

사물인터넷 응용을 위한 에지-포그 클라우드 기반 계층적 데이터 전달 방법의 설계 및 평가[☆]

Design and Evaluation of an Edge-Fog Cloud-based Hierarchical Data Delivery Scheme for IoT Applications

배 인 한^{1*}
Ihn-Han Bae

요 약

사물인터넷 (Internet-of-Things, IoT) 장치들의 개수와 기능은 앞으로 기하급수적으로 증가하고 향상될 것이다. 그러한 장치들은 방대한 양의 시간에 제약을 받는 데이터를 생성할 수도 있다. IoT 상황에서, 데이터 관리는 데이터를 생성하는 객체와 장치 그리고 분석 목적과 서비스를 위해 그 데이터를 액세스하는 응용 사이의 중간 계층으로서의 역할을 해야 한다. 덧붙여, 대부분 IoT 서비스들은 데이터 가용성과 데이터 전달의 효율성을 증가시키기 위하여 호스트 중심 보다는 콘텐츠 중심이다. IoT는 모든 통신 장치들을 상호 연결할 것이고, 그리고 장치들과 객체들에 의해 생성된 또는 관련된 데이터를 글로벌하게 액세스할 수 있게 만든다. 또한 포그 컴퓨팅은 최종 사용자 근처의 네트워크 에지에서 데이터와 계산을 관리하고, 그리고 최종 사용자들에게 낮은 지연, 고대역폭, 지리적 분산으로 새로운 유형의 응용들과 서비스들을 제공한다. 본 논문에서는 시간 민감성을 보장하면서 효율적이고 신뢰적으로 IoT 데이터를 해당 IoT 응용들에게 전달하기 위하여 에지와 포그 컴퓨터 클라우드의 완전 분산 하이브리드 모델인 에지-포그 클라우드에 기반하고, 그리고 정보 중심 네트워크와 블룸 필터를 사용하는 EFCHD² (Edge-Fog cloud-based Hierarchical Data Delivery) 방법을 제안한다. EFCHD² 방법에서는 IoT 데이터의 특성인 지역성, 크기, 실시간성과 인기도 등을 고려하는 에지-포그 클라우드의 적절한 위치에 그 IoT 데이터의 복사본이나 에지 노드에 의해 전 처리된 특징 데이터를 저장한다. 그리고 제안하는 EFCHD² 방법의 성능을 분석적 모델로 평가하고, 그것을 성능을 포그 서버 기반 방법 그리고 CCN (Content-Centric Networking) 기반 데이터 전달 방법과 비교한다.

☞ 주제어: 블룸 필터; 데이터 전달; 에지-포그 클라우드; 정보 중심 네트워킹; 사물 인터넷

ABSTRACT

The number of capabilities of Internet of Things (IoT) devices will exponentially grow over the next years. These devices may generate a vast amount of time-constrained data. In the context of IoT, data management should act as a layer between the objects and devices generating the data and the applications accessing the data for analysis purposes and services. In addition, most of IoT services will be content-centric rather than host-centric to increase the data availability and the efficiency of data delivery. IoT will enable all the communication devices to be interconnected and make the data generated by or associated with devices or objects globally accessible. Also, fog computing keeps data and computation close to end users at the edge of network, and thus provides a new breed of applications and services to end users with low latency, high bandwidth, and geographically distributed. In this paper, we propose Edge-Fog cloud-based Hierarchical Data Delivery (EFCHD²) method that effectively and reliably delivers IoT data to associated with IoT applications with ensuring time sensitivity. The proposed EFCHD² method stands on basis of fully decentralized hybrid of Edge and Fog compute cloud model, Edge-Fog cloud, and uses information-centric networking and bloom filters. In addition, it stores the replica of IoT data or the pre-processed feature data by edge node in the appropriate locations of Edge-Fog cloud considering the characteristic of IoT data: locality, size, time sensitivity and popularity. Then, the performance of EFCHD² method is evaluated through an analytical model, and is compared to fog server-based and Content-Centric Networking (CCN)-based data delivery methods.

☞ keyword: Bloom filter; Data delivery; Edge-Fog cloud; Information-centric networking; Internet of Things

¹ School of IT Eng., Catholic University of Daegu, Gyeongbuk, 39430, Korea

* Corresponding author (ihbae@cu.ac.kr)

[☆] 이 결과물은 2017년도 대구가톨릭대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

[☆] 본 논문은 2017년도 한국인터넷정보학회 춘계학술발표대회 우수 논문 추천에 따라 확장 및 수정된 논문임.

[Reviewed 25 September 2017, Reviewed 10 October 2017, Accepted 6 November 2017]

1. 서 론

사물인터넷 (Internet of Things, IoT)는 기술적, 사회적, 그리고 경제적으로 최근에 생겨난 중대한 주제이다. 소비재, 내구재, 승용차와 트럭, 산업 및 유틸리티 구성요소, 센서, 그리고 다른 일상 용품은 인터넷과 접속되고 우리의 삶, 행동, 놀이를 변형시키기 위하여 강력한 데이터 분석 기능과 결합되고 있다[1]. IoT는 인터넷 연결로 외부 환경과 통신하고 상호작용하기 위하여 내장형 기술을 이용하는 다양한 범위의 장치들과 사물들로 확장되고 있다. 이 IoT 기술은 원격 센싱, 실시간 교통 감시, 날씨 관측, 군사 감시, 헬스케어, 도시 구조물 감시, 화재 탐지, 스마트 홈 관리, 그리고 실제 생활과 관련된 많은 다른 영역과 같이 많은 응용 영역들에서 채택되고 있다. IoT는 자원 제약 기기, 작은 교환되는 데이터의 방대한 양에 기인하여 오늘날 인터넷과 아주 다르다.

세계적인 규모에서 방대한 양의 장치들의 연결과 통합의 필요성은 IoT 비전으로 자연스럽게 이어진다. IoT에 2가지 주요 과제: 언제나 연결과 어떤 것과 통신하는 것이다. 그리고 사물인터넷은 모든 통신 장치들을 상호 연결할 것이고 장치들과 객체들에 의하여 생성된 또는 관련된 데이터는 인터넷을 통해 그것을 전송하고, 그리고 글로벌하게 액세스할 수 있게 한다[2].

이 논문에서, 우리는 실시간성을 보장하면서 효율적이고 신뢰적으로 IoT 데이터를 해당 사물인터넷 응용들에게 전달하기 위하여 에지-포그 클라우드에 기반하고, 정보 중심 네트워킹과 블룸 필터를 사용하여 IoT 데이터의 특성: 지역성, 크기, 실시간성과 인기도 등을 고려하는 에지-포그 클라우드의 적절한 위치에 그 IoT 데이터의 복사본이나 전 처리된 특징 데이터를 저장하여 계층적인 방법으로 데이터를 전달하는 EFcHD² 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 EFcHD² 방법이 실행되는 시스템 환경인 포그 컴퓨터 클라우드의 완전 분산 하이브리드 모델인 에지-포그 클라우드와 IoT 데이터 전달에 사용되는 정보 중심 네트워킹과 블룸 필터, 그리고 IoT 데이터 수명주기와 데이터 관리 및 관련된 장치들과 객체들에게 데이터를 전달하는 방법들에 대하여 살펴보고, 3장에서는 IoT 데이터의 특성에 따라 그 데이터의 복사본이나 에지 노드에서 전 처리된 특징 데이터를 배치 및 저장하고, 데이터를 검색하고 전달하는 EFcHD² 방법을 설계하고, 그리고 4장에서는 제안하는 EFcHD² 방법의 성능을 분석적 모델로 평가하고, 그것을 성능을 포그 서버 기반 방법 그리고 CCN 기반 데이터

전달 방법 [12]와 비교한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론과 향후 연구 과제에 대하여 설명한다.

2. 관련연구

2장에서는 본 논문에서 제안하는 EFcHD² 방법이 실행되는 환경을 제공하는 완전 분산 하이브리드 모델인 에지-포그 클라우드 패러다임에 대하여 설명하고, EFcHD² 방법의 효율적인 IoT 데이터 검색과 전달을 위하여 사용되는 콘텐츠 중심 네트워킹과 블룸 필터에 대하여 기술하고, 그리고 IoT 데이터 생명주기와 관리 방법 등에 대하여 살펴본다.

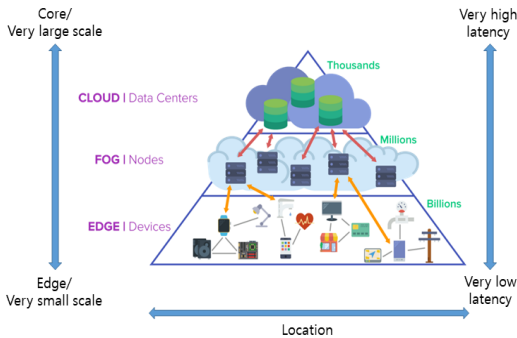
2.1 에지-포그 클라우드

사물인터넷은 환경으로부터 정보를 센싱하는 다수의 스마트 센서들을 포함하고 처리를 위해 클라우드 서비스와 센싱 정보를 공유한다. IoT 생성 데이터를 처리하기 위하여 2가지 주요 문제가 야기될 수 있다. 한 가지 문제는 시간 임계적인 IoT 응용의 처리 시간은 클라우드로의 데이터 오프로딩을 위한 망 지연에 의해 제한될 수 있고, 그리고 다른 문제는 다수의 IoT 장치들로부터의 데이터 업로딩은 망 혼잡을 유발하여 추가 망 지연을 일으킬 수도 있다는 것이다[3].

빅 데이터의 새로운 차원은 데이터가 클라우드 컴퓨팅 패러다임의 데이터 센터 대신에 센서 근처 에지에서 처리되어야 한다. 중요한 인프라의 구성요소의 안전성을 보호하기 위하여 낮은 지연 응답을 제공해야 한다. 포그 컴퓨팅은 클라우드 컴퓨팅을 네트워크 에지로 확장한 적절한 패러다임이다. 데이터가 에지에서 처리되기 때문에 포그 컴퓨팅 모델을 사용하여 빠른 제어 루프를 구현할 수 있다[4].

그림 1은 에지-포그 클라우드의 구조를 보여준다. 네트워크의 에지는 클라우드의 포그를 확장하고 많은 특성: 에지 위치, 위치 인식, 낮은 지연, 지리적 분산, 환경 감시를 위한 센서망, 많은 노드의 개수, 이동성 지원, 실시간 상호작용, 무선 액세스, 이질성, 상호운용성과 통합, 그리고 온라인 분석과 클라우드와 상호작용을 위한 지원 등을 갖는다.

포그 컴퓨팅 [5-7]은 단말 장치와 클라우드 컴퓨팅 데이터 센터 간의 처리, 저장, 네트워킹 서비스들을 제공하는 가상화된 플랫폼이다. 그러나 네트워크의 에지에 독점적으로 위치하지 않는다. 처리, 저장, 네트워킹 자원들은



(그림 1) 에지-포그 클라우드의 구조
(Figure 1) Edge-Fog cloud architecture

클라우드와 포그의 빌딩 블록들이다.

일반적인 클라우드 모델과 달리, 에지-포그 클라우드의 코어인 클라우드 컴퓨팅 계층은 계산 기능을 없고 클라우드 내의 모든 데이터를 보관하는 저장소만을 제공한다. 집중화된 데이터 스토어는 신뢰성과 클라우드 내의 어떤 컴퓨팅 자원들에 의한 데이터의 쉬운 액세스를 제공한다. 에지-포그 클라우드 구조의 코어에 있는 데이터 스토어는 에지와 포그 계층 모두에 의해 액세스될 수 있다[3].

에지-포그 클라우드는 다음과 같은 장점들을 제공한다.

- 네트워크 부하 감소: 에지-포그 클라우드는 IoT 장치들 근처의 네트워크 에지에서 계산을 제공하여 네트워크에 흘러 들어가는 데이터 양이 줄어든다.
- 이동성 기본 지원: 신뢰성에 따른 이동성은 많은 IoT 응용들에 대한 본질적인 요구사항이다. 스마트폰 또는 랩톱과 같은 에지 자원들은 모바일 IoT 응용들을 지원하기 위하여 물리적 또는 가상 이동성을 제공할 수 있다.
- 상황 제공: 에지-포그 클라우드에서 자원들은 센서들에 의해 생성되는 데이터에 상황 인식을 역시 제공한다. 에지 자원들은 위치 또는 응용 상황들을 사용하여 센서들에서 데이터를 결합하는 역할을 한다.
- 단일 장애점 없음: 에지-포그 클라우드에서 계산이 완전히 분산되어진 것처럼, 그 모델은 단일 장애점을 가지지 않는다. 어떤 응용의 다수의 스냅샷은 신뢰성 증가를 위하여 클라우드에 배치될 수 있다.

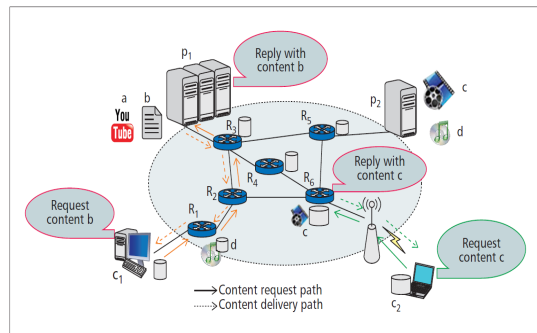
2.2 정보 중심 네트워킹

현재 인터넷 데이터 서비스는 웹 페이지와 같이 수백만의 사용자가 동일 한 서비스를 요구하는 동일한 데이터

라는 특징을 가진다. 이에 비해, 현재의 인터넷 전송 방법은 데이터가 무엇이든 상관없이 송수신 호스트의 IP 주소를 이용하여 서비스를 제공하므로 동일한 데이터들이 네트워크상에 사용자 수만큼 반복 전송되는 방식으로 동작하고 있는 비효율성이 있다. 이러한 데이터 반복 전송의 비효율성을 피하기 위하여 데이터 배포 개념을 도입한 정보 중심 네트워킹 (Information - Centric Networking, ICN) 기술이 제안 되었다.

ICN 기술 [8, 9]는 데이터를 제작한 생성자와 소비자가 IP 헤더 대신 데이터 이름을 사용한다. 즉, 소비자는 데이터를 요구하는 패킷에 콘텐츠 이름을 적어서 방송하고, 라우터는 데이터의 해당 요구 패킷을 저장하며, 데이터를 갖고 있는 노드가 콘텐츠를 요구하는 패킷을 수신하면, 콘텐츠 요구 패킷을 전송한 노드에게 데이터를 응답으로 전송한다. ICN 기술은 콘텐츠 생성자가 반드시 데이터를 전송한다는 제한을 두지 않고, 데이터를 갖고 있는 임의의 노드도 데이터를 배포할 수 있게 함으로써, 빠른 서비스와 같은 데이터가 네트워크에서 반복되어 전송되는 횟수를 줄이는 장점을 가진다. ICN의 공통적인 핵심 내용은 다음과 같다.

- 콘텐츠 기반 네이밍과 보안
- 인-네트워킹 캐싱
- 이름 기반 콘텐츠 발견과 전달
- 비 연결형 수신자 방식 통신 모델



(그림 2) ICN에서 콘텐츠 교환 [9]
(Figure 2) Content exchange in ICN [9]

일반적인 ICN 데이터 교환은 그림 2와 같이 요약되어진다. 여기서 ICN 소비자 (C₁과 C₂)는 그것들이 제공하지 않는 그것들이 찾는 명명된 콘텐츠를 명시한다. ICN에서 계층적 이름과 플랫 이름 둘 다 가능하다. 계층적 이름은 가변 길이를 갖는 URI와 유사한 식별자로 나타내고, 반면

에 플랫폼 이름은 시맨틱 구조가 없는 고정 길이 식별자로 구성된다. 유일한 이름을 사용하여 자신을 식별하는 단위인 각 콘텐츠 패킷을 만들고, 콘텐츠 제공자를 향해 요청 전송을 만들어 애니캐스트 검색을 가능하게 한다.

2.3 블룸 필터

블룸필터는 구성원 정보 질의를 위한 집합 표현의 간단한 공간 효율적 무작위 자료구조이다. 블룸필터는 어떤 원소가 집합의 일부인지를 정확하게 식별할 것이다. 그러나 약간의 거짓 긍정 응답을 생성할 수도 있다. 블룸필터의 매개변수들이 적절히 선택되어지면 거짓 긍정의 확률은 매우 낮다고 알려져 있다. 따라서 블룸필터는 원소들의 거대한 집합이 관리되어야 하고 작은 비율의 거짓 긍정 응답이 문제가 되지 않는 응용들을 위하여 권장되고 있다[10].

블룸필터 정의를 위한 수학적 배경은 다음과 같다. n 원소들의 집합 $S = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 이 존재하고, 그것의 블룸필터는 0 또는 1로 설정되는 m 비트들의 배열이다. 초기에 해시 영역의 모든 m 비트들은 0으로 설정된다. 블룸필터는 범위 $\{1, 2, \dots, m\}$ 을 갖는 k 개의 독립 해시함수 h_1, h_2, \dots, h_k 를 가지고, 그 해시함수들을 집합 S 의 각 원소에 적용한다. 따라서 각 요소 $x_i \in S$ 에 대해, $h_1(x_i), h_2(x_i), \dots, h_k(x_i)$ 위치들에 대응하는 비트들은 1로 설정된다. 동일한 비트는 제한 없이 여러 번 설정될 수 있다.

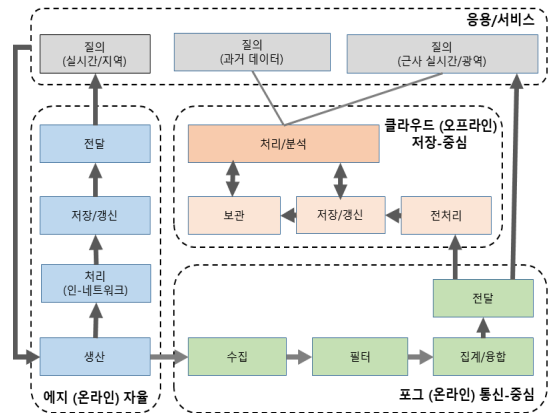
어떤 원소들을 삽입한 후, 구성원 정보 질의는 쉽게 실행될 수 있다. 어떤 원소 x 가 S 에 속하는지를 검사하기 위하여 $h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x)$ 위치들에 대응하는 배열의 비트들이 모두 1로 설정되었는지를 검사한다. 만일 최소한 하나의 비트가 0이면 확실히 $x \notin S$ 이고, 아니면 높은 확률로 $x \in S$ 이다.

2.4 IoT 데이터 관리

IoT를 위한 데이터 관리 프레임워크는 독립적인 IoT 서브시스템들을 적응적이고, 유연하고, 그리고 무단절 데이터 네트워크에 연결하기 위하여 계층적, 데이터 중심, 연결 패러다임을 통합한다. 이 프레임워크에서, 사물 계층은 데이터를 생성할 수 있는 모든 개체들과 서브시스템들로 구성되고, 원시 데이터는 통신 계층을 통하여 데이터 저장소로 전송된다. 그러한 데이터 저장소들은 특정 서버나 클라우드에 위치될 수 있고, 사용자들은 질의와 분석 작업을 처리하고, 필요한 데이터를 보유한 저장소를 결정하고, 그

리고 그 데이터를 획득하기 위하여 참여를 협상하는 질의와 연결 계층을 통하여 그러한 저장소들을 액세스할 수 있다.

그림 3은 데이터 생산에서부터 수집까지의 과정, 전송, 선택적 필터링과 전처리, 그리고 마지막으로 저장하고 보관하기 위한 IoT 시스템의 데이터 수명주기를 보여준다. 질의와 분석은 데이터 생산을 시작하고 소비하는 중점들이다. 그러나 데이터 생산은 IoT 소비하는 서비스들에 푸시되게 설정될 수 있다. 생산, 수집, 누적, 필터링, 그리고 다소의 기본 질의와 준비된 처리 기능들을 온라인 통신 집약형 연산으로 고려되고, 집약형 전처리, 장기 저장과 보관 그리고 심층 처리와 분석은 오프라인 저장 집약형으로 고려된다[11].



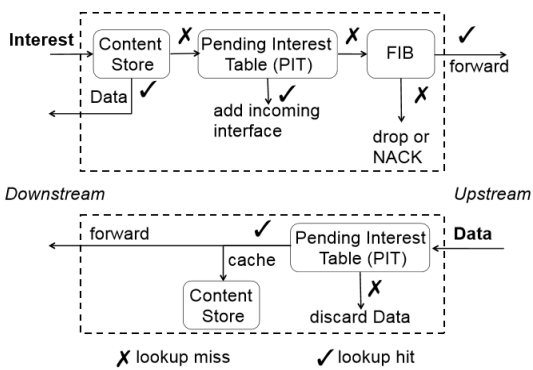
(그림 3) IoT 데이터 생명주기와 데이터 관리
(Figure 3) IoT data life cycles and data management

저장 연산은 안정된 액세스와 갱신을 위하여 장기적으로 이용할 수 있는 데이터를 만드는 것이 목적인데, 보관은 읽기 전용 데이터와 관계가 있다. 다소의 IoT 시스템은 실시간 지역 서비스를 위하여 시스템 내의 집중 지점인 클라우드까지 데이터를 전파할 필요가 없고, 네트워크 내에 데이터를 생성하고, 처리하고, 그리고 저장할 수도 있다. 저장 요소와 처리 요소 둘 다를 결합한 에지는 이 생명주기에서 자율 장치로 존재할 수 있다.

유비쿼터스 컴퓨팅을 향해 가는 최근 추세와 함께 데이터 수집과 전달에 대한 광범위한 연구가 진행되고 있다. 이전에 제안되었던 다른 콘텐츠 중심 시스템들 중에서 CCN과 그것의 후계자인 NDN (Named Data Named)는 인기 있고 완전히 발전된 구조 중의 하나이다[12]. CCN 노드들 간의 통신은 2가지 다른 패킷을 가지고 있다. 관심

패킷은 콘텐츠에 대한 요청을 운반하는 패킷이고, 데이터 패킷은 요청된 콘텐츠를 운반하는 패킷이다. CCN 라우터들은 관심 패킷과 데이터 패킷 전달 기능을 수행하기 위하여 그림 4와 같이 3가지 데이터 구조: 콘텐츠 스토어 (Contents Store, CS), 미해결 관심 테이블 (Pending Interest Table, PIT), 포워딩 정보 베이스 (Forwarding Information Base, FIB)를 관리한다. CS는 데이터 캐시로서 역할을 하고 그 노드에 의해 전송되는 데이터 패킷을 저장하고, PIT은 그 노드에 도착하였으나 아직 해결되지 않은 콘텐츠 요청을 저장하고, 그리고 FIB는 데이터 생성자를 향해 관심 패킷을 라우트하는 데 사용된다.

CCN 라우팅은 다음과 같이 구축된다. 어떤 노드에서 새로운 데이터가 가용이면, 그 노드는 모든 발신 인터페이스로 그 데이터의 가용성을 광고한다. 광고 패킷은 업스트림 노드들로 전파되고, 그 광고 패킷을 수신한 노드들은 FIB 엔트리를 생성한다. 특히, CCN 데이터 이름은 계층적인 만큼, 그 광고 패킷은 새로운 데이터의 이름 접두사와 일치하는 광고 패킷을 수신한 노드에 도착할 때까지 계속 전파된다.



(그림 4) CCN 노드의 포워딩 프로세스 [13]
(Figure 4) Forwarding process of a CCN node [13]

CCN 노드의 포워딩 프로세스는 그림 4와 같다. 어떤 노드가 관심 패킷을 생성하면, 그 관심 패킷은 FIB에 저장된 정보에 따라 노드에서 노드로 전달된다. 그 포워딩 프로세스는 그 관심 패킷이 요구하는 콘텐츠의 소스에 도착하거나 요구하는 콘텐츠를 CS에 저장하고 있는 노드에 도착하면 종료된다. 또한 관심 패킷은 전달되는 동안 요청한 노드로 데이터를 다시 전송하는데 사용되는 역방향 라우트를 설치한다. 각 중간 노드에서, 캐싱 정책은 수신한 데이터를 그 노드의 CS에 저장할지 여부와 어떻게 교

체할지를 결정한다.

Bosunia 등 [2]는 직사각형의 망 위에 랜덤하게 분산된 N 센서들로 구성된 센서 망에서 콘텐츠 중심 네트워킹에 기반 한 효율적인 데이터 전달을 위한 가능 구조, 필요한 구성요소, 그리고 관련 메커니즘들을 제안하였다. 제안하는 CCN 구조는 스마트 베이스 시스템 (Smart Base System, SBS), 스마트 라우터 (Smart Router, SR), 스마트폰과 같은 스마트 모바일 센서(Smart Mobile Sensors, SMS), 서비스 관리 시스템 (Service Management System), 그리고 상황 관리 시스템 (Context Management System)으로 구성된다. 서비스 관리 시스템과 상황 관리 시스템은 IoT 결정 제어장치 (IoT Decision Controller, IDC)를 형성한다. SR, SBS, SMS는 전송 영역에 속하고 SMS로부터 IDC까지 신뢰적 데이터 전송에 책임이 있고, 서비스 관리 시스템과 상황 관리 시스템은 상황을 식별하기 위하여 추론을 만들고, 관련 이벤트를 처리하고, 분산 지능 제어장치로 작동하는 서비스 영역에 속한다. 에지 센서 대 IDC의 데이터 전달 방법은 3 단계: 보급되는 데이터 이름 발행, 데이터에 대한 관심 패킷 방송, 데이터 전달로 처리된다. 데이터 전달 단계에서 데이터는 SSD에서 IDC로 전달된다.

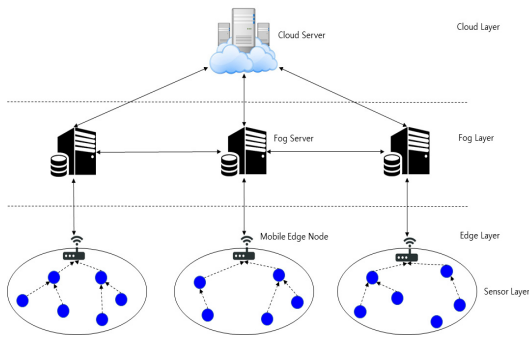
L. Cheng 등 [13]는 모바일 요소들을 갖는 멀티홉 클러스터 기반 무선 센서망을 위한 SSDN (Seamless Streaming Data Delivery) 프로토콜을 제안하였다. SSDN은 계층적 무선 센서망에서 스트리밍 데이터의 전달을 위하여 지역화된 이동성 지원에 집중한다. 교차 클러스터 핸드오버 메커니즘과 경로 재지정 방법을 도입하여 소스와 모바일 요소 간의 중단 간 연결성을 유지한다.

3. EFcHD² 방법의 설계

본 논문에서는 에지-포그 클라우드에 기반하고, 정보 중심 네트워크와 블룸 필터를 사용하여 센서 망으로부터 획득한 데이터를 IoT 응용들에게 효율적으로 전달하는 EFcHD² 방법을 제안한다.

3.1 시스템 구조

제안하는 EFcHD² 방법을 위한 시스템 구조는 그림 5와 같이 4 계층: 클라우드, 포그, 에지, 센서 계층들로 구성된다. 각 계층의 ICN 노드들은 로컬 캐시에 데이터 이름과 저장된 데이터 간의 관계를 관리하기 위하여 약화된 블룸필터 (Attenuated Bloom Filter, ABF), 그리고 Jacobin의 방법 [12]와 같은 역할을 하는 CS와 PIT를 관리한다.



(그림 5) EFcHD² 방법을 위한 시스템 구조
(Figure 5) The system architecture for EFcHD² method

최상위 계층은 포그 계층으로부터 정보를 수신할 수 있는 클라우드 컴퓨팅 계층으로 클라우드 내의 모든 데이터를 보관하는 저장소 역할을 하고, 저장된 정보는 데이터 마이닝과 관리와 같은 다른 목적을 위해 사용될 수 있다. 포그 계층은 IoT 장치들 근처의 네트워크 에지에서 계산, 저장, 네트워킹 서비스 등과 같은 많은 서비스를 제공하는 아주 가상화된 플랫폼이다. 따라서 IoT 장치들이나 모바일 가입자들 근처에서 클라우드 서비스들을 사용 가능하게 만든다.

에지 계층은 해당 에지 지역의 센서나 IoT 장치들로부터 정보를 수집하기 위하여 센서나 IoT 장치들로부터 한 홉 또는 두 홉 거리 내의 가게, 카페, 교차로와 같은 공공 시설 등에 설치되는 적은 자원을 갖는 모바일 에지 노드 (Mobile Edge Node)를 가지고 있다. 그것은 IoT 장치들 근처의 네트워크 에지에서 계산을 제공하여 클라우드로 전송되는 데이터 량을 많이 줄일 수 있고, 강력한 무선 접속으로 아주 많은 노드들을 서비스할 수 있다. 예를 들어, 교통 제어는 노변에 설치된 카메라와 센서 장치들로부터의 실시간 데이터를 수집하여 에지 망에서 자동화 할 수 있다. 센서 장치는 보행자와 차량과 같은 접근하는 객체들을 탐지할 수 있고, 그 객체의 거리와 속도를 측정할 수 있다. 수집된 정보에 기초하여 스마트 신호등에 적절한 신호를 보내 차량들의 경로를 변경할 수 있다.

에지 계층들은 커버하는 지역의 크기가 다르지만 낮은 망 지연, 센서 위치 인식, 널리 퍼진 지리적 분산과 이동성 서비스를 제공한다. 모바일 무선 센서 계층은 다수의 모바일 센서들로 구성된다. 그것은 주변 환경으로부터 정보를 수집하는 중요한 구성요소이다. 여기서 각 계층의 서버들 간에는 코어 네트워크를 통하여 상호 연결된다.

3.2 복사본 생성과 배치

IoT 장치들에 의하여 생성된 IoT 데이터는 그 데이터의 특성: 크기, 실시간성, 인기도 그리고 지역성을 갖는다. 여기서 인기도는 IoT 데이터가 IoT 응용들에 의해 자주 참조되는 정도를 의미하고, 크기에는 IoT 장치들과 센서들로부터의 데이터 스트림 처리와 분석에 의존하는 빅 데이터가 포함된다.

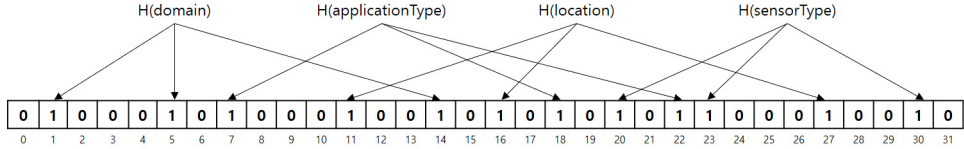
제안하는 EFcHD² 방법에서는 인기 있는 데이터와 빅 데이터를 제외한 모든 IoT 데이터는 클라우드 계층에 저장된다. 해당 에지 노드는 하부의 센서 계층의 센서들로부터 수집한 데이터를 일시적으로 저장하고, 빅 데이터 스트림에 대한 잠재적인 패턴을 식별하고, 그리고 추가 분석을 위하여 상위 계층의 계산에 필요한 특징 추출을 수행한다. 따라서 에지 노드는 원시 센서 데이터를 클라우드 계층으로 전송하는 대신에 지형 공간정보를 포함하는 전 처리된 특징 결과만을 저장하고 전송한다. 에지-포그 클라우드의 각 계층이 갖는 특성과 IoT 장치들에 의해 발생하는 IoT 데이터의 특성에 따라 데이터 복사본 또는 전 처리된 데이터 생성되고 에지-포그 클라우드 계층의 적절한 위치에 배치된다. IoT 데이터의 특성에 따라 에지-포그 클라우드 계층의 노드들에 데이터를 배치하는 기본 규칙은 다음과 같다.

대용량의 IoT 데이터는 큰 규모의 시스템 자원을 가지고 있는 클라우드의 데이터 센터에만 배치되고, 지역성을 갖는 데이터 복사본은 그 IoT 데이터가 생성된 해당 포그 서버에 배치되고, 그리고 인기가 있는 데이터 복사본은 많은 요청의 분산 처리를 위해 모든 포그 서버들에 배치된다. 그리고 실시간 이벤트 감시와 실시간 모바일 집단 센싱 등과 같은 실시간 응용이 요구하는 긴급한 데이터의 복사본은 낮은 지연을 제공하기 위하여 그 실시간 IoT 데이터가 생성된 해당 포그 서버와 모바일 에지 노드가 획득한 주변 센서 정보와 위치 정보 등에 기초한 상황과 실시간 IoT 데이터에 대한 전달 프로세스의 히스토리에 기초한 시공간적 상관관계를 갖는 해당 지역의 모바일 에지 노드들에 각각 배치된다. 데이터 복사본을 배치한 후, 그 데이터 복사본이 배치된 노드는 그 노드의 ABF를 갱신하고, 그리고 요약 블룸 필터를 계산하여 그 노드의 상위 계층에 있는 노드들에게 전송한다.

3.3 데이터 전달 모델

EFcHD² 방법은 IoT 환경에서 효율적 데이터 전달을 위하여 에지-포그 클라우드에 기반하여 계층적 정보-중심

$S = \{\text{domain, applicationType, location, sensorType}\}$
 $H = \{h_1, h_2, h_3\}$



(그림 6) 계층적 네이밍에 대한 블룸 필터의 예
 (Figure 6) Example of the Bloom filter for a hierarchical naming

네트워킹과 블룸 필터를 사용한다. ICN의 주된 원칙은 콘텐츠가 호스트 주소보다는 콘텐츠 이름을 사용하여 액세스된다는 것이고, 콘텐츠 네이밍은 ICN에서 중요한 문제이다. IoT 장치들의 기하급수적인 증가로 빠르고 효율적인 방법으로 관련 데이터를 검색하고 관리하는 것이 어렵다. 따라서 유연한 잘 구성된 네이밍 방법을 제공하는 것과 에지 망으로부터 그 콘텐츠를 검색과 식별에 낮은 지연을 제공하는 것은 중요하다.

제안된 대부분의 네이밍 방법은 계층적 네이밍과 플랫 네임스페이스이다. 계층적 방법은 현재 URL과 유사한 구조를 갖는다. 그 계층구조는 라우팅 정보의 누적을 가능하게 하여 라우팅 시스템의 확장성을 향상시킨다[14]. 따라서 제안하는 EFcHD² 방법은 데이터 네이밍을 위하여 [2]의 CCN 기반 데이터 전달 방법에서 정의한 동일한 계층적 구조를 사용한다.

/domain/applicationType/location/sensorType
 /timeStamp/dataAttribute/...

여기서 그 계층구조의 루트는 그 데이터가 그 ICN 도메인에 속하는지를 검사하는데 사용되는 도메인이다. 블룸 필터는 생성되는 IoT 데이터의 계층적 이름을 구성하는 m 요소들의 집합 $S = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 에 대한 n 비트들의 배열이다. 초기에 그 필터의 모든 비트들은 0으로 초기화 된다. 블룸 필터의 핵심 개념은 항목 $x \in S$ 를 범위 $\{1, \dots, n\}$ 의 균등 난수를 설정하기 위하여 k 해시함수 $h_i(x), 1 \leq i \leq k$ 를 사용하는 것이다. 따라서 각 요소 $x_i \in S$ 에 대해, $h_1(x_i), h_2(x_i), \dots, h_k(x_i)$ 위치들에 대응하는 비트들은 1로 설정된다.

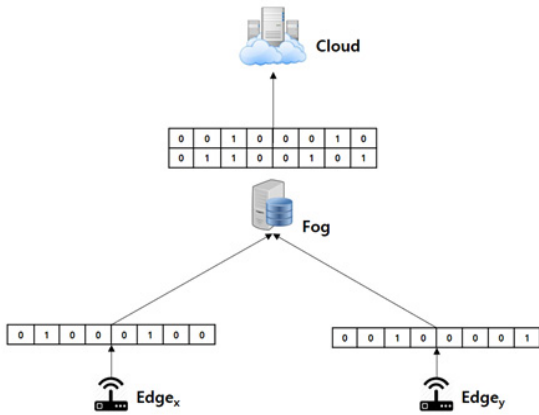
그림 6은 비트스트링 길이 32로 구성된 블룸 필터를 보여준다. 여기서 IoT 데이터의 계층적 이름을 구성하는 4가지 요소들, domain, applicationType, location, 그리고

sensorType은 k=3 해시 함수들을 사용하여 그 비트스트링의 비트 위치들로 해시되고, 그 대응하는 비트들은 1로 설정된다.

EFcHD² 방법에서는 IoT 장치들이 엄청나게 많기 때문에 에지-포그 클라우드 구조를 사용하여 하위 계층의 노드 그룹들은 상위 계층의 우수한 서버에서 관리되는 계층적 방법을 사용한다. 이러한 계층구조에서 콘텐츠의 검색을 최적화하기 위하여 ABF를 사용한다. ABF [15]는 특히 발견될 객체가 근처에 위치할 때 위치 관리의 성능을 최적화하는 방법으로 소개되었다. ABF는 깊이 d의 표준 블룸 필터의 배열이다. ABF에서 각 행은 다른 거리에 있는 객체들을 나타낸다.

계층적 데이터 전달 방법인 EFcHD² 방법에서 IoT 장치들은 에지-포그 클라우드의 에지 계층에서 광고 메시지를 전송하여 데이터 정보를 교환한다. 이 정보는 ABF로 표현된다. ABF는 여러 계층의 블룸 필터로 구성된다. 첫 번째 계층은 전송 에지 노드에서 가용인 데이터들을 표현하는 블룸 필터를 포함한다. 두 번째 계층은 그 노드로부터 1 홉 떨어져 있는 데이터로 구성된다. 이 때 홉의 수를 깊이라 한다.

그림 7의 ABF의 최대 깊이는 3이 된다. 따라서 최대 2 홉 떨어져 있는 콘텐츠를 발견할 수 있다. 그림 7은 입력 ABF들로부터 어떻게 정보가 수집되는지, 출력 ABF로 어떻게 표현되는지를 보여준다. 여기서 상단의 포그 서버 Fog는 하단의 왼쪽 에지 노드 Edge_x와 오른쪽 에지 노드 Edge_y로부터 ABF를 각각 수신한다. 각 노드는 자신의 콘텐츠에 대응하는 하나의 계층과 Edge_x와 Edge_y에서 수신한 각 계층들을 비트마다 OR한 계층들을 포함하는 ABF를 전송한다. Fog는 그것의 자식 노드들의 ABF에 열 단위로 비트 OR 연산을 수행하여 요약 블룸 필터를 계산하고, 그리고 계산된 요약 블룸 필터는 다시 더 상위 계층인 Cloud로 전송된다.



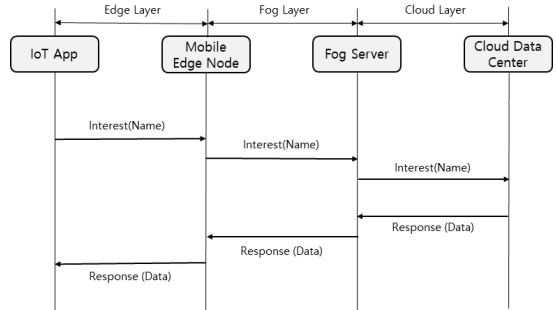
(그림 7) 포그 서버의 ABF 구축 과정

(Figure 7) The process of building a Fog server's ABF

EFcHD² 방법은 IoT 응용의 요구에 따라 필요한 데이터를 요청하기 위하여 그 장치가 속한 에지-포그 클라우드 계층구조의 해당 데이터 관리 노드로 데이터 이름을 갖는 관심 패킷을 전송한다. 각 계층의 데이터 관리 노드가 그 관심 패킷을 수신하면, 수신한 관심 패킷에 대한 ABF 엔트리가 그 노드가 관리하는 ABF에 존재하는지를 검사한다. 만일 그 엔트리가 ABF의 첫 번째 계층에 존재하면, 그 노드의 CS에 저장된 해당 IoT 데이터를 응답으로 전송하고, 다른 계층에 존재하면 그 노드의 하위 계층의 노드들에게 수신한 관심 패킷을 전송한다. 그리고 수신한 관심 패킷에 대한 ABF 엔트리가 그 노드의 ABF에 존재하지 않는다면, 그 관심 패킷을 그 노드의 PIT에 저장하고, 그것을 상위 계층 노드로 전송한다.

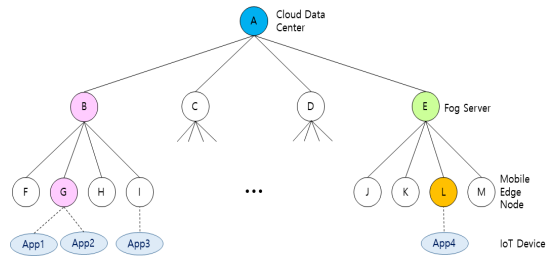
그림 8은 FEcHD² 방법의 최악의 경우에 IoT 데이터 검색과 전달에 위한 메시지 시퀀스 다이어그램을 보여준다. 여기서 데이터 요청에 대한 응답으로 요청된 데이터가 클라우드의 데이터 센터로부터 중간 노드로 포그 서버와 모바일 에지 노드를 거쳐 IoT 응용으로 전달된다. 그 데이터 패킷이 그 중간 노드에 의해 수신되면, 그 중간 노드는 수신된 데이터 이름을 그것의 PIT에서 찾아본다. 만일 그 데이터 이름이 그 PIT에서 검색되면, 데이터를 CS에 저장하고 ABF를 갱신한 후, 관심 패킷이 도착한 인터페이스로 그 데이터 패킷을 전송하고, 그리고 전송이 완료되면, 그 PIT 엔트리는 삭제된다.

그림 9는 제안하는 EFcHD² 방법의 실행과정을 보여준다. 센서 계층 G에서 생성된 인기 있는 데이터는 모바일 에지 노드 G에 의해 응용 1과 응용 2로 전달되고, 센서 계



(그림 8) EFcHD² 방법에서 데이터 요청/전달을 위한 메시지 시퀀스 다이어그램 (최악 경우)

(Figure 8) Message sequence diagram for data request/delivery in EFcHD² method (the worst case)



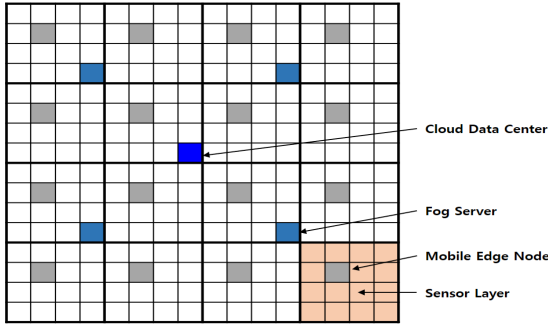
(그림 9) EFcHD² 방법에 의한 데이터 전달의 예

(Figure 9) Example of data delivery through EFcHD² method

층 I에 있는 응용 3가 요청한 지역성이 있는 IoT 데이터는 포그 서버 B에 의해 전달된다. 그리고 응용 4에 의해 요구되는 빅 데이터의 패턴 또는 특징 데이터와 실시간 데이터는 포그 서버 E와 모바일 에지 노드 L에 의해 각각 전달된다.

4. 성능평가

4 장에서는 그림 10와 같이 16개의 모바일 에지 노드와 4개의 포그 서버, 그리고 1개의 데이터 센터가 계층적으로 구성된 격자구조의 에지-포그 클라우드 컴퓨팅 환경에서 IoT 데이터 전달 방법들의 성능을 평가한다. 여기서 우리는 제안하는 EFcHD² 방법과 모든 IoT 데이터를 해당 계층의 포그 서버에 저장하는 포그 기반 데이터 전달 방법 (Fog Server-based method)과 CCN 기반 데이터 전달 방법 (CCN-based method) [13]의 성능을 분석하고 평가한다.



(그림 10) EFcHD²의 성능 평가를 위한 에지-포그 클라우드의 격자 계층 구조
(Figure 10) A grid hierarchy of Edge-Fog cloud for performance evaluation of EFcHD²

우리는 [16]에서 사용한 지리적으로 분산된 온라인 사회 관계망을 위한 복사본 배치의 최적화를 수행하는 위치 인식 데이터 배치 방법의 자원 이용률을 평가하는 전체 비용 모델을 IoT 데이터 관리를 위한 전체 비용을 평가하는데 맞도록 수정한 수식 (1)을 사용한다.

$$C_{total} = C_{store} + \frac{\lambda}{\mu} C_{traffic} \quad (1)$$

$$C_{store} = \sum_{i \in N_d} size_d trans_i \quad (2)$$

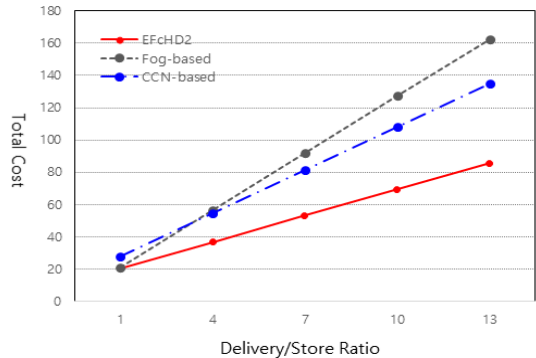
$$C_{traffic} = size_d [P_{pit} trans_{inode} + (1 - P_{pit}) trans_{abf}] \quad (3)$$

여기서 C_{store} 는 IoT 장치의 데이터를 저장하고 복사본을 에지-포그 클라우드 계층구조의 분산된 데이터 관리 노드들에 저장하는 평균 비용이고, $C_{traffic}$ 은 데이터를 요청한 IoT 장치와 요청한 데이터를 저장하고 있는 데이터 스토어 간의 데이터를 전송하는 평균 비용이고, 그리고 λ/μ 는 IoT 데이터의 전달/저장 율을 나타낸다. 수식 (2)와 (3)에서 N_d 는 IoT 데이터 d 를 저장하고 있는 지리적으로 분산된 데이터 관리 노드들의 집합, $size_d$ 는 데이터 d 의 크기, 그리고 P_{pit} 는 요청한 데이터 이름이 데이터 패킷이 수신하는 중간 노드의 PIT에 존재할 확률을 나타낸다. 그리고 $trans_i$ 는 데이터 d 를 복사본이 배치되는 데이터 관리 노드 i 까지의 홉스 수와 거리를 고려한 평균 전송 비용을 나타내고, 그리고 $trans_{inode}$ 와 $trans_{abf}$ 는 요청한 데이터 d 에 대한 PIT 엔트리를 갖는 중간 노드 또는 ABF에 의해 해당 IoT 장치까지의 홉스 수와 거리를 고려한 평균 전송 비용을 각각 나타낸다.

(표 1) 분석적 성능 평가를 위한 매개변수와 값
(Table 1) Parameters and values for analytical performance evaluation

매개변수	값
IoT 데이터의 종류별 크기: $size_{ppd}, size_{dat}, size_{big}$	1, 2, 20
데이터 종류별 생성률: $g_{hot}, g_{rt}, g_{norm}, g_{big}$	0.25, 0.4, 0.2, 0.15
지역 데이터의 요청 비율: r_{local}	0.7
데이터 종류별 요청률: $r_{hot}, r_{rt}, r_{norm}, r_{big}$	0.5, 0.25, 0.15, 0.1
요청된 데이터가 에지-포그 클라우드의 각 계층구조에서 발견될 확률: $P_{edge}, P_{fog}, P_{cloud}$	0.3, 0.6, 0.1
IoT 장치와 에지-포그 클라우드 계층구조의 노드들 간의 데이터 전송 비용: $trans_{edge}, trans_{fog}, trans_{cloud}$	1, 2, 4
P_{pit}	0.2

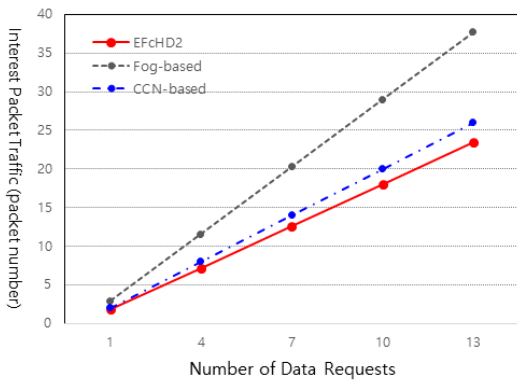
본 논문에서는 IoT 데이터 전달/저장 율에 따른 전체 데이터 관리 비용과 전송되는 광고와 관심 패킷들의 트래픽 부하로 데이터 전달 방법들의 성능을 평가한다. 표 1은 IoT 데이터 전달 방법의 성능을 분석적으로 평가하는데 사용되는 매개변수와 값을 보여준다. 여기서 데이터 크기와 데이터 전송 비용은 정규화 된 값이다.



(그림 11) 데이터 전달/저장 율에 따른 전체 데이터 관리 비용
(Figure 11) Total data management cost by data delivery/store ratio

그림 11은 IoT 데이터 전달/저장 율에 따른 전체 데이터 관리 비용을 보여준다. 제안하는 EFcHD² 방법은 에지-

포그 클라우드의 계층구조에 기초하고, 인기 있는 데이터의 복사본을 모든 포그 계층에 배치하고, 블룸필터를 사용하여 데이터 전달 비용을 줄이고, 그리고 빅 데이터는 그 자체보다는 전 처리된 특징 또는 패턴 데이터를 클라우드 계층에 저장하여 데이터 저장비용을 줄인다. 따라서 EFcHD²는 데이터 전달/저장 유효에 관계없이 우수한 성능을 제공한다.



(그림 12) 데이터 요청 횟수에 따른 관심 패킷 트래픽 (Figure 12) Interest packet traffic by number of data requests

그림 12는 IoT 데이터 요청 횟수에 따라 전송되는 관심 패킷의 트래픽 부하를 보여준다. 제안하는 EFcHD² 방법은 IoT 데이터의 특성에 따라 에지-포그 클라우드 계층의 적절한 위치에 복사본을 배치하여 요청 데이터의 지역 적중률 높이고, ABF를 사용하여 데이터 광고 패킷의 크기도 줄일 수 있다. 따라서 EFcHD²는 데이터 요청 횟수에 관계없이 우수한 성능을 보인다. 그러나 포그 기반 데이터 전달 방법에서는 포그 계층에서 모든 포그 서버들에게 관심 패킷을 플러딩하기 때문에 관심 패킷 트래픽 부하가 높다.

5. 결 론

IoT 환경에서 인터넷에 연결된 많은 장치들과 IoT 장치들 간의 효율적 데이터 전달을 포함한 IoT 데이터 관리 프레임워크는 IoT 응용들을 개발하는데 중요한 문제가 되고 있다. 따라서 우리는 IoT 데이터 특성에 따라 IoT 장치 근처의 포그 서버에 데이터 복사본을 배치하여 데이터 전달 시간과 신뢰성을 향상시키고, 정보 중심 네트워크와 블룸필터를 사용하여 효율적으로 데이터를 전달하는 에지-포

그 클라우드의 계층구조 기반 EFcHD² 방법을 제안하고, 그것의 성능을 분석적 모델로 평가하였다.

향후 연구 과제로는 모의실험을 통한 제안하는 EFcHD² 방법의 동적인 성능을 평가하는 것, 정보 중심 네트워크에서 데이터 패킷들이 지나가는 경로 상에 있는 라우터들에 그 데이터 패킷을 캐시하는 인-네트워크 캐싱을 EFcHD²에 통합하는 하이브리드 데이터 전달 방법을 연구하는 것, 그리고 상황인식 기술을 적용한 정보 중심 네트워크 기반 지능형 데이터 전달 방법을 연구하는 것 등이 있다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] Internet Society, The Internet of Things: An Overview, <https://www.internetsociety.org/iot>, 2015.
- [2] M. R. Bosunia, K. Hasan, N. A. Nasir, S. Kwon, and S-H. Jeong, "Efficient Data Delivery based on Content-Centric Networking for IoT Applications," *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 12(8), 2016, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1109/ijcn.2016.68>
- [3] N. Mohan and J. Kangashaju, "Edge-Fog Cloud: A Distributed Cloud for Internet of Things Computation," *International Conference Cloudification of the Internet of Things*, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ciot.2016.7872914>
- [4] B. Tang, Z. Chen, G. Hefferman, T. Wei, H. He, and Q. Yang, "A Hierarchical Distributed Fog Computing Architecture for Big Data Analysis in Smart Cities," *Proceedings of the ASE BigData & SocialInformatics*, 2015, pp. 1-6.
- [5] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog Computing and Its Role in the Internet of Things," *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*, 2012, pp. 13-16. <https://doi.org/10.1145/2342509.2342513>
- [6] H. R. Arkin, A. Diyanat, and A. Pourkhalili, "MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications," *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 82, 2017, pp. 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.012>

- [7] I. Stojmenovic, "Fog computing: A cloud to the ground support for smart things and machine-to-machine networks," Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, 2014, pp. 117-122.
<https://doi.org/10.1109/atnac.2014.7020884>
- [8] I. J. Kim, H. Y. Jung and W. G. Park, "Content Centric Networking Technology," Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 25, No. 6, 2010, pp. 136-143.
- [9] M. Amadeo, C. Campolo, J. Quevedo, D. Corujo, A. Molinaro, A. Lera, R. L. Aguiar and A. V. Vasilakos, "Information-Centric Networking for the Internet of Things: Challenges and Opportunities," IEEE Network, Vol. 30, Iss. 2, 2016, pp. 92-100.
<https://doi.org/10.1109/mnet.2016.7437030>
- [10] G. Sebestyen, A. Hangan, "Bloom Filters for Information Retrieval in the Context of IoT," International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2016, pp. 1-6.
<https://doi.org/10.1109/aqtr.2016.7501349>
- [11] M. Abu-Elkheir, M. Hayajneh and N. A. Ali, "Data Management for the Internet of Things: Design Primitives and Solution," Sensors, Vol. 13, Iss. 11, 2013, pp. 15582-15612.
<https://doi.org/10.3390/s131115582>
- [12] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs and R. L. Braynard, "Networking Named Content," Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies, 2009, pp. 1-12.
<https://doi.org/10.1145/1658939.1658941>
- [13] L. Cheng, J. Niu and M. D. Francesco, "Seamless Streaming Data Delivery in Cluster-Based Wireless Sensor Networks with Mobile Elements," IEEE System Journal, Vol. 10, Iss. 2, 2016, pp. 805-816.
<https://doi.org/10.1109/wowmom.2011.5986379>
- [14] B. Ahlgren, C. Dannewitz, C. Imbrenda, D. Kutscher and B. Ohlman, "A Survey of Information-Centric Networking," IEEE Communication Magazine, Vol. 50, Iss. 7, 2012, pp. 26-36.
- [15] F. Liu, G. Heijenk, "Context Discovery Attenuated Bloom Filters in Ad-hoc Networks," Journal of Internet Engineering, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 49-58.
https://doi.org/10.1007/11750390_2
- [16] J. Zhou, J. Fan, J. Jia, B. Cheng and Z. Liu, "Location-Aware Data Placement for Geo-distributed Online Social Networks," International Conference on Advanced Cloud and Big Data, 2016, pp. 234-239.
<https://doi.org/10.1109/cbd.2016.048>

● 저 자 소개 ●



배 인 한(Inh-han Bae)

1990년 중앙대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)

1996년~1997년 Department of Computer Science and Eng., The Ohio State University(Postdoc)

2002년~2003년 Department of Computer Science, Old Dominion University(Visiting professor)

2009년~2010년 Department of Computer Science, Old Dominion University(Visiting professor)

1989년~현재 대구가톨릭대학교 IT공학부 교수

관심분야 : 차량망, IoT, 차량클라우드, 지능스마트플랫폼&앱 등

E-mail : ihbae@cu.ac.kr