

## Ray distance 를 이용한 3 차원 형상의 유사성 판단

정지훈\*, 황태진, 오현영, 이건우 (서울대학교 기계 항공 공학부)

### Similarity Measurement of 3D Shapes Using Ray Distances

J. H. Jeong, Tae Jin Hwang, H.Y. Oh, Kunwoo Lee (School of Mechanical and Aerospace Engineering, SNU)

#### 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

주문적응형 제품이란 소비자 개인의 취향이나 특징에 맞추어 형상이나 크기가 다르게 생산되는 제품을 말한다. 이러한 주문적응형 제품을 생산하기 위해서는 생산 방식에 따라 차이는 있겠지만 일반적으로 시간과 비용 면에서의 비효율을 감수하여야 한다. 이러한 비효율성을 최소화 하기 위해서 이전의 대량 생산 방식과는 다른 생산과정을 필요로 한다. 이 논문에서는 주문형 제품을 위한 새로운 생산 방식과 이에 필요한 알고리즘에 대해 소개하고자 한다.

주문형적응형 제품을 위한 새로운 생산 방식은 다음과 같다. 우선, 표본 데이터들의 형상을 입력받아 그 유사성을 판단하고 집합화하여 몇 개의 제품 군으로 구분을 한다. 그 후, 각 제품 군마다 그 그룹에 포함되는 모든 제품을 가공할 수 있는 가장 작은 기본형(work-piece)을 각 그룹별 데이터베이스

에 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 기본형(work-piece)과 새로운 제품(query-part)의 차이만을 가공한다. 이렇게 함으로써 제품 생산에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있다.

자유 곡면 형상을 지닌 주문 적응형 생산 제품의 경우 기본형과 새로운 제품의 유사성을 비교하기 위해서는 geometric 특성을 이용한 유사성 판단(similarity measurement)알고리즘이 필요하다. 그리고, 이 geometric 특성을 이용한 유사성 비교를 위해서는 우선 두 물체를 가장 비슷한 자세로 배치하기 위한 자세 결정(pose estimation)알고리즘이 필요하다.

유사성 비교를 위해 Elison[1]은 특징형상을 기반으로, McWherter[2]는 물체의 위상정보를 이용하였다. 하지만 자유 곡면 형상을 갖는 물체의 유사성을 찾는 데는 geometric 특성을 이용하는 것이 더

적합하다고 할 수 있다. Saupe[3]과 Tangelder[4]는 geometric 특성을 이용하여 유사성 판단과 자세 결정을 연구하였고 Shum 과 Herbt[5], Klein[6][7]역시 geometric 특성을 이용하였다. 이들의 연구는 유사성 비교에 관한 좋은 연구 결과를 내었다. 다만, Saupe[3]과 Tangelder[4]의 경우 자세 결정이 rough 하게 이루어진다는 점과, Klein[6][7]의 경우 비교 대상의 모든 각도에 대해 회전시켜 자세를 결정해야 한다는 점이 문제로 남는다.

본 연구에서는 물체의 geometric 특성을 이용하여 유사성 비교와 자세 결정을 판단하도록 한다. Ray distance 와 가상회전(virtual rotation)[8]을 이용하여 자세를 결정한 후 자세가 결정된 두 물체로부터 유사성을 판단하는 지수인 형상 유사성지수(shape similarity value)와 유사성지수(overall similarity)를 계산하여 두 물체의 유사성을 판단한다. 그리고 이 유사성 지수를 이용해서 그룹화를 하고자 한다.

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

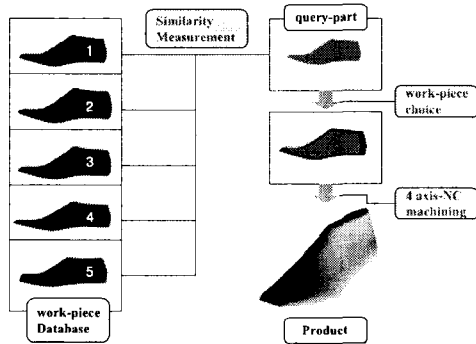


Fig. 1 Custom-tailored product system

## 2. 3 차원 형상의 자세 결정

### 2.1 3 차원 형상의 이동

두 3 차원 물체의 형상과 크기의 비교를 위해서는 우선적으로 가장 얇은 모양의 자세를 결정하여야 한다. 3 차원 형상은 xyz 축 각각에 대한 translation 과 rotation 의 6 개의 자유도를 갖는다. 그러나 밀도가 균일한 두 형상의 무게 중심을 원점에 일치 시킴으로써, translation 에 대한 자유도를 제거할 수 있다. 따라서, 3 축의 rotation 에 대한 3 개의 자유도를 가지고 자세를 결정할 수 있다.

### 2.2 3 차원 형상의 가상 회전

#### 2.2.1 Unit Normal Vector Set

Pose estimation 을 위해 3 축에 대한 가상 회전을 한다. 이 때 data structure 는 가상 회전에 대하여

symmetric 해야 하므로, unit normal vector set 을 3 축에 대해 각각 생성한다. Unit normal vector set 은 각 축을 중심으로 한 spherical coordinate 로 표현되며, 원점에서 밖을 향해 방사선 형태로 뻗어 나가는 단위 벡터이므로 끝점( $x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n}$ )은 반지름이 1 인 구의 표면에 위치한다. 예를 들어 Z 축을 중심으로 한 unit normal vector set 은 아래의 식으로 구해지며 Fig. 2 와 같이 표현된다.

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

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

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

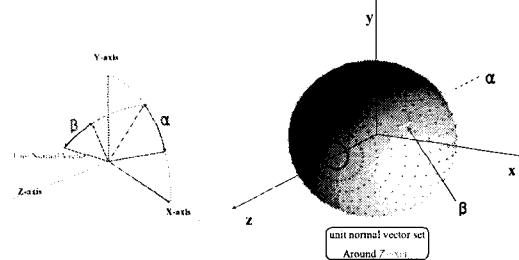


Fig. 2 Unit normal vector set by z axis

#### 2.2.2 Ray Distance to Surface (RDS)

원점에서 ray 를 unit normal vector 방향으로 쏘아 두 형상 각각의 surface 와 만나는 점  $P_{m,n}(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$  를 구한다. 원점에서 점  $P_{m,n}$  까지의 거리를 Ray Distance to Surface(RDS)라 한다.

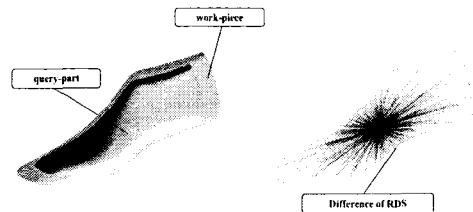


Fig. 3 Similarity measurement by the distance of rays

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

RDS 는 원점에서 3D 형상의 surface 까지의 거리를 바탕으로 계산한 값으로 물체의 모양뿐만 아니라 크기에 대한 정보도 함께 가지고 있다. 같은 물체를 축소 또는 확대한 경우에는 자세 결정시 크기 보다는 형상에 중점을 두어야 하므로, RDS 만을 이용하기에는 무리가 따른다. 이에 RDS 를

normalized 함으로써 물체의 크기에 상관없이 형상만 비교할 수 있게 된다. 즉, 하나의 축에 대한 모든 RDS의 성분을 합산한 후 각각의 RDS 성분이 합산된 값으로 나누어 형상만을 비교할 수 있는 Normalized ray distance to surface(NRDS)를 구할 수 있다.

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

### 2.2.4 가상회전(Virtual Rotation)

가상회전은 실제 물체를 회전시키지 않고 데이터의 index를 바꾸는 방식으로 실제 회전했을 때와 같은 효과를 주어 자세를 결정시킬 수 있게 하는 알고리즘이다.

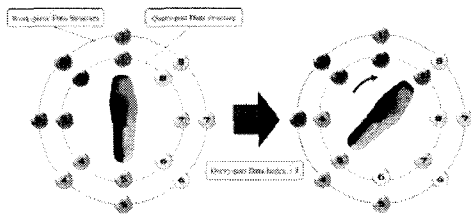


Fig. 4 Virtual rotation using memory index

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  $k\alpha^\circ$  만큼 회전했을 때는 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 index를 k씩 증가시켜, x 축 중심으로  $k\alpha^\circ$  간격씩 회전하는 효과를 나타낸다. 따라서, k를 1에서 M-1까지 증가시킴으로써, index의 증가만으로 x 축을 중심으로 한 모든 경우의 NRDS의 차의 합을 표현할 수 있다.

같은 방법으로 y 축과 z 축의 중심에 대하여도  $SND_{y,k}$ 와  $SND_{z,k}$ 를 계산해 낼 수 있다. 이 중 최소값이 가장 유사한 형태도의 rotation을 나타낸다. 이와 같은 가상회전을 실제 두 물체에 반복 적용하면 다음 Fig. 5와 같이 표현된다.

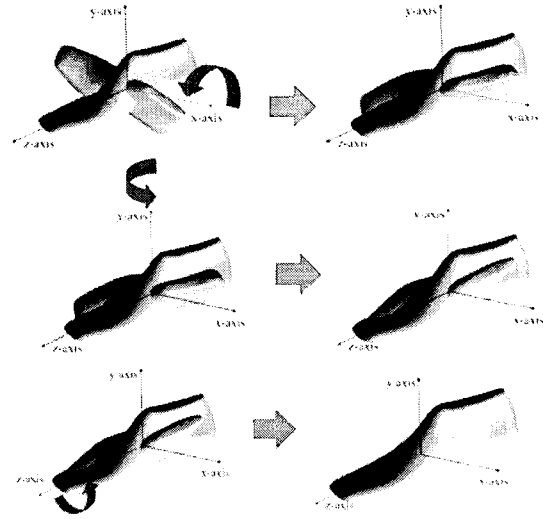


Fig. 5 Pose estimation using virtual rotation

## 3.3 차원 형상의 유사성 판단

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

형상 유사성 지수는 물체의 크기에 상관없이 겉으로 보이는 shape의 닮음 정도를 정량적으로 측정하는 값이다. 앞서 가상회전을 통해 자세가 정렬된 두 물체의 NRDS를 이용하여 다음 식과 같은 유사성 지수를 구한다.

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

두 형상이 같은 물체를 확대 혹은 축소할 경우라면 shape similarity value는 100이 된다. 그리고 두 형상이 닮지 않았을 경우 0에 수렴하게 된다.

### 3.2 유사성 지수(Overall Similarity Value)

주문형 제품의 생산에는 형상의 유사성과 더불어 크기도 중요한 요소가 된다. 이는 새로운 제품(query-part)가 들어왔을 때 Work-piece와 query-part의 크기를 비교하여 절삭량이 가장 작게 되는 것을 찾기 때문이다. 따라서 미리 제품들을 그룹화시킬 때에도 크기 요소를 포함하는 parameter를 이용해야 한다. 이때 유사성 지수를 찾기 위해서는 크기 요소가 고려된 RDS를 이용한다.

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

위 식에서 두 형상의 차이를 절삭량의 판단 기

준으로 보고, 유사성지수를 정의했다. 두 형상의 크기가 유사한 경우 100에 가까운 값을 갖게 되며 서로 다른 크기를 가질 경우, 그 차이가 클수록 0에 수렴하는 값을 갖는다.

#### 4. 유사성 판단의 적용 및 결과

##### 4.1 표본 제품들의 유사성 판단

앞서 제시한 shape similarity value 와 overall similarity value 를 유사성 판단의 기준으로 이용하여 10 개의 표본 제품들의 유사성을 측정하였다. 여기에 사용된 표본 제품은 신발을 제작할 때 사용되는 shoe-last 로서 자유 곡면 형상을 지닌 제품들이다. 유사성은 10 개의 제품들 서로 각각에 대한 shape similarity value 와 overall similarity value 를 구하였다.

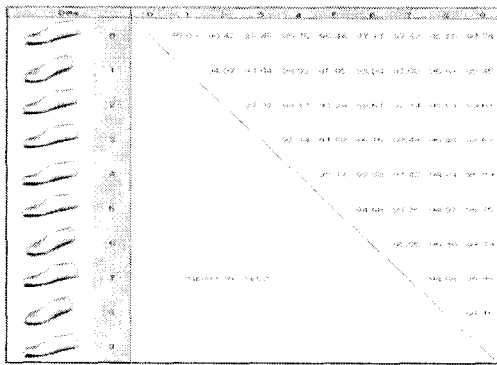


Fig. 6 Similarity measurement for shoe-last

##### 4.2 표본 제품들의 그룹화

shape similarity value 와 overall similarity value 를 이용하여 10 개의 표본 제품을 그룹화 하였다. 최종적으로 1 개의 그룹이 되게 하는 tree 구조를 사용함으로써 필요에 따라 그룹의 수를 나눌 수 있도록 하였다. 아래의 Fig. 7 은 10 개의 표본 제품을 4 개의 그룹으로 나눈 결과이다.

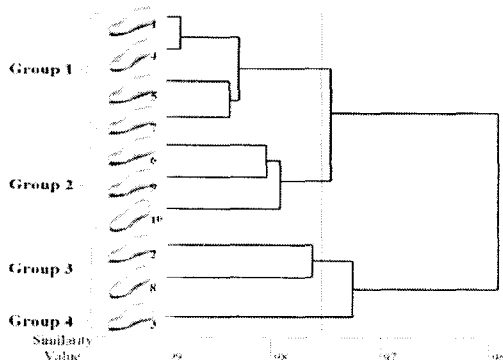


Fig. 7 Groups of shoe-last

#### 5. 결론

주문적응형 제품 생산을 위한 새로운 framework 와 이를 위한 알고리즘들을 소개하였다. 자유 곡면 형상을 가진 물체들의 유사성을 geometric 특성을 이용하여 비교할 수 있었으며 가상회전을 이용하여 pose estimation 시의 효율을 높였다. 그리고 유사성 비교에서 도출된 shape similarity value 와 overall similarity value 를 이용해 shoe-last 의 그룹화에 적용 시켜보았다.

본 연구에서 소개된 framework 와 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, Atlanta GA, 1997, 297-310
2. David McWherter, Mitchell Peabody, Ali Shokoufandeh, William C.Regli. "Database Techniques for Archival of Solid Models", Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Application, Michigan, 2001, 78-87
3. Dietmar Saupé, Content-Based 3D Model Retrieval, <http://www.informatik.uni-leipzig.de/cgip/2000>
4. Johan W.H. Tangelder, Remco C. Veltkamp, Polyhedral Model Retrieval Using Weighted Point Sets, *Int'l Journal of Image and Graphics*,3(1),pp.209-229,2003
5. Heung-Yeung Shum, Martial Hebert, Katsushi Ikeuchi, On 3D Shape Similarity, 1995
6. Marcin Novotni and Reinhard Klein, A Geometric Approach to 3D Object Comparison, Proc. *Int'l Conf. on Shape Modeling and Applications 2001*, pp.167-175, Genova, Italy, 2001
7. Reinhard Klein, Andreas Schilling, Wolfgang Straß er, Reconstruction and simplification of surfaces from contours, In *Pacific Graphics*, 1999
8. Seungyob Kim, "Grouping Algorithm for Custom-tailored Products", 학위논문(석사), 서울대학교, 2002