

◆특집◆ 쾌속 제품 개발

쾌속제품개발을 위한 형상역공학

최병규\*, 배석형\*\*, 유석규\*\*, 정원형\*\*

Shape Reverse Engineering for Rapid Product Development

B. K. Choi\*, S. H. Bae\*\*, S. K. Yoo\*\*, and W. H. Jung\*\*

Key Words : Shape Reverse Engineering, Rapid Product Development, Digital Model, CAD Model, Digital Mock-Up, Measuring System, RE S/W, Registration, 3D Triangulation, Data Reduction, Segmentation, Surface Fitting

1. 서론

개념으로부터 실물을 만드는 과정을 공학(engineering)이라고 할 때, 주어진 실물로부터 공학적 개념이나 형상 모델을 추출하는 과정을 역공학(reverse engineering)이라고 한다. 특히 실물의 형상을 측정하고, 측정데이터를 기반으로 형상모델링 과정을 거쳐, 컴퓨터상에서 이용 가능한 디지털 모델을 생성하는 것을 형상역공학(shape reverse engineering)이라고 한다. 형상역공학에 의해 만들어진 디지털 모델은 CAD/CAM 시스템에서 활용될 수 있도록 표준포맷(예, IGES, STEP 등)으로 출력되거나, 쾌속 제품 조형(rapid prototyping)을 위한 STL 파일 생성에 이용되기도 하며, NC(numerical control)가공을 위한 가공데이터 생성에도 이용된다.(Fig. 1 참조)

형상역공학은 자동차, 항공, 가전, 의료장비 등의 제조업 뿐만 아니라 게임, 애니메이션, 영화 등의 문화산업에서 널리 이용되고 있으며, 그 예를 나열하면 다음과 같다.

- 자동차 분야 : 외판, 양산금형, 부품 등의 CAD 모델 생성
- 의료 분야 : 보철기구, 인공장기의 제작
- 스포츠 분야 : 스포츠웨어 특수 제작
- 문화 분야 : 문화재 복원, 가상박물관
- 영화, 애니메이션, 게임 분야 : 실물 모형으로부터 캐릭터 제작

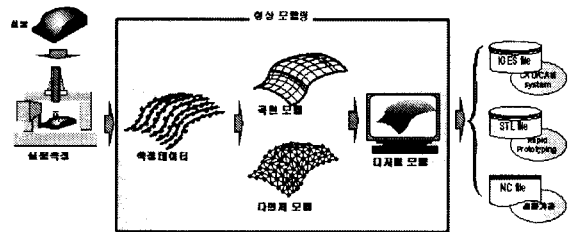


Fig. 1 Process of shape reverse engineering

특히 최근 제조업 분야에서는 신제품 개발 주기 단축으로 인한 개발 납기 단축 요구에 대응하기 위한 방안으로서, 주문적응형 쾌속제품개발(OARPD; Order Adaptive Rapid Product Development) 시스템<sup>16)</sup>의 필요성이 대두됨에 따라, 이를 지원하기 위한 형상역공학 기술 개발의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 본 논문에서는 쾌속제품개발 시스템에서 차지하는 형상역공학의 역할을 살펴보고, 국내에 보급된 주요 상용 역공학 시스템을 소개한다. 아울러 형상역공학 소프트웨어(이하 RE S/W

\* 한국과학기술원 산업공학과  
 Tel. 042-869-3115, Fax. 042-869-3110  
 Email bkchoi@vmslab.kaist.ac.kr  
 Surface modeling, CAD/CAM, CAPP, 자동화 제조시스템 모델링 및 시뮬레이션에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.  
 \*\* 한국과학기술원 산업공학과 대학원

개발에 필요한 주요 연구 내용을 조망하고, 앞으로의 개발 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 쾌속제품개발을 위한 형상역공학

주문적응형 쾌속제품개발 시스템은, 고객의 주문에 대응하여 고품질의 제품을 빠른 시간안에 개발하기 위한 시스템으로서, 지능형 제품설계, 가상시작시스템, 쾌속시작시스템, 형상역공학 시스템 등의 세부 시스템으로 구성된다.(Fig.2 참조)

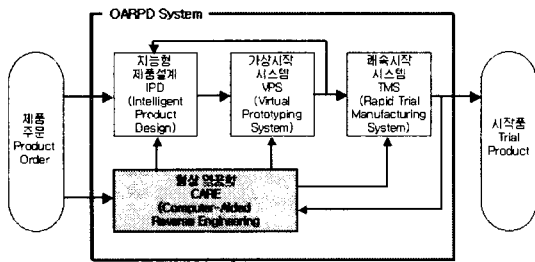


Fig. 2 OARPD system

심미적인 외관을 필요로 하는 제품 주문의 경우 스타일링 모형(styling mock-up)이 주어진다. 지능형 제품설계는 주어진 외관으로부터 정의되는 공간 내에서 수행되므로, 설계초기에 이에 필요한 외관의 형상 모델이 확보되어야 한다. 이를 위하여 형상역공학 시스템은 스타일링 모형으로부터 개략적인 형상 모델(rough surface model)을 신속히 생성할 수 있어야 한다.

가상시작 시스템은 디지털 모형(digital mock-up)을 이용하여 설계된 부품간의 상호관계를 가상 공간에서 검증하는 시스템으로, 비교적 단순화된 형태의 다면체 모델이 이용된다. 다면체 모델은 설계과정에서 생성된 CAD 모델로부터 얻어지지만, CAD 모델이 없는 표준 부품이나, CAD 도입 이전에 개발된 부품, 또는 타사 제품 등의 경우에는 실물을 대상으로 디지털 모델을 복원하여야 한다.

한편, 쾌속시작시스템에서는 가상시작시스템을 통하여 검증된 설계 모델을 이용하여 단시간내에 시작품을 제작한다. 이 경우도 형상역공학시스템을 통하여 실물로부터 쾌속시작시스템에 필요한 STL 파일이나 CAM 시스템이 요구하는 정밀한 디지털 모델을 생성한다.

쾌속시작시스템에서 만들어진 시작품은 조립

및 시험과정을 통하여 설계의 이상 유무를 확인하게 되고, 문제 발생 부위는 직접 시작품을 수정함으로써 해결한다. 이러한 경우 수정된 시작품은 형상역공학을 통하여 입력 CAD 모델과의 오차를 분석하고, 그 결과를 다시 설계에 반영하는 피드백(feedback) 과정을 제공한다. 특히 자동차 외관 곡면을 성형하기 위한 프레스 금형 제작의 경우 피드백 과정은 설계 경험을 축적한다는 의미에서 매우 중요하다.

### 2.1 심미적 곡면 생성을 위한 형상역공학

자동차의 아웃사이드 미러(outside mirror)나 기어쉬프트 노브(gearshift knob)와 같은 내외장 부품의 경우, OEM(Original Equipment Maker)은 외관 형상에 대한 스타일링 모형을 부품업체에 제공하고, 부품업체는 스타일링 모델을 이용하여 부품의 설계 및 개발을 전담한다. 따라서 부품업체에서는 CMM(Coordinate Measuring Machine)이나 비접촉식 삼차원 측정기를 이용하여 스타일링 모형의 측정 데이터를 얻어 내고, 이로부터 심미적인 곡면모형을 생성하여야 한다. 기어쉬프트 노브의 경우 CATIA®(73)를 사용하여 스타일링 모형으로부터 고품질의 곡면모형을 생성하기 위해서는, 약 1 개월의 고속런자의 작업을 필요로 한다. 또한 개념설계(layer-out design)단계에서는 내부 구조설계를 위해서 개략적인 외관 형상모델의 신속한 생성이 필요하다. 형상역공학 시스템은 신속한 곡면 생성을 통하여 개념설계단계에 필요한 대략적인 곡면 모델을 제공하고, 이를 이용하여 심미적인 고품질 곡면모형을 생성함으로써 제품개발기간을 획기적으로 단축시킬 수 있다.(Fig. 3 참조)

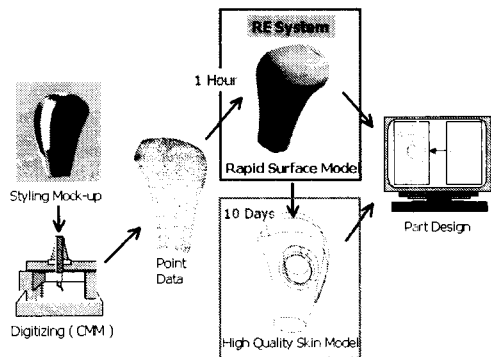


Fig. 3 Shape reverse engineering for knob design

### 2.2 디지털 모형 생성을 위한 형상역공학

컴퓨터상에서 제품의 조립성을 검토하는 가상 시작 시스템을 실행하기 위해서는 모든 부품의 CAD 모델화가 필요하다. 따라서 측정데이터로부터 단시간 내에 디지털 모델을 생성할 수 있는 형상역공학 시스템의 개발이 필요하다.

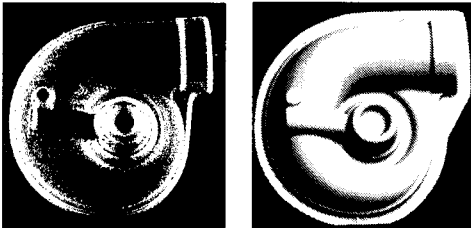


Fig. 4 Digital model of pump housing

### 2.3 설계 피드백을 위한 형상역공학

설계 피드백을 위한 형상 역공학의 대표적인 예로서 자동차 외관 생산을 위한 프레스 금형 제작 과정을 들 수 있다.(Fig. 5 참조) 자동차 외관의 CAD 모델로부터 프레스 가공성 검사를 위한 성형 해석(stamping simulation)과정을 거쳐 금형을 설계한다. 금형의 CAD 모델이 완성되면, NC 데이터를 생성하여 금형을 가공하고, 시험 성형(try-out)을 통해 주요 치수와 외관의 품질을 검사한다. 이 때 나타난 문제는 다년간의 경험을 가진 숙련자의 수작업을 통하여 해결하고 있다. 여러 번의 수정과 시험 성형에 의해 완성된 금형은 양산에 이용되는데, 이 때 금형의 수정된 결과는 CAD 모델에 반영되고 있지 않는 것이 일반적이다. 그러나 형상역공학을 통해 양산금형의 CAD 곡면을 확보하면 성형해석결과를 검증할 수 있고, 이후 금형설계에 반영할 수 있는 기술축적이 가능하다.

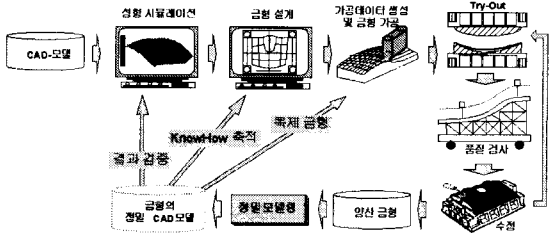


Fig. 5 Shape reverse engineering for die design

### 3. 국내에 보급된 형상역공학 시스템

형상역공학을 위한 주요 기술로서 측정 기술

과 모델링 기술을 들 수 있다. 측정 기술은 측정기와 운용 소프트웨어로 이루어진 측정시스템의 형태로 구현되고, 모델링 기술은 측정데이터를 바탕으로 곡면생성을 지원하는 형상 역공학 소프트웨어(RE S/W)로 구현된다. 형상역공학을 위해 국내에 보급된 비접촉식 측정 시스템으로서 Surveyor<sup>®67</sup>, Hyscan<sup>®68</sup>, iplus<sup>®69</sup> 등이 있으며, RE S/W 로는 Surfacar<sup>®70</sup>, ICEMSurf<sup>®71</sup>, RapidForm<sup>®72</sup> 등이 있다.

#### 3.1 비접촉식 측정 시스템

Laser Design Inc.에서 개발된 Surveyor<sup>®</sup>는 측정 가능한 대상물의 크기에 따라 다양한 규격의 측정기를 제공하고 있으며, 측정오차  $\pm 0.0125(mm)$ 의 성능을 보여준다. 측정경로에 해당하는 기준곡선(guide curve)이 주어지면 작업물의 형상에 따라 측정기의 높이를 자동으로 조절하여 높은 정밀도의 데이터를 얻을 수 있다. 운용 S/W 인 DataSculpt<sup>®</sup>는 측정을 위한 기준곡선 모델링에 사용되며, 측정데이터의 수정(editing) 및 페어링(fairing)에 이용된다.

Hyscan<sup>®</sup>은 Hymarc사에서 개발되었는데, CMM 또는 CNC(computer numerical control) 기계에 장착할 수 있는 형태로서, 60mm의 측정너비를 가지며  $\pm 0.025mm$  내의 형상오차를 보장한다. XHyscan<sup>®</sup>이라고 하는 운용 S/W와 함께 제공된다.

국내에서 개발된 비접촉식 측정시스템으로는, ㈜인텍플러스에서 개발한 iplus<sup>®</sup> 시리즈가 있는데, 비교적 작은 측정물을 대상으로 고속 및 고정밀 3차원 측정이 가능하다.

#### 3.2 상용 형상역공학 소프트웨어

Imageware<sup>®</sup>사에서 개발한 Surfacar<sup>®</sup>는 방대한 양의 비접촉 측정데이터를 처리할 수 있으며, 여러 방향에서 측정된 데이터를 정합(registration)하는 기능을 제공한다. 측정데이터로부터 단면데이터를 생성하여 근사곡면을 생성하는 기능과 블렌딩(blending)과 같은 곡면 연산(operation)을 통해 원하는 CAD 모델을 생성할 수 있다. 생성된 곡면 모델은 측정데이터와 비교가능(inspection)하며 오차검사가 용이하도록 컬러 디스플레이를 지원한다. 최근에는 모델링 도중 곡면간의 연속성(continuity)을 유지시키는 기능과, 여러 곡면의 관계를 유지

시키며 수정(editing)할 수 있는 기능이 보완되었다.

ICEM Technology 에서 개발된 ICEMSurf<sup>®</sup>는 입력데이터로부터 삼각형망을 생성한 후 x, y, z 방향에 평행인 단면 곡선들(contour line)로부터 곡면을 생성한다. 격자에서 생성된 사각형을 기반으로 곡면모델링을 하는 것이 특징이며, 곡면 재단(trimming)과정을 거치지 않고 사각형곡면으로 전체를 모델링 할 수 있다는 특징이 있다. 여러가지 곡면 연산(blending, offsetting 등)을 지원하며, 곡면 수정이 이루어지는 동안 곡면 품질 검사에 이용되는 곡률곡선(curvature curve), 하이라이트 곡선(highlight curve)을 실시간으로 갱신하여 보여줌으로써 고품질 곡면생성을 용이하게 한다.

RapidForm<sup>®</sup>은 국내벤처기업인 INUS Technology 가 개발한 RE S/W 로서, 여러 방향에서 측정된 데이터간의 정합 기능이 뛰어나며, 점군 데이터로부터 NURBS 곡면을 생성하고, 곡면간의 경계에서 불연속이 생기지 않도록 한번에 조정하는 기능을 가지고 있다.

#### 4. 형상역공학 소프트웨어 개발

비접촉식 3 차원 측정기술의 발전과 보급 확대로 높은 정밀도의 많은 양의 측정데이터를 얻을 수 있게 됨에 따라, 이를 처리하여 디지털 모델을 효율적으로 생성할 수 있는 RE S/W 의 개발에 필요한 다양한 연구들이 진행되고 있다. RE S/W 는 기존의 CAD 모델러(modeler)와 달리 (1)대용량 점군 데이터의 처리와 활용 (2)신속한 곡면생성 (3)사용자 개입 최소화 등의 요구조건을 수용하여야 한다. 본 장에서는 이와 같은 요구조건을 만족시키는 RE S/W 에서의 작업과정(Fig. 6 참조)에서 나타나는 주요 기능들과 이와 관련된 연구들을 살펴보고자 한다.

##### 4.1 측정데이터 정합

일반적으로 측정기의 측정 범위 및 측정 방향의 한계에 기인하여, 측정대상물 전체 형상의 복원을 위한 측정작업은 서로 다른 위치 및 방향에서의 반복측정을 필요로 한다. 이 경우 각 측정데이터는 각각의 지역좌표계상에서 정의되는 3D 좌표로 나타나므로, 하나의 통합된 좌표계로 일치시

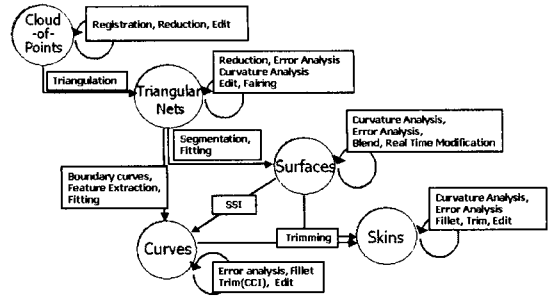


Fig. 6 Overall RE process

키는 작업이 필요한데, 이를 측정데이터의 정합(registration)이라고 한다.

가장 일반적인 방법은 측정물에 툴링볼(tooling ball)이나 입방체(cube)를 부착하여 툴링볼의 중심점이나 입방체의 상대적 위치 및 방향에 근거하여 변환행렬(transform)을 구하는 것이다.<sup>[28, 61, 62]</sup> Fig. 7 은 툴링볼에 근거한 측정데이터의 정합을 효율적으로 수행하기 위하여 개발된 다관절 고정구(fixture)이다.<sup>[61]</sup> 한편, 각 측정데이터 간의 대응점들을 반복적으로 탐색하고 그 오차를 최소화시키는 방법도 연구되고 있는데<sup>[7, 9, 20, 55, 60]</sup>, 측정데이터 간 중복영역을 검출하는 문제와 중복영역간 오차의 전역최소(local minimum)가 보장되지 않는 문제가 있다.

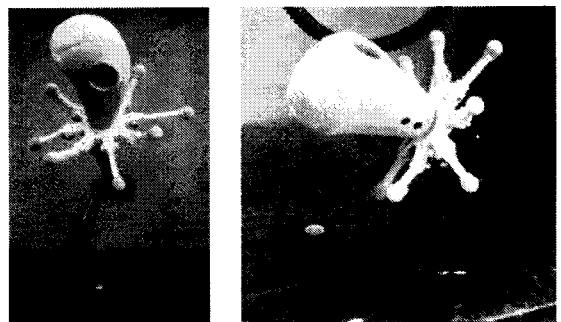


Fig. 7 Fixture for registration

##### 4.2 삼각형망 생성

삼각형망은 측정데이터의 렌더링(rendering) 이미지를 보여줄 수 있을 뿐만 아니라, 단순한 형태의 위상(topology)이 부여되어, 곡률 계산과 같은 정보를 쉽게 추출할 수 있으므로, 곡면모델 생성 작업의 입력데이터로서 활용된다.

기존에 연구된 3D 삼각형망 생성 연구는 측정 점들을 모두 지나는 삼각형망 생성방법<sup>[1, 3, 4, 5, 8, 31, 42, 44]</sup>과 측정점을 근사하는 삼각형망을 생성하는 방법으로 나눌 수 있다.<sup>[13, 33]</sup> 전자의 방법은 다시 체적기반방법<sup>[1, 3, 4]</sup>과 곡면기반방법<sup>[5, 8, 31, 42, 44]</sup>으로 나누어 볼 수 있는데, 체적기반방법은 3D 델로니(Delaunay) 방법을 이용하여 삼각형군을 생성하는데, 측정데이터가 필요조건을 만족한다면 올바른 결과를 보장할 수 있으나<sup>[1]</sup>, 많은 계산시간과 메모리를 요구하고, 측정데이터의 개수가 극단적으로 커지는 경우 수치적 불안정성(numerical instability)이 발생할 수 있다.<sup>[15]</sup> 한편, 곡면기반방법은 최초 삼각형으로부터 출발하여 모든 입력점이 삼각형망에 포함될 때까지 삼각형망을 확장해나가는 방법인데, 계산속도가 빠르고 대용량 데이터의 처리가 가능한 연구<sup>[5]</sup>가 있지만, 올바른 결과에 대한 이론적 보장은 주지 못하고 있다. Fig. 8은 Amenta<sup>[11]</sup>가 제안한 방법에 의하여 생성된 삼각형군에 위상관계를 부여하여, Lawson 삼각형망 구조<sup>[38]</sup>로 변환하는 그림이다.

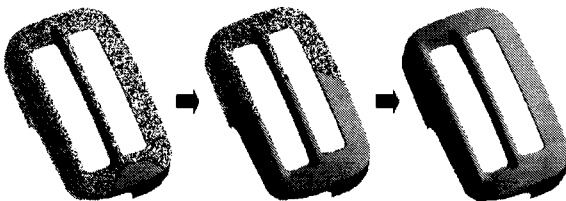


Fig. 8 Manifold extraction and LTL(Lawson's triangle list) data structure construction

### 4.3 데이터 감소 알고리즘

실물을 정확히 복원하기 위해서는 고밀도의 측정데이터가 요구되고, 이로부터 생성된 삼각형망은 대부분 수십만 개의 삼각형을 가지게 된다. 하지만 RE S/W 상의 시각화나 곡면생성 작업에서는 항상 고밀도의 삼각형망을 필요로 하지는 않는다. 오히려 수행하고자 하는 작업에 따라 주어진 오차범위 내에서 삼각형망의 삼각형 수를 줄임으로서 디스플레이에 필요한 계산량의 부담을 줄여 작업효율을 높일 수 있다.

삼각형망의 감소알고리즘으로는, 국소감소기준(local decimation criteria)에 근거한 반복적 감소알고리즘<sup>[14, 20, 57]</sup>, 동일평면통합<sup>[58]</sup>, 에너지함수최소화<sup>[34, 35]</sup>, 꼭지점 클러스터링<sup>[27]</sup>, 웨이브렛 기반방법<sup>[29]</sup>

및 셀분할방법<sup>[64]</sup> 등이 있다. Fig. 9은 셀분할방법을 이용하여 수행한 삼각형망의 감소 결과이다.

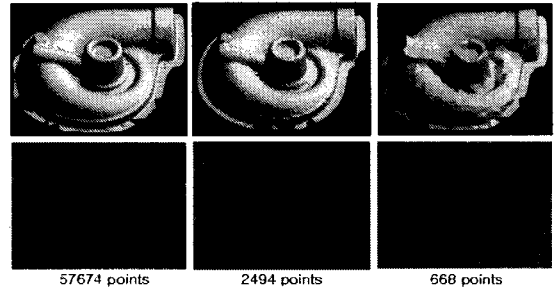


Fig. 9 Triangular net reduction using cell decomposition

### 4.4 페어링

실물 측정시 측정방법이나 측정환경에 따라 다양한 형태의 노이즈가 개입하므로, 부드러운 곡면모델 생성을 위해서는 구조화된 측정데이터 및 삼각형망에 대한 페어링이 필수적이다.

점열곡선(point sequence curve)에 대한 페어링에 대한 연구로는, 점열곡선에 대하여 정의되는 페어니스 값의 최소화<sup>[16, 20]</sup>, 저주파 필터링<sup>[45]</sup>, 웨이브렛을 이용한 다해상도 모델 생성 연구<sup>[23]</sup>, 차분페어링<sup>[10, 12, 48, 54]</sup> 등이 있다. 어레이 데이터(array data)에 대한 페어링은 주로 이미지 프로세싱 분야에서 주로 다루어지고 있으며<sup>[2]</sup>, 삼각형망 페어링은 다해상도 해석<sup>[17]</sup> 및 차분페어링에 관련된 연구<sup>[54, 65]</sup>가 진행되고 있다. Fig. 10은 대퇴골의 CT 측정데이터로부터 생성한 삼각형망에 대하여 4차차분페어링 수행전후의 렌더링 이미지 및 최대곡률맵을 보여주는 그림이다.

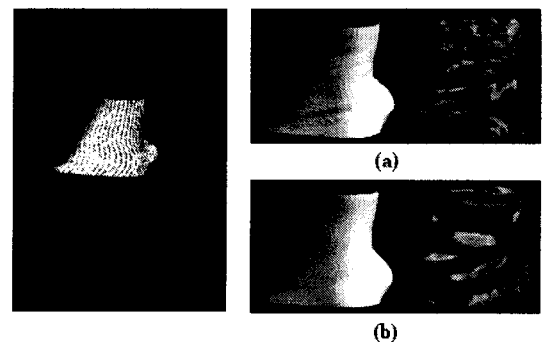


Fig. 10 4<sup>th</sup> difference fairing (a)before (b)after

#### 4.5 측정데이터 분할

주어진 구조화된 측정데이터를 자연스러운 곡면생성이 가능하도록 부분적인 점군으로 논리적으로 나누는 것을 분할(segmentation)이라고 한다.

분할은 크게 점기반, 선기반, 면기반 분할로 분류해 볼 수 있다. 점기반 분할<sup>32, 53, 56)</sup>은 주어진 측정데이터의 각 측정점에서 주변점들을 이용하여 특성값(planar/cylinder/sphere, base/blend surface 등)을 부여하고, 동일한 특성값을 만족하는 측정점을 연결하여 영역을 추출하는 것이고, 선기반 분할<sup>22, 43, 59)</sup>은 법선벡터의 불연속점이나 최대/최소곡률점 등을 추출한 후 영역의 경계로 연결함으로써 내부영역을 추출하는 방법이다. 마지막으로 면기반 분할은 분할과정과 곡면생성과정을 동시에 수행하는 것으로서, 영역확대(region growing)<sup>6, 24, 52)</sup> 또는 삼각형망 감소를 통한 분할 및 곡면 생성<sup>3, 18)</sup>에 관한 연구가 보고되고 있다. Fig. 11는 각 측정점에서 계산한 곡률에 근거하여 곡면생성에 용이한 영역으로 분할한 결과이다.

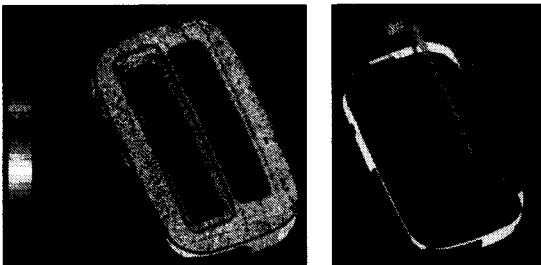


Fig. 11 Surface curvature analysis and segmentation

#### 4.6 곡면생성

적절히 분할된 측정데이터는 보간 및 근사에 의하여 곡면모델로 변환된다. 일반적인 B-스플라인 곡면 보간/근사 방법<sup>11, 15, 19, 36, 47)</sup>은 매개변수설정 방법(parameterization)이 결과곡선 및 곡면의 품질에 결정적인 영향을 미치므로 이와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다.<sup>15, 25, 26, 39, 40, 41)</sup> 한편, NURBS 곡선/곡면을 포함하는 유리곡선/곡면의 직접적인 생성방법에 대해서는 알려진 연구가 많지 않는데, 곡면생성문제를 비선형최적화문제로 해석하는 방법<sup>37)</sup> 및 측정물의 형상에 따라 적절한 직교좌표계상에서 일가함수로 곡면을 생성하고 공간상의 NURBS 곡선/곡면으로 변환하는 방법 등이 있다.<sup>49, 50, 51, 63)</sup> Fig. 12는 일반적인 4각정의역(domain)을 가

지는 곡면으로 나타내기 힘든 구면 이나 원주형 형상을 포함하는 형상의 측정데이터를 대상으로, 적절한 직교좌표변환을 통하여 적은 수의 곡면으로 근사하고 있는 과정을 보여주고 있다.

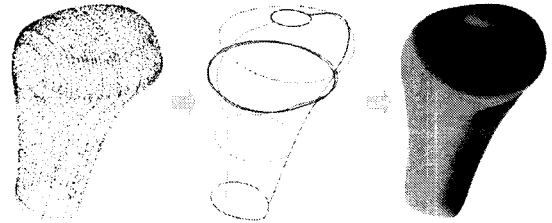


Fig. 12 NURBS surface approximation using orthogonal coordinate transformation

### 5. 결론

본 논문에서는 주문적응형 쾌속제품개발을 위한 형상역공학 시스템의 역할과 기능에 대하여 설명하였다. 아울러 국내에 보급되어 있는 형상역공학 시스템으로서 비접촉 측정 시스템과 RE S/W 들에 대하여 살펴보았으며, RE S/W 개발의 기반이 되는 주요 연구 내용을 정리하였다.

쾌속제품개발을 보다 효과적으로 지원할 수 있도록, 형상역공학 시스템을 구성하는 RE S/W 는 (1)측정 시스템의 보완, (2)모델링 속도향상을 위한 사용자 환경을 제공, (3)비속련자도 사용 가능한 지능형 시스템 등이 고려되면서 개발되어야 하며, 이를 정리하면 다음과 같다.

#### 5.1 측정시스템 보완

측정 노이즈(noise)를 제거하고, 여러 번 측정된 데이터들을 정합(registration)하는 알고리즘을 통해 측정데이터 보정을 할 수 있어야 하는데, 이는 측정 시스템과 밀착되어 개발하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 비접촉 측정에 의한 방대한 데이터를 효율적으로 처리할 수 있어야 하며, 다면체 모델 등을 보다 신속하게 생성하는 기능 등이 요구된다.

#### 5.2 모델링 속도향상을 위한 사용자 환경 제공

곡면 모델링 시간을 단축시키는 것이 형상역

공학을 실시하는 가장 큰 이유라고 할 수 있다. 모델링 속도 향상은 디자이너의 개념에 맞는 곡면 생성 환경을 지원하고 곡면 변경 결과를 효율적으로 보여주는 기능을 지원함으로써 가능해진다. 측정데이터 페어링(fairing), 곡면 생성의 단위 분할(segmentation), 근사 곡면 생성 등의 과정에서 사용자 입력을 줄이고 자동화 수준을 높이는 것이 모델링 속도향상을 위해 필수적이다.

### 5.3 비숙련자도 사용 가능한 지능형 시스템

숙련도가 높은 디자이너의 심미적 관점을 분석하고 이를 프로그래밍하여 비숙련자에게 제공하는 기능이 필요하다. 예를 들어, 일반적으로 알려진 디자인 요소 중 실루엣 라인(silhouette line), 하이라이트 곡선(highlight curve), 꺾인 부위 곡선(sharp edge), 외곽 곡선(boundary curve) 등의 특성 곡선(characteristic line) 등을 자동추출하고 작업자의 의도대로 변경할 수 있는 기능을 지원해야 한다.

### 참고문헌

1. Amenta, N., Bern, M., and Kamvyselis, M., "A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm," Proc. SIGGRAPH'95 Computer Graphics conf., pp. 415-422, 1998.
2. Anil K. Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing," Prentice Hall, 1989.
3. Bajaj, C., Bernardini, F., and Xu, G., "Automatic reconstruction of Surfaces and Scalar Fields from 3D Scans," Proc. SIGGRAPH'95 Computer Graphics conf., pp. 109-118, 1995.
4. Bernardini, F., Bajaj, C., Chen, J., and Schikore, D., "Automatic reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans," International Journal of Computational Geometry and applications, Vol. 9, No. 4 & 5, pp. 327-370, 1999.
5. Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C., Taubin, G., "The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction," IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol.5, No.4, pp. 349-359, 2000.
6. Besl, P. J. and Jain, R. C., "Segmentation through variable-order surface fitting," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No. 3, pp. 167-192, 1988.
7. Besl, P. J. and McKay, N. D., "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
8. Boissonnat, J.D., "Geometric structures for three-dimensional shape representation," ACM Transactions on Graphics Vol. 3, pp. 266-286, 1984.
9. Chen, Y. and Medioni, G., "Object modelling by registration of multiple range images," Image and Vision Computing, Vol. 10, No. 3, pp. 145-155, 1992.
10. Cho, S. K. and Choi, B. K., "Analysis of difference fairing based on DFT-filter," Computer-Aided Design, to be published
11. Choi, B. K., "Surface Modeling for CAD/CAM," Elsevier, Amsterdam, 1991.
12. Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Sculptured Surface Machining: Theory and Practice," Kluwer academic publishers, 1998.
13. Clarkson, K., Mehlhorn, K. and Seidel, R., "Four results on randomized incremental constructions," Computational Geometry: Theory and Applications, pp. 185-221, 1993.
14. Cohen, Varshney, "Simplification Envelopes," SIGGRAPH'96. ACM Press, August 6-8, pp. 119-128.
15. DeBoor, C., "A Practical Guide to Splines," Springer-Verlag, Berlin, 1978.
16. Eck, M. and Jaspers, R., "Automatic Fairing of Point Sets," Ed. N.S. Sapidis, Designing Fair Curves and Surfaces, pp. 45-60, 1994.
17. Eck, M. et al., "Multi-resolution analysis of Arbitrary Meshes", SIGGRAPH'95, Vol. 29, pp. 173-182, 1995.
18. Eck, M. and Hoppe, H., "Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type," SIGGRAPH'96, pp.325-334, 1996.
19. Farin, G., "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practice Guide," Academic Press, New York, USA, 1988.
20. Feldman, M., "Tight String Method to Fair Piecewise Linear Curves," Ed. N.S. Sapidis, Designing Fair Curves and Surfaces, pp. 61-72, 1994.

21. Feldmar, J., Ayache, N. and Betting, F., "3D-2D projective registration of free-form curves and surfaces," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 65, No. 3, pp. 403-424, 1997.
22. Ferrie, F. P., Legarde, J. and Whaite, P., "Darboux frames, snakes, and super-quadratics: geometry from the bottom up," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 8, pp. 771-783, 1993.
23. Finkelstein, A. and Salesin, D. H., "Multiresolution Curves," *SIGGRAPH'94*, pp. 261-268, 1994.
24. Fitzgibbon, A. W., Eggert, D. W. and Fisher, R. B., "High-level CAD model aquisition form range images," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 321-330, 1997.
25. Floater, M. S., "Parameterization and smooth approximation of surface triangulations," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 14, pp. 231-250, 1997.
26. Foley, T. A. and Nelson, G. M., "Knot selection for parametric spline interpolation," in *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design*, Edited by T. Lyche and L. L. Schumaker, Academic Press, pp. 261-272, 1989.
27. Garland, M., Heckbert, P. S., "Surface simplification using quadric error metrics," *SIGGRAPH'97*, pp. 209-216, 1997.
28. Goshtasby, A., Nambala, S., DeRijk, W. and Campbell, S., "A range scanner for digital reconstruction for stone dental casts," *IEEE Transactions of Medical Imaging*, Vol. 16, No. 5, pp. 664-674, 1997.
29. Gross, M. H., Staadt, O. G. and Gatti, R., "Efficient triangular surface approximations using wavelets and quadtree structures," *IEEE Trans. on visual. and Comp. graph.*, June, Vol.2, No.2, pp. 130-144, 1996.
30. Hamann, "A data reduction scheme for triangulated surfaces," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 11, pp. 197-214, 1994.
31. Hilton, A., Stoddart, A., Illingworth, J., and Windeatt, T., "Marching Triangles: Range Image Fusion for Complex Object Modelling," *Proc. IEEE Int'l conf. Image Processing*, Vol. 2, pp. 381-384, Laussanc, 1996.
32. Hoffman, R. and Jain, A. K., "Segmentation and classification of range images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 5, pp. 608-620, 1987.
33. Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W., "Surface Reconstruction from Unorganized Points," *SIGGRAPH'92*, pp. 71-78, July, 1992.
34. Hoppe, "Mesh Optimization," *SIGGRAPH'93*, pp. 19-26, 1993.
35. Hoppe, "Progressive meshes," *SIGGRAPH'96*, pp.99-108, 1996.
36. Hoschek, J. and Lasser, D., "Fundamentals of Computer Aided Geometric Design," A K Peters, USA, 1993.
37. Laurent-Gengoux, P. and Mekhlief, M., "Optimization of a NURBS representation," *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 11, pp. 699-710, 1993.
38. Lawson, C. L., "Software for C1 surface interpolation," In *Mathematical Software III*, Rice(ed.), Academic Press, U.S.A., 1977.
39. Lee, E. T. Y., "Choosing nodes in parametric curve interpolation," *Computer-Aided Design*, Vol. 21, No. 6, pp. 363-370, 1989.
40. Lim, C. G., "A universal parameterization in B-spline curve and surface interpolation," *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 16, pp. 407-422, 1999.
41. Ma, W. and Kruth, J. P., "Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surface," *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 9, pp. 663-675, 1995.
42. Mencl, R., "A Graph-based Approach to Surface Reconstruction," *EUROGRAPHICS '95*, Vol.14, No. 3, pp. 445-456, 1995.
43. Milroy, M. J., Bradley, C. and Vickers, G. W., "Segmentation of a wrap-around model using an active contour," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 299-320, 1997.
44. Oblonsek, C. and Guid, N., "A Fast Surface-Based Procedure for Object Reconstruction from 3D Scattered Points," *Computer vision and image understanding*, Vol. 69, No. 2, pp. 185-195, Feb. 1998.
45. Oliensis, J., "Local Reproducible Smoothing without



- Shrinkage," IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mech. Inte., Vol. 15, No. 3, pp. 307-312, 1993.
46. Olling, G. J., Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Machining Impossible Shapes," pp. 1 - 7, 1998.
  47. L. Piegl and W. Tiller, The NURBS Book, Springer-Verlag, Berlin, 1995
  48. Renz, W., "Interactive Smoothing of Digitized Point data," Computer Aided Design, Vol. 14, No. 5, pp. 267-269, 1982.
  49. Sanchez-Reyes, J., "Single-valued curves in polar coordinates," Computer-Aided Design, Vol. 22, No. 1, pp. 19-26, 1990.
  50. Sanchez-Reyes, J., "Single-valued spline curves in polar coordinates," Computer-Aided Design, Vol. 24, No. 6, pp. 307-315, 1992.
  51. Sanchez-Reyes, J., "Single-valued surfaces in spherical coordinates," Computer Aided Geometric Design, Vol. 11, pp. 491-517, 1994.
  52. Sapidis, N. S. and Besl, P. J., "Direct construction of polynomial surfaces from dense range images through region growing," ACM Transactions on Graphics, Vol. 14, No. 2, pp. 171-200, 1995.
  53. Sarkar, B. and Menq, C. H., "Smooth-surface approximation and reverse engineering," Computer-Aided Design, Vol. 23, No. 9, pp. 623-628, 1991.
  54. Taubin, G., "A Signal Processing Approach to Fair Surface Design," Comp. Graphs. Proceedings, pp. 351-358, 1995.
  55. Thirion, J. P. and Gourdon, A., "The 3D marching lines algorithm," Graphics Models and Image Processing, Vol. 58, No. 6, pp. 503-509, 1996.
  56. Varady, T., Benko, R. and Kos, G., "Reverse engineering regular objects: simple segmentation and surface fitting procedure," EU Copernicus Project 1068-RECCAD, 1997.
  57. Veron, P., Leon, J.C., "Shape preserving polyhedral simplification with bounded error," Computer & Graphics, Vol. 22, No. 5, pp. 565-585, 1998.
  58. Volpint, Sheffer, "Mesh simplification with smooth surface reconstruction," Computer Aided Design, Vol. 30, No. 11, pp. 875-862, 1998.
  59. Wani, M. A. and Batchelor, B. G., "Edge-region-based segmentation of range images," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 3, pp. 314-319, 1994.
  60. Zhang, Z., "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces," International Journal of Computer Vision, Vol. 13, No. 2, pp. 119-152, 1994.
  61. 김승만, 이관행, "3 차원 비접촉식 측정용 fixture 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 303-306, 2000
  62. 김용환, 윤정호, 이관행, "리버스 엔지니어링 체계 확립을 위한 측정 및 레지스트레이션 방법 개발," 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, pp. 249-256, 1998.
  63. 배석형, 최병규 "NURBS curve fitting using polar coordinate transform PART I: Core Procedure," Technical Report VMS-2000-04, VMS Lab, KAIST, 2000
  64. 정원형, "셀 분할을 이용한 3D 삼각형망 생성," 한국과학기술원 석사 학위논문, 2000.
  65. 조수경, "차분연산자를 이용한 점군데이터 페어링," 한국과학기술원 박사 학위논문, 2000.
  66. <http://oarpd.kaist.ac.kr>
  67. <http://www.laserdesign.com>
  68. <http://www.hymarc.com>
  69. <http://www.intekplus.com>
  70. <http://www.iware.com>
  71. <http://www.ptc.com/icem>
  72. <http://www.rapidform.com>
  73. <http://www.catia.com>