Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2016) 22(12):1027-1033
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.16.0170 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

두 개의 산업용 양팔로봇간의 실시간 동기화 방법

Real-time Synchronization Between Two Industrial Dual-arm Robots

최 태 용*, 경 진 호, 도 현 민, 박 찬 훈, 박 동 일
(Taeyong Choi[1,*], Jinho Kyung[1], Hyunmin Do[1], Chanhun Park[1], and Dongil Park[1])
[1]Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials

Abstract: There is an increasing need for manufacturing systems to produce batches in small quantities. Such manufacturing systems are significantly difficult to develop with conventional automation equipment. Recently, several research groups have applied industrial dual-arm robots to cell production lines. A synchronization method for robots is necessary for the cell production process when robots work in a shared workspace. Conventional automation factories do not need this method because the main control system operates all of the machines or robots. However, our intended application for the developed robot is in small manufacturing environments that cannot install an expensive main control system. We propose an inexpensive and high-performance method with a simple digital in/out channel using a real-time communication protocol. The developed method was validated in a pilot production line for cellular phone packing.

Keywords: robot synchronization, multi-dualarm robot, cell production

I. 서론

산업용 로봇은 1960년대 개발 이후 다양한 분야에 적용되어 생산성을 올리는데 큰 역할을 하고 있다. 특히 자동차 제조공정의 용접, 다양한 뿌리산업 분야에서 고속 Pick& Place에 많이 쓰이고 있다. 하지만 최근에는 그 적용처의 한계가 점점 나타나고 있다. 단순 반복 작업에는 산업용 로봇이 최고의 생산성을 보이지만, 복잡한 조립작업이나 다품종 소량 생산이 주류인 IT제품의 제조 등에서는 여전히 사람이 작업을 하고 있다. 이는 교시 후 단순 반복 작업에는 현재의 산업용 로봇이 월등한 성능을 보여주지만, 유연 공정 대응이 힘들고 작업공간이 사람과 다르기 때문에 공정 대응이 1:1로 안되기 때문이다. 특히 최근 IT제품 제조분야에서 각광받고 있는 셀기반 생산시스템에서는 사람과 유사한 작업을 수행할 수 있는 로봇이 꼭 필요하다.

앞서 서술한 기존 산업용 로봇의 한계를 극복하기 위해서 최근 산업용 양팔로봇이 개발되어 시장에 등장하고 있다[1]. 일본의 Yaskawa는 이미 시장에서 상용으로 구매 가능한 Motoman 시리즈를 출시하여 산업용 양팔로봇 시장을 선도하고 있다. 또한, 고기능을 가진 Baxter나 ABB의 Yumi 등이 상용으로 출시되어 시장에서 접근하기가 용이해졌고, 작업자와 같은 공간에서 협업을 하는 공정에 적용하고자 하는 시도가 세계적으로 이루어지고 있다. 국내에서도 한국기계연구원이 국책사업으로 셀생산기반 IT제품의 제조에 쓰이는 것을 목적으로 양팔로봇 AMIRO를 개발하였다[2-3].

* Corresponding Author
Manuscript received August 29, 2016 / revised October 28, 2016 / accepted November 2, 2016
최태용, 경진호, 도현민, 박찬훈, 박동일: 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실
(taeyongc@kimm.re.kr/jhkyung@kimm.re.kr/hmdo@kimm.re.kr/chpark@kimm.re.kr/partstar@kimm.re.kr)

Copyright© ICROS 2016

하지만 아직까지는 이런 산업용 로봇이 하나의 공정에 복수로 적용되어 협업하는 경우는 없었다. 이는 중앙 통제 시스템 없이 오직 로봇 간의 동기화에 대한 기술연구가 전무하기 때문이다. 실제 양팔로봇을 생산라인에 배치할 때는 공정설계관점에서 입·출력을 가지는 하나의 장비로 간주한다. 즉, 복수의 양팔로봇이 생산라인에 배치되더라도 상호간의 간섭 없이 정해진 시간에 정해진 동작을 하는 것이다. 하지만, 좀 더 복잡한 생산라인에서는 사람이 그러하듯이 로봇간의 작업공간이 겹치며 로봇간의 협업을 요구하는 경우가 많다. 로봇을 적용하지 못하여 사람이 작업을 하는 핸드폰이나 태블릿 같은 IT제품의 조립공정이 대표적인 예다. 예를 들어 2명의 사람이 마주보고 핸드폰 박스를 포장하는 과정의 경우 로봇의 작업공간이 겹치기 때문에, 로봇을 적용하고자 하면 충돌과 간섭에 대한 고려가 절실히 필요하다. 현재 기술로는 중앙 통제 시스템에서 각 로봇을 제어함으로서 이런 문제를 해결할 수 있다. 그 경우 항상 로봇 들이 중앙 통제 시스템에 연결되어야 하는 시스템의 복잡성이 문제가 되고, 중앙 통제 시스템 구축에 들어가는 비용과 작업의 유연성이 문제가 된다. 작업의 변화가 없는 대규모 생산라인에서는 중앙 통제 시스템이 해결책이 될 수 있지만, 셀생산 방식의 유연 생산 라인이나, 중앙 통제 시스템을 갖출 수 없는 소규모 뿌리산업위주의 생산 현장에서는 불가능한 방법이다.

본 연구에서는 소규모 사업장이나 셀기반 생산라인에서 중앙제어시스템 없이 복수의 양팔로봇을 동기화시키기 위한 방법을 찾고자 한다. 이런 문제에 대한 해결은 크게 두 가지로 접근할 수 있다. 첫째는 로봇의 지능과 센싱 기술이 급격히 발달하여 충돌을 감지하고 회피하는 경로를 실시간으로 생성하는 방법이다. 이는 현재의 기술로는 불가능하다. [4]의 경우처럼 동작이 느린 서비스 로봇간의 저성능의 동기화를 하고자 하는 시도는 있었다. 하지만, 산업용 로봇

의 고속 동작에서는 충돌을 감지하기도 힘들뿐더러, 그 때마다 충돌회피 경로를 실시간으로 구할 수 있는 알고리즘과 초소형 슈퍼컴퓨팅 기술도 없다. 두 번째 방법은 충돌하지 않도록 사전에 계획하여 복수의 로봇을 동기화시켜 제어하는 것이다. 이는 앞서 서술한 중앙 통제 시스템 방식의 접근이며, 실제로 생산라인에서는 후자를 많이 사용한다. 로봇은 하나의 장비로 인식되어 중앙 통제 시스템에 연결되어 동기 동작을 하는 것이다. 이렇게 구현할 경우 위해서는 설치·유지비용과 유연성 측면에서 문제가 되기 때문에, 중앙 통제 시스템 없이 로봇을 동기화하는 방법을 소개하고자 한다.

개발된 시스템은 실제 휴대폰 포장공정에 적용되어 양팔로봇 2대가 마주보고 박스포장을 수행하는데 사용된다. 중앙 제어장치 없이 복수의 로봇의 실시간 동기화를 위해서 본 개발에서는 로봇 간 디지털신호를 주고 받기위한 Digital Input/Output (DIO) 채널, DIO채널의 실시간 처리를 위한 실시간 제어 시스템, 관련 동작을 사용자에게 쉽게 제공하기 위한 동기화 언어를 구현하였다.

II. 적용 공정 및 동기화 적용 양팔로봇

1. 적용 공정

휴대폰은 대표적인 IT제품으로 생산 주기가 짧기 때문에 대량 생산 라인 구축이 불가능하다. 대표적인 휴대폰 제조업체인 미국 애플사의 경우도 생산은 중국의 팍스콘의 제조인력을 통해서 생산하고 있다. 국내 기업인 삼성이나 LG의 경우도 사람이 수작업으로 생산·검수·포장을 하고 있다. 본 연구에서는 휴대폰과 관련된 많은 생산 라인 중 박스 포장 공정에 두 대의 산업용 양팔로봇을 적용해보고자 한다.

휴대폰 박스 포장을 위해서 그림 1과 같은 셀 생산 라인을 설계하였다. 설계된 생산라인에는 2대의 양팔로봇이 마주보고 배치되고, 각 로봇 주변으로 휴대폰 액세서리들이 배치된다. 액세서리는 이어폰, 전원어댑터, 전원선, 매뉴얼, 배터리, 배터리 크래들, 중간 덮개 등이 배치된다. 로봇 2대가 번갈아가며 각각의 액세서리를 정해진 순서에 따라서 휴대폰 박스에 투입하는 공정이다. 그림 1의 로봇이 마주보는 가운데 있는 원 부분이 두 대 양팔로봇의 작업공간이 겹치는 부분이다. 컨베이어 위로 5개의 휴대폰 유닛박스가 있고, 그 속에 액세서리 7종에 해당하는 총 35개를 번갈아가며 채워 넣는 공정이다. 이 때 Robot1이 Object 3 혹은 Object 4를 유닛박스에 넣는 동작과 Robot2가 Object 1 혹은 Object 2를 넣은 동작은 겹칠 경우 양팔로봇의 팔이 충돌하는 상황이 벌어진다. 마찬가지로 Robot1이 Object 5 혹은 Object 6을 유닛박스에 넣는 동작과 Robot2가 Object 7을 넣은 동작은 겹칠 경우 양팔로봇의 팔이 충돌한다. 로봇 간의 충돌 외 주변 환경과의 충돌은 사전에 환경 정보를 가지고 있기 때문에 충돌하지 않는 궤적을 실시간 생성한다. 하지만, Robot1 입장에서 Robot2의 팔의 위치는 Robot2가 궤적을 생성하기 전에는 알 수 없는 실시간으로 변하는 예측 불가능한 고속 동작 장애물이기 때문에, 정확한 위치를 획득할 수 있는 방법이 없다. 이에 대해서 본 연구에서는 근원적으로 공간을 분리시켜 그림 1의 'Collision Area'를 한 번에 한 대의 로봇만 접근하도록 함으로서 충돌 가능성을 없애고자 한다. 이 때 개발한 동기화 기술이 적용된다.

각각의 로봇은 개별 제어기로 연결된다. 제어기는 실시간 OS를 탑재한 PC기반 제어기를 사용한다. 당연히 사용자 접근이 용이하지 않은 기존 산업용 로봇 제어기의 사용은 불가하고, 알고리즘 개발 측면에서 embedded system을 활용한 제어기 보다 PC기반 제어기가 많이 유리하다. 비용 측면에서 추후 embedded system으로 바꾸는 것은 가능하지만, 현재 단계에서는 개발에 유리한 PC기반 제어기로 구축되어 있고, 다양한 공정 관련 알고리즘이 개발·탑재되고 있다.

2. 산업용 양팔로봇 개발

해당 생산 공정을 위해서 별도의 양팔로봇을 개발하였다. 상용 양팔로봇의 경우 개발자용 프로토콜이 공개되지 않는 경우가 대부분이다. 단순 동작에 관련된 인터페이스만이 제공된다. 양팔로봇 시스템 개발은 로봇 하드웨어뿐만 아니라, 로봇 실시간 제어기, 전용 언어 등을 포함한다. 개발된 로봇은 그림 2와 같다. 실제 사람과 유사한 관절구조를 갖추었고, 크기 또한 사람과 유사하다. 각 팔에 7자유도

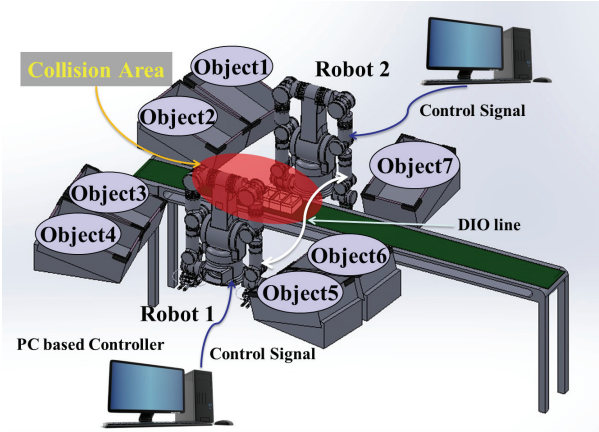
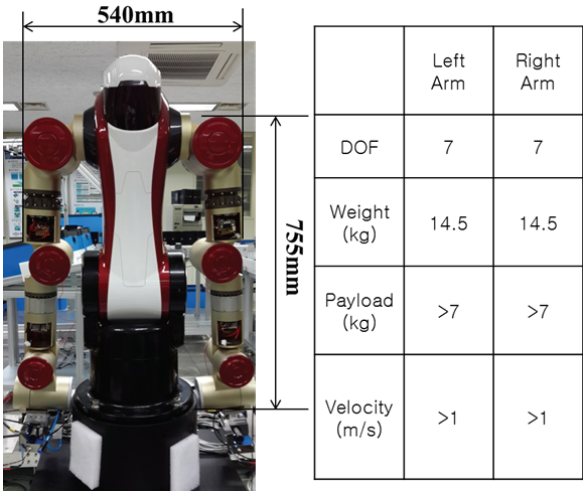


그림 1. 두 대의 양팔로봇이 적용된 대상 생산 공정의 개념도.

Fig. 1. Conceptual design of target manufacturing process with two dual-arm robots.



	Left Arm	Right Arm
DOF	7	7
Weight (kg)	14.5	14.5
Payload (kg)	>7	>7
Velocity (m/s)	>1	>1

그림 2. 개발된 양팔로봇.

Fig. 2. The developed dual-arm robot.

를 가지고, 각 팔의 무게는 15kg이하로 가볍게 구현되었으며, 최대 부하는 7kg까지 가능한 상용로봇에 비해서 파워특성이 뛰어난 산업용 양팔로봇이다. 또한 다른 양팔로봇과 달리 허리에 2자유도의 여유자유도를 가지고 있어서 작업공간이 크고, 사람과 유사한 동작을 하는 것이 가능하다.

로봇에 사용된 구동모듈은 중공형으로 모터, 절대엔코더, 감속기, 모터드라이버를 포함한다. 즉 외부에 별도의 모터 드라이버를 위한 전장을 필요로 하지 않기 때문에 공정 변화 시 위치 이동이 쉽다. 다만, 전원부는 내장이 불가능하여 허리 아래 부분에 박스 형태로 탑재하였다.

각 구동모듈은 실시간 통신 방법인 EtherCAT으로 연결된다. EtherCAT은 공개표준으로 실시간 통신을 요하는 다양한 장비에 주로 적용되고 있다[5]. 최근에는 물리적 하드웨어의 단순성과 성능의 우수성으로 로봇에도 많이 적용되고 있다. 본 연구에서 사용하는 양팔로봇의 경우 각 모듈의 중공축을 통과하는 것은 LAN 통신에 필수적으로 필요한 4선 wire와, 모터 구동용 전원선, 로직동작용 전원선 등이 전부이다. 최종적으로는 외부에 있는 PC기반 실시간 제어기와 Shielded LAN선으로만 연결된다. 따라서 결선이 쉽고 간단한 장점이 있다. 또한 EtherCAT의 경우 실시간 통신 방법으로 Ethernet에 할당한 100$Mbps$의 대역폭 전부를 EtherCAT데이터 전송에 할당하여 쓰기 때문에 굉장히 빠르다[6]. 구현에 따라서 다르지만, 외국의 사례를 보면 10여개의 모터 서보를 제어하는데 μs수준의 실시간 통신속도를 보여주고 있다. 특히 EtherCAT은 제어기에 별도의 하드웨어를 요구하지 않아서, 저렴하고 하드웨어 개발이 쉬운 장점이 있다. 즉, 일반 PC와 Lan card와 Shielded lab선만이 요구되기 때문에, 다른 특수 통신용 카드와 케이블을 요구하는 fieldbus 고속 시리얼 통신에 비해서 월등이 비용이 적게 든다.

III. 실시간 동기화 방법

1. 실시간 제어 시스템 개발

산업용 로봇은 그 정밀성과 속도 때문에 실시간 제어시스템기반에서 동작해야 한다. 본 개발에서 사용한 EtherCAT 또한 실시간 통신프로토콜이기 때문에 실시간 OS에서 그 성능이 나타난다. 본 개발에서는 실시간 제어 시스템은 microsoft windows 기반으로 구현하였다. 일반적으로 가격적인 문제 때문에 linux에 실시간 Patch를 해서 사용하는 것을 선호하고, 경우에 따라서는 OS 없이 구현하는 경우도 많다. 하지만, 단순히 개발 목적일 경우 windows는 그 편의성 때문에 많은 개발자들이 선호한다. 다만, windows 는 선점형 OS가 아니기 때문에 기본적으로는 실시간 OS의 특성을 가지고 있지 않다. Windows가 실시간성을 가지도록 하기 위해서 본 개발에서는 상용소프트웨어인 [7]의 intervalzero의 RTX를 사용하였다. EtherCAT통신을 위한 물리계층은 [8]의 상용소프트웨어인 Koenig사의 KPA를 사용하였다. PC기반 실시간 제어 시스템에는 물리적인 통신 계층 외에도 제어를 위해 별도로 개발한 실시간 기구학 및 동역학 알고리즘도 탑재하였고, 복수개의 CPU를 사용함으로서 고연산부하에 대응하도록 하였다. 그림 3에서 개발한 PC기반 제어소프트웨어의 구조를 보이고 있다.

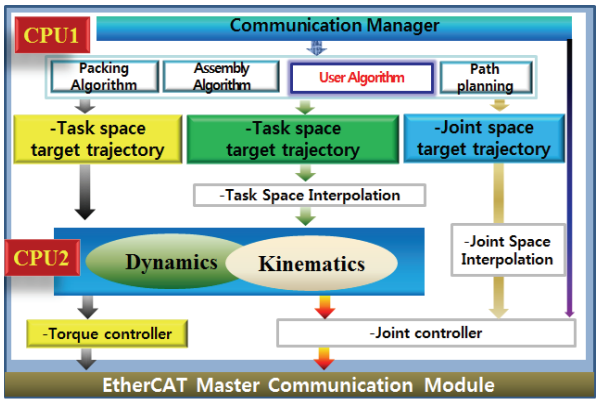


그림 3. 개발된 실시간 제어 시스템의 구성 및 개념도.

Fig. 3. The concept and configuration of the developed real-time control system.

보통의 산업용 로봇이 6자유도에 그치는 것과 달리, 개발한 양팔로봇은 각 팔 7자유도와 허리 2자유도를 포함한 16자유도를 가지고 있기 때문에, 연산량이 많고 여유자유도를 고려한 역기구학을 풀어야 한다. 일반적으로 산업용 로봇에서 정밀도와 속도를 확보하기 위해서는 1㎑ 이상의 고속 제어주기를 확보해야 한다. 예를 들어 cartesian space에서 움직일 경우, 0.001초 이내에 각 관절의 위치 값을 읽고, 목표 cartesian space에서 보간을 수행하고, 16여유자유도에 대한 역기구학 연산을 하고, 목표 관절 값을 추종하기 위한 전류 값을 만들어 내야 한다.

실험적으로 개발한 PC기반 제어기의 실시간 성을 확인하였다. 전체 16축에 대한 여유자유도를 고려한 역기구학 연산 및 EtherCAT을 통한 구동모듈과의 입·출력 통신, torque기반 관절 제어기 등을 구동하였다. 그림 4에서 가로축은 제어주기를 측정한 횟수이며, 세로축은 매 횟수마다 측정한 제어주기이다. 이 때 0.001초의 제어시간 내에서 모든 동작이 끝나는 것을 확인할 수 있었고, 최대 jitter도 1% 이내임을 확인할 수 있었다.

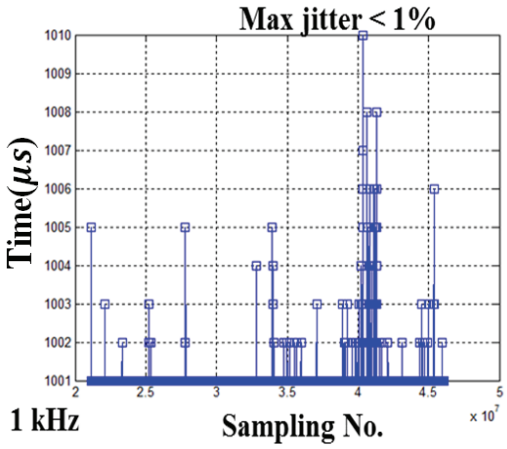


그림 4. 실시간 제어 시스템으로 1khz 제어시 Jitter.

Fig. 4. Jitter when control a dual-arm robot with the developed PC based controller.

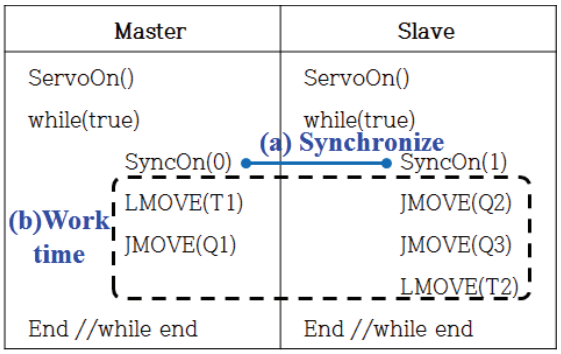


그림 5. 동기화 명령 사용 예시.

Fig. 5. Example of synchronization command.

2. 실시간 동기화 명령어 개발

중앙 통제 시스템 없이 두 양팔로봇을 동기화하기 위해서 본 개발에서는 DIO를 로봇간의 동기화 메세지 전달 방법으로 활용하였다. 이는 성능과 가격적인 면을 둘 다 고려한 방법이다. DIO는 입출력 속도가 ns수준이고, 유전율에 따라 다르기는 하지만 통상적으로 빛의 속도에 가까운 속도로 전달되기 때문에, ms수준의 제어주기에서는 시간 지연이 거의 없는 정보전달 방법이다. DIO의 디지털 신호는 EtherCAT 통신에 연결되어 전체 제어 주기인 1kHz내에서 처리가 이루어진다. 가격적인 면에서도 별도의 중앙 통제 시스템과 비교할 수 없이 저가의 DIO 장치만 있으면 되기 때문에, 전체 양팔로봇 시스템의 가격을 고려하면 추가 비용이 없다고 봐도 무방하다. DIO는 개발한 산업용 양팔로봇에 DI, DO각 1채널씩 장착된다. 필요시 더 많은 DIO채널을 구축하여 다양한 정보를 로봇 간에 전달하는 것도 가능하다.

장착한 DIO를 사용하여 동기화를 구현하기 위해서 별도의 로봇제어 언어로 SyncOn()을 제안하고 구현하였다. 기개발 로봇제어 언어는 다른 산업용 로봇과 같은 PTP관련 언어 외 양팔로봇에 특화된 양팔 간의 협조를 위한 명령어 세트 등을 포함한다. SyncOn에서 사용되는 변수는 복수로봇에서 로봇의 index이다. 즉, SyncOn(0)은 0번 로봇이 SyncOn을 수행했다는 뜻이다. 다른 한편으로는 index 0은 복수의 로봇에서 Master로봇에게 부여되는 index이다. 예를 들어 그림 5와 같은 사용이 가능한데, SyncOn(0), SyncOn(1)을 호출한 부분에서 Master에 해당하는 robot 0과 Slave에 해당하는 robot 1은 내부적으로 동기화를 수행하게 된다. 즉, Master측의 LMOVE(T1)과 Slave측의 JMOVE(Q2)는 동시에 시작하게 된다. 따라서 개발한 동기화는 언어별 혹은 단위 행동별 동기화 특성을 가진다. 예에서는 While loop내부에 있기 때문에, 반복적으로 동작하면서 동일하게 그림 5의 (a)에서 동기화를 수행하고, (b)의 Worktime은 로봇별도 동기화 없이 진행이 된다.

이를 시간 측면에서 보면 그림 6과 같은 동작을 한다. Robot1이 t_2에서 SyncOn을 호출하고, Robot2가 t_1에서 SyncOn을 호출할 경우 먼저 호출된 Robot2는 Robot1이 SyncOn을 호출할 때까지 기다렸다가 동시에 다음 동작을 시작한다. 그리고 Robot1과 Robot2가 실제로 동작이 다르기 때문에, 동시에 시작했더라도 동시에 끝나는 것은 아니다.

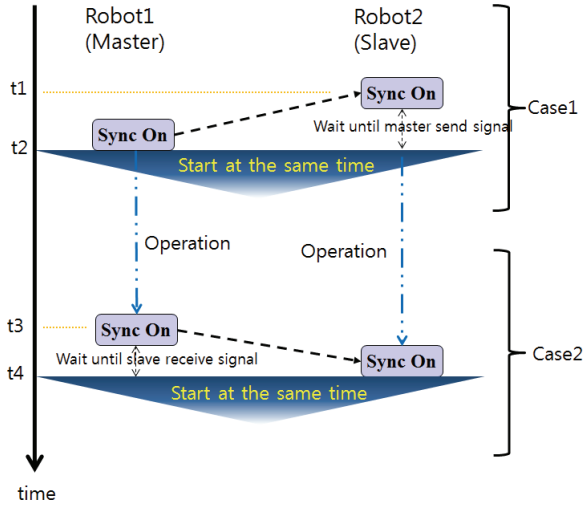


그림 6. 동기화 명령 사용 시 시간에 따른 동작 흐름도.

Fig. 6. The operation flow with synchronization command by time.

다음 동기화 시점인 t_3에서는 이전과 달리 Robot1이 먼저 SyncOn을 호출하고, Robot2가 t_4에서 SyncOn을 호출하는 것이 가능하며, 이때도 역시 SyncOn이 두 로봇에서 다 호출되었을 때 다음 동작으로 진행한다. 다른 예로 그림 5의 경우에서 Master의 LMOVE(T1) 이후 SyncOn()을 하고, Slave에서 JMOVE(Q3)이후에 SyncOn()을 하면 Master와 Slave는 그 시점에서 동기화를 수행하고, 다음 동작인 Master의 경우 JMOVE(Q1), Slave의 경우 LMOVE(T2)등을 동시에 시작하게 된다.

3. SyncOn 명령어 구현

SyncOn을 호출했을 때 실제 내부에서는 많은 메시지가 Master와 Slave사이에서 DIO를 통해서 전달된다. 기본적으로 제안하는 방법은 한 개의 Master와 복수의 Slave로봇 간에 동기화가 가능한 메시지를 구현하고 있다. 다시 말하면 복수의 로봇 중 하나는 Master로 미리 정의되어야 한다는 뜻이다.

그림 7은 Master와 Slave간 동기화시 시간흐름을 나타내는 것이다. 그림 7의 S1,S2,S3,S4는 “Signal”을 나타내고, 실제로는 DIO를 통한 On/Off 신호의 전달이다. Master에서 Slave로 전달되는 S1,S3의 경우는 Master robot의 DO출력이

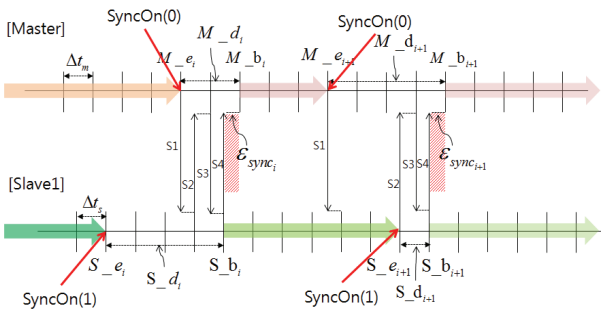


그림 7. 로봇간의 동기화 메시지의 시간 흐름도.

Fig. 7. Timing chart of synchronization message between robots.

Slave robot의 DI입력으로 들어가는 것이다. 유사하게 Slave에서 Master로 전달되는 S2,S4의 경우는 Slave robot의 DO 출력이 Master robot의 DI입력으로 들어가는 것이다. S1,S3 혹은 S2,S4는 별도의 신호이지만 물리적으로는 같은 DIO채널을 이용한다. 즉, S1신호 후 S2를 받으면 S1은 reset된다. 다시 말하면 Master의 DO는 S1에서 set되고, S2신호가 DI를 set시키면 다음 절차를 위해서 DO를 reset한다. 그리고 필요시 다음 제어주기에 DO를 set함으로서 S3을 전송한다.

M_e, M_b, S_e, S_b, 는 각각 Master 동작 end와 begin, Slave 동작 end와 begin을 나타낸다. $\Delta t_m, \Delta t_s$는 각각 Master와 Slave의 제어단위시간이다. 다시 말하면 제안하는 동기화 방법에서 각 로봇들이 같은 제어주기를 가질 필요는 없다. M_d, S_d는 SyncOn후 실제 동작을 시작할 때까지의 지연시간을 의미한다. Master는 SynOn 명령 시 항상 그림 7의 S1 메시지를 먼저 보낸다. 의미는 “Are you ready?”이다. Slave는 SyncOn 명령시 S1 메시지가 올 때까지 기다리거나, 이미 S1이 있으면 S2를 Master로 전송한다. S2의 의미는 “I am ready”이다. 이 후 Master는 S3을 Slave에 전송한다. 의미는 “Let’s go”다. S3를 수신한 Slave는 S4를 Master 로 보낸다. 의미는 “Ok”다. 이때 Slave는 S4를 송신하고 바로 다음 동작을 시작한다. Master는 S4를 수신하고 바로 다음 동작을 시작한다. 따라서 이론적으로 (1)과 같이 동기화 오차 ϵ_{sync} 는 제어주기 이하가 된다. (1)에서 f_{cm}은 제어주파수이고, Δt_m은 제어주기이다. 본 개발에서는 Δt_m은 0.001초 이하다. 하지만, M_d와 S_d는 얼마든지 길어질 수 있다. 먼저 끝낸 로봇은 동기 대상인 다른 로봇이 작업을 끝내고 SyncOn을 호출할 때까지는 기다려야 한다.

$$\epsilon_{sync} < \left(\frac{1}{f_{c_m}} = \Delta t_m\right) \tag{1}$$

IV. 양팔로봇을 이용한 동기화 실험

개발한 동기화 방법의 적용 실험을 위해서 그림 8과 같은 실제 데모 생산라인을 구축하였다. 자체적으로 개발한 두 대의 산업용 양팔로봇과 PC기반 제어기 및 양팔로봇 언어 등을 적용하였다. 대상 공정은 앞서 제시한 휴대폰 박스에 액세서리(이어폰, 전원어댑터, 전원선, 매뉴얼, 배터리, 배터리 크래들, 중간 덮개 등)를 넣는 공정이다. 실제 구현 시에는 액세서리가 정해진 위치로 공급되지 않고 공급 위치가 가변적일 수 있음을 가정하여, 비전시스템을 적용하여 가변 위치에 대응 가능하도록 구현하였다. 이는 원래 사람이 해당 공정을 수행할 때와 유사한 조건을 부여하기 위함이다. 사람은 공급되는 물체의 위치에 상관없이 액세서리를 집어서 포장을 한다. 로봇을 적용하기 위해서 액세서리별로 전용 공급 장치를 추가하면 비용, 공간 등에서도 문제가 있지만, 목적으로 하는 유연 생산 공정 적용이 불가능한 시스템이 된다. 휴대폰이 변경되면 그에 따라 액세서리가 바뀌는데, 그 때 마다 전용 공급 장치를 새로 제작하고 생산 라인에 적용할 수는 없다.

설계한 데모 생산라인에서 두 양팔로봇의 동작순서는 그림 1의 액세서리 위치 및 인덱스를 기준으로 표 1과 같이 정리할 수 있다. Robot 1이 Master이고, Robot 2가 Slave이다. 그림 8의 왼쪽의 로봇이 Robot 1이고, 오른쪽의 로봇이 Robot 2이다. 두 대의 로봇이 번갈아가며 액세서리를 집어서 휴대폰 박스에 투입하는 과정이다. 휴대폰 박스가 두 양팔로봇의 작업공간의 충돌지점이기 때문에 동기화를 통해 순차적으로 휴대폰 박스에 액세서리를 삽입하는 것이 중요하다.

이를 위해서 그림 9와 같이 공정 시스템 및 절차를 설계하였다. 크게 해당 공정에서 양팔로봇은 좌측·정면·우측 세 가지 작업공간에서 작업을 한다. 왜냐하면 좌·우로 액세서리가 놓여있기 때문에 액세서리를 집는 작업을 허리를 좌로 회전 혹은 우로 회전한 후 수행한다. 그리고 허리를 정면으로 회전했을 때는 핸드폰 포장 박스에 투입하는 작업

표 1. 두 양팔 로봇별로 할당된 작업 대상 물.

Table 1. Target objectives assigned to two dual-arm robots.

	Robot	Operation
Step 1	1(Master)	Object 3,4
Step 2	2(Slave)	Object 2,1
Step 3	1(Master)	Object 6,5
Step 4	2(Slave)	Object 7

그림 8. 실 구현된 두 대 양팔로봇을 이용한 생산라인.

Fig. 8. Physical manufacturing environment with two dual-arm robots.

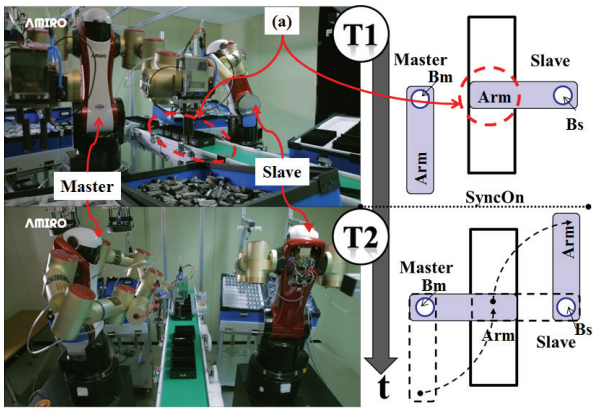


그림 9. 개발된 동기화 방법을 적용한 두 대 양팔로봇의 생산 공정 실적용.

Fig. 9. Designed manufacturing process with two dual-arm robots using the developed synchronization method.

을 수행한다. 이런 로봇 허리의 동작에 착안하여 두 로봇이 동시에 정면을 향하지 않도록 동기화하였다.

그림 9에서 (a)가 두 로봇 간의 충돌이 가능한 지점이고, 이를 회피하기 위해서 그림의 T1단계에서는 Slave가 (a)지점에서 작업을 하고, Master는 우회전하여 액세서리를 잡는다. T2단계에는 Master가 정면으로 회전한 후 T1단계에서 잡은 액세서리를 휴대폰 박스에 집어넣고, Slave는 우회전하여 새로운 액세서리를 잡는다. 이렇게 로봇 두 대가 톱니바퀴가 돌아가듯이 번갈아가면서 충돌지역 (a)에 접근하도록 한다. 단계를 넘어갈 때는 SyncOn 명령을 통해서 동기화를 하여 충돌 없이 회전하도록 했다. 그림 9에서 Bs는 Slave 로봇의 Base위치, Bm은 Master 로봇의 Base위치를 뜻한다.

본 연구의 동기화 방식은 기본적으로는 자체 시간지연은 없다고 봐도 무방하다. 연산량이 거의 없고, 전체 EtherCAT 통신 대역에서 차지하는 데이터 양도 미미하다. 다만, 실제 구현에 있어서는 동기화 성능은 로봇 제어기에 의존적이다. 즉, 실험에서는 0.001s의 제어주기 동안 16자유도의 양팔로봇에 장착된 다양한 위치센서를 비롯한 다양한 상태 값을 읽고, 역기구학 및 중력보상 값을 계산한 후 축제어기 계산 결과로 토크 명령을 각 관절 제어기에 EtherCAT통신으로 전달한다. 이 때 동기화 명령도 같이 처리된다. 0.001s안에 이 모든 것이 가능한 것은 본 연구에서 개발한 고효율의 기구학 및 동역학 소프트웨어 덕분이다. 개발 시스템에서 더 짧은 시간에의 동기화는 위해서는 로봇 제어 알고리즘이나 소프트웨어의 개선을 통해서 가능하며, 제어 알고리즘 연산량이 훨씬 작은 매니퓰레이터 등에 적용시에는 제어주기를 단축함으로서 동기화 시간도 단축 가능하다.

V. 결론

산업용 양팔로봇은 미래 생산 공정에 필요한 유연 생산성, 사람과 비슷한 작업 가능성 등으로 각광받고 있다. 하지만 현재까지의 기술은 전체 생산라인에서 단위 장비로 로봇을 사용하는데 그치고 있다. IT제품과 같은 셀 기반 생산라인에서는 사람과 마찬가지로 복수 로봇의 협업을 요하는 경우가 많고, 그 경우 로봇간의 동기화에 대한 고려가 꼭 필요하다. 본 논문에서는 중앙 통제 시스템 없이 두 개의 양팔로봇이 협조 작업을 할 수 있는 동기화 방법을 제시하고 실제 공정에서 그 결과를 보였다. 제시한 방법은 비단 양팔로봇뿐만이 아니라 다양한 로봇에 적용이 가능하다.

REFERENCES

[1] C. Smith, Y. Karayiannidis, L. Nalpantidis, X. Gratal, P. Qi, D. V. Dimarogonas, and D. Kragic, “Dual arm manipulator - a survey,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 10, pp. 1340-1353, 2012.

[2] T. Choi, H. Do, C. Park, D. Park, and J. Kyung, “Development of small-sized industrial dual-arm robot with convenient interface,” *International Journal f Engineering and Innovative Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 1-6, 2013.

[3] P.-K. Kim, H. Park, J.-h. Bae, J.-H. Park, D.-H. Lee, J. Park, J.-H. Kyung, and M.-H. Baeg, “Intuitive programming of dual-arm robot tasks using kinesthetic teaching method,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 8, pp. 656-664, 2016.

[4] S.-J. Chung and J.-J. Slotine, “Cooperative robot control and concurrent synchronization of Lagrangian systems,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 3, pp. 686-700, 2009.

[5] S.-M. Park, C.-J. An, H. Kim, H.-C. Yi, and J.-Y. Choi, “Implementation of linux RTAI open CNC system based on EtherCAT network,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 10, pp. 977-981, 2015.

[6] G. Cena, I. C. Bertolotti, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino, “Evaluation of EtherCAT distributed clock performance,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 20-29, 2012.

[7] IntervalZero, “IntervalZero RTOS Platform,” Available at http://www.intervalzero.com, 2016.

[8] Koenig, “KPA EtherCAT Master,” Available at http://koenig-pa.de/products/kpa-ethercat-master, 2016.

최 태 용

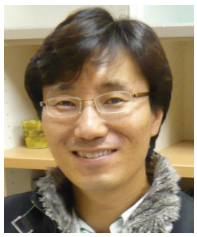
2003년 POSTECH 전자전기공학과 졸업. 2010년 KAIST 전기전자공학과 박사. 2010년 2월~2010년 12월 삼성전자 생산기술연구원 책임연구원. 2011년 1월~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실 선임연구원. 관심분야는 산업용 로봇 제어 및 응용. 산업 지능 등.

경 진 호

1985년 한국항공대학교 기계공학과 졸업. 1988년 한국항공대학교 기계공학과 석사. 2003년 KAIST 기계공학과 박사. 2003년~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실 책임연구원. 관심분야는 산업용 로봇 설계 및 제어. 인간로봇협조 시스템.

도 현 민

1997년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1999년 서울대학교 전기공학부 석사. 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사. 2004년 8월~2007년 3월 현대자동차 선임연구원. 2007년 4월~2010년 5월 AIST(일본) 특별연구원. 현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실 선임연구원. 관심분야는 산업용 로봇 제어 및 응용. 로봇 안전 기술, 신경망 기반 학습 및 적응 제어 등.



박 찬 훈

1994년 영남대학교 기계공학과 졸업. 1996년 POSTECH 기계공학과 석사. 2010년 KAIST 기계공학과 박사. 1996년 2월~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스 연구실 책임연구원. 관심분야는 산업용 양팔로봇의 설계 및 제어, 군사용 양팔로봇의 설계 및 제어, 고속 병렬형 로봇의 설계 및 제어, 인간-로봇 협업을 위한 직관적 교시기술 등.

박 동 일

2000년 KAIST 기계공학과 졸업. 2002년 KAIST 기계공학과 석사. 2006년 KAIST 기계공학과 박사. 현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실 선임연구원. 관심분야는 로봇 설계, 해석 및 응용 등.