

여유구동을 지닌 무특이점 병렬형 3 자유도 햅틱기구의 성능해석

김 태 주, 정 구 봉, 이 재 훈, 이 병 주, 서 일 홍
한양대학교 전자컴퓨터공학부

Performance Analysis of Singularity-Free 3-DOF Parallel Haptic Device with Redundant Actuation

Tae Joo Kim, Goo Bong Chung, Jae Hoon Lee, Byung-Ju Yi, and Il Hong Suh
School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University

Abstract - 세 개의 체인으로 구성된 병렬형 3 자유도 기구는 특이점을 지남으로 인하여 햅틱기구로 활용시 불특정한 힘반영으로 인해 제한요소가 발생한다. 본 논문은 여유구동을 활용함으로써 특이점을 해소하고, 힘반영의 크기를 증가시킴으로써 햅틱기구의 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 또한 여유구동 모터를 베이스에 부착함으로써 관성력을 최소화 시키고, 와이어와 기어비를 활용하여 부드럽고 큰 힘반영 능력을 가능케 했으며, 시뮬레이션을 통해 힘반영 성능을 확인하였다.

를 지닌다. 각 직렬체인은 세 개의 링크와 세 개의 회전관절로 이루어져 있다.

모든 링크의 길이를 0.1m로 고정하고, 반지름이 0.15m인 원에 접하는 정삼각형의 세 꼭지점을 각 체인의 원점으로 정한다.

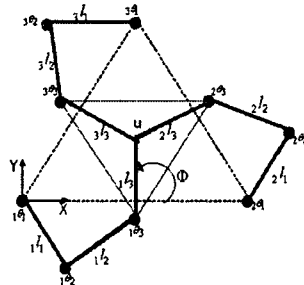


그림 1. 병렬형 3자유도 평면형 햅틱기구

1. 서 론

특정 분야에 제한적으로 사용되던 햅틱기구가 근래에 들어 산업전반으로 확대되고 있다. 특히 의료나 원격조경등의 분야에서는 햅틱기구를 이용한 작업이 점점 늘어나고 있다. 그러나 아직 햅틱 인터페이스 기술은 시스템 자체의 고가, 큰 부피, 그리고 낮은 힘반영 능력으로 인해 사용자의 요구를 완전하게 충족시켜주지 못한다.

그림 1에서 u 는 기준좌표계에 대한 로봇말단의 x, y 위치 좌표와 마지막 링크의 x 축에 대한 회전각 ϕ 로 이루어진 출력벡터이다. i 번째 체인의 입력 벡터 ϕ_i 는 관절각 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 으로 이루어진다

좋은 햅틱기구의 조건으로는 넓은 작업공간을 지녀야 하고, 시스템 자체의 관성이 작아야 하며, 관절등에서 발생하는 마찰이 적어야 한다[1,2]. 또한 작업공간내 특이점이 없어야 하며 정밀하고 큰 힘을 낼 수 있어야 한다.

2.1.1 정방향 기구학

각 관절의 각속도와 말단장치에서의 속도관계를 나타내는 1차 기구학은 식 (1)과 같다.

$$\dot{u} = [1G_u^{\phi}] \dot{\phi} = [2G_u^{\phi}] \dot{\phi} = [3G_u^{\phi}] \dot{\phi} \quad (1)$$

식 (1)의 역기구학은 식 (2)와 같이 다시 정리할 수 있으며

$$\dot{\phi} = [1G_u^{\phi}]^{-1} \dot{u}, \quad \dot{\phi} = [2G_u^{\phi}]^{-1} \dot{u}, \quad \dot{\phi} = [3G_u^{\phi}]^{-1} \dot{u} \quad (2)$$

여기서 $[iG_u^{\phi}] = [iG_u^{\beta}]^{-1}$ 이다.

식 (2)로부터 각 체인의 구동기가 부착된 능동관절 ϕ_A 와 u 과의 관계가 식 (3)으로 표현되며

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \\ \dot{\phi}_5 \\ \dot{\phi}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1G_u^{\phi}]_1 \\ [1G_u^{\phi}]_2 \\ [2G_u^{\phi}]_1 \\ [2G_u^{\phi}]_2 \\ [3G_u^{\phi}]_1 \\ [3G_u^{\phi}]_2 \end{bmatrix} \dot{u} = [G_u^A] \dot{u} \quad (3)$$

여기서 $[iG_u^{\phi}]_j$ 는 i 번째 체인 자코비안의 j 번째 행을 의미한다. 힘과 속도의 이중관계에 의해 말단장치의 힘 벡터 T_u 와 구동관절의 토크벡터 T_A 의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$T_u = [G_u^A]^T T_A \quad (4)$$

2. 본 론

2.1 기구학

그림 1과 같이 본 논문에서 고려하는 햅틱기구는 세 개의 직렬체인이 상판의 한 점에 연결된 기구학적 구조

2.2 기구학적 성능지수

본 논문에서는 작업공간, 기구학적 등방성비, 최대 힘전달비를 성능지수로 선정하고 햅틱 기구의 성능을 분석하고자 한다. 작업공간은 햅틱기구가 작업가능한 공간을 의미하며, 기구학적 등방성비는 작업공간 안에서의 균일한 속도분포 정도를 나타낸다. 그리고 최대 힘전달비는 입력과 출력간의 힘전달비를 의미한다.

2.2.1 작업공간

작업공간은 도달 가능한 작업공간과 그 위치에서 방위각을 포함하는 자유작업공간으로 구분된다. 본 논문에서는 방위각의 범위가 $-30^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$ 으로 주어진 자유작업공간을 고려한다.

2.2.2 기구학적 등방성비

기구학적 등방성비는 다음과 같이 정의되며

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{\min}(\{G_A^{\#}\})}{\sigma_{\max}(\{G_A^{\#}\})} \quad (5)$$

여기서 σ_{\min} 과 σ_{\max} 는 각각 자코비안 행렬 $\{G_A^{\#}\}$ 의 최소 및 최대 특이값을 나타낸다. σ_I 가 1에 근접할수록 말단장치가 그 지점에서 모든 방향으로 동일한 속도로 움직일 수 있음을 의미한다.

2.2.3 최대 힘 전달비

최대 힘전달비는 말단에서의 단위크기 힘을 지지하기 위한 모터 구동력의 농을 의미하며 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_F = \sigma_{\max}(\{G_A^{\#}\}) \quad (6)$$

위 식 (6)은 σ_F 가 작을수록 말단장치에서 단위 힘을 내기 위해 모터에 더 작은 부하가 걸림을 의미한다. 즉, 같은 구동력으로 말단장치에서 낼 수 있는 힘이 더 커짐을 의미한다.

2.3 힘분배 알고리즘

여유구동시에는 구동모터의 개수가 필요한 최소한의 모터수보다 많으므로, 말단장치에서 요구되는 힘을 적절하게 모터에 분배하는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 구동력을 최소화하는 알고리즘과 각 모터의 구동력 한계를 고려하는 힘분배 알고리즘을 적용하고자 한다.

2.3.1 구동력 최소화 힘분배 알고리즘

여유구동시 구동모터의 구동력을 최소화하는 힘분배 기법은 힘벡터와 토크벡터 사이의 이중관계식인 식 (4)로부터 구할 수 있다. 주어진 T_u 에 대하여 구동력을 최소화시키는 T_A 는 의사역행렬을 통해 다음과 같이 구해지며

$$T_A = (\{G_u^A\}^T)^+ T_u \quad (7)$$

여기서 T_A 는 구동력 벡터의 농 $\|T_A\|$ 를 최소화시킨다.

2.3.2 구동력 한계를 고려한 힘분배 알고리즘

구동력의 한계를 고려한 알고리즘은 구동모터 중에서 어느 하나라도 구동력 한계를 넘게 되면 구동력이 최대가 되는 모터의 구동력을 줄이고, 나머지 모터의 구동력을 증가시키는 방법이다.

만일 식 (7)의 해 중에서 특정한 모터가 구동력 한계를 넘는다고 가정하면, 식 (8)의 영공간을 활용함으로써 그 모터의 구동력을 줄이고 다른 모터의 구동력을 증가시키는 새로운 해를 구할 수 있다.

$$T_A = (\{G_u^A\}^T)^+ T_u + \{[I] - (\{G_u^A\}^T)^+ (\{G_u^A\}^T)\} \epsilon \quad (8)$$

만약 식 (7)의 해 중 i 번째 모터의 구동력이 T_{\max} 로 가장 크다면, 감소비 ρ 를 곱해줌으로써 T_{\max} 의 구동력을 줄일 수 있다.

$$\rho \cdot T_{\max} = (T_A)_i = s^T T_A, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (9)$$

여기서 s 는 i 번째 요소만 1이고 나머지는 0인 열벡터이다. 식 (9)을 만족시키는 구동력의 해는 위의 식 (8)을 식 (9)에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho \cdot T_{\max} = (T_A)_i = s^T T_A = s^T (\{G_u^A\}^T)^+ T_u + s^T [I] - (\{G_u^A\}^T)^+ (\{G_u^A\}^T) \epsilon \quad (10)$$

$$\epsilon = [S]^+ (\rho \cdot T_{\max} - s^T (\{G_u^A\}^T)^+ T_u) \quad (11)$$

그리고 $[S] = s^T [I] - (\{G_u^A\}^T)^+ (\{G_u^A\}^T)$.

ϵ 를 식 (8)에 대입하면, 구동력 한계를 고려한 구동기의 힘 T_A 는 식 (12)과 같이 표현된다.

$$T_A = (\{G_u^A\}^T)^+ T_u + [S]^+ (\rho \cdot T_{\max} - s^T (\{G_u^A\}^T)^+ T_u) \quad (12)$$

감소비 ρ 는 대부분 0.7 ~ 0.9사이에서 정해진다. 만일 ρ 를 너무 적게 정하면 해당 모터의 구동력은 줄어들겠지만 그만큼 다른 모터들의 구동력이 커져야 하기 때문에 다른 모터의 구동력 한계가 초과되는 현상이 발생한다.

2.4 성능 해석

2.4.1 작업공간

그림 2는 병렬형 햅틱기구의 작업공간을 나타낸 것이다. 각 링크의 길이를 0.1m로 고정했을 때 말단효과장치가 $-30 \leq \phi \leq 30$ 의 범위를 유지할 수 있는 모든 공간을 나타낸 것이다.

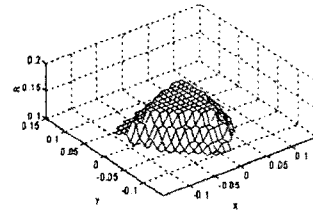
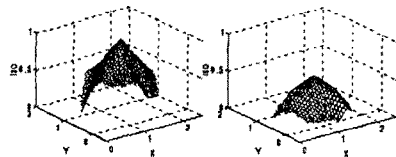


그림 2. 자유작업공간 ($-30 \leq \phi \leq 30$)

2.4.2 기구학적 등방성비

그림 3은 여유구동일 경우와 비여유구동일 경우에 대한 기구학적 등방성비를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것처럼 여유구동일 경우 비여유구동일 경우보다 등방성비가 높게 나타나고 그 영역이 넓은 것을 알 수 있다.

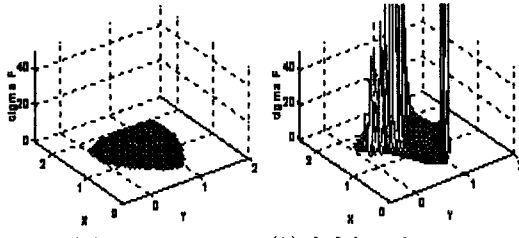


(a) 여유구동 (b) 비여유구동

그림 3. 등방성비 ($\phi = 0^\circ$)

2.4.3 최대 힘전달비

그림 4는 여유구동일 경우와 비여유구동일 경우 최대 힘전달비를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것처럼 여유구동일 경우 비여유구동에 비해서 말단장치에서 단위 힘을 지지하기 위하여 더 작은 구동력이 필요한 것을 알 수 있다.



(a) 여유구동 (b) 비여유구동
그림 4. 최대힘전달비 ($\phi = 0^\circ$)

2.5 모의실험 결과

2.5.1 구동력 비교

현실감 재현을 위해, 가상공간에서 종로봇에 가해지는 힘은 주로봇에 의하여 조작자에게 전달된다. 종로봇이 일정한 스프링 상수를 가지는 가상의 벽에 부딪치는 경우에 그림 5가 반발력 T_u 의 정보라고 가정하자. 그림 6은 여유구동일 경우와 비여유구동일 경우에 대하여 주로봇의 말단장치에서 힘 T_u 를 재현하기 위한 관절모터의 토크를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 여유구동일 경우 비여유구동에 비해서 더 작은 토크들이 필요함을 알 수 있다.

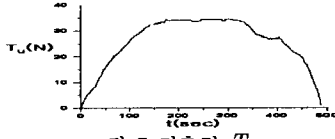


그림 5 접촉력 T_u

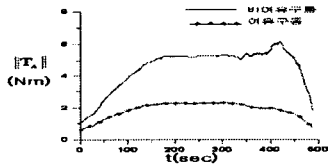


그림 6. 토크를 비교

2.5.2 구동력 제한을 고려한 힘분배 알고리즘과 구동력 최소화 알고리즘의 결과 비교

여유구동시 말단장치에서의 힘 T_u 가 그림 7과 같이 임의로 주어졌을 때, M4 모터가 포화상태인 구간에 대하여 각 알고리즘을 적용한 경우 말단장치에서의 힘을 도시하였다. 그림에서 보여지듯 모터가 포화상태일 경우 구동력 최소화 알고리즘만을 적용할 시에는 말단장치에서 요구되는 힘을 올바르게 생성하지 못하고 있음을 보여준다.

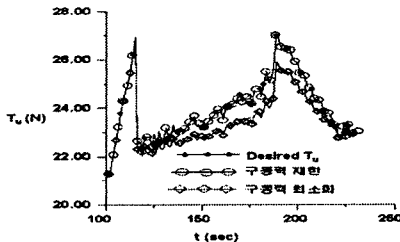


그림 7. 말단장치에서의 T_u

그림 8과 그림 9은 그림 7에서 주어진 T_u 를 재현하기 위한 각 구동관절에서의 토크를 표시한 것이다. 각 모터의 최대구동토크는 $\pm 1.5Nm$ 이다. 그림 8은 여유구동시

구동력 제한을 고려한 힘분배 알고리즘을 적용했을 경우이고, 그림 9은 구동력 최소화 힘분배 알고리즘을 적용했을 경우이다. 이 모의실험 결과에서 나타난 것처럼 모터의 구동력을 제한하지 않았을 때 M4가 구동력이 포화된 것을 알 수 있다. 반면에 구동력 제한을 고려한 경우에는 어떤 구동기도 포화상태에 들어가지 않음을 보여준다.

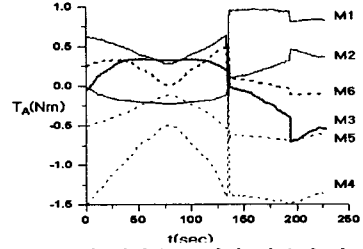


그림 8. 구동력 제한을 고려한 힘분배 알고리즘

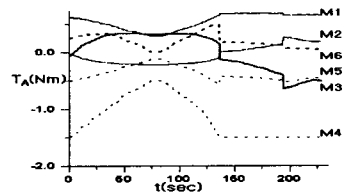


그림 9. 구동력 최소화 힘분배 알고리즘

3. 결론

본 논문에서는 하나의 햅틱기구를 여유구동인 경우와 비여유구동인 경우로 나누어 성능의 비교 분석을 수행하였다. 그 결과 여유구동이 비여유구동보다 작업공간, 기구학적 등방성비, 최대힘전달비에서 보다 좋은 성능을 가지는 것을 확인하였다. 또한 말단장치에서 요구되는 힘을 생성하기 위하여 구동력 제한을 고려한 힘분배 알고리즘과 구동력 최소화 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 구동력 제한을 고려한 힘분배 알고리즘을 적용할 시에 모터가 포화상태에 도달하지 않으면서 원하는 힘을 좀 더 충실히 반영할 수 있음을 입증하였다.

[참고문헌]

- [1]Jae Hoon Lee, et al. "A New 6-DOF Parallel Haptic Device : Optimum Design and Analysis", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 63-72, 2003.
- [2]Jae Hoon Lee, et al. "Design Scheme for a 6-DOF Parallel Haptic Device and Comparative Study on the Singularity-Free Algorithms", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 1041-1047, 2002.
- [3]Clement.Gosselin, et al. "The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator", Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design Vol. 110. pp. 35-41, 1988.
- [4]Kuk Hoon Cho, et al. "Parallel Gripper Mechanism", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 16, No. 11, pp. 89-97, 1999.
- [5]Sang Heon Lee, et al. "Control of Active Stiffness and Impact Disturbance by Redundancy Actuated Mechanism", Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Kaist, 2000
- [6]Sang Heon Lee, et al. "Performance Analysis and Optimal Actuator Sizing for Anthropomorphic Robot Modules with Redundant Actuation", 대한기계학회 제 19권 제 1호, pp. 181-192, 1995.