

# 유전 알고리즘을 이용한 6 자유도 병렬기구의 최적화 설계

## Optimal Design of a 6-DOF Parallel Mechanism using a Genetic Algorithm

황 윤 권, 윤 정 원\*

(Youn-kwon Hwang and Jung-won Yoon)

**Abstract :** The objective of this research is to optimize the designing parameters of the parallel manipulator with large orientation workspace at the boundary position of the constant orientation workspace (COW). The method uses a simple genetic algorithm(SGA) while considering three different kinematic performance indices: COW and the global conditioning index(GCI) to evaluate the mechanism's dexterity for translational motion of an end-effector, and orientation workspace of two angle of Euler angles to obtain the large rotation angle of an end-effector at the boundary position of COW. Total fifteen cases divided according to the combination of the sphere radius of COW and rotation angle of orientation workspace are studied, and to decide the best model in the total optimized cases, the fuzzy inference system is used for each case's results. An optimized model is selected as a best model, which shows better kinematic performances compared to the basis of the pre-existing model.

**Keywords :** genetic algorithm, fuzzy inference, haptic device, optimal design, parallel manipulator

### I. 서론

병렬 매니플레이터는 직렬매니플레이터에 비해 고강성, 고정밀도, 큰 하중지지능력, 적은 관성등 많은 장점을 가지고 있다. 따라서, 병렬 매니플레이터의 효율적인 사용을 위해서 최적설계에 관련된 많은 연구가 수행되었다. 대부분의 경우, 병렬매니플레이터의 최적설계를 위해 기구부의 등방성(isotropy)을 증가시키기 위한 기구부의 설계변수들을 찾는 기법들이 제시되었다.

Tsai & Huang[1]는 등방성 조건을 만족시키는 6개의 직선으로 구성된 등방성 발생기(isotropy generator)에 기반해서 6자유도 병렬 매니플레이터를 설계하는 방법론을 제시하였고 등방성의 Stewart-Gough타입 병렬 매니플레이터를 개발하는데 적용하였다. Tsai & Zhou[2]는 등방성 발생기를 이용하여 최적의 전역등방성(global isotropy)을 가지는 설계 값을 얻기 위한 방법론을 제시하였다. 직렬매니플레이터의 비해 병렬 매니플레이터의 주요 단점으로 적은 작업공간을 들 수 있고, Gallant and Boudreau[3]는 지정된 작업공간에 설계된 작업공간이 근접한 값을 가지도록 기구부 변수들의 최적설계기법을 제시하였다. 이로 인해 특이점이 작업공간 밖에 위치 하도록 작업공간의 생성이 가능하여졌다. 이상과 같이, 병렬 매니플레이터의 기구부 성능지수로서 등방성, 작업공간등이 최적의 기구를 설계하는데 중요한 인자들로 사용되었다. 하지만, 병진작업공간(Constant Orientation Workspace, COW)과 회전작업공간(Orientation Workspace, OW)을 동시에 고려하는 설계기법은 아직까지 제시되지 않고 있다.

현재까지, 대부분의 연구들은 매니플레이터 끝단(end-effector)

의 병진 및 회전 운동 변위의 중심위치(neutral position)인 초기 자세에서의 기구 성능을 평가하였다. 하지만, 초기 자세에서 큰 회전작업공간을 가지는 기구가 전체 병진공간에 비해 해서 큰 회전 작업공간을 가진다는 보장은 없다. 특히, 복잡한 다자유도 기구부의 특이점은 위 문제점의 주 원인이 된다. 기존 6자유도 병렬기구를 햅틱디바이스 [4,5]에 적용할 경우 동시에 넓은 COW/OW를 필요로 하지만 직관적이고 경험적인 설계방법으로는 조금만 중심위치에서 벗어나도 OW가 급속도로 줄어들어 원하는 적용분야에 만족스런 작업을 수행하는데 어려움이 있다. 따라서, 정해진 COW에서 OW값을 보장할 수 있다면 병진 및 회전 운동이 동시에 필요한 작업의 예측 및 분석을 통하여 효과적으로 작업을 수행 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 6자유도 병렬매니플레이터의 병진 및 회전 작업공간을 동시에 고려하여 기구부를 설계할 수 있는 최적 설계기법을 제시하고자 한다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용해 병진작업공간, 회전작업공간, 등방성 인자들로 이뤄진 목적함수가 주어진 병진작업공간 전역에서 큰 회전 작업공간을 가지도록 최적 설계기법을 제시하고자 한다. 또한, 퍼지추론(fuzzy inference)을 이용하여 최적 설계 값들 중에서 적용분야인 햅틱디바이스에 맞는 최적 값을 선택 할 수 있도록 하는 방법을 제시하고자 한다. 2장에서는 제안된 기구모델에 대해서 간단히 설명하고, 3장에서는 유전자알고리즘을 이용한 최적설계기법을, 4장에서는 병진작업공간의 구형반경 및 회전작업공간의 허용가능 경사(tilt)각에 의해서 최종 15개의 타입으로 분리한 각 타입에 대해서 최적설계를 수행하였고, 5장에서는 15개 타입 각각에 수행된 최적설계 값을 목적에 맞게 선택할 수 있도록 퍼지추론을 이용하였고, 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺고자 한다.

### II. 베이스 기구모델

#### 1. 기구부 설명

그림 1과 같이 햅틱디바이스 적용을 위해 제안된 6자유도

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 2. 17.

황윤권 : 현대모비스 기술연구소(ykhwang@mobis.co.kr)

윤정원 : 경상대학교기계항공공학부 항공기부품기술연구센터

(jwoon@gnu.ac.kr)

※ 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-005-109902).

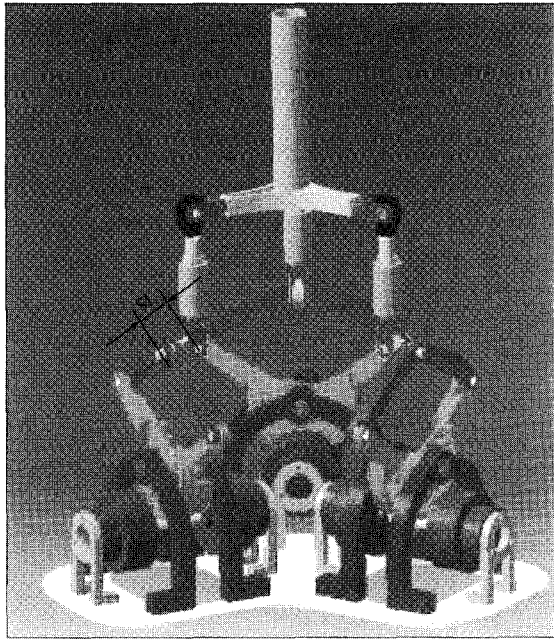


그림 1. 판토크래프로 구성된 6자유도 병렬기구.  
Fig. 1. The 6-DOF parallel mechanism with pantograph mechanisms.

병렬기구는 베이스모델[5]에 사용된 링크 길이의 절반 크기를 초기모델로 선택하였다. 베이스 기구모델은 6개의 베이스에 고정된 서보모터에 의해서 구동되고, 기구부는 베이스에 고정된 평면에서 2자유도 운동을 만드는 2자유도 기구부(pantograph)와 연결링크(connecting bar)가 구형관절(spherical joint)로 연결 되어 있고 이 연결링크(connecting bar)가 다시 상판(end-effector)에 회전관절(revolute joint)로 연결되어 있으며 이 구조가 상판과 베이스에 대해 서로 3각 대칭을 이루고 있다. 제안된 기구부는 베이스에 고정된 모터와 RRR타입의 볼조인트 설계 덕분에 적은 관성 및 넓은 작업공간을 가진다.

2. 역기구학 및 자코비안

각 기구 변수들은 그림 2에 나타나 있다. 베이스, 이동, 판토크래프의 각 플랫폼은 각각  $\Sigma_b, \Sigma_m, \Sigma_{pi}$  ( $i = 1, 2, 3$ )로 정의된다. 제안된 구조의 각 변수들을 정의하면 2자유도 기구부(pantograph)의 상부링크의 길이  $L_1$ , 하부링크의 길이  $L_2$ , 연결링크의 길이를  $L_3$ 로 정의하고 베이스에서 2자유도 기구부(pantograph)까지의 반지름을  $R_0$ , 상판의 반지름을  $R_1$ 로 정의한다. 또한, 2자유도 기구부와 연결링크를 연결해주는 구형관절의 위치를  $Q_i$  ( $i=1,2,3$ )로 정의하고, 2자유도의 입력 값이 위치하는 베이스에서 고정된 이동좌표계가 위치한 좌표를  $M_i$  ( $i=1,2,3$ )으로 정의하며, 연결링크와 상판을 연결하는 회전관절이 위치하는 좌표를  $E_i$  ( $i=1,2,3$ )로 정의한다. 베이스의 반지름  $R_0$ 에 위치한 판토크래프의 위치각 및 이동플랫폼의 반지름  $R_1$ 에 위치한 회전관절의 위치각은 각각  $\delta_i, \gamma_i$  ( $i = 0, 2/3, 4/3, \pi$ )로 표시된다. 여기서, 구형조인트가 판토크래프 기구부의 꼭지점에 위치한 것 같이 보일지라도 실제 구현단계에서의 센터는  $SL$ 의 옅섯거리를 가지고 위치한다(그림1 참조). 하지만 기구학 해석에 있어서, 구형조인트 중심은

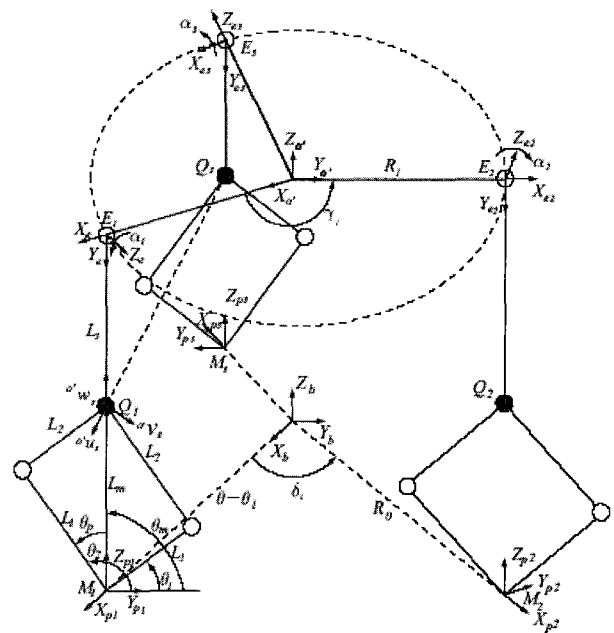


그림 2. 기구학 모델.  
Fig. 2. Kinematic model.

판토크래프의 꼭지점에 위치하고 있다고 가정해도 기구학에 영향을 미치지 않는다. 역기구학은 상판의 주어진 각 축의 위치 및 각 축의 방향  $(x, y, z, u, v, \gamma)$  값에서 판토크래프 하부 링크의 능동관절 각  $\theta_{1i}, \theta_{2i}$ 를 찾는 것으로 정의된다. 게다가, 자코비안 매트릭스는 쉽게 역나선(reciprocal screws) 개념을 이용해서 구해졌다. 보다 구체적인 기구학 해석은 베이스 모델[5]의 설계 및 해석부분에 잘 구현되어 있다.

III. 최적화 알고리즘

1. 유전자 알고리즘

다 자유도의 복잡한 기구부를 가지는 병렬매니퓰레이터의 최적설계 문제는 변수와 성능지수와와의 관계가 복잡한 비선형성을 가져서 해를 구하기가 쉽지 않다. 많은 비선형 최적 설계 해석방법들 중에서, Holland에 의해 제시된 유전자 알고리즘(Simple Genetic Algorithm, SGA)은 유전(genetics)과 자연진화(natural evolution)를 수치적으로 모델화하는 확률기반 최적 설계방법이다[6,7]. 이 최적기법은 여러 세대를 통해서 보다 강력해지는 각 개체(individuals)의 생성과 진화에 기초한다. 무작위로 생성된 각 개체는 기구변수부의 함수를 나타낸다. 각 개체( $L1, L3, R0$ )의 세기는 기구부의 최적화 목표에 기초한 목표 함수를 사용하는 것에 의해 평가된다. 각 개체의 진화는 최적화 값을 향해서 수렴하기까지 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 유전연산자(genetic operation)들을 사

표 1. 유전자 알고리즘에 사용된 변수.

Table 1. Parameters used to a genetic algorithm.

개체군 수	100
세대 최대 수	50
교배확률 ( $P_c$ )	0.85
돌연변이확률 ( $P_m$ )	0.05

용하는 것에 의해 성취된다. 특히, 전역해(global solution)에 수렴하는 강건성 때문에 제안된 모델과 같이 복잡한 기구부에 효과적이다. 표 1은 유전자 알고리즘에 사용된 각 변수들을 보여주고 있다.

2. 성능기준

본 연구는 3개의 기구부 성능평가 지수 병진작업공간(Constant Orientation Workspace, COW), COW 경계위치에서의 회전작업공간(OWEA), 작업공간내에서의 기구부 등방성(Global Conditioning Index, GCI [8])을 이용하고 있다. 위 성능지수들은 최적화 과정에서 목표함수로서 사용된다. COW( $\varphi = \theta = \gamma = 0$ )는 상수의 회전을 유지한 채로 끝단의 위치에서 획득 될 수 있는 3차원 공간의 크기로 정의된다. 따라서, 큰 부피의 COW는 끝단의 넓은 병진작업공간을 의미한다. 그림 3과 같이 지정된 작업공간으로 구 반경  $R_i$  ( $i = 20, 30, 40\text{mm}$ )의 변화에 따라서 형성되는 3개의 COWs는  $\Omega_i$  로 정의된다.  $\Omega_i$  는 N개의 포인트로 이뤄진 집합으로 구성되어 있다고 가정한다. 각 포인트의 좌표계는  $P_k(x_k, y_k, z_k)$ 와 같이 정의되고, 여기서 이동좌표계  $\sum^i$ 에서  $K=1, 2, \dots, N$ 이다. 수많은 포인트들이 구 안에서 분포되어 있고, 각 포인트들에 관해서 역기구학(Inverse Kinematics)이 수행된다. 만일 역기구학을 통한 각 구동부 각들이 실수 값들을 가진다면, 각 포인트는 매니플레이터의 작업공간 안에 속한다고 할 수 있다. 또한, Gosselin & Angeles[8]에 의해 제시된 GCI는 기구부 작업공간 전역을 포함하여 계산하도록 설계 되어졌다. 여기서 GCI는 전 작업공간에 대한 매니플레이터의 평균 등방성을 나타내고 있다. 따라서, GCI가 1에 가까우면, 작업공간내에서의 기구부가 보다 균일한 작업성을 나타낸다고 볼 수 있다. 마지막으로, 오일러 각에 의한 회전 작업공간(OWEA)은  $\Gamma_i$ 로 정의된다.  $\Gamma_i$ 는  $M_i$  각( $i = 10, 15, \dots, 40^\circ$ )의 집합으로 구성되어 있다. 각들의 회전 값들은  $\Psi_k$  ( $\varphi_k, \theta_k$ )로 정의되고, 여기서 이동좌표계  $\sum^i$ 에서  $K = 1, 2, \dots, M_i$ 이다. 수많은 각들이  $\Omega_i$ 의 경계에 위치한  $\Gamma_i$  안에서 구분되어 있고 각 경우에 대해서 역기구학이 수행된다. 예를 들어,  $\Omega_{20}$ 의 따라서,  $\Gamma_i$ 에 관해서 4번의 역기구학이 수

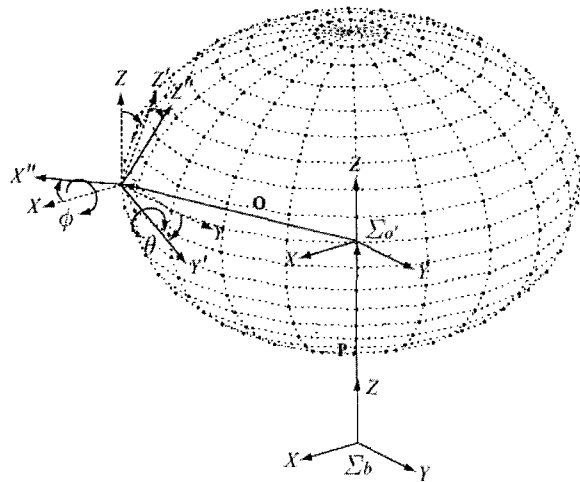


그림 3. 끝단의 위치변화에 따른 기구부의 작업공간.  
Fig. 3. Workspaces of mechanism with respect to position of an end-effector.

행된다. 만일 구동부 회전각이 실수 값들로 구해진다면, 위 회전각은 매니플레이터의 작업공간에 속한다고 할 수 있다. 기구의 성능을 결정하는 중요한 3개의 주요 인자(병진작업공간, 회전작업공간, 등방성)들의 조합을 통해서,  $F(x)$ 로 정의되는 목적함수는 다음과 같이 표현되었다.

$$F(x) = MAX \left\{ \frac{n_{in}}{N_{tot}} + \sum_{i=1}^4 \left( \frac{m_{i,in}}{m_{i,tot}} \right) + GCI \right\} \quad (1)$$

여기서,  $\Gamma_i, \Omega_i$  안에 속한  $n, m$  은 각 포인트 및 회전각의 개수이고,  $N_{tot}, m_{i,tot}$  는 역기구학에 의해 실수 값을 계산하기 위한 최적설계과정에서 필요한 각 위치점 및 회전의 총 개수이다.  $F(x)$ 가 큰 값을 가질수록 COW 전역에서 회전 작업공간의 부피가 커진다고 할 수 있다.

3. 시스템경계의 구속조건

목적함수를 계산하기 위해, 시스템 경계영역에 대한 구속조건식을 정의하여 최적 값이 물리적으로 합당한 값을 가질 수 있도록 하여야 한다. 또한, 주어진 해의 범위 내에서 (1)을 만족하는 실제적인 최적화 값을 만족하기 위하여 링크 길이의 범위뿐만 아니라 기구부의 초기자세 및 특이점 형상 또한 고려되어야 한다.

3.1 링크 변수의 범위

제안된 기구를 표현하기 위한 최적설계 기구 변수들은  $L_1, L_3, R_0$  3개의 변수들로 축소된다. 기구형상을 표현하는 모든 다른 변수들은 다음과 같이 상수 값을 가지도록 설계되었다.

$$L_2 = L_1, SL, R_1 = R_0 - SL$$

시스템 경계를 위한 변수들의 구속 조건식은 다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda = \{x \mid x^{(L)} \leq x \leq x^{(U)}\} \quad (2)$$

여기서  $\Lambda$  는 역기구학을 통해 구해지는 실수의 구동 조인트 각 해들의 집합이고, 상위 제한 벡터  $x^{(U)}$  ( $x = (L_1, L_3, R_0)$ ) 및 하위 제한 벡터  $x^{(L)}$ 에 의해서 제한된다. 주어진 구속조건식들을 모두 만족하는  $x \in \Lambda$ 는 유전자 알고리즘의 최적화 과정 동안에 유효해(feasible solution)로 정의된다. 최적화 설계에 필요한 각 변수들의 범위는 표2에 표시되어 있다.  $x_{min}$  값은 베이스 모델에 사용된 변수 값 이고  $x^{(L)}$ 와  $x^{(U)}$ 은 베이스모델 값의 상하 60%에 대응하는 값이다.

3.2 변수엔코딩(encoding of parameter)

유전자연산자와 적합성(fitness)은 이진문자열(binary string)에 기초한 코딩공간 및 변수에 기초한 해(solution) 공간으로 실행된다. 탐색공간(search space)의 점들을 표현하기 위해 표 2와 같이 조건 식에 관한 실제 유효해 범위가 코딩공간에서 문자열 혹은 염색체로 불리는 자연변수로 전환된다. 그림 4

표 2. 변수 값들의 범위.

Table 2. Ranges of variables.

Variables								
$L_1$			$L_3$			$R_0$		
$x_{min}$	$x^{(U)}$	$x^{(L)}$	$x_{min}$	$x^{(U)}$	$x^{(L)}$	$x_{min}$	$x^{(U)}$	$x^{(L)}$
40mm	64mm	16mm	80mm	128mm	32mm	65mm	104mm	26mm

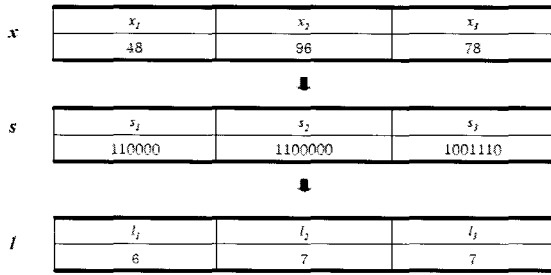


그림 4. 벡터  $x$  를 위한 이진엔코딩  $s$  및 염색체 길이  $l$ .  
Fig. 4. Binary encoding  $s$  and chromosome length  $l$  for real vector  $x$ .

는 변수  $x$ 가 이진문자열 벡터에서 염색체길이  $l$  벡터로 전환되는 과정을 보여주고 있다. 조건식  $x_i$  는 유효해 범위에서 얻어지고, 이진문자열  $s_i$  는  $x_i$  의 이진엔코딩(binary encoding)에 의해 계산되고, 염색체 길이  $l_i$  는 다음 식을 사용하는 것에 의해 구해진다.

$$l_i \geq \log_2[(|x_i^{(U)}| - |x_i^{(L)}|)10^{d_i} + 1] \quad (3)$$

여기서  $d_i=(0,0,0)$ 는 각 변수의 디지털 분해능이다. (3)에서 염색체 길이  $l$ 의 총 길이는 20비트(bit)가 된다. 유전자연산자를 통한 진화를 수행하기 위해서 초기개체군을 생성하는 것이 필요하고, 개체군은 개체들이 진화하는 동안에 메모리와 같은 역할을 담당하고 있다.  $k$ 번째 세대(generation)에서  $P(k)$ 로 지정된 개체군은  $N$ 번째 개체들의 집합으로 정의된다.

$$P(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)] \quad (4)$$

여기서  $s_i(k)$ 는  $i$ 번째 염색체로 탐색공간(search-space)에서의 포인트이고,  $N(>1)$ 은 개체군 크기이다. 초기개체군  $P(0)$ 은 무작위 초기화 방법(random initialization method)에 의해서 생성된다. 이 방법은 무작위 숫자 발생기에 의해  $N$ 의 수만큼 생성되는 이진 상수로 염색체를 초기화한다. 따라서, 총 비트수는  $100 \times 20 = 2000$ 개가 된다. 게다가, 교배에 의해서 생성되는 염색체 수는  $P_c N = 0.85 \times 100 = 85$ 개 이고( $P_c$ 는 교배확률), 각 세대에서 돌연변이에 의해서 발생하는 수는  $P_m N = 0.05 \times 100 \times 20 = 100$ 개 ( $P_m$ 은 돌연변이확률)이다.

3.3 초기자세

매니플레이터 끝단의 병진 및 회전 운동의 변위들을 고려하였을 때 벡터  $O_i$  로 정의되는 초기위치는  $\Sigma_0$  좌표계의  $Z$ 축을 따라서 상하 높이 값이 같은 값이 되도록  $\theta_{1i} = 30^\circ$ ,  $\theta_{2i} = 120^\circ$ 일 때로 정의되었다.

3.4 특이점 형상

현재까지 발견된 제안된 구조의 특이점은 판토크래프의 링크가 베이스에 놓일 때 혹은 바로 섰을 때 발생하고 연결 링크가 판토크래프 평면에 수직할 때 발생한다. 위 형상들은 주어진 구동부 나선을 제외하고 모든 구동부 나선에 역적(reciprocal)인 역나선(reciprocal screws)을 통해 기하학적으로 구할 수 있고 주어진 구동부 나선과 역나선이 역적일 때 특이점형상이 발생되게 된다.

IV. 최적설계 결과

본 연구에서  $\Omega_i$ 에 의해서 구분되는 3가지 타입 및 회전에

구분되는 5가지 타입 각각은  $\Gamma_i$ 에 의해서 다음과 같이 총 15가지 경우의 수로 구분된다.

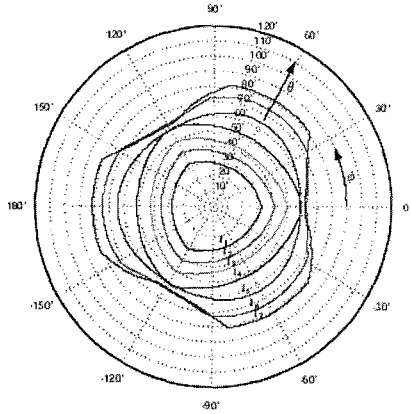
- Type I<sub>i</sub> =  $\Omega_{20}$  &  $\Gamma_i(i=5, 10, \dots, 40)$ ,
- Type II<sub>i</sub> =  $\Omega_{30}$  &  $\Gamma_i(i=5, 10, \dots, 30)$ ,
- Type III<sub>i</sub> =  $\Omega_{40}$  &  $\Gamma_i(i=5, 10, 15, 20)$ .

$\Omega_i$ 와  $\Gamma_i$ 의 최대 조합 값들은 유전자알고리즘의 최적화 과정에서 변수 값들의 수렴여부에 의해서 결정되었고, 총 15개의 경우의 수에 대해서 최적화된  $L_1, L_3, R_0$  값들이 결정되었다. 게다가, GCI 값이 각 축에 대한 등방성의 정도를 보이기 위해서 구해졌고, 각 변수들에 대한 전체변수들에 대한 크기가 커질수록 GCI값이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 중심위치 및 COW의 경계점인 중심에서 치우친 지점에서 얼마나 큰 끝단의 회전각을 발생 시킬 수 있는지를 진단하였다. 각의 표현 방법은 수정된 오일러각(modified euler angle) 및 회전각을 실린더 좌표계로 표현하여 하나의 부피로 3축에 대한 회전각의 크기를 측정할 수 있는 방법[9]을 사용하였다. 더구나, 투영된 회전작업공간(projected orientation workspace)은 두 개의 경사각 ( $\phi, \theta$ )으로 표현되는 끝단의 지시벡터(approach vector)의 가능한 집합으로 정의된다. 표 3은 총 15개의 경우의 수에 대한 기구 성능지표에 대한 결과들을 보여주고 있다. 그림 5는 끝단의 중심위치에서의 투영회전작업공간을 보여주고 있다. 기구부의 등방성은  $\psi_{i,max}, \psi_{i,min}$  값을 가지는 작업공간의 형상에서 계산되었다. 병진작업공간을 정의하는 구의 반지름이 20mm이고( $\Omega_{20}$ ), 경계점에서 설계 회전각이  $10^\circ$  일 때인 Type I<sub>1</sub>의 경우 중앙 위치에서의 최대 경사각은  $30^\circ$ 이고, 설계 회전각이  $40^\circ$ 인 Type I<sub>7</sub>의 경우 최대 경사각은  $80^\circ$ 에 이른다(그림 5(a)). 하지만, 작업공간이 증가 할수록 등방성지수(GCI)가 떨어지는 것을 볼 수가 있다(표 3). 구의 반지름이 30mm( $\Omega_{30}$ ), 40mm( $\Omega_{40}$ )일 경우에 대해서도 그림 5(b), (c)에 각 타입에 따른 결과 값이 나타나 있다. 중심위치에서 떨어진 병진작업공간 내( $\Omega_{20}, \Omega_{30}, \Omega_{40}$ )에서 설계입력으로 주어진 회전작업공간을 만족하는 지의 여부가 그림 6의 결과 값에 나타나 있다. Type I<sub>1</sub>의 경우 병진작업공간이 경계 위치에 위치하더라도 회전작업공간이  $10^\circ$  이상을 만족하는 것을 볼 수 있다. 비슷하게 Type I<sub>7</sub>의 경우 회전작업공간이  $40^\circ$  이상을 만족하는 것을 볼 수 있다. 즉, 병진작업공간 전역에서 지정

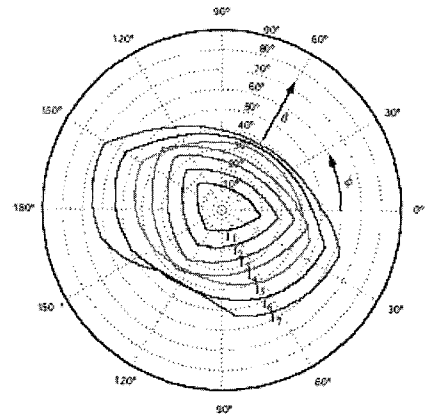
표 3. 최적화된 변수 값 및 성능지수.

Table 3. Values of optimized parameters and performance indices.

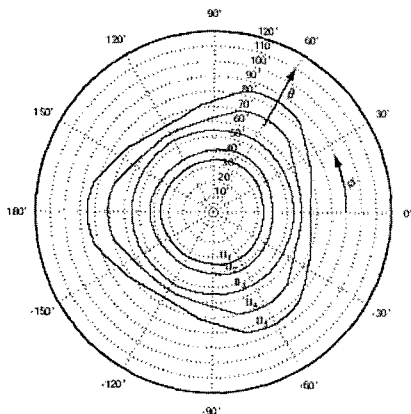
	Constraints				$O_2$	$L_3$	$R_0$	$\psi_i$		GCI $_{\Omega_{20}}$
	$\Omega_i$	$\Gamma_i$	$\theta_{1i}, \theta_{2i}$	$\psi_{i,max}$				$\psi_{i,min}$		
Base model	20	-	30, 120	120.0	40.0	80.0	65.0	49.8	39.3	0.0279
Type I <sub>1</sub>		10		129.1	41.9	87.2	104.0	32.7	27.9	0.0526
Type I <sub>2</sub>		15		136.0	52.6	83.4	104.0	41.7	35.1	0.0519
Type I <sub>3</sub>		20		142.1	62.5	79.6	104.0	50.1	42.0	0.0515
Type I <sub>4</sub>		25		132.3	64.0	68.3	89.3	58.8	51.6	0.0423
Type I <sub>5</sub>		30		142.9	64.0	78.9	77.0	64.2	58.5	0.0347
Type I <sub>6</sub>		35		125.4	63.2	62.2	67.1	74.4	63.0	0.0285
Type I <sub>7</sub>		40		116.4	64.0	52.4	61.6	81.3	62.1	0.0249
Type II <sub>1</sub>		10	30, 120	170.0	52.6	117.4	104.0	35.4	33.9	0.0518
Type II <sub>2</sub>		15		179.2	62.5	116.7	104.0	42.6	39.9	0.0513
Type II <sub>3</sub>		20		146.6	64.0	82.6	86.2	55.2	54.0	0.0404
Type II <sub>4</sub>		25		143.6	64.0	79.6	72.1	71.1	59.4	0.0317
Type II <sub>5</sub>		30		130.0	64.0	66.0	62.9	84.9	65.4	0.0259
Type III <sub>1</sub>		10		192.0	64.0	128.0	104.0	43.8	38.7	0.0512
Type III <sub>2</sub>		15		182.2	64.0	118.2	80.7	59.4	42.9	0.0369
Type III <sub>3</sub>		20		154.2	64.0	90.2	64.7	76.2	54.6	0.0271



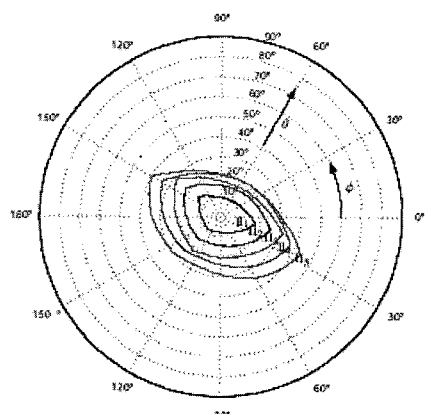
(a) Type I<sub>i</sub> at Ω<sub>20</sub>



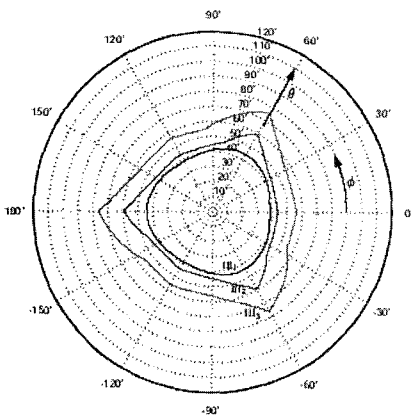
(a) Type I<sub>i</sub>



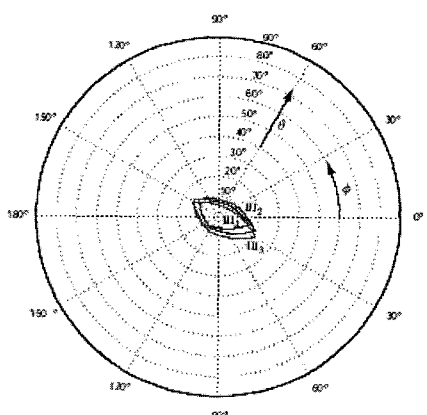
(b) Type II<sub>i</sub> at Ω<sub>30</sub>



(b) Type II<sub>i</sub>



(c) Type III<sub>i</sub> at Ω<sub>40</sub>



(c) Type III<sub>i</sub>

그림 5. COW의 구 반경의 변화에 따른 끝단의 각 중심위치에서의 투영작업공간의 비교.

Fig. 5. Comparisons of the projected orientation workspace at each neutral position of the end-effector with respect to the sphere radius of COW.

한 회전작업공간이 만족하는 것을 볼 수 있다. 위 결과값을 이용할 경우, 병진작업공간 전역에서 항상 회전작업공간의 설계입력 값을 보장할 수 있으므로, 병진 및 회전 작업을 동시에 수행하여야 하는 햅틱디바이스의 경우 그 성능을 최대한으로 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 6. 이동좌표계  $\Sigma_o$ 의 각 경계위치  $O_k$ 에서 15가지 각 경우에 대한 투영작업공간의 비교.

Fig. 6. Comparison of projected rotational workspace of fifteen cases at each boundary position  $O_{ki}$  ( $O_{kx}, O_{ky}, O_{kz}$ ) in  $\Sigma_o$ .

**V. 퍼지추론에 의한 최적 값의 선택**

15개의 경우의 수에서 계산된 각 타입 결과로부터, 햅틱디바이스에 적합한 최적 값을 가지는 경우의 수를 선택하여야 한다. 하지만, 사용자에게 따라서 원하는 햅틱디바이스의 사양이 틀릴 것이다. 예를 들어 어떤 사용자는 병진작업공간은 작아도 상관없으나 회전작업공간은 큰 사양을 원하고, 어떤

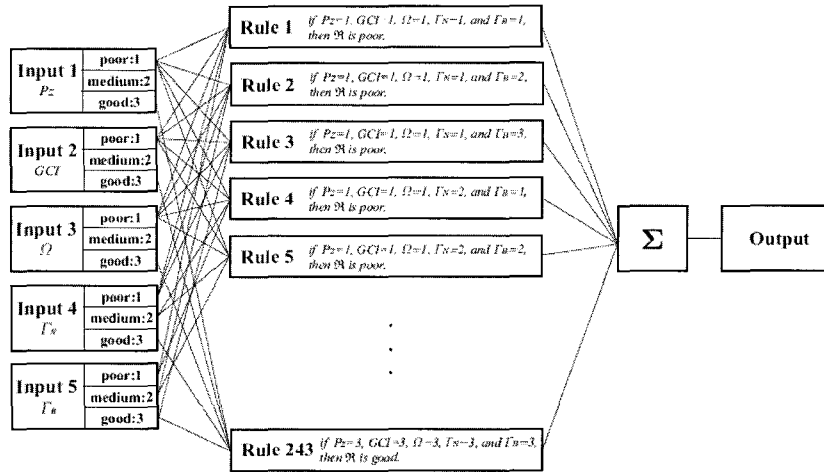


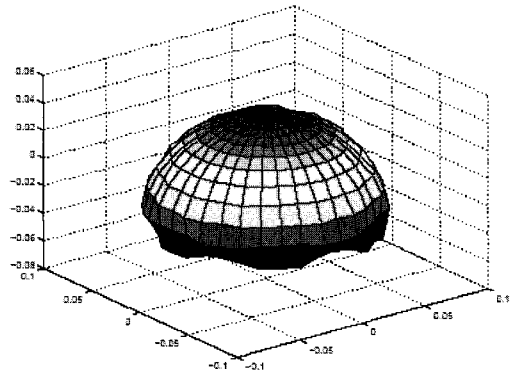
그림 7. 퍼지추론 시스템.  
Fig. 7. Fuzzy inference system.

사용자의 경우 작업공간은 기준이상만 만족하면 되고, 등방성에 보다 큰 중요성을 줄 수가 있다. 더구나 경우의 수가 늘어 나고, 적용분야가 바뀐다면 최적 설계된 각 경우의 수에 적합한 결과를 선택하는 것은 아주 어려운 일이 될 것이다. 따라서, 최적결과값을 가지는 경우의 결과 값을 용도에 맞게 선택하기 위한 방법이 필요하다. 본 장에서는 퍼지추론을 이용한 최적결과값의 선택방법론을 제시하고자 한다.

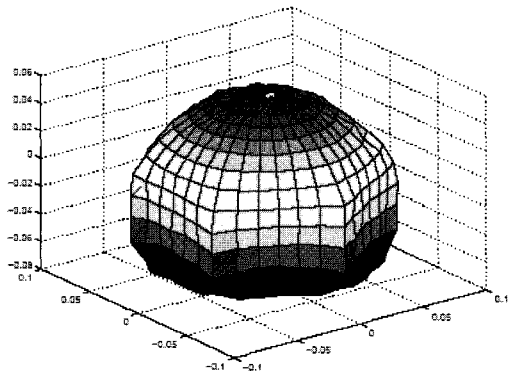
1. 퍼지추론시스템

퍼지추론(fuzzy inference)은 주어진 입력에서 퍼지 로직을 이용하여 출력까지의 매핑(mapping)을 공식화하는 과정이다. 따라서, 매핑은 결정이 내려질 수 있는 혹은 패턴을 결정하는 기초를 제공한다. 퍼지 추론과정은 멤버십 함수, 퍼지 로직 연산자, if-then 규칙을 포함하고 있다. 입력은 입력변수의 전체집합(universe of discourse)에 제한되는 부분 집합(crisp value)값이고, 출력은 0과 1사이에서 언어적 집합을 평가하는데 멤버십의 소속 정도이다. 그림 7에 보여진 것 같이 이 시스템은 다섯 개의 입력 및 하나의 출력, 243개의 규칙으로 구성되고, 각각의 규칙은 입력을 수많은 다른 퍼지 논리집합(linguistic set)으로 결정하는 것에 의존한다. 여기서 입력인자는 각각 디바이스의 상대적인 크기를 나타내는 중심위치의 높이( $P_z$ ), 등방성( $GCI$ ), 병진작업공간( $\Omega$ ), 중심위치에서의 회전작업공간( $\Gamma_s$ ), 경계위치에서의 회전작업공간( $\Gamma_B$ )로 지정하고, 각 경우에 대해서 사용자의 적용분야에 적합하도록 각

항목에 대한 중요성의 선호도(good, medium, poor)가 입력범위의 선택에 따라서 결정되도록 하고, 각 입력 값에 따라서 퍼지 규칙에 의해 출력 값이 나오도록 설계하였다. 예를 들어 다음과 같은 규칙들이 있다.



(a) 중심위치(0, 0, 120)에서의 베이스 모델



(b) 중심위치(0, 0, 142.9)에서의 제안된 모델(Type I<sub>5</sub>)

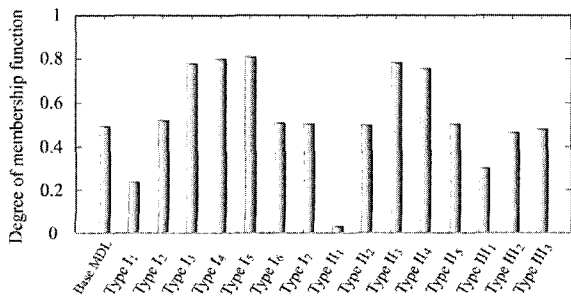


그림 8. 멤버십 함수의 값.  
Fig. 8. Degree of membership function.

그림 9.  $\sum_b$  좌표계에서의 각 중심위치에서의 병진작업공간 비교(단위: m).

Fig. 9. Comparison of translational workspaces at each neutral position of an end-effector in  $\sum_b$  (unit: m).

$P_z$  (Input 1) is good,  
 $GCI$  (Input 2) is medium,  
 $\Omega$  (Input 3) is poor,  
 $\Gamma_N$  (Input 4) at P is poor,  
 $\Gamma_B$  (Input 5) at  $O_k$  is good  
 ...

여기서,  $\Omega = \|\pm X\| + \|\pm Y\| + \|\pm Z\|$ ,  $\Gamma_N = \Psi_{\max} + \Psi_{\min}$ ,  $\Gamma_B = \Psi_{\max} + \Psi_{\min}$ 로 정의되고 입력 변수 값의 합  $\mathfrak{R}$  은 다음과 같이 정의된다.

$5 \leq \mathfrak{R} \leq 9$  is poor,  
 $10 \leq \mathfrak{R} \leq 12$  is medium,  
 $13 \leq \mathfrak{R} \leq 15$  is good.

결과적으로, 그림 8은 Sugeno method[10]에 의한 15개의 경우의 수에 대한 멤버십 함수의 결과 값을 보여 주고 있다. 위 결과에서 Type  $I_5$  를 15개의 각 경우의 수에서의 값들에 있어서 1에 가장 가까운 값을 가지는 최적 값으로 선택되었다. 선택된 모델의 경우 기구 변수 값들의 크기가 베이스 모델과 비슷할 뿐만 아니라, 모든 다른 기구 성능지표가 기존의 경우에 비해서 증가 하였다. Type  $I_5$ 의 경우에 병진 운동을 평가하기 위해서 베이스 모델과 최적 설계된 COWs 각 방향에 구해졌다. 그림 9는 Type  $I_5$  및 베이스 모델에 대한 중심위

에서의 병진작업공간을 나타내고 있다.  
 각 축에 대한 범위를 표시하면

- 베이스모델(mm)  
 $-75.1 \leq X \leq 74.7, -77.8 \leq Y \leq 77.9, -43.8 \leq Z \leq 39.9$
- 최적 설계된 모델(mm)  
 $-73.9 \leq X \leq 74.1, -84.5 \leq Y \leq 85.4, -69.1 \leq Z \leq 55.9$

최적 설계된 모델의 COW 는 기존 베이스모델의 모든 축에 대해서 베이스 모델보다 크기가 증가 한 것을 볼 수 있다. 특히, Z축에 대한 차이는 20%이상 증가 하였다. 그림 10에서는 베이스모델 및 최적설계 값의 회전 작업공간을 비교하고 있다. 그림 10(a)는 중심위치에서의 회전작업공간으로 베이스 모델 값이 40° 이상인데 비해 최적설계 값의 경우 60° 이상인 것을 볼 수 있다. 그림 10(b)의 경우 경계지점에서의 베이스 모델이 10° 이상인 것에 비해 최적 설계 값의 경우 모든 방향에 대해서 30° 이상인 것을 볼 수 있다. CGI의 경우 베이스 모델에 비해서 최적설계모델이 10% 정도 지표가 증가하였다. 결론적으로, 기구부의 성능지표들은 전 범위의 COW를 통해서 베이스모델에 비해서 좋은 지표들을 보였다.

**VI. 결론**

본 논문은 판토히그램 기구부로 구성된 6자유도 병렬매니플레이터의 최적설계 기법을 제시하고 있다. 제안된 기법은 전 병진작업공간을 통하여 큰 회전작업공간을 획득할 수 있는 것을 목표로 하고 있다. 최적설계 과정에서 목적함수는 3개의 성능지표로 병진작업공간(COW), 병진작업공간 경계점에서의 회전작업공간(OW), 작업공간 내에서의 등방성(GCI)을 선택하였고, 최적의 설계변수를 얻기 위해 유전자 알고리즘을 이용하였다. COW를 표현하기 위한 구의 반지름 및 회전 작업공간을 표현하기 위한 경사각의 조합에 의해서 총 15개 타입의 최적설계 경우의 수가 최적화 알고리즘의 수렴여부를 따져 선택되었고, 각 경우에 대해서 최적화 알고리즘을 통해 결과값을 구하였다. 퍼지추론을 통해 15개중에서 가장 적합한 모델을 선택하여 직관적이고 경험적으로 구해진 기존 베이스 모델의 기구부 성능지표들과 비교하였다. 결과적으로 모든 기구부의 성능지표에 있어서 베이스모델에 비해 우수한 결과 값을 얻을 수 있었다. 제안된 최적설계방법은 다양한 기능을 필요로 하는 복잡한 로봇의 기구적 구조를 가지는 매니플레이터의 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 본다.

**참고문헌**

- [1] K. Y. Tsai and K. D. Huang, "The design of isotropic 6-DOF parallel manipulators using isotropy generators," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 38, pp. 1199-1214, 2003.
- [2] K. Y. Tasi and S. R. Zhou, "The optimum design of 6-DOF isotropic parallel manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 333-340, 2005.
- [3] M. Gallant and R. Boudreau, "The synthesis of planar parallel manipulators with prismatic joints for an optimal, singularity-free workspace," *Journal of Robotic Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 13-24, 2002.
- [4] 이재훈, 김형욱, 이병주, 서일홍, "새로운 6자유도 병렬형

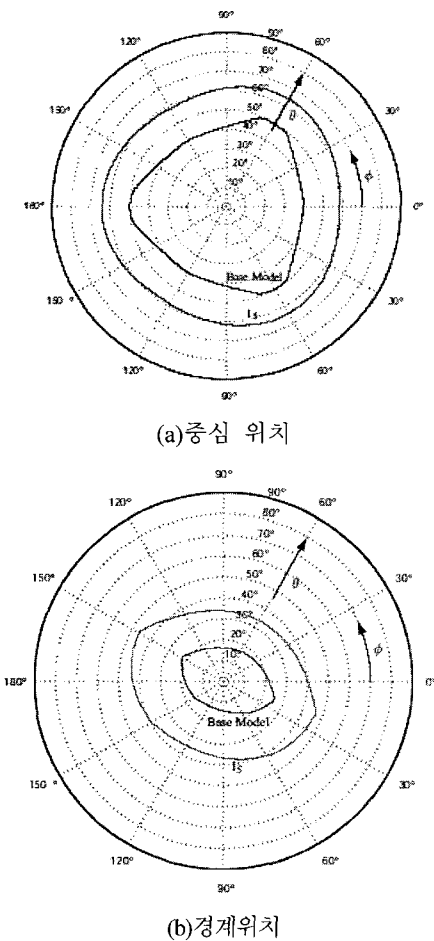
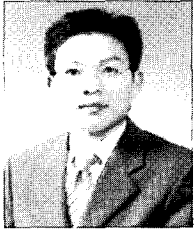


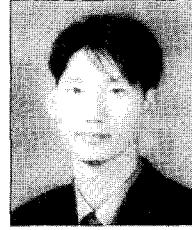
그림 10. 투영회전작업공간의 비교.  
 Fig. 10. Comparisons of the projected orientation workspaces.

- 햅틱 기구의 최적설계 및 해석,” 제어·자동화·시스템공학회지, 제 9 권, 제 1 호, 1월, pp. 63-72, 2003.
- [5] 윤정원, 류제하, “병렬구조를 이용한 새로운 6자유도 역감제시 장치의 해석 및 설계,” 제어·자동화·시스템공학회지, 제 7 권, 제 1 호, 3월, pp. 32-40, 2001.
- [6] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- [7] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithm*, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [8] C. Gosselin and J. Angeles, “A global performance index for the kinematic optimization of roboti manipulator,” *Trans. ASME J. Mech. Des.*, vol. 113, pp. 220-226, 1991.
- [9] I. A. Bonev, J. H., “A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, pp. 15-28, 2001.
- [10] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, *An introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.

**황윤권**

1966년 11월 10일생. 1993년 조선대학교 조선공학과(공학사). 2001년 일본 동북대학교 항공우주공학과 석사. 2004년 동대학원 항공우주공학과 박사. 2007년~현재 현대 모비스 기술연구소 책임연구원. 관심분야는 휴머노이드 로봇 설계

및 제어, 힘반영 장치설계/제어 및 능동형 현가장치 시스템.

**윤정원**

1973년 5월 1일생. 1998년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 2000년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2005 동 대학원 기전공학과 박사. 2005년 한국전자통신연구원 선임연구원. 2005년~현재 경상대학교 기계항공공학부 전임

강사. 관심분야는 햅틱스 및 이동인터페이스, 병렬로봇 설계/제어, 역감제시장치의 재활 훈련적용, VR기반 부품설계.