

## 독립 비전 시스템 기반의 축구로봇을 위한 계층적 행동 제어기

이동일\*, 김형중\*, 김상준\*\*, 장재완\*\*\*, 최정원\*, 이석규\*

### A Hierarchical Motion Controller for Soccer Robots with Stand-alone Vision System

Dong Il Lee\*, Hyung Jong Kim\*, Sang Jun Kim\*\*,  
Jae Wan Jang\*\*\*, Jung Won Choi\* and Suk Gyu Lee\*

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a hierarchical motion controller with stand-alone vision system to enhance the flexibility of the robot soccer system. In addition, we simplified the model of dynamic environments of the robot using petri-net and simple state diagram. Based on the proposed model, we designed the robot soccer system with velocity and position controller that includes 4-level hierarchically structured controller. Some experimental results using the stand-alone vision system from host system show improvement of the controller performance by reducing processing time of vision algorithm.

**Key Words** : soccer robot(축구로봇), hierarchical motion controller(계층적 행동 제어기), petri-net, stand-alone vision system(독립 비전 시스템)

#### 1. 서론

산업현장에서 많이 사용되고 있는 로봇은 작업 공간이 제한되어 있지만, 이동로봇의 경우는 공간상의 제약이 거의 없고 다양한 작업이 가능하기 때문에 산업용이나 군사용, 가정용, 우주탐사용 등의 목적으로 연구되고 있다. 특히 최근에는 보다 효율적인 협동작업을 위하여 다 개체 이동로봇에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다.<sup>[1-3]</sup>

다개체 이동 로봇의 대표적인 연구분야인 로봇 축구는 단순히 마이크로 로봇, 센서 등을 이용해

축구를 하는 로봇을 개발하는 마이크로 로봇의 응용 분야를 넘어서 다양한 기술 및 이론과 함께 현대의 산업이 요구하는 시스템 통합(System Integration)의 대표적인 분야로 자리잡고 있다. 또한 동적 환경에서 다 개체 로봇의 제어 및 협조에 대한 연구를 수행할 수 있는 가장 적합한 테스트 시스템으로 인정받고 있다.<sup>[4,5]</sup>

MiroSot<sup>[6-9]</sup>는 불규칙적인 공의 이동, 벽이나 상대팀 로봇과 같은 장애 요소나 영상의 외란에 의한 부정확한 물체 인식 등과 같이 불규칙적인 변화가 많으며, 예측이 어려운 환경을 가지고 있기 때문에

\*\*\* 2002년 1월 16일 접수

\* 영남대학교 전자정보공학과

\*\* 고려대학교 대학원 메카트로닉스 협동과정

\*\*\* 영남대학교 전자통신전파공학부

주어진 동적인 환경을 효과적으로 모델링하기란 쉬운 일이 아니다. 또한 로봇을 정확하게 제어하기 위해 복잡한 작업형태로 분할하는 것은 시스템의 연산 속도를 느리게 하여 시간적인 지연을 일으키고, 실시간 제어의 구현을 어렵게 만든다. 본 논문에서는 경기장의 동적인 상황을 간단하고 효율적으로 모델링 하고 이를 바탕으로 각각의 로봇에 미리 계획된 여러 가지 패턴에 따라 로봇의 이동 알고리즘이 수행되는 과정을 가지는 계층적 행동 제어를 제안한다.

로봇 축구 시스템은 일반적으로 물체 인식 알고리즘과 로봇 이동 알고리즘을 동일한 시스템에서 처리하는 구조를 많이 사용한다.<sup>[6]</sup> 이 구조의 경우 고성능의 컴퓨터를 사용하지 않으면, 물체를 인식하기 위한 비전 처리 알고리즘과 로봇 이동 알고리즘을 동시에 처리해야 하기 때문에 두 개의 알고리즘이 계산되는 양에 따라서 시간적인 지연이 일어날 수 있다. 만약 주어진 제어 주기 내에서 비전 처리 알고리즘이 많은 부분을 차지할 경우 실시간 제어를 위해서는 로봇의 이동 알고리즘이 상대적으로 보다 간단해져야만 한다. 본 논문에서는 두 개의 알고리즘을 두 개의 시스템에 각각 분리시키는 방법<sup>[5,10]</sup>을 이용하여 보다 효과적인 실시간 제어를 구현한다.

## 2. 계층적 행동 제어기

본 논문에서 제안하는 제어기는 속도 제어기와 위치 제어기로 구성되어 있으며, 감시 시스템(Supervisory system)으로 비전 시스템이 모든 상태와 상황을 고려하고 판단하여 의사를 결정, 로봇에게 명령을 내리는 방식으로 로봇에서는 비전으로부터 입력되는 명령을 추종하는 기능만을 수행한다.

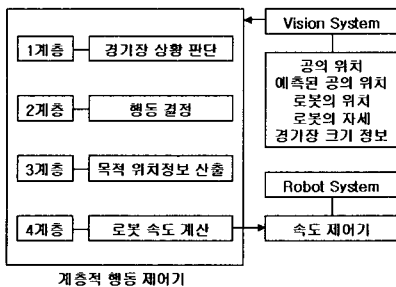


Fig. 1 Architecture of the hierarchical motion controller

속도 제어기는 비전 시스템이 로봇의 움직임을 추종할 수 있는 최소한의 계산과 간단한 알고리즘을 이용하여 구현할 수 있는 PID 제어에 기반을 둔 DC 모터의 제어를 로봇 축구의 특성에 맞게 설계하여 사용한다.<sup>[6]</sup> 이것은 상대적으로 호스트 시스템에 비해 빠르지 않은 로봇의 프로세서를 고려하고 로봇에 들어가는 속도 제어를 다양하게 구현하여 자주 업데이트 한다는 것이 상대적으로 호스트 시스템에 비해 어렵기 때문이기도 하다. 위치 제어기는 4 계층의 계층적 행동 제어기로 설계되어 있다.

### 2.1 경기장의 상황을 판단을 위한 1계층

MiroSot 경기장 위에 있는 객체는 6대의 로봇과 1개의 공 등 7개이며, 서로 다른 객체의 충돌이나 불규칙적인 움직임으로 인하여 경기 상황을 매우 세분화된 형태로 나타내기 어렵기 때문에 이를 단순화하여 경기장 상황을 빠르게 판단함으로써 보다 능동적으로 대처할 수 있도록 경기장의 여러 가지 상황을 모델링한다.

경기에서 공격과 수비가 동시에 이루어질 수는 없으므로 공격 및 수비 상황에 대한 명확한 기준이 요구된다. 골키퍼 로봇 이외의 두 대의 로봇에게 공격과 수비에 대한 각각의 행동을 부여하거나 서로의 역할을 교환해 주는데 사용될 판단 기준이 필요하다. 본 논문에서는 공의 절대적인 위치에 따른 판단 모델, 공과 로봇의 상대적인 위치에 따른 판단 모델, 공의 진행 방향과 속도에 따른 판단 모델의 3가지 기준으로 단순화하고 있다.

공의 절대적인 위치에 따른 판단 모델은 경기장 위에서 절대적인 공의 위치와 공격의 방향에 따라 상태를 구분하는데, Fig. 2에서 공이 어떤 영역에 속하는가에 따라 A0~A5상태로 구분된다.

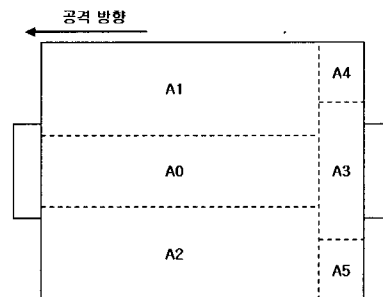


Fig. 2 Decision model based on position of ball

공과 로봇의 상대적인 위치에 따른 판단 모델은 Table 1과 같은 판단 기준에 의해서 2가지 상태로 구분된다. 두 대의 로봇이 협동하여 공격할 때 두 로봇과 공의 상관관계를 정의한 것이다. Table 1에서  $d_{R1B}$ 는 한 로봇과 공과의 거리를 나타내고,  $d_{R2B}$ 는 다른 로봇과 공과의 거리를 나타낸다.

Table 1 States based on the positions of ball and robots

조 건	상 태
$d_{R1B} \geq d_{R2B}$	B0
$d_{R1B} < d_{R2B}$	B1

공의 진행 방향과 속도에 따른 판단 모델은 Table 2와 같은 판단 조건을 가지며 4개의 상태를 가진다. 공의 진행 방향은 현재 기준 팀이 공격 및 수비 상태를 판단하는 기준이 되고, 공의 속도는 경기장 위에 있는 6대의 로봇이 공을 다루고 있는지 판단하는 기준이 될 수 있다.

Table 2 States based on the direction and speed of ball

조 건	상 태
공의 진행 방향이 공격 방향일 때	VPG
공의 진행 방향이 공격 방향과 반대일 때	VNG
일정 시간 동안 공의 속도가 빠르게 유지될 때	VBMAX
일정 시간 동안 공의 속도가 느리게 유지될 때	VBMIN

### 2.2 행동 결정을 위한 2계층

2계층에서는 경기장의 상황을 모델링한 결과를 가지고 각각의 로봇에 미리 구성되어 있는 패턴에 따라 각 로봇에게 Petri-net 모델을 이용하여 행동을 부여한다.

Fig. 3은 간단한 상태도를 이용하여 로봇 역할의 교환, 공격과 수비의 전환이 되는 경우를 보여준다. Fig. 3에서 P는 로봇의 행동을 나타내고, T는 행동이 변화되는 조건이 된다. Table 3에서는 Fig. 3의 상태도에 따른 두 대의 로봇에 대한 각각의 동작을 나타내며, Table 4에서는 각 행동이 결정되기 위한 상태들을 나타낸다. Table 3에서 R1과 R2의

행동 역할을 나타낸다.

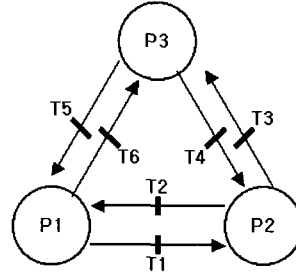


Fig. 3 State diagram for actions

Table 3 Actions of two robots

	두 로봇의 행동
P1	R1 : 공격 R2 : 대기
P2	R1 : 대기 R2 : 공격
P3	R1,R2 : 수비

Table 4 Conditions for the action decision

	조 건
T1	$((A0 \rightarrow A1) \mid (A0 \rightarrow A2)) \& B0 \mid VBMIN$
T2	$((A0 \rightarrow A1) \mid (A0 \rightarrow A2)) \& B1 \mid VBMIN$
T3	$A3 \mid A4 \mid A5 \mid (VBMAX \& VNG)$
T4	$(A0 \mid A1 \mid A2) \& B1$
T5	$(A0 \mid A1 \mid A2) \& B0$
T6	$A3 \mid A4 \mid A5 \mid (VBMAX \& VNG)$

공격을 위한 로봇의 동작을 킥(kick)을 위한 위치 확보, 드리블, 슈팅(Table 5)의 3가지의 동작으로 세분화한 것을 Fig. 4에서 보여 주고 있다.

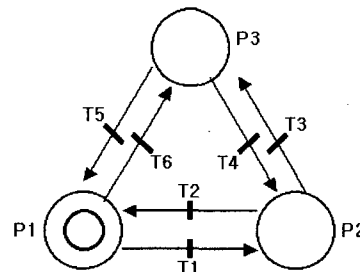


Fig. 4 State diagram for attack

Fig. 5는 대기하는 동작의 순환과정을 보여주고 있다.

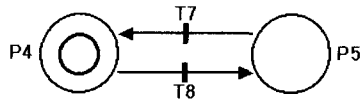


Fig. 5 State diagram for waiting

수비하는 로봇의 동작은 A3, A4, A5상태일 때 지역방어를 하는 동작과 공의 흐름을 방해하여 블로킹을 하는 동작으로 세분화된다. Fig. 6은 수비하는 동작의 순환과정을 보여주고 있다.

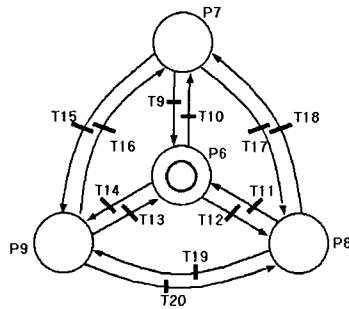


Fig. 6 State diagram for defense

Table 5에서는 공격, 대기, 수비의 세분화된 동작을 보여주고 있으며, Table 6에서는 동작이 결정되는 조건들이 나타나 있다. KGP상태는 로봇의 위치가 Fig. 7과 같이 공격하기 좋은 영역에 놓여진 상태를 의미하며, NKGP상태는 로봇의 위치가 KGP상태의 영역에 벗어난 영역에 놓여진 상태를 의미한다.

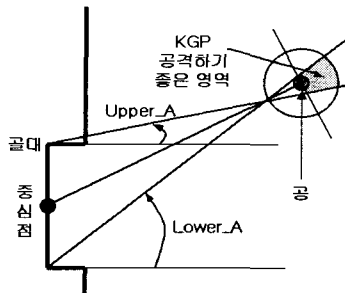


Fig. 7 Good position to kick

Table 5 Actions of the robot

	로봇의 동작
P1	킥(kick)을 위한 위치 확보
P2	드리블(dribble)
P3	슈팅(shooting)
P4	대기(wait)
P5	슈팅(shooting)
P6	블로킹(blocking)
P7	A3상태의 지역방어
P8	A4상태의 지역방어
P9	A5상태의 지역방어

Table 6 Conditions of the robot actions

	조 건
T1	KGP 상태일때
T2	NKGP 상태일때
T3	Upper_A < RO < Lower_A
T4	Upper_A > RO   Lower_A < RO
T5	NKGP   Upper_A > RO   Lower_A < RO
T6	KGP & (Upper_A < RO < Lower_A)
T7	NKGP   Upper_A > RO   Lower_A < RO
T8	KGP & (Upper_A < RO < Lower_A)
T9	(A0   A1   A2) & (VBMAX & VNG)
T10	A3
T11	(A0   A1   A2) & (VBMAX & VNG)
T12	A4
T13	(A0   A1   A2) & (VBMAX & VNG)
T14	A5
T15	A5
T16	A3
T17	A4
T18	A3
T19	A5
T20	A4

골키퍼 로봇의 경우 2대의 로봇과 협조하여 이동하지 않고 골대 안으로 이동하는 공의 경로를 차단하는 역할을 담당한다. 골키퍼의 행동에는 골(goal)을 방어하는 하나의 행동만 존재한다. 골키퍼 동작은 Fig. 8과 같은 상태도를 가지게 되며, Table 7과 같은 동작으로 설명될 수 있으며, Table 8에서는 동작이 결정되는 조건을 설명한다.

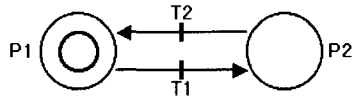


Fig. 8 State diagram for goalkeeper

Table 7 Actions of goalkeeper robot

	로봇의 동작
P1	가까운 공에 대한 골 방어
P2	먼 공에 대한 골 방어

Table 8 Conditions of the robot actions

	조건
T1	A3   A4   A5
T2	A0   A1   A2

### 2.3 이동 목표 지점을 산출을 위한 3계층

3계층에서는 2계층에서 결정된 로봇의 행동을 기반으로 3대의 로봇 각각에 대한 이동 목표 지점을 산출한다. 두 대의 로봇의 협조동작은 킥을 위한 위치 확보, 드리블, 슈팅, 대기, 블록킹, 지역방어으로써 Fig. 9(a)~(h)과 같은 형태로 로봇의 이동 좌표를 구하게 된다.

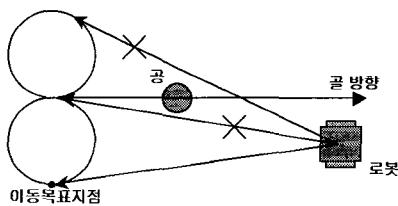


Fig. 9(a) Target point to kick

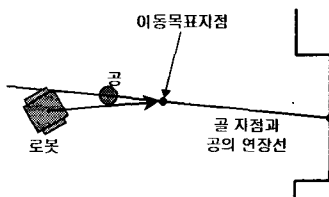


Fig. 9(b) Target point to dribble

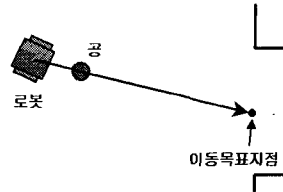


Fig. 9(c) Target point to shoot

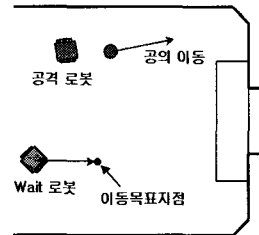


Fig. 9(d) Target point to wait

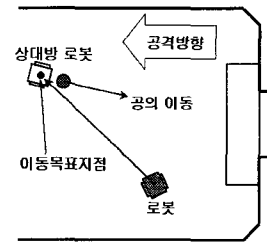


Fig. 9(e) Target point to block

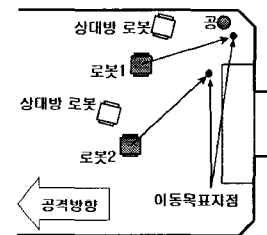


Fig. 9(f) Target points for zone defense

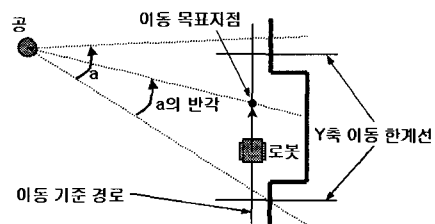


Fig. 9(g) Target point of goalkeeper for ball with long distance

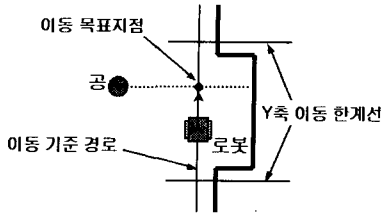


Fig. 9(h) Target point of goalkeeper for ball with short distance

### 2.4 로봇의 속도를 구하기 위한 4계층

3계층에서 산출된 로봇의 이동 목표 지점과 현재의 로봇 위치를 이용하여 로봇의 속도를 계산해 송신하게 된다.

비전 기반의 축구 로봇 시스템을 개발하는 경우, 호스트 시스템에서 설정한 움직임을 로봇이 따라가지 못하는 경우가 발생하는데, 로봇의 관성으로 인해 로봇이 미끄러짐(slip)이 생기는 경우와 non-holonomic constraint로 인하여 최적의 이동 경로와 실제 로봇이 큰 반경을 그리며 목표 지점에 도달하는 경우가 대표적인 경우이다. 따라서 오차 각도가 커서 로봇이 회전으로 인해 미끄러짐이 발생하거나 경로의 회전 반경이 크게 될 가능성이 있는 경우를 미리 처리해 줘야 하는데, 본 논문에서는 Fig. 10과 같은 속도 제어를 이용해 처리한다.

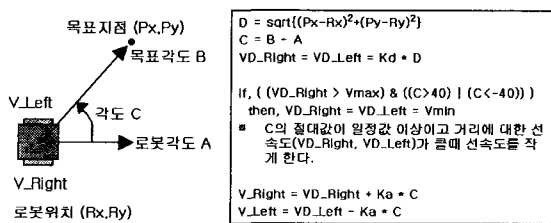


Fig. 10 Revolute velocity decision of two wheels for the robot

## 3. 계층적 행동 제어기의 실제 구현

### 3.1 전체 시스템 개요

전체 시스템의 구성은 비전 시스템, 3대의 로봇, R/F 모듈 그리고 계층적 행동 제어기로 되어 있다. 시스템의 간소화 및 처리 성능의 향상을 위해 비전 시스템은 독립적인 비전 보드를 사용하여 실제 제

어를 처리하는 메인 PC와 분리하는 방식을 취하였다.

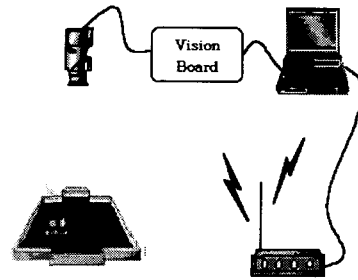
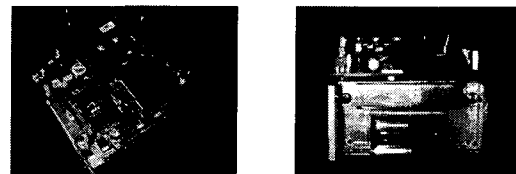


Fig. 11 Structure of the whole system

### 3.2 축구 로봇

개발한 축구 로봇은 CPU로 TMS320F240을 사용하였으며, DC모터의 속도에 대한 PID제어를 한다. 무선 R/F방식을 통해 로봇과 호스트 컴퓨터간의 통신을 하며, 데이터 전송속도는 38400bps이다. Fig. 12는 로봇의 제어부와 몸체를 각각 나타내고 있다. 로봇의 최대 속도는 1.98m/s이며 이 속도는 개발한 비전 시스템에서 초당 60번의 정확한 위치 추적이 가능한 한계속도 2.0m/s와 근접하도록 설계하였다. 로봇의 킥(kick) 동작에 의해 공의 최대속도는 2.0m/s 보다 클 수 있는데, 이러한 경우 개발한 비전 시스템은 색깔 샘플링의 부정확성으로 인해 초당 60번의 정확한 위치를 추적하지 못한다.



a) Controller of the robot      b) Body of the robot

Fig. 12 Pictures of the robot

### 3.3 비전 시스템

#### 3.3.1 비전 시스템의 구성

본 논문에서 사용한 비전 시스템은 CCD카메라로부터 받은 NTSC신호를 디지털 값으로 변환하여 640x480의 해상도에서 60 field/sec의 속도로 영상의 YUV값을 비교, 각 물체들의 중심 좌표를 추출

하여 계층적 제어기로 전송한다. Fig. 13은 비전 보드의 구성 및 구성별 기능을 보여 주고 있다.

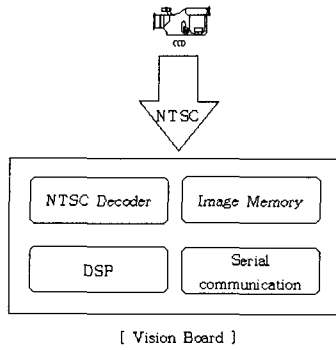


Fig. 13 Structure of vision board

### 3.3.2 비전 알고리즘

비전 처리 알고리즘은 비전 시스템의 DSP에서 행하는 것으로 각 물체의 중심 좌표 및 방향을 구하는 것을 목적으로 한다. 본 논문에서의 비전 알고리즘은 다음과 같은 두 가지 처리 순서로 구현하였다.



Fig. 14 Vision algorithm

컴포넌트 라벨링(component labeling)에서는 입력되는 칼라 값을 비교, 각 물체들의 이어진 픽셀을 연결하여 각각 물체의 군을 구분한다. 작업의 수행시간은 많은 시간이 소요될 수 있으므로 기존의 순차 라벨링 알고리즘을 개량하여 축구 로봇에 최적화된 알고리즘을 개발하였다. 위치와 방향 추출에서는 일반적으로 많이 사용하는 면적중심법과 최소자승정합법을 사용하였다.

## 4. 구동실험

Fig. 15(a)~(f)에서는 공과 로봇의 위치를 비전 시스템의 매 6번 샘플마다 한번의 위치를 기록하였으며, 비전 시스템의 샘플링 시간은 16.6msec이다.

Fig. 15(a)에서는 로봇의 이동 목표 지점을 공의 위치로 하고 로봇의 자세를 목표 지점과 수직이 되도록 한 로봇의 이동 궤적을 보여 주고 있다.

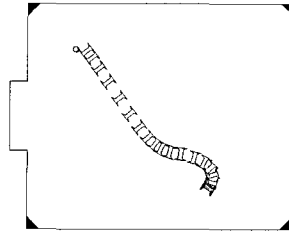


Fig. 15(a) Moving motion to target point

Fig. 15(b)에서는 동심원도법에 의해 생성된 궤적에 따라 일정한 회전 반경을 그리며 공의 뒤쪽으로 접근하고, 슈팅 할 조건이 만족되면 바로 골 방향으로 공을 몰고 가고 있음을 알 수 있다.

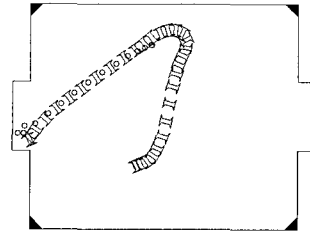


Fig. 15(b) Attack motion for stationary ball

Fig. 15(c)에서는 이동하고 있는 공에 대해서 로봇의 공격 궤적을 나타내고 있으며 공 근처로 접근하고 드리블하는 과정을 보여 주고 있다.

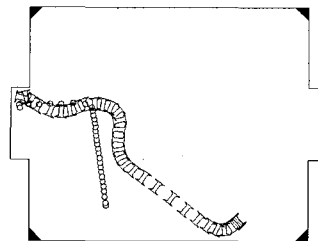


Fig. 15(c) Attack motion for moving ball

Fig. 15(d)에서는 공의 움직임이 거의 없을 때 대기 로봇과 공격 로봇이 서로 역할을 교환하는 과정을 보여 주고 있다.

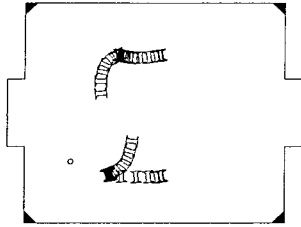


Fig. 15(d) Role change depending on the speed of the ball

Fig. 15(e)에서는 한 로봇이 공격을 하던 중에 공이 반대편으로 흐르게 되어 대기하고 있던 로봇이 바로 슈팅을 할 수 있는 상황으로 판단되어 공을 골 방향으로 몰고 가는 궤적을 나타내고 있다.

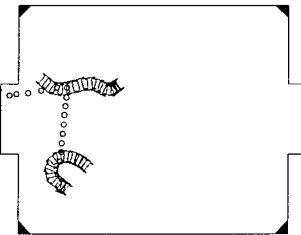


Fig. 15(e) Role change depending on shooting condition

Fig. 15(f)에서는 공이 먼 거리에서 골 방향으로 빠르게 이동할 때 골키퍼 로봇의 이동 궤적을 나타내고 있다.

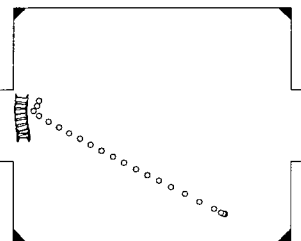


Fig. 15(f) Motion for goalkeeper robot

## 5. 결론

본 논문에서 제안한 계층적 행동 제어를 기반으로 구현된 호스트 프로그램은 비전 입력의 최대

샘플링 주기(60 field/sec)와 같은 16.6msec 내에 비전 처리와 동시에 행동 결정 알고리즘을 모두 수행하였다.

로봇 축구 경기는 7개의 객체가 매우 빠르고 불규칙적으로 변화하는 시스템이므로 느린 샘플링 시간을 가지는 판단 모델과 위치 제어기는 로봇의 이동을 포함한 전체 시스템을 지연시키게 된다. 그러나 본 논문에서는 로봇 축구의 동적 특성과 빠른 샘플링 시간을 고려하여 4개의 계층을 통해 경기장의 상황을 인식하고 판단하는 간단한 모델과 경기 알고리즘을 위한 행동을 결정할 수 있는 계층적 행동 제어를 설계하였고, 로봇에 대해 임의의 거리와 각도를 설정하고 각 계층의 다양한 동작들을 실행하여 그 경로와 시간을 보여줌으로써 제안된 위치 제어기의 성능을 입증하였다.

## 참고문헌

1. R. E. Fayek et. al., "A System Architecture for a Mobile Robot Based on Activities and a Blackboard Control Unit," IEEE Robotics and Auto. Conf., pp. 267-274, 1993.
2. Atsushi Fujimori, Peter N. Nikiforuk, Madan M. Gupta, "Adaptive Navigation of Mobile Robots with Obstacle Avoidance," IEEE Trans. Robotics and Automat., Vol. 13, No. 4, August 1997.
3. Lynne E. Parker "ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation," IEEE Trans. Robotics and Automat., Vol. 14, No. 2, April 1998.
4. 심현식, 정명진, 김홍수, 김종환, "비전 기반 축구 로봇 시스템을 위한 혼합형 제어 구조의 역할 계층 설계," 제1회 로봇축구 공학 워크샵 논문집, FIRA, pp. 3-22, 1999.
5. 이인재, 백승민, 손경오, 국태용, "축구로봇을 위한 계층적 제어기," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제6권, 제9호, pp. 803-812, 2000.
6. 장재완, 이동일, 김상준, 이석규, "로봇축구를 위한 다개체 로봇의 행동제어에 대한 연구," 2000 로봇축구 공학 워크샵 논문집, FIRA, pp. 69-99, 2000.
7. Proceedings of Micro-Robot World Cup Soccer Tournament (MIROSOT '97)," KAIST, Daejon, Korea, 1997.



8. Jong-Hwan Kim, "Robot Soccer System," 한국 퍼지 및 지능 시스템 학회 '99 추계 학술 대회 Tutorial, 1999.
9. FIRA Homepage, <http://www.fira.net>.
10. 김병수, 하인용, "로봇 축구 시스템의 효과적 구현을 위한 구성방법," 제1회 로봇축구 공학 워크샵 논문집, FIRA, pp. 23-44, 1998.
11. 김형중, 장재완, 김상준, 이석규, "축구로봇을 위한 비전처리," 2000 로봇축구 공학 워크샵 논문집, FIRA, pp. 147-158, 2000.