

평행사변형 기구를 이용한 평면 병렬형 병진운동 기구 개발

김한성[#]

Development of Two Types of Novel Planar Translational Parallel Manipulators by Using Parallelogram Mechanism

Han Sung Kim[#]

ABSTRACT

In this paper, two types of novel planar Translational Parallel Manipulators (TPMs) by using parallelogram mechanism are conceived. One is made up of two *Pa-P* (Parallelogram-Prismatic) legs connecting the base to the moving platform. The other consists of two *P-Pa* legs, which is the kinematic inversion of the former. Since connecting links in a parallelogram mechanism are subject to only tensile/compressive load and all the heavy actuators are mounted at the base, the proposed manipulators can be applied for planar positioning/assembly tasks requiring high stiffness and high speed. The position, velocity, and statics are analyzed, and the design methodology using prescribed workspace and velocity transmission capability is presented. Finally, two types of prototype manipulators have been developed.

Key Words : translational parallel manipulator (병렬형 병진운동 기구), parallelogram mechanism (평행사변형 기구), kinematic inversion (기구학적 전이), prescribed workspace (규정된 작업영역), velocity transmission capability (속도 전달능력)

1. 서론

전자, 포장, 식품, 제약 산업 등에서 많이 요구되는 위치배치, 조립 및 경가공 작업들은 주로 3 또는 4 자유도 직교 구조나 SCARA 구조의 직렬형 로봇에 의존되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 직렬형 로봇은 이동부의 관성이 상대적으로 크고 자체중량에 비하여 작업하중은 상당히 작은 편이다. 따라서, 이러한 직렬형 로봇을 고속 또는 비교적 큰 작업하중이 요구되는 작업에 적용하는 데는 어려움이 있다. 반면, 병렬형 기구는 이동 플랫폼이 고정부에 다수의 직렬체인 또는 다리로 연결된 구

조를 갖는다. 일반적으로 구동부가 고정부 근처 또는 고정부에 위치하므로, 이동부의 관성이 작아 고속작업이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한, 이동 플랫폼의 작업하중이 여러 개의 직렬체인 및 구동기에 분산되므로, 고강성 및 고하중 작업이 가능한 장점을 갖는다.

최근, 이러한 직교 로봇 또는 SCARA 로봇을 대체할 수 있는 3 자유도 또는 4 자유도 병렬형 로봇 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 많은 연구들이 3 자유도 병렬형 병진운동 기구 개발에 집중되고 있고, 이중 대표적으로 상업화된 Delta 로봇 등이 있다.¹⁻⁴ 그러나 Z 축 방향으로 요구되는 작동

접수일: 2007년 1월 9일; 게재승인일: 2007년 6월 27일

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2627

범위가 상대적으로 작은 작업의 경우, 3 자유도 공간 병렬형 병진운동 기구 대신 2 자유도 평면 병렬형 병진운동 기구에 소형의 1 자유도 기구를 직렬로 연결한 혼합형 구조(hybrid structure)를 사용하는 것이 보다 경제적이 될 수 있다.

대표적인 2 자유도 평면기구로는 $RRRRR$ (R : revolute) 구조를 갖는 5 절 기구⁵ 및 pantograph⁶가 있다. 또한, 회전 구동기 대신 선형 구동기를 사용한 $PRRRP$ 기구⁷가 있다. 이러한 구조의 평면기구는 이동 플랫폼의 위치에 따라 이의 각도가 변화한다는 단점을 갖고 있다. 2 자유도 평면 병진운동 기구를 만들 수 있는 간단한 방법은 $2-PP$ 구조를 사용하는 방법이다.⁸ 그러나 이러한 방법은 선형 구동기에 큰 모멘트가 작용될 수 있다는 단점을 갖는다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 최근 평행사변형 기구를 이용하는 사례가 발표되고 있다.^{9, 12} 평행사변형 기구는 출력링크의 각도가 일정하게 유지되는 1 자유도 기구로 이동 플랫폼의 각도를 구속하는 역할을 한다. 또한, 출력링크에 작용하는 힘 또는 모멘트를 출력링크에 연결된 링크들에 분산시키므로 강성측면에서 유리하다. Li와 Xu⁹는 유연한 조인트(flexible joint)를 사용하여 $2-PPa$ 구조의 병렬형 병진운동 기구를 설계하고 이를 나노(nano) 작업에 적용하였다. Liu와 Wang¹⁰은 2 개의 선형 구동기를 서로 평행하게 배치한 $2-PPa$ 구조 병렬형 병진운동 기구를 설계하였다. 또한, 평행사변형 기구를 사용하는 2 자유도에서 6 자유도 병렬형 기구들을 제안하였다.¹¹ Huang 등은 $2-PaPa$ 구조를 갖는 병렬형 병진운동 기구를 제안하고 이를 고속 조립작업에 적용하였다.¹² Kong과 Gosselin은 입출력이 비연성화된 병렬형 기구의 합성방법을 제안하였다.¹³ 한편, 평행사변형 기구를 이용한 다양한 구조의 3 자유도 병렬형 병진운동 기구들도 제안되었다.^{1, 2, 14}

본 논문에서는 평행사변형 기구를 사용하는 새로운 두 가지 구조의 평면 병렬형 병진운동 기구를 제안하고 이의 설계방법을 제시하고자 한다. 첫 번째 기구는 $2-PaP$ 구조를 갖고 비교적 저렴한 회전 구동기를 사용하여 평행사변형 기구를 구동한다. 이 기구는 입력과 출력이 비연성화되어 제어가 간단하고 고속작업에 적합한 구조를 갖는다. 두 번째 기구는 $2-PPa$ 구조를 갖고 $2-PaP$ 와 기구학적 전이(kinematic inversion) 관계를 갖는다. 이 기구는 두 개의 선형 구동기를 수직으로 배치하여 기존에

평행하게 배치한 $2-PPa$ 기구¹⁰에 비하여 높은 속도전달능력을 갖고 상대적으로 작은 횡방향 하중이 작용된다는 장점을 갖는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 제안하는 기구들의 기구학적 구조 및 해석방법을 설명하고, 3 장에서는 설계 고려사항을 제시하고 4 장에서는 규정된 작업영역과 설계지수를 이용하여 설계된 $2-PaP$ 및 $2-PPa$ 기구의 시작품을 제시한다.

2. 기구학적 구조 및 해석

본 장에서는 제안하는 $2-PaP$ 및 $2-PPa$ 기구의 기구학적 구조를 설명하고 해석방법을 제시하고자 한다. 먼저, Fig. 1과 같이 $2-PaP$ 기구에서는 이동 플랫폼이 동일한 두 개의 다리에 의하여 고정부에 연결된다. 각 다리는 평면 4 절 평행사변형 기구와 직선 조인트로 구성된다. 여기서, 각 평행사변형 기구는 마주보는 두 변의 길이가 서로 같으므로 고정링크와 마주보는 출력링크의 각도가 일정하게 유지된다. 링크와 1 자유도 조인트 개수가 각각 8 개 및 10 개 이므로 Grübler 자유도 공식에 의하면 이 기구는 1 자유도를 갖는다. 그러나, 양쪽 다리 모두 이동 플랫폼의 회전을 구속하므로 회전구속조건이 충족된다. 따라서, 이 기구는 평면 병진운동만이 가능한 2 자유도 과구속(over-constrained) 기구가 된다. 각 평행사변형 기구는 고정링크와 출력링크를 연결하는 두 개의 회전링크 중 하나를 회전 구동기로 구동한다. 한편, 이동 플랫폼에 부착된 2 개의 직선 조인트는 Oldham 커플링과 같이 서로 수직으로 교차되어 배치된다. 한쪽 다리의 회전 구동기에 의하여 구동되는 출력링크의 이동 방향이 다른 쪽 다리에 있는 수동 직선 조인트와 평행하므로 입력과 출력이 비연성화된 병렬형 기구(input-output decoupled parallel manipulator)가 된다.

다음, Fig. 2에 도시된 바와 같이 $2-PPa$ 기구의 각 다리는 직선 조인트와 평행사변형 기구로 구성된다. 이 기구는 $2-PaP$ 와 기구학적 전이(kinematic inversion) 관계를 가짐을 알 수 있다. 이 기구는 선형 구동기에 의하여 구동되고 평행사변형 기구는 직선 조인트 축에 수직인 방향으로 수동적으로 움직인다. 양쪽 다리 모두 이동 플랫폼의 회전을 구속하므로 회전구속조건이 충족된다. 따라서 이 기구도 평면 병진운동만이 가능한 2 자유도 과구

속 기구가 된다. 평행사변형 기구의 회전링크에 순 인장/압축력만 작용하므로 2-PaP 기구에 비하여 구조적으로 고강성을 갖는다. 회전링크와 선형 구동기 축간의 각도가 선형 구동기를 평행하게 배치한 2-PPa 기구¹⁰에 비하여 작으므로 상대적으로 높은 속도전달 능력을 갖고 작은 횡방향 하중이 선형 구동기에 작용된다.

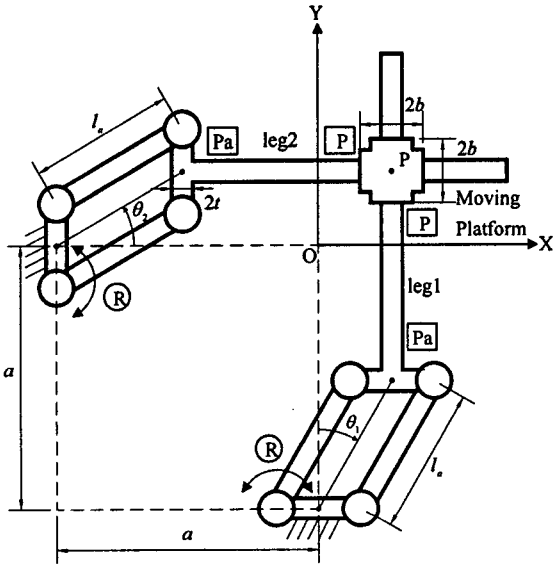
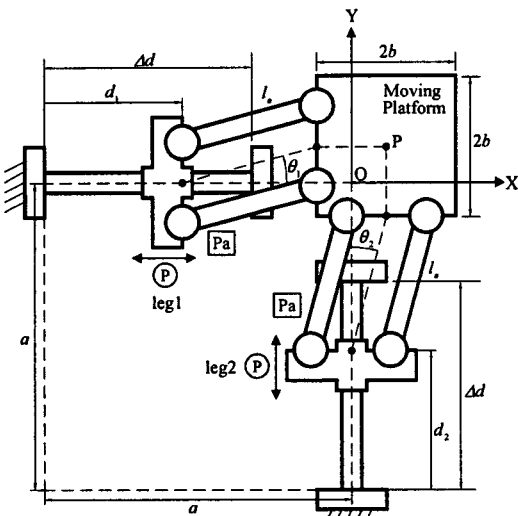


Fig. 1 2-PaP TPM with rotary actuation



(사각형: 수동조인트, 원: 구동조인트)
Fig. 2 2-PPa TPM with linear actuation

2.1 2-PaP 기구 해석

Fig. 1 에서 도시된 바와 같이, 고정 좌표계 OXY 에서 표현된 이동 플랫폼 P 점의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a \sin \theta_1 \\ l_a \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, l_a 는 평행사변형 기구의 회전링크 길이를 나타낸다. 이 기구의 역기구학 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^{-1}(p_x / l_a) \\ \sin^{-1}(p_y / l_a) \end{bmatrix} \quad (2)$$

만약, $p_x > l_a$ 또는 $p_y > l_a$ 인 경우, 이 기구는 작업영역 밖에 있음을 알 수 있다.

식 (1)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같은 속도관계를 얻을 수 있다.

$$\dot{p} = J \dot{\theta} \quad (3)$$

여기서, $\dot{p} = [\dot{p}_x, \dot{p}_y]^T$, $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ 이고, 자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$J = l_a \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

가상일의 원리를 적용하면 정역학적 관계는 다음과 같다.

$$\tau = J^T f \quad (5)$$

여기서, $f = [f_x, f_y]^T$ 는 P 점에 작용하는 힘 벡터를, $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ 는 구동력 벡터를 나타낸다.

오프셋 길이 a 가 회전 링크 길이 l_a 보다 충분히 크고 평행사변형 기구의 회전링크의 작동범위를 $|\theta_i| \leq \theta_{li}$ 로 동일하게 제한한다면, Fig. 3 에 나타난 바와 같이 P 점이 움직일 수 있는 영역은 정사각형이 됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 제안하는 기구의 형상 및 기구의 성능을 나타내는 자코비안 행렬이 원점에 대하여 대칭이므로 원점에 대하여 대칭적인 성능을 갖는 작업영역을 확보하기 위하여, 중심이 원점인

정사각형을 규정된 작업영역(prescribed workspace)으로 정의한다. 만약, 3 장에서 제시될 설계지수에 의하여 θ_L 이 결정되었다고 가정하면, Fig. 3 과 같이 규정된 정사각형 작업영역을 만족하도록 하는 l_o 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$l_o = w / \sin \theta_L \quad (6)$$

주어진 t 와 b 에 대하여, 구동기의 회전 작동범위($2\theta_L$)를 확보하기 위하여 필요한 a 의 최소길이를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$a_{\min} = l_o(1 + \sin \theta_L) + t + b \quad (7)$$

이때, 필요한 직선축의 최소길이는 다음과 같다.

$$L_{\min} = l_o(1 + 2 \sin \theta_L - \cos \theta_L) + 2(t + b) \quad (8)$$

2.2 2-PPa 기구 해석

Fig. 2 에서 나타낸 바와 같이, 고정 좌표계 OXY 에 대하여 표현된 이동 플랫폼상의 점 P 는 다음과 같은 vector-loop 방정식을 만족하여야 한다.

$$p = -ae_i + d_i e_i + l_o s_i + be_i, \quad \text{for } i=1,2 \quad (9)$$

여기서, $p = [p_x, p_y]^T$ 이고, e_i 와 s_i 는 각각 직선 조인트 및 평행사변형 기구 회전링크(l_o)의 단위방향벡터를 나타낸다. 식 (9)를 다시 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

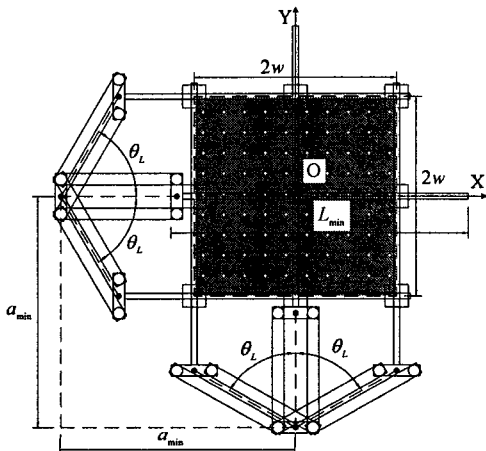


Fig. 3 Workspace analysis of a 2-PaP TPM

$$l_o s_i = m_i - d_i e_i, \quad \text{for } i=1,2 \quad (10)$$

여기서, $m_i \equiv p + ae_i - be_i$ 이다.

각 변끼리 내적을 취한 후, d_i 에 대하여 정리하면 다음과 같은 역기구학 식을 유도할 수 있다.

$$d_i = m_i^T e_i \pm \sqrt{(m_i^T e_i)^2 - m_i^T m_i + l_o^2} \quad (11)$$

식 (11)은 2 개의 해를 가질 수 있으나, 양의 제곱근의 경우 선형 구동기의 구동범위 밖에 존재하므로 음의 제곱근값 만을 고려한다. 따라서, 선형 구동기의 길이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1 &= (p_x + a - b) - \sqrt{l_o^2 - p_y^2}, \\ d_2 &= (p_y + a - b) - \sqrt{l_o^2 - p_x^2} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (9)를 벡터 p 에 관하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$p - n_i = l_o s_i, \quad \text{for } i=1,2 \quad (13)$$

여기서, $n_i \equiv d_i e_i + be_i - ae_i$ 이다. $c_i = d_i + b - a$ 로 정의하면, $n_1 = [c_1, 0]^T$ 이고 $n_2 = [0, c_2]^T$ 가 된다. 각 변끼리 내적을 취하면 다음과 같다.

$$p^T p - 2n_i^T p + n_i^T n_i = l_o^2 \quad \text{for } i=1,2 \quad (14)$$

식 (14)는 중심이 n_i 이고 반지름이 l_o 인 두 원을 나타낸다. 따라서, 점 P 는 두 원의 교차점으로 결정된다. 2 개의 교차점은 원의 중심을 잇는 선분에 대칭이고 선분 위쪽에 있는 교차점이 초기형상과 일치하므로 음의 제곱근값 만을 순기구학 해로 다음과 같이 선택하였다.

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{1}{2} \left(c_1 - c_2 \sqrt{\frac{4l_o^2}{c_1^2 + c_2^2} - 1} \right), \\ p_y &= \frac{1}{2} \left(c_2 - c_1 \sqrt{\frac{4l_o^2}{c_1^2 + c_2^2} - 1} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

속도관계를 유도하기 위하여, 식 (9)를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{p} = \dot{d}_i e_i + l_o (\omega_i \times s_i) \quad \text{for } i=1,2 \quad (16)$$

여기서, ω_i 는 i 번째 다리의 회전링크 l_a 의 각속도이다. 미지의 ω_i 를 소거하기 위하여, s_i^T 를 양변에 곱하면 다음과 같다.

$$s_i^T \dot{p} = (s_i^T e_i) \dot{d}_i \quad \text{for } i=1,2 \quad (17)$$

식 (17)을 행렬 및 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$J_x \dot{p} = J_q \dot{d} \quad (18)$$

여기서, $\dot{p} = [\dot{p}_x, \dot{p}_y]^T$, $\dot{d} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2]^T$ 이고,

$$J_x = \begin{bmatrix} s_1^T \\ s_2^T \end{bmatrix}, J_q = \begin{bmatrix} s_1^T e_1 & 0 \\ 0 & s_2^T e_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

식 (19)를 평행사변형 기구의 회전링크와 해당되는 축과의 각도(θ_i)로 표현하면 다음과 같다.

$$J_x = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix}, J_q = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

따라서, 속도관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J \dot{p} = \dot{d} \quad (21)$$

여기서,

$$J = J_q^{-1} J_x = \begin{bmatrix} 1 & \tan\theta_1 \\ \tan\theta_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

한편, 정역학적 관계는 다음과 같다.

$$f = J^T \tau \quad (23)$$

여기서, $f = [f_x, f_y]^T$ 는 P 점에 작용하는 힘 벡터를, $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ 는 구동력 벡터를 나타낸다.

각 다리는 선형 구동기와 평행사변형 기구로 구성되므로, 각 다리에 의하여 P 점이 움직일 수 있는 영역의 형상은 Fig. 4 와 같다. 예를 들어, 첫 번째 다리에 의하여 움직일 수 있는 영역의 형상은 좌우가 반지름이 l_a 인 반원이고 높이가 $2l_a$ 인 도형이 된다. 따라서, 이 기구의 총 작업영역은 두 도형의 교차영역으로 결정된다. 그러나, Fig. 4 에서

보는 바와 같이, 총 작업영역의 왼쪽 아래 부분은 실제 사용이 불가능하므로, 유효 작업영역 ($2w \times 2w$)을 총 작업영역에 내접하고 중심이 원점인 정사각형으로 규정하였다.

만약, θ_L 이 설계지수에 의하여 결정되었다고 가정하면, 규정된 작업영역을 만족하는 평행사변형 기구의 회전링크 길이 l_a 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$l_a = w / \sin\theta_L \quad (24)$$

Fig. 4 를 참조하면, $d_i = 0$ 일 때 점 P 는 Q_0 에 위치하고, $d_i = \Delta d$ 일 때 점 P 는 Q_2 점에 위치할 경우, 선형 구동기의 행정길이를 최대로 활용할 수 있음을 알 수 있다. 이를 역기구학 식을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$0 = (-w + a - b) - l_a, \quad (25)$$

$$\Delta d = (w + a - b) - \sqrt{l_a^2 - w^2}$$

b 가 주어졌을 때, 식 (24)와 식 (25)로부터 a 와 Δd 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$a = w \left(1 + \frac{1}{\sin\theta_L} \right) + b, \quad (26)$$

$$\Delta d = w \left(2 + \frac{1}{\sin\theta_L} - \sqrt{\frac{1}{\sin^2\theta_L} - 1} \right)$$

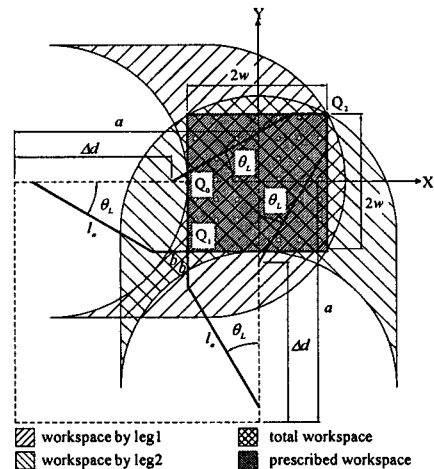


Fig. 4 Workspace analysis of a 2-PPa TPM

3. 설계 고려사항

본 연구에서 제안하는 기구는 고속 작업에 적합한 기구이므로 속도 전달능력을 설계지수로 고려한다. 본 장에서는 속도 전달능력을 고려하여 θ_L 을 결정하는 방법을 제시하고 기구들의 성능을 정량적으로 비교하고자 한다.

속도관계식으로부터 속도전달 타원을 유도할 수 있고 이 타원의 최소 반지름은 모든 방향으로 생성할 수 있는 속도 전달능력의 최대값에 해당된다.¹⁵ 본 연구에서는 이를 지역설계지수(LDI, Local Design Index)로 다음과 같이 정의한다.

$$LDI \equiv \alpha_{\min} \quad (27)$$

여기서, 2-PaP 기구의 경우 α_{\min} 은 JJ^T 의 최소 고유치의 제곱근 값이 되고, 2-PPa 기구의 경우 α_{\min} 은 $(JJ^T)^{-1}$ 의 최소 고유치의 제곱근 값이 된다.

규정된 작업영역에서 지역설계지수의 최대값대 최소값의 비율을 전역설계지수(GDI, Global Design Index)로 정의하면 다음과 같다.

$$GDI \equiv \frac{LDI_{\min}}{LDI_{\max}} \quad (28)$$

Fig. 5(a)는 $w=1$ 이고 $\theta_L = 60^\circ$ 일 때 규정된 정사각형 작업영역 내에서 2-PaP 기구의 지역설계지수를 나타내고, Fig. 5(b)는 $w=1$ 이고 $\theta_L = 30^\circ$ 일 때 2-PPa 기구의 지역설계지수를 나타낸다. 식 (27)과 식 (28)을 이용하여 각 기구에 대한 설계지수를 구하면 Table 1 과 같다.

또한, θ_L 의 상한값은 다음과 같이 특이성을 고려함으로써 결정할 수 있다. 2-PaP 기구의 경우, 특이성(singularity)¹⁶ 은 $\theta_i = \pm 90^\circ$ 에서 발생하나, $\theta_L < 90^\circ$ 인 경우, 작업영역 내에 특이성은 존재하지 않는다. 한편, 2-PPa 기구의 경우, $\det(J_q) = 0$ 일 때 발생하는 특이성은 $\theta_i = \pm 90^\circ$ 에서 발생하나, $\theta_L < 90^\circ$ 인 경우, 작업영역 내에 이 특이성은 존재하지 않는다. 반면, $\det(J_r) = 0$ 일 때 발생하는 특이성은 $\theta_1 + \theta_2 = \pm 90^\circ$ 일 때 발생한다. 이러한 특이성을 방지하기 위하여서는 평행사변형 기구의 회전 작동범위를 $\theta_L < 45^\circ$ 로 제한할 필요가 있다.

2-PaP 기구와 2-PPa 기구의 성능을 Table 2 와 같이 비교하였다. 정량적 비교를 위하여 회전링크

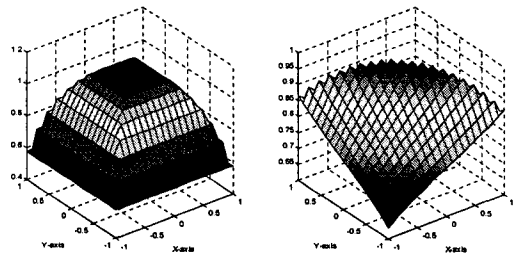
의 작동범위를 Table 2 와 같이 선정하였고, 이 때 두 기구가 유사한 GDI 값을 갖는다. Table 2로부터 2-PaP 기구가 큰 작업영역을 확보하기가 보다 용이함을 알 수 있다. 또한, 2-PaP 기구는 감속비와 회전링크의 길이를 동시에 조정함으로써 고속을 보다 쉽게 얻을 수 있다. 반면, 2-PPa 기구는 힘 전달능력이 우수하고, 평행사변형 기구 및 선형구동기가 주로 축방향 하중을 받으므로 구조적으로 고강성을 갖는다. 또한, 일반적으로 볼나사 방식의 선형구동기는 감속기를 사용하는 회전구동기에 비하여 백래쉬가 작으므로 2-PPa 기구는 고정밀도를 갖는다. 따라서, 2-PaP 기구는 고속운동이 요구되는 평면 위치작업에 활용될 수 있고, 2-PPa 기구는 높은 속도뿐만 아니라 고강성 및 고정밀도가 요구되는 작업에 주로 활용될 수 있다. 특히, 2-PaP 기구는 총 작업영역에서 항상 입력과 출력이 비연성화되므로 제어가 단순하다는 장점을 갖는다.

선형구동기를 수직으로 배치한 방법과 유사하게 평행하게 배치한 경우 2-PPa 기구의 자코비안 행렬을 구하면 다음과 같다.¹⁰

$$J = \begin{bmatrix} \tan \theta_1 & 1 \\ -\tan \theta_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Table 1 Design indices of 2-PaP and 2-PPa

	2-PaP	2-PPa
LDI_{\max}	l_o (at $\theta_1 = \theta_2 = 0$)	1 (at $\theta_1 = \theta_2 = 0$)
LDI_{\min}	$l_o \cos \theta_L$ (at 4 corners)	$1/(1 + \tan \theta_L)$ (at $\theta_1 = \theta_2 = \pm \theta_L$)
GDI	$\cos \theta_L$	$1/(1 + \tan \theta_L)$



(a) 2-PaP ($\theta_L = 60^\circ$) (b) 2-PPa ($\theta_L = 30^\circ$)

Fig. 5 Mesh plots of LDIs

수직 및 평행 배치시 각 기구의 최적점에서 주요 성능을 Table 3 과 같이 비교하였다. 수직 배치인 경우, 속도 전달능력이 높고 선형구동기에 비교적 작은 횡방향 하중이 작용된다. 또한, 최적점에서 입력과 출력이 비연성화된다. 따라서, 고속운동을 얻기 위해서는 본 논문에서 제시하는 수직 배치기 평행 배치 경우보다 유리함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of 2-PaP and 2-PPa

Performance	2-PaP ($\theta_L = 60^\circ$)	2-PPa ($\theta_L = 30^\circ$)
Decoupled	Always	At one point
GDI	0.5	0.634
Workspace/stroke ($2w / \Delta d$)	1.0 ($\Delta d = 2l_a \sin \theta_L$)	0.882 (Eq. (26))
Workspace/size ($2w / a$)	0.928 (Eq. (7), $b=t=0$)	0.667 (Eq. (26), $b=0$)
Velocity & Force at $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$	$v = (l_a / \gamma) \omega_m > v = (p / 2\pi) \omega_m$ $f = (\gamma / l_a) \tau_m < f = (2\pi / p) \tau_m$	

(ω_m 과 τ_m : 모터 회전속도 및 토크, γ 와 p : 감속비 및 볼나사의 피치)

Table 3 Comparison of the perpendicular and parallel arrangements of linear actuators in 2-PPa

Performance	Perpendicular ($\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$)	Parallel ($\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$)
Decoupled	Yes	No
Velocity Transmission	Larger (LDI=1.0)	Smaller (LDI=0.707)
Load	Axial force	Axial and transversal force

4. 시작품 설계

본 연구에서는 전역설계지수와 설계 고려사항을 적용하여 2-PaP 기구와 2-PPa 기구의 시작품을 설계하였고, 이의 설계 변수값은 Table 4 와 같다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 2-PaP 기구 및 2-PPa 기구의 시작품 사진을 나타낸다. 제어 실험을 통하여 두 기구의 시작품에 대한 작동성을 확인하였다.

Table 4 Design parameters of 2-PaP and 2-PPa

Performance	2-PaP	2-PPa
θ_L (GDI)	60° (0.5)	30° (0.634)
Workspace ($2w$)	173.2 mm	260.0 mm
Stroke (Δd)	173.2 mm	300.0 mm
Total size (a)	265.0 mm	482.0 mm
Additional parameters	$l_a = 100.0$ mm $b = 20.0$ mm $t = 55.0$ mm	$l_a = 260.0$ mm $b = 92.0$ mm
Velocity	2731.8 mm/s	1000.0 mm/s
Force	10.9 N	408.4 N

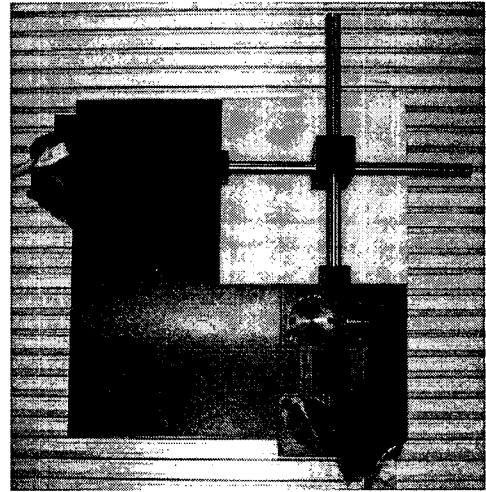


Fig. 6 Prototype 2-PaP TPM with rotary actuation

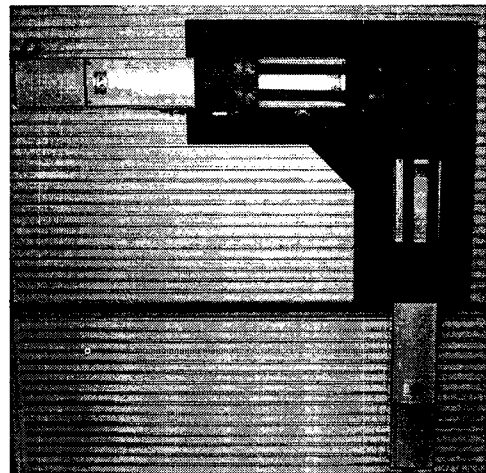


Fig. 7 Prototype 2-PPa TPM with linear actuation

5. 결론

본 연구에서는 평행사변형 기구를 이용하여 2-*PaP* 와 2-*PPa* 구조의 평면 병렬형 병진운동 기구를 고안하고 설계 방법을 제안하였다. 이 기구들의 기구학적 해석을 수행하였고 규정된 작업영역을 만족하도록 각 설계변수들을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 속도 전달능력을 고려하여 평행사변형 기구의 회전링크의 각도를 제한하는 설계지수를 제안하였다. 2-*PaP* 와 2-*PPa* 기구의 성능을 정량적으로 비교하였고, 2-*PPa* 기구에서는 선형구동기의 수직 및 평행 배치를 비교하였다. 설계결과를 바탕으로 두 가지 구조 기구의 시작품을 개발하고 이의 작동성을 확인하였다. 향후, 이 기구들의 고속제어 및 정밀도 향상에 대한 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 2007 학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Clavel, R., "Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry," 18th Int. Sym. on Industrial Robots, pp. 91-100, 1988.
2. Tsai, L. W., "Kinematics of a Three-DOF Platform Manipulator with Three Extensible Limbs," Advances in Robot Kinematics, pp. 401-410, 1996.
3. Kim, H. S. and Tsai, L. W., "Design Optimization of a Cartesian Parallel Manipulator," J. of Mechanical Design, Vol. 125, No. 1, pp. 43-51, 2003.
4. Liu, X. J., "Optimal Kinematic Design of a Three Translational DoFs Parallel Manipulator," Robotica, Vol. 24, No. 2, pp. 239-250, 2006.
5. Gao, F., Liu, X. and Gruver, W. A., "Performance Evaluation of Two-Degree-Of-Freedom Planar Parallel Robots," Mechanisms and Machine Theory, Vol. 33, No. 6, pp. 661-668, 1998.
6. Atia, K. R. and Cartmell, M. P., "A General Dynamic Model for a Large-Scale 2-DOF Planar Parallel Manipulator," Robotica, Vol. 17, No. 6, pp. 675-683, 1999.
7. Liu, X. J., Wang, J. and Pritschow, G., "On the Optimal Kinematic Design of the PRRRP 2-DOF Parallel Mechanism," Mechanism and Machine Theory, Vol. 41, No. 9, pp. 1111-1130, 2006.
8. Dong, J., Yuan, C., Stori, J. A. and Ferreira, P. M., "Development of a High-speed 3-axis Machine Tool using a Novel Parallel-kinematics X-Y Table," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No. 12/13, pp. 1355-1371, 2004.
9. Li, Y. and Xu, Q., "A Novel Design and Analysis of a 2-DOF Compliant Parallel Micromanipulator for Nanomanipulation," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 248-254, 2006.
10. Liu, X. J., Wang, Q. M. and Wang, J., "Kinematics, Dynamics and Dimensional Synthesis of a Novel 2-DOF Translational Manipulator," J. of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 41, No. 4, pp. 205-224, 2005.
11. Liu, X. J. and Wang, J., "Some New Parallel Mechanisms Containing the Planar Four-Bar Parallelogram," J. of Robotics Research, Vol. 22, No. 9, pp. 717-732, 2003.
12. Huang, T., Li, Z., Li, M., Chetwynd, D. G. and Gosselin, C. M., "Conceptual Design and Dimensional Synthesis of a Novel 2-DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-Place Operations," J. of Mechanical Design, Vol. 126, No. 3, pp. 449-455, 2004.
13. Kong, X. and Gosselin, C. M., "Type Synthesis of Input-Output Decoupled Parallel Manipulators," Trans. of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 28, No. 2A, pp. 185-196, 2004.
14. Liu, X. J., Tang, X. and Wang, J., "HANA: a novel Spatial Parallel Manipulator with One Rotational and Two Translational Degrees Of Freedom," Robotica, Vol. 23, No. 2, pp. 257-270, 2005.
15. Kim, H. S. and Choi, Y. J., "The Forward/Inverse Force Transmission Analyses of the Stewart Platform," J. of KSPE, Vol. 16, No. 5, pp. 200-208, 1999.
16. Joshi, S. A. and Tsai, L. W., "Jacobian Analysis of Limited-DOF Parallel Manipulators," J. of Mechanical Design, Vol. 124, No. 2, pp. 254-258, 2002.