

WSN 기반 화재 상황 모니터링을 통한 대피 경로 도출 알고리즘

윤진이*, 진연진*, 박소연*, 이형준^o

Customized Evacuation Pathfinding through WSN-Based Monitoring in Fire Scenarios

JinYi Yoon*, YeonJin Jin*, So-Yeon Park*, HyungJune Lee^o

요약

본 논문에서는 화재 상황에서의 위험도 예측 시스템과 화재 대피 경로 도출 알고리즘을 제안한다. 온도 예측 시스템에서는 무선 센서 네트워크를 통해 수집한 온도 정보를 기반으로 멀티레벨 클러스터링 기법을 통해 사용자가 대피할 시점의 온도를 예측한다. 예측된 온도와 이의 신뢰도를 바탕으로 사용자의 현재 위치부터 가장 안전한 출구까지의 대피 경로를 도출하는 화재 대피 경로 알고리즘을 제안한다. NIST의 FDS(Fire Dynamics Simulator) 시뮬레이터를 이용하여 47개의 정적 노드로 구성된 무선 센서 네트워크에 대해 1436.41초 동안 성능 평가를 한 결과, 제안하는 온도 예측 시스템을 사용하였을 때, 예측 정확도가 1.48배 증가하였으며, 예측 정확도가 높은 군에 속하는 노드에 대해서는 4.21배로 크게 증가한 것으로 나타났다. 또한, 화재 대피 경로 알고리즘을 통해 도출한 대피 경로가 실제 ground-truth 온도를 사용하여 대피했을 때에 비하여 안전한 노드를 경유하는 비율이 큰 차이를 보이지 않았으며, 최단 대피 경로에 비해서는 약 12% 이상 더 안전한 경로를 도출하였음을 확인할 수 있었다.

Key Words : Multi-level Clustering, Fire Evacuation, Wireless Sensor Networks, Pathfinding, Environmental Monitoring

ABSTRACT

In this paper, we present a risk prediction system and customized evacuation pathfinding algorithm in fire scenarios. For the risk prediction, we apply a multi-level clustering mechanism using collected temperature at sensor nodes throughout the network in order to predict the temperature at the time that users actually evacuate. Based on the predicted temperature and its reliability, we suggest an evacuation pathfinding algorithm that finds a suitable evacuation path from a user's current location to the safest exit. Simulation results based on FDS(Fire Dynamics Simulator) of NIST for a wireless sensor network consisting of 47 stationary nodes for 1436.41 seconds show that our proposed prediction system achieves a higher accuracy by a factor of 1.48. Particularly for nodes in the most reliable group, it improves the accuracy by a factor of up to 4.21. Also, the customized evacuation pathfinding based on our prediction algorithm performs closely with that of the ground-truth temperature in terms of the ratio of safe nodes on the selected path, while outperforming the shortest-path evacuation with a factor of up to 12% in terms of a safety measure.

* 이 논문은 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터(IITP)의 서울어코드활성화지원사업(IITP-2016-R06131610040001002) 및 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1D1A1A01057902).

• First Author : Department of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University, yjin3012@ewhain.net, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University, hyungjune.lee@ewha.ac.kr, 정회원

* Department of Computer Science Engineering, Ewha Womans University, yeonjin@ewhain.net, ewsy25@ewhain.net, 학생회원

논문번호 : KICS2016-08-226, Received August 31, 2016; Revised October 17, 2016; Accepted October 18, 2016

I. 서 론

최근 모바일 기기 사용의 증가 및 유비쿼터스 기술의 발전으로 인하여, 컴퓨터를 통한 자동화를 넘어 장소와 시간에 구애받지 않고 정보통신망에 접속함으로써 사물들이 유기적으로 연결되어 정보를 교환하는 4차 산업 혁명의 단계에 진입하였다. 이를 위해 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)를 활용한 연구¹⁻³⁾들이 진행되어지고 있다. 대표적으로 무선 센서를 이용하여 실시간 주위 환경 모니터링을 수행하는 연구^{2,4)6)}가 활발히 진행되고 있으며, 실시간 모니터링을 활용하여 재난 상황 발생의 경우에 신속한 상황 인지 및 대처를 가능하도록 하는 연구들이 진행되고 있다^{1,3,6)}.

화재 발생은 사고 발생 시 보다 신속한 사고 발생 인지 및 대응이 절대적으로 필요한 대표적인 재난 상황으로서, 건물 내에서 발생 시 사람들에게 신속하고 효율적인 대피 경로 제시가 사고 발생으로 인한 피해를 최소화하는데 중대한 영향을 미친다. 본 논문에서는 빌딩 내 화재 발생 시 WSN 으로 수집한 온도 데이터를 바탕으로 지역별로 멀티레벨 클러스터링(multi-level clustering)을 통해 일정 시간 이후의 재난 상황 정도를 예측하는 기법과, 이의 신뢰도를 고려한 화재 대피 경로를 결정해주는 알고리즘을 제안한다.

화재와 관련하여 기존에 진행된 연구들은 WSN 으로부터 수집된 데이터를 통해 해당 시점의 상태를 파악하여 신뢰성 있는 화재 발생 인지를 목표로 하는 내용^{7,8)}으로 국한되며, 이를 위해서 온도, 가스 밀도, 비열 등 다양한 추가적 요소를 필요로 하기에 시스템의 복잡성 또한 큰 한계점이 존재한다⁹⁾. 대피 경로를 제안해주는 기존 연구들은 건물에 익숙하지 않은 사용자들이 이용하기에 어려움이 있으며, 사용자의 위치 및 상황과는 관계없는 대피 경로를 제시해 주는 정도에 그치고 있다^{10,11)}. 또한 현재 시점을 바탕으로 하여 대피 경로를 제안해주기에 실제 대피할 시점의 상황에는 적절하지 않다는 한계를 내포하고 있다¹²⁾. 따라서 본 논문에서는 이런 상황을 고려하여, 최소한의 정보인 온도 정보만을 수집하여 일정 시간 이후의 화재 상황을 파악하며, 사용자의 위치와 실제 대피할 시점을 고려한 대피 경로를 제안한다는 점에서 기존 연구들과의 차별성을 가진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 멀티레벨 클러스터링을 사용한 온도 예측 기법과 화재 대피 경로 도출 알고리즘을 제안하고, III장에서는 시뮬레이션 실험을 통하여 제안하는 시스템의 성능을 검증한

다. 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구 방향에 대해 제시하도록 한다.

II. 본 론

본 논문에서는 정적 노드들로 구성된 WSN 환경이 구축된 스마트 빌딩 내 화재가 발생하였을 때, WSN 에서 수집한 각 노드별 온도 정보를 바탕으로 멀티레벨 클러스터링 기법과 화재 대피 경로 알고리즘을 제안한다. 멀티레벨 클러스터링은 차례대로 여러 단계의 클러스터링을 적용하는 방식으로, 앞의 클러스터링 결과를 토대로 다음 클러스터링에 적용하는 단계적 클러스터링 기법이다. 해당 시스템에서는 총 두 단계의 클러스터링을 수행하는데, 온도 예측 정확성을 높이기 위한 가우시안 혼합 모델(Gaussian Mixture Model, GMM)¹³⁾을 기반으로 한 클러스터링과 화재 상황 파악을 위한 예측정확도를 기반으로 하는 클러스터링을 사용한다. 또한, 이러한 멀티레벨 클러스터링 기법을 통해 도출한 예측 온도와 해당 온도 값의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하여, 각 노드에서의 평균적인 예측 신뢰도를 분석하여 사용자의 현 위치에서부터 출구까지의 화재 대피 경로를 파악한다. 본 시스템에 대한 전반적인 구조도는 그림 1과 같다.

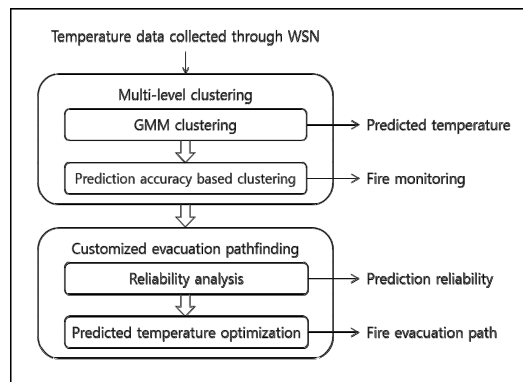


그림 1. 시스템 구조도
Fig. 1. System Structure Diagram

2.1 멀티레벨 클러스터링 기법을 사용한 온도 예측 시스템

본 온도 예측 시스템에서는 정적 노드들로 구성된 WSN을 통해 수집한 온도 정보를 기반으로 사용자가 대피할 시점의 온도 변화를 예측한다. 이를 위해 다음과 같이 두 개의 세부 단계로 나누어 수행한다. 첫 번

째 단계인 멀티레벨 클러스터링 기법에서는 GMM 클러스터링을 통해 노드별 온도 변화를 예측하고, 예측 정확도 기반 클러스터링을 사용하여 화재 상황을 파악한다. 두 번째 단계에서는 예측된 값의 정확성을 파악하기 위해, RMSE를 사용하여 예측 온도 값의 신뢰도를 분석한다.

멀티레벨 클러스터링 기법은 두 번의 서로 다른 클러스터링을 사용함으로써 온도 변화 예측 정확도를 높이고, 화재 상황 파악이 용이하도록 한다. 첫 번째 GMM 클러스터링은 온도 데이터를 사용하여 각 클러스터에 속할 확률 계산을 통해, 가장 높은 확률의 클러스터에 속하도록 한다. 두 번째 클러스터링은 각 노드마다 실제 온도와 예측 온도의 차이에 따라 그룹을 나누는 예측 정확도 기반 클러스터링이다.

화재의 영향으로 인해 순간적으로 온도가 급변하는 경우를 완화하면서 구간 신뢰성을 높이고 예측에 필요한 평균적인 상황을 파악하기 위해 클러스터링 기법을 적용한다. 특히 GMM 클러스터링 기법은 확률 변화를 통해 클러스터를 결정하기 때문에 실시간으로 계속해서 변화하는 화재 상황을 확률 기반으로 처리하기에 적합하다고 할 수 있다.

2.1.1 GMM 클러스터링

모든 노드들은 WSN으로 수집한 온도 데이터를 바탕으로 매 단위시간마다 각 클러스터에 속할 확률을 계산하여 가장 높은 확률의 클러스터에 속하게 된다.

먼저, GMM 클러스터링에서 사용할 클러스터의 개수를, 전체 노드 수가 N 일 때, 1이상 N 이하의 값으로 선정을 하게 된다. 이는 노이즈 현상의 영향을 완화하면서 동시에 클러스터링을 위한 연산 시간을 최소화하기 위함이다. 이를 위해, 초기에 클러스터의 개수가 1부터 N 인 모든 경우에 대해서 각각 GMM 클러스터링을 실행한다. 그리고 각 노드마다 실제 온도와 속한 클러스터의 중심 온도의 차이 값을 구한다.

$$|cluster_i - real_i| \tag{1}$$

i 는 노드 번호이며, $cluster_i$ 는 노드 i 가 속한 클러스터의 중심 온도, $real_i$ 는 노드 i 의 실제 온도를 나타낸다. 즉, 한 클러스터의 개수에 대해, 모든 노드 번호를 식 (1)에 적용한 결과의 평균과 표준 편차를 계산한다.

각각의 모든 클러스터 개수에서의 결과들의 평균과 표준 편차를 다시 계산한 값과 가장 유사한, 이 모든 경우들을 대표할 수 있는 클러스터의 개수를 GMM

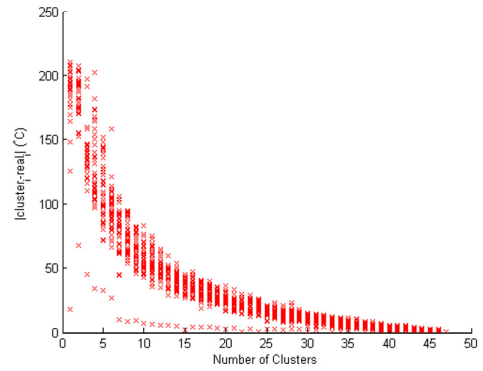


그림 2. 클러스터 개수에 따른 각 노드별 실제 온도와 속한 클러스터 중심 온도의 차이 값들의 분포
Fig. 2. Difference between the real temperatures and the average temperature at a belonging cluster for each node with respect to the number of clusters

클러스터링에 사용할 클러스터의 개수로 선정한다.

예를 들어 화재 상황 시 온도가 변화하는 47개의 노드(3장 성능평가 시뮬레이션 데이터)에 대하여, 3.61초부터 741.61초까지 18초의 간격으로 클러스터링 했을 때의 실제 온도의 노드가 속한 클러스터의 중심 온도의 차이 값들의 평균은 36.3215, 표준 편차는 7.39004인 것으로 나타났다. 클러스터의 개수 튜닝을 통해 15개로 클러스터링할 때, 평균 36.05083과 표준 편차 7.027293으로 앞의 전체 경우와 가장 유사한 결과를 보이는 클러스터링 개수를 설정하였다..

클러스터의 개수와 이에 대해 해당 클러스터에 속한 노드들을 GMM 클러스터링 기법^[13]에 따라 결정하면, 그에 속한 노드들의 온도 값들의 평균을 클러스터의 중심온도로 정하고, 각 노드는 노드에서 측정된 온도가 아닌 해당 노드가 속한 클러스터의 중심 온도를 사용하여 온도를 예측한다. 이와 같이 평균화 시킨 온도를 사용함으로써 온도 측정 시에 발생하는 노이즈를 완화할 수 있다.

2.1.2 노드별 온도 변화에 따른 온도 예측

온도를 예측하기 위해서, 화재 발생 시 내화 성능 판정에 일반적으로 사용하는 표준 화재 온도 곡선^[13]을 바탕으로, 각 노드별 온도 변화가 다양한 것을 고려한 응용 식을 사용한다. 응용 식은 현재까지 수집된 경험적 자료를 사용하여, 노드의 특성에 따라서 식을 결정할 수 있다.

$$T_t = a \times \log(0.133t + 1) + b \tag{2}$$

T_t 는 시간 t 일 때의 온도를 의미한다. 각 노드마다

시간과 그 시간에서의 온도로 구성된 데이터를 사용하여, 가장 적합한 계수 a 와 b 값을 최소 자승법(Least Square)을 통해 도출하고, 이렇게 완성된 식을 통해 예측하고자 하는 시간에서의 온도를 구한다. t 는 초 단위이며, T_i 는 $^{\circ}\text{C}$ 를 사용한다.

2.1.3 예측정확도 기반 클러스터링을 통한 화재 상황 파악

노드별 예측한 온도의 RMSE 값의 분포를 확인하였을 때, 화재 발생 지점과 가까울수록 온도 변화가 일정하지 않았음을 확인할 수 있었다. 이러한 현상 파악을 바탕으로, 각 노드의 특성을 파악하여 화재 진행 상황을 알아내기 위해, 각 노드마다 실제 온도와 예측 온도의 차이에 따라 나눈다.

$$diff = |real_i - predict_i| \quad (3)$$

i 는 노드 번호이고, $predict_i$ 는 노드 i 에서 예측한 온도, $real_i$ 는 노드 i 에서의 측정된 실제 온도를 의미한다. $diff$ 는 실제 온도와 예측한 온도의 차이 값이며, 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

각각의 노드마다 사용한 시간 자료와 예측할 시간의 데이터 세트들에서의 차이 값들에 대한 평균값을 도출하고, 해당 값이 30 미만일 경우 그룹 1, 60 미만일 경우 그룹 2, 그 이상은 그룹 3으로 분류한다. 즉, 그룹 1은 예측이 잘 된 노드들로, 그룹 3은 예측이 가장 부정확한 노드들로 구성된다.

2.2 화재 대피 경로 도출 알고리즘

본 논문에서 제시하는 화재 대피 경로 도출 알고리즘에서는, 정적 노드들로 구성된 WSN을 통해 얻은 각 노드별 온도 정보를 바탕으로, 멀티레벨 클러스터링 기법을 통해 도출된 예측 온도와 해당 값의 신뢰도를 이용해 사용자가 대피하는 지점으로부터 W 초 이후의 안전한 대피경로를 제시한다. 이를 위해 알고리즘은 두 개의 세부 단계로 나누어져서 수행된다.

첫 번째 단계인 예측 온도 값의 신뢰 분석에서는 그림 3의 Section 1과 같이 센서로부터 온도 데이터가 측정된 구간에서 실제 온도 $real_i$ 와, 식 (2)를 사용하여 예측한 온도 $predict_i$ 를 사용하여 RMSE를 도출하고 이를 통해 모든 노드에 대해 신뢰도를 구한다. 두 번째 단계에서는 대피 경로 최적화 알고리즘을 사용해, Section 2와 같이 센서로부터 온도 데이터가 측정되지 않은 시간 구간에 대해 Section 1의 온도데이터

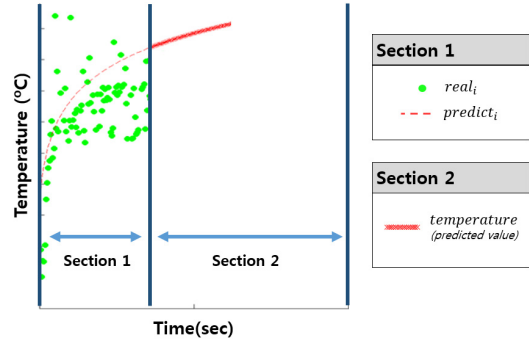


그림 3. Section 1의 실제 온도를 기반으로 Section 2 영역의 온도 예측
Fig. 3. Temperature prediction in Section 2 region based on real temperatures in Section 1

와 식 (2)를 사용하여 예측한 온도 값인 $temperature$ 와, 앞의 단계에서 도출한 신뢰도, 각 노드 사이의 거리에 최적화된 대피 경로를 도출한다.

2.2.1 예측 온도 값의 신뢰도 분석

예측 온도 값의 신뢰도 분석은, 두 번째 단계에서 사용할 예측된 온도의 정확성을 판단하기 위해 수행된다. 모든 노드에 대해서 각각 RMSE를 계산하여 신뢰도를 측정한다. RMSE를 도출하는 데에 사용되는 온도 데이터는, 센서를 통해 온도 데이터가 측정된 시간 구간 내에서 식 (2)를 사용하여 예측한 온도와 해당 시간에서의 실제 온도 데이터 이고, 두 데이터 집단을 사용하여 아래의 식을 통해 RMSE를 도출한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{20} (predict_{ij} - real_{ij})^2}{20}} \quad (4)$$

i 는 노드 번호이며, 신뢰도의 오차를 줄이기 위해 각 노드마다 20개의 실제값과 예측값과의 차의 제곱 평균값을 사용하였다. $predict_{ij}$ 는 노드 i 에 대해 j 번째 예측 경우에 얻은 온도 예측 값을 의미하고, $real_{ij}$ 는 실제 j 번째 경우의 온도 데이터를 의미한다. 이렇게 도출한 RMSE값은 각 노드에서의 예측 온도 값의 신뢰도로 사용한다.

2.2.2 대피 경로 최적화 알고리즘

각 노드별로 예측 온도와 예측 정확도, 그리고 노드 간의 거리 데이터가 주어졌을 때, 이를 이진 정수 프로그램을 수립하여 최적화된 대피 경로를 도출한다. 수립한 이진 정수 프로그램은 아래와 같다.

maximize

$$\sum_{i,j} \frac{reliability_i}{temperature_j \times distance_{i,j}^2} \cdot I_{i,j} \quad (5)$$

subject to

$$\sum_i I_{i,j} = \sum_k I_{j,k} \leq 1 \quad (j \neq source, exit) \quad (6)$$

$$\sum_j I_{source,j} = 1 \quad \text{and} \quad \sum_{k=1}^n \sum_i I_{i,exit(k)} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_i I_{i,source} = 0 \quad \text{and} \quad \sum_{k=1}^n \sum_j I_{exit(k),j} = 0 \quad (8)$$

목적함수 (5)는 각각의 노드를 이어주는 연결정보에 대해, 신뢰도와 예측 온도, 노드 간 거리에 따른 값을 최대화한다. 즉 예측 신뢰도를 최대화하면서, 예측 온도 및 노드 간 이동 거리를 최소화하는 방향으로 경로들을 최적 결정하도록 한다. $I_{i,j}$ 는 대피경로를 나타내기 위한 표시함수(indicator function)로, 노드 i 에서 j 로 가는 경로가 선택되면 $I_{i,j} = 1$, 선택되지 않으면 $I_{i,j} = 0$ 의 값을 갖는다. $reliability_j$ 는 노드 j 에서의 신뢰도를 의미하며, $temperature_j$ 는 노드 j 에서 예측된 온도를 의미한다. $distance_{i,j}$ 는 노드 i 에서 j 까지의 거리이며, 단위는 미터(m)를 사용한다. n 은 전체 출구의 총 개수이다.

식 (6)은 $source, exit$ 가 아닌 모든 노드 j 에 대해서, 노드 i 에서 j 로 향하는 경로가 선택되면 반드시 j 에서 다른 노드 k 로 향하는 경로가 존재한다는 조건을 의미한다. 식 (7)과 (8)은 $source$ 는 경로를 시작하는 경우만 존재하며, $exit$ 는 경로를 끝내는 경우만 존재한다는 것을 의미한다. 이러한 조건에서 목적함수 (5)의 최대화를 통해, 대피 경로를 선택할 때, 각 출발지 $source$ 에 따라 온도를 최소화하고, 신뢰도를 최대화, 이동거리를 최소화할 수 있는 최적의 경로를 찾아낸다.

III. 성능평가

본 논문에서 제안한 멀티레벨 클러스터링 기법을 사용한 온도 예측 시스템과 화재 대피 경로 도출 알고리즘을 검증하기 위해 그림 4와 같은 이화여자대학교 아산공학관 3층 $20 \times 50m^2$ 의 공간에 47개의 정적 노

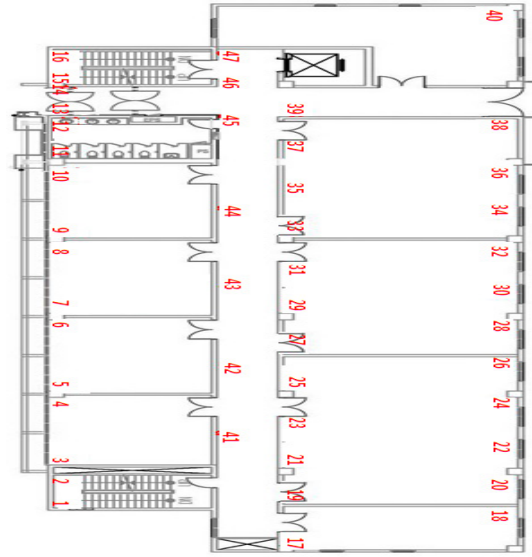


그림 4. 47개의 정적 노드들로 구성된 무선 센서 네트워크 환경의 실험 공간
Fig. 4. Simulation test-bed environment based on wireless sensor network with 47 static nodes

드들로 구성된 무선 센서 네트워크 환경을 가정하여, 화재로 인한 유체 역학적인 전달 과정을 시뮬레이션하는 프로그램인 NIST의 FDS(Fire Dynamics Simulator)^[15]를 이용하여, 총 1436.41초 동안 시뮬레이션을 통해 얻은 온도 데이터를 바탕으로 모의실험을 수행하였다.

3.1 멀티레벨 클러스터링 기법을 사용한 온도 예측 시스템

온도 예측 정확도를 검증하기 위해서 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용하는 측도인 식 4의 평균 제곱근 오차를 사용하였다. $predict_i$ 를 구하는 기준 시간은 화재 진압의 초기대응에 있어서 가장 중요한 시간인 골든 타임(golden time)^[12] 5분을 참고하여, 예측을 하기 위해 최근으로부터 과거 L 시간 전까지의 데이터를 통해 모델 학습을 수행하고, 현재로부터 W 앞의 시간을 예측 하되 $L + W$ 가 3분에서 5분이 되도록 하였고, 예측하고자 하는 시간이 사용한 시간 자료의 두 배가 넘지 않을 경우에서만 예측 정확도를 측정하였다.

3.1.1 GMM 클러스터링에서의 클러스터 분포

멀티레벨 클러스터링의 첫 번째 단계인 GMM 클러스터링을 적용하였을 때의 예측 정확도를 살펴보았다. 클러스터링을 수행할 때 각 노드의 온도 정보와

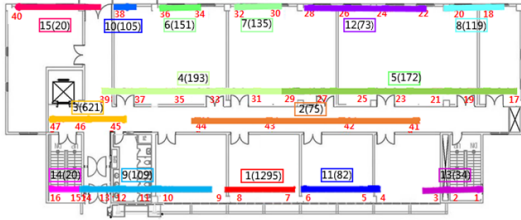


그림 5. GMM 클러스터링에서의 클러스터 분포 (그림 표기 양식: 클러스터 번호(중심 온도))
 Fig. 5. Cluster distribution map after GMM clustering (Naming Rule: Cluster Number(Average Temperature))

위치 정보가 사용하였다. 그림 5와 같이 15개의 클러스터로 나누었을 때의 분포에서 볼 수 있듯이, 각 클러스터가 가까이 있는 노드들로 묶임을 확인할 수 있다. 클러스터링 과정 없이 실제 주어진 온도 자체만을 사용하여 그대로 예측하였을 경우의 RMSE는 92.5로 나타났다. 하지만 클러스터링 과정을 수행하여 어느 정도 상위 레벨에서 그룹별로 묶은 후에 각 노드가 속한 클러스터의 대표적 중심 온도를 사용하여 예측하였을 경우의 RMSE는 62.5로 측정이 되었다. 이는 GMM 클러스터링을 적용하였을 경우 예측 정확도가 1.48배 증가하였다는 결과로, 클러스터링을 거쳐 예측을 수행하는 것이 화재 상황에서 온도의 예측 정확도를 더욱 높이기 위해 필요한 단계라는 것을 확인할 수 있다.

3.1.2 표준 화재 온도 곡선 응용식

표준 화재 온도 곡선을 응용한 식을 사용하여, 일정 시간의 데이터를 학습에 사용하여 최소자승법 기반

curve fitting을 한 후, 도출된 식을 사용하여 실제 예측을 했을 때의 온도 분포이다. 연두색 점의 분포가 실제 온도 분포이며, 빨간색 표시는 식을 통해 얻은 값이다. 응용식의 그래프가 실제 온도 분포의 그래프와 유사함을 볼 수 있다.

3.1.3 예측 정확도 기반 클러스터링에서의 클러스터 분포

멀티레벨 클러스터링의 두 번째 단계인, 예측 정확도 기반의 클러스터링을 적용하였을 때의 클러스터 분포와 예측 정확도를 살펴보았다. 그림 7을 통해 그룹 3의 분포는 복도와 일치하였고, 그룹 2는 불이 난 지점과 복도와 접한 노드들, 그리고 그룹 1은 화재의 영향이 직접적으로 미치지 않은 나머지 노드들이 속하였다. 이를 통해 건물의 구체적인 구조 설계도 없이도 온도의 변화 양상만으로도 화재가 발생한 지점과 직접적으로 영향을 받는 인근 지역을 파악할 수 있으며, 해당 건물의 구조를 어느 정도 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

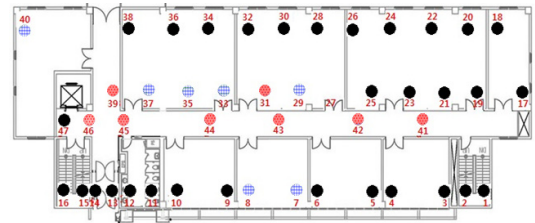
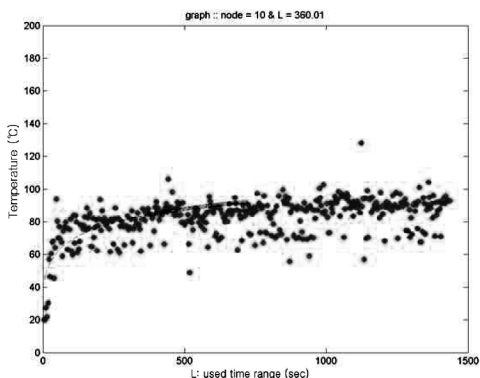
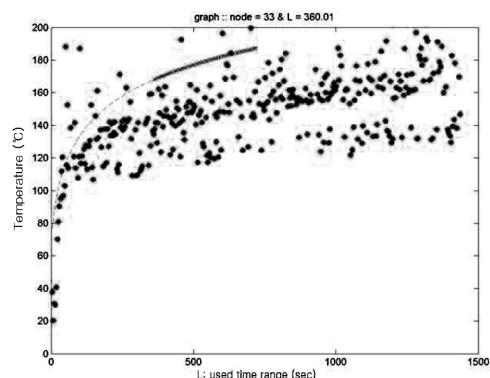


그림 7. 예측 정확도 기반의 클러스터링에서의 클러스터 분포(● : 그룹 1, ● : 그룹 2, ● : 그룹 3)
 Fig. 7. Cluster distribution of prediction accuracy-based clustering(● : Group 1, ● : Group 2, ● : Group 3)



(a)



(b)

그림 6. (a) 노드 10에서 360.01초의 수집한 온도 데이터를 사용하였을 때의 예측 온도 분포 (b) 노드 33에서 360.01초의 수집한 온도 데이터를 사용하였을 때의 예측 온도 분포 (● : 수집한 온도 데이터, ×××××××× : 예측한 온도 데이터)
 Fig. 6. (a) Distribution of predicted temperature when using real ground-truth temperature during 360.01 seconds at node 10 (b) Distribution of predicted temperature when using real ground-truth temperature during 360.01 seconds at node 33 (● : Ground-truth temperature data, ×××××××× : Predicted temperatures)

3.1.4 멀티레벨 클러스터링 예측 정확도

그림 8에서 확인할 수 있듯이, 실제 온도와 예측 온도의 차이가 가장 큰 그룹 3에서의 RMSE는 평균 113.92로 나타났고, 그룹 2는 68.01, 그룹 1은 21.96으로 점점 RMSE의 값이 크게 감소하였다. 그룹 1에 속하는 예측 정확도가 높은 군에 속하는 노드에 대해서 예측 정확도가 4.21배로 크게 증가한 것으로 나타났다. 즉, 그룹 1에서 그룹 3으로 갈수록 예측정확도가 떨어지고, 예측 정확도의 변화가 불규칙함을 확인할 수 있었다.

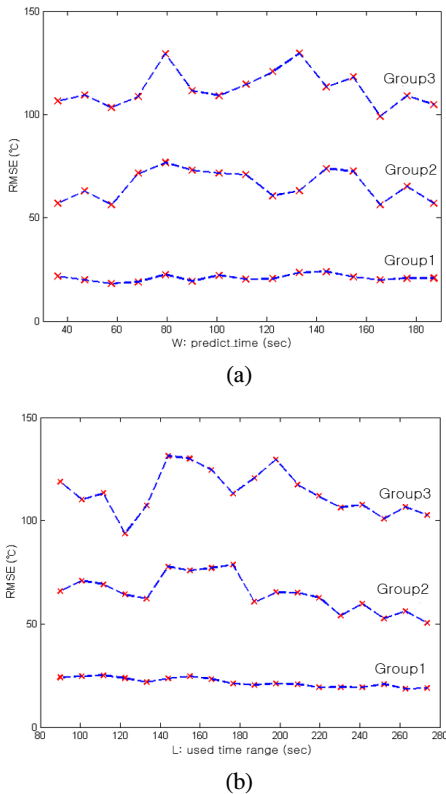


그림 8. (a) 현재로부터 W 시간 이후 지점에 대한 멀티레벨 클러스터링 예측 정확도 결과 (b) 학습에 사용한 데이터 히스토리 L 에 따른 멀티레벨 클러스터링 예측 정확도 결과
Fig. 8. (a) Prediction accuracy of multi-level clustering over the future W seconds (b) Prediction accuracy of multi-level clustering based on the previous L seconds

3.2 화재 대피 경로 도출 알고리즘

본 논문에서 제안한 화재 대피경로 도출 알고리즘을 검증하기 위해 그림 4의 환경에서 얻은 온도데이터와 출구 노드, 출발 노드 정보를 바탕으로 MATLAB의 bintprog를 사용하여 시뮬레이션 기반 실험을 진행하였다. 알고리즘을 결정하는 자료는 온

도, 신뢰도와 거리가 있는데, 온도 변화 예측을 통한 화재 대피경로 도출 알고리즘의 정확도를 검증하기 위해, 3가지의 서로 다른 정보를 경로 도출 알고리즘에 적용하였을 때 도출한 결과를 분석하였다. 세 가지의 경우 모두 노드 간의 동일한 거리를 사용하였으며, 온도와 신뢰도는 서로 다른 3가지의 정보를 사용하였다. 첫 번째 경우는 본 시스템에서 제안하는 온도 예측 시스템을 통해 얻는 예측 온도와 식(4)를 사용하여 계산한 신뢰도를 적용한 'Predict' 경로 도출 알고리즘 결과이다. 두 번째는 WSN을 통해 수집한 ground-truth 온도 정보를 적용하여 신뢰도 또한 100%라고 가정한 'Real' 경로 도출 알고리즘 결과이

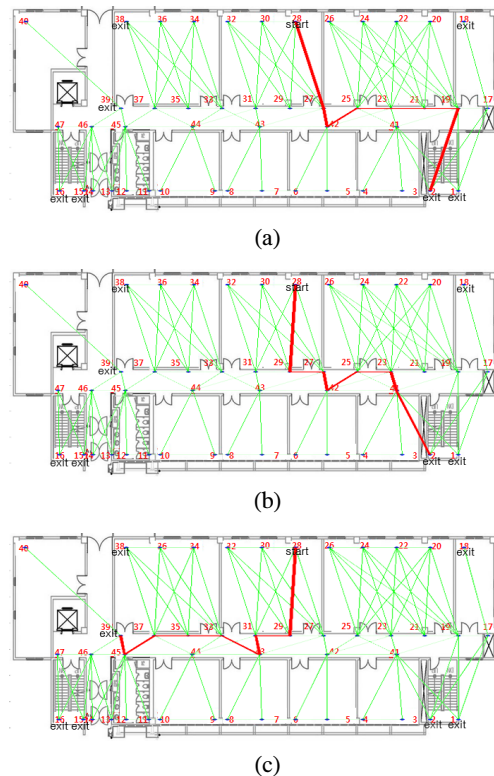


그림 9. (a) 예측된 온도를 사용하여 화재 대피 경로 알고리즘을 적용하였을 때의 경로 (b) ground-truth 온도데이터를 사용하여 화재 대피 경로 알고리즘을 적용하였을 때의 경로 (c) 노드 사이의 거리 정보만을 사용하여 화재 대피 경로 알고리즘을 적용하였을 때의 경로
— : 각 노드 사이의 연결 정보
— : 대피 경로
Figure 9. (a) Obtained evacuation path by our fire evacuation algorithm using the predicted temperature (b) Obtained evacuation path by our fire evacuation algorithm using the ground-truth temperature (c) Obtained evacuation path by our fire evacuation algorithm using only physical distance between nodes
— : Connection information among nodes
— : Evacuation path

다. 마지막 경우는 온도가 모두 동일하며, 해당 온도가 100% 신뢰할 수 있다고 가정하여, 노드 간의 거리 정보만을 사용한 'Shortest' 경로 도출 알고리즘 결과이다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 3가지 경우 각각에 따라, 탈출에 걸리는 시간 및 거리와, 각각의 경로가 방문하는 노드 중 안전한 노드의 비율을 비교해보았다. 이때 데이터 값으로는 특정 시간대에 대하여 그림 7의 그림 1에 해당하는 노드들을 시작점으로 했을 때의 값을 사용하였다.

3.2.1 탈출에 걸리는 시간 및 거리 비교

그림 10은 예측된 온도 데이터를 사용했을 때, 시뮬레이션 온도 데이터를 사용했을 때, 그리고 노드 간의 거리만을 사용했을 때의 각 세가지 경우에 대해 경로 도출 각의 알고리즘 결과로 나온 경로 데이터의 탈출 거리와 탈출 시간의 평균값에 따른 결과 비교 그래

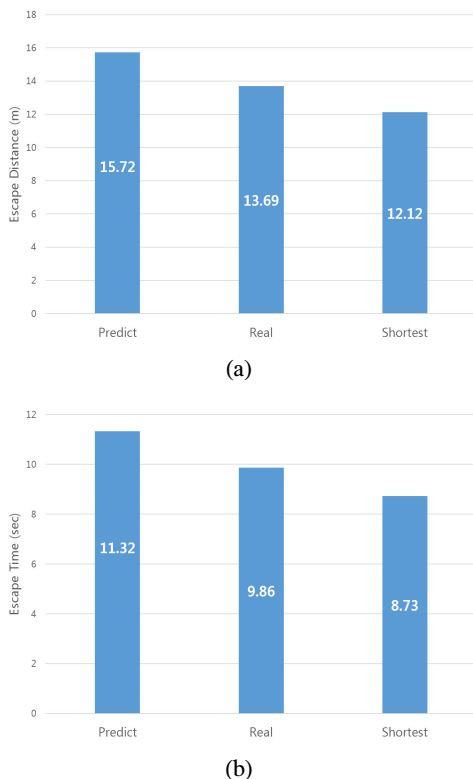


그림 10. (a) 화재 대피 경로 알고리즘으로 도출한 탈출 경로의 총 거리의 평균
(b) 화재 대피 경로 알고리즘으로 도출한 탈출 경로의 탈출 시간의 평균

Fig 10. (a) Average of the total distance of the evacuation path obtained by our fire evacuation algorithm
(b) Average of the total evacuation time of the evacuation path obtained by our fire evacuation algorithm

프이다. 이때 탈출 시간은 평균적인 사람이 걷는 속도인 5.0km/h^[15]을 참고하였다. 두 그래프를 확인하였을 때 탈출하는 데에 걸리는 거리와 시간이 Predict > Real > Shortest 순으로 나타났다. 거리 면에서는 Predict가 Real에 비해 약 15%, Shortest보다는 약 30% 길게 나타났다. 마찬가지로, Predict가 Real과 Shortest에 비해 더 많은 시간이 소요되었으나, Real에 비해서는 약 1.5초, Shortest에 비해 약 2.6초로 큰 차이를 보이지 않았음을 알 수 있다.

3.2.2 경로 내 노드의 안전성 비율

그림 11은 예측된 온도 데이터를 사용했을 때, ground-truth 온도 데이터를 사용했을 때, 그리고 노드 간의 거리정보만을 사용했을 때, 각각의 알고리즘 결과로 나온 경로가 방문하는 노드 중 안전한 노드 비율의 평균값을 나타낸 그래프이다. 이때 노드에서 측정된 온도가 100°C이하^[16]인 경우 안전한 노드라고 판단하였다. 그래프를 확인하였을 때, 안전한 노드를 경유하는 비율은 Real > Predict > Shortest 순으로 나타났다. 이때 Predict는 Real에 비해 경로 내 안전한 노드의 비율이 약 11% 더 떨어지는 것으로 확인되었으나 평균적으로 경로의 반 이상 안전한 노드를 지나는 것이 확인되었다. 또한 Predict는 Shortest에 비해 12% 정도 더 많은 비율로 안전한 노드를 지나는 것으로 확인되었다. 따라서 경로 내 노드의 안전성 비율을 확인하였을 때, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 사용하여 탈출 경로를 도출할 경우, 최단 거리만을 고려한 경우 (Shortest)보다 더 안전한 경로를 도출하였음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 복잡도 측정을 위해 온도 예측 알고리즘 및 대피 경로 도

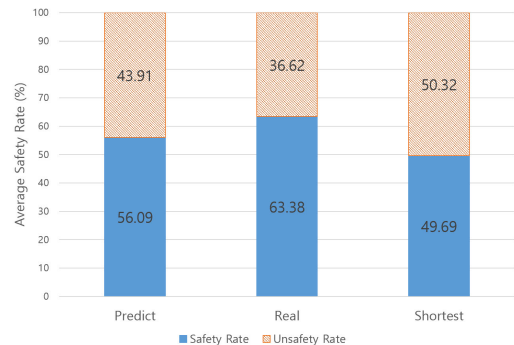


그림 11. 탈출 경로에 속한 노드 중 안전한 노드 비율의 평균

Fig. 11. Average ratio of safe nodes in the selected evacuation path

출 알고리즘의 실행 시간을 측정하였다. 온도 예측 알고리즘의 경우 약 0.41초, 대피 경로 도출 알고리즘의 경우 약 0.85초로 측정되어, 전체 시스템은 약 1.26초의 실행 시간이 소요됨을 확인하였다. 이는 화재 대피 시 5분의 골든 타임이라는 시간을 고려했을 때, 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 복잡도 측면에서 적합성을 갖는다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 화재가 발생하였을 때, WSN으로 수집한 온도 정보를 바탕으로 온도 예측 정확성을 높이기 위한 가우시안 혼합 모델 기반 클러스터링과 예측 정확도 기반 클러스터링의 두 단계에 걸친 멀티레벨 클러스터링 기법을 사용한 온도 예측 시스템을 제안하였다. 또한, 앞에서 예측한 온도와 이의 신뢰도에 기반하여, 사용자의 현재 위치부터 가장 안전한 출구까지의 대피 경로를 도출하는 화재 대피 경로 알고리즘을 제안하였다.

성능 및 비교 평가 결과, 제안한 온도 예측 시스템을 사용하였을 경우, 전체 노드에서 예측 정확도가 1.48배 증가하였고, 특히 예측 정확도가 높은 클러스터에 속한 노드들에 대해서는 최대 4.21배 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 멀티레벨 클러스터링을 사용하여 화재 상황 및 화재가 발생한 건물의 구조를 파악할 수 있음을 모의실험을 통해 검증하였다. 화재 대피 경로 도출 알고리즘을 통해 찾아낸 대피 경로는 실제 ground-truth 온도를 사용하여 대피했을 때에 비하여 안전한 노드를 경유하는 비율이 큰 차이를 보이지 않았으며, 최단 경로만 고려하여 도출된 대피 경로의 경우에 비해서는 더 안전한 경로를 도출하였음을 확인하였다.

본 연구는 화재가 발생하였을 시, 현재 상황이 아닌 대피할 시점의 상황을 예측함으로써 대피 경로를 제안한다는 점에 있어서, 기존의 화재 대피 경로 시스템에 비해 더 실용적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제안한 대피 경로 알고리즘과 기존에 제안된 대피 경로 도출 방식의 성능을 알고리즘의 정확성, 복잡성 등 다양한 측면에서 비교분석할 예정이다. 또한, 도출된 경로를 실제 상황에 적용하기 위하여, 사용자에게 대피 경로를 전달하여 실질적으로 본 시스템을 적용할 수 있는 방안을 연구할 계획이다.

References

- [1] W. Y. Chung, S. J. Jung, J. J. Kim, and T. H. Kwon, "A study on local area weather condition monitoring system in WSN and CDMA," *J. KIICE*, vol. 13, no. 8, pp. 1713-1720, 2009.
- [2] D. Jeong, M. Cho, O. Gnawali, and H. J. Lee, "Proactive patrol dispatch surveillance system by inferring mobile trajectories of multiple intruders using binary proximity sensors," *IEEE INFOCOM 2016*, pp. 1-9, 2016.
- [3] H. J. Kim, G. Y. Shin, B. H. Woo, N. K. Koo, K. S. Jang, and K. W. Lee, "A study on forest fires prediction and detection algorithm using intelligent context-awareness sensor," *J. KIICE*, vol. 19, no. 6, pp. 1506-1514, 2015.
- [4] Y. S. Moon, J. J. Kim, H. R. Choi, B. K. Park, S. P. Choi, T. H. Kim, B. H. Lee, and J. W. Jung, "A study on the container indoor status monitoring system," in *Proc. KICS Winter Conf.*, vol. 2015, no. 1, pp. 499-500, 2015.
- [5] J. W. Kim, D. P. Kim, S. P. Heo, and S. Y. Shin, "Monitoring software based on IoT & Public weather information to control led street light," in *Proc. KICS Winter Conf.*, vol. 2016, no. 1, pp. 624-625, 2016.
- [6] S. Park and S. R. Lee, "Marine disasters prediction system model using marine environment monitoring," *J. KICS*, vol. 38, no. 3, pp. 263-270, 2013.
- [7] D. J. Cheon, D. Y. Jung, and D. K. Kwak, "A study on the implementation of zigbee sensor node for building USN using only transmission of fire sensing data," *Fire Sci. and Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 75-81, 2009.
- [8] Y. Li, Z. Wang, and Y. Song, "Wireless sensor network design for wildfire monitoring," *WCICA 2006*, Dalian, China, 2006.
- [9] J. H. Lee, W. J. Kim, and J. C. Lee, "A literature review on compartment fire temperatures during fully developed fire," *J. Architectural Inst. Korea Structure & Con-*

struction, vol. 30, no. 10, pp. 21-28, 2014.

[10] M. Barnes, H. Leather, and D. K. Arvind. "Emergency evacuation using wireless sensor networks," *32nd IEEE LCN 2007*, pp. 851-857, 2007.

[11] T. Lee, "Development of a mobile-based fire evacuation system using a wireless network," M. S. Thesis, Dept. of Architecture, Yonsei University, 2013.

[12] E.-R. Cho, "Gyeonggi with Safety: Reduction of Mobilization Time," *Issue&Analysis 2015*, no. 179, pp. 1-25, Apr. 2015.

[13] S. Calinon, *Robot programming by demonstration*, EPFL Press, 2009.

[14] S. Lamont, B. Lane, and A. Usmani, "The behaviour of multi-storey composite steel framed structures in response to compartment fires," *Fire Safety Sci.*, vol. 8, pp. 177-188, 2005.

[15] K. B. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Fire dynamics simulator, user's guide," *NIST Special Publication 1019*, 2010.

[16] R. C. Browning, E. A. Baker, J. A. Herron, and R. Kram, "Effects of obesity and sex on the energetic cost and preferred speed of walking," *J. Appl. Physiol.*, vol. 100, no. 2, pp. 390-398, 2006.

[17] S. Marsar, "Survivability profiling: How long can victims survive in a fire?," *Fire Eng.*, vol. 163, no. 7, pp. 77-82, 2010.

윤진이 (JinYi Yoon)



2013년 3월~현재 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 학사과정
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 이동 애드혹 네트워크, 알고리즘, 데이터베이스

진연진 (YeonJin Jin)



2013년 3월~현재 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 학사과정
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 데이터베이스

박소연 (So-Yeon Park)



2016년 2월 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 졸업
 2016년 3월~현재 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 무선 애드혹 네트워크, 네트워크 최적화, 최적 셀 선정 기법, 네트워크 복구

이형준 (HyungJune Lee)



2001년 8월 : 서울대학교 전기공학부 졸업
 2006년 6월 : Stanford Univ. 전자공학과 석사
 2010년 8월 : Stanford Univ. 전자공학과 박사
 2012년 3월~현재 : 이화여자대학교 컴퓨터공학과 조교수
 <관심분야> 무선 센서 네트워크, 이동 애드혹 네트워크, 네트워크 최적화, 임베디드 시스템