

분산 무선 네트워크에서 생체모방 컨센서스 알고리즘의 성능 평가

최현호*

국립한경대학교 전기전자제어공학과

Performance Evaluation of Biologically Inspired Consensus Algorithm in Distributed Wireless Networks

Hyun-Ho Choi*

Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University

hhchoi@hknu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 다양한 생명체들의 동조 원리를 모방한 컨센서스 알고리즘을 소개하고 CSMA/CA 기반의 분산 무선 네트워크에 컨센서스 알고리즘을 적용하여 그 성능을 살펴본다. 다양한 파라미터에 따른 컨센서스 성능 변화를 살펴보고 컨센서스를 빠르게 달성하기 위한 최적 파라미터 및 프로토콜 운용 방법을 제시한다.

1. 서론

자연계에서는 반딧불이, 새나 물고기 떼, 심장 박동 조절 세포 등 다양한 생명체에서 동조 현상을 볼 수 있다. 이러한 자연계 동조 현상을 모방하여 다중 에이전트 네트워크 시스템에서는 컨센서스 (consensus) 알고리즘을 개발하였다 [1]. 컨센서스는 각 노드의 어떠한 상태 값이 서로 동일하게 됨을 의미하며, 컨센서스 알고리즘은 컨센서스를 위해 각 노드가 행동하는 규칙을 일컫는다 [2].

컨센서스 알고리즘은 분산 시간 및 주파수 동기화, 분산 공평 자원 할당, 빠른 분산 데이터 공유, 센싱 정보의 분산 퓨전 등 다양한 통신 네트워크 분야에 적용되어 사용될 수 있다 [1]. 이때 중요한 성능 메트릭은 얼마나 빨리 원하는 컨센서스를 달성할 수 있는가이다. 하지만 지금까지의 컨센서스 관련 연구는 알고리즘 자체의 수렴 속도에 중점을 두었지 실제 네트워크 환경에서 컨센서스 알고리즘의 동작시 발생하는 지연에 대해서는 고려하지 않았다 [2]. 알고리즘 자체는 노드간 정보 공유가 많을수록 수렴 속도가 빨라지므로 모든 노드가 다같이 협력하는 것이 가장 이상적이지만, 실제 네트워크 상황에서는 협력 노드 수가 증가할수록 오버헤드가 커지므로 이를 고려하여 전체적인 컨센서스 알고리즘의 성능을 파악해야 한다.

본 논문에서는 CSMA/CA 기반의 분산 무선 네트워크 환경에서 주어진 노드들이 컨센서스를 달성하고자 할 때, 다양한 파라미터에 따른 컨센서스 성능 변화를 살펴본다. 이를 통해 컨센서스 달성 시간을 최소화하기 위한 최적 파라미터를 도출하고 컨센서스 프로토콜의 운용 방법을 제시한다.

2. 컨센서스 알고리즘

컨센서스 알고리즘은 연속/이산시간에 따라, 상태 값의 처리 방식에 따라 몇 가지 형태가 존재하는데, 본 논문에서는 다음 식으로 표현되는 이산시간 기반의 컨센서스 알고리즘을 고려한다 [2].

$$x_i(k+1) = \frac{1}{1+|N_i|} \left(x_i(k) + \sum_{j \in N_i} x_j(k) \right) \quad (1)$$

여기에서 $x_i(k)$ 는 k 시간에 노드 i 의 상태 값, N_i 는 노드 i 와 연결 가능한 이웃 노드의 집합을 나타내고, $|N_i|$ 는 노드 i 의 이웃 노드의 개수를 나타낸다. 이 컨센서스 알고리즘에 따르면 각 노드는 현재 자신과 이웃 노드들의 상태 값의 평균으로 다음 상태 값을 결정한다. 즉, 각 노드는 주변 이웃 정보만을 가지고 분산적으로 지역적인 평균(local average)을 취한다. 이와 같은 반복 동작은 수행 횟수가 증가함에 따라 모든 노드의 상태 값이 동일한 값으로 수렴하게 되는($x_i \approx x_j \forall i, j$) 컨센서스를 이루게 된다.

또한 식(1)은 다음과 같은 행렬 연산 형태로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\mathbf{I} + \mathbf{D})^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{x}(k) \\ &= \mathbf{P}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

전체 참여 노드 수가 N 일 때 \mathbf{I} 는 $N \times N$ 단위 행렬이며, \mathbf{D} 는 주대각 성분이 각 노드의 이웃 노드 개수인 대각 행렬이며, \mathbf{A} 는 i, j 노드간 연결성을 나타내는 인접 행렬이다. 이때 페론(Perron)이라 불리는 행렬 \mathbf{P} 는 $(\mathbf{I} + \mathbf{D})^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{A})$ 로 정의되는데, 이론적으로 행렬 \mathbf{P} 의 두 번째로 큰 고유값(eigenvalue)이 작을수록 컨센서스 알고리즘의 수렴이 빠르다는 사실이 밝혀져 있다.

지금까지 연구된 컨센서스 이론은 컨센서스 알고리즘의 수렴여부 및 수렴속도의 경향성은 알려주지만, 실제 컨센서스 달성 시간은 계산해주지 못한다. 이는 노드 간 연결 토폴로지와 노드 별 상태 값 분포를 반영하여 시뮬레이션을 통해 구해야 한다.

3. 분산 무선 네트워크에서의 전송 지연

컨센서스 알고리즘은 노드간 상태 정보를 교환해야 하므로 노드간 패킷 전송 지연이 발생하게 된다. 고려하는 분산 무선 네트워크에서는 CSMA/CA의 사용을 가정하여 패킷 전송 지연을 도출하고 컨센서스 달성 시간에 반영한다. 이때 노드 수에 따라 접속 확률을 쉽게 제어할 수 있는 p -persistent CSMA 방식을 고려한다.

모든 노드가 p 의 확률로 패킷을 전송하고자 할 때 발생하는 평균 전송 지연은 다음과 같이 계산된다 [3].

$$D = \sum_{i=1}^{\infty} i(T_{idle} + T_{data})(1 - P_s)^{i-1} P_s = \frac{T_{idle} + T_{data}}{P_s} \quad (3)$$

이때 현재 슬롯에서 한 명이라도 접속을 시도할 확률은 $P_r = 1 - (1 - p)^{N_i}$ 가 되며 접속 성공확률과 전송이 없는 idle 시간은 각각 아래와 같이 주어진다.

$$P_s = \frac{N_i p (1 - p)^{N_i - 1}}{P_r}, T_{idle} = T_s \sum_{i=1}^{\infty} i (1 - P_r)^{i-1} P_r = \frac{T_s}{P_r} \quad (4)$$

따라서 컨센서스 달성에 걸리는 시간은 시뮬레이션을 통해 구한 수렴에 필요한 알고리즘 반복 횟수와 식(3)으로 주어지는 전송지연의 곱으로 결정된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

표 1은 사용한 시뮬레이션 파라미터를 보여준다. 무선전송 파라미터는 IEEE 802.11 표준을 참고하였고[4], 네트워크 토폴로지는 간단한 정규(regular) 네트워크[2]를 가정하여 각 노드 별 이웃 노드 수를 모두 동일하게 증가시켜가며 성능을 보았다. 컨센서스 알고리즘의 수렴조건은 모든 노드의 상태 값 벡터의 2-norm 값이 10^{-2} 보다 작은 경우로 결정하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Name	Value
Persistent probability (p)	0.03~0.05
Duration of time slot (T_s)	9 μ s
Transmitted packet size	64 byte
Transmission rate	6 Mb/s
Number of participating nodes (N)	10~500
State value of each node	Uniform(1,100)

그림 1은 협력 이웃 노드 수의 증가에 따른 컨센서스 알고리즘의 반복 횟수, 평균 지연, 컨센서스 달성 시간을 보여준다. 이웃 노드 수가 증가할수록 알고리즘의 반복 횟수는 기하급수적으로 줄어들지만 노드 간 정보 공유 지연은 기하급수적으로 증가한다. 따라서 이 두 성능의 곱으로 결정되는 컨센서스 달성 시간을 보면 아래로 볼록한 형태가 되며 이웃 노드 수가 36일 때 가장 빨리 컨센서스를 달성함을 알 수 있다.

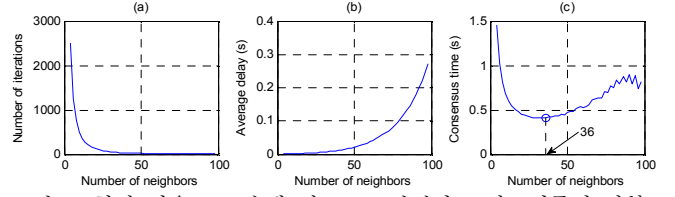


그림 1. 협력 이웃노드 수에 따른 (a) 컨센서스 알고리즘의 반복 횟수, (b) 평균 전송 지연, (c) 컨센서스 달성 시간 ($p=0.05$ 일 때)

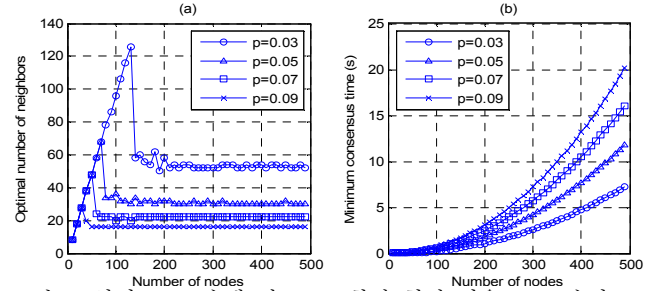


그림 2. 참여 노드 수에 따른 (a) 최적 협력 이웃 노드 수와 (b) 최소 컨센서스 달성 시간

그림 2는 컨센서스에 참여하는 전체 노드 수에 따른 최적 협력 이웃 노드 수와 최소 컨센서스 달성 시간을 보여준다. 참여 노드 수가 작을 때는 최적 이웃 노드 수가 선형적으로 증가하다가 어느 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하게 된다. 즉, 네트워크의 규모가 작을 때에는 모든 노드가 협력하는 것이 알고리즘의 반복 횟수가 줄어 성능에 좋지만, 어느 이상으로 네트워크 규모가 커지면 전송 지연으로 인해 이웃 노드 수를 적절히 제한하는 것이 성능에 좋다. 주목할만한 점은 참여 단말 수가 어느 이상으로 증가하면 단말 수에 상관없이 최적 이웃 노드 수는 일정한 값으로 수렴해 나간다는 점으로, 이때는 접속 제어 확률 p 에만 의존한다. 아울러 컨센서스에 걸리는 최소 시간은 노드 수와 p 값이 커질수록 증가하게 된다.

5. 결론

분산 무선 네트워크에서 컨센서스 알고리즘은 이웃 노드 수에 따른 수렴 속도와 전송 지연간의 트레이드 오프로 인해 컨센서스 달성 시간을 최소화하는 최적 이웃 노드 수를 갖는다. 따라서 빠른 컨센서스를 위해서는 참여 노드 수에 따라 협력 이웃 노드 수가 제한되도록 관련 프로토콜을 운용해야 한다.

6. 참고 문헌

- [1] 최현호, “자연계 동조 현상의 이해와 공학적 활용 방안,” 한국통신학회지, 31 권, 1 호, pp. 71-81, 2014년 1월.
- [2] R. Olfati-Saber, J. Fax, and R. Murray, “Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems,” *Proc. IEEE*, vol. 95, pp. 215-233, Jan. 2007.
- [3] R. MacKenzie, T. O’Farrell, “Throughput and Delay Analysis for p -Persistent CSMA with Heterogeneous Traffic,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, pp. 2881-2891, Oct. 2010.
- [4] IEEE Std 802.11-2007: “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, 2007.

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025424).