

< 논문 >

## LCD 글래스 핸들링 로봇의 실시간 정적 처짐 보상

조필주<sup>†</sup> · 김동일<sup>\*</sup> · 김효규<sup>\*</sup>

(2005년 7월 26일 접수, 2006년 4월 18일 심사완료)

### Real-time Static Deflection Compensation of an LCD Glass-Handling Robot

Phil-Joo Cho, Dong-Il Kim and Hyo-Gyu Kim

**Key Words :** LCD Glass-Handling Robot (LCD 글래스 핸들링 로봇), Real-time Static Deflection Compensation(실시간 정적 처짐 보상), Mother Glass(원판 글래스)

#### Abstract

For last couple of decades, uses of TFT-LCDs have been expanded to many FPD(Flat Panel Display) applications including mobile displays, desktop monitors and TVs. Furthermore, there has been growing demand for increasingly larger LCD TVs. In order to meet this demand as well as to improve productivity, LCD manufactures have continued to install larger-generation display fabrication facilities which are capable of producing more panels and larger displays per mother glass(substrate). As the size of mother glass becomes larger, a robot required to handle the glass becomes bigger accordingly, and its end effectors(arms) are extended to match the glass size. With this configuration, a considerable static deflection occurs at the end of the robot arms. In order to stack maximum number of mother glasses on a given footprint, the static deflection should be compensated. This paper presents a novel static deflection compensation algorithm. This algorithm requires neither measurement instrument nor additional vertical axis on the robot. It is realized by robot controller software. The forward and inverse kinematics considering compensation always guarantees a unique solution, so the proposed algorithm can be applied to an arbitrary robot position. The algorithm reduced static deflection by 40% in stationary robot state experiment. It also improved vertical path accuracy up to 60% when the arm was running at its maximum speed. This algorithm has been commercialized and successfully applied to a seventh-generation LCD glass-handling robot.

#### 1. 서론

최근 LCD TV, 모니터, 휴대전화용 디스플레이 등 LCD 장치를 응용한 제품이 증대되고 있다. 특히 30" 이상 대형 LCD-TV 에 대한 소비자의 욕구는 급격히 증대되고 있다. 이런 대형화 제품추이와 가격경쟁력 확보라는 과제에 발맞추기 위해 LCD 제조업체들은 생산의 기본인 원판(原板) 글래스(mother glass)의 크기를 증가시키는 방향으로

제조라인에 대한 투자를 해왔다. 최근 업체들은

대형 LCD TV 시장 선점을 위해 잇따라 7 세대 (1870 mm × 2200 mm), 7.5 세대(1950 mm × 2250 mm), 8 세대(2160 mm × 2460 mm) 및 9 세대 (2400 mm × 2800 mm) 원판 글래스 규격을 발표하고 있는 상황이다.

LCD 제조공정은 크게 TFT(thin-film transistors) 공정, CF(color filter) 공정, Cell 공정, Module 공정으로 나눌 수 있는데, 이중 특히 CF 공정, TFT 공정의 증착, 노광, 현상, 식각 등의 설비들은 원판 글래스 단위로 작업을 하고 있다.

이들 설비들간에 원판 글래스 반송을 위해 LCD 글래스 핸들링 로봇(LCD glass-handling robot)을 비롯하여 스톡크 크레인(stocker crane), 콘베이어 등이 사용되고 있는데, 이중 글래스 핸들링 로봇은

† 책임저자, 회원, 삼성전자 기술총괄 생산기술연구소

E-mail : pj.cho@samsung.com

TEL : (031)200-5538 FAX : (031)200-2434

\* 삼성전자 기술총괄 생산기술연구소

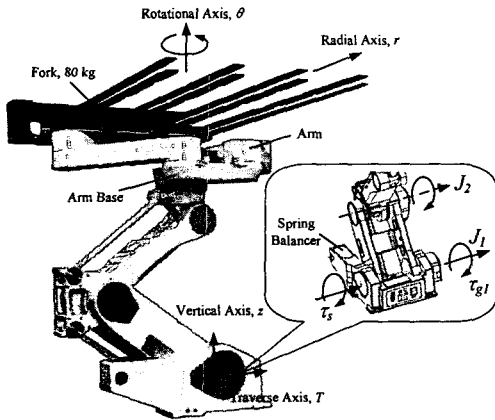


Fig. 1 Typical configuration of the seventh-generation LCD glass-handling robot (LTR-AD7FL1,  $z_{max} = 2400$  mm)

가장 기본이 되는 반송장치이다.

핸들링 로봇은 LCD 글래스 핸들링 작업특성상 Fig. 1 과 같이 원통형 작업영역(cylindrical work area)의 구조를 갖는다.<sup>(1)</sup> 그림의 로봇은 한번에 두장의 원판 글래스를 핸들링하기 위해 두 개의 로봇 팔(arm)을 가지고 있다. 원판 글래스는 크기에 비해 두께가 0.7 mm 정도로 매우 얇으므로 핸들링시 처짐이 발생하기 쉽다. 이러한 글래스 자체 처짐을 최소화하기 위해 핸들링 로봇은 그림과 같은 포크형 말단장치를 가지고 있다.

설비간 글래스 반송을 위해서는 Fig. 2 와 같이 카세트(cassette)라고 불리는 글래스 적재공간이 필요하다. Fig. 2 와 같이 핸들링 로봇이 글래스를 카세트에 수직으로 적재할 때 한 카세트에 최대한 많이 적재할수록 LCD 제조라인 레이아웃을 설계할 시 카세트 설치면적을 최소화할 수 있다. 이를 위해 7 세대 제조라인에 사용되는 카세트의 경우에는 글래스 핸들링 로봇이 최대 10 mm 의 포크 정적 처짐 만을 허용하도록 설계되어 있다. 즉 7 세대 글래스 핸들링 로봇은 임의의 수직축(z) 및 회전축( $\theta$ ) 위치에서 Fig. 2 와 같이 포크를 뺄거나 접을 때에 포크 최대 높이와 최소 높이와의 차이가 10 mm 이내가 되어야 한다.

그러나 감속기 강성은 무한하지 않으므로 기구 설계 측면에서 정적 처짐을 줄이기에 한계가 있다. 따라서 정적 처짐을 제어 관점에서 해결하려는 연구들이 이루어지고 있다.

LCD 글래스 핸들링 로봇과 같은 대형 유연로봇(large flexible robot)의 처짐 보상을 위해 Alichì 등<sup>(2)</sup>은 레이저 인터페로미터로 6 축 다관절 로봇

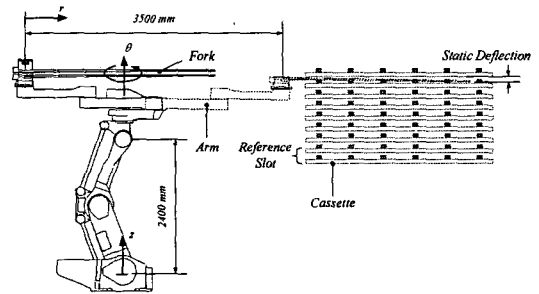


Fig. 2 Arm stretching motion for glass handling

말단장치의 직교공간 상의 위치를 측정하여 기구학적 파라미터를 추정한 다음 교시위치 수정으로 오차를 보상하는 방법을 제시하였다.

반면 Xu 등<sup>(3)</sup>은 레이저 광학센서를 각 관절에 부착하여 측정된 각 관절의 변형량에 근거하여 처짐 오차를 보상하는 방법을 제시하였다. 이와 같이 센서를 사용하여 처짐을 보상하는 방법<sup>(2-4)</sup>은 센서로 미리 측정된 특정 경로에 대해서만 유용한 결과를 주거나, 작업 중에 처짐 계산을 위해 센서를 로봇 팔 등에 항상 부착해야 하는 단점이 있다.

Surdilović 등<sup>(6)</sup>은 기구학적 영향계수(kinematic influence coefficients)를 사용한 유연 로봇 구조물의 비선형 기구학적 모델링을 구성하여 처짐을 보상하는 방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그러나 이러한 모델링 방법<sup>(5,6)</sup>은 관절강성, 링크길이 등의 파라미터 오차와 로봇의 조립공차 등에 민감한 단점을 가지고 있다.

Genov 등<sup>(7)</sup>은 Wafer 나 LCD 글래스를 핸들링하는 로봇에 대해 정적 처짐을 보상하는 연구를 하였다. 수직축을 세 개의 작동기로 구성하여 말단장치가 뺄 때에 로봇 팔 지지부의 수직위치와 각도를 조절함으로써 처짐을 보상하는 기구를 제안하였다. 그러나 이러한 기구는 실제 구현에 있어 많은 비용이 들고, 수직축의 스트로크를 크게 하는 데에 한계가 있다.

본 논문은 LCD 글래스 핸들링 로봇의 정적 처짐을 수직축의 보상제어에 의한 해결방법을 제시한다. 제시된 방법은 레이저 센서와 같은 외부 측정장치를 로봇에 부착하거나, 수직축에 부가축을 부착할 필요가 없이 구현 가능하다. 이 알고리즘은 7 세대 LCD 글래스 핸들링 로봇 제어기에 탑재되어 현재 삼성전자 7 세대 제조라인에서 양산 적용되고 있다.

## 2. 실시간 정적 처짐 보상

### 2.1 실시간 처짐 오차 보상 개념

본 논문에서 처짐 오차( $\delta$ )는 로봇 팔이 Fig. 3 과 같이 글래스를 카세트로 투입할 때에 각 자세 (Pose A,B,C)에 대해 4 개, 총 12 개의 포크 위의 점( $P_{ij}$ )을 측정하여 이 중 최대 높이와 최소 높이의 차이로 정의한다. 여기서  $P_{ij}$  는 3 차원 공간상의 수직위치( $z$ )를 의미한다.

$$\delta \triangleq \max(P_{ij}) - \min(P_{ij}) \quad (i=1 \sim 3, j=1 \sim 4) \quad (1)$$

Fig. 3 과 같이 포크의 처짐 오차는 포크 처짐각 (angle of deflection)이 포함된 오차인데, 이 때 처짐각은 수직축의 모션만으로는 보상할 수가 없다. Hwang 등<sup>(8)</sup>은 포크 고정단(fork attachment part)에 피칭축(pitching axis) 등의 부가축을 설치하지 않고도 처짐각을 보상하는 방법, 즉 로봇 팔을 구성하는 관절에 얇은 박판(shim)을 삽입하는 방법을 제시하였다. 그의 방법에 의하면 최대 78% 수준까지 처짐 오차 보상이 가능하다. 그러나 이는 로봇 팔을 Fig. 1 과 같이 로봇 팔 베이스(arm base) 및 수직 축에 장착하지 않았을 때의 결과로, 실제 로봇 팔이 Fig. 1 과 같이 수직 축에 장착이 되었을 때에는 그의 방법만으로 핸들링 로봇의 처짐 오차 규격을 만족시키기에 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 박판을 이용해 처짐각을

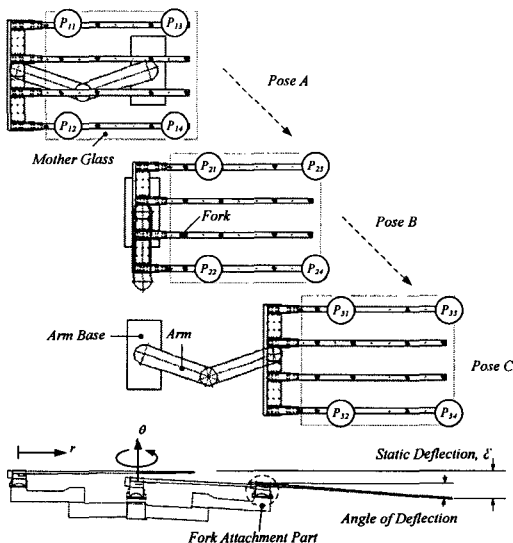


Fig. 3 Static deflection definition ( $z = 0 \text{ mm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ )

보상한 상태에서 처짐 오차를 제어기 알고리즘을 통해 보상하는 방법을 제안한다.

제안하는 실시간 처짐 오차 보상은 다음의 순서로 이루어진다. 먼저 주 작업영역에서의 포크 처짐 오차를 측정하고 이 측정 데이터에 기반한 처짐 오차 보상식을 정의한다. 그런 다음 제어기가 매 순간 핸들링 로봇의 위치를 계산할 때에 보상식에 의해 계산된 처짐 오차 보상량을 수직 축에 더함으로써 포크 처짐을 보상한다.

### 2.2 처짐 오차 보상식 정의

보상식 정의를 위해 먼저 처짐 오차에 대한 분석을 수행한다. Fig. 1 의 로봇을 대상으로 하였고, 측정장치는 3 차원 실시간 위치측정계(laser tracker, FARO)를 사용하였다.

Fig. 1 로봇의  $z$  축은 두 개의 관절  $J_1, J_2$ 로 구성되어 있다. 이 중 관절  $J_1$  의 좌측에는 스프링 밸런서가 채용되어  $J_1$  우측에 부착된 모터의 중력토크 (gravity torque)를 줄여주는 구조로 되어 있다. 즉 정적상태에서 관절  $J_1$  의 감속기에 작용하는 토크  $\tau_{g1}$  는 총 중력토크  $\tau_{g1}$  에 스프링 밸런서 토크  $\tau_s$  를 뺀 값이 된다. Fig. 4 는  $z$  축 위치에 대해 측정된  $\tau_{g1}, \tau_{g2}, \tau_s$  토크 데이터다. 각 토크들은 모두  $z$  의 함수이고,  $\tau_{g1}(z)$ 과  $\tau_s(z)$ 는 아래의 관계식을 가진다.

$$\tau_{g1}(z) = \tau_{g1}(z) - \tau_s(z) \quad (2)$$

식 (2)와 같이 관절  $J_1$  의 좌측 토크  $\tau_s(z)$ 와 우측 토크  $\tau_{g1}(z)$ 가  $z$  에 따라 달라지므로 이 토크 차이는 로봇 팔 베이스의 미세한 피칭(pitching) 및 롤링(rolling) 각 오차를 야기시키고, 결국  $\theta$  축 위치 및  $z$  축 위치에 따라 다른 처짐 오차를 발생시킨다.

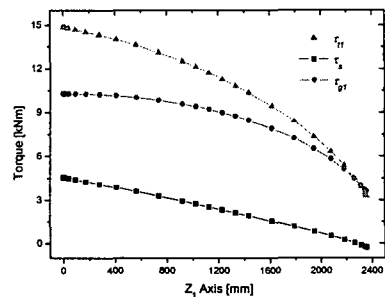
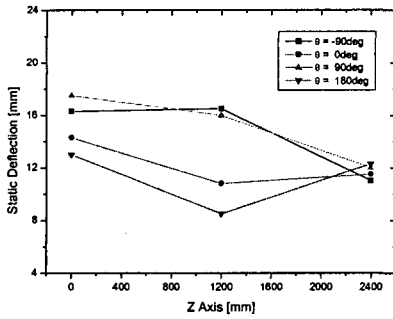
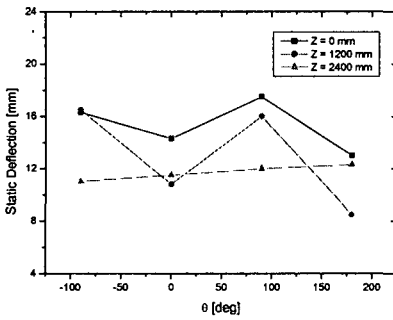


Fig. 4 Measured  $J_1$  torque according to  $z$ -axis ( $\tau_{g1}, \tau_s, \tau_{g2}$ ; LTR-AD7FL1)



(a) With respect to z-axis



(b) With respect to theta-axis

Fig. 5 Measured static deflection data w.r.t. z or theta-axis (LTR-AD7FL1)

Fig. 5 에 처짐 오차를 측정결과를 나타낸다. 측정은 글래스 핸들링 로봇의 작업특성상  $\theta$  축 주 작업위치가  $90^\circ \times n$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2$ ) 임을 고려하여,  $\theta$  축으로는  $-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  네 방향에 대해, z 축으로는 z 축 스트로크  $z_m$  를 3 등분한 위치 0 mm, 1200 mm ( $z_m/2$ ), 2400 mm ( $z_m$ )에 대해 측정하였다. 각 위치에서 Fig. 3 과 같이 r 축으로 뻗어 12 개의 포크 위의 점  $P_{ij}$  ( $i = 1\sim 3, j = 1\sim 4$ )을 측정하여 각 위치에서의 처짐 오차를 계산하였다.

Fig. 5 에 의하면 처짐 오차는 전술한대로  $\theta$  축 위치 및 z 축 위치에 따라 달라짐을 알 수 있다.

또한 처짐 오차는 로봇 팔의 반경축(r) 방향거리에 대해서도 달라지는 값이므로 처짐 오차 함수식은  $\theta$  축 위치, z 축 위치 및 r 축 위치에 대한 함수  $dz(z,r,\theta)$ 로 표현할 수 있다.

이제 Fig. 5 의 측정 데이터에 따라 각 축에 대한 함수식을 정의한다.

먼저 r 축에 대해서는  $r = 0$  일 때 처짐 오차가 없고, r 축 방향 최대 스트로크  $r_m$  에서 최대값을 갖는 2 차식으로 정의한다. Fig. 6(a)에 r 에 대한 처짐 오차 보상곡선을 나타내었다.  $r = 0$  에서 꼭지

점을 가지게 하여 r 방향으로의 처짐 오차 보상값의 부호 변경이 없도록 하였다.

Fig. 5(a)에 의하면 처짐 오차는 z 축에 대해  $z = 0, z_m/2, z_m$  세 값을 지나는 2 차식으로 근사할 수 있으므로  $dz(z,r,\theta)$ 를 다음과 같이 정의한다. 식에서  $g(z,\theta)$ 는  $r = r_m$  일 때의 처짐 오차 보상값이다.

$$dz(z,r,\theta) = (r/r_m)^2 g(z,\theta) = (r/r_m)^2 (p(\theta)z^2 + q(\theta)z + r(\theta)) \quad (3)$$

식 (3)에서  $p(\theta), q(\theta), r(\theta)$ 은  $\theta$  축에 대한 처짐 오차 보상값으로부터 구할 수 있다.

r 축 방향으로의 최대 스트로크가  $r_m$  일 때,  $z = 0, z_m/2, z_m, r = r_m$  그리고 임의의  $\theta$  축에서의 처짐 오차 보상값을 각각  $f_1(\theta), f_2(\theta), f_3(\theta)$ 로 정의한다. 그러면  $p(\theta), q(\theta), r(\theta)$ 는 Fig. 6(b)의 z 축에 대한 처짐 보상 곡선의 정의에 따라 식 (4)와 같이 계산된다.

$$p(\theta) = (2f_1(\theta) - 4f_2(\theta) + 2f_3(\theta)) / z_m^2 = \Delta f_p(\theta) / z_m^2 \quad (4)$$

$$q(\theta) = (-3f_1(\theta) + 4f_2(\theta) - f_3(\theta)) / z_m = \Delta f_q(\theta) / z_m$$

$$r(\theta) = f_1(\theta)$$

여기서

$$f_i(\theta) = dz(z_i, r_m, \theta) \quad (i = 1\sim 3, z_i = 0, z_m/2, z_m)$$

$$\Delta f_p(\theta) = 2f_1(\theta) - 4f_2(\theta) + 2f_3(\theta)$$

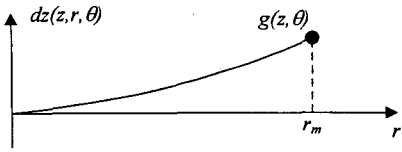
$$\Delta f_q(\theta) = -3f_1(\theta) + 4f_2(\theta) - f_3(\theta)$$

마지막으로  $f_i(\theta)$ 를 Fig. 5(b) 측정데이터에 따라 정의한다. 전술한대로 처짐 오차는  $\theta$  축 위치마다 모두 다르다. 그런데 Fig. 1 의 글래스 핸들링 로봇은 빠른 작업위치 전환을 위해  $\theta$  축에 대해  $+183^\circ \sim -183^\circ$  의 작업영역 즉  $-180^\circ, 180^\circ$  부근에서 다회전(multi-turn)이 가능하도록 설계되어 있다.

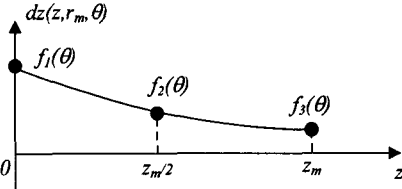
따라서 다회전이 일어나는 위치에서 핸들링 로봇의 위치 및 속도 불연속이 발생하지 않고, 4 개의  $\theta$  축 위치  $\theta_j = -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  에서 서로 다른 처짐 오차 보상값을 갖도록  $f_i(\theta)$ 를 식 (5)와 같이 6 차식으로 정의한다. Fig. 6(c)에  $f_i(\theta)$ 를 나타내었다.

$$f_i(\theta) = \sum_{k=1}^7 a_{ik} \theta^{7-k} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

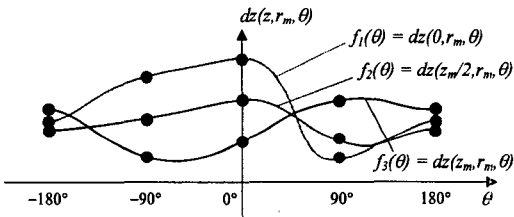
식 (5)에서 계수  $a_{ik}$  는 전술한 조건 식 (6)과 (7)을 만족해야 하므로 식 (8)과 같이 계산된다. 여기서  $\delta_{ij}$  ( $i = 1\sim 3, j = 1\sim 4$ )는  $z = z_i, r = r_m, \theta = \theta_j$  에서의 처짐 오차 보상값을 의미하는 것으로, 식 (1)의 처짐 오차  $\delta$  와는 정의가 다르다. 하지만 제안하는 보상 함수는 r 축 방향에 대해  $r = r_m$  에서 최대값



(a) With respect to r-axis



(b) With respect to z-axis



(c) With respect to theta-axis

Fig. 6 Static deflection compensation curve

을 갖는 2 차식으로 정의했으므로  $\delta_{ij}$  를 해당 위치에서의 처짐 오차  $\delta$  로 근사한다.

$$f_i(\theta) = \begin{cases} \delta_{i1} & \theta = -\pi/2 \\ \delta_{i2} & \theta = 0 \\ \delta_{i3} & \theta = \pi/2 \\ \delta_{i4} & \theta = -\pi, \pi \end{cases} \quad (6)$$

$$f_i(\pi) = f_i(-\pi) = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_{1i} &= 4(-7\delta_{i4} + 8\delta_{i3} - 9\delta_{i2} + 8\delta_{i1})/9\pi^6 \\ a_{2i} &= 16(\delta_{i3} - \delta_{i1})/9\pi^5 \\ a_{3i} &= (47\delta_{i4} - 64\delta_{i3} + 81\delta_{i2} - 64\delta_{i1})/9\pi^4 \\ a_{4i} &= 32(\delta_{i1} - \delta_{i3})/9\pi^3 \\ a_{5i} &= 2(-5\delta_{i4} + 16\delta_{i3} - 27\delta_{i2} + 16\delta_{i1})/9\pi^2 \\ a_{6i} &= 16(\delta_{i3} - \delta_{i1})/9\pi \\ a_{7i} &= \delta_{i2} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 식 (3)에 의한 임의의 위치에서의 처짐 오차 보상 함수식  $dz(z, r, \theta)$  은 식 (4), (5) 및 (8)

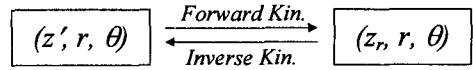


Fig. 7 Forward/inverse kinematics considering static deflection compensation

로부터 정의된다.

### 2.3 처짐 오차 보상을 고려한 순기구학, 역기구학 방정식

제안한 처짐 오차 보상이 적용되면 ‘보상후’ 실제 포크의 z 축 위치는 ‘보상전’ 포크의 z 축 위치와 달라지게 된다. 즉 z' 를 보상후 실제 포크의 z 축 위치, z\_r 를 보상전 포크의 z 축 위치로 각각 정의할 때, 로봇 사용자가 z\_r 을 목표위치로 지령할 경우 실제 로봇은 처짐 보상에 의해 z' 가 된다. 이렇듯 로봇 사용자가 지령한 목표 위치와 처짐 보상에 의한 목표 위치가 달라지게 되면 사용자는 로봇 모션을 프로그래밍하기가 매우 힘들어진다.

따라서 제안한 처짐 오차 보상의 실제 적용을 위해서는 z\_r 과 z' 를 실시간으로 변환을 해주는 관계식 즉 처짐 오차 보상을 고려한 순기구학, 역기구학 방정식이 필요하다.

먼저 z' 로부터 z\_r 를 구하는 순기구학 방정식(forward kinematics equations)을 검토한다.

식 (3)의 처짐 오차 보상함수 정의에 의하면 z' 와 z\_r 은 식 (9)와 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} z' &= z_r + dz(z_r, r, \theta) \\ &= z_r + (r/r_m)^2 (p(\theta)z_r^2 + q(\theta)z_r + r(\theta)) \\ &= z_r + Q(r) (p(\theta)z_r^2 + q(\theta)z_r + r(\theta)) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$Q(r) = (r/r_m)^2$$

식 (9)를 z\_r 에 대해 정리하면 식 (10)과 같은 2 차식이 구성되므로 순기구학 방정식에서 실수해의 존재여부는 식 (11)의 행렬식(determinant)으로부터 결정된다.

$$\begin{aligned} (Q(r)p(\theta))z_r^2 + (1+Q(r)q(\theta))z_r + (Q(r)r(\theta) - z') \\ = Az_r^2 + Bz_r + C = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Det &= B^2 - 4AC \\ &= Q(r)^2 (q(\theta)^2 - 4p(\theta)r(\theta)) \\ &\quad + Q(r)(2q(\theta) + 4p(\theta)z') + 1 \\ &= Q(r)^2 \alpha + Q(r)\beta + 1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= Q(r)p(\theta), B = 1 + Q(r)q(\theta), C = Q(r)r(\theta) - z' \\ \alpha &= q(\theta)^2 - 4p(\theta)r(\theta) \\ \beta &= 2q(\theta) + 4p(\theta)z' \end{aligned}$$

식 (10)에서 A 가 0 에 근사한 값이면 아래와 같이 간단히 해  $z_r$  을 구할 수 있다.

$$z_r = -\frac{C}{B} = \frac{z' - Q(r)r(\theta)}{1 + Q(r)q(\theta)} \quad (12)$$

A 가 0 이 아닌 경우의 해를 살펴본다. Fig. 5 실험 데이터에 의하면 최대 처짐 오차는 17.5 mm 로 z 축 스트로크 2400 mm 의 0.73% 수준으로 매우 작다. 따라서 처짐 오차의 제곱을 분자로,  $z_m$  의 제곱을 분모로 취하는  $\alpha$  는 1 보다 현저히 작은 값이 된다.

$$\begin{aligned} \alpha &= q(\theta)^2 - 4p(\theta)r(\theta) \\ &= (1/z_m^2)(\Delta f_q(\theta)^2 - 4\Delta f_p(\theta)f_r(\theta)) \ll 1 \end{aligned} \quad (13)$$

Cauchy-Schwarz 부등식에 따라  $\beta$  는 식 (14)의 관계가 성립하는데, 이 때  $z' \leq z_m + |dz_{max}|$  이고,  $|dz_{max}| \ll z_m$  임을 고려하면  $\beta$  도 역시 1 보다 현저히 작은 값이 된다.

$$\begin{aligned} \beta^2 &= (2q(\theta) + 4p(\theta)z')^2 \\ &\leq (2^2 + 4^2)(q(\theta)^2 + p(\theta)^2 z'^2) \\ &\leq 20(q(\theta)^2 + p(\theta)^2 z_m^2) \\ &= (20/z_m^2)(\Delta f_q^2 + (z_p/z_m)^2 \Delta f_p^2) \ll 1 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서

$$z_p = z_m + |dz_{max}|$$

$Q(r)$ 가 정의에 따라 0 이상 1 이하 범위를 가지고,  $\alpha$  와  $\beta$  가 1 보다 매우 작으므로 식 (11)의 행렬식은 1 에 근사한 값 즉 항상 양수를 보장한다. 따라서 식 (10)의 이차 방정식은 언제나 두 개의 실수해  $z_{r1}, z_{r2}$  를 보장한다.

$$\begin{aligned} \sqrt{Det} &= \sqrt{Q(r)^2 \alpha + Q(r)\beta + 1} \\ &= 1 + \epsilon > 0 \quad (\forall z_r, \theta, |\epsilon| \ll 1, 0 \leq Q(r) \leq 1) \end{aligned} \quad (15)$$

두 개의 실수해 중 행렬식에 음수를 취하는  $z_{r1}$  를 전개하면 식 (16)이 되는데, 식에서  $|\Delta f_p(\theta)|, |\Delta f_q(\theta)| \ll z_m$  이므로  $|z_{r1}| \gg z_m$  가 되어  $z_{r1}$  는 적절한 해가 되지 못함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{r1} &= \frac{-B - \sqrt{Det}}{2A} = \frac{-2 - \epsilon - Q(r)q(\theta)}{2Q(r)p(\theta)} \\ &= \left( -\frac{(\epsilon + 2)z_m + Q(r)\Delta f_q(\theta)}{2Q(r)\Delta f_p(\theta)} \right) z_m \\ &= c_1 z_m \quad (|c_1| \gg 1, |z_m| \gg |\Delta f_p(\theta)|, |\Delta f_q(\theta)|) \end{aligned} \quad (16)$$

0 이상  $z_m$  이하의 범위를 갖는 해를  $z_{rc}$  라고 하면 식 (9)와 (11)에 의해 식 (15)의  $\epsilon$  는 식 (17)과 같이 계산되므로, 행렬식에 양수를 취하는 해  $z_{r2}$  는 언제나  $z_{rc}$  가 된다.

따라서 A 가 0 이 아닌 경우 처짐 오차값은  $z_m$  에 대해 충분히 작으므로 식 (10)의 이차방정식은  $z_{r2}$  를 유일하게 가진다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= Q(r)(q(\theta) + 2p(\theta)z_{rc}) \\ &= \frac{Q(r)}{z_m} \left( \Delta f_q(\theta) + 2 \left( \frac{z_{rc}}{z_m} \right) \Delta f_p(\theta) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} z_{r2} &= \frac{-B + \sqrt{Det}}{2A} = \frac{\epsilon - Q(r)q(\theta)}{2Q(r)p(\theta)} \\ &= \frac{\epsilon \cdot z_m^2 - Q(r)\Delta f_q(\theta)z_m}{2Q(r)\Delta f_p(\theta)} \\ &= z_{rc} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (12)와 (18)을 정리하면 처짐 오차를 고려한 순기구학 방정식의 일반 해는 다음과 같다.

$$z_r = \begin{cases} \frac{z' - Qr(\theta)}{1 + Qq(\theta)} & (A \approx 0) \\ \frac{-1 - Q(r)q(\theta) + \sqrt{Det}}{2Q(r)p(\theta)} & (A \neq 0) \end{cases} \quad (19)$$

처짐 오차 보상을 고려한 역기구학(inverse kinematics) 문제는 보상전 포크위치  $z_r$  로부터 실제 포크위치  $z'$  를 계산하는 문제이므로 식 (9)에 따라 바로 계산된다.

### 2.4 실시간 처짐 오차 보상 구현

앞에서 정의한 처짐 오차 보상 함수식과 순기구학, 역기구학 방정식을 이용하여 핸들링 로봇 제어기에 실시간 처짐 오차 보상을 구현한다.

로봇 제어기 중 모션제어부는 크게 경로계획기(path planner)와 서보제어기(servo controller)로 나눌 수 있다. 이 중 경로계획기는 로봇 사용자로부터 현재 위치  $P_c = (z_{rc}, r_c, \theta_c)$ , 목표 위치  $P_g = (z_{rg}, r_g, \theta_g)$  속도  $v$  및 가속속 시간  $t_{acc}, t_{dec}$  등의 정보를 입력 받아 매 위치 보간 주기(interpolation period) 마다 속도 및 위치  $z_r, r, \theta$  를 계산한다. 이 때 사용자가

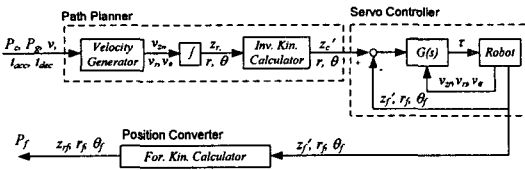


Fig. 8 Proposed robot controller structure

반드시 처짐 오차 보상 적용전의  $z$  축 위치를 지령해야만 제어기는 식 (9)의 역기구학 방정식에 따라 보상 후 지령  $z$  축 위치  $z_c'$  를 생성할 수 있다. 이를 위해 경로계획부 끝단에 식 (9)의 역기구학 계산기(inverse kinematics calculator)를 둔다.

서보 제어기는  $z_c'$  를 입력값으로 하여 위치, 속도 및 진류제어를 수행한다.

전술한대로 사용자는 처짐 오차 보상 알고리즘이 적용되더라도 보상전의  $z$  축 위치  $z_r$  로만 모션 프로그래밍한다. 그러나 서보 제어기는 보상 후 지령 위치로 제어를 수행하고 있으므로 보상 후 실제  $z$  축 위치  $z_f'$  를 식 (19)의 순기구학 방정식에 따라 보상 전 실제  $z$  축 위치  $z_f$  로 바꾼 뒤 사용자에게 보여주거나 위치저장이 되도록 하는 모듈이 필요하다.

위치변환기(position converter)는 로봇의 보상 후 실제 위치를 입력으로 하여, 보상 전 실제 위치를 계산한다. 이는 매 위치 보간주기마다 동작하여 사용자에게 보상 전 실제 위치를 보여준다. 제안하는 로봇 제어기 구조가 Fig. 8 에 있다.

경로계획기와 위치변환기는 모두 제어기 소프트웨어에 해당되므로 제안하는 처짐 오차 보상 알고리즘은 소프트웨어만으로 구현이 가능하다.

### 3. 실험 결과

제안된 알고리즘을 Table 1 의 사양을 갖는 Fig. 1 의 실제 7세대 LCD 글래스 핸들링 로봇에 적용하여 효과를 검증해 보았다.

식 (3)의 처짐 오차 보상함수는 처짐 오차 보상 값  $\delta_{ij}$  만으로 계수가 결정되므로, 실험을 통해 처짐 오차를 측정하고 이를 각 위치에서의  $\delta_{ij}$  으로 근사한다. 2.1 절의 실험과 동일하게 3개의  $z$  축 위치 0,  $z_m/2$ ,  $z_m$  및 4개의  $\theta$  축 위치  $-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  에 대해 Fig. 3 과 같이  $r$  축으로 뻗어 12 개의 포크 위의 점  $P_{ij}$  ( $i=1\sim3, j=1\sim4$ )을 측정하여 각 위치에서의 처짐 오차를 계산하였다.

Table 1 Specifications of LTR-AD7FL1

Item	Specification
degree of freedom	4 DOF / 5 Axis
max. glass size	1870 mm × 2200 mm
work range	$z$ : 2400 mm (1100 mm/s)
(max. velocity)	$\theta$ : $366^\circ$ (180 °/s)
	$r$ : 3697 mm (3200 mm/s)
	$T$ : 7000 mm (1500 mm/s)
repeatability	± 0.3 mm
payload	80 kgf/arm
weight	1450 kgf
cleanliness <sup>a</sup>	Class 4

<sup>a</sup> 청정도(cleanliness)는 ISO 14644-1 에 따라 정의되었다.

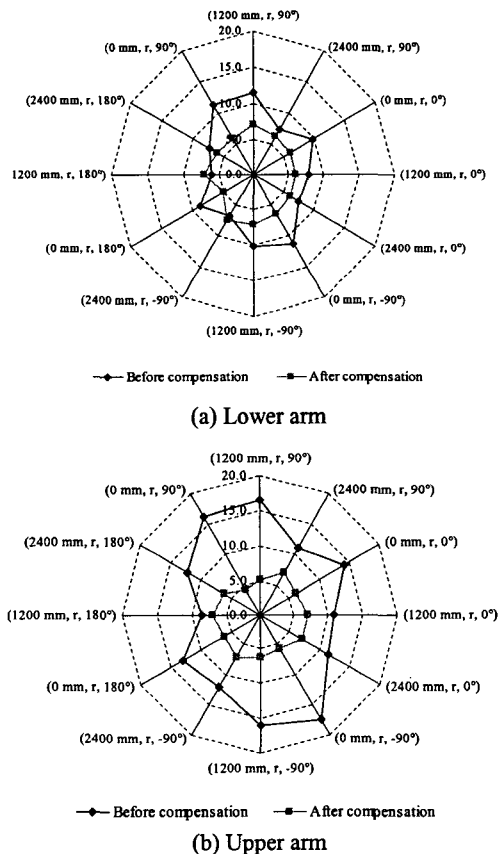
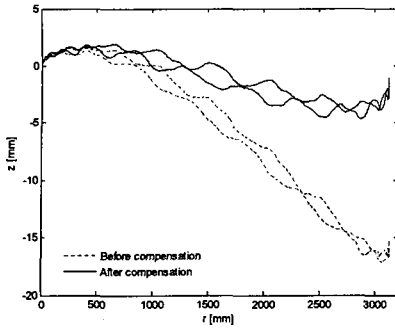
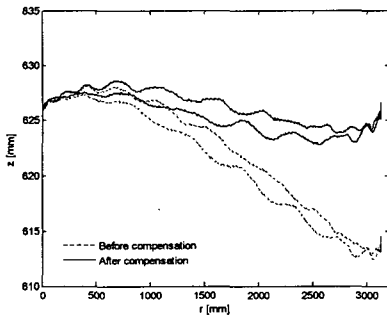


Fig. 9 Experimental results for static deflection compensation

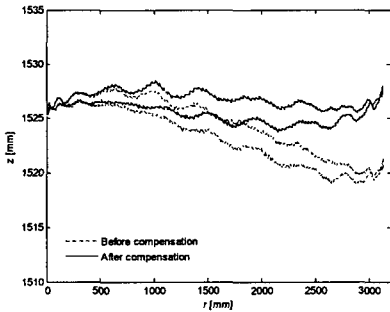
대상 로봇의 팔이 두 개(lower arm and upper arm) 임을 고려하여 두 팔에 대해 각각 3 회씩 동일 실험을 반복하였고, 두 팔에 대한 처짐 오차를 평균하여  $\delta_{ij}$  을 계산하였다. Fig. 9 에 각 로봇 팔에 대한 보상 전후의 처짐 오차 측정결과를 나타내었다



(a)  $(z, r, \theta) = (0 \text{ mm}, r, 0^\circ)$



(b)  $(z, r, \theta) = (626 \text{ mm}, r, 90^\circ)$



(c)  $(z, r, \theta) = (1526 \text{ mm}, r, -90^\circ)$

**Fig. 10** Vertical path accuracies considering real-time static deflection compensation

아랫 팔(lower arm)의 경우 보상 전 처짐 오차 평균값은 비록 8.8 mm 로 처짐 오차 규격인 10 mm 이내를 만족하지만,  $\theta$  축 위치가  $90^\circ$  또는  $-90^\circ$  위치에서 처짐 오차가 10 mm 를 넘음을 알 수 있다. 반면 보상 후에 처짐 오차 평균값은 6.3 mm 로 28% 감소하였고, 최대 처짐 오차는 7.0 mm 로 임의의 위치에 대해 규격을 만족함을 알 수 있다.

윗 팔(upper arm)의 경우, 보상전에는 최대 처짐 오차 17.5 mm, 평균 오차 13.3 mm 로 규격을 모두 넘지만, 보상 후에는 최대 오차는 7.0 mm, 평균 오차는 6.2 mm 로 54% 감소했다.

**Table 2** Comparison of vertical path accuracies

$(z, r, \theta)$	Before comp.	After comp.	Reduction rate
$(0 \text{ mm}, r, 0^\circ)$	19.008 mm	6.576 mm	65.4%
$(626 \text{ mm}, r, 90^\circ)$	15.638 mm	5.729 mm	63.5%
$(1526 \text{ mm}, r, -90^\circ)$	8.865 mm	4.577 mm	48.4%

실제 제조라인에서는 생산성 향상을 위해 로봇을 최대 속도로 구동시키므로 진동을 포함한 처짐 오차가 규격을 만족하는지가 중요하다. 이를 위해 처짐 오차 보상 적용 전후의 로봇 팔의 수직방향 궤적정밀도 측정 실험을 하였다. 대상 로봇은 Fig. 1 과 동일 사양에  $z$  축 최대 스트로크가 1800 mm, 중량이 1400 kgf 인 로봇(LTR-AD7FL0)으로 하였다. 최대 속도 3200 mm/s 로  $r$  축을 0 mm 에서 3120 mm 로 왕복 이송시킬 때에 포크 앞단( $P_3$ )을 3 차원 실시간 위치측정계로 측정하여 수직방향 궤적정밀도를 계산하였다.  $(0 \text{ mm}, r, 0^\circ)$ ,  $(626 \text{ mm}, r, 90^\circ)$ ,  $(1526 \text{ mm}, r, -90^\circ)$  세 위치에 대해 측정하였고, 측정결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

보상 전후의 곡선이 두 개씩 보이는 것은  $r$  축 방향으로 왕복 이송시켰기 때문이다. 수직방향 궤적정밀도는 왕복 이송시킨 측정데이터에서 최대 포크 위치와 최소 포크 위치로 정의하였다. Fig. 10 에서 처짐 오차 보상을 적용한 경우에는  $z$  축 위치,  $\theta$  축 위치에 무관하게 4.5~6.5 mm 의 수직방향 궤적정밀도 오차를 보인다. 이는 모두 처짐 오차 허용 규격을 만족함은 물론 보상전에 비해 평균 60% 정도의 궤적정밀도 향상효과를 나타내고 있다. Table 2 에 각 위치에서 측정된 수직방향 궤적정밀도 오차를 정리하였다.

정적 위치에서 측정한 값이 아니므로 측정결과가 처짐 오차와 함께 포크 진동을 포함하고 있음을 고려하면 이는 주목할만한 결과이다.

#### 4. 결론

대형화 제품 추세 반영 및 가격 경쟁력 확보를 위해 LCD 제조업체들은 원판 글래스 크기를 증가시켜 왔다. 이에 따른 글래스 적재공간의 최소화를 위해 LCD 글래스 핸들링 로봇 팔의 정적 처짐은 최소화되어야 한다. 본 논문에서는 LCD 글래스 핸들링 로봇 팔의 정적 처짐 오차를 보상하는 실용적이면서도 효과적인 알고리즘을 제시한다. 제시된 알고리즘에 의하면 로봇 팔에 레이저 센서 등을 부착하거나, 수직 축에 부가 축을 부착할 필요 없이 로봇 제어기 소프트웨어 변경만으로 처짐



보상 구현이 가능하다.

처짐 보상을 위한 보상식은  $z$  축,  $\theta$  축,  $r$  축 에 따라 처짐 오차가 다름을 고려하여 세 축의 위치를 모두 참조하는 함수식으로 정의하였다.

또한 처짐 오차 보상을 고려한 순기구학, 역기구학 방정식을 전개하여 임의의 위치에서 두 식은 언제나 유일한 실수 해를 보임을 증명하였다.

실제 7 세대 LCD 글래스 핸들링 로봇에 적용한 결과, 정지 위치 실험에서 두 개의 로봇 팔에 대해 평균 41%의 오차 감소를 보여 모두 처짐 오차 규격을 만족하며, 최대 속도 이동 실험에서도 평균 60% 정도의 수직방향 궤적정밀도 향상 효과를 보였다. 제안한 알고리즘은 현재 로봇 제어기에 탑재되어 삼성전자 7 세대 LCD 제조라인에 적용 중이다.

향후에는 8 세대, 9 세대로 더욱 대형화 되는 핸들링 로봇의 최적 처짐 보상을 위해 기울기, 가속도 MEMS 센서 등을 활용한 처짐 보상 및 제어연구를 할 계획이다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, C.S., Lee, D.G., O, J.H. and Kim, H.S., 2002, "Composite Wrist Blocks For Double Arm Type Robots For Handling Large LCD Glass Panels," *Composite Structures*, Vol. 57, pp. 345~355.
- (2) Alici, G. and Shirinzadeh, B., 2005, "A Systematic Technique To Estimate Positioning Errors For Robot Accuracy Improvement Using Laser Interferometry Based Sensing," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 40, pp. 879~906.
- (3) Xu, W. L., Tso, S. K. and Wang, X. S., 1998, "Sensor-Based Deflection Modeling and Compensation Control Of Flexible Robotic Manipulator," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, pp. 909~924.
- (4) Demeester, F. and Van Brussel, H., 1991, "Real-time Optical Measurement Of Robot Structural Deflections," *Mechatronics*, Vol. 1, pp. 73~86.
- (5) Rouvinen, A. and Handroos, H., 1997, "Deflection Compensation Of A Flexible Hydraulic Manipulator Utilizing Neural Networks," *Mechatronics*, Vol. 7, pp. 355~368.
- (6) Surdirović, D. and Vukobratović, M., 1996, "Deflection Compensation For Large Flexible Manipulators," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 31, pp. 317~329.
- (7) Genov, G., Sorirov, Z.M. and Bonev, E., 2002, "Robot Motion Compensation System," *US Patent 6489741 B1*, Dec. 3.
- (8) Hwang, J.C., Byun, K.S., Choi, Y.W., Lee, I.H. and Kim, D.I., 2005, "Improvement Of The Path Accuracy Of The 7<sup>th</sup> Generation LCD Glass Transfer Robot," *Int. Conf. On Mechatronics and Information Technology*, In Press, Chongqing, China.