

## 신발 러핑 경로 측정기 개발

강동배\*, 김화영\*\*, 손성민\*, 안중환#

### Development of the Roughing Path Measurement System for Footwear

Dong Bae Kang\*, Hwa Young Kim\*\*, Seong Min Son\* and Jung Hwan Ahn#

#### ABSTRACT

For successful establishment of the roughing CAM system based on reverse engineering, it is necessary to develop the measurement method for generation of roughing path from a physical footwear model. In this study, the development of the roughing path measurement system is presented. It consists of 3 CCD cameras, image acquisition board and the roughing path measurement algorithm. The 3 CCD cameras capture images of the sidewall and the bottom of the footwear and, from two images, the outer and inner lines are extracted using image-processing algorithm. The roughing path measurement algorithm generates the roughing path which is reflected on the change of resolution according to the distance between the CCD camera and the measured point. The experimental results show that the developed system can measure the roughing path within the allowable roughing error range.

**Key Words** : roughing path measurement system(러핑 경로 측정기), vision system(비전 장치), shoe roughing(신발 러핑), image-processing(영상 처리), reverse engineering(역공학), resolution correction(분해능 보정)

#### 1. 서론

신발 조립 공정은 각각의 공정이 흐름을 타고 순차적으로 진행되는 대표적인 컨베이어 공정 시스템으로 전체 신발 조립 공정의 생산성은 병목 현상이 일어나는 공정에 의해 좌우된다. 러핑 공정(roughing process)은 Fig. 1 과 같이 밑창(out-sole)을 접착하기 전 밑창과 갑피(upper)의 접착력 향상을 위해 갑피의 접착부위를 슛돌이나 브러시(brush)를 사용하여 거칠게 가공하는 공정으로 대부분이 수작업으로 진행되고 있기 때문에 다른 공

정에 비해 불량품 발생률이 높고 작업자의 숙련도에 따라 러핑면의 품질 및 생산성에 큰 차이가 발생한다.

신발 제조시 접착부위 전영역에 대해 러핑이 충분히 이루어 지지 않은 상태(under-roughing)에서 밑창을 접착하면 접착이 제대로 이루어지지 않아 방수불량이 발생하며, 반대로 러핑 영역을 넘어 과도하게 러핑이 될 경우(over-roughing) 접착부위에 갑피가 손상이 되어 미관불량이 발생하게 된다. 따라서 정확한 러핑 경로를 따라 적당히 거칠게 가공하는 것이 중요하다.

접수일: 2003 년 4 월 21 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일

\* 부산대학교 지능기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

Email: jhwahn@pusan.ac.kr, Tel. (051) 510-2333

대부분의 국내 신발 제조업체의 경우 러핑 공정이 작업자에 의한 수작업으로 진행되고 있으며 최근의 3D 업종 기피현상에 따른 숙련된 작업자의 부족과 비숙련 작업자에 의한 품질 및 생산성 저하 문제 때문에 점차 러핑 공정의 자동화에 대한 관심이 커지고 있다. 자동 러핑 가공을 위해서는 자유 곡면인 신발 러핑면을 공구가 따라가며 가공할 수 있도록 CNC 형태의 러핑기가 5축제어가 되어야 하며, 러핑 경로 프로그램을 생성하는 CAM 기능을 갖고 있어야 한다.

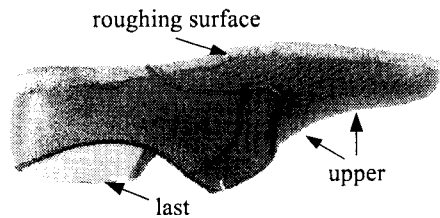


Fig. 1 The roughed shoe

이중 러핑용 CAM 시스템은 신발형상 데이터로부터 자동 러핑을 위한 러핑 경로 프로그램을 생성하는 역할을 한다. 이때 신발 형상 데이터가 CAD 화 되어 있는 경우에는 그 CAD 데이터를 이용하여 러핑 경로 데이터를 추출하면 되나 신발의 경우 아직도 CAD 데이터화 되어 있지 않고 설계자의 심미적 감각에 의존하여 설계되는 경우가 많다. 이 경우 러핑 경로 데이터를 얻기 위해서는 측정 장치를 이용하여 실제 신발 형상으로부터 러핑면을 측정하고 이를 이용하여 러핑 경로 데이터를 추출하는 역공학(reverse engineering)<sup>1,7</sup> 기법을 채택하여야 한다.

최근 역공학적 기법을 이용한 3 차원 실물모델의 CAD 모델링에 대한 관심이 커짐에 따라 실물 모델을 고정도로 스캐닝하는 3 차원 스캐닝 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 신발의 골(last)형상이나 발형상 측정의 경우 광 삼각법을 이용한 비접촉식 측정법과 접촉 프로브(probe)를 갖춘 3 차원 측정장치에 의한 접촉식 측정법이 현재 많이 사용되고 있다.<sup>5,6</sup> 광 삼각법의 경우 고속, 고분해능의 측정이 가능하다는 장점을 갖고 있지만 측정물 표면에 부착된 이물질이나 주변광, 표면 반사율 등의 영향을 받기 쉬워 측정이 어렵

다는 단점이 있다.<sup>2,4</sup> 이에 반해 접촉식 측정법의 경우 비접촉식보다 주변 환경에 대한 영향을 덜 받으나 측정 속도가 늦고 정확한 측정을 위해서 미리 측정점들을 표시하는 선행작업을 수행해야 하기 때문에 측정 시간이 많이 소요되는 단점을 갖고 있다. 신발의 골이나 발형상 측정과 비교해 볼 때 러핑 경로 측정의 경우 측정 영역의 형상이 간단하고 요구되는 분해능도 신발의 골이나 발형상 측정보다 낮다. 또한 러핑할 신발의 앞, 옆, 뒷부분에 사용되는 가죽의 재질이 서로 달라 반사율에서도 차이가 종종 발생한다.

본 연구에서는 이러한 러핑면의 특징을 고려하여 레이저 빔을 이용한 광 삼각법보다 분해능은 조금 떨어지나 일반적인 조명하의 작업장 환경에서도 빠르게 측정할 수 있으며 동시에 가죽소재의 변화에도 그다지 영향을 받지 않는 CCD 카메라를 이용한 비접촉식 측정방법과 이를 이용한 측정시스템을 제안하고자 한다.

## 2. 러핑 경로 측정 시스템

### 2.1 시스템 구성

Fig. 2 는 본 연구에서 개발한 러핑 경로 측정 시스템의 구성을 나타낸다. 전체 측정 시스템은 3 대의 CCD 카메라가 달린 3 축 측정기 본체, 영상 획득에 필요한 영상 획득부, 획득된 영상으로부터 러핑 경로를 추출하는 경로 생성 소프트웨어로 구성되어 있다.

3 대의 CCD 카메라를 러핑 가공면을 따라 일정 간격으로 이동시키면서 러핑면의 영상을 추출한 뒤 영상 처리 및 경로 측정 알고리즘에 의해 러핑 경로 데이터를 추출한다.

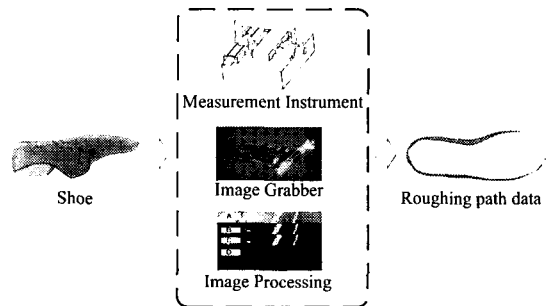


Fig. 2 Structure of the measurement system

## 2.2 측정 원리

Fig. 2의 측정 시스템을 이용하여 러핑 경로를 측정하기 위해서는 먼저 신발에 러핑 경로를 표시하는 게이지(gauge)작업을 수행하여야 한다. 이를 위해 러핑할 신발의 갑피와 밑창을 결합시킨 후 접착부위를 따라 선을 표시하며, 이때 표시된 선이 신발의 러핑 경계를 나타내는 외부 곡선(outer line)이 되며, 신발의 바닥면과 옆면의 경계선을 따라 표시한 선이 내부 곡선(inner line)이 된다. 두 곡선 사이에 이루어진 곡면이 러핑면이 된다. Fig. 3은 두 곡선의 결합으로 이루어진 러핑면을 나타낸다.

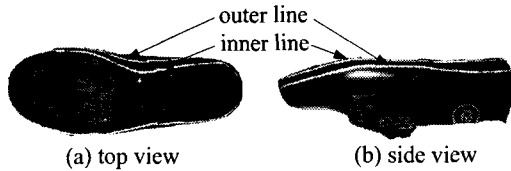


Fig. 3 Roughing surface of the shoe enclosed by two white lines

신발의 러핑면은 실제로 미소한 구배를 가지는 곡면이다. 따라서 정확한 가공을 위해서는 공구의 위치뿐 아니라 자세까지도 제어해 주어야 한다. 일반적인 자유 곡면 가공의 경우 구배면 형상을 나타내기 위해 절삭깊이, 커슴을 예측하여 공구 경로를 생성해야 한다. 하지만 신발의 러핑 가공의 경우 러핑면에 존재하는 구배가 비교적 간단한 형태이기 때문에 공구 위치 및 공구 법선 방향 기울기 정보를 알면 충분히 가공할 수 있다. 본 연구에서는 러핑면의 CL 데이터 생성시 필요한 공구 위치 및 자세에 대한 정보를 외부곡선, 내부곡선으로부터 구하게 된다.

Fig. 4는 3대의 CCD 카메라를 이용하여 러핑 곡선상에 존재하는 한 점의 좌표를 측정하는 원리를 나타낸다. CCD 2 카메라는 신발 바닥면과 수직인 직선상에 위치하며(Z 축 방향), CCD 1과 CCD 3 카메라는 신발의 측면상(Y 축 방향)에 위치한다. 좌표값의 측정시 먼저 측정하고자 하는 측정 시작점과 각 CCD 카메라 사이의 거리를 일정하게 고정시킨 다음, 측정점 위치 변화에 따라 카메라와 측정점사이의 거리변화가 생기면 이를 보상하기 위해 카메라를 이동시키고 이때 이동된 거리를 이용하여 측정점의 좌표값을 구한다.

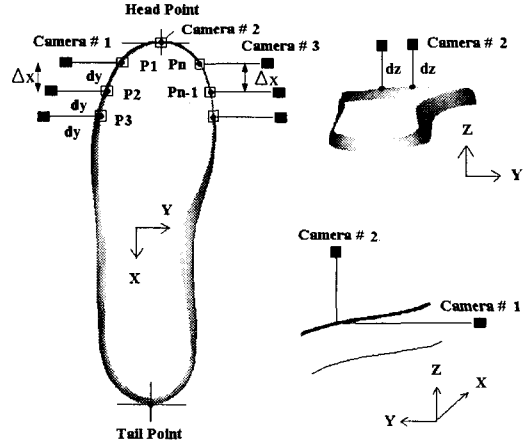


Fig. 4 The principle of measurement

### 1) X 좌표값 측정

사용자에 의해 측정 기준점인 시작점(head point)과 끝점(tail point)을 입력 받아, 3대의 CCD 카메라의 중심을 신발 시작점과 먼저 일치시킨다. 그런 다음 두 개의 입력점을 기준으로 미리 입력된 측정 간격  $\Delta X$  만큼 X 축 방향으로 이동한다. 이때 이동한 거리  $\Delta X$ 가 러핑 경로상의  $P_1$  점의 X 좌표값이 된다.

### 2) Y 좌표값 측정

X 축 방향 이동 후, Z 축 방향에 있는 CCD 2 카메라로부터 신발 바닥면의 영상을 입력 받고 영상 처리(Image processing)를 통해 참조 곡선(러핑 곡선)을 찾는다. 이때 입력 받은 영상에서 참조 곡선(러핑 곡선)이 카메라 중심과  $\Delta Y$  만큼 이동된 위치에 존재할 경우, 측면 카메라 CCD 1 카메라의 측정 거리  $dy$ 를 일정하게 유지시키기 위해  $\Delta Y$  만큼 Y 축 방향으로 이동하여 CCD 2 카메라의 중심이  $P_1$  점과 일치하도록 한다. 따라서  $P_1$  점의 Y 축 좌표값은 측정 시스템의 Y 축 이동거리로부터 구할 수 있다.

### 3) Z 좌표값 측정

Y 좌표값 측정과 유사한 방법으로 Z 축 좌표값을 찾는다. 측면 카메라 CCD 1으로부터 러핑면의 측면 부위 영상을 입력 받은 후, 영상 처리를 통해 참조 곡선을 찾는다. 참조 곡선이 CCD 1 카메라의 중심에 위치하도록 Z 축 방향으로 이동하여 CCD 2 카메라와 내부 곡선 사이의 거리  $dz$ 가 일

정하게 유지되도록 한다. 그런 다음 측정 시스템의 Z 축 방향 이동 거리로부터 P<sub>1</sub> 점의 Z 축 좌표값을 계산한다.

위의 과정을 반복하여 시계 방향이나 반시계 방향으로 폐곡선을 추종하도록 X, Y, Z 축으로 이동하여 전체 러핑 곡선상의 P<sub>1</sub>, ..., P<sub>n</sub> 값을 측정한다. Fig. 5는 경로 측정 알고리즘의 흐름도이다.

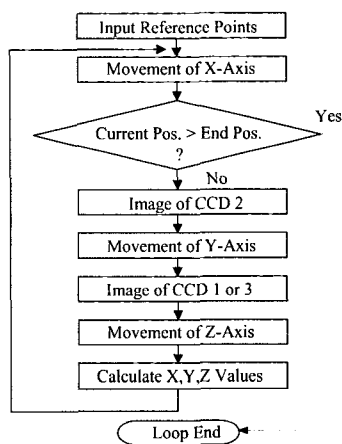


Fig. 5 The flow chart of the tracking algorithm

### 2.3 경로 추종 모드

앞에서 설명한 측정 원리에 따라 러핑 곡선을 측정하게 될 경우 외부 곡선과 내부 곡선 모두를 측정하게 되므로 측정 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 두 개의 러핑 곡선 중 한 곡선은 직접 곡선을 따라가면서 경로상의 점들을 측정하고, 나머지 한 곡선상의 점에 대해서는 좌표계산을 통해 간접측정하는 방법을 사용하였다. 즉, 두개의 곡선 중 어떤 곡선을 따라가는데 따라 내부 곡선을 참조해서 시스템을 구동하는 모드(Inner Line Focus Mode, ILFM), 외부 곡선을 참조하는 모드(Outer Line Focus Mode, OLFM), 양곡선 사이의 중간점들로 구성되는 가상의 중간 곡선을 참조하는 모드(Center Line Focus Mode, CLFM) 등의 3 가지 경로 추종 모드로 나누어지며, 사용자에게 의해 3 가지 모드 중 하나를 선택하게 된다. 3 가지 경로 추종 모드 중 ILFM, OLFM은 실제의 두 폐곡선 중 하나를 선택하여 추종하므로 CLFM에 비해 상대적으로 추종 곡선에 대해서는 정밀한 측정이 가능하나 백래쉬, 데이터 변환 오차, 지령 오차 등으로 인해 발생한

이동량의 오차와 영상 처리 오차가 직접적으로 반영이 되는 문제점이 있으며 초점 거리 변화에 따른 정밀도 저하 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 CLFM을 기본 모드로 사용하였으며 특별한 경우 사용자에게 의해 ILFM과 OLFM을 선택할 수 있도록 하였다.

### 2.4 좌표 계산

앞질의 측정 원리에 따라 얻어진 영상으로부터 추종 곡선이 아닌 다른 곡선상의 측정점에 대한 정확한 좌표값을 얻기 위해서는 CCD 카메라의 측정거리 변화에 따른 분해능 변화를 고려하여 좌표값을 구하는 좌표 보정 작업이 필요하다. Fig. 6은 ILFM로 추종을 한 경우, 외부 곡선상의 한 점에 대한 좌표 계산시, 측정거리에 따른 분해능 변화를 보정하는 좌표 계산 원리를 보여준다.

A 점은 두 개의 러핑 곡선 중 내부 곡선 상에 존재하는 임의의 한점으로 2 대의 CCD 카메라(CCD 1, CCD 2)의 중심과 초점이 맞춰져 있기 때문에 시스템의 위치 좌표가 된다. B 점은 외부 곡선 상에 존재하는 임의의 한 점으로 좌표 계산을 통해 구해야 하는 점이다. B'점은 CCD 1 카메라에서 획득한 B 점의 투영점이고, B''은 CCD 2 카메라에서 획득한 B 점의 투영점이다. 따라서 B 점의 좌표 계산을 위해 CCD 2(Z 축 방향) 카메라와 CCD 1(Y 축 방향) 카메라의 영상을 조합할 경우 투시 되는 좌표점은 B<sub>r</sub>(Y,Z)로 실제의 좌표 B(Y,Z)에 대해서 (+Δy, -Δz)만큼 이동 변환된 좌표값이다.

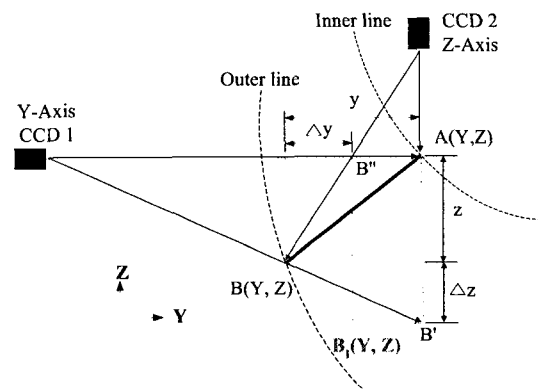


Fig. 6 The principle of the coordinate calculation for correction

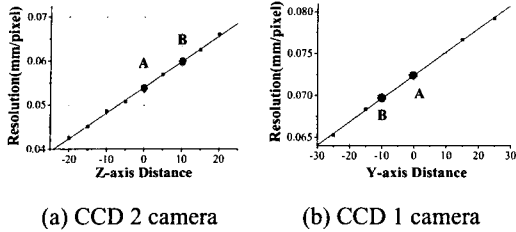


Fig. 7 Resolution per pixel versus the distance between CCD camera and the measuring point

Fig. 7 은 본 연구에서 사용한 각 CCD 카메라의 측정거리 변화에 따른 픽셀당 분해능 변화를 구한 실험결과이다. 실험결과 CCD 카메라와 측정점 사이의 거리가 멀수록 화소당 분해능은 선형적으로 떨어진다. 따라서 실제의 B 점 좌표값은 Z 축 상에 존재하는 CCD 2 카메라에서 볼 때 기준점인 A 점보다 z 만큼 멀리 떨어져 있기 때문에 기준점인 A 점 지점에 비해 B 점의 분해능은 떨어지게 된다(Fig. 7 (a)). 이와는 반대로 CCD 1 카메라에 대해서는 B 점이 기준점인 A 점보다 상대적으로 y 만큼 가까이 접근해 있는 상태이다(Fig. 7 (b)). A 점의 분해능을 기준으로 계산을 하게되면 Z 축 방향에 대해서  $-\Delta z$  만큼, Y 방향에 대해서  $+\Delta y$  만큼의 오차를 가지게 된다. 따라서 정확한 B(Y,Z)의 좌표를 구하기 위해서는 카메라와 러핑 곡선사이의 거리에 따른 분해능 변화를 고려하는 좌표 계산 알고리즘을 적용하여야 한다.

식 (1)은 분해능 변화를 고려하여 B 점의 좌표값을 계산하는 좌표 계산 알고리즘이다.

$$y = \sum_{i=A}^B \text{Resolution}_y(i) \tag{1}$$

$$z = \sum_{i=A}^B \text{Resolution}_z(i)$$

여기서,  $\text{Resolution}_y(i)$ ,  $\text{Resolution}_z(i)$  는 각각 CCD 2, CCD 1 카메라에서 획득한 영상의 A 점에서 i 번째 픽셀의 분해능(mm/pixel)을 나타낸다. A, B 점 사이의 측정거리인 y, z 값은 식 (1)처럼 A 점에서 B 점까지의 각 픽셀의 분해능을 모두 더한 값이 되며 이때 각 픽셀당 분해능은 Fig. 7 에서와 같이 측정 거리에 따라 선형적으로 변한다.

Fig. 7 에서 알 수 있듯 픽셀당 분해능과 측정거리 사이에는 선형적인 관계가 있으므로 식 (1)은 식 (2)와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$y = \frac{\text{Resolution}_y(A) + \text{Resolution}_y(B)}{2} \times P_y \tag{2}$$

$$z = \frac{\text{Resolution}_z(A) + \text{Resolution}_z(B)}{2} \times P_z$$

여기서,  $P_y$ ,  $P_z$  는 각각 CCD 2, CCD 1 카메라에서 획득한 A, B 점 사이에 있는 픽셀의 수를 나타낸다. 따라서 각 CCD 카메라에 대한 B 점의 분해능을 알면 식 (2)로부터 B 점의 좌표값 B(Y,Z)를 구할 수 있다.

먼저 CCD 2 카메라에 대한 B 점의 분해능을 구하기 위해서는 A, B 점 사이의 수직 거리 z 를 알아야 하므로 Y 축상에 존재하는 CCD 1 카메라에서 이 거리를 측정한다. 이때 CCD 1 카메라에서 영상 처리를 통해 측정되는 최초의 수직 거리는  $z' (=z+\Delta z)$ 이다. 이 값을 이용하여 Fig. 7 (a)로부터 선형적으로 변화된 B 점의 분해능을 구한 다음, 식 (2)를 이용하여 수평 거리  $y'$ 을 측정한다. B 점의 Z 축 좌표값 z 는 CCD 1 카메라에 대한 B 점의 분해능을 알아야 하므로 앞에서 구한 수평 거리  $y'$ 를 이용하여 B 점의 분해능을 구한 다음, 식 (2)를 이용하여 구한다.

여기에서 문제가 되는 것은  $y'$ 을 구하기 위해 이용한 최초의  $z' (=z+\Delta z)$ 이  $\Delta z$  값을 포함하고 있기 때문에 추정된  $y'$ 은 실제의 y 값에 어느 정도의 오차가 포함된 값이 구해진다. 만약  $z'$ 이 실제의 z 값과 일치할 경우 한번의 계산으로 정확히 y 을 구할 수 있다. 그러나 최초의  $z'$ 값은 항상  $\Delta z$  만큼의 오차를 포함하고 있으므로 위의 과정을 반복해서  $y'$ ,  $z'$ 을 추정하면서 각축 측정오차가 어느 범위내에 수렴하도록 하는 반복알고리즘을 적용하여 측정분해능을 향상시킨다. 하지만 예비실험 결과 반복횟수가 증가하면 수렴하게 되는 값들도 점점 줄어들어 일정 횟수 이상이 되면 거의 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있었다. Fig. 8 은 위의 계산 과정에 대한 흐름도를 나타내고 있다.

OLFM 의 경우에는 위의 ILFM 의 경우와 반대 개념으로 계산을 하여 좌표값을 구하고, CLFM 의 경우는 현재의 위치를 기준으로 내부 곡선은

OLFM 계산 방법으로, 외부 곡선은 ILFM 의 계산 방법으로 계산을 각각 수행하면 된다.

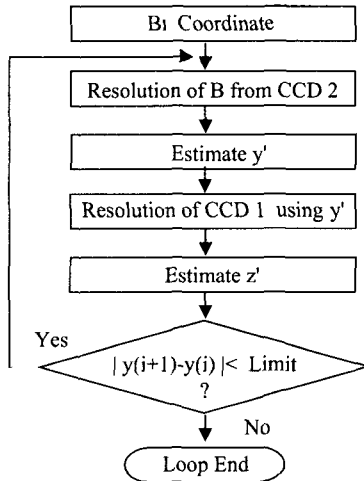


Fig. 8 Flow chart of the correction algorithm

### 2.5 영상 처리

CCD 카메라를 통해 획득된 영상은 일반적으로 많은 잡음을 포함하고 있다. 따라서 기본적으로 모든 영상에 대해 미디언 필터(median filter)를 사용하여 잡음을 제거하였으며 잡음 제거 후 경계값(thresholding)처리에 의해 러핑 경로와 갑피사이의 경계를 추출하였다.<sup>8</sup> 측정할 러핑 곡선은 측정 전에 흰색으로 표시하였으며 러핑 곡선 외의 부위는 반사광의 영향을 없애기 위해서 어두운 색으로 처리가 되어 있기 때문에 밝게 표시가 된 러핑 곡선을 경계값 처리 기법을 통해 쉽게 추출할 수 있다. 경계값 처리 기법과 함께 신발의 곡면 구배가 정(positive)에서 부(negative)가 되는 부분에서의 경계 추출을 위해 미분(gradient) 기법을 함께 사용하였다. 영상처리시 미분 기법을 함께 사용하므로 경계값 처리 기법으로 추출하기 어려운 미세한 부분의 경계를 추출하는 것이 가능하다.<sup>8</sup>

### 3. 러핑 경로 측정기 제작

Fig. 9 는 개발된 러핑 경로 측정기의 전경이다. 측정 장치는 CCD 카메라 및 영상 획득 보드로 구성된 측정부와 CCD 카메라가 달린 3 축 기구부 구동을 위한 구동부로 구성되어 있다.

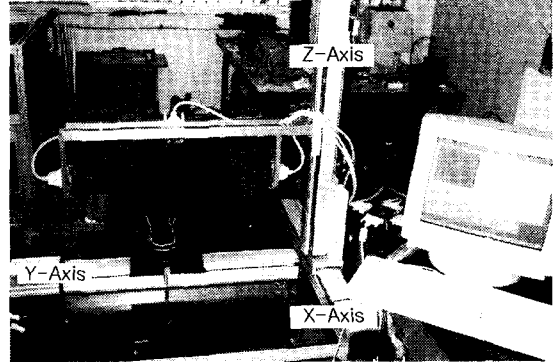


Fig. 9 The developed measurement system

### 3.1 구동부

3 축 직교 좌표계(X,Y,Z) 형태로 구성된 기구부를 구동하기 위해 스테핑 모터 구동계를 선택하였다. 스테핑 모터는 2 상 하이브리드(hybrid) 타입의 모터이며, 이송기구는 C10 등급의 볼스크류를 사용하였다. 정확한 위치 이송을 얻기 위해 스테핑 모터의 회전량을 엔코더로 피드백한 후 피드백 제어를 행하도록 설계하였다. 구동축의 실제 이동량은 엔코더를 통해 제어기로 피드백 되어지고, 제어기는 지령치 오차 정보를 이용하여 위치 제어를 수행한다. 3 대의 스테핑 모터 제어기와 통신은 PC 의 RS-232C 를 통해 이루어지며, PC 상에 존재하는 1 개의 RS-232C 포트를 이용하여 3 대의 스테핑 모터 제어기로 제어지령을 내리기 위해 각 축 제어기에 고유의 식별 ID 를 부여하여 제어지령을 식별하도록 설계하였다. 레이저 간섭계(HP5529A)를 이용하여 구동부의 직선 운동에 대한 반복 위치 정밀도를 측정된 결과 300 mm 이송시 약 150 μm 정도의 위치 정도 오차가 발생하였다.

### 3.2 측정부

측정부는 3 대의 CCD 카메라와 CCD 카메라로부터 촬영된 영상 데이터를 획득하기 위한 영상 획득 보드(image grabber)로 구성이 된다.

Fig. 10 은 본 시스템에서 제작하여 사용한 CCD 카메라와 영상 획득 보드를 나타내며 Table 1 은 본 시스템에 사용된 CCD 카메라의 사양을 나타낸다. 본 시스템에서는 자체 제작된 CCD 카메라와 영상 획득 보드 외에 3 대의 CCD 카메라에 대한 영상 데이터를 스위칭 해주는 장치를 사용하여 하나의 영상 획득 보드로 3 대의 CCD 카메라

라에 대한 영상을 획득하였다.

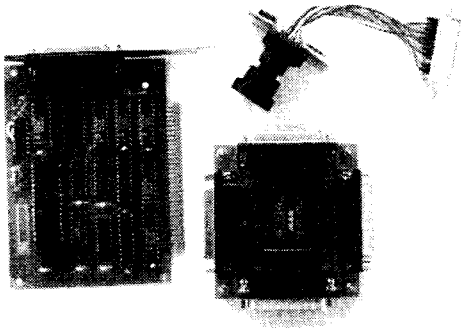


Fig. 10 The CCD Camera and image grabber board

Table 1 Technical specification for HV7141B

Pixel Resolution	802× 602
Pixel Size	8× 8 $\mu\text{m}^2$
Fill factor	30%
Sensitivity	2.5V/lux· sec
Technology	0.5 $\mu\text{m}$ 3metal CMOS

#### 4. 성능평가 및 고찰

##### 4.1 측정 오차 평가

과도 러핑은 갑피의 깊이 방향·바닥면에서 아래쪽·으로 발생하는 문제이기 때문에 과도 러핑을 방지하기 위해서는 러핑 경로 측정 시 Z 축 방향에 대한 정확한 좌표값 측정이 중요하다. 러핑 공정 중 실제 러핑 곡선보다 1 mm 정도 과도 혹은 과소 러핑 되더라도 신발의 품질에는 별 문제가 되지 않는다. 따라서 측정을 통해 얻은 러핑 경로의 Z 축 방향 오차가  $\pm 300 \mu\text{m}$  정도이면 양호한 러핑 가공면으로 간주할 수 있다.

Fig. 11 은 러핑 경로 측정시 Z 축 방향 측정오차 평가를 위해 러핑 곡선상에서 임의의 러핑점을 샘플링하여 상용 3 차원 좌표 측정기(CMM, MHB 1000C)와 개발한 측정기에서 측정된 값을 비교한 것이다. Fig. 11 의 결과는 X, Y 값은 동일하다는 가정 하에 Z 축에 대한 차이값을 나타낸다.

Fig. 12 는 두 측정 결과의 측정값 오차를 나타낸 것으로 오차 범위가  $\pm 300 \mu\text{m}$  정도로 측정자의 개인 오차와 갑피의 탄성을 고려할 경우, 러핑에 적당한 정밀도를 유지할 수 있음을 보여 준다.

Fig. 13 은 외부 곡선상의 임의의 한점에서의 좌표 계산시 반복에 의한 오차 감소 정도를 나타낸다.

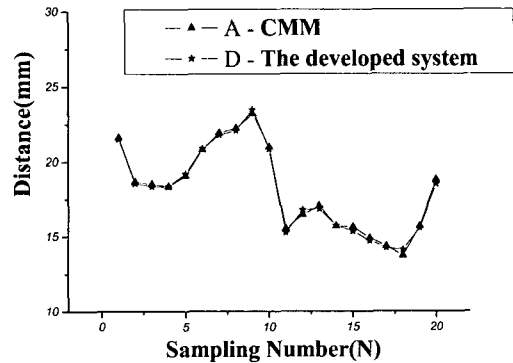


Fig. 11 Evaluation of the measuring error

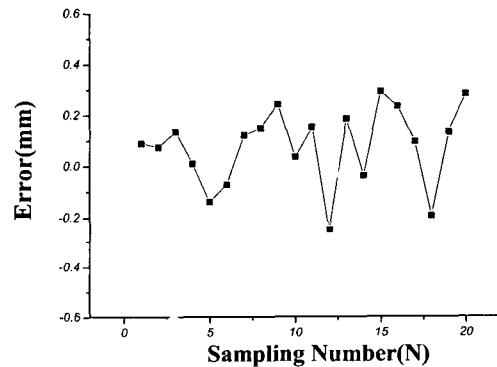


Fig. 12 Differences of the measuring error between the developed system and CMM

좌표 계산 알고리즘을 적용하기 전 Y 축 측정 오차가 Z 축 측정 오차 보다 크게 나타나는 것은 측정기의 기하학적인 구조 때문이다. 즉, 신발 측면과 측면 카메라(CCD 1, CCD 3) 사이의 충돌을 피하기 위해서 측면 카메라와 신발의 기준점 사이의 거리를 상면 카메라(CCD 2)와 기준점 사이의 거리보다 더 길게 하였고 이에 따른 분해능 저하를 보완하기 위해 Y 축 상에 존재하는 측면(CCD 1, CCD 3) 카메라의 렌즈는 고배율의 초점 거리가 긴 렌즈를 사용하였다. 따라서 투영으로 인해 발생하는 Z 축 오차가 Y 축의 오차보다 훨씬 적다. 좌표 계산 알고리즘에서 Z 방향의 값을 먼저 사용한 이유도 이러한 기하학적인 구조를 고려한 때문이다.

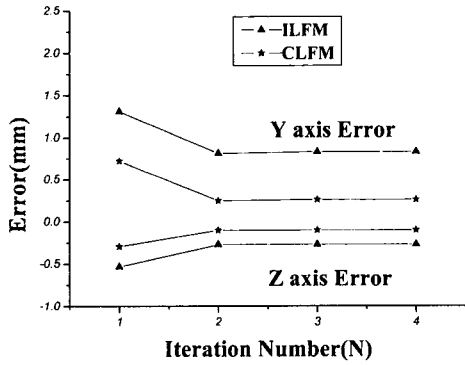


Fig. 13 Error reduction by iteration during coordinate calculation

이론적으로 좌표 계산 횟수가 증가할수록 오차의 값이 작아지도록 수렴이 된다. 그러나 측정 결과에서 볼 수 있듯 2 회 이상의 반복에서는 그다지 큰 값의 변화가 없다. 이것은 좌표 계산을 위해 참조되는 거리 변화율에 비해 분해능 변화율이 너무 작아서 오차의 감소에는 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 보여진다.

Fig. 13 으로부터 CLFM 로 외부곡선상의 한 점을 좌표 계산할 경우가 ILFM 에 의한 것보다 초기 오차뿐 아니라 수렴된 오차 또한 작다는 것을 알 수 있다. 이는 계산에 사용된 초기 픽셀수가 많을수록 오차가 커지며 이로 인해 최종적으로 수렴되는 오차값 역시 큰 값을 가지기 때문이다. 따라서 CLFM 으로 추종하는 것이 좌표 계산시 오차를 적게하여 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있음을 보여준다.

4.2 추종 모드에 따른 측정 성능 평가

Fig. 14 는 신발 러핑면 측정시 추종 모드에 따른 측정 데이터의 변화를 나타낸다. 러핑 경로 측정시 곡률변화가 큰 신발 앞과 뒷부분은  $\angle X$  값을 작게 하여 촘촘히 측정하였고, 곡률변화가 크지 않는 그 외 부분에서는  $\angle X$  값을 크게 하여 측정 시간을 단축하였다. 본 연구의 경우 양끝점(기준점)에서 50mm 이내의 범위는 4mm 간격으로 측정하였고, 그 외의 부위는 10mm 간격으로 측정점을 선택하여 측정하였다.

ILFM, OLFM 의 경우 각각 직접 측정하는 내부 곡선, 외부 곡선은 정확히 측정되나 좌표계산을 통해 얻어지는 외부 곡선, 내부 곡선은 추종 곡선

측정시 발생하는 오차요인들로 인해 곡선이 매끄럽지 못하고 끊어지는 부분이 존재함을 알 수 있다. 실험 결과 XY, XZ 평면 모두 CLFM 에 의한 측정이 각각의 모드에 의한 측정보다 신발 러핑면을 잘 추종함을 보여준다.

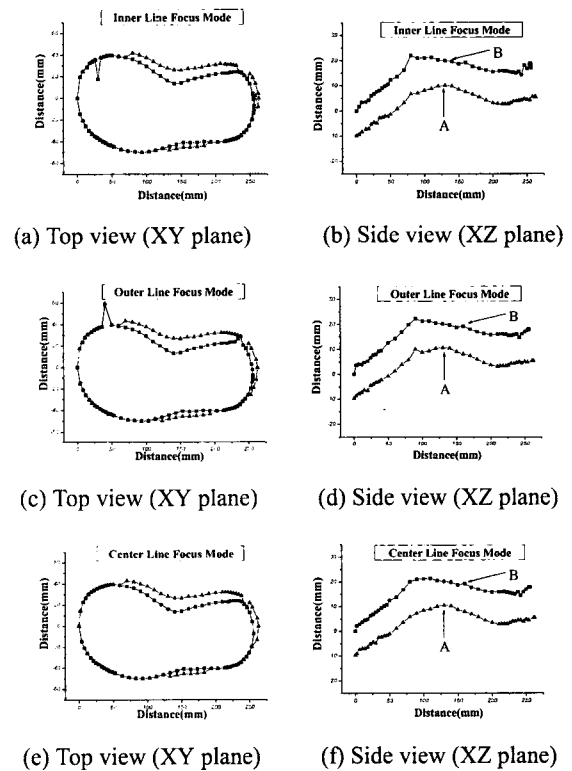


Fig. 14 The measured data for each measurement mode (A: Outer line, B: Inner line)

Fig. 15, Fig. 16 은 각 모드에 따른 오차 크기를 나타낸다. 내부 곡선의 경우 직접 측정된 ILFM 에서의 결과를 기준값으로 하여 CLFM 과 OLFM 으로 내부 곡선을 계산했을 경우와 비교하였다. CLFM 의 경우 오차는 150  $\mu\text{m}$ , OLFM 의 경우는 오차가 600  $\mu\text{m}$  정도이다. 외부 곡선 측정의 경우는 반대로 OLFM 을 기준으로 하여 CLFM 과 ILFM 과의 오차를 구하였다. CLFM 과의 오차는 250  $\mu\text{m}$  정도이고, ILFM 와의 오차는 800  $\mu\text{m}$  정도이다. CLFM 의 경우 내부 곡선, 외부 곡선 측정시 오차가 각각 150  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ 으로 러핑 가공시 허용오차 범위인  $\pm 300 \mu\text{m}$ 을 만족함을 알 수 있다.



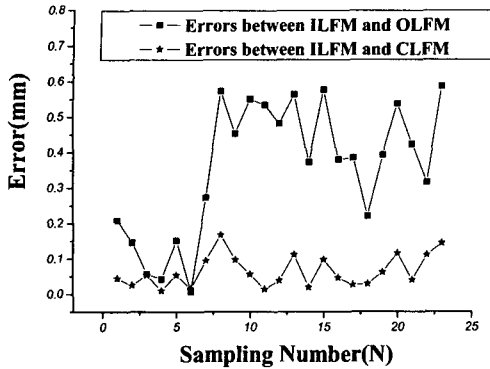


Fig. 15 Accuracy error according to change of modes for inner line

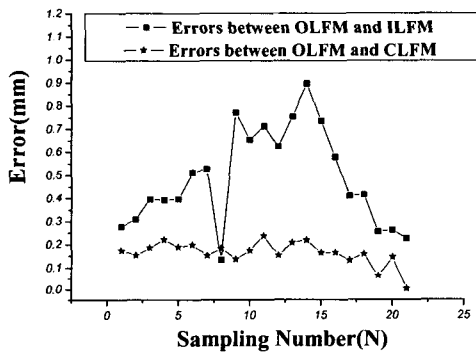


Fig. 16 Accuracy error according to change of modes for outer line

Table 2 Comparisons of maximum error according to the measuring modes

	ILFM	CLFM	OLFM
Inner line	Reference	150 $\mu\text{m}$	600 $\mu\text{m}$
Outer line	800 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	Reference

복잡하고 곡면의 기울기 변화가 큰 러핑 곡면의 경우, 러핑 가공용 NC 프로그램을 생성하기 위해서는 공구의 중심위치(location) CL 데이터 뿐만 아니라 공구의 자세(orientation)까지 고려한 5축 러핑용 데이터를 생성해야 하며 이 경우 외부 및 내부 곡선 모두에 대해 허용 오차 범위내에서 정확히 측정해 내는 CLFM을 사용하는 것이 가장 바람직하다. 한편 비교적 간단하고 곡면변화도 그다지 심하지 않는 러핑면의 경우는 3축 러핑 가공용 데이터로 충분하며 이 경우는 OLFM을 선택

하여 공구끝점이 지나가는 외부곡선을 보다 정확하게 측정하는 것이 좋다.

### 5. 결론

역공학 기반의 자동 러핑용 CAM 시스템을 구축하기 위해서는 먼저 실제 신발로부터 러핑경로를 측정하는 작업이 선행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 3대의 CCD 카메라로 획득한 영상 정보를 이용하여 러핑 경로를 측정하는 자동 러핑 경로 측정 시스템을 개발하였으며, 성능평가를 수행하였다. 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 3대의 CCD 카메라와 러핑 경로 상의 측정 기준점 사이의 거리를 일정하게 유지토록하여 측정시 기준점으로부터의 거리변화를 이용하여 러핑 경로상의 측정점의 좌표를 계산하는 측정알고리즘을 개발하였다.

2) 러핑경로 측정을 위한 CCD 카메라 이동시 추종 곡선 선정에 따른 3가지 경로 추종 모드를 제안하였다. 즉, 하나의 곡선은 직접 따라가면서 측정점을 일정 간격으로 측정하고 나머지 곡선에 대한 좌표값은 CCD 카메라의 분해능 변화를 보정하여 계산하는 좌표 계산 알고리즘을 이용하여 구하였다.

3) 위치정밀도 평가를 위해 3차원 좌표 측정기(CMM)와 개발한 측정장치를 이용하여 동일한 점들을 측정하였으며 3차원 좌표 측정기로 측정 한 값을 기준값으로 하여 정밀도를 구한 결과  $\pm 300 \mu\text{m}$ 이내에서 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 각 추종모드에 따른 측정 정도 실험결과 CLFM에서 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 5축 러핑용 데이터가 필요한 경우에는 CLFM을 사용하고, 3축 데이터만 필요한 경우에는 OLFM을 선택하여 측정하는 것이 좋음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- Hur, S. M., Choi, J. W. and Lee, S. H., "Study on Application of Reverse Engineering by Generation of the Free-Form Surface," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 10, pp. 168-177, 2001.
- Lee, S. Y. and Lim, S. G., "Three Dimensional

- Measurements Using Machine Vision," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 18-22, 2001.
3. Park, H. G., Kim, S. W. and Park, J., "3-Dimensional Profile Measurement of Free-Formed Surfaces by Slit Beam Scanning Topography," Journal of the KSME, Vol. 17, No. 5, pp. 1202-1207, 1993.
  4. Yang, M. Y. and Yoo, J. K., "A CAM System of Sculptured Surface Using Computer Vision," Journal of the KSME, Vol. 14, No. 4, pp. 850-856, 1990.
  5. Kim, S. H., Jang, K. K., Kim, K. P., Huh, H. and Kwon, D. S., "New CAD Datarization Technique of Shoe Lasts for Automation of the Adaptive Lasting Machine," Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 17-23, 2001.
  6. Park, Sangkun, Lee, Kunwoo, Kim, Jongwon and Park, Jongwoo, "A System for Rapid Design and Manufacturing of Custom-Tailored Shoes," KSME International Journal, Vol. 14, No. 6, pp. 675-689, 2000.
  7. Choi, J. W., Hur, S. M. and Lee, S. H., "Free-form Surface Generation from Measuring Points using Laser Scanner," International Journal of the KSPE, Vol. 3, No. 4, pp. 15-23, 2002.
  8. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley Publishing Company, 1993.
  9. Lee, S. B., Kim, K. D. and Chung, S. C., "Machined Surface Inspection Based on Surface Fairing on the Machine Tool," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 24, No. 4, pp. 937-945, 2000.
  10. Kang, D. B., Son, S. M., Kim, H. Y. and Ahn, J. H., "A Study on the Development of the 3-D Scanner for Shoe Roughing," Proceedings of the KSPE Annual Fall Meeting 2002, pp. 396-399, 2002.