

원자력 발전소 아날로그 계기판 영상인식

조재완*, 정경민

*한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

e-mail : jwcho@kaeri.re.kr

Analog Type Instrument Panel Recognition in the Nuclear Power Plant using an Image Processing Technology

Jai-Wan Cho * and Kyung-Min Jeong

*Dept. of Nuclear Convergence, Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

원자로 건물 내부에는 원자로의 안전운전을 위한 다수의 계통, 구조물 및 기기들이 위치하고 있다. 원자로의 안전과 직결되는 안전계통 변수 (수위, 압력) 들은 경우에 따라서는 현장확인이 요구된다. 원자로 가동 중에 운전원에 의한 안전계통변수의 현장확인이 용이하도록 원자로 건물 내부의 출입구 (2 중문) 부근에 수위계, 압력계 등의 현장계기가 위치하고 있다. 본 논문에서는 일본의 (주) 동경전력이 공개한 후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로건물의 IC (비상용 복수기, isolation condenser) 조사영상에 나타나는 현장계기의 영상인식에 대해 기술한다. 조사 영상의 분석에 의하면 현장계기들은 기계식의 아날로그 타입이다. 아날로그 타입의 기하구조를 이용하여 계기판 눈금을 인식하고, 계기판 바늘의 기울기 계산을 통해 계기판을 영상 관독할 수 있었다. 이러한 계기판의 영상관독은 후쿠시마 원전 사고와 같이, 고방사선 피폭 우려로 인해 사람대신에 로봇이 원자로 건물내부에 진입하여 주요 계통, 구조물 및 기기의 현장계기를 관독한다고 가정하면, 유용한 기능이다.

1. 서론

최근에 (주) 동경전력은 후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로 건물 4 층에 위치한 비상용복수기 (IC, isolation condenser, 이하 IC 로 기술) 조사 영상을 공개하였다 [1][2]. 이는 일본 국회의 후쿠시마 원자력 발전소 사고조사위원회 조사위원이 IC 의 현장조사 불발에 따른 불만을 언론에 토로하는 과정에서 (주) 동경전력이 공개한 것으로 보인다. 일본 국회의 사고조사위원회의 조사위원은 IC 의 기능상실이 대지진 충격에 의한 것이라고 판단하고 있고, (주) 동경전력은 대지진 발생 이후에도 IC 는 정상 작동하였으며, 쓰나미에 의해 IC 가 기능이 상실되었다고 주장하고 있다. 이와 같은 논점을 해소하기 위해 사고조사위원회는 IC 의 현장조사를 추진하였으나, (주) 동경전력은 상기 동영상 (2011 년 10 월 18 일 촬영)을 2012 년 2 월 25 일경에 조사위원에게 보여주고, 1 호기 원자로 건물 내부의 상황(조명)이 열악하여 상세조사가 어렵다고 설명하여 현장조사를 단념하게 하였다. 최근에 국회 사고조사위원회 조사위원이 언론에 IC 조사 중단의 문제점을 토로하여 일반 (동경전력 Web Site) 에게 공개된 것이다. 1 호기 원자로의 IC 작동문제는 후쿠시마 제 1 원자력 발전소를 사고에서 재난 수준으로 확대시킨 중요한 열쇠이다. 대지진에 의한 쓰나미가 일단락된 뒤에 1 호기 원자로 주 제어실의 당직장은 IC 작동을 확실히 하기 위해, 발전소 본부에 증기분출의

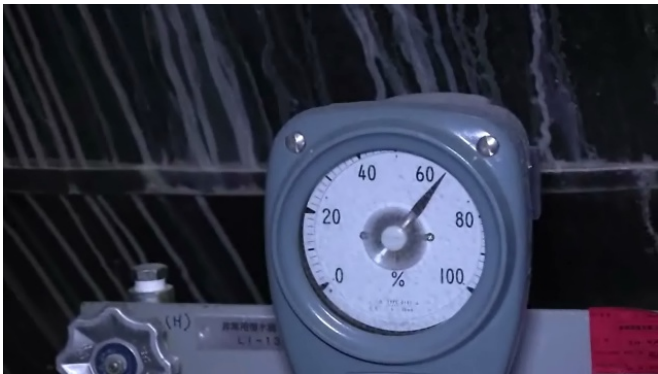
육안확인을 의뢰하였으며, IC 수위의 현장확인조사를 위해 운전원을 원자로건물에 파견하였다. 그러나 운전원은, 방사선 레벨이 평소보다 높았기 때문에 건물 입구에서 철수하였다 [3]. 역사에 가정은 없다고 하지만, 1999 년에 발생한 일본 도카이부라(東海村) JCO 우라늄 정련공장의 임계사고를 계기로 2001 년 초에 개발된 원자력 비상대응 로봇들이 유지보수 및 설계개선이 지속적으로 이루어져 후쿠시마 제 1 원자력발전소에 긴급 투입될 수 있었다면, 개발된 로봇 시스템 (JAEA RaBOT 및 미쯔비시 중공업의 MARS-A) 들의 제원에 근거하여 추론하면, 1 호기 원자로 건물 4 층에 위치한 IC 수위계의 영상관독임무는 수행할 수 있었을 것으로 판단된다 [4][5]. 원자력시설 작업 종사자의 방사선 피폭선량 제한치 (100mSv / 5years) 와 JCO 임계사고 이후 개발된 로봇 시스템의 내방사선 설계 특성 (10Sv/h × 2 hours) 을 고려하면, 운전원이 진입을 주저하였던 당시의 원자로 건물 감마선 선량을 (~ 약 100 mSv/h) 환경에서 로봇은 충분히 임무를 수행할 수 있다.

원자력 발전소 중대사고에 원자력 비상대응로봇이 투입된다고 가정하면, 로봇에 탑재되는 관측 카메라를 이용한 영상관독기능이 중요하다. 본 논문에서는 일본 (주) 동경전력이 발표한 1 호기 원자로 건물 4 층의 조사 동영상을 분석하였으며, 원자로 건물내에 위치한 주요 계통, 구조물 및 기기들의 상태를 파악하였다. 본 논문에서는 원자로 건물 내부에 위치한

계기판에 대한 영상판독을 위한 영상처리기법을 개발하였으며, 이에 대해 기술한다.

2. 후쿠시마 1 호기 원자로 IC 동영상 분석

(주) 동경전력은 후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로 건물 4 층에 위치한 IC 조사 관련 동영상을 3 개 공개하였다. 본 논문에서는 로봇의 관점에서, 1 층의 건물 입구에서 4 층의 목표지점까지 접근하는 내용들이 담긴 2 개의 동영상들을 분석하였다. 최초 공개된 동영상은 2011 년 10 월 18 일자 촬영영상이며, 1 년 경과된 2012 년 11 월 30 일자에 촬영한 동영상을 추후 공개하였다. 2011 년 10 월 18 일자 동영상을 frame 단위로 분해한 결과, 작업원이 원자로 건물 입구에서 IC 계기판 위치 지역까지 접근하는데 4 분 소요되었다. 사람의 걷기 속도 (6km/h) 와 로봇 (JAEA RaBOT 및 미쯔비시중공업 MARS-A) 의 주행속도 (2km/h) 를 감안하여, 로봇이 투입된다고 가정하면 12 분 소요되는 것으로 계산되었다. 여기서, 로봇의 조작 및 원자로 건물의 지형 및 내부 구조에 대해서는 충분한 훈련을 통해 완전히 숙지가 되었다고 가정한다. 그림 1, 2 에는 1 호기 원자로 건물 4 층에 위치한 주요 계기판을 나타낸다.



(그림 1) 1 호기 원자로 건물 4 층의 주요 계기판(1)



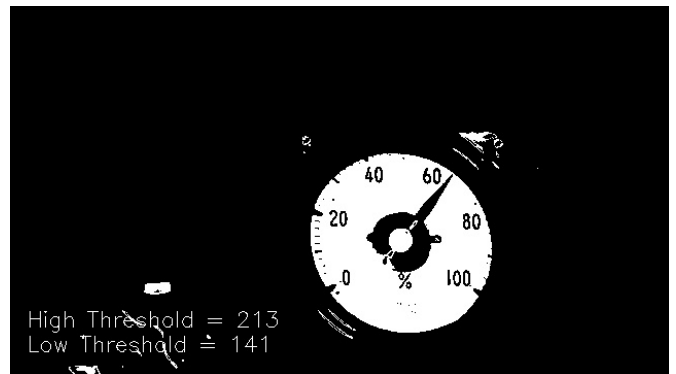
(그림 2) 1 호기 원자로 건물 4 층의 주요 계기판(2)

그림에서 나타낸 바와 같이 계기는 기계식의 아날로그 타입이었으며, 육안 판독의 시인성을 고려하여 계기판 바늘의 색상으로 적색을 사용한 것도 있었다.

1 호기 원자로 건물은 노심용융에 의한 수소폭발로 쓰레기 잔해들이 널려 있었으며, 사람의 진입이 용이하지 않았다. 따라서, 공개된 동영상은 안정된 자세에서 촬영되지 않아 유용한 정보를 파악하는데 한계가 있었다. 본 논문에서는 계기판 영상 판독의 시험 영상으로 그림 1 을 사용하였다. 이는 로봇이 진입할 경우, 원격조작에 의해 안정된 상태에서 주요 계통, 구조물 및 기기를 촬영할 수 있기 때문에, 영상품질이 상대적으로 좋을 것이라는 가정에 근거하였다.

3. 계기판 영상 인식

그림 1 에 나타낸 바와 같이 IC 의 주요 계기판은 아날로그 형태이다. 계기판 패널에 눈금이 표시되어 있고, 바늘의 끝이 지시하는 눈금의 값을 읽는 방식으로 계기를 판독한다. 계기의 영상 판독은 크게 2 가지로 구분된다. 첫째는 계기판의 눈금을 인식하는 것이고, 두번째는 계기판 바늘의 방향(기울기)을 파악하는 것이다. 본 논문에서는 계기판 눈금을 인식하기 위해서 다음과 같은 방식을 사용하였다. 계기판은 육안판독을 고려하여 시인성 (색의 대비) 을 좋게 하기 위하여 백색면에 흑색의 눈금자와 값들이 표시되어 있다. 백색의 계기판 영역은 주변의 배경에 비해 휘도가 크기 때문에 간단한 2 진화 처리로 계기판 영역의 추출이 가능하다. 이를 그림 3 에 나타낸다.



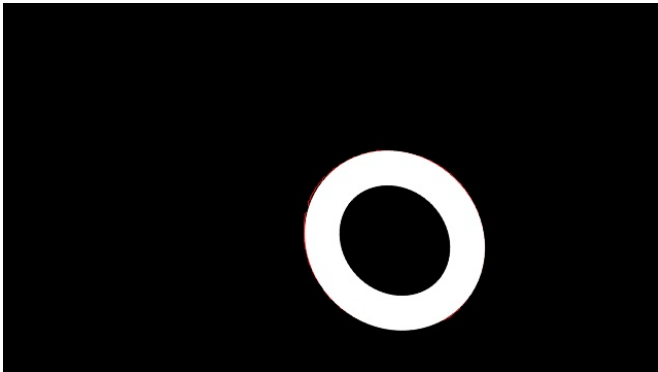
(그림 3) 2 진화 처리에 의한 계기판 영역 분리

Size Filter 처리를 통해 계기판 영역 이외의 작은 영역들을 제거한다. 이러한 작은 영역들은 외부 조명이 계기판 프레임에 반사되어 밝게 나타나는 영역들이다. 추출된 영역을 타원으로 fitting 하여 타원의 중심을 구한다. 타원의 중심을 계기판 눈금자의 중심으로 가정한다. 그림 4 에 계기판 영역의 타원 모델링 결과를 나타낸다. 계기판은 진원이다. 그러나 카메라를 계기판 정면과 수직으로 일치시키는 것은 어렵기 때문에 타원으로 관측된다. 눈금 영역을 구하기 위해 donut 모양의 형상 (그림 5) 을 임의로 만들어 donut 형상에서 2 진화 영상 (그림 3) 을 감산 처리하면, 그림 6 에 나타낸 바와 같이 눈금 영역만 추출된다. 계기판의 눈금들이 일정한 간격으로 배열되어 있다고 가정하면, 계기판에서 가장 중요한 눈금은 최소눈금 (LSS, least significant scale) 과 최대눈금 (MSS, max. significant scale) 표시자 이다. 본 논문에서는 타원의 중심좌표

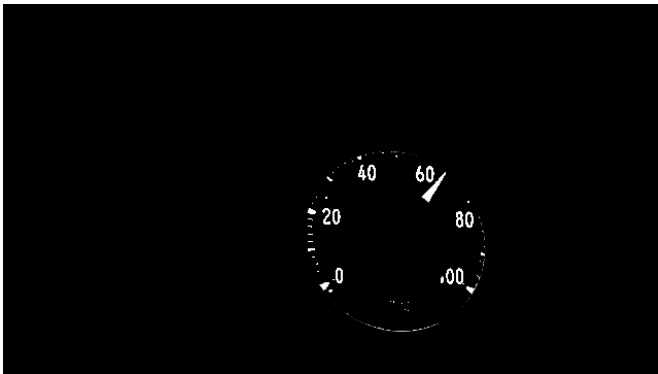
(그림 4)를 이용하여 그림 5의 donut window의 일부 영역만을 이용하여 LSS와 MSS를 용이하게 추출하였다. 이를 그림 7에 나타낸다.



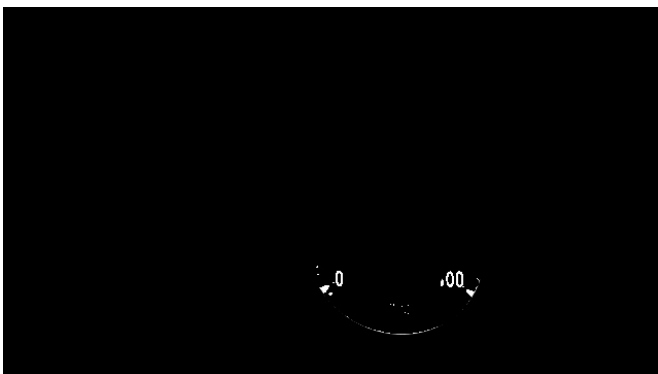
(그림 4) 계기판의 눈금 중심점 설정



(그림 5) 계기판 눈금영역 추출을 위한 donut window

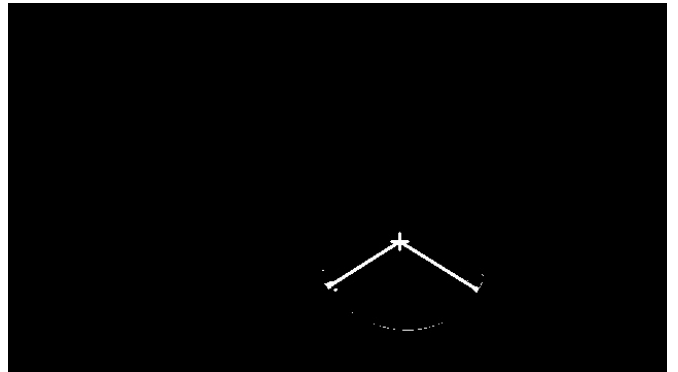


(그림 6) 추출된 계기판 눈금영역



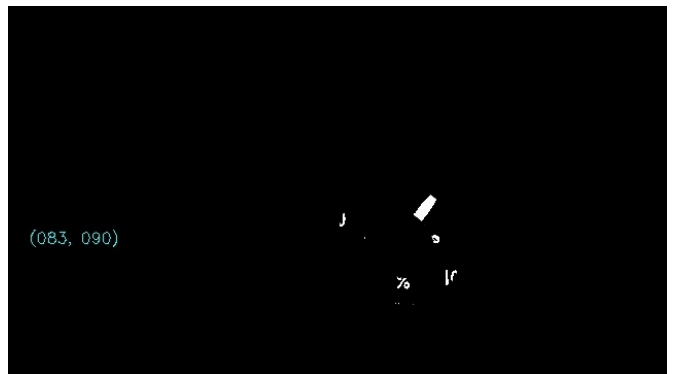
(그림 7) 계기판의 최소 및 최대눈금 영역추출

앞서 구한 타원의 중심과 LSS 및 MSS를 연결하는 선분을 구하고, 이들 선분의 기울기를 계산한다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 타원의 중심과 LSS 연결선과 MSS 연결선의 각도가 계기판의 유효측측 영역에 해당한다.

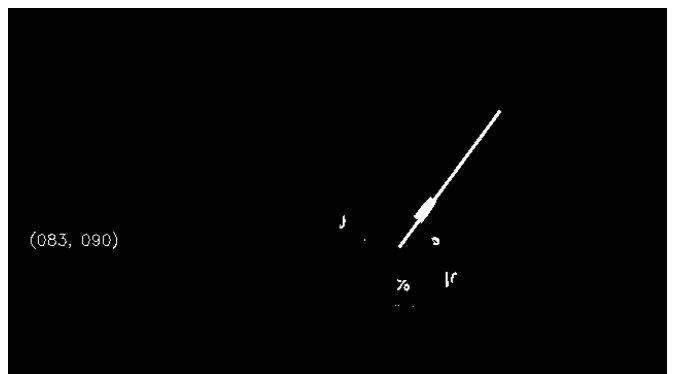


(그림 8) 계기판의 유효 측정 영역 계산

앞서 기술한 계기판 눈금자 추출방법과 동일한 방법을 사용하여, 그림 5의 donut window (size 변화)와 그림 (3)의 2진화 영상을 감산처리하면 계기판의 바늘 성분만을 추출할 수 있다. Size filter를 이용하여 바늘성분만을 추출하고, line fitting 알고리즘을 이용하여 바늘의 기울기를 구할 수 있다. 이를 그림 9, 10에 나타낸다.



(그림 9) 계기판 바늘영역 추출



(그림 10) 계기판 바늘의 기울기 계산

그림 8에 나타낸 계기판의 유효 측정영역 (각도)과 계기판 바늘의 각도 비를 구하면 계기판의 판독 값이 된다. 그 결과를 그림 11에 나타낸다. 그림 8에 나타

낸 바와 같이 계기판의 유효 계측 영역은 다음과 같이 구할 수 있다.

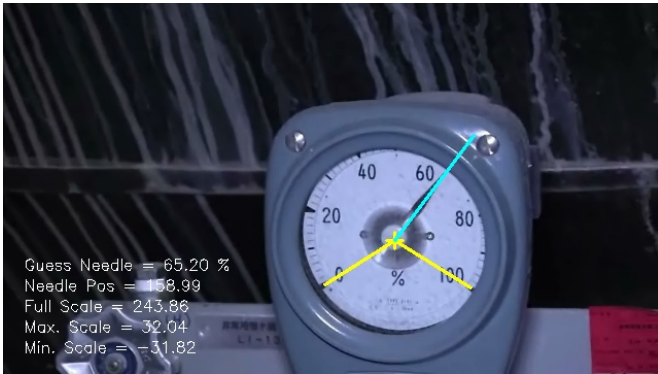
$$\theta_{full\ scale} = \theta_{LSS} + \theta_{MSS} + \pi \quad (1)$$

식 (1) 에서, θ_{LSS} 는 타원의 중심과 LSS (최소 눈금) 를 연결하는 선분의 기울기(각도)이고, θ_{MSS} 는 타원의 중심과 MSS (최대 눈금) 을 연결하는 선분의 기울기이다. 그리고, 그림 10 에서 판독한 계기판 바늘의 기울기 성분, θ_{needle} 을 이용한 계기판 지시치는 식 (2) 와 같다.

$$\theta_{needle\ scale} = \theta_{LSS} + \theta_{needle} \quad (2)$$

식 (1)과 식(2) 로부터 계기판의 영상판독은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{needle\ pos} = \frac{\theta_{needle\ scale}}{\theta_{full\ scale}} \quad (3)$$



(그림 11) 계기판의 영상판독 결과

그림 11 로부터 그림 1 에 나타낸 IC 계기판의 영상판독결과는 65.2% 임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 일본의 (주) 동경전력이 공개한 후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로건물 4 층의 IC 조사영상에 나타나는 현장계기의 영상인식에 대해 기술하였다. 조사영상에 의하면 현장계기들은 기계식의 아날로그 타입이다. 아날로그 타입의 기하구조를 이용하여 계기판 눈금을 인식하고, 계기판 바늘의 기울기 계산을 통해 계기판을 영상 판독할 수 있었다. 계기판의 배경과 같은 타원 모양의 donut window 를 만들고, 이를 2 진화 처리로 구한 계기판 배경과 감산 처리함으로써 계기판 눈금 및 계기판 바늘 영역을 간단히 추출할 수 있었다. 계기판 배경의 타원 중심점과 최소 및 최대 눈금을 연결하는 선분을 구하고, 2 선분이 이루는 각도를 계기판의 유효 계측영역으로 간주하였다. 그리고, 계기판 바늘 선분의 기울기를 line fitting 으로 구하고, 이를 유효계측영역과 비교함으로써 계기판의 지시치를 영상 판독할 수 있었다. 후쿠시마 원전 사고와 같이, 고방사선 피폭 우려로 인해 사람대신에 로봇이 원자로 건물내부에 진입하여

주요 계통, 구조물 및 기기의 현장계기를 판독한다고 가정하면, 계기판의 영상판독기능은 유용하게 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] (주) 동경전력, “일본 국회사고조사위원회에 후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로건물내의 상황을 보여준 영상 (2011 년 10 월 18 일 촬영)”, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/>
- [2] (주) 동경전력, “후쿠시마 제 1 원자력발전소 1 호기 원자로건물 4 층의 조사영상 (2012 년 11 월 30 일 촬영)”, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/>
- [3] (株)東京電力, 福島 第一 原子力発電所 被災 直後の 対応状況について “, 2011. 6. 18
- [4] 柴沼 清 (Kiyoshi Shibamura), “原研における事故 対応ロボットの開発 (その 2) 耐環境型 ロボットの 開発”, 日本ロボット學會誌, Vol. 19, No.6, pp710-713, 2001
- [5] 日本 經濟産業省 原子力防災支援システム評價検討會, “原子力防災支援システム開発 - 事後評價報告書”, 平成 13 年 12 月 (2001 年 12 月)