

분산 구동 메커니즘을 내장한 로봇 핑거의 정밀 자세 제어기 설계

Precise Control Law Design of Robot Finger Embedding Distributed Actuation Mechanism

신 영 준, 김 경 수*, 김 수 현
(Young June Shin¹, Kyung-Soo Kim¹, and Soohyun Kim¹)

¹Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: In this paper, we newly propose a novel control strategy of a three joints-robot finger for the purpose of artificial hands. The robot finger is specifically modeled by using a 3D CAD program (CATIA), considering human fingers, and then the proposed control method is verified through the dynamic simulation tool (Simulink and Recurdyn R2). Each slider is individually controlled to be located at the optimal positions where the maximal joint torque can be generated. To prove the effectiveness of the proposed control method, we devise two cases for the reference position of sliders. By comparing the control performance of two cases, the validity of the proposed control method will be verified.

Keywords: artificial hand, robot finger, force control, distributed actuation mechanism

I. 서론

로봇손 개발연구는 로보틱스에서 중요한 이슈 중 하나이다. 재활 및 의료용 로봇 분야에서는 불의의 사고나 선천적 장애에 의해 손이 없는 사람을 위한 의수(artificial hands or arms)를 개발하는 연구가 활발히 진행 중이다. 사람손이 가지는 유연하고 섬세한 매니플레이션 기능을 로봇손으로 대체하기 위해서, 구동기 및 센서, 물체의 정밀/강력 파지를 위한 제어기법 그리고 구동 메커니즘, EMG 신호처리, 햅틱 등 다양한 분야에서 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그 중에서도 로봇손을 실제 사람의 손과 흡사한 물리적 특성을 가지도록 개발하는 것이 중요한 이슈가 되고 있다.

기존에 개발된 대부분의 의수는 구동장치로 모터를 사용하고 있다[4]. 모터는 다소 무겁고 부피가 크기 때문에 단위 무게당(단위 부피당) 출력이 낮다. 이로 인해 사용자에게 큰 불편함을 가져다 준다는 연구 결과가 보고된바 있으며[5], 의수의 실용화가 어려운 결정적인 요인이다. 이러한 문제점을 해결하고자 형상기억합금 와이어(SMA wire)를 사용하여 경량의 로봇손을 개발하려는 시도가 있었다[6,7]. 이 경우 구동기의 비선형적 성질 때문에 제어가 용이하지 못하며 출력이 크지 않아서, 의수로 사용하기에는 역부족이다. 의수뿐만 아니라 수술용 로봇의 말단장치로(End-effector)로 응용하기 위한 로봇손 연구[8]가 있었으나, 이 또한 그 출력힘이 작고 제어가 용이하지 않다는 단점이 있으며, 충분한 운동범위 및 반응속도를 확보하기 위해서는 부피가 커질 수밖에 없는 단점

이 있다. 무게 대비 출력힘이 큰 구동기로는 공압 인공근육(pneumatic artificial muscle)을 생각할 수 있으며, 이를 활용해서 개발된 로봇손이 제안되어 왔다. 이 로봇손은 공압 인공근육의 특성상 유연성(compliance)을 가지며, 무게 대비 출력힘이 기존 구동기에 비해 매우 크다. 하지만 공압 인공근육은 높은 압력을 내기 위해서 큰 부피를 차지하는 압축기(compressor)가 필요하기 때문에, 의수 등에 활용하기에 부적절하다.

최근에는 사람 손가락의 메커니즘을 규명하여 로봇손 개발을 하거나[11], 이종의 구동기를 사용하여 로봇손을 개발하는 경우도 보고되고 있다[10]. 또한 사람손과 같이 유연성을 구현하고자 EAP 구동기를 사용하여 로봇손가락을 개발한 연구도 최근 보고 되었다[12].

하지만 로봇손에 대한 이러한 많은 노력에도 불구하고 아직 상용화 시킬 수 있을 만큼의 기술이 개발되지 못하였다. 비용적 측면이나 사람손의 크기 및 무게에 비해서 로봇손의 출력 힘이 만족할만한 수준에 미치지 못하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하고자 사람손에 대한 본질적인 이해를 바탕으로 분산구동메커니즘이 제안되었다[1,2]. 이 메커니즘은 로봇 핑거의 추가적인 설계 변수를 제공하기 때문에, 출력 힘 등을 현저하게 증대시킬 수 있음을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증 되었다[1-3].

본 연구에서는 분산구동메커니즘을 내장한 로봇 핑거의 효과적인 제어법에 대해서 논하고자 한다. 분산 구동 메커니즘을 내장한 로봇 핑거의 기구학적 해석 및 토크 최적화 문제를 다루고 있으며, 수치적 접근을 통해 토크의 증대 및 최적 이동자 위치를 확인한다. 3D CAD 프로그램(CATIA)으로 로봇 핑거의 모델을 구축하고, 상용 동역학적 시뮬레이션 툴 리커다인(recurdyn) 및 시뮬링크(simulink)를 활용하여 제안된 제어기법을 검증하고자 한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 6. 10., 수정: 2010. 7. 12., 채택확정: 2010. 7. 20.

신영준, 김경수, 김수현: KAIST 기계항공시스템학부

(yjsin@kaist.ac.kr/kyungsookim@kaist.ac.kr/soohyun@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술재단의 전략기술인력양성 사업과 두뇌한국(BK21) 사업의 지원을 받아서 수행되었음.

II. 로봇 핑거

1. 분산 구동 메커니즘

로봇 핑거에 내장된 분산 구동 메커니즘은 사람 손가락에 분포한 근육의 관찰 및 분석으로부터 제안되었다[1-3]. 손가락에는 무수히 많은 근육이 마디에 고르게 분포되어 있으며, 이로 인해서 손가락이 섬세하고 유연한 동작이 가능하다. 손가락 마디에 분포된 각각의 근육은 다수의 힘의 작용점이 분산되어 있는 것으로 간주할 수 있으며, 이러한 점을 그림 1과 같이 단순한 구조를 가지도록 효과적으로 구현한 것이 분산 구동 메커니즘이다. 이 메커니즘은 각 관절에 선형 운동을 하는 2개의 이동자(slider)를 설치하고 커넥팅 로드(connecting rod)로 두 이동자를 구속하는 구조이며, 이동자를 이동시킴으로써 원하는 로봇 핑거의 자세를 얻을 수 있는 구조적인 여유도(redundancy)를 가지고 있다. 또한 고정된 관절 각에 대해서 이동자의 위치를 변경할 수 있는 이 메커니즘은 손가락의 분포된 근육들의 힘의 작용점이 연속적으로 분산된 것처럼 손가락 운동 시 손가락의 자세에 따라 최적의 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 특징은 경량의 고풍력 로봇 핑거 설계를 가능하게 해주는 중요한 요소이다.

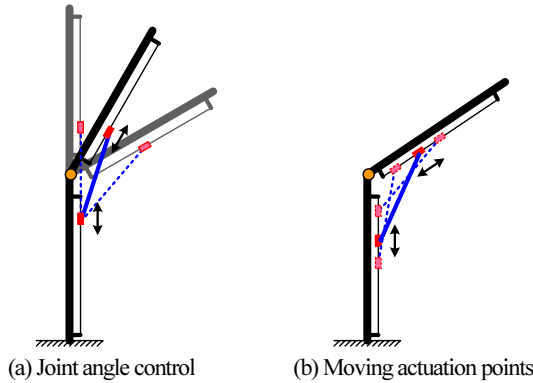


그림 1. 분산구동 메커니즘의 개념도.
Fig. 1. The schematic diagram of distributed actuation mechanism.

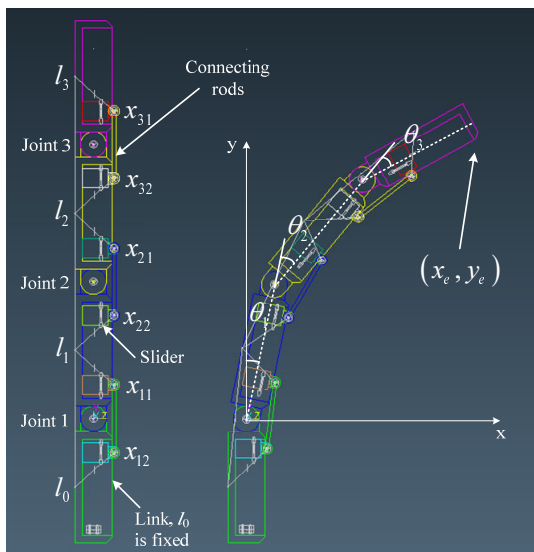


그림 2. 로봇 핑거 모델.
Fig. 2. The model of robot finger.

표 1. 로봇 핑거의 설계 변수.

	설계 변수
자유도	3 DOF(4 links and 3 joints)
관절 운동 허용 범위	$0 < \theta_j < 90^\circ, j=1,2,3$
길이(mm)	$l_0=33.5, l_1=37, l_2=37, l_3=33.5$
커넥팅 로드 길이	18 mm
질량(g)	$m_0=5.09, m_1=5.41, m_2=5.41, m_3=5.09$
관성 모멘트(kgmm ²)	$I_1=0.671, I_2=0.671, I_3=0.554$
힌지 오프셋, h_{jk} ($j=1,2,3, k=1,2$)	5.5 mm

2. 설계 개념

그림 2는 3D CAD 툴(CATIA)을 활용하여 설계한 분산구동 메커니즘을 내장한 4링크-3관절의 로봇 핑거 모델이다. 분산 구동 메커니즘을 내장한 로봇 핑거의 설계 시 중요하게 다루어야 하는 설계 변수에는 로봇 핑거의 총 길이, 부피, 무게, 이동자 및 각 관절의 운동 범위 등이 있다. 우선 로봇 핑거의 길이 및 부피는 성인의 손가락을 기준으로 하였으며, 선형 구동이 가능한 상용 구동기의 크기를 고려하여 결정되었다. 또한 이동자 및 관절의 운동범위를 고려하여 커넥팅 로드의 길이를 정하였다. 그리고 기존 로봇손가락에 비해 유연성(dexterity)을 높이고자 3 자유도를 가지도록 설계하였다. 다만, 단순화를 위해서 손가락의 내전(adduction)/외전(abduction) 운동에 대한 고려는 하지 않았다. 끝으로 설계된 로봇 핑거의 설계 변수를 표 1에 정리하였다.

III. 로봇 핑거 분석

1. 기구학적 해석

우선, 로봇 핑거의 자세 제어기의 설계에 앞서, 피드백 제어를 위한 위치 센서의 고찰이 필요하다. 그림 3은 각 변수에 대해 로봇 핑거 한 관절을 도식화한 그림이다. 로봇 핑거의 고정된 자세에 대해서, 이동자의 위치는 구조적 여유도로 인해, 유일하게 결정되지 않으며, 각 관절의 관절각과 다음의 상관 관계를 가진다.

$$x'_{j2} = -x'_{j1} \cos \theta_j + \sqrt{-x'^2_{j1} \sin^2 \theta_j + c_j^2} \quad (1)$$

여기서

$$x_{j1}' = x_{j1} - h_{j1} \tan \frac{\theta_{j1}}{2}$$

$$x_{j2}' = x_{j2} - h_{j2} \tan \frac{\theta_{j2}}{2}$$

$j = 1, 2, 3$ 이다. 즉, 로봇 핑거의 자세가 주어지고, 이동자 $j1$ (j 관절의 slider 1)의 위치도 정해진다면, 식 (1)로부터 기하학적으로 이동자 $j2$ (j 관절의 slider 2)의 위치를 도출할 수 있다. 여기서 주의할 점은 이동자 각각의 위치를 측정 한다면, 구속 조건을 이용하여 관절각의 근사해(approximated solution)를 구할 수 있지만, 엄밀해(exact solution)를 구할 수 없다는 점이다. 근사해의 경우, 반복 수치계산으로 인해 소비되는 계산량이 커지게 되므로, 로봇 핑거 각각의 변수를 빠르고 정확하게 측정하기 위해서는 관절각과 이동자 $j1$ 에 위치 센서를 장착

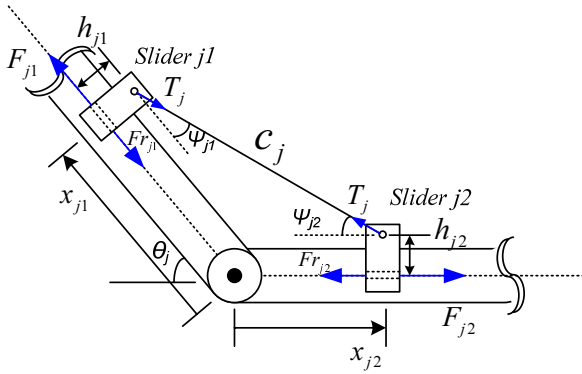


그림 3. 한 관절에 따른 각 변수.

Fig. 3. The notations for a joint.

하는 것이 더욱 바람직하다.

2. 토크 최적화 및 최적 이동자의 위치

이동자의 추력에 의해 로봇 핑거의 각 관절에 가해지는 토크를 유도하기 위해 앞서 문제의 복잡성을 피하기 위해, 다음의 가정을 고려하도록 한다.

- 이동자 j1만 작동하며, 이동자 j2는 정지되어 있다.
- 각 이동자에 가해지는 마찰력은 쿨롱 마찰 모델을 따른다.
- 이동자는 천천히 움직인다($\dot{x}_{j1} \approx 0$, $\dot{\theta} \approx 0$).

위의 가정하에, 각 관절에 가해지는 토크를 유도하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_j = T_j (x_{j1} \sin \psi_{j1} + h_{j1} \cos \psi_{j1}) \quad (2)$$

(c)의 가정하에, 이동자의 관성력을 무시하면,

$$F_{j1} - \mu_{j1} T_j \sin \psi_{j1} - T_j \cos \psi_{j1} \approx 0 \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하면 각 관절의 토크는 다음과 같이 유도된다.

$$\tau_j = F_{j1} \frac{x_{j1} \tan \psi_{j1} + h_{j1}}{1 + \mu_{j1} \tan \psi_{j1}} \quad (4)$$

여기서

$$\psi_{j1} = \tan^{-1} \left(\tan \theta_j \sqrt{\frac{c_j^2 - x_{j1}^2 \cos^2 \theta_j}{c_j^2 + x_{j1}^2 \sin^2 \theta_j}} \right)$$

이다.

만약 이동자의 추력이 주어질 경우, 식 (4)로부터 로봇 핑거의 각 관절의 토크는 다음과 같이 관절각과 이동자의 위치에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\tau_j = f(\theta_j, x_{j1}) \quad (5)$$

따라서 식 (5)는 로봇핑거의 구조적 여유자유도 및 분산구동 메커니즘의 영향을 잘 나타내고 있으며, 이러한 영향은 추가적인 설계변수를 제공해주는 역할을 한다. 로봇 핑거의 자세가 주어지는 경우, 다음과 같은 최적화 문제를 정의할 수 있다.

$$x_{j1}^* = \arg \max_{x_{j1} \in X_{all}} \|\tau_j(x_{j1})\| \quad (6)$$

여기서 X_{all} 은 이동자의 가능한 거리의 전체 집합이다.

식 (6)에 정의된 최적화 문제를 통해서, 주어진 로봇 핑거의 자세 및 이동자의 추력에 대해서, 각 관절의 토크가 최대가 되도록 하는 이동자의 최적 위치를 얻을 수 있다.

3. 수치적 검증

정의된 토크 최적화 문제에 대해서, 분산구동 메커니즘이 제공하는 효과를 수치적으로 검증하기 위해서 표 1 및 표 2의 시스템 변수를 고려하도록 한다.

로봇 핑거의 말단의 목표지점(target position)이 정해지면, 로봇 핑거의 자세는 기하학적으로 다음의 관계식에 의해서 첫 번째 관절각(θ_1)의 함수로 나타낼 수 있다[2].

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{x_e - l_1 \sin \theta_1}{y_e - l_1 \cos \theta_1} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_1 l_2} \right) - \theta_1 \quad (7)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \right) \quad (8)$$

여기서 $l_i = \sqrt{(x_e - l_1 \cos \theta_1)^2 + (y_e - l_1 \sin \theta_1)^2}$ 이다.

식 (7)과 식 (8)을 통해 주어진 목표지점에 대한 관절의 작동 범위를 구하면 다음과 같으며, 이를 그림 4에 나타내었다.

$$25.5^\circ < \theta_1 < 47.6^\circ, \quad 0^\circ < \theta_2 < 59.5^\circ, \quad 0^\circ < \theta_3 < 61.6^\circ$$

이러한 로봇 핑거의 자세 변화에 각 관절에서 생성되는 토크와 이동자의 최적 위치를 계산한 결과를 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 단, 해석의 간편화를 위해서 세 번째 관절

표 2. 로봇 핑거의 상세 사양.

Table 2. The specifications of the robot finger.

	상세 사양
목표지점	$(x_e, y_e) = (86.3 \text{ mm}, 38.9 \text{ mm})$
이동자의 동작 범위	$X_{j1,all} = \{x_{j1} \mid 8 < x_{j1} < 20\}$
추력(N)	$F_{11} = 0.5, F_{21} = 0.5, F_{31} = 0.5$
마찰계수	$\mu_{11} = 0.1, \mu_{21} = 0.1, \mu_{31} = 0.1$

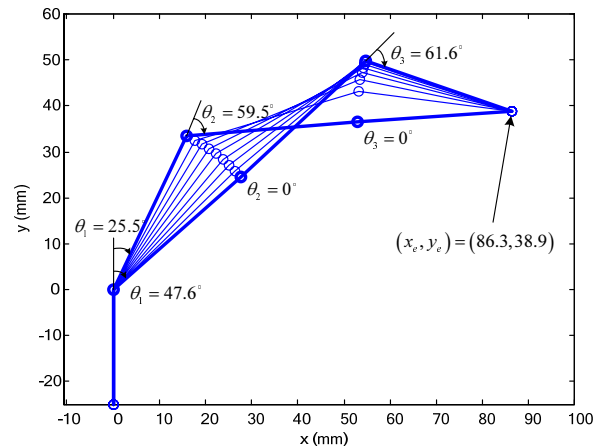


그림 4. 목표 지점에 대한 로봇 핑거의 자세.

Fig. 4. Postures of robot finger for the target position.

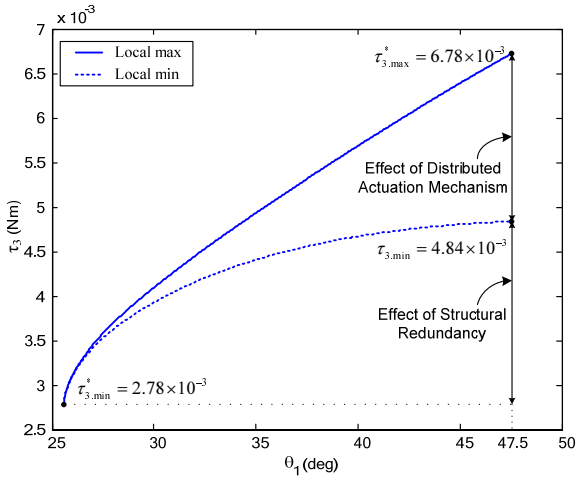


그림 5. 세 번째 관절에서의 토크변화.
Fig. 5. Torque change depending on the third joint.

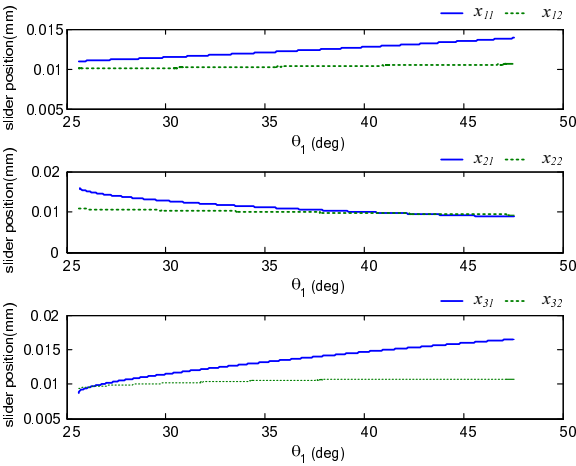


그림 6. 관절각에 따른 이동자의 최적 위치.
Fig. 6. Optimal positions of slider depending on joint angles.

에 대해서만 토크 변화를 나타내었다.

그림 5에서 확인할 수 있듯이, (정적인 평형 상태에 도달한 경우) 관절에서 발생하는 토크는 이동자의 위치 조정만으로 도 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 여유 자유도의 효과로 동일한 목표지점에 대해서 로봇 핑거의 자세 변경으로 74.1% 향상 할 수 있으며, 로봇 핑거의 자세가 고정되어 있어도 이동자의 위치 조절만으로 69.8%의 토크를 추가적으로 더 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 점은 로봇 핑거에 가져다 주는 분산 구동 메커니즘의 중요한 특징이다. 따라서 로봇 핑거를 위치 및 힘 제어 시 이동자의 경로를 최적으로 설정한다면, 더 작은 용량의 구동기를 사용하여 부피를 줄일 수 있으며, 더 큰 출력을 생성하여 구동기의 최대 효율을 이끌어 낼 수 있다.

IV. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 조건

동역학적 시뮬레이션을 통해, 이동자의 위치 조절이 제어 성능에 미치는 효과를 검증하고자 표 3과 같이 Case I과 Case II를 고안하였다. Case I의 경우, 각 관절에서 생성되는 토크가

표 3. 이동자 및 관절각의 이동경로.

Table 3. The trajectory of sliders and joint angles.

	Case I	Case II
x_{11}	$\arg \max_{x_{11} \in X_{11,all}} \ \tau_1(x_{11})\ $	$\arg \max_{x_{11} \in X_{11,all}} \ \tau_1(x_{11})\ $
x_{21}	$\arg \max_{x_{21} \in X_{21,all}} \ \tau_2(x_{21})\ $	$\arg \max_{x_{21} \in X_{21,all}} \ \tau_2(x_{21})\ $
x_{31}	$\arg \max_{x_{31} \in X_{31,all}} \ \tau_3(x_{31})\ $	$9 - 1 / (1 + e^{-2(t+5)})$
θ_1	$25.5 + 22.1(1 - e^{-t})$ (deg)	
θ_2	$59.5e^{-t}$ (deg)	
θ_3	$61.6(1 - e^{-t})$ (deg)	

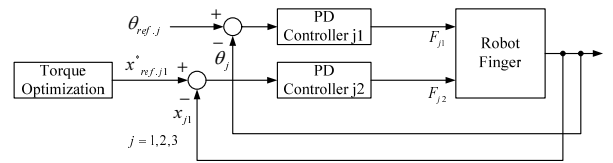


그림 7. 로봇 핑거 자세 제어 블록도.
Fig. 7. The block diagram of robot finger.

최대가 되도록 하는 이동자의 위치를 고려하여 이동자의 경로를 생성하였으며, 반대로 Case II의 경우, 첫 번째 및 두 번째 관절의 경로는 Case I과 동일하며, 세 번째의 관절에 대해서만 임의의 경로를 지정해 주었다. 로봇 핑거 말단의 목표지점 및 이동자의 작동 범위는 표 2의 조건과 동일하며, 상용 시뮬레이션 툴 리커다인(RecurDyn R2) 및 시뮬링크(simulink)를 활용하여 2가지 경우에 대해서 위치 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 로봇 핑거 자세 제어기 설계

본 연구에서 고려하는 로봇 핑거는 정해진 목표 지점에 대해서 자세 변경이 가능하고, 주어진 자세에 대해서도 이동자의 위치가 유일하게 결정되지 않는 추가적인 설계변수를 가진다. 그리고 로봇 핑거의 제어 입력은 각 관절 당 2개씩 총 6개가 필요하기 때문에, 토크 분배법[13] 등의 다양한 자세 제어 방법을 생각할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 이동자의 위치가 로봇 핑거의 성능에 미치는 영향을 평가하는 것이 목표이며, 이를 위해서 이동자의 기준 경로(reference trajectory)를 추종할 수 있는 PD 제어기를 설계하였다. 각 관절당 2개의 제어 입력 중 하나는 로봇 핑거의 자세(또는 관절각)을 제어할 수 있도록 하며, 나머지 하나는 이동자의 최적 위치를 추종하도록 한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

고정된 로봇 핑거 끝단의 목표 지점 (86.3 mm, 38.9 mm)에 대해서, 로봇 핑거의 자세를 변화시키면서 제어한 결과를 그림 8, 9, 10에 나타내었다. 토크 최적화 함수에 의해서 세 번째 관절의 이동자의 위치가 두 가지 경우에 대해 다르게 나타남을 확인할 수 있으며, 이동자 및 관절각의 제어 성능은 두 가지 경우 모두 정밀하게 제어가 된 것을 확인할 수 있다.

또한, Case I 및 Case II의 제어 결과에 대해서, 성능 비교를 위해, 표 4에 제어 입력 힘의 대푯값을 정리하여 나타내었

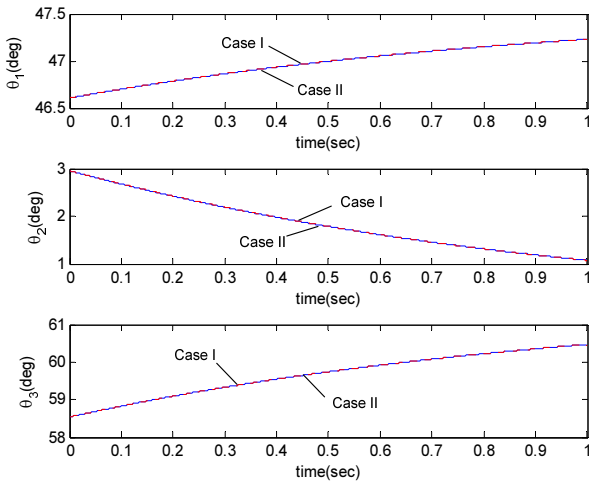


그림 8. 관절각 제어 결과.
Fig. 8. Control results of joint angles.

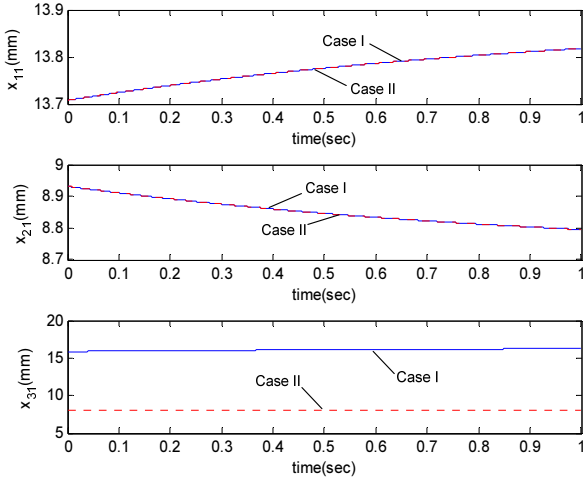


그림 9. 이동자의 위치 제어 결과.
Fig. 9. Control results of slider positions.

표 4. 세번째 관절의 Case I과 Case II의 성능 비교.

Table 4. The performance comparison of the third joint between Case I and Case II.

	Case I	Case II
최대 입력 힘(N)	4.3751×10^{-7}	7.3832×10^{-7}
RMS	1.0260×10^{-6}	1.8295×10^{-6}

다. 로봇 핑거의 자세 위치제어를 위해 이동자에 가해진 최대 입력 힘은 Case I에 비해 Case II의 경우 68.9 % 더 크며, RMS(root mean square) 값 또한 Case I에 비해서 Case II가 78.3 % 크게 나타났다.

즉, 동일한 조건에 대해서 각 Case 별 이동자의 기준 경로를 최적으로 결정하면 로봇 핑거를 효과적으로 제어할 수 있으며, 이는 로봇 핑거의 내장된 분산 구동 메커니즘의 중요 특징이다. 따라서 로봇 핑거에 사용된 구동기의 최대 성능을 발휘하게 해주는 역할을 하므로 로봇 핑거를 기준에 비해서 더 작고 가벼우며 큰 출력 힘을 낼 수 있게 해 줄 수 있다.

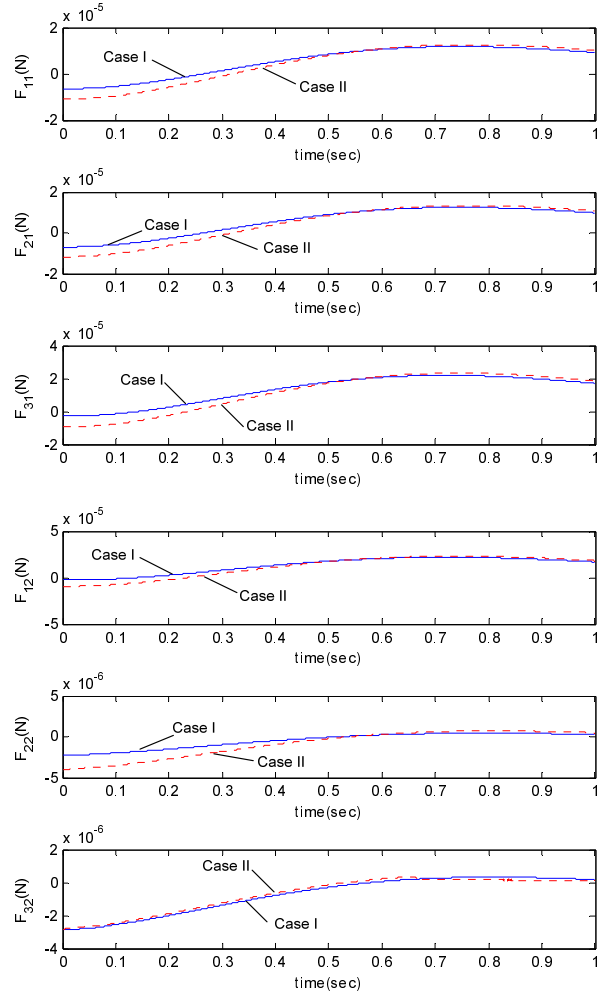


그림 10. 이동자에 가해지는 제어 입력 힘.
Fig. 10. Control input force for six sliders.

V. 결론

본 연구에서는 분산구동 메커니즘을 내장한 4마디 3관절의 로봇 핑거의 효과적인 제어법에 대해서 논하였다. 분산구동 메커니즘은 로봇 핑거의 성능 향상을 위한 추가적인 설계 변수를 제공하기 때문에, 이동자의 최적 위치 제어를 통해 최대 78.3 % 정도의 성능 향상을 얻을 수 있었다.

이것은 분산구동 메커니즘의 핵심 요소로, 효율적인 이동자의 위치 제어를 통해 구동기의 최대 효율을 낼 수 있도록 한다. 따라서 로봇 핑거를 작고 가볍게 설계할 수 있도록 하며, 또한 토크의 증대로 출력 힘을 배가 시킬 수 있다. 이러한 결과는 작고, 경량의 고효율 의수 개발의 가능성을 제시하고 있으며, 나아가 수술용 로봇 등 재활 및 의료용 로봇 분야의 다관절의 매니플레이터에 활용하면 그 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다.

참고문헌

[1] Y. J. Shin, K.-S. Kim, and S. Kim, "Application of sliding actuation mechanism to robot finger," *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 550-553, 2009.
[2] Y. J. Shin and K.-S. Kim, "Distributed actuation mechanism for

a finger-type manipulator: theory & experiments,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 569-575, June 2010.

[3] Y. J. Shin, K.-S. Kim, and S. Kim, “BLDC motor driven robot finger design using the sliding actuation principle,” *International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems & Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 550-553, 2010.

[4] C. Cipriani, M. Controzzi, F. Vecchi, and M. C. Carrozza, “Embedded hardware architecture based on microcontrollers for the action and perception of a transradial prosthesis,” *Proc. of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics Scottsdale*, pp. 848-853, 2008.

[5] L. E. Pezzin, T. R. Dillingham, E. J. MacKenzie, P. Ephraim, and P. Rossbach, “Use and satisfaction with prosthetic limb devices and related services,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 85, pp. 368-375, 2004.

[6] A. D. Price, A. Jnifene, and H. E. Naguib, “Design and control of a shape memory alloy based dexterous robot hand,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. 1401-1414, 2007.

[7] V. Bundhoo, E. Haslam, B. B. Birch, and E. J. Park, “A shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation,” *Robotica*, vol. 27, pp. 131-146, 2009.

[8] T. Maeno and T. Hino, “Miniature five-fingered robot hand driven by shape memory alloy actuators,” *Proc. of the 12th IASTED International Conference Robotics and Applications*, pp. 174-179, 2006.

[9] N. Tsujiuchi, T. Koizumi, S. Nishino, Hiroyuki Komatsubara, T. Kudawara, and M. Hirano, “Development of pneumatic robot hand and construction of master-slave system,” *Journal of system design and dynamics*, vol. 2, no. 6, pp. 1306-1315, 2008.

[10] J. B. Rosmarin and H. H. Asada, “Synergistic design of a humanoid hand with hybrid DC motor sma array actuators embedded in the palm,” *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 773-778, 2008.

[11] R. Balasubramanian and Y. Matsuoka, “Biological stiffness control strategies for the ACT (Anatomically Correct Testbed) hand,” *Proc. of 2008 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 737-742, 2008.

[12] N. H. Chuc, J. K. Park, N. H. L. Vuong, D. Kim, J. C. Koo, Y. Lee, J.-D. Nam, and H. R. Choi, “Multi-jointed robot finger

driven by artificial muscle actuator,” *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 587-592, 2009.

[13] S. Kock and W. Schumacher, “A parallel x-y manipulator with actuation redundancy for high-speed and active-stiffness application,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2295-2300, 1998.



신영준

2007년 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 기계공학전공 졸업. 2009년 KAIST 기계항공시스템 학부 석사 졸업. 2009년~현재 KAIST 대학원 기계공학 전공 박사과정 재학중. 관심분야는 Robot hands, Robot manipulator, Actuator,

Force/Position control, 인공지능 알고리즘.



김경수

1993년 KAIST 기계공학과(공학사). 1995년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1999년 KAIST 기계공학과(공학박사). 1999년~2003년 (주)LG전자 디지털미디어 연구소 책임연구원. 2003년~2004년 STMicroelectronics Co. Ltd. Multimedia Technology Center R&D Manager. 2005년~2007년 한국산업기술대학교 기계공학과 교수. 2007년~현재 KAIST 기계항공시스템공학부 기계공학전공 교수. 관심분야는 Robust control, Sliding mode control, Robot manipulator 및 구동기 설계.



김수현

1978년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1980년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1991년 Imperial College, Univ. of London (공학박사). 1991년~현재 KAIST 기계항공시스템학부 기계공학전공 교수. 관심 분야는 로봇 메커니즘 설계 및 제어,

국방 로봇, Spectroscopy.