

## 페트리 넷과 퍼지 제어를 이용한 다수 이동 로봇의 물체 운반에 관한 연구

정 재 식\*, 이 석 주\*, 이 병 주\*, 박 귀 태\*\*  
 고려대학교 전기공학과 자동제어연구실\*  
 고려대학교 전기전자전파공학부\*\*

### A Study on Object Transportation by Multiple Mobile Robot using Petri Net and Fuzzy Logic Controller

Jae Sik Jeong\*, Seok Joo Lee\*, Byung Joo Lee\*, Gwi Tae Park\*\*  
 Automatic Control Lab., Dept. of Electrical Engineering, Korea University\*  
 School of Electrical · Electronic · Radio Wave Engineering, Korea University\*\*

**Abstract** - 단일 로봇을 이용한 물체의 운반은 제어 대상이 하나이기 때문에 제어가 쉽다는 장점이 있다. 그러나 로봇의 크기에 비해 물체의 길이가 길어지거나 부피가 커지고 무게가 증가할 경우, 물체의 균형을 유지하기가 힘들고 로봇의 속도가 감소하는 등의 문제가 발생한다. 본 연구에서는 페트리넷의 그래픽적인 모델링 방법을 이용하여 전체 작업을 모델링하여 로봇의 작업 상태를 쉽게 파악할 수 있도록 하였으며 명령체계상에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 제거하려 하였다. 또한 시스템을 분산형 구조로 설계하여 시스템을 관리하는 별도의 시스템을 설정하지 않는 대신 퍼지 제어를 이용하여 두 로봇의 협조 작업을 통해 물체를 운반할 경우 일어날 수 있는 애매한 상황에 대한 문제를 수학적인 모델링이 필요하지 않은 퍼지 제어기의 특성을 이용해 해결하고자 한다.

## 1. 서 론

20세기 후반에 들어서면서 로봇은 산업현장에서 인간의 역할을 대체하기 위한 도구로서 뿐만이 아니라 일상 생활에서 각종 서비스를 제공하는 용도로도 연구되고 있다. 자율 이동 로봇은 이동성을 지니면서 주어진 알고리즘에 따라 임무를 완수할 수 있기 때문에 물체의 탐색 [1]이나 운반 [2], 청소 [3], 안내 [4] 등에 널리 응용되고 있다. 이 중 물체 운반 작업은 자율 이동 로봇이 실제 상용화된 분야이며 산업 현장에서 RTU(Robot Transport Unit)나 AGV(Autonomous Guided Vehicle) 등을 쉽게 찾을 수 있다. 그러나, 기존의 무인 운반 시스템은 로봇의 제원(諸元)에 비해 운반 대상의 부피가 지나치게 커지거나 무게가 현저히 증가하는 경우, 단일 로봇만으로 물체를 안전하게 운반할 수 없는 제약을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 시스템을 제작하는 방법이 있지만, 이 경우 시스템 제작에 따르는 추가적인 비용이나 시간을 고려해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 비용 절감을 위해 기존의 시스템의 협조 작업을 통해 작업을 수행하는 방법을 제안한다.

협동 작업을 위한 다수 로봇 시스템의 제어는 각각의 단일 로봇이 고유한 작업을 수행하는 것뿐만 아니라 다른 로봇들과 유기적인 관계를 유지하며, 공동 작업을 완수해야 하기 때문에 단순히 여러 대의 단일 로봇을 제어하는 것 이상의 의미를 갖는다. 그러므로, 이 시스템에 필요한 알고리즘은 크게 로봇 전체의 작업 계획을 설계하는 부분과 로봇 각각의 세부 동작을 제어하는 부분으로 나누어 생각해야 한다. 본 연구에서는 작업 계획에 페트리넷(Petri net)의 그래픽적인 모델링 방법을 사용하여 시스템의 현재 상태를 파악하고 로봇간의 고유 역할을 분담하여 명령체계에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 제거하였다. 또한 세부 동작 제어에 퍼지 알고리즘을 적용하여 실제로 다수 로봇이 처할 수 있는 애매한 상황

서 로봇 스스로 대처할 수 있도록 하였다.

2장 1절에서는 로봇의 기본적 주행에 대해 기술하며, 2절에서는 페트리넷을 이용한 시스템의 작업 설계와 로봇 동작을 위한 퍼지 제어를 보인다. 3절에서는 실제 실험 결과를 보이고 3장에서 결론을 맺도록 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 물체의 운반 방법

물체를 운반하는 로봇의 협조 작업을 위해 한 대의 로봇은 대형의 선두에서 주행하며 다른 로봇은 후위에서 주행하도록 한다. 이 때 앞선 로봇은 선두 로봇(leader robot)이라 한다. 이 로봇은 장애물을 회피하며 경로를 확보하게 된다. 그리고 선두 로봇을 뒤따르는 로봇을 추종 로봇(follower robot)이라 한다. 선두 로봇은 로봇 우측의 벽으로부터 일정한 거리를 떨어져서 주행하며, 추종 로봇은 지속적으로 선두 로봇을 탐색하면서 선두 로봇의 후방에서 일정한 각도( $\theta$ )와 거리( $R$ )를 유지하며 주행한다. 그림 1은 추종 로봇과 선두 로봇의 이상적인 대형을 보여준다. 물체는 두 로봇의 상부에 놓여져서 운반된다. 따라서 물체를 안전하게 운반하기 위해 두 로봇은 작업 중 일정한 간격을 유지해야만 한다.

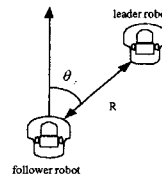


그림 1 이상적 대형

선두 로봇은 경로를 확보하는 역할을 하지만 추종 로봇에게 별도의 명령을 내리지 않는 분산화된 제어 구조를 갖는다. 분산 제어 구조는 각각의 로봇에 대한 의존도가 낮고, 각 로봇을 독립된 형태로 제어하므로 중앙화된 구조에 비해 시스템이 단순해진다. 따라서 이러한 구조는 중앙화된 구조에 비해 다수 로봇 시스템에 유리한 구조이다. 두 로봇 사이에서는 통신을 통해 지속적인 정보 교환이 이루어지며 이를 통해 상대 로봇의 속도나 방향 등을 알게 된다. 단, 선두 로봇이 목적지에 도착한 경우에는 통신을 통해 추종 로봇은 이를 인식하고 정지하게 된다.

### 2.2 페트리넷과 퍼지 제어를 이용한 물체 운반

#### 2.2.1 페트리넷 모델링

두 로봇의 협조 작업을 위해서는 단일 로봇의 모델링

이 선행되어야 한다. 단일 로봇의 동작은 환경의 인식과 처리, 실제 로봇 구동의 두 가지 부분으로 구성된다. 또한 다수의 로봇이 작업을 함께 작업하기 위해서는 각 로봇의 정보가 공유되는 부분이 마련되어야 한다. 본 시스템에서의 정보의 공유는 통신을 통해서 이루어지며 이를 통해 두 로봇이 동기화를 이루고 정보를 교환하도록 하였다. 특히 시스템을 이루는 로봇의 수가 증가하는 경우 각 로봇 사이의 중복된 동작을 중재할 수 있는 수단이 필요하다. 이를 위해 본 시스템은 통신을 할 수 있는 부분을 모델링하였다.

그림 2와 표 1은 로봇의 정보 교환과 동기화를 위한 페트리넷이다. 그림 2의 좌측은 선두 로봇의 작업 흐름을 나타내고 우측은 추종 로봇의 작업 흐름을 나타낸다. P1은 선두 로봇이 정보를 송신하는 상태이며 P3은 추종 로봇이 정보를 수신하기 위해 대기하는 상태이다. P1과 P3의 조건이 모두 만족되면 두 로봇은 동기화되어 다음 동작을 하게 된다. 만일 두 상태가 동시에 존재하지 않는다면 선두 로봇의 작업 흐름은 P2에서 정지하게 되고, 추종 로봇 또한 선두 로봇의 정보를 수신하지 못 하면 P3 상태에서 흐름이 정지된다.

표 1 통신 상태 모델링 리스트

Place	Transition
P1 정보 전달	T1 전달 완료
P2 대기	T2 수신 완료
P3 대기	T3 수신 완료
P4 응답	T4 전달 완료

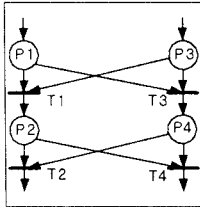


그림 2 통신 페트리넷

표 2와 그림 3은 실제 두 로봇이 협조 작업을 하기 위한 전체 작업 계획을 보이고 있다. 그림 3의 좌측은 선두 로봇의 동작을 위한 페트리넷이고 우측은 추종 로봇의 동작을 위한 페트리넷이다. 그림 3의 상단에는 그림 2에서 보인 두 로봇의 통신 페트리넷이 포함되어 있다.

표 2 협조 작업을 위한 페트리넷 모델링 리스트

Place(선두 로봇)	Place(추종 로봇)
P1 레이저 작동	P17 레이저 작동
P2 데이터 분석	P18 데이터 분석
P3 통신	P19 대기
P4 응답 대기	P20 응답
P5 목적지 계산	P21 수신 데이터 분석
P6 우측 통로 존재	P22 목적지 계산
P7 우회전 중	P23 주행조건
P8 전방 통로 존재	P24 주행 정지 조건
P9 우측 통로 없을 때	P25 이동 중
P10 우수법 주행	P26 작동 정지 조건
P11 전방에 벽 존재	P27 레이저 작동 조건
P12 보정 주행	
P13 이동 중	
P14 주행 정지 조건	
P15 작동 정지 조건	
P16 레이저 작동 조건	
P28 로봇 주행 조건	

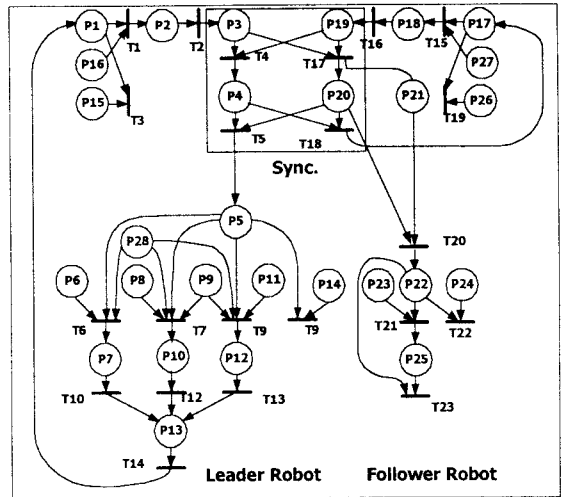


그림 3 협조 작업을 위한 페트리넷 모델링

### 2.2.2 협조 작업을 위한 퍼지 제어

두 대의 로봇이 협조 작업을 통하여 물체를 운반하는 작업에서 가장 중요한 것은 두 로봇 사이의 간격을 일정하게 유지하는 것이다. 이 간격이 벌어지거나 좁아지면 물체를 받치고 있는 부분이 불안정해져 물체를 떨어뜨릴 수 있다. 추종 로봇은 선두 로봇의 명령없이 스스로 다음 동작을 계산하여 움직이게 되며, 이를 위해 본 논문에서는 복잡한 수식 계산이 불필요한 퍼지 제어를 적용하여 추종 로봇의 동작을 제어하였다.[8]

추종 로봇이 관찰했을 때의 선두 로봇과의 거리와 각도가 퍼지 제어의 입력이 된다. 그림 4와 5는 선두 로봇의 거리와 각도의 퍼지화된 소속 함수이다.

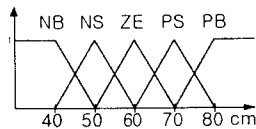


그림 4 거리 소속 함수

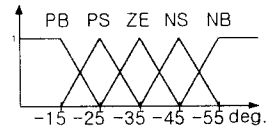


그림 5 각도 소속 함수

추종 로봇의 선두 로봇과 거리와 각도를 입력으로 하여 로봇이 다음에 취해야 할 동작을 결정한다. 따라서 퍼지 제어의 출력은 추종 로봇이 취해야 할 속도와 방향이 되며 표 3,4에 그 제어 규칙을 나타내었다. 또한 비퍼지화를 위한 소속함수는 그림 6,7과 같다.

표 3 속도 제어 규칙

	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	P	P	P	P	P
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	N
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	N
NS	N	N	ZE	N	N
NB	N	N	N	N	N

표 4 각도 제어 규칙

	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PB	PS	ZE	NS	NB
ZE	PB	ZE	ZE	ZE	NB
NS	PS	ZE	ZE	ZE	NS
NB	PS	ZE	ZE	ZE	NS

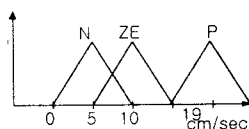


그림 6 기준 속도의 소속 함수

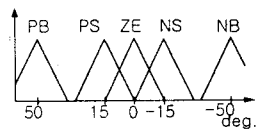


그림 7 이동 방향의 소속 함수

비퍼지화를 위해서는 간략화된 무게 중심법을 사용하

였다.

### 2.3 실험 및 결과

본 절에서는 실제 실험을 통하여 제안된 전략의 타당성을 검증하도록 한다.

#### 2.3.1 시스템 구성

로봇은 ActivMedia의 Pioneer-2 CX를 사용하였다. 레이저는 독일 SICK에서 제작된 Laser Range Finder LMS-200을 사용하였다. 이것은 로봇이 외부 환경을 인식할 수 있는 유일한 센서이며, 이를 이용하여 전방 0~180도에 대해 0.5도 간격으로 361개의 거리 정보를 얻을 수 있다. 로봇에 탑재된 컴퓨터는 AMD의 K6II-350을 CPU로 사용하여 제작하였다.

#### 2.3.2 실험 환경

실험은 직진 경로와 좌회전 우회전 경로가 복합적으로 존재하는 환경에서 실시되었다. 실험은 직진 주행과 우회전 주행, 좌회전 주행 상태에서 실시하였다.

#### 2.3.3 탐색과 추종 실험 및 결과

작업 환경 전역을 관찰할 수 있는 센서를 이용하지 않기 때문에 추종 로봇은 레이저만을 이용하여 선두 로봇을 추종해야 한다. 이를 위해 2차원의 전체 레이저 데이터를 클러스터로 나누었다. 클러스터는 식 (2.1)를 만족하는 연속된 점들의 집합이다.

$$|(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2| < \delta^2 \quad (2.1)$$

클러스터화를 통하여 전체 데이터는 몇 개의 클러스터로 나누어 진다. 각 클러스터는 식 (2.2)에 의해 인접한 점들의 거리의 합을 그 크기로 하며, 이 중 식(2.3)을 만족하는 클러스터를 선두 로봇으로 인식한다.

$$S(C_i) = \sum_{k=0}^{n_i-1} |(x_k - x_{k+1})^2 + (y_k - y_{k+1})^2|^{1/2} \quad (2.2)$$

$$LR_{\min} < S(C_i) < LR_{\max} \quad (2.3)$$

여기에서  $LR_{\min}$ 은 로봇으로 인식할 수 있는 클러스터의 최소 크기이며  $LR_{\max}$ 는 로봇으로 인식할 수 있는 클러스터의 최대 크기이다. 그러나 다양한 장애물이 존재하는 환경에서는 식(2.3)을 만족하는 클러스터가 여럿 존재할 수 있으므로 최초에는 선두 로봇을 추종 로봇의 전방에 위치시키는 것이 필요하다. 그림 8은 실제 실험에서 추종 로봇이 선두 로봇을 탐색하는 실험 결과이다. 원으로 표시된 부분이 탐색된 선두 로봇이다.

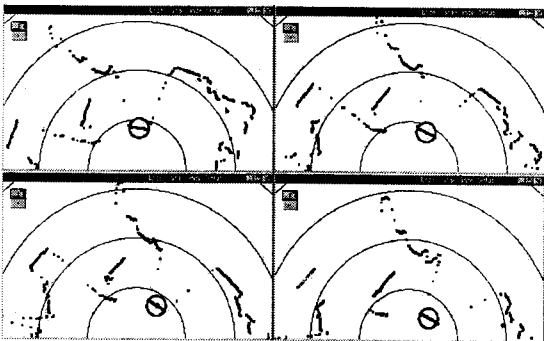


그림 8 시간에 따른 선두 로봇의 탐색 결과

그림 9는 퍼지 제어에 의한 두 로봇의 주행 궤적을 보여준다. 이 때의 기준 궤적은 2.1절에서 보인 그림 1과

같다. 그림 9는 직진 경로, 우회전 경로, 좌회전 경로에서 추종 로봇이 선두 로봇을 추적하는 실험 결과이다. 그림의 좌측으로부터 직진, 우회전, 좌회전 시 선두 로봇과 추종 로봇의 주행 궤적, 기준 궤적을 나타낸다.

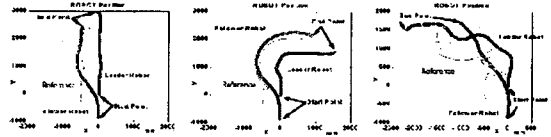


그림 9 직진, 우회전, 좌회전 주행 궤적 ( $\theta_r = 35^\circ$ ,  $R = 50\text{cm}$ )

직진과 우회전 주행에서는 추종 로봇이 선두 로봇과 일정한 간격을 유지하는 것을 볼 수 있다. 선두 로봇과 추종 로봇의 경로가 근접하거나 겹치는 경우에도 시간차에 의해 로봇들이 충돌하지는 않는다. 그러나 좌회전 주행에서는 기준 궤적을 제대로 따르지 못 했다. 이것은 실험에서 사용하는 레이저의 샘플링 주기가 2초이기 때문에 선두 로봇이 급격히 회전하는 경우 추종 로봇이 선두 로봇을 놓치는 경우가 발생하기 때문이다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 한 대의 로봇만으로는 운반이 어려운 물체를 운반하기 위해 두 대의 로봇을 이용하여 물체를 운반할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 시스템을 구성하기 전, 페트리넷을 이용하여 전체 작업의 흐름을 도시하고 이를 통해 시스템의 오류를 사전에 제거하였으며, 아울러 작업 흐름의 이해를 도왔다. 또한 실제 로봇의 동작에는 퍼지 제어를 적용하여 복잡한 수식의 전개 없이 추종 로봇의 동작을 제어하였다. 실제 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였으며 좌회전의 경우에는 만족할 만한 결과를 얻지 못 했다. 이를 해결하기 위해서는 별도의 회전 규칙이 필요할 것으로 보인다. 레이저만을 이용하여 선두 로봇을 위치시키기 위해선 추종 로봇의 바로 앞에 선두 로봇을 위치시키는 제한이 필요했다. 이는 다른 센서의 도움없이 불가피한 초기 조건이다.

이후의 연구에서는 레이저의 샘플링을 고려하여 좌회전 상황에서도 원하는 결과를 얻을 수 있도록 하겠다. 또한 다양한 센서를 이용하여 물건 운반 이외의 작업에 대한 협조 전략을 연구해 보도록 하겠다.

### [참 고 문 헌]

- [1] James McLurkin, "Using Cooperative Robots for Explosive Ordinance Disposal", <http://www.ai.mit.edu/people/jdmac/old-jdmac.html>.
- [2] Kazuhiro, Kosuge, T.Oosumi, M. Satou, K. Chiba, and K. Takeo, "Transportation of a single object by two Decentralized-Controlled nonholonomic Mobile Robots", Proc. of the 1998 IEEE ICRA, pp. 2989-2994, May, 1999.
- [3] Ulrich, Mondada, Nicoud "Autonomous Vacuum Cleaner", pp. 16, Robotics and Autonomous Systems 19, 1997.
- [4] S. Thrun, M. Benniswitz, W. Burgard, A.B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hahnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte, D. Schulz, "MINERVA: a second-generation museum tour-guide robot", Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1999-2005, 1999.
- [5] 채 석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 청문각, 1985.