

# 퍼지 알고리즘을 이용한 자율주행 이동로봇의 설계에 관한 연구

정회원 서현재\*, 임영도\*

## A Study on Autonomous Driving Mobile Robot by Using Fuzzy Algorithm

Hyun Jae Seo\*, Young Do Lim\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 퍼지 알고리즘을 사용하여 지능형 자율주행로봇을 설계하였다. 설계된 로봇은 이동시 장애물을 인식하여 이를 회피하며 안전하게 도달하는데 목적이 있다. 또한 로봇의 이동에 있어서 로봇의 안정성과 주행성의 성능을 높이기 위해 보조 바퀴에 서스펜션을 장착하였다. 이렇게 설계된 지능형 자율주행로봇은 병원이나 빌딩 내부의 좁은 실내에서 노약자나 장애인에 원하는 목적지 까지 안전하게 갈수 있다.

Key Words : ARV, Ultra sonic sensor , Nonholonomic, Kinematic model, suspension modeling

### ABSTRACT

In this paper, we designed a intelligent autonomous driving robot by using Fuzzy algorithm. The object of designed robot is recognition of obstacle, avoidance of obstacle and safe arrival. We append a suspension system to auxiliary wheel for improvement in stability and movement. The designed robot can arrive at destination where is wanted to go by the old and the weak and the handicapped at indoor hospital and building.

### I. 서 론

21세기 고령화 사회 속에서 병원, 간병시설 등의 수요급증으로 보조인력의 필요성이 급증하게 될 것으로 예상된다 따라서 본 논문에서는 노약자를 위한 안내 이동 로봇에 관한 연구의 일환으로 안내 서비스 이동로봇의 설계를 하였다.

안내 서비스 이동로봇은 구동 제어를 위한 전기적 신호 처리부분, 레버 및 레이저 스캔 센서(Laser scan sensor)에 대한 신호 처리부분으로 나눌 수 있다.

안내 서비스 이동로봇은 큰 용량의 모터(Motor)와 큰 전력의 회로 디바이스(device)를 사용하기 때문에 인터페이스 및 각 디바이스간의 연결 회로를

잘 구성하여 전력을 위한 부분과 신호를 위한 부분이 겹치지 않도록, 각각에 대해 잡음(noise) 및 오작동의 영향을 주지 않게 시스템(system)을 설계하여야 한다.

다음 Fig. 1은 전기 신호적인 전체 시스템을 블록 다이어그램(block diagram)으로 나타내었다.

사용자(user)가 안내 서비스 이동로봇을 안내를 받기 위해 사용할 때 가장 먼저 주 제어기에 원하는 위치를 입력 시킨다.

그렇게 하면 주 제어기는 MMC에 디지털(digital) 신호를 보내고, 그 신호가 인터페이스 카드(interface card)에 지나 모터 드라이브에 연결된 모터를 회전시켜 사용자가 원하는 위치까지 이동하게 된다.

또한, 센서(Load cell)가 장착된 레버에 압력을 가

\* 동아대학교 (shj0868@hanmail.net)

논문번호 : KICS2005-04-383, 접수일자 : 2005년 4월 23일, 최종논문접수일자 : 2006년 4월 13일

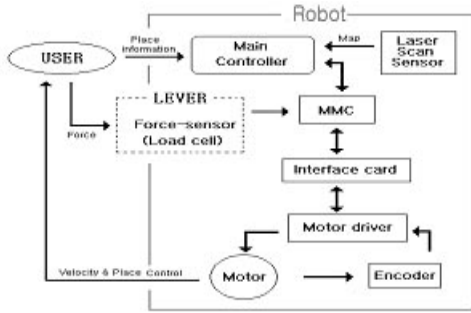


Fig. 1. Signal block diagram of the whole system

하면 아날로그(analog) 신호를 MMC가 입력 받아 힘의 크기에 대해 반응하도록 주 제어기에서 연산을 하게 된다. 따라서, 연산된 값이 속도제어에 관한 범위에 속한다면, 위와 같은 방법으로 모터의 회전 수를 제안하여 사용자의 걷는 속도를 제어하게 된다.

## II. 시스템 모델링

### 2.1 이동로봇의 구동부 설계

제어기 설계를위하여 자율이동로봇의 기구학적 모델을 설정한다. Fig. 2은 최적 제어기 설계를 위한 자율이동로봇의 기구학 모델을 나타내고 있다

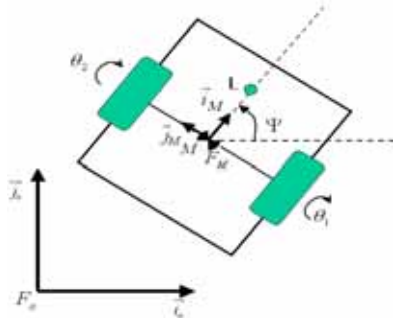


Fig. 2. Schematic diagram of mobile robot

그림에서 M는 차량의 무게중심점(CG point)으로 차량 위치의 기준점이 된다. FO는 고정된 기준 프레임(frame)이며 FM은 움직이는 차량부분의 프레임이다. O는 기준 좌표계의 원점이며 M은 차량 좌표계의 원점이다. 간단한 기구학 모델을 얻기 위해 안내 / 재할 이동 로봇의 바퀴는 지면에 대해 완전구름 조건을 만족하고 축면 미끄러짐도 없다고 가정한다. 이 가정을 통하여 다음과 같은 기구학 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\cos\Psi \\ \dot{y}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin\Psi \\ \dot{\Psi}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (1.1)$$

이 식은 가장 일반화 된 2륜 구동 차량의 기구학 방정식이지만 제어는 쉽지 않다. 그 이유는 식(1.1)의 처음 두 식은 완전하게 적분 될 수 없는 Non-holonomic 특성을 갖기 때문이다. 제어를 수월하게 하기 위해 차량 프레임에 대한 기구학 방정식을 유도한다. 먼저 차량에 가상적으로 연결되어 있는 점 D는 바퀴 축에 거리 d만큼 떨어져있다고 하자. 구성 벡터(vector)를 다음과 같이 놓는다.

$$\mathbf{X} = [x \quad y \quad \Psi]^T \quad (1.2)$$

보조 제어 벡터를 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\mathbf{U} = [v \quad \Psi]^T \quad (1.3)$$

여기서 v는  $\vec{i}_M$  축을 따르는 차량의 접선 방향 속도이다.

제어벡터 U는 구동 바퀴의 회전 속도에 의해 구속되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{U} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2R} & -\frac{r}{2R} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

따라서 아래와 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{B}(\mathbf{X})\mathbf{U} \quad (1.5)$$

FM의 속도, 각속도, 그리고 M과 P의 속도를 고려하면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi \\ -\sin\Psi & \cos\Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

여기서 점P를 고정 프레임 FO의 원점O라 놓으면  $\dot{x}_p = \dot{y}_p = 0$  이 된다.

이제 식(1.7)에서 제어 입력  $\mathbf{B}(\mathbf{X})$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$B(X) = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

여기서 제어 입력  $B(X)$ 의 안정성을 확인해보자. 두가지 경우로 나누어 피드백 제어를 한다. 첫번째  $d=0$ 인 경우 즉, 제어 위치를 차량 중심(M)에 설정하였을 때 간단하게 Lyapunov 안정성 이론을 적용하여 아래와 같은 피드백 제어를 할 수 있다. 제어 입력력을 다음과 같이 정한다.

$$U = \begin{bmatrix} v \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x \\ k_2 y \end{bmatrix}, \quad k_1 > 0, \quad k_2 \neq 0 \quad (1.8)$$

2.2 보조바퀴 모델링

이러한 수식을 이용하여 생성된 경로 알고리즘이 적용되기 위해, 가정한 바와 같이 축면 미끄러짐과 완전 구름을 만족시켜주는 구동부 메커니즘이 필요하다. 즉, 서스펜션(suspension) 메커니즘을 적용하고자 한다.

서스펜션 용량을 설정하기 위해, 서스펜션에 대한 모델링하였다. Fig. 3은 서스펜션의 모델링을 나타내고 있다. 보조 바퀴는 진동 충격 흡수용 정밀 캐스터(caster)를 사용하였으며, 서스펜션(suspension)을 장착하였다. 적용된 서스펜션은 바퀴 일체형 모터의 구동을 원활하게 도와 주는 기능과 주행 중 지면의 충격을 흡수할 수 있다. 또한 노인이 속도조절장치에 의지하는데 따른 로봇의 전체 하중을 분산시켜 주는 기능을 갖고 있다. 특히, 구동 바퀴의 접지력을 향상시킨다. 바퀴가 접지력을 잃으면 순간적으로 안내 / 재할 이동 로봇은 조향 능력을 상실하게 되므로, 이는 곧 커다란 위험과 직결될 수 있다.

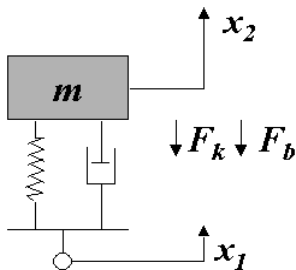


Fig. 3. Modeling of a suspension

서스펜션 모델링에 대한 식은 (2)과 같이 표현되어진다.

$$m\ddot{x}_2 + B(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K(x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $x_2$ : 이동로봇의 움직인 변위  
 $F_b$ : 댐핑력  $F_k$  탄성 변형력  
 $x_1$ : 바닥의 변위

III. 제어기 설계

Fig. 4는 자율이동 로봇의 경로 추적, 장애물 회피, 힘 제어를 위해 본 연구에서 적용한 제어기의 개요도를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 이 제어기는 두개의 피드백 루프(feedback loops)로 구성되어 있는데, 하나는 바퀴의 속도(wheel velocity)가 퍼지 제어기에 의해 생성된 목표 속도(desired velocity)를 추종하도록 하는 내부 루프(inner loop, minor controller)로서 이는 PID 제어기로서 구현하였다.

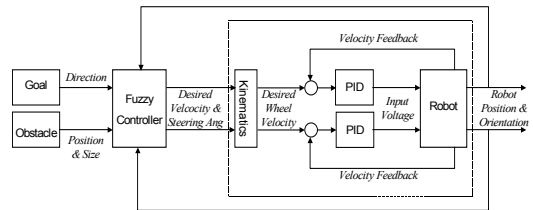


Fig. 4. Diagram of Control System

반면에 외부 루프(outer loop, major controller)는 목표 지점의 위치, 장애물의 위치 및 힘 센서의 입력에 따라 로봇의 속도 및 조향각(steering angle)을 산출하는 제어기로서 이는 규칙 기반(rule-based)의 퍼지 제어(fuzzy control)를 이용하여 구현하였다.

퍼지 제어에 의해 얻어진 자율이동 로봇의 속도 및 조향각은 앞 절에서 기술한 기구학적 관계에 의해서 양 바퀴의 속도로 변환되고 이 값은 앞서 기술한 PID 제어기의 목표 값으로 사용된다.

3.1 경로인식 알고리즘

레이저 센서 스캐닝에 의한 경로 인식은 주행하고자 하는 내부의 벽면에 대한 정보를 이용하여 이동 로봇의 위치와 자세를 결정하는 알고리즘을 적용하였다. 다음 Fig. 5은 벽면과 이동로봇의 관계를 나타내고 있다.

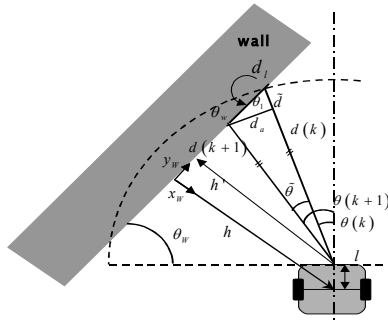


Fig. 5. Sensor frame in scannin

위와 같은 모델링으로부터 이동로봇이 벽으로부터의 자세 및 거리를 인식하는 좌표로 변환하는 관계식은 다음 식과 같다.

$$\theta_w = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left( \frac{d_a^2 - \tilde{d}^2 - d_l^2}{2\tilde{d} \cdot d_l} \right) - \theta(k) \quad (3.1)$$

$$h = h' - \cos \theta_w \cdot l \quad (3.2)$$

여기서,

$$d_l = \sqrt{d(k)^2 + d(k+1)^2 - 2d(k) \cdot d(k+1) \cos \tilde{\theta}} \quad (3.3)$$

$$\tilde{\theta} = \theta(k+1) - \theta(k) \quad (3.4)$$

$$\theta_l = \cos^{-1} \left( \frac{d_a^2 - \tilde{d}^2 - d_l^2}{2\tilde{d} \cdot d_l} \right) \quad (3.5)$$

$$\tilde{d} = d(k+1) - d(k) \quad (3.6)$$

$$d_a = d(k+1) \cdot \tilde{\theta} \quad (3.7)$$

여기서,  $\theta_w$ 는 이동로봇의 자세가 되고,  $h$ 는 벽으로부터  $x$ 방향의 거리가 된다. 이동로봇은 벽의 자세와 거리를 최소화 하는 경로로 주행 하는 경로 추종 알고리즘에 의해 주행한다. 결국 이동로봇은 은 벽으로부터 자신의 주행 경로가 결정 되어 Wall-following algorithm이 된다.

### 3.2 퍼지알고리즘

퍼지 이론(fuzzy theory)은 1969년 미국의 Zadeh 교수가 처음 제안한 이후, 기존 이분법적 논리에서 비롯되는 수학의 한계를 극복하고 실제 자연 현상 및 인간의 사고 방법을 더 잘 표현할 수 있는 대체

과학으로서 높은 관심과 조명을 받으며, 활발히 연구되어 왔다. 인공지능(AI, artificial intelligence)을 비롯한 다양한 분야에서 많은 성과를 이룩하였지만, 퍼지 이론이 가장 성공적인 결과를 얻어낸 분야는 퍼지 제어기이다.

퍼지 제어기는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 (1) 본질적으로 모호한 자연 언어(natural language)를 바탕으로 한 IF-THEN 형식의 규칙 베이스(knowledge base)와 (2) 주어진 퍼지 입력과 규칙 베이스(base)로부터 결론을 이끌어내는 추론(inference) 시스템, 그리고 (3) 그 결과 얻어진 퍼지 결론을 숫자(crisp value)로 바꿔주는 반퍼지화(defuzzification) 시스템으로 구성된다. 그러나, 추론 방법에 따라서 역퍼지화 시스템은 없을 수도 있다.

#### 3.2.1 퍼지 변수

이 연구에서 개발하고자 하는 자율이동 로봇은 경로 생성 및 장애물 회피, 사용자의 도보 속도에 따라 속도를 조절할 수 있는 기능을 수행해야 한다. 이를 위해서 (1) 목표 지점의 방향, (2) 장애물의 위치, (3) 로드 셀의 출력을 입력 변수로 받아들인다. 퍼지 규칙은 이로부터 자율이동 로봇의 (1) 속도와 (2) 조향각을 결정한다. 입력과 출력 변수의 퍼지값은 각각 Table 1과 Table 2와 같은 값을 가질 수 있도록 설계하였다.

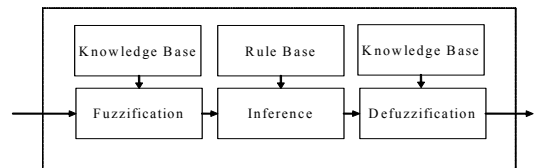


Fig. 6. Diagram of Fuzzy Controller

Table 1. Input Variables and Fuzzy Sets in Them

| Variable <sup>⊖</sup>                | Fuzzy Sets in the university <sup>⊖</sup>      |
|--------------------------------------|--|
| Distance of Obstacle <sup>⊖</sup>    | NAR MED FAR <sup>⊖</sup>                       |
| Orientation of Obstacle <sup>⊖</sup> | NBG NMD NSM<br>ZER PSM PMD<br>PBG <sup>⊖</sup> |
| Size of Obstacle <sup>⊖</sup>        | SML BIG <sup>⊖</sup>                           |
| Goal orientation <sup>⊖</sup>        | NEG ZRO POS <sup>⊖</sup>                       |

Table 2. Output Variables and Fuzzy Sets in Them

| Variable <sup>⊖</sup>               | Fuzzy Sets in the university <sup>⊖</sup> |
|-------------------------------------|---|
| Velocity of Robot Body <sup>⊖</sup> | SM BG <sup>⊖</sup>                        |
| Steering angle <sup>⊖</sup>         | NE ZE PO <sup>⊖</sup>                     |

3.2.2 규칙 베이스

로봇의 속도를 결정하는 규칙은 다음과 같다.  
 장애물이 앞에 있고 가까이 있으면 천천히 움직인다.  
 그렇지 않으면 빨리 움직인다.

Table 3. Control Rules for Velocity

|     |     |     |     |    |
|-----|-----|-----|-----|----|
| NAR | NBG | ANY | ANY | BG |
|     | NMD | ANY | ANY | BG |
|     | NSM | ANY | ANY | SM |
|     | ZER | ANY | ANY | SM |
|     | PSM | ANY | ANY | SM |
|     | PMD | ANY | ANY | BG |
|     | PBG | ANY | ANY | BG |
| MED | ANY | ANY | ANY | BG |
| FAR | ANY | ANY | ANY | BG |

조향각을 결정하는 규칙은 다음과 같다.  
 장애물이 가까이 있으면서 뒤에 있는 것이 아니라면 피한다.  
 장애물이 멀리 있으면 목표지점을 향해 간다. ● 장애물이 뒤에 있으면 목표지점을 향해 간다. 장애물이 중간 정도에 있고 장애물의 크기가 작으면 목표 지점을 향해 간다.

IV. 시뮬레이션

4.1 장애물회피

경로인식방법은 센서의 스캐닝 모션을 통해 우선 자율이동로봇이 주행할 모든 경로 형태는 직선으로 간주하여 모델링 할 수 있다.

Fig. 7은 센스로부터 경로를 인식한 시뮬레이션으로 좌측은 한 쪽만 벽면이 검출된 것이며 우측은 정면과 왼쪽이 검출된 시뮬레이션이다.

Fig. 8는 자율이동 로봇의 제어기가 장애물을 회피하며 다시 목표지점으로 주행하는 것을 보여주고 있다.

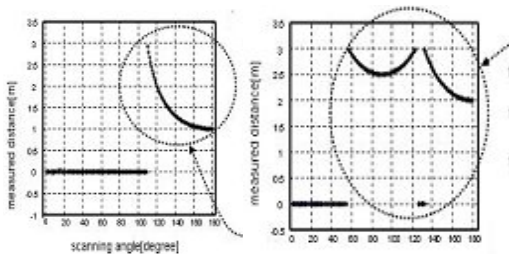


Fig. 7. Simulation of navigating the recognized path

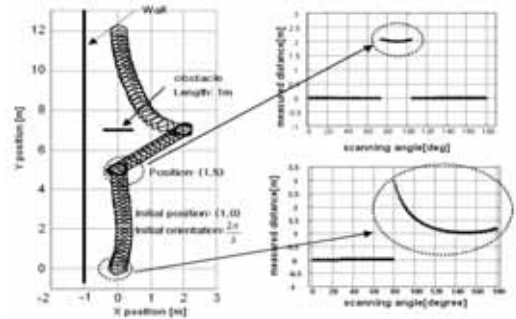


Fig. 8. Obstacle avoidance simulation

시뮬레이션에서 보듯이 자율 이동 로봇은 센서를 통해 먼저 주행할 경로형태를 인식하여 제어기로부터 명령을 받아 주행한다.

이렇게 진행 중에 장애물이 있을 때 이동로봇의 센서가 다시 장애물을 인식하여 이 장애물을 회피하며 장애물에 의해 경로를 이탈한 자율이동로봇은 다시 목표경로로 추종하는 것을 보여주고 있다.

4.2 서스펜션

Fig. 9~10은 도로의 요철을 있을 경우를 고려하여 상용프로그램인 Matlab을 하였다. 일점쇄선은 도

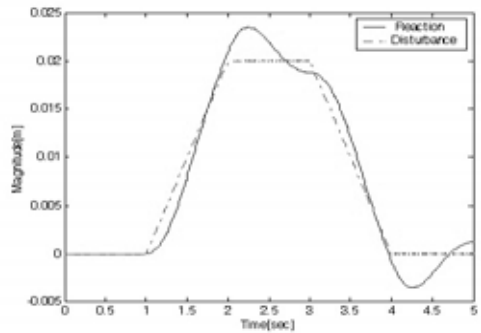


Fig. 9.

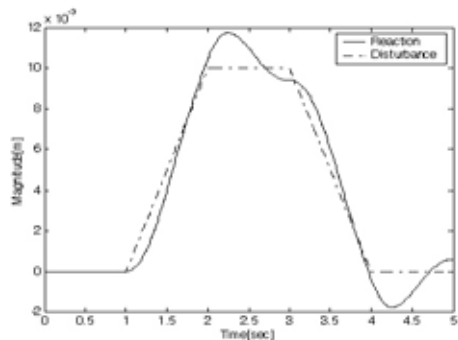


Fig. 10.

로의 요철을 나타내며, 실선은 서스펜션의 흡수력을 나타내고 있다. 또한, Fig. 11~Fig. 14는 도로의 임의의 미세한 굴곡 또는 이물질이 있을 경우를 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 일점쇄선은 도로의 임의의 미세한 굴곡 또는 이물질을 나타내며, 실선은 서스펜션의 흡수력을 나타내고 있다.

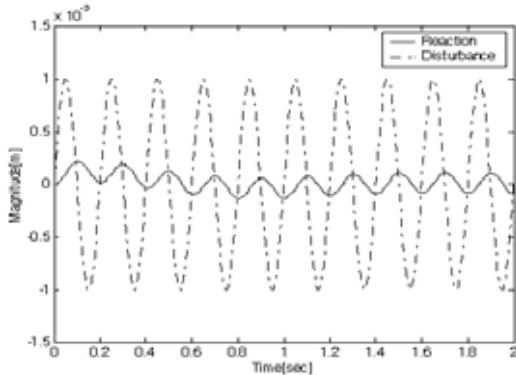


Fig. 11. 5HZ(Magnitude : 0.001)

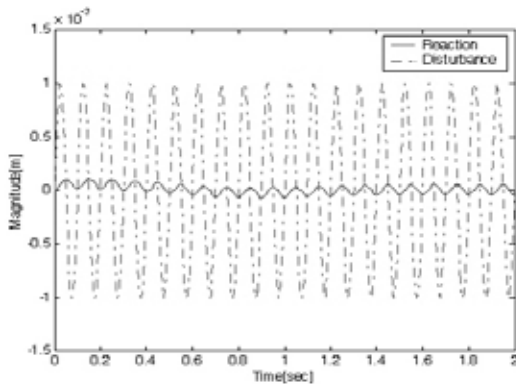


Fig. 12. 15HZ(Magnitude : 0.001)

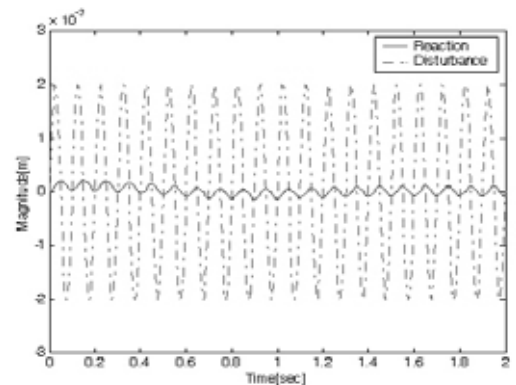


Fig. 13. 5HZ(Magnitude : 0.002)

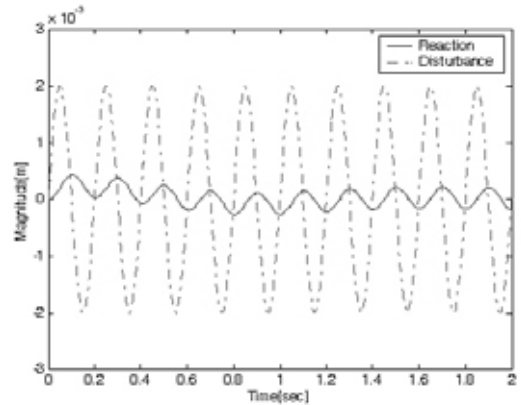


Fig. 14. 15HZ(Magnitude : 0.002)

## VII. 결론

본 논문에서는 안내 및 재환을 위한 이동 로봇의 기구학 모델링을 바탕으로 로봇의 위치에 따른 경로 추정, 장애물 회피, 힘 제어를 바탕으로 안내 서비스 이동로봇에 적용된 제어 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션으로 결론을 내렸다.

본 논문의 연구내용 결론은 다음과 같다.

1. 퍼지 제어를 이용하여 안내 서비스 이동로봇이 경로를 추종하여 주행할 수 있음을 보였다.
2. 경로를 인식하는 알고리즘과 장애물을 인식하는 알고리즘을 서로 통합하여, 퍼지 로직 제어기에 의해 경로를 추종하는 알고리즘을 고안하였다.
3. 보조바퀴에 서스펜션의 장착으로 도로의 임의의 미세한 굴곡 또는 이물질에 대한 우수한 흡수력을 알수 있었다.
4. 많은 수의 센서를 사용하여 대상물을 인식하는 것 보다, 레이저 스캔 센서의 적용만으로 충분히 경로 추정과 대상물을 인식할 수 있음을 보였다.

본 안내 서비스 이동로봇을 사용하여 안내 및 재환의 기능 효과를 좀더 극대화 할 수 으안내 서비스 이동로봇에 무선 인터넷 통신 시스템과 영상 비전(vision) 시스템을 구축하여 사용자의 현 상황과 상태를 의사 또는 도우미등과 화상통신을 할 수 있게 하며, 인터넷을 통한 다른 유용한 정보를 쉽게 얻을 수 있게 한다.

