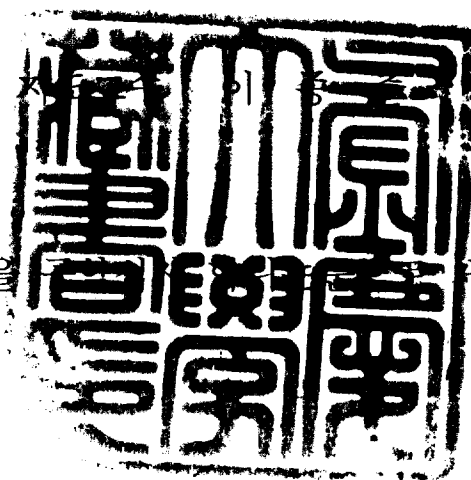


74
12
9

공학석사 학위논문

디지털 영상을 이용한 철도선형정보 추출

이 논문을



제출함.

2006년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

강 윤 성

강윤성의 공학석사 학위논문을 인준함

2006년 2월 24일

주 심 공학박사 정 진 호



위 원 공학박사 국 승 규



위 원 공학박사 이 중 출



목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	iv
1. 서 론	1
1.1 연구목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구방법 및 범위	4
2. 철도궤도 및 디지털 영상 이론	6
2.1 철도궤도 이론	6
2.1.1 궤도선형	7
2.1.2 Cant	9
2.2 디지털 영상 이론	11
2.2.1 공선조건식	11
2.2.2 광속조정법	13
2.2.3 에피폴러 기하학	15
2.2.4 다중영상표정	16

2.2.5 자체검정	18
2.3 최소제곱법	21
3. 철도선형 관측 시스템	26
3.1 연구대상지 선정	26
3.2 관측시스템 구성	26
3.3 철도선형 관측	30
3.3.1 Camera Calibration	31
3.3.2 기준점 측량	32
3.3.3 디지털 영상처리	35
4. 철도선형정보 추출	43
4.1 IP좌표 추출	43
4.2 철도평면선형 추출	45
4.3 철도종단선형 추출	49
4.4 Cant 산정	51
5. 결 론	53
참고문헌	55

List of Tables

Table 2.1	Acceptance Criteria on Gravelly Field	6
Table 2.2	Design Speed by Level of Railroad	8
Table 2.3	Radius by Level of Railroad	8
Table 2.4	Transition Curve Length by Level of Railroad	9
Table 3.1	Specifications of Rollei d7 metric ⁵ Camera	27
Table 3.2	Specifications of Total Station	28
Table 3.3	Specifications of GPS Receiver	29
Table 3.4	Data of Camera Calibration	31
Table 3.5	The Result of GPS Survey	32
Table 3.6	The Result of Control Survey	34
Table 3.7	Inputted Control Points	37
Table 3.8	Adjusted Object Coordinates	38
Table 3.8	Adjusted Object Coordinates [Continued]	39
Table 3.9	The Residuals of Control Points	40
Table 3.9	The Residuals of Control Points [Continued]	41
Table 4.1	The Result of Center Line [X, Y]	43
Table 4.2	The Result of Design Element	47
Table 4.3	The Result of Center Line [Z]	49
Table 4.4	The Result of Cant [Straight Section]	51
Table 4.5	The Result of Cant [Curved Section]	52

List of Figures

Figure 1.1	The Flow Chart of Thesis	5
Figure 2.1	Shape of Track [Track Alignment]	7
Figure 2.2	Necessity of Cant on Railroad	10
Figure 2.3	Collinearity Condition	12
Figure 2.4	Epipolar Geometry of a Stereopair	16
Figure 2.5	Multi-Image Orientation	17
Figure 2.6	Space Intersection	17
Figure 2.7	Space Resection	18
Figure 2.8	Radial Optical Distortion	19
Figure 2.9	Radial Distortion of Lens	20
Figure 2.10	Components of Lens Distortion Errors	21
Figure 2.11	Least Squares Line	23
Figure 3.1	View of Test-Field Area	26
Figure 3.2	Shape of Rollei d7 metric ⁵ Camera	27
Figure 3.3	Shape of Total Station	28
Figure 3.4	Shape of GPS Receiver	29
Figure 3.5	Test Field for Correction of Radial Distortion	30
Figure 3.6	Profiles for Calibrated Radial Distortion	31
Figure 3.7	Shape of GPS Survey	32

Figure 3.8	Shape of Total Station Survey	33
Figure 3.9	Shape of Photogrammetric Control Survey	35
Figure 3.10	Shape of Observation System	35
Figure 3.11	The Flow Chart of 3D Coordinates Acquisition	36
Figure 3.12	Image Point Measurement	37
Figure 3.13	RMSE of Object Coordinates [X, Y, Z]	40
Figure 3.14	RMSE of Control Points [X, Y, Z]	42
Figure 4.1	Observation Point of Straight Section	44
Figure 4.2	Estimation of IP	44
Figure 4.3	The Flow Chart of Program Process	45
Figure 4.4	Design Program about Railroad Alignment	46
Figure 4.5	Shape of Horizontal Alignment	48
Figure 4.6	Shape of Vertical Alignment	50

The Extraction of Alignment Information on Railroad Using Digital Imagery

Yoon-Sung, Kang

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

ABSTRACT

Railroads made many contribution to modernization being developed so quickly as public transportation, but after middle of 20 century, its qualities are getting low because of focusing on the investment and development of cars and airplanes. Its role which is getting the excellent merits on the mass transportation, rapid transit, safety, state period, energy efficiency, and prevention of environmental pollution has been reconsidered.

An information establishment of express railroad and the existing facilities have been rising as a mandatory clause in order to make for between a traffic route in northeast asia and a transcontinental railway in the future. Especially, the information about railroad alignment is essential to understand because it can provide materials of an information establishment to other facilities.

Element of horizontal alignment in an existing railroad line is needed as basic materials, when it will be improved or moved. If its design drawing was lost or damaged, it is impossible to recover. It is not easy to repair for it as disasters. We must understand an existing railroad line to bring a function included a basic geography situation.

In this studies we acquire, analyze, and handle the digital picture of

railroads and then reappear shape of three dimension. But also we want to contribute to establish the facilities information choosing materials of existing railroad line in outputting the alignment element by reverse.

1. 서 론

1.1 연구목적

철도는 대중교통 수단으로 가장 일찍이 개발되어 근대 산업발전에 크게 기여하였으나 20세기 중반이후 자동차, 항공기 산업의 발달과 투자의 집중으로 철도시설의 낙후 등 정체화의 길을 걷게 되었다. 그러나 산업의 고도화 및 분업화로 인한 교통수요의 급속한 증가와 다양화로 대량수송, 고속성, 안전성, 정시성, 에너지 효율성 및 환경오염 방지 측면에서 탁월한 장점을 갖는 철도의 역할을 재인식하게 되었다.

우리나라에서는 국가 경제의 성장과 인구 증가 및 소득의 증대는 물적, 인적수송 수요의 증가를 가져왔다.¹³⁾

앞으로 대륙연계철도 및 동북아 교통 중심지로 자리 잡기 위해서는 기존선 및 고속철도의 정보화 구축이 필수적인 사항으로 대두되고 있다. 특히 선형에 대한 정보화는 다른 시설물의 정보화 구축에 기반 자료를 제공할 수 있기 때문에 이의 선행이 필수적이다.¹⁴⁾

또한 최근 기존선의 개량 및 이설하고자 할 경우 기존선의 평면선형 제원은 기본적인 자료로서 필요하게 되는데, 만약 최초 선형자료의 기본인 설계도서가 분실되었거나 훼손되었을 경우에 설계제원의 복원이 불가능하며, 최근 발생하는 각종 재난으로 인한 선로 유실시 선형의 정밀 복구가 어려운 실정이다. 철도선형제원이 기본적인 지리정보 자료로서의 기능을 발휘하기 위해서는 누락된 기존선의 철도선형에 대한 제원을 알아야 한다.

따라서, 본 연구에서는 사회간접자본시설인 철도를 대상으로 디지털 영상을 획득하고 분석·처리하여 선형의 3차원 형상을 재현하며, 선형제원을 역으로 산출함으로써 기존선의 선형자료를 정밀하게 추출하여 철도시설의

정보화 구축에 기여하고자 한다.

1.2 연구동향

우리나라에서 철도는 1899년 9월 18일 경인선 철도가 개통된 이래 100년이 넘는 역사를 가지고 있다.¹⁵⁾ 어느 나라에서나 철도는 국가의 주요한 시설이고 그 나라의 대동맥이라 해도 과언이 아니다. 이에 우리나라는 1962년 1월 1일 각령(제250호)으로 「국유철도건설규정」이 시행되었다. 1966년 8월 5일 대통령령(제2699호)으로 개정되었고, 1977년 2월 16일 대통령령에서 건설교통부령으로 개정됨에 따라 대통령령(제8450호)에 따라 「국유철도건설규정」이 폐지되고 건설교통부령(제552호)으로 「국유철도건설규칙」을 공포하여 사용해 왔으나, 기존선의 열차 최고속도 향상에 대한 기준의 미비, 노반폭 협소로 인한 유지보수 기계화작업 및 보수요원의 안전 확보 곤란, 전동차전용선에 대한 기준 미비 등의 문제점이 있고 열차고속화, 철도차량 및 전기시설의 현대화 추세 등 시대적인 변화에 부응할 수 있도록 「국유철도건설규칙」 개정의 필요성이 제기되어 21세기 대비 철도수송능력을 향상하여 국가경쟁력을 강화하고 철도운용과 유지·보수, 철도서비스의 질적 향상, 고속철도 및 장래 남북철도와의 연결운행에 대비하기 위하여 우리나라에 철도가 들어온 지 100년을 즈음하여 2005년 7월 6일 건설교통부령(제453호)에 따라 「철도건설규칙」으로 제정되어 현재까지 적용되고 있다.

최근 남·북 경제협력 등 경인선과 경원선의 철도 복원사업이 본격적으로 추진되면서 한국중단철도연결(TKR), 러시아횡단철도(TSR), 중국대륙철도(TCR), 몽골연결철도(TMR)를 연결함으로써 중국대륙, 몽골, 유럽과의 연계 철도망 구축이 현실로 직면하게 되었다.¹⁶⁾ 이러한 도로나 철도와 같은

교통시설의 망 구축을 위해서는 3차원 위치좌표와 선형정보의 추출이 선행되어야 한다.

국외의 문헌을 보면, 1997년 Bjorn Kufver¹⁾는 철도선형에 있어서 평면선형을 최적화하기 위한 연구를 하였으며, 1998년 John C. Trinder²⁾와 Wang³⁾ 등은 항공사진으로부터 자동으로 도로를 추출하는 연구를 하여, 고해상도의 영상과 저해상도 영상에 대하여 비교분석하였다. 또한, 1999년 Tetsuya Kuuno⁴⁾ 등은 차량에 CCD 카메라를 장착하여 도로의 상태를 추출하는 연구를 하였다.

Habib.A⁵⁾ 등은 mobile mapping 연속영상의 표정 및 조정의 자동화에 대하여 연구하였고, 여기서는 VISAT(Video Inertial SATellite)라는 시스템에서 연속영상을 획득하였다. 그리고 연속영상을 92-98%정도 의 중복촬영을 했으며, 표정과 조정을 자동화하여 3차원 위치를 획득하였다.

한편, 국내에서는 1993년 이남수¹⁷⁾¹⁸⁾는 철도곡선부에 있어서 캔트 설정에 관한 연구와 완화곡선 측량에 관한 연구를 동시에 시행하였다. 기존의 연구를 근간으로 하여 여러 응용분야에서 공간상에 위치한 대상물의 위치를 결정하기 위해 수치영상이나 수치자료를 이용한 연구가 확대되었으며, 1996년 유환희¹⁹⁾는 도로정보의 자동추출을 위하여 수치사진측량기법을 적용하였고, 2001년 허종호²⁰⁾는 평면선형의 설계제원을 산정하고자 최소제곱법을 적용하였다. 2003년 이종출²¹⁾은 수치사진측량을 이용한 도로평면선형 정보체계개발에 대하여 연구함으로써 3차원 위치결정을 할 수 있는 기법과 3차원정보체계를 개발하였다. 김수성²²⁾은 철도선형을 최적화하기 위해 GIS를 적용하였으며, 정의환¹⁴⁾은 철도선형에 대한 제원을 복원하고자 GPS 기법을 적용하여 연구를 시행하였다. 또한, 서동주²³⁾는 수치사진측량을 이용한 도로정보체계 개발을 연구하여 선형과 시설물의 정보를 추출하여 그 정보를 체계화할 수 있는 시스템을 개발하였다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구에서는 사회간접자본시설인 철도를 대상으로 영상을 이용하여 효과적인 선형을 추출하기 위한 기법을 제시하고 선형자료를 추출하기 위해 먼저 연구계획을 수립하고 대상지역을 선정하였다. 그리고 대상지역에 기준이 되는 기준점들을 GPS측량 및 Total Station으로 위치 자료를 획득하였으며, 디지털 영상을 획득·처리함으로써, 철도선형의 3차원 위치 형상과 선형자료를 추출하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 Figure 1.1과 같은 일련의 과정으로 연구를 수행하였다.

대상지역 총 528m에 대하여 획득한 영상들을 처리하여 10m 간격으로 분할하였다. 그 결과 54개소(STA.0~520, STA.528)의 3차원 좌표를 획득하였으며, Cant 및 최소제곱법에 의한 IP좌표를 산정하였다.

이렇게 산정된 IP좌표를 철도선형 설계 프로그램에 적용함으로써, 연구 대상지역의 평면선형과 종단선형을 추출하였다.

최종적으로 추출된 평면선형과 제원은 선형자료의 기본인 설계도서가 분실되었거나 훼손되었을 경우에 기존선의 개량 및 이설에 활용될 것이다.

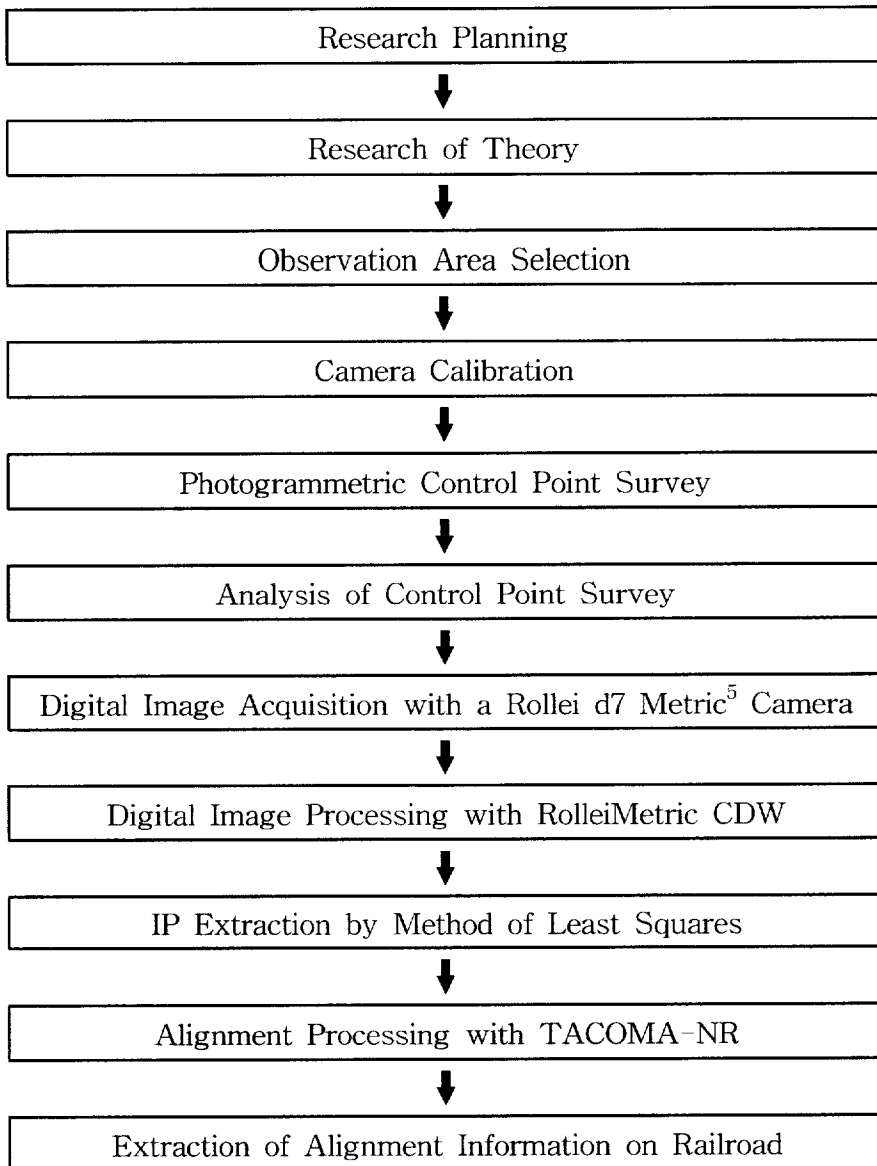


Figure 1.1 The Flow Chart of Thesis

2. 철도궤도 및 디지털 영상 이론

2.1 철도궤도 이론

철도는 철로 된 궤도를 부설하고 그 위에 차량을 운전하여 여객과 화물을 수송하는 설비이다.²⁴⁾ 철도의 3대 요소는 여객 및 화물, 궤도, 차량으로 구성된다. 이 중 궤도는 레일과 부속품, 침목, 도상으로 구성되며, 분기기는 물론 선로 방호설비, 선로 부대설비도 이에 속한다.

궤도의 구성요소와 기능은 다음과 같다.

첫째 레일은 차량을 직접 지지하며, 차량의 주행을 유도한다.

둘째 침목은 레일로부터 받는 하중을 도상에 전달하며, 레일의 위치를 유지한다.

셋째 도상은 침목으로부터 받는 하중을 분포시켜 노반에 전달하고 침목의 위치를 유지하며, 탄성에 의한 충격력을 완화시킨다.

자갈도상의 궤도부설 후 허용치는 Table 2.1과 같다.²⁵⁾

Table 2.1 Acceptance Criteria on Gravelly Field

(단위 : mm)

구 분	본 선	측 선
궤 간	+10, -2	+10, -2
수 평	7	9
고 저	직선(레일길이 10m에 대하여) 7 곡선(레일길이 2m에 대하여) 3	직선(좌동) 9 곡선(좌동) 4
방 향	레일길이 10m에 대하여 7	좌동

2.1.1 궤도선형

궤도의 형상(궤도선형)은 Figure 2.1과 같으며, 철도선로의 선형은 직선이 가장 유리하나 국토계획적 측면, 경제적 측면, 문화·환경적 측면, 기타 정치·군사적 또는 물리적·기술적 제약 및 민원 등으로 부득이 특정지역을 우회하지 않을 수 없는 경우가 생긴다.

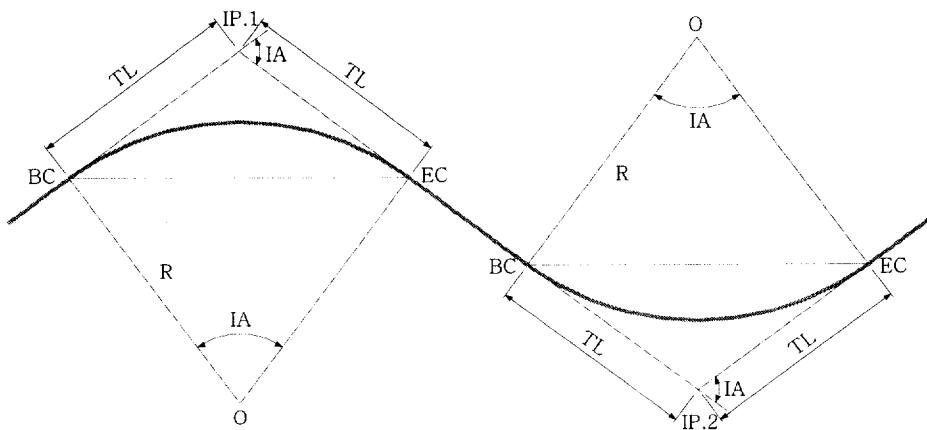


Figure 2.1 Shape of Track [Track Alignment]

철도의 선로가 직선만으로 이루어지는 것은 불가능하며, 지형에 따라 이것을 연결하는 평면과 연직 방향의 곡선을 필요로 한다.²⁶⁾

직선을 연결하는 선형의 기본은 원곡선이지만, 직선에서 원곡선으로 진입할 때 원심력을 받으므로 이것을 원활하게 이행하고, Cant와 Slack을 설치하기 위해 평면곡선에 완화곡선이 설치되어야 한다.²⁷⁾²⁸⁾

선로의 등급은 열차의 속도, 곡선 및 기울기 등에 따라 고속선과 1급선·2급선·3급선·4급선으로 구분한다.

선로의 설계속도는 선로의 등급에 따라 Table 2.2의 크기 이하로 하여야 한다.

Table 2.2 Design Speed by Level of Railroad²⁹⁾

Level	Design Speed (km/hr)
고속선	350
1급선	200
2급선	150
3급선	120
4급선	70

본선의 곡선반경의 선로의 등급에 따라 Table 2.3의 크기 이상으로 하여야 한다.

Table 2.3 Radius by Level of Railroad²⁹⁾

Level	Radius (m)
고속선	5,000
1급선	2,000
2급선	1,200
3급선	800
4급선	400

완화곡선의 길이는 선로의 등급에 따라 설정된 Cant 값에 Table 2.4의 배수 이상으로 하여야 한다.

Table 2.4 Transition Curve Length by Level of Railroad²⁹⁾

Level	Transition Curve Length
고속선	2,500
1급선	1,700
2급선	1,300
3급선	1,000
4급선	600

2.1.2 Cant

열차가 곡선부를 통과할 때 차량에 작용하는 원심력으로 외측레일에는 과도한 부하가 생기는 반면, 내측레일에는 하중이 감소되어 불안정(전도위험, 승차감 저해, 외측레일의 부담 및 손상 궤도보수량 증가 등)하게 된다. 열차속도가 커지면 차량은 곡선 외방으로 탈출할 우려가 있으므로 이를 방지하기 위하여 외측레일을 내측레일보다 높게 하여 원심력(F)과 중력(W)과의 합력(P)이 궤간 중앙부에 작용하도록 하여 주행차량의 안전을 도모한다. 이와 같이 곡선에서 내측레일을 기준하여 외측레일을 높게 하는 것을 Cant라 한다.

Figure 2.2(a)에서 차량 주행 중의 힘의 균형을 고려하면 차량의 중심 O를 통하여 차량중량 W(kg)가 연직으로 작용하고 여기에 직각인 원심력 F(kg)가 작용한다. 원심력 F는 열차속도를 V(km/h), 곡선반경을 R(m), 중력가속도를 g(9.8m/sec)라 할 때, 산정식은 식(2-1)과 같이 나타낸다.

$$F = \frac{W \cdot V^2}{g \cdot R} \quad (2-1)$$

식(2-1)에서와 같이 원심력 F 는 열차속도 V 의 2승에 비례하여 크게 되지만, V 가 점점 크게 되어 F 와 W 의 합력 P 가 외측레일의 바깥쪽으로 작용하게 되면 차량은 외측으로 전복한다. 이것을 방지하기 위하여 Figure 2.2(b)와 같이 Cant를 붙여 P 를 궤간 내에 오도록 하고 있다.

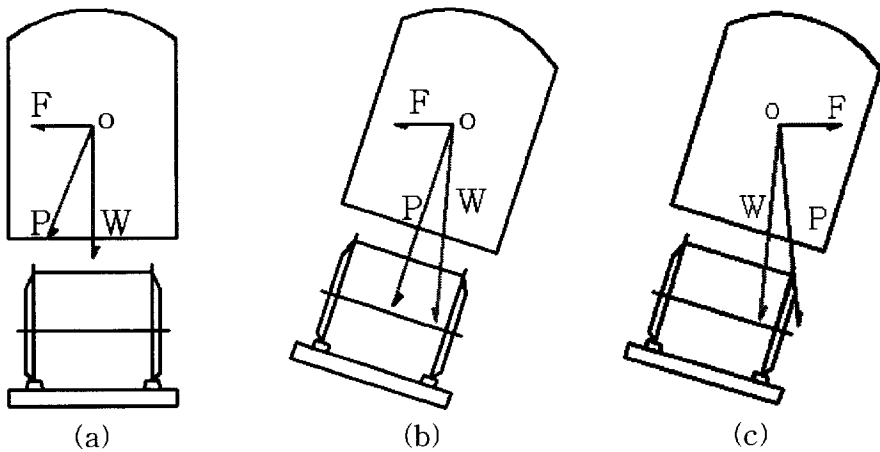


Figure 2.2 Necessity of Cant on Railroad

Cant를 붙인 곡선 상에 열차가 정지한 상태에서 강한 바람이 불 때를 가정해 본다. Figure 2.2(c)와 같이 곡선 안쪽으로 강한 바람이 작용한 경우, 그 힘 F 와 차량의 중량 W 와의 합력 P 가 궤간 내로 오면 차량은 곡선 안쪽으로 전복한다. 이때 최대풍속과 차량의 중심고를 고려하면 Cant의 최대량이 정해지며, 철도에서는 안전율을 3.5로 하여 정차한 차량의 중심선이 궤도중심에서 $G/6$ 이내에 들도록 하여 국유철도건설규정³⁰⁾ 제23조에 서 최대 Cant량 160mm로 규정하고 있다.

Cant는 원심력과 중력가속도의 합력이 궤도중심으로 향하도록 설정하는 것이 바람직하며, 이것을 균형 Cant라고 한다. 그 산출은 Cant를 $C(mm)$, 좌우차량접촉점간 거리를 $G(mm)$ 로 하면 식(2-2)에서 F , W 는

$$\frac{F}{W} = \frac{C}{G} \quad (2-2)$$

의 관계가 성립되며,

$$C = \frac{GV^2}{127R} \quad (2-3)$$

된다. 즉 식(2-3)의 Cant를 설정하면 차량중심과 원심력의 합력 P는 레일면과 직각으로 되어 차량이나 승객에게 원심력의 영향을 주지 않는 것으로 된다. 이 식에서 알 수 있듯이 곡선반경이 작은 만큼, 또 열차속도가 클수록 Cant의 값을 크게 하지 않으면 안 되는 것을 알 수 있다.

표준궤간에서 G=1500mm로 하면, Cant는 식(2-4)와 같다.²²⁾³¹⁾³²⁾

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} \quad (2-4)$$

2.2 디지털 영상 이론

디지털 영상은 사진과 렌즈의 투영중심 그리고 대상물간의 기하학적 관계를 이용하여 대상물이 지니고 있는 특성을 정량적으로 해석하는 학문으로써, 사진의 기하학적인 원리는 중심투영이며, 사진과 대상물간의 상관관계는 공선조건식, 광속조정법, 에피폴라 기하학 등의 이론에 의해 해석된다.⁶⁾

2.2.1 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 2.3에서 나타낸 바와 같다.⁷⁾⁸⁾⁹⁾

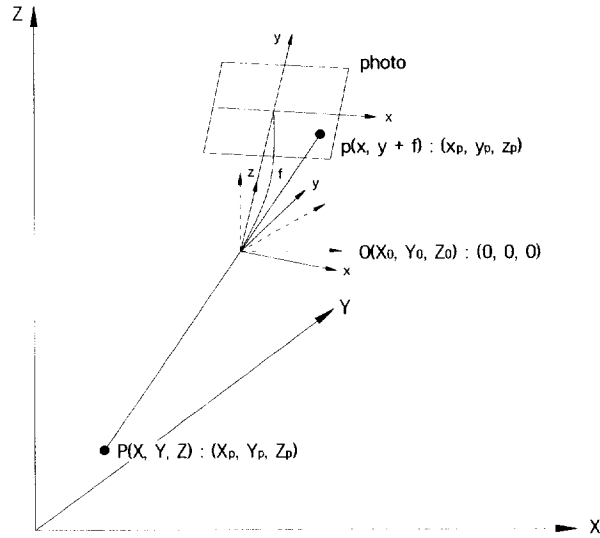


Figure 2.3 Collinearity Condition

사진기 투영중심과 P의 상점 및 대상물 사이의 관계는 투영변환의 기하학적 관계에 의해 식(2-5)와 같이 표현되어지며, 상호간의 기하학적 위치 관계를 이용하여 식(2-6)과 같은 공선조건을 기본식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = s \cdot R \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

여기서,

$$x - x_p = -f \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \quad (2-6)$$

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

2.2.2 광속조정법

식(2-7)은 최소제곱조정과 Taylor 급수를 사용하여 식(2-6)과 같은 비선형식을 선형화한 것으로, 관측식의 함수(F)와 매개변수 값이 0과 같음을 기초로 한다.

$$\begin{aligned} F_1 = 0 &= px + qf \\ F_2 = 0 &= py + rf \end{aligned} \quad (2-7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} p &= r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0) \\ q &= r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0) \\ r &= r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0) \end{aligned}$$

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(2-8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ \omega \\ \Delta \\ \phi \\ \Delta \\ \kappa \\ \Delta \\ X_0 \\ \Delta \\ Y_0 \\ \Delta \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad (2-8)$$

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(2-8)을 다음과 같이 수정·정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = 0 \quad (2-9)$$

미지점의 3차원 좌표는 공선조건식의 외부표정요소와 최소 3점 이상의 잉여 기준점 좌표로부터 계산되어 진다. 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 총횡접합모형(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 에피폴라 기하학

디지털 사진측량에서 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 디지털 사진측량 기술의 발달과 더불어 입체사진에서 공액점을 찾는 공정은 점차 자동화되어 가고 있으며, 공액요소 결정에 에피폴라 기하를 이용하고 있다.

Figure 2.4는 에피폴라 기하(Epipolar Geometry)를 이루고 있는 각각의 투영중심이 C' , C'' 인 입체쌍을 나타내고 있으며, 에피폴라선은 2개의 투영중심과 대상점 P 에 의해 정의된다. 또한, 에피폴라선 e' 와 e'' 는 에피폴라면과 영상면의 교차점으로써, 공액점은 에피폴라선상에 반드시 있어야 하며 이러한 에피폴라선은 탐색공간을 많이 감소시킨다.

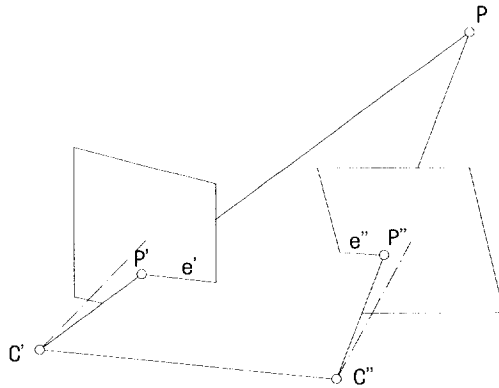


Figure 2.4 Epipolar Geometry of a Stereopair

2.2.4 다중영상표정

다중영상정합의 표정(Orientation)이란 여러 다른 사진들과 대상물에 관련된 각 사진의 Camera 위치(X_c, Y_c, Z_c)와 회전요소(ω, ϕ, κ)에 대한 계산이며, 표정점에 대한 대상물 좌표를 계산하는 것으로서 내부표정과 외부표정으로 구분할 수 있다.

내부표정은 Camera의 내적인 특성을 나타내는 것으로 주점의 위치(X_0, Y_0)와 주점거리(cK)를 결정하는 것이고, 외부표정은 Camera 시스템과 대상물 공간사이의 관계를 나타내는 것으로 Camera 외부투영 중심으로 절대좌표계 X, Y, Z 에 관계되는 촬영점 좌표 X_c, Y_c, Z_c 에 의해 표현되며, 절대좌표에 관계되는 사진좌표축의 각회전 ω, ϕ, κ 를 알아야 한다. 상-대상물 관계를 정의함에 있어서 기본적으로 외부표정요소는 좌표변환이며, 표정각 ω, ϕ, κ 는 사진좌표계와 절대좌표계 사이에서의 회전변환을 말한다.

다중영상정합에서는 표정을 위해 공간 전방교회법(Space Intersection)과 공간 후방교회법(Space Resection)을 동시에 이용하며, 표정점의 사진좌표와 스케치에 의해 입력된 대략의 외부표정요소, 자체검정에 의한 Camera

의 내부표정요소와 사진의 정확한 외부표정과 표정점의 대상물 좌표를 계산하기 위한 대상물 좌표체계결정을 이용한다.

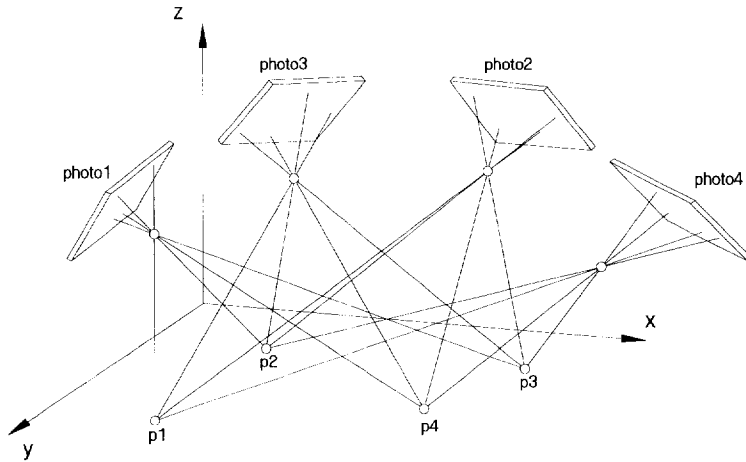


Figure 2.5 Multi-Image Orientation

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 2.6과 같다.

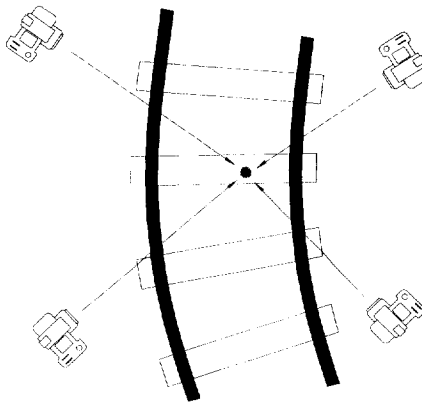


Figure 2.6 Space Intersection

공간 후방교회법은 이미 알고 있는 위치와 일치하는 지점에서 적어도 3개의 기지방향으로 교차시킴으로써 공간 위치를 결정하는 것이며, 기지의 대상물 좌표와 적어도 3개의 표정점의 사진 좌표로부터 어떤 사진의 외부 표정을 결정하는 방법으로써 이를 도식화하면 Figure 2.7과 같다.

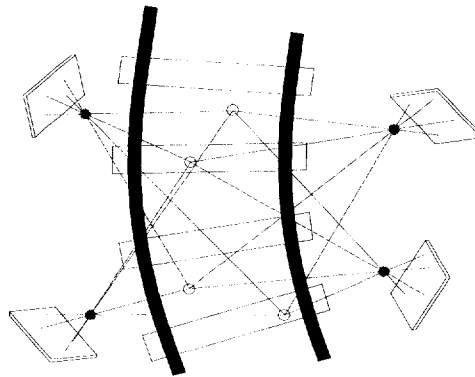


Figure 2.7 Space Resection

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 $60 \sim 90^\circ$ 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.

2.2.5 자체검정

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

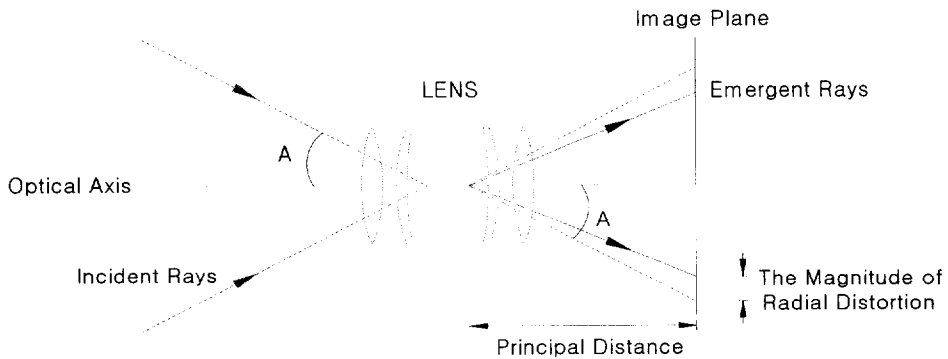


Figure 2.8 Radial Optical Distortion

이론적으로 이상적인 Camera는 Figure 2.8에서 나타난 바와 같이, 대상물 공간 속에서 Camera에 입사하는 빛이 렌즈 중심을 통하여 입사각과 같은 각으로 내부에서 직진하지만, 실제 Camera는 이와 같이 작용하지 않고 두 개의 투영중심이 생기는데 이 점들을 내부 및 외부의 투영중심이라 한다.²³⁾³³⁾ 따라서, 이상적인 렌즈의 특성을 갖고 있지 않기 때문에 이에 대한 보정이 필요하며, 이 밖에도 필름의 신축 및 편평도, 대기의 굴절, 지표 좌표의 보정, 기타 여러 가지 조건 등이 고려될 수 있다.

렌즈의 특성으로 인하여 대상물 공간상에서 Camera에 들어오는 입사각과 Camera 내부에서 렌즈의 중심을 통해 굴절하는 굴절각이 일치하지 않기 때문에 발생하며 이러한 형태의 왜곡을 방사방향 왜곡수차라고 하며, Figure 2.9에서 나타낸 것과 같다.¹⁰⁾

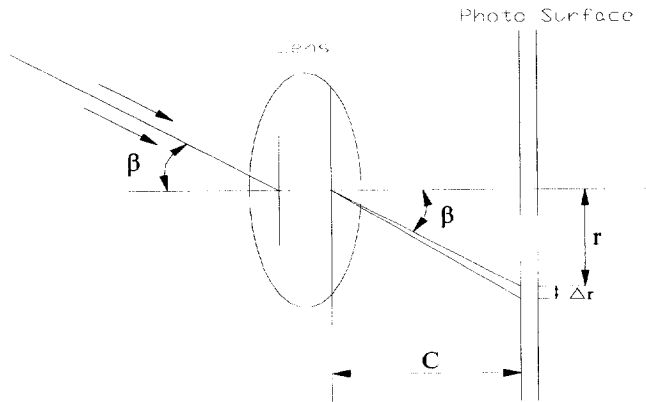


Figure 2.9 Radial Distortion of Lens

방사방향 왜곡수차는 식(2-10), 식(2-11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \dots \quad (2-10)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (2-11)$$

여기서,

k_1, k_2, k_3 : 방사왜곡 계수

r : 주점에서부터의 방사거리(radial distance)

x, y : 임의의 점에 대한 사진좌표

x_0, y_0 : 주점의 사진좌표

이다.

렌즈왜곡의 두 번째 성분은 편심왜곡으로서 일반적으로 방사방향 왜곡보다 작은 양이다. 렌즈의 합성과정에서 렌즈 각각의 곡률 중심이 일치하지 않으므로 생기는 비대칭 렌즈왜곡은 주점에 대하여 방사방향왜곡 성분과 접선방향왜곡 성분 모두를 갖기 때문에 주점에 대해 비대칭이므로 비대칭 렌즈왜곡이라고도 하며, Figure 2.10에서 나타낸 것과 같다.

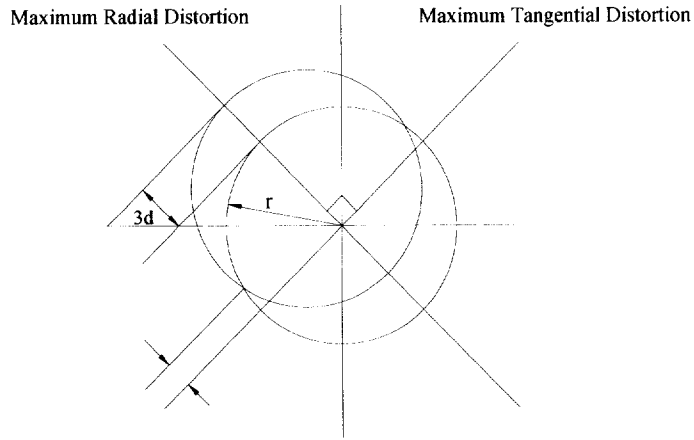


Figure 2.10 Components of Lens Distortion Errors

x와 y방향에 대한 편심방향 왜곡수차는 식(2-12), 식(2-13)과 같다.

$$d_x = \{ P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \} (1 + P_3r^2 + \dots) \quad (2-12)$$

$$d_y = \{ 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \} (1 + P_3r^2) \quad (2-13)$$

여기서,

P_1, P_2, P_3 : 편심방향왜곡계수

2.3 최소제곱법

표본관측치(x_i, y_i)를 이용한 철도선형추출방법에 대하여 다음과 같이 접근하고자 한다. 표본관측치가 직선상에 정확히 있지 않기 때문에 표시된 자료를 통해 서로 다른 여러 가지 직선을 그릴 수 있다. 여기서의 관심사는 자료를 가장 잘 설명하는 직선을 선택하는 것이다.

표본회귀선을 구하는데 있어서 개인적인 판단을 피하기 위해 무엇이 가장 적합한 직선인지에 대한 정의를 필요로 한다. 평균적으로 가장 작은 잔차를 제공하는 직선을 가장 좋은 직선으로 정의하는 것이 합리적이다. 이 방법에 따른 문제는 어떤 잔차는 양이 되고 어떤 잔차는 음이 되어, 비록 어떤 잔차도 0에 가깝지는 않지만, 잔차의 합은 항상 0이란 점이다. 이 문제를 피하기 위해 잔차의 제곱합이 가장 작은 직선을 가장 좋은 직선으로 정의한다. 이 절차를 최소제곱법이라 부르며, 최소제곱법은 관찰된 자료에서 직선까지의 거리를 제곱한 합을 최소화하는 직선을 도출하는 방법이다.

자료 점들에 함수 $f(x) = ax + b$ 를 대응시키려고 하면, 연립방정식

$$\begin{aligned} y_1 &= ax_1 + b \\ y_2 &= ax_2 + b \\ &\vdots \\ y_n &= ax_n + b \end{aligned} \quad (2-14)$$

또는

$$Y = AX \quad (2-15)$$

여기서,

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

를 만족하는 a 와 b 를 구해야 한다. 아쉽게도 식(2-14)는 과잉 결정된 연립 방정식이고, 자료점들이 그와 같은 직선 위에 있지 않으면, 해를 갖지 않는다. 따라서 우변 AX 가 좌변 Y 에 근접토록 벡터 $X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ 를 구하는

것으로 만족하고, 자료 점들이 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 라 하면, 1차 함수 $f(x) = ax + b$ 가 준 좌표에 얼마나 잘 일치하는가를 결정하는 한 방법은 점들이 f 의 그래프 사이의 수직거리,

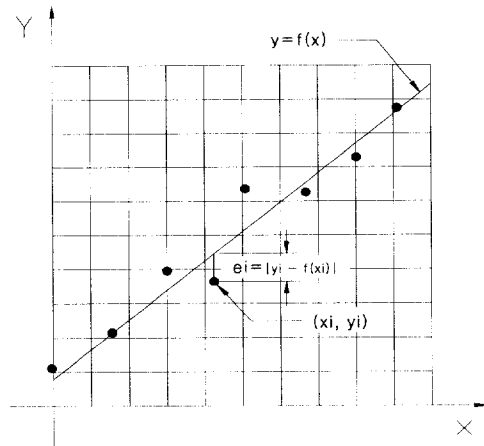


Figure 2.10 Least Squares Line

$e_i = |y_i - f(x_i)|$, $i = 1, 2, \dots, n$ 을 측정하는 것이다. 각 e_i 는 자료값 y_i 를 함수값 $f(x_i)$ 으로 근접시키는 오차로 생각할 수 있다. Figure 2.10을 보면 직관적으로, 모든 e_i 의 값들의 합이 최소이면, 함수 f 는 자료에 잘 맞을 것이라는 것을 알 수 있다. 실제로 그 문제에 더욱 손쉽게 접근하는 방법은 모든 e_i 의 값들의 제곱의 합을 최소가 되게 하는 1차함수를 구하는 것이다. 연립방정식(2-14)의 해는 식

$$\begin{aligned}
 E &= e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 \\
 &= [y_1 - f(x_1)]^2 + [y_2 - f(x_2)]^2 + \dots + [y_n - f(x_n)]^2 \\
 &= [y_1 - (ax_1 + b)]^2 + [y_2 - (ax_2 + b)]^2 + \dots + [y_n - (ax_n + b)]^2
 \end{aligned}$$

또는

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - ax_i - b]^2 \quad (2-16)$$

을 최소화하는 계수 a 와 b 라고 정의하자. E 를 제곱오차의 합이라 한다. 제곱오차의 합을 최소화하는 직선 $f(x) = ax + b$ 는 최적선이라고 정의되고, 자료 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 에 대한 최소제곱선이라고 불린다.

식(2-16)을 최소가 되도록 a 와 b 는 미적분학으로 구한다. 식(2-14)를 두 변수 a 와 b 의 함수로 생각하면, E 의 최소값을 구한다는 것은 1계 편도함수가 0과 같게 놓는 것이다.

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad \text{및} \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

마지막 두 조건은 차례로

$$\begin{aligned} -2 \sum_{i=1}^n x_i [y_i - ax_i - b] &= 0 \\ -2 \sum_{i=1}^n [y_i - ax_i - b] &= 0 \end{aligned} \quad (2-17)$$

이 된다. 합을 전개하고 $\sum_{i=1}^n b = nb$ 을 이용하면, 연립방정식(3-17)은

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) b &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a + nb &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (2-18)$$

와 같다.

행렬로, 식(3-18)은 다음과 같이 동치의 꼴로 쓸 수 있다.

$$A^TAX = A^TY \quad (2-19)$$

여기서, A , Y 와 X 는 식(2-15)에서 정의되었다. A 는 $n \times 2$ 행렬이고 A^T 는 $2 \times n$ 행렬이므로, 행렬 A^TA 는 2×2 행렬이다. 더욱이, 자료점이 모두 같은 수직선 위에 있지 않으면, 행렬 A^TA 는 정치이다. 따라서 식(2-19)는 유일해

$$X = (A^TA)^{-1}A^TY \quad (2-20)$$

을 갖는다. 이 때, X 는 과잉 결정된 연립방정식(2-14)의 최소제곱해라 하고, $Y = aX + b$ 를 최소제곱선이라 한다.²⁰⁾

3. 철도선형 관측 시스템

3.1 연구대상지 선정

연구대상지역은 부산광역시 ○○구간으로 총연장 528m인 4급선 철도를 선정하였다. 본 연구를 위해 선정한 대상지역은 Figure 3.1과 같이 원곡선과 직선이 조합되어 있고, 비교적 곡선이 급하여 Cant가 큰 지역을 선정하였다.

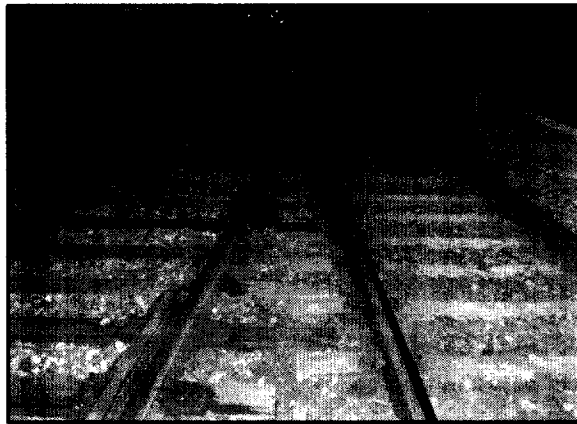


Figure 3.1 View of Test-field Area

3.2 관측시스템 구성

1) Digital Camera

본 연구에서 대상구간의 철도선형정보를 추출하기 위해 사용된 장비로는 Rollei사에서 제조한 d7 metric⁵를 사용하였으며, Camera의 형상 및 제원은 Figure 3.2와 Table 3.1과 같다.



Figure 3.2 Shape of Rollei d7 metric⁵ Camera

Table 3.1 Specifications of Rollei d7 metric⁵ Camera

Classification	Rollei d7 metric ⁵
Recording mode	CCD recode
Shutter	1/8,000 sec
Focal Length	7 mm
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

2) Total Station

실제 연구대상지역에서 지상기준점과 검사점들을 측량하기 위해 Total

Station을 사용하였으며, 그 장비의 모습과 제원은 Figure 3.3과 Table 3.2에 나타내었다.

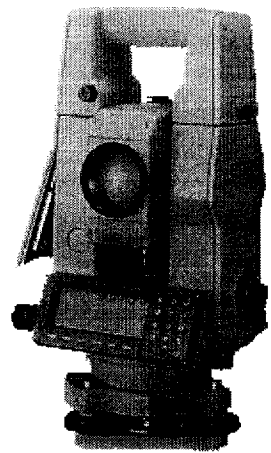


Figure 3.3 Shape of Total Station

Table 3.2 Specifications of Total Station

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

3) GPS Receiver

본 연구에서는 기준점 관측을 위해 JAVAD사의 GPS Receiver를 사용하였으며, 이 수신기는 L1/L2 C/A코드와 P코드 및 반송파 위상을 수신할 수 있다. 장비의 모습은 Figure 3.4와 같으며, 제원은 Table 3.3과 같다.

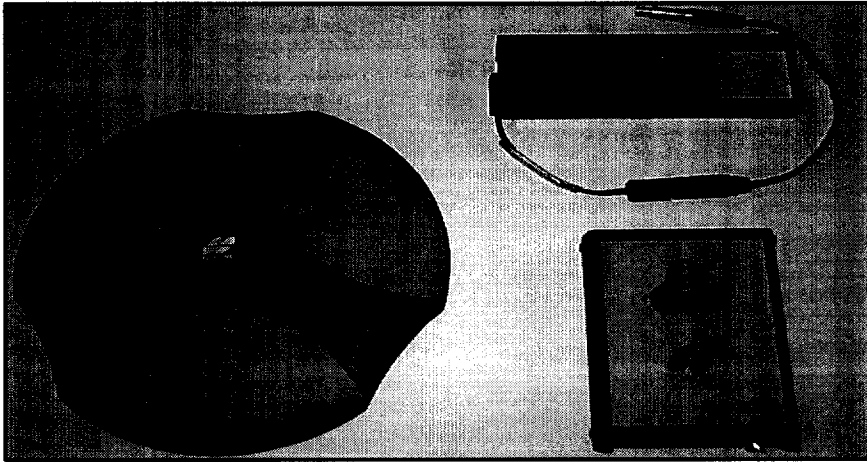


Figure 3.4 Shape of GPS Receiver

Table 3.3 Specifications of GPS Receiver

Receiver Type	Legacy-H
Channel	20 Channel GPS L1, GPS L1/L2
Signal	GPS L1/L2 (L1-C/A와 L1/L2-Full Cycle Carrier Phase, P1/P2)
Accuracy	Vertical 3mm + 1ppm
	Horizontal 5mm + 1ppm

3.3 철도선형 관측

3.3.1 Camera Calibration

본 연구에서는 촬영에 사용될 Rollei d7 metric⁵ Camera의 렌즈를 검정하기 위한 작업을 선행하였다. Figure 3.5와 같이 약 8m×5m 되는 벽면에 40개의 원형타겟을 부착하고, 중복촬영 및 Swing값을 변화시키면서 12장의 사진을 획득하였다.

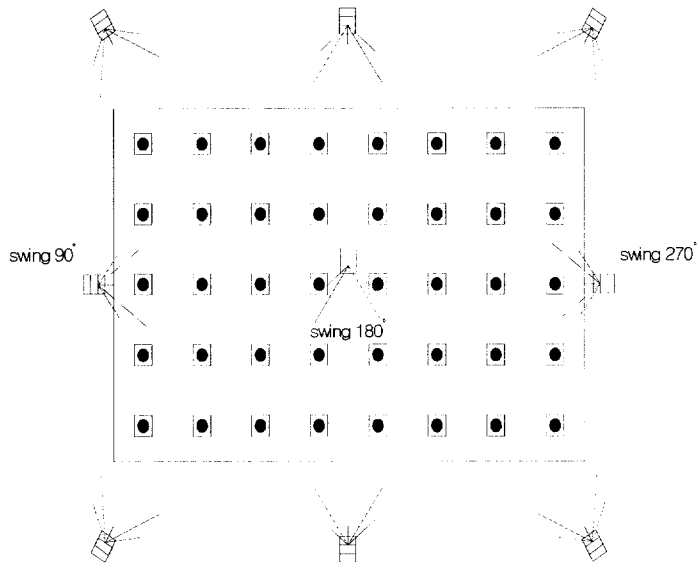


Fig. 3.5 Test Field for Correction of Radial Distortion

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 3.4는 Camera Calibration에 의해 보정된 자료를 나타낸 것이며,

Camera 검정결과 시스템의 왜곡 매개변수들을 도식적으로 나타내면 Figure 3.6과 같다.

Table 3.4 Data of Camera Calibration

Calibration [Rollei d7 metric ⁵ 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

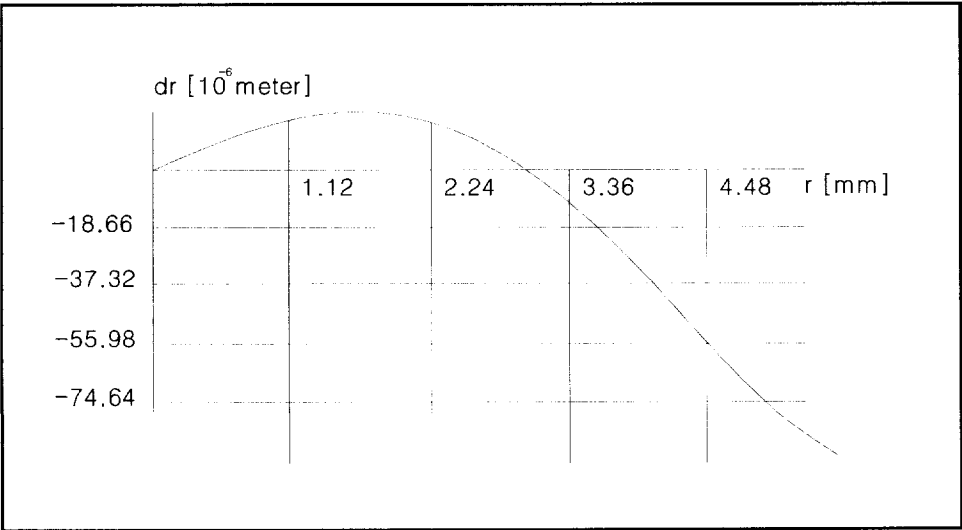


Figure 3.6 Profiles for Calibrated Radial Distortion

3.3.2 기준점 측량

GPS를 이용한 지상기준점 측량은 현장 내 임의의 점을 선정하여 관측하려고 하였으나, 현장의 여건상 불가하여 현장 인근지역의 2점을 선정하여 GPS로 기준점을 관측하였다.

Figure 3.7은 GPS에 의한 기준점 측량 모습이며, 그 성과는 Table 3.5와 같다.

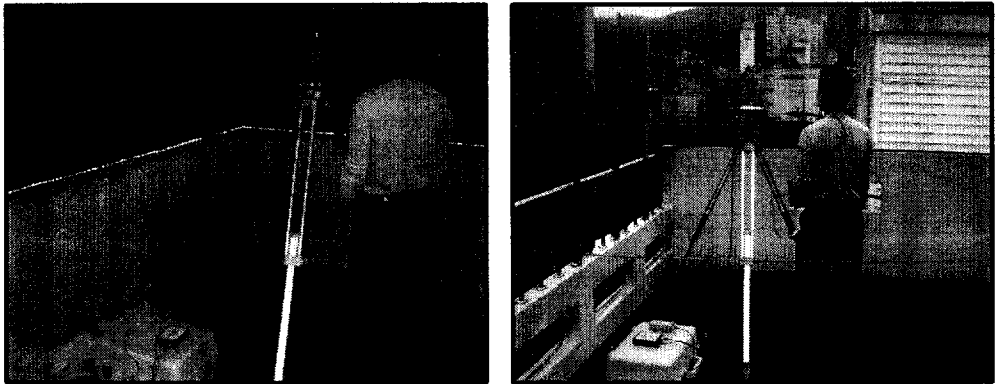


Figure 3.7 Shape of GPS Survey

Table 3.5 The Result of GPS Survey

No.	X (m)	Y (m)
①	192861.3456	208010.4363
②	192933.7598	208010.1268

또한 디지털 영상처리 시스템의 광속조정법에서 얻어진 지상좌표 값의 정확도를 분석하기 위해 대상점에 대한 측량을 실시하여 기준점 측량 성과를 얻었다. 본 연구에서 사용된 대상점은 총 50점으로 각 대상점에 대하여 3차원 좌표를 최소 0.5" 독 Total Station으로 정밀하게 관측하였다. 관측 모습은 Figure 3.8과 같으며, 관측된 3차원 좌표값은 Table 3.6에 나타난다.

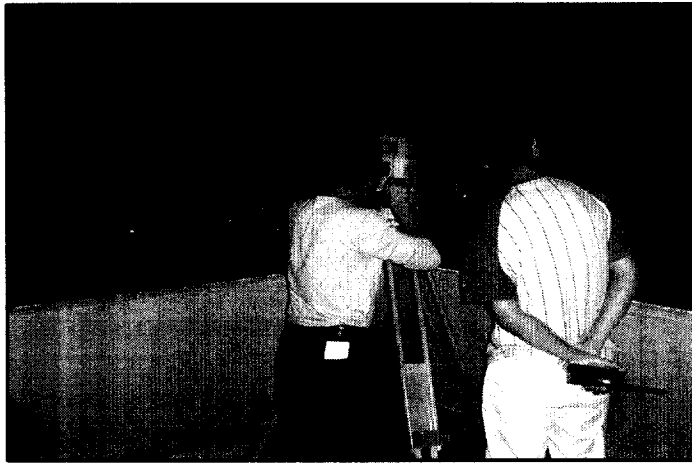


Figure 3.8 Shape of Total Station Survey

Table 3.6 The Result of Control Survey

No.	X(m)	Y(m)	Z(m)	No.	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	192926.145	208047.358	23.801	26	192822.203	208078.627	22.690
2	192925.346	208047.057	23.798	27	192819.908	208079.007	22.644
3	192925.015	208047.934	23.788	28	192817.663	208079.490	22.640
4	192924.227	208047.426	23.786	29	192816.935	208078.973	22.551
5	192923.103	208047.836	23.774	30	192815.754	208079.191	22.533
6	192921.958	208048.183	23.761	31	192815.248	208079.898	22.601
7	192919.766	208049.134	23.722	32	192814.560	208079.444	22.525
8	192919.432	208049.926	23.723	33	192814.038	208080.106	22.583
9	192918.656	208049.425	23.718	34	192813.340	208079.657	22.504
10	192917.506	208049.834	23.704	35	192812.875	208080.203	22.555
11	192917.184	208050.674	23.699	36	192811.717	208080.508	22.555
12	192916.441	208050.258	23.694	37	192811.040	208079.998	22.469
13	192916.058	208051.087	23.691	38	192810.537	208080.707	22.542
14	192914.932	208051.500	23.676	39	192809.847	208080.171	22.454
15	192914.052	208050.983	23.666	40	192809.379	208080.890	22.526
16	192913.725	208051.934	23.665	41	192808.692	208080.398	22.447
17	192912.935	208051.358	23.662	42	192807.555	208080.646	22.445
18	192911.820	208051.724	23.657	43	192807.120	208081.253	22.509
19	192911.485	208052.699	23.657	44	192806.424	208080.760	22.423
20	192910.637	208052.135	23.654	45	192805.954	208081.480	22.507
21	192910.351	208053.097	23.661	46	192805.284	208080.980	22.423
22	192909.479	208052.481	23.658	47	192804.778	208081.576	22.484
23	192823.770	208077.699	22.642	48	192803.628	208081.732	22.485
24	192823.326	208078.386	22.705	49	192803.004	208081.267	22.410
25	192822.619	208077.846	22.619	50	192802.495	208081.838	22.476

3.3.3 디지털 영상처리

본 연구에서는 철도노선에 대한 디지털 영상을 획득하기 위해 Figure 3.9와 같이 촬영을 실시하였으며, 그 모식도는 Figure 3.10과 같다. 관측한 영상들을 이용하여 Figure 3.11과 같은 흐름도로 연구를 수행하였다.



Figure 3.9 Shape of Photogrammetric Control Survey

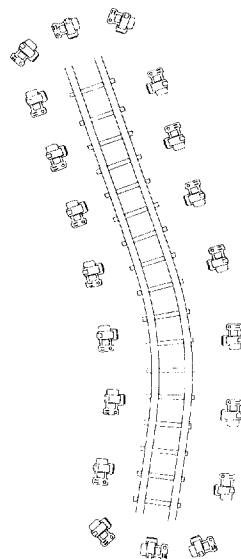


Figure 3.10 Shape of Observation System

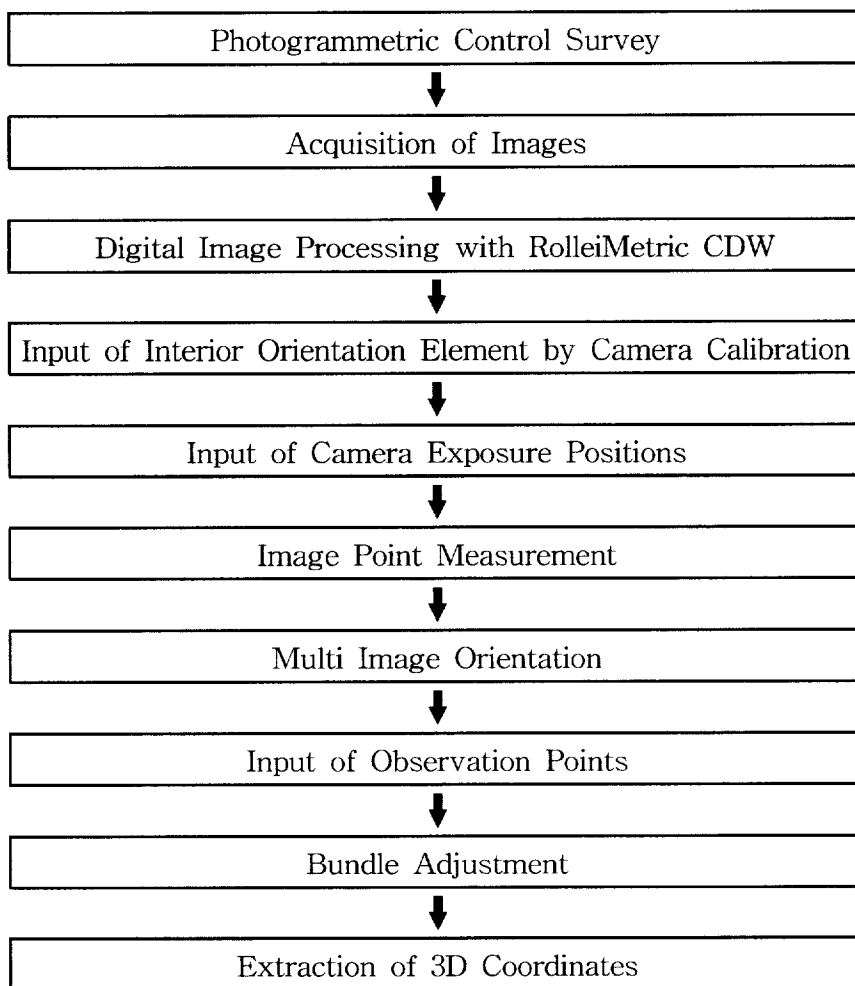


Figure 3.11 The Flow Chart of 3D Coordinates Acquisition

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

먼저, Camera Calibration에 의해 결정된 내부표정요소와 촬영 시 Camera 위치를 입력하고 표정점을 관측하였다. 두 영상에 대한 표정점 관측모습은 Figure 3.12와 같다.

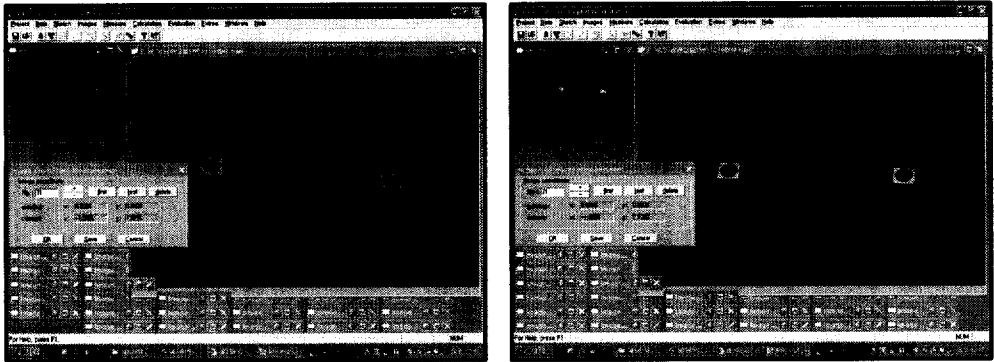


Figure 3.12 Image Point Measurement

이렇게 연속된 영상에서 중복 관측된 표정점은 다중영상표정을 위해 총 50개의 관측점 중 Table 3.7과 같이 12개의 기준점을 입력하였다. 다중영상표정과 번들조정에 의해 대상점의 3차원 좌표를 획득할 수 있었으며, 획득한 3차원 좌표를 10m 간격으로 총 54개소(STA.0~520, STA.528)에 걸쳐 Table 3.8과 같이 나타내었다.

Table 3.7 Inputted Control Points

Control Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	192926.145	208047.358	23.801
6	192921.958	208048.183	23.761
8	192919.432	208049.926	23.723
12	192916.441	208050.258	23.694
16	192913.725	208051.934	23.665
20	192910.637	208052.135	23.654
23	192823.770	208077.699	22.642
27	192819.908	208079.007	22.644
30	192815.754	208079.191	22.533
36	192811.717	208080.508	22.555
42	192807.555	208080.646	22.445
48	192803.628	208081.732	22.485

Table 3.8 Adjusted Object Coordinates

Section	Inside			Outside		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
0 m	193107.0641	207983.0989	24.9685	193107.5505	207984.4915	24.9686
10 m	193097.6390	207986.4410	24.9305	193098.1102	207987.7900	24.9300
20 m	193088.1857	207989.7024	24.8827	193088.6801	207991.1179	24.8828
30 m	193078.7502	207993.0148	24.8478	193079.2408	207994.4192	24.8470
40 m	193069.3101	207996.3139	24.8101	193069.8012	207997.7199	24.8116
50 m	193059.8646	207999.5977	24.7748	193060.3610	208001.0189	24.7813
60 m	193050.4276	208002.9057	24.7535	193050.9164	208004.3051	24.7525
70 m	193040.9870	208006.2034	24.7298	193041.4811	208007.6180	24.7278
80 m	193031.5436	208009.4930	24.6905	193032.0407	208010.9164	24.6901
90 m	193022.1044	208012.7950	24.6333	193022.5985	208014.2094	24.6327
100 m	193012.6636	208016.0921	24.5837	193013.1537	208017.4951	24.5866
110 m	193003.2183	208019.3762	24.5313	193003.7139	208020.7953	24.5341
120 m	192993.7792	208022.6783	24.4914	192994.2724	208024.0905	24.4907
130 m	192984.3416	208025.9848	24.4392	192984.8395	208027.4102	24.4440
140 m	192974.9094	208029.3064	24.3745	192975.4040	208030.7224	24.3739
150 m	192965.4725	208032.6147	24.3040	192965.9659	208034.0274	24.3025
160 m	192956.0293	208035.9050	24.2451	192956.5258	208037.3265	24.2437
170 m	192946.5898	208039.2060	24.1776	192947.0831	208040.6183	24.1724
180 m	192937.1485	208042.5017	24.0878	192937.6404	208043.9101	24.0870
190 m	192927.7021	208045.7829	23.9903	192928.1993	208047.2064	23.9900
200 m	192918.2987	208049.0912	23.8874	192918.7312	208050.5219	23.8876
210 m	192908.8611	208052.3639	23.7657	192909.2795	208053.8162	23.7805
220 m	192899.4664	208055.6414	23.6535	192899.7568	208057.0957	23.6776
230 m	192889.8947	208058.8559	23.5342	192890.2139	208060.3212	23.5758
240 m	192880.3743	208061.9586	23.4180	192880.6512	208063.4688	23.4753
250 m	192870.8375	208065.0011	23.3119	192871.0400	208066.5354	23.3771
260 m	192861.0955	208067.8867	23.1982	192861.3913	208069.3603	23.2807
270 m	192851.7521	208070.5218	23.0795	192851.8627	208072.0456	23.1856

Table 3.8 Adjusted Object Coordinates [Continued]

Section	Inside			Outside		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
280 m	192841.9090	208073.0447	22.9628	192842.0224	208074.6069	23.0908
290 m	192832.0828	208075.4096	22.8443	192832.2327	208076.9163	22.9832
300 m	192822.3320	208077.4406	22.7311	192822.4394	208078.9474	22.8703
310 m	192812.3553	208079.2251	22.6168	192812.4960	208080.7581	22.7536
320 m	192802.2956	208080.7607	22.5053	192802.5061	208082.3685	22.6431
330 m	192792.3863	208082.1054	22.2298	192792.5810	208083.5929	22.3680
340 m	192782.5380	208083.1131	22.1399	192782.6960	208084.6049	22.2790
350 m	192772.7846	208083.8317	22.0609	192772.8950	208085.3278	22.1997
360 m	192762.9822	208084.3516	21.9954	192763.0482	208085.8501	22.1306
370 m	192753.0390	208084.6548	21.9526	192753.0897	208086.1541	22.0941
380 m	192743.1780	208084.6973	21.9395	192743.1954	208086.1974	22.0745
390 m	192733.2698	208084.4802	21.9351	192733.2645	208085.9810	22.0749
400 m	192723.4789	208084.0165	21.9381	192723.4374	208085.5165	22.0631
410 m	192713.9181	208083.3430	21.9516	192713.8221	208084.8402	22.0611
420 m	192704.0877	208082.4755	21.9834	192703.9680	208083.9709	22.0782
430 m	192694.2753	208081.4375	22.0286	192694.1252	208082.9302	22.1057
440 m	192684.4842	208080.2342	22.0664	192684.3084	208081.7240	22.1316
450 m	192674.7182	208078.9116	22.0995	192674.5176	208080.3982	22.1475
460 m	192664.8220	208077.4704	22.1336	192664.6214	208078.9570	22.1666
470 m	192654.9246	208076.0383	22.1797	192654.7241	208077.5249	22.1970
480 m	192645.0237	208074.6324	22.2203	192644.8231	208076.1190	22.2245
490 m	192635.1259	208073.2035	22.2372	192634.9253	208074.6901	22.2374
500 m	192625.2280	208071.7752	22.2523	192625.0274	208073.2618	22.2537
510 m	192615.3301	208070.3470	22.2700	192615.1295	208071.8336	22.2700
520 m	192605.4322	208068.9187	22.2835	192605.2316	208070.4053	22.2865
528 m	192595.5343	208067.4904	22.2886	192595.3337	208068.9770	22.2906

결정된 대상물의 번들조정 후 RMSE는 Figure 3.13과 같이 X방향으로 1.43mm, Y방향으로 1.28mm, Z방향으로 2.99mm로 나타났다.

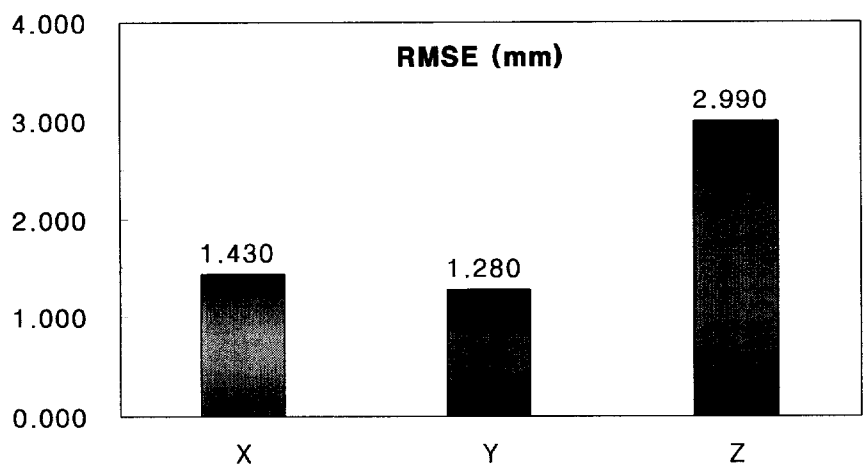


Figure 3.13 RMSE of Object Coordinates [X, Y, Z]

3차원 좌표의 정확도를 분석하기 위해 38점에 대한 기준점 좌표성과의 차이로 비교하였으며, 그 결과는 Table 3.9와 같다.

Table 3.9 The Residuals of Control Points

No.	Total Station			Digital Photogrammetry			Error		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Ex(m)	Ey(m)	Ez(m)
2	192925.346	208047.057	23.798	192925.348	208047.057	23.807	-0.002	0.000	-0.009
3	192925.015	208047.934	23.788	192925.020	208047.933	23.787	-0.005	0.001	0.001
4	192924.227	208047.426	23.786	192924.232	208047.426	23.787	-0.005	0.000	-0.001
5	192923.103	208047.836	23.774	192923.108	208047.836	23.770	-0.005	0.000	0.004
7	192919.766	208049.134	23.722	192919.765	208049.135	23.714	0.001	-0.001	0.008
9	192918.656	208049.425	23.718	192918.656	208049.426	23.712	0.000	-0.001	0.006
10	192917.506	208049.834	23.704	192917.504	208049.834	23.699	0.002	0.000	0.005
11	192917.184	208050.674	23.699	192917.180	208050.676	23.691	0.004	-0.002	0.008

Table 3.9 The Residuals of Control Points [Continued]

No.	Total Station			Digital Photogrammetry			Error		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	Ex(m)	Ey(m)	Ez(m)
13	192916.058	208051.087	23.691	192916.053	208051.087	23.686	0.005	0.000	0.005
14	192914.932	208051.500	23.676	192914.927	208051.499	23.675	0.005	0.001	0.001
15	192914.052	208050.983	23.666	192914.048	208050.983	23.670	0.004	0.000	-0.004
17	192912.935	208051.358	23.662	192912.933	208051.359	23.667	0.002	-0.001	-0.005
18	192911.820	208051.724	23.657	192911.821	208051.723	23.662	-0.001	0.001	-0.005
19	192911.485	208052.699	23.657	192911.488	208052.698	23.659	-0.003	0.001	-0.002
21	192910.351	208053.097	23.661	192910.355	208053.097	23.663	-0.004	0.000	-0.002
22	192909.479	208052.481	23.658	192909.484	208052.481	23.663	-0.005	0.000	-0.005
24	192823.326	208078.386	22.705	192823.334	208078.384	22.714	-0.008	0.002	-0.009
25	192822.619	208077.846	22.619	192822.617	208077.845	22.617	0.002	0.001	0.002
26	192822.203	208078.627	22.690	192822.202	208078.633	22.692	0.001	-0.006	-0.002
28	192817.663	208079.490	22.640	192817.659	208079.505	22.634	0.004	-0.015	0.006
29	192816.935	208078.973	22.551	192816.936	208078.981	22.542	-0.001	-0.008	0.009
31	192815.248	208079.898	22.601	192815.252	208079.899	22.596	-0.004	-0.001	0.005
32	192814.560	208079.444	22.525	192814.564	208079.446	22.516	-0.004	-0.002	0.009
33	192814.038	208080.106	22.583	192814.041	208080.105	22.578	-0.003	0.001	0.005
34	192813.340	208079.657	22.504	192813.342	208079.656	22.497	-0.002	0.001	0.007
35	192812.875	208080.203	22.555	192812.876	208080.201	22.552	-0.001	0.002	0.003
37	192811.040	208079.998	22.469	192811.042	208079.994	22.465	-0.002	0.004	0.004
38	192810.537	208080.707	22.542	192810.541	208080.701	22.544	-0.004	0.006	-0.002
39	192809.847	208080.171	22.454	192809.851	208080.166	22.452	-0.004	0.005	0.002
40	192809.379	208080.890	22.526	192809.383	208080.884	22.528	-0.004	0.006	-0.002
41	192808.692	208080.398	22.447	192808.697	208080.393	22.445	-0.005	0.005	0.002
43	192807.120	208081.253	22.509	192807.124	208081.251	22.511	-0.004	0.002	-0.002
44	192806.424	208080.760	22.423	192806.427	208080.758	22.421	-0.003	0.002	0.002
45	192805.954	208081.480	22.507	192805.956	208081.479	22.510	-0.002	0.001	-0.003
46	192805.284	208080.980	22.423	192805.284	208080.980	22.422	0.000	0.000	0.001
47	192804.778	208081.576	22.484	192804.770	208081.577	22.487	0.008	-0.001	-0.003
49	192803.004	208081.267	22.410	192802.998	208081.271	22.411	0.006	-0.004	-0.001
50	192802.495	208081.838	22.476	192802.488	208081.843	22.481	0.007	-0.005	-0.005

또한, 기준점의 좌표에 대한 RMSE는 X방향으로 0.658mm, Y방향으로 0.620mm, Z방향으로 0.797mm로 나타났으며, 이를 도식적으로 나타내면 Figure 3.14와 같다.

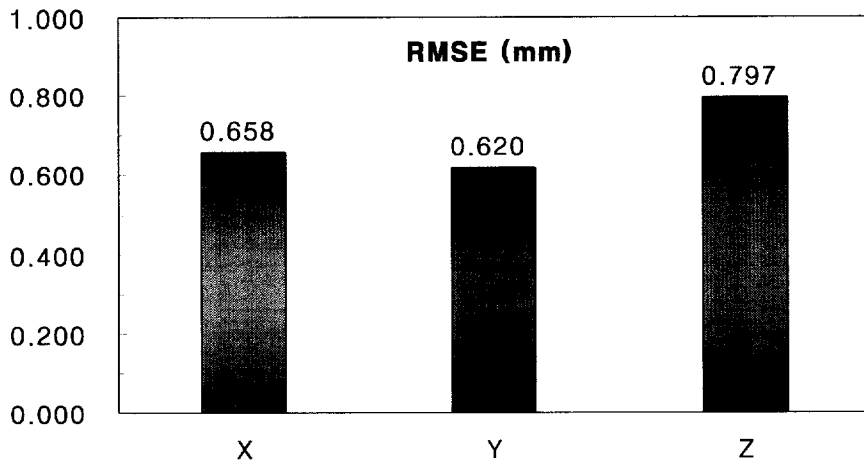


Figure 3.14 RMSE of Control Points [X, Y, Z]

4. 철도선형정보 추출

4.1 IP 좌표 추출

본 연구에서 평면선형을 추출하기 위해 영상으로부터 얻은 자료를 이용하여 중심선 좌표를 획득하였으며, 획득한 총 54개소에 대한 중심선 평면 좌표는 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 The Result of Center Line [X, Y]

Section	X (m)	Y (m)	Section	X (m)	Y (m)
0 m	193107.3073	207983.7952	270 m	192851.8074	208071.2837
10 m	193097.8746	207987.1155	280 m	192841.9657	208073.8258
20 m	193088.4329	207990.4102	290 m	192832.1578	208076.1630
30 m	193078.9955	207993.7170	300 m	192822.3857	208078.1940
40 m	193069.5557	207997.0169	310 m	192812.4257	208079.9916
50 m	193060.1128	208000.3083	320 m	192802.4009	208081.5646
60 m	193050.6720	208003.6054	330 m	192792.4837	208082.8492
70 m	193041.2341	208006.9107	340 m	192782.6170	208083.8590
80 m	193031.7922	208010.2047	350 m	192772.8398	208084.5798
90 m	193022.3515	208013.5022	360 m	192763.0152	208085.1009
100 m	193012.9087	208016.7936	370 m	192753.0644	208085.4045
110 m	193003.4661	208020.0858	380 m	192743.1867	208085.4474
120 m	192994.0258	208023.3844	390 m	192733.2672	208085.2306
130 m	192984.5906	208026.6975	400 m	192723.4582	208084.7665
140 m	192975.1567	208030.0144	410 m	192713.8701	208084.0916
150 m	192965.7192	208033.3211	420 m	192704.0279	208083.2232
160 m	192956.2776	208036.6158	430 m	192694.2003	208082.1839
170 m	192946.8365	208039.9122	440 m	192684.3963	208080.9791
180 m	192937.3945	208043.2059	450 m	192674.6179	208079.6549
190 m	192927.9507	208046.4947	460 m	192664.7217	208078.2137
200 m	192918.5150	208049.8066	470 m	192654.8244	208076.7816
210 m	192909.0703	208053.0901	480 m	192644.9234	208075.3757
220 m	192899.6116	208056.3686	490 m	192635.0256	208073.9468
230 m	192890.0543	208059.5886	500 m	192625.1277	208072.5185
240 m	192880.5128	208062.7137	510 m	192615.2298	208071.0903
250 m	192870.9388	208065.7683	520 m	192605.3319	208069.6620
260 m	192861.2434	208068.6235	528 m	192595.4340	208068.2337

중심선 좌표를 이용하여 직선구간의 직선식을 획득하기 위해 본 연구에서는 Figure 4.1과 같은 최소제곱선을 이용하였으며, 최소제곱법에 의해 산정된 직선식은 Figure 4.2와 같다.

이 두 최소제곱선으로 IP(X=192786.761, Y=208095.859)를 산정하였다.

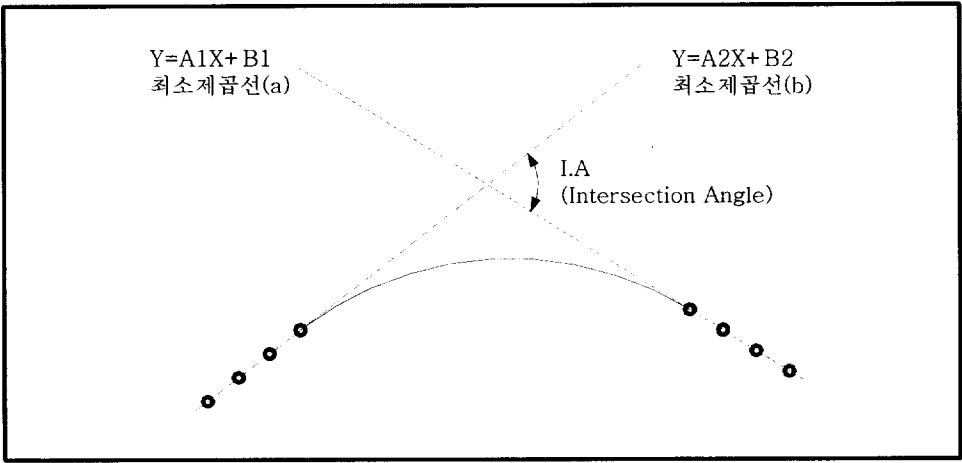


Figure 4.1 Observation Point of Straight Section

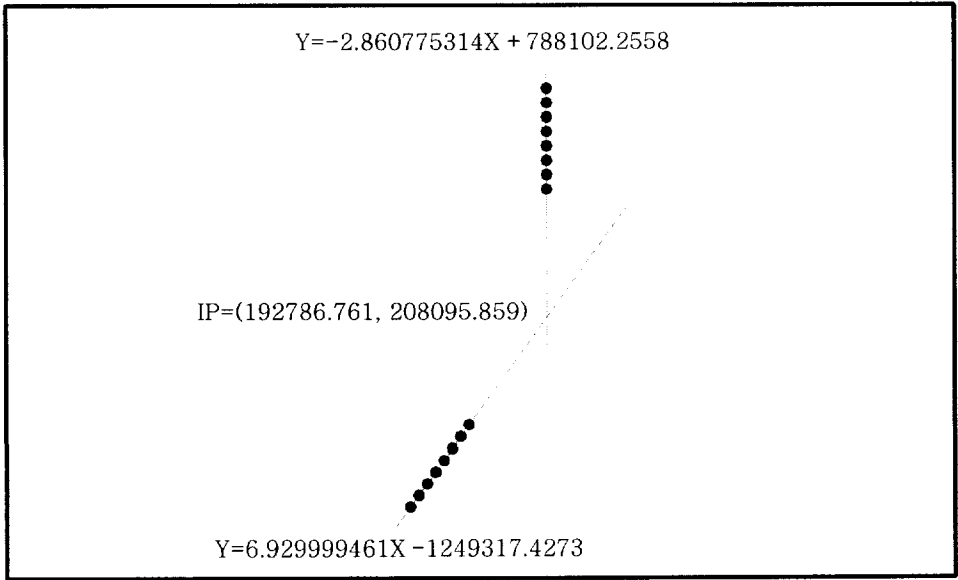


Figure 4.2 Estimation of IP

4.2 철도평면선형 추출

철도설계에서 중요한 요소는 평면선형정보이다. 평면선형정보 자료는 영상에서 얻은 수치를 이용하였으며 철도선형설계에 많이 활용되고 있는 TACOMA-NR을 이용하여 평면선형을 추출하였다. 프로그램의 흐름도는 Figure 4.3과 같다.

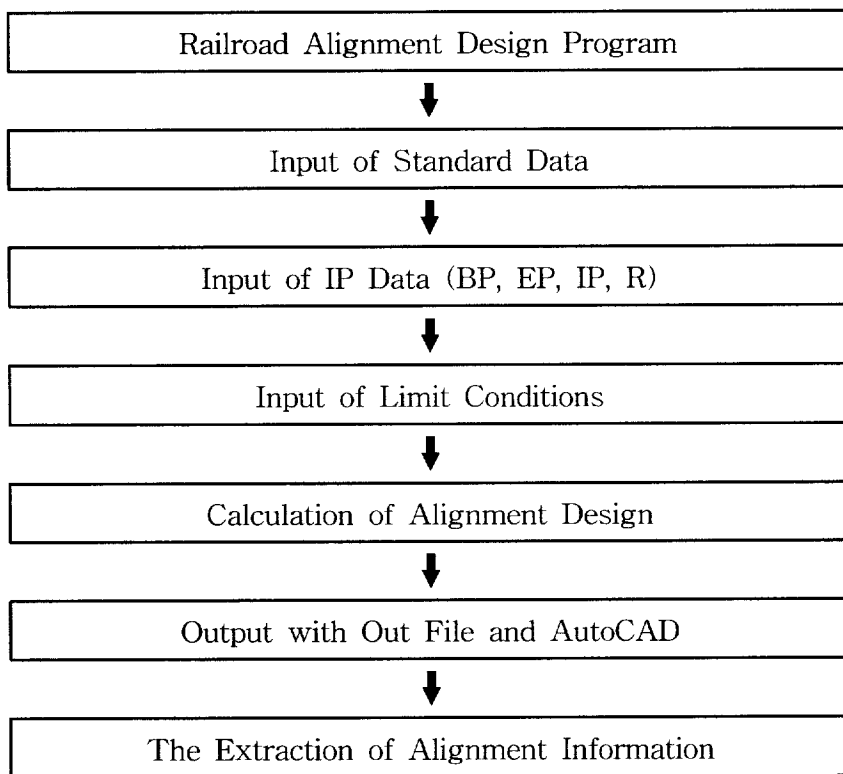


Figure 4.3 The Flow Chart of Program Process

먼저, 철도선형 설계 프로그램에서 기본데이터와 BP, EP, IP, R 그리고 제
한조건들을 입력하여 텍스트 파일과 도면파일로 평면선형정보를 추출하였다.
프로그램에 입력과정은 Figure 4.4와 같다.

Figure 4.4 Design Program about Railroad Alignment

프로그램 시행 후의 결과로 나타난 연구대상구간의 평면선형제원은 Table 4.2와 같고, 평면선형의 형상은 Figure 4.5로 출력되었다.

Table 4.2 The Result of Design Element

B P	X(m)	193107.3118	I A	27° 28 ' 43 "
	Y(m)	207983.8081		
I P	X(m)	192786.7607	T L	139.599 m
	Y(m)	208095.8586		
E P	X(m)	192595.4318	C L	275.107 m
	Y(m)	208068.2498		

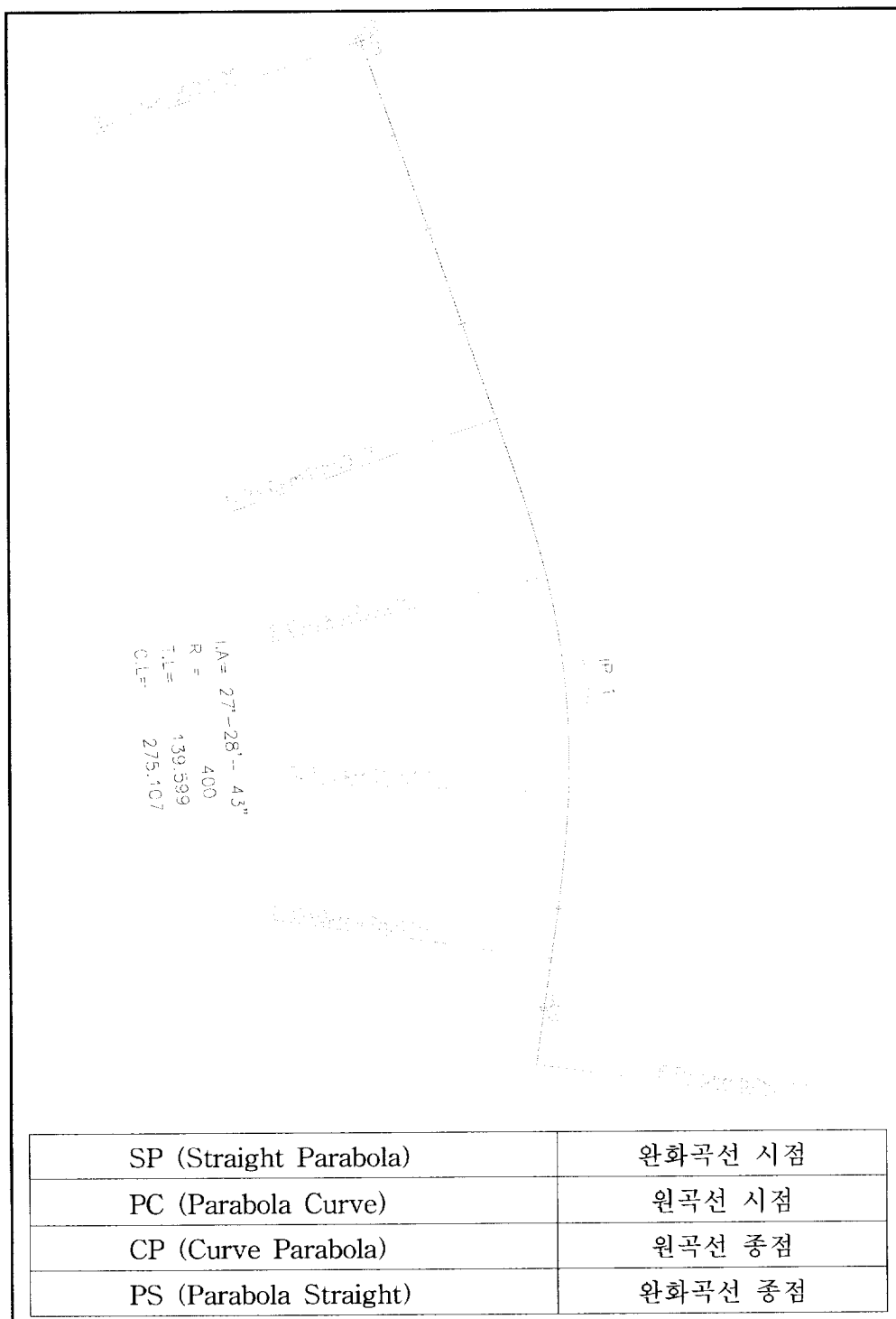


Figure 4.5 Shape of Horizontal Alignment

4.3 철도종단선형 추출

철도평면선형을 이용하여 철도의 종단에 관련된 종단선형을 추출하였다. 종단선형은 디지털 영상처리해서 나온 값들을 이용하였으며, 중심선에 대한 종좌표는 Table 4.3과 같다. 54개소의 종단선형은 Figure 4.6과 같이 나타났다.

Table 4.3 The Result of Center Line [Z]

Section	Z (m)	Section	Z (m)	Section	Z (m)
0 m	24.9686	180 m	24.0874	360 m	22.0630
10 m	24.9303	190 m	23.9902	370 m	22.0234
20 m	24.8828	200 m	23.8875	380 m	22.0070
30 m	24.8474	210 m	23.7731	390 m	22.0050
40 m	24.8109	220 m	23.6656	400 m	22.0006
50 m	24.7781	230 m	23.5550	410 m	22.0064
60 m	24.7530	240 m	23.4467	420 m	22.0308
70 m	24.7288	250 m	23.3445	430 m	22.0672
80 m	24.6903	260 m	23.2395	440 m	22.0990
90 m	24.6330	270 m	23.1326	450 m	22.1235
100 m	24.5852	280 m	23.0268	460 m	22.1501
110 m	24.5327	290 m	22.9138	470 m	22.1884
120 m	24.4911	300 m	22.8007	480 m	22.2224
130 m	24.4416	310 m	22.6852	490 m	22.2373
140 m	24.3742	320 m	22.5742	500 m	22.2530
150 m	24.3033	330 m	22.2989	510 m	22.2700
160 m	24.2444	340 m	22.2095	520 m	22.2850
170 m	24.1750	350 m	22.1303	528 m	22.2896

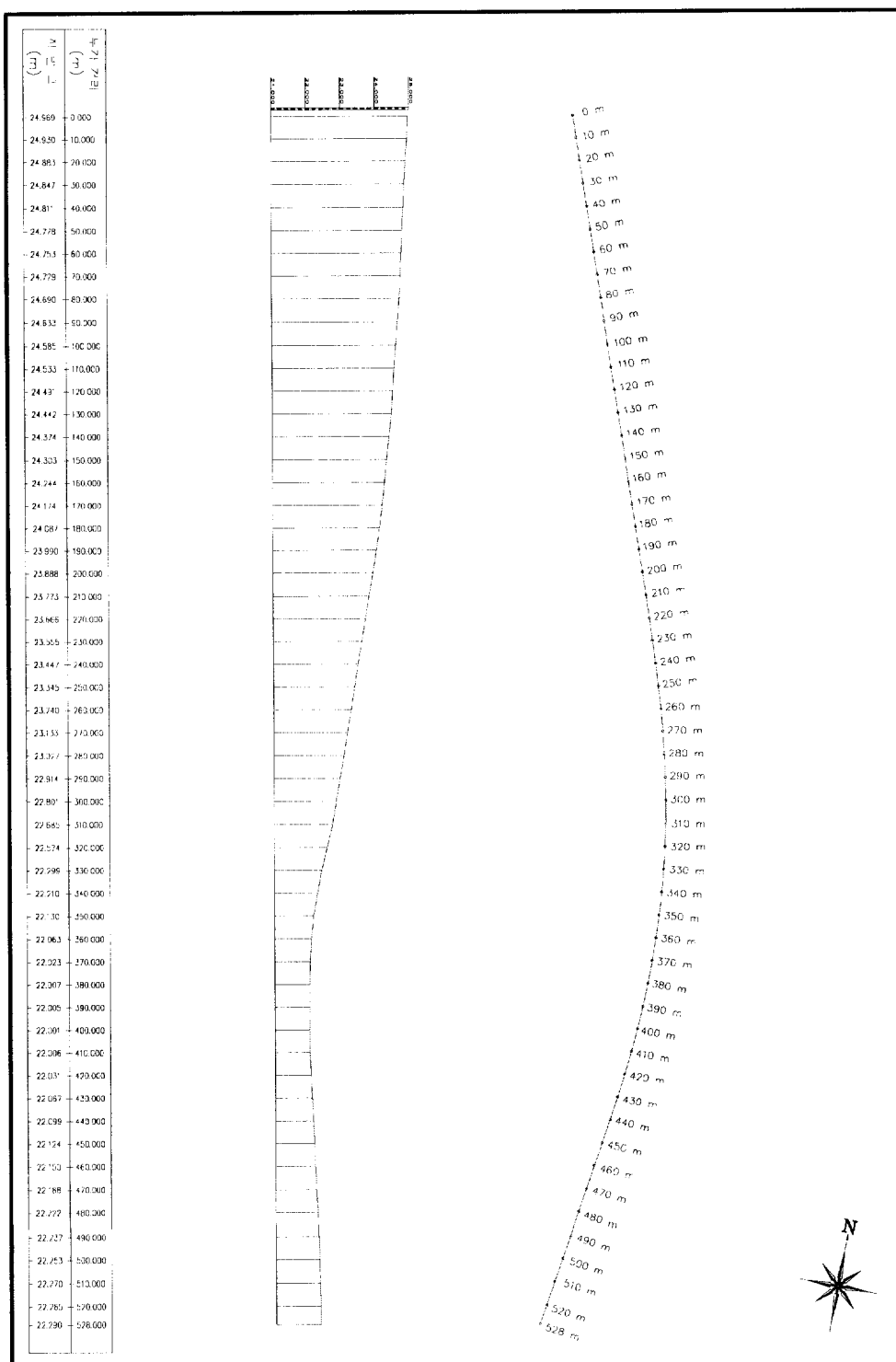


Figure 4.6 Shape of Vertical Alignment

4.4 Cant 산정

디지털 영상을 이용하여 철도의 내·외측에 대한 Cant 정보를 산정하였다. Cant 정보는 디지털 영상처리에서 나온 3차원 값들을 이용하였다. 10m 간격으로 산정하였으며, 본 연구대상지역에서 Cant가 존재하지 않는 직선 20개소, Cant가 0.138m인 원곡선 11개소에 대하여 비교하였다.

산정된 Cant는 Table 4.4와 Table 4.5로 나타난다.

Table 4.4 The Result of Cant [Straight Section]

Section	Inside (m)	Outside (m)	Cant (m)		
			Test	Design	Error
0 m	24.9685	24.9686	0.0001	0.0000	0.0001
10 m	24.9305	24.9300	0.0005		0.0005
20 m	24.8827	24.8828	0.0001		0.0001
30 m	24.8478	24.8470	0.0008		0.0008
40 m	24.8101	24.8116	0.0015		0.0015
50 m	24.7748	24.7813	0.0065		0.0065
60 m	24.7535	24.7525	0.0010		0.0010
70 m	24.7298	24.7278	0.0020		0.0020
80 m	24.6905	24.6901	0.0004		0.0004
90 m	24.6333	24.6327	0.0006		0.0006
100 m	24.5837	24.5866	0.0029		0.0029
110 m	24.5313	24.5341	0.0028		0.0028
120 m	24.4914	24.4907	0.0007		0.0007
130 m	24.4392	24.4440	0.0048		0.0048
140 m	24.3745	24.3739	0.0006		0.0006
150 m	24.3040	24.3025	0.0015		0.0015
160 m	24.2451	24.2437	0.0014		0.0014
170 m	24.1776	24.1724	0.0052		0.0052
180 m	24.0878	24.0870	0.0008		0.0008
190 m	23.9903	23.9900	0.0003		0.0003
Average					0.0017

Table 4.5 The Result of Cant [Curved Section]

Section	Inside (m)	Outside (m)	Cant (m)		
			Test	Design	Error
290 m	22.8443	22.9832	0.1389	0.1380	0.0009
300 m	22.7311	22.8703	0.1392		0.0012
310 m	22.6168	22.7536	0.1368		0.0012
320 m	22.5053	22.6431	0.1378		0.0002
330 m	22.2298	22.3680	0.1382		0.0002
340 m	22.1399	22.2790	0.1391		0.0011
350 m	22.0609	22.1997	0.1388		0.0008
360 m	21.9954	22.1306	0.1352		0.0028
370 m	21.9526	22.0941	0.1415		0.0035
380 m	21.9395	22.0745	0.1350		0.0030
390 m	21.9351	22.0749	0.1398		0.0018
Average					0.0015

5. 결 론

디지털 영상을 이용하여 철도의 선형정보를 추출하기 위해 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 디지털 영상을 이용하여 다중영상표정과 광속조정법에 의해 결정된 대상물의 번들조정 후 RMSE는 X방향으로 1.43mm, Y방향으로 1.28mm, Z방향으로 2.99mm로 나타났으며, 3차원 좌표의 정확도를 분석하기 위해 기준점 좌표성과와 비교한 결과, 기준점 좌표에 대한 RMSE는 X방향으로 0.658mm, Y방향으로 0.620mm, Z방향으로 0.797mm로 나타났다. 이는 궤간(2mm) 및 표고(7mm)의 허용오차기준(철도건설규칙)을 만족하므로 선형정보추출의 방법으로 타당함을 보여준다.
2. 영상분석을 통해 중심선을 추출하고 최소제곱법에 의한 직선궤도를 산정하였으며, 산정된 최소제곱선에 의해 IP(192786.761, 208095.859)를 추출할 수 있었다. 이를 철도선형 설계 프로그램에 적용한 결과 IA, CL, TL 등의 제원과 평면선형 및 종단선형을 추출할 수 있었다.
3. Cant의 정확도를 분석하기 위해 영상으로부터 추출된 Cant를 산정한 결과 본 연구대상지역의 Cant가 없는 직선구간에서는 오차가 0.1mm~6.5mm, Cant가 138mm인 원곡선구간에서는 오차가 0.2mm~3.5mm의 범위를 나타냈다. 이는 레일길이 10m에 대하여 7mm의 허용오차기준(철도건설규칙)을 만족하므로 철도궤도에 디지털 영상을 이용하여 Cant량을 해석할 수 있겠다.

4. 향후 디지털 영상자료에 대한 정밀한 기하학적 해석의 연구가 지속될 경우, 선형의 틀림을 결정함과 동시에 레일, 침목 등의 마모와 교체시기와 같은 철도궤도 정보를 과학적이고 효율적으로 획득할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Bjorn Kufver, "Optimization of single horizontal curves in railway alignments" Division of transport systems, Swedish Road and Transport Research Institute, Sweden, TRITA-FKT Report 1997:45, ISSN 1103-470X, ISRN KTH/FKT/FR-97/45-SE, VTI Report 424A, KTH Hskoletryckeriet, 1997.
2. John C. Trinder, Yandong Wang, "Automatic Road Extraction from Aerial Images", Digital Signal Processing 8, pp.215~224, 1998.
3. Wang, Y, Trinder, J. C., "Use of topology in automatic road extraction", Int Archives Photogrammetry Remote Sensing, 32, pp.394~399, 1998.
4. Tetsuya Kuuno and Hiroaki Sugiura, "Detection of Road Conditions with CCD Cameras Mounted on a Vehicle", systems and computers in Japan, Vol. 30, No. 14, pp.88~98, 1999.
5. Habib, A. "Matching road edges in stereo-image sequences using data association techniques", photogramm. Eng. Remote sens. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote sensing Vol. 66(1), pp.91~98, 2000.
6. Prof. Dr. Karl KRAUS, "PHOTOGRAMMETRY I, II", 4th edition, 1997.
7. Pratt, W.K., "Digital Image Processing", 2nd ed, Wiley Interscience, pp.477-662, 1991.

8. A. T. Khaled and L. Alfred, "Merging Algorithms of 3D Geodesy and Photogrammetry", ASPRS-ACSM Annual Convention Technical Papers, pp.74~83, 1989.
9. S. K. Ghosh, "Phototriangulation", Lexington Books, pp.103~141, 1975.
10. 材井後治, "寫眞測量 とリモートセンシング", ISP特集號, pp.61~71, 1980.
11. Esveld. C, "Modern Railway Track", MRT - Productions, 1989.
12. 이종득, "철도궤도역학", 노해출판사, 1998.
13. 서사범, "궤도장비와 선로관리", 열과알, 2000.
14. 정의환, 이남수, "GPS 기법을 이용한 철도 선형제원의 복원", 한국철도학회, pp.123-128, 2003.
15. 엄기영, 엄주환, "기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술개발", 한국철도기술, 2003.
16. 최종길, "철도 전철화에서 건설과 유지보수 사업에 관한 연구", 석사학위논문, 연세대학교 대학원, 2003.
17. 이남수, "철도곡선부에 있어서 캔트 설정에 관한 연구", 한국측지학회, 제11권 제1호, 1993.
18. 이남수, "철도 완화곡선 측량에 관한 고찰", 철도전문대학 논문집, 1993.

19. 유환희, 조해용, 송영선, “수치사진측량을 이용한 GIS의 지형정보 자동 획득”, 대한토목학회 논문집, 제16권 제Ⅲ-4호, pp.335~341, 1996.
20. 허종호, “최소제공법에 의한 평면선형 설계제원 산정”, 석사학위논문, 부경대학교 대학원, 2001.
21. 서동주, 이종출, “수치사진측량을 이용한 도로평면선형정보체계 개발”, 한국측량학회지, 제21권 제4호, pp.347~354, 2003.
22. 김수성, “GIS를 이용한 철도선형 최적화에 관한 연구”, 석사학위논문, 부산대학교 대학원, 2003.
23. 서동주, “수치사진측량에 의한 도로정보체계 개발”, 박사학위논문, 부경대학교 대학원, 2003.
24. 건설교통부, “철도설계기준(철도교편)”, 대한토목학회, 2004.
25. 건설교통부, “도시철도(지하철) 공사표준시방서”, 대한토목학회, 1997.
26. 서사범, “쾌도시공학”, 노해출판사, 1989.
27. 서사범, “선로공학”, 열과알, 2002.
28. 민 원, “도로공학”, 구미서관, 1993.
29. 건설교통부, “철도건설규칙”, 2005.
30. 건설교통부, “국유철도건설규칙”, 2003.
31. 김난영, “속도 향상에 따른 철도완화곡선 연신에 관한 연구”, 석사학위 논문, 경기대학교 산업정보대학원, 2001.

32. 이남수, “철도곡선부의 캔트 설정에 틸팅장치에 의한 주행성 연구”, 박사학위논문, 경기대학교 대학원, 1993.
33. 장호식, “무선조정헬리콥터 사진측량시스템을 이용한 문화재관리 정보 시스템 구축”, 박사학위논문, 부경대학교 대학원, 2004.
34. 한국철도시설공단, “철도설계편람 I (철도계획 및 정거장)”, 대한토목학회, 2004.
35. 한국철도시설공단, “철도설계편람 II (토공 및 안전부대시설)”, 대한토목학회, 2004.
36. 김경철, “도시 철도론”, 노해출판사, 2002.
37. 건설교통부, “철도설계기준(철도교편)”, 대한토목학회, 2004.

감사의 글

이제 새로운 첫 발걸음을 내딛으려 합니다. 이 한걸음을 내딛을 수 있
기까지 정말 오랜 시간이 걸렸습니다. 2년 전 이 곳 부정대학교 대학원에
들어올 때의 제 모습이 떠오릅니다. 새로운 시작에 대한 설렘과 두려움,
앞으로 이루어 나가야할 연구에 대한 열정 등으로 가득한 저였습니다. 이
러한 열정 앞에서도 지난 시간 동안 수 없이 많은 좌절과 어려움이 저를
힘들게 하였습니다. 이런 저를 옆에서 지켜보아 주시며 끊임없이 힘을 주
신 많은 분들에게 이 글을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

먼저, 부족한 저를 가까운 곳에서 많은 가르침과 조언을 아끼지 않으시
고 생활의 지혜를 가르쳐주신 이종출 지도교수님께 진심으로 감사드리며,
진심어린 말씀 하나하나 새겨가며 최선을 다해 살아가겠습니다.

그리고 바쁘신 와중에 본 논문을 위해 정성을 다하신 정진호 교수님,
국승규 교수님께 깊은 감사를 드리며, 대학원 생활을 비롯하여 학문연구
에 아낌없는 가르침을 주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 손인식 교수
님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이영대 교수님, 김명식
교수님, 이환우 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님, 김수용 교수님께
도 진심어린 감사의 인사를 올립니다.

또한, 연구실의 발전과 가족들의 우애를 위해 항상 노력하시는 서동주
박사님, 친형처럼 자상함으로 보살펴주신 노태호 박사님, 연구실에 활기가
넘치게 이끌어주시는 장호식 박사님, 2년 동안 미흡한 저에게 많은 경험
으로 성장하게 해주신 김진수 선배님, 후배에게 따뜻한 격려를 해주신 조
용재 선배님, 지난 1년 동안 힘든 생활속에서도 열심히 생활해준 유영화
후배님, 서재수 후배님, 남일현 후배님께 고마움을 전합니다.

특히, 언제나 마음만은 항상 연구실 가족들과 함께하며 후배들에게 용
기를 북돋아 주시는 서정훈 선배님, 허종호 선배님, 서유미 선배님, 강성

원 선배님, 남신 선배님, 강상민 선배님께 감사의 마음을 전하며, 직장생활과 학업을 병행하시면서 연구실에 많은 애정을 보여주시는 김종원 부장님, 이영도 선생님, 박태중 님, 박종민 님, 김정현 님, 박현용 님, 그밖에 도우회 회원님들께도 고마움을 전합니다.

그리고 부경대학교 대학원의 화합과 발전을 위해 노력하시는 백동일 선배님, 정인주 박사님, 김정민 선배님, 윤은찬 선배님을 비롯한 부경토사모의 여러 학우님께도 감사드리며, 오랫동안 곁에서 힘이 된 친구 형대, 현학, 영준, 성준, 동민, 병철, 광일, 같은 길을 걸어가고 있는 대학동기 모임인 D-1515 회원 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

끝으로, 성실한 삶의 모습을 몸소 보여주시고 자식을 믿고 자식만을 위해 살아오신 아버님과 항상 자식 걱정해 하루도 편한 날이 없이 사랑과 정성으로 돌봐주신 어머님께 감사드리며, 그 깊은 은혜에 보답하겠습니다.

이 자리에 서기까지 관심을 아끼지 않고 도움을 주신 모든 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

강 윤 성 올림