한국측지학회지, 제 14 권, 제 1 호 pp.17~25(1996년 6월 30일)

산업정밀측정에서 수치영상을 이용한 근접사진측량의 효율적 응용
Effective Application of Close-Range Photogrammetry with Digital Images in Industrial Precise Measurement

이 진 덕*
Lee, Jin-Duk

要 旨

스틸비디오 CCD 카메라는 수치영상의 획득과정이 크게 단순화되어 컴퓨터에 직접 연결되지 않고도 독립적으로 수치영상을 획득하여 자체내에 영상을 저장할 수 있는 융통성을 갖추고 있다. 본 연구에서는 각종 산업분야에서 요구되는 품질검사, 구조물의 모니터링 등에 스틸비디오 카메라를 이용한 수치근접사진측량 시스템의 수행성을 평가하고자 하였다. 수치영상측정에서 필수적인 sub-pixel 측정기법을 제시하고, 고해상도의 DCS420 스틸비디오 카메라에 대한 기하학적 자체검정 및 구조물에 대한 시험측정을 실시하였다. 자체검정 광속조정의 결과 1:46,000을 초과하는 대상공간 정확도를 얻을 수 있었으며 산업적 응용에 수치영상을 이용한 본 근접사진측량 시스템의 정확도 잠재성과 작업의 효율성을 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

The development of still video CCD cameras has simplified dramatically the digital imaging process. Still video cameras have flexibility that allows digital image acquisition and on-board image storage without being connected to a computer.

The objective of this paper is to evaluate the performance of digital close-range photogrammetric system using the still video camera for dimensional inspection and structural monitoring being required in various industries. Some sub-pixel measurement techniques,which is indispensable for digital image measurement, were suggested. The author carried out the self-calibration of a high resolution DCS420 still video camera and then test application of a structure. The self-calibrating bundle adjustments resulted in object space accuracies which exceed 1:46,000. It is ascertained that this digital close-range photogrammetric system has high accuracy potential and task effectiveness for industrial applications.

1. 서 론

필름을 매체로 한 사진측량기법이 신속한 자료획득, 높은 정확도 및 관측잉여도 등 여러가지 장점을 지닌 매력적인 측정도구로서 이미 잘 입증되어 왔으나 측정용 카메라와 좌표측정기(comparator) 등으로 구성되는 아날로그 시스템을 설치하는데 드는 고가의 비용은 이 기법의 활용과 발전을 가로막는 주요한 장애요인 중의 하나가 되어왔다. 최근 광전자센서와 디지탈 측정시스템이 측정의 자동화를 필요로 하는 외형적 품질검사,로보트 제어, 의학, 토목, 건축 등 산업 각 분야에서 폭넓게 이용되고 있어 근접사진측량분야에서 그 중요성이 부각되고 있다.[1] CCD 카메라는 작고 견고하며 유지하기 편할 뿐 아니라 다양한 크기의 CCD 배열센서들에 의하여 기하학적 충실도가 높은 영상을 레코딩과 프로세싱 없이 실시간으로 얻을 수 있으므로 자동화 측정의 가능성을 열어주었다.[2] 아날로그 영상에 대한 물리적인 상측정은 고가의 정밀좌표측정기를 사용해야 하는 반면, 수치영상의 경우에는 상점 위치들이 직접 화소배열(array)의 행렬 수에 근거하여 측정될 수 있으므로 타겟인식과 자동측정을 위한 컴퓨터 알고리즘에 의해 대치될 수 있다.[3]

*금오공과대학교 토목공학과 부교수

대부분의 CCD 카메라가 영상획득, 데이타 저장, 전원공급 등을 위해 호스트 컴퓨터에 연결되어야 하는 반면, 최근 개발된 스틸비디오 카메라는 영상을 기록하는 동안 컴퓨터와 연결될 필요가 없는 새로운 유형의 디지탈 카메라로서 사진측정학자들의 주목을 받고 있다. 이 고해상도의 카메라는 휴대하기 용이하며 소형포맷의 필름카메라처럼 작동할 수 있는 영상획득시스템으로 사진측량 적용을 위해 매우 효과적이고 정밀한 도구임이 입증되었다.[4] 스틸비디오 카메라의 이러한 장점은 산업측정을 위한 수치근접사진측량 시스템(digital close-range photogrammetric system)의 개발을 촉진하는 계기를 가져다 주었다.[5] 수치사진측량의 약속된 미래가 측정의 자동화에 있는 반면, CCD 카메라의 측정목적을 위한 폭넓은 적용에 있어 주된 장애는 역시 정확도 제한이다. 수치사진측량 시스템의 정확도를 향상시키기 위해서는 종래의 아날로그 시스템에서 이용되는 전형적인 정밀좌표측정기에 비하여 더 높은 측정 정확도가 요구되어 왔으며, 최신 산업사진측량시스템과 새로운 수치사진측량기법은 자동 상측정기법을 도입함으로써 정밀 3차원 측정목적을 위한 높은 정확도가 현실화되고 있으며 작업자의 숙련수준에 따른 영향을 제거할 수 있게 되었다.[5] 현재 아날로그 카메라와 자동상좌표측정을 통하여 대상물 크기의 1:100,000~500,000의 상대정확도를 얻고 있으나 다중센서 수치근접사진측량 시스템의 정확도는 1:10,000~1:30,000의 범위에 머무르고 있다.[6] 최근 몇년간 스틸비디오 카메라를 이용한 3차원측정 시스템개발 등의 연구결과들이 발표되었으며 이제 높은 해상도의 독립적 CCD센서와 자동상측정 및 자체검정 광속조정기법의 통합에 의한 수치사진측량 시스템은 종래의 아날로그 시스템에 거의 접근하는 정확도를 얻을 수 있게 되었다.[7),8),9),10)]

본 연구에서는 이러한 융통성과 잠재성을 지닌 스틸비디오 카메라 내부의 기하학적 특성을 도출하고 수행성을 평가하고자 우선 자체검정기법을 이용하여 충분한 해상도를 가진 Kodak DCS420 카메라에 대한 기하학적 검정을 실시하였다. sub-pixel 영상측정기법 및 자체검정 광속조정(self-calibrating bundle adjustment)과 통합시킨 본 측정시스템을 실제 구조물에 대한 시험측정에 적용함으로써 각종 산업분야에서 요구되는 대상물의 외부적 품질검사 및 변형 모니터링 등을 위한 정확도 잠재성 및 그 효용성을 검증하고자 하였다.

2. 스틸비디오 카메라에 의한 수치화상획득 시스템

영상자료는 CCD 카메라의 렌즈에 의해 연속신호로서 수집된다(그림 1). CCD 배열은 강도를 감지함으로써 빛을 수집하게 되며 수집된 빛은 아날로그 전압신호로서 전달되고 A/D 변환자에 의해 수치정보로 변환되어지는데, 측정목적을 위하여 이 강도는 전형적으로 0(black)에서 255(white) 범위의 그레이 스케일로 변환된다. 범용적인 CCD 카메라를 이용하여 수치영상을 얻기 위해서는 카메라 내부에 있거나 또는 호스트 컴퓨터시스템에 연결된 프레임 포착기(frame grabber)가 A/D 변환을 수행하는데 필요하다. 이러한 유형의 시스템은 CCD 카메라와 컴퓨터시스템 간의 케이블 연결에 의해 휴대성과 현장적용의 융통성이 크게 제한된다.

최근 자체내에 저장능력을 가진 'still video' CCD 카메라의 개발은 수치영상 획득과정을 크게 단순화하여 영상획득, 전송, A/D변환, 영상저장이 내부의 휴대용 패키지내에서 수행되어진다. 이 디지탈 카메라는 휴대용 PC와 직접 연결하여 작동할 수 있으며, 후속적인 영상

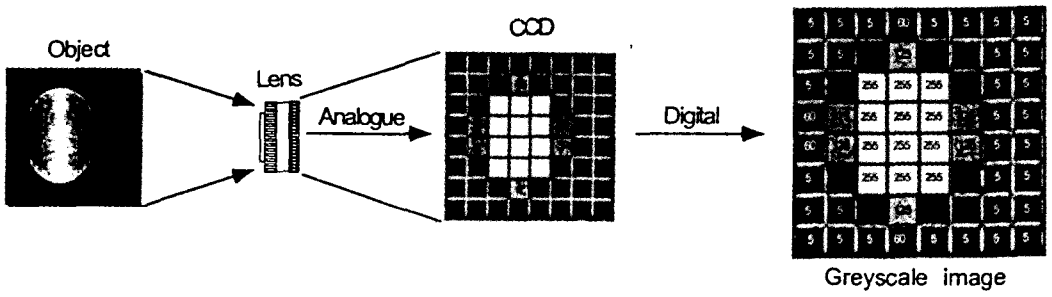


그림 1. Image Aquisition and transfer process

처리와 영상측정을 위하여 내부디스크에 저장될 수도 있다. 번거로운 컴퓨터 인터페이스 없이도 다중의 고해상도 수치영상을 수집할 수 있는 능력 때문에 이 카메라는 매우 유용한 수치사진측량의 도구이다.[12]

Kodak DCS 시리즈의 카메라는 Nikon 35 mm 카메라몸체를 기본적으로 포함하고 있고, CCD 칩의 크기는 13.8 mm x 9.2 mm, 화소(pixel)의 크기는 가로, 세로 각각 9 μm이며 CCD 칩은 1524 x 1012 화소의 해상도를 가지고 있다. 촬영을 행하는 순간 영상자료는 디지탈 형태로 변환되어 DRAM(dynamic random access memory)에 저장된다. 1개 영상(DCS200) 또는 5개 영상(DCS420)이 DRAM에 저장될 수 있으며, 이 영상자료는 DRAM에서 최소 50영상으로부터 최대 100 영상까지의 저장용량을 가지고 있는 내부의 하드디스크로 옮겨진다. DCS420 카메라는 탈착식 PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) 유형의 하드디스크를 이용하고 있는데 이 카드의 메모리는 80 Mb부터 340 Mb까지 다양하며 각각의 영상은 약 1.5 Mb의 저장용량을 필요로 한다. 영상자료는 SCSI 인터페이스를 통하거나 PCMCIA 하드디스크 카드를 적당한 인터페이스를 갖춘 컴퓨터에 삽입함으로써 이동시킬 수 있다.[13]

3. Sub-Pixel 측정기법

사진측정 Network에서는 타겟영상이 최소한 여러 화소의 범위에 걸쳐 얻어질 수 있도록 계획되어지므로 타겟영상을 sub-pixel 정확도로 측정하는 것이 가능하다. 타겟영상 측정에 대한 sub-pixel 정확도는 일반적으로 공학적, 산업적 측정작업의 허용오차 요구를 성취하는데 필수적이다. 주요 측정기법들로는 도심위치 결정기법(centroiding), 최소제곱 정합(matching), 형상적합(shape fitting)과 조합된 경계검출에 의한 기법 등이 있으며, 타겟의 형상과 이들 측정기법은 상호관련된다.[14),15),16),17)]

3.1 타겟유형의 선택

수치영상의 측정에 적합한 타겟을 선택하는 데는 몇가지 요소들이 고려되어야 한다. 일반적으로 원형,+자형 또는 점(dot)과 같은 분명한 타겟을 대상위치에 배치하게 되는데 그 중 원형 타겟은 상의 회전에도 비교적

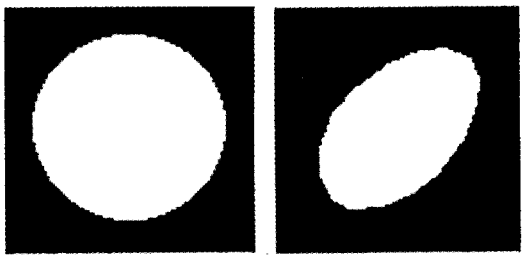


그림 2. Examples of effects of viewing angle on circular retro-reflective targets

영향을 받지 않으므로 선호된다. 측정환경,대상물 및 기타 여건에 따라 영상에서 타겟을 찾아내는 것은 종종 어려운 문제일 수 있는데, 이 경우 대부분 상의 배경과 밝기에 그 원인이 있으며 이러한 문제를 최소화하기 위해서는 대상물의 배경과 대조적인 타겟들을 선택하여야 한다. 일반적으로 역반사 테이프(retro-reflective tape)를 이용한 타겟은 최상의 신호응답을 줄 수 있도록 광조건을 조작할 수 있으므로 바람직하다. 다양한 직경의 원형 타겟들을 이용한다면 이들은 카메라의 피사각도에 따라 타원형으로 나타날 것이다(그림 2).

3.2 타겟영상의 도심위치 결정

원형 또는 타원형 타겟들의 sub-pixel 위치를 결정하는 가장 단순한 접근방법은 타겟영상의 도심위치결정(centroiding) 기법으로서 영상에서 격리된 폐곡선 내부의 도심은 무게중심 또는 1차 모멘트를 계산함으로써 결정될 수 있다. 경중률을 고려한 기법은 0.03 화소의 정확도로 타겟영상의 위치를 결정할 수 있으며[18] 화소의 밝기값 또는 타겟영상을 지나는 밝기값 변화율을 이용하는 등 여러가지 방법에 의하여 경중률이 부여될 수 있다.

3.2.1 밝기값 변화율에 의한 경중률

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^{m} (j \times g_x)}{\sum_{j=1}^{m} g_x} \qquad y_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} (i \times g_y)}{\sum_{i=1}^{n} g_y} \tag{3-1}$$

여기서 $x_c y_c$는 상의 도심위치이고 g_x와 g_y는 각각 x, y 방향에서의 밝기값 변화율이고 i,j는 화소의 행렬 위치를 나타낸다. 밝기값 변화율에 의해 경중률을 부여하

는 기법은 영상의 배경에 의해 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 균일한 배경을 갖는 영상에서 x,y 화소방향에서의 밝기값 변화율은 그들의 밝기값을 무시하고 0에 접근하며, 따라서 그것들은 도심위치 결정에 최소의 영향을 미친다.

3.2.2 밝기값에 의한 경중률

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(j \times g_{ij})}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} g_{ij}} \qquad y_c = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(i \times g_{ij})}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} g_{ij}} \qquad (3\text{-}2)$$

여기서 g_{ij}는 밝기값을 나타내며 m,n은 각각 타겟영상이 포함된 윈도우내 화소의 행과 열의 수를 나타낸다. 밝기값에 의해 경중률을 부여하는 방법이 이용될 때 높은 밝기값의 배경을 갖는 영상은 낮은 등급의 위치정확도를 나타내게 되는데 이는 타겟중심 외부의 높은 값을 갖는 화소들의 영향에 기인한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 배경의 임계값(threshold)을 정하고 0의 밝기값을 갖는 이 임계값 내에서 화소들을 재정의할 필요가 있다. 임계값은 타겟이미지 윈도우내에서 밝기값의 통계적 해석을 이용하거나 또는 단순히 영상검사에 의해 결정되는 상수로서 정해질 수 있다. 인근타겟에 의한 방해 또는 배경에 있는 이상(anomaly)은 *blob testing*이라 하는 기법을 이용하여 배제시킬 수 있다. 적당한 임계값과 blob testing으로 결합된 밝기값에 의한 경중률을 고려한 도심위치 결정기법은 단순하고도 정확한 해법이며 계산적으로도 효율적인 장점을 가지고 있다.[15]

4. 자체검정기법에 의한 스틸비디오 카메라의 기하학적 검정

4.1 Network 기하학 및 영상획득

CCD 카메라의 검정은 센서와 렌즈의 기하학적 특성을 파악하기 위하여 필수적이며 카메라의 내부기하학의 지식은 공선원리가 바르게 적용될 수 있기 위해 필요불가결하다. 이러한 지식없이 유도된 대상물 공간에서의 측정값들은 정오차들의 영향을 받게 되어 정확도가 저하될 것이다. 자체검정기법은 측정환경상 사전검정이 적당하지 않은 경우에 적합하며, 자체검정을

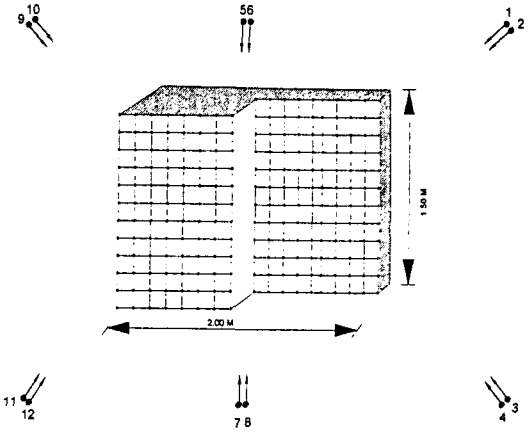


그림 3. Test field and network geometry for self-calibration

위한 Network의 기하학이 강해야 신뢰성 있는 검정매개변수들이 결정될 수 있다.[19] 검정매개변수로는 주점위치, 주점거리, 렌즈왜곡계수 등에 대한 물리적 항들은 물론, 센서의 affinity와 직교성(orthogonality) 등이 포함되어질 수 있다. 대부분의 사전 및 사후 실험실 검정기법들의 경우 기지의 좌표를 가진 타겟들이 2차원 또는 3차원 배열을 이룬 시험범위를 필요로 하는 반면, 자체검정기법은 타겟의 대상공간좌표들을 필요로 하지 않는다.

본 연구에서는 자체검정기법과 시험대상영역(test field)를 이용하여 DCS420 카메라의 기하학적 특성을 추출하고자 하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 폭 2.0 m, 높이 1.5 m 크기의 3차원 시험영역을 설치하고 20 mm의 광각렌즈를 이용하여 주점과 affinity 매개변수를 결정할 수 있도록 각 촬영지점에서 표준상태(roll 회전각 0°)와 광축을 기준으로 한 90°의 roll 회전으로 두개 영상씩 6개 지점에서 총 12개의 영상을 획득할 수 있도록 계획하였다. 모든 영상은 카메라의 광축방향이 시험영역의 중앙을 향하도록 한 수렴촬영으로 얻어졌다. 왜곡매개변수들을 정밀하게 유도하기 위하여 모든 타겟들이 카메라의 화각내에 포함되도록 하였으며 약 2.8 m의 촬영거리를 선택함으로써 약 1/140의 상축척이 얻어지도록 하였다.

시험대상영역에 직경 10 mm의 원형 역반사타겟을 120점 설치하였고 DCS420 카메라 내부의 기하학적 조건을 균일하게 해 주기 위하여 사전에 렌즈의 초점조절링을 ∞에 고정해 주었다. 영상자료를 저장하고 있는

카메라 내부의 PCMCIA유형의 탈착식 하드디스크 카드를 적합한 인터페이스를 갖춘 컴퓨터에 이동설치하고 영상편집 소프트웨어인 Aldus Photostyler를 이용하여 영상자료를 다운로딩한 다음, 이들 영상들을 TIF형식(Tagged Image File Format)으로 변환해 주었다.

4.2 검정매개변수의 해석

검정매개변수들은 영상블럭의 광속조정에 의해 계산되어지며, 아울러 측정시스템이 대상물 공간에서 성취할 수 있는 정확도를 추정할 수 있다. 모든 타겟영상은 도심위치결정 알고리즘에 의해 Windows 환경에서 측정되었고 자유망(Free-net) 기법에 의한 자체검정 광속조정으로 처리한 결과, #2, #3, #7, #11의 4개 영상에서 상측정 잔차가 비교적 크게 나타났다(표 1).

더욱 정확한 검정매개변수를 도출해 내기 위하여 이 4개 영상을 배제한 나머지 8개의 영상으로 재처리한 결과, 상좌표의 잔차는 평균적으로 x에서 0.33 μm,y에서 0.28 μm로 나타났으며, DCS420카메라의 검정매개변수값들은 표 2와 같이 도출되었다.

여기서 c,xp,yp는 내부표정매개변수이고 K's는 방사방향 렌즈왜곡계수, P's는 비대칭(decentering) 렌즈왜곡계수이다. 모든 타겟들의 X, Y, Z 방향 대상공간 좌표의 정확도의 RMS(root mean square)는 각각 0.028 mm, 0.062 mm, 0.024 mm로서 0.1 mm 미만의 정확도를 나타냈으며, 대상물 공간의 최대길이에 대한 표준오차의 비로 표현할 수 있는 상대정확도는 1:46,400이다. 그림 4는 실험결과 얻어진 본 DCS420 카메라의 방사방향 렌즈왜곡량을 나타낸 것으로서 최대 방사거리 8.3 mm에서 140 μm 정도의 왜곡량을 보이고 있다.

표 1. Summary of image residuals

Image #	Residual (unit : μm)			Number of Points
	x	y	Tatal	
1	0.43	0.33	0.39	119
2	0.59	0.50	0.55	102
3	0.52	0.53	0.52	100
4	0.30	0.36	0.33	113
5	0.40	0.32	0.36	119
6	0.38	0.33	0.36	111
7	0.48	0.55	0.52	101
8	0.45	0.39	0.42	117
9	0.31	0.31	0.31	109
10	0.37	0.47	0.42	107
11	0.74	0.68	0.71	108
12	0.44	0.29	0.37	114
Total Residual	0.46	0.43	0.45	

표 2. DCS420 digital camera parameters obtained by self-calibration

c	20.4558	K1	0.2829E-03	P1	0.3880E-05
xp	-0.0750	K2	-0.5133E-06	P2	0.1594E-04
yp	0.0198	K3	0.6211E-09		

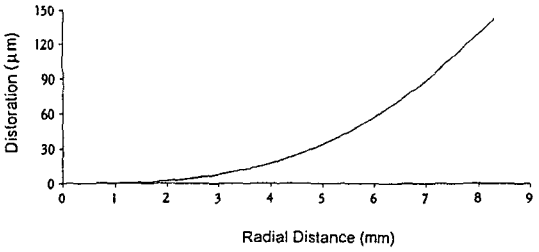


그림 4. Diagram of radial lens distortion

5. 구조물 모니터링에의 적용실험

5.1 Network 기하학

6.32 m x 3.45 m 크기의 벽체구조물에 비교적 균일한 간격으로 직경 10 mm의 원형 역반사타겟(retro-reflective targets)을 설치함으로써 선명하고 쉽게 정량화할 수 있는 타겟영상을 얻을 수 있도록 하였다. 따라서 이는 모니터링을 위한 타겟영상의 자동화 관측에 요하는 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다.

부가매개변수를 고려한 자체검정 광속조정에 의하여

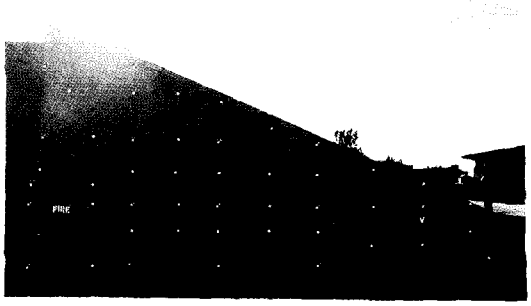


그림 5. The object with retro-reflective targets

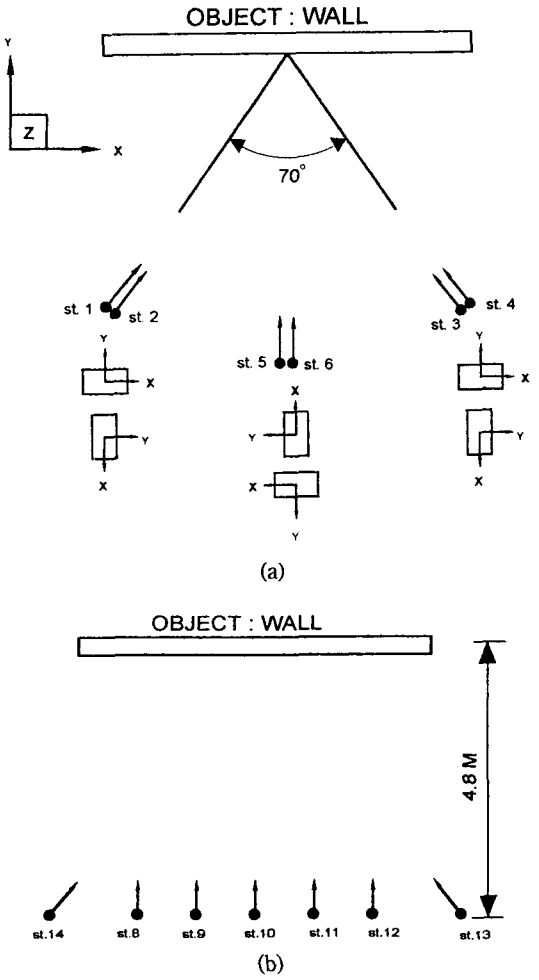


그림 6.(a) Convergent case: Network I
(b) Combination of normal and convergent case: Network II

정확한 카메라 검정요소들을 구할 수 있도록 그림 6(a)와 같이 약 5.5 m 정도의 촬영거리에서 카메라축을 대략 표준상태(roll 0°)와 90° 또는 180° 정도의 roll 회전을 취하여 3개 지점에서 두개의 영상씩 총 6개의 수렴영상을 획득하였다. 또한 그림 6(b)와 같이 5개 지점에서 기선에 직각방향으로 5개의 영상을 획득하고 Network의 기하학적 강도를 보완하고자 외측 2개 지점에서 각각 수렴영상을 획득하였다. 카메라의 F-stop을 22에 설정하고 초점조절링을 ∞에 고정한 상태에서 후레쉬를 사용함으로써 역반사 타겟이 선명하게 나타날 수 있도록 촬영하였다.

5.2 영상 측정 및 데이타 처리

5.2.1 영상 측정

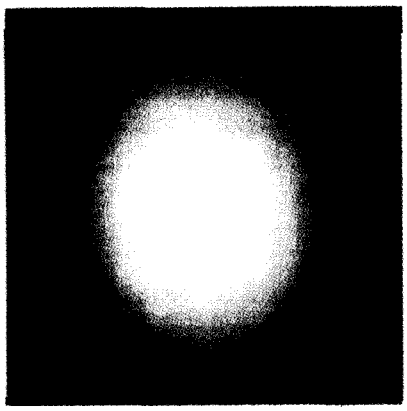
영상측정은 4.2절에서 적용한 기법과 달리 수동측정 알고리즘에 의하여 개개 타겟영상에 대한 확대모드(zoom-in mode)에서 측정하였다. 디지타이징하는 순간 상좌표는 2차원 변환을 통하여 영상중심을 원점으로 하는 값으로 데이타화일에 입력되어진다. 그림 7은 전형적인 원형의 역반사타겟 영상을 나타낸 것으로서 후레쉬를 사용한 인위적인 광조건 조작의 결과를 화소단위 밝기값으로 나타내었다.

5.2.2 데이타 처리

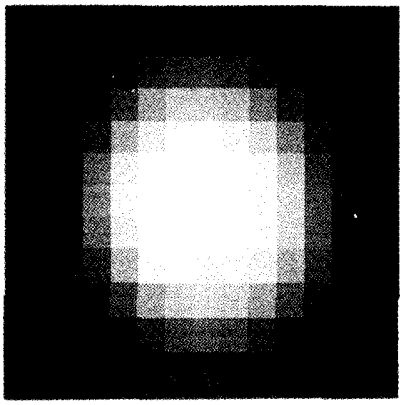
그림 6(a), (b)에서 제시한 두가지 유형의 Network I,II 및 이 두가지 유형의 Network을 조합하여 13개의 영상으로 구성된 Network III에 대하여 각각 자체검정 광속조정으로 처리하였다. 또한 각 Network에 대하여 기준점을 이용하는 표준 광속조정과 기준점을 필요로 하지 않는 자유망(Free-net) 광속조정법으로 각각 처리하고 이들의 결과를 상호비교함으로써 자유망 조정기법의 효용성을 평가하고자 하였다. 상좌표의 사전표준오차는 x, y 각각 3 μm로 부여하였고 기준점좌표의 사전표준오차는 X, Y, Z방향 공히 0.01 mm로 주었다. Network I의 경우 기준점을 이용한 표준 광속조정으로 38개의 타겟에 대한 3-D 좌표를 구하기 위하여 165개의 미지수에 대한 374개의 방정식이 동시에 처리되었다. 조정결과, 상좌표의 잔차는 x, y 각각 3 μm 정도로 나타났으며, 이는 4.2절에서 적용된 도심위치 결정기법에 비해 무려 10배 정도 큰 값으로서 도심위치결정 기법의 효과를 확인할 수 있다.

표 3은 비교적 고르게 배치된 4개 기준점의 X,Y,Z 좌표를 이용하여 표준 광속조정으로 처리된 3가지 유형의 Network, 즉 6개의 수렴영상을 이용한 Network I (그림 6a), 5개의 직각수평 및 2개의 수렴영상을 이용한 Network II(그림 6b), 그리고 Network I과 II를 조합하여 13개 영상으로 해석한 Network III에 대한 결과의 표준오차를 비교하여 나타낸 것이다. 역시 수렴 Network의 정확도가 우월함을 확인할 수 있으며 상대정확도는 Network I에서 1:13,000, Network II에서 1:7,000, Network III에서 1:16,500로 각각 나타났다.

표 4는 자유망 광속조정으로 처리한 결과로서 전반적인 양상은 표 3의 기준점 측량자료를 이용한 표준 광속조정의 결과와 유사하게 나타났다. Network I과 Network II를 비교할 때 X, Z 방향에서 비교적 동일한



(a)



15 18 23 30 38 46 48 40 34 28 18 18
18 23 34 51 92 120 128 107 70 42 28 15
18 30 55 120 189 219 224 204 150 84 38 28
25 40 102 195 233 248 250 241 221 150 65 34
25 49 145 231 252 255 254 250 245 202 97 38
28 56 162 241 255 255 255 252,246 219 117 44
25 48 143 233 255 254 254 250 245 214 112 42
28 40 100 200 245 250 248 248 236 182 84 34
20 32 55 124 192 224 231 222 187 115 49 30
15 25 34 56 99 135 150 135 96 51 32 23
15 20 23 34 38 53 58 49 42 28 25 18
12 15 18 20 25 25 28 28 25 20 18 45

(b)

그림 7.(a) Retro-reflective target image (b) Typical gray level map of target image

정확도를 보이는 반면, Y 방향에서 2~3배까지의 정확도의 향상효과를 가져왔음은 주목할 만하다. Network I, II, III의 상대정확도는 각각 1:18,700, 1:11,100, 1:21,100이다. 표 3과 표 4의 3가지 Network의 유형별 X, Y, Z 방향의 표준오차를 기준점을 이용한 표준 광속조정과 자유망 광속조정의 결과를 그림 8에 비교도시하였다.

표 5는 기준점 좌표를 이용한 표준 광속조정에 대한 자유망 광속조정 결과의 정확도 향상효과를 제시한 것으로서 case Network II에서 비교적 자유망 조정기법의 효과가 크게 나타나고 있다.

표 3. Coordinate standard Errors of standard bundle adjustment employing preferred control points

Std Errors / Network Type	σX(mm)	σY(mm)	σZ(mm)
Network I	0.388	0.534	0.308
Network II	0.422	1.519	0.386
Network III	0.259	0.489	0.234

표 4. Coordinate standard errors of free-net bundle adjustment

Std Errors / Network Type	σX(mm)	σY(mm)	σZ(mm)
Network I	0.273	0.367	0.225
Network II	0.274	0.956	0.253
Network III	0.206	0.374	0.184

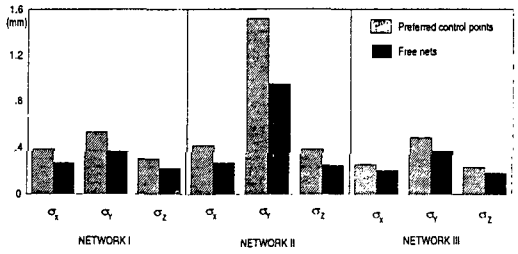


그림 8. Comparison of coordinate standard errors between preferred control and free-net in three networks

표 5. Accuracy improvement rate of free-net bundle adjustment compared with standrd bundle

Direction / *Network Type*	X	Y	Z
Network I	29.6%	31.3%	17.2%
Network II	35.1%	37.1%	34.5%
Network III	20.5%	23.5%	21.4%

6. 결 론

고해상도의 스틸비디오 영상을 이용한 수치근접사진측량 시스템을 각종 산업분야의 측정에 효율적으로 적용하기 위한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스틸비디오 CCD 카메라는 A/D 변환, 데이타 저장, 전원공급을 자체적으로 갖추고 있는 독립적인 영상획득시스템으로서 이러한 높은 융통성과 영상획득의 신속성은 정확하고 비용효과적인 방법으로 3-D 위치결정을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 1:46,000을 초과하는 상대정확도를 얻을 수 있었으며 산업사진측량에 수치영상을 이용한 본 측정시스템의 정확도 잠재성을 입증할 수 있었다.

2. 본 시스템에 의해 획득된 수치영상을 상측정 알고리즘을 이용하여 1/30 화소까지의 sub-pixel 측정 및 자동 도심위치 결정(autocentroiding)을 통한 측정의 준자동화가 실현됨으로써 기존의 아날로그 좌표측정기상에서의 물리적인 측정작업을 대치할 수 있게 되었다.

3. 기하학적 강도가 높은 Network을 전제로 하는 자체검정 광속조정을 이용함으로서 스틸비디오 카메라 내부의 기하학적 매개변수를 도출할 수 있음은 물론, 렌즈왜곡 등의 계통적 오차들을 소거할 수 있으므로 측정용으로 확립되지 않은 본 카메라의 약점을 보완할 수 있었다.

4. 자유망 조정을 적용함으로서 기준점측량의 어려움과 신뢰성 문제로부터 벗어날 수 있게 되고 복잡한 산업현장에서 더욱 신속하고도 효율적인 측정을 기할 수 있을 것이다.

앞으로 스틸비디오 카메라는 수치근접사진측량을 위한 표준영상획득장치로서 활용될 것으로 기대되며, 타겟영상의 자동인식 및 도심위치 결정기법과 자체검정 광속조정과의 온라인 연속처리시스템을 꾀한다면 획기적인 실시간 산업사진측량이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1994년 후반기 해외 Post Doc. 연수지원하에 수행된 과제의 일부로서 본 연수를 지원해 준 동재단에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Gruen,A.,"Digital Close-Range Photogrammetry - Progress through Automation," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30(5), 1994, pp. 122-135.
2. Shortis,M.R. and Fraser,C.S., "Current Trends in Close-Range Optical 3D Measurement for Industrial and Engineering Applications," Survey Review, 31(242), 1991, pp.188-200.
3. Fraser,C.S. and Anne Legac,"Industrial Applications of Single-Sensor Vision Metrology," ISPRS Commission V Symposium," 1994, pp.82-86.
4. Fraser,C.S. and Shortis, M.R., "Vision Metrology in Industrial Inspection:A Practical Evaluation," ISPRS Commission V Symposium, 1994, pp.87-91.
5. Fraser,C.S. and Shortis,M.R.," Metric Exploitation of Still Video Imagery," Photogrammetric Record, Vol.15, No.85, 1995, pp.107-122.
6. El-Hakim,S.F., "Application and Performance Evaluation of a Vision-Based Automated Measurement System," Videometrics, SPIE 1820, 1992, pp.181-195.
7. van den Heuvel,F., "Automated 3-D Measurement with the DCS200 Digital Camera,"In Gruen, A.,Kahmen,H. (Eds),Optical 3-D Measurement Techniques II, wichmann Verlag,Karlsruhe, 1993, pp.63-71.
8. 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 (Eds. A. Gruen und H.Kahmen), Wichmann, Karlsruhe, 1993, pp.292-300.
9. Kersten,T.P. & Maas,H.-G., "Digital High-Resolution Still Video Camera versus Film-Based Camera in Photogrammetric Industrial Metrology," Int. Arch. photogramm. & Remote Sensing., 30(1), 1994, pp.114-121.
10. Fraser,C.S., Shortis,M.R. & Gannci,G., "Multi Sensor System Calibration," Invited paper, SPIE Video metrics IV Conference,Philadelphia,25-27 Oct., Vol. 2598, 1995, pp.2-18.
11. Karara,H.M., Non-Topographic Photogrammetry,2nd ed., American Society of Photogrammetry & Remote Sensing, 1989, pp.279-304.
12. Peipe,J and Schneider,C.T., "High Resolution Still Video Camera for Industrial Photogrammetry," Photogrammetric Record, 15(85), 1995, pp.135-189.
13. Maas, H.-G. and Kersten, T.,"Experiences with a High Resolution Still Video Camera in Digital Pho-

togrammetric Applications on a Shipyard," Int. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXX, Part 5, Commission V, Melbourne, March 1-4, 1994, pp.250-255.

14. Trinder,J.C.,"Precision of Digital Target Location,Photogrammetric Engineering & Remote Sensing," 55(6), 1989, pp.883-886.
15. Shortis,M.R.,Clarke,T.A. and Short,T.,"A Comparison of Some Techniques for the Sub-Pixel Location of Discrete Target Images," Proceedings,Videometrics III, SPIE, vol. 2350, 1994, pp.239-250.
16. Lemmens,M.,"A Survey on Stereo Matching Techniques," Proceedings, Commission V, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing 16th Congress, Kyoto, Japan, 1988,pp.11-23.
17. Zhou,G.,"Accurate Determination of Ellipse Centres in Digital Imagery," Proceedings, vol.4, ACSM-ASPRS Annual Convention,Washington D.C., USA, 1986, pp.256 264.
18. West,G.A.W. and Clarke,T.A.,"A Survey and Examination of Sub Pixel Measurement Techniques," Proceedings, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, SPIE Vol.1395, 1990,pp.456-463.
19. Shortis,M.R., Burner,A.W.,Snow,W.L. and Goad W.K., ' Calibration Tests of Industrial and Scientific CCD Cameras," First Australian Photogrammetric Conference, Sydney, Invited Paper 6, vol.1, 1991, 11 pages.
20. Lee,J.-D. Fraser,C.S.and Edmundson,K.E.,"Vision Metrology Applied to Deformation Monitoring of a Silo Support Structure," Proceeding of Symposium on Surveillance and Monitoring Surveys, November 1-2, 1995 pp.45-53.