

거울 및 단일 카메라를 이용한 3차원 발 스캐너

정성엽*, 박상근**

A 3D Foot Scanner Using Mirrors and Single Camera

Seong Youb Chung* and Sang Kun Park**

ABSTRACT

A structured beam laser is often used to scan object and make 3D model. Multiple cameras are inevitable to see occluded areas, which is the main reason of the high price of the scanner. In this paper, a low cost 3D foot scanner is developed using one camera and two mirrors. The camera and two mirrors are located below and above the foot, respectively. Occluded area, which is the top of the foot, is reflected by the mirrors. Then the camera measures 3D point data of the bottom and top of the foot at the same time. Then, the whole foot model is reconstructed after symmetrical transformation of the data reflected by mirrors. The reliability of the scan data depends on the accuracy of the parameters between the camera and the laser. A calibration method is also proposed and verified by experiments. The results of the experiments show that the worst errors of the system are 2 mm along x, y, and z directions.

Key words : 3D reconstruction, Calibration, Foot scanner, Structured beam laser

1. 서 론

맞춤형 신발을 제작하기 위해서는 발의 모형이 필요하며, 따라서 석고를 이용하여 발의 틀을 제작하고 플라스틱 물질을 넣어 발의 모형을 만들게 된다. 이렇게 만들어진 발의 모형을 구두골(shoelast)이라고 하며, 맞춤형 신발을 제작할 때는 이와 같은 방법이 널리 이용되고 있다. 그러나 구두골은 제작하는 데 있어 시간 및 비용이 과다하게 발생하며 고객에게 불편을 야기할 수 있는 문제점이 있다. 따라서 최근에는 3차원 스캐너를 이용하여 발의 형상을 측정하여 CAD 모델을 만들고 3차원 성형기를 통해 구두골을 제작하는 방법으로 점차 변화되고 있다.

일반적으로 물체의 3차원 데이터를 측정하기 위한 방법은 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있다¹⁾. 접촉식 방법은 위치를 정확히 알 수 있는 탐침(probe)을 이용하여 대상 물체에 직접 접촉하여 탐침의 위치를

측정해 표면의 위치를 알아내는 방법이다. 이 방법은 측정 정밀도 및 정확도는 매우 높으나 표면이 변형되는 물체의 측정은 어려우며, 또한 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 비접촉식 방법은 물체의 반사 또는 투과되는 빛을 측정하여 3차원 데이터를 얻는 방법으로 초음파, CT, 광학식 방법 등으로 나눌 수 있으며, 한 번에 많은 데이터를 측정할 수 있는 장점이 있다. 발과 같은 인체의 측정은 많은 데이터의 측정이 필요하고, 또한 인체의 표면은 접촉 시 변형될 수 있기 때문에 접촉식 보다는 비접촉식 방법이 유리하다. 비접촉식 방법 중 광학식 방법은 사용 방법의 편의성으로 인해 인체 측정과 같은 분야에서 널리 사용된다. 본 논문에서는 발 측정을 위해 광학식 방법 중 구조화된 빔 레이저를 이용한 측정 방법과 이에 따른 캘리브레이션 방법을 제안하고자 한다.

일반적으로 사람의 발은 서있는 상태에서 측정한다. 이것은 봄무게에 의해 변형된 발의 모습을 측정하기 위함이다. 그러나 카메라는 시야각이 제한되어 있기 때문에 한쪽 면밖에는 측정할 수 없다. 따라서 발의 전체를 측정하기 위해서는 여러 대의 카메라를 사용하는 것이 일반적이다. Infoot²⁾은 대표적인 3D 발 스캐너로 8개의 CCD 카메라와 4개의 빔 레이저를 이

*비회원, 충주대학교 기계공학과

**교신저자, 정회원, 충주대학교 기계공학과

- 논문부고일: 2010. 10. 07

- 논문수정일: 2010. 12. 21

- 심사완료일: 2010. 12. 27

용하여 300 mm 정도 크기의 발을 10초의 시간에 ± 1 mm 오차로 측정할 수 있다. 리투아니아의 ElinvisionTM 사는 Infoot과 같은 8개의 카메라와 4개의 레이저 빔을 이용하여 4-60초의 시간에 ± 0.25 mm 오차로 발을 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. Precision 3D 사의 FotoScanTM 3차원 발 스캐너는 레이저 빔을 사용하지 않고, 5대의 카메라를 이용하여 4초의 시간에 발의 색감까지 측정할 수 있는 장치를 개발하였다.

그러나 기존의 3차원 발 스캐너는 여러 대의 카메라를 이용하기 때문에 발전체 형상의 측정 정도는 높지만 높은 가격으로 인해 널리 보급되지 않고 있다. 이와 같이 여러 면을 동시에 측정하기 위해서 다수의 카메라를 사용하여야 하지만, 거울을 이용하면 카메라를 적게 사용하면서도 여러 카메라를 사용하는 것과 같은 효과를 볼 수 있다^[5-7]. Fig. 1은 거울을 이용하여 발의 밑면과 측면을 하나의 카메라를 이용하여 동시에 측정하는 모습을 나타낸 것으로 세 대의 카메라를 사용한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

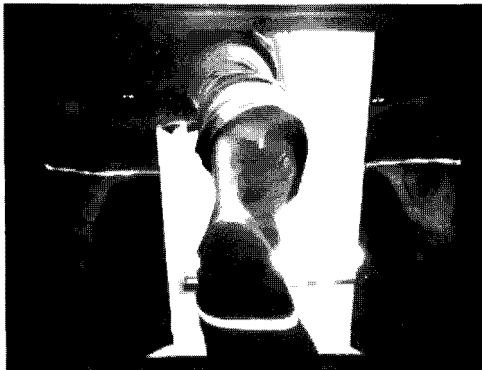


Fig. 1. Occluded areas projected by mirrors.

본 연구에서는 저가형 보급형 발 스캐너 개발을 목적으로 하나의 카메라와 거울을 이용하여 발의 3차원 형상을 측정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 구조화 빔 레이저 스캐너 모델링

2.1 핀홀 카메라 모델

Fig. 2는 카메라의 모델을 나타내는 것으로 카메라 외부의 물체 P 는 핀홀(Pinhole)을 지나 카메라의 망막(Physical Retina)에 p 점으로 투영된다. 일반적으로 렌즈에 굴절이 있을 경우에 핀홀 모델을 적용하기는 어려우나 본 논문에서는 수식의 간소화를 위하여 비

굴절 렌즈를 사용하여 핀홀 모델을 적용할 수 있었다. CCD 카메라에서 CCD 평면이 카메라의 망막의 역할을 한다. 그림에서 보는 바와 같이 핀홀 카메라 모델은 빛이 핀홀을 통과하여 CCD 평면에 투영되기 때문에 삼각형 PPO 와 삼각형 C_pO 가 닮은꼴이라는 특징을 가지게 된다.

픽셀 좌표는 이미지의 왼쪽 상단 또는 왼쪽 하단이 원점이기 때문에 광축이 CCD 평면과 만나는 점 C_p 가 원점이 되도록 좌표 변환을 해줘야 하며, 실제 픽셀의 크기를 곱해주어 길이에 해당하는 좌표를 얻게 된다. 픽셀의 u 축과 v 축의 크기를 d_u 와 d_v 라고 하고, 픽셀 좌표의 센터인 C_0 의 픽셀좌표를 u_0, v_0 라고 하면 식 (1)과 (2)와 같이 픽셀 좌표와 물체의 좌표 간의 관계를 구할 수 있다^[8]. 여기서 f 는 카메라의 초점 거리로 선분 OC_0 의 길이를 나타낸다.

$$\frac{d_u(u - u_0)}{f} = \frac{x}{z} \quad (1)$$

$$\frac{d_v(v - v_0)}{f} = \frac{y}{z} \quad (2)$$

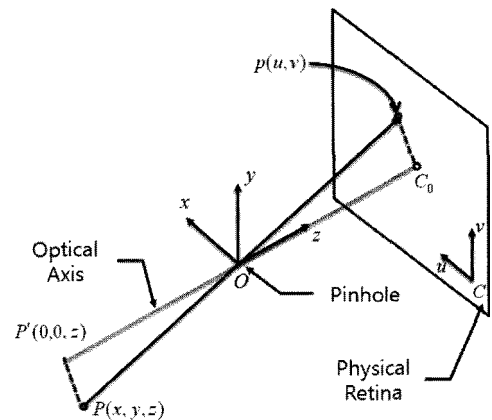


Fig. 2. Pinhole camera model^[8].

α 를 f/d_u 라 하고 β 를 f/d_v 라 하면, 식 (1)과 (2)는 각각 식 (3)과 (4)로 바꿀 수 있다. 이것은 카메라 캘리브레이션(calibration) 시에 파라미터의 개수를 줄이기 위함이다.

$$u = \alpha \frac{x}{z} + u_0 \quad (3)$$

$$v = \beta \frac{y}{z} + v_0 \quad (4)$$

일반적으로 카메라의 CCD는 가공 상의 오차로 인

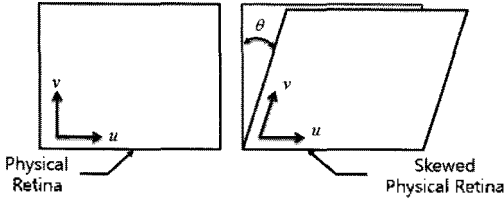


Fig. 3. Skewness of physical retina.

해 Fig. 3과 같은 뒤틀림이 생길 수 있다. CCD의 뒤틀림 각을 θ 라고 하면 식 (3)과 (4)는 각각 식 (5)와 (6)로 바뀌게 된다^[8]. 식 (7)과 (8)은 x 와 y 를 u 와 v 의 함수 형태로 나타낸 것이다.

$$u = \alpha \frac{x}{z} - \alpha \tan \theta \frac{y}{z} + u_0 \tag{5}$$

$$v = \frac{\beta}{\cos \theta} \frac{y}{z} + v_0 \tag{6}$$

$$x = z \left(\frac{u - u_0}{\alpha} + \frac{v - v_0}{\beta} \sin \theta \right) \tag{7}$$

$$y = z \left(\frac{v - v_0}{\beta} \cos \theta \right) \tag{8}$$

2.2 구조화 빔 레이저 모델

카메라는 2차원 데이터만을 측정할 수 있으나, 측정하는 평면을 알고 있다면 3차원 좌표로 변환이 가능하다. Fig. 4는 레이저 평면에 투영된 물체가 카메라 CCD에 상이 투영되는 과정을 보여준다. 그림에서 물체의 높낮이에 따라서 CCD 평면의 v 좌표가 바뀌게 됨을 알 수 있다.

만일, 레이저 평면과 카메라를 동시에 같은 속도로 이동하면, 물체 단면의 표면이 연속적으로 측정되고, 따라서 측정 단면의 2차원 데이터 값을 누적시키면 물체 전체 표면의 3차원 데이터를 구할 수 있게 된다.

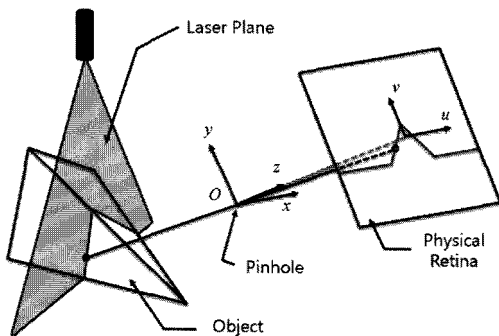


Fig. 4. Structured laser.

Fig. 5는 구조화 빔 레이저 모델로 측정점의 3차원 데이터를 구하는 과정을 나타낸다. 그림에서 $P_u(X, Y, Z)$ 는 기준 좌표계 O_u 에 대한 측정점의 좌표 값을 의미하며, $P(x, y, z)$ 는 편환 좌표계에 대한 좌표 값을 나타낸다. 그림에서 D 은 핀홀과 레이저 평면 간의 거리를 나타내며, θ_0 는 X 축에 대해 카메라의 광축이 기울어진 정도를 나타내는 각도이다. D 과 θ_0 는 측정 가능한 물체의 크기 및 측정 정밀도와 관련이 있는 파라미터로 측정하는 동안에는 변하지 않는다. 구조화 빔 레이저를 이용한 스캐너 설계 시 카메라의 위치와 방향을 결정하기 위해 두 파라미터는 중요한 설계 변수가 되며, 측정 범위 및 측정 정밀도와 관련된다.

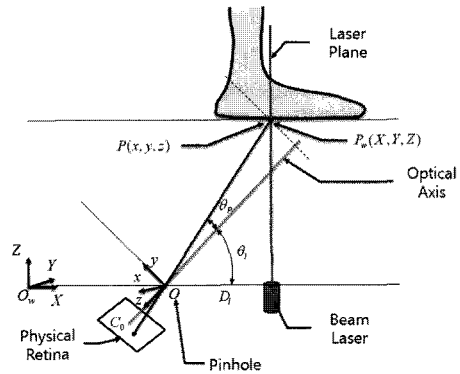


Fig. 5. Structured beam laser model for the proposed system.

만일 X - Z 평면에서 광축에 대해 측정점의 각도를 θ_p 라고 한다면, θ_p 는 이미지 좌표 값 u, v 를 이용하여 식 (9)과 같이 나타낼 수 있으며, Z 좌표는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{y}{z} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{v - v_0}{\beta} \cos \theta \right) \tag{9}$$

$$z = D_t \tan(\theta_t + \theta_p) = D_t \tan \left(\theta_t + \tan^{-1} \left(\frac{v - v_0}{\beta} \cos \theta \right) \right) \tag{10}$$

Y 좌표는 Fig. 5에서 보듯이 $-x$ 와 같으며, 이것은 식 (7)을 이용하여 전개하면 식 (11)과 같다. Z 좌표와 z 좌표 간의 관계는 식 (9)와 (10)을 이용하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, 이것을 이용해서 Y 좌표에 관해 정리하면 식 (13)과 같다.

$$Y = -x = -z \left(\frac{u - u_0}{\alpha} + \frac{v - v_0}{\beta} \sin \theta \right) \tag{11}$$

$$z = \sqrt{D_l^2 + Z^2} \cos\theta_p = \frac{D_l}{\cos\theta_l - \sin\theta_l \frac{v-v_0}{\beta} \cos\theta} \quad (12)$$

$$Y = \frac{D_l}{\cos\theta_l - \sin\theta_l \frac{v-v_0}{\beta} \cos\theta} + \left(\frac{u-u_0}{\alpha} + \frac{v-v_0}{\beta} \sin\theta \right) \quad (13)$$

물체의 X 좌표의 경우에 레이저 평면의 위치가 결정되면 그 평면에서 측정된 모든 점은 X 좌표 값은 동일하다. 본 연구에서는 X 축 방향으로 일정한 간격 ΔX 로 카메라와 레이저를 동시에 이동하여 측정을 하기 때문에 X 좌표는 식 (14)로 구해진다. 식 (14)에서 k 는 3차원 레이저 스캐너의 측정 시작점으로부터 측정 횟수를 의미한다. 예를 들어 ΔX 를 1 mm라고 하면, $k=10$ 에서 측정된 모든 점의 좌표는 (10, Y , Z)를 가지게 된다.

$$X = \Delta X \times k \quad (14)$$

3. 3차원 발 스캐너

3.1 시스템 파라미터 결정

Infoot 제품의 경우 측정 속도가 10초로서 사람이 정지동작을 유지하는 데 있어 다소 불편을 줄 수 있다. 본 연구는 이러한 불편을 최소화하기 위해 관련 설계 파라미터를 결정하였다. 카메라는 이미지를 얻는 방식에 따라 Rolling 스캔 방식과 Progressive 스캔 방식이 있다. 일반적으로 스캐너는 이동하며 정지 이미지를 얻어야 하기 때문에 후자의 방식을 사용해야 한다. 또한 빠른 측정 속도를 위해 초당 30장 이상의 이미지를 획득할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Table 1과 같은 측정 스펙을 가지는 뷰런 (Viewrun)의 카메라를 이용하였다.

Table 1. Specification of CCD Camera^[9]

| Parameter | Specification |
|--------------|--|
| Camera Model | DMK 21BG04.H |
| Scan Type | Progressive scan |
| CCD Size | 1/4" |
| Resolution | H: 640, V: 480 |
| Pixel size | d_u : 5.6 μ m, d_v : 5.6 μ m |
| Focal Length | f : 4.61 mm |

측정 분해능은 2.2절에서 언급한 것과 같이 카메라와 레이저 간의 거리 D 와 카메라와 레이저 간의 각도

θ 에 의하여 결정된다. 또한 대상 물체의 Z 방향의 위치가 높아질수록 측정 분해능이 나빠지기 때문에 측정 대상까지의 높이를 700 mm 이하로 제한하였다. 식 (15)와 식 (16)는 두 파라미터와 측정분해능 간의 관계를 나타내는 것이다. 이 식을 보면 D_l 와 θ_l 를 작게 할수록 분해능이 좋아지나 시야각이 좁아지기 때문에 발의 전체 모습을 찍을 수가 없게 된다. 본 논문에서는 발의 전체 모습이 카메라 영상에 나오도록 유지한 후, Z_{\max} 를 700 mm로 고정하고, 두 파라미터를 값을 변화시켜 가능한 정밀한 측정분해능을 갖도록 그 값을 구하였다. 이 결과 파라미터 D_l 와 θ_l 는 각각 290 mm와 62도로 결정하였으며, 식 (15)와 (16)을 이용하여 분해능을 계산하면 Y 방향의 분해능은 0.92 mm이며 Z 방향의 분해능은 1.96 mm이다.

$$\text{Resolution}_Y = \frac{\sqrt{(D_l^2 + Z_{\max}^2)} \times d_u}{f} = \frac{\sqrt{(D_l^2 + Z_{\max}^2)}}{\alpha} \quad (15)$$

$$\text{Resolution}_Z = \frac{\sqrt{(D_l^2 + Z_{\max}^2)} \times d_v}{f \cos(\theta_l)} = \frac{\sqrt{(D_l^2 + Z_{\max}^2)}}{\beta \cos(\theta_l)} \quad (16)$$

3.2 발 스캐너 프로토타입

앞에서 설명한 바와 같이 본 논문에서는 하나의 카메라와 거울을 이용하여 발의 전체 모습을 측정할 수 있는 스캐너의 프로토타입을 개발하였다. Fig. 6은 개발된 스캐너의 사진으로 강화유리와 2개의 거울, 카메라 한 대, 빔 레이저 한 대로 구성되어 있다. 발판은 사람의 무게를 고려하여 두께 15 mm의 강화유리를 사용하였다. 카메라와 레이저는 하나의 고정 프레임이 되도록 볼스크류 위에 고정하였다. 볼스크류는 스텝모터를 통해 구동되며 마이크로 컨트롤러를 이용

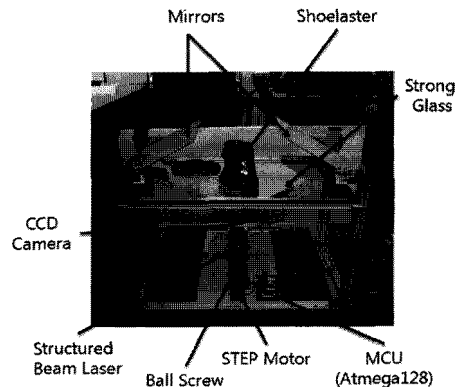


Fig. 6. Foot scanner.

하여 제어하는 구조로 되어 있다. 마이크로 컨트롤러는 이미지를 저장하고 해석하기 위한 메인 컴퓨터와 시리얼 통신으로 모터 속도, 이동, 정지, 장치 오류 등과 같은 메시지를 주고받도록 설계하였다.

Fig. 7은 제작된 3차원 발스캐너의 동작 과정을 보여주는 그림으로, 메인 컴퓨터의 시작버튼을 누르게 되면 마이크로컨트롤러는 메인 컴퓨터에서 지정한 속도를 전송받아 모터를 일정한 속도로 구동하게 된다. 모터가 구동되고 동시에 CCD 카메라를 통해 영상의 캡처 및 저장이 이루어진다. 마이크로 컨트롤러가 스캔 종료로 알리는 메시지를 메인컴퓨터에 알려주게 되면 메인컴퓨터의 프로그램에서 저장된 영상을 이용하여 영상 처리를 수행하게 된다. 영상 캡처 및 저장, 영상 처리 과정은 OpenCV 비전 라이브러리^[10]를 이용하여 구현하였다. 영상 처리과정은 우선 256 단계의 흑백 영상을 2진 이미지로 바꾼 후에 레이저 평면에 투영되지 않은 점들을 제거하는 노이즈 필터링 과정을 거치게 된다. 이렇게 얻게 된 영상에서 레이저는 하나의 선이 아니라 띠의 형태를 가지게 된다. 본 연구에서는 Zhou^[11]가 제안한 세션화(thinning) 알고리즘을 적용하여 중심선을 구하였다. 이렇게 구한 중심선의 점들이 발의 표면의 데이터가 되며, 모든 측정면에 대해 누적인 데이터는 식 (10), (13), (14)를 통하여 3차원 데이터로 변환한다. 여기서 발 측면 데이터는 거울에 투영된 위치에서 구해지기 때문에 거울면에 대해 대칭이동 과정이 필요하게 되며, 이 과정을 거치면 완벽한 3차원 발 데이터가 구해진다. 3차원 발 데이터는 매틀랩(matlab)을 이용하여 시각적으로 나타내었다.

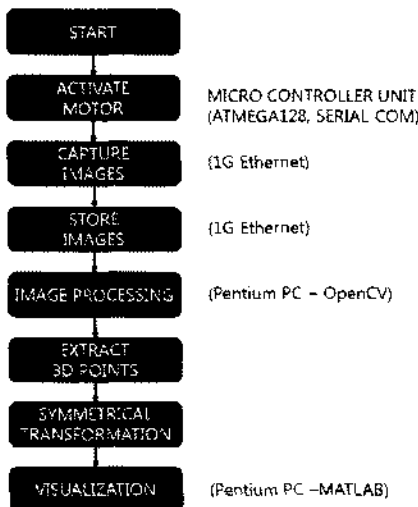


Fig. 7. Procedure of foot scanning.

3.2 캘리브레이션

카메라를 통해 3차원 좌표를 구할 때 실제로는 오차가 발생하게 된다. 오차의 원인은 영상 좌표에서 실제 좌표간의 관계를 나타내는 수식의 파라미터에 오차가 존재하기 때문이다. 카메라의 파라미터는 크게 내부 파라미터와 외부 파라미터로 나눌 수 있다. 내부 파라미터는 초점 거리, 픽셀 사이즈, 렌즈 외곡, CCD 정렬의 오류, CCD 중심 위치의 오류로 외부적인 요인과 상관없는 카메라 자체의 오차이다. 외부 파라미터는 레이저와 카메라 간의 거리, 레이저와 카메라 간의 각도와 같이 카메라 설치 후에 발생하는 제작 오차를 의미한다. 카메라의 내부 파라미터를 구하는 방법으로 Zhang^[12]이 제안한 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 Caltech의 Vision랩에서 개발한 매틀랩 캘리브레이션 툴박스^[13]를 이용하여 내부 파라미터를 구하였다. 이 프로그램은 Zhang의 이론을 확장하여 구현한 프로그램으로 사각 격자 영상을 이용하여 카메라의 내부 파라미터를 계산한다.

Fig. 8은 내부 파라미터를 구하기 위해서 사용한 패턴으로 6×9의 30 mm 정사각형 격자를 보여준다. Fig. 8(a)는 패턴의 원본 영상이며, Fig. 8(b)는 매틀랩 캘리브레이션 툴박스에서 검출한 코너 점으로 캘리브레이션에 직접적으로 이용되는 점이다. Table 2는 캘리브레이션 결과이다. 표에서 α 와 β 는 초점 f 를 한 픽셀의 크기 d_x 와 d_y 로 나눈 값을 나타내며, u_0 와 v_0 는 카메라의 광축이 지나는 CCD 화소의 중심점을 의미하며, θ 는 CCD의 비대칭도(skewness)를 나타내는 것으로 본 논문에서 사용한 카메라의 CCD는 비대칭도가 0인 것으로 나타났다.

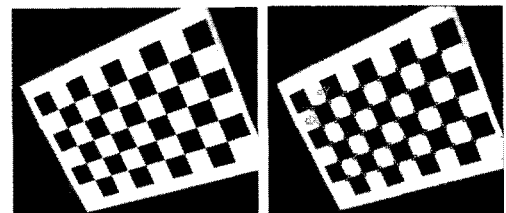


Fig. 8. Pattern for calibration of intrinsic parameter.

Table 2. Calibrated internal parameter of camera

| Parameter | Calibrated Value |
|-------------------------------|------------------|
| $\alpha(=fd_x), \beta(=fd_y)$ | 742.19, 750.15 |
| u_0, v_0 | 350.52, 210.86 |
| θ | 0 |

비대칭도가 0인 것을 이용하면, 물체의 3차원 좌표 Z 와 Y 를 구하는 식 (10)과 (13)은 아래와 같이 식 (17)과 (18)로 간략화된다.

$$Z = D_j \tan\left(\theta_i + \tan^{-1}\left(\frac{v-v_0}{\beta}\right)\right) \quad (17)$$

$$Y = \frac{D_j}{\cos\theta_i - \sin\theta_i \frac{v-v_0}{\beta}} \left(\frac{u-u_0}{\alpha}\right) \quad (18)$$

카메라의 내부 파라미터를 구한 후에 카메라의 외부 파라미터를 구하기 위해서 Fig. 9과 같이 캘리브레이션 지그를 제작하였다. 캘리브레이션 지그는 꼭지점 간의 거리를 정확히 알고 있기 때문에, 측정점 간의 차이와 이 값의 차이를 비교하여 외부 파라미터의 오차를 구하는 데 이용할 수 있다. 그러나 캘리브레이션 지그를 레이저 평면과 직각으로 정렬하기 어렵기 때문에 꼭지점의 거리보다는 각 모서리 간의 거리를 비교하는 방법이 더 오차를 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 측정된 꼭지점을 이용하여 직선의 방정식을 구하고 그 직선의 방정식으로부터 두 직선 간의 수직 거리를 구하여 실제 값과 비교하여 외부 파라미터를 구하는 방법을 고안하였다.

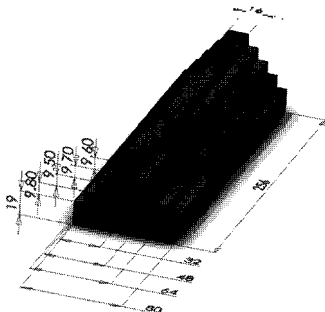


Fig. 9. Calibration jig.

Fig. 10과 같이 모서리 i 에서 측정된 점을 P_{i1} 및 P_{i2} 라 하고 모서리 j 에서 측정된 점을 P_{j1} 과 P_{j2} 라 하면 이 점들을 연결하여 해당 모서리의 직선의 방정식을 구할 수 있다. 두 직선을 각각 l_i 와 l_j 라 하면, 직선의 방정식은 식 (19)과 (20)과 같다. 여기서 a_i, b_i, c_i 는 각각 $X_{i2}-X_{i1}, Y_{i2}-Y_{i1}, Z_{i2}-Z_{i1}$ 을 의미하며, a_j, b_j, c_j 는 각각 $X_{j2}-X_{j1}, Y_{j2}-Y_{j1}, Z_{j2}-Z_{j1}$ 을 의미한다.

$$\frac{X-X_{i1}}{a_i} = \frac{Y-Y_{i1}}{b_i} = \frac{Z-Z_{i1}}{c_i} \quad (19)$$

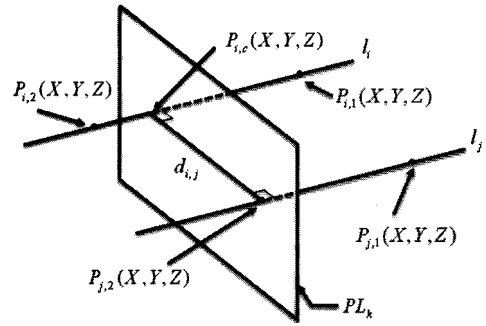


Fig. 10. Distance between line l_i and l_j .

$$\frac{X-X_{j1}}{a_j} = \frac{Y-Y_{j1}}{b_j} = \frac{Z-Z_{j1}}{c_j} \quad (20)$$

두 직선 사이의 거리 $d_{i,j}$ 를 구하기 위해 우선 P_{j2} 를 지나며 직선 l_j 와 수직인 평면 PL_k 의 평면의 방정식을 식 (21)과 같이 구한다. 이 때 평면의 방정식 PL_k 와 직선의 방정식 l_i , 즉 식 (19)와의 교점 $P_{i,c}$ 를 구하면 식 (22)과 같다. 여기서 매개 변수 t 는 식 (23)과 같다.

$$a_j(X-X_{j2}) + b_j(Y-Y_{j2}) + c_j(Z-Z_{j2}) = 1 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} X_{i,c} &= X_{i1} + a_i t \\ Y_{i,c} &= Y_{i1} + b_i t \\ Z_{i,c} &= Z_{i1} + c_i t \end{aligned} \quad (22)$$

$$t = \frac{1 - a_j(X_{i1} - X_{j2}) - b_j(Y_{i1} - Y_{j2}) - c_j(Z_{i1} - Z_{j2})}{a_i a_j + b_i b_j + c_i c_j} \quad (23)$$

따라서 직선 l_i 와 l_j 간의 거리 $d_{i,j}$ 는 $P_{i,c}$ 와 P_{j2} 간의 거리로 식 (24)와 같이 구할 수 있으며, 이 값의 계급을 식 (25)과 같이 $D_{i,j}$ 라고 하면, 이 값은 외부 파라미터 D_j 과 θ_i 의 함수가 되고 이를 식 (26)과 같이 $f_{i,j}$ 의 함수 형태로 정의할 수 있다.

$$d_{i,j} = \sqrt{(X_{i,c} - X_{j2})^2 + (Y_{i,c} - Y_{j2})^2 + (Z_{i,c} - Z_{j2})^2} \quad (24)$$

$$D_{i,j} = d_{i,j}^2 = f_{i,j}(D_j, \theta_i) \quad (25)$$

식 (25)으로부터 구한 $D_{i,j}$ 는 외부 파라미터의 오차로 인해 캘리브레이션 지그의 실제 값과 차이가 발생하게 된다. 따라서 테일러 급수를 이용하여 식 (25)을 식 (26)과 같이 전개하여 외부 파라미터의 오차를 구한다. 식 (26)에서 식 (29)의 과정은 일반적인 Newton-Raphson 방법^[14]을 따르고 있다.

$$D_{i,j} = f_{i,j}(D_i, \theta_i) + \frac{\delta f_{i,j}}{\delta D_i} \Delta D_i + \frac{\delta f_{i,j}}{\delta \theta_i} \Delta \theta_i \quad (26)$$

식 (26)은 다시 정리하면 식 (27)과 같이 쓸 수 있으며, 모든 직선 간의 거리에 대해서 내부 파라미터 ΔD_i 와 $\Delta \theta_i$ 의 계수를 누적시킨 행렬을 M_c 라하고 측정값과 계산값의 차이 $D_{i,j} - f_{i,j}(D_i, \theta_i)$ 를 누적시킨 벡터를 M_b 라 하면 식 (28)과 같은 행렬식의 형태로 표현할 수 있다. 따라서 외부 파라미터의 오차는 식 (29)와 같이 M_c 의 유사 역행렬을 이용하여 구할 수 있다. 오차의 크기를 나타내는 식 (30)이 수렴할 때까지 식 (19)에서 (29)의 과정을 반복하여 외부 파라미터를 캘리브레이션 한다. 이렇게 구한 D_i 값과 θ_i 값은 각각 290.562 mm와 61.351도이다.

$$\frac{\delta f_{i,j}}{\delta D_i} \Delta D_i + \frac{\delta f_{i,j}}{\delta \theta_i} \Delta \theta_i = D_{i,j} - f_{i,j}(D_i, \theta_i) \quad (27)$$

$$M_c \begin{pmatrix} \Delta D_i \\ \Delta \theta_i \end{pmatrix} = M_b \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta D_i \\ \Delta \theta_i \end{pmatrix} = (M_c^T M_c)^{-1} M_c^T M_b \quad (29)$$

$$Error = \sqrt{M_b^T M_b} \quad (30)$$

카메라의 내부 및 외부 파라미터의 캘리브레이션이 끝나면 거울 면의 방정식을 구하여 거울에 반사되어 측정된 좌표를 대칭이동 시킨다. Fig. 11 및 Fig. 12는 바닥면 및 거울면의 방정식을 구하기 위하여 마커를 이용하여 데이터를 수집하는 장면이다. 바닥면의 방정식은 3차원으로 변환된 데이터에서 바닥면 보다 아래에 있는 데이터를 제거하는 방법에 유용하게 사용될 수 있기 때문에 바닥면도 같이 측정하였다. Fig. 13은 바닥면과 거울 면에 부착된 마커를 측정하여 구한 3차원 점 데이터를 매트랩을 이용하여 3차원 좌표

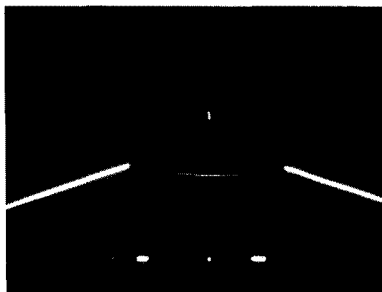


Fig. 11. Images for ground plane.

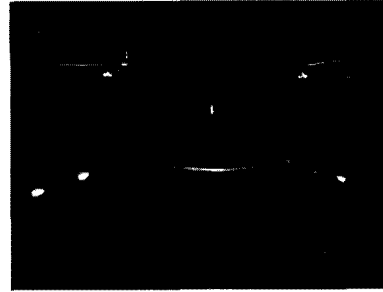


Fig. 12. Images for side mirror planes.

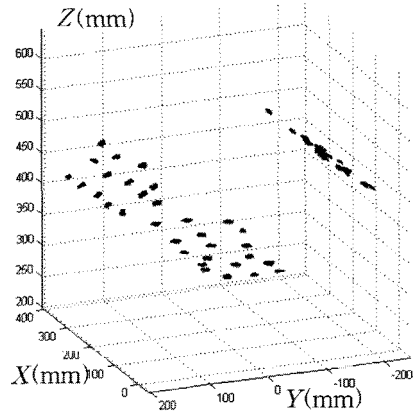


Fig. 13. 3D points of mirror and ground planes.

계에서 표현한 것이다.

수식 (31)에서 (34)는 측정점을 이용하여 평면의 방정식을 구하기 위한 과정을 설명하고 있다. 식 (31)은 평면의 방정식을 의미하며, 식 (32)는 N개의 측정점을 식 (31)에 대입하여 나열한 것이며, 이것을 행렬의 형태로 나타내면 식 (33)과 같다. 따라서 평면의 방정식을 나타내는 계수 a, b, c 는 Least-square 방법^[4]을 적용하여 식 (34)와 같이 구할 수 있다. Table 3은 이 방법을 통해 구해진 파라미터 값을 나타낸다.

$$aX + bY + cZ = 1 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} aX_1 + bY_1 + cZ_1 &= 1 \\ aX_2 + bY_2 + cZ_2 &= 1 \\ &\vdots \\ aX_N + bY_N + cZ_N &= 1 \end{aligned} \quad (32)$$

$$M_m \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}; \quad M_m = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (34)$$

Table 3. Parameters of mirror and ground planes

| Plane | a | b | c |
|-------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Glass plane | 1.18996*10 ⁻⁵ | 2.84681*10 ⁻³ | -3.10291*10 ⁻⁶ |
| Right plane | 1.21750*10 ⁻³ | 1.62155*10 ⁻³ | 3.40536*10 ⁻⁶ |
| Left plane | -1.22622*10 ⁻³ | 1.56419*10 ⁻³ | -1.11972*10 ⁻⁵ |

4. 실험결과

본 연구를 통해서 개발한 3차원 발 스캐너의 성능을 검증하기 위해 사람의 발을 측정하는 실험을 수행하였다. 발의 크기는 260 mm 정도이며, Fig. 7과 같은 절차대로 실험을 수행하였다. 가능한 선명한 영상의 획득을 위해 조명을 모두 제거한 상태에서 빔 레이저의 영상을 획득하였다. Fig. 14는 이렇게 획득하여 저장한 영상 중 하나이다. 그림의 가운데 부분은 발바닥에 빔 레이저가 투사된 것이 영상에 나타난 것이며, 좌우의 곡선은 발등에 빔 레이저가 투사된 것이 거울에 반사되어 영상에 나타난 것입니다. 이 실험에서는 좀 더 세밀한 영상을 얻기 위해 ΔX를 1/3 mm로 설정하였으며, 초당 60 프레임의 영상을 얻었다. 총 1000장의 이미지를 저장하였으며, 계산 시간을 절약하기 위해 발이 나타나는 영상의 시작점과 끝부분을 찾아 그 부분에서만 영상처리를 수행하였다. 원본 영상을 보면 레이저 빛의 강도로 인해 영상이 산란되어 띠의 형태를 띠고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2절에서 설명한 바와 같이 원본 영상에서 3차원 데이터를 추출하기 위해서는 우선 2진 영상으로 변환해야 한다. 식 (35)와 같은 방법으로 영상의 2진화를 수행하였다. 식 (35)에서 Th로 180을 이용하였다.



Fig. 14. Original image.



Fig. 15. Binary image.

$$\begin{aligned} & \text{If } Image(u, v) > Th, Image(u, v) = 255 \\ & \text{else, } Image(u, v) = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Fig. 15는 식 (35)를 적용하여 만들어진 2진 영상을 나타낸다. 그림에서 중간 및 외각 부분의 밝은 점들이 사라진 것은 그 부분은 발이 존재하지 않는다는 것을 사전에 알고 있기 때문에 2진 영상을 만들기 전에 원본 영상을 수정하여 그 부분을 모두 0으로 설정하여 어둡게 처리한 결과이다. 이 작업은 영상의 특성을 파악할 당시에는 수동으로 제거 위치를 지정하지만, 한번 결정하게 되면 측정하는 발의 위치가 크게 바뀌지 않기 때문에 변경할 필요가 없다. 따라서 처음에는 수동으로 지정하지만 그 이후에는 즉, 사용단계에서는 자동으로 적용된다. Fig. 15의 2진 영상은 레이저의 산란으로 인해 발의 외곽선을 판단하기가 어려움을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 띠의 중심을 발 표면의 점이라고 가정하였다. 부피를 가지고 있는 영상을 세선화 하기 위해서 앞서 설명한 바와 같이 Zhou가 제안한 알고리즘을 이용하였다. 세선화 알고리즘은 몇 가지 패턴을 이용하여 자신이 경계에 있으면 사라지는 방법이 적용되는 알고리즘이다. Fig. 16은 세선화 알고리즘의 결과를 나타낸 영상이다. 이 영상에서 밝게 나타나는 점들이 결국 발의 외곽선의 점

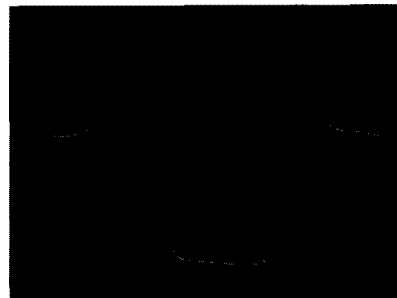


Fig. 16. Thinning image.

들이기 때문에 3차원 데이터로 변환을 수행한다.

본 논문에서는 발의 영상을 한꺼번에 수집하여 PC에 저장한 후 후처리 과정을 통해서 3차원 데이터를 구하였다. 영상 수집 및 처리에 사용된 PC의 CPU의 속도는 3.2 GHz이며, 1장의 영상을 처리하는 데 소요되는 시간은 0.072초로 측정되었다. 만일 1 mm 간격으로 300 mm 크기의 발을 측정할 경우 모두 300장의 영상 처리가 필요하며 따라서 21.6초의 후처리 시간으로 발의 3차원 데이터를 구할 수 있다.

일반적으로 사람의 피부는 반투명성으로 인해 레이저가 투사될 때 피부 밑으로 빛을 분산시키게 만드는 효과(subsurface scattering) 때문에 Fig. 14와 같이 레이저 피가 두껍게 나타나는 현상이 발생하게 된다. 본 논문에서는 영상을 이진화한 후 세션화 방법을 적용하여 피의 중간 부분을 발의 측정값으로 이용하고 있다. 추후 연구에서는 이러한 문제를 좀 더 깊이 있게 연구하여 최적의 영상 처리 기법 및 필터 방법을 제안할 계획이다.

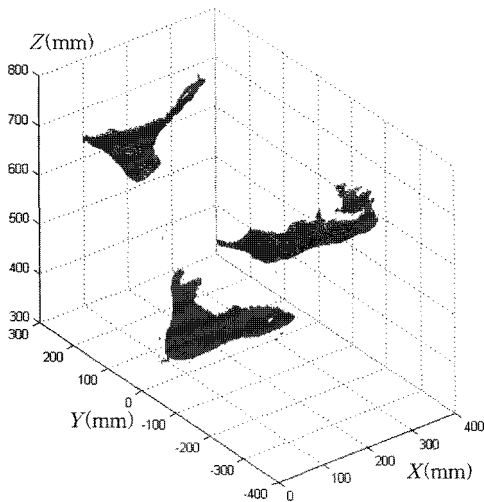


Fig. 17. 3D points of scanned foot.

Fig. 17은 영상처리 프로그램에서 얻은 3차원 점 데이터를 3차원 좌표계에서 나타낸 것이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 거울에 의해서 측정된 면은 발의 밑면과 분리되어서 발의 위쪽에 좌우로 나타나게 된다. 따라서 거울 면에 대칭이동이 필요하며, 3.4절에서 구한 거울 평면의 방정식을 적용하여 측정 데이터를 대칭이동 하였다. Fig. 18은 대칭 이동의 결과로 하나의 완전한 발의 형상이 만들어진 것을 알 수 있다. 그러나 발을 3개의 부분으로 분리하여 측정된 데이터가 통

합되는 과정에서 중복되는 부분이 발생하게 된다. 이와 같은 중복 데이터는 표면 모델링 과정을 어렵게 만드는 원인이 되기 때문에 추후 보완 과정이 필요하다.

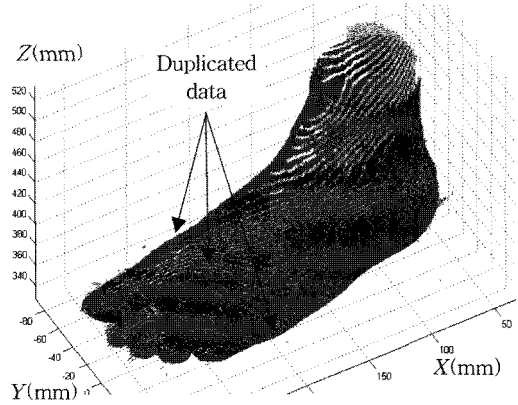


Fig. 18. 3D points of reconstructed foot.

5. 결 론

본 논문은 빔 레이저와 카메라를 이용한 3차원 측정법에 관한 것으로 거울을 이용하여 고정된 물체의 3차원 데이터를 측정하기 위한 방법 및 이에 따른 측정 시스템의 파라미터 오차 보정을 위한 자동 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 이용하면 단일 카메라를 사용하는 것으로도 고정된 물체의 3차원 데이터를 측정할 수 있다.

제안된 방법을 통해 3차원 발 스캐너의 프로토타입을 제작하였으며 실험을 통해 유용성을 확인하였다. 제작된 스캐너의 해상도는 Y축 방향으로 1 mm이며, Z축 방향으로는 2 mm이다. X축 방향은 카메라의 이동 속도와 관련되며, 1 mm의 분해능을 가질 때, 5초 정도에 300 mm 크기의 발의 전체 모습을 측정할 수 있다. 참고로 이것은 Infoot의 측정시간 10초 보다 100% 향상된 성능이다. 현재 Z축 방향의 분해능이 비록 Infoot에 비해 낮지만, Z_{min} 을 400 mm로 재설정한다면, 식 (16)에 의해 분해능이 1.26 mm가 된다. 따라서 본 논문에서 제안된 발 스캐너는 측정시간 측면에서 경쟁 상용제품에 앞서며, 특히 제작비용 측면에서 큰 장점을 가진다고 판단할 수 있다. 한편 분해능을 더 높여야 할 필요가 있을 경우는 해상도가 높은 카메라를 이용하거나, 혹은 카메라를 하나 더 추가하여 외부 파라미터의 값을 변화시키면 1 mm 이하의 분해능은 가능하다고 예상된다.

참고문헌

1. 주창우, 박지영, 김호원, 박정철, 임성재, 구분기, "3차원 복원 기술 동향," 전자통신동향분석, 제22권, 제4호, pp. 1-11, 2007.
2. Infoot Scanner Catalog, http://www.iwl.jp/pdf_files/infoot_usb_standard_e.pdf
3. 3D Foot Scanner Catalog, <http://www.elinvision.com/>
4. Foot Scanner Factsheet, <http://www.precision3d.co.uk/>
5. Peleg, S., Ben-Ezra, M. and Pritch, Y., "Omnistere: Panoramic Stereo Imaging," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 3, pp. 279-290, 2001.
6. Joshua, G. and Shree, K. N., "Catadioptric Stereo Using Planar Mirrors," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 44, No. 1, pp. 65-79, 2001.
7. Alexandre, R. J. F., Medioni, G. G. and Waupotitsch, R., "Reconstructing Mirror Symmetric Scenes from a Single View Using 2-view Stereo Geometry," *International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 4, 2002.
8. Forsyth, D. A. and Ponce, J., *Computer Vision: a Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
9. GigE Mono Camera Catalog, <http://www.viewrun.co.kr/>
10. OpenCV library, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>
11. Zhou, R. W., Quek, C. and Ng, G. S., "A Novel Single-pass Thinning Algorithm and an Effective Set of Performance Criteria," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 16, pp. 1267-1275, 1995.
12. Zhang, Z., "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.
13. Camera Calibration Toolbox for Matlab, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc
14. Chong, E. K. P. and Zak, S. H., *An Introduction to Optimization*, Wiley-interscience, 2001.



정 성 엽

1994년 연세대학교 기계공학과 학사
 1996년 KAIST 정밀공학과 석사
 2005년 KAIST 기계공학과 박사
 2005년~2007년 삼성중공업 에카트르닉
 센터 책임연구원
 2007년~현재 국립충주대학교 기계
 공학과 교수

관심분야: Human-robot Interface,
 Robotic Assembly, Machine
 Vision



박 상 근

1991년 포항공과대학교 학사
 1993년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1997년 서울대학교 기계설계학과 박사
 1997년~1999년 삼성SDS 정보기술연구
 소 책임연구원
 1999년~2000년 서울대정밀기계공동연
 구소 특별연구원
 1999년~2002년 (주)K&I 테크놀로지
 정보기술연구소장
 2000년~2001년 서울대 BK21 기계분야
 사업단 계약교수
 2003년~현재 국립충주대학교 기계
 공학과 교수

관심분야: Computational Geometry,
 CAD/CAM/CAE, Design Opti-
 mization, Scientific Visualization