

기술논문

마이크로 부품 조립을 위한 평면 3 자유도 병렬 정렬기의 최적설계

이정재*, 송준엽+, 이문구**
(논문접수일 2011. 04. 18, 심사완료일 2011. 06. 02)

Design Optimization of Planar 3-DOF Parallel Manipulator for Alignment of Micro-Components

Jeong-Jae Lee*, Jun Yeob Song⁺, Moon G. Lee⁺⁺

Abstract

This paper presents inverse kinematics and workspace analysis of a planar three degree-of-freedom (DOF) parallel manipulator. Furthermore, optimization problem of the manipulator is presented. The manipulator adopts PRR (Prismatic-Revolute-Revolute) mechanism and the prismatic actuators are fixed to the base. This leads to a reduction of the inertia of the moving links and hence enables it to move with high speed. The actuators are linear electric motors. First, the mechanism based on the geometry of the manipulator is introduced. Second, a workspace analysis is performed. Finally, design optimization is carried out to have large workspace. The proposed approach can be applied to the design optimization of various three DOF parallel manipulators in order to maximize their workspace. The performance of mechanism is improved and satisfies the requirements of workspace to align micro-components.

Key Words : Parallel manipulator(병렬 기구), Planar 3-PRR mechanism(평면 3-PRR 구조), Inverse kinematics(역기구학), Workspace analysis(작업영역 해석), Design optimization(최적설계)

기호설명

$\{B\}$ = coordinate system of base frame
 $\{H\}$ = coordinate system of moving frame
 O = center position of base frame
 P = center position of moving frame
 x = x -directional translation
 y = y -directional translation
 θ = Z -directional rotation

A_i = vertices of base frame ($i=1,2,3$)
 C_i = vertices of moving frame
 B_i = end positions of each prismatic joint
 d_i = displacement of each prismatic joint
 b_i = lengths of each link
 r_i = lengths of vertices of base frame from O
 e_i = lengths of vertices of moving frame from P
 ϕ_i = orientation angles of each prismatic joint
 Ψ_i = orientation angles of each link ($i=1,2,3$)

* 아주대학교 기계공학과
+ 한국기계연구원
++ 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (moongulee@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지

1. 서론

최근 스마트폰, MP3 플레이어, PMP 같은 휴대전자기기들은 소형화와 휴대성을 고려해서 작게 만들어지고 있다. 전통적인 대량생산 시스템은 제조하고자 하는 대상물의 크기에 비해 상대적으로 큰 대형 기계 및 그와 관련된 여러 장치들로 이루어져 있다. 이런 시스템은 대형 기계를 운용하는 데 사용되는 에너지 소비, 환경오염 그리고 초정밀 부품에 대한 요구의 증대를 가져오게 되는 문제점을 가진다. 마이크로팩토리 분야는 소형 기계들의 운용을 통해, 전통적인 생산 시스템의 단점을 최소화하는 것이 가능하며 작업장의 한정된 영역을 효율적으로 사용하게 하고 원자재의 소모를 줄여준다. 이러한 추세로 인해 마이크로팩토리 분야는 주목을 끌고 있다⁽¹⁾.

지난 수 십 년간, 많은 연구자들이 병렬 정렬기에 대해서 연구했다. 병렬 정렬기는 직렬 정렬기에 비해서 높은 정밀도와 정확성을 가진다. 그리고 높은 기구학적 정밀도, 가벼운 무게, 높은 강성, 높은 제한 하중, 안정적인 동작 그리고 구동기의 자유로운 배치가 가능하다는 장점을 가진다. 하지만, 병렬 정렬기는 제한된 작업영역과 불가피한 특이점을 가진다. 따라서 정밀하고 소형화된 마이크로팩토리 분야에 적합한 병렬 정렬기는 제한된 기기 크기에서 작업영역을 최대화하기 위한 설계가 필요하다.

여러 연구자들은 병렬 메커니즘의 최적화 문제에 대해서 연구하였다. 그들은 단일 또는 복수 변수에 대한 최적화 설계 문제를 해결하였다. 예를 들어, Hay와 Snyman은 지정된 작업범위를 얻기 위해 병렬 정렬기의 최적설계를 수행하였다⁽²⁾. Gosselin과 Angeles는 평면 3 자유도 병렬 정렬기의 작업영역 부피를 최대화하기 위한 설계에 대해서 고찰하였다⁽³⁾. 김한성은 6 자유도 병렬 기구의 최적설계를 위하여 힘전달 지수와 작업영역 크기를 복합적으로 고려하였다⁽⁴⁾. 이전 연구자들의 대부분은 병렬 정렬기의 전체 작업영역 평가를 통해서 메커니즘의 성능을 개선하였다.

본 논문에서는 3-PRR 메커니즘을 이용하여 평면 3 자유도 병렬 정렬기를 다음과 같이 제안하고자 한다. 첫째, 제안하는 병렬 정렬기의 구성 및 특징을 설명한다. 둘째, 제안된 정렬기의 구동을 위하여 적용된 역기구학에 대해서 기술한다⁽⁵⁾. 셋째, 기하학적인 방법을 이용하여 제안된 정렬기의 작업영역의 해석에 대해서 기술한다⁽⁶⁾. 마지막으로 작업영역의 최대화를 통해 최적설계에 대해서 기술한다⁽⁷⁾.

2. 평면 3-PRR 병렬 정렬기

평면 병렬 정렬기는 x, y 그리고 θ_z 의 평면 움직임을 가지는 플랫폼을 포함하고 있다. 평면 병렬 정렬기는 각 조인트들이 어떠한 조합으로 연결되느냐에 따라서 다음과 같이 표현이 가

능하다: RRR, RPR, RRP, RPP, PPR, PRP, PPP⁽⁸⁾. Fig. 1에 이러한 조합들의 예시가 있다. 본 논문에서는 P는 능동 프리스매틱 조인트이며, R은 수동 회전 조인트를 의미한다. 또, P나 R에 밑줄은 능동 조인트를 의미한다.

제안된 평면 병렬 정렬기는 Fig. 2와 같이 대칭적인 동일한 PRR 다리 구조로 되어있으며, 각각의 다리는 기저부에 고정되어 플랫폼에 연결되어 있다. 다시 말해, 각 다리는 능동 프리스매틱 조인트와 수동 회전 조인트들로 이루어져 있으며, 세 개의 능동 프리스매틱 조인트를 구동하여 플랫폼의 평면 운동을 완성하게 된다. Grubler 식에 따라서 제안된 정렬기는 3 자유도

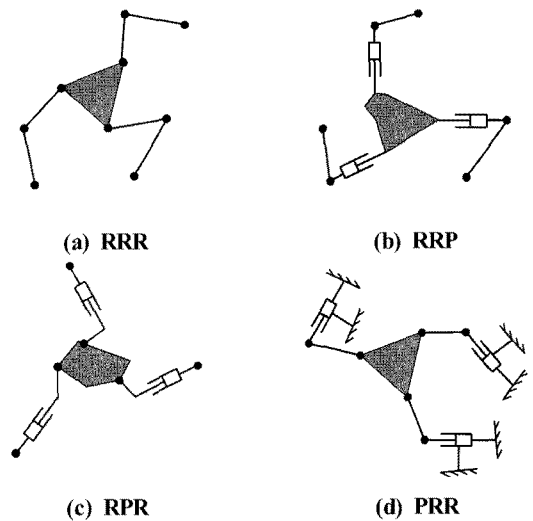


Fig. 1 Example of planar 3-DOF parallel manipulator

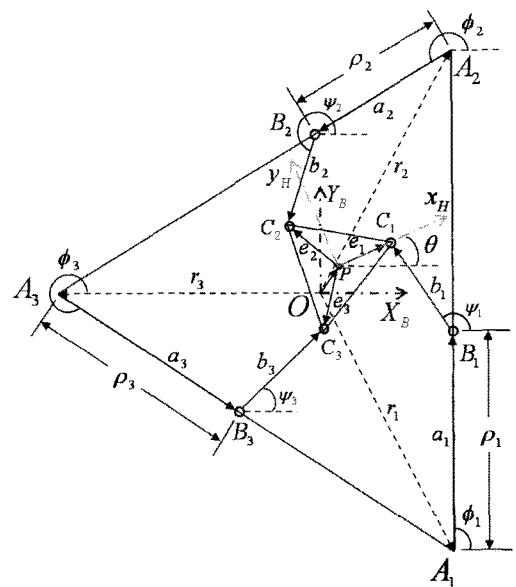


Fig. 2 Schematic Diagram of 3-PRR manipulator: {B} is fixed frame on the base and {H} is moving frame with platform

를 가지는 것을 확인 할 수 있다.

제안된 3-PRR 정렬기는 정삼각형 모양의 플랫폼 C_i ($i=1,2,3$)의 위치와 회전을 평면상에서 구현한다. 플랫폼의 기하학적 중심점은 P 이며 정렬기의 작동점이 된다. 평면상에서 해당 정렬기를 구동하기 위해, 세 개의 프리스매틱 조인트 구동거리 (ρ_1, ρ_2, ρ_3)는 입력 변수이다. 그리고 플랫폼의 중심점 P (x, y, θ)는 출력 변수가 된다. 정렬기의 기저부 또한 정삼각형 모양을 하고 있으며 꼭짓점은 A_1, A_2 그리고 A_3 이며 기하학적 중심점은 O 이다. 능동 프리스매틱 조인트는 기저부의 각 꼭짓점에 위치하며 방향은 ϕ_1, ϕ_2 그리고 ϕ_3 의 방향으로 향한다. 따라서 각 프리스매틱 조인트는 기저부 정삼각형의 각 변을 따라 움직이게 된다.

본 논문에서 제안된 병렬 정렬기는 개념설계 단계에서 두 가지의 요구 사항이 있다. 첫째, 정렬기의 크기는 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 이내를 만족해야 한다. 둘째, 플랫폼의 구동영역은 $x, y \sim \pm 1 \text{mm}$ 와 $\theta_z \sim \pm 0.5^\circ$ 를 만족해야 한다. 일반적인 정밀 시스템의 설계원리에 따라 구동기의 위치가 기저부에 고정되어 있으며 각 구동기의 방향은 120° 를 이루며 대칭적으로 배열되어 있다.

3. 역기구학

제안된 3-PRR 정렬기의 도식은 Fig. 2와 같다. 병렬 정렬기를 고려할 때 기구학적 기술은 중요하며, 이는 순기구학과 역기구학적인 문제를 통해 가능하다. 정렬기의 도식을 통해 점 C_i 를 기준점으로 기저부와 플랫폼의 연결 부분을 표현하면 다음과 같다.

$${}^B \underline{C}_i = {}^B \underline{P}_H + {}^B R^H \underline{C}_i = {}^B \underline{A}_i + \rho_i e^{i\phi_i} + b_i e^{i\psi_i} \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

$\{B\}$ 에 대한 C_i 의 위치는 ${}^B \underline{C}_i$ 이며, $\{H\}$ 에 대한 C_i 의 위치는 ${}^H \underline{C}_i$ 이다. 또한 ${}^B R^H$ 는 $\{H\}$ 에서 $\{B\}$ 로의 회전변환을 나타낸다.

식 (1)에서 ${}^B \underline{C}_i$ 와 우측 세 개의 항은 다음과 같이 표현 가능하다.

$${}^B x_{C_i} = {}^B x_{A_i} + \rho_i \cos \phi_i + b_i \cos \psi_i \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

$${}^B y_{C_i} = {}^B y_{A_i} + \rho_i \sin \phi_i + b_i \sin \psi_i \quad i=1, 2, 3 \quad (3)$$

또한 식 (1)에서 ${}^B \underline{C}_i$ 와 중간 두 개의 항은 다음과 같이 표현 가능하다.

$${}^B x_{C_i} = {}^B x_P + {}^H x_{C_i} \cos^B \theta - {}^H y_{C_i} \sin^B \theta \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

$${}^B y_{C_i} = {}^B y_P + {}^H y_{C_i} \cos^B \theta + {}^H x_{C_i} \sin^B \theta \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

식 (2)와 (3)의 ψ_i 는 삼각법 관계를 사용하여 소거하는 것이 가능하다. 따라서 ρ_i 에 대한 이차방정식을 얻어 낼 수 있으며 이 결과와 식 (4), (5)로부터 역기구학 문제의 닫힌 형태 해를 구하는 것이 가능하다. 점 P 에 대한 위치(${}^B x_P, {}^B y_P$)와 회전(${}^B \theta$)이 주어지면 프리스매틱 조인트 (ρ_i)의 구동거리를 계산할 수 있다. 따라서 역기구학을 통해 프리스매틱 조인트의 구동거리를 구하는 것이 가능하고, 총 8개의 해를 얻을 수 있다.

순기구학 문제는 역기구학 문제와 반대로 프리스매틱 조인트의 구동거리가 주어지면 플랫폼의 위치 P 와 회전을 구하는 것이다. 이것은 Gosselin과 Merlet이 해를 구하였다⁽⁹⁾. 순기구학 문제를 통해서 6개의 해를 얻을 수 있다.

기구학 문제의 해를 얻기 위해서 MATLABTM을 사용하였으며 3-PRR 정렬기의 기구학적 움직임에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 e_i 와 b_i 이 고정된 상황에서 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다.

4. 작업영역 해석

병렬 로봇을 설계하는 데 있어 고려해야 할 요소들은 여러 가지가 있지만, 병렬 로봇이 가지는 단점 중의 하나인 제한된 작업영역은 다른 요소들 보다 중요하게 고려되어야 한다. 본 논문에서는 기하학적인 접근을 통해, 제안된 평면 3-PRR (Prismatic-Revolute-Revolute) 병렬 로봇의 작업 영역 해석을 수행하였다.

Merlet 과 Gosselin은 병렬 로봇의 작업영역 해석을 위한 일반적인 알고리즘을 제안하였으며 요약하면 다음과 같다⁽¹⁰⁾. 첫째, 각 다리의 구속조건을 고려하여 이동 가능한 영역을 나타내는 곡선을 찾는다. 둘째, 각 다리의 곡선들이 겹치는 교점을 찾는다. 셋째, 교점을 이용하여 각 다리들이 나타내는 곡선을 분할한다. 마지막으로 각 다리들의 이동 가능 영역 중, 교집합 영역을 분할된 곡선을 이용해서 찾는다. 단, 플랫폼의 회전은 고정되어 있는 상태에서 진행한다. 본 논문에서 제안된 정렬기는 이러한 알고리즘을 적용하여 작업영역 해석을 수행하였다.

Fig. 1로부터, 작업영역을 나타내는 곡선들 중에 각 다리의 바깥쪽 곡선을 나타내는 곡선을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$${}^B x_P = x_{A_i} + \rho_{i,\min} \cos \phi_i + b_i \cos \eta_i - ({}^H x_{C_i} \cos^B \theta - {}^H y_{C_i} \sin^B \theta) \quad (6)$$

$${}^B y_P = y_{A_i} + \rho_{i,\min} \sin \phi_i + b_i \sin \eta_i - ({}^H x_{C_i} \sin^B \theta + {}^H y_{C_i} \cos^B \theta) \quad (7)$$

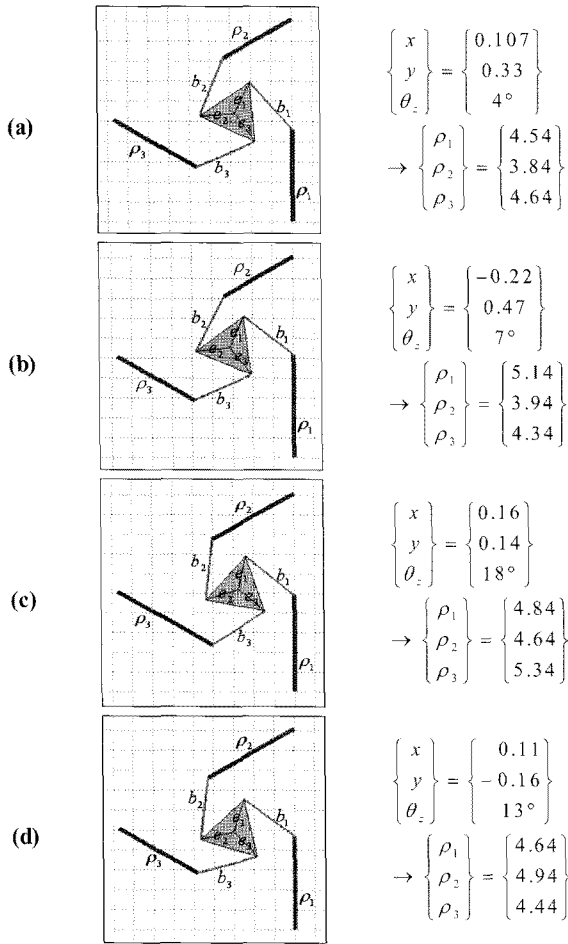


Fig. 3 Simulation of 3-PRR manipulator for position kinematics, where $e_{1, 2, 3} = 1.3\text{mm}$ and $b_{1, 2, 3} = 3.1\text{mm}$

이때, $\rho_{i, \min}$ 과 $\rho_{i, \max}$ 는 각 프리스매틱 조인트 변수값의 최소값과 최대값이다.

η_i 는 아래와 같은 조건이다.

$$\phi_i - \frac{3\pi}{2} \leq \eta_i \leq \phi_i - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

그리고 나머지 하나의 반원 곡선은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} {}^B x_P &= x_{Ai} + \rho_{i, \max} \cos \phi_i + b_i \cos \eta_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \cos {}^B \theta - {}^H y_{Ci} \sin {}^B \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} {}^B y_P &= y_{Ai} + \rho_{i, \max} \sin \phi_i + b_i \sin \eta_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \sin {}^B \theta + {}^H y_{Ci} \cos {}^B \theta) \end{aligned} \quad (10)$$

또한, 이때의 η_i 는 아래와 같은 조건이다.

$$\phi_i - \frac{\pi}{2} \leq \eta_i \leq \phi_i + \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

다음 단계는 제안된 병렬 정렬기가 빈(void) 영역을 가지지에 대한 판단을 수행한다. 아래의 테스트를 통해 정렬기의 빈 영역 유무를 판단한다.

$$\rho_{i, \max} - \rho_{i, \min} < 2b_i \quad (12)$$

제안된 정렬기는 식 (12)을 만족한다. 따라서 빈 영역을 가지게 되고 이에 따라 빈 영역을 나타내기 위한 내부 곡선들을 나타낸다.

내부 두 개의 곡선들은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} {}^B x_P &= x_{Ai} + \rho_{i, \min} \cos \phi_i + b_i \cos \varepsilon_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \cos {}^B \theta - {}^H y_{Ci} \sin {}^B \theta) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} {}^B y_P &= y_{Ai} + \rho_{i, \min} \sin \phi_i + b_i \sin \varepsilon_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \sin {}^B \theta + {}^H y_{Ci} \cos {}^B \theta) \end{aligned} \quad (14)$$

이때, ε_i 와 V_i 는 아래와 같은 조건이다.

$$\phi_i - \cos^{-1}(V_i) \leq \varepsilon_i \leq \phi_i + \cos^{-1}(V_i) \quad (15)$$

$$V_i = \frac{\rho_{i, \max} - \rho_{i, \min}}{2b_i} \quad (16)$$

그리고 나머지 내부의 곡선은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} {}^B x_P &= x_{Ai} + \rho_{i, \max} \cos \phi_i + b_i \cos \varepsilon_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \cos {}^B \theta - {}^H y_{Ci} \sin {}^B \theta) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} {}^B y_P &= y_{Ai} + \rho_{i, \max} \sin \phi_i + b_i \sin \varepsilon_i \\ &\quad - ({}^H x_{Ci} \sin {}^B \theta + {}^H y_{Ci} \cos {}^B \theta) \end{aligned} \quad (18)$$

이때, ε_i 는 아래와 같은 조건이다.

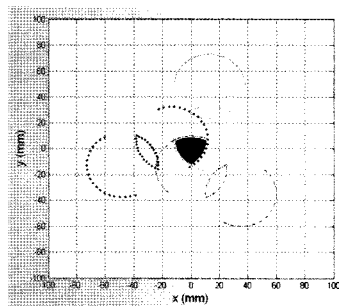
$$\phi_i - \cos^{-1}(V_i) + \pi \leq \varepsilon_i \leq \phi_i + \cos^{-1}(V_i) + \pi \quad (19)$$

위의 수식을 이용하여 평면 3-PRR 정렬기 작업영역 해석을 수행한 예시는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 식 (12)의 빈 공간 판별

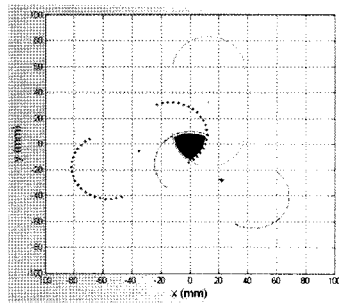
식에 따른 세 가지 경우를 보여준다. (a)는 빈 공간이 발생하는 조건을 만족시킨 경우이며, (b)는 내부 곡선이 접하는 경우이다. 따라서 다리가 움직일 수 없는 영역이 각각 한 점으로 나타난다. 그리고 (c)는 빈 공간이 발생하지 않는 경우를 나타낸다. Fig. 4는 $b_i = b$, $\rho_{i,max} = \rho_{max}$, 그리고 $\rho_{i,min} = \rho_{min}$ 의 조건에서 수행되었다.

5. 최적설계

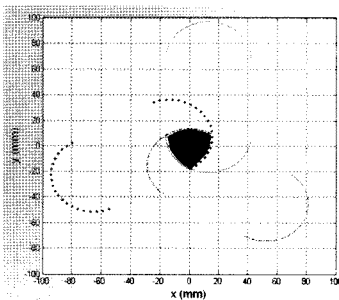
최적화 문제 기술의 목적은 병렬 구조 정렬기가 최대 작업영역을 갖기 위한 최적 변수를 찾기 위함이다. 본 논문에서 제안된 메커니즘의 작업영역 해석은 정렬기 크기 제한으로 인해 여러 구속조건 하에서 수행된다. 최적설계 결과는 요구되는 작업영역의 범위를 비교하게 평가되며, 작업영역 해석을 바탕으로 시각적인 확인이 수행된다.



(a) $\rho_{i,max} - \rho_{i,min} < 2b_i$



(b) $\rho_{i,max} - \rho_{i,min} = 2b_i$



(c) $\rho_{i,max} - \rho_{i,min} > 2b_i$

Fig. 4 Example of workspace analysis

5.1 최적화 목적

병렬 정렬기의 작업영역은 설계 시 반드시 고려되어야 할 사항 중 하나이다. 작업영역은 기저부의 중심점을 기준으로 플랫폼의 중심점이 움직이는 영역을 계산해서 확인 가능하다. 병렬 정렬기의 단점 때문에 작업영역의 크기와 형상은 병렬 정렬기의 성능 평가에 있어 가장 우선시 된다.

병렬 메커니즘의 최적화 설계를 위한 작업영역 해석은 서로 다른 두 가지 방법으로 구분된다⁽¹¹⁾. 첫 번째 방법은 병렬 정렬기에 요구되는 작업영역을 만족시킬 수 있는 설계를 하는 것이다. 두 번째 방법은 구속조건 하에서 병렬 정렬기가 최대의 작업영역을 가질 수 있도록 설계하는 것이다. 하지만 두 번째 방법은 정렬기의 민첩성(dexterity)과 조작성(manipulability) 측면에서 좋지 않은 결과를 초래할 수도 있으며, 작업영역의 크기가 최대화 되었지만 그 형상이 적절하지 않을 수도 있다. 이러한 문제는 최적화 문제를 정의할 때 적절한 구속조건을 사용하면 해결 가능하다. 본 논문에서는 적절한 구속조건을 사용하여, 제안된 병렬 정렬기가 최대의 작업영역을 갖도록 최적화 문제를 기술한다.

병렬 정렬기의 작업영역을 확인하고 목적함수를 계산하기 위해서 제안된 병렬 정렬기의 잠재적 전체 작업영역을 Fig. 5와 같이 도입한다. 이것을 이용한 수치적인 해를 찾는 과정은 다음과 같다.

- 단계 1: 정렬기의 가능한 전체 작업영역을 고려한다.
- 단계 2: 가능한 잠재적 전체 작업영역 내부에 임의의 점들을 선정하고 그 점들의 총 개수(n_{total})를 고려한다.
- 단계 3: 모든 임의의 점들을 앞서 계산된 역기구학 문제에 대입하여 ρ_i 값을 얻는다. 이때 프리스매틱 조인트의 구속조건 (ρ_{min} 과 ρ_{max})을 고려하여 ρ_i 가 원하는 범위 내에 있는지 판단한다.
- 단계 4: ρ_i 가 원하는 범위 내에 있게 하는 출력 P 점들의 개수(n_{in})를 헤아린다.
- 단계 5: 작업영역의 최대화를 위하여 잠재적 전체 작업영역 내부의 임의의 점들 총 개수와 ρ_i 가 주어진 범위에서 변할 때 얻을 수 있는 P 의 개수의 비를 계산하여 가장 큰 값을 찾는다.

$$W = \frac{n_{in}}{n_{total}} \quad (20)$$

5.2 구속조건 및 설계변수

본 논문에서 제안된 병렬 정렬기는 휴대전화 카메라 모듈 조립 같은 마이크로 부품 정렬에 적용된다. 마이크로팩토리 분야의 특성상 정렬기의 소형화가 요구되며 이에 따라 형상과 구동

기의 구동범위에 관한 구속이 고려되었다. 최적화 설계를 위한 요소들의 구속조건 및 설계 변수는 다음과 같다.

- 프리스매틱 조인트들은 기저부에 고정되어 있으며 서로 120° 를 이루며 대칭적으로 위치하고 있다.
- 작업영역의 최대화 시, 작업영역의 형상을 고려하고 대칭적인 결과를 얻기 위해 이와 같은 구속조건을 둔다.
 $b = b_1 = b_2 = b_3, e = e_1 = e_2 = e_3, r = r_1 = r_2 = r_3$
- 프리스매틱 조인트들 간의 간섭을 피하기 위해서 기하학적인 구속조건을 준다.

$$0 \leq \rho_i \leq \sqrt{3}r \quad (21)$$

- 앞서 언급된 설계 요소들은 제안된 평면 3-PRR 병렬 정렬기의 설계변수(e, r, b)이다. 설계변수는 다음과 같이 나타낸다.

$$x = [e \ r \ b]^T \quad (22)$$

5.3 최적화 문제의 기술

앞서 기술된 평면 3-PRR 병렬 정렬기의 최적화 문제는 다음과 같이 정리된다. 제시된 구속조건 하에서 최대의 작업영역을 갖는 평면 3-PRR 병렬 정렬기 최적설계변수 x 의 값을 찾는다. 또한 최적화 문제는 식 (23)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad f(x) = W \\ & \text{over} \quad x = [e \ r \ b]^T \\ & \text{subject to:} \quad g_1 : 0 \leq \rho_i \leq \sqrt{3}r \\ & \quad \quad \quad g_2 : x_{lb} \leq x \leq x_{ub} \end{aligned} \quad (23)$$

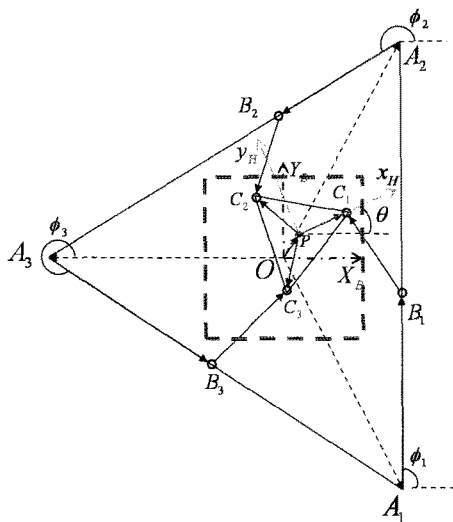
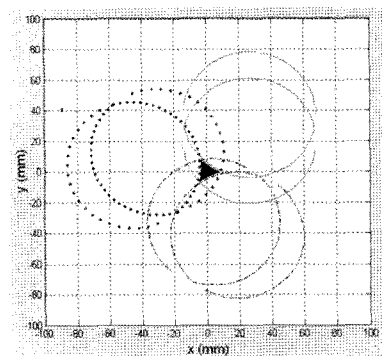


Fig. 5 Possible Workspace: dotted square is entire possible workspace

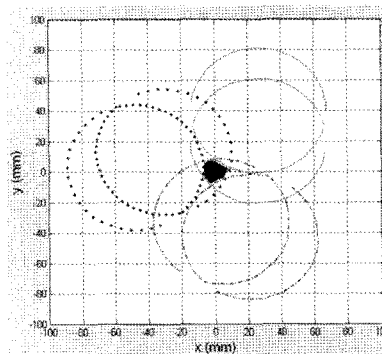
이때, x_{lb} 와 x_{ub} 는 최적설계변수 x 의 최소값과 최대값을 나타내는 경계조건이다.

6. 결과

식 (23)의 최적화 문제는 상용 프로그램인 MATLAB™ Optimization Toolbox를 사용하여 해결하였다. 설계변수의 최소값과 최대값은 Table 1에 나타나있다. 앞서 언급한 바와 같이, 제안된 병렬 정렬기의 크기 제한과 기하학적으로 조립을 하기위한 제한 조건이 반영되었다. Table 2에는 제안된 최적화 문제 접근을 통해 얻은 결과이다. 결과값을 통해서 e 는 경계조건인 최대값을 가지며 반대로 r 은 경계조건인 최소값을 가짐을



(a) Workspace of the proposed manipulator, when $W = 0.1439$



(b) Workspace of the proposed manipulator, when $W = 0.2608$

Fig. 6 Maximum workspace of the proposed manipulator

Table 1 Lower and upper bounds of the design variable

Design variable	e	r	b
x_{lb} (Lower Bound)[mm]	0	59	35
x_{ub} (Upper Bound)[mm]	10	61	45

Table 2 Optimal solutions of the proposed approach

Objective	Design variable		
W (Workspace)	e	r	b
0.2608	9	59	41

확인할 수 있다. 제안된 최적설계 접근을 통해 3-PRR 정렬기의 목적함수 (W)는 0.2608인 것을 확인하였으며, 이 때 최대 작업영역을 가진다.

앞서 수행된 작업영역 해석의 결과와 최적값을 이용하여 시각화를 수행하였다. 이것은 Fig. 6에 나타나 있으며, 최적설계 변수(b)를 이용했을 때 최적설계 변수가 아닌(a) 작업영역 보다 넓은 것을 직관적으로 확인할 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 평면 3 자유도 병렬 정렬기의 개념설계가 수행되었으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제안된 정렬기는 크기 제한을 가지는 소형의 정렬 장치로 적용되므로 구동기의 위치와 방향이 고정되는 특징을 가진다.
- (2) 제안된 접근법을 통하여 정렬기의 최적설계가 수행되었으며, 최적 변수값을 얻기 위해 역기구학과 작업영역 해석이 수학 방정식을 통해 수행되었다. 이는 시뮬레이션을 통해 결과값을 시각적으로 확인하였다.
- (3) 개념설계 단계에서 요구되는 조건은 두 가지로서 제안된 정렬기의 크기 ($100 \times 100 \text{ mm}^2$)와 플랫폼의 운동 영역 ($x, y \sim \pm 1 \text{ mm}$ 와 $\theta_z \sim \pm 0.5^\circ$)이다. MATLABTM을 이용한 시뮬레이션을 통해 플랫폼의 작업영역이 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원을 받아서 차세대 신기술개발사업의 일환으로 수행된 연구 결과입니다.

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Park, J. K., 2002, "Technical Trends of Micro Factory," *Journal of KSPE*, Vol. 19, No. 10, pp. 7~14.
- (2) Hay, A. M., and Snyman, J. A., 2004, "Methodologies for the Optimal Design of Parallel Manipulators," *Int.*

- J. Numerical Methods Eng.*, Vol. 59, pp. 131~152.
- (3) Gosselin, C. M., and Angeles, J., 1988, "The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-degree-of-freedom Parallel Manipulator," *J. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 110, No. 1, pp. 35~41.
- (4) Kim, H. S., 2010, "Development of a New 6-DOF Parallel-type Motion Simulator", *Journal of KSMTE*, Vol. 19, No. 2, pp. 171~177.
- (5) Lee, J.-J., Dong, Y., Lee, C.-W., Song, J. Y., Lee, H. J., and Lee, M. G., 2010, "Design Optimization of Planar 3-DOF Parallel Manipulator for Alignment of Micro-components", *Proceeding of the International Conference of Micro Manufacturing*, pp. 583~588.
- (6) Lee, J.-J., Yoo, Y.-H., Lee, C.-W., Song, J. Y., Lee, S.-H., Hong, M.-S., and Lee, M. G., 2010, "Inverse Kinematics of Planar Parallel 3-PRP Manipulator for Micro-components Mignment", *Proceeding of the International Workshop on Microfactories*, pp. 302~307.
- (7) Lee, J.-J., Dong Y., Lee, C.-W., Song, J. Y., and Lee, M. G., 2011, "Workspace Analysis of Planar 3-DOF Parallel Manipulator for Alignment of Micro-componets", *Proceeding of the KSMTE Spring Conference*, pp. 47~48.
- (8) Merlet, J.-P., 2006, *Parallel Robots 2th Ed.*, G.M.L. Gladwell, Springer, Netherlands, pp. 21~23.
- (9) Gosselin, C. M., and Merlet, J.-P., 1994, "The direct kinematics of planar parallel manipulators: special architectures and number of solutions," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 29, No. 8, pp. 1083~1097.
- (10) Gosselin, C. M., Lemieux, S., and Merlet, J.-P., 1996, "A New Architecture of Planar Three-degree-of-freedom Parallel Manipulator," *Proceeding of Int. Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3738~3743.
- (11) Stamper, R. E., Tsai, L.-W., and Walsh, G. C., 1997, "Optimization of a Three-dof Translational Platform for Well-conditioned Workspace," *Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3250~3255.