

# CAN 기반 휴머노이드 로봇에서의 실시간 데이터 통신의 구현

## Implementation of Real-Time Communication in CAN for Humanoid Robot

권 선 구\*, 허 욱 렬\*\*, 김 진 겐\*\*\*

(Sun-Ku Kwon, Uk-Youl Huh, Jin-Geol Kim)

**Abstract** - The Controller Area Network (CAN) is being widely used for real-time control application and small-scale distributed computer controller systems. However, CAN may exhibit unfair behavior under heavy traffic conditions. When there are both high and low priority messages ready for transmission, the proposed precedence priority filtering method allows one low priority message to be exchanged between any two adjacent higher priority messages. In this way, the length of each transmission delays is upper bounded. These procedures are implemented as local controllers for the ISHURO (Inha Semvung Humanoid ROBOT).

**Key Words** : CAN, bandwidth, Distributed Control System, Message Scheduling

### 1. 서 론

휴머노이드 로봇(humanoid robot)이 인간의 생활공간에서 자율적인 보행을 수행하기 위해서는 자체적으로 보행에 필요한 데이터를 생성하거나 외부로부터 데이터를 받아들일 수 있는 통신 시스템 구축이 필요하다. 더불어 각각의 지역제어기(local controller)로 이러한 데이터를 빠르고 정확하게 전송하기 위한 네트워크 구축에 관한 연구는 필수적이다. 이러한 관점에서 휴머노이드 로봇에 관한 네트워크 기반 실시간 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2].

CAN 프로토콜은 차량 내부의 복잡한 배선과 전자 장치를 통합하기 위해 개발되었다. 이후 프로토콜의 유용성으로 인해 로봇, 공정제어, 자동제어 등의 다양한 산업 분야에 적용되어 신뢰성 높은 네트워크를 구성하고 있다. 특히 저가의 하드웨어 장치로 고속의 통신 인터페이스를 제공할 뿐만 아니라, 데이터 프레임의 오버헤드(overhead)가 작기 때문에 빠른 응답 특성을 가지며, 크기가 작은 데이터의 주기적인 전송에 적합하다. 또한 일반적인 CSMA/CD 방식과 달리, ID(identifier)를 이용한 충돌 방지와 전송 중재(arbitration) 기능을 갖고 있어서 우선순위 기반의 실시간 제어 네트워크 프로토콜로 널리 사용되고 있다[3][4]. CAN 프로토콜이 사용하는 MAC 방식은 충돌이 발생했을 때 신호들을 파괴시키지 않고, 가장 우선순위가 높은 프레임을 전송하고, 나머지는 전송을 중지시키는 방식이다. 메시지에 따라 고유한 ID를 통해 우선순위를 부여하고, ID를 통해 메시지 간의 충돌을 방지하고 중재하는 역할을 한다[1][2].

ID를 할당하는 방법은 CAN의 응용 계층에서 중요한 부분

저자 소개

\* 仁荷大學校 電氣工學科 碩士課程

\*\* 仁荷大學校 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 仁荷大學校 電氣工學科 教授 · 工博

이고, 실제로 ID를 시스템에서 발생하는 메시지와 연결하고 할당하는 방법에 따라 매우 다른 특성을 가지게 된다. 그러나 네트워크에서 발생하는 메시지들의 우선순위를 정확하게 ID로 표현하기 어렵다. CAN 프로토콜은 ID가 고정되어 있기 때문에 비주기적인 메시지나 우선순위가 낮은 메시지의 전송 지연 현상이 가장 큰 문제점이 될 뿐만 아니라, 네트워크 기반 휴머노이드 로봇의 안전성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 이를 위한 기존 연구에서는 CAN의 장점을 최대한 살릴 수 있는 메시지 스케줄링에 의한 동적 ID 할당 방법으로써 RMS(Rate Monotonic Scheduling), DMS(Deadline Monotonic), EDS(Earliest Deadline 혹은 EDF : Earliest Deadline First), MTS(Mixed Traffic)와 같은 방법들이 제안되었다[5][6][7]. 또한 통신상의 지연시간과 전송 데이터 손실 및 오류에 따른 시스템 성능 및 안정도 분석을 통해 실시간 제어 가능성을 판단하고 평가하는 방법에 대한 연구가 진행되었다[1][8].

그러나 다축 구동 시스템으로써의 휴머노이드 로봇은 많은 지역제어기들이 제어 및 샘플링 주기에 따라 유기적으로 동작해야 한다. 그리고 메시지 전송 중재가 ID를 통해 시스템 수준에서 이루어지는 CAN에서는 시간 지연(delay)을 고려한 제어 방식이나 동적 ID 할당 방식보다는 지연 요소를 제거하고 시간 지연을 일정하게 함으로써 네트워크의 신뢰도를 향상시키는 것이 효과적이다. 또한 대역폭 할당 등의 태스크 기반 메시지 스케줄링 방식에서 RMS/DMS 방식은 데드라인(deadline) 정보만으로 데이터의 중요도와 그에 따른 우선순위를 판단하기 어렵다. EDS, MTS와 같은 동적 ID 할당 방식은 ID 갱신으로 인한 CPU의 연산량이 증가하고, 시스템의 local clock의 동기화가 필요하게 된다. 본 논문에서는 동적 ID 할당 방식에 의한 불필요한 연산 시간과 이로 인한 시간 지연을 최소화하는 선형순위 필터링 방법을 제안한다. 낮은 우선순위를 갖는 메시지의 전송 지연을 최소화하고, 메시지

간의 시간 지연을 일정하게 하고자 round-robin 방식을 구현한다. 낮은 우선순위 메시지에 대해서도 공정한 전송 기회를 부여하고, 시간 지연의 변동을 최소화하고 일정하게 함으로써 제어의 안정성 보장할 수 있다. 순차적으로 높은 우선순위에 낮은 우선순위의 메시지를 전송함으로써 시간 지연이 우선순위에 의해 편중되는 현상을 개선한다.

이러한 방법은 주기적인 데이터 전송이 빈번한 네트워크, 제어 주기의 실시간 제약 조건이 존재하는 제어 시스템 및 표준 CAN 프로토콜에서 발견된 응용 분야에도 동일하게 적용할 수 있다.

### 3. 선행 순위 필터링 방법

앞서 살펴본 바와 같이 메시지 스케줄링에 의한 ID 할당 방법은 메시지의 중요도와 우선순위 결정의 어려움과 ID 필드의 제한, 프로세서 연산량 증가의 문제가 발생한다. 메시지 스케줄링은 배정능력과 실시간성 보장을 위해 연구되고 있지만 네트워크 시스템에 있어서 발생하는 시간 지연을 줄이고 개선하기는 어렵다. 무엇보다도 지속적으로 ID가 갱신되면 ID의 고유성을 침해하므로 CAN 프로토콜에서는 사용이 제한된다[1][2][9].

또한 휴머노이드 로봇은 swing leg과 support leg이 보행 하면서 서로 교차되고 이에 따라 개별 제어 및 메시지의 우선순위가 바뀌게 된다. 다시 말해 로봇의 보행에 관련된 메시지는 절대적으로 높은 우선순위를 가질 수 없고 우선순위가 유사한 경향이 있다. 뿐만 아니라 전송 요청 순서는 고정할 수 없고, 무작위적인 전송 요청 순서에 따라 메시지의 시간 지연은 항상 변화하게 된다. 따라서 유사한 우선순위를 가진 메시지의 공정한 전송 기회 부여와 시간 지연을 일정하게 하는 것이 네트워크 기반 휴머노이드 로봇 제어의 핵심이라고 할 수 있다.

CAN은 네트워크 상에서 개별 메시지의 우선순위를 ID로 절대적으로 할당한다. 이러한 기법은 여러 메시지가 동시에 전송을 시작할 때 일어나는 충돌을 해결할 수 있으나 각각의 메시지에 대해서 최대 허용 지연시간 범위를 보장할 수 없다. 만약 네트워크 상에 매우 많은 메시지가 전송을 위해 대기하고 있다면 우선순위가 낮은 메시지는 전송 기회를 계속적으로 잃어버릴 수도 있다[10]. 따라서 우선순위가 낮은 메시지는 버스를 점유하는 시간까지의 액세스 시간이 길어지기 때문에 시간 지연이 증가한다.

우선순위 기반 네트워크 제어에 있어서 메시지의 우선순위에 따라서 그림 1과 같이 낮은 우선순위의 메시지에 시간 지연이 편중되는 현상이 발생한다. 주제어기와 하부의 12개의 지역제어기의 데이터 통신을 묘사하기 위해 메시지의 우선순위는  $M1 > M2 > M3 > M4 > M5 > \dots > M11 > M12$  순으로 높다고 가정한다. 그림 1에서 메시지 12는 빠른 전송 요청에도 우선순위가 높은 메시지에 의해 전송이 지연되면서 시간 지연이

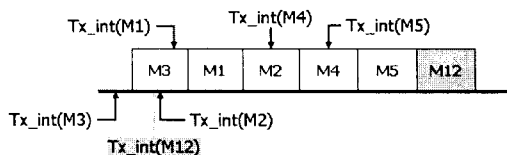


그림 1 최악의 시간 지연 현상

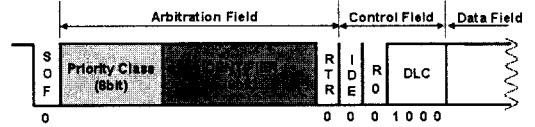


그림 2 선행 순위 필터링에 의한 전송의 예

다른 메시지에 비해 훨씬 커진다. 총 시간 지연은 동일하지만 낮은 우선순위를 가진 메시지가 가지는 불공정한 전송 기회로 인한 시간 지연의 편중 현상을 개선하고자 하는 것이 목적이다.

앞서 보행 궤적 데이터는 유사한 우선순위를 가진다고 말했지만, 휴머노이드 로봇 시스템에는 보행 궤적 데이터 뿐 아니라 비주기적인 센서 정보와 제어 명령도 있으므로 최소한의 우선순위를 할당할 필요가 있다. EDS나 MTS 방식, CANopen에서는 상위 2~6비트를 우선순위 클래스(priority class)로 할당하고 있다[2][7][11]. 현재 묘사된 모든 메시지들을 하나의 클래스로 묶는다고 가정하면 ID는 최소한 8비트 ( $2^8=256$ )를 할당해야한다. 따라서 그림 2와 같이 CAN 데이터 프레임의 헤더를 정의한다.

그림 3은 제안하는 선행 순위 필터링 방법의 과정을 나타낸다. 우선순위는 메시지를 전송할 때 각 전송 개체(메시지)에 할당되고, 선행 순위는 대기 열이 생성되는 경우 대기 열 내에서의 전송 순위로 구분되어 정의된다[10]. 즉, 우선 순위는 메시지의 중요도 및 긴급성에 따라 고정적으로 할당하여 사용하는 것이며 선행 순위는 대기 열 내에서의 전송 순서를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 낮은 우선 순위와 높은 우선 순위의 메시지가 대기 열에서 전송을 대기하는 과정에서 선행 순위인 높은 우선 순위의 메시지가 중재에 성공하여 전송이 된다. 선행 순위 필터링 방법은, 대기 열에서 선행 순위를 가지는 높은 우선 순위의 메시지를 필터링하여 순차적으로 낮은 우선 순위를 가진 메시지가 전송되도록 하는 방법이다. 다만 제안하는 방법은 버스가 휴먼(idle)인 상태에 대해서만 적용하지 않고, 메시지들이 대기 열에 진입한 경우에만 적용이 된다.

우선 순위 필터링 방법은 전송 요청이 들어오면 우선 순위 클래스 3비트와 ID 8비트를 분리하여 저장해둔 후, 클래스 값을 참조하여 해당 클래스를 결정한다. 클래스가 결정이 되면 과거 전송된 메시지의 ID가 저장되는 변수인 mp를 가장 낮은 우선 순위인 lp(1111111)로 초기화를 시킨다. 버스

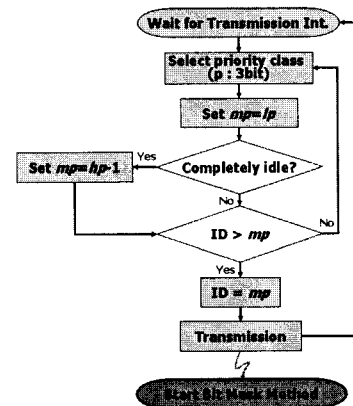


그림 3 선행 순위 필터링 과정

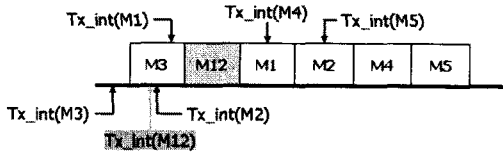


그림 4 CAN 데이터 프레임의 재정의

가 휴먼 상태이면  $mp$ 를 '0'(hp-1)으로 초기화하고, 이 때는  $ID > mp$ 를 만족하므로 무조건 전송을 시작하며 전송 요청을 받은 클래스와 ID를 다음 전송 요청을 받을 때까지 비교 값으로 저장한다. 만약 ID가  $mp$ 인 메시지가 전송되고 있어서 버스가 휴먼 상태가 아니라면 과거 전송된 메시지의 ID인  $mp$ 와 현재 전송 요청을 받은 메시지의 ID 값을 비교하여 우선순위가 낮은 경우에 전송요청을 수락하여 대기 열에 해당 메시지를 보낸다. 이런 과정으로 순차적으로 우선순위가 낮은 메시지들을 전송하고, 도중에 우선순위가 높은 메시지가 전송 요청을 보내면 버스의 휴먼 상태가 될 때까지 의도적으로 대기시키며 대기 열에 있는 낮은 우선순위의 메시지가 전송이 완료된 후에 전송이 되도록 한다. 그림 4는 선행순위 필터링 방법에 의해 그림 1의 문제점이 개선된 예를 나타낸다. 낮은 우선순위의 메시지에 대해서도 공평한 전송 기회가 부여되고, 시간 지연이 편중되는 현상을 개선할 수 있다. 따라서 제안된 방법을 통해 round-robin access 방법을 구현하게 된다.

### 7. 성능 평가 및 결과 분석

또한 그림 5는 기존 CAN과 제안된 선행순위 필터링 방법의 평균 전송시간에 대한 그래프이다. 결과에서 볼 수 있듯이 네트워크 부하가 커질거나 메시지의 수가 더 많아질수록 각 메시지에 걸리는 전송 지연 시간은 점점 증가함을 볼 수 있다. 각각 다른 ID를 가지는 메시지의 전송지연은 부하가 커지면 불공평하게 배분된다. 기존 CAN의 경우 전송지연이 각 메시지마다 불공평하게 작용하는 반면에 제안된 선행순위 필터링 방법을 적용한 CAN은 전송지연 시간이 부하의 양만큼 공평하게 발생한다는 것을 볼 수 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 부하가 적은 경우보다 네트워크의 부하가 커질수록 공정한 메시지 전송 기회 부여와 시간 지연의 균등화를 위해서는 제안된 선행순위 필터링 방법은 꼭 필요하다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 실시간 제어 시스템에 적합한 CAN 프로토콜을 휴머노이드 로봇의 네트워크로 최적화시키기 위해 몇 가지 주요한 특징을 살펴보았다. 또한 CAN은 가장 중요한 특징인 ID 할당 방법으로 기존에 제안된 방법들의 특징을 보였지만 기존 방법의 제반 한계를 극복하고 휴머노이드 로봇을 적합한 개선된 ID 할당 방법으로써 선행순위 필터링 방법을 제안하였다. 대기 열에 있는 낮은 우선순위 메시지의 전송을 보장하기 위해 우선순위가 순차적으로 낮아지도록 선행순위의 메시지를 의도적으로 대기시키는 방법이다. 또한 전송 지연시간을 일정하게 만들어주며 휴머노이드 로봇의 네트워크와 같이 안전성을 가장 중시하는 데이터 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 제안하는 방법은 단일 전송보다는 주기적

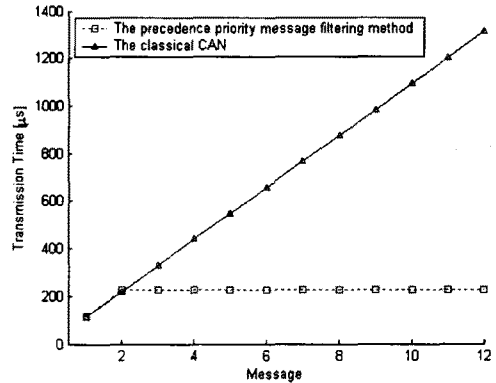


그림 5 선행순위 필터링 방법에 의한 전송 시간

인 데이터 처리를 해야 하는 제어 시스템에 보다 효율적이고, 휴머노이드 로봇과 비슷한 데이터 특성을 가진 시스템에도 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 전종만, 김대원, "메시지 지연시간을 고려한 CAN 기반 피드백 제어시스템의 응답특성 분석", 대한전기학회 논문지, 제51D권, 5호, pp. 190-196, 2002
- [2] 이병훈, 김홍렬, 김대원, "CAN기반 실시간 시스템을 위한 확장된 EDS 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문지, 제51D권, 7호, pp. 294-301, 2002.
- [3] G.C. Walsh and Y. Hong, "Scheduling of networked control systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, No. 1, pp. 57-65, 2001.
- [4] *CAN Specification version 2.0*, BOSCH, pp. 42-44, sep, 1991.
- [5] N.C. Audsley, A. Burns and A.J. Wellings, "Deadline monotone scheduling theory and application", *IFAC J. Contr. Eng. Practice*, vol. 1, No. 1, pp. 71-78, 1993.
- [6] M.D. Natale, "Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques", in *Proceeding of Real-Time Systems Symposium*, pp. 259-268, 2000.
- [7] K.M. Zuberi and K.G. Shin, "Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 49, No. 2, pp. 182-188, 2000.
- [8] S. Punnekkat, H. Hansson and C. Norstrom, "Response time analysis under errors for CAN", in *Proceeding of Real-Time Technology and Applications Symposium*, pp. 258-265, 2000.
- [9] 구자봉, 허옥렬, 김진걸, 김병룡, "CAN내장 휴머노이드 로봇에 대한 진보된 우선순위 적용", 대한전기학회 논문지, 제 53D권, 10호, pp. 714-719, 2004.
- [10] 최호식, 이장명, "CAN 네트워크상의 효율적인 대역 할당을 위한 분산 선행대기 열 기법", 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 10권, 11호, pp. 1058-1064, 2004.
- [11] *CANopen Application Layer and Communication Profile*, CiA Draft Standard DS301, Rev. 4.01, June 2000.