

# 다양한 센서를 이용한 배전선 점검 로봇의 높이 및 자세제어

## Height & Position Control of a Power Line Inspection Robot Using Various Sensors

한 순 신, 최 재 영, 이 장 명\*  
(SunSin-Han, JaeYoung-Choi, and JangMyung-Lee)

**Abstract** : A new wire detection algorithm for power line inspection by a mobile robot has been proposed in this paper. There have been a lot of studies in order to support the high-quality electric power. For the high-quality power supply, it is necessary to investigate the power lines and insulators before the lines or insulators were disconnected or damaged. Although Korea Electric power Corp. has made many efforts for the quality improvement, it is not enough to inspect all the power lines by human inspectors. According to this problem, it is decided to replace the human operators by the power line inspection robot. When the robots are used for the inspection, there could be several advantages, for example, the working efficiency and the prevention of accident. And also the shortage of human power for dangerous jobs can be resolved. In this paper, as a part of the development of power line inspection robot, DICRO, the sensor fusion and fuzzy control algorithms are developed to detect the wire and slope of the wire. The effectiveness of the proposed algorithms is proved by the real experiments with DICRO which is under development so far.

**Keywords** : fuzzy control, power line inspection, sensor composition

### I. 서론

최근 고품질의 전력을 공급하기 위한 노력이 각 분야에 걸쳐 이루어지고 있다. 이와 같은 추세에 따라 기기의 이상 징후와 장애에 일어날 고장을 인지하여 필요한 대응을 실행하는 예방진단 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예방진단은 애자와 배전선로의 가공전선에 대하여 실행한다. 애자는 송·배전선이나 전기기기의 나선 부분을 절연하고 동시에 기계적으로 유지 또는 지지하기 위하여 사용되는 자기로 만든 것을 말한다. 애자의 불량은 장비의 노후로 인한 이물질과 파손에 의한 것으로 이는 전력 수송에 있어 많은 손실을 가져온다. 그리고 배전선로의 가공전선은 공급전압과 부하용량 등에 대하여 다양한 종류의 전선이 사용되며 가공전선의 금속재료와 설치환경 그리고 전선규격에 따라 매우 복잡한 형태의 불량을 나타낸다. 애자와 배전선로의 가공전선의 다양한 불량상태와 결합에 대응하여 애자가 설치된 상태에서 그리고 가공전선이 활선인 상태에서 분리 혹은 절취하지 않고 검사를 하기 위해 현재 진단 방법은 승주기별 점검 방법으로 육안에 의존한 방법을 사용하고 있다[1,2]. 그러나, 이런 육안에 의한 검사는 연간 500억의 예산을 투입하면서도 전체 지지물의 7% 만을 점검하는 것이 가능한 실정이다. 그리고 검사를 위하여 바켓-트럭(bucket truck) 위에서 전공자에 의한 활선 점검은 안전사고에 대한 우려가 있고 인력에 의한 검사이므로 한 지역 전체를 자세히 검사할 수 없을 뿐만 아니라 신뢰성이 없고 외부의 결합이 아닌 내부적인 결합에 대하여서는 검출할 수 없다[3].

현재 영국과 일본 그리고 폴란드 등의 여러 국가에서 전력 기기와 배전선로의 결합에 대한 많은 연구를 진행하였으나

현재까지 실용화하지 못하였다. 그리고 국내에서는 최근 전력연구원의 연구진에 의하여 다양한 연구가 진행되고 있다.

첨단산업과 IT 산업의 급격한 팽창으로 사회 전반에 걸쳐 고품질의 전력을 공급하기 위해 다각도의 노력을 하고 있으나 배전선로 승주기별 점검에는 큰 영향을 미치지 못하는 실정이다. 따라서, 작업자에 의한 점검에서 로봇에 의한 점검으로의 교체가 필요한 시기이다.

로봇은 배전선로에 사용하도록 설계 제작된 것으로 배전선로의 가공선로 점검에 활용하여 예방 점검 및 노후 절연전선의 교체시기 판별이 가능하도록 한다.

또한, 로봇을 이용하여 작업의 효율을 상승시킬 수 있으며 안전사고의 예방도 가능하다. 현재 예방 진단 기술로는 열화상 카메라에 의한 애자와 배전선로의 가공전선의 열화에 의한 고장을 검출하는 방법과 전자파를 이용하여 정상 애자와 불량 애자를 판별하는 방법이 알려지고 있다. 이러한, 검사장치를 로봇에 설치하여 로봇과 연동하여 동작시키면, 전기 종사자의 전문 인력 부족 문제와 안전사고의 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다[4,5].

본 논문에서는 애자와 배전선로의 예방진단에 있어 배전선로의 가공선로 상단에 위치한 가공지선을 이동하는 로봇을 개발하는 과정에서 필요한 선로 인식 및 기울기를 판정하는 알고리즘을 소개한다. II 장에서는 실험에 사용된 센서의 설명과 센서합성을 이용하여 분기점에서 정밀하게 가공지선과의 거리를 검출할 수 있는 방법을 나타내었다. 그리고 III 장에서는 전체 로봇의 시스템과 구조를 나타내고 IV 장에서는 로봇의 제어 방법에 대하여 나타내었다. 그리고 V 장에서 센서합성에 대한 실험 결과 및 로봇의 동작에 대한 결과를 나타내고 VI 장에서는 실험 결과에 대한 정리 및 향후 연구 방향에 대한 결론을 제시한다.

### II. 센서 합성

#### 1. 초음파 센서

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 3. 10., 채택확정 : 2008. 10. 21.

한순신, 최재영, 이장명 : 부산대학교 전자전기통신공학부

(ranger112@pusan.ac.kr/jam5177@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

초음파 센서는 저렴한 가격과 간단한 작동법, 높은 물체 탐지능력으로 거리 측정센서로 많이 사용되고 있다.

기본적으로 진동자를 초음파 주파수로 진동을 발생시켜 초음파 신호를 송수신한다. 이를 이용한 거리측정 방법에는 여러 가지가 있으나, 로봇의 응용 영역에서는 일단의 음파 열(sonic wave trains)이 센서로부터 방사된 후 목표물에 반사되어 돌아올 때까지의 비행시간(TOF, Time of Flight)를 측정하는 방식이 널리 이용된다.

이 때 초음파 센서의 수신된 시간을  $T$ 라고 할 때,  $T$ 로부터 목표물까지의 거리  $L$ 은 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$L = \frac{T}{2}u \tag{1}$$

여기서  $u$ 는 음파의 진행속도로 기지의 거리에 있는 목표물을 이용하여 결정될 수 있다[10].

일반적으로 초음파 센서는 측정 거리가 멀어질수록 발산하는 성질을 가짐으로써 얻어진 데이터의 신뢰도는 측정 거리에 반비례하게 나타나게 된다. 초음파 센서는 일정 각도 안에 존재하는 장애물을 검출할 수 있는 원주형으로 방사하는 형태의 빔(beam)이다. 따라서 물체의 정밀한 위치를 알 수는 없으나 빔 내부에 존재하는 장애물의 존재 유·무와 대략적인 거리를 알 수 있다. 또한, 음파를 이용한 송·수신 방식은 장거리 측정이 가능하고 타 거리센서와 비교해 볼 때 외란에 대하여 비교적 강인하다. 본 논문에서 사용된 초음파 센서는 KEYENCE 사의 FW-H series로 초음파 센서와 증폭기로 구성되어있으며 유효 측정 거리는 대략 15cm에서 70cm까지이다.

2. 적외선 센서

적외선 거리 센서는 물체에 반사되어 돌아오는 적외선의 양을 측정하는 방식과 적외선의 반사 각을 측정하는 방식이 있다. 본 논문은 적외선을 송신한 후 장애물에 반사되어 돌아오는 적외선을 수신하여 거리를 측정한다. 실험에 사용한 센서는 SHARP 사의 GP series로서 유효 측정거리의 10cm에서 80cm이다. 이 센서는 적외선의 반사각을 측정하여 출력 전압 값을 변화시켜 내보내는 방식이다.

3. 센서 합성 알고리즘

배전선 점검 로봇이 분기점에서 다음 선로로 진입하기 위하여 다음의 전진주로 향하는 가공지선을 검출하고 이 가공지선을 붙잡아야 한다. 이를 위하여 가공지선과 로봇과의 정확한 거리 측정이 매우 중요하다.

적외선 센서를 사용하면 정밀한 거리 측정은 가능하나 공중에서 이동 로봇이 바람 및 모터의 진동과 같은 외란으로 인하여 일정한 위치에서 정밀하게 정지 상태를 유지하는데 불안정한 요소가 발생된다. 따라서 적외선 센서는 가공지선 자체를 검출하는 목적에는 사용될 수 있으나 가공지선을 검출하여 정지상태를 유지하는 목적으로 사용하면 여러 가지 문제를 발생시킬 수 있다. 또한, 초음파 센서는 비교적 넓은 폭의 물체를 감지하기 때문에 제어에 사용하기는 적합하나 15cm에 이르는 넓은 비 검출 영역을 가진다. 이로 인하여, 일반적으로 로봇과 가공지선과의 거리가 23cm 정도에 되어 검출에 문제가 없으나, 경사면 혹은 실제 가공지선의 상태에 따라 가공지선과 로봇 사이의 거리가 비검출 영역에 들어가

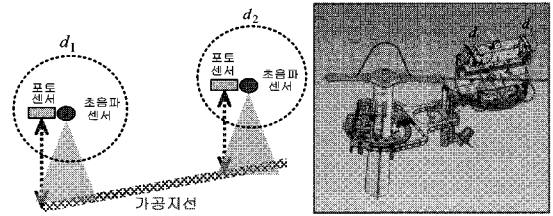


그림 1. 센서의 배치.

Fig. 1. Sensor arrangement.

게 되어 거리 정보를 구하지 못하는 경우가 발생하기도 한다. 그리고 초음파 센서는 검출 각도가 넓어 외란이 존재해도 가공지선을 검출할 수는 있으나 평균 3cm의 오차를 가진다.

따라서 대략적이지만 넓은 검출 영역을 가지는 초음파 센서의 특성과 적외선 센서의 정밀한 거리 데이터 측정 능력을 합성하여 정밀하고 안정적으로 가공지선을 검출할 수 있는 합성 알고리즘을 개발하였다. 합성 알고리즘을 통하여 각 센서의 약점을 보완할 수 있었다. 예로, 적외선 센서의 경우 로봇의 몸체 부분에 장착되어져 태양광의 영향을 직접적으로 받지 않으나 가공지선에 의해 반사되는 태양광의 영향으로 외란을 가질 수 있다. 이러한 외란은 두 센서의 데이터 합성을 통하여 걸러낼 수 있으므로 외란에 강인하고 정밀한 거리 값을 추출할 수 있다. 각 센서의 배치는 그림 1과 같다.

센서 합성은 초음파 센서가 가공지선을 검출하는 과정에서 사용된다. 센서 합성은 초음파 센서의 특징인 넓은 검출 영역에 의해 우선적으로 가공지선을 검출하게 되고 그 후 적외선 센서에 의해 가공지선과의 거리를 정확하게 검출하게 된다. 이 때 두 센서의 출력거리간의 오차가 발생하게 되는데, 두 센서의 차를 오차 값으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_d = d_{IR} - d_{sonic} \tag{2}$$

이 식에서  $d_{IR}$ 는 적외선 센서의 의한 출력 거리를 나타내고  $d_{sonic}$ 은 초음파 센서에 의한 출력 거리를 나타낸다. 그리고  $E_d$ 는 두 출력 거리간의 오차 값을 나타낸다. 그리고 태양광에 의한 영향으로 적외선 센서가 오작동하게 되는 경우가 발생하므로 다음과 같은 조건 식을 통하여 그 영향을 최소화 할 수 있다.

$$\begin{cases} |E_d| < \varepsilon & d_{out} = d_{IR} \\ otherwise & d_{out} = d_{sonic} + \frac{\varepsilon}{2} \end{cases} \tag{3}$$

여기서  $d_{out}$ 은 센서 합성의 결과로 최종 출력되는 거리 값을 나타내고  $\varepsilon$ 는 오차 값에 대한 문턱 값으로 오차가  $\varepsilon$  미만일 경우는 적외선 센서의 출력 값은 일반적인 오차 범위 안에서 존재한다. 그러나  $\varepsilon$  이상인 경우 태양광에 의한 영향으로 센서의 오작동을 나타내게 된다. 이 경우 외부에 대한 오차를 가지지 않는 초음파 센서의 값을 기준으로 하여 문턱 값을 이용하여 출력 값을 나타낸다. 이  $\varepsilon$ 의 값은 많은 실험을 통하여 설정된 값으로 외부 외란이 존재하지 않는 경우 적외선 센서의 출력 거리 값과 초음파 센서의 출력 거리 값을 다양한 거리에서 실험을 하여 최대 오차를 문턱 값으로

설정을 하였다. 그  $\varepsilon$  값을 이용하여  $\varepsilon$  값의 평균 값인  $\frac{\varepsilon}{2}$  을 더하여 좀 더 신뢰성 있는 데이터로 가공지선이 검출될 수 있도록 식 (3)으로 나타내었다.

**III. 퍼지 제어기**

퍼지 제어기는 시스템에 대한 특정방정식을 유도하지 않고, 설계자가 설계한 규칙들을 이용하여 제어할 수 있는 방법으로서, 비 선형, 플랜트의 수학적인 모델링이 어렵거나 혹은 불가능한 경우에 이르기까지 광범위하게 이용된다[12].

1. 일반적인 퍼지 제어기의 구조

- (1) 측정값으로부터 유도된 값을 퍼지 입력으로 만드는 퍼지화(fuzzifier)부분
- (2) 퍼지 입력으로부터 퍼지출력을 추론하는 퍼지 추론(fuzzy inference)부분
- (3) 퍼지 출력으로부터 실제 이용 가능한 값인 제어 입력을 계산하는 비퍼지화(defuzzifier)

2. 지식기반

퍼지 규칙을 저장하는 규칙 기반과 퍼지 규칙에 사용되는 소속 함수를 정의 하는 데이터 기반으로 구성되어 있다.

**IV. 로봇 주행 및 제어기 설계**

1. 로봇 주행 원리

로봇의 주행은 크게 4가지의 동작으로 구성한다. 첫번째는 가공지선을 따라 이동하는 과정에서의 포스트의 검출이고 두 번째는 포스트와의 결합이다. 그리고 세 번째로 다음에 분기할 가공지선의 검출과 가공지선과 몸체의 결합과 마지막으로 다시 주행을 위한 초기 상태로 돌아가는 것이다. 그림 3는 전체 동작에 대한 개념도를 나타내고 있다. 로봇의 주행 시 현재 로봇의 상태와 주변 장애물을 인식하는 것도 중요하다. 우선 로봇의 이동 시 포스트(post) 인식은 초음파 센서를 통하여 인식한다.

포스트의 형태는 그림 4에 보인 것과 같이 좌측, 우측, 그리고 중앙에 위치한다. 이렇게 3가지 방향으로 나타나는 포스트의 인식을 위하여 3개의 초음파 센서를 이용하여 각각의 포스트를 인식할 수 있도록 배치하였다.

포스트를 인식하게 되고 다음 선로의 진입을 위하여 포스트와 gripper 부분을 결합을 하여야 한다. Gripper부는 세 종류의 포스트에 대한 결합을 하기 위하여 두 종류의 형태를 가

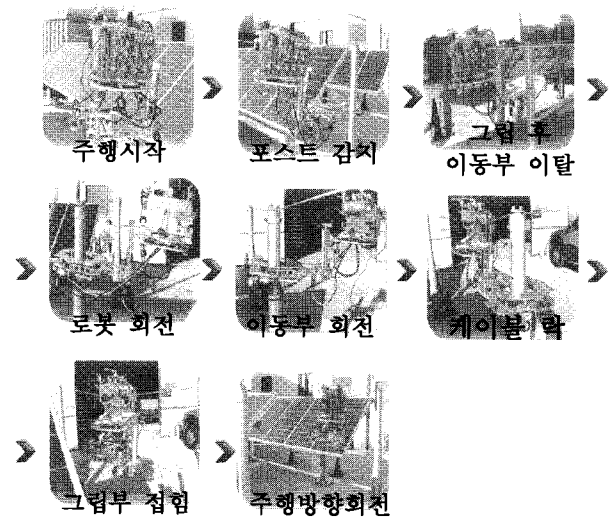


그림 3. 검사 로봇의 동작 개념도.  
Fig. 3. Operation sequence of the inspection robot.

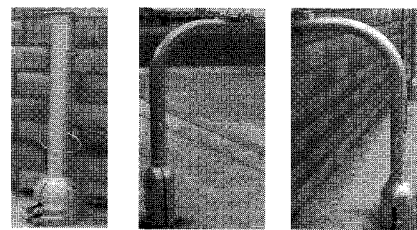


그림 4. 다양한 종류의 포스트.  
Fig. 4. Types of post.

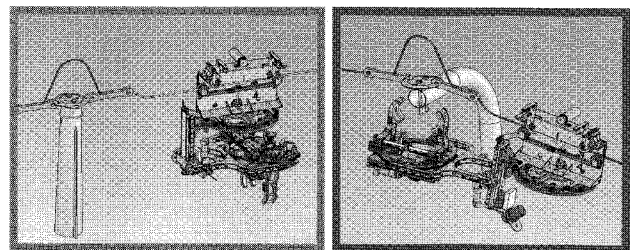


그림 5. 포스트의 인식 및 결합.  
Fig. 5. Post detection and holding.

진다. 그리고 포토 센서와 리미트 스위치를 이용하여 gripper에 대한 포스트의 정 위치를 확인할 수 있다. 그림 5은 포스트의 인식과 결합을 하기 위한 것을 나타낸다.

포스트와 로봇이 결합한 후 다음 분기를 위한 가공지선의 검출을 한다. 가공지선의 검출은 초음파 센서와 적외선 센서의 합성된 결과 값을 이용해 검출하여 로봇과 결합을 한다. 그림 6은 가공지선의 검출과 로봇 몸체에서의 가공지선 정 위치를 나타낸다.

로봇이 분기점에서 분기하여 다음 선로의 진입을 마치면 모든 동작이 끝나게 된다. 이로서 로봇은 안전하게 포스트를 통과하여 다음 가공지선으로 이동을 한다. 그리고 마지막으로 로봇은 기존의 엔코더 값과 스위치를 이용하여 로봇을 초기 주행 형태로 다시 돌아가 주행을 하게 된다.

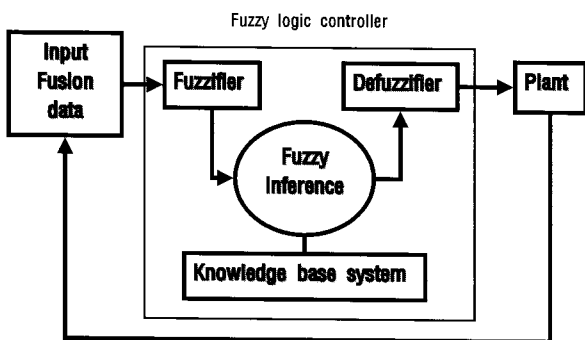


그림 2. 퍼지 제어기의 기본 구조.  
Fig. 2. Block diagram of a fuzzy controller.

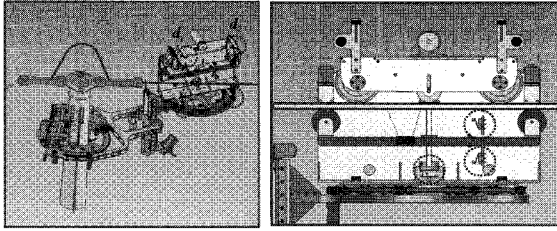


그림 6. 가공지선의 검출 및 결합.  
Fig. 6. Cable detection and holding.

2. 제어기 설계

배전선 점검 로봇과 같이 많은 환경 변수와 외란을 가지는 경우 직관과 경험에 의해 정해진 규칙만으로 원하는 성능을 가지긴 어렵다. 또한 PID 제어의 경우 많은 계산량과 불확실성 외란으로 인하여 오차의 보정에 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 논문은 배전선 점검 로봇의 제어를 위하여 기본적으로 FLC 구조를 가지고 성능 테이블을 이용하여 성능을 자체 평가하고 제어 규칙에 따른 제어량을 스스로 변화시킬 수 있는 자기구성 퍼지 제어기를 제안한다. 자기구성 퍼지 제어기는 제어 알고리즘이 제어 대상체의 공정과 제어기가 작동하는 환경의 변화에 따라 스스로 변환하는 방식이다. 성능 테이블을 통하여 원하는 성능에 도달할 때까지 스스로 성능을 개선해 나갈 수 있다. 퍼지 자기구성 제어기는 기본 제어 계층과 자기 구성 계층으로 나누어 진다. 두 계층은 그림 7에서와 같이 기본 제어 계층은 FLC에 해당된다. 그리고 자기구성 계층은 제어 성능 평가 테이블과 제어 명령의 수정, 기본 제어 계층의 변경의 부분으로 구성된다.

$d_1$  과  $d_2$  는 가공지선과 센서 사이의 거리를 나타내며  $\theta$  는 두 거리 값을 이용하여 추출한 가공지선의 기울기를 나타낸다. 그리고  $e(t)$  는 성능 평가를 위한 샘플링 주기  $n$  에 따른 목표치에 대한 오차값을 나타내고  $U$  는 FLC에 의한 최종 출력을 나타낸다.

배전선 점검 로봇이 분기점에서 다음 선로로 분기하기 위해서는 가공지선을 검출하여야 하며, 그 후 가공지선과 로봇 몸체를 평행으로 만들어 주어 로봇이 다시 가공지선과 결합하기 용이하도록 해 주어야 한다.

제어기의 입력 값은 센서 합성에 의한 두 개의 거리 값이고 그 두 거리 값을 이용하여 가공지선의 기울어짐을 판별할

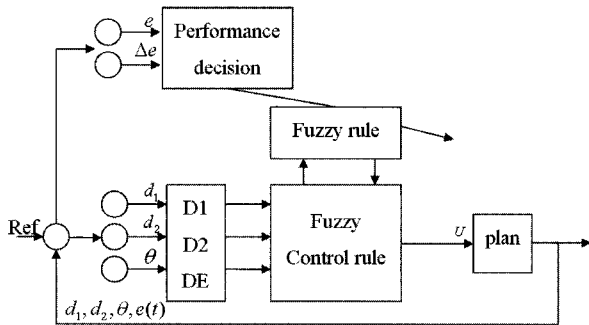


그림 7. 자기구성 퍼지 제어기.  
Fig. 7. Self-Organizing Fuzzy Controller.

수 있다. 가공지선의 검출은 센서 합성의 거리 값에 상관 없이 가공지선의 존재 유·무만을 필요로 하며 가공지선과 로봇의 평행화 과정에서 두 센서의 거리 정보와 이를 통하여 유추한 가공지선의 기울기 정보가 필요하다. 입력은 식 (10) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_1(k) = \text{measure distance}(d_{out\_1})$$

$$d_2(k) = \text{measure distance}(d_{out\_2}) \tag{10}$$

$$\theta(k) = \text{cable tilt}(\tan^{-1} \frac{|d_1 - d_2|}{d_L})$$

각 입력에 대한 소속함수를 나타내면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 그림 9에서 양 상단에 위치한 소속함수가 센서 합성에 의한 거리 출력의 소속함수이며 아래에 위치한 소속함수가 가공지선의 기울기를 나타내는 소속함수이다. 배전선 점검 로봇의 분기 제어에 관한 퍼지 규칙은 총 25가지로서 가공지선의 검출하고 또, 가공지선과 로봇을 평행으로 만들기 위해 사용된다. 우선 가공지선의 검출을 위한 행동으로 PB의 경우 가공지선이 검출되지 않은 영역으로 표현하고 가공지선의 검출에 사용되는 함수가 TL (Turn Left), TR (Turn Right)와 GS(Go Straight)로 표현된다.

그리고 가공지선과 로봇의 평행화를 위한 함수들을 BU (Body Up), BD (Body Down), TU (Tilt Up), TD (Tilt Down)로 나타내었으며 CL (Cable Lock)는 가공지선이 로봇과 평행한 상태에서 원하는 거리에 왔을 경우 가공지선과 로봇과의 결합을 위한 함수이다.

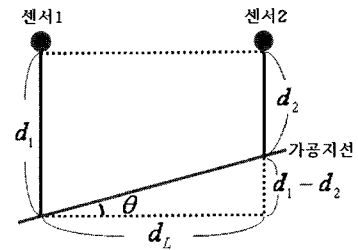


그림 8. 가공지선의 기울기.  
Fig. 8. Cable tilt.

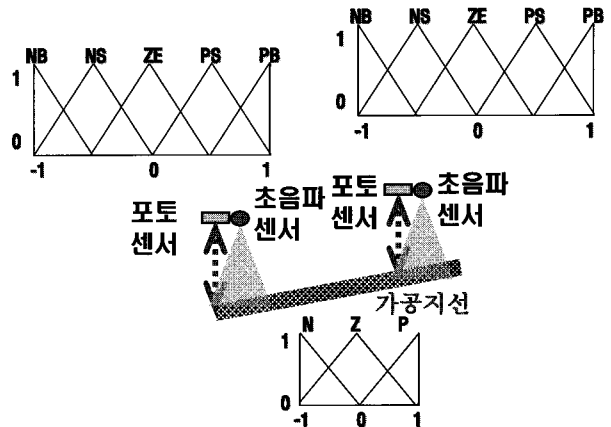


그림 9. 가공지선의 기울기 검출을 위한 소속함수.  
Fig. 9. Membership functions for cable tilt detection.

표 3. 배전선 점검 로봇의 분기 제어를 위한 퍼지규칙.

Table 3. Fuzzy control rules for inspection robot control in a diverging point.

	$d_1$	$d_2$	$\theta$	act		$d_1$	$d_2$	$\theta$	act
1	NB	NB	Z	BU	14	ZE	PS	P	TD
2	NB	NS	P	BU	15	ZE	PB	P	TL
3	NB	ZE	P	BU	16	PS	NB	N	TU
4	NB	PS	P	BU	17	PS	NS	N	TU
5	NB	PB	P	TL	18	PS	ZE	N	TU
6	NS	NB	N	TU	19	PS	PS	Z	BD
7	NS	NS	Z	BU	20	PS	PB	P	TL
8	NS	ZE	P	TD	21	PB	NB	N	TR
9	NS	PS	P	TD	22	PB	NS	N	TR
10	NS	PB	P	TL	23	PB	ZE	N	TR
11	ZE	NB	N	TU	24	PB	PS	N	TR
12	ZE	NS	N	TU	25	PB	PB	Z	GS
13	ZE	ZE	Z	CL					

총 25개의 퍼지 규칙을 통하여 로봇의 행동은 기본적으로 3가지의 과정을 수행하게 된다. 첫 번째는 가공지선의 검출이 우선이고 두 번째는 기울기를 조절하여 로봇과 가공지선의 기울기를 맞추는 작업이다. 그리고 마지막으로 로봇과 가공지선의 높이를 조절하여 가공지선과 로봇과의 결합을 유도하는 것이다.

표 3은 두 센서 합성의 결과와 가공지선과의 기울기를 이용하여 안정적인 결합을 위한 검사로봇의 제어를 위한 퍼지 규칙을 정리한 것이다.

V. 실험 및 결과

1. 실험환경 및 장비의 구성

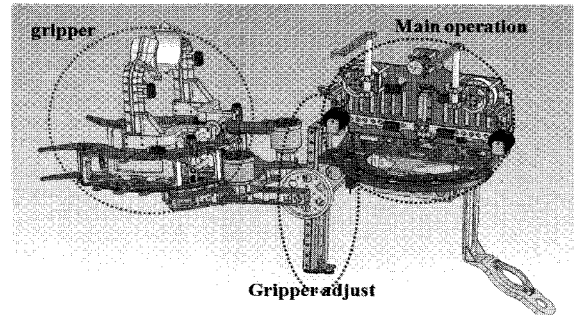
본 논문에 사용된 로봇은 크게 몸체 부분, 그리고 조절부 부분, 그리고 부분으로 나누어지고 로봇의 제어기를 dspic30fxx 계열의 프로세서를 이용하여 메인 컨트롤 부분과 센서부 그리고 모터부로 구성된다. 실험 환경은 실제 포스터의 높이를 가람의 키 높이로 낮추어 지상 1.5m에서 실험을 진행하였다. 그리고 다양한 포스터의 형태와 가공지선의 기울기를 가변하여 실험을 진행하였으며 가공지선의 장력은 실제 포스터의 장력과 일치하도록 구성하여 실험을 진행하였다. 그림 10은 로봇과 제어기 그리고 실험 환경에 대하여 나타낸 그림이다.

2. 센서 합성 실험

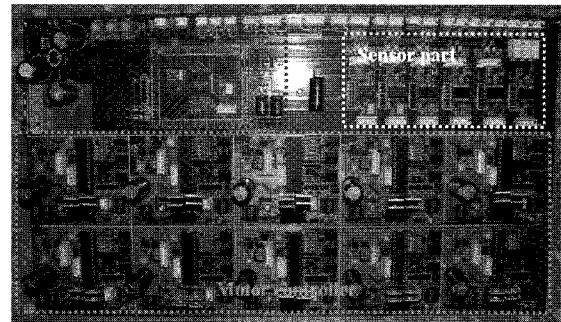
센서 합성의 실험은 실제 가공지선과 로봇과의 거리에 대한 초음파와 적외선 센서의 측정값에 대하여 오차 값을 나타내고 두 센서의 합성된 결과값과 실제 값을 비교하여 나타낸다.

그림 11에서 실선은 적외선 센서에 의한 출력거리를 나타내고 점선은 초음파 센서의 출력거리를 나타낸다.

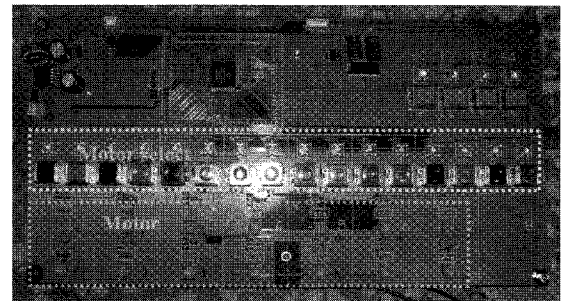
그리고 실제 거리 값은 20cm, 26cm, 30cm으로 나타내었다. 20-26cm은 로봇이 안전하게 가공지선과 결합할 수 있는 영역의 거리를 나타낸다.



(a) 로봇의 구성.



(b) 제어기 구성.



(c) 리모컨의 구성.

그림 10. 실험 장치의 구성.

Fig. 10. Structure of Test board.

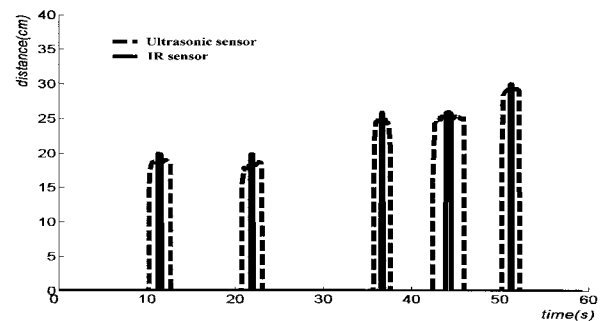


그림 11. 적외선 센서와 초음파 센서 출력 거리 비교.

Fig. 11. Distance output of IR sensor and ultrasonic sensor.

그림 12에서 실선은 적외선 센서와 실제 거리와의 오차를 나타내고 점선은 초음파 센서와 실제 거리와의 오차를 나타낸다. 적외선 센서의 경우 거리 오차가 5mm 이하의 값으로 정밀함을 가진다. 하지만 초음파 센서의 경우 원뿔 형태의

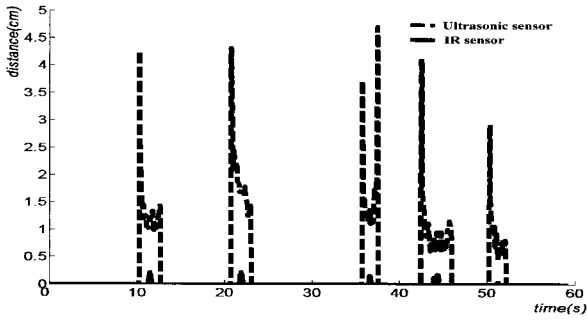


그림 12. 거리 오차.  
Fig. 12. Distance error.

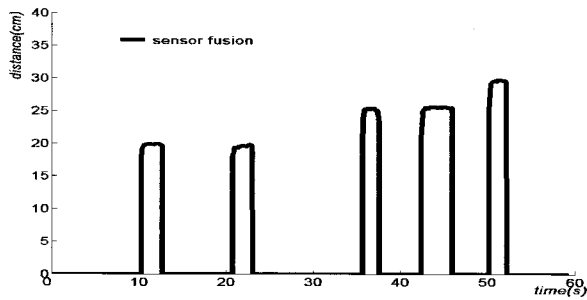


그림 13. 센서 합성에 의한 출력 거리.  
Fig. 13. Distance output by sensor composition.

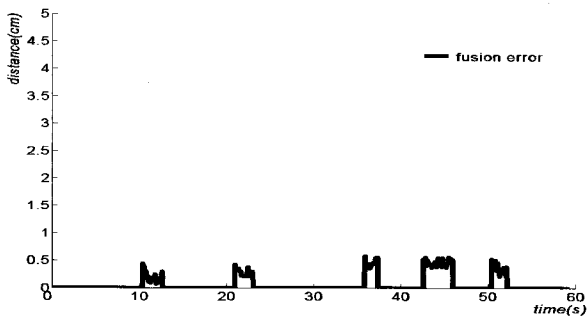


그림 14. 센서 합성 오차.  
Fig. 14. Sensor composition error.

전과 전달로 인하여 처음 가공지선을 접하게 되는 지점에서 크게 오차를 가진다. 그리고 평균적으로 1~2cm사이의 오차를 가진다. 로봇과 가공지선 사이에서 수용할 수 있는 거리가 20~26cm이라고 할 때 2cm의 오차는 로봇의 오동작을 유발할 수 있다.

그림 13에는 센서 합성에 의한 출력 거리를 나타낸다. 출력 거리는 그림 11에 나타낸 것과 동일하다. 그리고 그림 14에서는 센서 합성에 의한 출력 거리와 실제 거리의 차이를 나타내었다.

센서 합성에 의한 출력과 실제 거리와의 차이는 최대 5mm로 이는 로봇과 가공지선 사이의 허용할 수 있는 오차 범위이다.

3. 센서 합성의 결과에 대한 퍼지 제어 실험

설계된 퍼지 제어기의 성능 실험을 위하여 다양한 거리에

대하여 위치 및 속도 추정 제어 성능 실험을 수행하였다. 실험은 로봇이 가공지선을 검출한 후 로봇과 가공지선이 평행 상태에 도달하기까지의 시간에 대하여 PID 제어기와 비교하여 나타내었다. 그림 15는 로봇과 가공지선이 평행한 상태에서 가공지선과 결함을 위한 위치추적을 나타낸다.

그림 15은 로봇과 가공지선이 평행한 상태에서 로봇이 가공지선과의 결함을 위한  $d_1$  과  $d_2$  가 동일할 때의 위치 추적 값을 나타내었다. 로봇의 상하 운동만을 한 결과로 로봇과 가공지선 사이에서 센서의 오차를 고려한 최적의 거리가 23cm이므로 이에 초점을 맞추어 거리 값이 수렴함을 나타내었다. PID 어기와 비교하여 최종 수렴까지는 0.5~1sec 미만으로 큰 차이가 나타나지는 않았다.

그림 16은 로봇과 가공지선이 평행하지 않은 상태에서 로봇이 가공지선과의 결함을 위한  $d_1$  과  $d_2$  가 동일하지 않을 때의 위치 추적 값을 나타내었다.  $d_1$  의 경우 로봇이 동일한 상하운동을 함으로써 그림 15와 비슷한 출력 파형을 가진다. 그러나  $d_2$  의 경우 로봇이 상하운동과 회전운동을 동시에 함으로써 나타나는 출력은  $d_1$  과 많은 차이를 가진다는 것을 알 수 있다. PID 제어기와 비교하여 최종 수렴까지의 시간이 1~1.5sec의 시간 차를 가지게 되고 결함 공간의 허용 오차 범위에 진입을 하기 위한 시간이 약 1sec의 차이를 가진다.

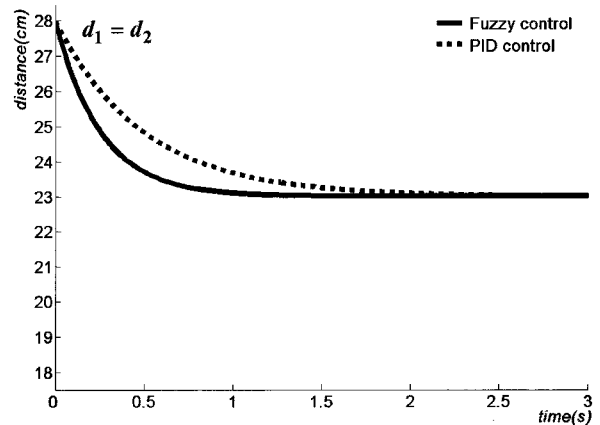


그림 15. 제안된 퍼지 제어기와 PID 제어기의 비교( $d_1 = d_2$ ).  
Fig. 15. Comparison of PID control with fuzzy control ( $d_1 = d_2$ ).

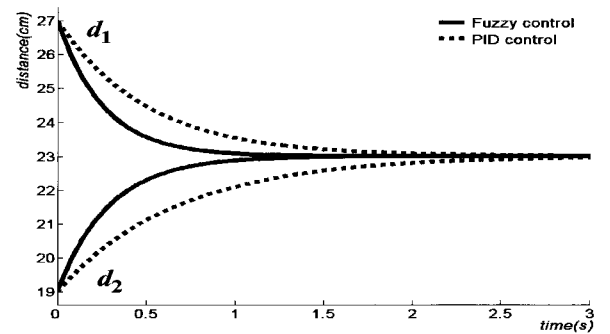


그림 16. 제안된 퍼지 제어기와 PID 제어기의 비교( $d_1 \neq d_2$ ).  
Fig. 16. Comparison of PID control with fuzzy control ( $d_1 \neq d_2$ ).

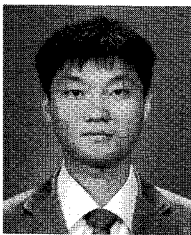
**V. 결론**

본 논문에서는 초음파 센서와 적외선 센서의 장·단점을 모두 활용하는 센서 합성 기술을 사용하여 배전선 점검 로봇이 가공지선을 검출하고 퍼지 제어기에 의하여 안정적으로 로봇과 가공지선의 결합이 이루어질 수 있음을 보였다. 이러한 알고리즘들의 효율성을 실제 실험을 통하여 검증하여 배전선 점검로봇에 활용할 수 있도록 하였다. 배전선로는 전력산업의 정맥과 같은 역할을 하는 것으로서, 기존의 많은 연구를 통하여 열화상 진단 장치나 전자파에 의한 진단 장치 등이 소개되고 있으나 실제 적용을 못하고 있다. 그러나 배전선 점검 로봇의 개발로 인력에 의존하는 검사 형태를 로봇이 대신 수행함으로써 막대한 비용 절약 효과를 가져올 것으로 예상된다. 향후 연구되어야 할 부분은 제어 알고리즘 분야 중 더욱 강인한 적응성을 보장하기 위해 자기 학습 기능을 갖춘 제어기를 설계하고 이에 따른 로봇의 주행 알고리즘의 개발이다. 또한, 배전선 점검 로봇의 효율적인 주행과 관리를 위하여 카메라를 이용한 영상부분을 실시간으로 관리자가 모니터링 할 수 있도록 로봇을 감시하고 제어할 수 있는 시스템의 개발하는 것 또한 관련된 향후 과제이다.

**참고문헌**

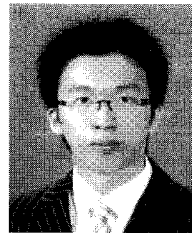
[1] 조연욱, “송전선로의 코로나에 의한 전파잡음 통계적 예측 모델,” 전기학회지, 제35권 제5호, pp. 290-294, 1986.  
 [2] 조연욱, “송전계통의 코로나에 의한 라디오잡음 분석,” 전기학회지, 제35권 제1호, pp. 5-10, 1986.  
 [3] J. Sawada, K. Kusumoto, Y. Maikava, T. Munakata, and Y. Ishikawa, “A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines,” *Power Delivery, IEEE Transaction on*, vol. 6, issue 1, pp. 309-315, Jan. 1991.

[4] A. Santamaria, R. Aracil, A. Tuduri, P. Martinez, F. Val, L. F. Penin, M. Ferre, E. Pinto, and A. Barrientos, “Teleoperated robots for live power lines maintenance(ROBTET)” *14th International Conference and Exhibition on*, vol. 3, no. 2-5, pp. 31/1-31/5, Jun. 1997.  
 [5] A. Souza, L. Moscato, M. Santos, W. Filho, G. Ferreira, and A. Ventrella, “Inspection Robot For High-Voltage Transmission Lines” *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. 1, pp. 1-7, 2004.  
 [6] J. Gu, M. Meng, A. Cook, and P. X. Liu, “Sensor fusion in mobile robot: Some perspectives” *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 2, pp. 1194-1199, June 2002.  
 [7] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe “Mobile robot positioning-sensors and techniques,” *Invited paper for the Journal of Robotic System*, vol. 14, no.4, pp. 231-249, Set. 1996.  
 [8] J. Vazquez and C. Malcolm, “Fusion of triangulated sonar plus infrared sensing for localization and mapping,” *International Conference on Control and Automation*, vol. 2. pp. 1097-1102, June 2005.  
 [9] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information & control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.  
 [10] Y. F. Li, and C. C. Lau, “Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems,” *IEEE International conference on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 3, pp. 65-72, April 1989.  
 [11] S. M. Smith and D. J. Comer, “Automated Calibration of a Fuzzy Logic Controller Using a Cell State Space Algorithm,” *IEEE Control System*, vol. 11, no. 5, pp. 18-28, Aug. 1991.  
 [12] S. Thongchai and K. Kawamura, “Application of fuzzy control to a sonar-based obstacle avoidance mobile robot” *IEEE International Conference on Control Application*, pp. 425-430, September 2000.



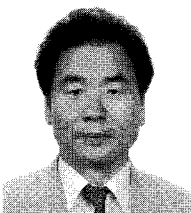
**한순신**

2004년 동서대학교 전자공학전공 졸업.  
 2006년 부산대학교 전자공학과 석사졸업.  
 2007년~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 센서 융합, 마이크로프로세서 응용 설계, 모터구동 제어.



**최재영**

2007년 동서대학교 정보네트워크전공 졸업. 2007년~현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 센서 융합, 영상 인식, 모터구동 제어.



**이장명**

1980년 서울대학교 전자공학과 공학사.  
 1982년 서울대학교 전자공학과 공학석사.  
 1990년 University of Southern California 공학박사.  
 1992년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 지능 로봇 시스템의 설계 제어, 마이크로 프로세서 응용 및 설계.

세서 응용 및 설계.