한국측량학회지, 제 21권 제 4호, pp. 365~371(2003년 12월 31일)

수치사진측량기법을 이용한 문화재의 3차원 모델링에 관한 연구

The 3D Modelling of Cultural Heritage Using Digital Photogrammetry

김진수[1] · 박운용[2] · 홍순헌[3]

Kim, Jin Soo · Park, Woon Yong · Hong, Soon Heon

Abstract

Digital high resolution cameras are widely available, and are increasingly use in digital close-range photogrammetry. And photogrammetry instruments are developing rapidly and the precision is improving continuously. The building of 3D terrains of high precision are possible and the calculation of the areas or the earthwork volumes have high precision due to the development of the technique of the spatial information system using computer. 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 pixel degree through digital close-range photogrammetry with bundle adjustment for local terrain model generation and 3D embodiment of tumulus. In the study is about to efficient analysis of digital information data for conservation of cultural properties.

Keywords : Digital close-range photogrammetry, Digital camera, Local terrain model, 3D embodiment of tumulus

요 지

고해상도의 디지털 카메라는 근거리 수치사진측량에서 널리 유용하게 사용되고 있으며 점차 활용도가 증가하고 있다. 또한 사진측량 장비의 급속한 발전으로 정밀도가 많이 향상되었고 컴퓨터를 이용한 지형공간정보체계기술의 발달로 더욱 정밀한 3차원 지형의 재현과 면적 및 토공량 산정이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 휴대가 간편하고 수치영상의 자체저장능력을 지닌 디지털 카메라를 이용하여 촬영조건의 다양한 변화에 따른 위치오차를 분석하였으며 광속조정을 통하여 높은 정확도의 화소 좌표를 획득하여 3차원 지형의 모니터링을 위한 기초자료로 사용할 수 있도록 하였다. 또한 근거리 수치사진측량기법의 국부지역모형생성과 문화재의 보존과 복원을 보다 효율적으로 하기 위해 수치 정보 분석에 관한 연구를 수행하여 봉분의 3차원 구현에 대한 활용방안을 모색하였다.

핵심용어 : 근거리 수치사진측량, 디지털 카메라, 국부지역모형생성, 봉분의 3D 구현

1. 서 론

최근 많은 국제 행사와 문화 행사를 통하여 국가의 위상이 점차 높아짐에 따라 옛 조상들의 발자취인 문화재를 복원하려는 노력을 많이 하고 있다. 하지만 현실적으로 도시화의 가속화와 도굴로 인하여 문화재의 유지관리, 보존 및 복원에 상당한 어려움을 겪고 있는 실정이다(박운용 등, 2003). 문화재 측정은 대상물의 파손 없이 비접촉 방법에 의한 3차원 해석이 요구되는 분야로서 추후 보존과 복원을 위한 정밀한 수치자료의 구축방안이 여러 각도로 모색되

1) 연결저자 · 정회원 · 동아대학교 토목공학과 시간강사(E-mail:8051kjs@hanmail.net)
2) 정회원 · 동아대학교 토목공학과 교수(E-mail:uypark@daunet.donga.ac.kr)
3) 정회원 · 밀양국립대학교 토목공학과교수(E-mail:hongsh@mnu.ac.kr)

고 있는 실정이다(강준묵 등, 2000).

지형의 특성을 공간상에 수치적으로 표현하는 수치표고모형(DEM : Digital Elevation Model)은 문화재 복원분야에서 광범위하게 적용이 되어 오고 있다.

본 연구에서는 봉분의 3차원 시각화을 위하여 근거리 수치사진측량(digital close-range photogrammetry)을 이용하여 국부지형모델(LTM : Local Terrain Model)을 생성하였다. 사전작업으로 보다 정확한 봉분의 3D을 생성하기 위하여 자체검정방법(self calibration method)을 실시하여 다중영상접합의 원리를 적용하고 광속조정법(bundle adjustment method)을 실시하였다. 또한 도심측정방법과 타원경계추출법으로 타켓의 위치측정 정확도를 살펴보고, 타켓 분석결과를 통해 가장 우수한 결과의 기법으로 봉분의 국부지형모델을 생성하였다. 이러한 공간유형 문화재들을 휴대가 간편하고 수치영상의 자체 저장능력을 가진 Rollei d7 metric 디지털 카메라로 촬영하여 다중 영상 표정의 과정을 거쳐 봉분의 3차원 좌표를 측정하고, 이를 통하여 형상화한 봉분을 컴퓨터 시스템과 연관해서 3차원으로 시각화하고자 하였다.

본 연구에서는 경상남도 창녕군에 위치한 송현동 고분군일대의 봉분을 관측 대상지로 선정하였다. 이 취득 데이터를 이용하여 후처리과정을 거친 후 3차원 형상을 수치화하여 복원 이전의 발굴상태를 영구히 보존하고, 발굴된 유적을 기초로 하여 복원시킨 봉분의 형상을 추측하기도 용이하며, 이러한 복원 작업을 효율적이고, 신속하게 분석하여 재현함으로써 문화재의 유지관리 · 복원을 위한 기초자료기반을 구축함에 있다.

그림 1은 본 논문의 연구 수행 과정이다.

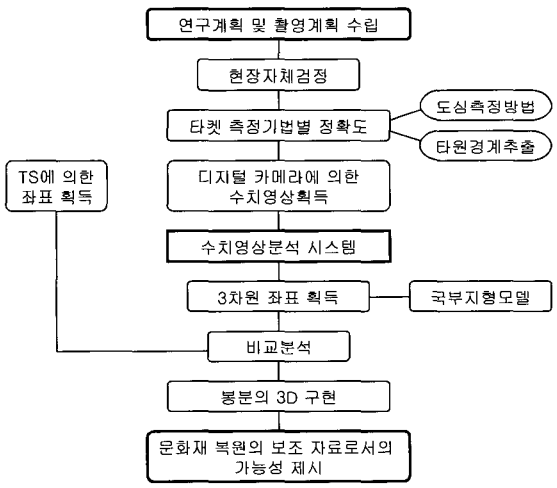

그림 1. 연구 수행과정

2. 다중영상 접합의 원리

근거리 수치사진측량에서 다중영상접합이란 여러 장의 사진을 기하학적 원리를 이용하여 접합함으로써 대상물의 3차원 좌표를 획득하는 것이다. 다중영상표정(multi-image orientation)은 여러 다른 사진들과 대상물에 관련된 촬영점(X_0, Y_0, Z_0)과 회전요소(ω, ϕ, κ)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 보정한 카메라의 내부표정요소와 사진의 정확한 외부표정과 표정점의 대상물 좌표를 계산하기 위한 대상물 좌표체계결정을 이용한다(Rollei Fototechnic GmbH, 2002, 이재원 등 2003).

2.1 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. 다음식 (1)과 같이 확장된 공선조건 방정식은 자체검정 광속조정의 기본 함수모델로 사용된다(이진덕 등, 2001).

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

$$y + \triangle y - y_p = -c\frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \quad (1)$$

여기서, x, y : 대상점의 상좌표

X, Y, Z : 대상점의 대상물 공간좌표

x_p, y_p : 주점 편위

c : 주점 거리

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

m_{ij} : 상공간과 대상물 공간 사이의 회전행렬 요소

X_0, Y_0, Z_0 : 투영중심의 대상물 공간좌표

내부표정, 방사방향 렌즈왜곡, 비대칭 렌즈왜곡을 모델링하는 부가매개변수들은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$$
$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 \quad (2)$$
$$\Delta x_1 = -x_p - \frac{\bar{x}}{c}\Delta c + K_1\bar{x}r^2 + K_2\bar{x}r^4 + K_3\bar{x}r^6 + P_1(3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y}$$
$$\Delta y_1 = -y_p - \frac{\bar{y}}{c}\Delta c + K_1\bar{y}r^2 + K_2\bar{y}r^4 + K_3\bar{y}r^6 + 2P_1\bar{x}\bar{y} + 2P_2(\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2)$$
$$\Delta x_2 = a_1\bar{x}\bar{y} + a_2\bar{y}^2 + a_3\bar{x}^2\bar{y} + a_4\bar{x}\bar{y}^2$$
$$\Delta y_2 = b_1\bar{x}b_2\bar{y} + b_3\bar{x}\bar{y} + b_4\bar{x}^2 + b_5\bar{x}^2\bar{y} + b_6\bar{x}\bar{y}^2$$

여기서, $\bar{x} = x - x_p$, $\bar{y} = y - y_p$, $r = (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)^{1/2}$

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

2.2 타켓 측정 기법

타켓의 위치결정방법은 도심을 이용한 도심측정방법과 타켓의 외곽선을 추출하여 일정 방정식으로 보간해 냄으로써 그 기하학적 도형의 중심을 계산하는 타원경계추출법이 있다. 전자는 임계값의 결정에 따라 그 결과가 달라지나 타켓의 형상에 관계없고 타켓 피팅 방법은 임계값에 무관하다는 장점이 있으나 타켓의 형상이 도형이어야 한다는 단점이 있다(한승희, 1999). 원형 또는 타원체 타켓의 부화소 위치결정은 강도에 의한 경중률을 고려하는 도심위치결정기법을 이용할 수 있다. 이는 임계값의 결정에 따라 그 결과가 달라지기도 하지만 타켓의 형상에는 영향을 주지 않는다. 그리고 타원경계추출법은 가우시안 필터(Gaussian filter)에 의해 대상물의 모서리로부터 선형요소와 외곽선을 추출한다.

도심위치 결정기법은 원형 또는 타원형의 타켓에 대한 부화소(subpixel) 위치를 결정하는 접근방법 중의 하나이다. 타켓 및 그 주변영역을 포함할 수 있는 적당한 크기의 사각형 윈도우내에 타켓이 놓여지게 되면 윈도우 내 역치처리(thresholding)가 수행된다. 역치(threshold)는 식 (3)에 의해 계산된다.

$$Threshold = \frac{(\min imum\ pixel\ value + mean\ pixel\ value)}{2} \quad (3)$$

3. 카메라의 기하학적 검정

3.1 현장자체검정

대상물 공간(object space)과 영상 공간(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.

수치영상의 획득을 위한 장비로는 Rollei d7 metric 카메라를 사용하였으며, 사용된 타켓 형태로 직경 13mm의 원형 타켓으로 흑백의 명암과 원 중심을 자동으로 인식한다.

타켓의 설치는 약 6m×5m 벽면에 원형 타켓을 55점에 걸쳐 설치하였으며 카메라의 촬영 위치 및 방향을 대칭적으로 하여 12장의 영상을 얻었다. 촬영위치는 좌측과 우측 가운데방향에서 높이 1m, 1.6m, 2m에서 9장을 촬영하였으며 카메라를 swing(y축의 회전각) 시계방향으로 90°, 180°, 270°로 회전하여 3장을 촬영하였다. 카메라의 표정점간의 축척을 위해 거리를 측정하였다.

왜곡수차 보정 시에는 방사방향 왜곡 수차와 접선방향

표 1. 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

ck : 초점거리

Xh, *Yh* : 주점좌표

A_1, A_2 : 방사-대칭 왜곡 매개변수들

R_0 : 방사왜곡이 0일때 주점까지의 반지름

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

각각의 영상마다 타켓을 확대하여 표정점을 측정하고, 연속된 영상에서 중복 측정된 표정점은 공선조건을 기초로 한 다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하며, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정 매개변수를 결정하게 된다. 광속조정 후의 검정값이 표 1의 값과 같이 보정되었다.

3.2 타켓 측정 기법별 정확도 실험

타켓의 설치는 약 6m×5m 벽면에 원형 타켓을 설치하였다. 타켓은 총 55점을 설치하였고, 좌측과 우측 및 중간부분을 높이 1m, 1.6m, 2m에서 중복촬영을 통해 총 9장의 영상을 얻었다. 그리고 표정점간의 축척을 위해 거리를 측정하였다.

본 연구에서는 동일 대상물에 대해 타켓 측정 기법을 4가지 방법으로 적용하여 영상좌표를 얻고 이를 광속 조정하여 3차원 결과를 얻음과 동시에 각각에 대한 정확도를 분석하고자 한다. 그림 2는 도심위치결정법이 유리한 타켓 영상이며, 그림 3은 타원경계추출법이 유리한 타켓 영상이다.

대상물상의 타켓의 3차원 좌표는 외부표정의 초기값과 영상좌표 그리고 다중영상표정을 이용하여 광속조정으로 얻어졌다. 그리고 각 표정점 좌표의 잔차와 3차원 위치정확도를 분석하였다. 도심측정방법의 경우에는 픽셀의 밝기값(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 2와 그림 4에 보였다.

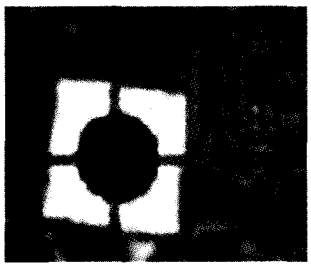

그림 2. 원형 타켓 피팅

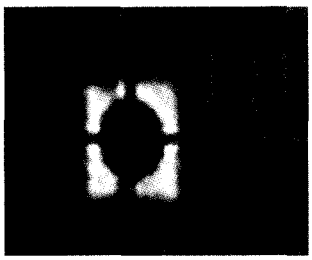

그림 3. 타원형 타켓 피팅

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. 표 2와 같이 두 가지 방법을 다 고려한 경우 표준편차는 X좌표에서 ±2.390mm, Y좌표에서 ±2.480mm, Z좌표에서 ±6.620mm였으며, 공간오차는 7.462mm로 나타났다.

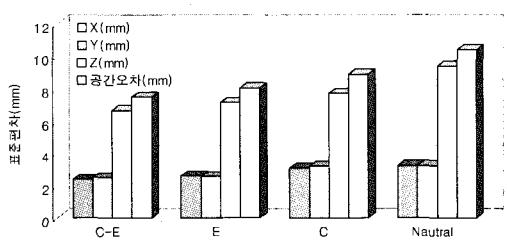

그림 4. 타켓 측정 기법별 표준편차

표 2. 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

4. 봉분의 촬영 및 분석

4.1 사진 촬영

경상남도 창녕군에 위치한 송현동 고분군일대 봉분을 3차원 형상으로 시각화하기 위해 58개의 원형 타켓을 사용하였고, 카메라의 촬영 위치 및 방향을 대칭적으로 하여 25장의 영상을 취득하였다. 봉분 둘레로 14방향에서 높이 1.6m상에서 14장, 높이 2m상에서 11장의 사진을 획득하였다. 표정점간의 축척을 위해 대략적인 거리를 관측하였으며 지상 기준점의 3차원 좌표를 SOKKIA사의 SET2B 최소 2″독 Total Station으로 정밀하게 관측하였다. 그림 5는 대상지역의 현황사진이고, 그림 6은 봉분(약 18m×11m)에 부착한 타켓 배치를 나타내고 있다.

4.2 분석 결과

연속된 25장의 영상에서 58개의 표정점을 중복 측정하여 다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하고, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정요소를 결정하게 된다.

광속조정 후의 잔차의 평균은 X좌표에서 4.84mm, Y좌표에서 4.77mm, Z좌표에서 7.28mm의 분포를 나타내고 있다. 표준편차의 평균값은 X좌표에서 2.98mm, Y좌표에서 1.64mm, Z좌표에서 3.28mm이다. 그림 7, 8에서 광속조정 후의 잔차와 잔차의 평균을 나타냈다.

그림 5. 발굴단계의 봉분 현황

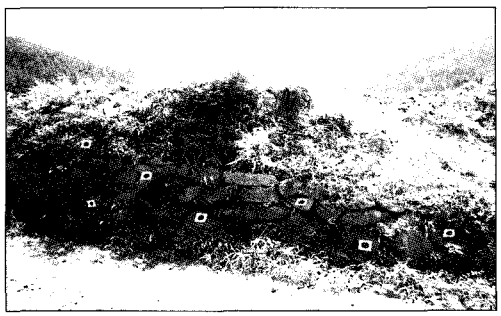

그림 6. 실험대상지의 타켓 배치

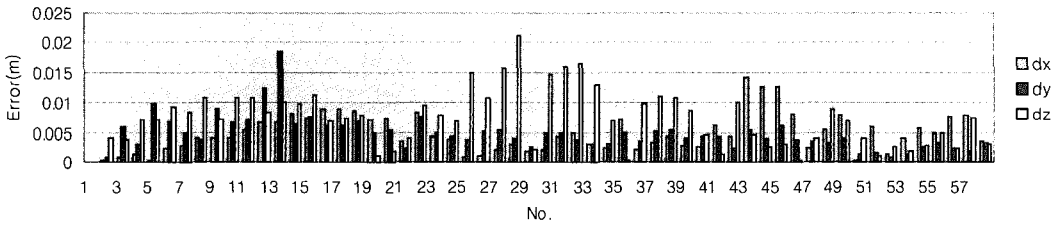

그림 7. 표정점의 잔차

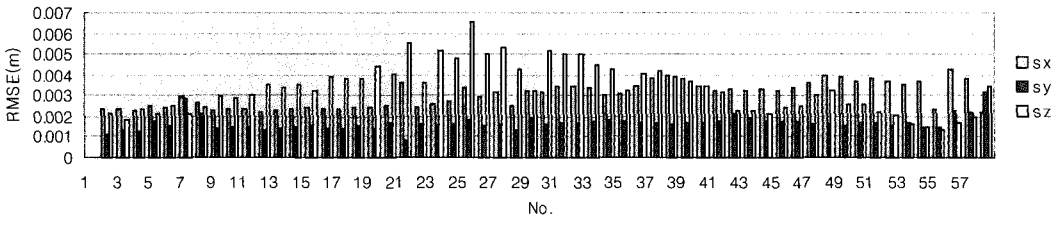

그림 8. 표정점의 표준편차

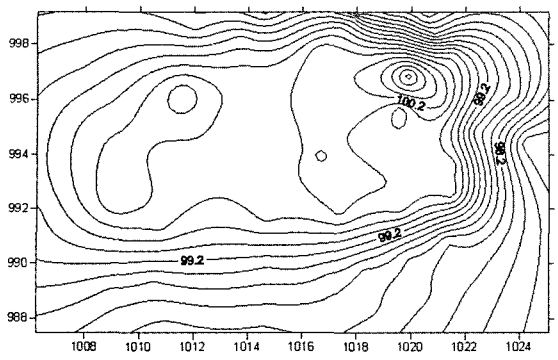

그림 9. 봉분의 등고선 지형

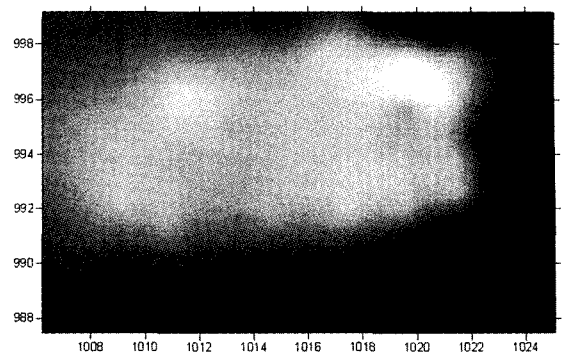

그림 10. 봉분의 DEM

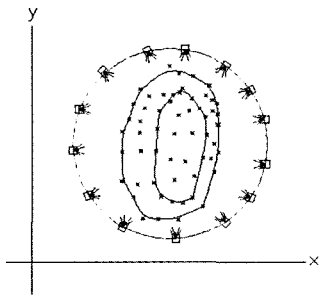

그림 11. 봉분의 단면 배치도

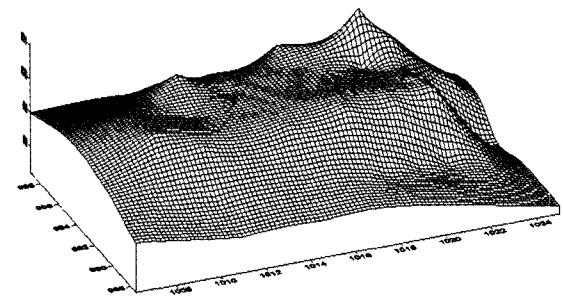

그림 12. 봉분의 3차원 wire frame

조정된 표정점 좌표를 기초로 상용 프로그램인 Surfer를 이용해서 크리징(Kriging)보간법으로 국부지형모델을 생성하였다. 봉분의 3차원 지형 모델을 통하여 형상재현을 효과적으로 구현하여 시각화 하고자 하였다. 크리징 보간법은 관측점이 불규칙한 경우에 등고선이나, 곡면의 보간 등에 유용하며 자료의 경향을 나타낼 수 있다.

그림 9는 등고선도, 그림 10은 DEM(Digital Elevation Model), 그림 11은 봉분의 단면 배치도, 그림 12는 3차원 망 형상을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 Rollei d7 metric 카메라를 이용하여 현장자체검정을 실시하여 렌즈검정을 하고 디지털 타켓에 대한 위치결정기법을 이용하여 정확도를 비교하였으며 근거리 수치사진측량을 이용하여 봉분을 3차원으로 구현하여 정확도를 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

현장자체검정실험으로 내부표정요소 및 렌즈 왜곡 등에 관련된 기하학적 검정 매개변수들을 도출하여 보정해줌으로써 정확도를 크게 향상시킬 수 있었으며, 도심측정방법과 타원경계추출방법을 여러 가지로 조합하여 적용한 결과 정확도는 타원경계추출방법과 도심측정방법을 동시에 적용되었을 경우가 가장 우수하였다. 또한 봉분의 3차원 시각화는 대상물 데이터베이스 영구보존이 가능하고, 각 지역에 많이 산재해 있는 봉분 데이터베이스화의 통일화, 전산화 작업에 보다 효과적으로 활용할 수 있으며 지형 및 문화재 정보를 판독할 수 있는 수치 영상은 봉분의 복원 전·후의 지형 변화나 상태를 알 수 있는 근거 자료로써 그 가치가 높다고 할 수 있다. 디지털 카메라를 이용한 근거리 수치사진측량시스템은 대상물의 3차원 모델링 및 형상재현 등을 효율적으로 구현하여 3차원 지형의 시각적 분석에 활용할 수 있을 뿐만 아니라 문화재 복원 분야의 기초 자료 및 경제적인 보조 자료로서 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

강준묵, 배연성, 엄대용, 이주대 (2000), 수치사진측량에 의한 대형문화재 건축물의 정밀실측, 대한토목학회 학술발표회 논문집, IV, p. 717.

박운용, 신상철, 안상준, 박홍주 (2003), 수치 사진 측량을 이용한 문화재의 3차원 시각화, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
이석군 (1998), CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치사진측량에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, p. 1.
이재원, 홍순헌, 김정희, 정공운 (2003), 근거리 수치사진측량을 이용한 국부지형모형의 생성, 한국측량학회지, 제21권, 제 2호, pp. 148-149.
이진덕, 연상호, 이병환 (1996), 스틸카메라의 자체검정에 의한 기하학적 수행성 평가, 대한토목학회 학술발표회 논문집, p. 105.
이진덕, 최용진 (2001), CCTV 유형 CCD카메라를 이용한 근거리 산업사진측량의 정확도, 한국측량학회지, 제 19권, 제 3호, p. 284.
한승희 (1999), 디지털 타켓의 중심측정을 위한 도심측정방법과 외곽선 추출 · 타원 피팅방법의 정확도 분석, 대한토목학회지, 제 19권, 제 III-3호, p. 434.
Rollei Fototechnic GmbH (2002), *Rollei metric CDW User Manual*, pp. 25-27.

(접수일 2003. 11. 14, 심사일 2003. 11. 27, 심사완료일 2003. 12. 15)