

## 4S-Van 구현을 위한 DGPS/INS 통합 알고리즘 설계

김성백<sup>1†</sup>, 이승용<sup>1</sup>, 김민수<sup>1</sup>, 이종훈<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한국 전자통신 연구원 4S통합기술 연구팀  
<sup>2</sup>한국 전자통신 연구원 공간정보센터

### THE DESIGN OF DGPS/INS INTEGRATION FOR IMPLEMENTATION OF 4S-Van

Seong-Baek Kim<sup>1†</sup>, Seong-Yong Lee<sup>1</sup>, Min-Soo Kim<sup>1</sup>, Jong-Hun Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>4S Integration Technology Research Team, ETRI, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Spatial Integration Technology Center, ETRI, Daejeon 305-350, Korea

E-mail: kimstar100@etri.re.kr

(Received September 30, 2002; Accepted November 28, 2002)

#### 요 약

본 연구에서는 저가의 INS와 GPS 정보를 합성하여 고기동 환경에서 항체의 위치와 자세정보를 연속적으로 제공할 수 있는 약결합 방식의 통합 알고리즘을 구현하였고, 4S-Van에 장착된 이미지 센서의 위치와 자세결정 방법에 사용하였다. (D)GPS/INS 통합을 실시하기 전 IMU의 초기 정렬과정에서 방위각은 두 대의 GPS를 통해 결정하였으며 칼만 필터를 이용한 정밀정렬을 수행하였다. 통합 알고리즘의 성능평가를 위해 차량 테스트와 시뮬레이션 테스트를 병행하였다. 통합 결과 차량 시험을 기준으로 나타난 위치 오차는 직선도로에서 10cm 내외의 정확도를 보이며 자세오차의 경우 시뮬레이션을 기준으로 롤각은 0°.01, 피치각은 0°.03, 요각은 0°.1 내외의 정확도를 보였다. 구현된 (D)GPS/INS 알고리즘은 기하보정 방법을 통해 이미지센서의 위치와 자세정보 제공자로서 활용될 수 있다. 따라서 4S-Van에 장착된 이미지 센서의 영상획득 시각에 대한 기하학적인 정보를 통해 지상의 건물이나 도로 시설물 등에 대한 3차원 공간 자료 구축이 가능하다고 보며, 구축된 정보를 통해 기존의 수치지도 갱신, 도로 시설물 관리, 비디오 GIS 데이터 베이스 구축 등에 대한 공간 자료 연계 및 응용에 활용할 계획이다.

#### ABSTRACT

In this study, we developed low cost INS and (D)GPS integration for continuous attitude and position and utilized it for the determination of exterior orientation parameters of image sensors which are equipped in 4S-Van. During initial alignment process, the heading information was extracted from twin GPS and fine alignment with Kalman filter was performed for the determination of roll and pitch. Simulation and van test were performed for the performance analysis. Based on simulation result, roll and pitch error is around 0.01-0.03 degrees and yaw error around 0.1 degrees. Based on van test, position error in linear road is around 10 cm and curve around 1 m. Using direct georeferencing method, the image sensor's orientation and position information can be acquired directly from (D)GPS/INS integration. 4S-Van achieved 3D spatial data using (D)GPS/INS and image data can be applied to the spatial data

<sup>†</sup>corresponding author

integration and application such as contemporary digital map update, road facility management and Video GIS DB.

*Keywords:* GPS, INS, exterior orientation, Kalman filter, georeferencing

## 1. 서 론

4S는 우리나라에서 처음 도입한 용어로서 공간정보와 관련된 4개의 시스템, 즉 지리정보시스템(GIS), 공간영상시스템(SIIS), 위성측위시스템(GNSS), 지능형교통시스템(ITS)을 통합하고 연계하는 기술이다. 4S 연계 기술은 고도정보화 사회에서 국토 공간의 효율적 이용 및 관리, 환경, 교통 대책, 재난재해 등과 같은 분야에 응용되어 국가경쟁력을 강화하고 공간정보 인프라를 구축할 수 있다.

4S 연계 기술에서 핵심적인 기능을 담당하는 4S-Van은 일반 차량에 이미지 획득 장치로 CCD 카메라, Laser Scanner, Video Camera를 장착하고 위치정보 획득 장치로는 GPS 수신기, IMU(Inertial Measurement Unit) 및 DMI(Distance Measurement Indicator)를 탑재하여 주행과 동시에 도로와 관련된 각종 시설물 현황이나 기타 속성정보를 실시간으로 자동 취득 및 갱신할 수 있는 이동식 도면화 체계(mobile mapping system)이다. 4S-Van은 GPS 측량기술, 차량항법 기술, 사진측량학 기술 등이 복합적으로 연계된 최신의 시스템이다. 4S-Van은 미국, 캐나다 등에서 개발한 GPS-Van, Visat-Van 등과 유사한 기능을 수행하며 추가적으로 Laser Scanner 장치를 장착함으로써 응용분야 확장을 시도하였다(한국전자통신 연구원 2002).

4S-Van은 이동식 도면화 체계에서의 핵심적인 역할을 하는 GPS와 INS의 정보를 통합하여 이미지 센서의 위치와 자세를 의미하는 외부표정요소(exterior orientation)를 직접적인 방식으로 결정할 수 있다. 기존의 재래식 측량시스템에서는 지상 기준점과 복잡한 블록조정을 통한 간접적인 방법으로 외부표정요소를 결정한 것에 비해 (D)GPS/INS 통합 정보를 사용하면 탑재한 각 센서의 위치와 자세정보를 직접적인 방법으로 정확히 결정할 수 있다(Skaloud et al. 1996). 직접적인 방식으로 이미지 센서의 위치와 자세 결정을 하면 많은 소요경비와 시간을 절약 할 수 있고, 사진 측량학적인 관점에서 수행된 복잡한 블록조정, 변들 조정 기법 등에 대한 함수모형의 단순화를 실현시킬 수 있다(최송욱 1999).

정지상태인 4S-Van의 위치 및 방위각을 두 대의 GPS 수신기를 통해서 결정하였다. 주행 중 4S-Van을 통해 획득된 영상에 대한 정보는 (D)GPS/INS 통합 정보를 이용하여 획득된 이미지 센서의 외부 표정 요소를 통해 자동적으로 추출 및 저장된다.

본 논문은 4S-Van에서의 (D)GPS/INS 통합 알고리즘의 구성에 대해서 알아보고, 이에 대한 성능분석을 통해 장단점 분석 및 향후 실용화를 위한 개선방안에 대해 논의하였다.

## 2. 관련 연구 동향

4S-Van은 이미지 센서와 GPS 수신기, 관성 항법 장치 등 다중 센서를 장착한 이동식 도면화 체계이므로 본 장에서는 GPS/INS 통합 분야, 디지털 사진 측량 분야 및 이동식 도면화 체계로 나누어 연구동향을 서술한다. 특히 사진측량학 분야에 관해서는 기본적인 이론적 배경을 통해 (D)GPS/INS 통합 정보를 이용한 외부표정요소 획득의 필요성에 대해 논의한다.

## 2.1 (D)GPS/INS 통합 분야

(D)GPS/INS 통합 시스템은 GPS 운영 초기인 1980년대 중반부터 많은 연구가 수행되었다(Kaplan 1996). 통합 방식은 통합이 되는 단계와 자료에 따라서 여러 가지로 구분할 수 있는데 가장 대표적인 것이 강결합(tightly coupled method) 방식과 약결합(loosely coupled method) 방식이다. GPS 의사거리와 의사거리율을 이용하거나 반송파를 이용하여 하나의 통합해(blended solution)를 구하는 것이 강결합 방식이고, GPS와 INS에서 각각의 해를 구하고 2개의 정보를 통합하여 좀더 향상된 통합해를 구하는 것이 약결합 방식이다(Jekeli 2001).

약결합은 GPS 항법해 자체를 이용하기 때문에, 모듈화 방식으로 간단하게 구현할 수 있다. 그러나 측정치 잡음으로 모델링 되는 GPS 항법해 오차 공분산의 상관성(correlation)을 고려하기 어렵기 때문에 준 최적(suboptimal)의 결합해를 얻는다. 반면 강결합 방식은 위성갯수가 부족할 때 가용성면에서 장점을 가지며, 항체의 동적 특성을 좀더 반영해 줄 수 있다. 그러나 강결합은 약결합에 비해 가시위성의 갯수에 따라 계산량이 증가하는 단점이 있다. 결국 (D)GPS/INS 통합 시스템의 정밀도는 GPS 정밀도에 좌우되므로 더욱 정밀한 (D)GPS를 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있는데 최근에는 주로 반송파(carrier phase)를 이용한 통합 시스템이 제안되고 응용되고 있다(Brown & Hwang 1997). 통합 시스템은 고정밀의 속도, 위치 및 자세정보를 제공할 수 있으며 이를 통해 도심지와 같이 지형적인 영향으로 인해 GPS 응용에 제약이 있던 분야에 광범위하게 활용될 수 있다(한광훈 2001).

## 2.2 디지털 사진 측량 분야

기존의 사진측량(photogrammetry)은 필름 형태의 사진영상을 이용하여 실시되었다. 따라서 영상의 판독이나 형상 추출 등이 수작업에 의해 이루어졌으며, 3차원 위치결정을 위한 다단계의 기하 해석 과정에서만 컴퓨터의 도움을 얻었다. 특히 입체영상에서 3차원 형상을 추출하기 위해서는 숙련된 전문 도화사(작업자)에 의해 작업이 이루어져야 했으므로 사진측량의 적용 범위가 매우 한정되었으며, 주로 항공사진에 의한 지형도 제작에 국한되었다.

1980년대 이후 컴퓨터 그래픽 분야의 발전과 더불어 사진측량 분야에서도 수치영상을 활용한 사진측량의 공정 전산화 및 자동화를 도입하기 시작하였고, 그 첫 단계로서 기존의 필름 형태의 사진 대신에 수치영상을 기본 자료로 이용하기 위한 연구가 이루어졌다.

수치영상은 기존의 필름 형태의 아날로그 영상을 스캐닝하여 얻는 간접적인 방법과 CCD나 디지털 카메라 등의 수치영상 수집장비를 이용한 직접적인 방법으로서 얻어질 수 있다. 초기에는 고해상도의 영상을 수집할 수 있는 수치영상 수집장비가 개발되지 못했기 때문에 주로 필름 형태의 아날로그 영상을 고성능의 스캐너를 이용하여 수치영상화 하여 사용하는 방법을 적용하였으나, 최근에 고해상도 영상수집 장비들이 계속적으로 개발되고 성능이 향상됨에 따라 점차 직접적인 방법에 의해 수치영상을 획득하고 있다(백상호 1996).

필름형태의 아날로그 영상이 수치영상으로 대체되었다는 것은 컴퓨터 비전 기법을 이용한 영상 인식(image recognition), 패턴인식(pattern recognition), 형상추출(feature extraction) 등이 자동화될 수 있는 가능성이 이루어진 것으로 사진측량 공정의 혁신적인 발전과 더불어 활용분야의 비약적인 확대가 가능하게 된 것을 의미한다(윤형권 1998).

사진측량에서는 일반적으로 지상기준점(ground control points) 측량을 병행하여 실시한다. 지상

기준점은 대상물 공간과 사진 위 양쪽 모두에서 그 위치를 명확히 알고 있는 지점을 의미하며, 사진 촬영 당시 카메라의 위치와 자세에 대한 기하학적 구성을 재현하기 위해 필요하다. 일반적으로 항공 사진측량에서 지상기준점 측량은 전체 비용에서 50% 정도의 비용을 차지하는 등 매우 많은 작업량이 소요된다. 지상기준점의 용도가 사진촬영 당시 카메라의 위치와 자세를 결정하기 위한 것이라는 것을 감안할 때, 카메라의 위치와 자세를 다른 방법을 결정할 수 있다면 사진측량 공정에서 경제성과 효율성이 급격히 증가될 수 있다. 즉, 대상공간에 일일이 접근하지 않고서도 대상물에 대한 3차원 기하학적 정보를 취득할 수 있으므로 사진측량의 효율성도 매우 높아진다.

위성영상의 경우에는 별 추적 센서에 의해 위성의 자세를 직접 구하고, 위치의 경우에는 정밀 GPS 측량에 의해 직접 구하는 방식으로 발전하고 있다. 지상의 경우에도 (D)GPS/INS의 결합에 의해 카메라의 정밀 위치와 자세를 구할 수 있다면, 사진측량의 유용성이 급격히 증가될 수 있다. 기존 수치사진측량의 자동화 과정에서 지상기준점의 입력은 사진측량 전 공정의 자동화에 걸림돌이 되어 왔다. 따라서 지상기준점의 입력 대신에 카메라의 위치 및 자세 정보를 직접적이며 자동적으로 결정할 수 있다면, 수치사진측량의 완전자동화의 구현이 가능해진다.

### 2.3 이동식 도면화 체계

현재 해외에서 개발중이거나 이미 운행중인 이동식 도면화 체계에 대해서 살펴보면, 미국은 이미 1970년대부터 사진기록차량(photologging vehicle)을 이용하여 도로시설물을 조사하는 연구가 시작되었다. 오하이오 대학의 지도제작 센터는 교통과 도시계획에 필요한 GIS 자료가 신속한 갱신과 고품질의 공간자료를 필요로 한다는 것을 인식하고 GPS-Van을 개발하였다. GPS-Van은 주행속도를 유지하면서 시설물 위치좌표, 이정표 및 도로좌표를 수치지도에 매칭하여 시설물관리 및 포장관리 등의 용도로 사용되고 있는 시스템이다.

캐나다의 Visat Van은 종전에 항공측량이나 위성측량으로 얻어지던 자료의 정확도의 한계를 극복하고 토탈스테이션 등을 이용한 지상측량을 대체하기 위하여 개발되었다. Visat Van의 경우에는 캐나다의 고속도로의 유지보수에 사용되며, 또한 도시계획에 필요한 건물의 측량 등에도 사용되고 있다.

독일은 CDSS(car-driven survey system)을 개발하여 시속 100km의 고속 주행시에도 위치정보를 얻을 수 있는 시스템을 개발하였다. 호주는 멜버른 대학이 철로의 유지 보수 등을 위하여 철도 측량 시스템을 개발하였다. 일본은 CCD카메라와 레이저 측량 장비를 GPS에 조합하여 도로 포장 등 실제 토목공사에 활용하고 있다(한국 전자 통신 연구원 2002).

## 3. (D)GPS/INS 통합 알고리즘

(D)GPS/INS 통합 시스템을 구현하기 위해서는 먼저 관성센서의 자료를 사용하여 항법해를 구하는 순수 관성 항법(pure inertial navigation) 알고리즘을 구현하여야 한다. 스트랩다운 항법 알고리즘은 IMU(inertial measurement unit)로부터 얻어진 자이로스코프와 가속도계의 출력을 이용한 자세 계산 알고리즘과 위치 및 속도 계산 알고리즘으로 구성된다. 자세계산 알고리즘의 경우 수치적으로 안정되고 계산비용에서도 유리한 쿼터니언(quaternion) 방법을 사용하였다. 쿼터니언은 특이점의 발생을 억제할 수 있어서 오일러(Euler) 방법보다 우수하다고 알려져 있다(Farrel & Barth 1999). 위치와 속도 계산 알고리즘의 경우는 가속도계가 동체에 직접 부착되어 있으므로 가속도계에서 측정

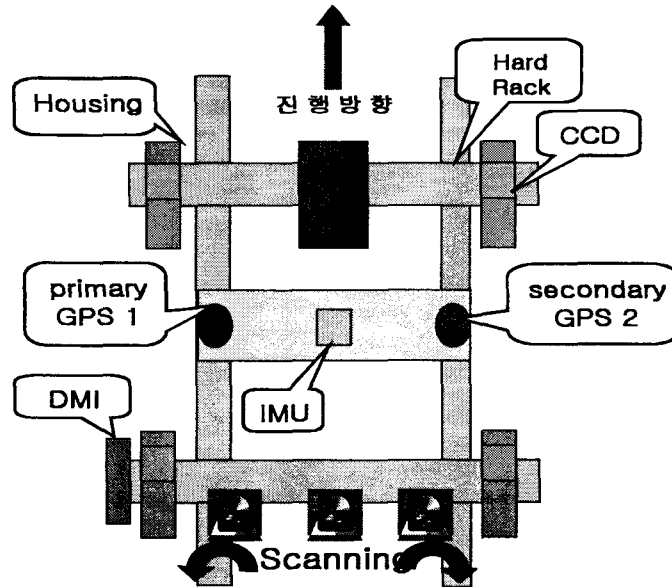


그림 1. 4S-Van 하드웨어 구성도 및 GPS 수신기 위치.

된 가속도를 항법 좌표계로 변환시킨 후 항법 방정식을 계산하여 속도 및 위치를 구하였다(Titterton & Weston 1997). 이 장은 IMU의 초기 자세정보 획득 및 센서오차 보정을 위해 필요한 초기정렬 알고리즘과 주행 중 (D)GPS/INS 통합 알고리즘에 대해서 논한다.

### 3.1 INS 초기 정렬 알고리즘

초기정렬이란 항법 시스템이 정상적인 항법 모드로 진입하기 이전에 가속도계와 자이로스코프의 센서 측정치로부터 항법 좌표계에 대한 동체 좌표계의 초기자세를 구하는 것이다(Salychev 1998). 초기 자세오차는 항법 오차의 주요 오차 요인 중 하나로 주로 자이로스코프 및 가속도계의 랜덤 바이어스 오차에 의해 발생한다. 초기자세에서 오차가 발생하면 그 오차는 계속 누적되어 항법 시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 초기정렬은 크게 동체좌표계의 대략적인 자세를 구하는 개략정렬 과정과 초기 개략적인 자세의 오차를 추정해 보정해 주는 정밀정렬이 있다. 본 논문에서는 초기 정렬을 위해 정지상태인 경우 영속도 정보를 이용하여 자세오차를 추정하였다. 칼만필터가 자세 오차 추정에 이용되었으며, 정지상태의 영속도 정보는 보조센서의 속도 측정치에 비해 상대적으로 정확하다는 장점이 있으나, 항법 센서인 IMU의 위치를 바꾸어 시스템의 가관측성을 증가시키지 않으면 단지 롤각과 피치각만이 추정 가능하다. 요각의 추정을 위해서 4S-Van에 장착된 두 대의 GPS 위치를 이용하여 방위각을 측정하였다. 그림 1은 4S-Van의 하드웨어 구성도와 두 대의 GPS 수신기의 위치를 보여주고 있다. 방위각 측정을 위해서

$$\text{heading} = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta E}{\Delta N} \right) \quad (1)$$

을 사용하였다. 여기서  $\Delta N, \Delta E$ 는 두 GPS 안테나 사이의 북쪽 방향과 동쪽방향에 대한 기저선 벡터(baseline vector)를 나타낸다.

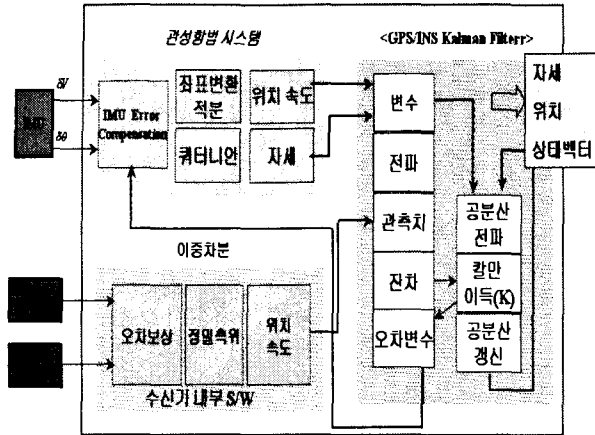


그림 2. (D)GPS/INS 통합 알고리즘 흐름도.

### 3.2 칼만필터를 이용한 주행중 (D)GPS/INS 통합 알고리즘

칼만필터를 이용하여 주행중 GPS 정보와 INS 정보를 통합하기 위해서 INS 센서 모델링의 작업이 선행되어야 한다. IMU 오차는 바이어스, 스케일 팩터 오차, 온도에 따른 오차 등 여러 가지가 있으나, 이들 오차중에서 바이어스와 스케일 팩터 오차가 가장 크게 나타난다. 식 (2, 3)에서는 IMU의 센서인 자이로스코프와 가속도계 오차 모델을 나타내고 있으며 자이로스코프와 가속도계의 오차중에서 바이어스와 스케일 팩터 및 랜덤노이즈로 모델링 하였다. 자이로스코프와 가속도계의 랜덤 노이즈 오차는

$$\delta\omega_g = C_b^n \delta\omega_{i_s}^s = C_b^n (d + \text{diag}(\omega_{i_s}^s) K_g + \omega_g) \quad (2)$$

$$\delta a_a = D^{-1} C_b^n \delta a^s = D^{-1} C_b^n (b + \text{diag}(a^s) K_a + \omega_a) \quad (3)$$

으로 표현되는 랜덤 워크(random walk)로 각각 모델링 하였다. 여기서  $\delta\omega_g, \delta a_a$ 는 각각 항법 좌표계에서의 자이로스코프와 가속도계의 센서오차를 나타내고,  $\omega_{i_s}^s$ 와  $\delta a^s$ 는 동체 좌표계에서의 자이로스코프와 가속도계의 센서오차를 의미한다.  $C_b^n$ 은 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 변환행렬, d와 b는 각각 자이로스코프와 가속도계에서의 바이어스 오차,  $K_g$ 와  $K_a$ 는 각각 자이로스코프와 가속도계의 스케일 팩터 오차,  $\omega_g$ 와  $\omega_a$ 는 랜덤 노이즈를 나타내고 있다. 식 (3)에서의 D항은 지구 곡률(earth curvature)에 대한 항으로서 위도를  $\phi$ , 고도를 h로 나타낼 때,

$$D = \begin{pmatrix} R_m + h & 0 & 0 \\ 0 & (R_t + h) \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

로 주어진다.  $R_m$ 과  $R_t$ 는 각각 남북방향의 지구반경과 동서방향의 지구반경을 나타내고 있다.

항법 시스템에서의 속도 오차모델은

$$\frac{d}{dt} \delta v^n = -\delta(w_{in}^n + w_{ie}^n) v^n - (w_{in}^n + w_{ie}^n) \delta v^n + \delta a^n + \frac{\partial g^n}{\partial p^n} \delta p^n + \delta g^n \quad (4)$$

로 기술된다. 여기서  $w_{ie}$ 는 지구고정 좌표계에서의 관성좌표계에 대한 각속도 항으로 지구자전 각속도를 의미하며,  $w_{en}$ 은 항법 좌표계와 지구고정좌표계 사이의 각속도 항으로서 항체의 운동에 따른 각속

도 성분을 나타내고 있다.  $\delta a^n$ 은 섭동항을 의미하며, 이는  $\delta a^n = C_b^n \delta a^s + a^n \Psi^n$ 로 주어진다. 위의 항법 좌표계에서 위치에 대한 항을  $\delta p^n$ 이라고 나타내었으며,  $\delta p^n = ((R_m+h)\delta\phi (R_t+h) \cos(\phi)\delta\lambda - \delta h)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 자세에 대한 오차모델은

$$\delta\psi^n = -w_{in}^n \times \psi^n - C_b^n \delta w_{ib}^b + \delta w_{in}^n \quad (5)$$

으로 유도될 수 있다.

식 (2~5)의 위치와 자세 및 센서오차 모델을 기반으로 시스템 방정식을

$$X(t_n) = \Phi(t_n, t_m - 1)X(t_n - 1) + w(t_n) \quad (6)$$

으로 기술할 수 있다. 또한, 항법 방정식으로부터 계산된 속도 및 위치해와 (D)GPS의 속도해와 위치해의 차를 관측치로서 구성하여 관측방정식을

$$Z(t_n) = H(t_n, t_n - 1)X(t_n - 1) + w_n(t_n) \quad (7)$$

으로 표현할 수 있다.

식 (7)의  $H$ 는 GPS에서의 위치해와 속도해의 단위와 INS에서 계산된 위치해와 속도해의 단위가 동일하므로 단위행렬로 이루어졌다. 그림 2는 약결합 방식으로 구현된 (D)GPS/INS 통합 알고리즘을 나타낸다. 강결합 방식과 달리, 약결합 방식은 수신기에서 제공하는 항법해(위치, 속도) 자체를 이용한다. 즉 INS와 (D)GPS에서 각각 얻어진 항체의 항법해 차이를 측정치로 이용하며, 칼만필터에서 추정된 상태 변수를 이용하여 INS 오차를 보상하는 구조를 취하고 있다. 그림 2는 전체적으로 간접 피드백 칼만필터(indirect feedback Kalman filter) 구조이며, 이에 맞는 확장형 칼만필터가 사용되었다.

본 논문의 알고리즘에서 항법오차로 위치 오차, 속도 오차, 자세오차를 사용하였으며 센서오차로는 자이로스코프의 바이어스와 스케일 팩터, 가속도계의 바이어스 오차와 스케일팩터를 상태변수로 하는 19차 모델을 사용하였다. 관측치는 항법 좌표계에서의 수평항에 대해서만 고려하였으며, 수직항은 DGPS 정보를 이용하여 갱신과정을 수행하였다.

### 3.3 직접 기하보정 과정

4S-Van은 이미지센서, 관성항법 센서 및 위성항법 센서 등의 여러 정보를 통합하는 과정이 필요하다. 즉 (D)GPS/INS로부터 추정된 INS 위치와 자세정보를 이용하여 차체에 부착된 이미지 센서의 위치와 자세에 대한 추정과정을 의미한다.

그림 3에서 지상 좌표계, (D)GPS/INS 좌표계 및 영상 좌표계와 각 좌표계 사이의 관계를 나타내고 있으며 이에 대한 기하보정과정은

$$r_i^m = r_{(D)GPS/INS}^m + C_b^m [s_m C_c^b r_i^c + r^b] \quad (8)$$

으로 표현된다. 여기서,  $r_{(D)GPS/INS}^m$ 은 GPS/INS 동체 좌표계에서의 값을 나타내고 있으며,  $s_m$ 은 좌표변환과정에서의 스케일 팩터(측척 보정 계수)를 의미한다. (D)GPS와 이미지 센서간의 벡터를  $r^b$ 로 표시하였다.  $C_b^m$ 과  $C_c^b$ 는 각각 동체 좌표계에서 지상 좌표계로 변환, 이미지 좌표계에서 동체 좌표계로 변환을 나타낸다. 이와 같은 기하 보정 작업을 위해서는 실측(real survey) 전에 미리 정확히

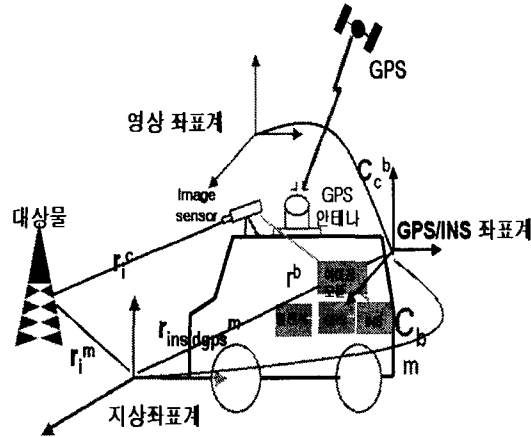


그림 3. 4S-Van의 각 센서 좌표계와 기하보정과정.

표 1. VG-600CA 사양.

	자이로스코프	가속도계
갱신간격	>80(Hz)	>80(Hz)
범위	±200(°)	±10(g)
바이어스	±0.03(°/sec)	±8.5(mg)
측정계수	<1%	<1%
분해능	0.025(°/sec)	0.25mg

설치된 표지(target)에 대해 차량이 정지한 상태에서 영상정보를 획득한다. 획득된 영상정보를 수학적 모델링 과정을 통해서 이미지 센서의 초점거리, 주점 및 렌즈에 대한 왜곡 계수를 의미하는 내부 표정 요소(interior orientation)와 촬영당시의 이미지 센서의 위치와 자세정보를 의미하는 외부표정요소(exterior orientation)를 계산한다. 계산된 외부표정요소와 (D)GPS/INS 정보와의 관계를 식 (8)에서 추출이 가능하므로 실제 자료 획득을 위한 주행시 역으로 (D)GPS/INS 정보를 통해 이미지 센서의 외부표정요소를 획득하게 된다.

#### 4. 실험 결과

(D)GPS/INS 통합 항법 시스템의 성능을 평가하기 위해서 정지 정렬 시험과 궤적 이동 시험을 수행하였다. 실험에서는 Cross-Bow사의 3축 FOG(fiber optic gyro)를 사용하였으며 자이로스코프 운용범위 온도는 -25°C~71°C에서 정상적인 동작을 보장하고 있다.

표 1은 자이로스코프와 가속도계의 성능을 종합하여 나타내고 있다. 바이어스는 일정한 온도에서 0.025°/sec의 성능을 제공하며, 정밀도는 ±0.03°/초로 저성능의 관성항법 센서이다. 또한 가속도계의 측정범위는 ±10g로서 바이어스는 ±8.5mg이다.

##### 4.1 시뮬레이션 실험결과

시뮬레이션 실험을 위해 그림 4와 같이 직사각형 궤적을 생성하였다. 3축 자이로스코프와 3축 가속도계로 구성된 IMU의 센서 출력을 이용하여 항법 알고리즘을 계산하기 위해서는 동체 좌표계에



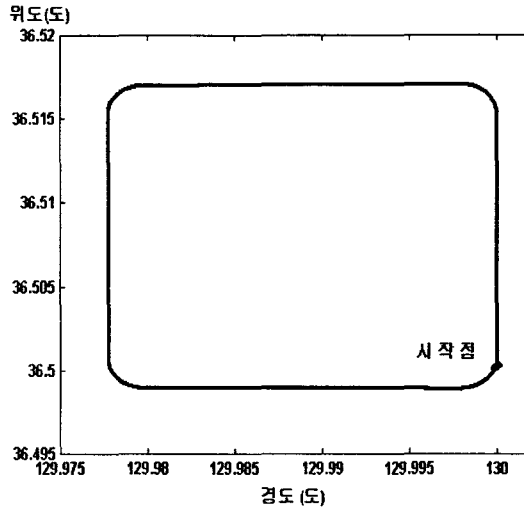


그림 4. 시뮬레이션에 사용된 참 궤적.

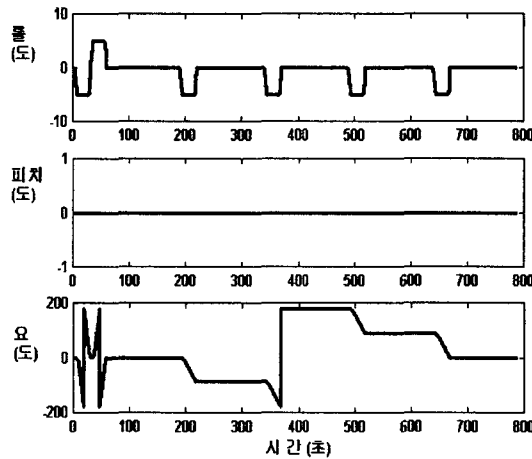


그림 5. 시뮬레이션에 사용된 참 자세.

서 측정된 센서의 값이 필요하다. 항법 알고리즘의 계산을 위해 동체좌표계에서 측정된 선형 가속도  $f^b$ 를 좌표변환 행렬  $C_b^n$ 을 이용하여 항법 좌표계상의 가속도는

$$\dot{V} = C_b^n (f^b + (2\omega_{ie} + \omega_{en})V + g^n) \quad (9)$$

으로 기술된다. 여기서,  $\omega_{ie}$ 와  $\omega_{en}$ 은 각각 지구의 자전 각속도와 지구에 대한 항법 좌표계의 회전을 의미한다. 식 (9)를 적분하여 위치와 속도를 얻었다.

쿼터니언 미분 방정식은

$$\dot{Q} = \frac{1}{2}(\omega_{ib}^b)Q - \frac{1}{2}(\omega_{ie} + \omega_{en})Q \quad (10)$$

으로 기술되는데, 여기서  $\omega_{ib}^b$ 는 동체좌표계에서 측정된 각속도이다. 식 (9)의 좌표변환행렬  $C_b^n$ 은 식 (10)을 적분하여 구한다. 이때 사용된 식은 항법 알고리즘의 식 (9)와 (10)을 동체 좌표계의 식으로

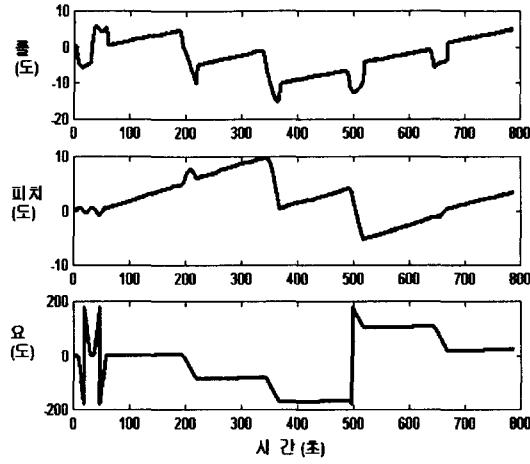


그림 6. 저급 IMU 센서 측정치를 이용한 자세결과.

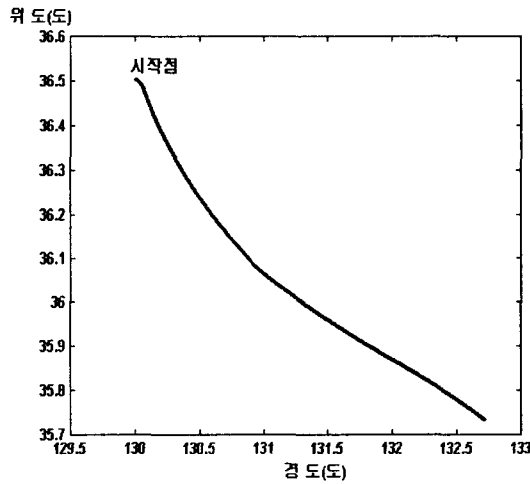


그림 7. 저급 IMU 센서 측정치를 이용한 궤적 수행 결과.

변환한 식으로 가속도계와 자이로스코프의 출력은, 각각

$$f^b = C_n^b(f^n + (2\omega_{ie} + \omega_{en})V - g^n) \tag{11}$$

$$\omega_{ib}^b = C_n^b(\omega_{in}^n + \omega_{nb}^n) \tag{12}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서,  $f^b$ 는 동체 좌표계에서의 센서 측정치를 나타내며,  $f^n$ 는 항법 좌표계에서의 가속도값을 나타낸다.  $C_n^b$ 은 항법 좌표계로부터 동체좌표계로의 변환 행렬이다.  $\omega_{ib}^b$ 는 동체 좌표계에서의 센서 측정치를 나타내고 있으며,  $\omega_{in}^n$ 는 항법 좌표계에서의 각속도벡터를 의미한다.

표 1과 같은 저급 IMU 사양을 고려하여 바이어스와 랜덤 노이즈가 첨가된 가속도계 및 자이로스코프의 출력 값을 이용하여 순수 항법 시스템을 구현하면, 주행 중 INS의 적분 오차로 인하여 항법 오차가 증가하게 된다. 즉, 저급 IMU의 바이어스와 랜덤 노이즈등으로 인하여 항법해의 궤적이 각각의 루프를 그리지 않고 발산하게 된다. 표 1의 저급 IMU 사양을 통해 순수 항법을 수행한 결과를

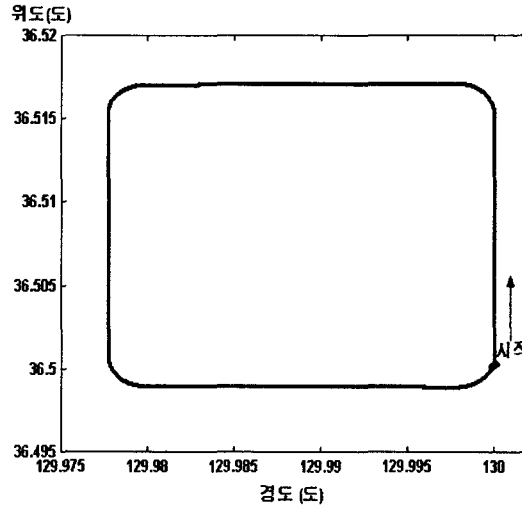


그림 8. (D)GPS/INS 통합 궤적해.

표 2. 자세 오차.

	평균(°)	표준편차
롤각	0.0128	0.0580
피치각	0.0292	0.0583
요각	0.1682	0.3471

그림 6과 7에 나타내었다.

그림 6은 저급 IMU의 센서 자료를 사용하여 관성항법 시스템을 구현하여 얻은 자세결과이다. 그림 5의 참 자세와 비교하여 볼 때 센서의 바이어스와 랜덤 노이즈로 인하여 롤각과 피치각은  $\pm 10^\circ$  정도의 차이를 보이고 있으며 요각에 대한 전체적인 경향성은 참 값과 크게 변화가 없어 보이지만 실제 오차는 운행 후 약 360초 후에는  $10^\circ$  정도의 오차를 보이며 약 780초에서 초기방향으로 위치하지 않고 약  $20^\circ$  정도 틀린 방향을 보이고 있다. 오차가 큰 자세결과를 이용하여 스트랩다운 관성항법 구현시의 궤적은 그림 4와는 다르게 그림 7과 같이 잘못된 위치해를 계산하게 되어 결국 엉뚱한 방향으로 발산하고 있다. 따라서 자이로의 경우  $0.03^\circ/\text{초}$  정도의 저급 사양의 경우 단독으로는 관성항법 시스템 구현이 불가능함을 알 수 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 INS와 상호 보완적인 특성을 나타내는 (D)GPS와의 결합을 시도하여 개개의 단독 시스템의 성능보다 우수한 성능을 얻을 수 있다. 이러한 기법을 주파수 관점에서 보면 고주파 특성이 좋은 관성 센서와 저주파 특성이 좋은 (D)GPS를 적절히 결합하는 것이다.

통합 과정 시뮬레이션에서는 IMU 센서측정치를 50Hz, DGPS 정보는 1Hz로 가정하였다. (D)GPS/INS 통합의 시뮬레이션 결과를 그림 8, 9에 나타내었다. 그림 8은 위치에 대한 결과, 즉 초기위치에서부터 북쪽으로 정렬된 상태에서 사각형의 궤적에 대한 해를 나타낸다. 그림 4의 참 위치해와 비교하여 볼 때 위치해의 추정이 비교적 올바르게 구현되었음을 알 수 있다. 그림 9는 통합 시스템을 통해 추정된 자세해를 나타내고 있으며, 그림 5의 참 자세해와 비교하여 볼 때 추정된 자세오차를 나타

표 3. 초기정렬 후 자세.

	평균(°)	표준편차(°)
롤각	0.12	0.021
피치각	-4.14	0.019

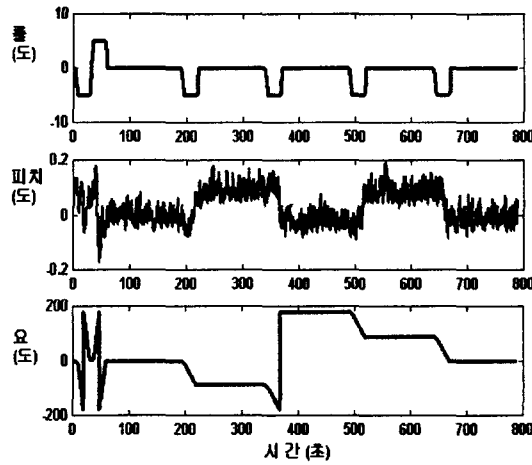


그림 9. (D)GPS/INS 통합 자세해.

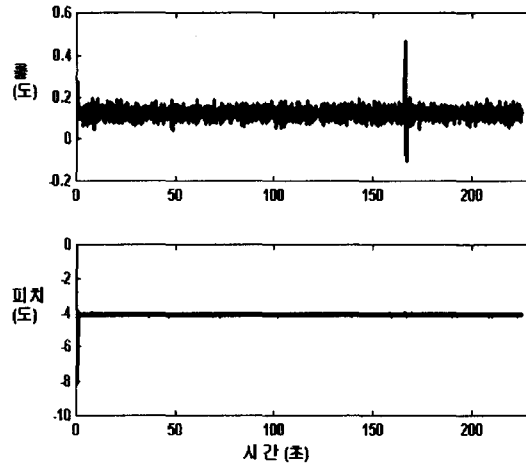


그림 10. 초기정렬 후 추정된 자세.

내면 표 2와 같다.

#### 4.2 4S-Van을 이용한 차량 실험 결과

통합 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 단거리 차량이동 시험을 실시하였다. 초기정렬과정에서 차량의 시작점에 대한 방위각은 식 (1)을 사용하여 결정하였으며, 롤각과 피치각은 영속도 보정을 통해 결정하였다. 정지상태에서는 관성항법 센서가 움직이지 않으므로 위치 및 속도의 참값이 0인 정보를 이용하여 오차를 파악할 수 있다. 그림 10에서 나타난 것처럼 약 230초 동안 초기정렬 과정이

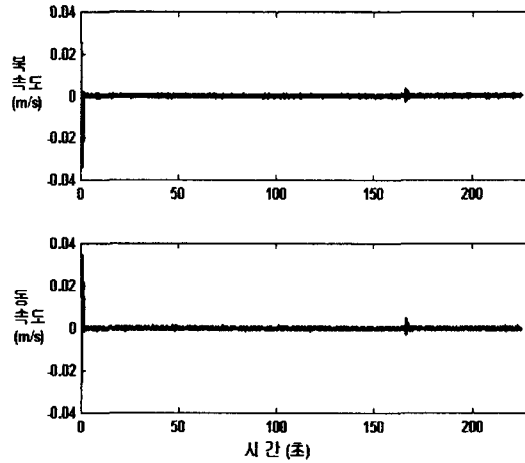


그림 11. 초기정렬후 추정된 속도.

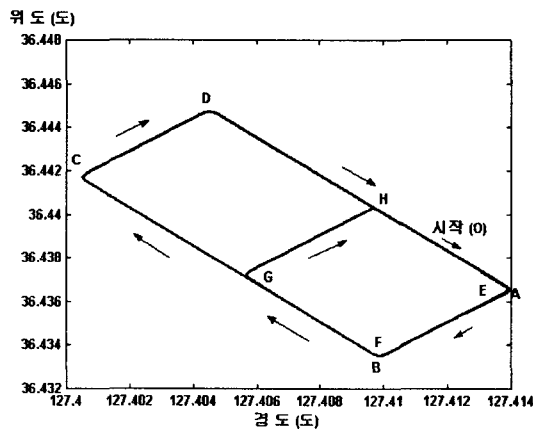


그림 12. 통합후 추정된 차량 궤적.

수행되었으며 초기정렬을 통해 구해진 롤각과 피치각은 표 3과 같다. 식 (1)을 사용하여 차량의 방위각을 결정한 결과는  $132^{\circ}.27$ 였다. 정지상태의 실험 도중 주변 차량 주행으로 인하여 약 165초에서 롤각이 약간 떨리는 현상이 발생하였다.

IMU가 정지상태이기 때문에 가속도계에서 측정되는 값이 0에 가까워져 이를 적분한 속도값의 경우에도 그림 11와 같이 영으로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

(D)GPS/INS 통합 궤적 실험 결과는 그림 12에 나타내었다. 그림 12는 출발지점(O)를 시작으로 A-B-C-D의 궤적을 따라서 직사각형의 궤적을 주행한 후 E-F-G-H의 궤적을 통해 작은 직사각형 도로를 주행한 결과이다. 정밀 측량된 DGPS 위치 자료와 비교할 때 통합 알고리즘의 궤적 수행의 결과 직선 도로에서의 오차는 표 4와 같으며, A-H에서는 방향 회전이 있기 때문에 표 5와 같이 오차가 크게 나타났다. 직선도로 주행시에는 일정한 자세 및 동적 변화로 인하여 10cm 내외로 오차가 나타나지만 차량의 급격한 회전이 발생하는 구간에서는 위치오차가 급격히 증가하여 1m 정도의 큰 오차가 발생하였다. DGPS 정보를 사용하여 통합을 실시하였지만 회전이 있는 부분에서 오차가 크게

표 4. 직선 주행로에서 나타난 오차.

	O-A	A-B	B-C	C-D	D-O	O-E	E-F	F-G	G-H	H-O
평균(m)	0.193	0.04	0.017	0.130	0.008	0.023	0.016	0.026	0.01	0.038
표준편차(m)	0.145	0.057	0.222	0.102	0.103	0.042	0.037	0.212	0.02	0.049

표 5. 직선 주행로에서 나타난 오차.

	A	B	C	D	E	F	G	H
위치(m)	1.421	1.063	0.904	1.178	0.944	0.755	0.631	0.887

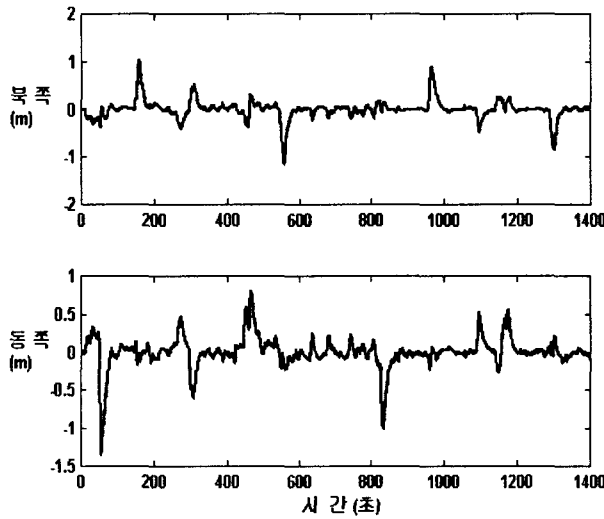


그림 13. (D)GPS/INS 통합후 나타난 위치 오차.

나타나는 이유는 표 1에 나타난 바와 같이 자이로의 성능이 저급이어서 차량 회전의 영향을 제대로 반영해주지 못하기 때문이다.

그림 13에 동쪽방향과 북쪽방향에 대한 궤적의 오차를 나타내었다. 그림 13에서 방향 회전이 있는 구간에서는 표 5에 나타난 것과 같이 순간적으로 오차가 크게 나타나지만 곧 칼만필터 추정자에 의해서 오차가 감소된 것을 알 수 있었다.

그림 14에서는 통합 후 추정된 자세결과를 나타내는데, 특히 통합된 자세 중에서 피치각이 급격히 변화하는 이유는 과속 방지턱을 지남으로서 나타나는 결과이다. 차량의 진행 방향에 따라서 피치각의 변화하는 경향에 대해서 유추해 볼 때, -5도 정도에서 일정한 분포를 보이고 있으나 차량 회전이 있는 구간에서는 그 값이 크게 변화하는 경향을 보인다. 롤각 역시 0도 근처에서 일정한 분포를 보이고 있다. 차량 회전에 따라 그 값이 크게 변화하는 경향성으로 보아 차량 주행시의 롤각과 피치각을 적절하게 나타내고 있음을 간접적으로 유추할 수 있었다. 주행중의 차량회전은 요각의 변화를 통해 주행방향을 확인할 수 있으며, 요각을 통한 방향회전의 경우 출발지점과 도착 지점이 일치하고 있음을 알 수 있다. 차량실험에서 위치오차에 대한 정확도를 나타내었지만 자세 정확도에 대해서는 현 시스템에서 참 값에 대한 정보가 부족하여 나타내지 않았다.

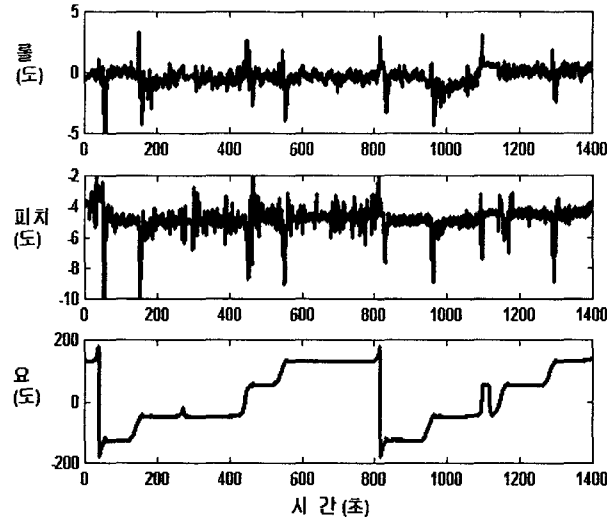


그림 14. (D)GPS/INS통합 후 자세.

추후 사진측량 시스템의 구현시 컨트롤 포인트(기준점)를 이용해서 구한 자세값과 비교하여 결과를 제시함이 타당하다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 GPS의 관측여건이 좋은 상태(favorable GPS constellation)에서 실험하였기 때문에 약결합 방식이지만 상당히 좋은 성능을 나타내 주고 있다. 그러나 도심지와 숲속 등과 같이 GPS 관측여건이 나쁜 곳에서는 GPS 정보의 이용이 불가능하여 INS 단독항법만을 실시하기 때문에 앞에 제시한 실험결과보다 더욱 큰 값의 오차를 나타낼 것이다. 따라서 다른 보조센서를 장착하여 이를 보정하는 추후 연구가 수행되어야 한다.

## 5. 토의 및 결론

본 연구를 통해 4S-Van에 장착된 이미지 센서의 외부표정요소를 직접적으로 결정할 수 있는 (D)GPS/INS 통합 방법에 대해 논하였다. (D)GPS/INS 통합 알고리즘의 성능 평가를 위해 시뮬레이션 테스트와 차량 실험 테스트를 수행하였다. 시뮬레이션 테스트에 의한 자세 정확도는 롤각 0.01도, 피치각 0.03도, 요각 0.1도로 나타났다. 차량 테스트에 의한 위치 정확도는 직선 도로에서는 10cm 내외의 정확도를 보이며, 곡선 도로에서는 저급 자이로의 영향으로 인하여 1m 내외로 매우 크게 나타났다.

본 연구에서는 GPS 관측상태가 좋은 환경을 가정하여 시뮬레이션 및 차량 테스트를 실시하였다. 약결합 방식의 경우 GPS의 가시위성의 개수가 4개 이상인 경우에는 위치와 자세해를 정밀하게 구할 수 있지만, 가시위성의 개수가 4개 미만인 경우는 약결합 방식내에서 (D)GPS 해를 구할 수 없기 때문에 INS 단독 항법만을 수행하므로 정밀도가 저하된다. 따라서 가시위성의 개수가 4개 이하인 경우에도 칼만필터를 이용한 통합을 통해 위치해와 자세해의 추정을 가능하게 하는 강결합 방식의 연구가 추후 진행되어야 한다. 특히 도심지와 같이 관측여건이 나쁜 경우에 강결합 방식의 통합 방법이 더욱 유용할 것이다. 성능 향상을 위한 다른 방법도 고려 대상이다. 본 실험에서는 전진 필터(forward filter)만을 적용하였지만 후진 필터(backward filter) 과정이 동반될 경우 더 좋은 성능향

상 효과가 기대된다.

본 논문에서 제시한 (D)GPS/INS 알고리즘은 4S-Van 구현의 여러 기반 기술 중 자동으로 외부 표정요소를 결정하는데 활용할 수 있으며 이러한 (D)GPS/INS 통합의 장·단점 파악과 개선방안 및 검토과정이 이루어진다면 4S-Van의 성능 향상에 기여할 수 있다. 향후 4S-Van을 통해 취득된 데이터는 이동체의 고정밀 항법이나 개인위치추적, 대상물에 대한 3차원 공간데이터 구축, 수지도 갱신 및 구축 등과 관련된 공간데이터 연계 및 응용분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- 백상호 1996, 석사학위논문, 연세대학교  
윤형권 1998, 석사학위논문, 연세대학교  
최송욱 1999, 박사학위논문, 연세대학교  
한광훈 2001, 석사학위논문, 서울대학교  
한국전자통신연구원 2002, 4S-Van을 위한 Field System 컴포넌트 개발  
Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. 1997, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering (New York: John Wiley and Sons), pp.270-278  
Farrel, J., & Barth, M. 1999, The Global Positioning System and Inertial Navigation (New York: McGraw-Hill), pp.39-42  
Jekeli, C. 2001, Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications (New York: de Gruyter), pp.308-318  
Kaplan, E. D. 1996, Understanding GPS: Principles and Applications (Boston: Arc Tech House Publishers), pp.391-395  
Salychev, O. S. 1998, Inertial Systems in Navigation and Geophysics (Moscow: Bauuman MSTU Press), pp.57-60  
Skaloud, J., Cramer, M., & Schwarz, K. P. 1996, IAPRS, 31, 125  
Titterton, D. H., & Weston, J. L. 1997, Strapdown Inertial Navigation Technology (United Kingdom: Peter Peregrinus), pp.371-374