

퍼지이론 및 진화연산을 이용한 원격 제어 이동 로봇의 고장 극복*

Fault Tolerant Control of a Tele-operated Mobile Robot by Using Fuzzy Logic Theory and Evolutionary Computation*

정일권, 이주장

전기 및 전자공학과, 한국과학기술원

대전시 유성구 구성동 373-1

E-mail: jik@odyssey.kaist.ac.kr Fax: 042-869-3410

Abstract: This paper deals with a fault diagnosis and fault-tolerant control for a tele-operated mobile robot in hazardous environments by using fuzzy inference and evolutionary computation techniques. In order to do so, a fuzzy fault diagnosis system is developed using an evolutionary technique. The validity and efficiency of the proposed method of developing a fuzzy fault diagnosis system is shown through simulation examples.

1. 서론

원자력 발전소와 같은 위험한 환경에서의 작업을 수행함에 있어 방사선 노출로부터 작업 종사자를 보호하기 위하여 여러 가지 자동화 장치들이 활용되고 있으며 이러한 장치들을 통하여 작업 속도 향상 및 작업의 질을 높일 필요성이 대두되고 있다. 보다 원활히 작업을 수행하고 또한 주위 환경 변화에 대처하여 작업의 안정성을 확보하기 위해서는 작업 현장에서 얻어지는 정보를 이용하여 작업자가 원격 제어를 행하는 형태가 바람직하다[6].

원격 제어 이동 로봇의 경우 구동부 자체는 방사선 등의 노출에 대해서 충분히 보호되도록 설계할 수 있으나 카메라나 구동을 위한 전자 회로부 및 센서 등은 외부 환경으로의 노출로 인하여 고장 및 오동작을 일으킬 확률이 큰 편이라 할 수 있다. 원격 작업을 행하는 원격 이동 로봇의 경우 일반적으로 이동 로봇에 부착된 카메라를 통해서 얻은 시각 정보를 바탕으로 원격 제어를 행하며, 만일 카메라가 고장이 났을 경우에도 안정적인 동작을 할 수 있도록 하는 기술이 요구된다.

위와 같은 일부 센서의 고장 상황에서, 원격지에서 조작자가 이를 판별할 수 있어야 하며, 이러한 기술을 개발하기 위해서는 인간의 추론 과정을 모사한 퍼지 이론을 도입하는 것이 타당하다고 사료된다. 한편 퍼지 규칙 표의 생성에 필요한 전문가 지식 확보의 어려움을 해결하기 위해서 진화 연산 기법을 적용하는 것이 적절하다고 볼 수 있다[2]. 카메라가 고

장난 경우에도 원격 조작자가 계속 제어를 하기 위해서는 작업자를 위한 가상 시각 정보가 필요하다. 또한 원격 작업자와의 통신마저 두절되는 최악의 상황을 대비해 이동 로봇이 미리 정해놓은 장소로 자율적으로 회귀할 수 있는 능력이 요구된다.

2. 문제 설정 및 범위

본 논문은 원격 제어되는 이동 로봇의 고장 극복에 관한 연구이다. 원격과 같은 위험한 환경에서는 사람이 직접 작업하기 위험하므로 원격 조종자가 이동 로봇을 원격 제어하는 방식이 선호되고 있다. 이를 위해서 이동 로봇엔 카메라가 부착되어 있어 원격 조종자는 전송된 카메라 영상을 보고 조이스틱 등으로 이동 로봇을 원격 제어하게 된다. 또, 카메라의 고장 상황시를 대비하여 이동 로봇엔 주위의 장애물을 감지할 수 있는 센서들이 장착되어 있을 수 있다. 본 연구에서는 이동 로봇이 등속 운동을 한다고 가정한다.

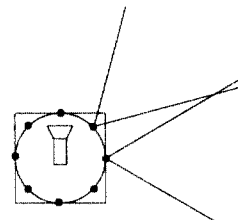


그림 1. 이동 로봇

본 논문에서 이동로봇은 그림 1에서 보는 바와 같이 2D 환경에서 동작하는 정사각형 형태의 차량형, 즉 4바퀴가 있는, 이동 로봇으로 가정하였다. 그림에서 보이는 작은 원들은 이동 로봇에 부착된 카메라를 보조하기 위한 센서들을 나타내며 빔폭이 60도인 초음파 센서로 구성되어 있다고 가정하였다. 그림 2는 본 연구의 모의 실험에 사용된 환경을 나타내고 있다. 그림 2에 보여진 작업 공간은 10m×10m이며 이동 로봇은 1m×1m 이고, 회색으로 표시된 부분은 장애물을 나타낸다. S, G로 표시된 부분은 각각 로봇 작업의 시작 위치 및 종료 위치(또는 완전 고장 시 자율 복귀 지점)를 나타낸다.

* "이 논문은 1997년도 과학기술정책관리연구소의 원자력 기초연구사업 연구비에 의해 연구되었음"

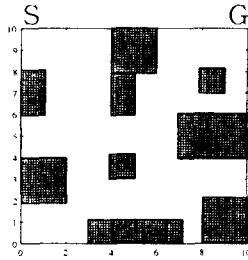


그림 2. 이동 로봇의 작업 환경

본 논문이 로봇의 고장 상황을 극복하기 위한 것인 만큼 어떠한 고장 상황을 가정하느냐에 따라 접근 방법이 틀려질 수 있다. 가정되는 고장 상황은 실제 일어날 수 있고 또 일어날 확률이 높아야 할 것이다. 초음파 센서 시스템은 실험적 경험에 비추어 볼 때 오동작의 확률이 아주 작지만 정밀한 부품들의 조합으로 이루어진 카메라나, 기계적인 요소가 많고 끊임없이 운동하게 되는 구동부나 구동부 측 센서 (예: 모터의 인코더)는 고장날 확률이 많은 부분이다. 따라서, 본 논문에서는 카메라가 고장나 있고, 구동부측 센서의 고장으로 이동 로봇이 이상(異常) 운동, 즉 원격 조종자의 의도대로 움직이지 않는 상황을 고장 상황이라 설정하였다. 카메라가 고장나 있으므로 원격 조종자는 카메라 영상 대신 개발될 퍼지 고장 진단 시스템을 이용한 가상 시각 정보에 의존해서 원격 조종을 계속 행하게 된다. 단, 통신부는 정상 동작한다고 가정하였다.

3. 진화 연산 기법을 이용한 퍼지 고장 진단 시스템의 개발

3.1. 왜 퍼지시스템 과 진화연산을 사용하는가?

고장 진단 시스템을 개발하는데 있어서는 크게 두 가지의 접근방법이 있을 수 있다. 첫째는 수학적 분석 및 모델을 통하여 해석적으로 접근하는 방법이고, 둘째는 요즘 각광 받고 있는 인공지능적 기법을 사용하여 수치적으로 접근하는 방법이다. 해석적인 방법은 결과의 예측이 쉽고 분석이 가능하다는 장점이 있는 반면에 미지의 시스템이나 복잡한 시스템은 적용하기 힘든 단점이 있다. 또, 시스템의 변화에 따라 달리 해석을 해야 하므로 방법의 유연성이 떨어진다고 할 수 있다.

한편, 인공지능적 기법은 발달된 컴퓨터 기술을 이용하여, 수치적으로 문제를 풀 수 있으므로 사람의 지식과 노력이 덜 들어가면서 미지의 시스템에도 쉽게 적용시켜 새로운 지식을 얻어낼 수도 있다는 장점이 있다. 인공지능적 기법중 널리 알려진 이론으로 퍼지 이론과 신경망 이론이 있다.

퍼지 이론은 전문가의 지식이 있을 때 이를 활용하여 문제를 풀기에 적합한 이론이다. 한편 신경망 이론은 주어진 입력과 출력 데이터가 있을 때 이를 맵핑하고자할 때 적합한 방법이다. 일단 퍼지 규칙표를 생성하게 되면 이로부터 인간이 이해하기 쉬운

지식을 얻을 수 있다는 장점이 있기 때문에 본 논문에서 퍼지 이론을 활용한다. 그리고, 전문가의 지식이 없는 상태에서 원하는 퍼지 규칙표를 생성시키기 위해 진화 연산 기법을 적용하게 된다. 일반적으로 신경망의 학습에는 진화 연산 기법이 적합치 않다고 알려져 있다.

3.2. 진화 연산 기법

이 절에서는 본 연구에 사용된 진화 연산 기법에 대해 설명한다. 진화연산이란 자연계의 진화를 컴퓨터로 모사함으로써 주어진 문제를 풀고자 하는 계산적 기술 또는 탐색 방법이라 할 수 있다. 진화연산은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 유전 알고리즘(genetic algorithm), 진화 기법(evolution strategy)과 진화 프로그래밍(evolutionary programming)이 그것이다. 그리고, 최근에 컴퓨터 프로그램을 진화시킬 수 있는, 유전 알고리즘의 확장된 형태라 할 수 있는 유전 프로그래밍(genetic programming) 기법이 여러 분야에 활용되고 있다[1].

본 연구에서는 인공지능 언어인 LISP언어로 구현된, 유전 프로그래밍 기법을 사용하기로 한다. 그 이유는 다른 방법들과 달리 유전 프로그래밍은 해의 길이가 가변이며 제한을 받지 않도록 해가 트리구조로 표시되기 때문이다. 유전 프로그래밍은 다음의 세 과정으로 이루어진다.

- (1) 함수와 터미널들의 무작위 조합으로 이루어진 초기 해(컴퓨터 프로그램)를 생성한다.
- (2) 종료 조건이 만족될 때까지 다음의 과정을 반복한다.

a. 집단내의 각 개체를 실행시켜 문제를 얼마나 잘 풀었느냐에 따라 적합도를 부여한다.

b. 재생산, 교차변이 그리고 돌연변이와 같은 유전학적 연산자를 유전 알고리즘과 같은 방법으로 적용하여 새로운 컴퓨터 프로그램들의 집단을 구성한다.

(3) 알고리즘이 종료될 때까지 생성되었던 프로그램 중에서 가장 성능이 뛰어난 체가 유전 프로그래밍의 결과가 된다.

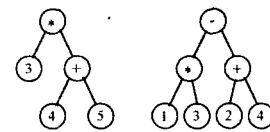


그림 3. 트리구조로 표시된 해의 예

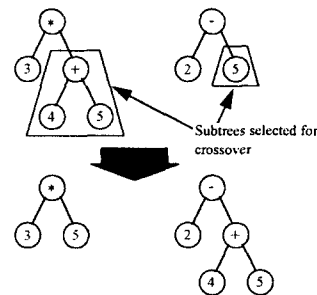


그림 4. 해의 교차변이

그림 3에 트리구조로 표시된 해의 표시 예를, 그림 4에는 트리구조로 표현된 해의 교차변이의 예를 나타내었다.

3.3 퍼지 고장 진단 시스템을 위한 해의 표현 및 규칙 표의 구성

이 절에서는 퍼지 고장 진단 시스템의 역할에 대해 설명하고 이의 구성을 위해서 사용되는 해의 표현 방법 및 규칙 표 구성 기술에 대해 설명한다.

퍼지 고장 진단 시스템은 각 초음파 센서들로부터 출력되는 거리 정보와 작업 환경의 장애물들의 위치로부터 전 시간 스텝과 현재 시간 스텝(여기서, 시간 스텝이란 샘플링 시간에 따라 정해지는 이산적 시간 표현을 말한다)의 출력 거리의 변화, 전 시간 스텝에서 원격 조종자가 내린 명령에 따라 이동 로봇이 움직여 현재에 있어야 할 위치에 대한 센서들의 거리 정보와 현재 출력 거리 정보와의 차이를 입력으로 받아들인다. 퍼지 추론 과정을 거쳐 출력되는 정보는 현재 있어야 할 기준위치에서 벗어난 정도를 나타내는, 기준위치로부터 벗어난 거리(R)와 기준 오리엔테이션으로부터 벗어난 각도(θ)이다.

퍼지 고장 진단 시스템으로부터 출력되는 R과 θ 는 3.5 절에서 설명되는 가상 시각 정보 구성에 사용되게 된다. 구동 센서부의 고장이 없는 정상 상황이라면 퍼지 고장 진단 시스템의 출력은 0에 가까울 것이며, 이상이 있는 경우 기준 위치로부터 벗어난 정도를 출력하게 되는 것이다.

위와 같은 퍼지 고장 진단 시스템을 유전 프로그래밍을 이용하여 구성하는데 있어서, 해를 평가할 때 퍼지 시스템의 모든 과정-퍼지화, 퍼지추론, 비퍼지화-을 포함할 것인가의 문제가 있는데, 본 연구에서는 계산 속도를 향상시키기 위하여 다음과 같은 방법을 제안한다.

해의 표현을 규칙 기반 제어기(rule based controller)형태로 하고, 유전 프로그래밍을 통해 얻어진 규칙 기반 제어기를 사용하여 퍼지 제어기를 구성하는 방법이다. 이는 입력과 출력에 퍼지 변수를 쓰지 않는 퍼지 시스템이 규칙 기반 제어기와 유사하다는 점에 착안한 방법이다. 유전 프로그래밍에 사용된 함수 및 터미널 집합은 표 1과 같다.

표 1. 유전 프로그래밍에 사용된 함수 및 터미널

함수	{ifDS1PBr, ifDS1PMr, ifDS1PSr, ifDS1Zr, ifDS1NSr, ifDS1NMr, ifDS1NBr, ifDS2PBr, ..., ifDS8NBr, ifES1PBr, ifES1PMr, ifES1PSr, ifES1Zr, ifES1NSr, ifES1NMr, ifES1NBr, ifES2PBr, ..., ifES8NBr, ifDS1PBt, ifDS1PMt, ifDS1PSt, ifDS1Zt, ifDS1NSt, ifDS1NMt, ifDS1NBt, ifDS2PBt, ..., ifDS8NBt, ifES1PBt, ifES1PMt, ifES1PSt, ifES1Zt, ifES1NSt, ifES1NMt, ifES1NBt, ifES2PBt, ..., ifES8NBt}
터미널	{random number in [-5, 5]}

위에서 D는 이전 시간 스텝과 현재 스텝의 거리 출력 정보 차를 의미하고, E는 현재 기준 위치에 따른 거리 정보와 현재 출력 정보와의 차이를 의미한다. S1, S2, S3, ..., S8 은 각 초음파 센서를 의미한다. PB 는 'positive big' 과 같이 일반적인 퍼지 시스템

에서 쓰이는 언어 변수와 같은 의미를 가진다. r은 기준위치로부터의 거리 R과, t는 기준 각도로부터의 변위인 θ 와 관계된 함수임을 의미한다. 각 함수는 인수를 2개 가질 수 있으며 다음과 같이 동작한다.

예를 들어, (ifDS1PBr arg1 arg2) 라는 명령은,

$$\text{if } DS1 \geq C_{ds1PB} \text{ then (if (arg2 == number) then } R \leftarrow \text{arg2 else evaluate arg2) else (if (arg1 == number) then } R \leftarrow \text{arg1 else evaluate arg1)}$$
 (1)

와 같이 동작한다. 여기서 argi는 i번째 인수를 나타낸다. C_{ds1PB} 은 DS1 변수의 positive big에 해당하는 중심값을 나타내고, DS1 이란 변수는 초음파 센서1의 이전 시간 스텝 출력 거리와 현재 출력 거리의 차를 나타낸다. 중심값은 작업환경의 크기를 고려하여 적당히 정하였다. LISP언어에서는 함수를 실행하기 전에 함수의 인수가 미리 실행되기 때문에 오동작을 피하기 위해 위의 함수들은 모두 pseudo 매크로로 씌어졌다.

유전 프로그래밍을 적용하여 최소화 시켜야 할 적합도 함수는 다음과 같다.

$$\text{Fitness} = \sum_{\text{trials}} (e_R^2 + e_\theta^2) \quad (2)$$

여기서 e_R 과 e_θ 는 각각 실제 R, θ 와 퍼지 고장 진단 시스템에서 출력된 R, θ 와의 차이이다. 초기 조건은 그림 2의 작업공간에서 작업 경로를 따라 추출된 13개의 위치와 각 위치에 대한 3개의 초기 각 그리고, 3개의 다음 진행 방향각으로부터 얻어졌다. 따라서, Fitness는 117개의 상황에 따른 오차 제곱의 합이 된다. 샘플링 시간은 0.1초, 이동 로봇의 속도는 1m/sec으로 하였다. 유전 프로그래밍에 적용되는 해의 개수는 100개를 사용했고 500세대 동안 진화시켰다.

3.4 퍼지 고장 진단 시스템 구성

앞 절에서 얻어진 규칙 기반 제어기의 규칙을 이용하고, DS1, DS2, ..., DS8, ES1, ES2, ..., ES8 입력 변수에 대한 언어 변수를 PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB 와 같이 설정한 후 중심값들을 이용하여 삼각 소속 함수(membership function)를 구성하면 퍼지화와 추론 부분이 완성된다. 출력과 비퍼지화 부분을

여기의 출력 결과가 많이 틀릴 경우, 비교하여 수정하는 시행 착오 방법이 사용되었다. 그림 5에 카메라가 고장났을 때, 앞에서 얻어진 퍼지 고장 진단 시스템으로부터 출력되는 정보에 의해 구성된 가상 시각 정보(3.5절 참조)를 이용하여 원격 조종된 이동 로봇의 가상 시각 화면상에서의 궤적과 실제 작업 환경에서의 궤적이 보여진다. 모의 실험시 원격 조종은 컴퓨터 모니터를 보고 연구자가 키보드로 행하였다. 그림에서 보듯이 실제 궤적과 가상 시각 정보를 통해 원격 조종된 가상 시각화면상에서의 궤적이 유사하며, 이는 개발된 퍼지 고장 진단 시스템이 제대로 동작함을 보여준다.

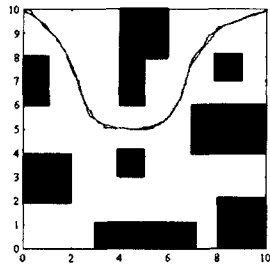


그림 5. 가상 시각 정보에 의해 원격 조종된 로봇의 시각 정보상에서의 궤적과 실제 궤적

3.5. 가상 시각 정보의 구성

퍼지 고장 진단 시스템의 출력 정보인 R 과 θ 는 가상 시각 정보 구성에 바로 유용하게 사용될 수 있다. 컴퓨터 모니터에 현재의 로봇 위치와 퍼지 고장 진단 시스템의 출력으로부터 간단한 수학적 조작을 통해 작업환경내의 이동 로봇의 위치를 표시할 수 있기 때문이다.

4. 자율 주행

3.5 절에서 얻어지는 가상 시각 화면상에서 장애물의 위치, 로봇의 위치 및 각이 주어지므로 기존의 어떤 자율 운행 기법이라도 자유로이 적용할 수 있게 된다. 본 연구에서는 널리 알려진 위치 장 (potential field) 방법을 사용하여 퍼지 고장 진단 시스템과 더불어 모의 실험해 보았다. 그림 6은 이와 같이 제어된 이동 로봇의 실제 작업환경 하에서의 궤적을 나타낸다. 실제 장애물 정보를 이용한 보통의 위치 장 방법과 비슷한 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

5. 초음파 센서부의 고장에 대한 고찰

초음파 센서의 고장은 본 논문의 문제 설정에서 제외하였었다. 초음파 센서의 오동작은 특별한 진단 시스템 없이 출력 거리 정보의 시간에 대한 미분이나 거리 정보의 평균값으로부터 알 수 있다. 지속적인 지나친 변화는 심한 노이즈를 의미하여 오동작을 알 수 있게 한다. 또, 거의 0에 가까운 평균값은 센

서의 고장이나 단선을 의미한다. 이런 경우 고장난 센서를 제외한 센서부에 대해 본 논문에서 제안한 퍼지 고장 진단 시스템을 미리 구성해 놓으면 고장 상황에 대비할 수 있게 된다. 3가지의 센서 배열에 대해 퍼지 고장 진단 시스템을 구현해 놓으면 2개의 센서가 고장나는 상황에도 대처할 수 있게 된다. 이를 위해선 잉여 센서들이 부착되어 있어야 한다.

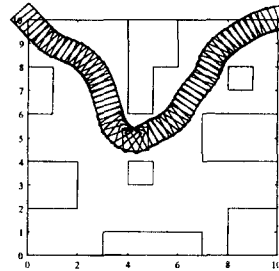


그림 6. 퍼지 고장 진단 시스템과 위치 장 방법을 사용한 이동 로봇의 자율 복귀

6. 결론

본 논문에서는 진화연산을 사용하여, 원격 제어되고 있는 이동 로봇의 고장 상황에 대한 퍼지 고장 진단 시스템을 설계하는 방법을 제안하였다. 원격 제어자는 퍼지 고장 진단 시스템으로부터 얻어지는 정보를 이용한 가상 시각 정보를 통해 고장 상황하에서도 성공적으로 작업을 수행할 수 있었다. 센서 등이 일부 고장난 상황에서의 원격 제어 이동 로봇의 자율 회귀 운행 기법은 기존의 자율 운행 이동 로봇의 경우에도 다양하게 적용될 수 있을 것이다.

7. 참고문헌

- [1] J. R. Koza, *Genetic programming*, Cambridge, MA, MIT Press, 1993
- [2] W. R. Hwang and W. E. Thompson, "Design of Intelligent Fuzzy Logic Controllers Using Genetic Algorithms," *Proceedings of the Third IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1383-1388, 1994
- [3] B. G. Buchman and E. H. Shortliffe, *Rule-Based Expert Systems*, Addison-Wesley, 1984.
- [4] O. Khatib, "Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 90-96, 1986.
- [5] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1398-1404, Sacramento, California, Apr. 1991.
- [6] S. H. Kim and et. al, "The Development of Robotic System for the Nuclear Power Plants," *Annual Report No. KAERI / RR-1508 / 94*, Advanced Robotics Team, KAERI.