

주문형제품의 생산을 위한 집합화 알고리즘의 개발

김승엽*, 이건우**

Grouping Algorithm for Custom-tailored Products

Kim, S. Y.* and Lee, K. W.**

ABSTRACT

Custom-tailored products always vary their sizes and shapes to satisfy the customers' tastes and requirements but they have to be fabricated as fast as possible when ordered. One way to solve this problem is to prepare several representative products in advance and each custom-tailored product is generated by machining the closest representative product. To realize this approach, it would be necessary to be able to group the products into several groups each of which has a representative product. Once the similar products are identified to be grouped, the representative shape can be generated such that all the products in the group can be made by machining the representative product. The custom-tailored products considered in this work have similar shapes but different sizes. Since these products have free surfaces, that are hard to be compared, their convex hulls are used for the grouping. Among all the products to be grouped, one product is chosen as a base shape. The shape and overall similarity values between the base shape and the remaining shapes are calculated as their convex hulls are rotated virtually. By calculating these similarity values at each rotation, the optimal alignment of the reference shape with respect to the base shape is determined. Overall similarity value at this optimal alignment is used as a measure for grouping. A prototype system based on the proposed methodology has been implemented and used to group the shoe-lasts for custom-tailored shoes.

Key words : 주문형제품, convex hull, 유사성지수, 정렬 알고리즘

1. 서 론

1.1 연구 배경

주문형제품이란 소비자 개개인의 취향이나 특성에 맞추어 형상이나 크기가 다르게 생산되는 제품을 말한다. 대표적인 예로 맞춤 양복을 들 수 있겠다. 맞춤 양복과 마찬가지로 소비자의 발 형상에 맞춘 구두라든가 머리 형상에 맞춘 모자나 가발 등도 대상 고객의 신체 일부분의 형상을 본떠 제품의 기본형에 적용시키는 생산 과정을 거치며 그 생산품은 많은 경우 자유곡면을 포함한다. 주문형 제품의 효율적인 생산을 위하여 다음과 같은 생산과정을 가정할 수 있다.

우선, 표본 데이터들의 형상을 입력받아 그 유사성

을 판단하고 집합화하여 몇 개의 제품군으로 구분한다. 그 후, 각 제품군이 포함하는 모든 제품을 가공할 수 있으면서 가공량이 가장 작은 기본형(work-piece)을 만든다. 새로운 소비자의 특성에 맞춘 제품의 생산이 요구되면 새로운 제품의 형상을 기존의 제품군의 형상과 비교하여 가장 적합한 기본형을 찾아내고 이를 이용해 가공 시간을 단축할 수 있는 공구 경로를 생성한다. 이러한 과정에서 자유곡면을 가진 제품 형상간의 유사성을 판단하고 집합화에 필요한 척도를 제공할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이와 더불어 2차원 또는 3차원 공간상에 임의의 자세로 배치되어 있는 제품의 형상 데이터를, 기본형의 형상 내에 담아 가공이 용이하도록 자세를 정렬하는 알고리즘이 필요하다.

1.2 알고리즘의 개요

본 논문에서는 정렬과 유사성 판단의 기준이 될 파트와 비교 대상이 될 파트들이 존재할 때, 각 비교 대

*서울대학교 기계항공공학부

**종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

- 논문투고일: 2002. 1. 16

- 심사완료일: 2002. 2. 15

상 파트들과 기준파트와의 일대일 비교를 통하여 각각을 정렬하고, 기준파트를 기준으로 한 정렬된 상태에서의 유사성지수를 계산한다. 이렇게 계산된 유사성지수를 이용하여 기준파트를 기준으로 하는 집합에 비교 대상 파트를 포함할 것인지 아닌지를 결정한다.

유사성지수는, 크기에 관계 없이 형상이 닮은 것인지를 판단하기 위한 최대형상유사성지수에, 파트의 크기에 의한 영향을 고려한 값을 더한 것이다. 자유곡면을 가진 파트 간의 최대형상유사성지수는 기준파트와 비교 대상 파트의 convex hull을 이용하여 계산되며, 그 convex hull은 다음과 같은 요구를 만족한다.

- Convex hull의 인접한 두 face(2차원에서는 edge)의 법선 방향간의 각도는 일정하다.

형상유사성지수는 대상파트의 회전자세에 따라 달라지는 값으로, 두 convex hull의 법선 방향이 같은 face를 밀면으로 하는 각별의 부피(2차원에서는 edge를 밀면으로 하는 삼각형의 넓이)를 비교하여 계산한다. 회전을 통한 형상유사성지수 계산 과정을 대상파트가 초기상태로 돌아올 때까지 반복하면 매 회전마다 계산한 형상유사성지수 중에서 가장 기준파트와 비슷하다고 판단되는 회전 상태를 찾아 낼 수 있을 것이다. 이때의 형상유사성지수가 최대형상유사성지수이다. 이러한 과정을 효율적으로 수행하기 위해 본 논문에서는 실제 대상파트를 회전하지 않고 convex hull의 정량적인 값들의 메모리 상의 배치를 바꾸어 파트가 회전한 것과 같은 효과를 내는 가상회전 방법을 사용하였다.

본 논문에서는 이와 같은 일련의 과정을 2차원 형상에 대해 적용한 방법과 이를 확장하여 3차원 형상에 대하여 적용한 방법을 제시한다.

1.3 관련 연구

Elinson 등^[11]은 파트 간의 유사성을 판단하려는 연구를 GT코드(group technology code)를 이용하는 방법과, 파트의 특징형상에 기반을 둔 방법, 형상정보에 기반을 둔 방법으로 구분하였다.

GT 코드란 형상이나 치수, 재료와 같이 파트의 중요한 특성을 규정하고 이를 코드로 만든 것이다. GT 코드는 파트의 종류나 용도와 같은 매우 전반적인 구별에는 사용이 가능하지만, 비슷한 형상을 가지는 같은 용도의 파트를 구분하는 것과 같이 구체적으로 파트 간의 유사성을 판단하는 척도로는 사용될 수 없다.

Elinson 등^[11]은 특징형상을 점(node)으로 하고 특징형상 간의 관계를 선(edge)로 하여 그래프를 구성하고 동형의 그래프를 찾는 방법으로 유사한 파트를 찾는 방법을 제시하였다. 그러나 이러한 방법은 파트의 형

상이 복잡하거나 특징형상들이 서로 얽혀있는 경우에는 판단이 어려워진다. 또한 동일한 특징형상을 갖는 같은 용도의 파트가 여러 개 있을 경우, 특징형상의 파라미터만으로 서로간의 유사성을 비교해야 하는 어려움이 있다.

Sun^[8]은 일반적인 다면체(polyhedral) 형상의 파트의 B-rep정보를 이용하여 각 면(face)의 방향과 면을 이루고 있는 모서리(edge) 간의 유사성을 수치화하여 그래프를 구성하고 각 파트의 그래프 간의 비교를 통하여 최적화된 정렬 자세와 형상 유사성을 계산하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 자세 정렬에 필요한 회전 각도를 제공하긴 하지만 파트의 face가 직선 모서리로만 이루어진 평면(polygonal face)이어야 한다는 제약이 있다. 또한 같은 형상을 지니면서 균등하게 확대되거나 축소된 파트들은 구분할 수 없다는 단점이 있다.

본 논문에서 제시하는 알고리즘과 같이 convex hull을 이용하여 형상의 유사성을 판별하려는 시도로 Mukai 등^[4]과 Rea 등^[5]의 알고리즘이 있다. Mukai 등^[4]의 알고리즘은 오목한 형상을 구분해 낼 수 있다는 장점이 있고, Rea 등^[5]의 알고리즘은 convex hull의 전체 부피나 대칭성 등을 정량적인 값으로 사용하여 유사성을 판단하기 때문에 매우 빠른 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 알고리즘 역시 자유곡면으로 이루어진 형상을 다룰 수 없고, 파트간의 정렬을 수행하지 못한다는 단점이 있다.

이렇게 기존 알고리즘들에 공통적인 취약점이 있는 이유는 빠른 형상 비교를 위하여 파트의 자세와는 무관한 알고리즘을 선호하여 왔기 때문이다^[6]. 그러나 본 논문에서 제시하는 방법은 가상회전을 통해 파트의 각 회전 자세에서의 유사성 지수를 파트의 형상과 무관하게 계산할 수 있다. 즉 파트의 자세에 따른 유사성을 고려하면서도 그 효율을 극대화하였다.

2. 2차원 형상의 정렬

2차원 형상의 정렬은 파트의 2차원 형상으로부터 서론에서 밝힌 요구를 만족하는 convex hull을 생성하는 데서 출발한다. 기준파트와 대상파트의 2D convex hull이 완성되면 이를 가상회전시키면서 대상파트의 적절한 정렬 자세와 최대형상유사성지수를 계산한다. 유사성지수는 최대형상유사성지수에 크기 요소를 반영하여 계산되며, 이를 집합화의 척도로 삼는다.

2.1 2차원 형상의 Convex hull 생성

각 edge 사이의 각도가 일정한 convex hull을 만들

기 위해, 다음의 개략적인 순서에 따른다. 본 장에서의 벡터는 2차원 벡터를 의미한다.

2.1.1 Unit Normal Vector Set

Convex hull의 각 edge들의 수직인 방향을 미리 정의해 놓는다 사용자가 정의한 각도 θ 간격으로 단위법선벡터(unit normal vector)들을 결정한다. 이때 θ 는 $90^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ 와 같이 90° 를 n 등분할 수 있는 각도로 하며 $[0^\circ, 90^\circ)$ 에서 unit normal vector는 존재한다. 즉 unit normal vector set $N = \{N_0, N_1, \dots, N_n\}$ (n 은 $n\theta < 90^\circ$ 인 최대 정수)이다. 여기서 사용자에게 의해 정의된 각도 θ 는 앞으로의 전 과정에서 고정 불변이다. 기준파트와 대상파트의 모든 convex hull은 θ 를 기준으로 생성하여야 하며, 비교를 위한 가상회전도 θ 간격으로 이루어진다.

2.1.2 파트의 이동

대상파트의 무게중심을 (x, y) 이라 하면, $(x, y) \rightarrow (0, 0)$ 인 이동(translation)을 수행한다.

2.1.3 Position Vector Set

Unit normal vector set의 각 원소 $N_i (i=0 \sim n)$ 의 방향을 기준으로 대상파트의 외곽선에 접하는 직사각형을 구성하기 위한 4개의 점을 찾는다. N_i 방향으로 직사각형의 윗면(top) 상에 존재하는 점을 P_{ti} 라 하고, 반 시계방향으로 $N_i + 90^\circ$ (left) 상의 점을 P_{li} , $N_i + 180^\circ$ (bottom) 상의 점을 P_{bi} , $N_i + 270^\circ$ (right) 상의 점을 P_{ri} 로 한다.

2.1.4 2D Rectangle Set

Fig. 1과 같이 position vector를 지나는 2차원 직사각형(2D rectangle R_i)을 구성하고 각 edge를 $e_{ti}, e_{li}, e_{bi}, e_{ri}$ 라 한다.

2.1.5 Convex hull Vertex Set

2D rectangle R_i 를 unit normal vector set N 의 모든 원소에 대해서 만들면 n 개의 직사각형과 $4n$ 개의 edge가 존재한다. (n 은 $n\theta < 90^\circ$ 인 최대 정수) Edge간

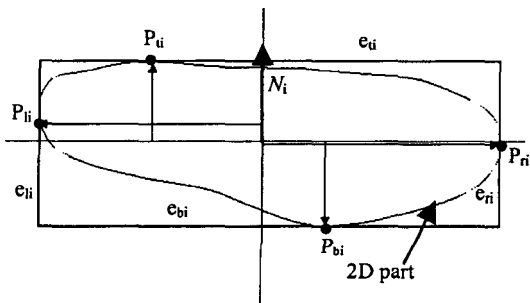


Fig. 1. Example of 2D rectangle, R_i .

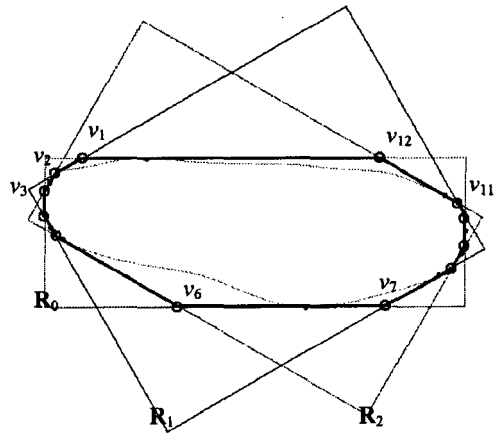


Fig. 2. Convex hull vertices.

의 교차점을 다음식과 같은 순서대로 정렬하여 convex hull vertex set V 를 구한다.

$$V = \left\{ \begin{array}{l} \{(e_{i1} \otimes e_{i2}), (e_{i2} \otimes e_{i3}), \Lambda(e_{i(n-1)} \otimes e_{in}), e_{in} \otimes e_{i1}\}, \\ \{(e_{i1} \otimes e_{i2}), (e_{i2} \otimes e_{i3}), \Lambda(e_{i(n-1)} \otimes e_{in}), e_{in} \otimes e_{b1}\}, \\ \{(e_{b1} \otimes e_{b2}), (e_{b2} \otimes e_{b3}), \Lambda(e_{b(n-1)} \otimes e_{bn}), e_{bn} \otimes e_{r1}\}, \\ \{(e_{r1} \otimes e_{r2}), (e_{r2} \otimes e_{r3}), \Lambda(e_{r(n-1)} \otimes e_{rn}), e_{rn} \otimes e_{i1}\} \end{array} \right\}$$

$A \otimes B$ is intersection point between edge A and B

예를 들어, Fig. 1의 파트를 대상으로 $\theta = 30^\circ$ 의 convex hull을 구성하면 Fig. 2와 같다.

2.1.6 Normalized Triangle Area Set

형상유사성지수를 구하기 위한 convex hull의 정량적인 값으로, 각 unit normal vector에 해당하는 edge를 밑변으로 하고 원점을 꼭지점으로 하는 삼각형의 넓이를 계산하여 저장하고 이를 A_i 라 한다. 삼각형의 넓이에는 convex hull edge의 길이와 원점에서의 거리 정보가 포함되며, 이는 각 삼각형의 넓이를 모두 합한 넓이(즉, convex hull의 넓이)로 나누어져 정규화된다.

2.2 2D Convex hull의 가상 회전

2.2.1 기본 회전각도

대상파트의 convex hull을 일정 각도로 회전시키면서 대상파트와 기준파트의 형상을 비교한다. z 방향을 축으로 하는 회전만을 고려하며, 대상파트와 기준파트의 무게중심이 z 축 상에 존재하므로 회전의 중심은 원점이다. 회전각 θ_z 는 convex hull을 생성하는데 사용된 사용자에게 의해 정해진 θ 를 사용하여 정의한다.

$$\theta_z = m\theta \left(m \text{ is integer bet. } 0 \sim \frac{360^\circ}{\theta} \right)$$

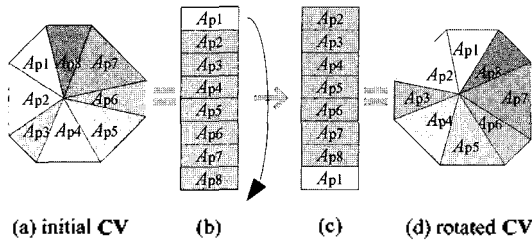


Fig. 3. Virtual rotation of 2D convex hull.

2.2.2 Rotated Normalized Triangle Area Set

대상파트의 convex hull이 회전된 상태에서 기준파트의 convex hull과 비교하기 위해서 가상의 회전을 수행한다.

Fig. 3(a)와 같이 $\theta = 45^\circ$ 로 만들어진 팔각형의 convex hull이 있다고 가정하자. 이 convex hull에 관하여 시스템에서 가지고 있는 정보는 $\theta = 45^\circ$ 라는 정보와 대상파트 P의 triangle area set A_p 뿐이다. 이 경우 $n(A_p) = 8$ 이고, 전혀 회전이 일어나지 않은 초기 상태의 경우 Fig. 3(b)와 같이 메모리 상에 $A_{p1}, A_{p2}, \dots, A_{p8}$ 의 순서로 저장되어 있다. 기준파트의 A_b 역시 같은 θ 를 이용하여 만들어졌으므로 같은 개수의 원소와 순서로 저장되어 있다.

이제 가상 회전을 위해 A_{p1} 의 메모리 상의 위치를 A_{p8} 의 뒤로 옮기면, Fig. 3(c)와 같은 메모리 상태가 된다. 이렇게 순서가 바뀐 A_p 를 rotated normalized triangle area set A'_p 이라 한다. $A'_p = \{A_{p2}, \dots, A_{p7}, A_{p8}, A_{p1}\}$ 을 기준파트의 변형되지 않은 $A_b = \{A_{b1}, A_{b2}, A_{b3}, \dots, A_{b8}\}$ 와 비교하면 결과적으로는 Fig. 3(d)와 같이 시계 방향으로 $\theta_2 = \theta = 45^\circ$ 만큼 회전된 convex hull과 비교하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. A'_p 의 첫번째 원소를 맨 뒤로 보내는 것만으로 시계방향으로 45° 회전된 convex hull은 다시 한번 45° 만큼(초기 상태에서부터는 90° 만큼) 회전한 효과가 나타난다. 즉 같은 과정을 8번($360^\circ/\theta$) 반복하여 초기 convex hull의 자세로 돌아올 수 있다.

2.3 형상유사성지수

형상유사성지수(shape similarity value)는 대상파트의 convex hull CV_p 가 가상회전을 수행할 때마다 계산되며, 크기에 무관하게 기준파트의 convex hull CV_b 와 형상이 얼마나 비슷한지를 수치화하여 나타낸 것이다.

정해진 회전 각도 θ_2 에 대하여 순서가 정렬된 대상파트의 A'_p 을 기준파트의 A_b 와 비교하여 형상유사성지수 $S(\theta_2)$ 을 구한다. 그 식은 다음과 같다.

$$r_i = \exp\left(-\left|\log \frac{A'_{p,i}}{A_{b,i}}\right|\right)$$

$$\text{if } A_{b,i} = A'_{p,i} = 0, \text{ then } \frac{A'_{p,i}}{A_{b,i}} = 1$$

$$K_i = \begin{cases} \text{weight} \times r_i, & (\text{if } r_i > \text{threshold}) \\ 0, & (\text{if } r_i < \text{threshold}) \end{cases}$$

$$(0 \leq \text{threshold}, \text{weight} \leq 1)$$

$$S(\theta_2) = \frac{\sum_{i=0}^n K_i}{\text{weight} \times n}$$

$$n = n(A_b) = n(A_p) = n(A'_p)$$

위 식에 의해 계산되는 형상유사성지수의 범위는 $0 \leq S(\theta) \leq 1$ 이다. $S(\theta_2)$ 가 1에 가까울수록, θ_2 만큼 회전한 대상파트의 convex hull CV_p 의 형상이 기준파트의 convex hull CV_b 의 형상에, 많이 유사하다는 의미이다.

2.4 최대형상유사성지수

앞에서 정의한 θ_2 의 범위 내에 있는 모든 θ_2 에 대하여 $S(\theta_2)$ 를 구하고 그 중 가장 클 때의 형상유사성지수와 그 각도를 최대형상유사성지수 $S_{p,\max}(\theta_{2,\max})$ 라 한다. 최대형상유사성지수는 대상파트가 기준파트의 자세와 유사하도록 회전이 된 뒤의, 형상의 유사성을 나타내는 값이다.

2.5 유사성지수

대상파트 집합 $P_{set} = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ 과 P_{set} 의 각 원소 파트에 해당하는 최대유사성지수의 집합 $S_{\max} = \{S_{p1,\max}, S_{p2,\max}, S_{p3,\max}, \dots, S_{pm,\max}\}$ 가 있다고 하자. 최대유사성지수에 파트의 넓이비를 반영하여, 각 파트의 유사성지수 G_p 를 아래와 같이 정의 한다.

$$G_{pi} = \begin{cases} +O_{pi} & (\text{if } \text{Area}(CV_{pi}) \geq \text{Area}(CV_b)) \\ -O_{pi} & (\text{if } \text{Area}(CV_{pi}) < \text{Area}(CV_b)) \end{cases}$$

$$O_{pi} = \left\{ w_s S_{pi,\max} + (1 - w_s) \exp\left(-\left|\log \frac{\text{Area}(CV_{pi})}{\text{Area}(CV_b)}\right|\right) \right\}$$

w_s is shape weight factor ($0 \leq w_s \leq 1$)

$$\text{Area}(CV_{pi}) = \sum_{j=0}^n A_{pi,j} \quad \text{Area}(CV_b) = \sum_{j=0}^n A_{b,j}$$

$|G_p|$ 가 클수록 즉, G_p 값이 1에 가까울수록 대상파트는 기준파트에 크기와 형상이 유사하다는 것을 의미한다. 형상가중치 w_s 는 사용자에게 의해 결정되는 값으로 집합화를 크기와 형상 중 어느 쪽에 더 비중을 두어서 할 것인지를 결정한다.

3. 3차원 형상의 정렬

3차원 형상의 정렬 알고리즘은 2차원 형상의 정렬 알고리즘을 3차원에서 가능하도록 확장하고 수정한 것이다. 3차원 convex hull을 요구에 맞도록 생성하고 그 정량적인 값들을 이용하여 최적의 자세에서의 유사성 지수를 계산한다는 기본적인 배대는 동일하지만 구체적인 부분에서 차이가 난다.

3.1 3차원 형상의 Convex hull 생성

3차원 형상의 정렬에서 사용할 convex hull은 다음과 같은 순서로 만든다. 본 장에서의 벡터는 3차원 벡터를 의미한다.

3.1.1 Unit Normal Vector Set

$\pm x, \pm y, \pm z$ 방향을 향하고 있는 면들로 이루어져 있는 육면체를, 사용자가 정의한 각도 θ 간격으로 x 축, y 축, z 축을 따라 회전할 때 발생할 수 있는 모든 면의 법선 방향을 찾아 정의한다. 이때 θ 는 2차원 형상의 정렬에서와 마찬가지로 작용한다. 이때 벡터 간의 각도가 $\theta/2$ 보다 작을 경우에 형상유사성지수를 계산할 때 불필요한 간섭을 일으킨다. 유사한 벡터들 중 서로 Euclidean 거리가 limit distance, $d_{limit} = \sin(\theta/2)$ 보다 가까운 거리에 있는 벡터들의 평균벡터를 구하여 대치시키는 필터링을 수행한다. 즉, 모든 face의 법선 방향간의 각도가 항상 $\theta/2$ 보다 크도록 한다.

3.1.2 파트의 이동

대상파트의 무게중심을 (x, y, z) 이라 하면, $(x, y, z) \rightarrow (0, 0, 0)$ 인 3차원 이동(translation)을 수행한다.

3.1.3 Position Vector Set

Convex hull을 구성할 대상파트의 무게중심인 원점 $(0, 0, 0)$ 으로부터 충분히 먼 위치(예를 들면 대상파트를 둘러싸는 최소직육면체의 대각선 길이($d_{diagonal}$)에 unit normal vector set N 의 한 원소 N_i 를 법선 방향으로 갖는 가상의 평면 plane(X)를 설정한다. 설정된 평면 plane(X)로부터 대상파트 상의 가장 가까운 위치를 찾아, position vector P_i 를 정한다.

3.1.4 Rectangular Sheet Set

Position vector set P 의 각 원소 P_i 를 지나는 접평면을 만들기 위해, position vector P_i 를 지나면서, unit normal vector N_i 를 법선 방향으로 갖는 rectangular sheet R_i 를 만든다.

3.1.5 Convex hull Face Set

최종적으로 만들어진 convex hull의 신뢰할 수 있는 정량적인 값을 얻기 위해서는 rectangular sheet set R 의 한 원소 R_i 와 나머지 원소 $R_k(k=0 \sim n, k \neq i)$ 간의

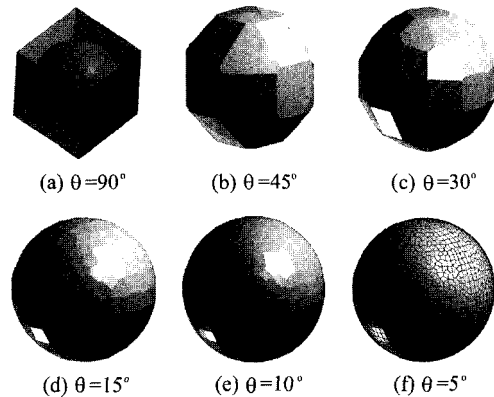


Fig. 4. 3D Convex hulls of sphere part.

경계를 정확하게 구해야만 한다. 이 과정은 R_i 와 R_k 간의 교차 곡선을 구하고 R_i 의 경계를 재 정의하는 과정을 $k=0 \sim n$ 까지 반복하면서 이루어진다. $R_i(i \neq 0)$ 와 R_0 간의 교차곡선을 R_i 의 edge로 만들어 하나의 face로 이루어져 있던 R_i 를 두개의 face를 가진 sheet body로 만든다. 이 때 position vector P_i 가 루프 내에 존재하는 face를 남기고 다른 루프의 face는 제거하여, R_i 의 경계를 재 정의한다. 모든 face의 경계를 재정의하면 Fig. 4와 같은 3차원 convex hull이 완성된다.

3.1.6 Normalized n-Sided Pyramid Volume Set

형상유사성지수를 구하기 위한 3차원 convex hull의 정량적인 값으로, 각 unit normal vector에 해당하는 face를 밑면으로 하고 원점을 꼭지점으로 하는 각뿔(n-sided pyramid)의 부피를 계산하여 저장한다. 각뿔의 부피에는 face의 넓이와 원점에서의 거리 정보가 포함되며, 이는 각뿔의 부피를 모두 합한 부피, 즉 convex hull의 부피로 나누어져 정규화된다.

3.2 3D Convex hull의 가상회전

3차원에서의 가상회전은 unit normal vector를 회전하여 해당하는 각뿔의 부피들을 non-normalized volume으로 만드는 과정이다.

3.2.1 3차원 회전각

$0 \leq \theta_1, \theta_2, \theta_3 < 360^\circ$ 의 범위 내에서 각각의 회전각을 증가시키면서 회전 행렬을 구하면 중복되는 행렬을 포함한다. 그러므로 불필요한 회전을 하지 않기 위해, 다음과 같이 회전각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 범위를 제한한다.

- 1) $0 \leq \theta_1 < 180^\circ, \theta_1 = n\theta$ (n 은 0이상의 정수)
- 2) $0 \leq \theta_2 < 360^\circ$, 단 $\theta_2 \neq 0^\circ$ 이면 $\theta_2 = 90^\circ$ 나 270° 일 수 없다. $\theta_2 = m\theta$ (m 은 0이상의 정수)
- 3) $0 \leq \theta_3 < 360^\circ, \theta_3 = l\theta$ (l 은 0이상의 정수)

이와 같은 조건으로 θ 간격으로 x, y, z축을 따라 가능한 모든 장체의 회전이 표현되며 다음과 같이 원점에 대하여 x축, y축, z축을 축으로 하는 순차적인 회전 행렬 $Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 을 사용한다.

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}$$

3.2.2 Rotated Unit Normal Vector Set

Unit normal vector set N_p 의 회전을 이용하여 대상 파트의 convex hull CV_p 는 정해진 각도에 대해 가상으로 회전한다. 이를 위하여 우선 N_p 의 각 원소 $N_{p,i}$ 에 대하여 x축, y축, z축의 순차적인 회전 행렬 $Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 를 적용하여 rotated unit normal vector $N'_{p,i}$ 를 구한다.

3.2.3 Non-normalized Volume Set

N_p 를 회전하여 구한 $N'_{p,i}$ 이 비교할 기준인 N_b 와 정확히 같은 원소가 하나씩 존재하는 1대 1 대응이 되지 않기 때문에 non-normalized volume set V'_p 을 계산한다.

예를 들어 Fig. 5와 같이 unit normal set N_p 와 normalized n-sided pyramid volume set V_p 가 존재하는 상황에서 $N_{p,0}$ 를 회전하여 $N'_{p,0}$ 를 구하였다면 $N_{p,10} \sim N_{p,12}$ 과 비슷하였다면, 가상으로 회전된 부피인 non-normalized volume $V'_{p,0}$ 는 $V_{p,10} \sim V_{p,12}$ 을 적절히 섞어서 구한다.

N'_p 의 한 원소 $N'_{p,i}$ 에 대응하는 non-normalized volume $V'_{p,i}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$V'_{p,i} = \begin{cases} -1, & (\text{if } n(N_{dist,i})=0) \\ \sum_k f(|N'_{p,i}-N_{p,k}|) \cdot V_{p,k}, & (N_{p,k} \in N_{dist,i} \text{ if } n(N_{dist,i}) \neq 0) \end{cases}$$

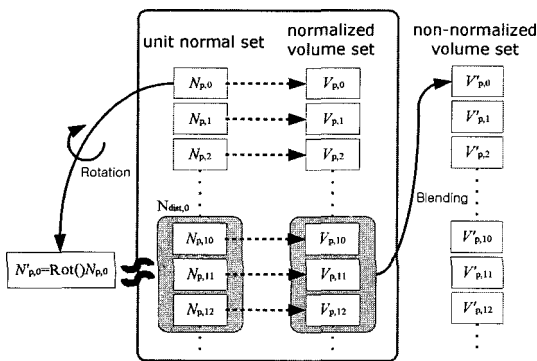


Fig. 5. Concept of non-normalized volume set.

$$N_{dist,i} = \{v \mid |N'_{p,i}-v| < d_{limit} \text{ and } \forall v \in N_p\}$$

$f(|N'_{p,i}-N_{p,k}|)$ 는 블렌딩 함수로 Fig. 5에서 $V'_{p,0}$ 을 구하기 위해 $V_{p,10} \sim V_{p,12}$ 를 섞는 구체적인 방법을 의미하며 다음과 같은 경계조건을 갖는다.

$$\begin{cases} f(|N'_{p,i}-N_{p,k}|) = 1, & \text{at } |N'_{p,i}-N_{p,k}| = 0 \\ f(|N'_{p,i}-N_{p,k}|) = 0, & \text{at } |N'_{p,i}-N_{p,k}| = d_{limit} \end{cases}$$

또한 정규화를 위해 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_k f(|N'_{p,i}-N_{p,k}|) = 1$$

예를 들면, 다음과 같은 1차 함수나 2차 함수를 정규화하여 사용할 수 있다.

$$1 - \frac{|N'_{p,i}-N_{p,k}|}{d_{limit}}, \frac{-1}{d_{limit}^2} |N'_{p,i}-N_{p,k}|^2 + 1$$

3.3 형상유사성지수

형상유사성지수는 2차원 형상의 정렬에서와 유사한 방법으로 계산된다. 정해진 회전 각도($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)에 대하여 대상파트의 가상 회전된 부피 V'_p 와 기준파트의 V_b 와 비교하여 형상유사성지수 $S(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 을 구하며, 그 식은 다음과 같다.

$$r_i = \exp\left(-\log \frac{V'_{p,i}}{V_{b,i}}\right)$$

if $A_{b,i} = A'_{p,i} = 0$, then $\frac{V'_{p,i}}{V_{b,i}} = 1$

$$K_i = \begin{cases} weight \times r_i, & (\text{if } ratio_i > threshold) \\ 0, & (\text{if } ratio_i < threshold) \end{cases} \quad (0 \leq threshold, weight \leq 1)$$

$$S(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \frac{\sum_{i=0}^n K_i}{weight \times (n - \text{number of } V_{p,i} = -1)}$$

3.4 최대형상유사성지수

앞에서 정의한 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 의 범위 내에 있는 모든 경우의 $Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 를 적용하여 $S(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 를 구하고 그 중 가장 클 때의 형상유사성지수와 각도를 최대 형상유사성지수 $S_{p,max}(\theta_{x,max}, \theta_{y,max}, \theta_{z,max})$ 라 한다. 계산된 $S_{p,max}$ 의 회전각도를 실제 대상파트 P의 회전에 적용할 때는 각도와 순서를 거꾸로 하여 이루어진다. 즉 $P \cdot Rot(-\theta_x, -\theta_y, -\theta_z)$ 을 사용하여 대상파트를 회전시켜야 한다.

3.5 유사성지수

2차원 형상의 정렬에서와 마찬가지로, 기준파트를 기준으로 일련의 파트들의 집합화를 위한 선형적인 비교가 가능하도록 하기 위해 유사성지수 G 를 도입한다. Convex hull의 전체 넓이를 전체 부피로 변경하면 식은 2차원에서와 동일하다.

4. 적용 결과

4.1 2차원 형상

9개의 구두 밑창 파트를 대상으로 하여 정렬을 수행하고 유사성지수를 계산하였다. 각각의 파트는 사람의 발을 측정하여 만든 것으로 비교적 유사한 형상을 지니지만 부분적으로 형상에 차이가 있으며 Fig. 6(a)와 같이 공간상에 배치되어 있다.

9개 파트를 각각 $P_1 \sim P_9$ 로 정하고 첫번째 파트 P_1 를 기준파트로 하였다. 각 파트의 외곽곡선으로 $\theta = 0.5^\circ$ 의 convex hull을 만들어 정렬을 수행하였다. 그 결과

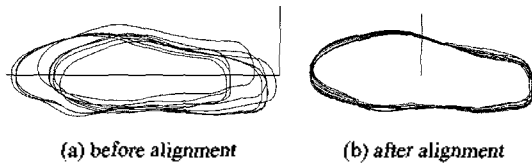


Fig. 6. 2D alignment of 9 insole parts.

Table 1. Grouping results when P_1 is a base part

P_i (before alignment)	P_i (in the order of G_p)	$S_{pi,max}$	G_{pi}
1	4	0.195	0.592
2	8	0.250	0.602
3	6	0.259	0.620
4	9	0.265	0.624
5	7	0.271	0.629
6	5	0.272	0.633
7	2	0.320	0.650
8	1	1.0	□
9	3	0.333	-0.659

각 대상파트의 최대형상유사성지수가 계산되었으며 정렬 결과는 Fig. 6(b)와 같다.

P_1 을 기준파트로 하는 최대형상유사성지수 $S_{pi,max}$ 와 유사성지수 G_{pi} 를 Table 1과 같이 유사성지수를 기준으로 정렬하여 나타내었다. 유사성지수의 계산에 사용된 형상가중치 w_s 는 0.5이다.

사용자가 집합화를 하고자 할 때는 유사성지수를 직접 이용한다. 예를 들어 기준파트로부터 유사성지수의 절대값이 0.63 이상인 파트들만을 하나의 집합으로 정한다면, P_3, P_2, P_5 이 P_1 을 기준으로 하는 집합에 속하게 되고 이들 파트를 둘러싸는 기본형을 설계하고 생산할 수 있을 것이다. 만약 새로운 밑창 파트가 설계되었을 때, P_1 을 기준으로 하는 유사성지수의 절대값이 0.63보다 크다면, 이 파트는 앞에서 만들어둔 기본형을 이용하여 생산이 가능하다. P_1 이 기준파트인 그룹을 제외한 나머지 파트를 집합화하여 새로운 집합을 구성할 수도 있다. P_7 을 기준파트로 하여 새로운 집합화를 수행한 결과는 Table 2와 같다. P_1 을 기준으로 하는 그룹에서와 마찬가지로 $|G_p|$ 가 0.63이상인 파트를 P_7 을 기준으로 하는 집합에 속하게 한다면 P_6, P_4, P_9 가 이에 해당한다. 결과적으로 예제에 사용된 9개의 파트는 유사성지수에 근거하여 다음과 같이 3개의 집합으로 구분할 수 있다.

- Group 1 = $\{P_1, P_2, P_3, P_5\}$
- Group 2 = $\{P_4, P_6, P_7, P_9\}$
- Group 3 = $\{P_8\}$

4.2 3차원 형상

4.2.1 자세정렬 결과

· 서로 다른 자세의 동일한 파트의 정렬
동일한 파트 두개를 Fig. 7(a)와 같이 회전하여 서로

Table 2. Grouping results when P_7 is a base part.

P_i (in the order of G_p)	$S_{pi,max}$	G_{pi}
8	0.278	0.622
9	0.268	0.632
6	0.292	0.643
7	1.0	□
4	0.278	0.622

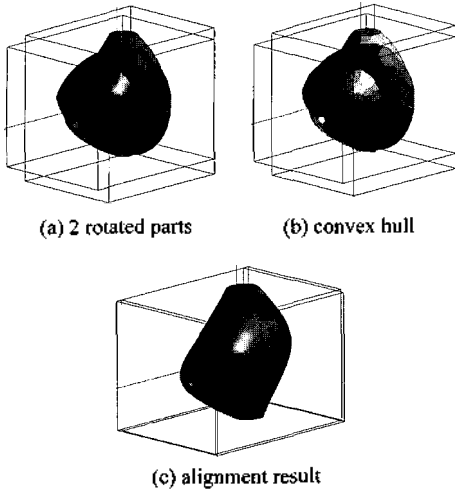


Fig. 7. 3D alignment of rotated parts.

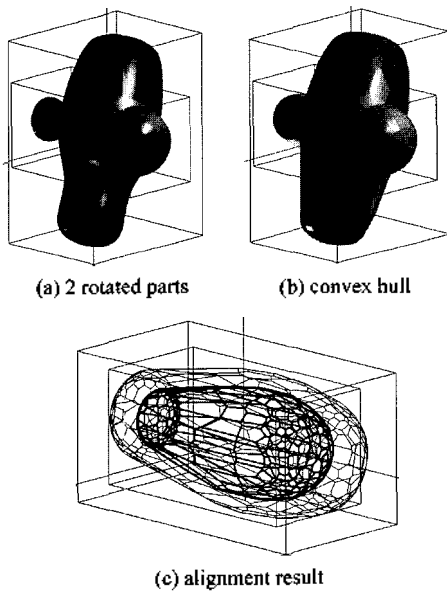


Fig. 8. 3D alignment of similar parts.

다른 자세로 배치한 후에 각각의 초기 자세에서 $\theta = 15^\circ$ 의 convex hull을 생성하고 정렬을 수행하였다. 최대형상유사성지수 $S(315^\circ, 225^\circ, 30^\circ) = 0.55$ 라는 결과가 나왔으며 Fig. 7(c)와 같다.

· 유사한 형상과 크기를 가진 두 파트의 정렬

Fig. 8(a)와 같이 크기와 형상이 다르지만 감성적으로 유사하다고 판단되는 두개의 파트를 공간상에 임의로 배치하고 정렬을 수행하였다.

최대형상유사성지수 $S(300^\circ, 345^\circ, 225^\circ) = 0.63$ 이다.

4.2.2 집합화 결과

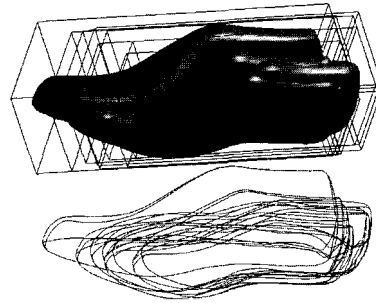


Fig. 9. Eight last parts and its wireframe view.

Table 3. Grouping results when a base part is P_1

P_i	$S_{pi,max}$	$\frac{Vol(CV_{P_i})}{Vol(CV_{P_1})}$	G_{pi}
	1.0	1.0	□
	1.0	1.372	0.936
	0.596	1.135	0.771
	0.671	1.847	0.719
	0.580	1.653	0.692
	0.596	1.847	0.681
	0.493	1.405	0.678
	0.533	2.519	0.601

8개의 구두 제조용 라스트를 대상으로 정렬하고 유사성지수를 계산하였다. P_1, P_3, P_5, P_7 는 사람의 발을 측정하여 각각 만든 것으로 형상과 크기가 조금씩 다르며, P_2, P_4, P_6, P_8 은 이를 균등 확대/축소(uniform scaling) 혹은 회전하여 생성한 파트들로 원본 파트와 형상은 동일하다. 각 파트를 하나의 공간상에 배치한 모습은 Fig. 9와 같다.

각 파트에 대하여 $\theta = 15^\circ$ 의 convex hull을 생성하고 집합화를 수행하였다. P_1 을 기준파트로 하여 정렬을 수행하였고, 이때의 최적 정렬 자세와 최대형상유사성지수를 계산하였다. 2차원에서와 마찬가지로 P_1 을 기준으로 하여 계산한 유사성지수를 이용하여 하나의 집합을 만들었고, 나머지 파트들을 중 P_1 을 기준으로 하는 유사성지수를 계산하여 또 다른 집합을 만들었다. 집합화 결과는 아래와 같고, 유사성지수는 Table 3과 같다.

Group 1 = { P_1, P_2, P_6 }, Group 2 = { P_3 }
 Group 3 = { P_4, P_5, P_7 }, Group 4 = { P_8 }

5. 결 론

본 논문에서는 주문형제품의 생산과정에서 필요한 자유곡면을 가진 제품 형상간의 유사성을 판단하고 집합화에 필요한 척도를 제공하는 알고리즘을 제시하였다. 이와 더불어 유사성을 판단하는 과정에서, 공간상에 임의의 자세로 배치되어 있는 제품의 형상 데이터를 기준으로 사용된 제품의 형상과 유사한 자세를 갖도록 정렬할 수 있는 회전 각도를 계산해 낸다. 알고리즘은 주문형제품의 생산에만 국한된 것이 아니라 2차원과 3차원의 다양한 형상에 대해서 일반성을 갖도록 만들어졌다.

본 알고리즘은 제품을 정확한 convex hull로 근사화함으로써 제품 내부의 세부적인 형상에 구애 받지 않고 전체적인 형상의 비교가 가능하다. 또한 자유곡면을 가진 제품이나 단순한 B-rep을 가진 제품 간의 유사성을 판단할 수 없는 기존의 유사성 판단 알고리즘들이 가지고 있는 제약을 해결하였다. PARASOLID kernel을 이용하여 알고리즘을 구현하였고, 실제 주문형제품을 대상으로 정렬하고 집합화에 필요한 유사성 지수를 계산하여 그 결과를 나타내었다.

참고문헌

1. Elinson, A., Nau, D. S. and Regli, W. C. "Feature-based Similarity Assessment of Solid Models," *Solid Modeling '97*, Atlanta GA, pp. 297-310, 1997.
2. Srinivasan, M. and Moon, Y. B. "A Framework for a Goal-driven Approach to Group Technology Application using Conceptual Clustering," *International Journal of Production Research*, Vol. 35, pp. 847-866, 1997.
3. Tien-Lung Sun., "Shape Similarity Assessment of Polyhedral Parts Based on Boundary Models," *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 18, pp.

4655-4670, 2000.

4. Shinji Mukai, Susumu Furukawa, and Mitsuru Kuroda, "An Algorithm for Deciding Similarities of 3-D Objects," *Submitted to '2002 Solid Modeling Symposium*.
5. Rea, H. J., Sung, R. Corney, J. R., Clark, DER., Pritchard, J., Breaks, ML., MacLeod, RA, "Assessing the Effectiveness of Filters for Shape Matching," *Submitted to '2002 Solid Modeling Symposium*.
6. Madhumati Ramesh Derek Yip-Hoi, "Debasish Dutta, Feature Based Shape Similarity Measurement for Retrieval of Mechanical Parts," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 1, pp. 245-256, 2001.



김 승 엽

2000년 서울대학교 기계항공공학부 학사
 2002년 서울대학교 기계항공공학부 석사
 관심분야: Shape similarity assessment,
 Surface modeling



이 건 우

1978년 서울대학교 기계공학과 학사
 1981년 미국 M.I.T. 기계공학과 석사
 1984년 미국 M.I.T. 기계공학과 공학박사
 1984년~1986년 미국 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수
 1986년~1990년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 조교수
 1990년~1995년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 부교수
 1995년~현재 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수
 관심분야: CAD, Assembly Modeling, Multiresolution Modeling for Design and Analysis, Rapid Prototyping, Customized Shoe Design and Manufacturing