

Industrial Measuring System(IMS)과 그 소프트웨어의 구조

Industrial Measuring System (IMS) and its Software Structure

金秉國*

Kim, Byung Guk

Abstract

IMS, a precision coordinate measuring system using theodolites, is being used to survey and align precision mechanical structures. Compared to conventional mechanical devices for precision measurement, such as CMM (Coordinate Measuring Machine), the target objects of IMS have little limitations in their sizes and shapes, and can be measured in place. Also since IMS displays the coordinate values in real-time, it is possible to perform measurement and alignment of the objects simultaneously. In this paper, the elements and functions of IMS are introduced and a mathematical model of the new software, which utilizes an altered version of the 'Bundle' adjustment algorithm of analytical photogrammetry for the specific use of IMS, is demonstrated. Differences of the mathematical model of IMS from that of analytical photogrammetry are discussed by following the steps of the 'Measurement' option in the 'Main Menu' of the software. A new IMS calibration method is proposed to calculate better first approximations for the 4 unknown theodolite parameters and the coordinates of target objects. The software provides the 'Bundle' procedure for the first approximations of the unknowns before the real-time measurement. It also provides an opportunity of 'bundling' to re-adjust the collected positional data at the end of the measurement.

요 지

테오도라이트를 이용한 정밀측량시스템인 IMS가 개발되어 기계구조물의 정밀측량에 사용되고 있다. CMM(Coordinate Measuring Machine)과 같은 종래의 기계적 정밀측정장비에 비하여 측정대상물의 크기와 모양에 거의 제한이 없으며, 대상물이 설치되어 있는 현장에서 측량을 실시할 수 있다는 장점이 있으며, 또한 자료의 실시간 표현이 가능하여 대상물에 대한 관측과 위치수정을 동시에 수행할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 본 논문에서는 IMS의 구성과 기능에 관한 고찰과 더불어, 새로이 개발된 소프트웨어의 수학적 모델이 제시되었는데, 그 모델은 해석사진측량에서의 광속조정법을 IMS의 특수성에 맞게 변형한 형태이다. 관측에서의 단계별 진행방법이 설명되었고, 그 배경 및 해석사진측량 기법과의 차이에 대하여 논의되었다. 테오도라이트 외부표정요소와 대상물 공간좌표의 초기치를 더욱 近似하게 계산할 수 있는 새로운 IMS Calibration의 방법도 제시되었다. 대상물 관측전에 광속조정법을 적용하여 테오도라이트 외부표정요소와 대상물 공간좌표의 초기치를 산출하도록 하였으며, 측량작업이 완료된 후 광속조정법을 이용하여 결과치를 재조정할 수 있게 하였다.

* 정회원 · 浦項加速器研究所 測量研究室 室長, 責任研究員

1. 序 論

테오도라이트(Theodolite)의 읽음값이 수치화되어서 직접 컴퓨터에 입력할 수 있게 되고 그 분해능이 향상되어 1/10000 Grad(0.3 arc second)에 이르게 됨에 따라, 일반적인 지형측량 등에만 이용되어 오던 테오도라이트가 이제는 정밀측량의 분야에도 이용되게 되었다.

기계구조물의 제작, 조립 및 설치를 위한 정밀측정에는 Micrometer 등의 일반적인 기계적 측정장비와 CMM(Coordinate Measuring Machine) 등의 3차원 측정장비들이 주로 사용되어 왔다. CMM은 그림 1에서 보는 것과 같은 Crane 형식으로, Cartesian Coordinate System으로 이동하며 측정대상물(피측정물)의 형태를 X, Y, Z의 점의 집합으로 나타내는 정밀측정장비이다.

그러나, 이러한 측정장비는 설치 및 유지의 비용이 그 대상물의 크기와 요구되는 정확도에 비하여 매우 高價이며, 일정장소에 고정설치 되어야 하므로 대상물은 반드시 이동될 수 있는 것이어야 하고, 또 그 크기에 제한이 있어서 전투기, 로켓 등 대형 공작물의 측정에는 거의 사용할 수 없었다. 예를 들면, CMM 측정장비로는 로봇트 팔이 설계도면대로 제작이 되었는가 하는 검사는 가능하나, 공장내에 설치되었을 때 다른 기계와의 상대위치의 관측은 불가능하다. 또, 예전에는 크게 문제가 되지 않았던 자동차, 전투기, 로켓, 미사일 등의 실제표면의 설계 표면과의 상이점 또는 작동 후의 표면의 변형 등이 이제는 그들의 속도의 상승, 주행거리의 연장, 정확

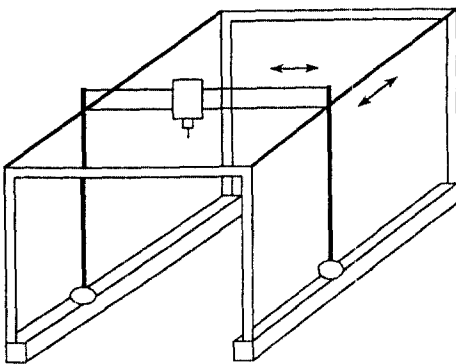


그림 1. Schematic Drawing of CMM.

도 향상의 욕구 등으로 인하여 主要 문제의 하나가 되므로서, 그 제작의 정확도 및 변형의 관측이 필요하게 되었으나, CMM 측정장비로는 많은 공간적인 제약이 있어 왔다.

이러한 문제들의 일부를 해소할 수 있는 방안으로, 테오도라이트를 이용한 광학적, 비접촉(Non-Contact) 방식의 좌표측량상비인 Industrial Measuring System(IMS)이 개발되었다. IMS는 그 정확도를 CMM 측정장비의 정확도와 거의 같은 수준으로 유지할 수 있으면서, 그 가격이 비교적 저렴하며, 대상물의 크기에 그다지 제한이 없고, 또한 대상물이 설치되어있는 현장에서 측량이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 즉, 공장 설비내로 측정 시스템을 옮겨 현장관측을 할 수 있으며, 부피가 큰 공작물은 그 형상을 고려하여 테오도라이트를 배치하거나, 테오도라이트의 수를 늘려 관측에서의 死角을 없게 함으로서 측량을 가능하게 하였다.

본 논문에서는 IMS의 구성과 기능에 관한 고찰과 더불어 그 기능의 근간을 이루는 소프트웨어의 구조를 중점적으로 연구하였다. 소프트웨어의 흐름과 수학적 모델은 상품화된 IMS마다 서로 다를 것으로 사료되나, 본 논문에서 기술하는 소프트웨어의 흐름과 수학적 모델은 필자가 개발하여 미국 Brunson Instrument社에 공급한 것을 모형으로 하였다.

2. IMS의 구성

IMS 구성은 다음의 것을 기본으로 한다.

- (1) 2대 이상의 테오도라이트
- (2) 수치변환장치(테오도라이트 Interface Module)
- (3) 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어
- (4) 그외 보조 구성품

테오도라이트는 IMS의 가장 중요한 부분이다. 테오도라이트의 대수는 대상물의 크기, 형상 및 요구되는 정확도에 따라 결정을 하여야 하지만, 대체로 3대 이상의 테오도라이트를 사용한다(혹은 1대의 테오도라이트로도 다른 3곳으로 위치를 옮기며 사용할 수 있다). 2대의 테오도라이트로는 잉여관측(Redundant Observation)이 없으므로 失手의 감지, 오차수정 등이 불가능하여 지며, 아주 작은 대상물이

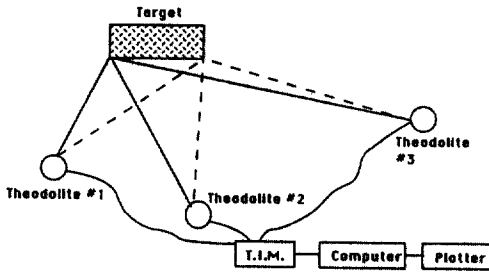


그림 2. Configuration of IMS.

아니고서는 각 測點간의 Error Ellipse의 큰 격차를 피할 수 없는 경우가 많다. 그림 2는 기본적 IMS의 개요를 보여주고 있다. 현재 몇 데오들라이트 製作社들은 自社의 IMS를 개발하여 상품화하였는데, 대표적인 IMS로는 Leica社의 ECDS(Electronic Coordinate Determination System) Series, Cubic Precision社의 AIMS(Analytical IMS) Series, Brunson Instrument社의 BETS(Brunson Electronic Triangulation System) 등이 있다.

수치변환장치(Theodolite Interface Module : TIM)란 데오들라이트로 視準한 수평, 수직각의 읽음값을 컴퓨터의 Data Base로 직접 입력하기 위한 데오들라이트와 컴퓨터 간의 Communication 장치이다. 보통 10대 정도의 데오들라이트를 동시에 연결하여 사용할 수 있도록 되어 있으며, 특별히 Laser Tracker 겸용으로 설계되어 있는 것도 있다. 데오들라이트의 모델에 따라 숫자의 송신방식에 차이가 있으므로 각 모델 고유의 변환장치가 필요하게 된다. 그러나, 하나의 수치변환장치에 여러 종류의 데오들라이트를 동시에 연결, 사용할 수 있도록 한 수치변환장치도 개발되어 있으며, 또한 컴퓨터에서 逆으로 변환장치의 전기신호 수신방식을 바꿀 수 있는 수치변환장치도 개발중에 있다. 수치변환장치와 컴퓨터는 주로 RS-232 Serial Port로 연결된다.

데오들라이트의 망원경(Telescope)을 통한 시준에 따른 測角 이외의 모든 기능은 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어에서 이루어진다. 개인용 또는 Portable 컴퓨터를 사용하며, 자료의 입력, 보관, 처리 및 해석을 거의 實時間(Real-Time)으로 해야 되므로 고성능, 고용량의 것일수록 좋다. 물론 그 처리능력은 소프트웨어에 기반을 두고 있는데, 다음 章에서 설

명될 IMS의 기능은 주로 소프트웨어의 기능을 말하는 것이다.

그외의 보조적 장비로는, 데오들라이트를 안정되게 하기위한 Heavy Industrial Stand ; 시스템의 Scale Calibration 을 위한 기준봉(Invar Calibration Bar) ; 데오들라이트의 시준완료를 알리는 Signal Box ; 데오들라이트와 수치변환장치를 연결하는 Cable ; 그리고 시스템의 이동을 용이하게 하기 위하여, 위의 모든 구성품을 보관하고, 운반할 수 있게 제작된 Cart 등이 있다.

3. IMS의 기능

IMS의 기능은 그 시스템 사용의 용도, 편의성, 또는 소프트웨어 자체나 취득한 자료의 보안을 위하여 변경되어질 수 있는 것이지만, 크게 보아 관측의 기능(시스템 Calibration 기능 및 변경의 기능을 포함함), 해석의 기능, 일반자료 관리의 기능으로 나눌 수 있다. 각 기능을 가동키 위한 전형적인 선택항목들은 그림 3에 보인 바와 같다.

3.1 관측(Measurement)의 기능

관측은 IMS의 가장 기본적인 기능으로서, 데오들라이트로 어떤 점을 視準하는 순간 그 점의 X, Y, Z의 3차원 좌표를 컴퓨터의 Screen에 나타내게 한다. 사진측량과 비교할 때, 이 자료의 實時間 표현(Real-Time Display)이 IMS의 주된 장점의 하나인데, 어떤 기계를 설치하는 경우 그 설치의 현장에서 관측과 위치수정을 동시에 수행할 수 있게 된다. 이 관측의 단계는 다시 데오들라이트를 Calibration하는

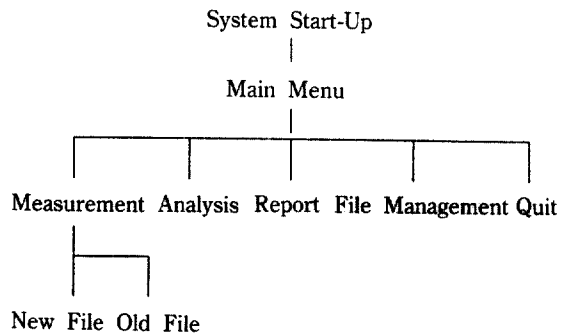


그림 3. IMS Start-Up Menu.

단계와 대상물의 未知點 측량의 단계로 나눌 수 있는데, 그 Calibration의 단계란 좌표계를 결정하고, 기준봉을 사용하여 데오돌라이트의 위치 및 零의 방향(Zerodirection)을 결정하는 단계를 말한다. 未知點 측량작업中の 한가지 기능으로 변경의 기능이 있는데, 이는 한가지 대상물을 측량하는 사이에 있을 수 있는 데오돌라이트의 이동을 수용하게 한 기능이다. 즉, 철탑의 변위 관측, 전투기 날개의 표면 관측등 장시간을 요하는 측량의 경우 도중에 데오돌라이트의 움직임이 있을 수 있으며, 또 대상물의 형상에 따라 데오돌라이트를 움직여야 할 경우도 있는데 이들 각 경우를 Option으로 택할 수 있게 한 것이다. 또 작업을 도중에서 중단하였다가 다시 시작할 수 있도록 새로운 작업과 부가작업을 분리하여, 부가작업일 경우 새 작업시의 여러 준비단계를 생략할 수 있게 하였다(그림 3의 New File, Old File Option).

3.2 해석(Analysis)의 기능

대상물에서 수집된 諸點으로부터 線 혹은 面으로의 Fitting 기능을 말한다. 이는 이미 개발되어 있는 어떤 기하학적인 형태에 대상물을 부합시키는 작업이며, 그 결과로 변위 형상을 알게 된다.

3.3 일반자료관리(Report and File Management)의 기능

자료의 입력, 출력, 분리, 결합, 복제, 삭제 등 말 그대로 일반적 자료관리의 기능이며, 그에 따른 자료보안의 문제 등도 필수적인 고려사항의 하나이다.

그밖에 사용자의 숙련도에 따른 Prompt, 도면화를 위한 자료의 변환기능 또는 GIS(Geographic Information System) 프로그램과의 연결로 공장설비지도의 제작 등 공장자동화에 도움이 되게한 기능 등이 있다.

4. IMS 소프트웨어의 구조

본 논문에서의 主 연구대상인 관측항목의 진행도는 그림 4에 보인 바와 같다.

시스템을 원하는 장소에 설치하고, 모든 전기선(Power & Signal Cable)의 연결을 마친 후, 그림

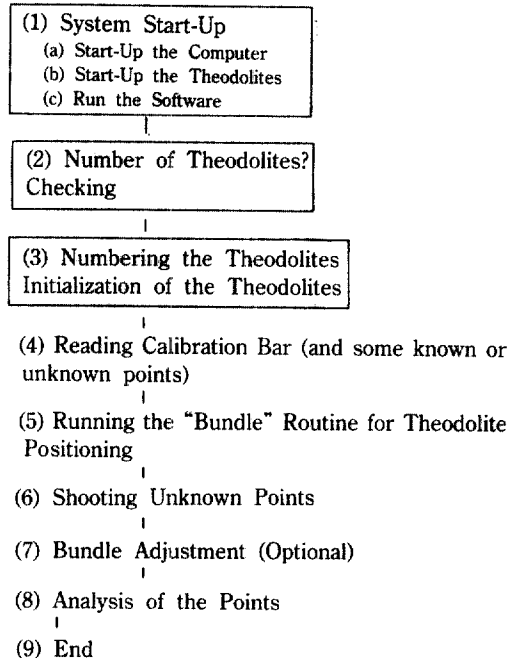


그림 4. Flow of IMS Measurement.

4의 1단계 작업인 'System Start-up'을 한다. 그 첫번째 Prompt가 데오돌라이트의 대수를 입력하라는 것인데(그림 4의 2단계), 수치변환장치를 통하여 컴퓨터가 직접 사용자가 의도하는 데오돌라이트의 수를 점검하게 된다. 이는 데오돌라이트의 전기적 연결을 점검하여, 데오돌라이트의 연결 잘못에 의한 재작업을 미연에 방지하고자 적용하였다. 그림 4의 3, 4단계의 IMS Calibration 단계는 다음의 절에서 자세히 언급이 된다. 데오돌라이트의 未知요소 계산을 위하여 광속조정법이 1차 적용되어지며(5단계), 모든 시스템 준비단계(1~5단계)가 끝나면 6단계의 未知點 관측에 들어간다. 未知點들의 관측을 완료한 후, 선택사항으로서, 다시 광속조정법으로 보정하는 단계(7단계)를 거칠 수도 있다. 이 관측된 점의 집합은 8단계의 해석의 기능을 거치면서 그 대상물의 형상을 가지게 된다. 새로이 개발된 소프트웨어의 가장 큰 특징은 해석사진측량학(Analytical Photogrammetry)의 이론^(1,2,4)을 그대로 이용하였다는 것인데, 그 유사성을 4.1절에 기술하였다. 해석사진측량학에서의 관측방정식을 다소 변형시켜, 수평측량방정식에 이용되는 수평각 및 수직각의 관측방정식을

도입하고,⁽³⁾ 그 정규방정식을 유도하였으며(4.2절), 그림 4의 3, 4단계에 대한 상세설명을 4.3절에 기술하였다.

4.1 해석사진측량과의 유사성

임의의 위치에 설치한 2대 이상의 데오돌라이트에 의한 수평각 및 수직각의 측각으로 대상물의 공간좌표를 구하는 것은, 사진측량학에서 2대 이상의 사진기로, 혹은 1대의 사진기로 2곳 이상의 위치에서 대상물을 촬영하여 공간좌표를 얻는 것과 같은 원리가 적용되어질 수 있다. 즉, 사진측량에서의 사진기의 6개의 외부표정요소인 $\omega, \phi, \kappa, X, Y, Z$ 를 데오돌라이트에 적용하여, 데오돌라이트를 $\omega=90^\circ, \kappa=0^\circ$, 그 이외의 요소(ϕ, X, Y, Z)는 未知인 4개의 외부표정요소를 가지는 사진기로 생각할 수 있다. 또한 해석사진측량에서 사진상의 既知와 未知의 점들의 사진좌표를 관측하여, 광속조정법을 이용하여 사진기의 외부표정요소와 대상물의 공간좌표를 동시에 계산하는 것과 마찬가지로, 데오돌라이트의 수평각 및 수직각을 일정거리에 있는 임의의 연직면에 투사한 가상의 사진을 조성하여 해석사진측량의 이론을 적용할 수 있다.

그러나, 해석사진측량에서는 대상물의 모든 점의 사진좌표를 구한 후 사진기의 외부표정요소 및 대상물의 未知點의 위치를 계산해 내는, 촬영과 계산이 분리되어 있으나, IMS에서는 자료의 實時間 표현이 가장 중요하므로, 각 개별점의 관측 및 좌표값 표현에는 전방교회법(Space Intersection)을 사용하고(그림 4의 6단계), 대상물의 개별점의 관측이 완료된 후 선택사항으로서 광속조정법을 이용하여 좌표값들을 점검, 보정할 수 있게 하였다(그림 4의 7단계). 물론 개별점 관측을 위해 필수적으로 알아야 하는 데오돌라이트의 未知의 외부표정요소는 IMS 설치 준비 단계(그림 4의 5단계)에서 이미 광속조정법을 이용하여 결정하였다.

4.2 IMS에서의 관측방정식

윗 절에서 기술한대로, 사진기의 6개의 외부표정요소中 $\omega=90^\circ, \kappa=0^\circ$ 로 고정한 나머지 4개의 未知요소를 구하는 방법으로, 3점 이상의 既知點 관측에 의한 광속조정법과, 길이가 정확하게 알려진

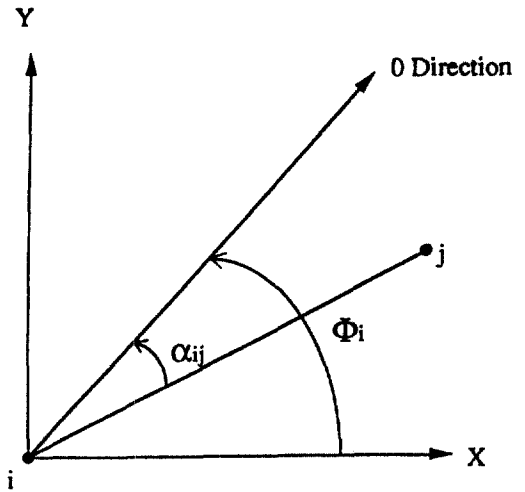


그림 5. Direction Reading from Theodolite 'i'.

1개 이상의 기준봉과 3점 이상의 未知點 관측에 의한 광속조정법의 두 가지 경우를 검토하였다. 3점 이상의 既知點 관측은 사진측량의 경우와 동일한데, 보통의 기계구조물에(또는 배경의 구조물에) 3점 이상의 既知點을 가지는 것이 용이한 일이 아니므로, 既知點없이 未知요소를 구할 수 있도록 두번째의 방법을 채택하였다. 기준봉 관측에 의한 초기치(First Approximation) 결정에 관하여는 4.3절에 기술하였다.

사용된 광속조정법의 수학적 모델을 기술하면 다음과 같은데, 사진측량에서의 사진좌표를 이용하는 대신, 데오돌라이트의 수평각 및 수직각의 관측방정식을 사용한 것과 사진기의 6개의 외부표정요소중 4개만을 未知요소로 한 것을 그 특징으로 들 수 있다.

(a) 수평각 관측방정식

데오돌라이트 'i'의 위치좌표를 X_i, Y_i, Z_i , 零의 방향(Zero direction)을 Φ_i 라고 하고, 'i'에서 관측된 점 'j'의 위치좌표를 X_j, Y_j, Z_j 라고 하면, 그림 5의 표현을 참고하여 수평각(Direction reading) α_{ij} 를

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^{00} + V\alpha_{ij} = \Phi_i - \tan^{-1}((Y_j - Y_i)/(X_j - X_i)) \quad (1)$$

로 표현할 수 있다. 첨자⁰⁰는 실측치를 표시하는데, α_{ij}^{00} 는 α_{ij} 의 실측치를 표현한 것이다. $V\alpha_{ij}$ 는 잔차(Residual)를 나타낸다. 위의 식을 Taylor의 급수전개에 의해

전개하여 선형함수로 바꾸고, 이를 다시 행렬식으로 나타내면,

$$V\alpha_{ij} + [a_1, a_2, a_3, a_4] \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ \Delta \Phi_i \end{bmatrix} + [a_5, a_6, a_7] \begin{bmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \\ \Delta \Phi_j \end{bmatrix} = \epsilon\alpha_{ij}$$

(2)

여기서

$$a_1 = \frac{(Y_i - Y_j)_0}{(IJ_H)_0^2} \quad a_2 = \frac{(X_j - X_i)_0}{(IJ_H)_0^2}$$

$$a_3 = a_7 = 0 \quad a_4 = 1$$

$$a_5 = \frac{(Y_i - Y_j)_0}{(IJ_H)_0^2} \quad a_6 = \frac{(X_i - X_j)_0}{(IJ_H)_0^2}$$

$$\epsilon\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^{00} - \alpha_{ij}^0$$

첨자 0은 초기치를 표시하는데, 예를 들면 Y_{i0} 는 Y_i 의 초기치이며, $(IJ_H)_0$ 는 데오들라이트 'i'에서 점 'j'까지의 수평거리의 초기치이다.

수평측량망 조정을 위한 수평각 관측방정식과 식 (2)와의 차이점은, 수평측량망 조정에서의 角 관측 시에는 관련되는 점이 3점으로 각 점이 2개의 미지수를 가지지만, 여기서는 같은 수평각 관측이지만 畧의 방향을 고정한 2점 조정이며, 데오들라이트의 위치 'i'는 방향의 변수인 Φ 를 가지는 것이 특징이다.

(2)식을 다시 쓰면,

$$V\alpha_{ij} + \dot{a}_{ij} \dot{\Delta}_i + \ddot{a}_{ij} \ddot{\Delta}_j = \epsilon\alpha_{ij} \quad (3)$$

$$(1,1) \quad (1,4) \quad (4,1) \quad (1,3) \quad (3,1) \quad (1,1)$$

m대의 데오들라이트가 점 'j'의 수평각을 관측하였다면,

$$V\alpha_j + \dot{a}_j \dot{\Delta} + \ddot{a}_j \ddot{\Delta}_j = \epsilon\alpha_j \quad (4)$$

$$(m,1) \quad (m,4m) \quad (4m,1) \quad (m,3) \quad (3,1) \quad (m,1)$$

n개의 점이 m대의 데오들라이트에 의해 관측되었다면, 그 관측방정식은,

$$V\alpha + \dot{a} \dot{\Delta} + \ddot{a} \ddot{\Delta} = \epsilon\alpha \quad (5)$$

$$(mn,1) \quad (mn,4m) \quad (4m,1) \quad (mn,3n) \quad (3n,1) \quad (mn,1)$$

로 표현할 수 있다.

(b) 수직각 관측방정식

데오들라이트 'i'에서 관측된 점 'j'의 수직각 (Elevation Angle)이 β_{ij} 라고 하면,

$$\beta_{ij} = \beta_{ij}^{00} + V\beta_{ij} = (Z_j - Z_i) / ((X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2)^{1/2} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 위의 식을 선형화하여 행렬식으로 표현하면,

$$V\beta_{ij} + [b_1, b_2, b_3, b_4] \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ \Delta \Phi_i \end{bmatrix} + [b_5, b_6, b_7] \begin{bmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \\ \Delta \Phi_j \end{bmatrix} = \epsilon\beta_{ij} \quad (7)$$

여기서,

$$b_1 = \frac{(Z_j - Z_i)_0}{(IJ_H)_0} \frac{(X_j - X_i)_0}{(IJ_S)_0^2} \quad b_2 = \frac{(Z_j - Z_i)_0}{(IJ_H)_0} \frac{(Y_j - Y_i)_0}{(IJ_S)_0^2}$$

$$b_3 = \frac{-(IJ_H)_0}{(IJ_S)_0^2}$$

$$b_4 = 0, \quad b_5 = -b_1, \quad b_6 = -b_2, \quad b_7 = -b_3$$

$(IJ_S)_0$ 는 데오들라이트 'i'에서 점 'j'까지의 경사거리의 초기치를 나타낸다. 만일 n개의 점이 m대의 데오들라이트에 의해 관측되었다면, 그 관측방정식은

$$V\beta + \dot{b} \dot{\Delta} + \ddot{b} \ddot{\Delta} = \epsilon\beta \quad (8)$$

$$(mn,1) \quad (mn,4m) \quad (4m,1) \quad (mn,3n) \quad (3n,1) \quad (mn,1)$$

로 표현할 수 있다.

(c) 데오들라이트 관측방정식

위의 경우와 마찬가지로

$$\begin{bmatrix} Vx_i - \Delta X_i \\ Vy_i - \Delta Y_i \\ Vz_i - \Delta Z_i \\ V\Phi_i - \Delta \Phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_i)^0 - (X_i)^{00} \\ (Y_i)^0 - (Y_i)^{00} \\ (Z_i)^0 - (Z_i)^{00} \\ (\Phi_i)^0 - (\Phi_i)^{00} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이므로, m대의 데오들라이트 관측방정식을

$$\dot{V} - \dot{\Delta} = \dot{C} \quad (10)$$

$$(4m,1) \quad (4m,1) \quad (4m,1)$$

로 표기할 수 있다.

(d) 대상점 관측방정식

데오들라이트 관측방정식의 경우와 마찬가지로

$$\begin{bmatrix} V_{X_j} - \Delta X_j \\ V_{Y_j} - \Delta Y_j \\ V_{Z_j} - \Delta Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j^o - X_j^{oo} \\ Y_j^o - Y_j^{oo} \\ Z_j^o - Z_j^{oo} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이므로, n개의 대상점에 대한 관측방정식은

$$\dot{V} - \dot{\Delta} = \dot{C} \quad (12)$$

(3n,1) (3n,1) (3n,1)

로 표현할 수 있다.

(e) 정규방정식

위의 (5), (8), (10), (12)를 조합한 관측방정식은

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \\ \dot{V} \\ \dot{V} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{a} & \dot{a} \\ \dot{b} & \dot{b} \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Delta} \\ \dot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon\alpha \\ \varepsilon\beta \\ \dot{C} \\ \dot{C} \end{bmatrix} \quad (13)$$

간단히 나타내면,

$$\bar{V} + \bar{B} \cdot \Delta = \bar{C} \quad (14)$$

(2mn+4m+3n,1) (4m+3n,1)

관측방정식 (14)의 정규방정식은

$$(\bar{B}^T \bar{W} \bar{B}) \cdot \Delta = \bar{B}^T \bar{W} \bar{C} \quad (15)$$

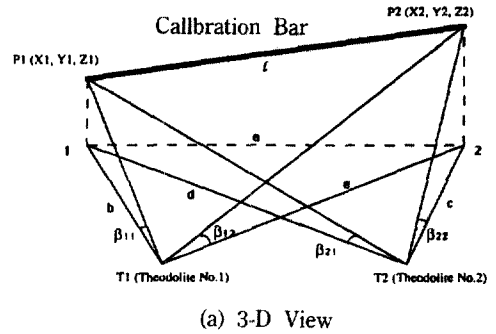
(4m+3n,4m+3n) (4m+3n,1) (4m+3n,1)

로 표현된다. 이 정규방정식의 축약방정식 및 解의 도출은 해석사진측량학의 부분^(1,2,4)과 동일하므로 생략한다. 다만 데오들라이트의 未知요소(未知要素)가 4개이기 때문에 모든 행렬의 차원(Dimension)이 달라졌을 뿐이다.

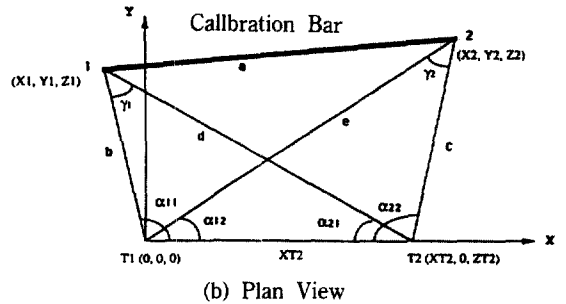
4.3 기준봉 관측에 의한 초기치 산출

길이가 일정한(온도보정으로 그 길이를 정확하게 알 수 있는) 기준봉을 그림 6에 보인 바와 같이 2대의 데오들라이트로 관측하므로써, 데오들라이트 좌표계를 정의하고, 데오들라이트의 외부표정요소의 초기치를 계산하여 광속조정법으로 연결되게 하였다.

기준봉 視準에 앞서, 데오들라이트의 수평각 읽



(a) 3-D View



(b) Plan View

그림 6. Schematic Drawings of Calibration Bar Sighting.

음값이 零인 방향을 고정하기 위하여, 1번 데오들라이트(좌표계의 원점으로 삼고 싶은 곳에 위치한 데오들라이트를 1번으로 하고, 반시계방향으로 일련번호를 붙이는 것이 통상적인 방법이다)와 2번 데오들라이트를 마주 보게하여 서로의 십자선을 시준하고, 양 데오들라이트를 Zero-Setting 한다. 나머지 데오들라이트는 앞번호의 데오들라이트의 십자선을 시준하고 Zero-Setting 한다. 즉, 3번 데오들라이트는 2번 데오들라이트의 십자선을, 4번 데오들라이트는 3번 데오들라이트의 십자선을 시준하는 식의 방법이며, 그 방향을 零으로 한다.

데오들라이트 좌표계는 1번 데오들라이트의 십자선을 원점으로 하고, 그것의 零인 방향을 X의 (+) 방향, 수평면상에서 X축에 반시계방향으로 수직인 방향을 Y의 (+) 방향, 그리고 중력의 반대방향을 Z의 (+) 방향으로 하는 오른손 좌표계를 채택하였다. 물론 좌표계의 전환은 언제든지 가능하다.

그림 6을 참고로 하여, 기준봉 관측으로 2번 데오들라이트의 未知의 초기치 (XT2, ZT2)를 구하는

식을 보면 다음과 같다. Y_{T2} 는 0이다.

$$L^2 = (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 = a^2 + (Z_1 - Z_2)^2 \quad (16)$$

$$\{a^2 = (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2\}$$

{L : 기준봉의 길이}

그림 6 (a)의 수직각 측량에 의하여

$$\frac{Z_1}{\tan \beta_{11}} = b = Z_1 = b \cdot \tan \beta_{11} \quad (17)$$

$$\frac{Z_1 - Z_{T2}}{\tan \beta_{21}} = d = \frac{b \cdot \tan \beta_{11} - Z_{T2}}{\tan \beta_{21}} = d \quad (18)$$

$$\frac{Z_2}{\tan \beta_{12}} = e = Z_2 = e \cdot \tan \beta_{12} \quad (19)$$

$$\frac{Z_2 - Z_{T2}}{\tan \beta_{22}} = c = \frac{e \cdot \tan \beta_{12} - Z_{T2}}{\tan \beta_{22}} = c \quad (20)$$

식 (16), (17), (19)로부터,

$$\begin{aligned} a^2 &= L^2 - (Z_1 - Z_2)^2 \\ &= L^2 - (b \cdot \tan \beta_{11} - e \cdot \tan \beta_{12})^2 \end{aligned} \quad (21)$$

그림 6(b)의 수평각에 대한 Sine 법칙에 의하여,

$$\begin{aligned} \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} &= \frac{d}{\sin \alpha_{11}} = \frac{b}{\sin \alpha_{21}} \\ \therefore b &= \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} \cdot \sin \alpha_{21} \end{aligned} \quad (22)$$

$$d = \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} \cdot \sin \alpha_{11} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} &= \frac{c}{\sin \alpha_{12}} = \frac{e}{\sin \alpha_{22}} \\ \therefore c &= \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} \cdot \sin \alpha_{12} \end{aligned} \quad (24)$$

$$e = \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} \cdot \sin \alpha_{22} \quad (25)$$

Cosine 법칙에 식 (22), (25)를 대입하면,

$$a_2 = b^2 + e^2 - 2be \cos(\alpha_{11} - \alpha_{12})$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} \cdot \sin \alpha_{21} \right) + \left(\frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} \cdot \sin \alpha_{22} \right) - 2 \left(\frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} \right. \\ &\quad \left. \cdot \sin \alpha_{21} \right) \left(\frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} \cdot \sin \alpha_{22} \right) \cos(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \end{aligned} \quad (26)$$

식 (21)에 (22)와 (25)를 대입하여,

$$a_2 = L^2 - \left(\frac{X_{T2}}{\sin \gamma_1} \cdot \sin \alpha_{21} \cdot \tan \beta_{11} - \frac{X_{T2}}{\sin \gamma_2} \cdot \sin \alpha_{22} \cdot \tan \beta_{12} \right)^2 \quad (27)$$

식 (26)과 (27)의 등식을 풀면 유일한 미지數인 X_{T2} 를 구할 수 있다. 구하여진 X_{T2} 와, 식 (22), (23)에 의해 구해진 b와 d의 값을 식 (18)에 대입함으로써 Z_{T2} 를 구할 수 있다. 식 (20), (24), (25)로 그 Z_{T2} 값을 검사해 볼 수 있다.

이와 같이 데오돌라이트를 쌍방 시준하게 하고 기준봉을 사용한 새로운 Calibration 방법을 수행하게 하여, 데오돌라이트의 외부표정요소 초기치를 거의 참값에 가깝게 계산함으로써, 개략의 초기치 입력에 의한 광속조정법에 비하여 보정치 수렴(Convergence)의 기회를 증가시키고자 하였다.

5. IMS의 적용

앞에서도 몇 적용의 예가 언급되었지만, IMS는 고도의 정확도가 요구되는 어떠한 대상물의 측량에도 이용될 수 있다.

미국에서는 General Dynamics, LTV, McDonnell Aircraft 등의 군수업체에서 전투기, 미사일, 잠수함 등의 측량, 그 부분품의 조립틀(Jig and Fixture) 측량 등에 이용하고 있으며, LBL (Lawrence Berkeley Lab, UC Berkeley), Fermi Lab 등의 가속기연구소, Good-Year 등 타이어 제조업체, 독일의 Volkswagen 등 자동차 업체, 위성통신수신기 제작회사 등을 포함하여 정밀을 요하는 기계, 기구의 제작 및 설치에 관련되는 대부분의 산업체들이 이 IMS를 이용하고 있다. 우리나라에서도 포항가속기연구소, 대우중공업 항공산업본부 등에서 IMS를 활용하고 있다. 그러나 많은 군수업체들은 그 사업의 특수성으로 인하여 IMS의 사용여부, 사용목적 및 방법

등에 관하여 외부에 알리고 있지 않으며, 일반 회사들도 제품 품질 또는 그 생산성 향상 방법 등을 경쟁회사에 알리게 되는 결과가 되므로 사용목적 및 방법을 발표하지 않는 경향이 많다. 그러므로 현재 알려진 것 보다는 더 많은 곳에 IMS가 적용되고 있다고 생각되며, 앞으로도 IMS 가격의 인하와 기계 제작의 정확도 향상의 욕구에 부응하여, IMS는 거의 모든 산업분야에서 사용이 보편화될 전망이다.

6. 結 論

정밀측량의 새로운 방법으로 탄생된, 데오돌라이트를 主裝備로 하는 IMS는 측량대상물의 크기와 모양에 거의 제한이 없으며, 대상물이 설치되어 있는 현장에서 측량을 실시할 수 있는 광학적, 비접촉(Non-Contact) 방식의 좌표측량장비이다. 사진측량에 대비하여서는 자료의 실시간 표현이 가능하여 관측과 위치수정을 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있다.

IMS 기능의 근간을 이루는 소프트웨어를 개발하였는데, 그 개발의 주요사항으로 다음의 것들을 들 수 있다.

- 1) 해석사진측량 기법을 응용한 광속조정법을 도입하였고,
- 2) 사진기의 6개의 외부표정요소($\omega, \phi, \kappa, X, Y, Z$)를 데오돌라이트에는 未知요소를 4개(ϕ, X, Y, Z)로 줄였으며
- 3) 사진좌표를 이용하는 대신, 데오돌라이트의 수평각 및 수직각 관측방정식을 사용하였다.
- 4) 시스템 준비단계에서 데오돌라이트를 쌍방 시준하게 하고 기준봉을 사용한 새로운 Calibration 방법을 수행하게 하여, 데오돌라이트의 외부표정요소 초기치를 거의 참값에 가깝게 계산함으로써, 보정치 수렴(Convergence)의 기회를 증가시키고자 하였으며,

였으며,

- 5) 대상물 관측전에 광속조정법을 적용하여 데오돌라이트 외부표정요소와 대상물 공간좌표의 초기치를 산출하도록 하였으며, 측량작업이 완료된 후 결과치를 광속조정법을 이용하여 재보정할 수 있게 하였다.

현재 많은 산업분야에서 IMS가 이용되고 있는데, IMS의 소프트웨어는 아직도 개선되어질 여지가 많이 있으며, 특히 특정한 기계구조물의 측량작업을 위한 특별 소프트웨어는 향후 개발의 주요 대상이 될 것으로 생각된다.

감사의 말

本研究의 수행을 가능하게 한 미국 Brunson Instrument社와 IMS의 기능선정과 프로그램의 작성에 많은 도움을 준 Mr. Gary Powell, Mr. Robert Phillips, Mr. David Sanders, Mr. Robert Barry께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. American Society of Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry, 4th Edition*, Falls Church, VA, 1980.
2. Brown, D.C., *The Bundle Adjustment - Progress and Prospective*, Invited Paper, Archives, 13th International Society of Photogrammetry Congress, Commission III, Helsinki, Finland, 1976.
3. Wolf, P.R., *Adjustment Computations, 2nd Edition*, Landmark Enterprises, Rancho Cordova, CA, 1980.
4. Kim, Byung-Guk, *Development of a Photogrammetric System for Monitoring Structural Deformations of the Sturgeon Bay Bridge*, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1989.

(接受 : 1992. 8. 19)