

# 마코브 연산 기반의 함정 분산 제어망을 위한 실시간 고장 노드 탐지 기법 연구

## Markov Model-Driven in Real-time Faulty Node Detection for Naval Distributed Control Networked Systems

노 동 희, 김 동 성\*  
(Dong-Hee Noh<sup>1</sup> and Dong-Seong Kim<sup>2\*</sup>)

<sup>1</sup>Dept. of IT Convergence, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2</sup>Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**Abstract:** This paper proposes the enhanced faulty node detection scheme with hybrid algorithm using Markov-chain model on BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) code in naval distributed control networked systems. The probabilistic model-driven approach, on Markov-chain model, in this paper uses the faulty weighting interval factors, which are based on the BCH code. In this scheme, the master node examines each slave-nodes continuously using three defined states : Good, Warning, Bad-state. These states change using the probabilistic calculation method. This method can improve the performance of detecting the faulty state node more efficiently. Simulation results show that the proposed method can improve the accuracy in faulty node detection scheme for real-time naval distributed control networked systems.

**Keywords:** faulty node detection, naval distributed control networked systems, weighting factors, BCH, Markov-Chain model

### I. 서론

함정 분산 제어망 내 노드의 생존성 및 실시간성을 보장하기 위해 분산 제어망 내에 결합 탐지 기법, 결합 관리 기법 및 고장 진단기법을 통한 오류 정정 기술을 적용시키는 연구가 진행 중에 있다[1-3].

분산 제어망 설계 시 주요하게 여겨지는 문제 중 하나는 제어망 구성 시 노드 소실로 인한 불규칙적인 자원 분배로 인한 전체 망 성능의 저하를 야기한다는 점에 있다[4,5]. 이로 인해, 다수의 슬레이브 노드로 구성된 분산 제어망 내에서 결합이 발생한 노드를 탐지하기 위해서는 실시간성이 위배되는 처리 시간이 소요된다[6,7].

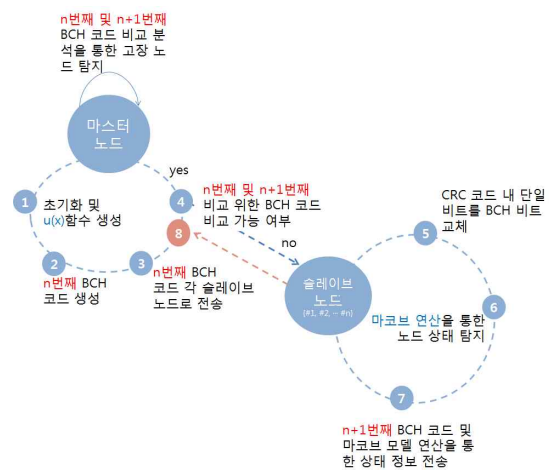
본 논문에서는 마스터 노드에서 고장 노드를 탐지함에 있어 고장 노드의 탐지 정확도를 높이기 위해 마코브 모델을 적용한다. 이를 통해, 결합이 있는 노드를 실시간으로 탐지함을 목적으로 한다.

각 슬레이브의 상태는 안정 상태, 경고 상태 및 위험상태의 세 가지 상태를 기반으로 특정한 확률적 조건에 따라서 간 상태가 설정된다. 이는 마코브 모델을 통한 확률적

연산을 통해 노드 내 상태 천이가 이루어지며, 마스터 노드에서는 상태 천이 정보를 BCH 코드와 함께 수신 받아 결합이 있는 노드를 보다 정확하게 탐지한다.

### II. 문제점 분석 및 분산 제어망 내 노드 설계

그림 1은 마스터 노드와 슬레이브 노드 간 BCH 코드를 통해 고장노드를 탐지하는 알고리즘을 도식화한 것이다. 그림 1에서, 마스터 노드는  $D$ 값을 생성한다. 이후 해당 값은



\* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2014 / revised September 10, 2014 / accepted September 15, 2014

노동희: 금오공과대학교 IT융복합공학과(ndh1309@kumoh.ac.kr)

김동성: 금오공과대학교 전자공학부(dskim@kumoh.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 “창조ICT 융합인재양성사업” 및 지역혁신인력양성사업 (NRF-2012H1B8A 2026109)으로 수행된 연구결과임

※ 이 논문은 2014 제 29회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음 [10].

그림 1. 제안된 기법의 마코브 모델이 적용된 BCH 코드를 이용한 고장노드 탐지 알고리즘 도식도.

Fig. 1. The Design of Fault Node Detection using BCH Distribution based on the Markov-chain Model.

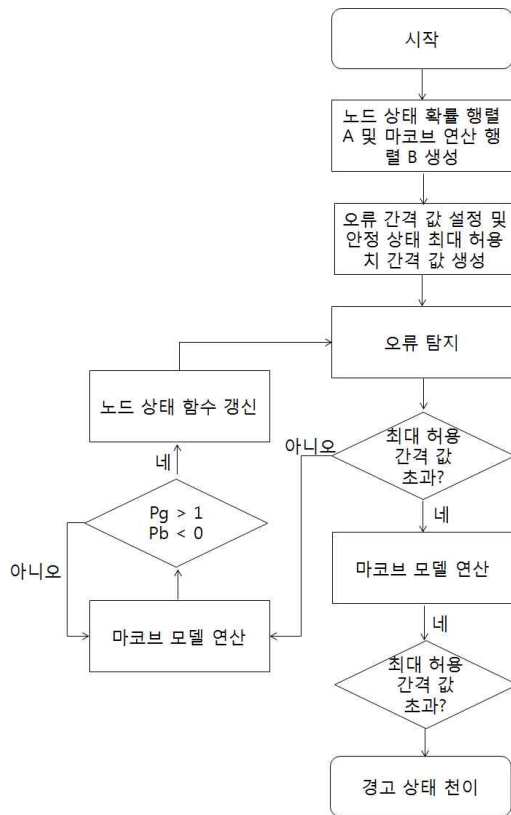


그림 2. 마코브 모델 기반의 안정 상태 알고리즘 도식도.  
Fig. 2. The Design of Good-State Algorithm in Markov models.

슬레이브 노드로 분산한다.  $D$ 값은 BCH 코드를 계산하기 위한 기본 값으로 사용되며, 각 노드 내 수행되는 BCH 코드 값  $b(x)$ 는 식 1과 같이 증명할 수 있다. 각각의 슬레이브 노드는 일정 기간 순환하여 마스터 노드와 통신한다. 즉,  $n$ 번째 노드 내 데이터의  $c^n = l$ 의 비트가 있을 때, 데이터 전송은  $c_{0:l-2}^n = l$ 와 같은 데이터 및  $c^{n-1} = 1$ 와 같은 단일 BCH 코드로 수정될 수 있다.

$$b(x) = d(x)x^p + (d(x)x^p \bmod g(x)). \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여, 앞서 언급된 문제를 개선하기 위해, 마스터 노드에서 다수의 슬레이브 노드와 통신 시, 오류 검출 코드인 CRC (Cyclic Redundancy Code) 코드 내 단일 비트를 BCH 비트로 대체하여 이를 마스터 노드로 전송하여 이전에 수신받은 BCH 코드와의 비교 분석을 통해 고장 가능성이 있는 슬레이브 노드를 탐지하는 방법이 제안되었다 [8,9].

하지만, 고장 노드를 탐지함에 있어 판정의 신뢰성을 보장하기 위해 앞서 제안된 고장 노드 판정법의 경우 시퀀스 번호에 따라 오류 발생 빈도가 차이가 영향을 받으며, 또한 정해진 필터를 사용함에 따른 효율성의 문제에 직면하는 등 많은 개선사항이 요구되었다. 본 논문에서는 앞서 연구된 시스템 설계에서 문제로 제기된 고장 노드 판단 기법의 효율성을 얻기 위해, 확률적 연산을 통한 마코브 모델이 적용된 새로운 고장 노드 판단 기법을 제안한다. 본 논문에서 구성된 분산 제어망 설계의 구성은 다음과 같다. 각 슬레이브

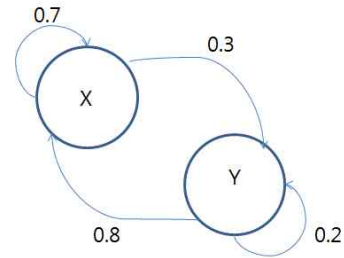


그림 3. 마코브 모델 기반의 상태 함수 B 도식도.  
Fig. 3. The Design of State Matrix-B in Markov models.

브 노드의 상태는 각각 안정, 경고 및 위험 상태로 정의되며 이를 통해 노드의 상태의 천이 혹은 유지 정보를 마스터 노드로 BCH 코드와 함께 전송하여 마스터 노드에서 고장 노드를 실시간으로 탐지한다.

본 논문에서 제안된 기법은 식 (2)을 이용한 마코브 체인 연산을 통해 확률적 연산이 이루어진다. 상태 함수 A는 초기 노트의 안정 및 위험 단계에서의 확률을 행렬로 표현한 것이며, 상태 함수 B는 마코브 연산을 수행한다고 가정할 시, 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 상태 천이 시 적용되는 확률을 행렬로 표현한 것이며, 각 행렬값은 상태 확률을 임의로 설정한 값이다. 그림 3은 이를 도식화한 것이다. 마코브 연산을 수행한다고 가정할 때, 식 (2)는 식 (3)을 통해 구체화할 수 있다.

$$\begin{cases} A = (p_g, p_b) \\ B = \begin{pmatrix} B_{ii} & B_{ij} \\ B_{ji} & B_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 \\ 0.2 & 0.8 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

$$B^{n+1} = A \times \prod_{i=1}^n B^i. \quad (3)$$

### III. 마코브 연산이 적용된 고장 노드 탐지 알고리즘

#### 1. 슬레이브 노드 내 안정 단계 알고리즘 설계

기본적으로 분산 제어망 내 각 슬레이브 노드는 BCH 코드를 마스터 노드로 전송하여  $n-1$ 번째 수신값과  $n$ 번째 수신값의 비교를 통해 고장 노드를 탐지한다. 본 논문에서는 각 슬레이브 노드에서는 자신의 상태를 제안된 마코브 연산을 이용하여 얻어진 정보를 실시간으로 BCH 코드와 함께 전송하여 오류를 탐지한다. 일정 시간  $t$ 동안 오류가  $t_A$  및  $t_B$ 로 각각 탐지된다면, 이를 통해 오류 간격 값을 얻어낼 수 있으며, 이는  $t_o$ 로 표현한다.

본 논문에서 제안된 기법에서, 노드의 초기 상태는 안정 상태를 띄며 노드 상태 확률 값은  $A = (p_g, p_b) = (1 \ 0)$ 으로 정의된다.  $p_g$ 는 안정 상태에서의 확률을 나타낸 값이며,  $p_b$ 는 위험 상태에서의 확률을 나타낸 값이다. 본 알고리즘에서 해당 간격 값과 안정 상태 최대 허용치를 비교한다. 간격 값  $t_o$ 이 안정 상태 최대 허용치  $t_{th}$ 보다 작을 경우, 일정 시간 동안 오류 발생 횟수가 허용치보다 빈번하게 발생함을 의미하기 때문에, 이러한 조건을 만족할 시 식 (3)의 마코브 모델 연산을 수행한다. 이와 반대의 경우는

식 (4)의 연산을 통해 노드 상태 함수를 갱신한다.

$$A' = (p_g + 0.1, p_b - 0.1) \quad (4)$$

만약  $p'_g, p'_b$ 의 값이 각각 1보다 클 경우, 혹은 0보다 작아질 시 정규화 과정을 거친다.

한편, 식 (3)을 통해 마코브 연산을 수행한 후, 해당 노드는 후에 안정 상태에 머무르거나 혹은 경고 상태로 넘어가기 위한 판정 단계를 거친다.  $n+1$ 번째 마코브 연산을 수행한 후,  $A$ 행렬 내  $p_b$ 의 값과 위험 상태에서의 최대 허용 확률과의 크기를 나타내는  $p_{tb}$ 와의 비교 단계를 거친다.

해당 단계를 통해  $p_b$ 값이  $p_{tb}$ 보다 클 경우, 경고 상태에 접어들음을 판정하게 된다. 그림 2는 안정 상태에서의 알고리즘을 도식화한 것이다.

2. 슬레이브 노드 내 경고 단계 알고리즘 설계

본 알고리즘에서는 초기 노드 상태 행렬로 표현되는  $A$ 의 경우  $C = (p_b, p_g)$ 로  $p_g, p_b$ 의 값이 각각 반전된다. 이 때, 경고 상태로 상태가 전환된 노드는 불능 상태로 간주하는 위험 상태 및 회복 가능성이 있는 안정 상태로의 상태 천이 판정 단계를 수행한다. 본 알고리즘 단계에서는 노드 내 오류 발생 횟수를 측정한다.  $e_t$ 로 표기하며 최대 허용 오류 발생 횟수로 표기되는  $e_m$ 과의 비교를 통해 위험 상태로의 천이 판단 단계를 수행한다.  $e_t$ 가  $e_m$ 보다 클 경우, 주어진 시간 내 허용치를 초과하는 오류가 발생함에 따라, 위험 상태에 접어들음을 판정하게 된다.

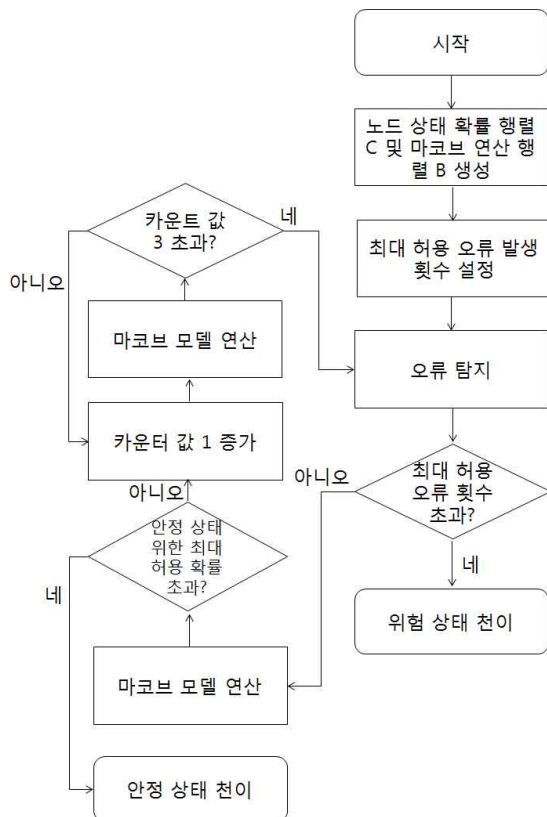


그림 4. 마코브 모델 기반의 경고 상태 알고리즘 도식도.  
Fig. 4. The Design of Warning-State Algorithm in Markov model.

$$B^{k+1} = C \times \prod_{j=1}^k B \quad (5)$$

$e_t$ 가  $e_m$ 보다 적을 경우,  $k+1$ 번째 마코브 연산을 수행하며, 식 (5)를 통해 해당 연산이 가능하다. 이 때, 카운터 값  $k$ 는  $p_g$ 의 값과 안정 상태를 위한 최대 허용 확률과의 크기를 나타내는  $p_{tg}$ 와의 비교 단계를 통해 증가 여부를 판단하며, 이 때  $p_g$ 의 값이  $p_{tg}$ 보다 클 경우, 안정 상태로 상태 천이 단계로의 판정을 수행한다. 반대의 경우는, 카운터 값  $k$ 를 증가시키며, 그 연산 횟수가 3회 이상일 경우  $e_t$ 와  $e_m$ 의 비교 판정 단계로 이동하여 다시 위험 상태 여부를 탐지하게 된다. 그림 4는 경고 상태에서의 알고리즘을 도식화한 것이다.

IV. 모의 실험

본 논문에서 제안하는 마코브 모델 연산을 이용한 고장 노드 탐지 방법을 위한 환경 구성은 다음과 같다. 슬레이브 노드는 최대 15개로 설정되었으며, 폴링 시간은 100ms로 설정하였다. 그리고 안정 및 위험 상태에서의 최대 허용 확률을 각각 0.375 및 0.625로 설정하였다. 또한 모의실험에 사용된 오류값을 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널 하에서 무작위로 발생 및 이를 탐지하는 환경을 구성하였다.

1. 분산 제어망 내 제안된 기법의 오탐지율 분석

본 논문에서는 기존의 방법인 CRC 및 BCH 삽입 방법과 비교하여 오탐지율을 분석하였다. 또한 본 논문에서는 성능 분석을 위하여 세 가지 방법을 정의하여 모의실험을 진행하였으며, 이는 동일한 고장 가능성을 내포하는 임의의 두 노드가 있을 때, 또 다른 노드가 고장 가능성이 있다고 할 때의 환경을 가정하였다. 첫 번째 방법은 앞서 가정된 고장 가능성을 가지고 있는 두 개의 노드와 또 다른 노드가 동일한 SNR (Signal to Noise Ratio) 특성에서 고장 가능성을 가지고 있다고 가정한다. 두 번째 방법은 앞서 언급된 두 개의 노드가 SNR 9 레벨에서 고장 가능성이 있을 때, 또

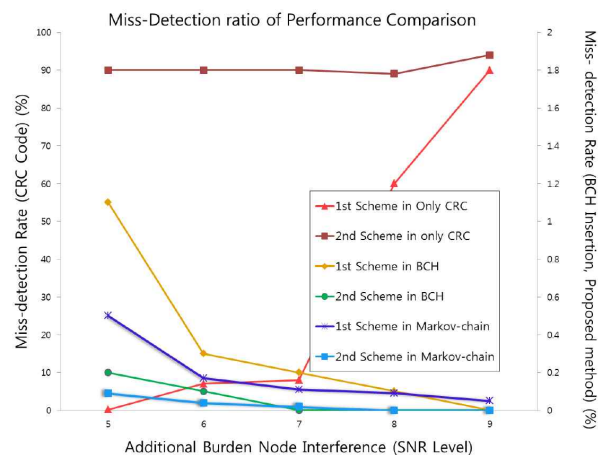


그림 5. 분산 제어망 내 오탐지율 분석.  
Fig. 5. Faulty Node Detection performance through the comparative study.

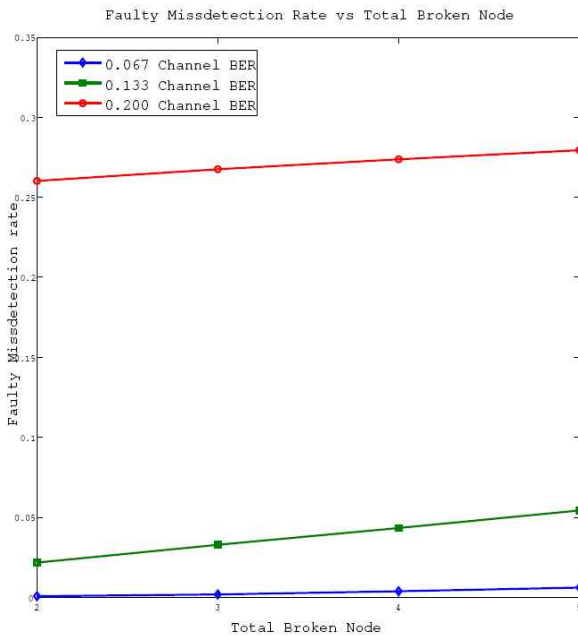


그림 6. 고장 노드 발생에 따른 분산 제어망 내 오탐지율 분석.  
Fig. 6. Performance of Correlation between Miss-Detection Rate and the Total Faulty Node.

다른 노드가 그림 5의 x축의 다양한 SNR 레벨에 의해 고장 가능성을 가지고 있음을 가정한다.

그림 5를 통해 CRC 코드의 오탐지율을 y축의 좌측 축을 통해 해석할 수 있으며, BCH 삽입 방법 및 제안된 기법을 통한 오탐지 성능분석은 y축의 우측 축을 통해 해석할 수 있다. 그림 5에서 CRC코드의 경우 BCH 단일코드가 대체된 CRC 코드와 비교하여 동일한 SNR 레벨에서 탐지 능력에 있어 성능이 떨어짐을 알 수 있다. 이는 CRC코드의 경우, 오직 오류를 탐지할 뿐 채널 영향 및 노드의 성능에 의해 오류가 발생하는 것에 대해서는 분별하지 못함을 알 수 있었으며, BCH 삽입 방법에 비해 제안된 기법이 보다 정확하게 고장 노드를 탐지할 수 있음을 보였다.

## 2. 분산 제어망 내 고장 노드 발생 정도에 따른 탐지 성능 분석

그림 6을 통해 분산 제어망 내 고장 노드가 2개에서 최대 5개까지 발생했을 때의 오탐지율을 분석하였다. 그림 6을 통해 분산 제어망 내 고장 노드가 발생하였을 때, 0.067에서 0.2에 이르는 다양한 채널 잡음에서 효율적으로 고장 노드를 탐지하는 성능을 보였다. 이를 통해, 채널 품질의 저하로 인한 잡음 등에 의해 손실된 지연시간에 영향을 받는 고장노드는 제안된 기법을 통해 보다 쉽게 탐지될 수 있음을 보였다.

## V. 결론

본 논문에서는 분산 제어망에서 고장노드가 발생할 때 이를 단시간 내에 보다 정확하게 탐지하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 CRC 코드 내 BCH 단일 비트를 대체하는 환경에서 확률적 연산을 통한 마코브 연산 이용하여 고장 노드를 보다 정확하게 탐지한다. 특히 마코브 연산을 통

해 각 슬레이브 노드는 안정, 경고 및 위험 상태를 정의하여 마스터 노드에 의해 각 슬레이브 노드의 상태를 확률적 연산에 따른 친이 방법을 통해 분산 제어망 내 고장 노드를 보다 정확하게 탐지 가능함을 보였다.

본 논문에서의 모의실험 결과를 통해 분산 제어망에서 기존의 방법인 CRC 코드 및 BCH 삽입 방법과 비교하였을 때 우수한 고장 노드 탐지율을 보였으며, 일부 또는 다수의 슬레이브 노드가 고장 상태에 접어들었을 때에 다양한 채널 잡음 상황이 고려되는 무선 환경에서도 효율적으로 이를 탐지할 수 있음을 보였다.

## REFERENCES

- [1] D.-S. Kim and S. K. Huh, "Distributed control networks of naval combat systems," *The Korea Institute of Information and Communication Engineering Semiannual*, vol. 13, no. 2, pp. 41-47, 2013.
- [2] K. S. Song, D. S. Kim, and Y. S. Choi, "A design of message oriented management and analysis tool for naval combat systems," *Journal of IEEK*, vol. 51, no. 2, pp. 437-444, 2014.
- [3] H. A. Putra and D.-S. Kim, "Node discovery scheme of DDS for combat management system," *Computer Standard and Interface*, Jun. 2014.
- [4] S. Kelkar and R. Kamal, "Adaptive fault diagnosis algorithm for controller area network," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, Oct. 2014.
- [5] C.-K. Ryoo, H.-S. Shin, and M.-J. Tahk, "Energy optimal waypoint guidance synthesis for antiship missiles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 80-95, Jan. 2010.
- [6] D. S. Kim, Y. S. Lee, and W. H. Kwon, "Maximum allowable delay bounds in networked control systems," *Control Engineering Practice*, vol. 11, pp. 1301-1313, no. 11, Dec. 2003.
- [7] D.-S. Kim, D.-H. Choi, and P. Mohapatra, "Real-time scheduling method for networked discrete control systems," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 5, pp. 564-570, May 2009.
- [8] A. Prasetyadi and D.-S. Kim, "Faulty node detection in distributed systems using BCH code," *IEEE Communications Letter*, vol. 17, no. 3, pp. 620-623, Mar. 2013.
- [9] D.-H. Noh and D. S. Kim, "Real-time faulty node detection scheme in naval distributed control networks using BCH codes," *Journal of IEEK*, vol. 51, no. 5, pp. 20-28, May 2014.
- [10] D.-H. Noh and D. S. Kim, "Real-time fault detection of naval distributed control networks using markov-chain computation," *Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean)*, Daegu, Korea, pp. 240-241, 2014.



**노 동 희**

2013년 금오공과대 전자공학과 졸업.  
2013년 동 대학원 IT융복합공학과 석사. 관심분야는 네트워크 기반 임베디드 시스템, 항정 제어 통신망.



**김 동 성**

1992년 한양대학교 전자공학과 학사졸업. 2003년 서울대학교, 전기 및 컴퓨터공학부 박사졸업. 2003년 Cornell 대학교 ECE 박사 후 연구원. 2007년 12월~2009년 2월 U. C. Davis 전산학부 객원교수. 2004년 3월~현재 금오공대 전자공학부 부교수. 2014년 6월~현재 미래창조과학부 지원 ICT 융합 특성화 연구센터 센터장. 관심분야는 국방/산업용 제어 통신망, 실시간 임베디드 시스템.