CAD와 CAM은 산업 현장에서 부품 설계와 생산의 자동화에 각기 중요한 기능을 담당하고 있다.

하지만, CAD와 CAM 사이에는 여전히 인간이 개입하여 CAD 데이터를 읽고 해석해 CAM 기계를 작동시키는 명령들을 만들어 내는 것이 현재의 실정이다. CAD와 CAM을 연결시키는 이와 같은 인간의 역할을 대체하고자 하는 것이 자동 공정 계획(Computer Aided Process Planning: CAPP)인데, 한 부품의 CAD 데이터를 입력으로 받아들여 그 부품을 제조할 수 있는 일련의 가공 명령들을 출력해내는 것이 CAPP의 임무이다. 이를 위해서 CAPP는 우선 구멍(hole), 홈(slot), 포켓(pocket) 등과 같은 특징 형상(feature)으로 그 부품을 해석해 내는 것이 필요하다. CAPP은 이들 각각의 특징 형상을 가공할 명령을 만들어내고 이들 명령을 순서 지운다. 예를 들면, 하나의 구멍에 대해 CAPP는 드릴 가공 명령을 만들어낼 수 있다.

그 부품의 특징 형상 모델(feature model)이라 하는데, 특징 형상 모델을 만드는 방법은, 위의 그림에 도식화된 것처럼, 특징 형상 인식(feature recognition)과 특징 형상 기반 설계(feature based design)의 두 가지로 나누어진다. 특징 형상 인식은 부품의 솔리드 모델을 입력하여 이로부터 특징 형상을 인식해내는 것이며, 특징 형상 기반 설계는 부품의 설계 단계에서부터 특징 형상을 이용하는 것이다. 특징 형상 기반 설계 시스템은 Quick Turnaround Cell(QTC), NEXT-Cut, Cybercut 등과 같은 학계에서 개발된 시스템과, Parametric Technologies의 Pro/ENGINEER, Bentley Systems의 Microstation Modeler 등의 상용 시스템들이 있다. 특징 형상을 이용하여 부품을 설계하게 되면, 특징 형상 인식 단계가 불필요 할 수도 있다. 하지만, 특징 형상 기반 설계의 문제점은, 부품의 설계자가 염두에 두는 특징 형상은 그 부품의 제조 과정에서 쓰이는 특징 형상과 항상 일치하지는 않는다는 것이다. 즉 설계 특징 형상(design feature)과 제조 특징 형상(manufacturing feature)은 종종 다르다. 예를 들면 Y자형의 부품을 설계하는데 있어 설계자는 rib이라는 설계 특징 형상을 없애놓는 간단한 특징 형상 모델을 생각하게 되지만, 생산 공정에 필요한 제조 특징 형상은 rib 주변을 깎아내는 포켓들을 필요로 한다는 것이다. 부품 설계자의 주관심은 그 부품의 기능과 외양에 있지, 그 부품이 어떻게 가공 생산되는지에 있지 않으므로 설계자로 하여금 제조 특징 형상으로 부품을 설계토록 하는 것은 무리가 있다. 따라서 특징 형상 연구에서는 (1) 설계 특징 형상과 제조 특징 형상은 다르다는 것, (2) 부품의 디자인은 설계 특징 형상 또는 일반적인 솔리드 모델링 기법을 이용하여 이뤄져야 한다는 것, (3) 이렇게 설계된 부품은 제조 특징 형상들로 재해



하나의 부품이 특징 형상들로 표현되었을 때 이를

석되어야 한다는 것에 대해 공감대가 이루어져 있다.

설계 특징 형상 모델을 제조 특징 형상 모델로 바꾸는 것을 특징 형상 모델 변환(feature model conversion) 또는 특징 형상 사상(feature mapping)이라 한다(그림 참조). 한 부품의 설계 특징 형상들을 제조 특징 형상들로 기계적으로 변환하는 것이 불가능 할 경우, 제조 특징 형상들은 CAD 데이터로부터 기하 추론과정을 거쳐 "인식"되어야 한다. 한편, 일반적인 솔리드 모델링 기법을 이용하여 부품이 설계된 경우, 또는 솔리드 모델링과 설계 특징 형상들의 혼합으로 설계된 경우에는 당연히 제조 특징 형상들은 "인식"되어야 한다. 따라서 특징 형상 모델 변환과 특징 형상 인식의 경계는 모호하며, 특징 형상 모델 변환에 있어서 특징 형상 인식의 기능은 핵심인 것으로 받아들여지고 있다.¹⁾

1970년대말 Tony Woo가, 또 1980년 캠브리지 대학의 Kyprianou가 특징 형상 인식에 관한 선구자적 연구 논문을 발표한 이래 기계공학, 산업공학, 컴퓨터 공학 등의 여러 관련 분야에서 특징 형상 인식에 대해 근 20년간 활발히 연구가 이루어져 왔는데, 현재는 미국을 중심으로 다음과 같은 커다란 4개의 조류가 형성되어 있다. 1) Purdue 대학의 T. C. Chang과 S. Joshi에 의해 처음 제창되고 그 뒤 대중적으로 많은 연구가 되어온 그래프 기법, 2) Colorado 주립 대학의 사쿠라이 교수가 주도하는 쉘 분해 기법, 3) 1982년 Tony Woo에 의해 제안되고 그 뒤 김용세 교수(Illinois 대학)에 의해 완성된 Convex Hull 기법, 4) 1980년대 말 USC의 Requicha 교수와 Vandenbrande가 제안하고, 그 뒤 Maryland 대학의 연구진에 의해 또 필자에 의해 지속적으로 연구되고 있는 혼적 추적 기법이 현재 가장 두드러진 연구 성과를 보이는 4가지 기법이다.

솔리드 모델링의 대중적인 기법으로는 Constructive Solid Geometry(CSG)와 경계 표현(Boundary Representation)이 있다. 특징 형상 인식 연구에서는 경계 표현을 입력으로 하는 것이 지배적인데, 이는 한 부품의 경계 표현은 유일하지만 CSG 표현은 유일하지 않고, 따라서 개별 특징 형상의 면/모서리/꼭지점의 패턴을 CSG에서 찾는 것은 용이하지 않기 때문이다. 그래프 기법에서는 부품의 경계 표현과 개별 특징 형상의 주요 위상 요소(topological entity)들을 각기(전산학

에서 가장 많이 쓰이는 자료 구조인) 그래프로 표현하고, 부품 그래프의 부그래프(subgraph)가 특정한 특징 형상 그래프와 일치되는지 간단한 패턴 매칭(pattern matching)기법을 이용해 탐색한다.

한 부품의 특징 형상들이 각기 고립되어 완전한 형태로 존재한다면, 이와 같은 패턴 매칭을 통해 우리는 쉽게 특징 형상을 인식해 낼 수 있을 것이다. 하지만 특징 형상들이 서로 교차할 경우, 각 특징 형상의 패턴은 종종(부분적으로) 파괴되므로 단순한 패턴 매칭은 불가능해진다. 예를 들어, 홈(slot)의 패턴은 두 벽면과 이들을 이어주는 바닥면으로 정의할 수 있지만, 교차하는 다른 특징 형상들이 존재할 경우 이들에 의해 홈의 벽면과 바닥면은 모두 분리될 수도 있다. 이를 기계적인 패턴 매칭으로 인식해내는 것은 불가능할 것이다. 이와 같이 서로 교차하는 특징 형상들(intersecting features)을 인식해 내는 것은 난해한 일이고, 이에 관한 연구가 특징 형상 인식 연구에 있어 핵심이었다.

그래프 기법에서는 1990년대 들어 Purdue의 Kashyap과 Marefat이,²⁾ 기하 추론과 인공지능의 불확정 추론이론을 결합하여, 교차하는 다른 특징 형상들로 인해 소실된 위상 요소들을 복구해 낸 뒤 패턴 매칭을 시도하는 알고리즘을 발표하였다. 하지만 이 방법의 문제점은, 필요한 위상 요소들만의 정확한 복구가 보장되지 않는다는 것이다. 필요 이상의 복구가 이루어지면 실제 존재하지 않는 특징 형상들이 인식되어질 수 있고, 필요이하의 복구가 이루어지면 존재함에도 불구하고 인식 못해내는 특징 형상들이 생길 것이다. 같은 그룹의 뒤이은 연구 결과, 필요한 위상 요소들만을 정확히 복구해내는 알고리즘이 개발되기는 하였지만, 이 알고리즘은 곡면을 포함하지 않는다면 체 부품과 서로 직교하는 특징 형상들만으로 인식 범위가 국한되어 있어서 실용적이지 못하다. 이들을 포함한 그래프 기법의 최근의 연구 성과는 참고문헌 [3], [4], [5]에서 찾아볼 수 있다.

이제까지 대부분의 특징 형상 인식 시스템들은 절삭 가공(machining)분야에서 개발되어 왔는데, 대체로 이들 시스템들은 절삭 가공을 시작할 재료(stock)의 솔리드 모델을 입력으로 요구한다. 불리안 연산을 이용해 stock에서 부품을 빼 이룬바 delta volume을 계산한 뒤, 이 delta volume을 완벽히 분해할 수 있는 특징 형상들의 집합을 인식해낸다. 최근 들어

주목을 받고 있는 쉘 분해 기법은 우선 delta volume의 곡면들을 확장 교차시켜 delta volume을 다양한 형태의 쉘들로 분해시킨 뒤(cell decomposition), 이들 쉘들의 부분 집합을 특정 기준에 의거해 재결합시키고(cell composition), 최종적으로 이들을 패턴 매칭을 통해 직결한 특징 형상으로 분류한다(feature classification). 쉘 분해 기법을 따르는 많은 알고리즘들은 분해된 쉘들을 재결합시키는데 있어 상이한 방법을 제안하고 있다. 쉘 분해 기법의 문제점은 "다단계 추론"에 있는데, 예를 들면 첫 단계인 cell decomposition은 특정한 특징 형상들을 인식하겠다는 계획 아래 지도되는 것이 아니라, 특징 형상 인식이라는 목표로부터 완전히 분리되어 독자적으로 진행된다는 것이다. 이렇게 분해된 쉘들을 재결합하는데 있어 이제까지 제안된 알고리즘들은 모두 임의(ad hoc) 고안된 것으로, 우리가 원하는 특징 형상들을 항상 인식해 내지는 못하는 한계를 가진다. Convex Hull 기법 역시 다단계 추론을 거치며 쉘 분해 기법과 유사한 한계를 보인다. 쉘 분해 기법과 Convex Hull 기법의 최근의 연구 성과는 참고문헌 [6], [7]과 [8], [9]에서 각각 찾아볼 수 있다.

혼적 추적 기법은 처음부터 각 특징 형상의 완전한 패턴을 찾기보다는, 교차 이후에도 존재하는 각 특징 형상의 최소의 '혼적'으로부터 시작해 고도의 기하 추론(geometric reasoning)과정을 거쳐 특징 형상을 복원해 내는 것이다. 개별 특징 형상마다 고유한 혼적과 기하 추론 알고리즘이 고안되었는데, 구멍의 경우 예를 들면, 교차하는 다른 특징 형상에 의해서 그 구멍이 완전히 파괴되지 않는다면 이는 부품에 최소한의 혼적을 남길 것인데(종종 파손된 형태로 존재하기도 하는), 원통형의 벽면이 그러한 혼적에 해당한다. 이 혼적이 바로 구멍이라는 특징 형상의 존재를 암시하는 '힌트'가 된다. 원통형 벽면으로부터 원통형 반공간(cylindrical halfspace)을 만들고, 불리언 연산을 이용해 이를 delta volume과 교차시킨 뒤, 이의 경계표현이 원래의 원통형 벽면과 stock 면이외의 면을 가지고 있는지 검사한다. 그러한 면을 가지고 있지 않다면, 이는 이른바 through hole이 된다. 가지고 있을 경우, 이들이 원통형 벽면 한쪽 끝에만 존재한다면, 이는 다른 한쪽 끝에서 접근 가능한(accessible) 구멍이 된다. 반면, 원통형 벽면 양단에 그러한 면들이 존재하면, 접근 불가능한

즉 가공 불가능한 특징 형상이 된다. 원통형 벽면 안쪽에 그러한 면들이 존재할 경우도 마찬가지로 가공 불가능한 특징 형상이 된다. 혼적 추적 기법에서 혼적 또는 힌트는 해당 특징 형상의 존재를 암시하는 하나의 정보에 불과하다. 따라서 많은 힌트들은 실제로 특징 형상을 만들어내지 못하기도 하며, 둘 이상의 힌트가 동일한 특징 형상을 만들어 내기도 한다. 혼적 추적 기법의 문제점은 실제 특징 형상보다 훨씬 많은 이러한 힌트들을 관리하는 만족할만한 알고리즘이 개발되지 않았다는 데에 있다. 혼적 추적 기법의 최근의 연구 성과는 참고문헌 [10], [11], [12]에서 찾아볼 수 있다.

특징 형상 인식의 연구에는 상호 교차하는 특징 형상들의 문제이외에도 많은 미해결 과제가 존재한다. 예를 들면, 하나의 부품이 여러 개의 제조 특징 형상 모델을 가질 수 있는 이른바 multiple interpretations의 문제, 인식된 특징 형상이 과연 주어진 절삭 공구들로서 가공 가능한지를 따지는 이른바 machinability의 문제, 개발된 알고리즘이 절삭 가공 이외의 분야로 확장될 수 있는가의 문제등이 주 연구 대상이다. 이들 문제들에 대한 소개, 그리고 이 논문에서 개략적으로 다룬 특징 형상 연구의 주요 4가지 기법의 차이점과 장단점은 참고문헌 [13], [14]에 상세히 기술되어 있다.

현재 특징 형상 인식의 소프트웨어 제품으로는 Geometric Software Services Co. Ltd.(GSSL)과 AlliedSignal Inc.에서 초보적인 제품들이 나오고 있다. GSSL의 제품은 대체로 그래프 기법에, AlliedSignal Inc.의 제품은 혼적 추적 기법에 기반한 것이다. 하지만 이들 제품들은 대체로 고립된 형태로 존재하는, 즉 상호 교차하지 않는 특징 형상들만을 인식하고 있으며, 입력 부품 CAD 데이터의 기하학적 구성도 상당히 제한하고 있다.

특징 형상에 관해 가장 많은 연구 논문이 발표되는 학술 회의는 미국 기계 공학회(ASME)의 Computers in Engineering Conference와 미국 전산학회(ACM) 그래픽스 분과(SIGGRAPH)의 Solid Modeling Symposium이며, 학술지로는 CAD 지에 훌륭한 논문들이 가장 많이 발표되고 있으며, Computers in Industry, IEEE의 그래픽스와 컴퓨터 비전 관련 학술지에도 논문들이 발표되고 있다. 한편 1997년 9월 Computers in Engineering Conference에서는 필자의

주도로 특징 형상 인식에 대한 특별 토론회가 열리는데, 현재 특징 형상 인식에 대한 연구를 가장 활발히 수행하고 있는 성균관 대학, Wisconsin 대학, Illinois 대학, Carnegie Mellon 대학, 스코틀랜드 Heriot-Watt 대학, 미국 Kansas 소재 AlliedSignal의 연구팀이 참여하여, 공통으로 주어진 9개 부품에 대해 각 팀의 특징 형상 인식 시스템을 시험해 본 결과를 토론한다. 어느 토론회와는 달리 참여팀들의 논문이 학술회지에 실리게 되어있으므로 이를 검토해 보면 특징 형상 인식 연구의 현 주소를 점검해 볼 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Jami Shah, Marti Mantyla and Dana Nau, editors, *Advances in Feature Based Manufacturing*, Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1994.
2. M. Marefat and R. Kashyap, Geometric Reasoning for Recognition of 3-D Object Features, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12**(10): 949-965 (1990).
3. Q. Ji and M. Marefat, Bayesian Approach for Extracting and Identifying Features, *Computer Aided Design*, **27**(6): 435-454 (1995).
4. S. Trika and R. Kashyap, Geometric Reasoning for Extraction of Manufacturing Features in Iso-oriented Polyhedrons, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16**(11): 1087-1100 (1994).
5. N. Sormaz, D. Clark, J. Corney and J. Tuttle, A Feature Recognition Algorithm for NC-machining, *Proc. 5th IFIP Workshop, WG 5.2*, 1996.
6. H. Sakurai, Volume Decomposition and Feature Recognition, Part I: Polyhedral Objects, *Computer Aided Design*, **27**(11): 833-843 (1995).
7. H. Sakurai and P. Dave, Volume Decomposition and Feature Recognition, Part II: Curved Objects, *Computer Aided Design*, **28**(6-7): 519-537 (1996).
8. Y. Kim, Recognition of Form Features using Convex Decomposition, *Computer Aided Design*, **24**(9): 461-476 (1992).
9. D. Waco and Y. Kim, Geometric Reasoning for Machining Features using Convex Decomposition, *Computer Aided Design*, **26**(6): 477-489 (1994).
10. JungHyun Han and Aristides Requicha, "3D Geometric Reasoning for Feature Recognition from CAD Models," *IEEE Computer Graphics and Applications* (accepted and to appear).
11. JungHyun Han and Aristides Requicha, "Integration of Feature Based Design and Feature Recognition," *Computer Aided Design*, **29**(5): 393-403 (1997).
12. W. Regli, *Geometric Algorithms for Recognition of Features from Solid Models*, PhD thesis, The University of Maryland, Department of Computer Science, College Park, MD, USA, 1995.
13. JungHyun Han, "Survey of Feature Research," Technical Report IRIS-96-346, Institute for Robotics and Intelligent Systems, USC, 1996.
14. JungHyun Han, William Regli and Mike Pratt, "Algorithms for Feature Recognition from Solid Models: 1997 Status Report," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (under review).