

기구학적 등방성을 고려한 특정작업경로를 가진 6-DOF 병렬형 매니퓰레이터

양 현 익* · 허 원 혁*

(2003년 3월 7일 접수, 2004년 2월 28일 심사완료)

The 6-DOF Parallel Manipulator Having the Specific Trajectory Based on the Kinematic Isotropy

Hyun-Ik Yang and Yuan-Ge Xu

Key Words: Parallel Manipulator(병렬형 매니퓰레이터), Specific Trajectory(특정작업경로), Kinematic Isotropy(기구학적 등방성), Transformation Method(변환법), Motion Transmissibility(운동전달성)

Abstract

In this paper, kinematic structure of parallel manipulator having 6-DOF is determined to follow the specific trajectory represented by several curves expressed by the parametric variable functions. In addition, the parallel manipulator is designed to have a high dexterity by considering a kinematic isotropy which can stabilize the motion of the moving platform in the restricted workspace.

기호설명

R : 고정플랫폼의 반지름
 r : 운동플랫폼의 반지름
 α : 고정플랫폼에 부착된 조인트에 의해 구성된 6각형의 짧은 변에 대한 중심각
 β : 운동플랫폼에 부착된 조인트에 의해 구성된 6각형의 긴 변에 대한 중심각
 α_i : 고정플랫폼에 부착된 조인트의 위치각
 β_i : 운동플랫폼에 부착된 조인트의 위치각
 $\overrightarrow{A_i B_i}$: i 번째 다리벡터

ρ_i : i 번째 다리의 길이
 ρ_{i_max} : i 번째 다리가 늘어날 수 있는 최대길이
 ρ_{i_min} : i 번째 다리가 줄어든 수 있는 최소길이
 γ : 조인트 최대허용각
 $[T]$: 운동플랫폼의 자세행렬
 θ, ϕ, ψ : 운동플랫폼의 방향각 (Euler Angle)
 $Cond(J)$: 자코비안 행렬의 상태수

1. 서론

병렬형 매니퓰레이터는 구조강성이 높고 정밀도가 우수하지만 작업공간의 협소성으로 인하여 그 성능이 구성부품들의 기하학적 형상에 많이 좌우된다는 단점을 가지고 있다(Fig. 1). 전체적인 작업공간 결정에서 가장 중요한 고정 및 운동플랫폼의 기하학적 형상에 대한 최적설계는 작업공간, 민첩성, 유효하중, 강성 등에 의하여 수행

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

E-mail : skynet@hanyang.ac.kr

TEL : (031)417-2374 FAX : (031)419-3447

* 회원, 한양대학교 공과대학원 기계설계학과

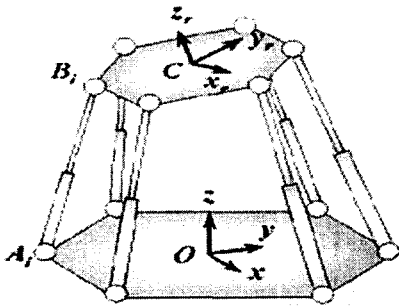


Fig. 1 A 6-DOF Parallel manipulator

될 수 있다. Gosselin⁽¹⁾은 3-DOF 병렬형 매니플레이터의 최적설계에서 매니플레이터의 작업공간을 극대화시키는 연구를 하였고, 특히 Merlet⁽²⁾은 정기구학적 설계방법에 있어서 독창적인 구속조건의 그래픽화를 통하여 설계의 과정을 가시화 하였으며 특정작업경로의 표현에서 공간을 유한개의 직선 또는 점으로 변환시켜 작업공간의 정량적인 연구를 수행하였다. Takaaki⁽³⁾은 병렬형 매니플레이터를 이용한 6자유도 정밀운동기구 설계에서 자코비안 행렬의 상태수를 이용하여 다리의 부착위치에 관해 연구하였다. Yukio⁽⁴⁾는 로봇기구 출력의 공간적 등방성평가에서 운동전달지수를 이용한 말단장치의 공간적 등방성에 관해 연구하였고, Tsai⁽⁵⁾은 Spatial 3-UPU 병렬형 매니플레이터의 운동학과 최적화에서 자코비안 행렬의 상태수(Condition Number)를 이용하여 민첩성이 좋은 작업공간의 극대화에 관한 연구를 하였다. 이렇게 많은 연구가 이루어지고 있지만 대부분의 연구자들은 전체작업공간을 무수히 많은 점들의 집합으로 보고 이들 중에서 임의로 일부를 택한 유한개의 점에 대한 연구였기에 설계의 효율과 정밀성, 그리고 무병플랫폼의 자세연구에서는 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 6자유도 병렬형 매니플레이터의 설계에 있어서 정기구학적방법을 이용하여 기존의 연구들에서 취급되지 않은 운동계도와 자세가 매개변수 방정식에 의해 규칙적인 유한개의 점들의 집합으로 표현된 특정작업경로를 소화할 수 있도록 함으로 이런 한계를 극복하고자 하였다. 또한 설계결과에 대하여 역기구학 방법을 적용한 운동전달지수에 대한 분석으로 설계의 정확성을 검증하였다.

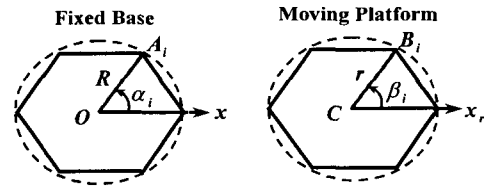


Fig. 2 Design parameters of each platform

본 연구에서는 병렬형 매니플레이터의 기하학적 형상설계에서 가시화 설계방법을 채용하였다. 설계변수로 2~3개의 중요변수를 선택하여 설계를 진행할 수 있는데, 설계편리상 상, 하 플랫폼에 있어서 조인트 부착위치에 의해 결정되는 6각형 외접원의 반지름 R, r (Fig. 2)로 함으로 2차원 평면상에서 설계가 수행될 수 있게 표현하였다. 다시 말하면 주어진 특정 작업공간 내에서 기구학적 등방성 지수 $Cond(J)$ 가 최소로 작용되도록 선정하는 것이다. 따라서 본 연구에서의 등방성에 의한 민첩성연구를 통하여 말단장치의 속도와 가공품에 가해지는 힘의 각 방향에 대한 불균형성을 설계단계에서 해결할 수 있을 뿐만아니라 특정작업경로에서의 특이점 생성도 방지할 수 있다.

2. 기구학적 구속조건과 운동분석

2.1 기하학적 형상과 등방성

2.1.1 기구학적 형상

본 연구에서 고려된 6-DOF 병렬형 매니플레이터는 Fig. 1과 같이 6자유도를 갖는 SPT(Stewart Platform Type)으로 한다. SPT는 고정플랫폼(Fixed Base)과 운동플랫폼(Moving Platform)이 여섯 개의 다리(link)와 12개의 볼소켓 조인트(ball-and-socket joint)로 연결되어 있다. 또한 여섯 개의 선형 액추에이터(Linear actuators)가 각각의 다리길이를 변화시킴으로써 플랫폼의 위치와 자세를 제어하게 된다.

Fig. 1에서 A_i, B_i 는 각각 고정플랫폼과 운동플랫폼에 조인트가 부착된 점을 나타낸다. 고정플랫폼은 A_i 의 z 좌표들이 모두 0이 되는 $O-x-y-z$ 의 기준 좌표계로 선정하였으며, 운동플랫폼에는 B_i 의 z 방향좌표들이 모두 0이 되

는 $C-x_r-y_r-z_r$ 의 이동 좌표계로 표시되었다. 이러한 관계들로부터 $\overrightarrow{A_i O}$ 와 $\overrightarrow{C B_i}$ 를 각각 식 (1), (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overrightarrow{A_i O} = \begin{pmatrix} -R \cos \alpha_i \\ -R \sin \alpha_i \\ 0 \end{pmatrix} = R \overrightarrow{u_i} \quad (1)$$

$$\overrightarrow{C B_i} = \begin{pmatrix} r \cos \beta_i \\ r \sin \beta_i \\ 0 \end{pmatrix} = r \overrightarrow{v_i} \quad (2)$$

SPT의 $C-x_r-y_r-z_r$ 의 $O-x-y-z$ 에 대한 자세변환은 회전 행렬 $[T]$ 로 식 (3)과 같다.

$$[T] = T_\phi T_\theta T_\psi \quad (3)$$

위 식 (3)에서

$$T_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix},$$

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.1.2 자코비안 행렬과 상태수

SPT의 입출력 속도관계는 다음과 같이 표현된다.

$$[\dot{q}] = [J] [V, \omega]^T \quad (5)$$

위 식 (5)에서 V, ω 는 각각 말단장치의 속도와 각속도를 표시하고, $[\dot{q}] = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_6]^T$ 는 선형 액추에이터의 입력 속도이며, $[J]$ 는 자코비안 행렬로서 식 (6)과 같다.

$$[J] = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 & \dots & W_6 \\ b_1 \times W_1 & b_2 \times W_2 & \dots & b_6 \times W_6 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

위 식(6)에서 b_i, W_i 는 3차원 벡터로서

$b_i = \overrightarrow{OB_i}$, $W_i = \frac{S_i}{|S_i|}$, $S_i = \overrightarrow{A_i B_i}$, $i = 1 \sim 6$ 으로 정의된다. 자코비안 행렬의 상태수는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cond(J) = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2}} \quad (7)$$

위 식 (7)에서 $\lambda_{\max}^2, \lambda_{\min}^2$ 는 대칭행렬

$[J^T J]$ 의 최대, 최소 고유치이다. 식 (5)에서 선형 액추에이터의 속도와 말단장치의 속도는 선형 관계이고 자코비안 행렬은 이에 따른 비례계수이다. 따라서 자코비안 행렬의 상태수가 크다는 것은 자코비안 행렬이 특이행렬에 접근한다는 것을 의미하고, 상태수가 작을수록 등방성은 좋아지며 따라서 매니플레이터의 각 액추에이터는 균일한 속도로 작동될 수 있다.

2.1.3 운동전달성⁽⁴⁾

병렬형 매니플레이터에서는 선형 액추에이터에 의해 말단장치에 운동과 동력이 전달된다(Fig. 3). 말단장치에 전달된 동력은 식 (8)과 같다.

$$P = \sum |f_i| \cdot |V_i| \cdot \cos(\phi_i) \quad (8)$$

위 식 (8)에서 ϕ_i 는 선형 액추에이터의 입력힘 f_i 와 운동플랫폼에서의 조인트의 부착위치 B_i 의 속도 V_i 사이의 압력각으로서 $|\cos(\phi_i)|$ 의 값이 1에 가까울수록 운동전달성이 좋은 특성을 이용하여 운동전달성 지수 TI 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$TI = \min(|\cos(\phi_1)|, |\cos(\phi_2)|, \dots, |\cos(\phi_n)|) \quad (9)$$

위 식 (9)에서 압력각 ϕ_i 가 90° 에 접근할 때 관절힘 f_i 는 속도 V_i 를 제어할 수 없게 된다. 즉, $TI = 0$ 일 때 특이성이 발생한다. 따라서 일반적으로 작업공간 내에서 $TI \leq \epsilon$ 인 영역을 특

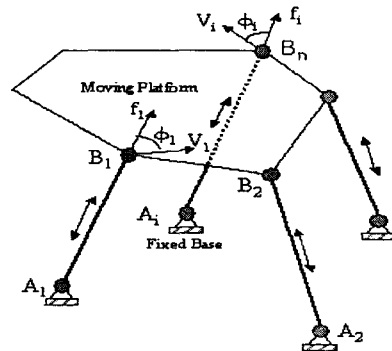


Fig. 3 Definition of ϕ_i based on f_i and V_{B_i}

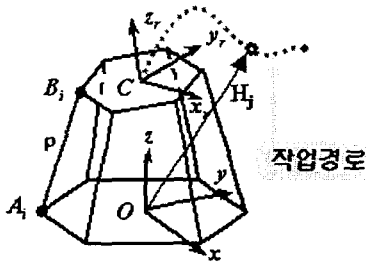


Fig. 4 Definition of the specific trajectory

이성 영역이라 정의한다. 여기서 ϵ 은 사용자 정의의 작은 正數이다. 따라서 병렬형 매니플레이터의 등방성 연구에서 정기구학에 의한 자코비안 행렬의 상태수를 이용한 설계에서 역기구학에 의한 운동전달지수의 분석으로 설계결과의 정확성을 검증할 수 있다.

2.1.4 곡선작업경로

본 연구에서는 운동플랫폼의 중심점 C의 운동 궤적을 작업경로로 규정하였다(Fig. 4). 주어진 특정한 작업경로는 곡선의 매개변수방정식을 이용하여 다음 식 (10)으로 표시할 수 있다.

$$W = \{(H_j, T_j), j \in [1, n]\} \quad (10)$$

여기서 $H_j = [X(t), Y(t), Z(t)]$ 는 곡선 매개변수 방정식, $T_j = [\theta(t), \phi(t), \psi(t)]$ 는 방향행렬이고 j 는 입력작업경로의 수이다.

2.2 기하학적 구속조건

2.2.1 다리길이의 구속조건에 의한 허용영역

운동플랫폼이 임의의 $W(H, T)$ 의 위치에 있다고 하면 다리의 길이 ρ 는 벡터 $\overrightarrow{A_i B_i}$ 의 놈(norm)이므로 식 (11)과 같이 표현되며, 따라서, i 번째($i = 1 \sim 6$) 다리길이는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\rho_i^2 = \|\overrightarrow{A_i B_i}\|^2 = \overrightarrow{A_i O} \cdot \overrightarrow{A_i O} + \overrightarrow{H B_n} \cdot \overrightarrow{H B_n} + 2(\overrightarrow{A_i O} + [T] \overrightarrow{H B_n}) \cdot \overrightarrow{OH} + 2[T] \overrightarrow{H B_n} \cdot \overrightarrow{A_i O} + \overrightarrow{OH} \cdot \overrightarrow{OH} \quad (11)$$

$$\rho_i^2 = R^2 + r^2 + 2Rr[T] \overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{u_i} + 2R \overrightarrow{u_i} \cdot \overrightarrow{OH} + 2r[T] \overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{OH} + \overrightarrow{OH} \cdot \overrightarrow{OH} \quad (12)$$

여기서 $\epsilon(R, r, H, \rho_i)$ 를 식 (13)과 같이 정의

할 수 있다.

$$\epsilon(R, r, H, \rho_i) = R^2 + r^2 + 2Rr[T] \overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{u_i} + 2R \overrightarrow{u_i} \cdot \overrightarrow{OH} + 2r[T] \overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{OH} + \overrightarrow{OH} \cdot \overrightarrow{OH} - \rho_i^2 \quad (13)$$

따라서 식 (13)은 다리의 길이 ρ 가 주어지면 $R-r$ 평면에서 타원으로 정의되고, i 번째 다리 길이의 범위는 식 (14)와 같다.

$$\rho_{i_min} \leq \rho_i \leq \rho_{i_max} \quad (14)$$

각각의 다리길이가 식 (14)과 같이 제한되므로 $R-r$ 평면에서의 임의의 한 점 $M(R, r)$ 은 다음 구속조건을 모두 만족하여야 한다.

Maximum length constraint

$$\epsilon(R, r, H, \rho_{i_max}) \leq 0 \quad (15)$$

Minimum length constraint

$$\epsilon(R, r, H, \rho_{i_min}) \geq 0 \quad (16)$$

여기서 6개 다리 모두가 만족되어야 하므로, 점 $M(R, r)$ 의 허용영역 A_{length} 는 다음과 같다.

$$A_j = \bigcap_{i=1}^{i=6} \epsilon(R, r, H_j, \rho_{i_max}) - \bigcup_{i=1}^{i=6} \epsilon(R, r, H_j, \rho_{i_min}) \quad (17)$$

따라서 허용영역은 식 (18)과 같다.

$$A_{length} = \bigcap_{j=1}^{j=n} A_j \quad (18)$$

2.2.2 조인트의 역학적 구속조건에 의한 허용영역

조인트의 역학적 제약조건은 Fig. 5와 같이 Merlet⁽²⁾이 제안했던 피라미드 모델을 이용하여 표현하였다. 조인트의 중심이 꼭지점(apex)이 되는 피라미드를 결정하고, 따라서 조인트로 연결 조인트로 연결된 각각의 다리들이 피라미드의 모든 면들(faces) 안쪽에 위치하게 하여야 한다. i 번째 조인트 피라미드 모델에서 각 면들의 법선벡터를 $n_f^i, f \in [1, k]$ 라 정의하면 운동플랫폼이 임의의 위치 $W(H, T)$ 에 있을 때 다리가 피라미드 안쪽에 위치하기 위한 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{A_i B_i} \cdot \overrightarrow{n_f^i} \leq 0, \forall f \in [1, k] \quad (19)$$

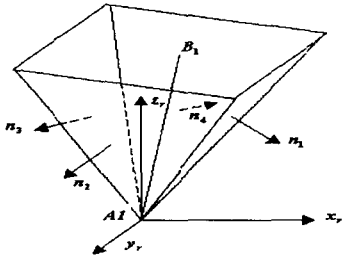


Fig. 5 Pyramid model for the constraint on a passive joint located at A1

$$R \vec{u}_i \cdot \vec{n}_j + r [T] \vec{v}_i \cdot \vec{n}_j + \vec{OH} \cdot \vec{n}_j \leq 0 \quad (20)$$

식 (20)의 좌변의 항을 $L_{i,j}(R, r, H)$ 라 정의하면 $R-r$ 평면에서 임의의 작업경로 W 는 다음 구속조건을 만족시켜야 한다.

$$L_{i,j}(R, r, H) \leq 0 \quad (21)$$

6개의 조인트 모두가 만족되어야 하므로, 작업경로 W 의 허용 영역 A_{joint} 는 다음과 같다.

$$A_j = \bigcap_{i=1}^{j=6} (\bigcap_{f=1}^{f=k} L_{i,f}(R, r, H_j)) \quad (22)$$

따라서 허용영역은 식 (23)과 같다.

$$A_{joint} = \bigcap_{j=1}^{j=n} A_j \quad (23)$$

2.2.3 다리들의 간섭 구속조건에 대한 금지영역

먼저, 다리의 두께가 없다고 가정했을 때 두 개의 다리가 서로 간섭(Interference)이 일어나는 경우 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

- 두 다리의 연장선이 교차한다.
- 교차점이 양쪽 다리에 모두 속한다.

2.2.4 설계변수 R, r의 경계조건

설계변수 R, r의 경계조건은 다음과 같다.

$$0 < K_{min} \leq r/R \leq K_{max} \quad (24)$$

위 식 (24)에서 K_{min} , K_{max} 은 실제설계요구에 근거하여 설계자가 정의할 수 있다. 본 연구

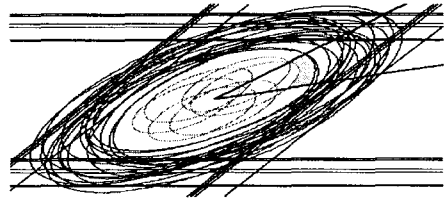


Fig. 6 Graphic expression for the entire constraint conditions and their admissible area

에서는 $K_{min}=0.3$, $K_{max}=1$ 로 하였다. Huang⁽⁸⁾의 연구에 의하면 설계변수의 비 r/R 의 변화는 말단 장치의 자세능력을 나타내는 상수로서 r/R 의 증가는 민첩성 하강을 대가로 한다. 때문에 병렬형 매니플레이터의 민첩성 향상을 위해서 K_{min} 는 일정한 크기의 값을 가져야 한다.

2.2.5 모든 구속조건들의 검증

공간곡선들로 이루어진 작업공간을 포함할 수 있는 병렬형 매니플레이터의 설계에 있어서 설계변수 R, r는 위에서 언급한 모든 구속조건을 만족시키는 영역에서 선택할 수 있다. Fig. 6은 주어진 특정곡선경로를 갖기 위한 병렬형 매니플레이터의 기하학적 구속조건들을 $R-r$ 평면상에 나타낸 그림으로서 모든 구속조건을 만족시키는 최종적인 허용영역은 그림에서 회색부분이다.

2.3 최적화 기법

설계변수 좌표계인 $R-r$ 평면에서 작업경로 W 의 모든 가능한 구속조건들을 고려한 허용영역으로부터 등방성을 고려한 최적점 $M(R, r)$ 선정해야 한다. 따라서 목적함수(Objective function)를 다음과 같이 정의하고, 이를 최소화시키는 설계변수 (R, r) 을 구한다.

Objective function:

$$F(R, r) = -\{\max f_1(R, r, t), \dots, \max f_n(R, r, t)\} \quad (25)$$

Minimize

$$f_i(R, r, t) = \lambda_{\max}(J^T J) / \lambda_{\min}(J^T J) \quad (26)$$

Subject to:

- (1) 다리길이에 관한 구속조건;
- (2) 조인트 구속조건;
- (3) 다리간섭 구속조건;

- (4) $0 < K_{\min} \leq r/R \leq K_{\max}$;
- (5) $r, R > 0$.

위 최적화문제는 경계 최적화문제(Constrained optimization problem)로서 목적함수가 불명확하며, 구속조건의 수가 매우 많고 그 수가 고정적이지 않으며, 비선형이기 때문에 일반적인 최적화 방법으로는 문제를 해결하기 어렵다. 때문에 본 연구에서는 자체 개발 구속조건 선택 알고리즘과 변환법을 이용하여 최적화를 수행하였다. 변환법이란 제약조건에 관한 최적화문제를 알고리즘이 잘 적립된 비제약조건의 최적화문제로 변환시켜 최적화를 수행하는 방법이다.

2.3.1 구속조건 선택 알고리즘

특정 곡선작업공간을 결정하는 과정에 많은 여유구속조건이 생기므로 최적화계산이 매우 복잡하게 된다. 여유구속조건을 제거하기 위해 본 연구에서는 구속조건 선택 알고리즘을 개발하였다. 구속조건을 간소화하는 기본원리는 Fig. 7과 같이 표현할 수 있으며, 알고리즘으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

- Step1: 구속조건타원에 모두 속하는 참조타원을 계산한다.
- Step2: 참조타원 위에 참조점 N개를 정한다.
- Step3: 참조타원 위의 각 참조점에서 제일 가까운 구속타원을 선택한다.
- Step4: Step3에서 선택된 구속조건타원 수는 N개로서 여기서 서로 다른 구속조건 타원을 선택한다.

2.4 설계 프로그램

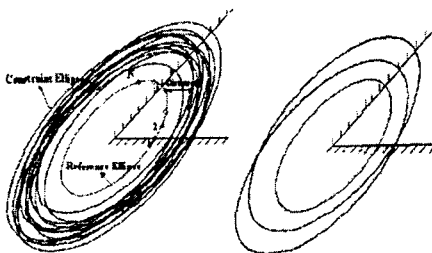


Fig. 7 Graphic expression of the simplified constraints

본 연구에서는 병렬형 매니플레이터가 주어진 작업경로를 수행함과 동시에 등방성 지수의 값이 최소가 되는 조인트들의 부착점위치를 계산하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 MS Visual Basic 6.0으로 프로그래밍 되었다. Fig. 8은 개발된 프로그램의 순서도이다.

2.5 적용예제

본 연구에서 개발된 설계프로그램의 타당성을 검토하기 위해 예제를 선정하여 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 플랫폼에서의 조인트 부착위치와 운동특성의 관계⁽⁶⁾를 고려하여 상, 하플랫폼에서의 조인트의 부착위치를 $\alpha = 10^\circ, \beta = 110^\circ$ 로 하였다. 본 프로그램 실행예제는 주어진특정 작업경로를 포함하는 동시에 말단장치의 작업경로에서 각 방향으로 가장 작은 등방성 지수

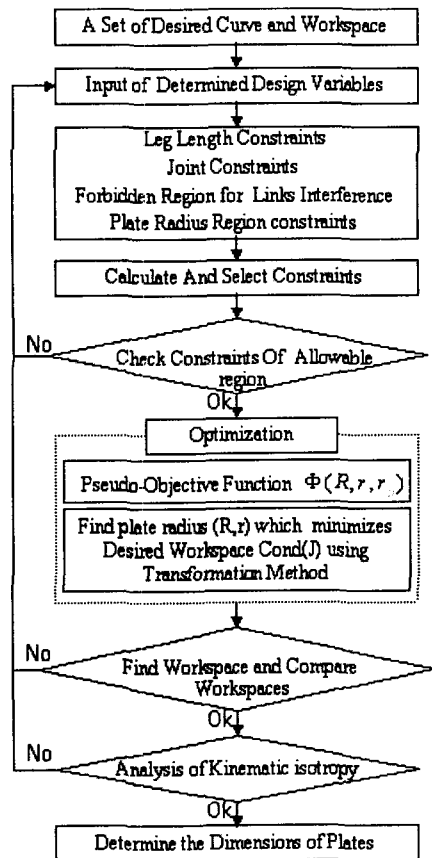


Fig. 8 Flow chart of the algorithm

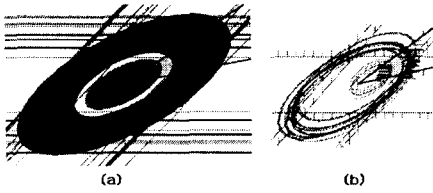


Fig. 9 Graphical expression of the simplified constraints in example

Table 1 Parametric Functions Input of Workspace

곡선	X(t)	Y(t)	Z(t)
나선곡선	$100 \cdot \cos(t) \cdot \sin(2 \cdot t)$	$100 \cdot \sin(t) \cdot \sin(2 \cdot t)$	320
원	$100 \cdot \cos(t)$	$100 \cdot \sin(t)$	320
사엽장미	$100 \cdot \cos(t)$	$100 \cdot \sin(t)$	$4 \cdot t$
쌍곡나선	$16 \cdot t \cdot \cos(t)$	$16 \cdot t \cdot \sin(t)$	520

의 값을 갖도록 각 구속조건을 만족하는 허용영역에서 최적의 R, r 값을 구하는 것으로 하였다.

특정 작업경로는 작업경로의 다양화를 충분히 나타내기 위하여 Table 1과 같이 매개변수 방정식 $[X(t), Y(t), Z(t)]$ 으로 표현하였다. 운동플랫폼의 자세는 오일러각 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 으로 하였고 주어진 다리의 길이 허용영역은 $350 \text{ mm} \leq \rho \leq 660 \text{ mm}$ 로 하였다.

Fig. 9(a)는 전체 구속조건을 표현한 그림이며 Fig. 9(b)는 구속조건 간소화 알고리즘의 실행을 통하여 간소화한 것이다. 특히 본 구속조건 간소화 알고리즘의 실행을 통하여 전체 구속조건을 수를 대폭 줄일 수 있었기 때문에 차후의 최적화 설계를 진행하는데 있어서 효율 및 정확도를 높일 수 있었다. Fig. 10에서는 설계값 R, r에 의해 구해진 작업공간에 주어진 특정작업경로가 포함됨을 확인할 수 있다. Fig. 11은 작업경로에서의 위치변화에 따른 운동전달지수에 관한 그래프이다. 그림에서 최적점에서 운동전달지수가 해석점보다 약 0.2가량 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 자코비안 행렬의 상태수에 의한 등방성 설계 결과가 운동전달성 분석에 의해 그 정확성이 검증됨을 보여 주고 있다. 즉, 자코비안 행렬의 상태수 값이 작을수록 운동전달지수가 커진다. Fig. 12는 설계값 R, r와 설계변수의 허용영역에서의 해석값에 의해 계산된 말단장치에 수요되는 출력에 대한 선형 액추에이터의 입력속도를 표한 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 등방성이 좋은 설

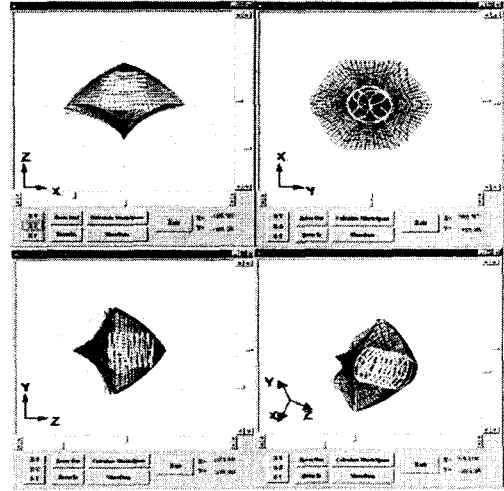


Fig. 10 Determined workspace containing the desired trajectories

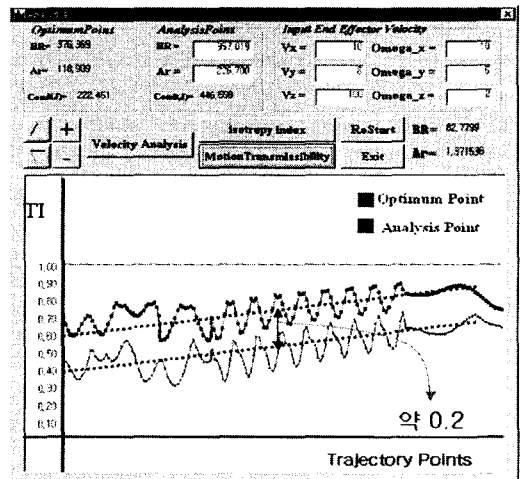


Fig. 11 Analysis of the motion transmissibility

계값이 해석값에 비해 더욱 작은 입력으로도 능히 요구되는 출력이 보장될 수 있음을 알 수 있다. 동시에 자코비안 행렬의 상태수에 의한 등방성 설계 결과가 운동전달성 분석에 의해 그 정확성이 검증됨을 보여 주고 있다. 즉, 자코비안 행렬의 상태수 값이 작을수록 운동전달지수가 커진다. Fig. 12는 설계값 R, r와 설계변수의 허용영역에서의 해석값에 의해 계산된 말단장치에 수요되는 출력에 대한 선형 액추에이터의 입력속도를 표시한 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 등방성이 좋은 설계값이 해석값에 비해 더욱 작은 입력으로도

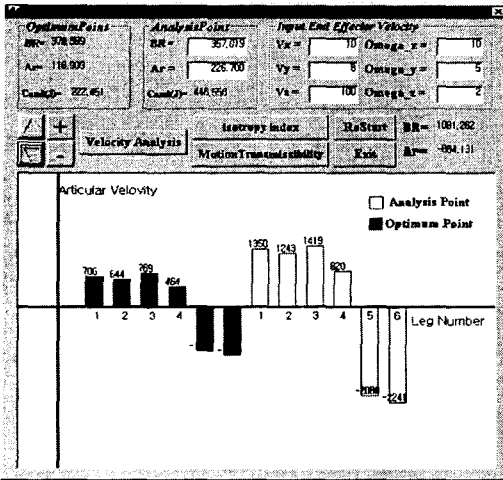


Fig. 12 Analysis of kinematic motion

능히 요구되는 출력이 보장될 수 있음을 알 수 있다. 이상의 분석으로부터 개발된 설계프로그램에 의해 계산되는 설계결과는 주어진 설계요구에 부합되며 또한 본 곡선작업경로는 또한 전체작업 공간에서 원기동형 작업공간의 등방성을 특징짓기도 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 요구되는 작업공간을 갖는 병렬형 매니플레이터의 기하학적 등방성을 고려한 설계를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 특정작업경로를 공간곡선의 매개변수 방정식으로 표현함으로써 작업공간을 보다 세밀하게 분석할 수 있게 하였으며, 전체작업경로가 자코비안 행렬의 상태수를 통하여 최적의 등방성을 갖도록 하였다.

(2) 6-DOF 병렬형 매니플레이터의 정기구학적 설계에 있어서 방대한 기하학적 구속조건 중 여유구속조건은 그래픽화 분석을 통하여 간소화 할 수 있었고, 따라서 주어진 조건에서 최적의 설계 결과를 결정하는데 있어서 효율성 및 정확성을 높였다.

(3) 본 연구에서는 특정작업경로에서의 기구학적 운동특성만 취급하였는데 향후 동적영향에 대

한 종합적인 분석연구도 함께 수행된다면 보다 완성도 높은 설계가 이루어질 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 한양대학교의 연구기금의 지원으로 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gosselin, C., 1990, "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators," *Journal of Mechanism and Design*, pp.331~336.
- (2) Merlet, J. P., 1994, "Trajectory Verification in the Workspace for Parallel Manipulators," *Journal of Robotics Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 326~333.
- (3) Takaaki, Oiwa., 1999, "Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 65, No. 10. pp. 288~292.
- (4) Yukio, Takeda., 1995, "Evaluation of Spatial Isotropy of Output of Robotic Mechanisms," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (C) Vol. 61, No. 586, pp. 462~469.
- (5) Tsai, L. W. and Joshi, S., 2000, "Kinematics and Optimization of a Spatial 3-UPU Parallel Manipulator," *Journal of Mechanical Design*, 122, pp. 439~446.
- (6) Weijia, Li., 1999, "Study on the Maximum Working Capability of Stewart Platform," *Machine design and Reserch*, No.1.
- (7) Zanganeh, K. E., and Angeles, J., 1997, "Kinematic Isotropy and the Optimum Design of Parallel Manipulators," *Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 2, pp.185~197.
- (8) Huang, T., 1998, "Local Dexterity and Optimal Architecture of Parallel Machine Tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 347~351.