

무선 네트워크에서 실시간 원격제어를 위한 동기화 전송

강홍구^{1*}, 김남곤¹, 김종원¹
¹국방과학연구소 지상기술연구원

Synchronized Transmission for Real-Time Remote Control in the Wireless Network

Hongku Kang¹, Namgon Kim¹, Jong-Won Kim¹

¹Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development

요약 최근 무선 네트워크 기반 실시간 원격제어에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 무선 네트워크를 통하여 실시간 원격제어를 구현하는데 있어서, 중요한 요소들 중 하나가 실시간 제어메시지의 지연시간 성능이다. 특히, 주기적으로 송신되는 실시간 제어메시지의 안정적인 수신을 위해 지연시간 지터를 줄이는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 실시간 제어메시지를 무선 네트워크에서 운용 하는데 있어서 지연시간 지터를 감소시키는 동기화 전송을 제안한다. 제안된 동기화 전송은 송신노드와 무선통신기 간의 동기화를 바탕으로 적절한 전송시점을 제어하여 실시간 제어메시지가 항상 정해진 시간에 무선 네트워크를 통하여 전송 되도록 한다. 군용무인차량 시스템을 이용한 실험 결과에 따르면, 제안된 동기화 전송은 지연시간 지터를 일반 전송 방식의 지연시간 지터의 32% 수준으로 감소시켰다.

• 주제어 : 실시간 제어, 무선 네트워크, 지연시간 지터, 동기화 전송, 군용무인차량 시스템, 성능 분석

Abstract Nowadays, there are significant interests in real-time remote control using wireless networks. In implementing real-time remote control, one important factor is delay performance of real-time control message. Especially, the technique to reduce jitter of delay is necessary in transmitting periodically real-time control message. In this paper, we proposed synchronized transmission to reduce jitter of delay, when real-time control message was transmitted through wireless networks. The proposed transmission kept synchronization between source node and wireless transmitter and controlled transmission instance to transmit real-time control message with fixed delay in wireless networks. According to results of experiment in military unmanned vehicle system, the proposed transmission reduced jitter of delay as 32% as that of a non-employing case.

• Key Words : Real-Time Control, Wireless Network, Jitter of Delay, Synchronized Transmission, Military Unmanned Vehicle System, Performance Evaluation

Received 15 April 2021, Revised 29 June 2021, Accepted 30 June

* Corresponding Author Hongku Kang, Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon, 34186, Korea. E-mail: hkkang@add.re.kr

I. 서론

최근 스마트기기를 이용하여 원격지의 사물을 제어하는 다양한 원격제어기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 그리고 이러한 관심은 인명의 소중함을 강조하는 재난 현장이나 군사 분야로 확대 되고 있다[1-2]. 이러한 분야에서 원격제어는 원격지로부터 수신되는 영상, 거리 정보 등과 같은 다양한 센서 정보를 기반으로 수십 Hz 이상의 고속으로 실시간 제어메시지를 송수신하여 원격지의 사물을 운용한다. 이러한 실시간 원격제어의 안정적 운용을 위해서는 통신 지연시간이 최소화 되어야 하며, 특히 이들 실시간 제어메시지의 수신 간격의 변화인 지터가 최소화 되어야 한다. 유선 네트워크에서의 실시간 제어는 이미 Ethernet을 이용하는 차량용 Automotive Ethernet나 산업용 제어 네트워크 등과 같이 높은 수준에 도달해 있다[3-4]. 반면에, 무선 네트워크에서는 지연시간과 지연시간의 지터와 같은 실시간 특성 측면에서 유선 네트워크에 비하여 상대적으로 낮은 성능을 보이고 있다[5]. 이러한 무선 네트워크에서 발생하는 실시간 특성의 성능저하는 주로 무선 네트워크에서 무선전송 전까지 대기하는 시간에서 기인된다. 본 논문에서는 이러한 무선 네트워크에서 발생하는 대기시간의 변화로 인한 성능저하를 줄이기 위한 동기화 전송을 제안한다. 제안된 동기화 전송은 안정적인 실시간 지연시간 특성 제공을 위하여 송신노드가 실시간 제어메시지를 무선통신기의 무선프레임의 시작시간을 기준으로 전송시점을 제어한다. 제안된 동기화 전송은 모의실험과 군사용 무인차량 시스템을 통하여 구현 가능성과 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 동기화 전송의 기본원리를 설명하고, 3장에서는 동기화 전송의 설계에 대하여 설명한다. 4장에서는 군사용 무인차량 시스템을 이용하여 제안된 동기화 전송의 성능을 확인하고, 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 제안된 동기화 전송

유선과 무선 네트워크가 함께 운용되는 시스템에서 전달지연시간 성능은 상대적으로 그 성능이 열등한 무선 네트워크에 의하여 결정되는 경우가 많다. 이러한 무선 네트워크 내에는 무선 전송시간, 메시지 처리시간 등 다양한 지연시간 요소들이 존재하지만 그중에서

도 전달지연시간 불확실성에 가장 큰 영향을 주는 것은 전송버퍼 내에서의 대기시간이다. 제안된 동기화 전송은 이러한 전송버퍼 내에서의 대기시간 변화를 최소화 하는 것을 목표로 한다. 무선 네트워크로 인한 전송버퍼 내 대기시간 변화를 설명하기 위하여 프레임 기반 무선 네트워크를 고려한다. 프레임 기반 무선 네트워크에서 일반 전송의 메시지 송신 과정이 그림 1.에 보인다.

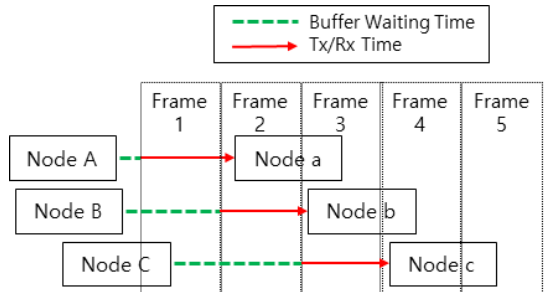


Fig. 1. Tx/Rx Procedure of Conventional Transmission

그림에서 전송노드 A, B, C는 무선 네트워크를 이용하여 각각 원격지의 수신노드 a, b, c로 메시지를 무작위 시점에 전송한다고 가정한다. 최초 발생된 메시지는 프레임1을 통하여 전송되고, 이 후 발생된 메시지들은 순차적으로 프레임2와 3을 통하여 전송된다. 이들 메시지의 지연시간을 살펴보면, 무선채널을 통하여 송수신되는 시간은 상대적으로 일정하게 나타난다. 하지만, 무선프레임을 통하여 전송되기 전까지 대기하는 시간은 발생시점에 따라 변하게 된다. 이처럼 일반 전송에서 이러한 전송 대기시간이 전송지연시간 지터를 크게 변화시켜 실시간 원격제어의 실시간 특성을 저하시킨다.

이러한 실시간 특성의 저하를 줄이기 위하여 그림 2와 같은 동기화 전송을 제안한다.

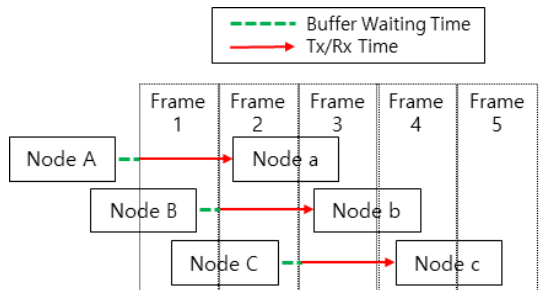


Fig. 2. Tx/Rx Procedure of Proposed Transmission

제한된 동기화 전송은 무작위 시점에 메시지의 전송 요청을 하지 않고, 정해진 시점에 전송요청이 발생되도록 제어한다. 이 때, 각 전송노드 A, B, C는 서로 다른 무선프레임을 통하여 전송되도록 동일 시점에 메시지를 발생시키면 안 된다. 또한, 메시지가 발생 후 전송버퍼 내 대기시간을 최소화하기 위하여 메시지 발생 시점을 무선프레임 시작시간 직전으로 제어한다. 이러한 제어를 이용하면 그림 2와 같이 송신노드 A, B, C에서 전송되는 메시지들이 모두 동일한 전송버퍼 내 대기시간과 무선 송수신 시간을 거쳐서 지연시간 지터가 크게 감소한다.

III. 동기화 전송의 설계

1.1 운용메시지 설계 고려사항

제한된 자원을 갖는 무선 네트워크를 통하여 운용되는 모든 메시지들을 동기화 전송한다는 것은 불가능하다. 이러한 제약으로 동기화 전송을 적용할 메시지를 실시간 제어를 위한 실시간 주기메시지로 제한한다. 또한, 동기화 전송 적용 메시지는 하나의 무선프레임을 통하여 전송되도록 그 최대 크기를 제한한다. 메시지 크기가 하나의 무선프레임을 통해 전송할 수 있는 크기를 넘게 되면 송수신 완료를 위하여 2개 이상의 무선프레임이 소요되고, 이는 전송지연시간이 메시지 크기에 따라 변화된다. 마지막으로 메시지의 전송우선순위를 적용한다. 시스템 운용에 있어서 다양한 이벤트의 발생으로 메시지들이 언제 발생할지 예측 불가능하다. 무작위로 발생하는 메시지들 중에서 실시간 제어메시지보다 근소하게 앞서 메시지 전송요청이 발생되면, 일반적으로 FIFO(First In First Out)와 같은 동작에 의해 실시간 제어메시지 전송이 다음 무선프레임으로 지연될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 실시간 제어메시지의 전송우선순위는 타 메시지들보다 우선되어야 한다.

1.2 무선프레임 설계 고려사항

주기적으로 전송되는 실시간 제어메시지를 동기화 전송하기 위해서는 우선 무선프레임과 실시간 제어메시지의 전송주기를 그림 3과 같이 정수배(2배)로 유지한다.

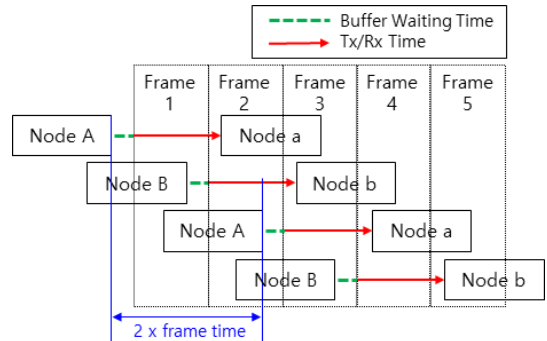


Fig. 3. Relation between Transmission Period and Frame Time and Frame Allocation

메시지 전송주기와 무선프레임 길이를 정수배로 설정하면, 메시지 전송시점이 항상 무선프레임 시작시점을 기준으로 일정한 위치에 발생하게 한다. 또한, 다수 개의 실시간 제어메시지를 운용하기 위해서는 이들 메시지들이 서로 다른 무선프레임을 통하여 전송되도록 할당해야 한다. 그림3에는 송신노드 A는 홀수프레임을 할당하였고, 송신노드 B에는 짝수프레임을 할당하여 안정적인 전송을 지원한다. 이처럼 모든 실시간 제어메시지를 운용하는 송신노드들은 자신의 할당 전송 무선프레임의 시작시간을 직전에 메시지를 전송하도록 제어해야 한다.

1.3 실 시스템 설계 고려사항

앞에서 언급한 운용메시지 설계 고려사항과 무선프레임 설계 고려사항을 반영하여 시스템을 설계 및 구현하여도 여전히 실 시스템이 갖는 불확실성들에 의하여 문제가 발생한다.

우선 각 시스템 구성장치들의 클럭의 부정확성이 있다. 그림3에서 송신노드 A, B와 무선통신장치들이 모두 같은 클럭 정확도를 갖는 경우에는 긴 시간이 흘러도 시스템 운용상 문제가 발생되지 않는다. 하지만, 송신노드 B의 클럭이 다른 장비들보다 1ppm 미세하게 차이가 난다고 가정한다. 그러면 시작시점에 정확하게 동작하던 송신노드 B는 103초(16.7분) 경과 후에는 1ms의 오차를 갖는다. 이는 50Hz(20ms) 속도로 운용되는 실시간 제어메시지 주기의 5%에 해당하는 오차다. 이러한 클럭의 부정확성은 실시간 특성의 성능 저하를 유발한다. 이를 방지하기 위하여 주기적으로 하나의 클럭을 기준으로 동기화한다. 보통 무선통신장치들은

정확한 무선 송수신을 위하여 서로 시간과 주파수 측면에서 높은 정확도로 동기를 유지한다. 따라서, 송신 노드들은 각 차량 단위로 장착된 무선통신장치를 기준으로 동기화를 주기적으로 유지한다.

다음은 실제 시스템에서 발생하는 다양한 지연시간 지터다. 그림 3의 이상적인 경우에는 실시간 제어메시지는 바로 무선통신장치로 전달되어 전송 대기시간을 겪는다고 설명했지만, 실제로는 송신노드부터 무선통신장치까지 메시지가 전달되는데 다양한 지연요소와 지터가 존재한다. 유선 네트워크를 경유하면서 발생하는 전송 지연시간, 스위칭 지연시간, 메시지 처리시간 등 이들은 실시간 제어메시지가 무선통신장치에 도달하는 시간을 변경시킨다. 이러한 가변적인 지연요소를 보상하기 위하여 보호시간을 고려하여 전송시점을 제어해야한다. 보호시간은 송신노드부터 무선통신장치까지 메시지가 송수신되는데 소요되는 최대 시간 이상으로 설정한다.

1.4 동기화 전송 설계

클럭의 부정확성과 다양한 실 시스템 지연에 보상을 위한 보호시간을 적용한 제안된 동기화 전송 설계 개념이 그림 4에 보인다.

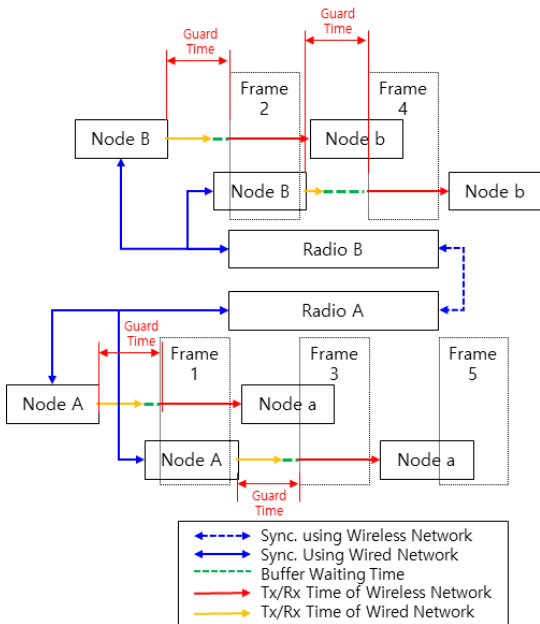


Fig. 4. Proposed Synchronized Transmission

그림 4에서 A와 B는 독립된 차량을 의미한다. 각 차량 내 무선통신장치 A, B는 서로 무선 네트워크를 이용하여 동기를 유지한다. 전송노드 A는 통신장치 A와 동기를 주기적으로 유지하고, 전송노드 B는 통신장치 B와 동기를 주기적으로 유지한다. 또한, 각 전송노드 A와 B는 유선 네트워크 지연시간을 고려하여 각 무선프레임 시작시간에서 보호시간 만큼 앞서서 실시간 제어메시지를 전송하도록 제어한다. 비록 전송된 메시지가 가변적인 지연시간을 갖고 무선통신장치에 수신되지만, 전송버퍼 내 대기시간을 포함하는 메시지의 전송시점까지의 총소요시간은 보호시간과 동일하게 유지된다.

제안된 동기화 전송 설계를 검증은 그림 5와 같은 시스템을 고려하여 모의실험을 이용한다.

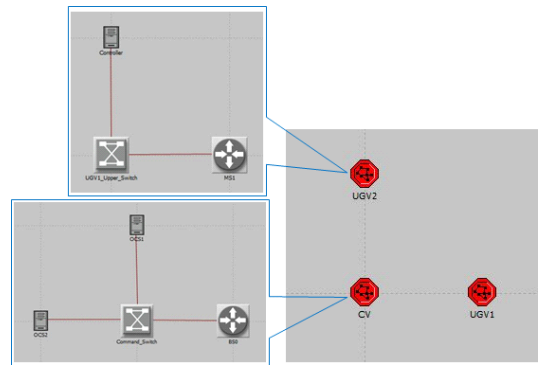


Fig. 5. M&S Model to Verify Design of Proposed Synchronized Transmission

모의실험을 위한 시스템은 앞에서 언급한 메시지 설계 고려사항들을 모두 반영한다. 실시간 제어메시지는 통제차량(CV: Control vehicle)내 운용스테이션 1, 2(OCS: Operation Control Station)에서 각각 무인차량(UV: Unmanned Vehicle) 1, 2로 50hz로 전송한다. 무선프레임은 5ms로 설계하여 실시간 제어메시지의 전송주기와 4배 정수배를 유지하고, 이들 중 매 $4n+1$ 번째와 $4n+3$ 번째 무선프레임을 각각 무인차량 1, 2로 전송되는 실시간 제어메시지에 할당한다. 클럭은 제안된 동기화 전송의 성능을 확인하기 위하여 단일 클럭을 가정하고, 보호시간은 모의실험 내 유선 네트워크의 지연시간이 500us 이내로 측정되는 것을 고려하여 1ms로 설정한다. 모의실험은 다양한 메시지 발생 환경을 반영하기 위하여 무인차량 2대가 운용되는 조건에서 10회 반복한다. 모의실험을 이용한 일반 전송의 지연시간 성능이 그림 6에 보인다.

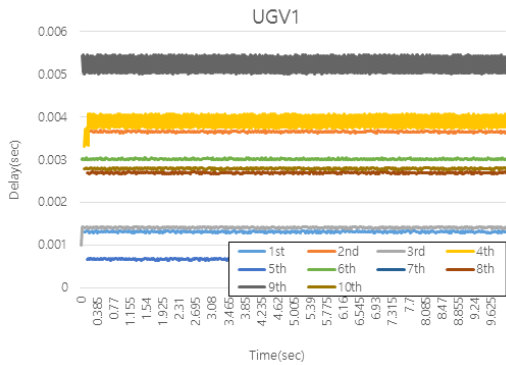


Fig. 6. Delay of Conventional Transmission in M&S

통제차량 내 운용스테이션 1에서 무인차량 1로 전송되는 실시간 제어메시지의 지연시간을 살펴보면, 모의실험 상황에서는 수백 us 이내의 우수한 지연시간 지터 성능을 보인다. 하지만, 모의실험 횟수가 변하는 경우에는 평균 지연시간이 700us~5.7ms의 범위에서 무작위로 형성된다. 이는 메시지 발생 시점과 무선프레임간의 간격에 따라 지연시간이 크게 변하는데, 그 변화량이 무선프레임 길이와 동일하게 때문에 약 5ms의 지연시간 지터를 만든다. 이러한 결과는 운용스테이션 2에서 무인차량 2로 전송되는 실시간 제어메시지에서도 동일하게 나타난다.

모의실험을 이용한 제안된 동기화 전송의 지연시간 성능은 그림 7에 보인다.

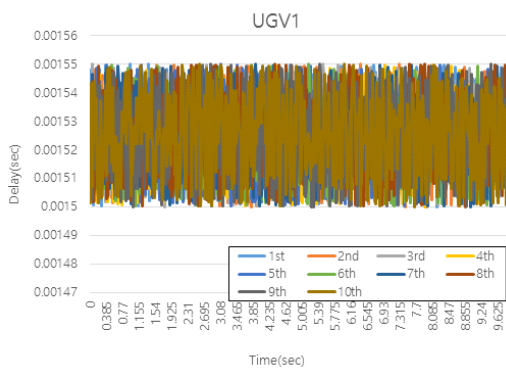


Fig. 7. Delay of Proposed Transmission in M&S

통제차량 내 운용스테이션 1에서 무인차량 1로 전송되는 실시간 제어메시지의 지연시간을 살펴보면, 1.5ms~1.55ms의 범위에서 총 10회 모두 동일하게 나타난다. 이는 송신노드가 전송시점을 동기화된 무선프레임의

시작시간을 기준으로 보호시간만큼 앞선 고정된 시점에 전송하기 때문이다. 일반적 전송의 5ms와 비교해 보면, 제안된 동기화 전송은 약 50us로 지연시간 지터가 1% 수준으로 크게 감소한다. 운용스테이션 2에서 무인차량 2로 전송되는 실시간 제어메시지도 전송 무선프레임 할당을 무인차량 1로 전송되는 제어메시지와는 분리하여 할당하였기 때문에 무인차량 1과 동일한 성능을 보인다.

IV. 동기화 전송 구현 및 성능평가

기존 군용무인차량 시스템은 무선 네트워크와 연동 시 실시간 제어메시지의 지연시간 특성 저하가 발생되었고, 이를 개선하기 위하여 제안한 동기화 전송을 적용하는 개선된 군용무인차량 시스템을 이용하여 구현 가능성을 확인하고 성능을 평가한다[6-7]. 개선된 군용무인차량 시스템은 유선 네트워크로 상용 Giga-LAN(Local Area Network)를 적용하고, 무선 네트워크로서는 자체개발 무인차량용 무선 네트워크를 적용한다[8]. 개선된 군용무인차량 시스템은 동기화 전송 설계사항을 모두 반영한다. 단, 보호시간은 실 시스템에서 발생하는 다양한 실제적인 지연시간 요소를 반영하여 모의실험의 1ms를 3.5ms로 변경하여 적용한다. 송신노드와 무선통신장치 간의 동기화는 구현의 비용 및 편의성 등을 고려하여 각 무선통신장치에서 무선프레임 시작 시점에서 단순한 LAN 패킷을 전송노드들에게 주기적으로 전송하도록 구현한다. 실험에 있어서 개선된 군용무인차량은 개발간의 제작 시제 대수의 제약으로 1대만 적용한다. 이러한 개선된 군용무인차량 시스템에서 동기화 전송이 적용되지 않는 일반 전송의 실시간 제어메시지 지연시간 성능은 그림 8과 같다.

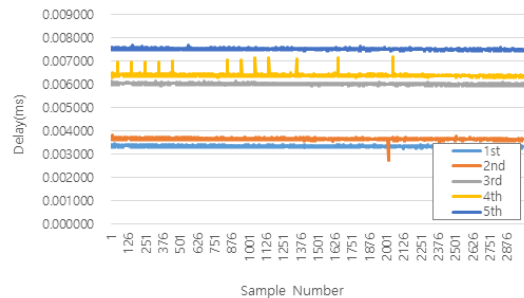


Fig. 8. Delay of Conventional Transmission in Military UV System

V. 결론

측정된 지연시간 성능을 살펴보면, 모의실험 결과와 유사하게 단일 전원 인가 실험동안에는 적은 지연시간 지터를 보인다. 하지만, 장비의 전원 인가 및 차단 실험을 반복하면 지연시간이 약 3ms~8ms, 즉, 무선프레임 길이인 5ms 범위 내에서 발생된다.

다음 그림 9는 제안된 동기화 전송을 채택한 군용무인차량 시스템에서 실시간 제어메시지의 지연시간 성능이다.

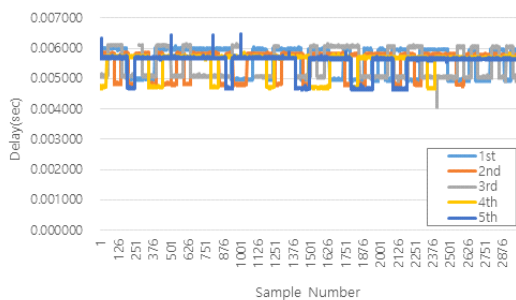


Fig. 9. Delay of Proposed Transmission in Military UV System

실시간 제어메시지의 전달지연시간 성능을 살펴보면 평균 지연시간이 약 5.8ms로 모의실험의 1.5ms 보다 4.3ms의 더 크게 측정된다. 이는 유선 네트워크 송수신 지연시간, 무선통신장치의 송수신 처리시간, 각종 컴퓨터와 스위치들의 처리시간, 컴퓨터 프로그램 부하로 인한 성능저하 등 실제 시스템에서 발생하는 다양한 추가적인 요소들과 늘어난 보호시간의 적용 때문이다. 하지만, 지연시간의 변화량은 4.8~6.4ms로 약 1.6ms의 지연시간 지터 성능을 보인다. 1.6ms의 지연시간 지터를 세부적으로 살펴보면, 약 1ms의 계단 형태의 지연시간 변화가 발생한다. 이는 무선통신장치가 동기화를 위하여 사용되는 LAN 패킷을 송신하는데 불규칙적으로 1ms의 오차를 만들기 때문이다. 즉, 보다 정확한 동기화 방식을 적용하거나 무선통신장치가 동기화를 위해 LAN 패킷을 전송하는 로직을 안정화 한다면 지연시간 지터를 더욱 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 비록 실제 시스템에서 지연시간 지터가 약 1.6ms로 모의실험의 50us 지터에 비하며 크게 증가하지만, 일반 전송의 5ms의 지연시간 지터와 비교하면 여전히 32% 수준의 우수한 성능을 보인다.

본 논문에서는 무선 네트워크 기반 실시간 원격제어를 위한 동기화 전송을 제안하였다. 제안된 동기화 전송은 무선 네트워크 내에서 발생하는 전송 대기시간의 불확실성을 줄이기 위하여, 송신노드들과 무선통신장치 간의 동기화를 기반으로 실시간 제어메시지의 전송시점을 제어하였다. 제안된 동기화 전송의 설계는 모의실험을 통하여 검증되었고, 그 결과에 제안된 동기화 전송을 적용하는 경우 일반 전송의 지연시간 지터에 비하여 약 1% 수준으로 크게 향상 시켰다.

또한, 제안된 동기화 전송은 현재 진행 중인 개선된 군용무인차량 시스템에 적용하여 그 구현 가능성과 성능을 확인하였다. 다양한 설계 고려사항들은 물론, 무선프레임 시작 시점에 주기적으로 LAN 패킷을 전송하는 단순한 동기화 방식, 실 시스템의 다양한 지연시간을 고려한 보호시간을 적용하여 구현하였다. 개선된 군용무인차량 시스템을 이용한 실험 결과에 따르면, 제안된 동기화 전송은 일반 전송의 5ms 지연시간 지터를 1.6ms로 크게 감소시킬 수 있었다. 또한, 보다 정밀한 동기화 방식을 적용하거나 다양한 지연시간 지터를 감소하는 기술을 적용하여 시스템의 지연시간 지터를 줄인다면, 실시간 제어메시지의 지연시간 지터를 더욱 개선시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 이처럼 제안된 동기화 전송은 실 시스템에 구현이 가능하고, 그 성능도 크게 향상됨을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] "The Newspaper Report on the Unmanned Robot," Asia Economy, 12, 2020. Available: https://view.asiae.co.kr/article/2020120708_351884303
- [2] "The Newspaper Report on the Unmanned Military Robot," Kookbang Il-Bo, 2, 2021. Available: http://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20210219/1/BBSMSTR_000000100147/view.do
- [3] P. Hank, S. Müller, O. Vermesan, and J.V.D. Keybus, "Automotive Ethernet: In-vehicle networking and smart mobility," in Proc. Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2013.

- [4] S. Fuchs, A. Gercikow, and Hans-Peter Schmidt, "Monitoring of real-time behavior of industrial ethernet for industry 4.0," in Proc. International Electrical Engineering Congress, 2017.
- [5] H. Kang, D.Y. Jung, T. Kang, and G. Sung, "Communication Characteristics of Unmanned Vehicle Network for Remote Control," in Proc. the Spring Conference of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2017, pp. 1910-1911.
- [6] G. Y. Sung, J. W. Kim, D. Y. Jung and T. K. Kang, "Integrated Operation/Control Technology of the Multi-Robot for Light Combat," Final Project Report, 1st Ground Weapon System PMO, ADD, 2016.
- [7] D. J. Kim, G. Y. Sung, H. K. Kang and D. W. Yang, "System Critical Design Report for UGV-R," Technical Report, Ground Technology Institute, ADD, 2020.
- [8] J. S. Choi, W. B. Jang, D. J. Kim and M. C. Lee, "Applied Research project Result Report(Robot Control Network)," Final Project Report, Unmanned Technology Center, ADD, 2014.

저자소개

강 홍 구(Hongku Kang)



1998년 2월 : 성균관대학교
전자공학과(공학사)
2000년 2월 : 광주과학기술원
정보통신공학과(공학석사)
2004년 2월 : 광주과학기술원
정보통신공학과(공학박사)
2004년 2월~현재 : 국방과학연구소
연구원

관심분야 : 무선통신, 통신신호처리, OFDMA, 무인로봇

김 남 곤(Namgon Kim)



2004년 2월 : 전남대학교
컴퓨터공학과(공학사)
2006년 2월 : 광주과학기술원
정보통신공학과(공학석사)
2012년 8월 : 광주과학기술원
정보통신공학과(공학박사)
2012년 9월~2019년 12월 :
(주)케이티 융합기술원 연구원

2019년 12월~현재 : 국방과학연구소 연구원

관심분야 : 네트워크가상화, In-Vehicle Network,
무인로봇

김 종 원(Jong-Won Kim)



1990년 2월 : KAIST 경영과학과
(이학사)
1999년 2월 : KAIST 경영공학과
(공학석사)
1990년 3월~현재 : 국방과학연구소
연구원

관심분야 : 무인체계 설계 및 안전,
실시간 원격제어