

통계적 반복법에 기반한 노이즈에 강한 소형튜브 측정 알고리즘 개발[§]

김형석* · Erdenesuren Naranbaatar** · 이병룡**†

* 울산대학교 지능형자동차부품기술개발팀, ** 울산대학교 기계자동차공학부

A Noise-Robust Measuring Algorithm for Small Tubes Based on an Iterative Statistical Method

Hyoung Seok Kim*, Erdenesuren Naranbaatar** and Byung Ryong Lee**†

* Team of Technical Development for Intelligent Vehicle Parts, Univ. of Ulsan,

** School of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan

(Received July 5, 2010 ; Revised December 15, 2010 ; Accepted December 17, 2010)

Key Words : Pipe(파이프), Standard Deviation(표준편차), Computer Vision(컴퓨터비전), Measurement(측정), Error Minimization(오차최소화)

초록: 최근 컴퓨터비전을 이용하여 부품의 치수를 정확하게 그리고 빠르게 측정하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 컴퓨터비전의 경우 조명이 완벽하지 않으면 노이즈가 많이 발생하는 경우가 있다. 실제 산업현장에서는 기계들 간의 간섭에 의해 완벽한 조명을 구현하기 어렵기 때문에 노이즈를 피하기 어렵다. 본 논문에서는 튜브의 내경 반지름 측정 시 문제가 되는 노이즈를 효과적으로 제거하고 반지름 측정의 정밀도를 향상시키기 위한 컴퓨터 비전 측정 알고리즘을 제안한다. 표준편차가 최소가 되는 중심점을 이용하여 노이즈를 제거하고 이 때 발생하는 원호상의 불연속 문제는 원호 연결 알고리즘으로 해결하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 노이즈가 추가된 원과 실제 튜브의 영상을 이용한 실험을 통해 증명하였다. 15%의 수준의 노이즈가 추가된 원의 반경을 구하는 실험에서도 1.4% 수준의 오차를 보여주어 본 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있었다.

Abstract: We propose a novel algorithm for measuring the radius of tubes. This proposed algorithm is capable of effectively removing added noise and measuring the radius of tubes within allowable precision. The noise is removed by using a candidate true center that minimizes the standard deviation with respect to the radius. Further, the disconnection in data points resulting from noise removal is solved by using a connection algorithm. The final step of the process is repeated until the value of the standard deviation decreases to a small predefined value. Experiments were performed using circle geometries with added noise and a real tube with complex noise and that is used in the braking units of automobiles. It was concluded that the measurement carried out using the algorithm was accurate within 1.4%, even with 15% added noise.

1. 서론

튜브는 생산현장에서 장치의 부품으로 많이 사용되고 있다. 일반적으로 튜브의 양 끝 단은 성형되어 다른 부품에 조립되기 때문에 튜브의 끝 단 특히 성형 부위가 정상적인지 비정상적인지를 판단하는 것이 때

우 중요하다. 성형불량인 튜브가 다른 장치에 결합된 다면 안전상에 치명적인 문제를 야기할 수도 있다. 예를 들어 자동차의 제동장치에 불량인 튜브가 결합 되는 경우, 브레이크 작동유가 누출되고 제동 시에 충분한 제동력을 제공할 수 없게 되므로 심각한 문제를 초래할 수 있다. 따라서, 많은 튜브 가공회사들은 성형공정 후에 튜브 양단의 형상과 치수를 측정하여 불량유무를 파악하기 위한 노력을 해 왔다. 불량유무를 판단하기 위한 핵심적인 내용은 튜브 성형부의 내경과 외경치수를 측정하는 것과 내경과 외경중심간의 편심을 정확하게 측정하는 것이다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 울산지회 춘계학술대회(2010. 5. 14., 울산대) 발표논문임

† Corresponding Author, brlee@ulsan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

지금까지도 대부분의 튜브 가공회사들은 마이크로미터 등을 이용한 수작업에 의해 튜브 불량검사를 수행하고 있는 실정이다. 수작업에 의한 측정 방법은 작업자의 상태에 따라 오차가 많이 발생할 수 있고, 또한 전수검사를 하는 것이 불가능하다.⁽¹⁻³⁾ 최근에는, 이러한 문제점들을 극복하기 위해서 자동검사장비들이 많이 개발되어 왔다. 생산 현장에서 부품의 불량을 측정하기 위한 대표적인 자동화 방법은 컴퓨터 비전을 이용하는 방법이다.⁽⁴⁾ D. Ponsa 등은 안전벨트 위의 흠을 탐지할 수 있는 컴퓨터 비전 시스템을 개발하였다. 그들은 2 m/s의 속도로 움직이는 벨트상에서 흠을 탐지할 수 있는 최적화된 검사 알고리즘을 개발하였다.⁽⁵⁾ 철강산업에서도 영상처리방법이 많이 적용되고 있는데 대표적인 철강제품인 코일은 여러가지 형태의 결함이 발생되며, 또한 코일의 이동 선속도도 18.5 m/s 정도로 빠르다. J. P. Yun 등은 지역경계탐색 알고리즘(local border search algorithm)을 이용하여 탐색시간을 줄였으며, 가우스 필터, 평균필터 및 미디언 필터등을 사용하여 2 종류의 랜덤 노이즈를 탐지하였다.^(6,7) C. J. Lu과 D. M. Tsai 는 핀홀, 스크래치, 입자 및 지문등의 미소결함(micro-defect)을 검사할 수 있는 자동화된 비전검사방법을 제안하였다. 그들은 특이점 분할법(singular value decomposition)을 이용하여 주기성을 갖는 TFT-LCD 영상에서의 결함을 탐지하였다.⁽⁸⁾ F. F. Wang 등은 암실에서 제작되는 필름의 오염을 막기위해 940nm의 파장을 가진 조명장치를 이용하여 필름의 결함을 확인하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 순차적으로 치수를 검사할 뿐 아니라 결함부분의 위치정보도 보관하도록 하였다.⁽⁹⁾ B. K. Kumar 는 비전 검사시스템을 이용하여 핵연료 장치의 엔드캡(end-cap)부분의 용접상태를 검사하였다.⁽¹⁰⁾ 한편, 3-D 물체의 형상정보를 구하기 위해 복합 조명기술을 사용하는 연구가 많이 수행되어 왔다. M. R. Lee는 여러 개의 laser 띠를 물체에 투과한 다음 B/W CCD 카메라를 이용하여 물체의 형상영상을 획득하였다.⁽¹¹⁾ 컴퓨터비전을 이용한 영상처리는 조명장치의 색과 투사각도에 매우 민감하게 영향을 받는다. 따라서 최적의 조명조건을 갖추게 되면 획득된 영상에서 노이즈 성분도 그만큼 줄어들게 된다.

그러나, 현장에 이미 설치되어 있는 장치에 비전장치를 부착하여 검사자동화를 구현하는 경우, 많은 경우에 기구적인 간섭 혹은 공간적인 문제 등에 의해 최적의 조명방식이나 조명각도로 설치

하는 것이 어려운 경우도 있다. 이 경우 획득된 영상에서 노이즈나 음영 등의 문제가 발생하는 경우가 있다. 튜브의 경우 이러한 문제가 더욱 심해지게 된다. 몇몇 연구자들이 튜브의 직경을 측정하는 연구를 수행하여 왔다. K. H. Hong은 원의 공식을 이용하여 원을 측정하기 위해 여러 개의 픽셀을 선정하고, 원의 중심과 선정된 픽셀 점들을 지나는 직선을 이용하여 원의 중심을 구하는 방법을 제안하였다.⁽¹²⁾ 하지만 이 연구는 특별한 값을 갖는 원을 찾아내는 것을 목적으로 하기 때문에 임의의 원의 직경을 정확하게 측정하는 데에는 적합하지 않다. H. S. Kim 와 B. R. Lee는 자동차 부품용으로 사용되는 소 구경 튜브의 외경을 측정하는 비전검사 시스템을 개발하였다.⁽¹³⁾ 하지만 이 연구는 노이즈가 많이 발생하는 내경을 측정하지 않기 때문에 튜브의 내경까지 정확하게 측정하는 곳에는 적용하기가 어렵다.

본 연구에서는 조명조건이 좋지 않은 노이즈 환경에서 튜브와 같은 원 형상을 가지는 부품의 측정 정밀도를 높일 수 있는 통계적 방법에 기반을 둔 새로운 직경측정 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 기본적으로 방사적 스캔(radial scanning) 방법에 의해 노이즈가 많은 원의 내경을 측정하는 방법으로써 다음과 같이 3 단계를 거친다. 먼저, 획득된 영상에서 관심지역인 ROI(region of interest)를 선정하고, 다음에 ROI 내의 임의의 점을 선택하여 이 점을 중심으로한 반경과 표준편차를 구한다. 이 과정을 반복하여 표준편차가 가장 적은 점을 내경의 실제중심으로 간주하는 방법이다. 마지막으로 내경을 나타내는 윤곽선 상에서 노이즈로 간주되는 부분을 삭제한다. 위의 단계들은 내경에 대한 표준편차 값이 주어진 설정 값 이내가 될 때까지 반복한다.

2. 튜브 중심 계산 알고리즘

평균값에 비해 분산이 심하거나 잡음이 많이 발생하는 경우 통계적 방법이 유용하게 적용될 수 있다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 표준편차는 각 지표 값이 평균으로부터 벗어나 있다는 것을 말하는데, 표준편차가 적을수록 각 지표 값이 평균부근에 몰려 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 표준편차는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - m)^2}{n}} \quad (1)$$

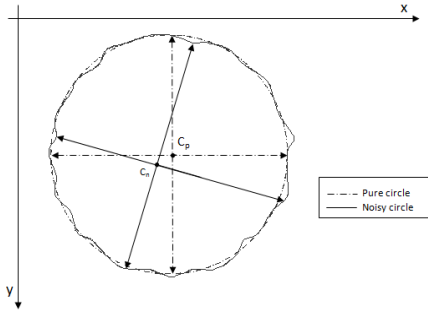


Fig. 1 Discrepancy between the center points of a pure circle and a noisy circle

여기서 σ 는 표준편차이고, $x_k (k = 0, \dots, n)$ 는 측정값, m 은 데이터의 평균값, 그리고 n 은 데이터의 개수이다. Fig. 1 은 순수한 원과 잡음이 있는 원의 중심 값이 서로 일치하지 않음을 보여준다. 잡음이 적은 경우 기존의 간단한 직선탐색법(line-scanning method)을 이용하여 원의 중심을 구할 수 있다. 그러나, 잡음이 많은 경우 이 방법은 많은 오차를 발생한다.

따라서, 본 논문에서는 잡음이 있는 환경에서도 원의 중심을 정밀하게 계산할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 알고리즘의 특징은 통계적인 방법을 이용하여 잡음을 효과적으로 제거할 수 있다는 점이다. 먼저 원의 중심을 포함하는 ROI 를 선정하고 ROI 내의 임의의 중심 후보 값인 C_i 와 원의 윤곽선(EOC, edge of circle) 상에 있는 점 O_j 를 다음과 같이 정의한다.

$$C_i = (x_{c_i}, y_{c_i}), (x_{c_i}, y_{c_i}) \in ROI, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$O_j = (x_{o_j}, y_{o_j}), (x_{o_j}, y_{o_j}) \in EOC, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

여기서 x 와 y 는 영상화면에서의 픽셀좌표이다. n 과 m 은 각각 ROI 와 EOC 상에 있는 픽셀의 개수이다. 그러면, 반경 r_{ij} 는 식 (4)와 같이 C_i 와 O_j 사이의 거리값으로 표현된다. 파라미터 C_i , O_j , 그리고 r_{ij} 는 Fig. 2 에 나타나 있다.

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_{c_i} - x_{o_j})^2 + (y_{c_i} - y_{o_j})^2} \quad (4)$$

그러면, 후보 중심점인 C_i 에 대한 평균 반경은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$r_{i,avg} = \frac{\sum_{j=1}^m r_{i,j}}{m} \quad (5)$$

원의 윤곽선(edge)에 놓여있는 모든 점들의 C_i 에 대한 반경 값을 구하고 평균반경과 비교하면 각

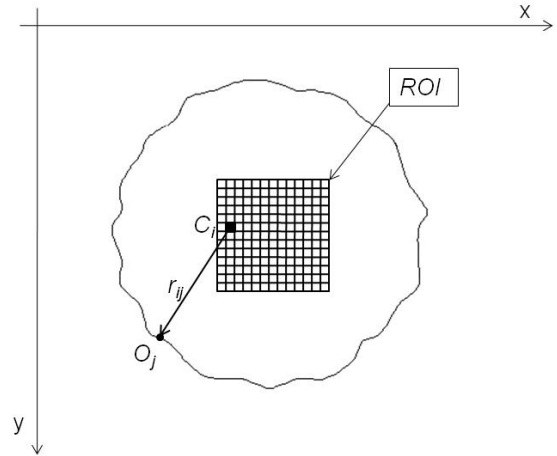


Fig. 2 Candidate center point in ROI and its radius to a point on the circle edge

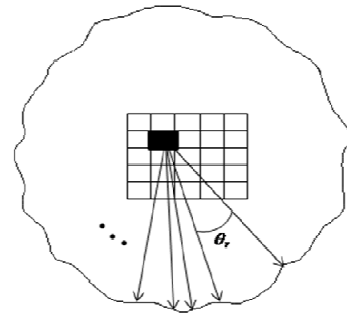


Fig. 3 Radius calculation of the points selected randomly

반경의 편차 값이 계산될 수 있다. 그러나, EOC 상의 모든 점들을 고려하는 데는 계산 시간이나 기억용량에 한계가 있으므로 식 (6)에 정의된 바와 같이 원을 일정한 각도로 분할하고 분할된 영역에서 한 개의 점을 추출하는 방법을 사용하였다.

$$\theta_i = (i - 1)\Delta\theta + \text{random} [0^\circ, \Delta\theta], i = 1, \dots, 360/\Delta\theta \quad (6)$$

예를 들어 분할 각을 $\Delta\theta = 10$ 으로 선택한 경우 원의 윤곽선은 36 개의 구역으로 분할되며, 그 구간 안에서 단 한 개의 점이 난수적으로 선정된다. 그러므로, 인접한 두 점의 각도거리는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 $0^\circ < \theta_i \leq 2\Delta\theta$ 범위의 값을 가지게 된다.

윤곽선상의 각 점의 반경값과 평균 반경값의 차이는 다음과 같다. 식 (7)에서 p 는 난수적으로 선정된 점의 개수를 나타낸다.

$$\Delta r_{i,j} = r_{i,j} - r_{i,ave}, j = 1, \dots, p \quad (7)$$

그러면, 모든 점들의 반경에 대한 표준편차는 식

식 (8)과 같이 계산 되어진다.

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^p \frac{(Ar_{i,j})^2}{m}} \quad (8)$$

표준편차와 원에 대한 파라미터를 이용하여 잡음이 있는 환경에서 튜브의 중심을 찾을 수 있다. 제안된 알고리즘은 다음과 같은 단계를 가진다:

[단계 1] ROI 내에 있는 모든 점 $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 에 대한 표준편차 σ_i 를 계산한다.

[단계 2] 표준편차를 최소화 하는 점 C_{min} 을 찾는다. 그리고 그 점을 잡음이 있는 원의 가상 중심점으로 간주한다.

[단계 3] C_{min} 점을 중심으로 원의 윤곽선 위의 모든 점에 대한 반경을 구하고 평균반경과 비교하여 편차를 구한다. 만약 편차가 매우 크면 윤곽선 위의 해당 점은 잡음으로 간주된다. 그리고, 그 점은 평균 반경 값으로 대체된다.

[단계 4] 단계 1 에서 단계 3 까지의 과정을 다음의 조건이 만족될 때까지 반복한다.

$$\sigma_{min} \leq \varepsilon \quad (9)$$

여기서 ε 은 미리 정의된 미소 양의 값이다. 본 연구의 실험에서는 ε 의 값은 0.4 로 선정되었다.

3. 윤곽선 노이즈 제거 알고리즘

측정된 반경인 r_{ij} 가 조건 $|r_{ij} - r_{i,avg}| > T$ (T 는 미리 규정된 편차값) 을 만족하면 이 반경은 잡음성분을 가지고 있다고 판단한다. 이 경우 r_{ij} 에 대응하는 윤곽선 상의 점은 제거되고 평균값 $r_{i,avg}$ 반경을 갖는 점으로 대체된다. 이러한 목적을 위해 Fig. 4 와 같은 잡음제거 윈도우를 사용한다. 잡음제거윈도우는 윤곽선 위의 점을 포함하는 5x5 픽셀로 구성되어 있다.

Fig. 5 는 잡음제거윈도우의 상세그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 잡음을 갖는 점 O_j 는 새로운 점 O'_j 로 대체되었다. 그렇지만, 이로 인해서 윤곽선 상에는 불연속 구간이 발생하게 된다. 이러한 불연속 구간 문제를 해결하기 위하여 3 점 원호법(three-points-arc method)을 제안하였다. 이 원호는 3 개의 점 즉, 출발점, 중간점 그리고 끝점으로 구성되어 있다. 여기서, 점 O'_j 는 중간점에 위 치하도록 하며, 다른 두 점은 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 O'_j 에서 각 방향으로 가장 가까운 점으로 선택한다.

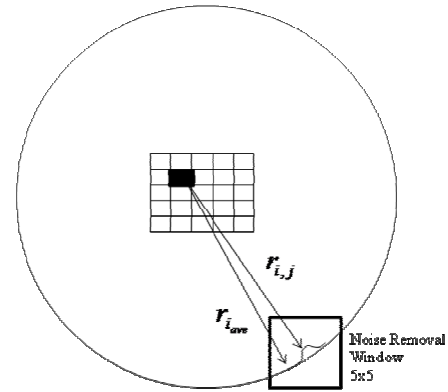


Fig. 4 Noise removal window

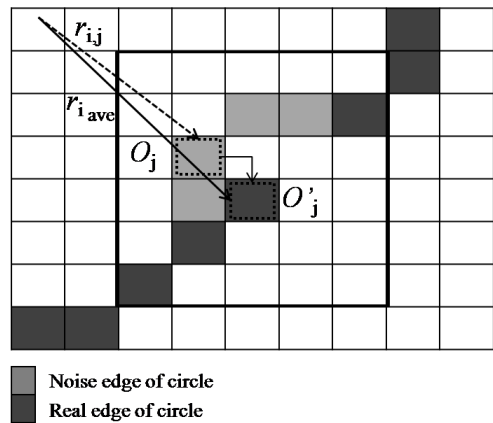


Fig. 5 Discontinuity at the circle edge caused by point replacement

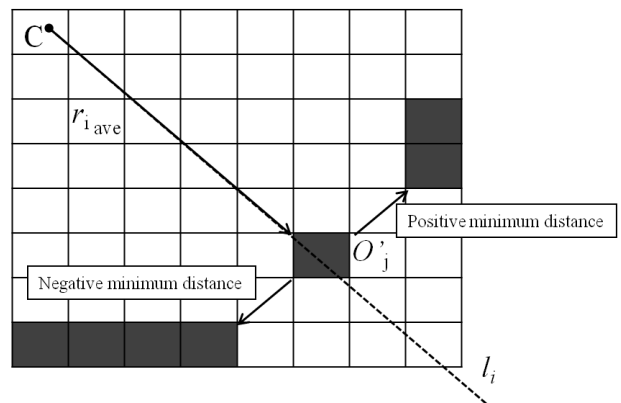
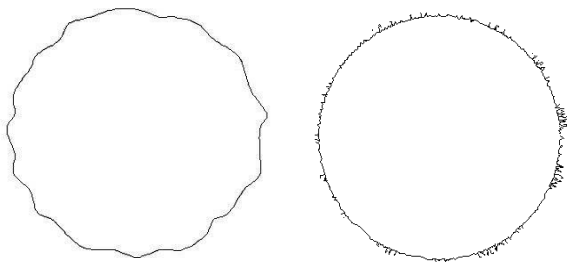


Fig. 6 Connection of circle edge using three points arc

여기서, 가장 가까운 점이란 직선 l_i 와 거리가 최소인 두 점을 말하는데, 직선 l_i 는 원의 중심점과 O'_j 를 통과하는 직선이다. 직선 l_i 와의 거리가 최소인 두 점들 중에서 첫 번째는 시계방향의 거리이고 나머지 한 점은 시계반대방향의 거리를 나타낸다.

Table 1 Experimental result for noisy circle with 5% noise

	Actual Radius	Noise Strength	No. of Iteration	Measured Radius	σ_{min}
Noisy Circle	140 (pixel)	5%	33	139 (pixel)	0.38



(a) Noise-added circle (b) Resulting image after removing inside noise

Fig. 7 Experimental results for the circle with 5% noise

Table 2 Experimental result for noisy circle with 5% noise

	Actual Radius	Noise Strength	No. of Iteration	Measured Radius	σ_{min}
Noisy Circle	140 (pixel)	10%	28	139 (pixel)	0.37

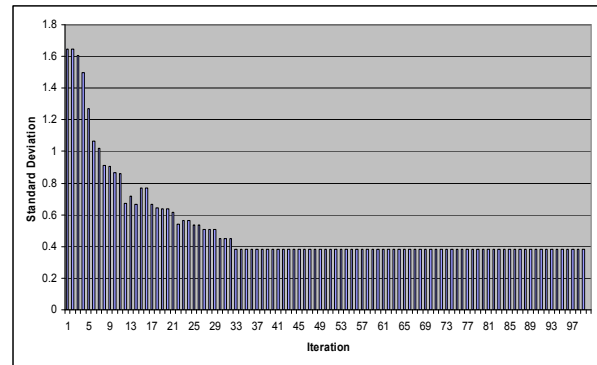


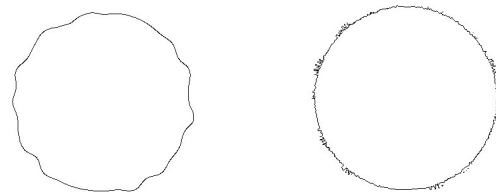
Fig. 8 Standard deviation value by iteration number

4. 실험 및 고찰

제안된 알고리즘의 성능을 테스트하기 위해 잡음이 포함된 원을 고려하였다. 잡음은 순수한 원의 내외부에 분포되어 있다. 하지만 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해 원의 내부에 있는 잡음만 제거하였다. 원의 반경을 정확하게 측정하기 위해서는 원의 중심과 원 윤곽선의 내부치수가 중요하기 때문이다. 먼저, Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 순수한 원에 5%의 잡음을 부과하였다. 잡음을 가진 원에 제안된 알고리즘을 적용하였고 원의 내부에 노이즈가 제거되어 순수한 원으로 복구되었다. Fig. 7(b)는 단계 1에서 단계 3까지 32회의 반복수행의 결과를 보여 주고 있다.

Table 1은 실제 원의 반지름과 제안된 알고리즘이 적용된 후 측정된 원의 반지름을 보여 주고 있다. 실험에서 제안된 알고리즘은 기준 표준편차인 0.4 이하가 되어 32회 반복 후 정지되었음을 알 수 있으며 측정 오차율은 0.7%, 즉 140 픽셀에 대해 오직 1 픽셀의 오차만을 보여 주고 있다.

원의 중심점을 찾기 위해 표준편차는 매우 좋은 지표이다. 예를 들어, 만일 표준편차의 값이 매우 작은 값이 되면 이 때의 중심점은 실제의 원의 중심점이 된다. Fig. 8은 Fig. 7에서 보여진 원의 중심점을 찾는 반복수행 과정을 보여주고 있다. 중심점을 찾기 위한 반복수행과정 중 시작은 큰 표준편차의 값으로부터 시작한다. 왜냐하면 잡음을



(a) Noisy circle (b) Result of removing inside noise

Fig. 9 Experimental results for the circle with 10% noise

가진 원의 중심점을 한 번에 찾는 것을 매우 어려운 일이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 반지름의 표준편차는 1.6을 넘는 값에서 시작하여 32회의 반복수행 후 0.38까지 값이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 후보 중심점이 실제의 중심점으로 매우 가까워진 것을 알 수 있다.

Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 순수한 원에 10%의 잡음을 부과하였다. 잡음을 가진 원에 제안된 알고리즘을 적용하였고 원의 내부에 잡음이 제거되어 순수한 원으로 복구되었다. Fig. 9(b)는 단계 1에서 단계 3까지 28회의 반복수행의 결과를 보여 주고 있다. Table 2는 실제 원의 반지름과 제안된 알고리즘이 적용된 후 측정된 원의 반지름을 보여 주고 있으며 측정 오차율은 0.7%, 즉 140 픽셀에 대해 오직 1 픽셀의 오차만을 보여 주고 있다.

Fig. 10(a)와 10(b)는 15%의 잡음을 가진 원의 42회 반복수행의 결과를 보여 주고 있으며 Table 3

Table 3 Experimental results of noisy circle with 15% noise

	Actual Radius	Noise Strength	No. of Iteration	Measured Radius	σ_{min}
Noisy Circle	140 (pixel)	15%	42	138 (pixel)	0.39

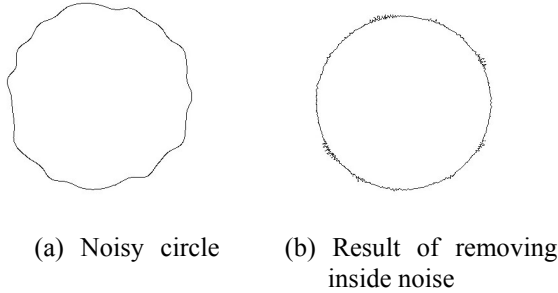


Fig. 10 Experimental results of circle with 15% noise

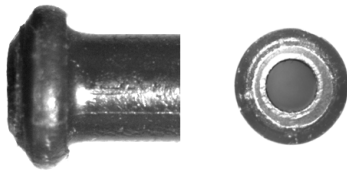
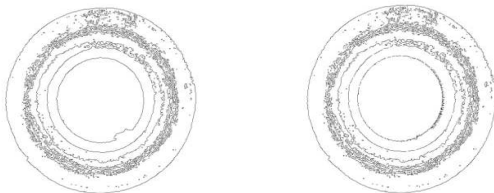


Fig. 11 Real brake tube



(a) Sample brake tube of the vehicle (b) Result after removing inside noise

Fig. 12 Experimental results for sample brake tube of the vehicle

은 실제 원의 반지름과 제안된 알고리즘이 적용된 후 측정된 원의 반지름의 오차율이 0.14%, 140 픽셀에 대한 2 픽셀의 오차를 나타내고 있다.

마지막으로 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 자동차 브레이크 튜브를 이용하여 알고리즘을 적용하였다. 자동차 브레이크용 튜브의 외부 직경과 내부 직경은 각각 $7.1 \pm 0.18 \text{ mm}$ 와 $3.2 \pm 0.13 \text{ mm}$ 이다. 실제 실험에서 사용된 자동차 브레이크 튜브의 게이지를 이용한 실측 직경은 7.00 mm 이다.

Fig. 12(a) 는 실제 자동차 브레이크 튜브의 윤곽

Table 4 Experimental results for sample brake tube of the vehicle

	Actual Radius	No. of Iteration	Measured Radius	σ_{min}	Error (%)
Brake Tube	140 (pixel)	50	138 (pixel)	0.40	1.4

선 검출 이미지이며 Fig. 12(b)는 50 회 제안된 알고리즘의 반복수행 후 결과이미지를 보여주고 있다. 자동차 브레이크 튜브 내부의 원의 잡음이 효과적으로 제거 되었음을 알 수 있다. Table 4 는 실험의 결과를 나타내고 있으며 최소 표준편차의 값은 0.4 이며 오차율은 1.4%이다.

5. 결 론

일반적으로 튜브형태의 기계부품의 외경을 컴퓨터비전 기법을 이용하여 측정하는 것은 그렇게 어렵지 않다. 외부 조명을 적절하게 배치하면 외경의 경우 잡음이나 음영 등의 문제를 해결할 수 있기 때문이다. 하지만 내경 측정의 경우는 조명의 어려움 때문에 잡음이나 음영 등의 문제가 발생되므로, 내경 측정은 단순한 직선탐색 알고리즘(line-scanning algorithm) 으로는 정확하게 측정하기 어렵다. 본 논문에서는 잡음을 효과적으로 제거하고 허용정도 내에서 내경을 정확하게 측정할 수 있는 컴퓨터비전 알고리즘을 제안하였다.

먼저, 획득된 영상에서 관심지역인 ROI(region of interest)를 선정하고, 다음에 ROI 내의 임의의 점을 선택하여 이 점을 중심으로한 반경과 표준편차를 구한다. 이 과정을 반복하여 표준편차가 가장 적은 점을 내경의 실제중심으로 간주하는 방법이다. 그 다음은 내경을 나타내는 원의 윤곽선 상에서 잡음으로 간주되는 부분을 내경 평균값으로 대체한다. 그리고, 이 때 발생하는 불연속 현상은 연결 알고리즘(connection algorithm)을 적용하여 해결하였다. 위의 단계들은 내경에 대한 표준편차 값이 주어진 설정값 이내가 될 때까지 반복하여 가장 신뢰성이 높은 내경의 중심과 반경을 구하였다.

제안된 알고리즘의 측정성능을 확인하기 위하여 순수한 원에 5%, 10% 및 15% 의 잡음을 임의로 더한 다음 이 원의 중심과 반경을 구하는 실험을 수행하였다. 실험 결과 15% 수준의 잡음이 있는 경우에도 측정오차는 2 픽셀 이내인 것을 확인하였다. 마지막으로 실제 자동차부품으로 사용되고 있는 브레이크 튜브를 대상으로 측정실험을 수행

한 결과 잡음이 강한 상태에서도 1.4% 수준의 정도를 유지하였다.

참고문헌

- (1) Liao, C. W., Su, J. C. and Tarn, Y. S., 2008, "Application of the Structured Illumination Method for Automated Visual Inspection of the Loudspeaker Cones," *Jr. of Materials Processing Technology*, Vol. 200, No. 1-3, pp. 59~70.
- (2) Shafeek, H. I., Gadelmawla, E. S., Abdel-Shafy, A. A. and Elewa, I. M., 2004, "Automatic Inspection of Gas Pipeline Welding Defects Using an Expert Vision System," *NDT & E International*, Vol. 37, No. 4, pp. 301~307.
- (3) Chan, C. and Grantham, K.H., 2000, "Fabric Defect Detection by Fourier Analysis," *IEEE Trans Ind. Appl.*, Vol. 36, No. 5, pp. 1267~1275.
- (4) Rao, B.P.C., 2001, "Visual Techniques in Non-Destructive Testing," *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 6043~6046.
- (5) Hong, K. H., 2006, "A New Circle Detection Algorithm for Pupil and Iris Segmentation from the Occluded RGB images," *The Journal of the Korea Contents Association*, pp. 22~26.
- (6) Kim, H. S. and Lee, B. R., 2006, "Real-Time Pipe Fault Detection System using Computer Vision," *IJPEM*, 7(1), 30~34.
- (7) Rokhmatuloh, Tateishi, Wikantika, R., Munadi, K. and Aslam, A. M. A., 2003, "Study on the Spectral Quality Preservation Derived from Multisensor Image Fusion Techniques Between JERS-1 SAR and Landsat TM data," *IGARSS '03*, Vol. 6, pp. 3656~3658.
- (8) Lu, C. J. and Tsai, D.M., 2004, "Defect Inspection of Patterned TFT-LCD Panels Using a Fast Sub-Image Based SVD," *International Journal of Production Research*, Vol. 42, pp. 4331~4351.
- (9) Wang, F. F., Wang, Z., Mo, X. T., Wang, P., Liu, M., Ren, L., Zhu, Y., Zhang, F. and Liu, W. Y., 2007, "Machine Vision Inspection System for Film," *Machine Vision Inspection System*, Vol. 27, No. 3, pp. 212~216.
- (10) Kumar, B. K., Lakshminarayana, A., Kulgod, S. V., Deshpande, P. P., Palod, S., Singh, V. P. and Rao, G. V. S. H., 2006, "Vision Systems for Inspection of Nuclear Fuel Components," *Proc. NDE*.
- (11) Lee, M. R., 2000, "Machine Vision System for Curved Surface Inspection," *Mach. Vision Appl.*, pp. 177~188.
- (12) Ponsa, D., Benavente, R., Lumbreras, F., Martínez, J. and Roca, X., 2003, "Quality Control of Safety Belts by Machine Vision Inspection for Real-Time Production," *Opt. Eng.*, Vol. 42, No. 4.
- (13) Yun, J. P., Choi, S. H., Seo, B. Y. and Kim, S. W., 2008, "Real-Time Vision-Based Defect Inspection for High-Speed Steel Products," *Opt. Eng.*, Vol. 57, No.7.
- (14) Zhang, H., Wu, G., Sun, X., Xu, J. and Xu, K., 2007, "A New Fast Border Search Algorithm and Its Expansion," *Proc. IEEE Intl. Conf. Automation Logistics*, pp. 1886~1890.
- (15) Denzler, J. and Brown, C., 2002, "Information Theoretic Sensor Data Selection for Active Object Recognition and State Estimation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, pp. 145~157.
- (16) Arbel, T. and Ferrie, F., 2001, "Entropy-Based Gaze Planning," *Image and Vision Computing*, Vol. 19, No. 11, pp. 779~786.