한국해양공학회지 제23권 제1호, pp 135-139, 2009년 2월 (ISSN 1225-0767)

곡판 가공의 인라인 완성도 평가에 관한 연구(I)

정재민* · 박치모* · 양박달치*
*울산대학교 조선해양공학부

A Study on the In-line Assessment of Completion for Fabrication of Curved Plates(I)

Jae-Min Jung*, Chi-Mo Park* and Park-Dal-Chi Yang*
*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Line heating 선상가열, Registration 정합, Curved plate 곡판

ABSTRACT: *In the line heating for the plate forming of a ship's hull, an in-line assessment of completion is necessary for an automated production system. In the current curved plate forming process, a fabricated plate is compared to a template that is made in the mold loft and is used for the determination of the heating-line for the next step. In this paper, a new method is presented for the in-line assessment of completion for curved plate forming. This method uses a 3-D scanner. For the registration of the scanned data for a surface and the target surface, the ICP (Iterative Closest Points) method was adopted. A computer program was developed to carry out the registration, check for similarities, visualize the surface, and control the results. This program was applied to a sample curved-plate forming process.*

1. 서 론

선박의 외판의 대부분은 곡면으로 이루어져 있다. 이러한 곡면의 제작은 평판을 곡판으로 가공하는 것으로 숙련공의 경험에 전적으로 의존하여 왔고, 곡가공에 관한 기술의 계승과 작업능력의 유지라는 측면에서 문제가 되어 생산 자동화의 중요한 부분으로 인식되어 왔다. 곡판의 가공은 대부분 선상가열을 통해 이루어진다. 선상가열시 판의 변형은 열탄소성 영구변형이 동반되는 어려운 문제라서 아직도 대부분의 숙련된 작업자에 의존하여 이루어지고 있으며 가공 중인 판의 가공 정도를 판단하는 완성도 평가 또한 템플릿을 이용하여 비교하는 경험적인 방법을 사용하고 있어서 보다 정확한 판단 기준이 필요하다.

곡판을 제작할 때 목적 곡면과 현재 가공하고 있는 곡판의 형상을 비교하는 과정이 필요한데, 현장에서는 목형을 사용하여 판단을 하고 있으나 최근에는 컴퓨터를 이용한 비교 방법이 연구되고 있다. 이주성(1996)은 두 곡면사이의 닮은 정도를 유사성으로 정의하여 가공 정보를 조사하였고, 장창두와 문성춘(1998)은 가공 곡면과 목적 곡면을 비교하여 변위차이곡면을 만들고 각 단계마다 얼마나 가공 곡면이 목적 곡면에 가까이 도달했는가를 수렴지수(Convergence index)를 사용하여 검사하였다. 박정서 등(2007)은 부재의 계측된 데이터가 목적 형상과 얼마나 유사한지 판단하기 위한 완성도 평가를 위한 기준으로 목적 형상과 계측된 데이터 사이의 곡면 정합을 하였다. 고광희 등(2008) 및 김정 등(2007)은 목적 곡면과 계측 곡면을 정합하고 노드점의 관계를 이용하여 변형률을 계산하였고, 현장에서 요구되는 제약 조건을 적용한 정합 방법을 제시하였다. 그러나 가공 과정 중 형상이 변하는 곡면에 각 노드점의 관계를 구하고 대응시키는 것은 어려운 일이다.

본 논문에서는 가공 중인 곡면을 3D스캐너를 사용하여 얻어진 임의 분포된 데이터로부터 곡면을 생성하여 목적 곡면과 정합 후 비교하였다. 완성도 평가는 곡판 가공이 다단계 작업인 특성상 인라인 작업으로 진행되어야한다는 것을 인지하고, 곡면 정합 및 완성도 평가를 일괄적으로 처리하는 평가 시스템을 구성하였다. 그리고 그 결과를 가공 곡면과 템플릿의 형태로 가시화하고 사용자 인터페이스를 개발하여 현장과 유사한 작업환경과 사용 편의를 구현하고자 하였다.

2. 가공 곡면 정보

2.1 곡면 정보 획득 방법

목적 곡면은 격자점의 공간좌표로 구성되며, 주로 선체 프레임의 위치에서 산출된다. 이에 반하여 가공 곡면으로부터 계측된 곡면정보는 계측 방법에 따라 다르다. 접촉식 곡면 정보 추출 방법은 통상 미리 표시된 위치에서의 정보를 추출하며, CMM(Coordinate-measuring machine), OSD(Optical distance sensor)가 있다. 광학 3D스캐너, 사진 계측기와 같은 비접촉식 변위 계측기는 곡면 상의 점군(Point cloud)에 대한 정보 추출이 가능하다. 광학 3D스캐너는 단시간에 많은 양의 정확한

교신저자 양박달치: 울산광역시 남구 무거동 산29번지, 052-259-2159, pdcyang@mail.ulsan.ac.kr
본 논문은 2008년 10월 울산에서 개최된 한국해양공학회 추계학술대회에 발표된 논문의 주된 내용을 발췌하였음을 밝힙니다.

데이터를 얻을 수 있는 장점을 가지며 광원으로 레이저 또는 할로겐을 사용하며 높은 정도를 가지지만, 한 번에 스캔할 수 있는 영역이 좁은 편이고 휴대가 어렵다. 이에 비하여 사진 계측기는 한 번에 넓은 영역을 스캔할 수 있고, 카메라를 개조한 방식이라 휴대가 간편하지만, 광학 3D스캐너에 비해 정도가 떨어지는 것으로 알려져 있다.

2.2 스캐닝을 통한 곡면 정보로부터 곡면의 생성

본 연구에서는 레이저 스캔 방식의 3D스캐너를 사용하였다. 레이저 스캔 방식 등에 의해 얻은 데이터는 불규칙적으로 산개되어 있는 포인트 형식의 데이터이다. Fig. 1는 곡면을 스캔하여 생성된 랜덤데이터를 나타낸 것이다.

이 데이터로 격자 곡면 생성을 위해 본 연구에서는 Akima (1978)가 제안한 임의 분산형 곡면 데이터에 대한 2-매개변수로 표현되는 곡면의 계산 방법을 사용하였다. 이 계산과정은 공간상에서 곡면 π에서 임의로 분포된 N개의 데이터점

$$\{(x_i,y_i,z_i)\}_{i=1}^{N} \; on \; \pi$$

에 대하여 영역 내의 규칙적으로 분포된 격자점에서의 삽간값 S를 구하며, 그 과정은 먼저 대응하는 xy-평면 내의 점 $\{(x_i,y_i)\}_{i=1}^{N}$에 대한 Delaunay 삼각분할(Triangulations)를 구한다.

이 삼각분할 내의 각 삼각형에 대하여 S는 다음 형태를 갖는다(Fig. 3 참조).

$$S(x_i,y_i)=\sum_{m+n\le 5} C_{mn}^{T} x^m y^n \qquad x,y\in T \tag{1}$$

여기서, S는 2-변수 5차 다항식으로 각 삼각형 T 내에서 정의되며

$$S(x_i,\ y_i)=z_i \quad i=1,\ \cdots,\ \ N \tag{2}$$

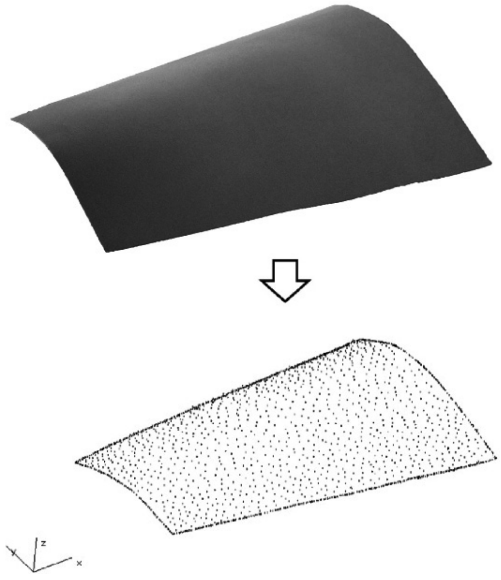

Fig. 1 3D-Surface and scanned data

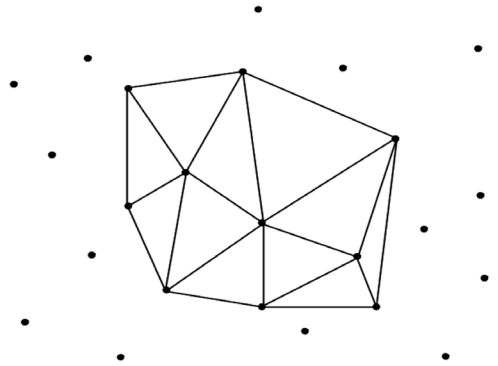

Fig. 2 Delaunay triangulation

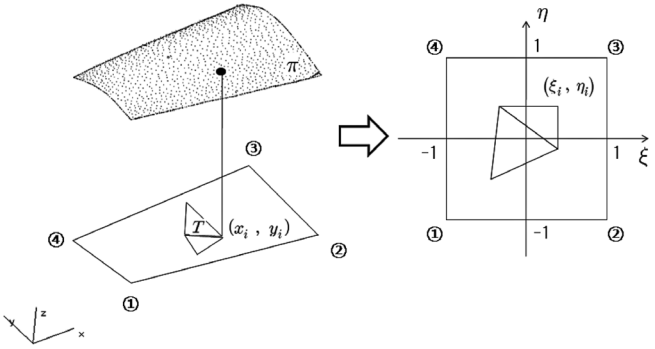

Fig. 3 Application of Delaunay triangulation for random data on a 3D surface and mapping on the normalized plane

을 만족한다. S는 인근 삼각형 간의 경계선에서 연속이고 미분가능하다. 이 조건으로부터 C_{mn}^{T}을 구한다(Akima, 1978).

이 과정에서 임의 형상의 사각형을 가지는 데이터점들의 경계를 Fig. 3에서 보인 것과 같이 정규화된 좌표(ξ, η)로 변환시키고 이에 대한 곡면을 생성한다. 이 변환관계는 다음과 같다.

$$x=\sum_{i=1}^{4} N_i(\xi,\eta)x_i \tag{3}$$

$$y=\sum_{i=1}^{4} N_i(\xi,\eta)y_i \tag{4}$$

여기서,

$$N_1=\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \tag{5}$$

$$N_2=\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \tag{6}$$

$$N_3=\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \tag{7}$$

$$N_4=\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \tag{8}$$

생성할 격자의 수는 임의로 조정할 수 있다. 위의 내용을 토대로 프로그램을 작성하였으며 Fig. 1의 곡면에 대해 계측된

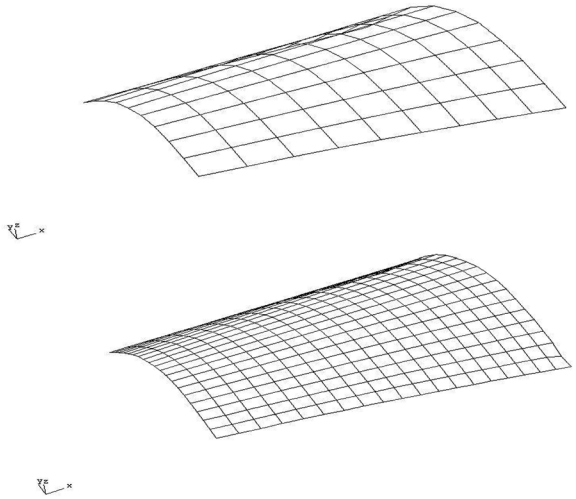

Fig. 4 Grid data(10×10, 20×20) generated by using the present algorithm

2186개의 임의 분포 데이터점으로부터 생성된 격자 곡면은 Fig. 4와 같다. 이 계산은 0.219초 소요되는 효율성을 보여주고 있다. 본 연구에는 WindowsXP기반으로 2.1GHz CPU에 2GB 메모리가 장착된 노트북을 사용하였다.

3. 목적 곡면의 정합

가공된 곡판과 목적 곡판 간에 유사성을 비교하여 정확도를 판단할 때, 현재 대부분 조선소의 작업장에서는 목형을 사용하여 경험에 기반을 둔 곡면 비교를 하고 있다. 이를 목적 곡면과 가공 곡면의 정합을 통하여 수치적인 완성도 평가를 할 수 있다. 두 곡면의 정합 방법은 대응점이 정해져있는 경우와 그렇지 않은 경우가 달라진다. 두 곡면 사이의 대응점이 정해진 경우는 Horn(1987)의 알고리즘을 사용하여 정합 조건을 찾을 수 있고, 그에 반해 두 곡면 사이의 대응점이 정해져 있지 않는 경우는 ICP(Besl and Mckay, 1992)에 의한 목적 곡면과 가공 곡면을 정합시킬 수 있다.

3.1 Horn의 알고리즘

Horn은 다른 좌표계로 표현된 두 개의 데이터 집합 사이의 관계를 찾아서, 두 좌표계의 정합 문제에 단위 쿼터니온(Unit quaternion)을 이용한 해결 방법을 제시하였다. 가공 곡면 상의 점집합을 $P=\{\overrightarrow{p_i}\}$, 목적곡면 상의 점집합을 $X=\{\overrightarrow{x_i}\}$로 놓으면, 두 곡면 상의 점들의 변환관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overrightarrow{x_i} = \mathbf{R}(\overrightarrow{p_i}) + \mathbf{t} \tag{9}$$

여기서 **R**, **t**는 각각 회전행렬과 평행이동벡터를 의미한다. 이 변환관계식은 두 곡면이 완벽하게 같은 형상이 아니라면 다음과 같은 거리 오차 e_i가 존재한다.

$$e_i = \overrightarrow{x_i} - \mathbf{R}(\overrightarrow{p_i}) - \mathbf{t} \tag{10}$$

이 때, 모든 데이터 점들에 대한 오차 e_i의 제곱 값의 합은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \| e_i \|^2 \tag{11}$$

이 함수 Φ를 최소로 하는 조건에서 회전행렬 **R**과 평행이동벡터 **t**가 구해질 수 있다(Horn, 1987).

3.2 ICP 알고리즘

ICP(Iterative closest point) 알고리즘은 정합 작업을 반복적으로 수행하여 정합과정 중에 발생하는 오차를 최소화하는 최적화 기법이다. 이 알고리즘은 거리 오차의 제곱의 합을 계산하고 오차가 미리 정의된 오차를 만족할 때까지 다음의 과정을 반복 수행한다.

(1) 대응점(Corresponding point)을 계산한다. 여기서는 목적 곡면에서 계측 곡면 상에 최소거리를 가지는 점(Closest point)들의 집합으로 대응시켰다.

(2) Horn의 알고리즘을 이용하여 회전행렬 **R**과 평행이동벡터 **t**를 구한다.

(3) Registration을 적용하여 계측 곡면을 변환된 좌표로 업데이트하며, 그 변환 관계는 다음과 같다.

$$P = \mathbf{R}(P) + \mathbf{t} \tag{12}$$

4. 완성도 평가 시스템 구성

4.1 프로그램의 구성

일반적으로 인라인 프로그램은 현장과 유사한 환경을 컴퓨터 상에서 구현하고, 활용하고자 하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서 완성도 평가를 위한 인라인 프로그램에서 곡면 스캔 데이터를 읽어들여 처리하고 결과를 출력하는 과정은 Fig. 5에서 보인 것과 같은 순서에 의해 수행된다.

프로그램의 전체적인 구조는 Win32 API 함수를 사용하여 구성하였으며, 작업자가 원하는 방향으로 곡면을 이동시키기 위

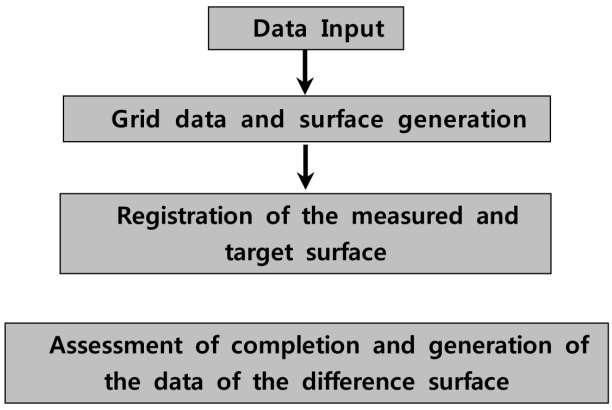

Fig. 5 Flowchart of the In-line program

해 Opengl 그래픽 라이브러리를 사용하였다. Opengl은 물체의 이동, 회전, 크기변경 등을 행렬의 곱으로 쉽게 표현할 수 있다.

4.2 완성도 평가

두 곡면의 대응점 간 거리 제곱의 평균 η는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 이 값을 기준으로 완성도의 오차를 판정하였다.

$$\eta = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \| p_i - x_i \| \tag{13}$$

본 연구에서는 600 × 1000mm 강판의 곡면 가공 과정에 대하여 완성도 평가를 적용하였다. 실제 가공 곡판에 대하여 각 가공 단계별 곡면 정보 추출결과로부터 생성된 계측곡면에 대하여 목적곡면을 정합시키는 과정은 Fig. 6과 Fig. 7에 보였으며 각 단계별 완성도의 오차 η는 Table 1과 같다.

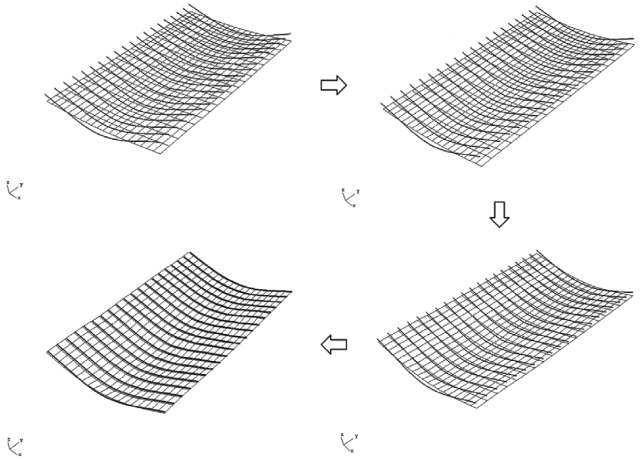

Fig. 6 Registration results of the fabricated plate and the target surface for each step (plate 1)

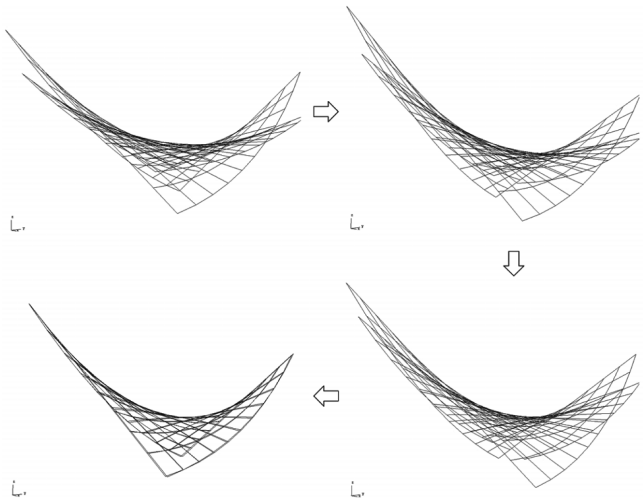

Fig. 7 Registration results of the fabricated plate and the target surface for each step (plate 2)

Table 1 η-value for each step (mm)

plate 1	Step	1	2	3	4
	η	19.3300	17.4106	9.7551	5.0282
plate 2	Step	1	2	3	4
	η	10.2210	9.0568	6.8607	2.5125

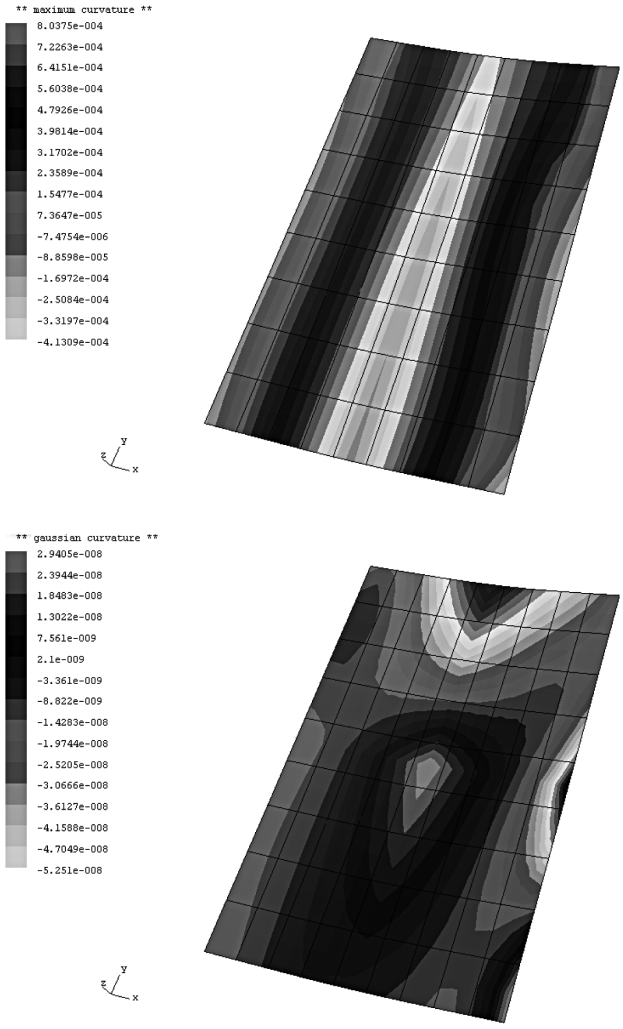

Fig. 8 Results of the surface analysis (maximum and Gaussian curvature)

위 결과는 가공 과정이 진행됨에 따라 완성도의 오차 η는 감소함을 보여준다. 가공 곡면과 목적 곡면의 차이 곡면에 대해 곡면해석 결과는 Fig. 8과 같으며, 이 결과로부터 추가 가공정보를 산정할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 선체외판의 곡판 가공 과정에서 현재의 가공 상태의 정도를 계측하고 그로부터 추가 가공정보 획득에 활용할 수 있는 곡판 가공의 인라인 완성도 평가 시스템을 제안하

였다. 가공 곡면 계측으로는 광학 3D스캐너를 활용하였다.

계측된 곡면 데이터의 임의 분포 특성으로부터 Akima의 알고리즘을 사용하여 수치곡면 상의 격자점 데이터를 구하였다. 계측 곡면에 대한 목적 곡면의 정합 방법으로는 ICP알고리즘을 사용하였다. ICP알고리즘은 가공 곡면과 목적 곡면의 점 데이터 수가 상이할 경우에 적용하는 방법으로 본 연구의 예에 잘 적용됨을 확인할 수 있었다. 이 알고리즘으로 평가 시스템을 구성하였으며, 이 평가 시스템은 완성도 평가의 인라인 시스템 구성의 기본이 될 수 있음을 확인하였다. 향후 가공조건 산출 시스템을 적용하여 인라인 시스템을 확장할 필요가 있다. 또한 실제 가공 과정에 적용하기 위해서는 현재의 광학 3D스캐너는 특성상 곡면에 흰색 도포를 해야하는 문제점이 있어 가공 과정 중 원활한 계측을 위해서는 이를 대체할 계측기의 확보가 필요하다.

참 고 문 헌

고광희, 지중현, 김현수, 김강연, 김덕봉, 박정서, 신종계, 현충민, 도영칠 (2008). “곡면의 완성도 평가를 위한 정합 방법에 대한 고찰”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp 1952-1957.

김정, 고광희, 박정서, 신종계, 현충민, 도영칠 (2007). “열간가공에서 곡면 부재 완성도 평가를 위한 연구”, 2007년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp 1413-1423.

박정서, 고광희, 신종계, 현충민, 김대경 (2007). “곡면 정합 및 비교 알고리즘을 이용한 선상가열 시스템의 구성 및 현장 적용성 검토”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp 1403-1412.

이주성 (1996). “선상가열법에 의한 강판의 곡가공 자동화 시스템(II)", 대한조선학회 논문집, 제33권, 제3호, pp 81-93.

장창두, 문성춘 (1998). “선상가열법에 의한 강판 가공의 가열선 결정 알고리즘”, 대한조선학회 논문집, 제35권, 제2호, pp 104-113.

Akima, H. (1978). ”A Method of Bivarate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points”, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol 4, pp 148-159.

Besl, P.J. and McKay, N.D. (1992). ”A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 14, No 2, pp 239-256.

Horn, B.K.P (1987). ”Closed-form Solution of Absolute Orientation using Unit Quaternions”, Journal of Optical Society of America, Vol 4, No 4, pp 629-624.

2008년 11월 21일 원고 접수
2009년 1월 13일 최종 수정본 채택