

# 스테레오 영상인식을 이용한 신관폭발고도 계측기술

## Measuring Technique for Height of Burst using Stereo-vision Recognition

강 규 창 · 최 주 호 · 박 원 우 · 황 의 성 · 홍 성 수 · 유 준  
국방과학연구소 · 충남대학교

### Abstract

This paper presents a measuring technique for bursting height of proximity fuses. This technique uses camera calibration to obtain the perspective transformation matrix describing the projection of the world coordinates to image coordinates, and calculates the world coordinates of bursting points from their image coordinates. The surface approximation algorithm by polynomial functions are also implemented.

Keywords : height of burst, camera calibration, surface modeling

### 1. 머리말

근접작동기능을 지닌 전자신관의 개발과 함께 신관의 근접작동기능을 평가하기 위하여 신관폭발고도에 관한 계측의 필요성이 제기 되었다. 신관의 폭발은 빛, 열, 폭음 및 파편비산을 동반하며 짧은 시간에 이루어지고 표적영역(target area)내에서 신관의 폭발위치를 정확히 예측할 수 없으며 파편 비산으로 인한 위험성으로 근거리에서 폭발장면을 관측하는 것도 매우 위험하다. 이와 같은 위험성으로 인하여 본 연구에서는 신관폭발고도 계측을 위한 하나의 방법으로 비디오 카메라를 이용한 스테레오 비전의 3차원 측정기술을 제안하였다.

제안한 방법은 비디오 카메라를 이용하여 원거리에서 폭발장면을 촬영하고 후처리하는 비접촉식 계측기법으로써 계측시 안전성을 제공하며 계측이 끝난 후에도 폭발장면을 기록매체에 저장 가능하여 계측에

대한 재현성을 보장할 수 있다.

기록된 영상을 이용하여 신관의 폭발위치를 계산하는 과정은 폭발장면에 대한 디지털 영상의 폭발점 좌표를 인식하는 과정과 카메라의 위치, 방향과 같은 기하학적 특성과 광축(optical axis), 축척을 및 왜곡계수를 이용하여 폭발점 좌표를 역투영(inverse projection)하여 공간상의 폭발위치로 향하는 시선(line of sight)을 계산하는 과정 그리고 두 개 이상으로부터 얻어진 시선들의 교점을 구하여 폭발위치를 계산하는 과정으로 나눌 수 있다.

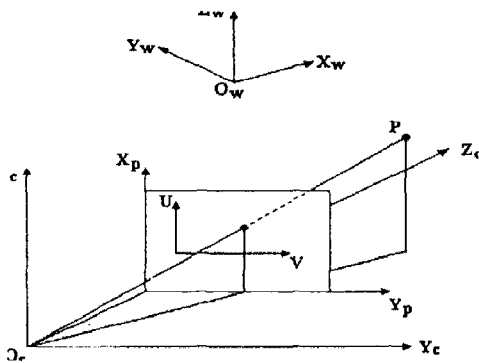
본 연구에서는 신관폭발고도계측에 사용되는 비디오 카메라의 기하학, 광학적 특성을 알아내기 위하여 렌즈왜곡을 고려한 카메라 교정기술에 대해 먼저 기술하고 폭발고도 산출을 위하여 지면을 수식으로 표현하기 위한 지면 모델링 과정과 폭발영상내에서 폭발점을 인식하는 방법에 관해 기술 하였으며 모의 실험을 통한 결과를 기술하였다.

## 2. 카메라 교정 및 지면 모델링

카메라 교정(camera calibration)이란 카메라의 기하학적 광학적 특성을 나타내는 내부 파라미터와 임의의 기준좌표계(world coordinate system)에 대하여 카메라의 3차원 위치와 방향을 나타내는 외부 파라미터를 알아내기 위한 과정이다. 카메라 내부 파라미터는 카메라의 광축(optical axis)과 영상면과의 교점인 영상좌표의 중심(image center), 영상 획득과정에서 센서의 배열 또는 주사간격과 관련된 요소인 축척율(scale factor), 렌즈에 의한 광학적 왜곡을 나타내는 왜곡계수(distortion coefficients), 초점거리(focal length)등이 있다. 카메라 외부 파라미터는 기준좌표계 내에서 카메라 좌표계의 위치와 방향을 나타내는 파라미터들이다.

### (1) 카메라 모델링<sup>(1),(2),(3),(5)</sup>

렌즈왜곡을 고려한 카메라 교정기술에서 카메라 모델링은 바늘구멍(pin-hole)모델을 이용하였다.



(그림 1) 바늘구멍(pin-hole) 모델의 투시변환

그림 1은 카메라 모델링의 기본적인 형태를 나타내는 바늘구멍 모델인데 여기서  $(x_w, y_w, z_w)$ 는 중심이  $O_w$ 인 기준좌표계에서 점 P의 3차원 좌표이며  $(x_c, y_c, z_c)$ 는 중심이  $O_c$ 인 카메라 좌표계에서 점 P

의 좌표이다. 카메라를 바늘구멍(pin-hole)모델로 가정하였을 때 영상형성단계는 3단계로 구분하여 설명할 수 있다.

1) 1단계 : 기준좌표계( $x_w, y_w, z_w$ )를 카메라 좌표계( $x_c, y_c, z_c$ )로 변환

X 축의 회전을  $\alpha$ , Y 축의 회전을  $\beta$ , Z 축의 회전을  $\gamma$ 라고 가정하면, 좌표계의 변환은 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + T \quad (1)$$

$$\text{여기서, } R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

여기서  $R$ 은  $3 \times 3$  회전행렬이고  $T$ 는  $3 \times 1$  이동행렬로써 카메라 좌표계에서 기준좌표계 원점의 위치를 나타낸다.

(1)을 동차행렬로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 행렬  $R$ 의 각 요소는 다음과 같이 표현된다.

$$r_1 = \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \quad (3)$$

$$r_2 = \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \quad (4)$$

$$r_3 = -\cos \alpha \sin \gamma \quad (5)$$

$$r_4 = -\cos \alpha \sin \gamma \quad (6)$$

$$r_5 = \cos \alpha \cos \gamma \quad (7)$$

$$r_6 = \sin \alpha \quad (8)$$

$$r_7 = \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma \quad (9)$$

$$r_8 = \sin \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \quad (10)$$

$$r_9 = \cos \alpha \cos \beta \quad (11)$$

카메라 좌표계 원점( $x_{co}, y_{co}, z_{co}$ )의 위치를 기준 좌표계로 변환하면 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$X_c = R(X_w - R^{-1}T) = R(X_w - X_{co}) \quad (12)$$

$$\text{여기서, } X_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$$

$$X_w = [x_w \ y_w \ z_w]^T$$

$$X_{co} = [x_{co} \ y_{co} \ z_{co}]^T$$

회전행렬  $R$ 은 'Proper Orthogonal'이므로  $R^{-1} = R^T$ 이다. 따라서 기준좌표계로 나타낸 카메라좌표계의 원점은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x_{co} \\ y_{co} \\ z_{co} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 t_x + r_4 t_y + r_7 t_z \\ r_2 t_x + r_5 t_y + r_8 t_z \\ r_3 t_x + r_6 t_y + r_9 t_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

### 2) 2단계 : 투시변환

이상적인 바늘구멍(pin-hole) 모델에서 투시 변환에 의해 무왜곡 영상좌표 ( $x_p, y_p$ )는 초점거리를  $f$ 라고 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$x_p = f \cdot \frac{x}{z} \quad (14)$$

$$y_p = f \cdot \frac{y}{z} \quad (15)$$

### 3) 3단계 : 디지털 영상화

영상면상으로 투영된 점의 좌표( $x_p, y_p$ )가 샘플링 과정을 거쳐 컴퓨터 영상좌표로 변환된다. 이 과정에서 축척계수 및 컴퓨터 영상좌표로의 이동요소 등을 고려하여야 한다. 영상면상의 좌표와 컴퓨터 영상좌표 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$x_p = \frac{u_p - u_0}{k_u} \quad (16)$$

$$y_p = \frac{v_p - v_0}{k_v} \quad (17)$$

여기서 ( $u_p, v_p$ )는 영상좌표, ( $u_0, v_0$ )는 컴퓨터 영상좌표의 중심, 그리고 ( $k_u, k_v$ )는 축척계수를 나타낸다.

(2), (13), (16), (17)로부터 카메라를 바늘구멍(pin-hole)모델로 가정하였을 때 임의의 점에 대한 3차원 좌표( $x_w, y_w, z_w$ )와 이에 대응되는 영상좌표( $u_p, v_p$ )의 관계를 동차행렬을 이용하여 선형방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} w u_p \\ w v_p \\ w \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$C = C_{INT} \cdot C_{EXT}$$

$$= \begin{pmatrix} k_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & k_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{pmatrix}$$

여기서  $w$ 는 영상좌표계를 균일좌표계로 표현시 필요한 0이 아닌 상수이며  $C$ 는 투시변환행렬이다. 그리고  $C_{INT}$ 는 내부 파라미터 행렬로써 영상좌표의 중심( $u_0, v_0$ )과 축척계수( $k_u, k_v$ ) 등을 포함하고 있으며,  $C_{EXT}$ 는 외부 파라미터로써 회전 및 이동요소를 내포하고 있다.

### (2) 투시변환 행렬의 계산<sup>(1),(2),(3)</sup>

투시변환행렬  $C$ 는 이상적인 바늘구멍(pin-hole) 카

메라에 대하여 3차원 공간상의 한 점이 카메라의 영상면에 투영되었을 때 3차원 공간좌표와 2차원 컴퓨터 영상좌표와의 관계를 나타내어 준다. 따라서 3차원 측정을 위한 카메라 교정 과정에서 매우 중요하다.

(18)을 바꾸어 표현하면 다음과 같다.

$$x_w c_{11} + y_w c_{12} + z_w c_{13} + c_{14} - u_p x_w c_{31} - u_p y_w c_{32} - u_p z_w c_{33} - u_p c_{34} = 0 \quad (20)$$

$$x_w c_{21} + y_w c_{22} + z_w c_{23} + c_{24} - v_p x_w c_{31} - v_p y_w c_{32} - v_p z_w c_{33} - v_p c_{34} = 0 \quad (21)$$

투시변환행렬을 임의의 수로 나누어도 영상좌표에 어떠한 영향도 주지 않으므로 (18), (20), (21)에서  $c_{34} = 1$ 로 놓을 수 있으므로 구하고자 하는 투시변환행렬의 요소는 11개이다. 3차원 공간상에  $n$ 개의 점의 좌표와 대응되는 컴퓨터 영상좌표를 이용하여 (20), (21)의 방정식을 행렬의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_w & y_w & z_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_p x_w & -u_p y_w & -u_p z_w \\ & & & & \vdots & & & & & & \\ x_w & y_w & z_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_p x_w & -u_p y_w & -u_p z_w \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_w & y_w & z_w & 1 & -v_p x_w & -v_p y_w & -v_p z_w \\ & & & & \vdots & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_w & y_w & z_w & 1 & -v_p x_w & -v_p y_w & -v_p z_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_p \\ u_p \\ \vdots \\ u_p \\ v_p \\ v_p \\ \vdots \\ v_p \end{pmatrix} \quad (22)$$

투시변환행렬의 각 요소( $c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_{33}$ )를 얻기 위해서는 11개의 방정식이 필요하다. 따라서 이미 위치를 알고 있는 6개 이상의 점들을 이용한다면 최소자승법을 이용하여 (22)로부터 투시변환행렬을 구할 수 있다.

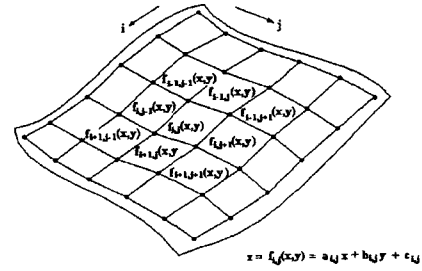
(3) 지면 모델링

지면에 대한 정보는 신관폭발고도를 계산하기 위하여 반드시 필요하다. 지면을 기술하는 한 가지 방법은

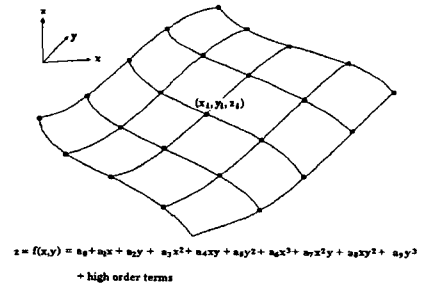
표적영역 내의 지면상에 존재하는 여러 점을 이용하여 그림 2처럼 근사화된 4각 평면의 조합으로 나타낼 수 있는 그물형과 표적영역을 하나의 수식으로 나타낼 수 있는 다항식 근사화 방법이 있다.

그물형으로 지면을 표현하는 방법은 지정된 면 주변의 3개 이상의 점의 좌표를 사용하여 면 방정식을 나타낸다. 여러 개의 평면방정식을 계산하기 위하여 구분된 면의 수에 따라서 지면의 기준점의 수가 결정된다. 구분된 면이 많을수록 지면에 대한 정확한 표현을 할 수 있으나 처리하기 위한 절차는 번거롭게 된다.

다항식 근사화 방법은 표적영역의 지면을 하나의 근사화된 다항식으로 나타내는 방법이다. 다항식 근사화에 의한 지면 모델링은 그물형과 비교하여 운용상 편리한 장점을 지니므로 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다.



(a) 그물형



(b) 다항식 근사화 방법

(그림 2) 표적영역의 지면에 대한 표현방법

다항식 근사화에 의한 지면 모델링 과정은 기준점 설치 및 위치측정 과정과 다항식 계산과정으로 구분할 수 있다. 기준점을 설치하는 방법은 변화율이 많은 즉 굴곡이 심한 부분은 기준점 간의 간격을 작게하고 평평할수록 간격을 멀리하여 설치한다.

다항식의 일반형은 (23)과 같이 표현된다.

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} x^i y^j \quad (23)$$

지표면의 높이는  $z$  값으로 나타낼 수 있으며  $x, y$ 의 함수로 볼 수 있다. 따라서 지면의 수학적 모델은 (23)으로 정확히 표현된다. 그러나 (23)은 무수히 많은 점들의 공간상 위치를 알고 있을 때 가능한 모델이므로 3차 이내로 근사화된 다항식을 사용하기 위하여 (23)을 다음과 같이 변형하여 사용할 수 있다.

$$z = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 + \text{Highorderterms} \quad (24)$$

지면이 완만한 변화를 지니거나 평탄하다고 가정하면 고차항의 영향은 무시할 수 있다. 대부분의 지형은 급격한 변화를 지니지 않고 있으며 인위적으로 건설된 신관폭발고도 계측 시험장은 되도록 평탄하게 설계되어 있다.

지면을 표현하기 위하여 고차항을 무시하고 근사적으로 나타내면 다음과 같다.

$$z = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \quad (25)$$

(25)의 모든 계수들을 얻기 위해서는 적어도 10개 이상의 지면에 존재하는 기준점을 알아야 하는데 이는 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2^3 & x_2^2y_2 & x_2y_2^2 & y_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n^3 & x_n^2y_n & x_ny_n^2 & y_n^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서 각  $z$ 좌표 ( $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$ )는 각 함수값 ( $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ )에 대응된다.

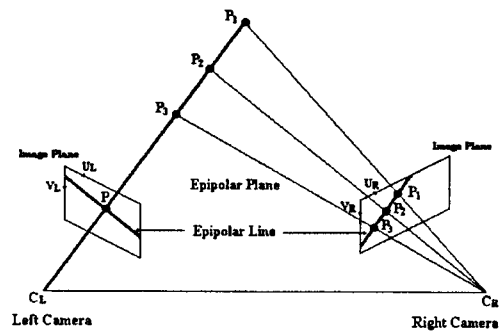
본 연구에서는 (26)을 이용하여 지면 모델링 계수를 구하기 위해서 Gauss-Jordan 방법<sup>(6)</sup>을 이용하였다.

### 3. 신관폭발고도 계산

#### (1) 극상선을 이용한 폭발점 인식

획득된 영상으로부터 폭발점을 찾아내는 것은 계측 정확도와 계측시스템의 신뢰성에 상당한 영향을 주므로 매우 중요하다. 본 연구에서는 극상선(epipolar line) 탐색방법을 제안하였다.

그림 3에서처럼 두 대의 카메라가 서로 떨어져 있을 때, 두 카메라의 중심  $C_L$ 과  $C_R$  그리고 물체의 점  $P_1$ 에 의해 형성되는 평면을 극상면이라 하고, 극상면과 영상면이 만나는 선을 극상선이라 한다.



(그림 3) 극상면(epipolar plane)과 극상선

좌측영상의 한 특징점에 대응하는 우측영상의 대응 특징점은 반드시 극상선 상에 존재한다. 따라서 극상선을 이용하면, 두 영상에서의 일치점 탐색영역이 2차원적의 영상면에서 극상선으로 한정되는 1차원으로 축소되어 탐색영역이 줄어든다. 또한 1차원 직선상에서 일치점을 구하므로 탐색 시간도 줄일 수 있으며 쉽게 대응점을 찾을 수 있다.

좌측영상의 점  $P$ 에 대응하는 우측영상의 극상선은 좌측영상의 특징점을 역투영하여 시선을 구한 후, 이 시선을 우측영상에 투영시키면 얻어진다. 이 때 우측영상의 극상선은 (27)로 표현된다.

$$pU_R + qV_R + r = 0 \quad (27)$$

여기서  $p, q, r$ 은 좌측영상좌표와 좌우 카메라 파라미터에 의해 결정된다.

실제적인 극상선을 얻기 위한 한 가지 방법으로 (18)을 이용하여 물체표면을 나타내는 좌측영상의 한 점의 좌표 ( $U, V$ )가 주어지면 역투영시 얻을 수 있는 카메라로부터 물체의 표면으로 향하는 직선의 방정식을 얻을 수 있다. 이 방정식은 (28)과 (29), (30)으로 2개의 면 방정식을 만족시키는 직선이다.

$$\begin{pmatrix} c_{l_{11}} - U_l c_{l_{13}} & c_{l_{12}} - U_l c_{l_{14}} & c_{l_{15}} - U_l c_{l_{16}} & c_{l_{17}} - U_l c_{l_{18}} \\ c_{l_{21}} - V_l c_{l_{23}} & c_{l_{22}} - V_l c_{l_{24}} & c_{l_{25}} - V_l c_{l_{26}} & c_{l_{27}} - V_l c_{l_{28}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (28)$$

$$a_1 x_w + b_1 y_w + c_1 z_w + d_1 = 0 \quad (29)$$

$$a_2 x_w + b_2 y_w + c_2 z_w + d_2 = 0 \quad (30)$$

여기서,

$$a_1 = c_{l_{11}} - U_l c_{l_{13}}, \quad b_1 = c_{l_{12}} - U_l c_{l_{14}}$$

$$c_1 = c_{l_{15}} - U_l c_{l_{16}}, \quad d_1 = c_{l_{17}} - U_l c_{l_{18}}$$

$$a_2 = c_{l_{21}} - V_l c_{l_{23}}, \quad b_2 = c_{l_{22}} - V_l c_{l_{24}}$$

$$c_2 = c_{l_{25}} - V_l c_{l_{26}}, \quad d_2 = c_{l_{27}} - V_l c_{l_{28}}$$

(29), (30)으로 표현된 직선의 식을 우측 카메라에 투영시킴으로써 우측 영상에서 극상선을 얻을 수 있다. 실제적으로 카메라 시계의 범위에 속하는  $z_b \leq z \leq z_t$ 에서  $z = z_b$ 의 값에 대한  $(x_b, y_b)$ 의 좌표를 계산하고  $z = z_t$ 일 때  $(x_t, y_t)$ 를 계산한다.

$$x_b = \frac{b_1(c_2 z_b + d_2) - a_1(c_1 z_b + d_1)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (31)$$

$$y_b = \frac{a_2(c_1 z_b + d_1) - b_2(c_2 z_b + d_2)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (32)$$

$$x_t = \frac{b_1(c_2 z_t + d_2) - a_1(c_1 z_t + d_1)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (33)$$

$$y_t = \frac{a_2(c_1 z_t + d_1) - b_2(c_2 z_t + d_2)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (34)$$

이 때 얻어진 두 점  $(x_b, y_b, z_b), (x_t, y_t, z_t)$ 를 (18)을 이용하여 우측영상에 투영시킨 영상좌표를 각각 계산한다.

$$U_b = \frac{c_{r_{11}} x_b + c_{r_{12}} y_b + c_{r_{13}} z_b + c_{r_{14}}}{c_{r_{31}} x_b + c_{r_{32}} y_b + c_{r_{33}} z_b + c_{r_{34}}} \quad (35)$$

$$V_b = \frac{c_{r_{21}} x_b + c_{r_{22}} y_b + c_{r_{23}} z_b + c_{r_{24}}}{c_{r_{31}} x_b + c_{r_{32}} y_b + c_{r_{33}} z_b + c_{r_{34}}} \quad (36)$$

$$U_t = \frac{c_{r_{11}} x_t + c_{r_{12}} y_t + c_{r_{13}} z_t + c_{r_{14}}}{c_{r_{31}} x_t + c_{r_{32}} y_t + c_{r_{33}} z_t + c_{r_{34}}} \quad (37)$$

$$V_t = \frac{c_{r_{21}} x_t + c_{r_{22}} y_t + c_{r_{23}} z_t + c_{r_{24}}}{c_{r_{31}} x_t + c_{r_{32}} y_t + c_{r_{33}} z_t + c_{r_{34}}} \quad (38)$$

계산된 영상좌표 2개를 연결시키면 영상면 상에 존재하는 (27)과 같이 극상선인 직선의 식을 얻을 수 있다. 직선을 나타내는 (27)의 각 계수  $p, q, r$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = V_b - V_t \quad (39)$$

$$q = U_t - U_b \quad (40)$$

$$r = U_b V_t - U_t V_b \quad (41)$$

실제적으로 좌측 영상면 상의 한 특징점에 대응하는 우측 영상면 상의 특징점은 우측 극상선 상에 정확하게 존재해야하지만 영상의 양자화 오차, 카메라 모델링 오차, 잡음 등으로 인하여 오차가 발생할 수 있으므로 대응점 탐색 영역을 극상선 일부 주변으로 제한할 수 있다.

## (2) 폭발위치 및 폭발고도 계산

동기된 두 개의 카메라를 이용하여 폭발순간의 폭발장면을 디지털 영상으로 획득하고, 얻어진 좌우 각 영상에서 폭발점을 영상화소좌표로 읽을 수 있다면 이미 알고 있는 각 카메라의 투시변환행렬을 이용하여 3차원 공간상의 폭발위치를 계산할 수 있다.

(18)로부터 각 2개의 방정식을 얻을 수 있으므로 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$(C_1 - uC_3)X_w = 0 \quad (42)$$

$$(C_2 - vC_3)X_w = 0 \quad (43)$$

여기서,

$$wu = C_1 X_w, \quad wv = C_2 X_w, \quad w = C_3 X_w$$

$$C_1 = [c_{11} \ c_{12} \ c_{13} \ c_{14}]$$

$$C_2 = [c_{21} \ c_{22} \ c_{23} \ c_{24}]$$

$$C_3 = [c_{31} \ c_{32} \ c_{33} \ c_{34}]$$

$$X_w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$$

좌우 영상에서 얻어진 폭발점을 각각  $(U_l, V_l)$ ,  $(U_r, V_r)$ 라고 하면 (44)를 얻을 수 있고 이 (44)를 이용하여 폭발위치를 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} c_{11} - U_l c_{13} & c_{12} - U_l c_{13} & c_{13} - U_l c_{13} \\ c_{21} - U_r c_{23} & c_{22} - U_r c_{23} & c_{23} - U_r c_{23} \\ c_{31} - V_l c_{33} & c_{32} - V_l c_{33} & c_{33} - V_l c_{33} \\ c_{31} - V_r c_{33} & c_{32} - V_r c_{33} & c_{33} - V_r c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -c_{14} + U_l c_{14} \\ -c_{24} + U_r c_{24} \\ -c_{34} + V_l c_{34} \\ -c_{34} + V_r c_{34} \end{pmatrix} \quad (44)$$

계산된 폭발위치를  $(x_b, y_b, z_b)$ 라고 한다면 폭발 위치와 지면과의 최소거리를 구함으로써 신관폭발고도를 계산할 수 있다. 지면상의 임의의 위치를  $(x, y, z)$ 라고 했을 때, 두 점 사이 거리의 제곱은 다음과 같이 주어진다.

$$g(x, y, z) = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (z - z_b)^2 \quad (45)$$

그러나 지면을 나타내는 다항식 (25)를 이용하여  $z$  대신에  $f(x, y)$ 를 대입시키면 (45)는  $x, y$ 함수가 되며 다음 식으로 표현된다.

$$g(x, y) = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (f(x, y) - z_b)^2 \quad (46)$$

폭발위치와 지면과의 거리가 최소일 때,  $g(x, y)$ 의 기울기는 영(zero)이다. 이와 같은 사실을 Chain Rule을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dg(x, y) = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} dy = 0 \quad (47)$$

(47)을 만족시키려면 이 식의 각 편미분 항은 영이어야 한다. 따라서 다음과 같은 2개의 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = 2(x - x_b) + 2(f(x, y) - z_b) \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = 0 \quad (48)$$

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} = 2(y - y_b) + 2(f(x, y) - z_b) \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = 0 \quad (49)$$

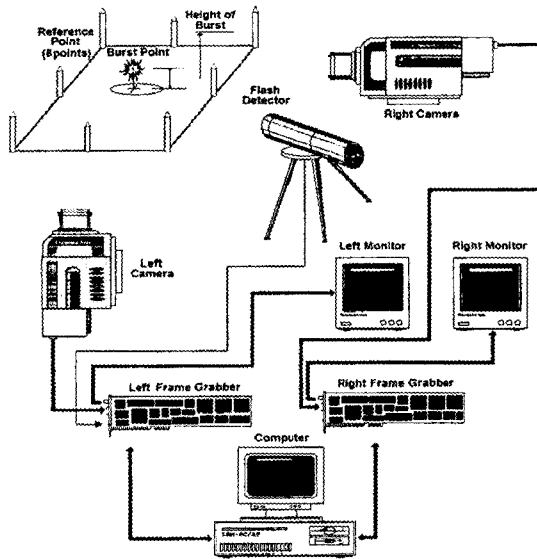
비선형 방정식인 위 식의 해를 수치 해석적으로 구하는 방법은 여러 가지가 있으며, 본 연구에서는 Newton 방법<sup>(6)</sup>을 사용하였다.

## 4. 계측 시스템의 구성

계측시스템의 구성은 그림 4와 같이 좌우측 비디오

카메라 2대와 폭염감지기, 영상보드 2개, 그리고 컴퓨터와 모니터로 구성된다.

카메라는 예상 탄착지역을 한 화면에 담을 수 있도록 적절한 거리에 설치하며, 카메라 사이의 거리는 두 카메라의 광축(optical axis)이 가능하면 직각을 이루도록 설치하는 것이 오차를 작게 한다.

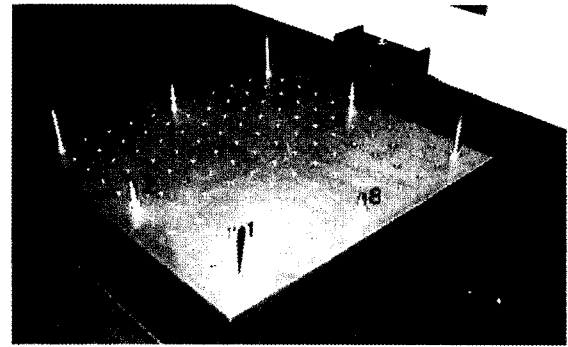


(그림 4) 계측 시스템 구성

폭염감지기는 신관이 폭발할 때 방출되는 적외선을 감지하여 트리거 펄스를 발생시키는 장치로서 신관이 폭발한 시점에 폭발영상을 획득하게 한다. 영상보드는 카메라로부터 입력되는 영상신호를 A/D 변환하여 메모리에 저장하거나 모니터에 표시하는 기능이 있다. 또한 각 카메라의 영상신호를 동기 시키는 동기신호 발생장치를 갖추고 있으며, 폭염감지기의 트리거 신호를 받아 컴퓨터에 신관이 폭발한 시점을 알려주는 외부 트리거 기능을 수행한다. 마지막으로 컴퓨터는 하드웨어 제어기능과 획득된 영상을 분석하여 신관의 폭발고도를 계산하는 영상처리 기능을 수행한다.

## 5. 실험 및 결과

신관폭발고도 계측시스템의 성능을 알아보기 위하여 모의실험 장치를 그림 5와 같이 구성하였다.



(그림 5) 모의 표적영역

표적영역(target area)을 60 cm × 60 cm의 알루미늄 판으로 만들고, 가로 세로 5 cm 간격으로 막대를 세울 홈을 판 후, 표적 영역의 가장자리에 8개의 기준 막대를 설치하였다. 기준 막대 번호를 그림 5와 같이 1번부터 8번까지 부여하고 1번 막대의 하단을 기준좌표계(world coordinate system)의 원점으로 하여 8번 막대 방향을 x축, 2번 막대 방향을 y축 그리고 높이 방향을 z축으로 하였을 때 각 기준막대의 상단점 좌표는 표1과 같다.

카메라는 표적영역으로부터 5 m의 거리에 표적영역과 두 카메라가 이루는 각도가 약 90도 정도 되도록 설치하고 초점거리 50 mm 렌즈를 사용하였다. 표2는 모의 표적영역을 좌우측 카메라로 바라보았을 때 각 기준점의 화면좌표이다.

기준막대와 같은 모양으로 실험막대를 만들어 그 상단점을 모의 폭발점으로 가정하고, 여러 가지 길이의 실험막대를 표적영역내의 임의의 위치에 꽂아 놓고 카메라로 영상을 획득한 후, 실험막대 상단점의 화



면좌표를 읽어 역투영 과정을 거쳐 모의 폭발점의 기준좌표를 계산하였다. 표3에 실험막대 상단점 좌표의 참값과 계산값, 그리고 높이에 대한 계산값과 참값의 차이를 나타내었다.

[표 1] 기준막대 상단점의 기준좌표

좌표축 막대번호	x(mm)	y(mm)	z(mm)
1	0	0	90
2	0	25	30
3	0	50	90
4	25	50	40
5	50	50	90
6	50	25	50
7	50	0	90
8	25	0	20

[표 2] 기준점들의 좌우 화면좌표

막대 번호	왼쪽 화면좌표		오른쪽 화면좌표	
	x(pixel)	y(pixel)	x(pixel)	y(pixel)
1	367	252	254	251
2	247	295	151	284
3	123	257	56	234
4	107	275	156	252
5	93	231	246	204
6	204	254	342	238
7	312	230	446	221
8	338	284	355	286

실험에 의해 나타난 측정상대오차의 평균은 1.35% 이고 최대오차는 3%이었다.

## 6. 맺음말

스테레오 비전(stereo vision)의 3차원 측정기술을 응용한 신관폭발고도 계측기법을 개발하고 성능시험을 실시하였다.

[표 3] 모의 폭발점들의 참값과 계산값

순 번	참값(mm)			계산값(mm)			높이 오차 (%)
	x	y	z	x'	y'	z'	
1	250	250	90	249.7	251.3	91.0	1.11
2	150	200	80	151.5	201.4	80.8	1.00
3	400	450	60	400.3	450.8	61.1	1.83
4	200	350	30	200.1	351.4	30.9	3.00
5	50	150	70	49.7	150.7	71.7	2.42
6	250	250	90	249.9	249.0	90.3	0.33
7	0	200	50	-1.1	201.2	51.2	2.40
8	350	500	20	351.8	499.6	20.2	1.00
9	400	0	80	397.6	-1.7	79.9	0.12
10	50	50	110	50.1	49.1	109.6	0.36
평균							1.35

개발된 시스템은 카메라 교정기술을 이용하여 투시 변환행렬을 구하고 이를 이용하여 2차원 화면좌표를 3차원 공간좌표로 바꾸어 주는 과정을 구현하였다. 또한 지면을 수학적으로 모델링하여 폭발고도를 폭발점과 지면사이의 최단거리로 구하도록 하였다. 실제 표적영역(target area)을 약 1/100 정도로 축소하여 모의 표적영역을 만들어 시험하였을 때 측정상대오차의 평균은 1.35%이고 최대오차는 3%이었다. 그러나 실제 표적영역에서는 기준점에 대한 측량오차가 포함될 것으로 판단된다.

스테레오 비전의 3차원 측정기술을 응용한 신관폭

발고도 계측기법은 비디오 카메라를 이용하여 원거리에서 폭발장면을 촬영하여 처리하는 비접촉식 계측기법으로써 안전성을 제공하며 계측이 끝난 후에도 폭발장면을 기록매체에 저장이 가능하여 충분한 자료 보존뿐만 아니라 계측에 대한 재현성으로 신뢰성을 보장할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 최주호, 변영진, 윤상운, “카메라 교정기술 연구”, 기술보고서, 국방과학연구소, 1993. 3. pp.6~11
2. Robert J. Schalkoff, Digital Image Processing And Computer Vision, John Wiley & Sons, Inc., 1989. pp.18~39
3. 김희승, 영상인식, 생능출판사, 1998, pp. 51~67, pp.223~233
4. S. Ganaphthy, “Decomposition of Transformation Matrix for Robot Vision”, Proceedings IEEE Conference on Robotics and Automation, 1984, pp.130~139
5. Dana H. Ballard, Christopher M. Brown, Computer Vision, Prentice Hall, Inc., 1982, p.482
6. Curtis F. Gerald, Patrick O. Wheatley, Applied Numerical Analysis, Fifth Edition, Addison Wesley, 1994, pp. 116~126, pp. 52~57.