베어링 강구 검사용 기계시각 시스템 설계

박수우 · 김윤수 · 이상욱 · 임병훈 · 김태균 · 박철영 · 최병재 · 이문락* · 도용태†

Machine vision system design for inspecting steel bearing balls

Suwoo Park, Yoonsu Kim, Sangok Lee, Byunghun Lim, Taegyun Kim,
Cheol-Young Park, Byung-Jae Choi, Moonrak Lee*, and Yongtae Do†

Abstract

Steel bearing balls are important component in machines having moving parts. In this paper we describe a vision-based automatic inspection system designed for sensing defects on the surface of steel bearing balls. The system has a camera looking down over a rail on which balls roll. Two mirrors are installed at both sides of the rail so that the side parts of a ball can be well inspected. The entire ball surface can be sufficiently seen by taking three images at 120° rotation interval. Defects are detected by thresholding the difference image between an image captured and the reference image of a good ball.

Key Words : visual inspection, bearing ball, machine vision system setup

1. 서 론

베어링용 강구(steel ball)는 많은 기계장치의 동작에 필요한 기초 부품이다. 기계장치의 운전 시 강구는 높은 압력을 받으므로, 강구 표면의 작은 결함에도 심각한 기기 고장을 야기할 수 있다. 그러므로 강구를 출고할 때 엄격한 전수검사가 요구되고 있다. 현재 일반적인 검사방법으로 사람 눈에 의한 방식, 즉 목시 검사가 사용되고 있으나, 이는 검사자에게 장시간의 지속적인 주의를 요하는 어려운 작업이며, 항상 실수의 가능성을 안고 있다. 이와 같은 경우 일부의 샘플만을 검사하는 방법이 전수검사를 하는 것 보다 오히려 더 효과적이라는 결과도 보고된 바도 있다^[1]. 일반적으로 인간의 시각에 의한 검사는 매우 엄격한 기준에 의해 이루어졌을 때에도 최고 80 % 정도의 효율을 가진다고 알려져 있다^[2,3]. 또, 검사를 위한 고용비용은 전체 생산가격의 10 % 이상으로 평가되어지고 있다^[4]. 본 논문의 경우와 같이, 거울과 같은 반사광을 내는 금속표면을

검사할 때 검사자의 눈은 쉽게 피곤해지기 때문에 그 상황은 더욱 악화된다.

위와 같은 이유로, 자동화된 강구 검사 시스템에 대한 필요성이 관련 산업에서 제기되고 있다. 강구의 외관검사를 위한 기존의 시스템으로, Parent 등은 베어링용 구의 결함을 검사하는 음파 현미경을 개발한 바 있다^[5]. 이 장비는 음파의 폭과 위상을 측정함으로써 표면의 아주 작은 결함도 찾아낼 수 있었다. 그러나 세라믹 재질 구의 부분적인 검사만 가능하도록 개발되어졌고, 시스템의 설치비용이 높다. 한편 Szlavik 등은 신경망을 이용하여 영상신호를 처리함으로써 금속표면을 검사하였다^[4]. 그들은 결함부의 광학적 특성에 관심을 가졌고, 카메라로부터 획득한 영상에서 결함으로 인해 매우 밝은 점들을 찾는 방법을 사용하였다. 검사는 각구에 대해서가 아니라 베어링 구조물에 대해서 실행되어졌다. 또, Ng는 기계시각을 이용해 강구를 검사할 때 일어나는 반사광을 피하기 위해 돔형 조명의 사용을 제안하였다^[6]. 링 모양의 조명을 사용한 후 획득된 영상에서 결함에 의한 링 모양의 왜곡을 검출하였다. 이러한 방식은 자동화된 시각 검사의 한 방법을 제공하고 있다. 그러나 장치와 강구 간의 거리를 조절하며 반복적인 조명의 변경과 영상 획득을 해야 하기 때문

대구대학교 대학원 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Graduate School, Daegu University)

* (주)대호센트(DAEHO CEMT)

† Corresponding author: ytdo@daegu.ac.kr

(Received : May 30, 2008, Accepted : July 3, 2008)

그림 1. 설계된 장치의 구조
Fig. 1. Designed system structure.

에 검사 속도가 느리게 되었다. 또한 윗 반구(카메라에서 보이는 강구의 윗면)만을 검사하고 아래 반구의 검사에 대한 방법도 제안하지 못하였다.

본 논문에서는 강구의 베어링용 외관검사를 목적으로 하는 기계시각 시스템을 설계 제작 하였다. 장치는 카메라가 바라보는 방향 아래에 레일을 설치하였고, 그 양쪽에 거울을 설치하여 레일 위를 지나가는 강구의 윗면뿐 아니라 양측면도 볼 수 있게 하였다. 강구가 굴러갈 때마다 총 3장의 영상이 획득되어진다. 제안된 구조의 설계는 검사 대상 강구의 거의 모든 표면을 효과적으로 관측할 수 있게 한다.

2. 시스템의 전체적 구조

본 논문의 시스템은 베어링용 강구를 자동으로 검사하기 위해 설계되었으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 카메라, 조명, 거울, PC, 트리거(trigger) 발생기, 강구 이송을 위한 레일(rail) 등으로 구성되어 있다.

2.1. 시스템의 설계조건

산업용으로의 사용이 목표인 장치의 설계에 있어서 실제 사용자의 필요를 고려하는 것은 매우 중요하다. 우리는 현재 목식 검사를 하고 있는 베어링 강구 생산자와 협의하여 검출 가능한 결함의 최소크기를 0.1 mm, 전체 강구 표면의 70 % 이상을 검사할 수 있도록 하는 설계조건을 설정하였다.

그림 2. 강구의 이동
Fig. 2. Steel ball movement.

그림 3. 레일 상 강구의 실제 회전거리
Fig. 3. Actual rotational distance of a steel ball on the rail.

2.2. 카메라

카메라는 기계시각 장치를 설계함에 있어 가장 핵심적인 요소이다. 우리는 시스템에 사용할 적절한 카메라를 결정하기 위해 관측영역(Field Of View; FOV), 해상도, 그리고 강구의 이동속도 등을 고려하였다.

강구의 전체 면을 검사하기 위하여 그림 2에서 보인 바와 같이 강구가 120° 굴러 갔을 때마다 트리거 신호를 입력 받아 영상을 획득하도록 시스템을 설계하였다. 그림 3과 같이 강구의 직경이 19.84 mm인 경우 레일의 폭은 11 mm로 하였다. 이 때 강구가 굴러가는 실제 원주는 51.87 mm가 되고, 120° 회전 시 강구가 이동한 거리는 51.87 mm의 $1/3$ 인 17.29 mm가 된다. 그래서 17.29 mm를 이동할 때마다 트리거 신호를 발생시켜 영상을 획득하였다.

그림 2에 보는 바와 같이 구성된 시스템에서 강구는 $\theta = 0.59^\circ$, 길이가 600 mm인 빔면 위를 $9806.65 \times \sin\theta$ 의 가속도로 등가속도 운동을 한다. A지점에서 정지 상태로 출발하여 마지막 트리거 지점인 D지점을 통과할 때까지의 시간 t_{AD} 와 순간속도 v_D 는 다음 식 (1)과 (2)에 의해 구해 질 수 있다.

그림 4. 카메라의 관측영역

Fig. 4. Camera's field of view.

$$t_{AD} = \sqrt{\frac{2s_{AD}}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 295}{100.98}} = 2.42 \text{ sec} \quad (1)$$

단, s_{AD} 는 A지점에서 D지점까지의 거리이다.

$$v_D = 9806.65 \times \sin \theta \times t_{AD} \\ = 100.98 \times 2.42 = 224.09 \text{ mm/sec} \quad (2)$$

FOV는 그림 4에서와 같이 실상과 거울에 의한 허상이 포함된 영역의 크기를 고려하여 설정하였다. 실상과 허상이 하나의 카메라로 획득될 때, 최대한의 검사 영역을 확보하기 위해 서로 간섭을 일으키지 않는 최소의 실상과 허상 이격을 가지도록 해야 한다. 검사 중 강구의 규격을 FOV 선정에 이용하며, 최대강구의 크기는 20 mm, 허상의 크기는 18 mm, 여유를 가장자리로 2 mm라고 두었다. 설계사양에서 제시한 강구 표면의 불량을 검출하기 위한 최소 불량 크기의 크기는 0.1 mm이며, 따라서 공간해상도는 0.1 mm/pixel이라 할 수 있다. 공간해상도와 FOV를 이용하여 영상해상도를 식 (3), (4), (5)와 같이 각각 계산하였다.

$$R_i = \frac{FOV_i}{R_s} = \frac{60}{0.1} = 600 \text{ pixel} \quad (3)$$

$$FOV_j = \frac{4}{3} \times FOV_i = 80 \text{ mm} \quad (4)$$

$$R_j = \frac{FOV_j}{R_s} = \frac{80}{0.1} = 800 \text{ pixel} \quad (5)$$

이상의 계산으로부터 카메라가 800×600 이상의 해상도를 가지면, 충분히 결함을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 R_i , R_j 는 수평, 수직축에 대한 영상 해상도이며, FOV_i , FOV_j 는 방향별 FOV를 나타낸다. FOV_j

는 식 (4)에서 일반적인 CCD셀의 종횡비가 4:3인 것을 고려하여 FOV_i 로부터 FOV_j 를 계산하였다.

카메라의 셔터 속도는 강구의 이동 속도를 기준으로 결정하며, 강구의 이동 속도는 그림 2의 D지점에서 가장 빠를 것이다. 강구가 정지된 것처럼 영상을 획득하기 위해서는 공간해상도 개념을 도입하여 2.1절에서 제시된 최소결함인 0.1 mm 움직임 이내로 셔터 속도를 설정하면 된다. 즉, 1/2,240.10 sec의 이상의 셔터 속도를 가지는 카메라로 선정하여야 한다.

이상의 해석을 통하여 얻어진 조건들을 만족하는 카메라로 Point Grey사의 GRS-20S4M^[7]은 1/1.8" type CCD를 채용하였으며, 이는 1600×1200 해상도의 Progressive scan 방식에 1/50,000의 셔터 속도를 가지고 있다. 선택된 카메라를 기준으로 검출 가능한 결함의 최소 크기와 셔터 속도는 식 (6)과 (7)을 통하여 계산할 수 있다.

$$R_s = \frac{60}{1200} = 0.05 \text{ mm/pixel} \quad (6)$$

$$Shutter_{MIN} = \frac{224.09}{0.05} = 4480.20 \text{ frame/sec} \quad (7)$$

검출 가능한 최소 결함은 0.05 mm로 2.1절에 제시된 최소 결함의 크기 0.1 mm를 검출하기에 충분하다. 0.05 mm를 검출하기 위한 셔터 속도 또한 1/4,480 이상의 속도를 가지기 때문에 선택된 카메라는 설계사양에 부합함을 알 수 있다.

2.3. 렌즈

GRS-20S4M의 1/1.8" 센서로부터 초점거리를 계산하기 위한 배율 M_r 은 센서의 수직 크기 S_j 와 FOV_j 를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M_r = \frac{S_j}{FOV_j} = \frac{5.32}{60} = 0.089 \quad (8)$$

여기서 S_j 는 CCD 센서 배열의 수직 크기이며, 1/1.8" CCD의 실제 수직크기는 5.32 mm이다. 수평배율 또한 위와 같은 방법으로 계산이 가능하다. 카메라와 강구의 거리가 190.00 mm라고 가정할 때 렌즈의 초점거리는 식 (9)를 통해서 구할 수 있다.

$$F = \frac{D_o \times M_r}{1 + M_r} = \frac{190 \times 0.089}{1 + 0.089} = 15.475 \text{ mm} \quad (9)$$

식 (9)의 초점거리를 만족하는 기성품 렌즈는 없으며, 본 시스템에서는 이와 근사한 16 mm 렌즈를 채용하였다. 이 초점거리로부터 다시 실제 이격거리를 수정

그림 5. 카메라 설정
Fig. 5. The camera setting.

하면 다음 식과 같다.

$$D = \frac{F(1+M)}{M} = \frac{16(1+0.089)}{0.089} = 194.451 \text{ mm} \quad (10)$$

그림 5는 상기 조건에 만족하는 카메라 및 렌즈의 설정을 보여준다.

2.4. 트리거 신호

강구의 전체 면을 검사하기 위하여 120°씩 회전한 강구의 영상을 획득하였으며, 그림 2의 B, C 그리고 D의 위치에 카메라의 트리거를 위한 센서를 설치하기로 한 것은 이미 설명한 바 있다. 그림 6은 설치된 Omron사의 근접 센서인 E2E-CR8C1이다. E2E-CR8C1의 반응 속도는 3 kHz, 감각면 직경은 4 mm이다.

근접센서의 출력은 트리거 발생기를 통해 카메라가 영상을 획득하는 시점을 결정한다. 트리거 발생기는 그림 7의 CD4023B를 사용하였다. CD4023B는 3-input CMOS NAND 게이트이다. Sensor 1, Sensor 2, 그리고 Sensor 3에 입력 신호 중 하나의 신호라도 입력이 되면 트리거 신호를 발생시켜 영상을 획득하게 한다.

그림 6. E2E-CR8C1 근접 센서
Fig. 6. E2E-CR8C1 Proximity sensors.

그림 7. 트리거 발생기
Fig. 7. Trigger generator.

2.5. 조명

조명은 기계시각의 효율을 결정하는 중요한 요소로, 여기서는 강구의 표면에 빛이 균일하게 비추어지도록 해야 한다. 특히 거울면 반사 특성을 가지는 강구에서는 더욱 그 중요성이 크다. 사용된 시스템의 조명은 LIGHT HOUSE21사의 PC-CANVAS로 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp: 냉음극 형광등)을 이용한 발광장치이다.

Shade는 강구에 균일하게 조명을 주고, 배경의 잡음을 없애기 위한 장치로, 70% 편광판을 사용하여 주문 제작하였다. 그림 8은 사용된 Shade의 외관이다.

그림 8. 간접 조명용 Shade
Fig. 8. Shade for indirect illumination.

3. 결함 검출 기법

트리거 장치에 의해 강구 영상은 항상 지정된 위치에서 획득되어지며, 획득된 영상과 기준 영상(reference image)과의 차 영상(difference image)을 통해 강구의 결함을 검출하였다.

획득된 전체 영상에서 이미 알고 있는 강구의 반지름으로부터 강구에 해당하는 영역만을 먼저 추출함으로써 처리시간을 절약하고, 비 관심 영역에서 발생할 수 있는 오류의 영향을 방지할 수 있다. 임의 화소가 관심 영역 내에 있는지의 판정은 식 (11)을 사용한다. 단, r 은 영상 내 강구의 반지름, (x, y) 는 임의의 화소좌표, (x_c, y_c) 는 강구의 중심 화소좌표로 기지이다.

$$\begin{aligned} &\text{관심영역화소 if } (x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 < r^2 \\ &\text{비관심영역화소 otherwise} \end{aligned} \quad (11)$$

이제 이와 같이 추출된 강구의 영역과 미리 저장된 기준 영상과의 차 영상을 얻는다. 기준 영상은 다수의 양품 강구 영상으로부터 화소단위의 평균영상을 구함으로써 생성되어진다.

차 영상을 통해 결함 화소를 찾기 위한 임계치는 통계적 표준편차를 이용하였다. 표준편차는 식 (12)를 사용하여 화소 단위로 계산되어 졌다. 여기서 m 은 평균 영상을 구하기 위해 사용한 영상의 개수이다. $\sigma_{x,y}$ 는 표준편차, $\mu_{x,y}$ 는 x, y 좌표의 화소의 평균, $I_{x,y,n}$ 은 n 번째 영상에서 x, y 좌표의 현재 화소값을 나타낸다.

$$\sigma_{x,y} = \frac{1}{m-1} \sum_{n=0}^m \sqrt{(\mu_{x,y} - I_{x,y,n})^2} \quad (12)$$

표 1에서와 같이 표준편차의 1.4배 이상의 값을 임계치로 사용하였을 때 양품에서 완벽한 결과를 얻었음을 볼 수 있다. 단, 임계치가 커지면 당연히 불량품을 찾지 못할 가능성이 커지고 작아지면 오분류의 가능성이 커진다. 우리는 이와 같은 실험적 방법으로 1.4 σ 가 적절한 값임을 알 수 있었다.

표 1. 임계치의 결정

임계치	양품의 시료에 대한 실험 (unit: 회)	
	정분류	오분류
1.3 σ	8	2
1.4 σ	10	0
1.5 σ	10	0

그림 9. 완성된 검사 시스템
Fig. 9. Constructed Inspection System.

그림 10. 거울 영상의 결함 검출 : (a) 결함 검출, (b) 결함의 크기

Fig. 10. Defect detection from mirror image: (a) Defect detection, (b) Defect size.

4. 실험 결과

완성된 시스템은 그림 9와 같다. 본 시스템의 구성은 1개의 CCD 카메라, 2개의 거울, 1개의 CCFL 조명, Shade 그리고, 3개의 근접 센서를 사용하였다. 알고리즘의 구현에는 Visual C++ 6.0과 Intel사의 공개 Vision library인 OpenCV 1.0을 사용하였다.

거울에 비친 강구는 실제 강구의 크기보다 작아진다. 이를 점검하기 위하여 그림 10에서와 같이 거울 영상에서 나타나는 1 mm × 1 mm 크기의 결함을 기준 영상과의 차영상을 통해 검출하였다. 그림 10(b)와 같이, 검출된 강구의 결함은 15 pixel × 13 pixel로, 한 화소는 0.06 mm × 0.07 mm의 크기를 가진다. 즉, 0.1 mm 결함

그림 11. 실영상과 관심 영역 추출
Fig. 11. Real image and extracting region of interest.

을 검출하기에 충분하다는 것을 알 수 있다.

그림 11은 실상과 거울에 대한 허상 모두를 이용하여 강구를 검사하는 상황의 영상을 보여준다. 우측 그

표 2. 여러 종류의 결함에 대한 실험 결과
Table 2. Results for Various Defects (unit: 회)

결함의 종류	정분류	오분류
양 품	10	0
녹	10	0
찍 힘	10	0
패 임	10	0
흑 피 #1	10	0
흑 피 #2	8	2

림은 좌측 그림과 같이 획득된 실제 영상에서 기지의 강구 반지름을 이용하여 관심 영역만을 추출한 것이다. 영상의 처리는 이 부분에서만 이루어진다.

표 2는 여러 종류의 결함과 양품에 대하여 반복 실행한 실험 결과이다. 양품을 완벽히 분류해 내고 있으며, 모든 결함을 효과적으로 찾아내었으나, 흑피의 경

그림 12. 다양한 결함의 종류 : (a) 찍힘, (b) 녹, (c) 패임, (d) 흑피
Fig. 12. Defects of various kinds : (a) Peck, (b) Rust, (c) Gouge, (d) Black dots.

우 소수 오분류가 발견되었다. 흑피는 아주 작은 점 모양의 결함으로 육안으로도 식별이 어렵고, 70 % 이상의 검사성능을 목표로 한 점을 고려할 때 양호한 결과라고 할 수 있다.

그림 12에서는 다양한 결함에 대한 실험 결과를 보여 준다. 각 결함 별로 3개의 영상 열(column)에서 좌측 중앙은 기준으로 사용된 양품 강구의 실상, 상하는 이의 거울에 의한 허상에 대한 영상, 중간 열은 검사 대상 강구의 실상 및 허상 영상, 우측은 이들의 차영상이다. 그림 12(a)는 주로 강구간의 부딪힘으로 인해 발생한 찍힘을 결함으로 검출한 것이다. 그림 12(b)는 강구 전역에 녹이 쓴 것, 그림 12(c)는 강구의 패임, 그리고 그림 12(d)는 강구 표면상 작은 흑피를 검출해 내었다.

5. 결 론

기계시각을 사용하여 강구의 결함을 자동 검사하는 시스템의 효율적인 설계 방법이 제안되었다. 기구부는 광학적 조건을 고려하여 설계되었다. 레일 위를 굴러가는 강구를 120° 회전 간격으로 3번 관측하고, 양쪽 측면은 거울을 이용하여 관측하도록 하였다. 결과적으로 강구의 전 영역을 검사할 수 있고, 강구의 이송 중 측정이 이루어지므로 검사 속도가 빠르다. 이는 기존의 기법^[6]이 고정된 강구의 한쪽 면에 대해서 측정거리를 달리하며 반복 측정하여야 하는 것과 비교하여, 관측 면적과 속도 및 자동화 용이성 측면에서 현실적으로 유리하다. 설계 제작된 기구는 실험을 통하여 여러 종류의 결함을 검출할 수 있음을 입증해 보였다. 본 시스템의 실제 현장에서의 활용을 위한 시험 및 개선은 차

후 과제로 남아 있다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] G. B. Wetherill, "Sampling inspection and quality control", *Methuen and Co., Ltd.*, London, 1969.
- [2] T. S. Newman and A. K. Jain, "A survey of automated visual inspection", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 61, no. 2, pp. 231-262, 1995.
- [3] B. Smith, "Making war on defects: Six-sigma design", *IEEE Spectrum*, vol. 30, no. 9, pp. 43-47, Sep. 1993.
- [4] Z. Szlavik, R. Tetzlaff, A. Blug, and H. Hoefler, "Visual inspection of metal objects by using cellular neural networks", *Proc. Int'l Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications*, Aug., pp. 1-5, 2006.
- [5] P. Parent, C-H Chou, and B. T. Khuri-Yakub, "Ball bearing inspection with an acoustic microscope", *Proc. of IEEE Ultrasonic Symposium*, vol. 2, pp. 1111-1113, Oct. 1988.
- [6] T. W. Ng, "Optical inspection of ball bearing defects", *Measurement Science and Techniques*, vol. 18, pp. N73-N76, 20071-15, 2004.
- [7] Point Grey, "Grasshopper datasheet", <http://www.ptgrey.com>

박 수 우(Suwoo Park)

- 2006년~ 현재 대구대학교 대학원 전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 자동화 센서, 기계시각, 임베디드 시스템

김 윤 수(Yoonsu Kim)

- 2007년~ 현재 대구대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 기계시각, 자동화 장치

이 상 옥(Sangok Lee)

- 2007년 (주)대호셈트 연구원
- 2008년~현재 대구대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 인공지능, 영상처리

임 병 훈(Byunghun Lim)

- 2007년~현재 대구대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 센서시스템, 광센서, 회로 설계

김 태 균(Taegyun Kim)

- 2007년~현재 대구대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 인공지능, 퍼지제어, 자동화 센서

박 철 영(Cheol-Young Park)

- 현재 대구대학교 전자공학부 교수
- 주관심분야 : 집적회로 및 지능형 소자 설계, USN

최 병 재(Byung-Jae Choi)

- 현재 대구대학교 전자공학부 교수
- 주관심분야 : 지능제어, 자동화용 센서 및 인터페이스

이 문 략(Moonrak Lee)

- 현재 (주)대호셈트 대표이사
- 주관심분야 : 기계시각, 자동화 장치 설계 및 제작

도 용 태(Yongtae Do)

- 센서학회지 제17권 제2호 p. 106 참조