

다중센서 융합기반 소형로봇 자율복귀에 대한 연구

Multi-sensor Fusion based Autonomous Return of SUGV

최지훈* 강신천* 김준* 심성대* 지태영* 송재복**
 JiHoon Choi SinCheon Kang Jun Kim SungDae Shim TaeYong Jee Jae-Bok Song

Abstract

Unmanned ground vehicles may be operated by remote control unit through the wireless communication or autonomously. However, the autonomous technology is still challenging and not perfectly developed. For some reason or other, the wireless communication is not always available. If wireless communication is abruptly disconnected, the UGV will be nothing but a lump of junk. What was worse, the UGV can be captured by enemy. This paper suggests a method, autonomous return technology with which the UGV can autonomously go back to a safer position along the reverse path. The suggested autonomous return technology for UGV is based on multi-correlated information based DB creation and matching. While SUGV moves by remote-control, the multi-correlated information based DB is created with the multi-sensor information; the absolute position of the trajectory is stored in DB if GPS is available and the hybrid MAP based on the fusion of VISION and LADAR is stored with the corresponding relative position if GPS is unavailable. In multi-correlated information based autonomous return, SUGV returns autonomously based on DB; SUGV returns along the trajectory based on GPS-based absolute position if GPS is available. Otherwise, the current position of SUGV is first estimated by the relative position using multi-sensor fusion followed by the matching between the query and DB. Then, the return path is created in MAP and SUGV returns automatically based on the MAP. Experimental results on the pre-built trajectory show the possibility of the successful autonomous return.

Keywords : Autonomous Return(자율복귀), Multi-sensor Fusion(다중센서 융합), SUGV(소형로봇)

1. 서론

무인 차량 및 로봇은 원격으로 운용되거나, 또는 자

율적으로 운용이 될 수 있다. 하지만 다양하고 열악한 환경에서 로봇이 완전히 자율적으로 운용되기에는 아직까지 기술의 어려움이 있으며 신뢰성 확보가 또한 필요하다. 또한, 센서 및 고성능 프로세서 탑재에 많은 어려움이 있고 상대적으로 운용지역이 넓지 않은 소형로봇은 무선통신을 통하여 원격제어로만 운용되고 있는 실정이다. 이럴 경우, 무선통신이 어떠한 이유에서든 두절되면 로봇은 무용지물이 되며, 심지어

† 2012년 2월 20일 접수~2012년 4월 20일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 고려대학교(Korea University)

책임저자 : 송재복(jbsong@korea.ac.kr)

포획될 수도 있다. 자율복귀 기술은 통신이 두절될 때나, 혹은 필요시 로봇이 자율적으로 주행한 경로를 역으로 보다 안전한 위치로 돌아가는데 필요한 기술이다. 이 소형로봇^[1] 자율복귀는 로봇을 원격으로 운용하면서 다중상관정보(항법정보, 영상정보, 거리정보, 등) 융합기반으로 긴급 복귀 시 기 주행경로를 이용하여 경로를 복귀하는 핵심알고리즘으로 원격제어기반 다중상관정보 DB(MAP) 구축 알고리즘과 구축된 다중상관지도 기반의 자율복귀 알고리즘으로 구성된다.

다중상관정보 DB 구축 알고리즘은 소형로봇을 운용자에 의해 원격으로 주행하면서 로봇에 장착된 소형/경량화 센서 정보를 이용하여 이동경로 환경조건에 따라 절대위치정보 또는 주변 환경 특징정보기반 상대위치를 포함하는 DB를 구축하는 알고리즘으로 GPS(Global Positioning System), IMU(Inertial Measurement Unit), Stereo camera, 2D LADAR, Optical sensor^[2], Magnetic compass 등을 사용하여 다중센서 정보를 융합한 Hybrid map 기반으로 DB를 생성한다.

다중상관정보 기반 자율복귀 알고리즘은 소형로봇 자율복귀 시에 센서에 입력되는 정보와 사전에 만들어진 DB와의 매칭을 통해 로봇의 위치를 추정하고 기 주행경로 복귀를 위한 경로(로봇의 진행방향)를 생성하는 알고리즘이다. GPS가 가용한 환경에서는 DB에 저장된 절대위치 기반으로 복귀경로를 생성하고 GPS가 불가능한 환경에서는 상대위치기반으로 로봇의 위치를 개략적으로 추정하고 입력 센서정보(영상, 거리)와 DB와의 매칭을 통해 DB상에서의 현재위치를 보다 정확하게 추정하여 DB기반으로 복귀경로를 생성한다.

제 2장은 자율복귀 알고리즘 구조를 기술하였고, 제 3장에서는 Hybrid MAP 생성 및 경로복귀를 기술하였으며, 제 4장에서는 위치추정 알고리즘을 기술하였고, 제 5장 및 6장은 자율복귀 시험 결과 및 결론을 기술하였다.

2. 자율복귀 알고리즘 구조

자율복귀 알고리즘은 주변 환경에 적응적인 자율복귀를 위해 Fig. 1과 같이 절대위치기반 자율복귀와 특징정보기반 자율복귀로 구분된다. GPS가 가용한 환경에서는 지상에 설치한 기준군 GPS를 이용하여 소형로봇 GPS오차를 보정해주는 LDGPS(Local DGPS)^[3]기반

으로 복귀경로를 생성하고 자율복귀를 수행하도록 하였다. GPS가 가용하지 않은 환경에서는 stereo camera와 2D LADAR 융합기반의 hybrid MAP과 다중센서 융합기반 상대위치를 이용하여 DB를 생성하였고, 자율복귀 시에는 센서 입력정보와 DB와의 매칭을 통해 로봇의 위치를 추정하여 DB상에서 자율복귀 경로를 생성하여 자율복귀를 하도록 하였다.

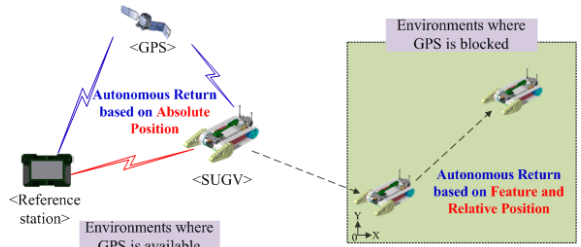


Fig. 1. Concept of autonomous return

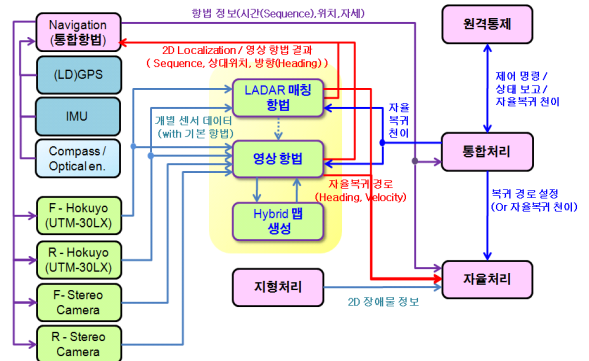


Fig. 2. Autonomous return algorithm

Fig. 2는 본 논문에서 제안된 자율복귀 알고리즘 구조를 보여주며, 다중상관정보를 이용한 Hybrid맵 생성 (Fig. 3)과 다중상관정보와 Hybrid맵과의 매칭을 통해 자율복귀를 수행하는 다중상관정보 기반의 자율복귀로 구분된다. 자율복귀를 위한 센서는 Stereo camera (Pointgrey, FLEA2), 2D LADAR(HOKUYO, UTM-30LX), Magnetic compass(Honewell, HMR3500), IMU(SDI500, 1°/hr Gyro Bias), GPS(NoVatel, OEMV-1), Optical encoder 등으로 구성된다. 소형로봇은 원격통제장치를 통해 원격주행을 수행하고 통합처리장치는 통합항법 및 영상항법 등의 다중상관정보를 통해 생성된 DB를 이용하여 복귀경로를 설정하고 자율처리장치는 복귀를 수행한다.

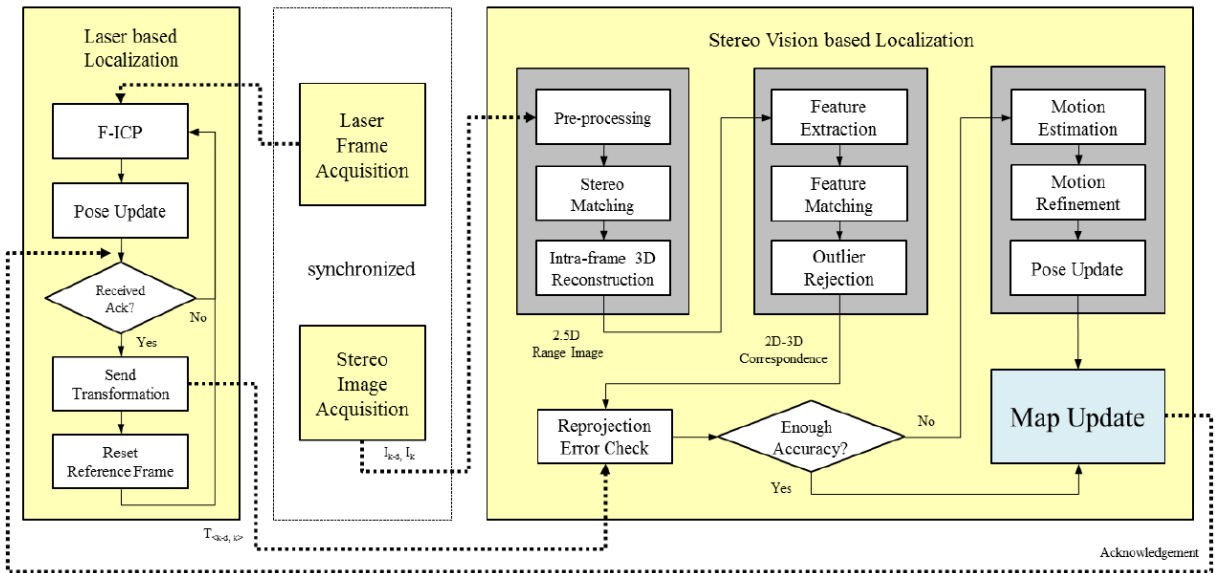


Fig. 3. Hybrid map generation based on the fusion of laser and stereo

3. Hybrid MAP 생성 및 경로복귀

가. Laser-Stereo 융합기반 형 Hybrid MAP 생성
GPS가 가용하지 않은 환경에서의 자율복귀를 위한 Hybrid MAP 생성은 Laser-stereo 융합기반 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 기법을 적용하였다. 적용된 기법은 Fig. 3과 같이 크게 레이저 센서의 거리 데이터 매칭 기반의 위치 인식과 영상 기반의 움직임 정합기법으로 구성되며, 2개의 스레드로 구현하였다. 더불어 동기화된 영상 및 레이저 센서의 획득을 위한 별도의 2개의 스레드를 두었다.

최초 로봇의 위치와 자세를 설정하고, 레이저 센서 데이터의 첫 프레임으로 설정하여 지속적으로 Fractional-ICP 알고리즘^[4]을 활용하여 프레임 간 매칭을 수행한다. 몇 프레임 간의 매칭을 수행한 후 메인 스레드는 레이저 데이터 처리 컴포넌트로 기준 프레임과 현재 프레임 사이의 누적된 위치변화를 요구하게 되고, 동시에 레이저 데이터 처리 컴포넌트는 현재 프레임을 기준 프레임으로 재설정하고 프레임 간 매칭을 재수행하도록 설정한다. 이와 동시에 stereo camera 데이터 처리 컴포넌트에서는 데이터 간 매칭 및 검증을 위한 데이터를 수신하고, 최종적인 변화량에 대한 정확도를 분석한다. 분석된 정확도가 기준 이상이면 맵 갱신 절차를 수행하나, 정확도가 기준 이하

로 분석되면 쌍안영상 기반의 움직임 추정 절차를 추가적으로 수행함으로써, 정확도를 높이기 위한 시도를 수행한 후 정확도를 재분석한다. 최종적인 정확도 분석 결과 레이저 기반의 위치 추정 결과가 영상 기반의 결과 보다 좋을 경우 레이저 기반의 위치 추정 결과를 활용하며, 그렇지 않을 경우, 영상 기반의 추정 결과를 활용하여 맵을 갱신하게 된다. 마지막으로 메인 스레드는 최종적인 위치 추정 결과를 레이저 부로 신호를 보내 매칭 과정을 리셋하여 최종적으로 Hybrid MAP을 생성한다.

나. MAP 매칭 기반 경로복귀

로봇이 맵 매칭 기반으로 경로복귀를 수행하는데 있어서, 실내 환경에서는 2차원의 평면 공간으로 생각할 수 있다. 로봇이 움직이는 공간이 평면이라고 하면, 2D LADAR의 ICP(Iterative Closest Point)^[5]를 활용하여 로봇의 위치 및 자세를 상대적으로 연산이 간단하면서도 정확하게 측정할 수 있다. ICP 알고리즘은 레이저 센서에서 획득한 점들간의 대응점간의 MSE(Mean Squared Error)를 최소화하여 2차원 공간의 위치(X,Y)와 회전(θ)을 구할 수 있다. ICP 알고리즘을 사용해서 소형로봇이 10 m를 이동 했을 경우의 위치오차와 360도 회전시의 회전오차는 Table 1과 같다. 이 결과는 반복 최근점의 최대 반복 회수를 50번으로 했을 때의

결과이며 이에 따른 알고리즘 수행속도는 프레임 (Frame) 당 평균 22 ms 였다.

Table 1. Laser-based localization performance

구 분	평 균	표준편차
위치오차(10 m)	-2.6 cm	4.4 cm
회전오차(360°)	-0.4°	0.3°
알고리즘 수행시간	22.0 ms (45 fps)	

2D LADAR 기반의 ICP는 레이저 간의 매칭을 통해서 위치 및 자세를 추정하게 되는데, 레이저의 형태가 Homogeneous한 공간에서는 매칭 정확도가 떨어지게 된다. 이를 보완하기 위해서 2D LADAR에 영상 정보를 추가하게 되면 자율경로복귀 성능의 향상을 기대할 수 있다.

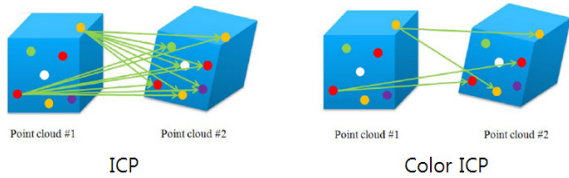


Fig. 4. Concept of ICP and Color ICP

먼저, 일반적인 2D LADAR ICP에 영상의 색상정보를 결합하여 정합오차를 줄이고 계산의 효율성을 높일 수 있도록 하기 위해 Fig. 4와 같이 Color ICP를 활용하였다.

Color ICP는 유사한 색상을 가지는 레이저 포인트끼리 매칭하므로 정확도 및 속도가 향상되는 효과를 볼 수 있다. 즉, 레이저가 Homogeneous한 영역에서도 색상정보가 다르면, ICP 매칭 정확도를 향상시킬 수 있다.

Color ICP를 통해서 ICP의 정확도를 높이더라도 기본적으로 ICP 알고리즘은 초기값에 따라서 수렴속도 및 성능에 영향을 받게 된다. 이 초기 값은 ICP가 잘 수행될 때에는 크게 문제 되지 않지만, ICP 매칭이 잘 이루어지지 않은 경우에는 보정이 필요하게 된다. ICP의 매칭확률을 계산하여 매칭확률이 일정수준 이하일 때는 Fig. 6에서 보듯이 영상에서 특징점과 Vocabulary Tree를 활용하여 영상의 키프레임 매칭을 수행하여, ICP의 초기값을 제공하여 ICP 매칭을 수렴할 수 있도

록 할 수 있다. 보정된 초기값을 가지고 Color ICP를 수행하여 로봇의 위치 및 자세를 측정할 수 있다. Fig. 5는 영상 키프레임 매칭의 결과를 2D LADAR Color ICP에 활용하는 경로복귀 알고리즘을 나타낸다.

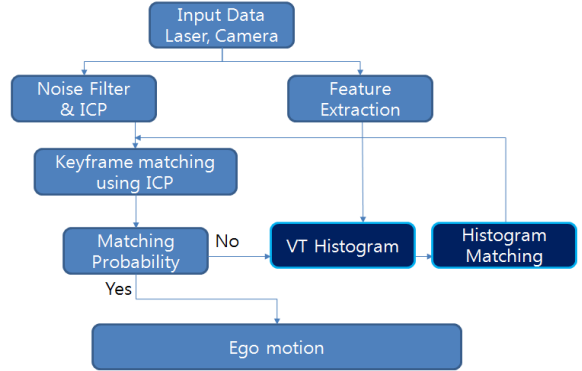


Fig. 5. Localization by the fusion of image matching and laser ICP algorithm

4. 위치추정 알고리즘

소형로봇 위치추정을 위한 통합항법 알고리즘은 Fig. 6과 같이 고장검출 및 시스템 통합 등이 원활한 NR (No Reset) mode 연합형 칼만필터^[5], 방식을 이용하여 indirect-feedback 방식으로 설계하였으며 부필터 융합은 navigation manager에 의해 결정되도록 하였다.

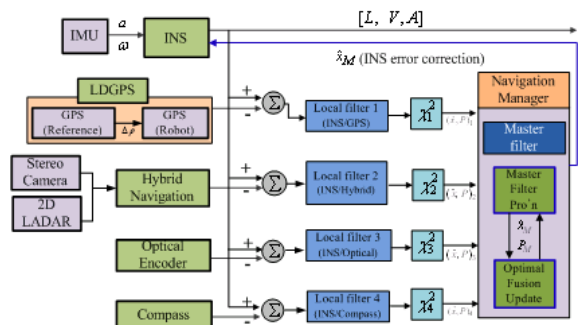


Fig. 6. Block diagram of integrated localization

IMU 센서는 3축의 가속도계와 자이로로 구성되며 센서 출력 값을 적분하여 로봇의 위치, 속도, 자세 등을 계산한다. 부필터 설계를 위한 INS의 오차방정식으로 본 논문에서는 식 (1)과 같이 Psi(ψ) angle 모델을

적용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta L}^n &= -\omega_{en}^n \delta L^n + \delta V^n & (1) \\ \dot{\delta V}^n &= C_b^n \delta f^b + f^n \times \delta \psi^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n + \Omega_s \delta L^n \\ \dot{\delta \psi}^n &= -(\omega_{in}^n \times \delta \psi^n) - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \end{aligned}$$

여기서, δL^n , δV^n , $\delta \psi^n$ 은 3축에 대한 위치오차, 속도오차, 자세오차이며, f^n 은 가속도 벡터, δf^b 는 가속도 오차벡터, $\delta \omega_{ib}^b$ 는 자이로 오차벡터, C_b^n 은 동체좌표계(b)에서 항법좌표계(n)로의 좌표변환행렬, ω_{ie}^b 는 earth rate, ω_{en}^n 은 craft rate, ω_{in}^n 은 관성좌표계에 대한 항법좌표계의 각속도이다.

부필터의 측정방정식은 일반적으로 식 (2)와 같다.

$$z_i(k) = H_i(k)x_i(k) + v_i(k) \quad (2)$$

여기서 $z_i(k)$ 는 i번째 부필터 측정치이고, $H_i(k)$ 는 측정치와 상태변수 $x_i(k)$ 를 연결하는 측정치행렬이며, $v_i(k)$ 는 측정치 노이즈 벡터이다.

첫 번째 부필터 입력인 z_1 은 NED(North-East-Down) 좌표계에서 LDGPS와 INS의 위치와 속도의 차이로 측정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_1(k) &= H_1(k)x_1(k) + v_1(k) \\ z_1 &= [\delta L_N \delta L_E \delta L_D \delta V_N \delta V_E \delta V_D]^T \\ x_1(k) &= [x_{nav} \quad x_{IMU}]^T \\ H_1 &= [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 9}] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x_{nav} &= [\delta L \quad \delta V \quad \delta \psi]_{1 \times 9} \\ x_{IMU} &= [\delta f \quad \delta \omega]_{1 \times 6} \end{aligned}$$

두 번째 부필터 입력인 z_2 는 NED좌표계에서 hybrid navigation기반 위치와 INS의 위치의 차이로 측정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_2(k) &= H_2(k)x_2(k) + v_2(k) \\ z_2 &= [\delta L_N \delta L_E \delta L_D]^T, \quad x_2(k) = x_1(k) \\ H_2 &= [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 12}] \end{aligned} \quad (4)$$

세 번째 부필터 입력인 z_3 는 NED 좌표계에서 optical sensor기반 위치와 INS의 위치의 차이로 측정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_3(k) &= H_3(k)x_3(k) + v_3(k) \\ z_3 &= [\delta L_N \delta L_E \delta L_D]^T, \quad x_3(k) = x_1(k) \\ H_3 &= [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 12}] \end{aligned} \quad (5)$$

네 번째 입력인 z_4 는 magnetic compass와 INS의 Heading 차이로 측정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_4(k) &= H_4(k)x_4(k) + v_4(k) \\ z_4 &= [\delta \psi] \\ x_4(k) &= [x_{nav} \quad x_{IMU} \quad \delta \psi_B]^T \\ H_4 &= [0_{1 \times 6} \quad -\tan \theta \cos \psi - \tan \theta \sin \psi \quad -1 \quad 0_{1 \times 7}] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\delta \psi_B$ 는 magnetic compass의 bias 오차이다. 본 논문에서는 부필터를 선형 칼만필터로 모델링 하였다.

마스터필터는 부필터에서 추정된 상태변수와 공분산을 준측정치로 사용하여 식 (7), (8)과 같이 융합하여 INS의 오차를 보정한다.

$$P_{M,k|k}^{-1} = \sum_{i=1}^4 P_{i,k|k}^{-1} \quad (7)$$

$$x_{M,k|k} = P_{M,k|k} \sum_{i=1}^4 [P_{i,k|k}^{-1} \hat{x}_{i,k|k}]^{-1} \quad (8)$$

여기서, M은 주필터를 의미한다. 본 논문에서는 주변환경에 적응적인 자율복귀를 위해 주필터에서 부필터를 선택적으로 융합하도록 Fig. 7과 같이 Navigation manager를 설계하였다. GPS가 가용한 경우에는 LDGPS기반으로 통합항법을 운용하여 절대위치기반으로 자율복귀를 수행하며, GPS가 사용 불가능한 경우에는 영상매칭 등의 다중센서 융합을 통해 상대위치를 추정하여 DB와의 매칭을 통해 자율복귀를 수행하도록 하였다.

또한, 항법시스템의 안정성을 위하여 식 (9)와 같이 Chi-squared(χ^2) test를 사용하였다.

$$\zeta_k = \sum_{i=k-N+1}^K v_i^T S_i^{-1} v_i : \chi_{Np}^2 \quad (9)$$

여기서, ζ_k 는 Chi-squared 분포를 가지는 통계치, v_i 는 residual, S_i 는 residual분산을 의미한다.

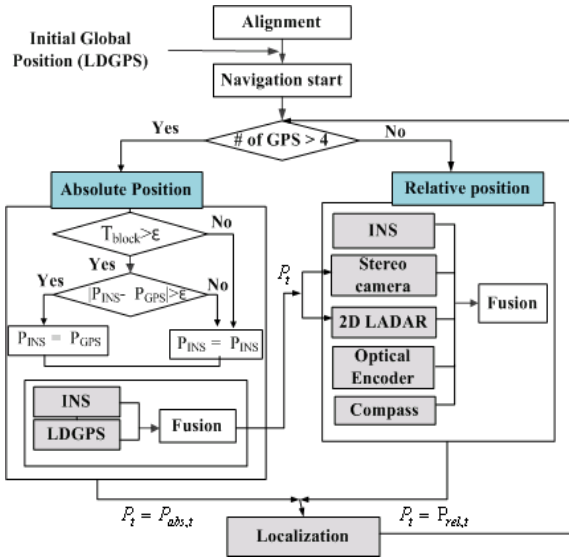


Fig. 7. Navigation manager design

5. 시험결과

본 논문에서 제안된 다중센서 융합기반 자율복귀 알고리즘은 소형로봇을 이용하여 GPS가 가용한 환경과 GPS가 가용하지 않은 환경에서 성능시험을 수행하였다.

가. 실내환경 자율복귀 시험

실험은 소형 로봇 플랫폼을 이용하여 원격주행하며 획득한 쌍안 영상 및 레이저 데이터를 기반으로 수행하였다. 실험에 사용된 레이저 센서는 HOKUYO 사의 UTM-30LX로써 270°의 시야각(FOV)과 0.25°의 각도 분해능으로 50 Hz 주기로 데이터를 획득한다. stereo camera는 Point Gray 사의 Bumblebee2를 활용하였으며, 320 × 240 픽셀 크기의 영상을 약 30 Hz 주기로 획득하였다. 제시된 Fig. 8은 실험실 내부 공간을 원격주행하는 상황에서 Laser-Stereo 융합형 SLAM에서 레이저 부의 Fractional-ICP 기반 위치 추정결과를 기반으

로 2D 맵을 실시간으로 생성한 결과로써, 로봇의 이동 경로(노란색 라인)와 레이저 센서의 획득 포인트(흰색 점군)를 도시화 하였다.

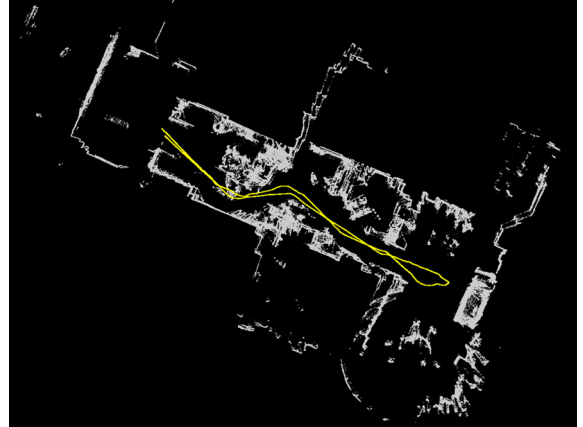


Fig. 8. Localization and map building based on fractional-ICP

2 GB RAM과 인텔 core 2 duo 2.4 GHz의 멀티 코어 프로세서가 장착된 컴퓨터를 활용하여 약 25~30 Hz처리가 가능함을 확인하였다.

Fig. 9와 10은 복도형 실내 건물을 약 0.5 m/s 속도로 총 184 m를 원격주행하며 획득한 쌍안 영상 및 레이저 데이터를 기반으로 통합 알고리즘을 시험한 결과이다. 실험은 4 GB RAM과 인텔 i7 2.4 GHz의 멀티 코어 프로세서가 장착된 컴퓨터를 활용하여 오프라인으로 처리하였으며, 일부 기능을 GPU(NVIDIA GTX260)을 활용하여 처리할 경우 프레임 당 약 98.2 ms(약 10 Hz)가 수행되며, CPU 단독 수행 시 약 300 ms(약 2~3 Hz)가 처리됨을 확인하였다.

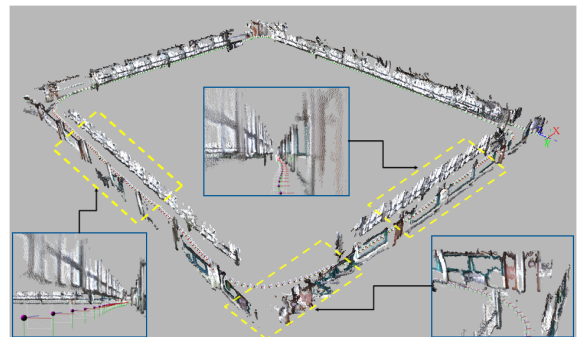


Fig. 9 Map building based on Laser-Stereo SLAM

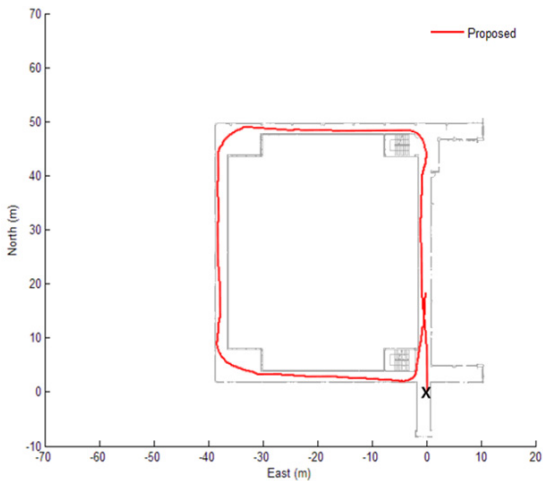


Fig. 10. Autonomous return based on laser-stereo SLAM

나. GPS가 가능한 환경에서 자율복귀 시험

Fig. 11은 실외환경에서 GPS기반 자율복귀 시험결과를 보여준다. 소형로봇을 원격주행으로 이동궤적을 사전에 생성하고 이동궤적의 절대위치를 DB에 저장한 다음 소형로봇이 자율복귀를 하도록 하였다. 시험결과, off-track 오차는 RMS 0.45 m로 DB에 저장된 절대위치 기반 이동궤적을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

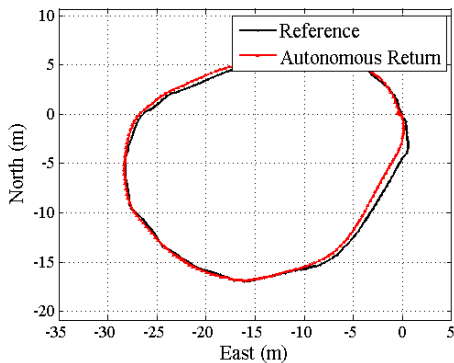


Fig. 11. Autonomous return in outdoor environment

6. 결론

본 논문에서는 다중센서 융합기반 소형로봇 자율복귀 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 다중상관정보기반 DB구축 알고리즘과 다중상관정보기반

자율복귀 알고리즘으로 구성하였다.

자율복귀를 위한 주행경로 생성을 위해 GPS 가용여부에 따라 GPS의 절대위치와 다중센서 융합기반 상대위치를 포함하는 주변 환경 특징정보(영상, 거리)기반 Hybrid MAP으로 DB를 구성하였다. 소형로봇 자율복귀 시, GPS가 가능한 환경에서는 절대위치 기반으로 자율복귀를 수행하고 GPS가 사용 불가능한 환경에서는 주변 환경 특징정보와 DB의 매칭을 통해 현재위치를 추정하여 DB상에서 복귀경로를 생성하고 연속적인 DB매칭을 통해 자율 복귀하도록 하였다. 따라서, 본 논문에서 제안한 자율복귀 알고리즘을 이용하여 소형로봇은 주변 환경에 적응적인 자율복귀가 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 알고리즘을 보다 정확하고 강인하게 하기 위해서는 향후에 GPS 천이구간에 대한 DB 생성 및 매칭에 대한 연구가 필요하며, 상대위치 추정을 위한 다중센서 융합알고리즘에 대한 최적화가 필요하다.

References

- [1] 지태영, 개방형 아카텍처 기반의 소형로봇 설계, 제17회 지상무기 학술대회, 2009. 9.
- [2] 현동준, Development of Self-contained Navigation System with Optical Navigation Sensors and MEMS Inertial Sensor for Pipeline Mapping and Mobile Robots, a Doctoral Dissertation, Yonsei University, 2009. 12.
- [3] 최지훈, 박용운, 무인로봇 정밀위치추정을 위한 전술통신 및 영상기반의 통합항법 성능 분석, 한국군사과학기술학회지, 제14권 제2호, pp. 271~280, 2011.
- [4] S. I Choi, L. Zhnag, S. Y Park, "Stereo Vision based Motion Adjustment of 2D Laser Scan Matching", in Proc. IVCNZ2011, 2011.
- [5] Lei Zhang, 최성인, 박순용, "Weighted Point to Line ICP for 2D Lser Scan Based SLAM Application", 제23회 영상처리 및 이해에 관한 워크샵, 2011.
- [6] N. A. Carlson, Federated Filter for Fault-tolerant Integrated Navigation Systems, IEEE Plans on Position Location and Navigation Symposium, pp. 110~119, Dec. 1988.