Multiple Shape Object Handling을 위한 양팔 로봇의 성능지수 평가

Evaluation of Performance Index of Dual-arm manipulator for Multiple Shape Object Handling

손 준 배¹, 진 호², 이 장 명³

Son Joon-Bae¹, Chen-Hu², Lee Jang-Myung²

Abstract This paper proposes a performance index for the multiple shape object handling of dual arm manipulator to determine whether a robot is good or not. When the dual-arm manipulator grasps a fixed object and is posed, the dual-arm manipulator should procure a space to freely control the manipulator. As a performance evaluation parameter, each joint torque from current sensor signal is utilized. From the current information, torque and energy for each joint are estimated. In this paper an performance index for an unstructured object is defined by an energy-cost function, and stability analysis for each motion is derived by the maximum force to the object. The maximum force to the object is computed by the inertia of object and acceleration information of end-effector. The acceleration data are derived by the double derivation of each encoder signal. Manipulability measure which implies how efficiently the dual -arm manipulator can move with the grasped object, can be represented by the intersection of the two manipulability ellipsoids for the left and right arms. Effectiveness of the proposed algorithm has been verified through the practical simulations and real experiments.

Keywords: Dual-arms robot, multiple shape, grasping, performance index

1. 서 론

로봇산업은 기계 및 전자 산업의 첨단 기술이 결합된 산업으로 20세기 후반부터 제조업 현장에 투입되기 시작한 이 후 현재까지 산업용 로봇이 주류를 이루고 있다. 그러나 산업용 로봇 시장이 성숙기에 들어서면서 로봇 산업은 새로운 분야로의 발전을 모색하게 되었다. 최근 사회의 정보화와 저 출산, 의학기술의 발달에 따른 고령화, 그리고 인간의 고립화 등 패러다임의 변화에 따라 로봇은 인간에게 큰 도움을 줄 것으로 예상되고, 이런 문제들을 해결할 유일한 수단이라고 할 수

있다. 현재 로봇산업의 선진기술을 보유한 미국, 일본 등을 중심으로 인간생활과 밀접한 지능형 서비스 로봇의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 제한된 공간 내에서 주어진 작업을 반복하는 산업용 로봇과 달리, 인간과 인터페이스를 통하여 주어진 작업을 수행해야 하는 지능형 서비스 로봇은 보다 높은 지능과 환경의 인식 기술이 요구된다. 또 인간과 로봇이 상호 협동하여 작업을 하거나 인간에게 서비스 하기 위한 로봇의 작업 중에서 원하는 물체를 쥐고 옮기는 작업은 가장 기본적인 작업이며 중요한 작업으로 많은 세부적인 연구가 활발하게 진행되고 있다.

먼저 비전 정보를 이용하여 물체의 형상과 위치를 인식하고 인식한 물체를 안전하고 정확하게 파지하기 위한 최적의 포지션으로 머니플레이터의 공구단을 이동시키고 파지하는 것에 관한 연구^[1-4)]가 진행 되었고 인간의 핸드와 유사하거나 물체를 집기에 용이한 로봇

Received : Oct. 6. 2011; Reviewed : Nov. 2. 2011; Accepted : Jan. 9. 2012
※ 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

¹ 부산대학교 로봇협동과정 석사과정

² 부산대학교 전자전기공학과 석박 통합과정

³ 부산대학교 전자전기공학과 교수

핸드를 개발하여 물체의 형태에 따른 최적 파지방법^[5-7]에 관한 연구가 진행되고 있다. 그리고 물체를 파지 후 적절한 경로로 이동하는 경로계획^[8,9]과 사람과 비슷한 동작으로 일을 처리하기 위해 모션을 학습 시키거나 사람의 동작을 따라 하는 연구^[10-12]도 진행되고 있다.

일반적으로 여유 자유도를 가지는 머니플레이터의 경우에는 로봇이 물체를 파지하여 이동할 때 공구단의 특정 위치 및 방위 벡터를 표시하기 위하여 여러 가지의 모션으로의 작업이 가능하다. 그리고 이런 모션들을 더욱 유연하게 실행할 수 있는 방법에 대한 연구도 진행되었다^[13]. 점차 인간과 로봇의 상호작용이 일반화됨에 따라, 산업용 로봇뿐만 아니라 서비스 로봇에서 성능지수의 평가가 중요해지고 있다. 본 논문에서는 5 자유도를 가지는 양팔로봇의 물체 파지 시 최적의 자세를 제안한다. 최적자세 비교를 위해 다음의 3가지 파라미터를 이용하였다. 사용된 파라미터는 1. 물체에 가해지는 힘의 크기의 변화 (전류 센서를 이용한 토크 추정기로 공구단에 걸리는 힘을 벡터의 합으로 계산) 2. 양팔 조작성 지수의 크기 3. 양팔 로봇에 소모되는 전력량이다. 그리고 양팔 로봇이 물체를 파지하고 있는 자세에 대하여 일정한 외란을 가하였을 때, 1번과 2번 파라미터의 변화량을 구하였다.

양팔 로봇이 물체를 파지할 때 물체에 가해지는 힘이 물체를 파지할 수 있는 최소의 힘보다 적어지게 되면 물체를 떨어뜨릴 수 있으며, 반대로 매우 커지게 되면 강성을 띄지 않는 물체에 대해서는 파손될 위험이 있다. 그리고 양팔에 대한 조작성 지수가 적은 자세로 물체를 파지하게 되는 경우 물체 파지 후 양팔의 활동 제한이 커진다. 따라서 안정적인 자세는 1번 파라미터의 변화량이 적어야 하고 2번 파라미터 값이 커야 하며 3번 파라미터 값이 작아야 한다. 본 논문에서 제안한 성능지수 평가는 1번 파라미터의 변화량과, 2번 파라미터의 크기, 3번 파라미터의 전력량을 고려하여 합한 성능지수 평가 함수의 값이 가장 적은 성능지수가 최적의 성능을 가진 로봇 이라고 정의 하였다.

2. 양팔 조작성 지수

2.1 양팔 로봇의 구성

실제 실험에 사용된 양팔 로봇은 왼쪽, 오른쪽 각각 어깨부에 2자유도, 상박에 1자유도, 팔꿈치에 1자유도, 하박에 1자유도로 구성하였다. 그리고 공구단 부분

에는 물체를 파지 할 수 있도록 gripper 형태의 로봇 핸드를 제작하였다. 팔의 말단 좌표에 대한 각 관절의 각을 알기 위하여 기구학적 해석을 그림 1과 같이 행하였다.

그림 1. 5자유도 양팔 로봇의 구조와 모델링

2.2 조작성 지수

머니플레이터의 운동을 분석할 때, 관절 속도벡터와 작업공간 속도벡터의 관계를 나타내는 자코비안으로부터 조작성 타원 (Manipulability ellipsoid)을 유도할 수 있다. 로봇 팔은 5 개의 연속적으로 연결된 모터가 링크의 역할을 하며 5 자유도를 가지고 있다. 한편, 로봇에 주어진 작업은 공구단(end-effector)의 위치와 방향의 연속된 값으로 이루어진 경로를 로봇이 추종한다. 일반적인 머니플레이터에 대한 작업 공간의 좌표와 관절 변수와의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = f(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{X}$ 는 공구단의 위치 및 방위각에 대한 정보를 갖고 있으며 관절 각속도와 공구단의 속도($\dot{\boldsymbol{\theta}}$)와의 관계는 식(2)과 같다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2)$$

여기서, $\dot{\mathbf{X}}$ 와 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 를 각각 작업공간 속도벡터와 자코비안이라고 하며, 관절속도 공간에서의 표현은 식(3)과 같다.

$$\|\dot{\theta}\|^2 = \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dots + \dot{\theta}_n^2 = 1 \quad (3)$$

식 (3)을 자코비안을 이용하여 직교좌표 공간에서의 속도로 변환을 하면,

$$\begin{aligned} \|\dot{\theta}\|^2 &= \dot{\theta}^T \dot{\theta} = \dot{\mathbf{X}}^T (\mathbf{J}^{-1})^T \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{X}} \\ &= \dot{\mathbf{X}}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\mathbf{X}} = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)가 된다. 잉여자유도를 가지는 머니플레이터에 대한 조작성 지수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있는데,

$$M(\theta) = \sqrt{\det \mathbf{J}(\theta) \mathbf{J}^T(\theta)} \quad (5)$$

이는 조작성 타원 (Manipulability ellipsoid)의 부피를 나타내며, 잉여자유도가 없는 로봇의 경우에는

$$M(\theta) = |\det \mathbf{J}(\theta)| \quad (6)$$

식 (6)과 같이 되며, 보통 현재의 위치에서 말단장치가 모든 방향으로 움직일 수 있는 능력의 척도를 나타낸다.

즉, 조작성 지수 값이 0으로 가까워지는 경우에는 식(2)에 의해 어떤 방향으로든 말단장치를 움직일 수 없게 된다. 그러므로, 조작성 지수 값이 아주 작으면, 공구단이 경로에서 어떤 방향으로든 못 움직이므로 특이점의 난관에 빠지게 된다.

2.3 양팔 조작성 지수

위와 같은 원리를 이용하여 조작성 지수가 0이 되는 지점을 특이점의 위치로 판단하고 양팔 로봇의 협업제어를 위하여 앞서 한팔 로봇에 대한 조작성 지수를 DAMM(Dual Arm Manipulability Measure) 이라는 개념으로 확장하여 양팔 로봇의 협업 제어 시 최적자세에 대해 연구하였다. 또한 DAMM을 양팔의 조작성 지수라 정의하고 기구의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로부터 유도된 조작성 타원의 크기가 크면 클수록, 공구단이 원하는 속도와 힘을 얻기 위해 필요한 각 관절의 속도, 힘 요구량은 적어진다. 또한 타원이 원에 가까우면 가까울수록, 기구가 임의의 또는 특정한 방향과 위치로 이동하는데 요구되는 각 관절의 속도와 힘이

거의 같아진다.

양팔에 대한 직교좌표에 대한 각각의 관절 속도의 관계식은 다음과 같다.

$$Arm1: \dot{\mathbf{X}}_1^T (\mathbf{J}_1 \mathbf{J}_1^T)^{-1} \dot{\mathbf{X}}_1 = 1 \quad (7)$$

$$Arm2: \dot{\mathbf{X}}_2^T (\mathbf{J}_2 \mathbf{J}_2^T)^{-1} \dot{\mathbf{X}}_2 = 1 \quad (8)$$

팔에 대한 최고의 조작성 타원을 그리고 그 중에서 겹치는 부분을 DAMM에 의한 영역으로 정의하고, 로봇 팔의 작업 공간의 척도로 삼았다. 식(7)과 식(8)에 따른 양팔의 조작성 타원과 양팔에 대한 조작성 지수를 그림 2에 나타내었다. 양 팔에 대한 조작성 지수는 이미 정의 되었으며^[17] 양팔에 대한 조작성 지수를 구하기 위한 식은 (13)과 같다.

$$DAMM(P_i) = \max \left[\prod_{i=1}^m (\min({}^1\sigma_i, {}^1\eta_i)), \prod_{i=1}^m (\min({}^2\sigma_i, {}^2\eta_i)) \right] \quad (9)$$

위 식(9)를 이용하여 구한 조작성 지수가 최대가 되는 값을 본 논문에서 조작성 지수의 파라미터로 이용하였다.

그림 2. 양팔에 대한 조작성 지수 및 타원 (교차영역)

3. 성능지수 평가 함수

3.1 물체에 가해지는 힘의 변화량

성능지수 평가 함수의 첫 번째 파라미터인 물체에 가해지는 힘 크기의 변화는 안정적으로 물체를 파지할 수 있다는 의미를 가지는데 이를 구하기 위하여 그림 3과 같이 각 관절에 대하여 관절의 이동 방향 및 벡터의 방향을 설정 하였다. 굵은 화살표를 포함하는 녹색의 원은 현재 팔의 모양에서 하나의 관절만 동작시켰을 경우 공구단의 이동 궤적을 나타내고 비교적 얇은 붉은색 화살표는 공구단의 이동 궤적상에서 공구단에서 발생하는 힘의 방향을 나타낸다. 공구단에 접해 있는 마지막 관절은 모든 경우의 모션에서 힘의 변화량이 적어 연산량 향상을 통해 실시간으로 정보를 모니터링 하기 위해 연산에서 제외시켰다.

원팔 첫번째 관절에서 발생하는 토크에 의한 힘을 구하기 위해

$$\tau_{l1} = F_{L1} * r_{l1} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 정의 하고, 위의 정의를 이용하여 i 번째 관절에 의해서 발생하는 힘을 식(11)를 이용하여 추정한다.

$$\frac{\tau_{li}}{r_{li}} = F_{Li} \quad (11)$$

r_{l1} 은 첫 번째 회전 관절중심에서 공구단까지 직선 거리를 나타내며 자세에 따라서 달라진다. 공구단이 xy, yz, xz평면상에서 움직일 때에는 피타고라스 정리에 의해 공구단과 기준관절 사이의 거리를 구할 수 있으며 공구단이 위에서 언급한 평면 이외의 좌표에 위치 할 때에는 기준 관절과 수평을 이루는 평면에 공구단의 좌표를 투영시킨 위치까지의 거리를 구 할 수 있

그림 3. 각 관절 동작시 발생하는 궤적(초록)및 힘 표시(빨강)

그림 4. 각 관절에서 공구단까지의 거리 계산 방법

으며 그림 4에 나타내었다.

우리가 찾고자 하는 i번째 관절에 의해 공구단에 작용하는 힘은 r_{li} 과 i번째 관절이 움직이는 방향으로 공구단의 수직 방향으로 생성되며

$$\sum \frac{\tau_{li}}{r_{li}} = \frac{\tau_{l1}}{r_{l1}} + \frac{\tau_{l2}}{r_{l2}} + \dots + \frac{\tau_{li}}{r_{li}} = F_{Li} \quad (12)$$

식 (12)와 같은 방법으로 i번째 관절에 대한 힘을 구하였다. 이렇게 구한 각 관절의 모든 힘을 합하면 물체에 가해지는 힘을 구할 수 있다.

3.2 양팔의 조작성 지수

기구학 해석을 위하여 그림 1과 같이 모델링 한 후, 각 관절의 조인트 좌표를 DH 규칙에 의해서 정의 하고, 그로 인한 Denavit-Hartenberg (DH) 링크 파라미터 테이블을 표 1과 같이 설정하였다. 기준 어깨 관절에서 각 팔의 공구단까지의 동차행렬을 구하고 각 팔에 대한 자코비안 행렬을 유도하였다.

표1에서의 DH 파라미터 테이블에 의한, 기준좌표에서 각 팔의 공구단 까지의 동차행렬을 구하고 동차행렬을 이용해 각 팔에 대한 자코비안 행렬을 유도하였다.

표 1. DH 파라미터 표

관절	$\theta_i(^{\circ})$	$d_i(mm)$	$a_i(mm)$	$\alpha_i(^{\circ})$
1	θ_1^*	260	0	90
2	θ_2^*	0	0	90
3	θ_3^*	250	0	-90
4	θ_4^*	0	0	90
5	θ_5^*	200	0	0

3.3 각 자세에 대한 전력 소모량

에너지 개념으로 효율적인 자세를 판단하기 위하여 양팔 로봇이 작업 수행 시에 소모되는 총 전력량을 구하였다. 모든 작업 수행 시 총 전력량을 가시적으로 확인하기 위하여 사용되는 전압은 15V로 일정하게 사용하였다. 전력은 식(13)를 이용하여 구하였다. I_i 는 소모된 전류의 양을 V_i 는 전압을 나타낸다.

$$P_i = \sum_{i=1}^5 (I_i \times V_i) \quad (13)$$

3.4 효율적인 자세를 위한 평가

F_{force} , $M_{anipulability\ measure}$ 와 P_{power} 는 앞에서 소개한 방법으로 구한 파라미터를 나타내고, $P_{performance\ index}$ 는 효율성의 정도를 나타내는 지수이다. $P_{performance\ index}$ 평가함수는 식 (14)와 같이 구하였고 $P_{performance\ index}$ 값이 낮은 자세를 효율적인 움직임을 보이는 자세로 정의 하였다.

$$P_{performance\ index} = \alpha F_{force} + \beta \frac{1}{M_{anipulability\ measure}} + \gamma P_{power} \quad (14)$$

자세에 따라 3가지 파라미터 중에서 중점적으로 여기는 파라미터의 값을 앞의 상수를 통해서 $P_{performance\ index}$ 평가 함수 내에서의 비중을 높일 수 있도록 하였다. 현재 각 파라미터 앞의 상수는 1로 정의하였고 앞으로 이 상수들에 대해 연구할 계획이다.

4. 실험 결과

실험에 사용된 로봇 구조는 그림 5와 같은 양팔 로봇을 사용 하였다. 실험에 사용한 각 물체들은 강성을

그림 5. 실험에 사용된 양팔 로봇

떨고 있으며 무게는 일치 시켰고 각 물체에 따라 몇 가지 파지 형태를 정하여 실험을 하였다.

4.1 양팔 로봇의 구성 및 실험 환경

양팔 로봇의 관절 구성은 표 2와 같다. 각 관절은 DC모터로 구성 되어 있고, 각 관절의 위치에 따라서 적절한 규격의 DC모터를 사용하였다. 또 양팔 로봇의 정밀한 제어를 위해 100:1 하모닉 기어를 사용하여 백래쉬를 최소화 하였다. 물체의 파지를 위한 목적으로 3개의 servo모터를 사용하여 gripper를 제작하였다. 그리고 초기 home position의 반복 정밀성을 높이기 위하여 EL-1KL2, ST-1KLA 적외선 센서와 potentiometer를 사용하였다.

표 2. 양팔 로봇의 관절 구성

항목	모델명	규격
Shoulder	Maxon W10	DC motor 24V, 150W
Elbow, Elbow-up	Maxon W06	DC motor 24V, 70W
Elbow-down	Maxon W01	DC motor 24V, 20W
Hand	HSR-5995TG	Servo motor 30.0Kg.cm at 7.4V
Encoder	HEDL-5540	500 Counts / turn

4.2 제어기 구조

제어기는 한 개의 마스터 제어기와 13개의 분산 슬레이브 제어기로 구성되어 있다. 분산 제어기는 통합 제어기에 비해서 각각의 관절을 독립적으로 제어하기 때문에 개별 제어가 가능하고 향후 관절의 추가 등에 따른 업그레이드가 가능하다. 또한 고장 시에도 고장이 난 부분의 제어기 및 모터 드라이브만 교체하면 되므

로 유지 보수가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 마스터 제어기는 Host PC에서 각 관절의 위치 정보를 수신하여, 양팔 로봇의 관절 및 gripper제어를 담당하고 있는 슬레이브 제어기로 명령을 송신한다. 슬레이브 제어기는 한 쪽이 5자유도인 양팔 로봇을 제어하기 위한 10개의 모터 드라이브용 제어기와 gripper제어용 2개, 각 관절의 전류 정보 수집을 위한 1개의 전류 제어기로 구성되어 있다. 또한 슬레이브 제어기에서는 관절위치의 PID-Fuzzy제어를 수행하면서, 현재의 인코더 정보와 전류 정보를 30ms 마다 마스터로 전송하게 되고 마스터에서는 100ms 주기로 Host PC에 이 값을 보내게 된다. 그림 6은 분산제어기의 구조를 나타내었다.

그림 6. 분산 제어기 구조

4.3 모바일 역진자 로봇

양팔 로봇이 목표 물체로 이동하기 위해 실험에 사용된 모바일 역진자 로봇은 그림 7과 같다. 사용된 센서는 ‘Analog Devices’사의 PWM 타입의 ‘ADXL210E’를 사용하였고, 프로세서는 Microchip 사의 dsPIC30f series 프로세서 5개를 SPI 통신을 이용한 분산제어를 통해 사용한다^[18]. 구동부는 60V 배터리를 사용하여 200W-BLDC 모터를 상 제어 하였다. 양팔 로봇을 모바일 역진자 로봇 위에 위치시켜 외란 인가 시에 발생하는 자이로 데이터를 외란의 크기로 환산, 비교에 적용 하였다.

4.4 육면체

육면체에 대한 파지 자세 성능지수 평가를 위해 선정한 자세는 그림 8와 같다. (a)는 양팔 로봇의 양쪽

그림 7. 모바일 역진자 로봇

그림 8. 육면체의 두 가지 파지 방법

공구단이 물체 표면에 z축을 기준으로 90도로 접촉해 있고, gripper가 물체의 양쪽 아랫부분을 파지하고 있는 자세이다. (b)는 (a)와 같이 양팔 로봇의 양쪽 공구단이 물체 표면에 z축을 기준으로 90도로 접촉해 있지만 gripper가 물체의 아랫부분과 윗부분을 파지하고 있다. 육면체의 규격은 가로 20cm, 세로 20cm, 높이 20cm, 무게 3.5kg이다.

그림 9는 그림 8의 (b)모션에 사용된 모바일 역진자 로봇의 자이로 데이터를 보여준다. 10초 동안에 앞에서 두 번, 뒤에서 두 번 외란을 인가 하였다. 외란

[그림 9] 모바일 역진자 로봇의 자이로 센서 데이터

인가 후 앞뒤로 크게 흔들리고 점점 0으로 수렴 하는 걸 볼 수 있다.

그림 10은 양팔 로봇의 기준 좌표의 방향과 각 관절의 위치에 따른 표식을 보여주고 하단의 좌표는 작업 공간의 좌표를 보여준다. 그림 11은 각 관절에 소비되는 전류의 양을 보여준다. 전류 센서의 출력 값을 ADC 변환하여 데이터화 하였다. 어깨 관절에 가깝게 위치 할수록 무게 때문에 많은 전류를 소모하는 것을 볼 수 있고, 그림 8의 (b)에 나타나듯이 L1의 관절이 R1의 관절의 위치보다 높은 곳에 위치하기 때문에 관절의 소모되는 전류의 양이 L1이 크게 나타남을 볼 수 있다. 소모되는 전류에 따른 파워는 (a)가 342W (b)가

그림 10. 양팔 로봇의 각 관절 표식 및 좌표

(a) 오른쪽 팔의 소모 전류 량

(b) 왼쪽 팔의 소모 전류 량

그림 11. 양팔 로봇의 각 관절에 소모되는 전류 량

346.5W로 (a)에서 소모되는 전력의 양이 낮게 나왔다.

그림 12는 그림 8의 (b)자세에 대한 양팔 로봇에 외란이 인가 되었을 때의 인코더 데이터의 오차의 변화를 볼 수 있다. 인코더 데이터는 각 관절에 부착된 모터의 위치에 따라 오차의 부호가 다름을 알 수 있다. 인코더 데이터는 모터가 한 바퀴 회전 시에 500번의 펄스 신호가 발생되며 1:100비의 하모닉 기어를 사용함으로 관절이 1° 이동 시에 139번의 인코더 펄스가 들어오게 된다. 실험에 사용된 그림 8의 (b)모션에서 L1과 L3의 관절은 이동 방향이 중력의 영향을 받고 있다. 따라서 L1과 L3의 관절이 R1과 R3의 관절의 위치보다 높은 곳에 위치 하기 때문에 외란 인가 시에 L1과 L3의 관절이 R1과 R3의 관절보다 인코더 오차 범위가 더욱 큰 것을 확인할 수 있다. R4와 L4번 관절은 이동 방향이 외란 인가 시 로봇이 움직이는 방향과 동일하므로 데이터 오차가 수시로 변화함을 보이고 있다.

다음의 그림 13은 그림 8의 (a), (b)자세의 양팔 로봇의 xy, xz, yz축에 대한 조작성 타원을 나타내고 있다. 붉은 색은 그림8의 (a)자세를 녹색은 (b)자세를 의미한다. 또한 (a) 자세에 대한 타원은 붉은색 동그라미(오른팔)와 별(왼팔)로 (b)자세에 대한 타원은 녹색 네모(오른팔)와 점(왼팔)로 표시하였고 타원이 하나로 보이는 것은 오른쪽 팔과 왼쪽 팔이 대칭되기 때문에 조

(a) 오른쪽 팔의 인코더 오차

(b) 왼쪽 팔의 인코더 오차

[그림 12] 각 관절 목표점의 인코더 데이터 오차

(a) xy 평면상의 조작성 타원

(b) xz 평면상의 조작성 타원

(c) yz 평면상의 조작성 타원

그림 13. 육면체 파지 자세에 대한 평면상의 조작성 타원

작성 타원이 겹쳐져서 나오는 것이다. 첫번째 그림13의 (a)자세는 우측으로 기울어져 있으므로 기준 좌표에서 북동쪽 방향과 남서쪽 방향으로 움직임이 자유롭고 (b)자세는 좌측으로 기울어져 있어 북서쪽 방향과 남동쪽 방향으로의 움직임이 자유롭다. 그림 8의 (a)자세의 타원이 (b)자세의 타원보다 크기가 크므로 조작성 지수는 자세 (a)가 자세 (b)보다 크다는 것을 알 수 있다. 각 평면에 대해서 조작성 지수를 고려해 보면 (a)자세가 (b)자세에 비해 높음을 보였다

첫 번째 파라미터인 물체에 가해지는 힘의 크기 변화도 인코더의 변화에 따라 힘이 달라 지므로 다음의 결과로 최적자세 평가함수를 계산해 보면 3가지 파라미터 모두 (a)의 자세에서 적은 값이 나왔다. 따라서 육면체의 파지 자세는 (a)의 자세가 높은 성능지수를 가진 자세이다.

4.5 구

구를 파지하는 모션은 그림 14와 같이 세 가지로 선정하였다. (a)는 구의 아랫부분과 윗부분을 gripper가 세로로 파지하였다. (b)는 구를 양쪽 다 아랫부분에서 파지를 하였다. (c)는 구의 아랫부분과 윗부분을 gripper가 파지하고 파지면을 왼쪽은 세로로 오른쪽은

그림 14. 구의 세 가지 파지 방법

가로로 파지 하였다. 구의 규격은 반지름 13cm, 무게 3.2kg이다.

그림 15는 그림 14의 파지 자세 (a), (b), (c)에 대한 조작성 타원을 보여준다. 이 조작성 타원은 xy, xz, yz 3평면에 대하여 나타내었다. 붉은색은 (a)자세 녹색은 (b)자세 파란색은 (c)자세를 의미한다.

구의 각 자세에 대해서도 육면체 파지 성능지수 평가 방법과 동일한 과정으로 실험을 진행하였다. 먼저 물체에 가해지는 힘의 변화는 (a)의 자세가 가장 적었고 (c)와 (b)의 자세 순으로 적었다. 조작성 지수는 (a)-(b)-(c), 전력량은 (b)-(a)-(c)순으로 적게 나타났다. 또 이를 합한 값은 (a)-(b)-(c)순으로 적게 나타나 (a)가 성능지수가 높은 자세로 나타났다.

(a) xy 평면상의 조작성 타원

(b) xz 평면상의 조작성 타원

(c) yz 평면상의 조작성 타원

그림 15. 구 파지 자세의 xy, xz, yz평면상의 조작성 타원

4.6 막대

막대의 파지 모션 최적자세 평가를 위해 선정된 모션은 네 가지로 그림 16과 같다. (a)는 막대와 x축이 90도를 이루도록 막대의 중앙 부분을 양손으로 파지하였고, (b)는 막대의 양끝을 아래서 위로 파지하고 있다. (c)는 막대의 양 끝을 잡고 물체의 무게중심을 낮추어 파지 하였고, (d)는 막대의 양쪽 끝을 왼쪽은 아래서 위로 오른쪽은 위에서 아래로 파지하고 있다. 막대의 규격은 가로 80cm, 세로 5.5cm, 높이 3.5cm 무게 3.5kg이다.

그림 17는 그림 16의 파지 자세 (a), (b), (c), (d)에 대한 조작성 타원을 보여준다. 이 조작성 타원은 xy, xz, yz 3평면에 대하여 나타내었다. 붉은색은 (a)자세 녹색타원은 (b)자세 파란색은 (c)자세 노란색은 (d)자세를 의미한다

앞의 성능지수 평가 방법과 동일한 과정으로 선정된 막대 파지자세에 대하여 실험을 진행하였다. 물체에 가해지는 힘의 변화는 (c)의 자세가 가장 적었고 나머지는 (a)-(b)-(d)순으로 나타났다. 조작성 지수의 크기는 (d)-(c)-(b)-(a), 전력량은 (a)-(b)-(c)-(d)순으로 적게 나타났다. 성능지수 평가 함수로 계산한 결과는 (c)-(b)-(a)-(d)순으로 적게 나타났으며, (c)의 자세가 높은 성능지수를 가진 자세로 나타났다.

표 3은 각 자세에 대한 양팔 조작성 지수 및 소모되는 에너지를 정량적으로 나타내고 있으며 실험결과를 뒷받침 하고 있다.

그림 16. 막대의 네 가지 파지 방법

(a) xy 평면상의 조작성 타원

(b) xz 평면상의 조작성 타원

(c) yz 평면상의 조작성 타원

그림 17. 막대 파지 자세의 xy, xz, yz평면상의 조작성 타원

표 3. 각 자세에 대한 양팔 로봇의 조작성 지수 및 파워

구분	조작성지수($10^{-3} \cdot \text{mm}^2$)			소비전력 (w)
	xy	xz	yz	
그림8(a)	92.6	169.8	147	342
그림8(b)	84.4	145	141.6	346
그림14(a)	152	168	134	346.5
그림14(b)	104	152	154	342
그림14(c)	93	139	128	349.5
그림16(a)	165	136	155	337.8
그림16(b)	119.8	122.5	117	318.2
그림16(c)	116.8	118.5	108.5	296.7
그림16(d)	78	79	176	338.9

5. 결론

전 세계적으로 점점 HRI (Human Robot Interaction)의 중요성이 증대됨에 따라, 인간형 서비스 로봇의 안정성 및 최적자세에 대한 연구가 다방면으로 이루어지고 있다^[4]. 그에 대한 일환으로 본 논문에서는 양팔 로봇의 안정성을 수치적으로 평가하기 위해 3가지 파라미터(1. 물체에 가해지는 힘의 크기의 변화 2. 양팔 조작성 지수의 크기 3. 양팔 로봇에 소모되는 전력량)를 이용하여 각 자세에 대한 가격 함수를 만들고 그에 따른 최적성능지수를 가진 자세를 제안하였다. 그리고

양팔 로봇이 인간과 상호작용을 할 때, 물체의 형태에 따라 취할 수 있는 대표적인 자세를 정하고 각 자세에 따른 성능지수 평가 함수를 사용하여 각 상황에 적합한 최적 성능지수를 제안함으로써 양팔 로봇이 물체 파지 시 더욱 많은 작업공간을 확보할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] Y. C. Lee, S. J. Lim, S. W. Hwang and C. S. Han, "Object grasp method of the service robot using the robot vision," Conference on Korean Society for Precision Engineering, vol. 3, pp. 7-8, 2008.
- [2] N. Vahrenkamp, A. Barski, T. Asfour, and R. Dillmann, "Planning and execution of grasping motions on a humanoid robot," IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2009.
- [3] C. Eitner, Y. Mori, K. Okada, and M. Inaba, "Task and vision based online manipulator trajectory generation for a humanoid robot," Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference, pp. 293-298, Dec. 2008.
- [4] C. Ott, O. Eiberger, W. Friedl, B. Bauml, U. Hillenbrand, C. Borst, A. Albu-Schaffer, B. Brunner, H. Hirschmuller, S. Kielhofer, R. Konietzschke, M. Suppa, T. Wimbock, F. Zacharias, and G. Hirzinger, "A humanoid two-arm system for dexterous manipulation," IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 276-283, Dec, 2006.
- [5] A. Miller, S. Knoop, H. Christensen, and P. Allen, "Automatic grasp planning using shape primitives", IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp.1824-1829, 2003.
- [6] X. Zhixing, A. Kasper, J. M. Zoellner, R. Dillmann, "An automatic grasp planning system for service robots," 14th International Conference on Advanced Robotics, Munich, Germany, June, 2009.
- [7] N. Vahrenkamp, D. Berenson, T. Asfour, J. Kuffner, and R. Dillmann, "Humanoid motion planning for dual-arm manipulation and re-grasping tasks," Intelligent Robots and Systems, IROS, Oct, 2009.
- [8] M. Gharbi, J. Cortés, T. Siméon, "A sampling-based path planner for dual-arm manipulation," Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.383-388, 2008.
- [9] K. S. Chang, R. Holmberg, and O. Khatib, "The augmented object model: Cooperative manipulation and parallel mechanism dynamics," IEEE International Conference Robot. & Autom, pp. 470-475, 2000.
- [10] E. Gribovskaya and A. Billard, "Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bimanual coordination tasks to a humanoid robot," Proceeding of the International Conference on Human-Robot Interaction, 2008.
- [11] M. Do, P. Azad, T. Asfour and R. Dillmann, "Imitation of Human Motion on a Humanoid Robot using Nonlinear Optimization," IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea, 2008.
- [12] S. Calinon and A. Billard, "Learning of Gestures by Imitation in a Humanoid Robot," Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals: Behavioural, Social and Communicative Dimensions, Cambridge University Press, pp. 153-177, 2007.
- [13] J. S. Kim, "Position Control of a Redundant Flexible Manipulator," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, vol.10, no.3, 2001.
- [14] Lihu Road, "Kinematics and Task-Oriented Manipulability Measure for the Bionic Cricket Hopping Robot," ICIRA 2008, Part 1, LNAI5314, pp. 342-351, 2008.
- [15] Young Il Lee, "A Study on the Manipulability Measure of Robot Manipulators," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, vol. 4, no. 1. Feb, 1998
- [16] Tsuneo Yoshikawa, "Analysis and Control of

Robot Manipulators with Redundancy,” Robotics Research The First International Symposium, pp. 735-747, 1984.

- [17] S. H. Lee, “Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-Oriented Dual Arm Manipulability,” IEEE Trans. Robotics. &Autom. vol. 5, no. 1. Feb, 1989.

진 호

2011 부산대학교 전자전기공학부(공학사)

2011~현재 부산대학교 전자전기공학과 석사과정 재학중

관심분야: 다관절 머니플레이터 및 지능로봇 제어, 센서응용 제어

손 준 배

2010 동아대학교 전자공학과 (공학사)

2010~현재 부산대학교 로봇협동과정 석사과정 재학중

관심분야: 지능제어 시스템 제어, 휴모노이드 제어, 모터제어, 센서응용

이 장 명

1980 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1982 서울대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)

1990 미국 남가주 대학교 (USC) (공학박사)

1992~현재 부산대학교 전자 전기 통신 공학부 교수

관심분야: 지능로봇 시스템 제어, 마이크로 프로세서 응용, 특수환경 Localization 및 Navigation