

산업 환경에서의 실시간 주기 무선 I/O 노드들을 위한 동적 GTS 할당 기법에 대한 연구

이정일, 정지원, 김동성
 금오공과대학교 전자공학부 네트워크 기반 시스템 연구실

Dynamic GTS Allocation Method for real-time periodic I/O Data in Industrial Environment

Jungi-il Lee, Ji-won Jung, Dong-sung Kim
 Networked System Lab. School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Abstract - 본 논문에서는 산업용 무선 제어네트워크의 네트워크 이용률과 가용 무선 I/O 노드 수를 동시에 증대시킬 수 있는 동적 GTS 할당 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해, 제안된 동적 GTS 할당 기법이 가용 노드 수와 네트워크 이용률의 향상시킴을 살펴 볼 수 있다.

1. 서 론

IEEE 802.15.4은 무선 센서와 제어장치를 위한 특수한 요구사항을 만족하면서 저비용, 저 전력을 목적으로 설계된 저속 근거리 무선 통신 기술이다 [1]. 저렴한 노드 설치비용과 낮은 전력 소모, 많은 수의 노드 구성을 지원 등의 장점이 있다. 하지만, IEEE 802.15.4를 산업 환경에 적용하기 위해서는 두 가지 한계점들을 극복해야 한다. 두 가진 한계점은 GTS내에서의 낮은 네트워크 이용률과 최대 가용 노드 수가 7개라는 점이다.

IEEE 802.15.4에서 실시간성에 관련된 연구들은 지금까지 주로 Slotted CSMA/CA 기법의 성능 향상과 그 평가에 초점을 맞추어 왔다. 특히, IEEE 802.11과 IEEE 802.15.4의 상이한 백오프(Back-Off)과정에 주목한 연구들이 발표되고 있다 [2]. 이에 비해, GTS를 이용한 실시간 관련 연구는 미비한 실정이다. 이러한 배경에는 GTS 내에서의 낮은 네트워크 이용률을 나타내는 IEEE 802.15.4의 GTS 기능의 한계점 때문이다. 최근 IEEE 802.15.4 기반의 실시간 어플리케이션에서 GTS와 관련된 연구들이 발표되고 있다 [3]. [3]에서는 결정 대기 이론(Deterministic Queuing Theory)에 기초하여, GTS의 성능을 평가하였다 하지만, 앞서 언급한 IEEE 802.15.4의 두 가지 한계점을 극복할 수 있는 방법에 대해서는 기술하고 있지 않다. 본 논문에서는 GTS의 한계점을 극복하여 네트워크 이용률과 가용 무선 I/O 노드 수를 동시에 증가시키는 동적 GTS 할당 기법을 제시한다.

2. 표준 GTS 할당 기법의 매커니즘과 한계점

본 논문에서는 산업 환경을 고려한 가장 짧은 형태의 슈퍼프레임 구조 (15.36 ms)을 사용했다 [1]. IEEE 802.15.4에서는 CAP(Contention Access Period)의 최소 길이인 $aMinCAPLength = 440 symbols$ 을 유지하기 위해, CFP내의 GTS의 한계 수를 7개로 규정하고 있다. 그래서 한 개의 타임슬롯으로 하나의 GTS를 구성하여 총 7개의 GTS를 사용한다. 이는 GTS내의 대역폭 낭비를 최소화하기 위해서이다. 하지만, 최소의 GTS의 구성에도 불구하고, 표준 GTS 할당 기법에서는 높은 대역폭 낭비를 나타낸다. 또한 7개 이상의 I/O 노드를 지원하기 위해서는 GTS 할당/해제 프로시저가 수행되어야 한다. 하지만 이는 지연 시간을 만들어 낸다. 실시간성이 요구되는 산업 환경에서의 실시간 I/O 데이터 노드에는 부적합하다. GTS내에서 순수 데이터 전송을 위한 시간 T_d 는 식(1)과 같이 표현된다.

$$T_d = T_{GTS} - T_{IFS} - T_{idle} \quad (1)$$

T_{GTS} 는 SO에 의해 구성된 슈퍼프레임의 활성 구간내의 하나의 GTS 길이에 해당 한다 T_{idle} 은 IFS 처리 시간과 데이터 전송 시간을 제외하고 남은 시간이다. 하나의 GTS가 제공하는 평균 보장 대역폭 B_{GTS}^{avg} 은 아래 식 (2)의 최대 처리율 Th_{max} 의 개념을 활용해 구할 수 있다.

$$Th_{max} = T_d \cdot C / BI \quad (2)$$

최대 SO 값이 14에 이르기까지 하나의 GTS가 제공하는 평균 대역폭은 아래 식 (3)를 통해 구할 수 있다.

$$B_{GTS}^{avg} = \frac{\sum_{SO=0}^{14} T_d \cdot C}{15} \cdot \frac{C}{BI} \quad (3)$$

만약, GTS가 k개의 타임 슬롯으로 구성될 경우, 평균 대역폭은 $k \times B_{GTS}^{avg}$ 가 된다. SO의 증가는 GTS의 크기를 증가시키지만, 더불어 총 T_{IFS} 와 T_{idle} 을 증가시키기 때문에 평균 보장 대역폭의 크기가 일정한 값을 가지게 된다. B_{GTS}^{avg} 는 약 12kbps로 계산된다. 각 GTS 내에서의 네트워크 이용률은 식 (4)과 같이 구해진다.

$$U_{GTS}^k = a_i / k \cdot B_{GTS}^{avg}, \quad B_{GTS}^{avg} \approx 12kbps \quad (4)$$

7개의 실시간 주기 I/O 노드의 내부 I/O 데이터 도착율이 1 kbps라고 할때, 각 GTS내에서 네트워크 이용률은 13%에 불과해 전체적으로 보면 약 87%의 대역폭 낭비를 초래한다.

3. 산업 환경에서의 실시간 주기 무선 I/O 노드들을 위한 동적 GTS 할당 기법

다수의 I/O 노드를 지원함과 동시에 네트워크 이용률을 증가시킬 수 있는 방법은 하나의 GTS를 공유할 수 있는 실시간 주기 I/O 노드의 집합을 찾는 것이라 할 수 있다. 해당 GTS를 공유하기 위해서는 다음 2가지의 요건이 만족되어야 한다.

조건 1. 허용 지연 범위(Allowable Delay Bound)가 실시간 주기 I/O 노드의 데드라인을 만족해야 한다.

조건 2. 해당 실시간 주기 I/O 노드의 도착율을 만족할 수 있는 대역폭이 보장되어야 한다.

[4]에서는 결정 대기 이론에 기초한 주기 데이터의 도착율 함수와 서비스 함수사이의 관계를 정의하고 있다. 이를 이용하면, 그림 1과 같이 실시간 주기 I/O 노드와 IEEE 802.15.4의 GTS 서비스 함수 사이의 관계를 해석할 수 있다.

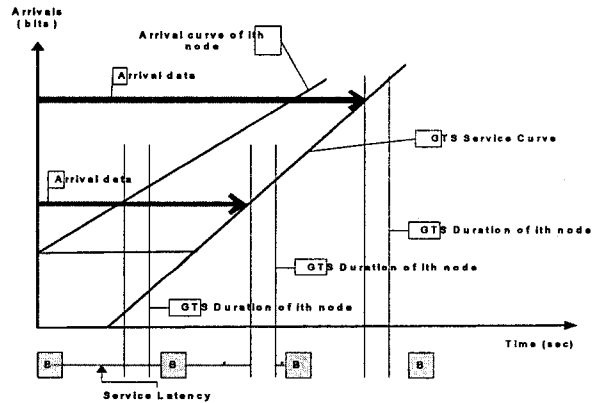


그림 1. 도착율 함수와 GTS 서비스 함수의 관계

도착율 함수와 GTS 서비스 함수사이의 최대 수평거리가 최대 허용 지연 시간에 해당한다. 해당 노드의 도착 데이터가 이 지연 시간보다 작은 데드라인 값을 요구하는 경우라면, GTS를 통한 전송이 가능해진다. 지연 허용 범위는 다음 식 (5)를 통해 구해진다.

$$D_{db} = \frac{b}{B_{GTS}^{avg}} + (nBI - T_{GTS}) \quad (5)$$

식 (5)은 연속되는 슈퍼프레임 상에서 특정 I/O 노드의 도착 데이터가 GTS를 사용할 수 있는 시점까지의 지연 시간을 나타낸 것이다. [5]에서는 여러 주기를 가지는 실시간 프로세스 사이에서, 중복되는 주기를 피하면서 각 프로세스를 스케줄링 하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 이용해 본 논문은 전송 주기를 결정하는 방법을 제안하였다. 이를 식 (6)에 나타내었다.

$$T_{TP}^{MD} = T_0 \times 2^j \leq D_i \leq T_0 \times 2^{j+1} = 2T_{TP}^{MD} \quad (6)$$

D_i 는 임의의 i번째 노드의 데드라인 값을 의미한다. T_{TP}^{MD} 는 i번째 노드의 데드라인 보다 작거나 같은 경우 값 중 최대치를 의미한다. T_0 는 최소 전송 주기(기본 전송주기)로서는 한 슈퍼프레임의 길이인 15.36 ms에 해당한다. n은 특정 실시간 주기 I/O 데이터 노드가 자신의 GTS를 사용하기 까지 경과된 슈퍼프레임의 수에 해당한다. 각 실시간 주기 I/O 데이터 노드의 전송 주기를 결정함에 있어서 식 (7)이 사용된다.

$$T_{TP} = \left\lceil \frac{T_{TP}^{MD}}{T_{SF}} \right\rceil \times 16 = n \times 16, \quad T_{SF} = BI = 15.36ms \quad (7)$$

n은 해당 노드의 다음 GTS까지 경과되는 슈퍼프레임의 수를 의미(본 논문에서는 BI의수와 동일)함과 동시에, 기본 전송 주기인 슈퍼프레임 구간에 대한 데드라인이 일정크기의 정수배에 해당하는 지를 의미한다. 각 실시간 주기 I/O 데이터 노드들에 대한 실질적인 사용 대역폭은 식 (8)을 통해 구할 수 있다.

$$B_D^i = B_{GTS}^{avg} \times \frac{1}{n_i} \quad (8)$$

초기 해당 GTS 슬롯에 할당된 노드의 n값 i_n 을 통해, 특정 테드라인 범위의 노드들의 최대 할당 가능 수를 알 수 있다. 이를 식 (9)에 나타내었다.

$$n_i \geq i_n, C_{n_i}^{max} = n_i - \left(\frac{n_i}{i_n}\right) \text{ 그의 } C_{n_i}^{max} = 1 \quad (9)$$

$C_{n_i}^{max}$ 는 초기 GTS 할당 테이블 완성된 후 n_i 값을 가지는 임의의 i 번째 노드가 해당 GTS 슬롯에서 할당 가능한 최대 수를 의미한다. 하지만, 식(9)는 조건 2가 만족되는 경우에서만 유효하다. 그림 4는 동적 GTS 할당 기법을 적용했을 때의 GTS할당 절차의 순서도이다.

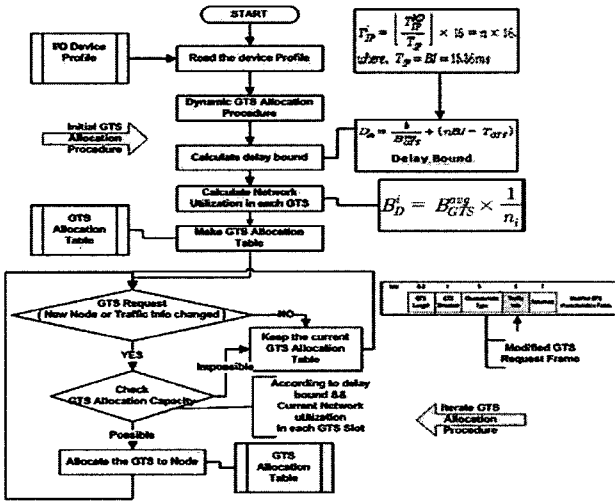


그림 2. 동적 GTS 할당 절차

4.OPNET을 이용한 컴퓨터 모의실험

모의실험에서는 네트워크 이용률과 지원 가능한 I/O 노드 수의 향상을 위해 IEEE 802.15.4의 GTS할당 기법과 동적 GTS할당 기법을 적용하였다. 총 I/O 노드 25개를 대상으로 10분간 29,040개의 슈퍼프레임을 수행한 결과이다. 초기 GTS를 할당받는 노드 A~G 노드의 GTS 할당을 위한 트래픽 정보는 표 1과 같다. 동적 GTS 할당 기법을 적용 후 총 17개의 신규 노드를 추가하였다. 도착율은 1kbps, 테드라인은 70, 80, 100, 130 ms 등으로 설정하였다. 그림 3,4는 각각 IEEE 802.15.4의 GTS 할당 기법과 동적 할당 기법을 적용했을 때의 GTS내에서 나타난 네트워크 이용률의 결과이다.

표 1. 7개 I/O 노드에 대한 트래픽 정보

노드	도착율	I/O Data 크기	테드라인	n
A	3.4 kbps	4 Byte	40 ms	2
B	2.7 kbps	4 Byte	50 ms	2
C	6.8 kbps	4 Byte	20 ms	1
D	4.5 kbps	4 Byte	30 ms	1
E	2.2 kbps	4 Byte	60 ms	4
F	1.9 kbps	4 Byte	70 ms	4
G	1.5 kbps	2 Byte	80 ms	4

그림 3에 나타난 낮은 네트워크 이용률은 두 가지 요인 때문에 발생한다. 첫 번째는 산업 환경에서의 작은 I/O 데이터 크기로 인해 IFS와 같은 프로토콜 오버헤드의 영향이 상대적으로 크게 작용하기 때문이다. 둘째로, 각각의 실시간 주기 I/O 노드들은 자신의 전송 주기에 따라서 매체 접근을 시도하기 때문에, 전송주기에 해당하지 않는 GTS 구간에서는 전송 행위가 발생하지 않기 때문이다. 그림 5는 그림 3,4의 결과인 네트워크 이용률의 평균값을 두 GTS 할당 기법별로 비교한 것이다. 3, 4번째 GTS 슬롯을 제외한 GTS내에서의 네트워크 이용률이 상승하였음을 알 수 있다. 지원 가능한 노드 수 또한 7개에서 25개로 증가하였다. 3, 4번째 GTS 슬롯에서의 네트워크 이용률은 표본 GTS할당 기법을 적용하였을 때의 크기랑 동일하다. 테드라인 20~30ms의 노드의 허용지연 범위는 17ms에 해당하기 때문에, 전송 주기에 해당하는 슈퍼프레임의 수가 1이 된다. 이러한 경우, 조건 1, 2를 모두 만족함에도 불구하고, 신규 노드를 3, 4번 GTS 슬롯에 할당하는 것은 불가능하다. 동적 GTS 할당 기법의 특징은 기본 전송 주기를 슈퍼프레임의 길이로 사용하는 것에 있다. 즉, 슈퍼프레임의 길이에 근접하는 전송주기에 해당하는 테드라인을 요구하는 I/O 노드가 많아질 경우, 지원 가능한 노드 수는 상대적으로 감소할 수밖에 없다. 이는 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임에 기초한 전송 기법의 한계에 해당한다고 할 수 있다. 따라서 동적 GTS 할당 기법에서는 40ms이상의 테드라인을 요구하는 실시간 주기 I/O 데이터 노드들의 수가 많은 수록 GTS를 사용할 수 있는 노드 또

한 증가하게 된다.

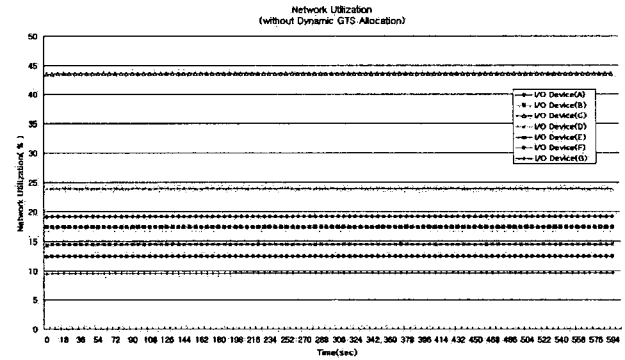


그림 3. GTS내의 네트워크 이용률

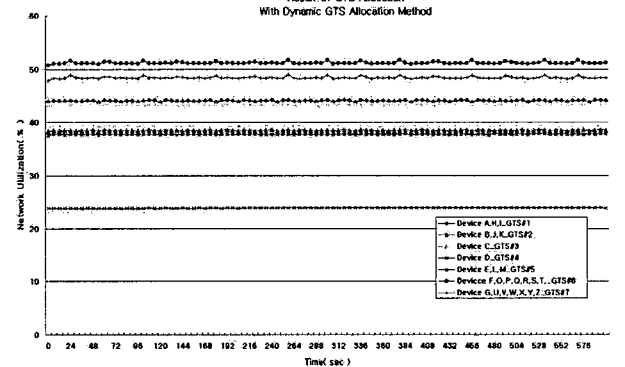


그림 4. GTS내의 네트워크 이용률(동적 GTS 할당 기법 적용)

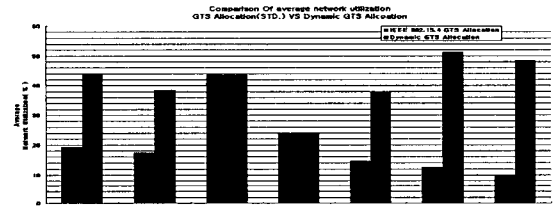


그림 5. 평균 네트워크 이용률의 비교

5. 결론

본 논문에서는 산업용 무선 제어 네트워크를 위해 IEEE 802.15.4의 GTS 내에서의 네트워크 이용률과 지원 가능한 노드 수를 증가시키는 동적 GTS 할당 기법을 제안하였다. 또한 모의실험을 통해 동적 GTS 할당 기법의 성능을 분석하였다. 산업 환경에서는 많은 실시간 주기 I/O 노드들이 필요하므로, 멀티 홉 환경에서의 동적 GTS 할당기법에 대한 연구들이 추후 필요하다.

참고문헌

- [1] IEEE 802.15.4 Standard-2003, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", IEEE-SA Standards Board, 2003.
- [2] Koubaa, Mário Alves, Eduardo Tovar "Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks" published in proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS'06), Torino, Italy, JUN, 2006.
- [3] A. Koubaa, M. Alves, E. Tovar, "GTS Allocation Analysis in IEEE 802.15.4 for Real-Time Wireless Sensor Networks", to appear in 14th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS) 2006
- [4] J-Y. Leboudec, and P. Thiran, A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet, LNCS, Vol. 2050, P. 274, ISBN: 3-540-42184-X, 2001.
- [5] Ching-Chih Han and Kwei-Jay Liu "Scheduling distance-constrained real-time tasks" Real-Time Systems Symposium, PP 300-308, Dec, 1992