

충돌 비 감지 리더 기반의 RFID 시스템에서 신뢰성 있는 고속 태그 개수 추정 알고리즘

종신회원 정한유*, 윤원주**, 정상화**°

Fast and Reliable Tag Estimation Algorithm in RFID Systems with Collision-Oblivious Reader

Han-You Jeong*, Won-Ju Yoon**, Sang-Hwa Chung**° *Lifelong Members*

요 약

다수의 RFID 시스템들이 시스템 내의 RFID 태그 정보를 식별하기 위하여 동적 슬롯 알로하 프로토콜을 사용한다. 이러한 RFID 시스템에서 가장 중요한 문제점들 중의 하나는 일정 수준 이상의 정확도를 가지고 RFID 태그 개수를 추정하는 문제이다. 본 논문에서는 태그의 응답을 성공적으로 수신하였는지의 여부만을 판단할 수 있는 충돌 비 감지 리더를 기반으로 태그의 개수를 추정하는 새로운 알고리즘을 제시한다. 구체적으로, 본 논문에서 RFID 태그 개수를 추정하기 위해 무기억 성공 추정법과 교집합 기반 성공 추정법을 제시한다. 무기억 성공 추정법은 리더가 태그 정보를 수집하는 매 프레임마다 성공적으로 수집한 태그 응답의 개수를 기반으로 전체 태그 개수의 범위를 추정하는 반면, 교집합 기반 성공 추정법은 현 프레임에서 수집한 정보를 기반으로 추정된 전체 태그 개수 범위와 이전 프레임들에서 수집한 전체 태그 개수 범위의 적절한 교집합을 취함으로써 전체 태그 개수를 추정한다. 시뮬레이션 결과를 통해 교집합 기반 성공 추정법이 빠르고 정확하며 제어 가능한 태그 추정 방식임을 검증하고 그 성능이 기존의 충돌/무응답 기반 추정법의 성능에 근사함을 보인다.

Key Words : RFID 시스템, 충돌 비 감지 리더, 태그 개수 추정 알고리즘, 무기억 성공 추정, 교집합 기반 성공 추정

ABSTRACT

Many RFID systems use dynamic slotted ALOHA to identify the label information of the RFID tags. One of the key problems in the RFID system is how to estimate the number of RFID tags up to the desired level of accuracy. In this paper, we present the framework of tag estimation algorithm for the collision-oblivious (CO) reader which can only decide whether the tag response is successful or not. Thus, the CO reader must rely on the success estimator to predict the RFID tag population. We propose two estimation algorithms to predict the number of RFID tags, named the memoryless success estimator (MSE) and the intersection-based success estimator (ISE). The MSE considers only the estimate obtained at the current inventory round, while the ISE finds an appropriate intersection interval of the existing estimates collected at every inventory round. Through the simulation results, we demonstrate that the ISE is a fast, accurate, and controllable estimator whose performance is close to that of the collision/idle estimators.

※ 이 논문은 2009년 교육과학기술부(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)와 2008년도 부산대학교 신입교수연구 정착금 지원으로 이루어졌음

* 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 (hyjeong@pusan.ac.kr),

** 부산대학교 정보컴퓨터공학부 (anospirit@pusan.ac.kr, shchung@pusan.ac.kr)(° : 교신저자)

논문번호 : KICS 2009-11-541, 접수일자 : 2009년 11월 2일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 28일

I. 서 론

RFID (Radio Frequency Identifier) 시스템은 재고 조사, 건강 관리, 항만 물류 등의 자산 추적 목적으로 각광받고 있는 기술이다. RFID 시스템에서는 표식(label) 정보를 포함하고 있는 소형의 태그(tag)를 추적하고자 하는 물체에 직접 부착한다. 이러한 태그의 표식 정보들은 통신 범위 내에 존재하는 RFID 리더(reader)를 통해 수집된다. RFID 시스템에서 공통적으로 발생하는 문제는 태그의 표식 정보를 수집하는 시간을 최소화하는 방법을 찾는 것이다^{[3][4]}.

표식 정보 수집 알고리즘과 관련하여 기존에 많은 연구들이 진행되었다^{[2][4]}. 대부분의 RFID 태그들이 연산 처리 능력과 메모리 용량 측면에서 제약을 가지고 있으므로, 이들 알고리즘들은 동적으로 변하는 프레임(frame)의 크기를 가지는 간단한 알로하(ALOHA) 프로토콜을 채택하였다^[2]. 이들은 모든 태그들의 표식 정보를 수집할 때까지 프레임 전송을 반복적으로 수행한다. 이러한 절차를 수행하는데 필요한 시간을 최소화하기 위하여 매 프레임을 전송할 때마다 슬롯 기반 알로하 프로토콜의 최적 프레임 크기를 결정하여야 하는데, [5]에서 최적 프레임의 크기는 시스템 내의 태그의 총 개수와 같음을 보였다. 따라서, 최적 프레임 크기 결정 문제는 시스템에 존재하는 RFID 태그들의 총 개수를 어떻게 추정할 것인가의 문제로 귀결된다. 일반적으로, 태그 개수 추정값은 매 프레임 전송을 통해 수집한 정보를 기반으로 계산된다.

그런데, 기존 연구에서는 RFID 리더가 매 슬롯마다 태그의 무응답(idle), 단일 응답(success), 및 충돌 응답(collision)을 정확하게 구별할 수 있다고 가정하였다. 본 논문에서 이와 같은 리더를 충돌 감지(Collision Sensitive) 리더로 정의한다. 충돌 감지 리더는 동적 슬롯 알로하 프로토콜의 태그 개수를 추정하기 위하여 무응답 혹은 충돌 응답 기반의 추정 방식을 사용한다^[4]. 이를 위해서는 RFID 리더의 수신기(Transceiver)가 수신한 신호의 특성을 기반으로 적응적으로 슬롯의 상태를 결정할 수 있어야 한다. 특히, 시간에 따라 급격하게 변하는 무선 채널 환경에서 오류 없이 안정적으로 동작하는 무선 송수신기를 설계하는 것은 쉽지 않은 일이다.

이러한 문제점들로 인해 본 논문에서는 매 슬롯마다 성공적으로 표식 정보를 수신하였는지의 여부만을 판단할 수 있는 충돌 비 감지(Collision

Oblivious) 리더를 고려하게 되었다. 이러한 기능은 모든 송수신기가 기본적으로 제공하는 기능이다. 하지만, 성공적으로 수신하지 못한 슬롯의 원인(무응답 또는 충돌)을 파악할 수 없기 때문에, 충돌 비 감지 리더는 전체 태그 개수를 추정하기 위하여 성공 슬롯 기반 추정법을 사용할 수밖에 없다. 그런데, 주어진 프레임의 성공 슬롯 확률에 대하여 일반적으로 두 개의 태그 개수 값이 대응된다. 이는 슬롯 알로하 프로토콜에서 성공 슬롯의 확률이 RFID 태그 개수에 관한 일대일(monotonic) 함수가 아니기 때문이다^{[2][5]}.

본 논문에서는 충돌 비 감지 리더 기반의 RFID 시스템에 있는 태그의 개수를 추정하기 위한 새로운 알고리즘을 제시한다. 표식 정보들을 수집하는 과정에서 충돌 비 감지 리더가 전체 태그 개수에 관한 두 개의 추정치를 가지게 되면, 다음 프레임 전송에서 이들 두 추정치의 성공 슬롯 확률의 차이가 최대가 되도록 프레임의 크기를 결정한다. 다음 프레임 전송에서 성공 슬롯 확률에 관한 추정치를 기반으로 두 추정치 중 하나를 실제 태그 개수로 결정한다. 본 논문에서는 RFID 태그 개수를 추정하기 위해 무기억 성공 추정법(Memoryless Success Estimator, MSE) 과 교집합 기반 성공 추정법(Intersection-based Success Estimator, ISE) 을 제시한다. 무기억 성공 추정법은 각각의 프레임마다 RFID 리더가 수집하는 성공 슬롯 개수를 기반으로 태그 개수의 범위를 추정한다. 반면, 교집합 기반 성공 추정법은 현 프레임 및 이전 프레임들에서 수집한 태그 개수 추정 범위들 간의 적절한 교집합을 취함으로써 태그 개수를 추정한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통해 교집합 기반 성공 추정법이 빠르고 정확하며 제어 가능한 태그 추정 방식임을 보인다. 또한, 별도의 송수신기 기능 없이 동작하는 충돌 비 감지 리더에서의 교집합 기반 성공 추정법의 성능이 충돌 감지 리더에서의 충돌/무응답 기반 추정법의 성능에 근사함을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 우선, RFID 시스템 모형을 2 장에서 소개하고, 3장에서는 본 논문에서 이용하는 수학적 배경을 요약한다. 충돌 감지 리더의 표식 정보 수집 절차를 4장에서 설명하고, 5장에서는 충돌 비 감지 리더에서의 표식 정보 수집 절차를 제시한다. 시뮬레이션 결과에 관해 6장에서 토의하고, 7장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. RFID 시스템 모형

본 논문에서는 한 개의 리더와 t 개의 태그로 구성된 RFID 시스템을 고려한다. 리더는 프레임 내 슬롯의 개수 f 를 포함하는 메시지를 모든 태그들에게 방송한다. 각각의 태그는 프레임 크기 내의 임의의 슬롯을 선택하여 태그 응답을 전송한다. 만약, 특정 슬롯에서 한 개의 태그만 응답을 하게 되면, 리더는 태그의 정보를 성공적으로 수집할 수 있다 (성공 슬롯). 만약, 둘 이상의 태그들이 동일한 슬롯을 통해 응답하게 되면 이들이 무선 채널에서 서로 충돌하게 된다 (충돌 슬롯). 또한, 특정 슬롯에 어떤 태그도 응답을 하지 않으면 그 슬롯은 태그 정보 전달을 위해 사용하지 않게 된다 (무응답 슬롯). 본 논문에서는 특정 프레임에서 태그가 표시 정보를 리더에게 성공적으로 전달하면 RFID 표준 [7]에서 명시한 바와 같이 그 이후의 프레임 전송에 참여하는 대신 슬립 (sleep) 모드로 천이함을 가정한다.

충돌 감지 리더는 위에서 언급한 세 가지 슬롯 상태를 구별할 수 있는 반면, 충돌 비 감지 리더는 단순히 태그의 응답을 성공적으로 수신하였는지에 관한 여부만을 판단할 수 있다. 매 프레임 전송 이후에 각 슬롯의 상태 정보는 다음 프레임의 크기를 결정하는데 이용된다. 본 논문에서 프레임 내의 무응답 슬롯의 개수를 \hat{n}_0 , 성공 슬롯의 개수를 \hat{n}_1 , 그리고 충돌 슬롯의 개수를 \hat{n}_c 로 나타낸다. 전체 프레임의 슬롯 개수는 이들 슬롯 개수의 합과 같으므로 $\hat{n}_0 + \hat{n}_1 + \hat{n}_c = f$ 를 만족한다. 또한, 무응답 슬롯 확률을 $\hat{p}_0 = \hat{n}_0/f$, 성공 슬롯 확률을 $\hat{p}_1 = \hat{n}_1/f$, 충돌 슬롯 확률을 $\hat{p}_c = \hat{n}_c/f$ 로 각각 정의한다.

매 프레임마다 수집된 슬롯 상태 확률을 기반으로 RFID 리더는 시스템 내의 전체 태그 개수를 추정한다. 만약에 리더가 실제 태그 개수보다 작게 추정하는 경우에는 많은 슬롯들이 충돌로 인해 비효율적으로 사용하게 된다. 반면, 리더가 실제 태그 개수보다 크게 추정하는 경우에는 많은 무응답 슬롯으로 인해 시스템의 자원을 효율적으로 사용하지 못하게 된다. 따라서, RFID 태그 개수를 정확하게 추정할 수 있는 효율적인 알고리즘을 필요로 하게 되는데, 이 추정값은 다음 프레임의 크기로 설정된다. 송수신기의 특성에 따라 RFID 리더는 별도의 태그 개수 추정 알고리즘을 구현하는데, 본 논문에서는 이에 관해 자세히 설명하기로 한다.

III. 수학적 배경

본 장에서는 RFID 태그의 개수를 추정하는데 있어 필요한 수학적 배경에 관해 설명한다.

3.1 태그 개수의 추정

확률 변수 X 를 특정 슬롯에서 응답하는 태그의 개수로 정의하면, [3]에서 k 개의 태그가 동시에 응답할 확률 p_k 는 다음과 같이 주어진다.

$$p_k = \Pr(X = k) = \binom{t}{k} \left(\frac{1}{f}\right)^k \left(1 - \frac{1}{f}\right)^{t-k} \quad (1)$$

여기에서 각 슬롯의 태그 응답의 개수는 서로 독립이고 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 프레임 전송이 끝나면, (1)에서의 확률 p_k 는 평균 μ_{p_k} 와 표준편차 σ_{p_k} 를 가지는 정규분포를 따른다.

$$N(\mu_{p_k}, \sigma_{p_k}^2) = N\left(p_k, \frac{p_k(1-p_k)}{f}\right) \quad (2)$$

프레임 전송 결과로부터 측정된 슬롯의 상태 확률을 기반으로, 리더는 실제 확률 p_k 를 추정해야 한다. (2)에서 상수 β 와 최대 오차 확률 α 가 주어진 경우, 이를 만족하기 위한 확률 p_k 의 신뢰구간을 아래의 수식으로부터 얻을 수 있다.

$$\Pr\left(|p_k - \hat{p}_k| \leq \beta \sigma_{p_k}\right) \geq 1 - \alpha \quad (3)$$

여기에서 확률 p_k 를 추정하는 문제는 슬롯의 상태 확률 측정치 \hat{p}_k 이 주어졌을 때, (1)의 태그 개수 t 를 추정하는 문제로 귀결된다. 3.2 절에서 RFID 태그 개수를 추정하기 위한 간단한 모형을 제시한다.

3.2 무한 근사 모형

태그의 개수 t 와 프레임의 크기 f 가 $\rho = t/f$ 를 만족하면서 무한대로 발산하는 상황을 가정하자. 본 논문에서 $\rho (< \infty)$ 를 입력 부하로 정의한다. 위의 상황에서 (1)의 확률 p_k 는 포아송 (Poisson) 분포에 근사한다^[4].

$$p_k = \lim_{t, f \rightarrow \infty, \rho = t/f} \Pr(X = k) = \frac{\rho^k}{k!} e^{-\rho} \quad (4)$$

(4)를 이용하여 무응답/성공/충돌 슬롯 확률을 각각 $p_0 = e^{-\rho}$, $p_1 = \rho e^{-\rho}$, $p_c = 1 - p_0 - p_1 = 1 - e^{-\rho} - \rho e^{-\rho}$ 로 나타낼 수 있다. 수식 (4)에서의 무한 근사 모형은 프레임 크기가 상대적으로 작을 때에도 ($f \geq 10$) 수식 (1)에 가깝게 근사함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 수식 (4)를 이용하여 매 프레임 전송 시 측정하는 슬롯 확률 \hat{p}_k 을 기반으로 태그 개수 t 를 추정하기로 한다.

3.3 이론적 하한

3.2절에서 언급한 무한 근사 모형을 기반으로 모든 태그 정보를 수집하기 위해 필요한 전체 슬롯의 개수에 관한 이론적 하한 (lower bound)을 유도한다. 본 논문에서 슬롯 개수의 하한값을 계산하기 위해, 매 프레임 전송 시 항상 최적의 프레임 크기를 계산할 수 있다고 가정한다. (4)에서 첫 프레임 전송을 통해 평균적으로 수집하는 태그의 개수는 $(1/e)t$ 로 주어진다. 남아 있는 $(1-1/e)t$ 태그들 중에서 두 번째 프레임을 통해 수집되는 태그 개수의 평균은 $(1-1/e)(1/e)t$ 이다. 이러한 절차를 반복하면, 모든 태그를 수집하기 위하여 필요한 슬롯 개수 S^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$S^* = t \left\{ \frac{1}{e} + 2 \left(1 - \frac{1}{e} \right) \frac{1}{e} + 3 \left(1 - \frac{1}{e} \right)^2 \frac{1}{e} + \dots \right\} \quad (5)$$

위의 무한급수를 계산하면, 전체 슬롯 개수의 하한값 $S^* = et$ 를 얻을 수 있다.

IV. 충돌 감지 리더의 태그 정보 수집

충돌 감지 리더는 무응답/성공/충돌 슬롯을 정확하게 구별할 수 있다. 그런데, 무응답 (충돌) 슬롯 확률은 RFID 시스템 내의 태그 개수가 증가함에 따라 감소 (증가) 하므로, 충돌 감지 리더는 무응답 또는 충돌 슬롯 기반으로 태그의 개수를 추정한다. [4]에서 충돌 기반 추정 방식이 무응답 기반 추정 방식보다 더 넓은 동작 범위를 가짐을 보였으므로, 본 논문에서 충돌 감지 리더는 충돌 기반 추정 방식을 사용한다고 가정한다.

$$1 - e^{-\rho} - \rho e^{-\rho} = \frac{\hat{n}_c}{f} \quad (6)$$

수식 (6)에서 입력 부하 ρ 를 계산하는 폐쇄형

(closed-form) 해가 존재하지 않으므로 수치해석 방법인 이분법(bisection method)을 사용한다^[8].

그런데, 프레임 크기 f 의 값이 작은 경우, 태그의 개수 t 가 프레임 크기 f 보다 매우 크게 되면 태그 개수의 추정치가 부정확해지는 문제가 발생한다. 예를 들어, 수식 (6)에서 측정된 충돌 슬롯 확률이 1일 경우 입력 부하 ρ 가 무한대로 발산한다. 이러한 예외적인 상황을 방지하기 위하여 충돌 슬롯 확률의 상한을 $\hat{p}_c = 1 - 1/f$ 로 설정하고 수식 (6)을 활용하여 태그 개수를 추정하고, 계산된 추정치를 다음 프레임의 크기로 설정한다.

프레임 내에 충돌 슬롯이 없으면 이미 모든 태그 정보를 수집하였음을 의미하므로, 충돌 감지 리더는 태그 정보 수집 절차를 완료한다.

V. 충돌 비 감지 리더의 태그 정보 수집

충돌 비 감지 리더는 송수신기의 특성으로 인해 무응답 슬롯과 충돌 슬롯을 구별하지 못한다. 따라서, 충돌 비 감지 리더는 성공 기반 추정법을 사용하여 태그 개수를 추정해야 한다.

$$\rho e^{-\rho} = \frac{\hat{n}_1}{f} \quad (7)$$

이와 같은 충돌 비 감지 리더의 제약은 다음의 두 가지 새로운 문제를 야기한다. 1) 태그 정보 수집 절차 도중에 수식 (7)의 두 개의 가능한 해들 중 하나를 선택해야 한다. 2) 태그 정보 수집 절차의 종료 조건에 관해 확률적으로 결정을 내려야 한다. 본 장에서는 위의 두 가지 문제들을 해결하기 위한 방법을 설명한다.

그림 1은 파라미터 \hat{p}_1 와 α 값에 따라 발생 가능한 단일 신뢰구간 (Single Confidence Interval, S-CI)과 이중 신뢰구간 (Dual Confidence Interval, D-CI)을 도시하였다. 단일 신뢰구간의 경우, 전체 태그의 개수가 현재 프레임의 크기 f 와 유사할 경우를 나타내는데, 이 신뢰 구간이 입력 부하에 대한 적절한 추정값으로 간주할 수 있다. 5.3 절에서 다수의 추정값들을 기반으로 태그 개수를 추정하는 알고리즘에 관해 상세히 설명하기로 한다.

이중 신뢰구간의 경우, 실제 태그의 개수가 프레임의 크기 f 에 비해 크거나 작은 경우를 나타낸다. 수식 (7)을 만족하는 두 개의 입력 부하에 관한 해를 각각 ρ_L 과 ρ_H 라고 정의하면, 그림 1에서 보인

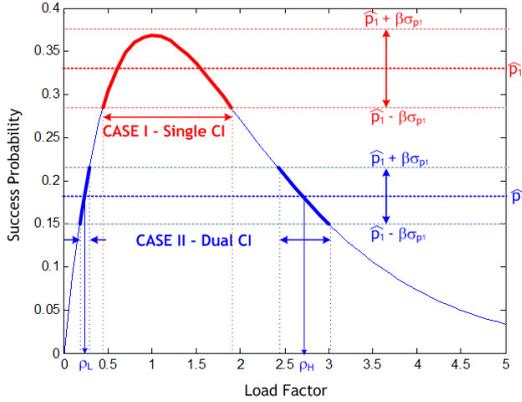


그림 1. 단일 신뢰구간 및 이중 신뢰구간의 예

바와 같이 ρ_L 은 구간 $[0, 1)$ 에 존재하고, ρ_H 는 구간 $(1, \rho_{MAX} = t_{MAX}/f)$ 에 존재한다. 수식 (7)의 두 해를 구하기 위하여 IV 장에서 언급한 이분법을 사용한다. 두 입력 부하 중 실제 태그 개수를 포함하는 해를 찾기 위하여 다음 프레임의 크기 f' 을 신중하게 결정할 필요가 있는데 이는 5.1절에서 설명한다.

5.1 프레임 크기를 결정하기 위한 지침들

본 절에서는 다음 프레임의 크기 f' 을 결정하기 위한 지침들을 제시한다. 앞에서 설명한 것처럼 충돌 비 감지 리더는 성공 슬롯 확률 (\hat{p}_1) 만을 측정할 수 있다. 따라서, 두 입력 부하 (ρ_L 과 ρ_H) 들의 성공 슬롯 확률의 차이가 최대가 되도록 다음 프레임의 크기 f' 을 신중하게 결정해야 한다.

다음 프레임에서 입력 부하들을 각각 ρ'_L 과 ρ'_H 으로 나타낸다. 현 프레임에서 성공적으로 수집하여 슬롯 상태로 천이하는 태그 개수 $\hat{n}_1 = \hat{p}_1 f$ 를 차감하면, ρ'_L 과 ρ'_H 는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho'_L = \frac{(\rho_L - \hat{p}_1)f}{f'}, \quad \rho'_H = \frac{(\rho_H - \hat{p}_1)f}{f'}. \quad (8)$$

그림 2는 다음 프레임 크기 f' 에 따른 두 성공 슬롯 확률의 차이를 도시하였다. 그림에서 점선 ($p'_{1,L}$)은 ρ'_L 의 성공 슬롯 확률, 점폐선($p'_{1,H}$)은 ρ'_H 의 성공 슬롯 확률, 그리고 실선 ($p'_{1,\Delta} = |p'_{1,L} - p'_{1,H}|$)은 이 두 성공 슬롯 확률의 차이를 나타낸다. $p'_{1,\Delta}$ 값은 $f' \approx (\rho_L - \hat{p}_1)f$ 와 $f' \approx (\rho_H - \hat{p}_1)f$ 에서 극대가 된다. 그런데, \hat{p}_1 값이 증가하면, 두 극점들 중에서 $f' \approx (\rho_L - \hat{p}_1)f$ 일 때 두 성공 확률의 차가 최대가 된다. 따라서, 본 논문에서는 이중 신뢰구간의 경우 다음 프레임의 크기를 $f' = (\rho_L - \hat{p}_1)f$ 로 설정한다.

5.2 MAP(Maximum a Posteriori) 추정법

충돌 비 감지 리더가 다음 프레임 크기 f' 을 결정하면 모든 태그들에게 이를 방송하여 다음 프레임 전송을 수행하고, 프레임 내 슬롯들의 상태를 기반으로 성공 슬롯 확률 \hat{p}'_1 을 계산한다. 이중 신뢰구간인 경우, \hat{p}'_1 을 기반으로 두 입력 부하 ρ'_L 과 ρ'_H 중 하나의 입력 부하를 선택해야 하는데 이를 위해 본 절에서 MAP 추정법을 사용한다.

MAP 추정법은 최소의 오류 확률을 가지고 성공 슬롯 확률 \hat{p}'_1 을 도출하는 입력 부하를 선택한다 [9]. 그림 3에서는 사후 확률 분포 (a posteriori probability distribution), $p'_{1,L} = \Pr(\hat{p}'_1 | \rho'_L)$ 과 $p'_{1,H} = \Pr(\hat{p}'_1 | \rho'_H)$ 를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 각각의 사후 확률 분포는 수식 (2)의 정규 분포를 따른다. 만약 프레임의 성공 슬롯 확률 \hat{p}'_1 이 임계값 θ 보다

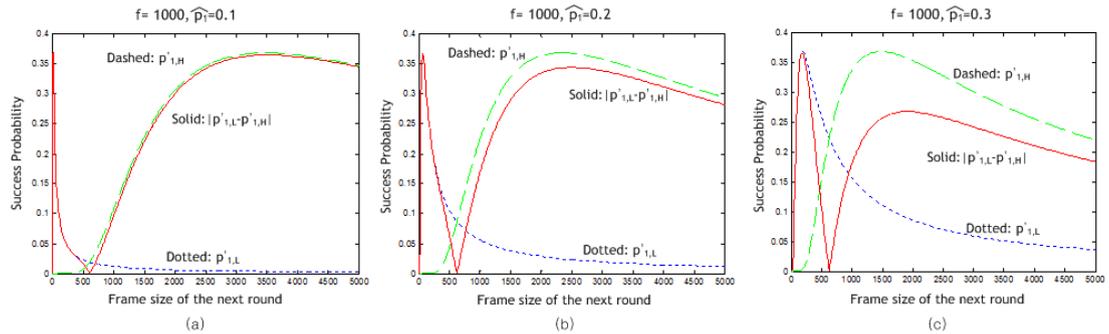


그림 2. 프레임 크기(f')에 따른 $p'_{1,L}$ 과 $p'_{1,H}$ 의 차이($f=1000$): (a) $\hat{p}_1=0.1$, (b) $\hat{p}_1=0.2$, (c) $\hat{p}_1=0.3$.

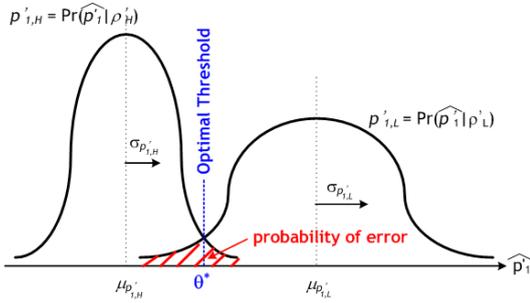


그림 3. 사후 확률 분포 $p_{1,L}'$ 과 $p_{1,H}'$

커지면 (작아지면), MAP 추정법은 입력 부하 ρ_L' (ρ_H')를 포함하는 신뢰 구간을 선택한다. 오류 확률을 나타내는 사선 영역이 최소화되는 최적의 임계값 θ^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta^* = \frac{\mu_{p_{1,L}}' \sigma_{p_{1,H}}' + \mu_{p_{1,H}}' \sigma_{p_{1,L}}'}{\sigma_{p_{1,L}}' + \sigma_{p_{1,H}}'} \quad (9)$$

여기에서 $\mu(\cdot)$ 와 $\sigma(\cdot)$ 은 수식 (2)로부터 얻을 수 있다.

5.3 태그 개수 추정 알고리즘

매 프레임 전송마다 충돌 비 감지 리더는 1) 추정된 신뢰 구간이 단일 신뢰구간이거나 혹은 2) 이전 프레임에서 이중 신뢰구간을 생성하였으나, 현재 프레임의 성공 슬롯 확률 \hat{p}_1' 을 기반으로 MAP 추정법을 통해 하나의 신뢰 구간을 선택한 경우, 수식 (3)에서 나타낸 유효한 신뢰구간을 생성한다. m 개의 유효한 신뢰구간이 주어졌을 때, 충돌 비 감지 리더는 태그 개수를 정확히 추정할 수 있어야 한다. 본 절에서는 이를 위해 무기억 성공 추정법과 교집합 기반 성공 추정법을 제시한다.

무기억 성공 추정법은 현 프레임 전송에서 도출한 신뢰구간만을 고려하여 태그 개수를 추정하는 방법이다. (3)에서 β 값이 주어진 경우, 무기억 성공 추정법은 확률 $1-\alpha$ 로 실제 태그의 개수를 포함하는 신뢰구간을 계산할 수 있다. 그러나, 확률 α 로 계산된 추정 범위가 실제 태그 개수를 포함하지 못하는 단점이 발생한다.

반면, 교집합 기반 성공 추정법은 현재 프레임에서 도출한 신뢰구간 뿐만 아니라 이전 프레임들에서 계산한 모든 신뢰구간들을 고려하여 태그 개수를 추정한다. 그러나, 신뢰구간들이 확률 α 로 실제

태그 개수를 포함하지 않고 있기 때문에, 단순히 모든 신뢰구간들의 교집합을 취할 경우, 그 해가 존재하지 않을 수가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 교집합 기반 성공 추정법의 문제를 m 개의 신뢰구간 중에서 적어도 $m-\delta$ 개 이상의 신뢰구간에 속한 모든 값을 포함하는 최소의 단일 구간을 찾는 문제로 정의한다.

그런데 이 문제는 NTP(Network Time Protocol) 등과 같은 네트워크 동기화 프로토콜 분야에서 활발히 연구되었다^{[10], [11]}. NTP에서 특정 노드가 다른 노드들로부터 클럭 (clock) 정보를 수신할 경우, 정확한 클럭과 오류가 있는 클럭을 구별할 수 있어야 한다^[11]. Marzullo 알고리즘은 주어진 m 개의 신뢰구간 중에서 적어도 $m-\delta$ 개 이상의 신뢰구간에 속한 모든 구간을 포함하는 최소의 단일 구간 $I_\delta^k = [t_{\min}^k, t_{\max}^k]$ 을 계산하기 위해 Marzullo 알고리즘을 적용한다.

Marzullo 알고리즘에서 신뢰구간 $I^k = [t_{\min}^k, t_{\max}^k]$ 는 <끝점, 종류>의 형식을 갖는 두 항목 $\langle t_{\min}^k, -1 \rangle$ 과 $\langle t_{\max}^k, +1 \rangle$ 을 가진다. 이러한 항목들은 끝점 속성의 크기에 따라 오름차순으로 정렬한다. 아래의 Marzullo 알고리즘에서 counter는 중복된 신뢰구간의 개수를 나타낸다.

1. counter 값을 0으로 설정한다.
2. 정렬된 항목들을 처음부터 끝까지 진행하면서 각 항목의 종류 속성을 counter로부터 차감한다. 만약 $\text{counter} \geq m-\delta$ 이면, t_{\min}^k 값을 현 항목의 끝점 속성 값으로 대입하고 3.으로 진행한다. 그렇지 않을 경우 다음 항목으로 진행한다.
3. counter 값을 0으로 설정한다.
4. 정렬된 항목들의 끝에서 처음으로 진행하면서 각 항목의 종류 속성을 counter에 가산한다. 만약, $\text{counter} \geq m-\delta$ 이면, t_{\max}^k 값을 현 항목의 끝점 속성 값으로 대입하고 5.로 진행한다. 그렇지 않을 경우, 다음 항목으로 진행한다.
5. 만약 $t_{\min}^k \leq t_{\max}^k$ 이면, $I_\delta^k = [t_{\min}^k, t_{\max}^k]$ 로 응답하고, 그렇지 않은 경우 에러를 응답한다.

그림 4에서는 $m=3, \delta=1$ 일 때, Marzullo 알고리즘의 두 예를 도시하였다. 그림 4 (a)에서 구간 I_δ^* 에 속한 모든 점들은 적어도 두 개의 신뢰구간에 속한다. 반면 그림 4 (b)의 경우 구간 I_δ^* 내부에

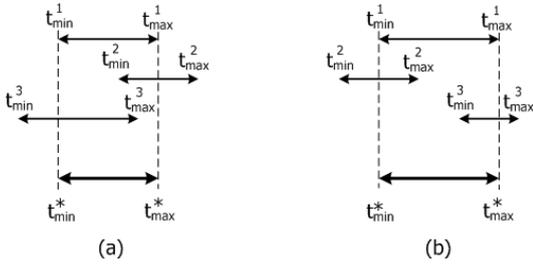


그림 7. Marzullo 알고리즘의 예($m=3, \delta=1$)

서 구간 (t_{\max}^2, t_{\min}^3) 에 속한 점들은 I^1 에만 포함된다. 비록 이 구간은 $m-\delta(=2)$ 개의 신뢰구간에 포함되지는 않지만, 구간 I_δ^* 는 두 개 이상의 신뢰구간에 포함된 모든 점을 포함하는 최소의 단일 구간이다.

주어진 파라미터 δ 에 대하여, 실제 태그 개수 t 가 단일 구간 I_δ^* 에 속할 확률의 하한값 $\gamma(\delta)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Pr(t \in I_\delta^*) \geq \gamma(\delta) = \sum_{i=m-\delta}^m \binom{m}{i} \alpha^i (1-\alpha)^{m-i} \quad (10)$$

예를 들어, $\alpha=0.01, m=20$ 일 때, $\gamma(0) \approx 0.818, \gamma(1) \approx 0.983, \gamma(2) \approx 0.999$ 를 가진다. 파라미터 δ 의 값을 조정함에 따라, 태그 개수 t 가 추정 구간 I_δ^* 에 속할 확률의 하한 $\gamma(\delta)$ 와 구간의 범위 $\Delta(I_\delta^*) = t_{\max}^* - t_{\min}^*$ 는 서로 상충 (trade-off) 관계를 가진다.

수식 (5)에서 매 프레임마다 수집되는 태그 정보의 개수는 기하 급수적으로 감소하기 때문에 신뢰구간의 개수 m 은 태그 개수 t 에 대하여 로그 함수적으로 증가한다. 따라서, 이전의 모든 신뢰구간을 저장하기 위해 많은 메모리 용량을 필요로 하지 않는다. 예를 들어, 6장의 시뮬레이션에서 20 개 이하의 신뢰구간($m \leq 20$)으로 2000 개의 RFID 태그 정보를 모두 수집할 수 있었다.

마지막으로 다음 프레임의 크기는 단일 구간 I_δ^* 의 중간점으로 설정한다.

$$f' = \frac{t_{\min}^* + t_{\max}^*}{2} \quad (11)$$

5.4 예외 처리

본 절에서는 충돌 비 감지 리더가 태그 정보 수

집 과정에서 발생하는 예외적인 상황(Exceptional Case)을 처리하는 방법에 대해 설명한다.

1) 초기 프레임 크기 : 충돌 비 감지 리더는 RFID 시스템 내의 태그 개수를 알지 못하므로 프레임의 초기값을 임의의 상수 f_{init} 으로 설정한다. 일반적으로 초기값 f_{init} 은 태그의 개수 t 에 비해 매우 작은 값으로 설정된다($f_{init} \ll t$). 따라서, 무시할 수 없는 확률로 첫 프레임의 모든 슬롯들이 충돌 슬롯이 되고 ($\hat{p}_1=0$), 이로 인해 수식 (7)에서 입력 부하의 해는 0 또는 무한대가 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 $\hat{p}_1=0$ 인 경우, 성공 슬롯 확률을 $\hat{p}_1=1/f_{init}$ 으로 대체하고, 항상 입력 부하 ρ_H 를 선택하여 다음 프레임의 크기를 증가시킨다. 이 절차는 충돌 비 감지 리더가 적어도 하나의 성공 슬롯을 인지할 때까지 반복한다.

2) 최소 프레임 크기 : 프레임의 크기 f 가 감소함에 따라 수식 (2)에서 성공 슬롯 확률의 평균 $\mu_{\hat{p}_1}$ 과 표준편차 $\sigma_{\hat{p}_1}$ 의 상대적 비율이 점점 감소하게 된다. 주어진 상수 β 에 대하여, 프레임의 크기가 임계값 f_{ths} 보다 작아지면, 신뢰구간이 입력 부하가 가질 수 있는 모든 값을 포함할 수 있다.

$$\beta \sqrt{\frac{\hat{p}_1(1-\hat{p}_1)}{f_{ths}}} \geq \hat{p}_1 \Rightarrow f_{ths} = \beta^2 \left(\frac{1}{\hat{p}_1} - 1 \right) \quad (12)$$

다시 말해, 프레임의 크기가 수식 (12)에서의 임계값보다 작아질 경우, 이를 기반으로 계산한 태그 개수의 추정치가 태그 개수에 관한 추가적인 정보를 제공하지 않는다. 따라서, (11)에서 계산된 프레임의 크기가 f_{ths} 보다 작을 경우, 최소 프레임 크기를 $f_{\min} = \lceil f_{ths} \rceil$ 로 설정한다. 예를 들어, $\beta=2.58$ 이고 $\hat{p}_1=1/e$ 인 경우, $f_{\min}=12$ 이다.

3) 종료 조건 : 충돌 감지 리더는 프레임 내 충돌 슬롯의 개수가 0이면 태그 정보 수집을 종료한다. 그러나 충돌 비 감지 리더는 충돌 슬롯과 무응답 슬롯을 구별할 수 없기 때문에 태그 정보 수집의 종료 조건을 확률적으로 결정해야 한다. 이를 위해 능동 RFID 시스템의 표준에서 언급한 바와 같이 연속된 세 프레임에서 $\hat{n}_1=0$ 이면 태그의 정보 수집 절차를 완료하는 방법을 생각할 수 있다⁷⁾. 그러나, 충돌 비 감지 리더의 경우, $\hat{n}_1=0$ 의 이벤트를

발생시키는 서로 다른 두 가지 원인이 있다.

1. 충돌 비 감지 리더가 태그 정보 수집을 이미 완료한 경우: 이 경우, 모든 슬롯들은 무응답 슬롯이다.
2. 충돌 비 감지 리더가 RFID 시스템 내 태그 개수를 매우 작게 추정할 경우: 이 경우 대부분의 슬롯들이 충돌 슬롯이고, 나머지 슬롯은 무응답 슬롯이다.

충돌 비 감지 리더는 위의 두 가지 경우를 구별하기 위해 프레임 내 성공 슬롯의 개수가 0임을 인지하는 경우, 다음 프레임의 크기를 5.3절에서 계산한 단일 구간 I_b^* 내의 최대값 $f' = t_{max}^*$ 으로 설정한다. 만약 다음 프레임에서 성공 슬롯이 발생하는 경우, 충돌 비 감지 리더는 두 번째 상황으로 판단하여 태그 정보 수집 절차를 계속하고, 그렇지 않는 경우에는 태그 수집 절차를 완료한다. 요약하면, 충돌 비 감지 리더는 연속된 두 프레임에서 $\hat{n}_1 = 0$ 이면 태그 정보 수집 절차를 종료한다.

그런데, 위와 같은 확률적 종료 조건 방식은 본질적으로 상황 판단의 오류를 내포하고 있다. 이 경우, 충돌 비 감지 리더는 모든 태그 정보를 수집하지 않았음에도 불구하고 태그 정보 수집 절차를 완료할 수 있는데, 본 논문에서 이러한 경우를 불완전 태그 정보 수집이라고 정의한다.

VI. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 RFID 시스템 내의 태그 개수를 100개에서 2000개까지 변경하면서 무기억 성공 추정법과 교집합 기반 성공 추정법의 성능을 평가한다. 기존 태그 수집 절차와의 비교를 위해 무기억 충돌 추정법 (Memoryless Collision Estimator, MCE)와 교집합 기반 충돌 추정법 (Intersection-based Collision Estimator, ICE)의 시뮬레이션 결과도 함께 나타내었다. 본 장에서의 시뮬레이션 결과는 구간 $[t-50, t+50]$ 에서 단일 분포 (uniform distribution)를 따르는 태그 개수 t 의 난수를 1000개를 생성하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과들의 평균을 도출하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 다음과 같다. $\beta = 2.58, \delta = 2, f_{init} = 16, f_{min} = 12, t_{max} = 10000$.

본 논문에서는 시뮬레이션을 수행하기 위해 다음의 두 가정을 설정한다. 1) 태그 수집 절차 도중에 RFID 시스템 내 태그 개수는 변하지 않는다. 2) 무

선 채널에서 오류로 인한 태그 정보 손실은 없다.

그림 5에서는 태그 정보를 수집하는데 필요한 전체 슬롯의 개수를 도출하였다. 또한 3.3절에서 계산한 슬롯 개수에 관한 이론적 하한값(LB)도 함께 도출하였다. 그림에서, 교집합 기반 성공 추정법(ISE)이 무기억 성공 추정법(MCE)에 비해 적은 슬롯 개수를 필요로 함을 알 수 있다. 예를 들어 $t = 2000$ 일 때, 교집합 기반 성공 추정법(ISE)은 모든 태그 정보를 수집하기 위해 무기억 성공 추정법(MCE)의 약 39% 슬롯만을 필요로 한다. 또한, 교집합 기반 성공 추정법(ISE)은 기존의 충돌 기반 추정법(MCE, ICE)에 비해 약 10% 정도의 추가 슬롯밖에 필요로 하지 않는 놀라운 결과를 확인할 수 있다. 이는 교집합 기반 성공 추정법이 적절한 연산을 통해 송수신기의 제약을 보완함을 의미한다.

그림 6에서는 불완전 태그 정보 수집 확률을 도출하였다. 충돌 기반 추정법(MCE, ICE)은 항상 모든 태그의 정보를 수집할 수 있음을 관찰할 수 있

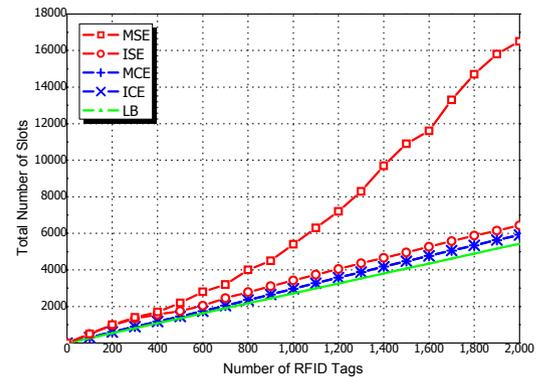


그림 5. 태그 정보 수집을 위한 전체 슬롯의 개수

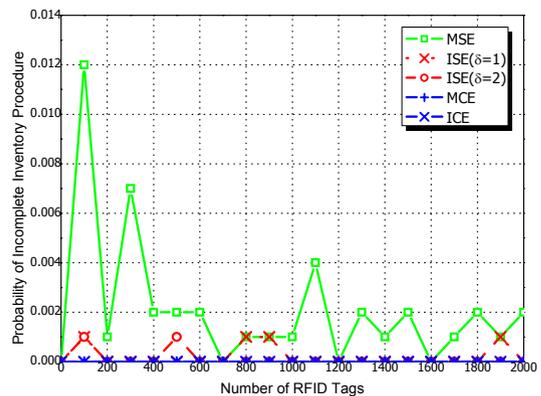


그림 6. 불완전 태그 정보 수집 확률

다. 반면에 성공 기반 추정법(MSE, ISE)의 경우 불완전 태그 정보 수집이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 불완전 태그 정보 수집은 확률 기반의 태그 수집 절차 종료 조건을 가지는 성공 기반 추정법에 서 필연적으로 발생하는 현상이다. 그럼에도 불구하고, 교집합 기반 성공 추정법은 무기억 성공 추정법에 비해 훨씬 낮은 불완전 태그 정보 수집 확률을 가진다. 또한, 교집합 기반 성공 추정법에서 파라미터 δ 값을 증가함에 따라 불완전 태그 정보 수집 확률이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

VII. 결 론

본 논문에서는 충돌 비 감지 리더 기반의 RFID 시스템에서 태그 정보 수집을 위한 효율적인 알고리즘을 제시하였다. 충돌 비 감지 리더에서 태그 개수를 추정하기 위하여 무기억 성공 추정법과 교집합 기반 성공 추정법을 제안하였다. 이전 프레임 전송에서 도출한 모든 신뢰구간을 고려함으로써, 교집합 기반 성공 추정법은 태그 정보를 수집하는데 필요한 슬롯들의 개수를 크게 줄일 수 있음을 보였다. 본 논문에서 제시하는 성공 기반 추정법은 빠르고 정확하게 태그 개수를 추정하는 완전히 새로운 방식으로, 그 성능이 무응답/충돌 기반 추정법의 성능에 근사함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] E. C. Jones and C. A. Chung, *RFID in Logistics: A Practical Introduction*, CRC Press, 2008.
- [2] F. C. Schoute, "Dynamic frame length ALOHA," *IEEE Trans. on Commun.*, COM 31, No.4, pp.565-568, April 1983.
- [3] H. Vogt, "Multiple object identification with passive RFID tags," *LNCS*, Springer-Verlag, vol.2414, 2002.
- [4] M. Kodialam and T. Nandagopal, "Fast and reliable estimation schemes in RFID systems," *ACM Mobicom*, Los Angeles, CA, Sept. 2006.
- [5] J.-R. Cha and J.-H. Kim, "Dynamic framed slotted ALOHA algorithms using fast tag estimation method for RFID system," *CCNC'06*, 2006.
- [6] EPCglobal Inc., "EPC™ radio-frequency

identity protocols class-1 generation-2 UHF RFID protocol for communications at 860 MHz - 960 MHz," version 1.2.0, May 2008, [Online] Available : <http://www.epcglobalinc.org/standards/uuhfc1g2>

- [7] ISO/IEC 18000-7, "Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 7: Parameters for active air interface communications at 433 MHz," 2008.
- [8] W. Cheney and D. Kincaid, *Numerical Mathematic and Computing*, 6th Ed., Thomson Brooks/Cole, 2008.
- [9] M. DeGroot, *Optimal Statistical Decision*, McGraw-Hill, 1970.
- [10] K. Marzullo and S. Owicki, "Maintaining the time in a distributed system," *ACM Operating Systems Review*, Vol.19, No.3, pp.44-54, July 1985.
- [11] D. L. Mills, "Improved algorithms for synchronizing computer network clocks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol.3, No.3, pp.245-254, June 1995.

정 한 유 (Han-You Jeong)

중신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공학부

2000년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사

2005년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2008년 9월~현재 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 조교수

<관심분야> 무선 메쉬/센서 네트워크, 광통신망

윤 원 주 (Won-Ju Yoon)



중신회원
2002년 2월 부산대학교 컴퓨터 공학과 학사
2004년 2월 부산대학교 컴퓨터 공학과 석사
2004년 3월~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 박사과정
<관심분야> 능동형 RFID 시스템, 무선랜 메쉬 네트워크, 컨테이너 보안 장치

정 상 화 (Sang-Hwa Chung)



중신회원
1985년 2월 서울대학교 전기공학과 학사
1988년 5월 Iowa State Univ. 컴퓨터공학과 석사
1993년 8월 Univ. of Southern California 컴퓨터공학과 박사
1993년~1994년 Univ. of Central Florida 컴퓨터공학과 조교수
1994년~현재 부산대학교 컴퓨터공학과 교수, 컴퓨터및정보통신연구소 연구원
2002년~2003년 Oregon State Univ. 컴퓨터공학과 초빙교수
<관심분야> 무선랜 메쉬 네트워크, RFID, 임베디드 시스템