

작업 적합도를 이용한 양팔 로봇의 운동 계획

Motion Planning of Bimanual Robot Using Bimanual Task Compatibility

황 면 중, 정 성 업, 이 두 용*

(Myun Joong Hwang, Seong Youb Chung, and Doo Yong Lee)

Abstract : A cost-function based on manipulability and compatibility is designed to determine assembly motions of two cooperating manipulators. Assembly motions are planned along the direction maximizing performance indices to improve control performance of the two manipulators. This paper proposes bimanual task compatibility by defining cost functions. The proposed cost functions are applied and compared to the bimanual assembly task. The problem is formulated as a constrained optimization considering assembly constraints, position of the workpieces, and kinematics and redundancy of the bimanual robot. The proposed approach is evaluated with simulation of a peg-in-hole assembly with an L-shaped peg and two 3-dof manipulators.

Keywords : bimanual robot, robotic assembly, motion planning, task compatibility

I. 서론

양팔 로봇은 복잡한 조립 작업을 수행하기 위해 사람과 같은 정도의 유연성을 가지고 있지만, 양팔의 여유 자유도로 인하여 운동 계획이 어려운 시스템이다[1]. 양팔 로봇을 이용한 조립 작업에 관한 연구로 기계적인 임피던스(impedance) 또는 힘 제어 구조를 이용한 단순한 삽입 작업에 대해 보고된 적은 있으나[2,3], 일반적인 조립 작업을 수행하기 위한 방법은 아직까지 보고되고 있지 않다. 양팔 로봇은 여유 자유도를 이용할 경우, 조립 작업 시 필요한 운동을 효과적으로 생성할 수 있다.

로봇의 효율을 측정할 수 있는 지표에 관한 연구는 Yoshikawa에 의해 최초로 개발 되었다. Yoshikawa [4]는 로봇 팔 움직임의 효율을 측정할 수 있는 조작성(manipulability)을 제안하였다. 조인트 공간 상의 단위 원(unit circle)은 자코비안 변환을 통해 작업 공간 상의 조작성 타원(manipulability ellipsoid)으로 사상(mapping)될 수 있다. 속도와 힘 조작성 타원은 작업 공간 상에서 이동 가능한 운동 및 달성 가능한 힘을 의미한다. 일반적으로, 속도와 힘은 타원의 단축 방향으로 매우 정교하게 제어될 수 있다. 반대로 타원의 장축 방향으로 큰 속도와 힘을 생성할 수 있다. 조작성 타원의 장축 및 단축의 길이는 로봇 팔의 관절(joint) 각도를 변화시키면 바꿀 수 있다. 따라서, 로봇 팔의 속도와 힘 타원의 주축 방향을 조정하여 작업 방향과 일치시킬 경우, 조립 작업에 사용되는 하이브리드 위치 힘 제어(hybrid position-force control)의 성능을 높일 수 있다. Lee [5]는 단일 로봇의 조작성 타원의 교차를 연구하여 조작성을 양팔 로봇에 적용할 수 있도록 확장하였으며, Bouffard-Vercelli 등 [6]은 힘 조작성 개념을 양

팔 로봇에 적용하였다. Chiu [7]는 속도 및 힘 조작성을 이용하여, 실제 로봇의 운동 방향과 최적 운동 방향의 일치하는 정도를 측정할 수 있는 작업 적합성(task compatibility) 지수를 개발하였다. 또한, Chiu는 작업 적합성 지수가 높을 경우 로봇 팔의 힘과 운동을 동시에 전달 하는데 있어 유리한 장점이 있다는 것을 증명하였다. 그러나, 한 팔 로봇에 대하여 작업 적합성을 정의하여 사용하였기 때문에, 양팔 로봇에 적용하기 위해서는 작업 적합성의 재정의가 필요하다.

작업 적합성의 목적은 로봇의 속도 및 힘 제어 성능을 향상시키는 것에 있으므로, 양팔 로봇의 작업 적합성 역시 양팔의 속도 및 힘 제어 성능을 측정할 수 있는 지수로 표현되어야 한다. 양팔 로봇의 경우작업 적합성은 각 로봇이 위치 제어 또는 힘 제어가 가능하다는 가정하에 속도 전달 비율과 힘 전달 비율의 조합으로 정의할 수 있다. 예를 들어, 로봇 1은 힘 전달 비율, TRf1에 초점을 맞추고 로봇 2는 속도 전달 비율, TRv2을 중요하게 생각하여 작업 적합성을 (1) 또는 (2)와 같이 정의할 수 있을 것이다.

$$\text{bimanual task compatibility} = \text{TRf1} * \text{TRv1} \quad (1)$$

$$\text{bimanual task compatibility} = \text{TRf1} + \text{TRv1} \quad (2)$$

본 논문의 목적은 양팔 로봇 작업에 있어 제어 성능을 향상시킬 수 있는 bimanual task compatibility 개념을 (1), (2)와 같이 속도 전달 비율 및 힘 전달 비율의 조합으로 정의하고 조립 상황에 따라 다양한 조합으로 정의된 가치 함수가 로봇에 어떤 영향을 미치는가 시뮬레이션을 통해 살펴보고, 최적의 양팔 로봇 작업 적합도를 정의하는 데 있다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 작업 적합성에 기반한 운동 계획법에 대해 설명하고 작업 적합성을 고려하지 않았을 경우에 발생할 수 있는 문제점을 보인다. 3장에서는 양팔의 작업 적합성을 정의한 후 4장에서의 시뮬레이션을 통해 양팔의 작업 적합성을 이용한 로봇 운동 계획을 검증한다. 5장에는 본 논문의 결론과 추후 필요한 연구에 대해 기술한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 2. 17., 채택확정 : 2008. 4. 17.

황면중, 이두용 : 한국과학기술원 기계공학전공

(hwangmj@kaist.ac.kr/lee.dooyong@kaist.ac.kr)

정성업 : 충주대학교 기계공학과(sychung@cju.ac.kr)

※ 본 연구는 교육부의 2008년도 BK21 사업 연구의 일환으로 수행되었음.

II. 작업 적합성(task-compatibility)에 기반한 운동 계획

작업 적합성은 속도 조작성 타원과 힘 조작성 타원으로 표현할 수 있다. 작업 적합성 지수 값이 큰 경우는 속도와 힘 방향으로 모두 정확한 제어가 가능하다는 것을 의미하며 작은 값은 큰 속도와 힘을 낼 수 있다는 것을 의미한다.

작업 적합성은 Chiu에 의해서 제안된 것으로 한 대의 로봇에 대해 힘 전달 비율(force transmission ratio)과 속도 전달 비율(velocity transmission ratio)을 정의하여 이로부터 작업 적합성 지수를 구하였다.

u_i 를 관심으로 하는 방향의 단위 벡터라 하고, TR_{f_i} 를 벡터 u_i 의 방향으로 원점으로부터 로봇 i 의 힘 타원(force ellipsoid)의 표면까지의 거리라고 하자. J_i 는 로봇 i 의 자코비안 행렬이다. 스칼라 TR_{f_i} 는 u_i 방향으로 힘 전달 비율(force transmission ratio)이다. TR_{f_i} 는 (3)과 같이 정의된다.

$$TR_{f_i} = [u_i^T (J_i J_i^T) u_i]^{-1/2} \quad (3)$$

같은 방법으로, w_i 방향으로 속도 전달 비율(velocity transmission ratio) TR_{v_i} 는 (4)와 같이 정의된다.

$$TR_{v_i} = [w_i^T (J_i J_i^T)^{-1} w_i]^{-1/2} \quad (4)$$

기존 Chiu 논문에서는 로봇 i 의 작업 적합성 지수 c_i 는 힘 전달 비율과 속도 전달 비율 곱의 역수로 정의한다. 로봇 i 의 성능 지수 p_i 는 (5)에서와 같이 작업 적합성 지수의 제곱으로 정의한다. u_i 는 힘 제어 방향의 단위 벡터이고 w_i 는 속도 제어 방향의 단위 벡터이다.

$$p_i = c_i^2 = (TR_{f_i} \cdot TR_{v_i})^{-2} = [u_i^T (J_i J_i^T) u_i][w_i^T (J_i J_i^T)^{-1} w_i] \quad (5)$$

따라서, 로봇의 성능 지수를 최대화하면 힘 전달 비율과 속도 전달 비율을 최소화 함으로써 힘 제어 방향과 속도 제어 방향으로의 제어 정확성을 높일 수 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 두 대의 로봇 팔의 운동 방향을 구하기 위해서 작업 적합성 지수를 사용한다. 하이브리드 위치 힘 제어 구조에서는 로봇의 운동이 두 로봇 팔의 작업 적합성 지수를 최대로 하는 방향으로 이루어져야 한다.

$L_{C,i}$ 를 지역 좌표계 $\{i\}$ 에서 표현한 접촉 점의 위치라 하자. 전체 좌표계 $\{G\}$ 에서 표현한 접촉 점의 좌표 ${}^G P_{C,i}$ 은 (6)과 같이 표현된다. 이때 ${}^G P_i$ 와 ${}^G R_i$ 는 각각 전체 좌표계에 대한 지역 좌표계의 원점의 위치와 회전 행렬이다. 접촉 점의 속도 ${}^G \dot{P}_{C,i}$ 는 (6)을 미분함으로써 (7)과 같이 얻어지게 된다. 이 때, ${}^G \omega_i$ 는 전체 좌표계에 대한 지역 좌표계의 각속도이다. ${}^G \omega_i$ 는 회전각 $(\dot{\alpha}_i, \dot{\beta}_i, \dot{\gamma}_i)^T$ 을 이용하여 (8)와 같이 표현된다.

$${}^G P_{C,i} = {}^G P_i + {}^G R_i L_{C,i} \quad (6)$$

$${}^G \dot{P}_{C,i} = {}^G \dot{P}_i + {}^G \omega_i \times ({}^G R_i L_{C,i}) \quad (7)$$

$${}^G \omega_i = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ 1 & 0 & -\sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_i \\ \dot{\beta}_i \\ \dot{\gamma}_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

그래서, 속도 제어 방향의 단위 벡터 w_i 는 벡터 ${}^G \dot{P}_{C,i}$ 를 정규화 시킴으로써 구할 수 있고, 힘 제어 방향의 단위 벡터 u_i 는 w_i 의 수직 방향으로 결정한다.

X_i 를 (9)와 같이 부품 i 의 위치 벡터로 정의하고 행렬 L_i 를 (10)에서와 같이 두 로봇 팔의 물리적인 움직임의 한계를 포함하기 위해 정의한다.

$$X_i = [x_i \ y_i \ z_i \ \alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i]^T \quad (9)$$

$$\dot{X}_i^T L_i \dot{X}_i = 1 \quad (10)$$

예를 들면, 부품 i 를 잡고 있는 로봇 i 의 속도는 로봇 팔의 최대 속도인 s_i 에 의해서 제한된다. 따라서, 제한 행렬 L_i 는 (11)과 같이 정의된다. $l_{i,x}$, $l_{i,y}$, $l_{i,z}$ 는 각각 부품 i 의 원점으로부터 접촉점까지의 x, y, z 방향으로의 거리이다.

$$L_i = \begin{bmatrix} 1/s_i^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/s_i^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/s_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{i,x}^2/s_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_{i,y}^2/s_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{i,z}^2/s_i^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

접촉 상태는 두 말단 장치가 서로 상대 운동을 할 경우에만 변화한다. 따라서, 상대 운동에 대한 조건 식은 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$|\dot{x}_1 - \dot{x}_2| + |\dot{y}_1 - \dot{y}_2| + |\dot{z}_1 - \dot{z}_2| > 0 \quad (12)$$

로봇 팔의 각 관절은 기계적인 제한 때문에 물리적인 한계를 가지고 있다. 따라서, 관절 각도는 각 관절 각도의 최대값과 최소값을 벗어나지 않아야 한다. $\bar{\theta}_i$ 는 (13)과 같이 i 번째 n 자유도 로봇 팔의 관절 각도를 의미한다. 관절 속도는 (14)에서와 같이 자코비안 행렬을 이용하여 계산한다. 만약 여유 자유도를 가진 로봇 팔을 이용할 경우, $\bar{\theta}_i$ 는 (15)에서와 같이 자코비안 행렬의 유사 역행렬(pseudo-inverse)로부터 구한다. 만약 시간 단위가 Δt 일 경우 Δt 이후의 관절 각도는 최대값과 최소값 범위 이내의 값을 가져야 한다. (16)과 같은 관절 각도의 한계에 대한 부등식 조건이 운동 계획 과정에 포함된다.

$$\bar{\theta}_i = [\theta_1 \ \dots \ \theta_n]^T \quad (13)$$

$$\dot{\bar{\theta}}_i = J_i^{-1} \dot{X}_i \text{ for non-redundant robot} \quad (14)$$

$$\dot{\bar{\theta}}_i = J_i^T (J_i J_i^T)^{-1} \dot{X}_i \text{ for redundant robot} \quad (15)$$

$$\bar{\theta}_{i,\min} < \bar{\theta}_i + J_i^{-1} \dot{X}_i \cdot \Delta t < \bar{\theta}_{i,\max} \quad (16)$$

운동 계획법은 (17)과 같이 양팔 로봇 조립 작업의 작업

적합성을 나타낼 수 있는 가치 함수 C 를 포함한 최적화 과정으로 표현된다. 양팔 로봇 작업에 있어서 각 로봇의 힘 전달 비율과 속도 전달 비율을 적절히 고려한 가치 함수를 설계해야 한다. 이 문제의 해는 sequential quadratic programming (SQP) 방법을 이용하여 구한다[8].

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} \\
 & \quad C, \\
 & \text{subject to} \\
 & \quad \dot{X}_i^T L_i \dot{X}_i = 1, \\
 & \quad |\dot{x}_1 - \dot{x}_2| + |\dot{y}_1 - \dot{y}_2| + |\dot{z}_1 - \dot{z}_2| > 0, \\
 & \quad \bar{\theta}_{i,\min} < \bar{\theta}_i + J_i^{-1} \dot{X}_i \cdot \Delta t < \bar{\theta}_{i,\max} \quad \text{for } i=1,2, \\
 & \quad A_j(X) \dot{X} = 0 \quad \text{for each primitive contact } j \text{ to be maintained,} \\
 & \quad A_j(X) \dot{X} \geq 0 \quad \text{for each primitive contact } j \text{ to be avoided.} \\
 & \quad A_j(X) \dot{X} > 0 \quad \text{for each primitive contact } j \text{ to be acquired.}
 \end{aligned} \tag{17}$$

우선 로봇을 고려하지 않은 가치 함수에 대해서 작업 적합성의 변화를 살펴보기 위하여, L 형태의 팩인홀 작업에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우 제한 조건을 고르게 만족하는 것을 최적 운동이라 가정하고 가치 함수로 [9]에서 제안한 (18)을 이용하였다.

$$C_1 = \frac{1}{2} \sum_i^N \sum_j^N (A_i(X) \dot{X} - A_j(X) \dot{X})^2 \tag{18}$$

그림 1은 시뮬레이션 대상 로봇 작업이고 표 1은 3자유도 로봇 팔의 링크 길이를 나타내고 있다. 두 로봇은 400 mm 떨어져 고정되어 있다. 로봇 1이 팩을 이동하며, 로봇 2가 홀을 이동하여 조립한다. 시뮬레이션 결과에서는 부품의 움직임을 만족하는 로봇의 자세가 고려되어 있지 않기 때문에, 로봇의 적합도 측면에서 낮은 값을 갖는 자세가 발생할 수 있다. 그림 2의 네 가지의 로봇 위치에 대해 조립 작업을 수행하였을 때 표 2는 초기 상태와 최종 상태의 각 로봇의 힘 전달 비율과 속도 전달 비율을 나타낸 것이다. 각 경우에 대해 비교해 보았을 때 작업이 수행되는 동안 힘 전달 비율과 속도 전달 비율이 증가함으로써 제어 성능 관점에서 나빠지는 것을 알

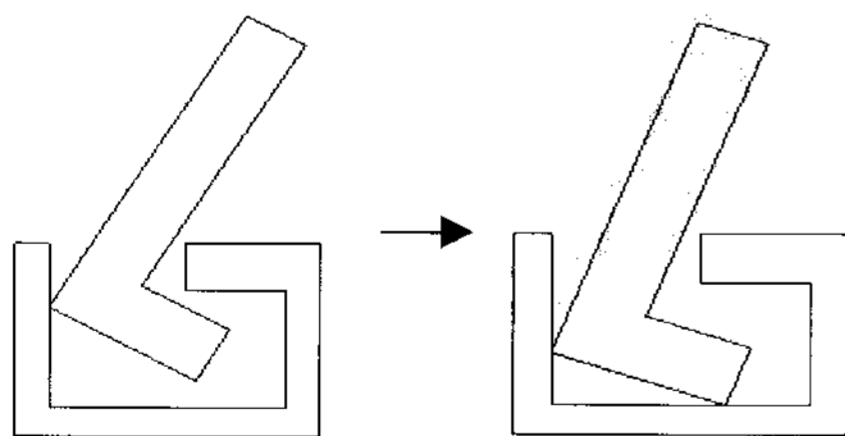


그림 1. 조립 상태 변화 예제.
Fig. 1. An example state transition.

표 1. 두 로봇 팔의 링크 길이.
Table 1. Link lengths of two manipulators (mm).

	Link 1	Link 2	Link 3
Robot 1	200	150	58
Robot 2	200	150	30

수 있다. 그림 3은 초기 위치 case 2에 대한 조립 작업을 수행하는 동안 로봇의 운동을 연속적으로 나타낸 것이다.

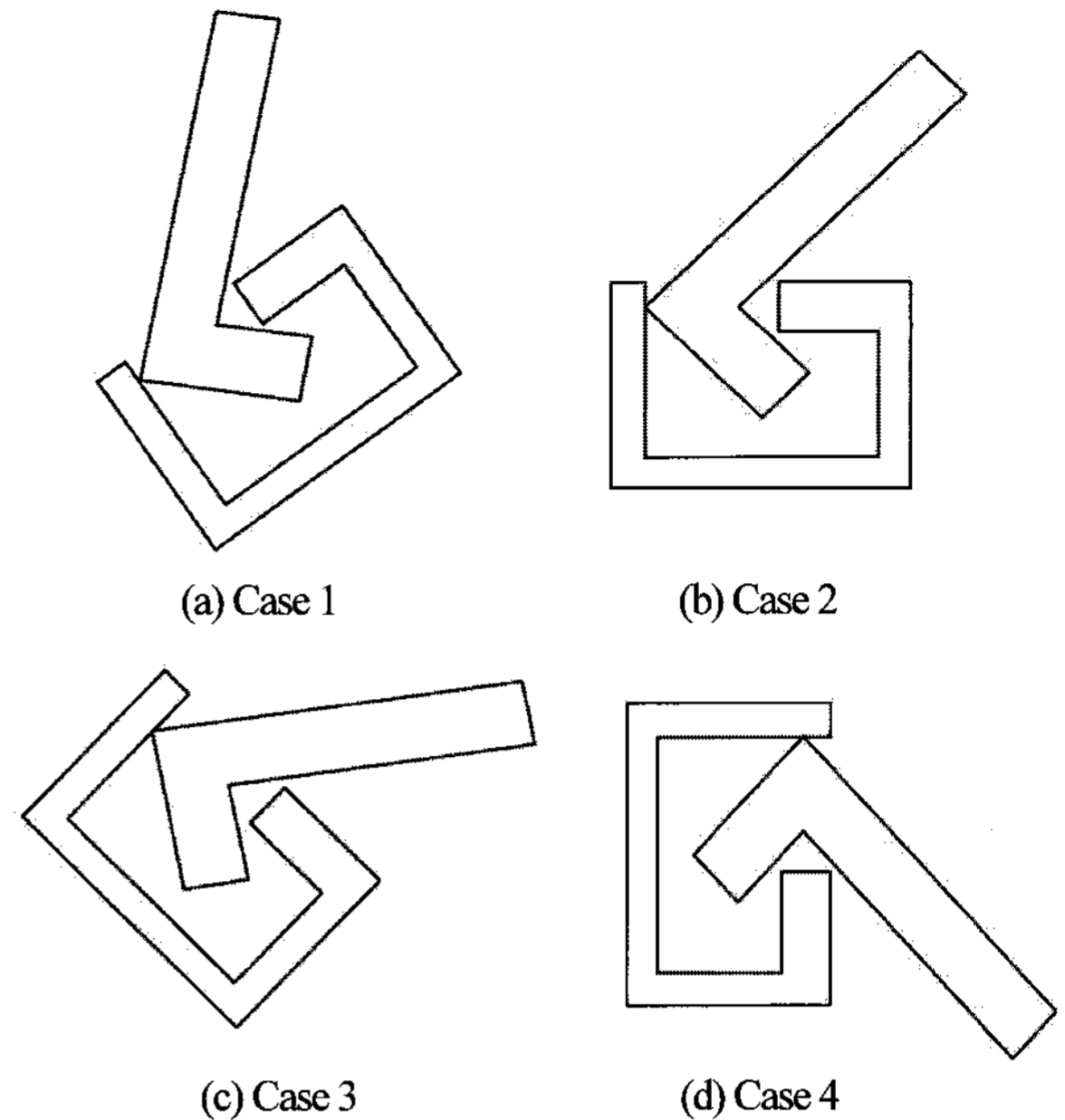


그림 2. 조립 초기 상태.
Fig. 2. Initial pose.

표 2. 작업 적합도를 고려하지 않았을 경우 전달 비율의 변화.

Table 2. Change of transmission ratios without considering task compatibility.

		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}
Case 1	Initial	0.6613	0.5015	0.7057	0.5881
	Final	2.0716	1.2375	0.8195	0.6508
Case 2	Initial	0.5964	0.5757	0.6029	0.5375
	Final	0.8843	0.9592	1.7895	1.4989
Case 3	Initial	0.6936	0.6912	0.7708	0.6744
	Final	0.9809	0.9146	0.7328	0.5571
Case 4	Initial	0.7260	0.6025	0.8776	0.6810
	Final	1.3414	1.2897	1.3782	0.9779

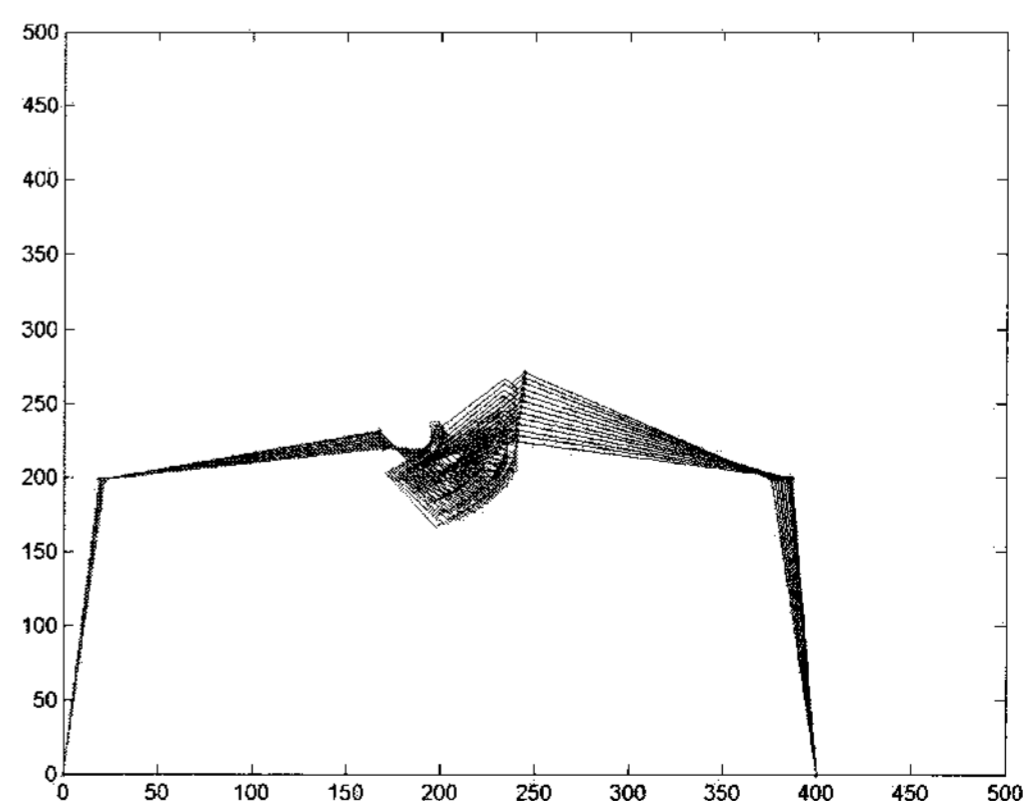


그림 3. 로봇의 조립 작업.
Fig. 3. Assembly task of bimanual robot.

III. 양팔의 작업 적합도(bimanual task compatibility)

앞 장에서 언급하였듯이 양팔 작업에 맞는 가치 함수를 설계하는 것이 필요하다. 각 로봇의 힘 전달 비율과 속도 전달 비율을 적절히 조합함으로써 각 로봇의 성능 지수를 다양하게 설계할 수 있다. 또한 두 대의 로봇의 성능 지수를 동시에 고려한 가치 함수를 설계하기 위해서 각 로봇의 성능 지수를 합하거나 곱하는 등의 조합이 가능하다. 본 논문에서는 양팔 로봇에 있어 가능한 성능 지수들의 조합을 고려한 후 결과를 비교 분석하도록 한다.

이렇게 하여 설계된 성능 지수들이 표 3에 나타나 있다. 각 로봇에 대해 모두 9가지의 성능지수 조합을 생각할 수 있으며 각각에 대해 곱하는 경우와 합하는 경우로 나누어 총 18가지 형태의 양팔 작업 성능 지수를 고안할 수 있다. 제안된 양팔 작업 적합도는 양팔의 속도 및 힘 제어 성능을 측정할 수 있는 지수로서 각 로봇의 위치 제어 또는 힘 제어 성능을 표현할 수 있는 속도 전달 비율과 힘 전달 비율의 다양한 조합으로 정의한다. 첫 번째 열의 $TR_{v1} \times TR_{v2}$ 는 각 로봇의 위치 제어 성능을 고려 하기 위해서 속도 전달 비율의 곱으로 나타낸 양팔 작업 적합도이다. 즉, 두 로봇 모두 위치 제어를 통해 운동 하는 상황을 나타낸 것이다. 네 번째 열의 $TR_{f1} \times TR_{f2}$ 는 두 로봇 힘 제어 되는 상황을 표현한 것이며, $TR_{v1} \times TR_{f1} \times TR_{v2}$ 는 하나의 로봇은 하이브리드 위치 힘 제어, 다른 로봇은 위치 제어를 통해 양팔이 작업을 수행하는 상황이다.

IV. 시뮬레이션

앞선 예제와 동일한 그림 1의 로봇 작업에 대해서 표 1의 3자유도 로봇을 이용하여 조립 작업을 시뮬레이션 하였다. 이 때, 초기 자세에 대한 영향을 비교하기 위해서 그림 2와 같이 네 가지 다른 초기 자세에 대해 각각 시뮬레이션 하였다.

표 3에서 정의된 각각의 함수에 대해서 그림 2의 네 가지 초기 자세를 고려하여 시뮬레이션 한 후 전달 비율의 변화를 나타내었다. C1부터 C9에 대해 각각 표 4부터 표 12까지 결

과를 작성하였다.

각각의 초기 자세에 따른 전달 비율 값의 변화를 정리하였다. 자세 1 부터 자세 4 까지의 결과는 각각 표 4부터 표 7에 정리하였다. 표에서 전달 비율의 값이 초기 보다 커지는 경우에 칸을 회색으로 마킹하였다.

시뮬레이션 결과 두 로봇의 전달 비율이 모두 나빠지는 경우는 발생하지 않았다. 양팔 작업 적합도의 고려 없이 조립 작업을 수행했던 표 2의 결과와는 달리 전달 비율이 모두 나빠지지 않음으로써 제어 성능을 나쁘게 하는 방향으로 로봇 작업이 수행되지는 않는 것을 알 수 있다. Case 4에서 C1 가치 함수를 적용한 때와 같이 4개의 전달 비율이 모두 좋아지는 경우도 있었지만 C2를 적용한 경우처럼 일부만 좋아지고 일부 전달 비율은 나빠지는 결과를 나타내는 조합도 있었다. 이것은 초기 자세에서의 전달 비율이 좋은 값이었기 때문에 해당하는 전달 비율은 운동이 진행되면서 초기값보다는 좋지 않은 값이 됨을 알 수 있다. 전체적으로는 전달 비율이 좋은 로봇이 나쁜 로봇에게 자세를 양보함으로써 두 로봇이 고르게 전달 비율을 만족시키려는 경향을 나타내고 있다.

표 3. 양팔 작업 적합도.

Table 3. Bimanual task compatibility.

	곱에 의한 정의	합에 의한 정의
1	$TR_{v1} \times TR_{v2}$	$TR_{v1} + TR_{v2}$
2	$TR_{v1} \times TR_{f2}$	$TR_{v1} + TR_{f2}$
3	$TR_{f1} \times TR_{v2}$	$TR_{f1} + TR_{v2}$
4	$TR_{f1} \times TR_{f2}$	$TR_{f1} + TR_{f2}$
5	$TR_{v1} \times TR_{f1} \times TR_{v2}$	$TR_{v1} \times TR_{f1} + TR_{v2}$
6	$TR_{v1} \times TR_{f1} \times TR_{f2}$	$TR_{v1} \times TR_{f1} + TR_{f2}$
7	$TR_{v1} \times TR_{v2} \times TR_{f2}$	$TR_{v1} + TR_{v2} \times TR_{f2}$
8	$TR_{f1} \times TR_{v2} \times TR_{f2}$	$TR_{f1} + TR_{v2} \times TR_{f2}$
9	$TR_{v1} \times TR_{f1} \times TR_{v2} \times TR_{f2}$	$TR_{v1} \times TR_{f1} + TR_{v2} \times TR_{f2}$

표 4. Case 1 일 경우 가치 함수에 따른 변화.

Table 4. Change of transmission ratio according to cost functions when Case 1 is applied.

합					곱					
		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}
	Initial	0.6613	0.5015	0.7057	0.5881		0.6613	0.5015	0.7057	0.5881
C1-P		0.7287	0.5379	0.6518	0.5658	C1-M	0.7214	0.5611	0.6687	0.5849
C2-P		0.7262	0.5409	0.6574	0.5716	C2-M	0.7244	0.5557	0.6640	0.5806
C3-P		0.7326	0.5258	0.6462	0.5602	C3-M	0.7085	0.6304	0.7018	0.6287
C4-P		0.7248	0.5507	0.6679	0.5778	C4-M	0.7260	0.5698	0.6671	0.5870
C5-P		0.7041	0.6054	0.7134	0.6307	C5-M	0.7202	0.5582	0.6690	0.5840
C6-P		0.7014	0.6224	0.7099	0.6291	C6-M	0.7226	0.5447	0.6620	0.5755
C7-P		0.7251	0.5589	0.6623	0.5794	C7-M	0.7304	0.5240	0.6477	0.5605
C8-P		0.7233	0.5668	0.6689	0.5865	C8-M	0.7198	0.5789	0.6745	0.5934
C9-P		0.7122	0.6010	0.6917	0.6117	C9-M	0.7168	0.5849	0.6811	0.6004

표 5. Case2 일 경우 가치 함수에 따른 변화.

Table 5. Change of transmission ratio according to cost functions when Case 2 is applied.

합						곱				
		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}
	Initial	0.5964	0.5757	0.6029	0.5375		0.5964	0.5757	0.6029	0.5375
C1-P		0.6132	0.6333	0.5889	0.4860	C1-M	0.6138	0.6331	0.5885	0.4847
C2-P		0.6129	0.6333	0.5890	0.4865	C2-M	0.6377	0.4121	0.5207	0.3453
C3-P		0.6376	0.3966	0.5184	0.3416	C3-M	0.6142	0.6323	0.5881	0.4840
C4-P		0.6226	0.6215	0.5804	0.4676	C4-M	0.6133	0.6300	0.5887	0.4890
C5-P		0.6147	0.6425	0.5862	0.4686	C5-M	0.6165	0.6370	0.5857	0.4721
C6-P		0.6393	0.5372	0.5443	0.3879	C6-M	0.6135	0.6442	0.5864	0.4708
C7-P		0.6418	0.5036	0.5344	0.3642	C7-M	0.6168	0.6355	0.5854	0.4729
C8-P		0.6160	0.6306	0.5862	0.4801	C8-M	0.6139	0.6386	0.5873	0.4768
C9-P		0.7478	0.5735	0.7973	0.5540	C9-M	0.6554	0.5864	0.9625	0.6906

표 6. Case3 일 경우 가치 함수에 따른 변화.

Table 6. Change of transmission ratio according to cost functions when Case 3 is applied.

합						곱				
		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}
	Initial	0.6936	0.6912	0.7708	0.6744		0.6936	0.6912	0.7708	0.6744
C1-P		0.6327	0.6711	0.9080	0.7122	C1-M	0.7352	0.7053	0.7177	0.6256
C2-P		0.6345	0.6721	0.9043	0.7116	C2-M	0.7360	0.7053	0.7155	0.6248
C3-P		0.6332	0.6718	0.9093	0.7116	C3-M	0.7355	0.7054	0.7167	0.6250
C4-P		0.7282	0.7044	0.7291	0.6342	C4-M	0.6350	0.6727	0.9047	0.7111
C5-P		0.6399	0.6759	0.8960	0.7082	C5-M	0.6301	0.6701	0.9171	0.7120
C6-P		0.7258	0.7043	0.7338	0.6358	C6-M	0.6350	0.6727	0.9047	0.7111
C7-P		0.7437	0.7072	0.7081	0.6090	C7-M	0.7393	0.7062	0.7127	0.6184
C8-P		0.6346	0.6722	0.9044	0.7115	C8-M	0.7387	0.7062	0.7143	0.6193
C9-P		0.6343	0.6719	0.9041	0.7117	C9-M	0.7294	0.7048	0.7270	0.6309

표 7. Case4 일 경우 가치 함수에 따른 변화.

Table 7. Change of transmission ratio according to cost functions when Case 4 is applied.

합						곱				
		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}		TR_{f1}	TR_{v1}	TR_{f2}	TR_{v2}
	Initial	0.7260	0.6025	0.8776	0.6810		0.7260	0.6025	0.8776	0.6810
C1-P		0.7090	0.5720	0.8351	0.5785	C1-M	0.7140	0.5633	0.8240	0.5642
C2-P		0.7351	0.5874	0.8162	0.5824	C2-M	0.7226	0.5637	0.8160	0.5602
C3-P		0.5994	0.5521	1.0895	0.7188	C3-M	0.6501	0.5716	0.9437	0.6516
C4-P		0.7498	0.5736	0.7959	0.5535	C4-M	0.7202	0.5703	0.8215	0.5683
C5-P		0.7013	0.5705	0.8439	0.5854	C5-M	0.7006	0.5570	0.8355	0.5669
C6-P		0.7070	0.5681	0.8348	0.5749	C6-M	0.7403	0.5725	0.8034	0.5573
C7-P		0.7009	0.5611	0.8370	0.5714	C7-M	0.6949	0.5602	0.8407	0.5733
C8-P		0.7307	0.5687	0.8092	0.5582	C8-M	0.6464	0.5697	0.9501	0.6541
C9-P		0.7478	0.5735	0.7973	0.5540	C9-M	0.6554	0.5864	0.9625	0.6906

표 4에서 표 7까지의 결과를 볼 때 각 로봇의 성능 지수를 더하거나 또는 곱하여 가치 함수를 정의하는 것은 큰 차이를 나타내지는 못했다.

양팔 작업 적합도를 고려하지 않은 결과와 비교하기 위해 각 초기 위치에 따른 전달 비율의 값을 그림 4 부터 그림7까지 나타내었다. 각각 그림은 로봇 1의 힘 전달 비율, 로봇 1의 속도 전달 비율, 로봇 2의 힘 전달 비율, 그리고 로봇 2의 속도 전달 비율의 값을 나타낸 그래프이며 x 축은 초기 위치, y 축은 각 가치 함수들의 결과 전달 비율을 나타낸 것이다. 'o' 으로 나타낸 결과가 양팔 작업 적합도를 고려하지 않은 조립 작업의 로봇 운동에 대한 결과 값이다. 그래프에서 보듯이 제안된 방법을 이용한 결과 대부분 각 로봇의 전달 비율이 낮아진 결과를 나타내고 Case 3의 로봇 2 같은 경우는 로봇을 고려하지 않은 경우와 크게 다르지 않거나 더 나쁜 결과를 보여주기도 한다. 초기 자세에 의해 좋은 전달 비율을 나타내는 경우 이러한 결과도 보일 수 있지만 대부분의 경우 제안된 방법을 고려하지 않을 경우 전달 비율이 증가하는 것을 알 수 있다.

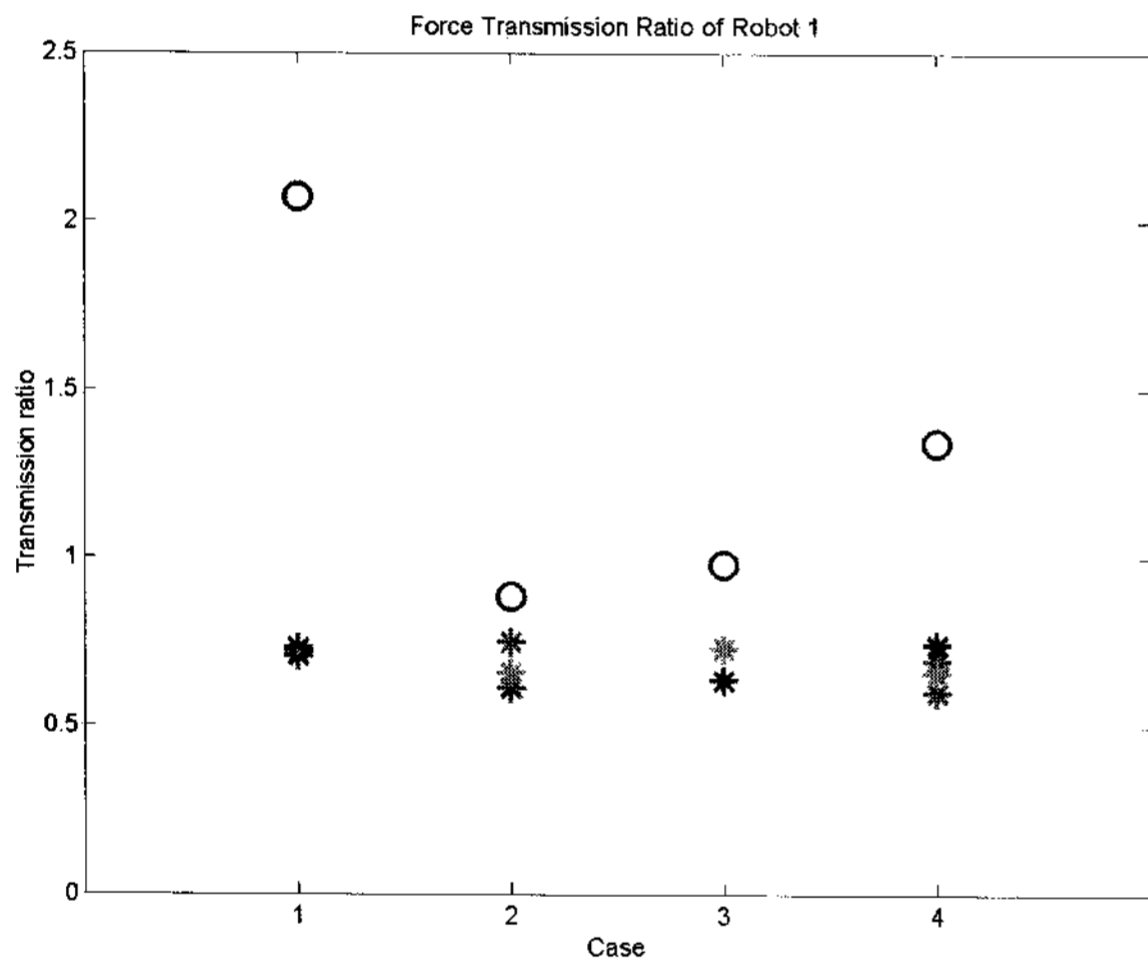


그림 4. 로봇 1의 힘 전달 비율 변화.
Fig. 4. Force transmission ratio of robot 1.

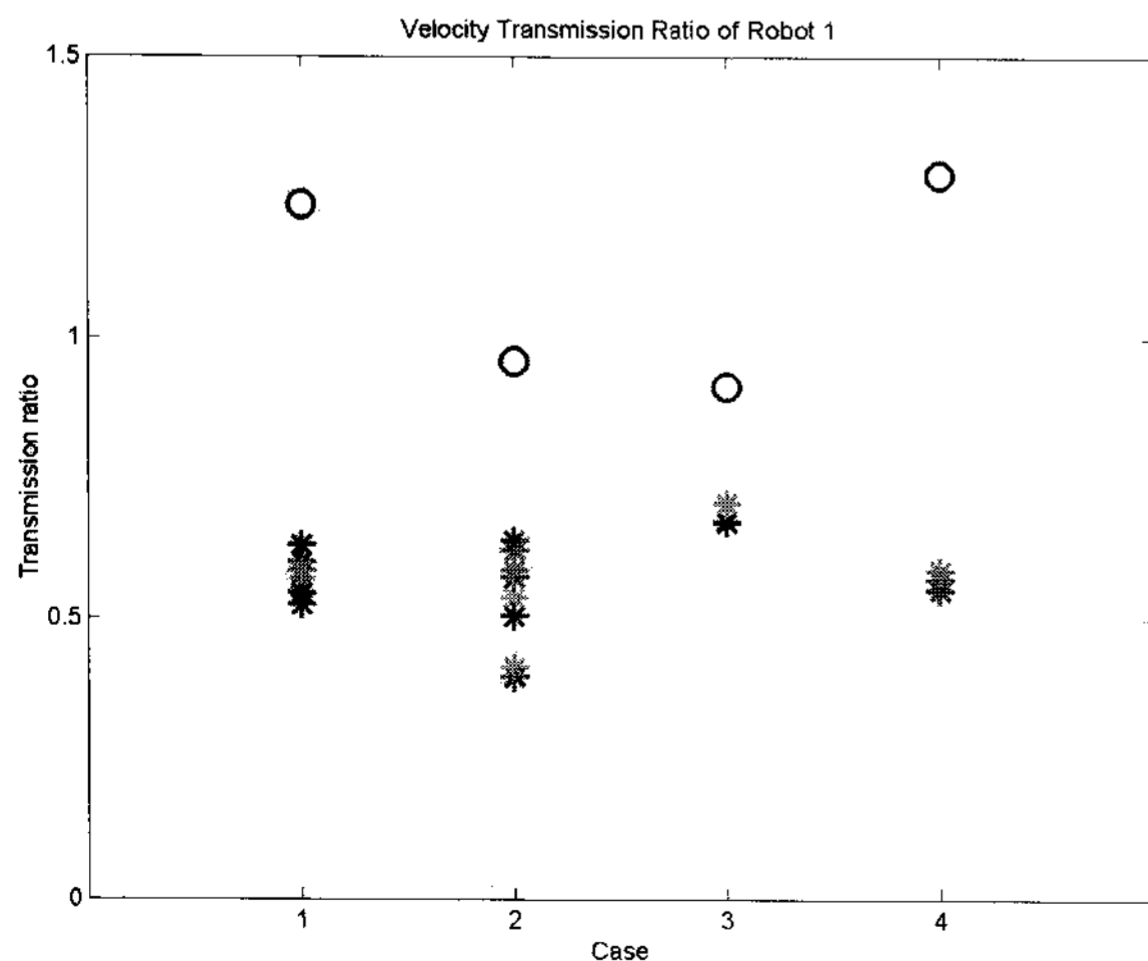


그림 5. 로봇 1의 속도 전달 비율 변화.
Fig. 5. Velocity transmission ratio of robot 1.

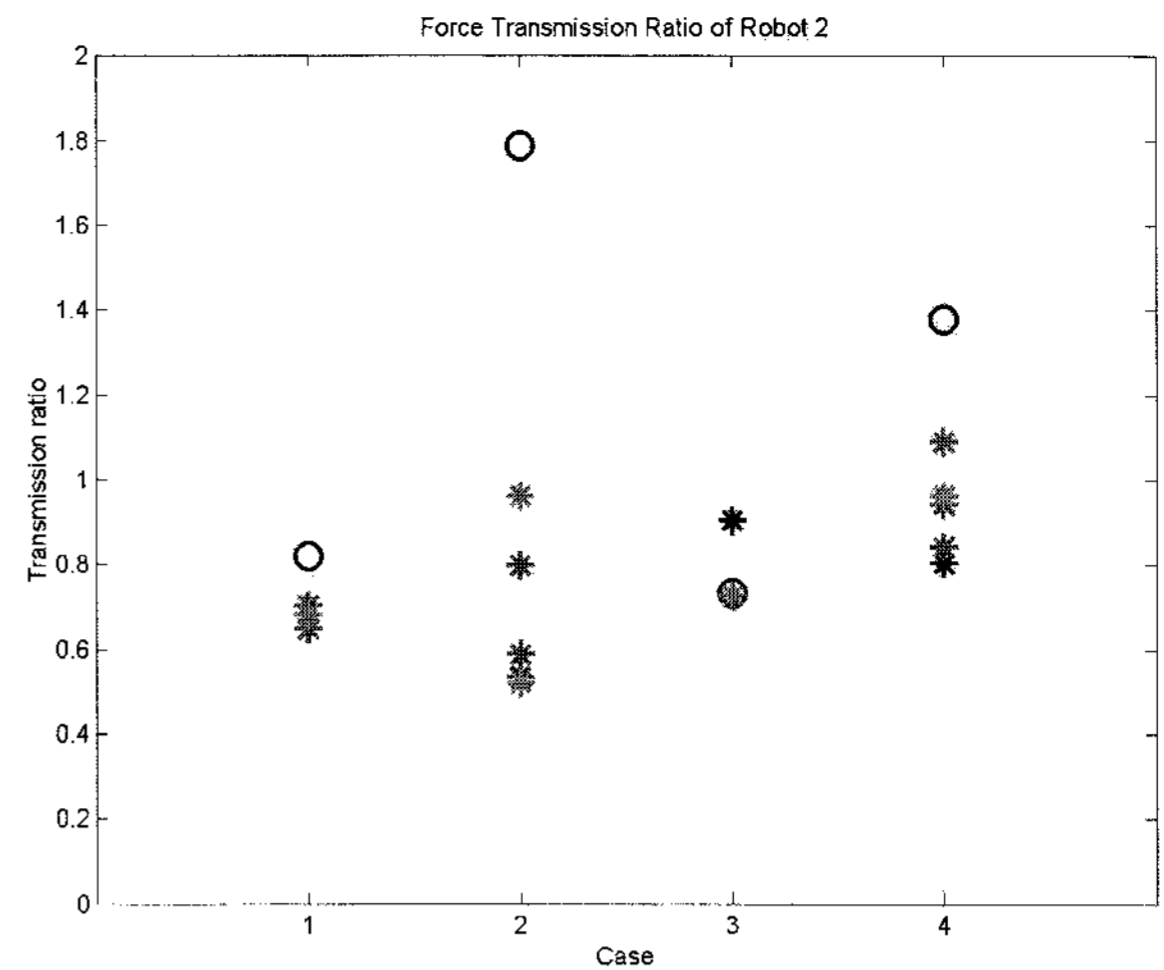


그림 6. 로봇 2의 힘 전달 비율 변화.
Fig. 6. Force transmission ratio of robot 2.

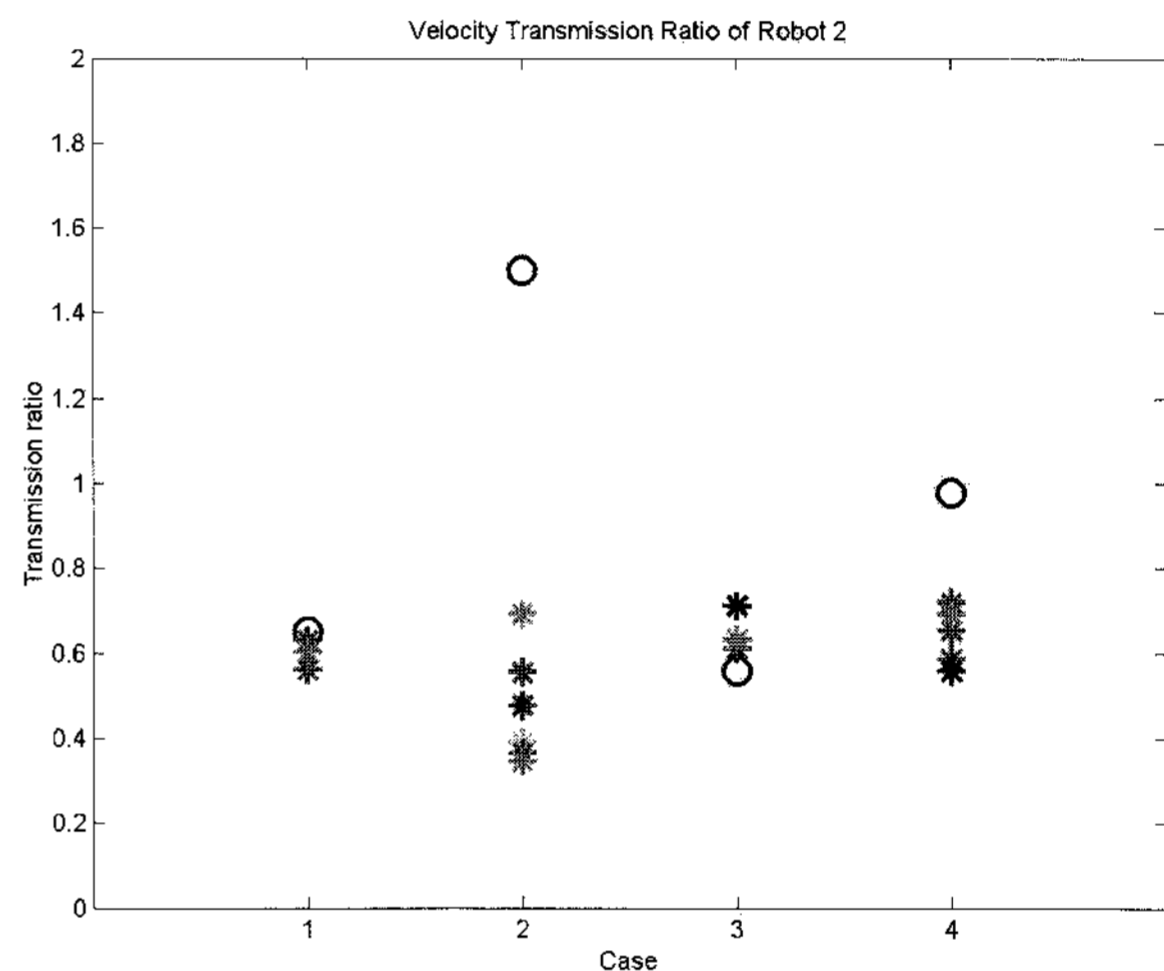


그림 7. 로봇 2의 속도 전달 비율 변화.
Fig. 7. Velocity transmission ratio of robot 2.

V. 결론

본 논문에서는 작업 적합성을 고려한 로봇 작업의 운동 계획에 있어서 양팔 작업 적합도 개념을 제안하였다. 각 로봇의 힘 전달 비율과 속도 전달 비율의 다양한 조합을 설계하여 가치 함수를 정의하였다. 4가지의 다른 초기 자세에 대해 각각의 가치 함수를 적용하여 조립 작업을 수행하였다. 그 결과 모든 전달 비율이 나빠졌던 기존의 운동 계획법과는 달리 모든 전달 비율 또는 일부 전달 비율의 값이 좋아지는 것을 확인하였다.

제안된 개념을 이용한 조립 작업은 두 로봇 팔의 제어 성능이 고루 향상되도록 초기 상태에 좋은 전달 비율을 나타내고 있던 로봇이 전달 비율이 나쁜 로봇의 자세를 보상해 주는 방향으로 운동이 일어나는 것을 확인하였다.

양팔 작업 적합도를 고려하지 않았을 경우 양팔 로봇 작업의 제어 성능이 나빠질 수 있다는 것을 확인한 후 모든 가능한 경우를 고려하여 양팔 작업 적합도를 고안하였다. 초기 자세에 대한 영향 확인을 위해 4가지 다른 초기 위치에 대한 조립 작업을 수행하여 비교하였다. 양팔 로봇이 L 형태의 부

품을 조립하는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법을 검증하였다.

추후에는 부품 및 로봇 자세, 대상 작업에 따라 어떤 형태의 조합이 적절한가에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

참고문헌

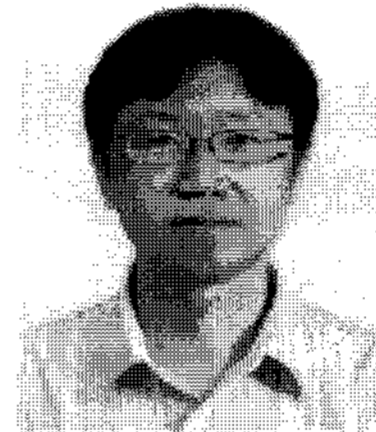
- [1] S. B. Moon and S. Ahmad, "Time-optimal trajectories for cooperative multi-manipulator systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, vol. 27, no. 2, pp. 343-353, April 1997.
- [2] F. Caccavale, C. Natale, B. Siciliano, and L. Villani, "Control of two industrial robots for parts mating," *Proc. the IEEE International Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, pp. 562-566, Sep. 1998.
- [3] S. Sakakibara, "A Two-armed intelligent robot assembles mini robots automatically," *Proc. the IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Taipei, Taiwan, Aug. 1996, pp. 1879-1883.
- [4] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy," in *Proceedings of the 1st International Symposium of Robotics Research*, Cambridge, MA, MIT Press, pp. 735-747, 1984.
- [5] S. Lee, "Dual redundant arm configuration optimization with task-oriented dual arm manipulability," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 78-97, Feb. 1989.
- [6] Y. Bouffard-Vercelli, P. Dauchez, and X. Delebarre, "Force-controlled assembly with a two-arm robot: how and where to perform it within the workspace," in *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japan, July 26-30, pp. 1977-1984, 1993.
- [7] S. Chiu, "Control of redundant manipulators for task compatibility," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, NC, USA, Mar. 31-Apr. 3, pp. 1718-1724, 1987.
- [8] A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, *Optimization Concepts and Application in Engineering*, Prentice Hall, 1999, pp. 183-188.
- [9] M. J. Hwang, S. Y. Chung, and D. Y. Lee, "Assembly approach for bimanual robots," *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1482-1487, Monterey, CA, USA, July 24-28, 2005.



황면중

2001년 KAIST 기계공학과 학사. 2003년 KAIST 기계공학과 석사. 2007년 KAIST 기계공학과 박사. 2007년 KAIST 기계기술연구소 Postdoctoral Researcher. 현재 미국 Case Western Reserve University 전자전산학과 Postdoctoral Researcher. 관심분야는 양팔 로봇 제어, 의료용 로봇.

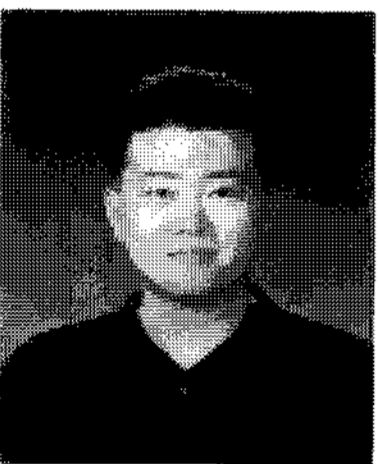
분야는 양팔 로봇 제어, 의료용 로봇.



정성엽

1994년 연세대학교 기계공학과 학사. 1996년 KAIST 정밀공학과 석사. 2005년 KAIST 기계공학과 박사. 2005년~2007년 삼성중공업 책임연구원. 2007년~현재 충주대학교 기계공학과 전임강사. 관심분야는 양팔 로봇 제어, 인공근육, 생체

모사 로봇.



이두용

1985년 서울대학교 제어계측공학과 공학사. 1987년 Rensselaer Polytechnic Institute, M.S. 1993년 동 대학교, Ph.D. 1993년~1994년 동 대학교. Postdoctoral Research Associate. 1994년~현재 한국과학기술원(KAIST) 기계항공시스템학부

교수. 관심분야는 로봇공학, 의료 시뮬레이션.