

Centroid Methods에 의한 Sub-pixel 측정정확도 향상 The Enhancements of Sub-pixel Measuring Accuracy by the Centroid Methods

강준목* · 배상호**

Kang, Joon-Mook · Bae, Sang-Ho

요 旨

디지털 카메라의 개발과 컴퓨터 프로세서의 발달은 수치영상 획득과 분석과정을 단순화시켜 수치사진측량의 실시간 처리를 가능케 하고 있다. 본 연구에서는 centroid기법을 이용한 상 측정 정확도의 향상을 위해 sub-pixel 측정 시스템을 개발하고 이미지의 준 자동 측정을 실현하므로써 보다 효과적인 centroid 측정기법과 이에 적합한 타겟의 형상을 결정할 수 있었다. 그리고 수치영상의 기하학적 내부정확도 향상을 위해 Kodak DCS200 카메라의 렌즈 왜곡보정을 실시하므로써 비측정용 카메라의 단점을 보완할 수 있었다.

ABSTRACT

The development of digital camera and advancement of computer processor could simplify the acquisition and the analysis of digital image, and be the real-time processing by the digital photogrammetry. This study is about to enhancement of the image measuring accuracy by the centroid methods. We were able to determine more effective centroid measuring methods and suitable target shape as the development of analysis system and actualize semi-automatic measuring of digital image. And we can supply the weakness of non-metric camera for the geometric internal accuracy of digital image as the correct of Kodak DCS200 camera 8008s lens distortion.

1. 서 론

최근 Solid-state Camera, 이미지 처리 기술, 컴퓨터 등의 개발은 수치사진측정기법에 의한 매핑 시스템의 자동화 구현을 가능하게 하고 있다. 또한, 디지털 카메라의 자체 정확도와 안정성은 컴퓨터의 처리속도와 함께 급진전하고 있어, 이러한 시스템들을 이용한 영상획득과 3차원 정보추출 기법은 로봇 공학, 산업공학, 생체 공학 등의 과학과 기술부분에 널리 활용될 전망이다.

수치사진측정시스템은 아날로그 형태의 사진측정시스템과 달리, 초점면에 배열된 선형 array를 센서로 이용하여 8 bits의 greylevel값을 밝기값(light intensity)으로 저장한다. 이미지의 왜곡은 선형 array에 밝기값이 기록되는 동안 렌즈, pixel 크기, 이미지 강도(intensity), 질감, 대상체의 크기 및 기준점 양상 등의 다양한 요소

에 기인하여 발생한다.^{1,6)} 또한, 타겟 크기/센서 해상도(resolution), 위치결정 정밀도, SNR(signal to Noise ratio), 이미지 스케일 등을 고려한 근거리 수치이미지의 정밀 해석을 실용화하기 위해서는 이미지좌표의 정밀측정과 왜곡보정을 위한 검정(calibration)이 중요하다.^{8,10)} 그리고 pixel당 수백분의 1 정밀도로 기준점의 수치정보를 획득하기 위한 알고리즘 개발과 타겟의 자동인식, 수 μm 크기의 pixel과 그 밝기 정보간의 관계를 인식하여 이미지의 왜곡과 기하학적인 특성을 파악하는 것이 필수적인 선결 과제이다.^{5,10)}

본 연구에서는 수치이미지의 정밀 위치측정을 위해, 스틸비디오 카메라(Still Video Camera)의 렌즈 검정과 .TIF 이미지의 파일포맷, sub-pixel 측정 알고리즘, 그리고 밝기 정보(greylevel values) 등의 특성을 연계하여 이미지좌표 측정 프로그램을 완성하고자 하였다. 아울러, 다양한 도심측정 알고리즘에 따른 sub-pixel 측정기법의 정확도 분석과 반사타겟(retro-reflective target)의

*忠南大學校 土木工學科 教授

**忠南大學校 土木工學科 博士課程

유형별 해석정확도를 비교하여 상측정 알고리즘에 적합한 타겟의 형상을 결정하고자 하였다.

2. 시스템

2.1 이미지 획득

Photo diode는 CCD카메라의 렌즈중심을 통과한 빛의 연속신호를 수집하여 수치영상 자료를 만들며, 빛의 강도를 감지하여 pixel에 그 강도를 저장한다. 빛의 강도는 이미지가 greyscale인 경우, 흑과 백의 2진 코드(code)로 0부터 255까지의 $256(2^8)$ 밝기값으로 스케일 변환된다. 그림 1은 CCD 칩과 저장 array를 포함하는 카메라 영역과 이미지의 저장과 출력(display)를 위한 인터페이스 영역의 일반적 형태이다.^{7,11)}

일반적인 CCD camera에는 이미지를 저장할 수 있는 메모리(shielded storage array) 영역이 할당되어 있지 않으므로, 이미지 입·출력을 위해서는 interface s/w를 포함한 하드디스크와 모니터가 항상 일체로서 수반되어야 한다. 이에, 무선 송·수신에 의한 이미지 획득을 위해 많은 연구가 되고 있으나, 아직까지 과다 노이즈와 불완전한 영상수신이 불가피한 실정이다. 최근 카메라 자체에 저장능력을 가진 스틸 비디오(still video CCD) 카메라의 개발은 수치영상의 획득과정을 크게 단순화하여 영상획득, 전송, A/D변환, 영상저장의 과정을 내부의 휴대용 패키지 내에서 가능케 하고 있다. 또한, 디지털 카메라는 휴대용 PC와 직접 연결하여 작동할 수 있으며, 후속적인 영상처리와 측정을 위하여 내부디스크에 저장될 수도 있다. 번거로운 인터페이스 없

이도 다중의 고해상도 수치영상을 수집할 수 있는 능력 때문에 이 카메라는 매우 유용한 수치사진측량의 도구이다.^{7,10)}

본 연구에서 사용한 스틸비디오 카메라(Kodak DCS 200)은 Nikon 8008s를 몸체(body)로 사용하고 있으며, 렌즈의 초점거리는 28 mm이다. CCD chip의 크기는 9.3×14 mm(1 pixel: $9 \mu\text{m}$)로 일반 필름($2'' \times 3''$)의 크기에 비해 1/7정도이고 화각은 26.6° 로 좁다(그림 6). 순간 포착된 이미지는 아날로그 신호에서 디지털 신호로 순간 변환되어 DRAM(dynamic random access memory)에서 PCMCIA(Personal Computer Memory Card International Association)로 저장된다. 카메라는 2Mb의 DRAM을 갖고 있으며, 이미지는 하드디스크에 저장되기 이전에 DRAM에 저장된다. 이미지 획득을 위한 소요시간은 DRAM에서 1초, 하드디스크에서 3초가 소요된다.

On-board 80 Mb의 하드디스크 용량은 A/D변환을 통한 50개의 압축되지 않은 원시 이미지(raw image)를 저장할 능력을 갖고 있다. 이미지 파일은 s/w를 이용하여 다운로드되기 이전에는 Kodak format(.KC2)이며 SCSI(Small Computer System Interface)포트를 사용하여 PC에 다운로드 된다. 획득된 8 bits greyscale의 이미지 크기는 $1524\text{pixel} \times 1012\text{pixel} \times 256\text{bit}$ 로써, 최소 1.56Mb의 저장메모리를 요하며, Interface(frame grabber, frame buffer 및 output controller)에 의해 .TIF file형태로 하드디스크에 저장 또는 모니터에 아날로그 형태의 이미지로 출력된다.

2.2 Sub-pixel 좌표 측정

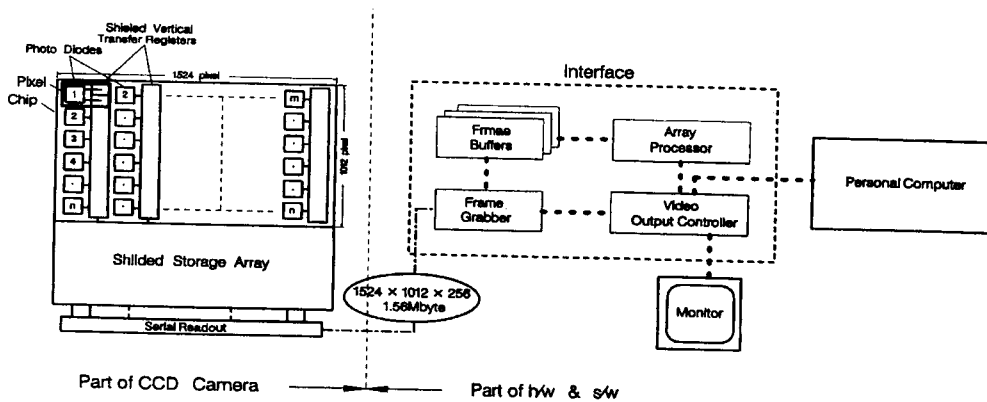


그림 1. CCD 카메라의 구조 및 interface과정

CCD 카메라가 지원하는 최소 해석단위는 pixel 크기이며, 해상력은 pixel 크기에 이미지 스케일이 고려되어 계산된다. pixel 단위의 이미지 좌표측정은 해석정확도의 한계가 pixel 크기이므로, 필름영상의 해상도에 해당하는 이미지 좌표측정 및 매칭 수행 등을 위해서는 sub-pixel 단위의 이미지 좌표측정이 반드시 필요하다. 그리고 .TIF 파일 포맷을 분석하여 1524×1024 pixel에 저장된 256 밝기값을 자유롭게 입·출력할 수 있는 알고리즘의 정립이 중요하다. 이에, 본 연구에서는 8bit .TIF B&W 이미지와 sub-pixel 측정기법을 조합한 프로그램을 완성하여 pixel 이하 단위로 타겟의 좌표측정을 실시하고자 하였다. 마우스, 검색 윈도우의 크기, 그리고 밝기값을 연계하여 경중률을 변화시킨 3가지 형태의 centroids 측정기법은 이미지의 정밀 좌표측정을 가능하게 하였다.

2.2.1 Sub-pixel 측정기법

최근 어두운 바탕에 밝은 이미지가 scan됨과 동시에 pixel당 수백분의 1의 정밀도로 원형 중심의 좌표를 결정하는 sub-pixel 알고리즘이 연구되어 오고 있다.^{1,6,8,9)} 본 연구에서는 검색영역내 이미지의 밝기값을 인식하고 임계값(threshold)을 정하여 sub-pixel의 측정 정확도를 획득하기 위한 이미지의 좌표측정 기법으로 도심(centroid) 측정기법을 사용하였다. 그리고 타겟의 형상을 인식하기 위한 임계값의 정의는 Statistical, Constant, Proportional, Wong 등의 여러 방식이 있으나, 본 연구에서는 constant 방식을 이용하여, 임계값을 정의하였다. 임계값 이하의 밝기값은 0으로, 그 이상의 밝기값은 원 이미지의 밝기값을 사용하여 타겟의 중심위치를 결정하도록 이미지의 greylevel값을 변환하였다. 임계값은 그림 2에서와 같은 프로그램 과정을 거쳐 계산하였다.

그림 3은 임계값 결정 기법을 적용하여 22×18 pixels 크기의 검색영역내 타겟과 배경이미지의 밝기정보를 변환시킨 결과이다. 재배열된 타겟 이미지의 밝기정보는 타겟의 중심위치 결정을 위해 도심측정기법의 경중률로 사용하였다. 무게중심의 위치(centroid or center of mass)를 결정하는 도심위치 측정기법은 sub-pixel 측정기법중 가장 일반적이며 높은 정확도를 가져오는 것으로 알려져 있다.³⁾ 타겟의 중심(x_c, y_c) 위치를 구하기 위해 3가지 유형의 도심위치 결정방법을 이용한 sub-pixel 좌표 측정 알고리즘을 정립하였다.

```
for(i=1;i<=size;i++){
    for(j=1;j<=size;j++){
        number++;
        sum_gl+=g[i][j];
        if(g[i][j]<=min_gl){
            min_gl=g[i][j];
        }
    }
}
ave_gl=sum_gl/number;
threshold=(min_gl+ave_gl)/2;
```

$g[i][j]$: i행과 j열에 위치한 pixel의 greylevel값
 min_gl : minimum greylevel in search window
 ave_gl : average greylevel in search window
 sum_gl : summation of greylevel in search window
 $size$: size of search window

그림 2. Threshold algorithm(constant 방식)

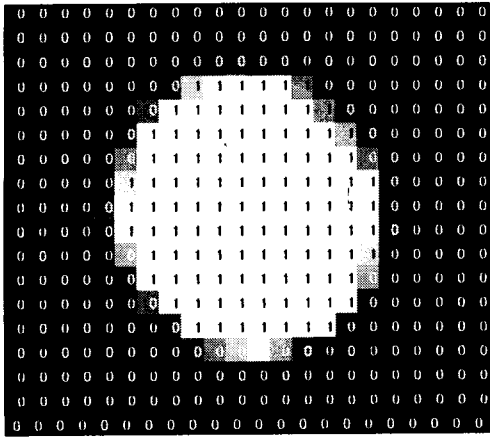
식 (2-1)은 도심위치 결정을 위한 기본식이다.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (i \times g_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij}}$$

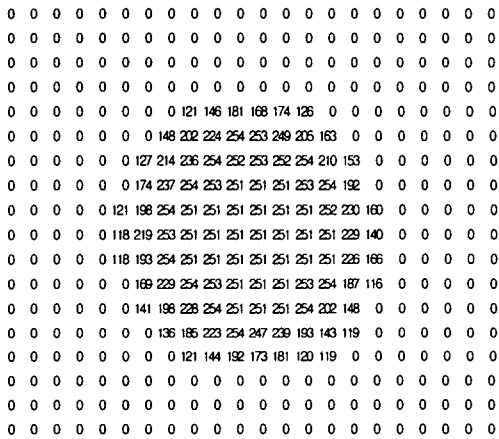
$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (j \times g_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij}} \quad (2-1)$$

i, j : 픽셀의 위치
 x_c, y_c : 타겟의 도심위치
 g_{ij} : 변환된 밝기값
 m, n : 타겟영역의 행과 열의 범위

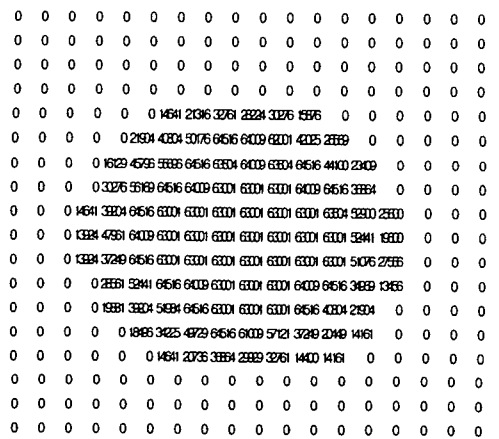
단위 밝기값($g_{ij}=1$)을 경중률로 사용하는 경우(그림 3(a)), 원 이미지(raw image)의 밝기값($g_{ij}=g_{ij}$)을 경중률로 사용하는 경우(그림 3(b)), 그리고 타겟의 밝기값²($g_{ij}=g_{ij}^2$)을 경중률로 사용하는 경우(그림 3(c))의 3가지 방법으로 구분하여 도심측정기법을 적용하였다. 그림 4는 밝기값²을 경중률로 사용하여 도심위치를 결정하는 경우로서, 프로그램 소스의 일부를 나타낸 것이다. 그림 5는 본 연구를 수행하기 위해 개발한 프로그램으로



(a)



(b)



(c)

그림 3. 타겟 이미지의 밝기값 변화

```

for(i=1;i<=size;i++){
for(j=1;j<=size;j++){
if(g[i][j]<threshold){
g[i][j]=0;
}
else if(g[i][j]>=threshold){
X+=i*g[i][j]*g[i][j];
Y+=j*g[i][j]*g[i][j];
weights+=g[i][j]*g[i][j];
}
}
}
Coord_X=X/weights;
Coord_Y=Y/weights;

```

그림 4. Centroid method(case of g_u)

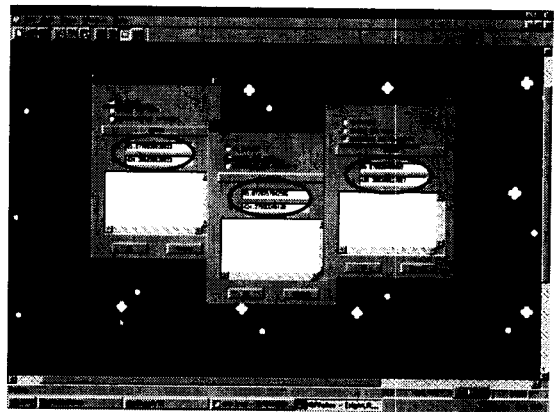


그림 5. Centroid 측정기법을 이용한 sub-pixel 좌표측정

서, 동일지점에 대해 도심측정기법의 알고리즘에 따라 상 측정 결과가 조금씩 다르게 계산됨을 알 수 있었다.

3. Lens Calibration

Videometric의 응용을 위해 사용되는 CCD camera는 기존의 사진측정용 카메라와 같은 방식으로 렌즈를 통한 중심투영 체제이다. 대상-공간상에서 디지털 카메라를 이용하여 획득한 측정데이터는 시스템 자체의 오차에 의해 많은 영향을 받으며 정확도 또한 저하된다. 그러므로 카메라의 기하학적 내적 안정성은 공선조건의 원리가 바르게 적용되기 위해서 반드시 필요하다. 이미지 형성 과정에서 카메라의 기하학적 시스템 오차에 따른

표 1. Kodak DCS200 8008s카메라의 렌즈검정에 따른 왜곡계수

Exposure distance(m)	Calibration parameter	Radial distortion coefficients($\times 10^{-6}$)			Tangential distortion coefficients($\times 10^{-6}$)		
		K1	K2	K3	P1	P2	P3
4	Calibrated value	227.6128	-0.0554	0.0006	-25.3050	-7.5686	0.0237
	Standard error	0.0078	0.0002	0	0.0709	0.0620	0.0293
2.5	Calibrated value	130.6406	-0.0530	-0.0003	-12.9350	-7.9710	0.0366
	Standard error	0.0031	0	0	0.0595	0.0477	

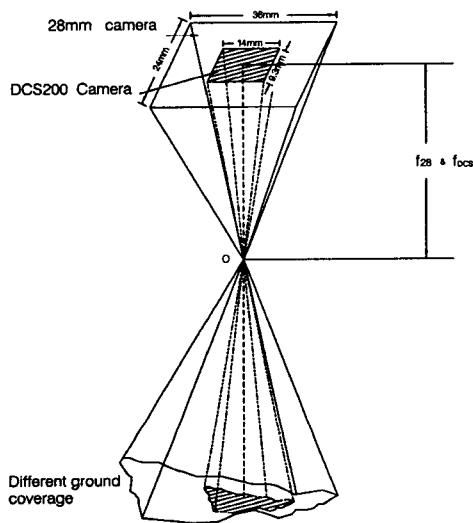


그림 6. CCD array format

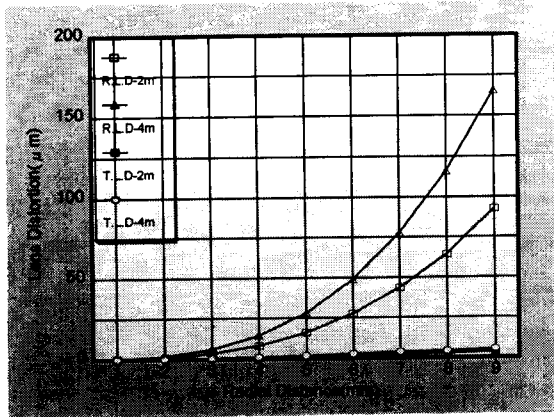


그림 7. 방사거리별 렌즈왜곡

이미지의 왜곡량은 다항식으로 표현되어 해석 사진측량에 전형적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 KODAK DCS200 디지털 카메라에 부착된 렌즈의 왜곡을 보정하고자 연직선(plumb line)

방법을 적용하였으며, 렌즈 검정을 위해 연직선 간격은 0.1 m로 배치하였다. 촬영은 f-stop 8, 촬영거리 4 m와 2.5 m, 그리고 shutter speed 1/2 sec로 이중 촬영하였다. 표 1은 이로써 도출해 낸 8008s카메라 28 mm렌즈에 대한 방사 왜곡계수와 접선 왜곡계수를 나타낸 것이며, 그림 7은 이에 대한 방사거리별 방사와 접선왜곡 증가량을 도시한 결과이다. 그림 7에서 방사거리의 증가에 따른 방사 왜곡량이 큰 폭으로 증가함을 알 수 있으나, CCD array의 크기가 작고, 렌즈 중심부만을 이용함에 따라, 최대 방사거리 8.4 mm에서 나타나는 왜곡량은 150 μm 이하임을 알 수 있다.

4. 정확도 분석

이미지의 왜곡은 빛의 강도, 파장특성, 타겟의 유형과 크기 등의 다양한 요소에 기인하여 발생되며, 이는 이미지 측정정확도에 많은 영향을 미치는 요소로 작용한다. 특히, 반사율은 배경 이미지와 타겟 이미지의 대조(contrast)를 규정짓는 중요한 변수로 간주되고 있다. 그리고 타겟이 선명한 형상을 보이기 위한 요소로 빛의 강도도 역시 이미지의 질에 많은 변화를 가져온다.

Wong과 wei-Hsin(1986)은 디지털 이미지에 있어 원형 타겟의 위치측정에 관한 기법을 개발하여 왔으며, 반면에 Mikhail et al(1984)은 모서리와 십자 타겟의 위치정확도와 검색에 관한 연구를 수행하여 왔다. 수치영상의 위치측정을 위한 타겟의 양상으로는 원형과 십자형이 가장 많이 사용되고 있으며, 빛의 대조 및 강도를 최대한 구현하기 위해 반사타겟을 사용하고 있다.

본 연구에서는 원형과 십자형 타겟에 대한 유형별 위치정확도를 분석하고자, 타겟크기별 정확도가 보다 양호하게 제시되는 7~9 pixel 크기의 반사타겟을 이미지 스케일을 고려하여 사용하였다. 그리고 그림 8과 같이 촬영 대상면에 기복타겟을 유형별로 각각 24점씩 등간

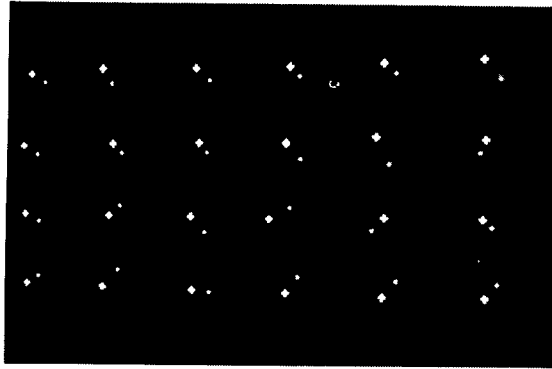
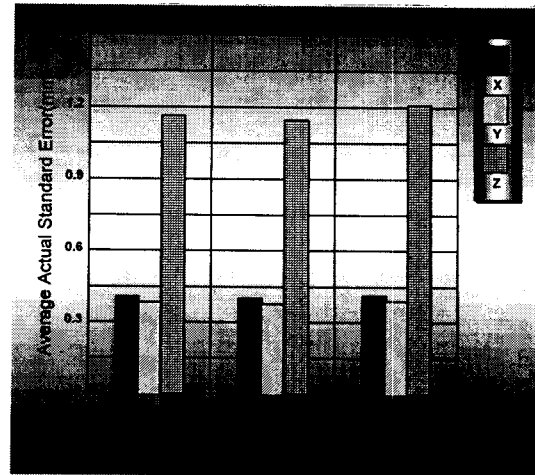


그림 8. Test filed

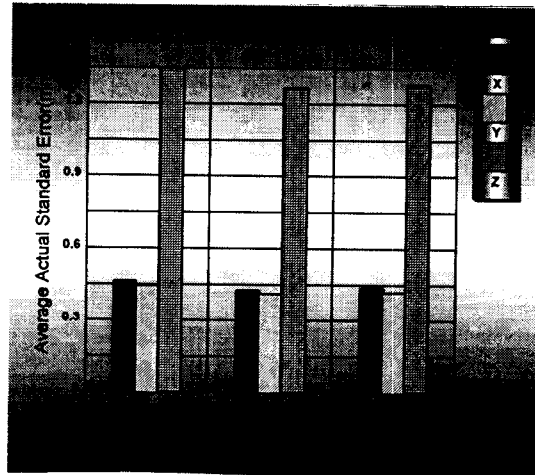
격으로 배치하여 촬영거리 4 m, f-stop 8, shutter speed 1/2sec로 90° 수렴촬영하였다 이는 직각수평촬영에 비해 향상된 정확도를 보이므로 타겟 중심의 불일치를 감안하여 계획하였다. 그리고 보다 정밀한 측정을 위해서는 이러한 타겟 중심의 불일치에 따른 오차의 보정과 타겟의 부결한계(reject limit) 등에 대해 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

표 2는 3가지 유형의 도심위치 결정기법과 타겟의 유형에 따른 X축, Y축, Z축에 대한 평균 기하학적 표준오차와 실 표준오차를 나타낸 것이다. 개개 유형에 따른 정확도를 분석한 결과, 타겟의 원(raw) 밝기값을 경중률로 사용한 도심측정기법에 원형타겟을 사용한 경우가 가장 좋 표 2 도심위치결정기법과 타겟 유형에 따른 X, Y, Z축에 대한 표준오차는 해석정확도를 보임을 알 수 있다.

그림 9~11은 이를 보다 세분화하여 분석한 결과이다. 그림 9(a)와 (b)는 타겟의 유형에 따른 도심측정기법별 X축, Y축, Z축에 대한 표준오차를 도시한 결과로서 X축과 Y축에 대한 표준오차가 Z축에 대한 표준오



(a) 원형타겟



(b) 십자형타겟

그림 9. 타겟 유형에 따른 도심측정기법별 X,Y,Z축에 대한 표준오차

표 2. 도심위치결정기법과 타겟 유형에 따른 X, Y, X축에 대한 표준오차

Target	Error Coord. Centroids methods	Average simulated standard error			Average actual standard error			*SDUW
		X	Y	Z	X	Y	Z	
Circular	$g_{ij}=1$	0.3780	0.355	1.079	0.4075	0.3833	1.1636	1.078
	$g_{ij}=g_{ij}$	0.3874	0.3648	1.1086	0.4006	0.3772	1.1463	1.034
	$g_{ij}=g_{ij}^2$	0.4008	0.3789	1.1758	0.4120	0.3895	1.2087	1.028
Cross	$g_{ij}=1$	0.3945	0.3779	1.1443	0.4639	0.444	1.3457	1.176
	$g_{ij}=g_{ij}$	0.4092	0.3949	1.2149	0.4268	0.4119	1.2671	1.043
	$g_{ij}=g_{ij}^2$	0.3946	0.3780	1.1574	0.4368	0.4185	1.2812	1.107

*SDUW: Standard Deviation of unit weight

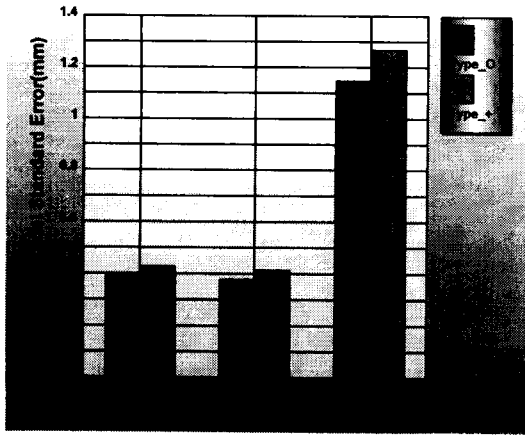


그림 10. X,Y,Z축에 대한 표준오차($\sigma_{xi} = \sigma_{yi}$)

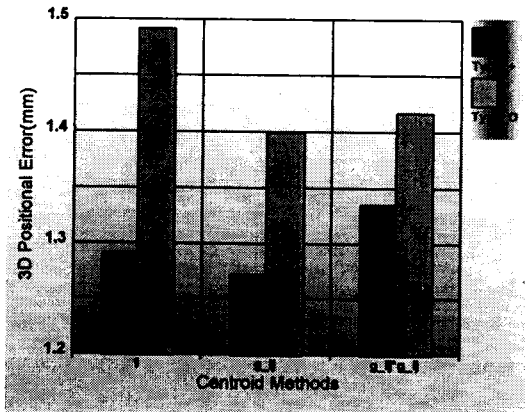


그림 11. 도심측정기법별 3D 위치오차

차에 비해 60%정도 작게 나타났으며, Y축에 대한 표준오차가 X축에 대한 표준오차보다 좀 더 향상된 정확도를 보임을 알 수 있었다.

그림 10은 타겟의 원 밝기값을 경중율로 사용한 도심측정기법을 적용하여 원형타겟과 십자형 타겟을 분석한 결과로서 유사한 정확도를 보이나, 십자형 타겟보다 원형 타겟을 사용하여 해석한 경우가 보다 나은 정확도를 보임을 알 수 있었다.

그림 11은 타겟 유형에 따른 도심측정기법별 3차원 위치오차를 나타낸 것으로, 타겟의 밝기값을 경중율로 사용한 경우가 가장 좋은 정확도를 보이며, 십자형 타겟을 이용하여 해석한 3차원 위치오차에 비해 원형 타겟을 이용하여 해석한 3차원 위치오차가 10%정도 나은 정확도를 보였다. 이로부터, centroids기법에 원형타

겟을 활용하는 것이 sub-pixel 좌표측정의 정확도 향상에 보다 효과적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

1. .TIF 파일포맷과 centroid 측정기법을 정립하여 sub-pixel 측정을 위한 시스템을 구축하였고 이미지의 준 자동 측정을 실현하므로써 기존의 아날로그 좌표측정의 물리적 어려움 및 정오차를 감소시킬 수 있었다.

2. 본 시스템의 상측정 알고리즘을 적용하여 원형과 십자형의 반사타겟에 대한 정확도를 분석한 결과, 원형 타겟의 활용이 centroid 측정기법에 보다 효과적이었다.

3. 수치이미지의 기하학적 내부정확도 향상을 위해 Kodak DCS200 8008s 카메라에 대한 렌즈 검정을 실시하여 왜곡보정 다항식계수 도출 및 비측정용 카메라의 단점을 보완할 수 있었다.

Sub-pixel 측정기법의 정확도 향상, 자동 타겟인식, 그리고 on-line 측정시스템의 개발 등에 관한 연구는 수치근접사진측량의 활용가능성을 증진시킬 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Guoping Zhou, "Accurate Determination of Ellipse Centers in Digital Imagery", KSCM/ASPRS, 4, pp.256-264, 1986.
2. H.A.Beyer, "Advances in Characterisation and Calibration of Digital Imaging Systems", ISPRS Commission V, pp.545-555, 1992.
3. H.A. Beyer, "Advances in Characterisation and Calibration of Digital Imaging Systems", ISPRS Commission V, pp.545-555, 1992.
4. I.C. Trinder, "Precision of Digital Target Location", PE&RS, 55(6), pp.883-886, 1989.
5. J.A. Beraldin, Sabry F. EL-Hakim, and L. Courmoyer, "Practical Range Camera Calibration", SPIE, 2067, videometrics II, pp.21-31, 1993.
6. J. Jansa, Y. Huang, and J.C. Trinder, "Problems of Precise Target Location and Camera Orientation in Digital Close-Range Photogrammetry", SPIE Videometrics II, 2067, pp.151-161, 1993.
7. K.B. Atkinson, "Close Range Photogrammetry and Machine Vision", 1996.
8. K.W. Wong, W.S. Ho, "Close-range Mapping with a Sol-

- id State Camera", PE & RS, 52(1), pp.67~74, 1986.
9. M.R. Shortis, T.A. Clarke, and S. Robson, "Practical Testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms", SPIE Videometrics IV, 2598, pp. 65-76, 1995.
 10. S.F. EL-Hakim, "Real-time Image Metrology with CCD Cameras", PE&RS, 52(11), pp.1757~1766, 1986.
 11. 이진덕, "산업정밀측정에서 수치영상을 이용한 근접사진측량의 효율적 응용", 한국측지학회, 제14권, 제1호, pp.17-25, 1996.