

강체를 함께 진 두 대 로봇의 제어를 위한 동력학적 해석과 최적화 방안 연구

고진환 (전북대 대학원 정밀기계공학과), 송문상 (전북대 대학원 정밀기계공학과),
유범상 (전북대 기계공학부), 박상민 (전주공업대 정밀기계공학과),

Study of Dynamic Analysis and Optimization for Control of Two Robots Simultaneously Grasping a Rigid Body Object

J. H. Ko (Premecha. Eng. Dept. CBNU), M. S. Song (Premecha. Eng. Dept. CBNU),
B. S. Ryuh (Mecha. Eng. Dept. CBNU), S. M. Park (Premecha. Eng. Dept., JTC),

ABSTRACT

This paper presents a method of finding optimal joint torques of two robots when they hold an object simultaneously. Although the importance of the multiple cooperating robot system increases for more flexible manufacturing automation, dynamic solutions to multi-robot system forming closed kinematic chain is not easy to find. Newton-Euler approach is used for the dynamic formulation of two robots forming closed kinematic chains grasping a rigid body object. The methodology to optimize the joint torques to satisfy given criteria and obtain better control of the system is discussed. The scheme is illustrated by an example.

Key Words : the multiple cooperating robot system(복수 로봇 시스템), flexible production automation(유연생산 시스템), closed kinematic chain (닫힌 체인)

1. 서론

자동화 시스템의 도입은 소품종의 다량 생산에 있어서 사람을 대신하여 짧은 리드타임을 유도하고 불량품을 줄여 품질 향상을 가져오는데 그 목적을 두고 있다. 이는 생산 품종이 바뀌었을 때 새로운 생산품종을 위한 자동화 시스템으로 교체하여야 하는 불편과 동시에 과대한 투자비를 다시 지출해야 하는 단점을 가지고 있다. 그래서 새로이 도입된 것이 바로 자동화 시스템에 로봇을 투입하는 것이다. 이는 범용로봇의 본체에 생산 제품의 특성에 맞게 설계, 제작된 공구(positioning device)를 부착하여, positioning device 의 교체만으로 새로운 생산품종에 대처할 수 있다. Positioning device 가 가장 널리 쓰이고 있는 것으로 gripper, 용접기구 등이 있고, 최근에는 연마 기구를 부착하여 로봇 자동 연마에 대한 연구 논문이 발표되기도 했다.[13] positioning device 또한 다품종의 취급에 있어서 그 유연성에 제약을 받는다. 이러한 유연 생산 시스템(flexible manufacturing system)을 구축하는데 positioning device 를 대신하여

가변하중을 증가 시킴과 동시에 조립라인 작업을 효율적으로 구성할 수 있는 복수 로봇 협력 시스템의 적용을 위한 연구가 최근 관심사로 떠오르고 있다.[3]

복수 로봇 협력시스템은 크게 각 로봇이 서로 떨어져서 각각의 제어 시스템에 의해 정해진 순서도에 따라 움직이는 경우와 각 로봇이 서로 체인을 형성하여 연결되어 있는 경우로 나뉘는데, 전자의 경우는 로봇이 서로 독립적으로 각각 다른 형태의 작업을 하기 때문에, 적절한 궤적 계획을 통하여 서로 다른 로봇군에 대한 최적의 알고리즘을 아 간섭 및 충돌을 회피(collision avoidance)하는데 관심이 주어진다.[4] 후자의 경우는 복수 로봇이 대상 물체들 사이에 두고 닫힌 체인(closed chain)을 형성하여, 하나의 기구처럼 움직이므로 기구학적, 동력학적 해석에 있어서 하나의 로봇일 때와 처음부터 다른 방향으로 접근되어야 한다.

본 논문에서는 후자의 경우를 두 대의 로봇에 관하여 해석하였다. 이는 닫힌 체인 기구(closed-chain mechanism)로서 많은 연구 대상이 되어왔는데, 지금

까지의 연구동향을 살펴보면 동력학적 선형화[5], 위치 제어[6], 하중 분포 해석[7], hybrid 위치/힘 제어, 적응제어 등이 그 대부분을 차지 하며, 이를 passive joints 를 포함한 매니퓰레이터로 확장한 경우도 있었다.[8] Arimoto and Miyazaki 는 두 로봇 중 하나를 master, 나머지 하나를 slave 로 하여, 두 로봇 사이의 물체, master, slave 사이의 접촉 힘(contact force)을 구하여 제어 시스템의 안정성을 분석하였다.[9] Luh and Zheng 은 두 로봇을 기구학적으로 닫힌 체인을 형성하는 것으로 고려하여, 일단 master 로봇의 궤적이 계획되면 slave 로봇의 궤적은 기구학적 구속조건(kinematic constraints)에 의해 결정되도록 하였다.[10]

로봇 매니퓰레이터의 동력학 해석 방법으로는 Lagrangian 방법과 Newton-Euler 방법이 크게 이용되어 왔는데, Lagrangian 방법은 매니퓰레이터를 전체로 다루어, 운동에너지와 위치에너지의 차이인 Lagrangian 함수를 이용하는 해석법이며, Newton-Euler 방법은 로봇의 각 링크를 차례로 다루어, 방정식을 직선운동과 회전운동으로 나타내는 회귀적인(recursive) 해석법이다.[11] 본 연구에서는 Newton-Euler 방법으로 접근하였으며, 두 로봇이 쥐고 있는 강체와 두 로봇 사이에 작용하는 반력을 결정하기 위해 강체를 6 축의 연장축 즉, 가상의 7 축으로 고려하였다. 이 새로운 축에 대한 반력과 토크를 각각 F_n, N_n 으로 다시 정의하였다. 두 로봇의 각 축에 대한 적절한 토크를 계산하기 위해 일반적인 형태를 가진 간단한 6 축 로봇을 구성하여 식을 확인하였다.

2. 두 대의 로봇이 닫힌 체인을 구성할 때의 모빌리티

자유도는 기구를 특정한 위치로 움직이기 위한 독립변수로서, 메카니즘의 해석에서 독립변수의 수를 결정하고, 구동시에는 잉여구동이나 과소구동을 방지하여 최적 구동조건을 결정하는 중요한 변수이다. 기구학에서 시스템의 자유도 계산은 일반적으로 Kutzbach 판별식을 이용하는데, 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$F = 6(n-1) - 5j_1 - 4j_2 - 3j_3 - 2j_4 - j_5 \quad (1)$$

$$F = 3(n-1) - 2j_1 - j_2 \quad (2)$$

여기에서, n = 링크의 수

$kj_m = k$ 개의 자유도를 갖는 관절의 수

식(1)과 (2)는 각각 공간과 평면에서의 자유도를 나타낸다. 두 대의 로봇이 강체를 쥐고 있어, 닫힌 기구가 되었을 때는 로봇 한 대의 열린 기구의 경우와 달리 시스템의 자유도는 강체 대상물의 기구학적 조건에 의해 결정되어지기 때문에 두 로봇이 적절한 동작을 유지하기 위해서는 그에 대한 기구학적 자유도의 고려가 선행되어야 한다. 로봇 동력학 해석은

자유도와 함께 각 관절에서의 위치, 속도, 가속도의 해석을 그 전제로 한다

2.1 단일로봇의 경우

단일 로봇의 기구학해석은 정기구학과 역기구학이 있는데, 로봇의 각 링크에 대한 파라미터 값들을 알고 있으면 쉽게 구해될 수 있다. 열린 기구형태를 하고 있는 로봇의 경우, 각 링크의 운동이 마지막 링크의 위치를 변화 시키므로 로봇의 자유도는 항상 링크 수와 같음을 알 수 있다.

2.2 두 대 로봇의 경우

평면로봇의 경우, 식(2)에 의해 한 대의 2 절 링크 로봇의 경우, 2 개의 자유도를 갖게 되지만, 두 대 로봇이 강체 대상물을 쥐고 있을 경우로 확대하여 Fig.1 과 같이 두 로봇의 손(end-effector)이 대상물과 완전히 결합되었다고 가정하면, 닫힌 기구(closed mechanism)가 되어 4 절 링크 기구로 해석이 가능하며, 1 개의 자유도를 갖게 된다. 이 경우에 한 대 로봇에서의 해석처럼 구동조건(driving constraint)을 각 관절마다 취하게 되면, 2 축의 잉여구동(redundant driving)이 되며, 이는 정적으로 부정정 상태가 된다. 즉, 각 관절에 부적절한 구동토크가 취해지면 기구가 파손되게 되며, 자유도 1에 해당되는 1 개의 구동조건이 주어질 때 올바른 궤적을 따라 운동하게 될 것이다.

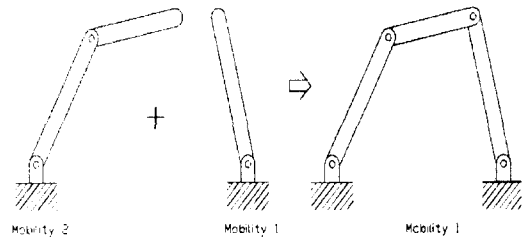


Fig. 1. Mobility of two robots forming closed chain

한 대의 로봇의 경우 각 관절에서의 위치, 속도, 가속도를 알고 있어야만 그에 따른 구동토크를 산출하였지만, 두 대의 로봇이 닫힌 체인이 되어 4 절 기구형태가 되면 나머지 링크의 운동은 구동 링크의 운동에 종속되어진다. 즉, driver 와 follower 의 관계가 된다. 4 절 기구에서 일반적인 위치, 속도 가속도의 해법으로 도식적인 해법과 해석적 방법이 있는데, 본 연구에서는 알고리즘의 프로그래밍을 위해 해석적 방법을 취하였으며, 다음 식으로 표현된다.

$$\omega_3 = \frac{r_2}{r_3} \omega_2 \frac{\sin(\theta_4 - \theta_2)}{\sin(\theta_4 - \theta_3)} \quad (3)$$

$$\omega_4 = -\frac{r_2}{r_4} \omega_2 \frac{\sin(\theta_3 - \theta_2)}{\sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \frac{-r_2\alpha_2 \sin(\theta_4 - \theta_2) + r_2\omega_2^2 \cos(\theta_4 - \theta_2) + r_3\omega_3^2 \cos(\theta_4 - \theta_3) - r_4\omega_4^2}{r_4 \sin(\theta_4 - \theta_3)} \quad (5)$$

$$\alpha_4 = \frac{r_2\alpha_2 \sin(\theta_3 - \theta_2) - r_2\omega_2^2 \cos(\theta_3 - \theta_2) + r_4\omega_4^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) - r_3\omega_3^2}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (6)$$

여기에서, ω = 각속도, α = 각가속도

지금까지의 경우, 특수한 형태인 4 절 기구로서 쉽게 해석할 수 있으나, 두 대의 6 축 로봇으로 확장시, 강체 대상물과 완전결합 한다고 가정하면, 13 개의 링크를 갖는 복잡한 기구가 된다. 식 (1)에 의해 6 자유도를 갖게 되어 12 축을 모두 구동하게 되면 과잉구동이 된다. 과잉구동은 적절한 기구학적 해석이 선행되지 않는다면 대상물 및 로봇에 손상을 입힐 것이다. 본 논문에서는 이런 경우 6 개의 구동축에 적절한 구동력을 주어 나머지 축에 무리를 주지 않는 범위에서의 구동력을 계산한다.

3. 두 대 로봇이 체인을 형성할 때의 동력학

본 절에서는 각 관절의 위치, 속도, 가속도 ($\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}$) 를 알고 있을 때, 체인을 형성하는 두 로봇이 원하는 궤적을 따라 운동하는데 필요한 각 관절에서의 토크와 반력, 그리고 강체 대상물에 대한 반력을 고려한다. 본 연구에서는 뉴턴-오일러 동력학 공식의 알고리즘을 근거로 하여 기술하였으며, 프로그래밍 하였다. 먼저 링크에 작용하는 관성력 계산을 위해 임의의 시점에서의 각 링크의 질량 중심에 관한 회전 속도, 선 및 회전 가속도를 계산하여야 한다. 뉴턴-오일러 동력학 알고리즘에 의해 링크 1 에서부터 단계적으로 n 링크까지 외향 반복으로 회전 속도, 선 및 회전 가속도가 계산되며, 회전 관절 $i+1$ 에 대한 회전 속도, 회전 가속도는 다음 식으로 표현된다.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (7)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (8)$$

각 링크의 원점에서의 선가속도는 식(9)와 같다.

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R^i [{}^i\dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i] \quad (9)$$

각 링크 질량 중심의 선가속도는 다음과 같다.

$${}^i\dot{v}_{C_i} = {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i P_{C_i} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i P_{C_i}) + {}^i\dot{v}_i \quad (10)$$

링크 1 에서는 ${}^0\omega_0 = {}^0\dot{\omega}_0 = 0$ 이 되므로 식이 간단

해짐을 알 수 있다. 뉴턴-오일러 방정식에 의한 각 링크 질량중심에 작용하는 관성력과 토크는 식 (11), (12)와 같다.

$$F_i = m \dot{v}_{C_i} \quad (11)$$

$$N_i = {}^C I \dot{\omega}_i \times {}^C I \omega_i \quad (12)$$

다음은 내향 반복에 의한 힘과 토크를 계산하는 관계식이다.

$${}^i f_i = {}^{i+1}R^i {}^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i \quad (13)$$

$${}^i n_i = {}^{i+1}N_i {}^{i+1}R^i + {}^i P_{C_i} \times {}^i f_i + {}^i P_{i+1} \times {}^{i+1}R^i {}^{i+1}f_{i+1} \quad (14)$$

f_i = 링크 $i-1$ 에 의해 링크 i 에 가해지는 힘

n_i = 링크 $i-1$ 에 의해 링크 i 에 가해지는 토크

결국, 로봇의 좌표계를 결정할 때 토크가 가해지는 방향을 항상 Z 축으로 결정하므로 각 관절에 가해지는 토크는 다음식과 같다.

$$\tau_i = {}^i n_i^T \hat{Z}_i \quad (15)$$

두 대의 로봇이 강체를 쥐고 있어 닫힌 체인을 형성할 경우에는 두 로봇의 운동이 강체들 사이에 두 고 서로에게 영향을 미치므로 각 식들은 그에 맞게 변형되어야 한다. 본 논문에서는 이를 6 축에 관하여 기술하였다. 뉴턴-오일러 알고리즘을 적용하기 위해서 각 링크의 위치, 속도, 가속도를 입력값으로 알고 있어야 하는데, 이는 각 로봇에 대한 6×6 자코비안 행렬을 계산하여 해결된다. 자코비안 행렬은 $\dot{\Theta}$ (6×1) 와 0v (6×1) 로 구성되며 0v 는 식 (16)과 같다.

$${}^0v = [{}^0v \quad {}^0\omega] \quad (16)$$

그림과 같이 두 로봇의 마지막 링크와 강체에 의해 형성되는 새로운 링크를 L_n , 이에 작용하는 토크와 반력은 각각 ${}^6N_{n6}$, ${}^6F_{n6}$ 로 정의하며, 식 (10), (11), (12)에 의해서 식 (17)과 (18)로 표현된다. 이는 뉴턴-오일러 알고리즘의 내향 반복식에 적용할 수 있도록 하기 위함이다.

$${}^i F_{n6} = M_n [{}^i \dot{\omega}_i \times {}^i P_{n6} + {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i P_{n6}) + {}^i \dot{v}_i] \quad (17)$$

$${}^i N_{n6} = {}^C I_{n6} {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times {}^C I_{n6} {}^i \omega_i \quad (18)$$

뉴턴-오일러 알고리즘의 내향 반복식에도 6 축 로봇을 적용하면, Robot 1, II 각각에 대해 식 (19)~(22)로 표현된다. 첨자 1, II 는 Robot 1, II 를 나타낸다.

$${}^1_6 f_{I_6} = {}^6_7 R_I {}^7 f_{I_7} + {}^1_6 F_{nI_6} \quad (19)$$

$${}^1_6 n_{I_6} = {}^1_6 N_{nI_6} {}^6_7 R_I {}^7 n_{I_7} + {}^1_6 P_{cl_6} \times {}^1_6 F_{nI_6} + {}^1_6 P_{nI_7} \times {}^6_7 R_I {}^7 f_{I_7} \quad (20)$$

$${}^{II}_6 f_{II_6} = {}^6_{II} R_{II} {}^{II}_7 f_{II_7} + {}^{II}_6 F_{nII_6} \quad (21)$$

$${}^{II}_6 n_{II_6} = {}^{II}_6 N_{nII_6} {}^6_{II} R_{II} {}^{II}_7 n_{II_7} + {}^{II}_6 P_{cl_6} \times {}^{II}_6 F_{nII_6} + {}^{II}_6 P_{nII_7} \times {}^6_{II} R_{II} {}^{II}_7 f_{II_7} \quad (22)$$

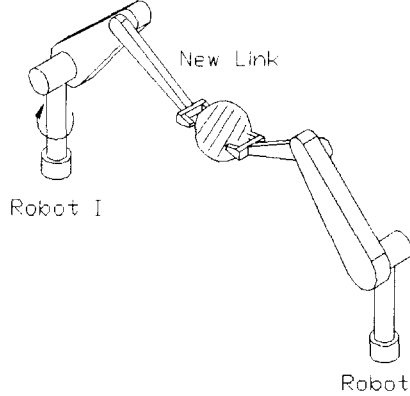


Fig. 2 The new link of two robots

나머지 5-1 축에서의 반력과 토크는 식(23)~(26)과 같이 정리된다.

$${}^i f_{I_i} = {}^i_{i+1} R_I {}^{i+1} f_{I_{i+1}} + {}^i F_{I_i} \quad (23)$$

$${}^i n_{I_i} = {}^i N_{I_i} {}^i_{i+1} R_I {}^{i+1} n_{I_{i+1}} + {}^i P_{cl_i} \times {}^i f_{I_i} + {}^i P_{I_{i+1}} \times {}^i_{i+1} R_I {}^{i+1} f_{I_{i+1}} \quad (24)$$

$${}^{II}_i f_{II_i} = {}^i_{II} R_{II} {}^{II}_{i+1} f_{II_{i+1}} + {}^{II}_i F_{II_i} \quad (25)$$

$${}^{II}_i n_{II_i} = {}^{II}_i N_{II_i} {}^i_{II} R_{II} {}^{II}_{i+1} n_{II_{i+1}} + {}^{II}_i P_{cl_i} \times {}^{II}_i f_{II_i} + {}^{II}_i P_{II_{i+1}} \times {}^i_{II} R_{II} {}^{II}_{i+1} f_{II_{i+1}} \quad (26)$$

식(23)~(26)를 보면 식들이 서로 종속적인 관계를 가져 반복적인 방법으로 해가 구해질 수 있는 형태를 취하지만, 식에서 Cross Product 연산에 미지수가 포함되어 각 성분별로 계산되어야 하며, 이는 각 성분이 하나의 식을 형성하는 연립방정식으로 표현된다. 6 축의 경우 12 개의 링크 중 11 개 링크에 대한 행렬식이 유도되며, 각 행렬은 x, y, z 의 성분으로 구성되므로 66 개의 연립방정식이 유도된다. Robot I, II 의 각 링크에 대한 반력과 토크가 미지수가 되며, 12 링크이므로 72 개의 미지수를 포함한다. 각 로봇의 6 축에 작용하는 반력과 토크는 서로에게 영향을 미쳐 종속적인 운동을 하므로 식(27)~(29)를 만족하게 된다. 이식은 연립 방정식의 해를 구할 때, 경계조건으로 사용된다.

$${}^7 f_{I_7} = {}^{II}_6 f_{II_6} \quad (27)$$

$${}^7 n_{I_7} = {}^{II}_6 n_{II_6} \quad (28)$$

$${}^6_7 R_{II} = {}^6_7 R_I \quad (29)$$

이 조건식을 연립 방정식에 대입하면, 식(19)와

(21), 식(20)과 (22) 이 같은 식이 되어 식이 60 개로 정리되며, 결국 12 개의 구동조건이 필요하다. 즉 최소 4 개의 링크에 구동 조건이 가해지면 원하는 궤적을 움직일 수 있다. 4 개의 링크에 부적절한 구동토크가 부가되면, 로봇에 부하작용 및 비효율적 궤적형성의 원인이 되므로 최적의 구동토크 구형이 중요하다. 본 논문에서는 4 개뿐만 아니라 다른 링크에도 구동토크를 적절히 분배하는 방법을 강구하였다.

4. 시뮬레이션.

본 절에서는 3 절에서 유도한 식을 확인하기 위해 간단한 6 축 로봇에 적용하여 각 링크의 토크 값들의 변화를 비교하였다. 같은 형태의 두 로봇을 사용했으며, 로봇의 파라미터들은 Table 1 과 같다.

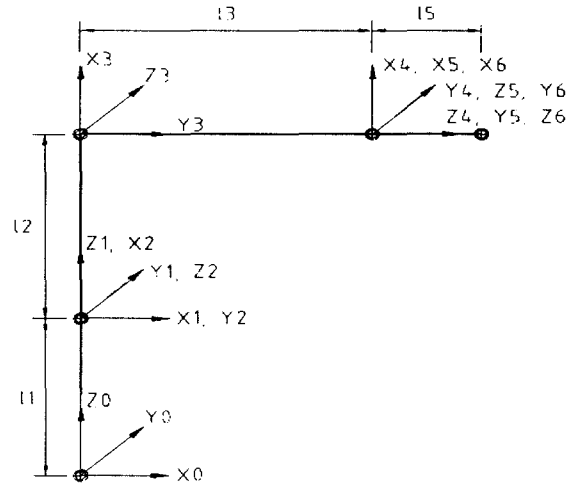


Fig. 3 The frame of 6-joint robot

여기에서, $l_1 = 75$, $l_2 = 71$, $l_3 = 85$, $l_5 = 10$ (cm),

비중 = 0.0028 kg/cm^3

Table 1. Link parameters

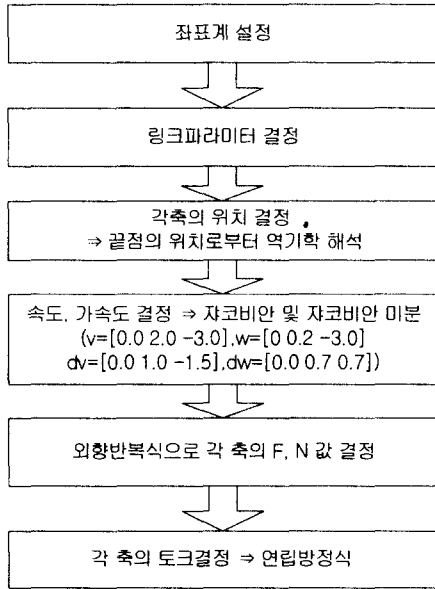
i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	0	0
2	-90	0	-90	0
3	0	l_2	0	0
4	-90	0	0	l_3
5	90	0	0	0
6	-90	0	0	0

End-effector 의 위치와 방향은 다음과 같이 설정하였다

$$P = [100, 20, 150]$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 \\ \sin 30 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matlab 을 이용하여 프로그래밍 하였으며, 순서도 및 방법은 다음과 같으며, input 값으로 사용된 속도, 가속도, 각속도, 각가속도를 보여준다.



연립 방정식을 풀기 위한 6 개의 input 값은 다음과 같이 주었다.

$${}^{116}n_{116} = [102710; -40480; 769] \quad (30)$$

$${}^{116}f_{116,y} = 1000 \quad (31)$$

${}^{116}n_{116}$ 의 x, y, z 값은 하나의 로봇일 때 작용하는 토크값을 기준으로 설정했으며, 경계조건에 의해 ${}^{116}n_{16} = {}^{116}n_{116}$ 이 되며, z 값의 변화에 따른 각 축의 토크변화를 계산하였다

Table 2 Torques of the links of two robots

	${}^{116}n_{16} = {}^{116}n_{116}$ (kg · cm)		
Unit(kg · cm)	6690	7690	8690
T1_1	-150120	-152190	-142150
T1_3	251900	355840	1195300
T1_4	91983	93891	83815

T1_5	-38333	-33089	-58548
T2_1	372830	386960	462550
T2_2	-2846400	-2967800	-3719500
T2_3	3724700	3605400	2865700
T2_4	-86371	-100510	-175500
T2_5	63561	64039	130270

5. 토크 최적화 방안 연구

Table 2 에서와 같이 각 로봇의 2 축과 3 축 값이 높은 값을 보이는데 이는 정적인 상태에서 측정했기 때문이며, 한 위치에서 다른 위치로 이동시에는 토크 값들이 적절히 배분되어야 한다. 이런 경우에 최적화 방법으로 변분법을 이용하는 최소 자승법이 널리 쓰이고 있으며, 여기서도 적용할 수 있는데 목적함수는 식(32)와 같다.

$$\min(f) = \int_0^{t_f} (\tau_1^2 + \tau_2^2 + \dots + \tau_n^2) dt \quad (32)$$

여기에서, f = 최적함수

, τ_n = 각 축에 작용하는 토크

최소 자승법은 일반적인 방법이며, 최적의 토크 값을 위해 고려되어야 할 사항을 소개 한다.

1. 토크값이 설정된 최대값보다 클 경우.

최대 한계값을 넘는 토크를 조정하기 위해서 그 축에 대해서 다시 식을 풀어 주어야 한다. 예를 들어 3 축의 토크가 한계값을 넘을 경우, 한계값 아래의 토크를 입력으로 하여 다른 축의 토크를 조정할 수 있다. 즉, 3 축과 6 축 로봇이 결합된 것으로 생각하여 식(19)~(22)를 변형하여 계산된다.

2. 로봇이 Singular Configuration 안에 있을 경우

로봇은 Singular Configuration 상태에서 운동이 불가능하므로 제어에 있어서 뒤틀리 해결 되어야 한다 한 대의 로봇에서는 일반적으로 Singular Point 를 피하도록 제어된다. 두 대 로봇에서는 어느 한 로봇이 Singular Point 를 지날 때 다른 로봇에 토크를 주어 Singular Point 를 피하게 되므로 작업 환경에 제약을 줄일 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 두 대의 6 축 로봇에 대한 동역학 해석을 Newton-Eulerian approach 를 이용하여 식을 정립하였으며, 최적화 방법을 제시하였다. 정립된 식을 검증하기 위해 matlab 을 이용하여 프로그래밍 하였으며, 간단한 형태의 로봇에 적용하였다. end-effector 의 위치로부터 역기구학을 해석하여 각 관절의 위치를 결정했으며, 이 위치로부터 자코비안을 구하여 속도와 가속도를 결정하였다.

여기서는 한 점에 대해서 각 축의 토크 변화를

살펴 보았다. 로봇이 운동할 경우, end-effector 의 위치와 방향이 계속해서 변하기 때문에 역기구학에 의한 각 축의 위치값과 자코비안값 또한 이에 따라 계속해서 계산이 되어져야 한다. 이러한 문제가 효율적으로 접근된다면, 경로에 따른 토크 변화를 비교할 수 있어, 최적의 토크값을 구하는 것이 가능하다.

참고문헌

1. S.Y. Ho, David Orin "Dynamic Computer Simulation of Multiple Closed-chain Robotic Mechanisms" IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986.
2. Yan-Ru Hu, Andrew A. Goldenberg, "Motion and Force Control of Coordinated Robots During Constrained Motion Tasks", The International Journal of Robotics Research ,Vol.14, No.4, August 1995, pp. 351-365
3. Henrik G. Petersen, Jhon W. Perran, "A General Algorithm for Dynamic Control of Multilink Robots", The International Journal of Robotics Research ,Vol.14, No.3, June 1995, pp. 281-294.
4. T.J. Tran, A. K. Bejczy, and X. Yun, "Design of Dynamic Control of Two Cooperating Arms: Closed Chain Formulation", in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Raleigh, NC,1987, pp.1242-1247.
5. J. T. Wen and K. Kreut-Delgadoz, "Motion and Force for Multiple Robotic Manipulators", Autometica, vol. 28, no.4, pp729-743, 1992.
6. Y. F. Zheng and J. Y. S. Luh, "Optimal Load Distribution for Two Industrial Robots Handling a Single Object", in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. 1988, pp. 344-349.
7. Y. H. Liu, Y. S. Xu and Marcel Bergerman, "Cooperation Control of Multiple Manipulators with Passive Joints", IEEE trans. Robot. Automat. Vol. 15, No.2, 1999.
8. Arimoto, S., and Miyazaki, F. 1987. "Cooperative Motion Control of Multiple Robot Arms or Fingers.", Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp.1407-1412.
9. Luh, J. Y. S., and Zheng, Y. F., "Constrained Relations between Two Coordinated Robots for Motion Control " Int. J. Robot. Res. 1987. Vol.6 No.3 pp67-70.
10. Mark W. Spong and M. Vidyagar, "Robot Dynamics and Control", 1989.
11. Thusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990..
12. Ryuh, B. S. "Dynamic Analysis of Two Cooperating

- Robots', ASME Design Technology Conference, 1987
13. 유범상, 이승훈, "모델링 데이터를 이용한 금형 연마 자동화 시스템", 1999 년 춘계학술대회논문집, 773-776 한국정밀공학회
 14. 조선휘, 분홍기. "로봇 매니퓰레이터의 치수 최적화", 대한기계학회 논문집 제 12 권 제 4 호, pp. 730-737, 1988.