

# Ray distance 를 이용한 3 차원 형상의 유사성 판단

황태진<sup>#</sup>, 정지훈\*, 오현영\*, 이건우\*

## Similarity Measurement of 3D Shapes Using Ray Distances

Tae Jin Hwang, J. H. Jeong, H.Y. Oh, Kunwoo Lee

### ABSTRACT

Custom-tailored products are meant by the products having various sizes and shapes to meet the customer's different tastes or needs. Thus fabrication of custom-tailored products inherently involves inefficiency. To minimize this inefficiency, a new paradigm is proposed in this work. In this paradigm, different parts are grouped together according to their sizes and shapes. Then, representative shape of each group is derived and it will be used as the work-piece from which the parts in the group are machined. Once a new product is ordered, the optimal work-piece is selected through making similarity comparisons of new product and each representative shape. Then an effective NC tool-path is generated to machine only the different portions between the work-piece and the ordered product. The efficient machining conditions are also derived from this shape difference. By machining only the different portions between the work-piece and the ordered product, it saves time. Similarity comparison starts with the determination of the closest pose between two shapes in consideration. The closest pose is derived by comparing the ray distances while one shape is virtually rotated with respect to the other. Shape similarity value and overall similarity value calculated from ray distances are used for grouping. A prototype system based on the proposed methodology has been implemented and applied to the grouping and machining of the shoe lasts of various shapes and sizes.

Key Words : Custom-tailored product(주문적응형제품), Similarity value(유사성지수), Virtual rotation(가상회전)

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경

주문적응형 제품이란 소비자 개개인의 취향이 나 특징에 맞추어 형상이나 크기가 다르게 생산되는 제품을 말한다. 이러한 주문적응형 제품을 생산하기 위해서는 생산 방식에 따라 차이는 있겠으나 일반적으로 시간과 비용 면에서의 비효율을 감

수하여야 한다. 이러한 비효율을 최소화 하기 위해서 이전의 대량 생산 방식과는 다른 생산과정을 필요로 한다. 이 논문에서는 주문형 제품을 위한 새로운 생산 방식과 이에 필요한 알고리즘에 대해 소개 하고자 한다.

주문형적응형 제품을 위한 새로운 생산 방식은 다음과 같다. 우선, 표본 데이터들의 형상을 입력 받아 그 유사성을 판단하고 집합화하여 몇 개의 제품 군으로 구분을 한다. 그 후, 각 제품 군마

접수일: 2003 년 6 월 24 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일

# 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

Email jini@cad.snu.ac.kr, Tel. (02) 880-7447

\* 서울대학교 기계항공공학부

다 그 그룹에 포함되는 모든 제품을 가공할 수 있는 가장 작은 기본형(work-piece)을 각 그룹별 데이터베이스에 저장한다. 다음 현장에서 새로운 소비자의 특성에 맞춘 제품(query-part)의 생산이 요구되면 새로운 제품의 형상을 데이터베이스에 저장된 기본형의 형상과 비교하여 가장 적합한 기본형을 찾아내고, 이 기본형과 새로운 제품의 차이만을 가공한다. 이렇게 함으로써 제품 생산에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있다.

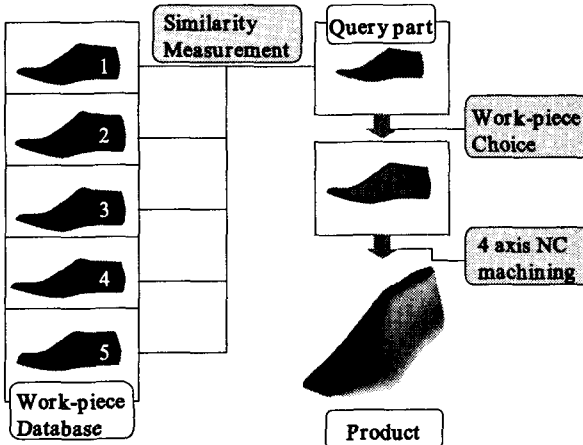


Fig. 1 Custom-tailored product system

### 1.2 관련 연구

유사성을 비교하는 기존의 연구는 형상기반 모델링(feature based modeling)된 물체의 특징 형상 간의 관계나 조합을 비교하는 방식으로 진행되어 왔다. Elison<sup>1</sup>은 특징형상을 기반으로, McWherter<sup>2</sup>는 물체의 위상정보를 이용하였다. 하지만 자유 곡면 형상을 갖는 물체의 유사성을 찾는 데는 기하학적 특성(geometric property)을 이용하는 것이 더 적합하다고 할 수 있다.

기하학적 접근방법(geometric approach)은 인간이 두 물체의 유사성을 비교하는 방식처럼 문제에 접근한다. 인간은 두 물체의 형상을 비교할 때, 직관적으로 가장 비슷한 모양으로 두 물체의 자세를 잡는다. 그런 후 두 물체의 크기나 곡률 등을 눈으로 보고 비슷한 정도를 생각해 낸다. 기하학적 접근방법에서도 두 3 차원 형상을 비교할 때, 가장 합리적인 위치로 두 물체의 자세를 정한 후(pose estimation), 두 물체의 부피나 곡률 등의 기하학적 특성을 비교함으로써 유사성을 정량화(similarity measurement) 한다. 따라서, 3 차원 형상의 유사성을 비교하는 문제는 자세결정(pose estimation)과 유사

사성 측정(similarity measurement) 두 가지의 문제로 정의 할 수 있게 된다.

Saupe<sup>3</sup>은 Principal Component Analysis(PCA)를 이용해, 이동(translation)과 회전(rotation)에 영향을 받지 않으면서 형상을 가장 잘 나타내는 벡터(vector)를 찾아 기준 축에 맞추어 자세를 결정하는 방법을 제안하였다. Tangelder<sup>4</sup>은 이 PCA를 이용하여 3 차원 물체의 자세를 결정하고, 물체를 감싸는 3 차원 격자를 만들어 각 셀에 가중치를 주고 계산하여 유사성을 판단하였다. 이 방법은 단순하면서도 효과적이지만, 물체의 자세를 대략적으로 결정할 수 밖에 없다는 단점을 지니고 있다.

Shum과 Hebert<sup>5</sup>는 3 차원의 닫힌 형상의 표면을 삼각형 분할하여(triangulation) 각 노드에서의 곡률을 비교해 자세결정과 유사성비교의 문제를 해결하였다. 반면, Novotni<sup>6</sup>와 Klein<sup>7</sup>은 3 차원 물체의 2 차 모멘트를 구하여 관성 매트릭스(inertia tensor matrix)의 고유벡터가 기본 축들과 일치하도록 하는 방식으로 자세결정 문제를 해결한다. 그리고, 자세가 결정된 후엔 비교 대상 형상을 기준 형상에 대해 옵셋 시켜서 전체 부피의 차이를 비교하여 유사성을 결정한다. 하지만, 이 방법만으로는 정확한 자세를 정할 수 없어 두 형상이 원점에 위치한 상태에서 겹치지 않는 부분의 부피를 최소화 시키는 상태를 찾는 추가 연산이 필요하게 된다. 부피 계산은 3D Distance Field를 이용하였는데, Distance Field는 Klein과 Schilling<sup>8</sup>의 논문에 자세히 설명되어 있다.

위에서 제시된 3 차원 형상의 유사성 비교에 관한 기존 알고리즘들은 효율적인 자세결정이 어렵다는 단점을 지니고 있다. 모든 자세에 대한 계산을 수행하지 않으려면, 대략적인 결과를 얻을 수 밖에 없고, 정확한 자세를 결정하기 위해서는 많은 계산량이 필요하기 때문이다.

Kim<sup>9</sup>의 논문에서 가상 회전(virtual rotation)이라는 개념은 이러한 문제를 해결하는 데 중요한 힌트가 된다. 실제의 회전을 통하지 않고 순환적인 데이터 구조를 이용하는 가상회전을 적용하면, 자세 결정시에 모든 회전각에 대해 부피 혹은 곡률 등을 일일이 실제로 회전하면서 계산하는 것을 막을 수 있게 된다. 따라서, 효율적으로 정확한 자세를 결정할 수 있게 된다. Kim<sup>9</sup>은 물체의 외곽을 둘러싸는 컨벡스헐(convex hull)을 생성하고 컨벡스헐의 부피들을 비교하는 방식에 가상회전을 적용하였고, 좋은 결과를 얻었다. 다만, 자세를 결정하는 기준으로서 제시된 단위 법선 벡터(unit normal vector)들이 회전한 후에 대칭되지 않아서 반복연산을 통해 새로운 단위 법선 벡터를 만들어야 한

다는 단점이 있었다.

### 1.3 알고리즘의 개요

본 연구에서는 물체의 기하학적 특성을 이용하여 자세결정과 유사성 판단을 하도록 한다. 앞서 제시된 여러 알고리즘에서 취약점으로 지적된 자세결정을 Ray distance 와 Kim<sup>9</sup>의 가상회전을 이용하여 해결한다. 이 때, Kim<sup>9</sup>의 논문에서 지적된 대칭성에 대한 문제도 해결한다.

우선, 기준이 되는 물체와 비교 대상인 물체의 무게 중심이 데카르트 좌표 계 상의 원점에 있도록 위치를 시킨다. 그리고 구형 좌표로 표현된 단위 법선 벡터 집합을 생성하여 원점에서 단위 법선 벡터들의 방향으로 ray 를 쏜다. 3 차원 형상의 표면에 닿게 된 ray 의 길이로부터 원점에서 표면까지의 거리를 구할 수 있게 되며, 이 거리를 Ray Distance to Surface(이하 RDS)라 한다. RDS를 정상화한 값을 NRDS(Normalized Ray Distance to Surface)라 하며, 두 물체를 가상회전 하였을 때, 같은 위상에서의 NRDS 의 차들의 전체 합이 최소가 되는 상태를 찾아 자세를 결정한다. 이 때, 가장 적합한 자세를 찾아가는 방식은 로봇의 자세 제어와 유사하다<sup>10</sup>.

자세가 결정되면, NRDS 와 RDS 로부터 두 물체의 형상유사성지수(shape similarity value)와 유사성지수(overall similarity value)를 계산할 수 있게 된다. 형상유사성지수는 물체의 크기에 관계없이 형상의 닮음을 정량화한 값이고, 유사성지수는 형상의 크기도 포함하여 닮음을 정량화한 값이다. 따라서, 이 두 값을 통해 두 물체의 형상의 유사성을 결정할 수 있다.

일단 형상유사성지수와 유사성지수가 결정되면, 이 두 값을 이용해서 여러 물체들을 유사한 제품끼리 그룹화시키는 것이 가능해 진다.

본 연구에서는 신발 제작 시에 사용되는 구두꼴(shoe-last)를 대상으로 유사성을 판단하고 그룹화하였다.

## 2.3 차원 형상의 자세 결정

### 2.1.3 차원 형상의 이동

두 3 차원 물체의 형상과 크기의 비교를 위해서 우선적으로 가장 닮은 모양의 자세를 결정하여야 한다. 3 차원 형상은 xyz 축 각각에 대한 이동

과 회전의 6 개의 자유도를 갖는다. 그러나 밀도가 균일한 두 형상의 무게 중심을 원점에 일치 시킴으로써, 이동에 대한 자유도를 제거할 수 있다. 따라서, 3 축의 회전에 대한 3 개의 자유도를 가지고 자세를 결정할 수 있다.

## 2.2 3 차원 형상의 가상 회전

### 2.2.1 Unit Normal Vector Set

3 차원 형상의 자세결정을 위해 3 축에 대한 가상 회전을 한다. 이 때 RDS 와 NRDS 의 값을 저장하는 데이터 구조(data structure)는 가상 회전에 대하여 대칭성을 지녀야 한다. 따라서, 이러한 데이터 구조의 요건을 충족 시키기 위해 3 축에 대해 단위 법선 벡터 집합을 각각 생성한다.

단위 법선 벡터 집합은 각 축을 중심으로 한 구형 좌표로 표현되며, 원점에서 밖을 향해 방사선 형태로 뻗어 나가는 단위 벡터로서 끝점  $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ 은 반지름이 1 인 구의 표면에 위치한다. 원점을 시점으로 하여 단위 법선 벡터 집합의 각 벡터 방향으로 ray 는 쏘아지며, 물체의 표면까지의 ray 의 거리가 RDS 이다. 이 때, m 과 n 은 단위 법선 벡터의 인덱스이며 동시에 RDS 와 NRDS 값들을 저장하는 위치의 인덱스를 나타낸다. 예를 들어 z 축을 중심으로 한 단위 법선 벡터 집합은 아래의 식으로 구해지며 Fig. 2 와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{m,n} &= \cos(n\beta) \cos(m\alpha) \\ y_{m,n} &= \cos(n\beta) \sin(m\alpha) \\ z_{m,n} &= \sin(n\beta) \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } M = \frac{360}{\alpha}, N = \frac{180}{\beta},$$

$$0 \leq n \leq N, 0 \leq m \leq M - 1$$

위 수식에서  $\alpha$  와  $\beta$  는 단위 법선 벡터의 간격을 degree 로 나타낸 값으로, 자세 결정시 이 값들을 기준으로 가상회전이 이루어 진다.

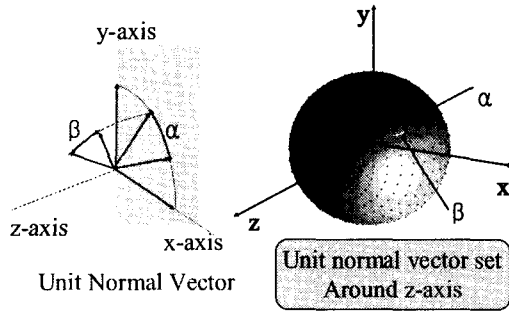


Fig. 2 Unit normal vector set by z axis

xyz 세 축에 대한 단위 법선 벡터 집합을 나타내보면 다음의 그림 Fig. 3 과 같이 표현된다.

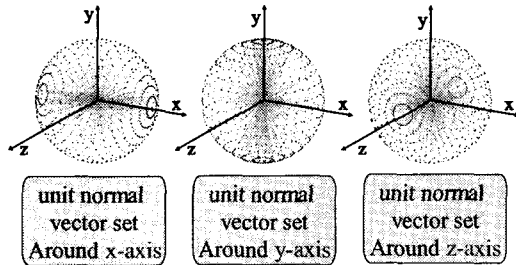


Fig. 3 Unit normal vector sets by xyz axes

### 2.2.2 Ray Distance to Surface (RDS)

원점에서 ray 를 단위 법선 벡터 방향으로 쏘아 기준인 형상과 비교 대상인 형상 각각의 곡면과 만나는 점  $P_{m,n}^w(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$  과  $P_{m,n}^q(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$  를 구한다. 원점에서 점  $P_{m,n}^w, P_{m,n}^q$  까지 의 거리들을 Ray Distance to Surface(RDS)라 한다.

$$RDS_{m,n} = \sqrt{(x_{m,n} - 0)^2 + (y_{m,n} - 0)^2 + (z_{m,n} - 0)^2}$$

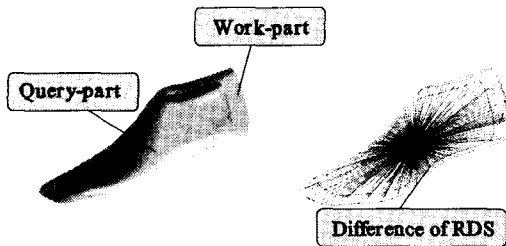


Fig. 4 Similarity measurement by the distance of rays

점  $P_{m,n}^w, P_{m,n}^q$  의 인덱스인 m, n 은 단위 법선 벡터의 인덱스와 동일하다. 단위 법선 벡터 집합은 xyz 세 축을 중심으로 3 개의 집합이 만들어 지므로, 기준인 물체와 비교 대상인 물체에 각각 적용하면 6 개의 RDS 집합을 찾을 수 있다.

$$RDS_{m,n}^{w,x}, RDS_{m,n}^{w,y}, RDS_{m,n}^{w,z}$$

$$RDS_{m,n}^{q,x}, RDS_{m,n}^{q,y}, RDS_{m,n}^{q,z}$$

### 2.2.3 Normalized Ray Distance to Surface (NRDS)

RDS 는 원점에서 3D 형상의 곡면까지의 거리를 바탕으로 계산한 값으로 물체의 모양뿐만 아니라 크기에 대한 정보도 함께 가지고 있다. 자세 결정시 크기 보다는 형상에 중점을 두어야 하므로 같은 물체를 축소 또는 확대한 경우 RDS 만을 이용하기에는 무리가 따른다. 이에 RDS 를 정상화함으로써 물체의 크기에 상관없이 형상만 비교할 수 있게 된다.

하나의 축에 대한 모든 RDS 의 성분을 합산한 후 각각의 RDS 성분을 이 합산된 값으로 나누어 형상만을 비교할 수 있는 NRDS(Normalized ray distance to surface)를 구할 수 있다. RDS 와 마찬가지로 NRDS 역시 6 개의 set 을 찾을 수 있다.

$$NRDS_{m,n} = \frac{RDS_{m,n}}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^N RDS_{i,j}}$$

$$NRDS_{m,n}^{w,x}, NRDS_{m,n}^{w,y}, NRDS_{m,n}^{w,z}$$

$$NRDS_{m,n}^{q,x}, NRDS_{m,n}^{q,y}, NRDS_{m,n}^{q,z}$$

NRDS 는 각 축에 대해서 RDS 의 전체 합을 1 로 보았을 때의 값이다. 따라서, 전체 형상에 대한 단위 법선 벡터 방향으로의 길이의 기여도를 나타낸다고 볼 수 있다.

### 2.2.4 가상회전(Virtual Rotation)

두 물체의 무게 중심이 원점으로 이동한 상태에서 각 좌표축에 대한 NRDS 를 구했으므로, 가상 회전을 통해 최적의 자세를 찾도록 한다. 앞서 알고리즘의 개요에서 설명한 바와 같이 가상 회전

은 실제 물체를 회전시키지 않고 데이터의 인덱스를 바꾸는 방식으로 실제로 회전했을 때와 같은 효과를 주어 자세를 결정시킬 수 있게 하는 알고리즘이다.

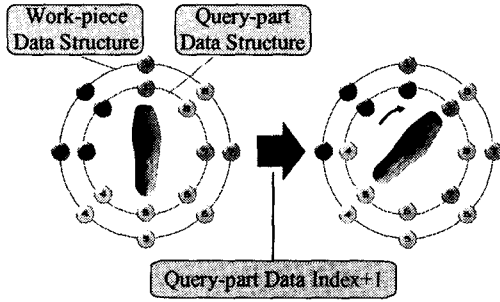


Fig. 5 Virtual rotation using memory index

가상회전의 적용은 다음과 같다.

- 1) 초기 위치에서 인덱스의 변환을 통해 xyz 축 각각을 중심으로 한 모든 회전에 있어서 NRDS의 차의 합을 구한다.
- 2) 1)의 경우에서 NRDS의 차의 합이 가장 작은 경우의 인덱스와 축을 찾고, 그 축으로 인덱스와 단위 법선 벡터 집합에서 정해 놓은  $-\alpha$  값의 곱에 해당하는 값으로 실제 회전을 한다.
- 3) 회전을 한 축을 제외한 나머지 두 축에 대해서 다시 NRDS의 차의 합을 찾고, 2)와 같은 방법으로 최소값을 갖는 위치로 실제 회전을 한다.
- 4) 3)을 반복 적용한다.

NRDS의 차의 합은 아래와 같은 식으로 구해진다. 예를 들어 초기 위치에서 x 축을 중심으로 한 NRDS의 차의 합은 다음과 같다.

$$SND_{x,0} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,x} - NRDS_{m,n}^{q,x}|$$

만일 x 축을 중심으로  $ka^\circ$  만큼 회전했을 때, 이 값은 다음과 같다.

$$SND_{x,k} = \sum_{m=0}^{M-k-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,x} - NRDS_{m+k,n}^{q,x}| + \sum_{m=M-k}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,x} - NRDS_{m-(M-k),n}^{q,x}|$$

위 식에서 k는 가상회전을 할 때 인덱스를 k씩 증가시켜, x 축 중심으로  $ka^\circ$  간격씩 회전하는 효과를 나타낸다. 따라서 k를 1에서 M-1까지 증가시키므로써 인덱스의 증가만으로 x 축을 중심으로 회전한 모든 경우의 NRDS의 차의 합을 표현할 수 있다. 각 축에 대해 가상회전을 할 때 NRDS의 차의 합은 다음과 같다.

$$n(SND_x) = M$$

$$SND_x = \{SND_{x,0}, SND_{x,1}, \dots, SND_{x,k}, \dots, SND_{x,M-2}, SND_{x,M-1}\}$$

(단,  $1 \leq k \leq M-1$ )

같은 방법으로 y 축과 z 축의 중심에 대하여  $SND_{y,k}$ 와  $SND_{z,k}$ 를 계산할 수 있다.

$$SND_{y,0} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,y} - NRDS_{m,n}^{q,y}|$$

$$SND_{y,k} = \sum_{m=0}^{M-k-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,y} - NRDS_{m+k,n}^{q,y}| + \sum_{m=M-k}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,y} - NRDS_{m-(M-k),n}^{q,y}|$$

$$SND_{z,0} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,z} - NRDS_{m,n}^{q,z}|$$

$$SND_{z,k} = \sum_{m=0}^{M-k-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,z} - NRDS_{m+k,n}^{q,z}| + \sum_{m=M-k}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,z} - NRDS_{m-(M-k),n}^{q,z}|$$

앞서 조건인  $1 \leq k \leq M-1$ 을 만족할 때,  $SND_{x,k}$ ,  $SND_{y,k}$ ,  $SND_{z,k}$  중 최소값을 갖는 경우가 xyz 세 축 중에서 가장 유사한 형태의 회전되는 축과 각도를 나타낸다. 이와 같은 가상회전을 실제 두 물체에 반복 적용하면 다음 Fig. 6와 같이 표현된다.

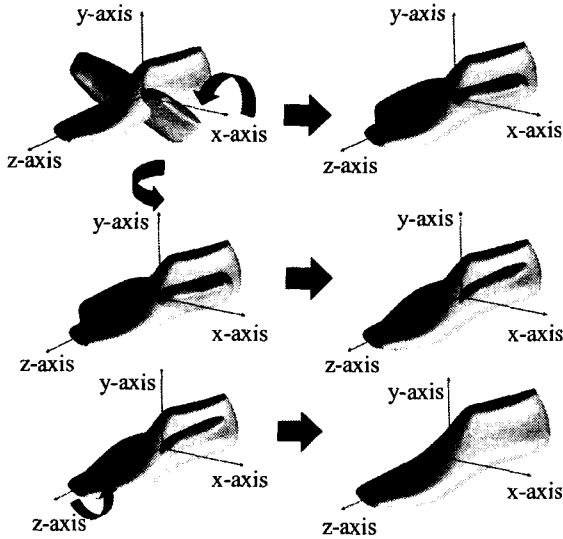


Fig. 6 Pose estimation using virtual rotation

### 3.3 차원 형상의 유사성 판단

#### 3.1 형상 유사성 지수(Shape Similarity Value)

형상 유사성 지수는 물체의 크기에 상관없이 겉으로 보이는 형상의 닮음 정도를 정량적으로 측정하는 값이다. 앞서 가상회전을 통해 두 물체는 최적의 상태로 자세가 결정되었으므로 자세가 결정된 상태에서 두 물체의 NRDS 를 이용하여 다음 식과 같은 형상 유사성 지수 **SSV**(shape similarity value)를 구한다.

$$SSV = \left[ 1 - \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N |NRDS_{m,n}^{w,z} - NRDS_{m,n}^{q,z}|}{2} \right] \times 100$$

앞의 식과 같이 NRDS 는 물체의 무게 중심에서 꼭면까지의 거리를 전체 거리의 합으로 나눈 값이다. 즉, NRDS 는 전체 거리의 합을 1로 두었을 때 각 단위 법선 벡터들의 방향으로의 거리의 기여치가 된다. 두 물체의 형상의 닮음 정도에 따라 다음과 같은 경우가 가능하다.

#### 1) 동일한 형상일 경우

두 물체의 NRDS 의 각 성분이 같으므로 **SSV** 는 100 을 갖는다.

#### 2) 동일한 형상의 축소 혹은 확대인 경우

위 **SSV** 의 식에서 알 수 있듯이 각 성분 NRDS 의 절대치  $|NRDS_{m,n}^{w,z} - NRDS_{m,n}^{q,z}|$  를 구하게 된다. 따라서, 축소 혹은 확대된 형상의 **SSV** 는 100 을 값으로 갖게 된다.

#### 3) 형상의 차이가 뚜렷이 클 경우

형상이 완전히 다르게 생겼을 경우의 가장 이상적인 형태는 두 물체가 단위 법선 벡터의 서로 다른 인덱스 방향으로 형상이 늘어진 경우이다. 이 때, **SSV** 는 0 을 값으로 갖는다. 하지만, 가상회전을 통해 자세가 결정되면 같은 형상으로 인식하게 되므로 0 이 될 경우는 없다.

#### 4) 형상의 차이가 작을 경우

**SSV** 의 식에 의해 0 에서 100 사이의 값을 갖는다. 두 물체의 크기에 관계없이 형상이 비슷할수록 100 에 가까운 값을 갖고, 닮지 않을수록 0 에 수렴하는 값을 갖게 된다.

$$0 \leq SSV \leq 100 \quad (\text{Shape Similarity Value})$$

#### 3.2 유사성 지수(Overall Similarity Value)

주문형 제품의 생산에는 형상의 유사성과 더불어 크기도 중요한 요소가 된다. 새로운 주문적응형 시스템에서는 새로운 제품에 대한 주문이 들어왔을 때 기본형과 새로운 제품의 크기를 비교하여 절삭 량이 가장 작게 되는 기본형을 찾으려 하기 때문이다. 따라서 미리 제품들을 그룹화시킬 때에 크기 요소를 포함하는 변수를 이용해야 한다. 이때 크기 요소가 고려된 RDS 를 이용하여 유사성 지수 **OSV**(overall similarity value)를 구한다.

$$OSV = \left[ 1 - \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N |RDS_{m,n}^{w,z} - RDS_{m,n}^{q,z}|}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N (RDS_{m,n}^{w,z} + RDS_{m,n}^{q,z})} \right] \times 100$$

위 식에서는 두 형상의 크기 차이를 절삭 량의 판단 기준으로 보고, 유사성지수를 정의했다. 이는 기본형을 가공하기 위해 형상이 유사한 상태(**SSV** 가 높은 상태)이며 절삭 량이 비슷한(**OSV** 가 높은 상태) 제품을 그룹으로 묶기 위함이다. 두 물체의 절삭 량을 기준으로 다음과 같은 경우가 가능하다.

- 1) 동일한 형상일 경우  
두 물체의 RDS 의 각 성분이 같으므로 OSV 는 100 을 갖는다.
- 2) 형상의 축소 혹은 확대인 경우  
축소와 확대의 배율이 클수록 0 에 수렴하는 값을 갖는다.
- 3) 형상의 차이가 큰 경우  
OSV 의 식에 따라 0 에 수렴하는 값을 갖는다.
- 4) 형상의 차이가 작은 경우  
OSV 의 식에 따라 두 형상의 크기가 유사한 경우 100 에 가까운 값을 갖게 되며, 서로 다른 크기를 가질 경우 그 차이가 클수록 0 에 수렴하는 값을 갖는다.

$$0 \leq OSV \leq 100 \quad (\text{Overall Similarity Value})$$

#### 4. 유사성 판단의 적용 및 결과

##### 4.1 표본 제품들의 유사성 판단

앞서 제시한 형상유사성지수(SSV)와 유사성지수(OSV)를 유사성 판단의 기준으로 이용하여 10 개의 표본 제품들의 유사성을 측정하였다. 여기에 사용된 표본 제품은 신발을 제작할 때 사용되는 구두골로서 자유 곡면 형상을 지닌 제품들이다. 유사성은 10 개의 제품들 서로 각각에 대한 형상 유사성지수와 유사성지수를 구하였다.

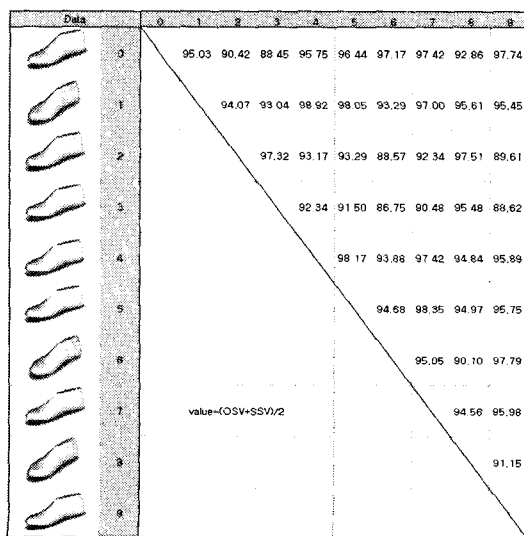


Fig. 7 Similarity measurement for shoe-last

##### 4.2 표본 제품들의 그룹화

형상유사성지수와 유사성지수를 이용하여 10 개의 표본 제품을 그룹화 하였다. 최종적으로 1 개의 그룹이 되게 하는 트리 구조를 사용함으로써 필요에 따라 그룹의 수를 나눌 수 있도록 하였다. 아래의 Fig. 8 은 10 개의 표본 제품을 4 개의 그룹으로 나눈 결과이다.

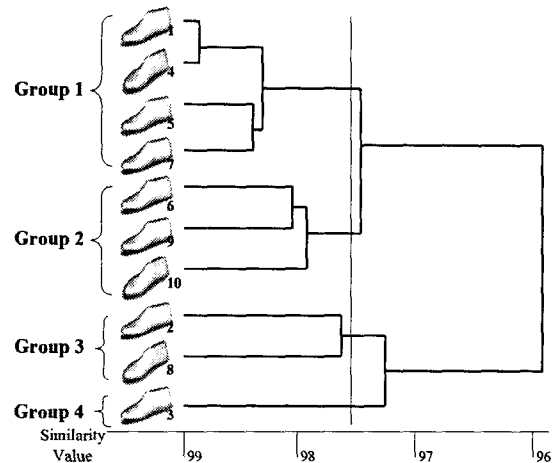


Fig. 8 Groups of shoe-last

#### 5. 결론

주문적응형 제품 생산을 위한 새로운 시스템과 이를 위한 알고리즘들을 소개하였다. 자유 곡면 형상을 가진 물체들의 유사성을 기하학적 특성을 이용하여 비교할 수 있었으며 가상회전을 이용하여 자세 결정시의 효율을 높였다. 그리고 유사성비교에서 도출된 형상유사성지수와 유사성지수를 이용해 구두골의 그룹화에 적용시켜보았다.

본 연구에서 소개된 주문적응형 제품 생산 시스템과 유사성 비교 알고리즘은 신발, 가발과 같은 인체형상을 이용한 제품과 자유곡면 형상을 지닌 다른 제품들에도 다양하게 활용되어 주문적응형 제품을 효율적으로 생산하는 역할을 할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 중점국가연구개발사업인 주문적응형 쾌속제품개발 시스템 사업의 연구지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Elinson, A., Nau, D.S. and Regli, W.C., "Feature based similarity assessment of solid models," Solid Modeling' 97, pp. 297-310, Atlanta GA, 1997.
2. McWherter, D., Peabody, M., Shokoufandeh, Ali, Regli, William C., "Database Techniques for Archival of Solid Models," Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Application, Michigan, pp. 78-87, 2001.
3. Saube, Dietmar, "Content-Based 3D Model Retrieval," <http://www.informatik.uni-leipzig.de/cgip/>, 2000.
4. Tangelder, Johan W.H., Veltkamp, Remco C., "Polyhedral Model Retrieval Using Weighted Point Sets," Int'l Journal of Image and Graphics, Vol. 3(1), pp.209-229, 2003.
5. Shum, Heung-Yeung, Hebert, Martial, Ikeuchi, Katsushi, "On 3D Shape Similarity," 1995.
6. Novotni, Marcin and Klein, Reinhard, "A Geometric Approach to 3D Object Comparison," Proc. Int'l Conf. on Shape Modeling and Applications 2001, pp.167-175, Genova, Italy, 2001.
7. Klein, Reinhard, Schilling, Andreas, Straßer, Wolfgang, "Reconstruction and simplification of surfaces from contours," In Pacific Graphics, 1999.
8. Klein, Reinhard, Schilling, Andreas, "Fast Distance Field Interpolation for Reconstruction of surface from Contours," In Eurographics, 1999.
9. Kim, Seungyob, "Grouping Algorithm for Custom-tailored Products," master's thesis, Seoul National University, 2002.
10. Park, J.K. "Optimal Geometric Path and Minimum-Time Motion for a Manipulator Arm," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16(12), pp.204-213, 1999.