

여유구동을 갖는 5관절 메커니즘의 콤프라이언스 제어 Compliance Control of a Five-bar Mechanism

소병록, 이병주*, 오상록**, 서일홍***

*한양대학교 제어계측공학과(Tel : +82-345-400-5218; Fax : +82-345-406-6639; e_mail: bj@hyunpl.hanyang.ac.kr)

**한국과학기술연구원 정보전자 연구부(Tel : +82-2-958-5748; Fax : +82-2-958-5709)

***한양대학교 전자공학과(Tel : +82-345-400-5172; Fax : +82-345-408-5803; e_mail: ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

Abstracts For the development of human hand, we develop the five-bar mechanism with redundant actuation. We propose a new compliance control algorithm, which is different from previous compliance control methods in that it employs equal or more actuators than the number of the required compliance elements in operational space. This algorithm has been successfully applied to hybrid control experimentation.

Keywords Compliance Control, Redundant Actuation, Five bar mechanism, Finger.

1. 서론

사람의 인체와 일반적인 동물구조 그리고 곤충의 구조를 보면 자유도 보다도 많은 액추에이터로 구동되는 여유구동 시스템임을 알 수 있다. 이러한 여유구동 시스템은 액추에이터간에 동작에 필요한 힘을 적절히 분배하는 여러 가지 방법을 제시할 수 있으며, 시스템의 정적평형 상태에서 내력을 이용하여 유용한 효과를 추가적으로 얻을 수 있다.

본 연구에서는 휴먼 핸드를 위해 개발된 5-bar 메커니즘에 여유구동을 이용하여 5-bar 메커니즘의 말단에 힘센서를 부착하지 않고도 여유구동을 이용하여 콤프라이언스(강성의 역) 효과를 적절히 조절하는 콤프라이언스 제어 방법을 사용해 원활한 위치 및 힘제어가 이루어짐을 살펴보려 한다. 기존의 콤프라이언스 제어 방법에서는 시스템의 자유도 만큼의 입력에 대한 제어 방식을 고려하였으나 이러한 경우에 실제로 제어하고자 하는 작업공간상의 콤프라이언스 요소들의 숫자보다 제어입력의 숫자가 적으며 또한 제어입력 관절간의 극심한 연관관계로 인하여 원활한 콤프라이언스 제어가 될 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 요구되는 콤프라이언스 요소 이상의 제어입력으로 관절간의 독립적인 제어를 수행하는 연구를 수행하고자 한다.

2. 5관절 메커니즘의 기구학 강성 모델링 및 해석

1. 기구학 해석

본 연구에서는 KIC(Kinematic Influence Coefficient)방법과 d'Alembert의 법칙을 접목하여 시스템 관계식이 벡터형으로 표현되는 모델링 방식을 선택하였다 [1-5].

페루프 체인의 기구학 모델에 대한 소개에 앞서, 직렬 체인의 기구학을 소개한다. 이것은 페루프 체인은 Open-Tree Structure 상황하에서 여러 개의 직렬 체인이 특정한 구속조건

으로 묶여서 이루어져 있기 때문이다. 모델링에 앞서 표기에 대해서만 간단히 소개하면, 다음에서 계속 쓰일 G 는 일차 미분을 나타내고, 위 첨자는 고려되거나 지시하는 종속 매개변수(Dependant Parameter)를 나타내고, 아래 첨자는 독립 매개변수(Independent Parameter)를 나타낸다.

페루프 체인의 i 번째 직렬 체인(Serial Chain)의 자코비안(Jacobian)은 $M \times 1$ 의 차원을 지닌 종속 변수(Dependant Parameter)의 속도 벡터(Velocity Vector) \dot{u} 를 $N \times 1$ 의 차원을 지닌 독립 변수(Independent Parameter)의 속도 벡터 $\dot{\phi}_a$ 로 나타내어 준다. 다음의 속도 관계식에서

$$\dot{u} = [{}_iG_{\phi}^u] \dot{\phi}_a \quad (1)$$

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

$$[{}_iG_{\phi}^u] = \left[\frac{\partial u}{\partial \phi_1}, \frac{\partial u}{\partial \phi_2}, \dots, \frac{\partial u}{\partial \phi_N} \right] \quad (2)$$

여기서 $[{}_iG_{\phi}^u]$ 의 i 번째 행은 출력 벡터(Output Vector) u 의 i 번째 입력 요소 u_n 에 대한 ϕ 의 편미분(Partial Derivative)이고, $[{}_iG_{\phi}^u]$ 의 i 번째 열은 출력 벡터(Output Vector) u 에 대한 i 번째 입력 요소 ϕ_i 의 편미분이다. 이 때 $[{}_iG_{\phi}^u]$ 를 일차 KIC(First Order Kinematic Influence Coefficient)라 정의한다.

1.1 5관절 메커니즘의 내부 기구학

그림 1은 5관절 메커니즘의 형태를 나타내며 모빌리티가 2이므로 두 개의 액추에이터로 구동이 가능하다. 그림 1의 모델은 변수 a 의 길이가 0인 형태로 많이 활용되고 있으며 지면에 연결된 두 개의 관절에 액추에이터를 부착하는 것이 일반적인 경우이다. 그러나, 나머지 세 개의 유효관절들에도 액추에이터를 부착하는 여유구동의 경우에는 두 개의 독립관절들과 나머지 세

개의 종속관절들 간의 기구학적 연관관계에 대한 이해가 필요하다. 5절 기구는 두 개의 직렬체인으로 구성되어 있으며 각 직렬체인은 로봇 끝점에 대하여 같은 기구학 관계식을 만족한다. 로봇 끝점벡터를 $\mathbf{u} = (x \ y \ \phi)^T$ 라고 정의하면 양 직렬체인의 위치에 관한 항등식은 아래와 같이 표현된다.

$$x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} = a + l_3 c_3 + l_4 c_{34} + l_5 c_{345}, \quad (3)$$

$$y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} = l_3 s_3 + l_4 s_{34} + l_5 s_{345}, \quad (4)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 = \theta_3 + \theta_4 + \theta_5. \quad (5)$$

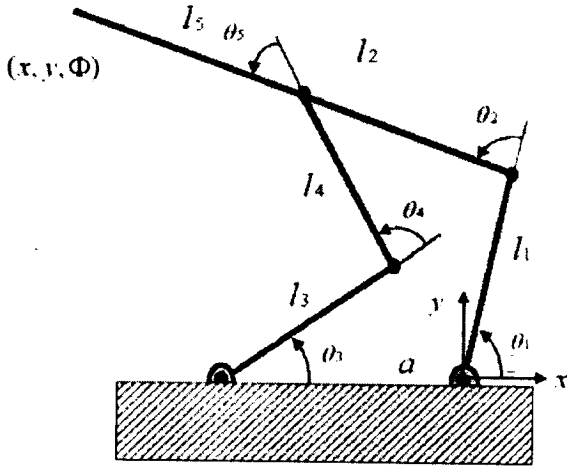


그림 1. 5관절 메커니즘

속도에 관한 항등식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{u}} = [{}_1G_\phi^u]_1 \dot{\phi} = [{}_2G_\phi^u]_2 \dot{\phi}, \quad (6)$$

여기서, $[{}_1G_\phi^u]$ 와 $[{}_2G_\phi^u]$ 는 각각 첫 번째와 두 번째 직렬체인에 대한 자코비안을 나타내며 다음과 같이 구해진다.

$$[{}_1G_\phi^u] = \begin{bmatrix} -(l_1 s_1 + l_2 s_{12}) & -(l_2 s_{12}) \\ (l_1 c_1 + l_2 c_{12}) & (l_2 c_{12}) \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$[{}_2G_\phi^u] = \begin{bmatrix} -(l_3 s_3 + l_4 s_{34} + l_5 s_{345}) & -(l_4 s_{34} + l_5 s_{345}) & -(l_5 s_{345}) \\ (l_3 c_3 + l_4 c_{34} + l_5 c_{345}) & (l_4 c_{34} + l_5 c_{345}) & (l_5 c_{345}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

첫 번째 체인의 θ_1 과 θ_2 를 독립관절(ϕ_a) 그리고 θ_3 , θ_4 , 그리고 θ_5 를 종속관절(ϕ_b)로 정하면, 종속관절과 독립관절 간의 일차기구학적 관계식은 식 (6)로부터 아래와 같이 표현되며

$$\dot{\phi}_b = [{}_2G_\phi^u]^{-1} [{}_1G_\phi^u] \dot{\phi}_a = [G_\phi^u] \dot{\phi}_a, \quad (9)$$

여기서,

$$\dot{\phi}_a = {}_1 \dot{\phi} = (\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2)^T, \quad (10)$$

$$\dot{\phi}_b = {}_2 \dot{\phi} = (\dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4 \ \dot{\theta}_5)^T. \quad (11)$$

그리고, $[G_\phi^u]$ 는 독립관절들과 종속관절들 간의 일차 기구학적 영향계수를 나타낸다.[6]

독립관절들과 종속관절들 간의 힘평형 관계식은 식 (9)의 속도 관계와 힘관계의 이중관계로부터

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = [G_\phi^u]^T \begin{pmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} \quad (12)$$

와 같이 주어지며, 본 논문에서의 5관절 메커니즘은 4개의 관절($\theta_1 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5$)이 구동되므로 독립관절에 대하여 표현된 전체 구동력은 다음과 같이 표현된다.

$$T_a^* = T_a + [G_\phi^u]^T \begin{pmatrix} T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} = [G_\phi^u]^T T_\phi, \quad (13)$$

여기서

$$[G_\phi^u] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ [G_\phi^u] \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$T_a = (T_1 \ T_2)^T, \quad (15)$$

$$T_\phi = (T_1 \ T_3 \ T_4 \ T_5)^T. \quad (16)$$

1.2 5관절 메커니즘의 외부기구학

외부 기구학은 말단장치의 위치($\dot{\mathbf{u}}$)와 페투프 체인의 독립관절($\dot{\phi}_a$)과의 관계를 나타내며, 식 (6)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\mathbf{u}} = [G_\phi^u] \dot{\phi}_a. \quad (17)$$

2. 5관절 메커니즘의 강성 모델링

5관절 메커니즘에 콤프라이언스 제어를 수행하기 위해 콤프라이언스 관계식을 사용하는 대신에 강성행렬을 활용하도록 한다. 이 경우에 자코비안 $[G_\phi^u]$, 관절공간에서의 강성 행렬 $[K_{\phi\phi}]$, 그리고 작업공간에서의 강성 행렬 $[K_{uu}]$ 은 각각 다음과 같이 정의한다.

$$[G_\phi^u] = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$[K_{\phi\phi}] = \begin{bmatrix} k_{\phi 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\phi 2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{\phi 1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\phi 2} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$[K_{uu}] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

관절공간에서의 강성 행렬 $[K_{\phi\phi}]$ 과 작업공간에서의 강성 행렬 $[K_{uu}]$ 간의 관계식은 다음과 같이 정의되며

$$[K_{uu}] = [G_u^{\phi}]^T [K_{\phi\phi}] [G_u^{\phi}] \quad (21)$$

$[G_u^{\phi}]$ 는 식(14)에서 정의된 $[G_u^{\phi}]$ 와 식(17)로부터 정의된 $[G_u^{\phi}]$ 의 역행렬 $[G_u^{\phi}]$ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$[G_u^{\phi}] = [G_u^{\phi}] [G_u^{\phi}]^{-1}, \quad (22)$$

여기서, 식(21)에 대한 강성 요소들 간의 관계식은 아래와 같이 나타내어지며

$$\begin{pmatrix} k_{xx} \\ k_{xy} \\ k_{yy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & a_4^2 \\ a_1 b_1 & a_2 b_2 & a_3 b_3 & a_4 b_4 \\ b_1^2 & b_2^2 & b_3^2 & b_4^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_{\phi 1} \\ k_{\phi 2} \\ k_{\phi 3} \\ k_{\phi 4} \end{pmatrix} = [A] K_{\phi}, \quad (23)$$

여기서,

$$K_u = [k_{xx} \quad k_{xy} \quad k_{yy}]^T, \quad (24)$$

$$K_{\phi} = [k_{\phi 1} \quad k_{\phi 2} \quad k_{\phi 3} \quad k_{\phi 4}]^T, \quad (25)$$

그리고 $[A]$ 는 3×4 행렬이므로 관절공간의 강성행렬 K_{ϕ} 은 다음과 같이 구해진다.

$$K_{\phi} = A^T (AA^T)^{-1} K_u. \quad (26)$$

3. 위치 및 힘제어 실험

1. 위치 제어 실험

위치 제어 실험은 5cm의 Line motion에 대한 실험을 수행하였으며, 관절 공간으로 환산된 강성행렬의 각 요소들이 제어 루프의 피드백 Gain으로 주어지며 시스템 블록도는 그림 2와 같다.

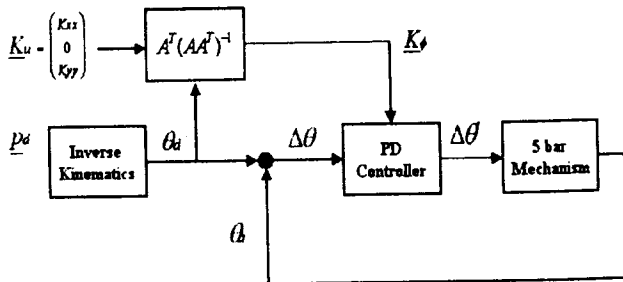


그림 2. 위치제어 시스템 블록도

그림3은 원하는 X방향의 Line motion이 원활히 수행되는 실험 결과를 보여주고 있다.

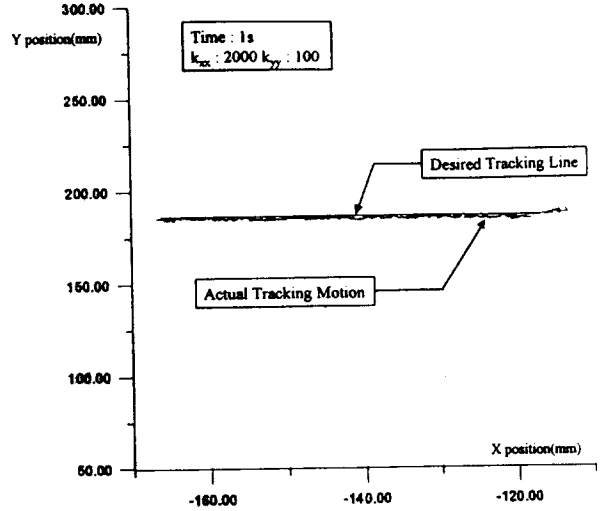


그림 3. 위치 제어 결과 (Line Traking Motion)

2. Hybrid 제어 실험

Hybrid 제어 실험은 아래와 같은 블록에 Y축으로는 $F_y (= K_{yy} \times \Delta y)$ 만큼의 힘을 제어하며, X축으로는 Line motion을 수행한다. 이때 X축으로는 Stiff하게, Y축으로는 Compliance하게 Gain을 정한다. 그림 4는 Hybrid 제어 실험을 위한 궤적을 나타낸다.

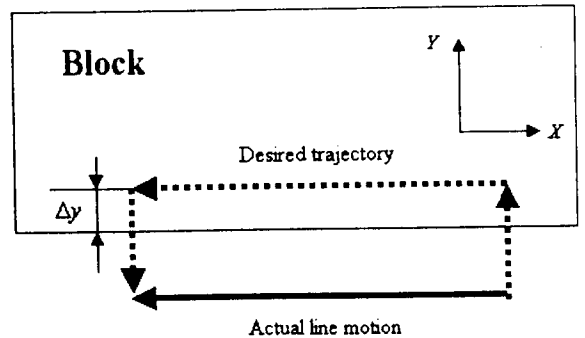


그림 4. Hybrid 제어 실험 궤적

그림 5는 Hybrid 제어를 위한 시스템 블록도를 나타낸다.

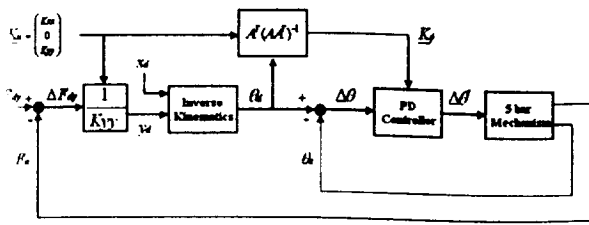


그림 5. Hybrid 제어 시스템 블록도

그림 6은 Hybrid 제어 실험에서의 벽을 따른 Line motion 추 결과를 나타내며, 그림 7은 힘제어 실험 결과는 나타낸다. 이 힘에서 Finger에서는 힘센서를 부착하기 어려우므로 Block위 F/T 센서를 부착하여 Block에 가해지는 힘을 측정하였다. Y 향의 강성을 500N/m로 정하고 Δy 를 6mm로 한 경우에 3N의 이 추종됨을 보여주고 있다. 힘에 대한 패루프 제어를 실시하 보다 향상된 결과를 가질 것으로 기대되며, 추후에는 sensorless 힘제어 알고리즘을 적용하여 힘제어를 실시하고자 한

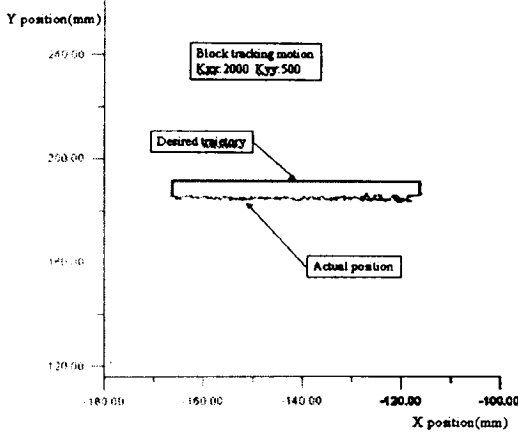


그림 6. Hybrid 제어 결과 (X축 방향의 위치 제어)

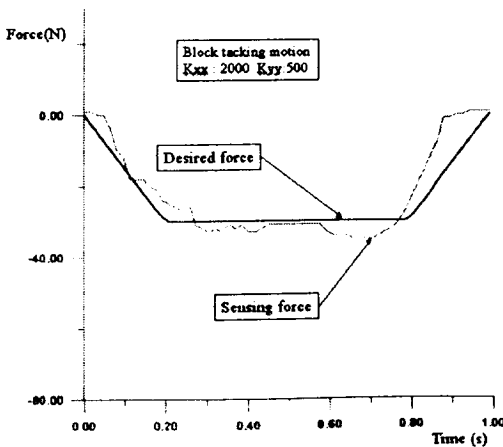


그림 7. Hybrid 제어 결과 (Y축 방향의 힘제어)

4. 결론

본 논문에서 제안한 여유구동을 지니는 메커니즘에서는 종전의 컴프라이언스 제어와는 달리, 제어 하고자 하는 작업공간상의 컴프라이언스(K_{xx} 와 K_{yy} 의 역수)보다 많은 수의 제어입력의 Gain($K_{\theta 1}$, $K_{\theta 2}$, $K_{\theta 3}$, $K_{\theta 4}$)을 독립적으로 조절해 줌으로써 향상된 제어 성능을 실험적으로 볼 수가 있었다.

추후로는 힘센서를 사용하지 않고 제어를 할 수 있는 알고리즘 적용과 여유구동된 메커니즘에서 고장난 액츄에이터가 생겼을 때 나머지 액츄에이터만으로도 원하는 제어 성능을 얻을 수 있는 알고리즘 개발과 Fault-tolerant 실험을 수행하려고 한다.

참고문헌

- [1] Benedict, C.E. and Tesar, D., 1978, "Model Formulation of Complex Mechanisms with Multiple Inputs: Part I-Geometry, Part II-The Dynamic Model," *J. Mechanical Design*, Vol.100, no.4, pp.747-761
- [2] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/ Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," Proceedings of 20th ASME Mechanisms Conference, Orlando, FL, 1988.
- [3] Freeman, R.A. and Tesar, D., 1988, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," *Proc. 20th ASME Biennial Mechanisms Conf. Orlando, FL, Trends and Development in Mechanisms, Machines, and Robotics*, DE-Vol.15-3, pp.7-27
- [4] Sklar, M. and Tesar, D., 1988, "Dynamic Analysis of Hybrid Serial Manipulator Systems Containing Parallel Modules," *ASME J. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol.110, pp. 109-115
- [5] 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," *The 1990 ASME Biennial Mechanism Conf., Chicago, IL*, DE-Vol.24, pp.125-132
- [6] Yi, B-J. and Freeman, R. A., Geometric analysis of antagonistic stiffness in redundantly actuated parallel mechanisms. Special Issues on Parallel Closed-Chain Mechanism, *Journal of Robotic systems* Vol. 10, pp. 581-603. 1993.