무인로봇 정밀위치추정을 위한 전술통신 및 영상 기반의 통합항법 성능 분석

The Performance Analysis of Integrated Navigation System Based
on the Tactical Communication and VISION for the Accurate Localization
of Unmanned Robot

최 지 훈* 박 용 운* 송 재 복** 권 인 소***
Ji Hoon Choi Yong Woon Park Jae Bok Song In So Kweon

Abstract

This paper presents a navigation system based on the tactical communication and vision system in outdoor environments which is applied to unmanned robot for perimeter surveillance operations. GPS errors of robot are compensated by the reference station of C2(command and control) vehicle and WiBro(Wireless Broadband) is used for the communication between two systems. In the outdoor environments, GPS signals can be easily blocked due to trees and buildings. In this environments, however, vision system is very efficient because there are many features. With the feature MAP around the operation environments, the robot can estimate the position by the image matching and pose estimation. In the navigation system, thus, operation modes is switched by navigation manager according to some environment conditions. The experimental results show that the unmanned robot can estimate the position very accurately in outdoor environment.

Keywords : Image Matching(영상매칭), Localization(위치추정), Reference Station(기준국), VISION(영상)

1. 서 론

무인 지상로봇이 자율주행 또는 다양한 임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 로봇의 현재 위치가 정

확하게 추정되어야 한다.

야외환경에서 위치추정을 위해 일반적으로 사용되는 GPS는 DOP(Dilution Of Precision : 정밀도 저하율)에 상관되어 위치보정확도가 크게 변화한다^[1]. 따라서 로봇의 정확한 위치추정을 위해서는 해안기지국/내륙기지국에서 위치보정데이터를 생성하고, 이를 라디오전파에 실어 이동국수신기로 DGPS 측위를 할 수 있도록 하는 위치보정서비스시스템이나 약 36,000km 상공에 있는 정지위성을 통해 중계방송 함으로써 가청범위 내에서 이동국수신기 1대만으로 DGPS 측위를

† 2010년 9월 20일 접수~2011년 2월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 고려대학교(Korea University)

*** 한국과학기술원(KAIST)

책임저자 : 최지훈(ji_hoon_choi@add.re.kr)

할 수 있도록 하는 위치보정시스템이 이용된다^[2]. 그러나 이러한 시스템을 사용하기 위해서는 DGPS 측위를 할 수 있는 정밀항법장치^[3]를 모든 무인로봇에 장착해야하므로, 향후 지상무인전투체계 운용 시에 큰 부담으로 작용하게 된다. 따라서 저가형 GPS를 사용하여 정밀한 위치를 추정할 수 있는 기술이 요구된다. 본 연구에서는 전술통신이 가능한 지역 내에서 저가형 GPS를 장착한 무인로봇의 정밀한 위치정보를 얻을 수 있도록 하는 LDGPS 기술을 개발하였다. 지휘통제차량에 기준국 GPS를 설치하고 정확한 위치를 알고 있는 지점에서 항법오차를 계산한 후 항법보정 메시지를 실시간으로 WiBro 통신을 통해 전파시킨다. 무인로봇에 장착된 GPS 수신기는 가시위성을 이용하여 계산된 오차가 포함된 항법 해와 항법보정 메시지를 이용하여 매우 정밀한 위치를 추정할 수 있다.

또한, 야외환경에서 GPS신호는 나무, 건물 주변에서 쉽게 단절된다. 하지만, 나무 및 건물 등은 많은 특징 점을 포함하고 있으므로, 카메라에 입력되는 영상과 데이터베이스 영상과의 영상매칭을 통해 로봇의 위치를 정확하게 추정할 수 있으므로 영상항법을 개발하여 무인로봇 통합항법에 적용하였다. GPS와 영상항법은 운용환경에 따라 성능이 크게 변화하므로, 통합항법은 운용모드에 따라 GPS와 영상항법을 선택적으로 운용되도록 설계하였다. 개발된 통합항법 성능은 다양한 시험을 통해 입증되었다. 제2장은 LDGPS(Local DGPS) 설계를 기술하고, 제3장에서는 통합항법을 기술하였고, 제4장에서는 항법성능 시험결과를, 제5장에서는 결론을 기술하였다.

2. LDGPS 설계

가. LDGPS 개념

본 연구에서 설계된 LDGPS 개념도는 Fig. 1과 같다. 기준국 GPS는 지휘통제차량에 설치되고 정확하게 알고 있는 위치정보와 위성에서 추정된 위치와의 차이를 계산한 후 WiBro 통신을 이용하여 항법보정 메시지를 실시간으로 전파시킨다. WiBro 통신영역 내의 무인로봇에 장착된 GPS 수신기는 가시위성을 이용하여 계산된 오차가 포함된 항법 해와 항법보정 메시지를 이용하여 매우 정밀한 위치를 추정할 수 있다.

Fig. 1. LDGPS 개념

나. DGPS 알고리즘

기준국과 항체 수신기에서 t 시간의 k 번째 GPS 위성에 대하여 측정한 의사거리는 일반적으로 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{rov}^k(t) = r_{rov}^k(t, t-\tau) + c[\delta t_{rov}(t) - \delta t^k(t-\tau)] + I^k(t) + T^k(t) + \epsilon_{rov}^k(t) \quad (1)$$

$$\rho_{ref}^k(t) = r_{ref}^k(t, t-\tau) + c[\delta t_{ref}(t) - \delta t^k(t-\tau)] + I^k(t) + T^k(t) + \epsilon_{ref}^k(t) \quad (2)$$

여기서 아래 첨자 rov 는 항체, ref 는 기준국, $\rho^k(t)$ 는 k 번째 위성과 기준국 및 항체 수신기에서 측정한 의사거리, $r^k(t, t-\tau)$ 는 k 번째 위성과의 기준국 및 항체 간 실제 거리, $c\delta t_{rov}(t)$ 또는 $c\delta t_{ref}(t)$ 는 기준국과 항체 수신기의 클럭 바이어스 오차, $c\delta t^k(t-\tau)$ 는 k 번째 위성 시계 오차, $I^k(t)$ 는 이온층 지연오차, $T^k(t)$ 는 대류층 지연 오차, $\epsilon^k(t)$ 는 다중경로 오차와 수신기 열잡음 오차를 나타낸다. 여기서 $c\delta t^k(t-\tau)$, $I^k(t)$, $T^k(t)$ 는 기준국 수신기와 항체 수신기의 공통 오차로서 기준국의 위치를 이미 알고 있으므로 위성으로부터 측정된 의사거리 측정치로부터 공통 오차를 추정할 수 있다. 기준국에서 추정한 공통 오차를 항체 수신기로 전송하면 항체에서는 보정된 의사 거리를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{rov}^k(t) = r_{rov}^k(t, t-\tau) + c\delta t_{rov}(t) + \epsilon_{rov}^k(t) \quad (3)$$

식 (3)에서 보듯이 항체 수신기에서 측정한 의사거리 중 공통 오차 성분인 위성 시계 오차, 궤도 오차, 이온층 및 대류층 지연 오차가 제거되어 보다 정확한 항법 해를 구할 수 있다.

Fig. 2. DGPS 원리

3. 통합항법 설계

무인로봇 통합항법은 INS, GPS 및 영상항법을 Windows 기반의 상용 PC에서 운용 가능한 통합항법 S/W로 개발되었으며, 구성도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. 통합항법 구조

가. INS 오차모델 및 필터 설계

IMU 센서는 3축의 가속도계와 자이로로 구성되어 있다. 센서로부터 출력되는 값을 적분하여 로봇의 위치, 속도, 자세 등이 계산된다. 관성항법과 보정항법(GPS, 영상항법)을 융합하는 통합필터의 적용은 INS의 수학적 모델을 요구한다. 본 논문에서는 장시간의 항법수행 시 널리 사용하는 Psi(ψ) angle 모델이 적용되었다. NED(North-East-Down) 좌표계에서 위치, 속도, 자세 오차방정식은 다음과 같이 쓰일 수 있다.

$$\delta \dot{L}^n = -\omega_{en}^n \delta L^n + \delta V^n \quad (4)$$

$$\delta \dot{V}^n = C_b^m \delta f^b + f^n \times \delta \psi^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n + \Omega_s \delta L^n$$

$$\delta \dot{\psi}^n = -(\omega_{in}^n \times \delta \psi^n) - C_b^m \delta \omega_{ib}^b$$

여기서 δL^n , δV^n , $\delta \psi^n$ 은 위치오차, 속도오차, 자세오차이며, f^n 은 가속도 벡터, δf^b 는 가속도계 바이어스 오차벡터, $\delta \omega_{ib}^b$ 는 자이로 바이어스 오차벡터, C_b^m 은 동체좌표계에서 항법좌표계로의 좌표 변환 행렬, ω_{ie}^n 는 earth rate, ω_{en}^n 은 craft rate, ω_{in}^n 은 관성좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도이다.

식 (4)를 State space equation으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{nav} \\ \dot{x}_{IMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{nav} \\ x_{IMU} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{nav} \\ w_{IMU} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 x_{nav} , x_{IMU} , F_{11} 및 F_{12} 는 다음과 같다.

$$x_{nav} = [\delta L_N \ \delta L_E \ \delta L_D \ \delta v_N \ \delta v_E \ \delta v_D \ \delta \psi_N \ \delta \psi_E \ \delta \psi_D]^T \quad (6)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{v_E \tan L}{R_t + h} & \frac{v_N}{R_m + h} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_E \tan L}{R_t + h} & 0 & \frac{v_E}{R_t + h} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_N}{R_m + h} & -\frac{v_E}{R_t + h} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{g_n}{R_m + h} & 0 & 0 & 0 & -2\Omega \sin L - \frac{v_E \tan L}{R_t + h} & \frac{v_N}{R_m + h} & 0 & -f_D & f_E \\ 0 & \frac{g_n}{R_t + h} & 0 & 2\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_t + h} & 0 & 2\Omega \cos L + \frac{v_E}{R_t + h} & f_D & 0 & -f_N \\ 0 & 0 & \frac{2g_n}{R_t + h} & -\frac{v_N}{R_m + h} & -2\Omega \cos L - \frac{v_E}{R_t + h} & 0 & -f_E & f_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega \sin L - \frac{v_E \tan L}{R_t + h} & \frac{v_N}{R_m + h} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_t + h} & 0 & \Omega \cos L + \frac{v_E}{R_t + h} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{v_N}{R_m + h} & -\Omega \cos L - \frac{v_E}{R_t + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$x_{IMU} = [\delta f_x \ \delta f_y \ \delta f_z \ \delta \omega_x \ \delta \omega_y \ \delta \omega_z]^T \quad (8)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -C_b^n \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 C_b^n 은 동체 좌표계에 대한 항법 좌표계의 좌표 변환 행렬이다.

필터의 측정방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$z_i(k) = H_i(k)x(k) + v_i(k) \quad (10)$$

여기서 $z_i(k)$ 는 i 번째 측정치이고, $H_i(k)$ 는 측정치와 상태변수를 연결하는 측정치 행렬이며, $v_i(k)$ 는 측정치 노이즈 벡터이다.

무인로봇 통합항법은 GPS와 영상항법을 운용모드에 따라 측정치로 사용하므로 측정방정식을 아래와 같이 각각 모델링 하였다.

첫 번째 측정방정식 설계에서, z_1 은 NED 좌표계에서 GPS와 INS의 위치와 속도의 차이므로 다음과 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned} z_1(k) &= H_1(k)x(k) + v_1(k) \\ z_1 &= [\delta L_N \ \delta L_E \ \delta L_D \ \delta V_N \ \delta V_E \ \delta V_D] \\ H_1 &= [I_{6 \times 6} \ 0_{6 \times 9}] \end{aligned} \quad (11)$$

두 번째 측정방정식 설계에서, z_2 은 NED 좌표계에서 영상항법과 INS의 위치의 차이므로 다음과 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned} z_2(k) &= H_2(k)x(k) + v_2(k) \\ z_2 &= [\delta L_N \ \delta L_E \ \delta L_D] \\ H_2 &= [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 12}] \end{aligned} \quad (12)$$

필터는 선형 칼만 필터를 사용하게 모델링하였으며 아래와 같다.

Time Update(Prediction) :

$$\widehat{x}_{k|k-1} = \Phi_k \widehat{x}_{k-1|k-1} \quad (13)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1|k-1} [\Phi_{k|k-1}]^T + Q_{k-1} \quad (14)$$

Measurement Update(Correction) :

$$W_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (15)$$

$$\widehat{x}_{k|k} = \widehat{x}_{k|k-1} + W_k [z_k - H_k \widehat{x}_{k|k-1}] \quad (16)$$

$$P_{k|k} = [I - W_k H_k] P_{k|k-1} \quad (17)$$

여기서, P는 공분산행렬, W는 칼만 게인, Q는 시스템 오차공분산, R은 측정치 오차공분산, Φ 는 시스템 행렬, $k|k$ 는 현재 시간에서의 필터 추정치, $k|k-1$ 는 미래시간의 필터추정치이다.

또한, 항법시스템의 안정성을 위해 FDI(Fault Detection and Isolation) 알고리즘으로 Chi-squared test를 아래와 같이 설계하였다.

$$\zeta_k = \sum_{i=k-N+1}^K v_i^T S_k^{-1} v_i \sim \chi_{Np}^2 \quad (18)$$

여기서, ζ_k 는 Chi-squared 분포를 가지는 통계치, v_k 는 residual, S_k 는 residual분산을 의미한다. 본 논문에서는 95% confidence level이 적용되었다.

나. 영상항법 설계

영상항법 알고리즘은 카메라에 입력되는 영상과 데이터베이스 영상간의 영상매칭을 통해 로봇의 현재 위치를 추정하는 알고리즘이다. Fig. 4는 영상항법 알고리즘 구조를 보여준다.

Fig. 4. 영상 위치추정 알고리즘 구조

영상항법은 먼저 로봇이 운용되는 영역에 대해 사전주행을 통해 영상 및 각 영상에 해당되는 위치정보

를 획득하고 이를 데이터베이스로 구축한다. 다음으로, 로봇이 실제로 감시정찰 등의 운용을 하면서 실시간으로 입력되는 영상과 데이터베이스 영상과의 영상 매칭을 통해 로봇의 위치를 추정하게 된다. 로봇의 실시간 위치추정을 위해서는 2단계가 수행된다. 첫 번째로 현재 영상과 가장 유사한 DB(Data Base)영상을 검색하고 두 번째는 현재 영상과 DB에서 검색된 영상들과의 상대위치를 통해 로봇의 위치를 보다 정확하게 추정하는 것이다.

비교할 영상이 연속된 영상 시퀀스의 두영상처럼 작다면 SAD(Sum of Absolute Difference), NCC(Normalized Cross Correlation) 등의 윈도우 기반 매칭방법으로도 충분하지만, 이 방법은 영상이 스케일변화, 회전 등이 있을 때 매칭이 잘 안 되는 단점이 있다. 따라서 영상매칭에는 스케일, 회전 등에 불변인 특징 점들을 추출해서 특징 점들의 기술자(Descriptor)를 비교하는 방법이 주로 이용된다. 본 논문에서는 최근에 제안된 불변 특징 량으로 SURF(Speeded Up Robust Feature)^[4]를 사용하였다. SURF는 SIFT(Scale Invariant Feature Transform)와 같이 DoG(Difference of Gaussian)를 이용하는 것이 아닌 Laplacian의 계산을 정수로 양자화 하여 box filtering을 적용하는 것이다. Fig. 5는 이를 보여준다.

Fig. 5. 가우시안의 2차 미분 커널과 이를 단순화시킨 커널의 예 y방향(상), xy방향(하)

영상검색은 데이터베이스 영상들 중 현재 입력받은 영상과 가장 비슷한 것을 찾는 과정이다. 두 장의 영상 사이의 상대적인 위치관계를 계산할 때 서로 공통된 부분이 있어야 하기 때문에 영상검색은 본 알고리즘의 가장 중요한 부분이다. 본 논문에서는 데이터베이스 트리구조를 만드는 과정은 오래 걸리지만, 실제로 영상을 검색할 때의 속도는 매우 빠른 vocabulary

tree^[5]구조를 사용하였다. 트리구조를 구성하는 방법은 다음과 같다. 우선 모든 데이터베이스 영상으로부터 특징 점(SURF)을 추출한다. 그 다음 특징 점의 기술자(Descriptor) 전체를 Fig. 6과 같이 k-means clustering 방법을 사용하여 분류한다. 중요한 점은 k를 적당한 작은 값으로 설정하여 분류한 다음, 각각의 분류된 결과를 다시 k-means clustering 방법을 적용하여 다시 분류하는 것이다. 이러한 과정을 몇 단계 반복하여 트리구조를 만든다. 트리구조에서 각각의 node에 해당하는 데이터는 cluster의 중심에 해당하는 값, 즉 cluster에 속하는 모든 데이터의 평균값으로 설정한다. Fig. 7은 vocabulary tree를 구성하는 예를 보여준다. 검색된 영상과 앞뒤 데이터베이스 영상을 이용하여 현재 입력된 영상의 상대적인 위치를 추정하여 현재 로봇의 위치를 추정하게 된다.

Fig. 6. k-means clustering

Fig. 7. Vocabulary tree를 형성하는 과정

추정된 위치를 다시 정제(Refinement)하기 위해 영상 매칭을 통해 검색된 데이터베이스 영상 및 앞뒤 2영상과 입력영상의 특징 점 매칭을 Harris corner와 NCC를 통해 수행된다. 특징 점 매칭 후, 3D 점들을 데이터베이스 영상으로부터 식 (19)를 이용하여 계산한다. 스테레오 카메라의 왼쪽 카메라 좌표계를 기준으로 오른쪽 카메라의 투영 행렬(Projection Matrix)을 $[r \ t]$, 데이터베이스 영상 상에서의 점의 좌표를 q_L, q_R 이라

하면 점의 3차원 좌표 Q 는 아래와 같이 $Ax = 0$ 의 형태로 만든 다음 SVD(Singular Value Decomposition)을 이용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -q_{LX} & 0 \\ 0 & 1 & -q_{LY} & 0 \\ r_{11} - r_{31}q_{RX} & r_{12} - r_{32}q_{RX} & r_{13} - r_{33}q_{RX} & t_1 - t_3q_{RX} \\ r_{21} - r_{31}q_{RY} & r_{22} - r_{32}q_{RY} & r_{23} - r_{33}q_{RY} & t_2 - t_3q_{RY} \end{bmatrix} \tilde{Q} = 0 \quad (19)$$

여기서, r_{ij} 는 r 의 (i,j) 번째 항, t_i 는 t 의 i 번째 항이며, $q_L = [q_{LX} \ q_{LY}]^T$, $q_R = [q_{RX} \ q_{RY}]^T$ 이고, $\tilde{Q} = [Q \ 1]^T$ 이다.

이 3D 점들이 입력 영상에 투영된 좌표를 이용하여 입력영상의 상대위치를 P3P(Perspective 3-point Algorithm)^[6]을 사용하여 계산한다. P3P 알고리즘은 Fig. 8에서 3개의 점 사이의 거리 a , b , c , 그리고 이 점들이 투영된 위치를 이용하여 계산한 카메라 광선(Camera Ray) 사이의 각도 α , β , γ 를 알고 있을 때, 카메라 좌표계의 중심으로부터 각 점들까지의 거리 s_1 , s_2 , s_3 을 구하는 알고리즘이다.

Fig. 8. P3P 알고리즘

다. 통합항법 설계

본 논문에서 제안된 알고리즘은 LDGPS, INS, 및 영상항법을 운용모드에 따라 융합하여 현재 위치를 추정하는 통합항법 알고리즘으로 Fig. 9와 같다. INS는 주 항법시스템이고, LDGPS와 영상항법은 INS의 오차를 보정해주는 보정항법이다.

일반적으로 GPS 수신이 양호한 야외환경에서는 주변에 특징정보가 없어 영상항법의 위치추정이 부정확하게 되지만, 나무나 건물 등으로 GPS 수신에 불량한 경우에는 특징정보가 많아 영상항법 위치추정이 정확하게 된다. 따라서 야외환경 조건에 따라 통합항법을 운용하는 매니저 설계를 구현하였다. 매니저에 의한 통합항법 운용모드는 다음과 같다.

Fig. 9. 통합항법 알고리즘

If LDGPS가 stable, INS/LDGPS 융합(Mode 1)
Else

If HDOP < 3, INS/GPS 융합(Mode 1)

Else INS/VISION 융합(Mode 2)

4. 시험결과

가. LDGPS 성능분석(Post-processing)

LDGPS 성능분석은 무인로봇을 이용한 실제 성능시험 전 상용 무소차량을 개조한 월드모델 시뮬레이터를 활용하여 획득된 데이터를 후처리(Post-processing) 방식으로 확인하였다. LDGPS 성능을 비교하기 위해 상용으로 사용되는 항법센서인 NovAtel iMAR SPAN (L1/L2), 및 Navcom Starfire receiver(L1/L2)로 시험장치를 Fig. 10과 같이 구성하였다.

(a) Data 로깅

(b) Navcom 수신기

(c) iMAR SPAN

(d) 월드모델시뮬레이터

Fig. 10. 시험장치 구성

성능시험은 대덕 테크노밸리 인근에서 수행 했으며 실험차량의 이동경로는 Fig. 11과 같다.

Fig. 11. 시험 경로

LDGPS 성능은 월드모델 시뮬레이터에서 획득된 GPS 데이터와 기준국에서 수신된 GPS 데이터를 이용하여 후처리로 분석되었으며 항법센서들의 성능은 CDGPS(L1/L2, Carrier)를 기준 값으로 하여 분석이 되었다.

Fig. 12는 시험간 항법센서들에서 추정된 이동궤적이며, Fig. 13은 Fig. 12의 이동궤적을 CDGPS를 기준으로 계산한 오차를 나타낸다.

Fig. 12. 각센서에서 추정된 경로

Fig. 13. CDGPS대비 항법오차

Fig. 13의 항법센서들에서 추정된 오차의 RMS(Root Mean Square), 최대값 및 최소값은 Table 1과 같다.

Table 1. Off-track difference (unit: m)

Senor	RMS	Maximum	Minimum
Starfire	0.414	1.473	0.041
LDGPS	0.418	2.254	0.002
iMAR SPAN	1.368	5.249	0.513
CDGPS/INS	0.337	4.912	0.000

시험결과로부터, LDGPS의 위치정확도는 RMS 0.418 m이었으며, 이는 고정밀 항법장치인 Navcom Starfire와 유사한 성능을 보임을 확인하였다. 또한, iMAR SPAN 장비는 L1/L2 GPS 수신기를 사용하므로 바이어스 등에 의해 오차가 순간적으로 JUMP하며 결과적으로 LDGPS 대비 성능이 크게 떨어짐을 알 수 있다.

Table 1에서 CDGPS/INS 오차 최대값이 4.912m로 크게 계산되었다. 이는 Fig. 14(a), (b)에서 보이는 것 같이 시험 간 GPS신호가 일정시간 단절된 후 정상적으로 수신되었지만 CDGPS/INS 후처리과정에서 필터가 통합항법을 30초 동안 수행하지 못하고 순수항법을 수행하여 Fig. 14(c)에서와 같이 이동궤적이 벗어났기 때문이다. 하지만, CDGPS/INS가 통합항법을 정상적으로 수행한 경우에는 오차가 매우 작음을 알 수 있다.

(a)

(b)

(c)

Fig. 14. CDGPS/INS 오차증가 분석 : (a) GPS신호 단절구간, (b) Off-track differences w.r.t. CDGPS, and (c) 순수항법 궤적

나. 통합항법 시험결과(Real-time)

무인로봇 통합항법 시스템은 Fig. 15에서와 같이 기준국인 C2차량과 이동국인 무인로봇으로 구성되며, 통합항법 성능시험은 야외환경에서 실시간으로 수행되었다.

Fig. 15. 통합항법 시스템 구성

1) LDGPS 시험

LDGPS 성능은 GPS 수신이 양호한 Fig. 16의 야외환경에서 수행하였다. 시험간 GPS 및 LDGPS에서 추정된 이동궤적은 Fig. 17에서 보여준다. Fig. 17에서 알 수 있듯이, GPS에 의한 이동궤적은 바이어스 오차 등에 의해 CDGPS 대비 차이가 있지만, LDGPS에 의한 이동궤적은 CDGPS와 유사하였다.

Fig. 16. LDGPS 시험환경

Fig. 17. CDGPS대비 시험궤적 비교

Fig. 18은 CDGPS대비 각각의 오차를 나타낸다. 시험간, 가시위성 개수는 8이었고 HDOP(Horizontal Dilution of Precision, 수평 정밀도 저하율)은 2.2였다. GPS, LDGPS의 RMS값은 각각 2.204m, 0.427m이었다. 시험결과를 통해, GPS는 바이어스 등에 의해 오차변화가 크게 발생하지만, LDGPS의 경우에는 기준국 GPS에 의해 무인로봇 GPS의 바이어스가 보정되므로 오차 변화가 크게 발생하지 않았다. 결과적으로, LDGPS를 적용함으로써 일반 GPS를 장착한 무인로봇의 위치정확도를 C2차량의 전술통신이 가능한 영역에서 1m 이하로 정확하세 추정하는 것이 가능하였다.

Fig. 18. CDGPS 대비 항법오차

2) VISION/INS 통합항법 시험

야외환경에서 영상매칭성능은 조명변화 및 특징정보 등에 따라 매우 달라진다. GPS가 정상적으로 작동하는 야외환경에서는 조명변화가 크고 특징정보가 작아 영상매칭성능이 저하되는 반면에 GPS가 비정상적인 환경에서는 조명변화가 작고 많은 특징정보를 가지고 있다. 무인로봇 통합항법은 이러한 환경변화에 적응적인 운용모드를 가지고 운용되므로 VISION/INS는 GPS가 비정상적인 영역에서만 작동되게 된다. 따라서 VISION/INS 시험은 Fig. 19와 같이 특징점이 많은 환경에서 하늘에 구름이 끼어 햇빛의 영향이 적은 조건에서 수행되었다.

Fig. 19. VISION/INS 시험환경

시험은 먼저 Fig. 20과 같이 LDGPS/INS를 이용하여 기준 궤적을 설정하고 궤적을 따라 영상 데이터베이스를 만든 다음, 로봇이 실제 주행하면서 위치추정을 수행하였다. 시험결과는 Fig. 21과 같다. 영상항법은 영상 매칭정확도에 따라 성능이 크게 변화하여 RMS 1.29m, 최대오차 3.19m를 보였으며, VISION/INS는 RMS 0.97m, 최대오차 1.94m를 보였다. VISION/INS 시험을 통해 GPS가 사용이 불가능한 지역에서는 주변의 특징정보를 이용한 영상매칭을 통해 로봇의 현재 위치를 추정하는 영상항법이 매우 효과적임이 확인되었다. 즉, GPS수신이 불가능한 지역은 일반적으로 나무나 건물 등의 주변으로 조명변화가 크지 않아 영상매칭이 양호하므로 영상항법은 통합항법시스템에서 GPS가 불가능한 경우에 효과적으로 사용할 수 있다.

Fig. 20. VISION/INS 시험의 기준궤적

Fig. 21. VISION/INS 통합항법 시험결과

3) Mode transition 시험

무인로봇 통합항법은 외부환경에 따라 적응적인 운용모드에 따라 운용되므로 본 실험에서는 모드전이 성능을 확인하기 위해 기준 궤적의 중간부근에서 GPS 신호를 강제적으로 단절시켰다. 따라서 통합항법은 궤적의 첫 번째 반 구간에서는 LDGPS/INS 통합항법으로

로, 두 번째 반 구간은 VISION/INS 통합항법으로 위치추정을 하였다.

시험결과는 Fig. 22와 같다. LDGPS/INS 통합항법에 의한 RMS 값은 0.563m이었으며 VISION/INS 통합항법에 의한 RMS 값은 0.982m을 보였다. 물론 영상항법 성능은 주변 환경 조건에 따라 크게 달라지므로 환경조건에 따른 영상항법성능 분석이 향후에는 필요하다. 하지만, 본 논문에서 제안하는 통합항법은 운용모드에 따라 운용되므로 영상항법은 GPS가 사용가능하지 않은 나무나 건물 주변에서 주로 이용되므로 영상항법 성능이 양호하여 본 시험 결과와 유사할 것으로 판단된다.

Fig. 22. Mode 전이 시험.

5. 결론

본 논문은 야외환경에서 무인로봇의 위치를 안정적이고 강건하게 추정하기 위해 LDGPS, 영상항법, INS를 이용하여 야외환경에 따라 LDGPS와 영상항법을 선택적으로 운용하는 통합항법 알고리즘을 제안한다. 개발된 알고리즘의 성능은 시험을 통해 확인되었으며 본 연구로부터, 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- 지휘통제차량을 기준국으로 활용하여 LDGPS를 구현함으로써, 무인로봇에 저가형 GPS를 장착하고 1m 이하의 정확한 위치추정이 가능하였다.
- 야외환경에서는 GPS신호가 나무나 건물 주변에서 쉽게 단절되므로 주변의 특징 점을 이용한 영상매칭에 의해 로봇의 위치를 추정하는 영상항법은 야외환경에서 무인로봇의 위치추정을 강건하게 할 수 있다.
- 야외환경에서 무인로봇 위치추정의 경우, GPS는 탁

트인 공간에서, 영상항법은 건물이나 나무 등의 특징점이 많은 GPS가 수신불량인 곳에서 위치를 정확하게 추정할 수 있으므로 환경변화에 적응적인 항법 운용모드는 통합항법 성능을 향상시킬 수 있다.

결론적으로 개발된 통합항법 시스템은 하나의 지휘 통제차량(기준국 GPS)을 이용하여 다중의 무인로봇(이동국 GPS) 위치를 GPS 및 영상항법을 이용하여 정확하게 추정 가능하므로, 향후 지상무인전투체계 연구개발에 크게 기여할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 통합항법 알고리즘을 보다 정확하고 강인하게 하기 위해서는 향후에 비동기 시간 지연 항법데이터간의 융합 알고리즘 및 조명에 따른 통합항법 성능 분석 등이 필요하다.

Reference

- [1] M. Kihara, "Study of a GPS Satellite Selection Policy to Improve Positioning Accuracy", Proc. IEEE Position Location Navigation Symp., PLANS'94, Las Vegas, NV, USA, pp. 267~273, Apr., 1994.
- [2] Yi Bian, "Modeling and Simulation of WADGPS Systems", OCEANS '96. MTS/IEEE. 'Prospects for the 21st Century', Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 188~195, 1996.
- [3] Y. Morales, T. Tsubouchi, "DGPS, RTK-GPS and Starfire DGPS Performance Under Tree Shading Environments", Integration Technology, ICIT '07. IEEE International Conference, Mar. pp. 519~524, 2007.
- [4] Herbert Bay, Andreas Ess, and Tinne Tuytelaars, "SURF : Speeded Up Robust Features", Computer Vision and Image Understanding(CVIU), Vol. 110, No. 3, pp. 346~359, 2008.
- [5] D. Nister, H. Stewenius, "Scalable Recognition with a Vocabulary Tree", Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 2161~2168, 2006.
- [6] R. M. Haralick, D. Lee, K. Ottenburg, and M. Nolle, "Analysis and Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem", International Journal of Computer Vision, Vol. 13, No. 3, pp. 331~356, Dec. 1994.