

# 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어를 이용한 평면 여자유도 매니퓰레이터의 토크 최적화에 관한 연구

## A Study on Torque Optimization of Planar Redundant Manipulator using A GA-Tuned Fuzzy Logic Controller

유봉수 · 김성곤 · 조중선\*

Bong Soo Yoo, Seonggon Kim and Joongseon Joh\*

창원대학교 제어계측공학과

### 요 약

여자유도 매니퓰레이터의 동적 제어는 관절에 가해지는 토크를 최소화하는 목적으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 기존의 국소 토크 최적화의 동적 제어 방법은 드라이버로 구현하기 힘든 토크가 요구된다. 본 논문에서는 그러한 큰 토크 요구를 상당히 개선시킨 새로운 제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 기존의 국소 토크 최소화 알고리즘에 퍼지 로직과 유전자 알고리즘을 적용시킨 것이다. 제안된 알고리즘은 3자유도 평면 여자유도 로봇에 적용하였으며, 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

키워드 : 여자유도 로봇, 토크 최적화, 유전자 알고리즘, 퍼지 로직 제어기

### Abstract

A lot of researches on the redundant manipulators have been focused mainly on the minimization of joint torques. However, it is well-known that the most dynamic control algorithms using local joint torque minimization cause huge torques which can not be implemented by practical motor drivers. A new control algorithm which reduces considerably such a huge-required-torque problem is proposed in this paper. It adapts fuzzy logic and genetic algorithm to the conventional local joint torque minimization algorithm. The proposed algorithm is applied to a 3-DOF redundant planar robot. Simulation results show that the proposed algorithm works well.

Key Words : Redundant manipulator, Torque optimization, Genetic algorithm, Fuzzy logic controller

### 1. 서 론

여자유도 매니퓰레이터는 주어진 작업을 수행하기 위해 필요한 자유도보다 더 많은 기구학적 자유도를 가지는 매니퓰레이터로 정의되며, 그 여분의 자유도는 여자유도라 한다. 이 여분의 자유도를 이용하여, 여자유도 매니퓰레이터는 로봇팔단 경로를 추적하면서 동시에 여러 가지 다른 부작업을 수행할 수 있다.

많은 연구자들이 여자유도의 이용에 적합한 부작업을 개발하기 위한 연구를 수행하였으며, 특이점 회피(singularity avoidance)[1], 국소 운동 에너지 최소화(local kinetic energy minimization)[2], 장애물 회피(obstacle avoidance)[3], 국소 관절 토크 최소화(local joint torque minimization)[4-8], 충격 제어(impact control)[9] 등에서 좋은 결과를 얻었다. Hollerbach와 Suh[5]는 최소화방법에 기초를 두고 자코비안의 영공간(null space)을 이용하여 가속도 단계에서 토크를 최적화할 수 있는 해를 유도하였고,

이 알고리즘을 3자유도 평면 매니퓰레이터에 적용하였다. 이 연구에서 비록 짧은 궤적에서는 관절 토크가 성공적으로 최소화되었지만, 긴 궤적을 이동하는 동안 드라이버로 구현하기 힘든 토크가 요구되었다. Kazerounian[4]는 토크 최소화 최소화방법을 이용하여 해를 직접적으로 유도하였다. 그러나 11자유도 매니퓰레이터에 대한 시뮬레이션에서 안정성 문제를 보였다. Maciejewski[10]는 이러한 안정성 문제를 해결하기 위해 관절 속도와 관절 가속도를 이용한 스위칭 방법을 제안하였다. Ma[6]는 Kazerounian이 제시한 방법을 수정하여 DSTO(Damped Squared Torque Optimization) 방법을 제안하였다. 위의 두 방법 모두 전역 토크 안정성(global torque stability)과 국소 토크 최적화(local torque optimization) 사이의 협정(trade-off)은 피할 수 없는 문제라고 보고, 협정할 수 있는 스위칭 기술을 제안하였다. 그러나 제안된 알고리즘에서 중요한 균형 인자(balancing factor)를 분석적인 표현으로 유도하지 못했다. Chung[8]은 Kazerounian과 Ma의 알고리즘을 개선한 새로운 스위칭 방법을 제안하였다. 이 알고리즘에서 최소-놈 가속도(minimization-norm acceleration)와 동차 가속도(homogeneous acceleration)를 스위칭하는 제어전략을 보였다. 그 결과로써 관절의 토크는 안정성을 보였으나, 관절 토크 변화에 대해서는 여전히 안정성을 보장하지 못했다. 매니퓰레이터를 구동 시 인가되는 관절의 토크나 토크 변화

접수일자 : 2008년 1월 22일

완료일자 : 2008년 7월 10일

\* 교신 저자

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업 및 2007년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

량은 하드웨어로 구현할 수 있는 값을 초과해서는 안된다. 각 관절의 토크가 순간적으로 크게 변할 경우 하드웨어의 치명적인 손상을 초래할 수 있으므로, 토크의 변화량의 안정성이 요구된다.

본 논문에서는 매니플레이터의 각 관절의 토크 변화를 퍼지 로직을 이용하여 최적화하는 방법을 제안한다. 기존의 퍼지 제어 시스템은 대부분 작업자의 지식에 기반을 두고 설계되었다. 그러나 숙련된 작업자의 경험이나 제어에 관한 지식을 언어로 표현하고 제어규칙의 형태로 논리화하는 것은 어려운 작업이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 유전자 알고리즘을 사용할 수 있다. 유전자 알고리즘은 자연도태와 유전적 성질에 기초한 탐색 알고리즘으로 복잡한 최적화 문제에 뛰어난 성능을 가진다. 최근 들어 이러한 유전자 알고리즘의 특성을 이용하여 비선형 시스템인 퍼지 제어를 최적화하는 방법들이 많이 연구되고 있다[11-14]. 본 논문에서는 매니플레이터의 토크 최적화를 위해 제안된 퍼지 로직 제어를 유전자 알고리즘을 이용하여 조정(tune)하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 로직 제어를 조정하는 방법으로 전건부, 후건부의 소속함수와 퍼지규칙을 동시에 조정하는 방법을 사용하였다. 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 2. 매니플레이터의 토크 최적화

관절 토크를 최적화하기 위해서는 가속도 단계에서 여자유도를 분해해야 한다.  $m$ -차원에서 동작하는  $n$ -자유도 매니플레이터에서 관절 가속도와 로봇말단 가속도의 관계는 다음과 같다. 여기서,  $n > m$  이다.

$$\ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^m$ 은 로봇말단의 가속도 벡터를 의미하고,  $\dot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbf{R}^n$ 은 각각 관절 속도 벡터, 관절 가속도 벡터를 의미한다.  $\mathbf{J}$ 는  $m \times n$  자코비안 행렬이고,  $\dot{\mathbf{J}}$ 는 자코비안의 시간에 대한 미분 행렬이다.

조인트 공간에서의 매니플레이터의 동역학은 다음과 같은 형태의 운동방정식으로 나타내어질 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (2)$$

여기서,  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$ 는 관절 토크 벡터이며,  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 은 관성행렬(inertial matrix),  $\mathbf{N} \in \mathbf{R}^n$ 는 코리올리력, 원심력 및 중력 등을 포함하는 비선형 벡터이다. 토크-최소화 최소자승 문제는 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$\text{Min } Z = \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\tau} \text{ subject to } \ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{O}_m \quad (3)$$

$m \times 1$  라그랑지 승수 벡터  $\lambda$ 를 이용하면, 확장된 목적 함수  $Z^*$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Z^* = \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\tau} + \lambda^T (\ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} - \ddot{\mathbf{x}}) \quad (4)$$

식 (2)를 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$Z^* = (\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N}) + \lambda^T (\ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} - \ddot{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

$Z$ 를 최소화하기 위한 필요조건은

$$\frac{\partial Z}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{O}_n^T, \quad \frac{\partial Z}{\partial \lambda} = \mathbf{O}_m^T \quad (6)$$

식 (4), (5)를 이용하여  $\lambda$ 를 구하면

$$\lambda = -2(\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}^T)^{-1}(\ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}) \quad (7)$$

따라서 관절 가속도  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_M^+ (\ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - (\mathbf{I} - \mathbf{J}_M^+ \mathbf{J}) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \quad (8)$$

여기서,

$$\mathbf{J}_M^+ = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \quad (9)$$

$\mathbf{J}_M^+$ 는 자코비안의 관성가중치 의사역행렬(squared-inertia weighted pseudoinverse)이다. 관절 토크의 전역거동에 대하여 의사역행렬(pseudoinverse)은 관성가중치 의사역행렬보다 안정성을 보장한다[5]. Chung[8]은 식 (8)을 수정하여 아래의 동적 제어 방법을 제안하였다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^+ (\ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \quad (10)$$

여기서,

$$\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \quad (11)$$

제안된 방법에서 전역 토크 안정성과 국소 토크 최적화를 보장하기 위하여, 스위칭 기준(switching criterion)으로 Maciejewski[10]가 제안한 안정성 조건(stability condition)을 적용하였다. 그러나 이 방법에서 스위칭이 일어나는 구간에서는 토크의 변화가 큰 것을 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 식 (10)을 수정하여 다음과 같은 동적 제어 방법을 제안한다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^+ (\ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \alpha (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \quad (12)$$

여기서,  $\alpha$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 은 연속함수(continuous function)이다. 식 (12)의 첫 번째 항은 관절 가속도의 놈(norm),  $\|\ddot{\boldsymbol{\theta}}\|$ 을 최소화시킨다. 따라서 이 항을 최소-놈 가속도(minimum-norm acceleration)라 하고,  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m$ 로 표현한다. 직각 좌표계의 로봇말단의 궤적을 보다 더 정확하게 추적하기 위하여  $\ddot{\mathbf{x}}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{\mathbf{x}} = \ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P \mathbf{e} \quad (13)$$

여기서,  $\mathbf{e} \equiv \mathbf{x}_d - \mathbf{x} \in \mathbf{R}^m$ 는 로봇말단의 추적 오차 벡터이고,  $\dot{\mathbf{e}} \equiv \dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^m$ 는 로봇말단의 속도 추적 오차 벡터이다.  $\mathbf{K}_D \in \mathbf{R}^{m \times m}$ ,  $\mathbf{K}_P \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 는 각각 상수 속도, 위치 피드백 행렬이다. 만약, 매니플레이터가 특이점을 통과하지 않는다면, 위의 제어법칙은 추적 오차가 지수함수적으로 줄어들음을 보장한다. 식 (12)의 두 번째 항은 동차 가속도(homogeneous, null space acceleration)라 하고  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_h$ 로 표현하며, 투영 연산자  $(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J})$ 에 의하여 자코비안의 영공간으로  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ 를 투영한다. 이 항은 로봇의 자체운동(null motion)을 결정짓는다. 매니플레이터가 말단 궤적을 정확하게 추적할 때 토크 최적화를 위해 자체운동에 따른 각 관절의 구성은 매 샘플링 시간마다 달라질 수 있으므로,  $\alpha$  값 또한 매 샘플링 시간마다 다른 값으로 설정하는 것이 타당하다.

매니플레이터에 가해지는 토크와 토크의 변화량은 샘플링 시간동안 하드웨어가 지원할 수 있는 값을 초과해서는 안된다. 여자유도 매니플레이터의 경우 토크 최적화를 보장하면서 주어진 작업을 수행할 수 있다. 이때  $\alpha$  값을 적절하

게 선택하면 토크 최적화를 보장할 수 있다.

본 논문에서는 매니플레이터가 주어진 작업을 수행함에 있어서 관절의 토크의 변화를 최소화하면서, 토크를 최적화할 수 있는  $\alpha$  값을 퍼지 로직 제어기를 통하여 생성하고자 한다. 이때 퍼지 로직 제어기는 유전자 알고리즘을 이용하여 조정(tune) 한다. 기존의 연구에서는 하나의 작업에 대해 고정된  $\alpha$  값을 가짐에 반해, 제안된 알고리즘에서는 각각의 샘플링 시간마다 토크 최적화를 보장하는  $\alpha$  값을 선택한다. 그림 1은 평면 여자자유도 매니플레이터의 토크 최적화를 위한 전체 시스템 구성도이다.

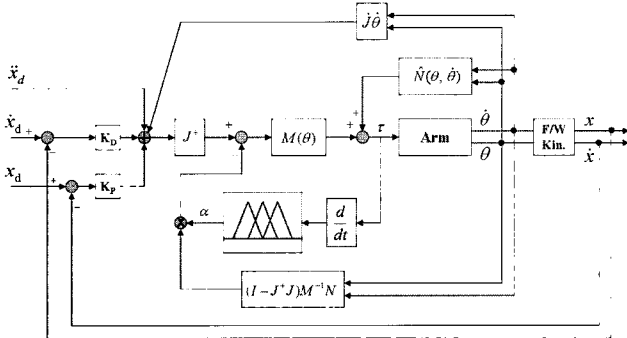


그림 1. 평면 여자자유도 매니플레이터의 토크 최적화를 위한 시스템 구조

Fig. 1. The Structure of system for torque optimization of planar redundant manipulator

### 3. 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기

퍼지 제어기를 설계함에 있어서 전통적인 방법은 전문가의 경험이나 지식을 이용하여 소속함수와 제어 규칙을 설계하는 것이다. 그러나 전문가의 경험이나 지식을 얻어내는 과정은 많은 시간과 비용을 요구한다. 따라서 퍼지 제어기를 전문가의 개입없이 생성하려는 많은 연구가 있어왔다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 직접 설계하는 방법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 방법들에는 제어기의 고정된 제어 규칙에 대한 소속함수만을 생성하거나[12], 미리 정의된 소속함수에 대한 제어규칙만을 찾아내는 방법[13], 소속함수와 제어규칙을 동시에 생성하는 방법[11,14] 등이 있다. 위의 모든 방법에서 퍼지 제어기의 설계에 유전자 알고리즘을 사용하는 것이 퍼지 제어기의 성능을 향상시키고 개발시간을 감소시킬 수 있다는 것을 보여 주었다. 유전자 알고리즘을 퍼지 제어기의 생성에 적용하기 위해서는 우선 퍼지 제어기를 문자열의 형태로 표현하는 부호화 방법이 필요하다. 본 논문에서는 퍼지 제어기의 입출력 변수의 소속함수와 제어 규칙을 모두 부호화하였다. 그림 2는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기의 구조를 나타낸다.

입출력 변수들의 소속함수는 그림 3과 같이 삼각 퍼지 숫자와 사다리꼴 퍼지 숫자로 표현하였으며, 이를 2진 부호로 부호화하였다.

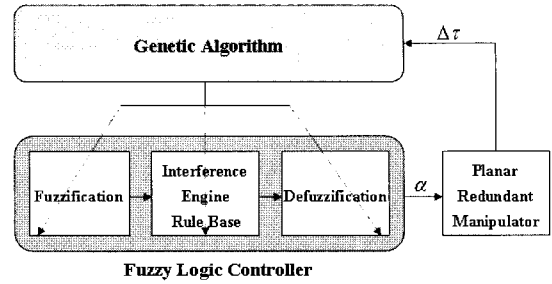


그림 2. GA로 조정된 퍼지 로직 제어기의 구조  
Fig. 2. The structure of a GA-tuned fuzzy logic controller

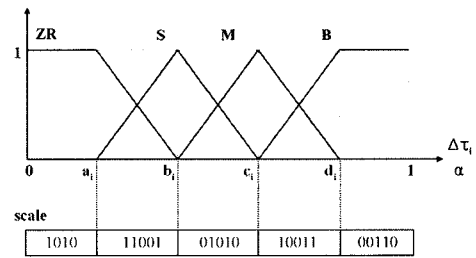


그림 3. 제안된 소속함수의 부호화 방법(예)  
Fig. 3. The Method of encoding of proposed membership function(example)

또한 퍼지 규칙은 행우선(row-wise)으로 나열하는 방법을 이용하여 그림 4와 같이 문자열로 표현하였다.

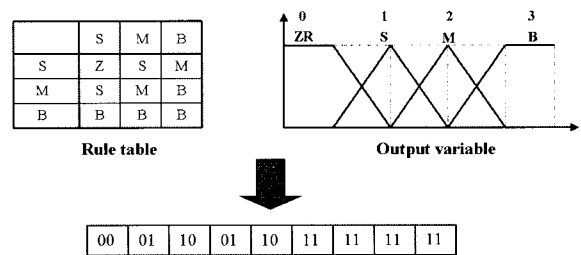


그림 4. 제안된 제어 규칙의 부호화 방법(예)  
Fig. 4. The Method of encoding of proposed fuzzy rule (example)

이때, 제어 규칙을 나타내는 염색체의 두 유전인자는 제어 규칙표의 한 부분을 나타내게 되는데, 유전인자가 가질 수 있는 값은 출력 변수의 언어항 중의 하나이다. 언어항을 표현하기 위하여 출력 변수의 전체 집합에서 왼쪽에 있는 언어항을 0으로 시작하여 오른쪽으로 가면서 1씩 증가시킨 값을 언어항의 이름으로 사용하였다.

유전자 알고리즘에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 각 개체를 평가하기 위하여, 식 (14)의 적합도 함수  $f$ 를 사용하였다.

$$f = \min \frac{1}{2} (\Delta \tau_1^2 + \Delta \tau_2^2 + \Delta \tau_3^2) \quad (14)$$

그림 5와 표 2는 제안된 방법에 의해서 생성된 각 변수들의 소속함수와 제어 규칙표를 보여준다.

표 1. 유전자 알고리즘 파라미터

Table 1. Genetic algorithm parameters.

Parameter	Value
Max. generation number	100
Population number	100
Crossover rate	30 %
Mutation rate	1 %
Chromosome length	165

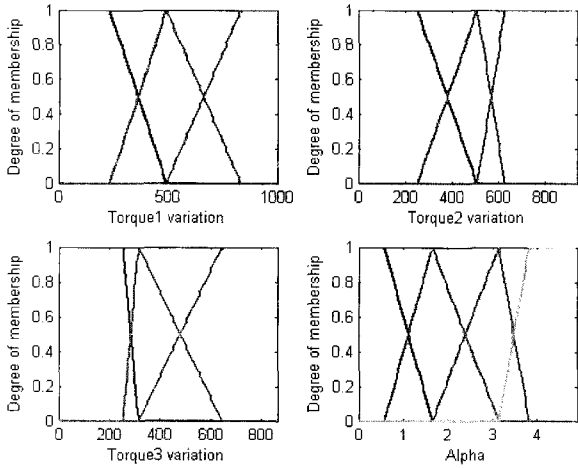


그림 5. GA로 조정된 소속 함수  
Fig. 5. GA tuned membership function

표 2. GA로 조정된 퍼지 규칙

Table 2. GA tuned fuzzy rules.

$\Delta\tau_3$	$\Delta\tau_1 = S$			$\Delta\tau_2 = M$			$\Delta\tau_3 = B$		
	S	M	B	S	M	B	S	M	B
$\Delta\tau_2$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
S	B	B	B	M	B	B	Z	B	B
M	S	Z	M	S	S	M	B	B	Z
B	Z	B	M	Z	S	B	M	M	Z

#### 4. 시뮬레이션

이 장에서는 Kazerounian[4]와 Chung[8]의 방법과 비교하여 제안된 알고리즘의 타당성을 평가하기 위하여 3자유도 평면 여자유도 매니플레이터에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 위의 두 가지 방법의 결과와 비교하기 위하여 링크 길이, 질량, 궤적은 Chung[8]과 동일하게 적용하였다. 그림 6은 시뮬레이션에 사용된 매니플레이터를 나타낸다. 각 링크의 길이는 1 [m], 질량은 10 [kg]이며, uniform thin rod로 모델링 되었다. 로봇 말단의 궤적은 bang-bang 경로 계획에 의하여 생성하였다.

각 관절의 초기값은  $\theta_0 = (180^\circ, -90^\circ, 0^\circ)$ 이며, 로봇 말단의 가속도는 궤적의 초기 반주기와 마지막 반주기로 각각  $\ddot{x}_d = (2, -1) m/s^2$ 와  $\ddot{x}_d = (-2, 1) m/s^2$ 으로 설정하였다.

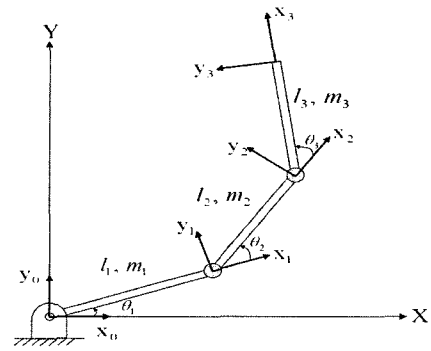


그림 6. 평면 여자유도 매니플레이터  
Fig. 6. Planar redundant manipulator

위치 및 속도 피드백 게인은 각각  $K_p = \text{diag}(256, 256)$ 과  $K_D = \text{diag}(32, 32)$ 이 사용되었다. 그림 7은 Kazerounian[4]의 방법에서의 관절의 토크를 나타낸다. 비교적 큰 토크가 요구됨을 알 수 있다. 그림 8은 Kazerounian[4]의 방법에서의 각 관절에서 요구되는 토크의 변화량을 나타낸다. 특정 구간에서 갑작스런 토크의 변화가 발생함을 알 수 있다.

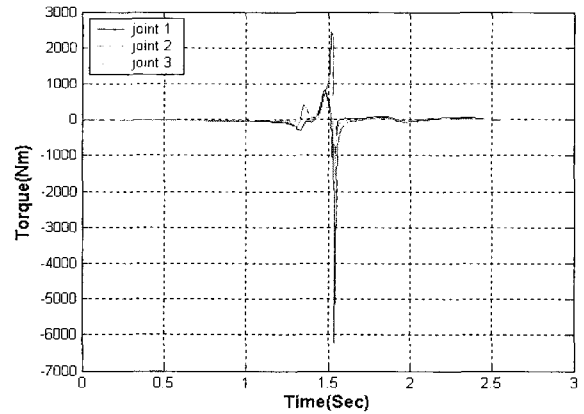


그림 7. 각 관절의 토크(Kazerounian[4] 방법)  
Fig. 7. Joint torque(Kazerounian[4] method)

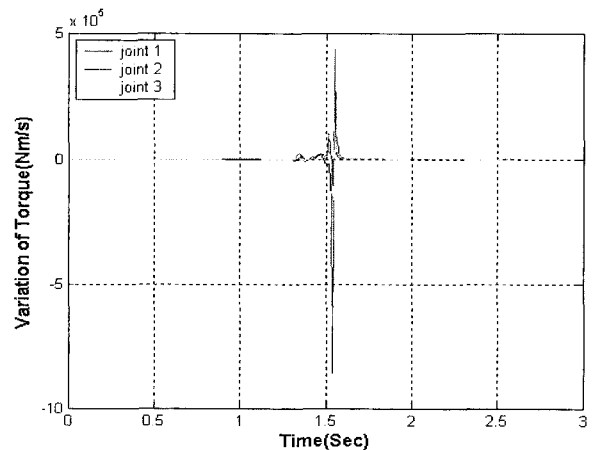


그림 8. 각 관절의  $\Delta\tau$ (Kazerounian[4] 방법)  
Fig. 8. Joint  $\Delta\tau$ (Kazerounian[4] method)

그림 9는 Chung[8]의 방법에서의 각 관절의 토크를 나타낸다. Kazerounian[4] 방법에서는 순간적으로 큰 토크를 요구하였지만 이 방법에서는 하드웨어가 지원할 수 있는 크기의 토크가 요구됨을 알 수 있다. 그림 10은 Chung[8] 방법을 사용했을 경우 요구되는 토크의 변화량을 나타낸다. 1.42[sec]에 나타나는 토크의 변화량은 Bang Bang 경로계획 시 순간적으로 가속도를 변화시켰기 때문에 나타나는 토크의 변화량이다. 이 외에도 순간적으로 토크의 변화량이 큰 구간이 보인다.

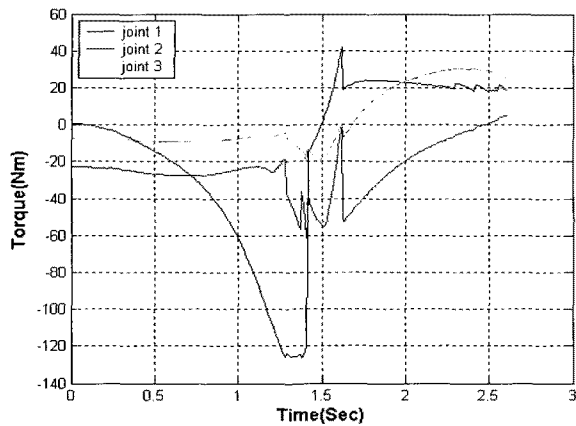


그림 9. 각 관절의 토크(Chung[8] 방법)  
Fig. 9. Joint torque(Chung[8] method)

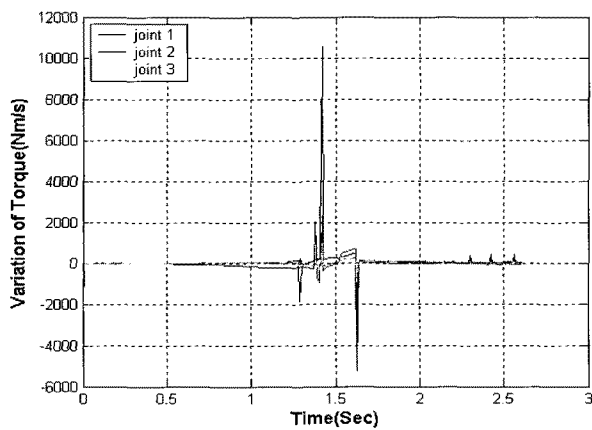


그림 10. 각 관절의  $\Delta\tau$ (Chung[8] 방법)  
Fig. 10. Joint  $\Delta\tau$ (Chung[8] method)

그림 11은 제안된 알고리즘을 사용했을 경우의 각 관절의 토크를 보여준다. 그림 9와 비교했을 경우 토크의 크기는 크지만, 부드러운 프로파일을 가짐을 알 수 있다. 이것은 토크의 변화량을 최소화하기 위한 목적으로 자체운동을 한 결과이다. 그림 12는 제안된 알고리즘을 사용했을 경우 각 관절에서의 토크의 변화량을 나타낸다. 그림 10과 비교하여 토크의 변화량이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

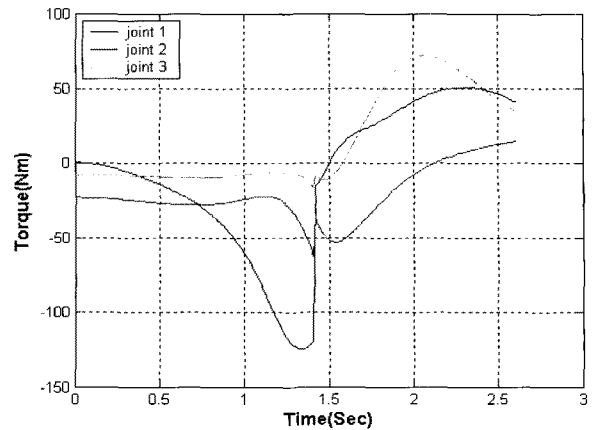


그림 11. 각 관절의 토크(제안된 방법)  
Fig. 11. Joint torque(Proposed method)

토크의 크기를 최소화하는 목적은 매니퓰레이터의 구동 시 필요한 하드웨어의 용량을 최소화하기 위함이다. 따라서 매니퓰레이터를 구동 시에 사용되는 드라이버의 최대 토크를 150[Nm]라고 가정한다면, Kazerounian[4]의 방법에서는 매니퓰레이터의 구동 토크가 부족하지만, Chung[8]의 방법과 본 논문에서 제안한 방법에서는 매니퓰레이터를 구동하기에 충분한 토크를 제공한다. 토크의 변화량을 최소화하는 목적은 매니퓰레이터의 움직임을 부드럽게 하기 위함이다. 고속화된 작업에서 매니퓰레이터는 빠른 속도를 요구하게 되고, 이때 매니퓰레이터가 부드러운 거동을 가져야 한다. 따라서 제안된 알고리즘은 Chung[8]이 제안한 방법보다 토크의 크기 관점에서 보면 조금 미흡하지만, 드라이버가 제공할 수 있는 토크 내에서 토크의 변화량을 최소화함으로써 매니퓰레이터의 움직임을 부드럽게 할 수 있다.

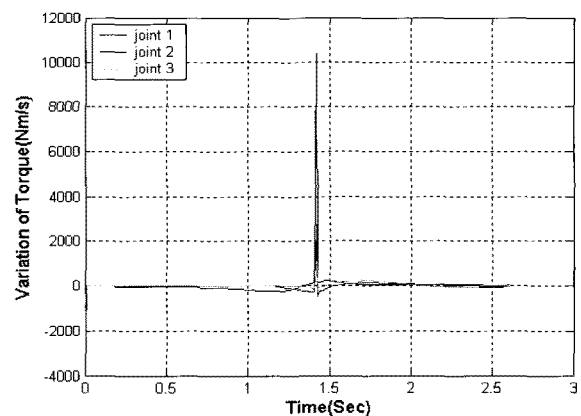


그림 12. 각 관절의  $\Delta\tau$ (제안된 방법)  
Fig. 12. Joint  $\Delta\tau$ (Proposed method)

그림 13은 제안된 방법을 이용했을 경우 로봇의 궤적을 나타낸다.

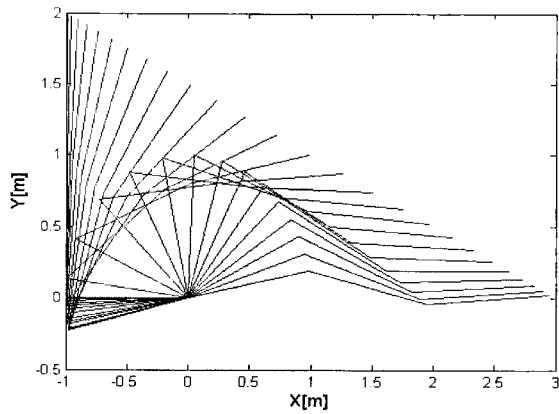


그림 13. 제안된 방법에서의 로봇의 궤적  
Fig. 13. Robot trajectory(proposed method)

표 3은 위의 세 가지 알고리즘에 대한 평가를 비교한 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 Kazerounian가 제안한 방법 뿐만 아니라 Chung이 제안한 방법보다도 약 27%가 개선되었음을 알 수 있다.

표 3. 세 가지 방법에 대한 결과 비교  
Table 3. Comparison of results about 3 method.

Method	$\int_{t_0}^{t_f} \Delta T^T \Delta \pi dt$
Kazerounian[4] method	$1.1123 \times 10^{12}$
Chung[8] method	$1.7630 \times 10^8$
Proposed method	$1.2852 \times 10^8$

### 5. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어를 이용한 매니플레이터의 관절 토크 최소화에 관한 방법을 제안하였다. 여자유도 매니플레이터의 관절 토크 최적화를 위한 제어를 위해서는 효과적인 동력학 제어 알고리즘이 필요한데, Chung[8]이 제안한 방법을 수정하여 개선된 방법을 제시했다. 기존의 방법에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성은 제어 알고리즘에 고려하지 않았지만, 제안된 알고리즘에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성을 고려했다. 실제로 각 관절에 토크를 인가할 경우, 관절 토크의 변화량은 하드웨어가 구현할 수 있는 양을 초과해서는 안 된다. 제안된 알고리즘에서는 관절 토크 변화량을 최소화하는  $\alpha$  값을 구하기 위하여 퍼지 로직 제어를 사용하였고, 이것은 유전자 알고리즘을 이용하여 조정하였다. 본 논문에서 사용된 유전자 알고리즘은 퍼지 제어기의 소속함수와 제어 규칙을 동시에 자동 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 제어 알고리즘은 3자유도 평면 여자유도 매니플레이터에 적용하였고, 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다. 향후 과제로는 제작된 3자유도 평면 여자유도 매니플레이터에 본 알고리즘을 적용하는 연구가 있어야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] T. Yoshikawa, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," *Robotics Research: The First International Symposium*, M. Brady and R. Paul, Eds., MIT Press, Cambridge MA, pp.439-446, 1984.
- [2] O. Khatib, "Dynamic Control of Manipulators in Operational Space," in *Proc. of 6th IFToMM World Conf. on Theory of Machines and Mechanisms (New Delhi, India)*, pp.15-20, 1983.
- [3] A. A. Maciejewski and C. A. Klein, "Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments," *Int. J. Robotics Research*, Vol. 4, no. 3, pp.109-117, 1986.
- [4] K. Kazerounian, A. Nedungadi, "A Local Solution with Global Characteristics for the Joint Torque Optimization of a Redundant Manipulator," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 6, pp.631-654, 1989.
- [5] J. M. Hollerbach, K. C. Suh, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, no.4, pp.308-316, 1987.
- [6] S. Ma, S. Hirose and D. Nenchev, "Improving local torque optimization techniques for redundant robotic mechanisms," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 8, no.1, pp.75-91, 1991.
- [7] H. J. Kang and R. A. Freeman, "Null Space Damping Method for Local Joint Torque Optimization of Redundant Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, no.2, pp.249-270, 1993.
- [8] W. J. Chung, W. K. Chung and Y. Youm, "Dynamic Control Algorithm of Redundant Manipulators based on Stability Condition," in *Proc. of the ISCA Int. Conf. on Computer Applications in Industry and Engineering, (Honolulu, HI)*, pp.7-11, 1993.
- [9] W. J. Chung, I. H. Kim and J. Joh, "Null-space Dynamics based Control of Redundant Manipulators in Reducing Impact," *Control Engineering Practice*, Vol. 5, no.9, pp.1273-1282, 1997.
- [10] A. A. Maciejewski, "Kinematic Limitations on the Use of Redundancy in Robotic Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, no.2, pp.205-210, 1991.
- [11] Michael A. LEE, Hideyuki TAKAGI, "Integrating Design Stages of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms," *2nd IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp.612-617, 1993.
- [12] V. B. Nguyen, A. S. Morris, "Genetic Algorithm Tuned Fuzzy Logic Controller for a Robot Arm with Two-link Flexibility and Two-joint Elasticity," *Journal of Intelligent and Robotic*

*Systems*, 49, pp.3-18, 2007.

- [13] S. S. Roy, D. K. Pratihar, "A Genetic-Fuzzy Approach for Optimal Path-planning of a Robotic Manipulator among Static Obstacles," *Internal Journal of Institution of Engineers*, vol. 84, pp.15-22, 2003.
- [14] K. Belarbi, F. Titel, W. Bourebia and K. Benmahammed, "Design of Mamdani Fuzzy Logic Controllers with Rule Base Minimisation using Genetic Algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 18, pp.875-880, 2005.

저 자 소 개



**유봉수(Bong Soo Yoo)**  
 2000년 : 창원대학교 제어계측공학과(학사)  
 2002년 : 창원대학교 제어계측공학과(석사)  
 2002년~현재 : 창원대학교 제어계측공학과 박사과정

관심분야 : 퍼지이론, 유전자 알고리즘, 로봇틱스, 햅틱 디바이스, DSP 컨트롤러



**김성곤(Seonggon Kim)**  
 2007년 : 창원대학교 제어계측공학과(학사)  
 2007년~현재 : 창원대학교 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지이론, 유전자 알고리즘, 하이브리드 굴삭기, 로봇틱스, DSP 컨트롤러



**조중선(Joongseon Joh)**  
 1991년 : Georgia Institute of Technology, Department of Mechanical Eng. (공학박사)  
 1991년~1993년 : 국방과학연구소  
 1993년~현재 : 창원대학교 제어계측공학과 교수  
 2001년 : IEEE Trans. of Fuzzy Systems 최우수 논문상

관심분야 : 퍼지이론, 신경회로망, 유전자 알고리즘, 하이브리드 굴삭기, 햅틱 디바이스, 로봇틱스, MR 브레이크