

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.3.677>

JCCT 2023-5-78

계층적 네트워크 기반 다중 모터 제어기의 안정도 분석

Stability Analysis of Multi-motor Controller based on Hierarchical Network

문찬우*

Chanwoo Moon*

요약 인간형 로봇을 구동하기 위해서 로봇 내부에는 많은 수의 모터와 센서가 사용된다. 다수의 구동기를 연결할 때 생기는 배선의 문제를 해결하기 위해 통신 네트워크에 기반한 제어기를 사용해왔는데 구성 비용면에서 유리하고, 신뢰성이 높은 통신 프로토콜인 CAN이 주로 사용되었다. 제어기의 구조 측면에서 상위 제어기에 알고리즘을 탑재하기 쉬운 속도 제어형 구조가 선호되고 있는데, 이때 CAN의 낮은 통신 대역폭이 문제가 되며, 충분한 통신 대역폭을 얻기 위해 이전에는 다수의 CAN 네트워크로 분리해서 통신망을 구성하였다. 본 논문에서는 높은 통신 대역폭을 얻기 위해 고속의 FlexRay와 저속의 CAN 통신망이 계층적으로 연결된 다중 모터 제어 시스템에 대해 전송시간 지연에 대한 안정도 분석을 수행하고 허용된 전송시간 내에 센서 정보와 구동 신호를 전달하기 위한 게이트웨이의 구성과 노드 할당 방법에 관하여 연구한다. 제안된 계층적 네트워크 기반 제어시스템은 다중 모터제어 시스템의 제어성능을 높이고 안정도를 확보하는 데 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 다중 모터, 네트워크 기반 제어, 계층적 네트워크, 안정도

Abstract A large number of motors and sensors are used to drive a humanoid robot. In order to solve the wiring problem that occurs when connecting multiple actuators, a controller based on a communication network has been used, and CAN, which is advantageous in terms of cost and a highly reliable communication protocol, was mainly used. In terms of the structure of the controller, a torque control type structure that is easy to implement an advanced algorithm into the upper controller is preferred. In this case, the low communication bandwidth of CAN becomes a problem, and in order to obtain sufficient communication bandwidth, a communication network is configured by separating into a plurality of CAN networks. In this study, a stability analysis on transmission time delay is performed for a multi-motor control system in which high-speed FlexRay and low-speed CAN communication networks are hierarchically connected in order to obtain a high communication bandwidth, and sensor information and driving signals are delivered within the allowed transmission time. The proposed hierarchical network-based control system is expected to improve control performance because it can implement multiple motor control systems with a single network.

Key words : Multiple motor, Network based control system, Hierarchical network, Stability

*정회원, 국민대학교 전자공학부 교수 (제1저자)
서울대학교 전기공학부 박사
접수일: 2023년 3월 29일, 수정완료일: 2023년 4월 12일
게재확정일: 2023년 5월 8일

Received: March 29, 2023 / Revised: April 12, 2023

Accepted: May 8, 2023

*Corresponding Author: mcwnt@kookmin.ac.kr

Dept. of Electrical Engineering, Kookmin Univ, Korea

I. 서 론

인간형 로봇은 사람의 외형을 모사하여 가정이나 생산 현장에서 인간의 작업을 대신할 수 있는 로봇이다. 인간의 몸은 많은 관절로 이루어져 있으며, 이를 모사하는 인간형 로봇도 많은 수의 관절과 구동하기 위한 액추에이터를 가지고 있게 된다. 인간형 로봇과 같이 다수의 제어기가 사용되는 시스템에서는 제어 명령과 되먹임을 위한 센서 정보를 통신 네트워크를 통해 전송하는 경우가 대부분이며, 통신 시스템으로는 차량용 네트워크이자 많은 마이크로컨트롤러에 제어기가 내장된 CAN이 널리 사용되고 있다. CAN은 저비용으로 구현할 수 있고 전송 오류에 강인하지만, 최대 1Mbps의 느린 전송 속도와 적은 데이터 페이로드, 이벤트 트리거 프로토콜로 인하여 실시간 네트워크 기반 제어에는 한계가 있다[1]. 이러한 문제를 개선하기 위해 최대 10Mbps의 전송 속도와 이벤트 트리거 및 타임 트리거 프로토콜을 모두 지원하는 통신 프로토콜인 FlexRay [2]와 64 바이트의 전송 데이터 페이로드와 통상 5Mbps의 통신 속도를 갖는 프로토콜인 CAN FD가 개발되었다. 하지만 이들 통신 드라이버는 아직 차량제어 전용의 고성능 마이크로컨트롤러에만 내장되어 있어 하드웨어 구현 측면에서 모든 제어기에 사용하기는 적합하지 않다. 따라서 통신 환경 구축 비용을 줄이고 네트워크 기반 제어기의 성능도 확보하기 위해 고속 통신과 저속 통신 시스템이 연결된 계층적 구조를 사용하는 것이 경제적이다.

통신 네트워크로 실시간 제어를 하는 경우, 전체 시간 지연이 제어성능에 주요한 영향을 주게 된다. 이전 연구[3]에서, CAN과 FlexRay 이중 통신망으로 구성된 다중 모터 제어 시스템을 구성하고 전송을 위한 게이트웨이를 구현하였으나, 이로부터 얻을 수 있는 성능 지수에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 이외에도 많은 논문을 통해 CAN과 FlexRay가 서로 연결된 시스템에 관해 연구하였으나 실시간 제어에 대해서는 다루지 않았다[4-7]. 본 논문에서는 참고논문 [3]을 개선하여 계층적 이중 네트워크로 제어되는 다중 모터 제어 시스템에 있어서, 성능 지표와 전송 시간 지연의 관계를 구하고 이를 이용하여 성능 지표를 유지할 수 있도록 최대 허용 시간 지연 내에 구동 명령과 센서 정보를 전송할 수 있는 FlexRay-CAN 게이트웨이의 구성을 제시한다.

II. 로봇의 다중 모터제어 시스템

1. 다중 모터 제어 시스템의 구조

이중 통신 네트워크에 의해 구동되는 다중 모터 제어 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 마스터 제어기에서는 위치와 속도 제어기가 구동되고 슬레이브 제어기는 마스터 제어기로부터 토크 제어 신호를 전송받아 토크 제어기가 구동되며 실제 모터가 연결된다. 슬레이브 제어기의 속도 센서 정보는 저속 통신망인 CAN으로 슬레이브 제어기 중 하나인 게이트웨이에 전송, 취합되어 고속 통신망인 FlexRay 네트워크를 통해 마스터 제어기로 전송된다. 마스터 제어기에서 출력된 토크 지령은 FlexRay를 통해 게이트웨이에 전달되고 여기서 CAN 통신을 통해 각 슬레이브 제어기에 분배된다. FlexRay 네트워크에는 이러한 CAN 네트워크가 다수 연결된다.

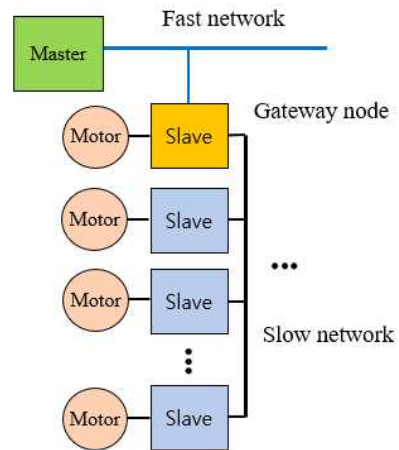


그림 1. 계층적 네트워크 기반 다중 모터제어 구성도

Figure 1. Block diagram of multi-motor control based on hierarchical network

로봇의 동작을 제어하는 마스터 제어기와 각 관절의 출력 토크를 구동하는 슬레이브 제어기의 기능은 그림 2와 같다. 그림에서 사용된 각 파라미터는 표 1과 같다. 마스터 제어기에서는 위치와 속도 제어가 이루어지고 슬레이브 제어기에서는 토크 제어가 이루어진다.

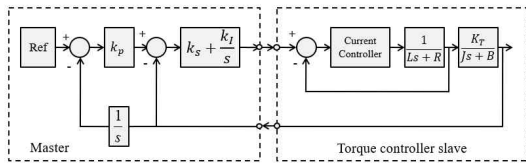


그림 2. 속도제어형 제어기
 Figure 2. Speed control type controller

표 1. 제어기 파라미터
 Table 1. Controller Parameters

기호	파라미터	사용된 값
k_p	위치제어기 비례 게인	-
k_s	속도제어기 비례 게인	-
k_I	속도제어기 적분 게인	-
K_T	모터 토크 상수	18.5e-3 N·m/A
L	모터 인덕턴스	0.038mH
R	모터 저항	0.24ohm
J	모터 관성 모멘트	54.5e-7 Kg·m ²
b	마찰 계수	1.0e-4 N·s/rad

2. 네트워크 기반 제어기의 대역폭과 안정도

제어 시스템의 대역폭은 제어기의 성능을 나타내는 지표로서, 대역폭이 클수록 응답속도가 빨라진다. 모터 제어에서 속도 제어기의 대략적인 대역폭은 식(1)과 같이 결정된다 [8].

$$\omega_s = \frac{k_s K_T}{J} \quad (1)$$

이 때, 속도 제어기의 적분게인은 식(2)와 같이 결정한다.

$$k_I = \frac{1}{5} k_s \omega_s \quad (2)$$

위치제어기의 대역폭은 속도제어기의 대역폭에 의해 보통 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{20}$ 으로 제한되며 k_p 가 대역폭이 된다. 제어 명령과 센서 정보를 통신 네트워크로 전송하는 경우 시간 지연이 발생하며 제어기의 대역폭이 크면 시스템이 불안해진다[9]. 그림 2의 구성에서 속도제어기와 위치제어기가 통신 지연에 의해 제어 대역폭에 제한을 받지만, 슬레이브 제어기의 대역폭 ω_c 는 제어가 슬레이브 제어기 내부에서 이루어지므로 통신지연의 영향을 받지 않는다. 네트워크로 구성된 제어기에 대해서 Zhang은 확장된 상태 공간 시스템을 구성하여 안정도 조건을 구하였다[9]. 본 연구에서도 Zhang의 방법에 따라 안정도를 보장하기 위한 최대 네트워크 시간 지연을 구한

다. 그림 2의 시스템은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -\omega_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_T}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \omega_c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (3)$$

$$y = (0 \ 1 \ 0)x$$

$$u = Kx = (0 \ k_I \ k_s)x$$

여기서 $x = (i \ \theta \ \dot{\theta})^T$ 이고 i 는 모터 전류, θ 는 회전 각도이다. 속도 제어기의 제어주기가 h 이라 하고 시간 지연 τ_k 가 $(l-1)h < \tau_k < lh$ 범위에 있을 때 확장된 상태 변수 z 를 다음 식(4)와 같이 선정한다.

$$z(kh) = [x^T(kh) \ u^T((k-l)h) \ \dots \ u^T((k-1)h)]^T \quad (4)$$

그러면 확장된 상태 공간 시스템은 식(5)와 같다.

$$z((k+1)h) = \tilde{\Phi}(k) z(kh) \quad (5)$$

$$\tilde{\Phi}(k) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(\tau'_k) & \Gamma_0(\tau'_k) & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -K & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

여기서

$$\tau'_k = \tau_k - (l-1)h$$

$$\Phi = e^{Ah},$$

$$\Gamma_0(\tau) = \int_0^{h-\tau} e^{As} B ds,$$

$$\Gamma_1(\tau) = \int_{h-\tau}^h e^{As} B ds$$

그리고 식에서 A, B 는 식 (3)에서의 시스템 행렬과 입력 행렬이다. 식 (5)의 확장 시스템이 안정한 최대 시간 지연을 τ_{max} 로 표시하기로 한다.

III. 이중 네트워크 기반 제어기

1. CAN 네트워크 시간 지연 분석

네트워크 기반 모터 제어 시스템에서 슬레이브 제어기의 센서 정보가 마스터 제어기로 전달된 후 제어기의 제어신호가 다시 슬레이브 제어기로 전달된다. 이 과정에서 발생하는 제어 시간 지연 τ_{total} 은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{total} = T_s + \tau_{stom} + T_m + \tau_{mtos} \quad (6)$$

여기서 T_s 와 T_m 는 각각 슬레이브 제어기와 마스터 제어기에서의 처리 시간이고, τ_{stom} , τ_{mtos} 는 각각 슬레이브에서 마스터로의 전송지연과 마스터에서 슬레이브로의 전송지연을 의미한다. CAN과 FlexRay의 이중의 통신망을 사용하므로, 각 전송지연은 두 네트워크상의 지연의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau_{stom} &= \tau_{stom(CAN)} + \tau_{stom(FlexRay)} \\ \tau_{mtos} &= \tau_{mtos(CAN)} + \tau_{mtos(FlexRay)}\end{aligned}\quad (7)$$

CAN 노드 n 에서, 전송 신호의 최악 시간 지연 $R_{n(CAN)}$ 은 다음과 같다 [10].

$$R_{n(CAN)} = J_s + w_s - qT_s + C_s \quad (8)$$

J_s : Jitter

w_s : Queuing delay

T_s : Minimum inter-arrival time

q : Message instance

C_s : Signal Communication time

2. FlexRay 네트워크 시간 지연 분석

FlexRay의 사이클 카운터는 64사이클까지 진행하며 전송되는 각 메시지는 프레임 ID (FID), 반복 주기 (Repetition Cycle) 그리고 사이클 오프셋(Cycle_offset)을 갖는다. FlexRay에서 허용된 반복 주기는 { 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20, 32, 40, 50, 64}이며 각각 몇 사이클마다 전송할 것인가를 의미한다. FlexRay 한 전송 슬롯을 2분할하여 {1, 2, 4, 8, 16, 32, 64} 사이클마다 전송하면 사이클 반복 주기가 커질수록 최악 응답시간은 증가하게 되지만 한 슬롯을 여러 노드가 공유할 수 있으므로 많은 노드를 연결할 수 있다[2]. 본 연구에서는 전송의 비동기 문제를 제거하기 위해 반복 주기를 $R_k = \{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64\}$ 로 제한한다. 이때 전송 메시지가 $2^{(C_k-1)} \in R_k$ 사이클마다 전송되는 경우 그 메시지의 소속 그룹을 C_k 사이클 그룹으로 정의한다. FlexRay는 타임 트리거 프로토콜이므로 C_k 그룹에 속하는 노드 m 에서의 최악 시간 지연 $R_{m(FlexRay)}(C_k)$ 은 전송할 슬롯을 놓치고 다음 전송 사이클에서 전송하는 경우이므로 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$R_{m(FlexRay)}(C_k) = 2^{C_k-1} C_{cycle} + C_n \quad (9)$$

여기서

C_{cycle} : FlexRay 1 사이클 주기

C_n : 메시지 전송시간

한 FlexRay C_{cycle} 은 정적 세그먼트, 동적 세그먼트, 심볼 윈도우, NIT (Network Idle Time)로 이루어지며 전송해야 할 노드의 수, 세그먼트의 구성 등에 따라 달라지는 설계 파라미터이다. 메시지 전송시간은 다음 식(10)과 같이 구해진다.

$$C_n = 2 \cdot gdActionPointOffset + \left[\frac{0.10015(B_f + 11)}{1 - 0.0015} \right] \quad (10)$$

gdActionPointOffset는 FlexRay 사양서에 정의되어있는 설계 파라미터이고 B_f 는 전송 메시지의 비트수이다. 실제 네트워크상의 지연은 최악 시간 지연보다 작지만, 최악의 경우에도 시스템이 안정하도록 설계 한다.

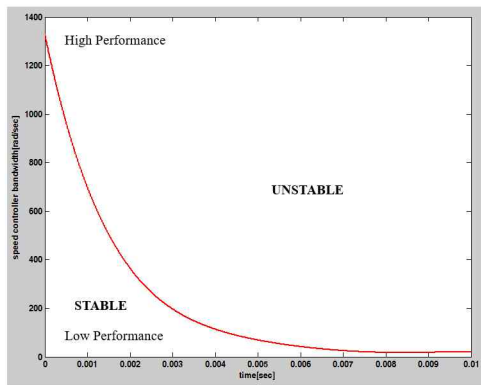
$$\begin{aligned}\tau_{total} &= T_s + \tau_{stom} + T_m + \tau_{mtos} \\ &\leq T_s + R_{s(CAN)} + R_{g(FlexRay)} + T_m \\ &\quad + R_{g(CAN)} + R_{m(FlexRay)} \\ &\leq \tau_{max}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 $R_{s(CAN)}$, $R_{g(CAN)}$ 는 각각 슬레이브 노드와 게이트웨이에서 CAN으로 전송시 최악 전송시간을 나타내고 $R_{g(FlexRay)}$, $R_{m(FlexRay)}$ 는 게이트웨이와 마스터 제어기에서 FlexRay로 전송시의 최악 전송시간이다.

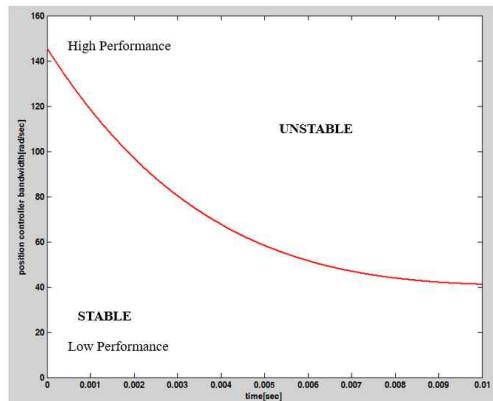
IV. 수치실험 및 결과

전체 시스템은 6개의 모터제어 슬레이브 노드로 구성되고 각 노드의 제어주기는 2 ms로 하고 센서 정보와 제어 지령값은 8바이트로 하였다. (5) 식과 표 1의 파라미터를 사용하여, 각 제어대역폭에 대해 시스템이 안정하게 되는 통신 시간 지연 시간을 구하면 그림 3-(a)와 같다. 그림에서 곡선의 아랫부분이 시스템이 안정한 영역이며 그래프의 위쪽으로 갈수록 제어성능이 우수하고 아래쪽은 긴 통신 지연은 허용하나 제어 성능이 낮게 되는 영역이다. 그림 3-(b)는 비교를 위해 일반적으로 사용되는 제어 형태인 위치 제어 기반 제어기의 그래프를 그린 것이다. 속도 제어에 비해 허용되는 통신 지연의 범위가 넓어 저속의 통신 프로토콜을 사용하는 경우에 적합하다. 표 2는 CAN 네트워크에 연결되어 있는 슬레이브 제어기의 최악 전송시간이다. CAN은 이벤트 트 드라이브 프로토콜이므로 우선순위가 낮은 노드들

은 최악 전송시간이 길어지는 데 연결된 노드의 수가 과도하게 많으면 지연시간이 급격히 늘어나고 전송을 못 하는 경우가 발생한다. 표 3은 FlexRay에서의 최악 전송시간이다. 한 사이클은 2 ms로, 노드들의 전송 데이터는 40 바이트로 설정하였다. 데이터의 전송 시급성에 따라 소속 사이클 그룹을 할당하는데, 가장 시급한 정보를 그룹 1에 할당하며 이 경우 최악 전송시간이 2.102 ms가 된다. 표 4는 슬레이브 노드를 1~4 사이클 그룹으로 할당했을 경우 각 노드의 최악 전송시간을 나타낸다. 그림 3의 결과에서 매스터 제어기를 속도제어 기반으로 구현하였을 때 얻을 수 있는 대역폭은 10 rad/s 이하이며 상용의 모터 제어기에 비해 상당히 낮으므로, 전체적인 네트워크 전송속도 향상이 필요하다. 위치 제어 기반으로 하는 경우 40 rad/s 정도가 된다.



(a) Speed control



(b) Position control

그림 3. 시간지연과 대역폭에 대한 안정 영역
 Figure 3. Stable region for time delay and bandwidth

V. 결 론

본 논문에서는 FlexRay와 CAN 통신망이 계층적으로 연결된 다중 모터 제어 시스템에서 각 모터 제어기가 안정성을 유지할 수 있는 최대 전송 지연 시간을 구하였다.

표 2. CAN 전송 데이터의 최악전송시간
 Table 2. Worst case delay of each CAN data

Signal no.	Period (ms)	Priority	Worst case delay (ms)	Data Size (Byte)
1	0.4	1	0.32	8
2	2	2	0.48	8
3	2	3	0.80	8
4	2	4	1.12	8
5	2	5	1.28	8
6	2	6	1.28	8

표 3. 각 사이클 그룹 별 FlexRay 최악 전송시간
 Table 3. Worst case delay for each cycle group of FlexRay

Cycle group	Worst case delay (ms)
1	2.102
2	4.102
3	8.102
4	16.102

표 4. 사이클 그룹에 대한 각 노드의 전송 지연
 Table 4. Transmission delay of each node for cycle group

node \ group	1	2	3	4
1	8.204	12.204	20.204	36.204
2	9.004	13.004	21.004	37.004
3	9.324	13.324	21.324	37.324
4	9.644	13.644	21.644	37.644
5	9.804	13.804	21.804	37.804
6	9.804	13.804	21.804	37.804

그리고, 이 허용된 지연 시간내에 통신망을 통하여 센서 정보와 제어 지령을 전송하는 방법을 제안하였다. 인간형 로봇과 같이 많은 수의 구동기가 장착되는 시스템에서는 네트워크 기반 제어를 사용하는 것이 일반적이었다. 그러나 통신 네트워크의 지연과 각 구동기의 대역폭에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. FlexRay는 실시간 제어를 목적으로 개발된 통신 프로토콜이어서 인간형 로봇을 구동하기 위한 충분한 전송 속도를 제공하지만, 고성능 마이크로컨트롤러에만 통신 모듈이 주변장치로 탑재되는 상황이어서 인간형 로봇

의 모든 액추에이터의 구동에 사용하기는 적합하지가 않다. 제안하는 제어기는 슬레이브 제어기의 센서 정보는 CAN으로 전송되어 슬레이브 게이트웨이에 의해 취합된 후 FlexRay 네트워크를 통해 마스터 제어기로 전송되고 마스터 제어기에서 제어 연산을 하는 데 사용되며, 마스터 제어기에서 출력된 토크 지령은 FlexRay를 통해 게이트웨이에 전달되고 여기서 CAN 통신을 통해 각 슬레이브 제어기에 분배된다. 슬롯의 전송 주기를 2분할하여 데이터들이 허용 시간 지연에 따라 전송하는 주기를 결정하고 각각의 허용 전송 지연을 넘지 않도록 슬롯은 선택하여 전달할 수 있는 슬롯 선택 알고리즘을 제안하였다. 이러한 전송 알고리즘은 계층적 네트워크에 의해 구동되는 다중 모터 제어 시스템의 네트워크 설계와 제어의 안정성 확보에 유용할 것으로 생각된다.

References

- [1] Robert Bosch GmbH, CAN specification version 2.0, (1991)
- [2] FlexRay Communications System Protocol Specification Version 3.0.1, FlexRay Consortium, 2010
- [3] 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 : 10.7236/JIIBC.2014.14.2.53
- [4] 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 : 10.1016/j.micpro.2006.07.003
- [5] 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: 10.1109/ISIE.2009.5214501
- [6] 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: 10.1109/ICECT.2009.99
- [7] 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: 10.1109/SIES.2010.5551395
- [8] S Kim, DC.AC.BLDC Motors, Bogdoo press, 2015
- [9] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability of networked control systems," IEEE Control Systems, vol 21, (2001), pp. 84-99. DOI: 10.1109/37.898794
- [10] 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: 10.1007/s11241-007-9012-7