

초음파 위치 센서를 이용한 차량 로봇의 경로 추종에 관한 연구

윤석민[†], 여태경*, 박성재*, 홍섭*, 김상봉**

A Study for Path Tracking of Vehicle Robot Using Ultrasonic Positioning System

Suk Min Yoon[†], Tae Kyeong Yeu*, Soung Jea Park*, Sup Hong*,
Sang Bong Kim**

Key Words: 4-Wheel Skid Steering Vehicle (4륜 스키드 조향 차량), Multi Robot (다중 로봇), Path Tracking (경로추종), Ultrasonic Positioning System (초음파 위치 시스템)

Abstract

The paper presents research for the established experiment environment of multi vehicle robot, localization algorithm that is based on vehicle control, and path tracking. The established experiment environment consists of ultrasonic positioning system, vehicle robot, server and wireless module. Ultrasonic positioning system measures positioning for using ultrasonic sensor and generates many errors because of the influence of environment such as a reflection of wall. For a solution of this fact, localization algorithm is proposed to determine a location using vehicle kinematics and selection of a reliable location data. And path tracking algorithm is proposed to apply localization algorithm and LOS, finally, that algorithms are verified via simulation and experimental.

기호설명

COM : 차량의 무게중심 좌표
 v : 차량의 전진 속도 (m/s)
 ω : 차량의 회전 각속도 (rad/s)
 r : 바퀴의 반지름 (m)
 c : 바퀴 간 거리의 1/2 (m)
 θ : 차량의 진행방향과 X축이 이루는 각 (rad)
 (x_n, y_n) : n번째 Way point 좌표
 (x_d, y_d) : 차량과 가장 가까운 경로상의 좌표
 (x_{los}, y_{los}) : 최종 목표 지향 좌표
 ϕ_d : 최종 목표 지향각 (rad)

1. 서론

차량 로봇(Vehicle robot)에 관한 여러 기술 중에서도 육상, 수중 그리고 공중에서 일정한 대형(Formation)을 이루며 동작하는 다중 로봇(Multi robot)에 대한 기술이 최근에 많은 각광을 받고 있다. 다중 로봇 제어의 경우, 각 차량의 위치 또는 위치 관계를 아는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 각 차량마다 위치 시스템을 갖추는 것보다 갖추어진 위치 시스템을 모든 차량이 동시에 이용할 수 있도록 하는 것이 더욱 효율적이다.

다중 로봇 제어에는 중심 역할을 하는 로봇의 기능에 따라 leader-following, behavioral, virtual structure 등의 여러 가지 방법이 제안되고 있다 [1]. 이러한 방법들의 공통점은 로봇의 기능 차이는 있지만 서버 혹은 리더와 같이 중심 역할을 하는 로봇이 필요하다는 것이다.

[†] 한국해양연구원 해양시스템연구부

E-mail : aquiline@moeri.re.kr

TEL : (042)868-0426

* 한국해양연구원 해양시스템연구부

** 부경대학교 기계공학부

본 논문에서는 다중 로봇 제어에 관한 실험을 위해 구축되어진 위치 인식 시스템, 차량 로봇과 서버 시스템 환경을 우선 소개하고자 한다. 먼저 차량 로봇의 위치를 측정하기 위하여, 한국 LPS 사의 초음파 위치 시스템(Ultrasonic positioning system)을 사용한다. 차량 로봇은 리눅스 기반의 임베디드 컨트롤러(Embedded Controller)가 탑재되어 있으며, 차량의 속도 및 위치를 인식하고 이것을 무선으로 통해 서버 시스템으로 보내거나 서버로부터의 지령을 수행한다. 초음파 센서의 경우, 벽면 반사 등 주위 환경에 의해 측정 오차가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 먼저, 위치 인식 알고리즘을 제안한다. 이것은 차량 운동학(Kinematics)에 양 바퀴의 엔코더(Encoder) 값을 대입한 위치 예측 값과 신뢰성 판단 알고리즘을 통해 선택되는 실제의 위치 데이터를 적절히 활용하여 위치를 결정하는 방법이다. 다음으로, 제안된 위치 인식(Localization) 알고리즘을 바탕으로, LOS(Line of Sight)법을 적용한 차량의 경로 추종(Path tracking) 방법을 제안한다. 끝으로, 차량 로봇과 위치 측정 시스템 그리고 제안된 알고리즘을 사용하여 경로 추종에 관한 실험을 통하여, 그 성능을 확인하고자 한다.

2. 기반 장비 구축

2.1 초음파 위치 시스템

초음파 위치 시스템은 초음파를 발송하는 발신기(Transmitter)에 의해 사용 대수의 제약 없이 무한대의 수신기(Receiver)를 추가해서 사용 가능하며, 수신기의 3차원 위치 인식 원리를 이용하여 좌표를 측정하는 시스템이다.

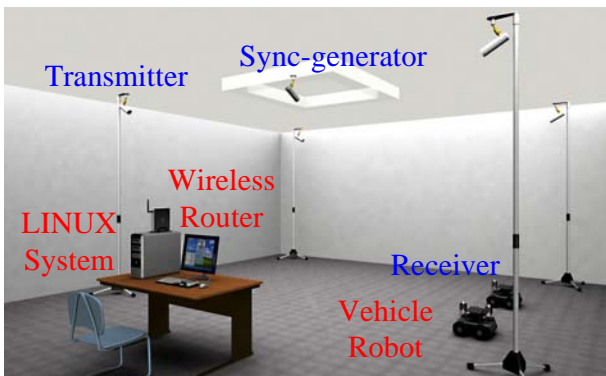


Fig. 1 Base experimentation environment

Fig. 1은 동기기(Sync-generator), 발신기 그리고 수신기로 구성되어 있는 초음파 위치 시스템이 설치된 실험시설이다. 동기기에서는 RF 무선과 10m 케이블 유선을 통해서 각각 수신기와 발신기에 동기신호를 전송한다. 물체 위치를 측정하기 위해서는 최소 4개의 발신기가 필요하며, 동기기는 0.15초 간격으로 1에서 4번의 발신기에 동기신호를 보낸다. 4개의 발신기로부터 신호를 받은 수신기는 자기 위치를 계산하며, 그 결과를 시리얼 통신을 통해 외부로 전송한다. 위치 측정에 소요되는 시간은 0.6초이며, 실험 공간의 크기는 가로 5m, 세로 6m이다.

초음파 위치 시스템은 이론상 수신기를 계속해서 늘릴 수 있고, 차량에 자유롭게 부착한다는 특징 때문에 다중 로봇 제어 실험을 하는데 적합한 위치 시스템이다.

2.2 차량 모델 제작

차량 모델은 Fig. 2 좌측 상단의 임베디드 컨트롤러와 좌측 하단의 이동차량으로 구성된다.

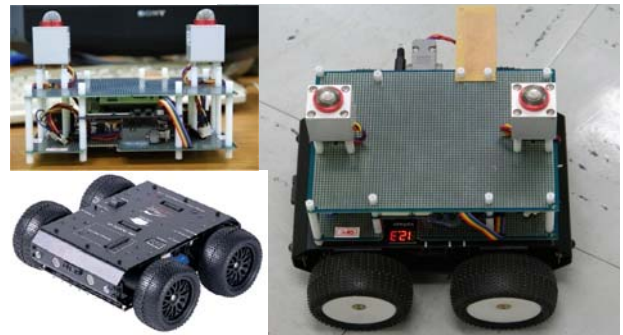


Fig. 2 Vehicle model

차량 모델 상단의 앞·뒤에는 두 개의 수신기가 부착되어 차량의 위치와 방위각(Orientation)을 계산한다. 이동 차량은 ATmega128L을 이용해 양쪽 뒷바퀴에 있는 엔코더 값을 시리얼 통신을 통해 임베디드 컨트롤러로 전송한다.

리눅스(Linux) 기반의 임베디드 컨트롤러에는 S3C2440 마이크로컨트롤러가 탑재되었으며, 두 개의 수신기와 차량으로부터 데이터를 받아서 차량의 위치와 방위각을 인식하고 경로를 추종하는 등의 알고리즘을 실행한다. 또한 임베디드 컨트롤러에는 USB 타입의 무선 랜을 연결하여 무선 공유기를 통해 리눅스 서버 시스템과의 통신이 가능하며, 이는 차후 다중 로봇 제어 실험으로의

확장이 용이하도록 하기 위함이다.

3. 차량의 운동학적 모델링 (Kinematics Modeling of Vehicle)

본 논문에서 고려하는 차량 모델은 강체로 이루어져 있고 2차원 평면상에서만 이동을 하며, 4개의 바퀴를 가지고 스키드 조향(Skid steering) 방식으로 이동하는 차량이다.

Fig. 3은 차량 모델의 운동학적 모델링을 위해서 차량에 대한 절대 좌표와 차량의 로컬 좌표를 나타낸 것으로 (X_g, Y_g, Z_g) 는 전체 시스템의 좌표계이다. 차량의 무게중심은 $COM=(X, Y, Z)$ 로 표현되며, 본 논문에서는 평면 운동만을 고려하므로 Z 는 고정이다. (x_l, y_l, z_l) 은 COM 을 원점으로 하는 차량의 로컬 좌표계이다.

$q = [XY\theta]^T$ 을 차량의 일반화 좌표 벡터라고 하면, $\dot{q} = [\dot{X}\dot{Y}\dot{\theta}]^T$ 는 일반화 속도 벡터로 정의할 수 있다. Fig. 3로부터 \dot{q} 와 차량의 로컬 속도 벡터와의 관계는 식 (1)과 같다[2].

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

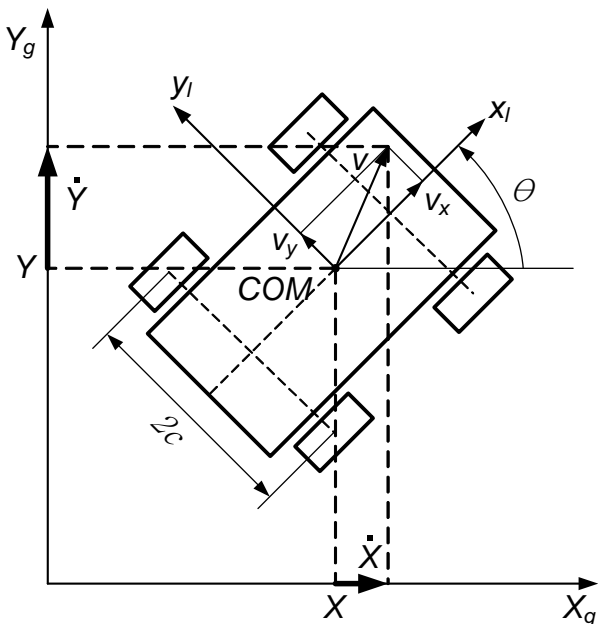


Fig. 3 Coordinates of four-wheel vehicle

v_L, v_R 을 각각 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 로컬 좌표계에서 x 축 속도라고 하면, 바퀴의 속도와 차량의 속도와의 관계를 식 (2)와같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -c \\ 1 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

ω_L, ω_R 을 각각 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 각속도라고 하면, v_L, v_R 로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

v_x 을 로컬 좌표계에서 차량의 x 축 속도라고 하면, 식 (2)와 식 (3)로부터 v_x, ω 에 대한 ω_L, ω_R 의 관계식은 식 (4)와 같다,

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ \frac{-\omega_L + \omega_R}{2c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. 위치 인식 알고리즘 (Localization Algorithm)

초음파 위치 시스템을 통해서 차량로봇의 위치 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 X 축과 Y 축은 절대 좌표계에서의 X_g 와 Y_g 이다.

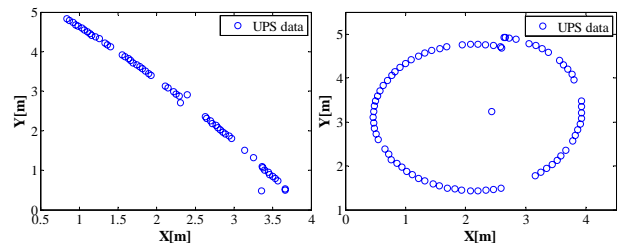


Fig. 4 Original data of ultrasonic positioning system

여기서, 측정된 위치 데이터는 벽면 반사 등과 같은 외란에 의해 정확한 차량 위치와 방위각을 알기란 어렵다. 또한 매 0.6초 간격으로 거리가 측정되기 때문에, 그 사이의 차량 위치와 방위각

을 알기가 불가능하다. 따라서 운동학 방정식과 엔코더 값을 이용한 차량의 위치를 예측 알고리즘을 구현하고자 한다.

3장에서 얻어진 운동학 방정식, 식 (4)에서 실제 차량의 엔코더 값을 이용해 위치를 계산한 결과는 Fig. 5와 같다. 여기서 $r=0.044$, $c=0.106$ 이며, 이것은 실측된 값이다. 그리고 선회비를 v_L/v_R 라고 하면, Fig. 5의 왼쪽과 오른쪽 그래프의 선회비는 각각 1.1007과 1.1740이다. 그림에서 파란 점은 초음파 위치 시스템에서 들어온 데이터이며, 빨간 점은 위치 인식 알고리즘에 의한 위치 인식 결과를 나타낸다.

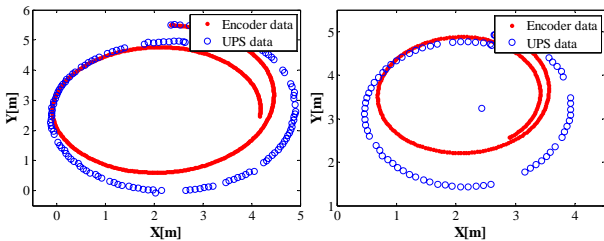


Fig. 5 Localization of kinematics

여기서, 실측 r , c 값을 사용한 차량 위치 예측 값과 실제 계측된 위치와는 큰 오차를 가진다. 이러한 문제점으로부터, 우리는 최적의 r , c 값을 찾는 알고리즘을 우선적으로 제안한다. 즉, 일정 범위 내에서 r , c 값을 계속 변화시키면서 예측된 값과 실제 계측된 위치 사이의 오차를 최소화하는 r , c 를 결정하는 것이다. Fig. 6의 왼쪽은 $r=0.042$, $c=0.135$ 을 이용하였고, 오른쪽은 $r=0.04$, $c=0.12$ 을 이용하여 위치를 예측한 결과이다.

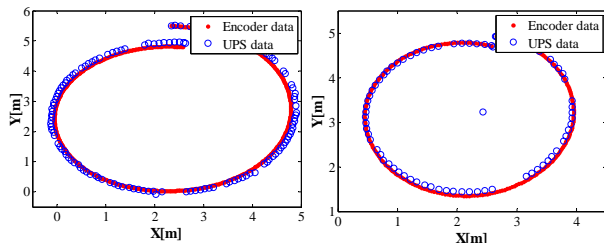


Fig. 6 Localization of kinematics of optimal r , l

위의 결과와 같이 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 선회비가 다를 경우 r , c 의 최적 값 또한 달라지는 경향을 보였다.

Fig. 4와 6의 결과로부터, 초음파 위치 시스템과 엔코더를 따로 사용하는 것만으로는 정확한 위치를 결정할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 앞의 두 데이터를 이용해서 현재 차량 위치와 방위각을 인식하는 알고리즘이 필요하다.

Fig. 7은 본 논문에서 제안하는 센서로부터 계측된 위치 데이터와 엔코더/차량 운동방정식을 이용한 위치 인식 알고리즘을 간략하게 설명하고 있다. 여기서 0.1초마다 엔코더 데이터를 운동학 방정식에 대입하여 위치를 예측하고, 0.6초마다 초음파 위치 시스템 데이터의 신뢰성을 판단하여 차량의 위치와 방위각을 보정한다. 계측한 위치 데이터에 대한 신뢰성 판단 기준은 다음과 같다.

1. 단위 시간에 움직일 수 있는 최대 거리를 계산하여 그 범위 안에 있는지 판단한다.
2. 두 개의 수신기 간격은 일정하므로 그 간격에서 벗어난 정도를 판단한다.

신뢰할 수 있다고 판단되어진 위치 데이터와 운동학적 방정식 데이터 사이에 적절한 하중을 가하여 최종적으로 차량의 위치와 방위각을 결정하게 된다.

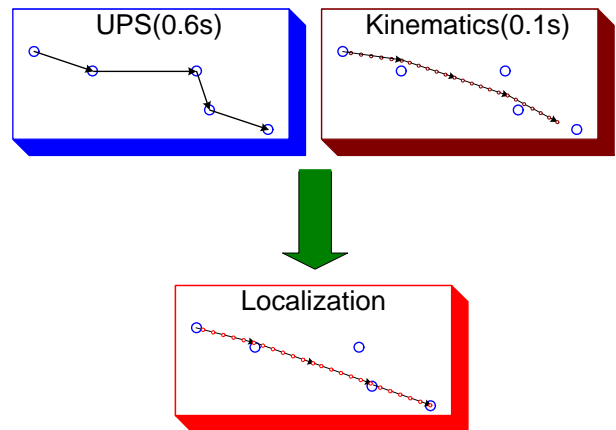


Fig. 7 Localization algorithm of vehicle model

Fig. 8은 차량의 자율 주행 실험을 통해 계측된 위치(파란색 O) 값과 예측된 위치(붉은색 .) 값을 나타낸다. 여기서 $r=0.04$ 과 $c=0.1431$ 로 선정하였다. 실험결과를 통해, 실제 값과 예측된 값 사이에는 오차가 없음을 확인할 수 있다.

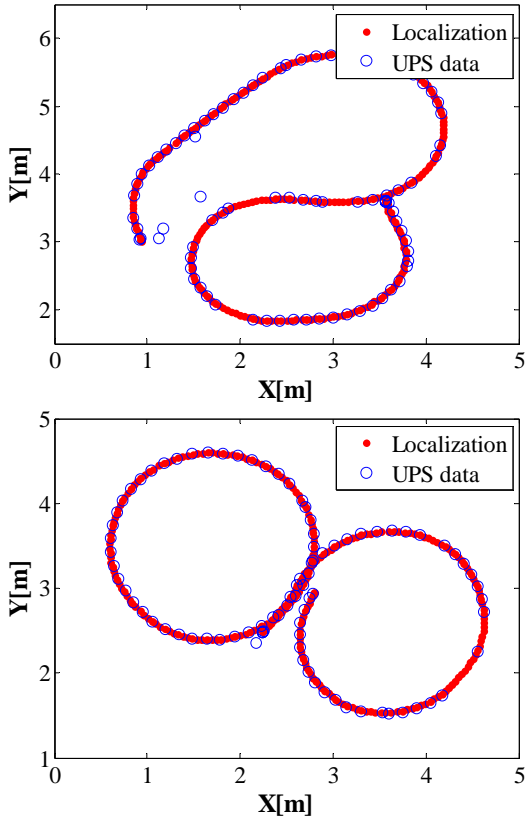


Fig. 8 Experiment result of localization algorithm

5. 경로 추종(Path Tracking)

차량의 경로를 추종하기 위해서 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 LOS 개념을 적용하였다[3]. 원하는 차량의 경로는 Fig. 9와 같은 다수의 경로점(Way point)의 집합으로 이루어지며, 차량의 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 과 목표 지향각 ϕ_d 는 LOS 벡터로 결정된다. 또한, 각각의 경로점에는 차량이 원하는 전진방향 속도 v_n 가 결정되는데, 본 연구에서는 그 값 v_n 이 일정하다고 가정한다.

현재 차량의 위치가 (X, Y) 일 때 차량의 위치와 가장 가까운 경로상의 위치 (x_d, y_d) 는 벡터의 내적을 찾는 식 (5)을 이용해서 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{(X - x_n)(x_{n+1} - x_n) + (Y - y_n)(y_{n+1} - y_n)}{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \quad (5)$$

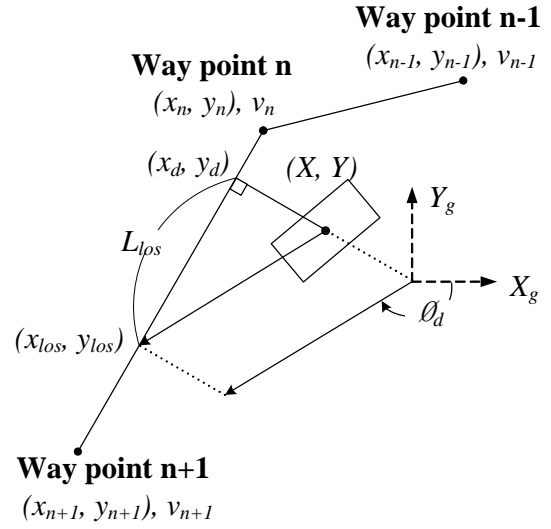


Fig. 9 Way point and LOS concept

$$\begin{aligned} x_d &= x_n + u(x_{n+1} - x_n) \\ y_d &= y_n + u(y_{n+1} - y_n) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)에서 u 는 0과 1사이의 값으로 이 값이 1에 가까우면 (x_d, y_d) 가 (x_{n+1}, y_{n+1}) 에 가까이 있음을 선형적으로 나타내는 파라미터이다.

최종 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 과 최종 목표 지향각 ϕ_d 는 LOS 상수로 불리는 L_{los} 을 사용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 최종 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 가 n 번째 Way point와 $n+1$ 번째 Way point 상에 없을 경우 $n+1$ 번째 Way point와 $n+2$ 번째 Way point 상에서 찾는다.

$$\begin{aligned} (x_{los}, y_{los}) &= (x_d, y_d) + L_{los} \\ \phi_d &= \text{atan2}(y_{los} - Y, x_{los} - X) \end{aligned} \quad (7)$$

차량의 움직임은 차선변경과 유턴을 이용하여 대부분 묘사할 수 있기 때문에, 차량을 이용한 실제 실험은 Fig. 10의 차선변경 경로와 Fig. 11의 유턴 경로의 추종을 목표로 하였다. 또한 최적의 경로 추종을 위해 반복적인 실험을 통한 최적 값 $L_{los} = 0.18$, $v_n = 0.0233$ 을 이용하여 실험하였다.

차선변경과 유턴 실험에서 계획되어진 경로와 실제 차량이 움직인 경로의 거리 차이를 식 (8)과 같이 정의하면, 실험 결과는 Fig. 12와 같다.

$$\text{error} = \sqrt{(x_d - X)^2 + (y_d - Y)^2} \quad (8)$$

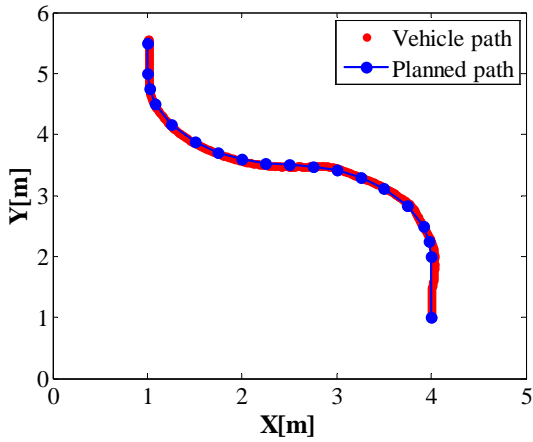


Fig. 10 Experiment result of lane change LOS

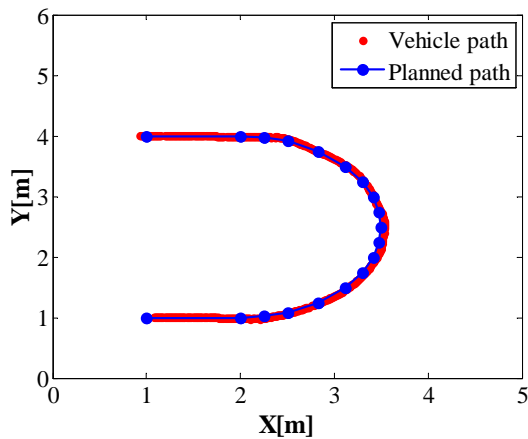


Fig. 11 Experiment result of U-turn LOS

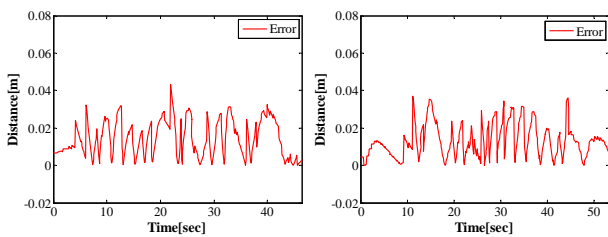


Fig. 12 Error of experiment

5. 결론

본 논문은 다중 차량 로봇의 제어를 위한 실험 시설 및 차량 제어에 있어 가장 기본이 되는 위치 인식 알고리즘의 제안과 경로 추종에 관한 실험 결과를 소개하였다. 먼저, 초음파 위치 센서를

통해 측정된 데이터는 주위 환경에 의해 많은 오차가 발생하였다. 이 문제를 해결하기 위해, 차량 운동학 방정식과 신뢰성 있는 위치 데이터 판단을 통한 위치 인식 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 그 적용성을 입증하였다. 제안된 위치 인식 알고리즘을 기본으로, LOS 개념을 적용한 경로 추종 알고리즘을 제안하였고, 실험을 통해 추정 성능을 검증하였다. 본 연구 결과(한대의 차량 로봇)를 바탕으로, 차후에는 다중 차량 로봇의 경로 및 대형(Formation) 제어 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 그 성능을 검증할 계획이다.

후 기

본 논문은 국토해양부 연구과제인 “심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발(2-2)” 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Stefano Carpin and Lynne E.Parker, 2002, "Cooperative Leader Following in a Distributed Multi-robot System", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2994~3001.
- [2] Krzysztof Kozłowski and Dariusz Pazderski, 2004, "Modeling and Control of 4-Wheel Skid-Steering Mobile Robot", *Int.J. Appl. Math. Comput. Sci.*, Vol. 14, No. 4, pp. 477~496.
- [3] Tae-Kyeong Yen, Soung-Jea Park, Sup Hong, Hyung-Woo Kim and Jong-Su Choi, 2006, "Path Tracking using Vector Pursuit Algorithm for Tracked Vehicles Driving on the Soft Cohesive Soil", *SICE-ICASE International Joint Conference*.
- [4] Jaydev P.Desai, James P.Ostrowski and Vijay Kumar, 2001, "Modeling and Control of Formations of Nonholonomic Mobile Robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp.905~908.
- [5] A.D.Nguyen, Q.P.Ha, S.Huang, H.Trinh, 2007, "Observer-Based Decentralized Approach to Robotic Formation Control"