

유전 알고리즘을 이용한 매니퓰레이터의 최적 링크 길이 선정

Optimal Link Length of The Manipulator Using Genetic Algorithm

***임현섭¹, 한창수¹, 황순용², 김현국², 신규식¹**

*H. S. Lim¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)¹, S. W. Hwang², H. G. Kim², K. S. Shin¹

¹ 한양대학교 기계공학과, ² 한양대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Genetic Algorithm, Optimal Link Length, Manipulability, 7 DOF Manipulator

1. 서론

최근 전문적인 용도의 산업, 군사, 의료용 매니퓰레이터를 비롯하여 개인적인 용도의 홈서비스, 엔터테인먼트, 실버용 매니퓰레이터까지 다양한 분야에서 사람의 팔 형태를 가지는 매니퓰레이터의 활용이 증가하고 있다. 이러한 매니퓰레이터의 설계 시 중요히 고려되어야 할 것은 매니퓰레이터의 성능에 큰 영향을 미치는 액추에이터의 배치 및 링크의 길이와 같은 기구학적 구조이다. 7 자유도 매니퓰레이터의 경우 액추에이터의 배치는 사람과 같게 배치를 함으로써 더 좋은 성능을 낼 수 있었지만, 링크의 길이 같은 경우 일반적으로 설계자의 직관과 경험에 기초하여 결정됐다. 하지만, 링크 길이는 기구학적 성능에 가장 많은 영향을 미치므로 다양한 적용분야와 환경에 따른 민첩성(Dexterity)이 고려되어야 한다. 대표적인 민첩성 지표로는 어떤 위치에 도달할 수 있는 능력 혹은 특정 위치에서 위치를 변화시킬 수 있는 능력을 의미하는 조작성(Manipulability)[1]이 있다.

본 연구에서는 특정 작업에 대한 7자유도 매니퓰레이터의 기구학적 성능 지표인 조작성을 최대화하는 최적 링크 길이를 찾는 것을 목표로 하며 이를 위해 두 부모의 유전자로부터 그들 자신의 유전자를 형성하는 유성생식과 자연환경에서 일어나는 진화원리를 적용한 유전 알고리즘을 사용하였다.

2. 기구학 해석

본 연구에 사용된 매니퓰레이터는 Fig.1과 같이 어깨 3자유도, 팔꿈치 1자유도, 팔목 3자유도로 총 7자유도로 이루어져 있다. 이는 기존의 6자유도 로봇에 비해 여자유도를 가지고 있어 더 부드러운 움직임과 장애물 회피 등의 장점을 가지고 있다. 정기구학 해석은 Denavit Hartenberg 표기법[2]에 따라 Table.1의 DH Table을 바탕으로 변환행렬(Transformation Matrix)을 이용하여 해석하였다. 다음으로, 기하학적인 방법을 이용한 매니퓰레이터의 역기구학 해석[3,4]을 위해 Fig. 2에서와 같이 주어진 각 링크의 길이 L_1, L_2, L_3, L_4 를 이용하여 Base, Shoulder, Elbow, Wrist, 그리고 End-Effector의 위치를 구한 후, Base에서 Shoulder까지의 벡터 \vec{BS} , Shoulder에서 Elbow까지의 벡터 \vec{SE} , Elbow에서 Wrist까지의 벡터 \vec{EW} , Wrist에서 End-Effector까지의 벡터 \vec{WE} 를 구성한다. 이를 바탕으로 θ_2 는 \vec{BS} 와 \vec{SE} 의 내적, θ_4 는 \vec{SE} 와 \vec{EW} 의 내적, θ_6 는 \vec{EW} 와 \vec{WE} 의 내적으로 구할 수 있으며 θ_1 은 0번에서 2번 프레임까지의 회전행렬(Rotational Matrix) 2_0R 의 Y축 성분, θ_3 는 3_0R 의 Y축 성분과, θ_5 는 5_0R 의 Y축 성분으로 구할 수 있으며 θ_7 은 0번 프레임에서 6번 프레임까지의 변환행렬 6_0T 의 역행렬과 End-Effector의 위치와 방위를 이용하여 구할 수 있다.

Table 1 D-H (Denavit-Hartenberg) Table

Link No.	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	L_1	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	$\pi/2$	0	L_2	θ_3
4	$-\pi/2$	0	0	θ_4
5	$\pi/2$	0	L_3	θ_5
6	$-\pi/2$	0	0	θ_6
7	$\pi/2$	0	L_4	θ_7

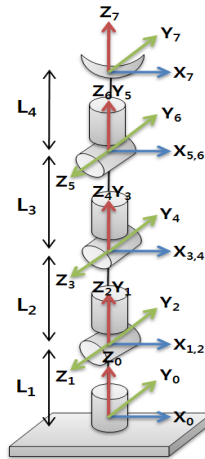


Fig. 1 Robot Configuration

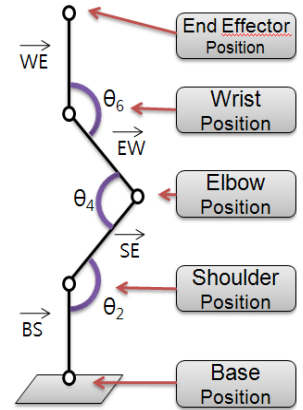


Fig. 2 Inverse kinematics

3. 매니퓰레이터의 성능지수

최적화의 목적함수로는 매니퓰레이터의 성능측정 지표로 널리 사용되는 조작성이 사용되었다. 조작성은 일본의 Yoshikawa에 의해 제안되었으며 매니퓰레이터가 얼마나 특이점(Singular Point)에서 떨어져 있는지를 나타낸다. 조작성 W의 값은 특이점에서는 0이 되며 동작성이 클수록 매니퓰레이터는 더 좋은 성능을 낼 수 있다. 조작성 W는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$W = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (1)$$

여기서 J는 매니퓰레이터의 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)을 의미하며 7 자유도 매니퓰레이터의 자코비안 행렬은 G-H Formulation에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$J = \begin{bmatrix} z_0 \times (p_7 - p_0) & z_1 \times (p_7 - p_1) & \dots & z_6 \times (p_7 - p_5) \\ z_0 & z_1 & \dots & z_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $z_{i-1} = R_1^0 \dots R_{i-1}^{i-2} z_0$, $p_{i-1} = T_1^0 \dots T_{i-1}^{i-2} p_0$ 이다.

4. 유전알고리즘의 적용

유전자 알고리즘[5-6]은 Darwin이 주장한 자연 진화의 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 Holland에 의해 개발된 최적화 탐색 알고리즘이다. 이 알고리즘의 원리는 Fig.3에서와 같이 자연계의 유전과정을 모방하여 생물학적인 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 가지는 문자열(String) 사이에서 선택(Selection), 교배(Crossover) 및 변이(Mutation) 등의 연산을 통해 현재의 조건보다 적합한 조건을 찾아가는 과정을 반복 수행하면서 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 감으로써 최적해를 찾을 수 있다.

기존의 최적화 기법이 한 점에서 한 점으로의 이동에 의한 국부적인 탐색과정을 가지지만 유전 알고리즘은 여러 개의 설계 점들이 집단(Population)을 이루어 동시에 탐색을 행하여 보다 넓은 설계영역에 대한 정보를 활용함으로써 전역 최적점에 수렴할 확률이 기존 방법보다 매우 크다. 또한, 목적함수와 제한

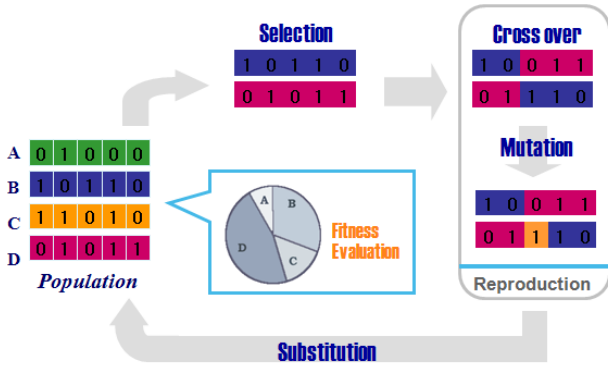


Fig. 3 Diagram of the genetic algorithm

조건의 값을 사용하고 다른 정보들이 필요하지 않는 직접 탐색방법을 이용하므로 복잡하고 다양한 환경의 최적화 문제에 적합하다.

본 연구에서는 정의된 작업은 Fig. 4에서와 같이 Y-Z 평면에 타원을 그리는 작업이다. 이러한 작업을 수행하는 경우 장애물 회피 등을 위한 여자유도가 필요하지 않기 때문에 Shoulder에서 Wrist로의 벡터를 기준으로 여자유도를 위한 각도 θ 는 고정된 상태이며 손목의 방위(Orientation)는 Y-Z 평면에 수직인 상태이다. 최적화 대상은 총 4개의 링크로 이루어져 있는 1500mm 길이의 7자유도 매니플레이터이며, 지정된 작업을 수행할 때 작업 궤적에서 72개의 점에서 조작성을 측정하여 평균값이 최대화되는 4개의 링크 길이를 찾는 것이 목표이며 이에 대한 목적 함수와 제한 조건은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize : } & f(x) = \sqrt{\det(JJ^T)} \\ \text{Subject to : } & g(x) = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 1500 \\ & 300 \leq L_1 \leq 500, 400 \leq L_2 \leq 600 \\ & 300 \leq L_3 \leq 600, 100 \leq L_4 \leq 300 \end{aligned} \quad (3)$$

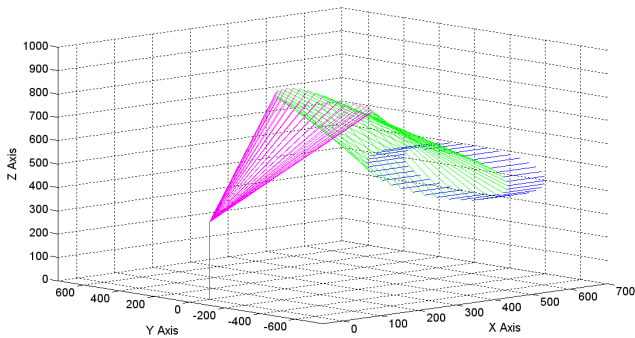


Fig. 4 The defined task of 7 DOF manipulator

유전 알고리즘을 구현하기 위해 MATLAB의 Optimization Toolbox가 사용되었으며 모집단수(Population)는 100, 최적해 수렴까지의 최대반복 연산회수인 최대 세대수(Generation)는 100으로 설정하였다. 또한, 선택(Selection) 연산을 위해 개체의 원소를 적응도에 비례하여 선택하는 방법인 룰렛 방법을 선택하였고 교차(Crossover) 연산으로는 개체의 원소 사이의 임의의 한 점을 기준으로 절단하여 두 부모로부터 각각 절단된 한 부분의 스트링을 상속받아 자손을 생성하는 방법인 일점교차(One Point Crossover)를 사용하였다.

5. 분석 및 결과

유전 알고리즘을 적용한 결과 Fig. 5의 그래프와 같이 목적 함수인 매니플레이터의 조작성이 최대 수렴하는 값은 약 10번째 세대에서부터 나타났으며, 20번째 세대까지 연산을 수행하였으나 개선이 이루어지지 않아 연산을 종료하였다.

20세대까지의 연산 결과, 초기 집단 (1번째부터 5번째 세대가

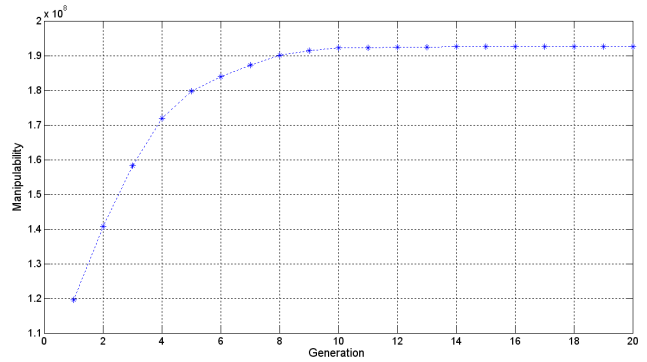


Fig. 5 Object function value with generation

지의 평균)의 조작성의 값은 1.54×10^8 인 것에 비해 20번째 세대에서는 1.92×10^8 로 나타나 20%의 개선 효과가 있었으며, 이때의 설계변수들의 값은 Table. 2에 정리되어 있다.

Table 2 Optimal link length

Links	Length (mm)
L ₁	370
L ₂	542
L ₃	488
L ₄	100

6. 결론

본 연구에서는 산업, 군사, 의료 그리고 서비스분야에서 다양한 용도로 활용이 증가하고 있는 매니플레이터의 설계 시 설계자의 직관과 경험에 의존하여 기초 설계를 진행하고 이를 수차례 수정함으로써 성능을 개선시키는 비효율적인 방법에서 벗어나 액추에이터의 크기, 목표 작업등을 고려하여 제한 조건을 정의하고 이 조건을 바탕으로 기구학적 성능 향상을 위해 유전 알고리즘을 적용하여 최적 링크 길이를 도출하였다. 이러한 방법은 실험계 획법 등의 최적화 방법보다 설계자의 요구에 맞게 목적함수와 제한조건의 지정이 용이하며 더 빠르게 최적화를 수행할 수 있다.

본 연구의 결과는 실제 매니플레이터의 초기 설계에 효과적으로 적용이 가능함을 보이며 이를 바탕으로 앞으로 액추에이터의 성능, 각 링크의 형상 설계 변수 및 여러 동특성을 고려한 최적 설계를 함으로써 더 높은 성능을 가지고 강건한 매니플레이터를 설계할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 (한양대학교 고기능 로봇 매니플레이션 연구센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참고문헌

1. Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms" The international journal of Robotics Research, 3-4, 1985.
2. B,Siciliano., L,Sciavicco., L,Villani. and G,Oriolo., "Robotics modeling, Planning and Control", Springer, 105-117, 2008.
3. Tolani,D., Goswami,T., and Badler,I., "Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs," Graphical Models, Vol.62, 353-388, 2000
4. Nakagawara,S., Tadakuma,R., Kajimoto,H., Kawakami,N., and Tachi,S. "A Method to Solve Inverse Kinematics of Redundant Slave Arm in The Master-Slave System with Different Degrees of Freedom", ISMCR2004, 1-4, 2004.
5. 문병로, "유전 알고리즘", 다성 출판사, 2001