한국측량학회지, 제 28권 제 3호, 2010. 6 : pp. 305~315

모바일매핑시스템으로 취득한 중첩 전방위 영상으로부터 3차원 객체좌표의 결정

Determination of 3D Object Coordinates from Overlapping Omni-directional Images Acquired by a Mobile Mapping System

오태완[1] · 이임평[2]
Oh, Taewan · Lee, Impyeong

Abstract

This research aims to develop a method to determine the 3D coordinates of an object point from overlapping omni-directional images acquired by a ground mobile mapping system and assess their accuracies. In the proposed method, we first define an individual coordinate system on each sensor and the object space and determine the geometric relationships between the systems. Based on these systems and their relationships, we derive a straight line of the corresponding object point candidates for a point of an omni-directional image, and determine the 3D coordinates of the object point by intersecting a pair of straight lines derived from a pair of matched points. We have compared the object coordinates determined through the proposed method with those measured by GPS and a total station for the accuracy assessment and analysis. According to the experimental results, with the appropriate length of baseline and mutual positions between cameras and objects, we can determine the relative coordinates of the object point with the accuracy of several centimeters. The accuracy of the absolute coordinates is ranged from several centimeters to 1 m due to systematic errors. In the future, we plan to improve the accuracy of absolute coordinates by determining more precisely the relationship between the camera and GPS/INS coordinates and performing the calibration of the omni-directional camera.

Keywords : Omni-directional Camera, Coordinate Determination, Mobile Mapping System, Sensor Fusion

초 록

본 연구는 지상모바일매핑시스템을 이용하여 취득한 중첩 전방위 영상을 이용하여 객체점의 3차원 좌표를 결정하는 방법을 제시하고 정확도를 분석하고자 한다. 제안된 방법은 먼저 개별 센서 및 대상공간에 좌표계를 정의하고 좌표계간의 관계를 설정한다. 이에 기반하여 전방위 영상의 한점에 투영되는 객체점이 위치한 직선을 유도하고, 공액점으로부터 결정되는 한쌍의 직선을 교차하여 객체점의 3차원 좌표를 결정한다. 제안된 방법을 통해 결정된 객체점의 좌표를 GPS와 토탈스테이션으로 측정한 검사점 좌표와 비교하여 정확도를 검증하였다. 본 연구의 결과 기선의 길이 및 카메라/대상객체 사이의 상호 위치를 적절하게 설정한다면 객체점의 상대좌표를 수 cm 내의 정확도로 결정할 수 있었다. 절대좌표의 정확도는 정오차로 인해 수 cm에서 1 m 정도를 보였다. 향후 카메라 좌표계와 GPS/INS 좌표계 사이의 관계를 보다 정확하게 설정하고 전방위 카메라의 보정을 통해 절대 좌표의 정확도를 개선할 계획이다.

핵심어 : 전방위카메라, 좌표결정, 모바일매핑시스템, 센서융합

1) 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 석사과정 (E-mail:moglyworld@gmail.com)
2) 교신저자 · 정회원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 부교수 (E-mail:iplee@uos.ac.kr)

1. 서 론

고품질 공간정보의 보다 신속하고 경제적인 구축을 위해 최근에는 다양한 플랫폼에 탑재된 다양한 센서들의 융합에 기반한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Eisenbeiss (2004)와 Choi 등(2009)은 무인항공기(UAV)를 플랫폼으로 하여 카메라 및 GPS/INS등의 멀티센서가 탑재된 시스템을 이용해 공간정보를 취득하는 시스템을 개발하고 있다. 항공기를 이용한 공간정보 획득시스템은 도심지의 경우 건물 벽면의 텍스쳐 획득에 취약하기 때문에 모바일매핑시스템과 같이 차량을 이용한 시스템의 활용이 요구된다. 모바일매핑이란 도로, 교통시설물, 도로주변의 건물 등 지형지물의 정보를 움직이는 차량을 이용해 취득하는 것을 말한다(Bossler, 1995). 최경아 등(2007)은 멀티센서를 차량에 탑재한 모바일매핑시스템을 개발하였으며, 정재승 등(2006)은 모바일매핑시스템을 이용하여 이동객체를 추적하고 필요한 특정 개체만을 추출하는 연구를 하였다.

최근에는 모바일매핑시스템에 전방위 카메라(Omni-directional Camera)를 탑재하여 공간정보를 획득하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 전방위 카메라를 탑재한 모바일매핑시스템은 차량 진행방향에 따라 중복 촬영한 영상을 이용하여 지형지물의 위치를 산출한다. 이러한 경우 프레임 카메라를 사용하는 방식에 비해 기선이 길어져 높은 정확도를 갖는 결과물 생성이 가능하다(황진상, 2009). 이와 관련하여 전방위 카메라 및 주행 기록계(Odometer)를 탑재한 모바일매핑시스템 이용을 통해 옵티컬 플로어(Optical Flow) 기반의 지형지물 인식 연구(Yata 등, 2002)등이 있다.

전방위 카메라란 시야각(FOV, Filed of View)이 360° 이기 때문에 촬영 지점을 기준으로 모든 방향의 영상정보 취득이 가능한 카메라를 말한다(Wikipedia, 2009). 기존의 전방위 카메라는 반구 모양의 거울을 통해 반사된 영상데이터를 하나의 CCD에 입력하여 전방위 영상을 취득하는 방식이었으나 이러한 전방위 카메라 영상은 반구거울을 사용하는 동작방식에 의해 필연적으로 많은 왜곡(distortion)들을 포함하고 있다(Silpa 등, 2005). Beauchemin 등(2000)은 전방위 영상에서 발생하는 왜곡을 CCD 센서에 맺히는 투영의 중심과 상 사이의 각을 이용하여 보정하였으나 왜곡을 완전하게 제거할 수 없었다. 최근에는 거울을 이용한 방식이 아닌 여러 개의 카메라를 이용한 전방위 카메라가 등장하였다. 그 중 캐나다의 Point Grey Research사에서 제작한 전방위 카메라인 Ladybug는 서로 다른 범위를 촬영하는 6개의 카메라를 통해 영상을 획득한다. 각 카메라로부터 획득된 6개의 영상들은 영상처리를 통해 모든 방향으로의 영상정보를 갖는 한 장의 전방위 영상으로 생성된다. 이러한 방식으로 생성된 전방위 영상은 기존의 반구거울을 이용한 전방위 카메라 영상에 비해 왜곡은 적고 공간해상도가 높다(Silpa 등, 2005).

전방위 카메라는 다양한 분야에서 사용되어 왔다. 이동로봇 시스템 분야에서는 Fiala 등 (2002)에 의해 Tracking vertex와 직선을 이용하는 방법을 사용하여 로봇의 위치 및 방향을 감지하고 이를 이용해 이동경로 결정하는 연구가 진행되었다. Mochizuki 등 (2008)은 전방위 영상의 옵티컬 플로어(Optical Flow) 백터를 이용하여 로봇의 방향을 계산하는 방법을 제안하였다. 이 밖에도 김진환 등(2008)은 전방위 영상을 평면에 투사하여 객체를 인식하고 추적하는 연구를 수행하였다.

모바일매핑시스템은 다양한 종류의 센서들을 결합하여 구성되므로 센서들의 성능에 따라 전체 시스템의 성능이 결정된다고 할 수 있다(황진상, 2009). 기존의 전방위 카메라를 탑재한 지상 모바일매핑시스템은 주로 객체의 움직임을 개략적으로 탐지하거나 가공되지 않은 원시 영상만을 제공하는 로드뷰(Road View)서비스에 사용되어 왔다. 최근에 전방위 카메라 기술의 발전을 통해 높은 해상도 및 낮은 왜곡을 갖는 전방위 영상의 취득이 가능하게 되었고 이로 인해 기존의 항공 및 지상에서 취득된 프레임 카메라 입체 영상을 통해 가능하였던 대상객체에 대한 3차원 절대좌표 결정이 전방위 영상을 이용해서 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 전방위 카메라와 GPS/INS가 통합된 지상 모바일매핑시스템을 이용하여 취득된 전방위 영상 및 위치/자세 정보를 이용하여 대상지점의 3차원 절대 좌표를 결정하는 방법을 제안하고 실측데이터에 적용하여 정확도 평가를 수행하고자 한다.

2. 좌표결정 방법론

2.1 개요

본 연구는 그림 1에서 보는 바와 같이 전방위 카메라 영상과 영상의 외부표정요소를 이용하여 대상지점의 3차원 좌표를 결정하는 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 크게 좌표계 설정, 내부표정, 외부표정 및 대상지점 좌표결정의 과정으로 구성된다.

첫 번째 과정은 탑재된 센서의 구성을 확인한 후 센서 및

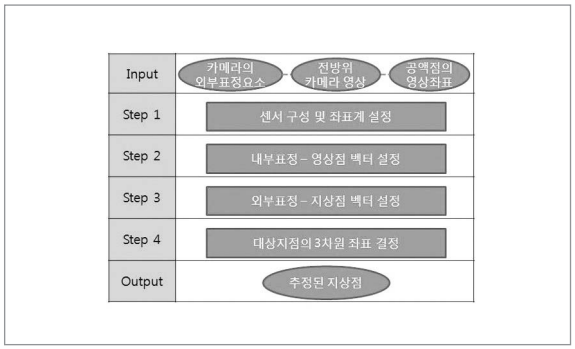


그림 1. 3차원 절대좌표 결정의 개요

지상에 개별적으로 정의되어 있는 3차원 좌표계를 정의하고 좌표계 사이의 관계를 수립한다. 두 번째 및 세 번째 과정은 하나의 영상점에 투영될 수 있는 3차원 후보 지상점이 존재하는 직선을 3차원 객체좌표계 상에 표현하기 위해 내부표정 및 외부표정을 수행한다. 내부표정은 하나의 영상점에 대응되는 후보 지상점의 직선을 카메라 좌표계로 표현하는 과정이고, 외부표정은 카메라 좌표계로 표현된 직선을 카메라와 지상과의 관계를 통해 지상 좌표계로 변환하는 과정이다. 마지막 과정은 두 개의 중첩된 영상에서 선정한 공액점으로부터 유도한 각각의 직선의 교점을 계산하여 대상지점의 3차원 절대좌표를 결정한다.

2.2 센서 구성 및 좌표계 설정

본 연구에서 사용한 모바일매핑시스템은 전방위 카메라와 GPS/INS 센서를 탑재하고 있다. 탑재된 센서들은 각각 개별 센서에 독립적으로 정의된 3차원 좌표계를 기준으로 원시 센서 데이터를 출력한다. 이러한 개별 센서 좌표계로 표현된 원시 센서 데이터를 융합하여 독립적인 지상좌표계를 갖는 객체공간에 포함된 대상객체에 대한 절대좌표를 결정해야 한다. 이에 카메라좌표계(CCS), GPS/INS좌표계(ICS)와 지상좌표계(GCS)를 그림 2처럼 정의하고 센서 데이터의 상호융합을 위해 좌표계 사이의 관계를 정밀하게 수립하고자 한다. 특히 고품질의 센서융합을 위해 GPS/INS 좌표계와 카메라 좌표계간의 이동(translation) 및 회전(orientation) 변환 계수는 반드시 정밀하게 측정되어야 한다(Jeroen 등 2008). 본 연구에서는 좌표계 사이의 관계를 설정하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 카메라 좌표계와 GPS/INS 좌표계의 X, Y 축은 평행하게 설정하고 Z축을 일치시키려 노력하였다. X축은 차량의 진행방향이고 Z 축은 차량 진행방향의 수직 직각 방향이다. 실제 두 좌표계간의 관계는 상대좌표 오차 측정 부분에서 검증하였다.

2.3 내부표정 – 영상점 벡터의 설정

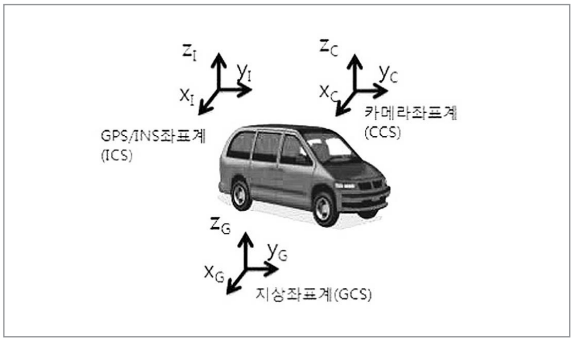


그림 2. 센서 및 지상 좌표계의 정의

평면에 투영된 영상을 제공하는 프레임 카메라와는 다르게 전방위 카메라는 여러 방향으로 관측된 다수의 프레임 카메라 영상을 조합하여 모든 방향의 영상 정보를 포함하는 영상을 제공한다. 본 연구에서 사용되는 전방위 카메라 영상은 수평방향으로 360° 와 수직방향으로 180° 의 범위를 나타내는 5400×2700 픽셀로 구성되어 15개의 픽셀(pixel)이 1°를 표현한다. 영상점의 좌표는 영상의 좌측상단을 기준으로 (r, c)로 표현한다. 여기서 r은 각 행의 번호를 의미하고 c는 각 열의 번호를 의미한다. 영상점의 좌표와 구면상의 위치를 나타내는 수평각(α)과 수직각(β)의 관계는 그림 3처럼 표현되고, 이는 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$\alpha = \frac{c}{15} - 180, \quad \beta = 90 - \frac{r}{15} \tag{1}$$

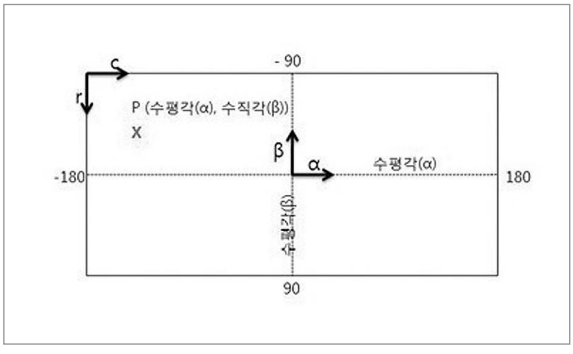


그림 3. 전방위 영상의 좌표

카메라 좌표계 상에서 반지름이 1인 구면 상의 영상점과 이에 투영된 지상점의 관계는 그림 4와 같다. 카메라 좌표계의 원점은 카메라의 투영의 중심에 해당하고, 중심투영의 원리에 따라 투영의 중심, 영상점, 지상점은 그림 4과 같이 하나의 직선 상에 존재한다. 투영의 중심에서 영상점을 잇는 벡터 - 영상점 벡터 ${}^{C}n$ 는 3차원 극좌표계의 원리에 의해 식(2)처럼 나타내어진다. 이는 투영의 중심에서 지상점을 잇는 벡터 - 지상점벡터와 동일한 방향을 갖는다. 결국 지상점은 투영의 중심에서 ${}^{C}n$ 의 방향을 갖는 직선 상에 존재한다.

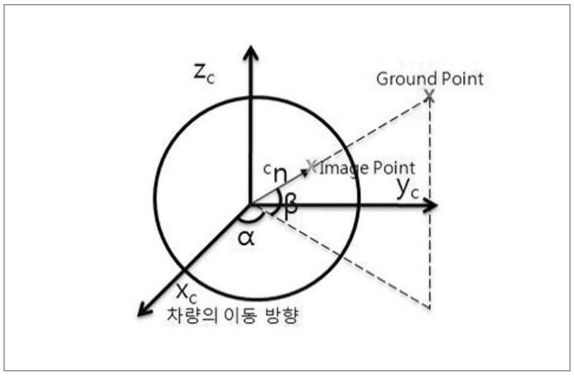


그림 4. 카메라 좌표계상의 지상점과 영상점 사이의 관계

$$ {}^{C}n = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\beta \end{bmatrix} \tag{2} $$

2.4 외부표정 – 지상점 벡터의 설정

그림 5는 카메라 좌표계, GPS/INS 좌표계, 지상 좌표계 및 지상점간의 관계를 보여주고 있다. 하나의 영상점에 투영된 지상점의 지상 좌표계 상의 좌표값 벡터 ${}^{G}P$는 투영의 중심에서 지상점을 연결하는 벡터 $\lambda\,{}^{G}n$와 지상좌표계의 원점에서 투영의 중심을 연결하는 벡터 ${}^{G}O_C$의 합으로서 식(3)처럼 표현된다.

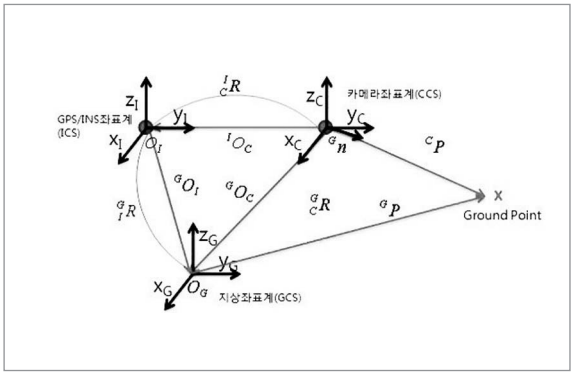


그림 5. 각 좌표계와 지상점과의 관계

$$ {}^{G}P = \lambda\,{}^{G}n + {}^{G}O_C \tag{3} $$

지상좌표계로 표현된 지상점의 방향벡터 ${}^{G}n$ 로 내부표정에서 구한 영상점 벡터를 회전변환하면 식(4)처럼 표현된다. 또한, 카메라의 투영중심인 ${}^{G}O_C$을 GPS/INS 좌표계의 원점과 GPS/INS 좌표계의 원점과 카메라의 투영중심 사이의 변이(offset)를 이용하여 식 (5)처럼 표현된다. 여기서 ${}^{I}_{C}R$ 은 카메라 좌표계와 GPS/INS 좌표계간의 회전행렬, ${}^{G}_{I}R$ 은 지상좌표계와 GPS/INS 좌표계간의 회전행렬을 나타낸다. 또한, ${}^{G}O_I$는 지상좌표계로 표현한 GPS/INS의 중심, ${}^{I}O_C$은 GPS/INS좌표계로 표현한 카메라의 투영중심을 나타낸다.

$$ {}^{G}n = {}^{G}_{C}R\,{}^{C}n = {}^{G}_{I}R\,{}^{I}_{C}R\,{}^{C}n \tag{4} $$

$$ {}^{G}O_C = {}^{G}O_I + {}^{G}_{I}R\,{}^{I}O_C \tag{5} $$

식 (4), (5)를 이용하여 ${}^{G}P$를 정리하면 식 (6)이 된다. 이는 결국 하나의 영상점에 투영된 후보 지상점들이 존재하는 직선을 지상좌표계로 표현한 식이다.

$$ {}^{G}P = \lambda\,{}^{G}_{I}R\,{}^{I}_{C}R\,{}^{c}n + {}^{G}O_I + {}^{G}_{I}R^{I}\,O_C \tag{6} $$

만약 카메라 좌표계와 GPS/INS 좌표계가 정확하게 일치한다고 가정하면, ${}^{I}_{C}R = I_3, {}^{I}O_C = 0$ 로 설정할 수 있고, 식 (7)처럼 표현된다. 본 연구에서 실시한 모든 실험은 두 좌표계가 서로 일치한다는 가정으로 진행되었다.

$$ {}^{G}O_C = {}^{G}O_I,\ {}^{G}_{C}R = {}^{G}_{I}R \tag{7} $$

2.5 3차원 좌표 결정

영상의 공액점에 투영된 지상점 P_1, P_2는 각각 방향벡터와 시작점으로 표현되는 식 (8)과 (9)와 같은 직선상에 존재한다. 공액점이기 때문에 두 개의 지상점은 동일한 점을 나타내고, 식 (8)과 (9)를 이용해 식 (10)을 유도할 수 있다. 식 (10)을 행렬로 표현하면 식 (11)과 같다. 최소제곱법을 이용하여 미지수(ξ)를 구하기 위해 식을 정리하면 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = \lambda_1 {}^{G}_{C_1}R\, {}^{C_1}n_1 + {}^{G}O_{C_1} \tag{8}$$

$$P_2 = \lambda_2 {}^{G}_{C_2}R\, {}^{C_2}n_2 + {}^{G}O_{C_2} \tag{9}$$

$$\lambda_1 {}^{G}_{C_1}R\, {}^{C_1}n_1 + {}^{G}O_{C_1} = \lambda_2 {}^{G}_{C_1}R\, {}^{C_1}n_2 + {}^{G}O_{C_2} \tag{10}$$

$$\underbrace{\left[{}^{G}_{C_1}R\, {}^{C_1}n_1 \quad -{}^{G}_{C_2}R\, {}^{C_2}n_2 \right]}_{\equiv A} \underbrace{\begin{bmatrix}\lambda_1 \\ \lambda_2\end{bmatrix}}_{\equiv \xi} = \underbrace{{}^{G}O_{C_2} - {}^{G}O_{C_1}}_{\equiv y} \tag{11}$$

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix}\lambda_1 \\ \lambda_2\end{bmatrix} = (A^T A) A^T y \tag{12}$$

이렇게 추정한 $\hat{\xi}$를 이용하여 식 (13)과 (14)와 같이 $\hat{P}_1, \hat{P}_2$를 구할 수 있다.

$$\hat{P}_1 = \hat{\lambda}_1 {}^{G}_{C_1}R\, {}^{C_1}n_1 + {}^{G}O_{C_1} \tag{13}$$

$$\hat{P}_2 = \hat{\lambda}_2 {}^{G}_{C_2}R\, {}^{C_2}n_2 + {}^{G}O_{C_2} \tag{14}$$

그림 6은 $\hat{P}_1, \hat{P}_2$ 간의 거리 ($\| \overrightarrow{E} \|$)를 보여주고 있다. 만약 두 점 $\hat{P}_1, \hat{P}_2$ 사이의 거리가 임계값 (T_d)보다 크다면 정합오류로 판단한다. 두 점 사이의 거리가 임계값 보다 작다면 두 점의 중점($\hat{P}$)을 산출하여 이를 3차원 좌표로 사용한다.

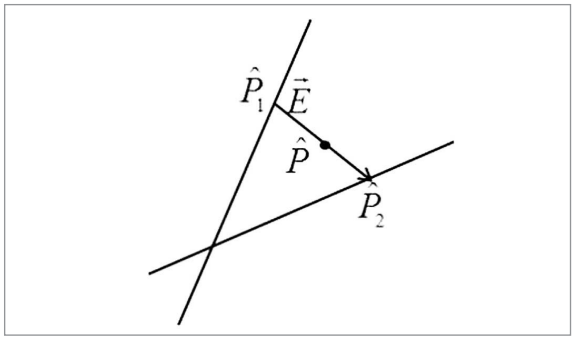


그림 6. $\hat{P}_1, \hat{P}_2$ 간의 거리

3. 실험 및 결과

3.1 센서 시스템

본 연구에서 사용한 전방위 카메라(Omni-directional camera)는 Point Grey Research사의 Ladybug 모델이다. 카메라의 외관과 제원은 각각 그림 7과 표 1에서 보여주고 있다. 본 카메라는 1600×1200의 공간 해상도를 갖는 6개의 CCD를 통해 360° 의 시야각(Field Of View, FOV)을 갖는다. 출력 영상은 가로 360°, 세로 180°를 포함하는 5400×2700의 해상도를 갖는다.

그림 7. 전방위 카메라(모델명: Ladybug)

표 1. 전방위 카메라의 제원

모델명	Ladybug
시야각(FOV)	360° * 180°
영상 해상도	5400×2700
획득률(capture rate)	15 FPS
카메라 개수	6

본 전방위 카메라가 6개의 개별적인 영상을 취득하여 최종적으로 통합된 하나의 영상을 생성하는 과정은 그림 8과 같다(Point Grey Research, 2008). 먼저 6개의 CCD를 통해 Bayer-tiled Raw 형식의 영상을 획득한 후 JPEG형식으로 압축하여 Firewire를 통해 PC로 전송한다. PC에서 전송된 영상의 압축을 풀고, Raw 영상을 RGB 컬러영상으로 변환하여 그래픽카드로 전달한다. 그래픽 카드에서 배럴왜곡(barrel distortion)을 제거하는 보정(rectification) 과정, 영상 텍스쳐를 2D 또는 3D 좌표계로 변환하는 투영(projection) 과정, 각각의 CCD를 통해 획득된 영상들을 서로 연결하는 블랜딩(blending) 과정을 거쳐 최종적으로 하나의 영상(stitched image)을 생성한다.

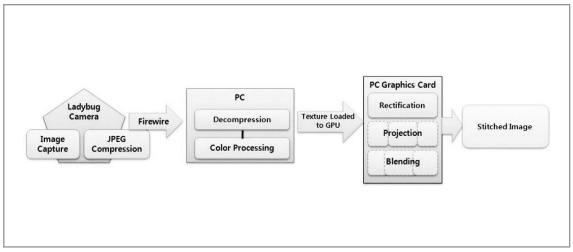


그림 8. 전방위 카메라 영상의 생성 과정 (Point Grey Research, 2008)

전방위 카메라 영상의 외부표정요소를 취득하기 위해 전방위 카메라와 함께 GPS/INS 시스템을 탑재하였다. 사용된 시스템은 Applanix사의 POSLV 420PP 모델로서 모바일매핑시스템(Mobile Mapping System)과 같은 이동형 시스템에 적합한 센서이다(Applanix, 2009). 3축 방향으로 가속도를 측정하는 가속도계(accelerometer)와 3개의 회전축의 각속도를 측정하는 자이로스코프(gyroscope)가 내장된 관성관측장치(IMU)로 구성되어 있다. GPS는 3차원 절대좌표의 위치를 측정할 뿐만 아니라 2개의 GPS 안테나를 이용하여 INS의 오차를 보정하는 GAMS(GNSS Azimuth Measurement Subsystem)을 사용한다. GPS의 반송파를 이용해 2개의 GPS 안테나 사이의 상대적 위치 벡터를 측정하는 시스템으로 INS의 오차를 연속적으로 보정한다. 표 2는 사용된 GPS/INS 시스템으로 측정한 위치 및 자세에 대한 정확도를 보여준다.

표 2. GPS/INS 제원표

모델명	POSLV 420PP
X, Y 위치 (m)	0.02
Z 위치 (m)	0.05
Roll and Pitch(°)	0.02
True Heading(°)	0.025

그림 9는 전방위 카메라 및 GPS/INS를 통합한 센서이고 그림 10은 통합센서를 차량에 탑재하여 완성된 모바일매핑시스템이다. 먼저 통합 센서의 상단부에는 전방위 카메라, 아래에는 INS가 탑재되어 있으며 차량 진행 방향(X축 방향)으로 2대의 GPS 안테나가 탑재되어 있다. 통합 센서를 탑재하는 차량으로는 기아자동차의 모닝이라는 모델을 사용하였다. 완성된 통합 센서는 상하방향으로 상당히 길어 터널 및 교량 하부를 통과할 경우 충돌 위험성이 있고, 전방위 카메라의 특성상 차량이 영상에 포함되기 때문에 이를 최소화하기 위해 차체가 작고 낮은 차량을 선정하였다.

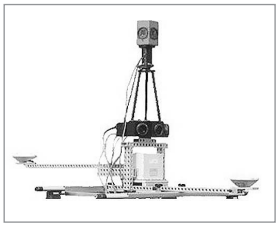


그림 9. 통합 센서 외관

그림 10. 모바일매핑시스템 외관

3.2 실험 데이터

3.2.1 전방위 영상 데이터

그림 11은 영상의 취득 경로 및 지상점 그룹을 보여주고 있다. 본 실험을 통해 획득된 영상 데이터는 평균 1MB의 용량을 가진 5400 * 2700의 해상도를 갖는 영상으로 Jpeg 압축방식을 사용하였다. 영상을 취득한 장소는 경기도 오산시청 부근의 도로 주변으로 지도상의 동쪽에서 서쪽으로 이동하면서 영상을 취득하였다. 차량이 이동한 도로는 편도 2~3차선으로 근처에 공원 및 5층 안팎의 낮은 건물이 있고 다소 먼 지점에는 고층 아파트 및 상가들이 분포되어 있다. 기존에 검사점이 확보되어 있는 3개의 그룹(A-C)에서 기선의 길이 따라 각 2쌍의 중첩영상을 선택하였다. 또한, 영역 C에서는 대상객체와 카메라의 상호위치와 정확도의 관계를 분석하기 위해서 추가로 유사한 크기의 기선을 갖는 2쌍의 중첩영상을 선택하였다. 선택된 전방위 영상의 예시는 그림 12에서 볼 수 있다. 이러한 전방위 영상은 수평방향으로 360°, 수직 방향으로 180°에 해당하는 범위의 전방위 정보를 포함하고 있으며 영상의 중심이 차량의 진행방향을 나타낸다.

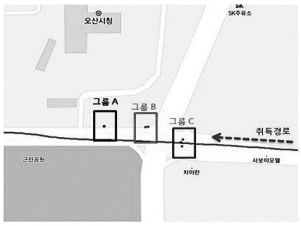


그림 11. 데이터 취득 경로 및 영역

그림 12. 전방위 영상의 예시

3.2.2 영상의 외부표정요소

표 3은 GPS/INS 데이터로부터 측정한 개별 영상을 취득한 시점의 전방위 카메라의 위치/자세를 나타내는 외부표정요소 및 기선 거리를 보여주고 있다. 각 영역 별로 단기선 그룹(A1, B1, C1)은 약 2 m 내외의 기선을 장기선 그룹(A2, B2, C2)은 16-18 m의 기선을 갖는다. 그룹 C3 및 C4는 대상객체와 카메라의 상호위치와 정확도의 관계를 분석하기 위해서 선택한 것으로 12 m의 기선을 갖는다.

표 3. 영상의 외부표정요소

영역	기선그룹	영상번호	외부표정요소						기선거리
			Xc(m)	Yc(m)	Zc(m)	$\omega(^\circ)$	$\varphi(^\circ)$	$\kappa(^\circ)$	
A	A1	1	897.892	521.520	49.307	0.998	-0.779	272.126	2.011
		2	895.883	521.610	49.289	1.090	-0.802	272.097	
	A2	1	905.904	521.159	49.368	0.790	-0.743	272.293	16.031
		2	889.889	521.857	49.238	1.099	-0.668	272.008	
B	B1	1	925.917	520.121	49.588	0.637	-0.922	273.010	1.994
		2	923.926	520.231	49.567	0.538	-0.718	272.962	
	B1	1	931.924	519.768	49.643	0.526	-0.836	272.942	16.051
		2	915.900	520.687	49.471	0.908	-0.995	272.653	
C	C1	1	991.939	515.911	49.429	0.808	-0.695	274.201	1.994
		2	989.951	516.065	49.409	0.757	-0.466	274.189	
	C2	1	989.951	516.06	549.409	0.757	-0.466	274.189	18.000
		2	971.998	517.369	49.411	-0.244	0.180	273.850	
	C3	1	997.933	515.442	49.472	0.913	-0.633	274.260	11.997
		2	985.971	516.360	49.393	0.469	-0.277	274.149	
	C4	1	985.971	516.360	49.393	0.469	-0.277	274.149	12.020
		2	973.983	517.234	49.402	-0.072	0.012	273.909	

3.2.3 검사점

제안된 방법을 통해 전방위 영상으로부터 결정된 지상점의 정확도를 검증하기 위해 GPS와 토탈스테이션을 이용하여 영상에서 식별이 용이한 주요 지점의 3차원 절대좌표를 측정하여 검사점으로 사용하였다. 그림 13은 각 영역별 검사점을 보여주고 있다. 영역 A는 경고 표지판으로 4개의 검사점을 포함하며 영역 B는 도로 표지판으로 3개의 검사점을 포함하고 있다. 마지막으로 영역 C는 도로 위의 방향 화살표로 3개의 검사점을 포함하고 있다.

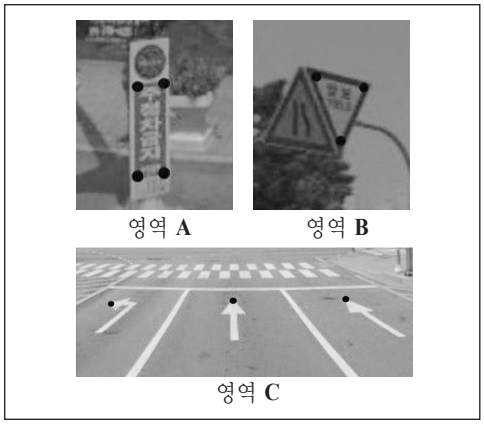


그림 13. 영역별 검사점

3.3 실험 결과 및 분석

3.3.1 기선 길이에 따른 정확도 분석

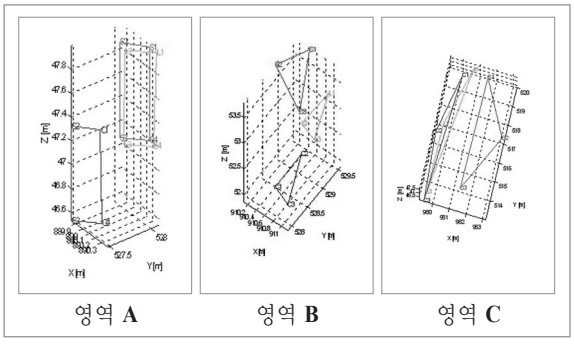
그림 14는 제안된 방법을 통해 전방위 영상으로부터 결정된 지상점과 GPS 및 토탈스테이션으로 측량한 검사점을 비교하여 보여주고 있다. 단기선 영상을 통해 결정된 지상점을 연결한 다각형(붉은색, S1～Sn)보다 장기선 영상을 통해 결정된 지상점을 연결한 다각형(녹색, L1～Ln)이 검사점을 연결한 다각형(파란색, C1～Cn)과 더 유사한 것을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해서 지상점 좌표의 오차를 계산하여 표 4에 정리하였다. 검사점 좌표를 참값으로 가정하여 지상점 좌표와의 차이를 계산한 결과 평균제곱근오차(RMSE)가 수 십 cm에서 1 m 내외로 계산되었다. 장기선의 경우에 다각형의 유사성이 높아보였지만 절대좌표값에 대한 평균제곱근오차(RMSE)는 기선의 길이에 따른 차이가 크지 않았다. 지상점과 검사점을 각각 연결한 다각형이 상당히 유사한 것으로 관측됨에도 불구하고 절대좌표값에 대한 평균제곱근오차(RMSE)가 큰 것을 미루어볼 때 지상점 좌표값에 상당한 크기의 정오차를 포함하고 있는 것이라고 판단된다. 이러한 정오차는 지상점과 검사점 사이의 3차원 이동 및 회전 변환을 통해 제거될 수 있다. 또는, 영상의 외부표정요소를 1-2개의 지상기준

표 4. 검사점과 지상점 사이의 절대좌표의 오차

단위 : m

기선 종류	지상점 ID	지상점-검사점 간의 절대 좌표 오차 (m)								
		영역 A			영역 B			영역 C		
		△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z
단기선	1	-0.234	-0.396	-0.664	0.429	-1.700	-1.215	-0.663	1.305	0.552
	2	-0.201	-0.425	-0.659	0.766	-0.192	-1.185	-0.966	-0.233	0.526
	3	-0.209	-0.409	-0.655	0.272	-0.752	-1.119	-0.481	0.342	0.463
	4	-0.205	-0.409	-0.653						
	평균	-0.212	-0.410	-0.658	0.489	-0.882	-1.173	-0.703	0.471	0.514
	표준편차	0.013	0.012	0.005	0.252	0.762	0.049	0.245	0.777	0.045
	평균제곱근오차	0.245	0.473	0.760	0.650	1.322	1.438	0.896	0.968	0.631
장기선	1	-0.358	-0.386	-0.673	-0.301	-1.325	-1.018	-0.404	-0.848	-0.678
	2	-0.360	-0.368	-0.659	-0.223	0.310	-0.936	-0.057	0.938	0.345
	3	-0.356	-0.353	-0.667	-0.234	-0.537	-0.997	-0.137	-0.677	0.277
	4	-0.351	-0.359	-0.677						
	평균	-0.356	-0.367	-0.669	-0.253	-0.517	-0.983	-0.199	-0.196	-0.019
	표준편차	0.004	0.014	0.008	0.042	0.817	0.042	0.182	0.986	0.572
	평균제곱근오차	0.411	0.424	0.773	0.312	1.034	1.205	0.304	1.015	0.572

점(Ground Control Point)을 포함하여 추정함을 통해 제거할 수도 있다. 정오차가 제거된 상태에서 여전히 남아있는 오차의 크기를 알아보고자 위 두 방법 중 축척을 고정한 후 지상점과 검사점간의 3축 회전각 및 이동량을 고려하여 변환계수를 결정하는 방법을 통하여 3차원 좌표의 상대적인 오차량을 계산하였다.



영역 **A** 영역 **B** 영역 **C**

그림 14. 전방위 영상으로부터 결정된 지상점과 검사점

표 5는 토탈 스테이션과 GPS를 통해 획득한 검사점과 제안된 방법론으로 추정된 지상점의 관계를 3개의 이동변환 계수와 3개의 회전변환 계수를 통해 보여주고 있다. 표 6은 앞서 구한 6개의 변환계수를 통해 산출된 지상점 오차를 보여주고 있다. 정오차를 포함하는 절대좌표 오차의 평균제곱근오차(RMSE)에 비해 정오차가 제외된 상대좌표 오차의 평균제곱근오차(RMSE)가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 정밀한 측정으로 획득한 검사점과 조정계산 된 지상점 사이의 3차원 이동 및 회전 변환 계수를 추정하여 정오차를 제거함으로써 중첩된 전방위 영상으로부터 대상객체의 3차원 모델 또는 대상지점의 상대좌표를 수 cm 내외의 정확도로 추출할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

표 5. 지상점과 검사점 사이의 변환계수

구분		변환양
변환계수	단위	
X_T	m	0.994
Y_T	m	-2.858
Z_T	m	1.262
ω_R	deg	-0.358
ρ_R	deg	-0.081
κ_R	deg	0.136

3.3.2 카메라/대상객체의 상호위치에 따른 정확도 분석

대상객체와의 거리에 비해 너무 짧지 않은 기선을 갖는 중첩영상을 선택하여 적절한 거리 대 기선의 비를 유지하

표 6. 검사점과 지상점 사이의 상대좌표의 오차 (정오차 제거)

단위 : m

지상점 ID	영역 A			영역 B			영역 C		
	△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z
1	0.027	-0.062	-0.117	-0.041	0.961	0.250	0.199	-0.068	-0.034
2	0.029	-0.081	-0.130	-0.117	-0.674	0.173	0.070	-0.013	-0.048
3	0.026	-0.101	-0.122	-0.106	0.168	0.231	-0.107	-0.035	-0.088
4	0.021	-0.094	-0.113						
평균	0.026	-0.085	-0.121	-0.088	0.152	0.218	0.054	-0.039	-0.057
표준편차	0.004	0.017	0.007	0.041	0.818	0.040	0.153	0.028	0.028
평균제곱근오차	0.026	0.086	0.121	0.094	0.685	0.220	0.136	0.045	0.061

면 상대적으로 상관관계가 낮은 두 개의 공선 조건식을 얻을 수 있고 이로부터 대상객체의 3차원 좌표를 정밀하게 결정할 수 있다. 그러나 그림 15에 있는 그룹 C3의 경우처럼 대상점이 차량의 진행방향(x축 방향)으로 분포되어 있는 경우는 기선이 길어도 각각의 투영중심에서 하나의 대상지점에 연결하는 직선이 상당히 유사하게 나타나고 이로 인해 공선 조건식 간의 상관관계가 크기 때문에 좋은 결과를 얻을 수 없다. 이에 거리 대 기선의 비뿐 만 아니라 대상객체와 카메라 사이의 상호위치도 3차원 좌표 결정에 중요한 요소로 예측된다. 이를 검증하기 위해서 기선의 길이는 거의 동일하게 유지하고 상호위치가 다른 중첩영상(그림 15의 그룹 C4)을 선택하였다. 본 실험에서는 카메라의 위치에 따른 영상만 다를 뿐 기선의 길이 및 사용된 검사점 등의 모든 실험 조건을 같게 하여 지상점의 3차원 절대좌표 및 오차를 구하였다. 그림 15에서 보는 바와 같이 그룹 C3는 X축을 기준으로 두 카메라 사이에 검사점 이 위치하지 않은 경우이고 C4는 두 카메라 사이에 검사점 그룹이 위치된 경우이다.

그림 16은 검사점과 두 그룹의 중첩영상으로부터 결정된 지상점을 보여주고 있다. 그림을 보면 그룹 C3의 지상점(붉은색, C3) 보다 그룹 C4의 지상점(녹색, C4)이 모양, 크기 및 방향 면에서 검사점(파란색, P)과 더 유사한 것을 확인할 수 있다. C3의 경우 각 공선 조건식의 상관관계가 높은 반면 C4의 경우 상관관계가 매우 낮아 독립적인 공선 조건식을 얻을 수 있어서 보다 높은 정확도를 갖는다. 표 7은 검사점과 지상점의 3차원 절대 좌표 및 그 오차를 정량적으로 보여주고 있다. 표를 통해 그룹 C4가 C3보다는 약 2배 정도의 높은 정확도를 갖는 다는 사실을 알 수 있다. 표 8은 정오차를 제거한 후 그룹 C3와 C4의 환경하에서 실험을 한 결과를 보여주고 있다. 기선 길이에 따른 정확도 검증 실험에서와 같이 정오차를 포함한 절대좌표 결정 정확도 보다 정오차를 제외한 상대좌표의 정확도가 높음을 확인할 수 있었다. 이 실험을 통해 검사점을 중심으로 앞뒤에 위치하는 중첩영상을 사용하면 보다 정확한 대상객체의 모델을 추출할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

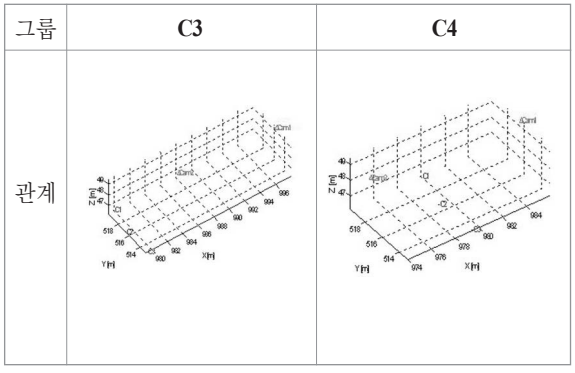


그림 15. 카메라 위치와 검사점 위치 사이의 관계

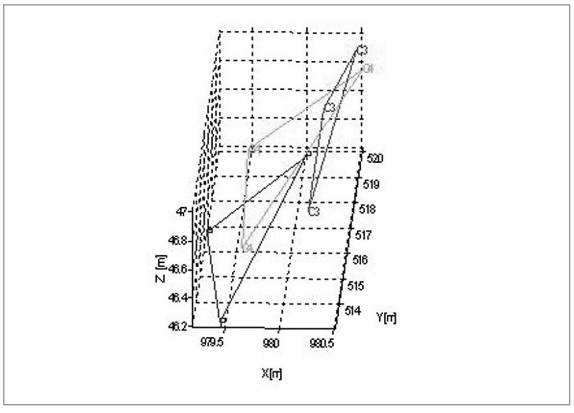


그림 16. 전방위 영상으로부터 결정된 지상점과 검사점

표 7. 검사점과 지상점 사이의 3차원 절대좌표 오차

단위 : m

구분	C3			C4		
	△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z
1	-0.450	-0.319	-0.685	-0.510	-0.173	-0.579
2	-1.062	-0.340	-0.820	-0.373	-0.230	-0.547
3	-0.793	-0.533	-0.685	-0.188	-0.208	-0.484
평균	-0.768	-0.397	-0.730	-0.357	-0.204	-0.537
표준편차	0.307	0.118	0.078	0.162	0.029	0.048
평균제곱근오차	0.808	0.409	0.733	0.381	0.205	0.538

표 8. 검사점과 지상점 사이의 3차원 상대좌표 오차 (정오차 제거)

단위 : m

구분	C3			C4		
	△X	△Y	△Z	△X	△Y	△Z
1	0.139	0.079	0.071	0.199	-0.068	-0.034
2	0.758	0.100	0.225	0.069	-0.013	-0.047
3	0.497	0.293	0.112	-0.107	-0.035	-0.088
평균	0.465	0.157	0.136	0.054	-0.039	-0.057
표준편차	0.311	0.118	0.080	0.154	0.027	0.028
평균제곱근오차	0.530	0.184	0.151	0.136	0.045	0.061

4. 결 론

전방위 카메라 중첩 영상과 GPS/INS정보를 이용하여 대상객체의 3차원 좌표를 계산하는 수학적 모델을 수립하고 이를 실측 데이터에 적용하여 검증하였다. 두 개의 영상에서 취득된 한 쌍의 공액점으로부터 이에 대응되는 지상좌표계상에서 정의된 한 쌍의 직선을 유도하고 이의 교점을 계산하여 지상점의 3차원 좌표를 결정하였다. GPS와 토탈스테이션으로 정밀하게 측정한 검사점과 비교하여 정확도를 검증하였다. 기선의 길이 및 카메라/대상객체 사이의 상호위치를 적절하게 설정한다면 수 cm 내의 정확도를 가지고 대상객체의 3차원 모델 또는 대상지점의 상대좌표를 추출할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 전방위 카메라 영상으로부터 도시정보시스템(UIS)를 구성하는 도로의 구성요소, 도로면의 표지, 도로주변의 교통시설물 및 건물 등의 주요 객체들을 충분히 활용 가능한 정확도 수준으로 추출할 수 있다는 것을 의미한다.

대상지점의 절대좌표는 수 cm에서 1 m내외의 정확도를 보이고 있으며 단순한 기하모델로 표현될 수 있는 정오차가 포함된 것으로 보인다. 이러한 오차는 카메라좌표계와 GPS/INS좌표계 사이의 관계를 보다 정확하게 설정하고, 전방위 카메라 보정(Calibration)을 수행함을 통해 상당히 제거될 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구로 전방위 카메라의 내부표정요소를 계산하는 카메라 보정을 수행할 계획이다. 그리고 이번 실험에서 동일하다고 가정하였던 GPS/INS 좌표계와 카메라 좌표계간의 관계를 재설정하여 정확도를 개선할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

김진환, 안재균, 김창수 (2008), 전방위 카메라를 이용한 객체 추적 시스템, 하계종합학술대회 논문집, 대한전자공학회, pp. 781-782.

전재춘 (2008), IMU/GPS와 카메라 좌표계간의 물리적 관계를 위한 수학적 모델링, 한국측량학회지, 한국측량학

회, 제 26권, 제 6호, pp. 611-616.

정재승 (2006), 모바일매핑시스템에서의 이동객체 추적을 위한 연구, 한국GIS학회지, 한국GIS학회, 제14권, 제2호, pp. 235-244.

최경아, 오소정, 이임평, 신진수 (2007), 모바일 매핑 시스템 개발, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 4468-4471.

황진상 (2009), 차량 모바일맵핑시스템의 현황과 활용분야, 대한측량협회, http://www.cylod.com/board/kboard.php board=full_text&act=view&no=5&page=1&search_mode=&search_word=&cid=

Applanix (2009), POSLV specifications, *Applanix Inc*., http://applanix.com/products/land/pos-lv.html

Beauchemin, S. S. and Bajcsy, R. (2000), Modeling and removing radial and tangential distortions in spherical lenses, *The 10th International Workshop on Theoretical Foundations of Computer Vision: Multi-Image Analysis, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2032, pp. 1-21.

Bossler, J. D., and Toth, C. (1995), Feature Positioning accuracy in mobile mapping: Results obtained by the GPSVANTM, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B4, pp. 139-142

Choi, K. and Lee, I. Hong, J. Oh, T. and Shin, S. (2009), Developing a UAV-based Rapid Mapping System for Emergency Response, *Proc. SPIE*, SPIE, Orlando, Vol. 7332 (on CD-ROM).

Eisenbeiss, H. (2004). A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, 5/W1, (on CD-ROM).

Fiala, M. and Basu, A. (2002), Robot navigation using panoramic landmark tracking, *The 15th International Conference on Vision Interface,* Calgary, pp. 117-124.

Jeroen, D. H., Thomas, B. S. and Fredrik, G. (2008), Relative pose calibration of a spherical camera and an IMU, *The 7th* IEEE/ACM *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE Computer Society, pp. 21-24.

Mochizuki, Y. and Imiya, A. (2008), Featureless Visual Navigation using Optical Flow of Omnidirectional Image Sequence, *International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR 2008)*, Venice, pp. 307-318.

Point Grey Research (2008), Ladybug specifications, *Point Grey Research Inc*., http://www.ptgrey.com/products/spherical.asp

Point Grey Research (2008), Overview of the Ladybug image stitching process, *Point Grey Research Inc*., http://www.ptgrey.com/support/downloads/documents/TAN20080010_Overview_Ladybug_Image_Stitching.pdf

Silpa-Anan. C. and Hartley, R. (2005), Visual localization and loopback detection with a high resolution omnidirectional camera, *The 6th Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS 2005)*, Beijing.

Yata, T., Thorpe, C., and Dellaert F. (2002), *Static environment recognition using omni-camera from a moving vehicle*. Technical report CMU-RI-TR-02-12, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Wikipedia (2009), Omnidirectional camera, *The free Encyclopedia,* http://en.wikipedia.org/wiki/Omnidirectional_camera

(접수일 2010. 03. 31, 심사일 2010. 04. 16, 심사완료일 2010. 05. 04)