

# 지능제어를 이용한 평면 여자유도 매니플레이터와 환경과의 상호작용에 관한 연구

## Study on Interaction of Planar Redundant Manipulator with Environment based on Intelligent Control

유봉수\* · 김신호\* · 조중선\*\*+

Bong Soo Yoo\*, Sinho Kim\* and Joongseon Joh\*\*+

\* 창원대학교 제어계측공학과 대학원

\*\* 창원대학교 제어계측공학과

### 요 약

로봇 매니플레이터를 이용한 대부분의 작업은 환경과의 상호작용을 요구하며, 위치제어, 충돌제어 그리고 힘제어로 구성된다. 위치제어는 환경에 도착하는 방법을 의미하고, 환경에 접촉하는 순간은 충돌제어 문제를 야기하며, 힘제어는 환경과의 충돌 후에 원하는 힘케적을 유지하는 것이다. 이러한 세 가지 제어문제는 순차적으로 발생하므로, 각각의 제어 알고리즘은 독립적으로 개발되어야 한다. 특히 여자유도 매니플레이터에서 이러한 세 가지 제어문제는 독립된 중요한 연구 주제이다. 예를 들어, 관절 토크 최소화와 충격힘 최소화는 여자유도 매니플레이터의 대표적인 연구주제이다. 본 논문에서는 단일 작업을 통하여 세 가지 제어문제를 구성하였다. 위치제어는 각 관절의 토크와 토크변화 그리고 충돌 시의 충돌힘 최소화를 위하여 개발되었다. 따라서 충돌제어의 초기조건은 이전의 위치제어 알고리즘으로부터 최적화 되고, 그러한 제어 전략은 충돌제어의 결과를 개선시킨다. 유사하게, 힘제어 문제의 초기조건은 이전의 위치제어와 충돌제어로부터 간접적으로 최적화된다. 힘제어 알고리즘은 각 관절 토크와 힘외란 최소화시키는 개념을 사용하였다. 모의실험 결과는 제안된 알고리즘의 타당성을 보여준다.

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

### Abstract

There are many tasks which require robotic manipulators interaction with environment. It consists of three control problems, i.e., position control, impact control and force control. The position control means the way of reaching to the environment. The moment of touching to the environment yields the impact control problem and the force control is to maintain the desired force trajectory after the impact with the environment. These three control problems occur in sequence, so each control algorithm can be developed independently. Especially for redundant manipulators, each of these three control problems has been important independent research topic. For example, joint torque minimization and impulse minimization are typical techniques for such control problems. The three control problems are considered as a single task in this paper. The position control strategy is developed to improve the performance of the task, i.e., minimization of the individual joint torques and impulse. Therefore, initial conditions of the impact control problem are optimized at the previous position control algorithm. Such a control strategy yields improved result of the impact control. Similarly, the initial conditions for the force control problem are indirectly optimized by the previous position control and impact control strategies. The force control algorithm uses the individual joint torque minimization concept. It also minimizes the force disturbances. The simulation results show the proposed control strategy works well.

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

### 1. 서 론

기구학적인 여자유도를 가진 매니플레이터는 말단(end-effector)을 원하는 위치와 방향으로 두는데 필요한

자유도보다 많은 자유도를 가진 매니플레이터를 말한다. 이러한 여자유도 매니플레이터는 말단의 운동에는 영향을 주지 않고, 자체운동(self motion)만을 이용하여 자세를 바꿀 수 있으며, 자체운동은 기구학적 특이점 회피(singularity avoidance)[1], 운동에너지 최소화(kinetic energy minimization)[2], 장애물회피(obstacle avoidance) [3], 관절 토크 최소화(joint torque minimization)[4-8], 충돌제어[9-11], 힘 제어[12] 등의 부작업(sub-task)에 이용되고 있다. 매니플레이터는 다양한 환경과의 상호작용을 수행하기 위하여, 비접촉, 충돌, 접촉과정을 거치게 되며, 이러한 과정

접수일자 : 2008년 10월 20일

완료일자 : 2009년 5월 16일

+ 교신저자

본 연구는 2008년도 창원대학교 연구비 및 2008년도 2 단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

은 순차적으로 발생한다. 따라서 각각의 상황에 맞는 제어 전략이 요구된다.

여자유도 매니플레이터의 위치제어를 위한 많은 성능지수 중 관절 토크 최소화는 각 관절에 가해지는 토크를 최소화하기 위하여 지금까지 많은 연구가 이루어졌으나, 기존의 방법들은 관절 구동용 구동장치로 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 매니플레이터에 적용하였고, 짧은 궤적에서는 관절 토크가 성공적으로 최소화되었지만, 긴 궤적을 이동하는 동안 관절 구동용 구동장치로 구현하기 힘든 토크가 요구되었다. Kazeroonian[5]는 토크 최소화 최소자승법을 이용하여 해를 직접적으로 유도하였으나, 11자유도 매니플레이터에 대한 시뮬레이션에서 안정성 문제(관절의 큰 토크를 요구)를 보였다. Maciejewski[8]는 이러한 안정성 문제를 해결하기 위해 관절 속도와 관절 가속도를 이용한 스위칭 방법을 제안하였다. Ma[6]는 Kazeroonian이 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 Kazeroonian과 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. 관절 토크 변화를 최소화한다는 것은 매니플레이터의 움직임을 부드럽게 한다는 것이다. 생산성 향상을 위하여 매니플레이터의 고속 움직임을 원한다면, 토크 변화를 최소화시켜 이러한 움직임을 얻을 수 있다.

매니플레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 기구학적인 여자유도를 이용할 수 있다. Walker[9]는 여자유도 매니플레이터와 환경을 강체로 모델링하고 순간 충돌 시의 현상을 해석하였다. 그 결과 충돌 시 매니플레이터가 유효질량을 최소로 하는 자세를 가지면 충격량을 최소화할 수 있다는 것을 밝혔다. Kim[10]은 관절공간 감쇠 제어 방법을 여자유도 매니플레이터의 충돌 시에 적용할 경우, 관성가중치 역행렬을 이용해 유효감쇠를 정의하고, 유효감쇠가 최대가 되는 자세를 가지면 충격력을 최소화할 수 있다고 제안하였다. Chung[11]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. Yoo[12]는 유전자 알고리즘으로 조정된 피지로직을 이용하여 관절 토크와 토크의 변화 및 충격량을 최소화하는 알고리즘을 제안하였고, 시뮬레이션을 통하여 타당성을 확인하였다.

매니플레이터가 목표지점에 도달하면, 일정한 힘을 유지하는 힘 제어가 요구된다. 힘 제어의 가장 보편적인 방법은 임피던스 제어이며, Hogan[14]과 Jung[15]은 비여자유도 매니플레이터에 임피던스 제어를 적용하였다. 여자유도 매니플레이터에도 임피던스 제어가 적용될 수 있으며, 각 관

절에 가해지는 토크를 최소화하기 위하여 자체운동을 이용할 수 있다. Park[13]은 위치/충돌/힘제어의 일련의 과정을 여자유도 매니플레이터에 적용하였다. 위치제어 시 확장 실공간 방법을 이용하여 속도 수준에서 여자유도를 분해하고, 특이점 회피를 위한 성능지수로 자세를 유지하였으며, 충돌 시 충격을 최소화하는 성능지수로 자세를 유지해 충돌에 대비하였으며, 충돌 후 힘제어에 적합한 성능지수로 자세를 변환하였다.

본 논문에서는 매니플레이터와 환경과의 상호작용 시 순차적으로 발생하는 위치/충돌/힘제어 과정을 각각의 상황에 맞는 제어전략을 구현함으로써 매니플레이터의 작업에 효율성을 높이고자 한다. 여자유도를 가속도 수준에서 분해하고, 위치제어 시 관절토크의 변화를 최소화하는 성능지수로 자세를 유지하는 알고리즘을 제안한다. 이때의 성능지수는 피지로직을 이용하여 최적화하였으며, 피지로직의 소속함수와 피지규칙은 유전자 알고리즘을 이용하여 조정(tune)하였다. 충돌제어 시에는 유효질량을 최소화하는 자세를 갖는 성능지수를 선택하여 충격을 최소화하였으며, 힘제어 시에는 최소한의 관절토크로 원하는 힘을 정확하게 가할 수 있는 자세를 유지하도록 성능지수를 선택하였다. 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 2. 가속도 수준에서의 여자유도의 분해

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.

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

여기서,  $\ddot{x} \in \mathbf{R}^m$ 은 말단의 가속도 벡터,  $\dot{\theta}, \ddot{\theta} \in \mathbf{R}^n$ 은 각각 관절 속도와 가속도 벡터이다.  $J$ 는  $m \times n$  자코비안 행렬,  $\dot{J}$ 는 자코비안의 시간에 대한 미분 행렬이다.

관절공간에서의 매니플레이터의 동역학은 다음과 같은 형태의 운동방정식으로 나타내어질 수 있다.

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

여기서,  $\tau \in \mathbf{R}^n$ 는 관절 토크 벡터,  $M \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 은 관성행렬(inertial matrix),  $N \in \mathbf{R}^n$ 는 코리올리력, 원심력 및 중력 등을 포함하는 비선형 벡터이다. Chung[11]은 국소 관절 토크 최소화와 충격량 최소화를 위해 여자유도를 가속도 단계에서 다음과 같이 분해했다.

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

$$\text{여기서, } J^+ = J^T(JJ^T)^{-1} \quad (4)$$

또한 식 (3)에서 전역 토크 안정성과 국소 토크 최적화를 보장하기 위해, 스위칭 기준(switching criterion)으로 Maciejewski[8]가 제안한 안정성 조건(stability condition)을 적용하였다. 그러나 이 방법에서 스위칭이 일어나는 구간에서 토크의 변화가 큰 것을 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 토크와 토크의 변화를 동시에 최적화하기 위해 식 (3)을 수정하여 다음의 동적제어 방법

을 제안한다.

$$\ddot{\theta} = J^+(\ddot{x} - \dot{J}\dot{\theta}) - \alpha(I - J^+J)M^{-1}N + (I - J^+J)M^{-1}\epsilon \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는  $0 \leq \alpha \leq 1$ 이고, 토크 변화의 최적화를 위해  $\alpha$ 값을 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어를 이용하여 선택한다. 식 (5)의 첫 번째 항은 관절 가속도의 norm  $\|\ddot{\theta}\|$ 을 최소화시키고, 최소-norm 가속도(minimum-norm acceleration)라 하며,  $\ddot{\theta}_m$ 로 표현한다. 직각 좌표계의 로봇말단의 궤적을 보다 더 정확하게 추적하기 위하여  $\ddot{x}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d + K_D\dot{e} + K_P e \quad (6)$$

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

식 (5)의 두 번째와 세 번째 항은 매니퓰레이터의 말단의 움직임에는 영향을 주지 않는 동차 가속도(homogeneous acceleration)이고, 다음과 같이 정의한다.

$$\ddot{\theta}_{h1} = -\alpha(I - J^+J)M^{-1}N \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}_{h2} = (I - J^+J)M^{-1}\epsilon \quad (8)$$

여기서,  $\ddot{\theta}_{h1}$ ,  $\ddot{\theta}_{h2}$ 는 각각 “첫 번째 동차 가속도(the first homogeneous acceleration)”, “두 번째 동차 가속도(the second homogeneous acceleration)”라 정의하며,  $\ddot{\theta}_{h1}$ 은 관절 토크의 국소 최소화를,  $\ddot{\theta}_{h2}$ 는 충격량최소화와 힘의란 최소화를 만족하게 한다. 임의의 벡터  $\epsilon$ 는 충격량을 최소화시키는 역할을 하고, 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon = k\nabla H(\theta) \quad (9)$$

여기서,  $k$ 는 상수,  $\nabla H(\theta)$ 는 성능지수(performance index)이고, 3장과 4장에서 소개된다. Chung[7]은 하드웨어가 지원하는 최대의 토크가  $\tau_L$  일 경우에 적당한  $k$  값을 계산하는 방법을 제안하였다.

$$0 < k \leq \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (10)$$

여기서,

$$A = p^T M^2 p$$

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

$$C = (\ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1})^T M^2 (\ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1}) +$$

$$2(\ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1})^T M N + |N|^2 - |\tau_L|^2$$

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

따라서 두 번째 동차 가속도는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\ddot{\theta}_{h2} = k(I - J^+J)M^{-1}\nabla H(\theta) \quad (11)$$

마지막으로 기준 명령 가속도(command acceleration)

$\ddot{\theta}_d$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1} + \ddot{\theta}_{h2} \quad (12)$$

위에서 설명한 식들을 조합하여 식 (5)를 다시 쓰면 다음과 같다.[12]

$$\ddot{\theta} = J^+(\ddot{x} - \dot{J}\dot{\theta}) - \alpha(I - J^+J)M^{-1}N + k(I - J^+J)M^{-1}\nabla H \quad (13)$$

식 (13)에서  $\alpha$ 는 위치제어 시 관절 토크를 최소화시키는 성능지수이고,  $k$ 는 충돌제어와 힘제어 시 최적의 자세를 유지하는 성능지수이다.  $\alpha$ 와  $k$ 를 적절하게 선택함으로써 관절 토크를 최소화하는 자세, 충격량을 최소화하는 자세, 그리고 원하는 힘을 정확하게 인가하는 자세를 유지하는 가속도를 생성시킬 수 있다.

### 3. 여자유도 매니퓰레이터와 강체 환경과의 충돌제어 시의 성능지수

환경과 접촉하고 있는 매니퓰레이터의 동역학 식은 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J^T(\theta)F_c \quad (14)$$

여기서,  $F_c$ 는 로봇말단에 가해지는 접촉힘이다. Walker[6]는 매니퓰레이터가 환경에 접촉할 때의 충격량은 다음과 같이 정의하였다.

$$\hat{F}_c = \frac{-(1+e)\dot{x}^T n}{n^T J M^{-1} J^T n} \quad (15)$$

여기서,  $n$ 은 충돌면에 수직인 방향을 가리키는 단위벡터이고,  $0 \leq e \leq 1$ 은 충돌계수이다. 식 (15)로부터 충격량은 충돌면의 기하학적인 특성과 충돌속도, 충돌계수, 충돌하는 물체의 질량과 관계가 있음을 알 수 있다. 충돌방향, 충돌속도 및 환경의 질량이 주어질 경우, 식 (15)의 분모가 최대가 되는 자세로 제어를 하면 충격량을 최소화할 수 있다. 따라서 식 (15)의 분모를 다음과 같이 충돌제어의 성능지수로 정의한다.

$$H(\theta) = n^T J M^{-1} J^T n \quad (16)$$

### 4. 여자유도 매니퓰레이터와 환경과의 힘제어 시의 성능지수

매니퓰레이터의 말단에 가해지는 힘과 관절토크 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\tau = J^T F \quad (17)$$

매니퓰레이터의 관절이 낼 수 있는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|\tau\|^2 = \tau^T \tau = F^T (J J^T) F \quad (18)$$

힘이 작용하는 방향을 벡터  $n$ 으로 표현한다면, 식 (18)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\|\tau\|^2 = n^T (JJ^T)n \|F\|^2 \quad (19)$$

매니플레이터는 제한된 관절토크 내에서 관절토크를 최적으로 이용해야 한다. 식 (19)에서 관절토크와 말단의 힘 사이의 관계를 알 수 있고, 말단에 가해지는 힘이 일정할 때  $n^T (JJ^T)n$ 가 최소가 되면, 적은 관절토크로도 말단에 원하는 힘을 가할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 성능지수를 얻을 수 있다.

$$H(\theta) = n^T (JJ^T)n \quad (20)$$

만약 힘외란이 존재한다면, 이를 효과적으로 제거할 수 있어야 한다. 힘외란이 존재할 경우의 매니플레이터의 동력학 방정식은 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J^T F_c - J^T F_{dist} \quad (21)$$

여기서,  $F_{dist}$ 는 힘외란이다. 이 경우 계산토크방법 (computed torque method)을 이용하여 오차방정식을 구하면 다음과 같은 관계가 성립한다.[13]

$$\ddot{e}_f + K_D \dot{e}_f + K_f K_e e_f = K_e (n^T JM^{-1}J^T n) F_{dist} \quad (22)$$

여기서,  $e_f = F_d - F_s$ ,  $K_e$ 는 환경의 강성,  $K_f$ 는 힘케환이득,  $F_d$ 는 원하는 힘,  $F_s$ 는 측정힘이다.

식 (22)로부터 외란에 의한 힘오차가 유효질량과 환경 강성에 따라 달라짐을 알 수 있다. 환경의 강성은 제어할 수 없지만, 유효질량은 매니플레이터의 자세에 따라 달라지므로, 여자유도를 이용하여 제어할 수 있다. 따라서 성능지수를 식 (23)와 같이 정의한다.

$$H(\theta) = n^T JM^{-1}J^T n \quad (23)$$

결국 식 (23)은 식 (16)과 같은 식이므로, 충돌제어 시에는 성능지수가 최대가 되게 제어를 함으로써 충격을 최소화할 수 있고, 힘제어 시에는 성능지수가 최소가 되게 제어를 함으로써 관절토크와 힘외란의 영향을 최소화할 수 있게 된다.

### 5. 여자유도 매니플레이터와 환경과의 위치/충돌/힘제어 시의 제어전략

여자유도 매니플레이터와 환경과의 상호작용 시 여분의 자유도를 이용하여 각 상황에 맞는 최적의 제어를 할 수 있다. 따라서 충돌 전 상황까지는 퍼지 로직을 이용한 관절토크 변화의 최소화 및 충격량 최소화를 위한 제어 알고리즘으로 구현하고, 충돌 후 상황부터는 관절토크 최소화 및 힘외란 영향 최소화를 위한 제어 알고리즘을 구현하고자 한다. 충돌 전 상황까지의 제어는 퍼지 로직을 이용한 제어 알고리즘을 제안하고, Chung[11]이 제안한 방법과 비교한다. 충돌 후 상황에 대해서는 힘제어를 위한 성능지수로 자세를 변환하는 것이 타당함을 모의실험에서 보인다.

#### 5.1 Chung[11]이 제안한 충돌 전 제어 알고리즘

여자유도 매니플레이터의 기준 명령 가속도를 식 (12)와 같이 나타내었다. 그러나 이 식은 고유의 불안정 문제를 내재하기 때문에 일반적인 응용에서 직접적으로 사용하지 않는다. 불안정 문제는 이전의 연구[4-8]에서 나타났듯이, 동

차 가속도는 국소 토크 최소화와 같은 부작용을 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)은 피할 수 없다. 기존의 많은 연구에서 여러 가지 스위칭 방법이 제안되었고[6-8,11], Chung[11]은 다음과 같은 스위칭 방법을 제안하여 3-DOF에 여자유도에 적용하였다.

$$\begin{aligned} &\text{if } (\dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h1} \leq 0 \text{ and } \dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h2} \leq 0) \text{ then} \\ &\quad \ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1} + \ddot{\theta}_{h2} \\ &\text{else if } (\dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h1} \leq 0 \text{ and } \dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h2} > 0) \text{ then} \\ &\quad \ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h1} \\ &\text{else if } (\dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h1} > 0 \text{ and } \dot{\theta}_h \cdot \ddot{\theta}_{h2} \leq 0) \text{ then} \\ &\quad \ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_m + \ddot{\theta}_{h2} \\ &\text{else } \ddot{\theta}_d = \ddot{\theta}_m \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,  $\dot{\theta}_h = (I - J^+J)\dot{\theta}$  이다. 식 (24)에 나타난 것과 같이, Chung[11]이 제안한 알고리즘은 국소 관절 토크의 최소화를 위하여  $\ddot{\theta}_m$ ,  $\ddot{\theta}_{h1}$ 을 스위칭하고, 충격힘의 최소화를 위하여  $\ddot{\theta}_m$ ,  $\ddot{\theta}_{h2}$ 를 스위칭한다. 그러나 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 이러한 제어 알고리즘에서는 토크, 토크의 변화량 그리고 충격량이 커서 여전히 불안정성 문제를 내포하고 있다. 따라서 유전자 알고리즘과 퍼지 로직 제어를 이용하여 토크와 토크의 변화량을 최소화시킴으로써 로봇의 부드러운 제어를 보장함과 동시에 충격힘을 최소화하고자 한다.

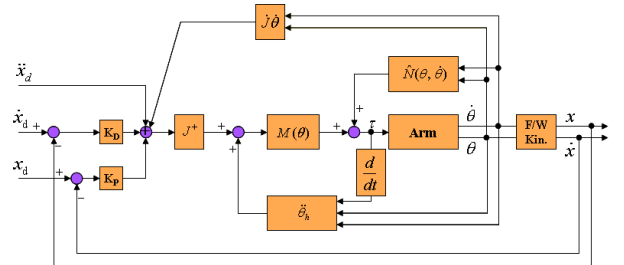


그림 1. 평면 여자유도 매니플레이터의 충돌제어를 위한 전체 시스템 구성도

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

그림 1은 평면 여자유도 매니플레이터의 충돌제어를 위한 전체 시스템 구성도이다. 위의 그림에서 동차 가속도  $\ddot{\theta}_h$ 는  $\ddot{\theta}_{h1} + \ddot{\theta}_{h2}$ 이다. 퍼지 제어를 이용하여  $\ddot{\theta}_h$ 를 생성하는 방법은 5.3절에서 식 (13)을 이용하여 설명한다.

#### 5.2 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 개입 없이 생성하려는 많은 연구가 있어 왔다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 직접 설계하는 방법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 방

법들에는 제어기의 고정된 제어 규칙에 대한 소속함수만을 생성하거나[16], 미리 정의된 소속함수에 대한 제어규칙만을 찾아내는 방법[17], 소속함수와 제어규칙을 동시에 생성하는 방법[18] 등이 있다. 위의 모든 방법에서 퍼지 제어기의 설계에 유전자 알고리즘을 사용하는 것이 퍼지 제어기의 성능을 향상시키고 개발시간을 감소시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 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 부호화하는 방법을 사용하였다. 그림 2는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기의 구조를 나타낸다.

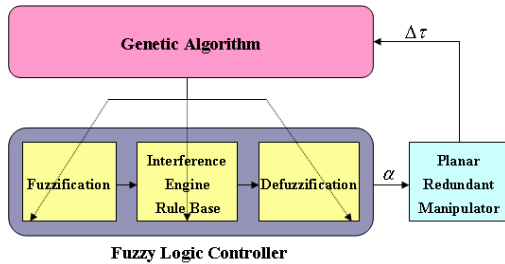


그림 2. GA로 조정된 FLC의 구조  
Fig. 2. The structure of a GA-tuned FLC

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

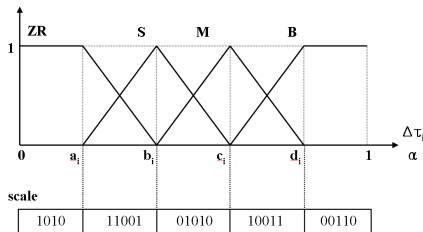


그림 3. 제안된 소속함수의 부호화 방법(예)  
Fig. 3. The method of encoding of proposed membership function(example)

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

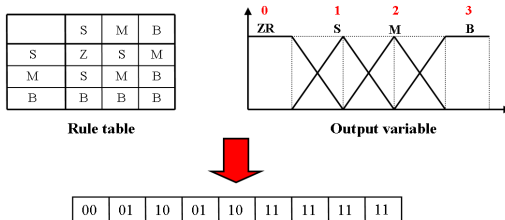


그림 4. 제안된 제어 규칙의 부호화 방법(예)  
Fig. 4. The method of encoding of proposed fuzzy rules (example)

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.

5.3 제안된 총돌 전 제어 알고리즘(12)

식 (13)의 α값을 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 구현하는 알고리즘을 설명한다. 그림 2의 GA를 이용하여 FLC의 소속함수를 조정하여 그림 5와 같이 퍼지 로직 제어기를 구성한다. 퍼지 로직 제어기의 입력력은 Δτ 이며, 출력은 α이다. k값은 식 (10)를 이용하여 계산한다. 표 1은 α값 생성 알고리즘의 FLC를 조정하기 위하여 사용된 GA의 파라미터이다.

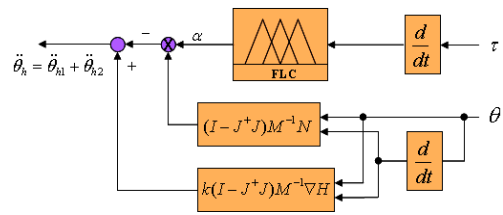


그림 5. α 값 생성 알고리즘  
Fig. 5. The α generation algorithm

표 1. 유전자 알고리즘의 파라미터

Table 1. The parameters of genetic algorithm

Parameter	Value
Max. generation number	50
Population number	20
Crossover rate	70%
Mutation rate	3%
Chromosome length	165

본 알고리즘을 평가하기 위하여, 식 (25)의 비용함수(cost function) f를 사용하였다.

$$f = \min \frac{1}{2} (\Delta\tau_1^2 + \Delta\tau_2^2 + \Delta\tau_3^2) \quad (25)$$

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

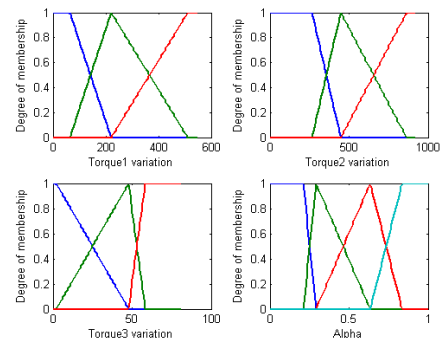


그림 6. GA로 조정된 FLC의 소속 함수  
Fig. 6. GA tuned membership function of FLC  
표 2. GA 로 조정된 FLC의 퍼지 규칙

Table 2. GA tuned fuzzy rules of FLC

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

5.4 충돌 후 제어 알고리즘

매니플레이터가 환경에 충돌 한 후에는 힘제어를 위한 성능지수를 이용하여 자세를 전환해야 한다. 자세 전환은 식 (13)의 두 번째 동차 가속도 항을 이용하여 수행할 수 있으며, 방향 상수  $k$ 의 부호를 바꿈으로써 일어난다.  $k$ 가 양의 값이면 성능지수  $H$ 는 최대가 되고 이것을 이용하여 충돌에 대비하는 자세로 전환할 수 있다.  $k$ 가 음의 값이면 성능지수  $H$ 는 최소가 되고 이것을 이용하여 힘제어에 적합한 자세로 전환할 수 있다. 따라서 매니플레이터가 환경과 상호작용하기 위해서는 먼저 관절토크의 변화를 최소화하는 성능지수로 자세를 유지하며 위치제어를 하다가, 환경으로 다가가는 시점에는 충돌을 대비하는 성능지수로 충격력을 최소화하는 자세로 변환하고, 충돌 후 힘제어에 적합한 성능지수로 자세를 변환한다. 그림 7은 여자유도 매니플레이터의 위치/충돌/힘제어를 위한 전체 구성도이다.

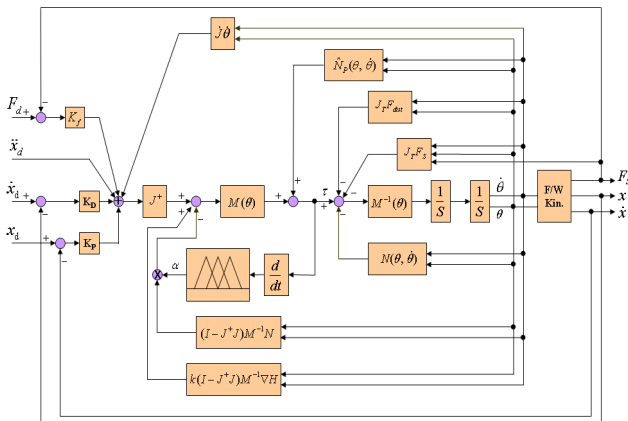


그림 7. 여자유도 매니플레이터의 위치/충돌/힘제어를 위한 전체구성도

Fig. 7. The structure of system for position/impact/force control of redundant manipulator

6. 시뮬레이션

제안된 알고리즘의 타당성을 평가하기 위하여 3자유도 평면 여자유도 매니플레이터에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 비교를 위하여, 충돌 전과 충돌 후로 나누어서 설명한다. 충돌 전 상황은 각 관절의 토크와 토크의 변화량, 그리고 충돌을 대비하는 자세로의 전환의 관점에서 Chung[11]의 방법과 제안한 알고리즘을 비교하였다. 충돌 후 상황은 힘제어로 전환될 때, 관절토크와 외란 영향의 최소화 관점에서 힘제어의 자세로 전환하지 않고, 기존의 자세를 유지하는 경우와 비교하였다.

6.1 시뮬레이션 파라미터

그림 8은 시뮬레이션에 사용된 여자유도 매니플레이터이다. 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.

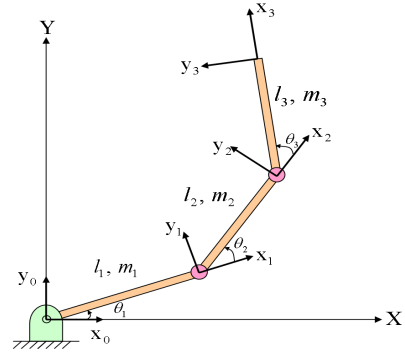


그림 8. 평면 여자유도 매니플레이터  
Fig. 8. Planar redundant manipulator

각 관절의 초기값은  $\theta_0 = (-150^\circ, 40^\circ, 20^\circ)$ , 매니플레이터 말단의 가속도는 궤적의 초기와 마지막 반주기로  $\ddot{x}_d = (0.4, 0.1)[m/s^2]$ 와  $\ddot{x}_d = (-0.4, -0.1)[m/s^2]$ 로 각각 설정하였다. 위치 및 속도 피드백 계인은 각각  $K_P = \text{diag}(150, 150)$ 과  $K_D = \text{diag}(20, 20)$ 이 사용되었다. 벽의 충돌계수  $e = 0.9$ 이며,  $x = 0.4$  [m]에서  $y$ 축과 평행하게 위치해 있다.

6.2 Chung(11)의 방법을 이용한 충돌 전 제어

이 절에서는 식 (3)에서 Chung[11]이 제안한 충돌제어 알고리즘을 3자유도 평면 여자유도 매니플레이터에 적용하여 각 관절의 토크와 토크의 변화 그리고 충격량을 분석하였다. 분석은 충격량 최소화 알고리즘에 해당하는 식 (3) 우변의 세 번째 항을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9는 충돌제어 알고리즘을 적용하지 않은 경우에 대한 각 관절의 토크와 토크의 변화량,  $H$ , 충격량, 매니플레이터의 궤적을 보여준다. 본 절의 시뮬레이션에서  $k$ 는 식 (10)을 이용하여 계산하였으며, 사용된  $\tau_L = [10, 10, 10]$  [Nm]이다.

그림 9에서 매니플레이터의 궤적을 보면 충격량을 줄이기 위한 자세와는 무관하게 진행되는 것을 알 수 있다. 따라서 단지 토크와 토크의 변화량을 최소화하는 자세를 유지하므로 토크와 토크의 변화량은 비교적 적은 값을 가지지만, 충격량은 큰 것을 알 수 있다. 충격량은 식 (15)에 의해 계산되었다.

그림 10은 충돌제어 알고리즘을 적용한 경우에 대한 각 관절의 토크와 토크의 변화량,  $H$ , 충격량, 매니플레이터의 궤적을 보여준다. 매니플레이터의 궤적을 보면 환경과의 충돌 시 충격량을 줄이기 위하여 유효질량을 최소화하는 자세를 유지하는 경향을 보인다. 이 자세를 유지하기 위하여 토크와 토크의 변화량은 그림 9와 비교하여 비교적 큰 값을 가짐을 알 수 있다.



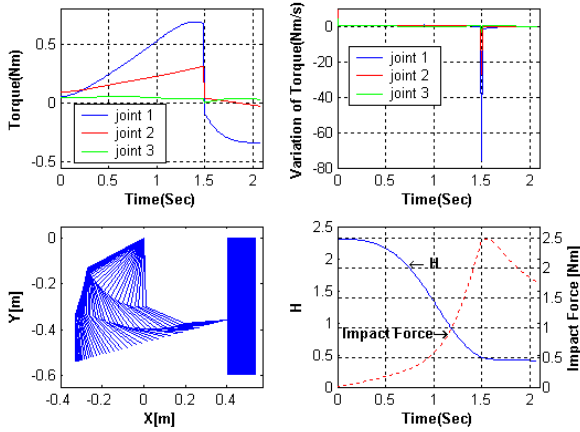


그림 9. 충돌 제어 알고리즘의 미적용 ( $k=7$ )  
Fig. 9. No adaption of impact control algorithm

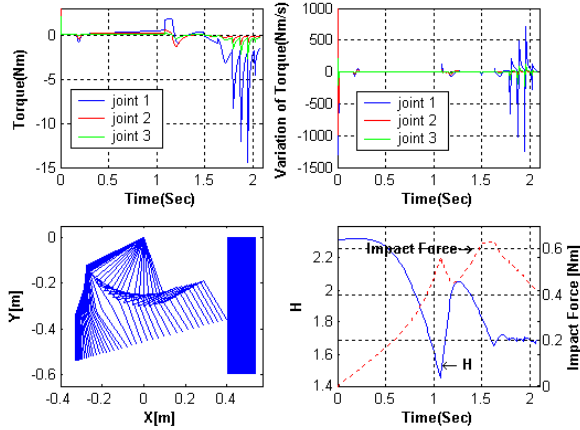


그림 10. 충돌 제어 알고리즘의 적용 ( $k=7$ )  
Fig. 10. Adaption of impact control algorithm

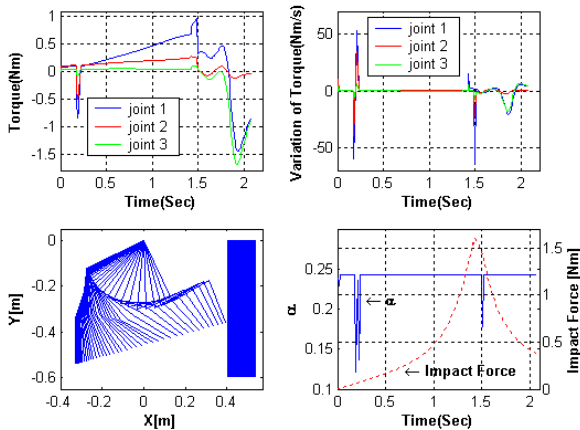


그림 11. 퍼지 제어를 이용하여  $\alpha$  생성 ( $k=7$ )  
Fig. 11. The  $\alpha$  generation using fuzzy controller

6.3 제안된 방법을 이용한 충돌 전 제어

본 절에서는 식 (13)의 충돌제어 알고리즘을 3자유도 평면 여유자유도 매니플레이터에 적용하여 각 관절의 토크와 토크의 변화 그리고 충격량을 분석하였다. 여기서  $\alpha$ 는 5.3

절의 퍼지 로직 제어를 이용하여 계산하였다. 그림 11은 그림 10과 비교하여 토크, 토크의 변화량은 아주 작고, 충격량 최소화를 위한 자세를 유지함을 알 수 있다. 이것은 토크와 토크의 변화량 그리고 충격량을 최소화시키기 위하여 고정된  $\alpha$  값을 사용하는 것보다 가변되는  $\alpha$  값을 사용하는 것이 타당함을 보여준다.

6.4 위치/충돌/힘제어

이 절에서는 위치/충돌/힘제어를 연속적으로 수행하였을 경우의 토크, 토크의 변화, 매니플레이터의 궤적, 말단의 힘을 나타내고, 충돌 후 힘제어를 하였을 경우와 하지 않았을 경우를 비교하여 제안된 알고리즘이 타당함을 검증하고자 한다. 그림 12는 충돌 후 힘제어를 위한 자세로 전환하지 않았을 경우이며, 이것은 매니플레이터의 궤적을 통하여 알 수 있다. 그림 13은 충돌 후 힘제어를 위한 자세로 전환한 경우이다. 스케일 때문에 그림 12와 13을 통하여 직접적인 비교가 어려우므로, 6.5절과 6.6절에 충돌 후 힘제어에 관해 상세히 비교하였다.

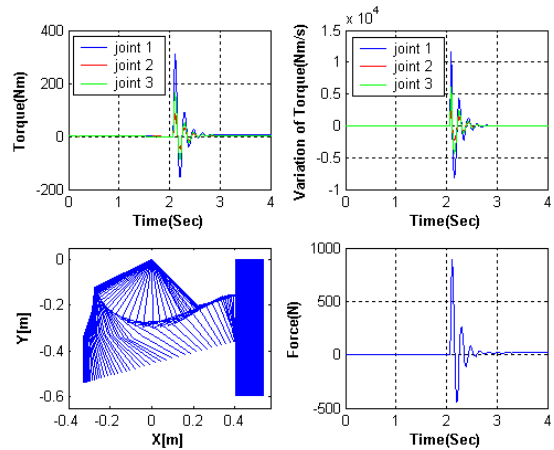


그림 12. 위치/충돌/힘제어(충돌 후 자세제어 안함)  
Fig. 12. Position/impact/force control after impact(without configuration control after impact)

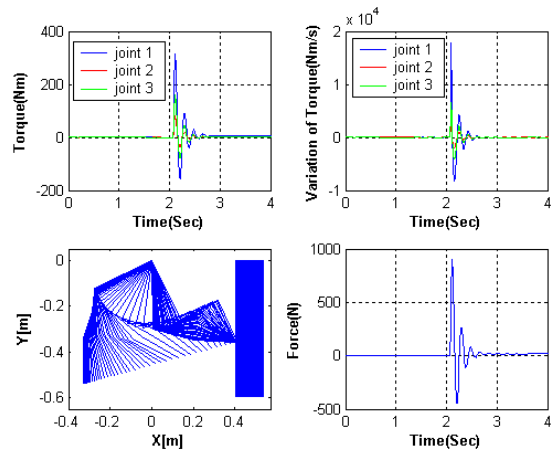


그림 13. 위치/충돌/힘제어(충돌 후 자세제어)  
Fig. 13. Position/impact/force control(with configuration control after impact)

6.5 외란이 없을 경우 충돌 후의 관절 토크

충돌 후 힘제어는 외란이 존재할 경우와 존재하지 않을 경우로 분류하고, 이 절에서는 외란이 존재하지 않을 경우의 힘제어에 대해 설명한다. 기준힘은 20[N]이고, 환경의 강성은 100,000[N/m]이다. 충돌제어를 위한  $k$ 는 7이고, 힘제어를 위한  $k$ 는 -7이다. 매니플레이터는 충돌 후 일정한 시간이 지난 후 정상상태에 도달하므로, 2.4초부터 분석하고자 한다. 그림 14는 충돌 후 힘제어를 위한 자세로 전환하지 않았을 경우이고, 그림 15는 충돌 후 힘제어를 위한 자세로 전환을 했을 경우이다. 두 그림을 분석한 결과 토크의 변화, 말단의 힘 등은 거의 비슷하지만, 관절 토크를 비교해 보면 4장에서 설명한 것과 같이 매니플레이터가 힘제어를 위한 자세로 전환했을 때가 더 작은 관절 토크를 요구함을 알 수 있다.

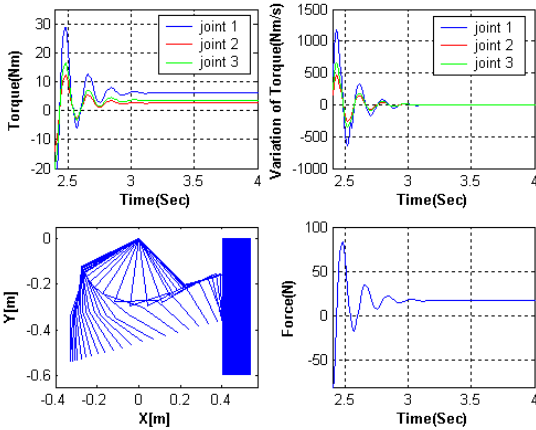


그림 14. 충돌 후 관절토크와 힘(자세제어 안함)  
Fig. 14. The joint torque and force after impact(without configuration control)

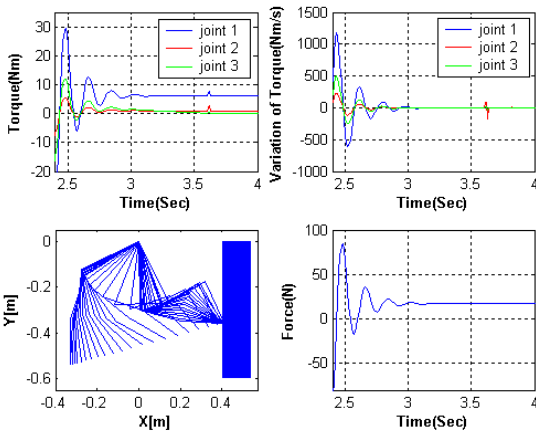


그림 15. 충돌 후 관절토크와 힘(자세제어)  
Fig. 15. The joint torque and force after impact(with configuration control)

6.6 힘외란이 있을 경우 충돌 후의 관절 토크

본 절에서는 충돌 후 힘외란이 존재할 경우 매니플레이터의 토크, 토크의 변화, 말단의 힘을 분석하고자 한다. 힘외란  $F_{dist} = [0.5\sin(50t), 0]^T [N]$ 이다. 그림 16은 힘제어를 위한 자세로 전환하지 않았을 경우이고, 그림 17은 힘제

어를 위한 자세로 전환하였을 경우이다. 유효질량을 크게 하여 힘제어를 위한 자세로 전환하였을 경우 힘외란의 영향을 훨씬 적게 받음을 알 수 있다.

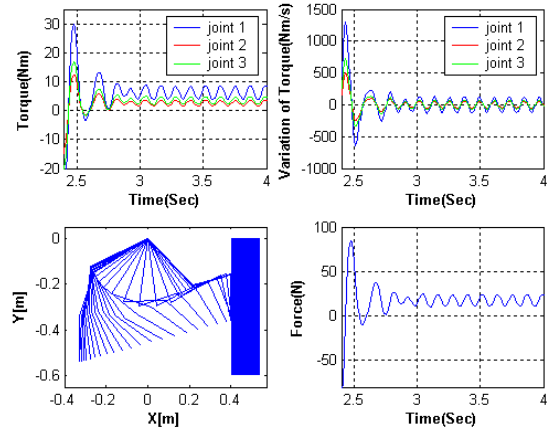


그림 16. 충돌 후 관절토크와 힘(자세제어 안함)  
Fig. 16. The joint torque and force after impact(without configuration control)

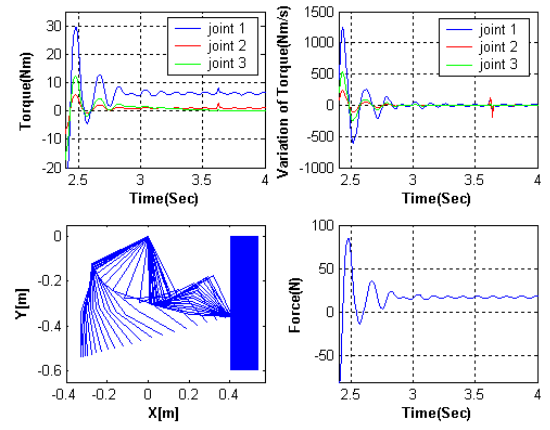


그림 17. 충돌 후 관절토크와 힘(자세제어)  
Fig. 17. The joint torque and force(with configuration control)

7. 결 론

본 논문에서는 매니플레이터와 환경과의 상호작용 시에 발생하는 위치/충돌/힘제어를 위해 기구학적인 여자유도를 이용하여 관절토크를 최소화시킴과 동시에 충돌을 최소화시키는 새로운 퍼지 제어 알고리즘과 관절토크와 외란영향 최소화를 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘에서는 유전자 알고리즘으로 조정된 퍼지 로직 제어기를 이용하여 매니플레이터의 관절 토크 최소화와 충격량 최소화를 구현하였다. 여자유도 매니플레이터의 관절 토크 최소화를 위해서는 효과적인 동력학 제어 알고리즘이 필요한데, Chung[11]이 제안한 방법을 수정하여 개선된 방법을 제시하였다.[12] 기존의 방법에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성은 제어 알고리즘에서 고려되지 않았지만, 제안된 알고리즘에서는 관절 토크의 변화량에 대한 안정성을 고려하였다. 관절 토크 변화량을 최소화하는  $\alpha$ 를 구하기 위하여



퍼지 로직 제어를 사용하였고, 퍼지 로직은 유전자 알고리즘을 이용하여 조정하였다. 유전자 알고리즘으로 퍼지제어를 설계 시 소속함수와 제어 규칙을 동시에 자동 설계하는 방법을 사용하였다. 또한 충돌 후 힘제어를 위해 유효질량을 최대로 하는 자세로 전환하여, 힘외란의 영향을 최소화하였다. 제안된 제어 알고리즘은 3자유도 평면 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하였고, 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였다. 모의실험 결과 매니퓰레이터와 환경과의 충돌 시 충격 및 손상을 줄이기 위해 유효질량을 최소로 하는 자세를 가지면 충격량을 최소화할 수 있고, 힘제어 시에는 유효질량을 최대로 하는 자세를 가지면 힘외란의 영향을 최소화할 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 and K. C. Suh, "Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. No.4, pp. 308-316, 1987.

[5] K. Kazerooni, and 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*, 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," in *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," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 5, No. 9, pp. 273-290, 1994.

[11] 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.

[12] B. S. Yoo, S. Koo and J. Joh, "A Study on Impact Control of Planar Redundant Manipulator using A Intelligent Control," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 787-796, 2008.

[13] 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.

[14] N. Hogan, "Impedance control : An approach to manipulator, part i, ii, iii," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 3, pp. 1-24, 1985.

[15] S. Jung, T. C. Hsia and R. G. Bonitz, "On force tracking impedance control with unknown environment stiffness," in *Proc. of IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing*, pp. 181-184, 1996.

[16] V. B. Nguyen and 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*, pp. 3-18, 2007.

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

[18] K. Belarbi and 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, 하이브리드 굴삭기, DSP 컨트롤러



**김신호(Sinho Kim)**

2004년 : 창원대학교 제어계측공학과(학사)  
2006년 : 창원대학교 제어계측공학과(석사)  
2006년~2009년 : 한국기계연구원 위촉 연구원  
2009년~현재 : 창원대학교 제어계측공학과 박사과정

관심분야 : 퍼지이론, 신경회로망, 유전자 알고리즘, 디지털 신호처리, 다중 무선 네트워크, 시스템 식별, 구조 건전성 모니터링



**조중선(Joongseon Joh)**

1991년 : Georgia Institute of Technology, Dept. of Mechanical Eng. (공학 박사)  
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