

유전 알고리즘을 이용한 스투어트 플랫폼의 최적 PID 제어 게인 선정을 위한 실험적 접근

Experimental Approach for Selecting an Optimal PID Control Gain Using Genetic Algorithm for Stewart Platform

박민규, 홍성진, 이민철
(Min Kyu Park, Sung Jin Hong, and Min Cheol Lee)

Abstract : The Stewart platform manipulator proposed by Stewart is the parallel manipulator which is composed of several independent actuators connecting the upper plate with the base plate and capable of executing a six degree of freedom(DOF) motion. The manipulator has a structure of a closed loop form, and provides better load-to-weight ratio and rigidity than a serial manipulator with an open loop form. Moreover, the manipulator has high positional accuracy because position errors of actuators are not additive. Because of these advantages, this manipulator is widely used in many engineering applications such as a driving simulator, a tool of machining center, a force/torque sensor and so on. When this Stewart platform manipulator is controlled in joint space, it is difficult to design a controller using an analytic method due to nonlinearity and unknown parameters of actuators. Therefore, a PID controller is often used because of easiness in applications. To find the PID control gain, a trial-and-error method is generally used. This method is time-consuming, and does not guarantee an optimal gain. Thus, this paper proposes a GA-PID controller which selects an optimal PID control gain using genetic algorithms. And this proposed controller is evaluated experimentally and shows acceptable performance.

Keywords : stewart platform manipulator, optimal control gain, genetic algorithm(GA), GA-PID controller

I. 서론

스튜어트에 의해 제안된 스투어트 플랫폼(Stewart platform)은 단말 효과기(end-effector)인 상판과 기저계(base frame)인 하판이 다수의 독립적인 구동기(actuator)로 연결되어 6자유도 운동을 구현할 수 있는 병렬형 매니퓰레이터(parallel manipulator)이다[1,2,3]. 직렬형 매니퓰레이터(serial manipulator)는 관절과 링크가 반복적으로 연결되는 외팔보의 구조를 가지고 있어 낮은 강성과 단말 효과기에서 상대적으로 낮은 적체하중용량을 가지게 되고, 또한 각 관절에서의 오차누적으로 인해 단말 효과기에서의 정밀도가 저하되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해, 스투어트 플랫폼은 직렬형 매니퓰레이터와 비교해서 구조적으로 폐루프(closed loop)의 형상을 가지고 있으므로 플랫폼의 부하를 다수의 구동기가 분담하게 되어 구조적인 측면에서 보다 높은 강성을 가지며, 각 조인트의 오차가 단말 효과기에 계속 누적되지 않으므로 작업 정밀도가 높은 장점이 있다. 그러나 스투어트 플랫폼은 구동기의 행정이 제한되기 때문에 운동영역에 한계가 있고, 부하조건과 공간운동조건을 만족하는 최적설계가 용이하지 않은 단점이 있다.

이러한 스투어트 플랫폼의 위치제어 방법에는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 플랫폼의 위치와 자세에

대한 운동을 직접 제어하는 방법[4,5], 두 번째로 역기구학[6]을 이용해서 원하는 6자유도 운동으로부터 링크길이를 계산하여 각각의 링크의 길이를 제어하는 방법이 있다[7,8]. 첫 번째 방법인 다변수 제어기법은 운동상태에 따른 부하변동에 능동적으로 대처할 수 있는 장점은 있지만 제어기 설계가 어렵고, 순기구학[6]을 실시간적으로 해석해야 하는 어려움이 있다. 그리고 두 번째 방법인 링크 영역에서 제어하는 단일 입출력 제어기법은 가변 부하에 능동적으로 대처하진 못하지만 순기구학을 해석하지 않으므로 비교적 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 그래서 일반적으로 높은 정도를 요하지 않는 오락용 등의 분야에서는 쉽게 적용할 수 있는 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어를 이용하는 경우가 종종 있으며, 이때의 제어 기법은 시행착오법에 의해 선정하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 경우 최적의 제어 기법을 찾기에는 실험적으로 많은 시행착오를 거쳐야 하는 어려움이 따른다. 따라서 좀더 효율적으로 제어 기법을 찾아낼 수 있는 제어 방법에 대한 연구가 필요하게 된다.

한편 유전 알고리즘은 모의 진화(simulated evolution)형의 탐색 알고리즘으로서, 최적화할 때 파라미터 그 자체를 사용하는 것이 아니라 파라미터 집합을 코딩해서 사용하고, 결정론적인 천이 규칙이 아닌 확률적인 규칙을 사용한다. 또한 단일해가 아닌 해집단을 탐색 공간으로 가지며, 미분가능성, 연속성 등과 같은 기타 최적화 알고리즘의 정보를 필요로 하지 않고 단지 적합도 함수(fitness function) 값만을 사용하기 때문에 수학적 제약이 거의 없고 시스템의 모델링이 필요없다는 점에서 기존의 최적화 알고리즘들과는 차이점을 보인다[9,10,11]. 이러한 적용의 용이성과

접수 일자 : 1999. 3. 9., 수정완료 : 1999. 10. 4

박민규 · 부산대학교 대학원 지능기계공학과

홍성진 · 부산대학교 대학원 기계설계공학과

이민철 · 부산대학교 기계공학부

※ 본 연구는 한국과학재단(특정기초연구과제·97-02-00-10-01-5)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

강인성 때문에 다양한 최적화 문제에 유전 알고리즘이 이용되고 있다. 최근 연구동향으로서 퍼지 제어에 유전 알고리즘을 도입해서 퍼지의 멤버십 함수를 최적화 하는 연구 [12], 동적 모델링이 어려운 비선형 시스템의 경우에 유전 알고리즘을 적용한 최적 제어에 관한 연구 [13], 비선형 연속 공정의 최적제어 문제에 유전 알고리즘을 적용해서 최적화 하는 연구 [14], 시뮬 시스템에 유전 알고리즘을 이용해서 적응 PID 제어기를 설계하는 연구 [15] 등이 진행 중이다.

본 연구에서는 스튜어트 플랫폼에 대한 링크 영역에서의 위치제어에 있어서 비교적 적용이 용이한 PID 제어기를 적용할 때의 문제가 되어온 제어 계인의 선정을 위해 유전 알고리즘을 이용해서 운동영역의 위치와 자세에 대한 추종오차가 최소가 되도록 제어 계인을 실험적으로 선정하는 방법을 제안하고 그 성능을 평가하고자 한다. 이를 위해 현재 운전 시뮬레이터의 운동제현기로 사용되고 있는 스튜어트 플랫폼을 이용하여 6개의 각 구동기를 제어하기 위한 제어기를 포함하는 제어 시스템을 먼저 구성하였다. 구성된 제어 시스템을 이용하여 적절한 PID 제어 계인을 선정하기 위해 유전 알고리즘을 적용할 때 스튜어트 플랫폼의 운동영역에서의 오차를 최소화하는 적합도 함수를 이용하여 PID 제어 계인을 선정하였다. 또한 선정된 제어 계인을 이용하여 다양한 운동제어에 대한 PID 제어를 수행하여 추종성능을 평가하였다.

II. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 둔 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로서, 모든 생물은 주어진 다양한 환경 속에 적응함으로써 살아남는다는 다윈의 적자생존(survival of the fittest)의 이론을 기본 개념으로 한다 [9,10]. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조 즉, 이진 스트링(binary string)으로 표현한 다음, 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 즉, 유전 알고리즘에서는 생물학적 유전인자인 염색체(chromosome)에 해당하는 문자열을 가지고 생물유전을 모방한 연산자인 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐 다음세대의 새로운 자손(offspring)을 인공적으로 만들어 내고, 이를 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색한다. 전체 유전 알고리즘의 동작원리는 그림 1과 같다. 즉 초기세대를 생성하고 이진 스트링으로 코딩한다. 그리고 교배, 돌연변이 과정을 확률적으로 수행하고 각각의 개체에 대한 적합도를 계산하고 적합도에 따라 다음 세대에 선택될 확률을 부여하는 재생산 과정을 수행함으로써 새로운 세대를 생성한다. 이러한 과정을 반복하면서 전역적으로 최적의 해를 탐색한다.

유전 알고리즘을 이용해서 최적화 문제를 풀고자 할 때 최적화 대상 변수, 즉 개체를 이진 스트링으로 표현한다. 이 코딩 방법은 최적화 문제의 변수가 이진치를 가질 경우에는 자연스러운 표현법이다. 하지만 만약 최적화 문제의

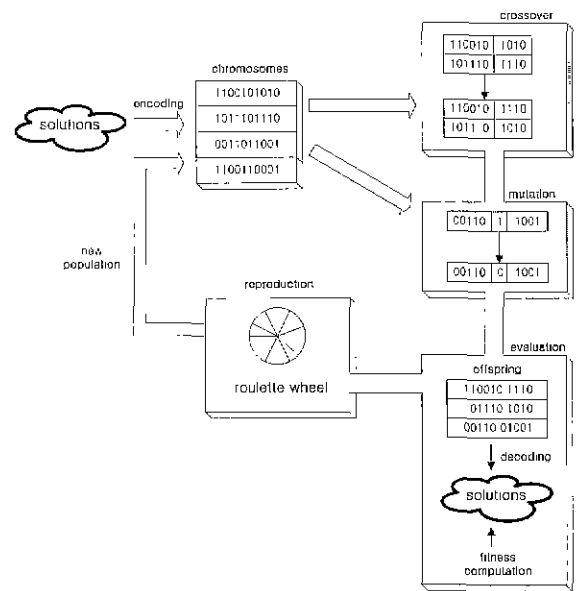


그림 1. 유전 알고리즘의 동작원리.

Fig. 1. Principle of a genetic algorithm.

변수가 실수값을 가질 경우에는 이진 스트링으로 표현된 변수를 실수 형태로 디코딩하여 사용한다 [10,11]. 이때 이진 스트링에 대한 실수값의 최대 및 최소값의 변경으로 변수값의 범위를 조절할 수도 있고 스트링 길이를 바꿈으로써 사용자가 원하는 변수의 정밀도도 정할 수 있다. 변수가 여러 개일 경우 이진 스트링으로 코딩된 변수들을 직렬로 연결함으로써 염색체(chromosome)라 불리는 하나의 개체(individual)를 형성하게 된다. 유전 알고리즘은 이렇게 생성된 개체들을 모아 하나의 집단을 구성하여 진화를 시킴으로써 한 점씩 탐색을 진행하는 고전적인 알고리즘과는 달리 여러 점을 동시에 탐색할 수 있는 능력을 가지게 된다.

유전 알고리즘의 연산자는 생물 유전학을 기본 이론으로 하여 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등으로 구성되어 전역적으로 최적의 해를 탐색할 수 있게 한다.

재생산 연산자는 각각의 개체가 가지는 적합도에 따라 그 개체를 복제하는 과정이며 이 때 적합도 함수는 사용자가 최대화하기를 원하는 어떠한 형태의 함수도 가능하다. 이 과정은 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높음을 의미한다. 이를 구현하기 위해서는 주로 biased roulette wheel 선택방법이 이용되며 수렴성을 보장하기 위해 최대 적합도를 가지는 개체에 대한 복제우선권(elitist mechanism)을 병행하기도 한다 [9].

이러한 재생산 과정은 탐색 방향을 적합도가 높은 방향으로 향하게는 하지만 새로운 개체를 생성하지는 못한다. 자연계에서 자손은 부모 세대로부터 유전자를 이어받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전 알고리즘에서 이 과정을 모방한 것이 교배 과정이다. 교배과정에서의 교배점과 교배율은 확률적인 과정에 의해 구함에도 불구하고 재생산과 함께 쓰여 개체간의 정보를 교환하고 스

트링의 좋은 부분을 결합하는 효과적인 수단이 된다.

돌연변이 과정은 현재 집단에 존재하지 않는 새로운 정보를 제공해 준다. 이는 아주 낮은 돌연변이율에 의해 스트링의 한 비트를 0에서 1 혹은 1에서 0으로 우연히 바꿈으로써 구현된다. 이 과정에 의해 탐색의 방향이 지역적 극값으로 향할 경우 여기서 벗어나도록 한다.

한편, 적합도 함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이다. 이러한 적합도를 이용해서 다음 세대에서 선택되어질 확률이 결정된다. 즉 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에서 선택되어질 확률이 높아지며 적합도가 낮을수록 다음 세대에서 선택되어질 확률이 낮아진다. 일반적으로 적합도 함수를 선정하는 방법은 각 개체를 이용해서 최적화 하고자 하는 대상에 적용하고 그 개체에 대한 결과와 원하는 기준 입력에 대한 차를 이용해서 적합도 함수를 선정한다[9].

이상과 같은 유전 알고리즘에 의한 탐색에 있어서 기존의 탐색 결과를 최대한 이용하려는 경향과 새로운 영역을 탐색하고자 하는 경향의 적절한 조합이 중요하다[11] 이 두가지 경향을 적절히 조합할 수 있는 유전 알고리즘의 파라미터로서는 개체군의 크기, 교배율, 돌연변이율 등이 있다. 일반적으로 교배율과 돌연변이율의 값이 크면 새로운 영역을 탐색하고자 하는 경향이 커져 진화의 초기에 적합도가 높은 탐색공간을 찾는 데는 유리하나 탐색 결과를 이용하려는 경향이 작아져 최적해로 수렴해가는데 있어서 수렴속도를 저해한다. 반면에 교배율과 돌연변이율이 작을 때는 이와 반대의 특성을 나타낸다. 또한 개체군의 크기가 작으면 시간을 절약할 수 있으나 개체간의 다양한 정보교환이 이루어지지 않아 최적해를 구하기 전에 수렴할 위험성을 내포한다. 반면에 개체군의 크기가 크면 최적해에 도달할 확률은 높으나 많은 기억 용량과 계산시간을 필요로 하는 단점이 있다. 따라서 주어진 대상물에 대해 적절한 유전 알고리즘의 파라미터 선정이 필요하다.

III. 유전 알고리즘을 이용한 최적 PID 게인 선정

스튜어트 플랫폼을 링크영역에서 제어할 경우, 플랫폼의 구동기로 사용된 유압 실린더의 비선형 성분 및 미지의 변수 등에 의해 PID 제어기 설계가 어려워 실제 실험에 적용할 때 일반적으로 시행착오법을 이용하여 PID 제어 게인을 선정하고 있다. 이로 인해 최적의 제어 게인을 찾는 것이 어려울 뿐만 아니라 실험적으로도 많은 시행착오를 거쳐야 하는 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 산업현장에서 많이 이용되고 있는 PID 제어기를 이용한 스튜어트 플랫폼의 위치제어에 있어서 전역적이고 병렬적인 탐색 알고리즘인 유전 알고리즘을 적용하여 최적의 제어 게인을 실험적으로 선정하고자 한다.

1. PID 제어기 설계

스튜어트 플랫폼의 위치제어는 원하는 6자유도 운동으로부터 역기구학을 이용하여 각 작동기의 길이를 계산하고 주어진 각각의 작동기 길이를 추종 제어하는 방법으로 수행된다. 여기에서 기준 좌표계는 스튜어트 플랫폼 하판의 중심에 고정되어 있으며, 상대 좌표계는 상판의 중심에

설정하였다[6]. 본 연구에서는 스튜어트 플랫폼의 위치제어를 위한 제어기로서 제어가 용이하고 알고리즘 구현이 용이하면서도 좋은 제어 성능을 얻을 수 있는 PID 제어기를 사용하였다.

PID 제어기에서 적분제어요소는 정상상태응답을 개선시키는 역할을 한다. 그리고 미분제어요소는 오차신호의 크기가 커지기 전에 오차신호의 변화율에 비례하는 제어 입력량을 계산하여 제어하므로 시스템의 안정도를 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 미분제어요소는 정상상태응답에 직접적으로 영향을 주지는 못하지만, 시스템에 감쇠효과를 주기 때문에 시스템 게인을 증가시킬 수 있게 되어 그 결과 정상상태응답 특성을 향상시키는 효과도 있다. 컴퓨터 상에서 구현할 수 있는 PID 디지털 제어기의 제어입력 $u(k)$ 는 (1)과 같다[16].

$$u(k) = u(k-1) + (K_p + T_s \cdot K_i + \frac{K_d}{T_s})e_a(k) - (K_p + 2\frac{K_d}{T_s})e_a(k-1) + \frac{K_d}{T_s}e_a(k-2) \quad (1)$$

여기서, $e_a(k)$ 는 링크 영역에서의 구동기 오차신호, T_s 는 샘플링 시간, 그리고 K_p, K_i, K_d 는 각각 비례게인, 적분게인, 미분게인이다.

2. PID 최적 게인 선정을 위한 유전 알고리즘의 적용

본 연구에서는 PID 제어기에서의 비례, 적분, 미분 게인을 시행착오적으로 구하지 않고 유전 알고리즘을 이용하여 스튜어트 플랫폼의 운동영역에서 오차가 최소화 되는 전역적인 최적의 제어 게인을 선정하고자 한다. 이를 위한 최적화 과정은 그림 2와 같다. 여기서 최적 제어 게인의 의미는 추종 오차를 최소화 시키도록 선정된 게인을 의미한다.

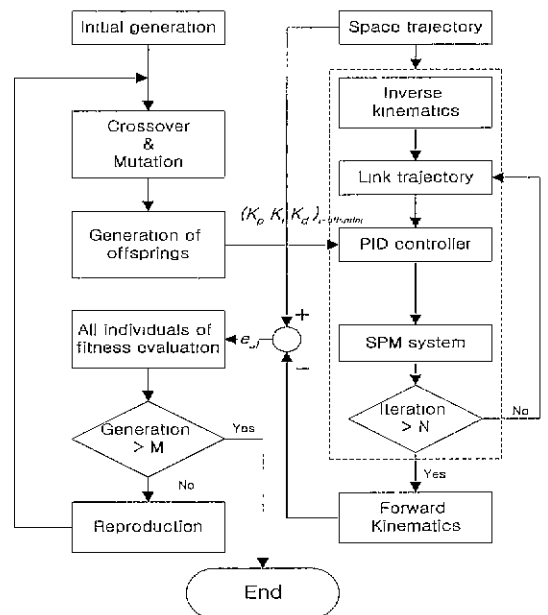


그림 2. 유전 알고리즘을 이용한 최적 제어 게인 선정 흐름도.

Fig. 2. Flowchart for selection of optimal gain by GA.

먼저 PID 제어 계인으로 구성된 현재 세대의 각 개체들에 대해 교배와 돌연변이 과정을 거쳐 자손들을 생성한다. 생성된 자손들은 PID 제어기의 계인으로 입력이 되어 주어진 구동기의 기준궤적에 대한 제어 실험을 수행한다. 이때의 구동기의 기준궤적은 공간 좌표계상의 운동영역에서 생성한 스튜어트 플랫폼의 위치와 자세에 관한 기준궤적에서 역기구학[6]을 해석해서 생성하였다. 제어 실험을 수행하면 구동기에 부착된 선형변위측정기에서 구동기의 길이값을 측정하고 이 길이값을 다시 뉴턴 램슨법에 의한 순기구학 해석[6]에 의해 운동영역에서의 추종궤적을 생성한다. 그리고 이 추종궤적을 운동영역에서의 기준궤적과 비교해서 각 자손들에 대한 적합도가 계산된다. 이때 적합도 함수는 운동영역에서의 오차를 최소화하는 제어 계인을 탐색하는 것이 목적이므로 운동영역의 오차의 제곱에 관계되는 식으로 설정하였다. 마지막으로 재생산과정에 의해 적합도의 크기가 큰 자손일수록 다음세대에 선택될 확률을 높게 한다. 이러한 교배, 돌연변이, 재생산, 평가 과정을 최대세대수까지 반복하여 수행함으로써 궤적 추종 오차를 최소화하는 최적의 PID 제어 계인을 선정하고자 한다. 그림 2에서의 (K_p, K_i, K_d) -offspring는 한 세대내의 각각의 자손들(j -offspring)인 PID 제어 계인, e_s 는 스튜어트 플랫폼의 위치와 자세에 대한 오차, M 은 최대세대수, N 은 최대제어루프이다.

3. 적합도 함수 및 유전 알고리즘 파라미터 선정

유전 알고리즘에서는 적합도를 이용하여 최적화의 상태를 평가하게 되는데, 본 연구에서는 주어진 운동영역에 대한 궤적 추종 정도(accuracy)를 최적화의 대상으로 삼았다. 즉, 유전 알고리즘을 거쳐서 출력되는 각 제어 계인들을 스튜어트 플랫폼의 PID 제어에 적용하고, 이 때 발생하는 운동영역에서의 기준 입력에 대한 오차를 구하고 이를 제공하여 초기 시간부터 누적시킨 것을 오차 함수로 설정하였으며, 오차가 줄어들며 따라서 최대의 적합도가 나올 수 있도록 적합도 함수를 선정하였다. 이와 같이 정의된 오차 함수와 적합도 함수는 (2), (3)과 같다.

$$e_{sum} = \sum_{i=0}^M \left(\sum_{j=1}^N e_{s_j}^2 \right) \tag{2}$$

여기서, e_s 는 운동영역에서의 오차이다

$$f_{GA} = \frac{1}{\text{Exp}(\omega \cdot e_{sum})} \tag{3}$$

여기서, e_{sum} 은 오차함수를 제공해서 합한 값, f_{GA} 는 적합도 함수의 값, 그리고 ω 는 가중치를 나타낸다. 여기서 가중치는 적합도를 높이기 위해서 사용한다. 그리고 유전 알고리즘의 파라미터는 실험시 작동유의 온도상승 및 실험 시간을 고려하여 최대 세대수는 20회, 한 세대에 생성시키는 최대 개체수는 10개로 하였다. 스트링의 구조는 그림 3과 같이 비례계인(K_p), 적분계인(K_i), 미분계인(K_d) 각각에 10비트씩 할당하여 한 개체의 최대 스트링수를 30비트로 설정하였고, 시스템이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 실험적으로 각 계인의 최소 및 최대값을 설정하였다.

그리고 한 세대의 개체수가 10개인 점을 고려하여 교배율은 비교적 높은 값인 0.8로 설정하였으며, 돌연변이율은 일반적으로 최대개체수의 역수를 취하는 방법을 사용해서 0.1로 설정하였다[9]. 그리고 재생산과정은 각 세대의 최대 적합도를 가지는 개체에 대해서 다음세대를 구성할 때 복제우선권(elitist mechanism)을 주었으며 선택방법은 biased roulette wheel 방법을 사용하였다. 이와 같이 유전 알고리즘을 이용해서 임의로 생성한 궤적에 대한 PID 제어를 수행함으로써, 주어진 상황에서 최적의 PID 제어 계인을 전역적으로 탐색할 수 있도록 한다.

IV. 최적 제어 계인 선정 실험 및 성능평가

1. 스튜어트 플랫폼 제어 시스템

본 연구에서는 차량 주행시의 거동을 모사할 목적으로 6개의 유압 실린더를 장착하여 공간상의 6자유도 운동을 구현하기 위한 운동재현기로서 개발된 스튜어트 플랫폼을 이용하여 연구를 수행하였다[17]. 그림 4는 본 연구에서 사용된 스튜어트 플랫폼이다. 스튜어트 플랫폼은 하판(basc plate), 상판(upper plate), 그리고 6개의 구동기로 구성되어 있다. 하판은 바닥에 고정되어 있고, 상판은 직선 운동만을 수행하는 6개의 유압 구동기에 의해서 움직이게 되어 있으며, 6개의 구동기와 하판의 연결부 및 상판의 연결부는 유니버설 조인트로 연결되어 6자유도 운동을 수행할 수 있다. 그리고 각 구동기에는 직선 변위를 검출하여 제어를 위한 피드백 신호로 사용할 수 있도록 선형 변위 검출기인 LDT(linear differential transformer)가 장착되어 있다. 본 연구에서 사용된 스튜어트 플랫폼의 기구학적 사양은 표 1과 같고 운동사양은 표 2와 같다[17]. 여기서 운동사양은 3자유도 가속도 센서 및 LDT를 이용해서 실험적으로 측정 한 결과이다.

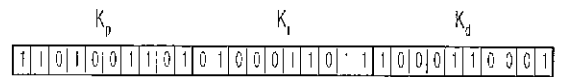


그림 3 스트링의 구조.
Fig. 3. Structure of string.

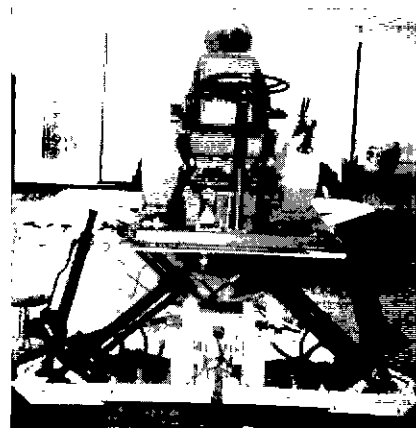


그림 4. 스튜어트 플랫폼
Fig. 4. Stewart platform.

표 1. 스튜어트 플랫폼의 기구학적 사양.

Table 1. Kinematic specification of Stewart platform

Item	Specification
Radius of base plate	930 mm
Radius of upper plate	780 mm
Height of neutral position	1.224 m
Joint of base plate	9.24°
Joint of upper plate	11°
Maximum payload	750 kg

표 2. 스튜어트 플랫폼의 운동 한계.

Table 2. Motion limit of Stewart platform

Spec. Motion	Excursion results	Velocity results	Acceleration results
Surge	-470~+580 mm	602.5 mm/s	3.3 g
Sway	+480 mm	614.9 mm/s	3.5 g
Heave	±320 mm	595.5 mm/s	4.6 g
Roll	±26 deg	43.2 deg/s	1015 deg/s ²
Pitch	+23 deg	46.7 deg/s	990 deg/s ²
Yaw	±38 deg	47.2 deg/s	1135 deg/s ²

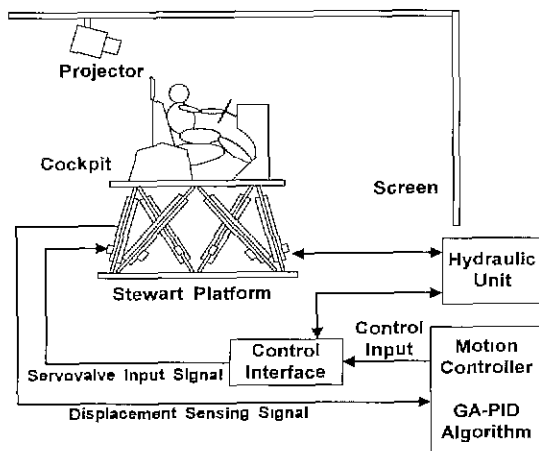


그림 5. 운동제현기의 블록 선도.

Fig. 5. Block diagram of motion bed system.

그림 5는 본 연구를 위해 구성된 스튜어트 플랫폼 제어 시스템을 나타낸다. 스튜어트 플랫폼의 위치 제어를 위한 PID 제어기는 컴퓨터(Pentium MMX-166 MHz)상에서 소프트웨어적으로 구현하였고, 제어를 위한 컴퓨터와 스튜어트 플랫폼간의 데이터 교환을 위해서 ADCLONE사의 ACL-812PG 인터페이스 카드를 이용하였다. ACL-812PG

인터페이스 카드는 기본적으로 IBM PC의 확장슬롯을 이용하여 사용할 수 있는 카드로 16 채널(channel)의 디지털 입/출력과 16 채널의 아날로그 입력이 가능한 A/D 변환기, 2 채널의 D/A 변환기, 그리고 3개의 독립된 8253 카운터를 내장하고 있는 카드이다. 하지만 6개의 구동기가 장착된 스튜어트 플랫폼을 제어하기 위해서는 6 채널의 D/A 변환기가 필요하므로 본 연구에서는 ACL-812PG 인터페이스 카드를 사용하여 6자유도 스튜어트 플랫폼의 위치 제어가 가능하도록 하였다.

스튜어트 플랫폼의 위치 제어는 다음과 같은 방법으로 수행된다. 먼저 스튜어트 플랫폼의 임의의 6자유도 운동을 생성하고, 이를 역기구학 해석을 통해 각 구동기의 길이값으로 변환하여 제어를 위한 기준궤적을 구성한다. 그리고 스튜어트 플랫폼의 각 구동기에 장착된 선형변위측정기에서는 구동기의 움직임에 따라 0~+10V 범위의 전압을 출력하는데, 이를 ACL-812PG 인터페이스 카드에 내장된 12비트의 A/D 변환기에서 검출하여 실제 구동기의 길이를 구하고, 이를 이용하여 뉴턴 랩슨 법에 의한 순기구학 해석을 수행하여 상판의 위치와 자세를 구한 후 주어진 상판의 기준궤적과의 오차를 계산하여 PID 제어기에 입력하게 된다. PID 제어기를 통해 얻어진 제어입력값은 다시 12비트의 이진 코드로 변환되고, 이것은 D/A 변환기를 거쳐서 -10V~+10V 범위의 전압으로 출력되어 스튜어트 플랫폼을 제어하게 된다.

2. 최적 제어 개인 선정 실험

구성한 시스템과 도출한 알고리즘을 바탕으로 6자유도 스튜어트 플랫폼의 위치제어를 위한 PID 제어기의 최적 제어 개인을 선정한다. 본 연구에서 사용되는 스튜어트 플랫폼의 상판에는 운전 시뮬레이터의 운동제현기로 활용하기 위해 약 300kg의 무게를 가지는 운전석을 탑재하고 있다.

2.1 기준 궤적 생성

본 연구에서 사용된 스튜어트 플랫폼은 운전 시뮬레이터의 운동제현기를 구성하는 부분이므로 운전자의 조작행위에 따른 차량의 거동에 대한 추종도가 중요한 문제로 부각된다. 그러므로 본 실험에서는 차량의 거동시 발생할 수 있는 임의의 6자유도 운동 중에서 가장 흔히 발생하는 가·감속 및 차량의 롤(roll) 운동을 고려하기 위하여 x축 방향의 운동만을 기준 궤적으로 구성하였다. 그리고 이를 역기구학 해석을 통해 작동기의 길이로 변환하여 그 길이

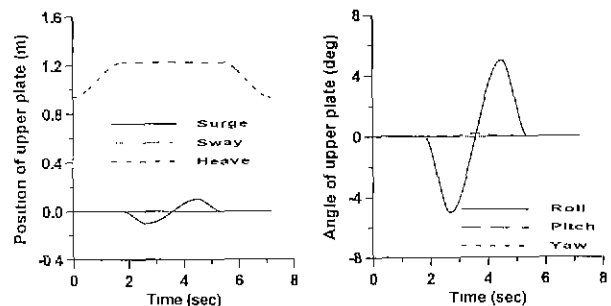


그림 6. 병진 운동 및 회전 운동에 대한 기준 궤적.

Fig. 6. Reference trajectory of translation and rotation motion.

값을 제어 입력으로 사용하였다. 본 연구에서 생성한 6자유도 운동은 그림 6과 같다. 초기위치에서 중립위치로 이동하여 먼저 x방향으로 -0.1 m만큼의 병진운동과 x축을 회전축으로 해서 -5° 만큼의 회전운동을 동시에 실행한 후, 다시 x방향으로 +0.1 m만큼의 병진운동과 x축을 회전축으로 +5° 만큼의 회전운동을 실행하고 중립위치로 돌아와서 초기위치로 귀환하는 운동이다. 샘플링 시간은 서보 앰프의 한계 주파수가 80Hz인 점을 고려해서 6 msec로 설정했으며, 궤적 수행 시간은 7.2 sec이다

2.2 최적 제어 게인 선정 실험

실제 스텐더트 플랫폼에 대해 유전 알고리즘을 적용하여 최적의 PID 제어 게인을 선정하는 경우에는 시뮬레이션과는 달리 스텐더트 플랫폼이 안정하게 작동할 수 있는 제어 게인의 범위를 측정하여 한계값을 설정할 필요가 있다. 진동이 심하게 발생하지 않는 범위를 시행착오적으로 구하였으며 이때 얻어진 각 제어 게인의 한계값은 비례 게인을 10~35, 적분 게인을 0~1, 미분 게인을 0~0.5로 정하였다. 이렇게 정해진 한계값 이내에서, 유전 알고리즘을 적용하여 최대 세대수까지 진화를 거듭하며 얻은 PID 제어 게인을 주어진 범위 내의 값으로 대응시킨 후 시스템에 적용하였으며, 그 결과 세대가 증가함에 따른 최대적합도와 평균적합도는 그림 7과 같이 구해졌다. 초기세대에서 세대가 증가할수록 적합도가 증가함을 알 수 있고 6, 10, 17세대의 평균적합도 값이 감소하는 것은 이 세대에서 돌연변이가 생겨서 좋지 않은 개체를 생성했기 때문이다. 그림 8은 초기세대에서 최대적합도를 가지는 제어 게인을 이용해서 실험했을 때의 병진운동에 대한 오차와 회전운동에 대한 오차를 나타내고 그림 9는 20세대에서 구해진 최적 제어 게인에 대한 병진운동에 대한 오차와 회전운동에 대한 오차를 나타낸다. 그림에서와 같이 세대가 증가하면서 적합도가 높아져 오차가 현저하게 줄어들 수 있다. 초기 세대의 최대적합도 즉 0.578일 때의 제어 게인을 스텐더트 플랫폼에 적용하였을 때는 비교적 큰 진동을 동반하면서 최대 오차가 약 7 mm, 0.24° 였다. 20세대에서 구해진 최대적합도 즉 0.861일 때의 게인값 즉, 비례 게인은 26.564, 적분 게인은 0.867, 그리고 미분 게인은 0.321을 이용했을 때 최대 오차는 약 3.5 mm, 0.14° 로서 절반 정도의 오차 감소율을 보이고 있으며, x축의 최대변위에 대해서는 3.5% 정도의 오차를 가지고 있어, 이는 1인승 오차용으로 사용할 경우에는 크게 문제가 되지 않는 것으로 판단된다. 그림 10과 11은 각각 1세대와 20세대 일때의 구동기의 오차이다. 운동영역에서의 오차와 마찬가지로 오차가 크게 줄어들 수 있다. 그러나 승객이 여럿이 탑승하게 될 경우 스텐더트 플랫폼 상판의 자세에 따라서 각 구동기에 가해지는 부하의 변동 등으로 인하여 단일 입력력 시스템을 취급하는 고전적인 PID 제어기로는 더 이상 오차를 줄일 수 없을 것으로 판단된다.

3. 제어 성능 평가

2절에서 선정된 PID 제어 게인들은 스텐더트 플랫폼이 제현할 수 있는 임의의 6자유도 운동 중에서 x축 방향의 운동만으로 생성된 기준 궤적을 이용하여 선정되었으므로,

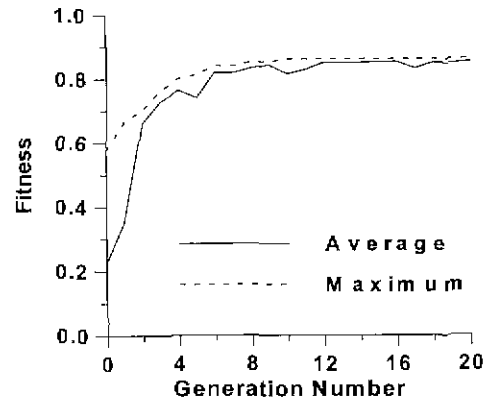


그림 7. 최대 및 평균적합도
Fig. 7 Maximum, and average fitness.

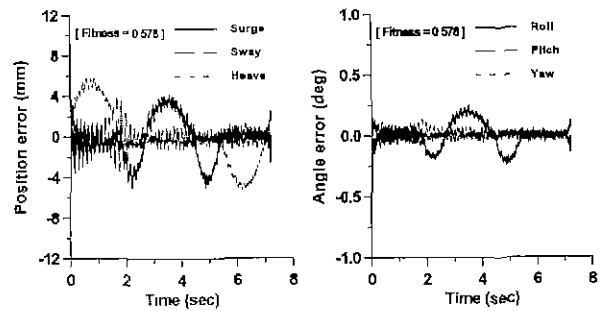


그림 8. 병진 및 회전 운동에 대한 오차 (1세대).
Fig 8. Translation and rotation error (1st-generation).

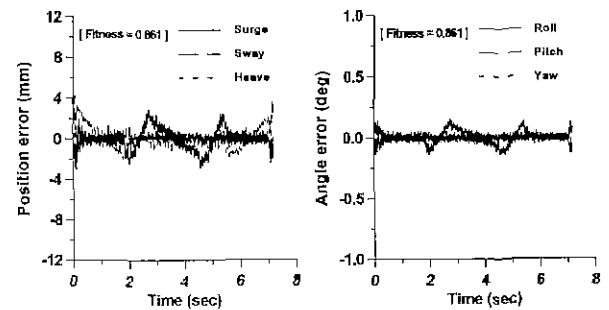


그림 9. 병진 및 회전 운동에 대한 오차 (20세대).
Fig. 9. Translation and rotation error (20th-generation)

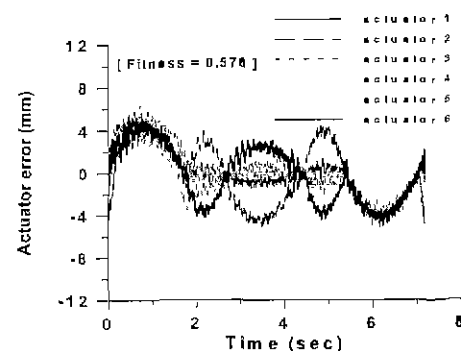


그림 10. 구동기 오차 (1세대).
Fig. 10. Error of actuators(1st-generation).

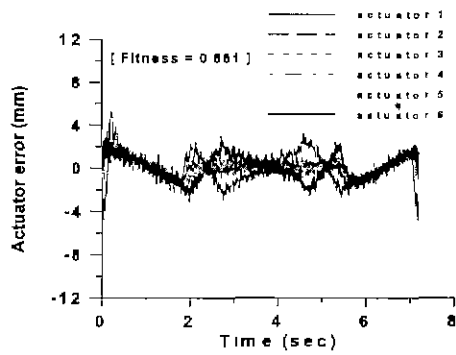


그림 11. 구동기 오차 (20세대).
Fig. 11. Error of actuators(20th-generation)

스튜어트 플랫폼이 x축 이외의 다른 방향으로 거동할 경우 보다 더 큰 오차가 발생할 수도 있다 이에 선정된 최적의 PID 제어 게인이 기준 궤적의 변화나 상판에서의 부하 변동에 대해 어느 정도의 제어 성능을 가지는지 실험을 통해 평가해 보았다.

그림 12는 y방향에 대해 복합운동을 수행했을 때의 병진운동 오차와 회전운동 오차를 나타내며 그림 13은 z방향에 대해서 동일한 복합운동을 수행했을 때의 병진운동 오차와 회전운동 오차를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 다른 궤적을 적용하였음에도 불구하고 각 구동기의 오차는 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 각 축 방향의 복합운동이 스튜어트 플랫폼의 중립위치를 중심으로 각 구동기의 변위를 크게 변화시키지 않기 때문에, 서로 다른 궤적에 대해서 모두 비슷한 양상의 오차를 나타내었다. 그러나 z축 방향의 병진운동이 발생할 때는 다른 방향의 운동에 비해 부하의 영향을 많이 받으므로 더 큰 오차가 발생하였다.

V. 결론

본 논문에서는 직렬형 매니플레이터보다 높은 강성도와 작업 정밀도를 갖는 6자유도 병렬형 매니플레이터인 스튜어트 플랫폼의 링크영역에서의 PID 위치제어의 적용에 있어 최적 제어 게인을 선정하기 위해 시행착오적으로 구하지 않고 유전 알고리즘의 적용에 의해 비교적 용이하게 구할 수 있는 방안을 제시하였다. 이때 운동영역에서 오차가 최소화될 수 있게 유전 알고리즘을 이용해서 최적의 제어 게인을 선정하도록 하였다

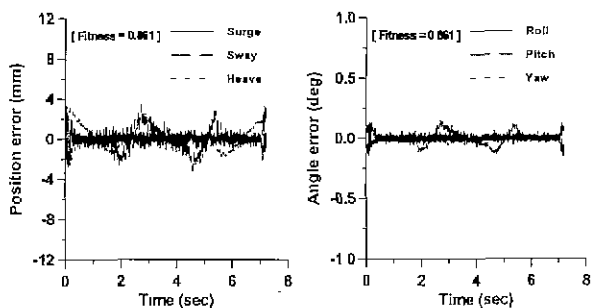


그림 12. 병진 및 회전 운동에 대한 오차 (y방향)
Fig. 12 Translation and rotation error for trajectory of y-direction.

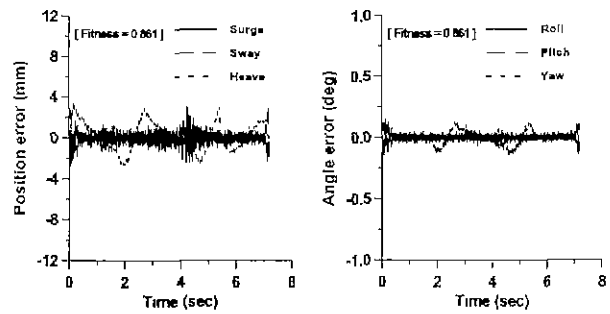


그림 13. 병진 및 회전 운동에 대한 오차 (z방향).
Fig. 13. Translation and rotation error for trajectory of z-direction.

실제 시스템에서의 적용을 위해 운전 시뮬레이터의 운동재현기로 사용되고 있는 스튜어트 플랫폼을 이용하여 6개의 각 구동기를 제어하기 위한 제어기를 포함하는 제어 시스템을 구축하였고, 스튜어트 플랫폼의 제어를 위한 PID 제어기의 제어 게인을 유전 알고리즘을 적용하여 20세대까지 수행한 결과 각 세대별 최대적합도는 10세대에서부터 수렴함으로써 최적의 제어 게인을 실험적으로 선정할 수 있었다. 이 때의 제어 게인을 선정하여 PID 제어를 수행한 결과 초기 세대에서의 제어 게인을 적용했을 때의 오차보다 약 50% 정도 줄어들어 주어진 궤적에 대해서 운동영역에서의 추종 오차가 최대 약 3.5 mm, 0.14° 이내로 비교적 양호하였다. 그러나 오차를 더욱 감소시키기 위해서는 고전적인 제어방식인 PID 제어기로는 한계가 있었다. 그러므로 보다 정밀한 제어를 위해서는 부하변동과 예기치 못한 외란에 더욱 강인한 제어 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] D. Stewart, "A Platform with six degree of freedom," *Proc. of the Institute of Mechanical Engineering*, vol. 180, pp. 317-386, 1966.
- [2] E F Fichter, "A stewart platform-based manipulator general theory and practical construction," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 5, no. 2, pp 157-182, 1986.
- [3] R. Wade Allen, Theodore J. Rosenthal, "Meeting important cuing requirements with modest, real-time, interactive driving simulations," '94 SAE Paper, 949228, 1994.
- [4] 정규홍, 박철규, 이교일, "스튜어트 플랫폼 방식 운동재현기의 다변수 건설제어에 관한 연구," '92 한국자동제어학술회의논문집, pp. 736-741, 1992
- [5] 박철규, 박종범, 심영보, 이교일, "스튜어트 플랫폼의 다변수 건설제어," '97 한국자동제어학술회의논문집, pp. 1017-1020, 1997.
- [6] 박민규, 이민철, 고석조, "유전 알고리즘을 이용한 6 자유도 병렬형 매니플레이터의 순기구학 해석," '97 한국자동제어학술대회 논문집, pp. 1624-1627, 1997.
- [7] S H. Chae, C W Chung, H. S. Yang, Y. J.

- Choi, S. J. Lee, "Adaptive control of a 6-dof stewart platform based machine tool," '98 *Proc. of ICMVC*, vol. 2, pp. 461-466, 1998.
- [8] C. W. Lee, N. I. Kim, "Model-based sliding mode tracking control of 6-6 stewart platform manipulator," '97 *Proc. of the 12th KACC*, pp. 772-775, 1997.
- [9] David E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization & machine learning," Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [10] Mitsuo Gen, Runwei Cheng, "Genetic algorithms and engineering design," A Wiley-Interscience Publication, 1997.
- [11] 임영도, 이상부, "퍼지·신경망·유전진화," 도서출판 영과일, 1997
- [12] A. Homaifar, Ed McCormick, "Simultaneous design of membership functions and rules sets for fuzzy controllers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Fuzzy System*, vol. 3, no. 2, pp 129-138, 1995.
- [13] K. Krishnakumar, "Control system optimization using genetic algorithms," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 15, pp. 735-740, 1992.
- [14] 이무호, 한종훈, 장근수, "유전 알고리즘을 이용한 연속 공정의 최적 제어." 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제3권, 제1호, pp. 46-51, 1997.
- [15] P. J. van Rensburg, I. S. Shaw, J. D. van Wyk, "Adaptive PID-control using a Genetic algorithm," '98 *Proc. of 2nd ICKBIES*, pp 133-138, 1998.
- [16] 김종식, 한명철, 이민철, 최재원, "제어시스템설계," 청문각, 1998.
- [17] 박민규, 이민철, 손권, 유완석, 한명철, 이장명, "차량 주행 감각 재현을 위한 운전 시뮬레이터 개발에 관한 연구(I)," 한국정밀공학회, 제16권, 제6호, pp. 90~99, 1999.



박민규

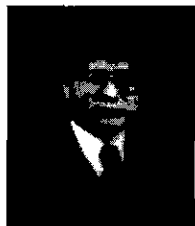
1996년 영남대학교 기계공학부 졸업.
부산대학교 기계공학과 대학원 석사
(1998). 1996년 ~ 현재 부산대학교 대
학원 지능기계공학과 박사과정 재학
중. 주관심분야는 유전알고리즘, 시스
템 규명, 건설 제어, 차량 시뮬레이터.



홍성진

1997년 부산대학교 기계공학부 졸업.
동대학원 석사(1999), 1999년 ~ 현재
부산대학교 대학원 기계설계공학과
박사과정 재학 중. 주관심분야는 지능
제어, 병렬형 매니플레이터, 차량 시뮬

레이터, 감성공학



이민철

1983년 부산대학교 기계공학과 졸업.
쓰쿠바 대학교 대학원 석사(1988), 동
대학 박사(1991). 1991년~현재 부산
대학교 기계공학부 부교수. 주관심분
야는 시스템 규명, 로봇제어, 메카트로
닉스, DSP를 이용한 디지털 제어기 구현.

닉스, DSP를 이용한 디지털 제어기 구현.