

차량측량시스템의 CCD 영상에 의한 3차원 위치결정 방법 비교 연구

정 동 훈*

A Comparative Study on the 3D Positioning Methods by CCD Images of The Mobile Mapping System

Jeong, Dong-Hoon*

요 약

정부 및 지자체 행정업무의 전산화와 통합시스템 구축이 증가함에 따라 차량측량시스템의 활용성이 점차 증대 돼 가고 있다. 이와 같은 요구에 따라 특정 지역의 시설물을 신속하게 측정해야 하는 경우가 발생하는데 이 경우에는 후처리방식보다는 실시간 현장처리방식이 필요하며 현장처리에 있어서는 정확도 못지않게 자료의 처리속도가 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 정확도와 처리속도 면에서 현장처리에 적합한 3차원 위치결정방법을 선정하기 위해 사진측량분야에서 사용되어 온 두 가지 공간전방교회법을 프로그래밍하여 비교하였다. 특히, 해석적 공간전방교회법에 대해서는 기존의 근거리 지상사진측량법을 차량의 이동에 따라 카메라의 위치와 자세가 변하는 차량측량시스템의 특성에 맞도록 수정하여 적용하였다. 비교결과, 정확도의 측면에서는 두 방법에서 차이가 거의 없었으나 계산에 소요되는 시간의 측면에서는 해석적 공간전방교회법이 약 1/3 정도로 나타났다.

주요어 : 차량측량시스템, 3차원 위치결정, 공간전방교회법, CCD 영상

ABSTRACT : Applicability of Land-based MMS(Mobile Mapping System) having been increased gradually as digitalization of administrative operation and construction of integrated systems of the government and provincial government are growing up. As these requirements, the case can be occurred that the facilities should be surveyed rapidly in the specific area. At this case, the real time field processing method is more necessary than the post processing method and data processing speed should be an essential element as important as accuracy.

*대한지적공사 지적연구원 책임연구원(gisjeong@kcsc.co.kr)

In this study, the two space intersection methods used in photogrammetry were programmed and compared with each other to select more proper method for the three dimensional positioning in the field processing. Especially, at the analytic space intersection, the traditional close range terrestrial photogrammetry was modified and applied to that to adapt to MMS's characteristics that camera position and attitude are changed according to the vehicle movement. As a result, the difference of the accuracy between two methods is not significant but at the calculation time, the analytic space intersection is faster three times than the space intersection using collinearity condition.

Keywords : mobile mapping system, 3D positioning, space intersection, CCD image

1. 서 론

1970년대부터 미국은 주 교통부를 중심으로 도로조사에 사진기록차량(Photologging Vehicle)을 사용해왔다. GPS 기술이 발전함에 따라 1990년대 초에는 미국의 오하이오 주립대학교에서는 C/A 코드만을 이용하는 GPS 수신기와 Giro, 2대의 흑백 CCD 카메라를 사용하여 GPS-Van을 개발하게 되었다. 이후로 캐나다, 독일, 일본, 중국에서 GPS-INS 통합 및 시스템 개발 연구가 활발히 진행되었다(Cameron Ellum et al., 2002). 국내에서도 학교와 연구소를 중심으로 개발이 진행되어 한국전자통신연구원에서 개발한 4S-Van과 한국건설기술연구원에서 개발한 도로 안전성 조사 분석 차량이 운용 중에 있다.

이들 GPS-INS 통합시스템은 GPS의 수신에 어려운 도심지나 심지어 터널 내에서도 INS(Inertial Navigation System)를 이용하여 위치를 측정할 수 있으며 INS의 성능에 따라 초당 100~200회의 자료를 취득

함으로써 고속운행 중에도 매우 조밀한 거리간격으로 위치를 결정할 수 있다. 특히 RTK(Real-Time Kinematic) GPS 기법을 이용하면 최적 환경에서 차량의 평면위치를 실시간으로 2cm 정확도까지 확보할 수 있는 것으로 알려지고 있다(Applanix, 2003, NovAtel, 2005).

그러나 현재는 대상물의 3차원위치결정이 작업여건, GPS-INS의 통합정확도, 공액점 매칭의 어려움 때문에 실시간 현장 처리보다는 후처리로 이루어지고 있다. 후처리방식의 장점은 GPS-INS 자료통합에 있어서 시간에 따른 전방예측 및 평탄화와 시간의 역순에 따른 후방예측 및 평탄화를 모두 사용함으로써 GPS 신호 단절 시의 측정 정확도를 높일 수 있으며 안정된 환경 하에서 자료를 처리할 수 있다는 것, 그리고 자료의 축적을 통해 다양한 용도로 영상을 활용할 수 있다는 것이다. 반면에 단점은 취득하는 영상의 수가 추출하고자 하는 자료에 비해 많고 별도의 처리시간이 필요하며, 현장의 상황을 영상을 통해서만 파악해야 한다는 점

이다.

따라서 측정목적과 대상, 현장상황에 따라 유연하게 시스템을 운용할 수 있고 차량의 운행이 종료됨과 동시에 필요로 하는 대상물의 3차원 위치결정이 끝나기 때문에 빠른 시간 내에 저렴한 비용으로 대상지의 모든 시설물의 자료를 취득할 수 있는 실시간 현장처리의 필요성이 증대되고 있다.

현장처리를 위해서는 자료처리에 사용하는 컴퓨터와 알고리즘의 성능이 중요하다. 예를 들어 200만 화소의 칼라영상(6MB 용량)을 동시에 두 개 촬영하는 차량이 80km/h로 운행한다고 할 때 초당 이동거리는 22m에 이르며 10m에 한 번씩 영상을 취득한다고 할 때 0.45초에 12MB의 자료를 취득하고 매칭하고 3차원 위치를 결정하는 모든 과정이 이루어져야 한다. 즉 현장처리에서 중요한 것은 정확도 못지않게 처리속도가 된다.

그동안 국내외에서 카메라 캘리브레이션, GPS-INS 통합, 시스템 개발, 공액점 매칭 등에 대한 연구는 많이 진행되어왔지만 차량측량시스템의 3차원 위치결정 방법에 대한 논의나 처리속도의 개선에 관한 연구는 아직 파악되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 사진측량에서 대상물의 위치결정에 사용되어 두 방법 즉, 공선조건식을 이용한 공간전방교회법과 해석적 공간전방교회법을 비교하여 정확도와 계산속도 면에서 현장처리에 보다 적합한 방법이 무엇인지 알아보려고 하였다. 두 방법 모두 현장처리나 후처리에 다 사용할 수 있다. 공선조건식을 이용한 공간전방교회법은 공선조건을 기반으로 관측방

정식을 조성한 후 최소제곱법을 적용하여 피사체의 3차원위치를 결정하는 방법으로 사진측량분야에 폭넓게 사용되고 있다. 전통적인 해석적 공간전방교회법은 하나의 영상을 기준으로 다른 영상의 위치와 자세를 나타냄으로써 사진측량의 원리를 설명하는데 많이 이용되는 반면 실제로는 많이 사용되지 않고 있다.

2. 주점 및 렌즈왜곡보정

비측정용 일반 CCD 카메라는 제작 시에 발생한 오차에 대한 정보가 없는 것이 보통이다. 따라서 일반 CCD 카메라를 사진측량학적인 목적으로 사용하기 위해서는 카메라의 내부기하를 정확하게 파악하는 것이 가장 중요하다. 카메라의 내부기하는 주점좌표(x_p, y_p), 초점거리(f) 등 3요소와 렌즈의 방사왜곡, 접선왜곡을 정의하는 계수들로 정의할 수 있는데 이 요소들을 결정하는 데는 Self-calibration 기법을 적용한 번들조정법이 주로 많이 사용된다(Cosandier and Chapman, 1992; Sento Wang et al., 2000). 차량의 장기적인 진동이나 큰 충격이 없다면, 최초에 검교정을 통해 결정한 내부기하 요소들을 차량측량시스템의 매 운용 시 마다 다시 산출할 필요 없이 이를 카메라 정보 파일에 기록하여 계속 사용할 수 있으나 수치사진측량의 정확도에 직접적인 영향을 주므로 주기적인 점검이 필요하다. 상기 카메라 내부기하 요소 중 접선왜곡은 렌즈 제조상의 불완전성에 의해 발생되는데 그 왜곡량이 방사왜곡에 비해 훨씬 작고 예전

에 비해 최근의 렌즈제조 및 조립기술이 많이 향상되었으므로 본 연구에서는 접선 왜곡을 제외한 나머지 요소들만을 고려하였다.

좌측과 우측영상에서 영상의 중심을 원점으로 관측된 점 j 의 영상좌표를 각각 $(x_{1j}, y_{1j}), (x_{2j}, y_{2j})$ 라고 하면 렌즈왜곡이 보정된 좌표 (x_{1j}^L, y_{1j}^L) 과 (x_{2j}^L, y_{2j}^L) 은 식 1과 같이 계산한다(Sanjib K. Ghosh, 1988).

$$\begin{aligned} x_{1j}^L &= x_{1j} \left(1 - \frac{\Delta r_{1j}}{r_{1j}}\right) - x_p = x_{1j} (1 - k_1 r_{1j}^2 - k_2 r_{1j}^4 - k_3 r_{1j}^6) - x_p \\ y_{1j}^L &= y_{1j} \left(1 - \frac{\Delta r_{1j}}{r_{1j}}\right) - y_p = y_{1j} (1 - k_1 r_{1j}^2 - k_2 r_{1j}^4 - k_3 r_{1j}^6) - y_p \\ x_{2j}^L &= x_{2j} \left(1 - \frac{\Delta r_{2j}}{r_{2j}}\right) - x_p' = x_{2j} (1 - k_1' r_{2j}^2 - k_2' r_{2j}^4 - k_3' r_{2j}^6) - x_p' \\ y_{2j}^L &= y_{2j} \left(1 - \frac{\Delta r_{2j}}{r_{2j}}\right) - y_p' = y_{2j} (1 - k_1' r_{2j}^2 - k_2' r_{2j}^4 - k_3' r_{2j}^6) - y_p' \end{aligned} \quad (\text{식 1})$$

이때, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3 는 좌측영상을 촬영한 카메라의 주점위치와 렌즈의 방사왜곡 계수를 나타낸 것이고 $x_p', y_p', k_1', k_2', k_3'$ 는 우측영상에 대한 것이다. 이렇게 렌즈왜곡이 보정된 좌표는 공간전방교회법을 적용하여 실세계의 3차원 좌표로 변환된다.

3. 공선조건식을 이용한 공간전방교회법

간단히 전방교선법이라고도 하며 유복모(2003)가 소개한 수식에 사진좌표 대신 주점 및 렌즈왜곡이 보정된 좌표를 대입하고, 좌우 카메라가 동일한 사양을 가지더라도 초점거리는 미세하게나마 차이가 있으므로 f 와 f' 를 달리 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 식 1을 통해 렌

즈왜곡이 보정된 영상좌표가 있고 좌우 영상의 내부 및 외부표정요소를 모두 알고 있다면 식 2를 이용하여 점 j 의 3차원 위치를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{1j}^L &= -f \cdot \frac{m_{11}(X_j - X_1^C) + m_{12}(Y_j - Y_1^C) + m_{13}(Z_j - Z_1^C)}{m_{31}(X_j - X_1^C) + m_{32}(Y_j - Y_1^C) + m_{33}(Z_j - Z_1^C)} \\ y_{1j}^L &= -f \cdot \frac{m_{21}(X_j - X_1^C) + m_{22}(Y_j - Y_1^C) + m_{23}(Z_j - Z_1^C)}{m_{31}(X_j - X_1^C) + m_{32}(Y_j - Y_1^C) + m_{33}(Z_j - Z_1^C)} \\ x_{2j}^L &= -f' \cdot \frac{m_{11}'(X_j - X_2^C) + m_{12}'(Y_j - Y_2^C) + m_{13}'(Z_j - Z_2^C)}{m_{31}'(X_j - X_2^C) + m_{32}'(Y_j - Y_2^C) + m_{33}'(Z_j - Z_2^C)} \\ y_{2j}^L &= -f' \cdot \frac{m_{21}'(X_j - X_2^C) + m_{22}'(Y_j - Y_2^C) + m_{23}'(Z_j - Z_2^C)}{m_{31}'(X_j - X_2^C) + m_{32}'(Y_j - Y_2^C) + m_{33}'(Z_j - Z_2^C)} \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

여기서,

x_{ij}^L, y_{ij}^L : 렌즈왜곡이 보정된 i 사진에서 찍힌 점 j 의 사진좌표

f, f' : 각각 좌측과 우측 카메라의 초점 거리

X_j, Y_j, Z_j : 점 j 의 실세계좌표

X_i^C, Y_i^C, Z_i^C : i 사진의 절대좌표계에서 투영중심 위치

$m_{11} \sim m_{33}, m_{11}' \sim m_{33}'$: 각각 좌측과 우측 카메라의 절대좌표계에서의 회전행렬

식 2를 측정점 j 와 카메라 렌즈 좌표에 대해 정리하면 식 3과 같다.

$$\begin{aligned} &(-m_{11} - \frac{x_{1j}^L}{f} m_{31})X_j + (-m_{12} - \frac{x_{1j}^L}{f} m_{32})Y_j + (-m_{13} - \frac{x_{1j}^L}{f} m_{33})Z_j + \\ &\left\{ (\frac{x_{1j}^L}{f} m_{31} - m_{11})X_1^C + (\frac{x_{1j}^L}{f} m_{32} - m_{12})Y_1^C + (\frac{x_{1j}^L}{f} m_{33} - m_{13})Z_1^C \right\} = 0 \\ &(-m_{21} - \frac{y_{1j}^L}{f} m_{31})X_j + (-m_{22} - \frac{y_{1j}^L}{f} m_{32})Y_j + (-m_{23} - \frac{y_{1j}^L}{f} m_{33})Z_j + \\ &\left\{ (\frac{y_{1j}^L}{f} m_{31} - m_{21})X_1^C + (\frac{y_{1j}^L}{f} m_{32} - m_{22})Y_1^C + (\frac{y_{1j}^L}{f} m_{33} - m_{23})Z_1^C \right\} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &(-m_{11}' - \frac{x_{2j}^L}{f'} m_{31}') X_j + (-m_{12}' - \frac{x_{2j}^L}{f'} m_{32}') Y_j + (-m_{13}' - \frac{x_{2j}^L}{f'} m_{33}') Z_j + \\
 &\left\{ \left(\frac{x_{2j}^L}{f'} m_{31}' - m_{11}' \right) X_2^C + \left(\frac{x_{2j}^L}{f'} m_{32}' - m_{12}' \right) Y_2^C + \left(\frac{x_{2j}^L}{f'} m_{33}' - m_{13}' \right) Z_2^C \right\} = 0 \\
 &(-m_{21}' - \frac{y_{2j}^L}{f'} m_{31}') X_j + (-m_{22}' - \frac{y_{2j}^L}{f'} m_{32}') Y_j + (-m_{23}' - \frac{y_{2j}^L}{f'} m_{33}') Z_j + \\
 &\left\{ \left(\frac{y_{2j}^L}{f'} m_{31}' - m_{21}' \right) X_2^C + \left(\frac{y_{2j}^L}{f'} m_{32}' - m_{22}' \right) Y_2^C + \left(\frac{y_{2j}^L}{f'} m_{33}' - m_{23}' \right) Z_2^C \right\} = 0
 \end{aligned}
 \tag{식 3}$$

식 3은 다시 몇 개의 기호를 사용하여 식 4와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

이때 $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, H_1$ 과 $A_2, B_2, C_2, D_2, E_2, F_2, G_2, H_2$ 는 점 j 의 3차원 좌표에 대한 계수를 나타낸 것이므로 점 j 에 따라 바뀌는 변수이다.

$$\begin{aligned}
 A_1 X_j + B_1 Y_j + C_1 Z_j + D_1 &= 0 \\
 E_1 X_j + F_1 Y_j + G_1 Z_j + H_1 &= 0 \\
 A_2 X_j + B_2 Y_j + C_2 Z_j + D_2 &= 0 \\
 E_2 X_j + F_2 Y_j + G_2 Z_j + H_2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{식 4}$$

위 식 4를 행렬형태로 나타내면 식 5와 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ E_1 & F_1 & G_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ E_2 & F_2 & G_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_1 \\ -H_1 \\ -D_2 \\ -H_2 \end{bmatrix}
 \tag{식 5}$$

4. 해석적 공간전방교회법

Paul R. Wolf(2000)는 근거리 사진측량방법 중 하나로서 두 장 이상의 지상사진으로부터 공간전방교회에 의한 측점위치결정방법을 소개하고 있는데 이 방법은 카메라 투영중심의 기선거리와 사진의 자세

중 ϕ 만을 이용하여 측점의 3차원 좌표를 상대적으로 결정하는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 원래 방법에 다중 영상좌표 사용, 3차원 사상변환의 적용, 시거선 길이 계산방법 변경, 절대좌표계에서 기선의 각도인 κ_{BL} 의 적용 등을 통해 GPS-INS에 의해 영상촬영시마다 산출되는 카메라의 위치와 자세를 이용하여 측점의 3차원 절대좌표계를 결정할 수 있도록 수정하였다. 이 방법은 기하학적으로 설명과 이해가 가능하기 때문에 본 논문에서는 해석적 공간전방교회법으로 지칭하고자 한다.

4.1 영상좌표의 3차원 사상변환

식 1을 통해 렌즈왜곡이 보정된 좌표를 (x_{1j}^L, y_{1j}^L) 과 (x_{2j}^L, y_{2j}^L) 라고 하고 (x_{1j}^T, y_{1j}^T) 과 (x_{2j}^T, y_{2j}^T) 를 3차원 사상변환된 좌표라고 하면 변환식은 식 6과 같다. 이때 $m_{11} \sim m_{33}$ 은 INS 중심 좌표계에서 왼쪽 카메라의 회전성분($\omega_1^C, \phi_1^C, \kappa_1^C$)으로 이루어진 회전행렬이고 $m_{11}' \sim m_{33}'$ 은 오른쪽 카메라의 회전성분($\omega_2^C, \phi_2^C, \kappa_2^C$)으로 이루어진 회전행렬이다.

$$\begin{aligned}
 x_{1j}^T &= x_{1j}^L \cdot m_{11} + y_{1j}^L \cdot m_{21} - f \cdot m_{31} \\
 y_{1j}^T &= x_{1j}^L \cdot m_{12} + y_{1j}^L \cdot m_{22} - f \cdot m_{32} \\
 z_{1j}^T &= x_{1j}^L \cdot m_{13} + y_{1j}^L \cdot m_{23} - f \cdot m_{33} \\
 x_{2j}^T &= x_{2j}^L \cdot m'_{11} + y_{2j}^L \cdot m'_{21} - f' \cdot m'_{31} \\
 y_{2j}^T &= x_{2j}^L \cdot m'_{12} + y_{2j}^L \cdot m'_{22} - f' \cdot m'_{32} \\
 z_{2j}^T &= x_{2j}^L \cdot m'_{13} + y_{2j}^L \cdot m'_{23} - f' \cdot m'_{33}
 \end{aligned}
 \tag{식 6}$$

4.2 삼각법칙을 이용한 시거선의 길이 계산

INS중심좌표계의 XY 평면상에서의 카메라 기선거리 BL_{hor} 은 두 카메라의 수평 위치 (X_1^C, Y_1^C) 와 (X_2^C, Y_2^C) 로부터 식 7과 같이 구할 수 있다.

$$BL_{hor} = \sqrt{(X_1^C - X_2^C)^2 + (Y_1^C - Y_2^C)^2} \quad (\text{식 7})$$

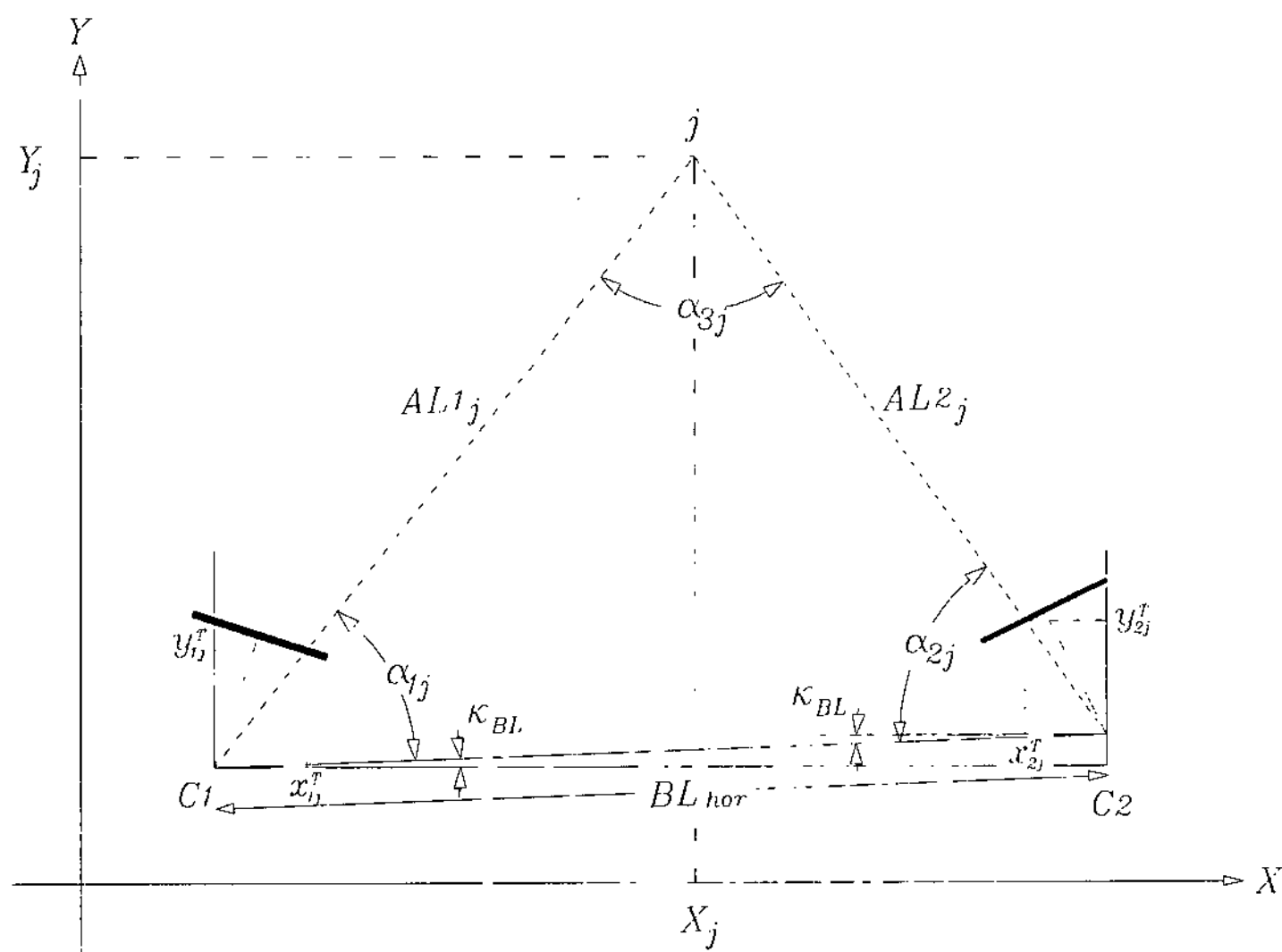
이때 카메라 기선은 XY 좌표평면 상에서 기울기 κ_{BL} 을 가진다. 식 8과 같이 좌우 카메라의 상대위치 계산을 통해 κ_{BL} 도 결정한다.

$$\kappa_{BL} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_2^C - Y_1^C}{X_2^C - X_1^C}\right) \quad (\text{식 8})$$

[그림 1]은 해석적 공간전방교회법을 개념적으로 나타낸 것이다. 좌우 카메라는 각각 C_1, C_2 로 표시하였으며 좌측 카메라와 객체 j 가 이루는 시거선을 AL_{1j} , 우측 카메라와 객체 j 가 이루는 시거선을 AL_{2j} 라고 하였다. INS중심좌표계에서 좌우측 영상의 회전에 의해 3차원 투영변환된 점 j 의 좌표를 각각 $(x_{1j}^T, y_{1j}^T), (x_{2j}^T, y_{2j}^T)$ 로 표시하였다.

[그림 1]을 통해 알 수 있듯이 시거선 AL_{1j} 및 AL_{2j} 가 카메라기선 BL_{hor} 이 이루는 α_{1j}, α_{2j} 를 구한 후 삼각형의 내각조건에 의해 식 9와 같이 α_{3j} 를 구한다.

$$\begin{aligned} \alpha_{1j} &= 90^\circ - \kappa_{BL} - \tan^{-1}\left(\frac{x_{1j}^T}{y_{1j}^T}\right) \\ \alpha_{2j} &= 90^\circ + \kappa_{BL} + \tan^{-1}\left(\frac{x_{2j}^T}{y_{2j}^T}\right) \\ \alpha_{3j} &= 180^\circ - \alpha_{1j} - \alpha_{2j} \end{aligned} \quad (\text{식 9})$$



[그림 1] 해석적 공간전방교회법

식 10과 같이 삼각법칙에 따라 시거선의 거리를 결정한다.

$$\begin{aligned} AL_{1j} &= BL_{hor} \cdot \frac{\sin \alpha_{2j}}{\sin \alpha_{3j}} \\ AL_{2j} &= BL_{hor} \cdot \frac{\sin \alpha_{1j}}{\sin \alpha_{3j}} \end{aligned} \quad (\text{식 } 10)$$

4.3 평면위치 결정

식 10을 통해 결정된 시거선의 길이를 이용하여 객체 j 의 평면위치를 결정한다. 계산식은 식 11과 식 12 등 두 가지가 있으나 결과 값은 똑같다.

$$\begin{aligned} X_j &= X_1^C - AL_{1j} \cdot \cos(\alpha_{1j} - \kappa_{BL}) \\ Y_j &= Y_1^C + AL_{1j} \cdot \sin(\alpha_{1j} - \kappa_{BL}) \end{aligned} \quad (\text{식 } 11)$$

또는,

$$\begin{aligned} X_j &= X_2^C - AL_{2j} \cdot \cos(\alpha_{2j} - \kappa_{BL}) \\ Y_j &= Y_2^C + AL_{2j} \cdot \sin(\alpha_{2j} - \kappa_{BL}) \end{aligned} \quad (\text{식 } 12)$$

4.4 수직위치 결정

카메라에서 객체 j 까지 Y축 거리에 대한 Z축 거리는 3차원 사상변환된 영상좌표에서 y축 거리에 대한 z축 거리와 그 비율이 똑같다. 수직위치는 좌우 카메라의 두 높이 Z_1^C, Z_2^C 에서 모두 계산 가능하다. 그러나 표정의 정확도에 따라 그 결과 값에는 차이가 있을 수 있으므로 두

값을 평균하여 결정하는 것이 바람직하다.

$$\begin{aligned} Z_j' &= Z_1^C + AL_1 \cdot \sin(\alpha_1 + \kappa_{BL}) \cdot \frac{z_{1j}^T}{y_{1j}^T} \\ Z_j'' &= Z_2^C + AL_2 \cdot \sin(\alpha_2 + \kappa_{BL}) \cdot \frac{z_{2j}^T}{y_{2j}^T} \\ Z_j &= \frac{Z_j' + Z_j''}{2} \end{aligned} \quad (\text{식 } 13)$$

4.5 절대좌표계로 변환

GPS-INS 통합자료의 처리결과는 절대좌표계에서 INS의 위치($X_{INS}, Y_{INS}, Z_{INS}$)와 자세(ω, ϕ, κ)를 나타낸다. 이 결과를 통해 측정점 j 의 절대좌표($X_j^{TM}, Y_j^{TM}, Z_j^{TM}$)를 구할 수 있다. 절대좌표계에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 우리나라의 평면직각좌표계(TM투영)를 절대좌표계로 설정하였다. 이때 $m_{11} \sim m_{33}$ 은 ω, ϕ, κ 성분으로 이루어진 회전행렬이다.

$$\begin{aligned} X_j^{TM} &= X_{INS} + X_j m_{11} + Y_j m_{21} + Z_j m_{31} \\ Y_j^{TM} &= Y_{INS} + X_j m_{12} + Y_j m_{22} + Z_j m_{32} \\ Z_j^{TM} &= Z_{INS} + X_j m_{13} + Y_j m_{23} + Z_j m_{33} \end{aligned} \quad (\text{식 } 14)$$

5. 실험 및 결과

5.1 실험장비 구성 및 운용

직접위치참조는 기존의 항공사진측량이 카메라의 위치와 자세를 계산하는데 지상 기준점을 참조하는데 반하여 GPS-INS를

이용하는 방법을 일컫는 것으로서 직접위치참조를 위해서는 카메라의 내외부표정 및 Boresight 변환이 필요하다(Naser El-Sheimy, 1996; Dorota A et al., 2001; Cameron Ellum et al., 2002.).

Boresight 변환은 절대좌표계에서 측정된 GPS 수신기, IMU, CCD 카메라의 위치와 자세를 차량기준점을 원점으로 한 좌표로 변환하는 처리작업으로서, 차량이 주행 중에 GPS-INS 자료를 취득하면 각 data를 이용하여 매 순간마다 절대좌표계에서 센서들의 위치와 자세를 계산할 수 있게 된다. 따라서 차량측량시스템의 수치사진측량 정확도는 각 센서들이 가지는 고유의 오차 이외에도 CCD 카메라의 내외부표정, Boresight 변환, GPS-INS 취득 및 통합, 3차원 좌표계산 등의 여러 단계를 거치면서 누적하여 발생된다.

본 연구에서는 이 중 마지막 단계인 3차원 좌표계산을 수행하는데 정확도와 계산속도면에서 더 효율적인 방법을 찾고자 두 공간전방회회법을 비교하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 GPS-INS-CCD 카메라가 탑재된 차량을 이용하였다. 이 차량은 캐나다 NovAtel사의 통합장비인 BDS(Black Diamond System)를 사용하고 있

으며 시스템에 포함된 GPS 수신기는 12채널 2중주파수를 수신하는 DL4 Plus를 채용하고 있고 관성항법장치(IMU : Inertial Measurement Unit)는 초당 100개의 data를 출력하는 Honeywell사의 HG1700을 채택하고 있다. 이 IMU의 Gyro Bias는 1deg/hr이다(NovAtel, 2005).

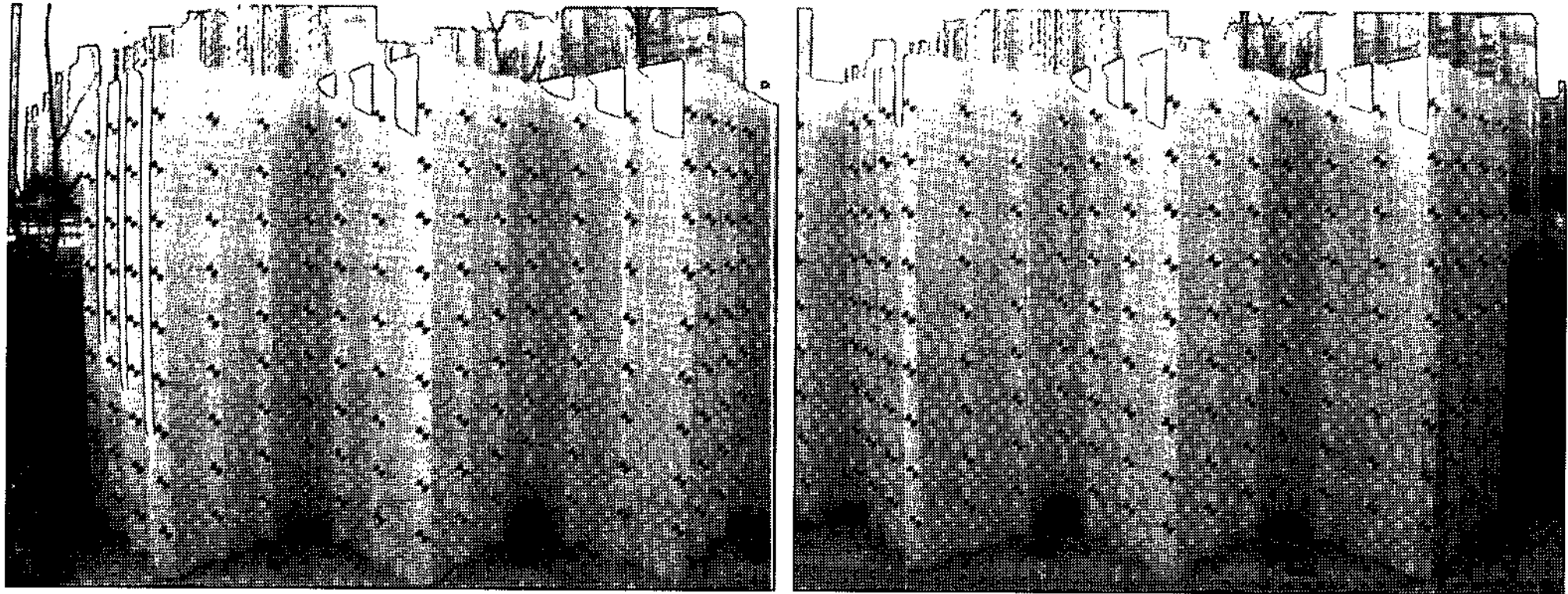
카메라 및 렌즈는 사양은 <표 1>과 같다. 카메라는 CL(Camera Link)방식을 지원하는 디지털 칼라 CCD 카메라인 JAI사의 CV-M7+CL을 사용하였다. 렌즈는 Auto-Iris가 가능하고 구경비(Aperture Ratio)가 큰 Zoom 렌즈를 사용하였다. Zoom 렌즈는 초점거리의 변경이 가능하지만 본 연구에서는 초점거리를 최소로 줄여 고정하여 사용하였다.

실험을 위해 차량에 탑재된 각 센서들을 검교정을 하였다. CCD 카메라의 내부기하요소는 평면타겟을 이용하여 실내에서 수행하였으며 차량이동 중 직접위치참조(Direct Geo-Referencing)를 위해 필요한 카메라 외부표정은 [그림 2]에 나타낸 캘리브레이션 타겟시설을 이용하였다.

타겟시설에 설치된 타겟간격은 30cm이고 전체 폭은 약 6m이며 높이는 약 3m, 깊이는 약 1m 정도이다. 각 타겟의 3차원

<표 1> CCD 카메라와 렌즈의 사양

항목	내용
카메라	JAI CV-M7+CL (칼라)
영상 크기	1380 × 1030
셀 크기	6.45 μ m × 6.45 μ m
유효 칩 크기	8.90mm × 6.64mm
렌즈	SPACECOM Zoom 렌즈(Zoom 고정), Auto-Iris
CCD 센서	2/3" progressive scan interline transfer CCD



[그림 2] 타겟시설을 촬영한 좌우 영상(한국건설기술연구원 내)

좌표는 각도오차(RMSE)가 2"이고 거리오차가 3mm+2ppm인 1초독 토탈스테이션을 이용하여 두 지점에서 반복관측한 후 평균값을 취하였다. 이렇게 구한 각 타겟의 3차원 좌표를 기준값으로 하고 두 방법의 위치결정 정확도를 비교하였다.

외부표정을 위해 차량의 위치와 방향을 바꿔가며 3회 영상을 취득하였으며 영상 취득 순간의 GPS-INS 자료도 취득하였다. 타겟이 촬영되는 영상에 최대한 많이 포함될 수 있도록 차량의 방향을 변경하고 적정한 위치와 방향이 되면 차량을 정지한 채로 영상을 취득하였다. 촬영거리는 3회 모두 타겟시설로부터 약 7m가 되도록 하였다. 촬영순간의 시각을 동기화하기 위해, 임의 순간에 영상을 촬영하고 그 시각을 1/1,000초의 정밀도로 기록하는 별도로 개발된 동기화장치를 이용하였으며, 기록된 시각은 GPS-INS 통합자료로부터 그 순간의 3차원 위치와 자세를 추출하는데 이용하도록 하였다(한국건설기술연구원, 2005)

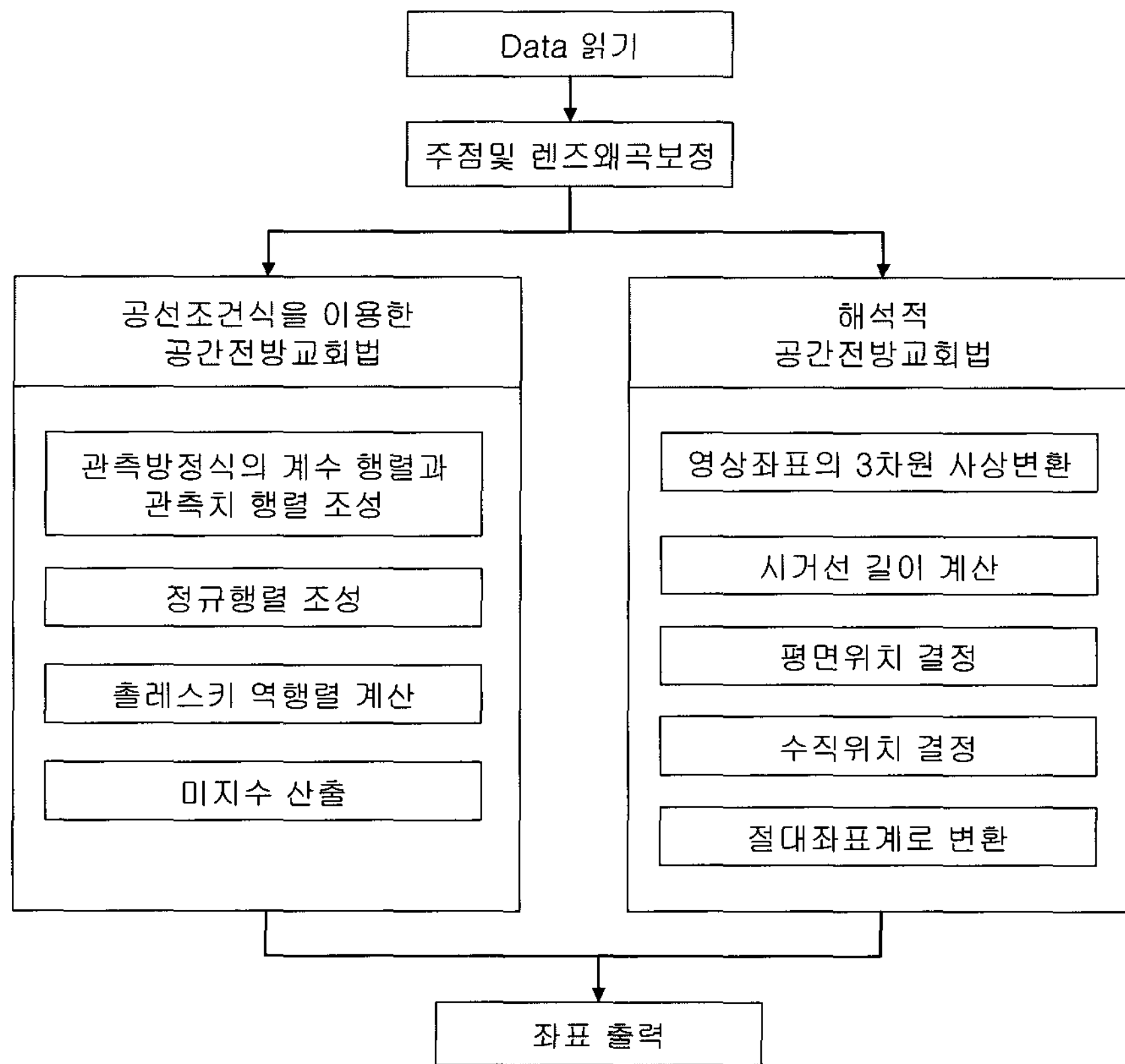
3회 촬영된 영상을 각각 외부표정하여 절대좌표계에서 카메라의 위치와 자세를

산출하였으며 GPS-INS 통합자료로부터 구한 차량기준점의 위치 및 자세와 함께 Boresight 변환에 이용하였다. 3세트(set)의 변환결과를 평균하여 차량기준점좌표계에서 각 센서들의 위치 및 자세를 결정하였다.

5.2 비교실험

본 연구의 목적은 전방교회법의 정확도와 처리시간을 비교하기 위한 것이기 때문에 외부표정을 위해 3회 촬영했던 영상 중 1세트를 사용하여 실험에 이용하였다. 카메라의 위치와 자세는 토탈스테이션을 통해 취득된 3차원 좌표를 기준점으로 하여 구한 외부표정요소를 사용하였다. 즉, 전방교회법을 통해 결정되는 좌표는 5.1 절에서 언급한 오차요인 중 Boresight 변환, GPS-INS 취득 및 통합에 의한 오차를 포함하지 않는다고 할 수 있다.

두 방법의 비교를 위해 [그림 3]과 같은 계산과정을 적용하였다. 좌표를 계산하는 부분은 두 방법이 서로 다르지만 Data 파일을 읽고 주점 및 렌즈왜곡을 보정하는



[그림 3] 3차원좌표 계산 방법 비교

과정, 출력하는 과정은 같고 좌표를 계산하는 부분은 공유하도록 하였다.

프로그래밍 언어로 C++를 사용하였으며 컴파일에 Visual Studio를 이용하였다. 특히, 공선조건식을 이용한 공간전방 교회법에서는 츨레스키방법을 사용하였다. 츨레스키 역행렬 계산방법은 처리속도가 빠르고 메모리를 절약할 수 있는 것으로 알려져 있다(Paul R. Wolf, 1997).

타겟 중 양쪽 영상에 모두 촬영된 126 점을 좌표계산에 이용하였으며, 한 측점 당 소요되는 시간은 극히 짧은 시간이므로 이 타겟 점들을 1000회 반복 계산하는 시간을 0.001초 정밀도로 측정한 다음

126,000점으로 나누어 측점 당 소요되는 시간으로 환산하였다. Pentium M 1.7GHz CPU와 512MB 메모리를 사용하는 노트북 컴퓨터에서 좌표계산을 실행한 결과 <표 2>에 나타낸 바와 같이 두 방법에 mm단위까지 동일하게 나타났다. 소요시간 측면에서는, 해석적 공간전방 교회법이 공선조건식을 이용한 공간전방 교회법에 비해 1/3정도로 나타났다.

<표 2>의 실험결과를 볼 때 3차원 거리 상에서 위치결정 정확도는 7m 거리에서 0.02m로 나타났으며 이는 일반적인 매핑 거리인 35m에서는 0.1m정도가 됨을 예측할 수 있다. 그러나 이 결과는 Boresight

<표 2> 두 방법의 위치결정 정확도(RMSE)

방법	위치결정 정확도(m)				소요시간 (μ s)
	X축	Y축	Z축	3D 거리	
공선조건식을 이용한 공간전방교회법	0.019	0.006	0.003	0.020	24.72
해석적 공간전방교회법	0.019	0.006	0.003	0.020	8.10

변환과 GPS-INS 취득 및 통합에 의한 오차가 포함되지 않았으므로 실제 주행 중의 3차원 위치결정 정확도는 실험결과만을 가지고 예측하기는 어렵다. 더욱이 국토지리정보원(2004)의 연구보고서에서도 차량측량시스템의 정확도는 대상지역과 대상물에 따라 다르게 나타나므로 이는 향후 별도의 연구를 통해 다루고자 한다.

6. 결 론

행정업무의 전산화와 통합시스템 구축이 증가함에 따라 기존에는 도면이나 대장을 기반으로 이루어졌던 도로의 횡단 및 종단선형 측정, 도로환경조사, 도로 및 교통시설물의 관리 등의 분야에 차량측량시스템의 활용성이 증대 돼 가고 있다. 차량의 주행만으로 현장자료취득이 완료되며 정확한 측정결과를 낼 수 있다는 점은 차량측량시스템의 큰 장점이지만 차량의 운행 및 자료취득에 소요되는 시간보다 후처리에 소요되는 시간이 더 많이 소요된다는 점은 해결해야 할 문제이기도 하다. 또, 신속하게 대상지역의 시설물을 측정해야 하는 경우에는 후처리방식보다는 실시간 현장처리방식이 필요하며 현장처리에서는 정확도 못지않게 자료의 처리

속도가 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 정확도와 처리속도 면에서 현장처리에 적합한 3차원 위치결정방법을 선정하기 위해 사진측량분야에서 사용되어 온 두 가지 공간전방교회법을 프로그래밍화 하여 비교하였다. 특히, 해석적 공간전방교회법에 대해서는, 기존의 근거리 지상사진측량법을 차량의 이동에 따라 카메라의 위치와 자세가 변하는 차량측량시스템의 특성에 맞도록 수정하여 적용하였다. 정확도의 측면에서는 두 방법에서 차이가 거의 없었으나 계산에 소요되는 시간의 측면에서는 해석적 공간전방교회법이 약 1/3 정도로 나타났다.

공선조건식을 이용한 공간전방교회법은 잉여관측이 많은 경우에 중요도에 따라 모든 변수에 오차를 배분함으로써 좋은 결과를 내기 때문에 영상을 통해 객체의 3차원 위치를 결정하는데 보편적으로 사용되는 방법이다. 그러나 이 방법은 행렬의 곱셈과 역행렬 연산을 사용하기 때문에 처리속도가 빠르고 메모리를 절약할 수 있는 역행렬 계산방법을 사용하더라도 계산이 다소 복잡하고 시간이 비교적 많이 소요되는 특성이 있다. 즉 하나의 객체가 여러 개의 영상에 촬영된 경우에는 좋은 방법이지만 중복영상 두 개만을 사용하는 경우에는 잉여관측이 적기 때문에

계산이 빠르고 간단한 해석적 공간전방교 회법을 사용하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. 따라서 객체의 위치를 신속 하게 정확하게 결정해야 하는 실시간 현 장처리에는 해석적 공간전방교 회법을 사 용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

실험을 위해 장비와 자료를 제공해 주 신 한국건설기술연구원에 감사드립니다.

참고문헌

국토지리정보원, 2004, GPS-Van을 이용한 지도 수정 가능성 검증.
 한국건설기술연구원, 2002, 도로시설물 DB 작 성을 위한 Digital Photologging 활용방안.
 한국건설기술연구원, 2005, 도로안전성 조사분 석 차량개발 연구보고서(3차년도).
 유복모, 2006, 현대 디지털 사진 측량학, 피어 슨에듀케이션코리아, 430.
 Applanix, 2003, POS LV Specifications.
 NovAtel, 2005, SPAN Technology System Charac- teristics and Performance.
 Cameron Ellum, Naser E-Sheimy, 2002, Land- Based Mobile Mapping Systems, PE&RS, January 2002.
 Chares K. Toth, 1998, Direct Platform Orientation of Multi-sensor Data Acquisition Systems, IAPRS Vol. 32 Stuttgart 1998.

Dorota A. Grejner-Brzezinska, 2001, Direct Sensor Orientation in Airborn and Land-based Mapping Applications.
 Gajdamowicz K, Öhamn D, Andersson K, Risse K, 2001, Accuracy Evaluation of Mobile Mapping Technology for Acquisition of Position Related Information. Optical 3-D Measurements Techniques V. ISBN3-9501492-0-1. pp. 153-164.
 Graefe, G., W. Casparty, H. Heister, J. Klemm and M. Sever., 2001, The Road Data Acquisition System MoSES-Determination and Accuracy of Trajectory Data Gained with the Applanix POS/LV. Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology(MMS 2001).
 Naser El-Sheimy, 1996, The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications, CALGARY, ALBERTA.
 Naser El-Sheimy, 2000, Integrated Systems and their Impact on the Future of Positioning, Navigation, and Mapping Applications, FIG Working Week 2000, Prague.
 Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, 2000, Elements of photogrammetry with application in GIS, McGraw-Hill, pp. 52-80.
 Paul R. Wolf, Charles D. Ghilani, 1997, Adjust- ment Computations, 564.
 Sanjib K. Ghosh, 1988, Analytical Photogrammetry, Pergamon Press, 308.
 Sendo Wang, Yi-Hsing Tseng, 2000, Automatic Self-Calibration of Digital Cameras for Close- Range Photogrammetry, IAPRS Vol. 33.