한국정밀공학회지 제 26권 9호 pp. 38-44 September 2009 / 38
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 9, pp. 38-44

◆ 특집 ◆ 산업용 듀얼 암 로봇(AUTOMAN) 개발

산업용 듀얼 암 로봇(AUTOMAN)의 교시기술 개발

Development of the Easy Teaching System for the Industrial Dual Arm Robot(AUTOMAN)

박찬훈[1,✉], 박경택[1], 권대갑[2]
Chan hun Park[1,✉], Kyoung Taik Park[1] and Dae Gab Gweon[2]

1 한국기계연구원 로봇/지능기계연구실 (Department of Robotics & Intelligent Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials)
2 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)
✉ Corresponding author: chpark@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7127

Key Words: Dual Arm Robot (듀얼 암 로봇), Teaching (교시), Direct Teaching (직접교시), Teaching Force (교시력), Relative Kinematics (상대기구학)

1. 서론

하나의 팔을 가진 전통적인 싱글 암 로봇은 작업자가 두 손을 가지고 작업을 하는 작업장에는 적용하기 곤란하다. 특히 기계 부품 등의 조립 작업을 위해서는 양팔을 가진 형태의 로봇의 적용이 매우 효과적이다. 이러한 동기로 인해서 최근에는 일본을 중심으로 양팔을 가진 산업용 로봇의 개발이 활발히 이루어 지고 있다. 동일한 이유에서 지식경제부의 지원으로 산업용 듀얼 암 로봇(AUTOMAN)이 개발되었다(Fig. 1). 이 로봇은 양팔 각각 7 자유도를 가지고 있으며 허리는 하나의 자유도를 가지고 있다. 로봇의 움직임이 인간과 유사하도록 하기 위해서 각 팔의 관절 배치를 인간의 관절 배치와 유사하게 배치하였다.

산업용 로봇은 매우 정밀하고 무거운 작업물을 지속적으로 핸들링 할 만큼 충분한 힘을 가지고 있으며 내구성이 뛰어나다. 그러나 지능의 측면에서는 매우 부족하다. 반면 인간작업자는 힘과 정밀도와 내구성에서는 매우 취약하지만 지능의 측면에서는 매우 우수하다. 따라서 인간의 장점과 로봇의 장점을 서로 결합하여 보다 우수한 로봇 시스템을 개발하고자 하는 연구가 다방면으로 진행되어 오고 있다. 특히 유럽을 중심으로 인간의 직관적인 지능이 좀 더 효율적으로 사용될 수 있도록 함으로써 로봇의 교시작업(teaching)이 쉽고 직관적으로 이루어 지게 하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-5]

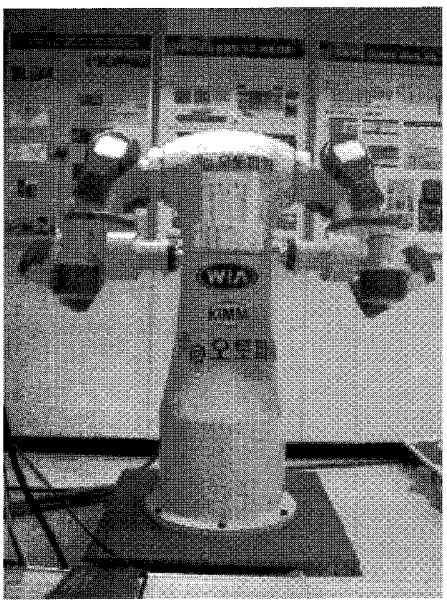

Fig. 1 The developed dual arm robot (AUTOMAN)

개발된 듀얼 암 로봇은 전통적인 싱글 암 로봇에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 허리와 양팔을 가진 로봇을 티칭하는 것은 싱글 암 로봇의 티칭에 비하여 많은 어려움이 따르게 된다. 기존과 같은 교시장치(teaching pendent)를 사용하는 형태의 티칭으로는 이러한 어려움을 해결하기가 쉽지 않다. 이러한 이유로 본 연구에서는 양팔로봇의 직관적인 교시에 관해 연구하였으며 그 연구결과를 기술하고자 한다.

2. 양팔의 독립 교시

일반적으로 로봇의 티칭은 교시장치 등을 이용하여 이루어진다. 이에 반해 직접교시는 로봇의 말단을 사용자가 직접 밀거나 당김으로써 로봇의 위치와 자세를 직접 교시하는 방식이다. 사용자가 로봇에 힘과 모멘트를 인가하면 로봇은 그 힘과 모멘트를 측정하여 이에 순응하도록 관절을 움직이기 때문에 사용자는 로봇이 자신의 지시에 따라 움직인다고 느끼게 된다. 이때 로봇은 자신이 움직이고 있는 궤적을 기억하였다가 이 후에 이 궤적대로 자동적인 반복운전을 진행하게 된다.[1-5]

본 연구에서는 듀얼 암 로봇의 양팔 말단에 힘/모멘트 센서를 설치하였다. 사용자가 힘/모멘트를 인가하면 로봇은 사용자의 힘에 의해서 팔의 말단에 설치된 가상 스프링이 압축된 것으로 이해한다 (Fig. 2). 가상 스프링이 압축되면 가상의 변위가 발생하게 되는데 이 가상변위 만큼 사용자가 로봇을 움직이고 싶어한다고 판단하며 따라서 현재의 위치나 회전으로부터 가상변위만큼 추가로 로봇의 말단이 이동하거나 회전한다. 그러므로 가상 스프링의 고정점은 항상 로봇 팔의 말단과 일치하게 된다. 이러한 절차를 통하여 로봇의 팔을 잡고 밀거나 당김으로써 로봇 팔을 직관적을 제어하는 것이 가능하다. 교시장치를 사용해서 듀얼 암 로봇을 티칭하는 경우에는 양팔을 각각 독립적으로 그리고 순차적으로 티칭하는 것이 필요하다. 본 연구에서 개발한 듀얼 암 로봇에서도 동일하게 각각의 팔을 독립적으로 직접 교시하도록 하였다. Fig. 3 에서는 왼팔을 직접 교시하여 설치된 셋업 테이블(setup table)의 홀(hole)에 삽입하는 작업을 연속된 사진으로 보여주고 있다. 본 논문의 실험에 사용된 로봇은 듀얼 암 로봇의 1 차 프로토 타입이다.

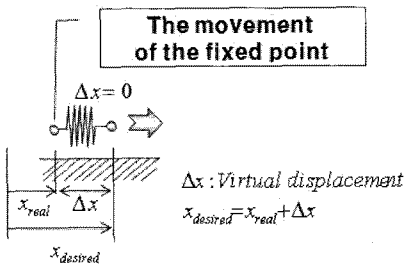

Fig. 2 Virtual spring and virtual displacement

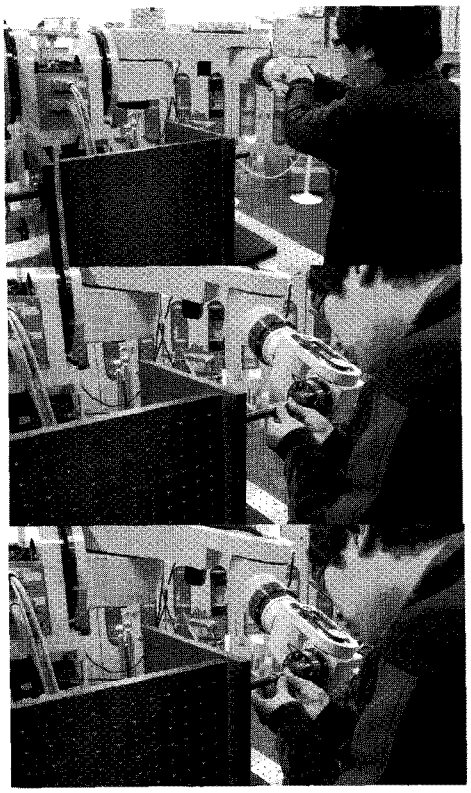

Fig. 3 Direct teaching of the right and the left arm separately

왼쪽 팔의 교시가 완료되면 오른쪽 팔의 교시가 이루어 진다. 양팔 모두 티칭이 이루어 지는 동안 로봇은 자신의 궤적을 기억해 두었다가 이를 다시 재생할 수 있다. 비록 양팔이 각각 시간차를 가지고 티칭되었지만 플레이백(playback) 시에는 동시에 재연되는 것이 가능하며, 재연의 속도도 간단히 변경될 수 있다. Fig. 4 는 재연작업을 연속된 사진으로 보여주고 있다.

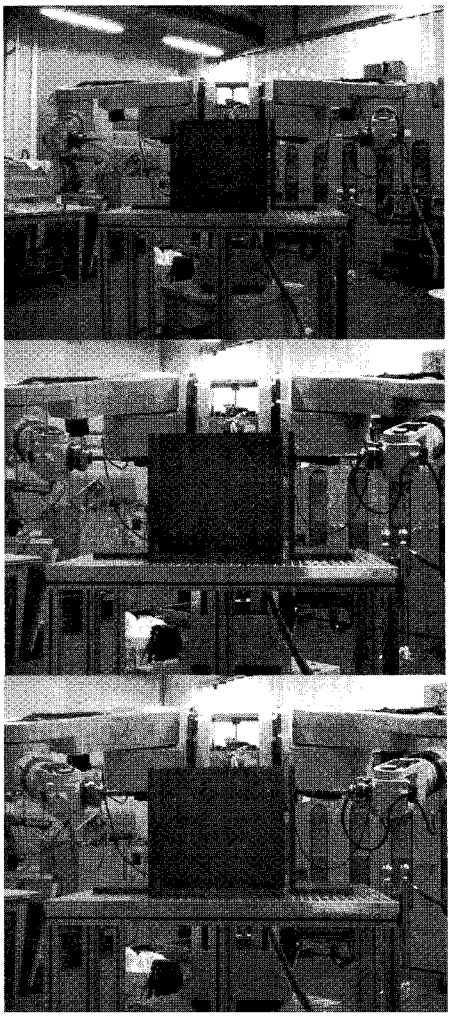

Fig. 4 Playback of the reference trajectory separately taught

교시장치를 사용하는 경우에는 양팔을 순차적으로 티칭하는 것만이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 허리의 움직임이 고정된 경우에 사용자가 양팔의 말단을 직접잡고 동시에 교시하는 것이 가능하며 이것은 듀얼 암 로봇의 교시에 있어서 매우 효과적인 교시방법이 된다. Fig. 5 는 작업자가 로봇의 양팔 말단을 동시에 잡고 힘을 가함으로써 양팔을 동시에 직접 교시하고 있는 것을 순차적인 사진을 통해 보여주고 있다. 양팔의 동기 교시가 이루어 지는 동안 로봇은 궤적을 저장해 두게 되고 플레이백 시에는 저장된 경로를 따라서 독립적인 운전을 하게 된다(Fig. 6).

이와 같은 양팔의 동시 직접교시는 Fig. 7 과 같

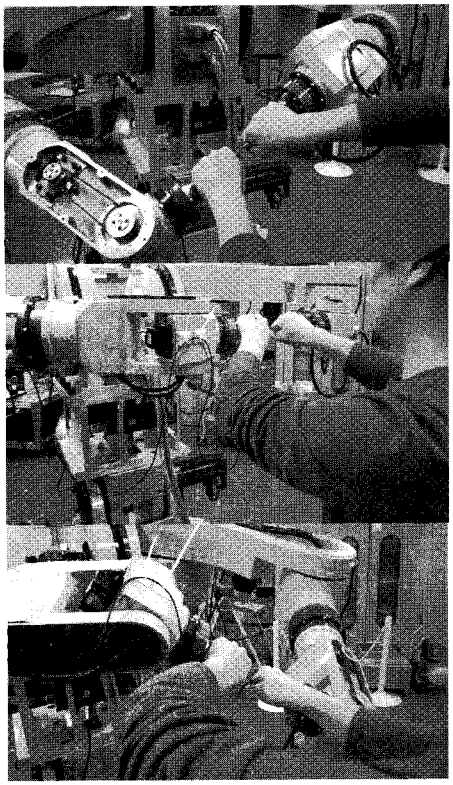

Fig. 5 Direct teaching of the right and the left arm simultaneously

은 직접교시 알고리즘에 의해서 구현된다. 이 알고리즘은 크게 Manual control 알고리즘과 Dual arm robot 제어 알고리즘으로 나누어 진다.

Dual arm robot 제어 알고리즘은 로봇의 모션을 제어하는 모션 제어기를 의미한다. 이 모션 제어기는 카테시안 공간(cartesian space)에서 표현된 양팔의 말단의 목표궤적 정보를 입력으로 받아들이고 역기구학을 통해 필요한 조인트 모션을 계산한다. 이러한 역기구학의 연산은 200 Hz 로 이루어지기 때문에 각 조인트의 서보 제어를 위해서 다시 1 kHz 의 축 궤적 보간을 수행한다. 그리고 이를 통해 입력으로 받아 들여진 로봇의 목표 궤적을 추종 하도록 제어한다. Manual control 알고리즘은 사용자의 힘과 모멘트를 측정하고 Fig. 2 에 기술된 가상 스프링과 가상 변위 모델에 의해서 로봇의 선형 움직임과 회전 움직임의 증분치를 계산하고 이를 모션 제어기의 입력으로 내보낸다. 허리의 움직임이 고정되어 있기 때문에 양팔의 직접교시 알고리즘은 서로 독립적으로 분리되어 있음을 알 수 있다.

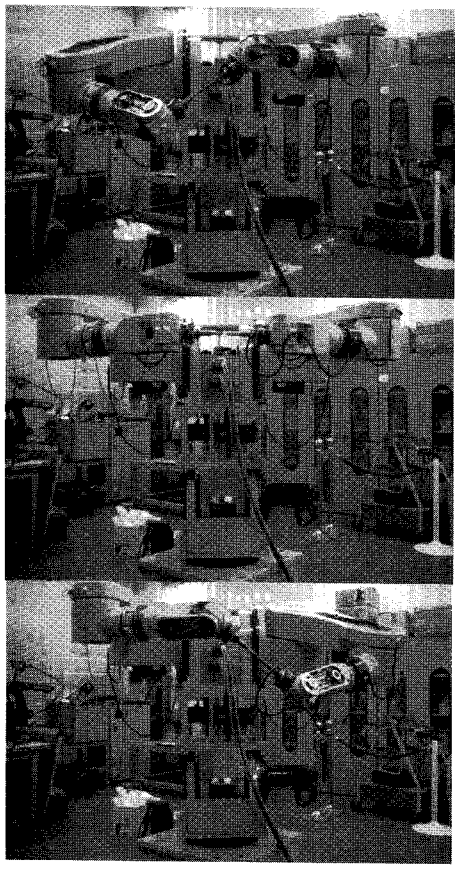

Fig. 6 Playback of the reference trajectory directly taught

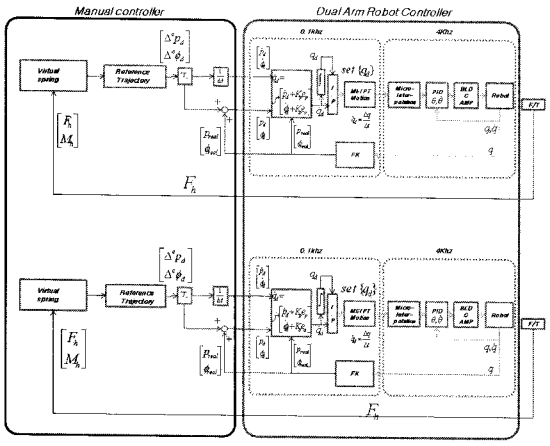

Fig. 7 Direct teaching algorithm in the case of the separated motion teaching

3. 상대기구학

싱글 암 로봇에 대한 듀얼 암 로봇의 최대의

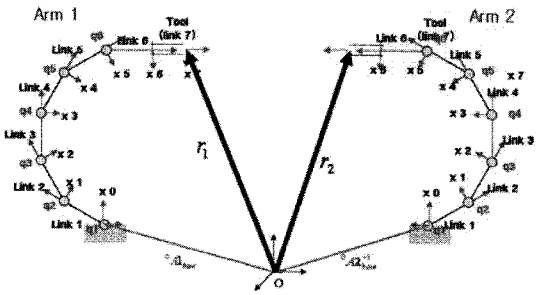

Fig. 8 Absolute definition of the position and orientation of the end-effectors of arm 1 and arm 2

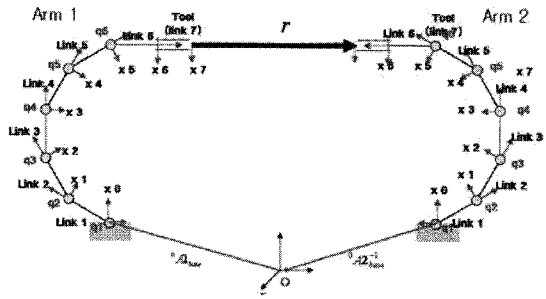

Fig. 9 Relative definition of the position and orientation of the end-effector of Arm 2 with respect to Arm 1

장점은 양팔의 동기제어를 통한 협력작업이 가능하다는 것이다. 이러한 양팔의 협력작업을 위해서는 양팔의 목표궤적을 별도로 설정(Fig. 8)하지 않고 협력에 필요한 양팔의 상대적인 운동을 표현하는 것이 편리하다. 이를 위해서 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 Arm 1의 말단 좌표계에서 바라본 Arm 2의 상대적인 운동을 기술한다.

이러한 상대운동은 식 (1)같이 기술된다. $\dot{r}$은 Arm 1의 툴에서 바라본 Arm 2의 상대적인 선속도/회전속도를 의미한다. Jacobian의 하첨자 (1,2)는 양팔의 상대적인 모션과 양팔의 조인트의 실제 움직임 사이의 Jacobian 임을 표현하며 상첨자 1은 Jacobian이 Arm 1의 말단 좌표계에 대해서 표현되었음을 의미한다. q는 조인트의 회전각도를 의미하며 하첨자 1, 2는 각각 Arm 1, Arm 2에 관련된 변수임을 의미한다.

$$\begin{bmatrix}\dot{q}1\\ \dot{q}2\end{bmatrix}={}^{1}J^{+}_{1,2}(q1,q2)\ \dot{r} \tag{1}$$

식 (1)에서 사용된 Jacobian은 문헌 [6]에서 정리된 바와 같이 식 (2)로 요약된다.

$$ {}^{1}J_{1,2} = \begin{bmatrix} -a1_1 \times (P2_7 - P1_1) & \cdots & -a1_6 \times (P2_7 - P1_6) \\ -a1_1 & \cdots & -a1_6 \\ a2_1 \times (P2_7 - P2_1) & \cdots & a2_6 \times (P2_7 - P2_6) \\ a2_1 & \cdots & a2_6 \end{bmatrix} \quad (2) $$

식 (3)에서 $U1_i$는 Arm 1 의 말단에서부터 Arm 1 의 조인트에 설치된 좌표계 i 까지의 전방향 기구학을 표현한다. $U2_i$는 Arm 1 의 말단에서부터 Arm 2 의 조인트에 설치된 좌표계 i 까지의 전방향 기구학을 표현한다. 식 (2)의 a, p 는 식 (3)으로 정의되는 동차변환 행렬의 3 번째, 4 번째의 컬럼이다.

$$ U1_i = \begin{bmatrix} n1_i & o1_i & a1_i & p1_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \; U2_i = \begin{bmatrix} n2_i & o2_i & a2_i & p2_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) $$

양팔의 협조작업이 상대적인 표현으로 기술되면 이러한 협조작업을 수행하기 위해 필요한 각 조인트의 실제 필요 움직임이 식 (1)에 의해서 연산될 수 있다.

식 (1)의 입력은 양팔의 상대적인 움직임뿐이다. 그러므로 양팔의 움직임은 입력으로 주어진 상대 움직임을 만족하도록 두 개의 팔이 동시에 움직이게 된다. 이것은 결과적으로 한 팔은 고정되고 한 팔만 움직이는 경우에 비하여 양팔의 평균적인 관절의 움직임이 작다는 장점을 가지게 된다.

4. 상대기구학을 이용한 직접교시

식 (1)에 의해서 양팔이 상대적인 운동을 수행하는 동안, 기준이 되는 하나의 팔의 궤적을 직접 교시할 필요가 있다. 즉 양팔이 Peg-in-Hole 등의 조립작업을 수행하고 있는 동안 사용자가 한쪽 팔을 밀거나 당길 경우 로봇은 사용자의 교시력에 순응하여 움직이면서 동시에 주어진 협력작업(Peg-in-hole 등)을 정확히 수행할 필요가 있다. 식 (1)은 기준이 되는 팔의 모션에 대한 정의가 없고 단지 양팔 사이의 상대적인 궤적에 대한 정의만 있으므로 이러한 목적에 부합하지 않다. 따라서 상대운동을 기술하면서 동시에 직접 교시되는 팔의 움직임을 기술할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 왼팔의 궤적을 식 (4)와 같이 결정한다. 이 식에서 하첨자 l,b는 각각 왼팔과 허리에 관련된 변수임을 의미한다. 상첨자 bo는 해당 벡터가 허리의 기준좌표계(고정좌표계)에 대해서 표현되었음을 의미한다. $\dot{p},\dot{\Phi}$는 각각 암의 선속도와 회전속도를 의미한다.

$$ \begin{bmatrix} {}^{bo}\dot{p}_l \\ {}^{bo}\dot{\Phi}_l \end{bmatrix}_b = {}^{bo}J_l \begin{bmatrix} \dot{q}_l \\ \dot{q}_b \end{bmatrix} \quad (4) $$

만일 허리의 움직임에 관한 별도의 기준궤적이 정해져 있다면 식 (4)에서 허리의 움직임에 관련된 Jacobian 과 왼팔의 움직임에 관련된 Jacobian 을 구분해서 식 (5)와 같이 표현하는 것이 편리하다.

$$ \begin{bmatrix} {}^{bo}\dot{p}_l \\ {}^{bo}\dot{\Phi}_l \end{bmatrix}_b = \left[\left[{}^{bo}J_l \right]_l \mid \left[{}^{bo}J_l \right]_b \right] \begin{bmatrix} \dot{q}_l \\ \dot{q}_b \end{bmatrix} \quad (5) $$

이제 왼팔의 조인트의 기준 궤적은 식 (6)에 의해서 결정된다.

$$ \dot{q}_l = \left[{}^{bo}J_l \right]_l^{+} \left[\begin{bmatrix} {}^{bo}\dot{p}_l \\ {}^{bo}\dot{\Phi}_l \end{bmatrix} - \left[{}^{bo}J_l \right]_b \dot{q}_b \right] \quad (6) $$

이제 양팔의 상대적인 움직임을 기술하는 식 (1)을 아래와 같이 전개한다. 여기에서 하첨자 (l,r)은 왼쪽 팔과 오른쪽 팔의 말단 간의 상대적인 움직임에 관련된 변수임을 의미한다. 상첨자 l은 해당 벡터가 왼팔의 말단 좌표계에 대해서 표현되었음을 의미한다.

$$ \begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^{l}\dot{p}_{l,r} \\ {}^{l}\dot{\Phi}_{l,r} \end{bmatrix} &= \left[\left[{}^{l}J_{l,r} \right]_l \mid \left[{}^{l}J_{l,r} \right]_r \right] \begin{bmatrix} \dot{q}_l \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} \\ &= \left[{}^{l}J_{l,r} \right]_l \dot{q}_l + \left[{}^{l}J_{l,r} \right]_r \dot{q}_r \end{aligned} \quad (7) $$

이 식을 정리하면 식 (8)이 얻어진다. 식 (4) 혹은 식 (6)에 의해서 왼팔의 목표궤적이 이미 설정되어 있으므로 식 (8)을 이용해서 입력으로 주어진 상대운동을 만족하는 오른팔의 기준궤적을 결정할 수 있다.

$$ \dot{q}_r = \left[\left[{}^{l}J_{l,r} \right]_r \right]^{+} \left[\begin{bmatrix} {}^{l}\dot{p}_{l,r} \\ {}^{l}\dot{\Phi}_{l,r} \end{bmatrix} - \left[{}^{l}J_{l,r} \right]_l \dot{q}_l \right] \quad (8) $$

작업자가 왼팔의 말단을 잡고 교시력을 가하면 로봇의 왼팔은 작업자의 교시력에 순응하여 작업

자의 의도대로 움직이게 된다. 로봇의 왼팔이 직접교시 되고 있는 동안에도 식 (8)에 의해서 생성된 궤적에 따라 오른팔이 제어되면 이미 주어진 왼팔과 오른팔의 상대운동도 동시에 만족된다. 이러한 전략은 Fig. 10 과 같이 요약될 수 있다.

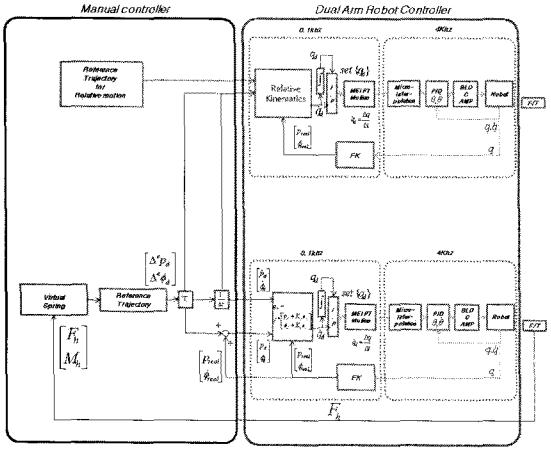

Fig. 10 Direct teaching algorithm during cooperative motion

5. 교시과정에서의 양팔충돌방지

로봇의 궤적을 직접 프로그램 하거나 혹은 티칭하는 경우에 있어서 듀얼 암 로봇은 싱글 암 로봇에 비해서 위험하다. 이는 싱글 암 로봇과 달리 양팔의 충돌 혹은 양팔과 몸통의 충돌 등의 문제가 발생할 위험이 있기 때문이다. 특히 기존의 로봇과 달리 직접 교시가 이루어 질 경우에는 사용자의 조작 미숙으로 인한 양팔의 충돌 위험이 상대적으로 크다고 할 수 있다. 이러한 충돌의 위험에 대응하는 것이 매우 중요하며 이를 위해서 신속하게 로봇이 자체충돌 위험에 있다는 것을 제어기 스스로 판단할 수 있어야 한다.

개발된 로봇의 경우 기구학적 연산이 200Hz 로 이루어지고 각 축의 서보 제어는 2kHz 로 이루어진다. 따라서 양팔의 자체 충돌 감시 알고리즘은 기구학 연산과 동일하게 200Hz 로 이루어 질 필요가 있다. 이러한 신속한 충돌 판단을 위해서 본 연구에서는 가상링크 개념을 사용하였다.[6,7] 링크의 실제형상을 고려하여 충돌을 감시하는 것이 아니라 Fig. 11 과 같이 링크상에 존재하는 충분히 큰 가상구로 형성된 가상링크를 만들고 이들의 충돌을 감시함으로써 보다 신속하게 링크간의 충돌을 감시할 수 있다. 일단 충돌이 예상되면 모든 작업명령을 무시하고 감속하여 로봇의 운전을 정지하게 된다.

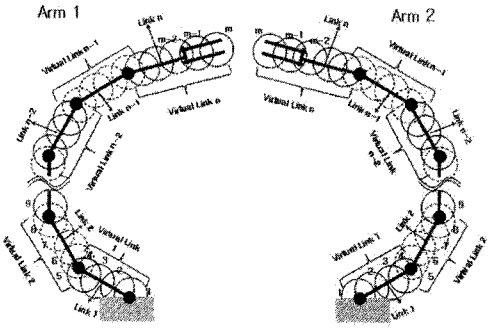

Fig. 11 Self-collision detection and virtual links

로봇이 운전되는 중에 순방향 기구학을 연산함으로써 가상구들의 현재 위치를 계산할 수 있고, 가상구들간의 거리가 그 반경의 합보다 작은지를 확인함으로써 가상구들간의 충돌 여부를 간단히 확인할 수 있다. 가상구의 크기를 크게 하고 그 수를 줄일수록 안전하고 신속하게 충돌을 감시할 수 있다. 반면에 가상링크가 실제링크와 유사한 형상을 가지도록 가상구의 반경을 작게 하고 개수를 늘릴 경우 충돌예측의 연산량이 늘어나고 충돌의 위험도 커지게 된다(Fig. 12).

Fig. 13 는 충돌감시 알고리즘의 3D 시뮬레이션 화면을 캡쳐 한 것을 보여주고 있다. Fig. 13 에서 좌측은 실제로봇이며 우측은 가상링크로 구성된 가상로봇이다. 각각의 가상링크는 4-5 개의 가상구로 구성되었다.

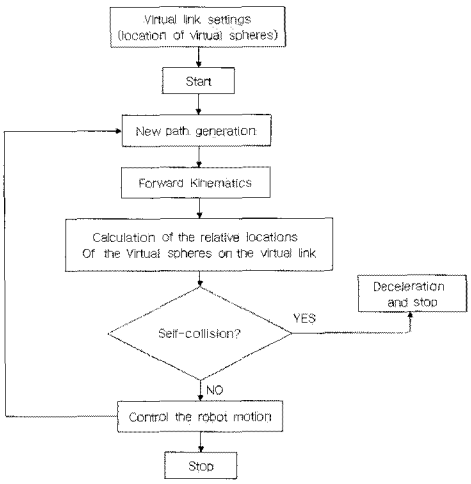

Fig. 12 Flow chart of self-collision detection algorithm

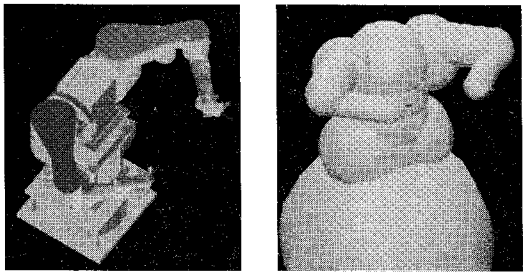

Fig. 13 Simulation results: the real robot(left) and the virtual robot with virtual links(right)

6. 결론

본 연구에서 개발한 산업용 듀얼 암 로봇은 기존의 싱글 암 로봇과 달리 하나의 허리와 양팔을 가지고 있어서 인간과 같이 양팔을 이용한 협력작업이 가능하여 보다 광범위한 적용이 가능하다. 그러나 이러한 듀얼 암 로봇은 기존의 교시장치를 이용한 교시방법으로 교시하기에는 어려움이 많다. 이에 본 논문에서는 로봇을 쉽고 직관적으로 교시할 수 있도록 양팔로봇을 위한 직접교시 알고리즘을 개발하였으며 로봇에 실제로 적용하여 실험을 통해 그 유용성을 검증하였다. 더 나아가 로봇의 양팔이 협조작업을 진행하고 있는 동안에도 이러한 협조작업을 그대로 유지하면서 동시에 직접교시가 가능하도록 하기 위하여 상대 기구학에 기반한 직접교시알고리즘을 개발하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지역산업중점기술개발사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Hara, K., "Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 644-650, 2002.
2. Tsumugiwa, T., Yokowawa, R. and Hara, K., "Variable impedance control with virtual stiffness for human-robot cooperative task (human-robot Cooperative peg-in-hole task)," Proc. 41st SICE Annual Conference, Vol. 4, pp. 2329-2334, 2002.
3. Tsumugiwa, T., Sakamoto, A., Yokowawa, R. and Hara, K., "Switching control of position/torque control for human-robot cooperative task - human-robot cooperative carrying and peg-in-hole Task," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1933-1939, 2003.
4. Rahaman, M., Ikeura, R. and Mizutani, K., "Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robots to cooperate with humans," JSME Int. Journal Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol. 45, No. 2, pp. 510-518, 2002.
5. Cetin, A. E. and Adli, M. A., "Cooperative control of a human and a robot manipulator for positioning a cart on a frictionless plane," Mechatronics, Vol. 16, No. 8, pp. 461-469, 2006.
6. Park, C. H. and Park, K. T., "Design and Kinematics Analysis of Dual Arm Robot Manipulator for Precision Assembly," 6th IEEE Int. Conf. on Industrial Infomatics, pp. 430-435, 2009.
7. Park, C. H. and Park, K. T., "Design and Control of Industrial Dual Arm Robot," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 58-65, 2008.