융합 센서 네트워크 정보로 보정된 관성항법센서를 이용한 추측항법의 위치추정 향상에 관한 연구

Study on the Localization Improvement of the Dead Reckoning using the INS Calibrated by the Fusion Sensor Network Information

최재영, 김성관*
(Jae-Young Choi¹ and Sung-Gaun Kim¹)
¹Kongju National University

Abstract: In this paper, we suggest that how to improve an accuracy of mobile robot's localization by using the sensor network information which fuses the machine vision camera, encoder and IMU sensor. The heading value of IMU sensor is measured using terrestrial magnetism sensor which is based on magnetic field. However, this sensor is constantly affected by its surrounding environment. So, we isolated template of ceiling using vision camera to increase the sensor's accuracy when we use IMU sensor; we measured the angles by pattern matching algorithm; and to calibrate IMU sensor, we compared the obtained values with IMU sensor values and the offset value. The values that were used to obtain information on the robot's position which were of Encoder, IMU sensor, angle sensor of vision camera are transferred to the Host PC by wireless network. Then, the Host PC estimates the location of robot using all these values. As a result, we were able to get more accurate information on estimated positions than when using IMU sensor calibration solely.

Keywords: sensor fusion, dead-reckoning, localization, IMU, machine vision

1. 서론

위치추정의 방법으로는 크게 절대적 위치추정과 상대적 위치추정으로 나뉜다. 절대적 위치추정은 GPS, RFID, 랜드마크 등을 이용하여 위치를 추정하는 방법으로 시간이 지남에 따라 누적되는 오차가 없으나 위치추정의 계산량이 복잡하고 RFID 등의 인위적인 표식을 미리 설치해야 하는 점이 있다[1]. 상대적 위치추정은 자이로스코프, 엔코더, 가속도계 등을 이용하여 이전의 위치를 기반으로 변화된 현재위치를 추정하는 방법으로 대표적으로 Dead-Reckoning (추측항법)이 있다.

추측항법은 바퀴의 이동량 만으로 모바일 로봇의 위치와 방향을 구하는 방법으로 모바일 로봇의 미끄러짐이 없고 바퀴의 크기와 회전각 등의 구조적인 에러가 없다면 이를 이용하여 정확한 로봇의 위치를 추정 할 수 있다 하지만 센서의 오차, 이동 중 바퀴의 미끄러짐, 모바일 로봇의 구조적 오차로 인하여 엔코더를 통한 오도메트리 정보만으로는 정확한 위치를 추정하기 어렵고 추측항법을 이용한 위치추정은 오차가 시간이 지남에 따라 누적되어 더 큰 오차를 발생시키기 때문에 오도메트리 정보를 보정하여 사용해야 한다[2].

이동로봇은 노면을 주행할 때 노면의 상태에 따라 미끄러짐이 발생하는데 그 중에서도 직진방향보다 좌측이나 우측으로 회전할 때 미끄러짐이 많이 발생한다. 따라서 로봇이 회전 할 때 heading 값을 간단히 측정 할 수 있는 IMU 센서

를 이용한다[3].

IMU (Inertial Measurement Unit) 센서는 현재 항법시스템에서 가장 많이 쓰이는 센서로 MEMS 기반의 IMU 센서는 저렴한 가격과 사용하기가 쉽고, 초소형, 초경량 등의 장점을 가지고 있어 현재 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 기존의 광선센서(기계식, 광학식)에 비해 정밀도가 낮고 주변 온도 변화의 영향을 많이 받는다. 또한 영구 자석이나 자성을 띤 물체 근처에서 자기센서의 X, Y, Z축의 측정치가 영향을 받아 정확한 heading 값을 얻어내기 힘들기 때문에 무조건 자기센서의 데이터를 신뢰할 수는 없다[4,5].

이러한 문제로 IMU 센서는 사용하기 전에 여러 가지의 보정 과정이 필요하며 이 과정 또한 매우 복잡하다. 그리고 보정이 잘 되어 있더라도 외부의 환경에 민감하게 반응하기 때문에 오차를 줄이기가 힘들다. 따라서 본 논문은 IMU 센서와 machine vision 카메라, 엔코더의 오도메트리 정보를 융합하여 센서 네트워크를 통한 모바일 로봇의 heading 값을 보정하고 위치추정의 오차를 감소하는 방법을 제안한다.

로봇의 회전구간에서 heading 오차를 감소시키기 위하여 로봇에 machine vision 카메라를 천장을 향하게 설치하고 skid-steering 방식의 이동로봇을 이용하여 회전구간에서 양쪽바퀴의 속도는 같고 방향을 다르게 한 후, 로봇의 중심을 기준으로 제자리 회전을 하도록 하였다. 그래서 이동로봇이 자율주행 중, 회전구간에서 제자리 회전을 하기 전에 machine vision 카메라를 이용하여 천장의 template 이미지를 추출한다. 그리고 이 추출된 template 이미지를 실시간 이미지와 비교하고 패턴매칭(pattern matching) 알고리즘을 이용하여 각도를 추출한 뒤, DAQ 장비를 통해 IMU 센서 정보, vision 센서 정보, 엔코더 센서정보를 수집하여 무선으로 Host PC에 전송한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 15., 수정: 2012. 6. 14., 채택확정: 2012. 6. 30.

최재영: 공주대학교 기계공학전공(choijae88@gmail.com)

김성관: 공주대학교 기계자동차공학부(kimsg@kongju.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

센서 정보들을 수집한 Host PC에서는 IMU 센서의 heading 값의 각도와 비교하고 offset 값을 계산한다. 이렇게 보정된 값을 로봇으로 전송하여 위치오차를 감소시키고 로봇의 센서 정보 및 보정된 위치정보를 Host PC에서 모니터링 하여 사용자가 로봇의 위치를 확인 할 수 있도록 하였다.

제안된 오차보정 방법은 IMU 센서가 자율주행 중 예측하지 못한 오차를 간단하고 효율적으로 감소시켜주며 이러한 보정방법과 기존의 IMU 센서를 이용한 방법을 비교 실험하여 위치추정의 정확도 성능을 비교 분석 하였다.

II. 모바일 로봇의 위치추정

1. 모바일 로봇의 엔코더 값을 이용한 위치추정

본 논문에서 사용된 Differential Skid-steering의 로봇은 그림 1과 같다. 모바일 로봇의 구동 방식은 별도의 조향장치 없이 구동되고, 각각 4개의 바퀴의 힘의 합으로 로봇의 이동방향을 결정하는 방식이다.

Differential Skid-Steering 이동로봇의 전진속도(translational velocity)와 각속도(rotation velocity)를 계산하기 위해서는 각각의 바퀴 회전량을 측정해야 한다.

로봇의 각속도를 측정하기 위해서 각각의 모터에 증분형 엔코더를 장착하여 모터가 회전 할 때마다 펄스를 입력 받아 RPM값으로 계산하는 방식을 통해 각속도를 측정하였다.

로봇에 장착된 엔코더가 왼쪽과 오른쪽에 각각 2개씩 장착 되어 있어 2개의 평균 값을 사용한다.

$$\begin{aligned}\Phi_L &= \frac{\Phi_{FL} + \Phi_{RL}}{2} \\ \Phi_R &= \frac{\Phi_{FR} + \Phi_{RR}}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 Φ_R, Φ_L 은 왼쪽과 오른쪽 엔코더 회전 값의 평균이다. 그리고 위에서 구한 엔코더 회전 값을 이용하여 속도와 각속도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}v &= \frac{r(\Delta\Phi_R + \Delta\Phi_L)}{2} \\ \omega &= \frac{r(\Delta\Phi_R - \Delta\Phi_L)}{D}\end{aligned}\quad (2)$$

그림 1. Skid-Steering 방식의 모바일 로봇.

Fig. 1. 4-Wheel differential skid-steering mobile robot.

여기서 r 은 바퀴의 지름이고 D 는 좌우 바퀴간의 폭이다.

시간 $[t_k, t_{k+1}]$ 동안 로봇이 일정한 속도 입력 v_k, ω_k 가 주어지고 현재 시각에서 로봇의 위치를 q_k 를 알고 있을 때, 다음 시간에서 로봇의 위치 q_{k+1} 을 계산하는 방법은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + v_k \Delta t \cos \theta_k \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \Delta t \sin \theta_k \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_k \Delta t \\ \Delta t &= t_{k+1} - t_k\end{aligned}\quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 시간 t_{k+1} 에서의 위치 q_{k+1} 을 구할 수 있다[6].

2. 엔코더와 IMU 센서를 이용한 추측항법

IMU 센서는 이동관성을 측정할 수 있는 가속도계와 회전관성을 측정할 수 있는 자이로계, 방위각을 측정할 수 있는 자계로 이루어진 하나의 통합 unit을 말한다. 이 센서에서 출력되는 지자기센서의 값으로 모바일 로봇의 heading 값을 알 수 있다.

실험에 사용된 IMU 센서는 RS-232 통신을 사용하여 로봇의 메인 컨트롤러에 데이터를 전송하며 지자기센서의 정밀도는 $\pm 3^\circ$ 이다. 추측항법에 IMU 센서를 사용하는 방법은 지자기센서 값을 이용하여 $0 \sim 180^\circ, -180 \sim 0^\circ$ 각도 범위에서 로봇의 heading 값을 출력한다. 이 출력된 heading 값을 식 (4)를 이용하여 t_{k+1} 에서의 위치 q_{k+1} 을 구한다.

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= x_k + v_k \Delta t \cos \theta_{imu} \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \Delta t \sin \theta_{imu} \\ \Delta t &= t_{k+1} - t_k\end{aligned}\quad (4)$$

여기서 θ_{imu} 값은 IMU 센서에서 출력된 모바일 로봇의 heading 값을 나타낸다.

III. 융합 센서 네트워크 정보를 이용한 IMU 센서 보정

모바일 로봇이 추측항법을 할 때 엔코더 정보만을 이용하여 위치추정이 어려운 가장 큰 이유는 바퀴와 노면 사이의 미끄러짐 현상 때문이다.

미끄러짐 현상은 로봇이 회전하는 구간에서 가장 많이 발생되는데 이러한 미끄러짐을 최소화하기 위해 그림 2와 같이 융합 센서 네트워크 정보를 이용하여 IMU 센서를 보정하고 위치 추정한다.

일반적인 중저가의 IMU 센서는 보통 yaw 값이 $\pm 3^\circ$ 정도 오차가 발생하는데 이러한 센서를 여러 개의 모터가 장착된 로봇에 부착하게 되면 자기장과 주변 환경의 영향을 받아 허용오차보다 더 많은 오차가 발생하게 된다. 그렇기 때문에 일반적인 보정방법에 추가적인 개선방안이 필요하다.

본 논문에서 제안한 방법은 그림 3과 같이 모바일 로봇이 자율주행시 회전 할 경우 machine vision 카메라를 이용하여 천장의 340×160 사이즈의 임의의 템플릿을 추출한다.

템플릿이 추출되면 로봇은 제자리에서 회전을 시작하며 추출된 template과 실시간 이미지를 이용하여 패턴매칭을 수행한다.

그림 2. 전체 시스템 구성도.

Fig. 2. Overall system configuration.

그림 3. Machine vision 카메라를 이용한 IMU센서 보정 시스템.

Fig. 3. IMU sensor calibration system using machine vision cameras.

그림 5. Machine vision 카메라를 이용한 heading 보정 방법.

Fig. 5. The heading calibration method using the machine vision camera.

(a)

(b)

그림 4. (a) LabVIEW를 이용한 영상처리 프로그램 (b) LabVIEW를 이용한 각도 측정.

Fig. 4. (a) Image processing program using LabVIEW (b) Angle Measurement Using LabVIEW.

이미지 패턴매칭 방법은 LabVIEW의 vision development module을 이용하여 프로그래밍 하였다. 패턴매칭 방법은 그림 4(a)와 같이 이미지 캡처, 캡처된 이미지의 ROI (Region Of Interest)영역 추출, 이미지 패턴매칭의 시퀀스로 이루어져 있다.

Capture된 부분의 시퀀스에서는 이미지를 포착하여 컬러영상의 noise를 감소 시켜주기 위해 8bit 이미지로 변경을 해주며, ROI 시퀀스에서는 포착된 이미지에서 패턴 매칭에 필요한 template를 추출 하기 위해 포착된 영상의 가운데 340*160 부분을 ROI영역으로 지정하여 template를 추출한다. 그리고 마지막으로 패턴매칭 시퀀스에서는 이전의 시퀀스에서 만들어진 template과 8bit의 실시간 이미지를 Euclidean distance 알고리즘을 기반으로 하는 Find Pattern.vi를 사용해 각도를 측정한다. 측정된 각도는 그림 4(b)와 같이 프론트 패널에서 확인할 수 있다.

위에서 설명한 패턴 매칭을 이용하면 회전 전과 회전 후의 이미지의 회전각을 추출하여 정확한 회전각을 알 수 있다. 이렇게 구한 각도를 IMU 센서와 비교하여 offset 값을 계산할 수 있으며 계산된 offset 값은 다시 IMU 센서 값으로 보

상이 되어 정확한 heading 값을 출력한다 이렇게 보상이 된 heading 값은 식 (4)를 이용하여 로봇의 위치추정에 사용된다. 또한 로봇의 다음 회전 전까지 이전의 offset 값이 계속 사용되며 다음에 회전을 할 경우 다시 IMU 센서를 보정하게 된다.

보정을 하는 시간은 이미지를 Capture하고, ROI 이미지를 추출하는 시간이 1.2s가 소요되며 패턴 매칭은 30 ms가 소요된다. 이미지를 얻어내는 시간이 약간 소요되지만 패턴 매칭 시간이 비교적 빠르므로 heading 값이 실시간으로 보정된다고 할 수 있다.

IV. 실험 결과

1. 모바일 로봇 및 시스템 구성

위에서 제한한 machine vision 카메라를 이용한 IMU 센서 보정 방법을 검증하기 위해서 실험을 하였다.

본 실험에서는 로봇의 위치추정을 위하여 카메라는 8bit, 60fps사양을 갖춘 machine vision 카메라를 사용하였으며 로봇의 중심에 천장을 향하여 설치 하였다.

모바일 로봇 플랫폼은 NI LabVIEW2010 소프트웨어와 NI 하드웨어를 기반으로 제작하였다.

그림 6은 실제 실험에 사용된 모바일 로봇이다. 메인 컨트롤러로 cRIO-9024가 사용되었으며 엔코더 값을 읽기 위한 NI 9403 DIO 모듈과 IMU 센서 값을 읽기 위한 NI-9870 RS-232 시리얼통신 모듈을 장착하였다.

각각의 센서 값들은 FPGA를 이용하여 데이터를 획득하게 되며 real-time에서는 모터컨트롤과 TCP/IP통신 그리고 이미지 영상 처리를 한다. 이러한 값들은 무선통신을 이용하여 Host PC로 전달되고 Host PC에서는 IMU 센서 보정을 통하여 정확도가 향상된 모바일 로봇의 위치를 추정하게 된다.

그림 7은 실험 검증을 위해 사용된 센서 네트워크의 구조를 나타낸다. 먼저 IMU 센서, Vision 센서 Encoder 데이터를 cRIO DAQ 장비를 이용하여 데이터를 수집하고 수집한 데이터를 WSN Gateway를 이용하여 노트북으로 전송한다. 전송된 데이터를 기반으로 IMU 센서를 보정하여 노트북에서 DAQ로 신호를 보내 모터를 컨트롤하고 로봇의 위치를 모니터링 하는 구조이다.

그림 6. 실험에 사용된 모바일 로봇.

Fig. 6. Mobile robot used in experiment.

그림 7. 실험에 사용된 센서네트워크 구조.

Fig. 7. Sensor network architecture used in this experiment.

2. 모터 제어 및 IMU 센서 기본 보정

IMU 센서는 사용 전 매뉴얼에 나온 방법으로 지자기 센서의 Z축과 offset 값을 각각 보정하였고 기본오차범위에서 값이 출력되는 것을 확인 하였다. 또한 직선구간에서의 오차를 최소화 하기 위해서 엔코더의 피드백 값을 이용하여 4개의 모터를 각각 PI 제어를 사용하여 모터제어로 인한 오차를 최소화 하였다.

PI 제어 결과는 그림 8과 같고 P의 게인 값은 0.006 I의 게인 값은 0.005로 설정해주었다. 그 결과 정상상태 오차는 5 %, 정상상태 상승시간은 0.5 sec의 결과가 나왔다.

3. IMU 센서보정 검증을 위한 실험

본 논문에서 제안된 센서 보정 방법을 검증하기 위하여 IMU 센서를 사용하여 위치추정을 하는 방법과 IMU 센서와 machine vision 카메라를 이용하여 센서를 보정하는 방법으로 주행 시험을 하였으며 그림 9와 같은 방법으로 2000 mm, 1000 mm, 28000 mm, 1000 mm를 주행하여 총 6800 mm를 주행하였으며 1번 구간에서는 90도, 2,3번 구간에서 각각 135도 회전을 시켜 각각 로봇의 위치 추정 값과 실제 주행한 값을 비교하여 검증을 하였다.

그림 8. 모터의 PI 제어.

Fig. 8. Motor PI control.

그림 9. 모바일 로봇의 주행 계획.

Fig. 9. Path planning of mobile robot.

4. 실험 결과

그림 10은 IMU 센서를 이용하여 위치추정을 한 결과이며 실제 값과 추정 값을 나타낸다.

IMU 센서와 엔코더 정보를 조합하는 방법으로 추측항법을 보정하였다. 위치추정오차가 어느 정도 발생되지만 계속해서 누적되지는 않는 것을 알 수 있다. 하지만 각각의 구간에 heading 값의 오차가 허용오차보다 많이 생기는 구간도 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 모바일 로봇의 모터나 회로에서 발생하는 자기장으로 인하여 센서의 정확도가 감소하거나 주변의 환경적인 요인으로 발생하는 오차로 보이며 이러한 오차 때문에 위치추정의 정확도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 본 논문에서 제안된 방법으로 IMU 센서를 machine vision 카메라를 이용하여 보정한 것이다.

그림을 보면 직선구간에서의 엔코더 정보를 이용하여 위치추정을 해서 오차가 약간 있지만 회전구간에서 로봇의 heading 값이 많이 보정이 되어 모바일 로봇의 이동 경로의 위치추정이 상당부분 일치하는 것을 볼 수 있다.

보정 하기 전의 그림 10과 보정 후의 그림 11을 비교해보면 모두 1,2,3, 포인트에서 직선구간에서 발생된 오차가 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해 PI 제어 방법을 사용했지만 4개의 모터를 사용하기 때문에 각각의 모터가 정확히 동시에 정상상태로 도달하지 못해 발생되며 직선구간에서 미끄러짐

그림 10. 보정전의 모바일 로봇의 위치추정.

Fig. 10. The localization of the mobile robot before the calibration.

그림 11. 보정후의 모바일 로봇의 위치추정.

Fig. 11. The localization of the mobile robot after the calibration.

오차를 따로 보상에 주지 않아 위와 같은 오차가 발생한다. 본 논문에서 제안한 보정방법으로 보정한 결과 heading 값의 오차가 감소함으로써 위치적 오차도 줄어들고 보정 전보다 주행 경로를 추정한 값도 상당부분 일치하는 것을 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 모바일 로봇의 실내 주행에서 융합 센서 네트워크를 이용하여 위치추정 정확도를 향상시키는 방법을 연구하였다.

제시된 방법은 융합 센서 네트워크를 활용한 machine vision 카메라를 이용하여 로봇이 제자리 회전시 heading 값을 측정하고 그 값과 IMU 센서 값, 엔코더 값을 Host PC에 전송한 후 센서를 보정하였다. 그리고 이렇게 보정된 IMU 센서의 heading 값을 이용하여 추측항법을 통해 위치추정을 하는 방법을 제시 하였다.

제안된 방법을 바탕으로 실제 로봇을 이용하여 실내에서 주행을 해봤으며, 기존의 IMU 센서를 사용한 위치추정보다 융합 센서 네트워크로 보정된 IMU 센서값을 사용하여 위치추정하는 방법이 heading 값 정확도가 3배 이상 향상되고 위치적 오차가 1.5배 이상 향상된 위치추정 결과를 실험을 통해서 도출하였다.

본 시스템은 실내 로봇의 위치추정을 보다 간단하고 빠르게 할 수 있으므로 실시간 위치 추정이 필요한 공간이나 공공서비스 로봇, 가정용 자율주행 로봇에 적용되어 로봇산업 활성화에 기여 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] D.-K. Lee, J.-S. Im, and S.-B. Kim, "A study on map building of mobile robot using RFID technology and ultrasonic sensor," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 3, pp. 239-244, Mar. 2010.
- [2] S.-Y. Kim and K.-S. Yoon, "Improved ultrasonic satellite system for the localization of mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1240-1247, Oct. 2011.
- [3] J.-G. Kang, W.-S. Choi, S.-Y. An, and S.-Y. Oh, "Improving accuracy of SLAM using online estimation of odometry error,"

Proceedings of KIIS Fall Conference (in Korean), vol. 19, no. 2, pp. 267-270, Dec. 2009.

- [4] S.-S. Park, K.-J. Kim, N.-Y. Ko, and D.-J. Seo, "Position estimation of a mobile robot using electronic compass and encoder," *Journal of Korean Institute of Information Technology (in Korean)*, vol. 5, no. 4, pp. 10-17, Dec. 2007.
- [5] W.-M. Koo, "Performance improvement of real-time heading estimation for magnetometer/IMU using a nonlinear filter," *Konkuk University, Dept. of Aerospace Information Engineering, A master's thesis (in Korean)*, Aug. 2009.
- [6] D.-K. Lee, "A study on test and error parameter estimation for MEMS-based low cost IMU calibration," *Korea Aerospace University, Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, A master's thesis (in Korean)*, Aug. 2010.
- [7] K. Kozłowski and D. Pazderski, "Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 477-496, 2004.

최재영

2011년 공주대학교 기계자동차 공학부 기계공학전공 졸업. 2012년~현재 공주대학교 대학원 기계공학전공 석사과정 재학중. 관심분야는 이동로봇의 위치추정.

김성관

1992년 KAIST 기계공학과(공학사). 1995년 KAIST 자동화 및 설계 공학과(공학석사). 2003년 GIST 기전 공학과(공학박사). 2005년~현재 공주 대학교 기계자동차공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 지능형 기전시스템, 로봇틱스, 분자동역학.