

711  
6-6  
6  
2

공학석사 학위논문

수치사진측량을 이용한 교통사고차량  
변형해석



이 論文을 學位 論文으로 提出함

2003년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

김진수

# 김진수의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주 심 공 학 박 사

위 원 공 학 박 사

위 원 공 학 박 사

김 상 용

이 영 대

이 종 출



# 목 차

List of Tables .....	i
List of Figures .....	ii
Notations .....	iv
<b>Abstract</b> .....	v
<b>1. 서론</b> .....	1
1.1 연구목적 .....	1
1.2 연구동향 .....	2
1.3 연구방법 및 범위 .....	5
<b>2. 수치사진측량 이론</b> .....	8
2.1 수치영상의 특성 .....	8
2.2 수치영상의 기하학 .....	9
2.2.1 공선조건식 .....	9
2.2.2 자체검정에 의한 광속조정법 .....	10
2.2.3 에피폴러 기하 .....	12
2.3 다중영상표정 .....	13
2.4 자체검정 .....	16
2.5 수치사진측량 시스템 .....	18
<b>3. 수치영상자료 취득</b> .....	19

3.1 촬영계획 .....	19
3.2 카메라 Calibration .....	22
3.3 기준점 측량 .....	24
3.4 교통사고차량 촬영 .....	28
<b>4. 자료처리 및 결과분석 .....</b>	<b>29</b>
4.1 수치영상자료 처리 .....	29
4.2 결과분석 .....	42
4.3 변형해석 .....	43
<b>5. 결 론 .....</b>	<b>46</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>47</b>

# List of Tables

<Table 3.1> Specifications of Rollei d7 metric <sup>5</sup> Camera .....	20
<Table 3.2> Data of Camera Calibration .....	23
<Table 3.3> Specifications of GTS-701 .....	25
<Table 3.4> The Result of Control Survey [Angle] .....	26
<Table 3.5> The Result of Control Survey [3D Coordinate] .....	26
<Table 3.6> The Element of Exterior Orientation [a] .....	30
<Table 3.7> The Element of Exterior Orientation [b] .....	31
<Table 4.1> Adjusted Object Coordinates [a] .....	32
<Table 4.1> Adjusted Object Coordinates [b] .....	33
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [c] .....	34
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [d] .....	35
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [e] .....	36
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [f] .....	37
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [g] .....	38
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [h] .....	39
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [i] .....	40
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [j] .....	41
<Table 4.3> The Residuals of Control Points .....	42
<Table 4.4> The Result of Deformation Calculation .....	45

# List of Figures

<Figure 1.1> The Flow Chart of Deformation Analysis .....	6
<Figure 2.1> Discrete Representation of an Image as a Matrix ...	8
<Figure 2.2> Collinearity Condition .....	9
<Figure 2.3> Epipolar Geometry of a Stereopair .....	13
<Figure 2.4> Multi-Image Orientation .....	14
<Figure 2.5> Space Intersection .....	15
<Figure 2.6> Space Resection .....	15
<Figure 2.7> Radial Optical Distortion .....	16
<Figure 2.8> Radial and Decentering Distortion .....	17
<Figure 2.9> The Flow Chart of Data Processing .....	18
<Figure 3.1> The Flow Chart of Digital Image Acquisition .....	19
<Figure 3.2> Rollei d7 metric <sup>5</sup> Camera .....	20
<Figure 3.3> The Type of Coded Target .....	21
<Figure 3.4> The Type of Natural and Round Target .....	21
<Figure 3.5> Test Field for Correction of Radial Distortion .....	22
<Figure 3.6> Profiles for Calibrated Radial Distortion .....	23
<Figure 3.7> Geometry of Control Survey .....	24
<Figure 3.8> Acquired Images [a] .....	27
<Figure 3.9> Acquired Images [b] .....	27
<Figure 3.10> A Test System for Digital Image Acquisition .....	28
<Figure 3.11> Positions of Camera Exposure .....	28

<Figure 4.1> Image Point Measurement .....	29
<Figure 4.2> RMSE of Object Coordinates [X, Y, Z] .....	41
<Figure 4.3> RMSE of Control Points [X, Y, Z] .....	42
<Figure 4.4> 3D Digital Model .....	43
<Figure 4.5> Vector Map .....	44
<Figure 4.6> Digital Elevation Model .....	44
<Figure 4.7> Digital Surface Model .....	45

# Notations

$a_{ij}$	: 미지값 산출을 위한 편미분 요소
$dr$	: 방사방향 왜곡수차
$f$	: 초점거리
$R$	: 회전행렬
$s$	: 축척인자
$r_{ij}$	: 회전행렬인자
$x, y$	: 영상좌표
$x_0, y_0$	: 영상 중심 좌표
$x_p, y_p$	: 영상내 p점의 좌표
$X_0, Y_0, Z_0$	: 카메라 투영중심의 대상-공간좌표
$X_c, Y_c, Z_c$	: 촬영점 좌표
$X_p, Y_p, Z_p$	: p점의 대상-공간좌표
$\omega, \varphi, \kappa$	: 회전요소
$\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$	: 외부표정요소
$\nu$	: 간차

***The Analysis of Deformation of Traffic Accident Vehicle  
using Digital Photogrammetry***

*Jin-Soo, Kim*

*Department of Civil Engineering, Graduate School,  
Pukyung National University*

***ABSTRACT***

In this study, Digital Photogrammetry is made use of precision surveying of deformation parts that occurred in the traffic accident.

So, deformation of the traffic accident, an essential basis in the traffic accident analysis, was analysed quantitatively by digital photogrammetry.

First, parts of deformation were represent by Grid(Planar Area : 0.434 m<sup>2</sup>, 100×58) and Vector Map, DEM, DSM of using the Triangulation with Linear Interpolation.

These showed that was able to evaluate an aspect of deformation. Also, to analyse an amount of transformation(deformation), volume in any datum level was calculated at an average 0.002017m<sup>3</sup> of a quantity of transformation.

If the study continue to build the basis of data, renew it, and consider the vehicle rigidity, a property of dynamics motion according to a various kind of cars, conditions of an accident, these deformation analysis will be able to not only decide the speed just before the collision, but also reappear the traffic accident and carry out an analysis more scientifically and effectively.

# 1. 서론

사진기의 발명과 함께 발달하기 시작한 사진측량학은 전산기술의 발달과 더불어 수치영상을 이용한 수치사진측량으로 점점 발전되어 나아가고 있다. 수치사진측량은 대상물의 수치화된 영상을 취득하고 이를 처리함으로써 과거 고가 장비에 의해서 처리되던 정보를 PC 환경에서도 처리, 출력할 수 있다는 장점이 있다.

또한, 자료의 취득 및 처리과정의 온라인화와 높은 정확도의 실시간 수치영상 처리기술의 개발로 인해 토목·건축분야에서 구조물의 변형관측은 물론, 고고학 분야에서 부서지거나 훼손되기 쉬운 대상물과 장소에 대한 비접촉기록, 경찰 및 법과학 분야뿐만 아니라 교통사고 조사·분석, 정밀 관측을 요하는 분야 등 수치사진측량의 활용이 증대되고 있다.<sup>1)2)3)4)5)6)</sup>

따라서, 본 연구에서는 최근 심각한 사회문제로 대두되고 있는 교통사고를 처리하는데 있어서 중요한 기초자료가 되는 교통사고차량의 변형해석에 수치사진측량을 이용한 측량기법을 제시하고자 한다.

## 1.1 연구목적

국가 경제규모가 커지고 국민소득이 증가함에 따라 교통수단으로서의 자동차는 우리의 일상생활에서 없어서는 안될 생활필수품으로 자리 잡고 있는 반면에 이로 인해 파생되는 자동차 사고는 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 이에 교통사고 당시의 상황을 추정하기 위한 다양한 분석기법에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 이를 위한 수치영상의 활용도도 높아지고 있다.

그러나, 교통사고처리에 있어서 수치영상의 활용은 노면 흔적, 차량의

파손상태, 사고 당시의 차량 위치, 사고 현장의 평면도 작성과 같은 대략적인 상황만을 재현하는 단계에만 이용되고 있는 실정이다.

특히, 사고차량의 변형량은 사고분석가들의 경험에 비추어 정성적인 분석에 의해 결정되며, 이러한 정성적 자료를 이용하여 사고차량의 충돌속도와 사고 직후 사고차량들의 최종정지위치를 근사적으로 추정함으로써 발생원인과 책임을 공정하고 정확하게 규명하는데 있어 많은 문제점들이 있다.

따라서, 본 연구에서는 수치사진측량을 이용하여 자동차의 3차원 형상을 재현하고, 교통사고차량의 변형부위를 정밀 측량함으로써 교통사고분석에 있어서 중요한 기초자료가 되는 교통사고차량의 변형을 정량적으로 해석하고자 한다. 이러한 변형해석은 다양한 차종과 여러 사고조건에 따른 자료기반 구축 및 갱신으로 인해 충돌직전의 속도를 결정함과 동시에 교통사고의 재현 및 해석을 보다 과학적이고 효율적으로 수행하는데 기여할 수 있을 것이다.

## 1.2 연구동향

18세기경 테일러(Brook Taylor)와 램버트(J. Lambert)가 선형중심투영의 원리 및 이를 이용한 지도제작의 가능성을 제시함으로써 사진측량의 기초에 대한 이해를 발표하였지만, 실질적인 지형도 제작은 1839년 프랑스인 Louis Daguerre에 의해 사진이 발명된 이후, 1849년 프랑스 공병장교인 Laussedat에 의해 최초로 시도되었다. 그 후 Laussedat는 1859년 광선의 공간적 교차에 의해 한 쌍의 사진으로부터 대상물의 좌표를 결정하는 방법을 소개한 바 있으며, 비슷한 시기에 A. Meydenbauer는 건물에 사진측량학을 적용하는 최초의 성공적인 시도를 하였다.

또한 1892년 독일의 Pulfrich가 부점(floationg mark)의 이론을 바탕으로

사진을 필요한 정확도 이내로 관측 및 도화함으로써 입체사진측량의 기본 이론을 소개하였으며, 이는 1909년에 E.von Ore의 정교한 입체자동도화기의 발명을 위한 발판을 마련하였다.

기계적 사진측량학(analogue photogrammetry)은 양대 세계대전을 전후로 한 항공기 및 전자계산기의 발달과 더불어 그 영역이 크게 확대되었으며, 1957년 8월 캐나다의 Helava 대학의 연구와 해석적 도화기의 개념이 도입되면서 해석적 사진측량학(analytical photogrammetry)으로 발전해 나갔다. 해석적 사진측량학은 1960년대에 연구가 시작되어 1970년대에 이르러 많은 연구가 진행되었으며, 1976년 헬싱키의 ISP(International Society of Photogrammetry)의 해석적 도화기의 소개로 인하여 획기적인 발전을 거두고, 오늘날의 수치사진측량학에 이르게 되었다.

수치사진측량은 1950년대부터 연구가 시작되어 1959년 Hobrough에 의해 연구의 기틀이 마련되었으며, 1970년대 중반부터 그 유용성과 활용성을 제시하기 시작했다. 또한 전산기술의 발달과 더불어 보다 간편하고 경제적인 영상자료의 획득, 처리 및 저장이 가능한 매체로서 CCD의 사용이 거론되면서 그 가능성과 실현성을 넓히고 있으며, 특히 사진측량의 일련의 과정에 대한 자동화를 목적으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

1980년대 이후, 스틸 비디오 카메라를 이용한 타겟 포인팅과 이의 알고리즘에 대한 연구가 실시되어 수치영상의 해석 가능성과 문제점이 제시되기 시작하였고, CCD 카메라를 이용한 실시간 영상분석을 위해 영상 분할, 타겟 인식, 모서리 검색, 특성 추출 등의 자동 수행과 수치영상 분석을 통한 사진측량기법의 잠재능력 평가와 이의 실제 적용에 관한 연구가 진행되었다.<sup>7)8)9)10)11)12)</sup>

1990년대 초, CCD를 이용한 영상분석기법의 효용 가능성이 널리 인지되면서 다양한 분야에서 비전 측정기법의 활용방안을 제시하기 위한 많은 연구가 수행되었으며, 수치영상을 이용한 높은 정확도의 측정기법 활용연

구와 더불어 시스템 오차를 줄이기 위한 많은 노력이 있었다.<sup>13)14)15)16)17)18)19)20)</sup>

한편, 국내에서는 1970년대부터 사진측량이 본격적으로 연구되기 시작하여 1972년 유복모에 의해 항공사진측량과 지상사진측량에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 1983년 박운용에 의해 사진측량에 의한 사면의 경사해석방법이 발표되면서 사면해석의 실용화에 기여하였다.<sup>21)22)</sup>

1984년 양인태는 경사사진에 의한 해석적 위치결정에 대해 연구하였고, 1985년 강준묵은 다중 근거리 측량에 의한 피사체의 정밀해석에 대해 연구하였으며, 1986년에는 이재기에 의해 비 측량용 사진기에 의한 좌표해석에 관한 연구가 발표되었다.<sup>23)24)25)</sup> 1986년 강인준은 블록조정기법을 이용한 기준점 설정에 관한 연구를 하였고, 1987년 박흥기는 과대오차제거를 위한 관측값의 조정기법으로서 robust 추정법에 의한 과대오차 제거방법을 제시하여, 과대오차조정을 위한 관측값 조정기법을 확립하였으며, 1988년 유환희는 근거리 사진측량에 의한 3차원 변형해석에 관한 연구를 수행하였다.<sup>26)27)28)</sup>

1989년 이종출은 근거리 사진측량에 의한 지형의 3차원 위치를 항공사진측량보다 간편하고 경제적으로 해석하고, 그 해석의 정확도를 향상시키고 동시에 효용성을 높이는 연구를 수행하였고, 1990년 손덕재는 지상사진의 촬영방향과 수렴각 변화에 따른 공간좌표해석으로 이론적 정확도 예측 모델을 개발하고 그 유용함을 입증한 바 있으며, 1992년 이진덕은 다중 근접사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석으로 비지형 대상물에 대하여 외부전면해석과 내부전면해석의 정확도를 향상시키는 연구를 수행하였다.<sup>29)30)31)</sup>

1990년대에는 기존의 연구를 근간으로 하여 여러 응용분야에서 공간상에 위치한 대상물의 위치를 결정하기 위해 수치영상이나 수치자료를 이용한 연구가 확대되었다.<sup>32)33)34)35)</sup> 1994년과 2000년 배상호는 근접사진측량에

의한 구조물의 변형 및 변위해석을 통해 구조물 모니터링의 해석 가능성을 제시하고 소프트웨어적 처리 방법에 따른 신뢰도를 분석하였고, 1996년 김성민은 수치화상을 이용한 근접사진측량 시스템의 수행성을 평가하였으며, 1997년 박경식은 CCD 카메라를 이용하여 사진측량의 전 과정을 온라인으로 처리하는데 가장 기본이 되는 동적 대상물의 상좌표를 직접 실시간으로 취득할 수 있는 기법을 소개하였다.<sup>36)37)38)39)</sup>

1998년 이석균은 객체지향기법을 이용하여 대상물의 거리에 따라 초점 거리가 변하는 CCD 사진기를 신속하게 검정할 수 있는 3차원 렌즈 검정 모형식을 개발하였고, 2000년 이효성은 고해상력의 디지털 카메라로 취득한 좌·우 중복된 수치화상데이터를 이용하여 3차원 좌표를 획득하고 획득된 좌표를 토대로 대상면의 거칠기를 정밀측정하는 연구를 수행하였으며, 2000년 이철우는 수치사진측량을 이용하여 자동차 Fender를 대상으로 3차원 모형을 생성함으로써 수치영상을 이용한 산업정밀측량 기법을 제시하였다.<sup>40)41)42)</sup>

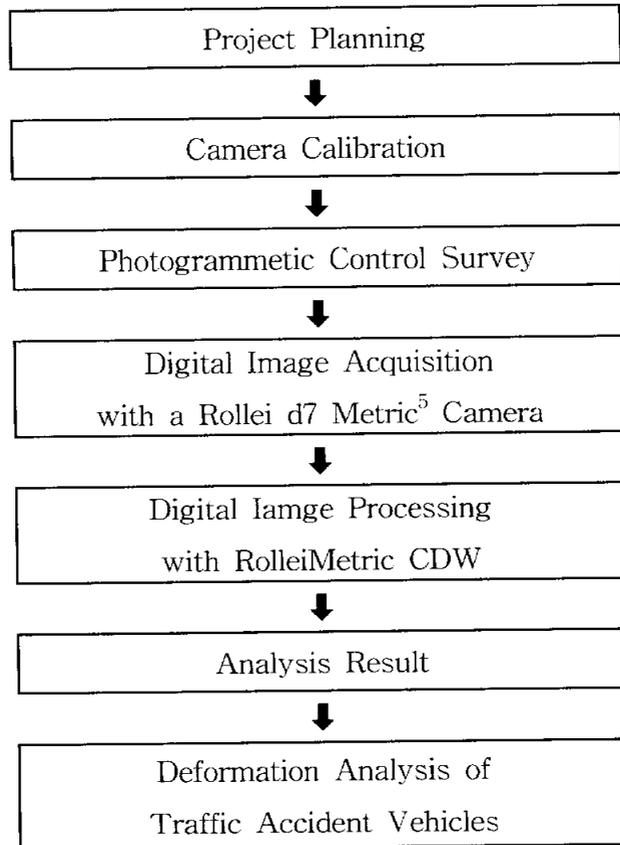
최근에는 자료의 취득 및 처리과정의 온라인화와 높은 정확도의 실시간 수치영상 처리기술의 개발, 운영 프로그램의 연계 분석이 가능한 통합된 처리체계의 환경구축에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.<sup>5)8)9)</sup>

이상과 같이 국내외 연구동향을 보면, 수치사진측량을 이용한 대상물의 3차원 위치결정은 컴퓨터비전, 컴퓨터그래픽스, 영상처리 등 다양한 학문과 연계되어 있으며, 앞으로 그 활용분야가 더욱 확대될 것으로 기대된다.

### 1.3 연구방법 및 범위

본 연구에서는 교통사고분석에 있어서 중요한 기초자료가 되는 교통사고차량의 변형을 해석하기 위하여, 먼저 대상물과 영상의 기하학적 관계를

정립하고 경미한 접촉사고로 바디에 변형이 발생한 차량을 대상으로 수치 영상을 획득·처리함으로써, 사고 후 차량의 변형을 정량적으로 해석하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 <Figure 1.1>과 같은 단계로 연구를 수행하였다.



<Figure 1.1> The Flow Chart of Deformation Analysis

먼저, 촬영계획 단계에서는 추돌사고로 인해 변형이 발생한 자동차를 촬영 대상으로 선정하고 차량에 부착할 타겟의 종류 및 분포 형상을 계획하였으며, 실제 촬영에 앞서 렌즈의 왜곡을 보정하기 위한 카메라 검정을 선행하였다. 기준점 측량은 타겟 중 정도가 가장 우수한 코드타겟을 기준으

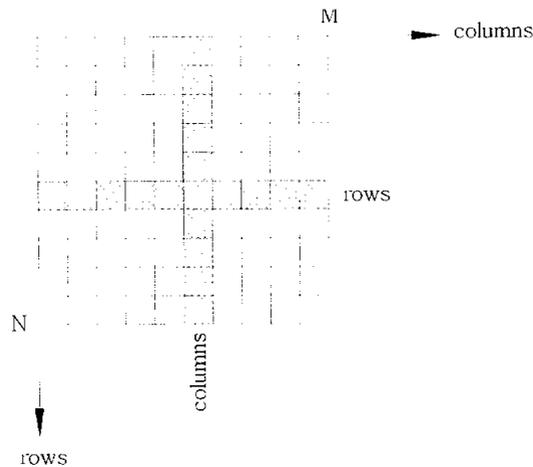
로 최소 0.5" 독 Total Station을 이용하여 삼각수준측량 방법으로 측정하고 그 결과를 기준점의 최확값으로 결정하였으며, 이를 영상처리단계를 거쳐 조정된 대상물 좌표와 비교·분석하였다.

이렇게 결정된 3차원 대상물 좌표를 DXF 파일형식으로 변환하여 대상 차량을 3차원 수치모형으로 생성하였으며, 사고 전후의 차량변형을 해석하기 위해 변형이 발생된 부위, 그리고 대칭위치에 있는 변형이 발생되지 않은 부위에 대해 취득된 대상물 3차원 좌표를 수치보간법을 이용하여  $100 \times 58$  (Planar Area:  $0.434\text{m}^2$ )의 규칙적인 간격을 가지는 Grid로 나타내고, 기준면으로부터의 체적을 각각 산정하여 차이값을 사고차량의 변형량으로 결정하였다.

## 2. 수치사진측량 이론

### 2.1 수치영상의 특성

수치영상은 대상물에서 반사된 빛이 렌즈의 중심을 통과하여 CCD(Charge Coupled Device) 센서에 감지되어 수치 정보화된다. <Figure 2.1>은 좌표상에 위치한 밝기값을 일정한 범위로 구분하여(0~255) 영상소(pixel) 단위로 나타낸 것으로서 유효 영상폭은 그 크기가 일정하게 규정된 직각 포맷을 이룬다.



<Figure 2.1> Discrete Representation of an Image as a Matrix<sup>44)45)</sup>

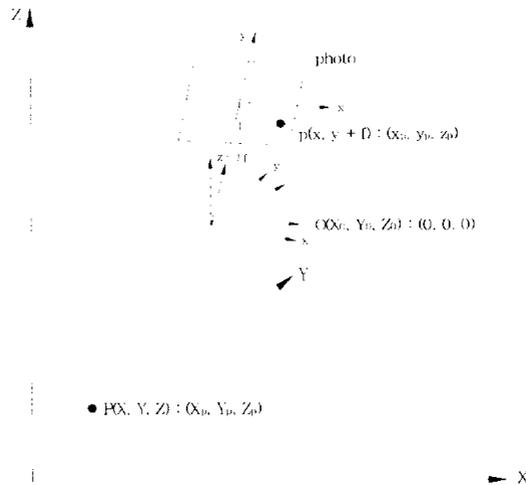
이러한 수치영상은 스캐너, CCD(Charge-Coupled Device) 카메라 및 디지털 카메라 등을 이용하여 취득할 수 있으며, 모든 처리가 컴퓨터에 의해 이루어지므로 신속, 정확할 뿐만 아니라 다양한 처리를 실현할 수도 있다.

## 2.2 수치영상의 기하학

수치사진측량은 사진과 렌즈의 투영중심 그리고 대상물간의 기하학적 관계를 이용하여 대상물이 지니고 있는 특성을 정량·정성적으로 해석하는 학문으로써, 사진의 기하학적인 원리는 중심투영이며, 사진과 대상물간의 상관관계는 공선조건식, 광속조정법, 에피폴러 기하학 등의 이론에 의해 해석된다.

### 2.3.1 공선조건식

대상 공간상의 임의점( $X_p, Y_p, Z_p$ )과 그에 대응하는 사진상의 점 ( $x_p, y_p, z_p$ ) 및 사진기의 촬영중심 ( $X_0, Y_0, Z_0$ )이 동일직선상에 있어야 하는 조건을 공선조건(Collinearity Condition)이라 하며, <Figure 2.2>에서 나타낸 바와 같다.



<Figure 2.2> Collinearity Condition<sup>46)</sup>

사진기 투영중심과 P의 상점 및 대상물 사이의 관계는 투영변환의 기하학적 관계에 의해 식(2.1)과 같이 표현되어지며, 상호간의 기하학적 위치관계를 이용하여 식(2.2)와 같은 공선조건의 기본식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = s \cdot R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad \text{식(2.1)}$$

여기에서

$$x - x_p = -f \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \quad \text{식(2.2)}$$

$$y - y_p = -f \frac{r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)}$$

## 2.2.2 자체검정에 의한 광속조정법

식(2.3)은 최소제곱조정과 Taylor 급수를 사용하여 식(2.2)와 같은 비선형식을 선형화한 것으로, 관측식의 함수(F)와 매개변수값이 0과 같음을 기초로 한다.

$$F_1 = 0 = px + qf \quad \text{식(2.3)}$$

$$F_2 = 0 = py + rf$$

여기에서,

$$p = r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)$$

$$q = r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)$$

$$r = r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)$$

선형화 형태로 다항식을 정리함에 있어, 미지값들의 초기값 계산에 대한 함수와 우연오차에 대한 보정값을 요소로 하여 편미분값을 기호화할 수 있다. 그리고, 기지 대상점이 3점 이상인 경우, 외부표정요소를 도출할 수 있으므로, 이를 간단히 행렬 요소로 표현하면 식(2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \phi \\ \Delta x \\ \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad \text{식(2.4)}$$

이로부터 획득한 외부표정요소는 기지값으로 이용되어 새로운 대상점의 보정값( $\Delta X_p, \Delta Y_p, \Delta Z_p$ )을 계산하게 되며, 대상점 p의 대상물 좌표  $X_p, Y_p, Z_p$ 에 대한 기초 근사값으로 사용되어진다. 이로써 식(2.4)를 다음과 같이 수정·정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad \text{식(2.5)}$$

미지점의 3차원 좌표는 공선조건식의 외부표정요소와 최소 3점 이상의 잉여 기준점 좌표로부터 계산되어진다. 이런 비선형화 방정식의 선형화를

통한 자료처리 과정을 공간 후방교회법(Space Resection)이라 하며, 여기서 획득한 수정된 외부표정요소는 공간 전방교회법(Space Intersection)을 통하여 초기값으로 이용되어 미지점의 좌표를 도출하게 된다.

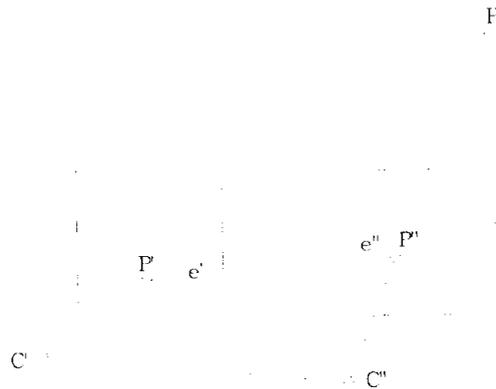
사진측량의 관측값에는 우연오차 뿐만 아니라 정오차도 포함되어 있고 이 정오차는 오차모형에 의해 해결될 수 있으므로 조정계산에서 입체모형의 일부에 이와 같은 오차모형식을 부가하여 정확도를 향상시킬 수 있으며, 이것이 자체검정의 기본목적이다. 초기의 자체검정은 정밀근접사진측량의 정확도 향상을 목적으로 고안된 사진기의 내부표정요소 및 렌즈왜곡의 검정이 주된 것이었으며, 이 후 발전적으로 항공삼각측량에도 도입되어 광속법에 의한 종횡접합모형(Block Adjustment)에 각종 오차모형이 제안되게 되었다.

이와 같은 방법을 자체검정에 의한 광속조정법(Bundle Adjustment with self calibration), 기내검정 또는 부가매개변수에 의한 조정이라 하며, 이는 광속조정법에서 미지변수로 취급되는 사진의 외부표정요소와 관측점의 지상좌표와 사진좌표에 포함되는 계통적 오차를 나타내는 변수를 미지변량으로 하여 이 미지변수들을 동시에 조정하는 방법이다.

### 2.2.3 에피폴러 기하학

수치사진측량에서 가장 기본적인 처리과정 중의 하나는 둘 또는 그 이상의 영상에서 공액점(Conjugate Point)을 찾고 관측하는 것이며 영상정합(Image Matching)이라는 처리과정에 의해 자동으로 그 문제를 해결하려고 시도하고 있다. 또한 수치사진측량 기술의 발달과 더불어 입체사진에서 공액점을 찾는 공정은 점차 자동화되어 가고 있으며, 공액요소 결정에 에피폴러 기하를 이용하고 있다.

<Figure 2.3>은 에피폴러 기하(Epipolar Geometry)를 이루고 있는 각각의 투영중심이  $C'$ ,  $C''$  인 입체쌍을 나타내고 있으며, 에피폴러면은 2개의 투영중심과 대상점  $P$ 에 의해 정의된다. 또한, 에피폴러선  $e'$  와  $e''$  는 에피폴러면과 영상면의 교차점으로써, 공액점은 에피폴러선상에 반드시 있어야 하며 이러한 에피폴러선은 탐색공간을 많이 감소시킨다.



<Figure 2.3> Epipolar Geometry of a Stereopair<sup>45)</sup>

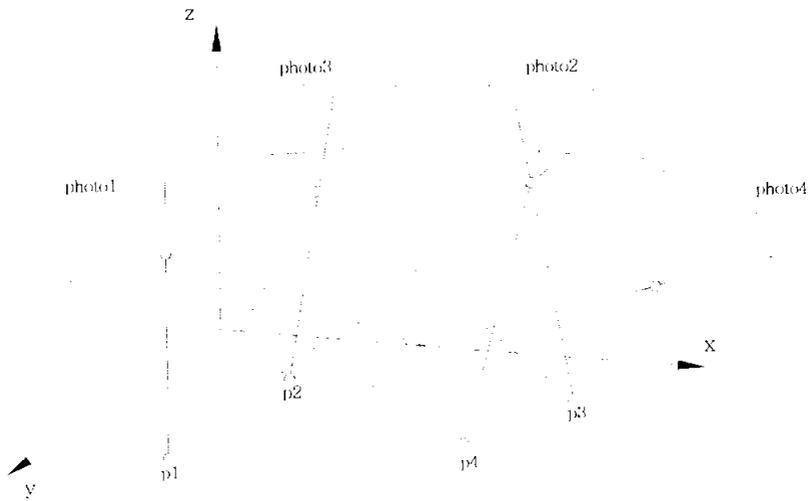
## 2.3 다중영상표정

다중영상정합의 표정(Orientation)이란 여러 다른 사진들과 대상물에 관련된 각 사진의 카메라 위치( $X_c, Y_c, Z_c$ )와 회전요소( $\omega, \varphi, \kappa$ )에 대한 계산이며, 표정점에 대한 대상물 좌표를 계산하는 것으로서 내부표정과 외부표정으로 구분할 수 있다.

내부표정은 카메라의 내적인 특성을 나타내는 것으로 주점의 위치( $X_0, Y_0$ )와 주점거리( $cK$ )를 결정하는 것이고, 외부표정은 카메라 시스템과 대상물 공간사이의 관계를 나타내는 것으로 카메라 외부투영 중심으로 절대좌표계  $X, Y, Z$ 에 관계되는 촬영점 좌표  $X_c, Y_c, Z_c$ 에 의해 표현되며, 절대

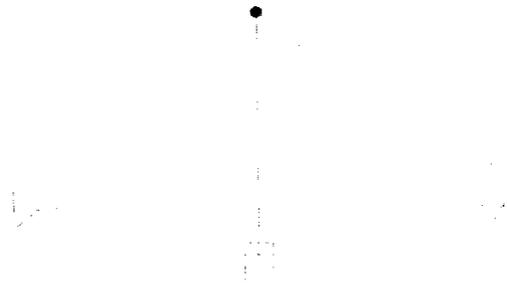
좌표에 관계되는 사진좌표축의 각회전  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ 를 알아야 한다. 상-대상물 관계를 정의함에 있어서 기본적으로 외부표정요소는 좌표변환이며, 표정각  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ 는 사진좌표계와 절대좌표계 사이에서의 회전변환을 말한다.

다중영상접합에서는 표정을 위해 공간 전방교회법(Space Intersection)과 공간 후방교회법(Space Resection)을 동시에 이용하며, 표정점의 사진자표와 스케치에 의해 입력된 대략의 외부표정요소, 자체검정에 의한 카메라의 내부표정요소와 사진의 정확한 외부표정과 표정점의 대상물 좌표를 계산하기 위한 대상물 좌표체계결정을 이용한다.



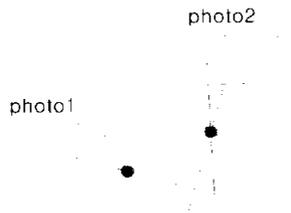
<Figure 2.4> Multi-Image Orientation

공간 전방교회법은 광속이 3차원 공간에서 교차하는 것을 기초로 하는 사진측량학적인 계산방법으로 두 장의 사진에 대한 외부표정과 사진좌표로부터 공통된 대상물의 표정점을 계산하고 이와 관련해서 정확한 외부표정을 결정하는 것이며, 이를 도식화하면 <Figure 2.5>과 같다.



<Figure 2.5> Sapce Intersection

공간 후방교회법은 이미 알고 있는 위치와 일치하는 지점에서 적어도 3개의 기지방향으로 교차시키므로써 공간 위치를 결정하는 것이며, 기지의 대상물 좌표와 적어도 3개의 표정점의 사진 좌표로부터 어떤 사진의 외부 표정을 결정하는 방법으로써 이를 도식화하면 <Figure 2.6>과 같다.



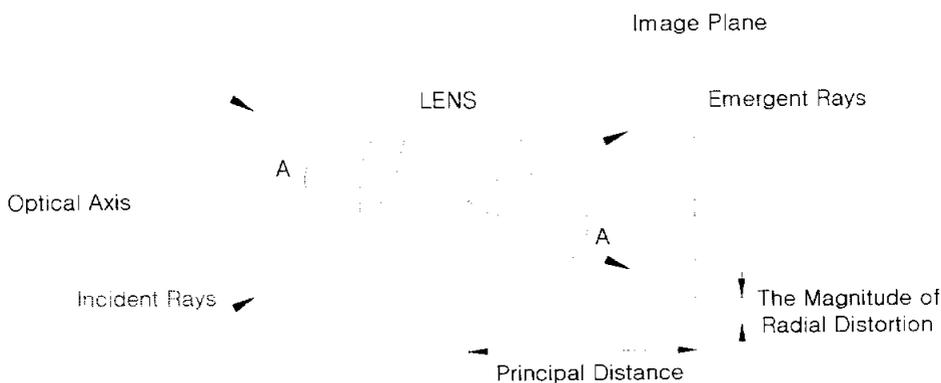
<Figure 2.6> Space Resection

공선조건에 만족하기 위하여 대상물 좌표체계 결정에 이용된 표정점은 표정 순서에서 최소 3장의 사진에 나타나야 하며, 맨 처음 두 장의 사진은 공간 전방교회법으로 모델 좌표를 계산하게 된다. 두 장의 사진방향은 3차원 공간에서 60~90°의 각도가 이루어지도록 하고 대상물 전역에 골고루

분포되어 있는 최소 7개의 표정점을 갖고 있어야 하며, 공간 후방교회법의 계산을 위하여 각 표정 순서에서 이미 알고 있는 3개의 표정점이 적어도 3장의 사진에 나타나야 한다. 그리고 결과값에 대한 정확도를 미리 고려하여 사진의 표정 순서를 결정하여 그에 대한 영향을 최소화해야 한다.

## 2.4 자체검정

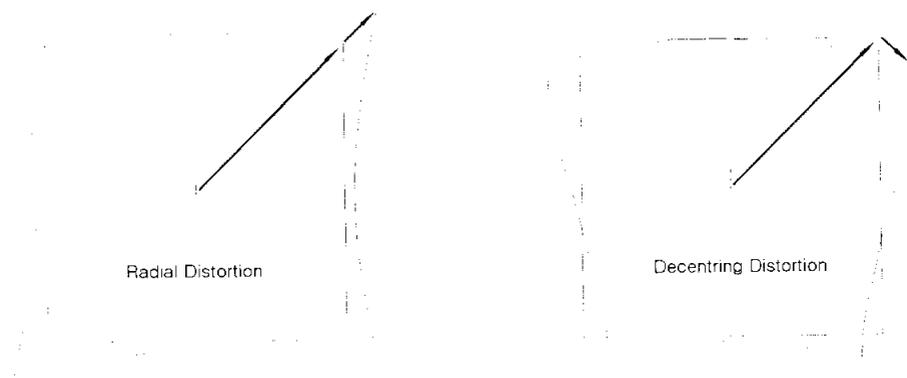
자체검정(Self-Calibration)은 카메라의 초점거리와 주점의 결정, 정오차를 보정하기 위한 부가매개변수의 취득에 이용된다.



<Figure 2.7> Radial Optical Distortion<sup>44)46)</sup>

이론적으로 이상적인 카메라는 <Figure 2.7>에서 나타난 바와 같이, 대상물 공간 속에서 카메라에 입사하는 빛이 렌즈 중심을 통하여 입사각과 같은 각으로 내부에서 직진하지만, 실제 카메라는 이와 같이 작용하지 않고 두 개의 투영중심이 생기는데 이 점들을 내부 및 외부의 투영중심이라 한다. 그러나 그 차이는 무시할 정도로 매우 미소하므로 기하학적 모델에서는 하나의 투영 중심만을 사용한다.

렌즈의 특성으로 인하여 대상물 공간상에서 카메라에 들어오는 입사각과 카메라 내부에서 렌즈의 중심을 통해 굴절하는 굴절각이 일정하지 않기 때문에 생기는 렌즈 왜곡수차는 방사방향 왜곡수차와 편심방향 왜곡수차가 있으며, <Figure 2.8>에서 나타낸 것과 같다.



<Figure 2.8> Radial and Decentering Distortion<sup>44)</sup>

일반적으로, 편심방향 왜곡수차는 극히 미세하여 특수한 경우를 제외하고는 고려하지 않으며, 방사방향 왜곡수차는 식(2.6)으로 보정한다.

$$DR = A_1R(R^2 - R_0^2) + A_2R(R^4 - R_0^4) \quad \text{식(2.6)}$$

여기서,

$DR$  : Radial Distortion

$A_1$  : 1차 왜곡상수

$A_2$  : 2차 왜곡상수

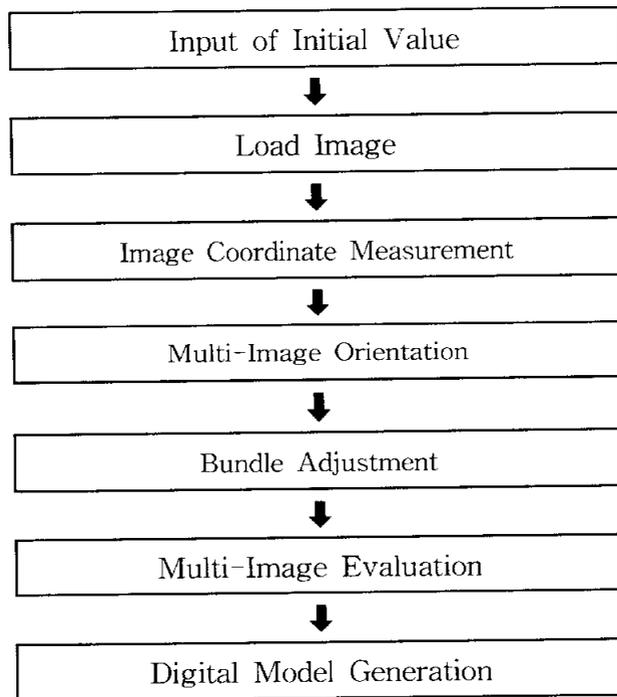
$R$  : 반지름

$R_0$  : 왜곡수차가 0이되는 주점으로부터 반경

## 2.5 수치영상처리 시스템

본 연구에서는 사진측량 S/W 중 다양한 카메라 및 렌즈의 선택과 설치의 편의성이 있고, 특히 자동차, 항공기, 선박 등과 같은 산업분야에서 많이 활용되고 있는 RolleiMetric CDW(Close-Range Digital Workstation)를 이용하여 획득된 대상물의 수치영상에서 각 표정점의 3차원 좌표를 결정하였다.

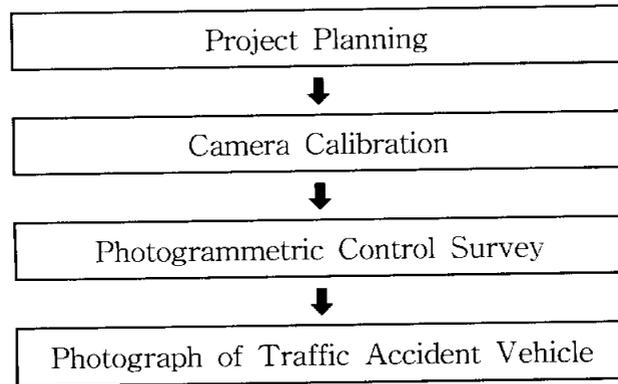
이러한 RolleiMetric CDW는 복잡한 수치영상에서 상좌표 취득이 용이할 뿐만 아니라 자료처리의 모든 공정이 자동으로 수행되며, 높은 정확도의 해석이 가능하다. 전반적인 수치영상처리 시스템의 흐름도는 <Figure 2.9>와 같다.



<Figure 2.9> The Flow Chart of Data Processing

### 3. 수치영상자료 취득

본 연구에서는 교통사고차량에 대한 수치영상을 획득하기 위해 <Figure 3.1>과 같은 흐름도로 연구를 수행하였다.



<Figure 3.1> The Flow Chart of Digital Image Acquisition

#### 3.1 촬영계획

본 연구에서는 교통사고차량의 변형해석을 위해, 먼저 추돌사고로 인해 변형이 발생한 자동차를 촬영 대상으로 선정하였으며 촬영을 위한 카메라 결정과 차량에 부착할 타겟의 종류 및 분포 형상을 계획하였다. 또한 촬영은 차량바디의 전체적인 3차원 수치모형 재현을 위한 촬영과 국부적으로 변형이 발생한 부위의 정밀촬영으로 세분화하였다.

일반적으로 사고 전후의 차량변형을 해석하기 위해선 같은 모델의 변형이 발생하지 않은 차량도 촬영해야 하나, 본 연구에서는 사고차량의 변형이 발생한 부위, 그리고 대칭위치에 있는 변형이 발생되지 않은 부위를 촬영하는 것으로 계획하였다.

수치영상의 획득을 위한 장비로는 Rollei사에서 제조한 d7 metric<sup>5</sup> 카메라를 사용하였으며, 카메라의 형상 및 제원은 <Figure 3.2>와 <Table 3.1>과 같다.

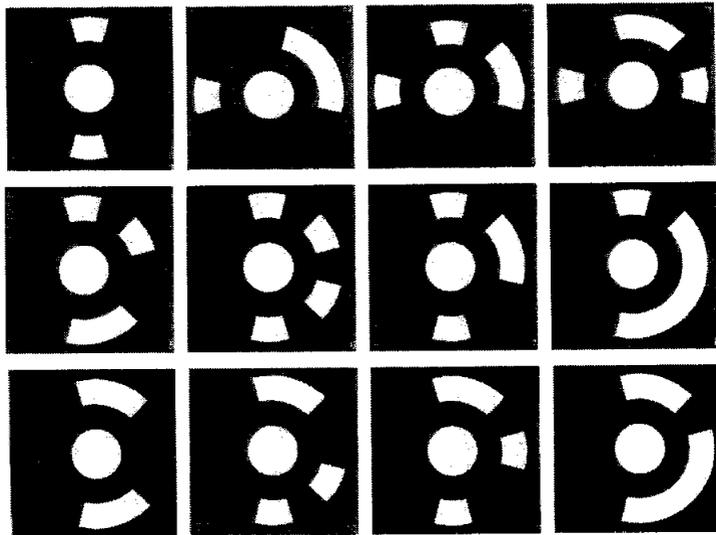


<Figure 3.2> Rollei d7 metric<sup>5</sup> Camera

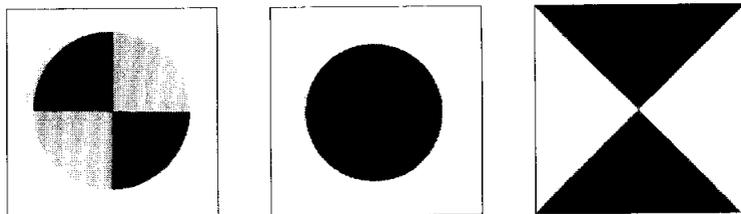
<Table 3.1> Specifications of Rollei d7 metric<sup>5</sup> Camera

Classification	Rollei d7 metric <sup>5</sup>
Recording mode	CCD recode
Shutter	1/8,000 sec
Focal Length	7mm
Dimensions	151×102×106 mm
Weight	650g (without batteries)
Pixel in X	2,552
Pixel in Y	1,920
Sensor in X	8.932
Sensor in Y	6.720

차량바다의 전체적인 3차원 수치모형 재현을 위한 촬영에서는 바코드로 인해 고유번호를 인식하는 코드타겟과 흑백의 명암과 원 중심을 자동으로 인식하는 직경 13mm와 직경 65mm의 원형타겟, 그리고 운용자의 표정작업을 원활히 하기 위해 자체제작한 일반타겟을 차량 전체에 분포시키는 것으로 계획하였으며, 국부적으로 변형이 발생한 부위의 정밀촬영에서는 좀더 조밀한 분포를 위해 직경 13mm의 원형타겟만을 부착하는 것으로 계획하였다. 촬영에 사용된 코드타겟, 원형타겟 및 일반타겟은 <Figure 3.3>과 <Figure 3.4>에 보여지는 것과 같다.



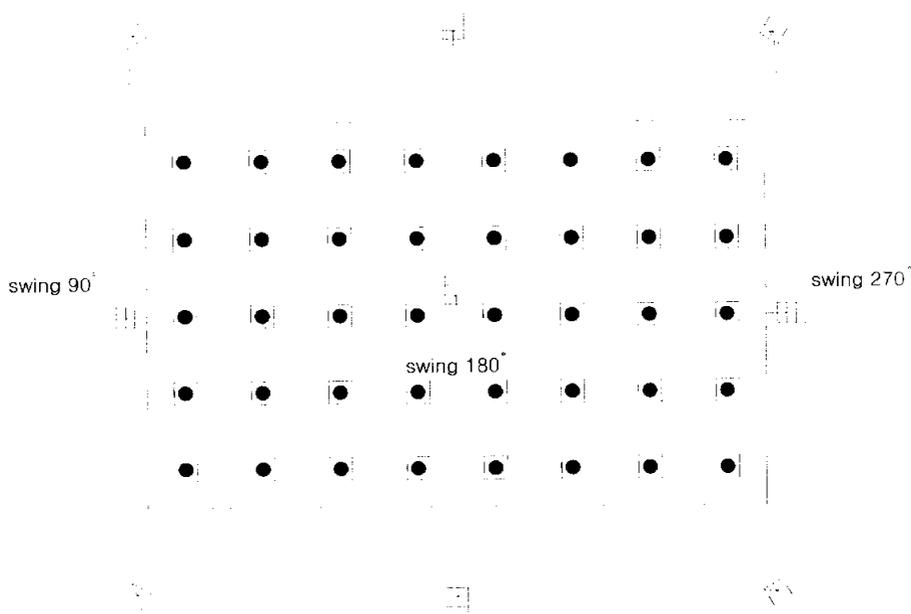
<Figure 3.3> The Type of Coded Target



<Figure 3.4> The Type of Natural and Round Target

## 3.2 카메라 Calibration

본 연구에서는 촬영에 사용될 Rollei d7 metric<sup>5</sup> 카메라의 렌즈를 검정하기 위한 작업을 선행하였다. <Figure 3.5>와 같이 약 8m×5m 되는 벽면에 40개의 원형타겟을 부착하고, 중복촬영 및 Swing값을 변화시키면서 12장의 사진을 획득하였다.



<Figure 3.5> Test Field for Correction of Radial Distortion

방사방향 왜곡 수차와 편심방향 왜곡 수차를 보정해야 하지만, 편심방향 왜곡 수차는 극히 미세하여 특수한 경우를 제외하고는 유사하므로, 본 연구에서는 실험을 되풀이하여 최소제곱법에 의해 구해진 1차 왜곡상수와 2차 왜곡상수를 적용하여 방사방향 왜곡 수차만을 보정해 주었다.

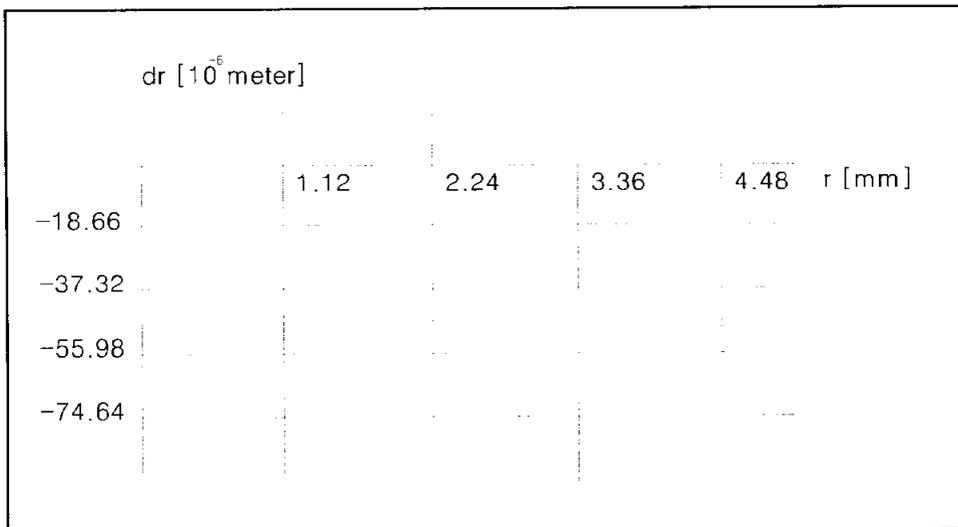
<Table 3.2>는 카메라 Calibration에 의해 보정된 자료를 나타낸 것이

며, 카메라 검정결과 시스템의 왜곡 매개변수들을 도식적으로 나타내면 <Figure 3.6>과 같다.

<Table 3.2> Data of Camera Calibration

Calibration [Rollei d7 metric <sup>3</sup> Camera]		
Interior Orientation	$cK^1$	-7.422 mm
	$xH^2$	0.6875 mm
	$yH^2$	0.0998 mm
	$A1^3$	-2.1884e-003
	$A2^3$	3.5727e-005
	$R0^4$	3.00 mm

1. Calibrated Focal Length
2. Coordinates of Principal Image Point
3. Parameters of Radial-Symmetric Distortion
4. Radius from Principal Point when Radial Distortion is zero

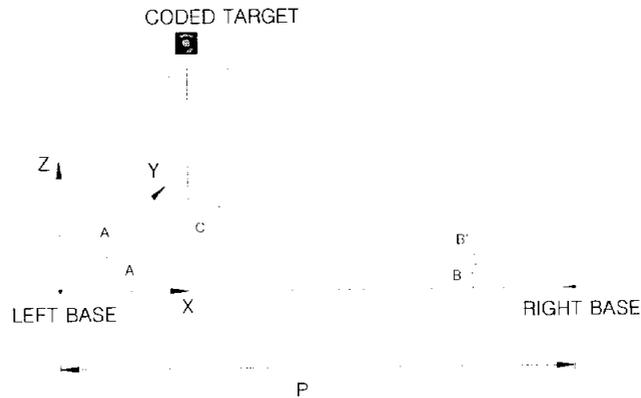


<Figure 3.6> Profiles for Calibrated Radial Distortion

### 3.3 기준점 측량

본 연구에서는 수치영상처리 시스템의 광속조정법에서 얻어진 지상좌표 값의 정확도를 분석하기 위해 대상차량에 대해서 삼각수준측량방법으로 대상점에 대한 측량을 실시하여 기준점 측량 성과를 얻었다. 본 연구에서 사용된 대상점은 총 5점으로 각 대상점에 대하여 3차원 좌표를 최소 0.5" 독 Total Station으로 정밀하게 관측하였다.

먼저, 좌·우측 기준점을 설치하고 Total Station을 이용하여 두 점간의 거리를 관측하여 이 거리를 기선으로 결정하였다. 그리고 <Figure 3.7>과 같이 좌·우측 기준점에 각각 Total Station을 설치하고 기준점과 대상점 간의 수평각과 고저각을 관측하였다.



<Figure 3.7> Geometry of Control Survey

기준점 측량에 사용된 Total Station은 TOPCON 사에서 제조한 장비를 사용하였으며, 모델명은 GTS-701이고 장비의 제원은 <Table 3.3>과 같다.

<Table 3.3> Specifications of GTS-701

Model		GTS-701	
Telescope	Objective Lens	45mm (EDM : 50mm)	
	Magnification	30 x	
	Resolving Power	2.5"	
	Minimum Focus	1.3m	
Distance Measurement	Measurement Range	1 Prism	2,400m
		3 Prism	3,100m
		9 Prism	3,700m
	Accuracy	±(2mm + 2ppm) m.s.e	
Angle Measurement	Angle Display	0.5" / 1"	
	Accuracy	1"	

또한, 좌측 기준점을 원점으로 하여 식(3.1)에 의해 대상점의 3차원 좌표를 계산하였으며, 관측된 수평각과 고저각은 <Table 3.4>와 같고, 계산된 3차원 좌표값은 <Table 3.5>와 같다.

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{P \sin B \cos A}{\sin C} \\
 Y &= \frac{P \sin B \sin A}{\sin C} \\
 Z &= \frac{P \sin B \tan A'}{\sin C}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

여기에서,

- $P$  : 기선길이
- $A, B, A', B'$  : 관측 각
- $C$  :  $180^\circ - (A+B)$

<Table 3.4> The Result of Control Survey [Angle]

Control Point	Left		Right	
	Horizontal Angle	Vertical Angle	Horizontal Angle	Vertical Angle
3	76° 07' 53.5"	11° 40' 56.0"	53° 01' 05.0"	14° 18' 06.5"
7	73° 32' 41.0"	8° 31' 55.5"	54° 50' 29.5"	11° 15' 08.5"
8	69° 28' 15.5"	8° 55' 26.5"	58° 10' 51.5"	10° 48' 16.0"
13	52° 35' 24.0"	17° 16' 21.0"	80° 19' 34.0"	16° 24' 08.0"
17	62° 36' 03.0"	20° 42' 07.0"	68° 15' 07.0"	21° 09' 43.0"

<Table 3.5> The Result of Control Survey [3D Coordinate]

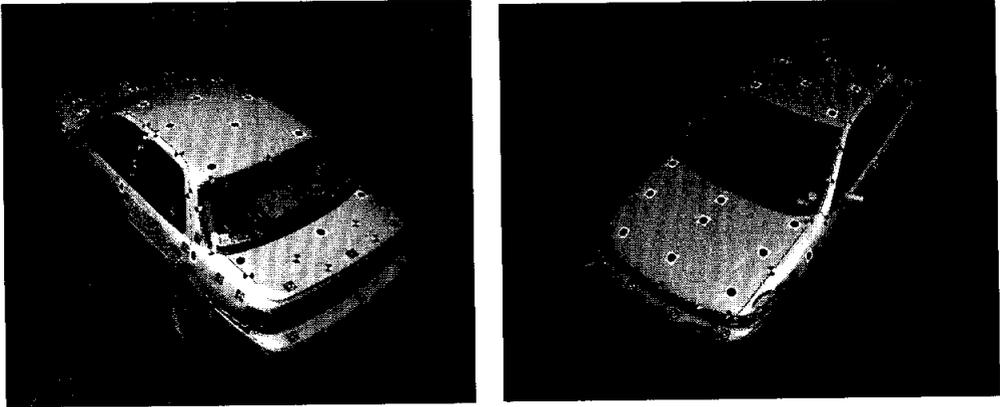
Control Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
3	0.808114002	3.273159760	0.859483009
7	0.967016548	3.273975190	0.679193407
8	1.231837702	3.289617929	0.670364376
13	2.676474810	3.499417751	1.296828633
17	1.849547014	3.568264925	1.555844242

### 3.4 교통사고차량 촬영

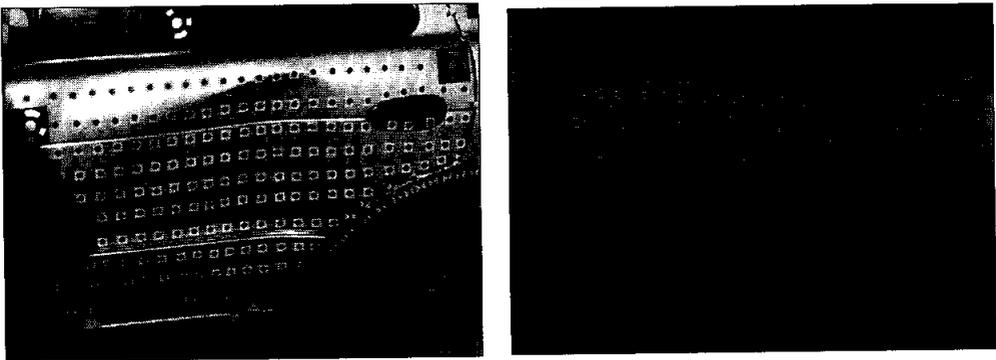
대상물 촬영에서는 차량바디의 전체적인 3차원 수치모형 재현을 위한 촬영과 국부적으로 변형이 발생한 부위의 정밀촬영을 수행하였다.

먼저, <Figure 3.8>과 같이 코드타겟 66개, 직경 65mm 원형타겟 24개, 일반타겟 200여개가 차량 전 부위에 분포할 수 있도록 하여 촬영하였으며,

국부적으로 변형이 발생한 부위에는 <Figure 3.9>와 같이 조밀한 분포로 직경 13mm 원형타겟을 부착하여 촬영하였다. 또한, 교통사고차량의 변형 해석을 위해 <Figure 3.9>와 같이 국부적으로 변형이 발생한 부위와 대칭 위치에 있는 부위도 정밀촬영 하였다.



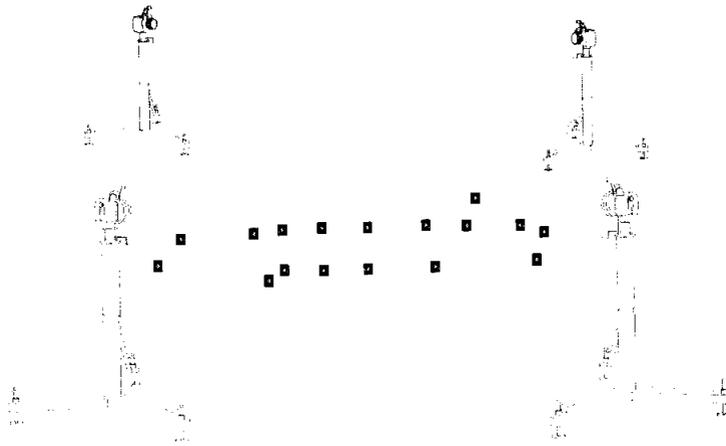
<Figure 3.8> Acquired Images [a]



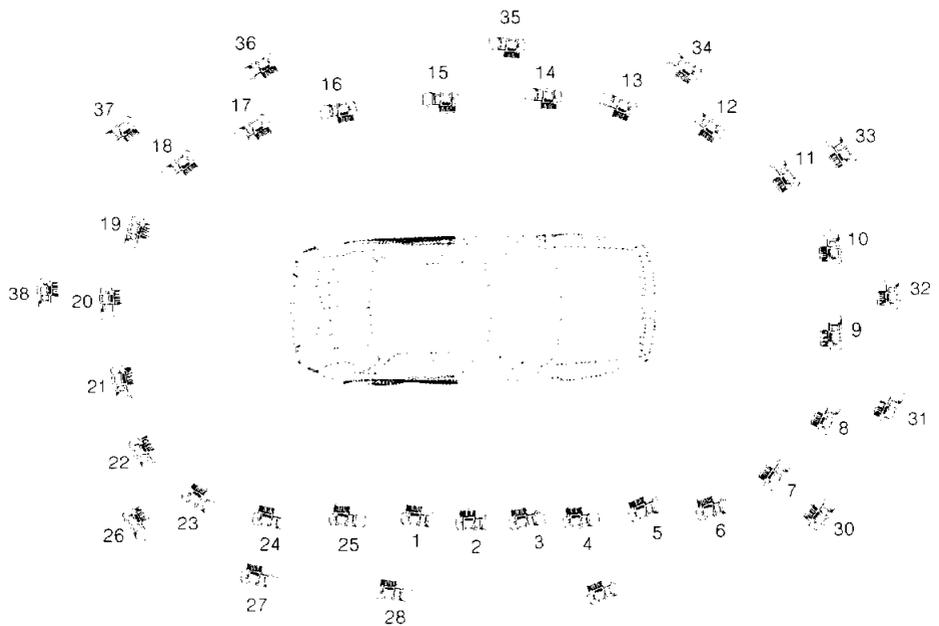
<Figure 3.9> Acquired Images [b]

연속된 수치영상의 촬영방향이 3차원 공간에서 대략 60~90°의 각도가 이루어지고, 각 수치영상에 대상점이 최소 7개 이상 골고루 분포할 수 있도록 대상물을 촬영하여 총 38매의 수치영상을 획득하였으며, 촬영 당시의

시스템은 <Figure 3.10>에서 나타낸 것과 같고, <Figure 3.11>은 카메라 노출위치를 평면도로 나타낸 것이다.



<Figure 3.10> A Test System for Digital Image Acquisition



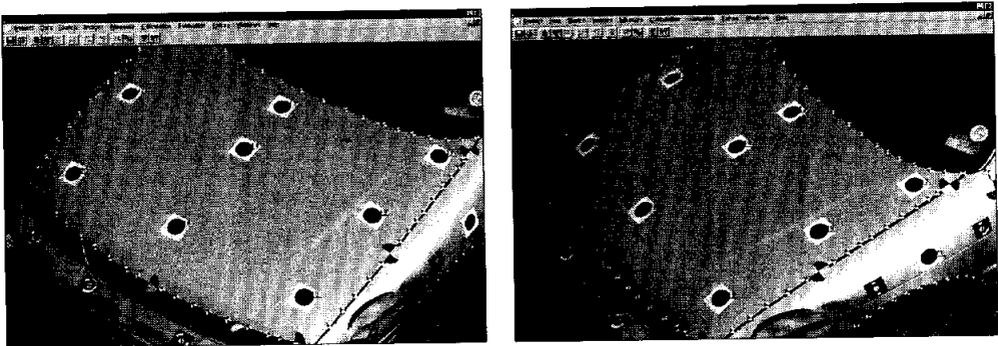
<Figure 3.11> Positions of Camera Exposure

## 4. 자료처리 및 결과분석

### 4.1 수치영상자료 처리

본 연구에서는 획득된 대상물의 수치영상에서 각 표정점의 3차원 좌표를 결정하기 위해 RolleiMetric CDW(Close-Range Digital Workstation)를 이용하였다.

먼저, 카메라 Calibration에 의해 결정된 내부표정요소와 촬영시 대략적으로 메모된 카메라 노출위치를 입력하고 획득된 38개의 영상에 있어서 표정점 472개의 상좌표를 측정하였으며, <Figure 4.1>은 연속된 두 영상에 대한 상좌표 측정모습을 나타낸 것이다.



<Figure 4.1> Image Point Measurement

이렇게 연속된 영상에서 중복 측정된 표정점은 공선조건을 기초로 한 다중영상표정에서 후방교회법과 전방교회법을 동시에 수행하고, 광속조정법에 의해 대상점의 3차원 좌표 및 외부표정 매개변수를 결정하게 되며, 최종적으로 결정된 각 영상에 대한 외부표정요소와 대상점의 3차원 좌표는 <Table 4.1>과 <Table 4.2>에 나타낸 것과 같다.

<Table 4.1> The Element of Exterior Orientation [a]

Image No.	X(m)	Y(m)	Z(m)	Axis [gon]	Tilt [gon]	Swing [gon]
1	1.159	1.492	1.699	-24.483	-21.686	6.902
2	1.793	1.366	1.732	-7.185	-23.827	8.194
3	2.371	1.383	1.801	1.884	-24.124	8.562
4	2.887	1.537	1.859	21.202	-26.336	7.704
5	3.427	1.668	1.924	22.509	-26.621	9.189
6	4.055	2.035	2.004	38.934	-28.166	10.378
7	4.584	2.521	2.067	52.180	-30.61	9.149
8	5.026	3.522	2.168	77.644	-27.697	8.719
9	5.184	4.395	2.214	101.222	-33.011	5.955
10	5.011	5.598	2.279	133.142	-26.764	2.635
11	3.909	6.714	2.200	164.235	-30.283	-1.459
12	2.918	6.833	2.136	174.603	-27.273	-2.663
13	2.190	6.946	2.060	194.804	-27.716	-2.310
14	1.494	6.812	1.995	215.701	-25.825	-6.309
15	0.773	6.526	1.907	216.882	-28.094	-7.655
16	0.107	6.472	1.839	237.071	-24.280	-9.043
17	-0.604	6.317	1.752	248.497	-24.428	-9.744
18	-1.428	6.070	1.650	251.630	-21.541	-6.450
19	-1.877	5.501	1.601	272.012	-19.748	-5.968

<Table 4.1> The Element of Exterior Orientation [b]

Camera No.	X(m)	Y(m)	Z(m)	Axis [gon]	Tilt [gon]	Swing [gon]
20	-2.317	4.736	1.498	286.430	-18.352	-5.044
21	-2.473	4.067	1.439	-94.776	-18.919	-2.030
22	-2.181	2.944	1.420	-71.492	-16.375	-0.167
23	-1.799	2.237	1.404	-61.825	-20.904	0.552
24	-1.077	1.527	1.480	-35.188	-18.473	5.075
25	-0.097	1.244	1.578	-31.625	-15.958	5.844
26	-2.378	2.117	3.448	-63.917	-42.286	7.457
27	-1.048	0.868	3.526	-51.920	-42.264	10.482
28	1.396	0.288	3.753	-12.523	-44.865	15.193
29	3.715	0.908	3.986	34.424	-49.177	14.946
30	4.983	2.179	4.171	48.675	-49.155	15.820
31	5.529	4.368	4.342	84.719	-53.596	12.129
32	4.745	6.358	4.353	137.558	-54.18	5.861
33	3.526	7.113	4.288	154.992	-54.638	3.460
34	1.197	7.619	4.097	197.395	-52.578	0.051
35	-1.107	6.963	3.823	243.687	-46.833	-3.788
36	-2.240	5.740	3.637	259.584	-44.891	-0.691
37	-3.236	3.728	3.427	-93.684	-41.326	1.956
38	-2.489	2.054	3.423	-63.104	-42.089	8.563

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [a]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
2	0.504	3.246	0.829	27	2.913	4.598	1.425
3	0.808	3.273	0.859	28	3.465	3.769	1.420
4	1.047	3.272	0.911	29	3.478	4.315	1.448
5	1.356	3.291	0.956	30	3.404	4.836	1.425
6	0.645	3.241	0.642	31	3.628	3.736	1.010
7	0.974	3.257	0.677	32	3.632	4.388	1.021
8	1.232	3.290	0.670	33	3.536	4.924	1.015
9	1.628	3.297	0.748	34	3.190	5.061	1.270
10	1.754	3.317	1.016	35	2.628	5.078	1.207
11	2.635	3.411	1.192	36	2.794	5.123	1.038
12	2.761	3.388	1.078	37	2.489	5.073	1.194
13	2.676	3.499	1.297	38	1.628	5.034	1.070
14	3.055	3.470	1.239	39	1.405	5.024	1.034
15	3.263	3.509	1.255	40	1.210	5.013	1.004
16	3.177	3.449	1.065	41	1.039	5.004	0.976
17	1.850	3.568	1.556	42	0.877	4.997	0.944
18	2.038	3.433	1.218	43	0.705	4.986	0.913
19	2.327	3.540	1.465	44	0.525	4.972	0.885
20	0.912	3.375	1.148	45	1.477	5.060	0.781
21	1.355	3.495	1.406	46	1.315	5.049	0.760
22	1.546	3.399	1.160	47	1.120	5.036	0.742
23	2.588	3.793	1.622	48	0.909	5.021	0.705
24	2.527	4.688	1.624	49	0.739	5.008	0.690
25	2.764	4.254	1.557	50	0.544	4.994	0.668
26	2.951	3.858	1.420	51	0.336	4.950	0.872

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [b]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
52	0.158	4.931	0.842	112	-0.117	4.642	0.893
53	-0.025	4.905	0.809	113	0.159	4.082	0.98
54	-0.224	4.871	0.766	114	-0.085	4.063	0.915
55	-0.404	4.828	0.715	115	1.179	4.54	1.539
56	0.381	4.981	0.650	116	-0.471	4.05	0.778
57	-0.707	4.576	0.523	117	0.340	3.458	0.976
58	-0.733	4.245	0.510	118	-0.025	3.500	0.887
59	-0.704	3.804	0.502	119	-0.414	3.497	0.751
60	-0.597	3.392	0.508	120	-0.508	4.555	0.754
61	2.717	3.218	0.654	122	1.682	4.563	1.626
62	2.828	3.224	0.665	123	1.467	4.161	1.605
63	2.728	3.225	0.551	124	2.036	4.209	1.673
64	2.837	3.230	0.563	701	1.742	3.336	1.066
65	2.741	3.233	0.425	702	1.795	3.339	1.074
66	2.851	3.239	0.437	703	1.836	3.341	1.079
101	2.751	3.427	1.205	704	1.873	3.344	1.086
102	3.056	3.640	1.343	705	1.914	3.346	1.092
103	2.388	3.789	1.660	706	1.951	3.349	1.098
104	1.256	3.743	1.541	707	1.990	3.352	1.106
105	1.745	3.765	1.624	708	2.027	3.355	1.111
106	3.156	4.291	1.390	709	2.063	3.357	1.117
107	1.632	3.325	1.037	710	2.101	3.36	1.124
109	2.969	4.884	1.352	711	2.140	3.362	1.129
110	2.368	4.623	1.669	712	2.177	3.365	1.135
111	0.259	4.732	0.986	713	2.214	3.368	1.141

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [c]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
714	2.250	3.371	1.146	739	2.412	3.370	1.107
715	2.286	3.375	1.153	740	2.452	3.372	1.112
716	2.326	3.377	1.160	741	2.491	3.377	1.126
717	2.368	3.382	1.164	742	2.528	3.382	1.134
718	2.405	3.386	1.168	743	2.568	3.386	1.142
719	2.442	3.390	1.172	744	2.618	3.390	1.144
720	2.481	3.394	1.177	745	2.665	3.395	1.148
721	2.519	3.398	1.180	746	1.725	3.304	0.950
722	2.561	3.402	1.184	747	1.771	3.308	0.957
723	1.804	3.321	1.021	748	1.813	3.313	0.963
724	1.846	3.324	1.026	749	1.855	3.317	0.972
725	1.885	3.327	1.031	750	1.893	3.321	0.977
726	1.924	3.330	1.037	751	1.933	3.326	0.982
727	1.962	3.334	1.045	752	1.971	3.331	0.987
728	2.002	3.337	1.048	753	2.010	3.337	0.992
729	2.038	3.341	1.054	754	2.046	3.343	0.998
730	2.076	3.347	1.057	755	2.085	3.349	1.003
731	2.112	3.353	1.062	756	2.121	3.355	1.008
732	2.150	3.360	1.070	757	2.159	3.362	1.013
733	2.189	3.367	1.075	758	2.200	3.370	1.020
734	2.225	3.373	1.079	759	2.235	3.375	1.025
735	2.261	3.376	1.083	760	2.269	3.377	1.030
736	2.298	3.376	1.088	761	2.306	3.376	1.036
737	2.336	3.373	1.095	762	2.343	3.373	1.043
738	2.375	3.371	1.101	763	2.382	3.370	1.049

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [d]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
764	2.418	3.367	1.052	789	2.430	3.367	1.000
765	2.456	3.366	1.056	790	2.469	3.365	1.006
766	2.512	3.367	1.065	791	2.516	3.365	1.014
767	2.550	3.369	1.066	792	2.559	3.367	1.018
768	2.597	3.372	1.076	793	2.606	3.37	1.024
769	2.642	3.378	1.085	794	2.641	3.372	1.028
770	2.677	3.381	1.090	795	2.677	3.374	1.034
771	1.733	3.300	0.897	796	1.746	3.302	0.849
772	1.779	3.306	0.908	797	1.784	3.307	0.856
773	1.820	3.311	0.913	798	1.826	3.312	0.860
774	1.861	3.316	0.917	799	1.867	3.317	0.864
775	1.902	3.321	0.923	800	1.908	3.323	0.871
776	1.942	3.327	0.928	801	1.948	3.328	0.878
777	1.980	3.333	0.934	802	1.989	3.335	0.882
778	2.017	3.338	0.940	803	2.026	3.341	0.884
779	2.054	3.344	0.945	804	2.063	3.346	0.892
780	2.092	3.351	0.951	805	2.103	3.353	0.896
781	2.129	3.358	0.956	806	2.138	3.359	0.901
782	2.165	3.364	0.962	807	2.173	3.366	0.906
783	2.206	3.371	0.967	808	2.211	3.372	0.912
784	2.244	3.376	0.971	809	2.252	3.378	0.916
785	2.280	3.378	0.978	810	2.292	3.38	0.920
786	2.317	3.378	0.982	811	2.329	3.379	0.924
787	2.356	3.375	0.988	812	2.366	3.375	0.933
788	2.392	3.370	0.992	813	2.404	3.370	0.940

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [e]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
814	2.442	3.366	0.946	839	2.490	3.362	0.909
815	2.481	3.363	0.954	840	1.741	3.308	0.735
816	2.526	3.363	0.963	841	1.780	3.313	0.741
817	2.563	3.364	0.971	842	1.816	3.317	0.744
818	2.603	3.366	0.980	843	1.852	3.320	0.750
819	2.639	3.369	0.994	844	1.882	3.323	0.753
820	1.758	3.306	0.793	845	1.921	3.328	0.758
821	1.790	3.310	0.800	846	1.963	3.333	0.764
822	1.834	3.315	0.808	847	2.003	3.339	0.770
823	1.873	3.319	0.814	848	2.042	3.345	0.776
824	1.914	3.325	0.820	849	2.083	3.351	0.779
825	1.955	3.331	0.824	850	2.120	3.358	0.785
826	1.996	3.337	0.831	851	2.157	3.364	0.789
827	2.034	3.343	0.836	852	2.193	3.369	0.793
828	2.073	3.349	0.840	853	2.231	3.375	0.799
829	2.112	3.356	0.846	854	2.270	3.380	0.802
830	2.146	3.361	0.849	855	2.313	3.383	0.807
831	2.180	3.367	0.857	856	2.352	3.382	0.812
832	2.219	3.373	0.863	857	2.391	3.376	0.818
833	2.261	3.379	0.866	858	2.427	3.369	0.825
834	2.301	3.381	0.872	859	1.752	3.318	0.673
835	2.336	3.380	0.878	860	1.792	3.321	0.678
836	2.374	3.375	0.885	861	1.829	3.324	0.684
837	2.413	3.370	0.894	862	1.867	3.327	0.689
838	2.449	3.365	0.901	863	1.901	3.331	0.694

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [f]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
864	1.937	3.334	0.699	889	2.219	3.372	0.676
865	1.978	3.339	0.703	890	2.255	3.377	0.681
866	2.016	3.343	0.708	891	2.293	3.380	0.685
867	2.056	3.348	0.713	892	2.334	3.382	0.694
868	2.098	3.353	0.718	893	2.382	3.387	0.701
869	2.135	3.358	0.724	894	1.778	3.380	0.524
870	2.173	3.364	0.726	895	1.818	3.381	0.532
871	2.208	3.370	0.732	896	1.853	3.384	0.534
872	2.245	3.377	0.735	897	1.885	3.385	0.540
873	2.283	3.381	0.740	898	1.920	3.388	0.545
874	2.325	3.383	0.746	899	1.956	3.389	0.553
875	2.364	3.381	0.751	900	1.995	3.389	0.563
876	2.399	3.378	0.755	901	2.035	3.389	0.572
877	1.763	3.340	0.606	902	2.079	3.395	0.573
878	1.802	3.341	0.615	903	2.122	3.397	0.579
879	1.838	3.342	0.624	904	2.159	3.400	0.584
880	1.876	3.344	0.631	905	2.198	3.403	0.590
881	1.914	3.347	0.637	906	2.234	3.409	0.589
882	1.947	3.349	0.643	907	2.273	3.410	0.597
883	1.988	3.353	0.644	908	2.309	3.413	0.603
884	2.026	3.355	0.651	909	2.352	3.422	0.601
885	2.068	3.358	0.657	1001	2.432	5.059	1.207
886	2.112	3.362	0.662	1002	2.390	5.058	1.202
887	2.146	3.365	0.667	1003	2.349	5.055	1.198
888	2.184	3.368	0.673	1004	2.310	5.053	1.193

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [g]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
1005	2.271	5.053	1.185	1030	2.032	5.067	1.099
1006	2.229	5.051	1.180	1031	1.991	5.066	1.093
1007	2.190	5.050	1.173	1032	1.955	5.064	1.087
1008	2.149	5.048	1.167	1033	1.912	5.062	1.082
1009	2.110	5.047	1.161	1034	1.871	5.059	1.078
1010	2.069	5.045	1.154	1035	1.830	5.056	1.072
1011	2.030	5.043	1.149	1036	1.787	5.054	1.065
1012	1.988	5.042	1.143	1037	1.747	5.054	1.054
1013	1.948	5.040	1.138	1038	1.704	5.051	1.048
1014	1.908	5.038	1.130	1039	2.484	5.111	1.087
1015	1.866	5.037	1.124	1040	2.442	5.110	1.073
1016	1.827	5.035	1.117	1041	2.398	5.108	1.067
1017	1.784	5.033	1.111	1042	2.361	5.106	1.070
1018	1.741	5.031	1.104	1043	2.323	5.102	1.062
1019	1.699	5.028	1.098	1044	2.284	5.100	1.058
1020	2.438	5.085	1.154	1045	2.241	5.098	1.051
1021	2.394	5.083	1.148	1046	2.203	5.096	1.047
1022	2.354	5.083	1.140	1047	2.162	5.094	1.040
1023	2.316	5.081	1.137	1048	2.120	5.092	1.033
1024	2.276	5.078	1.133	1049	2.078	5.089	1.029
1025	2.233	5.076	1.129	1050	2.037	5.087	1.022
1026	2.196	5.076	1.120	1051	1.998	5.085	1.017
1027	2.155	5.074	1.114	1052	1.962	5.083	1.011
1028	2.114	5.072	1.109	1053	1.918	5.081	1.006
1029	2.073	5.069	1.105	1054	1.878	5.078	1.002

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [h]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
1055	1.839	5.076	0.998	1080	1.844	5.082	0.937
1056	1.792	5.074	0.988	1081	1.796	5.080	0.930
1057	1.752	5.071	0.982	1082	1.755	5.077	0.927
1058	1.709	5.069	0.976	1083	1.712	5.075	0.922
1059	1.672	5.067	0.969	1084	1.678	5.073	0.918
1060	1.631	5.065	0.963	1085	1.637	5.070	0.914
1061	1.590	5.062	0.961	1086	1.595	5.068	0.904
1062	2.554	5.119	1.034	1087	2.446	5.117	0.960
1063	2.520	5.118	1.027	1088	2.413	5.115	0.954
1064	2.484	5.116	1.022	1089	2.376	5.112	0.949
1065	2.443	5.115	1.017	1090	2.336	5.110	0.940
1066	2.400	5.113	1.010	1091	2.295	5.108	0.935
1067	2.369	5.111	1.007	1092	2.258	5.106	0.933
1068	2.329	5.109	0.999	1093	2.218	5.104	0.928
1069	2.287	5.107	0.994	1094	2.174	5.102	0.923
1070	2.248	5.105	0.989	1095	2.131	5.099	0.918
1071	2.209	5.103	0.985	1096	2.085	5.097	0.912
1072	2.169	5.101	0.978	1097	2.046	5.095	0.906
1073	2.125	5.098	0.972	1098	2.006	5.092	0.901
1074	2.079	5.096	0.965	1099	1.972	5.091	0.899
1075	2.040	5.094	0.959	1100	1.926	5.088	0.892
1076	2.002	5.092	0.955	1101	1.886	5.086	0.885
1077	1.968	5.090	0.950	1102	1.849	5.084	0.881
1078	1.923	5.087	0.945	1103	1.800	5.081	0.875
1079	1.884	5.085	0.944	1104	1.761	5.078	0.868

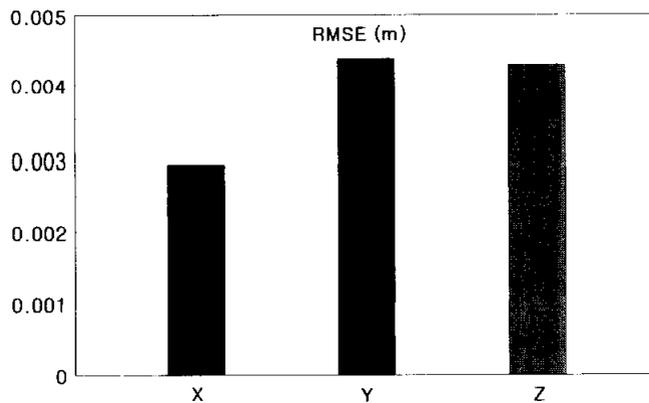
<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [i]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
1105	1.718	5.076	0.860	1130	2.193	5.084	0.746
1106	1.682	5.074	0.852	1131	2.151	5.082	0.741
1107	1.642	5.071	0.847	1132	2.105	5.080	0.736
1108	1.602	5.068	0.839	1133	2.065	5.077	0.728
1109	2.338	5.106	0.863	1134	2.023	5.076	0.725
1110	2.300	5.103	0.862	1135	1.985	5.074	0.722
1111	2.259	5.100	0.861	1136	1.940	5.072	0.718
1112	2.220	5.097	0.856	1137	1.896	5.070	0.713
1113	2.178	5.095	0.853	1138	1.859	5.068	0.706
1114	2.136	5.094	0.849	1139	1.813	5.066	0.703
1115	2.091	5.091	0.842	1140	1.769	5.063	0.696
1116	2.052	5.089	0.836	1141	1.728	5.061	0.690
1117	2.014	5.087	0.827	1142	1.691	5.060	0.686
1118	1.978	5.086	0.827	1143	1.647	5.057	0.681
1119	1.928	5.083	0.818	1144	2.245	5.061	0.658
1120	1.891	5.080	0.813	1145	2.200	5.059	0.654
1121	1.854	5.079	0.812	1146	2.157	5.059	0.655
1122	1.807	5.076	0.803	1147	2.112	5.060	0.655
1123	1.766	5.073	0.799	1148	2.074	5.058	0.650
1124	1.724	5.071	0.794	1149	2.032	5.055	0.645
1125	1.687	5.068	0.786	1150	1.989	5.054	0.641
1126	1.642	5.065	0.776	1151	1.942	5.052	0.637
1127	1.610	5.064	0.772	1152	1.901	5.050	0.634
1128	2.271	5.088	0.754	1153	1.865	5.049	0.633
1129	2.236	5.087	0.752	1154	1.816	5.047	0.629

<Table 4.2> Adjusted Object Coordinates [j]

No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
1155	1.771	5.046	0.628	1166	1.991	5.012	0.550
1156	1.732	5.043	0.624	1167	1.946	5.009	0.544
1157	1.691	5.040	0.616	1168	1.911	5.005	0.538
1158	1.651	5.037	0.611	1169	1.882	5.014	0.556
1159	2.243	5.029	0.582	1170	1.855	5.014	0.556
1160	2.209	5.036	0.598	1171	1.824	5.012	0.551
1161	2.168	5.033	0.592	1172	1.804	4.999	0.526
1162	2.134	5.031	0.588	1173	1.776	4.998	0.525
1163	2.114	5.017	0.558	1174	1.742	4.995	0.519
1164	2.072	5.014	0.553	1175	1.705	4.994	0.516
1165	2.036	5.016	0.557	1176	1.674	4.994	0.515

결정된 대상물 3차원 좌표의 RMSE는 <Figure 4.2>와 같이 X방향으로 0.00293m, Y방향으로 0.00438 m, Z방향으로 0.00429m 로 나타났다.



<Figure 4.2> RMSE of Object Coordinates [X, Y, Z]

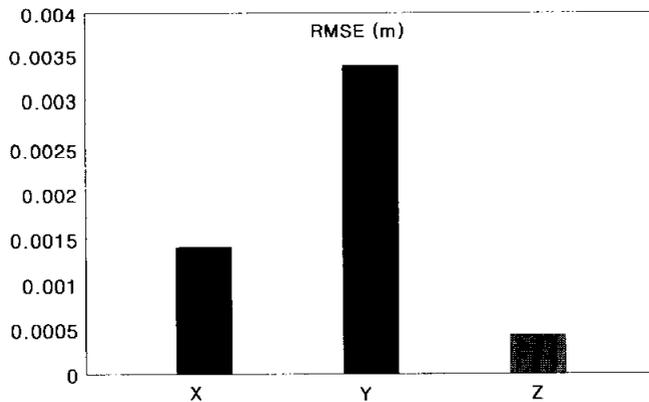
## 4.2 결과분석

본 연구에서는 다중영상표정과 광속조정법에 의해 결정된 대상물 3차원 좌표의 정확도를 분석하기 위해 삼각수준측량에 의한 기준점 좌표성공과의 차이로 비교하였으며, 그 결과는 <Table 4.3>와 같다.

<Table 4.3> The Residuals of Control Points

Control Point	$\nu_x$ (m)	$\nu_y$ (m)	$\nu_z$ (m)
3	-0.000110	-0.000160	-0.000480
7	0.006983	-0.016980	-0.002190
8	0.000162	0.000382	-0.000360
13	-0.000470	-0.000420	0.000171
17	0.000453	-0.000260	0.000156

또한, 기준점의 잔차에 대한 RMSE는 X방향으로 0.001403m, Y방향으로 0.003376m, Z방향으로 0.000433m로 나타났으며, 이를 도식적으로 나타내면 <Figure 4.3>과 같다.



<Figure 4.3> RMSE of Control Points [X, Y, Z]

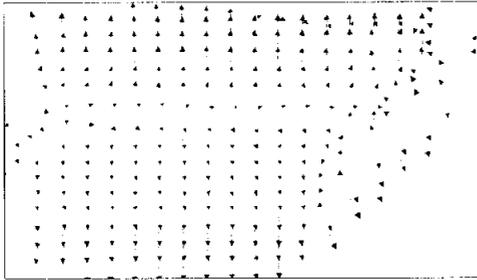
### 4.3 변형해석

본 연구에서는 바다에 변형이 발생한 차량을 대상으로 획득된 수치영상을 처리하여 <Figure 4.4>와 같이 3차원 수치모형으로 재현하고, 정밀 촬영된 변형부위를 수치모형으로부터의 3차원 수치자료를 이용하여 변형부위의 변형을 분석하였다.

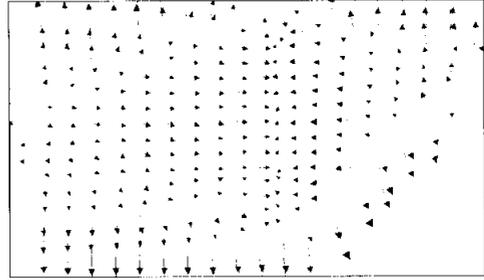


<Figure 4.4> 3D Digital Model

또한, 변형분석을 위해 변형이 발생되지 않은 부위와 변형이 발생된 부위를 규칙적인 간격의 Grid(Planar Area:0.434m<sup>2</sup>, 100×58)로 나타내고, 선형보간법 중 Triangulation방법을 이용하여 변형부위를 <Figure 4.5>, <Figure 4.6>, <Figure 4.7>과 같이 변형 전과 변형 후로 구분하여 Vector Map, 음영기복도, DSM (Digital Surface Model)으로 변환하여 변형의 양상을 분석하였다.

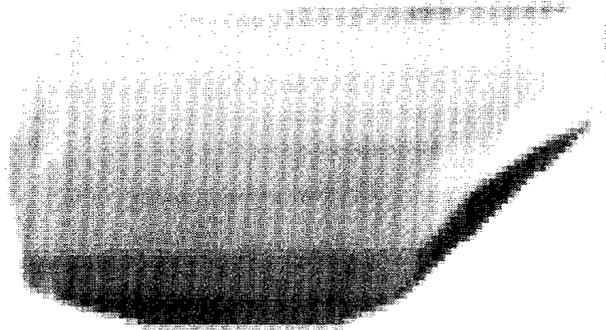


(a) a Vector Map before Deformation

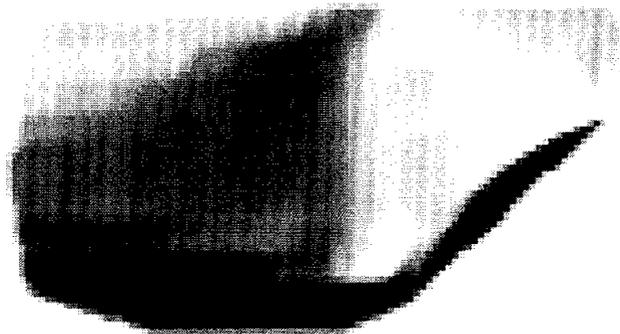


(b) a Vector Map after Deformation

<Figure 4.5> Vector Map

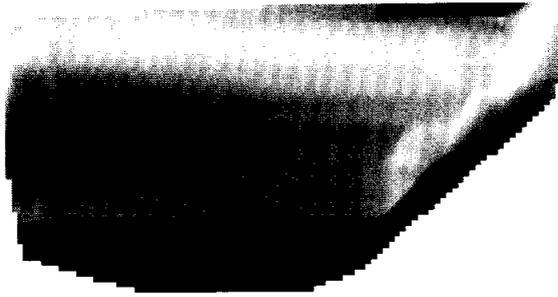


(a) a Shaded Relief Map before Deformation

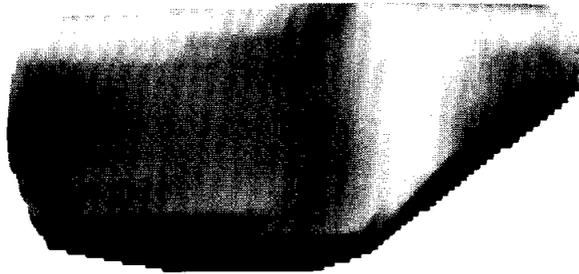


(b) a Shaded Relief Map before Deformation

<Figure 4.6> Digital Elevation Model



(a) a 3D Surface before Deformation



(b) a 3D Surface before Deformation

<Figure 4.7> Digital Surface Model

변형 전후의 변형량을 분석하기 위해 임의의 기준면을 설정하고 기준면에서의 체적을 Trapezoidal rule, Simpson's rule, Simpson's 3/8 rule에 의해 계산한 결과는 <Table 4.4>와 같이 나타났다.

<Table 4.4> The Result of Deformation Calculation

Rule	I* (m <sup>3</sup> )	II** (m <sup>3</sup> )	remark (m <sup>3</sup> )
Trapezoidal	0.031344	0.029325	0.002019
Simpson's	0.031379	0.029360	0.002019
Simpson's second	0.031388	0.029374	0.002014

\* volume before deformation

\*\* volume after deformation

## 5. 결 론

수치사진측량을 이용하여 교통사고차량의 변형부위를 정밀 측량하여 사고차량의 3차원 수치모형을 생성하고 변형부위의 변형을 정량적으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 근접수치사진측량을 이용하여 사고차량에 대한 대상점 472개의 3차원 좌표를 취득할 수 있었으며, 삼각수준측량에 의한 성과와 비교해 본 결과 RMSE는 X방향 1.4mm, Y방향 3.3mm, Z방향 0.4mm로 나타났다.
2. 사고차량 변형부위를 Grid (Planar Area:0.434m<sup>2</sup>, 100×58)로 나타내고 Triangulation 보간법을 이용하여 Vector Map, DEM, DSM으로 나타낸 결과, 변형의 양상을 평가할 수 있었다.
3. 변형 부위에 대한 변형 전후의 변형량을 분석하기 위해 임의의 기준면에서의 체적을 Trapezoidal rule, Simpson's rule, Simpson's 3/8 rule로 계산하여 변형량을 정확히 해석할 수 있었다.
4. 다양한 차종과 여러 사고조건에 따른 자료기반 구축 및 갱신, 차량강성, 그리고 차량의 운동 역학적 특성을 고려한 연구가 지속될 경우, 충돌직전의 속도를 결정함과 동시에 교통사고의 재현 및 해석을 보다 과학적이고 효율적으로 수행할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Clive S. Fraser, "Digital camera self-calibration", ISPRS Journal and Photogrammetry and Remoting, Volume 52, pp.149-159, 1997.
2. Clive S. Fraser, "Automated Processes in Digital Photogrammetric Calibration, Orientation, and Triangulation", DIGITAL SIGNAL PROCESSING 8, pp.277-283, 1998.
3. Clive S. Fraser, "Full Automation of Sensor Calibration, Exterior Orientation and Triangulation in Industrial Vision Metrology", International Workshop on Image analysis and Information Fusion, 1995.
4. Clive S. Fraser, K.L.Edmundson, "The Metric Impact of Reduction Optics in Digital Camera", Photogrammetric Record, 1996.
5. Hans-Gerd Mass, "Concepts of real-time photogrammetry", Human Movement Science, Volume 16, Issues 2-3, pp.189-199, 1997.
6. Steven A. Sader and J. Chris Winne, "Digital Image Analysis Hardware/Software Use at U.S Forestry Schools", PE&RS, Vol. 57, No.2. pp.209-211, 1991.
7. A Stefanidis, P.Agouris, A.F.Schenk, "Evaluation of the Performance of a Digital Camera", Technical papers of 1990 ACSM/ASPRS annual Convention, Vol.5, pp.109-118, 1990.
8. Bahadır Ergün, S tk K l r, "3D Modelling of car surface by means of digital photogrammetric methods", Third-Turkish German Joint Geodetic Days, pp.455-460, Istanbul, 1999.
9. Christian Heipke, "Automation of Interior, Relative, and Absolute Orientation", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,

Volume 52, pp.1-19, 1997.

10. J.C.Trinder, "Precision of Digital Target Location", PE&RS, Vol.55, No.6, pp.883-886, 1989.
11. S.F.EL-Hakim, "Real-Time Image Metrology with CCD Cameras", PE &RS, Vol.52, pp.1757-1766, 1986.
12. S.F.EL-Hakim, Nicolino J. Pizzi, "Multicamera Vision-Based Approach to Flexible Feature Measurement for Inspection and Reverse Engineering", Optical Engineering, Vol.32, No.9, pp.2201 -2215, 1993.
13. Horst A. Beyer, "Automated dimensional inspection with real-time photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 50, pp.20-26, 1995.
14. Horst A. Beyer, "Geometric and radiometric Analysis of a CCD Camera Based Photogrammetric Close-Range System", Zurich, 1992.
15. Klaus Hanke, Mostafa A. Ebrahim, "The Digital Projector Ray-tracing as a tool for close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, pp.35-40, 1999.
16. M. Pollefeys, R. Koch, M.Vergauwen, L. Van Gool, "Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 55 pp.251-267, 2000.
17. T.A. Clarke, "An analysis of the prospects for digital close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 50, pp.4-7, 1995
18. X.Wang, T.A. Clarke, "Separate adjustment in close-range photogrammetry", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , Volume 55, pp.289-298, 2001.

19. Shortis, M.R., Clarke, T.A. and Robson, S, "Practical testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centering Algorithms", Videometrics IV, SPIE, Vol.2598, pp.65-76, 1995.
20. S. Robson, T.A. Clarke, and J. chen, "The Suitability of the Pulnix CCD Camera for Photogrammetric Measurement", SPIE Videometrics II, Vol.2067, pp.66-77, 1993.
21. 유복모, "항공삼각측량에 있어서 독립모델의 연구", 대한토목학회 창립 20주년 기념논문집, pp.222-229, 1972.
22. 박운용, "사진측량에 의한 사면해석에 관한 연구", 박사학위논문, 동아대학교 대학원, 1982.
23. 양인태, "경사사진에 의한 해석적 위치결정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1984.
24. 강준문, "다중근거리 사진측정에 의한 피사체의 3차원 정밀해석에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1985.
25. 이재기, "비측정용사진에 의한 좌표해석", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
26. 강인준, "지상사진측량에 있어서 블록조정법을 이용한 기준점 결정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1986.
27. 박흥기, "사진측량관측값의 과대오차조정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1987.
28. 유환희, "근거리 사진측량에 의한 변형해석의 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1988.
29. 이종출, "근거리 사진측량에 의한 지형의 3차원 위치해석에 관한 연구", 박사학위논문, 동아대학교 대학원, 1989.
30. 손덕재, "지상사진의 촬영방향과 수렴각 변화에 따른 공간좌표해석", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1989.

31. 이진덕, “다중근접사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1992.
32. 한승희, 강준목, “3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표 획득에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제15권 제6호, pp.1721-1730, 1995.
33. 유환희, 김의명, “수치사진측량기법을 이용한 실시간 매핑 S/W 개발”, 대학토목학회 논문집, 제16권 제Ⅲ-1호, pp.37-45. 1996.
34. 신봉호, 엄재구, 양승용, 송왕재, “구조물의 변형측정을 위한 수치영상의 정확도 향상”, 대한토목학회 논문집, 제19권 제Ⅲ-4호, pp.677-685, 1999.
35. 한승희, “구조물 변형측정을 위한 지상사진측량의 기법개발”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1993.
36. 배상호, “구조물 변위해석을 위한 사진측량의 컴포넌트 개발”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 2000.
37. 배상호, “근접사진측량에 의한 교량의 변형해석에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1994.
38. 김성민, “수치화상을 이용한 근접사진측량 시스템의 수행성 평가”, 석사학위논문, 금오공과대학교 대학원, 1996.
39. 박경식, “CCD 카메라에 의한 동적 대상물의 상좌표 실시간 취득”, 석사학위논문, 충북대학교 대학원, 1997.
40. 이석균, “CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 수치사진측량에 관한 연구”, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1998.
41. 이효성, “수치근접사진측량에 의한 조경석의 표면거칠기 정밀측정”, 박사학위논문, 경상대학교 대학원, 2000.
42. 이철우, “수치사진측량을 이용한 Fender의 3차원 수치모형생성”, 석사학위논문, 충북대학교 대학원, 2000.
43. 이광진, “렌즈 왜곡영상을 위한 자동 보정 방법”, 석사학위논문, 한양

대학교 대학원, 1999.

44. Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, "Elements of Photogrammetry with application in GIS", 3rd edition, 1999.
45. T. Schenk, "Concept in Digital Photogrammetry", 1996.
46. Prof. Dr. Karl KRAUS, "PHOTOGRAMMETRY I,II", 4th edition, 1997.