

산업용 양팔로봇의 설계 및 제어

Design and Control of Industrial Dual Arm Robot

✉ 박찬훈¹, 박경택¹

✉ Chan Hun Park¹ and Kyoung Taik Park¹

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials)

✉ Corresponding author: chpark@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7127

Manuscript received: 2008.6.4 / Revised: 2008.8.19 / Accepted: 2008.8.21

The study on dual arm robot manipulator which consists of two 6-DOF arms and one 2-DOF torso is introduced. This dual arm robot manipulator is designed for automation of assembly process in automotive manufacturing line. Each industrial 6-DOF arm can be used as a stand-alone type of industrial robot manipulator with 6-DOF and as a manipulator part of dual arm robot at the same time. These structures help the robot maker willing to succeed in emerging market of dual arm robots have the high competitive power for the current industrial robot market and the emerging market of dual arm robot at the same time. The research results of the design concept, workspace analysis and the PC-based controller will be introduced.

Key Words: Dual Arm Robot (양팔로봇), Industrial Robot (산업용로봇), Assembly Automation (조립자동화), Mechanical Parts (기계부품), Real Time Control (실시간 제어), Self Collision (자체충돌)

1. 서론

오늘날 산업현장에서 고임금에 의해 점점 높아지는 생산단가를 낮추고 사회전체가 고령사회로 발전함에 따라 수반되는 인력 부족현상에 대처하기 위해서, 현재까지 로봇으로 대체되지 못한 많은 생산라인에 로봇을 사용하고자 하는 많은 노력이 기울여지고 있다. 현재의 대부분의 산업용 로봇은 외팔구조를 가지고 있기 때문에 작업자가 두 손을 사용하여 작업하고 있는 생산라인에는 적용이 어렵다. 이러한 이유로 양팔형 산업용 로봇에 대한 관심이 증대되고 있으며, 실제로 일부 완성차 업체에서는 로봇 제조업체와 공동으로 자동차 생산라인에 적용될 수 있는 양팔형 산업용 로봇을 개발하고자 노력하고 있다. 하나의 몸통에 2 개의 팔이 장착된 형태의 산업용 양팔로봇은 주로 일본

과 독일을 중심으로 그 연구가 진행되고 있다. 일본 YASKAWA 사에서는 한팔 당의 가반 하중이 20kg 인 양팔로봇 (DA20)과 10kg 인 양팔로봇 (DIA 10) 이 개발되었으며, 독일의 DLR 의 경우에는 한팔 당 가반 하중이 15kg 인 양팔로봇을 개발한 바 있다.¹⁻³ 김진수⁴ 는 강체 물체를 파지한 양팔로봇의 운동방정식을 제안하고 하이브리드 위치/힘 제어를 이용한 협조 제어 법을 제안한 바 있다.

양팔로봇에 대한 관심이 높아지고 있고, 향후 양팔로봇에 대한 수요가 증가할 것으로 예상됨에도 불구하고 현재의 양팔로봇에 대한 시장의 수요는 매우 작다. 따라서 국내 산업용로봇 제조회사에서 양팔로봇에 대한 미래의 수요에만 의존하여 양팔로봇을 개발하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 이유로 본 연구에서는 양팔이 일반적

인 산업용 수직 다관절 로봇과 동일한 기구학적 구조를 가짐으로써 산업용로봇시장과 양팔로봇시장에 동시에 효과적으로 대응할 수 있는 산업용양팔로봇을 개발하였으며, 이에 관한 연구내용을 기술하고자 한다.

2. 양팔로봇 설계

2.1 작업 분석

본 연구에서는 산업용양팔로봇을 개발하여 승용차용의 변속기(T/M) 조립작업의 자동화에 적용하는 것을 일차 목표로 하였다. 이 작업은 작업자가 양팔을 사용하여 작업하여야 하며, 이러한 이유로 대부분의 자동차부품회사에서 자동화가 되지 않고 있다. 산업용 로봇은 그 용도가 제한된 것이 아니라 가반 중량의 범위 내에서 다양한 용도로 사용될 수 있다. 개발되는 듀얼암 로봇의 경우에도 그 용도를 제한하는 것이 바람직하지는 않다. 그러나 적어도 적용될 용도의 범위를 결정하는 것이 의미 있는 개발결과를 가져올 개연성이 높다고 판단되어 본 연구에서는 적용공정을 T/M 조립라인으로 결정하였다(Fig. 1).

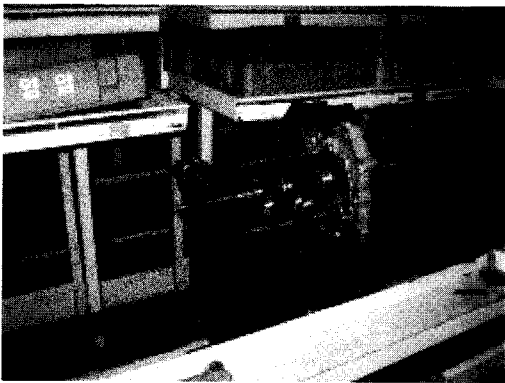


Fig. 1 Transmission assembly line

T/M 조립공정은 5 개의 공정으로 구성되며 각각은 작업물 투입공정, 조립공정, 도포공정, 시험 및 주입공정, 라인아웃이다. 이 가운데 조립공정은 I/PLATE ASS'Y 를 조립하는 공정으로써 본 연구에서 개발되는 로봇의 시험공정으로 선정되었다. 이러한 시험공정들은 현재 숙련된 작업자에 의해서 수행되고 있는 작업으로 이 가운데 다음과 같이 일부의 작업이 로봇에 의해서 수행될 예정이다.

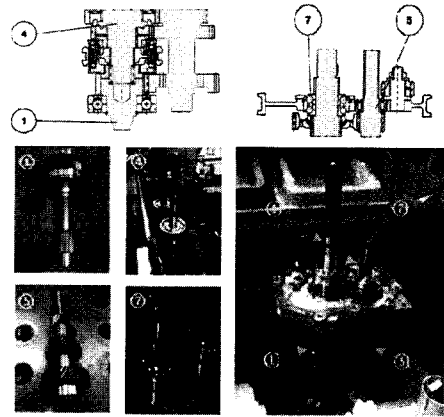


Fig. 2 Transmission drawings and important parts

이러한 작업공정을 살펴보면, 먼저 ⑤번 부품을 치구에 고정시키고, ①번 부품을 치구에 삽입하여 고정시킨다. 그리고 컨베이어로 이송된 ④번 부품을 ①번 부품 위에 맞추고 치구에 고정시킨다. 그리고, ①, ④, ⑤번 부품을 고정시킨 후 ⑦번 부품을 ④번 부품의 정위치에 고정시킨다. 그리고 트랜스미션의 간단한 도면과 사진이 Fig. 2 에 설명되어있다.

2.2 로봇 설계

Fig. 3 은 양팔로봇이 T/M 라인에 적용되어 자동화가 되었을 때, 생산라인의 간단한 치수를 보여주고 있다. 로봇의 좌우 방향의 최대 리치는 약 1.5m, 전후 방향의 최대 리치는 약 0.7m 가 요구된다.

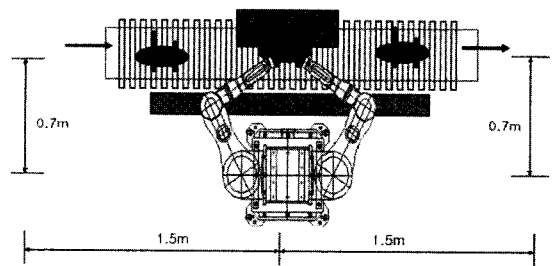


Fig. 3 Layout of automated transmission assembly line

조립대상이 되는 부품의 무게를 고려하였을 때, 하나의 팔에 대해서 약 10kg 의 가반하중이 필요하며 각각의 팔이 6 자유도를 가질 것이 요구된다. 기본적으로는 허리가 별도의 자유도를 가질 필요가 없으나 자동화 라인구성의 유연성을 위하

여 2 개의 자유도를 추가하였다. 로봇의 반복정밀도는 0.1mm 로 하였으며 허리를 제외한 각각의 조인트의 최대회전속도는 초당 150 도로 하였다.

양팔로봇을 구현하기 위해서는 매우 다양한 기구학적 구조가 가능하지만, 앞에서 언급했듯이 현재의 산업용 양팔로봇 시장의 규모가 매우 작은 점을 고려하여 양팔이 각각 수직 다관절 로봇의 구조를 가지도록 설계 하였다. 이를 통해 로봇제작사는 양팔로봇의 구매요구에 대응할 뿐만 아니라 각각의 팔을 구매 수요가 가장 많은 수직 다관절 로봇으로 별도로 생산하여 판매하는 것이 가능하여 경제적으로 매우 유리하기 때문이다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Out-reach	1.5m
Payload	15kg/arm
Max Speed	150deg/s
Repeatability	0.1mm
DOF	6/Arm, 2/Torso

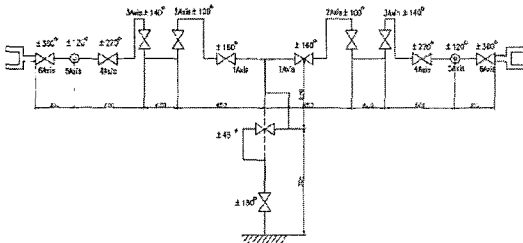


Fig. 4 Kinematic structure of developed dual arm robot

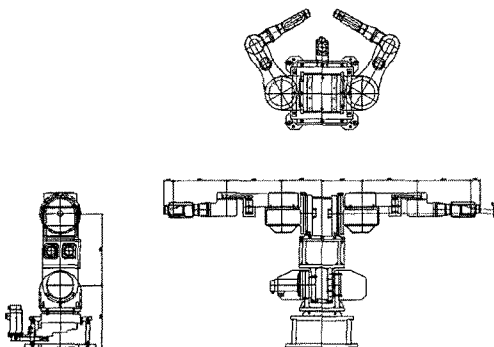


Fig. 5 CAD drawing of developed dual arm robot

Table 1 에서 정리된 바와 같은 로봇 사양을 만족하기 위하여 Fig. 4 와 같은 기구학적 구조를 가지도록 로봇을 설계하였다. 양팔의 최대 리치는 1980mm 이고, 제 1 조인트와 제 6 조인트까지의 거

리는 1330mm 이다. 각각의 조인트에 대한 회전한계는 링크간의 간섭을 고려하여 결정되었다. 이러한 기구학적 구조를 만족하는 실제의 로봇은 Fig. 5 와 같이 설계되었다. 좌하의 그림은 측면도를, 우상의 그림은 평면도를, 우하의 그림은 정면도를 보여주고 있다.

로봇 구동부의 구조는 Fig. 6 에 자세히 표현되어 있다. 대부분의 조인트에서는 모터와 감속기가 회전 축에 직접 연결되어 있으나 허리의 제 1 회전축(30)과 양팔의 제 1 회전축(12a, 12b)과 제 3 회전축(4), 제 5 회전축(2)은 벨트/풀리 메커니즘과 증속형 감속기를 사용하여 연결되었다. 허리의 제 1 회전축의 경우는 유지보수의 간결성을 고려하여 모터를 몸체 밖으로 빼내기 위하여, 그리고 양팔의 제 3 회전축과 제 5 회전축의 경우 모터 케이블을 로봇 몸체 안으로 배선하기 위하여 벨트/풀리 메커니즘과 증속형 감속기가 사용되었다.

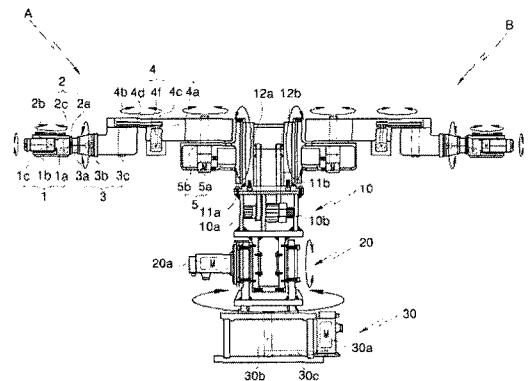


Fig. 6 Motor and joint connection mechanism

로봇에 사용된 모터는 범용의 AC 서보 모터로서 그 크기와 형상이 매우 제한적이다. 이러한 범용의 AC 모터를 채용하여 수직 다관절 형태의 양팔을 제작할 경우 모터와 회전축을 직결로 연결하는 방식으로는 양팔의 제 2 회전축(5)과 제 3 회전축 사이의 거리를 원하는 대로 조절하는 것이 매우 힘들다. 케이블을 로봇 내부로 배선해야 하는 구조이고, 양팔의 제 1 축에 사용되는 AC 서보모터의 길이가 비교적 길기 때문이다. 동일한 이유로 대부분의 상업용 수직 다관절 로봇은 바닥면부터 제 2 회전관절의 중심까지의 거리가 비교적 길게 제작되어 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 양팔의 제 1 회전 관절에 벨트/풀리 메커니즘과 증속형 감속기

가 사용되었다. Fig. 7 과 같이 제 1 회전축에 중공형 감속기를 사용하고 각각의 구동 모터는 그림과 같이 벨트/풀리 메커니즘을 통해서 감속기에 연결된다. 이를 통해 제 2 회전축 간의 거리를 설계상의 필요대로 조절할 수 있으며 모터내부의 케이블은 중공감속기의 중앙부로 배선될 수 있다.

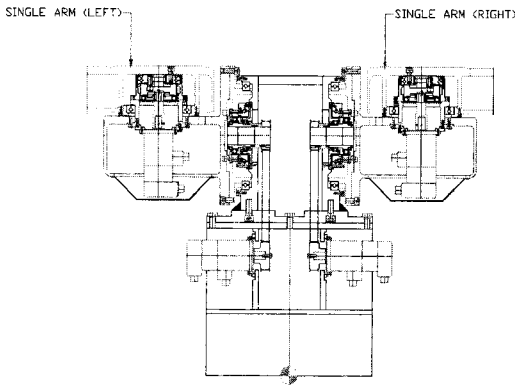


Fig. 7 Mechanism of shoulder joints for dual arm robot

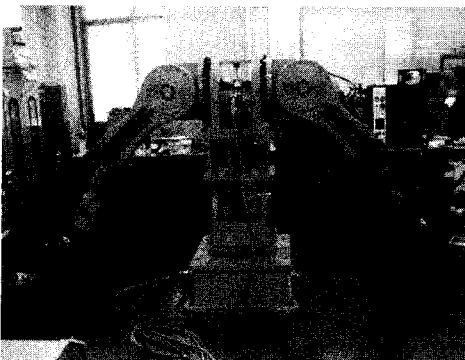


Fig. 8 Developed dual arm robot manipulator

이 로봇은 허리 2 자유도, 양팔 각각 6 자유도를 가지며 Table 1 의 설계사양을 만족하는 양팔로봇이 제작되었으며 그 형상이 Fig. 8 에 보여지고 있다. 이 로봇은 양팔로봇 작업에 적용이 가능할 뿐만 아니라 양팔 각각이 독립된 수직 다관절 로봇으로 적용될 수 있다.

2.3 작업공간해석

개발된 양팔로봇은 양팔이 독립적으로 작업을 하거나 혹은 서로 협력하여 작업하는 것이 가능하다. 양팔을 사용한 조립, 그라인딩, 디버링 등의 작업시에는 양팔의 협력작업이 필요하며, 개발된 로봇으로 적용 가능한 양팔의 협력작업의 한가지

예는 Fig. 9 와 같이 표현될 수 있다.

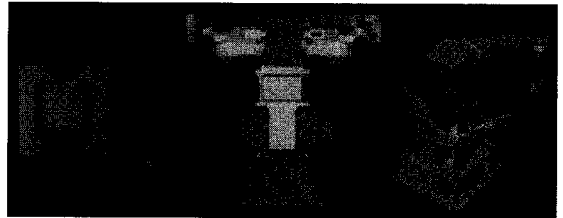


Fig. 9 Posture for cooperation job of developed dual arm robot manipulator

개발된 로봇은 전후의 작업공간이 모두사용 가능하다. 이것은 경우에 따라서는 로봇이 몸통을 뒤로 회전하여 작업하는 것 보다는 팔을 뒤로 돌려서 작업하는 것이 유리한 경우가 발생하기 때문이다. 작업공간 특이점은 작업공간의 가장자리에서는 발생하지만 작업공간내부에서는 발생하지 않는다.

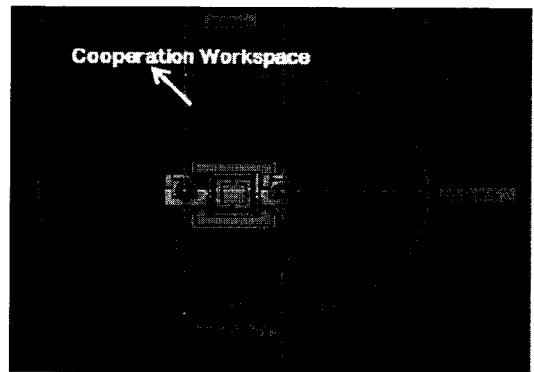


Fig. 10 (a) Cooperation workspace of developed dual arm robot (bird view)

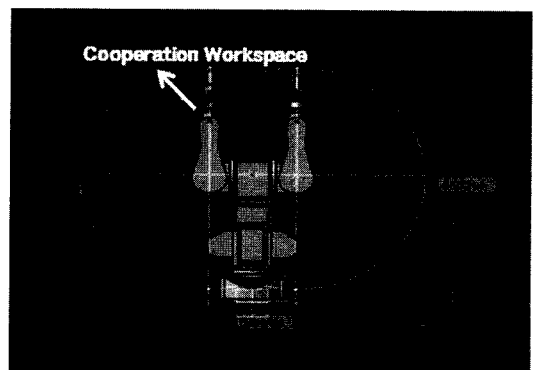


Fig. 10 (b) Cooperation workspace of developed dual arm robot (front view)

양팔의 협력작업은 허리의 2 관절의 영향을 받지 않는다. 즉 허리의 움직임은 양팔이 서로 독립하여 단독으로 운전할 때에는 그 작업공간에 영향을 준다. 그러나 양팔이 협력하여 작업하는 경우에는 양팔간의 상대적인 자세가 중요하기 때문에 허리의 운동은 협력작업공간에는 무관하게 된다. 따라서 협력작업공간의 해석을 위해서는 Fig. 10 과 같이 허리의 움직임을 고정하고 해석한다. Fig. 10 에서 흰색 가는 선은 각각의 팔의 엔드 이펙터의 작업공간의 가장자리를 표현하고 있다. 양팔의 작업공간의 교집합을 협력작업공간으로 고려할 수 있으며, 이것을 굵은 선으로 표현하였다. Fig. 10(a) 는 로봇의 작업공간의 평면도이며 로봇의 앞뒤로 협력작업공간이 발생하는 것을 볼 수 있으며 좌우 최대폭은 약 1043mm 이다. 물론 그리퍼의 길이와 구조, 작업물 간의 간섭에 의해서 작업공간은 Fig. 10 과는 다른 결과를 가지게 될 수 있다. Fig. 10(b) 는 로봇 작업공간의 정면도를 보여주고 있다.

3. 제어기 설계

3.1 제어기의 구조

개발된 양팔로봇의 제어를 위하여 PC 기반의 제어기가 개발되었다. IBM 호환의 PC 에 MicroSoft 사의 Windows XP 가 운영체제로 사용되었으며, 이로 인해 다양한 소프트웨어 자원을 편리하게 사용하는 것이 가능하여 프로그램의 개발 속도를 높일 수 있다. 반면에 Window XP 는 실시간성이 보장되지 않으므로 이를 보완하기 위하여 Ardence 사의 Real Time Extension(RTX)을 사용하였다. RTX 는 Windows XP 의 커널을 확장하여 OS 의 실시간 성을 확보하여 준다.⁵ 본 연구에서는 Intel 사의 Dual Core CPU 를 채용하였으며 이를 통해 하나의 Core 에서는 RTX 응용 프로그램이 단독으로 실행되게 하고, 나머지 CPU 에서는 Windows XP 용 응용프로그램이 실행되게 함으로써 실시간성을 구현하였다.

로봇의 제어를 위해서는 Motion Engineering 사의 범용 모션제어기인 ZMP Zyncnet 을 사용하였다. ZMP 모션제어기는 최대 32 축의 동기제어가 가능하고 400Mhz 의 CPU 를 가지고 있으며 100Mhz 의 통신기능을 가진다. 24 축의 동기 제어시에는 최대 4khz 의 Position Feedback 이 가능하다.⁶ Analog 입출력을 위해서는 100Mbps 통신을 통해 ZMP 와 데이터를 입/출력할 수 있는 Motion Engineering 사의 QSID 를 사용하였다.

듀얼암 로봇에 범용의 AC 서보모터가 사용되었고 모터제어를 위하여는 해당회사에서 제공되는 Amplifier 가 사용되었다. 모션제어기와 인터페이스를 위하여 Motion Engineering 사에서 제공하는 통신 인터페이스를 사용하는 RMB (Remote Motion Block)를 사용하였다. RMB 는 범용의 AC 서보모터 측과는 전류명령을 위해 10V 의 인터페이스, 회전측정을 위해서는 A,B,Z 상의 펄스에 대한 인터페이스를 가지며 모션제어기와는 Zyncnet 통신 인터페이스를 가진다.

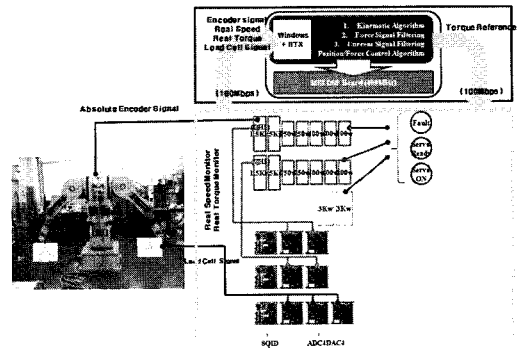


Fig. 11 Schematic diagram of PC-based dual arm robot controller

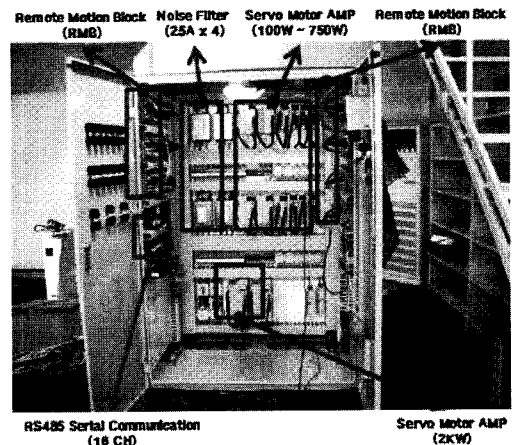


Fig. 12 Developed dual arm robot controller

개발된 PC 기반 제어기는 Fig. 11 와 같이 요약될 수 있다. 최상위의 제어알고리즘, 기구학 연산 알고리즘, 양팔의 충돌감시 알고리즘, 운전중의 사용자 입력, 입출력 처리 등의 작업은 PC 의 CPU 에서 처리되며 위치제어를 위한 Feedback 제어는 모션제어기에서 처리된다. 기구학 알고리즘은

200Hz 로 PC 상에서 연산되어 각 조인트의 기준각도의 궤적을 실시간으로 생성하고 이를 모션제어기에 PCI 인터페이스를 통해 전달한다. 모션제어기에서는 해당 조인트 각도를 다시 보간하여 4Khz 의 Sampling Rate 으로 제어한다. Fig. 12 는 개발된 제어기의 전장반의 구성을 보여주고 있다.

3.2 자체 충돌 방지

단독으로 운전되는 외팔형 로봇의 경우에는 자체 충돌 (Self collision)의 문제가 발생하지 않는다. 그러나 양팔로봇의 경우에는 각각의 팔이 별도로 동작하기 때문에 팔과 팔의 충돌, 팔과 몸통과의 충돌 등의 문제가 발생할 수 있다. 양팔로봇이 정확히 티칭 되었거나 프로그램 된 경우에는 이러한 자체충돌이 발생하지 않겠지만 개별 암의 티칭 이나 프로그램의 실수, 잘못된 프로그램의 실행, 제어시의 오작동 등에 의해서 이러한 자체 충돌의 문제가 발생할 수 있다.

이러한 자체 충돌의 위험을 방지하기 위해서는 로봇 기구부의 간섭 상황을 지속적으로 예측하는 것이 필요하다. 이때 복잡한 로봇의 형상을 정확하게 고려하는 것은 Boolean Operation 등의 연산을 필요로 하여 많은 연산시간을 필요로 하므로 비효율적이다.^{7,8} 본 연구에서는 양팔로봇의 충돌 위험의 발생시에 궤적을 변경하는 것이 아니라 로봇을 감속하여 정지시키는 것으로 충분하다.

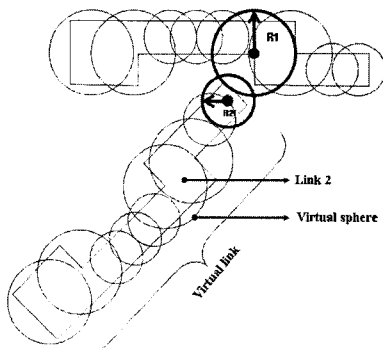


Fig. 13 Concept of collision estimation, virtual sphere and virtual link

따라서 간단한 방법으로 로봇의 충돌을 예측 하되 그 안전 여유를 쉽게 결정할 수 있는 방법이 요구된다. 이를 위하여 Fig. 13 과 같은 가상구 (Virtual Sphere), 가상링크(Virtual link)의 개념을 고안하였다. 가상의 링크는 실제의 링크의 부피를

모두 포함하는 임의의 형상의 링크로 정의되며 다수개의 반경 R 의 가상구로 구성되어있다. 링크간의 충돌을 예측하는 것은 가상링크간의 충돌을 계산하는 것으로 구현될 수 있다. 가상링크간의 충돌은 가상구들간의 중심점의 거리가 두 가상구의 반경의 합보다 작은지를 계산하는 것으로 예측될 수 있다.

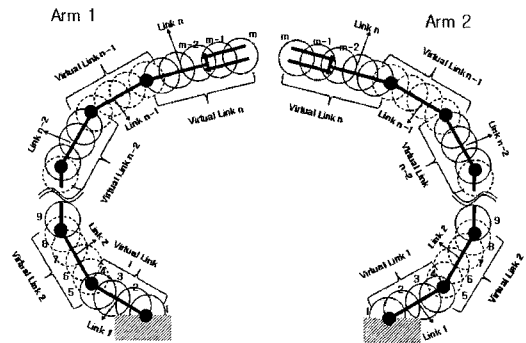


Fig. 14 A simple example of virtual links

양팔로봇의 충돌을 예측하기 위해서는 모든 링크에 대응하는 가상링크를 만들어서 가상구들간의 거리를 계산하면 된다. 이에 관한 간단한 예를 Fig. 14 에서 보여주고 있다. 이 방법의 장점은 충돌의 예측이 매우 간단하고 충돌안전성의 확보의 정도가 단순히 가상구의 반경의 크기에만 관계되므로 로봇의 사용자(프로그래머 혹은 티칭작업자)가 상황에 따라 가상구의 크기를 제어함으로써 자체 충돌안전성의 강화여부를 결정할 수 있다는 것이다. 이 방법의 단점은 보다 효과적으로 링크의 형상을 고려하기 위해서는 보다 많은 가상구들이 사용되어야 하기 때문에 연산량이 기하급수적으로 증가한다는 것이다. 그러나 본 연구에서는 충돌의 위험 발생시 로봇을 감속하여 정지하는 것이 목적이므로 한 개의 링크에 평균 5 정도의 가상구가 적용되어서 비교적 작은 연산시간으로 충돌위험을 계산할 수 있었다. 로봇 제어기내에서 양팔로봇의 충돌예측 알고리즘이 어떻게 동작하는지를 Fig. 15, Fig. 16 에 간략히 설명하였다.



Fig. 15 Two examples for collision detection

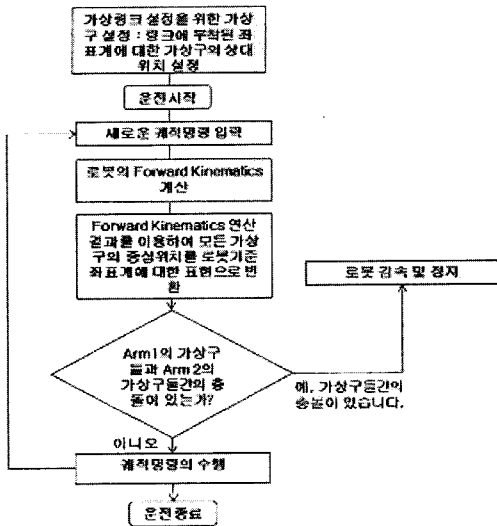


Fig. 16 Flow chart for self-collision detection

개발된 양팔로봇의 경우 총 자유도가 14 자유도가 되어 결과적으로 매우 복잡한 움직임을 수행하기 때문에 움직임을 직관적으로 고려하기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 기구학적 시뮬레이션을 수행하고 이를 시각화하는 전용 프로그램이 개발되었다. 시뮬레이션 프로그램은 Windows XP 가 설치된 주 제어기에서 동작되며 Visual C++ 6.0 과 OpenGL 라이브러리를 사용하여 개발되었다. 직교 좌표계에서의 표현된 로봇말단의 위치/자세에 대한 궤적 명령과 조인트 좌표계에서 표현된 각 관절의 궤적명령이 시뮬레이션할 수 있도록 되어있으며, 3.2 절에서 소개된 자체충돌알고리즘도 내장되어 주어진 궤적의 안전성을 예측할 수 있다(Fig. 17).

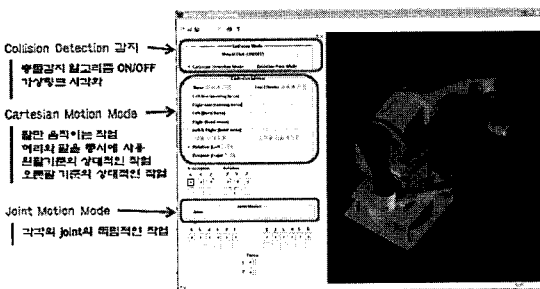


Fig. 17 Developed simulation program

시뮬레이션 프로그램의 구현에는 객체지향프로그래밍기법을 적용하여 향후 프로그램의 확장 및 재사용이 용이하도록 하였다. 로봇의 시각화를 위

해서는 CCad, CAxis, Clink, CArm, CDualArm 등의 객체를 구현하였고, 기구학 알고리즘, 작업교시, 자체충돌감시, 사용자 인터페이스를 위하여는 CDualArmKinematics, CHandCtrl, CUserIF, CCollision 등의 객체를 라이브러리화 하였다.

메인 제어기(PC)에서는 실행시간 연산을 위하여 RTX 에서 제공되는 Timer Interrupt 를 이용할 수 있는 반면에 모션제어보드에서는 자체적인 Timer 의 주기에 따라서 제어를 수행한다. 그러나 상위제어기와 모션보드가 동일한 Timer 를 사용하는 것이 제어프로그램의 개발에 유리하다. 이러한 이유로 모션보드에서는 서보 루프 주기마다 상위 제어기로 Interrupt 를 발생시키고 이를 통해서 상위 제어기는 기구학 연산, 모션보간 등의 작업을 서보 루프 주기와 동기하여 처리할 수 있게 하였다.

메인 프로그램은 사용자의 입력을 처리하고 로봇의 제어를 담당한다. 로봇의 기준 궤적은 200Hz 의 주기로 메인 제어기(PC)에서 계산되며 모션보드에서는 4Khz 의 주기로 기준궤적의 피드백제어를 수행한다. 메인 프로그램에서는 모션제어정보를 이용해서 로봇의 움직임에 대한 시각화 정보가 제공되며 자체충돌감지를 위한 알고리즘이 계산된다. 시각정보화를 위해서는 그래픽 라이브러리가 사용되지만 이는 Windows XP 가 점유한 Core 에서 실행되므로 RTX 가 점유한 Core 에서 실행되는 제어코드의 실시간 연산에는 영향을 미치지 않는다.

허리를 고정하고 양팔만으로 작업을 수행할 경우에는 각각의 팔에 대한 역기구학이 Closed form 으로 존재하므로 이를 이용하여 궤적명령을 생성하는 것이 가능하다.⁹ 그러나 허리와 팔이 동시에 움직여 작업하는 경우에는 결과적으로 8 축의 여유자유도 로봇의 경우와 동일하게 되어 Closed form 형태의 역기구학이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 직교 좌표계 기준으로 기준 속도궤적을 먼저 생성하고 속도 역기구학을 통해 조인트의 회전 속도궤적을 생성한 후 이를 적분하여 기준 회전각도 궤적을 생성하였다. 적분과정에서의 연산에러의 누적을 피하기 위하여 Closed Loop Inverse Kinematics⁹ 알고리즘을 적용하였다.

4. 결론

로봇이 적용될 작업에 대한 분석을 통하여 필

요한 로봇의 사양을 결정하고, 이를 만족하는 산업용양팔로봇을 설계하였으며, 이에 대한 작업공간을 분석하였다. 양팔의 구조는 범용의 수직 다관절 형태의 로봇과 동일하게 선택하였기 때문에 각각의 팔은 개별적으로 제작되어 수직 다관절 로봇으로 판매될 수 있으므로 양팔로봇 제작자는 개발과 제작 비용의 절감효과를 얻을 수 있다. 양팔의 어깨의 제 1 관절은 벨트 및 폴리 메커니즘으로 구성하여 범용의 AC 서보 모터와 감속기를 사용할 때에도 양팔로봇의 어깨 관절간의 거리를 쉽게 조절할 수 있도록 하였다.

Microsoft 사의 Windows XP 를 운영 체제로 하고 실시간성의 보장을 위하여 Ardence 사의 Real Time Extension 을 기반으로 PC 기반 제어를 개발하였다. 양팔로봇의 자체충돌 감지를 위한 알고리즘을 개발하여 자체충돌의 위험을 효과적으로 해결하였다. 메인 제어기상에서는 로봇의 제어를 수행하면서 동시에 자체충돌 감지, 로봇 움직임의 시각화를 위한 시뮬레이션 코드가 실행되지만 이들이 서로 다른 Core 를 사용하도록 함으로써 실시간성에 문제가 발생하지 않도록 하였다.

ISO9283 에 의거하여 로봇의 성능을 측정된 결과 반복정밀도 0.05, 절대정밀도는 2.4mm 의 결과를 얻었다. 향후 절대정밀도를 높이고 조립작업을 수행할 수 있는 양팔로봇의 기구학 알고리즘을 개발하여 개발된 로봇에 적용함으로써 T/M 조립라인에 적용할 계획이다.

참고문헌

1. Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, O., Stemmer, A., Wimböck, T. and Hirzinger, G., "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *The Industrial robot*, Vol. 34, No. 5, pp. 376-385, 2007.
2. Ott, C., Albu-Schaffer, A., Kugi, A., Stramigioli, S. and Hirzinger, G., "A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots - part I: torque feedback and gravity compensation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2659-2665, 2004.
3. <http://www.yaskawa.co.jp/Newsrelease/2005/15.htm>.
4. Kim, J. S., "Cooperative Control of Two Spatial Flexible Manipulators(Verification by Experiments)," *J. of KSPE*, Vol. 17, No. 9, pp. 87-94, 2000.
5. RTX Datasheet, Ardence (www.ardence.com).
6. <http://support.motioneng.com/Hardware/SynqNet-ZMP>
7. Henrich, D. and Cheng, X., "Fast Distance Computation for On-line Collision Detection with Multi-Arm Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2514-2519, 1992.
8. Ebert, D. M. and Henrich, D. D., "Safe Human-Robot-Cooperation : Image-based collision detection for Industrial Robots," *IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1826-1831, 2002.
9. Siavico, L. and Siciliano, B., "Modelling and Control of Robot Manipulators," Springer, 1999.