

모바일매핑시스템으로 취득된 전방위 영상의 광속조정법

오태완 · 이임평 †

서울시립대학교 공간정보공학과

Bundle Block Adjustment of Omni-directional Images by a Mobile Mapping System

Taewan Oh and Impyeong Lee †

Department of Geoinformatics, The University of Seoul

Abstract : Most spatial data acquisition systems employing a set of frame cameras may have suffered from their small fields of view and poor base-distance ratio. These limitations can be significantly reduced by employing an omni-directional camera that is capable of acquiring images in every direction. Bundle Block Adjustment (BBA) is one of the existing georeferencing methods to determine the exterior orientation parameters of two or more images. In this study, by extending the concept of the traditional BBA method, we attempt to develop a mathematical model of BBA for omni-directional images. The proposed mathematical model includes three main parts; observation equations based on the collinearity equations newly derived for omni-directional images, stochastic constraints imposed from GPS/INS data and GCPs. We also report the experimental results from the application of our proposed BBA to the real data obtained mainly in urban areas. With the different combinations of the constraints, we applied four different types of mathematical models. With the type where only GCPs are used as the constraints, the proposed BBA can provide the most accurate results, ± 5 cm of RMSE in the estimated ground point coordinates. In future, we plan to perform more sophisticated lens calibration for the omni-directional camera to improve the georeferencing accuracy of omni-directional images. These georeferenced omni-directional images can be effectively utilized for city modelling, particularly autonomous texture mapping for realistic street view.

Key Words : Omni-directional Camera, Mobile Mapping System, Bundle Block Adjustment, Accuracy Analysis, Sensor Fusion.

요약 : 대부분의 모바일 공간정보 획득시스템은 촬영범위가 좁고 기선 길이에 대한 제약이 따르는 프레임 카메라를 탑재하고 있다. 촬영지점을 기준으로 모든 방향으로의 영상정보 획득이 가능한 전방위 카메라 탑재를 통해 프레임 카메라의 촬영 범위 및 기선 거리에 대한 문제점을 해결할 수 있다. 광속조정법(Bundle Block Adjustment)은 다수의 중첩된 영상의 외부표정요소를 결정하는 대표적인 지오레퍼런싱(Georeferencing) 방법이다. 본 연구에서는 전방위 영상에 적합한 광속조정법의 수학적 모델을 제안하여 전방위 영상의 외부표정요소 및 지상점을 추정하고자 한다. 먼저 전방위 영상에 적합한 공선조건식을 이용해 관측방정식을 수립한다. 그리고 지상 모바일매핑시스템(GMMS, Ground Mobile Mapping System)에 탑재

되어 있는 GPS/INS로부터 획득된 데이터와 정지 GPS 및 토탈 스테이션(Total Station)을 통해 측정된 지상기준점을 이용한 확률제약조건(Stochastic Constraints)식을 수립한다. 마지막으로 확률제약조건 요소 및 추정 미지수를 조합하여 다양한 종류의 수학적 모델을 수립하고 모델별로 추정된 지상점 좌표의 정확도를 검증한다. 그 결과, 지상기준점을 확률제약조건으로 사용하는 모델에 적용한 경우에 지상점이 $\pm 5\text{cm}$ 정도로 정확하게 추정되었다. 연구의 결과를 통해 전방위 카메라 영상으로부터 대상객체의 3차원 모델 추출이 가능함을 알 수 있었다.

1. 서론

고품질 공간정보의 수요가 증가함에 따라 다양한 플랫폼(Platform)에 다양한 센서를 다중으로 탑재하여 공간정보를 보다 효율적으로 획득하려는 연구가 활발하게 진행 중이다. 유인항공기에 디지털카메라, 레이저스캐너, GPS/INS 등 다중센서를 탑재하여 공간정보를 취득하는 방법은 이미 많은 응용분야에 실용적으로 적용되고 있으며 최근에는 다양한 종류의 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 플랫폼으로 활용한 연구들도 상당히 활발해지고 있다(Henri, 2004; 유환희 외, 2006; 홍주석 외, 2008). 유무인항공기를 이용하여 공간정보를 획득하는 경우에는 공중에서 내려다 본 도시의 3차원 모델의 생성에는 유용하지만 실제 사람이 거리를 걸어가면서 볼 수 있는 소위 "Street View" 모델을 생성하는 것은 거의 불가능하다. 이를 보완하기 위해 지상 차량을 플랫폼으로 다중센서를 탑재하여 도로 및 그 주변과 교통시설물 등의 정보를 취득하는 지상 모바일 매핑 시스템(MMS, Mobile Mapping System)의 활용이 크게 증가하고 있다(Gontran *et al.*, 2003; 최경아 외, 2007). 또한, 최근 들어, 기존의 프레임 카메라 대신에 전방위(omni-directional) 카메라를 차량에 탑재하여 도로 주변을 따라 모든 방향의 영상을 취득하는 연구들이 빠르게 증가하고 있다(오태완, 이임평, 2010; Silpa, Hartley, 2005).

전방위 카메라란 시야각(FOV, Field of View)이 360° 이기 때문에 촬영 지점을 기준으로 모든 방향의 영상정보 취득이 가능한 카메라를 말한다(Wikipedia, 2009). 이러한 전방위 카메라를 탑재한 MMS는 차량 진행방향에 따라 중복된 전방위 영상 획득이 가능하며 프레임 카메라를 사용하는 시스템에 비해 기선이 길어져 보다 높은 위치결정 정확도를 기대할 수 있다(황진상, 2009). 기존에는 굴절거울을 사용하는 방식의 전방

위 카메라를 주로 사용하였으나 최근에는 다수의 개별 카메라의 영상을 하나의 전방위 영상으로 통합하여 생성하는 시스템이 개발되어 널리 활용되고 있다. 이러한 카메라는 기존의 카메라와 비교하여 왜곡이 적고 공간 해상도가 높다는 장점이 있어서 도로주변에 대한 가시화뿐만 아니라 대상객체의 형상 및 위치를 결정하는 것에 기여할 수 있다(오태완, 이임평, 2010).

다수의 중첩영상으로 부터 대상객체의 기하학적 정보를 결정하기 위한 전통적인 방법으로 광속조정법(BA, Bundle Adjustment)이 많이 활용되어 왔다. 광속조정법은 개별 영상이 촬영된 시점의 카메라의 위치 및 자세를 결정하는 대표적인 지오레퍼런싱(Georeferencing) 방법으로써 이를 이용하여 카메라의 외부표정변수(EOP, Exterior Orientation Parameters)와 2개 이상의 영상에 나타난 지상점 좌표의 추정이 가능하다. GPS/INS 정보를 광속조정법에 적용하여 영상을 직접 절대 좌표화(Direct Georeferencing)하는 연구하는 연구(송연경 외, 2005)와 전통적인 광속조정법과 GPS/INS 정보를 이용하는 광속조정법의 정확도를 비교하여 수치정사영상 제작과 도화 등 다양한 분야에 GPS/INS AT를 활용하기 위한 연구(조규전, 2002; 박운용, 2004; 나종기, 2004)가 있었다. 이 외에도 라이다 데이터로부터 선형 객체 또는 면 객체를 추출하여 영상 절대 좌표화에 활용(Habib *et al.*, 2005), 기준점이 없이 광속조정법을 이용한 UAV 영상의 절대 좌표화(최경아, 이임평, 2009)에 관한 연구 등이 이루어졌다. GPS/INS 및 프레임 카메라를 탑재한 지상 MMS를 통해 위치/자세 정보 및 프레임 영상을 획득하고 이를 직접 절대 좌표화를 통해 얻은 지상점 좌표를 지상기준점을 이용한 영상표정기법을 통해 결정한 좌표와 비교하여 정확도를 평가하는 연구도 수행되었다(Bae and Kim, 2005).

최근에는 전방위 영상을 이용해 3차원 절대좌표를 결

정하는 연구도 이루어졌다. 오태완 과 이임평(2010)은 지상 MMS를 통해 획득된 두 장의 전방위 영상을 이용하여 개체의 3차원 절대좌표를 결정하였다. 하지만 도로 주변의 수많은 개체들의 3차원 절대좌표를 두 장의 영상만으로 결정하기는 어렵다. 또한 수많은 영상을 이용하는 광속조정법에 비해 사용되는 영상점이 적기 때문에 GPS/INS의 오차 보정이 쉽지 않다.

선행연구 분석을 통해 지금까지 광속조정법은 주로 프레임 영상에 관한 연구에 활용되어 왔었으며 전방위 영상을 이용하여 3차원 개체의 절대좌표 결정에 관한 연구는 두 장의 영상만을 사용하였다는 사실을 알 수 있었다. 선행연구 분석 결과를 통해 지상 MMS로부터 획득된 전방위 영상에 적합한 광속조정법의 개발을 본 논문의 목표로 정하였다. 연구 수행을 위해 먼저 전방위 영상에 적합한 공선방정식의 수학적 모델을 수립한 후 전방위 영상을 통해 획득된 공액점, GPS/INS 데이터 및 지상기준점 데이터를 제안된 수학적 모델에 적용하여 그 결과를 도출하고 정확도를 분석한다.

2. 전방위 영상 광속조정법

1) 방법론의 개요

본 논문에서 제안하는 전방위 영상을 이용한 광속조정법은 Fig. 1과 같은 순서로 진행된다. 먼저 전방위 영상으로부터 획득된 공액점(Tie Points)과 GPS/INS로부터 획득된 데이터(GPS/INS Data) 및 초기 지상점 좌표(Initial GP)를 입력값으로 하여 제안된 광속조정법

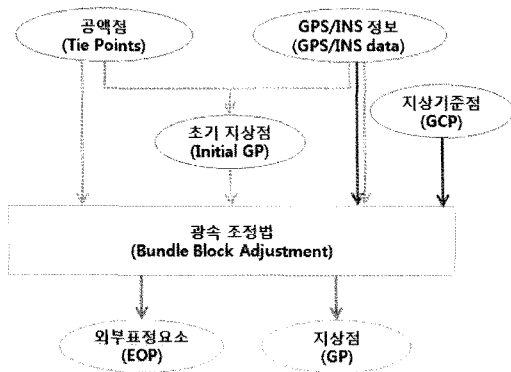


Fig. 1. Proposed method process.

(Bundle Block Adjustment)을 수행한 결과 최종적으로 외부표정요소(Exterior Orientation Parameters) 및 지상점 좌표(Ground Points)를 획득한다.

제안된 광속조정법은 전방위 영상에 대한 공선방정식과 제약조건으로 구성된 수학적 모델로 이루어져 있다. 카메라 투영 중심과 지상점을 잇는 하나의 직선은 카메라 투영의 중점을 중심으로 갖는 가상의 구면과 한 점에서 만나게 된다. 이렇게 형성된 점은 전방위 영상에서의 영상점에 해당되며 중심투영원리에 의해 하나의 영상점과 카메라 투영 중심 그리고 지상점은 하나의 직선상에 존재하게 된다. 중심투영원리는 식 (1)처럼 간단하게 나타낼 수 있다. 여기서 Y 는 전방위 영상 상의 공액점 좌표값이고 F 는 공선방정식을 나타내는 함수이다. Ξ_E 와 Ξ_P 는 각각 외부표정요소와 지상점 좌표에 대한 미지수이며 e_y 는 공액점 좌표가 관측에 수반된 오차를 의미한다.

$$Y = F(\Xi_E, \Xi_P) + e_y \quad (1)$$

다음은 지상 MMS에 탑재되어 있는 GPS/INS로부터 획득된 정보와 정지 GPS 및 토털 스테이션을 통해 획득된 지상기준점을 확률제약조건(Stochastic Constraints)으로 적용하는 단계이며 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 Z_1 과 Z_2 는 각각 GPS/INS와 지상기준점에 대한 관측 벡터이며 G_E 와 G_P 는 각각 외부표정요소와 지상점을 나타내는 확률제약조건을 나타내는 함수이다. Ξ_E 와 Ξ_P 는 각각 외부표정요소와 지상점 좌표의 미지수며 e_{z1} , e_{z2} 는 관측벡터의 오차다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= G_1(\Xi_E) + e_{z1} \\ Z_2 &= G_2(\Xi_P) + e_{z2} \end{aligned} \quad (2)$$

2) 전방위 영상에 대한 공선방정식

전방위 영상은 기존의 프레임 카메라 영상과 비교하여 Table 1에서 보는 바와 같이 크게 투영면 종류와 영상점 표현 방법이 다르다. 프레임 카메라의 경우 3차원 공간상의 지상점이 렌즈의 중심을 지나 2차원 초점면(Focal Plane)과 만나는 하나의 점이 영상점이 된다. 반면, 전방위 카메라의 경우 2차원 평면이 아닌 3차원 구의 표면을 초점면으로 사용하게 되며 그 초점면과 만나는 점이 영상점이 된다. 영상점을 표현하는 방법 또한 프레임 영상의 경우에는 영상의 중심으로부터 영상점까지

Table 1. Difference of projection between frame images and omni-directional images

구분	프레임 영상	전방위 영상
투영면 종류	평면	구면
영상점 표현 방법	거리	각도

지 거리를 X, Y축 상의 거리로 표현하지만 전방위 영상의 경우 가상의 중심점과 중심점으로부터 일정한 반지름을 갖는 구를 정의하고 구면상에 존재하는 영상점의 수평각 및 수직각을 이용하여 표현한다.

이러한 두 방식의 차이로 인해 전방위 영상을 위한 새로운 공선방정식이 필요하다. 먼저 공선방정식에서 사용하는 각 좌표계를 정의하였다. 카메라 좌표계(CCS), GPS/INS 좌표계(ICS) 및 지상 좌표계(GCS)와 각 좌표계 간의 관계는 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.

먼저 지상 좌표계로 표현된 지상점을 카메라 좌표계로 표현하여야 한다. 지상 좌표계로 표현된 지상점을 카메라 좌표계로 표현된 지상점으로 변환하는 식은 식(3)과 같다. C_P 는 카메라 좌표계로 표현한 지상점 좌표를 의미하며 G_P 는 지상점 좌표계로 표현된 지상점을 의미한다. G_{O_C} 는 지상 좌표계로 표현된 카메라 좌표계의 원점으로서 카메라 좌표계의 중심에서 지상좌표계의 중심으로의 변환계수를 의미한다. C_R 는 지상좌표계에서 카메라좌표계로 변환하는 회전행렬이며 식(4)와 같이 카메라 좌표계-GPS/INS 좌표계간의 회전변환을 뜻하는 I_R 과 GPS/INS 좌표계-지상 좌표계간의 관계를 나타내는 I_G 를 이용해 표현할 수 있다. G_{O_C} 는 G_{O_I} , I_G 및 I_{O_C} 를 이용하여 식(5)와 같이 표현할 수 있다. G_{O_I} 는 GPS/INS좌표계의 중심에서 지상좌표계의 중심으로의 변환계수를 의미한다. I_G 는 앞서 설명한 I_R 의 역변환이며 I_{O_C} 는 카메라좌표계의 중심에서 GPS/INS 좌표계의

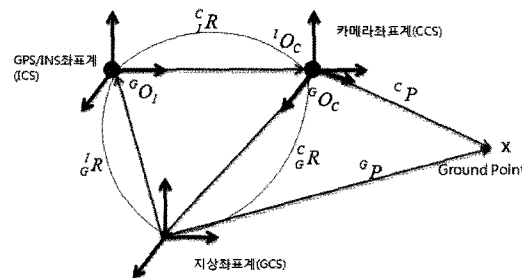


Fig. 2. Relationship of Coordinates(출처 : 오태완 등, 2010).

중심으로의 변환계수이다.

$$C_P = C_R(G_P - G_{O_C}) \tag{3}$$

$$C_R = I_R I_G \tag{4}$$

$$G_{O_C} = G_{O_I} + I_G I_{O_C} \tag{5}$$

지상좌표계로 표현된 하나의 지상점(G_P)은 카메라좌표계로 표현된 하나의 지상점(C_P)으로 변환이 가능하며 이는 식(3)~(5)을 통해 유도된 식(6)을 이용해 가능하다.

$$C_P = I_R(I_G(G_P - G_{O_I}) - I_{O_C}) \tag{6}$$

프레임 영상, 전방위 영상의 투영 중심과 영상점 및 지상점 간의 관계를 Fig.3을 통해 보여주고 있다. 프레임 영상의 경우 평면으로 이루어진 투영면이 투영의 중심으로부터 초점거리만큼 떨어져 있다. 중심투영원리에 의해 투영의 중심(O_C), 영상점(ρ), 지상점(P)은 Fig. 3과 같이 하나의 직선상에 존재한다. 영상점은 투영면의 중심으로부터의 X축 및 Y축 상의 거리를 이용하여 나타내며 카메라좌표계로 표현된 지상점 좌표인 $C_P(C_{P_x}, C_{P_y}, C_{P_z})$ 을 이용해 식(7)과 같이 표현할 수 있다. 반면, 전방위 영상의 경우 카메라 좌표계 상의 카메라 좌표계 원점은 카메라의 투영 중심(O_C)에 해당되고, 영상점(ρ)은 이 중심으로부터 갖는 구면상에 존재한다. 프레임 영상과 마찬가지로 중심투영원리에 의해 투영의 중심(O_C), 영상점(ρ), 지상점(P)은 하나의 직선상에 존재한다. 영상점(ρ)은 극 좌표계의 수평각(h)과 수직각(v)으로 표현되며 카메라 좌표계로 표현된 지상점 좌표인 $C_P(C_{P_x}, C_{P_y}, C_{P_z})$ 로 나타내면 식(8)과 같다.

$$\rho = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{P_x} - c_{P_z} \frac{C_{P_x}}{C_{P_z}} \\ c_{P_y} - c_{P_z} \frac{C_{P_y}}{C_{P_z}} \end{bmatrix}^T \tag{7}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} h \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} atan2(C_{P_y}, C_{P_x}) \\ asin(C_{P_z}/|C_P|) \end{bmatrix} \tag{8}$$

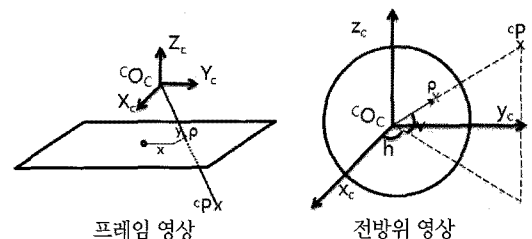


Fig. 3. Difference of central projection.

광속조정법은 중첩되는 다수의 영상을 공선방정식에 기반하여 계산된 영상점 좌표와 관측된 영상점 좌표 간의 차이를 최소화하는 영상의 외부표정요소와 지상점 좌표를 추정한다. 전방위 영상에 적합한 공선방정식을 식(6)과 (8)을 이용하여 유도할 수 있으며 식(9)와 같이 전방위 영상에 대한 관측방정식을 수립할 수 있다. σ_0^2 은 영상점 측정 시 발생할 수 있는 측정 오차의 분산이며, I_2 는 2×2 의 단위행렬이다.

$$\rho = \begin{bmatrix} h \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \tan 2(CP_y, CP_x) \\ a \sin(CP_z / \|CP\|) \end{bmatrix} + e, e \sim (0, \sigma_0^2 I_2) \quad (9)$$

비선형 방정식인 식(9)는 테일러급수를 이용하여 선형화된 식(10)을 유도할 수 있다. 미지수(Ξ)는 6개의 외부표정요소 및 3개의 지상점 좌표를 포함하는 9개의 변수이고 Ξ_0 은 Ξ 의 초기 근사값이며 F 는 공선 조건식의 함수이다.

$$\rho = F(\Xi_0) + \delta F / \delta \Xi \Xi = \Xi_0 (\Xi - \Xi_0) + e, e \sim (0, \sigma_0^2 I_2) \quad (10)$$

야코비 행렬(Jacobian Matrix)을 이용하여 식(10)을 식(11)과 같이 표현하였다. 여기서 t_1 과 t_2 는 식(12)와 같이 정의된다.

$$\frac{\partial F}{\partial \Xi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Xi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tan^{-1}(t_1)}{\partial t_1} \frac{\partial t_1}{\partial \Xi} \\ \frac{\partial \sin^{-1}(t_2)}{\partial t_2} \frac{\partial t_2}{\partial \Xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tan^{-1}(t_1)}{\partial t_1} \frac{\partial t_1}{\partial CP} \\ \frac{\partial \sin^{-1}(t_2)}{\partial t_2} \frac{\partial t_2}{\partial CP} \end{bmatrix} \frac{\partial CP}{\partial \Xi} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CP_y / CP_x \\ CP_z / \|CP\| \end{bmatrix} \quad (12)$$

각 성분별로 식(11)을 미분한다. 각 성분은 식(13)~(15)와 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \partial \tan^{-1}(t_1) / \partial t_1 \\ \partial \sin^{-1}(t_2) / \partial t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 / (1 + t_1^2) \\ 1 / \sqrt{1 - t_1^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial CP} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial CP} \begin{bmatrix} \frac{CP_y}{CP_x} \\ \frac{CP_z}{\|CP\|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{CP_y}{CP_x^2} & \frac{1}{CP_x} & 0 \\ \frac{CP_x CP_z}{\|CP\|^3} & \frac{CP_y CP_z}{\|CP\|^3} & \frac{CP_x^2 + CP_y^2}{\|CP\|^3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(11)의 마지막 미분인 $\frac{\partial CP}{\partial \Xi}$ 은 식(15)와 같이 Ξ 를 카메라의 위치에 대한 미지수(Ξ_{E1}), 카메라 자세에 대한 미지수(Ξ_{E2}) 및 지상점 좌표에 대한 미지수(Ξ_P)로 구분하여 계산한다. 각 미지수는 식(16)과 같이 구성되어 있다.

$$\frac{\partial CP}{\partial \Xi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial CP}{\partial \Xi_{E1}} & \frac{\partial CP}{\partial \Xi_{E2}} & \frac{\partial CP}{\partial \Xi_P} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Xi_{E1} &= [X_c \ Y_c \ Z_c]^T = {}^G O_I \\ \Xi_{E2} &= [\omega \ \phi \ \kappa]^T = {}^I_G R \\ \Xi_P &= [X \ Y \ Z]^T = {}^G P \end{aligned} \quad (16)$$

3) 확률제약조건식

앞서 제안한 공선방정식으로 기반으로 하여 GPS/INS 데이터 및 지상기준점 데이터를 적용하여 확률제약조건식을 수립하였다. GPS/INS 데이터는 지상 MMS에 탑재되어 있는 GPS/INS로부터 획득되었고 지상기준점은 정지 GPS 및 토털 스테이션을 통해 정밀하게 측정되었다. GPS/INS 데이터를 확률제약조건으로 적용한 것은 식(17)에서 보여주고 있다. 여기서 K_1 은 GPS/INS 데이터로 구성된 관측 벡터이고 ξ_p 는 외부표정요소의 미지수이며 e_{22} 는 관측벡터의 오차이다. 관측방정식에 확률제약조건으로 GPS/INS 데이터를 적용하는 예를 식(18)을 통해 보여주고 있다. GPS/INS 데이터를 구성하는 총 6개의 요소에 각각 관측오차를 포함하는 관측값을 입력한다.

$$z_1 = K_1 \xi_e + e_{z1}, e_{z1} \sim (0, \sigma_0^2 P_{z1}^{-1}) \quad (19)$$

$$\xi_e = \begin{cases} X_c = 100 \pm 0.05(m) & \omega = 0 \pm 0.05(^{\circ}) \\ Y_c = 150 \pm 0.05(m) & \phi = 5 \pm 0.05(^{\circ}) \\ Z_c = 200 \pm 0.05(m) & \kappa = 10 \pm 0.05(^{\circ}) \end{cases} \quad (20)$$

지상기준점을 확률제약조건으로 적용한 것은 식(19)에서 보여주고 있다. 식에서 K_2 은 지상기준점에 대한 관측 벡터이고 ξ_p 는 지상점의 미지수이며 e_{z2} 는 관측벡터의 오차이다. 관측방정식에 확률제약조건으로 지상기준점 데이터를 적용하는 예를 식(20)을 통해 보여주고 있다. 지상점을 구성하는 총 3개의 요소에 각각 관측오차를 포함하는 관측값을 입력한다.

$$z_2 = K_2 \xi_p + e_{z2}, e_{z2} \sim (0, \sigma_0^2 P_{z2}^{-1}) \quad (19)$$

$$\xi_p = \begin{cases} X_p = 100 \pm 0.05(m) \\ Y_p = 200 \pm 0.05(m) \\ Z_p = 300 \pm 0.05(m) \end{cases} \quad (20)$$

4) 수학적 모델

본 연구에서 적용하는 모든 제약조건과 미지수를 추정하는 관측방정식은 식(21)과 같다. ξ_e, ξ_p 은 각각 외부 표정요소, 지상기준점에 대한 미지수이다. y 는 영상점의 관측값이고 z_1, z_2 은 각각 GPS/INS 데이터, 지상기준점에 대한 관측값이다. A_e, A_p 는 각각 ξ_e, ξ_p 에 대한 설계행렬이며 K_1, K_2 는 각각 외부표정요소 및 지상기준점 제약조건에 대한 설계 행렬이다. e_y, e_{z1} 및 e_{z2} 는 각 관측값에 대한 오차이며 σ_0^2 는 미지수의 분산성분이고 P_y^{-1} 는 e_y 에 대한 여인수 행렬(cofactor matrix)이다. P_{z1}^{-1} 는 GPS/INS의 정밀도를 의미하는 e_{z1} 의 여인수 행렬이며, P_{z2}^{-1} 는 지상기준점의 정밀도를 의미하는 e_{z2} 의 여인수 행렬이다.

$$\begin{bmatrix} y \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e & A_p \\ K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_y \\ e_{z1} \\ e_{z2} \end{bmatrix} \sim \left(0, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_y^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & P_{z1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & P_{z2}^{-1} \end{bmatrix} \right) \quad (21)$$

본 논문에서는 미지수 및 제약조건에 따라 4개의 모델로 구분하였다. 모델 1에서는 적용하는 제약조건 없이 외부표정요소를 조정하지 않고 지상점만 추정한다. 모델 2에서는 GPS/INS 데이터를 제약조건으로 적용하여 외부표정요소 및 지상점을 추정한다. 모델 3에서는 지상기준점을 제약조건으로 적용하여 외부표정요소 및 지상점을 추정하고 모델 4에서는 GPS/INS 데이터와 지상기준점을 동시에 제약조건으로 적용하여 외부표정요소 및 지상점을 추정한다. Table 2는 수학적 모델의 종류에 따라 추정되는 미지수 및 사용되는 제약조건을 보여주고 있다.

Table 3은 4개 모델에 해당되는 수학적 모델식을 보

Table 2. Estimated unknown and constraint parameters

모 델	미 지 수		제약조건	
	EOP	GP	GPS/INS	GCP
1	×	○	×	×
2	○	○	○	×
3	○	○	×	○
4	○	○	○	○

Table 3. Mathematical models

모델	수학적 모델
1	$y = A_p \xi_p + e_y, e_y \sim (0, \sigma_0^2 P_y^{-1})$
2	$\begin{bmatrix} y \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e & A_p \\ K_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_y \\ e_{z1} \end{bmatrix} \sim \left(0, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_y^{-1} & 0 \\ 0 & P_{z1}^{-1} \end{bmatrix} \right)$
3	$\begin{bmatrix} y \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e & A_p \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_y \\ e_{z2} \end{bmatrix} \sim \left(0, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_y^{-1} & 0 \\ 0 & P_{z2}^{-1} \end{bmatrix} \right)$
4	$\begin{bmatrix} y \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e & A_p \\ K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_y \\ e_{z1} \\ e_{z2} \end{bmatrix} \sim \left(0, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_y^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & P_{z1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & P_{z2}^{-1} \end{bmatrix} \right)$

여주고 있다. 각 모델에서 사용한 미지수 및 관측값에 대한 설명은 앞서 제시된 식(21)에 대한 설명과 동일하다.

3. 실험 및 결과 분석

1) 데이터 준비

본 연구에서 사용한 데이터는 전방위 카메라 및 GPS/INS를 탑재한 지상 MMS로부터 획득되었다. 전방위 카메라는 Point Grey Research사의 Ladybug 3 모델로서 총 6개의 CCD를 사용하여 전방위 영상을 획득한다. GPS/INS는 이동형 시스템에 적합한 Applanix사의 POSLV 420PP를 사용하였다. 사용된 전방위 카메라 및 GPS/INS의 대한 설명은 오태완과 이임평(2010)의 논문에서 자세히 다루고 있다.

실험을 위해 지상 MMS를 이용해 센서데이터를 획득한다. 획득한 전체 데이터 중 본 실험을 위한 실험지역을 선정하고 그 지역의 전방위 카메라 영상 및 GPS/INS 데이터를 추출한다. 추출된 중첩 전방위 영상을 이용하여 지상기준점 및 검사점을 포함하는 다수의 공액점을 측정하고 공액점 및 GPS/INS 데이터를 이용하여 초기 지상점 좌표를 추정한다. 마지막으로 공액점, GPS/INS 좌표 및 초기 지상점 좌표를 제안된 광속조정법에 적용하여 외부표정요소 및 지상점 좌표를 추정한다.

실험에서 사용한 모든 데이터는 경기도 오산시 오산 시청 부근의 도로에서 획득되었다. 획득된 전방위 영상은 전체 288장이며 영상 취득과 동기화하여 개별 영상이 촬영된 시점의 위치/자세 데이터를 GPS/INS 데이터

로부터 추출하였다. 대상지역에서 지상기준점 및 검사점으로 사용하기 위해서 정지 GPS와 토털 스테이션을 통해 총 52개의 지점을 정밀하게 측량하였다. 획득된 모든 공간정보 중 본 연구를 통해 선정된 실험지역에 해당되는 전방위 카메라 영상 및 위치/자세 데이터를 선정하였다. 전방위 카메라 영상은 그 특성상 연속되는 영상의 중첩율이 매우 크기 때문에 불필요한 중첩이 생긴다. 이를 고려해서 2m 간격의 연속된 영상이 아닌 홀수 번째 영상만을 사용하여 영상이 획득된 각 지점간의 거리를 평균적으로 약 4m정도로 관측되었다. 선정된 영상의 개수는 24개이며 첫 번째 영상과 마지막 영상간의 거리는 약 100m이다. Table 4는 영상과 지상기준점 등에 대한 정보를 보여주고 있다.

본 실험에서는 지상기준점 및 검사점을 포함하여 총 28개의 지상점에 상응하는 212개의 공역점을 영상에서 측정하였다. 특히 본 연구에서는 연속되는 영상에서 상호표정이 수립되기 위해 최소로 필요한 공역점 개수인 5개보다 많은 평균 7.9개의 공역점을 연속되는 측정하여 사용하였다. 공역점과 지상점에 대한 주요한 정보를 Table 5에 정리하였다. 하나의 지상점이 평균적으로 7개 이상의 영상에 나타난 것을 볼 수 있는데 프레임 영상에 비교하여 상대적으로 중첩도가 높은 전방위 영상을 사용하였기 때문에 가능한 것이며 이로 인해 보다 높은 정밀도로 지상점 좌표를 결정하는 것이 가능하다.

개별 지상점이 어떤 영상에서 관측되는가를 나타내는 영상과 지상점의 관계를 Fig. 4를 통해 보여주고 있

Table 4. Information of selected data

구 분	값
영상 간의 촬영 거리(m)	4
총 영상 개수	24
지상기준점 개수	4
검사점 개수	9

Table 5. Information of tie points and ground points

구 분	최소값	최대값	평균
공역점 개수			212
지상점 개수			28
지상점 당 영상 개수	5	11	7.6
영상 당 지상점 개수	4	11	8.8
연속되는 영상에서의 공역점 개수	6	11	7.9

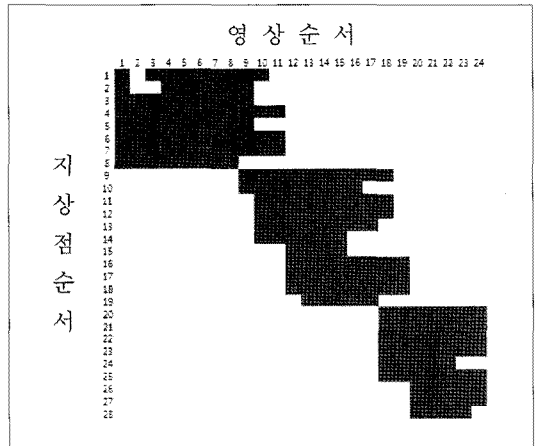


Fig. 4. Relation between images and ground points.

다. 행은 지상점의 색이며 열은 영상의 색이다. 그리고 해당 영상에 해당 지상점이 있을 경우 붉은색으로 나타내었다. 예를 들어, 3번 영상에는 1번 지상점을 포함하고 있으나 2번 지상점은 포함되어 있지 않다. 그림을 통해 연속된 영상이 동시에 포함하고 있는 공역점의 개수를 확인할 수 있다. 예를 들어, 1번 영상과 2번 영상의 경우 두 영상 간에는 6개의 공역점이 존재한다. 이러한 관계표를 통해 중첩된 영상 사이에 충분한 공역점을 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제시한 식(21)과 같은 수학적 모델에 최소제곱법을 적용하여 관측조정을 수행하기 위해서 관측값들 사이에 가중치를 설정해야한다. 가중치는 관측에 사용된 센서의 정밀도를 고려해서 관측값에 포함된 오차의 분산에 반비례하도록 설정해야한다. 영상점 측정 정밀도는 전방위 영상의 한 픽셀에 해당되는 각인 1/15°로 설정하였다. 이는 수평각 360°와 수직각 180°를 각각 전방위 영상의 가로 해상도인 5400 픽셀과 세로 해상도인 2700 픽셀로 나누면 1/15°가 되기 때문이다. 보통 공역점의 측정 정밀도는 영상의 한 픽셀에 해당되는 크기이므로 한 픽셀에 해당되는 각도인 1/15°로 설정하였다. 지상기준점 및 GPS/INS 데이터의 정밀도는 장비

Table 6. Measurement errors

구 분	값
공역점 (°)	±1/15
지상기준점 (m)	0.05
GPS (m)	0.05
INS (°)	±0.05

의 제원을 바탕으로 설정하였다. 영상점 및 센서들의 측정 정밀도를 정리하면 Table 6과 같다.

2) 결과 및 분석

제안한 수학적 모델에 지상 MMS로부터 획득된 실측 데이터를 적용하여 실험 결과를 도출하고 이를 분석하였다. 분석 내용으로는 외부표정요소 변화량, 지상점 오차 및 영상점 잔차이다. 외부표정요소 변화량이란 초기 GPS/INS로부터 획득된 데이터와 최종적으로 추정된 외부표정요소간의 차이를 의미한다. 지상점 오차란 정지 GPS와 토탈 스테이션을 통해 측정된 높은 정확도의 지상점 좌표와 최종 추정된 지상점 좌표간의 차이를 의미한다. 영상점 잔차란 영상 상에서 측정한 영상점 좌표와 조정 계산된 영상점 좌표간의 차이를 의미한다. 세계의 지표를 이용해 제안된 방법론의 정확도를 분석하였다.

모든 실험의 결과는 Table 7을 통해 확인할 수 있다. 각 모델별 영상점 잔차는 Fig. 5를 통해 그래프로 제시

Table 7. Summary of test

구분	요소	모델			
		1	2	3	4
외부표정요소 변화량	Xc(m)		0.042	0.319	0.045
	Yc(m)		0.186	0.140	0.164
	Zc(m)		0.183	0.543	0.175
	$\omega(^{\circ})$		0.073	0.848	0.071
	$\phi(^{\circ})$		0.559	1.289	0.562
	$\kappa(^{\circ})$		0.139	0.905	0.123
지상점 오차	X(m)	0.355	0.394	0.035	0.325
	Y(m)	0.393	0.440	0.033	0.371
	Z(m)	0.799	0.874	0.033	0.725
영상점 잔차	($^{\circ}$)	0.716	0.147	0.058	0.149

하였으며 각 모델별 외부표정요소의 변화량은 Fig. 6~9를 통해 보여주고 있다. 제약조건을 적용하지 않은 모델 1의 경우 지상점 오차가 30cm~80cm 정도로 매우 크다. 이를 개선하기 위해 GPS/INS 정보만을 제약 조건으로 사용한 모델 2의 경우는 영상점 잔차의 크기가 매우 감소하였지만 지상점 오차는 40cm~90cm 정

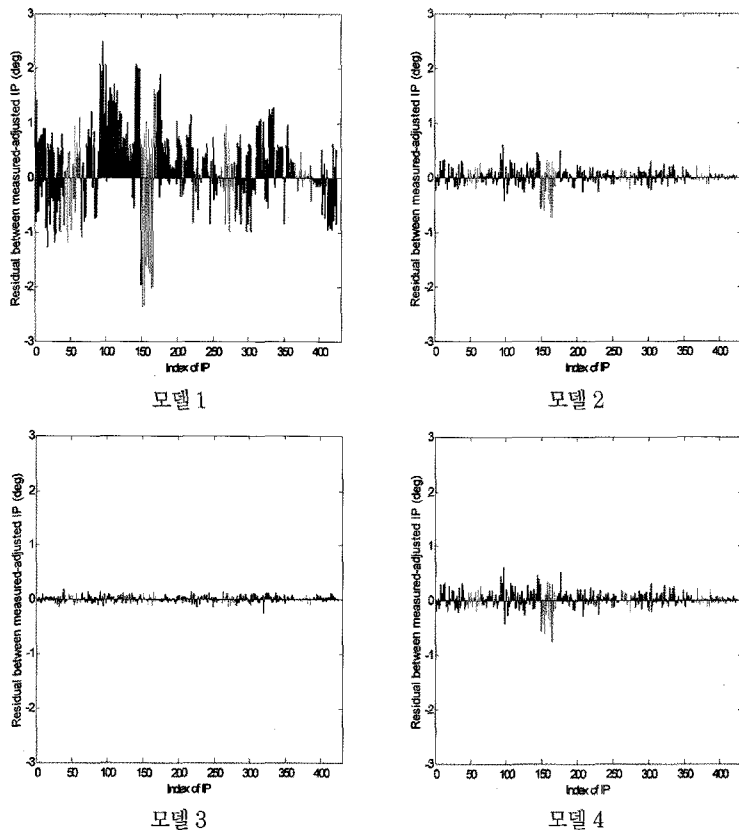


Fig. 5. Residual of image points.

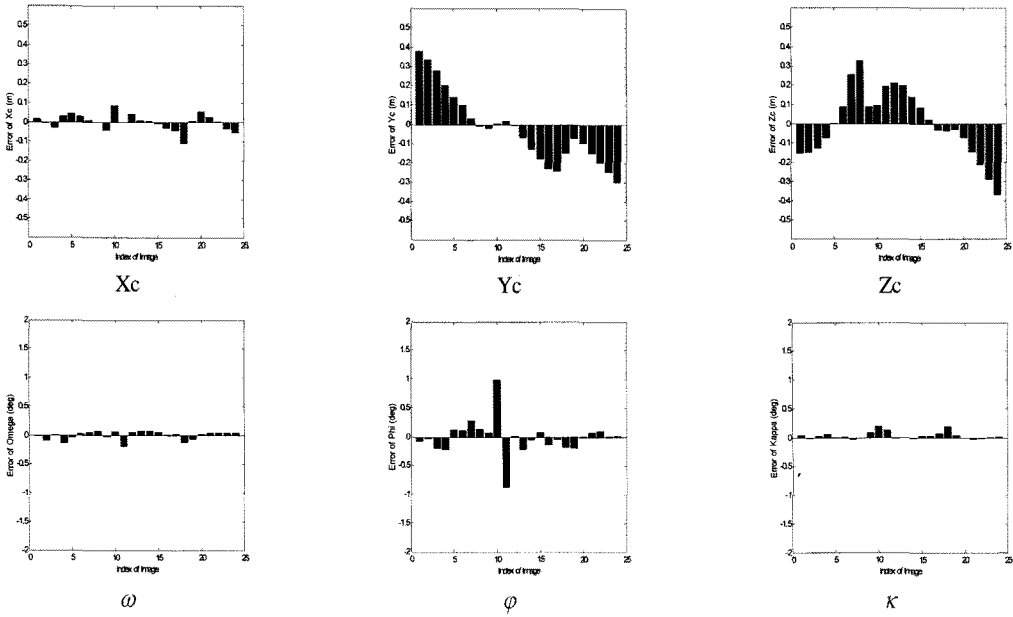


Fig. 6. Changes in EOPs (Model 2).

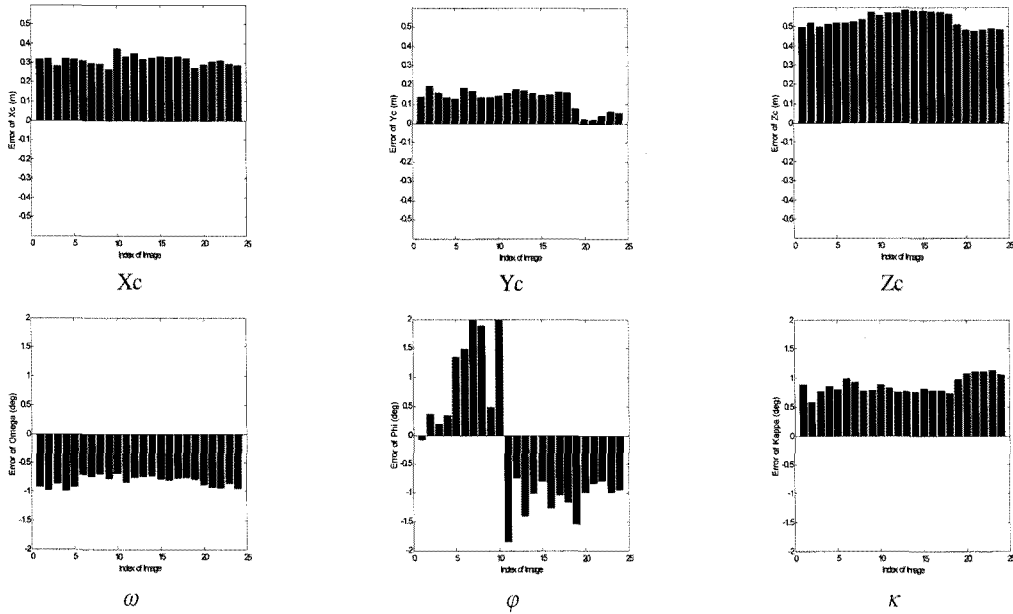


Fig. 7. Changes in EOPs (Model 3).

도로 모델 1과 비슷한 수준이다. 4개의 지상기준점을 제약조건으로 사용한 모델 3의 경우에는 다른 모델에 비해 외부표정요소가 크게 변화하였고 3cm 내외의 높은 지상점 추정 정확도를 보여주었다. GPS/INS 정보와 지상기준점을 모두 제약조건으로 적용한 모델 4의 경우에는 지상점 추정 정확도가 모델 1, 2에 비해서는 향상되

었지만 모델 3보다는 좋지 않았다. 실험의 결과 모델 3이 가장 높은 지상점 절대좌표 정확도를 제공하였으며 이를 통해 전방위 카메라 영상과 소수의 지상기준점만을 이용해 높은 정확도의 지상점 추정이 가능함을 알 수 있었다.

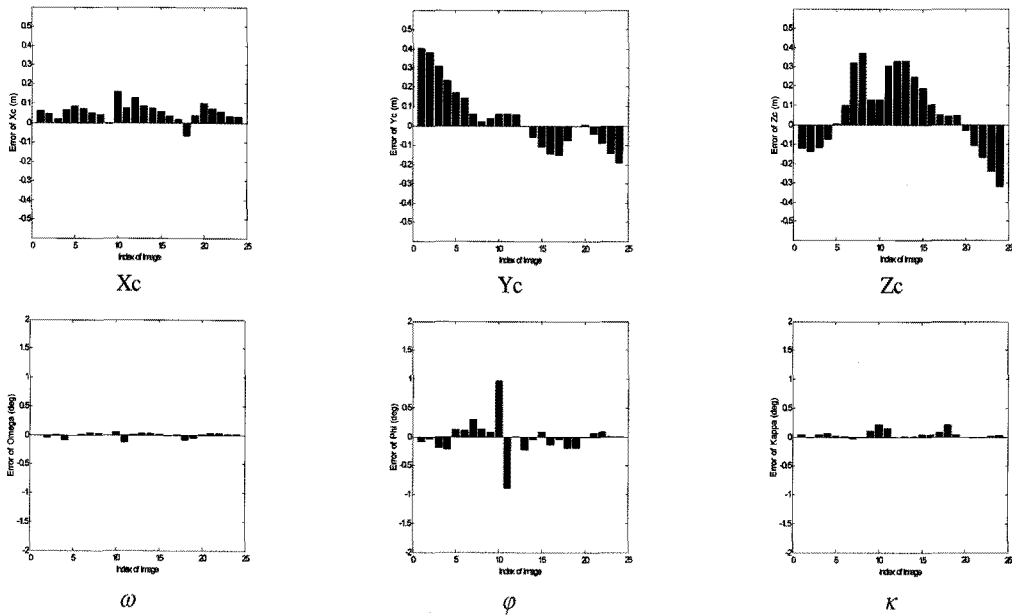


Fig. 8. Changes in EOPs (Model 4).

4. 결 론

프레임 영상에 적용하던 공선조건식을 전방위 영상에 적합하게 변형하여 새로운 관측방정식을 수립하였다. 또 지상 MMS에 탑재된 전방위 카메라로부터 전방위 영상을 획득하였고 공역점을 선정하였으며 GPS/INS를 통해 위치/자세 데이터도 획득하였다. 획득된 GPS/INS의 데이터 및 지상기준점을 확률제약조건으로 적용하여 전방위 영상의 외부표정요소 및 공역점과 상응되는 지상점을 추정하였다.

본 연구를 통해 프레임 카메라 영상에만 적용되었던 광속조정법이 전방위 영상에 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 지상기준점을 확률제약조건으로 사용할 때 3cm 내외의 높은 정확도로 지상점 추정이 가능하여 전방위 영상을 이용하여 객체의 정밀한 3차원 모델 추출이 가능함을 알 수 있었다. 더 나아가 기선 거리 및 촬영 범위의 제약 없이 도로의 구성요소 및 도로 주변의 건물 등 주요 객체들의 정보를 신속하고 정확하게 획득 및 처리가 가능함을 알 수 있었다.

하지만, 본 연구에서의 전방위 영상을 제공하는 전방위 카메라는 개별 센서로부터 획득된 개별 영상을 제공하지 않기 때문에 카메라의 내부표정요소를 추정하는 과정인 카메라 보정(Calibration)을 수행할 수 없다. 또

카메라와 GPS/INS간의 물리적인 관계를 의미하는 탑재변수(Mounting Parameters)도 실험 과정에서 추정하지 않았다. 위 두 과정은 실험의 정확도를 보다 향상시키기 위해 반드시 필요한 과정이다. 향후 카메라 보정 및 탑재변수 추정에 관한 연구를 통해 보다 정확한 3차원 좌표 추정에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03 #)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 나종기, 박운용, 문두열, 김진수, 2004. Direct Georeferencing을 이용한 도화 정확도 분석, 한국측량학회 학술대회논문집, 263-268.
- 박운용, 박흥기, 위광재, 송연경, 2004. 외부표정요소 직접결정에 의한 수치정사영상 생성, 한국GIS학회지, 13(1): 55-63.

- 송연경, 박운용, 박흥기, 2005. Direct Georeferencing에 의한 CCD 영상의 적용기법, 한국측량학회지, 23(1): 77-88.
- 오태완, 이임평, 2010. 모바일매핑시스템으로 취득한 중첩 전방위 영상으로부터 3차원 객체좌표의 결정, 한국측량학회지, 28(3): 305-315.
- 유환희, 박장환, 심재현, 김성삼, 2006. 저고도촬영시스템을 이용한 영상지도 제작, 지형공간정보학회지, 14(1): 37-47.
- 조규전, 이재원, 유재엽, 2002. Direct Georeferencing의 응용 연구, 한국측량학회 학술대회논문집, 111-116.
- 최경아, 이임평, 2009. UAV 기반 저가 멀티센서시스템을 위한 무기준점 AT를 이용한 영상의 Georeferencing, 한국측량학회지, 27(2): 249-260.
- 최경아, 오소정, 이임평, 신진수, 2007. 모바일 매핑 시스템 개발, 대한토목학회 학술대회논문집, 4467-4470.
- 홍주석, 최경아, 이임평, 오태완, 2008. UAV 기반의 실시간 공중모니터링을 위한 멀티센서 시스템 설계, 한국 GIS학회 춘추계학술대회, 322-324.
- 황진상, 2009. 차량 모바일매핑시스템의 현황과 활용분야, 대한측량학회, [http://www.cylod.com/board/kboard.php?board=full_text&act=view&no=5&page=1&search_mode=&search_w](http://www.cylod.com/board/kboard.php?board=full_text&act=view&no=5&page=1&search_mode=&search_word=&cid=)
- ord=&cid=.
- Bae. S. and Kim B., 2005. Accuracy Analysis of Image Orientation Technique and Direct Georeferencing Technique, The Journal of GIS Association of Korea, 13(4): 373-380.
- Gontran H., Skaloud J. and Gillieron PY., A mobile mapping system for road data capture via a single camera, 6th optical 3D measurement techniques, Zurich, Switzerland, Sep. 22-25, 2003.
- Habib, A., Ghanma, M., and Mitshita, E., 2005. Photogrammetric Georeferencing Using LIDAR Linear and Areal Features, Korean Journal of Geomatics, KSGPC, 5(1): 7-19.
- Henri, E., A Mini Unmanned Aerial Vehicle(UAV): System Overview and Image Acquisition, International Workshop on Processing and Visualization using High-Resolution Imagery, Pitsanulok, Thailand, Nov. 18-20, 2004.
- Silpa-Anan, C. and Hartley, R., Visual localization and loopback detection with a high resolution omnidirectional camera, 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Oct. 21. 2005.
- Wikipedia, 2009, Omnidirectional camera, The free Encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional_camera.