논문 17-42-03-01 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-03 Vol.42 No.03
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.3.545

분산 네트워크에서 단말 간 동기화를 위한 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘

서 상 아◆, 윤 상 석*, 하 정 석°

Reliability-Based Adaptive Consensus Algorithm for Synchronization in a Distributed Network

Sangah Seo◆, Sangseok Yun*, Jeongseok Ha°

요 약

본 논문에서는 중앙제어 형 기반 시설 없이 단말 간 자율적인 협력을 통해 무선 통신을 수행하는 분산 네트워크에서 단말 간 동기 획득을 위한 분산 동기 알고리즘에 관해 연구하였다. 무선 통신을 수행하기 위해 단말 간 동기는 필수적으로 획득되어야 하고, 따라서 이를 위한 다양한 분산 동기 알고리즘들이 활발히 연구되어 왔다. 하지만 대부분의 분산 동기 알고리즘에 관한 연구는 네트워크에 속한 모든 단말이 예외 없이 규칙을 따르는 경우에 한정되어 있다. 이 때문에 하나 이상의 단말이 기능 고장을 일으켜 오작동을 유발하거나, 혹은 단말 간 동기 획득을 방해할 목적으로 의도적인 오작동을 일으키는 단말이 네트워크에 존재하는 경우 기존 분산 동기 알고리즘으로는 단말 간 동기 획득을 보장할 수 없다. 이에 본 논문에서는 오작동이 존재하는 분산 네트워크에서도 효과적으로 단말 간 동기를 획득할 수 있는 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘을 제안하고 실험적으로 검증하였다.

Key Words : Distributed networks, Distributed synchronization, Consensus algorithm, Malfunction

ABSTRACT

This paper investigates a synchronization algorithm for a distributed network which does not have a centralized infrastructure. In order to operate a distributed network, synchronization across distributed terminals should be acquired in advance, and hence, a plenty of distributed synchronization algorithms have been studied extensively in the past. However, most of the previous studies focus on the synchronization only in fault-free networks. Thus, if there are some malfunctioning terminals in the network, the synchronization can not be guaranteed with conventional distributed synchronization methods. In this paper, we propose a reliability-based adaptive consensus algorithm which can effectively acquire the synchronization across distributed terminals and confirm performance of the proposed algorithm by conducting numerical simulations.

Ⅰ. 서 론

최근 무선통신 기술의 발달과 휴대형 단말기 보급의 증가로 인해 모바일 데이터 트래픽이 급증하고 있다. 이러한 모바일 트래픽의 폭발적인 증가는 셀 내에서 발생하는 모든 트래픽을 기지국과 같은 하나의 중

※ 이 논문은 2015년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2015R1A2A2A01007739).
◆ First Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology School of Electrical Engineering, dks00192@kaist.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology School of Electrical Engineering, jsha@kaist.edu, 종신회원
* Korea Advanced Institute of Science and Technology School of Electrical Engineering, ssyun@kaist.ac.kr, 학생회원
논문번호 : KICS2016-11-363, Received November 26, 2016; Revised March 6, 2017; Accepted March 6, 2017

앙제어 형 기반 시설에서 처리해야하는 기존 중앙제어 형 네트워크(centralized network)에 과도한 병목 현상을 유발하게 되고, 이로 인해 모든 셀 구성원들의 통신 성능을 악화 시키는 등 치명적인 문제를 야기하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 중앙제어 형 기반 시설 없이 단말 간 자율적인 협력을 통해 무선 통신을 수행하는 분산 형 네트워크(distributed network)에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 하지만 분산 네트워크에는 네트워크에 속한 단말들을 제어할 수 있는 중앙제어 형 기반 시설이 없기 때문에 단말 간 동기 획득, 자원 할당[1], 라우팅[2] 등 다양한 기술적 장애들이 존재한다. 특히, 단말 간 동기가 사전에 획득되지 않으면 무선 통신을 시작할 수조차 없기 때문에 단말 간 동기는 분산 네트워크를 동작시키기 위해 필수적으로 획득되어야 한다[3]. 따라서 분산 네트워크의 단말 간 동기화를 위한 다양한 분산 동기 알고리즘들이 연구되고 있다[4].

컨센서스(consensus) 알고리즘은 대표적인 분산 동기 알고리즘 중 하나로, 각 단말이 자신과 이웃 단말의 상태 값을 활용하여 정해진 규칙에 따라 자신의 상태 값을 갱신하는 과정을 반복하는 것만으로 단말 간 동기를 획득하는 알고리즘이다. 컨센서스 알고리즘을 사용하는 경우 네트워크에 고립된(isolated) 단말이 존재하지 않을 때 분산 단말 간 완벽한 동기를 획득할 수 있다는 사실이 잘 알려져 있다[5-6]. 컨센서스 알고리즘에 관한 초기의 연구는 대부분 이상적인 무선 통신 채널 상태를 가정하였으나, 최근 네트워크의 토폴로지가 시간에 따라 변화하는 경우[7-8], 통신 잡음이 존재하는 경우[9-11] 등 보다 현실적인 경우에 대한 컨센서스 알고리즘의 동기화 성능 및 수렴 속도에 관한 연구[12]가 진행되고 있다.

하지만 기존의 연구는 대부분 네트워크에 속한 모든 단말이 예외 없이 동기화를 위한 규칙을 따르는 경우에 한정되어 있고, 기능 고장에 의한 오작동 혹은 단말 간 동기 획득을 방해하기 위한 악의적인 공격이 존재하는 분산 네트워크에서의 단말 간 동기 획득에 관한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 이러한 오작동/공격의 존재를 고려하는 경우에도 오작동/공격 모델이 비현실적인 경우가 대다수이고[13-15], 동기화 가능 여부 및 동기화가 가능한 경우의 수렴 속도에만 초점을 맞추고 있다.

특히, 네트워크에 속한 오작동 단말이 분산 동기 알고리즘에서 정해진 규칙에 따라 동작하지 않음으로써 전체 단말의 동기의 획득을 방해하는 등의 현실적인 오작동/공격 모델에 관한 연구는 부족한 실정이다. 뿐만 아니라, 대부분의 연구에서 동기화 성능 평가 지표로 사용하는 단말 간 완벽한 동기 획득의 경우 실제 무선 통신 네트워크에서는 전송 지연 및 잡음 등에 의해 현실적으로 실현 불가능하기 때문에, 이러한 실제적인 환경에서 단말 간 동기화에 대한 성능 지표를 고려해야 하지만, 오작동 혹은 공격이 존재하는 네트워크의 단말 간 동기화에 관한 연구에서는 이러한 부분에 관한 고려가 상대적으로 부족하다.

따라서 본 논문에서는 먼저 현실적인 오작동 혹은 악의적인 공격의 모델을 정의하고, 이러한 오작동의 존재가 현실적인 단말 간 동기화 성능 평가 척도인 평균 제곱 오차 측면에서 기존 컨센서스 알고리즘의 동기화 성능에 미치는 영향을 분석한다. 뿐만 아니라, 기존 컨센서스 알고리즘의 상태 값 갱신 규칙을 이웃 단말에 대한 신뢰도를 기반으로 적응적으로 조절함으로써 오작동 혹은 악의적인 단말로부터의 영향을 최소화할 수 있는 새로운 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘을 제안하고 다양한 환경에서 기존 컨센서스 알고리즘에 비해 향상된 동기화 성능을 획득할 수 있음을 실험을 통해 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 분산 네트워크 및 단말 간 동기화에 관한 간략한 설명과 함께 분산 네트워크에서 발생할 수 있는 다양한 토폴로지를 소개한다. 또한, 대표적인 분산 동기 알고리즘인 컨센서스 알고리즘에 관해 설명한 후 본 논문에서 고려하는 현실적인 오작동/공격 모델을 정의한다. 기존 컨센서스 알고리즘을 활용할 때 네트워크에 존재하는 오작동/공격 단말이 동기화 성능에 미치는 영향을 3장에서 분석하고, 4장에서 제안하는 분산 동기 알고리즘인 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘에 관해 소개한 후 기존 컨센서스 알고리즘과 성능을 비교한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

2.1 분산 네트워크

본 논문에서는 N개의 적법 단말이 존재하는 분산 네트워크를 고려한다. k번째 단위 시간에 적법 단말 i가 가진 상태 값을 $x_i[k]$라 하면, 네트워크에 속한 전체 적법 단말들의 상태 값들을 $N\times 1$ 벡터 $\mathbf{x}[k]=[x_1[k],x_2[k],\ldots,x_N[k]]^T$ 로 나타낼 수 있다. 벡터 $\mathbf{x}[k]$에 속한 모든 원소의 값이 동일해지는 경우 분산 네트워크는 단말 간 동기를 획득했다고 한

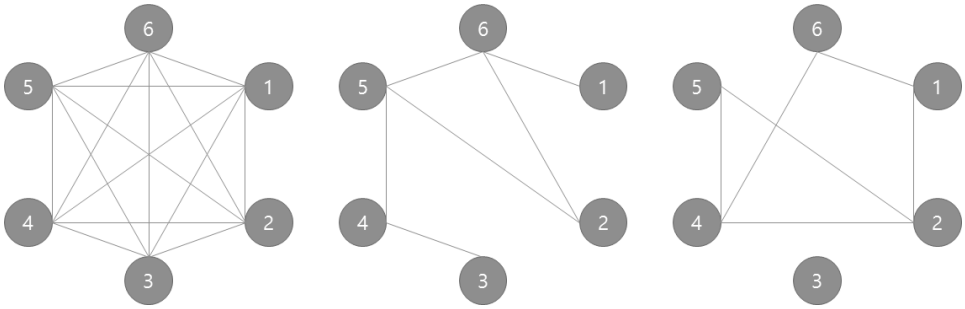


그림 1. 대표적인 분산 네트워크 토폴로지의 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram of representative topologies of distributed networks

다. 일반적으로 각 단말은 특정 최소값과 최대값 사이의 임의의 값을 초기 상태 값으로 가지며, 이하 특정 최소값을 0, 최대값을 1로 정규화 해서 고려하도록 한다.

먼저, 그림 1에 대표적인 분산 네트워크의 토폴로지를 도시하였다. 그림 1-(a)는 네트워크에 속한 모든 단말이 다른 모든 단말로부터의 상태 값을 수신할 수 있는 경우, 즉 완전히 연결된(fully connected) 상태를 나타내며, 그림 1-(b)는 네트워크에 속한 모든 단말이 다른 모든 단말로부터 상태 값을 수신할 수는 없지만 또 다른 단말을 통해 영향을 받을 수 있는 경우, 즉 연결된(connected) 상태를 나타낸다. 다시 말해서, 연결된 네트워크의 경우 고립된 단말, 즉, 네트워크에 속한 다른 모든 단말들로부터 상태 값을 수신할 수 없는 단말이 존재하지 않는 경우를 의미한다. 고립된 단말이 존재하는 경우 연결되지 않은 (disconnected) 상태라고 하며 그림 1-(c)에 그 예를 도시하였다. 그림 1-(c)의 3번 단말이 고립된 단말의 예시이며, 이러한 경우 3번 단말은 주변 단말들과의 협력이 불가능하게 되므로 단말 간 동기를 획득할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 분산 동기 획득이 가능한 경우인 완전히 연결된 상태 혹은 연결된 상태의 네트워크만을 고려한다.

2.2 컨센서스 알고리즘

대표적인 분산 동기 알고리즘인 컨센서스 기반의 분산 동기 알고리즘[5]에서는 네트워크에 속한 단말들이 주기적으로 자신의 상태 값을 이웃 단말들에게 전송한다. 이후 한 주기 동안 이웃 단말들로부터 수신한 상태 값들과 자신의 상태 값을 수식 (1)과 같이 미리 정해진 임의의 응답 함수에 입력하고, 출력된 값을 자신의 상태 값으로 갱신한다.

$$x_i[k+1] = \sum_{j \in N_i \cup \{i\}} \beta_{ij} x_j[k] \tag{1}$$

여기서 N_i는 i번 단말과 이웃한 단말들의 집합이며, β_{ij}는 $\sum_{j \in N_i \cup \{i\}} \beta_{ij} = 1$을 만족하는 i번 단말과 j번 단말 사이의 가중치를 의미한다. 이 때, 가중치의 설정 방법에 따라 다양한 종류의 컨센서스 알고리즘이 존재할 수 있다. 가장 일반적인 응답 함수로는 지역 평균을 예로 들 수 있다. 즉, 한 주기 동안 수신한 이웃 단말들의 상태 값과 자신의 상태 값에 대해 동일한 가중치로 평균을 구하고, 이 값으로 자신의 상태 값을 갱신한다. 이러한 경우 모든 단말은 각 이웃 단말과의 가중치를 $1/(|N_i|+1)$로 설정한다. 여기서 $|N_i|$는 집합 N_i의 원소의 수를 나타낸다.

그림 2에 평균 컨센서스 알고리즘을 사용하는 경우 각 단말의 상태 값의 변화를 나타낸 그래프를 도시하였다. 5개의 적법 단말이 연결된 토폴로지에 오작동 단말은 존재하지 않는다고 가정하였다. 이처럼 네트워

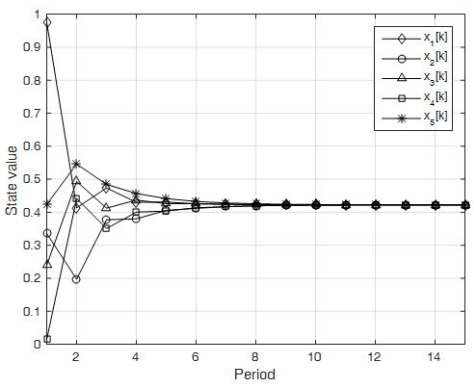


그림 2. 오작동이 존재하지 않는 분산 네트워크에서 기존 컨센서스 알고리즘을 활용하는 경우 상태 값의 변화
Fig. 2. The evolution of state values of the conventional consensus in distributed networks when there is no malfunction

크에 오작동 단말이 존재하지 않는 경우, 일정 시간이 지난 후 모든 단말의 상태 값은 동일한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

2.3 오작동 모델

본 논문에서는 두 가지의 오작동 모델을 고려한다. 본 연구에서 첫 번째로 고려한 모델은 수신 장치의 기능 고장 등으로 인해 이웃 단말로부터 상태 값을 수신하지 못해 자신의 상태 값을 갱신할 수 없거나, 혹은 단말 간 동기 획득을 방해할 목적으로 자신의 상태 값을 갱신하지 않는 경우, 즉 정적 오작동 (static malfunction)이다. k번째 단위 시간에서 오작동 단말 i의 상태 값을 $y_i[k]$라 하면, 정적 오작동 단말의 경우 수식 (2)와 같이 자신의 상태 값을 갱신하지 않고 일정하게 유지하게 된다.

$$y_i[k+1] = y_i[k] \tag{2}$$

두 번째는 응답 함수 설정에 오류가 발생하여 잘못된 값으로 자신의 상태 값을 갱신하거나, 단말 간 동기 획득을 방해할 목적으로 임의의 상태 값을 전송하는 경우, 즉 동적 오작동 (dynamic malfunction)이다. 동적 오작동 단말의 경우 수식 (3)과 같이 자신의 상태 값을 임의의 값으로 갱신함으로써 단말 간 동기 획득을 방해한다.

$$y_i[k+1] = U(0,1) \tag{3}$$

여기서 $U(0,1)$은 정규화 된 상태 값의 최대값과 최소값인 0과 1사이에서 연속 균등분포 (uniform distribution)를 따르는 임의의 값을 의미한다.

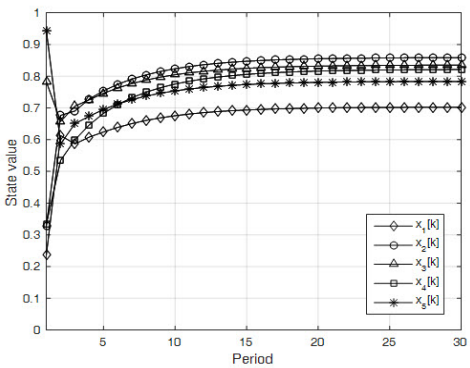


그림 3. 정적 오작동이 존재하는 분산 네트워크에서 기존 컨센서스 알고리즘을 활용하는 경우 상태 값의 변화
Fig. 3. The evolution of state values of the conventional consensus in distributed networks when there is static malfunction

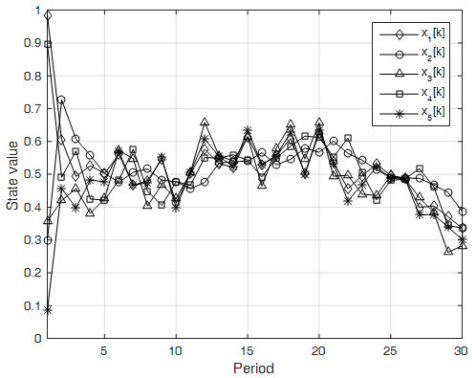


그림 4. 동적 오작동이 존재하는 분산 네트워크에서 기존 컨센서스 알고리즘을 활용하는 경우 상태 값의 변화
Fig. 4. The evolution of state values of the conventional consensus in distributed networks when there is dynamic malfunction

이러한 정적 오작동과 동적 오작동이 존재하는 분산 네트워크에 기존 평균 컨센서스 알고리즘을 적용한 경우 각 단말의 상태 값의 변화를 나타낸 그래프를 그림 3과 4에 각각 도시하였다. 두 시나리오 모두 연결된 토폴로지를 고려하였으며, 두 개의 오작동 단말이 네트워크에 존재하는 경우를 고려하였다. 이처럼 네트워크에 오작동 단말이 존재하는 경우 분산 동기 알고리즘 충분히 수행된 경우에도 단말들의 상태 값들이 하나의 값으로 수렴하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 오작동 단말의 영향 분석

3.1 평균 제곱 오차

2장에서 확인한 것과 같이 이상적 채널의 경우 분산 동기 알고리즘을 사용하여 단말 간 완벽한 동기 획득이 가능하다. 하지만 현실적인 경우 단말 간 상태 값 교환 시 발생하는 시간 지연, 무선 통신에서 필연적으로 발생하는 잡음 및 간섭 등의 영향으로 완벽한 동기 획득은 불가능하며, 따라서 평균 제곱 오차 (mean squared error, MSE)를 분산 동기화 성능의 척도로 사용한다. MSE는 아래 수식 (4)와 같이 정의된다.

$$MSE(\mathbf{x}[k]) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i[k] - \overline{x}[k]|^2 \tag{4}$$

여기서 $\overline{x}[k]$는 k번째 단위 시간에서 적법 단말들의 상태 값의 평균을 의미하며, 이 때 오작동 단말의

상태 값은 고려하지 않는다. 수식 (4)에 따르면, 적법 단말들의 상태 값들이 비슷할수록 MSE는 0에 가까워지며, 적법 단말들이 완벽한 동기를 획득한 경우, 즉 적법 단말들의 상태 값이 모두 동일한 값을 가질 경우 MSE는 0이 되는 것을 알 수 있다.

분산 동기 알고리즘을 이용해 평균 제곱 오차를 특정 목표 값, 즉 무선 통신에 유의미한 영향을 미치지 않을 정도로 작은 값 이하로 감소시킬 수 있는 경우, 네트워크에 속한 단말들이 동기를 획득했다고 한다. 무선 통신의 종류와 목적에 따라 목표 MSE는 달라질 수 있기 때문에 낮은 MSE 성능을 보장할 수 있는 분산 동기 알고리즘일수록 동기화 성능이 우수하다고 평가할 수 있다.

3.2 기존 평균 컨센서스 알고리즘의 성능 분석

오작동이 존재하는 경우 기존 평균 컨센서스 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 네트워크에 f개의 정적 오작동 단말이 있다고 가정하자. 전체 네트워크에 속한 단말들의 상태 값들의 벡터를 $\mathbf{z}[k]=[\mathbf{x}[k]^T,\mathbf{y}[k]^T]^T$라 하면, 수식 (1)에 나타낸 평균 컨센서스 알고리즘의 상태 값 갱신 방법을 수식 (5)와 같은 행렬 연산으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}[k+1] &= \sum_{j\in N_i\cup i}\beta_{ij}x_j[k] \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}[k]+\mathbf{B}\mathbf{y}[k]\end{aligned} \tag{5}$$

이 때, $N\times N$ 행렬 $\mathbf{A}$와 $N\times f$ 행렬 $\mathbf{B}$의 각 원소 a_{ij}와 b_{ij}는 각각 i번 적법 단말과 j번 적법 단말 사이의 가중치와 i번 적법 단말과 j번 오작동 단말 사이의 가중치를 나타낸다. 기존 평균 컨센서스 알고리즘을 사용하는 경우 a_{ij}와 b_{ij}는 수식 (6), (7)과 같이 정의된다.

$$a_{ij}=\begin{cases}\dfrac{1}{|N_i|+1} & \text{if } j\in N_i\cup\{\text{i}\} \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{6}$$

$$b_{ij}=\begin{cases}\dfrac{1}{|N_i|+1} & \text{if } j\in N_i \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{7}$$

한편, 행렬 $\mathbf{J}$를 모든 원소가 $1/N$인 $N\times N$ 행렬이라 하고, 1절에서 설명한 MSE의 정의를 이용하면 수식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}MSE(\mathbf{x}[k]) &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i[k]-\overline{x}[k]|^2 \\ &= \frac{1}{N}|\mathbf{x}[k]-\overline{\mathbf{x}}[k]|^2=\frac{1}{N}|(\mathbf{I}_N-\mathbf{J})\mathbf{x}[k]|^2 \\ &= \frac{1}{N}tr((\mathbf{I}_N-\mathbf{J})\mathbf{x}[k]\mathbf{x}^T[k](\mathbf{I}_N-\mathbf{J})^T) \\ &= \frac{1}{N}tr((\mathbf{I}_N-\mathbf{J})\mathbf{x}[k]\mathbf{x}^T[k]) \\ &= \frac{1}{N}tr(\mathbf{H}^T(\mathbf{I}_N-\mathbf{J})\mathbf{H}\end{aligned} \tag{8}$$

여기서 다섯 번째 등호는 행렬 $\mathbf{J}$의 정의에 의해 $\mathbf{J}^T\mathbf{J}=\mathbf{J}$가 성립하므로 쉽게 얻을 수 있으며, 마지막 등호는 $\mathbf{H}=[\mathbf{I}_N\,\mathbf{0}_{N\times f}]$을 활용함으로써 얻을 수 있다. 또한 토폴로지가 시간에 따라 변하지 않는 경우, $\mathbf{z}[k]$는 정의에 의해 아래 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{z}[k] &= \begin{pmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix}\mathbf{z}[k-1]=\begin{pmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix}^2\mathbf{z}[k-2] \\ &= \cdots=\begin{pmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix}^k\mathbf{z}[0] \\ &= \begin{pmatrix}\mathbf{A}^k & \sum_{i=1}^{k}\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix}\mathbf{z}[0] \\ &= (\end{aligned} \tag{9}$$

이 때, 충분히 큰 k에 대해 $\mathbf{A}^k\approx\mathbf{0}_{N\times N}$이므로 $\mathbf{I}_N\approx\mathbf{I}_N-\mathbf{A}^k=(\mathbf{I}_N-\mathbf{A})\left(\sum_{i=1}^{k}\mathbf{A}^{i-1}\right)$이 되어 행렬 $\mathbf{M}=\sum_{i=1}^{k}\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B}$은$(\mathbf{I}_N-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$로 근사할 수 있다. 결과적으로 수식 (9의) 행렬 $\mathbf{W}$는 수식 (10)과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{W} &= \begin{pmatrix}\mathbf{A}^k & \mathbf{M}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix} \\ &\approx \begin{pmatrix}\mathbf{0}_{N\times N} & (\mathbf{I}_N-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}\\ \mathbf{0}_{f\times N} & \mathbf{I}_f\end{pmatrix}\end{aligned} \tag{10}$$

마지막으로 수식 (8), (9) 그리고 (10)을 활용하면 k번째 단위 시간에서의 오차 제곱 평균을 다음 수식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&MSE(\mathbf{x}[k]) \\
&= \frac{1}{N} tr(\mathbf{H}^T(\mathbf{I}_N - \mathbf{J})\mathbf{H}\mathbf{z}[k]\mathbf{z}[k]^T) \\
&= \frac{1}{N} tr(\mathbf{H}^T(\mathbf{I}_N - \mathbf{J})\mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{z}[0]\mathbf{z}[0]^T\mathbf{W}^{\mathrm{T}}) \quad (11) \\
&= \left(\frac{1}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i}^{N}\left(\sum_{l=1}^{f}(m_{il} - m_{jl})y_i[0]\right)^2
\end{aligned}
$$

여기서 m_{ij}는 행렬 $\mathbf{M} = (\mathbf{I}_N - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}$ 의 (i,j) 번째 원소를 의미한다. 수식 (11)을 활용하면 네트워크의 토폴로지와 오작동 단말의 초기 상태 값만을 활용해 오차 제곱 평균을 쉽게 확인할 수 있다.

그림 5에 Monte-Carlo 실험 결과와 수식 (11)의 결과를 도시하였다. 네트워크에 5개의 적법 단말과 2개의 오작동 단말이 존재하는 경우를 고려하였으며 연결된 토폴로지와 완전히 연결된 토폴로지에서의 동기화 성능을 도시하였다. 전술한 바와 같이 분산 동기 알고리즘이 충분히 수행된 경우, 즉, k가 충분히 큰 경우 수식 (11)을 활용해 네트워크의 동기화 성능을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

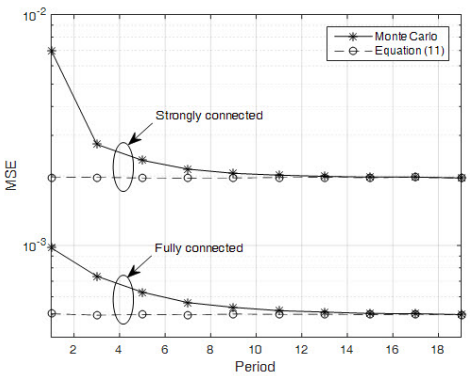


그림 5. 제안하는 분산 동기 알고리즘 수행 횟수에 따른 MSE 값의 변화
Fig. 5. The evolution of MSE according to the number of execution of proposed distributed synchronization algorithm

Ⅳ. 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘

본 논문에서는 오작동이 존재하는 분산 네트워크에서의 동기화 성능을 향상시키기 위해 상태 값 갱신 시 획득 가능한 정보들을 이용해 각 이웃 단말의 신뢰도를 평가하고, 평가한 신뢰도를 바탕으로 응답 함수의 가중치를 결정하여 신뢰도가 낮은 단말로부터의 영향을 최소화하는 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘을 제안한다. 각 단말에 대한 신뢰도는 수식 (12)와 같이 정의한다.

$$
d_{ij} = \frac{1}{|x_j[k] - \overline{x_i}[k]|} \quad (12)
$$

여기서 d_{ij}는 i번 단말이 j번 단말을 평가할 때 사용하는 신뢰도이며, $\overline{x_i}[k]$는 i번 단말의 k번째 단위 시간에서 수신한 이웃 단말들과 자신의 상태 값을 이용해 측정한 지역 평균으로 수식 (13)과 같이 정의된다.

$$
\overline{x_i}[k] = \frac{\sum_{j \in N_i \cup \{i\}} x_j[k]}{|N_i| + 1} \quad (13)
$$

즉, i번 단말은 j번 단말의 상태 값이 자신의 이웃 단말들과 자신의 상태 값의 평균에 가까운 값을 가질수록 높은 신뢰도를 가진다고 평가한다. 이는 컨센서스 기반 분산 동기 알고리즘을 사용하는 경우 모든 단말의 상태 값의 차이가 점차적으로 감소하는 반면, 오작동이 발생한 단말의 경우 상태 값이 변하지 않거나 (정적 오작동) 상태 값이 랜덤하게 변하기 때문이다 (동적 오작동).

이러한 신뢰도를 바탕으로 상태 값 갱신 시 사용하는 응답 함수의 가중치를 아래 수식 (14)와 같이 결정한다.

$$
\beta_{ij}[k] = \left(\frac{d_{ij}[k]}{\sum_{j \in N_i \cup \{i\}} d_{ij}[k]}\right)^{\alpha} \quad (14)
$$

여기서 α는 0보다 큰 상수이며 신뢰도 기반 가중치의 강도를 설정하는 매개변수이다. 즉, α가 큰 값을 가질수록 신뢰도가 높은 단말에 더 큰 가중치를 부여한다. 반면 α가 0에 가까운 값을 가지는 경우 각 단말에 비슷한 가중치를 부여하며 $\alpha = 0$인 경우 기존 평균 컨센서스와 동일한 가중치를 부여하게 된다. 또한 각 단말에 대한 신뢰도를 모든 단말에 대한 신뢰도의 합으로 정규화 함으로써 가중치의 합이 1이 되도록 설정하여 상태 값의 발산 혹은 0으로의 수렴을 방지한다.

제안하는 신뢰도 기반 적응적 컨센서스 알고리즘은 기존 평균 기반 컨센서스 알고리즘과 달리 매 상태 값 갱신 시 각 이웃 단말에 대한 가중치가 단말에 대한

신뢰도에 의해 적응적으로 변화한다. 따라서 신뢰도가 높은 단말에 큰 가중치를 부여하고, 신뢰도가 낮은 단말에 작은 가중치를 부여함으로써 동기화 성능을 향상시킬 수 있다.

그림 6과 7은 각각 정적 오작동과 동적 오작동이 존재할 때 기존 평균 컨센서스 알고리즘과 제안하는 신뢰도 기반 적응적 컨센서스 알고리즘을 사용한 경우 획득할 수 있는 동기화 성능을 도시한 그림이다. 전술한 바와 같이 동기화 성능을 평가하기 위한 지표로는 적법 단말들의 상태 값의 평균 제곱 오차를 활용하였다.

그림 6과 7에서 점선과 실선은 각각 완전히 연결된 상태의 네트워크와 연결된 상태의 네트워크에서의 실험 결과를 의미한다. 전체 네트워크에 5개의 정적 오작동 단말이 존재하는 경우와 5개의 동적 오작동 단말이 존재하는 경우를 각각 고려하였으며, 적법 단말의 수에 따른 50번째 단위 시간에서의 평균 제곱 오차를 나타내었다. 각 환경에서 10,000번의 반복 실험을 수행하였으며, 이를 통해 평균 제곱 오차의 평균값을 도시하였다. 본 논문에서 제안하는 신뢰도 기반 적응적 컨센서스 알고리즘을 사용하는 경우 네트워크 토폴로지 및 네트워크에 속한 단말의 수와 무관하게 기존 평균 컨센서스 알고리즘에 비해 분산 동기 성능을 향상시킬 수 있음을 그림 6과 7에서 확인할 수 있다.

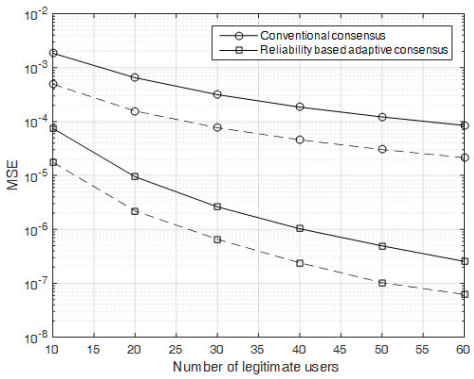


그림 6. 정적 오작동이 존재하는 네트워크에서 적법 사용자 수에 따른 평균 MSE
Fig. 6. The average MSE for the number of legitimate users in a network with static malfunction

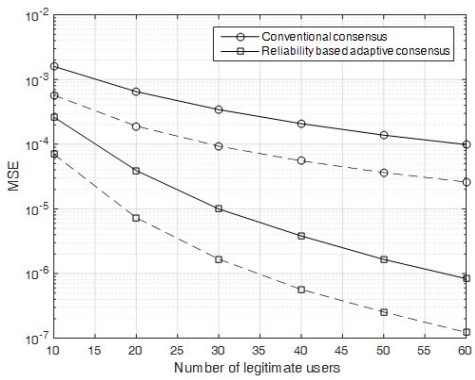


그림 7. 동적 오작동이 존재하는 네트워크에서 적법 사용자 수에 따른 평균 MSE
Fig. 7. The average MSE for the number of legitimate users in a network with dynamic malfunction

V. 결 론

본 논문에서는 오작동 혹은 악의적인 공격이 존재하는 분산 네트워크의 단말 간 동기 획득을 위한 분산 동기 알고리즘에 관해 연구하였다. 먼저, 네트워크에 존재하는 오작동 단말이 기존 컨센서스 알고리즘의 동기화 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 분석 결과가 실제 값을 효과적으로 예측할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다. 또한, 본 논문에서는 오작동 혹은 공격이 존재하는 분산 네트워크에서 단말 간 동기화 성능을 향상시킬 수 있는 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘 제안하였다. 제안하는 신뢰도 기반의 적응적 컨센서스 알고리즘은 적법 단말의 상태 값들의 수렴 특성을 활용하여, 이웃 단말로부터 수신한 상태 값으로부터 각 이웃 단말의 신뢰도를 평가하고, 획득한 신뢰도 정보를 활용하여 자신의 응답 함수를 적응적으로 조절함으로써 오작동 단말로부터의 영향을 감소시킬 수 있어 네트워크 토폴로지 및 네트워크에 속한 단말의 수와 무관하게 단말 간 동기 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

향후, 본 논문에서 진행한 오작동 단말 하에서의 동기 성능 분석을 다양한 공격 모델 및 응답 함수가 시간에 따라 변화하는 알고리즘으로 확장하여 본 논문에서 제안한 분산 동기 알고리즘의 성능을 분석함으로써 동기 성능 향상을 위한 응답 함수의 최적화 방법 등에 관한 추가 연구를 진행할 계획이며, 이를 통해 차세대 통신망의 핵심 기술인 분산 네트워크의 활성화 및 성능 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

References

[1] Y-J. Kim, J-Y. Jung, H-H. Choi, M-H. Han, C-Y. Park, and J-R. Lee, “Bio-inspired resource allocation scheme for multi-hop networks,” *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp.

2035-2046, Oct. 2015.

[2] H.-H. Choi, B. Roh, H. Choi, and J.-R. Lee. "Bio-inspired routing protocol for mobile ad hoc networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 11, pp. 2205-2217, Nov. 2015.

[3] O. Simeone, U. Spagnolini, Y. Bar-Ness, and S. H. Strogatz, "Distributed synchronization in wireless networks," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 81-97, Sept. 2008.

[4] M.-J. Kim, Y.-J. Lee, and Y.-S. Cho, "A distributed time synchronization technique for OFDMA-based wireless mesh communication systems using bio-inspired algorithm," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1069-1078, Dec. 2013.

[5] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, "A survey of consensus problems in multi-agent coordination," in *Proc. Am. Control Conf. 2005*, pp. 1859-1864, Portland, Jun. 2005.

[6] J. N. Tsitsiklis, D. P. Bertsekas, and M. Athans, "Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 31, no. 9, pp. 803-812, Sept. 1986.

[7] W. Ren and R. W. Beard, "Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 50, no. 5, pp. 655-661, May 2005.

[8] R. O. Saber and R. M. Murray, "Agreement problems in networks with directed graphs and switching topology," in *Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 4126-4132, Maui, Dec. 2003.

[9] R. O. Saber, "Distributed Kalman filtering for sensor networks," in *Proc. 46th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 5492-5498, New Orleans, Dec. 2007.

[10] R. O. Saber, "Kalman-consensus filter : optimality, stability, and performance," in *Proc. 48th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 7036-7042, Shanghai, Dec. 2009.

[11] Y-P. Tian, "Convergence rate of consensus algorithms with multiplicative and additive noisy measurements," in *Proc. IEEE Conf. Control Appl.*, pp. 755-760, Argentian, Sept. 2016.

[12] A. Olshevsky and J. N. Tsitsiklis, "Convergence speed in distributed consensus and averaging," *SIAM J. Control and Optimization*, vol. 48, no. 1, pp. 33-55, Feb. 2009.

[13] H. LeBlanc and X. Koutsoukos, "Consensus in networked multi-agent systems with adversaries," in *Proc. 14th Int. Conf. Hybrid Systems: Computation and Control*, pp. 281-290, Apr. 2011.

[14] S. Sundaram and C. N. Hadjicostis, "Distributed function calculation via linear iterative strategies in the presence of malicious agents," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 56, no. 7, pp. 1495-1508, Jul. 2011.

[15] F. Pasqualetti, A. Bicchi, and F. Bullo, "On the security of linear consensus networks," in *Proc. 48th IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 4894-4901, Shanghai, Dec. 2009.

서 상 아 (Sangah Seo)

2014년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업

2016년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

<관심분야> 무선통신, 물리계층 보안

윤 상 석 (Sangseok Yun)

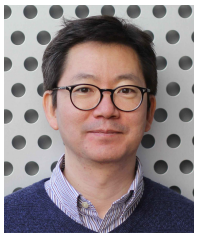
2010년 : 부산대학교 전자전기공학과 졸업

2012년 : 부산대학교 전자전기공학과 석사

2012년~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신, 물리계층 보안

하 정 석 (Jeongseok Ha)



1992년 : 경북대학교 전자 공학과 졸업
1994년 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
2003년 : Georgia Tech 박사
2004년~2010년 : 한국정보통신대학교 조교수
2010년~현재 : 한국과학기술원 부교수
<관심분야> 무선통신, 채널부호, 물리계층 보안