

스테레오 비전을 이용한 비접촉 3차원 족형 측정 시스템 설계

Development of a Noncontact Three Dimensional Foot Form Measurement System with a Stereo Vision Method

김 시 경*
(Sikyung Kim)

Abstract : In this paper, a cost-effective integrated 3D system for measuring and sizing foot is proposed. The proposed system employs two CCDs and a laser line projector which are capable of accurately measuring foot. The measurement is based upon the biologically motivated stereo vision principle providing ruggedness against minor system distortions. According to the tolerance, calibration between two different views are implicitly applied. Furthermore, the measurement system employs a measurement base, a frame grabber, a CCD moving cart, a stepping motor and computer. Analysis and design procedure is presented for the calculation of the 3D foot data and the proposed system. Experimental results on the proposed system would verify the concept and system operation.

Keyword : 3D(three-dimensional), stereo vision, foot measurement

I. 서론

인간은 각자 다른 여러 형태의 발 형상을 가지고 있다. 이러한 여러 형태의 발 형상 중 외반 모지나 평발 같은 비정상적인 발에 있어 부적합한 신발의 사용은 발의 건강을 악화시키고 인체에 무리를 주기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 맞춤형 신발이 필요 되어지고 맞춤형 신발을 제작하기 위해 발 각 부의 수평 단면 형태와 수직 단면 형태의 3차원 분석이 필요하다[1,2,3,4].

3차원 형상 측정에 대하여서는 오래전부터 지금까지 많은 연구가 진행 되고 있다. 현재 개발 되어진 비접촉 3차원 형상 추출 방법에는 광 삼각법(Optical triangulation), 구조 광원(Structured lighting) 이용법, 스테레오 비전(Stereo vision) 방식 등이 있다[5,6,7,8,9].

본 논문에서는 맞춤형 신발 제작을 위한 발의 3차원 형상 측정 시스템 설계시 요구되어지는 요소를 최적화시키기 위해 3차원 측정 알고리즘으로 스테레오 비전 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 스테레오 비전(Stereo vision) 기법은 두 대의 CCD로부터 받아들인 발의 스테레오 이미지를 이용하여 발 표면에 조사되어진 레이저 라인의 3차원 좌표를 계산 한다. 그 후 이들 CCD를 정해진 축을 따라 일정각도로 반복 이동시키면서 여러 장의 데이터프레임을 취득하고 이들 프레임에 스테레오 비전 방법을 적용하여 발 전체 3차원 형상을 얻어내는 기법이다.

본 논문에서 제안한 시스템의 하드웨어부는 발의 표면에 라인을 조사하는 레이저 라인 제너레이터와 발 스테레오 영상을 캡처하는 두개의 CCD(Charge Coupled Device), 캡처한 영상 신호를 컴퓨터 상의 이미지 평면($N \times M$)으로 변환하는 프레임 그라버(Frame Grabber) 그리고 CCD와 레이저

를 포함한 CCD카드, 이를 회전시키기 위한 이동 레일부, 이동 레일부의 회전원인 스테핑 모터부 이를 제어하는 제어부 및 취득되어진 스테레오 발 영상 데이터로부터 발 주요 부위를 측정하는 영상처리부로 구성되어 있다.

본 논문에서는 스테레오 발영상 데이터로부터 발의 3차원 형상 데이터 및 발 주요 부위 치수를 추출하는 방법을 제시하고 실험을 통하여 본 시스템의 유효성을 입증하였다.

II. 스테레오 비전 및 3차원 족형시스템 모델링

본 연구에서 3차원 족형 측정을 위하여 사용한 스테레오 비전 방식은 2 대 이상의 CCD로부터 얻은 스테레오 데이터에서 서로 대응되는 점을 찾고 이를 CCD의 기하학적 위치에 따라 3차원 정보를 계산해내는 알고리즘이다. 스테레오 비전 방식은 크게 컨버전(Convergent) CCD 모델 방식과 패러렐(Parallel) CCD 모델 방식이 있다[8,9]. 이중 컨버전 모델은 에피폴라 라인(Epipolar line)이 이미지 좌표에서 변동하는 단점과 거리계산이 복잡한 단점이 있다. 반면에 패러렐 모델은 대응되는 점의 위치를 찾기 쉽고, 또한 대응점으로부터 거리계산이 용이하기 때문에 본 연구에서는 패러렐 모델을 채택하였다.

먼저, 3차원 거리정보를 얻기 위해 피 측정 발에 라인 제너레이터를 이용하여 레이저를 조사한 후, 두 대의 CCD를 통하여 스테레오 발 영상을 취득한다. 그림 1은 3D 스테레오 측정 시스템의 좌표시스템 관계를 보인 것이다. 그림 1로부터 피 측정 발의 3D 모델을 얻는 방법은 다음과 같다. 먼저 좌/우 CCD의 영상좌표를 월드좌표로 변환하여 피 측정 발의 월드좌표 $P(x, y, z)$ 를 구한다. 그림에서 모델좌표의 원점은 피 측정 발의 중심과 월드좌표의 $x = 0$ 인 평면이 교차하는 부분으로 설정한다. 피 측정 발은 정지상태에 있고 CCD가 피측정 발 주위를 360도 회전하므로 모델좌표 $M(x_m, y_m, z_m)$ 는 월드좌표 $P(x, y, z)$ 로부터

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 28., 채택확정 : 2004. 7. 12.

김시경 : 공주대학교 정보통신공학부(skim@kongju.ac.kr)

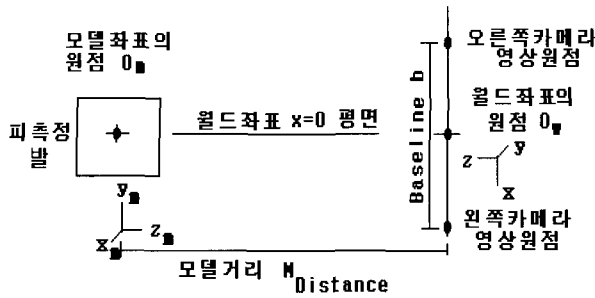


그림 1. 좌표 시스템간의 관계.
Fig. 1. Relation between coordinate systems.

터 다음과 같은 식으로 구현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ M_{distance} - z \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서, θ 는 카메라회전각도 이고 $M_{Distance}$ 은 모델 거리 이다.

1. CCD 캘리브레이션(Calibration)

본 논문에서는 패러렐 스테레오 모델을 사용하므로 좌우 CCD의 광축이 서로 평행하도록 조절하여야 하며 좌우 CCD의 에피폴라 라인이 같은 수직 축이 되도록 높낮이의 조절이 필요하다. 그러나 이러한 조절은 좌우 CCD가 연동 되어 있는 시스템에서 캘리브레이션을 위해 많은 시간이 소요되는 단점을 유발한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기위해 스테레오 패러렐 모델을 사용하는 캘리브레이션(Calibration)을 다음과 같이 제안 하였다.

좌측 영상좌표 $I_l(i_l, j_l)$ 와 우측 영상좌표 $I_r(i_r, j_r)$ 로부터 월드좌표 x 를 구하면 다음 식을 얻을 수있다.

$$x = \frac{b}{2D_h} \left(\frac{a}{N} (j_l + j_r) - a \right) \quad (7)$$

여기서 $x=0$ 인 지점은 $j_l + j_r = N$ 조건을 만족하여야 한다. 또한 $P(0, 0, M_{distance}) = M(0, 0, 0)$ 이므로 $M(0, 0, 0)$ 위치의 변위를 $D_h^{M_{Distance}}$ 라고 하면, $M(0, 0, 0)$ 위치에서의 이미지 평면의 기준 수평좌표 j_{Lref} 및 j_{Rref} 는 (8)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} j_{Lref} \\ j_{Rref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(N - \frac{N}{a} D_h^{M_{Distance}} \right) \\ \frac{1}{2} \left(N + \frac{N}{a} D_h^{M_{Distance}} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

즉 레이저 스트립 라인이 $M(0, 0, 0)$ 에 조사될 때 영상에서의 좌표가 각각 (8)의 값이 되도록 CCD의 팬각도를 조절한다. 이와 같이 좌우 CCD가 상호 독립적으로 개별 위치를 조절함으로써 정확하고 빠른 CCD 캘리브레이션(Calibration)을 얻을 수 있다. 이러한 캘리브레이션을 통해



그림 2. 3차원 측정 시스템(KOSACN II : 공주대학교 개발).
Fig. 2. Photograph of 3D foot measurement system.

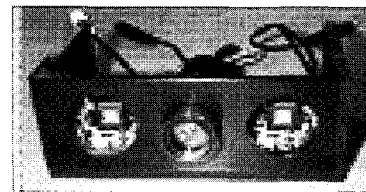


그림 3. 스테레오 비전 CCD 카트.
Fig. 3. Photograph of stereo vision CCD cart.

여, 본 시스템의 z방향 오차는 원점에서 14mm 이내 구간에서 0.8 mm 이며 오차를 좀더 줄이기 위해서는 베이스 라인 길이(b), 컴퓨터상의 이미지 평면 x 축 값(N)을 크게 하여야 한다.

III. 3차원 족형 측정 시스템 구성

시스템 구성은 발의 표면에 조사되어지는 레이저 라인과 발 형상을 캡처하는 두개의 CCD(Charge Coupled Device), 캡처한 영상 신호를 컴퓨터 상의 이미지 평면(N×M)으로 변환하는 프레임 그래버(Frame Grabber) 그리고 CCD와 레이저를 포함한 CCD카트, 이를 회전시키기 위한 이동 레일부, 이동 레일부의 회전원인 스테핑 모터부 등으로 구성되어 있다. 또한 소프트웨어 구성은 프레임 그래버 구동부, 스테핑 모터 구동부, 스테레오비전을 이용한 3차원 데이터 추출부, 데이터 저장부, OpenGL을 이용한 3차원 이미지 출력부, 각 부위별 발 데이터 추출부 등으로 구성되어 있다. 그림 2는 이러한 구성 요소로 설계 되어진 시스템의 전체 외형도를 보여주고 있다.

1. 스테레오 CCD카트

스테레오비전을 적용하여 발의 3차원 데이터를 추출하는 과정에서 발에 조사되어진 레이저 광축과 영상을 얻는 CCD 광축을 일치하여야 하며, 또한 CCD와 레이저가 이동 레일 위에서 동시에 발 주위를 360°회전해야 되기 때문에, CCD와 레이저가 함께 회전할 수 있도록 하기 위하여 그림

표 1. 레이저 특성.

Table. 1. Specification of laser.

Laser	파장수	670 nM
	정격전압 및 전류	12 [V], 2.5 [A]
	소비 전력	MAX 500 [mW]
	제조사	LASIRIS
	Fan Angle	44 degree
	Line Length	400 mm
	Working distance	500 mm
	Line Thickness	1500 um

3과 같은 CCD카트를 별도로 제작하였다.

그림 3의 스테레오 비전 CCD 카트의 중앙에는 Non-Gaussian Line 레이저를 사용하여 광 레이저 라인의 광 강도를 균일화 하여 레이저라인 라인 광 불균일로 발생 가능한 오차를 최소한으로 감소시켰다. 표 1은 실험에서 사용한 레이저 특성을 나타낸다.

2. 이동 레일부

CCD와 레이저가 설치된 CCD카트가 이동 레일 상부에 위치하고, 이동 레일은 스테핑 모터로 구동되어 CCD카트를 360°회전 및 역회전시킨다. 소프트웨어에서 CCD카트가 6°회전할 때마다 CCD가 발의 영상을 추출하도록 제어하기 때문에 이동 레일의 안정적인 회전 상태가 특히 중요하다. 이동 레일의 크기는 먼저 성인 발을 기준으로 CCD 촬영 소자에 투영된 발 영상이 컴퓨터 모니터(640 x 480) 상에 변환되고, 변환된 영상을 이용하여 발의 3차원 데이터를 추출하는데 가장 알맞은 크기와 전체 시스템 구성을 고려하여 외경 700(mm), 내경 600(mm)로 이동 레일부를 설정하였다.

3. 전체 프로그램 구성

프로그램은 크게 세 부분으로 나누어진다. 프로그램의 첫째 부분인 3차원 족형 측정 프로그램에서는 하드웨어와 소프트웨어가 함께 연동되고, 스테레오비전을 적용하여 발의 3차원 형상 데이터를 추출한다. 프로그램의 둘째 부분인 발 데이터 측정 프로그램은 추출된 3차원 데이터로부터 발의 주요 부위에 대한 정보를 측정하며 프로그램의 셋째 부분인 라스트 데이터 추출 프로그램은 발 데이터 측정 프로그램부에서 측정된 발 정보를 이용하여 라스트 설계에 필요한 데이터를 계산하는 프로그램이다.

4. 발의 3차원 스캐닝 알고리즘

본 논문의 스캐닝 알고리즘은 피 측정 물체를 360° 회전 하면서 물체의 3차원 모델을 획득한다. 3차원 모델은 OpenGL 등의 그래픽 라이브러리를 사용하여 렌더링하거나 또는 CAD용 데이터로 활용될 수 있다. 다음은 3차원 스캐닝 알고리즘을 단계로 나누어서 보여준다.

- [단계 1] - 레이저 라인 빔을 피측정 물체에 조사.
 - 패러렐 모델을 사용하여 좌측, 우측 영상 획득.
- [단계 2] - 좌측과 우측 영상의 에피폴라 라인에서 레이저 라인의 위치를 찾고 매칭점을 찾는다. (매칭점은 좌우 영상의 레이저라인 픽셀 위치 정보 및 영상계조 상관도를 이용하거나 특징 정보를 추출 하여 사용 가능)
- [단계 3] - 매칭점의 유효성을 검사하여 잘못된 매칭값

을 버리고 무효한 매칭 값은 유효한 매칭 값으로부터 보간법으로 산출(유효성 여부는 물체의 예상 거리정보로부터 판단).

[단계 4] - (1),(2),(6)을 사용하여 모델좌표 $M(x_m, y_m, z_m)$ 를 계산하고 이웃하는 모델 좌표로부터 모델테이블을 작성(모델테이블은 모델을 렌더링하기 위한 사각형 면(facet) 대한 정보와 면의 속성값을 갖음).

[단계 5] - 스테핑 모터를 구동하여 CCD를 6° 회전.

[단계 6] - 360° 스캐닝이 완료되면 모델테이블을 저장한 후 프로그램을 종료하고 그렇지 않으면 [단계 1]부터 반복한다.

[단계 2]의 매칭점의 위치는 $M(0, 0, 0)$ 위치의 기준 수평좌표 j_{Lref} 및 j_{Rref} 의 위치로부터 최대 검색 윈도우 크기(W_M) 내에서 찾는다. 왼쪽 영상은 $(j_{Lref} - W_M) \sim j_{Lref}$ 사이에서 검색하고 오른쪽 영상은 $j_{Rref} \sim (j_{Rref} + W_M)$ 사이에서 검색한다. 최대 검색윈도우의 크기는 측정하려고 하는 물체의 크기(O_s)에 따라 결정된다. W_M 은 모델좌표 $M(x_m, y_m, z_m)$ 내의 z_m 값의 최대값 $O_s = \text{Max} |z_m|$ 으로부터 (9)를 이용하여 구한다. z_m 의 최대값은 파라미터로 입력받는다.

$$W_M = \frac{Nbf}{\alpha} \left(\frac{O_s}{M_{Distance}(M_{Distance} - O_s)} \right) \quad (9)$$

[단계 3]의 유효성은 물체의 예상거리로부터 산출한다. 계산된 거리가 $z \leq M_{Distance}$ 를 만족하고, 상하 에피폴라 라인에서 구한 변위값과 많은 차이가 나지 않아야 한다. 또한 유효한 z 값이 최소 크기 이상이 되어야 한다. 필요한 거리 정보가 유실된 경우에는 상하방향의 에피폴라의 변위로부터 일차원 보간(interpolation)을 한다.

[단계 4]의 모델테이블은 하나의 면(facet)에 대한 위치 및 속성정보를 갖는다. 즉 면의 4개 꼭지점의 3차원 좌표와 속성으로서 면의 컬러 또는 영상계조 정보를 갖는다. 모델테이블은 이전 루프에서의 거리 테이블과 현재 루프의 거리테이블로부터 산출한다.

5. 하드웨어 소프트웨어 연동부

하드웨어와 소프트웨어가 함께 연동되어 동작되는 부분은 CCD로부터 영상 신호를 컴퓨터로 보내기 위한 프레임 그래버(Frame Grabber) 구동 부분과 이동 레일의 회전을 위한 스테핑 모터 구동 부분이다. 프레임 그래버(Frame Grabber)는 3차원 데이터를 계산하기 위한 발 영상을 CCD에서 컴퓨터로 전송해주는 역할을 한다. 스테핑 모터 구동부는 자체 제작한 PCI(PLX9050) 보드와 AT89C2051 보드를 사용하여 스테핑 모터를 제어하며 컴퓨터와 인터페이스(Interface) 하기 위하여 WDM(Windows Driver Model)을 사용해서 디바이스 드라이버를 작성하였다. 또한 동적 연결을 위한 DLL(Dynamic Link Library)을 작성하여 본 논문의 3차원 족형

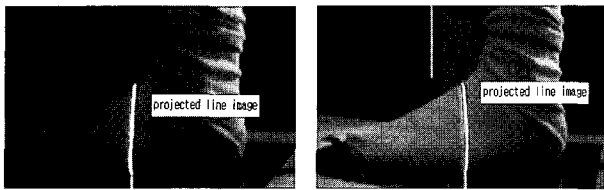


그림 4. 피 측정 발의 좌 우 영상.
Fig. 4. Left image and right image from the stereo CCD.



그림 5. 피 측정 발의 렌더링 데이터(좌)와 점군 데이터(우).
Fig. 5. Rendering data(left) and the point cloud data(right) of the Measured Foot.

측정 시스템 소프트웨어에서는 단순히 DLL 함수를 호출해 스테핑 모터를 구동시킨다.

IV. 실험 및 결과

1. 발의 3차원 형상 측정실험

본 논문에서는 Non-Gaussian Line 레이저와 광자바라를 사용하여 발의 3차원 데이터 측정시 발생 가능한 오차를 최소한으로 감소시켰다. 발의 3차원 형상 측정은 스테핑 모터의 구동으로 이동 레일에 설치된 CCD카트가 피 측정 발 주위를 360° 회전하면서, 조사되어진 발의 레이저 라인 영상을 획득하고 스테레오비전을 이용해서 발의 3차원 형상을 추출한다. 그림 4는 스테레오 비전을 통하여 컴퓨터에 입력되어진 좌, 우 영상을 보이고 있다. 3차원 데이터 측정시 소요되는 시간은 총 1분 이었으며 이 시간은 손으로 측정시 소요되는 시간 4분을 1/4 절감 시켰다. 추출된 3차원 형상은 다시 CNC 가공에서 사용할 수 있도록 DXF 파일로 변환되어 저장된다. 스테레오비전방법으로 측정한 발의 점군 데이터(100,000포인트)와 그 결과를 OpenGL로 렌더링한 결과를 그림 5에 나타내었다.

실험에 사용되어진 파라미터를 이용한 거리 분해능으로 측정 정밀도를 분석하여 표 2에 나타내었다.

z방향 오차는 원점에서 14mm 이내 구간에서 0.8 mm 이며 오차를 좀더 줄이기 위해서는 베이스 라인 길이(b), 컴퓨터상의 이미지 평면 x 축 값(N)을 크게 하여야 한다.

2. 측정된 발의 데이터

발의 저면부는 시스템에서 3차원 측정이 완료되고 모델 테이블이 작성되면 발의 주요 부위인 발의 길이, 폭, 볼 거스(Ball Girth)등 라스트의 중창(insole) 설계시 사용되는 데이터를 산출하게 된다. 표 2는 길이 255mm, 폭 120mm인 동일한 발을 10회씩 직접 사람이 손으로 측정한 데이터와 3차원 측정기에서 추출한 데이터를 나타내고 있다. 이

표 2. 거리 분해능.

Table 2. Distance resolution.

D_{hd}	149	150	151	152	153	154	155	156
z	601.1	599.7	597.4	594.2	591.0	589.8	586.7	583.6

표 3. 손과 3D측형으로 측정한 발 데이터(단위 : mm).

Table 3. Foot measurement data by 3D scanner and hand (Unit : mm).

측정횟수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	평균	표준편차
손	길이	253	255	256	255	254	254	257	255	255	254.3	0.7
	폭	120	117	120	117	120	115	120	116	120	118.5	1.5
3D	길이	254	254	255	254	255	255	255	254	255	254.6	0.4
	폭	120	120	120	120	118	120	116	118	120	119.2	0.8

결과로부터 사람이 직접 손으로 측정한 데이터(표준편차0.7, 1.5)보다 3D 측정 시스템에서 추출한 데이터가(표준편차 0.4, 0.8) 정확성이 높음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 맞춤형 신발 제작을 위해 필수적으로 요구되는 3차원 측정 시스템을 개발 하였다. 개발 되어진 측정시스템은 100,000개의 3차원 발 점군데이터를 제공하며 또한 신발 제작시 필요한 발의 저면부 및 측면부의 주요 부위 데이터를 제공한다. 이들 추출된 3차원 발 데이터는 다시 CNC 가공에서 사용할 수 있도록 DXF 파일로 변환되어 저장된다.

본 연구에서는, 또한 스테레오 비전의 캘리브레이션 방법을 제안하였으며 이를 통하여 실제시스템에서 소요되는 캘리브레이션 시간을 저감 시키는 효과를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통하여 제작한 3D 측정 시스템의 측정실험을 통하여 얻은 데이터는 표준편차(0.4mm, 0.8mm)의 재현성과 오차(1mm)의 측정 정밀성을 가져 신발 제작시요구되는 발 측정 오차범위(5mm)를 만족함을 확인 할 수 있었다.

마지막으로, 본 논문에서 개발한 시스템은 고객 주문형 및 맞춤형 신발 제작이 요구되는 고부가가치 신발산업 뿐만 아니라 발의 3차원 수직, 수평적 분석이 요구되는 의료 산업 분야에 다양 하게 사용 되어질 수 있음이 기대된다.

참고문헌

[1] K. C. Adrian(Brown Shoe Company), "American last making", 1, 1991.
 [2] D. Anzelc, "Practical pattern making", first edition, 1994.
 [3] P. Freychat, N. Bouche, "Dynamic arch deformation and its consequence on shoe design", *Fourth Symposium on Footwear Biomechanics*, August, 1999.
 [4] V. R. Coyles, M. J. Lake, "Forefoot plantar pressure distribution inside the soccer boot during running", *Fourth Symposium on Footwear Biomechanics*, August, 1999.

- [5] J.-A. Beraldin, Francois, L. Courmoyer, G. Godin and M. Rioux "Active 3D sensing", *Scola Normale Superiore*, Pisa 10 : 22-46; NRC 44159., 2000.(Invited paper.).
- [6] F. W. DePiero and M. M. Trivedi, "3-D computer vision using structured light : Design, calibration and implementation issues," *Advances in Computers*, vol. 43, pp. 243-278, 1995.
- [7] G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella, "3D vision based on the combination of Gray code and phase shift light projection". *Applied Optics*, 38(31) 6565-6573, 2001.
- [8] M. B. Stegmann, R. Fisker "On properties of active shape models". March 2nd 2000.
- [9] W. E. L. Grimson, "Computational experiments with a feature based stereo algorithm," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*, PAMI-7, no. 1, pp. 17-34, 1985.



김 시 경

1964년 5월 15일생. 1986년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동대학원 졸업(석사). 1994년 TexasA&M University 졸업(박사). 1994년~현재 공주대학교 정보통신 공학부 부교수.