

모듈형 로봇의 자가 결합을 위한 퍼지 주행 제어 및 장애물 회피 제어

Fuzzy Navigation and Obstacle Avoidance Control for Docking of Modular Robots

나두영* · 노수희* · 문형필** · 정진우*** · 김용태****

Doo-Young Na*, Su-Hee Noh*, Hyung-Pil Moon**, Jin-Woo Jung*** and Yong-Tae Kim****

*한경대학교 생물환경 · 정보통신 대학원

**성균관대학교 기계공학과

***동국대학교 컴퓨터공학과

****한경대학교 정보제어공학과, 전자기술종합연구소

요 약

자기 자신의 형태를 변형하거나 물리적인 결합으로 재구성하여 새로운 환경에 적응하는 모듈형 자가 결합 로봇은 많은 연구가 필요한 분야이다. 본 논문에서는 물리적으로 결합 가능한 모듈형 로봇을 위한 영상기반의 자가 결합 제어기를 제안한다. 먼저 실시간 영상처리가 가능한 모듈형 로봇 플랫폼을 설계하고, 킬러기반 물체 인식 방법을 구현하였다. 모듈형 로봇은 자가 결합을 위해 결합될 로봇 근처의 부목표점까지 장애물들을 회피하면서 주행해 가야 한다. 본 논문에서는 부 목표점의 추적을 위하여 영상처리를 통해 얻은 거리와 방향각 정보들을 사용한 퍼지 주행 제어기와 장애물 회피를 위한 퍼지 제어기를 제안하고, 제안된 퍼지 제어기들과 로봇의 절대 거리 및 방향각 정보를 사용하여 모듈형 로봇을 위한 자가 결합 제어기를 구현하였다. 실제 제작된 두 대의 모듈형 로봇을 사용하여 다양한 환경에서 로봇간 거리와 방향각이 다른 상황에서 실험을 수행하여 제안된 자가 결합 제어 방법의 성능을 검증하였다.

키워드 : 퍼지 주행 제어, 퍼지 장애물 회피 제어, 결합 제어, 모듈형 로봇

Abstract

Modular reconfigurable robots with physical docking capability easily adapt to a new environment and many studies are necessary for the modular robots. In this paper, we propose a vision-based fuzzy autonomous docking controller for the modular docking robots. A modular docking robot platform which performs real-time image processing is designed and color-based object recognition method is implemented on the embedded system. The docking robot can navigate to a subgoal near a target robot while avoiding obstacles. Both a fuzzy obstacle avoidance controller and a fuzzy navigation controller for subgoal tracking are designed. We propose an autonomous docking controller using the fuzzy obstacle avoidance and navigation controllers, absolute distance information and direction informations of robots from PSD sensors and a compass sensor. We verify the proposed docking control method by docking experiments of the developed modular robots in the various environments with different distances and directions between robots.

Key Words : Fuzzy navigation control, Fuzzy obstacle avoidance control, Docking control, Modular robots,

1. 서 론

현재 이동 로봇 시스템은 우주 탐사, 군사, 교육 등 사회 전반에 걸쳐 널리 연구되고 있으며, 단순한 이동에서 벗어

나 장애물 회피 및 자율 주행, 간단한 작업 수행을 위한 기능들을 추가해 더욱더 능동적인 작업이 가능하도록 연구 개발되고 있다. 그러나 일반적으로 노면상태가 불규칙하고 장애물이 있는 외부환경에서는 이동 로봇의 주행에 많은 어려움이 생긴다. 이러한 외부환경을 복수의 이동 로봇들 사이의 물리적인 또는 기계적인 결합과 형태 재구성으로 극복할 수가 있다. 자기 자신의 형태를 변형하거나 물리적인 결합으로 재구성하여 새로운 환경에 적응하는 자가 결합 가능한 모듈형 로봇에 대한 연구가 요구되고 있다. 자가 결합 가능한 모듈형 로봇은 여러 개의 동종 모듈로 자가 결합이 가능하거나 이종의 모듈로 자가 결합 가능한 로봇으로 구분할 수 있다. 국내에서는 이중 자가 결합 가능한 모듈형 로봇 플랫폼의 연구는 아직까지 많은 연구가 진행되고 있지 않

접수일자 : 2009년 4월 6일

완료일자 : 2009년 7월 21일

**** 교신저자

본 연구는 한국산업기술평가관리원의 IT핵심기술사업 [2008-F-041-01]에 의해 수행되었음.

본 논문은 2009년 한국지능시스템학회 춘계 학술대회에서 우수 논문으로 선정된 논문입니다.

며, 배터리 충전을 목적으로 사용하는 고정된 도킹 스테이션과의 결합 방법에 관한 연구들만 수행되고 있다.

자가 결합 가능한 모듈형 로봇은 다수의 로봇들이 스스로 연결과 분리를 할 수 있고 새로운 환경에 적응하기 위하여 다양한 방법에 의한 동적 재구성으로 로봇의 형태를 변형시키고 환경에 적응할 수 있다. 복잡한 작업을 수행함에 있어서 작업을 수행하기 위한 고기능의 로봇 한대를 이용하는 것은 높은 비용의 문제뿐만 아니라, 다른 작업이 발생했을 경우 적용하기 어려운 단점이 있다. 이와 같은 문제를 극복할 수 있는 방법으로 여러 대의 단순 기능을 가진 로봇들의 물리적인 결합을 통하여 형태를 재구성하여 복잡한 작업을 수행하게 하는 자가 결합 가능한 모듈형 로봇의 협력 작업에 대한 연구가 진행되어 왔다. 복수의 모듈형 로봇을 결합하여 불규칙한 노면과 장애물을 극복하고 협업하는 기술은 로봇 탐색과 인명 구조[1], 행성 탐사[2]와 도시 탐사[3] 등의 응용에 적용이 가능하다. 로봇 결합을 통한 협력 작업은 복수로 구성된 로봇들 사이에서 상호간 긴밀한 정보 공유를 바탕으로 이루어진다[4].

물리적 기계적 결합을 이용하는 로봇 연구는 셀 구조 로봇을 위한 후크(hook) 타입 결합 메커니즘[5], 관절형 물체를 가지는 이동 로봇[6], 모듈형 체인 로봇인 폴리봇(PolyBot) [7] 등의 연구가 수행되었다. 최근에는 핀(pin)과 홀(hole)의 결합 구조를 가지는 밀리봇(Millibot) [8]과 슈퍼봇(Super-Bot)[9] 등의 연구가 수행되었다. 물리적으로 결합된 로봇들은 상대적인 동역학적 움직임에 의한 이동성을 향상시킬 수 있다[11]. 그러나 현재 대부분의 이동 로봇들 사이의 기계적인 결합은 주로 수동으로 이루어지고 있으며, 일부 연구만이 자가 결합과 이동 로봇들이 정렬되어 있지 않은 상황에서 결합 연구를 진행하였다[12~15]. 효율적인 결합 메커니즘을 가진 모듈형 로봇 플랫폼과 로봇들이 정렬되어 있지 않음으로 발생하는 오차가 있을지라도 물리적인 자가 결합을 수행할 수 있는 기술에 대한 연구가 진행되고 있다[14][15].

본 논문에서는 물리적으로 결합 가능한 모듈형 로봇 플랫폼과 영상정보 기반의 자가 결합 제어 기법을 제안하였다. 미지의 환경에서 자가 결합을 수행하기 위해 주변 환경의 영상 인식 방법, 퍼지 장애물 회피 및 주행 제어기, 자가 결합 제어기를 제안하였다. 영상처리를 통해 얻어진 거리 정보와 방향각 정보를 사용하여 모듈형 로봇을 위한 자가 결합 제어 방법을 구현하고, 실제 모듈형 로봇을 제작하여 다양한 상황에서의 자가 결합 성능을 검증하였다.

2. 자가 결합 가능한 모듈형 로봇

2.1 모듈형 로봇의 시스템 구성

본 연구에서는 그림 1과 같이 4개의 바퀴가 장착되고 자가 결합 가능한 모듈형 이동 로봇을 사용하였다[14]. 로봇간 자가 결합을 위하여 페그 모듈과 컵 모듈을 각각 로봇의 전면과 후면에 장착하고, 결합 상태를 감지하기 위하여 접촉 센서를 사용하였다[14]. 로봇 전체 무게의 균형이 이루어지도록 전자하드웨어들과 배터리를 로봇의 중심부에 배치하고, 로봇의 전면 상단에 컬러 CCD 카메라와 로봇 방향 측정을 위한 지자기센서를 장착하였다. 바퀴의 구동을 위한 모터는 10V 전압에서 16.5kgf·cm의 토크를 낼 수 있는 DC 서보모터를 사용하였으며, 35cm까지 측정 가능한 PSD 센서를 로봇의 전면에 장착하였다.

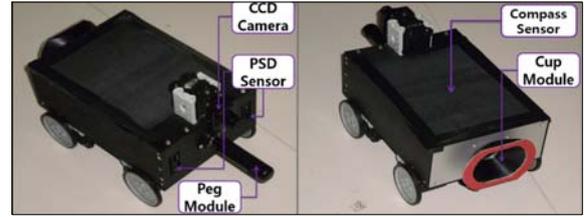


그림 1. 자가결합 가능한 모듈형 로봇
Fig. 1. Modular docking robot

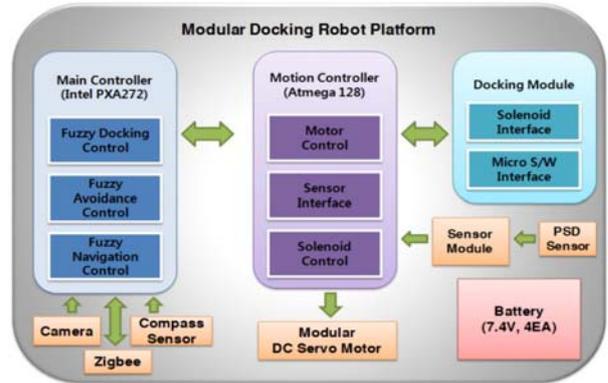


그림 2. 모듈형 자가 결합 로봇 시스템 구성
Fig. 2. Structure of modular docking robot

자가 결합 가능한 모듈형 로봇 플랫폼의 하드웨어 구조는 그림 2와 같이 주제어기, 모션제어기, 결합 장치, 배터리로 구성하였다. 주제어기는 리눅스 기반의 Intel PXA272 임베디드 보드로 구성하였으며, 카메라의 입력영상을 처리한 결과를 바탕으로 퍼지 주행 및 장애물 회피 제어, 자가 결합 기능을 수행한다. 모션제어기는 Atmega128 마이크로컨트롤러 보드를 사용하여 주행을 위한 모터 제어, PSD 센서 인터페이스, 자가 결합을 위한 솔레노이드제어, 주제어기와의 시리얼 통신을 수행한다. 결합 장치는 두 개의 솔레노이드와 마이크로 스위치로 구성하였으며, 4개의 7.4V의 리튬폴리머 배터리를 사용하였다.

2.2 모듈형 로봇의 주행 제어 모델

모듈형 로봇의 주행 제어를 위한 기구학 모델은 그림 3과 같다[15]. (x_1, y_1) 은 로봇의 중심점의 좌표이고, v 는 로봇 중심의 선속도이며, V_L 과 V_R 은 양 바퀴의 선속도이다. θ 는 로봇의 앞부분이 향하는 방향각이다. 간단한 기구학 모델을 얻기 위해 모듈형 로봇의 바퀴는 non-slipping 조건을 만족한다고 가정하고, 이를 바탕으로 다음 식 1)과 같은 속도 방정식을 얻었다. 여기서 ω 는 반시계 방향으로의 로봇의 각속도이며, v 는 로봇 중심의 선속도를 나타낸다. L 은 양쪽 바퀴 사이의 거리를 나타내며, r 은 바퀴의 반지름이다. ω_R 은 오른쪽 바퀴의 각속도를 나타내고, ω_L 은 왼쪽 바퀴의 각속도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} w &= \frac{V_R - V_L}{L} = r \frac{\omega_R - \omega_L}{L} \\ v &= \frac{V_R + V_L}{2} = r \frac{\omega_R + \omega_L}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

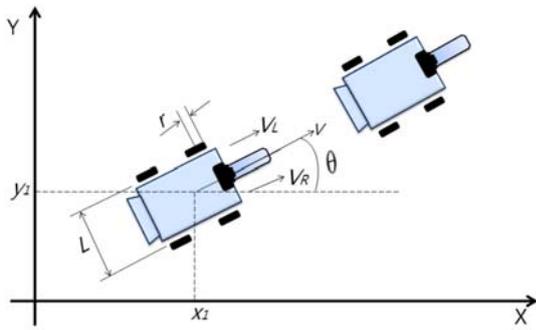


그림 3. 모듈형 로봇의 기구학 모델
Fig. 3. Kinematic model of modular docking robot

로봇은 목표점 (x_d, y_d) 와 현재 위치 (x_r, y_r) 와의 거리 및 각도 오차를 측정하여 이를 바탕으로 양바퀴의 속도를 제어하여 목표점까지 이동한다. 그림 4와 같이 목표점에서 로봇까지의 거리 오차는 d_e , 각도 오차는 θ_e 로 나타내면 다음 식과 같이 표현된다.

$$d_e = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (2)$$

$$\theta_e = \theta_d - \theta_r \quad (3)$$

여기서 d_x 와 d_y 는 X 좌표와 Y 좌표에서 원하는 위치와 로봇과의 거리차이고, θ_d 는 목표점과 로봇을 잇는 선각도이고, θ_r 은 현재 로봇의 방향각이다. 로봇의 기준방향은 지자기 센서의 측정값을 기준으로 설정하였다.

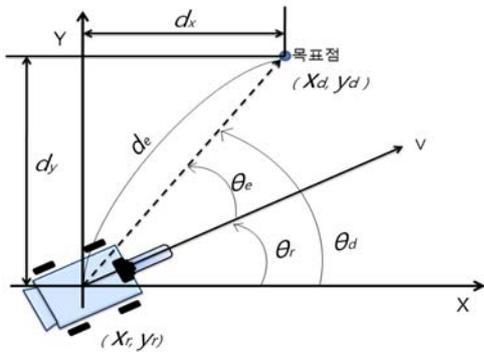


그림 4. 모듈형 로봇간 거리 및 각도 오차
Fig. 4. Distance and direction errors between robots

3. 영상기반 퍼지 자가 결합 제어

3.1 임베디드 보드 기반 영상 처리 과정

영상처리는 모듈형 로봇이 임의의 환경에서의 주행 및 장애물 회피와 자가 결합을 수행하기 위한 기반 정보들을 제공한다. 그림 5는 카메라에서 얻어진 영상이 영상처리 과정을 거쳐 결합 장치 및 장애물 인식 과정을 나타낸 것이다 [15].

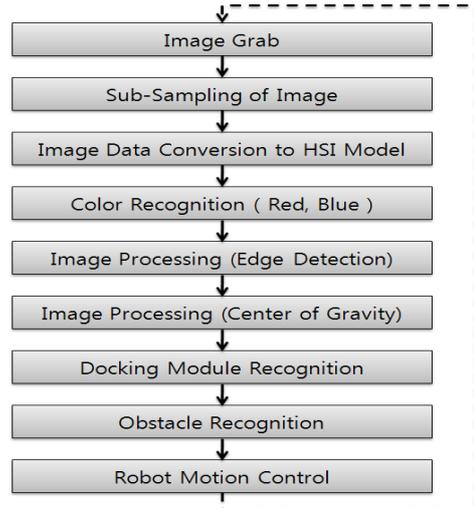


그림 5. 임베디드 보드에서의 영상 처리 과정
Fig. 5. Image processing of embedded systems

입력 영상은 임베디드 보드에서의 영상 처리 시간을 감소시키기 위해 영상의 크기를 축소 변환하고, 조명문제를 해결하기 위한 방법으로 HSI 영상으로 변환한다. 변환된 HSI 영상의 조명 정보를 제외한 색 정보만 이용하여 붉은 색과 파란색의 컵 모듈과 장애물들을 추출한다. 일부 분산되어 있는 픽셀들을 제거한 뒤에 물체의 윤곽선을 검출하고 대상 물체들을 인식하며, 무게 중심법을 이용하여 대상 물체들의 중심점을 추출하였다. 영상을 통해 얻어진 정보들을 기반으로 모듈형 로봇은 장애물 회피 및 주행 제어와 자가 결합 제어를 수행한다. 그림 6은 컬러 기반으로 장애물과 로봇 윤곽선을 검출하는 실험의 영상이며, 그림 7은 컬러 기반 결합 장치의 컵 모듈의 인식 및 중심점 추출 실험의 결과 영상이다[14].

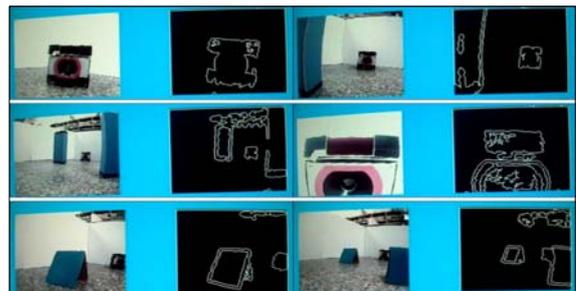


그림 6. 장애물과 모듈형 로봇의 윤곽선 검출 실험
Fig. 6. Edge detection of obstacles and robots

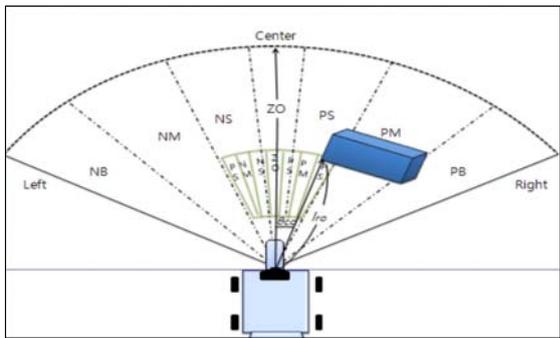


그림 7. 컵 모듈 인식 및 중심점 추출 실험
Fig. 7. Recognition of cup module and extraction of a central point

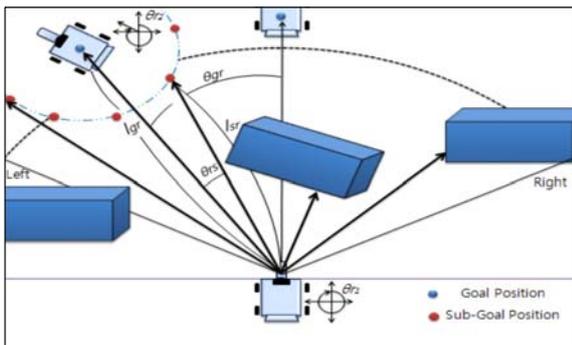
3.2 부 목표점 설정 및 퍼지 영역 분할

모듈형 로봇의 자가 결함을 위해 고려해야 할 사항은 최종 목표점, 부 목표점, 각 로봇들의 실시간 방향과 위치, 장애물의 위치이다. 모듈형 로봇은 자가 결함을 위해 주행하는 동안 장애물을 회피함과 동시에 부 목표점을 향하여 이동해야 한다. 본 연구에서는 퍼지 주행 및 장애물 회피 제어를 설계하여 문제를 해결하였다. 그림 8의 (a)는 주행 제어를 위해 설정한 7개의 퍼지 영역(NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB)과 장애물 회피 제어를 위해 7개 퍼지 영역 내에서 설정한 7개의 장애물 탐지 영역을 나타내고 있다. 장애물 탐지영역은 로봇의 크기에 맞추어 설정하였기 때문에 2개 이상의 장애물이 동시에 장애물 탐지 영역안에 인식된 경우 로봇이 통과하지 못하는 환경으로 판단한다. l_{ro} 는 로봇과 장애물 사이의 거리이며, θ_{ω} 는 로봇이 향하는 방향과 인식된 장애물 사이의 각도를 나타낸다.

그림 8의 (b)는 자가 결함을 위한 경로선택 과정에 필요한 지자기 센서에 의한 방위각 정보 θ_{r1} 과 θ_{r2} , 로봇과 목표점까지의 거리 l_{gr} , 로봇과 부 목표점까지의 거리 l_{sr} , 로봇의 방향과 부 목표점사이의 각도 θ_{gr} , 목표점과 부 목표점사이의 각도 θ_{rs} 를 나타낸다.



(a) 퍼지 영역 분할
(a) Fuzzy region partition



(b) 부 목표점 및 경로 선정
(b) Subgoal and path selection

그림 8. 자가 결함 제어를 위한 영역 분할 및 경로 생성
Fig. 8. Fuzzy region partition and path selection

장애물이 인식되지 않은 경우의 최종 목표점 위치에 따른 로봇의 이동 경로는 그림 9와 같이 몇 가지의 경우로 나타낼 수 있다. 그림 9의 3, 8, 13번 상황과 같이 최종 목표점의 위치가 정면에 있을 경우 직진만으로 자가 결함을 할 수 있다. 그림 9의 1번 상황의 경우와 같이 로봇과 최종 목표점의 거

리 l_{gr} 이 가깝고, 경로 방향각 θ_{gc} 은 왼쪽으로 큰 값을 가지는 경우는 후진을 하여 11번 상황을 만들고 좌회전으로 13번과 같은 상황을 만들어 쉽게 자가 결함을 할 수 있다.

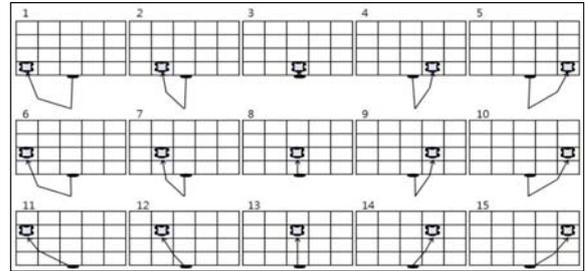
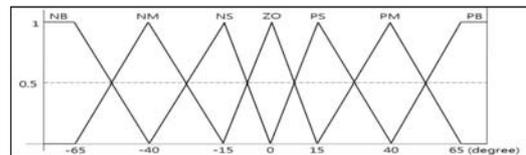


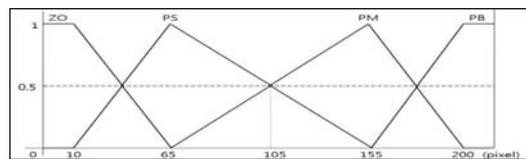
그림 9. 목표물의 위치에 따른 주행 경로 계획
Fig. 9. Navigation path planning based on the position of target robot

3.3 부 목표점 추적을 위한 퍼지 주행 제어기

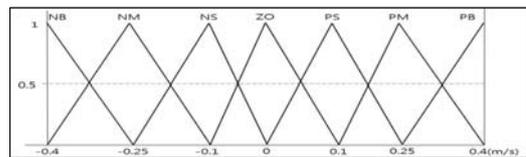
부 목표점 추적을 위한 퍼지 주행 제어기의 입력으로는 부 목표점과 모듈형 로봇이 이루는 경로 방향각 θ_{sc} 와 거리 l_{sr} 을 사용한다. 그림 10의 (a)는 각도에 대한 퍼지 소속 함수를 나타낸다. 결함 장치의 썩 모듈 오차 보상 범위를 고려한 자가 결함이 이루어지도록 하기 위하여 NS, ZO, PS 영역의 범위를 줄여 차등 분할하였다. 그림 10의 (b)는 거리에 대한 퍼지 소속 함수이며, 경로의 거리를 4단계로 ZO, PB, PM, PS 영역으로 나누어 경로 계획을 세웠다. 로봇 간 거리가 너무 짧을 경우 충돌이 발생하는 문제를 해결하기 위하여 차등 분할하였다. 그림 10의 (c)는 로봇 양쪽 바퀴의 속도에 대한 퍼지 소속 함수를 나타낸 것으로 최대 0.4 m/s , 최소 -0.4 m/s 로 설정하였다.



(a) 방향각 θ_{sc} 에 대한 퍼지 소속 함수
(a) Fuzzy membership function of θ_{sc}



(b) 거리 l_{sr} 에 대한 퍼지 소속 함수
(b) Fuzzy membership function of l_{sr}



(c) 속도에 대한 퍼지 소속 함수
(c) Fuzzy membership function of velocity

그림 10. 퍼지 주행 제어기의 소속 함수
Fig. 10. Membership function of fuzzy navigation controller

모듈형 로봇과 부 목표점이 이루는 경로 방향각과 거리에 따른 왼쪽/오른쪽 바퀴 속도의 퍼지 제어 규칙을 표 1과 같이 구성하였다. 각도 θ_{sc} 변수에서 NB는 부 목표점이 로봇의 왼쪽에 있고 PB는 오른쪽에 위치하는 것이며, 거리 l_{gr} 변수에서 PS는 부 목표점이 가까이에 위치하고 PB는 먼 거리에 위치하는 것이다. 제어 규칙에서 NB는 바퀴가 뒤로 빠르게 회전하고, PS는 앞으로 느리게 회전하는 것이다. 그림 9의 1번 상황의 경우는 표 1에서 θ_{sc} 가 NM이고, l_{gr} 이 ZO인 상황으로 로봇은 후진을 하게 된다. 퍼지 추론 방식은 Min-Max 방법을 사용하고 비 퍼지화기는 무게 중심법을 사용하였다.

표 1. 주행 제어기의 퍼지 제어 규칙
Table 1. Fuzzy rules of the navigation controller

θ_{sc} \ l_{sr}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	NM /NM	NS /NS	NS /NS	ZO /ZO	NS /NS	NS /NS	NM /NM
PS	NB /NS	NM /NS	ZO /PS	PS /PS	PS /ZO	NS /NM	NS /NB
PM	PS /PM	PS /PM	PS /PM	PM /PM	PM /PS	PM /PS	PM /PS
PB	PS /PB	PM /PB	PS /PM	PB /PB	PM /PS	PB/ PM	PB /PS

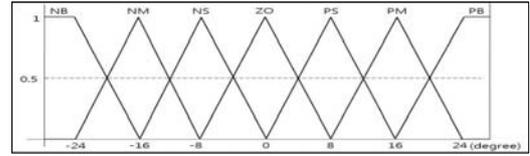
3.4 장애물 회피를 위한 퍼지 제어기 구성

모듈형 로봇은 부 목표점을 향해 주행하는 동시에 안전하게 장애물을 회피해야 한다. 이를 위해 장애물 회피를 위한 퍼지 제어기를 설계하였다. 제어기의 입력은 장애물 탐지 영역 내에 인식된 장애물과 로봇이 이루는 경로 방향각 θ_{co} 과 거리 l_{ro} 정보를 사용하였다. 그림 11의 (a)는 장애물과 로봇 사이의 각도에 대한 퍼지 소속 함수를 나타내며, 그림 11의 (b)는 로봇과 장애물 사이의 거리에 대한 퍼지 소속 함수이며, 로봇의 속도에 대한 퍼지 소속 함수는 주행 제어기의 그림 10의 (c)를 사용하였다. 방향각 θ_{co} 에서 NB는 모듈형 로봇에서 장애물이 왼쪽에 존재하고 있으며, PB는 오른쪽에 위치하고 있는 것이고, 거리 l_{ro} 에서 PS는 모듈형 로봇에서 장애물이 가까이에 위치하는 것이며, PB는 먼 거리에 위치하고 있는 것이다. 로봇이 부 목표점으로 주행하다가 장애물을 만나면 감지된 거리와 방향에 따라 주행 방향을 변경하여 안전하게 장애물을 회피하도록 하였다.

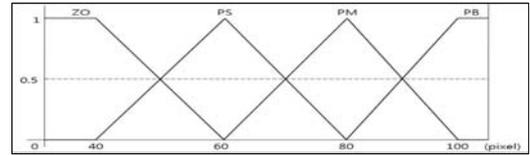
모듈형 로봇과 장애물이 이루는 경로 방향각과 거리에 따른 장애물 회피 제어기의 왼쪽/오른쪽 바퀴 속도에 대한 퍼지 규칙은 표 2와 같다. 장애물 회피 제어기는 장애물이 로봇 진행방향을 기준으로 오른쪽에 인식되면 로봇은 왼쪽으로 회피하고, 왼쪽에 존재하면 반대방향으로 회피하도록 설계 하였다. 부 목표점을 향해 주행하는 동안 카메라의 사각지대에 위치한 장애물을 2개의 PSD센서로 감지한다.

3.5 모듈형 로봇의 전체 자가 결합 알고리즘

모듈형 로봇이 영상을 입력받아 처리하는 순간부터 자가 결합까지의 전체 과정을 순서도로 나타내면 다음 그림 12와 같다.



(a) 각도 θ_{co} 에 대한 퍼지 소속 함수
(a) Fuzzy membership function of θ_{co}



(b) 거리 l_{ro} 에 대한 퍼지 소속 함수
(b) Fuzzy membership function of l_{ro}

그림 11. 장애물 회피 퍼지 제어기의 소속 함수
Fig. 11. Membership function of fuzzy obstacle avoidance controller

표 2. 장애물 회피 제어기의 퍼지 제어 규칙
Table 1. Fuzzy rules of obstacle avoidance controller

θ_{co} \ l_{ro}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	PM /PS	PS /NS	PS /NS	NS /NS	NS /PS	NS /PS	PS /PM
PS	PM /PS	PM /PS	PS /NS	PS /NS	NS /PS	PS /PM	PS /PM
PM	PB /PM	PM /PS	PM /PS	PM /PS	PS /PM	PS /PM	PM /PB
PB	PB /PM	PB /PM	PB /PM	PB /PM	PM /PB	PM /PB	PM /PB

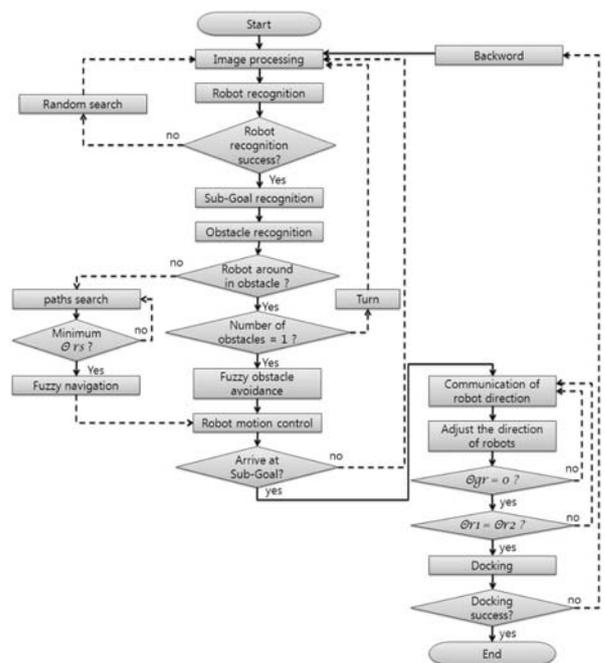


그림 12. 제안된 자가 결합 알고리즘
그림 12. Proposed autonomous docking algorithm

모듈형 로봇의 카메라를 통해 영상이 입력되면 임베디드 보드에서 영상처리를 거친 후 자가 결합 될 목표 로봇과 부 목표점을 인식한다. 로봇을 인식하지 못하면 다시 영상처리 과정을 거쳐 로봇과 부 목표점 인식과정을 반복한다. 부 목표점이 인식되면 장애물 탐지 영역 내의 물체를 탐지하면서 목표점과 부 목표점 사이의 각도 θ_{rs} 가 최소값을 가지는 경로를 선택하여 주행한다. 주행 중 장애물 탐지 영역 내에 장애물이 인식되면 장애물의 개수를 판단하고 한 개의 장애물이 인식된 경우 장애물 회피제어기에 의하여 주행제어가 이루어지며, 두 개 이상의 장애물이 동시에 인식된 경우에는 한 개의 장애물이 인식될 때까지 왼쪽으로 방향 전환하여 장애물을 회피한다. 로봇이 부 목표점에 도착하게 되면 두 로봇간 지자기 센서값을 무선 통신으로 공유하여 두 로봇이 같은 방향($\theta_{r1} = \theta_{r2}$)이 되도록 제어한다. 목표점이 중앙에 위치하고 두 로봇이 가지는 방향각이 같으면 결합을 시도한다. 만약 결합이 실패하게 하게 되면 로봇은 후진하면서 자가 결합할 로봇을 탐색하게 된다.

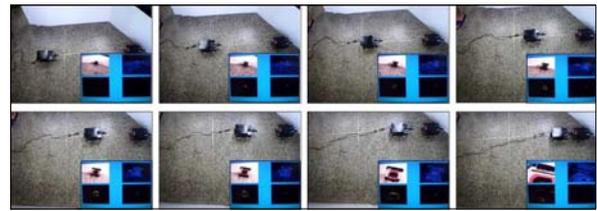
4. 실험 및 고찰

제안된 영상기반 퍼지 주행 제어기 및 장애물 회피제어기와 자가 결합 제어기의 성능을 검증하기 위해 두 대의 모듈형 로봇을 제작하여 실제 다양한 환경에서 실험을 수행하였다. 결합될 로봇의 컵 모듈이 영상에서 정면(환경 1), 왼쪽(환경 2), 오른쪽(환경 3)에 위치한 경우와 장애물 환경(환경 4)에서 로봇간 거리와 결합되어지는 로봇의 각도가 다른 여러 가지 상황을 고려하여 실험을 수행하였다. 표 3은 각각의 상황에서 10번의 시도에서 로봇간 자가 결합의 성공 횟수를 나타낸 것이다.

표 3. 다양한 환경에서 자가 결합 실험의 성공률
Table 3. Achievement rate of autonomous docking experiments in the various environments

환경 상황	환경 1 (정면)	환경 2 (왼쪽)	환경 3 (오른쪽)	환경 4 (장애물)
거리, 각도 (1m, 15°)	10 / 10회	8 / 10회	8 / 10회	7 / 10회
거리, 각도 (1m, -15°)	10 / 10회	9 / 10회	9 / 10회	8 / 10회
거리, 각도 (2m, 0°)	10 / 10회	9 / 10회	9 / 10회	9 / 10회
거리, 각도 (2m, 15°)	9 / 10회	7 / 10회	8 / 10회	6 / 10회
거리, 각도 (2m, -15°)	9 / 10회	8 / 10회	8 / 10회	7 / 10회

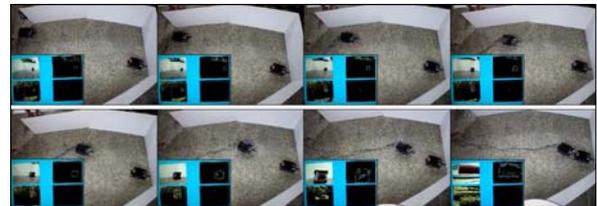
실험 결과에서 환경 1의 컵 모듈이 정면에서 인식된 경우에 자가 결합 성공률은 평균 95%로 높은 수준이며, 왼쪽과 오른쪽에 인식된 경우에는 각각 80%와 82.5%의 성공률을 보였다. 장애물 환경에서는 70%의 성공률을 보였으며, 다른 환경보다 낮은 것은 장애물 회피 주행 단계를 거친 로봇의 위치와 방향이 주행 제어 단계의 로봇자세에 영향을 미치기 때문이다. 그림 13은 다양한 상황에 따른 자가 결합의 실험 장면들을 보여준다.



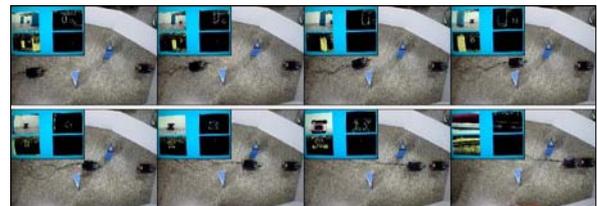
(a) 환경 1(1m 정면 위치, 방향각 차 0°)인 경우
(a) Environment 1 (1m, 0°)



(b) 환경 2(1m 앞 왼쪽 위치, 방향각 차 0°)인 경우
(b) Environment 2 (1m, 0°)



(c) 환경 3(2m 앞 오른쪽 위치, 방향각 차 15°)인 경우
(c) Environment 3 (2m, 15°)



(d) 환경 4(2m 앞 왼쪽 위치, 방향각 차 0°)인 경우
(d) Environment 4 (2m, 0°)

그림13. 자가 결합 실험 장면

Fig. 13. Experiment scenes of autonomous docking

5. 결론

본 논문에서는 모듈형 로봇들의 물리적인 자가 결합을 위하여 퍼지 주행 제어기와 퍼지 장애물 회피 제어기를 사용한 영상 기반의 자가 결합 방법을 제안하였다. 제안된 자가 결합 제어 방법은 두 대의 모듈형 로봇을 사용하여 실제 다양한 환경에서 로봇간 거리와 방향각을 다르게 하며 실험을 수행하여 성능을 검증하였다. 자가 결합될 로봇이 정면에 위치하는 경우에는 상대적으로 높은 자가 결합 성공률을 보여주며, 장애물 환경에서는 성공률이 다른 환경의 성공률보다 낮아지는 결과를 볼 수 있었다.

실제 실험에서 임베디드보드에서의 영상처리 시간이 자가 결합 성능에 중요한 변수로 작용하였다. 앞으로 영상처리 시간 단축을 위한 알고리즘 개선 방법을 연구하고, 물리적으로 결합된 모듈형 로봇들의 협력 이동 제어 기법과 다양한 환경에서의 협력 작업 방법에 관하여 연구할 예정이다.

참고 문헌

[1] R. Murphy, "Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue," *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 15, pp. 14-19, 2000

[2] C. Weisbin, et.al., "Miniature robots for space and military missions," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 6, No. 3, pp. 9-18, 1999

[3] R. Rich, C. Wood, and J. Keller, "ODV mobility enhancement using active height control," *SPIE conference on unmanned ground vehicle technology II* (Vol. 4024), 2000

[4] L. Parker, "ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multi-robot cooperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, pp. 220-240, 1998

[5] T. Fukuda and S. Nakagawa, "Dynamically reconfigurable robotic system," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1581-1586, 1988

[6] T. Fukuda and S. Nakagawa, "Method of autonomous approach, docking and detaching between cells for dynamically reconfigurable robotic system CEBOT," *JSME International Journal: Series C, Mechanical Systems, machine elements and manufacturing*, Vol. 33, pp. 263-268, 1990

[7] S. Hirose and A. Morishima, "Design and control of a mobile robot with an articulated body," *International Journal of Robotics and Research*, Vol. 9, pp. 99-114, 1990+

[8] M. Yim, D. G. Duff, and K.D. Roufas, "PolyBot: a modular reconfigurable robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 514-520, 2000

[9] H. B. Brown et.al., "Millibot trains for enhanced mobility," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 4, pp. 452-461, 2002

[10] W. Shen et. al., "Multimode locomotion via SuperBot reconfigurable robots," *Autonomous Robots*, Vol. 20, No.2, pp. 165-177, 2006

[11] A. Deshpande and J. Luntz, "Behaviors for physical cooperation between robots for mobility improvement," *Autonomous Robots*, Vol. 23, pp. 259-274, 2007

[12] R. Gross et. al., "Autonomous self-assembly in Swarm-Bots," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, pp. 1115-1130, 2006

[13] M. Delrobaei and K. Mclsaac, "Docking joint for autonomous self-assembly," *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 1025-1030, 2008-11-10

[14] Y. T. Kim, H. Moon, J. H. Park, H. R. Choi, H. S. Noh, and J. W. Jung, "Vision-based Modular Docking System for Cooperative Mobile Robots", *International Journal of Assistive Robotics and Systems*, Vol. 15, No .1, pp. 15-25, 2009

[15] 나두영, 노수희, 문형필, 정진우, 김용태, "모듈형 로

봇을 위한 비전기반 퍼지 자가 결합 제어", *한국지능 시스템학회 춘계학술대회 논문집*, Vol. 19, NO. 1, pp. 206-207, April 2009

저자 소개



나두영(Doo-Young Na)
 2009년 : 환경대학교 정보제어공학과 졸업 (학사)
 2009년~현재 : 동 대학원 석사과정

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템
 E-mail : nadooyoung@gmail.com



노수희(Su-Hee Noh)
 2004년 : 환경대학교 정보제어공학과 졸업 (학사)
 2006년 : 환경대학교 대학원 졸업(석사)
 2006년~현재 : 동 대학원 박사과정

관심분야 : 이족보행로봇, 지능시스템
 E-mail : neety@hanmail.net



문형필(Hyung-Pil Moon)
 1996년 : 포항공과대학교 기계공학과 졸업 (학사)
 1998년 : 포항공과대학교 기계공학과 졸업 (석사)
 2005년 : University of Michigan, Ann Arbor 기계공학 박사

2005년~2007년 : Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Post-doctoral fellow
 2008년~현재 : 성균관대학교 기계공학부 조교수

관심분야 : distributed manipulation, SLAM, multiple robot navigation, biomimetic robotics
 Email : hyungpil@me.skku.ac.kr



정진우(Jin-Woo Jung)

1997년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과 (공학사)

1999년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과 졸업(공학석사)

2001년~2002년 : 일본 동경대학교 기계
정보공학과 대학원 방문
연구원

2004년 : 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(공학박사)

2004년~2006년 : 한국과학기술원 인간친화 복지로봇 시스
템연구센터 박사 후 연구원

2006년~현재 : 동국대학교 컴퓨터공학과 조교수

관심분야 : 인간-로봇 상호작용, 다개체 모듈형 협력로봇,
소프트컴퓨팅, 생체측정, 지능로봇

E-mail : jwjung@dongguk.edu



김용태(Yong-Tae Kim)

1991년 : 연세대학교 전자공학과 졸업
(공학사)

1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과
졸업(공학석사)

1998년 : KAIST 전기 및 전자공학과
졸업(공학박사)

1998년~2000년 : (주)삼성전자

2006년 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구

2002년~현재 : 국립 한경대학교 정보제어공학과 부교수

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 기계학습

E-mail : ytkim@hknu.ac.kr