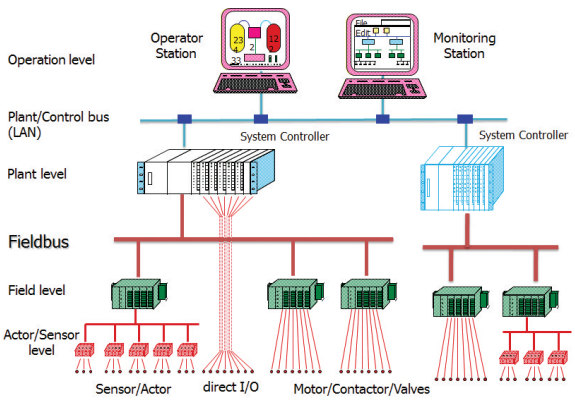
산업용 실시간 제어 시스템을 위한 무선 통신 기술 및 시스템 제어기 연구 동향

이 원 희
숭실대학교
정보통신전자공학부

유 명 식
숭실대학교
정보통신전자공학부

Ⅰ. 서 론

최근 몇 년간 제조업 및 생산업 등의 산업 분야에 적용되는 자동화 기술은 통신 기술과 결합되어 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 특히 산업용 자동화 기술은 산업 환경의 엄격한 조건을 만족시키기 위해 신뢰성 및 실시간성을 제공해야 한다. 이로 인해 〈그림 1〉과 같이 통신의 안정성이 매우 높은 유선 통신 기술을 접목한 산업용 실시간 시스템이 주를 이루었다. 그림에서 볼 수 있듯이 유선 통신 기반의 산업용 제어 시스템은 사용자 및 모니터링 시스템이 존재하는 관리자 레벨 (Operation level)과 산업 기기를 제어하는 시스템 제어기 (System Controller)가 존재하는 플랜트 레벨 (Plant level)로 구성된다. 또한 시스템 제어기와 다수의 구동 장치 및 센서가 존재하는 구동기 및 센서 레벨 (Actuator/Sensor level)을 연결해주는 필드버스 (Fieldbus)로 구성된다. 이와 같이 하나의 산업용 제어 시스템을 운용하기 위해 유선 기반의 통신 환경은 매우 복잡한 배선을 통해



〈그림 1〉 유선 통신 기반 산업용 제어 시스템 구조의 예

연결되어 있다.

하지만 최근 산업용 실시간 시스템의 성능 지표가 신뢰성과 실시간성 뿐 만 아니라 환경적 요인인 시스템의 유지/보수 용이성, 구축 비용, 공간 제약, 확장성 등으로 복잡해짐에 따라 유선 환경의 한계가 드러나게 되었다. 특히 산업 현장의 규모가 커지고, 관리 장비 수의 증가 등에 따라 경제적 문제가 발생하며, 생산 장비의 이동성이 요구됨에 따라 시스템의 확장성 등이 요구되고 있다.

이에 따라 무선 통신 기술을 산업용 제어 시스템에 접목하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 〈그림 2〉는 무선 통신기술을 산업용 제어 시스템 환경에 접목한 산업용 제어 시스템의 구조의 예를 도시하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 무선 통신 기술이 접목되는 부분은 플랜트 레벨 부분과 필드버스 레벨 부분으로서 시스템 제어기의 명령이 무선 통신 환경을 거쳐 구동기나 센서 장비로 전달되는 구조를 가지고 있다. 따라서 무선 통신 기반의 산업용 제어 시스템 구조는 유선 기반의 제어 시스템이 가진 배선 문제, 설치 공간 등의 문제를 극복할 수 있으며, 설치 장비의 이동성 확보가 가능하다.

하지만 무선 통신 환경은 유선 통신 환경과 달리 통신 환경이 매우 불안정하며, 특히 신호의 간섭 및 손실로 인해 유선 환경보다 신뢰성 및 실시간성이 떨어지는 문제점을 안고 있다. 이에 본 고에서는 최근 산업용 무선 통신 기술의 발전에 따라 산업용 제어 시스템 분야에서 접목하기 위한 무선 통신 기술과 시스템 제어기의 무선 화 연구에 대한 동향에 대해 살펴보고자 한다. 본 고의 구성은 Ⅱ장에서 무선 통신 기술 관점에서의 주요 기술에 대해 설명하고, Ⅲ장에서는 무선 통신 환경에서 시스템 제어기의 성능 향상을 위한 연구 방향에 대해 살펴본다. 마지막으로 Ⅳ장에서 본 고의 결론을 맺는다.

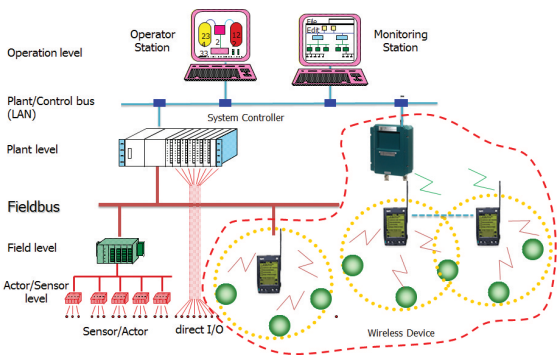
Ⅱ. 산업용 무선 통신 기술

1. 무선 통신 기술별 산업 환경 적용 연구

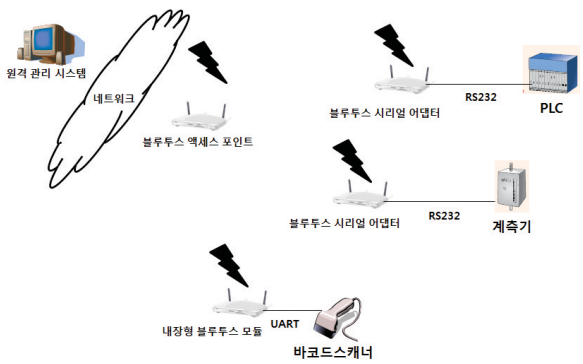
산업 환경에서의 무선 통신 요구가 증대됨에 따라서 현재 산업 환경에 적용되거나 적용을 위한 연구가 진행되고 있는 무선 통신 기술은 매우 다양하다. 이에 본 절에서는 산업 환경에서 무선 통신 기술을 적용하기 위해 후보 통신 기술에 대한 주요 개념 및 사용 분야 등을 소개하고자 한다.

(1) IEEE 802.15.1 블루투스 (Bluetooth)[1]

- 블루투스 기술은 근거리 환경에서 기기간 1:1 무선 통신 환경을 구성할 수 있는 애드혹 네트워크 기반의 기술이며, 2.4GHz 주파수 대역을 사용함
- 산업용 블루투스 기술은 현재 PLC 프로그래밍, 무선 물류 시스템, 산업용 무선 기기 제어 및 모니터링, 공장 자동화 무선 통신 응용 시스템에 적용이 이루어지고 있음
- 이를 위해 블루투스 시리얼 어댑터, 내장형 블루투스 모듈, 블루투스 액세스 포인트로 구성됨. 〈그림 3〉은 산업용 블루투스 시스템 구조의 예로서 중앙



〈그림 2〉 무선 통신 기반 산업용 제어 시스템 구조의 예



〈그림 3〉 산업용 블루투스 시스템 구조의 예

원격 관리 시스템은 블루투스 액세스 포인트를 통해서 종단 디바이스라 할 수 있는 PLC, 계측기 등으로부터 상태 정보를 수신하여 관리하는 구조를 지님

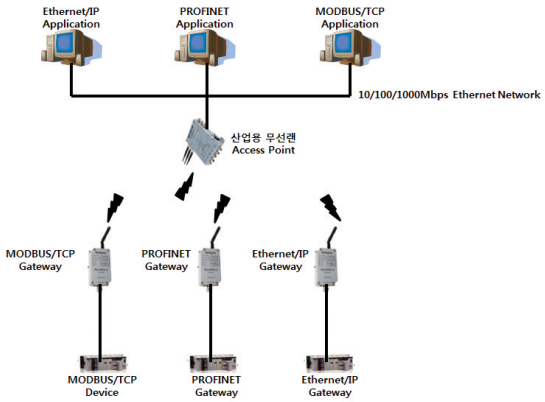
- 각 산업용 블루투스 장비는 UART, RJ45, RS232 등 다양한 인터페이스를 제공하며, 다양한 안테나 옵션을 통해서 최대 통신 거리 1km까지 가능할 뿐 아니라 최대 전송속도 920Kbps를 지원함
- 산업용 블루투스 장비는 각 장비 구성을 유동적으로 적용 시킴으로써 다수의 노드를 제어해야하는 산업용 환경에 적용이 가능함

(2) IEEE 802.15.4 지그비 (Zigbee)[2]

- 산업용 지그비는 적은 양의 데이터를 통해서 정보 수집 및 제어를 목표로 하기 때문에 현재 산업·공장 환경에서 프로세스 통제, 자재관리, 환경관리, 에너지관리, M2M 통신 등 모니터링 시스템에 적용 되고 있으며, ISM 대역인 2.4GHz 대역에서 사용됨
- 특히 주파수 변조 방식으로 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)를 사용하기 때문에, 산업 환경에 혼재 되어있는 다수의 주파수 간섭, 잼밍 (Jamming), 잡음 (Noise)에 대한 성능이 우수함
- 데이터 패킷 전송 방식에 있어서도 슈퍼 프레임 (Superframe)을 이용하기 때문에 많은 노드 수를 동시에 관리·제어해야 하는 산업 환경에 적합함
- 산업용 지그비는 규모가 큰 산업 분야에 적용하기 위해 다양한 안테나 옵션을 통해서 최대 통신 거리 5km까지 가능하며, 최대 전송 속도 250Kbps를 지원함
- 이와 더불어 다양한 데이터 전송형식을 지원하기 때문에 산업 환경에 기기들은 그 목적에 따라 다양한 토폴로지 구성이 가능함

(3) IEEE 802.11 WLAN[3]

- IEEE 802.11a/b/g/n 표준에 따른 산업용 무선



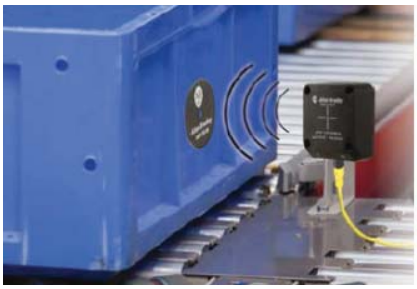
〈그림 4〉 산업용 무선랜 시스템 구조의 예

랜(IWLAN)이 최근에는 생산라인, 크레인 시스템, 고층 창고, 지하철 터널 등 산업 분야뿐만 아니라 홈·빌딩 자동화 시스템에 적용되고 있으며, 2.4GHz와 5GHz 주파수 대역을 사용함

- 〈그림 4〉는 산업용 무선랜 시스템 구조의 예로서 다양한 어플리케이션에 적용되는 필드 레벨 장비에게 제어 및 상태 메시지를 송/수신하는 구조를 가짐
- 플랜트 이더넷 망에서 확장 사용할 수 있다는 점이 큰 장점이고, VoIP 등 최근에 요구되고 있는 많은 다른 IT 기술과의 통합도 손쉬운 장점이 있음
- 산업용 무선랜 액세스포인트(AP)는 RS422/485, RJ45등의 다양한 인터페이스를 제공하며, 다양한 안테나 옵션을 통해서 최대 통신 거리 5km까지 가능 하며, 최대 전송속도 600Mbps를 지원함

(4) RFID[4]

- 산업용 RFID 기술은 자동차, 패키징, AGV, 제약 등 산업 분야 전반에 걸쳐 사용되고 있음
- 산업용 RFID 기술은 제조 공정을 따라 이동하면서 제품을 추적하고 기록하는 방식임. 〈그림 5〉는 산업용 RFID 시스템 예를 도시하고 있음
- 산업용 RFID는 ISO 15693 ICODE 표준을 사용하여 고주파 13.56MHz를 사용하며, ICODE 태그는 비용이 낮고, 다양한 제조업체로부터 서로 다른 스타일, 물리적 크기 및 메모리 크기로 제공되기 때문에 산업 환경 전체에 적용할 수 있음



〈그림 5〉 산업용 RFID 시스템

- 산업용 RFID 태그는 케이스, 상자 또는 기타 용기 안에서 읽기가 가능하여 노출이 불필요하고, 태그 겹쳐 쓰기 및 정보 변경이 10년 동안 100,000 회의 쓰기가 가능하며, 바코드와 달리 먼지나 습도가 높은 유해 산업 환경에서도 태그 사용이 가능함

(5) ISA 100.11a[5]

- ISA 100.11a는 ISA 100.11a 장치 간의 상호 호환성을 제공하면서 산업 현장에서 있을 수 있는 다른 무선 장치들과의 공존을 규정함
- 시스템 모니터링 분야, 제어 분야에서 신뢰성이 있고 안전한 동작을 제공하는 것을 목표로 하며, 특히 지연 시간이 100ms 단위인 실시간 모니터링과 제어 분야에 적용되고 있음
- 제한된 전력소모 조건을 지원하는 고정형, 휴대형, 이동형 장치와 연결되는 저속의 무선 연결에 대한 네트워크 시스템 관리, 게이트웨이, 보안관리 등의 구조를 정의하고 있음
- 무선 통신 기반 산업 환경에서 높은 성능을 유지하기 위해 지능적인 채널 호핑 알고리즘, 강력한 링크 복구 및 오류 기법을 사용함으로써 예측하기 어려운 산업 환경에서도 우수한 통신 성능을 제공함

(6) IEEE 802.15.4e[6]

- 시의성과 열악한 무선 환경에서 높은 수준의 무선 링크 신뢰성을 필요로 하는 산업 환경의 어플리케이션에 접목을 목적으로 하는 PHY/MAC 계층에 대한 기술 표준을 정의하고 있음
- IEEE 802.15.4e 기술은 산업 환경의 응용 분야에 따라 복수의 동작 모드를 두어 사용자가 목적에 따라 적응적으로 모드를 선택할 수 있음
- DSME(Distributed Synchronous Multi Channel Extension) 모드는 산업 자동화와 스마트 미터링과 같은 산업 어플리케이션, 홈 오토메이션, 스마트 빌딩 등을 중심으로 하는 상업 어플리케이션, 원격의료, 환자 모니터링과 같은 헬스 케어 응용 서비스를 지원함
- TSCH(Time Slotted Channel Hopping)모드는 공정 모니터링/자동화, 석유&가스 산업, 환경 모니터링 서비스를 지원함
- LL(Low Latency)모드는 산업 자동화 중 지연시간의 최소화를 목적으로 하며 무인로봇, 이동형 장비 제어 등을 지원함
- 시분할 채널 다이버시티 기술은 통신을 위한 예약 주파수 채널 시퀀스를 이용해 송신 노드와 수신 노드가 채널을 옮겨 다니며 프레임을 주고받는 채널 홉핑 방식과, 채널 상태가 정해진 수신 조건보다 열악해질 새로운 채널로 변경하여 프레임을 주고받는 채널 적용 방식으로 나뉨. 이와 같은 기술은 산업 환경에 간섭의 영향적음

(7) WirelessHART[7]

- USN(Ubiquitous Sensor Network) 분야의 발전과 더불어 산업 환경의 프로세스 계장 시스템에서도 이러한 USN의 장점에 기존 유선 환경의 문제점, 산업 환경 시스템의 기본적인 요구 사항이 고려된 표준이며, 2.4GHz 주파수 대역을 사용함
- 정보 수집의 업데이트 주기가 1초의 주기를 가지기 때문에 원거리 정보에 대한 정보수집 및 제어 자동화 분야에는 구축하기 힘들지만 수위조절, 레벨 및 온도 측정과 제어 등에서 활발히 사용되고 있음
- 산업 환경 시스템의 현장에 설치된 계기들은 서로의 신호를 중계하는 라우터의 역할을 하면서 자신의 신호를 전송함

2. 산업용 무선 통신 기술 개발의 문제점

산업용 무선 통신 기술을 개발하기 위해서는 무선 채널의 영향 및 산업 환경의 외적인 요소를 고려해야한다. 즉, 유선 통신 환경 보다는 무선 통신 환경이 보다 높은 통신 결함을 가지고 있으며, 특히 높은 통신 지연 및 빈번한 패킷 손실로 인해 심각한 문제가 발생할 것이다. 더욱이 기존 무선 통신 환경이 고려하는 전송 에러는 일시적이기 때문에 산업용 통신 환경을 접목한 새로운 프로토콜 메커니즘이나 현재 프로토콜의 재구성이 반드시 요구된다.

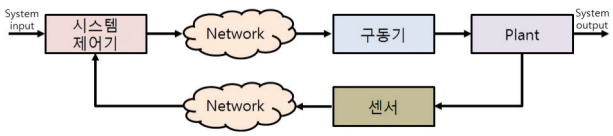
특히 현재 부분적으로 산업용 무선 통신 환경에서 사용되고 있는 무선 통신 기술들은 ISM 대역을 기반으로 사용하는데, 단일 작업 환경에서 복수의 무선 통신 기술이 사용될 경우 통신 기기간의 간섭이 발생할 가능성이 매우 높다. 물론 각 기술마다 자체적으로 주파수 간섭, 패킷 손실 및 오류 증가 등에 따른 통신 성능을 향상시키기 위해 채널 홉핑이나 적응적 변복조 기법 등을 사용하나 산업용 무선 통신 환경에 적용하기 위한 신뢰성있는 성능은 보장하지 못하고 있는 실정이다.

결과적으로 신뢰성 제공이 힘든 무선 환경에서 치명적인 손상 및 결함은 산업 분야에서의 궁극적인 목표인 수익 창출면에서 막대한 손실을 가져오기 때문에 높은 신뢰성 제공을 위한 문제가 해결되어야한다.

Ⅲ. 무선 통신 기반 시스템 제어기 기술

1. 시스템 제어 기술 분야

산업 환경에서의 제어 시스템은 엄격히 주어진 제한된 시간 내에 작업 수행 및 제어를 만족시킬 수 있는 신뢰성 보장을 위해 정밀도와 적시성을 모두 만족하여야 한다. 〈그림 6〉은 산업용 제어 시스템의 구조를 도시한 모습이다.



〈그림 6〉 산업용 제어 시스템의 구조

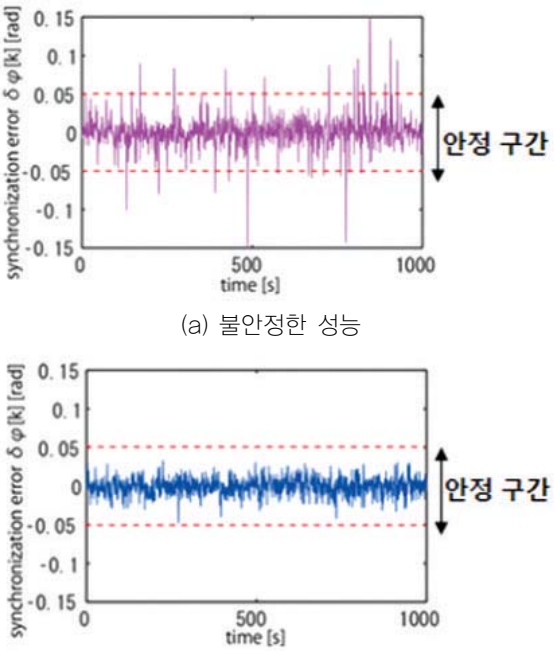
그림에서 볼 수 있듯이 일반적으로 실시간 제어 시스템은 시스템 제어기와 플랜트, 그리고 플랜트 내부의 구동기 및 센서, 마지막으로 시스템 제어기와 플랜트를 연결하는 네트워크로 구성되는데, 시스템 제어기는 플랜트를 동작시키기 위한 제어 명령을 전송하며, 플랜트 내에 설치된 구동기는 제어 명령에 따른 동작을 수행하고 센서는 플랜트의 상태 정보를 시스템 제어기로 전송하여 플랜트 전체를 모니터링 할 수 있는 폐루프(Close-loop) 기반으로 운용된다. 이러한 전체 흐름은 안정성 있게 수행되어야 하므로 산업 자동화 및 실시간 제어 시스템에서는 유선 네트워크를 기반으로 운용 되었다. 본 절에서는 유선 환경에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해서 무선 환경을 적용하여 해결하고, 정밀도 및 적시성을 높이기 위한 시스템 제어 기술에 대한 소개하고자 한다[8].

(1) 지연 및 지터 보상기

산업 환경에서 시스템 제어기의 성능을 향상은 데이터 패킷의 지연 및 지터에 초점을 맞추고 있다. 만약 제어 명령의 지연 또는 지터가 발생하는 경우 생산 및 제어 장치의 동작이 정확한 시간 내에 이루어지지 못하게 된다. 또한 센서가 플랜트로부터 수집한 상태 정보의 지연 또는 지터가 발생한 경우 플랜트의 상태를 잘못 판단하고 잘못된 정보를 토대로 시스템 제어기에서 플랜트를 제어하기 때문에 정밀도를 보장하지 못하는 문제가 발생한다.

이와 같은 시스템 제어 명령의 지연 및 지터는 통신 채널의 불안성을 갖는 무선 통신 환경에서 더욱 큰 문제로 작용한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 현재 다양한 연구가 진행되고 있는데, 주요 연구 분야가 바로 패킷 지연 및 손실 보상기(Compensator) 이다. 보상기란 어떤 장치에서 지연 및 지터의 영향으로 오차나 정확하지 않은 동작 상태를 보정하기 위해 사용되는 알고리즘 및 하드웨어 부품을 말한다.

이와 같은 알고리즘 기술은 LQR(Linear Quadratic Regulation)[9], LQG(Linear Quadratic Gaussian)[10], MPC(Model Predictive Contoller)[11], fuzzy[12], State



(a) 불안정한 성능

(b) 안정한 성능

〈그림 7〉 네트워크 상황에 따른 성능

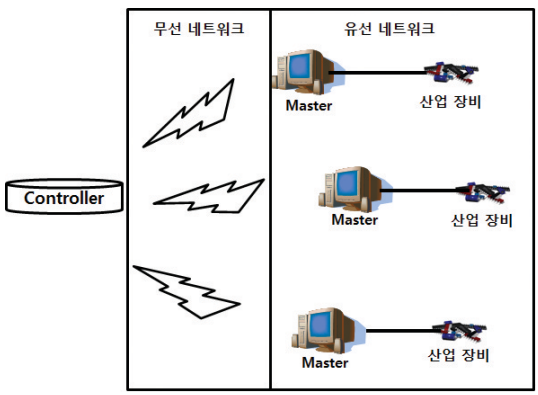
feedback[13] 등의 알고리즘이 있으며, 산업 환경에서 발생하는 지연을 줄이고 종단 디바이스의 정해진 동작을 정확한 시간내에 동작 시킨다. 〈그림 7〉은 각각 네트워크 상황에 따른 불안정한 성능과 안정한 성능을 도시한 것이다.

무선 통신 기반 산업 환경에서는 데이터 전송의 거리가 멀어질수록 신호의 세기가 약해지기 때문에 지연이 생긴다. 이러한 지연으로 인해 생기는 불안정한 상태 동안 지연이 되는 상황을 보정하기 위해서 보상기를 적용한다. 〈그림 7〉에 (a)의 경우 보상기가 적용이 되지 않은 경우로 일반적인 무선 통신 기반 산업 환경에서의 데이터 신호의 형태라고 볼 수 있다. 데이터 송신 중 네트워크 상의 지연 및 손실 등 오류를 발생시키는 영향으로 인하여 신호의 형태가 안정 구간에서 벗어나서 불안정한 성능을 보인다. (b)의 경우 보상기가 적용이 된 경우로 무선 통신 기반 산업 환경은 일반적으로 혼재되어있는 다수의 무선 주파수로 인하여 지연 및 손실이 발생하여 불안정한 성능을 보이지만, 보상기의 적용을 통해서 데이터 신호가 안정한 성능을 보인다.

위와 같은 정확한 동작을 정확한 시간 내에 수행하기 위한 기술인 보상기 알고리즘은 몇 가지 요구 사항에 대한 연구가 진행되고 있다. 첫째, 알고리즘은 패킷 지연 및 지터에 대해서 보상기의 역할을 하기 때문에 유동적인 지연 및 지터의 상황에 적응적으로 보상하기위한 보상 범위를 정해야한다. 둘째, 산업 환경에서의 장비 및 공정 과정은 작은 실수 및 오류로 인하여 치명적인 손해를 끼친다. 그러므로 망에서 발생하거나 제어기 내부에서 발생하는 지연 및 지터의 상황을 예측할 수 있어야한다. 이와 같은 요구 사항에 대해서 무선 통신 기반 산업 환경에서의 보상 알고리즘의 연구가 활발히 진행 되고 있다[14-16].

(2) 복합형 시스템 제어 구조 설계

무선 통신 기술을 산업 환경에 적용하기 위해 고려해야할 다수의 문제점들이 발생함에 따라 안정성 확보가 유리한 유선 통신 기술과 이동성 및 배선 문제를 해결할 수 있는 무선 통신 기술을 결합하여 통합적인 시스템을 운용할 수 있는 복합 시스템 설계 기술이 연구되고 있다. 유·무선 네트워크 복합 기술이 적용된 산업용 시스템에서는 산업 장비들이 케이블로 연결된 유선 장치들과 무선 통신 송수신기로 구성된 무선 장치들 간의 통신을 기본으로 한다. 즉, 무선 장치와 유선 장치는 각각의 네트워크를 형성한다. 유선 네트워크는 산업 장비를 제어하는 다수의 마스터(Master) 장치와 산업 장비가 유선 케이블로 연결되어 있으며, 전체 마스터



〈그림 8〉 유무선 복합 네트워크를 적용한 산업용 제어 시스템

장치를 관리하는 제어기에게 산업 장비의 상태를 전송한다. 이 과정에서 다수 마스터 장치와 제어기 사이는 무선 네트워크를 형성한다[13]. 〈그림 8〉은 유무선 복합 네트워크를 적용한 산업용 제어 시스템을 도시한 모습이다.

2. 시스템 제어 기술의 문제점

산업용 무선 통신 환경에서 시스템 제어 기술은 산업용 유선 통신 환경에서 제공하지 못하는 많은 부분을 수행 및 제공하는 장점이 있다. 그러나 유선 환경에서 제공하는 성능과 비교했을 때 안정도 측면에서 현저히 떨어진다. 안정도 측면에서 보면 유선 기반 통신 환경의 보상기는 보상기의 허용 범위가 매우 좁다. 즉, 패킷의 지연이나 손실이 발생할 확률이 낮으며, 발생하더라도 그 초과 값이 매우 작기 때문이다. 그러나 무선 통신 기반 산업 환경은 시스템이 불안정하기 때문에 보상해야 하는 오차 범위가 넓으며, 네트워크 상황이 매우 유동적이어서 제어기 관점에서 보상 범위를 결정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 보상기 설계 시 보다 네트워크 상황의 정확한 예측과 예측 정보를 이용해 시스템 제어기의 보상 범위를 유연하게 운용할 수 있는 시스템 구조 및 예측 기술 그리고 보상 알고리즘에 대한 연구가 반드시 요구된다.

Ⅲ. 결 론

최근 산업용 실시간 시스템의 성능 지표가 신뢰성과 실시간성 뿐 만 아니라 환경적 요인인 시스템의 유지/보수 용이성, 구축 비용, 공간 제약, 확장성 등으로 복잡해짐에 따라 유선 환경의 한계가 드러나게 되었다. 특히 산업 현장의 규모가 커지고, 관리 장비 수의 증가 등에 따라 경제적 문제가 발생하며, 생산 장비의 이동성이 요구됨에 따라 시스템의 확장성 등이 요구되어 무선 기술을 산업용 실시간 시스템에 적용해야 한다고 인식되고 있다. 또한, 최근 몇 년간 과거에 존재하였던 유선 산업 환경을 무선 산업 환경으로 대체하였을 때 생겼던 많은 문제점을 수많은 알고리즘 기술을 통하여 해결함으로써, 유선과의 성능 차이를 좁혀왔다. 그리고 유·무선 네트워크 복합 기술을 적용하여 산업 자동화 환경에서 반드시 요구되는 생산 설비 네트워크 구축의 신속성과 이동성, 표준화된 통신 프로토콜 사용, 데이터 수집 및 해석화의 명료성, 생산 설비의 유지/보수 용이성 등을 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A2042995)

참 고 문 헌

[1] 무선 네트워킹을 위한 산업용 블루투스 솔루션, www.sena.co.kr

[2] IEEE Std 802.15.4-2006, IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local metropolitan area networks - Specific requirements, Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs), 2006.

[3] 정민호, 이석규, 방승찬, "차세대 무선 랜 최신 기술동향", 전자통신동향분석, 제27권, 제2호, 2012년 4월.

[4] 정민화, "RFID 표준화 동향", 전자파기술, 제15권, 제2호, 2004년 4월.

[5] Nguyen Quoc Dinh and Dong-Sung Kim, "Performance Evaluation of Priority CSMA-CA Mechanism on ISA100.11a Wireless Network", Computer Standards and Interfaces, Vol. 34, No. 1, pp. 117-123, Jan. 2012.

[6] 정운철, 박태준, 신창섭, "무선 센서 네트워크 전송기술 표준화 동향", 전자통신 동향분석, 제25권, 제4호, 2010년 8월.

[7] 김지은, 김세한, 정운철, 김내수,"USN 센서노드 기술동향", 전자통신동향 분석, 제22권, 제3호 2007년 6월.

[8] A.Willing, K.Matheus, "Wireless technology in industrial network", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 6, pp. 1130-1151, Jun. 2005.

[9] J.Nilsson,"real-time control system with delays", Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, 1998.

[10] V.Gupta, B.Hassibi, and R.M.Murray, "Optimal LQG control across a packet dropping link", System&Control Letters, Vol. 56, No. 6, pp. 439-446, Jun. 2007.

[11] Y.Zou,T.Chen and S.Li,"Network-based predictive control of multirate system", IET Control Theory&Applications, Vol. 4, No. 7, pp. 1145-1156, Jul. 2010.

[12] Y.Tipsuwan and M.Y.Chow, "Control Methodologies in Networked Control System", Control Engineering Practice, Vol. 11, No. 10, pp. 1099-1111, Oct. 2003.

[13] Dong Yue, Qing-Long Han and Chen Peng,"State Feedback Controller Design of Networked Control System", International Conference on Control Application, Vol. 1, pp. 242-247, Sep. 2004.

[14] M.Pajic, S.Sundaram, J.L.Ny, G.J.Pappas, and R.Mangharam,"Closing the loop: A simple distributed method for control over wireless network", In Proc. of the ACM/IEEE Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 25-36, Apr. 2012.

[15] L.Schenato, B.Sinopoli, M.Francechetti, K.Poolla, S.S.Sastry,"Foundation of control and estimation over lossy networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, pp.1 63-187, Jan. 2007.

[16] Y.Xu and J.Hespanha, "Estimation under controlled communications in networked control system", In Proc. of IEEE Conference Decision and Control, pp. 842-847, Dec. 2005.

이 원 희

2010년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2011년 9월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정

〈관심분야〉
Wired/Wireless Fieldbus system

유 명 식

1989년 2월 고려대학교 전자전상공학과 학사
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
2000년 8월 SUNY at Buffalo Dept. EE 박사
2000년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

〈관심분야〉
Optical Network, Wireless Network, Ad-hoc routing protocol, Wired/Wireless Fieldbus system, Visible Light Communications