

초소형 스프링 정밀 측정을 위한 디지털 영상 처리 시스템 개발

표창률* · 강성훈** · 전병희*

Development of System based on Digital Image Processing for Precision Measurement of Micro Spring

C. R. Pyo, S. H. Kang and B. H. Jeon

Abstract

The purpose of this paper is the development of an automated measurement system for micro spring based on the digital image processing technique. This micro spring can be used in various engineering applications such as filament, load bearing springs, hard disk suspension and many others. Main functionality of the micro spring inspection system is to measure the representative pitch of the micro spring. The derivative operators are used for edge detection in gray level image. Measurement system developed in this paper consisted of new auto feeding mechanism to take advantage of air pressure. In the process of development of the micro spring inspection system based on the image processing and analysis, strong background technology and know-how have been accumulated to measure micro mechanical parts.

Key Words : Digital Image Processing, Micro Spring, Image Enhancement, Auto Feeding, ROI(Region Of Interest), Luminance Pattern Recognition, High Resolution Camera

1. 서 론

초소형 스프링(micro spring)은 약 $70\mu\text{m}$ 정도의 굵기로 가늘게 가공하여, 이를 코일 형태로 권선화하여 기계 부품으로 사용하고 있다. 기존의 검사방법은 숙련자에 의한 육안검사와 고배율의 공구 현미경을 이용한 영상

검사 두 가지가 병행되고 있다. 숙련자에 의한 육안검사는 검사자에 따라서 또는 검사자의 상태에 따라서 검사 결과가 상이하게 나타난다. 그리고 공구 현미경을 이용한 검사는 전체를 검사하지 못하고 임의의 3부분에 대해 수행되고 있다. 현재의 방법을 이용하여 불량검사를 할 경우 정확한 측정이 어렵고 비효율적이며, 1차 검사 후

* 인덕대학 컴퓨터응용기계세련

** 인덕대학 산업기술연구원

양품을 다시 검사할 경우 불량으로 판정되는 것이 30%를 초과하는 등 많은 문제점이 발생한다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구에서는 비효율적인 기존의 검사 방법을 대신해서 초소형 스프링을 검사할 수 있는 검사 시스템과 알고리즘을 이미 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 디지털 영상처리(digital image processing)^(2~4) 기법을 이용하여 개발하고자 한다. 또한 초소형 스프링의 특징에 맞는 자동 검사 장비를 구축하고자 한다. 본 연구에서 얻어진 측정 노하우는 앞으로 초소형 부품에 대한 자동화 시스템 개발에 중요한 요소 기술이 될 것으로 기대된다.

2. 검사장비 개발

2.1 검사 대상

영상처리를 이용한 검사장비는 여러 가지의 제품이 하나의 시스템을 이루기 때문에 장비의 선택에 있어서 신중을 기해야 한다. 장비의 선택에 있어서 가장 먼저 선행되어야 하는 것이 검사 대상의 분석이다. 검사 대상의 분석이 필요한 이유는 대상의 크기 및 형상에 따라 적절한 해상도의 카메라와 렌즈가 결정된다. 또한 재질, 검사 방법에 따라서 조명이 결정된다. 그리고 제품 특징에 따라서 이송장치를 개발하여야 한다. Fig. 1은 본 연구에서 검사하고자 하는 초소형 스프링이다. 초소형 스프링 검사 시스템의 주요 기능은 초소형 스프링 코일의 피치 측정과 그 균일성의 검사이다. 그리고 초소형 스프링의 전체 길이, 코일 부분의 길이와 초소형 스프링 양 끝단의 연결부의 방향성 등을 검사하게 된다.

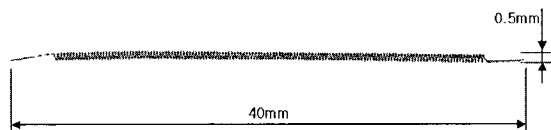


Fig. 1 Micro spring with very large aspect ratio(1/80)

그림에서와 같이 세장비(길이 40mm, 직경 0.5mm)가 매우 큰 경우에 고집적화된 피치를 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 초소형 스프링 양단의 연결부의 방향을 정확하게 검사하면서 전체 길이에 걸친 고집적 피치를 측정하기 위해서는 고해상도의 CCD 카메라가 필요하다.

2.2 시스템 구성

Fig. 2는 검사 시스템의 전체적인 구조를 나타내고 있다. 부품 공급장치는 초소형 스프링을 한 개씩 자유 낙하하도록 구성되었다. 이는 스프링의 직진성을 확보하기

위한 것으로서, 직진성이 확보된 영상일수록 정확한 검사와 검사 시간을 단축할 수 있기 때문이다. 낙하하는 초소형 스프링이 센서를 지나게 되면 센서의 신호는 카메라의 트리거(trigger) 신호로 이용되어 카메라가 작동하게 된다. 획득된 영상은 검사 알고리즘에 의해서 측정이 되고, 그 결과에 따라서 공기 추출기(air blower)가 작동하여 양·불량을 분류하게 된다. 시스템은 초소형 스프링의 자유 낙하 속도에 맞추어 정확한 시점에 트리거 신호가 작동하여 영상을 획득할 수 있도록 하였다. 또한 검사가 끝난 후 양·불량의 신호도 낙하 속도에 맞추어 작동되도록 구성하였다. 조명 장치는 고풍력 단파장 스트로브를 이용한 산란형 배경 조명 장치(diffused back lighting)를 사용하였다.

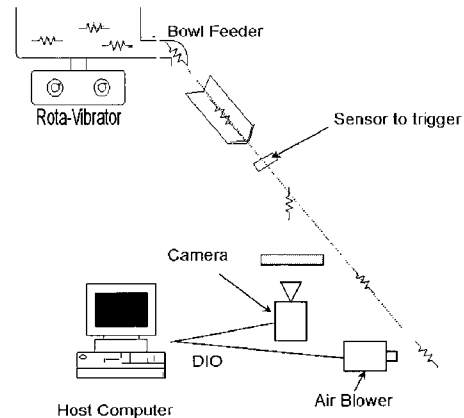


Fig. 2 Schematic diagram of the developed system

2.3 영상 획득 장치

본 연구에서는 측정하고자 하는 초소형 스프링을 한 프레임(frame)에 모두 나타내어 검사하였다. 따라서 보고자 하는 영역(FOV ; field of view)의 크기가 35mm ~ 45mm 정도가 된다. FOV에 비해 상대적으로 작은 피치를 측정하여야 하기 때문에 고해상도의 CCD 카메라를 장착하였다. 본 연구에서는 영상을 획득하는데에 Kodak Megaplus ES 4.0 digital CCD camera를 사용하였다. 이 카메라는 가로, 세로 각각 2,048화소의 해상도를 갖고 있어서 본 연구에서 필요한 FOV의 영상을 얻을 수 있으며, 한 화소(fixel)당 약 17 μ m의 분해능(resolution)을 갖게 된다. 이 분해능은 제품의 측정 공차보다 훨씬 적은 값으로서 만족할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

또한, 마이크로 렌즈를 이용하면 한 화소는 7.4 μ m²의 면적을 측정할 수 있다. 전자서터를 사용하면 초당 15프

레이(30 fps w/binning)을 촬영할 수 있는 실시간 디지털 영상능력을 보유하고 있다. 또한 4개의 레지스터가 센서의 데이터를 카메라 버퍼 메모리로 전달하며, 내부 영상 처리 장치가 영상을 수정하여 균일성을 보장한다. 모델 ES 4.0은 빠른 동영상 촬영을 위해 노출시간을 127 μ sec까지 줄일 수 있다. 동적 영상을 얻기 위해 2×2 binning을 채택하였으며 이는 프레임이 증가하여도 노이즈를 제거하는 데 도움을 준다. 여러 가지 스위치를 없애고 시리얼 인터페이스를 통해 카메라를 조절할 수 있고 다양한 프레임 그래픽과도 상호 호환적인 기능을 보유하고 있다.

다양한 기능을 최대한 활용하기 위해 이 카메라를 채택하였고 신속한 영상 획득을 위해 twain driver를 이용한 디지털 프레임 그래픽을 연결하였다. 서터작동은 초소형 스프링이 센서를 통과하자마자 구동하도록 하였다.

2.4 조명 장치

대부분의 산업 영상 처리 시스템의 성공여부는 기본적으로 적절한 조명에 달려 있다.⁴⁵⁻⁶⁾ 이는 영상처리라는 것이 기본적으로 카메라를 통해서 획득된 영상을 바탕으로 검사가 이루어지기 때문이다. 조명 장치는 관심영역, 작업거리, 영상적용의 난이성을 고려해 선택되어야 한다. 본 연구개발에서는 고출력 단파장 스트로브를 이용한 산란형 배경 조명 장치가 사용되었다. 이 조명기법은 CCD 센서에 짧은 시간 동안 고출력 스트로브 라이트를 노출함으로써 초소형 스프링의 영상을 잡아내는 데에 도움이 된다. 산란형 배경 조명을 사용함으로써 성공적인 영상 후처리를 위한 초소형 스프링 형상과 코일 피치의 선명한 영상을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 Advanced Illumination사의 BL18120 thinlite 조명을 사용하였으며 Table 1에 그 사양을 나타내었다.

Table 1 Specification of BL18120

Index	Performance
LED life	100,000 hours
Projected light distribution	+/- 6% over illuminated area
Operation temperature range	0° ~ 65°

2.5 무진동형 스프링 공급장치

부품 이송장치는 측정 부품을 정렬 공급하여 일정 작업위치까지 이송하는 장치로서 속도 제어부에 의하여 이송속도가 조절되며 위치 결정 정밀도에 따라 이송진동 및 형식이 구분되고 있다. 공급장치는 크기는 길이가 긴 부품에서 작게는 초소형 부품에 해당하는 전자부품 소자 분야에 이르기까지 각 분야에 많이 이용되고 있다. 일반적으로 산업현장에서 가장 많이 사용되는 이송기(부품공급장치 ; parts feeder)로는 진동을 이용한 볼(bowl) 피더 및 직선(linear) 피더가 널리 사용되고 있다. 검사 대상인 초소형 스프링은 1차 권선된 원선(row wire)을 재차 권선한 것으로서 제품간의 엉킴이 쉽게 발생한다. 진동형 이송장치는 초소형 스프링간의 엉킴을 유발하며, 적절한 영상을 얻는 과정에도 많은 문제점을 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 새로운 이송장치를 개발하였다. 새로 개발된 이송기의 원리는 Fig. 3과 같이 용기 내에 초소형 스프링을 넣은 후에 Fig. 4와 같이 한 쪽에서 일정 공기압을 불어넣어 반대편으로 스프링이 한 개씩 선별적으로 빠져나가는 것이다.

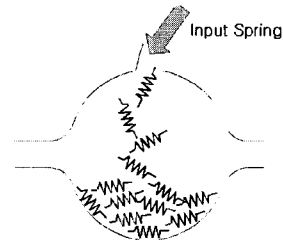


Fig. 3 Basic concept diagram (initial state)

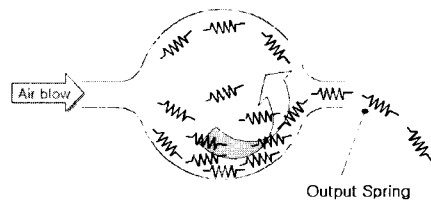


Fig. 4 Basic concept diagram (extract state)

Fig. 5는 초소형 스프링 공급장치의 기본적인 구조를 나타낸다. 초소형 스프링 공급장치의 구조는 로봇(robot)에 의해 이송된 스프링이 적재되는 호퍼, 적재된 스프링을 stacker로 이송하는 실린더와 1차 노즐, 밸브, 그리고 stacker에 적재된 스프링을 추출하기 위한 2차 노즐과 추출 노즐로 구성된다. 모든 장비는 공압을 이용하여 구동된다.

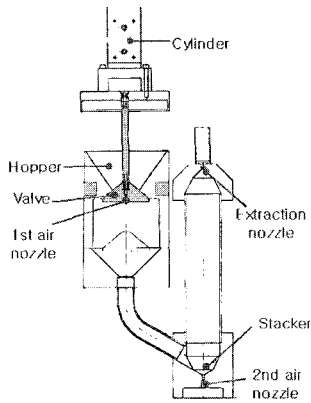


Fig. 5 Diagram of feeding system for micro spring

초소형 스프링 공급장치의 작동은 총 4단계로 이루어지며 Fig. 6에서 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 6은 초기상태로서 로봇으로부터 공급된 초소형 스프링은 호퍼부분에 적재된다.

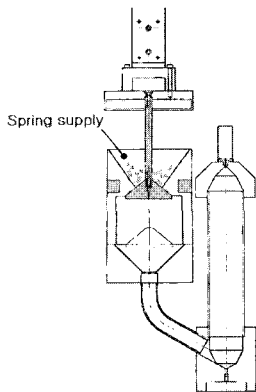


Fig. 6 Initial state

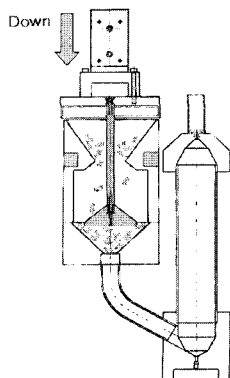


Fig. 7 Second state

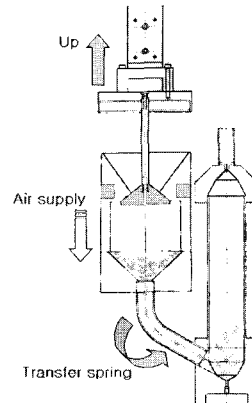


Fig. 8 Third state

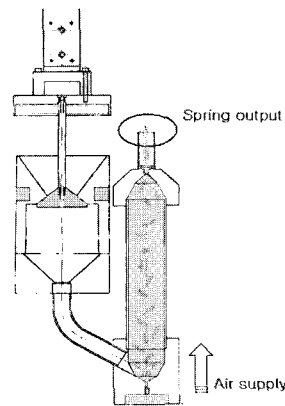


Fig. 9 Final state

Fig. 7은 두 번째 단계로 실린더가 하강하고, 이에 따라 스프링이 호퍼 아래부분으로 떨어지는 과정이다. 이때 밸브의 작동은 slacker 내에 설치된 센서에 의해서 작동되며, 센서는 slacker 내부에 존재하는 초소형 스프링의 량을 체크하여 일정량 이하가 되면 밸브가 작동하도록 되어있다. 세 번째 단계에는 실린더가 상승하여 호퍼 내부가 밀폐되고, 1차로 공기를 공급한다. 이때 호퍼 아래부분에 있던 초소형 스프링이 공압에 의해서 초소형 스프링 공급장치의 slacker 내부로 들어온다. Fig. 9는 최종단계로서 2차 공압을 이용해서 스프링을 추출하게 된다. 이때 추출 노즐을 통해서 스프링이 1개씩 추출된다. 이때 압력과 추출 노즐의 직경에 따라 스프링의 추출이 결정된다. 또한 제품에 따라서 압력과 추출 노즐의 직경이 틀리게 되므로 공기의 압력과 추출 노즐의 직경에 대한 충분한 실험이 필요하다. 본 연구에서 개발된 초소형 스프링 공급장치는 측정부품간의 영킴이 발생하지 않았으며, 공기압에 의한 부품의 선별로 진동에 자유

로 위 정확한 영상을 얻는데 효과적이며 이로 인해 검사 장비의 전체적인 크기를 줄일 수 있는 부가적인 효과도 얻을 수 있다.

이러한 무진동형 이송장치의 개발을 통해서 이송, 검사, 선별의 과정을 거치면서도 초당 4개의 검사가 가능한 시스템을 구축하게 되었다.

Table 2 Results of feeding system operation

Nozzle Size (mm)	Amount of Spring (EA)	Time (sec)	Air (kPa)
φ1.30	400	150	0.8
	400	180	0.8
φ1.25	400	160	0.85

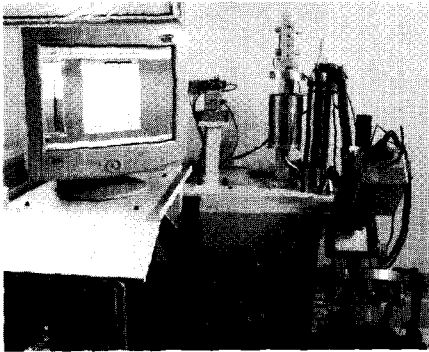


Fig. 10 Inspection system of micro spring

3. 영상처리 및 계산 방법

3.1 평활화(Equalization)

평활화⁽⁷⁾ 처리는 영상에서 고주파 성분을 감소시키고 저주파 성분을 보존시키는 역할을 한다. 평활화 처리는 보통 필터를 이용한 처리가 주로 이용되고 있다. 이러한 필터를 마스크(mask)라고도 하고 3×3, 5×5, 7×7 등의 크기를 갖는다. 평활화 처리에는 lowpass 필터(filter), median 필터 등을 이용하고 있다. Fig. 11은 일반적인 3×3 마스크를 보여준다.

W1	W2	W3
W4	W5	W6
W7	W8	W9

Fig. 11 A 3×3 mask with arbitrary coefficients(weights)

공간영역의 기본적인 식은 식(1)로 표현된다.

$$g(x, y) = h(x, y) \times f(x, y) \quad (1)$$

$f(x, y)$ 는 원 영상을 나타내고 $g(x, y)$ 합성에 의해 변환된 영상을 나타내고 $h(x, y)$ 는 position invariant operator이다. 식(1)은 식(2)가 된다.

$$h * f(x, y) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} h(i, j) \cdot f(x-i)(y-j) \quad (2)$$

식(1)은 다음 식(3)에 의해 식(4)로 표현된다.

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t f(t) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (4)$$

여기서 $F(u, v)$ 는 평활화하기 위한 Fourier 변환이고, $H(u, v)$ 는 필터 변환 함수이다. 본 연구에서는 평활화 필터 중에서 lowpass 필터의 보완한 median 필터 방식을 사용하였다.

3.2 연산(Operations)

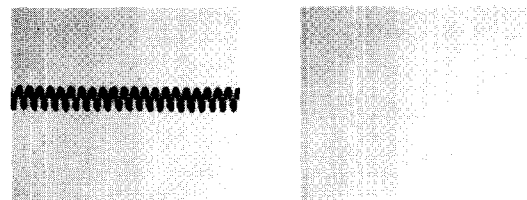


Fig. 12 (a) Spring image Fig. 12 (b) Background image

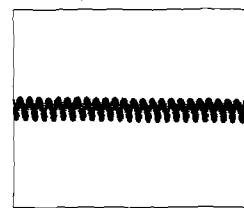


Fig. 12 (c) Enhanced bright field image

획득된 영상의 배경 제거 기법으로 영상의 사칙 연산을⁽⁸⁾ 사용하였다. 조소형 스프링이 있는 영상을 스케일

변수(scale factor)로 그레이 레벨(gray level)이 가장 높은 값인 255를 주고 배경영상으로 나누어주게 되면 배경이 제거된 영상이 얻어지게 된다. 그러나 영상 처리에서의 사칙연산은 모든 픽셀에서 이루어지는 관계로 초소형 스프링의 형상에도 변화를 가져오게 된다. 이를 보완하기 위해서 배경이 제거된 영상을 버퍼(buffer)에 저장 후 다시 곱해줌으로서 검사에 적합한 최적의 영상을 얻을 수 있었다. 이러한 영상 처리 기법이 초소형 스프링의 형상에 변화를 가져올 수 있으므로 영상처리 결과가 제품의 측정에 영향이 없음을 미리 판단하였다. Fig. 12는 배경 제거 기법을 도식적으로 나타내고 있다.

3.3 에지 검출(Edge Detection)

획득된 영상에서 가장 일반적인 특징은 에지 부근에서 강도(intensity)의 변화이다.^(7~8) 기본적으로 대부분의 에지 검출 기법은 편미분 연산자 계산에 근거한다. 영상내에서 어떤 점에서의 1차 미분은 그 점에서의 기울기(gradient) 크기를 나타낸다.

영상 $f(x, y)$ 의 위치 (x, y) 점에서의 기울기는 식(5)와 같은 벡터이다.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

에지 검출에서 중요한 값은 이 벡터의 크기이며, 이는 일반적으로 간단히 기울기라고 하며, ∇f 로 표시한다.

그 크기는 식(6)으로 나타낸다.

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

이 값은 ∇f 의 방향으로 단위 길이당 $f(x, y)$ 의 최대 증가율과 같다. 실제에서는 기울기를 절대 값들로 식(7)과 같이 근사화하여 많이 사용된다.

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (7)$$

기울기 벡터의 방향 역시 중요한 양이다. $a(x, y)$ 가 (x, y) 에서의 벡터 ∇f 의 방향각을 나타낸다고 하면, 벡터 해석으로부터 다음의 식을 얻을 수 있다. 여기서 각은 x 축을 기준으로 하였다.

$$a(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (8)$$

본 연구에서는 상기의 방법에 근거하여 원하는 위치에서 에지를 검출할 수 있도록 하였다. 즉 측정하고자 하는 부분에 라인(line)을 그려, 그 라인을 스캔(scan)하여 나타나는 에지만 검출할 수 있도록 하였다. 이러한 방법을 사용한 이유는 영상 처리에서의 일반적인 에지 검출은 영상에 나타나 있는 모든 에지를 검출하기 때문에 실제 측정하고자 하는 데이터(영상에서 검출된 에지의 화소 좌표) 이외의 불필요한 데이터가 더 많아지게 된다. 따라서 라인 스캔을 통해서 측정하고자 하는 부분의 데이터만을 검출하여, 이를 계산에 사용함으로써 측정의 효율성 증대하였다.

3.4 계산 및 보정(Calculation & Calibration)

구하고자 하는 길이 및 피치를 계산하기 위해 추출된 영상의 점들을 인식하고 그 점을 지나는 직선의 방정식을 구한다. 두 직선이 교차하는 새로운 점을 인식하여 그 점을 기준으로 구하고자 하는 곳(화소)까지의 거리를 계산한다. 윤곽선 추출이 된 영상에서 임의의 점을 인식하고 그 인식된 두 점 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 를 지나는 직선의 방정식은 아래 식(9)와 같다.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (9)$$

또한 두 직선은 한 점을 지나게 된다. 한 교차점의 좌표를 인식하고 두 점 사이의 거리를 구하게 된다.

식(10)은 두 점 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 사이의 거리를 나타낸다.

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (10)$$

본 연구에서는 위의 계산식들을 이용하여 물체의 화소를 인식, 폭과 깊이를 길이로 계산하게 되고 기준 시편을 이용한 보정 값을 적용하여 실제 값으로 계산하였다.

4. 초소형 스프링 정밀 측정 결과

언급한 에지 검출 방법으로 순차적으로 측정이 수행된다. 영상의 크기는 CCD 센서의 공간해상도에 걸쳐있다.

그러나 특별히 세장비가 큰 경우에는 전체 면적에 비해 일부만인 영상이 존재하므로 전체 영상보다 필요한 부분의 영상만을 획득(partial scan)하는 것이 매우 효과적이다. Fig. 13에서의 외곽선은 획득된 영상에서 실제로 검사가 이루어지는 영역을 나타낸 것으로 ROI(Region Of Interest)라 칭한다.



Fig. 13 Selection of region of interest from the whole image denoted by green box

이는 전체의 영역에 걸쳐 영상처리를 수행하는 것 보다 세장비가 큰 초소형 스프링의 경우에는 국한된 영역을 설정하여 영상 처리하는 것이 시간적으로 유리하기 때문에 이러한 ROI 영역을 설정하여 해석을 수행하였다.

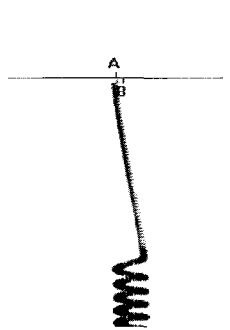


Fig. 14 Scan of the image inside the region of interest to location the tip of the upper lead of the target micro spring

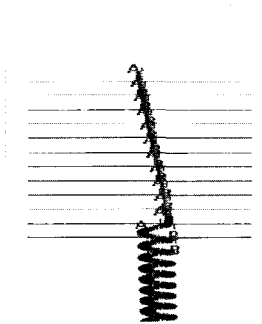


Fig. 15 Scan of the image within the lower wire to locate the root of lead wire

ROI 선택이 끝난 후에 Fig. 14에서 보여지는 바와 같이 스프링의 상단 끝단을 찾기 위해 앞에서 언급한 라인 스캔을 수행한다. 영상의 선 스캔은 선택된 ROI의 위에서 순차적으로 내려오면서 수행된다. 따라서 마커는 빨간색 선을 따라 화소의 강도가 급격히 변화하는 곳을 찾아낸다. 같은 방법으로 하단의 위치도 검출하여 초소형 스프링의 전체 길이를 구하게 된다.

전체 길이를 구한 후에 상하단의 리드선의 길이를 구한다. 리드선과 스프링의 연결부를 찾기 위한 해석 절차는 리드선의 끝단을 찾기 위한 절차와 유사하다. Fig. 15는 리드선의 길이를 구하기 위한 과정이다.

리드선에 걸쳐진 라인을 스캐닝과 동시에 검출된 위치의 변화율을 계산한다. 수평위치의 변화율이 미리 설정한 값보다 크면 스캐닝을 멈추고 그 위치를 리드선과 스프링의 연결부로 결정한다. 같은 절차가 하단의 리드선 길이를 구하는 데에 사용된다. 스캔에 소요되는 시간을 절약하기 위해 초기의 스캐닝은 비교적 큰 스텝을 사용한다. 수평위치의 변화율이 초기에 설정한 값보다 크면 그전의 스텝으로 돌아와 작은 스텝으로 다시 스캔을 시작한다. 이런 방법에 의해 정확한 연결부의 위치를 확인할 수 있고, 위치확인에 필요한 시간을 절약할 수 있다.

Fig. 16은 피치를 검사하는 것으로 초소형 스프링과 평행한 방향으로 라인 스캔을 하게 된다.

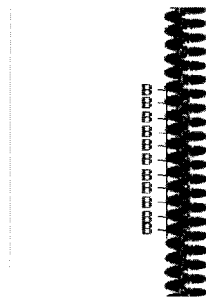


Fig. 16 Determination of the coil pitch of the micro spring body

그림에서 알 수 있듯이 수직 방향의 라인 스캔을 통해서 피치 사이의 간격을 구할 수 있다. 이러한 해석이 스프링 코일부에 걸쳐서 반복되며 구해진 피치들을 평균하여 피치 값을 구한다. 피치가 구해지면 스프링부위의 길이와의 관계를 이용하여 피치의 개수를 구할 수 있다.

초소형 스프링에 대한 치수 정보를 모두 구하면 Fig. 17과 같은 최종의 결과 값이 화면에 나타나게 된다.

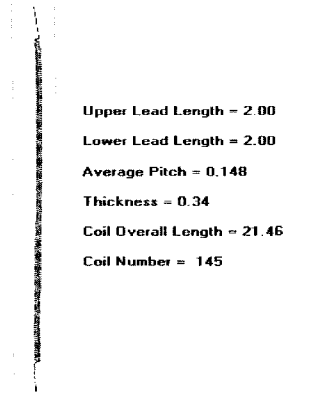


Fig. 17 Display of the summarized results of the analysis of the micro spring

5. 결론

본 연구에서는 무진동형 스프링 공급장치를 이용한 초소형 스프링 검사장비를 개발하였다. 이를 기반으로 영상처리를 이용한 검사장비의 기초를 확립하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 17 μ m/pixel 측정 가능한 초정밀 스프링 검사용 디지털 영상처리 프로그램을 개발하여 기존의 측정 방법을 혁신적으로 개선하였다.
- (2) 1/100의 세장비를 가진 초정밀 스프링을 검사할 수 있고, 4 parts/sec의 검사가 가능한 시스템을 구성하였다.
- (3) 초소형 스프링의 영킴을 방지하고 이송 속도를 균일하게 할 수 있는 무진동형 공급장치 시스템을 개발하였다.

참 고 문 헌

- (1) 전병희, 표창률, 2000, "초소형 초정밀 제품의 전수검사장비 개발(I)", 산업기술개발사업, 산업자원부.
- (2) Adrian Low., 1991, "Introductory Computer Vision and Image Processing", McGraw-Hill, New-York, pp.68~69, pp. 88~94.
- (3) Craig A. Lindley., 1991, "Practical Image Processing in C", John Wiley & Sons, New-York, pp. 351~421.
- (4) Ioannis Pitas., 1993, "Digital Image Processing Algorithms", Prentice Hall, New Jersey, pp. 223~230.
- (5) Robert S. Brodkey, 2000, "Motion of Dispersed Beads Obtained by Particle Tracking Velocimetry Measurements", Int. J. of Multi-Phase Flow. 26, 1419-38.
- (6) F. Bergholm, 1990, "Edge Focusing", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 6, pp. 726~741.
- (7) M. A. Sid Ahmed, 1995, "Image Processing", McGraw-Hill, New-York, pp. 87~88.
- (8) Woods, Richard E. & Gonzalez, Rafael C., 1992, "Digital Image Processing", Addison Wesley Longman, New-York, pp. 25~27.
- (9) Baxes, Gregory A., 1994, "Digital Image Processing : principles and applications", John Wiley & Sons, New-York, pp. 17~20.
- (10) Media Cybernetics, 1999, "Optimas : Technical Reference Manual", pp. 344~345