

에그크레이트 검사를 위한 Go-No 게이지의 삽입위치 및 이동방향 보정 알고리즘

An Algorithm for Adjusting Inserting Position and Traveling Direction of a Go-No Gauge Inspecting Eggcrate Assemblies

이 문규, 김 채 수
(Moon-Kyu Lee and Chae-Soo Kim)

Abstract : A machine-vision guided inspection system with go-no gauges for inspecting eggcrate assemblies in steam generators is considered. To locate the gauge at the right place, periodic corrective actions for its position and traveling direction are required. We present a machine vision algorithm for determining inserting position and traveling direction of the go-no gauge. The overall procedure of the algorithm is composed of camera calibration, eggcrate image preprocessing, grid-height adjustment, intersection point estimation between two intersecting grids, and adjustment of position and traveling direction of the gauge. The intersection point estimation is performed by using linear regression with a constraint. A test with a real eggcrate specimen shows the feasibility of the algorithm.

Keywords : eggcrate assembly, inspection, go-no gauge, machine vision, position and orientation, linear regression with constraints

I. 서론

에그크레이트(eggcrate)는 원자력 발전용 증기발생기(steam generator)의 주요 부품으로서 16,000개 이상의 특수 금속판이 서로 격자(grid) 구조를 이루면서 그물 모양 형태로 조립되어 있다(그림 1a 참조). 에그크레이트를 구성하는 기본 단위구조(opening)는 그림 1b에서 보는 바와 같이 4개의 금속판으로 이루어진 평행 사변형 모양으로 이루어져 있는데 각 단위구조에 방사능 물질이 포함된 고온 고압의 물이 흐르는 전열관(tube)이 삽입되게 된다(그림 2 참조). 이 전열관들은 에그크레이트가 증기발생기 내부에 용접되어 설치되고 난 후 각 에그크레이트 단위구조에 순서에 따라 삽입·고정된다. 이때 격자의 크기가 작은 경우에는 전열관 삽입이 불가능하므로 전열관이 원활하게 삽입될 수 있도록 에그크레이트가 제작되어야 한다. 그러나, 에그크레이트는 압연된 판재의 절단 및 용접 공정으로 제작되는 조립물이므로 네 개의 격자가 이루는 최대 내접원의 크기가 정해진 규격을 만족하지 않을 수 있으므로 제작 후 철저한 치수검사가 필수적이다.

이러한 에그크레이트 조립물은 검사대상인 격자의 수가 대단히 많을 뿐만 아니라 직경 4m의 대형 구조물이므로 작업자가 단위구조를 수작업으로 전수검사하는 데에는 많은 제약이 있다. 이를 극복하기 위해서 최근에는 이와 같은 검사작업을 자동화하려는 연구가 진행되고 있다[1]. 자동화된 치수검사 장치로서는 우선 머신비전 시스템(machine vision system)을 응용한 장치가 하나의 대안이 될 수 있다. 이 시스템에서는 카메라로부터 에그크레이트 단위구조에

대한 영상을 획득하여 이를 분석함으로써 단위구조에 삽입될 수 있는 최대 내접원의 크기를 추정하는 방법을 사용한다. 이 경우에는 영상처리의 속도 및 정확성과 조명장치를 포함한 시스템을 구성하는 각종 하드웨어의 특성에 따라 시스템의 성능이 크게 좌우되는 단점이 있다. 즉, 시스템 성능상의 일관성을 유지하기가 매우 어렵다는 것이다.

이에 대한 대안으로서 가장 현실성 있는 것은 표준 전열관의 크기에 맞게 제작된 Go-No 게이지(gauge)를 각각의 에그크레이트 단위구조에 직접 삽입하여 보아서 그 불량 유무를 확인할 수 있는 자동검사 시스템일 것이다. 이 시스템의 장점은 측정장치를 에그크레이트 단위구조에 직접 삽입하여 검사하기 때문에 측정상의 오차가 발생할 수 없어서 판단 결과의 신뢰도가 높고 또한 신속하여 실용적이라는 것이다.

이러한 시스템을 이용하여 검사하기 위해서는 게이지 장치의 중심위치를 정확하게 설정한 후 검사하여야 신뢰성 있는 결과를 얻게 된다. 그러므로, 최초의 검사 개시시점은 물론이고 각 에그크레이트 단위구조에 대한 검사가 시작될 때마다 그 중심위치와 함께 다음 단위구조로 이동하기 위한 게이지 장치의 이동 방향을 확인하여 주어진 오차범위를 벗어날 경우에는 이를 보정해 주어야 한다. 이를 위해서는 검사 자동화 시스템에 부수적으로 설치될 게이지 이동장치 제어 전용의 머신비전 시스템이 구축되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 머신비전 시스템의 핵심 부분으로서 게이지의 중심위치와 게이지와 카메라를 이동시키는 XY 이동 장치의 이동방향을 추정하여 게이지의 삽입위치를 정확하게 선정하기 위한 시각인식 알고리즘을 개발하였다.

II. 시각인식 알고리즘의 개요

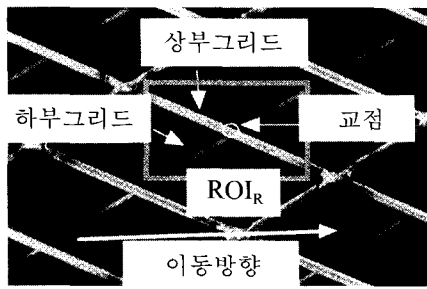
1. 알고리즘의 개요

에그크레이트 검사시스템은 그림 1a에 도시된 바와 같이

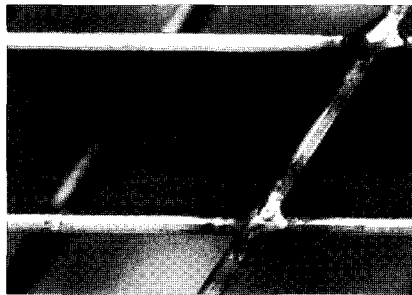
논문접수 : 2002. 7. 22., 채택확정 : 2003. 1. 14.

이문규 : 계명대학교 기계·자동차공학부 산업공학전공
(moonkyu@kmu.ac.kr)

김채수 : 서울사이버대학교 경성학부 e-Biz전공
(cskim@iscu.ac.kr)



(a) 에그크레이트 조립물의 일부.



(b) 에그크레이트 단위구조를 확대한 모습.

그림 1. 에그크레이트 조립물과 그 단위구조의 모습.
Fig. 1. An eggcrate assembly and assembly unit.

카메라가 부착된 게이지가 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면서 단위구조를 한 개씩 검사한다. 대상 단위구조를 검사하기 위해서는 게이지가 삽입될 위치를 정확하게 알아야 하고, 검사 후 다음 단위구조로 이동하기 위한 방향과 이동거리를 나타내는 이동벡터가 정해져야 한다. 그런데 에그크레이트 단위구조가 4개의 금속판에 의한 평행사변형 구조이기 때문에 그 중심점이 게이지의 삽입위치가 된다. 또한, 다음 단위구조로의 이동벡터는 평행사변형의 4꼭지점 중 서로 마주보는 좌우 꼭지점들을 연결하는 벡터(방향은 왼쪽에서 오른쪽)이다. 단위구조의 중심점은 좌우 꼭지점들의 중간점이기 때문에 결국 게이지 삽입 중심위치와 이동방향을 확인하는 문제는 단위구조의 좌우 꼭지점들의 위치를 추정하는 문제와 같다.

좌우 꼭지점들의 위치를 추정하기 위해서는 꼭지점을 만드는 2개의 금속판 그리드가 만나는 교점을 알아야 한다. 이 교점을 구하기 위해서 하나의 단위구조를 각 교점을 중심으로 하는 2개의 관심영역(region of interest: ROI)인 ROI_L(왼쪽)과 ROI_R(오른쪽)으로 분할하여 분석한다. 각 ROI에 대한 교점이 구해지면 이들 양 교점의 중앙인 중심점과 또한 교점간의 변위차로 정의되는 이동벡터를 구하게 된다.

한편, 그림 1b에서 보듯이 하나의 단위구조를 이루는 4개의 그리드 중 3개는 동일 평면상에 있으나 나머지 하나의 그리드는 그 평면보다 설계상 25.4mm만큼 밑에 위치하기 때문에 영상처리에 있어서 이러한 위치상의 높이 차를 고려하여야 한다. 여기서, 편의상 위에 있는 3개의 그리드를 "상부 그리드", 그리고 밑에 있는 그리드를 "하부 그리드"라고 명명한다.

이상의 개념 하에 개발된 시각인식 알고리즘의 전체적인

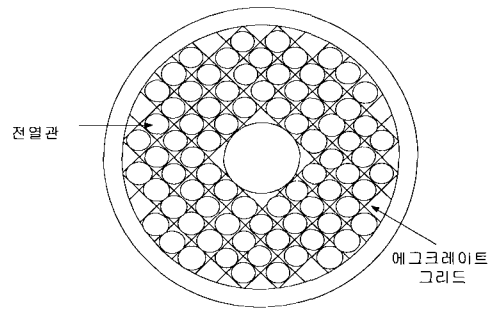


그림 2. 증기 발생기의 내부의 단면도.

Fig. 2. A sectional drawing of steam generator.

개요는 그림 3과 같다. 본 알고리즘은 우선 영상의 좌표와 실세계상의 좌표와의 정합(mapping) 관계를 규명하기 위한 카메라 교정(camera calibration)을 수행한 후 단위구조의 왼쪽 교점을 구하기 위한 ROI_L을 결정하여 그 영상을 획득한다. 획득된 영상에 대하여 영상처리 기법인 이치화(binartization)와 윤곽선 추출 작업(edge detection)을 수행한다.

다음으로 윤곽선 추출작업을 수행하여 얻어진 상부 그리드와 하부 그리드의 윤곽선의 좌표값을 이용하여 각각의 그리드의 윤곽선 영역을 분리한다. 즉, 영상의 Y축에 대한 통계적 특성을 이용한 영역분리 기법을 이용하여 상부 그리드와 하부 그리드의 윤곽선 영역을 구분하게 된다. 그런데 ROI의 종류에 따라 상부 그리드와 하부 그리드가 모두 동일한 평면에 있는 경우(ROI₁)와 하부 그리드가 상부 그리드 보다 일정높이 만큼 밑에 위치한 경우(ROI₂)의 두가지 유형이 있다.

그림 1a에 주어진 ROI는 ROI₂에 해당된다. ROI₁의 경우에는 상·하부 그리드가 모두 동일한 평면상에 있기 때문에 문제가 없으나 ROI₂의 경우에는 용접된 형태로 조립된 상부 그리드와 하부 그리드의 서로 위치가 다르기 때문에 영상상의 좌표점들을 동일한 평면으로 이동시켜야 한다. 즉, 하부 그리드의 좌표점들을 상부그리드가 있는 평면으로 올려주기 위한 하부 그리드 좌표 위치 보정작업이 필요하다. 또한, 상부 및 하부 그리드 좌표점들을 카메라 교정을 통하여 구해진 수리 모형을 이용하여 실세계좌표로 변환시킨다. 이와 같이 그리드 좌표점들을 실세계좌표로 변환시키는 이유는 향후의 분석작업을 영상상이 아닌 실세계상에서 수행하기 위함이다.

다음에는 분리된 각 그리드의 영상점들에 대하여 제약하의 회귀분석(regression analysis with constraints)을 수행하게 된다. 여기서 제약이라는 것은 영상에 나타나는 두 개의 직선식에 대한 회귀식이 실물의 사양으로부터 미리 알 수 있는 두 그리드의 각도를 만족하도록 동시에 결정되어야 함을 의미한다. 즉, 두 직선이 기지의 교각을 유지하면서 추정오차가 최소화되는 직선식을 동시에 구하는 것이다. 이렇게 구한 두 직선의 교점을 계산하여, 이를 왼쪽 교점 IP_L로 정의한다. 다음으로 나머지 오른쪽의 교점을 구하기 위해서 ROI_R을 설정한 후 카메라 교정 이후의 모든 과정을 반복하여 오른쪽 교점 IP_R을 구한다.

이와 같이 하여 두 교점 IP_L 과 IP_R 이 결정되면 이들의 중심점을 계산하고 이동벡터를 결정한다. 구해진 중심점과 현재 게이지 위치와의 차가 일정 이상이 되면 게이지의 위치를 구해진 중심점으로 이동하기 위한 보정량을 산출하여 XY 이동장치로 전송한다. 한편, 계산된 이동벡터는 다음 단위구조로의 이동 방향과 이동 거리를 나타내는 정보로 활용한다.

2. 시스템 구성

개발된 시각인식 알고리즘을 구현하기 위한 영상처리 시스템의 하드웨어는 다음과 같다:

2.1 카메라와 렌즈

카메라는 RS170 통신방식의 Teli카메라를 사용하였고, 렌즈는 영상영역(field of view: FOV)이 본 시스템의 영상처리 알고리즘에 핵심대상인 ROI를 충분히 반영할 수 있도록 16mm 렌즈에 5mm 접사링을 부착하여 사용하였다.

2.2 프레임 그래버(Frame Grabber)

프레임 그래버는 시각검사 및 측정을 위한 머신 비전시스템의 주요 하드웨어로서 영상신호를 획득하여 영상을 저장하고 필요한 처리를 실시간에 처리할 수 있는 기능을 갖고 있다. 처리된 영상의 결과를 문자와 함께 모니터에 출력시켜 대상 물체의 상황을 알 수 있게 D/A변환기 기능을 제공한다. 본 연구에서 사용된 프레임 그래버는 삼성전자의 MVB-03 모델로서 640*480*8 비트 (256 명암도)의 해상도를 나타낸다.

2.3 조명장치

일반적인 광원하에서 작동이 가능하도록 설계된 알고리즘으로 인하여 조명장치를 사용하지 않고 일반 조명 하에서도 시스템의 성능에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 특별한 조명장치를 사용하지 않았다.

III. 알고리즘의 단계

1. 카메라 교정

획득된 영상은 카메라의 자세와 위치, 렌즈의 특성, 프레임 그래버의 성능 등에 따라 영상과 실세계와의 관계가 크게 달라진다. 따라서, 정량적인 제품의 특성인 치수나 면적, 직경 등의 측정을 통한 양·불량검사를 위한 머신비전 시스템에는 영상좌표계(image coordinate system)와 실세계 좌표계(world coordinate system)와의 수리적인 관계를 규명하는 카메라 교정작업이 반드시 선행되어야 한다. 그럼으로써 영상에서의 길이나 면적에 대한 실세계상의 수치를 계산할 수 있게 되기 때문에 사양에 주어진 기준치와의 비교가 가능해진다.

이러한 카메라 교정은 카메라의 광학적인 특성과 내부구조 특성을 나타내는 내부인자(internal parameters)와 물체가 놓여있는 카메라의 3차원적인 위치 및 방향을 나타내는 외부인자(external parameters)를 결정하는 과정을 의미한다[2]. 본 연구에서는 동일평면상에 놓여진 대상 물체와 카메라의 렌즈가 거의 수평상태에 있기 때문에 카메라 교정의 조건으로는 약조건(ill-conditioned) 하의 상태가 된다. 따라서, 통상 30°이상으로 기울어진 경우에 많이 사용되는 Tsai[3]의 카메라 교정 알고리즘은 사용할 수 없기 때문에 여기서는 이정화·이문규[2]의 약조건하의 교정 방법을 사용하였다.

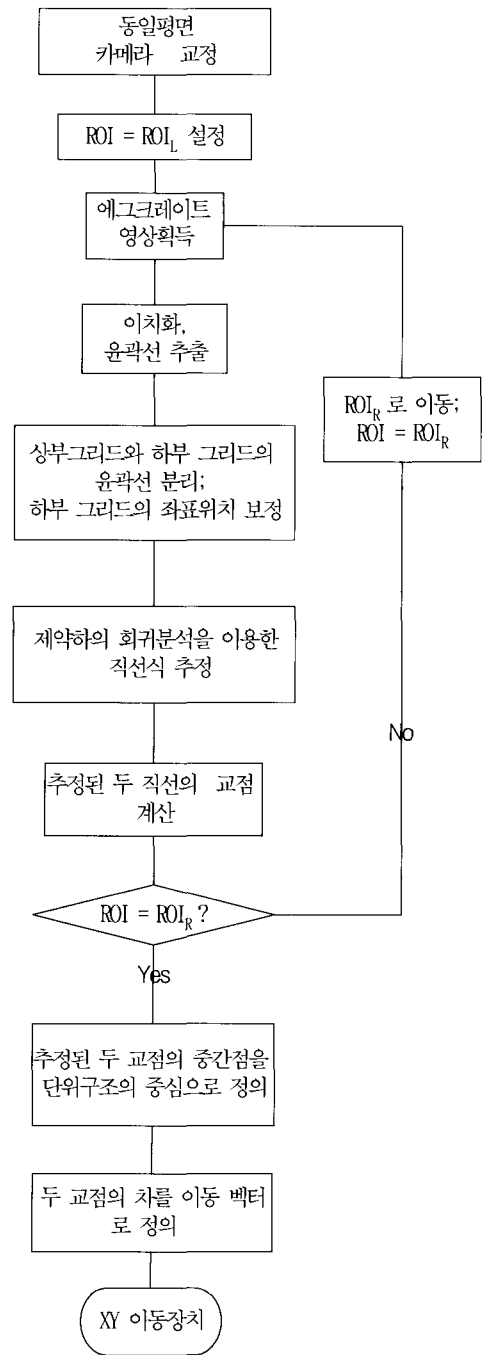


그림 3. 게이지 장치의 위치와 이동 방향을 보정하기 위한 시각인식 알고리즘의 흐름도.

Fig. 3. Flow chart of the machine-vision algorithm to adjust gauge position and travel direction.

2. 전처리 과정

전처리 과정에서는 시각인식 알고리즘에 필요한 기초적인 정보를 추출하기 위한 과정으로 ROI로의 이동, 이치화, 윤곽선 추출의 일련의 과정으로 구성되어 있다.

카메라로 들어오는 영상의 범위가 일정하게 정해져 있으므로 대상 ROI인 ROI_L (왼쪽)과 ROI_R (오른쪽)은 일정하게 정해진 범위를 가진다. 여기서는 편의상 교점을 추정하는 데

요구되는 정보가 충분히 확보될 수 있는 영역을 임의로 선정하였다. 이렇게 하여 정해진 ROI에 대하여 배경 부분과 그리드 부분을 구별하기 위하여 그리드 부분은 255의 값을, 배경은 0의 값을 갖도록 이치화를 수행한다. 즉, 관심의 대상이 되는 화소에 대하여 특정 임계치와 비교하여 그 값보다 크면 255를, 작으면 0의 값을 부여하는 과정이다.

다음의 전처리 과정은 구분된 그리드의 윤곽선을 추출하기 위하여 윤곽선 추출마스크를 적용시키는 것이다. 윤곽선 추출 마스크는 일반적으로 많이 사용되는 Sobel 마스크[4]를 사용하였다.

3. 윤곽선 분리

윤곽선 추출단계에서 추출된 윤곽선은 추정해야 할 교점을 중심으로 하여 X자 형태로 나타난다. 그런데, 교점을 추정하기 위해서는 2개의 그리드의 직선식을 알아야 하므로 이러한 윤곽선을 각 그리드로 분리해야 한다. 이를 위하여, 우선 추출된 윤곽선의 좌표값을 모두 획득한 후 그 윤곽선 좌표값들을 이용하여 다음에 정리된 윤곽선 분리 알고리즘을 이용하여 윤곽선을 분리·추출한다.

<윤곽선 분리 알고리즘>

- 단계 1 : 그림 4와 같이 그리드의 윤곽선의 좌표를 ROI 내의 윤곽선의 정보를 이용하여 구한 중심점을 기준으로 회전시켜 가면서 Y축을 기준으로 히스토그램을 획득한다.
- 단계 2 : 획득된 히스토그램을 토대로 회전각도에 따라 분산을 계산하고 그중 가장 분산이 큰 각도를 찾고 이를 정렬한다.
- 단계 3 : 분산이 가장 큰 각도만큼 회전이 된 상태에서 미리 그리드의 구분을 위해 정한 영역의 범위를 이용하여 구한 히스토그램을 토대로 Y축 상에서 이 값과 유사한 영역을 찾아내어 이를 그리드 1로 하고 나머지는 그리드 2의 윤곽선으로 판단한다.

그림 5에서는 위 윤곽선 분리 알고리즘의 단계 3을 수행하여 가장 분산이 큰 경우의 히스토그램과 윤곽선들의 모습을 보여주고 있다

4. 하부 그리드의 위치 보정

ROI₁의 유형인 경우에는 2개의 그리드가 모두 동일 평면 상에 위치하기 때문에 그리드간의 높이차에 대한 보정이 필요 없다. 그러나, 그림 1a에 주어진 ROI_R과 같이 ROI₂ 유형인 경우에는 상부그리드와 하부 그리드의 높이차로 인하여 영상에 나타난 영상점들의 위치가 왜곡되어 있다. 이는 단일 카메라에 의한 영상 획득시 나타나는 불가피한 현상으로서 정확한 영상점 좌표를 추출하기 위해서는 이들을 서로 동일 평면으로 이동시켜야만 한다. 본 연구에서는 하부 그리드의 좌표점들을 상부 그리드가 있는 평면으로 위치 보정하였는데 이를 위하여 김재수 등[1]이 제시한 보정 알고리즘을 그대로 사용하였다. 이와 같이 위치보정하여 얻은 그리드 i의 n_i개의 영상좌표점들을 III-1절의 카메라 보정

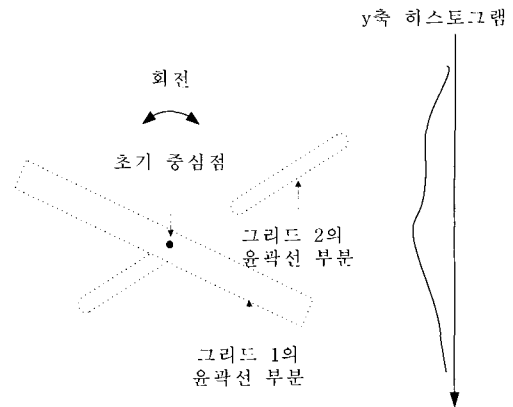


그림 4. 윤곽선 분리 알고리즘의 단계 1 적용 예.

Fig. 4. An example of applying step 1 of the edge segmentation algorithm.

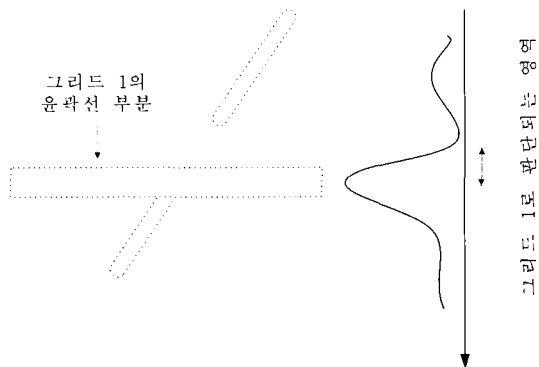


그림 5. 단계 3을 수행하여 추출된 그리드 1의 윤곽선 예.

Fig. 5. An example grid edge obtained by performing step 3.

을 통하여 구한 영상점과 실제좌표간의 정합관계를 이용하여 실제좌표로 변환된 점을 $(x_{ik}, y_{ik}), k = 1, \dots, n_i$ 로 정의한다. 따라서, 다음에 기술된 교점 추출과정에서는 모두 실제세상의 값으로 표현된 자료가 사용되므로 사실상 실제세상에서 계산이 이루어지고 있다.

5. 제약하의 회귀분석을 이용한 직선식도출 및 교점추출

앞 단계에서 구한 각 그리드의 영상점들을 가지고 회귀분석을 하면 그에 대한 회귀직선식을 얻을 수 있고 이를 이용하여 두 직선의 교점을 구할 수 있다. 그러나, 이러한 교점은 두 그리드 영역이 서로 기하학적으로 무관하다는 전제하에 구해진 것이다. 그런데 이는 본 문제의 대상이 되는 에그크레이트 그리드의 조립특성, 즉 4개의 그리드가 알려진 교각을 이루면서 평행사변형 형태를 유지하고 있다는 기하학적인 구조적 사실을 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 해석된다. 그러므로 에그크레이트의 이러한 조립형태를 반영하기 위해서는 두 직선식이 주어진 교각을 만족하도록 회귀식을 구해야 양 그리드에 대한 정확한 직선식을 얻을 수가 있다. 여기서는 이를 위한 수리적 모형을 제시하고 제시된 모형을 이용하여 계산된 직선식과 그 교점을 추정한다. 추정해야 할 2개의 직선식을 다음과 같이 정의하자:

$$y_{ik} = \beta_{i0} - \beta_{i1} x_{ik}, \quad i = 1, 2$$

여기서, β_{i0} 와 β_{i1} 는 그리드 i 의 Y축 절편과 기울기를 각각 의미한다.

실제 교각이 θ 로 주어졌을 때 이를 만족하는 회귀모형은 각 영역에 대한 두개의 회귀직선이 θ 만큼을 유지하여야 하는 제약조건이 주어진 선형회귀모형으로서 다음과 같이 정형화된다:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\beta} \quad Z &= \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ik} - \beta_{i0} - \beta_{i1} x_{ik})^2 \\ \text{s.t.} \quad \tan\theta &= \frac{\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \beta_{11}\beta_{21}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\beta = (\beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{20}, \beta_{21})^T = \text{unrestricted.}$$

목적함수 Z 는 2개의 영상점 자료에 대하여 각각 추정된 직선식에 대한 오차제곱의 합이며 두 직선의 교각 θ 를 알고 있을 때 이를 최소화하는 β 벡터를 구하고자 한다. 또한, (1)은 두 직선간의 주어진 교각을 만족해야 함을 나타내는 제약조건이다.

목적함수 Z 는 4개의 결정변수 $\beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{20}, \beta_{21}$ 에 대하여 불록이므로 최적해는 이 함수를 각 결정변수에 대하여 편미분한 것이 모두 0이 되어야 하는 조건을 만족해야 한다. 또한, 최적해는 제약조건 (1)을 만족해야 하므로 (1)로부터 β_{21} 을 β_{11} 의 함수로 표현한 다음 이를 목적함수에 대입하면 목적함수는 $\beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{20}$ 만의 함수가 된다. 이 목적함수를 각 변수에 대하여 편미분하여 그 값을 0으로 놓으면 다음과 같이 정리된다:

$$\frac{\partial Z}{\partial \beta_{10}} = -2 \sum_{k=1}^{n_1} (y_{1k} - \beta_{10} - \beta_{11} x_{1k}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \beta_{20}} = -2 \sum_{k=1}^{n_2} (y_{2k} - \beta_{20} - \beta_{21} x_{2k}) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial \beta_{11}} &= -2 \left[\sum_{k=1}^{n_1} x_{1k} (y_{1k} - \beta_{10} - \beta_{11} x_{1k}) + \right. \\ &\left. \frac{1 + \tan^2 \theta}{(1 - \beta_{11} \tan \theta)^2} \sum_{k=1}^{n_2} x_{2k} (y_{2k} - \beta_{20} - \frac{\beta_{11} + \tan \theta}{1 - \beta_{11} \tan \theta} x_{2k}) \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(2)와 (3)에서 β_{10} 와 β_{20} 를 모두 β_{11} 의 함수로 나타낼 수 있고 이를 (4)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_{11}^4 + \frac{\sum_{k=1}^{n_1} (-\tan^3 \theta \cdot x_{1i} y_{1i}' - 3 \tan^2 \theta \cdot x_{1i} x_{1i}')}{\sum_{k=1}^{n_1} \tan^3 \theta \cdot x_{1i} x_{1i}'} \hat{\beta}_{11}^3 + \frac{\sum_{k=1}^{n_1} (3 \tan^2 \theta \cdot x_{1i} y_{1i}' + 3 \tan \theta \cdot x_{1i} x_{1i}')}{\sum_{k=1}^{n_1} \tan^3 \theta \cdot x_{1i} x_{1i}'} \hat{\beta}_{11}^2 + \\ \frac{\sum_{k=1}^{n_1} (-3 \tan \theta \cdot x_{1i} y_{1i}' - x_{1i} x_{1i}') - \sum_{k=1}^{n_2} (\tan \theta \cdot x_{2i} y_{2i}' + \tan^3 \theta \cdot x_{2i} y_{2i}' + x_{2i} x_{2i}' + \tan^2 \theta \cdot x_{2i} x_{2i}')}{\sum_{k=1}^{n_1} \tan^3 \theta \cdot x_{1i} x_{1i}'} \hat{\beta}_{11} \\ + \frac{\sum_{k=1}^{n_1} x_{1i} y_{1i}' + \sum_{k=1}^{n_2} (x_{2i} y_{2i}' + x_{2i} y_{2i}' \tan^2 \theta - \tan^3 \theta \cdot x_{2i}' x_{2i} - \tan \theta \cdot x_{2i}' x_{2i})}{\sum_{k=1}^{n_1} \tan^3 \theta \cdot x_{1i} x_{1i}'} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n_1} [x_{1k} ((y_{1k} - \bar{y}_1) - \beta_{11} (x_{1k} - \bar{x}_1))] + \\ \frac{1 + \tan^2 \theta}{(1 - \beta_{11} \tan \theta)^2} \sum_{k=1}^{n_2} x_{2k} [(y_{2k} - \bar{y}_2) - \\ \frac{\beta_{11} + \tan \theta}{1 - \beta_{11} \tan \theta} (x_{2k} - \bar{x}_k)] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 따라서 원하는 각도 θ 만큼을 유지하면서 두 그리드 영역에 대하여 한꺼번에 회귀식을 구하는 것은 (5)을 만족시키는 β_{11} 를 결정하는 문제가 되었다. 따라서, $x_{1i}' = x_{1i} - \bar{x}_1, y_{1i}' = y_{1i} - \bar{y}_1, x_{2i}' = x_{2i} - \bar{x}_2, y_{2i}' = y_{2i} - \bar{y}_2$ 로 정의하고 (5)에서 분모의 항을 소거하여 정리하면 아래 (6)과 같이 β_{11} 의 4차 방정식으로 표현된다: 이 방정식에 대한 해는 4차 다항식의 일반해에 대한 공식 [5]을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 이렇게 해서 β_{11} 값이 정해지면 (2), (3), (4)로부터 $\beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{21}$ 의 추정치인 $\hat{\beta}_{10}, \hat{\beta}_{20}, \hat{\beta}_{21}$ 가 구해진다.

이상과 같은 방법으로 구해진 직선식 모수값인 $\hat{\beta}_{10}, \hat{\beta}_{11}, \hat{\beta}_{20}, \hat{\beta}_{21}$ 로부터 대상 ROI에 대한 교점은 $(\frac{\hat{\beta}_{20} - \hat{\beta}_{10}}{\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{21}}, \hat{\beta}_{10} + \hat{\beta}_{11} \frac{\hat{\beta}_{20} - \hat{\beta}_{10}}{\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{21}})$ 이 된다.

6. 중심점 및 기울기 보정치 계산

에그크레이트 단위구조를 정의하는 좌우 한쌍의 그리드 교점을 추정하기 위하여 III-2절부터 III-5절까지의 과정을 반복하여 적용하면 된다. 이렇게 해서 한쌍의 교점의 위치가 추정되면 이를 이용하여 이동방향 보정치와 게이지 삽입위치 중심점에 대한 보정치를 계산한다. 현재 검사대상의 에그크레이트 단위구조의 중심점은 추정된 좌우 한 쌍의 그리드 교점의 중간점으로 추정된다.

게이지는 검사해야 할 에그크레이트 단위구조에서 전열관이 통과하는 중심점에 있는 것을 가정하고 있다. 그러나, 바로 전에 검사한 에그크레이트 단위구조로부터 단위 구간만큼 이동된 상태에 있으므로 실제의 위치가 정확한 중심점과는 약간의 오차가 있을 수 있다. 그런데 게이지가 에그크레이트 단위구조에 삽입될 때 어느 정도 유격을 가지도록 제작되어 있기 때문에 이 오차가 일정 값 이상으로 크지 않을 경우에는 삽입 작업에 문제가 없을 것이다. 이 오차가 정도 이상으로 클 경우에는 게이지 위치 선정의 잘못

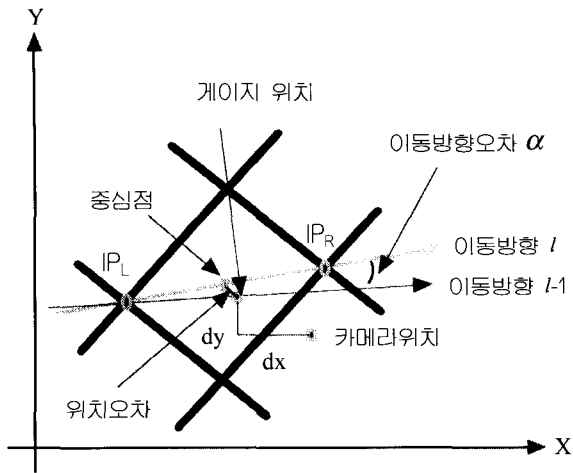


그림 6. 게이지 위치 및 이동방향 오차.
Fig. 6. Gauge position and the error of the gauge travel direction.

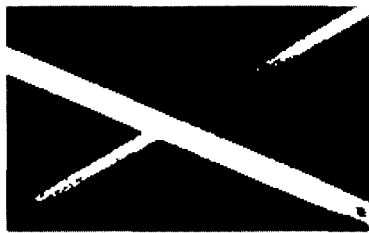


그림 7. 이치화 처리 후의 영상.
Fig. 7. Grid image after binarization.

으로 인하여 삽입 자체가 원천적으로 불가능하기 때문에 에그크레이트 단위구조의 불량 여부에 대한 검사를 할 수가 없다. 그러므로, 이러한 경우를 방지하기 위하여 게이지가 에그크레이트 단위구조의 정확한 중심에 위치될 수 있도록 보정할 필요가 있다.

카메라의 위치는 영상의 중심인 (255.5, 255.5)이 되는데 그림 6에 도시된 바와 같이 게이지는 카메라와 일정 거리만큼 떨어진 곳에 고정적으로 조립되어 있기 때문에 이 카메라 위치를 기준으로 하여 현재 게이지 위치를 추정할 수 있다. 따라서 게이지 중심위치의 오차는 게이지의 중심 좌표와 에그크레이트 단위구조의 중심점과의 차이로 나타난다. 여기서,

$$(X_R, Y_R) = IP_R \text{의 좌표;}$$

$$(X_L, Y_L) = IP_L \text{의 좌표;}$$

$$(C_x, C_y) = \text{카메라 중심의 좌표;}$$

$$(dx, dy) = \text{카메라 중심으로부터 게이지 중심까지의 실제 세상에서의 X축과 Y축의 상대거리}$$

라 하면, 게이지의 위치 보정치는

$$(\delta x, \delta y) = (C_x, C_y) + (dx, dy) - ((X_R, Y_R) - (X_L, Y_L)) / 2$$

로 표현된다. 여기서 카메라 중심 위치 (C_x, C_y) 와 상대거리 (dx, dy) 는 이미 알고 있는 상수이다.

다음으로 XY 이동장치의 이동방향은 그림 6에서 보듯이

이전의 단위구조로 이동할 경우에는 l-1번째 검사한 단위구조의 "이동방향 l-1"이었으나, 현재 l번째 단위구조를 검사한

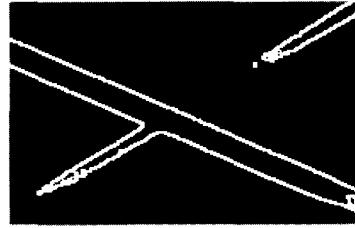


그림 8. 윤곽선 추출결과.
Fig. 8. Grid edges detected.

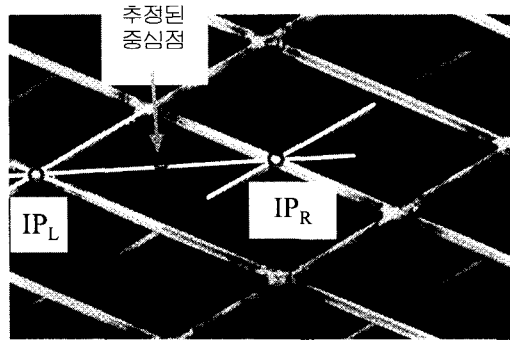


그림 9. 구해진 이등분선과 중심점.
Fig. 9. Obtained bisectonal line and center point.

후에는 "이동방향 l"이 된다. 그 이유는 게이지가 교점과 교점을 연결하는 방향으로 이동하는 것이 단위구조의 중심 위치가 존재하는 방향일 것이기 때문이다. 따라서, 이동방향의 오차 보정치는 이동방향 벡터 l-1과 이동방향벡터 l과 이루는 각도 α 를 나타낸다.

IV. 실제 적용례

본 절에서는 상기에 기술된 오차보정 알고리즘을 그림 1a와 같이 주어지는 실제 에그크레이트 단위구조를 대상으로 적용한 예를 기술한다. 우선 임의의 영상점에 대한 실제계좌표를 계산할 수 있도록 수학적 정합관계를 찾아내기 위하여 III-1절의 카메라 교정을 수행하였다. 다음으로 III-2절부터 III-5절까지의 절차를 수행하여 우측 교점을 먼저 구하고 동일한 절차를 반복하여 왼쪽 교점을 구하였다.

여기서는 우측 교점을 구하는 절차만을 설명하기로 한다. 대상 ROI인 ROI_R의 크기는 640×480의 전체영상 중 시작점을 (230, 150)로 정하고 ROI의 끝점을 (430, 300)으로 설정하였다. 그림 1a에 주어진 ROI는 이와 같이 정해진 영역을 화면에 도시한 것이다.

그림 7은 선택된 ROI에 대하여 MVB-03 보드 프로그램 함수를 사용하여 III-2절의 이치화가 수행된 영상 모습이고 이 영상에 대한 윤곽선 추출 결과가 그림 8에 주어졌다. 그림 9에서는 ROI_R과 ROI_L 각각에 대하여 구한 회귀 직선식과 함께 구해진 교점이 도시되어 있다. 이 그림으로부터 두 그리드에 대한 직선식과 교점이 성공적으로 추출되고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

원자력 발전용 증기발생기의 부품인 에그크레이트 단위구조에 대한 검사시스템의 하나는 GO-No 게이지를 활용하는 것인데 이 시스템에서는 게이지의 삽입 여부를 직접 확인함으로써 조립 상태를 검사한다. 이러한 시스템에서는 게이지 장치의 중심위치가 정확하게 설정되어야 하므로 각 에그크레이트 단위구조에 대한 검사가 시작될 때마다 그 위치와 함께 다음 단위구조로 이동하기 위한 게이지 장치의 이동 방향을 확인하여 보정하는 작업이 필수적이다. 본 연구에서는 이를 위해서 에그크레이트의 조립상태를 검사하는 자동화 검사장치에 필수적인 머신비전 기반의 이동 제어를 위한 알고리즘을 제시하였다. 에그크레이트 단위구조의 형상특성을 바탕으로 하여 여러 가지 영상처리를 거친 후 제약하의 회귀분석을 이용하여 오차 보정에 필요한 주요 좌표점들을 산출하였다. 이러한 점들을 이용하여 게이지의 위치와 이동 방향의 보정치가 효과적으로 산출되는 것을 확인할 수 있었다.



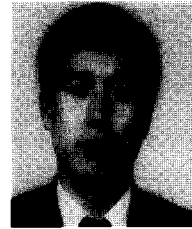
이 문 규

1957년 1월 8일생. 1979년 서울대학교 산업공학과 졸업. 1981년 KAIST 산업공학과 석사, 1989년 동대학 (박사). 1991년~1993년 미국 Rutgers대학 산업공학과 (방문교수). 1985년~현재 계명대학교 기계·자동차공학부 교수. 주요

관심분야는 machine vision, 신경망, 물류시스템.

참고문헌

- [1] 김채수, 김우성, 황학, 이문규, "에그크레이트(Eggcrate) 격자(Grid)의 내접원 직경 측정을 위한 머신비전 알고리즘," 한국정밀공학회지, 제17권, 제4호, pp. 85-96, 2000.
- [2] 이정화, 이문규, "악조건하의 카메라 교정을 위한 알고리즘," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 164-175, 1999.
- [3] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, USA, 1992.
- [5] W. H. Beyer, *CRC Standard Mathematical Tables*, CRC Press, USA, 1978.



김 채 수

1960년 3월 3일생. 1985년 동아대 산업공학과 졸업. 1991년 KAIST 산업공학과 석사. 1999년 동대학 (박사). 현재 서울사이버대학교 경상학부 조교수. 주요 관심분야는 machine vision, 물류시스템.