

근접 센서를 이용한 로봇 손의 파지 충격 개선

홍예선*, 진성무*

Grasping Impact-Improvement of Robot Hands using Proximate Sensor

Yeh Sun Hong* and Seong Mu Chin*

ABSTRACT

A control method for a robot hand grasping an object in a partially unknown environment will be proposed, where a proximate sensor detecting the distance between the fingertip and object was used. Particularly, the finger joints were driven servo-pneumatically in this study. Based on the proximate sensor signal the finger motion controller could plan the grasping process divided in three phases : fast approach, slow transitional contact and contact force control. That is, the fingertip approached to the object with full speed, until the output signal of the proximate sensor began to change. Within the operating range of the proximate sensor, the finger joint was moved by a state-variable feedback position controller in order to obtain a smooth contact with the object. The contact force of fingertip was then controlled using the blocked-line pressure sensitivity of the flow control servovalve for finger joint control. In this way, the grasping impact could be reduced without reducing the object approaching speed. The performance of the proposed grasping method was experimentally compared with that of an open loop-controlled one.

Key Words : Dexterous Robot Hand(능숙한 로봇 핸드), Servopneumatic Finger Joint(서보 공압 구동식 손가락 관절), Proximate Sensor(근접 스위치), Contact Force(접촉력), State-Variable Feedback Controller(상태 변수 궤환 제어기), Pneumatic Rotator(공압 로테이터), Flapper Valve(플래퍼 밸브), 4/3-way Proportional Valve(비례제어밸브)

1. 서론

단순한 그리퍼(gripper)에서 복잡한 구조의 인간형 로봇 손까지 그 형태와 무관하게 로봇 손의 손가락 동작 제어에서 요구되는 성능은 임의의 부품을 짧은 시간에 충격 없이 파지(grasp)하는 것이라고 할 수 있다. 일반적으로 파지 동작은 시간을 기준으로 보면, 손가락이 대상물에 신속히 접근하는 위치제어 구간, 최초의 접촉이 이루어질 때까지 대상물에 느린 속도로 접근하는 과도기 구간,

그리고 접촉력이 원하는 값으로 수렴할 때까지 소요되는 파지력 제어 구간으로 나눌 수 있다. 그리고 파지력 제어 성능은 오버슈트(overshoot), 정착 시간(settling time), 정상 상태 오차(steady state error) 등의 기준에 의해 평가할 수 있다. 만약 파지할 부품의 위치와 그 크기에 대한 사전 정보가 없거나, 로봇 손의 파지 과정을 시각 센서 등에 의해 실시간으로 관측할 수 없을 경우에는 과도기 구간의 설정이 불가능하게 된다. 따라서 파지 접촉력의 오버슈트를 줄이려면 손가락의 위치제어에 의한 접근 시간을 매우 길게 설정해야 할 것이다.

* 한국과학기술연구원

본 논문은 위와 같은 상황에서 신속한 파지와 파지 충격 방지를 동시에 실현할 수 있는 손 동작 제어 방식에 관한 것이다.

지금까지 소개된 로봇 손의 파지 동작에 대한 연구들은 부품을 안정되게 파지하거나 미지의 환경에서 부품을 파지하기 위한 동작 계획에 대한 것이 많은데^{[1][4]}, 이들은 파지 동작의 소요 시간에 대한 고려 없이 수행되었다. 그리고 핑거팁과 파지 대상간의 접촉력 제어와 관련해서는 매니플레이터의 제어에 주로 사용된 임피던스(impedance) 제어^[5] 또는 병렬형 접촉력/위치(hybrid force / position) 제어^[6]에 관한 연구사례를 들 수 있는데, 이것은 핑거팁에 로드 셀을 장착할 수 있을 정도로 핑거팁의 크기에 제한이 없는 경우이나 가능하고^[7], 사람의 손과 비슷한 크기를 갖는 로봇 손의 경우에는 공간의 제약 때문에 적용이 불가능하다. 또한, 손가락에 접촉(tactile) 센서를 부착하여 손가락 관절의 강성을 이용한 손 동작 제어 연구 사례들^{[8][9]}을 들 수 있는데, 접촉 센서를 곡면 형태의 좁은 핑거팁에 장착하는 것과 접촉 센서의 다중 아날로그 출력 신호를 처리하는 것이 실용성을 저해하는 문제점들이다

이상은 정적인 상태의 접촉력 제어에 관한 사례들인데, 실제로는 핑거팁이 대상물에 접촉하는 과도 상태에서 발생하는 충격력이 파지력 제어에 고려되어야 한다. 과도 상태에서의 충격력을 흡수하기 위해 손가락의 접촉면에 탄성 표피를 부착하고 그 내부에 기포 고무^[10], 자성 유체^[11]등과 같은 부드러운 재질을 충전하는 방법은 충격력 흡수 효과는 크지만, 강성이 낮아 파지 대상물의 위치 파악이 어렵고, 접촉력 측정을 위해 별도의 센서를 내장해야 한다. Shimoga^{[12][13]}는 핑거의 탄성 표피 내부에 사용된 부드러운 재질들의 충격 에너지 흡수 능력에 대한 비교와 모델링을 수행하였다. 그 밖에도 핑거팁에 내장된 로드셀의 신호를 이용하여 충격력을 제어하기 위한 알고리즘 연구^{[14][15]}, 기존 제어기에 비해 충격력의 오버슈트, 정착 시간을 개선시켜 주는 비선형 제어기에 관한 연구^[16]가 수행되었으며 근접 센서를 로봇에 응용한 연구로는 팔의 끝에 비접촉식 거리 센서와 6축 F/T-센서(6 axis- force/torque sensor)를 장착하여 접촉 거리의 오차에 의한 입력과 접촉력의 오차에 대한 입력을 조절함으로써 충격력을 감소시킨 연구^[17], 로봇 팔의 충돌 회피를 위한 경로 생성에 근접센서를 이용한 연구 등^{[18][19]}이 보고된바 있다.

본 논문에서는 인간형 로봇 손의 파지 동작 제어에 있어서 파지 시간의 단축과 파지 충격의 방지를 위해, 핑거팁에 근접센서를 장착함으로써

파지 구간을 구분하는 방식을 제안하고 그 실험 결과를 보고하고자 한다. 이 방식의 주된 개념은 핑거팁과 파지 대상물 사이의 거리가 근접 센서로 감지되는 거리(2-5mm)로 좁혀지기 전까지는 핑거팁이 on/off 제어 모드에 의해 최대 속도로 대상물에 접근하다가, 근접 센서의 신호가 출력되면 상태 변수 변환 제어기를 적용하여 핑거팁 속도를 감속시키고, 핑거팁 속도가 원하는 저속으로 감소되면 접촉력 제어 모드를 수행함으로써 파지 시간과 충격력을 감소시키는 것이다. 이러한 제어 방식을 사용한 경우의 파지 성능 개선 효과를 확인하는 방법으로써, 본 연구에서는 근접 센서 없이 개루프 제어(open loop control)에 의해 파지하는 경우와 비교하여 파지 충격력 및 파지 시간이 얼마나 상대적으로 감소하는지를 실험적으로 평가하였다.

2. 핑거팁 파지 제어 실험장치의 구성

본 연구에서 사용된 로봇 손은 Fig.1에서 보는 바와 같이 3 개의 관절을 갖는 손가락 4 개로 구성되며, 각 손가락 관절은, 자체 개발한 비례제어밸브^[20]와 공압 로테이터에 의해 직접 구동된다. 각 관절의 최대 회전각은 90도이며, 최대 구동 토크는 밸브 공급압력이 7 bar 일때 1 N-m 이다.

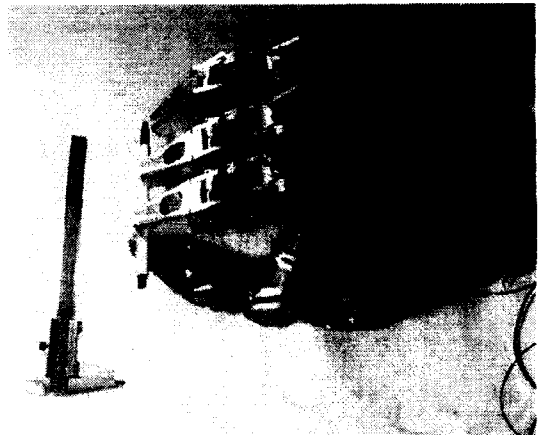


Fig. 1 Dexterous robot hand with servopneumatic finger Joint

각 관절은 총 12축 제어를 고속으로 수행할 수 있는 DSP 보드(PMAC VME)를 사용하여 1 ms 의

샘플링 주기로 제어된다. 파지 제어 실험에서는 손가락 관절 하나만을 이용하였으며, 파지 대상으로서 로드 셀을 사용하여 핑거팁이 로드 셀에 접촉할 때 발생하는 충격력을 측정하였다. 손가락 한 개의 무게는 약 375 g, 길이는 약 12 cm 이고 핑거팁의 면적은 19 mm X 23 mm 이다. Fig.2 는 실험 장치의 구성을 보여 준다. 손가락 관절의 위치 제어 및 토크 제어에는 관절 회전각(θ) 및 로테이터 양 챔버의 압력(p_1, p_2) 신호가 기본적으로 이용되고 이 신호들은 근접 센서의 출력 신호(s), 로드 셀의 접촉력(f) 신호와 함께 DSP 보드의 메모리에 저장되었다가 실험을 완료한 후 RS232 를 통해 PC로 전달되거나 VME-bus 및 네트워크를 통해 워크스테이션에 저장된다. 핑거팁이 파지 대상으로부터 일정 거리(2-5 mm)에 도달했음을 감지하는 근접 센서(proximate sensor)는 1 ms 이내의 응답 시간을 갖는다.

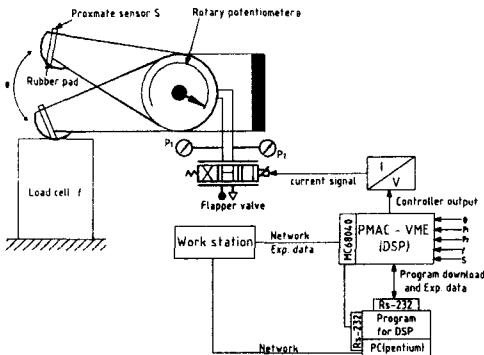


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for finger control system

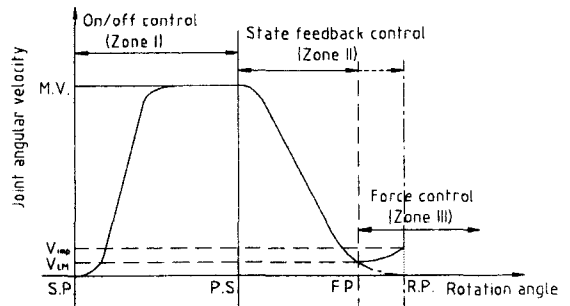
3. 파지동작 제어기의 구조

본 연구에서는 파지 동작을 Fig.3 에 도시한 바와 같이 3 단계로 구분하여 제어하였다.

3.1 On/Off 제어 구간

Fig.3 의 첫번째 구간으로서 손가락이 최대로 벌어진 상태에서 근접 센서의 신호가 입력되는 위치(P.S.)까지 on/off 제어 모드에 의해 최대 속도로 이동하는 구간으로서, 파지 시간을 단축시키는 효과를 낸다. 제어기는 제어 목표위치(R.P.)를 모르는

상태에서 최대 출력 값인 $U_{in1} = U_{max}$ 를 출력시키므로 비례제어밸브는, 손가락이 파지하는 방향으로 움직이도록, 최대로 열린다. 본 연구의 실험 장치에서는 손가락이 최대로 벌어진 위치에서 파지 접촉이 이루어질 때까지의 핑거팁 이동 거리는 약 65 mm 이며, 이를 손가락 관절의 회전 각도로 환산하면 약 38 도이다.



M.V. is maximum velocity
 V_{∞} is contacting velocity
 V_{LM} is velocity limit for force control
 S.P. is starting position
 P.S. is signal output position of proximate switch
 F.P. is starting position of force control
 R.P. is reference position

Fig. 3 Strategy of proposed control algorithm

3.2 상태 변수 궤환 제어 구간

Fig. 3 의 두번째 구간으로서, 파지 접촉 충격을 최소화하기 위해 손가락 관절의 속도를 급 감속시키는 효과를 얻게 된다. 근접 센서 신호가 입력되는 위치에서의 속도를 초기속도(M.V.)로 하고 파지접촉이 이루어질 것으로 예상되는 위치를 제어 목표위치(R.P. = P.S. + 근접 센서의 검출 거리)로 설정하여 관절의 회전각을 제어한다. 이때 오버슈트 없이 신속하게 목표위치에 도달하도록 위치 오차, 속도 및 양 챔버의 압력을 궤환하는 상태 변수 궤환 제어기를 사용하는데, 이는 공압 시스템의 위치 제어에서 상태 변수로서 관절속도와 함께 로테이터 부하 압력차를 궤환하면 댐핑 계수를 크게 높일 수 있기 때문이다. 제어가 시작되는 위치는 근접 센서의 신호가 입력되는 위치이며, 이때의 속도 및 양 챔버의 압력이 제어기의 초기 궤환 변수로 입력된다. 또한 초기 위치오차는 근접 센서의 검출 거리로 설정하여 핑거팁과 부품이 접촉하는 위치가 목표 위치가 되도록 하여 위치 제어

를 수행하며, 이때 사용된 제어기는 다음과 같다.

$$U_{in2} = K_p \times e - K_v \times v - K_{pr} \times (P_l - P_r)$$
 여기서 U_{in2} = 제어기 출력, K_p = 위치 게인, K_v = 속도 게인, K_{pr} = 압력 게인, e = 위치 오차, v = 핑거 속도, P_l, P_r = 양 챔버의 압력이다.

Fig.3 에서 보는 바와 같이 상태 변수 궤환 제어기는 핑거 팁과 부품이 접촉할 것으로 예상되는 목표위치까지 적용되지 않고 핑거가 정해진 속도 (V_{LM})까지 감소하는 위치(F.P.)까지만 적용된다. 여기서 목표위치(R.P.)는 근접 센서의 신호가 입력되는 시점의 포텐쇼메타의 출력값(P.S.)에 근접 센서의 검출 거리를 더하여 구할 수 있다. 이 구간에서의 핑거팁 이동거리는 약 5 mm 이내이며, 이것은 관절 회전각 3 도 정도에 해당된다.

3.3 접촉력 제어 구간

Fig.3 의 마지막 제어 구간으로, 전단계에서의 제어로 핑거팁의 속도가 정해진 속도(V_{LM})이하로 감소되면 손가락 관절의 제어방식을 접촉력 제어 모드로 변경하여 손가락이 대상을 파지하는 데 필요한 접촉력을 발생시키게 된다. 따라서 핑거팁은 속도 V_{LM} 을 기점으로 점차 증가 또는 감소하다가 목표위치(R.P.)에서의 속도(V_{mp})로 핑거팁과 파지 대상물이 충돌하게 된다. 이때 원하는 접촉력을 얻기 위해 방향 제어 밸브의 blocked-line pressure sensitivity 특성을 이용하게 되는데, 본 연구에 사용된 Fig.4 의 비례 방향 제어밸브의 위 특성 선도는 Fig.5 와 같다.

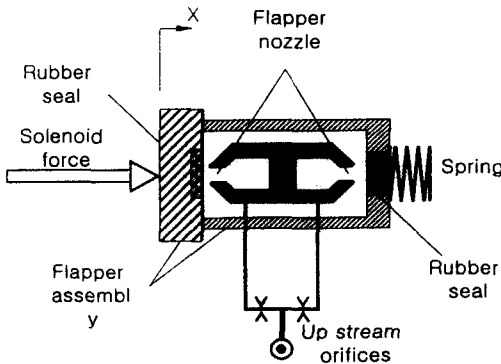


Fig. 4 Nozzle flapper valve

즉, 원하는 접촉력으로부터 로테이터의 유효 구동 토크를 구할 수 있고, 이것은 로테이터의 마찰 토크를 고려하여 양 챔버에 가해야 하는 압력차로

환산할 수 있다.

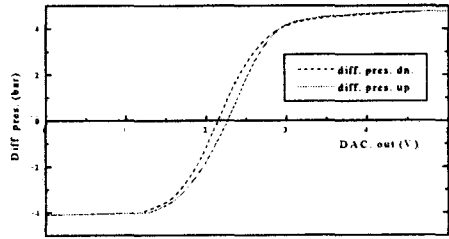


Fig. 5 Static characteristics of finger control system

이 압력차가 결정되면 Fig.5 의 특성곡선으로부터 방향 제어 밸브에 입력해야 하는 신호의 크기를 구할 수 있다. 즉, 본 연구에서는 관절 토크를 개루프 방식으로 제어하였다. 내장된 압력센서를 이용하여 폐 루프로 제어하는 것도 가능하나 이때는 잘 알려진 바와 같이 위치제어 모드와 토크 제어 모드가 변환되는 구간에서 제어 안정도 문제가 발생할 수 있기 때문에 본 연구에서는 연구 범위에서 포함시키지 않았다.

4. 실험 결과

4.1 근접 센서의 특성

본 논문의 실험에서 사용한 유도 전류형 근접 센서의 검출거리에 영향을 주는 인자는 대상물의 재질과 검출 면적의 크기이다. 본 연구에서 사용된 근접 센서는 헤드의 직경이 5.4 mm로서, 10 mm X 10 mm X 1 mm의 자성 금속 물체를 사용하여 최대 검출거리가 5 mm 가 되도록 민감도를 설정하였다. 즉, 파지 대상물의 재질이 자성체이고, 근접센서가 감지하는 표면이 평면 또는 완만한 곡면이면서 그 면적이 근접센서 투영 면적의 50%에 해당되는 직경 3.8 mm 보다 크면 5 mm 거리를 정확히 검출할 수 있다. 단, 이러한 제약 조건은 근접센서의 종류, 크기에 따라 달라짐으로 실험 조건에 따라서 적절한 특성의 근접센서를 선정하는 것이 요구된다.

4.2 손가락 관절 제어계의 정 특성 실험

Fig.5는 제어밸브에 로테이터가 연결된 상태에서 밸브의 blocked-line pressure sensitivity 특성을

측정한 결과이다. 특성 곡선에서 실선은 밸브에 가해지는 입력을 증가시킬 때의 곡선이고 점선은 감소시킬 때의 곡선이다. 이때 최대 히스테리시스는 약 $\pm 7\%$ 로 나타났다. 파지 접촉력을 이 선형 오차보다 더 정밀하게 제어해야 할 경우에는 이 오차를 feedforward 하게 보상하거나, 제어밸브와 부착된 압력센서를 이용하여 압력 제어 폐 루프 시스템을 구성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 접촉력의 제어 정밀도가 개루프 제어에 의해 얻을 수 있는 범위까지 허용된다고 가정하였다.

4.3 손가락 관절 제어계의 동 특성 실험

Fig.6은 비례 방향 제어밸브에 계단 입력을 인가하였을 때 양 포트 간 압력차의 동적인 응답특성을 측정한 것이다. 그 실험 조건으로서 양 포트에 연결된 체적을 달리 하였는데, 점선은 체적이 로테이터 챔버의 최소 체적에 해당되는 경우이고, 일점 쇄선은 로테이터 챔버의 최대 체적에 해당되는 경우이다. 따라서 배인이 중앙에 위치한 로테이터를 제어밸브의 양 포트와 연결한다면, 압력 특성 선도의 시 정수(time constant)는 두 곡선의 평균에 해당하는 약 70 ms 정도가 된다.

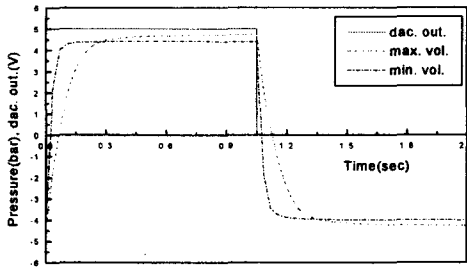
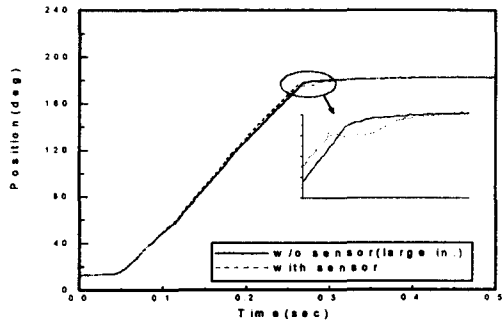


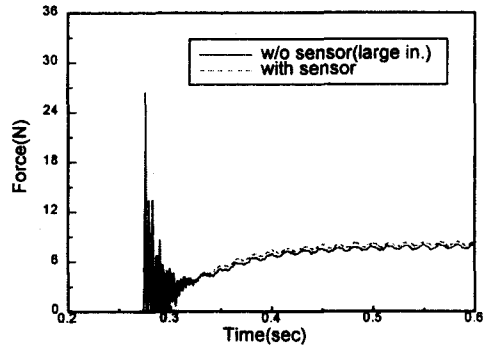
Fig. 6 Dynamic characteristics of finger control system in min. and max. volume

4.4 손가락 관절의 위치와 접촉력 제어 결과

이와 같은 동 특성 및 정 특성을 갖는 손가락 관절 시스템에 대해 위치 오차, 속도 및 양 챔버의 압력차를 제환시키는 상태 변수 제환 제어기를 적용한 위치 제어를 구성한 연구는 Ryu^[11]에 의해 수행된 바 있다. 이상과 같은 실험 장치에서 핑거팁의 정적인 접촉력은 로테이터에서 발생시킬 수 있는 최대값의 80%로 설정하였다.



(a) Position results

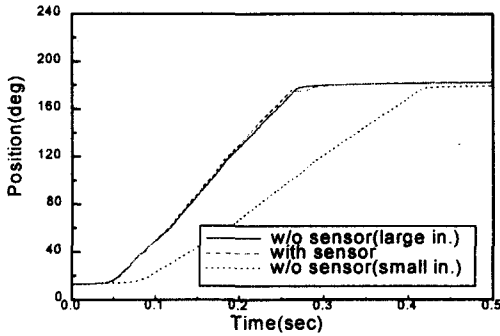


(b) Contact force results

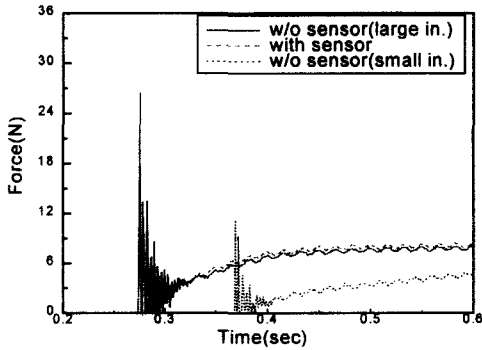
Fig. 7 Position and contact force results of proposed algorithm and open loop control with large input

Fig.7은 핑거팁에 근접 센서를 장착하여 본 논문에서 제안한 파지 알고리즘을 적용한 경우와 동일한 상승 시간(rising time)을 기준으로 개 루프 제어에 의해 핑거팁을 파지 대상물에 접촉시켰을 경우의 파지 충격을 측정한 결과이다. 이때 개루프 제어 실험에서는 일반적인 파지 충격 흡수 방식으로 핑거팁에 고무 패드를 부착하였다. Fig.7(a)는 관절 회전각의 실험 결과이고, Fig.7(b)는 로드셀에서 측정한 접촉력 응답 특성을 보여 준다. 예측할 수 있는 바와 같이, 손가락 관절 회전각이 동일한 시간 내에 목표치의 90%까지 도달하도록 제어하였을 때, 본 논문의 파지 알고리즘을 적용하면 on/off 제어 모드에서 상태변수 제환 제어모드로 바뀌는 감속구간 때문에 개루프 제어를 하였을 때보다 목표 지점 도달시간(settling time)은 약 7%정도 길어지나 접촉력의 피크값은 약 1/3 정도로 감소함을 알 수 있다.

5. 결론 및 검토



(a) Position results



(b) Contact force results

Fig. 8 Position and contact force results of proposed algorithm and open loop control with large and small input

Fig.8 은 Fig.7 에서와 같이 본 논문에서 제안한 파지 알고리즘에 의해 얻은 접촉력과 동일한 접촉력을 얻으려면 개루프 제어에서의 관절 회전 속도를 얼마 정도 줄여야 하는 지를 측정한 결과이다. Fig.8(a)는 관절 회전각의 변화를 측정한 것이고, Fig.8(b)는 접촉력을 측정한 결과이다. 실험 결과로부터 동일한 수준으로 충격력을 줄이려면 개루프 제어시 상승 시간 또는 정착 시간을 25-30 %정도 길게 설정해야 한다. 문제는 개 루프 제어에서, 동일한 정적인 접촉력을 얻기 위해서는 밸브 입력 신호를 증가시켜야 하는데, 그 시점을 정하기 위해서는 접촉 센서(tactile sensor)등이 별도로 장착되어야 할 것이다.

多關節 多指 로봇 손으로 임의 형상의 물체를 파지할 때, 각 손가락의 끝에 근접센서를 장착하여 파지 대상물까지의 거리를 감지함으로써 파지 동작을 신속 접근, 감속, 파지의 3 단계로 구분하여 제어하면, 로봇 손과 파지 대상물간의 상대적 위치가 사전 계획대로 정확하게 설정되지 않더라도 각 손가락이 독립적으로 파지 시간과 파지 충격을 최소화하면서 파지 대상물과 접촉할 수 있고, 결과적으로 로봇 손 전체가 신속하면서 소프트한 파지 동작을 이룰 수 있다는 것이 본 논문에서 새로이 제안하고자 하는 기본 개념이다.

본 논문에서는 손가락 관절 하나를 대상으로 그 효과를 실험적으로 확인한 결과를 보고하였다. 관절 수가 2개 이상인 손가락의 경우에는 대상물을 손가락 전체로 파지해야 할 지(power grasping), 아니면 손가락 끝으로만 파지해야 할 지(precision grasping)의 선택에 따라서 손끝 관절과 다른 관절의 연동 관계가 역기구학으로부터 결정될 것이고, 이에 따라 본 논문의 파지 방식을 어느 관절에 적용할 것인지 선택할 수 있을 것이다. 따라서 손가락 끝과 대상물간의 접촉이 신속 접근, 감속, 파지의 3 단계로 이루어지도록 하는 것은 손가락 관절의 수에 의해 제한 받지 않는다고 할 수 있다. 그러나 2 관절 이상의 손가락에 대한 후속 연구가 요구된다.

파지 대상물의 형태로서는 두 손가락 또는 세 손가락으로 파지할 수 있는 판, 실린더, 사각 봉, 정육면체, 구, 또는 이들이 조합된 형태를 일반적인 예로 들 수 있다. 본 논문에서 파지 대상물의 표면이 평면이나 완만한 곡면으로서 근접센서 헤드 면적의 50% 이상이어야 하며 재질이 금속이어야 한다는 것은 실험에서 사용한 유도전류형 근접센서의 특성으로 인한 제약 조건이고, 만약 광전식 센서를 사용한다면 감지 면적이나 재질에는 무관하고, 표면 색깔이 밝아야 한다는 제약조건이 따를 것이다. 따라서 파지 대상물의 재질이나 형태에 따라서 어떤 근접센서를 선정할 것인가의 응용 연구가 향후 요구된다. 분명한 것은 본 연구의 파지 충격 감소 효과는 대상물의 재질이 단단할수록 더 크게 나타난다는 것이다.

다른 향후 연구과제 중의 하나는 손가락 관절의 제어에 이용되는 압력센서의 신호를 이용하여

접촉력의 페 루프 제어 시스템 구성 등을 통해 접촉력의 제어 정밀도를 향상시키는 것이다. 그러나 이 경우 위치 제어 모드에서 힘 제어 모드로 전환할 때의 과도기에서 발생할 수 있는 안정도 문제가 해결되어야 하고, 이를 위해서는 이에 적합한 제어방식의 도출이 요구된다고 할 수 있다.

참고문헌

- David, J., Montana, "The Condition for Contact Grasp Stability," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 412-417, 1991.
- Jeffrey, Kerr, and Bernad, Roth, "Special Grasping Configurations with Dexterous Hands," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1361-1367, 1986.
- Rajko, Tomovic, George, A., Bekey, and Walter, J., Karplus, "A Strategy for Grasp Synthesis with Multifingered Robot Hands," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 83-89, 1987.
- S., T., Venkataraman, and Theodore, E., Djafferis, "Multivariable Feedback Control of the JPL/STANFORD Hand," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 77-82, 1987.
- Seraji, H., and Colbaugh, R., "Force Tracking in Impedance Control," The International Journal of Robotics Research, Vol. 16, No. 1, Feb., pp. 97-117, 1997.
- Raibert, M., H. and Craig, J., C., "Hybrid Position/Force Control of Manipulator," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, June, pp. 77-82, 1981.
- Martin, Buss, and Hideki, Hashimoto, "Dextrous Robot Hand Experiments," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 1680-1686, 1995.
- Robert, D., H., Nicolas, P., Prasad, A., Imin, K., and Mark, R., C., "Grasping Manipulation and Control with Tactile Sensing," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 1258-1263, 1990.
- Maekawa, H., Tanie, K., and Komoriya, K., "Tactile Sensor Based Manipulation of an Unknown Object by a Multifingered Hand with Rolling Contact," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 743-750, 1995.
- Prasad, A., Roland, S., and Mark, C., "Manipulation with Soft Fingers: Contact Force Control," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 652-657, 1991.
- Shimoga, K., B., and Goldenberg, A., A., "Soft Robotic Fingertips Part I: A Comparison of Construction Materials," The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 4, August, pp. 320-334, 1996.
- Shimoga, K., B., and Goldenberg, A., A., "Soft Robotic Fingertips Part II: Modeling and Impedance Regulation," The International Journal of Robotics Research, Vol. 15, No. 4, August, pp. 335-350, 1996.
- Yunying, W., Tzyh-Jong, T., Ning, X., and Alberto, I., "On Robust Impact Control via Positive Acceleration Feedback for Robot Manipulators," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 1891-1896, 1996.
- Marth, G., T., Tam, T., J., and Bejczy, A., K., "An Event Based Approach to Impact Control: Theory and Experiments," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 918-923, 1994.
- Yangming, X., John, M., H., and Donghai, M., "Force and Contact Transient Control Using Nonlinear PD Control," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 924-930, 1994.
- B., Allotta, and G., Buttazzo, "Impact Handling by Proximity and Force Sensing," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 2032-2037, 1992.
- Edward, C., and Vladimir, L., "Motion Planning for Robot Arm Manipulators with Proximity Sensing," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 740-745, 1988.
- J., L., Novak, and J., T., Feddema, "A Capacitance-based Proximity Sensor for Whole Arm Obstacle Avoidance," Proc. Int. IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 1307-1314, 1992.
- 류시복, 김상만, 홍예선, "공압 구동식 로봇 손을 위한 소형 4/3-way 비례 제어 밸브의 설계 및 실험," 한국 정밀 공학회 추계 학술 논문집, pp. 331-336, 1997.