

# 병렬형 그리퍼 메커니즘

조국훈\*, 이재훈\*, 이병주\*, 김희국\*\*

## Parallel Gripper Mechanism

Kuk Hoon Cho\*, Jae Hoon Lee\*, Byung-Ju Yi\*, and Whee Kuk Kim\*\*

### ABSTRACT

A new parallel gripper mechanism is proposed in this work. This device has a parallelogrammic 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 used as a micro-positioning device after grasping. Based on the position and kinematic analysis for this mechanism, this mechanism has been developed and the motion performance has been tested to corroborate the effectiveness of this mechanism.

**Key Words** : Parallel Mechanism (병렬형 메커니즘), Gripper (그리퍼)

### 1. 서론

로봇 매니플레이터는 크게 직렬형 매니플레이터와 병렬형 매니플레이터 그리고 이를 혼합한 형태를 가지는 혼합형 매니플레이터로 구분할 수 있다. 직렬형 매니플레이터는 큰 작업 공간과 우수한 기구학적 특성을 지니고 있으므로 많은 분야에서 다양한 목적으로 사용되고 있다. 그러나 직렬 매니플레이터는 관절과 링크가 반복적으로 연결되는 외팔보의 구조로 인하여 낮은 강성을 가지며 로봇 끝단에 적은 적재하중용량을 가진다. 또한 외팔보 구조로 인하여 로봇 말단에서의 오차가 큰 단점을 가지고 있다. 한편, 병렬형 매니플레이터는 직렬형 매니플레이터에 비해 작업 공간이 작아지는 단점이 있으나 시스템을 구성하는 여러 개의 직렬 체인들에 하중이 분산되므로 직렬형 매니플레이터보다 훨씬 큰 강성을 가지며, 또한 큰 강성으로 인하여 높은 정밀도를 가지므로 고정밀도 작업이나 큰 하중

을 요구하는 작업에 적합하다.

직렬형 매니플레이터는 정위치 해석이 손쉬운 반면에 일반적인 병렬형 매니플레이터의 정위치 해석은 고차의 비선형 문제로 나타내어지며 복수해가 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하는 방법으로 대부분 수치해석에 의존하고 있으므로 많은 계산량이 요구되며, 이로 인해 실시간 제어에 있어서 성능의 저하를 발생시키는 요인중의 하나가 된다. 따라서 일반적인 형태의 병렬형 매니플레이터에 대한 정위치 해석 해를 구하는 문제에 대한 연구가 활발히 진행되어오고 있다<sup>[1,2]</sup>. 또한 로봇 매니플레이터의 성능은 설계 단계에서 결정된다고 할 수 있으므로 정해진 사양을 지니는 시스템의 설계를 위해서 매니플레이터의 기구학적 그리고 동역학적 특성에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

산업용 로봇은 그 기능, 특성상 필요성에 의해 매니플레이터의 말단부에 말단장치를 부착시킨다. 이것은 인간의 손에 대응되는 것으로서 메커니즘

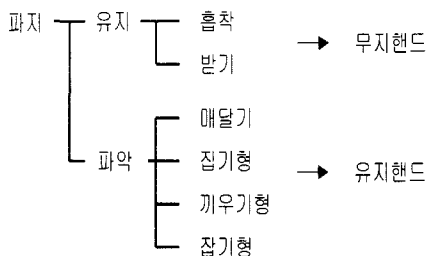
\* 한양대학교 전자컴퓨터공학부

\*\* 고려대학교 제어계측공학과

핸드(mechanical hand)라고 칭하며 다루는 대상 물체를 "파지"해 이동하는 목적에 사용되는 도구이다.

파지동작은 표1로 세분된다. 인간의 손, 손가락에는 많은 관절이 있으며 여러 가지 작업이 가능하다. 일상 생활에서의 붙잡기 형식을 분류한 것으로는 슬래징거의 12형식<sup>11,12)</sup>이 있다. 여기서 인간의 손에는 손가락이 있어서 그것을 유지(有指) 핸드로 이름 붙이면 메커니컬 핸드에는 손가락이 없는 구성법이 있는데 이것을 무지(無指)핸드라고 이름 붙이기로 한다. 이 무지 핸드는 기계적·물리적으로 구조상 무지핸드로 한 것과 공구가 메커니컬 핸드와 일체화했다고 생각하는 공구 핸드가 있다.

Table 1 Six types of Grasping



메커니컬 핸드를 분류해 보면 다음과 같다. 진공이나 자기 이용의 흡착 등 물리적 흡착형의 유지는 보통 평면(완만한 곡선도 포함)부를 흡착하는 형태로서 물체의 크기나 중량에 따라 여러 개가 설치되는 경우도 있다. 그러나, 물체 표면에 만곡부가 있는 경우나 구멍이나 공동이 있는 경우에는 적용할 수 없게 된다. 자력을 이용한 경우 철금속 재료를 다루게 되는데 경우에 따라서 매우 효율적이고 신뢰성이 높기는 하지만 물체에 잔류 자력이 남게 되는 문제점이 있다. 받기형의 유지는 지지의 동작만을 가지고 있는 형태이며 이는 전기한 흡착형보다 적극적이 아니어서 약한 구속을 갖는다. 변형하기 쉬운 물체의 이송 등에 이를 채택한다. 매달기형의 유지는 중력 방향의 이동 1자유도를 구속한

다. 집기형 파지는 유연성에 의한 변형으로 접촉 면적을 크게 하여 집는 형태이다. 현재 많이 사용하고 있는 끼우기형 파지 형태는 핸들링 대상물을 외측에서 파지하거나 구멍 속에 손가락을 넣은 후 벌려서 내측 사용면을 이용하는 등의 파지 종류이다. 그 외의 핸드 그 자체를 아크 용접, 스폿 용접, 도장 건 등의 공구로 하는 다양한 종류의 형태가 있다. 최근에는 이 메커니컬 핸드 이외에도 말단부에 도장에서의 스프레이 건, 용접에서의 스폿 용접기, 아크 용접기, 공구 등이 장착되어 사용되어진다. 인간의 손을 물체를 파지하는 기기로 볼 때 대단히 우수한 기능을 발휘하는 것은 손을 가진 인간으로서 누구나 인정하는 바이다. 1980년 초부터 Stanford대학/JPL<sup>13)</sup>, Utah/MIT 대학<sup>14)</sup>, 일본 MEL 연구소<sup>15)</sup>, 독일<sup>16)</sup> 등 세계 각지 그리고 국내에서도 로봇 그리퍼를 개발하여 왔으나, 인간의 손이 가지는 기능을 기초로 메커니컬 핸드의 설계를 하는 기술은 아직도 미흡한 단계라고 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 산업현장에서의 다지 손 형태의 메커니컬 핸드의 역할은 극히 제한된 실정이며, 단순한 1 자유도 그리퍼를 활용한 물체의 파지동작에 국한되고 있다. 그러나, 기존의 단순한 형태를 지니는 로봇 그리퍼들은 임의의 모양을 지닌 물체를 파지하는데 있어서 어려움이 있음을 살펴볼 수 있다. 즉, 불규칙한 모양을 안전하게 파지하기 위해서는 비전을 이용하여 물체의 형태를 파악한 후에 파지위치를 결정해야 하는 어려움이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 임의의 불규칙한 모양을 지니는 물체나 큰 부피의 물체를 손쉽게 파지할 수 있는 병렬형 그리퍼 메커니즘을 제안하고자 한다. 이러한 메커니즘은 접히는 사각형의 형태를 이루는 플랫폼을 이용하여 물체를 파지하기 때문에 임의의 불규칙한 모양을 지니는 물체의 파지에도 유용하게 적용될 수 있으며 큰 부피의 물체도 파지하기에도 적합하다. 또한, 병렬형의 구조를 지니고 있으므로 기존의 직렬형 그리퍼보다 가반하중(즉, 그리퍼가 물체를 파지하는 최대한의 힘)이 큰 장점이 있다. 뿐만 아니라, 물체의 파지 후에도 3 자유도 미소한 위치제어를 할 수 있으므로 큰 동작을 하는 상단의 매니플레이터의 움직임 없이 작업공간이 작은 작업에 대하여 그리퍼의 제어만으로 위치 오차를 보정하는 작업이 가능하다. 따라서, 병렬형 그리퍼는 임의의 물체를 안정되게 파지할 뿐만 아니라 흡 등에 삽입할 경우에

용이하게 사용되리라 기대된다.

본 연구의 목적은 형상제어 기능을 갖는 새로운 형태의 평면형 병렬 그리퍼 메커니즘에 대한 모델링, 구현 및 위치 제어실험을 통한 성능실험에 중점을 둔다.

## 2. 병렬형 그리퍼의 개념

여유자유도를 활용하여 관절 공간의 형태를 제어하는 방식을 형상제어(configuration control)라 칭하며, 이러한 분야에 대한 연구는 활발하게 진행되어 오고 있다<sup>[7-8]</sup>. 그러나, 로봇 공학 분야에서의 형상제어는 직렬형 여유자유도 매니플레이터에서 수행되어 왔으며, 병렬형 로봇 시스템에 대한 연구가 많이 진행되어오고 있지만<sup>[9-13]</sup>, 플랫폼 형상제어에 대한 연구는 아직 전례를 찾아볼 수 없다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 병렬형 그리퍼는 병렬형 시스템에서의 플랫폼 형상제어에 관한 연구로서 새로운 시도라고 사료된다.

운동성(mobility)은 어느 특정한 시스템의 작업 공간의 모든 위치에서의 운동을 제어하는데 필요한 최소한의 파라미터의 개수를 의미하며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$M = N(L-1) - \sum_{i=1}^J (N-F_i) \quad (1)$$

여기서,  $N$ ,  $L$ ,  $J$ , 그리고  $F_i$  는 각각 링크(또는 강체)의 운동 자유도(즉, 평면운동에서 3, 공간운동에서 6), 시스템의 링크의 개수, 시스템의 관절의 수, 그리고 각 관절의 운동 자유도를 나타낸다. 또한, 운동성은 시스템의 액추에이터의 최소한의 개수를 표현한다.  $M$ 이  $N$ 보다 클 때, 이 시스템은 기구학적 여유자유도 시스템이라 불린다.

Fig. 1에 주어진 병렬형 시스템은 평면에서 플랫폼이 강체인 경우인데 이 경우의 운동성은 3이다. 따라서, 플랫폼의 임의의 점에서의  $x$ ,  $y$  방향 위치와 회전 각도를 제어하는 목적으로 사용된다. 각 베이스의 관절에 액추에이터를 부착하여 사용할 경우에, 이처럼 네 개의 폐쇄 체인을 지닌 병렬형 메커니즘은 세 개의 폐쇄 체인 병렬형 메커니즘보다 강인성, 부하 하중 능력이 향상된다. 한편, Fig. 2에 주어진 시스템은 플랫폼의 링크들이 회전관절로 연결되며 플랫폼의 모서리 부분은 Fig. 3에 표현된 것같이 두 개의 회전 관절로 구성되므로 플랫폼

의 모양이 변화될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 병렬형 매니플레이터, 플랫폼의 임의의 점에서의  $x$ ,  $y$  방향 위치와 회전각도, 그리고 하나의 플랫폼 형상 파라미터를 조절할 수 있는 기능이 있다. 이러한 형상제어의 기능을 가진 병렬형 매니플레이터는 로봇 그리퍼로 활용할 수 있으리라 기대된다. 작업에 따라서는 그리퍼의 교체 없이 한 개의 그리퍼로서 여러 작업을 마칠 수 있어서 작업의 효율을 높이는 효과도 기대된다.

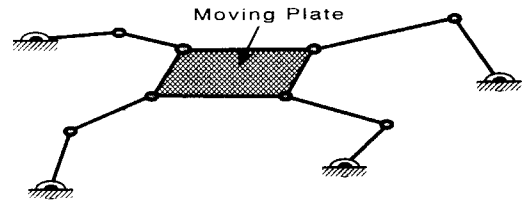


Fig. 1 Parallel mechanism with Mobility 3

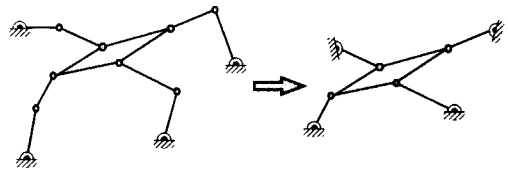


Fig. 2 Parallel mechanism with Mobility 4

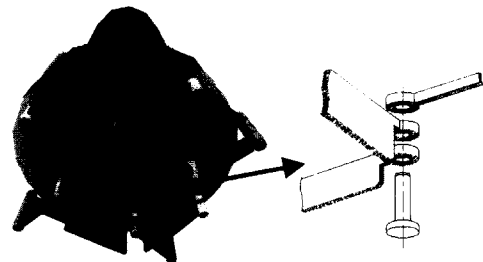


Fig. 3 Conceptual schematic for parallel gripper

### 3. 병렬형 그리퍼의 기구학 모델링 및 해석

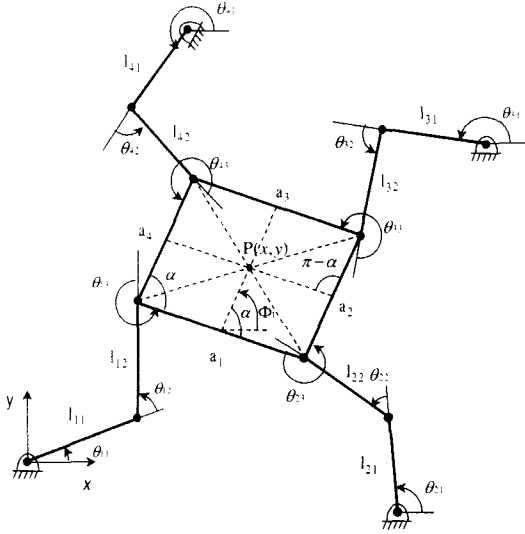


Fig. 4 Kinematic description of parallel gripper with Mobility 4

#### 3.1 역방향 기구학

역기구학에서는 Fig. 4에 주어진 병렬형 그리퍼의  $x, y$  위치와 방향각  $\phi$ , 그리고 플랫폼의 형상 파라미터  $\alpha$ 에 대하여 각 체인에서의 관절 각을 구한다. 첫 번째, 두 번째, 세 번째, 그리고 네 번째의 체인에 대해서, 플랫폼의 중앙  $x, y$  위치와 각 일련의 체인의 방향각  $\phi$ 는 다음과 같이 정의된다.

첫 번째 체인에 대하여

$$\phi_1 = \theta_{11} + \theta_{12} + \theta_{13} + \alpha, \quad (2)$$

$$x = l_{11}c_{11} + l_{12}c_{11+12} + \frac{a_1}{2}c_{11+12+13} + \frac{a_4}{2}c_{\phi}, \quad (3)$$

$$y = l_{11}s_{11} + l_{12}s_{11+12} + \frac{a_1}{2}s_{11+12+13} + \frac{a_4}{2}s_{\phi}. \quad (4)$$

두 번째 체인에 대하여

$$\phi_2 = \theta_{21} + \theta_{22} + \theta_{23} + \pi - \alpha, \quad (5)$$

$$x = x_{o1} + l_{21}c_{21} + l_{22}c_{21+22} + \frac{a_2}{2}c_{21+22+23} + \frac{a_1}{2}c_{\phi}, \quad (6)$$

$$y = y_{o1} + l_{21}s_{21} + l_{22}s_{21+22} + \frac{a_2}{2}s_{21+22+23} + \frac{a_1}{2}s_{\phi}. \quad (7)$$

세 번째 체인에 대하여

$$\phi_3 = \theta_{31} + \theta_{32} + \theta_{33} + \alpha, \quad (8)$$

$$x = x_{o2} + l_{31}c_{31} + l_{32}c_{31+32} + \frac{a_3}{2}c_{31+32+33} + \frac{a_2}{2}c_{\phi}, \quad (9)$$

$$y = y_{o2} + l_{31}s_{31} + l_{32}s_{31+32} + \frac{a_3}{2}s_{31+32+33} + \frac{a_2}{2}s_{\phi}. \quad (10)$$

네 번째 체인에 대하여

$$\phi_4 = \theta_{41} + \theta_{42} + \theta_{43} + \pi - \alpha, \quad (11)$$

$$x = x_{o3} + l_{41}c_{41} + l_{42}c_{41+42} + \frac{a_4}{2}c_{41+42+43} + \frac{a_3}{2}c_{\phi}, \quad (12)$$

$$y = y_{o3} + l_{41}s_{41} + l_{42}s_{41+42} + \frac{a_4}{2}s_{41+42+43} + \frac{a_3}{2}s_{\phi}. \quad (13)$$

여기서,  $x_{oi}$ 와  $y_{oi}$  ( $i=1-3$ )는 각각 기준좌표계 원점으로 부터 각 체인의 베이스 위치를 나타낸다.

첫 번째 체인에 대한 역기구학 해를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_{12} = \text{Atan2}(s_{12}, c_{12}), \quad (14)$$

여기서,

$$c_{12} = \frac{x'^2 + y'^2 - l_{11}^2 - l_{12}^2}{2l_1l_{12}}, \quad s_{12} = \sqrt{1 - c_{12}^2}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x' &= x - \frac{a_1}{2}c_{11+12+13} - \frac{a_4}{2}c_{11+12+13+\alpha}, \\ &= l_{11}c_{11} + l_{12}c_{11+12} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} y' &= y - \frac{a_1}{2}s_{11+12+13} - \frac{a_4}{2}s_{11+12+13+\alpha}, \\ &= l_{11}s_{11} + l_{12}s_{11+12} \end{aligned} \quad (17)$$

그리고

$$\theta_{11} = \text{Atan2}(y, x) - \text{Atan2}(k_2, k_1), \quad (18)$$

여기서,  $k_1, k_2$ 는

$$k_1 = l_{11} + l_{12}c_{12}, \quad k_2 = l_{12}s_{12}, \quad (19)$$

그리고

$$\theta_{13} = \phi_1 - \alpha - (\theta_{11} + \theta_{12}). \quad (20)$$

나머지 체인에 대한 역기구학 해는 같은 방법으로 구한다.

#### 3.2 일차 기구학

본 연구에서는 KIC(Kinematic Influence Coefficient)방법과 d'Alembert의 법칙을 접목하여 시스템 관계식이 벡터형으로 표현되는 모델링 방식을 사용한다.<sup>[13]</sup>

페루프 체인은 Open-Tree Structure 상황하에서 여러 개의 직렬체인이 특정한 구속조건으로 묶여서 이루어져 있음을 살펴볼 수 있다. 따라서, 페루프 체인의 기구학 모델에 대한 소개에 앞서, 직렬 체인의 기구학을 소개한다. 모델링에 앞서 표기에

대하여 간단히 소개하면,  $G$ 는 일차미분을 나타내며, 위 접사는 고려되거나 지시하는 종속 매개변수를 나타내고 아래첨자는 독립 매개변수를 나타낸다.

페루프 체인의  $r$  번째 직렬 체인의 자코비안(Jacobian)은  $M \times 1$ 의 차원을 지닌 종속 변수의 속도 벡터  $\dot{\mathbf{u}}$ 과  $N \times 1$ 의 차원을 지닌 독립 변수의 속도 벡터  ${}_r\dot{\phi}_a$ 과의 관계를 나타내어 준다. 다음의 속도 관계식에서

$$\dot{\mathbf{u}} = [{}_rG_\phi^u] {}_r\dot{\phi}_a \quad (21)$$

자코비안  $[{}_rG_\phi^u]$ 는  $M \times N$ 의 차원을 지니며, 아래와 같이 정의된다.

$$[{}_rG_\phi^u] = \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \phi_1}, \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \phi_2}, \dots, \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \phi_n} \right], \quad (22)$$

여기서,  $[{}_rG_\phi^u]$ 의  $i$  번째 행은 출력 벡터  $\mathbf{u}$ 의  $i$  번째 입력 요소  $u_n$ 에 대한  ${}_r\phi$ 의 편미분이고,  $[{}_rG_\phi^u]$ 의  $i$  번째 열은 출력 벡터  $\mathbf{u}$ 에 대한  $i$  번째 입력 요소  $\phi_i$ 의 편미분이다. 이 때  $[{}_rG_\phi^u]$ 를 일차 기구학적 영향계수(First Order Kinematic Influence Coefficient)라 정의한다.

$[G_\phi^u]_{(*,i)}$ 와  $[G_\phi^u]_{(i,*)}$ 는  $[G_\phi^u]$ 의  $i$ 번째 열과  $i$ 번째 행이고,  $[G_\phi^u]_{(i,j)}$ 은  $[G_\phi^u]$ 의  $(i, j)$  요소라고 정한다.

Fig. 4의 첫 번째 체인의 속도 관계식은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{\mathbf{u}} = [{}_1G_\theta^u] {}_1\dot{\theta}, \quad (23)$$

여기서,

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, {}_1\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

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

$$\dot{\mathbf{u}}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

첫 번째 체인의 속도 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{u}}^* = \begin{bmatrix} [{}_1G_\theta^u] \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} {}_1\dot{\theta} = [{}_1G_\theta^{u*}] {}_1\dot{\theta} \quad (26)$$

나머지 체인은 같은 방법으로 구한 후, 이 각 식들에 대한 역변환식을 다음과 같이 구한다.

$${}_i\dot{\theta} = [{}_iG_\theta^{u*}]^{-1} \dot{\mathbf{u}}^*. \quad (27)$$

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

$$\dot{\theta}_a = \begin{bmatrix} [{}_1G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_2G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_3G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_4G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}^*, \quad (28)$$

여기서,

$$\dot{\theta}_a = (\dot{\theta}_{11} \ \dot{\theta}_{21} \ \dot{\theta}_{31} \ \dot{\theta}_{41})^T. \quad (29)$$

식 (28)의 역변환을 취하여 시스템의 일차 정방향 기구학적 관계를 다음과 같이 구한다.

$$\dot{\mathbf{u}}^* = [G_a^{u*}] \dot{\theta}_a, \quad (30)$$

여기서

$$[G_a^{u*}] = \begin{bmatrix} [{}_1G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_2G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_3G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \\ [{}_4G_\theta^{u*}]^{-1}_{(1,*)} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (31)$$

속도 벡터와 힘벡터에 duality가 성립되므로,

$$\mathbf{T}_a = [G_a^{u*}]^T \mathbf{T}_u, \quad (32)$$

여기서,  $\mathbf{T}_u$ 와  $\mathbf{T}_a$ 는 각각 출력 힘벡터와 입력 관절 토크벡터를 나타낸다.

### 3.3 기구학적 성능 지수

작업 공간에서의 고른 기구학적 운동성을 지니기 위하여 등방성 지수를 고려한다. Jacobian은 SVD(Singular Value Decomposition)방법을 사용하여

$$[G_\theta^{u*}] = UDV^T, \quad (33)$$

로 표현할 수 있다. 여기서,  $U$ 는 출력공간에 관련된 관절 벡터로 구성된  $4 \times 4$ 행렬,  $D$ 는 대각 요소가 특이값들로 이루어진  $4 \times 4$  대각행렬,  $V$ 는 입력공간에 관련된 관절 벡터로 구성된  $4 \times 4$ 행렬이 된다. 대각 행렬을 구성하는 특이값들 중 최대 특이값( $\sigma_{\max}$ )과 최소 특이값( $\sigma_{\min}$ )의 비는 자코비안의 등방성 지수(Jacobian isotropic index)를 의미하며, 다음 식과 같이 정의된다<sup>[14]</sup>.

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (34)$$

등방성 지수는 Manipulability Ellipsoid에서 최강속 대 최단축의 비로서 설명되는데 이 값이 1에 가까워질수록 Manipulability Ellipsoid는 원에 가까워진다. 이는 그 지점에서 그리퍼의 중앙점이 모든 방향에 대하여 고른 속도전달분포를 지닌다는 것을 의미한다. 반대로 작업공간내의 특이점에서는 등방성 지수가 0이 된다. 전 작업공간에 걸쳐서 분포된 등방성 지수의 대표값으로 전역 등방성 지수는 다음과 같이 정의한다.

$$\Sigma_I = \frac{\int_W \sigma_I dW}{\int_W dW} \quad (35)$$

**파지힘(grasping force)**

사용된 힘벡터와 입력 힘벡터 간의 관계에서 플랫폼의 파지힘(grasping force)  $T_a$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_a = [G_a^{**}]_{(*,4)}^T T_a \quad (36)$$

여기서,  $[G_a^{**}]_{(*,4)}^T$ 는  $[G_a^{**}]^T$ 의 네 번째 열을 나타낸다. 입력 힘벡터에 대한 파지힘(grasping force)의 2-norm의 비는 다음과 같이 나타내어지며

$$\frac{\|T_a\|}{\|T_a\|} = \left\{ \frac{T_a^T [G_a^{**}]_{(*,4)} [G_a^{**}]_{(*,4)}^T T_a}{T_a^T T_a} \right\}^{\frac{1}{2}} = p \quad (37)$$

여기서, 스칼라 p는

$$p = \{ [G_a^{**}]_{(*,4)} [G_a^{**}]_{(*,4)}^T \}^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

그리고, 파지힘(grasping force)의 2-norm은 다음과 같다.

$$\|T_a\| = p \cdot \|T_a\| \quad (39)$$

그리퍼의 전체 작업 구간에 대한 파지힘의 평균값은 다음과 같이 정의한다.

$$\Sigma_F = \frac{\int_W \|T_a\| dW}{\int_W dW} \quad (40)$$

**4. 병렬형 그리퍼의 구현 및 실험**

**4.1 병렬형 그리퍼의 구현**

Figs. 5-7은 본 연구에서 개발한 병렬형 그리퍼의 외형사진이다. Fig. 5와 Fig. 6은 모터가 장착된

병렬형 그리퍼의  $\alpha$ 각을 각각  $90^\circ$ 와  $135^\circ$ 로 접힌 상태의 모습을 나타낸다. Fig. 7은 고안된 그리퍼를 SCARA 로봇의 말단에 장착하였을 때의 모습이다. 고안된 병렬형 매니퓰레이터의 각 종속 체인의 링크 길이와 베이스의 위치, 그리고 병렬형 플랫폼의 치수는 다음과 같이 정하며

$$l_1 = l_2 = 0.05m, a = 0.054m, r = 0.02m \quad (41)$$

플랫폼은 정방향 기구학의 해를 쉽게 유도할 수 있도록 등변의 평행사변형으로 정한다.

물체를 안전하게 파지하기 위해서는 그리퍼와 물체가 접촉하는 위치와 파지힘을 측정하여야 한다. 따라서, 불규칙적인 형상의 물체를 잡는 힘을 측정하기 위하여 그리퍼 표면에 힘센서를 부착할 수 있도록 고안하였다. 또한, 단일한 정방향 해를 구하기 위하여 네 개의 모터에 장착된 네 개의 엔코더 이외에, 병렬형 그리퍼를 구성하는 네 체인 중에 두 체인의 두 번째 수동관절에 각각 포텐시오미터를 추가로 부착시킨다.

**4.2 등방성 지수 및 파지힘 해석**

제안한 모델의 기구학적 특성에 대한 해석을 위하여 병렬형 매니퓰레이터의 등방성 지수와 병렬형 플랫폼의 파지힘을 고려한다. 사용된 힘벡터와 입력 힘벡터 간의 관계에서 플랫폼의 파지힘  $T_a$ 와 등방성 지수는 3.3절에서 정의하였다. 작업 공간은 물체를 잡은 이후의 미소위치 이동을 고려하여 다음과 같이 정한다.

$$-0.01m \leq \Delta x, \Delta y \leq 0.01m \quad (42)$$

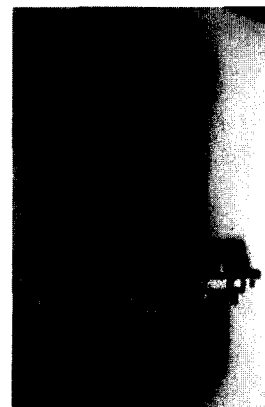


Fig. 5 Shape of designed parallel gripper

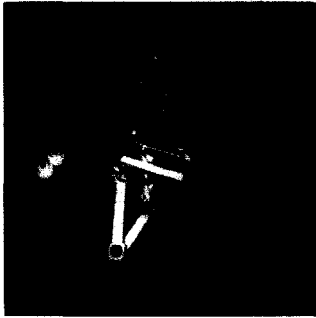


Fig. 6 Folded shape of parallel gripper

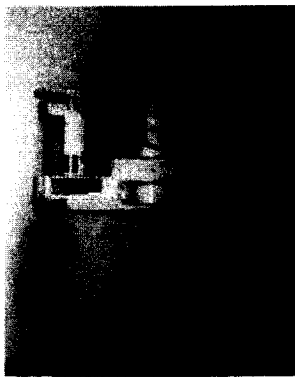


Fig. 7 Assembled configuration

Figs. 8-11은 플랫폼의 방향각은  $0^\circ$ 로 고정시킨 상태에서 형상제어 파라미터에 대한 등방성 지수와 파지힘의 값을 나타낸다. 이 결과를 살펴보면 등방성 지수와 파지힘의 값은 서로 상반되는 현상을 보여준다. 플랫폼의 형태가 접혀질수록 다시 말해,  $\alpha$ 각이  $60^\circ$ 일 때가  $\alpha$ 각이  $90^\circ$ 일 때보다 등방성의 특성이 작아지는 반면에 파지힘이 증가함을 살펴볼 수 있다.

### 4.3 위치제어실험

병렬형 그리퍼에 대한 원리를 확인하기 위한 실험으로 직선 이동(Line Motion)과 원 궤적 이동(Circle Motion) 실험을 수행하였으며, 이 때의 제어 블록선도는 Fig. 12와 같다.

$\theta_d$ 는 작업공간에서 주어진 궤적에 대하여 역기구학으로 계산된 관절각들을 나타내며,  $\theta$ 는 관절

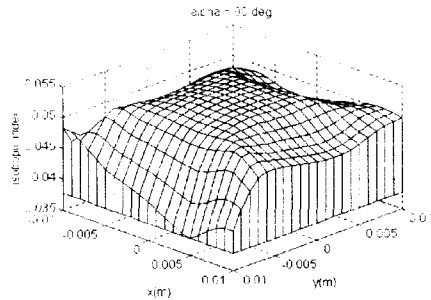


Fig. 8 Isotropic index for  $\alpha=90^\circ$

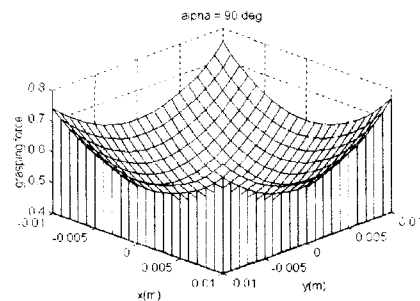


Fig. 9 Grasping force for  $\alpha=90^\circ$

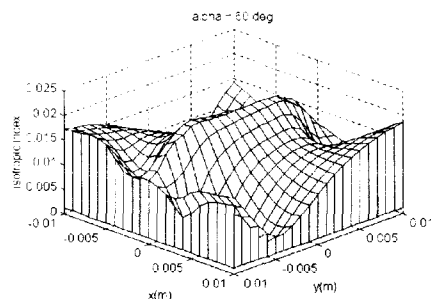


Fig. 10 Isotropic Index for  $\alpha=60^\circ$

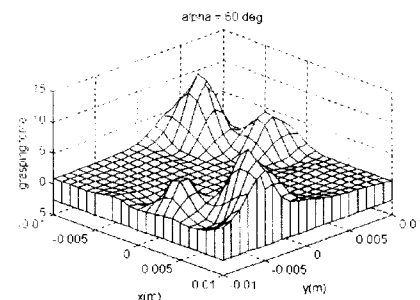


Fig. 11 Grasping force for  $\alpha=60^\circ$

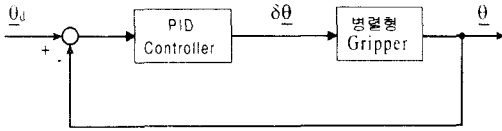


Fig. 12 Block diagram

각 센서에 의하여 측정된 관절각들을 나타낸다.

원하는 관절각을 현재의 관절정보와 비교하여 PID제어기로부터 생성된 명령을 병렬형 그리퍼에 전달한다. PID제어기는 10ms 주기로 명령을 갱신하며 주어진 궤적의 위치 갱신은 0.1s 주기로 하였다.

그리퍼의 정중앙점 P(Fig 4)에서 x축 방향으로 5cm만큼 이동하는 실험을 수행하였으며 Fig. 13은 베이스 관절의 엔코더에서 측정한 관절 각도를 나타낸다. Fig. 14는 그리퍼의 중심을 기준으로 반경이 3cm인 원주를 따라 움직이는 실험으로 베이스 관절의 예상되는  $\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}$ 의 값과 측정된 각도값을 나타낸다. 측정된 관절각에 대하여 작업공간에서 주어진 궤적을 잘 추종함을 살펴볼 수 있었다.

### 5. 결론

현재의 산업용 로봇 그리퍼는 불규칙하거나 큰 부피의 물체를 파지할 수 없는 단순한 형태를 지니고 있다. 본 연구에서는 다양한 형태를 파지할 수 있을 뿐 아니라 파지 후에도 미소의 위치를 제어할 수 있는 새로운 형태의 병렬형 그리퍼를 제시하였고 구현 및 제어실험을 수행하였다.

실제 시스템으로의 적용을 위해서는 작업조건에 알맞은 최적설계<sup>[15]</sup>가 수행되어야 할 것이며, 향후 연구 과제로는 병렬형 메커니즘에 접촉(tactile) 센서 및 힘센서를 부착하여 다양한 물체의 파지시 접촉힘을 측정하는 실험적 구현을 통하여 동적 제어 알고리즘을 구현하고자 한다. 또한 보다 일반적인 평면형 및 공간형 형상제어 메커니즘에 대한 고안 및 제어 알고리즘의 개발에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

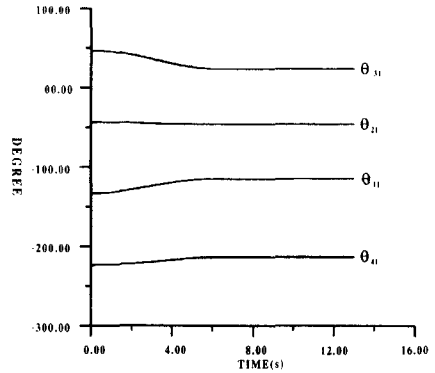


Fig. 13  $\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}$  for straightline motion

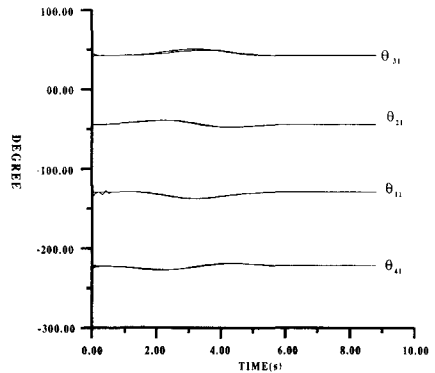


Fig. 14  $\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}$  for circular trajectory

### 후기

본 논문은 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호 : 981-1001-001-2) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Ichiro Kato, "Mechanical Hands Illustrated," Survey Japan, 1982.
2. 日本産業用로봇工學會, "産業用 로봇의 技術," 첨단과학기술도서출판 機電硏究社, 1992.
3. Jacobson, S.C., Wood, J.E., Knutti, D.F., and Biggers, K.B., "The Utha/MIT dexterous hands : Work in progress," Int. Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
4. Loucks, C.S., Johnson, V.C., Boissiere, P.T., Starr,



- G.P., and Steele, J.P.H., "Modeling and control of the Stanford/JPL hand," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 573-578, 1987.
5. Maekawa, H., Komoriya, K., and Tanie, K., "Manipulation of an unknown object by by multi-fingered hands with rolling contact using tactile feedback," Proc. of 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligence Robots and Systems, pp. 1877-1882, 1992.
  6. Buss M. and Kleinmann, K.P., "Multi-fingered grasping experiments using real time grasping force optimization," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1807-1812, 1997.
  7. 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.
  8. Burdick, J.W., "On the Inverse Kinematics of Redundant Manipulators : Characterization of the Self-Motion Manifolds," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 264-270, 1989.
  9. 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.
  10. Ropponen, T. and Nakamura, Y., "Singularity-Free Parameterization and Performance Analysis of Actuation Redundancy," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 806-811, 1990.
  11. 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 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS), 1997.
  12. Merlet, "Direct Kinematics of Planar Parallel Manipulator," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3744-3750, 1996.
  13. Kang, H.J., Yi, B-J., Cho, W., and Freeman, R.A., "Constraint-Embedding Approaches for General Closed-Chain System Dynamic in Terms of A Minimum Coordinate Set," Proc. ASME Biennial Mechanism Conf., Chicago, IL, DE-Vol. 24, pp. 125-132, 1990.
  14. Lee, S.H., Yi, B-J., Kwak, Y.K., "Optimal Dynamic Design of Anthropomorphic Robot Module with Redundant Actuators," KSME Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 265-276, 1996.
  15. Cho, K.H., "Design and Development of a Parallel-Type Gripping Mechanism," Master Thesis, Department of Control and Instrumentation Eng., Hanyang University, 1999.