

병렬형 Gripper/미소위치 제어 메커니즘 구현 및 실험

Development and Experiment of a Parallel-Type Gripping/Micro-Positioning Mechanism

조국훈* 이재훈* 이병주* 오상록** 서일홍*** 김희국****

*한양대학교 제어계측공학과(Tel : 0345 400-5218; Fax: 0345 416-6416; E-mail: bj@hyunpl.hanyang.ac.kr)

**한국과학기술연구원 정보전자부(Tel : 02 958-5757; Fax: 02 958-5709; E-mail: sroh@amadeus.kist.re.krhanyang.ac.kr)

***한양대학교 전자공학과 (Tel: 0345 400-5172; Fax: 0345 408-5803; E-mail: ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

****고려대학교 제어계측공학과(Tel: 0415 60-1443; Fax: 0415 865-1820)

Abstract : In this work, a parallel-type gripping and micro-positioning mechanism is proposed. This device has a parallelogramic platform which can be flexibly folded. Therefore, this mechanism not only can be used to grasp an object having irregular shape or large volume, but also can be utilized as a micro-positioning device after grasping the object. We developed this device to perform grasping experiment. Kinematic performances are observed in terms of isotropic index and grasping force index. Finally, the mapping relation between the grasping force and the offset joint torque is derived.

Keywords : parallel-type gripping, micro-positioning mechanism, Grasping force, isotropic characteristic

1. 서론

지금까지 직렬 및 병렬형 매니플레이터에 관련된 연구가 활발히 수행되어 왔으나, 병렬형 매니플레이터의 형상제어에 대한 연구는 미진한 상황이다. 본 논문에서는 병렬형 매니플레이터의 형상의 제어와 활용에 관하여 연구한다.

모빌리티는 어느 특정한 시스템의 작업 공간의 모든 위치에서의 운동을 제어하는데 필요한 최소한의 파라미터의 개수를 의미한다. 예를 들면, 그림 1에 주어진 병렬형 시스템은 moving plate가 강체인 경우인데 이 경우의 모빌리티는 3으로 plate의 임의의 점에서의 x, y 방향 위치와 회전각도를 제어하는 목적으로 사용된다.

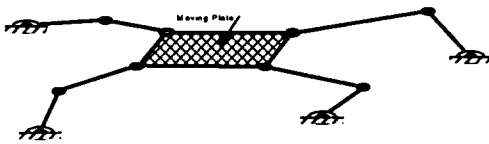


그림 1. 모빌리티가 3인 병렬형 메카니즘

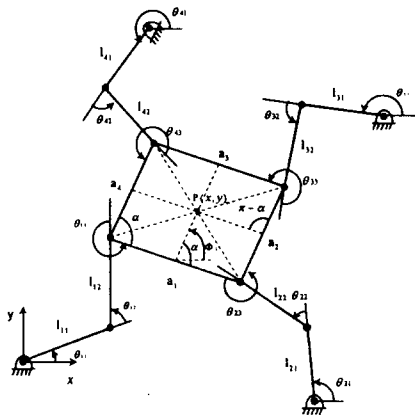


그림 2. 모빌리티가 4인 병렬형 메카니즘의 기구학적 형태

한편, 본 논문에서 제안된 그림 2에 주어진 시스템은 platform의 링크들이 두 개의 회전관절로 연결된 비강체로 구성되어 있어서 platform의 형상에 변화를 줄 수 있다. 이러한 병렬형 매니플레이터는 platform의 임의의 점에서의 x, y 방향 위치와 회전각도, 그리고 하나의 platform 형상 파라미터를 조절할 수 있는 기능을 지닌다. 이러한 형상제어의 기능을 가진 병렬형 매니플레이터는 로봇 gripper로 활용할 수 있으리라 기대된다. 기존의 단순

한 형태의 로봇 gripper들은 불규칙한 모양이나 큰 부피의 물체를 잡을 때 어려움이 있음을 살펴볼 수 있으나, 본 논문에서 제안된 병렬형 메커니즘은 임의의 불규칙한 모양을 지니는 물체나 큰 부피의 물체의 gripping에서도 유용하게 적용될 수 있다. 또한, 물체를 잡은 후에도 기구학적 변화를 이용하여 미소위치제어를 할 수 있다.

2. 기구학 모델링

2.1 정방향 기구학

일반적으로 병렬형 매니플레이터의 정방향 해는 유일하게 존재하지 않음을 경험해왔다. 본 논문의 일반적인 매니플레이터에서도 모빌리티 만큼의 관절 센서로 platform의 위치, 방향각, 그리고 형상 파라미터를 예측하기는 어려운 것으로 판단된다. 지금까지 병렬형 메커니즘의 단일한 정방향 해를 구하는 알고리즘들을 제안되어 왔으며, 여분의 센서들을 사용하거나[6], 유일한 정방향 해를 지니는 새로운 병렬형 매니플레이터 등을 제시하는 방식 등이 있다[5].

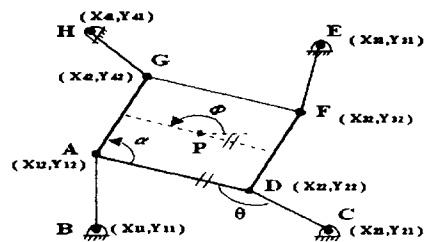


그림 3. 그림2의 단순화된 기구학적 모델

본 절에서는 그림 2에 주어진 하나의 형상 파라미터를 지닌 병렬형 매니플레이터에 대한 단일한 정방향 기구학에 대하여 기술한다. platform의 정중점 P에서의 위치 x, y와 방향각 ϕ , 그리고 platform의 형상 파라미터 α 를 제어하는 것을 목적으로 한다. 여기서 ϕ 는 platform의 a_1 와 기준좌표계와의 사이 각으로 정하고, 형상 파라미터 α 각은 a_1 와 a_4 의 사잇각으로 정한다.

각 베이스 관절에 위치 센서를 부착할 경우에 두 번째 관절들의 위치가 계산되므로 그림 2는 그림 3으로 단순하게 나타낼 수 있다. 이것은 모빌리티가 0인 다섯 개의 4절 링크이며, 각기 다

큰 기구학 파라미터를 지니는 platform의 경우에 있어서 B와 E에 센서를 부착하면 D와 G를 제외한 모든 위치를 알 수 있으므로 그림 4, 5와 같이 두 점의 위치와 두 변의 길이를 아는 삼각형의 형태에서 나머지의 위치를 계산할 수 있다. 이때 (X_{12}, Y_{12}) 의 위치를 기준으로 정한다면 그림 4(elbow up), 5(elbow down)에서와 같이 두 가지의 단순한 구조로 나타낼 수 있다. ϕ_1 은 platform과 기준좌표계의 사이각을 나타내고 그림 4에서 다음과 같이 정의된다.

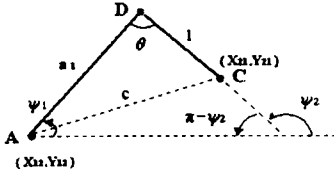


그림 4. 그림 4의 ABC삼각형 (elbow up)

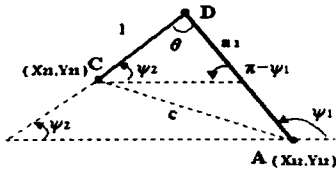


그림 5. 그림 4의 ABC삼각형 (elbow down)

$$\phi_2 = \theta + \phi_1, \quad (1)$$

여기서, θ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + l_2^2 - c^2}{2a_1 l_2} \right). \quad (2)$$

$$\text{여기서, } c = \sqrt{(X_{21} - X_{12})^2 + (Y_{21} - Y_{12})^2}. \quad (3)$$

D의 위치를 A와 C에서 x, y 성분으로 아래와 같이 주어지며,

$$X_{12} + a \cos \phi_1 = X_{21} + l \cos \phi_2 = X_{21} + l \cos(\theta + \phi_1), \quad (4)$$

$$Y_{12} + a \sin \phi_1 = Y_{21} + l \sin \phi_2 = Y_{21} + l \sin(\theta + \phi_1). \quad (5)$$

다음과 같이 정리된다.

$$(l \cos \theta - a) \cos \phi_1 + (-l \sin \theta) \sin \phi_1 = X_{12} - X_{21}, \quad (6)$$

$$(l \sin \theta) \cos \phi_1 + (l \cos \theta - a) \sin \phi_1 = Y_{12} - Y_{21}. \quad (7)$$

이로부터 ϕ_1 의 유일한 해를 구할 수 있으며, 그림 5(elbow down)의 경우도 위와 같은 방식으로 구한다. 이처럼 ϕ_1 으로부터 그림 3의 D의 위치를 얻을 수 있으며, F, G, H의 체인에서도 같은 방식으로 계산하여 G의 위치를 알아낼 수 있으며, ϕ_1 이 방향각 \emptyset 가 된다. 형상 파라미터 a 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$a = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_4^2 - \overline{DG}^2}{2a_1 a_4} \right), \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \overline{DG} = \sqrt{(X_{42} - X_{22})^2 + (Y_{42} - Y_{22})^2}. \quad (9)$$

ABCD의 사각형의 모서리의 위치를 알고 있으므로 선분 \overline{AF} 와 \overline{DG} 의 두 개의 직선의 방정식은

$$y = \left(\frac{y_{32} - y_{12}}{x_{32} - x_{12}} \right) x - \left(\frac{y_{32} - y_{12}}{x_{32} - x_{12}} \right) x_{12} + y_{12}, \quad (10)$$

$$y = \left(\frac{y_{42} - y_{22}}{x_{42} - x_{22}} \right) x - \left(\frac{y_{42} - y_{22}}{x_{42} - x_{22}} \right) x_{22} + y_{22}. \quad (11)$$

이며, platform의 정중양점 P의 위치 x, y 는 위 두 직선의 방정식의 교차점으로 다음과 같이 나타내어진다.

$$x = \frac{ax_{12} - y_{12} - bx_{22} - y_{22}}{(a-b)}, \quad (12)$$

$$y = \frac{ab(x_{12} - x_{22}) + ay_{22} + by_{12}}{(a-b)}. \quad (13)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{y_{32} - y_{12}}{x_{32} - x_{12}}, \quad b = \frac{y_{42} - y_{22}}{x_{42} - x_{22}}. \quad (14)$$

Platform이 평행사변형일 경우에는 시스템의 대칭성으로 인하여 단지 한 개의 센서를 추가로 부착하여 정방향 기구학의 해를 얻을 수 있다. 그러나 시스템의 파라미터의 calibration을 위하여 실제 시스템에는 두 개의 센서를 부착하도록 한다.

2.2 1차 기구학

1차 기구학은 입력 속도 벡터와 출력 속도 벡터간의 관계이다. 다음에 주어지는 G행렬은 자코비안을 나타낸다. G의 좌측의 아랫첨자는 병렬형 매니플레이터의 종속 체인의 숫자이고, 우측의 윗첨자와 아래 첨자는 각각 비독립, 독립 파라미터들을 나타낸다. 또한, $[G_{\phi}^{(i)}]_{(i, \bullet)}$ 와 $[G_{\phi}^{(i)}]_{(\bullet, i)}$ 는 $[G_{\phi}^{(i)}]$ 의 i 번째 열과 i 번째 행이고, $[G_{\phi}^{(i)}]_{(i, j)}$ 은 $[G_{\phi}^{(i)}]$ 의 (i, j) 요소라고 정한다.

첫 번째 체인의 속도 관계식은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{u} = [{}_1 G_{\phi}^{(1)}]_1 \dot{\phi}, \quad (15)$$

여기서,

$$\dot{u} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad {}_1 \dot{\phi} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이다. $\dot{\alpha}$ 를 추가하여 새로운 출력 벡터 \dot{u}^* 를 다음과 같이 정의하면

$$\dot{u}^* = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (17)$$

가 되고, 첫 번째 체인의 속도 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{u}^* = \begin{bmatrix} [{}_1 G_{\phi}^{(1)}] \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} {}_1 \dot{\phi} = [{}_1 G_{\phi}^{(1)*}]_1 \dot{\phi}. \quad (18)$$

나머지 체인은 동일한 방법으로 구한 후, 이 각 식들에 대한 역변환식은 다음과 같다.

$${}_i \dot{\phi} = [{}_i G_{\phi}^{(i)*}]^{-1} \dot{u}^*. \quad (19)$$

각 체인의 첫 번째 관절을 구동 관절로 정하는 경우에는 출력 벡터와 모든 베이스 관절을 모은 입력 벡터간의 관계식은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{\phi}_a = \begin{bmatrix} [{}_1 G_{\phi}^{(1)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_2 G_{\phi}^{(2)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_3 G_{\phi}^{(3)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_4 G_{\phi}^{(4)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \end{bmatrix} \dot{u}^*, \quad (20)$$

여기서,

$$\dot{\phi}_a = (\dot{\theta}_{11} \ \dot{\theta}_{21} \ \dot{\theta}_{31} \ \dot{\theta}_{41})^T. \quad (21)$$

식 (20)의 역변환을 취하여 시스템의 1차 정방향 기구학적 관계를 다음과 같이 구한다.

$$\dot{u}^* = [G_a^{(1)*}] \dot{\phi}_a. \quad (22)$$

$$\text{여기서, } [G_a^{(1)*}] = \begin{bmatrix} [{}_1 G_{\phi}^{(1)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_2 G_{\phi}^{(2)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_3 G_{\phi}^{(3)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \\ [{}_4 G_{\phi}^{(4)*}]^{-1}_{(1, \bullet)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (23)$$

속도 벡터와 힘간에 duality가 성립되므로,

$$T_a = [G_a^{(1)*}]^T T_u. \quad (24)$$

여기서, T_u 와 T_a 는 각각 출력 힘벡터와 입력 관절 토크벡터를 나타낸다.

Platform에 가상의 액츄에이터를 부착하였다고 가정하고 그림

3에서 $\angle GAD, \angle AGF, \angle GFD, \angle FDA$ 순서로 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 로 각도를 정하면 속도관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\phi}_P = [G_{u^*}^P] \dot{u}^* \quad (25)$$

여기서,

$$[G_{u^*}^P] = \begin{bmatrix} [G_{\theta_1}^{u^*}]^{-1} \\ [G_{\theta_2}^{u^*}]^{-1} \\ [G_{\theta_3}^{u^*}]^{-1} \\ [G_{\theta_4}^{u^*}]^{-1} \end{bmatrix}, \quad \dot{\phi}_P = (\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4)^T \quad (26)$$

식 (22)과 식 (25)을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\dot{\phi}_P = [G_a^P] \dot{\phi}_a \quad (27)$$

여기서, $[G_a^P] = [G_{u^*}^P][G_{u^*}^a]$. (28)

속도벡터와 힘간의 duality의 관계에 의해서 platform의 가상의 액추에이터를 의미하는 토크벡터(T_P)와 베이스에 부착된 액추에이터의 토크벡터(T_a)와의 관계를 다음에서 구할 수 있다.

$$T_a = [G_a^P]^T T_P \quad (29)$$

여기서, $T_P = (\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4)$. (30)

3. 기구학적 설계 및 해석

3.1 기구학적 설계

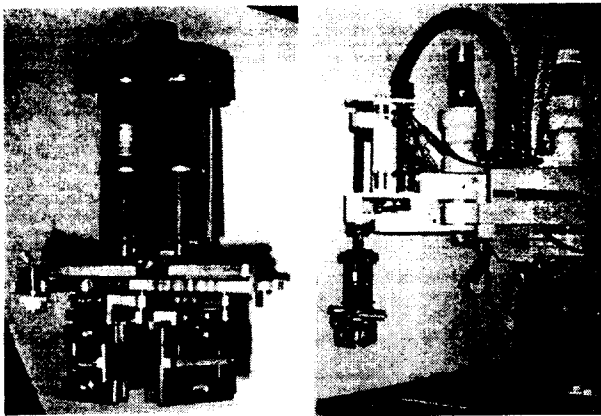


그림 6. 고안된 병렬형 매니플레이터 디자인.

고안된 병렬형 매니플레이터는 각 종속 체인의 링크 길이와 베이스의 위치, 그리고 병렬형 platform의 치수를 기구학적 파라미터로 정한다. 네 개의 종속 체인은 동일한 형태라고 가정한다. 즉, 네 개의 종속 체인의 첫 번째와 두 번째 링크의 길이가 상대적으로 동일하다. 그러므로, 두 개의 파라미터가 존재한다. platform은 정방향 기구학의 해를 쉽게 유도할 수 있도록 등변의 평행사변형으로 하였다. 그러므로, 하나의 파라미터가 주어진다(a). 주어진 gripper 메커니즘은 매니플레이터의 말단에 장착하여 사용할 수 있다. 그러므로, 네 개의 일련의 체인에 있는 베이스 위치를 대형의 매니플레이터의 말단에 로봇의 말단의 중심점을 기준으로 네 개의 위치에 대칭적으로 놓는다. 따라서, 중심으로부터 베이스의 위치까지의 하나의 파라미터(r)가 존재한다. 그림 6은 앞서 언급한 다섯 개의 파라미터를 지니는 병렬형 gripper를 나타낸다. 물체를 grasping하기 위해서는 gripper와 물체가 닿는 위치와 grasping force를 제어하여야 한다. 따라서, 본 논문에서 제안한 기구에서는 불규칙적인 형상의 물체를 잡는 힘을 측정하기 위하여 platform에 스프링으로 두 개의 판을 연결하고 한쪽에 홀센서를 부착하여 물체를 잡을 때의 두판의 간격의 변화를 측정하여 힘을 측정할 수 있도록하였고, 그리퍼와

물체가 접촉하는 플랫폼 상의 위치를 판별하기 위하여 텍탈센서를 부착할 수 있도록 고안되었다.

각 링크의 길이는

$$l_{11} = l_{12} = 0.05m, \quad a = 0.054m, \quad r = 0.02m. \quad (31)$$

이며, 앞에서 서술한 바와 같이 platform이 등변의 평행사변형 꼴이므로 다섯 개의 센서를 이용하여 정방향 기구학의 해를 구하며, 기구학적 파라미터의 calibration을 위하여 여분의 센서를 포함한 총 여섯 개의 센서를 사용하였다

3.2 등방성 지수 및 grasping force

제안한 모델의 기구학적 설계에 대한 해석을 위하여 병렬형 매니플레이터의 등방성 지수와 병렬형 platform의 grasping force를 고려한다. 사용된 힘벡터와 입력 힘벡터 간의 관계에서 platform의 grasping force T_a 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_a = [G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)}^T T_a \quad (32)$$

여기서, $[G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)}^T$ 는 $[G_a^{u^*}]^T$ 의 네 번째 열을 나타낸다.

입력 힘벡터에 대한 grasping force의 2-norm의 비는 다음과 같이 나타내어지며

$$\frac{\|T_a\|}{\|T_a\|} = \left\{ \frac{T_a^T [G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)} [G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)}^T T_a}{T_a^T T_a} \right\}^{\frac{1}{2}} = p, \quad (33)$$

여기서, 스칼라 p 는

$$p = \{ [G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)} [G_a^{u^*}]_{(\cdot,4)}^T \}^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

그리고, grasping force의 2-norm은 다음과 같다.

$$\|T_a\| = p \cdot \|T_a\| \quad (35)$$

작업 공간에서의 고른 기구학적 운동성을 지니는지 여부를 판별하기 위하여 등방성 지수를 고려한다. 등방성지수는 다음과 같이 $[G_a^{u^*}]$ 의 최대 특이값과 최소 특이값 간의 비(σ_I)로 정의된다.

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (36)$$

작업 공간은 grasping이후의 미소위치 이동을 고려하여 다음과 같이 작게 정한다.

$$-0.01m \leq \Delta x, \Delta y \leq 0.01m, \quad (37)$$

여기서, $\Delta x, \Delta y$ 는 작업 공간의 중심으로부터 x 와 y 방향으로의 이동 가능 거리를 나타낸다. Platform의 방향각 90° 로 하면 형상제어 파라미터에 따른 값은 다음(그림 7 - 10)과 같이 나타난다.

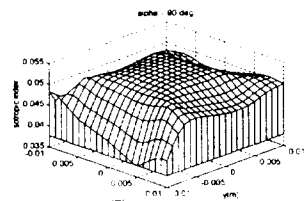


그림 7. α 각이 90° 일 때의 등방성 지수.

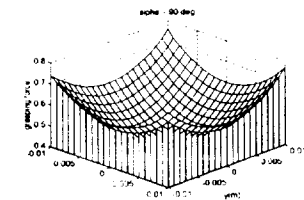


그림 8. α 각이 90° 일 때의 grasping force.

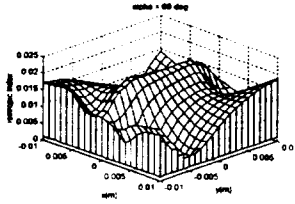


그림 9. α 각이 60° 일 때의 등방성 지수.

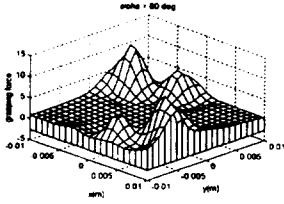


그림 10. α 각이 60° 일 때의 grasping force.

그림들을 살펴보면 등방성 지수와 grasping force의 값은 서로 상반되는 결과를 보여준다. 그리고, platform의 형태가 접혀질수록 α 각이 90° 일 때보다 등방성의 특성이 작아지는 반면에 grasping force가 증가함을 살펴볼 수 있다.

3.3 액추에이터 토크와 grasping force와의 관계

그림 11은 platform의 각 모서리에 가상의 액추에이터를 부착하였을 경우의 각 platform 링크의 free-body diagram을 나타낸다. 여기서, platform위의 가상의 액추에이터에서의 토크를 식 (30)에서 정의한 바와 같이 T_P 으로 정의하고, 물체에서부터 각 링크에 가해지는 힘을 F_1, F_2, F_3, F_4 로 정의한다. 그리고, 각 링크에 대하여 3개의 평형관계식이 존재하고 4개의 링크가 존재하므로 총 12개의 식이 얻어진다. 미지수는 8개의 반력과 4개의 토크로 총 12개가 12원 12차 연립방정식으로 귀결된다. 각 링크에 대한 힘평형관계식은 다음과 같다.

$$\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0, \Sigma \tau = 0. \quad (38)$$

$$R_{1x} = R_{2x}, R_{1y} + F_1 - R_{2y} = 0, \tau_1 = -r_1 F_1 + a_1 R_{2y} + \tau_2,$$

$$R_{2y} = R_{3y}, R_{2x} + F_2 - R_{3x} = 0, \tau_2 = -r_2 F_2 + a_2 R_{3x} + \tau_3,$$

$$R_{3x} = R_{4x}, R_{3y} + F_3 - R_{4y} = 0, \tau_3 = -r_3 F_3 - a_3 R_{4y} + \tau_4,$$

$$R_{4y} = R_{1y}, R_{4x} + F_4 - R_{1x} = 0, \tau_4 = -r_4 F_4 - a_4 R_{1x} + \tau_1.$$

위의 식을 이용하여 다음과 같이 행렬로 정리한다.

$$A(R_{1x} \ R_{1y} \ R_{2x} \ R_{2y} \ R_{3x} \ R_{3y} \ R_{4x} \ R_{4y} \ \tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4)^T = (0 \ r_1 F_1 \ F_1 \ 0 \ 0 \ r_2 F_2 \ r_3 F_3 \ 0 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ r_4 F_4)^T. \quad (39)$$

여기서, A는 12×12 행렬, F_i 와 r_i 는 물체를 잡는 힘과 물체접촉위치를 나타낸다. 접촉위치는 다음과 같이 구할 수 있다. 그림 12로부터 선분 \overline{BP} , \overline{DP} 는 같은 길이이고, $\angle BAF$ 와 $\angle BPC$ 는 $\frac{\alpha}{2}$ 이며, 삼각형 ACP와 BCP는 닮은꼴이므로 r_1 은 다음과 같이 구해진다.

$$r_1 = a \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (40)$$

같은 방식으로 r_2, r_3, r_4 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_3 = a \cos^2 \frac{\alpha}{2}, \quad r_2 = r_4 = a \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (41)$$

물체를 잡는 힘 F_i 는 platform이 대칭인 형태를 지니는 물체를 잡을 경우, 각 링크에 미치는 힘은 동일하므로 모두 F 라고 가정한다. 이상의 방법으로부터 물체를 잡는 힘 F 와 그리퍼 링크의 물체접촉위치를 측정하면 식 (39)를 역변환하여 그리퍼의 각

모서리에서의 가상의 토크벡터 T_P 를 구할 수 있으며, 다시 2.2 절의 식 (29)의 관계로부터 베이스 액추에이터에서 부담해야 할 토크 T_e 를 얻을 수 있다.

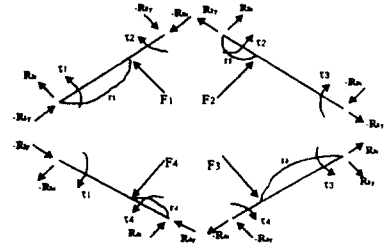


그림 11. platform의 free-body diagram

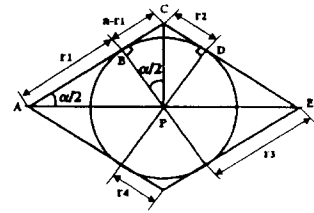


그림 12. 대칭인 물체를 잡았을 때 platform의 형태

4. 결론

현재의 산업용 로봇 gripper는 불규칙하거나 큰 부피의 물체를 잡을 수 없는 단순한 형태를 지니고 있다. 본 논문에서는 다양한 형태의 물체를 잡을 뿐 아니라, 잡은 후에 미소의 위치 제어가 가능한 병렬형 매니플레이터를 제안, 구현하였으며, 실험에 앞서 모의실험을 통해 메카니즘의 특성을 고찰하고 grasping force제어 알고리즘을 제안하였다.

추후 과제는 제안된 매니플레이터를 사용한 다양한 물체의 grasping 및 미소 위치 이동 실험과 힘 센서 없이 관측기를 사용한 grasping force 제어 알고리즘의 개발 및 실험 등이다. 또한, 일반적인 평면형 그리고 공간형 형상제어 메카니즘에 대한 해석과 제어 알고리즘 개발 등이 있다.

References

- [1] Colbaugh, R. Seraji, H., and Glass, K., "Obstacle Avoidance for Redundant Robots Using Configuration Control," *Journal of Robotic Systems* Vol. 6, pp. 72-744 1989.
- [2] Burdick, J.W., "On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators : Characterization of the Self-Motion Manifolds," *IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 264-270 1989.
- [3] Hayward, V. and Kurtz, R., "Multi-Criteria Design of a Parallel Wrist Mechanism with Actuator Redundancy," *Journal of Robotics and Automation* Vol. 8, No. 5, pp. 644-651 1992.
- [4] Yi, B.J., Oh, S-R., Suh, I.H., and You, B.J., "Synthesis of Frequency Modulator via Redundant Actuation : The Case for a Five-bar Finger Mechanism," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)* Sept. 1997.
- [5] Merlet, "Direct Kinematics of Planar Parallel Manipulator," *IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 3744-3750 April 1996.
- [6] Han, K., Chung, W.K., and Youm, Y., "Local Structurization for the Forward Kinematics of Parallel Manipulators Using Extra Sensor Data," *IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 541-520 April 1995.