

글래스 반송용 로봇핸드의 채터링 원인 해석

김주용*, 강철구#

Analysis of Chattering Problem of a Glass Transfer Robot Hand

Joo-Yong Kim* and Chul-Goo Kang#

ABSTRACT

A glass transfer robot is used for handling LCDs in the production line of flat panel displays under clean environments. During glass transfer operations of the robot, chattering phenomenon occurs at the robot hand. This deteriorates the accuracy and repeatability of the end-effector of the robot. In this paper, we present the kinematic solution of the robot and then analyze the cause of this chattering phenomenon in view of the mechanism and servo control and propose a practical solution that can reduce the chattering significantly at the robot hand of the glass transfer robot.

Key Words : Glass transfer robot (글래스 반송용 로봇), Chattering phenomenon (채터링현상), Robot hand (로봇손), Radial motion robot (레이디얼 운동로봇), Harmonic drive (하모닉드라이브), Timing belt (타이밍벨트)

기호설명

- a_i = length of the robot link i
- $c_i = \cos \theta_i$
- d_i = offset of the frame origin in the direction of joint axis i
- $s_i = \sin \theta_i$
- α_i = twist of two consecutive joint axes
- θ_i = rotational angle of link i with respect to the joint axis
- A_i = coordinate transformation matrix between two consecutive coordinate frames

1. 서론

최근 FPD (flat panel display)와 반도체 생산에 있어서 LCD (liquid crystal display)와 웨이퍼(wafer)가 대형화, 고밀도화됨에 따라 사람에 의한 운반손상과 파티클(particle) 생성의 원인을 제공하므로 반송용 로봇(transfer robot)이 사용되게 되었다. 이러한 로봇들은 운동학적으로나 제어상 일반 환경에서 사용되어지고 있는 로봇과 별다른 차이는 없고, 다만 클린 환경(clean environments)의 특성에 맞추어 특수하게 설계되어 진다. 로봇의 좌표계에 의한 분류상 이러한 반송용 로봇은 원통 좌표계(cylindrical coordinate system) 로봇에 속하며, 로봇

접수일: 2004년 5월 3일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 인사이드테크원㈜ 시스템설계팀

교신저자: 건국대학교 기계공학과

E-mail cgkang@konkuk.ac.kr Tel. (02) 447-2142

의 말단장치(end-effector)가 작업방향으로 항상 직선운동(radial motion)을 하기 때문에 로봇의 운동학적 특성에 따라 RMR(radial motion robot)이라고도 불린다.^{1,2}

따라서 넓은 의미에서 본다면 이러한 반송용 로봇은 RMR 의 한 종류라고 할 수 있으며, 반도체 제조장비에서 웨이퍼를 반송할 경우에 웨이퍼 반송용 로봇으로, FPD 제조라인에서 글래스를 운반할 경우에 글래스 반송용 로봇(glass transfer robot)으로 불리워진다.^{3,4}

글래스 반송용 로봇은 스카라(SCARA) 로봇의 변형된 형태라고 볼 수 있으며 Fig. 1 과 같은 형상을 갖는다. 로봇의 말단장치는 이송을 위해 진공 흡착포트를 장착하거나 지지핀(support pin), edge-grip 등과 같이 접촉에 의해 이송할 수 있는 구조로 되어 있다.

일반적인 산업용 로봇의 좌표계 정의와는 달리, 반송용 로봇의 축은 일반적으로 Z-축, θ -축(또는 T-축), R-축(또는 X-축)으로 정의되고, Z-축은 로봇의 상하운동, θ -축은 로봇의 회전운동, R-축은 말단장치의 직선운동에 해당한다. 로봇공학적 관점에서는 이러한 정의가 바람직한 좌표계 선택은 아니나, 각 축이 동시에 움직이지 않고 각각의 축이 독립적(independent)이므로, 나름대로 반송용 로봇의 특징을 표현하는 좌표계 선택이라 할 수 있다.

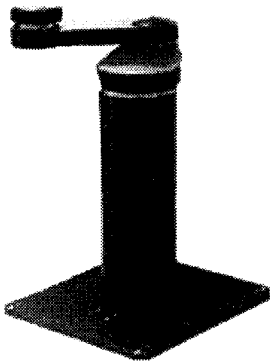


Fig. 1 Transfer robot

일반적으로 로봇 암(robot arm)을 구동할 때 발생하는 채터링(chattering) 현상은 기구학적인 오차 때문으로 알려져 있다.^{5,6}

본 논문에서는 글래스 반송용 로봇핸드에서 발생하는 채터링현상의 원인을 구체적으로 밝히고, 그 해결책을 제시하고자 한다. 로봇핸드의 채터링현상을 기구학적인 메커니즘 측면과 함께 제어기 입력에 대한 서보모터(servomotor)의 출력을 검토함으로써 알아보고자 한다.

서보모터의 출력은 엔코더(encoder)에 의해 검출된다. 엔코더 출력을 받기 위해서는 서보앰프의 단자대에 엔코더 출력의 A 상, B 상, Z 상 출력단자가 있어야 한다. 현재 Z 축 서보앰프(MR-J2-60A/B)에는 이러한 단자가 있으나, θ 축과 R 축 서보앰프(MR-C-20A)에는 이러한 단자가 없으므로, 미쯔비사에서 제공하는 RS232C 옵션유닛을 이용한 셋업소프트웨어를 사용하여 서보모터의 속도와 토크 출력을 알아낸다.

이러한 방법으로 시스템 입력에 대한 출력을 검토하여, 시스템 응답을 해석하고 채터링이 발생하는 원인을 찾아내 그 해결책을 제시하는 것이 본 논문의 목적이다.

산업용 로봇에 대한 연구는 많이 발표되고 있으나,^{7,8} 현장에서 발생하는 문제를 논의하는 논문은 많지 않다. 또한 채터링에 대한 연구로는 공작기계, 광디스크, 자동벨트긴장장치 등의 분야에서 연구결과가 발표되고 있으나,^{9,11} 반송용 로봇의 채터링에 대한 연구결과는 저자들의 조사로는 찾지 못했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 글래스 반송용 로봇의 로봇암 구동 원리와 기구학 해에 대해서 알아보고, 3 절에서는 서보모터의 출력 데이터를 얻기 위한 테스트 시스템 구성에 대하여 기술한다. 4 절에서는 시험결과를 논의하고, 5 절에서는 로봇핸드의 채터링방지를 위한 방안을 포함한 결론을 맺는다.

2. 글래스 반송용 로봇암의 구동 원리

본 논문에서 고려하고 있는 글래스 반송용 로봇암의 구성을 단순하게 표현하면 Fig. 2 와 같다.

로봇암이 구동하는 원리는 Fig. 3 과 같다. 관절 1 (joint-1)이 θ 만큼 반시계 방향으로 회전을 하면 링크 1 (link-1)은 축에 고정되어 있으므로 θ 만큼 회전을 하고, 기어비(2:1)에 따라서 관절 2 는 시계 방향으로 20만큼 회전을 한다. 동시에 관절 3 도

기어비(1:2)에 따라 링크 3 이 반시계방향으로 θ 만큼 회전을 하게 된다.

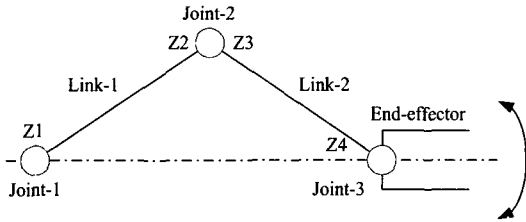


Fig. 2 Schematics of the robot arm

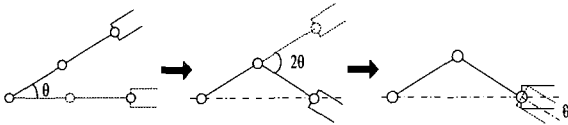


Fig. 3 Operation of the robot arm

각각의 타이밍풀리, 타이밍벨트가 이상적인 운동을 하면 로봇핸드가 직선운동을 하게 된다. 그러나, 실제로는 축의 편심, 타이밍풀리의 평행도, 타이밍벨트의 탄성변형, 회전부의 일정하지 못한 마찰력 등으로 인하여 로봇암 구동시 로봇핸드의 채터링이 발생한다.

각각의 타이밍풀리와 타이밍벨트는 Fig.3 과 같이 구성되어 있다. 서보모터의 가.감속시 발생한 토크에 의해 타이밍벨트에 긴장측(tight side)과 이완측(slack side)이 발생하면서 타이밍벨트는 탄성변형을 하면서 늘어난다. 이렇게 늘어난 양은 타이밍벨트에 탄성에너지로 축적되며, 이 에너지가 발산되면서 로봇핸드에 채터링을 유발하는 것으로 인식된다. 현재 글래스 반송용 로봇암 구동부의 감속은 모두 벨트풀리 감속으로 되어 있으므로, 이런 현상이 축적되어 나타날 수 있다.

이런 현상은 눈으로도 관찰할 수 있다. 링크 2 의 타이밍벨트를 손으로 잡고 인장력(tension)을 가하면 로봇핸드가 흔들린다. 이런 현상은 로봇암 구동시 움직임과 유사하다. 이것은 관절 3 의 타이밍풀리가 약간 회전하기 때문이고, 관절 2, 관절 1 순으로 회전변위는 줄어드는 것으로 보아 타이밍벨트의 신축으로 인한 영향으로 생각할 수 있다.

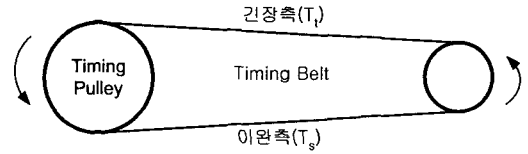


Fig. 4 Timing pulley and timing belt

또한 타이밍벨트 구동은 백래시(backlash)가 없다는 것이 장점으로 되어 있으나, 타이밍벨트의 탄성변형으로 인한 변형량이 존재한다. 다시 말하면, 구동측 풀리가 회전해도 타이밍벨트의 탄성변형량으로 인해 종동측 풀리는 회전하지 않는 것이다. 이 현상은 타이밍벨트의 탄성도가 클수록, 길이가 길수록 크게 나타난다.

이 글래스 반송용 로봇의 좌표계를 Denavit-Hartenberg (D-H) 규약을 써서 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다. 그러면 Table 1 과 같은 D-H 파라미터를 얻을 수 있다. 여기서 a_i 는 링크의 길이(length), α_i 는 관절축의 비틀림각(twist), θ_i 는 관절축의 회전각도(angle), d_i 는 관절축 방향으로의 좌표계 원점의 오프셋(offset)을 의미한다.

이 로봇의 순기구학(forward kinematics) 해는 각 관절사이의 좌표변환행렬 A_i 를 구하고 이를 곱하여 다음과 같이 얻어진다.^{5,6}

$$T_0^5 = A_1 \cdots A_5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서

$$\begin{aligned} r_{11} &= -c_2(-c_3c_4c_5 + c_5s_3s_4 + c_4s_3s_5 + c_3s_4s_5) \\ &\quad - s_2(c_4c_5s_3 + c_3c_5s_4 + c_3c_4s_5 - s_3s_4s_5) \\ r_{21} &= c_3(c_4c_5s_2 + c_2c_5s_4 + c_2c_4s_5 - s_2s_4s_5) \\ &\quad + s_3\{-s_2(c_5s_4 + c_4s_5)\} + c_2(c_4c_5 - s_4s_5) \\ r_{31} &= 0 \\ r_{12} &= s_3(-c_2c_4c_5 + c_5s_2s_4 + c_4s_2s_5 + c_2s_4s_5) \\ &\quad - c_3(c_4c_5s_2 + c_2c_5s_4 + c_2c_4s_5 - s_2s_4s_5) \\ r_{22} &= -c_2(-c_3c_4c_5 + c_5s_3s_4 + c_4s_3s_5 + c_3s_4s_5) \\ &\quad - s_2(c_4c_5s_3 + c_3c_5s_4 + c_3c_4s_5 - s_3s_4s_5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{32} &= 0 \\
 r_{13} &= 0 \\
 r_{23} &= 0 \\
 r_{33} &= 1 \\
 d_x &= a_3(c_2c_3 - s_2s_3) - a_4(-c_2c_3c_4 + c_4s_2s_3 \\
 &\quad + c_3s_2s_4 + c_2s_3s_4) - a_5\{c_2(-c_3c_4c_5 + c_5s_3s_4 \\
 &\quad + c_4s_3s_5 + c_3s_4s_5) + s_2(c_4c_5s_3 + c_3c_5s_4 \\
 &\quad + c_3c_4s_5 - s_2s_4s_5)\} \\
 d_y &= a_3(c_3s_2 + c_2s_3) + a_4c_4(c_3s_2 + c_2s_3) \\
 &\quad + a_4s_4(c_2c_3 - s_2s_3) + a_5c_5(c_3c_4s_2 + c_2c_4s_3 \\
 &\quad + c_2c_3s_4 - s_2s_3s_4) + a_5s_5(-s_2(c_4s_3 + c_3s_4) \\
 &\quad + c_2(c_3c_4 - s_3s_4)) \\
 d_z &= d_1 + d_2
 \end{aligned}$$



Fig. 5 Coordinate frame assignment using D-H convention

위 식에서 $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$ 를 의미한다. R 축에 해당하는 관절변수는 3 개 중 1 개만이 독립변수이므로, 전체 순기구학 해의 독립변수는 d_1, θ_2, θ_3 로 볼 수 있고, 이것이 반송용 로봇의 자유도를 결정한다. 관절-3,4,5 는 타이밍벨트와 풀리에 의해 연결에 의해서 구동되고, 구동축은 관절-0,1,2 에 장착되어 있다.

로봇 말단장치의 위치(position)와 방향(orientation)으로부터 관절변수를 구하는 역기구학 해는 직렬 머니플레이터일 경우에 일반적으로 순기구학 해보

다 구하기가 어렵다. 그런데 본 반송용 로봇의 경우에는 역기구학문제가 역위치기구학과 역방향기구학 문제로 디커플될 수 있으므로 역기구학 해를 기하학적 형상으로부터 2 변수 역탄젠트 함수를 이용하여 쉽게 얻을 수 있다.

Table 1 D-H parameters for the grass transfer robot.

링크	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1^*	0
2	0	0	d_2	θ_2^*
3	a_5	0	0	θ_3^*
4	a_4	0	0	θ_4^*
5	a_5	0	0	θ_5^*

* 변수

그리고 관절변수의 속도와 말단장치의 속도 사이의 관계를 표시해주는 미분 기구학(differential kinematics)의 해는 로봇 자코비안(Jacobian)을 이용하여 얻을 수 있다. 본 논문에서 고려하고 있는 반송용 로봇의 경우에 로봇 자코비안이 정방행렬(square matrix)이 아니므로 로봇 말단장치의 속도로부터 관절속도를 직접적으로 구할 수 없고, 기하학적 형상으로부터 다시 구하여야 한다.^{5,6}

3. 서보모터 출력데이터를 얻기 위한 테스트 시스템 구성

로봇암 구동 서보모터의 출력 데이터를 얻기 위해 Fig. 6 과 같은 테스트 시스템을 구성하였다.

테스트 시스템에서 로봇암 구동축 서보앰프(MR-C-20A)와 퍼스널 컴퓨터 사이에 RS232C 옵션유닛(MR-C-T01)을 이용하여 연결한다. 서보모터의 속력은 미쓰비시 옵션유닛(MR-C-T01)의 서보앰프에서 직접 신호를 얻고 있다. 테스트에 필요한 부품 리스트는 Table 2 와 같다. RS232C 통신케이블의 접속속도는 Fig. 7 에 주어져 있다. 셋업 소프트웨어(MRZJW3-SETUP)는 모니터 표시, 각종 파형 측정, 진단, 파라미터의 입출력, 테스트 운전 등을 행할 수 있는 프로그램으로서, GUI 의 모습은 Fig. 8 과 같다.

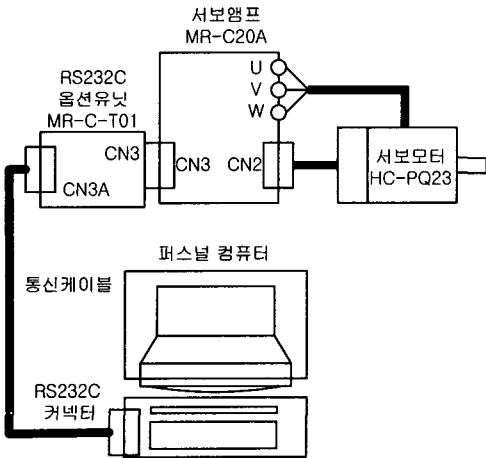


Fig. 6 Schematics of the test system

Table 2 Parts list

번호	품 명	수량
1	RS-232C 옵션유닛(MR-C-T01)	1
2	PC98용 통신케이블(MR-CPC98CBL3M)	2
3	10120-3000VE(콘넥터)	1
4	10320-52F0-008(셀키트)	1
5	GM-25LM(퍼스널컴퓨터측 콘넥터)	2
6	셋업소프트웨어(MRZJW3-SETUP31)	1

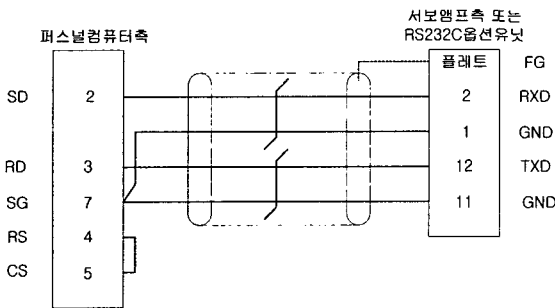


Fig. 7 Connection diagram of communication cables

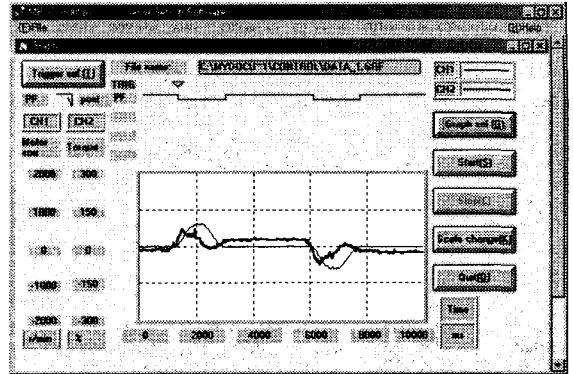


Fig. 8 Setup software MRZJW3-SETUP

4. 출력결과와 해석

글래스 반송용 로봇의 R 축 서보모터 속도출력과 토크출력은 Fig. 9 와 같다. 여기서, 샘플링 시간은 40 ms 이다. 40 ms 가 충분히 짧은 샘플링 시간은 아니지만 본 논문에서 해결하고자 하는 채터링을 보기엔 충분하였다. 속도계적의 형상은 포물선 형태로서 가속 후 바로 감속을 하였다. 이것은 Rorze 제어가 모터가 회전하는 구간의 회전에 필요한 시간이 가감속 시간x2 보다 적을 때는 가감속에 필요한 시간이 충분하지 않기 때문에 최고속도로 올라가지 못하고 도중에 감속을 개시하게 된다. 그러므로, 모터의 속도계적은 Fig. 9 와 같은 포물선을 그리게 된다.

또한, 모터의 최대 속력은 약 600 RPM 으로서 HC-PQ23 서보모터의 정격 RPM (3000 RPM)에 1/5 정도이다. 따라서 지금의 감속비를 적어도 3 ~ 4 배 이상 증가시켜야 한다.

토크계적의 형상이 매끄럽지 못한 이유는 일정하지 못한 마찰력, 축과 베어링의 편심, 폴리의 평행도, 타이밍벨트의 탄성변형 등으로 인한 영향 때문이다. 무엇보다도 타이밍벨트의 영향이 가장 크다는 것을 그래프에서 알 수 있다. 베어링의 편심, 마찰 등은 모두 움직임이 있을 때 발생하는 것이므로 Hand 가 정지한 상태에서도 모터 토크가 0 이 되지 않고 정격토크의 약 25%인 것으로 보아 타이밍벨트의 장력에 의한 정지토크가 발생하는 것으로 결론지을 수 있다.

속도의 값이 0 일 때는 토크의 값도 0 이 되는 것이 이상적이나, 토크계적 그래프에서 서보모터 정지시에도 정지토크가 걸리고 있다는 것을 알 수 있고, 서보모터의 회전방향에 따라 정지토크의 방향도 변하는 것으로 보아 타이밍벨트의 탄성변형으로 인한 탄성력이 정지시에도 존재한다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 가.감속시 뿐만 아니라 정지시에도 타이밍벨트에 긴장측과 이완측이 존재한다는 것이다. 특히, 글래스 반송용 로봇의 암 구동 감속기는 벨트풀리로 구성되어 있으므로 그 영향이 더욱 크다고 할 수 있다. 이것은 감속을 위해 하모닉드라이브(harmonic drive)를 사용한 셀(cell) 반송용 로봇의 서보모터 출력과 비교하면 더욱 명확해진다.

서보 앰프에 작용하는 외부 외란에 대한 영향은 동일한 서보모터와 서보 앰프를 사용하였을 때 측정된 Fig. 10 그래프를 보면 그 영향이 크지 않음을 볼 수 있다. Fig. 10은 셀 반송용 로봇 R축 서보모터의 속도계적과 토크계적을 보여주고 있다.

Fig. 9 와 Fig. 10 에서 세로축은 정격토크에 대한 %값을 나타내고 있다. 즉, 미쓰비시 옵션유닛(MR-C-T01)과 셋업 소프트웨어(MRZJW3-SETUP)를 이용하여, 정격토크값을 100 으로 했을 때 출력되는 토크값을 %로 나타낸 것이다. 글래스 반송용 로봇의 궤적에 비해 상당히 매끄럽고, 모터에 걸리는 최대토크가 정격토크의 10% 밖에 되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 하모닉드라이브 감속기를 사용했기 때문에 모터축에 걸리는 부하가 적어지고, 그만큼 타이밍벨트의 탄성변형도 적어지기 때문이라고 생각된다. 그러나, 1.5 ~ 2.5 초 사이에 정지토크가 발생하는 것으로 보아, 셀 반송용 로봇의 암 내부 타이밍벨트의 영향이 여전히 존재한다는 것을 알 수 있다.

위에 서술한 문제는 타이밍벨트의 초장력(initial tension)을 증가시켜서 해결할 수 있으나, 타이밍벨트 초장력을 증가시키면 그에 비례하여 서보모터축과 베어링에 과도한 모멘트가 걸린다. 따라서, 과도한 부하로 인한 베어링의 수명단축, 파티클 발생의 근원이 되고, 서보모터에 무리를 가하게 되기 때문에 좋은 방법이 아닐 수 있다.

그러므로, 상기한 문제점은 근본적으로 접근하여 해결해야 한다. 먼저, 글래스 반송용 로봇의 암 구

동 감속기는 하모닉드라이브로 교체되어야 한다.

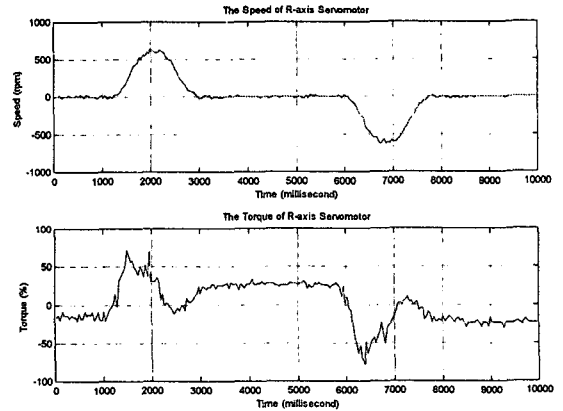


Fig. 9 Velocity and torque profiles of R axis of the servomotor at the glass transfer robot

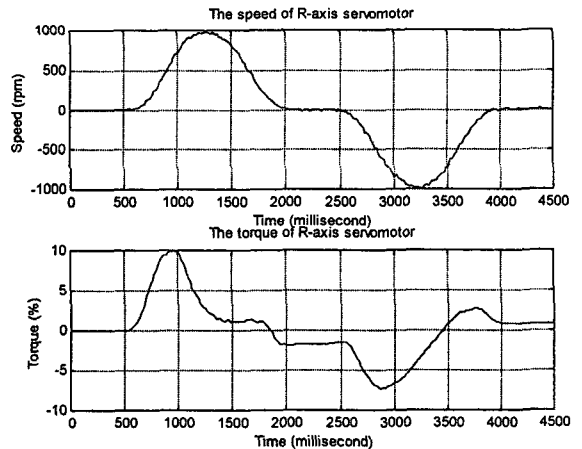


Fig. 10 Velocity and torque profiles of R axis of the servomotor at a cell transfer robot

그리고 로봇의 조립시, 특히 구동부 조립시에는 풀리 정렬도(평행도)를 맞추어야 하고 풀리 회전시 일정한 부하가 걸리도록 체결부분의 조립정밀도를 높여야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 글래스 반송용 로봇의 로봇핸드에서 발생하는 채터링현상의 원인을 기구학적 메

커니즘 측면과 함께 제어기 입력에 대한 서보모터 (servomotor)의 출력을 검토함으로써 규명하였다.

기구학적 메커니즘 검토와 서보모터의 출력으로 부터, 글래스 반송용 로봇의 로봇핸드 구동시 발생하는 채터링의 주 원인은 타이밍벨트의 탄성변형 때문이라는 결론을 얻었다. 따라서 타이밍벨트의 탄성변형으로 인한 영향을 줄이기 위해서, 하모닉 드라이브를 사용함으로써 감속비를 증가시켜 최대 토크를 줄이고, 보다 탄성변형도가 낮은 타이밍벨트를 써야 한다.

결론적으로, 글래스 반송용 로봇핸드의 채터링 현상을 해결하기 위해서는 지금의 로봇암 감속부분을 하모닉드라이브로 교체하고, 로봇암 내부의 타이밍벨트를 탄성변형도가 낮은 타이밍벨트로 교체하며, 지금의 조립정밀도를 한층 더 높여야 한다.

후 기

이 논문은 2001 년도 건국대학교 학술연구비지원에 의한 논문입니다. 학술연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Abbe, R.C. and Baker, D.G., "Rotary to Linear Motion Robot Arm," US Patent No. 4,897,015, 1990.
2. Tamai, T. and Okada, K., "Robot Arm Capable of Three Dimensional Moving a Robot Arm Member," US Patent No. 5,046,992, 1991.
3. ChomDan, Inc., Automation Systems (Korean), August Issue, pp. 120-126, 1998.
4. Electronic Sources Int'l Inc., Semiconductor Monthly (Korean), August Issue, pp. 60-69, 2000.
5. Spong, M. W. and Vidyasagar, W., Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons, 1989.
6. Kang, C.-G., Kweon, I.-S., Yoon, J.-S. and Chung, W.-K., Robot Dynamics and Control (Korean Translation), Hee Jung Dang, 1994.
7. Park, J.-K., "Optimal Motions for a Robot Manipulator amid Obstacles by the Concepts of Penalty Area," J. of the KSPE, Vol. 14, No. 3, pp. 147-155, 1997.
8. Jeong, D. Y. and Han, S. H., "Development of Off-line Simulator for Industrial Robots with Auto-teaching," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 12, pp. 80-88, 2003.
9. Baek, D. K. and Ko, T. J., "A Modeling Method of Equivalent Vibratory System in End Milling," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 135-141, 2003.
10. Kang, B. J., Chung, T. E., Shin, H. C. and Oh, J. W., "A Study on Vibration Reduction of an Optical Disk Drive with the Misaligned Axis of Rotation," J. of the KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 122-130, 2004.
11. Choi, Y. H., Ahn, Y. D. and Chung, W. J., "Vibration Analysis of a BEBTS Type ABTU," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 95-100, 2002.