

조건수를 고려한 모듈형 로봇의 최적 링크 조합

Optimal Link Combination of Modular Robot based on the Condition Number

*김현국¹, #한성수², 황순용¹, 임현섭², 신규식²

*H. G. Kim¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)², S. W. Hwang¹, H. S. Lim², K. S. Shin²

¹ 한양대학교 메카트로닉스공학과, ²한양대학교 기계공학과

Key words : Optimal Link Combination, Modular Robot, Condition Number, Taguchi Method

1. 서론

로봇에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있는 현재 단순 제조업만을 위해 사용되던 산업용 로봇에 대한 연구도 그 깊이를 더해가고 있다. 하지만 로봇 생산 라인에 생산품의 변화로 인한 새로운 생산 라인으로의 교체에 대해 유연하지 못한 문제점이 있다. 이런 변화에 좀 더 적극적으로 대응하기 위한 방법으로 모듈형태의 산업용 로봇을 이용하는 것이 있다[4]. 로봇의 링크 및 관절을 모듈화 시킨다면 수행 작업의 변경 시 관절 배치 및 링크 길이의 변화가 쉽게 가능해지면서 몇 개의 모듈 교체를 통해 새로운 라인을 구성할 수 있을 것이다. 이는 자동화 생산라인의 효율성을 높여 주고 또 산업용 로봇 시장의 성장으로 이어질 것으로 기대된다. 또한 이상 부분의 모듈만 수리 또는 교체함으로써 간단하게 로봇의 유지 및 보수가 가능하다. 이러한 이유들로 모듈형 매니플레이터의 활용이 증가되고 있으며 주어진 작업에 대해서 최고의 동작성능을 낼 수 있는 기구학적 구조 역시 비중 있게 다루어지고 있다.

이에 본 논문은 정해진 수행 작업에 대한 모듈형 로봇의 동작성능을 극대화 할 수 있는 링크 모듈의 최적 조합에 대해 논한다. 최적 조합의 평가를 내리기 위한 성능지표로 조건수(Condition Number)[1]를 선정했고, 실제 적용 시 효율을 위해 다구찌 기법(Taguchi Method)[6]을 이용하여 최적 모듈 조합을 찾고자 한다.

2. 기구학 해석

앞서 서술한 내용처럼 본 연구는 산업 현장에서 주로 쓰이는 산업용 매니플레이터의 최적 모듈 조합을 찾기 위한 연구이다. 본 연구에서는 여자유도(Redundant)를 가지는 7자유도 모듈형 매니플레이터의 기구학적 조합에 대해서 다룬다.

일반적으로 7자유도 매니플레이터의 경우 어깨 관절의 3자유도, 팔꿈치 관절의 1자유도, 손목 관절의 3자유도의 배치 형태를 보여준다. 기구학 해석은 링크 모듈의 조합에 대해 진행했다.

기구학 해석에 기본이 되는 Denavit-Hartenberg 표기법을 통하여 링크 인자를 나타내었으며 Table 1의 D-H Table에 맞추어 작성하고 변환행렬을 이용하여 정기구학을 풀이하였다.

Table 1 D-H Table

Link No.	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	L1	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	$\pi/2$	0	L2	θ_3
4	$-\pi/2$	0	0	θ_4
5	$\pi/2$	0	L3	θ_5
6	$-\pi/2$	0	0	θ_6
7	$\pi/2$	0	L4	θ_7

이러 역기구학 해석을 기하학적인 방법[2][5]으로 진행하기 위해 특정 관절들끼리 벡터로 표현하여 나타내었다. 베이스부터 어깨까지의 벡터 \overrightarrow{BS} , 어깨부터 팔꿈치까지의 벡터 \overrightarrow{SE} , 팔꿈치부터 손목까지의 벡터 \overrightarrow{EW} , 손목부터 말단 장치(End-effector)까지의 벡터 \overrightarrow{WE} 와 같이 표현하였다. 그 중 \overrightarrow{SE} 와 \overrightarrow{EW} 는 역기구학 풀이에 있어 중요하므로 Fig. 2에 표현하였다. 이와 같은 4개의 벡터를 구한 후 베이스, 어깨, 말단 장치의 위치 좌표는 초기값으

로 주어지고 손목 좌표는 말단 장치의 위치 좌표와 주어진 링크 길이로부터 구할 수 있으므로 알고 있는 값이 된다. $\theta_2, \theta_4, \theta_6$ 는 두 벡터와 그 끼인각의 관계에서 내적을 통해 구할 수 있다. 또한 남은 $\theta_1, \theta_3, \theta_5, \theta_7$ 은 변환행렬을 통한 정기구학의 해석 과정에서 구할 수 있다.

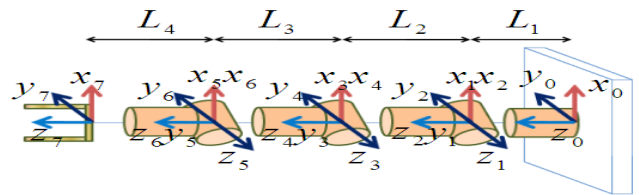


Fig. 1 Robot Configuration

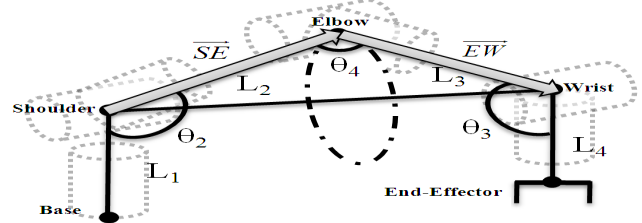


Fig. 2 Inverse Kinematics

3. 동작성능 지표

동작성능 지표로 선정한 조건수는 로봇의 전체적인 기구학적 행동을 하나의 수로 표현할 수 있는 주된 장점이 있다. 따라서 현재 조건수는 아래와 같은 상황에 대한 지표로 사용되고 있다.

- 로봇의 정밀도 및 동작성
- 로봇의 최적 설계 및 성능 비교에 대한 성능 지수

이런 특성상 로봇의 최적 링크 조합의 평가를 위한 지표로 조건수를 선택하게 되었다. 이어 G-H Formulation[3]을 이용, 로봇의 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)을 구하였으며 동작성능을 평가하기 위해 자코비안 행렬의 조건수를 계산하였다.

$$k(J) = k(J^{-1}) = \|J^{-1}\| \|J\| \quad (1)$$

식 (1)은 조건수의 정의를 나타내는 식이며, 조건수의 가장 이상적인 값은 1이 된다. 조건수가 커질수록 자코비안 행렬의 역행렬이 특이성을 가지게 되며, 이는 곧 매니플레이터의 동작이 특이점에 가까워짐을 나타낸다.

본 논문에서는 Y-Z 평면상에 직사각형을 그리는 작업을 바탕으로 하였다.(Fig. 3)

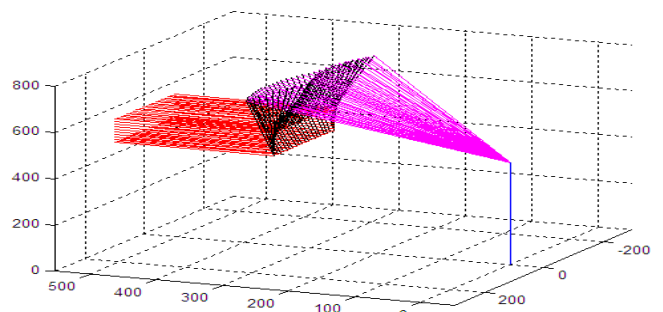


Fig. 3 Trajectory Based on the Task

4. 다구찌 기법을 이용한 최적 링크 조합

본 장에서는 실험계획법 중 하나인 다구찌 기법(Taguchi method)을 이용하여 최적 링크 조합을 구성하는 문제에 대해 다루려고 한다. 현 작업수행은 장애물 회피 등을 위한 여자유도의 이용은 필요하지 않기 때문에 어깨에서 손목 관절로의 벡터를 기준으로 팔꿈치 관절의 회전각도는 임의로 부여하였다. 또한 손목 관절의 방위(Orientation)는 작업 평면에 언제나 수직하도록 고정하였다.

본 연구에서는 직사각형을 그리는 작업을 수행 중에 지나는 60개의 목표점에서의 조건수의 평균을 평가특성으로 결정하였다. 또한 평가특성에 영향을 미치는 인자로 링크모듈의 길이를 선정하였다. 모듈의 특성상 제한된 범위를 세분화 하지 못하므로 링크모듈의 특정 길이를 5개의 수준(Level)으로 정의하였다. 이에 해당하는 값은 Table 2에 표기했다. 인자와 수준의 수를 고려하여 직교배열표(Orthogonal array)를 선정하고, 여기에 배치된 경우에 대해서만 조건수 해석을 수행하도록 한다. 직교배열표와 각 경우 별 해석 결과는 Table 3에 나타내었으며 각 인자별 영향도 및 민감도를 파악하여 최적 링크 조합을 구성할 수 있다.

Table 2 Level of Design Parameter

Design Parameter	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)
1	240	240	240	240
2	290	290	290	290
3	340	340	340	340
4	390	390	390	390
5	440	440	440	440

Table 3 Result of Analysis according to orthogonal array

No.	Design Parameter				Result
	L1	L2	L3	L4	Condition Number
1	1	1	1	1	7118.0
2	1	2	2	2	8964.1
3	1	3	3	3	12743.0
4	1	4	4	4	12189.0
5	1	5	5	5	7156.5
6	2	1	2	3	8885.4
7	2	2	3	4	7711.8
8	2	3	4	5	7442.8
9	2	4	5	1	4618.2
10	2	5	1	2	2616.1
11	3	1	3	5	6037.4
12	3	2	4	1	5672.3
13	3	3	5	2	5441.1
14	3	4	1	3	3371.3
15	3	5	2	4	5532.4
16	4	1	4	2	6561.1
17	4	2	5	3	8066.5
18	4	3	1	4	6105.0
19	4	4	2	5	6678.9
20	4	5	3	1	1895.8
21	5	1	5	4	11764.0
22	5	2	1	5	6275.0
23	5	3	2	1	2008.3
24	5	4	3	2	2275.7
25	5	5	4	3	4347.7

구해진 자료의 영향을 분석하기 위해 신호 대 잡음비(Signal

to noise ratio, S/N)로 자료를 가공한다. 조건수의 이상적인 값은 1이지만 또한 최소값이므로 망소특성을 적용하였다.

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

여기에서 y_i 는 평가특성의 값이며 n 은 평가특성의 개수이다. 각 설계인자에 대해 S/N 값을 분석한 결과는 Fig. 4 와 같다.

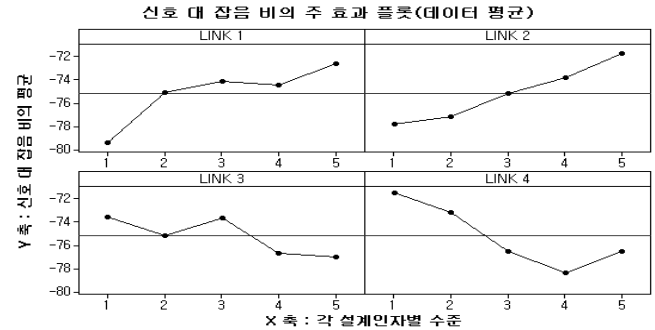


Fig. 4 S/N value response for design variables

L4의 기울기가 가장 급격한 것으로 보아 조건수에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 설계인자들에 대해 S/N를 최대도 하는 것을 최적수준으로 선택하면 L1~L4에 대해서 각각 5, 5, 1, 1 수준이 해당 작업을 수행하기 위한 최적 링크 조합이 되겠다. 이 조합에서 작업 수행 시 조건수의 평균은 1482.3 이었다.

5. 결론

본 논문에서는 조건수를 평가특성으로 다구찌 기법을 이용하여 특정 작업 수행 시 모듈형 로봇의 최대 성능을 위한 최적 링크 길이의 조합법을 제시하였다.

특정 작업을 위한 궤적 생성 후 지나가는 위치에 대한 조건수의 평균을 평가특성으로 하고 특정 링크모듈의 길이를 정하여 1~5 수준의 설계인자로 사용하였다. 다구찌 기법을 통해 25회의 해석만으로 최적 링크 조합에 가장 큰 영향을 주는 설계인자를 찾을 수 있었고 SN값의 분석을 통해 특정 작업 수행 시 주어진 수준에서 최고의 동작성능을 낼 수 있는 링크 조합을 찾을 수 있었다.

작업 환경이 바뀌는 상황에서 모듈형 로봇의 사용은 작업의 효율성을 높여줄 것이다. 그리고 이 같은 조합법을 따를 경우 주어진 환경 및 제한된 모듈의 종류에서 쉽게 최고의 동작성능을 내는 링크의 조합을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

후기

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

참고문헌

1. J. P. Merlet, "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots," Journal of Mechanical Design, 128, 199-206, 2006.
2. 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," ISMCR, A12, 1-4, 2004.
3. B. Siciliano., L. Siciliano., L. Villani. and G. Oriolo., "Robotics modeling, Planning and Control", Springer, 105-117, 2008.
4. 차세대로봇 전략기술위원회, "전략기술로드맵", 지식경제부, 2008.
5. 임현섭, "모듈형 로봇의 조작성 향상을 위한 최적 링크 조합," 한국 정밀공학회지, 163-164, 2009.
6. 이상복, "Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용", 이레테크, 74-109, 2006.