

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.199>

IIBC 2017-2-28

복합 센서 데이터 처리 알고리즘을 이용한 비접촉 가전 기기 식별 알고리즘 연구

A Study of Non-Intrusive Appliance Load Identification Algorithm using Complex Sensor Data Processing Algorithm

채성윤*, 박진희**

Sung-Yoon Chae*, Jinhee Park**

요약 본 연구는 가정 내에서 사용하는 가전 기기의 사용 에너지를 효율적으로 관리하기 위한 비접촉 가전 기기 식별 기법을 제시한다. 제안하는 기법은 총 전력 사용량 정보를 이용한 기존의 가전 기기 식별 기법을 개선하기 위해서 복합 센서 정보를 종합적으로 활용한다. 이를 위해서 기기 상태와 측정된 센서 값 간의 영향도를 그래프 형태로 정의한다. 기기 상태에 영향을 미치는 복합 센서를 표현하는 영향도 그래프를 통해 기기 식별 예측 결과를 계산하기 위해 총 전력 사용량 기반 예측값과 센서 데이터 처리 알고리즘 예측값의 가중치 합을 사용한다. 시뮬레이션 실험을 통한 성능 분석으로 기존 비접촉 가전 기기 식별 기법의 기기 식별 정확도와 비교한다.

Abstract In this study, we present a home appliance load identification algorithm. The algorithm utilizes complex sensory data in order to improve the existing NIALM using total power usage information. We define the influence graph between the appliance status and the measured sensor data. The device identification prediction result is calculated as the weighted sum of the predicted value of the sensor data processing algorithm and the predicted value based on the total power usage. We evaluate proposed algorithm to compare appliance identification accuracy with the existing NIALM algorithm.

Key Words : NIALM, complex sensor data, influence graph.

1. 서론

비접촉 가전 기기 부하 식별 기법(Non-Intrusive Appliance Load Monitoring)은 가정 내 총 전력 사용량 정보를 이용하여 사용 중인 가전 기기를 식별하고 관리하는 기술이다^[1]. 현재 비접촉 가전 기기 부하 식별 기법은 스마트홈, 스마트빌딩 등의 환경에 에너지 절감을 위한 핵심 기술로 적용되고 있다^[2].

기존의 비접촉 가전 기기 부하 식별 기법은 가전 기기별 전기적 특성을 이용한 학습을 통해 기기 사용 시 전력 사용량 변화의 특성을 추출한다. 미터링 디바이스의 총 전력 사용량 정보가 정밀할수록 기기 식별 정확도는 높아진다. 하지만 정밀도가 높은 미터링 디바이스일수록 가격이 높기 때문에 가정 내에 이러한 미터링 디바이스를 설치하는 것은 경제적이지 않다. 총 전력 사용량 정보만을 이용할 경우 가전 기기 사용 시 전력 사용량 변화가

*준회원, 전자부품연구원 연구원

**정회원, 전자부품연구원 책임연구원

접수일자: 2017년 2월 14일, 수정완료: 2017년 3월 14일

게재확정일자: 2017년 4월 7일

Received: 14 February, 2017 / Revised: 14 March, 2017 /

Accepted: 7 April, 2017

*Corresponding Author: unichae@keti.re.kr

Energy IT Convergence Research Center, KETI, Korea

큰 기기는 높은 식별 정확도를 보이지만 전력 사용량 변화가 작은 기기에 대한 기기 식별 정확도는 낮아질 수 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해서 주변 환경 변화를 측정하는 복합 센서 기반의 가전 기기 부하 식별 기법을 제시한다.

복합 센서 데이터의 연관성을 센서 처리 기법을 적용하여 상황인지에 활용하는 연구^[6,7]를 기반으로 센서 값을 효과적으로 활용하는 기법이 스마트홈^[8,9], 상황인지^[10]에 적용되고 있다. 본 연구의 목표는 기존의 미터링 디바이스를 사용하는 환경에서, 가격이 낮은 주변 환경 측정 센서를 활용하여 기기 식별 알고리즘의 정확도를 높이는 것이다. 제시하는 복합 센서 기반 데이터 처리 알고리즘은 가전 기기 간 상태 변화를 독립된 것으로 가정하고, 복합 센서 정보와 가전 기기 상태 간의 영향도에 따른 기기 식별을 위한 영향도 그래프(influence graph)를 정의한다. 측정된 센서 값은 영향도 그래프에 의해 가전 기기 상태 예측에 적용된다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장은 관련연구를 기술하고, 3장에서는 전체 시스템 모델을 정의한다. 4장에서는 제안하는 기법에 대해 자세하게 기술하고, 이를 5장의 실험 및 결과에서 분석한다. 마지막 6장에서는 결론 및 향후 연구에 대해서 기술한다.

II. 관련 연구

비접촉 가전 기기 부하 식별 기법은 총 전력량 정보 기반으로 각 가전 기기의 상태를 식별하는 기술이다. 이러한 알고리즘의 개념을 정립한 연구^[3]에서 FHMM(Factorial Hidden Markov Model)을 적용하여 식별 정확도를 높인 연구^[4]와 MP(Matching Pursuit) 알고리즘을 적용한 연구^[5]가 있다. 본 연구에서는 FHMM 기반의 비접촉 가전 기기 부하 식별 기법^[11]에 주변 환경 변화를 측정하는 복합 센서 데이터를 적용하여 기기 식별 정확도를 높이는 기법을 제시한다.

센서 데이터 퓨전 알고리즘은 주변 환경 센서 정보를 효과적으로 이용하기 위한 기법이다. 다양한 특성의 센서 값을 종합적으로 이용하여 상황인지의 정확도를 높이기 위한 연구^[8-10]로, 각 센서에서 측정되는 센서값의 연관관계를 evidential network 그래프^[7]로 정의한다. 이를 통해 확률적 추론 기법에 의한 가장 적합한 상황을 인지

하고, 사용자의 행동을 예측할 수 있다.

III. 시스템 모델

1. 시스템 구성

본 시스템은 그림 1과 같이 가전 기기의 전력량을 측정하고 전송하는 미터링 디바이스와 주변 환경 정보를 수집하는 복합 센서 노드, 수집된 정보 저장, 처리하여 가전 기기의 상태를 식별하는 EMS(Energy Management System)로 구성된다.

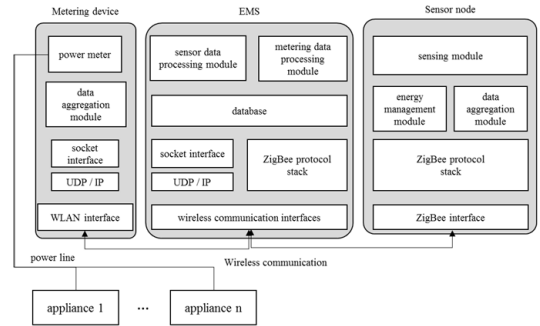


그림 1. 복합 센서 데이터 기반 비접촉 가전 기기 부하 식별 시스템 구성

Fig. 1. System components of NIALM using complex sensor data

미터링 디바이스는 일반적으로 가정 내 분전반에 설치되어 가정 내에서 사용되는 실시간 전력 사용량을 측정한다. 미터링 디바이스는 무선 통신 네트워크 모듈을 탑재하여 측정된 총 전력량 사용 정보를 송신한다.

복합 센서 노드는 ZigBee 기반 저전력 센서 노드로 한 노드당 다수의 센서 모듈을 탑재할 수 있다. 저전력 센서 노드는 주기적으로 sleep-wakeup을 반복하며 동작한다. 센서 노드에 탑재된 센서 모듈은 주변 환경에 대한 변화를 측정하여 데이터로 수집한다. 센서 노드는 수집한 데이터를 주기적으로 합산하여 ZigBee 네트워크를 통해 송신한다.

미터링 디바이스로부터 수신한 총 전력량 사용 정보와 복합 센서 노드로부터 수신한 환경 정보는 EMS의 데이터베이스에 저장된다. 시간 순으로 저장된 센서 데이터와 총 전력량 사용 정보 데이터를 기반으로 가전 기기의 상태를 식별하는 알고리즘을 수행한다.

2. 영향도 그래프

가전 기기의 상태의 변화는 주변 환경에 영향을 준다. 복합 센서는 이러한 환경 변화를 측정할 데이터를 수집한다. 수집된 센서 데이터를 기반으로 학습된 결과는 영향도 그래프(influence graph)로 표현된다. 영향도 그래프는 evidential network^[7]를 사용자의 행동을 기기의 상태로 정의하여 주변 환경 변화에 대한 기기 상태의 변화 정도를 표현한 정보이다.

영향도 그래프는 가전 기기의 상태와 주변 환경 변화와의 관계를 표현한다. 그림 2는 기본적인 영향도 그래프를 정의한다. 각 가전 기기 별로 독립적인 하나의 영향도 그래프가 생성된다. 각 센서 값이 기기 상태 변화에 영향을 주지 않을 경우($e=0$ 인 서브그래프)는 생성하지 않는다.

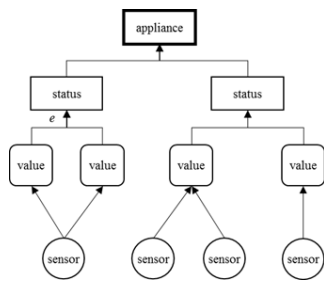


그림 2. 영향도 그래프 정의
 Fig. 2. Definition of influence graph

영향도 그래프는 가전 기기(그림 2: 굵은 사각형)의 상태(그림 2: 사각형)에 따라 상태 변화에 영향을 주는 센서(그림 2: 원형)를 표현한다. 센서를 통해 측정된 값(value)이 기기 상태에 영향을 줄 경우(그림 2: edge), 그 정도를 e 로 정의한다. 모든 가전 기기에 대해서 독립적인 영향도 그래프가 생성된다.

IV. 기기 식별 알고리즘

복합 센서 데이터를 활용하여 가전 기기의 상태를 식별하기 위해서는 복합 센서 데이터 처리 과정이 필요하다. 센서 데이터 처리는 센서 데이터가 기기 상태에 영향을 주는 정도를 표현한 영향도 그래프를 이용하여 influence matrix E 를 생성하고, 측정된 센서 값과 E 매트릭스를 기반으로 적용하는 단계로 구성된다.

1. Influence matrix 생성 과정

가전 기기의 영향도 그래프에서 영향도 매트릭스 E 를 생성하는 방법은 그림 3과 같다. 주어진 영향도 그래프를 degree=1인 서브그래프로 분리한다. 분리된 서브그래프에는 가전 기기 상태에 대한 하나의 센서로 구성된다. 이후, 서브그래프에 해당하는 가전 기기, 센서의 인덱스에 값을 입력한다. 서브그래프가 존재하지 않는 인덱스에 대해서는 0을 입력한다. 모든 가전 기기로부터 생성된 영향도 그래프에 대한 입력이 완료되면 영향도 매트릭스 E 가 생성된다.

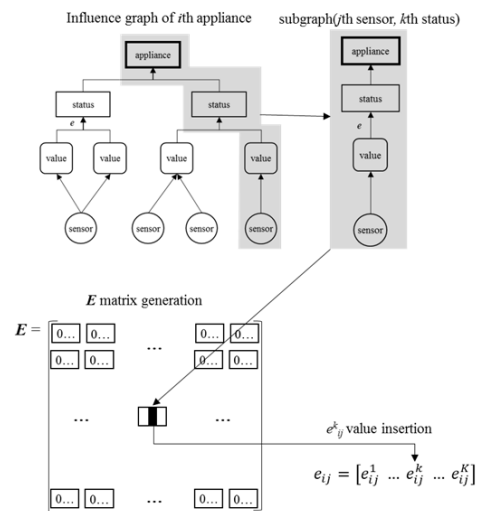


그림 3. Influence matrix E 생성 과정
 Fig. 3. Generation process of influence matrix E

2. 기기 식별 알고리즘

각 가전 기기의 상태($S(t)$)는 식 (1)과 같이 총 전력량 기반 기기 식별 기법^[11]의 결과($D(t)$)와 이전 시간 예측된 가전 기기의 상태($S(t-1)$), 복합 센서 데이터 처리 결과($A(t)$)의 가중치 합(weighted sum)으로 정의한다.

$$S(t) = w_1 D(t) + w_2 A(t) + w_3 S(t-1)\pi \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1 \quad (2)$$

총 전력량 기반 가전 기기 상태 식별 결과 매트릭스($D(t)$)는 예측된 결과의 정확도를 포함한 확률 값으로 표현된다^[11]. 복합 센서 데이터 처리 결과 매트릭스($A(t)$)는 다음과 같이 influence graph에 의해 생성된 influence

matrix E 와 측정된 센서 값 \mathbf{x} 를 이용하여 계산한다. 가전 기기의 상태는 K 개이고, m 은 가전 기기의 수, n 은 센서의 수를 나타낸다.

$$\mathbf{A}(t) = E(\mathbf{Y}(t))^T \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_k(t) = [e_1^k(\mathbf{y}_1^k(t))^T \dots e_m^k(\mathbf{y}_m^k(t))^T]^T \quad (4)$$

$$e_i^k(\mathbf{y}_i^k(t))^T = \sum_{j=1}^n e_{ij} y_{ji}^k(t), e_{ij}^k \in [0, 1] \quad (5)$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \dots x_n(t)]^T \quad (6)$$

$$y_{ij}^k(t) = \frac{f_{ij}^k(x_i(t))}{\tilde{x}} \quad (7)$$

시간 t 에 각 복합 센서 노드에서 측정된 센서 값은 $\mathbf{x}(t)$ 벡터에 저장된다. 따라서 각 복합 센서 노드의 센서 모듈 집합을 S_i 라고 했을 때, 측정된 센서 값은 $\mathbf{x}(t) = [x_j(t) \dots], j \in S_1 \cup S_2 \dots \cup S_m$ 가 된다. 센서 모듈에서 측정된 값이 가전 기기 상태에 영향을 주기 위한 임계값(threshold)을 초월할 경우에만 센서 값을 활성화하기 위해 활성화 함수(activation function)를 정의하여 사용한다. 또한, 각 센서에서 측정된 센서 값은 각기 다른 센서의 특성(온도: °C, sound: dB)을 포함하고 있기 때문에 이 값을 정규화하는 과정을 수행한다. 측정된 각 센서의 값($x_i(t)$)에 주어진 임계값에 따라 activation function을 적용하고, 그 결과를 센서 측정 최대값(\tilde{x})로 정규화하여 최종 결과 벡터 \mathbf{y} 를 추출한다.

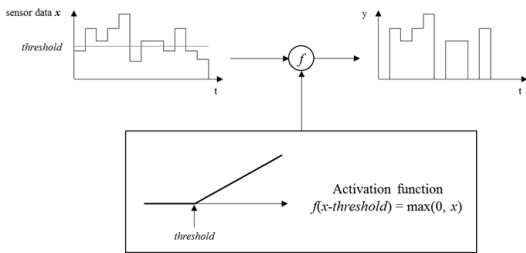


그림 4. 활성화 함수 예시
Fig. 4. An example of activation function

그림 4는 측정된 센서 데이터($\mathbf{x}(t)$)를 이용하여 최종 결과 벡터 \mathbf{y} 를 추출하는 과정이다. 활성화 함수는 max 함수로 정의한다. 활성화 함수는 센서와 가전 기기의 특성에 따라 다르게 정의할 수 있다. 이렇게 추출된 \mathbf{y} 벡터에 가전 기기 상태에 영향을 미치는 정도(e)를 적용하여

복합 센서 데이터가 적용된 가전 기기 식별 예측 결과 ($\mathbf{A}(t)$)를 식 (3)와 같이 계산한다.

이전 가전 기기의 상태가 현재 가전 기기의 상태에 영향을 주는 정도를 표현하기 위해 그림 5와 같이 가전 기기 상태 변경 확률($\boldsymbol{\pi}$)을 정의한다. 가전 기기의 상태가 변경되지 않을 확률은 $\pi_{ii} = 1 - \sum_{j \in K, j \neq i} \pi_{ij}$ 이다. 이전 가전 기기의 상태에 상태 변경 확률을 적용하여 현재 가전 기기 상태 식별 예측값에 반영한다.

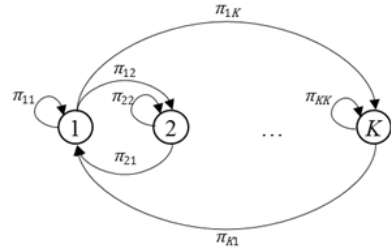


그림 5. 가전 기기 상태 변경 확률
Fig. 5. Transition probabilities of appliance status

최종적으로 시간 t 에서의 가전 기기 상태 예측 결과값 ($\mathbf{S}(t)$)이 계산되면, 식 (8)과 같이 각 기기 별로 가장 확률이 큰 상태가 현재 해당 기기의 상태로 결정된다.

$$i\text{-th appliance status} = \arg_{k \in K} \max(S_i^k(t)) \quad (8)$$

3. 센서 데이터 처리 과정

센서 노드는 주변 환경 정보를 수집하여 데이터로 변환하여 EMS로 송신하는 기능을 수행한다. 센서 노드는 저전력으로 동작하기 때문에 수집된 데이터는 주기적으로 종합하여 전송한다. 데이터 수집 및 처리 과정은 다음과 같이 수행된다.

- **Data collection:** 센서 노드의 센싱 모듈은 측정된 주변 환경 센서 값을 저장한다. 센서 노드의 에너지 관리 모듈에 의해서 주기적으로 주변 환경 센싱 정보를 데이터로 변환하여 저장한다.
- **Data aggregation:** 수집된 센서 데이터를 중복된 값을 제외하고 압축하여 전송하기 위한 패킷으로 생성한다.
- **Data transmission:** 각 센서 노드는 ZigBee 인터페이스를 통해 EMS로 패킷을 전송한다.

- **Data processing:** 수신된 ZigBee 패킷은 센서 처리 알고리즘의 입력으로 저장된다. 이를 위해 시간 순으로 센서 데이터를 저장하여 관리한다.

V. 실험 및 결과

1. 실험 환경

실험 환경은 총 5개의 가전 기기와 5종의 센서를 가진다. 가전 기기는 TV(aID: 1), audio(2), light(3), set-top box(4), heater(5)로 할당하고, 센서는 온도(sID: 1), 습도(2), 조도(3), PIR receiver(4), IR receiver(5)로 할당한다. 기기의 상태는 ON/OFF($K=2$)를 가정하였다. 실험은 24시간의 복합 센서 정보와 미터링 디바이스의 총 전력량 사용 정보를 기반으로 알고리즘의 결과를 분석하여 식별 정확도를 추출하였다.

2. 파라미터 설정

실험을 위한 파라미터는 영향도 매트릭스 값과 활성화 함수의 인자값을 설정한다. 활성화 함수는 max 함수를 사용한다. 표 1의 e 는 영향도 그래프에 따라 센서 값이 가전 기기 상태 변화에 영향을 주는 정도이고, arg 는 활성화 함수의 인자값으로 $x = \mathbf{x}(t)$, $|x| = |\mathbf{x}(t)|$, $\Delta x = (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t-1))$ 로 표시한다. 또한, 식 (1)의 가중치는 $w_1=0.75$, $w_2=0.85$, $w_3=0.15$ 로 설정한다.

표 1. 실험 인자값 (aID: 가전 기기 ID, sID; 센서 ID)

Table 1. Simulation Parameters (aID: appliance ID, sID; sensor ID)

aID \ sID	1		2		3		4		5	
	e	arg	e	arg	e	arg	e	arg	e	arg
1	0	-	0	-	0.9	$ x $	0.1	x	0	-
2	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
3	0.1	$ x $	0.1	$ x $	0.8	Δx	0	-	0	-
4	0	-	0	-	0	-	0	-	1	Δx
5	0.2	$ x $	0.2	$ x $	0.2	$ x $	0.2	$ x $	0.2	$ x $

3. 실험 결과

복합 센서 정보 기반 가전 기기 식별 알고리즘의 기기 식별 정확도를 다음과 같은 지표에 의해 실험 결과를 분석한다. 실험 결과로부터 TP(True Positive), FP(False Positive), TN(True Negative), FN(False Negative)를

계산한다. Precision은 정밀도를 나타내고 식별한 기기 중 실제로 사용 중인 기기의 비율이다. Recall은 재현율을 나타내고 실제로 사용 중인 기기 중 식별한 기기의 비율이다. Accuracy는 정확도를 나타내고 전체 기기 중 식별 성공한 기기의 비율이다.

표 2. 실험 결과

Table 2. Simulation results

Metric	FHMM ^[11]	Proposed algorithm
TP	5636	6593
FP	1715	1563
TN	5484	5636
FN	1565	608
Precision	76.7 %	80.8 %
Recall	78.2 %	91.5 %
Accuracy	77.2 %	84.9 %

표 2 실험 결과를 통해 기기 식별에 대한 precision, recall, accuracy 모두 향상된 것을 확인하였다. 복합 센서 정보 기반 가전 기기 식별 알고리즘의 결과, accuracy는 기존의 알고리즘보다 7.7% 포인트 향상되었고, precision과 recall이 각각 4.1% 포인트, 13.3% 포인트 향상되었다. 이를 통해 센서에 의해 ON 상태의 기기에 대한 식별 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 복합 센서 정보 기반 가전 기기 식별 알고리즘을 제시한다. 주변 환경 정보를 수집하는 센서의 복합적인 데이터를 효과적으로 사용하기 위해 기기 상태와 센서 값 간의 영향도 그래프를 정의하고, 이를 적용하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 또한, 실험을 통한 성능 분석으로 기존 알고리즘의 기기 식별 정확도와 비교하였다. 향후에는 현재 독립된 가전 기기에 대한 영향도 그래프를 확장하여 가전 기기 간 영향을 고려한 기기 식별 알고리즘을 연구한다.

References

[1] A. Zoha, A. Gluhak, M.A. Imran, and S.

- Rajasegarar, "Non-Intrusive Load Monitoring Approaches for Disaggregated Energy Sensing: A Survey," *Sensors*, vol.12, no.12, pp.16838-16866, December 2012.
- [2] M. Zeifman and R. Roth, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring: Review and Outlook," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.57, no.1, pp.76-84, March 2011.
- [3] G.W. Hart, "Nonintrusive Appliance Load Monitoring," *IEEE Proceedings*, vol.80, pp.1870-1891, 1992.
- [4] J.Z. Kolter and T.S. Jaakkola, "Approximate Inference in Additive Factorial HMMs with Application to Energy Disaggregation," in *Proc. of AISTATS*, 2012,
- [5] H. Goncalves, A. Ocneanu, M. Berges, and R.H. Fan, "Unsupervised Disaggregation of Appliances Using Aggregated Consumption Data," in *Proc. of KDD Workshop of Data Mining Applications for Sustainability*, 2011.
- [6] D. Zhang, M. Guo, J. Zhou, D. Kang, and J. Cao, "Context Reasoning Using Extended Evidence Theory in Pervasive Computing Environments," *Future Generation Computer Systems*, vol.26, no.2, pp.207-216, February 2010.
- [7] X. Hong, C. Nugent, M. Mulvenna, S. McClean, B. Scotney, and S. Devlin, "Evidential Fusion of Sensor Data for Activity Recognition in Smart Homes," *Pervasive and Mobile Computing*, vol.5, no.3, pp.236-252, March 2009.
- [8] T. Islam and I. Koo, "Autonomous Indoor Lighting Device Control System based on Wireless Sensor Network," *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC)*, vol.11, no.4, pp.31-38, August 2010.
- [9] Hyun-moon Park, Byung-chan Jeon, Daehyun Ryu, "A Study for Context-Awareness based on Multi-Sensor in the Smart-Clothing," *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC)*, vol.13, no.3, pp.71-78, June 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.3.71>.
- [10] Kee-Hwan Kim, "Development of Complex USN Sensor for Zero Energy House with Blind System," *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC)*, vol.13 no.4, pp.221-227, August 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.4.221>.
- [11] B. Kim and J. Yun, "A Study on Improving Identification Rate of Non-Intrusive Appliance Load Monitoring(NIALM) Using Combined Sensor," in *Proc. of Spring Conference of Korea Information Processing Society*, 2016.

저자 소개

채 성 윤(준회원)



- 2009년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정
- 2015년 8월 ~ 현재 : 전자부품연구원 위촉연구원
- <주관심 분야 : 센서 네트워크, 임베디드 시스템>

박 진 희(정회원)



- 2008년 2월 : 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학과(공학박사수료)
- 2001년 1월 ~ 현재 : 전자부품연구원 책임연구원
- <주관심 분야 : 센서 네트워크, 임베디드 시스템>

※ 본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지 기술 평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (20142010102390)