모듈형 조합 기법을 사용한 가상 매니퓰레이터 모델 생성 및 역기구학 해석

[글] 윤덕진[1*], 류한식[1], 오세웅[2], 최진환[2] Function Bay, Inc[1], 경희대학교[2] djyun@functionbay.co.kr

1. 서 론

근래의 산업은 과거의 대량생산과 소비의 시대에서 사람들의 다양한 요구를 충족시키기 위한 맞춤 제품에 대한 수요로 변화하고 있다. 이러한 수요를 충족시키기 위한 방법으로, 대량생산으로 가격을 낮추면서도 사용자의 다양한 요구를 충족시킬 수 있는 모듈 디자인 방법을 이용하고 있다.

로봇분야 또한 마찬가지 이다. 제조자 중심의 기존 로봇에서 수요자의 다양한 요구를 충족시켜 줄 수 있는 로봇의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 해결책으로 모듈형 로봇이 대안으로 떠오르고 있다. 모듈형 로봇이란, 여러 개의 기본 단위 모듈들의 조합으로 구성된 시스템이며 모듈간의 분리와 결합의 과정을 통해 전체 로봇 시스템의 크기와 모양이 변화 될 수 있는 것을 말한다 [1].

기존 로봇 매니뮬레이터의 수치 해석 방법은 DH 파라미터로 모델링을 하고 역기구학 해석(Inverse Kinematic Analysis)을 수행한다. 이 방법은 해가 존재하지 않거나 해를 찾기 어려운 경우, 내부적으로 해를 찾기 위해 추가적으로 반복 계산을 수행하면서 해석시간의 증가를 초래하게 된다. 또한 7자유도 이상의 조합에서는 여유자유도가 발생함에 따라 역기구학 문제를 풀 수 없다.

따라서 효율적으로 가상 로봇 매니퓰레이터 모델을 모듈형 조합기법을 사용하여 관절과 링크를 모델링하고 로봇 매니퓰레이터가 작업을 수행함에 있어 궤적이 주어질 경우, end-effector 가 그 궤적을 따라가기 위하여 point-on-curve 구속조건으로 모델링을 하는 방법과 이 모델을 빠르게 해석할 수 있는 솔버를 개발하여 역기구학 해석을 수행하였다 [2].

2. 매뉴퓰레이터 모듈

2.1 모듈형 조합

로봇의 구성은 구동부를 가지고 있는 조인트 모듈(joint module)과 조인트 모듈을 연결해 주는 링크 모듈(link module)로 구성할 수 있다. 조인트 모듈은 그림 1 과 같이 한 개의 회전 체결부와 한 개의 고정 체결부로 이루어진 1자유도 조인트 모듈과 두 개의 회전 체결부로 이루어진 2자유도 조인트 모듈로 표현이 가능하고 링크 모듈은 그림 2 에 나타난 것과 같이 I-타입 링크 모듈과 L-타입 링크 모듈로 표현이 가능하다 [2].

모듈형 조합이라 함은 1자유도 조인트 모듈과 I-타입 또는 L-타입 링크 모듈을 조합하여 기구학적으로 로봇을 모델링 할 수 있는 묶음 단위를 뜻한다.

모듈형 조합의 있는 경우의 수는 조인트 종류와 결합 방향, 링크의 종류와 결합 방향에 의해 결정 된다. 1자유도 조인트모듈의 경우 회전체결부가 링크와 체결하는 경우와 고정체결부가 링크와 체결되는 경우로 나눠지며 고정체결부가 먼저 체결 될 시 체결 각도에

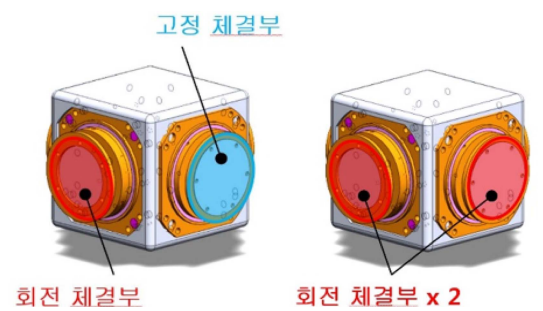

그림 1. 1 자유도 조인트 모듈(좌), 2자유도 조인트 모듈(우)

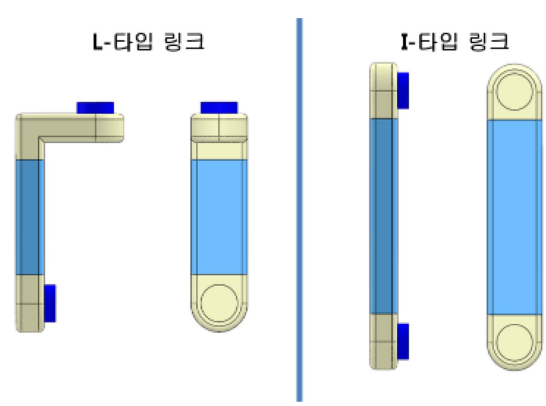

그림 2. L-타입 링크 모듈(좌), I-타입 링크 모듈(우)

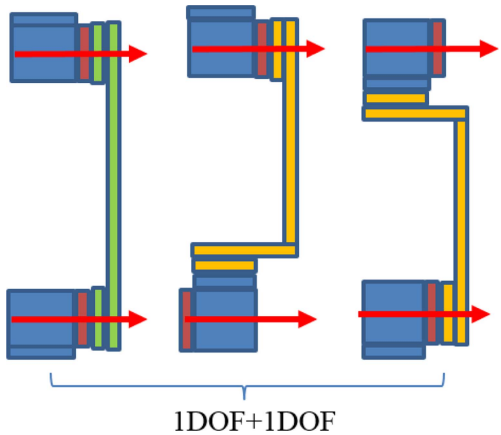

그림 3. 체결 형태는 다르지만 같은 기구학적 모양을 갖는 조합

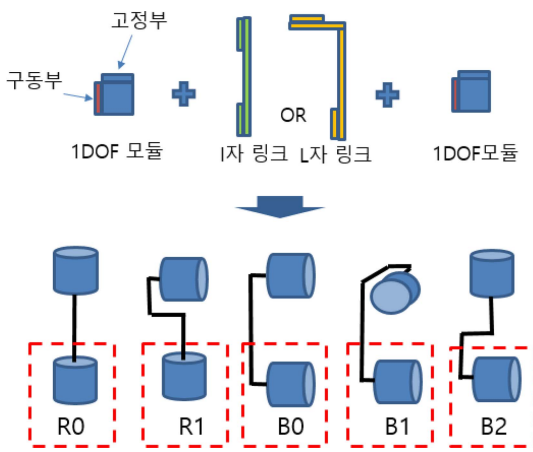

그림 4. 모듈형 조합

따라 두 가지로 나누어진다. 링크 모듈의 경우 I-타입 링크 모듈이 결합 할 수 있는 방법은 하나이고 L-타입 링크 모듈은 짧은 부분으로 체결되는 경우와. 긴 부분으로 체결되는 경우 두 가지로 나누어 진다. 링크 모듈의 경우 I-타입 링크 모듈이 결합 할 수 있는 방법은 하나이고 L-타입 링크 모듈은 짧은 부분으로 체결되는 경우와 긴 부분으로 체결되는 경우 두 가지로 나누어 진다. 총 결합될 수 있는 경우의 수에서 그림 3과 같이 기구학적으로 중복되는 경우를 제외하면 그림 4와 같이 5가지와 형태로 표현이 된다 [3].

2.2 모듈형 조합의 DH 파라미터

로봇의 기구학적 정보를 나타내는 DH 표시법(Denavit-Hartenberg notation)은 한 링크계로부터 그 다음 링크계의 위치 정보를 나타내는 변수들의 모

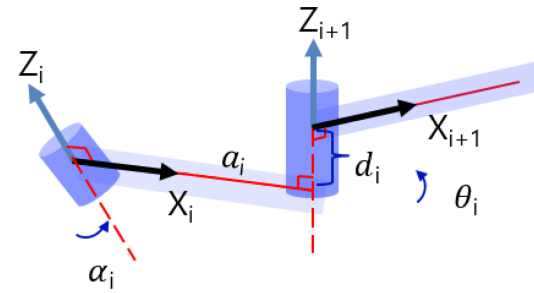

그림 5. DH 파라미터

표 1. 조인트 배열에 따른 부분 DH 파라미터

Type	#	i	d_i	a_i	i
R0	i	θ_i	0	0	0
	i+1	–	l_i	0	–
R1	i	θ_i	l_i	0	$\pi/2$
	i+1	–	0	0	–
B0	i	θ_i	0	l_i	0
	i+1	-	0	0	–
B1	i	θ_i	0	l_i	$\pi/2$
	i+1	–	0	0	–
B2	i	θ_i	0	0	$\pi/2$
	i+1	–	l_i	0	–

음이며 i 번째 축으로부터 i+1 번째 축의 방향과 위치가 정의 된다면 i 번째 부분 DH 파라미터를 구할 수 있다.

여기서 a_i 는 회전축 간 거리이고 a_i 는 조인트의 비틀림 각도 q_i 는 조인트의 회전 각도 d_i 는 링크의 offset 이다.

모듈형 조합은 i 번째 축 방향과 링크의 방향에 따라 평행하면 R(rotation)으로, 수직이면 B(bending)으로 분류를 하였으며[4], DH 파라미터의 값에 따라 R 또는 B 뒤에 숫자를 붙여 R0, R1, B0, B1, B2로 분류하였다. 모듈형 조합의 DH 파라미터는 표 1과 같다 [3].

산업용으로 사용되는 6자유도 매니퓰레이터의 경우 기구학적 정보가 비슷한 경우가 많다. 대표적으로 PUMA 560 의 경우 본 논문에서 정의한 모듈형 조합에 의해서 표현을 하면 R1-B0-B2-R1-B2-R1 로 표현을 할 수 있고 각 모듈의 형상과 순서대로 파라미터를 입력하면 결과적으로 6자유도 매니퓰레이터의 DH 파라미터를 얻을 수 있다.

3. 동역학 해석을 이용한 역기구학 해석

3.1 관절과 링크 해석 모델링

2장의 모듈형 조합 방법에 따라 R0, R1, B0, B1, B2의 선택과 각각의 파라미터 입력에 의해서 매니퓰레이터의 관절과 링크 모델이 만들어 진다. 본 논문에서는 역기구학 해석을 수행할 것이기 때문에 관절과 링크의 질량과 관성은 임의의 값을 넣어서 모델링을 하였다.

3.2 End-effector의 위치 자세 구속 조건

로봇 매니퓰레이터의 역기구학 해석을 위해서는 End-effector가 주어진 궤적 정보에 따라 해가 존재하는지 해석을 해야 한다. 가상 바디(Virtual Body)가 경로를 추정할 수 있도록 동역학 해석 프로그램에서 사용하는 Point-on-Curve 구속 조건으로 위치 구속을 하고 Cartesian-Motion 구속 조건으로 자세 구속을 한다. 그리고 End-effector 와 가상 바디 사이에 부싱힘(Bushing Force)을 모델링한다. 궤적에 대한 역기구학 해가 존재한다면 그림 6의(a)와 같이 가상바디와 End-effector 모두 궤적을 따라 움직이지만, 역기구학 해가 존재하지 않을 시 그림 6의(b)와 같이 구는 경로를 따라 움직이고 End-effector는 궤적을 추종하지 못하게 되므로, 가상 바디와 End-effector 사이의 부싱힘 요소의 크기가 증가하게 된다. 이 부싱힘을 관찰하여 해석 모델의 궤적 추종 여부를 판단하게 된다 [3].

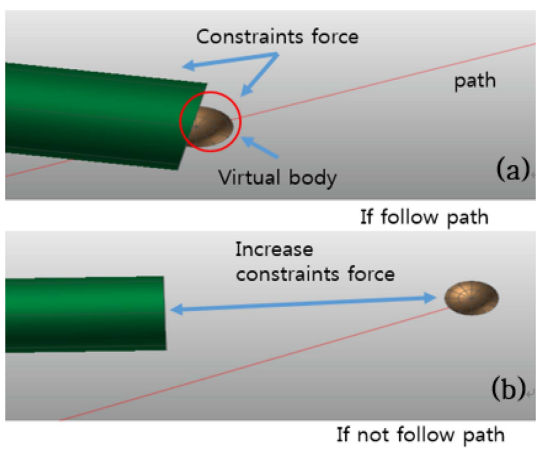

그림 6. End-effector의 위치 구속

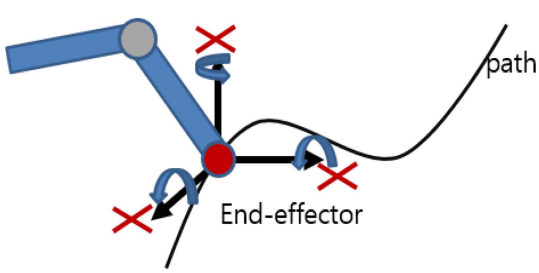

그림 7. End-effector의 자세 구속

3.3 동역학 해석 솔버

일반적인 매니퓰레이터의 역기구학 해석은 7자유도 이상에서는 여유(redundant) 자유도가 발생하여 해를 찾을 수 없고 6자유도 내에서 도 해가 여러 개 존재할 경우 해석에 실패할 수도 있다. 그리고 End-effector가 추정해야 할 궤적 전체 경로에 해를 찾기 위해서 많은 반복 호출이 필요하고 매니퓰레이터의 End-effector 가 경로를 추정할 수 없는 경우 해를 찾기 위해 추가적으로 반복 계산을 수행하면서 해석시간의 증가를 초래하게 된다. 이에 본 연구에서는 동역학 해석방법을 사용하여 역기구학 해석을 수행하였다. 개발된 솔버는 절대좌표계를 사용하지 않고 Recursive Formalism 을 적용한 상대좌표계를 사용한다 [5]. 상대좌표계를 사용했기 때문에 그림 8과 같은 로봇 매니퓰레이터 시스템에서 솔버의 좌표계가 매니퓰레이터의 자유도와 일치하게 된다. 매니퓰레이터의 자유도만큼 운동방정식이 정의되고 수치 해석이 이루어지기 때문에 실시간 보다 빠르게 해석이 된다.

절대좌표계에서 강체에 부착된 좌표계의 병진속도와 각속도는 각각 다음과 같이 정의 될 수 있다.

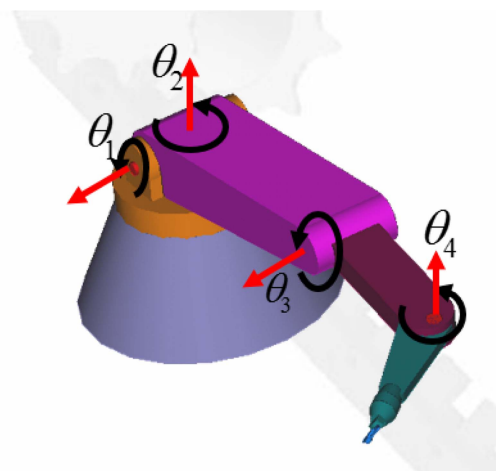

그림 8. Recursive Formalism

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ w \end{bmatrix} \tag{1}$$

병진 속도와 각속도를 강체 좌표계로 좌표 변환하면 다음과 같이 정의 된다.

$$Y = \begin{bmatrix} A^T\dot{r} \\ A^T w \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 Y는 병진과 회전에 관한 속도가 결합된 속도이며, 인접하는 강체 사이의 순차적 속도와 가상 변위의 관계도 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Y_i = B_{(i-1)i1}Y_{(i-1)} + B_{(i-1)i2}\dot{q}_{(i-1)i} \tag{3}$$

여기서, $q_{(i-1)i}$는 상대 좌표의 벡터를 나타내며, $B_{(i-1)i1}$와 $B_{(i-1)i2}$ 행렬이 단지 $q_{(i-1)i}$ 벡터의 함수라는 점은 매우 중요한 사항이다. 유사하게, 순차적 가상변위의 관계도 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\delta Z_i = B_{(i-1)i1}\delta Z_{(i-1)} + B_{(i-1)i2}\delta q_{(i-1)i} \tag{4}$$

만약 식(6) 와 같은 순환 공식이 각각 모든 조인트에 적용되면, 절대 좌표계와 상대적 일반화 속도들 사이의 관계는 다음의 식과 같이 정의 된다.

$$Y = B\dot{q} \tag{5}$$

여기서 B 행렬은 상대 좌표계에 의해 정의된 $\dot{q}_{(i-1)i}$ 벡터에 대한 상수들의 집합이다.

$$Y = [Y_0^T, Y_1^T, Y_2^T, \ldots, Y_n^T]^T_{nr\times 1} \tag{6}$$

$$\dot{q} = [Y_0^T, \dot{q}_{01}^T, \dot{q}_{12}^T, \ldots, \dot{q}_{(n-1)n}^T]^T_{nr\times 1} \tag{7}$$

여기서, nc와 nr은 각각 절대좌표계와 상대 좌표계에서 정의된 일반좌표의 개수이다. 식(6)와 (8)에서 $\dot{q}$는 R^{nr} 에서의 임의의 벡터이기 때문에 계산상으로 동일하며, 임의의 벡터 $x \in R^{nr}$ 에 대해서도 실제로도 동일하기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = B\dot{x} \tag{8}$$

그리고

$$X_i = B_{(i-1)i1}X_{(i-1)} + B_{(i-1)2}X_{(i-1)i} \tag{9}$$

여기서 $x \in R^{nr}$ 는 행렬 B와 벡터 x 의 곱한 결과 벡터이다. 결과적으로, 본 연구에서는 $x \in R^{nr}$ 를 $Bx \in R^{nc}$ 로의 변환은 수치적 효율을 높이기 위하여 적용된 순차적 속도 공식이 적용된 식(12)으로 계산할 수 있다. 반면, R^{nr} 에 속해 있는 G 벡터를 R^{nr} 의 새로운 벡터 $g = B^TG$ 로 변환이 자주 필요하게 되었다. 이런 변환은 직교 좌표계에서 정의된 힘들을 조인트 부위에서 계산되는 일반화된 힘을 계산 할 수 있게 한다. 직교 좌표계에서 정의된 힘 $Q \in R^{nr}$ 이 행한 가상 일은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta W = \delta Z^T Q \tag{10}$$

여기서, δZ 는 시스템의 모든 조인트에 대해서 기구학적으로 정의 될 수 있어야 한다. $\delta Z = B\delta q$ 로 변환하여 식(10)에 대입하면 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$\delta W = \delta q^T B^T Q = \delta q^T Q^* \tag{11}$$

여기서, $Q^* = B^TQ$ 이다.

구속조건이 주어진 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$F = B^T(M\dot{Y} + \Phi_Z^T\lambda - Q) = 0 \tag{12}$$

$$\Phi(q) = 0 \tag{13}$$

여기서, λ 는 R^m 에서 cut 조인트된 라그랑지 멀티플라이어 벡터이며, Φ 는 R^m 에서 위치 수준 구속 벡터(position level constraint vector)로 표현된다. M 과 Q 는 각각 직교좌표계에서 접촉력이 포함된 질량 행렬과 힘벡터이다.

(12), (13) 식을 행렬로 표현하면 (14)과 같고, 이때 운동방정식의 자코비안(Jacobian)은 (15) 이다 [5].

$$\begin{pmatrix} F_q & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{pmatrix}\begin{Bmatrix} Dq \\ D\lambda \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} g \\ \Phi \end{Bmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} F_q &= B_q^T(M\dot{Y} + \Phi_Z^T\lambda - Q) \\ &+ B^T(M\dot{Y}_q + (\Phi_Z^T\lambda - Q)_z B) \end{aligned} \tag{15}$$

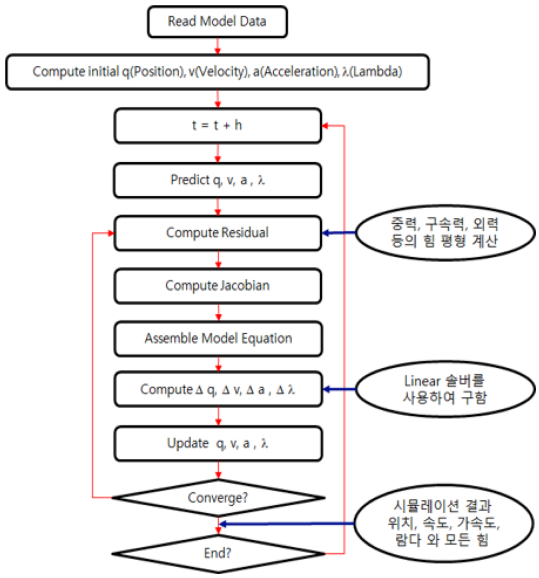

그림 9. 로봇 시스템 동역학 해석 솔버의 적분기

이렇게 상대좌표계를 사용하여 표현된 로봇 시스템의 운동방정식을 그림 9 순서도를 사용하는 적분기를 사용하여 로봇시스템의 역기구학을 효율적 해석할 수 있는 동역학 솔버를 개발하였다.

3.4 End-effector의 자코비안

로봇 매뉴퓰레이터에서 End-effector 의 자코비안(Jacobian) 은 로봇의 조작성을 판단할 수 있는 중요한 값이기 때문에 역기구학 해석에서 반드시 출력을 해야한다. 일반적인 동역학 해석기 들은 해석 좌표계와 매니퓰레이터의 좌표계가 일치하지 않기 때문에 자코비안을 출력할 수 없었다. 그러나 본 연구에서 개발된 솔버는 모듈형 조합 순서에 따라 매니퓰레이터를 모델링하고 해석을 수행하면 좌표계가 일치하기 때문에 동역학 해석을 하며 자코비안을 출력하여 준다.

End-effector의 자코비안은 조인트 공간에서의 속도와 작업 공간에서의 속도 사이의 관계를 의미한다. 그림 10과 같은 3자유도 매뉴퓰레이터의 자코비안은 수식(16) 과 같이 구해진다.

$$\Delta P = J\Delta\theta \tag{16}$$

여기서, P 는 end-effector의 위치, θ는 조인트의 각도이다.

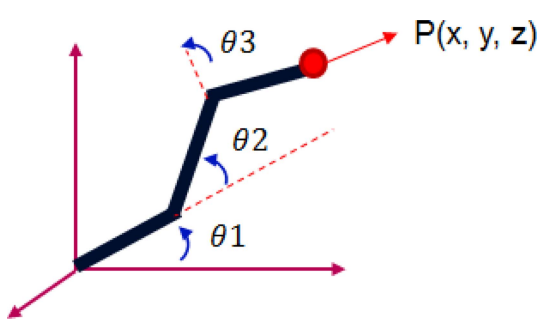

그림 10. 3자유도 모델

3.5 해석 결과

모듈형 조합기법에 따라 R1-B2-B1-R2-B0-R2으로 그림 11과 같은 6자유도 매니퓰레이터 모델을 생성하였다. 그리고 새롭게 개발된 동역학 해석 솔버를 사용하여 역기구학 해석을 수행하였다.

각 관절의 각도는 그림 12에 그렸다. 관절의 각도는 관절의 구동 토크를 얻는 동역학 해석에 사용될 것이다.

6자유도 매니퓰레이터는 여유자유도(redundant)가 없는 시스템이기 때문에 속도의 조작 역량을 지표로 나타내는Yoshikawa manipulability[10]를 식(17)

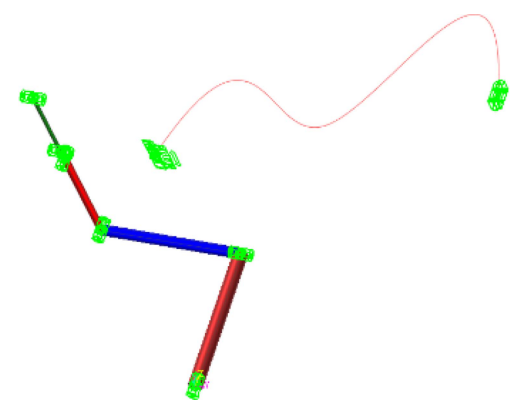

그림 11. 6자유도 모델

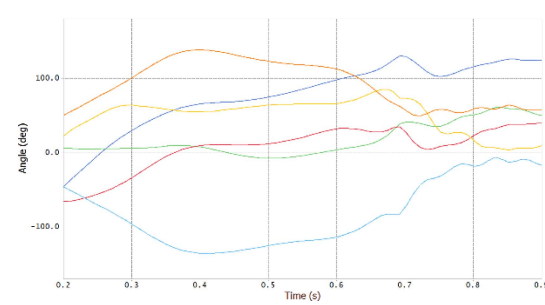

그림 12. 각 관절의 각도

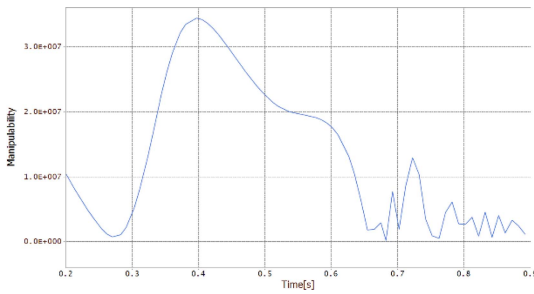

그림 13. Yoshokawa manipulability

를 사용하여 구하였다.

$$\varpi = |\det(J)| \tag{17}$$

여기서, J 는 end-effector의 자코비안이다.

6. 맺음말

본 논문에서는 모듈형 조합 기법을 사용하여 로봇 매뉴퓰레이터 모델을 생성하는 방법에 대하여 소개 하였으며 이렇게 만들어진 모델을 로봇 시스템 해석에 최적화된 동역학 해석 솔버를 사용한 역기구학 해석을 수행 하였다. 이 연구를 통해 로봇 매뉴퓰레이터를 빠르고 쉽게 모델링하고 해석하는 새로운 방법을 제시했으며 매뉴퓰레이터의 성능지표를 위한 자코비안 같은 다양한 해석 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

감사의글

본 연구는 산업통상자원부 엔지니어링 기술진흥사업 엔지니어링SW 기술개발 기반구축 (N051700001) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 서기성, “모듈라 로봇” 『전기의 세계(대한전기학회)』 62(11) (2013): 37-41.
2. 오세웅, “다물체 동역학 해석 기법을 이용한 3 DOF 모듈라 로봇 최적 조합 검색”, 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회, pp. 2769-2773, 2015.
3. 오세웅, “6 자유도 모듈과 매니퓰레이터 기구학 모델 조합 생성 및 역기구학 해석”, 제31회 제어로봇 시스템학회 학술대회, pp. 94-97, 2016.
4. Jeong Heon Han, “A Study on the Optimal Configuration of Modular Manipulator Based on Tesk Specification,” Department of Mechanical Engineering, p. 66, 1996.
5. D. S. Bae, J. M. Han, H. H. Yoo, and E. J. Haug, “Generalized Recursive Formulation for Constrained Mechanical Systems,” Mechanics of Structures and Machines, 27(3), 293-315, 1999.
6. B. Siciliano, “A closed-loop inverse kinematic scheme for online joint-based robot control”, Robotica 8, Part 3, 231-243 (1990).
7. Siciliano, B. The Tricept robot: Inverse kinematics, manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. Robotica, 17 (4), 437-445 (1999).
8. Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheune-mann. “A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices”. Trans ASME J. Appl. Mech 23: 215-221 (1955).
9. Lipkin, Harvey “A Note on Denavit-Hartenberg Notation in Robotics" 2005. pp. 921-926. doi:10.1115/DETC2005-85460 (2005).
10. T. Yoshikawa, “Manipulability of robotic mechanisms”, Int. J. Robotics Research 4, No. 1, 3-9 (1985).