

관절 콤플라이언스를 활용한 정밀 조립형 메카니즘에 관한 연구

(Study on Precision Assembly Mechanism Using Joint Compliances)

김동구* (고려대 대학원)

김희국 (고려대 제어계측공학과)

이병주 (한국기술교육대 제어기계공학과)

Keyword: Remote Center Compliance(RCC), Parallel Mechanism(병렬 메카니즘), Joint Compliance(관절 콤플라이언스), Assembly(조립)

ABSTRACT : Most of Commercial Remote Center Compliance(RCC) devices have been designed using deformable structures. In this work, we propose another type of assembly devices which generate the compliance effects by attaching the compliances (or spring) at the joints of the given mechanism. The compliance models are derived for a serial-type, parallel-type, and hybrid-type mechanisms, respectively. In particular, a planar three-degree of freedom parallel structure is shown to have RCC points at the center of the workspace for its symmetric configurations.

1. 서론

정확한 위치제어를 실행하는 로봇 시스템을 사용하여 균일하고 완전하게 만들어진 부품을 조립하는 경우에는 원하지 않는 반력을 야기함이 없이 작업을 성공리에 수행할 수 있다. 그러나, 실제의 경우 불완전하거나 불균일한 부품, 부정확한 조립면의 위치 및 삽입축과의 각도오차, 또는 로봇 시스템의 위치오차 등으로 인하여 Jamming이나 Wedging과 같은 현상이 자주 발생하게 된다. 이 때문에 부품에 작용되는 큰 반력이나 모멘트의 발생으로 인한 부품 파손과 작업 시간의 지연 등으로 생산 자동화 공정에 많은 문제점을 야기한다. 여기서 Jamming이란 로봇으로부터 잘못된 방향으로 가해진 힘이나 모멘트 때문에 조립부품(peg)의 조립이 이루어지지 않는 경우를 말하며, Wedging이란 부품이 구멍 내에서 두 점의 접촉을 갖는 상황에서 탄성변형을 주반하여 꽈 끼게 되는 경우를 의미한다.

이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로 조립반력 및 모멘트의 측정을 위한 Force/Torque(F/T)센서를 활용하는 제어 방법의 개발,⁽¹⁾⁽²⁾ 조립공정에서 사용되는 로봇 시스템과 Hand Gripper등의 콤플라이언스 예측을 위한 모델 개발⁽³⁾ 및 이를 활용하는 제어 알고리듬 개발,⁽⁴⁾ 그리고 조립용 로봇 시스템의 손목 부분에 부착되는 콤플라이언스 기기등의 개발 등에 관한 연구가 많이 진행되어 오고 있다.⁽⁵⁾⁽¹²⁾ 이와 같이 부품조립을 성공적으로 수행하기 위해 사용되는 방법은 크게 세 가지로 분류될 수 있다: 능동적인 순용방법(active accommodation), 수동적 순용방법(pассивive accommodation), 혼합적 순용방법(passive-active accommodation).⁽⁴⁾

능동적인 순용방법은 조립반력이 발생하는 경우 이를 감소시키기 위하여 조립반력 방향으로 시스템을 능동적으로 제어하는 방법으로써 F/T 센서를 이용하여 측정된 힘에 관한 정보를 활용하는 Force control, Damping control, Impedance control, Stiffness control 등이나 Vision 센서나 proximity 센서 등을 이용하는 방법들이 이에 속한다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 수동적인 순용방법은 조립반력이 발생하는 경우 이를 감소시키는 방향으로

변형이 일어나도록 콤플라이언스를 갖는 시스템을 사용하는 방법으로서 RCC(Remote Center Compliance) 또는 콤플라이언스 기기, 작업지지대(compliant work station), 공기나 가스 stream, 자력등을 이용하는 경우들이 이에 속한다. 수동적인 콤플라이언스기기(pассивive compliance device)의 활용은 능동적인 순용방법들(active accommodation methods)에 비해 높은 대역폭(bandwidth)과 적절한 damping을 제공하여 조립 로봇시스템의 안정성을 증가시키지만 전체 시스템의 유효강도를 감소시킴으로서 위치오차는 상대적으로 증가된다. 이 때문에 이 두 가지의 특성을 활용하는 제어방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 즉, 수동적인 순용방법에서는 위의 두 가지 방법의 장점을 이용하는 방법으로 IRCC(Instrumented Remote Center of Compliance)를 활용하는 경우가 이에 속한다. IRCC 기기는 RCC 내부에 RCC의 번위를 측정하고, 가해진 외력을 구할 수 있도록 필요한 센서들이 내장되어 있는 RCC 기기를 말하며 현존 IRCC의 경우 RCC 내부 구조물들의 복잡한 변형으로 인하여 정확한 외력의 값을 구하는데 많은 어려움이 있다.⁽⁹⁾

Whitney는 탄성변형이 없는 강체로 가정된 구멍에 강체의 조립부품(peg)을 삽입하는 경우 성공적인 부품조립이 이루어지기 위한 조건(즉 Jamming과 Wedging이 발생하지 않기 위한 조건), 즉 부품조립이론(part-mating theory)에 관한 연구에서 RCC의 위치는 조립시 발생하는 접촉점에 가까이 존재할 수록 접촉반력의 크기를 줄일 수 있으므로 조립의 성공률을 높일 수 있다는 것을 실험적으로 증명하였다.⁽²⁾ 이러한 특성을 바탕으로 콤플라이언스 기기 또는 RCC 기기들은 조립 시스템에 부착되어 조립 물품들이 삽입 구멍에 아주 작은 공차여유나 삽입축의 각도의 오차로 인한 조립반력을 작게 하도록 이들을 아주 유연한 상태로 지지하도록 개발/제작되었다. RCC 기기는 일반적으로 스프링이나 rubber 또는 강체구조를 등의 기계적 요소들로 구성되어 이들의 탄성 변형 특성이 기기에서부터 멀어진 어떠한 위치에서(remote center) 그 점에 가해진 외력에 대하여 서로 독립적인 변형이 일어나도록 만들어진 기기를 말

하며 이 점을 RCC점이라고 한다. 성공적인 부품조립을 위한 최적의 RCC점의 위치에 관한 이론은 완전히 체계화되어 있지 않지만 일반적으로 삽입부품의 끝에 있도록 제작/사용되고 있다. 이러한 RCC기기 및 콤플라이언스 기기들은 베어링에 축 끼우기, 구멍에 리벳 끼우기, 나사구멍에 나사 끼우기, press fit, 그리고 전자부품조립 등과 같은 미세 부품 조립작업에 많이 사용되고 있다.

일반적으로 이러한 RCC기기들은 링키지들(linkages)을 사용하는 구조나, 콤플라이언트 구조나 요소를 사용하는 두 가지 종류로 제작된다. 즉 링키지들을 사용하는 경우, 링키지들 중 병렬형태의 링크들은 회전변형이 없이 축면방향의 (lateral) 변형만이 주로 발생되고, RCC점에서 공통교차점을 갖는 링크들은 이 점에 가해진 모멘트에 대해서 회전변형을 일으키며 이 점에 가해진 힘에 대해서는 변형을 거의 일으키지 않도록 만들어져 있다. 콤플라이언스한 구조를 사용하는 RCC기기는 여러 형태로 제작될 수 있으며, 두개의 다른 콤플라이언트 특성을 갖는 구조들의 합으로 되어 있는 RCC기기의 경우, 하나의 구조는 RCC점이 그 구조 내부에 존재하며 다른 하나의 구조는 그 구조의 RCC점이 그 구조 밖에 위치한다. 그러므로 두개의 구조를 합할 경우 RCC점은 두 구조의 축면 변형특성과 회전 변형특성이 합수로서 결정된다.

한편, 여러 개의 적절하게 구부러진 줄(wires)들로서 구성된 RCC기기의 경우 휘어지지 않은 부분에 해당하는 줄의 부분과 휘어진 부분에 해당하는 줄 부분의 탄성 변형 특성에 의해 RCC점의 위치 및 콤플라이언스 특성이 결정된다. 대부분의 상품화된 RCC의 경우는 세 개 또는 여섯 개의 탄성중합체(elastomer shear pads)의 특성을 이용하여 제작되어 있으며,⁽³⁾ 상용 RCC기기의 축면 강도는 8.75 - 17.5 N/mm, 회전강도는 10 - 25 Nmm/rad, 위치변위오차의 허용범위와 회전변위오차의 허용범위는 각각 2mm - 3mm, 5 - 15° 정도이다.

Cutkosky는 네 개의 구형 유압 엑츄에이터 시스템을 이용한 능동식 콤플라이언스 wrist를 제작하였는데, 이 구조는 구(sphere)내의 유압을 변화시킴으로서 구의 콤플라이언스가 변화되어 이 wrist가 RCC기기의 특성을 유지하고 RCC점의 위치를 변화할 수 있도록 설계되었으나 내부의 복잡한 구조로 인하여 모형의 크기는 매우 크게(25.4cm) 제작되었다.⁽⁵⁾ McCallion은 비행기 시뮬레이터로서 사용되는 스트워트 플랫폼(Stewart Platform)의 구조를 이용한 콤플라이언스 기기로서 상판(Upper Platform)과 하판(Base Platform), 그리고 여섯 개의 스프링을 내포한 링크로서 구성된 콤플라이언스 기기를 제작하였으며, 이 기기의 RCC점은 상판의 중앙점에 위치한다. 또한 이 기기를 개량한 RCC기기로서 세 개만의 강체링크를 사용하고 링크와 Platform 사이에 탄성마(elastic membrane)을 사용하여 연결하므로 서 4-자유도의 콤플라이언스의 효과를 갖는 관절들을 이용하는 또 다른 PCD(passive compliance device)를 제작하였다.⁽⁷⁾

이상과 같이 일반 상용 RCC 기기들은 대부분 구조물의 변형을 활용하는 구조로 설계되어 있다. 그러나, 본 연구에서는 관절 콤플라이언스만을 활용하는 병렬구조를 지닌 메카니즘의 RCC 특성에 관하여 조사하고자 한다.

2. RCC 기기의 콤플라이언스 모델

일반적인 RCC 기기의 구조는 직렬구조와 병렬구조가 연결된 혼합구조를 사용하거나 Stewart Platform 구조와 유사한 병렬구조를 지니고 있다. 본 절에서는 직렬구조, 병렬구조, 그리고 혼합구조를 지닌 콤플라이언스 어셈블리 기기들의 콤플라이언스 모델에 관하여 논한다.

2.1 직렬구조 RCC기기의 콤플라이언스 모델

먼저 시스템의 RCC 점이 존재한다고 가정한다. 이 때, 이 점의 변수벡터를 $u = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m)^T$, 그리고 구동 엑츄에이터 관절 변수벡터(즉, 스프링이 부착된 관절 변수벡터)를 $\phi = (\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n)^T$ 라고 하면 이들 변수벡터 사이의 미분 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta u = [G_u^{\phi}] \delta \phi \quad (1)$$

여기서 δu 와 $\delta \phi$ 는 각각 가상 RCC 점의 속도벡터와 구동 엑츄에이터의 미소 변위벡터를 나타내고 $[G_u^{\phi}]$ 는 일차 기구학적 영향계수(자료비안)를 나타낸다. 그리고 $\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_n)^T$ 와 $f = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_m)^T$ 를 각각 엑츄에이터 토크벡터와 RCC 점(u)에 작용하는 외력벡터라고 하면 가상 일의 정리로부터 다음의 식이 성립한다.

$$d\phi^T \tau = du^T f \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하여 정리하면

$$\tau = [G_u^{\phi}]^T f \quad (3)$$

의 관계식을 얻는다. 각각의 관절에서의 콤플라이언스를 C_{ϕ_i} ($i=1, 2, \dots, n$)라고 할 때, 각 관절에서는 $\delta \phi_i = C_{\phi_i} \tau_i$ 의 관계식이 성립하며 전체를 행렬로 표현하면

$$\delta \phi = [C_{\phi}] \tau \quad (4)$$

이 된다. 위 식과 RCC 점에서의 위치변수 u 와 관절변수 ϕ 사이의 미분관계식을 이용하면 RCC 점에서의 콤플라이언스 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있으며

$$\begin{aligned} \delta u &= [G_u^{\phi}] \delta \phi \\ &= [G_u^{\phi}] [C_{\phi}] \tau \\ &= [G_u^{\phi}] [C_{\phi}] [G_u^{\phi}]^T f \\ &= [C_{uu}] f \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 변수 u 에 대한 콤플라이언스 행렬은 관절변수 ϕ 에 대한 콤플라이언스 행렬의 관계식으로 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$[C_{uu}] = [G_u^{\phi}] [C_{\phi}] [G_u^{\phi}]^T \quad (6)$$

또한 식 (6)을 강성 행렬로 표현하면

$$[K_{uu}] = ([G_u^{\phi}] [C_{\phi}] [G_u^{\phi}]^T)^{-1} \quad (7)$$

이며, 특히 $[K_{uu}]$ 가 대각행렬(diagonal matrix)인 경우 이에 대응하는 콤플라이언스 행렬도 대각행렬로 표현된다 ($K_{\phi_i \phi_i} = 1/C_{\phi_i \phi_i}$). 위와 같은 식은 시스템의 potential co-energy를 활용하여 얻어 질 수 있으며, 이로부터 여자유도 시스템의 콤플라이언스에 의한 명령은 항상 Penrose 유사 역행렬을 만족하는, 다시 말하면 에너지를 최소화하는 형상을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로, 이상적인 RCC 기기는 $[K_{uu}]$ 가 대각행렬이 되는 경우이며 앞에서 구한 콤플라이언스에 대한 관계식을 세 개의 회전관절들을 갖는 Figure 1과 같은 3 자유도의 직렬형 구조에 대하여 조사하기로 한다. 이 시스템의 각 관절에는 콤플라이언스가 부착되었다고 가정한다(다시 말하면, 스프링 효과를 내는 회전 스프링, 또는 공압등의 장치가 부착되었다고 가정한다). 이 시스템의 위치 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$x = l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{13} \quad (8)$$

$$y = l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{13} \quad (9)$$

$$\psi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (10)$$

앞에서와 같이 출력변수와 입력변수를 각각 $u = (x \ y \ \psi)^T$, $\Phi = (\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3)^T$ 라 정의하면 이들 간의 미분 관계식을 나타내는 일차 기구학적 영향계수는 다음과 같다.

$$[G^u] = \begin{bmatrix} -l_1s_1 - l_2s_{12} - l_3s_{13} & -l_1s_{12} - l_2s_{13} & -l_1s_{13} \\ l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{13} & l_2c_{12} + l_3c_{13} & l_3c_{13} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

이에 따라 콤플라이언스 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} [C_{uu}] &= [G^u] [C_{\Phi\Phi}] [G^u]^T \\ &= \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{x\psi} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{y\psi} \\ C_{\psi x} & C_{\psi y} & C_{\psi\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $[G^u]$ 와 $[C_{\Phi\Phi}]$ 을 각각 아래와 같이 정의하면

$$[G^u] = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[C_{\Phi\Phi}] = \begin{bmatrix} C_{\Phi\Phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{\Phi\Phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{\Phi\Phi_3} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$[C_{uu}]$ 의 각 요소들은 다음과 같이 구해진다.

$$C_{xx} = a_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + a_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3^2 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (15)$$

$$C_{yy} = b_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + b_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + b_3^2 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (16)$$

$$C_{\psi\psi} = c_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + c_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + c_3^2 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (17)$$

$$C_{xy} = a_1 b_1 C_{\Phi\Phi_1} + a_2 b_2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3 b_3 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (18)$$

$$C_{x\psi} = a_1 c_1 C_{\Phi\Phi_1} + a_2 c_2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3 c_3 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (19)$$

$$C_{\psi x} = b_1 c_1 C_{\Phi\Phi_1} + b_2 c_2 C_{\Phi\Phi_2} + b_3 c_3 C_{\Phi\Phi_3}, \quad (20)$$

시스템의 어떠한 위치가 RCC 점이 되기 위해서는 RCC 점에서의 콤플라이언스 행렬, $[C_{uu}]$, 는 대각행렬이 되어야 하며, 이에 따라서 다음과 같은 여섯 개의 식이 만족되어야 한다.

$$a_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + a_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3^2 C_{\Phi\Phi_3} = C_{xx} \quad (21)$$

$$b_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + b_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + b_3^2 C_{\Phi\Phi_3} = C_{yy} \quad (22)$$

$$c_1^2 C_{\Phi\Phi_1} + c_2^2 C_{\Phi\Phi_2} + c_3^2 C_{\Phi\Phi_3} = C_{\psi\psi} \quad (23)$$

$$a_1 b_1 C_{\Phi\Phi_1} + a_2 b_2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3 b_3 C_{\Phi\Phi_3} = 0 \quad (24)$$

$$a_1 c_1 C_{\Phi\Phi_1} + a_2 c_2 C_{\Phi\Phi_2} + a_3 c_3 C_{\Phi\Phi_3} = 0 \quad (25)$$

$$b_1 c_1 C_{\Phi\Phi_1} + b_2 c_2 C_{\Phi\Phi_2} + b_3 c_3 C_{\Phi\Phi_3} = 0 \quad (26)$$

이 식들로부터 세 개만의 관절 콤플라이언스를 사용하는 경우에 시스템의 형상이 위의 식들을 동시에 만족시킬 수 있다면 바로 그 점이 RCC 점이 된다. 그러나, 조건 식은 여섯 개이고 반면에 세 개의 미지수 ($C_{\Phi\Phi_1}$, $C_{\Phi\Phi_2}$, $C_{\Phi\Phi_3}$)를 지나고 있으므로 일반적으로는 해가 존재하지 않는다. 그러므로, 이들 여섯 가지 조건을 만족시키기 위해서는 여섯 개의 독립적인 관절 콤플라이언스를 사용하여야 하며(6 자유도 직렬 시스템) 이 경우에는 임의의 형상에서 항상 RCC 점의 특성을 가질 수 있다. 여섯 개 이하의 독립적인 관절 콤플라이언스를 활용하는

경우에는 시스템의 일차 기구학적 영향계수가 주어진 관절 콤플라이언스와 위의 여섯 가지 관계식을 만족시키는 형상(점)들만이 RCC 점의 특성을 가진다.

2.2 병렬구조 RCC기기의 콤플라이언스 모델

병렬구조에서 독립관절 변수벡터를 Φ 라고 하고 비독립관절 변수벡터를 Φ_d 라 하자. 여기서 독립 구동 관절변수는 시스템의 최소 구동 관절변수를 나타내며 비독립 구동 관절변수는 잉여구동 관절변수를 나타낸다. 그리고 이들 관절들에 스프링이 장착되었다고 가정한다. 이 때 이들 관절 스프링으로 인한 전체 시스템의 포텐셜 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P.E. = \frac{1}{2} \delta\Phi_i^T [K_{\Phi\Phi_i}] \delta\Phi_i + \frac{1}{2} \delta\Phi_d^T [K_{\Phi\Phi_d}] \delta\Phi_d \quad (27)$$

이들 독립 관절변수와 비독립 관절변수 사이의 일차 기구학적 관계식을

$$\delta\Phi_d = [G^d] \delta\Phi, \quad (28)$$

라고 하면, 전체 시스템의 포텐셜 에너지는

$$\begin{aligned} P.E. &= \frac{1}{2} \delta\Phi_i^T [K_{\Phi\Phi_i}] \delta\Phi_i + \frac{1}{2} \delta\Phi_d^T [G_i^d]^T [K_{\Phi\Phi_d}] [G_i^d]^T \delta\Phi_i \\ &= \frac{1}{2} \delta\Phi_i^T [K_{\Phi\Phi_i}] + [G_i^d]^T [K_{\Phi\Phi_d}] [G_i^d]^T \delta\Phi_i \end{aligned} \quad (29)$$

로 표현된다. 이로부터 비독립 관절에 부착된 강성 흐자는 등가의 독립 관절변수에서의 강성으로 나타나게 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 네 개의 회전관절들로 구성되는 병렬구조의 1 자유도 4-절 기구 시스템을 나타내며, 이 시스템의 출력변수 $u = (x \ y \ \psi)^T$ 와 관절변수 $\Phi = (\phi_1 \ \phi_2)^T$ 에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$x = l_1 \cos \phi_1 + \frac{l_2}{2} \cos(\phi_1 + \phi_2) + l_3 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \frac{\pi}{2}) \quad (30)$$

$$y = l_1 \sin \phi_1 + \frac{l_2}{2} \sin(\phi_1 + \phi_2) + l_3 \sin(\phi_1 + \phi_2 + \frac{\pi}{2}) \quad (31)$$

$$\psi = \phi_1 + \phi_2 \quad (32)$$

이들 변수들 간의 미분관계식은 아래와 같이 구해지며

$$\delta u = [G^u] \delta\Phi \quad (33)$$

여기서 일차 기구학적 영향계수는

$$[G^u] = \begin{bmatrix} -y & l_1 \sin \phi_1 - y \\ x & x - l_1 \cos \phi_1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

으로 구해진다. 네 개의 관절변수 중에서 ϕ_1 를 독립변수로 정하고 나머지 ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4 를 비독립 변수라고 할 때 구속 방정식은 다음과 같이 주어지며

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 = 5\pi \quad (35)$$

$$l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{13} = l_4 \quad (36)$$

$$l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{13} = 0 \quad (37)$$

이들 간의 미분 관계식들은

$$\delta\phi_2 = -\frac{l_3 l_4 s_{13}}{l_2 l_3 s_3} \delta\phi_1 \quad (38)$$

$$\delta\phi_3 = -\frac{l_1 l_{4S1}}{l_3 l_{4S3}} \delta\phi_1 \quad (39)$$

$$\delta\phi_4 = -\frac{l_2(l_{4S3} + l_{4S1})}{l_3 l_{4S3}} \delta\phi_1 \quad (40)$$

과 같이 구해진다. 식 (38)을 (33)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 RCC 점의 위치변수와 독립 관절변수에 (ϕ_1) 대한 일차 미분 관계식을 얻을 수 있다.

$$\delta u = [G_{\phi}^u] \delta\phi_1 \quad (41)$$

여기서 일차 기구학적 영향계수는 아래와 같다.

$$[G_{\phi}^u] = \begin{vmatrix} -y + (y - l_{4S1}) \frac{l_1 l_{4S3}}{l_3 l_{4S3}} \\ x - (x - l_{4C1}) \frac{l_2 l_{4S3}}{l_3 l_{4S3}} \\ 1 - \frac{l_1 l_{4S3}}{l_3 l_{4S3}} \end{vmatrix} \quad (42)$$

만약 이 병렬 시스템이 대칭인 경우, 즉, $l_1 = l_2 = l_3 = l$,

$l_4 = 2l$, 그리고 $\phi_1 = 60^\circ$ 인 경우를 살펴보면

$$[G_{\phi}^u] = \begin{vmatrix} l_5 & \sqrt{3}l/2 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (43)$$

을 얻을 수 있으며 다음과 같은 출력 콤플라이언스 행렬이 구해진다.

$$[C_{uu}] = [G_{\phi}^u] [C_{\phi}] [G_{\phi}^u]^T = \begin{vmatrix} l_5 & \sqrt{3}l/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{\phi} & 0 \end{vmatrix} \quad (44)$$

이 식으로부터 $l_5 = \sqrt{3}l/2$ 일 때 회전방향으로만 (ψ) 콤플라이언스가 존재한다는 것을 알 수 있으며, 이 위치는 이 시스템의 순간 중심에 해당된다. 기구학적으로 순간중심은 그 점에서 물체가 회전운동만을 가지는 경우를 나타내므로 이 점이 RCC 점이라는 것을 확인할 수 있다.

2.3 혼합구조 RCC 기기의 콤플라이언스 모델

앞에서의 4 절 기구와 같은 병렬구조의 모듈들이 직렬로 연결되어 있는 혼합구조 시스템에 대해서 살펴보기로 한다. r번째 병렬모듈의 독립관절 변수벡터와 비독립관절 변수벡터를 각각 ϕ_{pr} 와 ϕ_{pd} 라고 하자. 이 때 전체 시스템의 포텐셜 에너지는 각 병렬모듈을 그 각각의 독립관절에서의 포텐셜에너지의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$P.E. = \sum_{r=1}^R \frac{1}{2} d_r \phi_{pr}^T ([+, K_{\phi_{pr}, \phi_{pr}}] + [+, G_{pr}^M]^T, [K_{\phi_{pr}, \phi_{pr}}] [G_{pr}^M]) d_r \phi_{pr} \quad (45)$$

한 예로서, 앞의 예에서 활용한 동일한 1 자유도를 갖는 병렬구조의 4-bar 시스템과 또 다른 1 자유도의 4-bar 병렬시스템으로 구성되는 Fig. 3과 같은 혼합구조를 갖는 시스템에 대하여 조사하기로 한다. 이 시스템의 출력변수 $u = (x \ y \ \psi)^T$ 는 각각

$$x = l_0 \cos\phi_b + l_1 \cos(\phi_b + \phi_c + \phi_1) + \frac{l_2}{2} \cos(\phi_b + \phi_c + \phi_1 + \phi_2) + l_3 \cos(\phi_b + \phi_c + \phi_1 + \phi_2 + \frac{\pi}{2}) \quad (46)$$

$$y = l_0 \sin\phi_b + l_1 \sin(\phi_b + \phi_c + \phi_1) + \frac{l_2}{2} \sin(\phi_b + \phi_c + \phi_1 + \phi_2) \quad (47)$$

$$\psi = \phi_b + \phi_c + \phi_1 + \phi_2 \quad (48)$$

과 같이 표현될 수 있으며, 병렬형과 동일한 방법으로 출력변수(u)와 입력 독립변수($\phi = (\phi_b \ \phi_1)^T$)들 사이의 자코비안을 얻을 수 있다.

$$[G_{\phi}^u] = \begin{vmatrix} -l_0 s_b & -l_0 s_b - 2l_1 c_{b1} + y \\ l_0 c_b & l_0 c_b + 2l_1 c_{b1} - x \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (49)$$

앞에서와 마찬가지로

$l_0 = l_1 = l_2 = l_3 = l$, $l_4 = 2l$, $\phi_b = 90^\circ$, $\phi_1 = 60^\circ$ 일 때 일차 기구학적 영향계수는

$$[G_{\phi}^u] = \begin{vmatrix} l_0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (50)$$

로 표현된다. 이에 따라 출력변수에 대한 콤플라이언스 행렬은 다음과 같이 대각행렬의 형태로 얻어진다.

$$[C_{uu}] = \begin{vmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{x\psi} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{y\psi} \\ C_{\psi x} & C_{\psi y} & C_{\psi\psi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} l_0^2 C_{\phi, \phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{\psi, \psi} \end{vmatrix} \quad (51)$$

이 식으로부터 이 시스템은 현재 출력의 위치 및 형상에서 직선방향(x)과 회전방향(ψ)으로 독립적인 2 자유도의 콤플라이언스를 지닌다는 것을 알 수 있으며 이 점이 우리가 찾는 RCC 점이 된다.

3. 병렬구조 평면형 3 자유도 메카니즘의 콤플라이언스 특성에 관한 해석

본 연구에서 조사하려는 메카니즘은 Fig. 4와 같이 지면과 플랫폼 사이에 세 개의 관절과 두 개의 링크로 구성되는 세 개의 직렬형 부속체인으로 이루어진다. r번째 직렬형 부속체인에서 지면으로부터 n번째 관절변수를 ϕ_n 이라고 하자. 그리고 r번째 직렬형 부속체인의 n번째 링크의 길이를 d_n 이라고 하자. 이 때 플랫폼 중앙의 위치를 나타내는 출력ベ터를 $u = (x \ y \ \psi)^T$. 그리고 r번째 부속체인의 관절변수ベ터를 $\phi = (\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3)^T$ 라고 할 때, 이들 사이의 미분관계식은 다음과 같다.

$$\delta u = [r, G_{\phi}^u] \delta \phi, \quad r=1,2,3 \quad (52)$$

각 부속체인의 일차 미분계수 $[r, G_{\phi}^u]$ 가 비례이 할 때 역관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta \phi = [r, G_{\phi}^u]^{-1} \delta u, \quad r=1,2,3 \quad (53)$$

이 식으로부터 각 체인의 첫번째 관절변수들로 이루어진 벡터 $\Phi_a = (\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3)^T$ 를 입력관절 변수ベ터라고 할 때, 출력ベ터와의 입출력 미분관계식은 다음과 같이 주어지며

$$\delta\Phi_a = \{G_a^a\} \delta u \quad (54)$$

위 식에서의 자코비안은 다음과 같이 구해진다.

$$\{G_a^a\} = \begin{bmatrix} l_1 G_{11}^a & \\ l_2 G_{12}^a & \\ l_3 G_{13}^a & \end{bmatrix} \quad (55)$$

각 부속체인에 있어서 대응되는 링크 길이가 같은 경우에 ($l_1 = l_2 = l_3 = l$ for $n=1,2,3$), $\{G_a^a\}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\{G_a^a\} = \begin{bmatrix} C_{12}^1 & S_{12}^1 & l_3 S_3^1 \\ \frac{C_{12}^1}{l_3 S_3^1} & \frac{l_3 S_3^1}{l_3 S_3^1} & l_3 S_3^1 \\ \frac{C_{12}^2}{l_3 S_3^2} & \frac{S_{12}^2}{l_3 S_3^2} & l_3 S_3^2 \\ \frac{C_{12}^3}{l_3 S_3^3} & \frac{S_{12}^3}{l_3 S_3^3} & l_3 S_3^3 \end{bmatrix} \quad (56)$$

각각의 입력관절 $\Phi_a = (\phi_1, \phi_2, \phi_3)^T$ 에 대한 콤플라이언스가 C_{11}, C_{22}, C_{33} 라 할 때, 콤플라이언스 행렬은 다음과 같으며

$$\{C_{\bullet\bullet}\} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \quad (57)$$

이에 따른 출려 콤플라이언스 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \{C_{uu}\} &= \{G_a^a\} \{C_{\bullet\bullet}\} \{G_a^a\}^T \\ &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (58)$$

이 출려 콤플라이언스가 대각 행렬이기 위해서는 비대각 성분들이 모두 0이 되어야 하며, 이를 행렬의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{22} \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{22} \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

여기서

$$A_{11} = l_3 l_3^2 (S_3^1)^2 (C_{12}^1 S_3^2 - C_{12}^2 S_3^3) (S_{12}^2 S_3^3 - S_3^2 S_{12}^3) \quad (60)$$

$$A_{12} = l_3 l_3^2 (S_3^1)^2 (S_3^1 S_{12}^2 - S_{12}^1 S_3^3) (C_{12}^1 S_3^2 - C_{12}^3 S_3^3) \quad (61)$$

$$A_{13} = l_3 l_3^2 (S_3^1)^2 (S_{12}^1 S_3^2 - S_3^1 S_{12}^2) (S_3^1 C_{12}^2 - C_{12}^1 S_3^2) \quad (62)$$

$$A_{21} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (C_{12}^2 S_3^2 - C_{12}^3 S_{12}^2) (S_{12}^2 S_3^3 - S_3^2 S_{12}^3) \quad (63)$$

$$A_{22} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (C_{12}^1 S_{12}^2 - C_{12}^2 S_3^2) (S_{12}^1 S_{12}^3 - S_{12}^2 S_3^3) \quad (64)$$

$$A_{23} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (S_{12}^2 C_{12}^2 - C_{12}^2 S_{12}^2) (S_{12}^1 S_3^2 - S_{12}^2 S_3^2) \quad (65)$$

$$A_{31} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (C_{12}^2 S_3^2 - C_{12}^3 S_{12}^2) (C_{12}^3 S_3^2 - C_{12}^1 S_3^2) \quad (66)$$

$$A_{32} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (C_{12}^3 S_3^2 - C_{12}^2 S_{12}^2) (C_{12}^1 S_3^2 - C_{12}^2 S_3^2) \quad (67)$$

$$A_{33} = l_3^2 l_3 (S_3^2)^2 (C_{12}^1 S_{12}^2 - C_{12}^2 S_3^2) (C_{12}^2 S_3^1 - C_{12}^1 S_3^2) \quad (68)$$

위 식(식 59)이 0이 아닌 해(non-trivial solution)가 존재하기 위한 조건은 행렬 A 의 디터미넌트가 0이다. 시스템의 형상을 대칭으로 유지하고 관절의 콤플라이언스가 동일하다고 가정하는 경우, 즉,

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi \quad (69)$$

일 때, 행렬 A 의 디터미넌트가 0이 된다. 그리고 식 59의 해는 다음과 같다.

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{\bullet\bullet} \quad (70)$$

그리고 이 때 출려 콤플라이언스 행렬의 대각성분은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{11} = \frac{9 C_{\bullet\bullet} l_3^2 (S_{12}^1)^2 (S_{12}^3)^2}{2} \quad (71)$$

$$C_{22} = \frac{9 C_{\bullet\bullet} l_3^2 (S_{12}^2)^2 (S_{12}^3)^2}{2} \quad (72)$$

$$C_{33} = \frac{9 C_{\bullet\bullet} l_3^2 (S_{12}^3)^2}{4} \quad (73)$$

결론적으로, 위 식으로부터 각 관절에 동일한 콤플라이언스를 사용하는 경우에, $C_{11} = C_{22}$ 이며 $C_{33} = \frac{C_{11}}{2(l_3 S_3)^2}$ 의 관계

식이 성립하며 이 결과로부터 출려 콤플라이언스 행렬의 대각성분의 가 요소의 크기는 링크의 길이와 관절 콤플라이언스를 조절함으로서 변화될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 메카니즘의 관절 콤플라이언스만을 활용하는 치형구조, 병형구조, 그리고 혼합구조를 지닌 콤플라이언스 어셈블리 기기들의 해석을 위한 콤플라이언스 모델에 관하여 논하였다. 특히 병형구조를 지닌 평면형 3 자유도 메카니즘에 대한 콤플라이언스 특성을 대하여 조사하였다. 이러한 메카니즘의 경우에 있어서, 대칭 구조를 갖는 형상에서 메카니즘의 중앙 위치에 RCC 점이 존재하였으며 이러한 RCC점에서의 콤플라이언스와 관절 콤플라이언스 사이의 관계식을 도출하였다.

본 연구에서 제시된 관절 콤플라이언스를 활용하는 RCC 메카니즘은 병형형 구조로 인하여 잠정적으로 많은 관절에 콤플라이언스를 부여할 수 있고 쉽게 교체할 수 있는 이점들을 지니고 있다. 이에 따라, 관절에서의 콤플라이언스를 조절하여 RCC 점에서의 원하는 콤플라이언스를 만족시킬 수 있을 뿐만 아니라 양의 콤플라이언스를 나머지 관절에 배치함으로서 시스템의 강성을 조절할 수 있고 RCC 점을 중심으로 안정도를 향상시킬 수 있는 이점이 있다. 그러므로, 평면형 3 자유도 메카니즘이 최적의 콤플라이언스 기능을 갖도록 하기 위해 그 시스템의 인자들에 대한 콤플라이언스 특성을 관한 민감도 등을 고려한 최적화에 대한 연구와 평면형 3 자유도 메카니즘의 RCC점을 갖기 위한 필요 충분 조건에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

마지막으로, 현존하는 일반적인 RCC기기들의 특성은 모두 RCC기기 자체의 구조적 콤플라이언스를 활용하도록 설계되어 있으며 대부분 기기들이 병형구조의 형태를 취하고 있다. 이러한 구조적 콤플라이언스 이외에도 병형구조를 갖는 폐쇄회로 시스템(closed-loop system)의 경우에는 상반되게 작용하는 내부하중(internal loading)으로 인한 유효 강성(antagonistic stiffness)이 존재한다⁽¹⁾. 이러한 Antagonistic 강성을 활용하는 RCC기기에 관한 연구도 현재 진행 중이다.

참고문헌

1. Byung Ju Yi and R.A. Freeman, "Synthesis of Actively Adjustable Springs by Antagonistic Redundant Actuation," Trans. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 114, Sept. 1992, pp. 454-461.
2. D.E. Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 104, Mar. 1982, pp. 65-77.
3. D.E. Whitney, "Remote Center Compliance," in Encyclopedia of Robotics System and Control, vol 2., pp. 1316-1324, edited by J.J. Diponio and Y. Hasegawa, published by Industrial Training Corporation, 1986.
4. D.E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," Int'l. Journal of Robotics Research, vol. 6, no.1, Spring, 1987.
5. M.R. Cutkosky and P.K. Wright, "Active Control of a Compliant Wrist in Manufacturing Tasks," Transactions of the ASME, vol. 108, Feb. 1986, pp. 36-43.
6. M. R. Cutkosky and Imin, Kao, "Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand," IEEE transaction of robotics and automation, vol. 5, no. 2, April 1989, pp. 151-165.
7. H. McCallion, K.V. Alexander, and D.T. Pham, "Aid for Automatic Assembly," 1st Int'l. Conf. on Assembly Automation, Mar. 1980, pp. 313-323.
8. M. A. Peshkin, "Programmed Compliance for Error Corrective Assembly," IEEE Transactions on robotics and automation, vol. 6, no. 4, Aug. 1990, pp. 474-482.
9. T.L. De Fazio, D.S. Seltzer, and D.E. Whitney, "The Instrumented Remote Center Compliance," The Industrial Robot, vol. 11, no. 4, dec. 1984, pp. 238-242.
10. N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I, II, III," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, vol. 107, Mar. 1985.
11. H. Kazerooni, et al., "Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I: The Fundamental concept of Compliant Motion, Part II: Design Method," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA 2, no. 2, June 1986, pp. 83-92, 93-105.
12. H.V. Brussel, H.Thielmans, J.Simons, "Further Developments of The Active Adaptive Compliant Wrist(AACW) For Robot Assembly, Proc. th Int'l Symp. on Industrial Robots, SME, pp. 377-384.

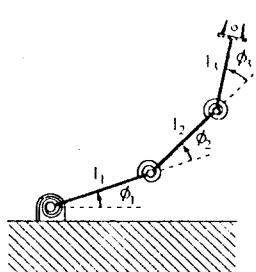


Figure 1. 3 degree-of-freedom serial mechanism

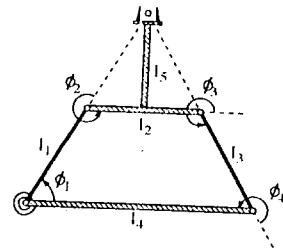


Figure 2. 1-degree-of-freedom parallel mechanism

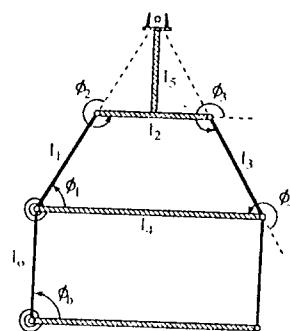


Figure 3. 2 degree-of-freedom hybrid mechanism

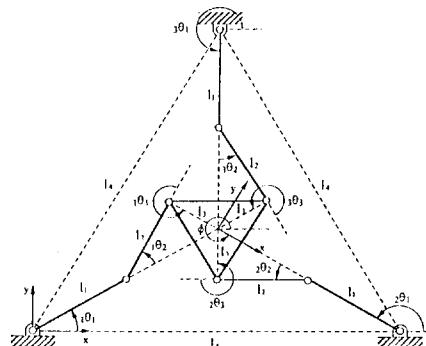


Figure 4. 3-degree-of-freedom parallel mechanism