한국지능시스템학회 논문지 2008, Vol. 18, No. 6, pp. 787-796

지능제어를 이용한 평면 여자유도 매니퓰레이터의 충돌제어에 관한 연구

A Study on Impact Control of Planar Redundant Manipulator using A Intelligent Control

유봉수* · 구성완* · 조중선**

Bong Soo Yoo*, Seongwan Koo* and Joongseon Joh**

* 창원대학교 제어계측공학과 대학원

** 창원대학교 제어계측공학과

요 약

매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격량을 줄이기 위해서는 유효질량이 최소화되는 자세가 요구되므로, 자체운동(self motion)을 통하여 이러한 자세를 유지해야 한다. 이때 여유자유도를 분해하기 위하여 관절 토크 국소 최소화 알고리즘을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 기구학적인 여자유도를 이용하여 관절토크를 최소화시킴과 동시에 충돌을 최소화시키는 새로운 제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 기존의 국소 토크 최소화 알고리즘과 국소 충돌 최소화 알고리즘에 퍼지 로직과 유전자 알고리즘을 적용시킨 것이다. 제안된 알고리즘은 3자유도 평면 여자유도 매니퓰레이터에 적용하였으며, 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

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

Abstract

When the manipulator collides with surroundings, there occurs an impulse. To reduce the impulse, the self motion should maintain the manipulator's position by the minimally effective mass. At this time, we can use the local joint torque minimization algorithm to resolve the redundancy. In this study, to reduce the impulse and damages by the impact between the manipulator and surroundings, new control algorithm for the minimization of the joint torque using the kinetic redundancy and the impact minimization is proposed. 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 manipulator. Simulation results show that the proposed algorithm works well.

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

1. 서 론

기구학적인 여자유도를 가진 매니퓰레이터는 말단(end-effector)을 원하는 위치와 방향으로 두는데 필요한 자유도보다 많은 자유도를 가진 매니퓰레이터를 말하며, 말단의 운동에는 영향을 주지 않고, 자체운동(self motion)을 통하여 자세(configuration)를 바꿀 수 있다. 여자유도 매니퓰레이터는 자체운동을 이용하여 기구학적 특이점 회피(singularity avoidance)[1], 운동 에너지 최소화(kinetic energy minimization)[2], 장애물 회피(obstacle avoidance)[3], 관절 토크 최소화(joint torque minimization)[4-8], 충돌제어(impact control)[9-12] 등의 부작업(sub-task)에 이용되고 있다.

접수일자 : 2008년 4월 8일
완료일자 : 2008년 9월 3일
*교신저자
본 연구는 2008년도 창원대학교 연구비 및 2008년도 2단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

매니퓰레이터는 다양한 환경과의 상호작용을 하며 주어진 작업을 수행한다. 이러한 작업은 비접촉, 접촉 그리고 충돌상황으로 구분된다. 비접촉 상황인 자유공간에서의 제어는 정확한 위치제어가 요구되고, 접촉 상황에서는 정확한 힘제어가 요구된다. 또한 충돌 시에는 충격량을 최소화할 수 있는 충돌제어가 요구된다.

여자유도 매니퓰레이터의 위치제어를 위한 많은 성능지수 중 관절 토크 최소화는 각 관절에 가해지는 토크를 최소화하기 위하여 지금까지 많은 연구가 이루어졌으나, 기존의 방법들은 드라이버로 구현하기 힘든 토크가 요구되었다. Hollerbach[4]는 자코비안의 영공간(null space)을 이용하여 가속도 단계에서 토크를 최적화할 수 있는 해를 유도하였으며, 이 알고리즘을 3자유도 평면 매니퓰레이터에 적용하였고, 짧은 궤적에서는 관절 토크가 성공적으로 최소화되었지만, 긴 궤적을 이동하는 동안 드라이버로 구현하기 힘든 토크가 요구되었다. Kazerounian[5]는 토크 최소화 최소자승법을 이용하여 해를 직접적으로 유도하였으나, 11자유도 매니퓰레이터에 대한 시뮬레이션에서 안정성 문제를 보였다. Maciejewski[8]는 이러한 안정성 문제를 해결하기 위해 관

절 속도와 관절 가속도를 이용한 스위칭 방법을 제안하였다. Ma[6]는 Kazerounian[5]이 제시한 방법을 수정하여 DSTO(Damped Squared Torque Optimization) 방법을 제안하였다. 위의 두 방법에서는 전역 토크 안정성(global torque stability)과 국소 토크 최적화(local torque optimization) 사이의 협정(trade-off)은 피할 수 없는 문제라고 보고, 협정을 위한 스위칭 기술을 제안하였다. 그러나 제안된 알고리즘에서 중요한 균형 인자(balancing factor)를 분석적인 표현으로 유도하지 못했다. Chung[7]은 Kazerounian[5]과 Ma[6]의 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 변화량에 대해서는 여전히 안정성을 보장하지 못했다.

매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 기구학적인 여자유도를 이용할 수 있다. Walker[9]는 여자유도 매니퓰레이터와 환경을 강체로 모델링하고 순간 충돌 시의 현상을 해석하였다. 그 결과 충돌 시 매니퓰레이터가 유효질량을 최소로 하는 자세를 가지면 충격량을 최소화할 수 있다는 것을 밝혔다. Kim[10]은 관절공간 감쇠제어 방법을 여자유도 매니퓰레이터의 충돌 시에 적용할 경우, 관성가중치 역행열을 이용해 유효감쇠를 정의하고, 유효감쇠가 최대가 되는 자세를 가지면 충격힘을 최소화할 수 있다고 제안하였다. Chung[12]은 영공간 동역학을 이용하여 위치제어와 충돌제어를 동시에 수행하였고, 이때 최소-놈 가속도와 관절 토크 최소 가속도 그리고 충격량 최소 가속도를 스위칭하는 제어전략을 제안하였다. 그러나 여전히 관절 토크에 대한 안정성을 보장하지는 못하였다.

본 논문에서는 매니퓰레이터의 각 관절의 토크 변화와 충격량을 퍼지로직을 이용하여 최소화하는 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 제어기를 최적화하는 방법들이 많이 연구되고 있다[13-15]. 본 논문에서는 매니퓰레이터의 토크와 충돌을 최소화를 위해, 제안된 퍼지 로직 제어기를 유전자 알고리즘을 이용하여 조정(tune)하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 로직 제어기를 조정하는 방법으로 전건부, 후건부의 소속함수와 퍼지규칙을 동시에 조정하는 방법을 사용하였다. 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 토크와 충격량 최소화를 위한 여자유도의 분해

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

$$\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \tag{1}$$

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

관절 공간에서의 매니퓰레이터의 동역학은 다음과 같은 형태의 운동방정식으로 나타내어질 수 있다.

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

여기서, $\boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{R}^n$는 관절 토크 벡터이며, $\boldsymbol{M} \in \boldsymbol{R}^{n \times n}$은 관성 행렬(inertial matrix), $\boldsymbol{N} \in \boldsymbol{R}^n$는 코리올리 력, 원심력 및 중력 등을 포함하는 비선형 벡터이다.

Chung[12]은 국소 관절 최소화와 충격량 최소화를 위해 여자유도를 가속도 단계에서 다음과 같이 분해했다.

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}_{M^2}^{+}(\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}_{M^2}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{N} \\ + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}_{M^2}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\epsilon}\end{aligned} \tag{3}$$

여기서,

$$\boldsymbol{J}_{M^2}^{+} = \boldsymbol{M}^{-2}\boldsymbol{J}^{T}(\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-2}\boldsymbol{J}^{T})^{-2} \tag{4}$$

Kazerounian[5]는 관성 가중치 의사역행렬, $\boldsymbol{J}_{M^2}^{+}$ 보다, 의사역행렬 $\boldsymbol{J}^{+}$가 관절 토크의 전역 거동의 안정성을 보장한다고 제안하였다. 따라서 Chung[12]이 $\boldsymbol{J}_{M^2}^{+}$ 대신 $\boldsymbol{J}^{+}$를 대입하여 제안한 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^{+}(\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{N} \\ + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\epsilon}\end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

$$\boldsymbol{J}^{+} = \boldsymbol{J}^{T}(\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{T})^{-1} \tag{6}$$

Chung[12]은 식 (5)에서 전역 토크 안정성과 국소 토크 최적화를 보장하기 위하여 , 스위칭 기준(switching criterion)으로 Maciejewski[8]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 (5)를 수정하여 다음과 같은 동적 제어 방법을 제안한다.

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^{+}(\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \alpha(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{N} \\ + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^{+}\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\epsilon}\end{aligned} \tag{7}$$

여기서, α는 $0 \le \alpha \le 1$이고, 토크 최적화를 위해 α값을 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 선택한다. 식 (7)의 첫 번째 항은 관절 가속도의 놈(norm), $\| \ddot{\boldsymbol{\theta}} \|$을 최소화시킨다. 따라서 이 항을 최소-놈 가속도(minimum-norm acceleration)라 하고, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\boldsymbol{m}}$로 표현한다. 직각 좌표계의 로봇말단의 궤적을 보다 더 정확하게 추적하기 위하여 $\ddot{\boldsymbol{x}}$는 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = \ddot{\boldsymbol{x}}_d + \boldsymbol{K_D}\dot{\boldsymbol{e}} + \boldsymbol{K_P}\boldsymbol{e} \tag{8}$$

여기서, $\boldsymbol{e} \equiv \boldsymbol{x}_d - \boldsymbol{x} \in \boldsymbol{R}^m$는 로봇말단의 추적 오차 벡터이고, $\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}}_d - \dot{\boldsymbol{x}} \in \boldsymbol{R}^m$는 로봇말단의 속도 추적 오차 벡터이다. $\boldsymbol{K_D} \in \boldsymbol{R}^{m\times m}$, $\boldsymbol{K_P} \in \boldsymbol{R}^{m\times m}$는 각각 상수 속도, 위치 피드백 행렬이다.

식 (7)의 두 번째와 세 번째 항은 동차 가속도(homogeneous acceleration)이라고 하고, 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1} = -\alpha(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{N} \tag{9}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{\epsilon} \tag{10}$$

여기서, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}$, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}$는 각각 "첫 번째 동차 가속도(the first homogeneous acceleration)", "두 번째 동차 가속도(the second homogeneous acceleration)"이라 정의하고, 이 항은 매니퓰레이터의 말단의 움직임에는 영향을 주지 않는다. $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}$은 관절 토크의 국소 최소화를, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}$는 충격량최소화를 만족하게 한다. 임의의 벡터 ϵ는 충격량을 최소화시키는 역할을 한다. 이것은 아래와 같은 경사 투영법(gradient projection technique)을 이용함으로써 수행된다.

$$\boldsymbol{\epsilon} = k\nabla \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta}) \tag{11}$$

여기서, k는 상수이고, $\nabla \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta})$는 성능함수(performance function)로써 스칼라 함수 H의 경사벡터를 의미하며, 3장에서 소개된다. Chung[12]은 하드웨어가 지원하는 최대의 토크가 τ_L 일 경우에 적당한 k 값을 해석적으로 선택하는 방법을 제안하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$0 < k \le \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \tag{12}$$

여기서,

$$A = \boldsymbol{p}^T\boldsymbol{M}^2\boldsymbol{p}$$

$$B = \boldsymbol{p}^T\boldsymbol{M}^2(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}) + \boldsymbol{p}^T\boldsymbol{M}\boldsymbol{N}$$

$$C = (\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1})^T\boldsymbol{M}^2(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}) + 2(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1})\boldsymbol{M}\boldsymbol{N} + |\boldsymbol{N}|^2 - |\boldsymbol{\tau}_L|^2$$

$$\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\nabla \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta})$$

따라서 두 번째 동차 가속도는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2} = k(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\nabla \boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta}) \tag{13}$$

마지막으로 기준 명령 가속도(command acceleration) $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d$는 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d = \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1} + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2} \tag{14}$$

위에서 설명한 식들을 조합하여 식 (7)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^+(\ddot{\boldsymbol{x}} - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \alpha(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{N} + k(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\boldsymbol{M}^{-1}\nabla \boldsymbol{H} \tag{15}$$

식 (15)에서 α와 k를 적절하게 선택함으로써 관절 토크를 최소화시킴과 동시에 충격량을 최소화하는 자세를 유지하는 가속도를 생성시킬 수 있다.

3. 강체 환경과 충돌 시의 충격량 최소화

환경과 접촉하고 있는 매니퓰레이터의 동역학 식은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{N}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{F}_c \tag{16}$$

여기서, $\boldsymbol{F}_c$는 로봇말단에 가해지는 접촉힘이다. 매니퓰레이터와 환경의 충돌은 시간, t에서 아주 짧은 시간, Δt 동안 일어난다고 가정한다. 동력학식의 양변에 시간 t에서 $t+\Delta t$까지 적분을 취하면 다음과 같다.

$$\int_t^{\Delta t} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}}\, dt + \int_t^{\Delta t} (\boldsymbol{N}(\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{\tau})\, dt = \int_t^{\Delta t} \boldsymbol{J}^T\boldsymbol{F}_c\, dt \tag{17}$$

고려하는 시간동안 $\boldsymbol{\tau}$, $\boldsymbol{\theta}$ 및 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$는 유한하므로, 유한함수인 $\boldsymbol{\tau}$와 $\boldsymbol{N}$의 시간에 대한 적분은 $\Delta t \to 0$ 일 때, 0이 된다. 따라서 식 (17)은 다음과 같이 단순해진다.

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\int_t^{\Delta t} \ddot{\boldsymbol{\theta}}\, dt = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta}\Delta)\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}^T\hat{\boldsymbol{F}}_c \tag{18}$$

여기서, 충격량은

$$\hat{\boldsymbol{F}}_c = \lim_{\Delta t \to 0} \int_t^{\Delta t} \boldsymbol{F}_c\, dt \tag{19}$$

으로 정의된다. 식 (19)는 점질량의 충격량-운동량 이론과 같이, 충격량은 충돌전후의 운동량의 변화와 같다는 것을 보여준다. 식 (19)는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T\hat{\boldsymbol{F}}_c \tag{20}$$

식 (20)은 충돌 시의 로봇 말단에 가해지는 충격량과 그로 인한 순간적인 관절속도의 변화와의 관계를 보여준다. 그런데, 충돌 시에도 관절속도와 로봇 말단 속도의 관계는 유지되므로 이로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\Delta\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}\Delta\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T\hat{\boldsymbol{F}}_c \tag{21}$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T)^{-1}\Delta\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_M^{\dagger}\Delta\dot{\boldsymbol{x}} \tag{22}$$

여기서, $\boldsymbol{J}_M^{\dagger} = \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T)^{-1}$ 이다.

식 (22)는 로봇말단에 가해지는 충격량으로 인해 순간적으로 발생하는 속도변화를 보여주고 있다.

순간충돌 동역학 모델에서 두 로봇이 충돌한다고 가정하

고, 로봇 1과 로봇 2의 속도를 각각 $\boldsymbol{v}_1$, $\boldsymbol{v}_2$, 이때의 속도의 변화를 각각 $\Delta\boldsymbol{v}_1$, $\Delta\boldsymbol{v}_2$라고 하면 충돌전후의 속도관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[(\boldsymbol{v}_1+\Delta\boldsymbol{v}_1)-(\boldsymbol{v}_2+\Delta\boldsymbol{v}_2)]^T\boldsymbol{n}=-e(\boldsymbol{v}_1-\boldsymbol{v}_2)^T\cdot\boldsymbol{n} \quad (23)$$

여기서, $\boldsymbol{n}$은 충돌면에 수직한 방향을 가리키는 단위벡터이고, $0\le e\le 1$은 충돌계수이다. 강체 환경과의 충돌 시의 충돌 동역학은 다음을 만족한다.

$$\boldsymbol{v}_1=\dot{\boldsymbol{x}},\quad \Delta\boldsymbol{v}_1=\Delta\dot{\boldsymbol{x}},\quad \boldsymbol{v}_2=\Delta\boldsymbol{v}_2=0 \quad (24)$$

따라서 식 (23)은 다음과 같이 된다.

$$(\dot{\boldsymbol{x}}+\Delta\dot{\boldsymbol{x}})^T\boldsymbol{n}=-e\,\dot{\boldsymbol{x}}^T\boldsymbol{n} \quad (25)$$

식 (21)과 (25)를 조합하여 충격량에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{F}_c=\frac{-(1+e)\dot{\boldsymbol{x}}^T\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{n}} \quad (26)$$

여기서,

$$\hat{\boldsymbol{F}}_c=\hat{F}_c\boldsymbol{n} \quad (27)$$

위 식으로부터 충격량은 충돌면의 기하학적인 특성과 충돌속도, 충돌계수, 충돌하는 물체의 질량과 관계가 있음을 알 수 있다. 여자유도 매니퓰레이터는 로봇말단의 움직임에는 영향을 주지 않고 다양한 자세를 가질 수 있고, 자세에 따라 유효질량이 변한다. 충돌방향, 충돌속도 및 환경의 질량이 주어진 경우, 식 (26)의 분모가 최대가 되는 자세로 제어를 하면 충격량을 최소화할 수 있다. 따라서 식 (26)의 분모를 충돌제어의 성능함수로 사용한다. 여기서부터는 이것을 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta})$로 정의한다. 즉,

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta})=\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{n} \quad (28)$$

이다. $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\theta})$가 최대가 되기 위하여 k는 양수이어야 한다.

4. 유전자 알고리즘과 퍼지 로직 제어기로 구성된 충돌제어 알고리즘

4.1 Chung[12]이 제안한 충돌제어 알고리즘

순간적인 충격힘을 최소화시키기 위한 기준 명령 가속도를 식 (14)와 같이 나타내었다. 그러나 기준 명령 가속도의 이러한 형태는 고유의 불안정 문제(instability problem)를 내재하기 때문에 일반적인 응용에서 직접적으로 사용하지 않는다. 이러한 불안정 문제는 이전의 연구[4-8]에서 나타났듯이, 동차 가속도는 국소 토크 최소화와 같은 부작업을 수행하기 위하여 동차 속도를 증가시키기 때문에 드라이버로 구현할 수 없는 토크를 요구하게 된다. 따라서 토크 안정성(torque stability)의 관점에서 동차 가속도 사이의 협정(trade-off)는 피할 수 없다. 기존의 많은 연구에서 여러 가지 스위칭 방법이 제안되었고[6-8,12], Chung[12]은 다음과 같은 스위칭 방법을 제안하여 3-DOF에 여자유도에 적용하였다.

$$\begin{aligned}
&\text{if}\quad (\dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}\le 0\quad\text{and}\quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}\le 0)\quad\text{then}\\
&\qquad \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d=\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m+\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}+\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}\\
&\text{else if}\quad (\dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}\le 0\quad\text{and}\quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}>0)\quad\text{then}\\
&\qquad \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d=\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m+\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}\\
&\text{else if}\quad (\dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}>0\quad\text{and}\quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_h\cdot\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}\le 0)\quad\text{then}\\
&\qquad \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d=\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m+\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}\\
&\text{else}\\
&\qquad \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d=\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m
\end{aligned} \quad (29)$$

여기서, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_h=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 이다. 식 (29)에 나타낸 것과 같이, Chung[12]이 제안한 알고리즘은 국소 관절 토크의 최소화를 위하여 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m$, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}$을 스위칭하고, 충격힘의 최소화를 위하여 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m$, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}$를 스위칭한다. 그러나 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 이러한 제어 알고리즘에서는 토크, 토크의 변화량 그리고 충격량이 여전히 커서 불안정성 문제를 내포하고 있다. 따라서 유전자 알고리즘과 퍼지 로직 제어기를 이용하여 토크와 토크의 변화량을 최소화시킴으로써 로봇의 부드러운 제어를 보장함과 동시에 충격힘을 최소화하고자 한다.

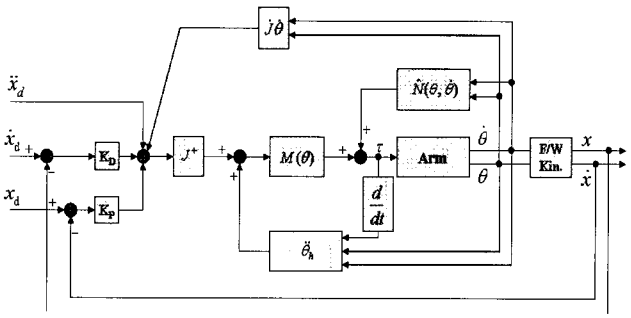


그림 1. 평면 여자유도 매니퓰레이터의 충돌제어를 위한 전체 시스템 구성도

Fig. 1. The Structure of system for impact control of planar redundant manipulator

그림 1은 평면 여자유도 매니퓰레이터의 충돌제어를 위한 전체 시스템 구성도이다. 위의 그림에서 동차 가속도 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_h$는 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h1}+\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{h2}$이다. 퍼지 로직 제어기를 이용하여 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_h$를 생성하는 방법은 4.3절과 4.4절에서 설명되며, 식 (15)의 관점에서 설명한다.

4.2 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지 로직 제어기 조정

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 있어 왔다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 직접 설계하는 방법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 방법들에는 제어기의 고정된 제어 규칙에 대한 소속함수만을 생성하거나[13], 미리 정의된 소속함수에 대한 제어규칙만을 찾아내는 방법[14], 소속함수와 제어규칙을 동시에 생성

하는 방법[15] 등이 있다. 위의 모든 방법[13-15]에서 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 제어규칙을 동시에 부호화하였다. 그림 2는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기의 구조를 나타낸다. GA I, GA II는 FLC I, FLC II를 각각 조정한다.

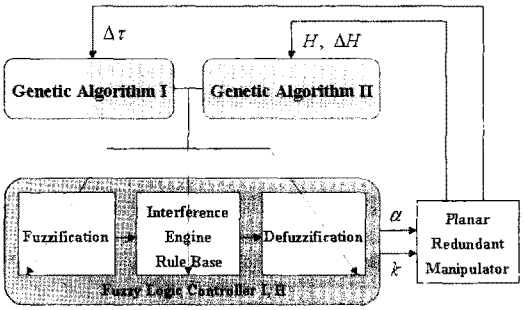


그림 2. GA로 조정된 FLC의 구조
Fig. 2. The structure of a GA-tuned FLC

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

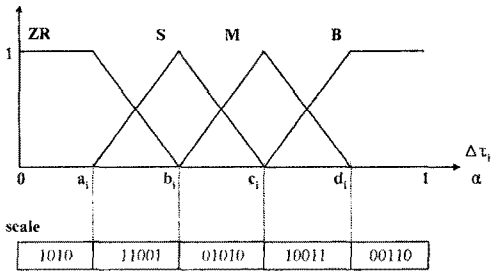


그림 3. 제안된 소속함수의 부호화 방법(예)
Fig. 3. The Method of encoding of proposed membership function(example)

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

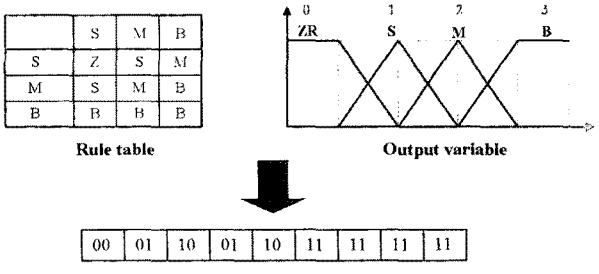


그림 4. 제안된 제어 규칙의 부호화 방법(예)
Fig. 4. The Method of encoding of proposed fuzzy rules (example)

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.

4.3 α값을 조정한 충돌제어 알고리즘

먼저 식 (15)의 α값만을 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 구현하는 알고리즘을 설명한다. 그림 2의 GA I을 이용하여 FLC I의 소속함수를 조정하여 그림 5와 같이 퍼지 로직 제어기를 구성한다. 퍼지 로직 제어기의 입력은 $\Delta\tau$ 이며, 출력은 α이다.

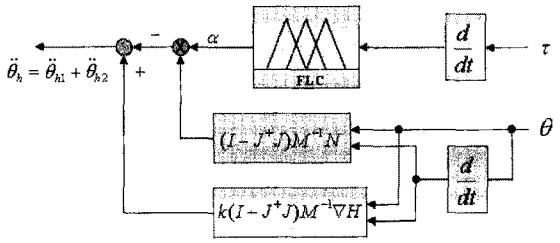


그림 5. α 값 생성 알고리즘
Fig. 5. The α generation algorithm

본 알고리즘에서는 α값만을 생성시키고, k값은 식 (12)를 이용하여 계산한다. 표 1은 α값 생성 알고리즘의 FLC I을 조정하기 위하여 사용된 GA I의 파라미터이다.

표 1. 유전자 알고리즘 I의 파라미터
Table 1. The parameters of genetic algorithm I

파라미터	값
최대 세대수	50
개체수	20
교배율	70%
돌연변이율	3%
염색체 길이	165

본 알고리즘을 평가하기 위하여, 식 (30)의 적합도 함수 f를 사용하였다.

$$f = min \quad \frac{1}{2}(\Delta\tau_1^2 + \Delta\tau_2^2 + \Delta\tau_3^2) \tag{30}$$

그림 6과 표 2는 제안된 방법에 의해서 생성된 각 변수들의 소속함수와 제어 규칙표를 보여준다.

4.4 α, k을 조정한 충돌제어 알고리즘

두 번째로 식 (15)의 α와 k를 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 구현하는 알고리즘을 설명한다. 그림 2의 GA I, II를 이용하여 FLC I, II의 소속함수를 각각 조정하여 그림 7과 같이 퍼지 로직 제어기를 구성한다. FLC I의 입력과 출력은 각각 $\Delta\tau$, α이며, FLC II의 입력은 $\boldsymbol{H}, \boldsymbol{\Delta H}$ 이고, 출력은 k이다.

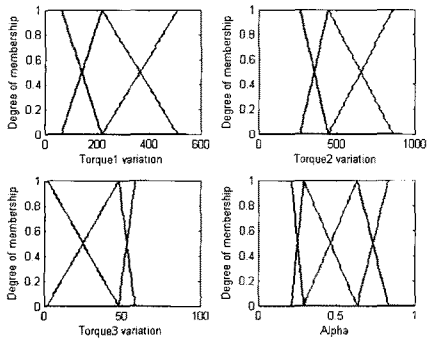


그림 6. GA I로 조정된 FLC I의 소속 함수
Fig. 6. GA I tuned membership function of FLC I

표 2. GA I 로 조정된 FLC I의 퍼지 규칙
Table 2. GA I tuned fuzzy rules of FLC I.

	$\Delta\tau_1 = S$			$\Delta\tau_2 = M$			$\Delta\tau_3 = B$		
$\Delta\tau_3$	S	M	B	S	M	B	S	M	B
$\Delta\tau_2$	α	α	α	α	α	α	α	α	α
S	ZR	S	M	S	Z	M	Z	B	M
M	S	S	B	M	Z	B	Z	Z	S
B	B	M	B	S	Z	M	Z	S	B

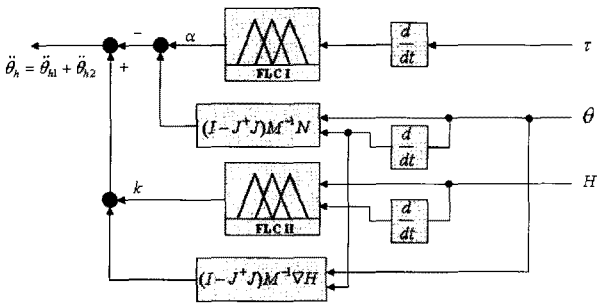


그림 7. α, k 값 생성 알고리즘
Fig. 7. The α, k generation algorithm

본 알고리즘에서는 α, k 값을 동시에 생성시켜 국소 관절 최소화와 충격량 최소화를 실현한다. 표 3은 GA I, II를 위한 파라미터이다.

표 3. GA I,II의 파라미터
Table 3. The parameters of GA I,II

파라미터		값
최대 세대수		100
개체수		20
GA1	교배율	70%
	돌연변이율	3%
	염색체 길이	165
GA2	교배율	70%
	돌연변이율	3%
	염색체 길이	119

본 알고리즘을 평가하기 위하여, 식 (31)의 적합도 함수 f_{GA1}, f_{GA2}를 사용하였다.

$$f_{GA1} = min \quad \frac{1}{2}(\Delta\tau_1^2 + \Delta\tau_2^2 + \Delta\tau_3^2)$$
$$f_{GA2} = \boldsymbol{max}(\boldsymbol{n}^T \boldsymbol{J}\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{n}) \tag{31}$$

그림 8과 표 4는 제안된 방법에 의해서 생성된 각 변수들의 소속함수와 제어 규칙표를 보여준다.

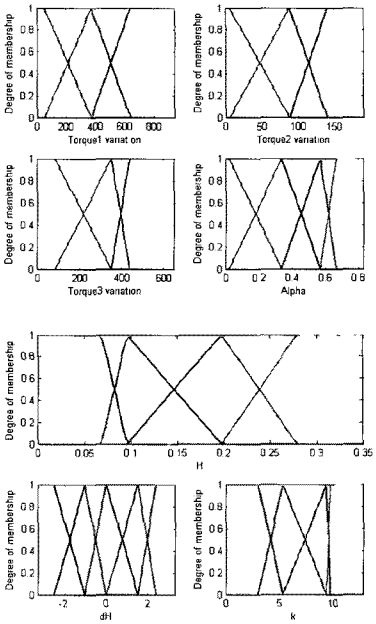


그림 8. GA I,II로 조정된 FLC I,II의 소속 함수
Fig. 8. GA I,II tuned membership function of FLC I,II

표 4. GA I,II 로 조정된 FLC I,II의 퍼지 규칙
Table 4. GA I,II tuned fuzzy rules of FLC I,II.

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

H \ ΔH	NB	NS	ZR	PS	PB
ZR	M	M	Z	S	S
S	Z	B	M	B	B
M	Z	M	S	Z	Z
B	B	Z	B	B	B

5. 시뮬레이션

5.1 시뮬레이션 파라미터

이 장에서는 Chung[12]의 방법과 비교하여, 제안된 알고리즘의 타당성을 평가하기 위하여 3자유도 평면 여유자유도 매니퓰레이터에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 그림 9는 시뮬레이션에 사용된 매니퓰레이터를 나타낸다. 각 링크의 길이는

$[l_1, l_2, l_3]$= [0.3, 0.2, 0.2] [m], 질량은 $[m_1, m_2, m_3]$= [0.565, 1.118, 1.514] [kg]이며, uniform thin rod로 모델링 되었다. 로봇 말단의 궤적은 bang-bang 경로계획에 의하여 생성하였다.

시뮬레이션에 사용된 매니퓰레이터의 궤적은 두 가지이다. 궤적 1에서 각 관절의 초기값은 $\boldsymbol{\theta_0} = (180^\circ, -90^\circ, 0^\circ)$ 이며, 로봇말단의 가속도는 궤적의 초기 반주기와 마지막 반주기로 각각 $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{d}} = (0.4, -0.16)\,[m/s^2]$와 $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{d}} = (-0.4, 0.16)\,[m/s^2]$으로 설정하였다. 위치 및 속도 피드백 게인은 각각 $\boldsymbol{K_P}$ = diag(150, 150)과 $\boldsymbol{K_D}$ = diag(20 ,20)이 사용되었다. 벽의 충돌계수 $e = 0.9$ 이며, $x = 0.5\,[m]$에서 y축과 평행하게 위치해 있다. 궤적 1의 퍼지 로직 제어기는 4.3절과 4.4절에서 소개되었다.

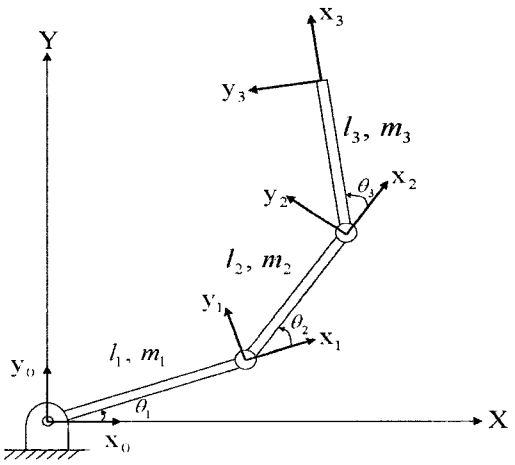


그림 9. 평면 여유자유도 매니퓰레이터
Fig. 9. Planar redundant manipulator

궤적 2에서 각 관절의 초기값은 $\boldsymbol{\theta_0} = (-150^\circ, 40^\circ, 20^\circ)$, 로봇말단의 가속도는 궤적의 초기와 마지막 반주기로 $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{d}} = (0.4, 0.1)\,[m/s^2]$와 $\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{d}} = (-0.4, -0.1)\,[m/s^2]$로 각각 설정하였다. 위치 및 속도 피드백 게인은 각각 $\boldsymbol{K_P}$ = diag(150, 150)과 $\boldsymbol{K_D}$ = diag(20 ,20)이 사용되었다. 벽의 충돌계수 $e = 0.9$ 이며, $x = 0.4\,[m]$에서 y축과 평행하게 위치해 있다. 궤적 2의 퍼지 로직 제어기는 첫 번째 궤적과 같은 방법으로 구성한다.

5.2 Chung[12]의 방법을 이용한 시뮬레이션

이 절에서는 식 (5)에서 Chung[12]이 제안한 충돌제어 알고리즘을 3자유도 평면 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하여 각 관절의 토크와 토크의 변화 그리고 충격량을 분석하였다. 분석은 충격량 최소화 알고리즘에 해당하는 식 (5) 우변의 세 번째 항을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10과 11은 충돌제어 알고리즘을 적용하지 않은 경우의 궤적 1과 궤적 2 각각에 대한 각 관절의 토크와 토크의 변화량, H, 충격힘, 매니퓰레이터의 궤적을 보여준다. 본 절의 시뮬레이션에서 k는 식 (12)를 이용하여 계산하였으며, 사용된 $\boldsymbol{\tau}_L = [10, 10, 10]$ [Nm]이다. 그림 10과 11에서 매니퓰레이터의 궤적을 보면 충격량을 줄이기 위한 자세와는 무관하게 진행하는 것을 알 수 있다. 따라서 단지 토크와 토크의 변화량을 최소화하는 자세를 유지하므로 토크와 토크의 변화량은 비교적 적은 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 10에서의 충격량은 다른 시뮬레이션 결과와 비교하여 작지만, 그림 11에서의 충격량은 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 특정 궤적에 대해서는 충돌힘이 작을 수는 있지만, 충돌을 최소화하는 자세와는 무관하게 진행하므로 충돌에 대한 안정성을 보장하지 않는다는 것을 의미한다.

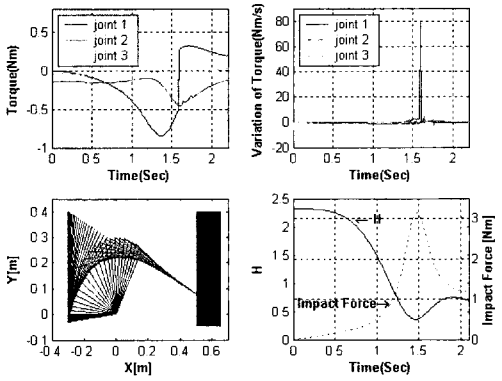


그림 10. 충돌 제어 알고리즘의 미적용 (궤적 1, k=10)
Fig. 10. No adaption of impact control algorithm

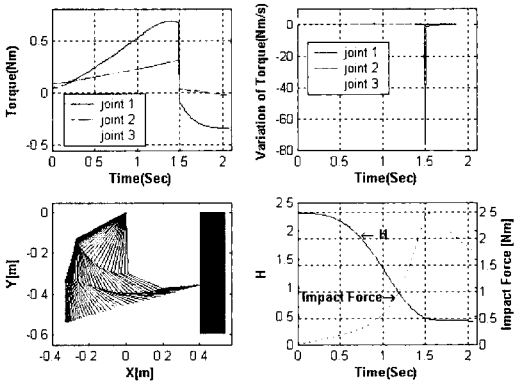


그림 11. 충돌 제어 알고리즘의 미적용 (궤적 2, k=7)
Fig. 11. No adaption of impact control algorithm

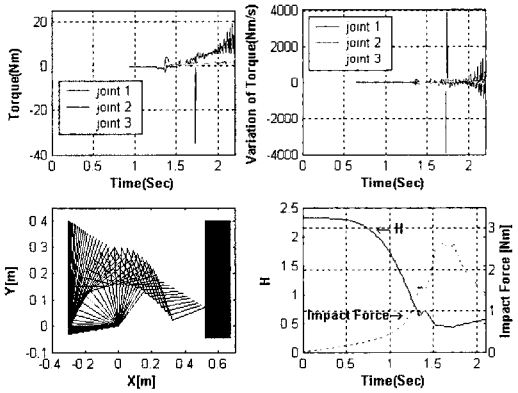


그림 12. 충돌 제어 알고리즘의 적용 (궤적 1, k=10)
Fig. 12. Adaption of impact control algorithm

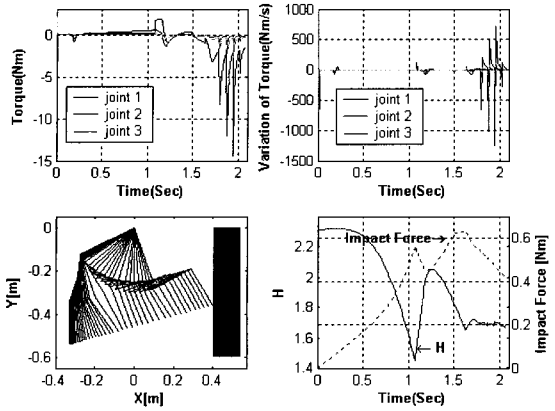


그림 13. 충돌 제어 알고리즘의 적용 (궤적 2, k=7)
Fig. 13. Adaption of impact control algorithm

그림 12와 13은 충돌제어 알고리즘을 적용한 경우의 궤적 1과 궤적 2 각각에 대한 각 관절의 토크와 토크의 변화량, H, 충격힘, 매니퓰레이터의 궤적을 보여준다. 이때의 매니퓰레이터의 궤적을 보면 환경과의 충돌 시 충격량을 줄이기 위하여 유효질량을 최소화하는 자세를 유지하는 경향을 보인다. 이 자세를 유지하기 위하여 토크와 토크의 변화량은 그림 10, 11과 비교하여 비교적 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

5.3 α값만 조정한 경우의 시뮬레이션

5.3과 5.4절에서는 식 (15)의 충돌제어 알고리즘을 3자유도 평면 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하여 각 관절의 토크와 토크의 변화 그리고 충격량을 분석하였다. 먼저 본 절에서는 식 (15)의 k를 식 (12)를 이용하여 계산하고, α는 4.3절의 퍼지 로직 제어기를 이용하여 계산한 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 14, 15는 그림 12, 13과 비교하여 토크, 토크의 변화량은 아주 작고, 충격량 최소화를 위한 자세를 유지함을 알 수 있다. 이것은 토크와 토크의 변화량 그리고 충격량을 최소화시키기 위하여 고정된 α값을 사용하는 것보다 가변되는 α값을 사용하는 것이 타당함을 보여준다.

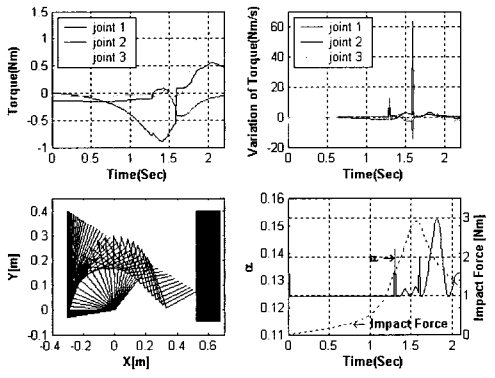


그림 14. 퍼지 제어기를 이용하여 α 생성 (궤적1, k=10)
Fig. 14. The α generation using fuzzy controller

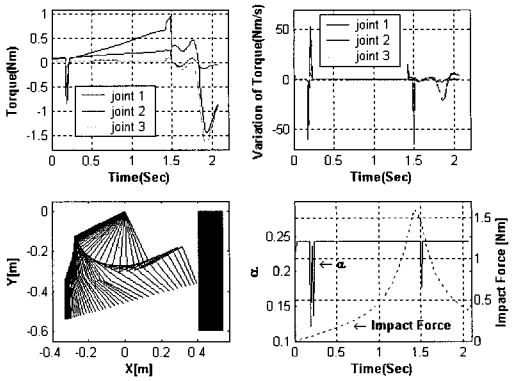


그림 15. 퍼지 제어기를 이용하여 α 생성 (궤적2, k=7)
Fig. 15. The α generation using fuzzy controller

5.4 α, k값을 조정한 경우의 시뮬레이션

본 절에서는 식 (15)의 α는 4.3절, k는 4.4절의 퍼지 로직 제어기를 이용하여 계산한 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 16과 17은 그림 14와 15에 비하여 충격량을 더 작은 값으로 유지하기 위한 자세를 가짐을 알 수 있다. 이때 이러한 자세를 유지하기 위하여 특정한 자세에서의 토크와 토크의 변화량은 그림 14와 15에 비해서 더 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 12와 13에 비해서는 여전히 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 충격량은 Chung[12]가 제안한 방법에 비하여 많이 개선되지는 않았다. 여자유도 매니퓰레이터가 취할 수 있는 자세는 기구학적으로 제한되어있기 때문이다. 그러나 토크와 토크의 변화의 관점에서 보면 상당한 개선효과를 볼 수 있다. 이것은 같은 충격힘을 유지하면서 토크와 토크의 변화량은 훨씬 작은 값을 요구하므로 제안된 알고리즘이 타당함을 알 수 있다.

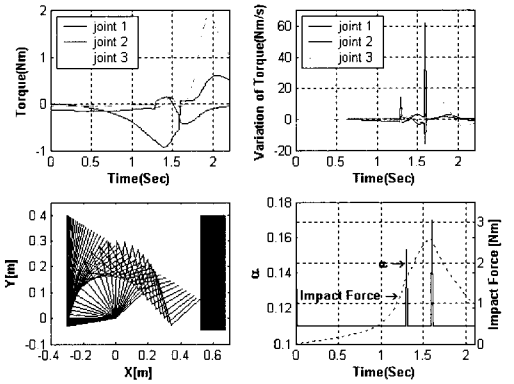


그림 16. 퍼지 제어기를 이용하여 α, k 생성 (궤적1)
Fig. 16. The α, k generation using fuzzy controller

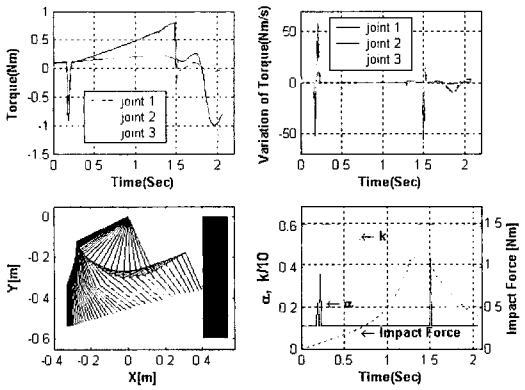


그림 17. 퍼지 제어기를 이용하여 α, k 생성 (궤적2)
Fig. 17. The α, k generation using fuzzy controller

6. 결 론

본 논문에서는 매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 기구학적인 여자유도를 이용하여 관절토크를 최소화시킴과 동시에 충돌을 최소화시키는 새로운 퍼지 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘에서는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 매니퓰레이터의 관절 토크 최소화와 충격량 최소화를 구현하였다. 여자유도 매니퓰레이터의 관절 토크 최소화를 위해서는 효과적인 동력학 제어 알고리즘이 필요한데, Chung[12]이 제안한 방법을 수정하여 개선된 방법을 제시하였다. 기존의 방법에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성은 제어 알고리즘에서 고려되지 않았지만, 제안된 알고리즘에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성을 고려하였다. 여자유도는 관절 토크를 국소적으로 최소화함으로써 분해하였다. 제안된 알고리즘에서는 관절 토크 변화량을 최소화하는 α와 충격량 최소화를 위한 k값을 구하기 위하여 퍼지 로직 제어기를 사용하였고, 이것은 유전 알고리즘을 이용하여 조정하였다. 본 논문에서 사용된 유전 알고리즘은 퍼지 제어기의 소속함수와 제어 규칙을 동시에 자동 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 제어 알고리즘은 3자유도 평면 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하였고, 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 유효질량을 최소로 하는 자세를 가지면 충격량을 최소화할 수 있고, 이러한 자세는 관절 토크를 최소화하면서도 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[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] 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.

[5] 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.

[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] 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.

[8] A. A. Maciejewski, "Kinematic Limitations on the Use of Redundancy in Robotic Manipulators," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, no.2, pp.205-210, 1991.

[9] I. D. Walker, "The Use of Kinematic Redundancy in Reducing Impact and Contact Effects in Manipulation," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.434-439, 1990.

[10] J. O. Kim, M. W. Gertz and P. K. Khosla, "Exploiting Redundancy to Reduce Impact Force," *Proc. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 5, no.9, pp.273-290, 1994.

[11] K. C. Park, "A Study on Position/Impact/Force Control of Redundant Robot Manipulators," MS thesis, Dept. of Precision Engineering & Mechatronics Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1993.

[12] 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.

[13] 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.

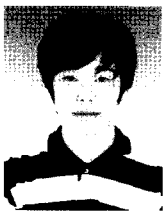
[14] S. S. Roy, D. K. Pratihar, "A Genetic-Fuzzy Approach for Optimal Path-planning of a Robotic Manipulator among Static Obstacles," *Internal Journal of Institution of Engineers*, vol. 84, pp.15-22, 2003.

[15] 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, 로보틱스, 햅틱 디바이스, DSP 컨트롤러



구성완(Seongwan Koo)
2008년 : 창원대학교 제어계측공학과(학사)
2008년 ~ 현재 : 창원대학교 제어계측공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지이론, 유전자 알고리즘, 하이브리드 굴삭기

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, 로보틱스, MR 브레이크