

자유곡면 가공기계 개발에 관한 연구

신현경*, 이형락**, 박규원***

A Study on the Development of a Freeform Surface Cutting Machine

H.Shin*, H.L.Lee** and K.W.Park***

요 약

자유곡면으로 이루어진 모형선의 표면을 가공할 수 있는 동작기계를 개발하고 서보시스템으로 절삭공구의 가공경로제어를 수행하였다. 서보시스템은 BLDC(Blushless DC) motor, 콘트롤 드라이버, 호스트 콘트롤러로 구성되어 있다. 또한 정밀한 가공을 위하여 PI제어기를 사용하였고 Visual C++를 이용한 GUI(Graphic User Interface)를 구성하였다. 개발된 자유곡면 가공시스템에 의해 모형선이 가공되었다.

Abstract

A cutting machine for freeform hull surfaces of ship models is developed and a servo system is employed for tool path control. The servo system consists of BLDC(Blushless DC) motor, control driver and host controller. Also PI controller is applied for precision processing. GUI(Graphic User Interface) was realized by visual c++ for the convenience of users. Free form surfaces are formed by the cutting machine developed in the Ocean Engineering Wide Tank of the University of Ulsan.

접수일자: 2001년 1월 8일, 승인일자: 2001년 2월 23일

* 정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 (E-mail:hkshin@uou.ulsan.ac.kr)

** 학생회원, 울산대학교 수송시스템공학부 (E-mail:lak-98@hanmail.net)

*** 정회원, (주) 한국 CAD/CAM Service 부설연구소 (E-mail:cadguru@hanmail.net)

1. 서언

자유곡면으로 이루어진 선체형상을 수 작업으로 가공하는데는 어려움이 수반될 뿐 아니라 제작되더라도 많은 시간이 소요되며 가공 오차를 피할 수 없다. 최근 정밀하게 기계부품 및 곡면을 가공하기 위해서 CNC공작기계를 이용하지만 자유곡면으로 이루어진 선체형상을 가공하기 위한 공구 이동경로를 데이터화하기 어렵고 데이터를 자동생성할 수 있는 장비는 고가장비이기 때문에 대학에서 도입하여 사용하기에는 현실적으로 어렵다.

선체형상을 수치로 표현하는 연구는 10여 년 전부터 이루어지고 있지만(신현경 등 1991,1994)(박규원 1992)(신상성 1994) 이를 응용한 가공 시스템에 관한 연구는 찾아보기 힘들다. 선체형상을 수치로 표현하고 이를 동작기계와 연결하는 연구가 성공적으로 수행되면 구조실험에서 사용될 각종 시험용 모형과 조선·해양분야의 실험장비의 부품을 가공할 수 있는 동작시스템을 공급할 수 있을 것이다. 곡면의 수식화는 유용성이 입증된 NURBS(Non Uniform Rational B-Spline)을 이용하였고, 3차원 선체형상표현을 1차년도 연구에서 수행하였다 (신현경 등 2000). 본 논문에서 수행할 자유곡면 가공은 NURBS의 곡면 데이터를 이용하여 각 수선면의 좌표를 받아들이고 2¹/₂ 차원법(Pick Feed방식)으로 가공하게 된다. 모형선 가공기를 개발하기에 앞서 스텝모터로 구동되는 모형가공기계를 개발하여 원뿔형상의 3차원물체를 성공적으로 가공하였으며(이형락/김동욱 1998), LM629와 80C196KC라는 콘트롤IC를 바탕으로 제어기와 구동회로를 직접 제작하여 DC모터로 제어하는 연구가 이루어졌다 (이창용/이학진 1999). 완성된 가공기계로 제작할 수 있는 모형선의 최대 길이는 2.5m이며 가공정밀도는 생성되는 NURBS데이터의 오차와 자유곡면 가공기계의 오차를 함께 고려하여 0.5mm/m이내를 목표로 하였다.(신현경 등 2000)

2. 자유곡면 가공시스템 설계 및 구성

2-1. 기계설계 및 제작

LM가이드는 마찰저항이 적어서 모터의 동력손실을 최소한으로 줄여주고(Fig.1), 1ton 정도의 중량을 갖는 가공부를 무리없이 이송시킬 수 있으며 제품의 치수 정도가 $\pm 0.01\text{mm/m}$이어서 정밀도 유지에 기여할 것으로 기대할 수 있다. 또한 LM가이드의 설치정도는 다이얼게이지를 이용하여 기준점으로부터의 거리측정으로 확인하였으며 만족할만한 평행도가 얻어졌다.



Fig.1 Front view of a cutting machine with LM guide

또한 길이가 약 2m인 모형선을 제작하기 위한 가공기 구조가 모형보다 크고 무거워지므로 동력원을 스텝모터(Stepper)보다 효율과 반응이 좋은 BLDC모터로 한다.

BLDC모터의 용량은 구조물의 중량과 목재 가공시 발생될 부하, 속도한계 등이 고려되므로 5:1 기어를 사용하여 토크를 높이고, 최대 속도를 약 600RPM 정도로 한다. 알루미늄부재를 사용하여 가공기 구조를 견고하게 하였고 목재가공이 가능 하다.

가공 방식에 있어서 기존의 엔드밀을 이용한 수직가공 방식 대신에 루터날을 이용한 수평가공 방식을 취한다. 이는 모형선의 수선면을 따라 가공하기 용이하고, 정밀성을 높이기 위함이다. 동력 전달부에서는 볼 스크류와 모터간의 동력전달을 유격 없이 정확히 하기 위하여 상용화된 커플링을 사용한다. 가공기의 하부 지지대는 진동을 최소화하고 설치를 용이하게 하기 위하여 알루미늄 프로파일(Profile)을 사용한다. 이것은 콘크리트 지지

방식보다 간편하며, 이동이 가능한 장점이 있다. 또한 프로파일은 확장성이 있으므로 공작대와 연결하여 일체화시킬 수 있다.

2-2. 제어시스템

Fig.2는 위치제어를 위한 시스템을 보여주고 있는 것이다. 상위제어기(Host Processor)에서 위치, 방향, 속도의 정보를 각 축에 연결되어있는 서보드라이버에 지령을 내리게 되고 이 명령에 따라 각 드라이버는 BLDC를 움직일 출력을 발생하게 된다. 움직여진 거리의 실제정보는 엔코더(Encoder)로부터 검출되어 드라이버를 통해 상위제어기로 들어가게 된다. 입력된 실제위치(X)는 카운터에서 증감되어진 값이 되고 일정한 Sampling Time을 두어 입력된 펄스의 개수에 의해 속도(Pulses/s)를 알 수가 있다.

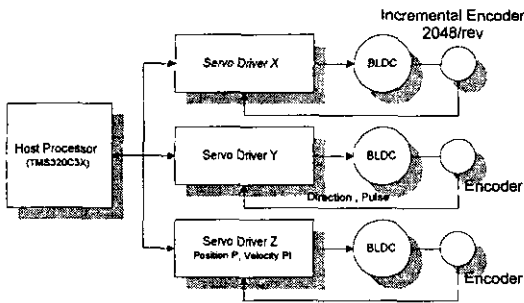


Fig.2 A block diagram of servo system

자유곡면 가공기계에서는 2,048(Pulses/Rev)의 분해능이 있는 엔코더(위치검출기)를 사용하고 있으며 볼스크류(10mm/Rev)와 감속기의 비 5:1을 고려해 볼 때 실제 X, Y축이 10mm를 움직이기 위한 펄스지령은 Eq.(1)과 같다.

$$2,048(\text{Pulses / rev}) \times 5.0(\text{rev / Rev}) = 10,240(\text{Pulses / Rev}) \quad (1)$$

Rev : Reduction gear revolution
rev : Encoder revolution

Eq.(1)로부터 원하는 거리를 가기 위한 펄스 수를 추정할 수 있고 만약 모형선 길이가 2m라고

할 때 NURBS로부터 받은 화면 좌표를 실제 펄스수로 옮기기 위한 식은 Eq.(2)와 같다.

$$\begin{aligned} X &= n \times (\ell / 10\text{mm}) \\ f &= X / e \\ \eta &= f \times a \end{aligned} \quad (2)$$

- ℓ : Length of model (mm)
- X : Number of pulses for ℓ
- n : Number of pulses per gear revolution
- f : Number of pulses per unit x-component from NURBS
- e : x-component of ending point from NURBS
- a : x-component of a certain point from NURBS
- η : Number of pulses signals between zero point and a certain point

3. 위치제어

3-1. 위치제어계 구성

위치제어계는 기본적으로 Fig.3과 같이 구성되어 있고, 각도나 펄스의 위치지령이 내려지면 그에 대응되는 속도지령이 내려지며 이 속도는 속도제어계를 거쳐 출력으로 나가게 된다. 출력된 속도는 속도와 위치에러의 값을 가지고 피드백된다 (Flanklin 1995)(생산기술연구원 1992).

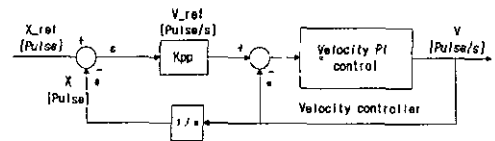


Fig.3 A block diagram of position control

- X_ref : Position command
- V_ref : Velocity command
- X : Real position
- V : Real velocity
- Kpp : Position loop gain

3-2. 직선보간

초기상태에서 각 축의 위치비례 이득을 같게 한다. 위치비례 게인이 같지 않으면 과도상태에서 직선을 벗어나기 때문이다.

지령의 궤적이 직선상에 있기 위해서는 Eq.(3)이 0이 되는 지점이어야 하고 현재 엔코더 좌표 X_i, Y_j 에서 종점의 엔코더 좌표 X_e, Y_e 의 거리오차에 대응할 수 있는 속도 V_x, V_y 로 나타낼 수 있다.

$$D_{i,j} = X_e \cdot Y_j - Y_e \cdot X_i \quad (3)$$

$$D_{i,j} = X_e \cdot V_y - Y_e \cdot V_x \quad (4)$$

예를 들어 Eq.(4)에서 X_e 와 Y_e 의 좌표값이 같다면 V_x, V_y 의 속도는 같게 된다. 이때 속도의 값은 Eq.(5)에 의하여 결정된다. 최종 도착 조건은 Eq.(6)과 같다.

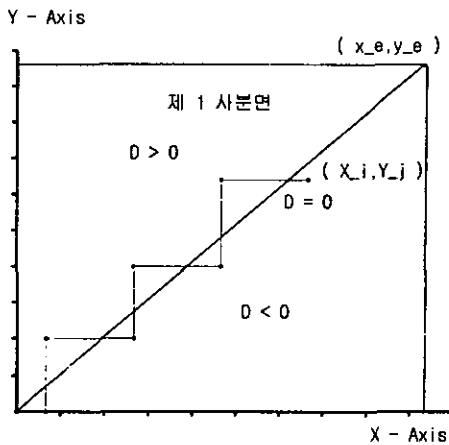


Fig.4 Method of drawing a straight line

- X_e : 종점의 X좌표 (pulse)
- Y_e : 종점의 Y좌표 (pulse)
- X_i : Encoder X pulse
- Y_j : Encoder Y pulse
- V_x : 현재의 X속도 (Pulse/s)
- V_y : 현재의 Y속도 (Pulse/s)

ϵ : 종점좌표와 현재 좌표와의 차

$$V = K_{pp} \times \epsilon \quad (5)$$

$D_{i,j} \geq 0$ 이면 V_x 증가

$D_{i,j} < 0$ 이면 V_y 증가

$$\begin{aligned} \text{Final condition: } X_j &= X_e, \\ Y_j &= Y_e \end{aligned} \quad (6)$$

(박종봉 1999), (야스가와 1988)

3-3. 공구보간

공구날의 지름이 바뀌었을 때 공구보간을 하지 않으면 가공시 가공물을 깎아버리게 되므로 구동하기 전 공구지름의 선택이 필요하다.

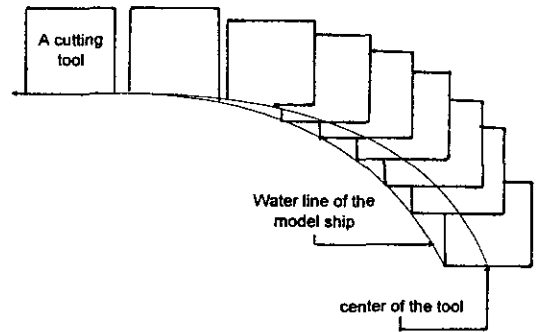


Fig.5 Tool path

Tool Path를 구하기 위한 공구보간 방법은 Eq.(7)과 같다.

$$\text{Tool Path} = N \times ((D / \ell) + 1) \quad (7)$$

D : Diameter of cutting tool

ℓ : Length of model(mm)

N : x(or y) component of all points from NURBS

Z축의 경우에도 앞서와 같은 이유로 공구보간을 해 줄 필요가 있다. Fig.6에서 보듯이 실제 모형의 외곽선보다 공구 반지름만큼 더 큰 Tool Path를 만들어 준다.

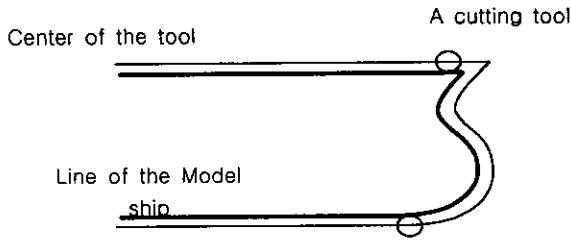


Fig.6 Z-Tool Path

Z축 Tool Path를 구하기 위한 공구보간 방법은 Eq.(8)과 같다.

$$\text{Tool Path}(z) = N_z \times ((D / d) + 1) \quad (8)$$

D : Diameter of cutting tool

d : Depth of model ship

N_z : z component of all points from NURBS

4. 사용자 프로그램

본 논문에서는 사용자의 편의를 위해 Visual C++를 이용하여 Fig.7과 같이 사용자 프로그램을 구성하였다(황광일 1999).

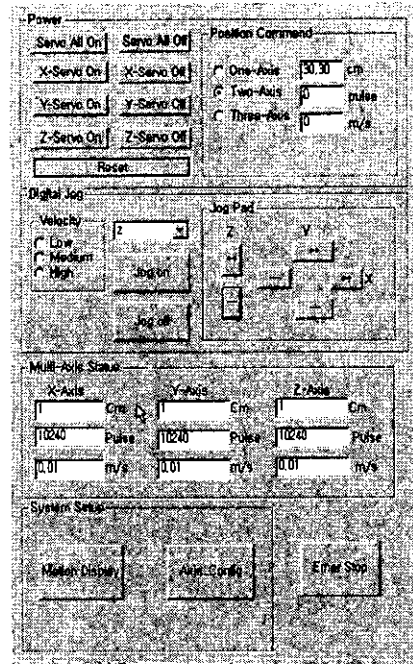


Fig.7 Basic control program

- 1) 각 축의 환경설정(속도, 가속도, 기어비 등)
- 2) 현재 가공되어지는 거리, 속도의 실시간 모니터링
- 3) 소프트웨어 조그(Jog)모드 지원
- 4) 단축, 다축의 위치입력으로 이동
- 5) 현재 가공되어지는 수선면의 모니터상 확인가능(Fig.8)



Fig.8 Monitoring of waterlines

5. 모형선 가공 방법 및 실험

Fig.9는 가공공정 흐름을 보여준다. 판재의 두께는 3.5cm로 가공하고 현도 작업이 끝나고 절단시 선체 중앙부(Midship)와 선체 중심선(Centerline)에 절단부가 없도록 하였다. 이러한 작업에서 가장 중요한 요소는 선체 중심선이 공구와 직각으로 놓이게 하고 작업대의 수평유지와 적층을 할 때 각 스테이션(Station)을 맞추어 나가는 일이다. 적층작업을 마친 후 틈이 보이지 않도록 야교를 발라 클램프로 고정을 하면 자유곡면 가공시스템을 이용하여 가공하기 전의 단계는 모두 마치게 된다.

가공이 시작되었을 때에는 선수, 선미, 선체 중앙부 부분에 공구가 지나갈 때 오차의 발생여부를 확인하고 하나의 수선면 가공 후 발생하는 오차는 선수, 선미부분의 기준위치에서 보정하게 되어 여러 수선면을 왕복 가공시 생기는 오차가 누적되지 않게 하였다.

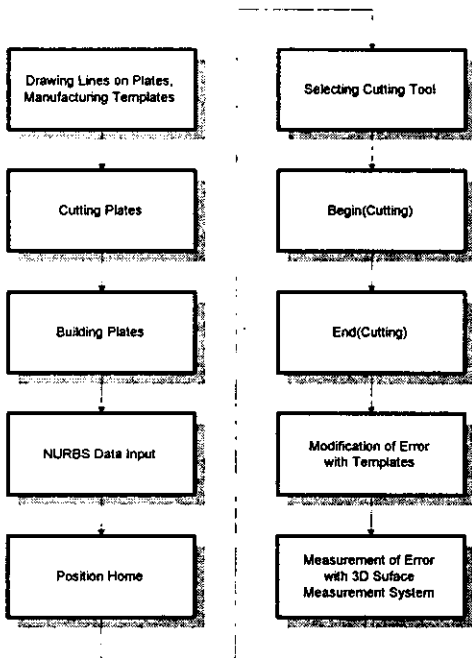


Fig.9 Flowchart of processing

Fig.10~Fig.12은 절삭가공 장면을 보여주며 지지대를 보여주기 위하여 한 단만 가공한 부분이다.



Fig.10 Front view of cutting process

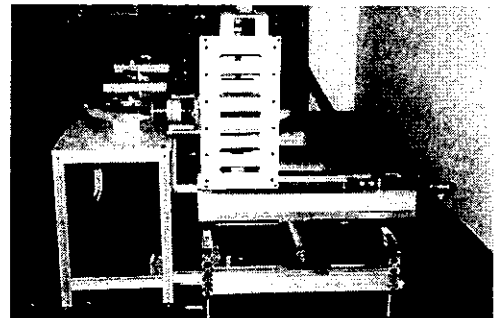


Fig.11 Side view of cutting process



Fig.12 View of cutting process

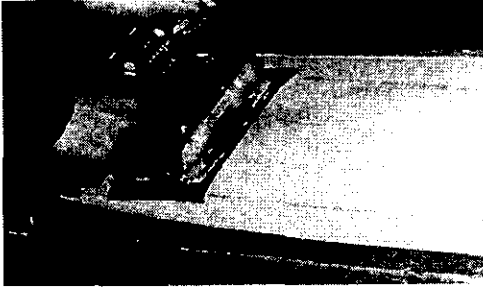


Fig.13 Process of sanding

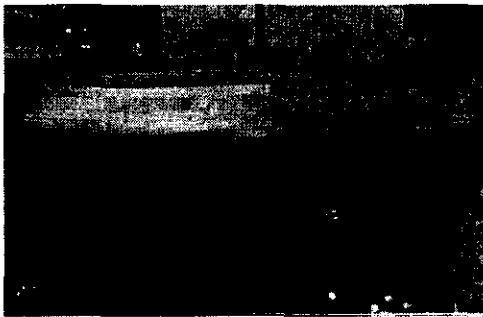


Fig.14 Processing of bottom on a plane

Fig.13과 Fig.14는 절삭가공 과정 후 사포(Sand paper)로 샌딩(Sanding)하면서 바닥을 다듬는 장면이다.



Fig.15 Measurement by a template

Fig.15는 선도(Lines)를 이용해 미리 만든 템플레이트(Template)를 사용하여 오차를 측정하는 장면이고 이러한 과정을 거치면서 사포로 오차가 없을 때까지 계속 다듬질하게 된다.

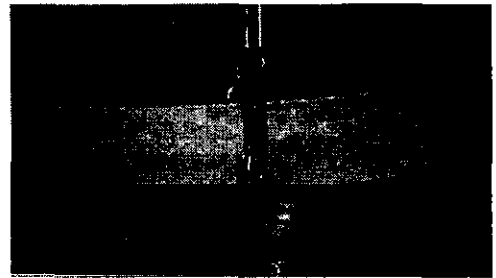


Fig.16 Measurement by a height gauge

Fig.16은 선저에서 선루까지의 높이를 높이 측정기(Height Gauge)를 이용하여 측정하는 모습이다.

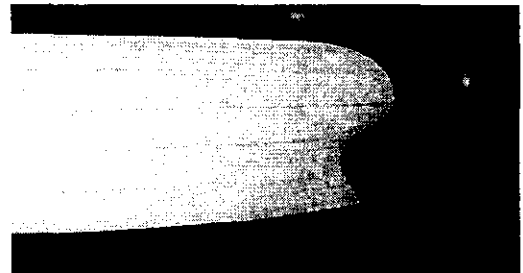


Fig.17 View of the bow

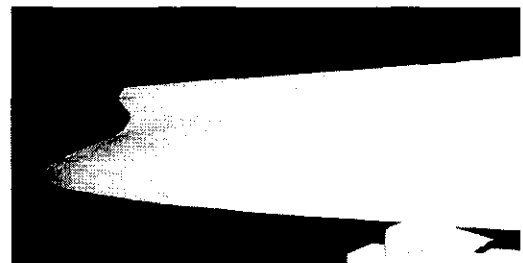


Fig.18 View of the stern

Fig.17과 Fig.18은 완성된 모형선의 선수와 선미 부분의 사진이다. Fig.17은 샌딩작업을 하지 않은 상태이며 Fig.18의 다듬질 작업이 끝난 상황과 비교된다.



Fig.19 A completed model ship

Fig.19는 완성된 모형선을 보여주고 있다. 선형은 30만톤 원유운반선(300K VLCC) KTTC 모델이다(김우전 등 2000).

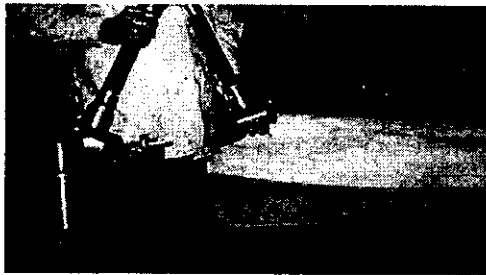


Fig.20 3D surface measurement system

Fig.20은 3차원 곡면측정기를 사용하여 제작된 모형선의 상태를 측정하고 있는 모습이다.

엔코더의 분해능은 2,048 Pulse/rev이고 현재 X, Y축의 볼스크류 피치가 10mm/Rev 이다. 또한 5:1기어비를 사용할 때 1 Pulse로 직선운동을 하는 거리는 Eq.(9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &(10\text{mm} / \text{Rev}) \div [2048(\text{Pulses} / \text{rev}) \\
 &\times 5(\text{rev} / \text{Rev})] \\
 &= 9.765 \times 10^{-4} \text{mm/Pulse} \quad (9)
 \end{aligned}$$

2m 모형선의 한 개 수선(Waterline)을 가공

하는데 1,000개의 좌표가 사용되어 좌표간의 이동은 평균 2mm로 볼 수 있고 최대 이동거리는 약 10mm 정도이다. PI제어 인터럽트 프로그램에서 직선보간 수행을 마친 후 다음 좌표로 이동하기까지의 오차는 ± 100 Pulses로 설정되어 있으므로 이론적인 오차는 약 0.1mm정도이며 누적되지 않는다.

6. 결론

모형선 제작 시 가장 많은 시간을 소요하는 것이 바로 성형작업이다. 기존의 수 작업 방식으로는 대패와 끌을 주로 사용하며 가공이 잘못된 경우 퍼티(Putty)작업을 하고 나서 다시 가공하는 과정들이 계속 반복되게 된다.

판재가공, 현도작업, 절단, 적층작업에서 약 3일, 성형가공에서는 거의 7일, 페인트, 방수작업, 마킹작업에서 약 4일정도 소요되므로 전체 모형선의 완성에 필요한 시간은 대략적으로 2주~3주이다.

이러한 일련의 과정 중에 성형작업에서 시간과 인력이 많이 소요되므로 이 시간을 줄이는 것이 목적이 된다. 오차는 전체길이 방향으로 볼 때 0.1~0.5mm정도이고 NURBS 데이터 오차까지 포함하여 수선면 가공 시에는 간헐적으로 1mm이하 정도의 오차가 나타났다.

오차의 측정과 수정부분에서 선수, 선미는 수선의 템플레이트를 기준으로 제작되고 또한 전체성형은 정면도(Body Plan) 템플레이트를 가지고 성형가공 후 각 스테이션 별로 수정 및 오차를 측정하게 된다. 템플레이트 역시 얇은 판재를 가지고 선도를 따라 절삭가공한 것이기 때문에 이 역시 오차의 요소가 될 수도 있어 템플레이트 가공이 상당히 중요하게 된다.

완성된 자유곡면 가공기계가 한 수선면 가공시 약 3~4분 정도가 소요되며, 100개의 수선면을 기준으로는 반쪽 기준으로 약 6~7시간이 소요되므로 가공시간을 크게 줄일 수 있었다.

울산대학교 해양공학광복수조에서 모형선 실험 등을 위해 자유곡면 가공시스템의 설계 및 제작,

프로그램 등을 자체적으로 개발하였으며 개발 완료된 시스템은 국내외 2, 3차원수조를 위한 모형선 실험과 자동용접, 자유항주, DPS(Dynamic Positioning System)개발 등에 응용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 지원 되었음. (RF-97-001-E0011)

참 고 문 헌

- 신현경, 박규원, 박호균, 김일환 2000 "NURB S 곡면을 이용한 선형표현에 관한 연구 - 자유 곡면 가공기계 개발(I)," 대한조선학회 논문집 제37권 2호
- 이형락, 김동욱 1998 "3차원 곡면 가공기에 관한 연구," 울산대학교 공학사 졸업논문
- 이창용, 이학진 1999 "3차원 곡면 가공기에 관한 연구 (II)," 울산대학교 공학사 졸업논문
- 신현경, 이형락, 박규원 2000 "자유곡면 가공기계 개발에 관한 연구(II)," 대한조선학회 추계 연구논문 발표회
- 생산기술연구원 1992 "모터제어기술", 도서출판 세화
- 일본 야스가와(安川) 전기 제작소 1988 "서보 기술 입문," 세운사
- 박종봉 1996 "수치제어 동작기계", 기전연구사
- Franklin, Powell and Emami-Naeini 19-95 "Feedback Control of Dynamic System", Addison Wesley
- 황광일 1999 "Visual C++ Professional Programming Bible", 영진출판사
- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주 2000 "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구", 대한조선학회 논문집 제37권 3호
- 신현경, 박규원 1991 "Open 균일 B-Spline 곡면을 이용한 선체 곡면 표현에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제28권 제2호
- 박규원 1992 "컴퓨터 그래픽스 기법을 이용한 Bi-Cubic B-Spline 선체형상 표현에 관한 연구", 울산대학교 공학석사 학위논문
- 신현경, 신상성, 박규원 1994 "선체형상 정의를 위한 벡터 산출 알고리즘 개발에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제31권 제3호
- 신상성 1994, "B-Spline 곡면정의를 위한 Vertex 산출 알고리즘 개발 및 순정에 관한 연구", 공학석사 학위논문, 울산대학교
- 신현경, 신상성 1994 "곡선 및 곡면 순정에 관한 연구", 대한조선학회 추계연구논문 발표회
- H.Shin, S.S.Shin, K.W.Park 1994 "A Study on Development of an Algorithm for Vertex Creation to Derive Ship Hull Forms", International Shipbuilding Conference, St.Petersburg, Russia



< 신 현 경 >

< 이 형 락 >