

論文99-36S-6-8

자율이동로봇군의 협조행동을 위한 지역적 통신 방식에 있어서 정보전파 해석 및 카오스 현상 분석

(An Analysis of Information Propagation and Chaotic Phenomena in Local Communication Method for Cooperative Behavior of Collective Autonomous Mobile Robots)

李 東 昱 *, 沈 貴 寶 **

(Dong-Wook Lee and Kwee-Bo Sim)

요 약

자율분산로봇시스템에서 협조행동을 위한 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 통신에 의한 정보의 전파를 해석하고 최적의 통신반경을 찾기 위한 3가지 방법을 제시한다. 또한 로봇이 정보를 획득하고 소실할 경우 발생하는 군의 카오스 행동을 피하기 위한 조건을 찾는다.

Abstract

The sensing and communication abilities of a mobile robot are essential to cooperative behavior in distributed autonomous robotic systems. 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 three methods with different conditions. Also, to avoid chaotic behavior which occurs when a robot obtains and loses information, we find stable condition of information propagation.

* 正會員, 中央大學校 制御計測學科

(Dept. of Control and Instrumentation Chung-Ang University)

** 正會員, 中央大學校 電子電氣工學科

(School. of Electrical and Electronics Engineering Chung-Ang University)

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

接受日字:1998年11月11日, 수정완료일:1999年5月26日

I. 서 론

여러 대의 자율이동로봇으로 구성된 자율분산시스템에서 합목적적인 협조작업을 수행하려고 하는 경우 로봇간의 통신이 반드시 필요하다^[1]. 만약 통신을 사용하지 않고 고도한 협조행동을 실현하기 위해서는 상대의 행동을 미리 알아차리는 추론기능이 필요하게 될 것이다. 이는 개체의 복잡성을 한층 더 가중시키며 유용한 정보를 다른 로봇에게 전달하지 못하여 작업효율도 떨어뜨린다. 또한 자율분산로봇시스템에서 로봇간의

협조작업 이외에도 학습된 정보를 교환하여 진화하는 방법^[2] 및 군행동 조절을 위한 의견 조정 방법^[3], 창발 행동(emergent behavior)의 실현^[4] 등을 하기 위하여 로봇이 통신을 이용하는 것은 필수적이다.

한편 지금까지의 자율이동로봇의 통신에 관한 연구는 사용하는 통신수단에 따라 크게 전역적 통신(Global Communication)^[5]과 지역적 통신(Local Communication)^[1]으로 나누어진다. 전역적 통신은 주로 광역성이 있는 매체를 이용하며 대상으로 하는 로봇의 수가 적은 경우에 유리하다. 그러나 대상으로 하는 로봇의 개수가 증가하면 통신 능력의 제한이나 로봇 상호간의 간섭, 코스트의 증가 등의 문제가 발생하여 모든 로봇이 서로 통신하는 것이 곤란하며 이 경우에는 후자인 지역적 통신이 유리하다.

자율분산로봇시스템에서는 사실상 모든 로봇의 정보를 알 필요가 없으며 주변에 있는 로봇의 정보와 자신이 처한 주변의 상황만 인식하여 행동하면 된다. 따라서 지역적 통신방법을 사용함으로써 불필요한 정보의 범람을 막을 수 있으며 정보의 간섭현상도 생기지 않는다. 지역적 통신을 하는 자율이동로봇이 다수 존재하는 시스템에서는 정보가 순간적으로 광범위하게 전달되지 않는다. 따라서 지역적 통신만이 이용되는 시스템에서 효율적인 협조 행동의 실행은 작업에 필요한 로봇이 한곳에 모이는 시간, 작업에 따라서 정보를 전파하는 범위, 주위 환경에 관한 정보의 전달방법 등이 매우 중요하다. 이를 위해서는 지역적 통신에 의한 정보전달과정에 대한 해석이 필요하다. 또한 대역적 통신에서는 문제가 되지 않았던 상대로봇의 이동에 의한 환경의 동적인 변화도 고려하지 않으면 안 된다.

본 저자들은 자율이동로봇의 협조행동을 위한 지역적 통신시스템을 개발하였으며 군 전체로 정보를 전파하는 매커니즘을 모델링하여 최적의 통신 파라미터를 찾았다^[1]. 본 논문에서는 정보를 군 전체로 전달하는 과정에 대한 모델링 뿐 아니라 서로 다른 여러 개의 작업이 존재하는 시스템에서 각 작업을 발현한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전달하고 작업을 수행하는 시스템에 대하여 정보전파 및 정보소실을 모델링한다. 그리고 이때 발생하는 카오스 현상에 대한 분석을 시도한다. 또한 각각의 경우에 대하여 최적의 통신반경을 구하기 위한 방법을 제시하고 그 유효성을 살펴본다.

II. 지역적 통신의 정보전파 해석

다수의 자율이동로봇으로 구성된 시스템에서 지역적 통신은 적외선 통신에 의해 쉽게 구현 될 수 있다. 적외선 매체를 이용한 통신은 직접 대면하는 로봇과 정보를 교환함으로써 지역적 통신을 실현하며, 정보전달이 용이하고 구현하기가 쉬운 장점을 가지고 있다. 또한 송수신부의 각도를 조절하거나 적외선의 강도를 조절함으로써 통신반경을 조절할 수 있다. 이 방법은 적외선이 직진하는 성질을 이용하기 때문에 모든 방향의 로봇과 통신을 하기 위해서는 최소 8개 이상의 적외선 센서를 전방향으로 설치하게 된다. 한편, 지역적 통신에서의 통신모델로는 주변의 로봇에게 일방적으로 자신의 정보를 전달하는 사인보드 모델(sign board model)과 특정한 로봇이 협조를 위해 서로 의견을 주고받기 위한 정보전달 모델(message passing model)이 제안되어 있다. 이들 모델은 함께 사용함으로써 정보를 전달하거나 팀을 구성하는 등의 협조행동을 수행한다^[1].

본 절에서는 지역적 통신을 하는 자율이동로봇군에서 최적의 통신 파라미터를 결정하기 위하여 정보를 군 전체로 전파하는 경우와 작업을 발현한 로봇이 주변의 로봇에게 정보를 전파하고 작업을 수행하는 경우에 대하여 정보전파를 모델링한다. 2.1절에서는 획득한 정보를 군 전체로 전파하는 경우의 정보전파 방정식을 소개하며, 2.2절에서는 이 방정식을 토대로 작업을 수행하고 정보를 소실할 경우에 대하여 정보전파를 모델링한다.

1. 정보 전파 방정식

면적 $S [m^2]$ 의 작업공간에 통신반경이 R_c 인 n 대의 로봇이 존재하고 w 개의 사건 또는 작업이 있을 경우, 이 정보를 획득한 로봇의 비율($r(t)$)의 변화는 로봇의 이동속도(v), 정보를 가지고 있지 않은 로봇의 비율($1-r(t)$)에 비례한다. 따라서 정보를 획득한 로봇의 비율의 순간 변화량은 (1)식과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\frac{dr(t)}{dt} = av(1-r(t))(E(t)r(t) + I(t)) \quad (1)$$

단, a 는 비례상수, $E(t)$ 는 통신범위 내에 정보의 간섭 없이 로봇이 존재할 확률, $I(t)$ 는 로봇이 작업을

발견할 확률이다. 이때 $E(t)$ 및 $I(t)$ 는 S, R_c, n, w 의 함수로서 표현된다 [1] 참조.

여기서 $a=avE(t), b=avI(t)$ 라 놓으면 (1)식은 (2)식과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = (1 - r(t))(ax(t) + b) \quad (2)$$

이 식을 지역적 통신의 정보전파 방정식이라 한다.

2. 정보소실을 고려한 정보전파 방정식

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

로봇 하나가 하나의 작업을 수행하는 시간의 평균 값을 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 (3)식과 같다.

$$T_1(t) = \frac{T}{\text{작업 중인 로봇 수}} = \frac{T}{n \cdot r(t)} \quad (3)$$

역으로, t 시각에 1초 동안 수행하는 작업량 $Q(t)$ 는 (3)식의 역수로서 (4)식과 같이 표현된다.

$$Q(t) = \frac{n \cdot r(t)}{T} \quad (4)$$

매 시 $Q(t)$ 개의 작업이 끝나고 이에 따라 정보를 소실하는 로봇이 생기는데, t 시각에 정보를 소실하는 로봇 수 $n_f(t)$ 는 (5)식과 같다.

$$\begin{aligned} n_f(t) &= Q(t) \times (\text{작업 하나 당 일하는 로봇 수}) \\ &= \frac{n \cdot r(t)}{T} \cdot \frac{n \cdot r(t)}{w} = \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 단위시간동안 정보를 소실하는 로봇의 비율 $r_f(t)$ 는 $n_f(t)$ 를 전체의 로봇 개수로 나눈 값으로서 (6)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_f(t) = n_f(t) \cdot \frac{1}{n}$$

$$= \frac{n^2 r^2(t)}{T \cdot w} \cdot \frac{1}{n} = \frac{n}{T \cdot w} r^2(t) \quad (6)$$

결국, 정보의 소실을 고려한 정보전파 방정식은 (2)식에 $r_f(t)$ 의 항을 추가한 형태로 (7)식과 같다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = (1 - r(t))(ax(t) + b) - r_f(t) \quad (7)$$

(6)식을 (7)식에 대입하여 정리하면 (8)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = -(a+c)r^2(t) + (a-b)r(t) + b \quad (8)$$

단, $c = \frac{n}{T \cdot w}$ 이다.

이상에서 유도한 정보전파 방정식은 정보를 소실하는 로봇을 메시지 확률로서 계산했기 때문에 메시지 연속적으로 정보를 소실하는 로봇이 발생하지만 실제적으로는 한 작업이 끝나면 작업을 하던 로봇이 동시에 정보를 소실한다. 그러나 (8)식은 대략적으로 정보를 가지고 있는 로봇의 비율의 변화를 예측하려고 할 때 유용하며, 로봇과 작업의 수가 많을수록 실제의 값과 거의 같아진다.

III. 정보소실을 고려한 정보전파 방정식의 카오스 현상 분석

앞의 II-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 (8)식은 logistic equation의 형태로서 파라미터의 값에 따라서 카오스 현상이 나타난다. 본 절에서는 정보를 가진 로봇의 비율이 불규칙하게 변하는 조건을 피하기 위하여 정보전파 방정식의 카오스 분석을 행한다.

카오스 현상(chaotic behavior)은 일반적으로 다음과 같이 정의된다 [6].

정의: v 를 집합이라고 하면 아래와 같은 조건에서 $f: v \rightarrow v$ 는 v 에 대하여 카오스적이라고 한다.

1. f 가 초기조건에 민감하게 의존한다.

2. f 가 위상학적(topological)으로 변화(transitive)한다.
3. 주기 점(periodic points)들이 v 에 밀집(dense)하다.

카오스 현상의 정의 1과 같이 정보를 가진 로봇의 비율이 초기조건에 매우 민감하게 의존한다면 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 (8)식을 차분 방정식의 형태로 고치고 정리하면 (9)식이 얻어진다.

$$r(k+1) = -(a+c)r^2(k) + (a-b+1)r(k) + b \quad (9)$$

(8)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 (9)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 (10)식과 같다.

$$\begin{aligned} r(k+1) &= r(k)(a+1-(a+c)r(k)) \\ &= (a+c)r(k)\left(\frac{a+1}{a+c} - r(k)\right) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 특수한 경우로서 $c=1$ 일 때를 생각해 보자. (11)식은 c 를 고정함으로써 파라미터를 한 개로 줄인 식이다.

$$r(k+1) = (a+1)r(k)(1-r(k)) \quad (11)$$

a 를 0에서 3까지 증가시키면서 $r(k)$ 의 수렴성을 살펴보면 그림 1(a)와 같은 그래프가 나온다. 그래프에 나타나있는 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 최대값인 0.65로 수렴하고 그 이후는 수렴점이 하나 이상 존재한다.

특히, a 가 약 2.5 이상이 되면 수렴하는 점이 사라지면서 카오스 현상이 나타난다. 한편, 그림 1(b)는 c 의 값을 2로 하였을 때의 그래프이다. 그림 1(a)와 비교해 보면 카오스가 일어나는 분기점은 똑같고 단지 그 값만 줄어들었을 뿐이다. 따라서 c 의 값은 카오스 영역과는 무관함을 알 수 있다.

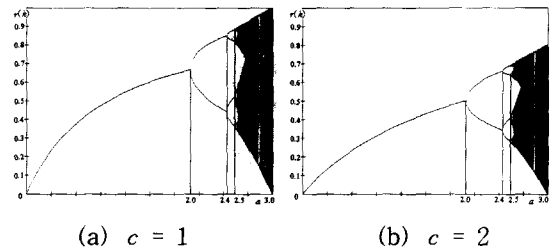


그림 1. a 의 변화에 따른 $r(k)$ 의 분기도.
Fig. 1. Bifurcation diagram of $r(k)$ by changing a .

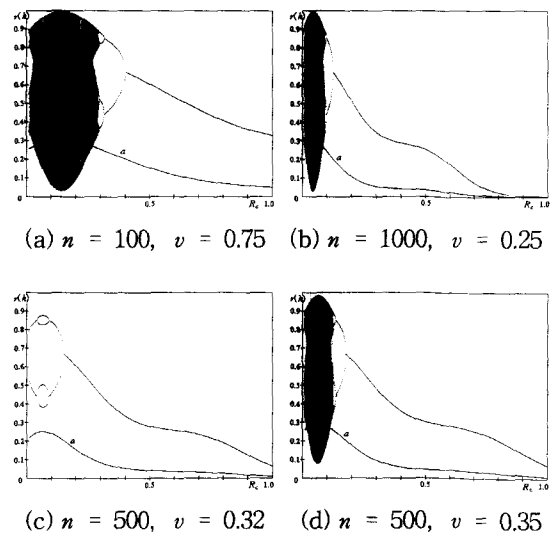


그림 2. n 과 v 가 주어졌을 때 R_c 의 변화에 따른 a 값 및 $r(k)$ 의 수렴 값.(가로축: R_c , 세로축: $r(k)$ 및 $a(\times 0.1)$)
Fig. 2. The converging value of $r(k)$ by changing R_c and a when n and v is determined.

위의 그래프로부터 파라미터 값의 범위에 따라서 카오스 현상이 나타남을 알 수 있었다. 이번에는 통신 반경(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 2는 $S=25$, $c=1$, n 과 v 가 각각 (a)~(d)의 조건과 같이 주어졌을 때 R_c 의 값에 따른 $x(k)$ 의 분기도를 나타낸 그래프이다. 각 그래프의 아래 곡선은 a 값, 위의 곡선은 $x(k)$ 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.

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.

VI. 최적의 통신 파라미터

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

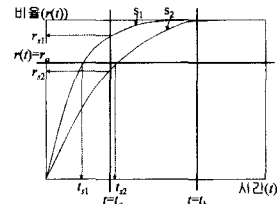
1. 최적의 통신반경을 구하는 방법

최적의 통신반경을 구하기 위하여 고정시켜 기준으로 삼아야 하는 양과 이때 최적화 시키기 위한 양을

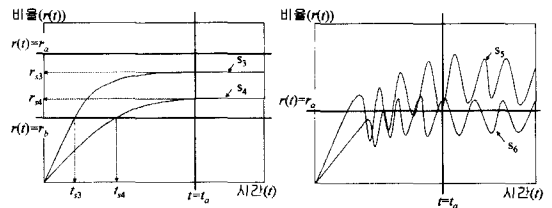
결정해야 한다. 일반적으로 정보전파 시간을 최소화하거나 정보를 획득한 로봇의 비율을 최대화하는데 이때 기준으로 삼는 양에 따라 표 1과 같은 3가지 방법으로 나눌 수 있다.

표 1. 최적의 통신반경을 구하기 위한 방법
Table 1. The method of finding an optimal communication radius.

	기준량	측정량	최적화
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		



(a) 단조증가, $x(t)$ 의 수렴 값이 1일 때



(b) 단조증가, $x(t)$ 의 수렴 값이 1보다 작을 때 (c) 카오스 행동, $x(t)$ 의 수렴 값이 없을 때

그림 3. 여러 가지 패턴의 $x(t)$ 곡선
Fig. 3. $x(t)$ curve of various patterns.

그림 3은 여러 가지 경우에 있어서 $x(t)$ 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 $x(t) = r_a$ 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 3(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 3(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 3(c)는 $r(t)$ 의 수렴 값이 없으며 카오스 행동을 나타낼 때의 그래프이다. 이 경우는 방법 1과 방법 2를 이용해서 비교를 할 수 없다.

이상의 내용을 종합해 보면, 그림 3(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 3(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 3(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.

2. 정보소실이 없는 시스템

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 4는 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 5는 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.

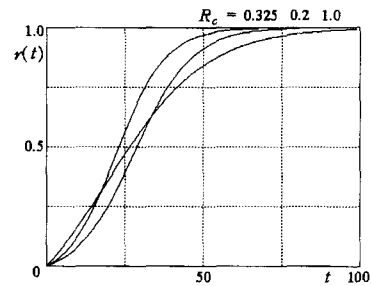


그림 4. $r(t)$ 그래프
Fig. 4. $r(t)$ curve.

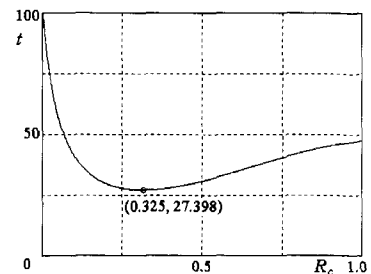


그림 5. 방법 1에 의한 R_c-t ($r(t)=0.8$)
Fig. 5. R_c-t curve by method 1 ($r(t)=0.8$).

3. 정보소실이 있는 시스템

정보소실이 있는 경우에는 정보를 가진 로봇의 비율이 1이하의 비율로 수렴하거나 변동한다. 따라서 이와 같은 경우에는 방법 2 또는 방법 3을 사용한다. 방법 2는 측정시간을 적당히 길게 두어서 수렴하는 비율

을 가지고 최적반경을 구하며 방법 3은 일정한 양의 작업을 주고 작업을 완료하는데 걸리는 시간을 측정함으로써 작업 효율을 관측한다.

그림 6~8은 $S=25$, $n=100$, $w=10$ 일 때의 그래프이다. 그림 6은 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 6(a)는 정보를 가진 로봇의 비율이 로봇의 한 값(0.413)으로 수렴하고 있으며 그림 6(b)는 카오스 행동을 보이고 있다.

그림 7은 방법 2에서 기준시간을 크게 잡고 통신반경에 따른 $r(k)$ 의 수렴 값(이하 $r_{conv.}$)을 나타낸 그래프이고, 그림 8은 방법 3을 이용해 일정량의 작업을 주고 수행시간을 나타낸 그래프이다. 그림 7(a)에서 최적의 통신반경은 $r_{conv.}=0.413$ 일 때의 반경인 0.235이며, 그림 7(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 7(a)와 그림 8(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 8(b)는 카오스 현상이 있는 경우인데 그래프를 보면 알 수 있지만 카오스가 일어나는 구간에서는 반경에 상관없이 작업 수행능력이 대체로 비슷하다. 따라서, 그림 7(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 9의 (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 증

가한다.

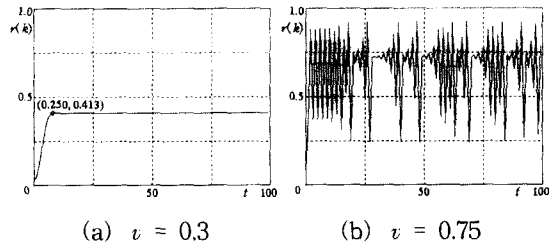


그림 6. 시간에 따른 $r(k)$ 의 변화
Fig. 6. $r(k)$ curve.

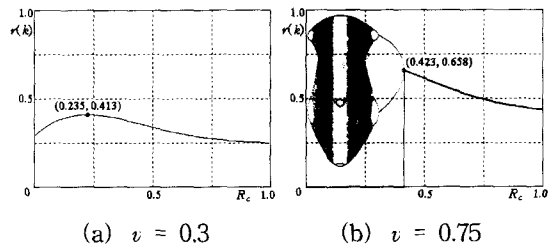


그림 7. 방법 2에 의한 $R_c - r_{conv.}$ 그래프
Fig. 7. $R_c - r_{conv.}$ curve by method 2.

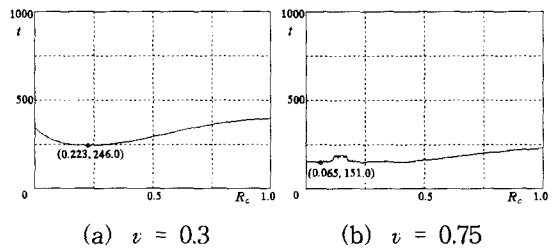


그림 8. 방법 3에 의한 $R_c - t$ 그래프.
Fig. 8. $R_c - t$ curve by method 3.

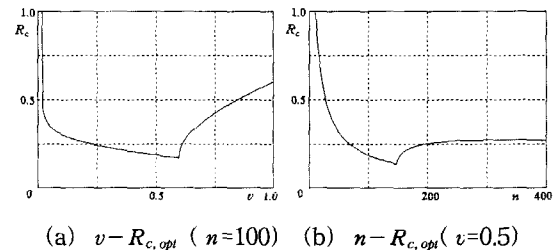


그림 9. 속도와 로봇수의 변화에 따른 최적반경.
Fig. 9. An optimal radius by changing the velocity and the number of robots.

그림 6~9의 그래프는 작업을 수행하면 수행 한 만큼 작업을 다시 공급해 주는 상황에서의 최적의 통신 반경을 구한 것이다. 이때 카오스 행동을 나타내는 경

우는 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 7(b)와 그림 8(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.

V. 결 론

현재까지는 자율이동로봇군의 지역적 통신시스템에 대하여 정보전파를 모델링한 경우가 거의 없었다. 따라서 최적의 통신반경을 구하는 방법은 경험에 의존할 수밖에 없었다. 앞으로 로봇의 기술이 발전하고 시대가 점점 다양화 되어가면서 다수의 로봇이 협조적으로 작업을 수행하는 경우가 많이 발생할 것으로 예상된다. 예를 들면 다수의 로봇이 작업하는 시스템을 통하여 화산, 해저, 지하에서의 자원 탐사 및 과학 탐사, 강이나 해저의 쓰레기 수거 및 자료 채취, 지뢰 탐사, 다수의 소형 마이크로 로봇에 의한 오염 물질 정화 등 많은 응용분야를 생각해 볼 수 있다. 이와 같은 시스템에서 작업 효율을 높이기 위하여 시스템을 모델링하고, 최적의 파라미터를 찾는 것은 매우 중요한 일이 될 것이다.

본 논문에서는 자율분산로봇시스템에서 협조행동을 위한 지역적 통신시스템의 정보전파를 해석하였다. 로봇이 획득한 정보를 로봇 군 전체로 전파 할 경우와 주변의 로봇에게 정보를 전파하고 작업을 완료하면 정보를 소실하는 경우에 대하여 정보전파를 모델링하였고, 이 모델링한 방정식을 토대로 정보를 가진 로봇의 비율의 변화가 카오스적인 현상을 나타내는지 살펴보았다. 해석 결과 정보를 가진 로봇의 비율은 로봇의 밀도가 높고 이동속도가 크며 로봇의 통신 반경이 작을수록 카오스 현상이 일어날 가능성이 높았다. 통신 반경이 작다는 것은 그 만큼 로봇간의 통신 간섭이 적어짐을 의미하기 때문에 통신반경이 작아지면서 로봇의 밀도 및 속도가 증가하면 로봇이 정보를 획득할 확률은 높아진다. 본 시뮬레이션에 사용한 조건을 살펴보면 카오스 현상이 나타나는 구간은 로봇의 밀도가 매우 높고 속도가 매우 빠른 조건임을 알 수 있다. 본

논문에서 제안한 방법은 여러 가지 조건이 다른 시스템에도 적용할 수 있는 일반적인 방법이기 때문에 로봇의 크기가 더 크거나 작아지는 것과 같이 시스템 파라미터가 달라지는 경우에도 카오스 현상을 예측할 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 3이, 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] 이동욱, 심귀보, "자율이동로봇군의 협조행동을 위한 통신시스템의 개발," 대한전자공학회 논문지, 제34권 S편, 제3호, pp. 33-45, 1997. 3
- [2] 이동욱, 심귀보, "강화학습과 분산유전알고리즘을 이용한 자율이동로봇군의 행동학습 및 진화," 대한전자공학회 논문지, 제34권 S편, 제8호, pp. 56-64, 1997. 8
- [3] 이동욱, 심귀보, "인공면역계 기반의 자율이동로봇군의 협조행동전략 결정," 대한전자공학회 논문지, 제35권, S편, 제3호, pp. 102-109, 1998. 3
- [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] 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.
- [6] R.L. Devaney, An Introduction to Chaotic Dynamical Systems, Addison-Wesley, p. 50, 1989.

저 자 소개



李 東 暉(正會員)

1996년 중앙대학교 제어계측공학과 학사. 1998년 중앙대학교 제어계측학과 석사. 1998년 ~ 현재 중앙대학교 제어계측학과 박사과정. 주관심분야는: 인공생명, 인공두뇌, 인공면역계, 자율분산시스템, 가상현실

등



沈 貴 寶(正會員)

1984년 중앙대학교 전자공학과 학사. 1986년 중앙대학교 전자공학과 석사. 1990년 The University of Tokyo 전자공학과 박사. 1990년 동경대학 생산기술연구소 연구원. 1998년 ~ 현재 한국 퍼지 및 지능시스템학회 이사 및 논문지 편집위원. 1999년 ~ 현재 한국 뇌학회 학술위원. 1991년 ~ 현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수 재직. 주관심분야는 인공생명, 진화연산, 지능로봇시스템, 뉴로-퍼지 및 소프트 컴퓨팅, 자율분산시스템, 로봇 비전, 진화하는 하드웨어, 인공면역계 등