

NURBS Skinning을 이용한 Inlet Surface 합성

최근일*

현대중공업(주) 선박해양연구소

Inlet Surface Blending using NURBS Skinning

Gun-Il Choi *

*Maritime research institute, Hyundai Heavy Industry Co. Ltd. Ulsan 682-792, Korea

KEY WORDS: Skinning 스킨닝, knot vector 노트벡터, local interpolation 국부보간법, inlet surface 인렛표면, blending 합성

ABSTRACT: The modeling of realistic water-jet geometry is needed in order to facilitate the design modifications. The present paper proposes a method of generating inlet geometry. Inlet duct was represented by NURBS method which utilized the skinning and local cubic interpolation scheme. Three test examples are presented demonstrating the effectiveness of the methods of skinning and local cubic interpolation. Computational examples associated with practical configurations have shown the usefulness of the present method.

1. 서 론

소형선이나 중형선중에서 다수의 선박들이 추진시스템으로서 프로펠러 추진 시스템의 대응으로 워터제트 추진 시스템을 채용하려는 쪽으로 관심이 고조되어 가고 있다. 이러한 움직임에는 기술적 및 상업적으로 연관된 이점과 새로운 추진 시스템을 갈망하는데 예로부터 기인하다고 볼 수 있다. 그러나 이 뒹개가 있는 추진 시스템의 설계는 기하학적으로 보다 더 복잡함은 물론 유체역학적으로도 프로펠러 추진 시스템보다 더 취급하기가 어렵다. 물론사 추진 시스템의 경우에 있어서 물론사 인렛덕트(inlet duct)의 유체역학적 설계는 간단히 해결될 수 있는 문제가 아니다. 인렛덕트의 설계수준은 기존모형에서 출발하여 지겨운 국부 형상 수정을 포함하고 수정된 형상을 수치계산이나 실험적인 방법을 통하여 평가하는 주로 경험적인 방법에 의존하고 있다. 예를 들면 Dai et al.(1995)는 물론사 추진시스템의 인렛 설계방법에 대하여 제시하였고 Jung and Lee(1999)는 캐비테이션 초기발생에 근거한 2차원 인렛형상의 영향에 대하여 조사하였다. Hu and Zangeneh(1999)는 2차원 RANS 방정식해로 인렛 주위의 유동현상을 구하고 최적화 기법을 사용하여 최적 인렛 형상을 조사 하는 연구를 수행하였다. 최근에 상업용 수치계산방법의 발달로 비교적 모형시험에 비하여 간단하게 인렛주위의 유동현상예측이 가능해짐에 따라 이를 이용한 새로운 인렛 형상의 설계가 추진되고 있다(Kariya et al 1999, Roberts et al 1997). 하지만 수치계산과 실험적인 방법을 이용하기 위해서는 인렛표면을 수치적으로 표현하는 방법이 요구된다. NURBS방법을 이용하여 복잡한 인렛표면을 수치적으로 표현하는 방법에 대하여 설명해 보하고자 하는 것이 본 고의 주요 목적이다. NURBS방법은 이미 일반공학분야에서는 형상을 나타내고자 하거나 형상을 설계하

고자 할 때 광범위하게 이용되고 있다. NURBS 방법은 선박설계에서 특히 구상선수와 선미설계에서 중요성이 증대되고 있으며(Kodama et al 2000, Shin et al 2000) 선박추진기의 설계와 해석에도 필요성을 더해가고 있다(Kim et al 2000). NURBS는 소형선박의 설계나 모형시험용 모형의 제작에도 필수 불가결한 것으로 인식되고 있다 (Shin et al 2000).

2. 형 상

그림1은 일반적인 2차원 인렛덕트 형상의 측면도를 보여주고 있다. 그림1에 나타나 있듯이 인렛형상은 2개의 부분으로 구성되어 있으며 상부형상의 측면도는 램프 벽(lamp wall)의 설계와 관련되고 하부형상의 측면도는 립(lip)의 형상설계와 관련된다. 램프 벽의 설계에 있어서 램프 벽의 측면형상은 T1에서 T2로 연결되는 3차원 곡선으로 이루어진다. 립 벽의 형상 설계는 T3에서 T4로 이어지는 3차원 곡선으로 이루어진다. Kashiwadani (1986)는 캐비테이션이 최소화되는 최적 인렛 형상을 구하려 여러 가지 flush 인렛 형상에 대하여 연구를 수행하였는데 이때 수치해법으로는 2차원 포텐셜 방법 이용하였다. 인렛의 측면도를 표현하기 위하여 Hermite 곡선을 이용하였다. 그러나 이 방법은 T3 및 T1 부근의 측면도 곡선 생성의 자유도 불만족으로 만족스러운 결과는 주지 못했다. 본 고의 그림1에 나타난 측면형상은 상부 및 하부 각각 5개의 조절점으로 구성된 NURBS에 의해 생성된 형상이다.

인렛덕트에서 입구와 출구에서의 단면형상은 그림1과 같이 인렛바닥 형상과 출구 횡단면으로 나타낸다. 인렛 입구바닥에서의 단면형상은 램프와 립의 측면도에 따라 타원형, 직사각형 형상 또는 이들의 합성으로 나타낸다. 출구에서의 횡단면은 원형으로 나타낸

다. 인렛의 최종 형상은 스키닝 방법을 이용하여 B-spline 곡면으로 나타낸다. 전체곡면은 램프와 립의 곡선 상의 임의의 위치에서 단면들의 연결로 이루어지며 이러한 단면들은 원형이나 사각형 단면의 변형된 형태이며 동일 차수를 갖는 곡선들이다. 이 곡선들은 인렛 형상의 중추를 형성한다. 하나의 인렛덕트 곡면은 이들 곡선들을 보간법을 통하여 형성되는 인렛형상에 의해 생성된다. B-spline 단면 형상들을 보간 하는 스키닝 방법의 특성 때문에 특정한 경우에 B-spline 표현이 불합리하게 되는 현상이 발생하는 피할 수 없는 경우도 생긴다. 이러한 경우는 대부분 단면형상이 달라서 fitting에 문제가 생기는 때이다. 이 문제는 여러 가지 방법으로 치유할 수 있다. 다음 장에서는 스키닝을 포함한 NURBS 방법에 대하여 일반적인 사항에 검토해보고 그다음에는 국부fitting 방법을 이용한 형상 생성에 대한 계산예에 대하여 기술한다.

3. NURBS 일반 및 수식 표현

곡선이나 곡면을 표현하는 가장 일반적인 두 가지 방법은 일반적인 함수로 명시적으로 표현하거나 매개변수를 사용하는 것이다. 명시적인 방법은 주 변수들에 의해 표현되는 함수로서

$$f(x, y) = x^2 + y^2 - 1 = 0 \text{ 와 같은 것이다.}$$

매개변수를 사용하는 함수에서 변수 u 는 함수에서 독립적인 변수이다. 하나의 곡선은 독립변수와 함께 다음과 같이 정의되어 진다.

$$C(u) = [x(u), y(u)] \quad a \leq u \leq b \quad (1)$$

하나의 매개곡선과 곡면들의 집합이 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)곡선이나 곡면이다. 기본적인 NURBS의 성질만 이곳에서 간략하게 돌이켜 보고자한다. 보다 더 자세한 사항들은 Piegl & Tiller (1995)이나 기타 문헌들을 참고하기 바란다. NURBS는 Non-Uniform Rational B-Spline의 약어로 Non-Uniform은 노트벡터의 공간이 불일정한 것을 뜻하며 Rational은 다항식의 비(ratio)에 의해 표현된다는 것을 뜻한다. 근사기법의 원조라 할 수 있는 Bezier기법은 하나의 조절점을 변경하면 전체적인 곡선의 형상이 변하는 전역조정특성이 있는 반면 B-spline기법은 각각의 조절점 P_i 가 특정한 기저함수와 연관되어 있기 때문에 Bezier기법과 같은 전체적인 형상변화는 일어나지 않는다. 이것은 연관된 기저함수가 '0'이 아닌 곳에서 노트벡터에 의해 형성된 매개변수의 범위에만 연관되어 형상이 변하기 때문이다. NURBS는 rational Bezier곡선들을 기본으로 한 rational B-spline의 일반형이다. B-spline 방정식은 다음과 같이 정의 된다

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p} P_i \quad a \leq u \leq b \quad (2)$$

여기에서 P_i 는 조절점이고 $N_{i,p}$ 는 p 차수 B-spline 기저함수(basis function)이다. B-spline 기저함수를 정의하는 여러 가지 다른 방법들이 있다 즉 divided differences of truncated power functions, blossoming과 recurrence formula이다. 이곳에서는 수치계산에 아주 적합한 recurrence formula를 기저함수로 사용하

였다. p차 B-spline 기저함수를 recurrence formula를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

B-spline 는 노트(u_i)라 불리는 분할점을 갖고 있다. 이 일련의 증가 노트를 노트벡터 $U = (u_0, \dots, u_m)$ 로 실수의 나열로 나타낸다. B-spline과 연관된 기법은 노트벡터와 관련되어 기저함수가 변하기 때문에 국부변형을 하는 것이다. 노트벡터는 보통 unclamped와 clamped 노트벡터로 구분 할 수 있다. 구분하는 기준은 처음과 끝의 노트 값이 차수만큼 반복되면 clamped라 하고 그렇지 않은 것을 unclamped라 한다. 그리고 clamped는 처음과 끝의 점을 지나는 곡선을 형성하는 반면에 unclamped는 처음과 끝점을 지나지 않는다. 또한, uniform과 non-uniform을 구분하는 기준은 노트공간 사이가 일정한 것을 uniform, 일정치 못한 것을 non-uniform이라 한다. B-spline 곡선의 노트벡터의 형태는 다음과 같다.

$$U = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_{m-p+1}, b, \dots, b\} \quad (4)$$

B-spline곡선을 일반화하여 나타낸 것이 NURBS이고 다음과 같이 정의한다.

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad (5)$$

여기서 P_i 는 조절점, w_i 는 가중치, $N_{i,p}(u)$ 는 B-spline 기저함수로 non-uniform 노트벡터를 구성한다. 만일 모든 w_i 가 1이면 위의 식은 B-spline 곡선이 된다. 그러므로 가중치는 곡선의 설계에 있어서 자유도를 더해준다. 따라서 NURBS는 B-spline 곡선에서는 불가능했던 원, 타원 등 다른 많은 곡선을 표현할 수 있다.

동차좌표계에서 NURBS 곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C^w(u) = \sum N_{i,p}(u) P_i^w \quad a \leq u \leq b \quad (6)$$

여기에서 $P_i^w = x_i w_i, y_i w_i, z_i w_i, w_i$ 는 가중치 동차좌표계에서 NURBS 곡면은 다음과 같이 정의한다.

$$S^w(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) M_{j,q}(v) P_{i,j}^w \quad (7)$$

$$U = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_{r-p+1}, b, \dots, b\} \quad (8)$$

$$V = \{c, \dots, c, v_{q+1}, \dots, v_{s-q+1}, d, \dots, d\} \quad (9)$$

여기에서 $P_{w_i, j}$ 는 곡면의 조절점이고 $N_{i, p}$ 와 $M_{i, q}$ 는 노트벡터에 정의된 non-rational B-spline의 기저함수이다. $r = n+p+1$, $s = m+q+1$ 이고 p, q 는 u, v 방향의 차수이다. 범위 $[a, b]$ 와 $[c, d]$ 는 통상 $[0, 1]$ 로 정한다.

4. 스키닝 방법

스키닝은 다중의 단면곡선들을 이용하여 곡면을 구성하는 절차를 말하며 선형설계나 프로펠러 곡면 제작에 사용하던 전통적인 보간법 중의 하나이다. 곡면의 합성 방향은 종방향 횡방향 어느 쪽으로도 가능하다. 비록 단면곡선상에서 근사과정을 거치나 스키닝 방법은 보통 다중 단면곡선들의 보간법으로 각 단면 곡선들은 같은 수의 조절점과 균일 노트수를 갖는 곡면을 형성한다. 좀더 상세한 것은 문헌(Hohmyer, M and Barsky, B, 1991)을 참고하기 바란다. 일련의 곡선들이 $C_k^w(u)$, $k = 0, \dots, K$,로 주어질 때 곡면은 다음과 같이 계산되어야 한다(Piegl, L and Tiller, W., 1996).

$$S^w(u, c_k) = C_k^w(u), k = 0, \dots, K \quad (10)$$

여기에서 계수 c_k , $k = 0, \dots, K$,는 다음과 같이 계산한다.

$$c_0 = 0, c_K = 1$$

$$c_k = c_{k-1} + \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n \frac{|P_{i, k} - P_{i, k-1}|}{d_i} \quad (11)$$

$$k = 1, \dots, K-1$$

이곳에서 d_i 는 $P_{i, 0}$ 과 $P_{i, k}$ 의 사이의 코드 길이이다

식(11)로 부터 q 를 Skinning 방향의 곡면 차수라 할 때 노트벡터 V 는 다음과 같이 구성 한다

$$v_{j+q} = \frac{1}{q} \sum_{k=j}^{j+q-1} c_k, j = 1, 2, \dots, n-q \quad (12)$$

$$v_0 = \dots = v_q = 0$$

$$v_{m-q} = \dots = v_m = 1$$

5. 3차식 보간법

다중의 인렛단면 곡선들을 가지고 NURBS곡선화 하기위해 3차식 곡선 보간법을 택하였는데 이는 3차식이 3차원형상 자료를 취급하는데 유연성이 있고 특별한 기법 없이도 변곡점을 조절할 수 있기 때문이다. 실제로 다수의 선형설계 CAD 소프트웨어가 3차식 보간법을 사용하고 있다. NURBS의 구조 안에서 다항식이나 Bezier 곡선을 이용하여 하나의 곡선을 부분곡선의 합으로 구성할 수 있다. 그리고 적당한 노트벡터를 취함

으로서 NURBS곡선을 얻을 수 있다. 임의의 곡선을 Bezier 곡선으로 나누는 작업은 곡선의 내부에 새로운 Bezier 조절점을 계산하는 것이다. 3차의 경우에는 추가 조절점이 2개가 된다. 이 조절점들은 주어진 점 Q에서 곡선의 접선 선상에 있다. 따라서 주어진 점 Q에서 접선벡터가 필요하다. 점 P_0 와 P_3 를 끝단점으로 하고 T_0 와 T_3 를 두 점의 단위 접선 벡터라 할 때 3차의 Bezier 곡선을 구성할 수 있다. 내부의 새로운 조절점은 이 끝단점과 단위 접선 벡터로부터 다음과 같이 구한다.

$$P_1 = P_0 + \frac{1}{3} \alpha T_0, P_2 = P_3 - \frac{1}{3} \alpha T_3 \quad (13)$$

이때 조절점들은 점 Q를 보간 하는 C^1 연속3차 B-spline 곡선을 정의한다.

$$Q_0, P_{0,1}, P_{0,2}, Q_1, P_{1,1}, P_{1,2}, Q_2, \dots, Q_{n-1}, P_{n-1,1}, P_{n-1,2}, Q_n \quad (14)$$

노트벡터는

$$U = \left\{ 0, 0, 0, 0, \frac{\bar{u}_1}{u_n}, \frac{\bar{u}_1}{u_n}, \frac{\bar{u}_1}{u_n}, \dots, \frac{\bar{u}_{n-1}}{u_n}, \frac{\bar{u}_{n-1}}{u_n}, \frac{\bar{u}_{n-1}}{u_n}, 1, 1, 1, 1 \right\} \quad (15)$$

여기에서
$$\bar{u}_{k+1} = \bar{u}_k + \frac{1}{3} |P_{k,1} - P_{k,0}|$$

6. 예제 계산

마이크로 소프트의 C++를 사용하여 컴퓨터 알고리즘을 작성하였고 출력은 여러 가지 그래픽 작업이나 CAD/CAM 작업에 편리하도록 표준 IGES Format을 기본으로 하였다. 개발된 알고리즘을 점검하기위하여 복잡한 실제 형상보다는 가장 단순한 수학적 기하학적 형상을 계산 대상으로 하였다. 즉 아래와 같은 매개변수 방정식으로부터 단순한 반구 형상을 생성하였다.

$$x = \sin \phi \cos \theta$$

$$y = \sin \phi \sin \theta$$

$$z = 1.2 \cos \phi \quad (16)$$

그림2는 식(16)에 의해 생성한 것을 그래픽으로 재현한 반구형상을 보여주고 있다. 각 방향으로 차수는 3차이다. 종방향으로 스키닝을 적용하였으며 주어진 2차원 단면을 계산 중 원래대로 보호하기위하여 inverse 보간법을 사용하였다. Inverse 보간법은 새로운 조절점을 구하기 위하여 기저함수의 inverse 매트릭스를 계산하는 것으로 다음과 같이 정의한다.

$$[B] = [R]^{-1} [P] \quad (17)$$

식 중에서 $[R]$ 은 기저함수를 나타내고, $[P]$ 는 자료점 그리고 $[B]$ 는 새로운 조절점이다. 그림3은 주어진 자료점을 이용해서 inverse 기법에 의해 구한 조절점을 비교한 그림이다. 여기서 구한 조절점이 주어진 자료점을 구성하기 위한 정확한 조절점임을 증명하기 위해 조절점을 이용해서 새로운 조절점을 생성한 결과 주어진 자료점과 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 주어진 자료점과 새로 구한 조절점이 약간의 차이가 남을 알

수 있다. 하지만 이는 행렬 $[R]^{-1}$ 와 $[R]$ 를 곱했을 때 단위행렬이 구성되어 inverse기법에서 구한 조절점이 주어진 형상의 조절점으로 인정해도 무방함을 알 수 있다.

두 번째 예제는 인렛 형상에서 자주보이는 사각형태의 바닥면과 원형형태의 상단면이 이루는 입체물의 합성이다. 현재 알고리즘 자체로도 사각형태의 형상을 취급이 가능하나 입력시 각진점이나 회전점은 특별하게 표식을 해주어야한다. 그림4는 현재 국부 보간법의 유용성을 보여주고 있다. 각진점이 확실하게 유지되고 직선도 곡선 상에서 유지됨을 알 수 있다. 그림5는 가중치 없이 생성된 복잡한 3차원 형상을 보여주고 있다. 그림5와 같은 경우에는 2차원 단면이 주어지지 않으면 개발된 알고리즘으로 3차원 형상 작업에 문제가 없으나 없으면 2차원 단면을 생성해야 하는 어려운 문제가 생긴다. 설계의 경우에는 2차원 단면을 수시로 조건에 맞게 수정해야 하므로 이에 대한 대비가 필요하다. 세 번째 예제는 실제 인렛형상을 합성하는 경우이다. NURBS방법을 적용하기 전에 정확한 다중의 2차원 단면이 필요하다. 여제에서는 보간법을 사용하기 때문에 특히 중요하다. 본 예제계산에서는 2차원 단면을 자동적으로 생성하고 이를 이용하여 스키닝하였다. 인렛입구에서의 바닥면은 립과 램프의 측면 형상을 따라 출구 단면까지 변하게 된다. 즉 기준선을 따라 사각형에서 원형으로 서서히 변화되는 2차원 단면이다. 종방향과 횡방향으로 각각 3차식으로 형성된 실제 인렛 형상을 그림6에 보여주고 있다. 다중단면곡선들은 동일 조절점과 동일 차수를 갖도록 하여 스키닝에 의한 합성이 완벽하도록 하였다. 이로부터 3차원 인렛 곡면을 NURBS형태로 나타내었다.

7. 토의 및 결론

최근에 소형선을 중심으로 추진 장치로서 프로펠러 대신에 물분사 추진 장치의 채용이 증대되고 있다. 추진 장치 중에서도 덕트의 입구부 형상은 선박의 성능뿐 만 아니라 펌프의 성능, 모멘텀 flux 방출량, 진동과 소음에 지대한 영향을 끼친다는 사실이 알려져 있다. 선박의 종류나 취부방식에 따라 입구부 형상의 종류는 다양하고 복잡한 3차원 형상을 하고 있다. 상업적으로 많은 CAD System이 있지만 일부 정형화된 형상을 제외하고는 인렛곡면같이 복잡한 3차원 형상을 구현하기가 어렵고 상당히 지루한 작업이 요구된다. 본고에서는 스키닝 방법과 국부 보간법을 이용하여 인렛형상을 3차원 NURBS로 구현하는 방법에 논하였다. 스키닝 방법을 이용하여 주어진 2차원 단면형상으로부터 3차원 형상을 형성하였고 곡이나 각이진 형상의 표현을 위하여 국부보간법을 도입하였다. 수치계산 결과 일반적으로 3차원 형상의 구현은 단순한 경우 문제가 없는 것으로 나타났으나 스키닝 특성상 접선방향의 3차원 형상구현에는 무리가 따르는 것으로 나타났다. 몇 가지 곡면에 대한 예제계산을 통하여 스키닝 방향의 전체 노트벡터의 합성 방법과 2차원 단면 형상이 3차원곡면 형성에 주요한 인자임이 확인됐다. 실제 인렛의 2차원 단면의 생성과 합성에 있어서 본 고에서는 계산의 편의상 직각 좌표계를 기준하여 회전 방향을 축으로 단면을 구하고 3차원 형상을 구하였다. 실제의 인

렛형상을 정확히 표현하고자 하면 3차원형상에 적합한 2차원 단면을 구해서 이를 립과 램프의 중간점을 통과하는 기준선에 따른 유체유동의 이동경로에 따라 스키닝을 적용해야 타당 할 것으로 생각되나 이는 중심선을 구하는 문제가 포함되어 차후의 검토사항으로 남기고자 한다.

참고 문헌

- Kim, K. D., Hwang, I. S and Lee, C. S.(2000). "A B-spline higher order panel method for analysis of three dimensional potential flow", Journal of the society of naval architects of Korea, Vol. 37, No.2.
- Hu, P and Zangeneh, M.(1999). "A method for automatic optimization of the intake duct geometry for marine water-jets", Proceeding of the Fifth International Conference on Fast Sea Transportation.
- Dai, C., Kerr, C., Nguyen, R and Wang, H. C.(1995). "A novel flush inlet design methodology for waterjet propulsion", Proceeding of the Third International Conference on Fast Sea Transportation.
- Jung, I.K and Lee, C.M.(1997). "The study on the configuration of waterjet inlet", Proceeding of the annual spring meeting of Society of Naval Architects of Korea.
- Shin, H., Park, K. W, Park, H. G and Kim, I. H.(2000)." A study on the representation of ship hull forms using NURBS surface - The development of a free form cutting machine: Part 1", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37.
- Kodama, Y., Takeshi, H and Hino, T.(1997). "Study on body geometry optimization by the combination of CFD and CAD", Report of Ship Research Institute of Japan, Vol. 38.
- Piegel, L and Tiller, W.(1995). "The NURBS Book", Springer
- Piegel, L and Tiller, W.(1996). "Algorithm for approximate NURBS skinning". Computer -Aided Design, Vol. 28. No.9
- Kariya, D., Kawawshima, T., Kawammoto, H., Nakano, T and Yoshikawa, K.(1999). "Flow investigation in an duct of water jet propulsor", Transaction of the Japan Society of Mechanical and Engineers, Vol. 65.
- Kashiwadani, T.(1986). "The study on the configuration of waterjet inlet (2nd report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 159.
- Robert, J. L., Walker, G. J. and Davis, M.R.(1997). "Flow distribution at waterjet intakes", Proceeding of the Fourth International Conference on Fast Sea Transportation.
- Woodward, C.(1987). "Cross-sectional design of B-spline surfaces", Comput. and graph, Vol.11, No.2
- Hohmyer, M and Barsky, B.(1991). "Skinning B-spline curves to construct an interpolatory surface", Comput. Vis, graph and image processing: graphical models and image processing, Vol.53.

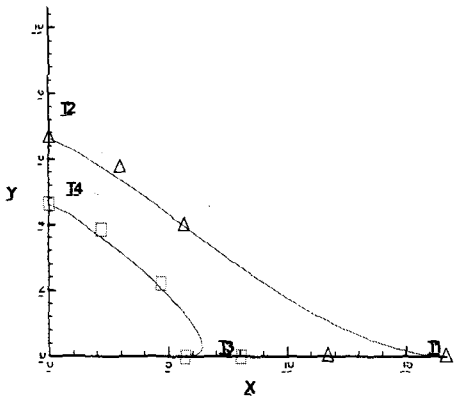


Fig. 1 A schematic diagram of inlet profile

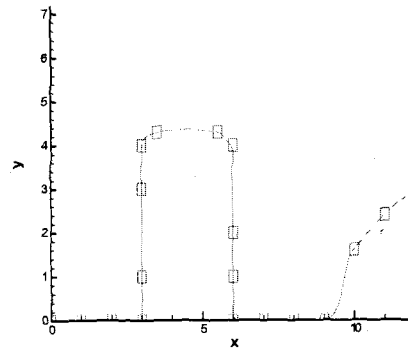


Fig. 4 Cubic local interpolation with flag

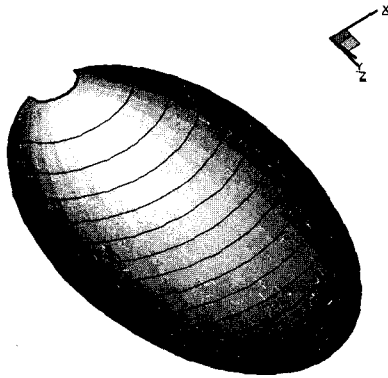


Fig. 2 A half-spherical with third degrees

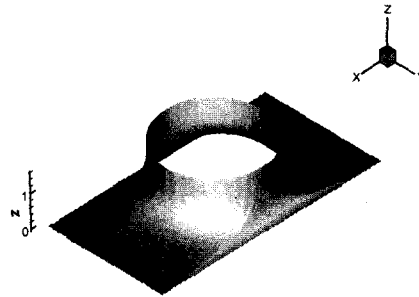


Fig. 5 Blending of geometry

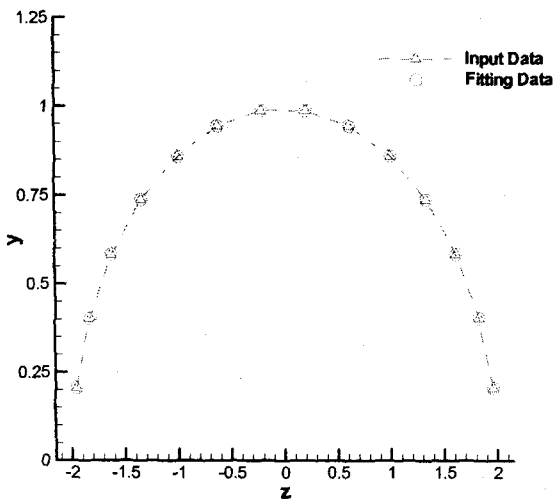


Fig. 3 Comparison of input and fitted data by inverse method

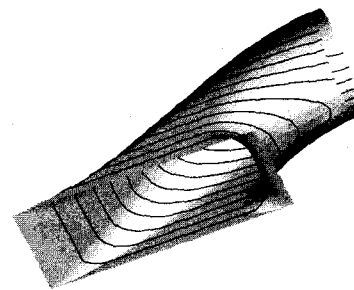


Fig. 6 Inlet geometry representation by NURBS