

〈論 文〉

## ‘93 대전엑스포 꿈돌이 조각가로봇의 인물형상 측정시스템

김승우\* · 박현구\* · 최이배\* · 김문상\*\*

(1993년 9월 16일 접수)

### 3-D Profile Measurement System of Live Human Faces for the ‘93 Taejon Expo Kumdori Robot Sculptor

Seung-Woo Kim, Hyun-Goo Park, Yi-Bae Choi and Moon-Sang Kim

**Key Words :** Sculptor Robot(조각가로봇), Three Dimensional Profile Measurement(삼차원형상측정), Slit Beam Projection(슬릿광주사법), Projection Type Slit Beam Method(영사식 슬릿광형상측정법), Moire Topography(모아레형상측정법), Camera Calibration(카메라보정), Sculptured Surfaces(자유곡면)

#### Abstract

This paper presents the 3-D profile measurement system of live human faces, which was developed specially for ‘KUMDORI sculptor robot’ of the ‘93 Taejon Exposition. ‘93 Taejon EXPO. The basic principle for measurement adopts the slit beam projection which is a method of measuring 3-D surface profiles using geometric optics between the slit beam and the CCD camera. Since the slit beam projection consumes long measuring time, it is unfit to measure the 3-D profiles of living objects as human. Therefore, the projection type slit beam method which consumes short measuring time is newly suggested. And an algorithm to reconstruct the 3-D profile from the deformed images using finite approximated calibration is suggested and practically implemented. The projection type slit beam method was applied to spectators in a period of ‘93 Taejon EXPO. The measurement results show that the technique is suitable for 3-D face profile measurement on a living body.

#### 1. 서 론

본 논문에서는 ‘93년 대전엑스포에 전시된 꿈돌이 조각가로봇에 설치된 인물형상 측정시스템의 설계 및 측정방법에 대해 세부적으로 기술한다. 꿈돌이 조각가로봇의 전체 기능은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 전시장에서 임의의 관람자로부터 얼굴의

3차원 형상을 고속으로 자동측정한 후, 측정된 얼굴형상정보를 기준으로 산업용 로봇을 이용하여 현장에서 직접 조각을 구현하도록 되어 있다. 본 전시의 주요 목적은 일반 국민들을 대상으로 현재 생산기술분야에서 활용되고 있는 메카트로닉스 자동화기술들을 집약하여 조각가로봇을 통해 구현함으로써 이들 기술들의 현황과 미래의 발전방향을 쉽게 이해하도록 함에 있다.

꿈돌이 조각가로봇의 인물형상의 3차원 측정용 슬릿광주사법(slit beam projection)에 근거한 비접촉식 자동측정기술에 의해 실현된다. 측정방법을

\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

\*\*정회원, 한국과학기술연구원

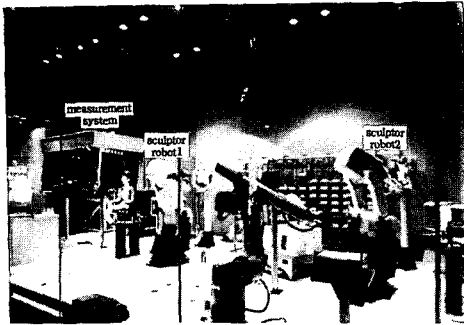
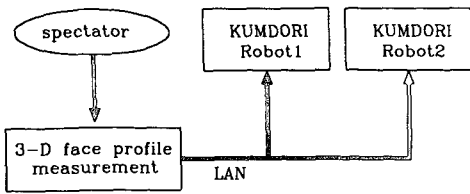


Fig. 1 KUMDORI sculptor robot system

선정하는 과정에서 측정대상인 사람의 얼굴로부터 생동감 있는 표정형상을 얻기 위해 가능한 빠른 시간내에 측정정보를 추출하는데 중점이 주어졌다. 이를 실제로 구현할 수 있는 측정방법으로 모아레법<sup>(1-4)</sup>과 슬릿광주사법<sup>(4-7)</sup>이 개발 초기단계에서 검토되었으며 최종적으로 슬릿광주사법이 채택되었다. 모아레법은 비슷한 주기를 갖는 두 개의 무늬를 중첩시켰을 때 형성되는 모아레무늬를 이용하여 3차원 형상을 측정하는 방법으로 빠른 시간에 측정정보를 갖는 영상을 촬영할 수 있는 장점을 가지나, 영상처리단계에서 요구되는 절대 모아레차수의 산출에 있어 자동수행이 어려운 문제점을 갖는다. 반면, 본 조각가로봇에 도입된 슬릿광주사법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 카메라사이의 기하광학을 이용하는 광삼각법(optical triangulation)에 의한 3차원 측정기술로 영상처리의 발전과 더불어 측정의 전체 공정을 자동화하기에 적절한 방법이다.

꿈돌이 조각가로봇이 요구하는 측정시스템의 기본 측정사양은 Table 1에 요약된 바와 같다. 측정분해능은 0.2 mm, 측정범위는 얼굴의 전 영역을 포함할 수 있는 300 mm×300 mm×200 mm로 하였다. 개발에 있어 가장 중점이 주어진 사양인 측정 촬영시간은 측정대상인 인물을 3초 이내동안 고정된 상황에서 3차원 형상에 관련된 정보를 촬영할 수 있도록 하여 가급적 생동감있는 표정을 얻고자 하였다. 또한, 촬영된 정보로부터 조각에 필요한 3

Table 1 Specification of the measurement system

Contents	Specification
Measurement uncertainty	0.2 mm/200 mm
Measurement volume	300 mm×300 mm×300 mm
Image capturing time	2~3"
3-D shape reconstruction time	2~3'

차원 형상 데이터는 디지털 영상처리기술을 통해 2분 이내에 추출하여 조각을 위해 로봇제어기로 고속으로 전송되도록 결정되었다.

## 2. 측정시스템 설계

전체 측정시스템은 Fig. 2에서와 같이 두 대의 슬릿광투사기(slit beam projector), 두 대의 CCD 카메라 그리고 영상처리를 위한 마이크로컴퓨터(IBM PC 486)를 중심으로 한 광전자시스템으로 구성된다. 측정의 기본방법은 슬릿광투사기로부터 여러개의 평면광을 주사하여 얼굴 표면에 형성되는 광의 궤적을 카메라를 이용하여 획득한다. 이때의

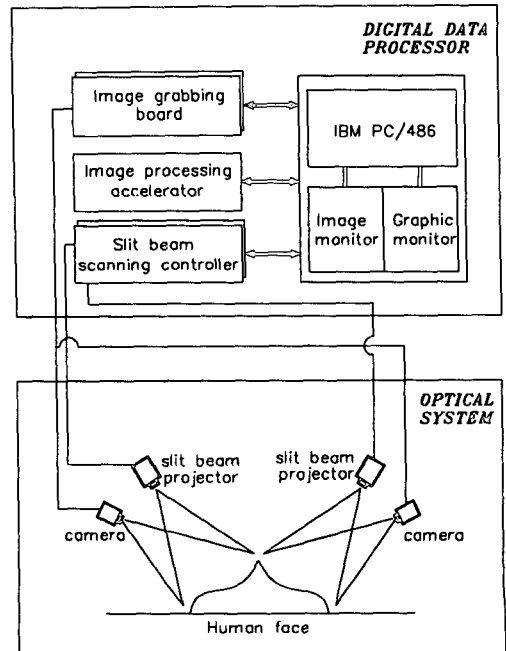


Fig. 2 Schematic diagram of the measurement system

광학계는 물체의 3차원 형상 정보를 갖게 되며 이를 주사된 슬릿광과 카메라의 공간상의 기하학적 관계로부터 영상처리 기술을 이용하여 산출하게 된다. 촬영시간을 단축하기 위하여 8개의 다중 슬릿광이 좌우에 위치한 광원으로부터 동시에 투사되며, 이를 8회 일정한 피치로 반복 주사함으로써 일

굴 측정에는 총 128개의 슬릿광이 얼굴 좌우면에 각각 64개씩 일정 간격으로 투사되도록 되어있다.

Fig. 3은 측정시스템의 광학계에 관한 세부설계를 보여준다. 측정시스템의 기본단위는 1대의 슬릿광투사기와 1대의 CCD카메라로 구성되며, 이를 얼굴 좌우면에 대칭으로 2조를 설치하여 조각에 필요한 얼굴형상의 전 범위를 동시에 측정한다. 슬릿광 투사기에는 할로겐램프(Halogen lamp)를 이용한 백색광을 광원으로 사용하였다. 슬릿광 투사기의 오브젝트 플레인(object plane)상에 놓여 있는 직선격자의 영상을 집광렌즈를 통하여 측정대상물에 투사한다. 슬릿광을 얻기 위한 직선격자는 Fig. 4(a)에서와 같이 8개의 직선으로 구성되어 있으며 본원의 전자과 반도체실험실에서 전자빔(E-beam)가공기를 이용해서 직접 설계·제작하였다. 이 직선격자는 격자선 사이의 일정간격을 보강하기위해 스테핑모터로 일정간격의 피치를 이동하면서 8회 반복적으로 투사된다. 이는 결과적으로 Fig. 4(b)와 같은 64개의 격자를 투사한 것과 같은 동일한 효과를 가지나, 64개의 슬릿광을 동시에 투사할 경우 카메라에 포착된 영상으로부터 각각의 슬릿광을 분리하는데 발생하는 어려움을 제거하기 위해 8개의 개별적인 영상으로 포착되도록 고안되었다. 포착된 카메라로부터의 8개의 영상은 영상처리보드(frame grabberA)의 영상메모리에 저장된 후 영상처리 알고리즘에 의해 일괄 처리된 후 합성된다. 또한 좌우로부터 투사되는 격자가 양쪽 카메라에 중첩되어 포착되면 영상처리의 혼란이 야기되므로 좌우의 광학계는 밴드패스필터에 의해 고립되어 왼편 카메라는 왼편 슬릿광투사기의 슬릿광만을 오른편 카메라는 오른편 투사기의 슬릿광만을 획득하도록 설계되었다. 사용된 밴드패스필터의 통과대역은 각각

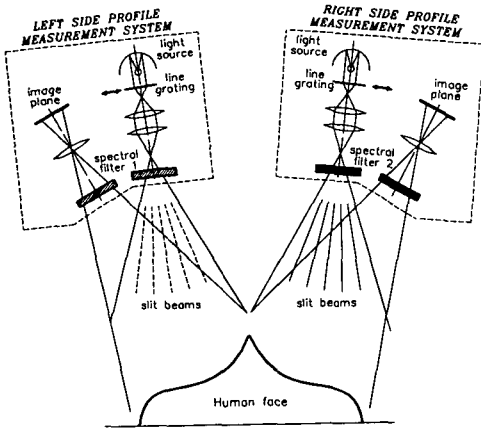
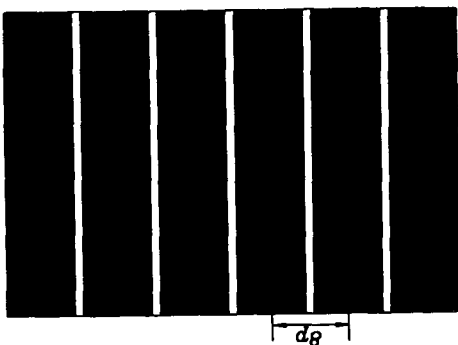
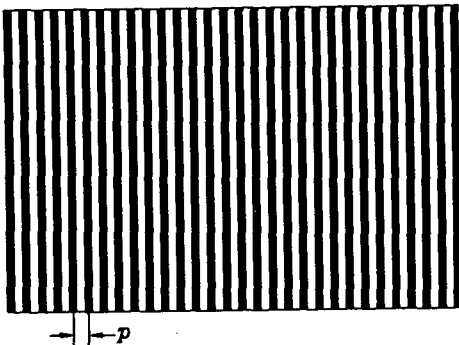


Fig. 3 Optical configuration of the measurement system



(a) Actual grating



(b) Equivalent grating after lateral scanning

Fig. 4 Projection grating



Fig. 5 Hardware setup of the measurement system

550±20 nm와 650±20 nm이며 투과율은 70%로 동일하다. Fig. 5는 최종적으로 제작된 측정시스템을 보여준다. 영상처리에 사용된 컴퓨터는 IBM PC 486으로 CCD카메라로부터의 비디오신호(NTSC 신호)를 디지털화하는 영상처리보드(frame grabber : 미국 Imaging Technology사의 OFG 모델)와 영상처리의 고속화를 위한 영상처리가속기(image processing accelerator : 미국 Imaging Technology사의 VIPA 모델)를 내장하고 있다.

### 3. 측정 알고리즘

#### 3.1 기본 원리

Fig. 6은 슬릿광주사법의 기본 측정원리를 보여준다. 측정물체를 기준으로 그림에서와 같이  $x_1x_2x_3$ -직교좌표계를 설정하여 측정물체상의 임의의 점을  $p(x_1, x_2, x_3)$ 로 표현하면, 측정하고자 하는 물체표면  $S$ 의 3차원 형상은 물체상에 위치한 점들의 집합으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S = \{p(x_1, x_2, x_3) \mid p(x_1, x_2, x_3) \in S\} \quad (1)$$

또한, 점  $q(y_1, y_2)$ 는 점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 에 대응되는 영상점으로 카메라 영상면에 설정된 2차원  $y_1y_2$ -직교좌표계로 정의한다. 이때 영상점  $q(y_1, y_2)$ 와 점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 의 관계는 카메라를 이상적인 핀홀형(pin-hole model)으로 가정하면 일반적인 원근투영법(perspective projection)에 의해 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

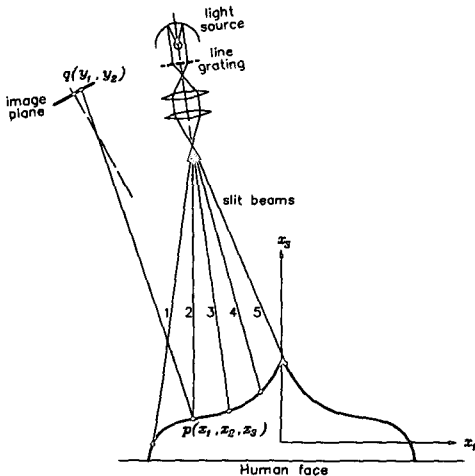


Fig. 6 Basic principle of the slit beam projection

$$\bar{y} = A\bar{x} \quad (2)$$

위 식에서 행렬  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 와  $q(y_1, y_2)$ 로부터 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{x}(x_i) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

그리고

$$\bar{y}(y_i) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(2)의  $A$ 는 영상점의 2차원 좌표와 측정표면상의 점의 3차원 좌표와의 관계를 나타내는  $3 \times 4$ 의 변환행렬로, 이의 역행렬은 존재하지 않는다. 이는 영상점  $q(y_1, y_2)$ 는 점  $p(x_1, x_2, x_3)$  뿐 아니라 이들 두 점을 연결하는 영상선(camera imaging line)상의 모든 점에 대응되고 있음을 의미한다. 따라서 영상점  $q(y_1, y_2)$ 로부터 측정물체상의 측정점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 를 유일하게 결정하기 위해서는 추가 정보가 요구되며 이는 투사되는 슬릿광으로부터 얻게 된다. 측정점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 가  $j$ 번째 슬릿광 케적상에 놓인다면, 슬릿광은 공간상에서 평면을 형성하므로 이의 평면방정식  $S^j$ 는 상수행렬  $\bar{a}^j$ 를 도입하여 다음과 같은 행렬식으로 기술될 수 있다.

$$S^j = \bar{a}^j \bar{x} = [a_1^j \ a_2^j \ a_3^j \ a_4^j] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

이 식을 식(2)와 병렬하여 하나의 행렬식으로 표현하면 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_1^j & a_2^j & a_3^j & a_4^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

또는

$$\bar{y}_e = A_e \bar{x} \quad (7)$$

이때  $A_e$ 는  $4 \times 4$ 행렬로 역행렬이 존재하게 되며 측정점의 3차원좌표는 최종적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{x} = A_e^{-1} \bar{y}_e \quad (8)$$

3.2 카메라 보정

식(2)의 변환행렬  $A$ 는 일반적으로 사용되고 있는 원근변환법(perspective transformation)<sup>(8,9)</sup>에 의해 결정될 수 있으나 이 원근변환법은 카메라를 핀홀(pin-hole)형으로 단순화하여 영상선이 항상 공간상에서 직선을 유지하는 것으로 가정한다. 그러나 일반적으로 카메라에 사용되는 렌즈는 각종 수차(abberation)와 가공의 불완전으로 인하여 영상면에 얻어지는 상에는 굴곡(distortion)이 존재하게 되며, 이로 인해 영상선이 공간상에서 하나의 직선으로 간주되면 측정정밀도에 오차를 유발하게 된다. 이러한 원근법 적용의 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 비전(vision)에서 사용되는 카메라보정법중에서 기존의 두 보정판 방법<sup>(10-11)</sup>을 확장하여 슬릿광형상측정법의 보정방법으로 개선한 유한근사보정법(finite approximated calibration)을 사용하였다. 먼저 Fig. 7(a)에서와 같이 측정범위내의 전체 공간을 직육면체의 유한요소들로 분할한 후, 각 유한요소 내에서 영상선은 직선을 유지하는 것으로 가정한다. 공간상의 유한요소들의 실제적인 구성은 격자점들의 2차원 좌표값을 미리 알고 있는 사각형격자로 구성된 평면 보정판(calibration plate)을  $x_3$ 축 방향으로 우리가 이미 알고 있는 간격  $\Delta x_3$ 씩 평행이동시키면서 구성한다. 이때 보정판으로의 투영점이 Fig. 7(b)에서와 같이  $x_3 = k\Delta x_3$ 인 보정판의  $(i, j)$ 번째 직사각형의 셀(cell)에 위치한 경우 격자점과 이에 대응되는 영상점의 좌표들간의 관계는 다음의 행렬방정식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{y} = A_k^k \bar{x} \tag{9}$$

만약 카메라의 굴곡이 심한 경우에는 식(9)의 행렬  $\bar{y}$ 를 다음과 같이  $y_1$ 과  $y_2$ 로 구성되는 다차항들을 추가하여 정의할 수 있다.<sup>(8)</sup>

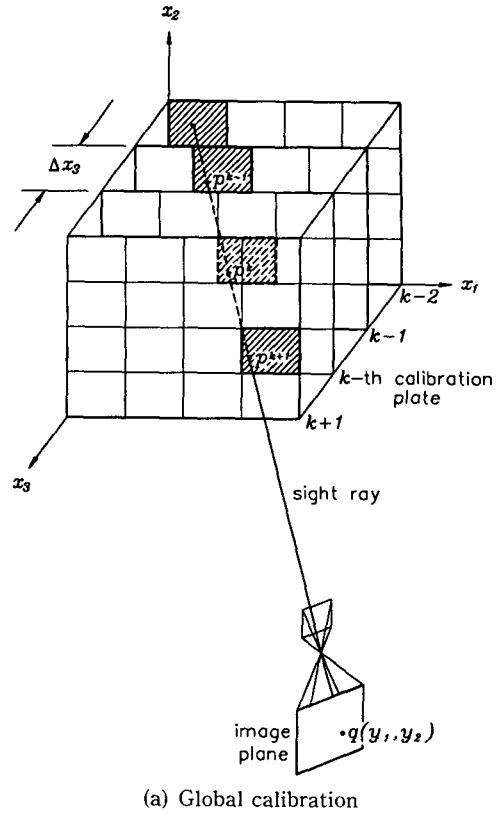
$$\bar{y} = [y_1 \ y_2 \ y_1 y_2 \ 1] \tag{10}$$

변환행렬  $A_k^k$ 를 구함에 있어 식(5)의 변환관계를  $x_3 = k\Delta x_3$ 에 위치한 보정판상의 셀  $(i, j)$ 의  $m$ 개의 격자점에 대해 적용하면 이의 결과는 다음과 같이 확장된 행렬식으로 얻어진다.

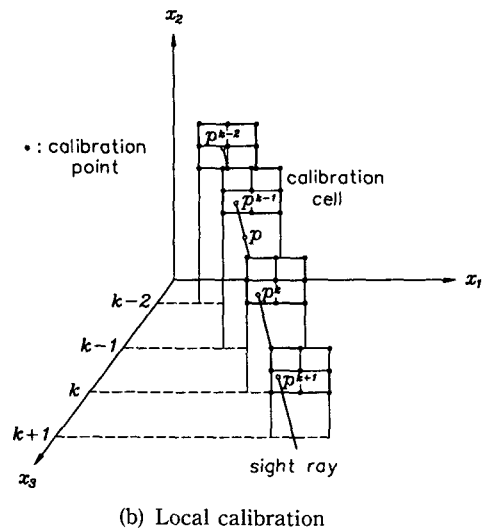
$$[\bar{y}_1 \ \bar{y}_2 \ \dots \ \bar{y}_m] = A_k^k [\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \dots \ \bar{x}_m] \tag{11}$$

이를 다음의 행렬식으로 간단히 표현한다.

$$Y = A_k^k X \tag{12}$$



(a) Global calibration



(b) Local calibration

Fig. 7 Finite approximated calibration of cameras

이때 격자점의 수  $m$ 이 충분히 크게 선정이 되면 위 식으로부터 행렬  $A_k^k$ 의 해는 일반적인 최소자승법에서의 해를 구하는 방법과 같이 다음과 같이 구해진다.

$$A_{ij}^k = YX^T[XX^T]^{-1} \quad (13)$$

식(13)으로부터 구해지는 변환행렬  $A_{ij}^k$ 는  $x_3 = k\Delta x_3$ 에 위치한 보정판의 셀중에서  $(i, j)$ 에서만 유효하다. 그러므로  $x_3$ 축의 전체 측정구간에서 보정판을  $k=1 \sim l$ 인 위치로 이동시키면서 그 면상의 모든 보정셀에 대해 변환행렬  $A_{ij}^k (i=1 \sim p; j=1 \sim r)$ 을 산출한다.

식(8)에서 보인 바와 같이 임의의 측정점  $p(x_1, x_2, x_3)$ 의 정확한 3차원 좌표  $(x_1, x_2, x_3)$ 를 산출하기 위해서는 이 측정점에 대응되는 변환행렬이 결정되어야 한다. 이 행렬을 결정하여 측정점의 3차원좌표를 산출하는 전체적인 측정과정은 아래에 기술된 바와 같은 반복적인 절차(iteration)에 의해 수행된다. 맨처음 초기측정에서는 모든 보정판에서 영상점  $(y_1, y_2)$ 의 영상선이 교차하는 보정셀을 결정하고 이들 셀의 변환행렬중에서 임의의 변환행렬  $A_{ij}^k$ 가 영상선의 모든점에 적용된다고 가정한 후 식(8)을 통해 측정점들의 3차원 좌표를 산출한다. 이로부터 얻어진 임의의 측정점의  $x_3$ 좌표가  $(k-1)\Delta x_3$ 와  $k\Delta x_3$ 에 위치한 두 보정판 사이에 존재하고, 각각 두 보정판에서 영상선이 교차하는 셀이  $(i, j) |_{x_3=k\Delta x_3}$ 와  $(l, m) |_{x_3=(k-1)\Delta x_3}$ 이라면 변환행렬은 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$A = \kappa_{x_1} \kappa_{x_2} \kappa_{x_3} A_{lm}^{k-1} + (1 - \kappa_{x_1})(1 - \kappa_{x_2})(1 - \kappa_{x_3}) A_{ij}^k \quad (14)$$

여기서, 상수  $\kappa_{x_i} (i=1, 2, 3)$ 는 다음과 같이 선형 보간된다.

$$\kappa_{x_i} = \frac{x_i^k - x_i}{x_i^k - x_i^{k-1}} \quad (0 \leq \kappa_{x_i} \leq 1) \quad (15)$$

측정의 반복적인 절차는 선정되는 변환행렬  $A$ 가 전단계의 변환행렬과 가까워지고 계속되는 반복작업에도 변화가 없으며, 환산된 측정점의  $z$ 축 방향으로의 오차범위가 우리가 원하는 오차범위(0.1 mm)보다 작게 되었을 때 반복작업을 종료한다. 이러한 일련의 과정이 끝났을 때 얻어지는 좌표  $(x_1, x_2, x_3)$ 가 측정하고자 하는 점의 3차원 좌표이다.

### 3.3 슬릿광 보정

측정을 위해 물체상에 투사되는 슬릿광들은 공간상의 측정영역내에서 평면을 형성하며 임의의  $j$ 번째 슬릿광의 투영면의 식은 다음과 같이 측정좌표계에 대해 정의될 수 있다.

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ 1] \begin{bmatrix} a_1^j \\ a_2^j \\ a_3^j \\ a_4^j \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

위의 식을 최소자승법을 이용하여 구하기 위하여 슬릿광의 평면방정식이  $x_1$ 축과 평행하지 않다고 가정하고,  $a_1^j$ 를 1로 가정하여 식(16)을 풀어 선형방정식을 세우면 다음과 같다.

$$-x_1 = [x_2 \ x_3 \ 1] \begin{bmatrix} a_2^j \\ a_3^j \\ a_4^j \end{bmatrix} \quad (17)$$

슬릿광의 투영면에 존재하는 임의의  $m$ 개의 좌표값들을 대표적으로 위의 식에 대입하면 다음과 같이 확장된 행렬식으로 표기할 수 있다.

$$- \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{1m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{21} & x_{31} & 1 \\ x_{22} & x_{32} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{2m} & x_{3m} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2^j \\ a_3^j \\ a_4^j \end{bmatrix} \quad (18)$$

또는,

$$X_1 = MC^j \quad (19)$$

식(19)의 해는 최소자승법을 이용하면 최종적으로 다음과 같이 유도된다.

$$C^j = [M^T M]^{-1} M^T X_1 \quad (20)$$

실제로 슬릿광투영면의 식을 산출하기 위해서는 슬릿광투영면에 존재하는  $m$ 개 점들의 3차원 좌표 측정이 요구된다. 본 연구에서는 카메라보정에서 사용되는 보정판에 슬릿광을 투영하였을 경우 형성되는 광케적상의 점들의 3차원 좌표를 측정하여 식(20)의 해를 구하는데 사용하였다. 이들 점들을 측정하는 세부과정은 다음과 같다.  $x_3 = k\Delta x_3$ 에 위치한 보정판에 슬릿광을 주사하여 광케적영상을 획득한다. 이 영상에서 일정한 농도값(intensity) 이상을 가진 화소로부터 변환행렬  $A_{ij}^k$ 를 이용하여 보정판에 형성된 직선 광케적의 3차원 좌표를 측정한다. 이와 같이 산출된 한 직선상의 좌표만으로는 슬릿광의 평면방정식을 산출할 수 없다. 따라서  $x_3 = (k+1)\Delta x_3$ 인 위치에 놓인 보정판에 슬릿광을 투영하고 앞의 과정을 반복하여 또 다른 보정판에 위치한 직선광케적의 3차원 좌표를 측정한다. 위의 과정을 통해 측정된 두 보정면상에 위치한 직선광케적의 좌표들을 식(20)에 대입하여 슬릿광의 평면

방정식의 계수를 산출한다.

#### 4. 측정결과 및 토의

이상에서 기술된 영사식 슬릿광형상측정법을 이용한 인물두상의 3차원 형상측정시스템이 Fig. 5에서와 같이 설계 제작되어 설치되었고, 측정조건이 다르고 다양한 형상을 갖는 엑스포의 관람자들을 대상으로 측정을 수행하여 만족할 만한 결과를 얻었다. Fig. 8은 한쪽 얼굴의 형상을 측정하기 위해 설치된 광학계를 보여준다. Fig. 9~Fig. 11은 꿈돌이 조각가로보트의 기능을 형상측정에서부터 조각하는 일련의 과정을 보여준다. 측정물체의 형상에 따라 변형된 슬릿광계적으로부터 3차원 형상을 재현하기 위해서는 측정을 하기 전에 반드시 카메라 보정과 슬릿광보정이 요구된다. Fig. 9는 카메라보정과 슬릿광보정을 위해 사용된 보정판에 슬릿광을 투영한 그림이다. 실제로 카메라보정에는 두 개의 보정판만이 사용되었다. 보정점으로 격자점과 이점에 상응하는 영상점으로는 보정판의 수직·수평 격자선에 대응되는 경계선영상(edge line image)들

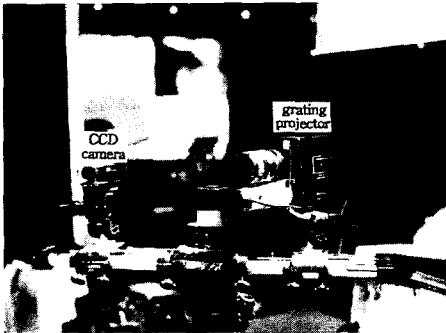


Fig. 8 Close look-up of the measurement system

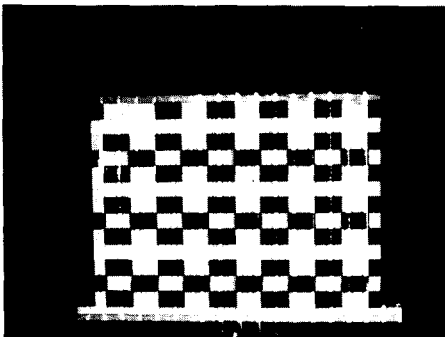


Fig. 9 Calibration plate

의 교점을 산출하여 사용하였다. 경계선영상의 식은 보정판의 영상에 가우시안함수(Gaussian function)의 일차도함수를 컨벌루션하고 일정한 값 이상을 가진 화소를 고려하여 최소자승법을 이용하여 얻었다. 슬릿광들의 면의 방정식은 Fig. 9에서와 같이 실제 보정판에 슬릿광을 투영하여 획득되는 영상을 2진영상으로 변환하고 앞서 제안된 방법에 의해 산출하였다. 여기서 구해진 슬릿광의 투영면의 식과 반복적인 과정을 통해 얻어지는 측정점의 변환행렬  $A$ 로부터 3차원 형상을 산출하게 된다. Fig. 10(a~f)는 측정대상인 사람의 얼굴에 슬릿광을 투영하여 최종적으로 형상이 얻어지는 과정이다. 이 측정과정의 세부적인 일련의 영상처리과정은 다음과 같다. Fig. 10(a)에서와 같이 측정대상인 사람이 형상측정시스템의 의자에 앉으면 측정위치를 조절하고 격자를 얼굴에 투영하여 획득되는 영상은 밴드패스필터의 통과, 피부에서의 흡수 그리고 빛의 파장에 대한 CCD카메라의 감도 등으로 인해 가시성이 저하된다. 따라서 배경이나 노이즈를 제거하고 가시성을 향상시키기 위해 두 측정시스템의 CCD센서의 출력이 다음과 같은 관계가 성립하도록 룩업테이블(look-up table : 입력빛의 강도에 따른 영상처리보드의 출력 테이블)을 조정한다.

$$I_{out} = \begin{cases} 255 \frac{I_{max} - I}{I_{max} - I_{cut}} & I > I_{cut} \\ 0 & I < I_{cut} \end{cases} \quad (21)$$

여기서,  $I_{max}$  : 영상에서 최대 밝기이다. 다음 측정 단계로 두 측정시스템에서 스텝핑모터를 이용하여 격자를 이동시키면서 Fig. 10(b)와 같이 사람의 얼굴형상에 따라 변형된 영상을 각 측면얼굴의 측정시스템에서 8개씩 총 16개의 영상을 획득하여 영상처리보드의 메모리에 저장한다. Fig. 10(c)는 메모리에 저장된 영상들을 합성한 영상을 보여준다. 이것은 한번에 64개의 슬릿광을 투영하면 얻게 되는 영상과 동일한 것이다. 촬영이 끝나면 Fig. 10(d)에서와 같이 영상처리기법을 이용하여 2진 영상으로 변환한 후 세선화하고 각 격자선의 중심선을 찾는다. 그리고 고립점 등의 노이즈를 제거하고 빛이 흡수되어 영상이 끊어 지는 눈동자나 눈썹 등의 위치에서는 같은 슬릿광영상선을 찾아 연결한 후 고유번호를 순차적으로 부여한다. 이 순차적인 번호는 3차원 형상을 재현하는 과정에서 사용할 슬릿광계적에 상응하는 슬릿광의 평면식을 찾기 위한 것이다. Fig. 10(e)는 일련의 영상처리 과정을 통해

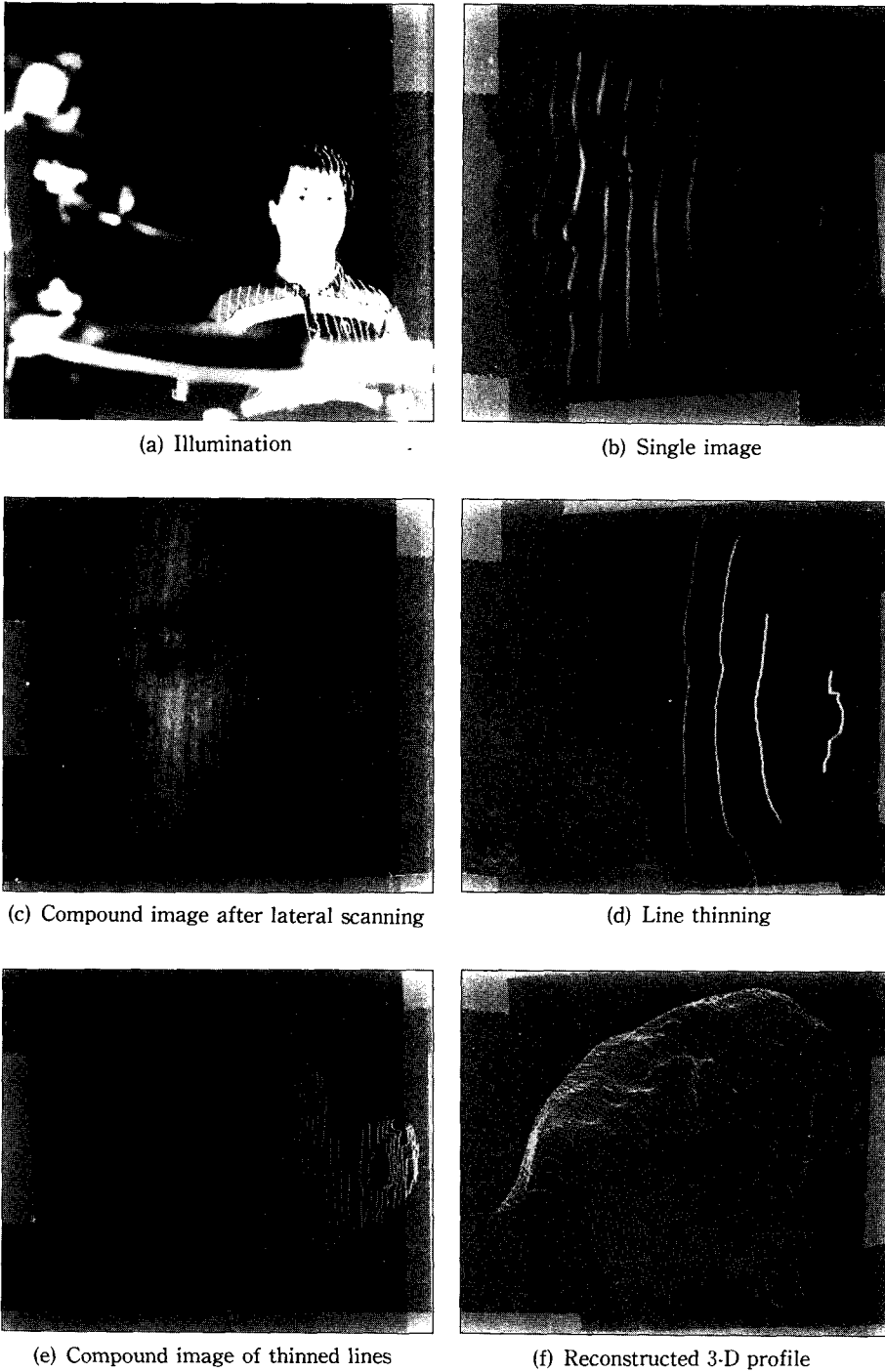
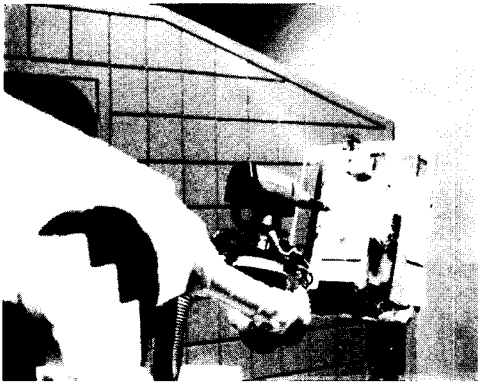


Fig. 10 Image processing procedure

최종적으로 얻어 지는 영상으로 개별적인 영상들을 처리한 후 합성한 것이다. 영상처리가 완료되면 측정의 마지막 단계로 식(8)과 식(15)로부터 각 양쪽

얼굴의 형상을 재현하여 합성한다. Fig. 10(f)는 측정시스템의 최종결과를 보여준다. 측정된 최종형상 데이터는 꿈돌이 조각가로봇트로 전송되어 Fig.





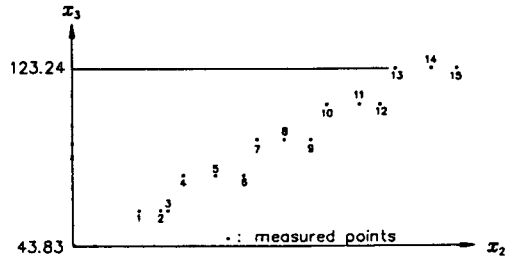
(a) Sculpturing by KUMDORI robot



(b) Sculptured profile

Fig. 11 Sculpturing by KUMDORI sculptor robot

11(a)에서와 같이 측정된 사람얼굴의 형상을 꿈돌이 조각가로보트가 조각을 한다. Fig. 11(b)는 측정대상인 사람과 조각된 최종형상을 보여준다. 3차원 형상을 재현하기 위한 측정시스템의 제어와 연산은 IBM PC 486을 이용하였다. 변형격자 영상을 획득하는 데는 약 2~3초 정도가 소요되며 형상재현은 2~3분 정도가 소요돼 측정소요시간면에서 만족할 만한 결과를 얻었다. 그리고, 측정정도를 평가하기 위하여 Fig. 12에서와 같이 우리가 정확한 3차원 좌표를 알 수 있는 계단형상을 갖는 물체를 전체 측정범위에 걸쳐  $\pm 0.01\text{ mm}$  오차로 가공한 후에 본 시스템을 이용하여 측정한 결과와 비교한 결과  $\pm 0.2\text{ mm}$  정도의 측정오차가 존재하였다. 이러한 측정정도는 세션화방법 등의 영상처리기법을 개선함으로써 향상시킬 수 있으나 본연구에서 사용한 방법으로도 꿈돌이 조각가로보트가 요구하는 사양은 충분히 만족시킬 수 있다. 측정결과에서 알 수 있듯이 영사식 슬릿광형상측정법은 인물두상의 측정 또는 살아있는 대상의 측정에는



매우 적합하고 효율적이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 살아 있는 측정대상인 사람얼굴의 3차원형상을 자동으로 측정하는 방법에 대한 연구가 수행되었다. 사람얼굴의 형상측정에 적합한 영사식 슬릿광형상측정법과 형상에 따라 변형되는 슬릿광계적영상을 보정하여 3차원좌표를 산출할 수 있는 유한근사법에 의한 보정방법이 제안되어 구체적인 이론이 정립되었다. 그리고 측정시스템이 제안되어 설계에 대해 세부적으로 기술되었다. 본 연구에서 제안된 방법을 이용한 측정알고리즘이 구현되었으며 측정시스템이 설계 및 제작되었고 실제 측정을 통해 제시된 측정데이터와 꿈돌이 조각가로보트가 조각한 최종형상으로부터 영사식 슬릿광형상측정법이 인물두상측정에 효율적이고 적합함을 입증하였다. 이 측정시스템은 '93 대전엑스포 기간(93. 8. 7~93. 11. 7)중에 꿈돌이 조각가로보트의 측정부를 담당하였고 관람자들을 대상으로 두상의 측정을 성공적으로 수행하였다.

### 후 기

본 연구가 성공적으로 완료되어 '93 대전엑스포 정부관에 전시될 수 있도록 재정적인 지원을 아끼지 않은 엑스포조직위원회와 한국과학기술연구원에 감사를 드린다.

### 참고문헌

- (1) Takahasi, H., 1970, "Moire Topography," *Appl. Opt.*, Vol. 9, pp. 1467~1472.
- (2) Idesawa, M., Yatagai, T. and Soma, T., 1977, "Scanning Moire Method and Automatic Mea-

- surement of 3-D Shapes," *Appl. Opt.*, Vol. 16, pp. 2152~2162.
- (3) Kim, S. W. and Park, H. G., 1992, "Moire Topography by Slit Beam Scanning," *Appl. Opt.* Vol. 31, pp. 6157~6161.
- (4) 谷田具豊彦, 應用光學 光計測入間, 丸善株式會社.
- (5) Sato, Y., Kitagawa, H. and Fujita, H., 1992, "Shape Measurement of Curved Objects using Multiple Slit-Ray Projections," *IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach., Intel.* Vol. PAMI-4, pp. 641~646.
- (6) Sato, K. and Inokuchi, S., 1987, "Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask," *IEEE First International Conference on Computer Vision*, pp. 657~661.
- (7) Keizer, R. L., Jun, H. S. and Dunn, S. M., 1991, "Structured Light: Theory and Practice and Practice and Practice," *Proceedings of SPIE*, Vol. 1406, pp. 88~97.
- (8) Ghosh, S. K., 1979, *Analytical Photogrametry*, Pergamon.
- (9) Duda, R. O. and Hart, P. E., 1973, *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley and Johns.
- (10) Martins, H. A., Birk, J. R. and Kelley, R. B., 1981, "Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes," *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 17, pp. 173~180.
- (11) Gremban, K. D., Thorpe, C. E. and Kanade, T., 1988, "Geometric Camera Calibration using Systems of Linear Equations," *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 562~567.