

군집 로봇의 군 행동을 위한 통신 모델과 이론적인 해석

Communication Model and Its Theoretical Analysis for Group Behavior of Swarm Robot

심귀보* · 이동욱**

Kwee-Bo Sim and Dong-Wook Lee

* 중앙대학교 전자전기공학부

** 한국생산기술연구원 로봇기술본부

요 약

군집 로봇시스템에서 로봇들 간의 협조행동 및 군 행동을 하기 위해서는 로봇의 센싱과 통신 기능은 필수적이다. 일반적으로 대역적 통신 시스템에서 로봇의 대수가 증가하면 통신자원의 제한과 정보의 범람이 발생한다. 따라서 이 경우 지역적 통신방법이 유리하다. 본 논문에서는 지역적 통신 방식을 제안하고, 정보의 전파(propagation) 해석을 통하여 최적의 통신 반경을 찾는 방법들을 제시한다. 또한 로봇이 정보를 획득하고 소실할 경우 발생하는 군(group)의 카오스 행동을 피하기 위한 최적의 조건을 제시한다.

Abstract

It is essential for robot to have the sensing and communication abilities in the swarm robot system. In general, as the number of robot goes on increasing, the limitation of communication capacity and information overflow occur in global communication system. Therefore a local communication is more effective than global one. In this paper, we analyze information propagation mechanism based on local communication. To find an optimal communication radius, we propose several methods with different conditions. Also, to avoid chaotic behavior which occurs when a robot obtains and loses information, we will suggest the stable condition of information propagation.

Key words : local communication, sign board, swarm robot, group behavior, cooperative strategy, chaotic behavior

1. 서 론

이동 로봇에 관한 연구의 진보에 따라 금후 수백 대 또는 수천 대의 이동 로봇이 복잡한 협조 작업을 수행할 수 있을 것으로 기대된다[1]-[6]. 아울러 이와 같이 대단히 많은 로봇에 의한 협조시스템에서는 장애물 회피나 자제 반송 등 불특정 다수의 로봇 협조에 의하여 작업을 수행하리란 것도 충분히 예상할 수 있다. 이와 같은 자율이동로봇군의 특징은 크게 자율분산성, 다양성, 협조성으로 대별할 수 있고, 시스템 전체의 설계이념으로서는 기능분산과 협조의 두 가지 개념으로 집약된다. 자율이동로봇으로 대표되는 군집 로봇시스템은 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 방법이 복수 개 존재하는 융장성을 가지고 있기 때문에 예측하지 못하는 사태가 발생하더라도 강건하게 대처할 수 있다.

최근 이와 같은 시스템에 대한 관심이 증대되고 있고, 금후 실제 사용되는 분야도 점차 늘어날 전망이다. 또한 반도체 가공 기술과 마이크로 머시닝 기술의 발전에 따라 머지않아 마이크로 로봇 등도 실용화 될 수 있을 것으로 생각된다.

이러한 군집 로봇(swarm robot)을, 합목적적인 협조 작업을 수행하려고 하는 경우 로봇간의 통신이 반드시 필요하다 [5]-[7]. 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.

Mataric은 통신의 기능은 사용하지 않고 센서만을 사용해 주위 환경을 인식하고 행동을 취하는 시스템에 대하여 연구하였으며 이에 의해 여러 가지 군 행동을 실현하였다[8]. 또한 신경망과 진화 알고리즘을 이용하여 로봇의 행동을 진화함으로써 협조행동을 구현하는 연구도 행하여지고 있다. 그러나 통신기능을 사용하지 않음으로 해서 나타나는 결과들은 전체적인 집단행동 등의 범위로 한정되었으며 구체적인 팀의 구성이나 특정한 작업을 하기 위한 협조는 고려되지 않았다.

한편 지금까지의 자율이동로봇의 통신에 관한 연구는, 사용하는 통신수단에 따라 크게 대역적 통신[9]과 지역적 통신 [6]으로 나누어진다. 일반적으로 전자인 대역적 통신은 무선 등의 광역성이 있는 통신매체를 이용하여, 대상으로 하는 로봇의 개수가 적은 경우에 유효하다(10대 이하). 그러나 대상으로 하는 로봇의 개수가 증가하면 통신능력의 제한이나 로

접수일자 : 2005년 12월 6일

완료일자 : 2006년 2월 1일

본 연구는 과학기술부의 뇌신경정보학연구사업의 '뇌정보처리에 기반 한 감각정보 융합 및 인간행위 모델 개발'의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

봇 상호간의 간섭, 코스트의 증가 등의 문제가 발생하여 모든 로봇이 서로 통신하는 것이 곤란하여 이 경우에는 후자인 지역적 통신이 유리하다[6][7].

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, ①작업에 필요한 로봇이 한 곳에 모이는 시간, ②작업에 따라서 정보를 전파하는 범위, ③주위환경에 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 안 된다.

본 논문에서는 여러 대의 자율이동로봇으로 구성된 군집 로봇시스템에서 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.

2. 군집 로봇의 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[6]. 본 장에서는 지역적 통신에서 이 두 가지 모델의 검토와 함께 이들을 융합한 새로운 통신 모델을 제안한다.

2.1 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 방식으로서 프로그래밍이 쉽고 통신 방법이 단순하여 비교적 시스템에 쉽게 적용할 수 있다.

실제로 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.

2.2 정보전달 모델(message passing model)

정보전달 모델은 특정한 수신자를 정해놓고 정보를 전달

하는 방법이다. 그러므로 지역적 통신의 방법에서는 통신 환경 내에 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 규약된 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 8과 같이 하나의 관측자가 얻은 정보를 특정 로봇에게 전달 또는 명령하여 일을 수행하도록 할 때에도 이용할 수 있다.

2.3 융합 모델(fusion model)

융합 모델은 사인보드 모델과 정보전달 모델의 두 가지 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.

3. 융합 모델을 이용한 팀의 구성

3.1 데이터 형식

융합 모델의 데이터는 그림 1과 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 1. 통신 데이터 형식

Fig. 1. Format of communication data

Sign board에 포함되는 내용은 다음과 같은 것이 있다. ①로봇의 고유 번호(ID), ②송신부의 번호, ③이동 속도, ④로봇의 상태: 고장, 작업 중, 대기 중 등, ⑤시스템 내에서 획득한 정보(information), ⑥도움 요청의 여부 등이다.

또한 Message에 해당하는 내용은 미리 규약된 내용 증 필요에 따라 선택하여 내보내게 되는데 그 내용은 다음과 같다. ①통신하고자 하는 특정(대상) 로봇의 고유 번호, ②전달하고자 하는 내용(message) 등이다.

여기서 전달하고자 하는 내용은 시스템 내에서 사용될 것으로 예상되는 미리 정해진 말을 사용하게 되는데 몇 가지 기본적인 내용의 예를 들면 다음과 같은 것이 있다.

- 응답할 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 할 때
 - Ⓗ HELP, JOIN
- 팀을 해체할 때
 - Ⓘ FREE

이 외에도 여러 가지를 때에 따라 정의하여 사용할 수 있다.

3.2 군 행동을 위한 팀 구성 방법

시스템 내에서 두 대 이상의 로봇이 함께 협조 작업을 해야 할 경우가 발생했을 때 통신에 의해 두 대 이상의 로봇이 팀을 이루게 된다.

로봇이 작업 환경 내에서 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. 다음 그림 2는 하나의 로봇이 작업을 발견하고 팀을 구성하는 방법의 흐름도이다.

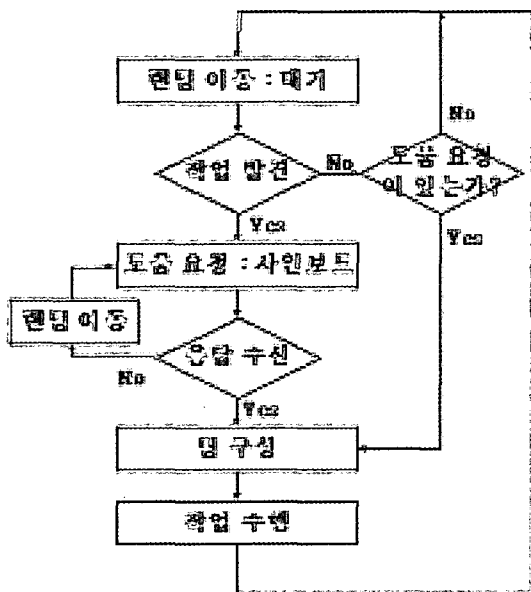


그림 2. 팀 구성을 위한 로봇 행동의 흐름도

Fig. 2. Flowchart of robot's behavior for organizing team

4. 지역적 통신의 정보 전파 해석

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

4.1 정보전파 방정식

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

다음의 표 1은 전파 방정식을 유도해 내기 위해서 사용된 각종 매개변수이다.

표 1. 지역적 통신시스템의 매개변수

Table 1. Parameters of local communication system

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

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

$$\Delta r(t) = av\Delta t(1-r(t))I(t) \quad (1)$$

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 나눈 값에 비례한다(그림 3 참조).

$$av\Delta t = \beta \frac{2R_c v \Delta t}{A} \quad (2)$$

따라서 a 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a = \frac{2\beta R_c}{A} = \frac{2\beta R_c}{\pi R_c^2} = \frac{2\beta}{\pi R_c} \quad (3)$$

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

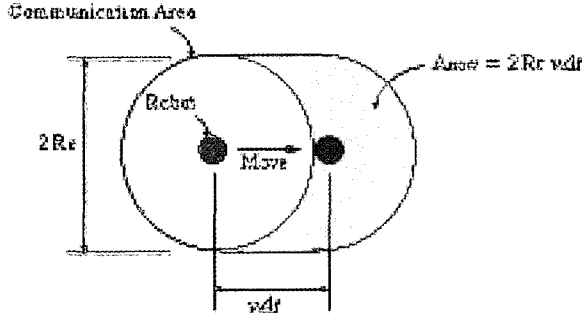


그림 3. 로봇이 움직임에 따라 늘어나는 영역
Fig. 3. Extended area with robot move

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 하나의 센서가 커버할 수 있는 영역, 즉 A/s 의 영역에 하나의 로봇이 존재할 확률(r_1)은 (4)식에 의해 다음과 같이 표현 된다(이때 $w \ll n$ 이므로 작업에 의한 간섭의 효과는 무시한다).

$$r_1 = P(1, \frac{1}{s} \rho A) = \binom{n}{1} (q_1)^1 (1-q_1)^{n-1} \quad (5)$$

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

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

$$E(t) = \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (r_1)^i (1-r_1)^{s-i} \quad (6)$$

이때 이 로봇이 특정한 정보를 가지고 있을 확률($I_R(t)$)은

$$I_R(t) = E(t) r(t) = r(t) \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (r_1)^i (1-r_1)^{s-i} \quad (7)$$

과 같이 된다.

또한, B/s 의 영역에 하나의 작업이 존재할 확률(r_2)은 (8)식으로 나타낼 수 있으므로, 로봇이 작업을 직접 발견하여 정보를 획득할 확률($I_T(t)$)는 (9)식과 같이 표현된다.

$$r_2 = \frac{w}{n+w} P(1, \frac{1}{s} (\rho + \rho_w) B) = \frac{w}{n+w} \binom{n+w}{1} (q_2)^1 (1-q_2)^{n+w-1} \quad (8)$$

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

$$I_T(t) = \sum_{i=0}^s \binom{s}{i} (r_2)^i (1-r_2)^{s-i} \quad (9)$$

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

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

(10)식을 (1)식에 대입하여 정리하면 (11)식을 얻는다.

$$\Delta r(t) = av\Delta t(1-r(t))(E(t)r(t) + I_T(t)) \quad (11)$$

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

$$a = avE(t) \quad (12)$$

$$b = avI_T(t) \quad (13)$$

$$\Delta r(t) = \Delta t(1-r(t))(ar(t) + b) \quad (14)$$

여기서 Δt 를 좌변으로 넘겨서 (14)식을 미분식으로 표현하면 (15)식과 같이 지역적 통신의 정보전파 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = (1-r(t))(ar(t) + b) \quad (15)$$

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

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

단, $C = \frac{1-r_0}{r_0 + \frac{b}{a}}$ 이다.

$$T_u = -\frac{1}{a+b} \ln \frac{(1-u)(r_0 + \frac{b}{a})}{(u + \frac{b}{a})(1-r_0)} \quad (17)$$

위 식을 이용하여 통신 반경(R_c)에 대한 정보 전파시간을 알아보기 위하여, 나머지 변수들을 고정하고 통신 반경에 대한 정보 전파시간을 구하는 시뮬레이션을 수행했다.

시뮬레이션에 사용한 로봇은 8개의 센서를 가지며, 로봇의 개수는 각각 50대와 100대로 설정했다. 로봇의 속도는 0.025m/s이고, 전체 작업 공간은 4.5m×4.5m에 작업의 수는 8개로 하였다. 이때 통신반경을 변화시켜가며 로봇의 80%에 게 정보가 전파되는 시간을 구하면 그림 4와 같다.

그림 4의 결과에서 전파시간을 최소로 하는 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.

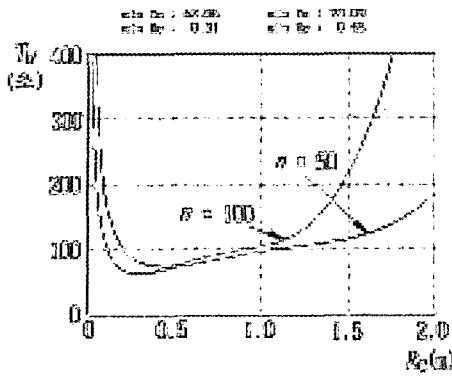
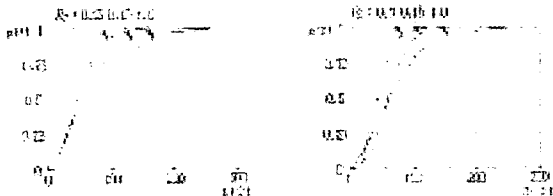


그림 4. 로봇의 통신 반경과 정보 전파시간

Fig. 4. Robot's communication radius and information propagation time

그리고 시간에 따른 정보를 가진 로봇의 비율($r(t)$)은 로지스틱 방정식(logistic equation)의 형태를 가진 (15)식에 의해 n 이 50과 100일 때 각각 그림 5와 같이 나타난다. 그림 5(b)에서 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 전파시간의 차이가 많이 남을 알 수 있으며 정보 전파시간을 최소로 하는 통신 반경을 구하는 일은 중요하다.



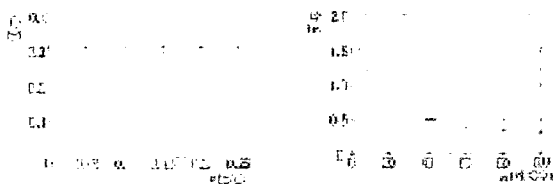
(a) $n=50$ (b) $n=100$

그림 5. 정보를 가진 로봇의 비율

Fig. 5. Percentage of informed robot

그림 6(a)는 n 이 100일 때 속도 변화에 따른 최적 반경의 변화를 나타낸 것이며, 그림 6(b)은 로봇의 개수에 따른 최적 반경의 변화 그래프를 나타낸 것이다.

그림 6에서 나타나듯이 로봇의 속도는 전파 시간에만 영향을 주고 최적 반경에는 영향을 주지 않으며 로봇의 개수(또는 밀도)가 증가함에 따라 최적 반경의 크기는 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.



(a) 로봇의 속도 (b) 로봇의 수
(a) velocity of robot (b) number of robot

그림 6. 로봇의 속도와 수에 따른 최적 반경

Fig. 6. Robot's number and velocity vs optimal radius

4.2 정보 소실을 고려한 정보전파 방정식

지역적 통신방법은 주변의 필요한 로봇에게만 정보를 전달할 필요가 있을 때 특히 효율적이다. 즉, 시스템 전체에 작업이 골고루 분포하며 작업을 수행하는데 필요한 로봇이 소수일 때 매우 적합한 통신방법이다. 본 절에서는 이와 같이 작업을 발견한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전달하고 작업을 수행한 후 정보를 소실하는 시스템을 설정하여 정보 전파를 해석한다.

로봇 하나가 하나의 작업을 수행하는 시간의 평균값을 T 라고 할 때 x 대의 로봇이 하나의 작업을 수행하는데 걸리는 시간은 T/x 가 된다. 작업에 대한 정보를 획득한 로봇이 바로 작업을 수행한다고 가정하면, 시각 t 에서 정보를 가진 모든 로봇이 한 개의 작업을 수행하는데 걸리는 시간($T_1(t)$)은 (18)식과 같다.

$$T_1(t) = \frac{T}{\text{작업 중인 로봇 수}} = \frac{T}{n \cdot r(t)} \quad (18)$$

반대로, t 시각에 1초 동안 수행하는 작업량 $Q(t)$ 는 식 (18)의 역수로서 (19)식과 같이 표현된다.

$$Q(t) = \frac{n \cdot r(t)}{T} \quad (19)$$

매 시 $Q(t)$ 개의 작업이 끝나고 이에 따라 정보를 소실하는 로봇이 생기는데, t 시각에 정보를 소실하는 로봇 수($n_f(t)$)는 (20)식과 같다.

$$\begin{aligned} n_f(t) &= Q(t) \times (\text{작업 하나 당 일하는 로봇 수}) \\ &= \frac{n \cdot r(t)}{T} \cdot \frac{n \cdot r(t)}{w} = \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \end{aligned} \quad (20)$$

따라서 단위시간동안 정보를 소실하는 로봇의 비율 $r_f(t)$ 는 $n_f(t)$ 를 전체의 로봇 개수로 나눈 값으로서 (21)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_f(t) &= n_f(t) \cdot \frac{1}{n} \\ &= \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \cdot \frac{1}{n} = \frac{n}{T \cdot w} r^2(t) \end{aligned} \quad (21)$$

결국, 정보의 소실을 고려한 정보전파 방정식은 (15)식에 $b_f(t)$ 항을 추가한 형태로 (22)식과 같다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = (1 - r(t))(ar(t) + b) - r_f(t) \quad (22)$$

(21)식을 (22)식에 대입하여 정리하면 (23)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dr(t)}{dt} = -(a+c)r^2(t) + (a-b)r(t) + b \quad (23)$$

단, $c = \frac{n}{T \cdot w}$ 이다.

이상에서 유도한 정보전파 방정식은 정보를 소실하는 로봇을 매시간 확률로서 계산했기 때문에 매시간 연속적으로 정보를 소실하는 로봇이 발생하지만 실제적으로는 한 작업이 끝나면 작업을 하던 로봇이 동시에 정보를 소실한다. 그러나 (29)식은 대략적으로 정보를 가지고 있는 로봇의 비율의 변

화를 예측하려고 할 때 유용하며, 로봇과 작업의 수가 많을수록 실제의 값과 거의 같아진다.

4.3 정보소실을 고려한 정보전파 방정식의 카오스 현상 분석

앞의 4.2절에서는 작업을 발견한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전달하고 작업을 수행한 후 정보를 소실하는 경우에 대하여 정보전파를 해석하였다. 작업을 계속 수행하고 공급되는 시스템에서 작업을 하는 로봇의 비율이 일정하다면 이에 따라 투입하는 작업의 양을 결정할 수 있다. 그러나 작업을 하는 로봇의 비율이 시간에 따라 매우 불규칙하게 변한다면 투입할 작업의 양을 결정하기 힘들다. 특히 (23)식은 logistic equation의 형태로서 파라미터의 값에 따라서 카오스 현상이 나타난다[10]. 본 절에서는 정보를 가진 로봇의 비율이 불규칙하게 변하는 조건을 피하기 위하여 정보전파 방정식의 카오스 분석을 행한다.

정보를 가진 로봇의 비율이 초기조건에 매우 민감하게 변한다면 확률적으로 동작하는 정보전파 방정식을 이용하여 미래의 상황을 전혀 예측할 수 없게 된다. 따라서 시스템에 공급할 작업의 양을 결정하기도 힘들뿐만 아니라 시스템의 변화에 적절히 대처하기도 힘들다. 이러한 점을 고려하면 카오스 현상을 피하는 조건을 찾는 것이 매우 중요한 일이다.

정보소실을 고려했을 때의 카오스 현상을 분석하기 위하여 (23)식을 차분 방정식의 형태로 고치고 정리하면 (24)식이 얻어진다.

$$r(k+1) = -(a+c)r^2(k) + (a-b+1)r(k) + b \quad (24)$$

(30)식에서 $r(k)$ 의 값을 조절하는 파라미터는 a, b, c 로서 실제로 이것은 S, R_c, n, w, v, T 의 영향을 받는 변수이다. 그러나 변수가 너무 많기 때문에 (24)식에 나타나 있는 변수를 그대로 이용하되 다음과 같이 조정하여 분석을 시도한다. b 는 로봇이 작업을 발견할 확률을 나타내는 항인데 일반적인 조건에서 $w \ll n$ 이므로 통신영역 안에 간섭 없이 로봇이 존재할 확률에 관한 항인 a 에 비하여 매우 작으며 수치상으로도 0.1 이하이므로 b 의 값을 무시하여도 카오스 현상이 나타나는 범위는 근사적으로 구할 수 있다. 따라서 b 를 무시함으로써 변수를 a 와 c 의 2개로 줄일 수 있으며 이때의 방정식은 (25)식과 같다.

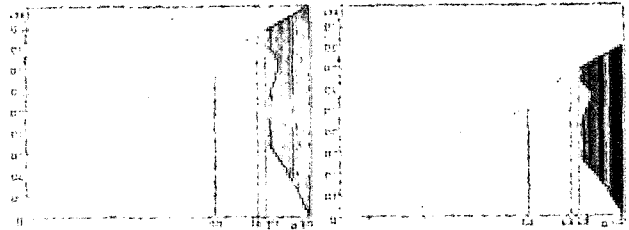
$$r(k+1) = r(k)(a+1-(a+c)r(k)) = (a+c)r(k)\left(\frac{a+1}{a+c} - r(k)\right) \quad (25)$$

여기서 특수한 경우로서 $c=1$ 일 때를 생각해 보자. 다음의 (26)식은 c 를 고정함으로써 파라미터를 한 개로 줄인 식이다.

$$r(k+1) = (a+1)r(k)(1-r(k)) \quad (26)$$

a 를 0에서 3까지 증가시키면서 $r(k)$ 의 수렴성을 살펴보면 그림 7(a)와 같은 그래프가 나온다. 그래프에 나타나 있는 바와 같이 a 는 통신범위 내에 정보의 간섭 없이 로봇이 존재할 확률에 관계된 항으로서 이 값이 0에서 2까지 증가함에 따라 $r(k)$ 역시 계속 증가한다. 그러나 a 가 2를 넘어서면서부터 $r(k)$ 는 2, 4, 8 ... 주기를 거쳐 카오스 상태로 들어간다. 다시 말하면, a 가 2일 때 정보를 가진 로봇의 비율이 최대 값인 0.65로 수렴하고 그 이후는 수렴점이 하나 이상 존재한다. 특히, a 가 약 2.5 이상이 되면 수렴하는 점이 사라지

면서 카오스 현상이 나타난다. 한편, 그림 7(b)는 c 의 값을 2로 하였을 때의 그래프이다. 그림 7(a)와 비교해 보면 카오스가 일어나는 분기점은 똑같고 단지 그 값만 줄어들었을 뿐이다. 따라서 c 의 값은 카오스 영역과는 무관함을 알 수 있다.

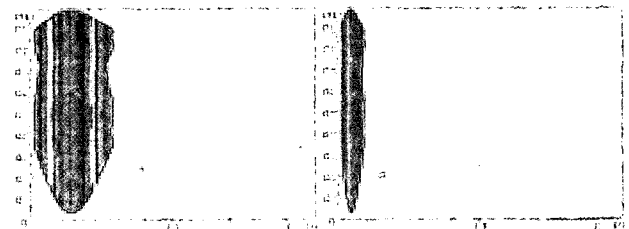


(a) $c = 1$ (b) $c = 2$

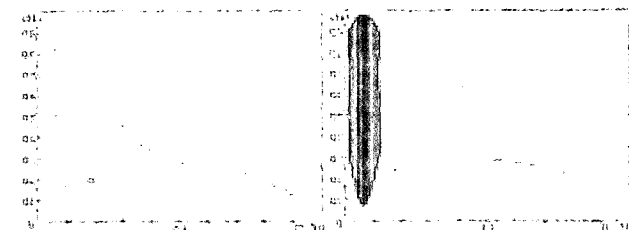
그림 7. a 의 변화에 따른 $r(k)$ 의 분기도

Fig. 7. Bifurcation diagram of $r(k)$ to the parameter a

위의 그래프로부터 파라미터 값의 범위에 따라서 카오스 현상이 나타남을 알 수 있었다. 이번에는 통신반경(R_c)과 카오스 현상과의 관계를 알아보기 위하여, a 와 b 의 값을 모두 고려하고 a 와 b 에 공통으로 영향을 미치는, 통신반경(R_c)을 변화시켜보자. 그림 8은 $S=25, c=1, n$ 과 v 가 각각 (a)~(d)의 조건과 같이 주어졌을 때 R_c 의 값에 따른 $r(k)$ 의 분기도를 나타낸 그래프이다. 각 그래프의 아래 곡선은 a 값, 위의 곡선은 $r(k)$ 의 수렴 값을 나타낸다. 그래프에서 R_c 가 증가함에 따라 a 의 값이 서서히 증가하고 다시 어느 정점을 고비로 감소한다. 이때 a 의 값이 대략 2를 넘는 구간에서 카오스 현상이 나타난다.



(a) $n = 100, v = 0.75$ (b) $n = 1000, v = 0.25$



(c) $n = 500, v = 0.32$ (d) $n = 500, v = 0.35$

그림 8. n 과 v 가 주어졌을 때 R_c 의 변화에 따른 a 값 및 $r(k)$ 의 수렴 값.

(가로축: R_c , 세로축: $r(k)$ 및 $a(\times 0.1)$)

Fig. 8. Convergence value of parameter a and $r(k)$ to the variation R_c when given parameter n and v (x axis: R_c , y axis: $r(k)$ and $a(\times 0.1)$)

이상의 결과를 종합해보면 여러 가지 파라미터의 설정에 따라서 정보를 가진 로봇의 비율이 카오스 행동을 나타낼 수 있고 주기적인 패턴이 나타날 수도 있었다. 해석 결과 정보를 가진 로봇의 비율은 a 의 값이 클수록 카오스 현상이 일어날 가능성이 높았다. a 값은 로봇이 정보를 획득할 확률에 관계된 값인데 로봇의 밀도가 높고 속도가 빠르며 반경이 작을수록 커진다.

정보를 가진 로봇이 카오스 행동을 보이는 구간에서는 작업의 수행속도가 일정하지 않기 때문에 작업을 효율적으로 공급하는데 어려움이 생긴다. 따라서 카오스 현상이 생기지 않는 통신파라미터를 설정하는 것이 중요하다. 다음절에서는 이상의 결과를 바탕으로 카오스 현상을 피한 범위에서 최적의 통신 파라미터를 찾는 방법을 살펴본다.

5. 최적의 통신 파라미터

본 절에서는 III장에서 구한 정보전과 방정식을 이용해 최적의 통신 파라미터를 구한다. 지역적 통신시스템에서는 정보의 간섭이 발생하기 때문에 ①정보의 간섭을 최소화하고 ②정보전과 효율을 최대로 하며 ③시스템의 변화를 예측할 수 있도록 통신반경을 설정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이 통신반경을 “최적의 통신반경” 또는 “최적반경”으로 나타낸다.

5.1 최적의 통신반경

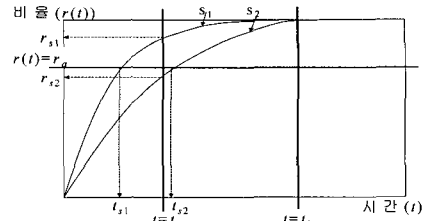
최적의 통신반경을 구하기 위하여 고정시켜 기준으로 삼아야 하는 양과 이때 최적화시키기 위한 양을 결정해야 한다. 일반적으로 정보전과 시간을 최소화하거나 정보를 획득한 로봇의 비율을 최대화하는데 이때 기준으로 삼는 양에 따라 표 2와 같은 3가지 방법으로 나눌 수 있다.

표 2. 최적의 통신반경을 구하기 위한 방법
Table 1. Method for determining the optimal communication radius

	기준량	측정량	최적화	방법
방법 1	비율	시간	최소화	일정한 비율의 로봇에게 정보를 전달하는 데 걸린 시간을 측정
방법 2	시간	비율	최대화	일정시간 후 정보를 가진 로봇의 비율을 측정
방법 3	작업	시간	최소화	일정량의 작업을 주고 작업수행 시간을 측정

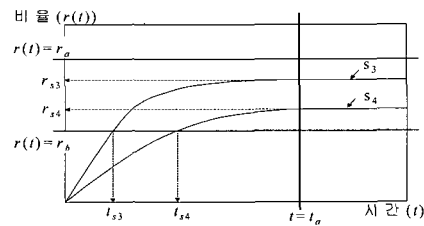
그림 9는 여러 가지 경우에 있어서 $r(t)$ 의 변화 그래프를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 단조증가 하면서 수렴 값이 1이 되는 경우이다. 일반적으로 정보 소실 없이 정보를 전파 할 경우 이와 같은 형태의 그래프가 나타난다. 이때 방법 1과 방법 2에 따라서 s_1 과 s_2 의 성능을 비교해 보자. 방법 1에 의해 $r(t) = r_a$ 를 기준으로 잡으면, 이때까지 걸리는 시간은 각각 t_{s1} 및 t_{s2} 로서 $t_{s1} < t_{s2}$ 이므로 s_1 의 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 방법 2에 의해서 $t = t_a$ 를 기준으로 잡으면 t_a 시간 동안 정보를 획득한 로봇의 비율은 각각 r_{s1} , r_{s2} 로서 $r_{s1} > r_{s2}$ 이므로 역시 s_1 의 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

그러나 s_2 곡선의 $r(t)$ 값이 1이 되는 시간(t_b) 즉, $t > t_b$ 인 시간부터는 방법 2를 이용해 성능을 비교할 수 없다. 한편, 그림 9(b)는 $r(t)$ 가 단조증가 하면서 수렴 값이 1보다 작은 경우의 그래프이다. 이와 같은 경우는 정보소실이 발생할 경우에 나타날 수 있는 곡선의 형태이다. 그림 9(a)와 마찬가지로 방법 1과 방법 2에 의해 성능을 비교 할 수 있다. 그러나 방법 1에서 $r(t) > r_{s3}$ 를 기준으로 하면 두 곡선의 성능을 비교할 수 없다. 그림 9(c)는 $r(t)$ 의 수렴 값이 없으며 카오스 행동을 나타낼 때의 그래프이다. 이 경우는 방법 1과 방법 2를 이용해서 비교를 할 수 없다.



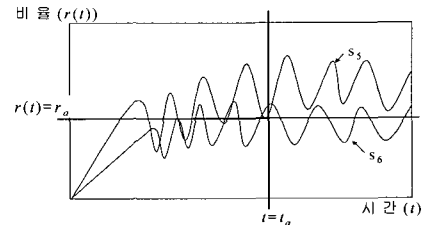
(a) 단조증가, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 1$

(a) Monotone increasing, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 1$



(b) 단조증가, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \text{constant} < 1$

(a) Monotone increasing, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \text{constant} < 1$



(c) 카오스 행동, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) : \text{시변}$

(c) Chaos behavior, $\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) : \text{time varying}$

그림 9. 여러 가지 패턴의 $r(t)$ 곡선

Fig. 9. $r(t)$ curve of the various pattern

이상의 내용을 종합해 보면, 그림 9(a)와 같은 경우는 각 조건에 대하여 $t = t_b$ 인 점을 알 수 없기 때문에 방법 1에 의해 비교를 하는 것이 효과적이다. 또한 그림 9(b)의 경우는 $r(t) = r_{s3}$ 인 점을 알 수 없기 때문에 방법 2를 사용하는 것이 안전하다. 특히 방법 2는 기준시간을 크게 잡으면 작업수행 비율이 안정화된 후의 성능 비교가 가능해진다. 방법 3은 위의 3가지 조건에 모두 적용할 수 있으나 작업을 수행하는 시뮬레이션을 해야 하기 때문에 작업량이 많으면 비교하는데 걸리는 시간이 매우 길어진다. 그러나 그림 9(c)와 같이 방법 1, 2를 이용할 수 없을 때, 또는 작업 수행능력을 상대적인 비교가 아니라 절대적인 값으로 비교하기 위해서는 방법 3을

이용하는 것이 좋다.

본 논문에서는 최적의 통신반경을 구하기 위하여 정보소실이 없는 경우에 대하여는 방법 1을 이용하여 일정한 비율의 로봇에게 정보를 전파하는 시간을 최소화하는 통신반경을 구하고, 정보소실이 있는 경우에는 방법 2와 방법 3을 이용하여 최적의 통신반경을 구한다.

5.2 정보소실이 없는 경우

일반적으로 한 로봇이 작업을 발견했을 때 그 작업을 수행하기 위하여 필요한 수의 로봇에게 정보를 전달할 필요가 있다. 지역적 통신에서 개개의 로봇은 모든 로봇의 정보를 알 수 없고 오직 주변의 통신 가능한 로봇의 정보만을 알 수 있다. 따라서 각 로봇은 현재 몇 대의 로봇이 정보를 획득했는지 알지 못한다. 그러므로 필요한 수의 로봇에게 정보를 전달하기 위해서는 정보전파 시간을 제어하는 방법을 사용한다. 즉, 필요한 로봇에게 정보가 전달되는데 걸리는 시간을 예측하여 그 시간동안 정보를 전파하고 그 이후 작업을 수행하는 것이다.

그림 10은 로봇의 통신반경(R_c)이 각각 0.325, 0.2, 1.0m 일 때의 정보소실 없이 정보전파를 하는 경우 $r(t)$ 의 변화를 나타낸 그래프이다. 본 그래프를 이용하여 일정 비율의 로봇에게 정보를 전달하는데 걸리는 시간과 일정시간이 지난 후 정보를 획득한 로봇의 비율을 살펴볼 수 있다. 그림 11은 방법 1에 의하여 통신반경을 변화시켜가면서 전체 로봇의 80%에게 정보를 전파할 때까지 걸리는 시간을 나타낸 그래프이다. R_c 가 0.325일 때 최소의 정보전파 시간인 약 27.4초가 걸린다. 따라서 이 경우 최적의 통신반경은 0.325m가 됨을 알 수 있다.

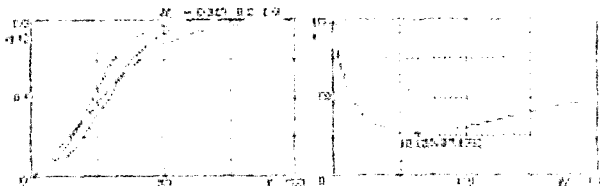


그림 10. $r(t)$ 그래프. 그림 11. 방법 1($r(t)=0.8$)
Fig. 10. $r(t)$ graph Fig. 11. Method no. 1($r(t)=0.8$)

4.3 정보소실이 있는 경우

정보소실이 있는 경우에는 정보를 가진 로봇의 비율이 1 이하의 비율로 수렴하거나 변동한다. 따라서 이와 같은 경우에는 방법 2 또는 방법 3을 사용한다. 방법 2는 측정시간을 적당히 길게 두어서 수렴하는 비율을 가지고 최적반경을 구하며 방법 3은 일정한 양의 작업을 주고 작업을 완료하는데 걸리는 시간을 측정함으로써 작업 효율을 관측한다.

그림 12~14은 $S=25, n=100, w=10$ 일 때의 그래프이다. 그림 12는 로봇의 통신반경이 0.25m 이며, 로봇의 속도가 각각 0.3, 0.75m/s 일 때 시간의 흐름에 따른 정보를 가지고 있는 로봇의 비율을 나타낸 그래프이다. 그림 12(a)는 정보를 가진 로봇의 비율이 로봇의 한 값(0.413)으로 수렴하고 있으며 그림 12(b)는 카오스 행동을 보이고 있다.

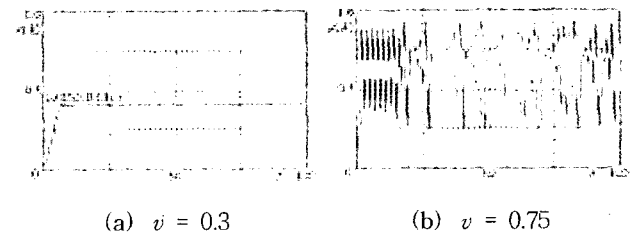
그림 13은 방법 2에서 기준시간을 크게 잡고 통신반경에 따른 $r(k)$ 의 수렴 값(이하 $r_{conv.}$)을 나타낸 그래프이고, 그림 14는 방법 3을 이용해 일정량의 작업을 주고 수행시간을 나타낸 그래프이다. 그림 13(a)에서 최적의 통신반경은

$r_{conv.}=0.413$ 일 때의 반경인 0.235이며, 그림 13(b)는 카오스 행동을 나타내는 구간을 제외한 구간에서 $r_{conv.}=0.658$ 일 때의 반경인 0.423이 최적반경이다. 그림 8은 일정량의 작업을 주었을 경우로 각각 반경이 0.223, 0.065일 때 작업수행시간이 최소가 됨을 알 수 있다.

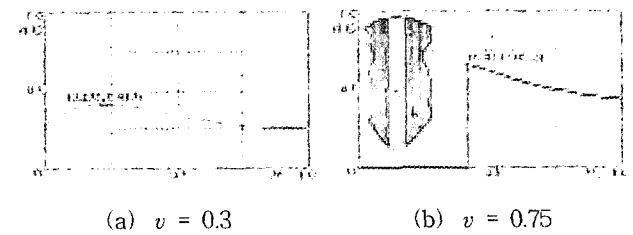
그림 13(a)와 그림 14(a)를 비교해 보면 같은 조건이지만 방법 2와 방법 3에 의하여 구한 최적반경은 약간의 차이가 있다. 그 원인은 조건에 따라 $r(k)$ 가 수렴하는 데 걸리는 시간(과도시간)이 다르기 때문이다. 그렇지만 과도 시간이 무시된다면 최적반경은 두 경우 거의 같아진다. 그림 13(b)는 카오스 현상이 있는 경우인데 그래프를 보면 알 수 있지만 카오스가 일어나는 구간에서는 반경에 상관없이 작업 수행능력이 대체로 비슷하다. 따라서 그림 13(b)에서 카오스 구간을 피해 구한 최적반경인 0.423에서도 수행능력이 우수함을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 일어나는 이유는 카오스 현상은 a 값 즉, 로봇이 정보를 획득할 확률이 클수록 발생할 가능성이 커지지만 카오스 현상이 일어나는 구간에서는 정보전달이 매우 불규칙해져서 작업효율이 더 이상 좋아지지 않기 때문이다. 오히려 정보전달이 불규칙해지면 매시간 작업 수행량 역시 불규칙하게 변하기 때문에 그에 맞게 작업을 공급해 주기 어렵다.

그림 15의 (a), (b)는 각각 속도 및 로봇의 수에 따른 최적의 반경의 변화를 나타낸 그래프이다. 로봇의 속도와 로봇의 수가 증가함에 따라 최적의 반경은 감소하지만 카오스 현상이 나타나는 구간부터는 다시 증가한다.

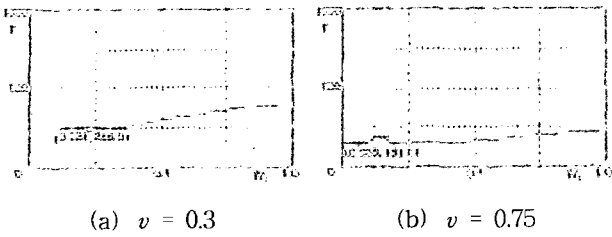
결론적으로 그림 12~15의 그래프는 작업을 수행하면 수행한 만큼 작업을 다시 공급해 주는 상황에서의 최적의 통신반경을 구한 것이다. 이때 카오스 행동을 나타내는 경우는 실제로 작업을 수행함에 따라 작업을 공급해 주어야 하는데 이것은 거의 불가능하다. 따라서 실제의 시스템에서는 카오스 현상이 일어나지 않는 구간에서 최적의 통신 파라미터를 구하는 것이 바람직하다. 실제로 그림 13(b)와 그림 14(b)를 살펴보면 카오스 현상을 피한 최적반경에서도 작업의 효율이 높음을 알 수 있다. 따라서 카오스 현상을 피해 최적반경을 구하면 작업효율도 높일 수 있고 작업하는 로봇의 수도 예측할 수 있다.



(a) $v = 0.3$ (b) $v = 0.75$
그림 12. 시간에 따른 $r(k)$ 의 변화
Fig. 12. $r(k)$ variation to the time

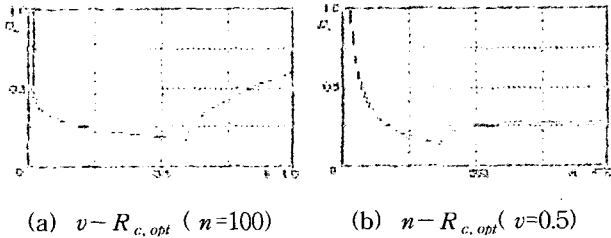


(a) $v = 0.3$ (b) $v = 0.75$
그림 13. 방법 2에 의한 $R_c - r_{conv.}$ 그래프
Fig. 13. $R_c - r_{conv.}$ graph using method no. 2



(a) $v = 0.3$ (b) $v = 0.75$
 그림 14. 방법 3에 의한 $R_c - t$ 그래프.

Fig. 14. $R_c - t$ graph using method no. 3



(a) $v - R_{c, opt} (n=100)$ (b) $n - R_{c, opt} (v=0.5)$
 그림 15. 속도와 로봇수의 변화에 따른 최적반경

Fig. 15. Optimal radius to the variation of robot number and its velocity

6. 결 론

본 논문에서는 군집 로봇시스템에서 군 행동을 위한 지역적 통신시스템의 정보 전파를 해석하였다. 로봇이 획득한 정보를 로봇 군 전체로 전파 할 경우와 주변의 로봇에게 정보를 전파하고 작업을 완료하면 정보를 소실하는 경우에 대하여 정보전파를 모델링 하였고, 이 모델링한 방정식을 토대로 정보를 가진 로봇의 비율의 변화가 카오스적인 현상을 나타내는지 살펴보았다. 해석 결과 정보를 가진 로봇의 비율은 로봇의 밀도가 높고 이동속도가 크면 로봇의 통신 반경이 작을수록 카오스 현상이 일어날 가능성이 높았다. 통신반경이 작다는 것은 그만큼 로봇간의 통신 간섭이 적어짐을 의미하기 때문에 통신반경이 작아지면서 로봇의 밀도 및 속도가 증가하면 로봇이 정보를 획득할 확률은 높아진다. 본 시뮬레이션에 사용한 조건으로 살펴보면 카오스 현상이 나타나는 구간은 로봇의 밀도가 매우 높고 속도가 너무 빨라서 물리적으로 실현하기 어려운 조건임을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법을 여러 가지 다른 시스템에도 적용할 수 있는 일반적인 방법이다. 로봇의 크기가 더 크거나 작아질 경우 시스템 파라미터가 모두 달라지며 이때 역시 카오스 현상이 발생 할 수 있다. 또한 본 논문에서는 정보전파 방정식을 이용하여 최적의 통신반경을 구하기 위한 3가지 방법을 제안하였다. 정보소실이 없는 경우 방법 1이 가장 적당하였고 정보소실이 있는 경우에는 작업의 양이 적을 경우에는 방법 3 이, 작업의 수가 많은 경우에는 방법 2가 적당하였다. 또한 카오스 현상이 발생하는 파라미터 범위에서는 방법 2를 통하여 카오스 현상이 일어나는 구간을 피하여 최적의 통신반경을 구할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Arai, E. Pagello, and L. E. Parker, "Advances in multirobot systems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp.655 - 661, Oct. 2002.
- [2] V. Kumarathanan and T. Nanayakkara, "Intelligent collaboration among robotic agents for landmine detection," *Proc. of Sri Lanka Association for Artificial Intelligence*, 2005.
- [3] D. P. Stormont, "Robot swarm for planetary exploration," *Proc. Fourth Int. Conf. on Robotics*, pp. 347 - 352, 2000.
- [4] H.B. Jun, K.B. Sim, "Emergence of cooperative behavior based on learning and evolution in collective autonomous mobile robots," *Journal of Electrical Engineering and Information Science*, vol. 3, 1998.
- [5] F. Mondada, G. C. Pettinaro, A. Guignard, I. W. Kwee, D. Floreano, J. Deneubourg, S. Nolfi, L. M Gambardella, and M. Dorigo, "Swarm-Bot: A new distributed robotic concept," *Autonomous Robots*, No. 17, pp. 193-221, 2004.
- [6] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발," *대한전자공학회 논문지*, 제34권 S편, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3.
- [7] T. R. Balch and R. C. Arkin, "Communication in reactive multiagent robotic systems," *Autonomous Robots*, Vol. 1, No. 1, pp.1 - 25, 1994.
- [8] M. J. Mataric, "Behavior-based control: Examples from navigation, learning, and group behavior," *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 9, no. 2, pp. 323-336, 1997.
- [9] S. Premvuti, J. Wang, "A medium access protocol (CSMA/CD-W) supporting wireless inter-robot communication in distributed robotic systems," *Distributed Autonomous Robotic Systems*, pp. 165-175, 1994.
- [10] R.L. Devaney, *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*, Addison-Wesley, p.50, 1989.

저 자 소개



심귀보(Kwee-Bo Sim)

1990년 : The University of Tokyo
 전자공학과 공학박사
 1991년 ~ 현재 : 중앙대학교
 전자전기공학부 교수

[제15권 6호(2005년 12월호) 참조]

2006년 ~ 현재 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 회장
 E-mail : kbsim@cau.ac.kr



이동욱(Dong-Wook Lee)

1996년 : 중앙대학교 제어계측공학과
공학사

1998년 : 동 대학원 제어계측공학과
공학석사

2000년 : 동 대학원 제어계측공학과
공학박사

2002년~2004년 : 중앙대학교 정보통신연구원 연구전담교수

2004년~2005년 : The Univ. of Tennessee, Dept. of
Electrical and Computer Engineering,
박사 후 연구원

2005년~현재 : 한국생산기술연구원 로봇기술본부 선임연구원

관심분야 : 인공생명, 군지능, 진화연산, 인공면역계, 지능시
스템, 인공두뇌 등

E-mail : dwlee@kitech.re.kr