

실외 도로 환경에서의 자율주행 로봇 개발

Development of Autonomous Navigation Robot in Outdoor Road Environments

노치원, 강연식*, 강성철
(Chi-Won Roh, Yeonsik Kang, and Sung-Chul Kang)

Abstract : This paper discusses an autonomous navigation system for urban environments. For the localization of the robot, EKF (Extended Kalman Filter) algorithm is used with odometry, angle sensor, and DGPS (Differential Global Positioning System) measurement. Especially in an urban environment, DGPS is often blocked by buildings and trees and the resulting inaccurate positioning prevents the robot from safe and reliable navigation. In addition to the global information from DGPS, the local information of the curb on the roadway is used to track a route when the global DGPS information is inaccurate. For this purpose, curb detection algorithm is developed and implemented in the developed navigation algorithm. Four different types of navigation strategies are developed and they are switched to adapt to different localization conditions according to the availability of DGPS and the existence of the curbs on the roadway. The experimental results show that the designed switching strategy improves the navigation performance adapting to the environment conditions.

Keywords : autonomous navigation, curb detection, mobile robot, switching strategy, outdoor environment

I. 서론

최근 컴퓨터와 센서기술의 발달로 이동로봇의 활용분야가 실내에서 실외로 점차 확대되고 있다. 실내용으로는 안내로봇, 청소로봇, 심부름로봇 및 간호로봇등이 개발되고 있으며 실외에서는 순찰, 보안, 재난구조 및 탐사의 목적으로 많은 로봇들이 개발되고 있다[1-5].

실내에서는 지도작성, 위치인식 및 주행을 위한 벽, 문 혹은 가구등의 특징점들이 있어 이동로봇이 주행에 활용할 수 있으나 실외에서는 인공표식외에는 주행에 이용할 수 있는 특징점들이 극히 제한적이다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 GPS (Global Positioning System), INS (Inertial Navigation Sensor) 및 레이저 거리센서 (LRF: Laser Range Finder)가 실외용 로봇에 많이 활용되고 있다.

GPS는 실외에서 이동로봇의 광역 위치추정을 위한 기본적인 센서중의 하나이지만 도심환경에서는 주변환경에 따라서 위치오차가 변하는 단점을 가지고 있다. 레이저 거리센서는 주변환경에 대한 거리정보를 제공하거나 로봇의 위치인식을 위한 가장 효율적인 센서중의 하나이며 정밀도와 신뢰성이 좋은 특징을 가지고 있다[6,7].

도심환경에서 로봇이나 차량의 안전성을 위하여 도로 연석의 위치를 추정하는 알고리즘이 많이 개발되고 있으며 Wijesoma등 [8]은 레이저 거리센서를 이용하여 Kalman 필터를 이용한 연석의 위치추정 알고리즘을 제안하였으며 Kodagoda등 [9]은 레이저거리센서 및 모노카메라를 이용하여 연석을 추출하는 알고리즘을 제안하기도 하였다.

이와 같이 이동로봇 및 차량의 주행을 위한 도로의 연석 및 차선검출에 관한 많은 연구[10]가 있었으나 이러한 정보를 이용한 이동로봇의 자율주행 및 제어에 관한 연구는 미흡

한 실정이다.

본 논문은 GPS 위치오차 범위가 변하기 쉬운 도심환경에서 주행의 안전성을 확보하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 제어방법 및 이를 이용한 자율주행 시스템에 관하여 기술하고 있다. 레이저 거리센서를 이용하여 도로의 연석의 위치를 추정하고 이를 추종하는 제어기를 설계하고 GPS 정보의 유무와 연석의 유무에 따라 제어기를 스위칭하는 제어전략을 제안하였으며 실제 도로에서 자율주행 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서는 EKF (Extended Kalman Filter) 기반의 위치추정 알고리즘을 기술하였고 III 장에서는 연석추출 알고리즘을 설명하고 IV 장에서는 스위칭 제어기에 관하여 논하였으며 V 장에서는 실험결과를 설명하고 VI 장에서 결론을 언급하였다.

II. EKF기반 위치추정 알고리즘

1. 이산 확장 칼만 필터

일반적으로 로봇의 휠에는 거리측정계(odometry)가 장착되어 있어 로봇의 위치를 측정할 수 있지만 시간이 지남에 따라 수치적분 오차 및 휠의 미끄러짐에 의하여 오차가 누적되게 된다. 이러한 오차를 보정하기 위하여 외부센서로 GPS와 자세센서를 장착하여 위치추정을 수행할 수 있으며 본 논문에서는 확장칼만필터 (EKF: Extended Kalman Filter)를 사용하였다. EKF 알고리즘은 비선형식을 선형화하여 칼만필터를 적용한 것으로 이동로봇을 비롯한 많은 분야에 적용되고 있다[7,11,12].

이동로봇이 그림 1과 같이 시간 간격 $[k\Delta T, (k+1)\Delta T]$ 동안 선속도 $v(k)$, 각속도 $\omega(k)$ 로 주행하고 있는 경우에 근사화된 이산 기구학은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Delta T \begin{bmatrix} -\sin(\theta(k)) & 0 \\ \cos(\theta(k)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}(k)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 11. 3., 채택확정 : 2008. 12. 11.

노치원, 강연식, 강성철 : 한국과학기술연구원

(ctrl88@naver.com/yeonsik@kist.re.kr/kasch@kist.re.kr)

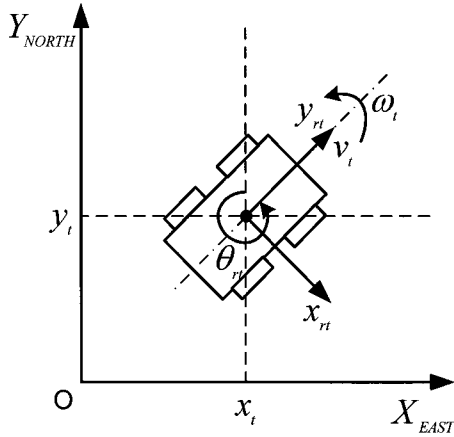


그림 1. 이동로봇의 기구학 모델.
Fig. 1. Kinematic model of mobile robot.

여기서 k 는 이산 시간, ΔT 는 샘플링 시간, $\mathbf{x}(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T$ 는 로봇의 위치 및 방향을 나타내는 상태 벡터이다. 또한 $\mathbf{u}(k) = [v(k), \omega(k)]^T$ 는 선속도 및 각속도 입력 벡터를 나타낸다.

기구학 모델의 잡음 $\mathbf{w}(k)$ 를 가우시안이라고 가정하면 오차모델은 $\mathbf{w}(k) \sim N(0, \mathbf{Q})$ 와 같다. 여기서 공분산 행렬 $\mathbf{Q} = E(\mathbf{w}(k)\mathbf{w}(k)^T)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

위치추정을 위한 외부센서로 GPS를 사용하였고 방향정보를 위하여 자세센서가 사용되었다. 이 센서에 대한 측정모델식은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{v}(k)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}(k)) = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{z}(k) = [x_g(k), y_g(k), \theta_a(k)]^T$ 는 센서 측정벡터이며 $x_g(k)$, $y_g(k)$ 는 GPS로부터의 위치측정값을 나타내며 $\theta_a(k)$ 는 자세센서로부터의 방향각을 나타낸다. 측정모델식에서 잡음 $\mathbf{v}(k)$ 를 가우시안이라고 가정하면 $\mathbf{v}(k) \sim N(0, \mathbf{R}(k))$ 으로 나타낼 수 있으며 공분산 행렬 $\mathbf{R}(k) = E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}(k)^T]$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{R}(k) = \begin{pmatrix} \sigma_{xg}^2(k) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yg}^2(k) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta a}^2(k) \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (1)과 식 (3)을 선형화하면 예측과정과 갱신과정 두단계로 구성되는 EKF 알고리즘을 구현할 수 있으며 그 과정을

다음에 기술하였다.

2. 예측방정식(prediction equation)

현재 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k, k)$ 에서 기구학식에 의하여 예측된 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k+1, k)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1, k) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k, k), \mathbf{u}(k)) \quad (5)$$

예측된 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k+1, k)$ 의 공분산 $\mathbf{P}(k+1, k)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{P}(k+1, k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k, k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q} \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{F}(k)$ 는 기구학식 f 를 현재 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k, k)$ 에서 선형화하여 구하며 다음과 같다.

$$\mathbf{F}(k) = \Delta \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k, k), \mathbf{u}(k)) \quad (7)$$

$$\mathbf{F}(k) = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))}{\partial \mathbf{x}(k)} \right|_{\substack{\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k, k) \\ \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k)}}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta T \cos \hat{\theta}(k, k)v(k) \\ 0 & 1 & -\Delta T \sin \hat{\theta}(k, k)v(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

마지막으로, 예측된 상태 $\hat{\mathbf{x}}(k+1, k)$ 를 이용한 예측 측정값은 식 (3)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{z}}(k+1, k) = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k+1, k)) \quad (8)$$

3. 갱신방정식(update equation)

실제 측정값 $\mathbf{z}(k+1)$ 과 예측 측정값 $\hat{\mathbf{z}}(k+1, k)$ 의 차이인 residual $\mathbf{r}(k+1)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{r}(k+1) = \mathbf{z}(k+1) - \hat{\mathbf{z}}(k+1, k) \quad (9)$$

$\mathbf{r}(k+1)$ 의 공분산 $\mathbf{S}(k+1)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1, k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1) \quad (10)$$

여기서 $\mathbf{H}(k+1)$ 는 $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k+1, k))$ 의 자코비안이며 다음과 같다.

$$\mathbf{H}(k+1) = \nabla \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k+1, k)) \quad (11)$$

$$\mathbf{H}(k+1) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}(k))}{\partial \mathbf{x}(k)} \right|_{\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k+1, k)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이때, Kalman 이득 $\mathbf{K}(k+1)$ 는 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1, k)\mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{S}^{-1}(k+1) \quad (12)$$

결과적으로 갱신된 상태벡터 $\hat{\mathbf{x}}(k+1, k+1)$ 와 공분산 $\mathbf{P}(k+1, k+1)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1, k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1, k) + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{r}(k+1) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}(k+1, k+1) = \mathbf{P}(k+1, k) - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{S}(k+1)\mathbf{K}^T(k+1)$$

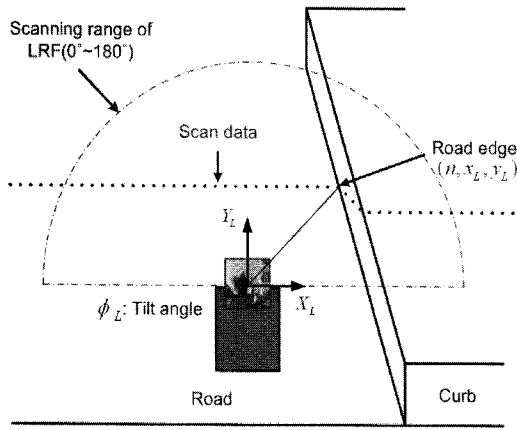


그림 2. 레이저거리센서를 이용한 도로의 연석 검출.
Fig. 2. Curb detection on the road using a laser range finder.

위와 같은 EKF 기반의 위치추정 알고리즘으로부터 예측과 정교 갱신과정을 반복하여 로봇의 상태를 구할 수 있다.

III. 연석추출 알고리즘

실외 도심환경에서 도로의 연석을 이용하여 주행의 안전성을 도모하거나 주행의 신뢰성을 향상시키려는 연구가 많이 진행되고 있다. Wijesoma 등 [8]은 레이저 거리센서 정보로부터 EKF 알고리즘을 이용하여 직선을 추출하고 분할하여 연석의 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하기도 하였고 Kim 등[6]은 호프변환 (Hough transform)을 이용하여 실시간으로 연석의 위치를 추출하는 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서는 그림 2와 같이 Kim 등이 제안한 알고리즘을 이용하여 연석의 위치 (n, x_L, y_L) 를 추정하였으며 GPS의 위치 오차가 크거나 신호가 차단되는 경우에는 연석 추종제어를 실행하여 실외 자율주행 시스템의 신뢰성을 향상시키는 스위칭 제어전략 기법을 적용하였다.

IV. 주행 제어기 설계

1. 스위칭 제어기 설계

실외 이동로봇의 위치를 추정하기 위하여 대부분의 시스템은 GPS와 관성센서를 사용하고 있다. 특히 미터이하의 정밀도를 갖는 DGPS의 사용이 일반화되고 있다. 그러나 도심환경에서는 GPS 신호가 차단되거나 감쇄 및 다중경로와 간섭효과에 의해 위치오차가 커지는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하고 신뢰성을 향상시키기 위하여 본 논문에서는 도로의 연석 정보를 이용하여 주행에 활용하는 제어기를 설계하였다.

우리는 표 1과 같이 GPS의 유무와 연석의 유무에 따른 네 가지 경우로 주행 조건을 분류하였으며 각각의 경우에 적합한 위치추정방법 및 경로추종 제어기를 설계하였다.

GPS와 연석이 모두 있는 경우에 국부영역에서는 GPS의 위치 정보보다는 연석추출 알고리즘에 의한 연석의 위치 정보가 더 정확하기 때문에 경로추종 제어기는 연석추종 제어기를 사용하였으며 로봇의 광역 위치추정은 GPS와 자세센서를 이용하였다. GPS는 양호한데 연석이 없는 경우는 GPS 정보에 의해 광역 위치추정 및 광역 경로추종 제어를 수행하게

표 1. 스위칭 제어기.

Table 1. Switching controller.

GPS	연석	주행 제어기
O	O	GPS와 자세센서를 이용한 광역 위치추정 및 국부 연석추종 제어기
O	X	GPS와 자세센서를 이용한 광역경로 추종 제어기
X	O	거리정보계(odometry)와 자세센서를 이용한 광역 위치추정 및 연석추종 제어기
X	X	거리정보계와 자세센서를 이용한 광역 경로추종 제어기

된다. GPS신호가 유효하지 않고 연석이 있는 경우에는 로봇의 거리정보계를 기본으로 하여 위치추정을 수행하며 연석 추종 제어기를 사용하고 GPS와 연석정보를 모두 사용할 수 없는 경우에는 로봇의 거리정보계를 이용한 위치추정 및 경로추종 제어기를 사용하게 된다.

2. 경로추종 제어기

개발된 시스템의 이동부는 4휠 차동 skid 조향방식으로 논홀로노믹(nonholonomic) 특성을 갖는다. 논홀로노믹 특성을 갖는 이동로봇의 경로 추종 제어기로 여러가지 비선형 제어기가 제안되었으며 특히 Kanayama 등 [13]은 직각좌표계에서 경로의 기준 선속도와 각속도가 0이 아닌 경우에 기구학적 비선형 제어기를 제안하여 점근적 안정성(asymptotic stability)을 증명하였다. 로봇의 경로가 주어지는 경우에 기본적인 경로추종 제어기로 Kanayama 제어기를 사용하였다.

3. 연석추종 제어기

연석추종 제어기로는 비선형 속도비례제어 (Velocity Ratio Control) 방법을 사용하였다[14]. 이동로봇 및 차량의 경로추종 제어 방법중의 하나인 속도비례제어는 현재 로봇의 위치로부터 일정거리 앞을 추종하도록 각속도를 제어하는 방법이며 많은 유사한 방법들이 제안되었다[15,16]. 레이저 거리센서에 의한 연석추출 알고리즘은 로봇으로부터 일정거리 앞의 연석의 위치를 추출하므로 속도비례제어방법이 연석추종 제어기로 적합할 것으로 판단되어 이를 적용하였다. 연석추종 제어기는 다음과 같다.

III 장의 연석추출 알고리즘으로부터 로봇의 위치 (x_c, y_c) 와 로봇의 주행방향과 연석의 상대적인 각도 ψ_c 를 구할 수 있다. 그림 3에서 연석의 접선을 구할 수 있으며 이 접선을 로봇과 연석이 유지해야 하는 거리 $d_{desired}$ 만큼 평행 이동한다. 연석추종 제어기의 목적은 이 평행이동된 선을 따라 거리 $d_{desired}$ 만큼 떨어진 점 (그림 3에서 별표로 된 점)을 로봇이 향하도록 만드는 것이다. 만약 로봇이 그림 3과 같이 별표를 향해 선속도 V 로 주행하는 경우에 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{y_{track}}{d_{ahead}} = -\frac{V_y}{V_x} \tag{14}$$

여기서 y_{track} 은 로봇의 위치로부터 평행이동된 접선까지

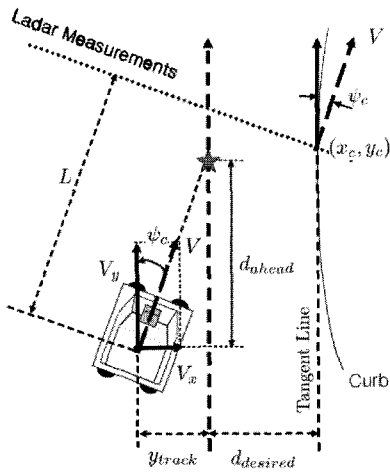


그림 3. 연석 추종 제어기.

Fig. 3. Curb tracking controller.

의 수직거리이며 d_{ahead} 는 제어기의 상수값이다. 또한 V_x 와 V_y 는 로봇 선속도의 접선에 대한 수직 및 수평 속도성분이다. 식 (14)로부터 오차 e 를 다음과 같이 정의한다.

$$e = V_x \cdot y_{track} + V_y \cdot d_{ahead} \quad (15)$$

식 (15)의 오차 e 를 최소화하는 로봇의 각속도 입력 u_{cmd} 를 다음과 같이 설정하면 비례속도제어방법을 이용한 연석추종 제어기를 설계할 수가 있다.

$$u_{cmd} = K_{VRC} e \quad (16)$$

여기서 K_{VRC} 는 로봇의 주행성능을 결정하는 비례이득이다.

V. 실험결과

1. 자율 주행 로봇

1.1 시스템 구성

자율 주행 로봇 시스템은 그림 4와 같이 이동부와 원격감시를 위한 원격서버로 구성되어 있다. 장애물을 감지하고 연석을 추출하기 위한 레이저 거리센서를 장착하였으며 광역

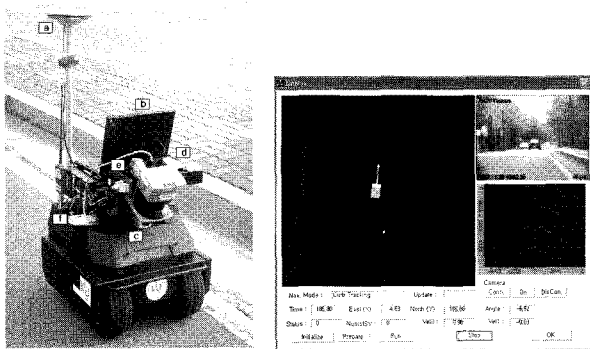


그림 4. 자율 주행 로봇과 상태표시창.

Fig. 4. Autonomous robot system and GUI: (a) DGPS antenna (b) PC (c) Pan-tilt Camera (d) Ladar (e) MTi 3-axis angle sensor (f) Wireless LAN bridges.

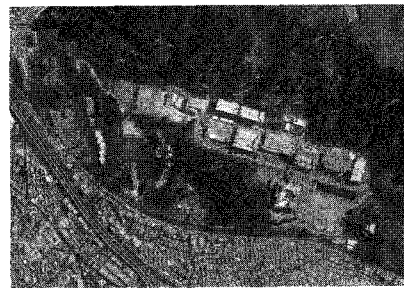
위치추정을 위하여 DGPS 수신기 및 자세센서를 장착하였다. 또한 주행중 실의 환경정보를 원격서버에 전송하기 위하여 카메라를 장착하였다. 원격서버는 이동부로부터 영상을 전송받아 표시하며 로봇의 상태정보 및 연석의 위치등의 주행 정보를 표시한다.

1.2 개선된 상태표시창

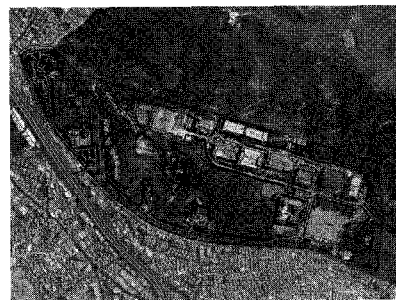
원격서버에 로봇의 상태를 표시하는 개선된 방안으로 Google earth의 위성지도와 안내도를 합성하여 주행지도로 표시하였다. 합성된 지도상에 로봇의 위치를 표시하여 원격 감시자는 주행 상황을 보다 직관적으로 쉽게 인식할 수 있도록 하였다. 그림 5는 개선된 GUI (Graphic User Interface)를 나타낸다. 그림 5에서 (a)는 안내도를 나타내며 (b)는 Google earth의 위성지도, (c)는 합성된 지도를 나타내며 (d)는 로봇의 위치가 표시된 주행지도의 확대/축소된 장면을 나타낸다.



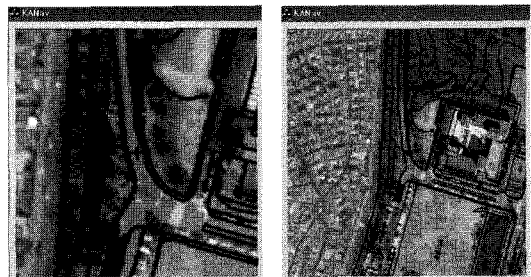
(a) Information map



(b) Google Earth map



(c) Combined map



(d) Zoom in/out map

그림 5. 개선된 GUI.

Fig. 5. Advanced GUI.

2. 실험 조건

그림 6은 KIST (Korea Institute of Science and Technology) 안 내지도에 주행 경로를 표시한 것이다. 주행 경로의 환경 및 조건은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 도로의 길이는 500m.
- 도로폭은 6m.
- 도로 주변에 아파트와 나무 및 숲이 도로의 좌우에 존재.
- A, B, C 및 D로 표시된 구간에는 연석이 존재하지 않음.
- 경로의 끝에서 로봇은 U턴을 하여 다시 출발점으로 복귀.

위에 요약된 주행 환경 조건은 도심에서 일반적인 조건이며 건물 및 나무들에 의한 GPS 신호의 차단 및 다중반사는 GPS의 위치오차를 증가시키는 원인이 된다.

개발된 로봇에는 ProPak-V3 DGPS가 장착되어 있으며 이 수신기는 네 가지의 다른 상태값을 출력하며 상태코드와 오차 범위는 다음과 같다.

- 0: Fail
- 1: Single 모드 (위치오차: 1.8 m RMS)
- 2: DGPS 모드 (위치오차: 0.45 m RMS)
- 5: RT20 모드 (위치오차: 0.2m RMS)

GPS의 이러한 특성은 가시위성수가 5 이상이고 PDOP이 3이하인 경우에 신뢰성을 가지며 이 조건이 만족하지 않으면 위치오차는 더욱 증가하게 된다. 실제 실험을 통하여 RT20 모드에서도 가시 위성수가 4 이하인 경우에는 위치오차가 1~5m의 범위를 갖는 것을 확인하였다.

이러한 문제점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 주행 방법을 적용하여 실험을 수행하였다.

- 가변 Kalman 이득: GPS의 상태 및 가시위성수에 따라 측정 공분산 R을 변경.
- 스위칭 제어기 설계: GPS 및 연석의 유무에 따라 제어기를 스위칭.
- 경로의 재계획(replanning): GPS의 위치오차가 큰 경우에는 경로를 재계획.

3. 실험 결과

그림 6의 KIST 원내 도로를 연석과의 거리를 1m 유지하면서 평균 1m/s의 속도로 왕복 주행할 수 있도록 경로를 설정하여 자율 주행 실험을 수행하였다. 그림 7의 사진은 로봇이 연석이 없는 구간을 통과하는 장면을 나타낸다. 연석이 없는 구간에서는 연석추종 제어기에서 광역 경로추종 제어기로 스위칭하고 다시 연석이 시작되는 구간에서는 연석추종 제어기로 스위칭을 하게 된다.

그림 8에 전체 주행 경로 및 스위칭이 발생하는 구간을 확대하여 표시하였다. 대시라인은 로봇의 EKF 기반의 추정된

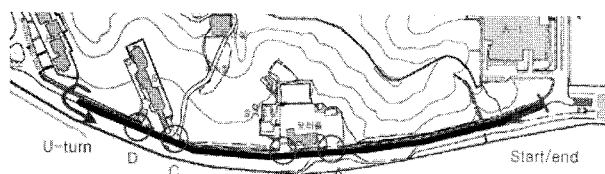


그림 6. 이동 로봇 주행 경로.
Fig. 6. Mobile robot navigation route.

위치를 나타내며 점선은 로봇의 거리정보계와 자세센서만을 이용한 로봇의 위치를 나타낸다. 이것으로부터 거리정보계만으로는 위치오차가 누적되는 것을 알 수 있다.

그림 9에서 (a)는 로봇과 연석과의 거리를 나타낸 것인데 로봇이 연석이 있는 구간에서 1m를 유지하는 것을 알 수 있으며 평균 10cm의 제어오차가 발생하였으며 (b)로부터 연석

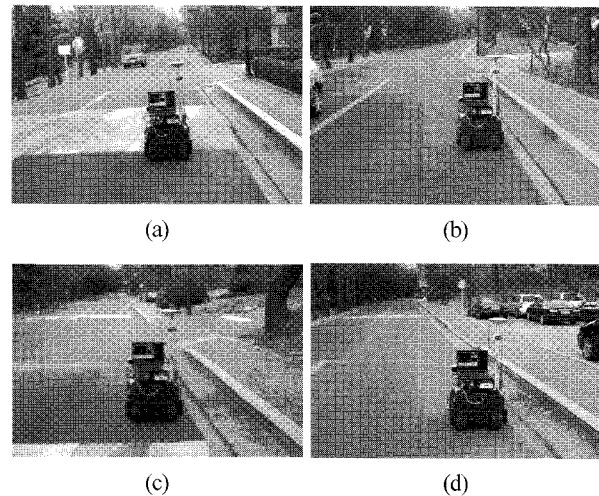


그림 7. 로봇 주행 사진.

Fig. 7. (a) Mobile Robot at point A (b) Robot at point B (c) Robot at point C (d) Robot at point D.

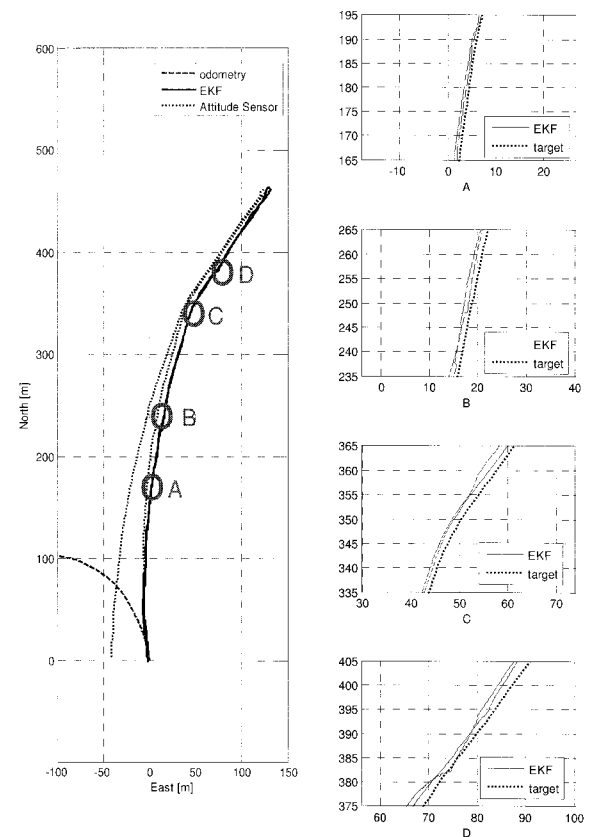


그림 8. 스위칭제어기에 의한 이동로봇의 경로.

Fig. 8. Trajectory of mobile robot controlled by the switching control strategy.

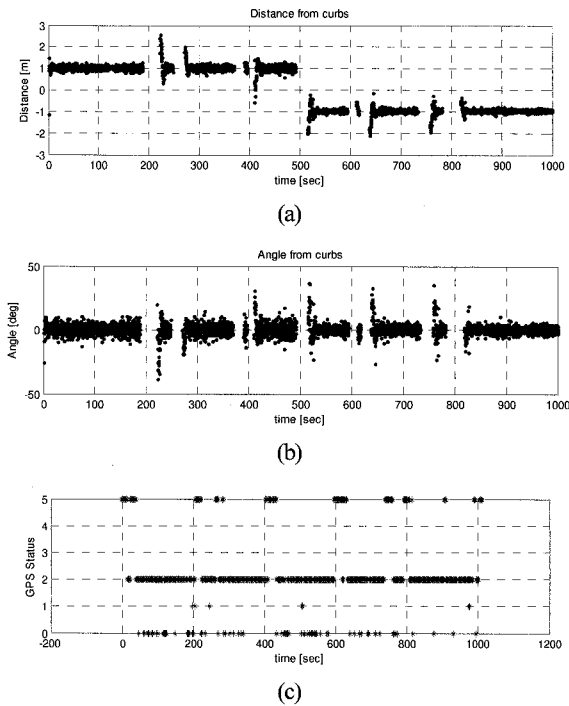


그림 9. (a) 연석과의 거리 (b) 연석과의 각도 (c) DGPS 상태.
 Fig. 9. (a) Relative distances from curb (b) the angles from curb (c) the status of DGPS.

과의 각도를 5도 이내로 유지하는 것을 알 수 있다. 그림 9(c)는 DGPS의 상태를 보여주는데 전체 주행 구간에서 DGPS의 위치오차범위가 작은 RT20모드 구간이 적음을 알 수 있다. 이 실험을 통하여 도심 환경에서 연석정보를 이용하면 GPS 신호가 불량한 경우에도 주행의 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문은 GPS 위치오차범위가 변하는 도심환경에서 신뢰성있게 동작하는 자율주행 로봇 시스템에 관하여 설명하였다. GPS와 거리주행계 및 자세센서를 혼합하여 EKF 알고리즘에 기반한 로봇의 위치추정을 수행하였다. 또한 GPS 신호가 변하는 환경에서 주행의 신뢰성을 확보하기 위하여 도로의 연석을 이용하여 연석을 추종하는 제어기를 설계하였고 이를 적용하여 주행 신뢰성을 향상시켰다.

GPS의 신호 상태와 연석의 유무에 따라 네 가지 주행조건으로 분류하고 각 조건에 적합한 위치추정 알고리즘 및 제어기를 설계하여 주행시 조건에 따라 위치추정 및 제어기를 스위칭하는 전략을 제안하였으며 도로에서 1km의 자율 주행 실험을 통하여 자율주행 로봇 시스템의 성능을 확인하였다.

참고문헌

[1] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A. B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hahnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte,

and D. Schulz, "Probabilistic Algorithms and the Interactive Museum Tour-Guide Robot Minerva," *International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 11, pp. 972-999, 2000.

[2] R. Thrapp, C. Westbrook, and D. Subramanian, "Robust localization algorithms for an autonomous campus tour guide," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2065-2071, 2001.

[3] K. Ohno, T. Tsubouchi, B. Shigematsu, S. Maseyama, and S. Yuta, "Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based on DGPS and Odometry Data Fusion," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1978-1984, 2003.

[4] S. C. Kang, W. S. Lee, M. S. Kim, and K. C. Shin, "ROBHAZ-Rescue: Rough-terrain negotiable teleoperated mobile robot for rescue mission," *IEEE Int. Safety, Security and Rescue Robotics Workshop*, pp. 110-115, 2005.

[5] R. A. Lindemann, D. B. Bickler, B. D. Harrington, G. M. Ortiz, and C. J. Voothees, "Mars exploration rover mobility development," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 13, issue 2, pp. 19-26, 2006.

[6] S. Kim, C. Roh, S. Kang, and M. Park, "Outdoor navigation of a mobile robot using differential gps and curb detection," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.

[7] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, "Probabilistic Robotics." MIT Press, 2005.

[8] W. S. Wijesoma, K. R. S. Kodagoda, and A. P. Balasuriya, "Road-boundary detection and tracking using lidar sensing," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 20, no. 3, pp. 456-464, 2004.

[9] K. Kodagoda, W. Wijesoma, and A. P. Balasuriya, "Cute:curb tracking and estimation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, Sep. 2006.

[10] N. Apostoloff and A. Zelinsky, "Robust vision based lane tracking using multiple cues and particle filtering," *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, June 2003.

[11] R. G. Brown and P. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, JOHN WILEY & SONS, 1997.

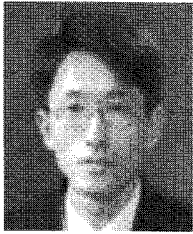
[12] S. Panzieri, F. Pascucci, and G. Ulivi, "An outdoor navigation system using GPS and Inertial platform," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 134-142, 2002.

[13] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990.

[14] E. Frew, T. McGee, Z. Kim, X. Xiao, S. Jackson, M. Morimoto, S. Rathinam, J. Padial, and R. Sengupta, "Vision-based road following using a small autonomous aircraft," *Proceedings of IEEE Aerospace Conference 2004*, 2004.

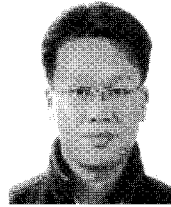
[15] C. Chan and H. Tan, "Lane tracking control in vehicle-following collision situations," *Proceedings of American Control Conference*, 1999.

[16] S. Bayraktar, G. E. Fainekos, and G. J. Pappas, "Experimental cooperative control of fixed-wing unmanned aerial vehicles," *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, 2004.



노치원

1995년 아주대학교 제어계측공학과 학사. 1997년 아주대학교 제어공학과 석사. 1997년~1999년 LG산전 플랜트 연구소 연구원. 2007년 아주대학교 전자공학과 공학박사. 2004년~2006년 KIST 지능로봇연구센터 위촉연구원. 2007년~현재 KIST 인지로봇연구단 Post-Doc 연구원. 관심분야는 최적/강인 제어이론, 비선형제어, 자율주행로봇.



강연식

1999년 서울대학교 조선해양공학과 학사. 2001년 서울대학교 조선해양공학과 석사. 2006년 University of California, Berkeley Mechanical Engineering Ph.D. 2007년~현재 KIST 인지로봇연구단 선임연구원. 관심분야는 표적추적, 이동로봇 네비게이션 알고리즘.



강성철

1989년 서울대학교 기계설계학과 학사. 1991년 서울대학교 석사. 1998년 서울대학교 기계설계학과 공학박사. 1991년~1999년 KIST 휴먼로봇연구센터 연구원. 1999년~2000년 일본 기계기술연구소(MEL) 로봇연구부 박사후 연구원. 1999년~2005년 KIST 지능로봇연구센터 선임연구원. 2005년~현재 KIST 인지로봇연구단 책임연구원. 관심분야는 지능형 dependable 매니플레이션, 위험작업용 필드 서비스로봇, Haptic, Tactile Interface, 소형 비행선 설계, 제어 및 응용.