

운동화 중창의 작업 자동화를 위한 인라인 3D 스캐너 개발

김성환^a, 이유나^a, 송성재^{b*}

In-line 3D Scanning System for Automated Manufacturing of Injected Shoe Midsole

Sung Hwan Kim^a, Yuna Lee^a, Sung Jae Song^{b*}^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology^b Department of Mechanical Engineering, Gangneung-Wonju National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	9	April	2020
Revised	9	May	2020
Accepted	13	May	2020

Keywords:

Shoe midsole
Inline 3D scanning
Laser stripe extraction
Point cloud reconstruction
Feature of point cloud

ABSTRACT

A shoe midsole is manufactured by the phylon mold method in which each product is manufactured successively with differing dimensions due to deformation, and it hinders the automation of shoe manufacture with issues such as size inspection or cement spraying. To address this drawback, it is necessary to perform real-time 3D scanning of the inline conveyor. For the footwear industry, a 3D scanner should have the necessary precision, reasonable cost, and processing speed higher than a commercially available 3D scanner. The optical non-contact method with a line laser is adopted for 3D shape measurement. A laser stripe extraction method and a mathematical model for constructing 3D information are proposed. Unique jig shape and a mathematical method for estimating machine parameters are also expressed. The method of extracting meaningful features from the acquired point cloud and treating the abnormal data in toe and heel is discussed.

1. 서론

일반적으로 운동화는 크게 발의 상부를 덮는 부위의 갑피(upper)와 발이 지면과 접하는 부분의 바닥재(sole)로 구분할 수 있으며, 바닥재는 다시 안창(insole), 중창(midsole) 그리고 겉창(outsole)으로 구분된다. 이 중 중창은 최근 파일론(phylon) 공법으로 제조되는 비율이 점점 늘어나고 있는데 이는 비중이 낮고 쿠션 기능이 증대되어 보행시의 강한 충격을 흡수하는 장점이 있어 주로 고급 운동화에 많이 적용되기 때문이다. 그런데 EVA 발포체 제조에 이용되는 파일론 공법은 첨가제들이 함유된 수지를 밀폐된 금형 안에 투입하고 프레스기를 이용하여 고온에서 가압한 후 금형을 순간적으로 열어 급팽창시키는 사출프레스 공정을 거쳐 연결의 독립기포 구조를 갖게 한다. 이 방법은 생산성이 높다는 장점이

있는 반면 성형 후 수축에 의한 변형 등으로 매 제품마다 치수와 형상에서 그 차이가 상당하다는 결과를 보이는 문제가 있다. 일정 이상의 변형이나 치수 이상은 불량이므로 현재로는 일일이 수작업으로 치수 불량을 검사하고 있는 실정이고, 합격품도 형상 차이가 상당하여 풀칠 스프레이 등의 자동화에 걸림돌이 되어 왔다. 매 제품마다의 형상 차이에 대응하여 스프레이나 치수측정을 자동화하는 방법으로는 인라인 컨베이어 위에서 3차원 스캐닝을 실시간으로 수행하여 다음 공정으로 전달하는 방법이 있다. 본 연구에서는 이러한 목적으로 컨베이어와 3D 스캐너를 이용한 인라인 검사 시스템을 개발하였다.

3차원 형상 측정을 위한 스캐닝 방법은 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있다. 접촉식 방법으로는 탐촉자(probe)를 대상물에 직접 접촉시켜 측정하는 방법으로 대상물에 직접 접촉해야 하므로 물체

* Corresponding author. Tel.: +82-33-760-8743

E-mail address: sjsong@gwnu.ac.kr (Sung Jae Song).

에 변형이나 손상을 줄 수 있으며 컨베이어 인라인 공정에 적합하지 않다는 단점이 있다. 광학식 측정 방법은 비접촉으로 측정이 가능하고 측정 속도가 빠르고 정밀도가 높으며 또한 자동화가 용이하여 산업현장에서의 측정 및 검사 등에 큰 장점이 있다. 최근에는 3차원 형상의 광학식 측정 방법이 많이 개발되어 가공, 품질검사, 자동화 분야에서 활용되고 있다.

광학식 비접촉 방법은 여러 가지가 있는데^[1-6], 본 연구에서는 인라인 공정에 적합한 라인 레이저를 이용한 광삼각법(optical triangulation) 스캐닝 방법^[7-9]을 이용하여 포인트 클라우드(point cloud)를 획득하고 자동 스프레이나 치수검사에 사용할 수 있는 특징형상을 추출하는 시스템을 개발하였다.

2. 3D 스캐너 개발

2.1 레이저 영상획득

광삼각법을 수행하기 위한 기본적인 구성요소는 레이저 광원, 2차원 광학 카메라, 이송 장치이다. 레이저 광원은 측정 대상물에 선형 레이저를 조사하고 2차원 광학 카메라는 대상물에 비춰진 레이저 형상을 카메라의 영상평면에 캡처한다. 그리고 대상물을 컨베이어 벨트 등의 기구로 이송하여 연속된 영상을 얻는다. 이때 대상물 표면의 높이는 영상에 나타나는 영상 위치 값을 이용하여 기하학적으로 결정할 수 있다. 광삼각법을 이용한 3차원 스캐닝의 장점은 높은 정확성을 보장해 주고, 조명 조건과 표면 질감 효과 등에 상대적으로 안정하다는 것을 들 수 있다.

2.2 레이저 스트라이프 추출(stripe extraction)

물체에 레이저가 비춰진 영상에서 레이저는 일정한 두께를 갖는 곡선 모양을 이루게 되는데 이때 이 곡선의 중심선을 레이저 스트라이프라 하고 이를 추출하는 것은 비접촉식 측정의 정확성과 안정성을 결정하는 매우 중요한 과정이다. 그러나 표면이 매우 매끄럽게 가공된 금속 표면이어서 반사광이 강하거나 표면의 불균일 및 조명 영향에 의한 노이즈(noise)가 있는 등의 요인으로 정확하

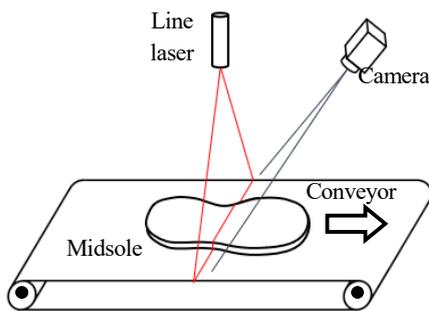


Fig. 1 Schematic diagram of laser triangulation

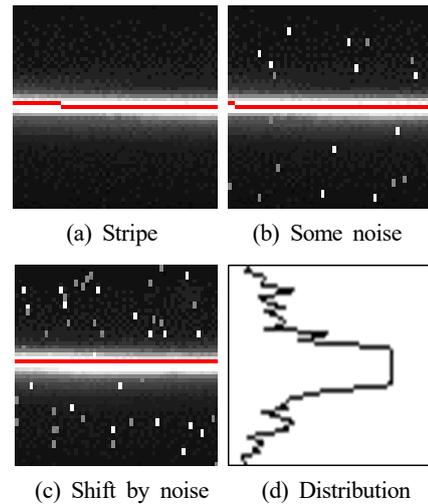


Fig. 2 Center curve and intensity distribution

고 안정적으로 밝기의 중심선을 추출하는 것은 쉽지 않은 작업이다. 특히 레이저가 조사면에 수직이 아니면 밝기 분포가 가우시 분포(gaussian distribution)를 따르지 않고 왜곡되어 레이저 스트라이프의 중심을 찾는 것이 더욱 어려워는데 최근에는 광학기술의 발전과 더불어 연속균등분포(uniformly distribution)에 가까운 레이저 광원이 개발되어 밝기의 중심 찾는 작업과 측정의 정확도가 많이 개선되었다^[11].

다음 Fig. 2(d)는 영상의 세로선(column)에 대한 조도(intensity) 연속균등분포의 예를 보여준다. 이의 단순 무게중심(mass center)을 구하면 해당 세로선의 의미있는 스트라이프 구성점을 얻게 되는데 이를 가로로 이어나 가면 (a)처럼 스트라이프가 완성된다. 하지만 노이즈가 있으면 오차가 발생한다. 그림의 (b)는 노이즈에 의해 약간 왜곡된 경우이다. 그리고 (c)는 비교적 많은 노이즈에 의해 스트라이프에 확인한 오차가 발생했음을 보여준다. 실제의 경우에는 레이저 선이 끊기는 경우도 발생하는데 이때는 스트라이프 추출이 더욱 어려워지게 되어 정확한 형상 구성을 위해서는 보다 포괄적인 대책이 필요하다.

밝기의 중심선을 추출하기 위하여 여러 가지 방법들이 제안되었다^[7-10]. 이들 방법들은 각각의 장단점을 가지고 있고 이를 비교한 연구도 있다^[10]. 비교된 방법은 4가지인데 각각 Steger의 방법^[7], GGM방법^[8], UM(CM)방법^[9], 그리고 IGGM방법^[10]이다. 이들을 연산 시간이 긴 순서로 나열하면 Steger, IGGM, CM, GGM이 된다. 정밀도의 순서는 소요하는 시간 순과 같다. 하지만 정밀도를 조금 올리기 위해 계산시간은 크게 늘어나는 양상을 보이므로 용도에 맞는 적절한 선택을 필요로 한다. 특히 Steger의 방법은 비교적 단순한 영상 1개를 처리하는데 대략 2~3초를 필요로 하는데 하나의 물체에 대해 대략 200~250장의 영상을 실시간으로 처리해야 하는 본 연구의 인라인 시스템에는 적용하기 불가능하다. 본

연구에서는 산업현장의 인라인 작업 속도에 대응하는 계산시간과 정확도를 종합적으로 검토하여 CM(center of mass)^[9] 방법을 채택하였다.

CM 방법은 이미지 열(image column)을 서로 독립적으로 다룬다. 우선 각 이미지 열에서 가장 밝은 점(Max 점)을 찾는다. 찾은 밝은 점 주변의 아래 위 일정 범위(윈도우 W)에서 밝기와 위치에 대한 무게중심을 찾아 CM로 삼는다. 그런데 가장 밝은 점이 배경에 비해 현저히 밝아 그 차이가 임계값(T)을 넘을 때만 CM을 채택하고 그렇지 않을 때는 CM이 없는 것으로 한다. 이를 위해 윈도우 W 외부의 영역에서 가장 밝은 점의 밝기와 Max 점의 밝기의 차이가 임계값 T보다 큰지 검사한다. 이와 같이 하면 레이저 영상에서 먼 부분의 영향을 제거하고 흐릿한 레이저와 노이즈를 구분 못하는 현상을 방지할 수 있다. 이제 i 열에서 추출점의 위치 P^i 는 다음 식으로 구할 수 있다.

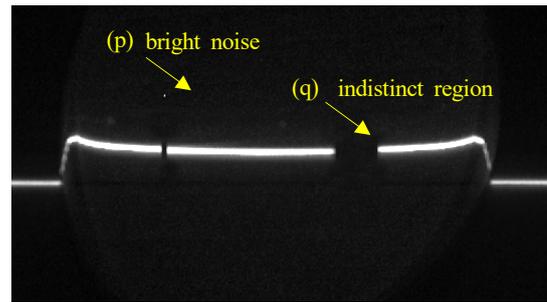
$$P^i = \begin{cases} CM^i & \text{if } (I_{\max}^i - B^i) > T \\ None & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$CM^i = \frac{\sum_{j=j_{\max}-W/2}^{j_{\max}+W/2} (I^{i,j} \cdot j)}{\sum_{j=j_{\max}-W/2}^{j_{\max}+W/2} I^{i,j}} \quad (2)$$

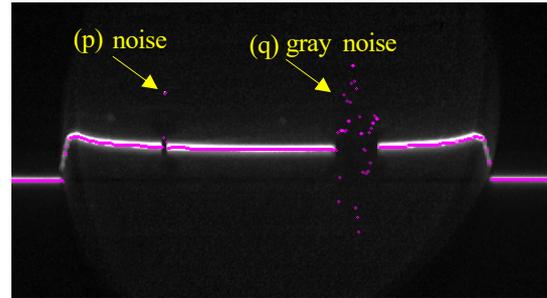
이때 CM^i 는 i 열에서 윈도우 W 내부에서의 무게중심이고, I_{\max}^i 는 i 열에서 가장 밝은 점의 밝기이며 j_{\max} 는 i 열에서 가장 밝은 점의 행 좌표이다. B^i 는 i 열에서 윈도우 W에 속하지 않은 점들 중 가장 밝은 점의 밝기이고, $I^{i,j}$ 는 i 열 j 행에서 픽셀의 밝기 값이다. W는 가장 밝은 점 주변의 일정 범위를 나타내고 T는 임계값을 나타낸다.

Fig. 3(a)는 카메라가 획득한 원영상이고 Fig. 3(b)는 각 열에서 가장 밝은 점을 찾은 결과이다. 그림의 (p)에는 원치 않는 밝은 점이 발생하였고 (q)에는 레이저가 의도와 달리 끊겨 부근에 흐릿한 노이즈가 많이 나타났다. Fig. 3의 (c)는 CM을 구한 결과인데 (p) 부분의 밝은 점은 CM으로 인정되어 작은 조각을 형성하였고 (q) 부분의 노이즈는 주변에 비해 현저히 밝지 않으므로 식 (1)에 의해 제거되어 불연속 상태가 되었다.

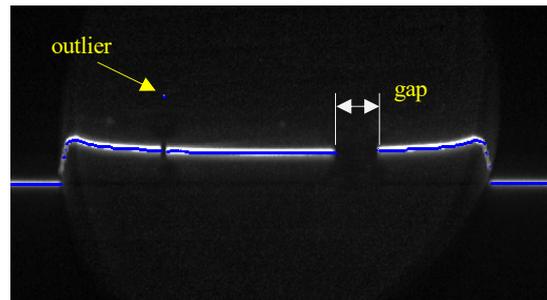
이제 (p)와 같이 주변으로부터 떨어진 이상점(outlier)은 대부분 작은 조각이므로 임계값보다 길이가 작으면 제거하여 공백(gap)으로 만든다. 따라서 이제 이상점 (p)가 제거된 공백과, 원 영상에서 흐릿했기 때문에 발생한 (q)의 공백이 생겼다. 이러한 공백은 주변의 형상을 반영하는 부드러운 곡선으로 채워질 수 있는데 이의 최종 결과가 Fig. 3(d)에 보여지고 있다. 이러한 채우기 과정은 다음



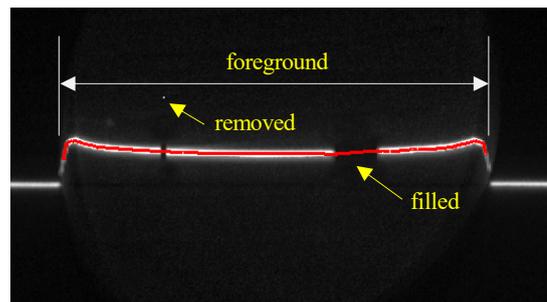
(a) Original image



(b) Max intensity



(c) Center of mass by column



(d) Final stripe

Fig. 3 Laser stripe extraction

과 같이 진행된다.

(단계 1) 공백(gap)이 아닌 추출점 중에서 물체 영역(foreground)에 해당하는 CM의 영역만 대상으로 삼는다. 물체 부분은 배경 레이저 영상보다 위로 일정 높이 이상을 가지는 부분이다.

(단계 2) 물체 부분 CM 점들에서 등간격으로 점들을 정하여 이를 스플라인으로 근사한다. 여기서는 5개의 점으로부터 결정되는 Akima 스플라인을 사용하였다^[12].

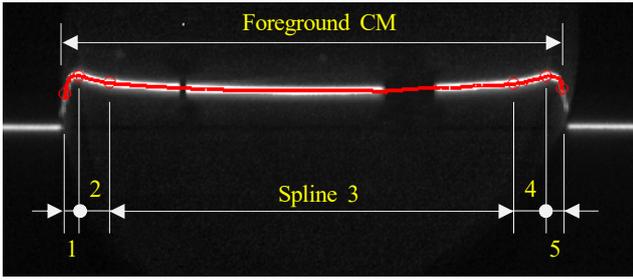


Fig. 4 Piecewise splines for laser stripe

- (단계 3) CM 점들과 근사된 스플라인의 최대 거리가 발생한 점을 찾는다. 그 거리가 공차 ϵ 보다 크면 그 점을 기준으로 2개의 영역으로 나눈다.
- (단계 4) 나뉘어진 영역에 대해 (단계 2), (단계 3)의 과정을 반복한다. (단계 3)에서 최대 거리가 공차 ϵ 보다 작으면 그 영역은 분할을 멈춘다.
- (단계 5) 결과로 여러 개의 연속된 Akima 스플라인이 얻어진다. 이는 최초에 1개의 스플라인이 분할되면서 더 가까이 근사된 것이므로 공백이 없다. 따라서 추출된 레이저 스트라이프는 연결된 여러 개의 스플라인들이 된다.

Fig. 4는 4개의 연속된 Akima 스플라인으로 구해진 레이저 스트라이프의 예를 보여준다. Akima 스플라인을 사용한 이유는 근사 곡선을 생성할 때 수치적 민감도를 줄이고 원치 않는 진동이 발생하는 것을 없애기 위함이다^[12].

2.3 이미지 평면 위의 점에 대응하는 물체 위의 점 좌표 계산

선형 레이저를 조사하여 레이저 스트라이프를 얻게 되면 이미지 내의 2차원 점 좌표 (u, v) 를 픽셀좌표계에 대해 알게 되는데 이로부터 이에 대응하는 물체 위의 3차원 점 좌표 (x, y, z) 를 얻어야 한다. 이때 2차원 영상 위의 위치는 서브 픽셀(sub pixel) 단위가 되고 이로부터 실제 3차원 공간의 정보가 보다 정확할 수 있다. 2차원 영상 평면 좌표로부터 3차원 공간 좌표를 결정할 때 영상에서 세로 방향의 변위 v 가 물체의 높이 z 와 관계된다는 기존의 연구^[11,13,14]가 있었다. 그러나 이들은 z 와 v 사이의 연관 관계에만 주목하고 x 는 u 에 비례하는 것으로 고려하였으나 실제로는 x 는 v 에도 영향을 받게 되므로 정확도가 결여되어 있다. 본 연구에서는 핀홀(pin hole) 카메라 모델을 기반으로 물체의 (x, z) 정보를 얻게 해주는 3차원 물체점 계산방법을 제안한다.

영상처리에서 보정은 내부(intrinsic) 파라미터 보정과 외부(extrinsic) 파라미터 보정으로 나뉜다. 본 연구에서는 산업 적용에서 보정의 부담을 경감하기 위해 저왜곡(low distortion) 렌즈를 적용하였는데 따라서 내부 파라미터 보정은 Lee^[15]와 같이 수행하면 되고 외부 파라미터 보정은 다음에 설명하는 핀홀 모델 기반의

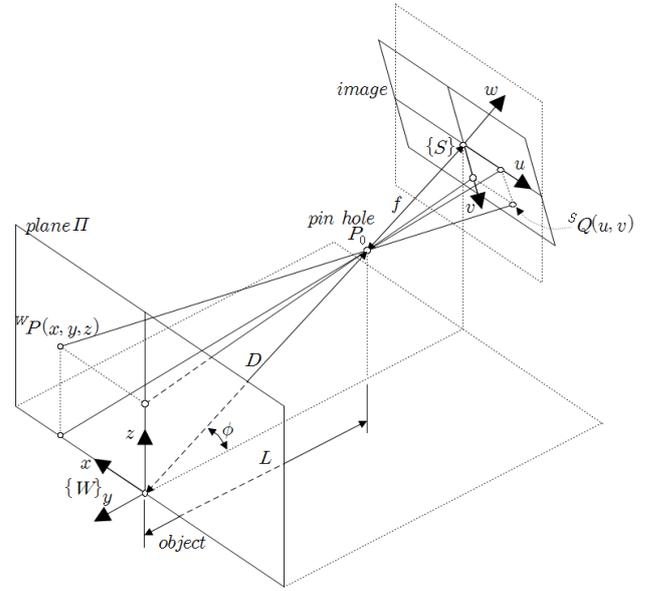


Fig. 5 Geometric relation between image plane and world plane

변환에 포함되게 된다. Fig. 5는 핀 홀 모델에서 기하학적 대응관계를 보여준다.

평면 $plane II$ 는 라인 레이저가 주사되는 평면이다. 레이저 스트라이프는 이 평면 내의 영상이 비춰진 것이므로 영상 위의 점 $Q(u, v)$ 와 핀홀 P_0 를 잇는 직선이 $plane II$ 와 교차하는 점을 찾으면 물체 위의 점 $P(x, y, z)$ 를 얻는 것이 된다. 여기서 $\{W\}$ 는 3차원 절대좌표계, $\{S\}$ 는 이미지 평면의 좌표계이다. D 는 핀홀에서 $\{W\}$ 의 원점까지의 거리이고, L 은 핀홀과 $plane II$ 사이의 거리이며 f 는 초점거리이다.

이미지 평면 위에 한 점 ${}^S Q(u, v)$ 는 이미지 평면 위의 점 (u, v) 를 좌표계 $\{S\}$ 를 기준으로 기술한 것이며 이는 핀홀을 통과하는 광선을 통하여 3차원 절대좌표계 ${}^W P(x, y, z)$ 에 대응한다. Q 점의 좌표를 좌표계 $\{W\}$ 에 대해 기술하는 ${}^W Q$ 는 다음 식을 이용해 얻을 수 있다.

$${}^W Q = {}^W T \cdot {}^S Q \quad (3)$$

이때 ${}^W T$ 는 좌표계 $\{W\}$ 에 대한 좌표계 $\{S\}$ 의 위치를 나타내는 동차변환행렬이다. 이제 ${}^W Q$ 와 핀홀을 연결하는 직선 $(\overrightarrow{QP_0})$ 과 $plane II$ 의 교점이 생기는데 이것이 물체 위의 점 ${}^W P(x, y, z)$ 이다. 이것은 약간의 기하학적 계산을 거쳐서 식 (4) 및 식 (5)와 같이 얻어지게 된다.

$$x = \frac{DL}{v\sqrt{D^2 - L^2} + fL} u \quad (4)$$

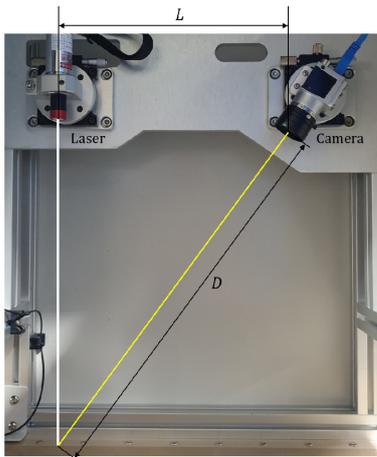


Fig. 6 Definition of D and L in machine hardware

$$z = \frac{D^2}{v\sqrt{D^2 - L^2} + fL} v \quad (5)$$

이 계산과정에서 식 (3)의 변환행렬 ${}^W_S T$ 는 기구와 카메라가 결정되면 변하지 않는 것이므로 미리 한번만 계산해 놓고 영상 위의 많은 점 ${}^S Q_i$ 에 대해 계산하여 효율을 높일 수 있다. 한편 물체 점의 y 좌표는 물체와 라인레이저의 상대 위치로 결정되므로 물체를 이송하는 컨베이어의 변위로부터 얻을 수 있다.

2.4 기구 치수의 추정

식 (4)와 식 (5)를 이용하여 이미지 평면 위의 점 (u, v) 로부터 물체 위의 점 $P(x, z)$ 를 계산할 수 있게 되었다. 그러나 이를 위해서는 핀홀과 물체 원점 사이의 거리 D 와, 핀홀과 레이저까지의 거리 L 이 필요하다. 이들의 정의는 Fig. 5에 표시되어 있으며 실물 기구에서는 Fig. 6에 보인 것과 같다. 설계단계에서 이들의 의도 값은 물론 정해지지만 조립 후 정확한 값을 측정하는 것은 그림에서 보듯 매우 곤란하다^[16,17]. 따라서 소프트웨어에 의해 이를 해결하는 방법을 개발하였다.

식 (4)와 식 (5)는 (u, v) 로부터 (x, z) 를 계산하는 식이지만 알고 있는 (x, z) 에 대해 (u, v) 를 얻을 수 있다면 D 와 L 을 미지수로 삼아 비선형 연립방정식을 풀어 그 값을 구할 수 있다. 변수가 2개이므로 이론적으로는 단 1개 세트의 $((u, v), (x, z))$ 만 있어도 D 와 L 을 구할 수 있다. 하지만 정확성을 높이기 위해 여러 개의 데이터를 획득하여 최적해를 구하는 방법을 사용한다. Fig. 7의 (a)는 이러한 목적으로 고안된 계단형 지그이다. 지그는 10개의 계단을 갖고 있으며 수평 계단면 양쪽은 경사진 형태이다. 따라서 수평 계단면은 좌우 모서리(edge)에 의해 경계 지워지며 영상에서 레이저는 Fig. 7의 (c)와 같이 3개의 꺾인 직선으로 보인다. 우리는 각 계단 수평면의 높이와 너비를 알고 있으므로

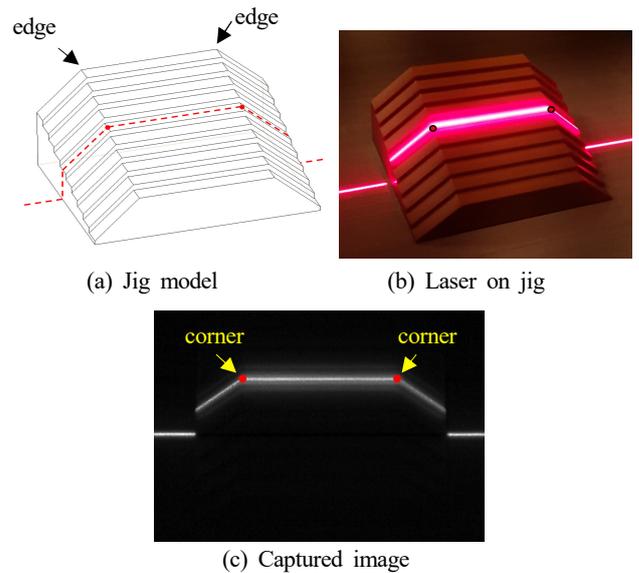


Fig. 7 Step jig for calibration

코너점의 물체 좌표를 알고 있고 영상에서 코너점의 좌표를 쉽게 인식할 수 있으므로 지그의 각 계단을 측정하면 모두 20개의 데이터 $\{(u_i, v_i), (x_i, z_i)\}$ 를 얻을 수 있다. 영상에서 코너점은 3개의 구간을 직선으로 근사한 뒤 이의 교점을 구하는 방식을 써서 국부적인 노이즈의 영향을 최소화 한다.

얻어진 데이터를 식 (4)를 변형한 식 (6)과 식 (5)가 변형된 식 (7)에 대입하면 아래와 같다.

$$F_{x,i}(D, L) = x_i f L + x_i v \sqrt{D^2 - L^2} - D L u_i \quad (6)$$

$(i = 0, 1, \dots, 9)$

$$F_{z,i}(D, L) = z_i f L + z_i v \sqrt{D^2 - L^2} - D^2 v_i \quad (7)$$

$(i = 0, 1, \dots, 9)$

이의 최적해 (D, L) 은 비선형 연립방정식에 대한 최소자승 근사법(least square method)을 사용하여 구한다. 이 과정은 지그를 컨베이어로 자동 이송하는 기능을 포함하는 캘리브레이션 프로그램으로 구현되어 원터치로 2~3분 이내에 수행된다.

3. 포인트 클라우드의 획득 및 특징형상 추출

3.1 포인트 클라우드(point cloud) 및 특징형상의 정의

앞서의 과정을 구현한 컨베이어 제어 및 영상 처리 프로그램이 개발되었고 이를 통해 아디다스 RUN70S 모델의 러닝화 중창에 대해 획득한 포인트 클라우드가 Fig. 8에 있다. 중창을 y 방향으로 이송하면서 레이저 스트라이프를 얻어내므로 여기서 추출된 점들이 같은 y 값을 갖는 띠 모양을 이루는 것을 볼 수 있다. 필요

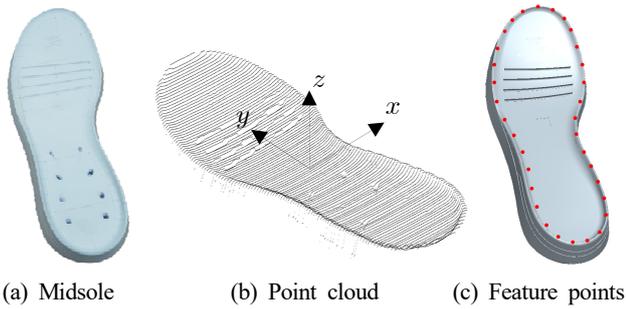


Fig. 8 Adidas RUN70S midsole and point cloud

해상도를 얻기 위해 띠와 띠 사이의 간격을 2 mm로 정했다. 컨베이어 속도는 생산성과 직결하므로 매우 중요한데 이를 100 mm/s로 하였고 따라서 이미지 캡처는 0.02초 간격으로 이루어진다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 한 장의 영상을 처리해서 3차원 점 띠를 얻어내는데 수 ms 이내의 시간이 소요되어 인라인 장비에서의 실시간 3D 스캐닝이 원활히 이루어짐을 확인할 수 있었다. 특히 이미지 큐(queue)를 중첩에 두고 영상 획득과 영상 처리가 서로 다른 쓰레드에서 수행되도록 하여 안정성을 확보한 결과 한 대의 산업용 PC로 공정제어 및 GUI, 모션 제어, 영상 획득, 영상 처리를 타이밍에 맞게 무난히 수행하였다. 한편 중창이 300 mm 정도 되므로 150장 내외의 영상을 처리한다.

포인트 클라우드를 얻었다더라도 이는 점들의 순서 없는 집합에 불과하므로 여기서 의미 있는 형상 정보를 얻어내야 하는데 이를 특징형상(feature)이라 한다. 특징형상은 대상물의 형태와 목표하는 작업에 따라 달리 정하게 되는데 본 연구의 경우 스프레이 작업의 자동화 혹은 치수 자동 검사가 목표이므로 테두리 둔덕을 따라가며 적당한 간격으로 얻어지는 점이 될 것이다. 이의 예가 Fig. 8의 (c)에 표시되어 있다. 이는 적절한 단면에서 주변에 비해 높은 점이므로 최고점(top point)이라 부를 수 있다. 따라서 우리 문제에서의 특징 형상을 최고점으로 정의하기로 한다.

3.2 포인트 클라우드에서 최고점 추출

본 연구에서 얻어진 포인트 클라우드는 같은 y 값을 갖는 점 띠들의 연속이므로 각 점 띠를 좌우 둘로 나누어 각각에서 가장 높은 점을 찾으면 비교적 간단하게 최고점을 추출할 수 있다. Fig. 9는 이렇게 얻어진 최고점들과 이를 직선으로 이은 탑 라인(top line)을 보여준다.

하지만 라인 레이저로 스캔할 때 레이저에 맞힌 형상만 인식할 뿐 라인 사이는 영상을 획득할 수 없으므로 인해 문제가 발생할 수 있는데 Fig. 10은 이를 보여준다. 그림에서 레이저 라인이 8개가 있고 라인 간의 간격이 7개가 있다. 이때 간격 3의 내부에 있는 형상은 앞 위의 스캔 형상으로부터 충분히 예측 가능한 변화이므

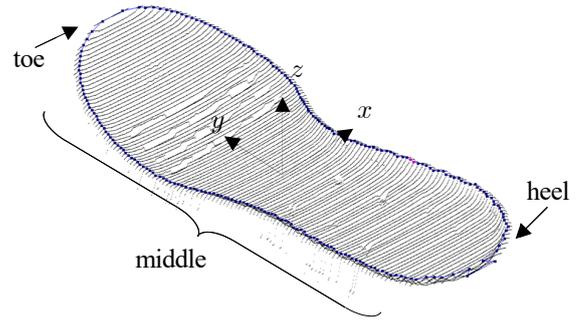


Fig. 9 Top point and top line

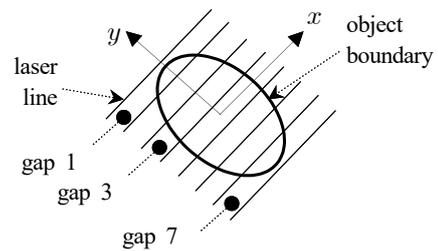


Fig. 10 Laser lines and object boundary

로 특이점이 없어 별다른 문제가 되지 않는다. 하지만 간격 1과 간격 7에 포함되는 물체 형상은 매우 큰 변화를 가지고 있어 이를 놓침으로 의미 있는 정보를 읽지 못하는 상황이 발생한다.

중창을 스캔했을 때도 이러한 현상이 나타난다. 미들(middle) 부분에서는 물체 테두리와 레이저 라인이 가로질러 비교적 정확한 테두리 형상을 얻을 수 있는 반면 앞꿈치(toe)와 뒷꿈치(heel) 부분에서는 테두리 형상이 깨끗하게 읽히지 않는 문제가 발생한다. 이를 해결하는 근본적인 대책은 레이저 사이의 간격을 매우 촘촘하게 만드는 것인데 그러려면 고속, 고가의 전문 스캐너를 채택해야 하고 이는 경제성이 매우 중요한 신발 산업에 바람직하지 않다.

Fig. 11에는 앞꿈치와 뒷꿈치에서의 최고점을 확대해 나타내었다. Fig. 11(a)의 앞꿈치에서는 스캔된 선이 별로 없어 최고점이 성기게 되었다. 심한 경우에는 아예 손실되기도 한다. Fig. 11(b)에 보여준 뒷꿈치에서는 최고점에 꼬임이 발생하였다. 스캔선이 테두리와 어긋나게 만나므로 높이가 현격히 차이 나지 않아 발생하는 문제이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 앞꿈치와 뒷꿈치에서는 x 축에 직각인 평면을 최고점을 찾기 위한 교차 도구로 사용한다. 즉 미들에서는 점 띠 내에서 높은 점을 찾고 앞꿈치나 뒷꿈치에서는 x 에 수직인 평면을 생각하여 이것과 점 띠가 만드는 곡선과의 교점을 만든다. 그러면 여러 개의 교차점이 생기는데 이 중에 가장 최고점을 선택한다. Fig. 12 및 Fig. 13은 이 과정을 보여준다. 이 예의 앞꿈치에서는 실물을 표현하기에 매우 부족하거나 아예 소실되기도 하는 점들이 조밀한 간격으로 보충되는 결과를 볼 수 있고 뒷꿈치에

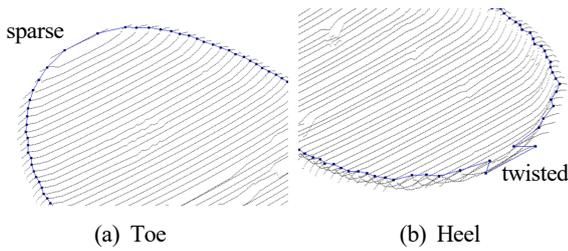


Fig. 11 Top points in toe and heel

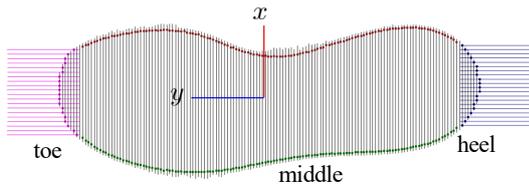


Fig. 12 Intersection points at toe and heel

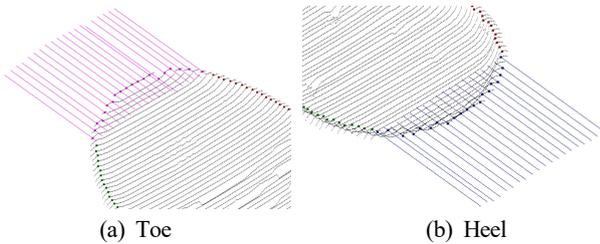


Fig. 13 Top points at toe and heel

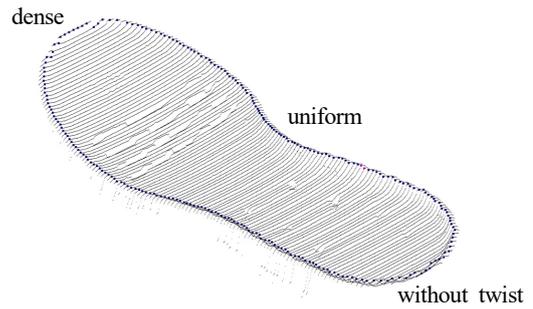


Fig. 14 Final top points

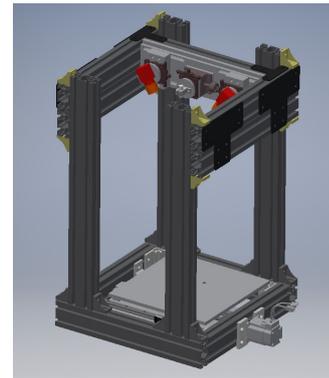


Fig. 15 Experimental machine

나타났던 비정상적인 꼬임이 사라지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 이렇게 얻어진 최종 최고점의 결과를 보여준다. 포인트 클라우드의 개수는 41075개 점으로 이루어져 있고 점 띠의 개수는 121개이며 최고점의 개수는 254개이다.

4. 결론

제안된 신발밑창 치수측정 비전검사 방법에 대한 실험과 평가는 실험실 내에서 이송 스테이지와 카메라 모듈을 만들어 산업용 PC로 실험하였다. 실험장비세트는 Fig. 15에 나타내었다.

실험에 사용된 카메라는 컴퓨터와 USB3.0으로 연결되며 1,280 × 1,024 화소를 가졌고 최대 203 fps 속도로 영상을 획득할 수 있다. 렌즈는 f=6.51의 저왜곡 렌즈이다. WD는 400 mm정도가 되게 하였고 FOV는 520 × 290 mm 정도가 되도록 하였으며 X-Y 해상도는 약 0.27 × 0.27 mm이다. 공정제어, GUI, 영상획득, 영상처리를 한 대의 산업용 PC에서 처리하도록 소프트웨어를 개발하였으며 언어는 C#을 사용하였다. 스테이지의 이동속도는 100 mm/s이다.

본 연구를 통해 납득할 만한 가격의 스캐닝 모듈을 구성해서 이것이 산업용도의 인라인 스캐닝에 적용될 수 있음을 보였다. 이를

위해 레이저 스트라이프 추출 소프트웨어를 개발하였으며, 이로부터 3차원 점을 계산하기 위한 수학적 모델을 제안하였다. 특히 기구 치수를 추정할 수 있는 효율적 지그 형상과 이를 이용한 계산 방법을 제시하여 간편하게 치수를 추정할 수 있는 방법을 모색하였다. 획득된 포인트 클라우드에서 의미 있는 특징형상을 추출하는 방법에 대해서도 논의하였다.

이상의 연구로 정확하고 효율적이면서 경제적인 인라인 스캐닝 시스템의 요소 기술을 성공적으로 확보하게 되었다. 향후 자동 스프레이 장비 혹은 자동 치수 검사 장비에 탑재하여 적용하는 연구가 후속되어야 한다.

후기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008473, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

References

[1] Yoo, H., Joo, J., 2015, Evaluation of the Moire Pattern in Accordance with LED Wavelength, Annual Conference of Korean Society of Mechanical Engineers, 1609-1611.

- [2] Baik, S. H., Park, S. K., 2005, Shape Measurement by Using Optical Triangulation, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 22 13-18.
- [3] Lee, J. Y., Kim, S. W., 1992, Design of a Non-contact Type Displacement Measurement System Based on Optical Triangulation Method, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 15 1030-1035.
- [4] Kyung, S. R., Kim, J. B., Jeon, B. R., Kim, S. H., 2015, 3D Scanning Using Fringe Pattern Projection, Autumn Annual Conference of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 120.
- [5] Lee, M. G., Kim, J. W., Jo, S. E., 2013, Proper Usage and Limitation of 3D Time of Flight Camera, Spring Annual Conference of the Korean Society for Precision Engineering, 177-178.
- [6] Lee, S. Y., Kang, H. S., Cha, M. C., et.al., 2018, A Study of Nut Loosening Inspection System using a Vision Machine Method, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 27:1 35-40, <https://doi.org/10.7735/ksmt.2018.27.1.35>.
- [7] Steger, C., 1998, An Unbiased Detector of Curvilinear Structures, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 20:2 113-125, <https://doi.org/10.1109/34.659930>.
- [8] Subbarao, M., Choi, T., 1995, Accurate Recovery of Three-dimensional Shape From Image Focus, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 17:3 266-274, <https://doi.org/10.1109/34.368191>.
- [9] Usamentiaga, R., Molleda, J., García, D. F., 2012, Fast and Robust Laser Stripe Extraction for 3D Reconstruction in Industrial Environments, *Mach. Vis. Appl.*, 23:1 179-196, <https://doi.org/10.1007/s00138-010-0288-6>.
- [10] Li, Y., Zhou, J., Huang, F., Liu, L., 2017, Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method, *Sensors*, 17:4 814, <https://doi.org/10.3390/s17040814>.
- [11] Sun, Q., Chen, J., Li, C., 2015, A Robust Method to Extract a Laser Stripe Centre Based on Grey Level Moment, *Optics and Lasers in Engineering*, 67 122-127, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.11.007>.
- [12] Akima, H., 1970, A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures, *J. ACM*, 17:4 589-602, <https://doi.org/10.1145/321607.321609>.
- [13] Fisher, R. B., Naidu, D. K., 1996, A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection, *Image Technology*, 385-404, https://doi.org/10.1007/978-3-642-58288-2_15.
- [14] Chen, Y. Y., Chang, R. S., Jwo, K. W., Hsu, C. C., Tsao, C. P., 2015, A Non-Contact Pulse Automatic Positioning Measurement System for Traditional Chinese Medicine, *Sensors*, 15:5 9899-9914, <https://doi.org/10.3390/s150509899>.
- [15] Lee, B. Y., Nguyen, H. C., 2015, Development of Laser-vision System for Three-dimensional Circle Detection and Radius Measurement, *Optik*, 126:24 5412-5419, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.131>.
- [16] Nguyen, H. C., Kim, D. J., Lee, B. R., 2017, Study on the 3D Assembly Inspection of Two-Step Variable Valve Lift Modules Using Laser-Vision Technology, *Journal of mechanical science and technology*, 41:10 949-957, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.10.949>.
- [17] Ko, Y. J., Lee, S. Y., Lee, J. O., 2016, Development of 3D Scanner Based on Laser Structured-light Image, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 22:3 186-191, <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.15.0204>.

	<p>Sung Hwan Kim Professor in the department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Manufacturing system and machine vision. E-mail: sunghwan@seoultech.ac.kr</p>
	<p>Yuna Lee Graduate student in the department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. Her research interest is machine vision and deep learning E-mail: lyn2344@seoultech.ac.kr</p>
	<p>Sung Jae Song Professor in the department of Mechanical Engineering, Gangneung- Wonju National University. His research interest is Mechanism design. E-mail: sjsong@gwnu.ac.kr</p>