

碩士學位論文

# 소형 이동 로봇의 경로 생성 및 제어



濟州大學校 産業大學院  
電子電氣工學科

金 曠 久

碩士學位論文

# 소형 이동 로봇의 경로 생성 및 제어

指導教授 康 鎮 植



濟州大學校 産業大學院  
電子電氣工學科

金 暎 久

2002 年 6 月

# 소형 이동 로봇의 경로 생성 및 제어

指導教授 康 鎭 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2002 年 6 月

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

通信工學專攻



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金 暎 久

金 暎 久의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2002 年 7 月

委員長 金 興 洙 印

委員 文 建 印

委員 康 鎭 植 印

# 목 차

Abstract .....	1
I. 서 론 .....	2
II. 이동로봇의 기구학적 해석 및 모델링 .....	4
1. 이동로봇의 기구학적 해석 .....	4
1) 차륜형 이동 로봇의 정의 .....	4
2) 이동 로봇의 이동 원리 .....	4
3) 이동 로봇의 기구학 .....	6
2. 이동 로봇의 모델링 .....	9
III. 이동 로봇의 경로 설정 및 제어 .....	14
1. 이동 로봇의 경로설정 .....	14
2. 원과 직선에 의한 경로설정 .....	14
3. 경로 추종을 위한 제어기 설계 .....	16
1) 비례 제어기 (Proportional Controller) .....	16
2) 적분 제어기 (Integral Controller) .....	16
3) 비례-적분 제어기 (Proportional - Integral Controller) .....	17
IV. 시뮬레이션 및 실험 .....	20
1. 시뮬레이션에 사용되는 파라미터 .....	20
2. 실험에 사용된 로봇 축구 시스템 .....	20
3. 시뮬레이션 및 실험 결과 .....	22
1) 2점 경로 .....	22
2) 3점 경로 .....	25
3) 5점 경로 .....	29
4) 7점 경로 .....	34

V. 결 론 ..... 39

참고문헌 ..... 40



# A Study on the Path Plannig and Control of the Small Mobile Robot

Kim Young Gu

Department of Electrical and Electronic Engineering  
Graduate School of Industry  
Cheju National University

Supervised by Professor Jin-Shig Kang

## Abstract

This thesis describes the path planning and control of the mobile robot driven by two different wheels. In order for the mobile robot successfully to carry out its role in a given environment, the path control is very important. Because it is basic step in the accurate mobile robot positioning system.

A motion control algorithm of the mobile robot is presented in this thesis. The mobile robot considered here is assumed to move on a horizontal plane with rigid body. All the steering wheels remain vertical to the plane and the contact between the wheels and ground satisfies the conditions of pure rolling and non-slipping. The mobile robot tends to keep away in moving the circular trajectory more than the straight trajectory as its velocity is increased. Hence, to control it accurately, a centrifugal force must be considered in its dynamic model.

In this thesis, the method of the path planning and control of the small mobile robot is presented. Also, the validity of the presented method is showed by computer simulations and experiments with the soccer robot system.

## I. 서론

로봇은 균일한 품질의 공산품을 대량 생산하거나 생산 원가를 절감하기 위해 산업현장 곳곳에서 사용되고 있다. 또한 사람이 직접 작업하기 어려운 원자력 발전소, 심해에서의 탐사등 열악한 환경에서도 널리 이용되고 있다. 그러나, 일반적으로 산업현장과 과학분야에서 이용되고 있는 로봇은 대부분이 로봇 매니퓰레이터(robot manipulator)로서 고정된 위치에서 반복작업만을 수행한다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 이동기능을 갖춘 다기능 로봇(multi-function robots)의 필요성이 대두되었으며, 현재 이동로봇(mobile robot)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이동로봇에 관한 연구는 1968년과 1971년에 Stanford Research Institute에서 Nilsson이 SHAKEY를 설계, 제작한 이후 20년 이상 지속되어왔으며, 특히 70년대 후반부터 마이크로프로세서 기술이 눈부시게 발전하였고, 온-보드(on-board) 신호처리 기술이 향상되어 이동로봇에 대한 관심이 재개되었으며, 현재는 구체적인 응용분야로 가시화 되고 있다(박종현,1995).

이동로봇은 이동방법에 따라 보행형 이동 로봇(legged-mobile robot)과 차륜 이동 로봇(wheeled-mobile robot)으로 구분될 수 있다. 차륜 이동로봇은 본체에 부착된 2개 이상의 차륜이 2개 이상의 독립된 구동기(actuator)에 의해 구동되어 이동하는 로봇으로 구조가 간단하고 제어가 용이하며 신속한 이동이 가능하다. 그러나 평면이 아닌 경사면이나 불균등한 주행면에서 주행할 경우, 위치 및 자세 추정을 위한 별도의 센서가 필요하고, 계단 등의 주행면에서는 이동할 수 없으며, 차륜과 주행면 사이의 접촉점에서 차륜의 미끄러짐(slippage) 현상이 발생할 경우, 이동로봇의 절대 위치(absolute position)를 파악하기 위해 별도의 외부 센서를 설치해야 하는 문제점이 있다.

차륜 이동로봇에 대한 연구분야는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 경로설계(path-planning), 위치추정(position distimation), 동작제어(motion control)이다. 경로설계의 목적은 이동로봇의 초기 위치(initial position)에서 목적 위치(target position)로 이동하기 위한 경로를 설계하는 것이다(박종현,1995)(임진모,1997).

차륜 이동로봇을 연구하는 목적은 로봇 스스로 현 위치에서 경로설계기에 의해 명시된 경로를 추종하여 목적위치로 이동하는 것이다. 이를 위해 차륜 이동 로봇

은 엔코더(encoder), 비전, 초음파/적외선 센서 등에서 얻은 정보를 이용하여 자신의 현 위치를 파악해야 한다. 그러나, 모델링의 불확실성과 측정 잡음 등으로 인하여 각종 센서를 통해 계산된 위치는 실제의 위치와 다르게 되며, 이러한 주행오차는 주행거리에 비례하여 누적되므로 장시간 주행시 상당한 주행오차가 발생하게 된다.

동작제어는 설정된 경로와 실제 경로 사이의 오차를 보상하여 이동로봇이 목적 위치에 도달하도록 하는 것으로, 기구학 모델과 차륜과 접촉면 사이의 마찰력, 그리고 각 구성요소 사이의 역학적 관계를 기술하는 동역학 모델이 필요하다.

본 논문에서는 서론에서 이동로봇 연구의 필요성과 연구 분야를 기술하였으며, 본문에서는 nonholonomic 제약조건을 갖는 이륜 이동로봇(이하 이동로봇)을 기구학적으로 해석하고, 모델링 하였다. 또한, 경로 설정을 위하여 원과 직선을 이용한 경로 설정 방법을 제시하였으며, 제시된 경로 추종을 위해 비례-적분 제어를 설계하였다. 마지막으로 시뮬레이션 및 로봇 축구 시스템을 이용한 실험을 통하여 제시된 경로 설정 방법과 비례-적분 제어기법의 타당성을 입증하였다.



## II. 이동로봇의 기구학적 해석 및 모델링

### 1. 이동로봇의 기구학적 해석

#### 1) 이동로봇의 정의

이동로봇이란, 로봇에 부착되어 지면과 접촉하고 있는 바퀴 어셈블리(wheel assembly)들의 작동만으로 지면상에서 이동할 수 있는 로봇을 말한다. 여기서, 바퀴 어셈블리란 그 탑재물(즉, 로봇 몸체)과 지면 사이에 단일의 구름 접촉만을 통해서 상대 운동을 제공하거나 허용하는 장치이다(박종현,1995).

이동로봇은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 차체와 바퀴 그리고 캐스터(caster)로 구성되어 있고, 바퀴와 연결되어 있는 모터를 구동시켜 로봇을 이동하도록 한다.



Fig. 1. Wheeled-mobile robot

#### 2) 이동로봇의 이동원리

이동로봇의 움직임에 대한 분석으로 이동로봇의 이동원리를 설명할 수 있다. 다음의 Fig. 2는 로봇이 위치한 2차원 공간을 나타내는 좌표계이다. Fig. 2에서  $X_1 - Y_1$  좌표계는 이동로봇의 외부에 기준점을 둔 절대 좌표계이며,  $X_2 - Y_2$  좌표계는 로봇의 무게 중심점을 원점으로 하고 로봇의 전진 방향을  $X_2$ 축으로 하는 로봇 좌표계이다. 이때의 로봇의 구조를 분석하기 위해 자세벡터(posture vector)  $P$ 를 식(1)과 같이 정의한다(김종환,2000).

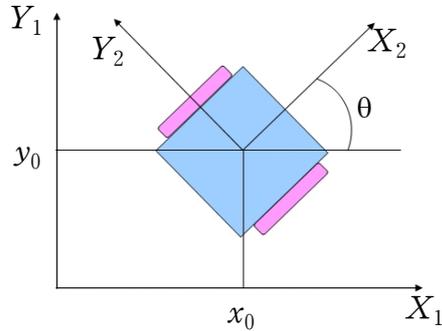


Fig. 2. The coordinate of wheeled-mobile robot

$$P = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $(x_0, y_0)$ 는 이동로봇의 질량 중심점 좌표이고,  $\theta$ 는 전방향각(heading angle)이다. 식(1)에서 이동로봇의 자세는 절대 위치  $(x_0, y_0)$ 와 전방향각  $\theta$ 로 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 이동로봇에서의 순간 회전 중심(ICR)을 나타내고 있다. 순간 회전 중심은 바퀴의 축에 일치한 직선 어디에나 위치할 수 있으며, 두 바퀴의 회전 속도비에 의해 결정된다.

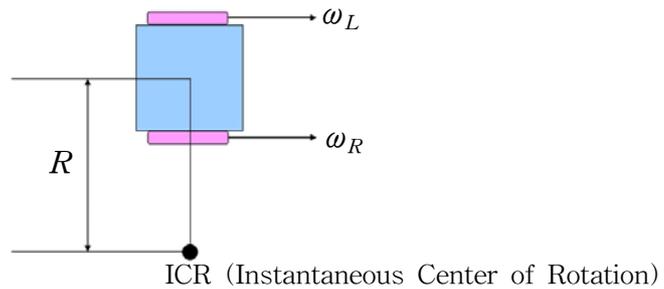


Fig. 3. ICR for wheeled-mobile robot

### 3) 이동로봇의 기구학

이동로봇에서의 기구학 식은 이동로봇의 본체와 바퀴 사이의 속도 관계를 나타내며 로봇의 구조에 따라 달라진다(김중환,2000).

Fig. 4로부터 이동로봇의 기구학 식을 구할 수 있다. 좌측 바퀴와 우측 바퀴의 각 속도를  $\omega_L$ ,  $\omega_R$ 이라고 하면 미끄러짐이 없다는 조건에 의해 좌측 바퀴와 우측 바퀴의 지면과의 접촉점 속도는 식(2)와 같다.

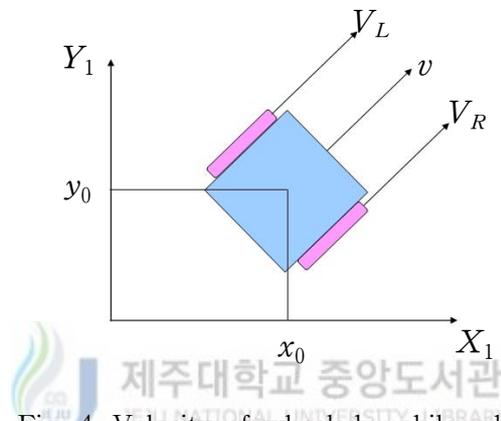


Fig. 4. Velocity of wheeled-mobile robot

$$\begin{aligned} V_R &= r \omega_R \\ V_L &= r \omega_L \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 바퀴의 반경,  $v$ 는 이동로봇의 중심 속도이며,  $V_R$ ,  $V_L$ 은 각각 우측과 좌측 바퀴의 속도이다. Fig. 5에서 반시계 방향으로의 각속도를  $\omega$ 라고 하면  $v$ 와  $\omega$  그리고, 이동로봇에 가해지는 입력  $\omega_L$ 과  $\omega_R$ 은 식(3), 식(4)와 같다.

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = r \frac{\omega_R + \omega_L}{2} \quad (3)$$

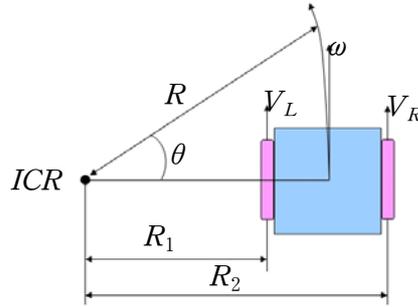


Fig. 5. Calculation of ICR

$$\omega = \frac{V_R - V_L}{L} = r \frac{\omega_R - \omega_L}{L} \quad (4)$$

여기서,  $L$ 은 두 바퀴 사이의 거리이다.

로봇 중심 좌표의 순간변화량  $(\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta})^T$  과 로봇 중심의 속도 및 각속도  $(v \ \omega)^T$ 의 관계는 다음과 같다(김종환,2000).

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(5)는 Fig. 5에서 각 위치에서의 좌표  $x, y$ 와 각도  $\theta$ 를 시간에 대해 미분한 것이다. 이동로봇의 기구학 식은 식(3), 식(4) 그리고 식(5)로 나타낼 수 있다. 여기서 이동로봇의 자세와 위치는 입력인 두 바퀴의 속도의 차에 의해 결정됨을 알 수 있다. 식(5)에서 이동로봇을 제어할 수 있는 구동기는 속도와 각속도 2개인데 반해, 도달해야 하는 위치 및 방향각의 자유도는 3이다. 따라서, 이동로봇의 자세에서 원하는 자세로 제어할 때 제한 조건이 발생하게 된다. 바닥과 바퀴의 접촉면에서 바퀴면에 수직인 방향의 속도성분은 0이라는 비미끄럼 조건을 이용하면, 식(6)과 같은 nonholonomic 제한조건을 구할 수 있다.

$$H \cdot \dot{p} = (\sin \theta - \cos \theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (6)$$

여기서, H는 바퀴면에 수직인 단위벡터이며,  $\dot{p}$ 는 자세 벡터를 시간에 대해 미분한 것이다. 식(6)은 바퀴가 주행하는 방향으로만 속도 제어(제어 입력)를 할 수 있고, 진행 방향과 다른 방향으로의 제어 입력이 가해질 수 없다는 의미를 나타낸다. 식(6)을 정리하면, 다음과 같이 된다.

$$\tan \theta = \dot{y} / \dot{x} \quad (7)$$

식(7)은 로봇의 순간 진행방향은 로봇이 향하고 있는 각도  $\theta$ 와 같아야 한다는 것을 의미한다. 이와 같은 제한 조건은 이동성 등급이 3인 전 방향 로봇에서는 발생하지 않는다. 여기서 이동성이란 로봇이 자세를 변화시킬 때 얼마나 자유롭게 움직일 수 있는가를 나타낸다.

두 바퀴의 속도  $V_R$ 과  $V_L$ 은 Fig. 5에서 나타난 순간 회전 중심에서 바퀴까지의 거리  $R_1$ 과  $R_2$ 에 비례하므로, 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$V_L : R_1 = V_R : R_2 \quad (8)$$

$R_1$ 과  $R_2$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R_1 = R - \frac{L}{2} \quad (9-1)$$

$$R_2 = R + \frac{L}{2} \quad (9-2)$$

식(9-1)과 식(9-2)를 식(8)에 대입하여 정리하면 식(10)이 된다.

$$V_L / \left( R - \frac{L}{2} \right) = V_R / \left( R + \frac{L}{2} \right) \quad (10)$$

식(10)에서 이동로봇의 회전 반경( $R$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{L}{2} \frac{V_R + V_L}{V_R - V_L} \quad (11)$$

식(11)에서  $R = \infty$ ,  $V_R = V_L$  일 때 이동 로봇은 직진을 하게 되며,  $R = 0$ ,  $V_R = -V_L$  일 때는 제자리에서 회전을 하게 된다.

## 2. 이동로봇의 모델링

이동로봇은 두개의 바퀴들이 각각 독립적으로 구동되기 때문에 두 바퀴의 속도 차이에 의해서 이동방향의 진행각도( $\theta$ )가 바뀌게 된다. 본 논문에서 사용한 이동 로봇은 구동 바퀴가 2개이고, 지지용 캐스터가 2개인 축구 로봇이다. Fig. 6은 이동 로봇의 구조와 각각의 파라미터들을 나타내고 있다.

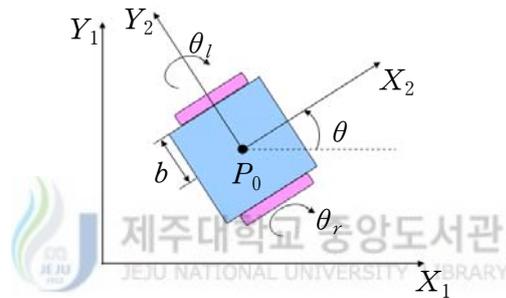


Fig. 6. Structure and parameters of wheeled-mobile robot

Fig. 6의 각 파라미터들은 다음과 같다.

$X_1 - Y_1$  : 이동로봇 외부의 기준 좌표계

$X_2 - Y_2$  : 이동로봇 중심 좌표계

$P_0$  :  $(x_c, y_c)$  좌표를 갖는 이동로봇의 무게 중심점

$\theta_l, \theta_r$  : 좌측, 우측 바퀴의 회전각

$b$  : 구동바퀴와 무게 중심점 사이의 거리

$\theta$  : 기준 좌표계의  $X_1$  축과 이동로봇과 이루는 전방향각

이동로봇의 동역학을 유도하기 위해서 다음과 같은 가정을 한다.

- ① 비미끄럼 조건 (nonslipping condition) : 바퀴와 바닥과의 접촉점에서 로봇의 진행방향과의 직각방향 속도 성분은 0이다. 즉, 이동로봇이 진행 중에는 측면 방향으로의 미끄러짐이 없다.

$$-\sin\theta \dot{x} + \cos\theta \dot{y} = 0 \quad (12)$$

- ② 순수구름 조건 (pure rolling condition) : 각 바퀴의 진행은 로봇의 진행방향으로 바퀴표면의 점들이 연속적으로 바닥표면의 점들과 일대일 접촉한다. 즉, 이동로봇의 진행방향으로는 미끄러짐이 없는 굴림 운동을 한다.

i) 우측 바퀴 :

$$-\cos\theta \dot{x} - \sin\theta \dot{y} - b\dot{\theta} + r\dot{\theta}_r = 0 \quad (13)$$

ii) 좌측바퀴 :

$$-\cos\theta \dot{x} - \sin\theta \dot{y} + b\dot{\theta} + r\dot{\theta}_l = 0 \quad (14)$$

식(12)와 식(13), (14)를 이용하면 다음과 같은 constraint 방정식이 유도된다.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (15)$$

여기서



$$A(q) = \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ -\cos\theta & -\sin\theta & cb & cb \end{pmatrix}, \quad q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta_r \\ \theta_l \end{pmatrix}$$

이고,  $c = \frac{r}{2b}$  이다. 이동로봇은 2차원 평면상에서만 운동하는 것으로 가정되므로 위치에너지는 0이 되며, 운동 에너지는 식(16)과 같다.

$$K = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I_w(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) + \frac{1}{2} I_c(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)^2 \quad (16)$$

여기서 질량  $m$ 과 관성력  $I$ 는

$$m = m_c + 2m_w, \quad I = I_c + 2m_w b^2 + 2I_m$$

이며,

- $m_c$  : 바퀴와 모터 로터를 제외한 로봇의 질량
- $m_w$  : 바퀴와 모터 로터를 합한 질량
- $I_c$  : 구동바퀴와 모터로터를 제외한 이동로봇의 관성력
- $I_w$  : 바퀴와 바퀴축에 대한 모터로터의 관성력
- $I_m$  : 바퀴와 바퀴 직경에 대한 모터로터의 관성력

이다. 또한, 운동에너지를 Lagrangian 방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = E(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (17)$$

여기서

$$M(q) = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_c^2 + I_w & -I_c^2 \\ 0 & 0 & -I_c^2 & I_c^2 + I_w \end{pmatrix}, \quad V(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$E(q) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}, \quad \lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix}$$

이다. 위에서 구한 동역학식에서 Lagrangian multiplier( $\lambda_1, \lambda_2$ )를 소거하기 위해  $A(q)$ 의 null space  $S(q)$ 를 다음과 같이 정의한다(정상훈,1998).

$$S(q) = (S_1(q) \ S_2(q)) = \begin{pmatrix} cb\cos\theta & cb\cos\theta \\ cb\sin\theta & cb\sin\theta \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

식(15)로부터  $\dot{q}$ 는  $A(q)$ 의 null space로 볼 수 있으며, 다음과 같다.

$$\dot{q} \in \text{span}\{S_1(q), S_2(q)\} \quad (19)$$

따라서, 다음의 두 식을 만족하는 smooth vector  $\eta = (\eta_1 \ \eta_2)^T$ 가 존재한다.

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (20)$$

$$\ddot{q} = S(q)\dot{\eta} + \mathfrak{S}(q)\eta \quad (21)$$

위에서  $\eta$ 를 구해보면  $\eta = \vartheta = (\vartheta_r \ \vartheta_l)^T$ 이 된다. 따라서 식(17)에  $S^T(q)$ 를

양변에 곱해서 정리하면 다음과 같다(정상훈,1998).

$$S^T(q)M(q)(S(q)\dot{\eta} + \mathfrak{S}(q)\eta) + S^T(q)V(q, \dot{q}) = \tau \quad (22)$$

$\eta$  를 상태변수  $q$  에 추가하면 다음과 같다.

$$x = [x \ y \ \theta_r \ \theta_l \ \vartheta_r \ \vartheta_l]^T = [q \ \eta]^T \quad (23)$$

이러한 새로운 상태변수로 로봇의 동역학 식을 6차의 상태 방정식으로 나타내면 식(24)과 같다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (24)$$

여기서,

$$f(x) = \left[ \begin{array}{c} -(S^TMS)^{-1}(S^TMS\eta + s^TV) \\ 0 \end{array} \right],$$

$$g(x) = \left[ \begin{array}{c} 0 \\ (S^TMS)^{-1} \end{array} \right]$$

이다.

식(22)-식(24)를 이용하면 이동 로봇의 동역학식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{11} & e_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \\ \dot{\vartheta}_r \\ \dot{\vartheta}_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & cbcos\theta & cbcos\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & cbsin\theta & cbsin\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_c^2 + I_w & -I_c^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I_c^2 & I_c^2 + I_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta_r \\ \theta_l \\ \vartheta_r \\ \vartheta_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

여기서

$$\begin{aligned} e_{11} &= m(cb)^2 + I_c^2 + I_w \\ e_{12} &= m(cb)^2 - I_c^2 \\ e_{21} &= m(cb)^2 - I_c^2 \\ e_{22} &= m(cb)^2 + I_c^2 + I_w \end{aligned}$$

이다. 로봇의 선속도  $(\dot{x}, \dot{y})$ 가 각속도  $(\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l)$ 에 비례한다고 하면, 선속도  $(\dot{x}, \dot{y})$ 는 동역학식에서 소거할 수 있다. 그러므로 식(25)는 다음과 같이 정리된다.

$$E\dot{x} = Ax + Bu \quad (26)$$

여기서

$$x = (\theta_r \ \theta_l \ \dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l)^T, \quad u = (\tau_1, \ \tau_2)^T$$

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{11} & e_{12} \\ 0 & 0 & e_{21} & e_{22} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & I_c^2 + I_w & -I_c^2 \\ 0 & 0 & -I_c^2 & I_c^2 + I_w \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이다.

그리고, 출력 방정식은 식(27)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cbcos\theta & cbcos\theta & 0 & 0 \\ cbsin\theta & cbsin\theta & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

### Ⅲ. 이동로봇의 경로 설정 및 제어

#### 1. 경로 설정

경로설정이란, 시작점에서 도착점까지의 경로를 찾는 것을 말하며, 이동로봇의 모션제어는 목표 지점에 대한 주행 경로를 설정하는 경로 설정과 그 결정된 경로를 추종하는 것으로 이루어진다. 따라서, 모션 제어를 위해서는 이동로봇이 추종해야 할 경로를 먼저 설정해야한다.

#### 2. 원과 직선에 의한 경로 설정

일반적인 경로설정법의 경우에는 이동로봇의 기구학 및 동특성을 고려하지 않으므로 경로 상에 이동로봇 속도의 불연속적인 점이 존재한다. 본 논문에서는 이동로봇의 현재 위치와 목표 위치, 그리고 방향각과 경유 위치를 알고 있을 경우 불연속점이 없는 가장 짧은 경로로 이동할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

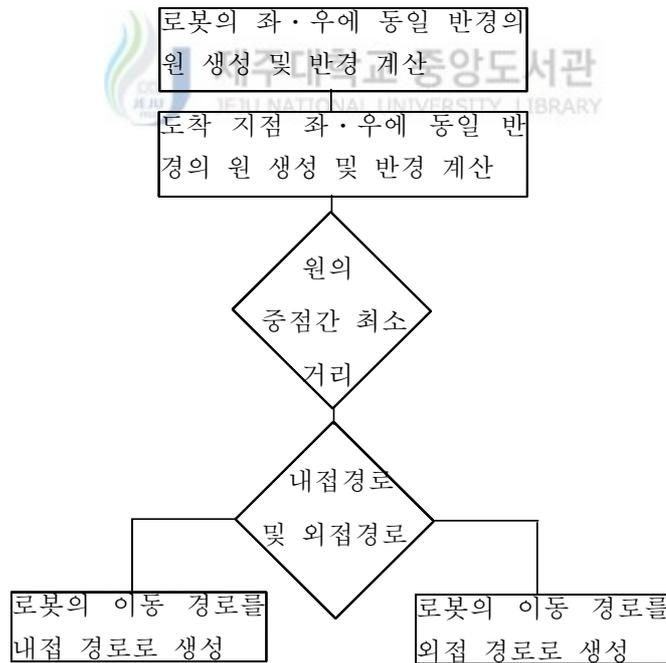
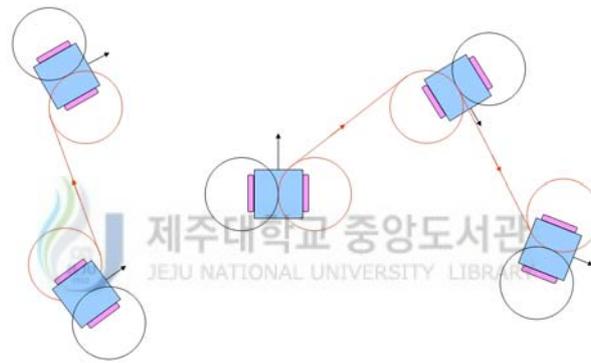


Fig. 7. Flowchart for path planning

Fig. 7은 제시된 원과 직선에 의한 경로 설정 방법을 나타내는 순서도이며, 경로 설정 방법은 다음과 같다.

- (1) 이동로봇의 시작점, 경유점, 도착점에서 좌·우측에 동일 반경의 원을 생성하고, 생성된 원의 반경을 계산한다.
- (2) 각 원간의 거리를 비교·판단하여 최소 거리가 되는 원을 선택한다.
- (3) 선택된 원을 비교하여 이동로봇이 가야할 직선 경로가 두 원의 공통 외접선인지 혹은 공통 내접선인지를 판단한다.
- (4) 위의 과정에서 생성된 직선 경로와 원의 경로를 선택하여 이동 경로를 선택한다.



(a) 2-point path

(b) 3-point path

Fig. 8. Examples of path planning

Fig. 8은 시작 지점에서 목표 지점까지의 경로를 설정하는 예를 나타내고 있다. 이동로봇은 시작 지점 및 경유 지점에서 공통 외접선 또는 공통 내접선을 포함하는 원을 선택하고 선택된 원을 따라 이동하다가 원과 직선이 이어지는 부분에서 직선경로를 따라서 이동을 한다. 목표 지점에서는 다시 선택된 원의 경로를 따라서 이동하고, 원하는 방향으로 정지한다. 이렇게 원과 직선의 경로를 선택하는 이유는 다음과 같다. 이동로봇이 직접 시작 지점에서 목표 지점으로 갈 수는 있으나, 직접 이동하는 경우에는 이동로봇이 시작 지점 및 목표 지점에서 원하는 방향으로

자세를 유지하기 위해서는 좌·우 바퀴의 정·역회전을 필요로 하게 된다. 따라서, DC 모터의 역기전력이 완전 방전되어 다시 정회전 또는 역회전을 하는데까지 지연 시간이 발생하게 된다. 그러나, 원과 직선을 이용하여 경로를 설정할 경우에는 모터의 정회전만을 이용하여 이동이 가능하므로 모터를 역회전 하게되는 경우보다 지연시간이 줄어들게 된다. 또한, 좌·우측 바퀴의 회전수만 조절해주면 원하는 방향으로의 자세 보정을 쉽게 할 수 있기 때문이다.

### 3. 경로 추종을 위한 제어기 설계

#### 1) 비례 제어기 (Proportional controller)

비례 제어기는 오차에 비례하는 크기의 구동력을 행사하도록 하여 보다 정밀한 제어를 가능하게 하며, 단순 ON/OFF 제어기보다는 우수한 성능을 갖는다.

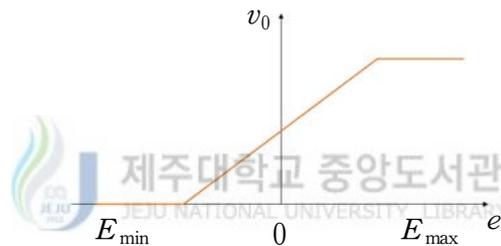


Fig. 9. Character graph of P controller

Fig. 9는 비례 제어기의 특성 그래프이고, 입·출력 관계식은 식(28)과 같다.

$$v_o = K_P v_e + V_{os} \quad (28)$$

여기서,  $E_{min}$  과  $E_{max}$  는 각각 최소, 최대 오차값이며,  $K_P$ 와  $V_{os}$ 는 비례 제어 특성 그래프의 기울기와 출력축의 절편이다.

#### 2) 적분 제어기 (Integral controller)

비례 제어기가 현재의 순간적인 오차만을 감소시키기 위한 단기적인 제어를 수행한다고 하면, 적분제어기는 누적된 과거의 오차를 반영함으로써 정상상태 오차를 작게 하려는 목적을 실현하는 방법이다. 이러한 적분제어기의 입·출력 관계식은 식(29)와 같다.

$$V_0(s) = K_I \frac{E(s)}{s} \quad (V_0 = 0) \quad (29)$$

적분 제어기는 일정한 입력에 대하여 정상상태 오차가 발생하지 않도록 하는 효과를 가지고 있으나, 시스템을 불안정하게 하는 경향이 있다. 그러므로 일반적으로 적분 제어요소만을 사용하는 경우는 극히 드물다. 따라서, 제어시스템을 안정하게 하며, 일정한 입력에 대하여 정상상태 오차가 발생하지 않도록 할 수 있는 비례-적분 제어기를 주로 사용하고 있다(김병기,1998).

### (3) 비례-적분 제어기 (Proportional-integral controller)

비례-적분 제어기는 구조가 간단하고 설계하기가 쉬워서 널리 사용되는 제어기이다. 대부분의 피드백 루프(feedback loop)들은 이 제어이론이나 약간 변형된 제어이론에 의해 구성된다.

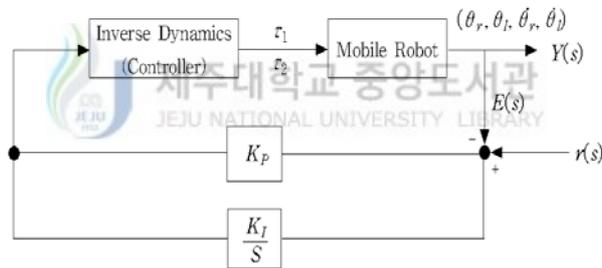


Fig. 10. Control input of PI controller

Fig. 10은 비례-적분 제어기에서 제어 입력이 형성되는 과정을 보여주고 있다. 이동 로봇의 출력에서 발생한 오차( $E(s)$ )는 입력( $r(s)$ )과 합쳐져서 각각 비례기( $K_p$ )와 적분기( $\frac{K_I}{S}$ )를 거쳐 역동역학으로 인가된다. 이렇게 생성된 제어 신호  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ 는 이동로봇의 두 바퀴의 속도를 제어하여 출력에서 발생한 오차를 줄이게 된다.

식(30)은 비례-적분 제어기의 제어 입력  $r(t)$ 의 기본 형태이다.

$$r(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (30)$$

여기서  $r(t)$  : 제어입력

$e(t)$  : 오차값

$K_P, K_I$  : 각각 비례이득, 적분이득

이다. 식(30)의 비례성분  $K_P e(t)$ 는 오차에 비례한 제어입력을 생성한다. 이 비례 성분만으로 제어기를 구성하였을 경우, 오차에 비례한 제어입력은 생성되나 안정성이 나쁘고 과도특성이 바람직하지 못하게 되며, 정상상태 오차가 존재하게 된다. 따라서 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분항을 추가하는데, 적분항의 추가 효과는 시스템의 차수를 한 차수 증가시키는 것으로 시스템의 형이 하나 증가하나 적분항이 없는 시스템의 정상상태 오차보다 한 차수만큼 개선된다. 즉, 어떤 입력에 대한 정상상태 오차가 존재하면 적분항은 그 오차를 0으로 감소시킨다. 또한 PI제어기는 초기의 작은 오차에도 불구하고 입력이 과다하게 인가되어 오버슈트를 발생한다. 그러므로 설계사양을 만족하도록 비례이득과 적분이득을 적절히 조합하는 것이 중요하다(김중환,2000).

Fig. 11은 일반적인 비례-적분 제어기의 응답 특성이다.

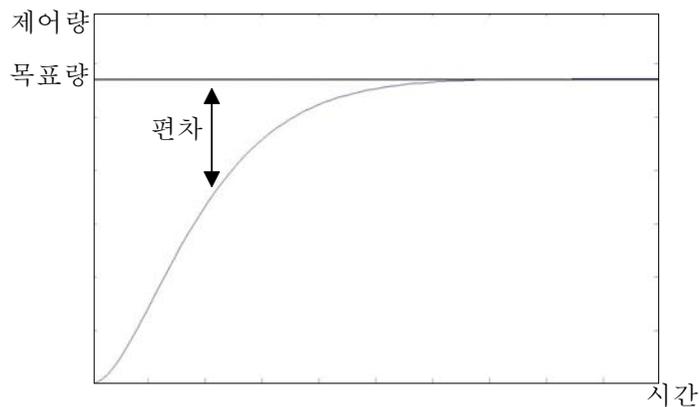


Fig. 11. General PI input response characteristic

Fig. 11에서 비례-적분 제어기의 적분항은 계단 응답에서 상승시간과 정착시간을 길게 하여 응답 속도를 늦게 한다. 그러나, 비례 제어기에서 나타나는 초기의 초과 응답이 제어 되었으며, 정상 상태에서 유연하게 실제의 목표량에 근접시키고 있음을 알 수 있다.



## IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 1. 시뮬레이션에 사용되는 파라미터

시뮬레이션에 사용된 이동 로봇은 현재 로봇 축구 시스템에서 사용되고 있는 로봇이며, 이에 대한 사양은 Table. 1과 같다.

Table 1. Parameter values of the robot in simulation

파라미터	값	단위
로봇의 가로길이	7	cm
로봇의 세로길이	7	cm
로봇의 높이	7	cm
바퀴의 직경	4.5	cm
모터의 최대 회전수	8000	rpm
모터의 기어비	1:8	
$m_c$	0.0681	kg
$m_w$	0.0473	kg
$I_m$	0.0800	kg · cm · sec <sup>2</sup>
$I_w$	0.0176	kg · cm · sec <sup>2</sup>
$I_c$	0.5000	kg · cm · sec <sup>2</sup>

### 2. 실험에 사용된 로봇 축구 시스템



Fig. 12. Robot soccer system

로봇 축구 시스템은 Fig. 12와 같이 경기장, 공, 로봇, 영상처리 시스템, 호스트 컴퓨터, 무선 통신부로 구성되며, 실험에 사용된 시스템은 다음과 같다.

1) 호스트 컴퓨터

: CPU- Pentium IV 800 Mhz, RAM- 576 MB

2) 영상처리 시스템

: 그래픽 카드- MATROX millenium II, Frame grabber- MATROX METEOR II, CCD 카메라- SDC-410N(NTSC 방식)

3) 무선 통신부

: RF BIM-433

4) 축구 로봇

: 주콘트롤러- 32bit 80C296SA, 모터부- 스위스 미니모터(512PPR), ROM- 29C010, 배터리- 7.4V 1.2A (Li-ion), 모터 구동 드라이버- L298 및 Table. 1의 사양을 갖는 축구 로봇 3대

5) 경기장

: 가로×세로- 150 *cm*×130 *cm*, 둘레- 5 *cm*의 벽, 골대 폭- 40 *cm*

본 논문에서는 MATLAB을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 양 바퀴의 속도를 계산하였다. 또한 계산된 결과를 실제 로봇 축구 시스템에 적용할 수 있도록 모터의 최대 속도 8000 *rpm*을 127개의 레벨로 양자화 하여 축구 로봇의 입력으로 주었다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 1) 2점 경로

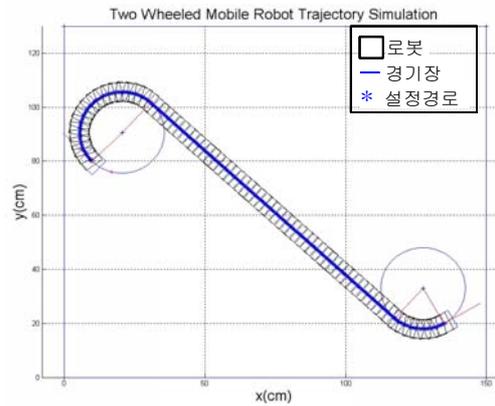


Fig. 13. 2-point path

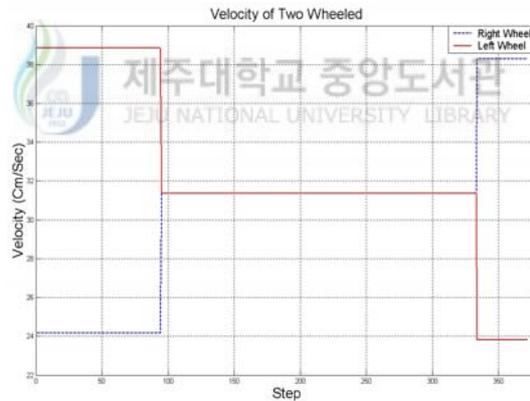


Fig. 14. Input velocity of two wheels

Fig. 13은 2점 경로에 대한 이동로봇의 주행 시뮬레이션 결과이고, Fig. 14는 이때 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

2점 경로 시뮬레이션에서 이동로봇의 최초 좌표는 (10, 80)이고, 이 지점에서 전 방향 각은 135도이다. 그리고 최종 좌표는 (135, 20)이며, 이때의 전방향각은 30도이다. 로봇 축구 시스템과 동일한 환경에서 시뮬레이션을 하기 위해 각 프레임간 샘플 시간은 0.0157초로 하였다. 총 샘플수는 372이고, 이동로봇이 설정된 경로를

주행하는 데에는 6초가 걸렸다. 이때 구간별 이동거리 및 생성원의 반지름 그리고 구간별 샘플수는 Table. 2와 같다.

Table 1. Simulation result values of 2-point

구간 형태	이동거리 ( <i>cm</i> )	생성원의 반경 ( <i>cm</i> )	누적 이동거리 ( <i>cm</i> )	샘플수
원	46.5	15	46.5	94
직진	117.7	-	164.2	239
원	19.0	15	183.2	39

이때 생성되는 원의 중심은 (20.6, 90.6)과 (127.5, 33.0)이며, 두 원 사이 직진구간을 생성할 때 사용되는 접점의 좌표는 (30.8, 101.6)과 (117.3, 22.0)이다.

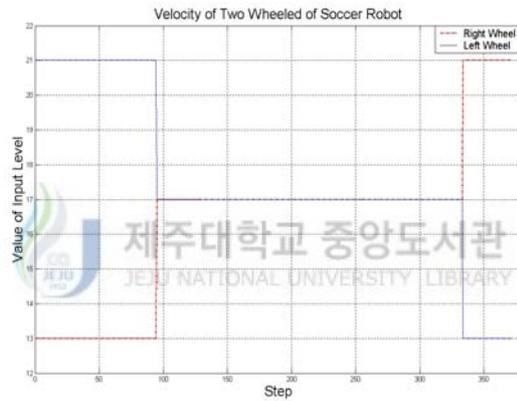


Fig. 15. Input velocity for soccer robot

Fig. 15는 축구 로봇에 입력되는 두 바퀴의 속도를 나타내며, Fig. 14의 속도 프로파일을 로봇이 인지할 수 있도록 양자화 하였다. 실험에 사용된 축구로봇의 중심 최대 속도는 17레벨로 실제 속도는 31.1 *cm*/sec 이다.



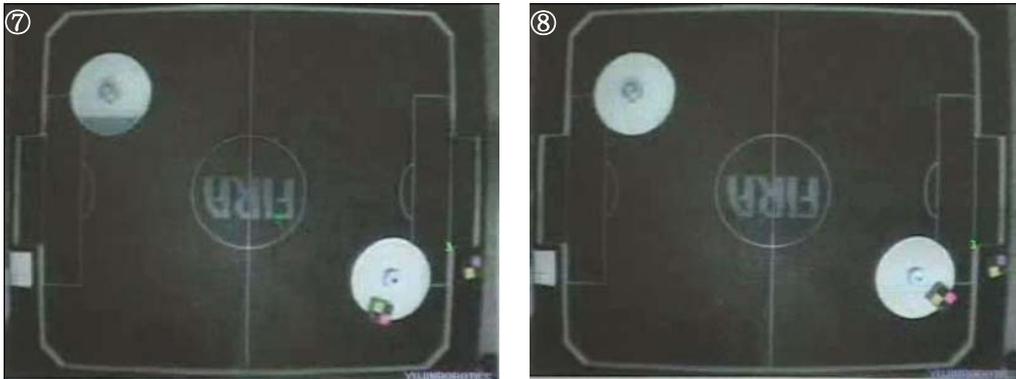


Fig. 16. Traveling result of 2-point path

Fig. 16은 로봇 축구 시스템을 이용하여 실험한 축구 로봇의 2점 경로 주행 결과이다. 시뮬레이션에서 계산된 속도를 양자화 하여 주행을 시킨 후 이를 캠코더로 촬영하였다.

설정된 경로를 잘 추종하였으나, 실수 데이터를 양자화 하는 과정에서 발생한 오차로 인하여 직선 경로를 생성하는 원의 접점 즉, 원구간의 탈출점에서 정확하게 탈출을 하지 못하여 도착원의 안쪽으로 또는 바깥쪽으로 로봇이 주행하였다.

## 2) 3점 경로

Fig. 17은 3점 경로에 대한 이동로봇의 주행 시뮬레이션 결과이며, Fig. 18은 이때 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

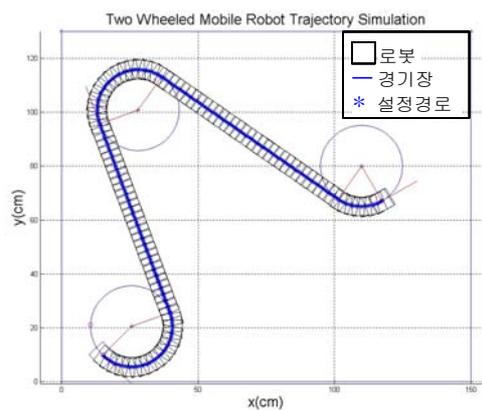


Fig. 17. 3-point path

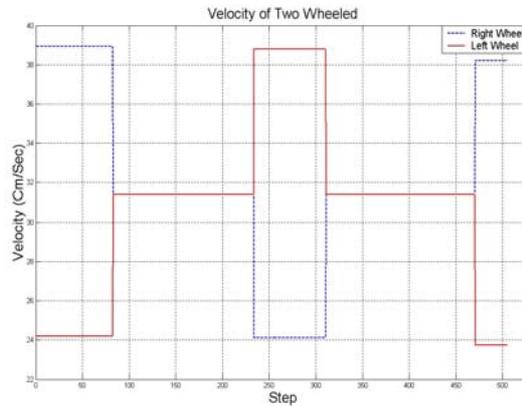


Fig. 18. Input velocity of two wheels

3점 경로 시뮬레이션에서 이동로봇의 최초 좌표는 (15.0, 10.0)이고, 이 지점에서 전방향 각은 315도이다. 그리고 중간에 경유해야하는 좌표는 (14.0, 95.6)이며, 최종 좌표는 (117.4, 67.1)이다. 최종 좌표에서 전방향각은 30도이다. 총 샘플수는 505이며 이동로봇이 설정된 경로를 주행하는 데에는 8초가 걸렸다. 3점 경로의 시뮬레이션에서 구간별 이동거리 및 생성원의 반지름 그리고 구간별 샘플 수는 Table. 3과 같다.



Table 3. Simulation result values of 3-point

구간 형태	이동거리 ( cm )	생성원의 반경 ( cm )	누적 이동거리 ( cm )	샘플수
원	40.6	15	40.6	82
직진	74.4	-	115.0	151
원	38.0	15	153.0	77
직진	78.9	-	248.9	160
원	17.0	15	231.9	35

이때 생성되는 원의 중심들은 (25.6, 20.6), (28.1, 100.8), (109.9, 80.1)이며, 두 원 사이 직진구간을 생성할 때 사용되는 점점의 좌표는 (39.7, 25.8), (36.7, 113.1), (101.3, 67.8)이다.

Fig. 19는 축구로봇에 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

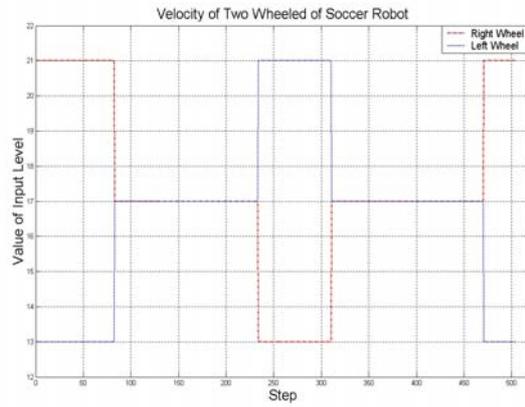


Fig. 19. Input velocity for soccer robot

Fig. 20은 3점 경로에 대한 축구로봇의 주행 실험 결과이다. 모델링 및 양자화 오차로 인하여 경유되는 원에서 원 경로를 제대로 추종하지 못하여 최종 도착점에 정확하게 위치하지 못하였다. 또한 시작원에서 정확하게 원을 탈출하지 못하여 로봇이 설계된 경로보다 좌측 또는 우측으로 이동하는 경우가 발생하였다.

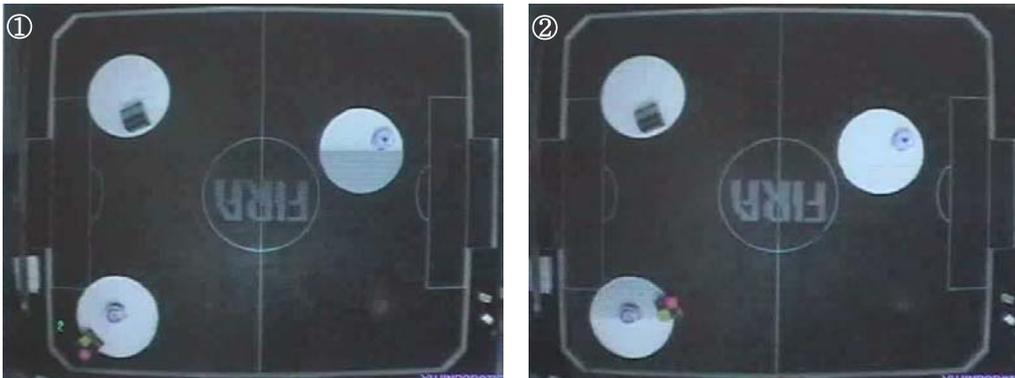






Fig. 20. Traveling result of 3-point path

### 3) 5점 경로

Fig. 21은 5점 경로에 대한 이동로봇의 주행 시뮬레이션 결과이며, Fig. 22는 이 때 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

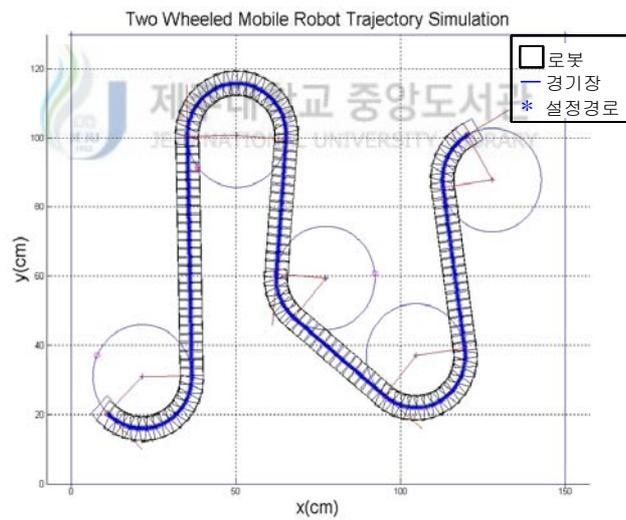


Fig. 21. 5-point path

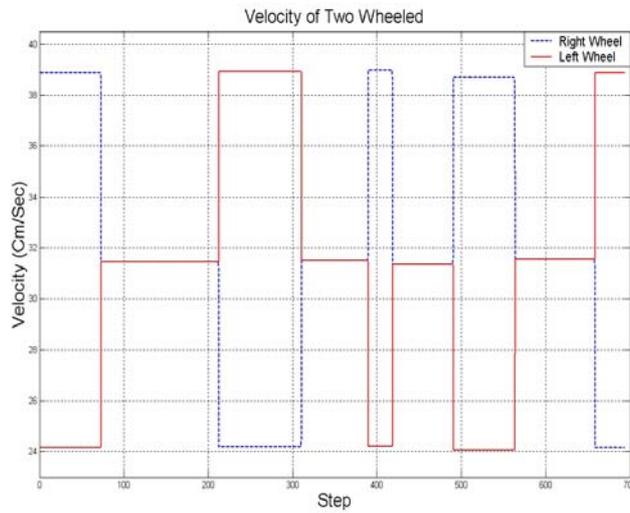


Fig. 22. Input velocity of two wheels

5점 경로 시뮬레이션에서 이동로봇의 최초 좌표는 (11.0, 20.4)이고, 이 지점에서 전방향 각은 315도이다. 그리고 중간에 경유해야하는 좌표는 (35.2, 100.4), (62.3, 60.6), (95.1, 25.4)이며, 최종 좌표는 (120.2, 100.8)이다. 최종 좌표에서 전방향각은 30도이다. 총 샘플수는 694이며 이동로봇이 설정된 경로를 주행하는 데에는 11초가 걸렸다. 5점 경로의 시뮬레이션에서 구간별 이동거리 및 생성원의 반지름 그리고 구간별 샘플 수는 Table. 4와 같다.

Table 4. Simulation result values of 5-point

구간 형태	이동거리 ( cm )	생성원의 반경 ( cm )	누적 이동거리 ( cm )	샘플수
원	35.6	15	35.6	72
직진	69.1	-	104.8	140
원	48.5	15	153.3	98
직진	39.0	-	192.4	79
원	14.4	15	206.8	29
직진	35.4	-	242.2	72
원	36.0	15	278.2	73
직진	47.0	-	325.2	95
원	17.8	15	343.0	36

이때 생성되는 원의 중심들은 (21.6, 31.0), (50.2, 100.7), (77.2, 59.5), (104.6, 37.0), (127.7, 87.8)이며, 두 원 사이 직진구간을 생성할 때 사용되는 접점의 좌표는 (36.6, 31.3), (65.2, 99.6), (67.7, 47.9), (119.5, 39.1), (112.9, 85.7)이다.

Fig. 23은 축구로봇에 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

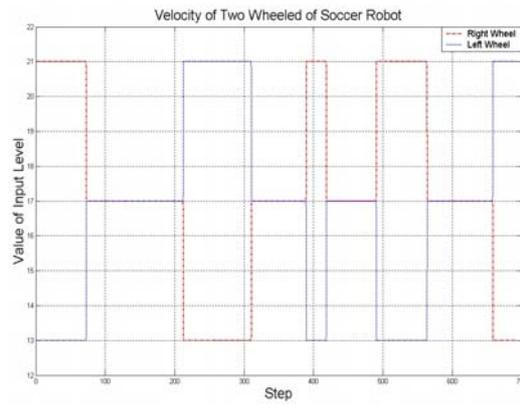
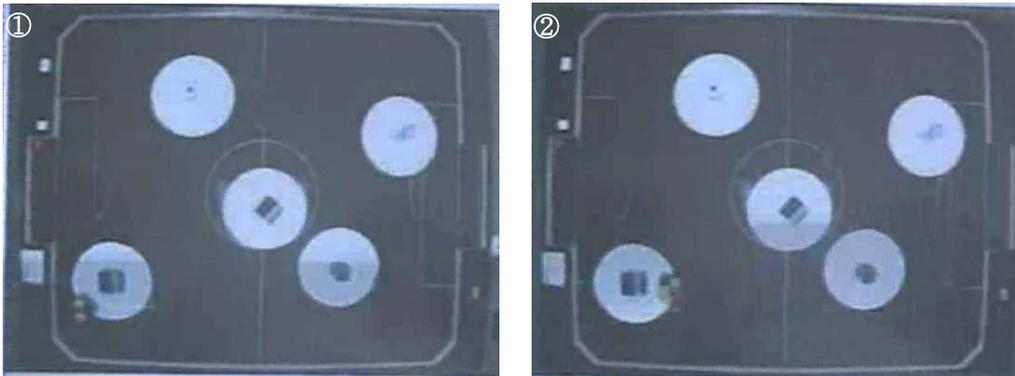
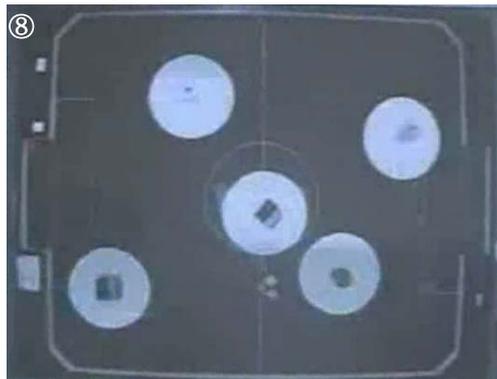
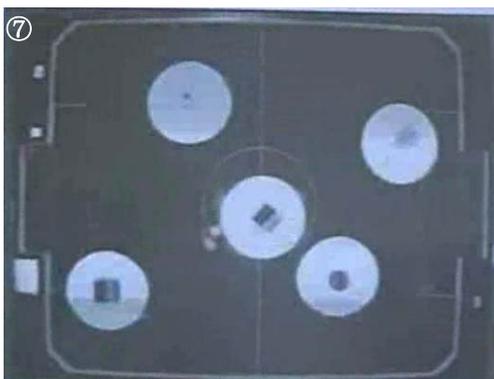
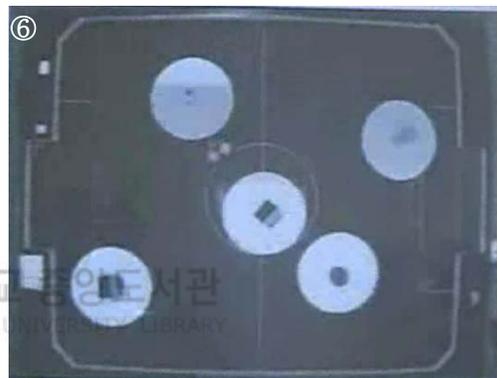
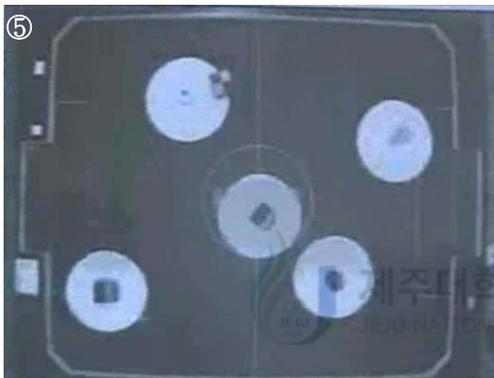
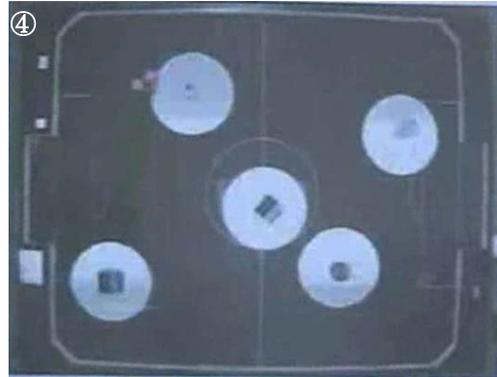
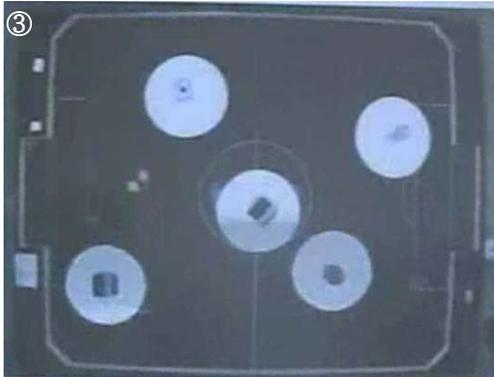


Fig. 23. Input velocity for soccer robot





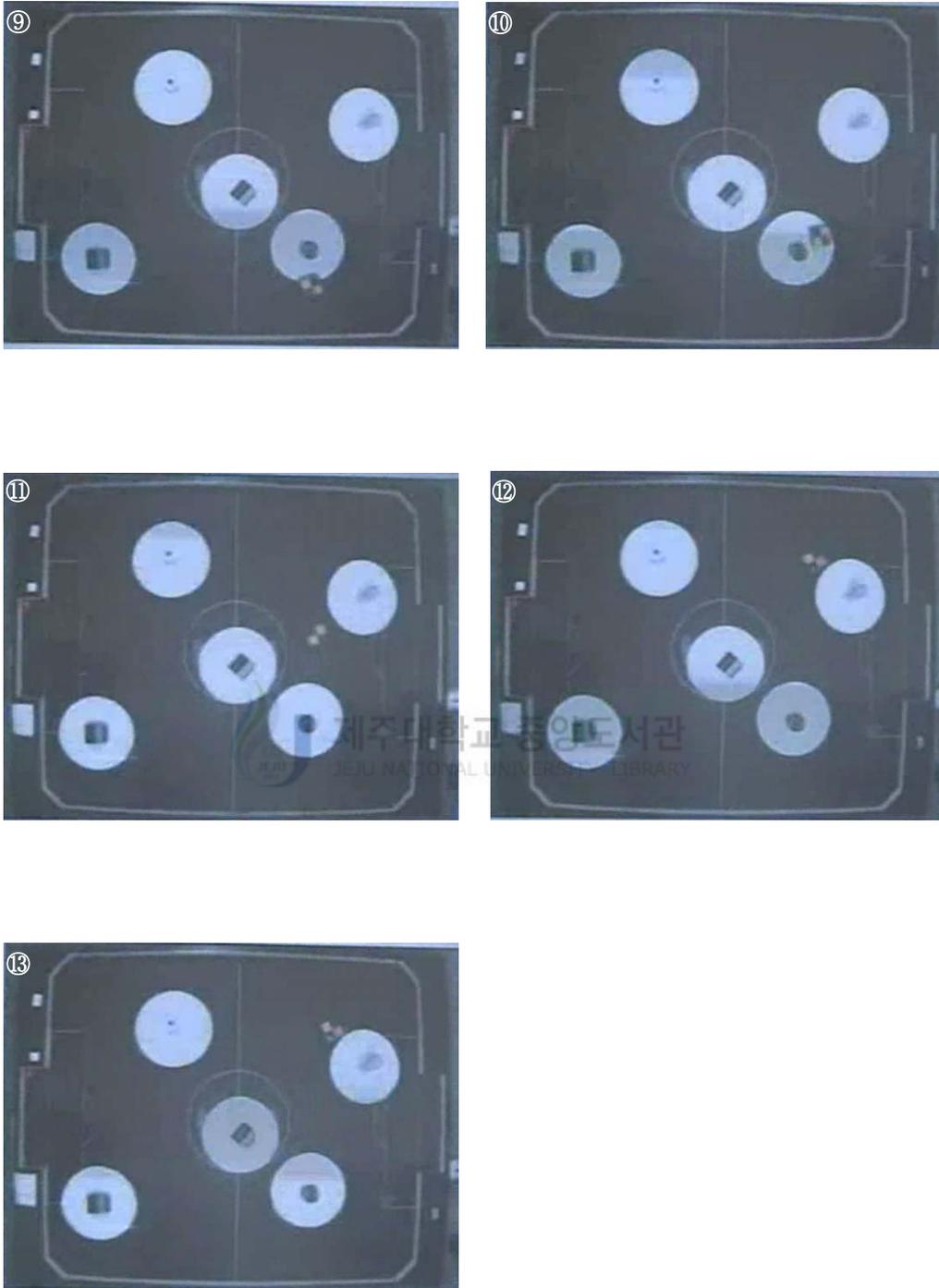


Fig. 24. Traveling result of 5-point path



7점 경로 시뮬레이션에서 이동로봇의 최초 좌표는 (56.3, 26.8)이고, 이 지점에서 전방향 각은 45도이다. 그리고 중간에 경유해야하는 좌표는 (22.9, 54.7), (37.9, 98.5), (85.5, 80.5), (125.7, 79.2), (128.0, 22.1)이며, 최종 좌표는 (70.9, 70.1)이다. 최종 좌표에서 전방향각은 30도이다. 총 샘플수는 787이며 이동로봇이 설정된 경로를 주행하는 데에는 13초가 걸렸다. 7점 경로의 시뮬레이션에서 구간별 이동거리 및 생성원의 반지름 그리고 구간별 샘플 수는 Table. 5와 같다.

이때 생성되는 원의 중심들은 (45.7, 37.4), (24.3, 69.6), (46.9, 86.4), (93.3, 93.3), (126.1, 64.2), (113.7, 26.8), (78.4, 57.2)이며, 두 원 사이 직진구간을 생성할 때 사용되는 점점의 좌표는 (47.2, 52.4), (15.3, 81.7), (54.7, 99.3), (93.7, 78.3), (140.4, 59.4), (104.0, 15.4), (68.6, 45.8)이다

Fig. 27은 축구로봇에 입력되는 두 바퀴의 속도이다.

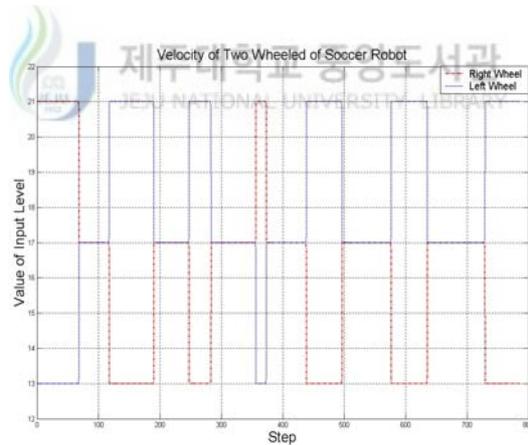
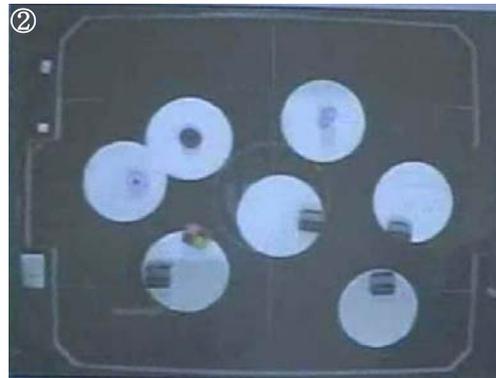
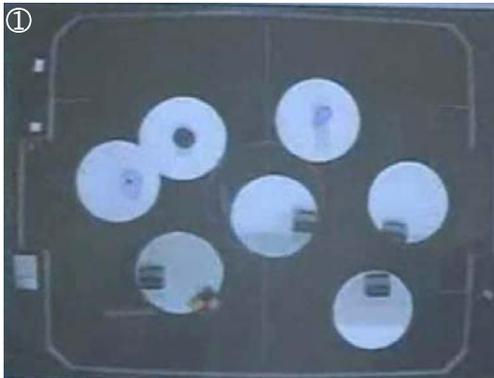
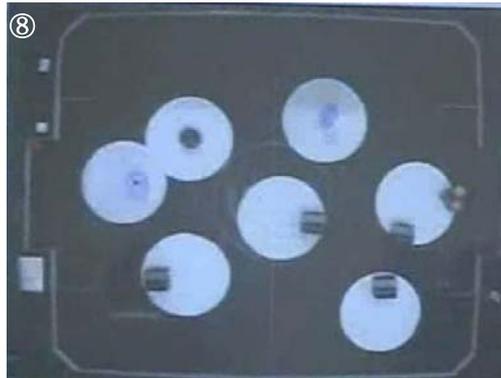
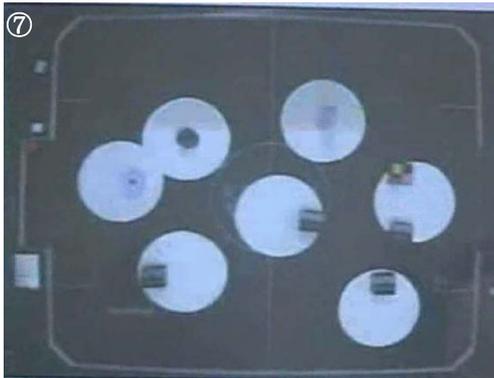
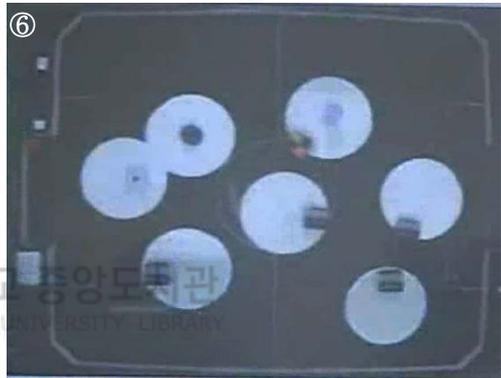
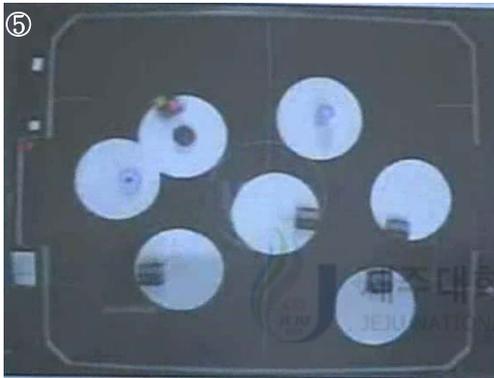
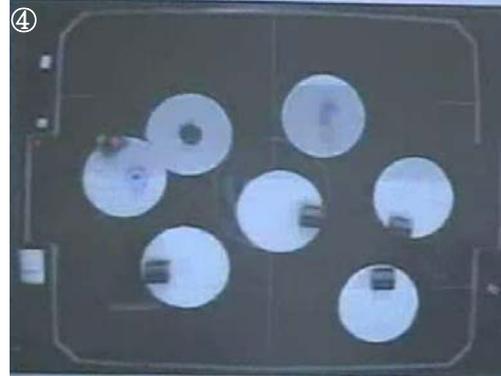
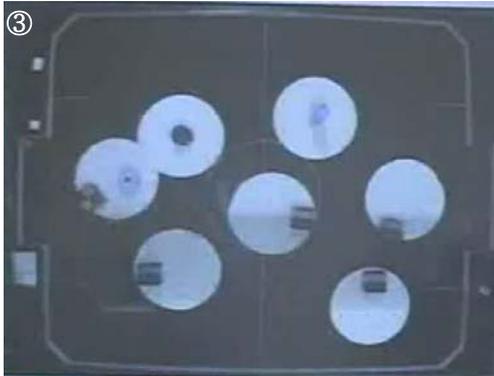


Fig. 27. Input velocity for soccer robot

Table 5. Simulation result values of 7-point

구간 형태	이동거리 ( <i>cm</i> )	생성원의 반경 ( <i>cm</i> )	누적 이동거리 ( <i>cm</i> )	샘플수
원	33.9	15	33.9	82
직진	24.4	-	58.3	151
원	36.1	15	115.0	77
직진	28.1	-	122.5	160
원	17.8	15	140.3	35
직진	36.1	-	176.4	160
원	8.6	15	185.0	35
직진	32.0	-	217.0	160
원	28.8	15	245.8	35
직진	39.3	-	285.1	160
원	29.4	15	314.6	35
직진	46.6	-	361.1	160
원	28.6	15	389.8	35





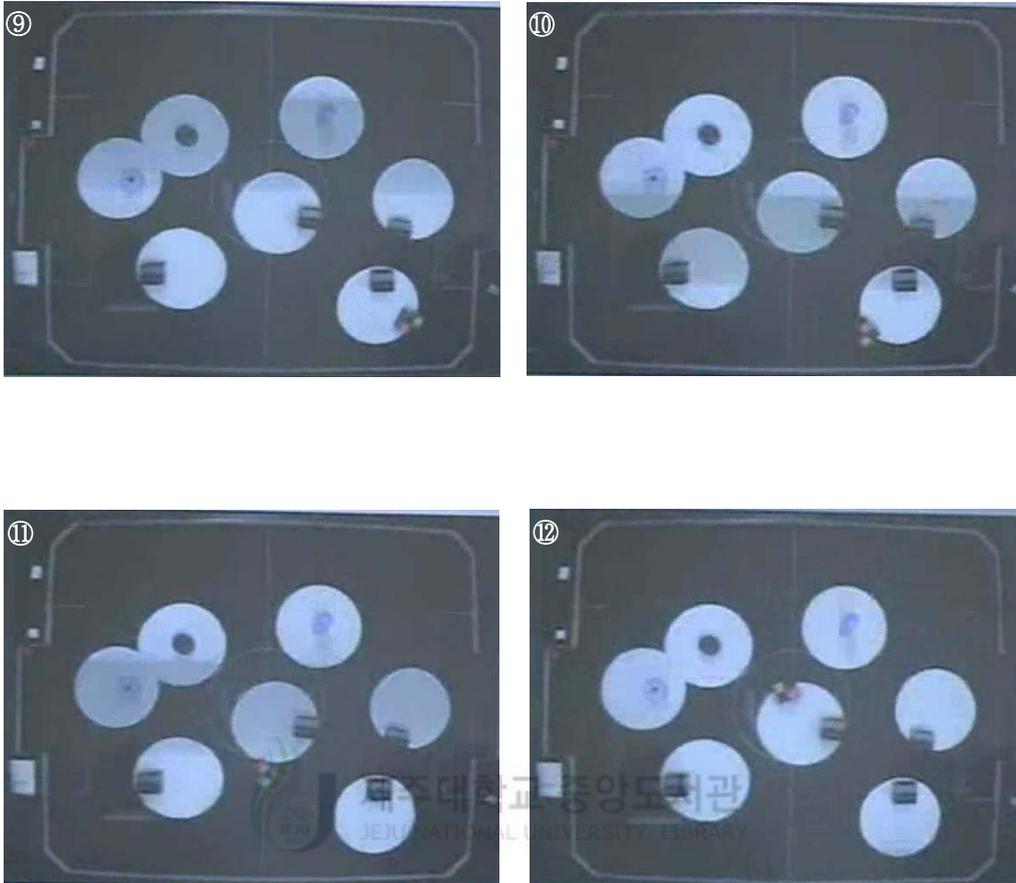


Fig. 29. Traveling result of 7-point path

Fig. 29는 7점 경로에 대한 축구로봇의 주행을 실험한 결과이다.

초기의 시작 위치 및 전방향각의 미세한 오차로 인해 경로가 증가됨에 따라 로봇이 경유 해야되는 점과 원의 접점을 정확하게 추종하지는 못하였다. 또한 로봇과 호스트 컴퓨터 사이의 통신 속도 오차로 인해 로봇 중심이 원을 따라 이동한 것이 아니라 원의 안쪽으로 주행을 하는 경우가 발생하였다.

## V. 결론

이동 로봇 연구에 있어서 경로 생성 및 생성된 경로를 추종하기 위한 제어기법은 매우 중요한 부분이다.

본 논문에서는 이러한 이동로봇의 경로 생성과 생성된 경로 추종에 대해 다루기 위해 먼저 이동 로봇의 기구학 식과 동역학 식을 이용하여 이동로봇을 수학적으로 모델링 하였다. 또한, 이동로봇의 시작 지점과 목표 지점이 주어졌을 때 최적 경로를 생성하기 위해 원과 직선에 의한 경로설정 방법을 제시하였으며, 설정된 경로 추종을 위해 비례-적분 제어기법을 사용하였다.

실험은 로봇축구 시스템을 이용하였으며, 대부분의 경우 설정된 경로를 잘 추종하였다. 그러나, 고속으로 주행할 경우 직선에서 곡선으로, 또는 곡선에서 직선으로 이어지는 부분에서 불연속적인 특성과 원심력, 모델링 오차, 외란 등에 의해 로봇이 경로를 이탈하는 경우가 발생하였다. 또한, 시뮬레이션에 의해 계산된 속도를 축구로봇에 적용시키기 위해 양자화 하는 과정에서 발생된 오차로 인하여 경로를 이탈하기도 하였다.

이동로봇을 고속으로 주행하는 경우 거리에 따른 누적오차를 줄이기 위한 방법, 그리고 양자화 과정에서 발생하는 오차를 줄일 수 있는 방법 등에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

## 참고 문헌

- 박종현, 1995, 로봇공학, 도서출판기술, pp. 392-471
- 김종환, 2000, 로봇 축구 시스템, 대영사, 467 pp.
- 오정석, 1999, 차륜형 이동 로봇의 경로 제어시스템에 관한 연구, 한국 해양대학교 석사 학위 논문, 36 pp.
- 김주영, 1999, 축구 로봇의 속도 및 자세 제어, 고려대학교 석사 학위 논문, 73 pp.
- 조법기, 2001, 축구 로봇의 경로 제어 알고리즘의 구현, 동양대학교 석사 학위 논문, 37 pp.
- 황보명, 1996, 월구동 이동 로봇의 설계 및 기구학적 제어, 포항공과대학 석사 학위 논문, 72 pp.
- 김민철, 1999, 차륜 구동 및 자동차형 이동 로봇을 위한 부분 연속 제어 및 위치 추정법, 포항공과대학 박사 학위 논문, 120 pp.
- 남재호, 1996, 이동 로봇의 동력학 제어에 관한 연구, 성균관 대학교 석사 학위 논문, 48 pp.
- 정상훈, 1998, 경로 추종과 자세 제어를 위한 이동 로봇의 하이브리드 제어, 한양대학교 석사 학위 논문, 36 pp.
- 임진모, 1997, 차륜형 이동로봇 시스템의 하이브리드 시스템 모델링 및 제어, 한양대학교 석사 학위 논문, 37 pp.
- 손효영, 1997, 이동로봇의 자세 및 경로제어를 위한 하이브리드 시스템 모델링과 제어, 한양대학교 석사 학위 논문, 42 pp.
- 김병기, 1998, 월구동 이동로봇의 경로추적 제어기설계, 포항공과대학 석사 학위 논문, 40 pp.
- 김세준, 1999, 축구 로봇 시스템을 위한 이동 로봇의 경로계획과 예측기의 설계, 국민대학교 석사 학위 논문, 46 pp.
- 황우현, 안성모, 1997, MATLAB을 이용한 제어시스템 설계, 대광서림, pp. 227-290

- 양원형, 1994, 최신 제어 시스템, 광문각, pp. 293-323
- 김종식, 1999, 선형 제어시스템 공학, 청문각, pp. 311-353
- G. Campion, G. Bastin, and B.D'Andrea-Novet, 1996, Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots, IEEE trans. on Robotics and Automation, vol. 12, no. 1, pp. 47-62.
- Jung-Min Yang and Jong-Hwan Kim, 1997, Tracking Control of Wheeled Mobile Robots Using Variable Structure Systems, Proc. of the 2nd Asian Control Conference, Seoul, Korea, Jul. 22-25, I-381-384.
- Sun-Gi Hong, Tae-Dok Eom, Il-Kwon Jeong, Changkyu Chio, Jin-Ho Shin and Ju Jang Lee, 1997, Development of Soccer-Playing Robots, Symposium of the Control Measurement, Automation and Robotics., pp. 303-308.
- Seung-Min Baek, Woong-Gie Han and Tae-Yong Kuc, 1997, Cell-Based Motion control of Mobile Robots for Soccer Game Proc. of the 12th KACC., pp. 819-824
- Sung-Wook Park, Eun-Hee Kim, Do-Hyun Kim and Jun-Ho Oh, 1997, Development of Soccer-Playing Robots Using Visual Tracking, Proc. of the 12th KACC., pp. 617-620
- Sung Ho Kim, Jong Suk Choi, Jae Kwon Kim and Byung Kook Kim, 1997, A Cooperative Strategy for Soccer Robots Symposium of Control Measurement, Automation and Robotics., pp. 283-287.
- Xiaoshu Wang and Masanori Sugisaka, 1999, Learning Soccer Robot Using Genetic Programming Proc. of the 14th KACC., E-292-297.

## 감사의 글

본 논문의 결실을 맺기까지 물심양면으로 도움을 주신 강진식 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 5학기 동안 성심을 다해 가르침을 주신 이용학 교수님, 김홍수 교수님, 문 건 교수님, 임재운 교수님, 양두영 교수님께도 감사를 드리며, 철우, 실험실 학생들께도 감사드립니다.

회사 일을 뒷전으로 하는 저를 나무라시기는커녕 격려와 힘을 주신 (주)제주 유선방송 문익부 사장님, 이형대 기술이사님, 그리고 전직원 여러분께도 가슴 깊은 감사를 드립니다.

2002년 월드컵의 활기찬 느낌을 안고 건강하고 예쁘게 태어나 준 우리 수연이, 그리고 너무나 사랑하는 수연 엄마 너무 너무 고맙습니다. 지금껏 못난 자식을 키우느라 너무나도 고생하신 어머니, 아버지 그리고 형을 무척 좋아하는 동생 성곤, 누나 그리고 매형, 지현, 지섭, 지민 너무 감사드립니다. 언제나 바쁜 사위의 뭇까지 말없이 챙겨주시는 장모님, 장인어른 그리고 현식이, 현숙이를 비롯한 우리 가족 모두에게 감사드립니다.

오늘까지 저와 함께 힘껏 노력해주신 MBC 김수방 부장님께도 감사드립니다. 힘들고 어려울 때 서로 힘이 되었기에 오늘 이 기쁨을 함께 할 수 있는 것 같습니다. 그리고, 논문을 완성하는 데까지 관심을 보여 주신 모든 분들께도 감사를 드립니다.

이제 더욱더 정진하는 전문 기술자로 여러분들의 감사에 보답하겠습니다. 다시 한번 너무 너무 감사드립니다.