정밀 차량 위치결정을 위한 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘 개발 및 성능 분석

Development of GPS/IMU/SPR Integrated Algorithm and Performance Analysis for Determination of Precise Car Positioning

한중희¹⁾ · 강범연²⁾ · 권재현³⁾

Han, Joong-hee · Kang, Beom Yeon · Kwon, Jay Hyoun

Abstract

Based on the GPS/IMU integration, the car navigation has unstable conditions as well as drastically reduces accuracies in urban region. Nowadays, many cars mounted the camera to record driving states. If the ground coordinates of street furniture are known, the position and attitude of camera can be determined through SPR (Single Photo Resection). Therefore, an estimated position and attitude from SPR can be applied measurements in Kalman filter for updating errors of navigation solutions from GPS/IMU integration. In this study, the GPS/IMU/SPR integration algorithm was developed in loosely coupled modes through extended Kalman filters. Also, in order to analyze performances of GPS/IMU/SPR, simulation tests were conducted in GPS signal reception environments and the GCPs (Ground Control Points) distributions. In fact, the position and attitude gathered from GPS/IMU/SPR integration are more precise than the position and attitude from GPS/IMU integration. When IPs (image points), corresponded to GCPs, were concentrated in the center of image, the position error in the optical axis respectively increased. To understand effects from SPR, we plan to carry additional test on the magnitude of GCP, IP and initial exterior orientation errors.

Keywords : Single Photo Resection, GPS/IMU/SPR Integration, Extended Kalman Filter, loosely coupled integration

초 록

현재 GPS/IMU 기반의 차량항법기술은 GPS 신호 불량지역에서 위치 정밀도가 급격하게 저하된다. 근래에는 많은 차량에 주행 상태를 기록하기 위한 카메라를 탑재하고 있음에 따라 만약 도로시설물을 위치를 알 수 있을 경우 단사진 후방교차법(SPR)을 통해 카메라의 위치 및 자세를 산출할 수 있다. SPR로 추정된 외부표정요소들은 GPS/IMU 항법해의 오차를 보정할 수 있음에 따라 GPS 신호 수신환경에 영향을 받지 않고 안정적으로 차량의 위치 및 자세를 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GPS, IMU, 사진측량 기술인 SPR을 결합하여 GPS 수신환경에 구애 받지 않고 안정적으로 위치 및 자세를 결정하는 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘을 개발하였다. GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 확장형 칼만필터를 이용하여 약결합 방식으로 구현하였다. 또한 개발된 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여, GPS 수신환경 및 영상에 획득되는 기준점의 배치에 따른 시뮬레이션 테스트를 수행하였다. 시뮬레이션 테스트 결과, GPS/IMU/SPR 결합을 통해 산출되는 위치 및 자세가 GPS/IMU 결합 결과보다 안정적으로 산출되는 것을 확인하였다. 또한 영상의 기준점이 영상 중앙에 집중되어 배치되어 있을 경우에는 광축 방향으로 위치 오차가 증가되는 것으로 분석되었다. 향후 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘 성능을 면밀히 분석하기 위해서는 SPR 수행결과에 영향을 미치는 영상점 및 지상점의 측정오차, 초기 외부표정요소들에 따른 성능 분석이 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

핵심어 : 단사진 후방교차법, GPS/IMU/SPR 결합, 확장형칼만필터, 약결합

Received 2014. 03. 26, Revised 2014. 04. 21, Accepted 2014. 04. 30

1) Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail:hjh0016@uos.ac.kr)

2) Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail:kby@uos.ac.kr)

3) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail:jkwon@uos.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 자동차 분야에서는 주행의 편의와 안전을 도모하기 위하여 차량에 탑재된 다양한 센서와 첨단 IT 기술을 융합하여 운전자에게 최적의 운전환경을 제공하는 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistant Systems, 이하 ADAS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ADAS는 차량 센서 및 카메라로부터 취득된 정보를 기반으로 외부환경정보와 차량상태정보를 운전자에게 제공하거나 자동적으로 차량을 제어하여 차량사고에 의한 피해를 최소화 또는 차단하는 것을 목적으로 한다(Heo, 2009). 이러한 ADAS가 원활히 작동되기 위해서는 장애물 인지, 외부환경정보에 대한 DB 구축도 필요하지만 우선적으로 주행정보와 관련된 차량의 위치, 자세 및 속도 정보를 안정적이고 정밀하게 결정할 수 있는 차량항법기술이 매우 중요한 요소이다. 그러나 현재의 차량항법기술은 GPS 기반으로 측위를 수행함에 따라 빌딩 숲, 터널 등과 같은 GPS 수신불량 지역에서 연속적이고 신뢰성 있는 위치 결정에는 한계가 있다. 최근 MEMS 기술이 발전함에 따라 저가형 MEMS IMU와 GPS 결합을 통해, GPS 수신불량 지역에서의 안정적인 차량 위치 결정을 위한 다양한 연구가 진행되었다(Godha and Cannon, 2007; Zhou *et al.*, 2010; Leung *et al.*, 2011). 그러나 GPS와 MEMS IMU 결합도 MEMS IMU의 낮은 성능으로 인해 GPS 신호단절 시에 항법해의 오차가 급격하게 증가하여 신뢰성 있는 위치를 결정하는 데는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 영상 센서를 통해 산출된 정보를 이용하여 GPS/IMU 위치 오차를 보정하여 위치 정확도를 향상시키는 다양한 연구가 진행되었다. 비전 시스템을 이용하여 차선 검출을 통해 차량의 상대적인 자세를 추정하고, 이를 이용하여 INS 항법해의 오차를 보정하는 연구가 진행되었다(Wang and Wang, 2008; Kim, 2012; Vu *et al.*, 2012). 또한 위치정보를 알고 있는 랜드마크를 비전 시스템을 통해 인식하고 랜드마크와 차량의 상대적인 거리를 산출하여 이를 이용한 차량 위치 정확도 향상을 위한 연구가 수행되었다(Tsalatsanis *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2013). 비전 시스템 이용한 차량 정확도 향상에 관한 기존 연구는 자동차 가격 수준에 비해 고가인 비전 시스템을 이용하였음에 따라 경제적인 측면에서 실용성이 떨어지며, 두 영상에서 특징점이 동시에 획득되어야 보정을 위한 관련 정보를 산출할 수 있다는 한계가 있다. Kim *et al.*(2004)은 GPS 신호 차단 시에 차량의 위치 정확도를 향상시키기

위하여 GPS, IMU, 주행기록계와 영상센서를 이용하여 산출된 외부표정요소를 결합하는 연구를 진행하였으나, 영상에서 획득되는 기준점의 배치에 따른 차량 위치 정확도 향상 정도에 대한 분석이 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 기존에 고가의 비전 시스템을 이용한 차량 측위 정확도 향상에 대한 연구보다는 경제적인 측면을 고려하여 추후 실질적으로 차량 측위 기술에 적용 가능하도록 저가의 GPS 센서, MEMS-IMU, 블랙박스 카메라를 이용하여 GPS 수신환경에 영향을 받지 않고 안정적인 위치를 산출하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 도로표지판 등 교통시설물의 위치정보 DB가 구축되어 있다는 가정 하에 사진측량 기술인 단사진 후방교차법(Single Photo Resection, 이하 SPR)을 통해 차량의 위치 및 자세를 산출하여 항법해의 오차를 보정하는 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘을 개발하였으며 GPS 수신환경에 따른 GPS/IMU 결합과 GPS/IMU/SPR 결합의 성능 비교 분석을 수행하였다. 또한 SPR은 영상에 획득되는 기준점의 기하학적인 배치에 따라 외부표정요소의 산출 정밀도가 달라지므로 기준점의 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 성능 분석을 수행하였다.

2. GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘

GPS와 IMU 결합을 통한 항법시스템은 장시간 GPS 신호불량 또는 단절이 발생할 경우에 항법해의 오차가 급격하게 증가하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 사진측량 기술인 SPR 수행을 통해 계산된 카메라의 외부표정요소를 이용하여 항법해의 오차를 보정하고 차량의 정밀한 위치 및 자세를 결정하기 위한 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘을 개발하였다. 개발된 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 준 실시간으로 차량의 위치 및 자세를 결정하기 위하여, GPS로부터의 계산된 위치와 SPR로부터 계산된 외부표정요소인 카메라의 위치 및 자세 정보를 이용하여 IMU 데이터를 이용하여 계산된 항법해의 오차를 보정하는 약결합 방식을 통해 구현하였다.

Fig. 1. GPS/IMU/SPR integration structure

GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 개략도는 Fig. 1과 같다. IMU로부터 획득된 가속도 및 각속도를 이용하여 항법방정식을 통해 항체의 위치 및 자세를 계산하게 된다. 만약 GPS로부터 항체의 3차원 위치가 획득되면, 이를 이용하여 항법해의 오차를 보정하게 된다. 또한 영상이 획득되면 획득된 시간을 기준으로 위치 및 자세의 값을 초기치로 하여 SPR을 수행하게 되며, 이를 통해 계산된 외부표정요소를 이용하여 필터를 통해 항법해의 오차를 보정하게 된다.

GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 확장형 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 이용하였으며, 오차를 보정하기 위하여 15개의 오차상태변수로 구성하였고, 오차 상태 방정식은 Eq. (1)과 같다. 항법해 오차 상태변수는 자세인 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw)각의 오차($\delta\alpha$, $\delta\beta$, $\delta\gamma$), NED 좌표계로 표현된 속도오차(δV_n , δV_e , δV_d), WGS84 좌표계(위도, 경도, 타원체고)로 표현된 위치 오차($\delta\phi$, $\delta\lambda$, δh)로 총 9개의 파라미터로 구성하였다. 그리고 센서오차 상태변수는 자이로에서 발생하는 편이($\delta\psi_n$, $\delta\psi_e$, $\delta\psi_d$)와 가속도계 편이(δf_n , δf_e , δf_d)로 총 6개의 파라미터로 구성하였다. 시스템 백색잡음은 자이로 랜덤워크(W_g), 와 가속도계 랜덤워크(W_a)로 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_i \\ 0_{6 \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where x_i : state vector of navigation error

$$(x_i = [\delta\alpha \ \delta\beta \ \delta\gamma \ \delta V_n \ \delta V_e \ \delta V_d \ \delta\phi \ \delta\lambda \ \delta h]^T),$$

x_f : state vector of system error

$$(x_f = [\delta\psi_n \ \delta\psi_e \ \delta\psi_d \ \delta f_n \ \delta f_e \ \delta f_d]^T),$$

F_{11} : dynamic matrix of navigation error,

F_{12} : dynamic matrix of system error

$$w_i: \text{white noise } (w_i = [W_g \ W_g \ W_g \ W_a \ W_a \ W_a]^T)$$

GPS 수신기에서 GPS 의사거리를 이용하여 3차원 위치가 계산되면, 이를 이용하여 예측된 상태변수를 갱신하며, 이를 위한 기본관측방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$z_{GPS}(t) = H_{GPS} \cdot x(t) + v_{GPS}(t), v \sim (0, R_{GPS}) \quad (2)$$

오차상태변수를 보정하기 위한 GPS 측정치 행렬(z_{GPS})은 INS의 추정된 위치($[\phi \ \lambda \ h]^T_{INS}$)인 WGS84 좌표계에서의 위도, 경도, 타원체고와 GPS 의사거리 기반의 절대측위 방법으로 계산된 3차원 위치($[\phi \ \lambda \ h]^T_{GPS}$) 차이인 간접측정치이며, Eq. (3)과 같다.

$$z_{GPS} = \begin{bmatrix} \phi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix}_{INS} - \begin{bmatrix} \phi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix}_{GPS} \quad (3)$$

또한 GPS로부터 위치가 계산되었을 때, 이를 이용하여 보정하기 위한 설계행렬(H_{GPS})과 분산-공분산 행렬(R_{GPS})은 Eq. (4)와 같다.

$$\begin{aligned} H_{GPS} &= [0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3}] \\ R_{GPS} &= \text{diag}([\sigma_\phi^2 \ \sigma_\lambda^2 \ \sigma_h^2]) \end{aligned} \quad (4)$$

where σ_ϕ^2 : variance of estimated latitude,

σ_λ^2 : variance of estimated longitude,

σ_h^2 : variance of estimated ellipsoidal height

SPR은 한 장의 사진에 찍힌 대상물의 지상좌표와 이에 대응하는 사진좌표를 이용하여 공간상의 사진이 촬영된 위치와 방향각을 결정하는 것으로 수학적 모델은 공선조건식을 이용한다. 공선조건식은 대상물의 한 점은 렌즈의 투영중심을 지나 영상에서 한 점에 맺히게 되며, 이 3개의 점은 하나의 직선상에 존재한다는 조건에 의해 수립되며, 수학적 모델은 Eq. (5)와 같다(Habib *et al.*, 2000).

$$\begin{aligned} x_a &= x_p - c \frac{r_{11}(X_A - X_0) + r_{12}(Y_A - Y_0) + r_{13}(Z_A - Z_0)}{r_{31}(X_A - X_0) + r_{32}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \\ y_a &= y_p - c \frac{r_{21}(X_A - X_0) + r_{22}(Y_A - Y_0) + r_{23}(Z_A - Z_0)}{r_{31}(X_A - X_0) + r_{32}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \end{aligned} \quad (5)$$

where (x_a, y_a) : image coordinates of point A,

(x_p, y_p) : calibrated principal point position,

c : focal length of the camera,

$r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}$: elements of the rotation matrix,

(X_A, Y_A, Z_A) : object coordinates of point A,

(X_0, Y_0, Z_0) : object coordinates of the perspective center

만약 사진에 찍힌 대상물의 지상좌표를 알고 있을 경우에는 SPR 수행을 통하여 외부표정요소인 위치 및 자세를 결정할 수 있게 되며, 이를 이용하여 오차상태변수를 보정할 수 있다. SPR 수행을 통해 계산된 외부표정요소를 이용하여 오차상태변수를 갱신하는 기본 관측방정식은 Eq. (6)과 같다.

$$z_{SPR}(t) = H_{SPR} \cdot x(t) + v_{SPR}(t), v \sim (0, R_{SPR}) \quad (6)$$

INS 추정치인 자세 및 위치($[\alpha \ \beta \ \gamma \ \phi \ \lambda \ h]^T_{INS}$)와 SPR 수행을 통한 외부표정요소($[\alpha \ \beta \ \gamma \ \phi \ \lambda \ h]^T_{SPR}$)와의 차이인 간접측정치(z_{SPR})는 Eq. (7)과 같다. SPR을 통해

오차상태변수를 보정하기 위한 설계행렬(H_{SPR}) 및 분산-공분산 행렬(R_{SPR})은 각각 Eqs. (8) and (9)와 같다.

$$z_{SPR} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \phi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix}_{INS} - \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \phi \\ \lambda \\ h \end{bmatrix}_{SPR} \quad (7)$$

$$H_{SPR} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_{SPR} = \text{diag}([\sigma_\alpha^2 \ \sigma_\beta^2 \ \sigma_\gamma^2 \ \sigma_\phi^2 \ \sigma_\lambda^2 \ \sigma_h^2]) \quad (9)$$

where σ_α^2 : variance of estimated roll angle,

σ_β^2 : variance of estimated pitch angle,

σ_γ^2 : variance of estimated yaw angle,

σ_ϕ^2 : variance of estimated latitude,

σ_λ^2 : variance of estimated longitude,

σ_h^2 : variance of estimated ellipsoidal height

3. 시뮬레이션 테스트

3.1. 시뮬레이션 개요

개발한 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 설정한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 차량에는 저가형 MEMS-IMU 및 GPS 센서와 저가의 카메라가 탑재되어 주행한다고 가정하였다. 탑재된 저가형 MEMS-IMU 센서와 카메라의 사양은 각각 Xsens사의 MTI-G와 GEViCAM사의 GD-155000C를 기준으로 하였다. Xsens사의 MTI-G와 GEViCAM사의 GD-155000C의 사양은 각각 Tables 1 and 2와 같다. 탑재된 GPS 센서는 GPS L1 C/A 코드만 수신 받을 수 있는 저가형 수신기이다. 차량의 시뮬레이션 경로는 북쪽방향으로 200초 동안 10m/s로 등속 직선운동을 한다고 설정하여 생성하였다. 또한 IMU 데이터 출력 주기는 100Hz이며 매초마다 GPS나 SPR로부터 정보가 획득되면 INS 오차상태변수를 갱신하며, 초기위치오차는 수평 3m, 수직 5m로 설정하였다.

Table 1. MEMS-IMU Specification (Model : Xsens MTI-G)

	Bias	Scale Factor	Random Walk
Accelerometer	0.02m/s ²	0.05%	0.002m/s ² /√Hz
Gyro	5deg/s	0.05%	0.125deg/s ² /√Hz

Table 2. Camera Specification (Model : GEViCAM GD-155000C)

Parameter	Value
Number of Pixel	2456 × 2058
Pixel Size	3.45 μm
Detector Size	8.47 × 7.10 mm
focal length	17 mm

본 연구에서 개발한 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘 성능은 GPS 수신환경 및 영상에 찍히는 기준점의 배치에 영향을 받게 된다. 따라서 GPS 수신환경을 개활지, 도심지, GPS 신호차단지역으로 구분하고, 영상에 찍히는 기준점의 기하학적 배치를 4종류로 설정하였다. GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 성능 분석은 설정된 GPS 수신환경 및 기준점의 기하학적 배치에 따른 차량의 위치 및 자세 오차를 비교하여 수행하였다.

3.2. GPS 코드기반 위치 데이터 생성

GPS 코드기반 위치 데이터는 설정된 GPS 수신환경에 따라 매초마다 가상의 GPS C/A 코드 관측 데이터를 생성하고, 절대측위를 수행하여 산출하였다. GPS C/A 코드 관측데이터를 생성하기 위한 GPS 수신환경은 개활지 및 도심지로 다음과 같이 환경을 정의하였다. 개활지는 모든 방향에서 고도각 15도 이상의 GPS 위성의 신호를 모두 수신할 수 있는 환경이라고 가정하였다. 도심지는 차량이 4차원 도로를 주행하고 있으며, 주행방향의 좌우측에 20미터 높이의 건물이 존재하여 GPS 신호가 차단되는 환경이라고 설정하였다.

가상의 GPS C/A 코드 관측데이터는 다음과 같은 가정 하에 생성하였다. 관측데이터에 포함된 오차는 위성 및 수신기 시계오차, 전리층 및 대류권 지연, 랜덤오차만 포함한다고 가정하였으며, 이를 고려한 관측방정식은 Eq. (10)과 같다. 위성의 위치는 2013년 10월 3일에 해당하는 정밀궤도력을 이용하여 1초 간격으로 계산하였다. 전리층 지연은 IGS에서 제공하는 TEC 파일을 이용하여 산출하였으며, 대류권 지연의 생성은 대류권 모델인 UNB3m(Leandro *et al.*, 2008)과 Niell 사상함수(Niell, 1996)를 이용하였다. 위성의 시계오차 생성은 IGS에서 제공하는 정밀 시계 오차 파일을 이용하였으며, 수신기 시계오차는 2-state random process 모델(Parkinson and Spilker, 1996)을 통해 생성하였다. 코드 랜덤오차는 3m로 설정하였다.

$$P_i^k = \rho_i^k + \frac{I_i^k}{f_1^2} + T_i^k + c(dt_i - dt^k) + e_i^k \quad (10)$$

where P_i^k : C/A code pseudorange measured between receiver i and satellite k ,

c : speed of light,

P_i^k : geometric distance between receiver i and satellite k ,

$\frac{I_i^k}{f_1^2}, T_i^k$: ionospheric delay and tropospheric delay, respectively,

f_1 : carrier frequency of GPS L1,

dt_i, dt^k : receiver and satellite clock error, respectively,

e_i^k : random error

생성된 가상의 GPS C/A 코드 관측데이터와 방송궤도력을 이용하여 절대측위를 통해 GPS 수신환경에 따른 GPS 코드 기반 위치데이터를 생성하였다. Fig. 2는 GPS 수신환경에 따른 가시 위성 배치 및 GPS 코드 기반 위치데이터의 오차 통계량을 나타낸 것이다. 개활지의 경우에는 매 시각마다 9개의 위성이 관측되었으며, GPS 위치오차의 표준편차는 수평 방향으로 약 3m, 수직 방향으로 약 6m 수준이다. 도심지의 경우에는 좌우에 위치한 건물로 인하여 4개의 위성 신호가 차단되어 매 시각마다 5개의 위성이 관측되었다. GPS 위치오차의 표준편차는 수평 방향으로 약 60m, 수직 방향으로 90m 수준으로 개활지 경우보다 위치 오차가 크게 증가되었다.

Fig. 2. GPS sky plot and GPS position error

3.3. SPR 수행을 위한 영상점 및 지상기준점 생성

SPR 수행에 필요한 입력데이터는 지상기준점(Ground Control Point, 이하 GCP)과 이에 상응하는 영상점(Image Point, 이하 IP)이다. SPR 수행에 필요한 입력데이터는 카메라의 방향은 차량 진행방향인 북쪽을 향해 있으며, 매초마다 동일한 기하학적 배치를 가진 4개의 GCP가 영상에 찍힌다고 가정 하여 생성하였다. SPR 수행에 필요한 입력데이터를 생성하는 과정을 간단하게 요약하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. Process of IP and GCP data generation

생성된 참 값의 차량 위치 및 자세 정보를 이용하여 매 초마다 영상의 촬영 위치 및 방향각인 외부표정요소를 생성한다. 영상에 동일한 기하학적 배치를 가지는 기준점이 찍힐 수 있도록 매초마다의 차량의 위치 및 외부표정요소를 이용하여 참 값의 GCP 위치 데이터를 생성한다. 공선조건식을 이용하여 GCP에 상응하는 IP를 계산한다. 오차가 포함된 GCP 데이터를 생성하기 위하여 GCP 측정오차는 수평 3cm 수직 5cm로 하였다. IP 측정오차는 Table 2의 카메라 사양을 고려하여 영상 한 픽셀 크기인 3.45 μm 로 가정하여 오차가 포함된 IP 데이터를 생성한다.

영상에 찍히는 GCP의 기하학적 배치에 따른 성능 분석을 수행하기 위하여 Fig. 4와 같이 4가지 유형의 영상을 생성하였다. 유형 1은 GCP가 영상에서 모든 방향에서 넓게 배치되는 형상으로 가장 안정적인 기하학적 배치를 가진다. 유형 2는 영상에 찍히는 GCP가 모두 중심에 모여 있는 상태로 4가지 유형 중 가장 불안정적인 기하학적 배치이다.

유형 3과 유형 4는 영상의 한쪽 방향으로 넓게 기준점이 찍히는 경우이다.

Fig. 4. Generated image with IP

3.4. 실험결과

3.4.1. GPS 수신환경에 따른 GPS/IMU 결합과 GPS/IMU/SPR 결합의 성능 비교

SPR 결합을 통한 위치 및 자세 정확도 향상을 분석하기 위하여, GPS/IMU 통합 결과와 기준점 배치가 가장 안정적인 유형 1 영상을 이용한 GPS/IMU/SPR 통합 결과를 비교하였다. Fig. 5는 GPS 수신환경이 개활지인 경우에 GPS/IMU 결합을 통해 산출된 위치 및 자세 오차와 GPS/IMU/SPR 결합을 통해 산출된 위치 및 자세오차를 비교한 것이며, Table 3은 위치 및 자세에 대한 RMSE를 비교한 것이다. 위치의 경우에는 GPS/IMU 결합은 수 미터 수준으로 오차가 발생되었으나, GPS/IMU/SPR 결합은 수 십 cm 수준으로 매우 정밀하고 안정적으로 계산되었다. GPS/IMU/SPR 결합의 위치 오차가 매우 작은 수준으로 나타난 이유는 GCP의 오차가 작음에 따라 SPR 수행 결과인 외부표정요소가 매우 정밀하게 결정되었기 때문이다. 자세의 경우에는 Roll과 Pitch 오차의 크기는 GPS/IMU 결합과 GPS/IMU/SPR 결합 결과가 비슷한 수준으로 계산되었으나, GPS/IMU/SPR 결합이 좀 더 안정적으로 계산된 것으로 확인되었다. Yaw 각에서는 GPS/IMU/SPR 결합 결과는 GPS/IMU 결합 결과보다 약 1도 정도 정밀하게 계산되었다. Roll과 Pitch보다 Yaw의 보정 효과가 큰 이유는 시뮬레이션 궤적이 같은

고도로 직선 운동을 함에 따라 Roll 및 Pitch 오차가 크게 증가하지 않았기 때문이다.

Fig. 5. Compared the position and attitude error of GPS/IMU with GPS/IMU/SPR in open area

Table 3. Compared RMSE of GPS/IMU with GPS/IMU/SPR in open area

Parameter		GPS/IMU	GPS/IMU/SPR
Position (m)	North	4.88	0.25
	East	3.96	0.25
	Down	7.95	0.48
Attitude (deg)	Roll	0.06	0.05
	Pitch	0.06	0.05
	Yaw	1.92	0.05

Fig. 6은 GPS 수신환경이 도심지인 경우에 GPS/IMU 결합과 GPS/IMU/SPR 결합의 위치 및 자세 오차를 비교한 것이며, Table 4는 위치 및 자세에 대한 RMSE를 비교한 것이다. 본 연구에서 설정한 도심지 환경은 차량의 진행방향의 좌우측 쪽은 20m 높이의 건물이 위치하여 GPS 위성 신호를 일부 수신 받을 수 없는 환경이기 때문에, GPS 위치 오차의 증가로 인하여 GPS/IMU 결합의 위치오차는 수 백미터 수준으로 나타났다. 이에 반해 GPS/IMU/SPR 결합의 경우에는 SPR을 수행을 통해 정밀한 위치 및 자세 정보를 획득하여 이를 보정함에 따라 개활지의 GPS/IMU/SPR 결합 결과와 거의 동일한 수 십 cm 수준으로 매우 정밀하게 위치가 계산되었다. GPS/IMU 결합을 통해 산출된 자세 오차는 GPS 오차가 큼에 따라 INS 항법해를 오보정하게 되어 개활지의 경우보다 오차가 증가되었다. 그러나 GPS/IMU/SPR 결합의 경우에는 SPR이 안정적으로 수행되어 정밀한 외부표정요소를 제공함에 따라 개활지의 실험 결과와 거의 동일한 결과가 나타났다. 이러한 결과는

SPR 수행을 위하여 초기치로 사용하는 GPS/IMU로 계산된 위치 및 자세의 오차가 증가하더라도 SPR이 수행이 된다면 동일한 정밀도로 외부표정요소인 위치 및 자세를 산출해주는 것을 의미한다. 그러나 SPR의 초기치로 사용되는 위치 및 자세의 오차가 증가함에 따라 SPR 수행 여부 및 수행 결과의 정밀도는 달라지기 때문에, 이에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이라 사료된다.

Fig. 6. Compared the position and attitude error of GPS/IMU with GPS/IMU/SPR in urban canyon area

Table 4. Compared RMSE of GPS/IMU with GPS/IMU/SPR in urban canyon area

Parameter		GPS/IMU	GPS/IMU/SPR
Position	North(m)	313.85	0.25
	East(m)	168.90	0.25
	Down(m)	111.25	0.48
Attitude	Roll(deg)	0.23	0.05
	Pitch(deg)	0.19	0.05
	Yaw(deg)	1.78	0.05

3.4.2. 기준점 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 결합의 성능 비교

기준점 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 결합의 성능을 비교하기 위하여 2장에서 정의한 4개의 기준점 배치 유형을 이용하여 GPS 수신환경에 따른 정밀도 분석을 수행하였다. GPS 수신환경이 양호한 개활지의 경우의 기준점 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 결합의 위치 및 자세 오차의 RMSE를 비교한 것은 Table 5와 같다. 위치의 경우에는 가장 안정적인 기하학적 배치를 가진 유형 1이 가장 정밀하게 위치가 계산되었으며, 불안정한 기하학적 배치를 가진 유형 2가 차량의 진행 방향과 동일한 북쪽 방향의 위치오차가 크게 나타났다. 한쪽 방향만 기하학적 배치가 좋은 유형 3과 유형

4는 유형 1에 비하여 1~2cm 수준으로 저하되었음에 따라 SPR 수행의 정밀도는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 자세의 경우에는 모두 같은 수준의 정밀도로 산출되었으며, 위치보다는 기하학적 배치의 영향을 적게 받는 것으로 확인되었다.

Table 5. Compared RMSE of GPS/IMU/SPR with respect to GCP Geometry types in open area

Parameter		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Position (m)	North	0.25	0.76	0.28	0.27
	East	0.25	0.25	0.25	0.26
	Down	0.48	0.48	0.47	0.48
Attitude (deg)	Roll	0.05	0.05	0.05	0.05
	Pitch	0.05	0.05	0.05	0.05
	Yaw	0.05	0.05	0.05	0.05

도심지 경우의 기준점 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 결합의 위치 및 자세 오차의 RMSE를 비교한 것은 Table 6과 같다. 도심지에서 GPS 위치 오차가 증가되었음에도 불구하고 SPR 수행을 통해 조정된 외부표정요소의 정밀도가 개활지의 경우와 동일하였기 때문에 위치 및 자세의 오차는 개활지와 같은 결과가 산출되었다.

Table 6. Compared RMSE of GPS/IMU/SPR with respect to GCP geometry types in urban canyon area

Parameter		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Position (m)	North	0.25	0.76	0.28	0.27
	East	0.25	0.25	0.25	0.26
	Down	0.48	0.48	0.47	0.48
Attitude (deg)	Roll	0.05	0.05	0.05	0.05
	Pitch	0.05	0.05	0.05	0.05
	Yaw	0.05	0.05	0.05	0.05

GPS 신호차단의 경우에 기준점 배치에 따른 IMU/SPR 결합의 위치 및 자세 오차의 RMSE를 비교한 것은 Table 7과 같다. GPS 신호가 차단되더라도 개활지와 도심지의 경우와 거의 유사한 결과가 나타났다. 본 연구에서는 GCP 및 IP의 측정오차를 작게 설정하고 매초마다 항상 동일한 영상을 취득한다고 가정하였다. 따라서 매 시각마다 SPR 수행 결과의 정밀도는 매번 비슷한 수준으로 계산되었기 때문에 GPS 신호가 차단된 경우에도 매우 정밀하게 위치 및 자세가 결정된 것이다.

Table 7. Compared RMSE of IMU/SPR with respect to GCP geometry types in GPS signal blockage

Parameter		Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Position (m)	North	0.25	0.76	0.28	0.27
	East	0.24	0.24	0.24	0.25
	Down	0.48	0.48	0.47	0.48
Attitude (deg)	Roll	0.05	0.05	0.05	0.05
	Pitch	0.06	0.06	0.06	0.06
	Yaw	0.04	0.04	0.06	0.04

4. 결론

본 논문에서는 GPS 수신환경에 구애받지 않고 연속적으로 안정적인 차량의 위치 및 자세를 결정할 수 있는 차량 항법 시스템 구축을 목적으로, GPS로부터 수신된 3차원 위치와 사진측량 기술인 SPR을 통해 계산된 외부표정요소를 이용하여 항법해의 오차를 보정하는 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘을 개발하였다. GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 준 실시간으로 차량의 위치 및 자세를 결정하기 위하여 계산시간에 중점을 두어 확장형 칼만필터 기반의 약결합 방식으로 결합하였다. 본 연구에서의 개발된 GPS/IMU/SPR 성능을 분석하기 위하여, 저급 GPS, MEMS-IMU 카메라 센서가 차량에 탑재되었다고 가정하여 이를 기반으로 시뮬레이션 테스트를 진행하였다. GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 GPS 수신환경 및 영상에 찍히는 기준점 배치에 따라 성능이 달라지기 때문에 이를 고려하여 실험을 진행하였다. SPR 수행 유무에 따른 GPS/IMU 결합 결과와 GPS/IMU/SPR 결합 결과를 비교한 결과, GPS/IMU 결합은 개활지는 수 m, 도심지는 수십 m 수준의 위치 오차가 발생되었으나, GPS/IMU/SPR 결합을 통한 위치 정밀도는 GPS 수신환경에 영향을 받지 않고 수 십 cm 수준으로 매우 정밀하게 나타났다. 기준점 배치에 따른 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘 성능 분석 결과, 기준점 배치 및 GPS 수신환경에 영향을 받지 않고 1m 오차 수준으로 안정적으로 위치가 결정되었다. 그러나 한쪽에 모든 기준점이 몰려있는 불안정한 기하학적 배치일 경우에는 카메라 시선 방향에 대해 위치오차가 증가하였다.

본 연구에서 개발한 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘은 SPR을 통해 산출되는 외부표정요소를 이용하여 GPS 수신환경에 구애받지 않고 안정적인 차량의 위치 및 자세를 결정할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 SPR을 통해 산출되는 외부표정요소인 카메라의 위치 및 자세는 영상점의 측정 오차, 기준점의 측정 오차, SPR을 수행하기

위한 카메라의 위치 및 자세에 대한 초기치에 의해 정밀도가 달라진다. 따라서 SPR 수행 성능에 영향을 미치는 다양한 요인을 고려하여 보다 면밀한 분석을 수행하고, 이를 기반으로 실제 데이터를 취득하여 추가적인 GPS/IMU/SPR 통합 알고리즘의 성능 분석이 필요할 것으로 사료된다.

References

- Godha, S. and Cannon M. E. (2007), GPS/MEMS INS integrated system for navigation in urban areas, *GPS Solutions*, Vol. 11, No. 3, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 193-203.
- Habib, A., Asmamaw, A., Kelley, D., and May, M. (2000), *Linear features in photogrammetry*, Report NO. 450, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, pp. 9-11.
- Heo, P. S. (2009), A Study on the Automotive ADAS Market Diffusion Factors, *Proceeding of KICS*, KICS, 22-24 June, Jeju, Korea, pp. 942-945. (in Korean)
- Kim, S. B., Lee, S. Y., Hwang, T. H., and Choi, K. H. (2004). An advanced approach for navigation and image sensor integration for land vehicle navigation, *Proceedings of 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 26-29 September, Los Angeles, USA, Vol. 6, pp. 4075-4078.
- Kim, M. W. (2012), *Research of Enhanced Ground Vehicle Navigation Using a GPS/Vision Sensor Hybrid Positioning algorithm*, Master's thesis, Korea Aerospace University, Goyang, Korea, 66p. (in Korean with English abstract)
- Leandro, R. F., Langley, R.B., and Santos, M. C. (2008), UNB3_m pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques, *GPS Solutions*, Vol. 12, No. 1, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 65-70.
- Leung, K. T., Whidborne, J. F., Purdy, D., and Barber, P. (2011), Road vehicle state estimation using low-cost GPS/INS. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 6 August, Vol. 25, No. 6, pp. 1988-2004.
- Niell, A. E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, Vol. 101,

- No. B1, Wiley, Hoboken, New Jersey, USA, pp. 3227-3246.
- Parkinson, B. W. and Spilker, J. J. (1996), *Global Positioning System: Theory and Applications Volume I*, AIAA, Washington, DC, USA, 643p.
- Tsalatsanis, A., Valavanis, K.P., Kandel, A., and Yalcin, A. (2007), Multiple sensor based UGV localization using fuzzy extended Kalman filter, *Mediterranean Conference on Control & Automation*, IEEE, 27-29 June, Athens, Greece, pp. 1-8.
- Vu, A., Ramanandan, A., Chen, A., Farrell, J. A., and Barth, M. (2012), Real-time computer vision/DGPS-aided inertial navigation system for lane-level vehicle navigation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13 No. 2, pp. 899-913.
- Wang, W. and Wang, D. (2008), Land vehicle navigation using odometry/INS/vision integrated system, *IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, IEEE, 21-24 September, Chengdu, China, pp. 754-759.
- Wei, L., Cappelle, C., and Ruichek, Y. (2013), Camera/Laser/GPS Fusion Method for Vehicle Positioning Under Extended NIS-Based Sensor Validation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, No. 11, pp. 3110-3122.
- Zhou, J., Edwan, E., Knedlik, S., and Loffeld, O. (2010), Low-cost INS/GPS with nonlinear filtering methods, *Proceeding of Information Fusion*, IEEE, 26-29 July, Edinburgh, Scotland, pp. 1-8.