

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(8), 671-677(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.8.671

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다수의 비전 센서와 INS를 활용한 랜드마크 기반의 통합 항법시스템

김종명*, 이현재**

INS/Multi-Vision Integrated Navigation System Based on Landmark

Jong-Myeong Kim* and Henzeh Leeghim**

Dept. of Aerospace Engineering, Chosun University* ,**

ABSTRACT

A new INS/Vision integrated navigation system by using multi-vision sensors is addressed in this paper. When the total number of landmark measured by the vision sensor is smaller than the allowable number, there is possibility that the navigation filter can diverge. To prevent this problem, multi-vision concept is applied to expend the field of view so that reliable number of landmarks are always guaranteed. In this work, the orientation of camera installed are 0, 120, and -120degree with respect to the body frame to improve the observability. Finally, the proposed technique is verified by using numerical simulation.

초 록

본 논문은 관성항법시스템(Inertial Navigation System)과 비전 센서(Vision Sensor)를 활용한 통합 항법시스템의 성능 향상을 위한 INS/멀티비전 통합항법 시스템을 제시하였다. 기존의 단일 센서나 스테레오 비전(Stereo vision)을 활용한 경우 측정되는 랜드마크의 수가 적을 경우 필터가 발산하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 3개의 비전 센서를 동체를 기준으로 0° , 120° , -120° 으로 설치하여 단일 센서로 사용되는 경우보다 성능이 향상됨을 수치 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

Key Words : Vision Sensor(영상센서), Kalman Filter(칼만필터), Vision Navigation System(영상항법시스템), INS(Inertial Navigation System, 관성항법장치)

1. 서 론

관성항법시스템(Inertial Navigation System)과 위성항법시스템(GPS, Global Positioning System)은 항법 시스템 중에서 가장 대표적인 시스템이

다. 일반적으로 두 시스템은 단독적으로 사용하 기보단 서로의 단점을 보완하기 위해 GPS/INS 통합 항법시스템 형태로 사용된다. 그러나 GPS가 외부의 간섭 등으로 인하여 사용이 불가능한 상태가 될 수 있는 단점을 지니고 있다. 따라서

† Received : May 10, 2017 Revised : July 25, 2017 Accepted : July 28, 2017

** Corresponding author, E-mail : h.leeghim@controla.re.kr

GPS를 대체할 방안을 마련하는 것은 매우 중요한 사항이다. 일반적으로, 보조센서를 활용한 방법에서 사용하는 센서들은 고도계, 레이저, 초음파 센서, 별 추적기, 지자기 센서, 비전센서가 있다[1-3].

최근 멀티콥터, 로봇 등의 개발로 인해 비전센서를 활용한 항법시스템을 많이 연구 및 사용하고 있다. 비전 항법시스템은 계산량이 많고, 조도의 영향을 많이 받는 단점을 가지고 있음에도 불구하고, 가볍고 소모 전력이 적다는 장점 때문에 많이 사용되고 있다.

비전센서를 활용하여 항법해를 구하는 방법에는 랜드마크를 활용한 방식, 맵(Map) 기반의 방식 등이 대표적이다. 맵 기반의 방식은 데이터베이스와 비교를 통해 항법해를 계산하는 방식이고 랜드마크 기반의 방식은 이미 알고 있는 랜드마크를 측정하여 항법해를 구하는 방식으로 알고리즘이 간단하고 장시간 항법에도 오차 누적이 없다는 장점을 지니고 있다[4-6]. 따라서 본 논문에서는 랜드마크 기반으로 비전 항법시스템에 대한 연구를 수행하고자 한다.

랜드마크 기반의 항법시스템은 비전센서에서 얻은 시선벡터(Line of Sight Vector)를 활용한다. 이때, FOV를 늘려 측정되는 랜드마크의 수를 늘리고 시선벡터 오차를 유지하기 위해서는 고성능의 영상 센서를 사용해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 다수의 영상센서를 활용한 INS/멀티비전 항법시스템을 제안하고자 한다. 3개의 영상 센서를 동체를 기준으로 요(Yaw) 방향으로 0° , 120° , -120° 으로 설치하여, 단일 센서로 FOV(Field of View)를 사용하는 방식보다 신뢰도가 높으며, 성능을 향상시키는 방법을 제안하고자 한다. 더욱이, 본 논문에서는 영상 센서의 성능을 높여 항법 성능을 증가시키는데 고가의 센서가 필요하다는 단점을 극복하고자 상대적으로 저렴한 영상센서 3개를 활용하여 영상 항법시스템의 성능을 증가시키는 방법을 제안하고 이를 수치 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한, 본 논문은 Unscented 칼만 필터를 기반으로 항법 시스템을 구성하였다[7].

본 논문은 다음과 같은 형태로 구성되어 있다. 먼저, II장 영상 항법시스템에서는 랜드마크(Landmark) 기반 3차원 영상 항법, 시스템 모델을 위한 수학적 모델 그리고 본 논문에서 제안하는 멀티비전 항법에 대해 설명한다. III장에서는 멀티비전 항법을 검증하는 시뮬레이션을 진행하고 IV장에서 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 영상 항법시스템

2.1 랜드마크 기반 3차원 항법방정식

본 논문에서는 3차원 기동을 하는 항체를 대상으로 진행된다. Fig. 1은 영상 항법에서 랜드마크, 시선벡터, 항체와의 관계를 보여준다. 영상 항법에서는 카메라에 투영된 랜드마크 측정값을 항법 방정식의 계산에 사용한다[2-3].

먼저, 랜드마크의 측정값을 이용하여 원점으로부터 초점면에 인식된 랜드마크의 거리와 랜드마크 사이의 거리를 계산한다.

$$\rho_k = \sqrt{f^2 + u_k^2 + v_k^2} \quad (1)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2} \quad (2)$$

여기에서 f 는 초점거리, u_k, v_k 는 각각 카메라 좌표계에서의 랜드마크의 위치를 나타낸다. 위의 식 (1), (2)으로부터 획득된 거리값을 바탕으로 코사인 제 2법칙을 사용하여 각각의 랜드마크 사이의 각을 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_{ij} &= \cos^{-1} \left(\frac{\rho_i^2 + \rho_j^2 - \rho_{ij}^2}{2\rho_i\rho_j} \right) \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{f^2 + u_i u_j + v_i v_j}{\sqrt{(f^2 + u_i^2 + v_i^2)(f^2 + u_j^2 + v_j^2)}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, 계산한 사이각을 활용해 실제 랜드마크와 항체의 거리를 코사인 법칙을 적용하여 아래와 같은 수식에 의해서 계산이 가능하다.

$$R_{ij}^2 = R_i^2 + R_j^2 - 2R_i R_j \cos \varphi_{ij} \quad (4)$$

이때, 최소 3개의 랜드마크를 획득할 수 있으면 다음과 같은 이용하여 항체의 위치를 최종적으로

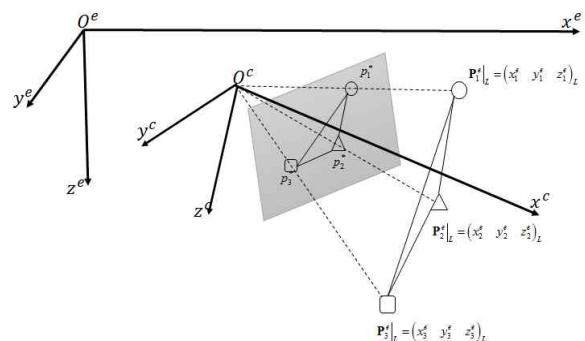


Fig. 1. Relationship between landmark and vehicle

결정할 수 있다.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (5)$$

이렇게 계산된 R_i 를 주어진 3차원 영상 항법 방정식에 대입해 항체의 위치를 계산할 수 있다.

$$\frac{P_i^e - P^e}{\|P_i^e - P^e\|} = C_b^E C_c^b \frac{P_i^c}{\|P_i^c\|} \quad (6)$$

이때, P^e 는 항체의 위치, P_i^e 는 i 번째 랜드마크의 위치 C_b^E, C_c^b 는 동체좌표계에서 ECEF좌표계로, 카메라좌표계에서 동체좌표계로의 변환 행렬이다.

2.2 Multi-Vision Navigation System

기존의 단일 센서와 스테레오 비전을 사용하는 항법시스템은 아래 Fig. 2와 같이 센서가 촬영한 랜드마크를 활용해 시선벡터를 구한다. 이때, 영상 센서의 FOV를 늘리면 측정되는 랜드마크의 수는 늘어날 수 있지만 화질이 떨어져 시선 벡터의 오차가 커지는 단점이 있다. FOV를 늘리고 시선벡터의 오차를 유지하기 위해서는 상대적으로 비싼 고성능의 센서를 사용해야한다. 따라서 저가의 영상센서를 활용해 성능을 증가시키기 위해선 효율적인 방법의 제안이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 다수의 영상센서를 활용한 INS/멀티비전 통합 항법시스템을 제안한다. 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 3개의 영상 센서를 동체를 기준으로 요 방향으로 $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ 으로 설정하였다. 정해진 FOV를 최대한 효율적으로 사용하기 위해서 센서를 가장 고르게 분포해야 관측성(Observation)을 높일 수 있다.

멀티비전을 사용하기 때문에, 3개의 센서에서 나오는 측정값을 식 (6)에 적용하기 위해 각각 다른 C_c^b 를 대입하여야 한다. 본 논문에서는 카메

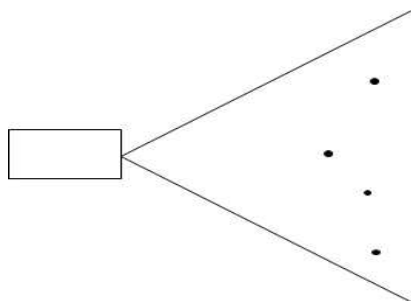


Fig. 2. Single Vision Navigation System

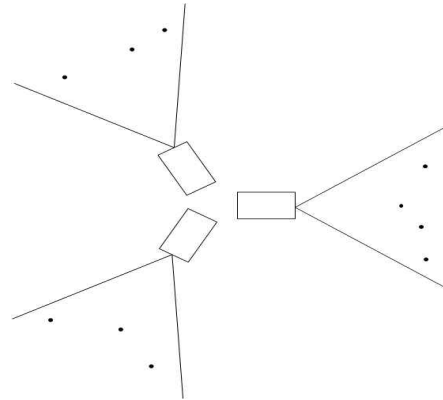


Fig. 3. Multi Vision Navigation System

라의 롤(roll)과 피치(pitch)는 항체와 동일하고 요(yaw)값은 항체와 $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ 의 차이를 가진다고 가정함에 따라 본 논문에서 C_c^b 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c^b = \begin{bmatrix} \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때, ψ 는 설정한 카메라와 항체의 요(yaw)에 해당한다.

2.3 시스템 모델

본 논문에서 추정하는 상태변수는 항체의 자세, 위치, 속도 자이로 바이어스, 각속도 스케일 팩터(Scale Factor), 가속도계 바이어스, 가속도계 스케일팩터로 총 21개이다. 또한, 사용된 센서는 IMU와 영상센서이다. 칼만필터를 적용함에 있어서 IMU의 측정값은 시스템 업데이트(Time Update)를 하는데 사용되고 영상 센서의 출력값은 측정값 업데이트(Measurement Update)에 사용하게 된다. 따라서, 주어진 INS의 수학적 모델과 센서를 활용하여 각속도와 속도를 추정할 수 있다. 우선, 자이로로 의 수학적 모델이 다음과 같다[8].

$$\omega_{ib}^b = (I + K_g) \omega_{ib}^b + \eta_{gv} + b_g \quad (8)$$

$$b_g = \eta_{gu} \quad (9)$$

$$s_g = \eta_{gs} \quad (10)$$

여기에서 K_g 는 자이로 스케일 팩터의 대각행렬, b_g 는 자이로 바이어스, 그리고 η_{gu}, η_{gv} 는 가우시안 백색잡음(Gaussian white noise)으로 가정한다. 또

한, 가속도계의 수학적 모델은 다음과 같다[7].

$$\mathbf{f}_b = (I + K_a)\mathbf{f}_b + \eta_{av} + b_a \quad (11)$$

$$s_a = \eta_{as} \quad (12)$$

$$b_a = \eta_{au} \quad (13)$$

여기에서 K_a 는 가속도계 스케일 팩터의 대각행렬, b_a 는 가속도계 바이어스, 그리고 η_{au}, η_{av} 는 가우시안 백색잡음(Gaussian White noise)으로 가정한다.

자세는 수치적으로 안정하고 계산 속도가 유리한[9] 쿼터니언(quaternion)을 적용하였으며, 이에 대한 미분 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\mathbf{q}}^e = \frac{1}{2}\mathbf{\Omega}_{eb}^b \mathbf{q}^e \quad (14)$$

여기에서 \mathbf{q}^e 와 $\mathbf{\Omega}_{eb}^b$ 는 아래와 같다.

$$\mathbf{q}^e = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Omega}_{eb}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

다음으로 병진운동(Translational Motion)을 활용하여 속도 및 가속도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{P}^e = \mathbf{V}^e \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{V}}^e = \mathbf{C}_B^E \mathbf{F}^b - 2\mathbf{\Omega} \mathbf{V}^e - \mathbf{\Omega}^2 \mathbf{P}^e + \mathbf{G}^e \quad (17)$$

여기에서 \mathbf{P}^e , \mathbf{V}^e 는 ECEF 좌표계에서 위치와 속도이고 $\mathbf{\Omega}$ 지구회전 각속도에 대한 교대행렬(skew symmetric matrix)이고 \mathbf{C}_B^E 는 동체 좌표계에서 ECEF좌표계로의 변환행렬이다. \mathbf{G}^e 는 르장드르 다항식으로 묘사한 중력모델로 2차항까지 고려했다. 그리고 \mathbf{F}^b 는 동체좌표계에서 측정되는 가속도계 출력 값이다[10].

III. 시뮬레이션

INS/멀티비전 통합항법 시스템의 성능을 검증하기 위해서 수치 시뮬레이션을 진행하였다. 멀티비전을 사용한 경우, 단일 센서를 사용한 경우와 비교하여 측정된 랜드마크의 수가 증가하기 때문에, 결과가 향상 되는 것은 일반적으로 예측이 가능하다. 다만 본 시뮬레이션을 통해서 확인

Table 1. Specification of Sensors

Sensors	Value	UNIT
Accelerometer		
bias	10	μg
scale factor	200	ppm
velocity random walk	11	$\mu g/h^{1/2}$
Gyroscope		
bias	10	deg/h
scale factor	200	ppm
angle random walk	0.0035	deg/h ^{1/2}
Vision Sensor		
FOV	30	deg
Maximum Visibility	500	m
Focal length	25	mm
Gaussian Noise	200	μm

하고자 하는 것은 성능향상의 정도를 판가름하고자 한다.

우선, 사용된 IMU(Inertial Measurement Unit)과 비전센서의 센서 사양은 Table 1과 같다. 센서의 데이터 전송속도(Data rate)는 IMU가 100Hz 영상 센서가 10Hz이다. 시뮬레이션은 자세, 위치, 속도, 자이로의 바이어스와 스케일팩터 가속도계의 자이로와 스케일팩터이고 시뮬레이션 시간은 200초이다. 또한, 영상항법은 오차가 발생하진 않지만 IMU보다 데이터 전송속도가 낮고 비전센서에서 3개 이상의 랜드마크를 측정하지 못하면 센서 활용이 힘들다. 따라서 본 논문에서는 센서에서 측정된 랜드마크를 일정하게 고정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 영상센서를 활용한 필터의 성능을 일정하게 유지시키기 위해 랜드마크와 항체의 거리와 랜드마크 간 거리는 Fig. 2, 3과 같이 고정시킨 후 진행한다. 이와 같은 설정하지 않고 일반적인 상황에서도 제안된 기법은 당연히 적용이 가능하다. 다만, 일정한 측정 성능을 유지한 상태에서 제안된 기법의 상대적인 성능향상을 수치적으로 판단하기 위함이다. 성능비교를 위하여 단일, 또는 멀티비전에 각각 적용된 기법은 동일한 Unscented 칼만 필터이다.

Table 2. Initial error in simulation

	Value	UNIT
Attitude	$[5 \ 5 \ 5]^T$	deg
Position	$[10 \ 10 \ 10]^T$	m
Velocity	$[5 \ 5 \ 5]^T$	m/s

적용된 필터링 기법은 비선형필터로 일반적인 EKF(Extended Kalman Filter) 보다 수렴성 및 안정성이 뛰어나다는 장점이 있기 때문이다.

본 시뮬레이션을 위하여 동체는 지속적으로 3 축의 각속도와 속도가 변화하고 있다고 가정하였다. 실제 비행체의 운동보다 훨씬 다양한 운동을 한다고 가정하였다. 그리고 시뮬레이션 결과는

아래 Fig. 4-10에 잘 나타나 있다. 그래프에서 점선은 3sigma에 해당하는 공분산값을, 실선은 오차이고, 빨간색은 멀티비전, 검정색은 단일 영상 센서를 활용한 항법의 결과이다.

참고로, 모든 오차와 3sigma는 다음의 수식과 같은 오차에 대한 크기(norm)값을 활용해 비교하였다.

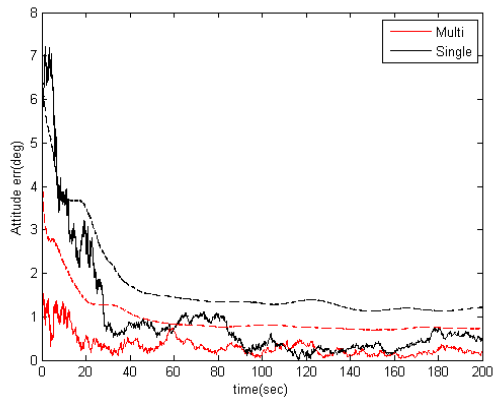


Fig. 4. Attitude error of vision navigation

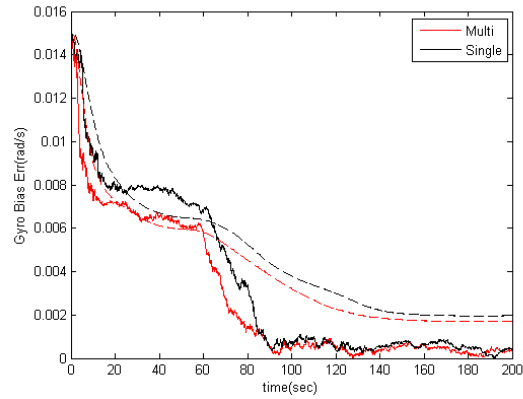


Fig. 7. Gyro bias of vision navigation

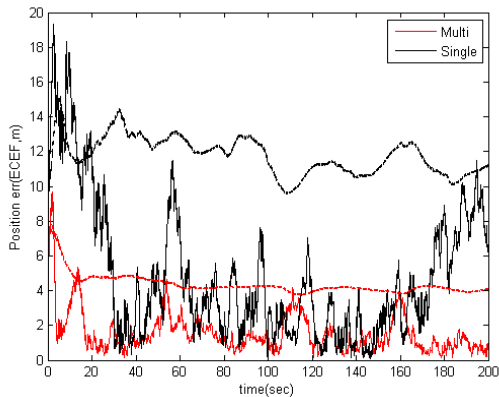


Fig. 5. Position error of vision navigation

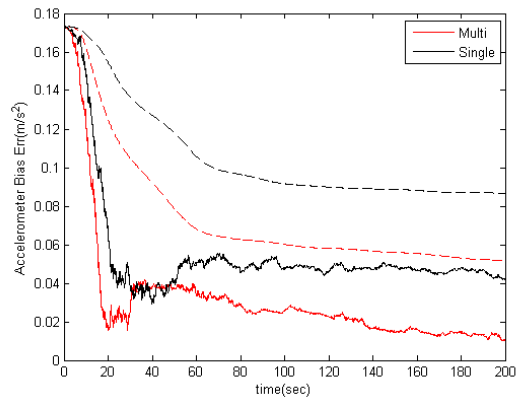


Fig. 8. Accelerometer bias of vision navigation

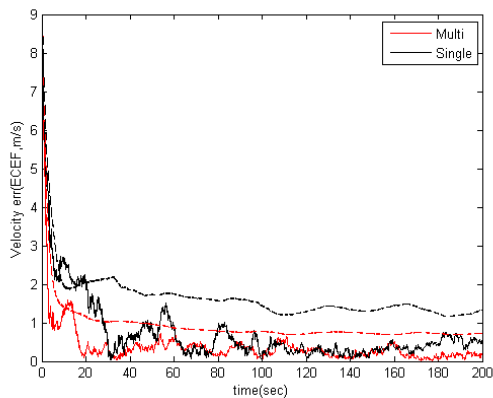


Fig. 6. Velocity error of vision navigation

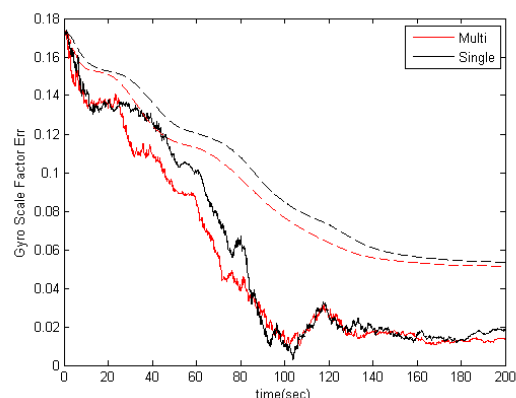


Fig. 9. Gyro scale factor of vision navigation

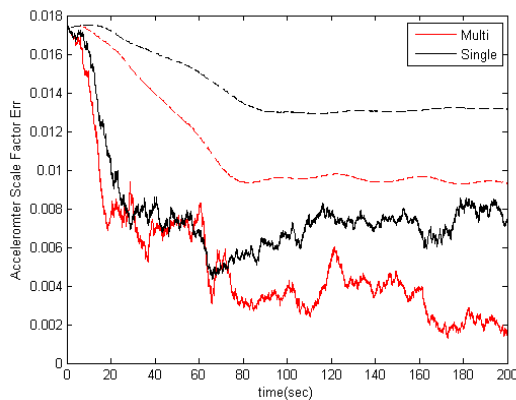


Fig. 10. Accelerometer scale factor of vision navigation

Table 3. RMSE(Root Mean Square Error) in simulation

	Multi	Single
Attitude(deg)	0.3195	0.9444
Position(m)	1.5730	4.8351
Velocity(m/s)	0.3938	0.7306
Gyro bias(rad/s)	0.0028	0.0034
Acc bias(m/s ²)	0.0324	0.0556
Gyro scale factor	0.0525	0.0581
Acc scale factor	0.0052	0.0079

$$\delta x_{norm} = \sqrt{\delta x_x^2 + \delta x_y^2 + \delta x_z^2} \quad (18)$$

결과적으로, 모든 결과 그래프에서 확인 할 수 있듯이 단일 센서를 활용하는 것보다 멀티비전을 사용한 경우가 수렴성이 향상되었으며, 추정오차가 상대적으로 작은값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

특히, 직접적으로 랜드마크의 측정값에 좌우되는 위치 정밀도는 매우 큰 폭으로 성능이 향상되는 것을 그래프로부터 확인 할 수 있다. 즉, 자세와 위치오차가 1/3수준으로 속도가 1/2수준의 오차로 향상됨을 확인하였으며, 전반적인 결과에 대한 상태 변수의 RMSE(Root Mean Square Error)를 획득하여 Table 3에 정리 하였으니 참고하기 바란다.

IV. 결 론

일반적으로 영상 항법시스템은 한 개의 비전 센서나 스테레오 비전을 사용하여 얻은 데이터를

활용한다. 이때, FOV(Field of View)를 늘려 측정값의 개수를 늘리면 영상센서의 하드웨어적인 해상도에 의한 측정 오차가 증가할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다수의 비전센서를 활용한 INS/멀티비전 항법시스템을 제안하였다. 즉, 다수개의 영상센서를 활용하여 FOV를 증가시켜 관측성을 높일 수 있다. 단일 영상 센서의 경우 시야의 제한이 생겨 랜드마크의 개수가 3개 이하로 측정될 경우 성능이 저하가 예상된다. 본 연구에서 제안된 기법을 사용한 경우 다른 각도의 카메라가 보조역할을 할 수 있다는 장점을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 항공우주부품기술 개발사업(No. 10074260)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 1) Groves, P. D., Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech house, 2013.
- 2) Kim, Y., and Hwang, D.-H., "INS/Vision integrated navigation system considering error characteristics of landmark-based vision navigation." Journal of Institute of Control, Robotics and Systems Vol. 19, No. 2, 2013, pp.95-101.
- 3) George, M., and Sukkarieh, S., "Camera aided inertial navigation in poor GPS environments." 2007 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2007.
- 4) Chatterji, G. B., Menon, P. K. and Sridhar, B., "GPS/machine vision navigation system for aircraft." IEEE Transactions on aerospace and electronic systems Vol. 33, No. 3, 1997, pp.1012-1025.
- 5) Bryson, M., and Sukkarieh, S., "Building a Robust Implementation of Bearing only Inertial SLAM for a UAV." Journal of Field Robotics Vol. 24, No. 1, 2007, pp. 113-143.
- 6) Borenstein, J., Everett, H. R. and Feng, L., Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning. University of Michigan 119.120, 1996.
- 7) Kang, W. Y., Kim, K. J. and Park, C. G.,

“Performance analysis of in-flight alignment using UKF,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 12, No. 11, 2006, pp. 1124-1129.

8) Crassidis, J. L., and Junkins, J. L., Optimal estimation of dynamic systems. CRC

press, 2011.

9) Titterton, D. H. and Weston, J. L. Strapdown inertial navigation technology, Peter Peregrinus Ltd., 1997.

10) Britting, K. R., Inertial Navigation Systems Analysis, Wiley & Sons, 1971.