

작업지향형 매니플레이터 기구설계기법에 관한 연구

이희돈[†]·유승남^{*}·고광진^{*}·한창수^{**}

A Study of Kinematic Selection and Design of Manipulator Aimed to Specified Task

Hee-Don Lee, Seung-Nam Yu, Kwang-Jin Ko and Chang-Soo Han

Key Words: Task-Oriented Design(작업지향 설계), Manipulability(동작성), Motion Capability(동작 능력), Computation Complexities(계산의 복잡성)

Abstract

Generally, development of a robot capable of fast movements or high payloads is progressed by the analysis of dynamic characteristics, DOF positioning, actuator selection, structure of links, and so on. This paper highlights the design of a robot manipulator handled by a human for man-machine cooperation. The requirements of the proposed system include its having multi-DOF(Degree of Freedom)and the capacity for a high payload in the condition of its maximum reach. The primary investigation factors are motion range, performance within the motion area, and reliabilityduring the handling of heavy materials. Traditionally, the mechanical design of robots has been viewed as a problem of packaging motors and electronics into a reasonable structure. This process usually transpires with heavy reliance of designerexperience. Not surprisingly, the traditional design process contains no formally defined rules for achieving desirable results, as there is little opportunity for quantitative feedback during the formative stages. This work primarily focuses on the selection of proper joint types and link lengths, considering a specific task type and motion requirements of the heavy material handling.

1. 서 론

일반적인 매니플레이터는 프로그래밍된 제어시스템에 의하여 동작하며 각종 센서에 의해 동작이 통제된다. 이러한 로봇시스템은 산업 전반에 걸쳐 반복 작업, 정밀 작업 등의 자동화를 위해 널리 보급되어 있다. 최근에는 로봇이 인간에 비해 월등한 능력을 가지고 있는 물리적 퍼포먼스와 인간의 정밀하고도 우수한 신경계를 접목한

인간-로봇 협동 시스템에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다.[1] 이러한 시스템은 정밀한 위치 제어 보다는 인간의 의지대로 움직이는 반응성, 복잡한 자유도의 구현 보다는 작업자가 편리하게 핸들링 할 수 있는 기구적 구조가 유리하다.[2] 본 논문에서는 이러한 시스템을 HRCS(Human-Robot Cooperation System)으로 명명하였으며, 기구적인 설계 문제에 초점을 맞추려한다. 본 연구에서 제안하는 기구적인 구조 및 조합은 일반적으로 로봇설계를 위해서 행하여지는 형상 최적설계 및 동작 성능 향상을 위한 관절 및 링크 길이설계와는 다소 차이가 있으며, 인간의 의지 및 다소의 물리력에 의해 구동되는- 로봇의 최대 리치 근처에서 무거운 물체를 핸들링하는 특정 작업에 적합한 6자유도 로봇의 적절한 관절

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ich180@nate.com

TEL : (031)400-4062 FAX : (031)406-6398

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

형태 및 링크 길이를 제안한다.

2. 매니플레이터의 기구적 조합

2.1 모델링을 위한 가정

본 연구의 논리 전개를 위한 몇 가지 가정을 실행한다.

- 1) 로봇의 각 관절부의 자유도는 1이다.
- 2) 로봇의 총 자유도는 6으로 제안하며, 말단부는 3자유도를 가진다.
- 4) 각 링크의 무게와 관성모멘트는 동일하다.
- 5) 가 관절의 마찰 및 감쇠 효과는 무시한다.

이러한 가정은 로봇의 기구적 조합에 따른 성능을 분석하기 위한 것이며, 계산상의 편의를 위하여 분할평면기법을 사용하여 3차원의 동작 자유도를 2차원 상의 자유도로 단순화하여 분석을 실시하였다. 본 연구는 기저부로부터 손목 및 어깨 관절의 순서로 선택이 이루어지며 각각의 관절 특성에 맞는 로봇 설계이론을 적용하여 유효한 조합에 대한 전체적인 비교 분석을 실시하여 가장 적절한 조합을 선정하는 방식으로 진행된다. 이후에 링크간의 길이 관계를 유사한 방식으로 규정하고 최종적으로, 본 본문에서 제시한 작업에 가장 적합한 전체 기구적 조합을 제안하는 순서로 진행된다.

2.2 R-R 및 R-P Type 관절 조합의 성능 비교

2.2.1 성능 비교를 위한 축소 모델링

본 논문에서 언급하게 될 관절의 형태는 크게 회전형 관절(Revolute Joint; R)과 직선형 관절(Prismatic Joint; P)이 있다.

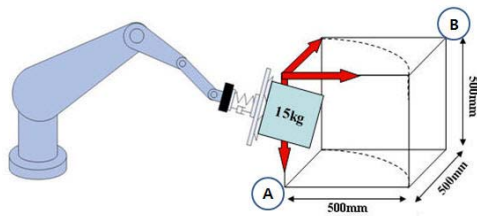


Fig.1 Motion range of the scaled down 6-DOF manipulator

본 연구에서는 가장 먼저 기저부의 관절형을 선정하기 위해 기본적인 작업 환경을 모델링하고 시뮬레이션 하였다. Fig.1과 같이 500mm×500mm×500mm의 작업환경을 가정하고 이러한 작업환

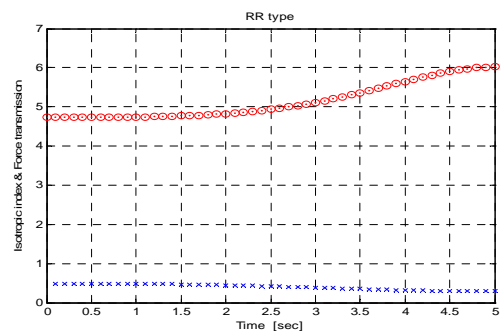
경을 커버하기 위하여 $l_1 = 300mm, l_2 = 330mm$ 로 각 링크의 길이를 가정하였다.

2.2.2 R-R 및 R-P Type 조합의 성능비교

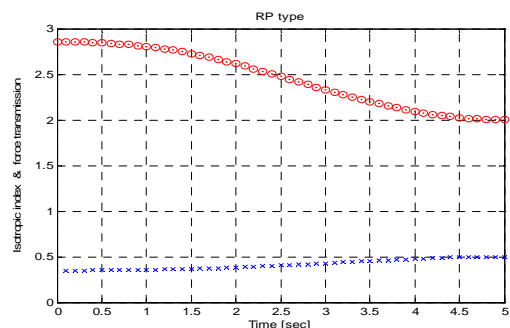
본 조합의 성능 평가를 위하여 매니플레이터의 힘전달율(Force Transmission Ratio)을 계산하였다.

$$\text{Force transmission ratio} = \frac{1}{(\text{Min. eigenvalue of Jacobian})} \tau = J^T f \quad (1)$$

힘전달율은 로봇의 자세 및 말단부의 위치가 변하면서 동시에 변하는 값으로서 특정 자세에 맞는 로봇의 성능을 평가하기 위하여 도입되었다. 로봇의 작업은 Fig.1에서의 A점에서 B점으로 15kg의 작업물을 옮기는 것으로 가정하였으며, Fig.2는 위의 수식을 사용하여 두 가지 형태의 매니플레이터에 대하여 작업을 수행한 시뮬레이션 결과를 도시하고 있다. 시뮬레이션 결과에 따르면, R-P Type이 R-R Type에 비하여 로봇의 리치가 길어졌을 때 우수한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) R-R Type



(b) R-P Type

Fig.2 Force transmission ratios

2.3 연산 복잡도 (Computation Complexities)

2.3.1 3자유도 평면 매니플레이터

먼저, R Type 및 P Type 관절을 이용하여 평면

3자유도의 매니플레이터에 대한 관절 조합을 생성하고 성능을 비교하였다. 연산 복잡도는 GIM (Generalized Inertial Matrix) 및 MCI(Matrix of Convective Inertia)라는 두 가지 파라미터를 구하여 각각의 조합에 대한 연산시간을 비교하여 각각의 연산 복잡도를 판별한다. 다음의 수식은 Bhanale에 의하여 제안되었다.[1]

$$GIM:(3.5n^2 + 11.5n - 7)M(2n^2 + 9n - 7)A \quad (2)$$

$$MCI:(7n^2 + 13n + 4)M(4n^2 + 13n + 2)A \quad (3)$$

Table.2는 3자유도 평면 매니플레이터의 관절 조합에 대한 연산 복잡도를 도시하고 위의 식에 의하여 계산한 결과를 나타내고 있으며 RPRTyp이 GIM에서, PRR Type이 MCI에서 더 우수한 결과를 보였다.

Table.1 Computation complexities of the 3-DOF planar manipulator

Type	GIM	MCI	Total
RRP	46M; 29A	76M; 42A	122M; 71A
RPR	34M; 22A	88M; 39A	122M; 61A
PRR	42M; 27A	53M; 29A	96M; 56A

2.3.2 3자유도 공간 매니플레이터

위에서 언급한 개념을 3차원 공간상으로 확장한 GIM 및 MCI가 아래의 식과 같이 소개되어 있다.[1]

$$GIM:(11n^2 + 34n - 18)M(7n^2 + 37n - 18)A \quad (4)$$

$$MCI:(14n^2 + 22n + 4)M(13.5n^2 + 55.5n - 65.5)A \quad (5)$$

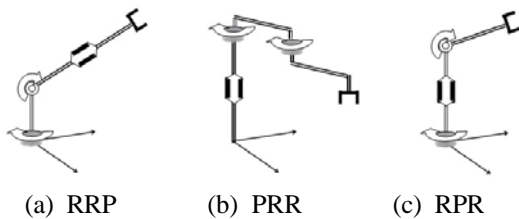


Fig.3 Three types of 3DOF manipulator

Fig.3은 본 연구에서 고려한 3가지 형태의 3자유도 공간 매니플레이터에 대한 관절 조합을 도시하고 있으며, 위의 두식을 적용하여 연산한 결과를 Table.2에 도시하고 있다. 평면 3자유도 매니플레이터와 유사하게 처리하기 위하여 서두에서 언급한 분할평면 (Slice Plane)이론을 사용하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 PRR 형태가 가장

빠른 연산속도를 보여주었다.

Table2. Computational complexities of the 3-DOF spatial manipulator

Type	GIM	MCI	Total
RRP	170M 154A	522M 352A	692M 506A
PRR	142M 138A	389M 317A	531M 455A
RPR	153M 148A	556M 415A	709M 583A

2.4 각 매니플레이터 형태에 대한 동작성

(Manipulability) 비교

2.4.1 매니플레이터 동작성의 개념

매니플레이터의 동작성은 특정 위치에 도달하는 성능 및 해당 위치 및 자세에서의 위치 및 방향을 전환하는 능력을 가늠하기 위한 척도이다. 이는 가장 널리 알려진 로봇 동작성 척도이며 로봇의 작업 영역과 함께 도시할 수 있는 장점이 있다.[3] 일반적으로 동작성은 아래와 같은 수식으로 정의된다.

$$W = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (6)$$

$$W = |\det(J)| = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m \quad (7)$$

여기서, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ 는 JJ^T 의 고유치이며, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$ ($\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$)는 자코비안(Jacobian) 행렬의 특이치(singular value)이다. 우수한 매니플레이터를 평가하는 척도중의 하나는 높은 주 동작 영역에서의 W값을 가지는 것이다. 동작성 평가의 예로서 Fig.4의 RR Type 평면 매니플레이터를 제시한다.

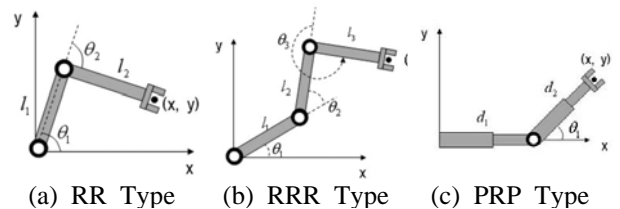


Fig.4 Type of planar manipulator

본 매니플레이터에 대한 자코비안 행렬 및 동작성을 계산하면 다음과 같다.

$$J(\theta) = \begin{pmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \\ -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$W = |\det J(\theta)| = l_1 l_2 |\sin \theta_2| \quad (9)$$

$\theta_2 = \pm \frac{\pi}{2}$ 일때, 최적의 성능 값을 갖는 자세임을 알 수 있다. ($l_1 + l_2 = C$, C 는 상수) 결과적으로 위의 매니플레이터 조합에서는 각 링크의 길이가 $l_1 = l_2$ 이고 $\theta_2 = \pm \frac{\pi}{2}$ 의 자세를 가질 때, 가장 우수한 동작성능을 발휘한다는 사실을 알 수 있다.

2.4.2 동작성 타원

일반적으로 자코비안 행렬의 결정자(Determinant)는 매니플레이터의 민첩성(Dexterity)을 평가할 수 있는 척도로 알려져 있다. 매니플레이터의 민첩성은 수식화를 통한 타원의 도식화를 통해 동작관절 내에서 직관적으로 평가할 수 있으며, 이는 타원이 해당 위치에서 정원(Full Circle)에 가까워질수록 더욱 우수한 성능을 가짐을 의미한다. 매니플레이터의 동작성 타원을 계산하기 위해서는, 아래의 수식이 사용된다.

$$V = J(\theta)\theta \quad (10)$$

$$J = Q_1 \Sigma Q_2^T \quad (11)$$

동작영역 내에서 매니플레이터의 성능을 판별하기 위해서는 단순히 각 위치에서 동작성 타원을 도시함으로써 전체 작업 영역 내에서 각 위치마다의 매니플레이터의 동작성의 변화 양상을 한눈에 판별할 수 있다. 본 연구에서는 1번 링크와 2번 링크의 길이 조합에 따른 각각의 동작성을 평가하였다.

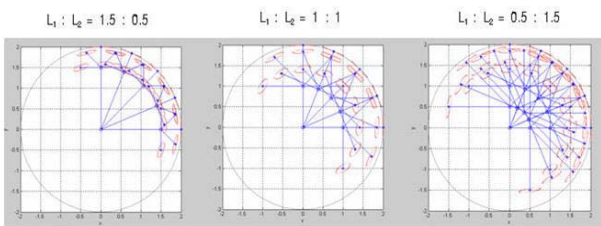


Fig.5 Manipulability of the RPR and RRP type

Fig.5는 RRP 및 RRP Type 매니플레이터의 길이 조합에 따른 동작성을 계산하고 이를 타원으로 도식화한 결과이다. 그림의 첫 번째 열은 링크1과 링크2의 길이 조합을 3:1로 설정하였을 때의 결과이다. 두 번째 열은 1:1의 비율로 설정하였을 때의 결과이며, 마지막 행은 1:3의 링크 비율에 대한 시뮬레이션 결과 값이다. 위의 결과에서 알 수 있듯이, 두 링크의 길이가 같을 때의

성능이 그렇지 않은 조합에 비해 전체적으로 우수한 동작 성능을 나타냄을 확인할 수 있다. 여기서 주목할 점은, 말단부에 가까운 링크의 길이가 증가할수록 동작 영역 외곽부의 동작성 타원의 면적이 증가한다는 점인데, 이는 본 연구에서 제안한 '최대링크에 가까운 작업영역에서의 하중물 핸들링'이라는 가정에 의하여 $l_1 = l_2$ 의 링크조합에 비해 우수한 조합으로 간주할 수 있다.

2.5 동작 능력 (Motion Capability)

매니플레이터의 동작능력은 매니플레이터가 R Type 및 P Type 조인트를 조합하여 나타낼 수 있는 동작영역의 체적으로서 정의된다.[4] 본 성능 요소는 $dV = dx dy dz$ 의 적분에 의하여 계산되며, 각각의 요소는 매니플레이터 작동기의 직교좌표계에서의 미소 변위량을 의미한다. Loncaric(1985)가 일반적인 개념을 제시하였으며, Karger(1989)가 처음으로 이러한 개념을 매니플레이터에 응용하였다. 첫 번째로, RRR Type 매니플레이터에 위의 개념을 적용하기 위하여 순기구학(Forward Kinematics)을 계산하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (12)$$

추가로 좌표축 기준의 탄젠트 벡터 (Tangent Vector)에 의한 행렬식을 아래와 같이 설정한다.

$$\begin{bmatrix} t_{\theta_1} \\ t_{\theta_2} \\ t_{\theta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial \theta}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

위의 두식을 조합하면 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$t_{\theta_1} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$t_{\theta_2} = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$t_{\theta_3} = \begin{bmatrix} -l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

위의 식은 매니플레이터의 말단부의 위치 및

자세를 각 관절 자유도에 의하여 미분한 값이며, 위의 값들을 내적하여 제곱근을 구하면 아래와 같은 수식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_3} \\ t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_3} \\ t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_3} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} = l_1 l_2 |\sin \theta_2| \quad (17)$$

행렬의 각각의 요소는 $v \cdot w = |v||w|\cos\theta$ 로 정의되며, 최종적으로 위의 값을 각각의 관절 자유도의 미소 변위량으로 곱하면, 매니플레이터의 단위 동작 체적을 구할 수 있다.

$$dV = l_1 l_2 |\sin \theta_2| d\theta_1 d\theta_2 d\theta_3 \quad (18)$$

만약, 각 관절이 2π radian 만큼 회전할 수 있다고 가정했을 때, 매니플레이터가 생성할 수 있는 체적은 매니플레이터의 동작 능력으로 정의되고, 이는 위의 식을 전체 동작영역에 의해 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$V = \int_{\theta_1=0}^{2\pi} \int_{\theta_2=0}^{2\pi} \int_{\theta_3=0}^{2\pi} l_1 l_2 |\sin \theta_2| d\theta_1 d\theta_2 d\theta_3 = 16\pi^2 l_1 l_2 \quad (19)$$

결과적으로 RRR Type의 매니플레이터는 자신의 최대 동작영역에 비하여 4pi배의 동작 능력을 가짐을 알 수 있다. 각 관절형의 조합에 따른 동작 능력을 비교하기 위해 다른 형태의 매니플레이터들도 같은 형식으로 계산해 보았다. RPR Type의 매니플레이터는 아래와 같이 계산되어질 수 있다.

$$t_{\theta_1} = \begin{bmatrix} -(l_1 + d_1) \sin(\theta_1) \\ (l_1 + d_1) \cos(\theta_1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$t_{\theta_2} = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(\theta_2) \\ l_2 \cos(\theta_2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$t_{d_1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

각각의 링크길이 및 직선형 관절의 리치는 1로 가정하면 탄젠트 벡터의 체적요소는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_1} &= 4\sin^2 \theta_1 + 4\cos^2 \theta_1 + 1 = 5 \\ t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_2} &= 2\sin \theta_1 \sin \theta_2 + 2\cos \theta_1 \cos \theta_2 + 1 = 2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 1 \\ t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_3} &= -2\sin \theta_1 \cos \theta_1 + 2\cos \theta_1 \sin \theta_1 = 0 \\ t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_1} &= 2\sin \theta_1 \sin \theta_2 + 2\cos \theta_1 \cos \theta_2 + 1 = 2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 1 \\ t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_2} &= \sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 + 1 = 2 \\ t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_3} &= -\sin \theta_2 \cos \theta_1 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 = \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_1} &= -2\sin \theta_1 \cos \theta_1 + 2\cos \theta_1 \sin \theta_1 = 0 \\ t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_2} &= -\sin \theta_2 \cos \theta_1 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 = \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_3} &= \cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1 = 1 \end{aligned} \quad (24)$$

위의 벡터들에 대한 단위 체적값을 계산하면,

$$\begin{bmatrix} t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_1} \cdot t_{\theta_3} \\ t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_2} \cdot t_{\theta_3} \\ t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_1} & t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_2} & t_{\theta_3} \cdot t_{\theta_3} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} = \begin{bmatrix} 5 & 2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 1 & 0 \\ 2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 1 & 2 & \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 & (\theta_1 - \theta_2) & 1 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

여기서 만약 $x = \cos(\theta_1 - \theta_2)$ 로 가정하면 위의 식은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sqrt{10 - 5\sin^2(\theta_1 - \theta_2) - (2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 1)^2} \\ &= \sqrt{10 - 5(1 - x^2) - (2x + 1)^2} \\ &= \sqrt{x^2 - 4x + 4} \\ &= |x - 2| \\ &= |\cos(\theta_1 - \theta_2) - 2| \end{aligned} \quad (27)$$

$$V = \int_0^{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \left(\int_0^{d_1} |\cos(\theta_1 - \theta_2) - 2| dd_1 \right) d\theta_1 \right) d\theta_2 = 8\pi^2 \quad (28)$$

마지막으로 PRP Type의 매니플레이터에 대해서도 같은 방식으로 동작 능력을 계산하기 위하여 매니플레이터의 순기구학을 이용하면 아래와 같은 기본적인 수식을 얻을 수 있고,

$$\begin{aligned} x &= d_1 + d_2 \cos \theta_1 \\ y &= d_2 \sin \theta_1 \\ \theta &= \theta_1 \end{aligned} \quad (29)$$

R Type 관절이 2π Radian만큼 회전할 수 있다고 가정하면, 동작능력에 대한 체적요소는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$V = \int_0^{d_1} \int_0^{d_2} \int_0^{2\pi} |\sin \theta_1| d\theta_1 ds_1 ds_2 = 4d_1 d_2 \quad (30)$$

본 절에서 우리는 동작능력이라는 성능요소를 사용하여 세 가지 형태의 관절 조합에 대한 성능 평가를 시도하였다. 이를 통하여 각 관절의 조합에 따른 매니플레이터의 물리적인 동작 영역을 판별할 수 있다. 계산의 간략화를 위하여 본 논문에서는 링크의 길이를 1로 설정하였고, 각각의 동작영역의 체적을 평면상에서의 동작영역으로 나눈 값을 비교하였다.

$$\begin{aligned} \text{RRR Type: } & \frac{V_{RRR}}{\pi(2 \cdot 1)^2} = 4\pi \\ \text{RPR Type: } & \frac{V_{RPR}}{\pi(l_1 + d_1)^2} = \frac{V_{RPR}}{\pi \cdot 2^2} = \frac{8\pi^2}{4\pi} = 2\pi \\ \text{PRP Type: } & \frac{V_{PRP}}{2l_1l_2 + \pi l_2^2} = \frac{4l_1l_2}{2l_1l_2 + \pi l_2^2} = \frac{4}{2 + \pi} \approx 0.78 \end{aligned}$$

위의 결과를 통해 P Type관절이 증가함에 따라 동작 능력이 현저하게 떨어짐을 확인할 수 있다.

3. Kinematic Isotropy and Optimal Kinematic Design

본 절에서는 제안된 매니플레이터의 링크별 최적 길이를 산출하기 위하여 기구적 등방성(Kinematic Isotropy)를 도입하였다.[5] 본 논문에서는 말단부에 위치한 두 번째 좌표계의 자코비안을 편의상 2J 로 표현하였으며, 수식은 아래와 같다.

$$J \equiv {}^2J = \begin{bmatrix} l_1 \sin_2 & 0 \\ l_2 + l_1 \cos_2 & l_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

위의 자코비안 행렬을 분석하기 위하여 행렬을 분해하는 기법(Golub and Van Loan 1989)이 제안된바 있으며, 각각의 특이치 σ_1, σ_2 를 아래와 같이 계산하는 방식이다.

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{l_1^2 + 2l_2^2 + 2l_1l_2c_2 \pm \sqrt{(l_1^2 + 2l_2^2 + 2l_1l_2c_2)^2 - 4l_1^2l_2^2s_2^2}}{2}} \quad (32)$$

상태수(Condition Number)는 위에서 구해진 최대 특이치와 최소 특이치의 비율로 정의되며, 일반적으로 로봇의 민첩성을 측정하는 잣대로 활용된다. 상태수를 계산함에 있어서, 각 링크의 길이의 비를 이용하여 정의하면 다음과 같다.

$$k = \frac{l_1}{l_2} \quad (33)$$

$$\mu(k, q_2) = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{k^2 + 2 + 2kc_2 + \sqrt{(k^2 + 2 + 2kc_2)^2 - 4k^2s_2^2}}{k^2 + 2 + 2kc_2 - \sqrt{(k^2 + 2 + 2kc_2)^2 - 4k^2s_2^2}}} \quad (34)$$

상태수가 1일 때 가장 최적(최소)의 상태수를 내고, 이는 위해 아래의 조건을 만족하여야 한다.

$$(k^2 + 2 + 2kc_2)^2 = 4k^2s_2^2 \quad (35)$$

이는 조건은 다시 아래의 조건이 만족되었을 때 성립한다.

$$l_1 = l_2\sqrt{2}, \sin \theta_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \cos \theta_2 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (36)$$

따라서, 일반적인 매니플레이터의 민첩성을 고려하였을 때, 링크의 길이 조합은 링크1이 링크2에 비하여 root(2)만큼 긴 조합을 선정하는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 로봇-인간의 협업 동작에 기반하여 특정 작업에 적합한 매니플레이터의 기구적 조합을 선정하였다. 본문의 내용을 정리하면 다음과 같다.(Fig.6)

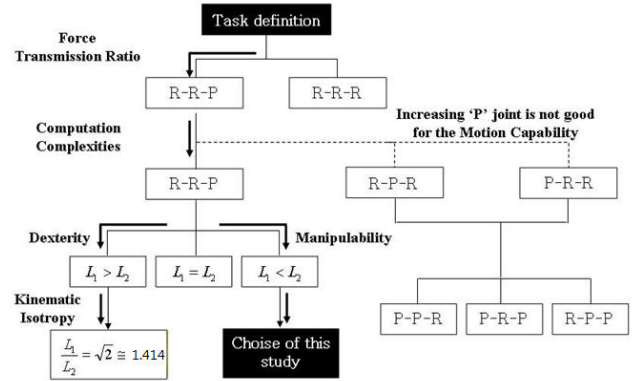


Fig.6 Flow chart showing the decision process for determining the optimal design of a manipulator for the specified task

참고문헌

- (1) SeungNam Yu, SeungYel Lee and ChangSoo Han, "Methodology for the Kinematical Selection of a Manipulator for a Specified Task" Autonomous Robot, vol.22, issue 3, pp.243-253, 2007
- (2) M.W Thring, " Robots and Telechirs", Halsted Press a division of John Wiley & Sons
- (3) Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms" The international journal of Robotics Research, 1985, pp.3~4
- (4) Udai Basavaraj, Joseph Duffy, "End-Effector Motion Capabilities of Serial Manipulators, The international journal of Robotics Research, 1993, pp132~137
- (5) Manja Kircanski, "Kinematic Isotropy and Optimal Kinematic Design of Planar Manipulator and a 3-DOF Spatial Manipulator, Robotic Research, 1996, pp.61~65