

## Multiple Robot 시스템의 제어

崔明煥

江原大學校 制御計測工學科

### I. 서론

산업체에서 자동화에 대한 관심이 높아지면서 산업용 로봇은 제조업체의 생산공정에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 로봇의 이용으로 얻을 수 있는 장점, 즉 생산성증대, 생산원가 절감, 제품의 질 향상 등 때문에 로봇의 적용 분야는 점차 확산되고 있다. 그러나 현재 사용되는 로봇은 대부분 단순반복작업 분야에 제한되고 있으며 이러한 예로서, 부품의 pick and place, 가공기계의 loading and unloading, spray painting, spot welding 등 프로그래밍된 작업을 기계적으로 반복하는 작업들을 들 수 있다. 이러한 제한을 극복하고 로봇의 적용분야를 확장하기 위해 최근에는 로봇 센서, 로봇 vision system 등을 이용하여 복잡한 작업을 수행할 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 로봇이 보다 넓은 분야에서 효율적으로 사용될 수 있으려면 각종 센싱능력을 갖는 지능로봇의 개발이 필요하다.

주어진 작업공간에서 로봇을 한대만 사용한다면 그 로봇이 수행가능한 작업의 종류는 크게 제한되며, 따라서 로봇 작업의 유용성을 증대시키려면 두대 이상의 로봇을 사용하는 것이 필요하다. 여러대의 로봇이 하나의 작업을 분담하여 수행하면 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 여러대의 로봇을 통합제어함으로써 작업수행시간을 단축시키거나, 단일 로봇이 수행할 수 없는 복잡하고 어려운 작업도 두대 이상의 로봇이 함께 작업하면 수행가능하다. 예를 들면 단일 로봇의 부하용량을 초과하는 작업물을 취급하거나 구조가 복잡한 부품의 조립작업이 있다. 무인 자동화공장에서 적용될 로봇 시스템은

거의 모든 종류의 생산공정을 수행할 수 있어야 하며, 로봇 들은 통합제어되어 협력작업해야만 로봇과 작업공간의 효율을 극대화 시킬 수 있다. 공장환경 외의 응용분야로는 로봇의 주변환경을 작업에 편리하도록 구조화할 수 없는 분야들, 예를 들면, 해저작업, 우주공간에서의 작업등이 있으며, 이러한 경우에 두대 이상의 로봇의 공동협력작업으로 복잡한 작업을 수행할 수 있다.

최근에 여러대의 로봇이 한 작업영역에서 공동작업하는 multi-robot 시스템의 개발과 응용이 많은 관심의 대상이 되고 있다. Multi-robot 시스템의 제어를 위해서는 단일로봇의 제어이론과 함께 여러대의 로봇이 함께 작업함으로써 발생하는 문제들을 파악하여 해결하여야 하며, 이에 관한 연구가 현재 국내외에서 활발히 진행되고 있으며, 분야에 따라서는 이미 많은 연구결과가 발표된 바 있다. 본고에서는 multi-robot 의 제어연구에서 관심이 되는 문제들을 단일 로봇의 제어와 비교하여 살펴보고자 한다.

### II. Multi-robot 의 운동계획과 Coordination

여러대의 로봇이 수행하는 공동작업은 작업물과 로봇의 접촉형태에 따라 크게 두가지로 분류할 수 있다. 첫째는 여러 로봇이 같은 작업공간내에서 작업하지만 각각 서로 다른 작업물을 갖고서 작업하는 형태이다. 예로서 하나의 생산공정을 여러 로봇이 분담하여 작업하는 경우 또는 조립작업에서 각 로봇이 서로 다른 부품을 잡고서 조립하는 경우가 이에 해당된다. 이러한 형태의 multirobot 시스템에서 각

로봇의 제어는 기본적으로 단일 로봇의 제어와 크게 다르지 않으나, 로봇과 로봇사이의 충돌문제를 고려해야 하며 또한 전체 로봇 시스템의 입장에서 본 작업효율의 극대화 등의 과제를 해결해야 한다. 이 형태의 시스템을 편의상 loosely coupled multi-robot 시스템이라고 한다. 둘째 형태로는 여러 로봇이 하나의 작업물을 잡고서 작업하는 형태이다. 예로서 단일 로봇의 부하용량을 초과하는 무거운 작업물을 두 대의 로봇이 같이 잡고서 이동하는 경우, 단일 로봇이 잡기에는 부피가 너무 큰 작업물을 두 대의 로봇이 잡고서 작업하는 경우, 사람의 손과 유사한 multi-fingered 로봇 손이 물체를 잡고서 작업하는 경우 등이 이에 해당된다. 이러한 형태의 multi-robot 시스템에서는 첫째 형태의 경우와 달리 로봇과 물체 그리고 바닥면사이에 closed chain 이 형성되며 이에따라 발생하는 새로운 문제들을 해결하여야 한다. 이 형태의 시스템을 편의상 tightly coupled 시스템이라고 한다.

두대 이상의 로봇이 loosely coupled 형태로 같은 작업공간내에서 작업을 수행할때, 각 로봇은 다른 로봇에게 장애물(obstacle)이 될수 있으며, 로봇들이 통합제어되지 않고 독립적으로 작업한다면 로봇간에 충돌(collision)이 발생할수 있다. 따라서 공동작업공간(common workspace)내에서 작업하는 모든 로봇들은 서로간의 충돌을 피하기위해 coordination 되어야 한다. 이와같이 로봇과 장애물사이에서 필요한 작업을 수행하기 위한 운동계획을 발생하는 작업을 무충돌 운동계획(collision free motion planning)이라 하며 조립자동화와 무인공장의 실현을 위해서는 multi-robot 의 운동계획이 중요한 역할을 담당한다. 대부분의 무충돌 운동계획 방법은 예견되는 충돌을 발견하는 단계(collision detection)와 충돌이 예견될때 이 충돌을 회피하는 단계(collision avoidance)의 두 단계로 구분된다. 충돌회피 방법에는 heuristics를 이용한 단순하고 실제적인 방법에서 부터 계산시간을 많이 필요로 하는 최적화(optimization) 이론의 응용방법등 이 있다.

무충돌 경로계획은 로봇의 이동경로가 변경가능한가의 여부에 따라 운동계획의 형태가 결정된다. 로봇의 이동경로가 변경될수 없을때 로봇이 장애물을 피해가려면 정해진 경로상에서 가속및 감속을 조절하여야 한다. 반대로, 로봇의 이동경로가 변경가능할경우는 충돌을 피하는 새로운 경로 및 운동제

적을 찾아야 한다. 로봇의 이동경로가 변경될수 있을때 multi-robot 시스템의 무충돌 운동계획의 예가 그림 1, 그림 2 에 있다.<sup>[1]</sup> 같은 작업공간 내부에 세 대의 고정된 로봇과 하나의 고정물체가 위치해 있고, 각 로봇은 동시에 그림 1의 경로를 따라 목적지로 이동하려 한다. 이때 로봇 사이의 충돌이 발생하므로 이 운동은 불가능하며, 이와같이 충돌이 예상될 경우 그림 2 와 같은 새로운 무충돌 경로를 발생시켜야 한다.

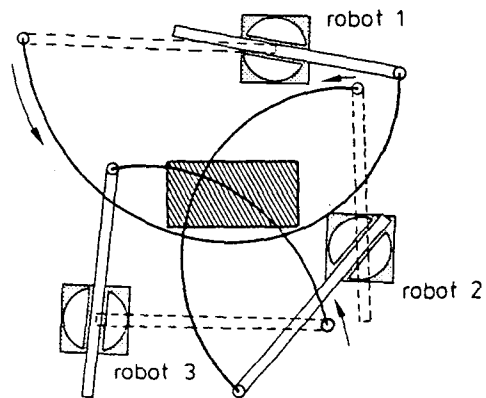


그림 1. 세 로봇과 사각형 장애물과의 충돌 예

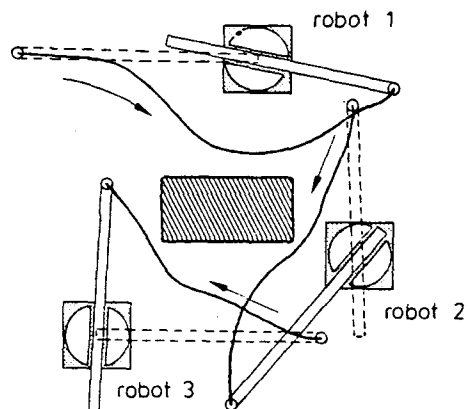


그림 2. Collision free motion planning 의 결과

로봇의 이동경로가 변경될수 없을때의 충돌회피 문제의 예로서, 두 로봇트가 각각의 목적지까지 직선을 따라 운동 하는 경우를 들수 있다. 이때 로봇트의 주어진 운동계획에서 충돌이 예상되면 경로상에서의 가속과 감속을 조절하는 time scheduling 방법과 collision map 을 사용하여 무충돌 운동계획을 찾을 수 있다. [2] 로봇트의 충돌회피 문제에서 로봇트의 link 에서 발생하는 충돌은 다루기가 어렵기 때문에 보통 로봇트 손끝에서의 충돌만 연구대상이 된다. 이와같이 두 로봇트 사이의 충돌 문제는 두 로봇트의 손목간의 충돌 문제로 근사화되며 각 로봇트의 손목은 손목을 포함하는 구 (sphere)로 대신 표현된다. 두 로봇트가 직선운동할 때의 충돌회피 문제는 일반적인 경로를 따르는 운동의 경우보다 쉽게 접근할 수 있는데 그 이유로는 첫째로 모든 운동이 직선을 따라 발생하므로 장애물의 감지가 쉽다. 예를 들면 장애물이 직선상에 있는지의 여부만 고려하면 된다. 둘째로 모든 운동이 직선운동이므로 최종적으로 얻어진 무충돌 운동경로를 사람의 눈으로 검증하기가 용이하다. 셋째로 두 개의 작업위치사이의 최단거리 경로는 직선경로이다. 넷째로 두 로봇트가 직선운동을 하지 않을 경우 시변 장애물에 대한 충돌회피를 고려하기가 매우 어렵다. 다섯째로 두 로봇트의 운동에 충돌이 예상될 경우 한 로봇트의 경로 정보를 이용하여 다른 로봇트의 무충돌경로 계획을 세우기 용이하다.

직선운동하는 두 로봇트의 충돌회피의 예가 그림 3, 그림 4 에 있다. 두 로봇트 중 로봇트 1 은 자신의 운동계획을 따라 변화없이 이동하며, 로봇트 2 는 자신의 운동계획을 변경하여 충돌을 회피한다. 그림 3 은 충돌이 발생하는 경우의 로봇트 2 의 collision map 이다. Collision map 은 시간축에 대한 직선상의 로봇트 2 의 위치를 나타내며, 충돌이 발생할수 있는 위치와 시간의 관계를 설명한다. 그림 3에서 보면 로봇트 2 는 20.51cm 길이의 거리를 1.66초 동안에 직선운동을 하며 로봇트의 운동계획은 S 자 형태의 곡선을 이룬다. 그림의 빗금친 부분은 충돌이 발생하는 영역으로서 시간이 0.42초에서 0.74초 사이일때 위치가 4.9cm에서 10.8 cm 거리 사이에 있으면 로봇트 2 의 운동계획과 충돌영역이 만나고 따라서 충돌이 발생함을 알려준다. 이러한 충돌을 피하기 위한 방법으로는 여러 방법이 있는데 그중의 하나는 로봇트 2 의 속도를 줄여서 로봇트 1이 지나간 뒤에 로봇트 2 를 이동시키는 방법이다. 그림 4는 로보

트 2 의 속도를 일시적으로 감소시켰다가 계속 진행시킨 결과의 로봇트의 궤적이다. 이 궤적이 충돌영역을 비껴가므로 충돌이 발생하지 않음을 알수 있다.

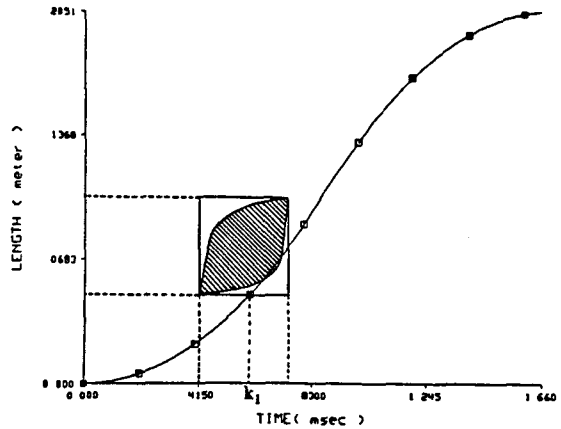


그림 3. Collision map 의 예. 로봇트의 운동계획이 빗금친 영역을 통과하므로 두 로봇트의 충돌이 발생한다

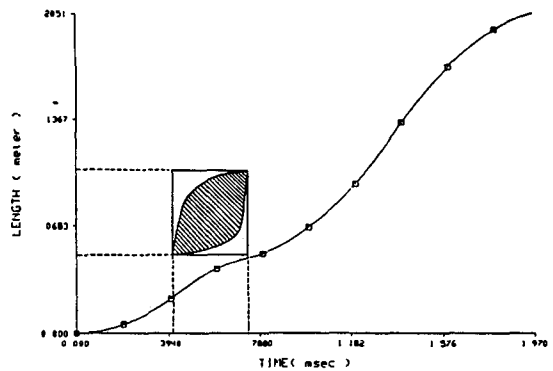


그림 4. Time scheduling 에 의한 충돌회피결과. 직선운동에서 가속도를 조절하여 두 로봇트의 충돌을 피한다

무충돌 운동계획 (collision free motion planning)은 다수의 이동로봇트 (multiple mobile robot)와도 밀접한 관계가 있다. 무인운반차 (AGV : Automated Guided Vehicle) 는 자동화된 생산 공장에서 그 응용이 급격히 증가하고 있으며, AGV 기술의 발전으로 인해 2 차원 작업평면을 깨도없이 자유롭게 이동하는 AGV 도 가까운 장래에 실현될수

있을 것이다. 따라서 자동차의 교통제어와 유사한 여러가지 문제들이 AGV 또는 이동로봇의 제어와 관련해서 연구되어야 한다. 무인차는 자동화된 공장에서 부품 또는 소재를 공급하는 수단으로 사용되어지며 그 보급은 점차 증가하고 있다. 현재의 생산현장에서 사용되는 대부분의 무인차 시스템은 비교적 단순한 형태이다. 무인차는 바닥에 표시된 정해진 길을 따라 이동하며, 길은 1 차선이어서 무인차가 다른 무인차를 추월하는 일은 불가능하며, 갈림길, 막다른 길, 무인차의 보수를 위한 차고등이 있다. 그러나 이러한 제한된 topology 하에서도 무인차 경로 layout의 최적설계, 최적 경로, 무인차의 스케줄링은 간단하지 않다.<sup>[3]</sup>

무인차 기술이 발전하면서 무인차가 2 차원 평면위에서 자유롭게 이동할 수 있게 될것이다. 이러한 관점에서 고정된 장애물을 피하는 무충돌 경로계획, 무인차의 navigation, 센싱, 기구학, 동역학등 개별적인 무인차연구가 이루어지고 있다. 개별적인 무인차의 navigation 과 제어기법이 발전함에 따라 공장환경에서는 다수의 무인차가 공장 바닥의 도로망을 따라 자유롭게 이동하며 각각 개별적으로 제어되는 시스템이 등장할 것이다. 이러한 상황은 무인차 교통제어(AGV Traffic Control)라는 새로운 문제를 제기한다. 무인차 교통제어문제는 외형적으로는 도시의 자동차 교통제어와 유사하다. 그러나 두가지 문제 사이의 중요한 차이는 자동차의 운전자는 자신의 운전 시간을 최소화하는 것이 목적이지만, 공장환경의 무인차 시스템에서는 무인차간에 협력을 통하여 공동의 목적을 달성하는것이 목표이다. 무인차 이동시 최적 경로에 관심을 갖는 이유는 첫째, 목적지 까지의 경로길이가 짧으므로 무인차의 수와 공장의 생산성이 정해졌을때 무인차의 속도를 감소시킬 수 있다. 둘째, 공장의 layout 을 변경해도 무인차 제어 시스템에는 큰 영향을 주지 않는다. 예를 들면, 경로의 일부를 막아서 경로의 보수 또는 무인차의 보수등의 용도로 사용해도 다른 무인차의 흐름을 막아서 deadlock 을 유발하지 않는다. 이러한 최적경로계획의 장점들을 잃지 않으려면 무인차의 교통제어가 효율적으로 수행되어야 할 것이다.

그림 5과 그림 6는 이동로봇 세 대와 이동 장애물 한개로 구성되는 로봇 시스템의 충돌회피의 예를 보여준다.<sup>[1]</sup> 세 대의 이동로봇이 그림 5와 같은 운동을 할경우 로봇과 장애물사이에 충돌이 발생하

며, 이를 방지하기위한 경로계획의 예가 그림 6에 있다.

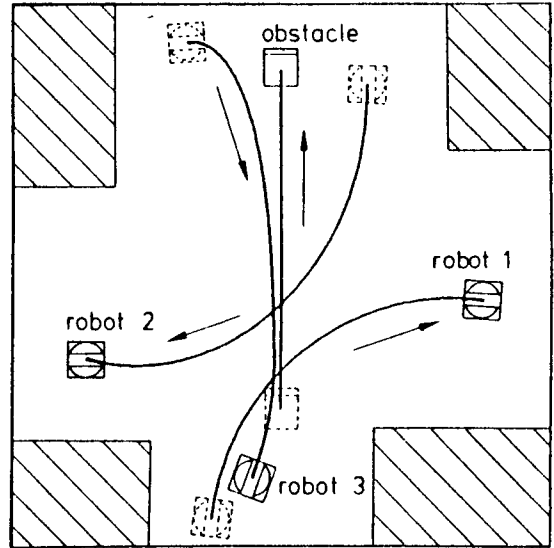


그림 5. 세 대의 이동로봇과 이동 장애물의 충돌 예

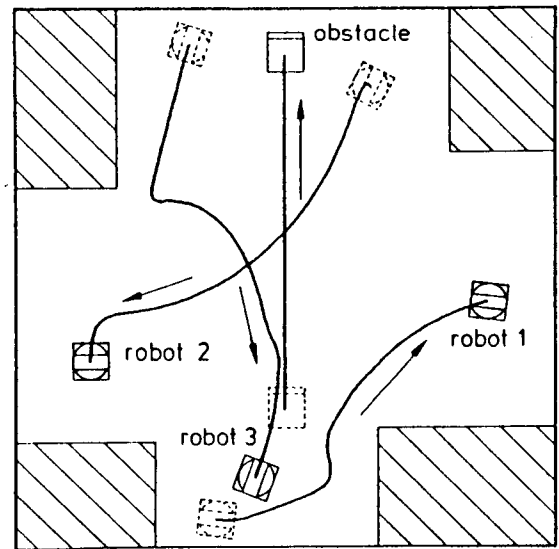


그림 6. 충돌회피 경로계획 후의 세 대의 이동로봇과 이동장애물의 운동

여러 대의 로봇이 같은 작업공간내에 있으므로, 각 로봇의 운동은 다른 로봇에게는 장애물의 운동 또는 작업환경의 변화와 동등한 의미가 된다. 이

러한 작업환경의 변화를 파악하려면 여러 형태의 센서 데이터를 분석해야 하며, 센서로는 vision, 거리 센서, 근접센서, 접촉센서, 음향센서등 다양하다. 이러한 다양한 센서 데이터로부터 유용한 정보를 추출하기 위해서는 효율적인 계산알고리즘의 개발이 필요하며, multi-robot 의 제어를 위한 센서데이터의 통합에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

Multi-robot 시스템의 고유한 문제는 아니지만, single-robot 의 경우와 함께 관심의 대상이 되는 문제들도 있다. 여유자유도를 갖는 multi-robot 와 충돌회피가 한 예 이다. 여유자유도를 갖는 로봇의 경우 임의의 로봇 end effector 위치에 대응하는 각 관절의 위치는 무한히 많다. 이 특성은 단일 로봇의 제어에서 장애물회피를 위해 사용되고 있으며, multi-robot 의 제어에서도 로봇간의 충돌회피 또는 장애물과의 충돌회피에 이용된다. 불확실한 정보를 이용한 운동계획문제는 작업환경에 대한 정보가 완전하지 않을때 또는 타 로봇의 위치정보에 불확실성이 있을때의 로봇 운동계획을 다룬다. 이외에 운동계획에 필요한 각종 센서의 개발, 센서 데이터의 표현방법, 로봇 운동계획을 위한 계층적 방법 등이 연구되고 있다.

### Ⅲ. Multi-robot 시스템의 동역학 모델링과 제어

여러 로봇이 tightly coupled 형태로 작업할때 multi-robot 시스템의 동역학 모델링과 제어를 위해서는 다양한 새로운 문제들을 해결해야 한다. 그러나 어떤 문제들을 해결해야 하는가에 대한 지식은 아직 완전히 정립되어있지 않으며 이에관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 동역학 모델링과 제어는 multi-robot 의 운동계획과 전체 시스템의 기구학(kinematics) 와 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 이때의 제어전략은 2 절에서 설명한 운동계획과 통합제어와 관계된다.

Multi-robot 의 제어문제중 중요한 분야의 하나는 작업물 하나를 여러대의 로봇이 같이 잡고 작업하는 경우의 제어문제이다. 이 경우 시스템의 동역학 모델은 unconstrained 시스템이 아니라 constrained 시스템으로 변화한다. 두대 이상의 로봇이 하나의 작

업물을 잡을때는 작업물과 로봇 팔, 바닥면사이에는 closed kinematic chain 이 형성되며, 전체 로봇 시스템의 자유도는 로봇의 관절수보다 작아진다. 또한 작업물에 대한 두 로봇의 그리퍼의 위치가 고정되므로, 각 로봇이 작업물에 가하는 힘/토크는 서로 밀접한 관계를 가진다. 따라서 각 로봇의 제어에는 이러한 동역학적 제한조건을 고려해야 한다. 두 로봇이 하나의 작업물을 잡고서 작업할때는 작업물의 운동계적과 두 로봇의 운동계적등의 계산값과 실제값의 오차가 발생한다. 이때 두 로봇을 모두 위치제어 방식으로 제어한다면 이 위치오차를 줄이려는 위치제어의 기능으로인해 작업물에는 불필요한 힘이 가해지며 작업물이 파손될 우려가 있다. 이를 해결하는 방법의 하나로 master/slave (그림 7) 제어구조를 사용할 수 있다.

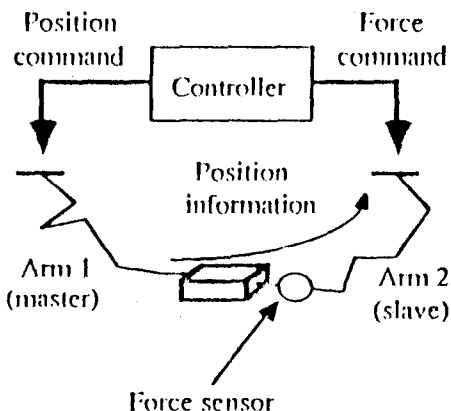


그림 7. 두 로봇의 Master/Slave 제어구조

이 방법은 로봇 1을 master 로, 로봇 2를 slave 로 정하여, 로봇 1은 위치제어시키고 로봇 2는 손목 힘센서에서 얻는 센서정보를 이용하여 힘/토크 제어 시키는 방법이다. 이 방법에서는 작업물의 위치는 로봇 1에 의하여 결정되며 로봇 1의 운동에 따라 작업물도 같이 이동한다. 로봇 2는 작업물과 로봇 2 사이에 발생하는 힘을 일정한 값으로 유지하면서 힘제어에 의해 작업물을 따라 이동한다. 이와같이 이 방법은 제어구조가 단순하다는 장점이 있다. 그러나 로봇 2가 작업물을 따라 충실히 운동하려면 로봇 2 운동의 임피던스가 매우 작아서 작업물과 로봇 2의 사이에서 발생하는 힘/토크에 따

라 로봇 2가 충분히 빨리 반응해야만한다. 그러나 로봇 기구의 운동 임피던스를 작게하는 힘제어 기법은 실제 구현하기가 어려우며 이는 master/slave 제어구조가 갖는 단점이다.

Master/slave 제어구조는 제어방법은 단순하지만 앞서 언급한 문제들을 가지고 있다. 이는 slave 로봇이 위치 명령을 힘센서를 통하여 간접적으로 얻기 때문이다. 만약 두 팔을 사용하는 사람과 같이 두 팔의 운동을 총괄하는 사람의 두뇌에 해당하는 주 제어기가 있다면 두 로봇의 위치는 작업물의 위치명령 정보에의해 직접 제어될 수 있을것이다. 이러한 배경에서 두 로봇을 동등하게 취급하는 non-master/slave 제어방식 (그림 8)이 사용된다. 이때 주 제어기는 두 로봇에게 위치명령과 힘명령을 동시에 내리며 각 로봇은 각각의 힘 센서와 관절위치 센서를 이용하여 힘/위치의 제어를 실현한다.

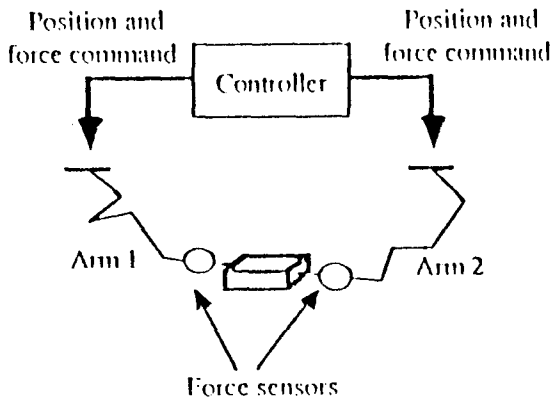


그림 8. 두 로봇의 Non-Master/Slave 제어구조

하나의 작업물을 잡고 공동작업하는 두 로봇이 non-master/slave 구조로 제어될때, 작업물의 운동 경로가 정해지면 두 로봇의 운동경로는 작업물과 로봇 그리퍼 사이의 기하학적 관계를 이용하여 계산될 수 있다. 각 로봇과 작업물의 운동이 결정되면 이 로봇 시스템을 목적하는 위치로 이동시키기 위한 각 관절의 토크를 결정해야한다. 그런데 각 로봇과 작업물은 closed kinematic chain 을 형성하므로 각 관절에서 발생하는 토크의 영향은 chain 상의 모든 부분에 전파되며 따라서 관절 토크 값은 전체 시스템의 운동을 고려하여 결정되어야 한다. 이상과 같이 여러 대의 로봇이 closed

kinematic chain 을 형성할때, 전체 시스템의 운동에 필요한 힘을 각 로봇의 관절 액츄에이터에 분배하는 문제를 부하분배(load distribution)라고 한다.

두 대 이상의 로봇이 작업물을 잡고 있을때는 작업물과 로봇, 바닥면 사이에 closed chain 이 형성된다. 이 경우 closed chain 시스템의 자유도는 각 로봇의 관절 액츄에이터보다 적어지며, 관절 토크 벡터와 작업물에 가해지는 합성힘 벡터사이의 mapping 은 null space를 갖게된다. 따라서 작업물의 운동이 결정되었을때 이를 발생시키기 위한 관절 토크는 무한히 많은 값이 있을 수 있다. 이 중에서 로봇 작업을 효율적으로 수행하기 위한 목적함수를 정하고 그 목적함수를 최소화하는 관절 토크 벡터를 결정하는 방법을 최적부하분배라고 한다. 이때의 목적함수는 작업수행에 소모되는 에너지를 최소화시키거나, 로봇 finger가 마찰력에 의해 작업물을 잡고있는 경우에는 작업물과 finger 사이에 slip 을 방지하기위해, 또는 작업물에 가해지는 내부 힘을 최소화하기위해서 등 여러형태가 사용된다.

Multi-fingered 로봇 손이 한개의 물체를 잡고서 조작하는 경우도 multi-robot 시스템과 유사한 문제이며 모두 multi-robot 의 협력작업이라는 관점에서 같이 연구될 수 있다. 하나의 물체를 잡고서 작업하는 여러 로봇의 제어에서 결정해야 할 중요한 과제의 하나는 물체에 가해지는 내부 힘 (internal force)이다. 두 개 이상의 로봇 또는 finger 가 물체에 힘/토크 (force/torque)를 가할 때 합성 힘/토크는 물체의 운동에 필요한 가속력을 발생시킨다. 물체에 가해진 여러 힘/토크 벡터의 성분 중 서로 상쇄되는 성분은 합성 힘/토크가 zero 이므로 물체의 운동에는 영향을 주지 못하나 물체 내부의 스트레스를 발생시키며 물체의 강도에 따라서는 물체를 파손시킬수도 있다. 이와같이 물체에 가해지는 힘/토크 중에서 물체 내부에서 서로 상쇄되어 운동에는 영향을 주지 않고 스트레스를 발생시키는 성분을 내부 힘 (internal force) 라고 한다. 로봇 그리퍼 또는 finger 가 작업물을 잡는 형태는 크게 두 가지로 분류할 수 있는데 첫째는 물체를 단단히 잡고 있어서 그리퍼 또는 finger 사이에서 물체의 운동이 있을 수 없는 경우이며, 둘째는 그리퍼 또는 finger 가 접촉 마찰력에 의해 물체를 잡고 있는 경우인데, 이 상황에서는 물체와 finger 사이의 접촉점에서의 법선 방향 힘이 적으면 마찰력이 감소하여 물체가 finger

사이에서 미끌어질 수 있다. 반면에 비누와 같이 표면이 매끄러운 물체를 잡을때 과도한 힘을 가하면 오히려 물체가 미끌어질 수 있다. 따라서 물체의 안정을 위해 법선방향의 힘을 적절히 제어하는것이 필요하며 법선방향의 힘 크기는 내부 힘과 직결되므로 내부 힘을 최적으로 결정하여야 한다<sup>[4]</sup>.

Multi-robot 시스템에서는 여러대의 로봇을 동시 제어해야하는 어려움과 전체 시스템의 자유도가 감소함으로서 발생하는 어려움을 동시에 해결해야 하며 빠른 계산능력이 요구된다. 따라서 이와같은 시스템에 적합한 병렬 계산 알고리즘과 계산기 구조에 대한 많은 연구가 이루어져야 한다.

각 로봇의 제어의 독립 정도와 multi-robot 시스템 제어의 중앙집중 정도는 로봇 시스템이 수행하는 작업의 특성과 깊은 관계가 있다. 로봇 제어 시스템이 FMS (Flexible Manufacturing System)의 경우와 같이 작업환경의 변화에 대한 유연성을 가지려면 제어 시스템은 로봇 주변 환경에 관한 정보를 효과적으로 또한 지능적으로 이용하여야 한다. 이러한 분야의 연구가 발전되어 multi-robot 시스템의 적응제어가 실효성을 인정받는다면 multi-robot 시스템은 다양한 제조공정에서 사용될 수 있을 것이다.

#### IV. Multi-robot 시스템을 위한 소프트웨어와 인공지능

인공지능을 이용한 로봇의 성능향상에 관한 연구는 단일 로봇의 경우에는 비교적 많은 연구가 이루어지고 있으나 multi-robot의 경우는 그 필요성은 알려져 있으나 실제 연구결과는 많이 발표되지 않고 있다. 실용적인 multi-robot 시스템의 구현을 위해서는 아래와 같은 과제들이 해결되어야 한다.

로봇 시스템의 고기능화를 위해서는 인공지능과 센서정보, 그리고 제어이론을 통합하는 연구가 필요하다. 이와 관련되는 문제로는 수행할 작업의 분류(task classification), 원하는 운동계획, 센서정보의 수집과 처리, multi-robot 시스템의 지능화를 위한 적절한 인공지능 기법의 연구 등이 있다. 현재 연구되고 있는 연구과제로서는 여러가지 다른종류의 센서신호를 통합하고 센서데이터를 정밀해석하기

위한 방법, 여러 로봇의 제어를 위한 fault tolerant 기법과 예러복구, multi-robot 프로그래밍 언어, 여러 로봇에대한 작업의 분배, multi-robot 시스템의 user interface, 로봇간의 네트워크와 통신등을 들수 있다.

#### V. 결론

최근들어 multi-robot 시스템의 개발과 응용은 학계 또는 산업체의 많은 연구진의 관심을 일으키고 있다. 그러나 실제 산업현장에서 적용될수 있는 multi-robot 시스템이 생산되려면 아직 많은 분야의 연구에 진전이 있어야 한다. 하지만 이러한 분야의 연구가 진행됨에 따라 미래의 로봇은 인간과 유사한 감각기능과 손 그리고 지능을 갖게 될 것이며 지능과 감각기능으로 손 또는 발을 이용하여 복잡한 작업을 사람처럼 작업할 수 있을 것이다. 여러 종류의 지능로봇이 모여 팀을 이루어 고도의 복잡한 작업을 수행할 수도 있을 것이다. 미래의 산업용 또는 상업용 로봇의 활약을 기대해 본다.

#### 参 考 文 献

- [1] E.Freund and H.Hoyer, "Pathfinding in Multi-Robot Systems: Solutions and Application", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1986, pp. 103-111.
- [2] B.H.Lee and C.S.G.Lee, "Collision-Free Motion Planning of Two Robots", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-17, Number 1, 1987, pp.21-32.
- [3] D.D.Grossman, "Traffic Control of Multiple Robot Vehicles", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol.4, Number 5, Oct. 1988, pp.491-497.
- [4] Y.Nakamura, N.Nagai, and T. Yoshkawa, "Mechanics of Coordinative

- Manipulation by Multiple Robotic Mechanisms", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1987, pp. 991-998.
- [5] M. Uchiyama and P. Dauchez. "A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1988, pp. 350-356.
- [6] Y.F.Zheng and J.Y.S Luh. "Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1988, pp.344-349.
- [7] J.Lim and D.H.Chyung. "On a Control Scheme for Two Cooperating Robot Arms", *Proc. 24th Conf. on Decision and Control*, pp.334-337, 1985
- [8] M.H.Choi, B.H.Lee, and M.S.Ko. "An Application of Force Ellipsoid to the Optimal Load Distribution for Two Cooperating Robots", *IEEE Int Conf. Robotics and Automation*, pp.461-466, May, 1992.
- [9] Z.Bien and J.Lee. "A Minimum-Time Trajectory Planning Method for Two robots", *IEEE Trans Robotics and Automation*, vol.8, no.3, pp.414-418, June,1992
- [10] K.I.Kim and Y.F.Zheng. "Unknown Load Distribution for Two Industrial Robots", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Sacramento, CA, pp992-997, April, 1991.
- [11] *Multirobot Systems*, IEEE Computer Society Robot Technology Series, IEEE Computer Society, 1990
- [12] A.J.Koivo and G.A Bekey, "Report on Workshop on Coordinated Multiple Robot Manipulators: Planning, Control, and Applications", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol.4, no. 1, Feb. 1988, pp.91-93

### 筆者紹介



崔明煥

1958年 11月 9日生

1986年 2月 서울대학교 제어계측공학과(학사)

1988年 2月 서울대학교 제어계측공학과(석사)

1992年 2月 서울대학교 제어계측공학과(박사)

1992年 8月 - 현재 강원대학교 제어계측공학과 전임강사

주관심분야 : 로봇 공학, 자동화시스템