

기능성곡면의 역공학 적용에 관한 연구

황종대*(창원대 대학원 기계공학과), 정종윤** (창원대학교 산업시스템공학과)
정윤교*** (창원대학교 메카트로닉스공학부)

A Study on Application of Reverse Engineering for Technical Surfaces

* J. D. Hwang, ** J. Y. Jung, ***Y. G. Jung

ABSTRACT

Reverse Engineering is to find CAD model through measured data of a physical model which is not available in CAD model. The measured data are obtained from measuring with Coordinate Measuring Machine or Laser Scanner. This paper introduces efficient methods of reconstruction through the applying process of the Reverse Engineering with technical surfaces.

Key Words : Reverse Engineering(역공학), B-Spline approximation(B-Spline 근사), NURBS (Non-Uniform B-Spline)

1. 서론

CAD 모델이 존재하지 않는 복잡하고 다양한 자유곡면 형상의 제품을 신속하고 정확하게 개발하기 위한 효과적인 방법의 하나로 역공학(reverse engineering)기법이 제시되어 현재 상당한 기술적 진전이 이루어졌다.^{(1)~(6)}

레이저스캐너를 비롯한 비접촉식 측정기는 측정속도가 빠르고 많은 데이터를 얻을 수 있어 최근 심미적인 자유곡면의 CAD 모델을 재 생성하는 역공학에 적용되어 많은 연구가 진행 중이다. 그러나 여러면을 측정할 경우 각각의 측정면들의 지역 좌표계(local coordinate)를 하나의 좌표계로 통합하는 정합(registration) 작업

이 필요하고 측정물이 함몰되어 있거나 꼬여있을 경우에는 빛이 투과되지 않아 측정이 불가능한 단점을 가지고 있어 블레이드, 프로펠러, 임펠러와 같은 기능성 곡면의 역공학 적용에는 어려움이 있으며, 관련연구도 미비한 상태이다,

이에 반해 접촉변형량을 이용하는 접촉식 좌표측정기인 CMM은 비접촉식에 비해 매우 정밀하며 여러면을 측정할 경우나 측정물이 복잡한 형상으로 꼬여있을 경우에도 회전프로브의 보정만을 통해 하나의 좌표계를 사용할 수 있어 기능성 곡면의 역공학에 적합하다. 그런데 복잡하게 꼬여있는 임펠러류는 측정물과 프로브의 간섭문제 때문에 자동 스캐닝 측정이 불가능하여 수동 측정을 해야하는 어려움이 있으며 이과정에서 오차가 발생한다.

따라서 수동측정 과정에서 발생하는 오차를 최소화하는 방법으로 '측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근사 알고리즘'을 통해 데이터를 근사(approximation)하고 이 데이터를 가지고 다시 프로그램 측정의 과정을 거쳐, 최종의 적합화된 근사곡선을 얻는 방법을 찾아내는 것을 연구의 목적으로 한다.

이렇게 찾아낸 근사곡선 데이터는 NURBS surface 알고리즘에 적용시켜 곡면생성에 사용하며, 적합화를 거친 곡면과 그렇지 않은 곡면의 오차를 비교하기 위해 상용소프트웨어인 CATIA를 사용한 표준곡면과 각각의 오차를 비교분석하여 본 연구에서 제시한 알고리즘의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 기능성 곡면의 측정

Fig. 1의 (a)는 MERIN(동우IMS) CMM을 사용한 측정장면을, (b)는 MERIN CMM을 구동하는 소프트웨어인 Virtual DMIS의 화면이다.

기능성 곡면을 측정 방식의 관점에서 분류하면 세가지로 나눌 수 있다. 1) 블레이드류와 같이 블레이드 곡면의 단면곡선을 직교좌표계의 어느 한 단면상에 나타낼 수 있어 임의의 한 축을 구속시킨 후 스캐닝 프로브를 사용하여 자동측정이 가능한 곡면 2) 프로펠러류와 같이 단면곡선이 동심원으로 이루어져 있어 동일반경 구속에 의한 프로그램측정이 가능한 곡면 3) 임펠러류와 같이 단면곡선이 직교좌표계와 원통좌표계에서 아무런 구속을 줄 수 없어 수동 측정을 해야하는 곡면 등이다.

2.1 임펠러류의 측정의 특징

블레이드류와 달리 임펠러류는 프로브와 측정물의 간섭문제 때문에 직교좌표계(cartesian coordinate)의 어느 한 평면을 단면곡선의 fitting에 사용하는 자동 스캐닝 측정이 불가능하다. 또한 임펠러 날개의 단면곡선(profile curve)은 프로펠러의 단면곡선과 같은 등경곡선이 아닌 3차원 공간상의 자유곡선들로 구성되어 있어 동일 반경값을 nominal data로 하는 프로그램 측정 또한 불가능하다. 결국 이와 같은 복잡형상의 임펠러는 Fig. 1과 같이 작업자의 수동측정에 의한 1차적인 측정데이터 획득을 필요로 한다.

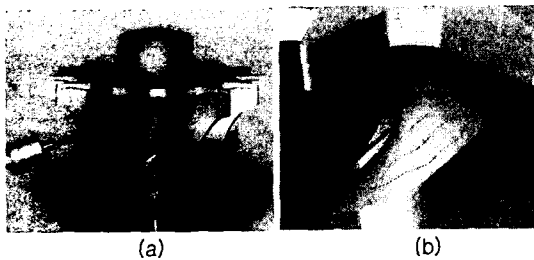


Fig. 1 임펠러의 측정

Fig. 1의 (a)는 임펠러의 수동측정 장면을, (b)는 수동측정 결과 생성된 임펠러 블레이드의 단면곡선과 CATIA에 의한 솔리드 모델을 보여

준다. 그림과 같이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선은 부드러운 폴리라인(polyline)이 아니라 블레이드면 상에서 들쭉날쭉한 모습이다. 이렇게 획득한 데이터를 곡면모델링의 최종 입력 데이터로 사용할 경우 곡면의 품질은 측정작업자의 숙련도에 의지할 수 밖에 없다.

3. 단면곡선의 적합화

임펠러와 같이 수동측정에 의해 생성된 단면곡선은 부정확하므로 곡면모델링을 위한 입력 데이터로 사용할 경우 오차가 증가하게 된다. 따라서 곡면의 품질을 양호하게 할 수 있는 곡선의 적합화 과정을 필요로 한다.

알려진 대로 보간(interpolation)은 주어진 측정점이 매우 신뢰할만 할 때 곡선이 측정점을 모두 지나면서 fitting하는 것을 의미하며, 근사(approximation)는 주어진 측정점을 신뢰하기 힘들 때 측정점 사이를 최대한 근사적으로 지나면서 fitting하는 것을 의미한다.

3.1 다항식회귀분석

점 데이터를 사용한 적합화 알고리즘의 대표적인 방식은 최소자승법(least squared method)이다. 그러나 최소자승법은 직선적인 데이터의 배열에서 사용할 수 있으며, 최소자승법 자체로는 3차원상의 자유공간곡선을 적합할 수 없다. 다만 최소자승법의 알고리즘을 매개변수식의 곡선보간 알고리즘인 B-spline 등에 적용하여 곡선의 적합성을 향상시키는 연구가 나와 있는 상태다.⁽⁷⁾

데이터의 배열이 직선적이지 않은 곡선을 근사하기 위하여 다항식 회귀분석(polynomial regression) 알고리즘을 사용할 수 있으며 식(1)의 e 를 측정점과 근사점과의 잔차라고 하면 식(2)와 같이 잔차의 제곱의 합을 구할수 있고 이값을 각각의 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_i$ 로 미분하면 식(3)과 같은 선형대수방정식이 된다. 이렇게 구해진 [a] matrix를 식(1)에 대입하면 구하고자 하는 근사 곡선이 생성된다. Fig. 2는 다항식 회귀분석법에 의한 곡선근사의 예를 보여준다.

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_i x^i + e \quad (1)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_1 - a_2 x_2^2 - \dots - a_i x_i^i)^2 \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i^3 y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

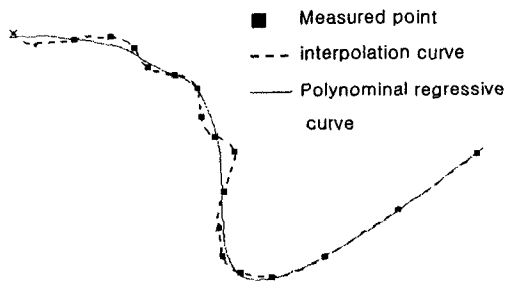


Fig. 2 다항식 회귀분석 근사 곡선

$$r^2 = \frac{S_i - S_r}{S_i} \quad (4)$$

$$\text{where, } S_i = \sum (y_i - y)^2$$

Fig. 2의 측정점과 보간곡선은 Virtual DMIS에 의해 얻어진 임펠러 블레이드의 단면곡선 데이터이며 이를 CATIA에서 xy 평면상에 투영한 그림이다. 다항식 회귀분석 근사 곡선은 동일한 측정점 데이터를 입력점으로 하는 다항식 회귀분석 알고리즘을 Visual C++로 구현한 출력점들을 CATIA에서 곡선으로 fitting한 것이다. 다항식회귀분석에 의한 근사곡선의 정확도를 평가하기 위한 식이 식(4)에 제시되어 있다. 식(4)를 결정계수라 하고 이 값에 제곱근을 씌우면 상관계수가 되는데 Fig. 2에 사용된 점 데이터에 의한 근사곡선의 상관계수는 9차식으로 근사했을 때 0.99940으로 99.9%의 정확도로 근사하였다. 그러나 이러한 다항식 회귀분석에

의한 근사곡선의 생성은 양함수식으로 표현되므로 평면상에서만 가능하다는 단점을 가지고 있다. 즉 매개변수식으로 표현되는 3차원공간곡선의 근사에는 유용하지 않다. 결국 Fig. 2에서 구한 근사곡선은 본 논문에서 제시할 '측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근사 알고리즘'에 의한 근사곡선의 품질을 평가하기 위한 비교수단으로만 사용한다.

3.2 측정점을 조정점으로 하는

B-spline 곡선 근사

주지하다시피 B-spline curve fitting은 주어진 점데이터를 모두 지나는 보간(interpolation) 곡선법으로 식(5)에 제시된 바와 같다. 본 논문에서는 측정점에 의한 3차원 공간 곡선을 근사하기 위한 방법으로, 식(5)의 조정점 R^i (control point)를 측정점(P_i)과 end tangent vector(t_i)로 부터 구하지 않고 측정점을 직접 조정점으로 하여 근사하였다.

$$r^i(u) = U N R^i \quad (5)$$

$$\text{where, control point } R^i = V_0 V_1 \dots V_{n+2}$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 \\ & & & \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 4 & 1 \\ & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{n+1} \\ V_{n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2t_0 \\ 6P_0 \\ 6P_1 \\ \vdots \\ 6P_n \\ 2t_n \end{bmatrix}$$

측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근사 곡선은 Fig. 3과 같이 P_i 와 P_{i+2} 를 이은 직선의 중점과 P_{i+1} 을 연결한 직선의 P_{i+1} 점으로부터 1/3인 점들을 지나는 곡선이므로 다항식 회귀분

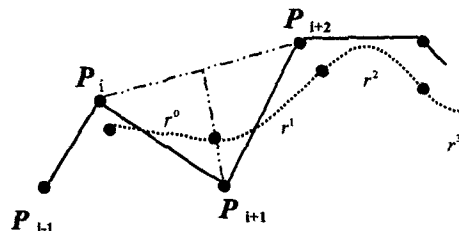


Fig. 3 측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근사

석 근사곡선처럼 에러를 최소화하지는 못하지만 곡면의 품질을 양호하게 하기 위한 유용한 곡선으로는 사용할 수 있다.

이렇게 구한 근사곡선을 Fig. 4와 같이 Visual C++ 과 OpenGL을 통하여 fitting하였고 다항식 회귀 분석 곡선과의 차이를 규명하기 위하여 CATIA에서 Fig. 5와 같이 표현하였다. 측정점을 조정점으로 하는 근사곡선은 다항식 회귀 분석 곡선 처럼 에러를 최소화 하지는 못하지만 주어진 점데이터를 모두 지나는 단면 보간 곡선 보다는 매우 적합화된 근사 곡선임을 알 수 있다.

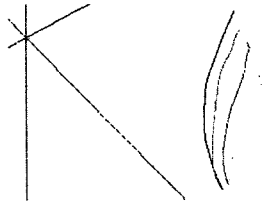


Fig. 4 측정점을 조정점으로 하는 B-spline 곡선근사

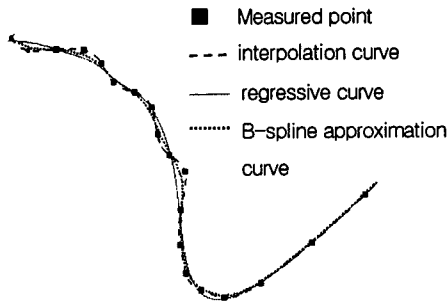


Fig. 5 측정점을 조정점으로 하는 B-spline

그런데 위에서 구한 근사 곡선은 측정점의 처음과 마지막 데이터를 조정점으로 사용하므로 $r^0(0)$ 과 P_0 사이의 구간과 $r^m(1)$ 과 P_m 사이의 구간을 표현하지 못하게 되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 근사곡선 점 데이터의 처음과 마지막 점 앞, 뒤로 기존의 측정점 P_0 와 P_m 을 추가하여 이 때 구해진 점들을 모두 지나는 곡선 보간을 수행할 수 있으며 곡선보간법으로는 NURBS 알고리즘을 사용하였다.

3.3 근사곡선의 점데이터를 사용한 프로그램측정

곡선보간의 또다른 방법으로, 측정소프트웨어인 Virtual DMIS 상에서, 근사에 의해 주어진 점데이터를 사용한 프로그램 측정을 통해 직접 보간곡선을 생성할 수도 있다. 그런데 근사에 의해 얻어진 점데이터를 입력점으로 하여 프로그램측정을 하면 근사 과정에서 발생할 수 있는 에러를 다시 한번 보정해 주는 효과가 있다. 근사곡선은 측정점 사이를 지나는 부드러운 곡선이긴 하지만 실제 곡면상의 곡선이 아닌 곡면의 상하를 통과하는 부정확한 곡선이기 때문에 프로그램 측정과정을 통해 실제 곡면상의 곡선으로 보상해 주면 보다 양호한 보간곡선 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 6은 이와같이 근사곡선의 점데이터를 입력점으로 하여 다시 CMM에서 프로그램 측정을 하여 얻어진 임펠러 단면의 보간곡선 형상인데 Fig. 1의 (b)와 비교하면 매우 부드럽게 적합화된 것을 알 수 있다. 이는 NURBS 곡면생성 알고리즘에 입력할 최종의 점데이터를 얻기 위한 입력곡선이 된다.

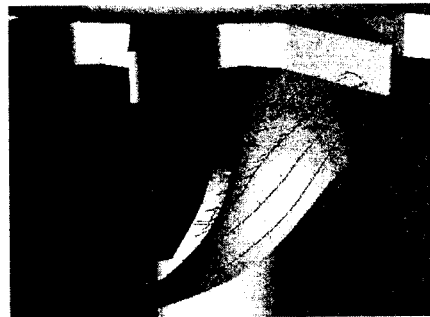


Fig. 6 근사곡선 점데이터의 프로그램 측정

4. NURBS 곡면생성

NURBS(Non-Uniform Rational B-spline) 곡면생성 알고리즘은 식(6)과 같다. NURBS는 B-spline과 달리 측정점이 등간격(evenly spaced point)이 아니어도 곡선을 정확하게 보간하며 조정점의 국부적인 조정으로 자유롭게 곡면을 변화시킬수 있기 때문에 최근 대부분의 상용 소프트웨어에서 채택하고 있다.

$$r^i(u, v) = U N_s B^j N_t^T V^T \quad (6)$$

where, $U = [1 \ u \ u^2 \ u^3]$, $V = [1 \ v \ v^2 \ v^3]$,

$$B^j = \begin{bmatrix} V_{i,j} & V_{i,j+1} & V_{i,j+2} & V_{i,j+3} \\ V_{i+1,j} & V_{i+1,j+1} & V_{i+1,j+2} & V_{i+1,j+3} \\ V_{i+2,j} & V_{i+2,j+1} & V_{i+2,j+2} & V_{i+2,j+3} \\ V_{i+3,j} & V_{i+3,j+1} & V_{i+3,j+2} & V_{i+3,j+3} \end{bmatrix}$$

N_s : as defined in (7) with u -knot spans Δ_i ,

N_t : as defined in (7) with v -knot spans ∇_j .

$$N_s^i = \begin{bmatrix} \frac{(\nabla_j)^2}{\nabla_{i-1}^3 \nabla_{i-2}^2} (1 - n_{11} - n_{13}) & \frac{(\nabla_{i-1})^2}{\nabla_{i-1}^2 \nabla_{i-1}^3} & 0 \\ -3n_{11} & 3n_{11} - n_{23} & \frac{3\nabla_j \nabla_{i-1}}{\nabla_{i-1}^3 \nabla_{i-1}^2} & 0 \\ 3n_{11} & -(3n_{11} + n_{33}) & \frac{3(\nabla_j)^2}{\nabla_{i-1}^3 \nabla_{i-1}^2} & 0 \\ -n_{11} & (n_{11} - n_{43} - n_{44}) & n_{43} & \frac{(\nabla_j)^2}{\nabla_{i-1}^3 \nabla_{i-1}^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$n_{43} = -\left\{ \frac{1}{n_{33}} + n_{44} + \frac{(\nabla_j)^2}{\nabla_{i-1}^2 \nabla_{i-1}^3} \right\}$$

$$\nabla_i^k = \nabla_i + \nabla_{i+1} + \dots + \nabla_{i+k-1}$$

NURBS 곡면생성 과정은 아래의 step을 따라 u, v 방향의 knot span들과 조정점들을 구한 후 식 (6)에 대입하여 구할 수 있다.

step I) determination of knot spans $\{\Delta_i\}$ and $\{\nabla_j\}$,

step II) determination of intermediate control points $\{C_{ij}\}$,

step III) determination of boundary vectors $\{d_i, e_j\}$,

step IV) determination of B-spline control vertices $\{V_{ij}\}$

Fig. 7의 (b)는 임펠러 블레이드 곡면의 B-spline 근사 곡선의 점데이터를 프로그램 측정하여 얻어진 최종보간곡선의 점데이터를 입력점으로 하여 NURBS 곡면생성 알고리즘을 통해 구현한 곡면형상이며 Visual C++과 Open GL 프로그램을 사용하여 수행하였다. 이렇게 얻어진 곡면은 u, v 방향의 점데이터의 나열로도 출력되어 NC-code를 생성하기 위한 CC(cutter contact) data로 사용할 수 있다. 이중 소프트웨어간의 데이터 교환을 위하여 IGES format으로 변환하여 사용할 수도 있는데 본 논문에서는 상용소프트웨어인 CATIA의 power fit cammand를 사용하여 Visual C++로 출력된 점군을 읽어들이어 곡면을 생성하는 방식을 택하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 Visual

C++을 통하여 출력된 점군의 데이터(*.txt)를 CATIA에서 읽어들이어 비교분석하는 그림이다.

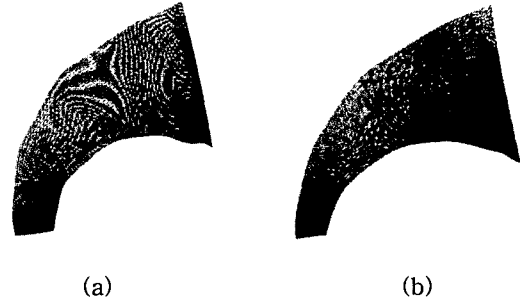


Fig. 7 Visual C++와 OpenGL로 구현한 임펠러 블레이드 곡면생성

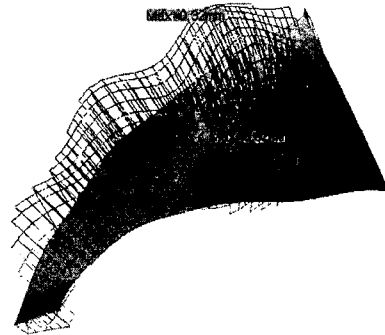


Fig. 8 CATIA 표준모델과, 근사알고리즘 및 프로그램측정으로 적합화하지 않은 NURBS 곡면의 비교



Fig. 9 CATIA 표준모델과 근사알고리즘 및 프로그램측정으로 적합화된 NURBS 곡면의 비교

5. 역공학 적용 결과의 분석

Fig. 7의 (a)는 근사알고리즘과 프로그램추정을 하지 않고 NURBS fitting한 곡면이고 (b)는 근사 알고리즘 및 프로그램추정 프로세스를 거친 NURBS 곡면이다. 그림을 통해 가시적으로 확인할 수 있듯이 (b)가 훨씬 부드럽게 생성되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 수동측정점을 입력값으로 하는 CATIA의 표준모델과, 근사알고리즘 및 프로그램추정 프로세스를 거치지 않은 NURBS 곡면의 오차를 비교한 것으로 최고 0.32mm의 오차가 발생하였다. Fig. 9는 표준모델과, 근사알고리즘 및 프로그램추정 프로세스를 거쳐 적합화된 NURBS 곡면의 오차를 비교한 것으로 곡면의 end 부를 제외한 모든 면에서 설정오차인 0.1mm 이내로 fitting 되었으며 end 부에서 최고 0.22mm의 오차가 발생하였다.

그림에서 확인할 수 있듯이 최대오차가 생긴 부분은 곡면의 end부로서 추정에 의한 end tangent의 입력에 의한 결과이다. 따라서 본 논문에서 적용하였던 circular end condition, polynomial end condition 및 free end condition의 추정치를 좀더 확실하게 해 줄 관련연구가 필요하다. Fig. 10은 이렇게 얻어진 곡면을 CATIA 모델로 변환하여 솔리드 모델링한 그림이다.

6. 결론

이상의 과정을 거쳐 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 수동측정에 의한 에러를 최소화하기 위하여 '측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근사 알고리즘'을 개발하고, 이 때 출력된 점데이터를 통한 프로그램추정 프로세스를 거쳐 최종의 적합화된 단면곡선을 얻을 수 있었다.
2. 위와 같은 방법으로 근사된 곡선의 점데이터를 입력점으로 하는 NURBS 곡면생성 알고리즘을 적용하여 Visual C++와 OpenGL에서 곡면을 구현하여 상용소프트웨어인 CATIA와 비교한 결과 비교적 양호한 품질의 곡면을 생성할 수 있었다.
3. 곡면의 end 부의 'end condition 추정에 의한 오차'를 보완할 관련연구가 필요하며, 이와같은 오차를 줄여 '측정점을 조정점으로 하는 B-spline 근

사 알고리즘'을 통한 NURBS 곡면 생성 프로그램의 질적향상을 도모할 필요가 있다.



Fig. 10 임펠러의 솔리드 모델링

감사의 글

본 논문은 과학기술부 및 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Tamas Varady, Ralph R Martin and Jordan Cox, "Reverse engineering of geometric models an introduction," Computer-Aided Design Vol. 29, No. 4, pp.255~268, 1997
2. 한동구, 이기현, 허성민, 이석희, "Reverse Engineering을 위한 단면데이터의 영상처리", 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회논문집, pp.414~417
3. 박정환, 고태조, "CAD 모델에 기초한 기상측정 시스템", 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp37~pp42, 2001
4. 박연근, 고태조, 김희술, "역공학에서 센서융합에 의한 효율적인 데이터 획득", 한국정밀공학회지, 제18권 제9호, 2001
5. Les Piegl and Wayne Tiller, "Algorithm for approximate NURBS skinning," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 9, pp. 699~706, 1996
6. 허성민, 최재원, 이석희, "자유곡면 생성을 통한 역공학 적용에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제18권, 제10호, pp168~177
7. 이현직, 고태조, 김희술, "점데이터의 Rational B-spline 근사를 통한 역공학", 한국정밀공학회지, 제16권 제5호, 1999년 5월