

3차원 하이브리드 비전 정렬 시스템에 관한 연구

황재웅* · 권상주†

*삼성전자, †한국항공대학교 항공우주기계공학부

On the Development of a Spatial Hybrid Visual Alignment System

Jaewoong Hwang* and SangJoo Kwon†

*Samsung Electronics,

†School of Aerospace and Mechanical Eng., Korea Aerospace University

ABSTRACT

In this paper, suggested is a hybrid-type visual alignment system to align mask and panel in 3-D space, where mask and panel are to be controlled independently by two individual positioning mechanisms in order to compensate for spatial misalignments. In the hybrid visual alignment system, the below 4-PPR parallel mechanism provides in-plane motions to pattern mask like the other conventional alignment systems while the above 4-RPS parallel mechanism is to move glass panel to achieve a complete spatial alignment. For the control of the hybrid alignment system, first, inverse kinematic solutions for the parallel mechanisms are given to determine the driving distance of each active joint, and also an efficient way to determine the spatial alignment error is developed by exploiting three in-plane cameras.

Key Words : Flat panel display, Visual alignment, Parallel mechanism, Inverse kinematics

1. 서 론

하나의 디스플레이 제품이 완성되기까지 증착, 리소 그래피, 프린팅, 본딩, 프로빙 등 여러 단계의 공정을 거쳐야 하며, 각 공정마다 패턴 마스크와 글래스 패널을 상호 정렬 시키는 얼라인 공정이 선행적으로 수행된다. 이 때 비전 정렬 시스템은 평판 디스플레이 제품의 품질과 생산성을 결정하는 핵심적인 기술에 해당된다고 할 수 있다[1-3]. 현재의 디스플레이 생산 라인에서 적용되고 있는 비전 정렬 시스템들은 2차원 평면 상에서 CCD 카메라를 이용하여 마스크-패널 간의 정렬오차를 검출하고 위치결정 스테이지를 구동하여 이를 보정하는 방식을 따른다. 그리고 비전을 이용한 자동적인 정렬이 수행되기 전에 전정렬(pre-alignment) 과정을 통해 비전 정렬에서 제외되는 방향들의 정렬 오차들을 일정한 오차 범위 이내로 유지시킨다. 그러나 마스크와 글래스 패널 사이에 공간적으로 6자유도의

정렬오차가 존재하므로 평면 정렬 시스템만으로는 3차원 공간상 모든 방향의 오차를 보정할 수 없다. 따라서 갈수록 대면적화, 초정밀화 되어가는 차세대 디스플레이 제품의 스펙을 만족시키기 위해서는 평면적인 정렬 방식에서 벗어나는 것이 필요하며, 최근 들어 3차원 공간 정렬 시스템 개발에 대한 요구가 자연스럽게 제기되고 있다.

기존의 평면 정렬 방식에서는 직전 공정을 종료하고 이송된 후에 고정된 상태의 글래스 패널에 대하여 패턴 마스크에 3자유도 운동성을 부여하는 위치결정 스테이지를 이용하여 평면적인 정렬을 수행한다. 그러나 마스크-패널에 대한 3차원 공간 정렬을 구현하기 위해서는 기본적으로 XYZ 직선운동과 RPY(roll, pitch, yaw) 회전운동을 포함하는 총 6자유도의 운동성을 갖는 정렬 메커니즘이 필요하다. 또한 3차원 공간 상의 모든 방향에 대한 정렬오차를 측정할 수 있는 센서 시스템을 구성해야 한다.

6자유도 정렬 시스템을 구성하기 위해서는 우선 마스크 구동을 위한 기존의 3자유도 정렬 스테이지를 6

†E-mail : sjkwon@kau.ac.kr

자유도 메커니즘으로 확장하는 방법을 생각할 수 있다. 대증량물을 핸들링하기에 적합한 병렬 구동 메커니즘으로서 6-RPS 조인트로 구성되는 스투어트(stewart) 플랫폼[4]이 가장 일반적이다. 또한 기존의 마스크 구동 시스템에 대한 구조적인 변경이 없이 글래스 패널 만을 핸들링하기 위한 별도의 구동 시스템을 추가하는 방법을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 마스크와 패널을 각각 독립적인 구동 시스템에 의해 핸들링하는 상하부 분리형의 하이브리드 비전 정렬 시스템을 제안한다. 이러한 상하 분리형 구조는 기존 평면 정렬 시스템을 원형을 유지하면서 공간형 정렬 시스템으로 확장할 수 있다는 장점을 가지며, 마스크와 패널에 두 대의 매니플레이터를 이용한 협동제어 개념을 적용하기에 유리하다.

현재 대부분의 디스플레이 비전 정렬 시스템은 마스크 구동을 위하여 3자유도 병렬형 메커니즘을 사용하고 있으며 작업 공간에서 2T1R(XY축 직선운동과 Z축에 대한 회전운동)의 평면운동을 구현한다. 따라서 마스크와 패널 사이에 존재하는 6자유도 정렬오차를 보상하기 위해서는 1T2R(Z축 직선운동과 XY축에 대한 회전운동) 구동 시스템을 추가적으로 구성해야 한다. 작업공간에서 1T2R 운동을 구현할 수 있는 병렬 구동 시스템의 예로는 Carreto et al.[5]이 제안한 3-RPS 메커니즘이 있으며 이 외에도 각 응용 목적에 맞게 변형된 다양한 형태의 1T2R 구동 메커니즘들이 존재한다[6, 7].

대증량, 대면적 평판 디스플레이 제품에 대응하기 위해서는 보다 큰 가반하중(payload)과 강성(stiffness)을 갖는 구동부 설계가 요구된다. 이를 위하여 본 논문의 하이브리드 정렬 시스템에서는 각 구동 시스템에 여분의 구동 축을 추가한다. 또한 3차원 비전 정렬 시스템의 제어를 위해서는 마스크-패널 공간 정렬오차에 대한 실시간 추정 기법이 요구된다. 본 논문에서는 기하적 패턴 매칭[1, 3]을 이용하여 카메라 입력 영상에서 정렬 마크들을 분리하고, 자동 초점조절 시스템에 대한 영상처리 기법[9-11]을 응용하여 마스크-패널 간의 수직거리를 추정함으로써 3차원 공간 정렬오차를 산출하는 방법을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 하이브리드 비전 정렬 시스템의 개념을 제안한다. 3장에서는 마스크와 패널 각각의 위치 및 자세 제어를 위한 4-PPR 병렬 메커니즘과 4-RPS 병렬 메커니즘의 기구학 해석을 다룬다. 4장에서는 공간 정렬오차 산출 방법을 제시하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 하이브리드 비전 정렬 시스템

하이브리드 비전 정렬 시스템에서는 Fig. 1과 같이 마스크 구동부와 패널 구동부가 독립적인 메커니즘으로 구성된다. 마스크 구동 시스템은 기존 평면 정렬 시스템에서 주로 이용하는 3-PPR 병렬 메커니즘을 4축 구동 타입으로 확장시켜 패턴 마스크 및 주변 장치에 대한 가반하중을 증가시키며, 작업공간에서 마스크에 1T2R 3자유도 운동성(mobility)을 부여한다. 그리고 패널 구동 시스템은 역시 글래스 패널 및 주변 장치에 가반하중을 증가시키기 위해 4축 타입 4-RPS 병렬 메커니즘을 채택하며 글래스 패널에 2T1R 3자유도 운동을 구현한다. Fig. 1에서 각 베이스의 첫번째 조인트는 모터에 의해 구동되는 능동 조인트에 해당하며, 나머지 조인트들은 각 플랫폼의 동작에 따라 수동적으로 움직인다. 하이브리드 메커니즘의 다른 예제로는 위치부와 자세부를 별도의 3자유도 기구로 분리 설계한 경우가 있다[8].

디스플레이 비전 정렬 시스템은 증착, 리소그래피, 프린팅, 본딩, 프로빙 등 각 공정 장비에 따라 내부 구조적인 면에서는 차이가 있으나 이송된 글래스 패널에 대하여 마스크를 정렬시키는 기능적인 측면에서는 동일하다. 먼저 글래스 패널이 별도의 핸들링 로봇에 의하여 공정 장비 내부로 이동하면 전정렬(pre-alignment) 과정을 거친 후, 획득된 이미지에 대하여 영상처리, 얼라인 마크의 중심점 추출, 마스크-패널 간 정렬오차 계산, 정렬오차 보상 제어가 연속적으로 수행된다. 이때 정렬오차가 허용오차 범위 이내로 수렴할 때까지 비전 루프와 오차보상 제어 루프가 반복된다. 하이브리드

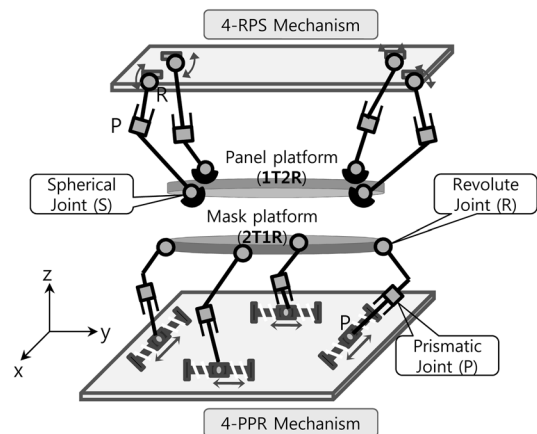


Fig. 1. Schematic of the hybrid visual alignment mechanism.

비전 정렬 시스템은 Fig. 2와 같이 마스크와 패널을 핸들링하는 두 개의 독립적인 구동 시스템을 이용하여 전체적으로 3차원 공간에서 6자유도 정렬 동작을 수행하는 것을 목적으로 한다. 한편, Fig. 3은 하이브리드 정렬 시스템의 제어 흐름도를 나타낸다.

하이브리드 타입의 공간 정렬 시스템은 디스플레이 또는 반도체 공정에서 사용되고 있는 기존 마스크 구동 시스템의 원형을 유지함으로써 시스템 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있다. 이러한 시스템을 개발하기 위해서는 구체적인 하드웨어 설계와 더불어 다음과 같은 제어기술 관련 문제들을 해결해야 한다.

1) 정렬 메커니즘에 대한 기구학 해석: 상하 분리형 하이브리드 정렬 시스템은 6자유도 메커니즘에 비해 상대적으로 기구학 해석이 용이하고 오차보상 제어를 위해 요구되는 역기구학 해를 구하기에 유리하다. 이 논문에서는 Fig. 1의 4-PPR 메커니즘과 4-RPS 메커니즘에 대한 역기구학 해를 제시한다.

2) 3차원 정렬오차 산출: 마스크와 패널은 3차원 공

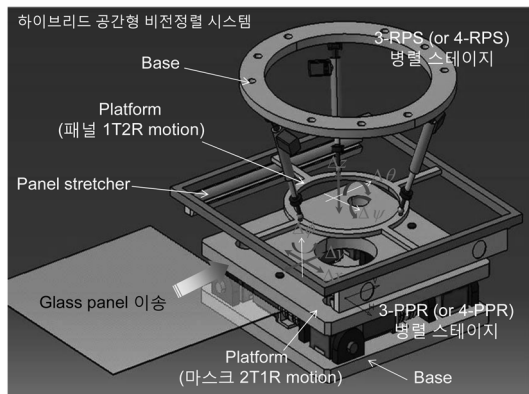


Fig. 2. Composition of the spatial visual alignment system.

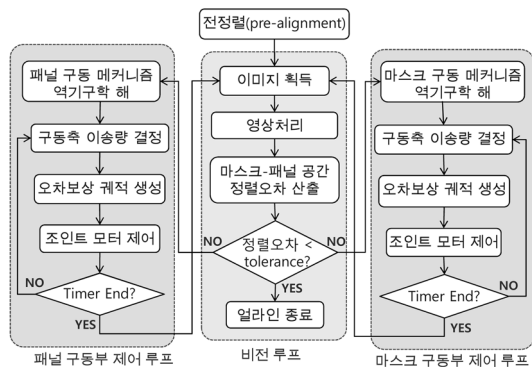


Fig. 3. Control flow of the hybrid visual alignment system.

간에서 Fig. 4와 같이 6자유도 정렬오차를 갖는다. 평면 정렬 시스템에서는 두 대의 카메라를 이용하여 마스크와 패널 표면의 정렬 마크들을 인식함으로써 평면 상에서의 정렬오차(D_x , D_y , D_f)를 산출한다. 하이브리드 정렬 시스템에서 오차보상 제어를 수행하기 위해서는 나머지 방향에 대한 오차(D_z , D_q , D_r)들도 실시간으로 산출해야 한다. 본 논문에서는 3대의 평면 카메라를 이용하여 6자유도 정렬 오차를 산출하는 방법을 제시한다.

3) 마스크-패널에 대한 협동제어 기법: 산출된 3차원 정렬오차에 대하여 정렬에 소요되는 시간을 단축하기 위해서는 상, 하부 시스템 간에 유기적인 제어 동작을 구현할 수 있는 경로 계획과 제어 전략이 요구된다.

3. 하이브리드 정렬 메커니즘의 기구학

3.1. 마스크 정렬 4-PPR 병렬 메커니즘

기존의 비전 정렬 시스템에서는 평면 상에서의 정렬 오차를 보상하기 위하여 보통 3-PPR 메커니즘을 이용한다. 그러나 대면적 디스플레이에 대응하기 위해서는 Fig. 5와 같이 여분의 구동 축을 추가한 4-PPR 타입이 도입하는 것이 제어 정밀도, 가반하중, 메커니즘의 강성 유지 등 여러가지 측면에서 유리하다[2]. 단, 4-PPR 메커니즘 역시 작업공간에서는 3-PPR 경우와 같이 2T1R(x, y, f) 3자유도 운동성을 갖기 때문에 각 축이 동기적으로 제어되지 않을 경우에는 기구적 잠금(locking)이 발생할 수 있다. 이 문제를 피하기 위해서는 정확한 기구학적 해에 근거하여 각 축의 이동거리를 결정해야 한다. 4-PPR 메커니즘에 대한 해석 결과는 선행 연구[2]에서 제시되었으나 논문의 완성도를 위해 본 절에서 간략히 요약한다.

Fig. 5는 4개의 다리(limb)와 베이스, 플랫폼으로 이루어진 4-PPR 병렬 메커니즘을 나타낸다. 병렬로 배치된 각 다리는 PPR 조인트로 구성되며 첫번째 pris-

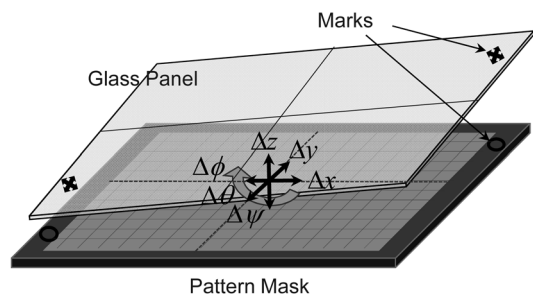


Fig. 4. 3-D misalignment between mask and panel.

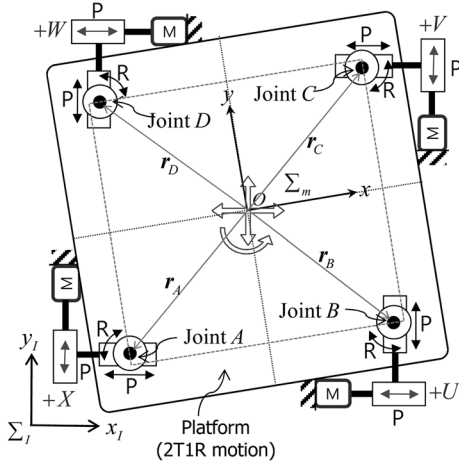


Fig. 5. Schematic of 4-PPR parallel mechanism.

matic(P) 조인트가 능동 조인트에 해당된다. 여기서 패턴 마스크가 부착되는 상판(platform)에 연결되는 각 revolute(R) 조인트의 위치 벡터를 $\mathbf{r}_A = (x_A, y_A)$, $\mathbf{r}_B = (x_B, y_B)$, $\mathbf{r}_C = (x_C, y_C)$, $\mathbf{r}_D = (x_D, y_D)$ 로 정의하며 각 능동 조인트의 구동 거리를 (U, V, W, X)로 나타낸다. Fig. 6은 작업공간에서의 평면 정렬오차($\Delta x, \Delta y, \Delta\phi$)와 이를 보정하기 위한 각 능동 조인트의 변위와의 관계를 표시하며 기구학 해석을 통하여 결론적으로 다음 식들로 표현된다.

$$U = \Delta x + x_B(\cos\Delta\phi - 1) - y_B\sin\Delta\phi \quad (1)$$

$$V = \Delta y + x_C\sin\Delta\phi + (y_C(\cos\Delta\phi - 1)) \quad (2)$$

$$W = -\Delta x + x_D(\cos\Delta\phi - 1) + y_D\sin\Delta\phi \quad (3)$$

$$X = -\Delta y - x_A\sin\Delta\phi - y_A(\cos\Delta\phi - 1) \quad (4)$$

위 결과는 4-PPR 메커니즘의 역기구학(inverse kinematics) 해로서 평면 정렬오차 보상을 위한 각 조인트 제어 루프의 기준 입력으로 인가된다.

3.2. 패널 정렬 4-RPS 병렬 메커니즘

하이브리드 비전 정렬 시스템에서 패널 정렬 시스템은 마스크 정렬 시스템에서 보정할 수 없는 나머지 방향에 대한 정렬오차(즉, Fig. 4에서 Dz, Dq, Dy)들을 보정한다. Fig. 7과 같이 4-RPS 병렬 메커니즘은 고정된 base와 움직이는 platform이 각각 RPS 조인트를 갖는 4개의 다리(limb)로 연결된다. 각 다리에서 중간 prismatic(P) 조인트가 모터로 구동되는 능동 조인트

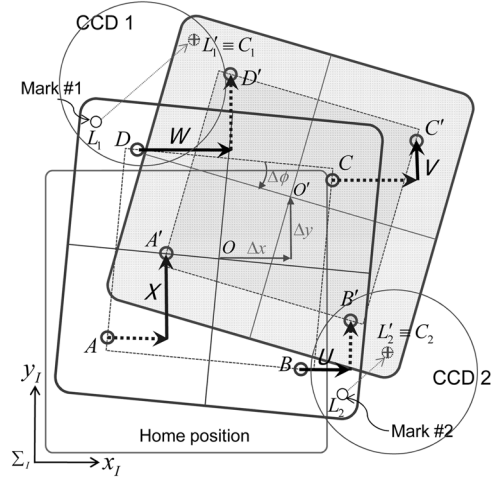


Fig. 6. In-plane misalignment and the displacements (U, V, W, X) of the active joints of 4-PPR mechanism.

(active joint)이며 나머지는 수동 조인트들이다. 4-RPS 메커니즘 또한 4-PPR 메커니즘과 같이 4개의 조인트 구동기에 의해 작업 공간에서 3자유도 운동을 결정하는 여유 구동 시스템이며 플랫폼(즉, 글래스 패널)에 IT2R(z, q, y) 운동을 발생시킨다.

공간 상에서의 정렬오차(Dz, Dq, Dy)를 보상하기 위해서는 4-RPS 메커니즘의 역기구학 해를 통하여 각 능동 조인트의 구동거리($d_1 \sim d_4$)를 결정해야 한다. Fig. 7에서 각 위치벡터를 다음과 같이 정의한다.

$\hat{p} = (p_x, p_y, p_z)$: base 중심(xyz 좌표계 원점)에서 platform 중심(uvw 좌표계 원점)까지의 벡터

$\hat{a}_i (i=1\sim 4)$: base 중심에서 base에 연결된 revolute(R) 조인트 $A_i (i=1\sim 4)$ 까지의 벡터

$\hat{b}_i (i=1\sim 4)$: platform 중심에서 platform에 연결된 ball(S) 조인트 $B_i (i=1\sim 4)$ 까지의 벡터

$\hat{q}_i (i=1\sim 4)$: base 중심에서 platform의 ball(S) 조인트 B_i 까지의 벡터

우선 base 중심에서 revolute(R) 조인트 A_i 까지의 거리를 g , platform 중심에서 ball joint(S) B_i 까지의 거리를 h 라고 하면 각 조인트의 초기 위치벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{a}_1 &= [g \ 0 \ 0]^T & \hat{b}_1 &= [h \ 0 \ 0]^T \\ \hat{a}_2 &= [0 \ g \ 0]^T & \hat{b}_2 &= [0 \ h \ 0]^T \\ \hat{a}_3 &= [-g \ 0 \ 0]^T & \hat{b}_3 &= [-h \ 0 \ 0]^T \\ \hat{a}_4 &= [0 \ -g \ 0]^T & \hat{b}_4 &= [0 \ -h \ 0]^T \end{aligned} \quad (5)$$

또한 platform의 운동에 따라서 base에 대한 plat-

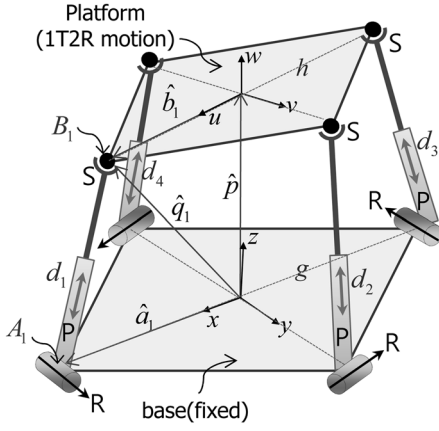


Fig. 7. Schematic of 4-RPS parallel mechanism.

form의 자세를 표현하는 방향 코사인 행렬이 다음과 같이 주어지면

$$R_B = R_y(\theta)R_x(\psi)R_z(\phi) = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\theta c\phi + s\psi s\theta s\phi & c\psi s\theta \\ c\psi s\phi & c\psi c\phi & -s\psi \\ -s\theta c\phi + s\psi c\theta s\phi & s\theta c\phi + s\psi c\theta c\phi & c\psi s\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

각 ball(S) 조인트의 위치벡터는 다음과 같다.

$$\hat{q}_1 = \begin{bmatrix} q_{1x} \\ q_{1y} \\ q_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + hu_x \\ p_y + hu_y \\ p_z + hu_z \end{bmatrix}, \quad \hat{q}_2 = \begin{bmatrix} q_{2x} \\ q_{2y} \\ q_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + hv_x \\ p_y + hv_y \\ p_z + hv_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{q}_3 = \begin{bmatrix} q_{3x} \\ q_{3y} \\ q_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x - hu_x \\ p_y - hu_y \\ p_z - hu_z \end{bmatrix}, \quad \hat{q}_4 = \begin{bmatrix} q_{4x} \\ q_{4y} \\ q_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + hv_x \\ p_y + hv_y \\ p_z + hv_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig. 7에서 prismatic(P) 조인트들은 1 자유도의 병진운동($d_1 \sim d_4$)을 하며 ball(S) 조인트들은 3자유도의 회전운동, revolute(R) 조인트들은 1자유도의 회전운동을 한다. 따라서 revolute joint를 Fig. 7과 같이 (x, y)축에 대하여 직각으로 배치하면 다음 구속 조건이 주어진다.

$$q_{1y} = 0, q_{2x} = 0, q_{3y} = 0, q_{4x} = 0 \quad (9)$$

(9)식을 (8)식에 대입하여 정리하면

$$v_x = u_y \rightarrow -c\theta s\phi + s\psi c\theta c\phi = c\psi s\phi \rightarrow \phi = \tan^{-1}\left(\frac{s\psi s\phi}{c\psi + c\theta}\right) \quad (10)$$

$$p_x - hu_x = h(\cos\theta \cos\phi + \sin\psi c\phi) = c\psi s\theta \quad (11)$$

$$p_y = hu_y = h\cos\psi \sin\phi \quad (12)$$

한편, 능동 조인트에 해당하는 prismatic(P) 조인트의 이동 거리는 다음 관계식으로 계산할 수 있다.

$$d_i^2 = [\hat{q}_i - \hat{a}_i]^T [\hat{q}_i - \hat{a}_i], \quad i = 1 \sim 4 \quad (13)$$

최종적으로 (5)~(12)식을 이용하여 위 식을 정리하면

$$d_1^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + h^2(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) + 2h(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) - 2gp_x - 2ghu_x + g^2 \quad (14)$$

$$d_2^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + h^2(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + 2h(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z) - 2gp_x - 2ghv_x + g^2 \quad (15)$$

$$d_3^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + h^2(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) - 2h(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) - 2gp_x - 2ghu_x + g^2 \quad (16)$$

$$d_4^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + h^2(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - 2h(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z) - 2gp_x - 2ghv_x + g^2 \quad (17)$$

한편, (10)~(12)식에서 (x, y) 각 축에 대한 회전 정렬오차 ($\Delta\theta, \Delta\psi$)가 주어지면 ϕ 값이 결정되고 위치벡터 \hat{p} 의 (x, y)축 성분 (p_x, p_y)을 계산할 수 있다. 또한 수직방향의 정렬오차 Δz 는 위치벡터 \hat{p} 의 z축 성분 p_z 일치한다. 결국 작업공간에서 공간 정렬오차 ($\Delta z, \Delta\theta, \Delta\psi$)가 주어질 때, (14)~(17)식을 이용하면 4-RPS 메커니즘 능동 조인트들의 구동거리가 산출된다. 위 식에서 알 수 있듯이 4-RPS 시스템의 역기구학은 두가지 해가 존재하며 선택적으로 사용할 수 있다.

4. 마스크-패널 공간 정렬오차 산출

4.1. 평면 정렬오차

기존의 평면 정렬 시스템에서는 마스크-패널 정렬오차를 산출하기 위하여 보통 두 대의 카메라를 사용하며 비전 알고리즘을 통하여 마스크와 패널 표면의 일

라인 마크들을 인식한다. Fig. 6에서 마스크의 얼라인 마크 (L_1, L_2)의 중심점 위치 (x_{L1}, y_{L1}), (x_{L2}, y_{L2})와 패널의 얼라인 마크 (C_1, C_2)의 중심점 위치 (x_{C1}, y_{C1})와 (x_{C2}, y_{C2})가 주어졌을 때 평면 상에서의 정렬 오차는 다음과 같다[1].

$$\begin{aligned}\Delta x &= p_x - m_x = \frac{x_{c1} + x_{c2} - (x_{L1} + x_{L2})}{2} \\ \Delta y &= p_y - m_y = \frac{y_{c1} + y_{c2} - (y_{L1} + y_{L2})}{2} \\ \Delta \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{y_{L2} - y_{L1}}{x_{L2} - x_{L1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_{C2} - y_{C1}}{x_{C2} - x_{C1}} \right)\end{aligned}\quad (18)$$

4.2. 공간 정렬오차

하이브리드 비전 정렬 시스템을 이용하여 마스크-패널 간의 공간적인 정렬오차를 보상하기 위해서는 3차원 모든 방향의 오차들을 산출할 수 있는 방법이 요구된다. 본 절에서는 평면적으로 배치된 3대의 카메라 영상을 이용하여 전 방향의 정렬오차들을 결정하는 방법을 제안한다. Fig. 8과 같이 세 대의 카메라를 설치하고 먼저 임의의 두 카메라의 영상 정보를 바탕으로 (18)식에 의거하여 평면 정렬오차 ($\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$)를 산출한다. 다음에 카메라가 설치된 각 위치에서 특정 영상 처리 기법을 적용함으로써 마스크와 패널 얼라인 마크 사이의 높이 정보 ($\Delta a, \Delta b, \Delta c$)를 추출하면, 나머지 방향의 정렬오차들을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta z &= \frac{\Delta a + \Delta b + \Delta c}{3} \\ \Delta \theta &= \sin^{-1} \left(\left| \frac{\Delta z - \Delta b}{r} \right| \right) \\ \Delta \psi &= \sin^{-1} \left(\left| \frac{\Delta c - \Delta a}{2r} \right| \right)\end{aligned}\quad (19)$$

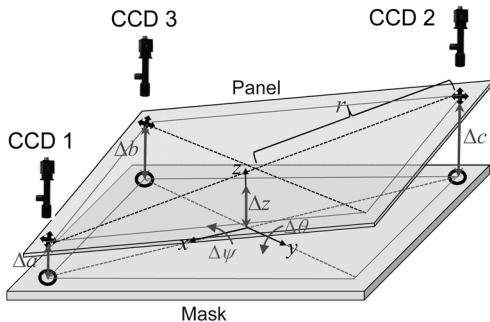


Fig. 8. Extraction of spatial misalignments using three CCD cameras.

각 얼라인 마크의 높이를 추출할 수 있는 매우 단순한 방법으로써 각 마크의 초점 정보를 이용할 수 있다. Fig. 9와 같이 카메라와 인식 객체 사이의 높이가 변화할 때 객체의 초점값은 정초점을 기준으로 대략 가우시안 분포를 보인다. 초점값에 대한 가우시안 곡선 모델은 다음 식으로 표현된다[9-11].

$$f(z) = \alpha_0 \exp \left[- \left(\frac{z - \alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \right] \quad (20)$$

여기서 α_0 는 곡선의 높이를 나타내며, 일반적으로 영상의 고주파 성분이 가장 많이 분포되어 있는 초점값을 1로 정규화하여 가우시안 모델에 적용한다. α_1 은 평균 값으로서 가우시안 곡선이 최대값을 갖는 카메라의 위치에 해당하며 영상의 정초점(in-focus) 위치를 의미한다. α_2 는 가우시안 곡선의 분산 값이다. 각각의 카메라에 대하여 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 값을 실험적으로 결정함으로써 비전 환경 및 카메라의 특성에 따른 가우시안 모델을 결정할 수 있다.

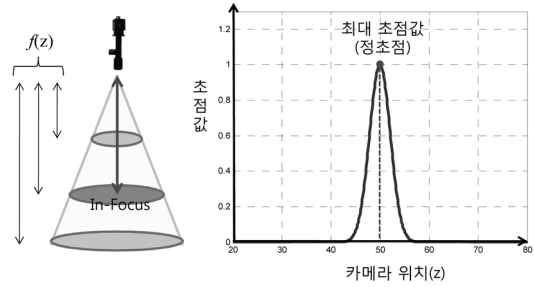


Fig. 9. Normal distribution of the focus value according to the camera vertical position.

여기서 (20)식에 대하여 역함수를 취하면 다음과 같이 각 얼라인 마크에 대한 카메라의 위치 정보를 초점값의 함수로 표현할 수 있다. 따라서 마스크-패널 정렬 제어 과정에서 각 CCD 카메라로부터 입력되는 영상으로부터 각 마크의 초점값을 계산하면 마스크와 패널 사이의 거리를 실시간으로 계산할 수 있다.

$$z = \alpha_2 \sqrt{-\ln \left(\frac{f(z)}{\alpha_0} \right)} + \alpha_1 \quad (21)$$

4.3. 측정 실험

3대의 CCD 카메라를 이용하여 마스크-패널 간 공간 정렬오차를 측정하기 위한 시스템을 Fig. 10과 같이 구성하였다. 마스크의 위치제어를 위한 정밀 스테이지의

플랫폼이 마스크에 해당하며 표면에는 각 카메라 설치 위치마다 원형 마크를 부착하였다. 그리고 글래스 패널에는 십자 마크를 부착하였고 마스크-패널간 높이는 별도의 z축 마이크로 스테이지를 이용하여 조절된다.

6자유도 공간 정렬오차를 계산하기 위해서는 각 얼라인 마크의 중심점과 마스크-패널 마크 사이의 수직 거리를 측정해야 한다. 한편, 카메라 입력 영상에서 각 얼라인 마크의 중심점 좌표를 추출하기 위해서 기하적 템플릿 매칭[1, 3]을 적용하였다. Fig. 11에 표시한 바와 같이 기하적 템플릿 매칭은 얼라인 마크의 형상이 매우 단순하다는 점에 착안하여 입력 영상의 모든 픽셀에 대하여 각 마크의 특징점들을 직접 매칭해 가면서 마크 중심점을 찾는 방법이다. Fig. 12는 각각 정초점과 불초점 상태에서 인식된 마크의 형상을 비교한다.



Fig. 10. Experimental setup with three CCD cameras.

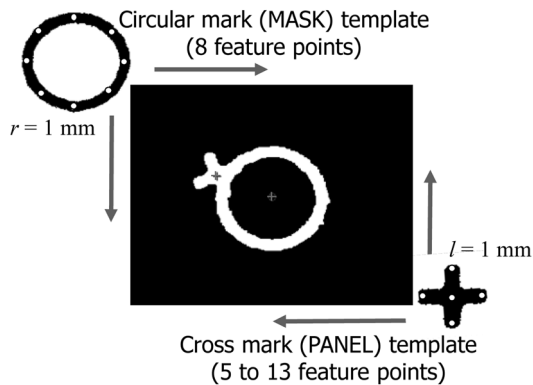


Fig. 11. Geometric template matching to extract mark centroids [1, 3].

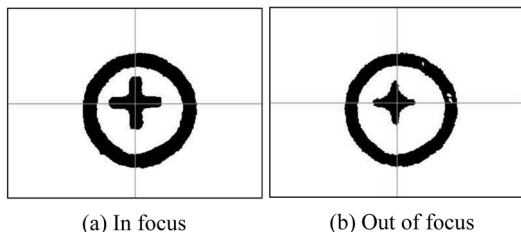


Fig. 12. Alignment marks of mask (circle) and panel (cross).

본 논문에서는 평면 정렬오차 측정에 관한 부분은 제외하고 마스크-패널 수직거리를 측정하여 공간 정렬오차를 산출한 내용을 다룬다.

먼저 각 카메라의 초점값에 대한 가우시안 모델을 얻기 위하여 카메라 수직 위치에 대한 초점값 분포를 구한다. 초점값은 마크의 인쇄 상태, 빛의 세기, 노이즈 등 환경적인 요인과 카메라의 특성에 영향을 받는다. 사용된 카메라들의 정초점 위치는 65 mm로서 초기 세팅 시에 정렬 스테이지 플랫폼(마스크)의 원형 마크에 초점을 맞춘다. 이어서 마이크로 스테이지를 이용하여 글래스 패널을 초기 위치에서 500 um씩 수직 이동시키며 초점값을 측정하였고 신뢰성을 높이기 위해 각 위치에서 10회씩 측정 후 데이터의 평균값을 취하였다.

결과적으로 Fig. 13은 15곳의 수직 위치에서 초점값을 산출한 후 가우시안 모델과 정합한 정규분포 곡선이다. 데이터 정합을 위해서는 Levenberg-Marquardt 방법[11]을 사용하였다. 또한 정합 결과의 신뢰도 평가를 위해서 R-Square 방법을 적용하였으며 다음 식과 같이 표현된다.

$$R-Square = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$SSE = \sum_i^n (f_i - \bar{f})^2, \quad SST = \sum_i^n (f_i - \hat{f}_i)^2 \quad (22)$$

여기서 n 은 정합에 사용된 데이터 수, f_i 는 초점값 분포, \bar{f} 는 초점값 평균, \hat{f}_i 는 정규 분포 곡선의 값을 의미한다. R-Square 값이 1에 가까울수록 가우시안 모델과의 정합이 잘 이루어졌다고 판단할 수 있다.

다음에 가우시안 초점값 모델을 바탕으로 (19)식에 의거하여 공간 정렬오차를 측정하기 위해 각 카메라의 위치에서 마스크와 패널 마크 사이의 수직거리를 각각 3, 2, 1 mm로 세팅하였다. 우선 평면 정렬 시스템이 동작하여 평면 상의 정렬오차가 보정된 후, 마스크-패널 사이의 공간 정렬오차를 300 msec 마다 계산하였을 때 Fig. 14의 결과를 얻었으며 평균 및 표준편차는 Table 1과 같다. 결과적으로 시간에 따라 초기 설정 값과의 오차가 크지 않은 일정한 수준의 정렬오차가 산출된다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

3차원 비전 정렬 시스템은 마스크와 패널에 대하여 공간적으로 완전한 정렬을 이룰 수 있을 뿐만 아니라 기존 평면 정렬 방식에서 별도로 수행되는 수직 접합 공정을 동시에 수행할 수 있는 장점을 갖는다. 본

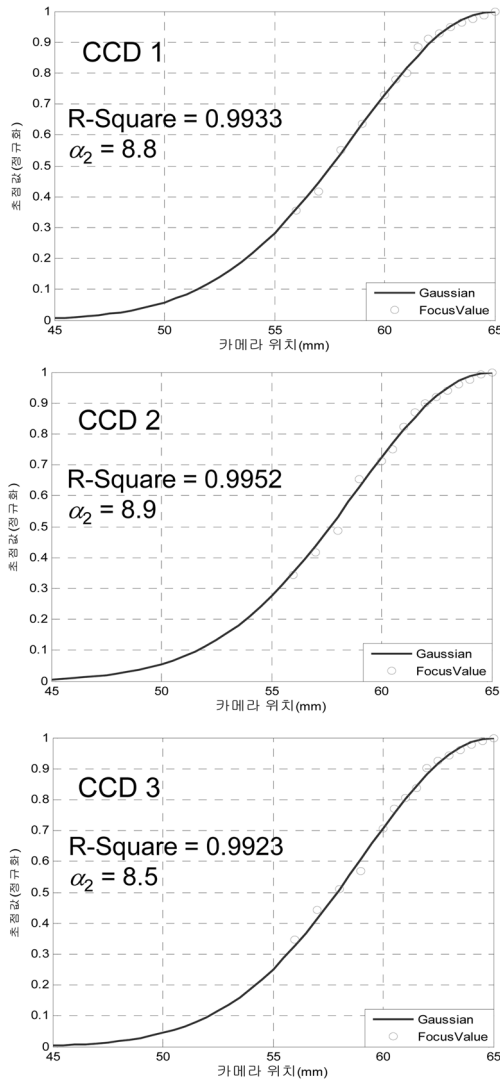


Fig. 13. Gaussian model of the focus value for the adopted three CCD cameras.

논문에서는 기존 평면 정렬 시스템을 3차원 공간형 정렬 시스템으로 확장하기 위하여 마스크 정렬 시스템과 패널 정렬 시스템을 기구적으로 분리한 하이브리드 타입의 비전 정렬 시스템을 제안하였다. 또한 정렬오차 보상제어를 요구되는 각 정렬 메커니즘의 역기구학 해를 제시하였고 평면적으로 설치된 3대의 카메라를 이용한 3차원 정렬오차 산출 방법을 개발하였다. 측정 실험을 통하여 카메라 초점값 가우시안 모델에 기반한 공간 정렬오차 측정 방법이 매우 효과적임을 보였다.

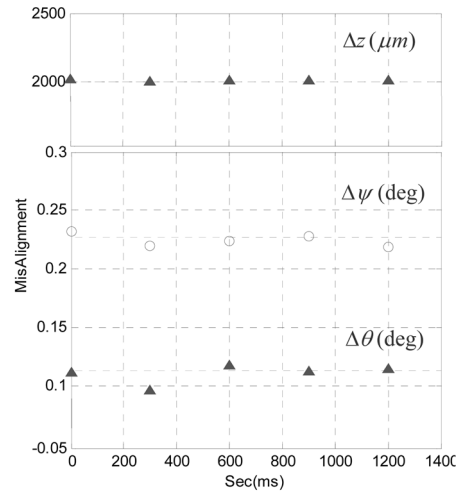


Fig. 14. Measurements of spatial misalignments.

Table 1. Means and Standard deviations.

	CCD1 (mm)	CCD2 (mm)	CCD3 (mm)	Δz (mm)	$\Delta \theta$ (deg)	$\Delta \psi$ (deg)
초기값	3	2	1	2	0.11	0.224
평균	2.987	2.014	1.015	2.01	0.11	0.224
편차	0.047	0.035	0.022	0.004	0.008	0.006

후 기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2009-0077203).

참고문헌

1. 권상주, 박찬식, 이상무, “평판 디스플레이 비전 정렬 시스템의 기구학 및 제어”, 제어로봇시스템학회 논문지, 제14권 4호, pp. 369-375, 2008.
2. 정해민, 권상주, 이상무, “여유 구동 병렬 기구를 이용한 마스크-패널 얼라인 로봇 시스템”, 제어로봇시스템학회 논문지, 제 15권 8호, pp. 887-893, 2009.
3. S. J. Kwon and J. Hwang, “Kinematics, pattern recognition, and motion control of mask-panel, alignment system”, Control Engineering Practice, Vol. 19, pp. 883-892. 2011.
4. J.-P. Merlet, Parallel Robots, 2nd. ed. Springer, 2006.
5. Carretero, J.A, Nahon, M. and Podhorodeski, R.P., “Workspace analysis of a 3-dof parallel mechanism”, IEEE, 1021-1026 Vol. 2, Oct, 1998.

6. M. S. Tsai, T. N. Shiau, Y. J. Tsai, and T. H. Chang, "Direct kinematic analysis of 3-PRS parallel mechanism", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 38, No. 1, pp. 71-83, Jan. 2003.
 7. Y. Li and Q. Xu, "Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 23, Issue 5, pp 395-408, Aug. 2007.
 8. L.-W. Tsai and S. Joshi, "Kinematic Analysis of 3-DOF Position Mechanism for Use in Hybrid Kinematic Machines", *ASME Journal of mechanical design*, Vol. 124, Issue 2, pp. 245-253, Jun. 2002.
 9. 한광수, "비디오 측정 시스템을 위한 효율적인 자동 초점 조절 알고리즘", *정보과학회논문지, 소프트웨어 및 응용*, 제 32권 9호, pp. 878-887, 2005.
 10. 지용우, 장경영, 정지화, 김석준, "자동 초점 기법을 이용한 유리 내부 결함 검출", *대한기계학회 논문집 A권*, 제28권, 제7호, pp. 1047-1054, 2004.
 11. M. Subbarao and J. K. Tyan, "Selecting the Optimal Focus Measure for Autofocusing and Depth-From-Focus", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 8, pp. 864-870, Aug. 1998.
-
- 접수일: 2011년 11월 10일, 심사일: 2011년 12월 7일,
게재확정일: 2011년 12월 15일