

CCTV유형 CCD 카메라를 이용한 근거리 산업사진측량의 정확도

Accuracy of Close-Range Industrial Photogrammetry Using CCTV Type CCD Camera

이진덕* · 최용진**

Lee, Jin-Duk · Choi, Yong-Jin

要 旨

저가의 CCTV유형 CCD 카메라를 기반으로 하는 수치 근거리사진측량 시스템의 산업정밀측정의 수행능력을 평가하기 위하여 CCD 카메라, 프레임그래버, 수치영상 측정 및 자체검정 광속조정 기법을 통합한 수치근거리 사진측량시스템이 구축되었다. 이 시스템의 적용실험을 위하여 정육면체 형상의 인공어초를 대상으로 하여 다중지점 수렴 네트워크상에서 수치영상을 획득하였다. 자체검정 광속조정기법에 의해 CCD 카메라의 기하학적 검정과 동시에 대상물 전면에 대한 사진삼각측량을 수행하였다. 또한 이미 높은 정확도 잠재성이 입증된 고해상도 스틸비디오 카메라(Kodak DCS)를 유사한 네트워크 조건에서 이용하여 처리함으로써 서로 다른 유형의 카메라를 기반으로 하는 두 시스템의 사진삼각측량 결과의 정확도를 비교하였다.

ABSTRACT

This paper demonstrates the performance of industrial precise measurement using the digital close-range photogrammetric system based on a off-the-shelf CCTV-type CCD camera. The system was constructed with a CCD camera and a PC with a frame grabber, coupled with digital image mensuration and self-calibrating bundle adjustment techniques. An artificial fish reef with cubic shape was taken as an object for the application test of the system and the digital images were acquired on multi-station convergent network around the object. The geometric calibration of the CCD camera and the phototriangulation of the entire surface of the object was carried out simultaneously by means of self-calibrating bundle adjustment technique. Also the system comprising a high resolution still-video camera Kodak DCS, which high accuracy potential has been already established, were employed in similar network condition. Then the results from two different camera systems were compared in the accuracies of phototriangulation.

1. 서 론

머신비전, 로봇비전, 컴퓨터비전과 유사한 의미를 지닌 실시간 사진측정 체계는 CCD 카메라와 프레임그래버(frame grabber) 및 관련 영상처리 소프트웨어 등으로 구성되며 다양한 산업분야에서 품질검사, 계측, 인식, 프로세스 제어의 자동화를 기할 수 있는 능력을 지닌다. 수치영상은 영상개선이 적용될 수 있고 자동화에 의한 실시간 작업을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있어 사진측정 분야에서도 처리 네트워크의 자동화를 기할 수 있게 되었다.¹⁾

전자(solid state) CCD 카메라 센서는 초당 25 또는 30 프레임의 샘플비로 영상 데이터를 획득하는 능력과 영상의 기하학적 안정성을 지니고 있어 수치영상에 의한 사진측정학적인 평가를 가능하게 하였다.²⁾ 또한 수치영상은 일정한 형태의 표현 목적과 분석을 위하여 벡터 또는 래스터 데이터로 취급되어 새로운 정보시스템으로 통합, 저장될 수 있다.

고해상도의 센서와 영상처리 기술의 발달로 수치화상을 이용한 정밀측정분야 또한 진보하게 되었으며, 이제 높은 해상도의 CCD 센서와 자동 상측정 및 광속조정기법의 통합에 의한 수치사진측량 시스템은 종래의 아날로그 시스템에 거의 접근하는 정확도를 얻을 수 있게 되었다.^{3,4)} 최근 CCD칩 포맷이 1524×1012픽셀(Kodak DCS200)에서 3072×2048픽셀(Kodak DCS460)에 이르

*금오공과대학교 토목·환경 및 건축공학부 교수

**한성유아이 엔지니어링 부설연구소 연구원

는 다양한 모델의 스틸비디오 CCD 카메라를 사용하여 1:180,000에 이르는 정확도로 측정이 가능하게 되었다.^{1),6),7)} 스틸비디오 카메라는 영상 획득시 호스트 컴퓨터와의 연결이 불필요하고 자체 내에 하드디스크가 내장되어 있어 산업현장에 적합한 독립성과 융통성을 갖추고 있는 한편, 비용이 고가이고 자체의 저장용량에 제약이 있다.

이에 본 연구에서는 폭넓게 범용되고 있는 저가의 CCTV 유형 CCD 카메라를 산업정밀측정에 적용할 수 있는 가능성을 검토하고자 CCD 카메라 및 프레임그래버 등으로 이루어진 수치영상 획득장치와 자체검정 광속조정 기법을 통합한 근거리 수치사진측량시스템을 구축하고, 실험을 통하여 카메라의 기하학적 매개변수를 검정하고 시스템의 3차원 측정능력을 평가하고자 하였다.

2. 자체검정 광속조정의 수학적 모델

자체검정 광속조정은 카메라의 검정을 포함하고 대상물 공간좌표 및 외부표정 매개변수들의 신뢰도를 향상시키기 위하여 계통적 오차들을 보정해 주는 확장된 광속조정 해법이다. 일반적으로 부가매개변수들은 높은 정밀도를 가지기 위하여 자체검정 광속조정에서 영상 시스템의 계통적인 모델을 포함하고 있다. 확장된 공선조건방정식은 자체검정 광속조정의 기본 함수모델로 사용된다.^{9),8)}

$$\begin{aligned} x + \Delta x - x_p &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ x + \Delta y - y_p &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기서 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 회전행렬 요소

X_0, Y_0, Z_0 : 투영중심의 대상물 공간좌표

내부표정, 방사방향 렌즈왜곡, 비대칭 렌즈왜곡을 모델링하는 부가매개변수들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_1 + \Delta x_2 \\ \Delta y &= \Delta y_1 + \Delta y_2 \end{aligned} \quad (2-2)$$

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

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

$$\Delta x_2 = a_1 \bar{x} \bar{y} + a_2 \bar{y}^2 + a_3 \bar{x}^2 \bar{y} + a_4 \bar{x} \bar{y}^2$$

$$\Delta y_2 = b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} + b_3 \bar{x} \bar{y} + b_4 \bar{x}^2 + b_5 \bar{x}^2 \bar{y} + b_6 \bar{x} \bar{y}^2 \quad (2-3)$$

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's, b's : 광속조정에서 결정된 부가매개변수

3. CCD 카메라에 의한 수치 근거리 측정시스템의 적용 실험

3.1 CCTV유형 CCD 카메라의 제원

본 연구를 위하여 저해상도 또는 중간 해상도의 영상 출력(아날로그 신호)을 가지는 저가의 CCTV(Close Circuit Television) 유형의 전자(solid-state) CCD 카메라를 사용하였다. CCTV유형 CCD 카메라는 일반적으로 C 마운트나 CS 마운트의 CCTV 렌즈를 가지며, 마운트에서 영상면 사이의 길이는 C 마운트와 CS 마운트 렌즈

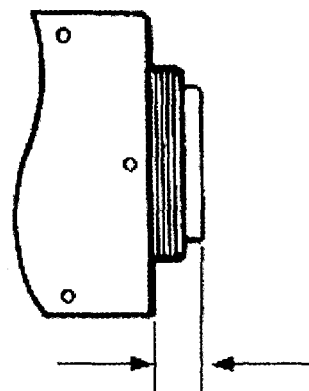


그림 1. CCTV유형 렌즈 마운트

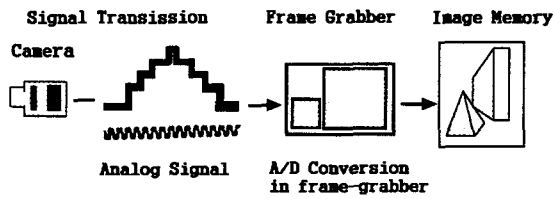


그림 2. 아날로그 CCD 카메라의 영상획득 과정 개요도

표 1. Panasonic WV_BP310 CCD 카메라의 제원

Pick-up Device	771(H)×492(V) pixels. IT CCD
Scanning Area	4.8(H)×3.6(V)
Scanning System	2:1 interlace
Scanning	525 lines/60 fields/30 frames
Horizontal Resolution	570 lines
Signal-to-Noise Ratio	46 dB(AGC OFF)
Lens Mount	C-mount or Special C-mount

각각에 대하여 17.526 mm와 12.5 mm이다.

그림 1은 렌즈마운트의 크기를 나타낸다.^{1),9)}

본 연구에 사용된 아날로그 방식의 CCD 카메라는 아날로그 영상신호를 가지는 영상자료를 전송하고 프레임 그래버에서 A/D 변환을 행한다(그림 2).^{1),10)}

본 연구에 사용된 Panasonic WV_BP310 CCTV-CCD 카메라의 경우 C-mount는 마운트에서 영상면까지의 거리가 11.5 mm이고 CS-mount에서는 7.2 mm이다. 사용된 CCD카메라의 제원은 표 1과 같다.

771×492 픽셀의 CCD 센서를 통하여 CCD 카메라에서 출력된 영상신호들은 프레임그래버(DT3155)를 통하여 640×480 픽셀로 재배열된다. DT3155는 단색의 PCI bus 프레임그래버이고 RS-170, NTSC, CCIR과 PAL의 포맷의 흑백영상신호를 60Hz에서 초당 30 프레임, 50Hz에서 초당 25 프레임의 속도로 실시간으로 포착하고, 수치화하기 위하여 8비트 A/D 변환자를 사용한다.

3.2 네트워크 기하배치 및 수치화상 획득

자체검정기법에 의해 CCD 카메라(Panasonic WV_BP310)의 내부표정요소 및 렌즈왜곡계수를 도출하고 이 CCD 카메라를 이용한 수치사진측량시스템의 3차원 측정능력을 평가하고자 한 번의 길이가 약 0.4 m인 정육면체 형상의 인공어초를 대상으로 택하여 그림 3과 같은 배치하에 수치영상을 획득하였다. 또한 측정결과를 비교하기 위하여 이미 높은 정확도 잠재성이 입증되어 온 스

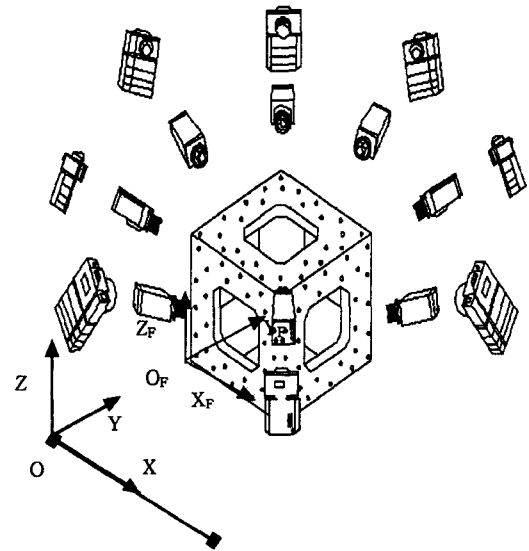


그림 3. 수치영상 획득을 위한 다중지점 수평촬영 네트워크

틸비디오 카메라(Kodak DCS200)를 사용하여 유사한 기하배치에서 수치영상을 획득하였다.^{3),6),7),12)}

이 두 가지 유형의 카메라의 다른 센서크기, 초점거리 및 피사각을 고려하여 대상물의 중앙으로부터 CCD카메라의 경우 약 1.0 m, 스틸비디오 카메라의 경우 2.6 m 떨어진 대상물 주위 공간상에 8점씩의 촬영지점을 갖는 다중지점 경사수평촬영 네트워크를 채택함으로써 대상물의 밑면을 제외한 전면에 대한 영상블럭을 형성하도록 하였다. 대상점으로는 대상물의 밑면을 제외한 5개 면에 직경 5 mm의 원형 반사타겟을 각각 28개씩, 모두 140개를 설치하였다.

본 연구에서는 광속조정과정에서 대상물에 대한 영상블럭내 최소 3점의 기준점을 필요로 하는 종래의 표준적 조정방법(standard adjustment)에 대하여 기준점 좌표를 필요로 하지 않는 자유망 조정(free-net adjustment) 방법¹³⁾의 효과를 고찰할 의도에서 2개의 기준계를 채택하였다. 그림 3에서 X, Y, Z는 표준적 조정에서 채택한 기준계로서 기선의 좌측단을 좌표원점으로 하고 있으며, X_F , Y_F , Z_F 는 자유망 조정에서 대상점들의 근사좌표를 결정하기 위한 기준계로서 대상물의 하단 모서리를 원점으로 채택하였다. 대상물의 한 측면으로부터 1.6 m 정도 떨어진 위치에 약 2.7 m의 기선을 설치하고 대상물의 상면에 분포된 타겟들 중 8점을 기준점으로 정하고 기선 양단에 토달스테이션을 설치하여 원형타겟의 중심에 대한



그림 4. 수치영상획득 시스템의 배치

삼각측량을 행하였다. 또한 자유망 조정을 위한 축척결정요소로서 타겟간의 거리 3세트를 대상물의 상면과 측면에서 테이프로 측정하였다.

자체검정 광속조정기법은 높은 기하학적 강도와 잉여 관측을 요하므로 각 촬영지점에서 표준상태(roll 0°)와 카메라 광축의 90° 회전상태(90° 또는 -90°의 roll 회전)로 2매씩, 따라서 8개 지점에서 모두 16매의 수치영상을 획득하였다.

C-mount가 있는 CCD 카메라의 경우 8 mm 렌즈를 사용하여 안정된 내부기하학적 조건을 유지하도록 초점

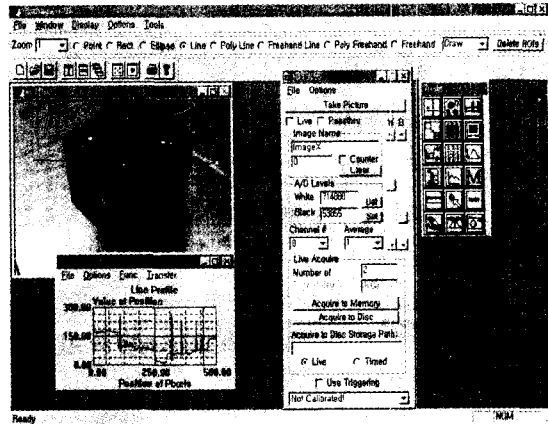
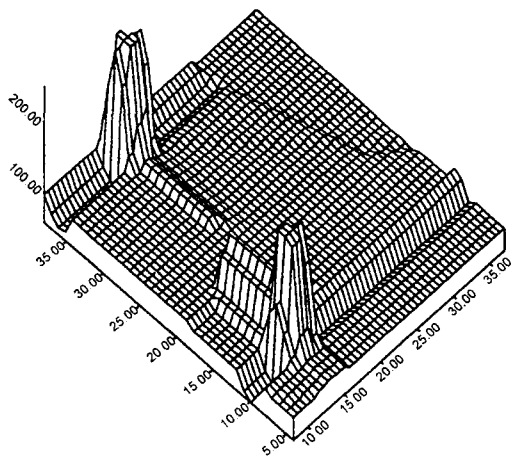


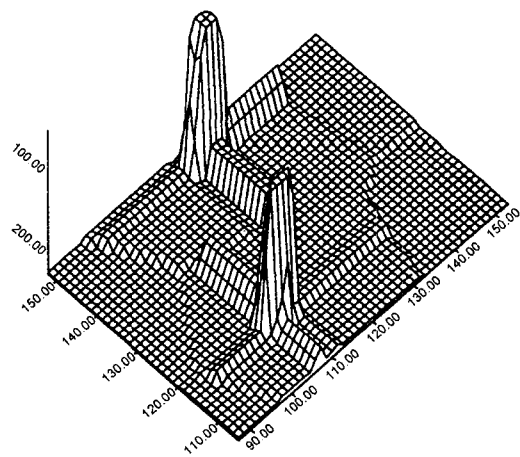
그림 5. 영상처리 소프트웨어 HLImage 화면

조절링을 ∞에 고정하여 촬영하였으며, 일정한 밝기와 타겟의 반사효과를 얻을 수 있도록 램프(Photoreflector 500W)를 이용하여 조명을 조절해 주었다. PC내 프레임 그래버(DT3155)를 통하여 형성된 수치영상은 영상처리 s/w인 HLImage상에서 실시간으로 나타내게 되며 TIF포맷으로 PC에 저장하였다(그림 5).

스틸비디오 카메라의 경우 Nikkor 28 mm 렌즈를 사용하였고, 스틸비디오 카메라 또한 안정된 내부기하학적 상태를 유지해 주기 위하여 카메라의 초점조절링을 ∞에 고정시켰으며, Nikon SB-26 후레쉬를 사용하여 역시 16매의 수치화상을 획득하였다. 80Mb 용량의 카메라 내부 하드디스크에 저장된 영상들은 Aldus PhotoStyler와



(a) CCD 카메라 영상



(b) 스틸비디오 카메라 영상

그림 6. 동일 타겟에 대한 CCD 영상과 스틸비디오 영상의 비교

SCSI 컨트롤러를 통하여 PC에 다운로드하고 그레이스케일로 변환하여 TIF포맷으로 저장하였다.

3.3 영상좌표 측정

타겟재료는 retro-reflective 필름시트로서 표면이 직경 50 μm 정도의 작은 구형으로 구성되어 있다. 각각의 구는 현저히 돌아온 빛의 방향이 입사방향을 따르게 되므로 cat's eye 또는 반사프리즘과 같이 작용한다.¹¹⁾ 따라서 반사테이프를 이용한 타겟은 최상의 신호응답을 줄 수 있도록 광조건을 조작할 수 있다. 원형타겟의 중심부에서 가장 높은 밝기값을 나타내며 고해상도의 영상일수록 밝기값에 있어서 배경과의 대조효과가 두드러지고 예리하여 자동 centroiding에 의한 상측정의 장점을 가지고 있다.¹¹⁾

그림 6은 두 종류의 카메라로 얻어진 반사타겟 이미지의 효과를 보여준다.

수치영상에서 타겟영상들의 좌표는 강도경중률을 고려한 자동 도심위치결정(Autocentroiding) 기법에 근거한 Mono-Comparator 프로그램으로 자동측정하였다.¹²⁾ 측정된 프레임별 타겟중심의 영상좌표들은 영상중심을 원점으로 하는 사진좌표로 자동변환되어 자체검정 광속조정을 위한 입력자료로 이용되었다.

4. 데이터 처리 및 결과 분석

자체검정 광속조정을 통하여 카메라의 기하학적 검정 매개변수를 도출하고 140개 대상점들에 대한 대상물 공간좌표 X, Y, Z 및 그에 대한 표준오차를 동시에 계산하였다. 상좌표의 사전표준오차는 Mono-Comparator 프로그램의 정밀도를 고려하여 x, y에서 각각 0.5 μm , 기준점좌표의 사전표준오차는 토털스테이션의 장비정확도를 고려하여 X, Y, Z에 각각 0.01 mm의 사전표준오차를 외부구속조건으로 부여하여 위치제약범위를 가지고 있는 바, 이러한 기준점위치를 외부구속조건으로 주어 표준광속조정에서 관측값의 경중률을 고려해 주었다.

자체검정 광속조정에서는 CCD카메라 영상과 스틸비디오카메라 영상 공히 표준적 조정방법과 자유망 조정방법으로 각각 처리하였다.

4.1 자체검정기법에 의한 CCD 카메라의 기하학적 검정

표 2는 자체검정 광속조정으로 도출된 CCD 카메라의 내부표정요소와 렌즈왜곡계수들을 나타낸 것으로서 기준

표 2. 자체검정기법으로 유도된 CCD 카메라의 내부표정 매개변수와 렌즈왜곡계수

	Standard	Free-net
c	8.050 mm	8.0471 mm
x_p	-0.0050 mm	-0.0060 mm
y_p	-0.0429 mm	-0.0450 mm
K_1	0.5181E-02	0.5061E-02
K_2	0.5487E-03	0.6179E-03
K_3	-0.6770E-04	-0.8482E-03
P_1	0.1347E-03	0.1643E-03
P_2	-0.9598E-05	-0.8804E-07

점을 이용한 표준 조정과 기준점을 이용하지 않은 자유망 조정의 두 가지 결과를 제시하였다. 여기서 c는 주점 거리, x_p , y_p 는 주점위치, K's는 방사방향 렌즈왜곡계수, P's는 비대칭 렌즈왜곡계수이다.

4.2 상좌표 잔차

표 3은 CCD 카메라 영상에 대한 자체검정 광속조정 처리결과들 중 상좌표 관측값의 잔차를 나타낸 것이다. CCD 카메라 영상에 대한 상좌표 측정의 잔차가 0.3~0.4 μm , 이는 화소크기의 1/22~1/30의 범위로서 본 시스템에서 디지털 모노컴퓨터에 의한 subpixel 측정의 양호함을 나타낸다.

표 3. CCD카메라 영상에 대한 상좌표 관측값의 잔차

Image No.	Standard(μm)			Free-net(μm)		
	x	y	total	x	y	total
1	0.39	0.33	0.36	0.32	0.29	0.31
2	0.43	0.38	0.40	0.40	0.30	0.36
3	0.41	0.26	0.34	0.36	0.26	0.31
4	0.29	0.39	0.35	0.30	0.23	0.27
5	0.38	0.25	0.32	0.35	0.25	0.30
6	0.37	0.36	0.37	0.37	0.31	0.34
7	0.43	0.40	0.41	0.38	0.28	0.33
8	0.38	0.34	0.36	0.34	0.28	0.31
9	0.41	0.39	0.40	0.32	0.30	0.31
10	0.51	0.40	0.46	0.44	0.34	0.39
11	0.36	0.27	0.32	0.26	0.22	0.24
12	0.38	0.44	0.41	0.34	0.32	0.33
13	0.33	0.31	0.32	0.30	0.29	0.29
14	0.43	0.37	0.40	0.40	0.35	0.38
15	0.35	0.31	0.33	0.31	0.22	0.27
16	0.46	0.44	0.45	0.40	0.35	0.38
Total	0.40	0.36	0.38	0.35	0.29	0.33

표 4. 16매의 CCD 카메라영상을 이용한 광속조정 결과의 정확도 비교

Network	Object point standard error(mm)			Object space accuracy
	X	Y	Z	
Standard	0.042	0.042	0.058	1:12,296
Free-net	0.037	0.037	0.053	1:13,772

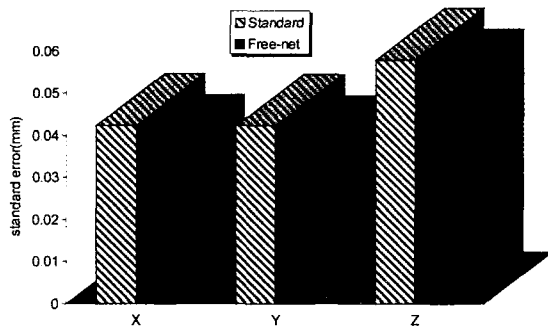


그림 7. 16매의 CCD 카메라 영상을 이용한 광속조정 결과의 정확도 비교

4.3 표준적 조정기법과 자유망 조정기법의 정확도 비교

표 4와 그림 7은 16매의 CCD 카메라 영상을 이용하여 처리한 140점의 타겟에 대한 X, Y, Z 대상물 공간좌표의 표준오차를 비교·도시한 것이다. 기준점 좌표를 사용한 표준적인 조정결과에 비해서 기준점을 사용하지 않는 자유망 조정결과가 오히려 약 11% 높은 정확도를 나타내었다. 기준점측량 성과가 사진측량으로 구해지는 결과보다 정확하다는 가정하에서는 사진삼각측량의 정확도는 기준점 수가 많을수록 높아지지만 고 정확도를 요하는 경우 실제적으로 기준점측량의 한정된 정확도는 문제가 될 수 있다. 그 대신 신속한 측정결과를 요하는 산업현장에서 대상점들의 3차원 근사좌표, 그리고 축척결정을 위한 대상공간길이를 입력자료로 하는 자유망(free-net) 조정기법을 이용한다면 종래 기준점측량에 소요되는 시간과 정확성 문제에서 탈피할 수 있음을 시사해 준다.

두 조정기법으로 각각 얻어진 대상점들의 좌표를 같은 기준계상에서 비교하기 위하여 자유망 조정기법의 결과를 8개의 기준점을 이용하여 표준 조정기법의 기준계로 3차원 좌표변환을 행하였다. 표 5는 최소제곱법으로 결정된 변환 매개변수이고, 표 6은 3차원 변환 후 140개 대상점들에 대한 X, Y, Z 좌표차의 평균과 RMS를 나

표 5. 3차원 변환 매개변수

Xo	1167.7117 mm
Yo	1599.2923 mm
Zo	10.3060 mm
SC	1.0001334
OMEGA	1.4240 deg
PHI	359.0799 deg
KAPPA	0.0513 deg

표 6. X,Y,Z 좌표차의 평균 및 RMS (Free-net minus Standard)

	DX(mm)	DY(mm)	DZ(mm)
Average	-0.1354	0.0237	-0.0502
RMS	0.0910	0.1189	0.0857

표 7. 8매의 CCD 카메라 영상에 의한 정확도 비교

Network	Object point standard error(mm)			Object space accuracy
	X	Y	Z	
Standard	0.056	0.055	0.072	1:9,628
Free-net	0.053	0.052	0.072	1:9,944

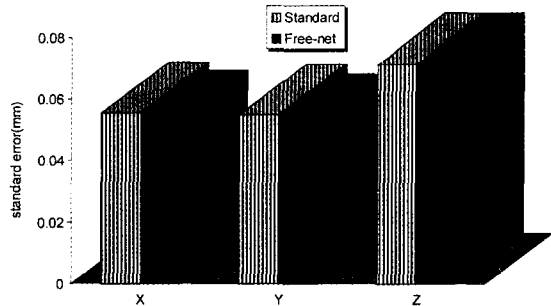


그림 8. 8매의 CCD 카메라 영상에 의한 정확도 비교

타낸 것이다. 각 방향에서 좌표차의 RMS가 0.1 mm내외로 나타났다.

4.4 표준 다중지점 수렴네트워크에서의 정확도 비교

대상물 주위 4개 지점에서 영상을 획득하는 기하배치를 표준 다중지점 수렴 네트워크이라 한다. 표 7과 그림 8은 CCD 카메라로 대상물 모서리 방향의 4 지점에서 얻은 총 8매의 영상으로 자체점정 광속조정을 행한 결과이다. 대상물 최대길이에 대한 XYZ 표준오차의 산술평균의 비로 표현한 상대정확도가 표준 조정과 자유망 조정에서 모두 약 1/10,000에 접근하는 정확도를 나타내었

다. 표 4 및 그림 7의 결과와 비교해 볼 때 촬영점 수와 영상의 수를 8지점 16매에서 4지점 8매로 1/2만큼 대폭 줄이더라도 2/3 이상의 정확도를 얻을 수 있음을 시사해 준다.

4.5 CCD 카메라와 스틸비디오 카메라에 의한 자체검정 광속조정 결과의 비교

스틸비디오 카메라(DCS200)의 경우 8지점에서 획득된 16매의 영상으로 자체검정 광속조정을 행한 결과 상좌표 측정 잔차는 x, y 평균 0.51 μm 를 나타내었으며, 이는 1 화소의 크기 9 $\mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 임을 고려할 때 1/18의 화소크기에 해당한다. 표 8과 그림 9는 140개의 대상점에 대한 X, Y, Z의 표준오차와 정확도를 비교 도시한 것이다. 역시 자유망 조정이 표준적 조정에 비하여 10% 이상 낮은 표준오차를 보였으며 1/20,000을 초과하는 정확도를 나타내었다.

표 9는 CCD 카메라와 스틸비디오 카메라 영상으로부터 각각 표준적 조정과 자유망 조정을 통하여 산출된 좌표들의 차를 X, Y, Z 방향에서 비교한 것이다. 표준적 조정에서는 0.07 mm의 RMS치를 보였고, 자유망의 경우 0.1 mm 정도의 RMS치를 나타냄으로써 저가의 범용적인 CCTV유형 CCD 카메라를 기반으로 한 시스템의 정밀측

표 8. 16매의 스틸비디오카메라 영상에 의한 광속조정 결과의 정확도 비교

Network	Object point standard error(mm)			Object space accuracy
	X	Y	Z	
Standard	0.038	0.034	0.035	1:16,366
Free-net	0.029	0.027	0.028	1:20,942

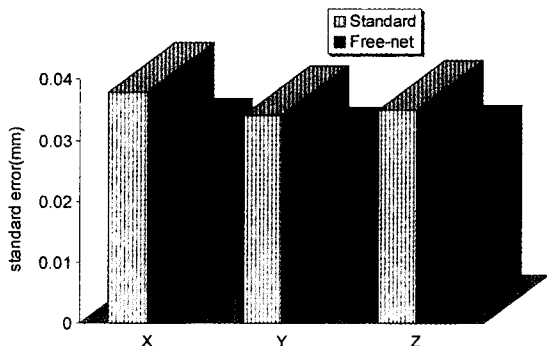


그림 9. 16매의 스틸비디오카메라 영상에 의한 광속조정 결과의 정확도 비교

표 9. CCD 카메라 영상과 스틸비디오카메라 영상에 의한 대상점들의 X,Y,Z 좌표차

Network		DX(mm)	DY(mm)	DZ(mm)
Standard	Average	0.0162	-0.0182	-0.0245
	RMS	0.0793	0.0673	0.0829
Free-net	Average	0.0032	0.0093	0.0349
	RMS	0.0909	0.1126	0.1292

정 활용가능성을 재차 확인할 수 있었다.

5. 결 론

범용적인 CCTV유형 CCD 카메라를 이용한 근거리 사진측량시스템의 3차원 측정능력을 평가하고자 카메라 검정 및 적용실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CCD 카메라 영상에 의한 광속조정 결과, x, y 평균 0.3 μm , 즉 1/25 화소크기에 해당하는 상좌표 잔차를 나타내어 저가의 CCD 카메라 영상에서도 강도 경중률을 고려한 자동 상측정의 정확도를 확인할 수 있었다.
2. 자체검정 광속조정에서 자유망 조정기법이 종래의 표준적인 조정기법에 비하여 약 11% 높은 정확도를 나타냈으며, 여러 산업분야의 복잡한 측정문제를 신속하고 효율적으로 해결하는데 기준점 측량이 불필요한 자유망 조정기법의 이용이 기대된다.
3. CCD 카메라 영상에 의한 3차원 측정결과가 고해상도의 스틸비디오카메라(Kodak DCS200) 영상에 의한 결과의 약 66%에 해당하는 약 1/13,800의 정확도에 도달하였으며, 두 결과의 X, Y, Z 방향의 좌표차가 평균 15 $\mu\text{m} \sim 135 \mu\text{m}$ 의 범위, RMS치는 65 $\mu\text{m} \sim 145 \mu\text{m}$ 의 범위로 나타났다.

대상물의 정밀측정을 위한 CCD 카메라의 이용은 영상획득 과정에서 컴퓨터와의 연결, 적당한 조명 조건 등의 제한이 있지만 화질을 현장에서 직접 확인할 수 있고 실시간으로 수치영상을 얻을 수 있으므로 산업시설 및 기계부품의 품질검사(dimensional inspection) 등 3차원 정밀측정에 적절히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2000년 금오공과대학교 학술연구비 지원으

로 이루어졌기에 이에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. K. B. Atkinson, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, 1996, pp. 52-150.
2. Mark R. Shortis, "The Influence of Storage Media on the Accuracy and Repeatability of Photogrammetric Measurements Using CCD Cameras," Videometrics II, SPIE, Vol. 2067, 1993, pp. 80-103.
3. Van den Heuvel F., "Automated 3-D Measurement with the DCS200 Digital Camera", Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993, pp. 63-71.
4. Peipe, J., Schneider, C.-T., and Sinnreich, K., "Digital Photogrammetric Station DPA-A Measurement System for Close-Range Photogrammetry," Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann, Karlsruhe, 1993, pp. 292-300.
5. Kersten, T. P. and Maas, H.-G., "Digital High-Resolution Still Video Camera versus Film-Based Camera in Photogrammetric Industrial Metrology," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing., Vol. 30, No. 1, 1994, pp. 114-121.
6. Fraser, C. S., Shortis, M. R. and Gannci, G., "Multi Sensor System Calibration," Videometrics IV, SPIE, Vol. 2598, 1995, pp. 2-18.
7. Jin-Duk Lee and Fraser, Clive S., "Deformation Monitoring of Structures Using Vision Metrology System," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 16, No. III-4, 1996, pp. 343-350.
8. H. El-Habrouk, X. P. Li and W. Faig, "Determination of Geometric Characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration," Karl Kraus, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria, ISP&RS, Commission I, Vol. X X XI, Part B1, 1996, pp. 60-64.
9. 유복모, Anton F. Schenk, 현대 디지털사진측량학, 문운당, 2001, pp. 15-21.
10. Horst A. Beyer, "Evaluating the Geometric Performance of Signal Transmission," First Australian Photogrammetric Conference, Sydney, Australia, Vol. 1, 1991.
11. T. A. Clarke, "An Analysis of the Properties of Targets Used in Digital Close Range Photogrammetric Measurement," Videometrics III, SPIE, Vol. 2350, 1994, pp. 251-262.
12. 이진덕, "고해상도의 스틸비디오 카메라를 이용한 수치 근접사진측량 시스템의 실용성 평가," 대한토목학회 논문집, 제18권, 제III-2호, 1998, pp. 183-193.
13. H. B. Papo, "Free Net Analysis in Close-Range Photogrammetry," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 4, 1982, pp. 571-576.
14. El-Hakim, S. F., "Application and Performance Evaluation of a Vision Based Automated Measurement System," Videometrics III, SPIE, Vol. 1820, 1992, pp. 317-323.

(2001년 7월 26일 원고접수)