

계층적 모델을 이용한 단일 센서 노드의 가용성 분석

윤영현*

Availability Analysis of Single Sensor Node using Hierarchical Model

Yoon, Young Hyun

〈Abstract〉

In this paper, we propose and evaluate the availability of single sensor node using a hierarchical modeling approach. We divide a sensor node into a software and hardware and analyze failures of each component. We construct Markov chains to represent the components of a sensor node, and then we construct a hierarchical model which uses a fault tree in the upper level and Markov chains in the lower level. We evaluate the availability and down of single sensor node.

Key Words : Availability, Sensor, Modeling, Hierarchical Model

I. 서론

센서 네트워크는 다양한 분야에서 활용되고 있으며 센서 네트워크에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 센서 네트워크는 실제 환경에 배치되어서 환경 정보를 수집하는 역할을 수행한다. 이때 센서 네트워크는 배터리 수명이 다하지 않은 한 사용자가 원하는 시간에 원하는 정보를 수집하고 전달할 수 있어야 한다. 이런 요구 조건은 센서 네트워크의 가용성(Availability)이라고 정의할 수 있고 센서 네트워크의 가용성을 보장하는 것은 매우 중요하다. 센서 네트워크의 가용성에 대한 연구는 많이 이루어지고 있으나, 대부분의 연구에서는 실제 센서 네트워크의 고장에 관한 세부적인 분석이 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 센서 네트워크를 구성하는 하드웨어와 소프트웨어로 분류하여 각각을 구성하는 세부 구성

요소들을 Markov Chain으로 모델링하고, 단일 센서 노드를 fault tree로 구성하였다. 이렇게 구성한 계층적인 모델은 세부 구성요소의 고장 복구를 뿐만 아니라 단일 센서 노드 관점에서 가용성을 모델링하고 분석할 수 있게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구와 관련된 기존 연구가 소개된다. 3장에서는 제안된 모델이 소개되고 4장에서는 이를 평가한다. 5장에서는 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

본 연구에서 사용한 모델링 기법은 단순히 fault tree가 아니라 fault tree를 이용하여 센서 노드의 구성 요소를 표현하고, 각 하위 모델의 세부 동작을 표현하는 계층

* 명지전문대학 정보통신과 부교수

적인 분석 모델이다. 이러한 계층적인 분석 모델을 이용한 가용성 분석은 비교적 새로운 모델링 기법으로 Combinatorial model type, state space model, hierarchical model 등이 사용될 수 있다.

Combinatorial model type으로는 Reliability block diagram(RBD), fault tree, reliability graph로 시스템 구성요소의 구조적인 관계를 표현함으로써 시스템 신뢰성 및 가용성을 표현할 수 있다. 이 모델 타입의 가정은 각 컴포넌트가 독립적이고 직렬-병렬 구조를 따른다는 것이나, 실제 많은 시스템 모델은 그런 구조를 따르지 않는다. State space model은 Markov chain, Semi-Markov process, Stochastic petri-nets 등이 있으며, 시스템 구성요소간의 상호 작용을 표현하는 데 사용된다. 그러나 시스템 구성 요소가 많아지면 Markov chain의 상태가 매우 복잡하게 되는 문제점이 있으며, 이러한 문제를 state space explosion 문제라고 한다. 이러한 state space explosion문제는 hierarchical model로써 해결 할 수 있다. Hierarchical model은 각 구성 요소를 세분화하고, 각 하위 구성 요소를 state space model로 만듦으로써 state space explosion 문제를 해결할 뿐만 아니라 시스템 구성요소의 세부 동작을 표현할 수 있는 구조이다. 이러한 계층적인 모델은 가용성 평가에도 RBD와 Markov chain이 사용되었다[1]. Fault tree와 Markov chain도 IBM server의 가용성 모델 분석에 사용되었다[2]. 그러나 계층적인 모델이 센서 노드에 사용되는 예는 없으며, 본 논문에서 처음으로 사용하였다.

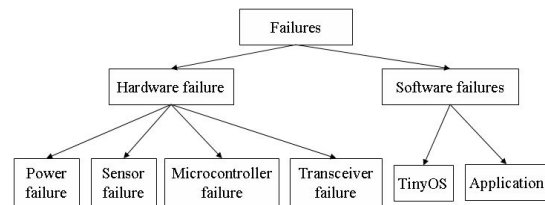
센서네트워크의 신뢰성 및 가용성 모델링에 관련된 연구를 살펴보면, S. Al-Omari는 큐의 스케줄링 관점에서 센서 네트워크의 가용성을 평가하였다[3, 4]. M. W. Chiang은 각각 다른 단일 노드 구조별로 노드 가용성을 평가하였다[5]. X. Liu는 파워 관리 관점에서 가용성을 평가하였으며[6], S. Parvin는 소프트웨어 재할 및 재구성이 센서 네트워크의 가용성 및 생존성에 미치는 영향을 모델링하고 평가하였다[7]. A. Taherkordi은 미들웨어 관점에서 센서 네트워크의 가용성을 간단한 수식으로 평가

하였다[8]. 앞서 소개한 연구들은 다음과 같은 문제점들이 있다. S. Al-Omari은 큐 관점에서만 가용성을 모델링하였고, X. Liu은 파워 관리 관점에서만, S. Parvin는 소프트웨어 고장에 관한 것으로만 그 범위가 한정되어 있으며, A. Taherkordi의 연구는 미들웨어 관점에서 가용성을 평가하였다. 본 연구에서는 보다 구체적으로 센서 노드 레벨의 가용성을 평가하기 위해 하드웨어 고장뿐만 아니라 소프트웨어 고장을 세부적으로 분류하고 이를 계층적인 방법으로 모델링한다. 따라서 기존의 가용성 모델들의 부분적인 컴포넌트 모델링 및 평가를 극복할 수 있다.

III. 제안 모델링

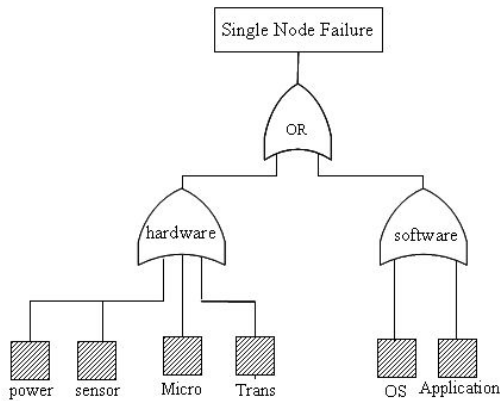
이 장에서는 단일 센서의 가용성을 모델링하기 위한 계층적인 모델링이 소개된다. 단일 센서 노드의 가용성을 표현하기 위한 계층적인 모델을 소개하기 전에 단일 센서 노드에 대한 고장을 <그림 1>과 같이 분류한다. 센서 노드의 고장은 하드웨어 고장과 소프트웨어 고장으로 나눌 수 있다. 하드웨어의 고장은 다시 전력, 센서, 마이크로 컨트롤러와 송수신기 고장으로 나눌 수 있으며, 센서 노드의 소프트웨어 고장은 운영체제와 응용프로그램으로 구분할 수 있다.

<그림 1>의 센서 노드의 고장 분류를 바탕으로 센서 노드의 가용성 모델을 <그림 2>와 같이 fault tree를 이용하여 구성할 수 있다.



<그림 1> 센서 노드의 고장 분류

<그림 2>는 단일 센서 노드의 가용성을 계층적인 모델로 나타낸 것이다. 센서 노드는 구성 요소 중에서 하나만 고장 나더라도 전체 노드가 고장 나게 되므로 fault tree의 제일 상위 층에 OR 게이트를 사용하였다. 센서 노드의 고장은 <그림 1>과 같이 하드웨어 고장이나 소프트웨어 고장 때문에 발생하므로 <그림 2>의 왼쪽 부분은 하드웨어 고장, 오른쪽 부분의 소프트웨어의 고장으로 나누었다.



<그림 2> 단일 센서 노드의 가용성 계층적인 모델

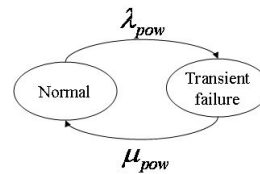
좀 더 간단한 모델은 제일 상위의 OR 게이트 하나로 표현할 수 있으나 좀 더 상세한 표현을 위하여 OR 게이트를 하위 수준에도 사용하였다. 실제로 <그림 2>의 fault tree는 series 연결 형태의 RBD (Reliability Block Diagram)로 나타낼 수 있다. <그림 2>의 fault tree에서 각 하위 구성 요소에서 사선으로 그려서 나타낸 부분은 이 하위 노드가 Markov chain의 하위 모델로 표현될 수 있다는 것을 표현한 것이다.

하드웨어 구성 요소의 경우는 영구적인 고장이 났을 경우에 복구되지 못하며, 소프트웨어 고장은 소프트웨어 재화이나 재 프로그래밍을 통하여 복구가 가능하다.

<그림 3>부터 <그림 7>까지는 각각의 하위 구성요소를 homogeneous Continuous Time Markov chain (CTMC, 이후 Markov chain)으로 표현한 것이다.

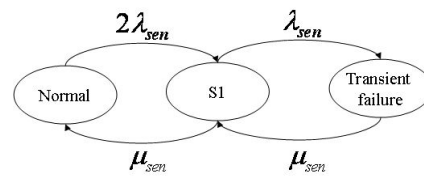
<그림 3>은 <그림 2>에서 전력(power) 구성 요소에 대한 가용성 모델을 나타낸 것이다.

<그림 3>에서 전력 구성 요소는 normal state일 때 up 상태이고, transient failure 상태일 때 down 상태이다. normal 상태에서 transient failure 상태로의 고장율을 λ_{pow} 로 표시하였다. Normal 상태에서 transient failure 상태로 가면 μ_{pow} 전이율로 복구될 수 있다.



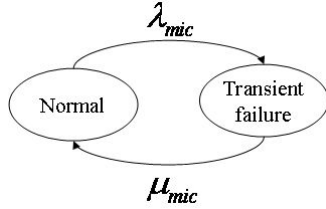
<그림 3> Power의 가용성 모델

<그림 4>는 센서에 관한 가용성 모델이다. 센서 서브 시스템은 센서 2개로 구성되어 있으며 하나의 센서가 고장나더라도 정상적으로 동작하나 2개의 센서가 고장나면 시스템은 다운 상태가 된다. Normal 상태일 때 센서는 센싱 기능을 수행하지만, 2개의 센서 중에서 하나의 센서가 $2\lambda_{sen}$ 고장율로 고장이 나면 하나의 센서만 남게 되고 μ_{pow} 로 복구된다.

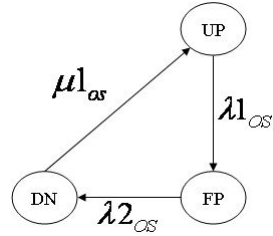


<그림 4> 센서 가용성 모델

<그림 5>는 마이크로 컨트롤러의 가용성 모델이다. 마이크로 컨트롤러도 파워 가용성 모델과 유사하게 Normal, Transient failure의 두 가지 상태를 가진다. Normal 상태에서 마이크로 컨트롤러는 정상적인 동작을 수행하며, transient failure 상태는 down 상태이다.

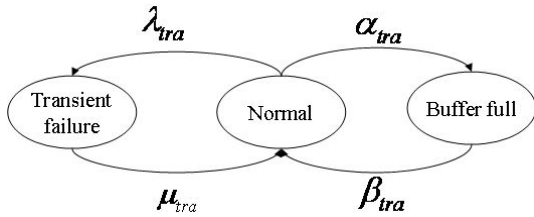


<그림 5> 마이크로 컨트롤러의 가용성 모델



<그림 7> TinyOS 가용성 모델

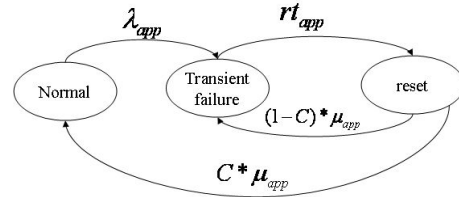
<그림 6>은 송수신기에 대한 가용성 모델이다. 송수신기에 대한 가용성 모델은 세 가지 상태, 즉 normal, buffer full, transient failure를 가진다. Normal 상태에서는 송수신기는 정상적으로 동작하며, buffer full 상태에서는 송수신기는 정상적으로 동작하지만 패킷을 수신할 수 없기 때문에 down 상태이며, 송수신기는 transient failure상태로 전이되면 얼마 후의 시간 후에 복구된다.



<그림 6> 송수신기에 대한 가용성 모델

<그림 7>은 TinyOS에 대한 가용성 모델이다. TinyOS는 센서 노드를 위한 전용 운영체제로, 3가지 상태를 가지는 Markov chain으로 모델링하였다. UP 상태는 TinyOS가 정상적으로 동작하는 상태이며, FP상태는 failure probable상태로 운영체제가 동작하고 나서 고장이 날 수 있는 가능성이 되는 상태이다. DN 상태는 tinyOS가 고장난 상태이다. UP상태와 FP상태는 가용 상태이며, DN 상태는 비가용 상태이다.

<그림 8>은 응용프로그램에 대한 모델이다. 센서 노드 상에서의 응용프로그램은 단일 응용프로그램이거나 다중 응용프로그램일 수도 있다. 본 연구에서는 단일 응용프로그램이 동작하는 것으로 간주한다. 단일 응용 프로그램의 상태는 크게 Normal, transient failure, reset의 세 가지 상태로 나타내었다.



<그림 8> 응용 프로그램 가용성 모델

<그림 8>에서 Normal 상태에서는 응용프로그램이 정상적으로 동작하며, transient failure 상태에서는 응용프로그램이 비정상적으로 동작한다. 이 때 reset을 수행하면 응용 소프트웨어는 정상적으로 복구되거나 혹은 다시 transient failure 상태를 유지하게 된다. 이러한 동작을 반영하기 위하여 coverage factor C를 사용하였다.

IV. 모델 평가

본 장에서는 단일 센서 노드의 가용성을 모델 파라미터 값을 통하여 평가한다.

하드웨어 구성요소에 대한 mean time to

<표 1> 모델 파라미터 설명 및 값

파라미터	설명	값
$1/\lambda_{pow}$	mean time to power transient failure	168 hours
$1/\lambda_{sen}$	mean time to sensor transient failure	168 hours
$1/\lambda_{mic}$	mean time to micro-controller transient failure	168 hours
$1/\lambda_{tra}$	mean time to transceiver transient failure	168 hours
$1/\lambda_{1OS}$	mean time to TinyOS failure probable state	24 hours
$1/\lambda_{2OS}$	mean time to TinyOS failure state	72 hours
$1/\lambda_{app}$	mean time to application failure	48 hours
$1/\mu_{pow}$	mean time to repair power	10 minutes
$1/\mu_{sen}$	mean time to repair sensor	10 minutes
$1/\mu_{mic}$	mean time to repair microcontroller	10 minutes
$1/\mu_{tra}$	mean time to repair transceiver	10 minutes
$1/\mu_{1OS}$	mean time to repair TinyOS	30 minutes
$1/\alpha_{tra}$	mean time to buffer full	30 minutes
$1/\beta_{tra}$	mean time to empty buffer	2 minutes
$1/r_{t_{app}}$	mean time to trigger reset of application	2 seconds
C	coverage factor for application	0.95

failure(MTTF), mean time to repair(MTTR)은 하드웨어 공급업체에서 보통 표 형태로 제공된다. 그러나 본 논문에서는 특정한 업체의 센서 노드를 대상으로 하지 않기 때문에 다양한 하드웨어 센서 제조업체에서 제공하는 MTTF와 MTTR중에서 임의로 선정한 모델 입력 파라미터 값을 사용하였다. H/W에 반하여 S/W부분에 해당되는 tinyOS와 응용프로그램에 대한 MTTF와 MTTR 등의 입력 파라미터 값들은 존재하지 않으므로, 본 논문에서는 일반적인 OS들과 응용프로그램의 MTTF, MTTR을 살펴보고 임의적인 값을 선정하였다.

센서 노드 각 컴포넌트에 대한 고장율/복구율을 구하는 것은 시간이 매우 오래 소모되고, fault injection experiment같은 실험이 소요되는 작업이며, 이러한 데이터를 구하기 위한 실험을 수행중이다. 본 논문에서는 센

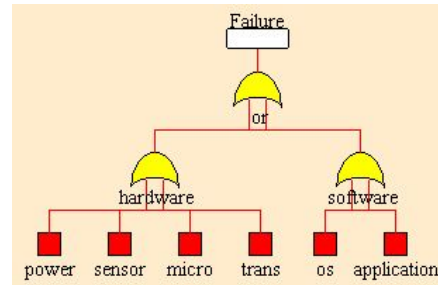
서 노드의 가용성 분석 방법론을 주로 제시하고, 데이터 값들은 일반적인 센서 노드의 수명을 고려하여 만든 데이터로 차후에 직접적인 노드로부터 고장율/복구율을 획득한 후 값을 바꾸어도 센서 노드의 가용성은 검증되어 질수 있을 것이다.

<표 1>은 사용된 실험을 위한 모델 파라미터이다.

<그림 9>는 <그림 2>에서 표현한 계층적 모델을 SHARPE에서 구현한 것이다.

<표 2>에서는 각 하위 모델의 가용성을 표시하였다.

<표 3>은 SHARPE 도구를 사용하여 가용성, 다운 타임, 다운타임당 비용을 각각 계산한 결과이다.



<그림 9> SHARPE [10]에 구현한 fault tree

<표 2> 각 하위 모델의 가용성

하위 모델명	가용성
파워	9.99980974e-001
센서	9.99998036e-001
마이크로 컨트롤러	9.99008920e-001
송수신기	9.91014799e-004
TinyOS	9.93107410e-001
응용 프로그램	9.99257375e-001

<표 3> 실험 결과

파라미터	결과값
가용성	9.82249276e-004
다운 타임	5.25083730e+005
다운 타임 비용 (분당 100USD)	5.25083730e+007

이상에서 단일 센서 노드의 가용성을 계층적인 모델링 기법을 통하여 만들고, 입력값을 통해서 단일 센서 노드의 가용성을 평가하였다.

본 연구의 장점은 기존의 관련 연구가 주로 네트워크 계층에서 이루어졌다면 본 연구는 센서 노드 계층에서 이루어진 연구이다. 기존 연구들이 하드웨어에 초점을 맞추었다면 본 연구에서는 하드웨어 뿐만 아니라 센서 노드를 구성하는 소프트웨어도 고려한 연구이다. 또한 센서 노드의 가용성을 향상시킬 수 있는 향후 연구 기반을 제공할 수 있다.

향후 연구 방향으로는 본 논문에서 제시된 하위 모델들을 좀 더 개선하고, 센서 노드 레벨뿐만 아니라 센서 네트워크 레벨에서의 가용성, 신뢰성을 보다 정교하게 모델링하고 평가하는 기술을 제시하고자 한다.

V. 결론

본 논문은 단일 센서 노드의 가용성을 정량적으로 평가하는 방안에 대해서 제안하고 계층적인 모델링을 통하여 이를 평가하였다. 이를 위해 먼저 단일 센서 노드에서 발생할 수 있는 고장을 분류하고 고장율에 따른 각각의 하위 구성 요소의 가용성을 평가하였으며, 이를 통하여 상위 fault tree에서의 시스템 가용성을 평가하였다.

향후 연구 과제로는 실제 센서 노드 각각의 구성요소에 대한 고장률과 복구율을 측정하는 연구와 단일 센서 노드가 좀 더 다양한 형태의 토폴로지로 구성되었을 경우와 더불어 링크에서 신뢰성, 가용성도 고려한 연구도 진행되어야 할 것이다. 또한 센서 노드에 대한 관련 연구가 활발하게 이루어지면서 센서 노드를 원격에서 재프로그래밍하는 연구가 진행되고 있으며, 센서 노드나 애드혹 노드들을 원격에서 제어함으로써 센서 노드의 가용성을 높이는 연구결과도 모델에 반영할 계획이다.

참고문헌

- [1] K. S. Trivedi, R. Vasireddy, D. Trindade, S. Nathan and Rick Castro, Modeling High Availability Systems, Pacific Rim Dependability Conference, PRDC 2006.
- [2] Kishor S. Trivedi, Dazhi Wang, D. Jason Hunt, Andrew Rindos, W. Earl Smith, Bart Vashaw: Availability Modeling of SIP Protocol on IBM(c) WebSphere(c). PRDC 2008, pp. 323-330.
- [3] S. Al-Omari, W. Shi, "Toward highly available WSNs for assisted living," In Proc. the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for health-care and assisted living environments, 2007, pp. 31-36.
- [4] S. Al-Omari, W. Shi, "Availability Modeling and Analysis of Autonomous In-Door WSNs," In Proc. IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems 2007(MASS 2007), Vol., No., Oct,2007, pp. 1-9, 8-11.
- [5] M. W. Chiang, Z. Zilic, J. -S. Chenard, K. Radecka, "Architectures of Increased Availability Wireless Sensor Network Nodes," In Proceedings of the International Test Conference on International Test Conference (ITC 2004), October 26-28, 2004, pp. 1232-1241.
- [6] X. Liu, "On the Availability of Wireless Sensor Networks," In Proc. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2008), Vol., No., March 31 2008-April 3 2008, pp. 3081-3086.
- [7] S. Parvin, D. Kim, S. Lee, J. Park, "Achieving availability and survivability in wireless sensor networks by software rejuvenation," In Proc. the 4th international workshop on Security, privacy and trust in pervasive and ubiquitous computing

- (SecPerU 2008), July 07-07, 2008, pp. 13-18.
- [8] A. Taherkordi, M. A. Taleghan, M. Sharifi, "Achieving availability and reliability in wireless sensor networks applications," In Proc. The First International Conference on Availability, Reliability and Security, 2006(ARES 2006), April 2006.
- [9] K. S. Trivedi, Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [10] K. S. Trivedi, SHARPE 2002: Symbolic Hierarchical Automated Reliability and Performance Evaluator, In Proc. Int. Conf. on Dependable Systems and Networks, 2002, pp. 54.

■ 저자소개 ■



윤영현
Yoon, Young Hyun

2000년 10월~현재
명지전문대학 정보통신과 부교수
2002년 2월 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
1994년 8월 고려대학교 산업대학원
전자통신공학과 (공학석사)
1992년 10월~2000년 10월
SKC&C 기술연구소
1989년 1월~1992년 10월
대우통신주 시스템기술부

관심분야 : 멀티미디어통신, 센서네트워크,
정보경영
E-mail : yhyoon@mjc.ac.kr

논문접수일 : 2009년 5월 10일
수정일 : 2009년 5월 20일 (1차)
2009년 5월 30일 (2차)
게재확정일 : 2009년 6월 5일