

스마트폰 내장 센서를 이용한 배터리 효율적인 사용자 상황정보 수집 방법

한윤선¹, 강준명², 서신석³, 홍원기¹

¹포항공과대학교 정보전자융합공학부

²Dept. of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Toronto, Canada

³포항공과대학교 컴퓨터공학과

{seon054, jwkhong}@postech.ac.kr

joonmyung.kang@utoronto.ca

seseis@postech.ac.kr

요 약

최근 사용자 상황정보를 활용한 모바일 네트워크 관리 및 서비스들이 증가하고 있다. 사용자의 상황정보를 획득할 수 있는 가장 쉬운 방법 중의 하나는 스마트폰에 내장된 센서를 이용하는 것이다. 스마트폰의 폭발적인 인기로 인해 다양한 스마트폰이 시장에 출시되고 있으며, 이들의 보급율이 급격하게 상승하고 있다. 대부분의 스마트폰은 GPS, 가속도계, 디지털 나침반과 같은 다양한 센서들을 기본적으로 내장하고 있으며, 이들을 직접적으로 활용하거나 수집된 데이터를 통한 유추를 통해 사용자의 상황정보 수집을 할 수 있다. 하지만, 센서를 활용한 상황정보 수집은 상시적으로 센서를 작동시키고 데이터를 분석하기 때문에 스마트폰 배터리의 급격한 소모를 초래한다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 수집하는 상황정보를 모델화하고 각 센서의 특징을 이용하여 에너지 효율적인 수집 방법을 제안한다. 또한, 수집된 상황정보에 기반하여 사용자의 상태를 판단하고 사용자의 상태에 따른 동적 센서 구성 기법을 통해 상황정보 수집에 소모되는 배터리 줄이는 방법을 제안한다. 제안된 방법을 검증하기 위해 안드로이드(Android) 기반의 스마트폰에서 구현 및 실험하였으며 상시적으로 모든 센서를 켜둔 경우에 비해서 1.29 배, 주기적으로 센서를 작동시키는 방법에 비해서는 1.14 배의 긴 작동 시간을 보여주었다.

1. 서론

사용자의 상황정보를 활용하여 보다 효율적인 네트워크의 관리 및 서비스를 제공하기 위한 시도가 계속되고 있다 [1, 2]. 사용자의 상황정보는 네트워크 관리에 있어 사용자의 과거 사용기록과 사용 경향을 통해 네트워크 및 서비스의 관리를 보다 효율적으로 할 수 있게 해준다. 이러한 상황에서, 사용자의 상황정보를 효율적으로 획득 할 수 있는 방법은 스마트폰과 내장된 센서를 이용하는 것이다. 현재 출시되는 대부분의 스마트폰은 GPS, 가속도계, 각 가속도계, 디지털 나침반과 같은 센서들을 기본적으로 탑재하고 있다. 스마트폰에 내장된 센서를 직접적으로 이용하거나 수집된 값을 기반으로 상황정보를 유추할 수 있다. 하지만, 이러한 형태의 상황정보 수집은 실시간 작동되어야 하기 때문에 내장된 센서들을 상시적으로 작동시켜야 한다. 따라서, 실시간 사용자 상황정보 수집은 스마트폰의 배터리의 급격한 소모를 초래하는 문제가 있다.

스마트폰의 센서를 사용하여 사용자의 상황정보를 수집하는 가장 기본적인 방법은 주기적으로 센

서를 작동시켜 값을 분석하고 분석 결과값에 기반하여 조건을 만족하는 상황정보를 판단하는 것이다 [3]. 이 때, 배터리의 사용을 줄이기 위한 기본적인 원리는 센서 작동 시 필요로 하는 정확도로 센서를 작동 시켜, 센서의 필요 없는 작동을 없애는 것이다. 예를 들어, 사용자의 움직임이 없는 상황에서는 GPS 센서를 작동 시킬 필요가 없다. 따라서, 센서의 작동 시점 및 센서의 정확도를 결정하는 것이 중요하다. 센서의 정확도를 조절하기 위한 기법으로는 센서의 작동 주기(Duty Cycle) 변경, 센서의 샘플링 레이트(Sampling Rate) 조정, 작동 센서 선택 방법들이 있다 [4]. 센서의 정확도와 배터리 소모 사이에는 반비례 관계를 보이므로, 정확도-배터리소모의 등가교환은 상황정보를 이용하는 응용프로그램이 허용하는 한도 내에서 자율적으로 허용될 수 있다. 따라서, 응용프로그램이 요구하는 최소한의 신뢰도와 정확도 분석을 통하여 통하여 배터리 효율을 높일 수 있다.

본 연구에서는 스마트폰을 이용한 배터리 효율적인 연속적 상황정보 수집 방법을 제안한다. 제안되는 방법은 수집되는 상황정보의 명세에 기반하여

최적화된 센서 작동 순서를 결정하고 수집된 상황 정보를 이용하여 각 센서들을 현재 사용자의 상황에 맞도록 동적으로 센서들을 재구성하는 방법이다. 이 방법은 기존의 주기적인 센서 작동을 통해 값을 분석하는 것과 달리 값의 갱신이 필요할 경우 센서를 작동시키는 Pull 기반의 방법에 기반한다. 센서 작동순서를 결정함으로써 배터리 소모가 큰 센서를 나중에 작동시키거나 제외시켜 배터리 소모를 줄일 수 있다. 또한, 수집된 상황 정보들을 이용하여 사용자의 현재상황을 판단하여 관련이 적은 센서의 성능을 낮추거나 작동주기를 길게 하여 배터리 소모를 줄일 수 있다. 제안되는 방법은 안드로이드 기반의 스마트폰을 통해 구현이 되었다. 실험결과 항상 센서를 작동시키는 것에 비해 1.29 배, 주기적으로 모든 센서를 작동시키는 방법에 비해 1.14 배의 긴 작동 시간을 보여주었다.

2. 관련 연구

스마트폰을 이용하여 사용자의 상황 정보 수집 또는 행동 인식에 관련된 다양한 연구가 존재한다. 현재 진행중인 연구들 중 가장 활발한 분야는 단일 단말을 사용하여 더 정확하게 사용자의 상황 정보 또는 행동을 분류하는 것이고, 이 분야에서 스마트폰은 다양한 외부 센서들의 연결하고 통신기능을 제공하는 허브 또는 수집된 데이터들을 분석하고 가공하는 처리장치로 동작한다. 스마트폰에 내장된 센서를 사용하여 상황정보를 수집하는 연구도 포함된다. 이러한 연구들에서 사용되는 센서의 종류로는 가속도계[5,6], 마이크[7,8], 그리고 GPS[9]가 대표적이다.

이러한 연구에서 가장 중요한 이슈는 상황정보 수집의 정확도를 높이는 것과 소모되는 배터리를 줄이는 것이다. 센서를 작동시키는데 소모되는 배터리를 줄이기 위해서는 필요한 센서만 작동 시키는 것, 센서의 샘플링 레이트를 줄이는 것, 작동 주기를 늘리는 것, 다른 장치 또는 사용자와 센서 값의 공유가 가장 기본적인 방법이다. 하지만, 이러한 방법은 센서 값의 정확도 및 신뢰도를 잃게 되므로 현재 상황을 판단하여 적절하게 사용하는 것이 중요하다. 이러한 상황 판단을 위해 [3]에서는 사용자의 현재 상황을 하나의 상태로 정의하여 각 상태에 따라 센서 수집 전략을 바꾸는 방법을 제안하였고, [4]에서는 각 센서의 특징에 기반하여 데이터를 효율적으로 수집하는 방법을 제안하였다. [9]에서는 GPS의 작동 시점을 결정하기 위해 과거의 특징 시간 및 장소에서 기록된 값을 이용하여 현재 작동 시점을 예측하는 방법을 제안하였다. [10]에서는 일반적인 사용자의 경우 대부분의 시간을 타인과 같은 장소에 있다는 현상에 착안하여 타인과 위치 정보를 공유함으로써 배터리의 소모를 줄이는 방법을 제안하였다. 하지만, 제안된 대부분의 방법들은 단

일 센서에 최적화 되어 있거나, 스마트폰이 아닌 전체적인 센서의 최적화에 중점을 두고 있는 경우가 많다. 따라서, 수집되는 상황정보를 자유롭게 명세하고 그에 따라 유연하게 배터리 소모를 줄이는 방법이 필요하다.

3. 상황 정보 수집 방법

본 연구에서는 연속적인 사용자 상황정보 수집을 위해 크게 두 가지 방법을 통하여 배터리 소모를 줄인다. 첫 번째 방법은 수집하는 상황정보를 명세하여 이를 기반으로 상황정보를 모델화 한다. 상황정보는 다수의 센서로부터 수집된 데이터를 다양한 방법으로 분석하여 판단된다. 이때, 상황정보를 판단 하기 위한 조건 중 한 센서의 조건이 부정된다면, 다른 센서의 작동 여부와 관계 없이 전체 상황정보가 부정되게 된다. 따라서, 배터리 소모가 작은 센서부터 작동을 시켜, 하나의 상황정보 판단에 필요한 배터리 소모를 줄일 수 있다. 또한 동일한 방법이 센서 값의 분석 기법에도 응용된다. 센서로부터 수집되는 데이터들은 수가 많고 큰 저장공간과 처리능력이 요구된다. 따라서 센서에 대한 스케줄링뿐만 아니라 센서 값의 분석 기법에도 스케줄링 기법이 적용되어야 한다. 두 번째 방법은 수집된 상황정보들을 바탕으로 현재 사용자의 상태(State)를 판단하여 각 센서들을 상황에 맞게 동적으로 재구성하는 것이다. 이때 센서의 샘플링 레이트(Sampling Rate)와 작동주기(Duty cycle)을 변경한다. 그림 1은 각 센서와 제안된 방법 사이의 관계를 도식화 한 것이다.

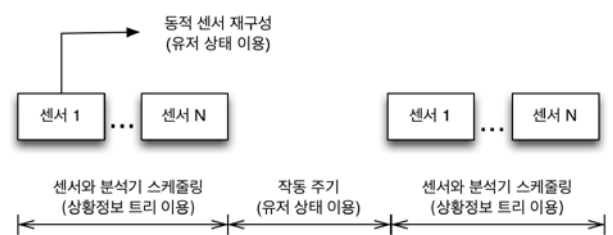


그림 1. 센서와 제안된 방법 사이의 관계

제안된 방법을 구현하기 위해서 스마트폰 상에서 작동 가능한 시스템의 아키텍처가 그림 2의 형태로 개발되었다. 각각의 물리적 또는 논리적 센서들은 Sensor를 상속받아 선언되어있는 네 가지 함수를 필수적으로 구현하여야 한다. 센서의 초기화(init), 센서 작동(resume), 센서 작동 중지(pause), 그리고 센서 값 획득(read)로 구성되고 각각의 함수들 실행에 필요한 정보들은 인자로써 받게 된다. Sensor Manager는 센서들의 제어에 관련된 관리 및 분석기(Analyzer)와 센서들을 연결시켜주는 기능을 한다. 분석기는 센서로부터 값을 획득하여 수학적 또는

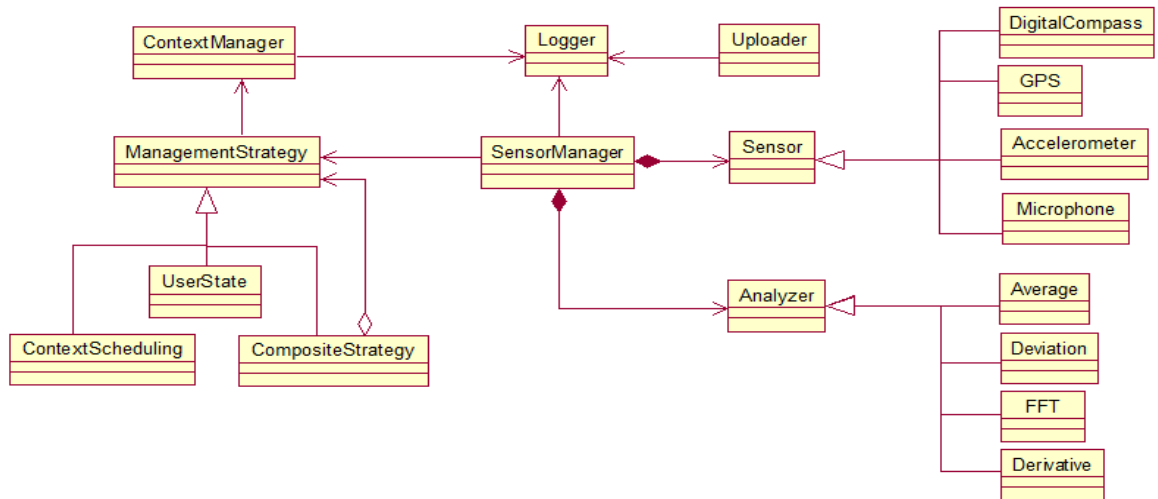


그림 2. 시스템 아키텍처 클래스 다이어그램

논리적 연산을 통하여 상황정보 판단에 필요한 정보 형태로 처리하게 된다. 분석기의 대표적인 예로는 평균, 분산, 도함수 등의 계산이 있다. 관리 전략(Management Strategy)은 센서들 관리를 위한 클래스로써 센서의 스케줄링과 재구성에 관련된 정보들을 처리한다. 관리 전략 클래스에서는 다수의 하위 센서 관리 전략을 허용하므로 다양한 센서 관리 방법을 복수로 구현 할 수 있다. 앞서 설명한 사용자의 현재 상태에 기반한 센서 관리 기법이 센서 관리의 하위 클래스로 구현된다. 마지막으로, 상황정보 관리기(Context Manager)는 수집되는 상황정보 전반에 관련된 기능을 수행한다. 상황정보 관리기는 분석기로부터 센서 값을 분석한 결과 값을 받아와 현재 사용자의 상황정보를 판단한다. 추가적인 구성 요소로써 각 구성요소에서 필요한 정보를 파일 또는 데이터 베이스에 저장하는 기록기(Logger)와 외부 서버에 기록된 정보를 전송할 수 있는 업로더(Uploader)가 있다.

3. 상황정보의 명세 기법과 스케줄링

상황정보는 일반적으로 독립된 개체(entity)의 현재 상황을 묘사하거나 특정 할 수 있는 모든 정보를 지칭하며, 개체는 사용자와 서비스에 영향을 미칠 수 있는 모든 사람, 장소, 또는 사물이 될 수 있다 [11]. 본 논문에서도 동일한 정의를 따르며, 상황정보는 센서로부터 수집된 값을 가공하여 조건의 만족 여부를 시험하여 결정한다.

상황정보 명세를 통해서 작동되어야 하는 센서의 종류, 값의 분석 대상 및 분석 방법, 그리고 판단 조건을 포함한다. 수집되는 각각의 상황정보는 그림 3 과 같이 JSON 문서 구조를 활용하여 명세된다. 상황정보 명세는 스마트폰 센서를 이용하여 수집 되어야 상황정보에 대한 정보 제공과 더불어 센서 및 분석기 작동 순서를 결정하는데도 이용된다. 센서 및 분석기의 작동순서의 결정하는 이유는 주어진 단일 상황정보의 조건을 만족시키기 위해서

먼저 실행된 센서의 값이 조건을 만족하지 않는다면 나머지 센서의 작동 여부와 관계 없이 전체 상황정보가 부정되기 때문이다. 또한, 분석 방법의 경우에도 센서에서 수집되는 데이터의 수가 많고 처리 및 저장 하는 작업에 많은 배터리를 소모하므로 센서의 작동 유무와 더불어 분석 방법에도 스케줄링이 필요하다 [12]. 더불어, 센서의 작동은 항상 활성화 하거나 주기적으로 활성화 하는 것이 아니라 필요한 경우 활성화하는 Pull 기반 방법을 사용한다.

```

Context :
  name : "walking",
  condition :
    sensor : "accelerometer",
    time frame : "5000",
    analysis method : "deviation_accellerometer",
    value : "1.0, 3.0",
  condition :
    sensor : "GPS",
    time frame : "36000",
    analysis method : "GPS_average",
    value : "0.0, 0.0"
  
```

그림 3. 상황정보 명세 예시

센서 및 분석기의 작동순서를 결정하기 위해서 본 연구에서는 상황정보 명세를 이용하여 현재 수집하는 상황정보 트리를 구성한다. 이 트리에서는 상황정보들을 판단하기 위해 필요한 센서의 종류, 분석기의 종류, 그리고 센서 작동시간이 포함 된다. 센서의 작동 순서를 결정하기 위해서는 각각의 센서에서 소모되는 배터리를 측정하거나 정확한 모델링이 필요하다. 하지만, 스마트폰의 경우 센서들의 배터리 소모 서열관계가 명확하기 때문에, 알려진 서열관계에 따라 센서의 작동순서를 결정한다. 일반적으로 가속도계, 마이크, 그리고 GPS 의 순서로 배터리 소모가 크다. 분석기에서는 동일한 센서로부터 획득한 값이라면 계산 복잡도가 낮은 분석기부터 작동하도록 스케줄링 된다. 그림 4 에는 Meeting at

office, Stay, Walking 의 세 가지 상황정보를 바탕으로 상황정보 수집 트리를 구성하는 것을 도식화 하였다. 주어진 상황정보 트리 내에서 센서의 작동 순서는 센서 배터리 소모 비율과 의존 상황정보 개수의 곱을 비교하여 작동순서를 결정하게 된다.

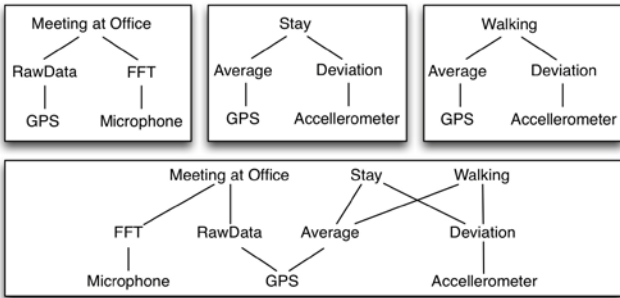


그림 4. 상황정보 트리 구성 예제

4. 사용자의 상태를 이용한 센서의 재구성

사용자 상태(User state)는 일정 시간을 두고 변화를 하며 특정 시간 단위를 두고 경향성을 지니는 경우가 많다. 예를 들어, 출근, 직장 업무, 퇴근, 식사와 같은 행동의 경우에는 하루를 간격으로 반복되는 경우가 많다. 따라서, 사용자의 현재 상태를 파악하여 상태와 관련된 센서를 보다 활성화 하거나 관련이 적은 센서의 성능을 낮춤으로써 상황정보 수집에 소모되는 배터리를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 사용자 상태를 명세하고 이에 따라서 센서를 재구성 할 수 있는 방법을 제공한다. 사용자 상태는 3 장에서 명세한 상황정보의 집합으로 표현되며, 사용자의 현재 상황정보들이 상태의 조건을 만족할 경우 센서의 재구성이 일어난다. 센서의 재구성은 얼마나 빠르게 센서의 샘플을 획득할 지를 나타내는 샘플링 레이트, 얼마나 자주 센서를 작동 시킬 것인지를 나타내는 주기가 포함된다.

```

User state:
name : "default"
duty cycle : "10000"
condition context : "stay"
condition context : "silence"
condition context : "located at the office"
sensor configuration :
  target sensor : "Accelerometer"
  sampling rate : medium
sensor configuration :
  target sensor : "GPS"
  sampling rate : medium
    
```

그림 5. 사용자 상태의 명세

사용자의 상태 명세는 JSON 문서구조를 이용하며, 그림 5 의 예제와 같이 명세 될 수 있다. 센서 재구성의 경우 정확한 샘플링 레이트를 명세 할 수도 있지만, 명세의 편의를 위해 상, 중, 하의 세 단계로 구분하여 주어진 상태에 연관성이 많은 센서의 경우 샘플링 레이트를 높여 더욱 정확한 값을

획득할 수 있으며, 반대로 연관성이 적은 센서의 샘플링 레이트를 낮춰 배터리 소모를 줄일 수 있다.

5. 구현 및 실험

2,3,4 장에 걸쳐 제안한 방법은 구글 안드로이드 기반 스마트폰인 Galaxy Nexus 에 백그라운드의 형태로 작동하는 서비스로 개발하였다. 구현에 사용된 Galaxy Nexus 는 안드로이드 버전 4.1.1 과 커널 버전 3.031 을 탑재하고 있다. 실험을 위해 12 가지 상황정보와 4 가지 사용자 상태를 명세 하였다. 명세 된 상황정보와 사용자 상태는 표 1 에 명시되어 있다.

표 1. 수집 상황정보와 사용자 상태

명세 된 상황정보 (Specified context)		
이름	센서	분석기
Still	Accelerometer GPS	Standard Deviation Standard Deviation
Walk	Accelerometer GPS	Standard Deviation Standard Deviation
Run	Accelerometer GPS	Standard Deviation Standard Deviation
Speech	Microphone	Silence Ratio
Music	Microphone	Silence Ratio
Silence	Microphone	Silence Ratio
Office	GPS	Range Classification
Home	GPS	Range Classification
Meeting	Accelerometer Microphone	Standard Deviation Silence Ratio
Morning	Time	Range Classification
Afternoon	Time	Range Classification
Night	Time	Range Classification
사용자 상태 (User state)		
이름	판단상황정보	
Default	None	
Working at office	Office, Meeting Office, Still	
Rest at Home	Home, Still Home, Science	
Walking	Walk	

실험 방법은 미리 계획된 동작의 순서로 주어진 시간 동안 반복하여 완충된 배터리가 완전히 방전되기까지 걸린 시간을 측정하였다. 계획된 동작은 20 분 단위로 사무실로 이동, 사무실에서 업무, 집으로 이동, 집에서 휴식의 4 가지 행동 패턴을 연속적으로 반복 하였다. 객관적인 비교를 위하여 실험과 관련되지 않은 서비스와 응용프로그램은 모두 종료한 상태로 배터리의 변화를 측정하였고, 측정을 위해서 안드로이드에서 제공하는 배터리 관련 API 를 이용하였다. 실험 대상은 항상 센서를 작동시킨 경우, 1 분의 주기로 10 초동안 센서를 작동시킨 경우, 제안된 방법을 이용한 경우의 세가지를 이다. 실험 결과는 그림 6 와 같다. 실험결과 제안된 방법의 경우 항상 센서를 작동시키는 경우에 비해 1.29 배, 주

기적으로 센서를 작동시키는 경우에 비해 1.14 배 더 오랜 작동시간을 보여주었다. 실험 중 작동 유무 확인을 위해 항상 스크린을 켜두었는데, 이것을 고려 한다면 그 차이는 더욱 커질 것으로 예상된다.

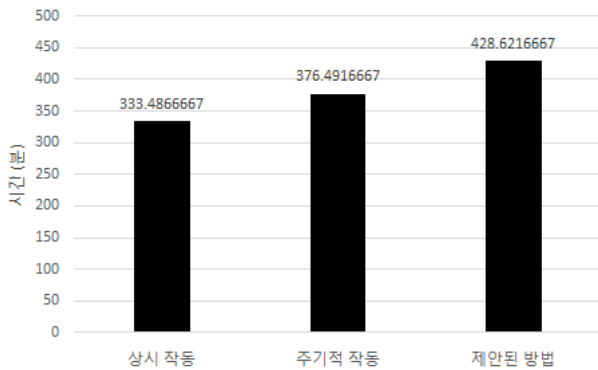


그림 6. 각 방법 별 작동시간

6. 결론 및 향후 계획

최근 상황정보를 이용한 네트워크 관리 기법, 모바일 네트워크 및 장치관리 기법, 그리고 새로운 서비스가 등장하고 있다. 상황정보를 획득하기 위한 방법 중 하나는 스마트폰을 이용하는 것인데, 스마트폰을 이용한 상황정보 수집은 빠른 배터리의 소모를 초래한다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 배터리 효율적인 사용자의 상황정보 수집 방법을 제안하였으며, 제안된 방법은 센서의 스케줄링 기법과 현재 사용자의 상태정보를 활용한 센서 재구성에 기반하고 있다. 실험 결과 제안된 방법은 항상 센서를 작동시키는 것에 비해 1.29 배, 주기적으로 필요한 센서를 작동 시키는 기법과 비교 하여 1.14 배 오랜 작동 시간을 보여 주었다.

향후 계획은 현재 상황정보 명세와 사용자 상태 명세를 수동적으로 해야 해야 하는 어려움이 있는데, 이를 자동화하는 것이다. 이를 위해, 사용자의 행동 패턴 및 이에 따르는 센서 값의 분석을 통해 상황정보를 자동적으로 분류하는 기법을 고려할 수 있다. 또한, 현재 제안된 방법은 사용자의 현재 상태만을 고려하고 있지만, 사용자의 과거 기록을 활용 함으로써 보다 정확하며 배터리 효율적인 상황 정보 수집이 가능 할 것으로 예상된다. 마지막으로, 주변의 다른 사용자와 공통적인 상황 정보를 공유 함으로써 배터리 소모를 줄이는 방법의 확장이 있다.

참고문헌

[1] Peyman TalebiFard and Victor C.M. Leung, "Context-Aware Mobility Management in Heterogeneous Network Environments," *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, volume: 2, number: 2, pp. 19-32

[2] Fuentes, B., Bantouna, A., Bennacer, L., Calochira, G.,

Ghader, M., Katsikas, G., and Yousaf, F.Z., "On accomplishing context awareness for autonomic network management," *Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, 2012, vol., no., pp.1,9, 4-6 July 2012

[3] Y. Wang, J. Lin, M. Annavam, Q. A. Jacobson, J. Hong, B. Krishnamachari, and N. Sadeh, "A framework of energy efficient mobile sensing for automatic user state recognition," in *Proceedings of the 7th international conference on Mobile systems, applications, and services*, ser. *MobiSys '09*. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 179-192.

[4] H. Lu, J. Yang, Z. Liu, N. D. Lane, T. Choudhury, and A. T. Campbell, "The jigsaw continuous sensing engine for mobile phone applications," in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ser. *SenSys '10*. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 71-84.

[5] Z. Yan, V. Subbaraju, D. Chakraborty, A. Misra, and K. Aberer, "Energy efficient continuous activity recognition on mobile phones: An activity adaptive approach," in *ISWC'12*, 2012, pp. 17-24.

[6] N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, and M. L. Littman, "Activity recognition from accelerometer data," in *Proceedings of the 17th conference on Innovative applications of artificial intelligence - Volume 3*, ser. *IAAI'05*. AAAI Press, 2005, pp. 1541-1546.

[7] S. Chu, S. Narayanan, and C.-C. J. Kuo, "Environmental sound recognition with time-frequency audio features," *Trans. Audio, Speech and Lang. Proc.*, vol. 17, no. 6, pp. 1142-1158, Aug. 2009.

[8] S. Chu, S. Narayanan, and C.-C. Jay Kuo, "Environmental sound recognition using mp-based features," in *Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2008. *ICASSP 2008*. IEEE International Conference on, 31 2008-april 4 2008, pp. 1-4.

[9] J. Paek, J. Kim, and R. Govindan, "Energy-efficient rate-adaptive GPS based positioning for smartphones," in *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services*, ser. *MobiSys '10*. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 299-314.

[10] Youngki Lee, Younghyun Ju, Chulhong Min, Seungwoo Kang, Inseok Hwang, and Junehwa Song, "CoMon: cooperative ambience monitoring platform with continuity and benefit awareness," in *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12)*. ACM, New York, NY, USA, 43-56, 2012.

[11] A. K. Dey, "Understanding and using context," *Personal Ubiquitous Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 4-7, Jan. 2001

[12] Archan Misra and Lipyeow Lim, "Optimizing Sensor Data Acquisition for Energy-Efficient Smartphone-Based Continuous Event Processing," in *Proceedings of the 2011 IEEE 12th International Conference on Mobile Data Management - Volume 01 (MDM '11)*, Vol. 1. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 88-97, 2011.