

# 조립 공정에서 양팔 로봇의 구조에 따른 작업성 평가 방법 연구

## A Study on the Performance Analysis of the Dual-arm Robot for the Assembly Task

김기훈<sup>1</sup>·박동일<sup>†</sup>·박종우<sup>2</sup>·김휘수<sup>2</sup>·조영수<sup>3</sup>·정원석<sup>4</sup>

Gi-Hoon Kim<sup>1</sup>, Dong Il Park<sup>†</sup>, Jong-Woo Park<sup>2</sup>, Hwi-Su Kim<sup>2</sup>, Youngsoo Cho<sup>3</sup>,  
Won-suk Jung<sup>4</sup>

**Abstract:** Recently, interest of a dual arm robot which can replace humans is increasing in order to improve the working environment and solve the labor shortage. Various studies related with design and analysis of dual-arm robots have been conducted because dual arm robots can have various kinematic configurations according to the objective task. It is necessary to evaluate the work performance according to various kinematic structures of the dual arm robot to maximize its effectiveness. In the paper, the performance analysis is studied according to the shoulder configuration and the wrist configuration of the dual-arm robot by using main performance indices such as manipulability, condition number, and minimum singular value by assigning proper weight values to each objective motion. Performance analysis for the robotic assembly process is effectively carried out for each representative dual arm robot configuration.

**Keywords:** Dual Arm Robot, Robotic Assembly, Manipulability Analysis, Performance Analysis, Kinematic Configuration

### 1. 서론

주어진 작업을 수행하는 로봇의 성능을 극대화시키기 위해서는 체계적인 성능 분석을 바탕으로 설계 변수에 대한 최적화와 구조 최적화가 매우 중요한 이슈이다. 따라서 다양한 조건 하에서 로봇의 성능을 측정할 수 있는 측정 기준에 대한 연구가 다수 이루어져 왔다. 대표적인 로봇의 조작성 개념은 Yoshikawa에 의해 처음 소개되었으며, 관절 속도를 엔드 이펙터 속도 공간에 매핑함으로써 조작성 타원체를 포함한 조작성

지수들을 정의하였다<sup>[1]</sup>. 이후 로봇 구성에 따른 성능을 분석하기 위한 다양한 조작성에 관한 연구가 이어졌으며<sup>[2-6]</sup>, 제안된 조작성 지수를 활용하여 최적의 궤적을 생성하는 알고리즘에 관한 연구<sup>[7]</sup>, 말단부의 대상 작업이 정해진 경우 조작성에 기반하여 로봇 링크를 재구성하는 응용 연구도 수행되었다<sup>[8]</sup>. 또한, 로봇의 기구학적 조작성 평가 및 응용 연구에 추가하여, 말단부의 속도 뿐만 아니라 동적 성능 평가를 도입하여 가속도 및 힘 능력에 대한 분석 연구로 확장하기도 하였다<sup>[9]</sup>. 로봇의 자세와 제어 파라미터를 결정하기 위한 말단부 강성 타원체에 관한 연구와 이와 연계하여 말단부의 힘/변형 거동 분석에 관한 연구도 수행된 바 있다<sup>[10,11]</sup>. 최근에는 로봇의 동적 조작성 지수에 가중치 행렬을 적용함으로써 다양한 동적 작업에 대한 로봇의 성능 분석에 관한 연구가 수행되기도 하였다<sup>[12]</sup>.

효율적인 작업을 수행하기 위해 사람과 닮은 양팔 로봇(Dual arm Robot)에 대한 연구가 증가하고 있으며<sup>[13]</sup>, 양팔 로봇의 형태에 따라 성능이 크게 달라지기 때문에 목적으로 하는 작업을 대상으로 하는 성능 평가가 필수적이다. 양팔로봇의 조작

Received : Mar. 10. 2022; Revised : Apr. 7. 2022; Accepted : Apr. 19. 2022

※ This project is currently supported by the Technology Innovation Program (No.1415169457) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea Government

1. Researcher, KIMM & CNU, Daejeon, Korea (kkidali753@naver.com)

2. Senior Researcher, KIMM, Daejeon, Korea (jekiel, hskim81@kimm.re.kr)

3. Post Doctor, KIMM, Daejeon, Korea (youngsucho@kimm.re.kr)

4. Professor, Co-Corresponding author: CNU, Daejeon, Korea (wonsuk81@cnu.ac.kr)

† Principal Researcher, Corresponding author: Dept. of Robotics and Mechatronics, KIMM, Daejeon, Korea (parkstar@kimm.re.kr)

성에 관한 기본적 이론부터<sup>[14]</sup> 각 팔의 자세에 조작성 지수 (Manipulability Index)를 계산하는 연구<sup>[15]</sup>, 여유도가 있는 매니퓰레이터의 Condition number, Determinant, 최소특이값 (Minimum Singular Value) 등 Dexterity 평가 방법에 대한 연구<sup>[16]</sup>, 조작성 지수에 여유도를 적용하여 평가하는 연구까지 다양한 분석이 이루어졌다<sup>[17]</sup>. 이외에도 공통 작업 공간, 여유자유도, 양팔 조작성 등에 대한 분석과 양팔 로봇 조작성을 기반으로 양팔 로봇의 부착 각도를 분석한 연구도 진행된 바 있다<sup>[18]</sup>.

하지만 현재까지 양팔 로봇의 어깨 구조(Shoulder Configuration), 손목 구조(Wrist Configuration) 등 전반적인 구조를 포함하여, 작업의 종류에 따라 필요한 요구조건들을 적합하게 반영한 체계적인 성능 평가를 수행하는 연구가 이루어진 바가 없다. 본 논문에서는 조작성(Manipulability), Condition Number, 최소 특이값 등 주요 성능지수를 활용하여 양팔의 각 모션에 대한 성능 수치를 도출한 후, 정규화 기법과 모션 특징별 가중치 부여 기법을 도입하여 조립 공정에 적합한 양팔 로봇의 구조를 체계적으로 분석하는 방법론을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 대표적인 7개의 축을 갖는 양팔 로봇으로 Rethink Robotics 사의 Baxter, ABB 사의 YuMi, 한국기계연구원의 Amiro2를 비교분석을 위한 예시 로봇으로 활용하였다<sup>[19-21]</sup>.

2장에서는 양팔 로봇 평가에 적용하고자 하는 작업성 평가 이론에 대해 서술하고, 3장에서는 작업성 평가 프로세스에 대한 설계와 실제 조립 공정 대상 모션 분석 등을 제시한다. 4장에서는 제시된 방법론을 적용하여 대상 모션에 대한 작업성을 평가하고, 결과와 제시된 방법론의 유효성에 대해 고찰을 수행하고자 한다.

## 2. 작업성 평가 이론

### 2.1 조작성 지수, 타원체

로봇이 다음 행동을 위한 행동 가능 범위 판단을 조작성 지수를 이용하고 있다. Yoshikawa가 정의한 이 지수는 로봇의 끝단이 다음 지점으로의 움직이거나 회전하고자 하는 정도의 크기를 의미한다. 이 조작성 지수는 식 (1)과 같다.

$$M(\theta) = \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \tag{1}$$

여기서,  $\theta$ 는 조인트 변수,  $M(\theta)$ 는 조작성 지수,  $J(\theta)$ 는 자코비안 행렬을 나타낸다. 조작성 지수의 조인트 속도를 원으로 매핑할 경우 원 형태의 카르테시안 속도를 도출할 수 있다. 이는 주어진 자세에서 다음 자세로 진행될 때 얻어질 수 있는 속도를 원의 형태로 나타낸 것으로 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \|\dot{\theta}\| &= \sqrt{\dot{\theta}^T \dot{\theta}} \tag{2} \\ &= \sqrt{\dot{x}^T (J^T)^T J^T \dot{x}} \\ &= \sqrt{\dot{x}^T (JJ^T)^T \dot{x}} \\ &= \sqrt{\dot{x}^T (JJ^T)^{-1} \dot{x}} \leq 1 \end{aligned}$$

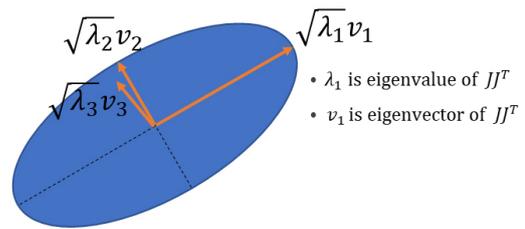
$\theta$  : Joint variable  
 $x$  : Cartesian variable  
 $J$  : Jacobian Matrix

이를 통해 [Fig. 1]과 같이 로봇 자세별로 고유값과 고유벡터가 정의될 수 있고, 로봇의 속도 크기, 방향을 시각적으로 표현할 수 있다. 각 고유벡터에 대응하는 고유값이 클수록 타원체의 크기가 커질 수 있으며, 이로 인해 로봇 말단부의 행동반경 비율이 증가하게 되므로 작업성이 증가한다고 볼 수 있다.

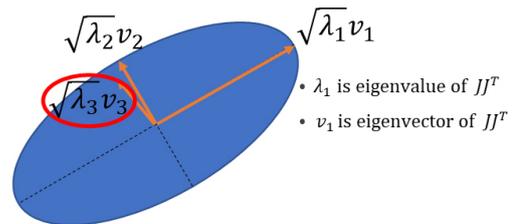
또한, 이 속도 조작성 타원체를 이용해 현 자세에서 힘의 크기와 방향을 도출할 수 있고, 속도 조작성 타원체의 역수 관계로 식 (3)과 같이 표현된다. 이는 동일한 방법으로 고유값과 고유벡터를 구하게 되면  $(JJ^T)^{-1}$ 과  $(JJ^T)$ 로부터 방향은 동일하고 크기는 역수를 가짐을 확인할 수 있으며, 이를 힘 조작성 타원체로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\tau\| &= \sqrt{\tau^T \tau} \tag{3} \\ &= \sqrt{f^T (JJ^T) f} \leq 1 \end{aligned}$$

$\tau$  : Joint torque  
 $f$  : Force on the end-effector



[Fig. 1] Manipulability Ellipsoid



$$(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0)$$

$\sqrt{\lambda}$  is Singular value

[Fig. 2] Minimum Singular Value

## 2.2 최소특이값(Minimum singular value)

최소특이값은 [Fig. 2]에서 나타나는 바와 같이, 현 자세에서 행동반경 비율이 가장 낮은 값을 의미한다. 조인트 속도의 최대값은 최소특이값에 의해 식 (4)와 같이 제한된다.

$$\|\dot{\theta}\| \leq (1/\sqrt{\lambda_m}) \|\dot{x}\| \quad (4)$$

$\theta$  : Joint variable

$x$  : Cartesian variable

$\sqrt{\lambda_m}$  : Minimum singular vlaue

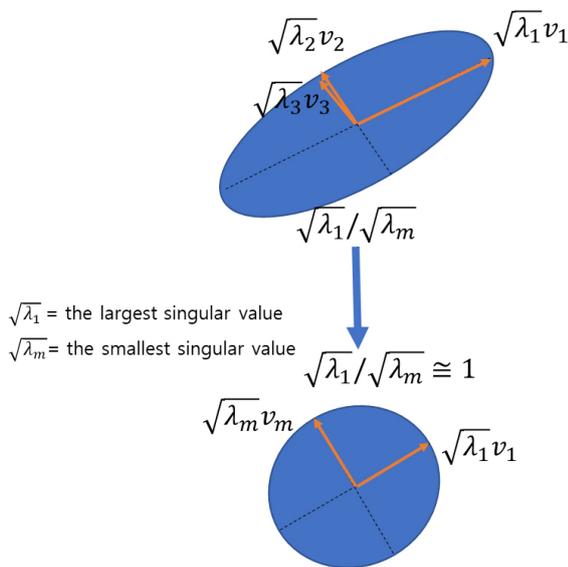
## 2.3 Condition Number

로봇의 현 자세에서 표현한 조작성 타원체의 균일함 정도를 평가하는데 Condition Number가 사용되고 있다. Slisbury와 Craig가 연구한 Condition Number의 정의는 [Fig. 3]과 같이 최소특이값과 최대특이값의 비로 표현이 되며, 현 자세에서 다음자세까지 행동 반경의 균일함 정도를 볼 수 있다. 최대특이값이 일정이라는 가정 하에 균일함의 정도가 클수록 행동반경의 비율이 증가하므로 작업성이 증가한다고 볼 수 있으며, 상태 지수의 표현은 식 (5)와 같다.

$$\text{Condition number}(k) = \frac{\sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{\lambda_m}} \quad (5)$$

$\sqrt{\lambda_1}$  : maximum singular value

$\sqrt{\lambda_m}$  : minimum singular value



[Fig. 3] Condition Number

## 3. 양팔 로봇의 작업성 평가

### 3.1 평가 방법 설계

본 논문에서는 양팔 로봇의 거동을 분석하기 위하여 MATLAB을 활용한 시뮬레이션을 수행하였다. 위에서 소개한 다양한 성능 지수들을 융합하여 양팔 로봇의 구조에 따른 작업 성능을 평가하였다.

$$\begin{bmatrix} F_{P1} \\ \vdots \\ F_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & \dots & W_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{vel.e} \\ f_{min} \\ f_{cond} \\ f_{force.e} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$W_{11} \sim W_{n4}$  : Weighting value for each index and motion

$F_{P1}, \dots, F_{Pn}$ 은 양팔 로봇의 전체 작업 중 1번부터 n번에 해당하는 각 자세에서의 종합 성능 지수를 의미하며, 모션에 따라서 n의 숫자는 확장이 가능하고 왼팔 작업과 오른팔의 작업에 대한 구분이 필요한 경우는 추가적으로 확장을 할 수 있다.  $f_{vel.e}$ 는 속도 조작성지수로 식 (1), (2)를 따르며,  $f_{min}$ 은 최소특이값으로 식 (4),  $f_{cond}$ 는 상태 지수로 식 (5),  $f_{force.e}$ 는 힘조작성지수로 식 (3)으로부터 계산된다.

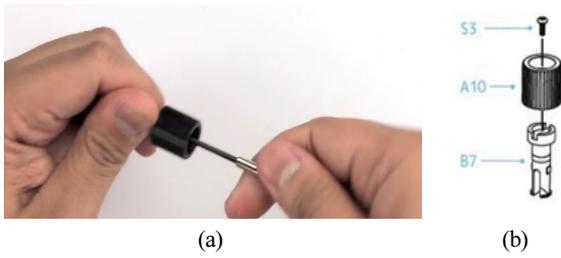
종합 성능 지수 평가는 식 (6)을 통해 이루어지며, 계산 절차는 다음과 같다. 첫째, 양팔 로봇이 수행할 목표 작업을 구분 동작으로 분류하고, 분류된 각 동작별로 작업 목표에 적합하도록 성능지수에 대한 가중치를 선정한다. 둘째, 목적 작업에 대해 각 성능 지수값을 계산한다. 셋째, 계산된 지수들은 최소-최대 정규화 방법을 적용하여 0~1 값으로 매핑 하여 민감도를 조정한다. 마지막으로, 식 (7)에 적용하여 총합이 가장 큰 값을 목적 작업에 적합한 로봇으로 평가한다.

$$\text{Total Performance} = \sum_{i=1}^n F_{Pi} \quad (7)$$

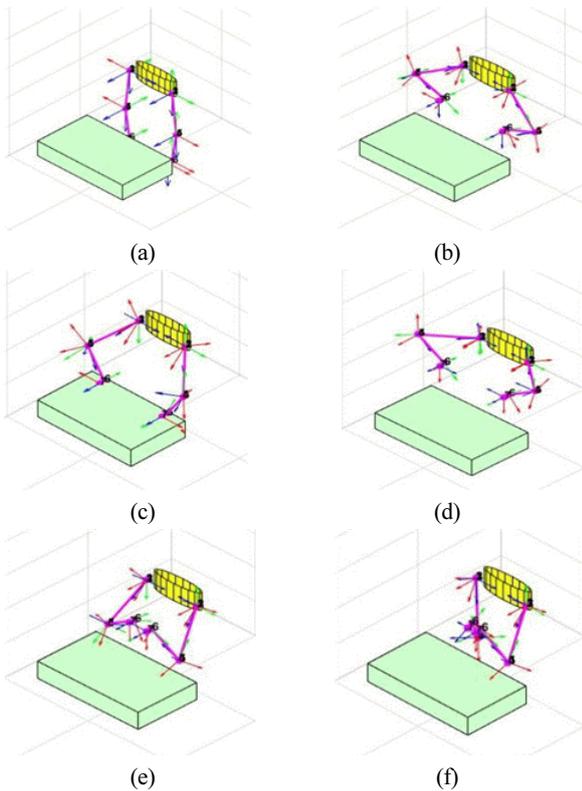
### 3.2 모션 정의

양팔 로봇의 성능 평가 프로세스를 검증하기 위해서 셀 조립 공정에서 사용되는 카메라 되감기 휠 부품을 예시로 [Fig. 4]과 같은 모션을 정의하였다. 구체적인 모션은 [Fig. 5]에 나타난 바와 같이 조립대에서 부품을 픽업 후 왼팔로 부품을 파지, 오른팔로 볼트를 조이는 작업 시퀀스를 가진다.

[Fig. 5(a)]는 양팔 로봇의 초기 위치를 나타낸다. [Fig. 5(b)]에서 [Fig. 5(c)]로의 모션은 작업 테이블에서 부품을 픽업하는 모션으로 정의하였다. 이 모션을 Case.1로 정의한다. [Fig. 5(d)] 모션은 부품을 들어 올려 조립을 준비하는 모션이며



[Fig. 4] (a) Assembling Rewind Wheel, (b) Rewind Wheel

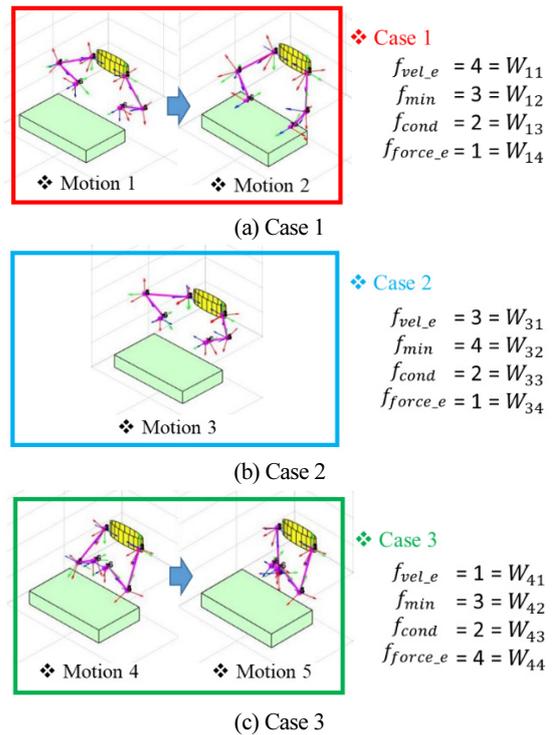


[Fig. 5] Assembling Motion for Rewind Wheel

Case.2 로 정의한다. 마지막으로 [Fig. 5(e)]에서 [Fig. 5(f)]로의 모션은 부품을 파지하고 손목 구조의 특성을 최대한 활용할 수 있도록 회전 행동을 부여하여 볼트 체결을 수행하는 작업으로, 이를 Case.3으로 정의하였다.

다양한 Case로 나눈 이유는 각 모션마다 동작의 목적이 다르고 그에 따른 작업성의 가중치가 다르기 때문이며, 각 Case에 대한 가중치의 합 10을 기준으로 분배하였고, Case 별 가중치 부여 결과는 [Fig. 6]에 나타난 바와 같다.

Case.1의 경우 부품 파지를 위해서 작업 테이블까지 가는 모션이기 때문에 조작성 지수에 4, 최소특이값에 3으로 가중치를 크게 부여하였다. Case.2의 경우 조립 위치 선정이 주목적으로 이동 방향성에 보다 비중을 두는 방향으로 최소특이값에 4, 조작성 지수에 3으로 가중치를 부여하였다. 실제로 Case.1과 Case.2 두가지의 경우는 조립 준비를 목적으로 이동



[Fig. 6] Separated Motion Cases

하는 유사성이 있고 단지 방향성에 차이가 있으므로, 유사한 가중치를 적용한 사례로 볼 수 있다. Case.3의 경우 주 목적이 조립 모션이므로 힘 조작성 지수에 가장 높은 가중치를 크게 부여한 것으로, 이는 목적으로 하는 모션의 특징을 반영한 가중치 부여 예시이다.

여기서 중요한 점은 가중치의 값이 특정값으로 고정되어 있는 유일한 것이 아니라, 목적 작업의 종류, 목적 작업의 모션별 중요도, 작업 방향, 작업 속도, 작업 힘 등을 종합적으로 고려하여, 사용자가 자유롭게 가중치를 변경하여 성능을 평가할 수 있다는 점으로, 제안된 기법을 자유롭게 적용할 수 있는 것이 주요 특징이다.

### 3.3 최소-최대 정규화

앞서 조립 공정에서 측정된 성능 지수들을 정리하였고, 이를 동일한 기준에서 평가하기 위해 정규화를 진행한다. 사용하는 정규화 방법은 최소-최대 정규화 방법(Min-Max Normalization)을 이용하였으며 측정된 성능 지수의 값을 0~1값으로 정규화했다. 값을 매핑함으로써 값의 기준이 서로 다른 성능 지수들을 같은 기준으로 평가할 수 있게 된다. 최소-최대 정규화 방법은 식 (8)을 이용하여 진행하였다.

$$x_s = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (8)$$

$x_s$ 는 정규화된 값으로 조립 공정에서 양팔 로봇의 각 구조마다 측정된 성능 지수들을 전부 정규화한 값으로 평가를 진행한다.

### 3.4 양팔 로봇 구조 정의

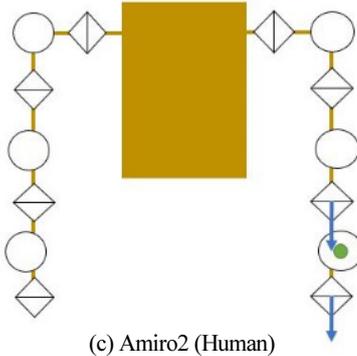
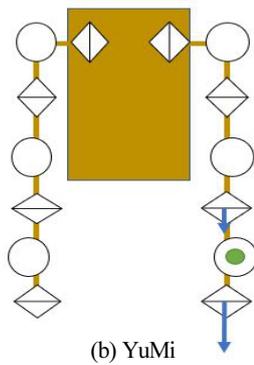
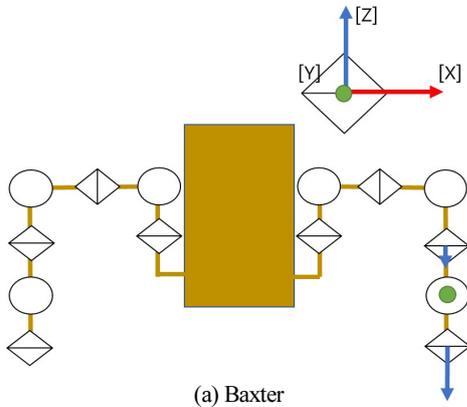
목적 작업에 있어서 가장 최적화된 양팔 로봇의 구조를 도출하기 위해서 어깨 구조 3가지와 손목 구조 3가지를 정의하였다.

어깨 구조는 [Fig. 7]에 나타난 바와 같이 산업용 양팔 로봇 중에서 각기 다른 구조를 가지고 있는 Baxter와 Yumi 그리고 한국기계연구원의 Amiro2 (Human 구조)를 채택하였다. Baxter의 어깨구조는 독특한 형태를 가지고 있고, Yumi와

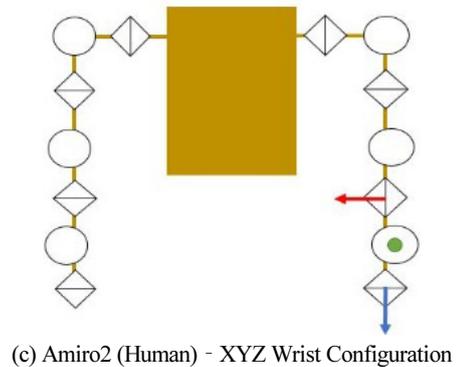
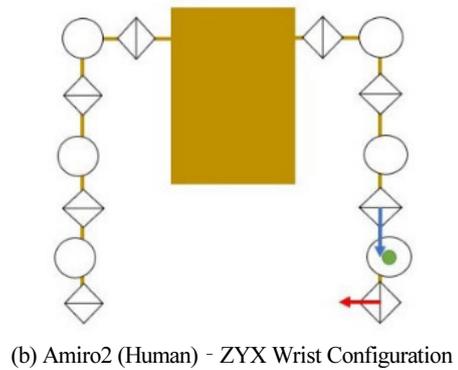
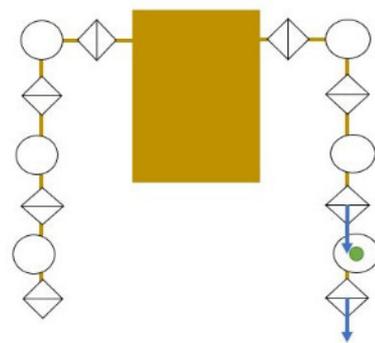
Amiro2는 유사한 구조이나 어깨가 부착된 방향각에 차이가 존재한다.

어깨 구조 이외에 손목 구조도 작업에 영향을 미치기 때문에, [Fig. 8]과 같이 산업용 로봇팔에서 가장 대표적인 손목 구조인 ZYZ, ZYX, XYZ 구조를 분류하였고, 앞서 언급된 Baxter, Yumi, Amiro2 3가지 로봇의 어깨 구조와 결합하여 총 9가지의 다양한 로봇 구조를 형성하였다.

이 과정에서 활용된 로봇들은 모두 한 팔당 7DOF를 가지고 있기 때문에, 동일한 목적 작업에 대해서 하나의 조인트 해를 가지고 있지 않으나, 본 논문에서는 각 로봇 시스템의 동일한 조건 하에서 분석을 하기 위하여, 에너지 최적화 해인 minimum norm solution을 공통적으로 적용하였다.



[Fig. 7] Three types of shoulder configuration



[Fig. 8] Three types of wrist configuration

### 4. 작업성평가 및 고찰

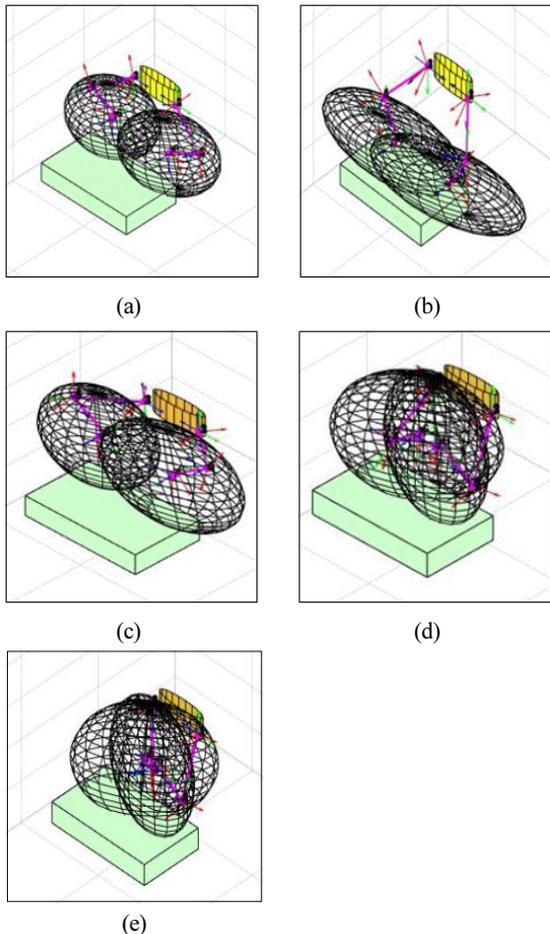
#### 4.1 양팔 로봇 시뮬레이션 모션 평가

앞서 소개한 MATLAB 시뮬레이션을 활용한 Amiro2-ZYZ 구조에 대한 목적 작업 분석 결과는 [Fig. 9]와 같다.

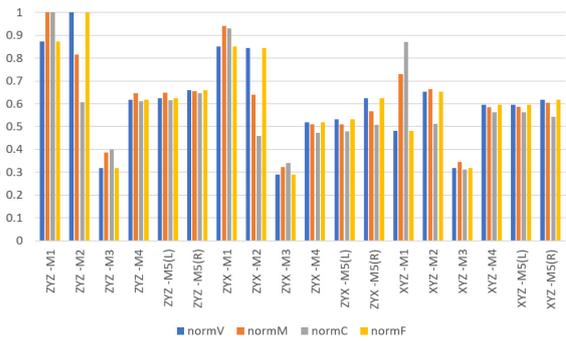
#### 4.2 Amiro, Baxter, Yumi 구조의 모션 별 성능 지수 평가

각 모션에 따른 양팔 로봇의 성능 지수들을 측정하고 비교 평가를 수행하였다. 평가를 위한 지수 매핑에 앞서서, 다음 [Fig. 10]은 Amiro2 - ZYZ, ZYX, XYZ 구조를 측정하여 Min-Max 정규화로 매핑한 값이다.

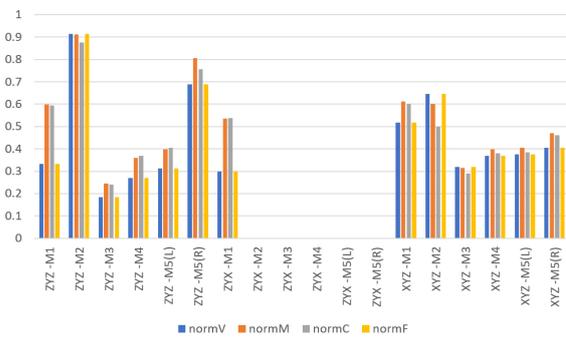
조작성 타원체(normV)는 값이 클수록 현재 자세에서 더 넓은 범위를 이동할 수 있는 지표가 되므로 가장 높은 값을 작업성이 우수하다고 표현할 수 있다. 측정한 값을 보면 전체적인 모션에서 ZYZ 손목 구조가 가장 우수하다. 하지만 이는 타원체의 크기만으로 평가한 것이기 때문에 어떠한 거동을 하는지 예측할 수 없다<sup>[22]</sup>.



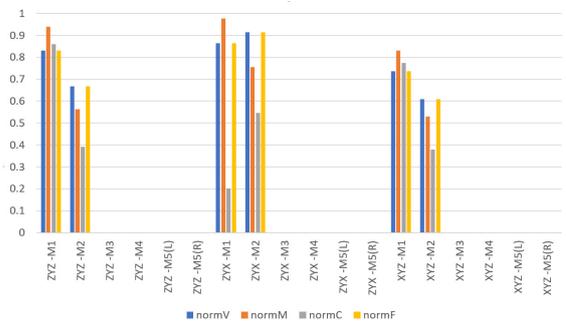
[Fig. 9] Motion Simulation, Manipulability Ellipsoid



[Fig. 10] Amiro2 (Human) - ZYZ, ZYX, XYZ Configuration



[Fig. 11] Baxter - ZYZ, ZYX, XYZ Configuration

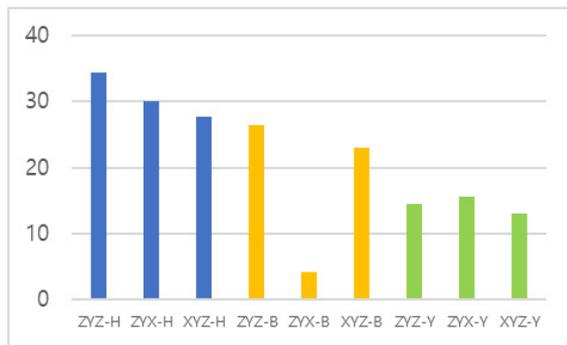


[Fig. 12] YuMi - ZYZ, ZYX, XYZ Configuration

각 모션의 최소특이값(normM)을 비교하여, 현재 자세에서 로봇이 가질 수 있는 가장 약한 방향 즉, 특이점에 가까운 방향과 크기를 평가할 수 있다.

각 모션에 따른 상태 지수(normC)를 비교하여, 타원체의 형태를 파악할 수 있다. 이를 통해 타원체가 특이점에 가까운지, 여유 범위의 모션이 어느 정도 되는지 알 수 있다.

각 모션의 힘의 조작성 타원체(normF)를 비교하므로, 현재 자세에서 로봇이 가질 수 있는 힘의 크기와 방향을 평가할 수 있다. 식 (3)으로 인해 크기는 앞서 비교했던 조작성 타원체와 동일하지만 역수이므로 타원체의 모양이 직교한다. 이는 조작성 타원체의 최소값의 방향이 힘의 조작성 타원체에선 최대값의 방향이 된다는 것이다.



[Fig. 13] Configuration Evaluation

앞서 Amiro2 (Human) 구조 로봇에 적용된 조립 공정 작업과 동일한 모션에 대하여 성능 지수를 분석한 결과, Baxter 형 로봇은 [Fig. 11]과 같고, Yumi 형 로봇은 [Fig. 12]와 같이 나타났다. 여기서 공백으로 표현된 부분은 해당 구조로 작업이 불가능한 작업 영역임을 나타낸다.

#### 4.3 목적 작업 양팔 로봇 작업성 결과 고찰

앞서 정규화를 진행한 조립 공정에서 측정된 성능 지수와 모션별 선정된 가중치를 제시된 평가 모델 식 (8)에 적용하며, 가중치는 [Fig. 6]에서 선정된 값으로 적용하였다.

모션 별로 성능 지수에 가중치를 적용하여 총합의 계산되고, 총합의 값이 클수록 양팔 로봇의 목적 작업에 최적화된 로봇으로 볼 수 있다. 각 구조 별로 평가된 값은 다음 [Fig. 13]과 같이 도출되었다.

카메라 부품 조립 공정에서 추출된 목적 작업에 대한 종합 성능 지수 평가 결과, 대상 모션들에 대해서는 상대적으로 Amiro-ZYZ 구조에서 높은 작업성을 갖는 것으로 나타났다. 다만 이와 같은 결과는 목적으로 특정 작업에 한정하여 해당하는 로봇 구조가 보다 적합한 구조임을 나타내는 한가지 결과에이다. 이번 연구에서 평가된 모션은 두 팔이 직교하며 조립하는 작업을 수행함에 있어, Case.1에서는 빠른 속도에 가중치를, Case.2의 경우 방향성에 가중치를, Case.3의 경우 힘 조작성에 가중치를 높게 부여하는 등 특정 목적에 부합하는 모션에 적합한 결과가 나타난 것이다.

이 경우 이외에도 목표로 하는 작업 영역이나 작업 속도, 작업력 등 조건들이 변경되거나, 이에 따른 각목표치에 대한 가중치가 변경될 때마다, 이와 같은 프로세스를 통하여 구조별 작업 성능을 예측할 수 있고, 다양한 구조의 솔루션이 도출될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 기존에 연구된 로봇의 측정 방법을 이용해서 원하는 공정에 대해 양팔 로봇의 작업성을 로봇 구조에 따

라서 체계적으로 측정하고 평가하는 방법을 제안하였다. 목적으로 하는 작업 기반으로 대표 모션을 도출하고, 각 모션의 목적에 따른 가중치 선정을 통해 다양한 양팔 로봇 구조에 대한 작업 성능 평가를 수행하고, 선정된 작업과 선정된 조건에 적합한 양팔 로봇의 형태를 도출할 수 있었다.

이러한 작업성 평가 방법을 바탕으로 본 논문에서 제시된 모션과 양팔 로봇 구조 이외에도 다양한 작업과 구조에 대하여 체계적인 평가를 수행할 수 있을 것이다. 향후 연구로는 동역학적인 요소와 양팔 로봇의 상대 운동을 고려한 작업성 지수를 추가로 고려하여 작업성 평가 범위를 확대하고자 한다.

## References

- [1] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985, DOI: 10.1177/027836498500400201.
- [2] E. Staffetti, H. Bruyninck, and J. De Schutter, "On the Invariance of Manipulability Indices," *Advances in Robot Kinematics: Theory and Applications*, Springer, pp. 57-66, 2002, DOI: 10.1007/978-94-017-0657-5.
- [3] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 1, no. 1, pp. 4-17, 1982, DOI: 10.1177/027836498200100102.
- [4] J.-O. Kim and K. Khosla, "Dexterity Measures for Design and Control of Manipulators," *IROS '91 - I IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1991, DOI: 10.1109/IROS.1991.174572.
- [5] S. L. Chiu, "Kinematic characterization of manipulators: an approach to defining optimality," *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12163.
- [6] J. Angeles and C. S. López-Cajún, "Kinematic Isotropy and the Conditioning Index of Serial Robotic Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 11, no. 6, pp. 560-571, 1992, DOI: 10.1177/027836499201100605.
- [7] L. Guilamo, J. Kuffner, K. Nishiwaki, and S. Kagami, "Manipulability optimization for trajectory generation," *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, USA, 2006, DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642001.
- [8] T. Zhang, M. Minami, O. Yasukura, and W. Song, "Reconfiguration Manipulability Analyses for Redundant Robots," *ASME. J. Mechanisms Robotics*, vol. 5, no. 4, 2013, DOI: 10.1115/1.4024727.
- [9] A. Bowling and O. Khatib, "The dynamic capability equations: a new tool for analyzing robotic manipulator performance," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 1, pp. 115-123, 2005, DOI: 10.1109/TRO.2004.837243.
- [10] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis, and A. Bicchi, "On the role of robot configuration in Cartesian stiffness control," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139300.

- [11] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis, and A. Bicchi, "Choosing Poses for Force and Stiffness Control," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1483-1490, 2017, DOI: 10.1109/TRO.2017.2708087.
- [12] M. Azad, J. Babič, and M. Mistry, "Effects of the weighting matrix on dynamic manipulability of robots," *Autonomous Robots*, vol. 43, pp. 1867-1879, 2019, DOI: 10.1007/s10514-018-09819-y.
- [13] C. Smith, Y. Karayiannidis, L. Nalpantidis, X. Gratal, P. Qi, D. V. Dimarogonas, and D. Kragic, "Dual arm manipulation survey," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 10, pp. 1340-1353, Oct., 2012, DOI: 10.1016/j.robot.2012.07.005.
- [14] S. Lee, "Dual redundant arm configuration optimization with task-oriented dual arm manipulability," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 1, Feb., 1989, DOI: 10.1109/70.88020.
- [15] M.-H. Choi, M.-Y. Lee, B.-H. Lee, and M.-S. Ko, "On the manipulability measure of dual arm," *Institute of Control, Robotics and Systems*, pp.1156-1161, 1990, [Online], <https://www.koreascience.or.kr/article/CFKO199011919696004.page>.
- [16] C. A. Klein and B. E. Blaho, "Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 2, pp. 72-83, 1987, DOI: 10.1177/027836498700600206.
- [17] N. Vahrenkamp, T. Asfour, G. Metta, G. Sandini, and R. Dillmann, "Manipulability analysis," *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, Osaka, Japan, 2012, DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651576.
- [18] M. Bagheri, A. Ajoudani, J. Lee, D. G. Caldwell, and N. G. Tsagarakis, "Kinematic analysis and design considerations for optimal base frame arrangement of humanoid shoulders," *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139566.
- [19] Z. Ju, C. Yang, and H. Ma, "Kinematics modeling and experimental verification of baxter robot," *The 33rd Chinese Control Conference*, Nanjing, China, 2014, DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896430.
- [20] F.-P. Kirgis, P. Katsos, and M. Kohlmaier, "Collaborative Robotics," *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Springer Int Publishing Switzerland, pp. 448-453, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-26378-6.
- [21] D. I. Park, C. Park, H. Do, T. Choi, and J. Kyung, "Development of dual arm robot platform for automatic assembly," *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, Gyeonggi-do, Korea, 2014, DOI: 10.1109/ICCAS.2014.6988013.
- [22] C. M. Gosselin, "The optimum design of robotic manipulators using dexterity indices," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 213-226, 1992, DOI: 10.1016/0921-8890(92)90039-2.



**김기훈**

2019 충남대학교 기계설계공학과(학사)  
2021 충남대학교 기계설계공학과(석사)

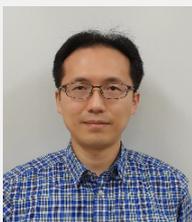
관심분야: 로봇 설계 및 제어



**김희수**

2007 고려대학교 기계공학과 졸업(학사)  
2014 고려대학교 기계공학과 졸업(박사)  
2015~현재 한국기계연구원

관심분야: 로봇 및 자동화 기계 설계 및 해석, 인간-로봇 협동 및 안전



**박동일**

2000 한국과학기술원 기계공학과(학사)  
2002 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
2006 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
2006~현재 한국기계연구원

관심분야: 로봇 설계 및 제어



**조영수**

2011 고려대학교 제어계측공학과(학사)  
2013 고려대학교 제어계측공학과(석사)  
2020 고려대학교 제어계측공학과(박사)  
2020~현재 한국기계연구원 Post-doc

관심분야: 로봇 기구학/동역학 분석 및 제어



**박종우**

2007 고려대학교 컴퓨터정보학과(학사)  
2009 고려대학교 제어계측공학과(석사)  
2016 고려대학교 제어계측공학과(박사)  
2016~2019 한국기계연구원 Post-doc  
2019년~현재 한국기계연구원 선임연구원

관심분야: 로봇 제어 및 운영 시스템



**정원석**

2008 한국과학기술원 기계공학과(학사)  
2010 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
2014 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
2015~2017 원광대학교 기계자동차공학부 조교수  
2017~현재 충남대학교 조교수

관심분야: 로봇 설계 및 제어