

# 근거리 수치사진측량을 이용한 국부지형모형의 생성

## The Generation of Local Terrain Model Using Digital Close-Range Photogrammetry

이재원<sup>1)</sup> · 홍순현<sup>2)</sup> · 김정희<sup>3)</sup> · 정공운<sup>4)</sup>

Lee, Jae One · Hong, Soon Heon · Kim, Jeong Hee · Jeong, Gong Uhn

### Abstract

The close-range photogrammetry is a surveying technique the acquiring the 3D object from 2D geometric appearance shown in the image. Camera treatment is relatively so simple. Camera position refer to the object can be freely adjusted by locating the exposure station at any site. So it is used effectively on a small area or object for survey. In this study, using the digital camera which has capacity of keeping numerical value by itself and easy carrying, we analyze the positioning error according to various change of photographing condition. Also we try to find a effective method of acquiring basis data for 3D monitoring of high-accuracy in sub-pixel degree through digital close-range photogrammetry with bundle adjustment for local terrain model generation.

### 요 지

근거리 수치사진측량은 카메라의 취급이 비교적 간단하고 카메라의 노출점을 임의로 결정하여 카메라와 대상물의 관계를 자유로이 조절할 수 있으므로 소규모지역 또는 지상의 대상물을 측정하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 이에, 본 연구에서는 휴대가 간편하고 수치영상의 자체 저장능력을 가진 디지털 카메라를 이용하여 촬영조건의 다양한 변화에 따른 위치오차를 분석하며, 광속 조정을 통하여 높은 정확도의 부화소 좌표를 획득하여 3차원 모니터링을 위한 기초 자료와 근거리 수치 사진측량기법의 국부지형모형생성의 활용방안을 모색하였다.

핵심용어(Keywords) : 근거리 수치사진측량, 디지털 카메라, 광속조정법, 국부지역모형생성

## 1. 서 론

최근 사진측량이 수치사진측량시대로 접어들어 따라 디지털 카메라를 이용하여 직접 수치영상을 얻고 이를 처리하는 기술이 발달하고 있다. 수치사진측량은 대상물(object)에 대해서 수치화된 영상을 취득하고, 이를 수치영상처리(digital image processing)함으로써 과거 고가의 장비에 의해서 처리되던 정보를 PC에서도 처리, 출력할 수 있다. 자체저장 능력을 갖고 있는 디지털 카메라는 독립적인 영상 획득의 수행과 수치사진측정기법을 이용한 수치영상의 실시간 처리가 가능하게 되었으며 영상 해석 분야에 많은 가능성을 제시하게 되었다(이석균, 1998).

사진측정기법을 이용한 수치영상의 정밀분석을 위해서는 디지털카메라의 렌즈 검정(calibration)과 부화소(sub-pixel) 측정기법의 개발 등에 의한 자체 정확도 향상 및 최적의 촬영조건 도출에 관한 연구가 선행되어야 한다(Tecklenburg 등, 2000).

본 연구에서는 현장에서 신속하게 렌즈 왜곡을 검정하기 위해 현장자체검정방법을 실시하여 영상에서 표정점을 측정하여 다중영상접합의 원리를 적용하고 광속조정법(bundle adjustment method)을 실시하였다. 카메라 검정을 통해 위치결정의 정확도를 높이고 PC를 이용하여 처리함으로써 수치사진측량을 가능하게 하고자 한다. 또한 도심 측정방법과 타원경계추출법으로 타켓의 위치측정 정확도

- 1) 정회원 · 대한측량협회 책임연구원(E-mail:jollee@kasm.or.kr)
- 2) 정회원 · 국립 밀양대학교 토목공학과 교수(E-mail:hongsh@arang.miryang.ac.kr)
- 3) 정회원 · 경남대학교 토목공학과 교수(E-mail:geodesy@kyungnam.ac.kr)
- 4) 정회원 · 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료(E-mail:gwjeong@hist.co.kr)

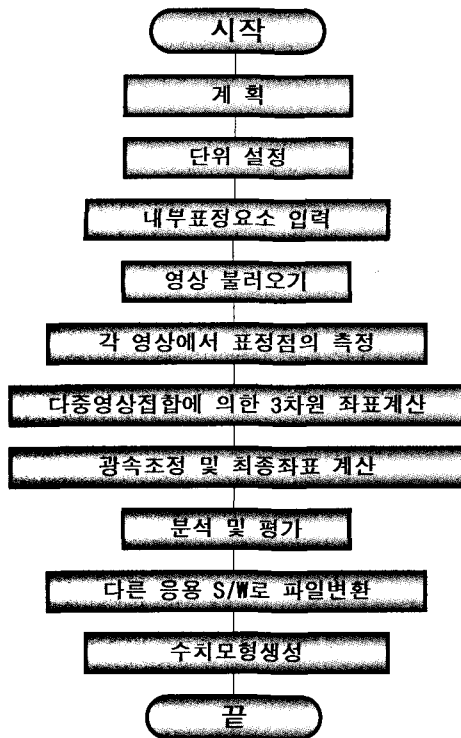


그림 1. 근거리 수치사진측량의 수행과정

를 살펴보고, 타켓 분석 결과를 통해 가장 우수한 결과의 기법으로 실험대상지역의 국부지형모형을 생성하였다. 또한 높은 정확도의 부화소 좌표를 획득하기 위해 정밀 3차원 모니터링을 위한 기초 자료로서의 국부지형모형 생성의 활용방안을 모색하고자한다.

그림 1은 근거리 수치사진측량의 수행과정을 도시한 것이다.

## 2. 다중영상 접합의 원리

근거리 수치 사진측량에서 다중영상접합이란 여러 장의 사진을 기하학적 원리를 이용하여 접합함으로써 대상물의 3차원 좌표를 획득하는 것이다. 다중영상접합의 표정은 여러 다른 사진들과 대상물에 관련된 촬영점  $(X_0, Y_0, Z_0)$  과 회전요소  $(\omega, \phi, \kappa)$ 에 대한 계산이며 표정점에 대한 대상물 좌표를 계산하는 것이다.

다중영상접합에서는 표정을 위해 전방교회법과 후방교회법을 동시에 이용한다. 전방교회법과 후방교회법은 영상점 관측에서 측정된 표정점의 사진좌표와 배치도에서 입력한 대략의 외부표정요소, 카메라 검정표로부터 보정

한 카메라의 내부표정요소와 사진의 정확한 외부표정과 표정점의 대상물 좌표를 계산하기 위한 대상물 좌표체계 결정을 이용한다(Rollei Fototechnic GmbH, 2002).

### 2.1 내부표정요소

카메라 렌즈의 특성으로 인하여 대상물 공간상에서 카메라에 들어오는 입사각과 카메라 내부에서 렌즈의 중심을 통해 굴절하는 굴절각이 일정하지 않기 때문에 생기는 렌즈 왜곡수치는 방사방향 왜곡 수차와 접선방향 왜곡 수차로 나눈다. 접선방향 왜곡 수차는 극히 미세하여 특수한 경우를 제외하고는 유사하며 방사방향 왜곡수차 DR(radial distortion)는 다음 식 (1)로 보정한다. 여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 실험을 되풀이하여 최소제곱법에 의하여 구한다.

$$DR = A_1 \times R \times (R^2 - R_0^2) + A_2 \times R \times (R^4 - R_0^4) \quad (1)$$

$A_1$  : 1차 왜곡 상수

$A_2$  : 2차 왜곡 상수

$R$  : 반지름

$R_0$  : 왜곡 수차가 0이 되는 주점으로부터 반경

### 2.2 외부표정요소

외부표정 요소들은 카메라 외부투영 중심으로 절대좌표계  $(X, Y, Z)$ 에 관계되는 촬영점  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 에 의해 표현된다. 또한 절대좌표에 관계되는 사진좌표축의 각회전  $(\omega, \phi, \kappa)$ 을 알아야 한다. 상-대상물 관계를 정의함에 있어서 기본적으로 외부표정 요소는 좌표변환이며, 표정각  $(\omega, \phi, \kappa)$ 은 사진좌표계와 절대좌표계 사이에서의 회전변환을 말한다.

### 2.3 자체검정 광속조정의 수학적 모델

자체검정 광속조정은 카메라의 검정을 포함하고 대상물 공간좌표(object space coordinate) 및 외부표정 매개변수들의 신뢰도를 향상시키기 위하여 계통적 오차들을 보정해 주는 확장된 광속조정법이다. 일반적으로 부가매개변수들은 높은 정밀도를 가지기 위하여 자체검정 광속조정에서 영향시스템의 계통적인 모델을 포함하고 있다. 다음 식 (2)와 같이 확장된 공선조건 방정식은 자체검정 광속조정의 기본 함수모델로 사용된다(이진덕 등, 2001).

$$x + \Delta x - x_p = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y + \Delta y - y_p = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$x, y$  : 대상점의 상좌표

$X, Y, Z$  : 대상점의 대상물 공간좌표

$x_p, y_p$  : 주점 편위

$c$  : 주점 거리

$\Delta x, \Delta y$  : 상좌표 측정에서 적용되는 보정항

$m_{ij}$  : 상공간과 대상물공간 사이의 회전형렬 요소

$X_0, Y_0, Z_0$  : 투영중심의 대상물 공간좌표

내부표정, 방사방향 렌즈왜곡, 비대칭 렌즈왜곡을 모델링하는 부가매개변수들은 다음 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2$$

$$\begin{aligned} \Delta x_1 = & -x_p - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + K_1 \bar{x} r^2 + K_2 \bar{x} r^4 + K_3 \bar{x} r^6 \\ & + P_1 (3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) + 2P_2 \bar{x} \bar{y} \\ \Delta y_1 = & -y_p - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + K_1 \bar{y} r^2 + K_2 \bar{y} r^4 + K_3 \bar{y} r^6 \\ & + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + 2P_2 (\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_2 = & a_1 \bar{x} \bar{y} + a_2 \bar{y}^2 + a_3 \bar{x}^2 \bar{y} + a_4 \bar{x} \bar{y}^2 \\ \Delta y_2 = & b_1 \bar{x} \bar{b}_2 \bar{y} + b_3 \bar{x} \bar{y} + b_4 \bar{x}^2 + b_5 \bar{x}^2 \bar{y} + b_6 \bar{x} \bar{y}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{x} = x - x_p, \quad \bar{y} = y - y_p$$

$$r = (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)^{1/2}$$

$K_1, K_2, K_3$  : 방사방향 렌즈왜곡계수

$P_1, P_2$  : 비대칭 렌즈왜곡계수

$a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_6$  : 광속조정에서 결정된 부가매개변수

### 3. 촬영시스템 및 실험

#### 3.1 촬영시스템

수치영상의 획득을 위한 장비로는 Rollei사에서 제조한 d7 metric 카메라를 사용하였으며, 카메라의 제원은 표 1과 같다. 그림 2는 본 실험에 사용된 타켓 형태로 직경 13mm의 원형 타겟으로 흑백의 명암과 원 중심을 자동으로 인식한다.

표 1. Rollei d7 metric 카메라의 세부사항

렌즈	Rollei D-Apogon 7.3 mm
기록 방식	2/3" CCD, 30bit color
셔터 스피드	1/8,000 초
무게	650g
Pixel in X	1,280
Pixel in Y	1,024

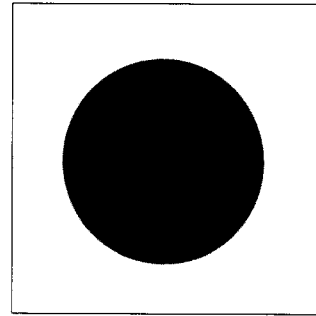


그림 2. 타켓 형태

#### 3.2 자체검정 기법 실험

대상물 공간(object space)과 상공간(image space)사이의 기본투영이론인 공선조건이 바르게 적용될 수 있기 위해서는 우선 검정을 통하여 카메라 내부의 기하학적 특성을 도출하여야 한다(이진덕 등, 1996). 이러한 지식 없이 유도된 대상물 공간에서의 측정값들은 정오차의 영향을 받게 되어 정확도가 저하된다.

##### 3.2.1 사진 촬영

그림 3은 자체 검정을 위해 촬영한 영상이며, 그림 4와

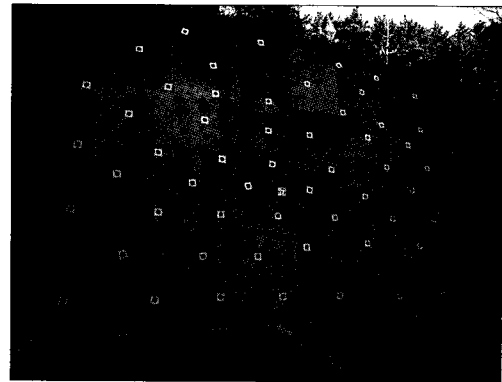


그림 3. 타켓 설치모습

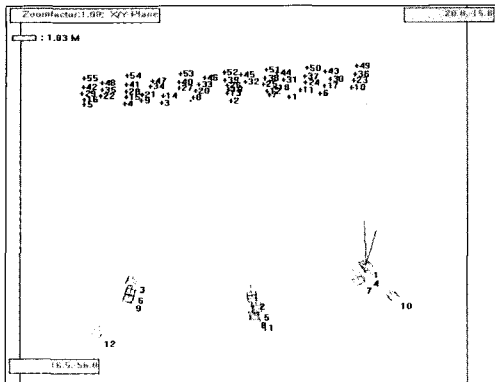


그림 4. 촬영점과 표정점 배치도(xy 면)

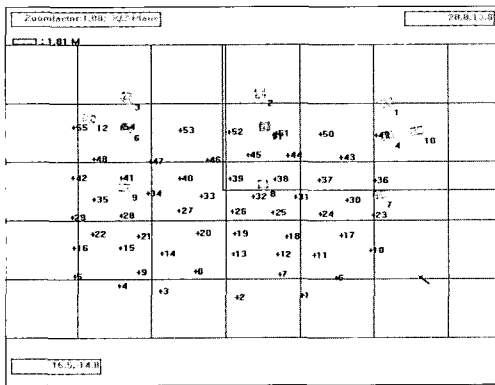


그림 5. 표정점 배치도(xz 면)

5는 측정 대상물의 촬영위치에 대한 배치도이다. 타겟의 설치는 약 6m×5m 벽면에 원형 타겟을 55점에 걸쳐 설치 하였으며 카메라의 촬영 위치 및 방향을 대칭적으로 하여 12장의 영상을 얻었다. 표정점간의 측척을 위해 대략적인 거리를 측정한다.

### 3.2.2 자료 처리

방사방향 왜곡 수차와 접선방향 왜곡 수차를 보정해야 하지만, 접선방향 왜곡 수차는 극히 작은 수치이므로, 최소 제곱법에 의해 구해진 1차 왜곡상수와 2차 왜곡상수를 적용하여 방사방향 왜곡 수차만을 보정해 주었다.

그림 6은 각각의 영상마다 타겟을 확대하여 표정점을 측정하는 것을 보여주고 있다. 이렇게 연속된 영상에서 중복 측정된 표정점은 공선조건을 기초로 한 다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하고, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정 매개변수를 결

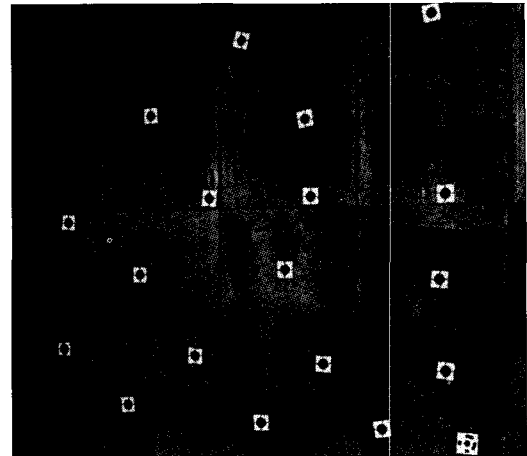


그림 6. 타겟측정모습

표 2. 보정 전후의 검정표 변화값

Calibration Rollei d7 metric		
	보정전	보정후
$ck$	-7.550	-7.560
$Xh$	-0.190	-0.193
$Yh$	0.2100	0.2743
$A_1$	-2.243E-003	-2.226E-003
$A_2$	4.381E-005	3.903E-005
$R_0$	3.0	3.0

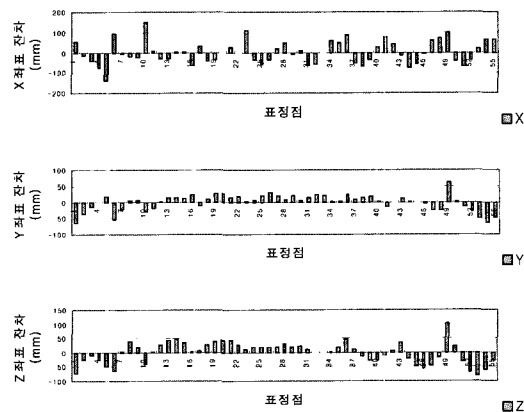


그림 7. 광속조정후의 X, Y, Z 좌표 잔차

정하게 된다.

광속조정 후의 검정 값이 표 2의 값과 같이 보정되었으며 그림 7에 광속조정후의 표정점 좌표의 잔차를 나타내었다.

$ck$  : 초점거리  
 $Xh, Yh$  : 주점좌표  
 $A_1, A_2$  : 방사-대칭 왜곡 매개변수들  
 $R_0$ : 방사왜곡이 0일때 주점까지의 반지름

광속조정 후의 잔차는 X좌표에서 -136.2~151.7mm, Y좌표에서 -64.0~59.9mm, Z좌표에서 -80.7~103.4mm의 분포를 보이고 있다.

### 3.3 타켓 측정 기법별 정확도 실험

타켓의 위치결정방법은 도심을 이용한 도심측정방법과 타켓의 외곽선을 추출하여 일정 방정식으로 보간해 냄으로써 그 기하학적 도형의 중심을 계산하는 타원경계추출법이 있다. 전자는 입계값의 결정에 따라 그 결과가 달라지나 타켓의 형상에 관계없고 후자는 입계값에 무관하다는 장점이 있으나 타켓의 형상이 타원이어야 한다는 단점이 있다(한승희, 1999).

원형 또는 타원체 타켓의 부화소 위치결정은 강도에 의한 경중률을 고려하는 도심위치결정기법을 이용할 수 있다. 이는 입계값의 결정에 따라 그 결과가 달라지기도 하지만 타켓의 형상에는 영향을 주지 않는다. 그리고 타원경계추출법은 가우시안 필터(Gaussian filter)에 의해 대상물의 모서리로부터 선형요소와 외곽선을 추출한다.

본 연구에서는 동일 대상물에 대해 영상좌표를 취득하여 광속 조정하고 난 뒤, 3차원 결과를 가지고 각각에 대한 정확도 분석과 변위를 분석하였다.

#### 3.3.1 사진촬영

타켓의 설치는 약 6m×5m 벽면에 10의 기준점과 추가

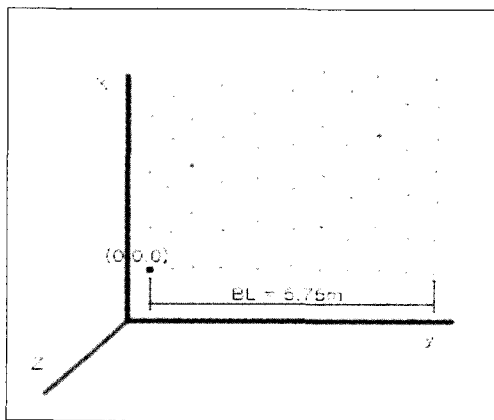


그림 8. 타켓 배치도

로 측정하고자 하는 점에 원형 타켓을 설치하였다. 타켓은 총 55점을 설치하였고, 중복촬영을 통해 총 9장의 영상을 얻었다. 그리고 표정점간의 측척을 위해 거리를 측정하였다. 그림 8은 타켓 배치도를 나타내었다.

#### 3.3.2 자료 처리

본 연구에서는 동일 대상물에 대해 타켓 측정 기법을 4가지 방법을 적용하여 영상좌표를 얻고 이를 광속 조정하여 3차원결과를 얻음과 동시에 각각에 대한 정확도를 분석하고자 한다. 그림 9는 도심측정방법이 유리한 타켓 영상이며, 그림 10은 타원경계추출법이 유리한 타켓 영상이다.

본 연구에서 사용된 기준점은 총 10점으로 각 대상점에 대하여 3차원 좌표를 SOKKIA사의 SET2B 0.5" 독 Total Station으로 정밀하게 관측하였다. 먼저, 좌·우측 기준점을 설치하고 Total Station을 이용하여 두 점간의 거리를 관측하여 이 거리를 기선으로 결정하였다.

대상물상의 타켓의 3차원좌표는 외부표정의 초기값과 영상좌표 그리고 다중영상표정을 이용하여 광속조정으로 얻어졌다. 그리고 각 표정점 좌표의 잔차와 3차원 위치정확도를 분석하였다. 도심측정방법의 경우에는 픽셀의 밝기값

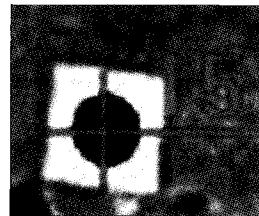


그림 9. 원형 타켓 피팅

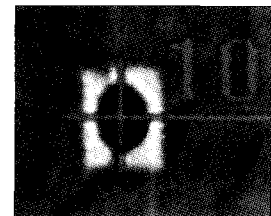


그림 10. 타원형 타켓 피팅

표 3. 타켓측정기법별 정확도실험에 사용된 기준점 좌표

기준점(No.)	X (m)	Y (m)	Z (m)
5	0.389	1.052	0.796
12	1.073	1.102	0.432
20	1.386	0.309	1.211
26	1.523	1.228	1.362
30	2.245	0.997	0.369
38	2.321	0.653	1.636
39	1.420	2.997	0.292
40	2.198	2.838	1.073
52	2.818	2.512	1.102
55	2.276	2.073	0.374

표 4. 타켓 측정 기법별 표준편차

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	공간오차 (mm)
C-E	2.390	2.480	6.620	7.462
E	2.610	2.560	7.110	7.995
C	3.055	3.175	7.670	8.845
Natural	3.195	3.210	9.355	10.394

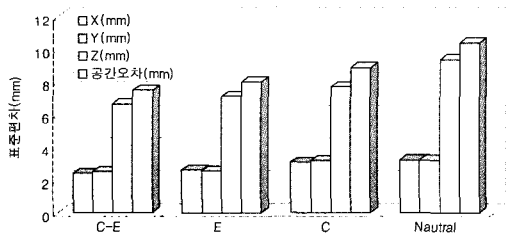


그림 11. 타켓 측정 기법별 표준편차

(grey value)을 경중률로 고려한 방법에 대해 정확도를 분석하였으며 타원경계추출법에서는 외곽추출조절방법으로 정확도를 분석하였다. 경중률을 고려한 도심측정방법과 외곽검출 타원경계추출법으로 타켓의 위치를 결정하고 광속 조정한 X, Y, Z 좌표 표준편차를 표 4와 그림 11에 보였다.

도심측정방법만을 적용한 결과(C)와 타원경계추출법만을 적용한 결과(E), 두 가지 방법을 다 적용한 결과(C-E), 두 가지 방법을 둘 다 사용하지 않은 경우(Natural)로 나타내었다. 도심측정방법에서 경중률을 고려하지 않은 경우에 임계값의 선택에 영향을 많이 받지만 양호한 결과를 보였다. 타원경계추출법의 경우는 도심측정방법의 경우보다 다소 양호한 결과를 보였다. 결과적으로 두 가지 방법을 다 고려하지 않은 경우가 가장 높은 오차를 보였고 그 다음은 도심측정방법을 고려한 경우였으며 가장 낮은 오차를 보인 것은 두 가지 방법을 다 고려한 경우로써 Z좌표에서 역시 가장 높은 오차를 보이는데 이는 영상의 수를 증가시키고 수렴각을 다양하게 함으로써 오차를 낮출 수 있을 것이다. 두 가지 방법을 다 고려한 경우 표준편차는 X좌표에서 2.390mm, Y 좌표에서 2.480mm, Z좌표에서 6.620mm였으며, 공간오차는 7.462mm로 나타났다.

#### 4. 국부 지형 모델 생성

##### 4.1 사진 촬영 및 자료 처리

실험대상지역에 54개의 타켓을 부착하고 카메라의 촬영 위

치 및 방향을 대칭적으로 하여 20장의 영상을 얻었다. 표정점 간의 측척을 위해 각 끝부분의 타켓 사이의 거리를 측정한다.

아래의 그림 12는 실험 대상지의 모습이며, 그림 13은 타켓의 배치도로서 국부적으로 굴곡이 많이 발생한 부위에는 타켓을 조밀하게 배치하였다.

본 연구에서 사용된 기준점은 총 12점으로 각 대상점에 대하여 3차원 좌표를 SOKKIA사의 SET2B 최소 0.5" 독 Total Station으로 정밀하게 관측하였다.

연속된 20장의 영상에서 54개의 표정점을 중복 측정하여 다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하고, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정 매개변수를 결정하게 된다. 그림 14에 표정점의 잔차를 그림 15에 표정점의 표준편차를 나타내었다.

광속조정 후의 잔차는 X좌표에서 -18.3~13.1mm, Y좌표에서 -11.4~81.6mm, Z좌표에서 -0.9~18.9mm의 분포를 보이고 있다.

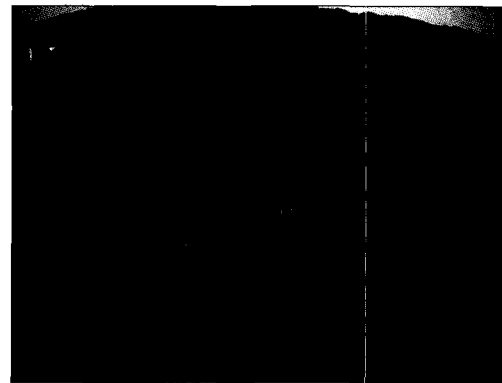


그림 12. 국부 지형 실험지역

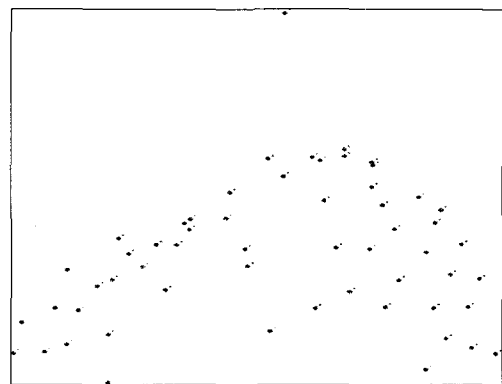


그림 13. 타켓 배치도

표 5. 국부지형모델생성실험에 사용된 기준점 좌표

No	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0	0	0
3	0.778	0.052	-0.798
5	1.364	0.313	-1.362
10	2.135	2.287	-1.077
14	3.643	3.711	-0.868
22	4.168	3.700	-1.311
27	8.453	6.942	-0.299
32	7.960	5.200	-1.675
33	8.244	3.591	-1.648
42	9.522	1.579	-1.839
46	11.461	3.721	-0.422
54	10.556	-0.553	-1.178

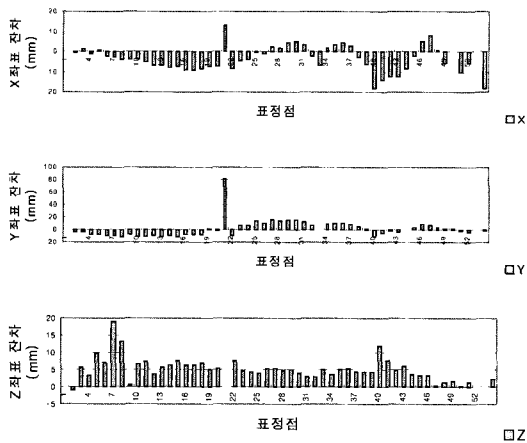


그림 14. 광속조정후의 X, Y, Z 좌표 잔차

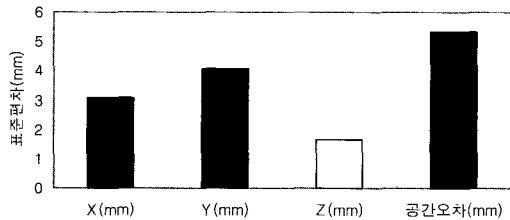


그림 15. 3차원 좌표의 표준편차

결정된 대상물 3차원 좌표의 표준편차는 그림 15와 같이 X방향으로 3.050mm, Y방향으로 4.040mm, Z방향으로 1.630mm, 공간오차는 5.318mm로 나타났다.

#### 4.2 국부지형모델 생성

조정된 표정점 좌표를 기초로 상용 프로그램인 Surfer를 이용해서 보간 기법별로 국부지형모델을 생성하였다. 대상물의 3차원 모델을 통하여 형상재현을 효과적으로 구현하여 시각화 하고자 하였다. 크리징 보간법은 관측점이 불규칙한 경우에 등고선이나, 곡면의 보간 등에 유용하며 자료의 경향(trend)을 나타낼 수 있다.

그림 16은 등고선도, 그림 17은 국부지형모델의 DEM (digital elevation model), 그림 18은 3차원 망 형상, 그림 19는 3차원 DSM(digital surface model)을 나타내었다.

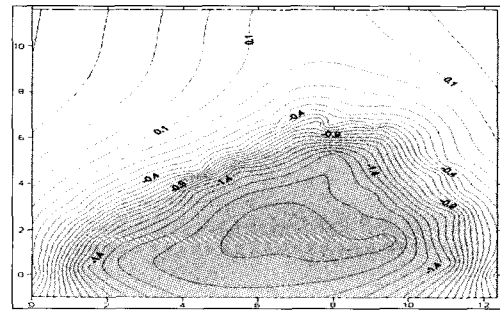


그림 16. 등고선도

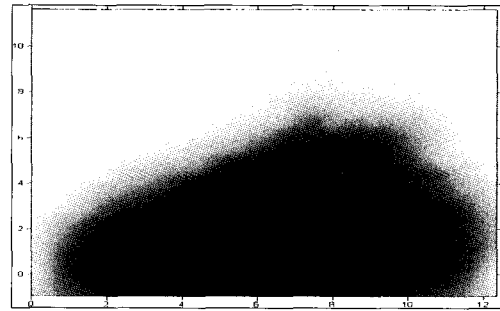


그림 17. 추출된 DEM

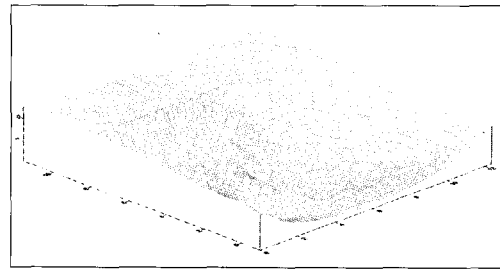


그림 18. 3차원 망 형상

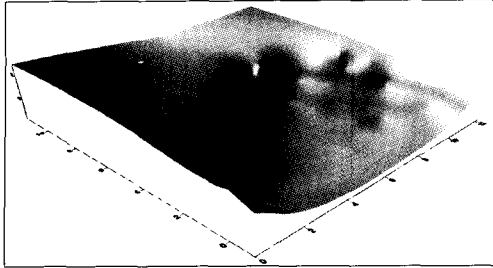


그림 19. 3차원 DSM

## 5. 결 론

본 연구에서는 Rollei d7 metric 카메라를 이용하여 현장 자체검정을 실시하여 렌즈검정을 하고 디지털 타켓에 대한 위치결정기법을 이용하여 정확도를 비교하였으며 근거리 수치사진측량을 이용하여 국부지형모델을 생성한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 현장자체검정실험으로 내부표정요소 및 렌즈 왜곡 등에 관련된 기하학적 검정 매개변수들을 도출하여 보정해 줌으로써 정확도를 크게 향상시킬 수 있었다.
2. 도심측정방법과 타원경계추출방법을 여러 가지로 조

합하여 적용한 결과 정확도는 타원경계추출방법과 도심측정방법을 동시에 적용되었을 경우가 가장 우수하였다.

3. 디지털 카메라를 이용한 근거리 수치사진측량시스템은 국부지형모델 생성, 대상물의 3차원 모델링 및 형상재현 등을 효율적으로 구현하여 대상물의 시각적 분석에 활용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 이석균(1998), CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치 사진측량에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, p. 1.
- Tecklenburg, W. and Luhmann, T.(2000), *Kamera modellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen*, Publikationen der DGPF, Band 9, p. 1.
- Rollei metric CDW User Manual(2002), pp. 25-27.
- 이진덕, 최용진(2001), CCTV 유형 CCD카메라를 이용한 근거리 산업사진측량의 정확도, 한국측량학회지, 제 19권 제 3호, p. 284.
- 이진덕, 연상호, 이병환(1996), 스틸카메라의 자체검정에 의한 기하학적 수행성 평가, 대한토목학회 학술발표회 논문집, p. 105.
- 한승희(1999), 디지털 타켓의 중심측정을 위한 도심측정방법과 외곽선 추출·타원 피팅방법의 정확도 분석, 대한토목학회지, 제 19권 제 III-3호, pp. 434.

(2003년 4월 29일 원고접수)