

大韓造船學會論文集
 第 37 卷 第 2 號 2000年 5月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 37, No. 2, May 2000

NURBS 곡면을 이용한 선형표현에 관한 연구 - 자유곡면 가공기계 개발 (I) -

신현경*, 박규원**, 박호균***, 김일환***

A Study on the Representation of Ship Hull Forms Using NURBS Surface - The Development of a Free Form Cutting Machine : Part I -

by

H. Shin*, K.W. Park**, H.G. Park*** and I.H. Kim***

요 약

선형개발을 위해서는 다양한 많은 모형이 필요하며, 자유곡면으로 구성된 여러가지 선체형상을 완전히 수작업으로 제작하기에는 어렵고, 많은 오차를 내포한다. 고가의 모형삭성기를 대체할 수 있는 자유곡면 가공기계 개발의 초기단계로서 선체형상을 위한 자유곡면 모델링 및 모형 자동 가공 CAD/CAM시스템을 개발 제작하고자 한다. 본 논문에서는 선체형상을 기존의 방법과는 달리 자료점을 조정점으로 가정하는 방법을 사용하여 NURBS로 정의하였고, 정의된 선체형상을 부드러운 3차원 곡면으로 가시화하였다.

Abstract

In order to develop ship hull forms, many various models are represented numerically in terms of B-spline surfaces and tested experimentally in the towing tank. It is very difficult to make various ship hulls with free forms in handiwork. As the first step of development of a free form cutting machine which becomes a good substitute for high-priced model cutting machines, free forms representation for model cutting are developed. In this paper, NURBS surfaces are represented on the assumption that data points may be control points contrary to existing methods.

접수일자 : 1999년 1월 12일, 재접수일자 : 2000년 1월 14일

*정회원, 울산대학교 수송시스템공학부

**정회원, (주) 한국 CAD/CAM Service 부설연구소

***학생회원, 울산대학교 수송시스템공학부

1. 서론

국내 산업계는 치열한 국제 경쟁력에 대응할 수 있도록 공학분야의 새로운 기술 혁신을 위해 부단한 노력과 막대한 연구비를 투자하고 있으며 특히 컴퓨터를 이용한 자동화에 많은 관심을 쏟고 있다. 최근 정부의 의지로 21세기 선진 해양국 진입을 위한 많은 노력과 더불어, 각종 해양사고로 인한 사회적 관심 및 차세대 선박(Advanced Ship)개발의 필요성이 대두되고 있는 이때에 울산대학교내의 국내 최초의 3차원 수조(해양공학수조)건설은 조선해양공학 연구의 많은 발전을 가져올 것이다. 한편 실험에 있어서 제일 먼저 선행되어야 할 것은 모형 제작이다. 새로운 형태의 선박을 실험하기 위해서는 형태가 다양한 많은 모형이 필요하다. 자유곡면을 가진 선체 형상을 수작업으로 제작하기에는 어려움이 수반되며 특히 제작에 있어서 많은 시간 및 오차를 내포한다. 최근 기계 부품 및 곡면의 정밀 가공을 위해서 CNC 선반을 이용하지만 자유곡면(free form)인 선체형상을 위한 데이터 작성(이동경로생성)이 용이하지 않고, 이를 위한 시스템이 국내에서 제작된 것이 없을 뿐만 아니라 특히 고액이기 때문에 대학에서 교육 및 연구에 도입하여 사용하기에는 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 저자들은 선체형상을 위한 자유곡면 모델링 및 모형 자동 가공 CAD/CAM시스템을 개발 제작하고자 한다.

선체형상을 정의하기 위해서는 Offset 및 도면이 필요하며[1][2], 이를 기반으로 하여 2차원 곡선을 생성하며, 이를 위해 최근에 개발된 ISE 알고리즘을 사용하여 Interpolation을 하고[3][4], 부드러운 곡선을 만들기 위해 수정 작업을 수행한다. 2차원 곡선이 완성되면 이를 이용하여 gird offset을 산출하고, 이들 데이터를 사용하여 곡면 Interpolation을 하여 3차원 곡면을 생성한다. 3차원 곡면도 2차원 곡선과 동일하게 부드러운 3차원 곡면을 만든다[5][6].

우선 자유곡면 가공기계 개발에 있어서 선행되어야 할 단계로서 선체곡면을 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)곡면으로 표현

한다.

NURBS곡면을 형성하기 위한 B-Spline 조정점(control point)을 크게 3가지 방법으로 결정하며, 이미 알려진 역행렬 방법, 가역행렬 방법과 본 논문에서 새로이 제시되는 자료점을 조정점으로 가정하는 방법을 이용한다. 또한 생성된 선체곡면의 관련인자에 대한 민감도를 조사하여 완전한 곡면을 얻기위한 관련 인자들의 영향을 살펴보고 Gaussian 곡률을 계산한다. 그리고 선체곡면 표현 기능, 곡면의 가시화 및 선도(lines) 생성 등을 위한 모듈(modules)을 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 개념을 도입하여 개발한다[7][8][9].

또한 Windows NT(Windows 95)운영체제 하에서 Visual C++를 사용한 그래픽사용자 인터페이스(GUI)를 구현하며, 현재 과학, 엔지니어링 모델링, 영상화 응용프로그램의 산업표준으로 사용되고 있는 OpenGL을 이용하여 보다 향상된 그래픽 수행능력을 가진 선체곡면을 표현하는 프로그램을 개발한다[10][11][12].

2. B-spline 곡면과 기초함수(Basis function)

2.1 NURBS(Non-Uniform Rational B-spline) 기초함수의 정의

차수가 p 인 NURBS 곡선의 정의는 다음과 같다[13].

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad a \leq u \leq b$$

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u)w_j}$$

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u)P_i$$

$$U = \underbrace{\{0, \dots, 0, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, 1, \dots, 1\}}_{p+1} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{p+1}$$

2.2 NURBS 곡면의 정의

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}$$

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) w_{k,l}}$$

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) P_{i,j}$$

다음 그림은 3차(cubic) NURBS 곡선의 가중치에 대한 변화와 매듭(knot)과 조정점의 중첩에 따른 곡선의 cusp를 나타낸 것이다.

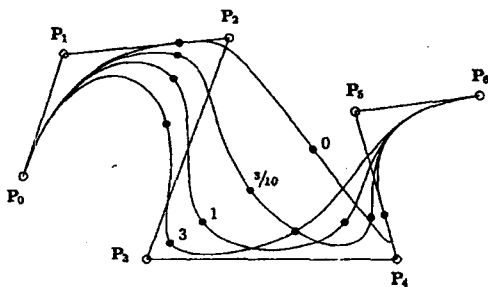


Fig.1 Rational cubic B-spline curves with varying w3

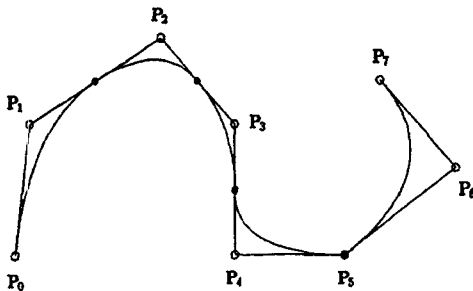


Fig.2 A quadratic curve with a cusp at a knot of multiplicity

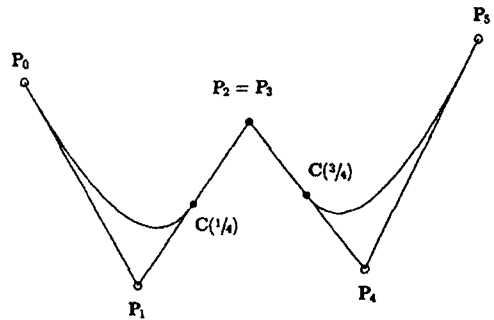


Fig.3 A quadratic curve at a double control point

3. 조정점의 산출

첫째는 기존 선형의 도면 정보 또는 개념적인 선형의 자유곡면 스케치(free sketch)로부터 디지털라이저(digitizer)를 이용하여 얻은 곡면 위의 자료점을 알고 있다면 이 곡면을 재생성하기 위한 조정점이 필요하다. 즉 offset으로부터 선체를 표현하기 위해서는 생성된 곡면이 offset을 지나가기 위한 조정점을 산출해야 한다.

3.1 역행렬 방법

(Inverse matrix method)

자료에서 얻은 자료점의 개수와 조정점의 개수가 같을 경우에 역행렬을 사용하여 조정점을 구할 수 있다.

B-Spline 곡면식의 행렬식 형태는 다음과 같다.

$$[S] = [M][P][M]$$

만약 행과 열의 수가 같다면 [N]과 [M]은 정방행렬(square matrix)이고 조정점 [P]는 다음과 같다.

$$[P] = [M]^{-1}[S][M]^{-1}$$

역행렬법은 계산량이 적고 수행속도가 빠른 삼각행렬 분해법(LU decomposition method)을 이용한다[14].

3.2 가역행렬 방법

(Pseudo inverse matrix method)

자료에서 얻은 자료점의 개수보다 조정점의 개수가 적을 경우에 가역행렬을 사용하여 조정점을 구할 수 있다.

만약 행과 열의 수가 다르다면 [N]과 [M]은 정방행렬이 아니고 조정점 [P]는 다음과 같다 [2].

$$[P] = [N]^{-1}[M]^T[S][M][M]^{-1}$$

$$[N] = [M]^T[M], [M]^{-1} = [M][M]^T$$

$[N]^{-1}$: [M]의 가역행렬

$[M]^{-1}$: [M]의 가역행렬

여기서 주어진 모든 점을 지나게 하려면 자료점과 조정점의 수가 일치하여야 하지만, 국부적으로 진동할 위험이 있으며, 부드러운(smooth, fair) 곡선 및 곡면을 보장할 수 없다. 따라서 조정점의 수를 줄이고 위의 식들을 이용하면 부분적으로 근사점을 지나는 순정(smooth, fair)한 곡면을 얻을 수 있다.

3.3. 자료점의 직접 사용

제한된 offset자료만으로 선형을 표현하기에는 한계가 있으므로 선도로부터 digitizer를 이용하여 자료점을 추가한다.

선체를 표현하는데 있어서 선체의 곡면은 대부분 완만한 곡률을 가지고 급격히 변화하는 부분이 없기 때문에 자료점의 직접 사용이 가능하다. 이 방법은 선형표현에 있어서 기존의 방법과는 다른 개념이지만 자료점의 수가 많으면 많을수록 그 곡선이나 곡면의 수렴도가 높기 때문에 시도한 방법이 복잡하고 역행렬 계산이 없는 간단한 행렬의 곱으로 쉽게 표현할 수 있는 장점이 있다.

$$[S] = [M][S^*][M]$$

$[S^*]$: 조정점으로 가정한 자료점

4. 곡면의 민감도(Sensitivity) 검토

선체곡면의 민감도를 다음과 같이 3가지 방법으로 주어진 자료점에 계산되어진 곡선이 얼마나 잘 수렴하는가의 정도로 검토하였다.

첫째는, 자료에서 주어지는 자료점의 개수와 조정점의 개수가 같을 경우에 역행렬 방법을 사용하여 조정점을 구하여 차수를 조정함으로써 민감도를 검토하였다.

Table 1 Sensitivity of hull surface when the number of control points are the same as that of data points

차수	3	4	5	6	7	8
민감도	×	△	○	◎	○	○

×:나쁨, △:보통, ○:좋음, ◎:매우좋음

둘째는 자료에서 주어지는 자료점의 개수보다 GC조정점의 개수가 작을 경우에 가역행렬을 사용하여 조정점을 구하여 조정점의 개수를 조정함으로써 민감도를 검토하였다.

Table 2 Sensitivity of hull surface when the number of control points are smaller than that of data points

조정점(u,v)	17.25	17.24	16.23	16.22	15.20	15.19
민감도	○	○	△	△	×	×

셋째는 자료에서 주어지는 자료점을 조정점이라고 가정하고 가중치를 조정함으로써 민감도를 검토하였다(Fig.6과 Fig.7).

Table 3 Sensitivity of hull surface with varying total weights

가중치	1.005	1.01	1.015	1.02	1.025	1.03
민감도	◎	○	○	○	○	△

Table 4 Sensitivity of hull surface with varying local weights

가중치	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006
민감도	◎	◎	◎	◎	○	○

5. 곡면의 순정도 검토

잘 알려진 bi-cubic 곡면(Bezier, Coon'patch, B-spline)들은 어느 곳에서나 2차 미분 (C^2)이 가능하며 곡률의 연속성을 가진다. 또한 곡면형상이 복잡한 경우에는 곡면이 주어진 점(Offset)을 지날지라도 곡률이 급격히 변화하는 부분이 발생할 수 있다. 이런 경우 수학적으로는 곡률의 연속성이 있지만, 기하학적인 측면에서 볼 때는 부드러운(Smooth, fair)곡면이라고 볼 수 없을 것이다. 순정도(fairness)를 검토하기 위해서 본 논문에서는 Gaussian곡률을 사용하였다. Gaussian 곡률은 주곡률(Principal Curvature)의 최대값 (χ_{max})과 최소값 (χ_{min})의 곱으로 나타낸다 [5][15][16].

$$K = \chi_{min} \cdot \chi_{max} \quad \text{여기서} \quad A = [Q_u \times Q_v] \cdot Q_{uu}$$

$$= \frac{AC - B^2}{Q_u \times Q_v} \quad B = [Q_u \times Q_v] \cdot Q_{uv}$$

$$C = [Q_u \times Q_v] \cdot Q_{vv}$$

Table 5 Gaussian curvatures of surfaces

$\chi_{min} \cdot \chi_{max}$	K	모양
같은 부호	> 0	타원 (bump or hollow)
반대 부호	< 0	쌍곡선 (saddle point)
하나, 둘	= 0	원통 (ridge, plane)

6. 선체곡면에 대한 응용

본 논문에 사용된 모델은 LBP(Length Between Perpendiculars)가 128m인 이중갑판 일반화물선(Twin-deck General Cargo Ship)이다[19].

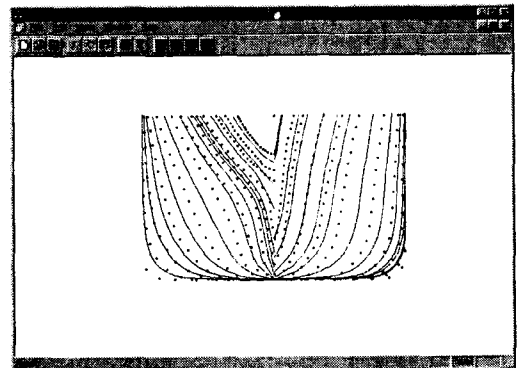
6.1. NURBS 선체곡면 생성

6.1.1 자료점 개수와 조정점 개수가 같은 경우(역행렬 방법)

삼각행렬 분해법(LU Decomposition method)을 사용하여 조정점을 구하여 차수를 변화시켜 얻은 결과는 다음 그림과 같다. 차수가 3인 경우에는 배의 곡면이 나타나지 않았다.

6.1.2 자료점 개수보다 조정점 개수가 적은 경우

가역행렬법을 사용하여 조정점을 구하여 조정점의 개수를 변화시켜 얻은 결과는 다음 그림과 같다.



... : 자료점
 — : 조정점을 구하여 얻은 NURBS 곡선
 자료점과 조정점이 18×27인 경우
 Fig.4 Body plan(degree 6)

6.1.3 자료점을 조정점으로 가정한 경우

자료점을 마치 조정점과 같다고 가정하고 가중치(weight)를 변화시켜 얻은 결과는 다음 그림과 같다.

Fig. 7에서와 같이 극부적인 가중치를 변화시킨 부분은 선체곡면의 선수, 선미 그리고 bilge부분이다. 가중치 변화의 예를 들어보면 선수와 선미부에서는 1.05 ~ 1.4정도로 가중치 변화의 폭이 크고 bilge부분은 1.01 ~ 1.15 정도이다.

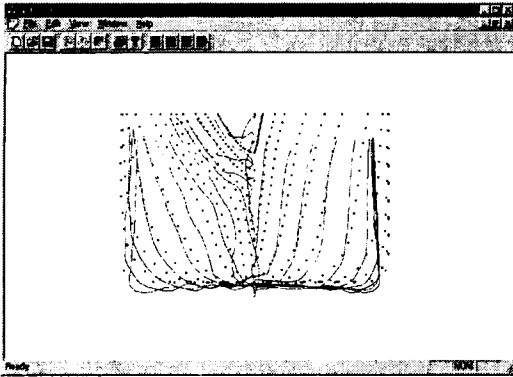


Fig.5 Body plan(data points : 18×27, control points : 17×27)

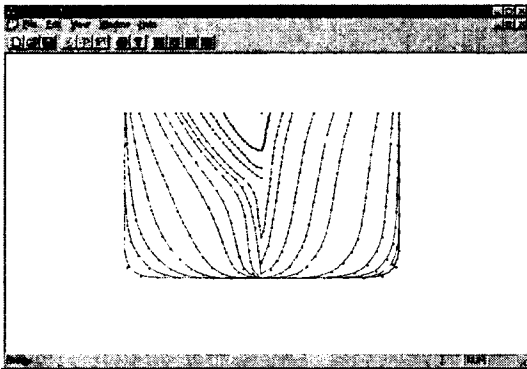


Fig.6 Body plan (before the change of weights)

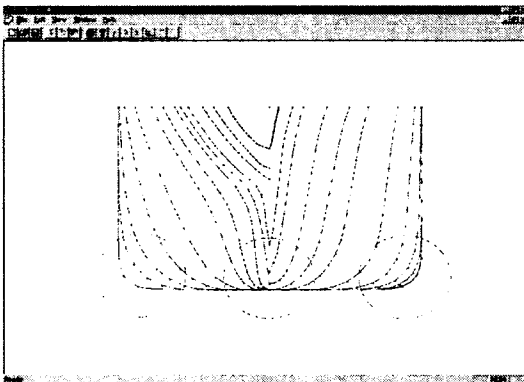


Fig.7 Body plan (after the change of weights)

6.1.4 결과 및 고찰

자료점과 조정점의 개수가 같고 차수가 6인 경우가 Fig.4에 보여진다. 차수가 6보다 적은 경우는 곡면이 자료점보다 밖으로 치우치는 경향이 있고, 차수가 6보다 큰 경우는 안으로 치우치는 경향을 볼 수 있었다.

자료점의 개수보다 조정점의 개수가 적은 경우에는 조정점의 개수를 줄일수록 곡면형성이 안좋아지며, 한 예로 Fig.5 에서 볼 수 있다. 이런 결과는 행렬의 곱이 많아서 역행렬의 오차 누적으로 인해 발생하는 것 같다.

자료점을 조정점으로 가정한 경우는 조정점의 개수가 충분히 많기 때문에 조정점이 자료점으로 근접하게 된다. 행렬법을 쓰지 않았기 때문에 오차도 거의 없는 전반적으로 만족할 만한 부드러운 곡면 Fig.6 에서 볼 수 있다. 그리고 부분적인 조정점의 가중치를 조정함으로써 자료점을 더 잘 지나가는 것을 Fig.7 에서 볼 수 있다.

이 세 방법 중에 행렬법을 쓰지 않은 마지막 방법이 가장 만족스러운 곡면을 생성하였으며, 좀 더 정확한 곡면을 얻기 위해서는 자료점이 많을수록 유리하다.

6.2 선체곡면의 가시화

NURBS 곡면으로 구성된 선체곡면을 OpenGL을 사용하여 다음과 같이 3차원으로 가시화하였다.

6.2.1 자료점 개수와 조정점 개수가 같은 경우(역행렬법)



Fig.8 Visualization of ship hull form(1)

6.2.2 자료점의 개수보다 조정점의 개수가 적은 경우(가역행렬법)

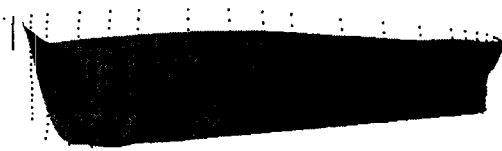


Fig.9 Visualization of ship hull form(2)

6.2.3 자료점을 조정점으로 가정한 경우
(부분적인 가중치 적용)



Fig.10 Visualization of ship hull form(3)

6.3 선체곡면의 Gaussian 곡률 표현

NURBS 선체곡면의 전체적인 곡률의 분포를 알기 위해서 우선 선체를 수많은 조각으로 곡면을 구성토록 하였다. 생성된 각각의 작은 조각에 임의대로 만들어진 아래의 색상표에서 해당되는 곡률의 색을 입히도록 하였다.

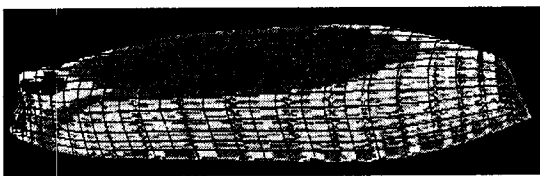
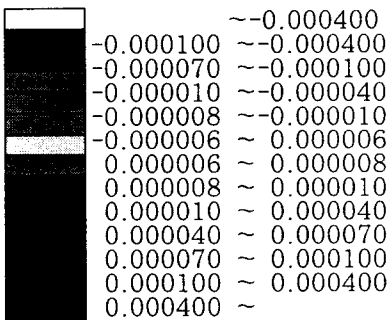


Fig.11 Gaussian curvature of ship hull form(degree 3x3)



Fig.12 Gaussian curvature of ship hull form(degree 4x4)



左) Fig.13 Curvature at stern

右) Fig.14 Curvature at bow

Fig.11과 Fig.12의 Gaussian 곡률분포의 비교를 통해 차수가 3인 경우의 선체곡률보다는 차수가 4인 경우의 선체곡률분포가 더 부드럽다는 것을 알 수 있다.

7. Bulbous Bow가 있는 선체에의 응용

7.1 NURBS 선체곡면 생성

자료점을 조정점으로 가정하여 얻은 결과는 다음과 같다.

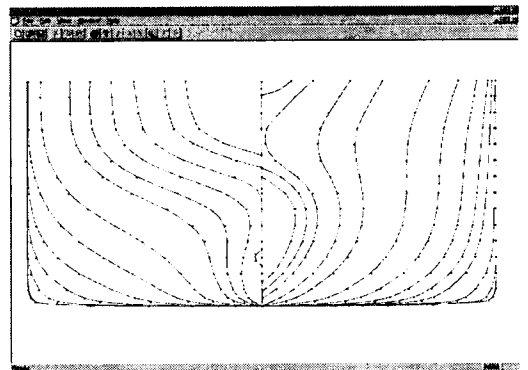


Fig.15 Body plan(with bulbous bow)

7.2 선체곡면의 가시화

NURBS 곡면으로 구성된 Bulbous Bow가 있는 선체곡면을 OpenGL을 사용하여 다음과 같이 3차원으로 가시화하였다. (본 절에서 사용된 Bulbous Bow가 있는 선형은 KTTC 선형임)

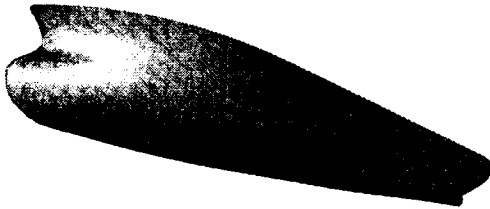
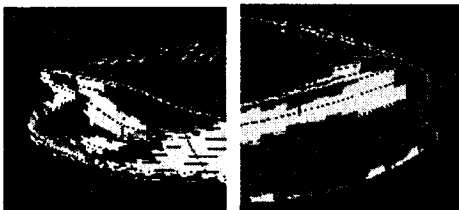


Fig.16 Visualization of ship hull form(with bulbous bow)



Fig.17 Curvature of ship hull form (degree 4×4)(with bulbous bow)



左)Fig.18 Curvature at stern (with bulbous bow)

右)Fig.19 Curvature at bow (with bulbous bow)

8. 결 론

본 논문에서는 선체형상을 NURBS로 정의하였고, 정의된 선체형상을 C^2 연속의 3차원 곡면으로 가시화하였다.

조정점 개수를 줄이지 않은 역행렬법을 이용한

결과는 국부적으로 진동을 하지는 않지만 주어진 자료에 의한 자료점을 잘 지나가지 않았다. 하지만, 차수를 조절함으로써 자료점을 근접하게 지나가게 할 수 있었다. 반면에 국부적인 진동을 막기 위해서 조정점을 줄인 가역행렬법을 이용한 결과는 만족스럽지 못한 결과를 얻었다.

본 논문에서 처음으로 제시된 자료점을 조정점으로 가정한 경우에는 자료점을 아주 잘 지나가는 만족스러운 곡면을 얻어냈고 부분적인 가중치를 조절함으로써 NURBS 곡면을 완벽히 표현할 수 있었다. 그리고 Bulbous Bow가 있는 선체에도 자료점을 조정점으로 가정하여 자료점을 아주 잘 지나가는 곡면을 얻을 수 있었다.

Fig.11과 Fig.12의 곡률분포의 비교를 통해 차수가 3인 경우의 선체곡면보다는 차수가 4인 경우의 선체 곡률분포가 더 부드럽다는 것을 알 수 있다.

NURBS 곡면의 표현과 적용을 일반 PC에서 사용이 가능하도록 Windows NT(또는 Windows 95) 환경 하에서 MFC(Microsoft Foundation Class)를 기반으로 한 Visual C++로 개발하였다. 전산기 지원 선박설계 및 건조에서 선행되어야 할 선형표현에 관하여 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 구현하여 2차원 및 3차원 곡면 선형정의 프로그램을 개발하였다. 그리고 OpenGL이라는 그래픽 라이브러리를 사용함으로써 좀 더 빠른 고화질의 3차원 그래픽을 화면상에 나타내게 할 수 있었다.

선체형상의 수학적 표현과 컴퓨터 그래픽스응용에 의한 선형의 가시화를 위해 개발된 전산프로그램은 조선소, 대학과 연구소등에서 전산기 지원 선박설계 및 선박제도에 직접 이용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 지원되었음(RF-97-001-E00115)

참 고 문 헌

- [1] 박규원, "컴퓨터 그래픽스 기법을 이용한 Bi-cubic B-Spline 선체형상 표현에 관한 연구", 울산대학교 공학석사 학위논문, 1992
- [2] 신현경, 박규원, "Open 균일 B-Spline곡면을 이용한 선체 곡면 표현에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제28권 제2호, 1991
- [3] 신현경, 신상성, 박규원, "선체형상 정의를 위한 벡터스 산출 알고리즘 개발에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제31권 제3호, 1994
- [4] 신상성, "B-Spline 곡면정의를 위한 Vertex 산출 알고리즘 개발 및 순정에 관한", 공학석사 학위논문, 울산대학교, 1994, 2.
- [5] 신현경, 신상성, "곡선 및 곡면 순정에 관한 연구", 대한조선학회 추계연구논문 발표회, 1994
- [6] H.Shin, S.S.Shin, K.W.Park, "A Study on Development of an Algorithm for Vertex Creation to Derive Ship Hull Forms", International Shipbuilding Conference, St. Petersburg, Russia, 1994
- [7] 신현경, 박규원, "컴퓨터 그래픽스 기법을 이용한 선체곡면 가시화 연구", 대한조선학회 논문집 제 29권 제 3호, 1992
- [8] 한순홍, 이순섭, "전산 선형 설계 시스템의 개발을 위한 기준모델", 대한조선학회 춘계연구 논문발표회, 1993
- [9] 김현철, 김수영, 안 당, 하문근, "횡단면적 곡선과 NURBS곡선을 이용한 선형변환", 대한조선학회 논문집 제32권 제3호, 1995
- [10] 신현경, 박규원, "그래픽 사용자 인터페이스 (GUI)를 도입한 선형설계 기법에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제30권 제4호, 1993
- [11] 전병선, "비주얼 C++ 4.0 MFC 윈도우 95 프로그래밍", 삼양출판사, 1996
- [12] 박준기, 백정렬, "Visual C++ 5.0", 삼각형, 1997
- [13] Les Piegl, Wayne Tiller, "The NURBS Book", Springer, 1995
- [14] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "Numerical Recipes in C", CAMBRIDGE Univ. Press, 1995
- [15] 김원돈, 남중호, 김광욱, "선형의 기하학적 모델링을 위한 직접순정법에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제28권 제1호, 1991
- [16] Rogers&Adams, "Mathematical Elements for Computer Graphics", McGRAW-HILL, 1990
- [17] 정종필, "OpenGL Superbible", 에프원, 1997
- [18] Ron Fosner, "OpenGL Programming for Windows 95 and Windows NT", Addison Wesley Developers Press, 1997
- [19] 대한조선학회, "표준 선박제도", 동명사, 1992