

논문 2024-19-25

차량용 전자 제어 시스템에서 비접촉식 자기장 센서와 이중 버퍼 구조를 이용한 필터링 시간 최적화

(Filtering Time Optimization in Vehicle Electronic Control Systems Using a Non-Contact Magnetic Sensor and Dual Buffer Structure)

김민중, 박대진*
(Minjung Kim, Daejin Park)

Abstract : The automotive industry is transitioning from traditional internal combustion engines to systems powered by motors, batteries, and various electronic control units. Central to this shift is the micro-controller unit, which processes data from various sensors for real-time environmental awareness and control. This paper explores using non-contact magnetic sensors for sensing vehicle inclination as part of a digital twin implementation. Unlike optical or contact sensors, non-contact magnetic sensors offer robust performance in challenging environments, providing consistent and reliable data under varying conditions. To optimize real-time data processing, we propose a double buffer structure to enhance digital signal processing performance in embedded systems. Experiments using a custom sensor-integrated board demonstrate that the double buffer structure with direct memory access-enabled serial peripheral interface significantly reduces data processing time and improves noise reduction filtering. Our results show that the proposed system can greatly enhance the reliability and accuracy of sensor data, crucial for real-time vehicle control systems. In particular, by using the double buffer structure proposed in this paper, it was possible to secure 8.27 times more data compared to raw data, despite performing additional filtering. The techniques outlined have potential applications in various fields, offering enhanced monitoring and optimization capabilities, thus paving the way for more advanced and efficient vehicle control technologies.

Keywords : Automotive, Embedded system, Digital Signal Processing, Micro-controller unit, Filtering

1. 서론 및 관련 연구

최근 자동차 산업은 내연기관 중심의 전통적인 방식에서 벗어나 모터, 배터리 및 다양한 전자 제어 장치로의 전환을 꾀하는 변화에 직면해 있다 [1, 2]. 이러한 변화는 사용자의 안전성과 편의성을 높이는 데 핵심적인 역할을 하는데, 근래의 패러다임 변화의 중심에는 마이크로컨트롤러 유닛 (Micro-controller unit, MCU)가 있다 [3]. MCU는 차량 내부의 다양한 센서 데이터를 수집하고 처리하며, 이를 기반으로 실시간으로 환경을 인식하고 제어 명령을 실행하는 중추적인 역할을 수행한다 [4].

이와 맞물려 최근 들어 자기장 센서를 이용한 비접촉식 센싱 기술이 부각되고 있다. 이 기술은 장비의 동작을 비접촉으로 관측할 수 있어 디지털 트윈 기술과 접목하기에 용

이하다 [5, 6]. 디지털 트윈 기술은 실제 장비의 동작을 디지털 모델로 만들어 분석하고 최적화하는 데 유용한데, 본 연구의 최종적 목적은 비접촉식 센싱 기술을 이용해 차량의 디지털 트윈화를 이루어내는 데 있다 [7, 8]. 차량 내부 부품이나 장비는 광학 센서나 접촉식 센서로 동작을 관측하기 어려운 경우가 많다. 광학식 센서는 조명 조건, 비용, 데이터 크기 등의 문제가 있으며, 접촉식 센서는 장비 동작에 영향을 미치거나 이물질로 인한 외부 잡음이 발생할 여지가 많다. 이에 따라 자기장 센서와 같은 비접촉식 센서 연구에 대한 관심이 증가하고 있으며, 실시간 처리를 위한 경량화 연구도 활발하게 이루어지고 있다 [9]. 본 논문에서는 비접촉식 자기장 센서를 이용해 차량의 기울기를 관측하기 위한 기법을 다룬다.

센서로부터 받은 데이터들을 실시간으로 처리하기 위해서는 디지털 신호 처리 (Digital Signal Processing, DSP)의 역할이 필수적이다. DSP는 고속의 연산 능력과 효율적인 데이터 처리 능력을 갖추고 있어, 다량의 센서 데이터를 빠르게 분석하고 필터링하며, 필요한 경우 데이터의 압축과 복원을 수행할 수 있다. 그러나 임베디드 환경에서의 DSP 활용에는 여러 제약이 따른다 [10]. 먼저, 임베디드 환경에서는 공간과 전력 소비에 제한이 있어, 고성능 DSP

*Corresponding Author (boltanut@knu.ac.kr)
Received: Jul. 10, 2024, Revised: Jul. 31, 2024, Accepted: Aug. 13, 2024.
M. J. Kim: Kyungpook National University (Master Student)
D. J. Park: Kyungpook National University (Assoc. Prof.)
※ 본 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단 (NRF-2018R1A6A1A03025109, 10%, NRF-2022R111A3069260, 10%)의 지원을 받아 수행된 연구임
※ 본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원 (No. 2021-0-00944, 30%, No. 2022-0-01170, 20%, No. RS-2023-00228970, 30%)의 지원을 받아 수행된 연구임

를 적용하는 데 어려움이 있다. 또한 차량 내부의 온도와 진동 등 열악한 환경에서도 강인하게 동작해야만 한다. 마지막으로, 실시간 처리가 필수적인 만큼, 시스템 지연을 최소화하고 신뢰성을 확보해야 한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 이중 버퍼 구조를 활용해 임베디드 환경에서 고성능 DSP를 최적화하는 방안을 고찰한다. 이중 버퍼 구조는 두 개의 버퍼를 번갈아 사용해 데이터를 읽고 쓰는 방식으로, 데이터 처리의 효율성을 극대화하고 시스템 지연을 최소화하는 데 유리하다 [11, 12]. 이를 통해 실시간 데이터 처리가 요구되는 시스템에서 DSP의 성능을 극대화할 수 있다. 이중 버퍼 구조를 적용하면 데이터 입력과 처리가 동시에 이루어져, 데이터 처리 속도가 크게 향상된다. 이로 인해 센서로부터 수집된 대량의 데이터를 신속하게 분석하고 필터링하며 최종적으로는 안정적이고 신뢰성 있는 제어 명령을 실행할 수 있다. 따라서 본 연구는 차세대 자동차 전자 제어 시스템에서 이중 버퍼를 통해 DSP의 효율성을 극대화하고 실시간 데이터 처리 성능을 향상시키는 데 그 의의가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자기장 센서의 구조와 측정 방식을 서술한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 이중 버퍼 구조를 다룬다. 4장에서는 이중 버퍼를 사용한 실험을 바탕으로 기존의 방식과 성능을 비교한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 자기장 센서의 구조 및 동작

2.1 자기장 센서 기본 구조

그림 1은 자기장 센서의 핀 맵과 각 축이 센서의 어느 방향을 가리키는지를 보여준다.

해당 핀 맵에서 센서의 통신을 담당하는 부분은 MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out)으로, SPI (Serial Peripheral Interface) 통신을 통해서 MCU에서 받아들인 명령을 처리한다. 우선 MCU에서 센서에 명령어를 보내면서 센서의 동작이 시작되므로, MCU가 마스터가 되고, 센서는 슬레이브가 된다. 이때, MCU에서 센서에 명령을 보내는 핀은 MOSI이고, 명령을 받고 동작을 수행한 이후 MCU로 데이터를 보낼 때는 MISO를 사용한다.

그러나 보드에서 명령어를 보낸다고 해서 센서에서 바로 응답할 수 있는 것은 아니다. 명령어 처리와 데이터 전송 사이에 일정한 딜레이 시간이 필요한데, 이 딜레이 시간은 센서가 명령어를 정확히 해석하고 적절한 데이터를 준비하는 데 필요한 시간으로, 이를 고려한 시스템 설계가 이루어져야 한다.

2.2 볼 조인트 동작 및 측정 구조

센서가 자기장의 세기를 측정하기 위해서 사용한다면, 어떤 물체로 자기장의 세기를 조절해 환경의 변화를 감지할지가 중요하다. 본 연구에서는 볼 조인트를 사용하며, 그림 2에서는 볼 조인트의 구조에 대해 간략히 설명한다.

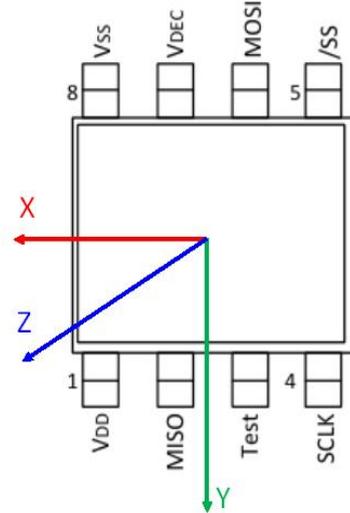


그림 1. 자기장 센서 핀 맵 및 축 방향 설정
Fig. 1. Magnetic field sensor pin map and axial direction

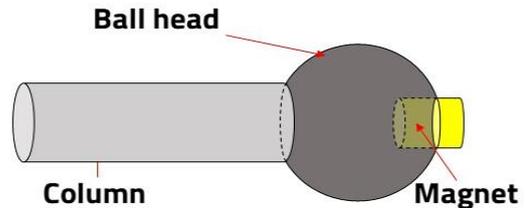


그림 2. 볼 조인트의 구조
Fig. 2. Structure of ball joint

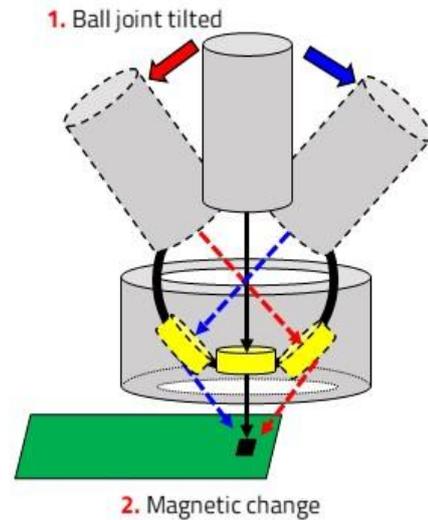


그림 3. 볼 조인트를 활용한 센서 측정 환경
Fig. 3. Sensor measurement environment using ball joint

볼 조인트는 기둥 (Column)과, 볼 헤드 (Ball head)와, 자석 (Magnet)으로 이루어져 있다. 볼 헤드 안에 자석이 내장되어 있어 이를 센서에 가져다 대면 주위 자기장의 변화를 센서가 감지하는 형식이다.

그림 3에서는 볼 조인트를 활용해 자기장 센서의 값을 받아 오는 환경을 묘사하였다.

볼 조인트가 센서와 비접촉 상태로 자기장에 영향을 미치게 된다. 이때, 볼 조인트의 볼 헤드를 센서와 비접촉 상태로 유지 시켜주는 장치가 필요하다. 비접촉 상태로 유지된 볼 조인트가 외부의 흔들림에 의해 기울어질 경우, 볼 헤드 내부에 있는 자석이 센서와 이루는 각도, 그리고 거리가 달라지면서 자기장 변화를 유발한다. 이 변화를 센서값으로 인지함으로써 비접촉식 자기장 센서로 외부의 변화를 효과적으로 감지해낼 수 있다.

III. 이중 버퍼 구조

3.1 DMA를 활용한 SPI

본 논문에서는 MCU 및 자기장 센서를 비롯한 여러 센서들이 결합되어 있는 시제작된 보드를 사용하였다. 해당 보드의 경우 비접촉식 자기장 센서와 더불어 온도, 소리, 가속도, 지자기 센서 등을 포함하고 있다. 실제 차량 제어 시스템 내부에서 주행 상황에 차량의 상태를 파악하는 목적으로 만들어졌고, 코어로는 STMicroelectronics 사의 STM32L476QGI3를 싱글코어로 사용하고 있다.

자기장 센서에서 나오는 데이터를 그대로 처리할 경우, 자석의 위치가 크게 변하지 않더라도 노이즈로 인해 데이터가 불안정해질 수 있다. 이러한 데이터는 신호의 정확한 해석을 방해하며, 사용자가 의도했던 제어 방향과 다른 동작을 하므로 안정적인 동작에 큰 위협이 된다. 차량뿐만 아니라 임베디드 환경에서는 실시간으로 다양한 변수와 복잡한 환경을 정확하게 판단해야 하므로 노이즈 감소 필터링은 필수적이다.

필터링 기술은 원치 않는 노이즈를 제거하고 유용한 신호를 추출하는 과정으로 시스템 성능을 향상시키고 데이터의 신뢰성을 높인다. 노이즈 감소 필터링의 효과를 극대화하기 위해서는 샘플링 주파수가 매우 중요하다. 샘플링 주파수는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 때 초당 측정하는 횟수를 의미하며, 샘플링 주파수가 높다는 것은 동일 신호에 대해 더 많은 데이터를 참고할 수 있다는 뜻이므로 원본 신호를 더 정확하게 샘플링할 수 있다.

또한, 원본 신호와 비교하면 노이즈는 고주파 대역에 분포되는 경향이 있으므로, 샘플링 주파수가 높을수록 저주파 대역의 원본 신호와 고주파 대역의 노이즈가 잘 분리되어 필터 설계에 유리하다. 식 (1)의 나이퀴스트 샘플링 이론(Nyquist Sampling Theorem)에서도 알 수 있듯이, 샘플링 주파수 f_s 는 신호의 최고 주파수 성분 f_{max} 의 두 배 이상이어야 에일리어싱이 발생하지 않는다 [13].

$$f_s \geq 2f_{max} \tag{1}$$

따라서 샘플링 주파수를 높게 유지할 수 있다면, 필터링의 정밀도가 증가하고, 에일리어싱 현상을 방지할 수 있으며, 실시간 데이터 처리 시스템의 성능이 크게 향상된다.

표 1. 센서에서 하나의 값을 받아오는 시간 비교
Table 1. Time to get single value from the sensor

	Normal SPI	SPI using DMA
Time	4 ms	26 us

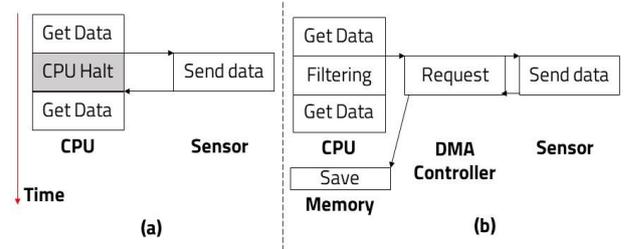


그림 4. SPI와 DMA를 사용한 SPI의 차이: (a) SPI 사용 시 CPU 유휴 상태, (b) DMA 사용 시 CPU 낭비 감소
Fig. 4. The difference between using SPI and SPI with DMA: (a) CPU idle state when using SPI, (b) Reduced CPU overhead when using DMA

2장에서 언급한 바와 같이 센서와 보드는 SPI로 명령어와 데이터를 주고받는다. 데이터를 보드에서 받은 이후 호스트 PC로 데이터를 전송할 때는 UART 통신을 이용하였다. 보드에서는 DMA (Direct Memory Access)를 활용한 SPI를 지원하기 때문에, 이를 적극적으로 활용하였다.

표 1에서는 DMA를 사용하는 것이 일반 SPI 통신을 사용하는 것에 비해 얼마나 큰 시간적인 이득을 가져오는지 보여준다. DMA를 사용하면 메모리와 주변 장치 간의 데이터 전송을 CPU (Central Processing Unit)의 개입 없이 수행할 수 있게 된다. 따라서 CPU가 데이터 전송 작업에 할당되는 시간을 절약하고 필터링과 같은 연산 작업에 집중할 수 있게 된다.

그림 4는 일반 SPI와 DMA를 사용한 SPI의 차이를 보여준다. 그림 4 (a)에서 설명하는 일반 SPI의 경우 데이터를 요청하는 명령어를 보낸 뒤 센서에서 값이 올 때까지 CPU가 대기 상태로 기다려야 하는 반면, 그림 4 (b)의 DMA를 사용하면 데이터를 요청한 이후의 동작은 DMA 컨트롤러에서 담당하기 때문에 센서에 데이터를 요청한 이후 필터링 혹은 다른 작업에 CPU 시간을 추가적으로 할당할 수 있다. 결론적으로 DMA의 사용은 센서와의 통신 시간도 획기적으로 줄이면서도 CPU를 효율적으로 사용하게 해 줌으로써 전체 시스템의 성능도 향상된다.

3.2 이중 버퍼 구조

본 논문에서는 3.1절에서의 높은 샘플링 속도를 신뢰성 있는 센서 데이터를 확보하는 데 활용할 수 있도록 이중 버퍼 구조를 제안하며, 그림 5는 이중 버퍼 구조의 간략한 동작을 보여준다.

그림 5 (a)에서는 처음 보드가 구동한 직후부터 타이머 인터럽트 안에서 DMA에 데이터를 요청하는 신호를 보내는

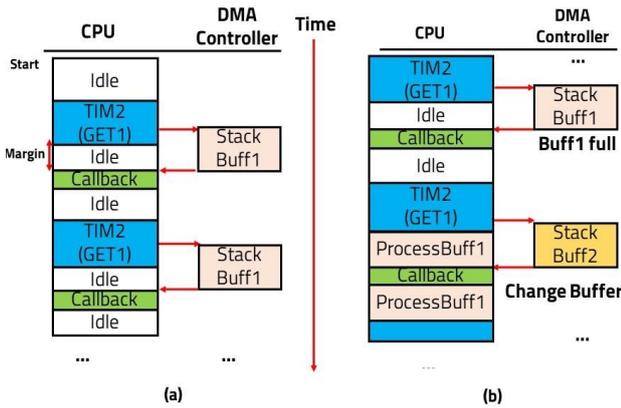


그림 5. 이중 버퍼 구조의 동작: (a) 첫 버퍼가 가득 찰 때까지 CPU의 대기, (b) 첫 버퍼가 가득 찬 이후 첫 버퍼 값의 필터링과 동시에 두 번째 버퍼에 데이터 수신

Fig. 5. Operation of a double buffer structure: (a) CPU waiting until the first buffer is full, (b) Filtering the values of the first buffer when the first buffer is full while simultaneously receiving data into the second buffer

과정을 보여주고 있다. 이때, 첫 번째 버퍼가 가득 찰 때까지 계속 데이터를 요청하게 된다. 첫 번째 버퍼가 차기 전까지는 필터링할 데이터가 없으므로, CPU는 유휴 (Idle) 상태에서 대기하게 된다. DMA로 첫 번째 버퍼에 데이터를 쌓는 일련의 과정을 그림 5 (a)에서는 Stack Buff1으로 통칭하였다.

그림 5 (b)에서는 첫 번째 버퍼가 가득 찼을 때부터는 가득 찬 버퍼의 필터링을 시작하는 모습을 보여준다. 기존 방법 대비 개선점은 두 번째 버퍼에 데이터가 쌓임과 동시에 다발적으로 첫 번째 버퍼의 필터링이 이루어진다는 점이다. 어느 한 버퍼에 데이터가 모두 쌓이면 필터링을 시작하게 되는데, 이 과정을 ProcessBuff1으로 통칭하였다. 동시에 다른 버퍼에 새로운 데이터를 DMA로 채우게 된다.

버퍼를 두 개로 제한한 이유는 센서와 DMA 통신이 동시에 다발적으로 이루어질 수 없기 때문이다. 특히, 본 연구에서 사용된 보드뿐만 아니라 많은 차량용 MCU는 싱글코어기반으로 동작하므로, 다수의 버퍼를 사용한다고 해서 동시에 여러 버퍼에서 데이터를 전송하거나 필터링할 수 없다. 오히려 필터링을 위해 대기 중인 버퍼가 발생할 수 있고, 이는 실시간성을 요구하는 시스템의 특성상 불필요한 지연을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이중 버퍼 구조를 채택해 성능을 최적화하는 것이 더 효율적이라고 판단하였다.

따라서 본 연구의 의의는 DMA를 활용한 SPI로 확보한 실시간성을 필터링을 통해 센서로부터 받아온 값에 대한 신뢰도를 높이는 데 사용함으로써 실시간성을 크게 떨어뜨리지 않음과 동시에 정확도를 보장할 수 있는 구조를 제안한 데 있다.

3.3 필터링 적용

3.1절에서 제안한 DMA를 활용한 SPI를 사용함으로써

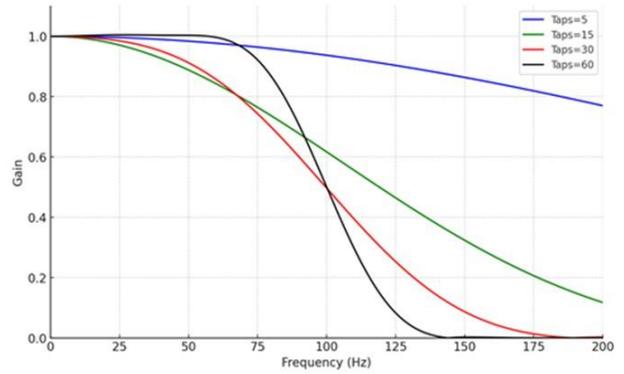


그림 6. 탭 수에 따른 저주파 통과 필터의 응답 차이
 Fig. 6. Low pass filter frequency for response for different number of taps

확보한 추가적인 CPU 시간을 효과적으로 활용하는 방법은 필터링에 더 많은 시간을 투자하는 것이다 [14]. 그림 6은 버터워스 저주파 통과 필터 (Butterworth Low-Pass Filter) 에서 차수에 따른 주파수 응답을 나타낸다.

그림 6에서 볼 수 있듯, 차수가 높아짐에 따라 이상적인 필터에 가까워지지만, 탭 수가 증가하게 되어 필터링 연산에 걸리는 시간도 증가한다 [15]. 본 논문에서는 3.1절의 DMA를 활용한 SPI 통신 기법과 3.2절의 이중 버퍼 구조의 장점을 통합해 필터 설계에서 적은 탭 수로도 높은 필터링 성능을 보여주는 방법을 제안한다.

신호의 샘플링 주파수가 높아질수록 노이즈 성분이 신호의 대역폭에서 멀어지게 되어, 버터워스 저주파 통과 필터를 사용할 경우 적은 탭 수의 필터로도 효과적으로 노이즈를 제거할 수 있게 된다. 이는 신호의 실시간성을 높일 뿐만 아니라 전체 시스템에서의 효율성을 개선하는 데 기여할 수 있다.

어떤 필터를 사용할지는 사용하는 센서나 환경에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서 제안한 이중 버퍼 구조에서는 탭 수가 30인 평균 필터까지 실시간 처리가 가능함을 확인하였으나, 차후 x, y, z 원시 데이터로부터 자기 각에 대한 추가적인 연산이 요구될 수 있으므로 최소한의 연산량과 적절한 수준의 필터 효과를 확보할 수 있도록 탭 수가 5인 평균 필터를 사용하였다.

본 논문에서는 이동 평균 필터를 사용했지만, 그림 6을 일례로 다른 필터들에도 이중 버퍼 구조는 충분히 적용될 수 있다. 따라서 시스템의 특성과 요구사항에 따라 적절한 필터를 선정하고 이중 버퍼 구조를 사용한다면, 효율적인 데이터 처리와 필터 설계 양면에서 모두 이득을 볼 수 있다.

IV. 실험

실험에 영향을 주는 요인은 세 가지이다: (1) 필터 종류, (2) 타이머 인터럽트 주기, (3) 버퍼의 크기.

먼저 어떤 필터를 사용해 데이터를 필터링할 것인지 결

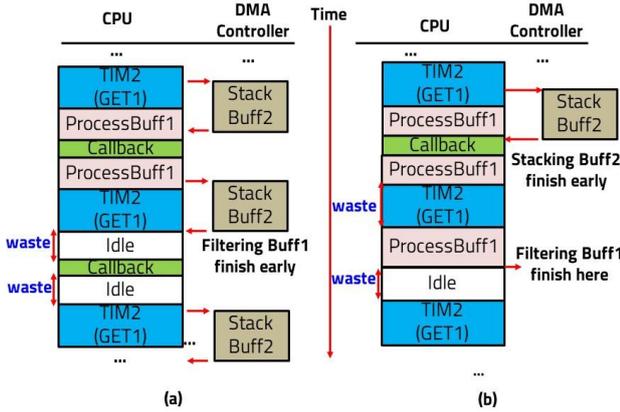


그림 7. 변인 통제 실패에 따른 오버헤드: (a) 필터링이 더 빨리 끝난 경우, (b) 버퍼에 데이터 수신에 더 빨리 끝난 경우
 Fig. 7. Overhead due to failure in controlling variables: (a) When filtering finishes faster, (b) When data reception into the buffer finishes faster

정해야 한다. 상기에 언급한 대로 유한 임펄스 응답 (FIR) 필터에서는 탭 수가 많아질수록 필터링에 걸리는 시간이 오래 걸리기 때문이다. 다음으로는 타이머 인터럽트의 주기를 결정해야 한다. 주기가 길어질수록 전체 CPU 시간 중 필터링에 사용되는 시간의 비율이 높아질 것이기 때문이다. 주기가 지나치게 짧아질 경우 DMA에서 값을 받아오기도 전에 새로운 값을 요청해 시스템에 오류가 생길 가능성도 존재하기 때문에, 최소한의 주기는 보장되어야 한다. 마지막으로, 각 버퍼의 크기를 결정해 주어야 한다. 버퍼의 크기가 클수록 버퍼가 가득 차는데 걸리는 시간이 늘어날 것이고, 그에 따라 필터를 계산하는 시간은 보장되었지만 실시간성을 포기하게 될 것이다. 그림 7에서는 최적화되지 않은 변인들을 사용하면 CPU 시간이 낭비될 수 있음을 보여준다.

그림 7 (a)에서는 버퍼의 크기가 너무 크거나, 타이머의 주기가 너무 길어 버퍼에 데이터가 다 쌓이기 전에 필터링 계산이 전부 끝나버리는 경우를 보여준다. 이 경우 버퍼가 다 쌓일 때까지 CPU가 유휴 상태로 기다려야 하므로 낭비가 발생한다. 그림 7 (b)에서는 이와 반대로, 필터링에 필요한 계산량이 너무 많거나, 타이머의 주기가 짧거나, 버퍼의 크기가 너무 작을 경우 필터링 계산이 완료되기 전에 버퍼가 가득 차서 타이머에서 추가적으로 데이터를 요청하는 명령을 보내지 않는 상황을 보여준다. 이 경우 필터링이 끝날 때까지 새로운 데이터를 요청하지 않으므로 실시간성에 더 손해를 보는 경우가 생긴다. 따라서 그림 7의 두 경우와 같은 상황이 발생하지 않도록 세 가지 변인을 사용자의 환경에 맞게 최적화하는 과정이 필요하다.

4.1 필터 설정 및 변인 통제

본 논문에서는 3.2절에서 언급한 대로 탭 수가 5인 이동 평균 필터를 사용해 값의 변화를 확인해 보았다. 그림 8은 이중 버퍼를 사용하면서 어떻게 이동 평균 필터가 작용하는지를 나타낸다. 컨볼루션 같은 슬라이딩 윈도우가 있다고

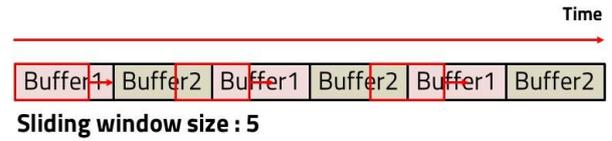


그림 8. 이중 버퍼 구조에서 이동평균 필터의 동작
 Fig. 8. Operation of a moving average filter in a double buffer structure

가정하면, 첫 번째 버퍼가 필터링을 마치고 동시에 두 번째 버퍼가 첫 번째 버퍼의 마지막 원소들과 한 윈도우 안에 들어가 필터링되어, 안정적인 필터링을 보여준다.

타이머 인터럽트의 주기를 1 ms로 고정하고 표 1의 SPI using DMA의 값을 받아오는 데 걸리는 시간이 26 us임을 감안하여, 필터링에 할당되는 시간을 974 us (1 ms-26 us)로 고정하였다. 이처럼 두 가지의 변인을 통제 한 이후에 버퍼 크기의 최적화된 값을 찾는 실험을 통해서 필터링을 거치지 않은 값에 대비한 변화를 살펴본다. 실험의 주안점은 어떤 필터를 사용하였는지가 아니라, 계산량이 많은 필터를 사용하더라도 다른 변인들을 조절해 시스템을 최적화할 수 있다는 데 있다.

4.2 버퍼 크기 설정

들어오는 데이터를 바로 필터링해 내보내지 않고, 데이터를 모아서 한 번에 처리한 이후 내보내는 방식을 사용함에 따라 실시간성에 대한 문제가 추가적으로 생기게 된다. 본 실험을 통해서 실시간성에 대한 문제가 이중 버퍼를 사용했을 때 생기는 이점보다 크지 않다는 점을 증명하고자 한다.

본 실험에서는 버퍼의 크기를 'n'으로 표기했는데, 이는 버퍼가 메모리에서 차지하는 공간보다 센서로부터 수집된 데이터의 개수가 필터링에 있어서 더 큰 영향을 미치고, 이러한 표기법이 실험의 목적과 더 적합하다고 판단하여 버퍼 하나의 블록 크기를 정수형의 크기인 4바이트로 제한하고, 버퍼의 크기를 저장할 수 있는 데이터의 개수로 나타내었다. 그림 9에서는 버퍼 크기에 따라 300개의 샘플링 데이터를 받는 데 걸리는 시간을 보여준다.

그림 9와 같이 버퍼의 크기가 시스템 전체의 성능을 최적화하는 특정 값으로 수렴함을 알 수 있다. 위의 조건에서는 버퍼의 크기가 50일 때 311ms가 소요됨으로써 최적화된 버퍼의 크기 값이 50임을 구할 수 있었다. 또한, 50 샘플이 쌓일 때마다 필터링이 진행될 것이므로, 약 50ms마다 50개의 데이터가 필터링을 거치게 되는데, 이는 실시간성에 큰 문제가 생기지 않는 수치라고 판단하여 버퍼의 크기를 50으로 고정하고 이후 실험을 진행하였고, 표 2에서는 실험이 진행된 시스템의 주요 파라미터 값들을 보여준다.

4.3 이중 버퍼 구조

그림 9에서의 실험 결과를 바탕으로, 버퍼 크기를 50으로 고정해 둔 이후 이중 버퍼 구조를 사용하지 않은 결과와 이중 버퍼 구조를 사용한 결과의 차이를 조명하기로 했다. 실

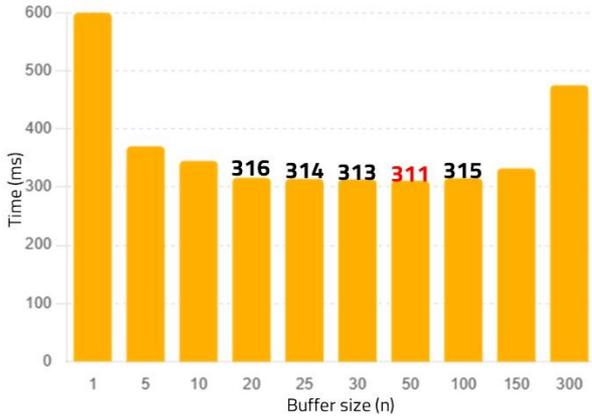


그림 9. 버퍼 사이즈에 따른 300개의 데이터 획득에 소요되는 시간 측정 결과

Fig. 9. Results of measuring the time required to acquire 300 data points depending on buffer size

표 2. 실험이 진행된 시스템의 주요 파라미터 값
Table 2. Parameter of the system used in the experiment

	Value
CPU Frequency	64 (MHz)
Buffer size	50 (n)
Buffering time	6.7 (ms)
Interrupt cycle	1 (ms)

험은 센서 위에 볼 조인트와 고정 지지대를 설치하고, 볼 조인트를 4초 동안 회전시키면서 센서로부터 받은 값들을 비교하는 방식으로 진행되었다. 그림 10은 실험이 진행된 환경을 간략하게 보여준다.

해당 구조에서 4초 동안 볼 조인트를 회전시킬 때, 볼 조인트가 약 3회 정도 회전하도록 회전 속도를 설정하였다. 본 실험은 차량 내부에 실제 비접촉식 자기장 센서가 부착되기 전 시뮬레이션 환경에서 진행된 실험으로, 센서가 설치된 후 예상되는 동작을 미리 검증하고, 이중 버퍼 구조의 효율성을 확인해 보기 위해 진행되었다.

그림 11은 이중 버퍼 구조를 사용할 때와 사용하지 않을 때의 차이를 극명하게 보여주는 실험 결과이다.

센서에서는 각 축에서의 자속 밀도를 밀리테슬라 (mT) 단위로 송신한다. 4초 동안 볼 조인트를 회전시키며 센서에서 측정된 데이터를 그래프로 나타내었다.

그림 11 (a)에서는 이중 버퍼 구조를 미사용했을 때의 결과를 보여준다. 해당 경우에는 4초 동안 292개의 샘플 데이터를 획득하였다. 또한, 4초 동안 약 3회를 회전하면서 각 회전마다 궤적에 오차가 생겨 실제로는 같은 궤적을 움직임에도 다른 궤적처럼 보인다. 따라서 센서로부터의 원시 데이터를 사용할 경우 노이즈가 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

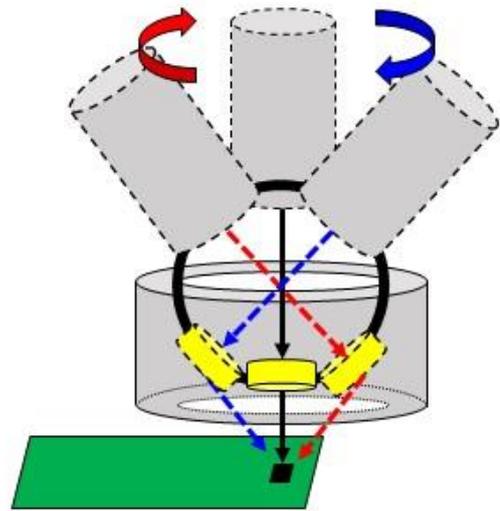


그림 10. 볼 조인트를 4초 동안 회전시킬 환경
Fig. 10. Environment with a ball joint rotated for 4 seconds

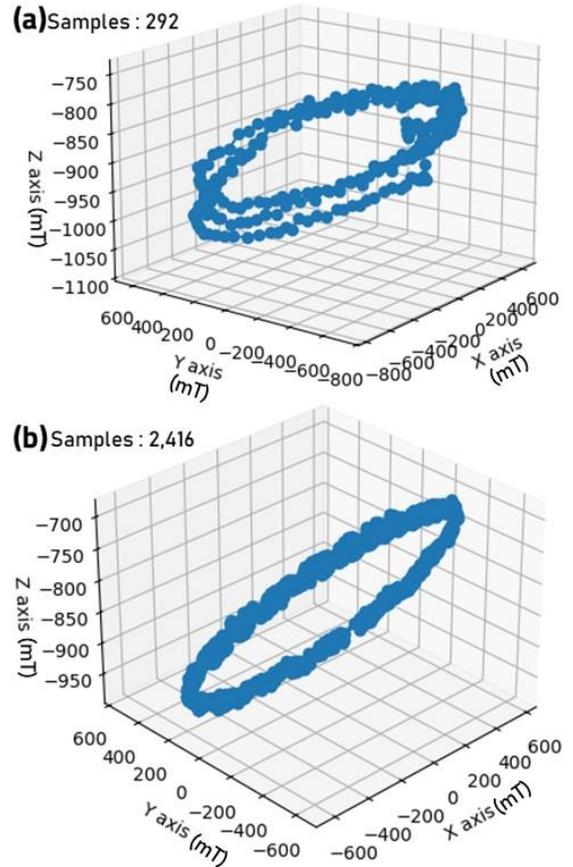


그림 11. 볼 조인트를 회전시키며 센서에서 측정된 값:
(a) 이중 버퍼 구조 미사용, (b) 이중 버퍼 구조 사용
Fig. 11. Measured values from the sensor while rotating the ball joint: (a) Without using a double buffer structure, (b) Using a double buffer structure

표 3. 실험 데이터에 대한 클러스터 밀도 분석 결과
Table 3. Cluster density analysis of experimental data

	Without Double Buffer	Using Double Buffer
Cluster Point	4	43
Noise Point	244	83

반면 그림 11 (b)에서는 이중 버퍼 구조를 사용했을 때의 결과를 보여준다. 4초 동안 2,416개의 데이터를 확보했으며, 이중 버퍼 구조를 미사용한 그림 11 (a)의 경우 대비 약 8.27배 많은 데이터를 확보하였다. 또한, 필터를 통해 3회의 매 회전에도 오차가 많이 감소해 거의 하나의 궤적처럼 보임을 알 수 있다.

오차가 얼마나 감소했는지를 정량적으로 비교하기 위해 실험 데이터로 클러스터 밀도 분석을 실시하였다. 클러스터 밀도 분석이란, 데이터 포인트들이 군집을 이루는 밀집도를 측정하는 방법으로, 데이터가 얼마나 밀집하게 그룹화되어 있는지를 분석하는 기법이다. 이 분석을 통해 데이터 포인트들이 군집을 이루는지, 혹은 산발적으로 분포되는지를 평가할 수 있다.

클러스터 밀도 분석은 노이즈를 분석하는 데 효과적인데, 데이터 포인트들이 모여있는 지역 (클러스터 포인트)과 떨어져 있는 노이즈 포인트를 구별할 수 있기 때문이다. 이를 통해 노이즈가 적은 클러스터를 식별하고, 노이즈 포인트를 골라내 시스템의 노이즈 감소 효과를 정량적으로 평가할 수 있다. 표 3에서는 각 데이터의 클러스터 밀도 분석 결과를 보여준다.

분석 결과, 이중 버퍼를 사용했을 때 클러스터 포인트의 개수가 244개로 사용하지 않았을 때의 4개에 비해 현저히 증가하였다. 이는 이중 버퍼 구조와 필터링을 사용하지 않았을 때, 동일하게 3회전을 하더라도 노이즈로 인해 데이터가 많이 군집하지 않는다는 것을 보여준다. 또한, 노이즈 포인트도 이중 버퍼를 사용했을 때 크게 감소하는데, 이는 이중 버퍼 구조가 필터링을 효과적으로 수행해 데이터의 군집도가 더 잘 이루어지고, 노이즈를 효과적으로 제거할 수 있음을 시사한다. 이 실험 결과는 이중 버퍼를 적용한 시스템이 노이즈 감소에 있어 유용한 접근법을 확인할 수 있게 해 준다.

V. 결론

본 논문에서는 자기장 센서를 통해 비접촉식으로 데이터를 수집하고, 이를 실시간으로 처리하여 차량 내부의 다양한 부품 및 장비의 동작을 디지털 모델로 전환하는 방법을 제안하였다. 특히, 이중 버퍼 구조를 도입해 DSP의 성능을 최적화함으로써 실시간 데이터 처리의 효율성을 극대화하였다.

연구 결과, DMA를 활용한 SPI 통신과 이중 버퍼 구조를 융합함으로써 데이터의 샘플링 주파수를 대폭 증가시킬

수 있었으며, 이로 인해 CPU 자원을 효율적으로 활용할 수 있었다. 이를 통해 노이즈 감소 필터링에 필요한 시간적 여유를 확보함으로써 센서 데이터의 신뢰성을 높이고, 실시간 처리 성능을 향상시킬 수 있었다. 실험 결과, 제안한 이중 버퍼 구조는 미가공된 원시 데이터 대비 동일한 소요 시간과 상황에서 8.27배 많은 데이터를 받아내면서도 노이즈 감소 측면에서 우수한 성능을 보였다. 클러스터 분석 결과, 노이즈 포인트가 원시 데이터 대비 60% 가량 감소하였다.

제안된 기법은 다양한 분야에서 응용될 수 있을 것으로 보인다. 먼저 스마트 팩토리에서 여러 가지 센서와 디지털 트윈 기술을 접목해 제조 장비의 실시간 모니터링 및 최적화에 활용될 수 있다. 또한, 의료 분야에서도 센서를 활용한 환자의 상태를 모니터링하고, 데이터를 기반으로 신속한 대응을 가능하게 할 수 있다. 스마트 홈 및 사물 인터넷 기기에서도 가전제품 등의 상태를 모니터링하고, 이상 징후를 조기에 감지할 수 있을 것이다.

앞으로의 연구에서는 제안한 시스템의 실제 차량 환경에 적용해 실시간 처리 성능과 신뢰성을 더욱 검증할 필요가 있다. 또한 여러 센서를 융합해 상황을 판단하는 센서 퓨전 기술과 연계된다면 더 정확한 제어가 가능할 것으로 기대된다. 마지막으로 다양한 필터링 기법을 적용해 시스템의 노이즈 저감효과를 비교 분석하고, 최적의 필터링 방법을 도출하는 연구도 후속될 것으로 보인다. 최종적으로는 비접촉식 자기장 센서와 다른 센서들을 결합해, 차량의 기울기나 높낮이와 같은 상태를 정확히 판단할 수 있게 될 것이고, 이러한 차량의 상태 정보를 통해 차량 관련 실험을 진행할 때 실제 차량 없이도 디지털 트윈화를 구현함으로써 다양한 실험을 수행할 수 있는 환경을 만드는 것을 계획하고 있다.

References

- [1] F. Marchiò, B. Vittorelli, R. Colombo, "Automotive Electronics: Application & Technology Megatrends," *ESSCIRC 2014 - 40th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Venice Lido, Italy, pp. 23-29, 2014.
- [2] J. Liu, X. Xiao, H. Li, "Automotive Electronic Control System Unit Design Based on Flexray Bus," *2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, Tianjin, China, pp. 381-384, 2020.
- [3] J. H. Oh, Y. H. Yoon, J. K. Kim, H. B. Ihm, S. H. Jeon, T. H. Kim, S. E. Lee, "An FPGA-based Electronic Control Unit for Automotive Systems," *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, pp. 1-2, 2019.
- [4] F. Salewski, S. Kowalewski, "Hardware/Software Design Considerations for Automotive Embedded Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 4, No. 3, pp. 156-163, 2008.
- [5] S. Lee, D. Lee, P. Choi, D. Park, "Efficient Power Consumption Technique of LiDAR Sensor for Controlling

- Detection Accuracy Based on Vehicle Speed," IEMEK Journal of Embedded Systems and Applications, Vol. 15, No. 5, pp. 215-225, 2020 (in Korean).
- [6] T. Chong, D. Park, "Efficiency Low-Power Signal Processing for Multi-Channel LiDAR Sensor-based Vehicle Detection Platform," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 977-985, 2021 (in Korean).
- [7] N. I. Gross, P. Svasta, "Transition to Digital Twin for Automotive Sensor Interfaces Test Equipment," 2023 46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Timisoara, Romania, pp. 1-5, 2023.
- [8] F. Biesinger, M. Weyrich, "The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry," 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, pp. 1-6, 2019.
- [9] K. V. Pankrashkina, "Non-contact Human Proximity Sensor," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Russian Federation, pp. 196-199, 2022.
- [10] N. Magotra, K. Gorman, A. Cusson, A. Lukomski, "Real-time Energy Efficient Embedded System Development Methodology," 2013 IEEE Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting (DSP/SPE), Napa, CA, USA, pp. 284-289, 2013.
- [11] M. Prokin, V. Čeperković, D. Prokin, "Double Buffered Angular Speed Measurement Method for Self-Calibration of Magnetoresistive Sensors," 2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, pp. 1-4, 2023.
- [12] J. Sun, X. Yao, "A Fast Double-Buffering Strategy for Electrophysiological Data Transmission," 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI), Taiyuan, China, pp. 9-13, 2019.
- [13] X. Luo, Z. Zhang, "Data Recovery from Sub-Nyquist Sampled Signals: Fundamental Limit and Detection Algorithm," 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Xi'an, China, pp. 1-6, 2019.
- [14] A. B. Alothman Alterkawi, S. W. Sattler, R. Teschl, W. Bösch, "A Reconfigurable Dual-mode Filter in Embedded Suspended Stripline Substrate Technology (ESSS)," 2021 IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop (IMFW), Perugia, Italy, pp. 306-308, 2021.
- [15] J. Cai, "Research on Embedded Software Based on Adaptive Filtering Algorithm," 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, pp. 973-979, 2022.

Minjung Kim (김민중)



2023 School of Electronics Engineering from Kyungpook National University (B.S.)

2024~School of Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (M.S.)

Field of Interests: embedded system, microcontroller, scheduling
Email: gms05143@knu.ac.kr

Daejin Park (박대진)



2001 School of Electronics Engineering from Kyungpook National University (B.S.)

2003 School of Electronics Engineering from KAIST (M.S.)

2003~2014 Research Engineer, SK Hynix/Samsung

2014 School of Electronics Engineering from KAIST (Ph.D.)
2016~School of Electronics Engineering from Kyungpook National University (Associate Professor)

Field of Interests: Low-power SoC Design, Robust Embedded Systems
Email: boltanut@knu.ac.kr