

논문 2009-46SP-6-1

철도차량용 제륵자의 자동 검사 시스템

(Automated Inspection System for Brake Shoe of Rolling Stock)

김 현 철*, 김 회 율*

(HyunCheol Kim and Whoi-Yul Kim)

요 약

본 논문에서는 이동 중인 철도차량 제륵자의 두께, 편마모 및 제륵자와 차륵 사이의 거리를 자동으로 측정하는 시스템을 제안한다. 철도차량의 제륵자는 촬영 시스템이 설치된 곳을 지날 때 자동으로 촬영되며, 두께 등을 측정하기 위해 가장 먼저 영상 내에서 제륵자의 위치를 검출한다. 이는 제륵자의 위치가 영상 마다 다르기 때문이며 이를 적응적으로 찾기 위해, 제륵자와 차륵 사이에 나타나는 그림자 영역을 이용한다. 그림자 영역의 경계는 2차 다항식을 통해 모델링되며, 그 영역을 지나는 임의의 곡선(초기 곡선)은 제약 곡선 피팅 방법을 통해 검출된다. 다음은 검출된 초기 곡선과 명암도 변화 정보를 이용하여 제륵자의 앞과 뒤, 차륵 상의 세 곡선 및 제륵자의 수직면을 지나는 직선을 검출한다. 최종적으로, 앞서 구한 곡선과 직선을 이용하여 제륵자의 두께, 편마모 및 제륵자와 차륵 사이의 거리를 측정한다. 실험에서는 제안된 방법을 실제 선로에서 촬영한 영상에 대해 적용해 보았으며, 그 결과 평균 0.654mm의 두께 측정 오차를 나타내었다.

Abstract

In this paper, we have proposed an automated system that accurately measures the thickness and unbalanced wear of brake shoes, and the distance between brake shoes and wheels for travelling rolling stock. The images of brake shoes are captured automatically while rolling stock is passing by an inspection station. And in order to measure the thickness, etc. the locations of brake shoes are first determined because the locations are not the same in the captured image. Toward this goal, shadow regions between the brake shoes and wheels are utilized that are common in all captured images. The boundary of the shadow regions is modeled by a second order polynomial, and constrained curve fitting method is adopted to detect a curve (the initial curve) that passes through the regions. Then, three curves that correspond to the front, back of brake shoes and wheels, and a line that passes through the vertical surface of brake shoes are detected using the initial curve and intensity change information. Finally, the thickness, etc. are calculated using the detected curves and line, and experimental results showed that the brake shoe thickness was measured with an accuracy of 0.654mm.

Keywords : brake shoe, automated inspection system, constrained curve fitting

I. 서 론

철도차량용 제륵자(Brake shoe)는 제동장치의 한 부품으로써, 차륵에 압력을 작용하여 차량을 정지시키는 역할을 수행한다. 제륵자는 차륵과 직접 접촉하기 때문에 차륵과의 접촉시 발생하는 마찰로 인해 마모가 발생하며, 장시간 사용하여 그 두께(50mm)가 일정 기준치

(15mm) 보다 작거나 또는 비균등하게 마모된 경우 즉각 새로운 부품으로 교체해 주어야 한다. 그렇지 않을 경우 철도차량의 안전한 운행을 방해하여 인명 사고를 유발할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 한국 지하철에서 사용되는 제륵자를 대상으로 하여 제륵자의 두께, 편마모 정도, 제륵자와 차륵사이의 거리를 측정하며, 그림 1은 제륵자 및 제륵자와 차륵이 함께 촬영된 모습을 보여준다. 그리고 표 1은 제륵자의 결함 여부를 판별할 때 반드시 고려되어야 하는 측정 부분들을 정리해 놓은 것이다.

현재는 제륵자 유지 보수를 위해, 전문 훈련을 받은

* 정희원, 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과
(Dept. of Electronics Computer Engineering,
Hanyang University)
접수일자: 2009년6월17일, 수정완료일: 2009년10월27일

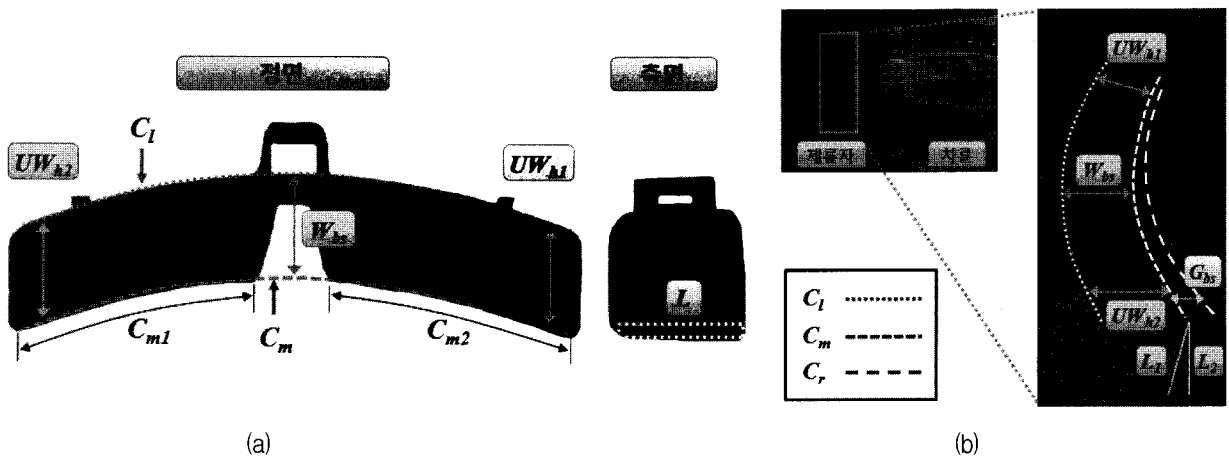


그림 1. (a) 철도차량용 제륵자 및 측정 부분 (b) 본 시스템의 입력 영상
 Fig. 1. (a) Brake shoe and measurement parts. (b) Input image of the proposed system.

표 1. 제륵자 검사 시 고려되어야 하는 측정 부분
 Table 1. Measurement parts that should be considered when brake shoes are inspected.

측정 부분	정의 및 측정 목적
제륵자 두께 W_b	정의: 제륵자의 앞면을 지나는 C_m 과 뒷면을 지나 는 C_f 사이의 거리 측정 목적: 기준치 보다 작을 경우 차륵과 접촉이 잘 되지 않아 차량의 안전한 운행을 방해할 수 있음
수평 편마모 UW_h	정의: 제륵자의 양 끝에서 측정된 제륵자 두께의 차이 ($UW_h = UW_{h1} - UW_{h2} $) 측정 목적: UW_h 가 클 경우 C_{m1} , C_{m2} 둘 중에 한 부분이 차륵과 정확하게 접촉되지 않는 문제가 발생
수직 편마모 UW_v	정의: L_1 (L 을 지나 는 직선)과 L_2 (수직 방향의 직선) 사이의 각도 $UW_v = \cos^{-1}(L_1 \cdot L_2 / L_1 L_2)$ 측정 목적: 차륵과 접촉하는 면인 L 이 수직 방향으로 균등하게 마모 되었는지를 측정하기 위함
제륵자와 차륵 사이의 거리 G_b	정의: 차륵을 지나 는 C_f 과 C_m 사이의 거리 측정 목적: W_b 가 기준치 보다 큰 경우에도 차륵과 제륵자 사이의 거리가 멀어서 차륵의 올바른 제어가 안 되는 경우를 알기 위함

검사관이 줄자와 같은 측량 도구를 이용해 직접 제륵자의 두께, 편마모 등을 측정하고 이를 통해 제륵자의 상태를 관리하고 있다. 그러나 이러한 작업은 시간의 제약을 받으며 업무의 효율이 효과적이지 못한 문제점이 있다. 실제 차량이 운행되지 않는 야간에 한정해 작업이 수행되며, 차량 한 대당 약 80개의 제륵자를 검사해야 하기 때문에 작업 시간 또한 많이 소요된다. 때문에

단 시간 내에 정확하게 제륵자의 두께, 편마모 정도를 측정하고 이를 통해 제륵자의 유지보수를 자동으로 수행할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

현재까지 제륵자 유지 보수를 위한 많은 시스템들이 제안되었지만^[1-4], 철도차량용 제륵자와 직접적으로 관련된 선행 연구는 거의 진행되지 않았다. 대부분의 방법들이 대형 차량 또는 공장에서 생산된 제륵자가 올바른 규격으로 생산된 것인지를 확인하기 위한 목적으로 제안되었으며, [1]만 유일하게 철도차량의 제륵자 유지 보수를 목적으로 하고 있다. [1]은 철도차량용 제륵자의 두께를 측정하기 위해 영상처리에 기반한 시스템을 제안하였으며, 실험을 통해 3mm 측정 오차를 보여주었다. 그러나 그 오차는 측정 한계치 15mm의 약 20%로써, 좀 더 정확한 방법의 개발이 요구된다. 또한 제륵자의 상태는 단순히 두께뿐만 아니라 편마모 및 차륵 사이의 거리에 의해서도 영향을 받기 때문에 이들을 정확히 측정할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

본 논문 또한 [1]과 유사하게 영상 처리를 이용한 철도차량용 제륵자 두께 측정 시스템을 제안한다. 하지만, 제륵자의 결함 분석에 있어 중요한 요소인 제륵자의 편마모, 제륵자와 차륵 사이의 거리 측정 방법을 추가적으로 제안한다. 또한 이 세 가지 요소를 모두 고려하기 위해, 입력 영상이 그림 1. (b)와 같이 촬영되도록 시스템을 구성한다. 그림 2는 제안된 시스템의 전체 흐름도를 보여주며, 이에 대해 간략히 설명하기로 한다.

본 시스템은 크게 영상 획득 및 영상 처리 2가지 부분으로 나누어지며, 추가적으로 관리자가 제륵자의 결함 유무 및 상태를 검사할 수 있는 인터페이스 부분을

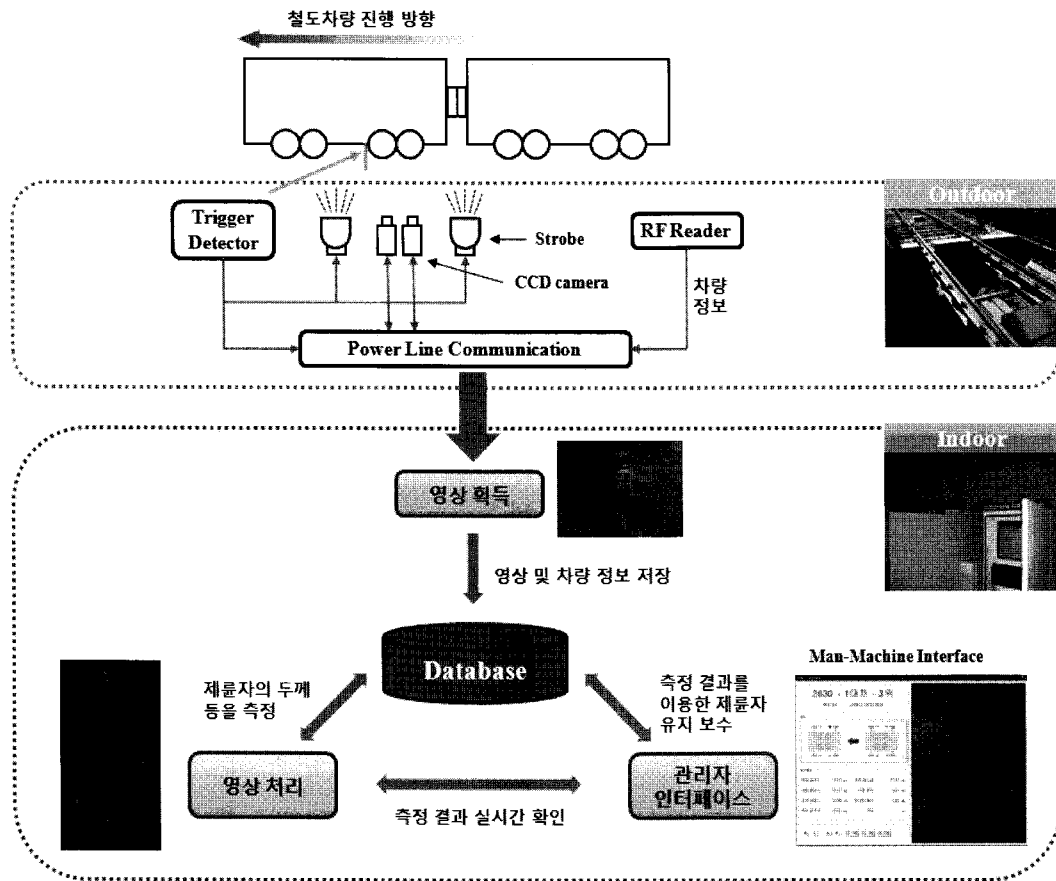


그림 2. 전체 시스템 구성.
Fig. 2. System configuration.

제공한다. 입력 영상은 이동 중인 철도차량이 카메라가 설치된 구간을 지날 때 자동으로 촬영되게 구성되며, 이는 빠른 시간 내에 많은 양의 데이터를 처리하기 위해서이다. 다음은 디지털 카메라를 통해 촬영된 영상으로부터 앞서 정의한 5개의 측정 부분 C_l , C_m , C_r , L_1 , L_2 을 검출하고 이를 통해 제륜자의 두께, 편마모 및 제륜자와 차륜사이의 거리를 측정한다. 측정된 결과는 차량 정보와 함께 데이터베이스에 저장되며, 만약 사전에 정의된 기준을 만족하지 못하는 경우에는 이를 관리자에게 통보하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 영상 획득을 위해 촬영 시스템을 어떻게 구성하였는지에 대해 설명하며, III장에서는 입력 영상으로부터 제륜자의 두께 및 기타 정보를 정확하게 측정하는 방법에 대해 설명하도록 한다. IV장에서는 제안된 방법의 성능을 분석 및 평가하며, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 영상 획득

제륜자의 상태를 자동으로 검사 및 관리하기 위해, 다음의 사항들이 고려된 영상 획득 시스템을 구성한다. (a). 가장 먼저 제륜자 영상을 자동으로 입력 받기 위해 차량은 촬영 시스템이 설치된 지점을 지나야 한다. 이때, 제륜자와 차륜 사이의 거리 측정 및 제륜자 위치를 쉽게 검출할 수 있도록 이동 중인 차량의 브레이크가 동작되어서는 안 된다. (b). 또한 촬영된 제륜자가 속하는 차량의 정보를 획득할 수 있어야 한다. (c). 그리고 촬영시 사용되는 카메라는 선로 옆 외부 환경에 설치되므로 비, 바람, 눈 등에 대해서 보호될 수 있어야 한다. (d). 낮과 밤에 따라 달라진 조명 환경에 대해서도 입력 영상은 좋은 화질을 유지하여야 한다. (e). 촬영된 영상은 건물 내에 설치된 컴퓨터에 전송되어 제륜자의 결함 유무가 판별된다. 이를 위해, 촬영된 영상을 카메라로부터 멀리 떨어진 지점에 전송할 수 있어야 한다. (f). 제륜자의 두께, 편마모 등을 정확하게 측정할 수 있어야

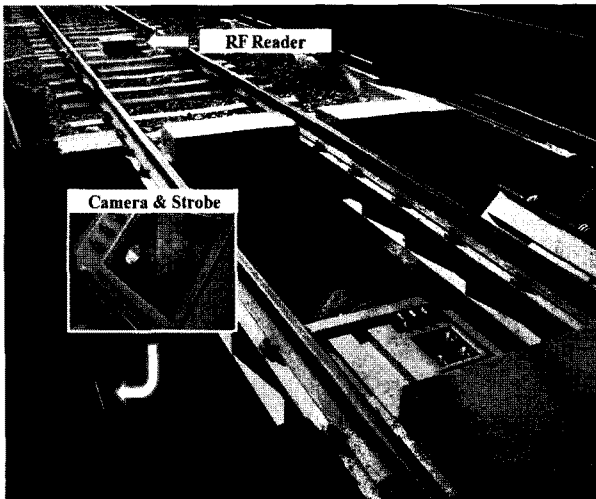


그림 3. 제륵자 영상을 자동으로 획득하기 위한 촬영 시스템

Fig. 3. Image capturing module to obtain the images of brake shoes automatically.

한다. 다음부터는 앞의 사항들을 고려하여 촬영 시스템을 어떻게 구성하였는지에 대해 설명하도록 한다.

먼저 이동 중인 차량의 제륵자 영상을 자동으로 촬영하기 위해, 트리거와 스트로브를 이용하였다. 그림 2를 예로 들어 설명하면, 차량이 촬영 시스템이 설치된 지점을 지날 경우 트리거 신호가 발생되며 이는 카메라에 전달되어 촬영을 하도록 한다. 이때, 이동 중인 물체를 촬영할 때 발생하는 모션 블러(Motion blur)의 영향을 최소화하기 위해, 스트로브의 플래시 타임과 CCD 카메라의 셔터 스피드를 짧게 하였다. 또한 현재 촬영된 제륵자가 속하는 차량의 정보를 얻기 위해 RF리더를 이용한다. 촬영된 영상은 차량 정보와 함께 PLC(Power line communication)를 통해 건물 내에 설치된 컴퓨터로 전송되어 데이터베이스에 저장된다. 촬영된 영상은 낮과 밤에 따라 달라진 조명 환경에 의해 영상의 화질이 달라질 수 있다. 이를 해결하여 균일한 영상을 획득하기 위해 스트로브가 사용된다. 그리고 선로 옆의 외부 환경에 설치된 카메라를 보호하기 위해, 팬과 히터를 이용해 카메라를 하우징 하였다. 그림 3은 제안된 촬영 시스템이 선로에 설치된 장면을 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 선로의 좌우에 카메라가 설치되어 있으며, 카메라를 지나가는 철도 차량의 모든 제륵자는 자동으로 촬영된다.

앞서 기술한 촬영 시스템은 [1]에서 제안된 방법과 많은 부분에서 유사하며, 가장 큰 차이점은 차륵이 원이 아닌 타원 형태로 촬영되게 카메라 위치를 설정한

것이다. 이는 영상으로부터 제륵자의 수직 편마모를 구하기 위한 목적으로 이루어진 것이며, 이로 인해 기존에 제안된 [1]과 전혀 다른 영상 처리 알고리즘을 통해 제륵자 두께 등을 측정한다.

III. 영상 처리

제륵자의 두께 등을 측정하기 위해서는 가장 먼저 제륵자의 위치가 적용적으로 검출되어야 한다. 이는 제륵자가 설치된 위치, 차량의 진동, 카메라로 전달되는 트리거 신호의 속도 차이 등으로 인해 촬영 영상 내 제륵자의 위치가 고정되어 있지 않기 때문이다. 본 논문에서는 이를 위해 제륵자와 차륵사이에 존재하는 그림자 영역을 이용한다. 그림 1. (b)를 통해 확인할 수 있듯이 제륵자 그 자체에서는 제륵자를 다른 구조물들과 분별할 수 있는 명확한 특징(예, 명암도)을 찾기 어렵다. 이에 반해, 그림자 영역은 명암도 이진화에 의해 주변 영역과 손쉽게 분리될 수 특징이 있다. 또한 그림자 영역은 제륵자와 밀접해 있으므로, 그림자 영역이 올바르게 검출된 경우 제륵자를 쉽게 검출할 수 있는 장점이 있

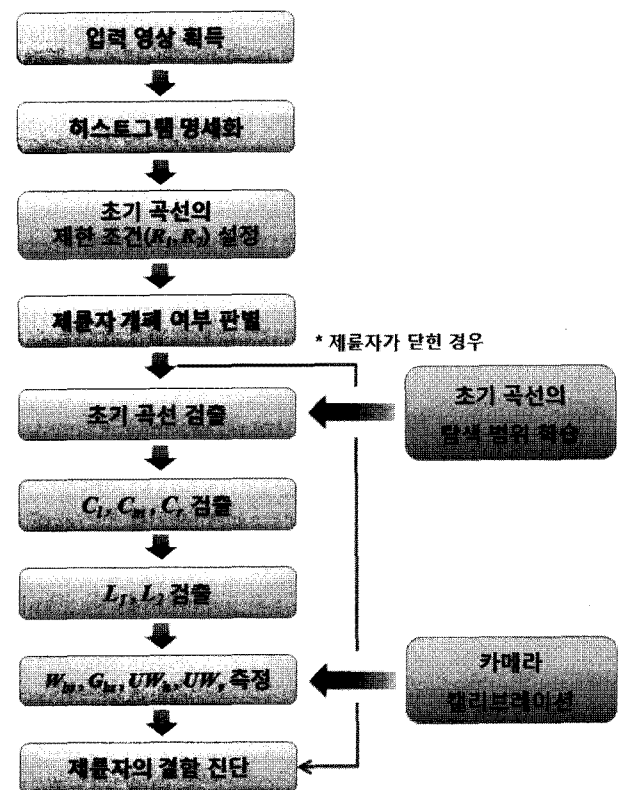


그림 4. 제륵자 검사를 위해 제안된 방법의 흐름도
Fig. 4. Flow chart of the proposed method to inspect brake shoes.

다. 마지막으로, 카메라가 설치된 지점을 지날 때 브레이크 시스템이 동작되지 않았다고 가정하면, 제륜자와 차륜 사이에는 그림 6. (a), (b)와 같은 곡선 형태의 그림자 영역이 항상 존재한다. 때문에 그림자 영역은 제륜자 위치를 검출함에 있어서 훌륭한 특징으로 이용될 수 있다.

그림 4는 제륜자의 결함 측정을 위해 제안된 방법의 전체 흐름도를 보여주며, 본 장의 구성은 다음과 같다. 먼저 제륜자와 차륜 사이의 그림자 영역을 왜 2차 다항식으로 모델링하였는지에 대해 분석 및 설명한 후 그림 4의 각 과정에 대해 자세히 설명하기로 한다.

1. 2차 다항식 모델링

제안된 방법의 핵심 아이디어는 곡선 형태를 가지는 그림자 영역을 2차 다항식($f(x)=p_1y^2+p_2y+p_3$)으로 모델링한 후 이 영역을 지나는 임의의 곡선 (초기 곡선)을 정확하게 검출하는 것이다. 실제로 차륜과 제륜자의 외곽

선은 원 형태를 가지지만 그림 1을 통해 차륜 및 제륜자의 형태가 타원으로 촬영된 것을 확인할 수 있다. 이는 UW_v 를 구하기 위해 카메라를 차륜과 수직이 아닌 각도로 설치하였기 때문이다. 따라서 엄밀히 말하면 제륜자와 차륜 사이를 지나는 부분 역시 타원으로 모델링되어야 할 것이다. 그러나 2차 다항식에 비해 타원으로 모델링할 경우 타원을 생성하기 위해 사용되는 샘플들의 영향을 크게 받는다. 특히, 현재의 응용과 같이 타원의 일부분을 이용하여 타원 전체의 파라미터를 추정해야 하는 경우, 샘플 분포의 미세한 차이에 의해서도 타원을 정의하는 6개의 계수가 크게 변화는 문제가 있다^[8]. 이에 반하여, 다항식의 경우 샘플들의 개수와 분포의 미세한 차이에 대해서도 비교적 정확하고 강인하게 그 값을 계산할 수 있는 장점이 있다. 또한, 타원의 일부분은 2차 다항식을 통해 효과적으로 표현할 수 있으며, 계산량 등에서 장점이 있기 때문에 제륜자와 차륜 사이의 영역을 2차 다항식으로 모델링한다. 식 (1)은 타원의 식을 수학적으로 나타낸 것이며, 그림 5는 앞서 언급된 문제점을 보여준다.

$$E_1x^2 + E_2xy + E_3y^2 + E_4x + E_5y + E_6 = 0 \quad (1)$$

(a)와 (c)는 20개, (b)와 (d)는 25개의 샘플을 이용하여 피팅(fitting)한 결과이다. 이때 타원 피팅은 현재까지 제안된 많은 방법들^[8-10] 중 [8]을 이용하여 계산된 것이며, 2차 다항식 피팅은 최소자승법을 통해 계산된 것이다. 그림과 추출된 계수 값의 비교를 통해 타원의 경우 샘플 개수의 조그만 차이에 의해서도 그 형태와 계수 값의 변화량이 큰 것을 확인할 수 있다.

2-1. 히스토그램 명세화^[5]

입력된 영상은 촬영 시 존재하는 대기중의 이물질과 차량의 빛 반사율에 따라 명암도 동적 범위를 다양하게 가진다. 본 논문에서는 곡선을 찾기 위하여 에지 검출, 이진화 등의 과정을 사용하는데 이 경우 고정된 임계치 값을 사용할 수 없는 문제가 있다. 비록 임계치 값을 영상의 명암 대비에 따라 유동적으로 변경할 수도 있지만 보다 빠르고 간편하게 영상 처리를 수행하기 위하여 명암 대비가 뚜렷한 기준 영상에 대해 히스토그램 명세화를 수행한다. 이때, 명세화는 영상의 $I = (R+G+B)/3$ 채널에 적용된다.

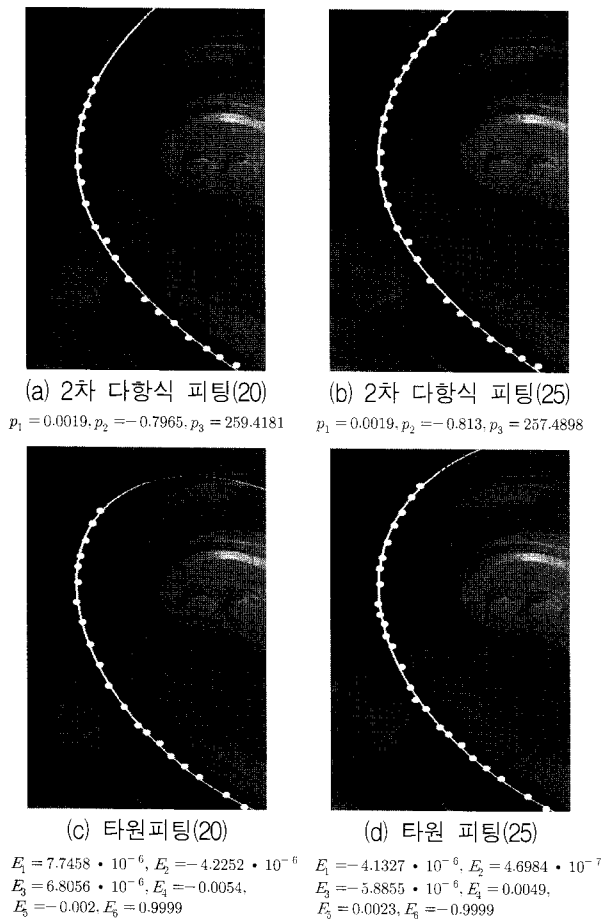


그림 5. 샘플 수에 따른 타원, 2차 다항식 피팅 결과
Fig. 5. Ellipse and second polynomial fitting results for different sample sizes.

2-2. 초기 곡선

그림 6은 히스토그램 명세화 된 영상(I_{hs})의 이진화 결과(I_{bi})를 보여준다. 여기서 검은색은 임계치 보다 낮은 명암도를 가진 화소를 의미하며, 하얀색의 경우는 그 반대를 의미한다.

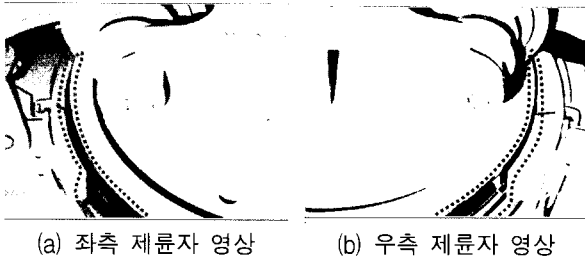


그림 6. 제륵자 영상의 이진화 결과
Fig. 6. Binarization results of brake shoe images.

그림 6을 통해 확인할 수 있듯이 제륵자와 차륵 사이의 검은색 그림자 영역(점선)은 곡선 형태로 길게 존재한다. 이를 찾기 위해 임의의 2차 다항식 중 곡선 상의 명암도 합이 가장 낮은 것을 초기 곡선으로 설정하며, 식 (2)는 이를 수학적으로 표현한 것이다. 여기서, $I_{hs}(x,y)$ 는 영상의 명암도를 의미하며, M 은 영상의 높이를 의미한다.

$$\operatorname{argmin}_{p_1, p_2, p_3} \sum_{y=0}^{M-1} I_{hs}(p_1 y^2 + p_2 y + p_3, y) \quad (2)$$

where, $x = p_1 y^2 + p_2 y + p_3$

그러나 단순히 식 (2)만 이용해서는 다음과 같은 두 가지 문제들이 발생할 수 있다. 먼저, 그림 6. (a)에서 점선 우측의 검은색 영역을 지나는 곡선이 해로써 선택되는 것이다. 이를 피하기 위해 2-3절에서 초기 곡선의 제한 조건 R_1, R_2 를 설정한다. 또 다른 문제점은 점선 부분과 전혀 다른 형태를 가지는 2차 다항식이 해로써 선택되는 것이다. 이는 초기 곡선의 형태를 결정하는 p_1, p_2, p_3 값의 범위를 제한하여 해결할 수 있으며 이는 2-5절에서 상세히 설명하기로 한다.

2-3. 초기 곡선의 제한 조건 R_1, R_2 설정

본 절에서는 초기 곡선이 반드시 지나야 하는 영역과 지나면 안 되는 영역을 구하며, 이를 위해 연결 요소 분석(connected component analysis)^[5]을 이용한다. 그림

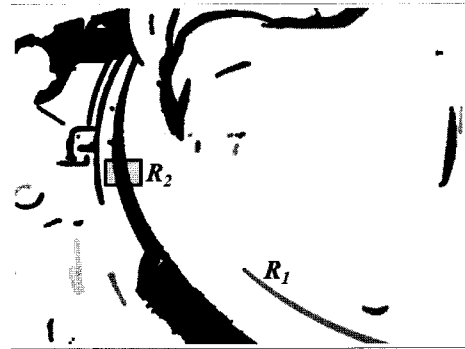


그림 7. 이진화 영상의 레이블링 결과
Fig. 7. Labeling result of binarization image.

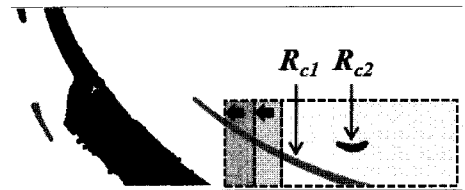


그림 8. R_1 검출 방법
Fig. 8. R_1 detection.

7은 I_{bi} 에 연결 요소 분석 방법이 적용된 결과를 보여주며, 여기서 R_2 와 R_1 은 각각 초기 곡선이 반드시 지나야 하는 영역과 그렇지 않은 영역을 나타낸다.

R_1 은 그림 8과 같이 그림 7의 우측 하단에 사각형 영역을 설정한 후 그 사각형 내에 존재하는 영역의 크기를 이용하여 검출한다. 그림 8의 경우 영역의 크기가 임계치 보다 작은 R_{c2} 는 배제되며 R_{c1} 이 R_1 으로 설정된다. 만약 초기에 설정된 사각형 내에 어떠한 레이블 영역도 존재하지 않을 경우에는 좌측에 인접한 사각형 내에서 R_1 을 검출한다.

R_2 는 초기 곡선이 반드시 지나야 하는 영역으로써, 이를 구하기 위해 가장 먼저 영상의 최하단에서 레이블의 변화를 확인한다. 레이블이 변하는 점들을 모두 찾은 후 이중 가장 우측에 존재하는 점을 찾는다. 이때, 앞서 구한 R_1 에 속하는 점들은 제외된다. 그림 9의 Step 1을 통해 확인할 수 있듯이 P_6, P_7 을 제외한 나머지 5개의 점 중에서 가장 우측에 있는 점 P_5 가 선택된다. 다음은 P_5 를 시작으로 y 값을 1만큼 감소시키면서 레이블이 변하는 지점을 찾는다. 이는 미리 정해진 값에 도달할 때까지 반복적으로 수행되며, 이때 x 축 방향의 검색 범위는 바로 전의 점 x 좌표를 중심으로 좌우로 균등하게 설정된다. Step 3의 $rect_1$ 은 Step 2를 통해 구한 좌표들의 처음과 끝 점을 통해 생성된 사각형

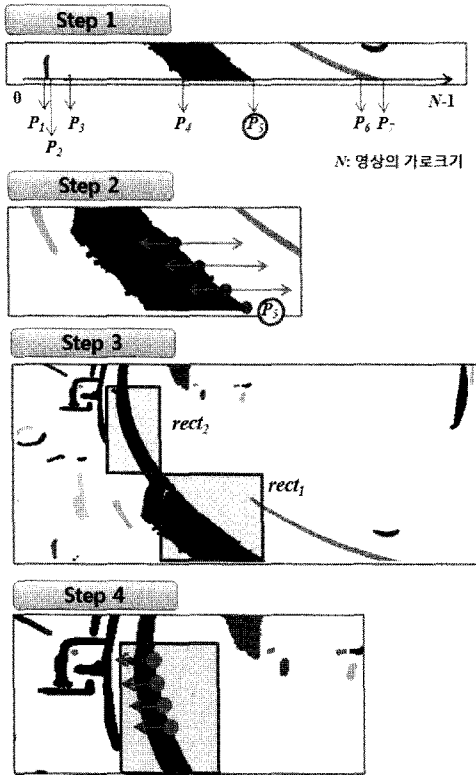


그림 9. R_2 를 검출하기 위한 4 단계
 Fig. 9. 4 steps in order to detect R_2 .

이다. 다음은 $rect_1$ 의 가로, 세로 크기 비율을 이용하여 $rect_2$ 를 생성하며, 이는 $rect_2$ 내에 제륜자와 차륜을 지나는 영역만 포함시키기 위함이다. 입력 영상을 분석해 본 결과 $rect_1$ 의 가로/세로 값이 클수록 제륜자와 차륜을 지나는 영역의 기울어짐이 큼을 확인하였다. 이러한 특성을 반영하여 $rect_2$ 의 가로, 세로 크기는 식 (3)과 같이 계산된다. 여기서, r_{1w} , r_{1h} , r_{2w} , r_{2h} 는 각각 $rect_1, rect_2$ 의 가로 세로 크기를 의미한다.

$$r_{2w} = \frac{r_{1h}}{r_{1w}} r_{1h}, r_{2h} = r_{1w} \quad (3)$$

$rect_2$ 가 계산되면 마지막으로 $rect_2$ 의 각 y 좌표마다 레이블이 변화하는 지점을 찾는다. 이때 x 좌표의 탐색은 $rect_2$ 의 가장 오른쪽부터 시작하여 왼쪽에서 끝마친다. x 좌표 탐색 중 레이블이 변하는 첫 번째 지점이 검출되면 y 좌표 값을 1 증가시킨 후 다음 x 좌표를 검출한다. Step 4의 사각형 내 네 개의 점들은 앞의 과정을 통해 검출된 좌표를 나타낸다. 마지막으로 검출된 좌표는 각각 x 좌표를 중심으로 제륜자 방향으로 일정 범위를 설정한 후 이를 R_2 로 설정한다.

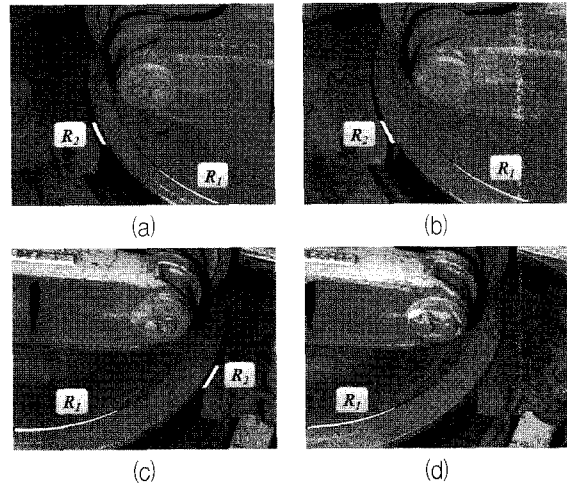


그림 10. R_1, R_2 검출 결과
 Fig. 10. Results of R_1, R_2 detection.

그림 10은 앞서 기술한 방법을 실제 제륜자 영상에 적용하여 R_1 과 R_2 가 검출된 결과를 보여준다. 그림 (d)의 경우 (a), (b), (c)와 달리 R_2 가 검출되지 않음을 확인할 수 있다. 이는 카메라가 설치된 지점을 지나는 기차의 브레이크가 작동되어 제륜자와 차륜 사이에 에지가 존재하지 않기 때문이다. 제안된 알고리즘은 제륜자의 두께 등을 측정하기 위해 초기 곡선을 가장 먼저 검출한다. 하지만 제륜자가 차륜에 붙은 경우 그 사이에 명암도가 낮은 그림자 영역이 존재하지 않음으로 인해 초기 곡선을 구할 수 없게 된다. 이로 인해 제륜자의 두께 등을 측정하지 못하며, [1] 역시 알고리즘의 특성상 이러한 문제를 해결하지 못한다. 이와 같은 상황을 피하기 위해, 실제로 기차를 운행하는 기관사에게 본 시스템이 설치된 위치에서 브레이크를 작동해서는 안 된다는 간단한 사항을 지시한다. 하지만 철도차량 운행 도중 기관사의 부주의, 안전 및 예기치 못한 상황 등으로 인해 브레이크를 작동해야 할 경우가 있으며, 이러한 경우에는 관리자에게 현재 상황을 통지하고 차후에 수동으로 그 제륜자만 재검색 할 수 있는 편의성을 제공하여야 한다.

2-4. 제륜자 개폐 여부 판별

그림 11은 제륜자와 차륜이 붙은 영상에 대해 R_2 탐색 방법이 Step 3까지 적용된 결과를 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 탐색 영역($rect_2$) 내 존재하는 레이블링 영역의 크기가 매우 작음을 알 수 있다. 때문에 2-3절의 Step 4를 적용할 때 레이블이 변하는 지점

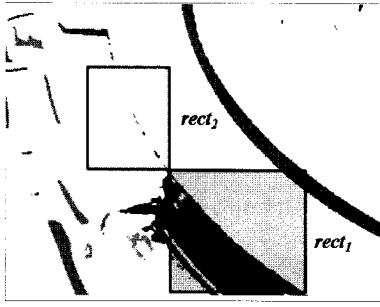


그림 11. 제륜자와 차륜이 붙은 영상의 레이블링 결과
Fig. 11. Labeling result for an input image that a brake shoe contacts with a wheel.

을 찾은 후 그 지점에 속한 레이블 영역의 크기가 임계치 보다 작으면서 동시에 가로 방향으로 연속된 레이블 지점들의 개수가 임계치 보다 작은 경우 제륜자와 차륜이 붙었다고 판단한다.

2-5. 초기 곡선의 탐색 범위 학습

초기 곡선의 탐색 범위는 사전에 촬영된 다수의 영상으로부터 획득한 p_1, p_2, p_3 의 통계치를 통해 생성되며, 그 과정은 다음과 같다. 먼저, 그림 5 (a)와 같이 각각의 영상에 대해 제륜자와 차륜 사이에 존재하는 20개의 좌표를 등간격으로 샘플링한다. 다음은 샘플링된 좌표 집합을 최소자승법의 입력으로 이용하여, 각각의 영상으로부터 2차 다항식의 계수를 예측한다. 마지막으로 식 (4)를 통해 초기 곡선의 탐색 영역 (p_{\min}^i, p_{\max}^i) 를 정의한다. 여기서, p_{\min}^i 와 p_{\max}^i 는 각각 p_i 의 최소, 최대값을 의미한다. 그리고 \bar{p}_i 는 p_i 의 평균, K 는 학습에 사용된 영상의 개수를 의미하며 $i = 1, 2, 3$ 이다.

$$p_{\min}^i = \bar{p}^i - 4\sigma_i, \quad p_{\max}^i = \bar{p}^i + 4\sigma_i \quad (4)$$

$$\text{where, } \sigma_i = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (p^i - \bar{p}^i)^2}$$

2-6. 초기 곡선 검출

앞에서 구한 초기 곡선의 탐색 범위와 제한 조건을 고려한 초기 곡선의 검출 식은 (5)와 같이 정리될 수 있다. 식 (5)는 곡선상의 명함도 합으로 구성된 목적함수와 제한 조건으로 구성된다. 이러한 최적화 문제(비선형 곡선 피팅)는 예전부터 연구되어 오던 것으로써, [11~14]를 통해 그 해를 정확하게 구할 수 있다. 그러나 [11~14] 방법들은 연산을 위해 많은 시간을 필요로

하는 단점이 있다. 또한 초기 곡선은 제륜자와 차륜 사이에서 검색될 정도의 정확도를 가지면 충분하며, 수치 해석적인 의미에서 최적화할 필요는 없다. 왜냐하면 초기 곡선은 단순히 곡선 C_m, C_r 의 후보점들을 찾음에 있어서 탐색 범위를 한정하기 위해 사용되기 때문이다. 이는 다음절에서 자세히 설명하기로 한다.

목적 함수(Objective function)

$$\operatorname{argmin}_{p_1, p_2, p_3} \sum_{y=0}^{M-1} I_{hs}(p_1 y^2 + p_2 y + p_3, y) \quad (5)$$

제한 조건(Constraints)

$$(p_1 y^2 + p_2 y + p_3, y) \notin R_1 \text{ for all } y$$

$$(p_1 y^2 + p_2 y + p_3, y) \in R_2 \text{ for all } y \in R_2$$

$$p_i \in (p_{\min}^i, p_{\max}^i) \quad i = 1, 2, 3$$

앞서 기술된 이유로 인해, 제안된 방법에서는 식 (5)의 문제를 해결하기 위해 먼저 탐색 영역의 공간을 연속(continuous)에서 비연속(discrete)으로 변경한다. 즉, $p_i \in (p_{\min}^i, p_{\max}^i)$ 는 t 개의 불연속적인 구간을 가지는 $p^* \in [p_{\min}^i, p_{\max}^i]$ 가 된다. 다음은 임의의 p_1^*, p_2^*, p_3^* 을 선택한 후 제한 조건을 만족하는지 비교한다. 제한 조건을 만족하는 (p_1^*, p_2^*, p_3^*) 중 목적 함수의 값이 가장 작은 (p_1^*, p_2^*, p_3^*) 를 해로써 선택한다.

그림 12는 제안된 방법을 이용하여 초기 곡선이 검출된 결과를 보여준다. (c)와 같이 제륜자에 기름칠이 칠해져 명암도가 낮은 경우, (d)의 경우와 같이 차륜 상에 그림자 크게 생긴 영상에 대해서도 강인하게 초기 곡선이 검출됨을 확인할 수 있다.

앞서 설명한 제한 조건 및 탐색 영역 설정은 좌측 제륜자 영상과 우측 제륜자 영상에 따라 달리 구해야한

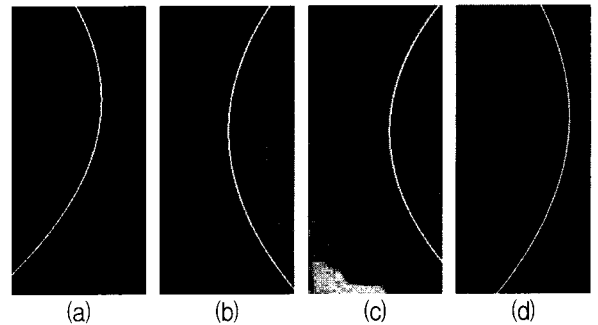


그림 12. 제안된 방법을 통해 검출된 초기 곡선
Fig. 12. The initial curves that are detected by the proposed method.

다. 즉, 입력 영상이 우측 제륜자인지 좌측 제륜자인지에 대한 여부를 판별할 수 있어야 한다. 그림 6을 통해 확인할 수 있듯이, 제륜자가 존재하는 부분에는 복잡한 구조물들이 존재하고 이로 인해 그림자 영역이 많이 발생한다. 때문에 우측, 좌측 제륜자 여부는 식 (6)과 같이 판별한다.

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{x=0}^{N-1/2} \sum_{y=0}^{M-1} I_{bi}(x,y) > \sum_{x=N-1/2}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} I_{bi}(x,y) \right) \\ \text{if} & \quad \text{좌측제륜자영상} \\ \text{else} & \quad \text{우측제륜자영상} \end{aligned} \quad (6)$$

2-7. 명암도 변화를 이용한 C_m, C_r 검출

본 절에서는 초기 곡선으로부터 곡선 C_m, C_r 을 생성하는 방법에 대해 설명하기로 한다. C_m 과 C_r 은 초기 곡선을 중심으로 일정 범위 내에 존재하며, 각각 특정한 형태의 명암 대비 변화를 가진다. 즉, 곡선 C_m 위의 점들은 좌측 방향으로 명암도가 높은 반면 우측 방향으로 명암도가 낮다. 이와 반대로 곡선 C_r 위의 점들은 좌측 방향의 명암도가 낮고 우측 방향의 명암도가 높다. 이와 같은 정보를 이용하여 C_m 과 C_r 선상에 존재할 가능성이 높은 점들을 추출하며, 식 (7)과 (9)는 각각 C_m 과 C_r 위에 존재할 가능성이 높은 점들을 추출하는 방법에 대해 나타낸다.

여기서, x_m^* 는 초기 곡선에 인접한 구간 내에서 앞서 설명한 명암도 변화 조건을 만족하는 x 좌표들의 집합으로 구성되며, 이는 식 (8)를 통해 생성된다. $C_i(y)$ 는 초기 곡선의 y 위치에 대응하는 x 좌표를 반환하는 함수이며, n 은 동일한 명암도의 개수를 나타낸다. 그리고 식 (7)과 (9)를 통해 검출할 후보 좌표들의 y 값 범위는 제륜자가 영상 내 두드러지게 나타나는 지점으로 제한한다.

$$\text{argmin}_{x_m^*} |C_i(y) - x_m^*| \quad (7)$$

$$x_m^* = \left\{ x | I_{bi}(x,y) = 0, \sum_{i=1}^n I_{bi}(x-i,y) = n \cdot 255 \right\} \quad (8)$$

$$\text{argmin}_{x_c^*} |C_i(y) - x_c^*| \quad (9)$$

$$x_r^* = \left\{ x | I_{bi}(x,y) = 0, \sum_{i=1}^n I_{bi}(x+i,y) = n \cdot 255 \right\} \quad (10)$$

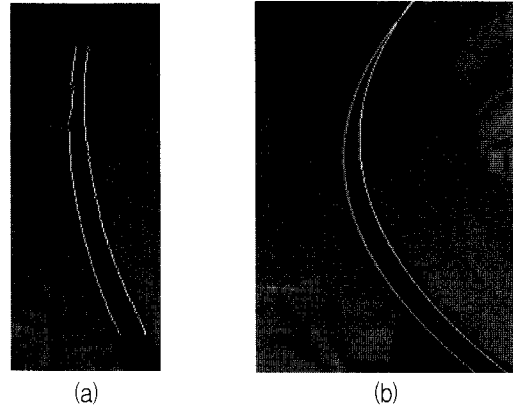


그림 13. 제안된 방법을 통해 구한 C_m, C_r
Fig. 13. C_m, C_r that are detected by the proposed method.

그림 13. (a)는 앞서 설명한 명암도 변화 특성을 이용하여 곡선 C_m 과 C_r 의 후보 좌표들이 검출된 결과를 보여준다.

다음은 추출된 후보 점들에 대해 최소자승법을 적용하여 후보 점들을 가장 잘 표현할 수 있는 2차 다항식을 획득하며, 식 (11)은 이를 나타낸다.

$$\text{argmin}_{p_1, p_2, p_3} \sum_{i=0}^{n-1} |p_1 x_i^2 + p_2 x_i + p_3 - y_i|^2 \quad (11)$$

여기서 n 은 x_m^* 과 x_r^* 의 개수를 의미하며, x_i, y_i 는 후보 점들의 좌표 값을 의미한다. 그림 13. (b)는 추출된 후보 점들에 대해 최소자승법을 수행한 결과를 보여준다.

2-8. C_i 검출

곡선 C_i 은 C_m, C_r 과 달리 후보 지점의 명암도 변화 특성을 이용하여 검출하기 힘들다. 그 이유는 그림 14에서 확인할 수 있듯이 곡선 C_i 상에서 명암도 변화 패턴이 일정한 점들의 개수가 부족하기 때문이다. 심지어는 제륜자의 하단 부분에서 에지가 검출되지 않는다. 그리고 앞서 수행한 전역 이진화의 결과로 곡선 C_i, C_m 사이에 많은 노이즈가 생성된다. 이와 같은 이유로 인해 곡선 C_i 은 C_m, C_r 과 다른 방법을 통해 검출하며 다음부터는 그 과정에 대해 상세히 기술하도록 한다.

가장 먼저 검출된 곡선 C_m 으로 부터 곡선 C_i 이 존재할 관심 영역을 설정한다. 본 촬영 시스템에서 획득된 영상에서는 곡선 C_i 이 C_m 을 좌측 또는 우측으로 20에서 120화소 수평 이동한 영역 내에 존재함을 확인하였

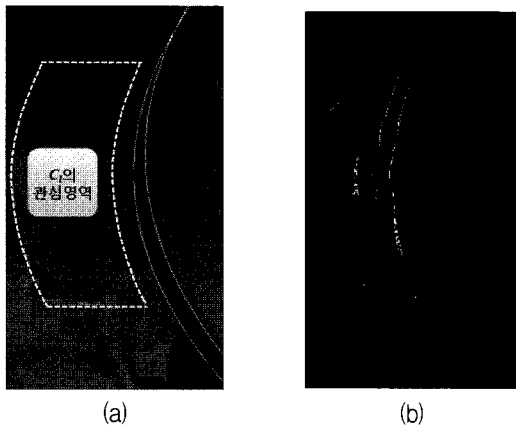


그림 14. C_i 의 관심 영역 및 후보 점들
 Fig. 14. Region of interest and candidate points for C_i .

으며, 관심 영역은 그림 14. (a)와 같이 설정된다. 다음은 x 축을 따라 관심 영역의 명암도를 지역적으로 이진화한다. 그리고 이진화 영상에서 검은색 화소를 가지며 동시에 히스토그램 명세화 영상으로 부터 획득된 에지의 값이 큰 화소를 곡선 C_i 의 후보 점들로 설정하며, 그림 14. (b)는 이를 보여준다. 다음은 초기 곡선 검출과 유사하게 후보 좌표들을 가장 많이 포함하는 다항식을 찾는다. 이때 검출된 다항식이 곡선 C_m 과 가까운 위치에 존재할 수 있도록 앞서 추출한 후보 점들에 가중치를 부여하며, 이는 식 (12)를 통해 수행된다. 가중치는 후보 점과 곡선 C_m 사이의 x 축 거리를 가우시안 분포의 입력을 통해 생성되며, 여기서 m 과 σ 는 각각 가우시안 분포의 평균, 표준편차를 의미한다.

$$w_{x,y} = \exp\left(-\frac{(|C_i(y)-x|-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

2-9. L_1, L_2 검출

L_1 은 C_m 선상의 좌표를 따라 이동하면서 명암도 변화가 발생하지 않는 지점(P_{L_1})을 찾고 이를 중심으로 영상의 패치(Patch $_{L_1}$)를 선정한다. 그림 15를 통해 확인할 수 있듯이 C_m 이 제륜자 선상에 있을 경우 그 점을 중심으로 좌우 방향의 명암도가 크게 변함을 알 수 있다. 반면에 제륜자를 벗어난 경우 명암도 변화가 거의 없으며, 이러한 특성을 이용해 P_{L_1} 을 찾는다. 다음은 Patch $_{L_1}$ 내 캐니(Canny)^[15], 소벨(Sobel)^[5] 등의 에지 디텍터를 적용하여 에지 영상을 생성하고 마지막으로 허프 변환을 적용하여 L_1 을 구한다. L_2 는 L_1 과 C_m 이 만

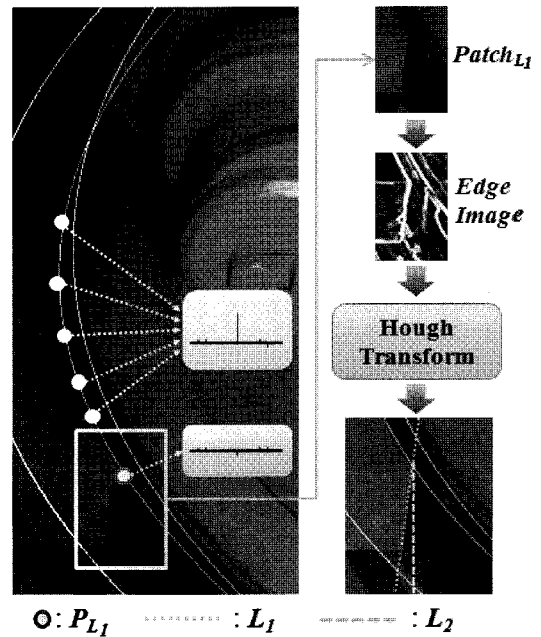


그림 15. L_1, L_2 검출
 Fig. 15. L_1, L_2 detection.

나는 점의 x 좌표를 이용하여 생성한다.

2-10. 카메라 캘리브레이션

영상에서 검출된 한 점의 3차원 위치 정보를 알기 위하여, 체커 보드를 카메라가 설치된 위치에 설치하였다. 이때, 각각의 체커 패턴에 대한 실제 크기를 미리 알고 있으므로, 체커보드가 촬영된 영상과의 대응점을 이용하여 카메라의 변수 및 프로젝션 행렬을 계산한다. 이때 [16]의 방법이 이용되었으며, 제륜자의 두께 등을 측정하기 위해 선택된 영상 내 좌표들은 먼저 프로젝션 행렬을 통해 3차원 공간의 좌표로 변환된 후 3차원 공간에서의 거리를 통해 계산된다.

IV. 실험

본 장에서는 가장 먼저 제안된 시스템에 사용된 하드웨어 구성에 대해 설명하기로 한다. 다음은 실험 영상 및 실험에 사용된 변수들의 값을 어떻게 결정하였는지에 대해 기술하도록 한다. 마지막으로 제안된 방법을 다양한 영상에 적용하여 그 성능을 분석하고 평가하기로 한다.

1. 하드웨어 구성

제륜자 촬영에 사용된 카메라는 Basler 제품으로써,

카메라의 분해능은 화소당 약 1mm이다. 모션 블러 효과를 최소화하면서 동시에 화질이 좋은 영상을 얻기 위해 카메라의 셔터 스피드는 0.025ms로 설정되었다. 다양한 조명 환경에서 균일한 영상을 얻기 위해 사용된 스트로브의 개수는 총 12개이다. 데이터베이스는 MS SQL 서버 프로그램을 이용하여 구축하였다. 계류자의 두께 등은 Pentium IV 3.0GHz, RAM 2GByte 메모리를 가진 PC상에서 측정되었으며, Microsoft Visual C++을 개발 툴로 사용하였다.

2. 실험 영상

실험에 사용된 영상은 경기도 시흥 철도 기지의 선로 상에서 촬영되었으며, 크기는 가로 세로 각각 696, 519이다. 곡선 C_b , C_m , C_r 이 정확하게 검출됨을 확인하기 위해 총 350장의 영상으로 구성된 $Dataset_A$ 를 이용하였으며, 이중 171장은 좌측 계류자 영상 나머지 179장은 우측 계류자가 촬영된 영상이다. 또한 $Dataset_A$ 중 38장으로 구성된 $Dataset_B$ 에 대해 W_{bs} 실측을 하고 이를 이용하여 제안된 방법의 성능을 비교 평가하였다.

3. 변수 설정

다음은 실험에 사용된 변수들의 값을 어떻게 결정하였는지에 대해 기술하도록 한다. 영상의 전역 이진화 임계치는 40으로 설정하였으며, 이는 히스토그램 명세화 과정에 사용된 기준 영상으로부터 획득된 값이다. 초기 곡선의 탐색 범위는 사전에 촬영된 50장의 영상으로부터 구하였다($p_1 \in (0.0015, 0.0023)$, $p_2 \in (-1.0833, -0.4929)$, $p_3 \in (178.0992, 358.2208)$). 그리고 곡선 C_m , C_r 을 구하기 위해 사용된 초기 곡선의 인접 영역 범위와 식 (8), (10)의 n 은 각각 20, 4로 설정되었으며, 이는 실제 영상을 분석하여 결정된 값이다. 곡선 C_l 을 구하기 위해 사용된 영상의 지역 임계치는 평균 명암도의 0.8배 곱한 값을 사용하였다. 마지막으로 식 (12)의 m 과 σ 는 각각 15, 10으로 설정하였다.

4. 측정 정확도

그림 16은 $Dataset_A$ 에 본 방법을 적용하여 구한 C_b , C_m , C_r 및 L_1 의 결과를 보여준다. 다양한 명암 대비를 가지는 영상에 대해서 정확하게 검출되었음을 확

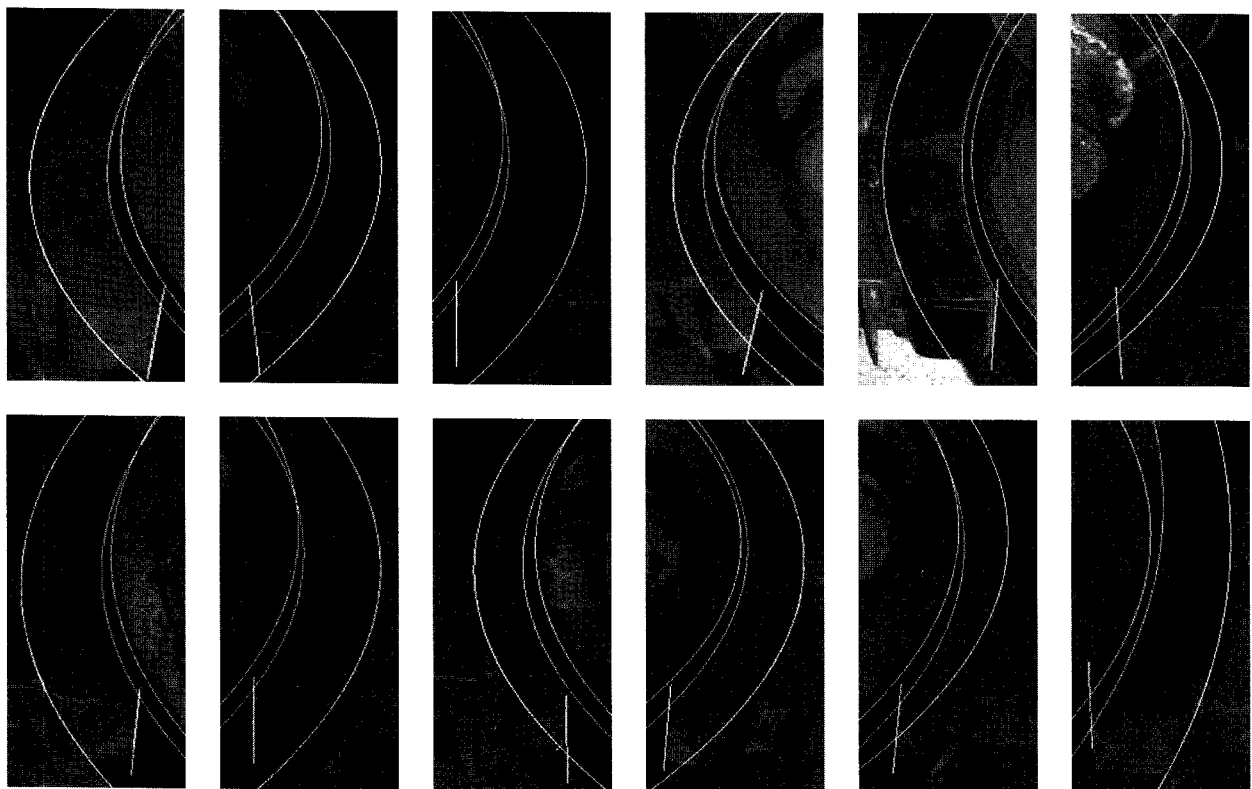


그림 16. C_b , C_m , C_r 및 L_1 이 검출된 결과
 Fig. 16. Result images that C_b , C_m , C_r , L_1 are detected.

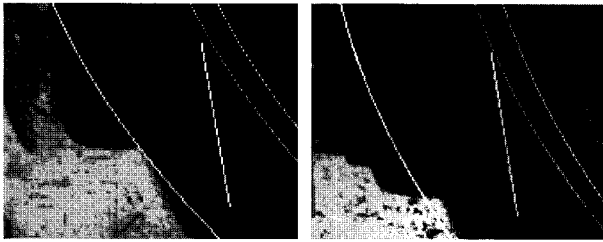


그림 17. L_1 이 부정확하게 검출된 결과
 Fig. 17. Result images that L_1 is detected inaccurately.

인할 수 있다. 또한 제륜자가 두껍거나 얇은 경우 그리고 제륜자에 이물질이 존재하는 경우, 제륜자에 기름칠이 칠해진 경우 등에 대해서도 제안된 방법이 강건하게 동작함을 확인할 수 있다. 실제 350장의 결과 영상을 시각적으로 분석해본 결과 C_l , C_m , C_r 이 정확하게 검출되지 않았다고 판단된 경우는 그림 16의 우측 하단 영상 2개 밖에 없었다. 그리고 L_1 이 올바르게 검출되지 않은 경우 역시 2개 밖에 없었으며, 그림 17은 L_1 이 잘못 검출된 경우를 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 두 경우 모두 제륜자에 이물질이 크게 묻어서 제륜자의 경계에 에지 값이 크지 않음을 알 수 있다. 제안된 방법은 $Patch_{L_1}$ 내에서 생성된 에지 영상에 허프 변환을 적용하므로 이와 같은 경우에는 L_1 을 올바르게 검출할 수 없었다.

다음은 제안된 방법이 C_l , C_m , C_r 을 얼마나 정확하게 추출하는지 실험을 하였으며, 본 실험의 목적은 화소 단위에서 정량적인 평가를 하기 위해서이다. 제륜자의 두께 등은 C_l , C_m , C_r 을 토대로 획득한 정보에 카메라 캘리브레이션 정보가 결합되어, 화소 단위에서 mm 단위로 변환된다. 때문에 비록 C_l , C_m , C_r 을 매우 정확하게 검출하였더라도 부정확한 카메라 캘리브레이션 과정 또는 분해능이 낮은 카메라의 사용으로 인해 실측과의 오차가 클 수도 있기 때문이다. 이와 같은 이유로 인해 화소단위에서 C_l , C_m , C_r 을 얼마나 정확하게 검출하는지에 대한 실험을 진행하였다. 먼저 각각의 영상에 대해 그림 18과 같이 사람이 손수 9개의 좌표를 설정하였다. 이때 설정된 좌표는 가능한 제륜자를 균등하게 3등분 할 수 있도록 위치시켰다.

제안된 방법을 $Dataset_A$ 에 적용하여 획득한 9개 좌표와 사람이 손수 설정한 좌표와의 x 값 차를 오차로 정의하였다. 이때 $Dataset_A$ 내 9장의 영상은 제륜자와 차륜이 붙은 경우로써 이는 실험에서 제외하였다. 물론 제안된 방법을 적용한 결과 9장의 영상을 모두 제

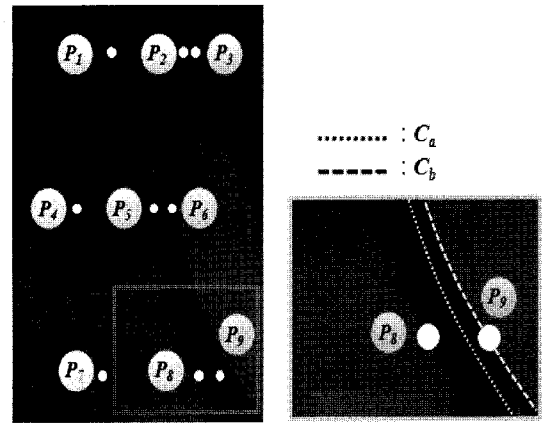


그림 18. C_l , C_m , C_r 의 검출 정확도 평가를 위해 사용된 점들
 Fig. 18. Points that are used to evaluate detection accuracy for C_l , C_m , C_r .

표 2. C_l , C_m , C_r 의 검출 정확도
 Table 2. Detection accuracy for C_l , C_m , C_r .

	평균 오차	오차의 분산
P_1	2.068	2.062
P_2	1.831	1.871
P_3	2.344	1.817
P_4	1.03	1.078
P_5	1.078	0.884
P_6	2.778	0.137
P_7	1.628	1.547
P_8	1.588	1.495
P_9	5.458	4.135
C_l 의 세 점	1.558	2.442
C_m 의 세 점	1.499	2.008
C_r 의 세 점	3.526	4.12

륜자와 차륜이 붙은 경우로 판단함을 확인하였다. 표 2는 제안된 방법의 평균 오차 및 오차의 분산을 보여준다. 표 2를 통해 C_l , C_m 위의 6점은 평균 오차가 2 미만으로 정밀하게 잘 찾아짐을 확인할 수 있다. 하지만 C_r 위의 3점 즉 차륜 위의 점들은 평균 오차가 3.526으로써 다소 크게 발생하였다. 또한 P_3 에서 P_6 , P_9 로 갈수록 오차가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 실제 차륜의 경사면 C_b 를 기준으로 C_r 선상의 점을 정한 반면에, 제안된 방법은 명암도 차가 크게 발생하는 C_a 를 찾기 때문이다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 제륜자의 아래쪽으로 갈수록 그 차는 커지며, 이로 인해 C_r 의 경우 C_l , C_m 에 비해 검출 성능이 다소 부정확하다.

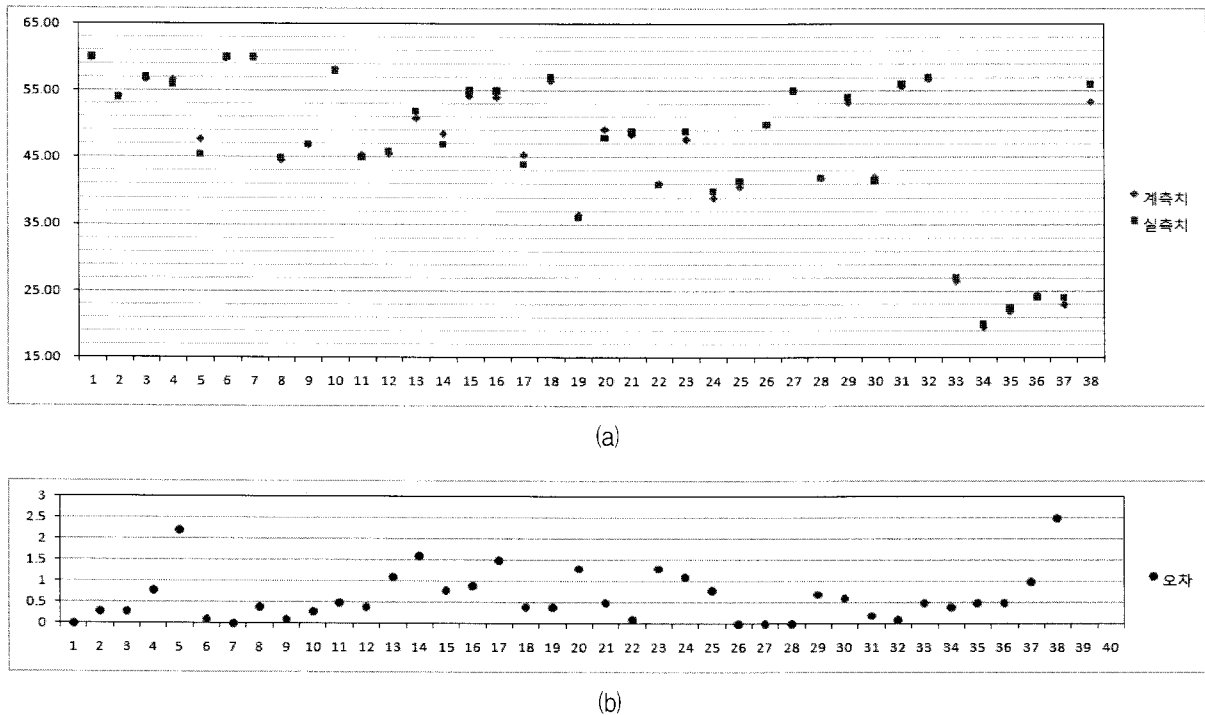


그림 19. 실측과 제안된 방법 결과 비교
 Fig. 19. Comparison of ground truth with the proposed method.

마지막으로 제안된 방법을 통해 구한 제륜자의 두께와 실측을 비교하는 실험을 하였다. 실제 현장에서 제륜자의 두께를 측정하는 검사관들은 제륜자의 가운데 부분(그림 18의 P_4 와 P_5 부근) 두께를 제륜자의 두께로 정의한다. 따라서 이에 근거하여 실측을 하였으며, C_l , C_m 의 가운데 부분을 찾기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하였다. 제륜자의 끝 부분 y 좌표 값은 L_1 을 구하기 위해 사용하였던 P_{L_1} 의 y 값을 이용하였으며, P_{L_1} 을 구하기 위해 사용하였던 방법을 C_l 에 적용하여 제륜자의 시작 부분 y 좌표 값을 구하였다. 두 y 좌표 값의 평균을 제륜자의 가운데 부분으로 정의한 후 이에 대응하는 C_l , C_m 의 x 좌표를 구하였다. 마지막으로 앞서 구한 두 점을 카메라 캘리브레이션을 통해 3차원 공간상의 좌표로 변환한 후 두 점의 유클리디언(Euclidean) 거리를 제륜자의 두께로 정의하였다. 그림 19. (a)는 $Dataset_B$ 에 대해 본 알고리즘이 적용된 결과와 실제 측량 결과를 보여주며, (b)는 오차의 절대값을 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 매우 정밀하게 측정되었음을 알 수 있다. 38장의 영상 중 2장을 제외하고는 대부분 1mm 내의 오차를 보였으며, 오차의 산술 평균은 0.654mm 임을 확인하였다. 이는 기존에

제안된 [1]보다 4배나 정밀한 결과이며 또한 실제 다양한 영상에 대해 그 결과를 분석하였다는 점에서 의미가 있다.

제륜자의 편마모 및 제륜자와 차륜 사이의 거리는 이를 정밀하게 측정할 수 있는 도구가 존재하지 않기 때문에 실측을 구하기 어려웠다. 실제로 현장에서 제륜자의 결함을 검사하는 검사관 역시 시각을 통해서 주관적으로 판단하는 실정이다. 때문에 G_{bs} , UW_h , UW_v 에 대해서는 관리자가 임계치를 설정하고 이 값을 넘는 경우에 결함이 존재한다는 것을 통지하는 방식으로 시스템을 구성하였다. 이때, G_{bs} 는 제륜자의 하단 부분에서 구한 좌표들을 이용하여 실측을 계산하였으며, UW_v 의 경우에는 두 직선의 기저(Basis)를 3차원으로 변환한 후 두 기저 사이의 사이각을 UW_v 로 정의하였다. UW_h 의 경우 UW_{h1} 을 구하기 위해 먼저 제륜자의 위 부분과 C_l , C_m 이 만나는 두 점 (x_l, y_l) , (x_m, y_m) 을 구하였다. 이때 제륜자의 위 부분은 제륜자의 두께를 측정하기 위해 구한 값을 이용한다. 다음은 미리 입력해 놓은 각도 Δa 만큼 (x_m, y_m) 을 기준으로 (x_l, y_l) 을 회전한 다음 C_l 과 만나는 점 (x_l^*, y_l^*) 을 구하고 (x_l^*, y_l^*) , (x_m, y_m) 을 3차원 공간으로 변환한 후 UW_{h1} 를 계산하

였다. UW_{h2} 는 제륜자의 아래 부분과 C_i , C_m 이 만나는 두 점을 구한 후 이를 UW_{h1} 와 동일하게 3차원 공간으로 변환한 후 계산하였다. 최종적으로 두 거리의 차이를 수직 편마모 UW_h 로 측정하였다. 비록 실측과의 정확한 비교는 할 수 없었지만 앞서 제륜자 두께의 결과를 통해 확인한 바와 같이 G_{bs} , W_{bs} , UW_h 역시 꽤 정확하게 측정될 수 있을 것이라고 판단된다. 또한 G_{bs} , W_{bs} , UW_h 측정 방법을 제안하였다는 점에서 의미가 있다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 제륜자의 두께, 편마모 및 제륜자와 차륜 사이의 거리를 자동으로 측정하는 시스템을 제안하였다. 영상 내 제륜자의 위치를 적응적으로 검출하기 위해 제륜자와 차륜 사이에 나타나는 그림자 영역이 이용되었다. 그림자 영역은 2차 다항식을 통해 모델링 되었으며, 그림자 영역을 지나는 초기 곡선을 검출하기 위해 목적 함수와 제한조건이 설정되었다. 초기 곡선이 검출되면, C_i , C_m , C_r , L_1 , L_2 는 검출된 초기 곡선과 명암도 변화 정보를 이용해 검출된다. 실험에서는 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 경기도 시흥 철도 기지에서 촬영된 영상에 적용해 보았으며, 그 결과 평균 0.654mm의 두께 측정 오차를 나타내었다.

참 고 문 헌

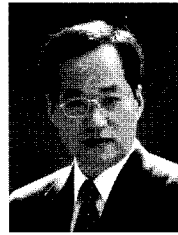
- [1] H. Sato, H. Nishii, and S. Adachi, "Automatic Thickness Measuring System by Image Processing for Brake Shoes of Traveling Rolling Stock," *Kawasaki Steel Technical Report*, no. 27, 1992.
- [2] <http://www.intra-corp.net>
- [3] <http://www.wabco-auto.com>
- [4] G. Glogowski and J. Sawatzky, "Computer Vision Measurement of Brake Shoes for Fort Garry Industries," *B.Sc. Thesis in University of Manitoba*, 2006.
- [5] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002.
- [6] R. O. Duda and P. E. Hart, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures," *Communications of the ACM*, vol. 15, pp. 11-15, 1972.
- [7] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, Brooks/Cole.
- [8] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher, "Direct Least Square Fitting of Ellipses," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, no. 5, pp. 476-480, 1999.
- [9] W. Gander, G. H. Golub, and R. Strebler, "Least-Squares Fitting of Circles and Ellipses," *BIT*, no. 34, pp. 558-578, 1994.
- [10] G. Taubin, "Estimation of Planar Curves, Surfaces and Non-Planar Space Curves Defined by Implicit Equations, With Applications to Edge and Range Image Segmentation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 11, pp. 1115-1138, 1991.
- [11] T. F. Coleman and Y. Li, "An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds," *SIAM Journal on Optimization*, vol. 6, pp. 418-445, 1996.
- [12] T. F. Coleman and Y. Li, "On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds," *Mathematical Programming*, vol. 67, no. 2, pp. 189-224, 1994.
- [13] J. E. Dennis, Jr., *Nonlinear least squares and equations*, in *The State of the Art of Numerical Analysis edited by D. Jacobs*, Academic Press, pp. 269-312, 1977.
- [14] D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [15] J. F. Canny, "A Computational Approach To Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, pp. 679-714, 1986.
- [16] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

저 자 소 개



김 현 철(정회원)
 2004년 한양대학교 전자전기
 공학부 학사 졸업.
 2006년 한양대학교 전자통신전파
 공학과 석사 졸업.
 2006년~현재 한양대학교 전자
 컴퓨터통신공학과 박사
 과정.

<주관심분야 : 패턴 인식, 내용기반 멀티미디어
 분석>



김 회 울(정회원)
 1980년 한양대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1983년 Pennsylvania State
 University 전기공학과
 석사 졸업.
 1989년 Purdue University
 전기공학과 박사 졸업.

1989년~1994년 University of Texas 조교수.
 1994년~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부
 정교수.

<주관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전, 패턴인식,
 머신비전, MPEG-7>