

https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.57

IIBC 2017-2-9

이종 통신망에 연결된 네트워크 기반 액추에이터 제어

Actuator Control based on Interconnected Heterogeneous Networks

김나연*, 문찬우**

Nayeon Kim*, Chanwoo Moon**

요약 차량의 전자화가 진행됨에 따라 차량내 전자제어장치의 사용이 증가하고 있으며 각 제어장치들은 급증하는 정보의 처리를 위해 차량 통신 네트워크에 연결되고 있다. 본 논문에서는 FlexRay-CAN의 이종 통신망에 연결된 액추에이터의 네트워크 기반 제어를 위한 FlexRay-CAN 게이트웨이를 구현하고 FlexRay 슬롯의 2분법을 사용하여 할당된 최소한의 FlexRay 프레임 ID (Frame ID)를 사용하여 필요한 센서 정보를 제어 안정성을 보장하는 최대 허용 지연시간 이내로 전송하기 위한 패킹 알고리즘 제안한다. 접촉 힘 센서 정보를 대상으로 패킹맵을 구성하였으며 제안된 알고리즘은 이종의 네트워크에 분산되어 있는 시스템의 제어에 적용할 수 있다.

Abstract Recently, the use of electronic control units in vehicle has increased. The ECUs are connected to in-vehicle networks to process a large amount of information. In this paper, for an actuator that is interconnected to CAN and FlexRay, a FlexRay-CAN gateway is presented and a data packing algorithm with a bisection method of a FlexRay slot is proposed. And, a network based actuator control system and packing map is implemented. With the proposed packing method, contact force sensor data are transferred within the maximum allowed delay to ensure the stability. The proposed method is useful for control of distributed system.

Key Words : Interconnected network, Network based control, CAN, FlexRay, Actuator control

1. 서론

최근 차량용 임베디드 전자 시스템의 발전으로 차량의 전자화가 급속히 진행되고 있다. 차량 전자화로 인해 차량 내부에 사용되는 ECU(Electronic Control Unit)의 수가 증가하며, 이로 인한 고속 차량 네트워크의 필요성이 대두되고 있다. 차량 내 네트워크(In-Vehicle Network: IVN)에는 차량의 보디나 새시 부분을 연결하고 제어하는 CAN, 차량의 오디오, 앰프 등 멀티미디어 기기 접속을 위한 MOST, 그리고 브레이크나 조향 장치를 연결하고 X-by-Wire 장치를 제어하는 FlexRay가 있

다^[1]. CAN은 비교적 저속의 통신 속도와 이벤트 트리거 방식을 지원하며, 다수의 노드를 하나의 단일 네트워크 버스에 연결하여 통신하기 때문에 모든 노드들 간의 직접적인 메시지 송수신이 가능하다. 그러나 메시지 충돌로 인한 전송 지연으로 제한된 시간 내에 주어진 작업을 완료해야 하는 실시간 특성을 만족시키기 어렵다. 또한 각종 안전 시스템과 운전자 편의 시스템이 개발되면서 기존의 CAN 프로토콜만으로는 전송용량 및 속도에 한계를 가지게 되었다^[1]. 이러한 CAN의 문제점을 해결하기 위해 FlexRay프로토콜이 개발되었다. FlexRay는 최대 10Mbps로 CAN에 비교하여 고속의 통신 속도를 지원

*준회원, 국민대학교 전자공학부

**정회원, 국민대학교 전자공학부

접수일자 2017년 1월 12일, 수정완료 2017년 3월 2일

게재확정일자 2017년 4월 7일

Received: 12 January, 2017 / Revised: 2 March, 2017 /

Accepted: 7 April, 2017

**Corresponding Author: mcwnt@kookmin.ac.kr

School of Electrical Engineering, Kookmin University, Korea

하고, 시간 트리거(time-triggered) 방식으로 확정적인 전송 시간을 보장하기 때문에 실시간 분산 제어 시스템에 적합하다^[2]. 그러나 FlexRay 프로토콜은 네트워크 설계자에 의해 모든 메시지가 스케줄링 되어야만 통신이 가능하기 때문에 설계에 비용 및 시간이 많이 들고, 스케줄링으로 인해 전체 시스템의 신뢰성에 많은 영향을 끼치게 된다. 또한 CAN이 구현이나 비용 면에서 합리적이기 때문에 CAN과 FlexRay를 혼용하여 사용하는 것이 효율적이다. 이를 위해 CAN과 FlexRay간의 프로토콜 변환을 수행하는 FlexRay-CAN 게이트웨이를 구현한 연구가 발표되었으며^[3], CAN 메시지와 FlexRay 메시지의 변환 맵을 제안하고, 실험을 통해 메시지가 정확히 변환되는지 확인한 연구가 있었다^{[4][5]}. Schmidt는 CAN과 FlexRay 노드 사이의 최악 응답시간 (Worst Case Response Time: WCRT)을 고려한 게이트웨이를 구현하였는데, CAN 시그날의 패킹(packng) 문제는 고려하지 않았다^[6]. 실시간 제어의 측면에서 전송 지연은 제어 시스템의 안정도에 영향을 미치는데, 본 논문에서는 FlexRay-CAN 시스템이 상호 연결된 액추에이터의 네트워크 기반 접촉 압력 시스템을 위한 FlexRay-CAN 게이트웨이를 구현한 후, 각 통신 별 최악 응답시간을 계산하고, 슬롯의 2분법(bisection method)을 사용하여 최소한의 FlexRay 프레임 ID를 이용하여 제어 안정성을 보장하는 시간 이내로 전송하기 위한 패킹 알고리즘 제안한다.

II. 접촉 압력 액추에이터의 구성

1. 제어용 통신 네트워크의 구성

차량내에서 고속의 시간 트리거 방식인 FlexRay는 통신 네트워크의 백본(backbone)의 역할을 하고, 저속의 센서와 액추에이터는 저속, 저가의 CAN 네트워크에 연결된 형태를 갖게 될 것이다. 이 때 CAN 네트워크와 FlexRay 네트워크는 게이트웨이를 통해 연결된다. 그림 1은 구현하고자 하는 전체 압력 제어 시스템의 네트워크 구성을 나타낸 것이다. 이 시스템에서 압력 센서를 포함한 각종 센서는 CAN 네트워크에, 액추에이터 및 실시간 제어기는 FlexRay 네트워크에 연결되어 있다. 센서로부터 검출된 값이 컨트롤러에 전달되어 액추에이터가 작동할 때까지의 시간 지연은 실시간 피드백 시스템의 제어

안정도에 영향을 미친다. 직접 제어에 사용되는 센서는 압력센서이지만 그 외의 센서 정보도 CAN 네트워크를 통해 FlexRay-CAN 게이트웨이로 전달되고 여기서 FlexRay 데이터로 패킹되어 컨트롤러에 전달된다.

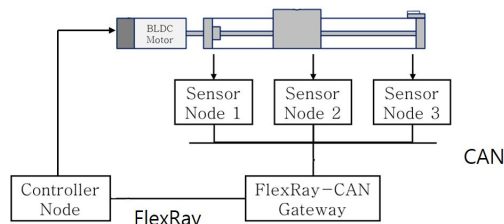


그림 1. 압력 제어 시스템의 구성
Fig. 1. Structure of a pressure control system

2. 제어용 통신 네트워크의 구성

네트워크에 의한 시간 지연을 고려하지 않은 시스템의 블록다이어그램은 그림 2와 같다. 여기서 K_T 은 모터의 토크상수이다. 액추에이터는 BLDC모터와 선형 스테이지로 구성되어 있고 접촉 압력을 측정하기 위해 스트레인게이지를 사용한다.

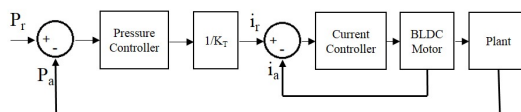


그림 2. 압력 제어 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 2. A block diagram of a pressure control system

전체 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{k}{Ms^2 + bs + k} \quad (1)$$

- M : 액추에이터 구동부 질량
- b : 댐핑 계수
- k : 압력센서 강성

압력 제어기로 PID 제어를 사용하고 압력 제어기에 출력된 토크값이 BLDC 모터 전류 제어기에 지령으로 입력된다. 실측한 파라미터와 Simulink로 시뮬레이션 하여 허용 지연시간을 구하면 안정도를 유지하는 허용 지연시간은 10ms 이다.

III. 게이트웨이의 설계

1. 네트워크 최악응답시간

제어시스템이 항상 안정도를 유지하려면 네트워크상의 최악응답시간이 허용 지연시간보다 작아야 한다. 센서에서 CAN을 통해 보내는 시그널 s_n 이 제어기에 도달할 때까지의 전체 최악응답시간 $R_{s_n(Total)}$ 은 다음과 같다^[6].

$$R_{s_n(Total)} = R_{s_n(FlexRay)} + R_{s_n(CAN)} \quad (2)$$

$R_{s_n(FlexRay)}$: FlexRay 상의 최악응답시간

$R_{s_n(CAN)}$: CAN 상의 최악응답시간

시그널 s_n 의 CAN 네트워크 상의 최악 응답시간 $R_{s_n(CAN)}$ 은 다음과 같다^[7].

$$R_{s_n(CAN)} = J_s + w_s - qT_s + C_s \quad (3)$$

J_s : Jitter

w_s : Queuing delay

T_s : Minimum inter-arrival time

q : Message instance

C_s : Signal Communication time

FlexRay의 각각의 메시지는 프레임 ID (FID)와 반복 주기 (Repetition Cycle), 사이클 오프셋(Cycle_offset)을 갖는다. FlexRay에서 허용된 반복 주기는 { 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20, 32, 40, 50, 64} 사이클이다. FlexRay 한 슬롯을 이분할하여 {1,2,4,8,16,32,64} 사이클마다 전송하면 한 슬롯에서 보낼 수 있는 데이터의 양은 증가하지만 사이클 반복주기가 커질수록 최악 응답시간은 증가하게 된다.

FlexRay 게이트웨이는 FlexRay 네트워크의 일부로서, 통신에 관련된 글로벌 파라미터는 게이트웨이가 포함되어 있는 전체 네트워크의 파라미터와 같게 설정해야 하며 게이트웨이에 할당된 설계파라미터는 프레임 ID 정도이다. 이 네트워크의 파라미터는 다음과 같다고 가정한다.

V : Flexray 메시지 패킷의 데이터 크기, payload length (Bytes)

$Mcycle$: Maximum cycle counter value in a given cluster ($gCycleCountMax^{[2]}$).

메시지를 본 연구에서와 같이 슬롯을 2분할하여 메시지가 $2^{(K_k-1)}$ 사이클마다 전송되는 경우 FlexRay 메시지의 사이클 그룹을 C_k 로 정의한다. ($K_c = 1, 2, \dots, K_c$) 여기서 K_c 는 다음을 만족하는 정수이다.

$$(Mcycle + 1) / 2^{K_c-2} \geq 2 \quad (4)$$

$$(Mcycle + 1) / 2^{K_c-1} < 2$$

C_k 그룹에 속하는 메시지는 $(Mcycle + 1)$ 사이클에 $\lfloor (Mcycle + 1) / 2^{K_k-1} \rfloor$ 회 전송된다. C_k 그룹의 메시지의 최악 응답시간 $R_{s_n(FlexRay)}(C_k)$ 는 다음과 같다.

- $(Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle = 0$ 인 경우

$$R_{s_n(FlexRay)}(C_k) = 2^{C_k-1} C_{cycle} + C_n \quad (5)$$

- $(Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle \neq 0$ 인 경우

· 메시지의 사이클 오프셋이 $0 \sim ((Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle - 1)$ 사이인 경우

$$R_{s_n(FlexRay)}(C_k) = 2^{C_k-1} C_{cycle} + C_n \quad (6)$$

· 메시지의 사이클 오프셋이 $(Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle \sim repetition_cycle - 1$ 인 경우

$$R_{s_n(FlexRay)}(C_k) = (2^{C_k-1} + (Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle) C_{cycle} + C_n \quad (7)$$

여기서

C_{cycle} : FlexRay 1 사이클 주기

C_n : 메시지 전송시간

따라서 식 (5)~(7) 로 부터 C_k 사이클 그룹의 최악 응답시간은

- $C_k = 1.. K_c-1$ 인 경우

$$R_{s_n(FlexRay)}(C_k) = (2^{C_k-1} + (Mcycle + 1) \text{ MOD } repetition_cycle) C_{cycle} + C_n \quad (8)$$

- $C_k = K_c$ 인 메시지인 경우

$$R_{s_n(FlexRay)}(C_k) = (Mcycle + 1) C_{cycle} + C_n \quad (9)$$

CAN 시그널 s_n 의 전체 허용 시간 지연을 d_{sn} 이라고 하면 FlexRay 네트워크상의 허용 시간지연 $d_{sn(FlexRay)}$ 은 다음과 같다.

$$d_{sn(FlexRay)} = d_{sn} - Rs_n(CAN) \quad (10)$$

시그널 s_n 의 사이클 그룹 b_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} b_n &\in 1, 2, \dots, K_c \\ s_n &\in \text{cycle group } b_n \\ &\text{if } Rs_n(FlexRay)(b_n) \leq d_{sn(FlexRay)} \\ &\quad < Rs_n(FlexRay)(b_n + 1) \end{aligned} \quad (11)$$

그리고

$$Rs_n(FlexRay)(K_c + 1) = \infty$$

메시지의 사이클 그룹 C_k 가 시그널 s_n 의 사이클 그룹 b_n 보다 상위라고 하는 것은 다음과 같은 경우이다.

$$b_n > C_k \quad (12)$$

제한된 수의 FID(Frame ID)를 게이트웨이가 할당 받은 상황에서 CAN 네트워크를 통해 전송된 데이터를 사이클로 2분할된 메시지에 패킹하여 데드라인(Deadline) 안에 FlexRay로 전송한다. 패킹하는 원칙은 다음과 같다.

- 사용하는 메시지의 수를 최소화하기 위해 CAN으로 전송된 시그널을 패킹하여 FlexRay로 전송한다.
- 각 시그널은 데드라인을 넘지 않도록 자기 자신의 사이클 그룹 또는 상위의 사이클 그룹의 메시지에 패킹되어 전송한다.
- 모든 시그널을 보낼 수 있도록 허용 시간 지연에 따라 프레임 ID 내 메시지를 사이클 별로 이분할하여 전송한다.
- 전송에 사용하는 메시지 수를 최소화 하고, 한 노드가 전송에 사용하는 메시지 수는 전송에 할당된 메시지수를 넘지 않도록 한다.

IV. 실험 및 결과

FlexRay의 파라미터가 $V = 20$ bytes, 전송속도 10 Mbit/s, 1 cycle 5 ms, $M_{cycle} (=gCycleCountMax) = 63$

일 때 각 사이클 그룹에서의 최악 응답시간과 전송 메시지의 데드라인 범위는 표 1과 같다.

표 1. 각 사이클 그룹 별 FlexRay 최악 응답시간

Table 1. Worst case response time for each cycle group of FlexRay

Cycle	Cycle group	$Rs_{(FlexRay)}$ (ms)	Deadline range (ms)
1	1	5.06	5.06 ~ 10.06
2	2	10.06	10.06 ~ 20.06
4	3	20.06	20.06 ~ 40.06
8	4	40.06	40.06 ~ 80.06
16	5	80.06	80.06 ~ 160.06
32	6	160.06	160.06 ~ 320.06
64	7	320.06	320.06 ~

게이트웨이를 통해 FlexRay 버스로 전달할 CAN 시그널은 모두 9개이며 각각의 시그널의 주기와 전달되어야 하는 총 데드라인, 각 시그널의 데이터 크기는 표 2와 같고 여기서 압력센서 데이터는 시그널 1번이다. 각 CAN 시그널에 대해, 계산된 FlexRay 네트워크상의 데드라인을 사용하여 사이클 그룹을 할당하면 표 3과 같고 압력센서 신호는 사이클 그룹 1에 속한다. 표 4는 각 시그널을 사이클 그룹에 맞게 패킹한 결과이다. 두 개의 프레임 ID를 사용하면 FID 1에서는 사이클 그룹 2의 메시지 하나와 사이클 그룹 3의 메시지 두 개를 사용하고, FID 2에서는 사이클 그룹 1의 메시지 하나를 사용한다. 프레임 ID를 하나를 배당받은 경우에는 해를 찾을 수 없다. 그림 3은 전체 시스템과 게이트웨이를 나타낸 사진이다.

표 2. CAN 시그널의 데드라인과 데이터 크기

Table 2. Deadlines and data sizes of each CAN signals

Signal no.	Period (ms)	CAN Deadline (ms)	Total Deadline (ms)	Data Size (Byte)
1	5	4	10	5
2	5	4	10	8
3	5	4	10	6
4	8	6	12	8
5	10	8	14	4
6	10	8	14	8
7	40	20	26	8
8	50	40	46	8
9	100	50	56	6

표 3. CAN 신호의 사이클 그룹
 Table 3. Cycle group of CAN signals

Signal no.	CAN WCRT (ms)	Deadline - WCRT _{CAN} (ms)	Cycle Group
1	2.35	7.65	1
2	2.08	7.92	1
3	1.46	8.54	1
4	1.32	10.68	2
5	2.47	11.53	2
6	1.92	12.08	2
7	2.63	23.37	3
8	2.77	43.23	4
9	2.77	53.23	4

표 4. 패킹 결과
 Table 4. Packing result

Signal no.	FID	Message No.	Cycle Group	Packed Data Size
1	2	1	1	19
2	2	1	1	19
3	2	1	1	19
4	1	3	2	20
5	1	3	2	20
6	1	3	2	20
7	1	2	3	14
9	1	2	3	14
8	1	1	3	8

차량내에서 저가의 시스템은 CAN에 고속 통신이 필요한 실시간 제어장치는 FlexRay에 연결될 것으로 예상되고 있다. 제작된 제어시스템은 BLDC모터와 선형 스테이지로 구성되어 있다. 이 때 센서는 CAN 네트워크에, 액추에이터와 제어기는 FlexRay에 분산되어 연결되어 있으며, 센서 정보가 액추에이터에 전달되는 시간 지연이 제어 안정도에 영향을 미친다. 우선 MATLAB/Simulink와 접촉압력 시스템 및 시간 지연 모델을 사용하여 접촉압력 시스템이 안정적으로 제어 가능한 최대 허용 지연시간을 구하고 CAN 노드에 연결된 정보를 각각의 허용 지연시간 안에 FlexRay 노드로 전달하기 위한 게이트웨이를 구현하였다. FlexRay는 연결된 모든 노드들이 전역 파라미터에 따라 설계되어야 하므로, 게이트웨이에서의 설계 가능한 파라미터는 연결된 CAN 네트워크 파라미터와 FlexRay 프레임 ID가 주어졌을 때 슬롯을 통해 전달되는 메시지들의 반복 주기와, 사이클 오프셋 정도이다. 본 연구에서는 슬롯의 사이클을 2분할하여 CAN 노드들로부터의 데이터들이 각각의 테드라인을 넘지 않도록 패킹하여 전달할 수 있는 패킹 알고리즘을 제안하였다. 이러한 패킹 알고리즘은 이중 네트워크에 분산되어 있는 제어시스템의 안정적 제어에 유용할 것으로 생각된다.

V. 결론

본 논문에서는 차량내 네트워크인 FlexRay와 CAN 시스템이 상호 연결된 액추에이터의 네트워크 기반 접촉압력 제어를 구현하였다.

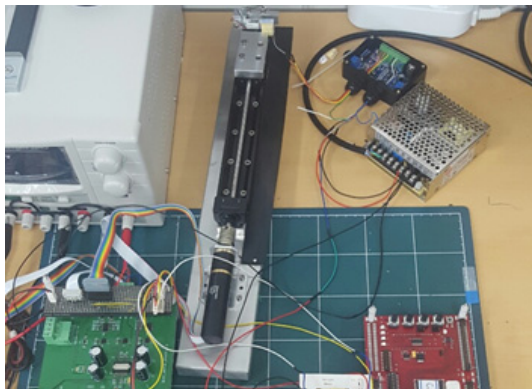


그림 3. 압력 제어 액추에이터 및 게이트웨이
 Fig. 3. Pressure control actuator and gateway

References

- [1] JeongHoon Park and Chan-Woo Moon, "Design and Implementation of a FlexRay-CAN gateway for Real-Time Control", The journal of the institute of internet, broadcasting and communication, vol 14, no 2, pp 53-58, 2014
 DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.2.53>
- [2] FlexRay Communications System Protocol Specification Version 3.0.1, FlexRay Consortium, 2010
- [3] S. Shaheen, D. Heffernan, and G. Leen, "A gateway for time-triggered control networks," Microprocessors and Microsystems, vol. 31, no. 1, pp. 38 - 50, 2007
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2006.07.003>
- [4] S.-H. Seo, J.-H. Kim, S. Hwang, K. H. Kwon, and

- J. W. Jeon, "An evaluation of the FlexRay-CAN gateway-embedded system in the HEV test bench," in Industrial Electronics, IEEE International Symposium on, 2009, pp. 664 - 669
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2009.5214501>
- [5] H. Li, H. Zhang, D. Peng, and W. Huang, "Design and application of communication gateway based on FlexRay and CAN," in International Conference on Electronic Computer Technology, 2009, pp. 664 - 668.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECT.2009.99>
- [6] Schmidt, Ece Guran, et al. "Performance evaluation of FlexRay/CAN networks interconnected by a gateway." International Symposium on Industrial Embedded System (SIES). IEEE, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/SIES.2010.5551395>
- [7] Robert I. Davis and et al. "Controller Area Network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised", Real-Time Systems April 2007, Volume 35, Issue 3, pp 239 - 272
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11241-007-9012-7>

저자 소개

김 나 연(준회원)



- 2015년 2월 : 국민대 전자공학부 학사
- 2017년 2월 : 국민대 전자공학부 석사
- <주관심분야 : 차량전자, 제어시스템>

문 찬 우(정회원)



- 2001년 8월 : 서울대학교 공학박사
- 2006년 9월 : 국민대 전자공학부 교수
- <주관심분야 : 차량전자, 지능로봇>