

論文97-34S-3-4

자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발

(Development of Communication System for Cooperative Behavior in Collective Autonomous Mobile Robots)

李 東 昱 *, 沈 貴 寶 **

(Dong Wook Lee and Kwee Bo Sim)

요 약

본 논문에서는 자율이동로봇군의 협조행동 및 협조작업을 위한 통신시스템을 개발한다. 통신에 의한 로봇간의 정보교환은 지적인 협조작업을 하는데 필수적이다. 일반적으로 대역적 통신은 로봇의 수가 적을 때 효율적이지만, 로봇의 수가 점점 증가한다면 통신자원의 제한과 다룰 수 있는 정보량의 증가로 인하여 로봇간의 통신 간섭 및 부적절한 정보의 전달 등의 문제가 생긴다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고 로봇간의 협조행동을 실현하기 위한 방법으로 적외선 센서를 사용한 지역적 통신 시스템을 제안한다. 이 시스템에서는 불특정 다수에게 정보를 전달하는 사인보드 모델과 특정 로봇과 통신을 하는 정보전달 모델의 두가지 모델을 융합하여 불필요한 정보의 범람을 막고 필요에 따라서는 복잡한 정보의 교환도 가능하다. 또한 제안한 통신시스템으로부터 정보의 전파 메커니즘을 해석하고, 최적의 통신 반경을 구하여 협조작업의 효율을 향상시킨다. 마지막으로 몇 가지 협조작업의 예를 보임으로서 제안한 통신시스템의 유효성을 확인한다.

Abstract

In this paper, we propose a new method of the communication system for cooperative behaviors and works in collective autonomous mobile robots. A communication function among the collective robots is essential to intelligent cooperative works. In general, global communication is effective for small number of robots. However when the number of robot goes on increasing, this becomes difficult to be realized because of limited communication capacity and increasing amount of information to handle. And also the problems such as communication interference and improper message transmission occur. So we propose local communication system based on infrared sensor to realize the cooperative behavior among robots as the solution of above problem. It is possible to prevent overflow of information and exchange of complex information by fusion sign board model which transmits the information to unspecified robots and message passing model which communicate a specific robot. And we formularize optimal communication range by analysis of information propagation mechanism from the proposed communication system. At last we verify the effectiveness of the proposed communication system from example of cooperative works.

* 正會員, 中央大學校 制御計測工學科

(Dept. of Control and Instrumentation Eng., Chung-Ang Univ.)

** 正會員, 中央大學校 電氣電子制御工學部

(Faculty of Electrical · Electronics · Control Eng., Chung-Ang Univ.)

※ 이 연구는 1996년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임(과제번호 : 96-0102-13-01-3)

接受日字: 1996年12月20日, 수정완료일: 1997年3月5日

I. 서론

이동로봇에 관한 연구의 진보에 따라 수백대 또는 수천대의 이동로봇이 복잡한 협조작업을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 이와 같이 대단히 많은 로봇에 의한 협조시스템에서는 장애물 회피나 자재반송 등 불특정 다수의 로봇협조에 의하여 작업을 수행하리란 것도 충분히 예상할 수 있다. 이와 같은 자율이동로봇군의 특징은 크게 자율분산성, 다양성, 협조성으로

대별할 수 있고, 시스템 전체의 설계이념으로서는 「기능분산」과 「협조」의 두가지 개념으로 집약된다. 자율이동로봇으로 대표되는 자율분산시스템은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- (1) 시스템 전체의 거동이 결정되어 있지 않기 때문에 미지의 상황이나 개체로서는 해결할 수 없는 사태에도 자율적으로 대처할 수 있는 풍부한 유연성을 가지고 있다.
- (2) 어떤 목표를 달성하기 위한 방법(solution)이 복수개 존재하는 용장성을 가지고 있기 때문에 예측하지 못하는 사태가 발생하더라도 강건하게 대처할 수 있다.

최근 이와 같은 시스템에 대한 관심이 증대되고 있으며 이것은 국내 및 국외에서 새로이 개최되고 있는 마이크로 로봇 축구대회 등을 보아도 알 수 있다. 이런 대회는 멀티 에이전트 시스템(multi-agent system)에 대한 하나의 간단한 예로 볼 수 있으며 이러한 시스템에 대한 연구 및 개발에 의해 앞으로는 실제 사용되는 분야도 점차 늘어날 전망이다. 또한 반도체 가공 기술과 마이크로 머시닝 기술의 발전에 따라 머지않아 마이크로 로봇이 탄생하게 될 것으로 보이며 이때, 매우 많은 개수의 마이크로 로봇을 제어 해야 할 경우가 발생한다(그림 1참조)^[11]. 이런 경우도 자율분산시스템이 이용될 수 있을 것이다.

이러한 자율분산형 이동로봇시스템을 이용하여, 합목적적인 협조작업을 수행하려고 하는 경우 「로봇간의 통신」이 반드시 필요하다. 만약 통신을 사용하지 않고 고도한 협조적 행동을 실현하려고 하면 상대의 행동을 미리 알아차리는 추론기능이 필요하게 될 것이다. 이는 개체의 복잡성을 한층 더 가중시키는 결과를 초래하게 되어 소형화 또는 마이크로화로 이어지는 개체의 제작은 거의 불가능하게 된다.

Brandeis대학의 Mataric 등^{[2][13]}은 통신의 기능은 사용하지 않고 센서만을 사용해 주위 환경을 인식하고 행동을 취하는 시스템에 대하여 연구하였으며 이에 의해 여러 가지 군행동을 실현하였다. 또한 신경망과 진화 알고리즘을 이용하여 로봇의 행동을 진화함으로써 협조행동을 구현하는 연구도 행하여지고 있다^{[4][15][10]}. 그러나 통신기능을 사용하지 않음으로 해서 나타나는 결과들은 전체적인 집단행동 등의 범위로 한

정되었으며 구체적인 팀의 구성이나 특정한 작업을 하기 위한 협조는 고려되지 않았다.

한편 지금까지의 자율이동로봇의 통신에 관한 연구는, 사용하는 통신수단에 따라 크게 대역적 통신(global communication)^[6~9]과 지역적 통신(local communication)^[10~16]으로 나누어진다. 일반적으로 전자인 대역적 통신은 무선 등의 광역성이 있는 통신 매체를 이용하여, 대상으로 하는 로봇의 개수가 적은 경우에 유효하다(10대 이하). 그러나 대상으로 하는 로봇의 개수가 증가하면 통신능력의 제한이나 로봇 상호간의 간섭, 코스트의 증가 등의 문제가 발생하여 모든 로봇이 서로 통신하는 것이 곤란하여 이 경우에는 후자인 지역적 통신이 유리하다. 따라서 본 논문에서는 지역적 통신에 의한 협조제어를 실현한다.

지역적인 통신을 하는 자율이동로봇이 다수 존재하는 시스템에서는 정보가 순간적으로 광범위하게 전달되지 않는다. 또 불필요한 정보의 범람도 막을 필요가 있다. 따라서 지역적 통신만이 이용되는 시스템에서 효율적인 협조행동의 실행은, 작업에 필요한 로봇이 한 곳에 모이는 시간, 작업에 따라서 정보를 전파하는 범위, 주위환경에 관한 정보의 전달방법 등이 매우 중요하다. 이를 위해서는 지역적 통신에 의한 정보 전달 과정에 대한 해석이 필요하다. 또한 대역적 통신에서는 문제가 되지 않았던 상대 로봇의 이동에 의한 환경의 동적인 변화도 고려하지 않으면 안된다.

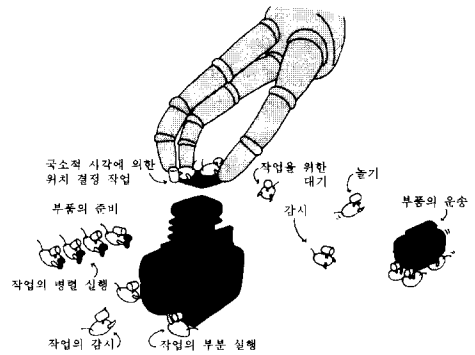


그림 1. 자율분산로봇시스템의 협조작업
Fig. 1. Cooperative work of distributed autonomous robotic system.

본 논문에서는 여러 대의 자율이동로봇으로 구성된 분산 시스템에서 실제적인 적용을 고려한 로봇의 모델과 협조를 위한 효과적인 통신 방법을 제안한다. 또한

로봇의 이동에 의한 환경의 동적인 변화를 확률로서 표현하여 정보 전파(propagation)를 해석함으로써 정보가 충분한 로봇에게 전달되는 시간 및 적절한 통신의 범위 등을 구해내고 시뮬레이션을 통해 제안한 통신시스템의 유효성과 전파 해석의 타당성을 검증한다.

II. 자율이동로봇의 구조

본 논문에서 제안한 방법을 실현하게될, 지역적 통신을 위한 자율이동로봇의 통신시스템은 그림 2와 같은 구조로 되어있다. 그림 2의 (a)는 로봇을 위에서 보았을 때의 센서계(송·수신부)의 배치도이고, (b)는 옆에서 보았을 때의 배치도이다. 주위의 8방향으로 정보를 출력할 송신부와 받아들일 수신부가 각각 하나씩 쌍을 이루어 배치되어 있고(필요에 따라 송·수신부의 쌍을 더 늘이거나 줄여서 조절할 수 있다) 송신부에서 보낸 신호는 수신부로 직접 전달된다. 이와 같은 통신을 실현하기 위하여 송신부는 그림 3과 같이 적외선 발광 소자인 LED를 사용하여 펄스의 형태로써 비트열로 구성된 데이터를 송신(적외선 통신)하며 수신부는 적외선 센서로서 데이터를 해독하게 된다. 따라서 데이터는 직접 송신부에서 수신부로 전달이 되며 그림 4와 같이 송신부의 각도를 조절함으로써 통신가능 범위(통신 반경)를 조절한다. 또한 송신한 데이터가 장애물에 부딪혀 되돌아오는 것을 감지함으로써 장애물의 유무 및 장애물과의 거리를 판단하게 된다. 이때 장애물을 감지할 수 있는 거리는 통신 반경의 약 절반정도가 된다. 이와 같은 적외선을 이용한 방법은 통신의 기능과 함께 장애물과의 거리 측정 기능도 갖출 수 있으므로 센서 및 그에 딸린 회로의 감소로 인해 데이터 처리에 많은 이점을 가진다.

로봇이 이동을 할 경우 수신하던 데이터가 중단되는 현상도 발생할 수 있다. 그러나 로봇의 이동속도에 비해 데이터의 전송속도는 매우 빠르기 때문에 일반적인 상황에서 그러한 문제는 고려하지 않는다.

수신부로 신호가 들어올 경우 로봇의 중앙 처리부로부터 인터럽트를 요청하여 이것이 받아들여질 경우 데이터가 처리되며 본 논문에서는 센서의 적당한 수로서 8개를 채택하였고 각각의 센서는 45도 범위의 데이터를 받아들이므로 결국 8개의 센서로서 주변의 어느 방향으로부터 들어오는 데이터도 받아들일 수 있다. 그러나 그림 5와 같이 하나의 영역에 두 대의 로봇이 동시에

정보를 송신할 경우 간섭에 의해 올바른 정보를 받아들일 수 없게 되며 또한 동시에 여러 개의 센서로부터 입력이 들어오는 경우 로봇의 데이터 처리능력에 따라 한계를 넘는 데이터는 처리를 할 수 없게 된다. 따라서 이러한 점들을 고려하여 통신의 간섭이 적고 효율적인 시스템이 되도록 로봇의 수나 통신 반경, 로봇의 이동 속도 등을 제어할 필요가 있으며 이를 위하여 IV절에서 이에 대한 해석을 통해 적절한 값을 구해낸다.

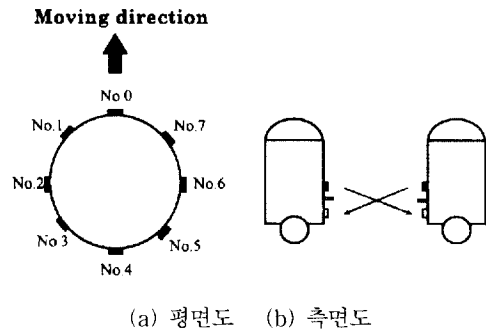


그림 2. 로봇의 센서계
Fig. 2. Sensor system of robot.

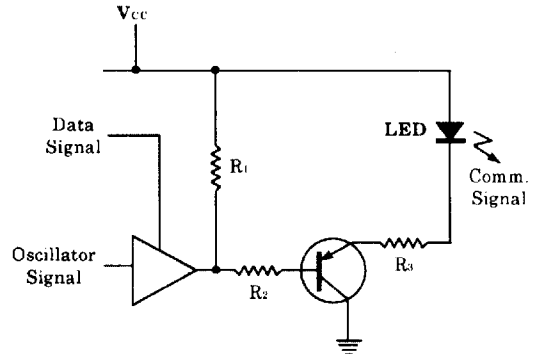


그림 3. 송신부 회로
Fig. 3. Transmission circuit.

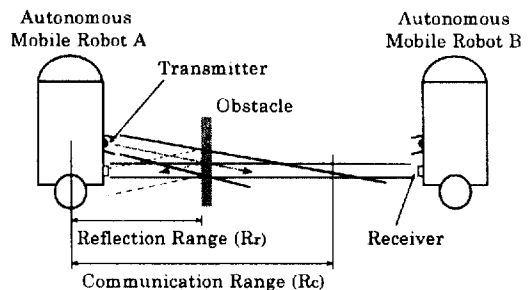


그림 4. 통신 범위 및 장애물 감지 범위
Fig. 4. Communication range and reflection range.

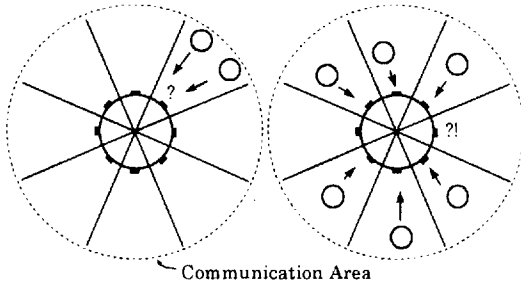


그림 5. 통신 간섭이 발생하는 경우
Fig. 5. Case of communication interference.

Ⅲ. 통신 모델

로봇간의 통신은 통신 범위에 따라 전역적 통신과 지역적 통신으로 나눌 수 있으며 크기가 큰 시스템에서는 지역적인 통신이 유리하다는 것은 이미 서론에서 언급했다. 또 하나의 분류 방법으로 수신자의 여부에 따라 특정한 수신자에게 정보를 보내는 정보전달(message passing) 모델과 어떤 특정한 수신자가 정보를 받을 것을 기대하지 않고 정보를 내보내는 사인보드(sign board) 모델의 두 가지로 나눌 수 있다. 본 절에서는 지역적 통신에서 이 두 가지 모델의 검토와 함께 이들을 융합한 새로운 통신 모델을 제안한다.

1. 사인보드 모델(sign board model)

사인보드 모델은 자신이 가진 정보를 주변으로 내보내는 방식이다. 이때 특정한 수신자가 정보를 받을 것을 기대하지 않으며 로봇이 서로 통신 가능범위 안으로 들어왔을 때 상대방의 정보를 획득할 수 있다. 여기에 사용되는 정보는 시스템에 관계된 정보로서 널리 다른 로봇에게 알려야 할 필요성이 있는 내용과 다른 로봇이 행동을 예측하는데 필요한 내용 즉, 로봇의 고유 번호, 이동 방향, 이동 속도, 상태 등이 된다. 또한 임의의 다른 로봇에게 도움을 요청할 경우 도움요청 신호도 사인보드 모델로서 사용된다.

이와 같은 사인보드 모델은 기본적인 정보전달이나 다른 로봇의 행동 예측을 위한 방식으로 프로그래밍이 쉽고 통신 방법이 단순하여 비교적 시스템에 쉽게 적용할 수 있다.

Ⅱ절에서 제안한 로봇을 가지고 사인보드 모델을 구현할 경우 각 송신부에서 출력할 정보는 로봇의 고유 번호, 송신부의 번호, 로봇의 이동 속도, 현재 상태 및

시스템에 대해 알고 있는 정보 등이 되며 이때 송신부의 번호에 의해 한 로봇과 다른 로봇과의 위치 관계 및 이동 방향을 알 수 있다. 예를 들면 그림 6과 같이 Robot A의 0번 센서에 Robot B의 1번 송신부에서 보낸 데이터가 검출되었다면 Robot A는 Robot B가 좌측으로 이동해가고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 사인보드 모델의 개략도이다. 그림에서와 같이 각각의 로봇은 자신의 손으로 사인보드를 들고 있는 것과 같이 정보를 주변으로 전파한다.

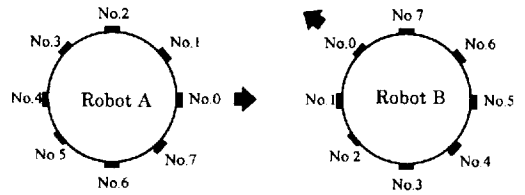


그림 6. 두 로봇간의 방향 관계
Fig. 6. Direction relation between two robots.

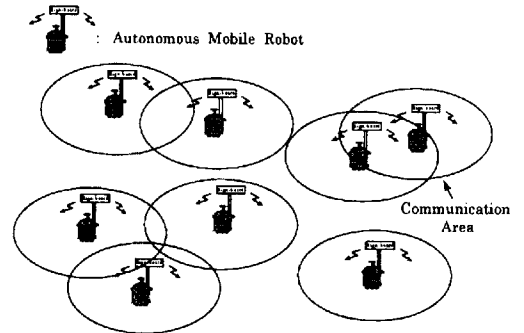


그림 7. 사인 보드 모델
Fig. 7. Sign board model.

2. 정보전달 모델(message passing model)

정보전달 모델은 특정한 수신자를 정해놓고 정보를 전달하는 방법이다. 그러므로 지역적 통신의 방법에서는 통신 반경내에 있는 특정한 로봇을 선택하여 정보를 보내게 된다. 따라서 상호간에 의사 교환이나 교섭을 할 수 있으며 사인보드 모델에 비해 성숙한 방법이다. 사인보드 모델이 기본적인 정보의 전파를 위한 1차적인 통신 방법이라면 정보전달 모델은 특정한 일을 수행하기 위한 교섭을 할 수 있는 2차적인 통신 방법이라 할 수 있다.

일반적으로 로봇은 인간과 같이 생각하고 말을 할 수 없기 때문에 로봇간의 상호 의사 교환은 이미 규약

된 정보만을 가지고 하게 된다. 따라서 시스템에서 발생할 수 있는 상황 및 문제에 대한 사전의 규약을 만드는 일이 필요하게 된다.

이와 같이 만들어진 규약은 데드락(dead lock)의 상황 해결이나 하나의 로봇이 다른 로봇에게 명령을 내려 일을 수행하는 경우에도 사용할 수 있으며 그림 8 과 같이 하나의 관측자가 얻은 정보를 특정 로봇에게 전달 또는 명령하여 일을 수행하도록 할 때에도 이용 할 수 있다.

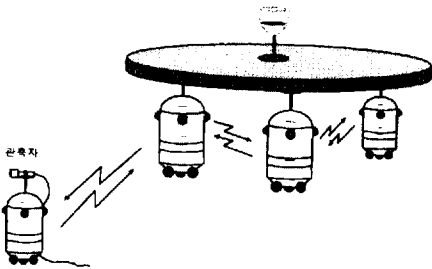


그림 8. 정보 전달 모델
Fig. 8. Message passing model.

3. 융합 모델(fusion model)

융합 모델은 사인보드 모델과 정보전달 모델의 두가지 방법을 동시에 사용할 수 있도록 한 모델이다. 이 방법은 사인보드 모델에 바탕을 두고 특정 로봇과 정보의 교환이 필요한 경우 정보전달의 방법을 이용하는 것인데, 사인보드 모델의 데이터에 다른 로봇의 고유 번호와 정보(message)의 영역을 두어 필요에 따라 정보교환을 가능하게 한다. 이 통신 방식은 비교적 간단하며 복잡한 프로토콜이 필요하지 않으므로 구현이 쉽다. 일반적으로 통신에 의한 협조를 위해서 이 융합 모델의 이용가치는 높아질 것으로 예상된다.

IV. 융합 모델을 이용한 팀의 구성

1. 데이터 형식

융합 모델의 데이터는 그림 9와 같이 앞의 헤더(header) 부분과 데이터 끝의 테일(tail) 부분 사이에 사인보드의 내용과 정보 전달을 위한 정보가 차례로 들어가며 특정한 로봇에게 보낼 정보가 없을 경우 Message 부분은 생략된다. 즉 정보를 보낼 대상의 로봇이 주위에 있을 경우에만 모든 송신부에서 Message 부분의 정보를 추가해서 보내게 된다.

Header	Sign board	Message	Tail
--------	------------	---------	------

그림 9. 통신 데이터 형식
Fig. 9. Format of communication data.

Sign board에 포함되는 내용은 다음과 같은 것이 있다.

- ① 로봇의 고유 번호(ID)
- ② 송신부의 번호
- ③ 이동 속도
- ④ 로봇의 상태 : 고장, 작업 중, 대기 중 등
- ⑤ 시스템 내에서 획득한 정보(information)
- ⑥ 도움 요청의 여부

또한 Message에 해당하는 내용은 미리 규약된 내용 중 필요에 따라 선택하여 내보내게 되는데 그 내용은 다음과 같다.

- ① 통신하고자 하는 특정(대상) 로봇의 고유 번호
- ② 전달하고자 하는 내용(message)

여기서 전달하고자 하는 내용은 시스템 내에서 사용 될 것으로 예상되는 미리 정해진 말을 사용하게 되는데 몇가지 기본적인 내용의 예를 들면 다음과 같은 것이 있다.

- 응답을 할 때
 - ⓐ YES, OK
 - ⓑ NO
- 명령을 내릴 때
 - ⓒ GO, CONTINUE
 - ⓓ STOP, WAIT
 - ⓔ RIGHT TURN
 - ⓕ LEFT TURN
 - ⓖ GET, CAPTURE, LIFT UP
- 특정 로봇에게 도움을 요청하거나 팀을 구성하기 위하여 요청 할때
 - ⓓ HELP, JOIN
- 팀을 해체할 때
 - ⓑ FREE

이 외에도 여러 가지를 때에 따라 정의하여 사용할 수 있다.

2. 팀 구성 방법

시스템 내에서 두 대 이상의 로봇이 함께 협조 작업

을 해야 할 경우가 발생했을 때 통신에 의해 두 대 이상의 로봇이 팀을 이루게 된다.

로봇이 작업 환경내에서 임의로 움직이다 협조가 필요한 작업을 발견하면 사인보드의 형태로 주위의 로봇에게 도움을 요청하게 된다. 이때 응답한 로봇이 있으면 그 로봇은 서브(sub)가 되고 도움을 요청한 로봇은 메인(main)이 되어 팀을 구성한다. 이때 팀의 행동은 메인 로봇의 명령에 따라 이루어지며 작업이 끝나면 팀은 해체된다. 서브 로봇은 주로 메인 로봇의 명령에 따라 움직이며 메인 로봇이 감지하지 못한 상황이 발생했을 때만 메인 로봇에게 명령을 내린다. 그림 10은 하나의 로봇이 작업을 발견하고 팀을 구성하는 방법의 흐름도이다.

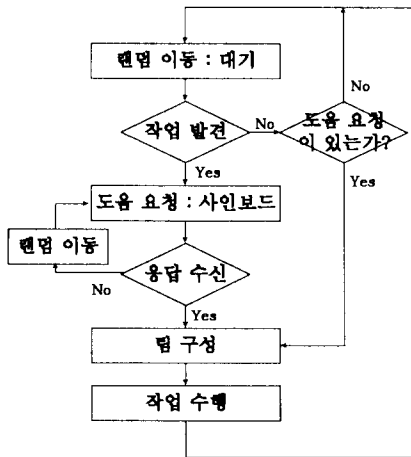


그림 10. 팀 구성을 위한 로봇 행동의 흐름도
Fig. 10. Flowchart of robot's behavior for organizing team.

V. 정보 전파 해석

지역적 통신에서 통신 반경은 중요한 역할을 한다. 통신 반경이 너무 작으면 정보의 전파(propagation) 시간이 늦어지고 반대로 너무 크면 그림 5와 같이 하나의 영역에 두 대 이상의 로봇이 온다든지 로봇이 한번에 처리할 수 있는 데이터의 양을 초과하는 등의 정보 간섭이 일어나서 효율이 떨어진다. 따라서 로봇간의 정보 전파 시간을 최소로 하면서 작업을 수행할 수 있는 조건을 구하기 위하여 로봇의 밀도, 이동 속도, 작업의 양, 그리고 통신 반경에 대한 관계를 해석한다.

이를 위하여 다음과 같은 두 가지를 가정한다. 첫째로 로봇 주위 센서계의 배치 수를 달리 했을 경우로

확장을 한다. 즉 그림 2에서 사용한 8개의 센서계를 s 개의 센서계로 한다. 둘째로 로봇 주위의 s 개의 센서에서 정보가 들어오더라도 모두 처리할 수 있다고 가정한다. 이것은 일반적으로 성능이 우수한 하드웨어를 사용함으로써 실현할 수 있으며 본 모델에서는 적외선 신호로서 통신 기능과 함께 장애물과의 거리 측정을 함께 하고 있기 때문에 처리에 한계가 있을 경우 문제가 발생할 수 있다. 그리고 식에 사용되는 매개변수는 다음과 같다.

표 1. 지역적 통신시스템의 매개변수
Table 1. Parameters of local communication system.

변수	내용
n	로봇의 수
w	작업의 수
S	작업공간의 면적
R_c	통신 반경
R_v	장애물 감지 반경 ($\cong \frac{1}{2} R_c$)
A	통신가능 면적 ($= \pi R_c^2$)
B	물체 감지가능 면적 ($= \pi R_v^2 \cong \frac{\pi}{4} R_c^2 = \frac{A}{4}$)
v	로봇의 속도
ρ	로봇의 밀도
ρ_w	작업의 밀도
$p(t)$	정보를 가진 로봇의 비율

$p(t)$ 의 변화율 $\Delta p(t)$ 는 지나간 시간(t), 로봇의 속도(v), 정보를 가지고 있지 않은 로봇의 비율($1-p(t)$) 그리고 정보 획득 확률($I(t)$)에 비례한다. 따라서 $\Delta p(t)$ 는 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p(t) = av\Delta t(1-p(t))I(t) \tag{1}$$

여기서 로봇의 속도와 지나간 시간의 곱, 즉 $v\Delta t$ 는 Δt 시간 동안에 로봇이 움직인 거리가 되며, 이때 a 는 로봇의 통신 면적에 대한 로봇이 새로이 지나간 통신 면적의 비율에 대한 상수로서 $av\Delta t$ 는 Δt 동안 새로이 늘어난 영역을 통신 영역(A)으로 나눈값에 비례한다 (그림 11참조).

$$av\Delta t = \beta \frac{2R_c v \Delta t}{A} \tag{2}$$

따라서 a 는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$a = \frac{2\beta R_c}{A} = \frac{2\beta R_c}{\pi R_c^2} = \frac{2\beta}{\pi R_c} \tag{3}$$

단, β 는 로봇의 상호이동의 영향에 의한 상수로서 로봇의 속도에 따라 약 1~4의 값을 갖는다.

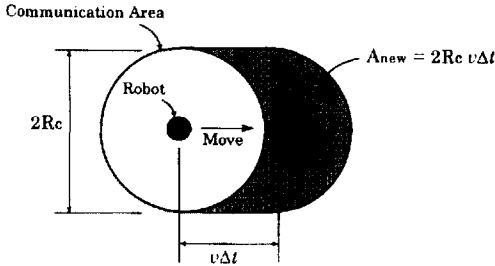


그림 11. 로봇이 움직임에 따라 늘어나는 영역
Fig. 11. Extended area with robot move.

평균 λ 개의 개체가 존재하는 영역에서 x 개의 개체가 존재할 확률은 다음 (4)식과 같다.

$$P(x, \lambda) = \binom{n}{x} q^x (1-q)^{n-x} \quad (4)$$

단, $q = \frac{\lambda}{n}$ 이다.

제한한 로봇의 통신이 이루어지기 위해서는 하나의 센서(수신부)에 하나의 입력이 들어와야 하므로(그림 5의 왼쪽 참조) 하나의 센서가 커버할 수 있는 영역, 즉 A/s 의 영역에 하나의 로봇이 존재할 확률(p_1)은 (4)식에 의해 다음과 같이 표현된다(이때 $w \ll n$ 이므로 작업에 의한 간섭의 효과는 무시한다).

$$p_1 = P\left(1, \frac{1}{s} \rho A\right) = \binom{n}{1} (q_1)^1 (1-q_1)^{n-1} \quad (5)$$

단, $q_1 = \frac{\lambda}{n} = \frac{A/s}{S}$ 이다.

로봇은 작업에 대한 특정한 정보의 유무에 관계없이 사인보드 모델로서 데이터를 내보내므로 한 대의 로봇의 주변에 정보의 간섭이 없이 로봇이 존재할 확률은 (6)식과 같다(각 센서 영역에 한 대만 존재).

$$E(t) = \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (p_1)^i (1-p_1)^{s-i} \quad (6)$$

이때 이 로봇이 특정한 정보를 가지고 있을 확률($I_R(t)$)은

$$\begin{aligned} I_R(t) &= E(t) p(t) \\ &= p(t) \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (p_1)^i (1-p_1)^{s-i} \end{aligned} \quad (7)$$

과 같이 된다.

또한, 로봇이 작업을 직접 발견하여 정보를 획득할

확률($I_T(t)$)은 B/s 의 영역에 하나의 작업이 존재할 확률(p_2)에 의해 (9)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} p_2 &= \frac{w}{n+w} P\left(1, \frac{1}{s} (\rho + \rho_w) B\right) \\ &= \frac{w}{n+w} \binom{n+w}{1} (q_2)^1 (1-q_2)^{n+w-1} \end{aligned} \quad (8)$$

단, $q_2 = \frac{\lambda_w}{w} = \frac{B/s}{S}$ 이다.

$$I_T(t) = \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (p_2)^i (1-p_2)^{s-i} \quad (9)$$

따라서 정보 획득 확률 $I(t)$ 은 로봇과 작업으로부터 정보를 얻을 확률의 합으로 표시된다.

$$I(t) = I_R(t) + I_T(t) = E(t) p(t) + I_T(t) \quad (10)$$

(10)식을 (1)식에 대입하여 정리하면 (11)식을 얻는다.

$$\Delta p(t) = a v \Delta t (1-p(t))(E(t) p(t) + I_T(t)) \quad (11)$$

(11)식을 간단히 하기 위하여 a 와 b 를 다음과 같이 놓으면, (11)식은 간단히 (14)식과 같이 표현된다.

$$a = a v E(t) \quad (12)$$

$$b = a v I_T(t) \quad (13)$$

$$\Delta p(t) = \Delta t (1-p(t))(a p(t) + b) \quad (14)$$

여기서 Δt 를 좌변으로 넘겨서 (14)식을 미분식으로 표현하면 (15)식과 같다.

$$\frac{dp(t)}{dt} = (1-p(t))(a p(t) + b) \quad (15)$$

(15)식을 풀면 정보 전파 확률인 (16)식이 나오고 u 의 비율로 정보가 전파될 때까지 걸리는 시간은 (17)식으로 구해진다.

$$p(t) = \frac{1 - C \frac{b}{a} e^{-(a+b)t}}{1 + C e^{-(a+b)t}} \quad (16)$$

단, $C = \frac{1-p_0}{p_0 + \frac{b}{a}}$ 이다.

$$T_u = -\frac{1}{a+b} \ln \frac{(1-u)(p_0 + \frac{b}{a})}{(u + \frac{b}{a})(1-p_0)} \quad (17)$$

이 식에서 통신 반경(R_c)에 대한 정보 전파시간을 알아내기 위하여 나머지 변수들을 다음과 같이 고정하고 통신 반경에 대한 전파 시간을 구한다.

로봇은 8개의 센서계를 가지며 개수는 각각 50대와

100대일 경우이다. 로봇의 속도는 0.025m/s이고 전체 작업 공간은 4.5m×4.5m에 작업의 수는 8개로 하였다. 이때 통신반경을 변화시켜가며 로봇의 80%에게 정보가 전파되는 시간을 구하면 다음과 같다.

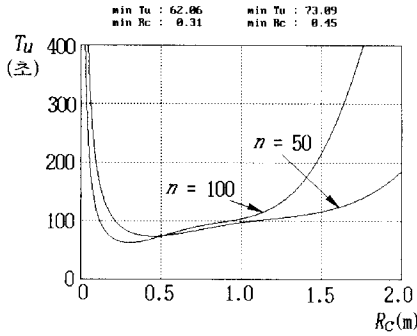


그림 12. 로봇의 통신 반경과 정보 전파 시간
Fig. 12. Robot's communication radius and information propagation time.

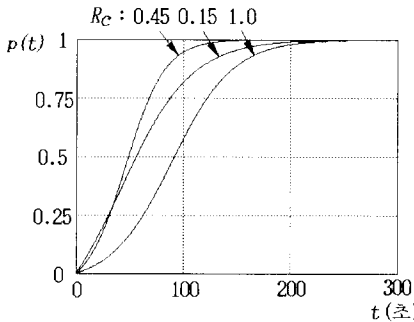


그림 13. 정보를 가진 로봇의 비율(n=50)
Fig. 13. Percentage of informed robot(n=50).

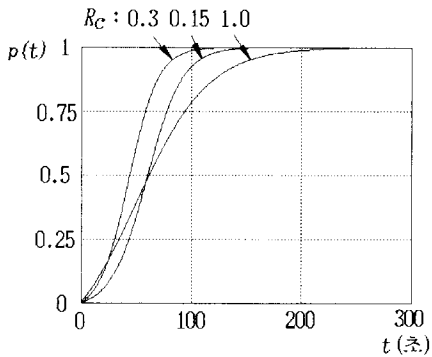


그림 14. 정보를 가진 로봇의 비율(n=100)
Fig. 14. Percentage of informed robot(n=100).

그림 12의 결과에서 전파시간을 최소화하는 반경 (R_c)은 n 이 50과 100일 때 각각 0.45m, 0.31m이며 이때의 시간 (T_u)은 73.09초와 62.06초로 나왔다. 또한 그래프에서 반경이 커짐에 따라 전파 시간이 단지 감소만 하지 않고 다시 증가하는 이유는 통신 간섭에 의한 영향 때문이다.

그리고 시간에 따른 정보를 가진 로봇의 비율($p(t)$)은 로지스틱 방정식(logistic equation)의 형태를 가진 (15)식에 의해 n 이 50과 100일 때 각각 그림 13 및 그림 14와 같이 나타난다.

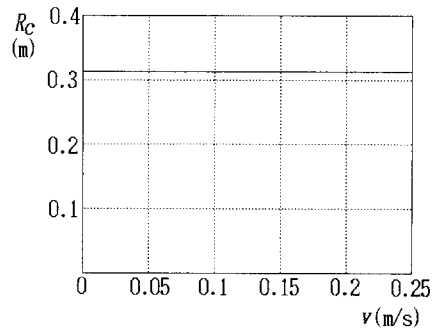


그림 15. 로봇의 속도와 최적 반경
Fig. 15. Robot's velocity and optimal radius.

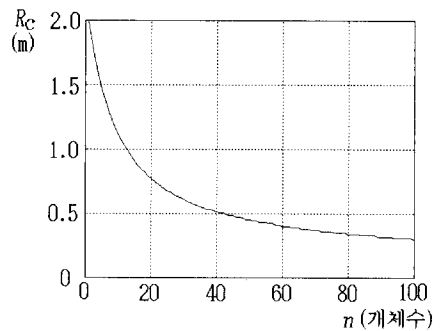


그림 16. 로봇의 수와 최적 반경
Fig. 16. Number of robots and optimal radius.

그림 14에서 정보를 가진 로봇의 비율이 80%가 될 때까지의 시간을 알아보면 R_c 가 0.15, 0.3, 1.0m일 때 각각 83, 63, 104초이다. 따라서 통신 반경을 어떻게 정하는가에 따라 정보 전파 시간의 차이가 많이 남을 알 수 있으며 정보 전파 시간을 최소화 하는 통신 반

경을 구하는 일은 중요하다.

그림 15는 n 이 100일 때 속도 변화에 따른 최적 환경의 변화를 나타내며 그림 16은 로봇의 개수에 따른 최적 환경의 변화 그래프이다.

이 두 개의 그림에서 나타나듯이 로봇의 속도는 전파 시간에만 영향을 주고 최적 환경에는 영향을 주지 않으며 로봇의 개수(또는 밀도)가 증가함에 따라 최적 환경의 크기는 점점 줄어든다.

VI. 시뮬레이션에 의한 검토

IV절의 통신 모델과 V절의 전파 해석의 유효성을 검증하기 위하여 6.1절과 6.2절에서 각각 모의 환경을 설정해놓고 시뮬레이션을 행한다

1. 통신 모델 검증을 위한 시뮬레이션

(1) 작업 설정 : 물체 모으기 작업(foraging)

본 논문에서 제안한 통신 모델을 검증하기 위한 자율이동로봇군의 작업으로서 그림 17와 같이 30대의 로봇이 물체(또는 먹이)를 목표지점까지 옮기는 작업을 설정하였다. 이때 물체는 하나의 로봇이 운반 할 수 있는 경우와 두 대의 로봇이 함께 운반하는 경우의 두 가지 경우로 하였다. 하나의 로봇이 물체를 운반하는 경우는 지역적 통신의 사인보드 모델만을 사용한 경우로써 작업을 발견한 로봇이 정보를 다른 여러 로봇에게 전파하여 일을 수행하는 경우이고, 두 대의 로봇이 함께 운반하는 경우는 융합 모델을 사용해 정보의 전파 및 팀의 구성을 하여 일을 수행하는 경우이다.

(2) 통신 방법 및 데이터 형식

로봇은 8방향으로 로봇의 ID, 센서 번호, 물체의 위치와 함께 교섭을 위한 정보를 출력한다.

정보(information)는 로봇이 물체가 모여있는 곳의 정보를 알고 있을 때 그 곳의 위치가 되며 메시지(message)는 교섭을 위해 미리 정해진 것으로 사용한다. 본 실험에서는 메시지로써 4.1절에서 제시한 9가지를 사용하였다. 따라서 구성되는 데이터의 내용은 다음과 같이 되며 아래의 예는 고유번호가 10인 로봇이 물체의 좌표(x, y)정보가 있을 때 그리고 주위에 있는 3번 로봇에게 GO라는 명령을 내릴 경우에 대한 4번 송신부에서 내보내는 데이터이다.

③ 센서 번호

④ 정보(information), 즉 물체의 x, y 좌표

⑤ 도움 요청 여부

⑥ 상대 로봇 번호

⑦ 메시지(message)

⑧ 테일(tail)

(데이터의 예)

```
111 0001010 100 0100011 0110011 0 0000011 011 111
    10    4  x좌표  y좌표  ↑  3    go
```

두 번째의 경우 로봇이 물체까지 이동한 후 주변에 감지된 로봇에게 HELP로서 도움을 요청하면 그 로봇이 YES로서 응답을 하고 이때 도움을 요청한 로봇이 메인(main)이 되고 응답한 로봇이 서브(sub)가 되어 함께 움직이게 된다. 이때 서브 로봇은 메인 로봇의 명령에 따라 함께 움직이게 되며 서브 로봇은 자신의 앞에 장애물이 놓여있을 경우에만 메인 로봇에게 명령을 내릴 수 있으며 작업이 완료되면 팀을 해체한다.

(3) 시뮬레이션 결과

로봇은 0.05m×0.05m의 크기이고 환경은 가로 세로 각각 4.5m의 정사각형의 영역이다. 로봇은 30대 이며, 통신반경은 0.5m이고 로봇의 속도는 0.05m/s이다. 물체는 200개를 그림 17와 같이 배치하였고 목적지는 중앙 하단부분이 된다. 목적지의 정보가 없는 로봇은 임의의 방향으로 움직이며 정보를 알고 있거나 다른 로봇에게 정보를 얻은 경우에는 목적지를 향해 이동한다.

[case 1] 한 대의 로봇이 하나의 물체를 운반할 수 있을 때 (지역적 통신에서 사인보드 모델에 의한 정보의 전파)

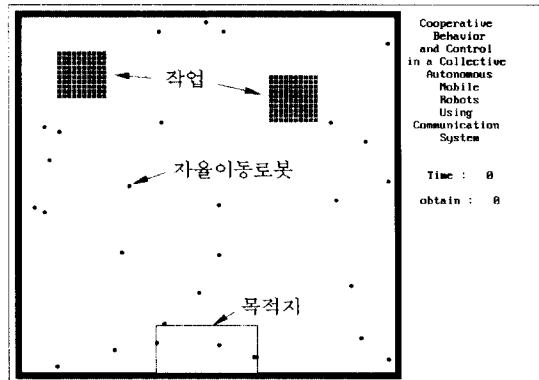


그림 17. 초기 상태
Fig. 17. Initial state.

① 헤더(header)

② 로봇의 고유 번호(ID)

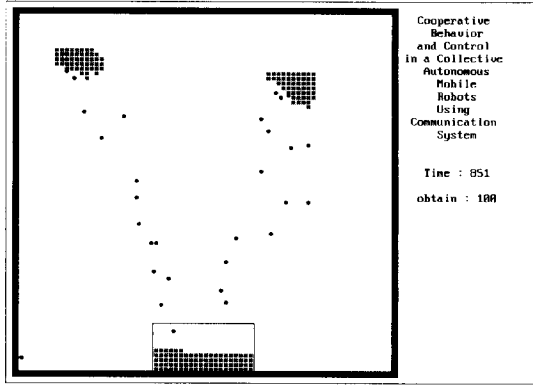


그림 18. 851초 후 (100개의 물체 운반)
Fig. 18. After 851 seconds (Move 100 object).

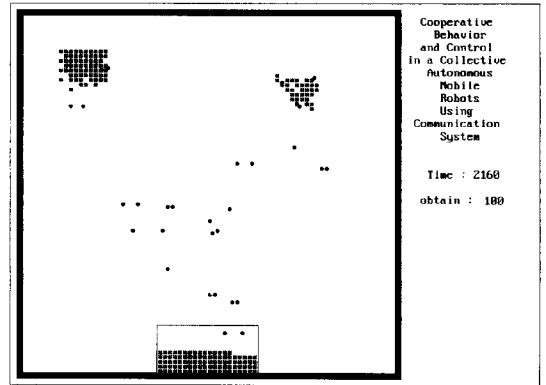


그림 21. 2160초 후 (100개의 물체 운반)
Fig. 21. After 2160 seconds (Move 100 object).

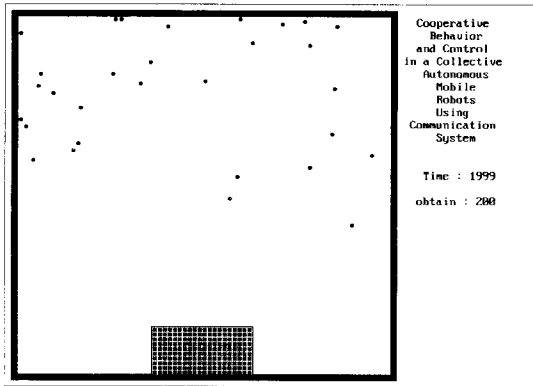


그림 19. 최종 상태 (1999초 후)
Fig. 19. Final state (After 1999 seconds).

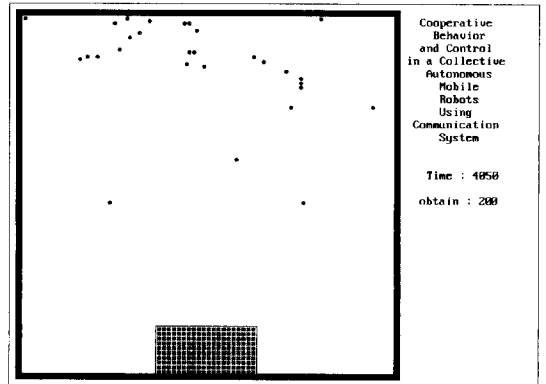


그림 22. 최종 상태 (4050초 후)
Fig. 22. Final state (After 4050 seconds).

[case 2] 두 대의 로봇이 하나의 물체를 운반할 수 있을 때 (협조적인 물체의 운반을 위해 사인보드 모델 및 정보전달 모델의 융합에 의한 팀의 구성)

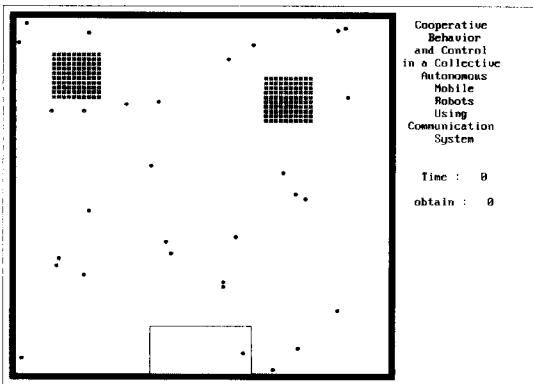


그림 20. 초기 상태
Fig. 20. Initial state.

case 1과 **case 2**에서 초기에 정보를 획득한 로봇은 작업을 수행하면서 정보를 가지고 있지 않은 로봇에게 정보를 전파하여 결국 전체의 로봇이 작업에 참여함으로써 협동을 하고 있다. 특히 **case 2**에서 로봇이 팀을 구성하여 협조 및 협동에 의해 작업을 수행함을 알 수 있다. 이로서 제한한 통신 방법이 실제적으로 로봇이 협조행동을 하는데 유효함을 알 수 있다.

2. 정보 전파 시뮬레이션

정보전파를 검증하기 위한 시뮬레이션의 환경은 다음과 같다.

작업 환경 및 로봇의 속도는 6.1절의 사양과 동일하며 로봇의 대수를 100대로 하고 작업(그림에서 검은 사각형)의 개수를 8개로 하여 작업이 있는 위치 정보를 전파하는 것을 목적으로 하였다. 그림 23에서 그림 25까지는 로봇에게 정보가 전파되고 있는 과정을 보여주

는 그림이다.

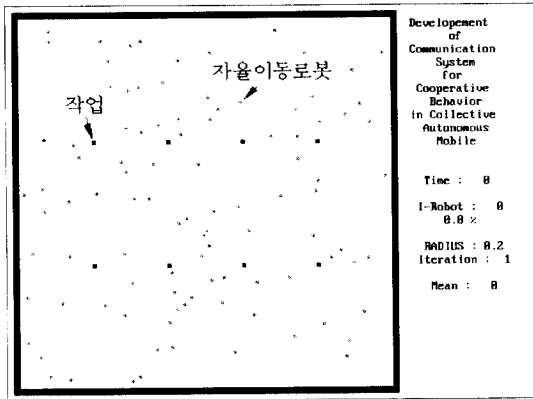


그림 23. 초기 상태
Fig. 23. Initial state.

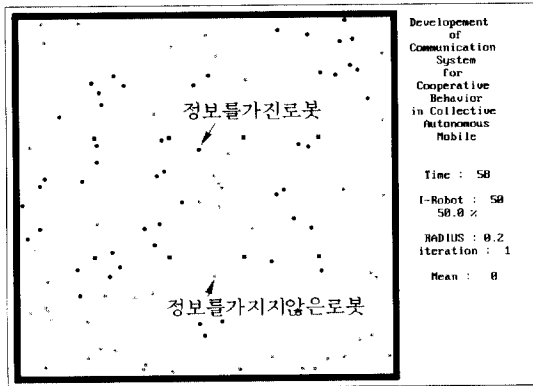


그림 24. 정보를 획득한 로봇이 50% 일 때
Fig. 24. When percentage of informed robot is 50.

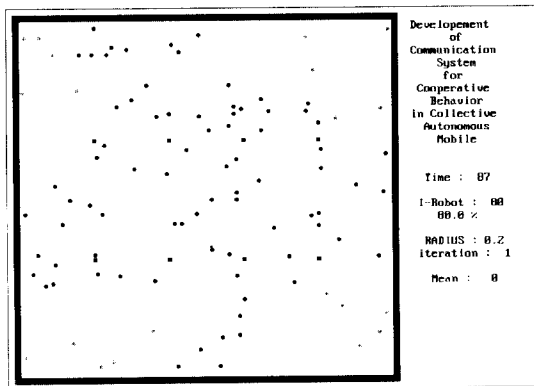


그림 25. 정보를 획득한 로봇이 80% 일 때
Fig. 25. When percentage of informed robot is 80.

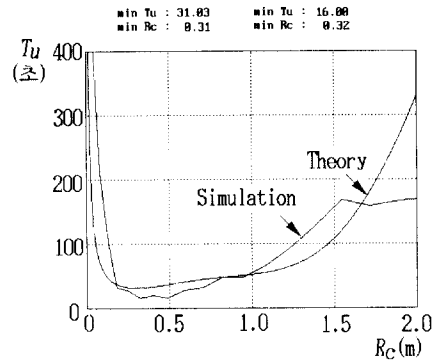


그림 26. 로봇의 통신 반경과 정보 전파 시간
Fig. 26. Robot's communication radius and information propagation time.

이와 같은 실험을 반경 R_c 를 변화시켜가면서 10회 수행한 결과의 평균값 및 이론적으로 구한 그래프는 그림 26과 같다. 실제 또는 시뮬레이션상에서 로봇이 작업공간의 경계부분으로 갔을 경우 통신영역내의 로봇의 평균밀도가 달라짐에 따라 약간의 오차가 발생한다. 따라서 V절에서 구한 정보전파의 해석은 작업공간에 비해 통신영역이 작을 때 타당하다고 볼 수 있으며 비교적 반경이 큰 경우도 보정에 의해 해석이 가능하다.

VII. 결 론

자율분산시스템이란, 시스템 전체를 통합하는 관리기능을 가지지 않고, 시스템을 구성하는 각 요소(서브 시스템 : 자율성을 강조하는 의미에서 儻라고도 한다)가 개별적으로 시스템의 목적 및 환경, 다른 요소의 거동 등을 인식하여 자신의 행동을 자율적으로 결정함으로써 각 요소간의 협조를 도모하여 시스템 전체로서의 대역적인 질서를 형성 또는 유지하는 시스템이다. 자율분산시스템의 각 요소가 로봇이 되는 경우를 특히, 자율분산로봇시스템이라고 한다. 이때 개개의 로봇은 자율적인 판단에 따라 행동하여 시스템 전체의 목적을 달성하게 된다. 따라서 시스템의 크기가 커졌을 때, 즉 구성하는 로봇의 수가 많아졌을 때에도 시스템 설계에 큰 영향을 주지 않으며 시스템 환경의 변화에 대처하는 능력도 우수하다. 또한 구성하는 서브 시스템인 로봇 몇 대가 고장을 일으켰을 때 시스템의 유지 능력도

뛰어나다.

자율이동로봇이 시스템의 목적에 부합하여 협조적으로 행동하기 위해서는 주변상황의 인지, 예측 및 판단의 능력과 함께 이동 및 작업 수행 능력을 갖추어야 한다. 따라서 개개의 로봇은 기본적으로 센싱을 통하여 주변상황을 인지하여 이를 토대로 상황예측 및 판단을 하게 되고 작업을 수행하거나 자유롭게 이동한다. 그러나 센서만을 이용하여 협조작업을 하는 경우에는 동적으로 변하는 환경이나 다른 자율이동로봇의 행동예측의 어려움으로 인해 시스템의 목적을 달성하기 어렵다. 따라서 로봇 개체간의 통신은 필수적이며, 센서만을 사용하는 경우보다 시스템 전체의 효율을 향상시킨다. 그러나 기존에 연구된 지역적 통신 방법은 로봇의 수가 점점 증가함에 따라 정보의 범람이나 처리 시간 등에 문제가 많고, 지역적 통신 방법도 실제 시스템을 염두하지 않은 정보 전파 해석이나 충돌회피 등의 단순한 목적을 위한 시스템이 대부분이었다. 본 논문에서는 실 시스템에 적용이 가능한 지역적 통신 시스템과 통신 모델을 제안하였고, 제안한 통신 모델에 대한 정보 전파의 메카니즘을 해석하여 최적의 시스템 조건을 찾아내었다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안한 통신 모델의 유효성을 확인하였으며 통신 환경에 따른 정보 전파의 영향도 정량화하였다.

금후의 과제로서는 자율이동로봇이 팀을 구성하여 작업을 하는 시스템에서 획득한 정보에 대해서 작업을 완수한 후 정보가 소실됨을 고려하여 정보 전파 모델을 해석할 계획이며 이때 예상되는 카오스적인 현상을 분석하고 정보를 획득한 로봇의 비율을 안정적으로 유지시킬 수 있는 조건을 찾아낼 계획이며 실험을 통하여 제안한 통신 방식을 검증할 예정이다. 아울러 본 논문에서 제안한 통신시스템은 군(swarm)전체를 제어할 수 있는 군제어 알고리즘을 찾아내는데에도 커다란 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 計測と制御, 特集 群知能ロボット, Vol. 31, No. 11, 1992.
 [2] M. J. Mataric, "Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence," *Proc. of 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*,

pp. 432-441, 1993.

- [3] C. R. Kube and H. Zhang, "Collective Robotic Intelligence," *Proc. of 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*, pp. 460-468, 1993.
 [4] 이동욱, 심귀보, "유전 프로그래밍에 의한 자율이동로봇군의 협조행동 및 제어," 제11회 한국자율제어학술회의 논문집, pp. 1177-1180, 1996. 10
 [5] 이동욱, 심귀보, "신경회로망과 유전 알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 창발 행동 실현," 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지시스템 종합학술대회(JCEANF '96) 논문집, pp. 34-37, 1996. 10
 [6] Y. Ishida, H Asama et al. "Development of an Integrated Communication System for Multiple Robotic Agents," *Proc. of the Int. Symp. on DARS*, pp. 193-198, 1992.
 [7] K. Ozaki, H. Asama et al. "The Cooperation among Multiple Mobile Robots using Communication System," *Proc. of the Int. Symp. DARS*, pp. 199-208, 1992.
 [8] J. Wang, "On Sign-board Inter-Robot Communication in Distributed Robotic systems," *Proc. of Int Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1045-1050, 1994.
 [9] J. Wang et. al. "A Wireless Medium Access Protocol (CSMA/CD-W) for Mobile Robot based Distributed Robotic Systems," *Proc. of Int Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2561-2566, 1995.
 [10] 이동욱, 심귀보, "분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동진화," 제5회 인공지능, 신경망 및 퍼지시스템 종합학술대회(JCEANF '96) 논문집, pp. 127-130, 1996. 10
 [11] 이동욱, 심귀보, "통신시스템을 이용한 자율이동로봇군의 협조행동 및 제어," 한국 퍼지 및 지능 시스템 학회 1996년도 추계학술대회 학술 발표 논문집, pp. 323-326, 1996. 11
 [12] I. Endo et. al. "An Infra-Red Sensory System with Local Communication for Cooperative Multiple Mobile Robots," *Proc. of IEEE Int Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 220-225, 1995.
 [13] Y. Arai, I Endo et. al. "Collision Avoidance among Multiple Autonomous Mobile Robots using LOCISS (LOCally Communicable Infrared Sensory System)," *Proc. of Int*

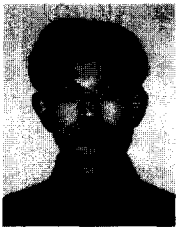
Conf. on Robotics and Automation, pp. 2091-2096, 1996.

- [14] H. Asama, I. Endo, "Evaluation of Team Organization Method Using Communication in a Distributed Autonomous Robotic System," *日本機械學會論文集(C編)*, Vol. 61, No. 587, pp. 3039-3044, 1995. 7.
- [15] T. Arai, J. Ota, "A study on Local

Communication of Multiple Mobile Robot System," *日本ロボット學會誌*, Vol. 12, No. 6, pp. 886-892, 1994.

- [16] T. Arai, J. Ota, "Effect of Grouping in Local Communication system of Multiple Mobile Robots," *日本ロボット學會誌*, Vol. 13, No. 5, pp. 727-733, 1995.

저 자 소 개



李 東 昱(正會員)

1973년 8월 24일생. 1996년 : 중앙대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사). 1996년 ~ 현재 : 중앙대학교 대학원 제어계측학과 석사과정 재학 중. 로보틱스 및 지능제어시스템 연구실. 주관심분야 : 로보틱스, 신경망, 진화알고리즘, 인공생명, 지능제어, 자율분산시스템 등



沈 貴 寶(正會員)

1956년 : 9월 20일생. 1984년 : 중앙대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1986년 : 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1990년 : The University of Tokyo, 전기전자공학과 졸업 (공학박사). 1990년 : 동경대학 생산기술연구소 (연구원). 1991년 ~ 1994년 : 중앙대학교 제어계측공학과 조교수. 1992년 ~ 현재 : 대한전자공학회, 인공지능·신경망 및 퍼지시스템 연구회 협동전문위원. 1995년 ~ 현재 : 대한전자공학회 논문지 편집위원. 1995년 ~ 현재 : 중앙대학교 전기·전자·제어공학부 부교수. 주관심분야 : 로보틱스 전반, 지능제어시스템, 퍼지, 신경망, 진화연산, 마이크로로봇시스템, 센서융합, 카오스제어, 인공생명기법, 자율분산시스템 등