

# 여유 구동 병렬기구를 이용한 마스크-패널 얼라인 로봇 시스템

## Mask-Panel Alignment Robot System Using a Parallel Mechanism with Actuation Redundancy

정 해 민, 권 상 주\*, 이 상 무  
(Haemin Jeong, SangJoo Kwon, and Sang Moo Lee)

**Abstract:** In this paper, a mask-panel alignment robot system is considered for IT industry applications. Two kinds of solutions are suggested which are required in constructing a control system for the alignment robot with actuation redundancy. First, the kinematic solution for the 4PPR parallel positioning mechanism is formulated for an arbitrary initial posture, which relates the mask-panel misalignment in the task space and the desired actuator displacements in the joint space. Secondly, in order to increase the stiffness of the control motion and also to avoid the mechanical lock which may happen due to the redundant actuation, a new synchronous control method is proposed which has the merit of coordinating joint control motions while not losing individual joint control performance. In addition, the engineering process to develop a visual alignment robot system is described with the results of experimental setup and GUI software. Finally, the experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed alignment system control methodology and how much beneficial it will be in real industrial applications.

**Keywords:** alignment robot, FPD (Flat Panel Display), synchronous control, actuation redundancy, parallel mechanism

### I. 서론

IT 산업 분야 중에서 디스플레이 산업은 최근 우리나라의 성장을 주도하는 주력 산업이다. 최초의 CRT가 탄생한지 100년이 지난 지금, 노트북, PC, 또는 대형 TV의 모니터로는 LCD, PDP, OLED 등을 떠올릴 만큼 차세대 디스플레이에 대한 연구 개발이 매우 활발하게 진행되고 있다. 디스플레이 산업에서는 고속 이송 기술, 초정밀 매니플레이터 기술, 얼라인 로봇 기술 등과 같은 다양한 자동화 관련 로봇 기술을 필요로 한다. 특히 마스크-패널 얼라인 로봇 시스템은 제품의 생산성과 품질을 결정짓는 핵심 기술에 속한다. 디스플레이 제품이 생산되기까지는 증착, 리소그래피, 프린팅, 본딩, 프로빙 등과 같이 여러 공정을 거쳐야 하고, 각 공정 단계마다 얼라인 로봇에 의한 마스크-패널 얼라인 단계를 거치게 된다. 따라서 얼라인 로봇의 성능은 제품의 생산성과 품질에 직접적인 관련이 있다[1].

최근 디스플레이 패널의 크기는 갈수록 대형화 되고 있고 픽셀 사이즈는 점차 작아지고 있다. 이에 따르는 생산 기술 개발이 중요한 문제점으로 떠오르고 있으며 대중량의 마스크 크와 패널을 요구 정밀도를 만족하도록 정렬시킬 수 있는 고정, 고가반하중 용량을 갖는 새로운 얼라인 로봇 시스템의 개발이 절실한 시점이다. 일반적으로 얼라인 로봇 시스템에서는 병렬형 위치결정 메커니즘[5]이 주로 사용되고 있으며 현재 대면적 디스플레이 생산 라인에 적용되고 있는 대부분의 얼라인 시스템은 3축 병렬 스테이지를 채택하고 있다. 그러나 차세대 디스플레이 제품에 요구되는 정밀도와 정렬 속도를 충족시키고 얼라인 성능을 한 차원 업그레이드 시키는

차원에서 여분의 구동 축을 갖는 로봇 시스템을 적용하는 것이 현재 관련 산업계에서 주된 관심사 중의 하나이다.

이 논문에서는 이러한 요구 조건에 대한 하나의 대안으로써 4개의 구동 축을 갖는 4PPR 구조의 병렬기구를 도입한 얼라인 시스템을 구축하고 기구학적 해석을 수행하며 여분의 구동 축 때문에 발생하는 제어 문제를 해결한다. 한편, 얼라인 작업 공간(task space)에서 평면 3자유도 얼라인 운동을 구현하기 위하여 필요 충분한 3개의 구동 축 외에 여분의 구동 축을 추가하면 얼라인 운동의 강성과 정밀도는 크게 증가하는 반면, 임의의 축에서 발생한 제어 오차 또는 외란의 영향이 다른 구동 축의 제어 성능에 연쇄적으로 영향을 미침으로써 전체 시스템의 성능 저하와 하드웨어 수명 단축을 가져오는 문제점이 발생할 수 있다. 이 논문에서는 이러한 문제에 능동적으로 대응하기 위하여 얼라인 로봇의 모든 구동 축들이 상호 간에 시간 동기적으로 동작하기 위한 동기제어(synchronous control) 개념을 적용하고 최선의 얼라인 성능을 구현하고자 한다.

다축 구동 시스템에 대한 동기제어기 설계에서 기본적인 개념은 우선 적합한 동기오차를 정의하고 이를 보정하기 위한 추가적인 제어 입력을 특성의 입력 분해(resolution) 방법에 따라 결정하는 것이다[6-10]. 그 동안 Twin-X 또는 XY 시스템과 같이 두 축 시스템에 대한 동기제어 방법이 꾸준히 연구되어 오다가 최근에 와서는 일반적인 다축 시스템에 적용할 수 있는 동기제어 알고리즘들이 제안되었다. 예를 들어 Su 등[7]이 제안한 피드백 PD 제어기와 동기제어에 대한 PI 제어기를 결합한 방법과 Xiao 등[8,9]이 제안한 모델링 정보를 이용한 2차 동기오차까지 고려한 제어방법 등이 있다. 또한 두 대 이상의 독립적인 로봇에 대한 동기제어 방식으로서 마스터-슬레이브 제어 방식도 제안되었다[10].

그러나 이러한 일반적인 방법들은 동기제어 입력이 축 간 동기오차 감소에는 기여하지만 각 축의 독립적인 제어 성능을 저하시킬 수 있다는 단점이 존재하기 때문에 얼라인 로봇

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 15., 채택확정: 2009. 6. 15.

정해민: STX 조선해양연구소(seamanjhm@kau.ac.kr)

권상주: 한국항공대학교 항공우주기계공학부(sjkwon@kau.ac.kr)

이상무: 한국생산기술연구원 로봇기술연구부(lsm@kitech.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 “차세대성장동력개발사업”에 의해 지원, 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

과 같이 수십 미크론 정도의 거리를 구동하는 초정밀 시스템에는 적합하지 않은 측면이 있다. 이와 관련하여 이 논문에서는 초정밀 제어 시스템의 조인트 제어 성능을 잘 유지하면서도 동기제어 성능까지 개선할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서는 4PPR 여유구동 병렬형 스테이지에 대한 기구학 해석을 통해 평면 얼라인 오차와 각 구동 축의 보상 거리 사이의 관계식을 유도한다. III 장에서는 임의 다축 시스템에 적용 가능한 새로운 동기제어 알고리즘을 제안한다. IV 장에서는 마스크-패널 얼라인 제어 시스템을 개발 과정을 기술한다. V 장에서는 제안된 제어 방법을 이용한 얼라인 실험 결과를 다루고 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

**II. 여유 구동 스테이지의 기구학 해석**

**1. 4PPR 스테이지의 구조**

그림 1은 본 연구를 통하여 개발된 얼라인 로봇 시스템으로서 크게 비전 시스템과 스테이지 제어 시스템으로 구성된다. 비전 시스템은 마스크와 패널 표면의 얼라인 마크를 인식하며, 스테이지는 얼라인 오차를 보상하는 역할을 수행한다[3]. 그림에 보인 위치결정 스테이지는 병렬적으로 배치된 4개의 림(limb)이 각각 PPR (Prismatic-Prismatic-Revolute) 조인트를 포함하는 4PPR 병렬형 타입으로서 첫번째 prismatic 조인트는 구동기에 연결된 능동 조인트에 해당한다. 일반적으로 병렬형 로봇이 작업 공간에서 평면 3자유도 운동을 구현하기 위해서는 3개의 limb이 능동 조인트를 갖는 것으로 필요 충분하다[5]. 그러나 제어 정밀도와 payload 증가를 위해 모든 limb에 능동 조인트를 장착하는 경우에는 여유 구동(actuation redundancy) 문제가 발생하여 이에 해당하는 기구학 해석과 제어기 설계 문제가 뒤따르게 된다.

그림 2에서 ( $P_g, Q_g, R_g, S_g$ )는 스테이지의 이동 플랫폼(platform)과 각 limb을 연결하는 조인트들의 초기 위치를 나타내며 기준 좌표계에 대하여 다음과 같은 좌표 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \overline{OP_g} &= -ai - bj, & \overline{OQ_g} &= bi - aj, \\ \overline{OR_g} &= ai + bj, & \overline{OS_g} &= -bi + aj \end{aligned} \quad (1)$$

한편, 그림 3은 스테이지의 플랫폼이 임의의 위치 ( $P, Q, R, S$ )에 있는 경우, 마스크-패널 간 얼라인 오차 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi =$



그림 1. 여유 구동축을 갖는 4PPR 병렬형 얼라인 스테이지. Fig. 1. 4PPR parallel alignment stage with actuation redundancy.

$\phi_P - \phi_M$ )를 보상하기 위해 각 능동 조인트(active joint)에 요구되는 구동거리 ( $U_x, V_y, W_x, X_y$ )를 나타낸다. 여기서 능동 조인트들의 제어 입력을 결정하기 위해서는 얼라인 오차와 조인트 구동거리 사이의 역기구학 관계식을 결정해야 한다.

**2. 역기구학 해석**

우선 플랫폼(패턴 마스크 부착) 면에 있는 S점의 초기 위치를 기준 좌표계에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\overline{OS} = \overline{OO_M} + R(\phi_M)\overline{OS_g} = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_M & -\sin \phi_M \\ \sin \phi_M & \cos \phi_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b \\ a \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한 패널 면 D점의 초기 위치는 다음과 같다.

$$\overline{OD} = \overline{OO_P} + R(\phi_P)\overline{OS_g} = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_P & -\sin \phi_P \\ \sin \phi_P & \cos \phi_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b \\ a \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서 마스크-패널 간 얼라인 오차 보상을 위해 스테이지의 S점이 이동해야 하는 거리는 다음과 같다.

$$\overline{SD} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \end{bmatrix} = \overline{OD} - \overline{OS} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + R(\phi_P) \begin{bmatrix} -b \\ a \end{bmatrix} - R(\phi_M) \begin{bmatrix} -b \\ a \end{bmatrix} \quad (4)$$

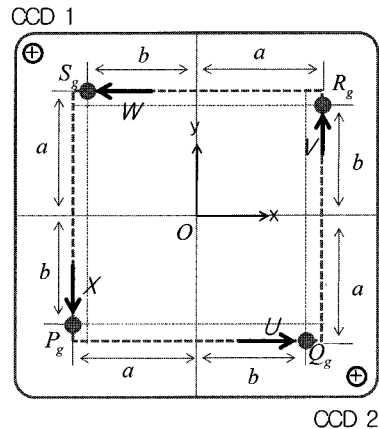


그림 2. 4PPR 병렬 스테이지 조인트의 초기 위치. Fig. 2. Initial posture of the 4PPR alignment stage.

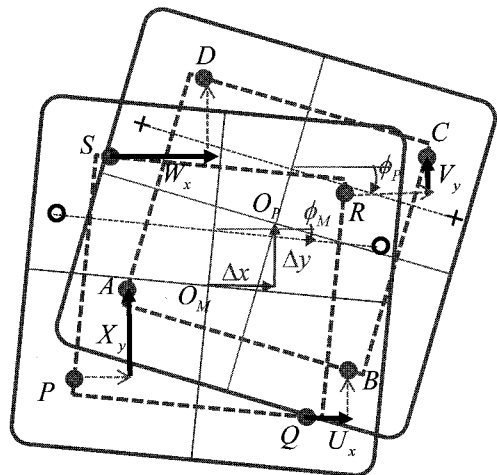


그림 3. 마스크-패널 얼라인 오차와 능동 조인트의 보상 거리. Fig. 3. Misalignment compensation distances of active joints.

동일한 방법으로 나머지 (P, Q, R) 점의 이동거리도 다음 식들과 같이 결정할 수 있다.

$$\overline{PA} = \begin{bmatrix} X_x \\ X_y \end{bmatrix} = \overline{OA} - \overline{OP} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + R(\phi_P) \begin{bmatrix} -a \\ -b \end{bmatrix} - R(\phi_M) \begin{bmatrix} -a \\ -b \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\overline{QB} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \overline{OB} - \overline{OQ} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + R(\phi_P) \begin{bmatrix} b \\ -a \end{bmatrix} - R(\phi_M) \begin{bmatrix} b \\ -a \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\overline{RC} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \overline{OC} - \overline{OR} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + R(\phi_P) \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} - R(\phi_M) \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 (4)-(7) 식에서 그림 3에 표시한 능동 조인트들의 이동거리(실선)는 다음과 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} U_x \\ V_y \\ W_x \\ X_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x + b \cos \phi_P + a \sin \phi_P - b \cos \phi_M - a \sin \phi_M \\ \Delta y + a \sin \phi_P + b \cos \phi_P - a \sin \phi_M - b \cos \phi_M \\ -\Delta x + b \cos \phi_P + a \sin \phi_P - b \cos \phi_M - a \sin \phi_M \\ -\Delta y + a \sin \phi_P + b \cos \phi_P - a \sin \phi_M - b \cos \phi_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서 얼라인 오차 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi = \phi_P - \phi_M$ ) 는 별도의 관계식을 통해 결정해야 한다[3]. 패널의 회전각  $\phi_P$  는 고정된 값이고 마스크의 회전각  $\phi_M$  는 스테이지의 움직임에 따라 계속 변화하므로 매 샘플링 시간 마다 계산되어야 하는 값이다. 위 식에서 W, X축의 정방향은 그림 3의 표시와는 반대이다. 한편, [3]에서의 결과와는 달리 위 결과를 이용하면 얼라인 스테이지 플랫폼이 홈 위치(home position) 외의 임의 위치에 있는 경우에도 얼라인 오차 보상 입력을 쉽게 결정할 수 있다.

III. 여유 구동 병렬 로봇에 대한 동기제어기 설계

고강성, 고가반하중, 고정밀 제어 시스템을 구현하기 위하여 병렬형 메커니즘에 여유 구동 축을 추가하는 경우, 임의의 한 축에서 발생 가능한 오작동 또는 큰 제어 오차가 다른 축들의 동작을 방해하거나 기구적 잠김(locking) 현상을 일으킬 수 있다. 본 절에서는 이에 대한 제어 전략으로써 모든 구동 축들이 주어진 오차보상 경로를 따라 시간 동기적으로 동작하는 동기제어기(synchronous controller) 설계를 제안한다.

1. 동기제어의 기본 개념

다축 구동 시스템에 대한 동기제어와 관련하여 이론적 배경을 제공한 것은 Koren의 상호 결합 제어기(cross coupled controller)[6]라고 할 수 있다. 이 후로 개념적으로 유사한 동기제어 알고리즘들이 공장기계 등 산업체에 적용하기 위한 목적으로 개발되었다. 동기제어의 기본적인 개념은 그림 4와 같이 각 독립 축에서 발생하는 조인트 제어 오차를 실시간으로 모니터링하여 이들을 각 축으로 적절히 분해(resolution)하는 추가적인 입력을 발생시킴으로써 제어 시스템을 구성하는 모든 구동 축들이 상호 동기적으로 동작하도록 만드는 것이다. 이러한 동기제어 방식을 도입하면 특정 축의 오차가 증가하는 것을 방지할 수 있고 여유 구동 시스템의 경우에는 기구적 잠김도 피할 수가 있어 기계가공 또는 작업의 정밀도를 한층 높일 수 있다.

한편, 두 축 시스템에 대해서는 동기오차 정의와 입력 분

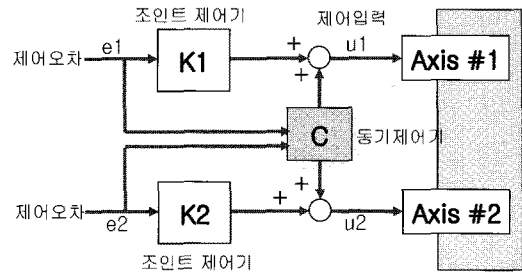


그림 4. 두 축 시스템에 대한 동기제어 입력. Fig. 4. Synchronous control input for a twin-axis system.

배가 비교적 용이하지만 구동 축의 수가 증가할수록 동기오차 정의 자체가 모호해 지고 전체 피드백 시스템의 안정성 확보 측면에서 입력을 분배하기 위한 로직을 구성하기가 어려워진다. 따라서 동기제어 설계에서도 최적제어 개념을 도입하여 체계적인 절차를 따라 제어 입력을 결정하는 방법들도 연구되었다[8,9].

최근에 들어서는 임의의 다축 시스템에 대한 일반적인 동기제어 알고리즘들이 개발되었다. 예를 들어 Su 등[7]은 시간 동기적인 제어 동작을 이룩하기 위해서는 다음 (9)식과 같이 모든 축에 대하여 기준 입력과 실제 출력 사이의 오차 비율이 모든 시간에 걸쳐 같아야 한다는 개념을 바탕으로 동기오차를 (10)식과 같이 정의하였다.

$$\frac{q_1(t)}{R_1^d(t)} = \frac{q_2(t)}{R_2^d(t)} = \dots = \frac{q_n(t)}{R_n^d(t)} \quad (9)$$

$$f_i(q_{i-1}, q_i, q_{i+1}) = 2 \frac{q_i(t)}{R_i^d} - \frac{q_{i+1}(t)}{R_{i+1}^d} - \frac{q_{i-1}(t)}{R_{i-1}^d} \quad (10)$$

결국 이 방법을 따르면 연속적인 3개 축에서 중간 축의 오차 비율의 2배가 좌우 양 축의 오차 비율의 합과 같다면 동기제어가 이루어진다고 것을 의미한다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하는 여유 구동 얼라인 로봇과 같이 4축 이상의 다축 시스템에 대해서는 위 방법이 모든 축의 동기화를 구현한다고 보장할 수 없다.

또 다른 동기제어 방식으로는 주 시스템에 다른 부 시스템들을 동기화시키는 마스터-슬레이브 개념의 동기제어 알고리즘이 존재한다[10]. 그러나 이 제어 방식에서는 주 시스템(또는 기준 축)의 제어성능이 항상 일관성이 가져야 한다는 제약이 있으며 주 시스템에서 발생하는 외란 또는 오차가 전체 시스템에 영향을 미치는 단점을 내포한다.

2. 얼라인 스테이지에 대한 동기제어기 설계

이 논문에서는 여유 구동 병렬형 얼라인 로봇에 대한 동기제어 입력을 결정하기 위하여 임의의 j번째 축에 대한 동기 오차를 다음 (11)식과 같이 대상 축의 제어오차 비율과 현 샘플링 시간에서 조인트 제어 오차가 가장 작은 축의 오차 비율과의 차이로 정의한다.

$$\epsilon_{syn,j} = \frac{R_j^d(t) - q_j(t)}{R_j^d(t)} - \frac{R_i^d(t) - q_i(t)}{R_i^d(t)} \Bigg|_{\min} \quad (11)$$

where  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$

여기서 n은 구동 축의 수,  $R_i^d$ 는 (8)식에 의거하여 각 조인

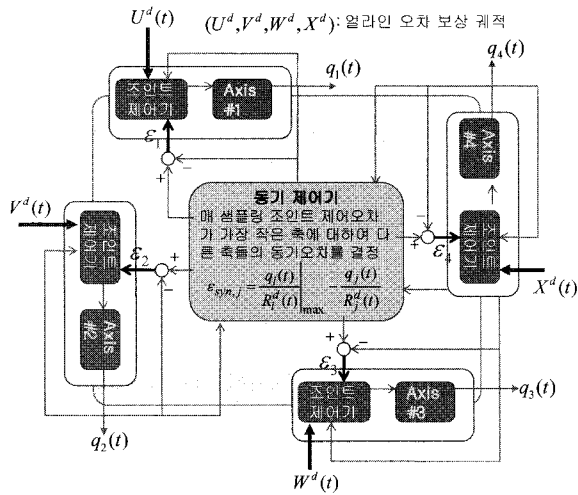


그림 5. 4축 병렬 로봇 시스템의 조인트 제어기 구성.  
Fig. 5. Joint control configuration of the 4-axis parallel robot system.

트 구동에 인가되는 기준 입력(얼라인 오차 보상 거리),  $q_i$  는 각 구동 축의 출력 값이다. 위 식을 다시 정리하면,

$$\epsilon_{syn,j} = \frac{q_i(t)}{R_i^d(t)} \Big|_{\max} - \frac{q_j(t)}{R_j^d(t)} \quad (12)$$

기존의 동기제어 방법에서는 모든 축에 대하여 시간 동기적인 제어 동작을 구현하기 위하여 동기제어 입력이 일부 축에 대하여는 역 토크로 작용함으로써 일부 조인트의 제어 성능이 감소하는 단점이 존재한다. 그러나 (12)식과 같은 정의에 따라 각 축에 제어 입력을 분배하면 매 샘플링 시간마다 조인트 제어오차가 가장 작은 축이 나머지 축들의 동작을 유도하는 형태이기 때문에 조인트 제어기의 성능을 최선의 상태로 유지할 수 있는 장점을 갖는다. 결론적으로 각 축에 대한 동기제어 입력은 다음과 같이 PID 규칙을 따라 결정할 수 있다.

$$u_{syn,j}(t) = K_p \epsilon_{syn,j}(t) + K_d \dot{\epsilon}_{syn,j}(t) + K_{syn} \int_0^t \epsilon_{syn,j}(\tau) d\tau \quad (13)$$

그림 5는 기본적인 조인트 피드백 루프 외에 동기오차 피드백 루프를 부가한 4축 병렬 로봇 시스템의 조인트 제어기 구성을 나타낸다. 기존의 동기제어 알고리즘들은 구동 축 수의 증가에 따라 제어입력 계산이 매우 복잡해지는 경향이 있지만 이 논문에서 제안된 방법은 동기오차 정의가 명확하고 구동 축이 확장되는 경우에도 적용하기가 간편하다.

3. 성능 비교 시뮬레이션

먼저 제안된 동기제어 알고리즘의 타당성을 그림 6과 같은 4대의 2-관절 매니퓰레이터에 대한 시뮬레이션을 통해 검증한다. 여기서 사용된 비선형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1(t) \\ \ddot{\theta}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2(t) \\ \dot{\theta}_2^2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1(t)\dot{\theta}_2(t) \\ \dot{\theta}_1(t)\dot{\theta}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

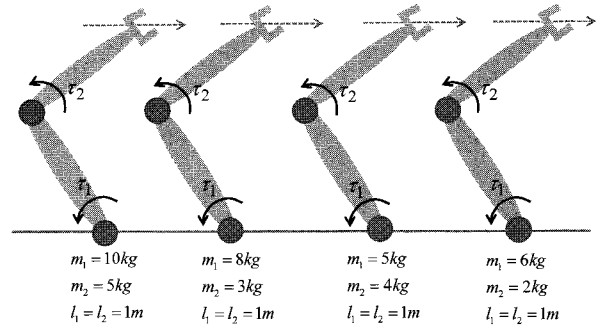
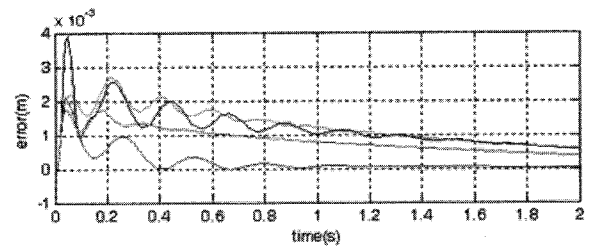
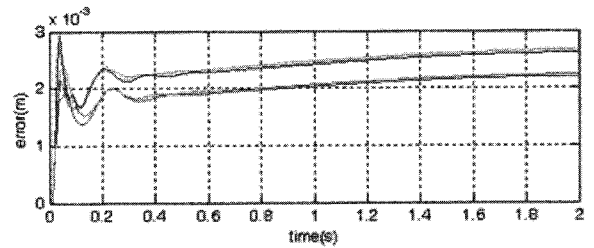


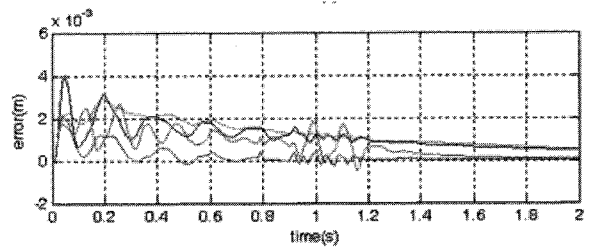
그림 6. 2-관절 매니퓰레이터 4대의 동기제어 운동.  
Fig. 6. Synchronous controlled motion of two-link manipulators.



(a) When only joint control is applied



(b) When the Su et al's algorithm [7] is applied



(c) When the proposed synchronous control is applied

그림 7. 시뮬레이션 결과(첫번째 구동 축들의 제어오차).  
Fig. 7. Simulation results.

위 식에서 각 행렬의 파라미터 식들은 참고문헌 [11]을 참고하면 얻을 수 있다. 시뮬레이션에서는 그림 6과 같이 2관절 로봇 4대의 말단부가 수평 방향으로 2초간 0.3m 직선 운동한다. 이 때 i) 각 조인트에 PID 피드백 제어기만을 적용한 경우, ii) Su[7]의 동기제어 알고리즘을 함께 적용한 경우, iii) 이 논문에서 제안된 동기제어 알고리즘을 함께 적용한 경우를 상호 비교한다.

그림 7의 시뮬레이션 결과는 위 세가지 경우에 대하여 2관절 로봇 4대의 첫번째 구동 축에서 발생한 오차들을 함께 표시한 것이다. Su[7] 알고리즘을 적용한 그림 7(b)의 결과를 보면 동기제어 입력을 추가함으로써, 각 축 사이의 동기 오차(즉 조인트 제어 오차간 거리)는 상대적으로 줄어들었으

나 조인트 제어 성능 자체는 그림 7(a) 경우보다 저하되었다. 이것은 동기적 제어 동작을 구현하기 위해 임의의 구동 축에서의 독립적인 제어 성능이 어느 정도 감소하는 것을 감수하는 기존 동기제어 방법들의 특성이라고 볼 수 있다.

반면 제안된 알고리즘을 적용한 그림 7(c)의 경우에는 축간 동기 오차는 감소하지만 조인트 제어 성능은 그림 7(a)와 거의 유사하게 유지된다는 사실을 알 수 있다. 수십 미크론 정도의 오차를 보상하는 일라인 제어 시스템에서 조인트의 제어 성능이 감소하면 일라인 시간도 그만큼 증가할 것이므로 여유 구동축을 갖는 일라인 로봇의 경우에는 기존의 동기 제어 알고리즘 대신 여기서 제안된 방법을 사용하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

**IV. 마스크-패널 일라인 제어 시스템 개발**

본 절에서는 실험장치 구성, 통합 소프트웨어 개발, 비주얼 서보잉 시스템 구성 등 병렬 스테이지를 이용한 일라인 로봇 시스템에 개발 절차에 대하여 기술한다.

**1. 실험장치 구성**

그림 8은 본 연구를 통하여 개발된 비주얼 일라인 시스템의 하드웨어 구성을 나타낸다. 마스크와 패널의 일라인 마크를 포함한 영상을 획득하기 위하여 2대의 CCD 카메라와 frame grabber를 사용한다. 일라인 스테이지의 4개의 능동 조인트들은 200W AC서보 모터에 의하여 구동된다. 한편, 조인트 제어기 및 비주얼 서보잉 시스템은 PC 기반으로 하여 개

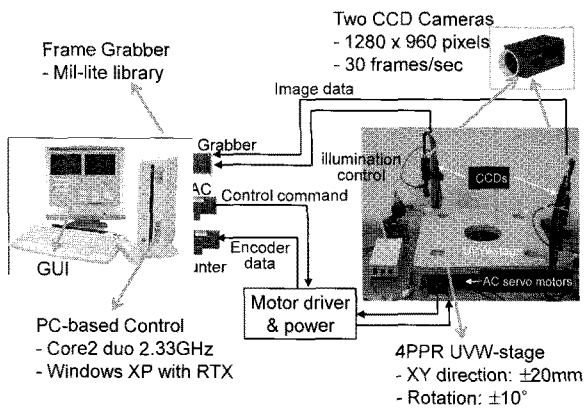


그림 8. 비주얼 일라인 로봇 시스템의 구성도.  
Fig. 8. Experimental setup for visual alignment robot system.

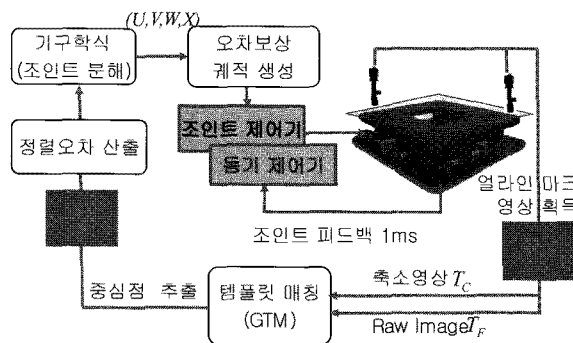


그림 9. 비주얼 일라인 시스템 제어 루프.  
Fig. 9. Position-based visual servoing of visual alignment system.

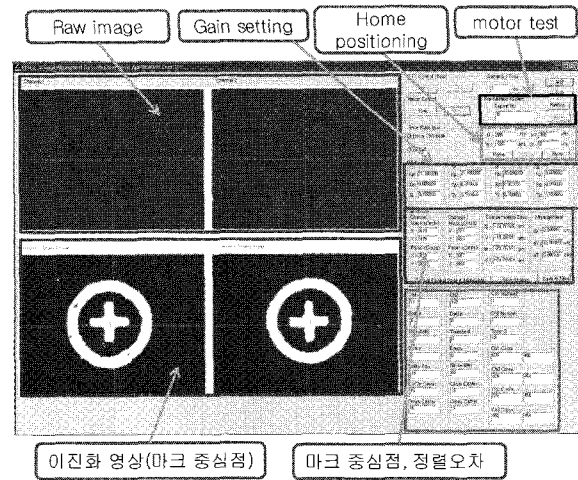


그림 10. 통합 운용 소프트웨어 시스템.  
Fig. 10. Integrated operation system.

발되었으며 일라인 마크 인식을 위한 비전 알고리즘은 [3]에서 제시된 기하적 템플릿 매칭(GTM) 기법을 이용하였다 그리고 실험에 사용된 일라인 마크는 직접 제작하였다.

그림 9는 4축 일라인 로봇에 대한 비주얼 서보잉 루프를 나타낸다. 영상처리 속도와 마크 중심점 갱신 주기를 증가시키기 위하여 원영상(original image)와 축소영상(reduced image)을 동시에 이용하여 코스파인 제어 방법을 개발하여 적용하였다. 조인트 제어기는 일반적인 PID 위치제어와 동기오차 제어를 동시에 수행한다. 일라인 오차에 대한 각 구동 축의 이동 거리는 (8)식에 의하여 결정되며 시간제적 생성을 위해서는 별도의 과정이 필요하다.

**2. 통합 소프트웨어 개발**

비주얼 일라인 시스템에 대한 제어용 소프트웨어는 MS VC++ 기반으로 제작하였으며 MFC 라이브러리를 이용해 그림 10과 같은 다이얼로그 기반의 통합 운용 GUI를 구성하였다. 그림과 같이 CCD 카메라에서 캡처된 원 영상에서 노이즈를 제거한 이진 영상에 일라인 마크의 중심점이 실시간으로 표시된다. 기타 스테이지의 구동 테스트 기능, 홈 포지셔닝 기능이 포함되며 정렬오차와 각 축의 조인트 오차, 동기 오차를 실시간으로 확인할 수 있다.

**V. 실험 결과**

본 논문에서 제안한 동기제어 알고리즘은 고강성, 고가반하중 구조의 여유 구동 시스템에서 임의의 축에서 발생 가능한 오동작 또는 과도한 제어 오차에 의해 전체 일라인 시스템의 성능이 저하되는 것을 방지하는데 목적이 있다고 볼 수 있다. 먼저 동기제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 그림 1의 4축 병렬 스테이지에서 모든 축이 정방향으로 1mm씩 움직이므로써 이동 플랫폼이 회전 운동을 하는 제어 실험을 수행하였다.

그림 11(a)의 결과를 살펴보면 조인트 제어기로서 PID 제어기만 적용한 경우보다 동기제어 입력을 추가하였을 때 축간 동기오차가 보다 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 제안된 동기제어기는 조인트 오차가 가장 작은 구동 축에 다른 축들의 동작을 동기화를 시키는 방식이기 때문에 매 샘플링

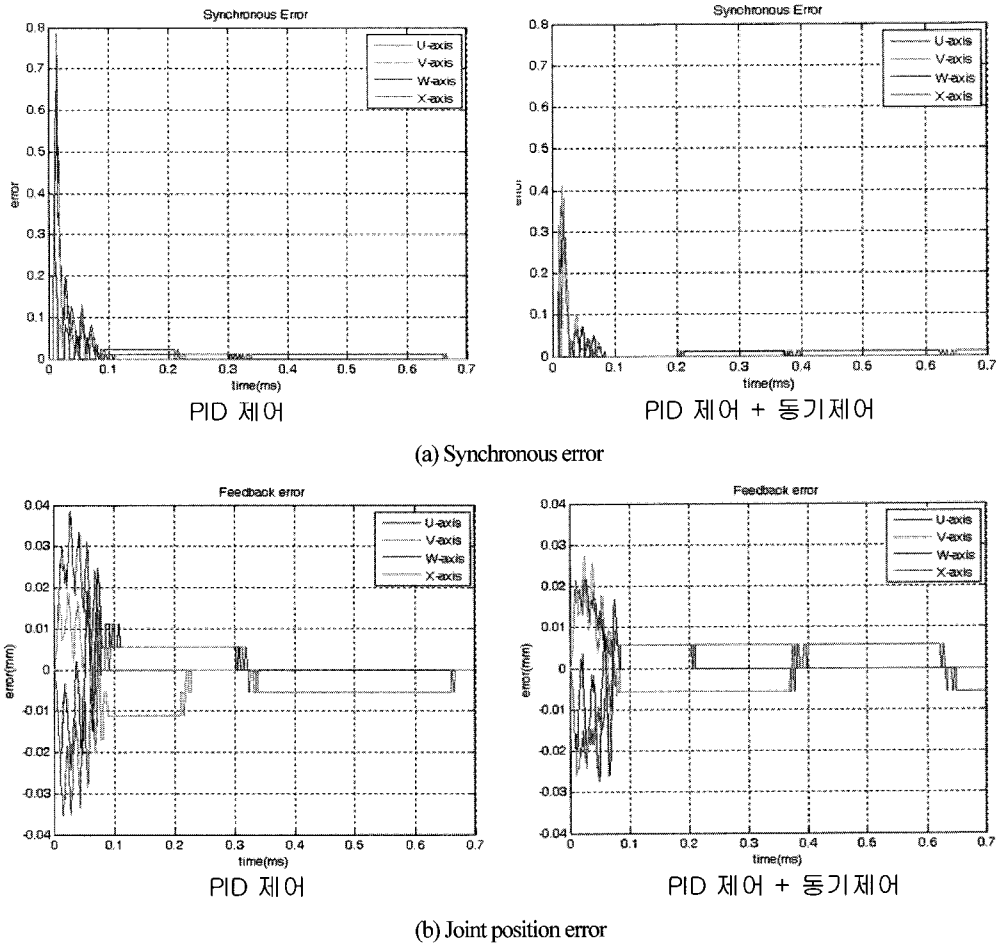


그림 11. 4축 병렬 스테이지 조인트 제어 실험 결과(회전 운동).  
 Fig. 11. Joint control experiment of the 4-axis parallel stage (rotational motion).

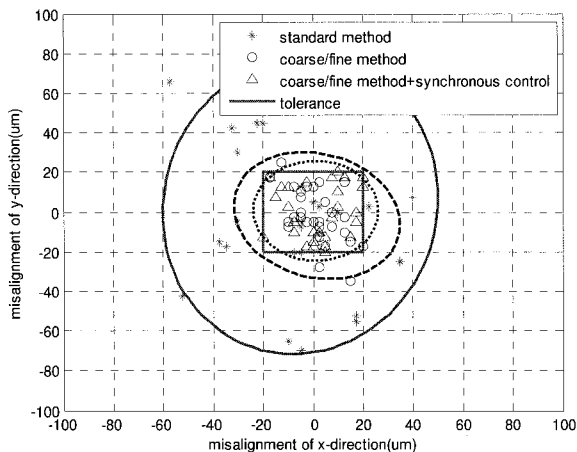


그림 12. 4축 병렬 여유 구동 스테이지를 이용한 비주얼 얼라인 실험 결과(30회 실험).  
 Fig. 12. Visual alignment experiment using the 4-axis parallel stage with actuation redundancy.

시간마다 제어 성능이 나쁜 구동 축은 제어 성능이 우수한 구동 축의 성능을 추종하는 경향을 보인다. 따라서 동기제어 목적과 더불어 조인트 위치제어 성능도 향상되는 것을 그림 11(b)의 결과를 통하여 알 수 있다.

다음에 [3]에서 제시된 GTM 기법을 적용하여 그림 9의 비주얼 얼라인 시스템 제어 루프를 구현하였고 얼라인 실험을 수행하였다. 동기제어 효과가 얼라인 성능에 기여하는 정도를 1회 단독 실험 결과를 가지고 판단하기는 곤란하므로 30번 반복 실험을 통해 그림 12와 같은 결과를 얻었다. 이것은 비전 루프가 2회 작동한 후의 얼라인 오차 분포를 나타내는데 그림에 표시된 타원은 각 얼라인 방법을 적용한 경우 얼라인 오차 분포의 3-sigma 표준편차 값을 의미한다. 결론적으로 동기제어 입력을 적용한 경우가 다른 2가지 경우보다 통계적으로 오차 분포를 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

또한 그림에 나타낼 수는 없었지만 동기제어기를 적용하면 얼라인이 종료되기까지의 비전 루프의 작동 횟수(즉 얼라인 시간)가 보다 균일해 진다는 사실을 알 수 있다. 동기제어기의 목적은 여유 구동 시스템에서 임의 축의 오동작을 방지하는 것에 주된 목적이 있지만 모든 구동 축의 성능을 균일하게 만드는 성질을 가지고 있으므로 얼라인 성능의 일관성을 확보하는 측면에서도 유리하다고 판단할 수 있다.

**VI. 결론**

이 논문에서는 차세대 대면적 디스플레이 생산기술 개발 측면에서 핵심 이슈 중의 하나인 얼라인 로봇 시스템에 적용하기 위한 목적으로 여유 구동 축을 갖는 병렬 기구의 기구

학적 해석과 동기제어기 설계 문제를 다루었다. 여유 구동 스테이지는 가반하중 및 제어 정밀도 측면에서 유리하지만 보다 정교한 제어 로직이 뒷받침되어야만 원활한 성능을 기대할 수 있다. 제안된 동기제어 알고리즘은 기존의 다른 방법과 비교하여 다축 시스템에 대한 동기오차 정의가 명확하고 동기적 동작을 구현하는 동시에 각 구동 축들의 독립적인 제어 성능을 최선으로 유지하는 장점을 갖는다.

### 참고문헌

- [1] 송춘삼, 김주현, 김종형, "LCD 모듈 조립라인의 공정 자동화 설계," 한국공작기계학회지, 제16권 제5호, 2007.
- [2] 박희동, "종이처럼 얇고 입체화면이 가능한 디스플레이," 과학과기술, 제7권, pp. 90-93, 2005.
- [3] 권상주, 박찬식, 이상무, "평판 디스플레이 비전 정렬 시스템의 기구학 및 제어," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제4호, pp. 369-375, 2008.
- [4] C. S. Park and S. J. Kwon, "An efficient vision algorithm for fast and fine mask-panel alignment," 2006 *SICE-ICASE Int. Joint Conference*, pp. 1461-1465, Oct. 2006.
- [5] J.-P. Merlet, *Parallel Robots*, 2nd. Ed., Springer, 2006.
- [6] Y. Koren, "Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 102, pp. 265-272, Dec. 1980.
- [7] Y. X. Su, D. Sun, L. Ren, and J. K. Mills, "Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulators," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 22, no. 1, pp. 202-207, Feb. 2006.
- [8] Y. Xiao, K. Zhu, and H. C. Liaw, "Generalized synchronization control of multi-axis motion systems," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 809-819, 2005.
- [9] Y. Xiao and K. Y. Zhu, "Optimal synchronization control of high-precision motion systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1160-1169, Aug. 2006.
- [10] K. Kosuge, J. Ishikawa, K. Furuta, and M. Sakai, "Control of

single-master multi-slave manipulator system using VIM," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1172-1177, 1990.

- [11] S. B. Niku, *Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications*, Prentice Hall, 2001.



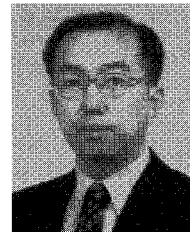
### 정 해 민

2007년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사). 2009년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학석사). 2009년 2월~현재 STX 조선해양연구소. 관심분야는 머신비전, 로봇제어, 메카트로닉스.



### 권 상 주

1989년 서울대학교 조선공학과(공학사). 1991년 POSTECH 기계공학과(공학석사). 2002년 POSTECH 기계공학과(공학박사). 1991년~1997년 국방과학연구소 연구원. 2003~2004년 한국과학기술연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 조교수. 관심분야는 강인제어 및 추정이론, 센서퓨전, 초정밀로봇, 휴머노이드, 비행로봇.



### 이 상 무

1987년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1989년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1999년 서울대학교 전기공학부(공학박사). 2005년~현재 한국생산기술연구원 로봇기술연구부 수석연구원. 관심분야는 초정밀로봇 제어, 모션제어, 위치인식.