

5절 링크구조를 갖는 2자유도 매니퓰레이터의 작업지향설계

Task Based Design of a Two-DOF Manipulator with Five-Bar Link Mechanism

김진영, 조형석

(Jin-Young Kim and Hyung Suck Cho)

Abstract : As the demand for the design of modular manipulators or special purpose manipulators has increased, task based design to design an optimal manipulator for a given task become more and more important. However, the complexity with a large number of design parameters, and highly nonlinear and implicit functions are characteristics of a general manipulator design. To achieve the goal of task based design, it is necessary to develop a methodology to solve the complexity. This paper addresses how to determine the kinematic parameters of a two-degrees of freedom manipulator with parallelogram five-bar link mechanism from a given task, namely, how to map a given task into the kinematic parameters. With a simplified example of designing a manipulator with five-bar link mechanism, the methodology for task based design is presented. And it introduces formulations of a given task and manipulator specifications, and presents a new dexterity measure for manipulator design. Also the optimization problem with constraints is solved by using a genetic algorithm that provides robust search in complex spaces.

Keywords : task based design, five-bar link mechanism, task specification, manipulator specification, optimality criterion, measure of isotropy, measure of dynamic isotropy

I. 서론

로봇 매니퓰레이터(robot manipulator)의 가장 큰 특징은 프로그램을 변경함으로써(programmability) 다양한 작업을 수행할 수 있다는데 있다[1]. 따라서 지금까지의 매니퓰레이터 설계는 이러한 매니퓰레이터의 특성을 살리기 위하여 가능한 한 여러 작업을 수행할 수 있는 범용(general purpose) 매니퓰레이터의 설계를 목적으로 하였다. 즉 다시 말해서 설계조건으로 사용되는 작업영역, 관절 각 한계(joint angle limit), 구동기기의 토크 한계 등은 어느 특정 작업을 대상으로 하여 사양이 결정되지 않는다.

그러나 이와 같이 범용으로 설계된 매니퓰레이터도 응용 영역에 한계가 있을 수 밖에 없으며, 대부분의 작업은 제대로 수행할 수 없다. 예를 들어 SCARA 로봇이 자동차용접에 쓰이기 곤란한 것도 그 예인데, 매니퓰레이터가 주어진 작업에 요구되는 작업영역, 자유도, 속도, 정밀도 등의 요구수준을 갖추고 있어야만 그 작업을 성공적으로 수행할 수 있는 것이다. 반면에 주어진 작업에 대한 과잉사양도 결코 바람직하지 않다 따라서 주어진 작업의 수행에 필요한 요구수준을 만족시키는 가장 적절한 매니퓰레이터를 설계하는 것이 바람직한데, 이를 작업지향설계(task based design)라 하고, 이는 모듈식 매니퓰레이터(modular manipulator)의 경우에 특히 중요하다.

최근들어 로봇 매니퓰레이터가 로딩/언로딩(loading/unloading), 용접, 조립 등의 산업용으로부터 우주, 해저, 원자력 발전소, 의료용 등의 비산업용에 이르기까지 보다

광범위한 영역으로 그 응용 분야를 넓혀 감에 따라 특정 작업을 위한 기능과 성능을 갖는 전용(special purpose) 매니퓰레이터의 필요성이 점점 증대되고 있다. 즉 주어진 작업에 가장 적절한 기능 및 성능 즉 작업영역, 정밀도, 속도, 가반하중 등의 적절한 값을 갖는 매니퓰레이터를 설계하는 것이 중요하게 된다.

작업지향설계에 관한 연구로써 Yoshikawa[2], 그리고 Salisbury 등[3]은 성능지수(performance index)로써 각각 조작성(manipulability)과 조건수(condition number)라는 기구학적 조작성수(dexterity measure)를 제안하고, 이를 이용하여 하나의 작업점이 주어진 경우에 대해 최적의 매니퓰레이터를 설계하는 초보적인 작업지향 기구학적 설계(task based kinematic design)를 수행하였다.

Tsai[4]는 일부의 기구학적 설계인자가 미리 주어진 직렬형 매니퓰레이터를 대상으로 하여 작업수행을 위한 작업영역으로부터 팔길이(link length), 관절각 한계 및 베이스의 위치를 결정하는 작업지향 기구학적 설계를 수행하였다.

Paredis 등[5,6]은 직렬형 매니퓰레이터를 대상으로 작업점(task points) 및 관절각 한계, 장애물 회피(obstacle avoidance)의 작업 사양을 고려하여 이들을 만족시키는 매니퓰레이터의 Denavit-Hartenberg 인자들을 찾아내는 작업지향 기구학적 설계를 수행하였으며, Au[7]는 [5]에서와 같은 방법을 이용하여 fault tolerant 매니퓰레이터의 작업지향 기구학적 설계를 수행하였다.

Kim[8]은 많은 기구학적 사양 및 설계인자를 포함하는 작업지향 기구학적 설계의 절차 및 방법론을 제안하였다. 작업사양의 수학적 표현, 작업지향 기구학적 설계를 위한 최적화 기법 및 성능지수의 제안을 통해 작업지향 기구학

직 설계를 수행함으로써 작업지향설계의 기본 틀(framework)을 제시하였다

한편 작업지향설계는 아니지만 generalized inertia ellipsoid, dynamic manipulability 등의 동력학적 성능지수를 제안하고, 이를 이용하여 주어진 매니플레이터의 크기(dimension) 및 질량분포 등을 재설계(redesign)함으로써 동력학적 성능향상을 꾀한 연구도 있다[9-11].

또한 Inoue[12]는 기구학적 사양 및 동력학적 사양을 모두 고려하고 기계부품에 관한 데이터베이스와 결합하여 직렬형 매니플레이터를 설계하는 연구를 수행하였는데, 이 연구는 설계자가 결정한 설계인자에 대해 이를 보정해 나가는 방법을 취하고 있다.

그러나 이상과 같은 매니플레이터의 작업지향설계에 관한 연구는 모두 직렬형 매니플레이터를 대상으로 하였으며, 5절 링크기구와 같이 병렬구동 구조를 갖는 매니플레이터를 대상으로 한 연구는 없다 또한 동력학까지 고려하여 기구학적 설계인자 또는 동력학적 설계인자를 결정하고자 한 연구도 흔치 않다. 따라서 본 논문에서는 향후 그 응용이 더욱 늘어나리라 예상되는 평행사변형 5절 링크구조를 갖는 매니플레이터를 대상으로 하여 기구학적 설계인자를 결정하는 작업지향 기구학적 설계를 수행하되, 기구학 뿐만 아니라 동력학까지 고려한 설계방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 진다. 우선 II장에서는 본 논문의 설계 대상인 5절 링크구조를 갖는 매니플레이터의 특성을 기술하고, III장에서는 작업지향설계의 정의 및 방법론을, IV장에서는 작업지향 기구학적 설계의 예제로써 기구학만을 고려한 설계를, V장에서는 동력학적 성능지수의 제안을 통해 동력학을 고려한 설계방법을 보여 준다. 그리고 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 5절 링크구조의 특성

5절 링크구조(five-bar link mechanism)를 갖는 매니플레이터는 그 기구의 특성으로 인하여 오늘날 많은 분야에 응용되고 있는데 특히 용접, 도장, 핸들링(handling), 실링(sealing), 디버링(deburring), 조립 등의 산업용은 그 대표적인 예이다.

그림 1에 보여지는 것처럼 하부링크(lower link)가 베이스에 위치한 모터에 의하여 구동되고, 상부링크(upper link)는 하부링크의 선단에 위치한 모터에 의하여 구동되는 직렬구동 기구(serial drive mechanism)의 경우에는 제 2 모터의 무게가 제 1 모터의 부하로 될 뿐만 아니라, 또한 제 2 모터의 반작용 토크가 제 1 모터에 작용하게 된다. 그러나 5절 링크로 이루어진 병렬구동 기구(parallel drive mechanism)의 경우에는 두 모터가 모두 베이스에 위치하므로 한 모터의 무게가 다른 모터의 부하로 되지 않을 뿐만 아니라 한 모터의 반작용 토크도 다른 모터에 직접적인 영향을 주지 않는다[13].

이러한 5절 링크구조는 같은 모터, 같은 작업영역을 갖는 직렬구동 기구에 비해 동력소모가 작을 뿐만 아니라, 특히 그림 2에서와 같은 평행사변형 5절 링크구조

(parallelogram five-bar link mechanism)의 경우에는 매니플레이터의 링크가 불변 및 독립된 관성(invariant and decoupled inertia tensor)[13]을 갖도록 설계할 수 있고 이로 인해 동력학이 단순화될 뿐 아니라, 또한 큰 구조적 강성(structural stiffness)을 갖는다는 장점이 있다 이상에서 기술한 평행사변형 5절 링크구조의 직렬형 구조에 대한 장점을 요약하면 (a) 작은 동력소모, (b) 간단한 동력학, (c) 큰 구조적 강성, (d) 모터간의 직접적인 영향배제 등을 들 수 있다.

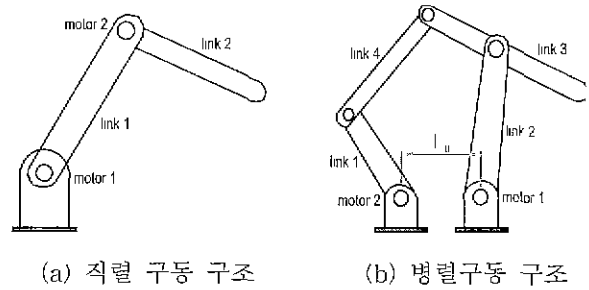


그림 1. 직렬구동 구조와 병렬구동 구조.

Fig. 1. A serial drive mechanism and a parallel drive mechanism.

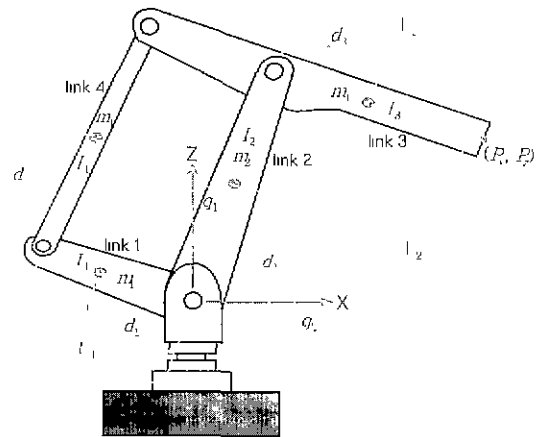


그림 2. 평행사변형 5절 링크 구조를 갖는 2 자유도 매니플레이터.

Fig. 2. Two-DOF parallelogram five-bar link mechanism.

한편 이와 같은 장점으로 인해 5절 링크구조를 갖는 매니플레이터는 그 응용이 더욱 늘어날 것으로 예상되지만, 설계 입장에서 보면 그 구조상 직렬형에 비해 더 복잡하고, 따라서 5절 링크구조를 갖는 매니플레이터의 설계방법이 제안되면 이를 직렬형 매니플레이터에 적용하는 것은 그리 어렵지 않을 것으로 예상할 수 있다.

III. 작업지향설계 문제의 정의

작업지향설계의 최종 목적은 결국 주어진 작업(task)으로부터 매니플레이터의 기구학적, 동력학적 설계인자

(kinematic and dynamic design parameters)들을 결정하는 것이다. 작업사양은 크게 매니플레이터의 기구학에만 영향을 미치는 기구학적 사양(kinematic specification)과 기구학 및 동력학에 모두 영향을 미치는 동력학적 사양(dynamic specification)으로 구분될 수 있는데, 기구학적 사양에는 작업영역, 기구요인에 의한 최대 위치오차 등이 있으며, 동력학적 사양에는 가반하중, 최대 관절속도 및 가속도 등이 있다. 이와 같이 작업사양을 두 가지로 구분하듯이 매니플레이터 설계도 기구학적 설계와 동력학적 설계의 두 단계로 구분할 수 있는데[14], 기구학적 설계는 매니플레이터의 기구학적 설계인자를 결정하는 단계이며, 동력학적 설계는 동력학적 설계인자를 결정하는 단계이다.

한편 동력학적 설계에 의해서는 기구학적 설계인자의 변화가 야기될 수 있기 때문에 기구학적 사양 및 동력학적 사양을 모두 만족시키는 매니플레이터를 설계하기 위해서는 기구학적 설계 및 동력학적 설계를 반복 수행할 필요가 있다. 즉 대부분의 매니플레이터 설계는 그림 3에 보여진 것처럼 작업사양이 주어지면 그에 따라 기구학적 설계, 동력학적 설계, 그리고 상세 구조설계, 제어기 설계 등으로 진행되어 지는데, 그들은 서로에 영향을 미치기 때문에 주어진 사양에 만족될 때까지 반복 수행되어 진다. 이러한 반복 설계방법은 작업지향설계에도 마찬가지로 적용될 수 있다.

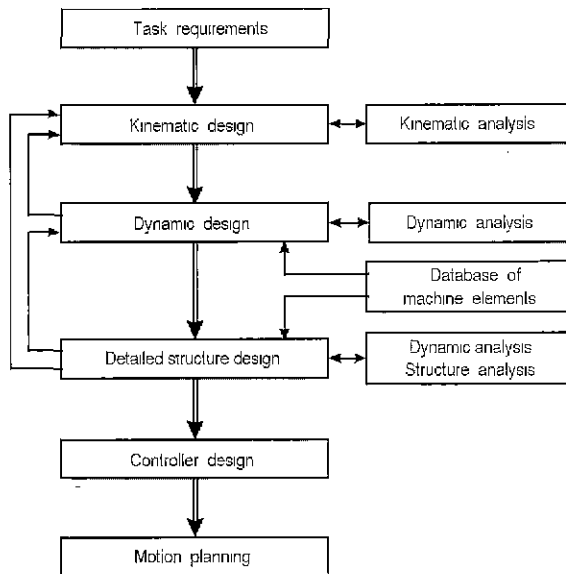


그림 3 매니플레이터 설계의 절차.
Fig. 3. Iterative manipulator design procedure

한편 작업지향설계를 이루는 요소로서는 작업사양(task specification)과 매니플레이터 사양(manipulator specification), 그리고 최적화 조건(optmality criterion)이 있는데, 작업사양은 위에서 기술한 바와 같다. 매니플레이터 사양의 예로는 관절각 한계 또는 매니플레이터 설계인자에 대한 구속조건 등을 들 수 있다. 최적화 조건으로는 작업점(task point)에서의 조작성수(dexterity measure), 또는 매니플레이터의 총 중량, 비용 등이 주로 사용된다.

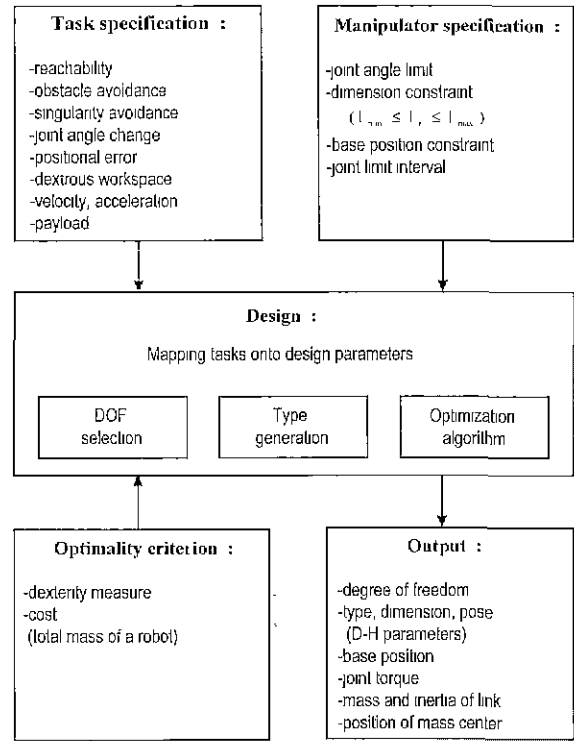


그림 4 매니플레이터의 작업지향설계 방법.
Fig. 4. A methodology for task based design of manipulator

즉 작업지향설계 문제는 그림 4에 보여진 것처럼 작업 사양과 매니플레이터 사양으로부터 최적화 조건을 이용하여 매니플레이터의 자유도 및 형태(type), 그리고 각 링크의 크기 및 질량 등 기구학적, 동력학적 설계인자를 결정하는 것이며, 이후에 운동계획(motion planning) 및 제어 변수의 결정도 이루어질 수 있다.

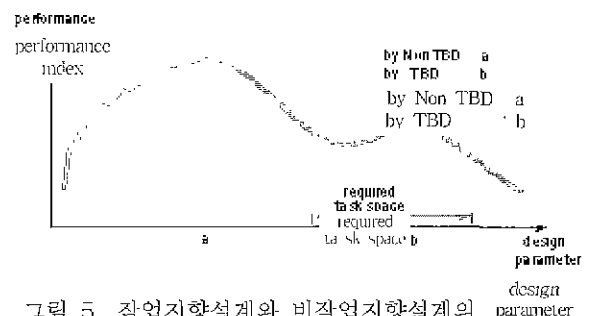


그림 5 작업지향설계와 비작업지향설계의 비교.
Fig. 5. Comparison of task based design and non task based design.

그림 5는 작업지향설계와 비작업지향설계가 아닌 기존의 단순 최적설계에 의한 설계결과가 달라질 수 있음을 보여 준다. 즉 작업지향설계는 주어진 작업사양을 기준으로 그 사양에 맞는 설계인자 설정을 추구한다.

한편 결정해야 할 설계인자가 너무 많고, 또 그들 사이의 관계가 매우 복잡하기 때문에 우선순위에 입각하여 설계인자를 결정하는 것이 필요한데, 반복 설계방법이 한 에

가 될 수 있다. 또한 최적화를 위한 최적화 알고리즘의 선택도 중요한 문제이다. 비선형적이고 복잡한 관계를 갖는 많은 설계인자를 하나의 작업점이 아닌 여러 개의 작업점 또는 작업영역에 대해 최적화하기 위해서는 기존의 최적화 알고리즘으로는 곤란하고, 보다 강력한 탐색기능과 전역 최적점으로서의 수렴성을 갖는 알고리즘이 필요하다. 이러한 기본 틀 하에서 작업사양 및 매니플레이터 사양의 수식화(formulation)가 필요하며, 또한 최적화 조건으로써 성능지수의 선택이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 평행사변형 5절 링크기구를 갖는 2자유도 매니플레이터를 대상으로 작업지향설계를 수행함으로써 문제해결을 위한 설계방법의 기본 틀을 제시하되, 단순화를 위해 기구학적 설계인자인 Denavit-Hatenberg 인자만을 결정하는 것으로 한다. 이를 위하여 매니플레이터 사양을 수학적으로 표현하고, 최적화 조건으로써 동력학을 고려한 새로운 성능지수를 제안함으로써 기구학 뿐만 아니라 동력학까지 고려한 설계인자 결정을 시도하고자 한다. 또한 최적화 알고리즘으로써는 전역 최적점으로서의 수렴성이 뛰어난 유전 알고리즘을 이용한다[15]. 더 복잡한 설계문제에 있어서도 본 논문에서 보여 준 기본 틀 하에서 같은 방법이 확대 적용될 수 있을 것이다.

IV. 기구학만을 고려한 기구학적 설계

작업사양으로써는 그림 6과 같은 12개의 작업점이 매니플레이터가 수행해야 할 작업을 대표하는 것으로 하고, 결정해야 할 설계 인자로는 기구학적 설계인자만을 고려하여 그림 2에서 Denavit-Hatenberg 인자인 ($l_1, l_2, l_3, \theta_1, \theta_2$)을 결정하는 것으로 하였다. 여기에서 링크길이 중 l_1 은 기구학적 위치 결정에 영향을 미치지 않으므로 기구학적 설계인자만을 결정하는 본 시뮬레이션에서는 설계인자에서 제외하였다.

관절각은 5절 링크구조의 역기구학이 완성된 형태(closed-form)의 해를 가지므로 이를 이용하여 결정될 수 있다. 매니플레이터 사양의 구속조건으로써는 관절각 범위를 $-80^\circ \leq \theta_1 \leq 80^\circ, \theta_1 - 80^\circ \leq \theta_2 \leq \theta_1 + 80^\circ$ 로 가정하여 제한하였으며, 이는 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$C_j = -w_j \sum_{i=1}^d [\sum_{k=2}^i [\max(0, \theta_k^i - \theta_{k, \max}) + \max(0, \theta_{k, \min} - \theta_k^i)] + [\max(0, \theta_2^i - (\theta_1^i + \theta_{2, r \max})) + \max(0, (\theta_1^i - \theta_{2, r \min}) - \theta_2^i)]] \quad (1)$$

여기서 w_j 는관절각 범위 구속조건 of 가중치(weight)이고, $\theta_{k, \max}, \theta_{k, \min}$ 은 각 링크의 관절각에 대한 상한값과 하한값을 나타내며, $\theta_{2, r \max}, \theta_{2, r \min}$ 은 θ_1, θ_2 사이의 허용 가능한 관절각의 상한값과 하한값을, 그리고 d 는 작업점의 개수, i 는 자유도를 나타낸다.

한편 본 시뮬레이션에서의 성능지수로는 매니플레이터의 차수(order)와 와 크기(scale)에 무관한 등방성 지수(measure of isotropy)[8] Δ 를 이용하였으며, 이를 이용한 수식화 결과는 다음과 같다.

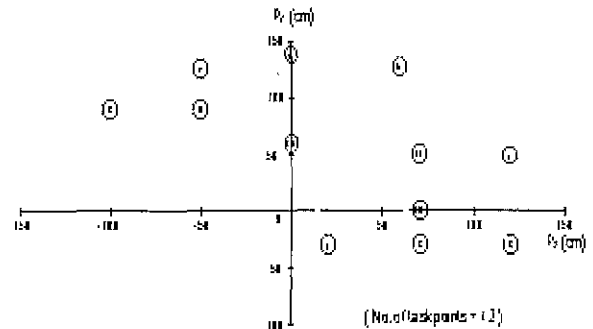


그림 6. 작업지향설계의 예제를 위한 작업사양.
Fig. 6. Task specification for an example of task based kinematic design.

$$C_P = W_P \sum_{i=1}^T \Delta = w_p \sum_{i=1}^T \frac{M_i}{\Psi} \quad (2)$$

$$= w_p \sum_{i=1}^T \frac{m \sqrt{\det(JJ^T)}}{\text{trace}(JJ^T)/m} = w_p \sum_{i=1}^T \frac{m \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m}}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p)/m}$$

여기서 M_i 는 차수에 무관한 조작성(Order-independent manipulability)이고, w_p 는 성능지수 조건의 가중치, m 은 차수(order), J 는 자코비안 행렬, Ψ 는 JJ^T 의 특이값에 대한 산술평균, λ 는 JJ^T 의 특이값을, 그리고 i 는 작업점의 개수를 나타낸다. 등방성 지수는 매니플레이터의 차수와 크기에 무관하고, 또한 수학적 표현이 가능하다는 장점을 갖기 때문에 매니플레이터 설계에 적합한 성능지수임을 알 수 있다.

이상과 같은 매니플레이터 사양 및 성능지수의 수식 표현으로부터 최적화를 위한 목적함수(fitness function) F 를 $F=C_1 + C_p$ 로 하고, 이를 이용하여 유전 알고리즘(genetic

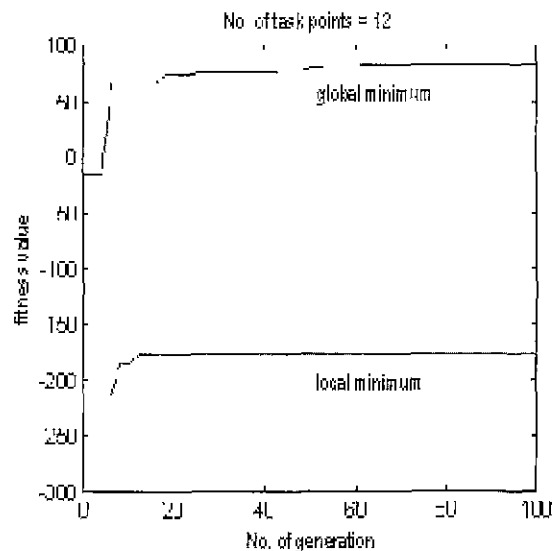


그림 7. 기구학적 성능지수에 의한 설계결과.
Fig. 7. Design results by kinematic performance index.

algorithm)에 의해 최적화를 수행한다. F 를 최대화 하는

최적화를 위하여 각 가중치 w_i 와 w_p 는 양의 적절한 값을 선정하되, 일반적으로 C_i 와 같이 보다 엄격하게 성립되어야 하는 항의 가중치 w_i 를 그렇지 않은 항의 가중치보다 상대적으로 더 크게 설정한다. 그림 7은 최적화 진행(generation)에 따른 목적함수의 수렴상황을 보여 주며, 여기서 가중치는 $w_i=20, w_p=10$ 으로 하였다. 설계 해의 집단이 생물학적 유전 법칙인 복제(reproduction), 교배(crossover), 및 돌연변이(mutation)의 과정을 거치면서 목적함수를 최대로 하는 설계 해를 탐색하는 유전 알고리즘은 다른 최적화 기법과 비교하여 전역 최적점을 찾아낼 수 있는 가능성을 더 많이 내포하고 있다.[15] 따라서 매니플레이터 설계라는 매우 복잡한 최적화 문제에서 적절한 알고리즘을 알 수 있다.

전역 최적점(global optimum)으로 수렴한 경우의 설계 결과는 링크길이가 $l_2=77cm, l_3=80cm$ 이며, 이들과 각각의 작업점에 대응하는 관절각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_1^1 &= 64.9^\circ, & \theta_2^1 &= 128.4^\circ, & \theta_1^2 &= 50.2^\circ, & \theta_2^2 &= 82.2^\circ, \\ \theta_1^3 &= 65.2^\circ, & \theta_2^3 &= 51.2^\circ, & \theta_1^4 &= 32.5^\circ, & \theta_2^4 &= 10.7^\circ, \\ \theta_1^5 &= 0.1^\circ, & \theta_2^5 &= -41.5^\circ, & \theta_1^6 &= -27.5^\circ, & \theta_2^6 &= -63.6^\circ, \\ \theta_1^7 &= -53.4^\circ, & \theta_2^7 &= -81.5^\circ, & \theta_1^8 &= -79.7^\circ, & \theta_2^8 &= -107.6^\circ, \\ \theta_1^9 &= -79.3^\circ, & \theta_2^9 &= -71.3^\circ, & \theta_1^{10} &= -70.2^\circ, & \theta_2^{10} &= -25.1^\circ, \\ \theta_1^{11} &= -4.0^\circ, & \theta_2^{11} &= 19.6^\circ, & \theta_1^{12} &= 24.3^\circ, & \theta_2^{12} &= 61.3^\circ \end{aligned}$$

한편 그림 7에 보여지는 것처럼 간혹 $l_2=100cm, l_3=92cm$ 와 같이 바람직하지 못한 국부 최적점(local optimum)으로 수렴한 경우도 있었으나, 거의 대부분의 경우에는 전역 최적점으로 수렴함을 확인하였다. 수렴 성능을 더욱 높이기 위해서는 다단계 유전 알고리즘[8]과 같은 방법을 이용할 수 있을 것이다.

V. 동역학을 고려한 기구학적 설계

본 장에서는 IV장에서와 같은 문제에 대해 기구학 및 동역학을 모두 고려한 작업지향 기구학적 설계를 수행하고자 한다. 우선 Lagrange-Euler 방정식을 이용하여 구한 2 자유도 평행사변형 5절 링크구조의 동역학은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= M_{11}\ddot{\theta}_1 + M_{12}\ddot{\theta}_2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2^2 + \Phi_1 \\ \tau_2 &= M_{21}\ddot{\theta}_1 + M_{22}\ddot{\theta}_2 + \frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \Phi_2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 τ_i, θ_i 는 i 번째 관절의 토크 및 관절각이고, $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ 는 관성가속도 관련 행렬(inertial acceleration-related matrix)의 요소이며, Φ_i 는 코리올리 및 원심력 벡터(Coriolis and centrifugal force vector)의 요소들이다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= m_2d_2^2 + m_3l_2^2 + m_4d_4^2 + I_2 + I_4 \\ M_{22} &= m_1d_1^2 + m_3l_3^2 + m_4l_1^2 + I_1 + I_3 \end{aligned}$$

$$M_{12} = M_{21} = (m_3d_3l_2 - m_4l_1d_4)\sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (4)$$

$$\Phi_1 = -(m_2d_2 + m_3l_2 + m_4d_4)g\sin(\theta_2)$$

$$\Phi_2 = (m_1d_1 + m_3d_3 + m_4l_1)g\cos(\theta_3)$$

여기서 m_i, l_i, I_i, d_i 는 i 번째 링크의 질량, 길이, 질량 관성모멘트, 관절에서 질량중심까지의 길이를 나타내며, g 는 중력 가속도이다.

한편 본 시뮬레이션에서는 모든 링크는 균일한 질량분포를 갖는 원기둥(cylinder)형상이라고 가정했고, 따라서 $d_1=l_1/2, d_2=d_1=l_2/2, d_3=(l_3-l_1)/2, I_1=1/12 m_1l_1^2, I_2=1/12 m_2l_2^2, I_3=1/12 m_3(l_1+l_3)^2, I_4=1/12 m_4l_2^2$ 으로 된다. 단 일반적인 링크 형상의 경우라면 그에 따른 d_i, I_i 를 구해야 할 것이다 또한 Asada 등[13]이 평행사변형 5절 링크 구조에서 동역학을 간단히 하기 위해 제안한 조건인 상호작용 배제조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{m_3 d_3}{m_1 d_1} = \frac{l_1}{l_2} \quad (5)$$

(5)를 만족하도록 설계되어 진다고 가정하고, 또한 각 링크의 질량이 IV장에서 기구학만을 고려함으로써 구해진 링크길이를 기초로 그것에 비례한다고 가정하면, 각 링크 질량은 $m_1=16Kg, m_2=29Kg, m_3=59Kg, m_4=16Kg$ 으로 된다.

주어진 작업사양 및 결정해야 할 설계인자, 매니플레이터 사양 등의 구속조건은 IV장과 동일하게 하였으며, 성능지수로는 IV장에서 사용한 등방성 지수(measure of dynamic isotropy) Δ_d 를 새로이 제안하였다. 동역학적 등방성 지수 Δ_d 는 Δ 와 마찬가지로 매니플레이터의 차수와 크기에 무관할 뿐 아니라 또한 동역학이 고려되어 있기 때문에 동역학을 고려하여 매니플레이터를 설계하고자 하는 경우의 성능지수로서 유용하며, 이것과 이를 이용한 수식화 결과는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta_d &= \frac{M_d}{\Psi_d} = \frac{m\sqrt{\det(J(M^T M)^{-1} J^T)}}{\text{trace}(J(M^T M)^{-1} J^T)/m} \\ &= \frac{m\sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_m}}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots \lambda_m)/m} \\ C_{pd} &= w_{pd} \sum_{i=1}^m \Delta_d \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 M_d 는 차수에 무관한 조작성(order-independent manipulability)이고, w_{pd} 는 성능지수 조건의 가중치, m 는 차수(order), J 는 자코비안 행렬, m 은 관성가속도 관련 행렬, Ψ_d 는 $J(M^T M)^{-1} J^T$ 의 특이값에 대한 산술평균, λ 는 $J(M^T M)^{-1} J^T$ 의 특이값을 나타낸다. Δ_d 에 코리올리 및 원심력 벡터는 포함되어 있지 않으나 관성가속도 관련 행렬에 의해 동역학이 고려되고 있다.

이상과 같은 매니플레이터 사양 및 성능지수의 수식 표현으로부터 최적화를 위한 목적함수(fitness function) F 는

IV장과 유사하게 $F = C_j + C_{pd}$ 로 하고, 이를 이용하여 $w_j = 20$, $w_{pd} = 10$ 의 가중치를 가지고 유전 알고리즘에 의해 최적화를 수행한다. 그림 8은 최적화 진행에 따른 목적함수의 수렴 상황을 보여준다.

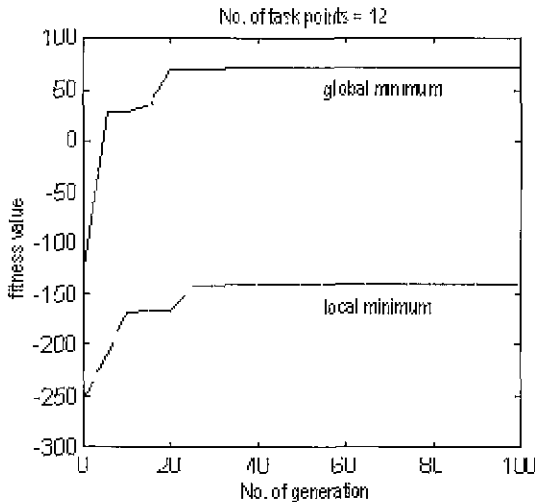


그림 8. 동력학적 성능지수에 의한 설계결과.
Fig. 8. Design results by dynamic performance index.

전역 최적점(global optimum)으로 수렴한 경우의 설계 결과는 링크길이가 $l_2 = 74cm$, $l_3 = 80cm$ 이며, 이들과 각각의 작업점에 대응하는 관절각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_1^1 &= 60.4^\circ, & \theta_2^1 &= 123.6^\circ, & \theta_1^2 &= 48.8^\circ, & \theta_2^2 &= 79.7^\circ, \\ \theta_1^3 &= 65.8^\circ, & \theta_2^3 &= 49.0^\circ, & \theta_1^4 &= 33.5^\circ, & \theta_2^4 &= 8.4^\circ, \\ \theta_1^5 &= 2.3^\circ, & \theta_2^5 &= -44.5^\circ, & \theta_1^6 &= -25.7^\circ, & \theta_2^6 &= -66.4^\circ, \\ \theta_1^7 &= -52.1^\circ, & \theta_2^7 &= -84.0^\circ, & \theta_1^8 &= -78.4^\circ, \\ \theta_2^8 &= -110.1^\circ, & \theta_1^9 &= -79.6^\circ, & \theta_2^9 &= -73.4^\circ, \\ \theta_1^{10} &= -72.5^\circ, & \theta_2^{10} &= -28.1^\circ, & \theta_1^{11} &= -5.0^\circ, \\ \theta_2^{11} &= 17.2^\circ, & \theta_1^{12} &= 22.6^\circ, & \theta_2^{12} &= 58.7^\circ \end{aligned}$$

IV장에서와 마찬가지로 $l_2 = 96cm$, $l_3 = 88cm$ 와 같이 간혹 바람직하지 못한 국부 최적점으로 수렴한 경우도 있으나, 이는 다단계 유전 알고리즘[8]과 같이 개선된 유전 알고리즘에 의해 해결될 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 평행사변형 5절 링크구조를 갖는 2자유도 매니퓰레이터를 대상으로 여러 작업점이 작업사양으로써 주어진 경우에 대해 최적의 링크길이를 구하는 작업지향 기구학적 설계를 수행하였다. 그 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

a) 매니퓰레이터의 작업지향설계 문제에 있어서 단순화된 예제를 통해 작업사양 및 매니퓰레이터 사양, 성능지수

등을 수식화(formulation)하고, 이를 이용하여 기구학적 설계인자를 결정하는 설계방법을 보여 줌으로써 작업지향설계의 기본 틀을 제시하였다. 이러한 방법론은 더 많은 설계인자를 결정하는 경우에도 제시된 기본 틀 하에서 같은 방법이 확대 적용될 수 있다.

b) 여러 개의 작업점이 주어진 경우에 있어서 등방성 지수 Δ 및 동력학적 등방성 지수 Δ_d 를 성능지수로 하여 이에 대한 최적의 링크길이 l_2, l_3 를 구할 수 있는데, 이들은 매니퓰레이터의 차수 및 크기에 무관하고 수학적으로 표현될 수 있다는 장점으로 인해 매니퓰레이터 설계를 위한 성능지수로써 매우 유용하게 사용될 수 있다. 한편 Δ 를 성능지수로 한 경우는 기구학만을 고려한 설계이지만 Δ_d 를 성능지수로 한 경우는 기구학 및 동력학을 모두 고려한 설계가 된다. 향후 동력학적 설계인자를 구하는 경우에도 Δ_d 는 여전히 유용할 것이다.

c) 전역 최적점으로서의 수렴 성능이 뛰어난 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 매우 복잡하고 비선형적인 매니퓰레이터 설계 문제의 최적해를 쉽게 구할 수 있었다.

향후과제로는 동력학적 설계인자를 결정하는 작업지향 동력학적 설계(task based dynamic design)가 수행되어진다.

참고문헌

- [1] J. L. Nevins and D. E. Whitney, Research on advanced assembly automation, *Computer*, pp. 24-38, Dec., 1977.
- [2] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *The International J. of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
- [3] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated hands : Force control and kinematic issues," *The International J. of Robotics Research*, vol. 1, no. 1, pp. 4-17, 1982.
- [4] Y. C. Tsai and A. H. Soni, "Workspace synthesis of 3R, 4R, 5R, and 6R robots," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 20, no. 6, pp. 555-563, 1985.
- [5] C. J. Paredis and P. K. Khosla, "An approach for mapping kinematic task specifications into a manipulator design," *5th Int. Conf. on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, pp. 556-561, 1991.
- [6] C. J. Paredis and P. K. Khosla, "Kinematic design of serial link manipulators from task specifications," *The International J. of Robotics Research*, vol. 12, no. 3, pp. 274-287, 1993.
- [7] W. K. F. Au, *Fault tolerant manipulator design*, M.S. Thesis, Carnegie Mellon University, 1992.
- [8] J. O. Kim, *Task based kinematic design of robot manipulators*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, 1992.
- [9] H. Asada, "A geometrical representation of manipulator dynamics and its application of arm

- design," *Trans. of ASME: J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 105, no. 3, pp. 131-135, 1983.
- [10] T. Yoshikawa, "Dynamic manipulability of robot manipulators," *J. of Robotic Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 113-124, 1985.
- [11] O. Khatib and J. Burdick, "Optimization of dynamics in manipulator design : The operational space formulation," *International J. of Robotics and Automation*, vol. 2, no. 2, pp. 90-98, 1987.
- [12] K. Inoue, K. Shina, M. Takano, and K. Sasaki, "Study on total computer-aided design system for robot manipulators," *24th Int. Sym. on Industrial Robot*, pp. 729-736, 1993.
- [13] H. Asada and K. Youcef-Toumi, "Analysis and design of a direct-drive arm with a five-bar-link parallel drive mechanism," *Trans. of ASME: J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 106, no. 3, pp. 225-230, 1984.
- [14] A. Krishnan, *A Methodology to Determine the Dynamic Configuration of a Reconfigurable Manipulator*. M.S. Thesis, Carnegie Mellon University, 1989.
- [15] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

김진영

제어·자동화·시스템공학논문지 제5권, 제7호, 참조

조형석

제어·자동화·시스템공학논문지 제4권, 제1호, 참조