

적층형 4-BAR 메커니즘을 이용한 평면형 메니플레이터

Planar Manipulator using Stackable 4-BAR Mechanisms

이 호 열, 최 영 진*
(Hoyul Lee and Youngjin Choi)

Abstract: This paper proposes a new planar robotic manipulator using stackable 4-BAR mechanisms for various applications. The proposed manipulator has an advantage that we can separate the driving actuators from a robotic manipulator. By separating actuators from the manipulator, we are able to separate the electrical component such as electrical wiring from the mechanical linkage/joint components in the robotic manipulator. Also, we suggest the kinematic analysis of the proposed manipulator which is composed of input mechanisms, multiple 4-BAR mechanisms and output mechanisms. Finally, we suggest numerical simulations to show the effectiveness of the proposed manipulator.

Keywords: 4-BAR, stackable mechanism, planar manipulator

I. 서론

로봇을 설계함에 있어 그 목적에 따라 관절을 구동하는 액추에이터를 관절에 직접 부착할 수 없거나 혹은 어떤 이유로 인해 부착하지 않는 경우들이 있다. 그림 1(a), (b)의 예제에서 보여지듯이 로봇 팔을 구동하는 모든 액추에이터는 로봇의 몸체에 장착하고 와이어(string wire)를 사용하여 관절을 구동함으로써 로봇 팔의 무게 및 크기를 줄이거나 하여 특수한(예를 들어, 수술용 로봇 메니플레이터) 목적에 사용하는 로봇에 관한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 또한 그림 1(c)와 같이 무거운 유압 소스를 몸체에 배치하고 상대적으로 가벼운 로봇 다리에 동력을 공급하는 방식의 로봇도 개발되고 있다[4]. 우리 일상생활 중에 흔히 관찰할 수 있는 그림 1(d)와 같은 굴삭기는 관절의 구동을 위한 액추에이터를 관절에 직접 부착하지 않는 대표적인 기구이다. 이와 같이 로봇의 관절과 이를 구동하는 액추에이터 및 액추에이터 시스템의 위치를 분리할 수 있는 기계시스템은 액추에이터의 무게 및 크기에 제약 없이 로봇 관절을 구동할 수 있기 때문에 설계상의 많은 장점을 가질 수 있다.

본 논문에서는 로봇의 관절에서 액추에이터를 분리할 수 있는 메커니즘 및 이를 이용한 로봇 메니플레이터를 제안하고자 한다. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 메커니즘의 개념을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 메커니즘을 구동하기 위한 동력을 제공하는 입력 메커니즘과 실제 작업을 하게 되는 메커니즘으로 구성된 각각의 평면을 나타낸 것이다. 그림 2(b)는 그림 2(a)에서의 각각의 평면을 결합한 2자유도 메커니즘을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각각의 평면은 특정 링크가 결합된다. 이와 같은 방법으로 작업이 이뤄지는 메커니즘은 다수의 4-BAR의 조합으로 구성된 평면을 n개를 조합하여 n 자유도 평면형 메니플레이터와 같은 작동을 할 수 있게 된다. 또한 다수의 4-BAR로 구성된 메커니즘이므로 병렬형 메커니

즘의 장점인 구조적으로 큰 힘을 지지할 수 있는 특성을 가지게 된다[5,6].

메커니즘을 구동하는 액추에이터가 실제 관절과 분리되어 있기 때문에 작업이 이뤄지는 메커니즘에는 이를 구동하기 위한 어떠한 시스템도 포함되지 않는 장점이 있다. 예를 들어 모터를 사용한 시스템의 경우 실제 작업을 하는 관절에는 모터, 전기회로, 배선 및 엔코더 등을 장착하지 않을 수

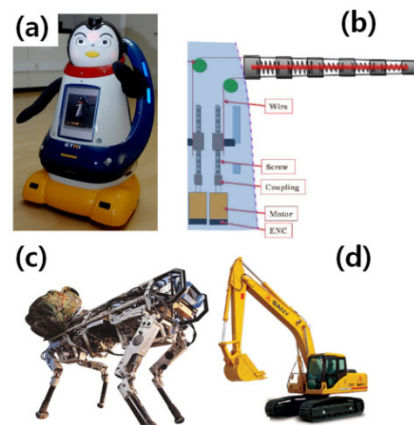


그림 1. (a) 소프트 암[1], (b) 스프링기반 소프트 암의 메커니즘[1], (c) BigDog[4], (d) 굴삭기.

Fig. 1. (a) Soft Arm[1], (b) Mechanism of the Spring-Backboned Soft Arm[1], (c) BigDog[4], (d) Excavator.

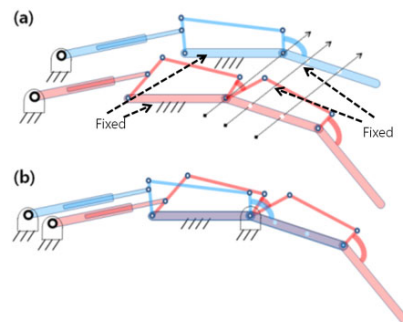


그림 2. 적층형 4-BAR 메커니즘의 개념.

Fig. 2. Concept of stackable 4-BAR mechanism.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 12. 8., 수정: 2010. 2. 2., 채택확정: 2010. 3. 11.

이호열, 최영진: 한양대학교 대학원 전기전자제어계측공학과

(hoyul@hanyang.ac.kr/cyj@hanyang.ac.kr)

* 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2008-000-20631-0)과 지식경제부의 전략기술인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

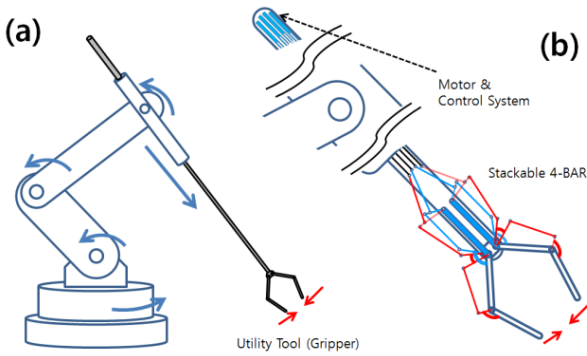


그림 3. 적층형 4-BAR메커니즘의 응용 예제.
Fig. 3. Application example of the stackable 4-BAR mechanism.

있다. 또한 와이어-드리븐(wire driven)과 같이 와이어를 사용하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한 작업 메커니즘은 4-BAR의 구성에 필요한 재질만으로 설계할 수 있다. 이와 같은 장점을 이용하여 수술 중에 X-선 또는 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 영상을 이용하여 환자에 삽입된 로봇 및 수술 목표 부위를 촬영하면서 수술할 수 있는 로봇에 관한 연구도 진행되고 있다[7]. 이와 같이 로봇의 작업 관절을 구성하는 요소의 재질을 임의로 선정할 수 있다면 특수한 환경에서 작동하는 로봇분야에 적용할 수 있다. 그림 3은 제안하는 메커니즘을 사용한 로봇의 응용 예제이다. 그림 3(a)는 5 자유도 메커니즘에 그리퍼(gripper)를 장착한 것이다. 작업의 특수성으로 인해 그리퍼가 소형, 경량, 특수한 재질(전기 적인 시스템 장착 불가)이어야 하는 경우와 로봇으로부터 먼 거리에 있는 물체를 취급해야 하는 경우 사용할 수 있는 가상의 메커니즘의 구상도이다. 그림 3(b)는 그리퍼를 확대하여 나타낸 것이다. 액추에이터 및 이를 제어하는 시스템은 그리퍼의 반대쪽 끝부분에만 부착할 수 있으며, 그리퍼 부분은 적층형 메커니즘으로 구성할 수 있다.

본 논문에서는 다양한 장점을 가지는 적층형 4-BAR 메커니즘의 개념을 제안할 것이며, 다수의 관절을 각각 독립적으로 제어할 수 있는 방법에 대해서 설명할 것이다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 모든 관절이 각각 독립적으로 제어될 수 있음을 보일 것이다.

II. 1자유도 메커니즘

관절을 구동하는 액추에이터 및 액추에이터 시스템을 구동 관절에서 분리할 수 있는 1자유도 메커니즘을 소개하고 이를 구동할 수 있는 입력 메커니즘에 관해 설명 한다. 또한 병렬형 메커니즘으로 구성된 적층형 메커니즘의 기구학 및 속도 관계식을 구하는 방법에 관해 설명 한다.

그림 4는 입력 메커니즘, 1개의 4-BAR, 출력 메커니즘으로 구성된 1자유도 시스템을 나타내고 있다. 상세히 설명하면 그림 4(a)는 슬라이드로 구성된 선형 입력 메커니즘이며, 그림 4(b)는 웹 기어를 사용한 회전형 입력 메커니즘이다. 그림 5는 그림 4를 입력 메커니즘, 4-BAR, 출력 각으로 분리 한 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 <0>은 액추에이터에 의해서 직접 구동되는 입력 메커니즘, <1>은 4-BAR, <Fix>는 4-BAR의 출력을 외부에 전달하기 위해 고정 각이다. 그림에서

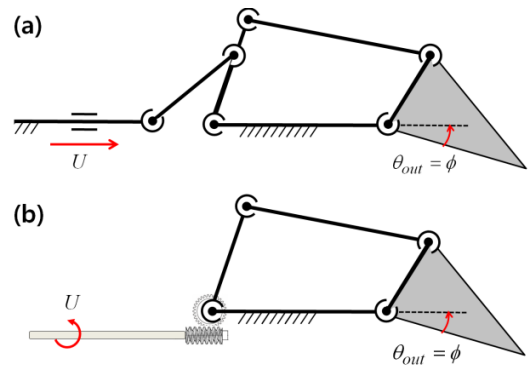


그림 4. 1자유도 메커니즘.
Fig. 4. 1 DOF mechanism.

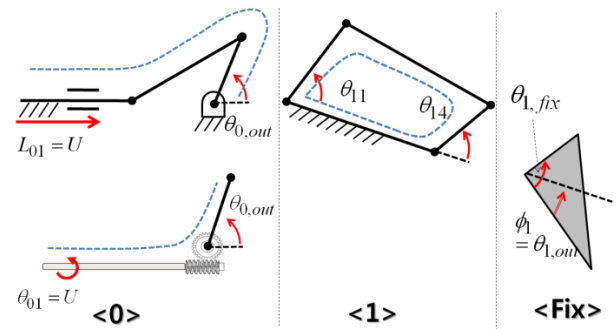


그림 5. 1자유도 메커니즘 분석.
Fig. 5. Analysis of the 1 DOF mechanism.

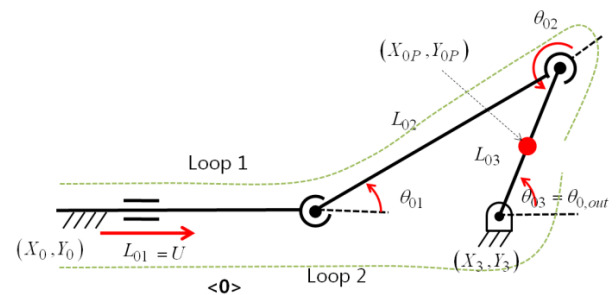


그림 6. 입력 메커니즘의 기구학.
Fig. 6. Kinematics of input mechanism.

<0>, <1>은 각각 모빌리티가 1이며 1자유도 시스템이다[6, 7]. <0>의 출력 링크는 <1>의 입력 링크와 동일한 각을 가지도록 결합되어 있다. 따라서 <0>에 가해진 액추에이터의 구동은 <1> 메커니즘을 구동하게 되며 이때 <1>의 출력은 <Fix>를 통해 출력 링크를 구동하게 된다. 이와 같은 원리에 그림 4는 1자유도이며, 1개의 입력에 대하여 1개의 회전 출력을 가지는 1자유도 직렬형 메니플레이터와 같이 구동 된다.

그림 6은 그림 5의 입력 메커니즘(<0>)의 슬라이드 메커니즘을 상세히 표시하였다. 여기서 L_{02} 는 0번째 메커니즘의 2번째 링크의 길이를 나타내며 이를 일반화 하여 임의의 상수 L_{jk} 와 임의의 변수 θ_{jk} 는 j번째 메커니즘(<j>)의 k번째 링크와 관절을 각각 의미한다. 기구학적 해석을 위해 L_{03} 의 가운데 지점을 임의의 목표점으로 지정하고 X, Y 방향의 속도와 L_{03} 의 회전 속도를 Loop 1과 Loop 2로 표현하면 다음 식과

같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{0,P} \\ \dot{Y}_{0,P} \\ \dot{\Phi}_{0,P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -L_{02}S_{\theta_{01}} - \frac{L_{03}}{2}S_{\theta_{01}+\theta_{02}} & -\frac{L_{03}}{2}S_{\theta_{01}+\theta_{02}} \\ 0 & L_{02}C_{\theta_{01}} + \frac{L_{03}}{2}C_{\theta_{01}+\theta_{02}} & \frac{L_{03}}{2}C_{\theta_{01}+\theta_{02}} \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{L}_{01} \\ \dot{\theta}_{01} \\ \dot{\theta}_{02} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{0,P} \\ \dot{Y}_{0,P} \\ \dot{\Phi}_{0,P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_{03}}{2}S_{\theta_{03}} \\ \frac{L_{03}}{2}C_{\theta_{03}} \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1)과 (2)는 동일 지점의 속도에 관한 식이기 때문에 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [A_0]_1; [A_0]_2; [A_0]_3; \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{L}_{01} \\ \dot{\theta}_{01} \\ \dot{\theta}_{02} \end{bmatrix} = [B_0] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $[A_0]_1, [A_0]_2, [A_0]_3$ 는 (1)의 3X3 행렬의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 열(column)벡터를 각각 의미한다. 입력 메커니즘 (0)은 모빌리티(mobility)가 1이므로 병진운동과 회전운동 관절로 구성된 4개의 관절 중에서 임의의 하나를 입력으로 하면 나머지 3개 관절의 운동 및 각도는 모두 결정된다[8,9]. 여기서 입력으로 하는 관절을 능동(active)관절, 나머지 관절을 수동(passive)관절로 정의 한다. (3)의 능동관절을 우변, 수동관절을 좌변에 위치하도록 정리하면 다음 (4)과 같다. 여기서 L_{01} 을 능동관절로 설정하였다.

$$\begin{bmatrix} [A_0]_2; [A_0]_3; -[B_0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{01} \\ \dot{\theta}_{02} \\ \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A_0]_1; \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{L}_{01} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)는 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{01} \\ \dot{\theta}_{02} \\ \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} = [Q_0] \begin{bmatrix} \dot{L}_{01} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$[Q_0] = \begin{bmatrix} [A_0]_2; [A_0]_3; -[B_0] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -[A_0]_1; \end{bmatrix}$$

우리는 (5)를 통해 입력 능동관절로부터 수동관절에 이르는 속도 관계식을 얻을 수 있다. 그림 6에서의 출력 θ_{03} 와 입력 L_{01} 의 관계식은 (5)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} = [Q_{0(3,1)}] \begin{bmatrix} \dot{L}_{01} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $[Q_{0(3,1)}]$ 는 열벡터 $[Q_0]$ 의 세 번째 성분을 의미한다.

(6)을 일반화하여 다음과 같이 표현 하고자 한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{0,out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{03} \end{bmatrix} = [G_0] \begin{bmatrix} \dot{U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $[G_0]$ 는 (0) 메커니즘의 입력에 대한 출력의 속도 관계식이며 $\dot{\theta}_{0,out}$ 는 (0)의 최종 출력이다. 위에서 제시된 식(7)은 입력 메커니즘으로 그림 3(a)와 같이 슬라이드 구조를 이용했을 때 유도되는 것이며, 입력 메커니즘으로 그림 3(b)와 같이 웜 기어를 이용했을 경우는 다음 식과 같이 기어비만으로 표현 된다.

$$[G_0] = [r_0] \quad (8)$$

여기서 r_0 는 웜 기어의 기어 비이다. 본 논문에서 언급하지 않은 다양한 입력 메커니즘에 대해서도 (7), (8)과 같이 입력 메커니즘 (0)의 속도 관계식을 구할 수 있다.

그림 7은 4-BAR 메커니즘을 나타낸 것이다. 일반적인 4-BAR 메커니즘은 4개의 관절과 4개의 고정된 길이의 링크로 구성된다. 하지만 다자유도 메커니즘으로 확장할 경우 L_{14} 의 각도가 변화될 수 있으므로 5개의 변수로 정의 한다. (1)-(8)의 입력 메커니즘의 기구학 해석과 동일한 방법으로 4-BAR 메커니즘의 능동 관절에 대한 수동 관절의 속도 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \\ \dot{\theta}_{14} \end{bmatrix} = [Q_1] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{15} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$[Q_1] = [A_1]^{-1} [B_1], \quad (10)$$

$$[A_1] =$$

$$\begin{bmatrix} -L_{12}S_{\theta_{11}+\theta_{12}} - \frac{L_{13}}{2}S_{\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}} & -\frac{L_{13}}{2}S_{\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}} & \frac{L_{13}}{2}S_{\theta_{14}+\theta_{15}} \\ L_{12}C_{\theta_{11}+\theta_{12}} + \frac{L_{13}}{2}C_{\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}} & \frac{L_{13}}{2}C_{\theta_{11}+\theta_{12}+\theta_{13}} & -\frac{L_{13}}{2}C_{\theta_{14}+\theta_{15}} \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

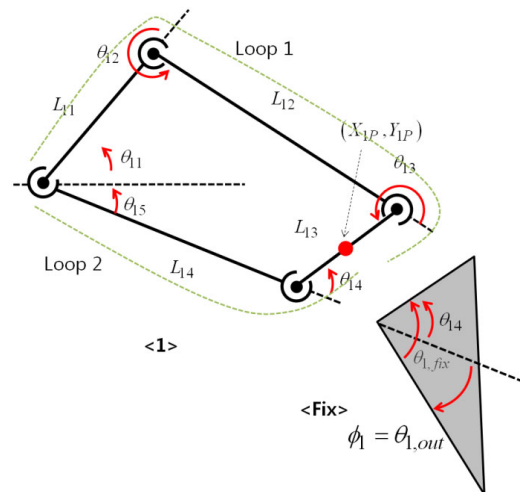


그림 7. 4-BAR 및 출력 메커니즘의 기구학.
Fig. 7. Kinematics of 4-BAR and output mechanism <Fix>.

$$[B_1] = \begin{bmatrix} L_{11}S_{\theta_1} + L_{12}S_{\theta_1+\theta_2} + \frac{L_{13}}{2}S_{\theta_1+\theta_2+\theta_3} - L_{14}S_{\theta_5} - \frac{L_{13}}{2}S_{\theta_4+\theta_5} \\ -L_{11}C_{\theta_1} - L_{12}C_{\theta_1+\theta_2} - \frac{L_{13}}{2}C_{\theta_1+\theta_2+\theta_3} L_{14}C_{\theta_5} + \frac{L_{13}}{2}C_{\theta_4+\theta_5} \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $\dot{\theta}_{11}$ 는 4-BAR의 입력이며 능동관절이다. $\dot{\theta}_{15}$ 는 링크 L_{14} 가 기준 축과 이루는 각도이며 가상의 능동관절이다. 즉, θ_{15} 는 수동관절이지만 기구학적 해석을 위해 우선 능동관절 처럼 정의한다. 4-BAR <1>의 입력에 대한 출력의 관계식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{14} \\ \dot{\theta}_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1(3,1)} & Q_{1(3,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{15} \end{bmatrix} \quad (13)$$

만약 관절 L_{14} 가 지면에 고정되어 있는 경우라면 (13)은 다음과 같이 축약되어 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{14} &= [Q_{1(3,1)}] \dot{\theta}_{11} \\ &= [G_1] \dot{\theta}_{11} \end{aligned} \quad (14)$$

그림 5와 그림7을 비교하여 우리는 다음의 관계를 알 수 있다.

$$\begin{cases} \phi_1 = \theta_{1,out} = \theta_{14} - \theta_{1,fix} \\ \dot{\phi}_1 = \dot{\theta}_{1,out} = \dot{\theta}_{14} \end{cases} \quad (15)$$

(14)와 (15)의 관계를 이용하여 메커니즘 <0>, <1> 과 <fix>의 결합에 의한 첫 번째 4-BAR <1>의 입력 $\dot{\theta}_{11}$ 에 대한 <1>의 출력 $\dot{\phi}_1$ 의 속도 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\phi}_1 = [G_1] \dot{\theta}_{11} \quad (16)$$

(9)를 이용하여 (16)을 입력 U 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\phi}_1 = [G_1][G_0] \dot{U} \quad (17)$$

여기서 $[G_0]$ 는 (7)이나 (8)에서 설명한 것과 같이 입력 메커니즘에 관한 관계식이며, $[G_1]$ 은 1개의 4-BAR로 구성된 1자유도 메커니즘의 4-BAR의 입력에 대한 출력 관절의 속도 관계식이다. 그러므로 우리는 (17)과 같은 1자유도 메커니즘의 입력 \dot{U} 에 대한 출력 $\dot{\phi}_1$ 의 속도 관계식을 얻을 수 있다.

III. 다자유도 메커니즘

본 장에서는 다수의 4-BAR로 구성된 다자유도 메커니즘에 관해서 설명한다. 여기서 입력 메커니즘 <0>은 다양하게 구성될 수 있고 다양한 관계식으로 표현될 수 있다는 것을 II장에서 제시하였기 때문에 첫 번째 4-BAR <1>의 입력에 대한 n 번째 4-BAR <n>까지의 관계식을 구하는 방법에 관해 설명한다.

명한다.

1. 2 자유도 메커니즘

그림 8은 그림 2와 같은 2자유도 메커니즘의 각각의 평면 상에서 자세히 나타낸 것이다. 여기서 각각의 평면 그림 8(a)와 그림 8(b)는 적층되어 있으며 ${}_1L_{1,out}$ 과 ${}_2L_{24}$ 는 위치와 방향각이 항상 일치하도록 고정되어 있다. 그림 8(a)는 그림 2의 첫 번째 평면에 있는 1개의 4-BAR 메커니즘이다. 여기서 <1,1>의 ${}_1L_{14}$ 는 지면에 항상 고정되어 있으므로 (13)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\phi}_1 = [{}_1\dot{\theta}_{14}] = [{}_1Q_{1(3,1)}] [{}_1\dot{\theta}_{11}] \quad (18)$$

여기서 <1,1>는 첫 번째 평면의 첫 번째 메커니즘을 나타내며 이를 일반화 하여 <i,j>는 i번째 평면의 j번째 메커니즘을 나타내며 ${}_i\theta_{jk}$, ${}_iL_{jk}$ 는 i번째 평면의 j번째 메커니즘의 k번째 관절 각 및 링크를 각각 나타낸다. 그림 8(b)는 2번째 평면을 나타낸다. 여기서 <2,2>의 ${}_2L_{24}$ 는 지면에 고정되어 있지 않은 4-BAR 이므로 (13)과 같이 입력 ${}_2\dot{\theta}_{21}$ 에 대한 출력 ${}_2\dot{\theta}_{24}$ 의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_2 \\ \dot{\theta}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_2\dot{\theta}_{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_2Q_{2(3,1)} & {}_2Q_{2(3,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_2\dot{\theta}_{21} \\ {}_2\dot{\theta}_{25} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기에서 ${}_2\dot{\theta}_{25}$ 는 그림 8(b)와 같은 2번째 평면 메커니즘 가상 입력(가상 능동 관절)이다.

또한 <2,1>의 ${}_2L_{14}$ 는 고정되어 있으므로 (13)으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[{}_2\dot{\theta}_{14}] = [{}_2Q_{2(3,1)}] [{}_2\dot{\theta}_{11}] \quad (20)$$

그림 8(b)로부터 다음과 같은 관계를 알 수 있다.

$${}_2\theta_{21} = {}_2\theta_{14} - {}_2\theta_{1,fix} \quad (21)$$

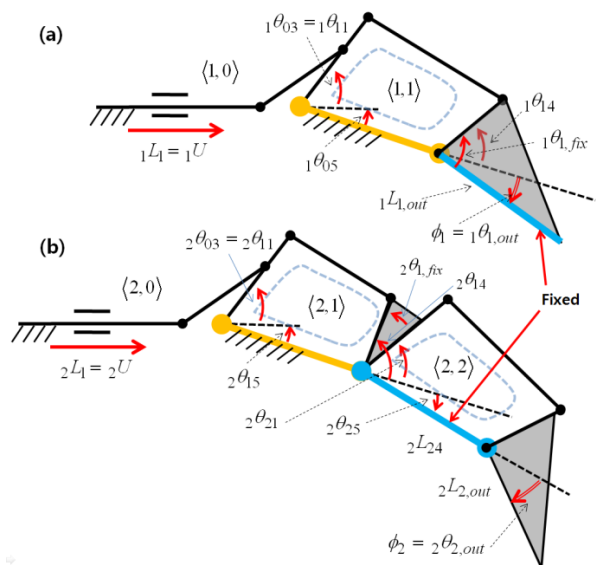


그림 8. 2자유도 메커니즘. Fig. 8. 2DOF mechanisms.

(2.1)의 출력이 (2.2)의 입력으로 작용하므로 (21)을 속도에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$${}_2\dot{\theta}_{21} = {}_2\dot{\theta}_{14} \quad (22)$$

또한 (22)의 관계와 (20)을 이용하여 (19)를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}_2\dot{\theta}_{24} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}_2Q_{2(3,2)} & {}_2Q_{2(3,1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & {}_2Q_{l(3,1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_2\dot{\theta}_{25} \\ {}_2\dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

(23)과 같이 그림 8(b)의 메커니즘은 입력 변수 2개에 출력 변수 1개를 가지는 시스템으로 정의의 됨을 알 수 있다. 하지만 여기서 ${}_2\theta_{25}$ 는 가상의 능동관절이다. 즉, 입력 ${}_2\theta_{11}$ 에 의해 ${}_2\theta_{25}$ 와 ϕ_2 의 각도가 모두 변화될 수 있다. 따라서 입력 1개에 출력 2개인 자유도가 하나 부족한 시스템이기 때문에 다음과 같은 구속조건을 고려한다. 그림 2의 첫 번째 평면 메커니즘과 두 번째 평면 메커니즘은 그림 8(a), (b)에서 알 수 있듯이 ${}_1L_{14}$ 와 ${}_2L_{14}$, ${}_1L_{1,out}$ 와 ${}_2L_{24}$ 는 서로 결합되어 있다. 다시 말해서 그림 8(a)의 출력 ${}_1\theta_{1,out}$ 는 그림 8(b)의 두 번째 4-BAR의 ${}_2\theta_{25}$ 와 같으므로 우리는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\phi_1 = {}_1\theta_{1,out} = {}_1\theta_{14} - {}_1\theta_{1,fix} = {}_2\theta_{25} \quad (24)$$

(24)의 관계를 이용하여 첫 번째 평면의 관계식 (18)과 두 번째 평면의 관계식 (23)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ {}_2Q_{2(3,2)} & {}_2Q_{2(3,1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_1Q_{l(3,1)} & 0 \\ 0 & {}_2Q_{l(3,1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} \quad (25)$$

(25)를 간략히 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = [G_2] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} \quad (26)$$

그림 8과 같이 2개의 평면으로 구성된 4-BAR 메커니즘의 입력에 대한 출력의 속도 관계식은 (26)과 같이 구할 수 있다. (26)은 입력 변수 2개에 출력 변수 2개의 관계식이다. 이와 같이 2개의 4-BAR로 구성된 평면과 1개의 4-BAR로 구성된 평면으로 결합하면 직렬형 매니플레이터와 같이 작동할 수 있는 2자유도 시스템이 됨을 알 수 있다. 또한 각각의 평면의 첫 번째 4-BAR ((1.1), (2.1))의 입력에 입력 메커니즘 ((1.0), (2.0))을 각각 적용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = [G_2] \begin{bmatrix} {}_1G_0 & 0 \\ 0 & {}_2G_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_1\dot{U} \\ {}_2\dot{U} \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기서 ${}_iG_0$, ${}_i\dot{U}$ 는 각각 i 번째 평면의 입력 메커니즘 (($i.0$))의 입력에 대한 출력의 관계 식과 i 번째 평면의 입력을 각각 나타낸다. 그러므로 우리는 (27)과 같이 2자유도 적층형 4-BAR 메커니즘의 속도 관계식을 얻을 수 있다. 앞서 언급한 두 번째 평면은 ${}_2\theta_{25}$ 가 가상 능동관절(실질적으로는 수동관

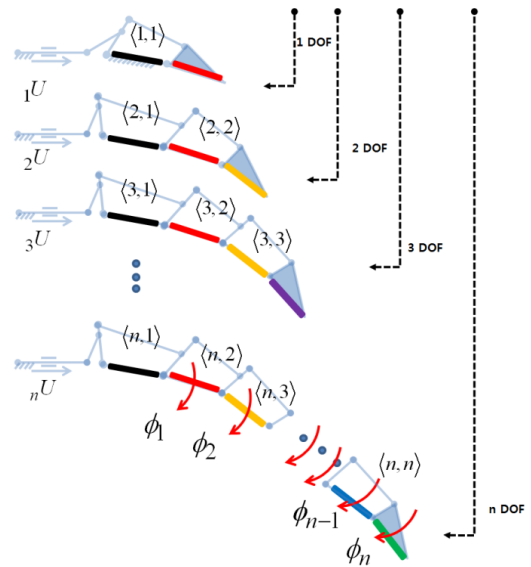


그림 9. 다자유도 메커니즘.

Fig. 9. n-DOF mechanisms.

절)이기 때문에 (23)은 1개의 자유도가 부족한 메커니즘이지만 그림 8과 같이 평면 1을 적층함으로써 부족한 1자유도를 평면 1의 출력 ϕ_1 으로 구속함으로써 완전한 2자유도 메커니즘을 구성할 수 있다.

2. N 자유도 메커니즘

III. 1절에서 2개의 평면과 3개의 4-BAR로 구성된 2자유도 메커니즘의 관계식을 얻을 수 있었다. 이와 같은 방법으로 다자유도 메커니즘의 입력에 대한 출력 관계식을 구할 수 있다. 그림 9는 n 개의 평면으로 구성된 n 자유도 메커니즘의 개념을 나타낸다. 동일한 색으로 표현된 링크는 각각 결합되어 있다. 즉 n 자유도 메커니즘은 n 개의 평면 및 n 개의 입력 (${}_1U \sim {}_nU$)으로 구성된다. (18)-(26)과 같은 과정을 반복하여 n 자유도 메커니즘의 입력 속도와 출력 속도의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix} = [G_n] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ {}_2\dot{\theta}_{11} \\ \vdots \\ {}_n\dot{\theta}_{11} \end{bmatrix} \quad (28)$$

여기서 $[G_n]$ 은 n 자유도 메커니즘의 n 개의 출력 링크의 각도 $\dot{\phi}_n$ 과 n 개의 평면의 첫 번째 4-BAR (($n.1$))의 입력 관절 ${}_n\dot{\theta}_{11}$ 의 속도 관계식이다.

다음의 식(29)는 입력 메커니즘을 까지 포함한 n 자유도 메커니즘의 입력에 대한 출력의 속도 관계식이다. 이와 같은 방법으로 n 자유도 평면 직렬형 매니플레이터의 속도 관계식을 일반적으로 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix} = [G_n] \begin{bmatrix} {}_1G_0 & & & \\ & {}_2G_0 & & \\ & & \ddots & \\ & & & {}_nG_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (29)$$

IV. 모의 실험

본 장에서는 그림 10과 같은 2자유도 적층형 메커니즘을 모의실험할 것이다. 모의실험을 통해 적층형 메커니즘으로 구성된 모든 관절이 (27)을 사용하여 각각 독립적으로 제어됨을 보일 것이다.

그림 3(b)에서의 그리퍼는 적층형 메커니즘으로 구성된 두 개의 2자유도 손가락으로 구성된다. 본 모의실험에서는 두 개의 손가락이 서로 대칭되게 움직이도록 하여 하나의 2자유도 적층형 메커니즘에 관해서만 설명할 것이다. 또한 그림 3(a)에서 그리퍼가 장착되는 다자유도 로봇은 일반적인 방법으로 제어될 수 있기 때문에 모의실험에서는 고려하지 않는다. 즉, 그리퍼는 지면에 고정된 것으로 가정한다. 그리퍼의 끝점의 속도관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_e \\ \dot{Y}_e \end{bmatrix} = [J]^{-1} [G_2] \begin{bmatrix} {}_1\dot{U} \\ {}_2\dot{U} \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 $[J]$ 는 2자유도 시리얼 메니플레이터의 속도관계식이며, $[G_2]$ 는 입력 메커니즘이 제외된 적층형 메커니즘의 속도 관계식 (4-BAR로만 구성된 메커니즘), ${}_1G_0, {}_2G_0$ 는 각각의 평면에 있는 입력 메커니즘의 속도 관계식이다.

그림 11(a)는 2자유도 적층형 메커니즘의 각각의 평면을 나타낸 것이다(점선: 첫 번째 평면, 실선: 두 번째 평면). 그림 11(b)와 같이 그리퍼의 끝점이 Case1, Case2, Case3와 같이 움직이도록 (\dot{X}_e, \dot{Y}_e) 을 (30)의 입력으로 하여 모의 실험을 진행할 것이다.

그림 12는 그림 11(b)와 같은 초기위치에서 그리퍼 끝점이 Case1과 같이 구동 되도록 그리퍼 끝점의 속도 (\dot{X}_e, \dot{Y}_e) 을 (10, -60)한 경우의 모의실험 결과이다. 그림 12(a)-(d)는 시간의 변화에 따른 그리퍼 끝점의 위치 및 이를 구성하는 모든 링크와 관절의 상태를 표시한 것이다. (e)는 시간에 따른 입력 메커니즘의 입력 관절의 변위 ${}_1U, {}_2U$ 를 나타낸 것이다.

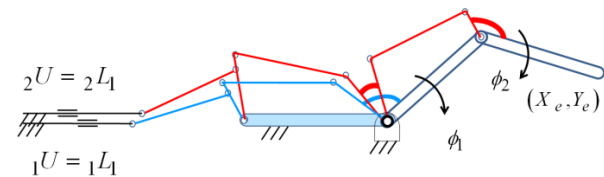


그림 10. 모의 실험 모델.
Fig. 10. Simulation model.

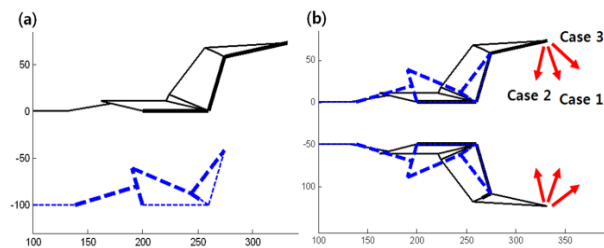


그림 11. 모의실험 과정.
Fig. 11. Simulation procedures.

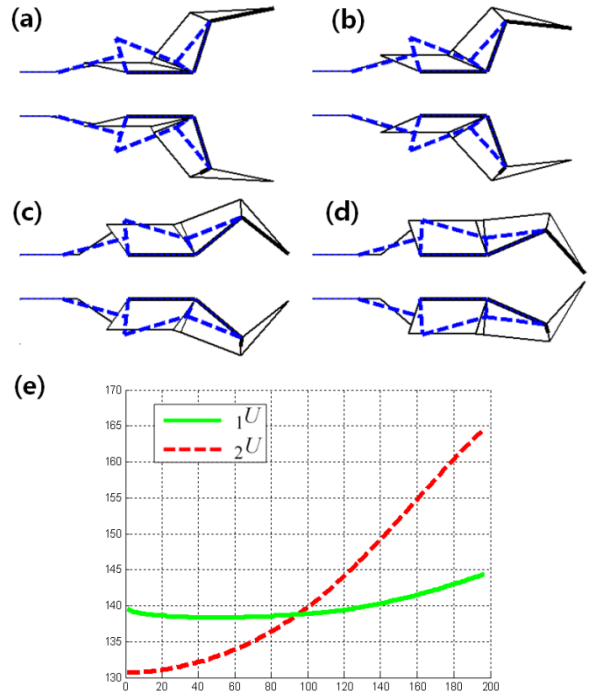


그림 12. 시뮬레이션 결과: Case 1.
Fig. 12. Simulation result: Case 1.

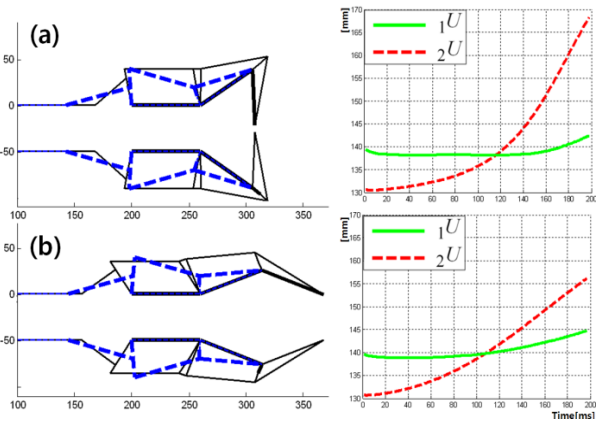


그림 13. 시뮬레이션 결과: Case 2, 3.
Fig. 13. Result of the simulation : Case 2, 3.

그림 13은 그림 11(b)와 같은 초기 위치에서 그리퍼 끝점의 속도 (\dot{X}_e, \dot{Y}_e) 를 각각 (-10, 60), (20, 30)으로 하였을 때의 모의실험 결과이다. 그림 12, 13과 같이 본 논문에서 제안하는 적층형 메커니즘의 끝점의 좌표를 일반적인 시리얼 메니플레이터와 같이 제어할 수 있음을 볼 수 있다. 또한 제시된 모의실험 결과에서 모든 작업 관절을 독립적으로 구동할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 로봇 메니플레이터의 액추에이터를 작업관절에서 분리할 수 있는 메커니즘에 관한 개념을 제시하고 이를 구동하기 위한 속도 기구학을 제시하였다. 다수의 4-BAR로 구성된 평면을 n개를 조합하여 n자유도 메커니즘으로 설계할 수 있음을 또한 제시하였다. 제안된 로봇 메커니즘은

다양한 입력 메커니즘 n 개에 대한 n 개의 회전 관절의 출력을 얻을 수 있는 메커니즘이므로 평면에서 구동되는 n 자유도 직렬형 매니퓰레이터와 같이 제어할 수 있음을 제시하였다. 또한 제시된 적층형 메커니즘은 모든 작업 관절들을 4-BAR 메커니즘으로 구성하였으므로 일반적인 병렬형 메커니즘이 가질 수 있는 장점을 가질 수 있다. 최종적으로 모의실험을 통해 모든 작업관절을 각각 독립적으로 구동할 수 있음을 보였다. 특히 병원의 수술실과 같은 특수한 목적에 의해 작업 관절들의 재질의 특성이 중요시 되는 분야에 적용될 수 있으며 로봇의 그리퍼와 같이 일반적인 매니퓰레이터 말단에 장착하는 소형, 다 자유도의 작업 관절로 사용할 수도 있음을 모의실험을 통해 제시하였다.

참고문헌

- [1] H.-S. Yoon and B.-J. Yi, "A 4-DOF flexible continuum robot using a spring backbone," *IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 1249-1254, Aug. 2009.
- [2] K. Xu, R. E. Goldman, J. Ding, P. K. Allen, D. L. Fowler, and N. Simaan, "System design of an insertable robotic effector platform for SPA (Single Port Access) surgery," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5546-5552, Oct. 2009.
- [3] K. Tadano¹, W. Sumino¹, K. Kawashima¹, and T. Kagawa¹, "Pneumatically driven forceps manipulator for laparoscopic surgery," *SICE Annual Conference*, pp. 2993-2996, Aug. 2008.
- [4] www.bostondynamics.com.
- [5] J. H. Chung, B.-J. Yi, and S. Oh, 2007, "Design of a new spatial 3-DOF parallel mechanism with application to a PDP TV mounting device" *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 3999-4006. 2007.
- [6] B.-J. Yi and R. A. Freeman, "Geometric analysis of antagonistic stiffness in redundantly actuated parallel mechanisms," *Journal*

of Robotic Systems, vol. 117, pp. 10-16. Sep. 1993.

- [7] K. Chinzei and K. Miller, "MRI guided surgical robot," *Austrain Conference on Robotics and Automation Sydney*, pp. 50-55, Nov. 2001.
- [8] J.-P. Merlet, *Parallel robots*, Springer, 2006.
- [9] B.-J. Yi, S.-R. Oh, and I.-H. Suh, "A five-bar finger mechanism involving redundant actuators: analysis and its applications," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 1001-1010, Dec. 1999.
- [10] J.-H. Lee, B.-J. Yi, S.-R. Oh, and I.-H. Suh, "Optimal design and development of a five-bar finger with redundant actuation," *Mechatronics*, vol. 11, no. 1, pp. 27-42, 2001.



이 호 열

2004년 부경대학교 제어계측 공학(학사). 2008년 한양대학교 메카트로닉스 공학과(석사). 2009년~현재 한양대학교 전기전자제어계측공학과 박사과정 재학중. 관심분야 Bio-Robotics, Robotics, Mechanism.



최 영 진

1994년 한양대 정밀기계공학(학사). 1996년 포항공대 기계공학(석사). 2002년 포항공대 기계공학(박사). 2002년~2005년 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터 선임연구원. 현재 한양대학교 공학대학 전자시스템공학과 조교수. 관심분야 Bio-Robotics, Humanoid Robot, Robot Walking, 선형/비선형 강인 제어, 자동조정 PID제어.