

인체 모델 생성을 위한 등고선 삼각분할 기반의 3차원 전신 스캐너 개발

(Development of a 3D Whole Body Scanner for Reconstructing Human Body based on Contour Triangulation Technique)

최영규^{*} 구본기^{**} 최병태^{**}
(Young-Kyu Choi) (Bon-Ki Koo) (Byoung-Tae Choi)

요약 인간의 신체에 대한 정확한 3차원 표면모델을 추출할 수 있는 기술에 대한 요구와 관심이 최근 멀티미디어 등 다양한 응용 분야에서 증폭되고 있다. 본 논문에서는 인체의 3차원 모델을 효율적으로 추출하기 위한 3차원 스캐너를 소개하였으며, 취득된 3차원 정보로부터 등고선(Wire-frame Contour)을 안정적으로 생성하는 반자동 등고선 생성 방법을 제안하였다. 또한 생성된 등고선으로부터 3차원 표면모델을 추출하기 위한 표면 삼각분할 알고리즘을 제안하였다. 실험을 통해 개발된 시스템과 제안된 방법이 안정적이고 효과적으로 인체의 3차원 표면모델을 생성하는 것을 확인할 수 있었다.

키워드 : 3차원 스캐닝 시스템, 표면 모델링, 등고선 등록, 등고선 삼각분할

Abstract In the past decade, significant effort has been made toward increasing the accuracy and robustness in the three-dimensional scanning methods. In this paper, we introduce a novel laser-stripe 3D scanning system which was developed to digitize a whole human body. We also suggest a new semi-automatic contour registration method to generate robust contours from the 3D data points acquired by our scanning system. A contour triangulation based surface modeling method was also introduced. Experimental result shows that our system is very robust and efficient for reconstructing overall 3D surface model of a human body.

Key words : 3D scanning system, surface modeling, contour registration, and contour triangulation

1. 서론

지난 십여년 동안 실세계의 사물들에 대한 형태 재구성에 관한 연구가 매우 활발히 진행되어 왔다. 특히 컴퓨터 비전과 그래픽스 분야에서 3차원 표면 모델의 재구성에 대한 요구와 관심이 증폭되었는데, 기존의 수작업을 통한 모델 제작의 많은 문제점을 자동화함으로써 시간과 비용을 크게 절약할 수 있기 때문이다. 이러한 3차원 모델들 중에서도 인간의 신체에 대한 모델은 3차원 게임이나 가상현실 분야는 물론이고 헬스클럽에서의 비만 측정이나, 맞춤 부츠나 운동화의 제작, 성형, 미용 등 매우 다양한 분야에서 필요성이 절실히 대두되고 있

다. 본 논문에서는 인체에 대한 3차원 모델을 빠르고 정확하게 추출할 수 있는 전신 스캐너(whole body scanner)를 소개하고, 효과적으로 표면 모델을 생성하기 위한 알고리즘을 제안한다.

3차원 정보의 취득을 위해 지금까지 다양한 능동형 및 수동형 거리영상 취득 방법들이 제안되어왔다[1][2]. 수동형 방법은 물체 표면에 직선이나 그리드와 같은 패턴을 주사하지 않고 거리정보를 취득한다는 점에서 능동형 시스템과 차이가 있는데, 정밀도가 떨어진다는 단점이 있고 따라서 사용할 수 있는 응용 범위도 제한적이다. 이에 비하여 능동형 시스템은 물체 표면에 다양한 형태의 패턴을 주사하고 이들이 반사되어 돌아오는 정보를 이용하는 방법으로 매우 정밀한 3차원 정보의 측정이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 능동형 측정 방법의 하나인 구조광(structured lighting) 방법을 채택하였는데, 이는 비접촉식으로 취득 속도나 정밀도면에서 다른 방법들에 비해 우수하여 많은 기업이나 연구소에서

* 통신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수

ykchoi@kut.ac.kr

** 비회원 : 한국실사동성연구소 가상현실연구부 연구원

bkkoo@etri.re.kr

btchoi@etri.re.kr

논문접수 : 2002년 11월 2일

심사완료 : 2003년 5월 7일

채택되고 있다[3,4,5,6,7].

거리영상의 취득은 컴퓨터전 분야에서 지금까지 활발히 연구되어온 분야이며, 3차원 데이터에서 표면 모델을 생성하는 문제는 그래픽스 분야에서 수년전에 몇 개의 연구결과가 발표되었다. 그러나 전신 3D 스캐너와 재구성 알고리즘들에 대한 연구 결과들은 그렇게 많이 발표되고 있지 않은데, 사이버웨어사의 WB4[3]와 모아레를 사용하는 W&W사의 Triform[4]시스템이 현재 알려져 있으며 자세한 재구성 방법은 알려져 있지 않은 실정이다. WB4는 구조광 방법을 사용하며 4개의 프로브를 이용하여 3차원 정보를 추출하는데, 스캐닝 및 3차원 추출 처리 과정을 별도의 하드웨어 장비를 사용하여 실시간으로 처리하는 반면, 부가 장비의 증가로 시스템 본체의 가격이 40만 달러를 넘어 서고 있으며, Triform은 모아레 패턴을 이용하여 3차원 정보를 추출한다.

본 논문에서는 구현된 전신 스캐너는 사이버웨어의 시스템을 모델로 설계하였는데, 구조광 방법을 사용하며 측정 시스템 구조를 최적화하였고 별도의 실시간 처리를 위한 하드웨어를 사용하지 않아 상용제품 대비 75%의 가격 절감 효과를 가지도록 구현되었다. 스캐너의 각 방향의 프로브에서 추출된 정보를 통합하여 완전한 3차원 모델로 재구성하는 알고리즘도 제안하는데, 반자동 등고선 등록(contour registration)방법과 등고선 삼각분할(contour triangulation)을 재구성의 기본 틀로 사용하였다.

본 논문은 2장에서 먼저 하드웨어 구조에 대해 소개하고, 3장에서 카메라 보정방법과 거리정보 추출의 기본 개념을 설명한다. 4장에서는 취득된 3차원 데이터를 등고선으로 등록하고 등고선 삼각분할을 통해 표면 모델을 재구성하는 알고리즘을 제안하고, 5장에서 실험결과를 보이며, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 구조광 방식 전신스캐너의 구조

제안된 시스템은 인간의 신체로부터 자동으로 보다 정확한 3차원 정보를 추출하는 방향에 초점을 맞추어 설계되었는데, 그림 1은 개발된 스캐너의 구조를 나타내고 있다. 높이 2미터의 두 개의 수직 축이 대칭으로 설치되어 있는데, 각 축에 2개씩의 거리측정 프로브가 장착된다. 이들의 높이는 NC 선형보정 알고리즘을 통해 컴퓨터로 정밀하게 제어되는데, 두 축의 기계적인 정밀도는 0.05mm 이하로 보정하였다. 각 방향에서의 3차원 거리정보 추출을 위한 각각의 프로브는 구조 광(structured light) 방식을 채택하였는데, 화소수가 640×480인 흑백 CCD 카메라가 장착되었다. 또 Class II의 다이오

드 레이저가 부착되었는데 인간의 시각에 해가 없도록 하기 위해서 강도를 1.5mw이하로, 파장은 635nm로 설정하였다. 이들 프로브들은 바닥과 평행하게 수평방향으로 설치되었는데, 그림 2는 이러한 다이오드 레이저부(아래쪽 원)와 카메라부(위쪽 원)를 나타내고 있다. 하나의 축에 2개씩의 프로브가 장착되며, 전체 4 방향 프로브의 레이저가 모두 켜졌을 때 같은 높이가 되도록 정확히 정렬하였으며, NC머신에서 사용되는 선형보정 알고리즘을 통해 정확히 같은 속도로 위에서 아래로 수직 방향으로 움직이면서 머리에서부터 발끝으로 스캐닝하게 된다.

신체의 측정을 위한 대상자가 시스템 내에 서서 오래 있을 수 없기 때문에 전체 스캐닝 시간은 가능한 한 빨라야 하므로, 각 축이 수직으로 내려오다가 멈추지 않고 계속 움직이는 동안에 각 높이에서의 3차원 정보를 추출해야 한다. 이를 위해 4방향의 프로브의 거리측정시각을 정확하게 일치시켜야 하는데, 이는 각 카메라의 동기신호를 제어함으로써 가능하다. 제안된 시스템은 신장 180cm의 대상자에 대해 16.7초 정도의 스캐닝 시간이 걸리며, 4mm의 간격으로 3차원 거리정보를 얻도록 설계되었는데, 측정 오차는 1mm 이내이다.

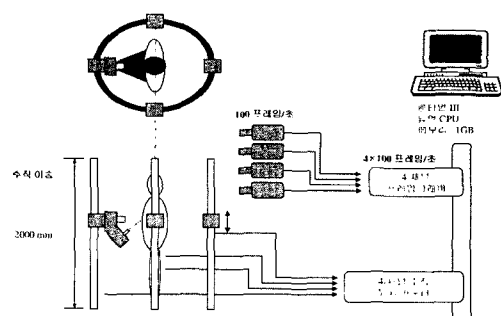


그림 1 구조광방식 전신스캐너의 구조

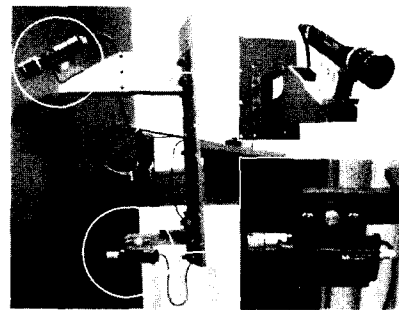


그림 2 거리측정 프로브

그림 3은 제안된 시스템의 정면도를 보여주고 있는데, 시스템 중앙의 점선으로 된 사각형 영역이 프로브의 측정 범위이다. 레이저는 바닥과 평행하게 수평방향으로 조사되고 카메라는 30도 위쪽 방향에서 레이저 빔이 인체의 표면에 반사되어 나타나는 영상을 취득하기 위해 설치되었다. 그림 4는 평면도로, 각 축은 삼각 트러스(truss) 구조를 이루고 있어 프로브가 움직이는 동안에도 안정적으로 지지해 줄 수 있도록 하였다. 또한 각 축의 수직방향 움직임에 균형을 잡아주기 위해 0.001mm 정확도의 선형스케일(linear scale)을 사용하였다. 각 프로브와 인접 프로브 사이의 작은 중심을 기준으로 75도와 105도 설정되었는데, 이는 다양한 실험을 통해 가려짐에 가장 적다고 판단되어 선택되었다. 그러나 겨드랑이나 양쪽 다리 사이와 같이 표면이 매우 근접해 있는 부분에서는 여전히 가려짐 현상이 발생할 수 있는데, 이는 CT와 같이 투과적인(transmissive) 방법이 아닌 반사적인(reflective) 방법을 사용하는 경우 피할 수 없는 문제점이다. 그러나 측정 대상자가 자세를 적절히 함으로써 그 영향을 줄일 수 있다.

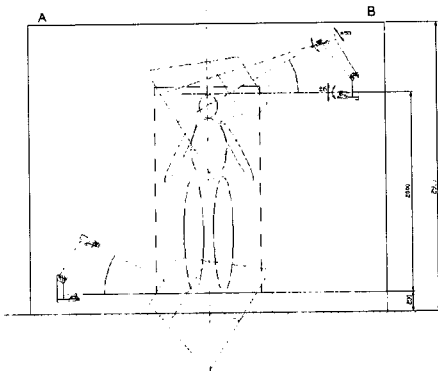


그림 3 시스템의 정면도

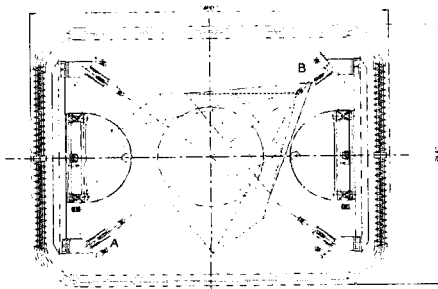


그림 4 시스템의 평면도

3. 카메라 보정과 거리정보 취득

구조 광 방식의 3차원 거리정보 측정을 위해서는 인체에 투영된 레이저 슬릿광에 대한 영상을 카메라를 이용하여 취득하고 이를 분석하여야 한다. 영상에서 레이저 빔은 밝은 띠의 형태로 나타나게 되는데, 이곳에서 거리정보가 추출된다. 본 장에서는 이를 위한 카메라 보정 방법과 3차원 거리정보 추출 방법을 설명한다.

3.1 카메라 보정(Camera Calibration)

인체에 조사된 레이저 빔을 카메라를 이용하여 영상을 취득하고 이를 분석하여 3차원 거리정보를 추출하기 위해서는 측정하고자 하는 3차원 공간상의 임의의 점 $p(X, Y, Z)$ 와 카메라를 통해 영상에 나타나는 2차원 점 $q(x, y)$ 간의 상호 변환관계를 알아야 하며, 이러한 일련의 변환관계를 유추하는 과정을 카메라 보정이라고 한다. 이를 위해, 그림 5에서와 같이 측정 영역을 모두 포함할 수 있는 2차원 카메라 보정판을 사용하였는데, 검은 바탕에 흰색의 등간 점들로 이루어져 있으며, 한 점의 크기는 8mm이고 전체적으로 36×36 (1296)개의 점으로 이루어져 있다.

이러한 카메라 보정판은 Z방향으로 움직일 수 있게 되어 있어 대상 영역을 모두 포함할 수 있게 하였으며, 4방향의 모든 프로브에 대해 시스템 설치 초기에 한 번

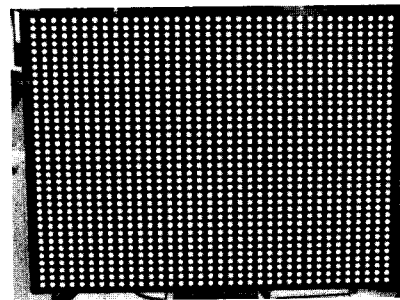


그림 5 카메라 보정판

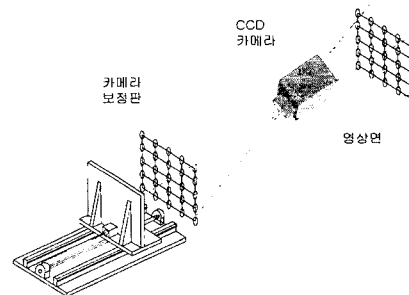


그림 6 카메라 보정 시스템의 구조

이러한 보정을 해 주어야 한다. 공간상의 3차원 점과 영상내의 2차원 점의 변환관계를 구하는 카메라 보정에는 Tsai의 방법을 사용하였다[8]. 그림 6은 카메라 보정 시스템의 구조를 보여주고 있는데, 움직임에 따라 기계적인 정밀도가 보장되도록 선형 스케일을 이용하여 제작하였다.

3.2 3차원 거리정보의 추출

레이저 슬릿광을 이용하여 형상을 측정하는 기본 과정은 물체의 표면에 슬릿광을 투영하여 표면에 형성된 레이저의 궤적을 카메라를 이용하여 획득하고, 영상처리를 통해 영상내의 정확한 레이저의 위치를 구한 후 카메라 보정 파라미터들을 이용하여 3차원 좌표로 계산되어진다. 그림 7은 이러한 레이저 슬릿광을 이용한 거리 측정 원리를 보여주고 있다.

대상 물체의 임의의 3차원 공간상의 측정점을 $p(X, Y, Z)$ 라 하고, 이에 대응하는 영상내의 좌표를 $q(x, y)$ 라고 할 때, $q(x, y)$ 와 $p(X, Y, Z)$ 사이에는 $p = Hq$ 라는 행렬식을 만족하게 되는데, 이때 H 는 영상면의 2차원 좌표와 측정 대상물의 3차원 좌표 사이의 관계를 나타내는 3×4 변환 행렬이다. 이때 점 $q(x, y)$ 는 $p(X, Y, Z)$ 뿐만 아니라 이 두 점으로 형성되는 직선상의 모든 점에 대응된다. 따라서 $q(x, y)$ 에 대한 측정점(실제 물체의 표면)을 결정하기 위해서 측정점 $p(X, Y, Z)$ 이 레이저 슬릿광의 궤적상에 놓이고, 슬릿광은 공간상의 측정 영역내에서 평면을 형성함으로써 이 평면 방정식을 이용하여 유일한 3차원 측정좌표를 구할 수 있다. 레이저 투영면의 식은 다음과 같다.

$$[X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = 0$$

이 식을 최소자승법을 이용하기 위하여 $c=1$ 로 가정

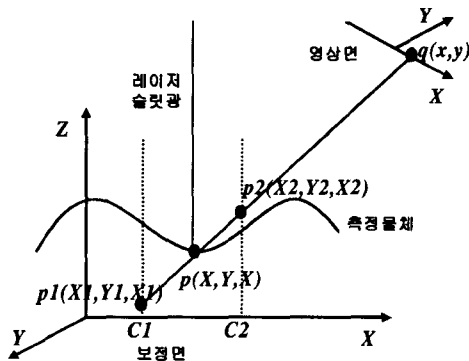


그림 7 레이저 슬릿광을 이용한 거리측정 원리

하고 m 개의 삼차원 좌표값을 이용하여 확장하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_m & Y_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_m \end{bmatrix}, \quad P=MC$$

이 식의 평면방정식의 계수를 최종적으로 구하면 다음과 같다.

$$C=[M^T M]^{-1} M^T P$$

그림 7에서 동일 직선상의 두 3차원 좌표 $p_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 와 $p_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 를 지나가는 직선의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{X-X_1}{a} = \frac{Y-Y_1}{b} = \frac{Z-Z_1}{c}$$

$$A = X_1 - X_2, \quad B = Y_1 - Y_2, \quad C = Z_1 - Z_2$$

여기에서 평면 방정식의 계수를 d, e, f, g 라고 하고 이들 식을 풀면 다음과 같다.

$$X = a \times T + X_1, \quad Y = b \times T + Y_1, \quad Z = c \times T + Z_1$$

$$T = \frac{-d \times X_1 - e \times Y_1 - f \times Z_1 - g}{MES} \quad a + e \times b + f \times c$$

이 식에서 구해지는 X, Y, Z 가 최종적인 3차원 좌표가 된다.

입력 영상에서 $q(x, y)$ 를 구하기 위해서는 적절한 영상처리가 필요한데, 먼저 처리되어야 하는 과정이 영상의 이진화이며, 이어서 세선화 과정이 필요하다. 일반적으로 영상에서 레이저 슬릿광의 영역은 매우 밝게 나타나므로 영상의 이진화는 시스템의 설정에 따라 적절한 문턱치를 사용하는 등의 방법으로 매우 간단하게 처리될 수 있다. 세선화는 두께가 여러 화소로 나타나는 슬릿광의 중심에 대해서만 3차원 정보를 추출하기 위해 처리되어야 하는데, Zhang과 Suen[9]이 제안한 방법을 사용하였다. 그러나 이 방법은 화소단위의 정확도만을 보장하므로 실험 결과 최종적인 표면에서 계단 현상이 나타났다. 이를 해결하기 위해서는 부화소(Sub-pixel) 레벨에서 세선화가 이루어져야 하는데, 영상에 나타나는 띠의 방향이 어느 정도 일정한 패턴을 가지므로 영상을 이진화 하지 않고 그레이 영상 레벨에서 부화소 레벨의 세선화가 가능하데, 현재 이에 대한 보완연구가 진행 중이다.

4. 등고선 삼각화를 이용한 표면 모델 생성

앞서 설명한 시스템의 최종 스캐닝 결과는 각 프로브에서 보이는 면(또는 피부)에 대한 3차원 데이터 포인트의 집합이 된다. 그러나 이들만으로는 인체에 대한 가시

하나 체적의 계산과 같은 다양한 용도로 사용할 수 없으며, 3차원 표면모델로 재구성하는 과정이 반드시 수행되어야 한다.

수년전부터 그래픽스 분야에서 이러한 문제에 대한 해결책이 제시되어 왔는데, Curless[10]는 이들을 두 그룹으로 분리하였다. 하나는 구성되지 않은(unorganized) 3차원 점들로부터 표면을 재구성하는 방법으로, 3차원 디지털라이저를 사용하는 경우와 같이 추출된 3차원 좌표 서로간의 상관관계를 전혀 알 수 없는 데이터에서부터 표면을 만드는 방법이다. 공간을 먼저 균일한 크기의 셀(cell)들로 분할하고 이들 사이에서 표면을 생성하는 방법(Hoppe[11])이 가장 전형적이며, 셀의 크기가 큰 경우는 모델의 정확도가 떨어지며, 작은 경우는 표면에 크랙(crack)이 발생할 수 있다는 단점이 있다.

다른 그룹으로는 취득된 데이터의 기본 구조를 유지하고 있는 경우의 표면 모델링 방법으로, 거리영상(range image)으로부터의 모델링이 이 그룹에 속하는데, 어떤 물체의 거리영상을 다양한 각도로 취득하는 경우 각각의 거리영상에서 인접한 화소는 실제로 물체에서도 근접한 표면이 되므로 이러한 정보를 모델링에 사용하는 방법이다. Turk[12]가 제안한 메쉬 짜깁기(mesh zipping)가 가장 대표적인 방법으로, 프로그램이 복잡하고 표면을 구성하기 위해 가장 인접한 표면조각을 찾는 데 모호성이 발생하며, 짜깁기 된 부분이 자연스럽게 않을 가능성이 많다는 등의 단점이 있다.

개발된 시스템의 경우 한 순간에 4 방향의 프로브에서 취득되는 3차원 점들은 모두 같은 높이 값을 갖게 된다는 특징이 있다. 따라서 이러한 성질을 충분히 활용하면서도 표면 재구성에서 모호성이 발생하지 않는 방법으로 등고선 기반의 재구성법이 가장 적합하다고 판단하였다. 이것은 먼저 각 층(높이)에서 취득된 3차원 점들을 이용해 등고선을 만들고, 다음 단계에서 인접한 층의 등고선 사이의 표면을 등고선 삼각 분할을 이용하여 보간 하여 인체의 전체 표면 모델을 재구성하는 방법이다. 본 논문에서는 이러한 등고선 등록 방법과 등고선 삼각분할 방식으로 표면을 재구성하는 방법을 제안한다.

4.1 반 자동 등고선 생성(Semi-automatic contour registration)

제안된 시스템에서는 모든 데이터들이 층별로 얻어지게 되는데, 위에서 아래방향으로 축이 움직이면서 4mm의 간격마다 4방향의 프로브들을 통해 3차원 좌표들을 추출하게 된다. 각 층에서 추출되는 3차원 좌표들을 같은 높이를 갖는 2차원 점들의 집합으로 볼 수 있으며,

따라서 3차원에서의 등고선 생성 문제는 2차원 평면상에 주어지는 점들로부터 등고선을 생성하는 문제로 단순화된다. 그러나 불행히도 이러한 2차원 점들로부터 등고선을 만드는 문제에는 다음과 같은 어려움이 있다.

1) 각 층에서 하나 이상의 등고선이 만들어질 수 있다. 예를 들어 머리카락 등의 높이에서는 하나의 등고선이 만들어지지만, 가슴 높이에서는 3개의 등고선이 만들어져야 한다(몸통과 양팔을 위한 등고선). 따라서 이 경우 등고선을 생성하는 알고리즘을 적용하기 전에 평면상의 2차원 점들을 적절한 방법으로 분할하여야 한다.

2) 머리에서부터 아래로 내려오면서 이들 등고선이 분기되는 층을 자동으로 결정하는 것 또한 매우 어려운 문제이다. 겨드랑이가 시작되는 부분의 층에서는 가려짐(occlusion)에 의해 겨드랑이 사이의 피부에서는 데이터를 취득하지 못할 가능성이 많고, 따라서 정확히 어떤 층에서 분기가 일어나는지를 자동으로 판단하기가 거의 불가능하다.

4.1.1 반자동 데이터 포인트의 분할

이러한 고찰의 결과로 본 연구에서는 반자동 등고선 생성 방법을 채택하게 되었다. 3차원 데이터가 구해지면 먼저 운영자가 분기가 일어나는 층을 결정하여 분기의 기준이 되는 분할선을 명시해 주는데, 정상적인 사람의 경우 어깨에서 2개의 팔이 시작되는 부분과 엉덩이에서 양다리로 분기되는 부분에서 분기가 발생한다. 그림 8에서와 같이 전체 데이터에서 사용자가 이 두 층(그림 8의 경우 103층과 216층)을 사용자가 결정하여 직선을 정의해 주는데, 겨드랑이의 경우 2개의 분할선이 필요하며, 엉덩이 부분에서는 하나의 분할선이 필요하다. 분할선이 결정되면 그 이후로는 모든 것을 자동으로 처리된다. 하나의 층에서 분할선이 정의되면 이 직선을 기준으로 모든 점들을 분할하여 그룹으로 만든다. 각 그룹의 중심을 구하고 인접 그룹의 중심과 연결한 직선을 계산하고 다음 층에서 사용될 분할선을 갱신한다. 그림 8의

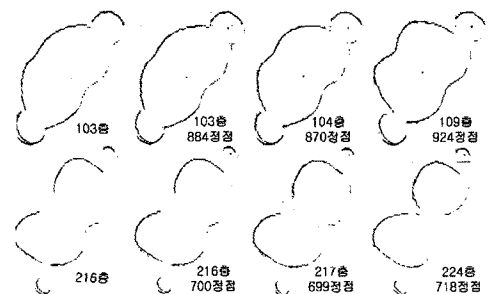


그림 8 반자동 3차원 좌표의 분할

경우 103층과 216층에서 사용자가 그림과 같이 분할선을 3개 지정해 주면(좌측 영상), 이를 이용해 점들을 분할하고 분할선을 갱신(좌에서 두 번째 영상)한다. 갱신된 분할선들은 다음 층에서의 분할선이 되어 점들을 분할하고 같은 방법으로 하나의 그룹에 점들이 하나도 없을 때까지 각 층의 점들을 분할한다. 분할선의 갱신에는 각 그룹의 중심에서 인접 그룹의 중심방향으로 가장 멀리 떨어진 점들을 인접 그룹에서 각각 구하고 그 두 점의 중심에서 이 직선의 수직방향의 직선을 생성해 이를 분할선으로 사용하게 된다.

4.1.2 등고선의 생성 (Contour registration)

점들이 각각의 그룹으로 분할되면, 하나의 그룹에 속한 2차원 좌표들로부터 등고선을 생성하는 과정이 이어지는데, 다양한 방법들을 사용할 수 있으나, 인체의 특징을 이용한 경험적인 방법을 사용하였다. 먼저 각 그룹의 점들을 포함하는 최소 직사각형을 구하고 이것의 중심을 등고선의 중심으로 사용한다. 이어서 “등고선의 중심으로부터 모든 점들이 가시적(visible)이다”는 가정하에 한쪽 방향에서부터 반시계 방향으로 모든 좌표들을 정렬한다. 마지막으로 정렬된 좌표들을 순서적으로 운행하면서 각 단위 방향의 좌표들을 계산한다. 이때, 단위 방향은 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 로 하였는데, 이 각이 크게 하면 생성되는 표면은 보다 평활화되지만 등고선의 꼭지점의 개수가 줄어들어 스캐너에서 추출된 데이터를 많이 잃게 될 수 있고, 이 각이 너무 작아지면 등고선에 잡음의 영향이 많이 나타날 수 있는데 실험결과 이 정도의 각이 적당하였다. 그림 9는 이러한 방법으로 등고선을 생성한 결과를 보여주고 있다. 모든 그룹의 좌표들에 대해 이러한 과정을 거치면 최종적으로 전신에 대한 등고선 모델이 생성되며, 이를 이용한 표면 재구성 알고리즘을 수행할 수 있게 된다.

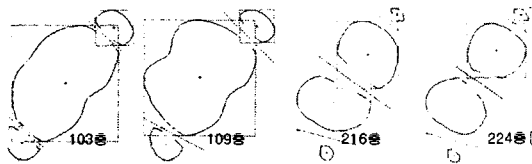


그림 9 등고선 생성 결과

4.2 등고선 삼각분할에 의한 표면 재구성

전신에 대한 3차원 좌표들이 등고선 모델로 변환이 되면 마지막으로 인접한 층의 등고선 사이의 공간을 근사하는 표면을 생성하여야 하는데 본 연구에서는 이 공간을 삼각형 표면 조각으로 채우는 방법을 사용하였다.

등고선 삼각분할이라고 불리는 이 방법은 인접한 층의 등고선의 제어점들 사이를 삼각형 표면조각으로 연결하여 표면 모델을 생성하는데, 보통, 공간을 균일한 크기의 복셀(voxel)로 나누고 이들 사이에서 표면을 만드는 방법[10]을 체적기반 모델링이라고 부르는데 비해 표면기반 모델링이라고 불린다. 이 방법의 장점은 다음과 같다.

1) 등고선들이 이미 선형적으로 보간 되었으므로 표면에 계단현상이 없고 따라서 추가적인 앤티앨리어싱 과정이 필요하지 않다.

2) 모델링에 2차원 등고선이 사용되므로 필요한 메모리의 양이 체적기반 방법에 비해 훨씬 적다.

3) 일반적으로 체적기반 모델링 방법에 비해 비슷한 정밀도로 모델링하는 경우에도 훨씬 적은 수의 표면조각을 만들게 되며, 따라서 이후의 여러 작업들의 처리시간을 크게 줄여 주는데, 특히 Gouraud나 Phong명암법을 사용하거나 Ray-casting 방법들을 사용하여 고품질의 렌더링을 하는데 걸리는 시간을 줄여준다.

4) 모델링에 걸리는 시간이 체적기반 모델링 방법에 비해 매우 짧다.

5) 등고선을 스플라인으로 근사하거나 꼭지점을 줄이는 등의 다양한 방법으로 처리하여 표면의 정밀도에 변화를 기할 수 있다.

이와 같은 장점들에 비해 다음과 같은 문제점도 있다.

1) 인접층의 등고선의 형태가 매우 다른 경우 자연스럽지 않은 표면을 만들게 되는 경우가 있다.

2) 등고선에서 분기가 발생하는 경우에 대한 처리가 어렵다.

3) 체적기반 모델링 알고리즘들이 대부분 정형화된 스캔라인 알고리즘인데 비해 일반적으로 계산기하학적인 복잡한 알고리즘을 사용하게 되어 구현이 복잡한 경우가 많다.

본 연구에서 생성되는 등고선의 형태는 인체에서 발생하는 것으로 비교적 복잡하지 않은 형태이므로 이러한 단점들도 불구하고 등고선 삼각분할 방법을 적용하는 것이 적합하다. 이러한 등고선 삼각분할에 의한 표면 재구성을 위해서는 세 가지 주요한 문제를 해결해야 하는데, 등고선 대응성문제, 표면 생성문제 그리고 표면 분기문제가 그것이다.

4.2.1 등고선 대응성 문제(correspondence problem)

등고선 대응성 결정 문제는 한 층에 있는 임의의 등고선과 표면으로 연결되어야 하는 인접층의 등고선을 결정하는 문제이다. 만약 등고선의 크기에 비해 층간의 거리가 멀다면(예를 들어 CT영상에서 혈관의 모델링)

이 문제는 매우 심각해지는데, 이를 해결하기 위해서는 보통 표면을 원통으로 근사하여 원통이 진행되어 나가는 방향을 추정하여 인접 층의 등고선간의 연결성을 판단하게 된다. 그러나 본 연구에서와 같이 등고선의 크기에 비해 인접한 층간의 간격이 매우 작은 경우(인체의 몸통 지름이 30~40cm인데 비해 층 간격은 4mm)에는 인접한 층의 두 등고선의 중첩성(superimposition)을 사용하여 쉽게 해결할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 중첩성을 이용하여 인접 층의 두 등고선의 중첩된 영역이 어느 정도 이상이면 이들 등고선이 표면으로 연결되어야 한다고 판단한다[13].

4.2.2 표면 생성 문제(tiling problem)

표면 생성문제는 단일 분기 문제라고도 하는데, 인접한 층의 한 쌍의 등고선 사이를 근사하는 가장 최적의 표면을 구하는 문제이다. 이를 위한 해결책으로 주어진 문제를 토로이달(Troidal) 그래프로 변환하고 적절한 기준(예를 들어 체적의 최대화 또는 표면적의 최소화 등)을 사용하여 최적의 경로를 찾는 그래프 탐색방법으로 해결하고자 하는 접근 방법(optimal method)과, 경험적인 방법을 사용하여 초기에 한 쌍의 꼭지점을 연결하고 이후로는 지역적인 정보만을 이용하여 표면을 생성하는 방법(heuristic method)들이 제안되었다. 본 연구에서는 기존에 개발한 띠 분할 방식[14]을 사용하였는데, 이 방법은 한 쌍의 등고선에서 최단 정점쌍을 구하여 초기 띠(initial band)로 변환하고, 하나의 띠를 연속적으로 두 개로 분할하며, 분할되지 않는 최종적인 띠는 삼각형 형태가 된다. 기본적으로 최적해 방식은 아니지만 띠를 분할하는 과정에서 기존의 경험적 방법과는 달리 많은 정보를 이용할 수 있고, 이렇게 함으로써 최적해 방법과 경험적인 방법의 장점들을 살려 보다 개선된 표면을 만들 수 있는데, 띠 분할에 사용된 최대 변위 기준이 경험적인 방법에서 발생할 수 있는 표면 생성 에러의 급격한 과급현상을 막아주게 되며, 최적해 방법에서의 처리 시간 문제를 해결해 준다.

4.2.3 표면 분기 문제(branching problem)

표면 분기문제는 한 층에서의 하나의 등고선이 인접 층의 두 개 이상의 등고선과 연결되어야 하는 경우에 발생하게 되는데, 신체에서 취득한 등고선의 경우 어깨에서 양팔이 시작되는 부분과 엉덩이에서 다리로 내려가는 부분에서 분기가 발생한다. 분기를 처리하는 다양한 방법들이 많이 발표되었는데[15], 일반적으로 그림 10에서와 같이 분기가 시작되기 직전의 층의 등고선 C_i^k 에서 분기층의 등고선(C_i^{k+1} , C_j^{k+1})의 기하학적인 정보

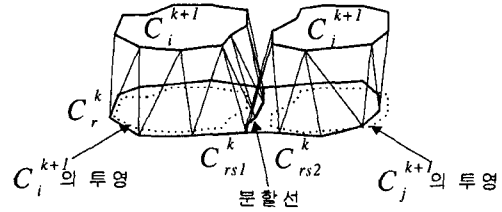


그림 10 분할선을 이용한 분기의 처리

를 이용해 폴리라인(polyline)형태의 분할선을 구하고, 이것으로 모 등고선 C_r^k 을 $C_{r_1}^k$ 과 $C_{r_2}^k$ 로 나눈다. 이렇게 되면 이 두 층 사이의 표면 재구성 문제는 두 개의 표면 생성문제로 단순화되며, 앞 절에서 설명한 방법으로 처리하여 표면을 구할 수 있게 된다. 그러나 이 과정에서의 중요한 문제는 분할선을 어떻게 구하는가 하는 것이며, 일반적인 경우 분할선을 강건하게 추출하는 것이 어려운 일이다.

본 시스템에는 이러한 분할선을 매우 간단하게 구할 수 있다. 그것은 4.1.1절에서 설명한 데이터 포인트의 분할에 사용된 분할선을 분기처리의 분할선으로 사용할 수 있기 때문이다. 예를 들어 그림 8의 경우, 103층에서 분기가 발생하였고 분할선을 사용자가 그림과 같이 정의하였는데, 이 분할선을 그 직전의 층(102층)의 등고선의 분할에 사용하게 된다. 102층의 경우 하나의 등고선이 103층의 3개의 등고선으로 분기가 되므로 그림에서 지정한 것과 같은 두 개의 분할선을 사용하여 등고선을 세 개의 영역으로 나누게 된다. 101층과 102층간의 공간의 표면 구성에서는 102층의 원래의 등고선을 사용하여 표면을 만들고, 102층과 103층간의 공간은 각각 3쌍의 등고선 사이에서 앞 절에서 설명한 방법으로 표면을 생성하게 된다. 제안된 방법에서의 분할선은 폴리라인 형태가 아니라 하나의 직선 형태가 된다. 일반적으로 분기 발생 영역에서 자식 등고선의 형태가 매우 복잡한 경우는 자식 등고선의 형태에 따라 폴리라인 형태로 분할선이 이루어져야 하지만, 본 연구에서와 같이 등고선의 형태가 단순한 경우(타원으로 근사가 잘 됨)는 하나의 직선을 이용한 등고선 분할도 무리 없이 적용될 수 있다. 이렇게 하나의 직선을 실험 결과 제안된 방법이 분기영역에서 자연스러운 표면을 생성함을 알 수 있었다.

4.3 제안된 방법의 특징

제안된 표면 모델링 방법은 다음과 같은 특징을 갖는다.
 - 등고선 기반의 재구성법을 채택함으로써 보다 정밀한 표면 재구성이 가능하며 표면 크랙의 발생이 근본적

으로 방지된다. 공간을 균일한 셀로 나누어 표면을 생성하는 Hoppe 등의 방법에서는 표면의 정밀도가 셀의 크기에 종속되며 크랙 발생가능성이 있는데 비해, 제안된 방법은 원 데이터의 정밀도가 그대로 유지되어 표면이 만들어진다. 또 메쉬 짜깁기 방법에서 발생하는 모호성 문제나 짜깁기된 영역에서 발생하는 표면의 부자연스러움이 발생하지 않는다.

- 같은 시각에 얻어지는 4 방향 프로브의 데이터는 같은 높이를 갖는다는 시스템 구조상의 특징을 활용하는 최적의 방법이 등고선 접근방법이라 할 수 있다.

- 등고선의 등록에서 무리한 전자동 시스템이 아니라 반자동 방식을 취하여 인간이 쉽게 결정할 수 있는 부분을 지정해 줄 수 있도록 함으로써 항상 안정적인 모델을 생성할 수 있다. 이러한 반자동 처리 방법은 영상의 영역분할이나 영상기반 모델링, 렌더링 등에서 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 멀티미디어 및 그래픽스 분야에서 하나의 중요한 개념이 되고 있다. 또한 본 시스템에서 사용자가 처리해야 하는 부분이 세 개의 분할선을 지정해 주는 것으로 매우 간단하며 수 초 내에 이루어지게 된다.

- 등고선 삼각분할을 이용한 표면 모델링에서 일반적인 복잡한 알고리즘을 사용하지 않고 데이터의 특성을 충분히 살려 모델링 하도록 하였다. 중첩성을 이용해 대응성 문제를 해결하였고, 기 개발된 락분할 알고리즘에 의해 표면 생성문제를 처리하였으며, 사용자가 지정한 분할선을 활용하여 표면 분기문제를 해결하였다.

이러한 제안된 모델링 방법의 특징들은 실험을 통해 개발된 시스템으로부터 추출되는 데이터의 표면 모델링에 매우 적합함을 확인할 수 있었다.

5. 실험

제안된 알고리즘은 C++ 및 C언어를 이용하여 작성되었고, Windows-NT 운영체제하의 PC에서 구현되었다. 실험에는 보통의 사람과 비슷한 크기의 마네킹을 사용하였다. 그림 11에서는 사용된 마네킹과 레이저 슬릿광이 투영되었을 때 프로브의 카메라에 촬상된 영상을 보여주고 있다. 오른쪽 영상들이 이진화 한 영상이 되는데, 앞에서 설명한 바와 같이 화소레벨의 정밀도로 세선화하는 알고리즘을 사용하여 각 라인의 중심화소를 찾고 3.2절에서 설명한 방법으로 3차원 좌표를 추출하였다.

그림 12는 각 방향의 프로브에서 인체의 어떤 부분을 측정하였는지를 보여준다. 실험결과 겨드랑이 부분에서 가려짐(occlusion)이 많이 발생하였는데, 이로 인해 팔

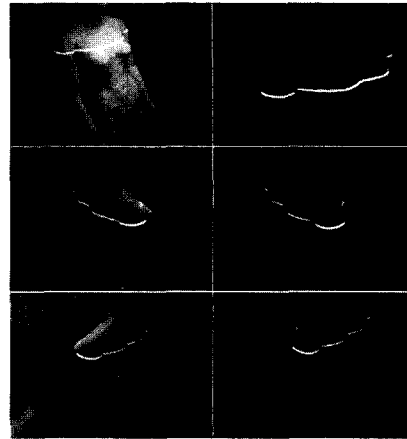


그림 11 마네킹에 투영된 레이저 슬릿광

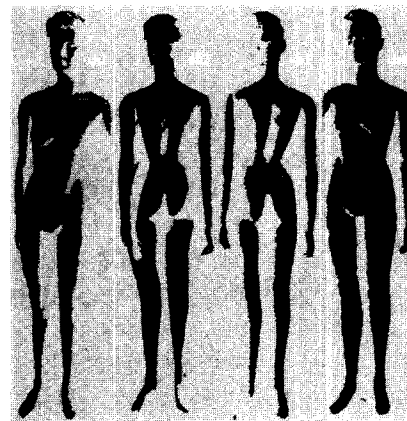


그림 12 각 방향에서 취득된 3D 포인트 데이터

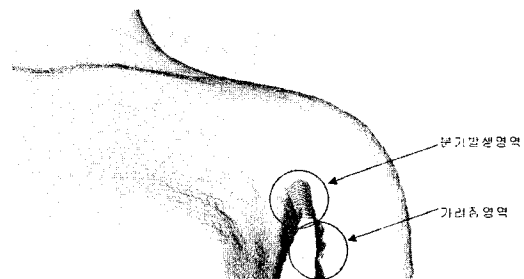


그림 13 왼쪽 어깨 분기 영역 및 가려짐(occluded) 발생 영역

안쪽의 좌표값을 추출하지 못하게 된다. 그림 13은 이러한 겨드랑이부분의 모델링 결과를 보여주고 있는데, 겨드랑이 안쪽의 팔에서 3차원 좌표가 취득되지 못해 부

자연스러운 표면을 생성하였다. 이러한 문제를 해결하는 방법은 2가지가 있는데, 하나는 가려짐이 적게 발생하지 자세에서 스캐닝을 하는 방법으로, Cyberware[16] 제품에서는 권장 자세를 지정하고 이 자세에서 스캐닝을 실시한다(실험에서는 마네킹을 사용하였으므로 권장 자세를 만들기가 어려움). 다른 방법은 가려짐에 의해 좌표가 추출되지 않은 부분에 대해 지식기반 보간(knowledge based interpolation)하는 방법이다. 가려짐이 주로 일어나는 부분이 겨드랑이와 다리 부근이고, 분기되는 등고선의 형태도 타원에 근사한 형태가 되므로, 적당한 방법으로 보이는 부분의 정보를 이용하여 나머지 부분의 데이터를 연산하여 근사할 수 있다. 예를 들어 겨드랑이부분에서 단위 방향에 대해 데이터가 없는 부분이 일정이상 연속되는 경우 이를 가려짐 영역으로 판단하고 이 영역을 데이터가 있는 다른 영역들을 사용하여 보간하는 방법을 적용할 수 있는데, 자세한 방법에 대한 연구가 현재 진행중이다.

그림 13에서는 또 분기가 발생한 경우에 대한 처리도 보여주고 있는데, 분할선을 이용한 분기의 처리가 잘 동



그림 14 상반신 모델링 결과 영상: (a) 마네킹 상체 사진, (b) 스캐닝후 등고선 생성 결과, (c) 표면 재구성 결과, (d) Gouraud Shading 결과



그림 15 마네킹 영상(좌)과 모델링 후 렌더링 영상들(우)

작함을 알 수 있다.

그림 14는 모델링 결과를 보여주고 있는데, (a)는 사용된 마네킹을 일반 카메라로 촬영한 영상이며, (b)는 제안된 방법으로 등고선을 생성한 후 등고선에 포함된 점들만을 보여주고 있다. (c)는 이러한 등고선을 제안된 방법 모델링하여 발생하는 표면 모델을 보여주고 있으며, (d)는 이를 Gouraud Shading을 사용하여 렌더링한 영상을 보여주고 있다. 그림 15는 전체 데이터에 대한 결과를 보여주고 있는데, 마네킹 영상과 모델링 후 다양한 방향에서 렌더링 한 결과를 보여주고 있다. 그림 15에서 부분적으로 표면에 계단무늬가 나타나는 것을 알 수 있는데, 이것은 그림 11의 영상에서 세선화를 화소레벨의 정밀도로 했기 때문에 발생하는 결과이다. 이를 해결하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 화소내레벨(sub pixel level)의 정밀도로 세선화하여야 한다. 이러한 실험을 통해 제안된 방법이 효율적으로 인체의 표면모델을 구할 수 있음을 확인하였다. 표 1은 전체적인 결과를 정리하였다.

표 2는 개발된 전신 스캐너와 상용 제품의 사양 비교를 보여주고 있다. 3차원 측정 센서로는 WB4와 본 시스템이 레이저 다이오드를 사용한 구조광 방식을 사용하며, Triform은 모아레 패턴을 사용하였다. 프로브의 수나 측정범위, 측정포인트, 정밀도는 등의 면에서는 비슷한 정도를 나타내며, 처리시간은 WB4가 가장 우수하였는데, 전용 그래픽 처리 하드웨어의 사용과 DSP 칩에 직접 소프트웨어를 이식하여 처리 속도를 향상 시켰기 때문이다. 이러한 전용 하드웨어의 사용은 장비 가격의 상승을 가지고 와서 경제적인 효율성을 감소시키게 된다. 개발된 시스템은 WB4에 비해 약 25%의 비용으로 구현이 되는데, PC기반 시스템이며 전체 3차원 복원 과정을 별도의 장비 없이 소프트웨어로 처리함으로써 가능하였다.

표 1 전체적인 처리 결과

총 Section의 수	513 [총]	
3차원 데이터 포인트의 개수	296880 [개] (77552+80217+66635+72476)	
등고선 생성에 사용된 Vertex의 개수	93594 [개]	
표면조각의 개수	185276 [개]	
처리시간 (Pentium 700MHz)	스캐닝 시간	≈16.7 [초]
	분할중 및 분할선 지정	< 10 [초]
	등고선 생성	2.32 [초]
	표면 재구성	1.27 [초]

표 2 기존 시스템과의 사양 비교

사양 \ 시스템	WB4[3]	Triform[4]	3D Model Studio
제작사	사이버웨어사	Wicks and Wilson Limited(W&W)	한국전자통신연구원
센서종류	레이저 다이오드	모아레 패턴	레이저 다이오드
프로브의 수 (개)	4	4	4
측정범위 (높이×직경)	2000×1200	1950×700	2100×1000
캡처시간 (초)	≈17	≈20	≈16
전체 모델생성시간 (초)	30 이하	70 이하	40 이하
측정포인트수 (포인트)	≈1,000,000	≈1,000,000	≈1,000,000
정밀도 (mm)	≈±2	≈±2	≈±2
운영시스템	SGL/PC	PC	PC

6. 결론 및 향후 과제

인간의 전신에 대한 정확한 모델을 추출할 수 있는 기술이 멀티미디어 등 다양한 응용 분야에서 요구되고 있다. 이러한 전신에 대한 모든 방향의 표면을 구하는 스캐너 시스템과 모델링 방법에 대한 연구결과는 현재 국내에서 거의 발표되고 있지 않다. 본 논문에서는 인간의 신체에 대한 3차원 표면 모델을 효율적으로 추출하기 위한 3차원 스캐너를 소개하였으며, 취득된 3차원 점들로부터 등고선을 안정적으로 생성하는 반자동 등고선 생성 방법을 제안하였다. 또한 이를 통해 생성된 등고선(wire-frame contour)으로부터 3차원 표면모델을 추출하기 위한 표면 삼각분할 방법을 제안하였다. 실험을 통해 개발된 시스템과 제안된 방법이 인체의 3차원 표면모델의 생성에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

앞으로의 연구 방향은 생성되는 모델에 매핑할 컬러 텍스처(texture)를 구하는 방법과 앞서 언급한 가려짐의 처리와 부화소(sub-pixel) 레벨의 세션화 알고리즘에 대해 진행되어야 한다. 또한 현재의 알고리즘을 개선하여 보다 정확한 표면을 취득할 수 있도록 하는 것과 특히 가려짐이 발생하는 부분에 대해 지식기반 보간법(knowledge-based interpolation)에 대해서 연구가 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] M. Hebert, "Active and passive range sensing for robotics," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 102-110, April, 2000.
- [2] R. Klette, K. Schluns, and A. Koschan, "Computer Vision," Springer-Verlag Singapore, 1998
- [3] Cyberware co., "WB4 Whole Body Color 3D Scanner," www.cyberware.com.
- [4] Wicks and Wilson Limited, "Triform Body Scanner," www.wwl.co.uk.
- [5] M. Levoy, K. Pulli, et al., "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," SIGGRAPH2000 Conference Proc., pp. 131~144, Jul. 23~28, 2000.
- [6] J. Davis and X. Chen, "A Laser Range Scanner Designed for Minimum Calibration Complexity", Proc. 3DIM 2001
- [7] I. B. Kong and S. W. Kim, "General Algorithm of Phase Shifting Interferometry by Iterative Least Square Fitting," Optical Eng., 34, no. 2, pp. 183-188, 1995
- [8] R. Y. Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, pages 364-374
- [9] T. Y. Zhang, C. Y. Suen, "A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns," Comm. ACM, vol. 27, no. 3, pp. 337-343, 1997
- [10] B. Curless and M. Levoy, "A volumetric method for building complex models from range images," Proceedings of SIGGRAPH 96 (New Orleans, LA, August 5-9 1996), ACM Press, pp. 303-312.
- [11] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, "Surface reconstruction from unorganized points," In Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Proceedings), volume 26, pages 71-78, July 1992.
- [12] G. Turk and M. Levoy, "Zippered polygon meshes from range images," In Proceedings of SIGGRAPH 94 (Orlando, FL, July 24-29, 1994), pages 311-318. ACM Press, July 1994.
- [13] Y. K. Choi, "Surface reconstruction from a set of wire frame contours," Ph.D thesis. Korea Advanced Institute of Science and Education, 1995.
- [14] Y. K. Choi, "Band partitioning algorithm for surface reconstruction from planar contours,"

Electronics Letters, Vol. 35, No. 20, pp. 1713-1714, Sep, 1999

- [15] 최영규, "이중분기 확장을 통한 등치선 삼각화의 다중 분기 알고리즘", 정보과학회논문지 제 27권, 2호, pp. 123-134, 2000년 2월
- [16] Addleman, Stephen R., Cyberware, Inc., "Whole-body 3D scanner and scan data report," Proc. SPIE Vol. 3023, p. 2-5, Mar. 1997.



최 영 규

1989년 경북대학교 전자공학과(학사)
 1991년 KAIST 전기 및 전자공학과(석사). 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과(박사). 1995년~1999년 LG산전연구소 영상연구실 선임연구원. 1999년 3월~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 조교수. 관심분야는 Volume Visualization, 가상현실, Computer Vision, 생체인식 등



구 본 기

1995년 경북대학교 전자공학과 학사
 1997년 경북대학교 전자공학과 석사
 1997년~1998년 시스템공학연구소(SERI) 연구원. 1998년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 가상현실연구부 CG기반기술 연구팀 선임연구원. 관심분야는 컴퓨터비전, 3D Imaging, 가상현실, 컴퓨터그래픽스, 온라인 게임



최 병 태

1986년 경북대학교 전자공학과 학사
 1991년 KAIST 전산학과 석사. 1986년~1988년 삼성전자(주) 사원. 1991년~현재 ETRI 책임연구원, CG기반기술연구팀 팀장. 관심분야는 가상현실, 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 온라인 게임