

촉각 센서를 이용한 로봇 손의 행위 기반 제어

박노훈\*\*, 오상록\*, 박종현+, 유범제\*, 오용환\*, 윤도영\*\*

Control of robotic hand by behavior-based tactile servoing

No-Hoon Park\*\*, Sang-Rok Oh\*, Jong-Hyun Park+, Bum-Jae You\*, Yong-Hwan Oh\*, Do-Young, Yoon\*

\* ISCRC, KIST/+ Dept. of Precision Mechanical Eng., Hanyang Univ. /# Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.

**Abstract** - 시각 장애인의 경우 어떤 물체를 집어 들기 위해서는 처음에 물체를 더듬으면서 전체 형상을 파악하게 된다. 손의 촉각을 이용하여 충분히 물체의 특징을 파악하게 되면, 무게 중심이 될 만한 지점에 접촉하여 물체를 한 번쯤 들어보게 된다. 시각 등 다른 감각의 제한을 받는 조건에서 촉각만으로 물체 파지(object-grapng)을 수행하고자 할 때, 일련의 행위들을 반복하게 된다. 본 논문은 촉각을 이용한 로봇 손의 행위 기반 제어 연구에 관한 것으로 R.Brooks가 제안한 subsumption architecture(SA)을 진화시켜 본 연구실에서 개발한 4DOF hand에 적용하였다.

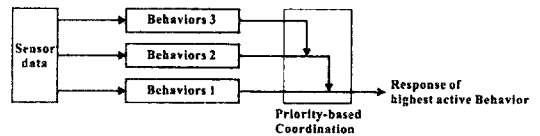
1. 서 론

로봇이 수행하는 많은 일들 중에는 로봇과 물체(object), 주변 환경과의 접촉[1]이 필수 불가결하다. 특히 인간형 로봇 손(J.K.Salisbury[2], Utah/MIT[3], DLR's[4])의 정교한 작업에 있어 tactile sensing(이하 촉각)[1][5]의 역할은 매우 중요하다. Tactile servoing[1]이라 함은 촉각을 이용하여 로봇의 end-effector나 손을 제어하는 것을 말한다. 지금까지 인간형 로봇 손의 제어 기법[3][4][6]은 여러 가지가 있으나, grasping dexterity에 있어 절대 우수성은 아직 입증되지 않은 상태다. 최근 behavior-based(이하 행위 기반)[7]의 제어 연구[7][8][9]가 mobile robot의 navigation[7][12][13]등 지능 제어 분야에서 많은 성과[15][16]를 보이고 있다. R.Brooks[7]의 SA를 이용한 최근 시스템으로는 K.Takita[12]의 multi-legged robot과 Rober T.Pack[13]의 climbing robot, 그리고 Andrew Bennett[14]의 AUV 등이 있다. Manipulation에 있어 행위 기반 시스템의 예로는 J.H.Connell[8]의 retrieving robot, 그리고 fuzzy logic을 부가한 P.Dassan.[9]의 3-link manipulator와 force control에 의한 T.G. Williams[10]의 manipulator robot, 그리고 artificial muscles에 적용한 M.M. Williamson[11]의 humanoid arm이 있다. 요컨대, 촉각을 이용한 로봇 손의 제어 부문에 있어 최근의 경향은 neuro-fuzzy와 adaptive control로서 촉각을 통해 팔과 손가락 관절의 움직임을 통한 제어[3][6][9][14][17]하는 기법이 주류를 이루고 있다. 본 논문에서는 로봇 손을 제어함에 있어 인간의 촉각을 모사한 행위기반 제어를 이용하여 그 성능을 보고자 한다. 특히 mobile robot 분야에서 R. Brooks[7]가 제안한 SA를 기초로 본 논문에서 제안한 chained releaser subsumption architecture(이하 CRSA)를 이용하였다. 이 구조는 기존 SA 구조에서 상위 레벨의 행위를 촉발시키는 releaser를 하위 레벨 행위의 실행여부로 결정하게 함으로서, 최하위 행위의 결과값의 신뢰도를 직접 확인할 수 있고, 상위 단계로의 진행을 고무(stimulate)시키게 함으로서 원하는 최종 행위의 완성을 높일 수 있는 구조이다. 따라서 이런 구조를 시인 로봇 손의 경우, 촉각으로 한정된 작업 능력을 극대화 시킬 수 있다.

2. 본 론

2.1 배경 지식

행위 기반 제어에 있어 행위의 기본 구조[7][15][16]는 SENSE-ACT 이다. 또한 행위 기반 제어에는 다음과 같은 4가지의 behavioral coordination(이하 BC)[15][16]이 있으며 이중 SA구조는 그림 1과 같다.



(a) Arbitration via suppression network

그림 1. Subsumption Architecture

그림 1의 각각의 BC들은 최종 응답 전단계의 조정(arbitration)부문에 있어 4가지로 분류될 수 있다. (a)의 SA(subsumption)구조는 본 논문이 기본으로 삼는 구조로 행위들의 우선순위를 bottom-up의 형태로 놓고 상위 layer의 행위가 하위의 것을 포섭(subsumption), 억제(inhibition)하여 최상위의 행위가 최종적으로 수행되도록 만든 구조이다. 이 구조의 장점은 기본적인 행위들을 하위 레벨에 배치하여 수행하면서 외부로부터 센서들을 통해 들어오는 신호값에 의해 하위 레벨의 행위들이 상위 레벨로 진행하게 하므로서 원하는 최종 상위레벨의 행위가 실행되는 것이다. 상위 레벨의 행위는 하위 레벨의 행위를 포섭, 억제 하는 통제 기능이 있기 때문에, 상위 레벨의 행위가 실행되어 목적으로 하는 결과가 나타나면 하위 레벨의 행위를 신뢰할 수 있다.

2.2. 제안된 구조.

본 논문에서는 기존 SA를 발전시켜 다음과 같은 CRSA를 제안하고자 한다. 제안된 CRSA는 기존 SA의 각 level의 행위의 실행 여부를 releaser로 하여 상위 level의 첫 행위를 진행시키도록 하였다.

그림 2. Chained-releaser subsumption architecture

제안된 구조는 SA에 있어 촉각만으로 물체를 파지하려는 행위 기반 제어 구조의 일반적 형태로서 모두 4개의 level(이하 레벨)을 갖는다. Level 0에서 처음 물체 감지 센서(예:IR)로부터 물체를 인식하게 되면 open-hand라는 행위를 통해 초기화 한다. 이는 level 1,2,3에서 로봇 손의 재위치(reposition)나, 파지단계에서 필요한 행위이다. 이후 로봇 손은 물체를 파지하기 위해 물체에 접근(approach object)한다. 물체 접근 행위가 끝나 근접 센서(예:Proximity sensor)로부터 물체로의 접근을 확인하면 곧 이 정보가 다음 단계의 첫 행위인 primitive grasp(최초 파지)를 기동시킨다. 이는 접촉 확인(check contact)행위로 포섭되어 파지 상태 확인(check grasp status)행위로 진행된다. 이 행위는 여러 센서들의 값에 따라 다시 최초 파지 행위로 reset하거나, open-hand 행위와 함께 로봇 손을 재위치 시킨다. 만약 재위치 행위

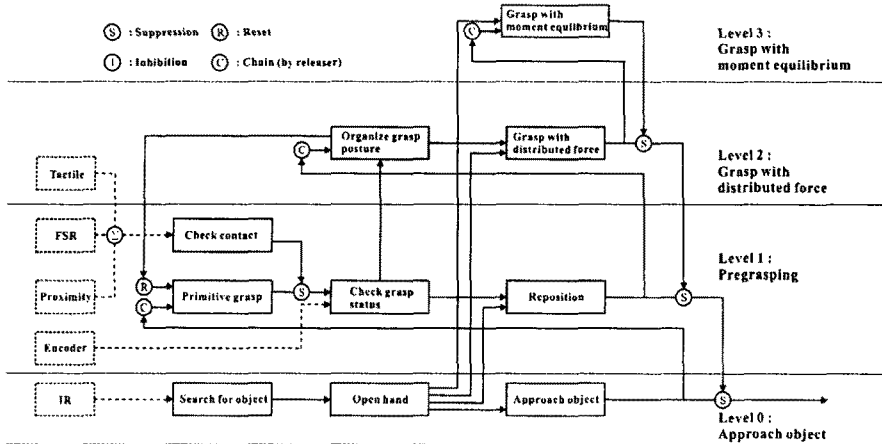


그림 2 Chained-releaser subsumption architecture

가 과지할 수 있는 결과값을 가져오면, 재위치 행위는 다음 단계로 release하고 접촉 확인 행위와 과지 상태 확인 행위는 과지 자세 조정(organize grasp posture)행위로 진행한다. 요컨대 과지 자세를 만드는 부분은 이 organize grasp posture행위로서 하위의 접촉 확인 행위와 재위치행위의 신뢰도에 의해 기대치를 높일 수 있다. 다시 이 행위는 균형 힘 과지(grasp with distributed force)로 이어지고 여기서 얻은 결과에 의해 최상위 최종 행위인 균형 모멘트 과지(grasp with moment equilibrium)로 고무되어 진다.

### 2.2. 4DOF Hand

다음은 본 연구실에서 개발 중인 4DOF hand system의 전체 모습이다.



그림 3. 4DOF hand system의 모습

4DOF hand는 4개의 모터로 구성되어 2개의 모터가 4개가 일체로된 손가락(4index finger)를 구동시키며, 나머지 2개의 모터가 엄지손가락을 구동시키는 구조로 되어 있다. 각 손가락 안쪽 부분에 모두 8개의 FSR센서가 부착되어 있으며, AD 보드를 통하여 측정된 값들은 전체 제어 프로그램으로 입력된다. 전체 프로그램에서는 FSR 측정값과 각 모터의 encoder에서 측정된 각 관절의 속도와 각도를 가지고 CRSA를 통해 물체 과지를 위한 과지 자세를 계산하게 된다.

### 2.3. 과지가능도(graspability)에 의한 물체의 과지 실험.

물체를 과지할 수 있는 graspability(이하 과지가능도)  $G$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$G = \prod_{i=1}^n G_i = (q_1 \times f_1) \cdot (q_2 \times f_2) \cdot L \cdot (q_n \times f_n)$$

여기서  $G_i$ 는 로봇 손의 각 관절  $i$ 의 각도  $q_i$ 와 FSR센

그 관절에 부착된 FSR센서에서 측정된 힘  $f_i$ 의 곱으로 나타내며, 이  $G_i$ 의 전체 곱을 로봇 손의 물체에 대한 과지 가능도라고 한다. 이  $G_i$ 는 미리 정의된 행위들인 최초 단순 과지들을 수행할 때 의미가 있는 값으로, 각 관절의  $q_i$ 가 항상 영에서 시작되어 물리적인 최대값까지 증가하며, 물체가 과지 가능 영역에 있을 때라는 전제조건이 붙는다. 이  $G_i$ 의 물리적 의미는  $q_i$ 가 클수록 과지 가능성이 높다는 의미와 물체와 접촉이 시작되어 접촉력이 클수록 과지 가능성이 크다 라는 의미이다. 여러 최초 단순 과지 모션에서 각각의  $G_m$ 를 구하여 그 중 가장 최대값  $G_{max}$ 를 구하고 그 때의  $q_{i,max}$  값을 해당 최초 단순 과지 모션에서 재과지 하면 우리가 레벨 3에서 최종적으로 구하고자 하는 균형 힘 과지를 수행할 수 있다. 요컨대, 여러 최초 단순 과지 모션에서 얻어진 과지 가능도 값들 중에서 최대값을 이용, 그 때의 각도값을 가지고 최초 단순 과지 모션으로 재과지 하면 촉각센서만을 가진 로봇 손으로 물체를 과지 하기 위한 자세를 쉽고 빠르게 구할 수 있다. 이 이론이 본문에서 제한하는 핵심부분으로서 이를 응용하여 일반적인 촉각센서를 이용한 로봇 손의 과지제어에 쓰일 수 있다.

다음의 그림 4는 물체의 최초 단순 과지 실험 중 각 FSR센서에서 얻어진 힘  $f_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ )의 데이터를 나타낸 것이다. 0값에서 크게 벗어난 값들은 물체와의 접촉힘을 의미한다. 이 값들이 얻어진 같은 시각에 encoder로부터 얻은 각 관절의 각도  $q_i$  값을 구하여 곱하면 과지 가능도  $G_i$ 를 구할 수 있다.

각 관절의 속도  $\dot{q}_i$  도 우리가 정의한  $G_i$  값의 의미를 더욱 명쾌하게 할 수 있을 것으로 기대한다. 예컨대,  $f_i$ 이 얻어지는 동일 시각에  $\dot{q}_i$ 을 얻어서 이에 inverse jacobian을 곱해 얻어지는 선속도를 적분한다. 그리고 얻어지는 직교좌표계에서의 접촉 위치를 구하여

역시 같은 시각에서의 힘의 값  $f_i$ 을 조사하는 것이다.

만약 FSR센서의 노이즈 여러 범위에서  $f_i \approx f_i'$  이라면

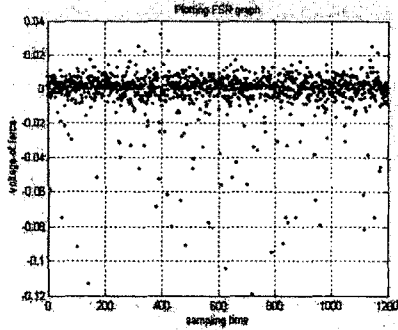


그림 4. 물체의 최초 단순 파지 실험 중 FSR

센서에서 얻어진 힘  
예측한 물체와의 접촉힘이라는 신뢰도를 높일 수  
있다.

그림 5는 시간에 따른 각 관절의 위치를 나타낸 것  
이다. 또한 그림 6은 4개의 그래프는 각 관절의 속도를 나  
타낸다.

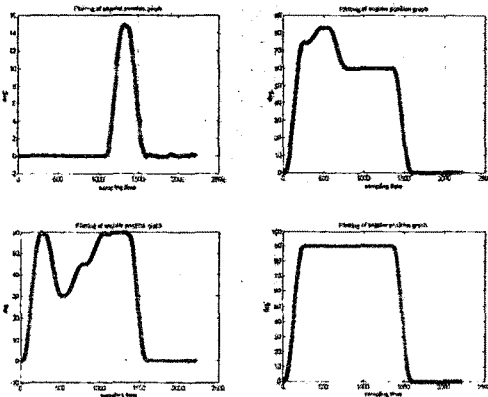


그림 5. 시간에 따른 각 모터에서의 위치 궤적

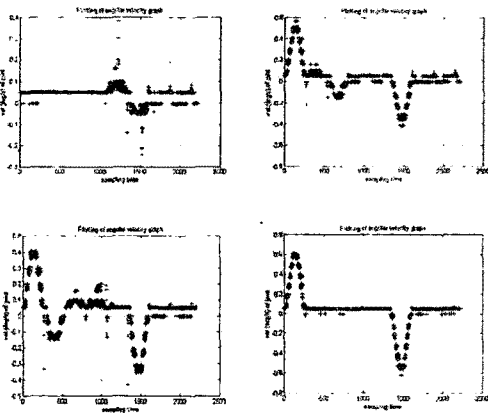


그림 6. 시간에 따른 각 모터의 속도 궤적

### 3. 결 론

본 논문은 R.Brooks[7]의 SA구조를 일반적인 물체 파  
지를 위해 발전시켰다. 최근 인간형 로봇의 등장으로 인  
로봇 손의 연구가 많은 제어기법을 이용하여 진행되고  
있다. 본 논문은 우리가 연구 개발 중인 로봇 손을 소개

하고 이를 제어 하기 위한 CRSA제안 하였다. 또한 파  
지 가능도를 소개하고 촉각만을 가지고 물체를 파지 할  
수 있는 연구를 제시하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Hong Zhang and Ning Nicholas Chen, "Control of contact via tactile sensing", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.5, pp482-495, Oct. 2000.
- [2] Starr, G.P, "Cartesian stiffness control of the JPL/Stanford/Salisbury hand", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp24-29, April, 1988.
- [3] Rainey, L.W, "Adaptive model-based control of the Utah/MIT hand", Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems and Engineering, pp113-116, Aug. 1991.
- [4] Butterfass, J. and Grebenstein, M, "DLR's hand II : next generation of a dexterous robot hand", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1. pp109 114, 2001.
- [5] Russell. Andrew, "Robot tactile sensing" Prentice Hall Press, 1990.
- [6] Hristu, D. and Babb, J., "Position and force control of a multifingered hand : a comparison of fuzzy logic to traditional PID control", Proc. of IROS Int. Conf. on Advanced Robotics Sys., Vol.2 pp1391 1398, Sept. 1994.
- [7] R. Brooks, "A layered intelligent control system for a mobile robot", IEEE J. of Robotics and Automat., RA-2:14-23, 1986.
- [8] J.H. Connell, "A behavior based arm controller", IEEE Trans. on Robotics and Automat., 5(6):784 791, 1989.
- [9] P.Dassan., K. Watanabe, "Fuzzy behavior based controller for a task of three link manipulator", Proc. of IEEE Int. Conf. on Sys., and Man, Cyber., pp776 781, 1999.
- [10] T.G. Williams and Hardy N, "Behavioral modules for force control of robot manipulators", Proc. of IEEE Int. Symp. on Robot Control, 2000.
- [11] M.M. Williamson, "Postural primitives : Interactive behavior for a humanoid robot arm", Proc. of SAB, Cape Cod, MA, USA, 1996.
- [12] K.Takita, K.Suzuki, "Learning mimic impression for multi legged vehicle", Proc. of IROS/IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat., pp215 222, 1996.
- [13] Rober T. Pack and Joe L. Christopher Jr, "A rubbertuator based structure climbing inspection robot", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat. pp1869 1874, 1997.
- [14] Andrew A. Bennett and John J. Leonard, "A behavior based approach to adaptive feature detection following with autonomous underwater vehicle", IEEE J. of Ocean Engineering, Vol.25, No.2, April, 2000.
- [15] Ronald C. Arkin, "Behavior based robotics" The MIT Press. 1998.
- [16] Robin R. Murphy, "Introduction to AI robotics" The MIT Press, 2000.
- [17] Taddeucci, D.Laschi, C,"An approach to integrated tactile perception", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.4 pp20 25, April, 1997.
- [18] Rossenblatt J.K, "Combining multi goals in a behavior based architecture", Proc. of IROS Int. Conf. on Human robot inter.. and Cooperat., Robots, pp136-141. 1995.