무선 메쉬 네트워크 기반 공정제어 시스템에서의 노드 고장에 따르는 도달 가능성 분석 1)

이정훈
제주대학교 전산통계학과
e-mail:jhlee@jejunu.ac.kr

Reachability analysis for node failures on a process control system built upon wireless mesh networks

Junghoon Lee
Dept of Computer Science and Statistics
Jeju National University

요 약

본 논문에서는 무선 메쉬 네트워크에 기반한 공정제어 시스템에서의 노드 고장에 따르는 통신 시스템의 특성을 파악하기 위하여 시뮬레이션 환경을 설정하고 노드의 고장 수와 그리드의 차원에 따르는 고립노드의 수를 측정하였다. 실험 환경에서 좌상단의 노드를 제어포인트로 설정하고 각 무선링크의 오류율이 주어졌을 때 노드들에 고장을 발생시켜 제어포인트로부터의 도달가능성을 측정하였다. 실험 결과는 25 % 보다 많은 노드들의 고장은 정상적인 노드를 고립시키기 시작하며 그리드의 차원이 클수록 동일한 비율의 노드 고장에도 더 영향을 받음을 보이고 있다. 이는 노드들의 고장율이 높은 시스템인 경우 노드 수리의 시간과 비용의 요구사항을 추정할 수 있도록 하며 그리드의 차원이 8 이상인 경우 또다른 제어포인트, 즉 싱크노드 도입의 필요성을 나타낸다.

1. 서론

공정제어 시스템은 그 적용분야가 공장자동화, 안전관련 감시제어 등과 같이 높은 신뢰성과 정확성을 요구하기 때문에 시스템의 정확성뿐만 아니라 통신 시스템의 정확성과 적시성이 필수적인 요소가 된다. 공정제어 시스템의 규모가 확장함에 따라 네트워크에 기반한 분산시스템으로 구성되는 경우가 일반화되었으며 더욱이 최근 무선통신 기술의 발달에 의해 무선 네트워크에 기반한 공정제어 시스템을 위한 프로토콜이 등장하고 있다[1]. 그러나 무선 통신기술은 그 특징상 통신 오류를 완벽하게 제거할 수는 없으므로 통신의 신뢰성과 적시성을 향상시킬 수 있는 방안을 끊임없이 추구하여야 한다.

WirelessHART는 이러한 공정제어를 위한 무선 프로토콜로서 10ms의 타임슬롯으로 각 노드들의 시간축을 나누어 노드간 통신의 예측가능성을 지원한다. 이를 위한 통신 프리미티브가 정의되었을 뿐 아니라 멤버의 관리를 위한 Join/Leave연산, CCA (Clear Channel Assessment) 탐지, 채널 호핑 등 다양한 기능들이 정의되어 있다[1]. 그러나 CCA 결과에 따르는 처리가 정의되어 있지 않으며 이 경우는 슬롯이 낭비된다. 이 문제를 해결하기 위해 한 슬롯 내에서 CCA 결과에 따라 다른 채널, 즉 다른 경로를 선택하기 위한 연산이 제안되었는데[2], 이는 제어포인트로부터 각 노드까지의 제어메시지에 대한 슬롯 할당 테이블을 만들 때 주경로와 대체 경로까지 고려하는 방식이다.

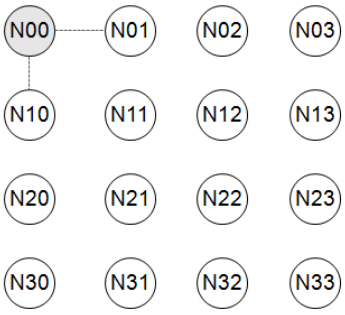
무선 공정제어 시스템이 좀더 현장에 적용이 가능하기 위해서는 이의 하부 네트워크인 무선 메쉬 네트워크가 단순히 링크의 오류뿐만 아니라 노드의 고장을 효율적으로 대처하는 방식이 필요하다. 메쉬 네트워크는 노드의 배치, 즉 토폴로지에 의해 많은 영향을 받는데 본 논문에서는 정방형 토폴로지를 가정한다. 이는 일반적이지는 않지만 맨하탄 스타일의 도로망을 갖는 도시지역에서의 신호등 제어망, 풍력발전소의 노드 배치 등에서 그 적용 예를 찾을 수 있다.

2. 시스템 모델

(그림 1)의 메쉬 네트워크는 4*4 정방행렬 구조를 보이고 있다. 여기서 N00 노드가 제어포인트가 되며 이는 제어과정에서 각 노드들로부터 순차적으로 센서값을 수신받아 할당된 제어로직을 수행하고 이에 의한 액튜에이터 구동값을 계산하여 다시 순차적으로 각 노드에게 전달한다. 또한 외부네트워크와 연결되어 제어로직의 변환 혹은 협력제어를 수행할 수도 있다. 각 노드는 자신의 수직 및 수평으로 인접한 노드와 직접적으로 통신할 수 있으며 대각선의 노드와는 일반적으로 장애물이 있을 가능성이 높기 때문에 통신이 불가능하다. 각 무선 링크는 평균 오류율이 사전에 알려져 있다고 가정하며[3] 제어포인트로부터 각 노드까지 이 오류율에 기반하여 최고의 성공 가능성을 갖

1) 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2009-C1090-0902-0040)

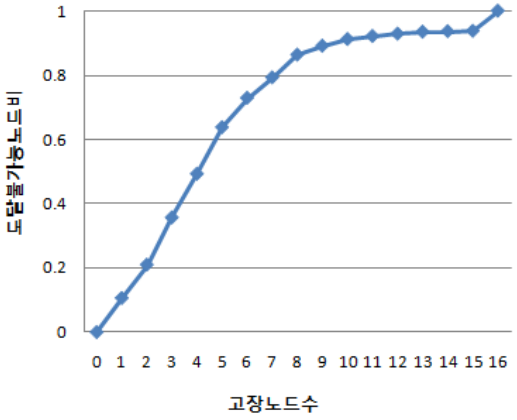
는 경로를 결정한다[2].



(그림 1) 대상 무선 메쉬 네트워크 구조

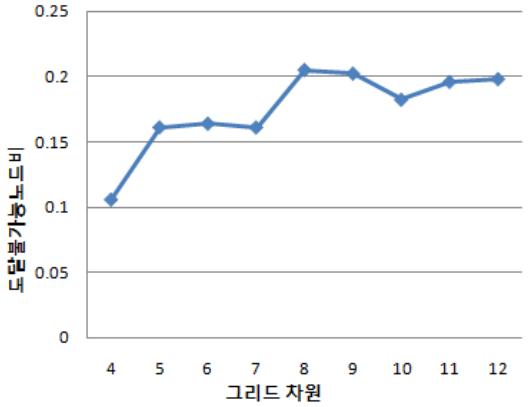
위의 네트워크에서 일부 노드에 고장이 발생한다면 그 노드뿐만 아니라 다른 노드에 도달하는 가능성에도 영향을 미치게 된다. 따라서 효율적인 경로제어를 위하여 노드의 고장 특성에 대한 파악이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 두 가지의 실험을 수행하는데 첫 번째 실험은 4*4 정방 그리드에서 주어진 개수만큼 임의의 노드를 선택하여 고장으로 처리한 후, 즉 이 노드에 연결된 4개의 링크를 제거한 후, Dijkstra 경로제어 알고리즘을 수행하여 평균 전송성공율을 측정한다. 두 번째 실험은 정방 그리드의 차원을 4*4에서 12*12까지 변화시켜가면서 25 %의 노드들에 고장이 발생했다는 가정하에 그 전송성공율을 측정한다. 두 실험에서 동일한 각 인자에 대해 500회의 시뮬레이션을 수행하고 평균값을 추출하였다. 또 각 무선 링크의 오류율은 슬롯 전송 오류율로 설정하였으며 이는 0.1을 평균으로 가지며 지수분포를 따라 생성되었다.



(그림2) 고장노드 수에 따른 도달가능성 측정

(그림 2)는 4*4 그리드에 대해 고장 노드의 수를 0부터 16까지 정하고 각각의 경우에 대해 노드의 고장을 가정하여 전송 성공률을 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 노드의 수가 3에 도달할 때까지는 도달이 불가능한, 즉 제어포인트로부터 연결될 수 없는 노드의 수가 선형적으로 증가하는데 이는 고장노드에만 영향이 있을 뿐 다른 노드들에게 까지 큰 영향을 주지 않는다는 것을 보인다. 그러나 고장 노드의 수가 10에 다가갈 때 까지 도달불가능 노드비가 빠르게 증가하는데 이는 여러 노드의 고장이 다른 노드의 고립을 초래하고 있음을 의미한다. 또 10 이후에는 이미 노드들이 거의 도달 불가능한 상태로 되므로 상승률이 정체를 보인다.



(그림 3) 그리드 차원에 따르는 도달가능성 측정

(그림 3)은 그리드 차원을 4부터 12까지 변화시켰을 때의 도달가능성을 측정한 결과를 보인다. 이 실험에서 고장노드의 수는 전체노드 수의 10 %로 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 10 %에서 20 %까지의 도달 불가능한 노드비율을 보이고 있다. 여기서 10 %는 순수하게 고장 노드에 기인한 고립율이며 10 %를 초과하는 부분이 정상노드에 미치는 영향도에 해당한다. 전반적으로 차원이 높을수록 동일한 슬롯 오류율에도 도달불가능노드의 비율이 증가함을 보이고 있는데 이는 제어포인트에서 가까운 노드들의 고장으로 이후의 노드들이 고립이 되는 경우 그 영향이 크기 때문이다.

3. 수행 결과 및 결론

본 논문에서는 정방 구조를 갖는 무선 메쉬 기반 공정제어 시스템에서의 노드 고장의 영향을 측정하였다. 4*4 그리드에 대해 고장 노드의 수에 따른 고립노드의 비율과 10 % 고장율에 대해 차원에 따른 고립노드의 비율을 측정하였다. 첫 실험은 노드 고장이 전체 노드의 25 % 이내에서는 자기 자신에게만 영향을 주는 반면 이 이후에는 제어포인트에서 먼 노드들에게도 영향을 주기 시작함을 보인다. 또 두 번째 실험은 그리드의 차원이 동일한 오류율에도 영향을 받는다는 것을 보이고 있으며 8차원 단위로 제어포인트, 즉 싱크 포인트를 설정하는 것이 바람직함을 나타낸다.

참고문헌

[1] J. Song, et al., "WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control," *IEEE RTAS*, pp. 377-386, 2008.

[2] J. Lee, I. Shin, C. Kim, "Design of a reliable traffic control system on city area based on a wireless network," *ICCSA*, pp.821-830, June 2009.

[3] Z. Zainab, B. Landfeldt, "Monitoring assisted robust routing in wireless mesh networks," *Mobile Network Application*, pp. 54-66, 2008.