

## 퍼지탐색을 이용한 머신비전 기반의 소형 튜브 내경측정 알고리즘

Erdenesuren Naranbaatar\* · 이상진\* · 김형석\*\* · 배용환\*\*\* · 이병룡\*†

\* 울산대학교 기계공학부, \*\* 금호타이어 연구본부

\*\*\* 안동대학교 기계교육과

### Radius-Measuring Algorithm for Small Tubes Based on Machine Vision using Fuzzy Searching Method

Erdenesuren Naranbaatar\*, Sang Jin Lee\*, Hyoung Seok Kim\*\*, Yong Hwan Bae\*\*\* and Byung Ryong Lee\*†

\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan, \*\*, R & D Center. Kumho Tires,

\*\*\* Dept. of Mechanical Education, Andong Univ.

(Received May 18, 2011 ; Revised August 8, 2011 ; Accepted August 18, 2011)

**Key Words:** Vehicle Brake Tube(자동차 브레이크 튜브), Standard Deviation(표준 편차), Fuzzy Searching(퍼지탐색), Machine Vision(머신비전), Radius Measurement(반경측정)

**초록:** 본 논문에서는 튜브의 내부에 이물질이 있거나, 조명에 의한 영상잡음이 많은 경우에도 내경중심과 내경을 정확하게 측정할 수 있는 머신비전 기반의 새로운 측정알고리즘을 제안하였다. 또한 내경과 외경 중심간의 이격거리인 편심량도 계산할 수 있다. 제안된 알고리즘은 퍼지제어에 바탕을 둔 반복탐색에 의하여 임의의 초기탐색점에서 거리와 방향을 단계적으로 이동함으로써 내경의 중심에 도달하게 한다. 제안된 알고리즘은 계산시간 뿐만 아니라 측정정밀도 면에도 기존의 방법에 비해 우수하였다. 성능을 비교하기 위하여 생산현장에서 생산되는 튜브들을 이용하여 실험을 수행하였고, 실험 결과 제안된 알고리즘을 사용하는 경우가 널리 사용되고 있는 알고리즘인 Hough 변환 방식과 RANSAC 방식보다 계산시간 및 측정정밀도에서 우수함을 보였다.

**Abstract:** In this paper, a new tube-radius-measuring algorithm has been proposed for effectively measuring the radii of small tubes under severe noise conditions that can also perform well when metal scraps that make it difficult to measure the radius correctly are inside the tube hole. In the algorithm, we adopt a fuzzy searching method that searches for the center of the inner circle by using fuzzy parameters for distance and orientation from the initial search point. The proposed algorithm has been implemented and tested on both synthetic and real-world tube images, and the performance is compared to existing circle-detection algorithms, such as the Hough transform and RANSAC methods, to prove the accuracy and effectiveness of the algorithm. From this comparison, it is concluded that the proposed algorithm has excellent performance in terms of measurement accuracy and computation time.

### 1. 서론

최근에 CCD 카메라로부터 영상을 획득한 후 기하학적인 해석을 하여 기계부품의 불량유무를 검사하는 이른바 머신비전 기반의 검사자동화 연구가 활발히 진행되고 있다. 아직도 일반 생산현장

에서 많은 검사작업이 작업자의 육안에 의해 진행되고 있는 것이 사실이다. 육안검사는 매우 섬세하고 복잡한 상황에서도 정확한 판정을 내리는 것이 가능하지만, 작업시간이 길거나 작업패턴이 반복되는 경우 작업자는 쉽게 피로해 지고 집중력을 잃게 되므로 때때로 검사오류를 유발하는 경우가 많다.<sup>(1,2)</sup> 머신비전을 이용하게 되면 작업자의 이런 실수를 쉽게 해결할 수 있으며 고속측정 및 반복 측정에서의 측정의 일관성(repeatability)을 유지할 수 있는 장점이 있다. 기계부품의 기하학적인 형

† Corresponding Author, brlee@ulsan.ac.kr

상이나 길이나 직경 등을 측정하는 것은 머신비전의 대표적인 적용 예라고 할 수 있다. 실제로 기계부품 생산현장에서 튜브, 파이프, 혹은 봉 같은 원형부품들이 많이 생산되고 있다.

본 논문에서는 자동차 브레이크의 유압튜브로 사용되고 있는 소형튜브를 머신비전을 이용하여 내경, 외경 및 편심을 정확하게 계산해 내는 알고리즘을 개발하는 것이 논문의 목적이다. 이 튜브는 먼저 성형기의 끝단이 배관에 결합이 쉽게 될 수 있도록 성형이 되는데, 성형 후에 성형부분의 치수 및 편심을 측정하여 불량유무를 정확하게 검사하여 불량품을 제거하는 것이 자동차 안전운전에 정성에 중대한 영향을 미친다고 할 수 있다. 머신비전에서 원을 추출하여 직경 혹은 반경을 측정할 수 있는 가장 일반적인 방법은 허프변환(Hough transform)<sup>(3,4)</sup>을 사용하는 것이다. 이 방법은 영상의 잡음에 강인한 면은 있지만, 계산시간과 메모리를 많이 차지하는 것이 단점으로 지적되고 있다. 허프변환의 또 다른 문제는 영상이 완전한 원이 아니고 약간의 타원형태를 가지게 되면 중심점을 계산하는데 정확성이 결여된다는 단점을 안고 있다.

다른 방법으로는 임의의 샘플점을 추출하여 통계적 반복기법을 사용하는 RANSAC 알고리즘을 이용하는 방법인데,<sup>(5,6)</sup> 이 방법은 처리 속도면에서는 우수하지만 잡음으로 구성된 유사 원을 내경원이나 외경원으로 오인하는 경우가 발생할 여지가 있다는 것이 단점이라고 할 수 있다. 실제로 소형튜브의 성형부위를 실시간으로 현장에서 검사하려면 공간적인 제약 등으로 최적의 조명을 구사하기 어려워 조명에 의한 잡음이 튜브의 내경과 외경 사이에 많이 발생하게 된다.<sup>(7)</sup>

위에서 언급한 방법들의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 퍼지기법<sup>(8,9)</sup>을 도입하여 튜브의 내경원(inner circle)의 중심을 정확하게 찾고, 이를 바탕으로 내경원의 직경과 외경원의 직경을 계산함과 동시에 두 원의 편심까지 계산할 수 있는 독창적인 검사알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 조명에 의해 잡음이 심한 경우나 튜브 내부에 부분적인 이물질(scrap) 등이 있는 경우에도 높은 검사 성공률을 가지며 계산시간 또한 다른 방법보다 우수하였다.

본 논문에서는 먼저 튜브의 영상에서 미리 할당된 ROI (region-of-interest)를 설정하고, 그 다음 퍼지 탐색법과 기하학적인 해석을 통하여 내경원의 중심을 찾게 된다. 그리고는 내경원의 평균반경, 외경원의 평균반경 및 중심점을 계산하게 된다.

끝으로, 제안된 알고리즘의 성능을 입증하기 위하여 실제 튜브 영상을 이용하여 측정 성능을 다른 방법과 비교하였다. 결론적으로 제안된 알고리즘은 다른 방법에 비해 검사성공률 및 계산시간에 있어서 우수한 성능을 보였다.

## 2. 원의 기하학적 분석

일반적으로 원의 영상이 깨끗하며 잡음이 없는 경우에는 선 스캔(line-scanning) 방법에 의하여 쉽게 원의 중심을 구할 수 있다. Fig. 1은 선 스캔 방법을 나타내고 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 원의 중심은 최대수평선과 최대수직선의 교점으로 결정된다. 하지만 실제 영상의 잡음을 고려하면 인근의 선들도 고려하여 식 (1), (2)와 같이 평균값을 이용하여 수평선과 수직선을 계산한 다음 원의 중심을 구하는 것이 바람직하다.

$$C_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{hm} - P'_{hm}) / 2 \tag{1}$$

$$C_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{vm} - P'_{vm}) / 2 \tag{2}$$

원의 중심 ( $C_x, C_y$ )가 구해지면 원의 반경은 쉽게 계산될 수 있다. 하지만, 선 스캔 방식은 원 주상에 잡음이 많거나 이물질이 많이 붙어있는 경우에는 정확하게 원의 중심을 계산하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안은 원 내부에 ROI를 설정하고, ROI 내부의 후보 점들에 대한 반경평균과 표준편차를 구하여 표준편차가 최소가

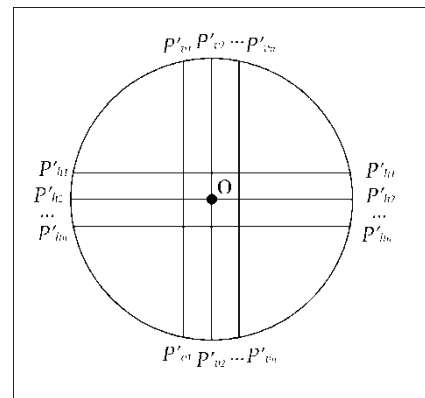


Fig. 1 Line scanning method to measure circle diameter and center

되는 점을 원의 중심으로 확정하는 방법이다. Fig. 2 에서 원주상의 모든 점들은  $\vec{X}=[x,y,r]^T$  로 표현 될 수 있다. 여기서, x 와 y 는 각각 좌표값을 의미하며, r 은 임의의 후보점 O 에서 원주상의 점 (x,y) 까지의 거리를 나타낸다. 원주상에 N 개의 등분포 점을 고려하면, 원주상의 임의의 점은 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$x(i) = x + r \cos \frac{2\pi}{N} i, \quad (i = 1 \dots N) \quad (3)$$

$$y(i) = y + r \sin \frac{\pi}{N} i, \quad (i = 1 \dots N) \quad (4)$$

그러면 후보점 O 에 대한 원주의 평균반경  $\bar{r}$  과 표준편차  $\sigma$  는 각각 식 (5), (6)과 같이 표현된다.

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x(i)-x)^2 + (y(i)-y)^2} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r(i) - \bar{r})^2} \quad (6)$$

식 (6)의 표준편차는 후보점 O 가 원의 실제 중심에서 얼마나 떨어져 있는가를 말해주는 지표가 된다. 예를 들어  $\sigma=0$  은 현재 후보점이 원의 중심에 위치한다고 말할 수 있고,  $\sigma$  값이 클수록 후보점이 원의 중심에서 떨어져 있다는 것을 의미한다. 이 개념은 다음 장에서 퍼지기반 탐색 알고리즘을 생성하는 중요 요소가 된다.

### 3. 퍼지 기반 탐색 알고리즘

먼저, Fig. 3 과 같이 원의 내부에 있는 4 개의 초기 탐색시작점 (C1, C2, C3, C4)을 고려해 보자.

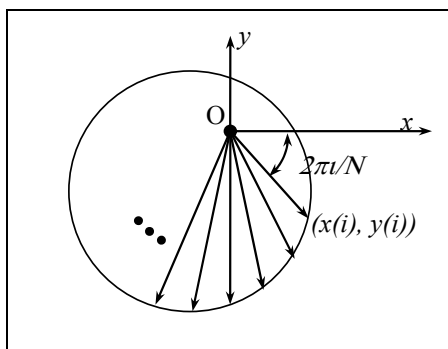


Fig. 2 The points distributed with equal angle with respect to center O and their radii

예를 들어 탐색점 1(C1) 에서 일정한 각도 간격으로 방사하여 원과 만나게 되는 거리값을 Fig. 4 와 같이 2 차원 좌표로 표시하면 조화함수(sinusoidal function)로 나타나게 되며 특정한 각도위치에서 거리값이 최대값과 최소값을 갖게 된다. 따라서, 현재의 탐색점에서 거리값이 최대인 방향으로 이동하면 원의 중심에 도달함을 알 수 있다. 같은 방법으로 탐색 2, 3, 4 를 수행하면 Fig. 4 와 같은 특징의 조화함수를 나타나게 된다.

이 때, 현재의 탐색점 위치를 중심으로 원의 평균반경을 구하고 표준편차값을 계산하면 현재 위치가 실제 원의 중심으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 예상할 수 있다. 이 개념을 바탕으로 Fig. 5 와 같이 퍼지기반의 탐색 알고리즘을 구성할 수 있다.

Fig. 5 에서 퍼지 시스템은 2 개의 입력변수와 2 개의

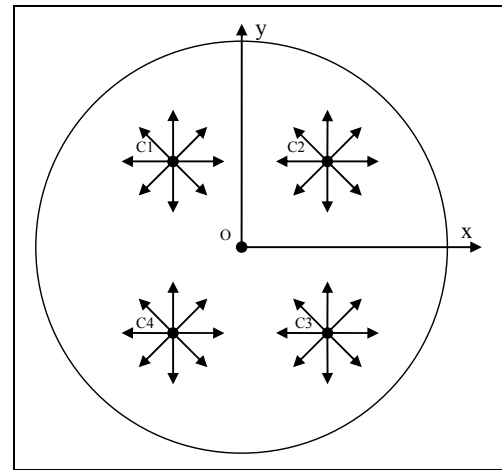


Fig. 3 Four possible initial search points and their search direction

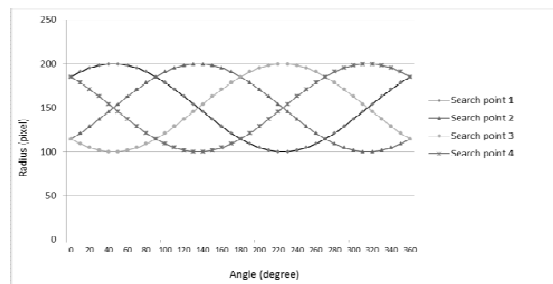


Fig. 4 Radial distribution of each initial search point

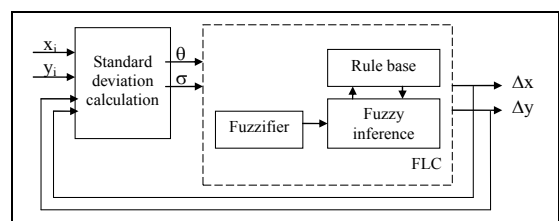


Fig. 5 Block diagram of iterative fuzzy searching system

출력변수를 가진다. 두 입력변수  $\theta$ 와  $\sigma$ 는 각각 최대반경이 가지는 각도와 반경의 표준편차를 나타낸다. 두 출력변수  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 x 방향 및 y 방향으로의 한 스텝 이동거리를 나타낸다. 입력변수와 출력변수의 퍼지소속함수(fuzzy membership function)는 Fig. 6과 같이 설계하였다.

Fig. 6에서, 입력변수인  $\theta$ 는 small(S), medium(M), big(B), very big (VB)의 4개의 소속함수로 구성되어 있다. 또 다른 입력변수  $\sigma$ 는 4개의 소속함수 zero(Z), small(S), big(B), very big(VB)으로 구성되어 있다. 출력변수인  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 각각 7개의 소속함수로 구성되어 있다. 출력변수의 소속함수 중에서 negative small(NS), zero(Z), positive small(PS) 함수는 좁게 작성되었고, negative very big(NVB), negative big(NB), positive big(PB), positive very big(PVB) 함수는 넓게 작성되었다. 그 이유는 빠른 탐색과 더불어 원의 중심 부근에서의 탐색정밀도를 높이기 위함이다.

Table 1은 퍼지탐색 제어기의 제어규칙을 나타내고 있다. 예를 들어, 첫 번째 규칙을 서술적으로 나타내면 다음과 같다.

If ( $\theta$  is S) and ( $\sigma$  is Z),  
then  $\Delta x$  is Z and also  $\Delta y$  is Z

따라서, 나머지 15개의 규칙도 위와 같이 서술적인 의미를 갖는다. 위 규칙과 Mamdani의 비퍼지 방법(Mamdani's defuzzified method)<sup>(10)</sup>을 이용하여 임의의 입력값에 대한 출력값을 계산해 낼 수 있다. 이러한 퍼지탐색은 표준편차가 일정한 값 이하가 될 때까지 계속된다. Fig. 7은 원의 중심을 찾기 위한 퍼지탐색의 흐름도를 나타내고 있다.

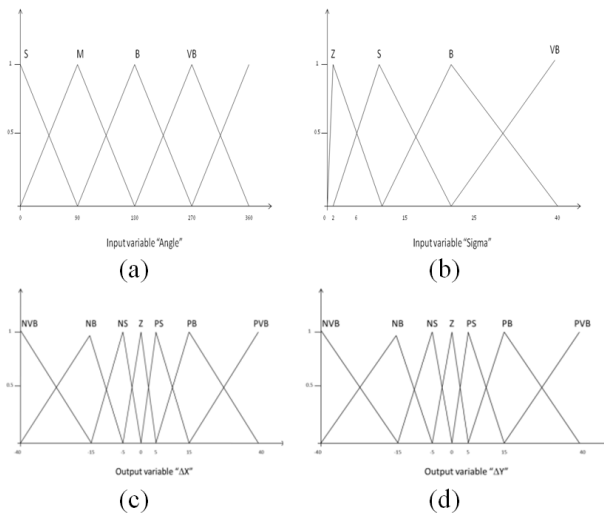


Fig. 6 Fuzzy membership functions: (a) input variable  $\theta$ , (b) input variable  $\sigma$ , (c) Output variable  $\Delta x$ , (d) Output variable  $\Delta y$

#### 4. 실험 및 고찰

##### 4.1 가상 도형을 이용한 시뮬레이션

실제 튜브를 이용해서 실험을 하기 전에, 제안된 알고리즘의 기본 성능을 검증하기 위하여 깨끗한 원과 왜곡이 심한 원을 사용하여 본 알고리즘을 적용하는 시뮬레이션을 수행하였다. 두 경우 초기 탐색점은 임의적으로 선정되었다. Fig. 8은 두 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 두 경우 모두 탐색이 진행됨에 따라 원의 실제 중심으로 접근하고 있음을 보여준다.

Table 1 Linguistic inference table for fuzzy search controller

$\Delta X, \Delta Y$		$\theta$ of max radius			
		S	M	B	VB
$\sigma$	Z	Z, Z	Z, Z	Z, Z	Z, Z
	S	PS, PS	NS, PS	NS, NS	PS, NS
	B	PB, PB	NB, PB	NB, NB	NB, PB
	VB	PVB, PVB	NVB, PVB	NVB, NVB	NVB, PVB

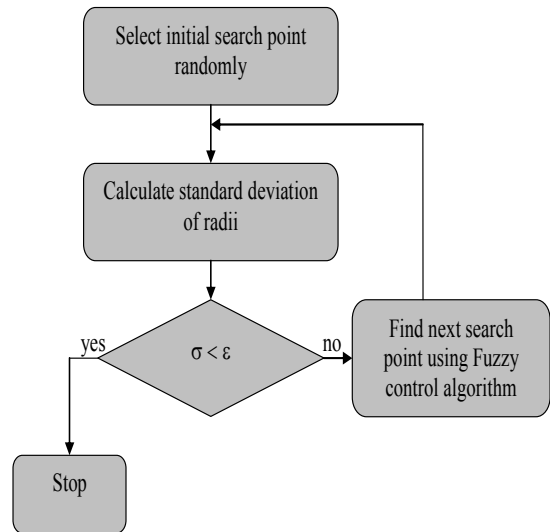


Fig. 7 Search algorithm to find the true center point of a circle

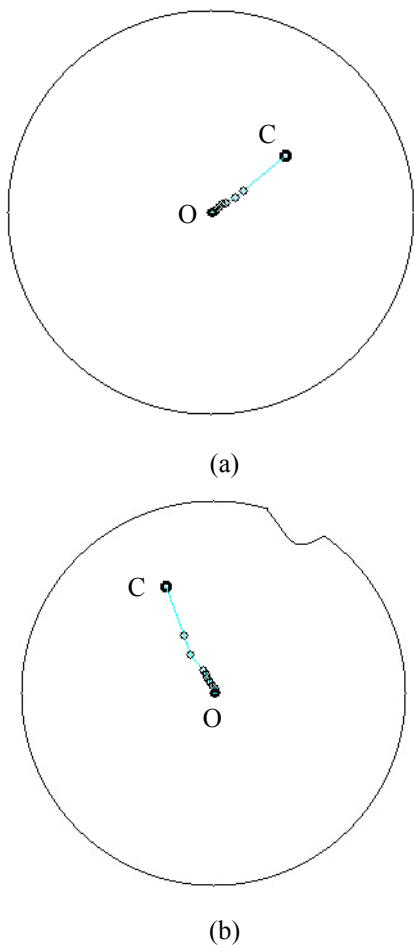


Fig. 8 Iterative fuzzy search simulation results on synthetic images: (a) Case of pure circle, (b) Case of noisy circle

이 시뮬레이션의 탐색과정의 파라미터 값의 변화를 Table 2에 나타내었다. 이 시뮬레이션에서 실제 원의 중심은 영상픽셀 좌표에서 (512, 384)이다. Table 2에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 13 스텝 이내에 종료되었다. 그리고 탐색성능도 매우 양호하였다. 두 경우 모두 탐색오차는 0이었다.

#### 4.2 실제 튜브를 이용한 실험

실제 실험에 사용된 자동차 브레이크 배관용 유압튜브는 직경이 비교적 작은 반면에 길이는 매우 긴 편이다. 그리고, 성형부위도 단차를 지닌 곡면으로 되어 있어서 조명에 의한 잡음도 많이 발생하는 편이므로 튜브의 내경 중심 및 내경의 크기를 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않다. Fig. 9는 검사에 사용되는 성형된 튜브의 끝단부를 나타내는 영상이다.

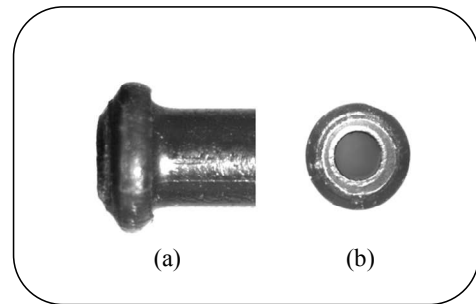


Fig. 9 The images of a vehicle brake tube: (a) side-view, (b) front-view

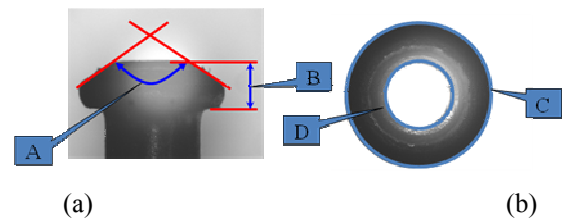


Fig. 10 Critical geometric parameters for the tube measurement

Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 측면영상에서는 성형부위의 각도와 성형부의 두께, Fig.10(b)의 정면 영상에서는 내경 및 외경 치수, 그리고 두 원이 이루는 편심값이 튜브의 불량여부를 판단하기 위해 사용되는 중요한 파라미터 들이다. 이 중에서 잡음이 가장 많이 발생하고, 또한 튜브 내부에 이물질의 부착에 의한 이미지 왜곡 등의 현상이 주로 정면영상에서 발생하므로 본 연구에서는 정면 영상만을 연구의 대상으로 삼았다. 측면 영상에서의 측정은 Hough 변환을 이용한 직선추출을 사용하면 각도를 쉽게 계산할 수 있다. 이 부분의 연구는 이전의 논문에 잘 나타나 있다.<sup>(11)</sup>

실험에 사용된 튜브의 외경 치수 및 허용공차는  $7.1 \pm 0.18 \text{ mm}$  이고, 내경의 치수와 허용공차는  $3.2 \pm 0.13 \text{ mm}$  이다. 그리고 편심에 대한 허용오차는 0.15mm 로 규정하고 있다. 즉, 측정값이 위의 값 범위 내에 있으면 정상품, 범위 밖에 있으면 불량품으로 판정된다. 사용된 영상에서 1 픽셀을 거리값으로 환산하면 0.01 mm 이다.

##### 4.2.1 편심이 심한 불량 튜브의 측정실험

본 실험에 사용된 튜브는 내경직경=3,18mm, 외경직경=7.11mm 이고, 내경과 외경의 편심이 0.23 mm 인 불량품 튜브를 사용하였다. 측정결과를

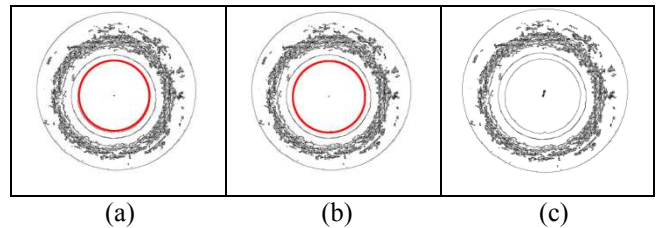
**Table 2** Result of iteration process

	True center	Synthetic pure circle (Fig.12(a))		
		Search point	Standard deviation	Distance (error)
1	X=512 Y=384	X=464 Y=467	35.966	95.880
2		X=484 Y=432	19.704	57.140
3		X=492 Y=418	13.816	39.446
4		X=500 Y=404	8.186	23.323
5		X=502 Y=401	6.892	19.723
6		X=500 Y=398	5.781	16.643
7		X=505 Y=395	4.538	13.030
8		X=506 Y=392	3.544	10.000
9		X=508 Y=389	2.247	6.403
10		X=510 Y=386	1.138	2.828
11		X=511 Y=385	0.755	1.414
12		X=512 Y=385	0.629	1.000
13		X=512 Y=384	0.568	0.000

	True center	Synthetic noisy circle (Fig.12(b))		
		Search point	Standard deviation	Distance (error)
1	X=512 Y=384	X=475 Y=301	34.13	90.873
2		X=489 Y=339	18.205	50.537
3		X=494 Y=354	12.523	34.985
4		X=504 Y=366	7.322	19.697
5		X=506 Y=369	6.028	16.155
6		X=507 Y=372	4.867	13.000
7		X=509 Y=375	3.889	9.486
8		X=511 Y=378	2.843	6.082
9		X=513 Y=380	2.377	4.123
10		X=514 Y=383	1.834	2.236
11		X=514 Y=384	1.716	2.000
12		X=513 Y=384	1.605	1.000
13		X=512 Y=384	1.539	0.000

비교하기 위하여 Hough 변환을 이용한 경우, RANSAC 을 이용한 경우, 그리고 본 연구에서 제안한 경우에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 각 실험에서 외경은 잡음이 없이 깨끗하기 때문에 단순히 선 스캔 (line-scanning) 방법을 사용하여 외경의 중심과 외경의 직경을 계산하였다. 즉, 내경의 중심과 내경의 직경을 구하는 부분에 3 가지의 방법을 적용하였다. Fig. 11 은 각각의 알고리즘을 적용하여 내경의 중심과 내경 직경을 구한 결과를 나타낸 결과이고, Table 3 은 구해진 중요 파라미터 값을 비교한 표이다.

Table 3 에서 알 수 있는 바와 같이 3 경우 모두 내경 직경은 정확하게 측정하였지만, Hough 변환을 사용한 경우 내경의 중심을 정확하게 찾지 못하는 바람에 편심값을 0.12mm 로 판정하였으며 이 결과는 튜브가 양품이라는 의미이므로 판정 오류가 발생한 경우이다. RANSAC 을 사용한 경우는 측정 성능은 양호하지만 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 발견되었다.



**Fig. 11** Comparison of measuring experiment: a)Hough transform, b) RANSAC, c) Proposed algorithm

4.2.2 내부에 이물질이 심한 정상튜브의 측정실험  
이 번 실험은 튜브 자체는 양품이지만 내부에 이물질이나 금속 파편(scrap)이 있어서 불량품으로 오인되기 쉬운 경우에 대한 측정실험을 수행하였다. Fig. 12 는 제안된 알고리즘을 두 경우의 튜브에 적용한 결과를 나타낸 것이다.

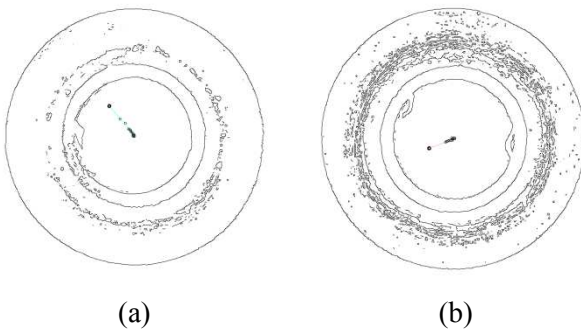
Table 4 는 본 퍼지탐색 알고리즘을 적용한 경우의 검사결과를 나타내었으며, 실제 수동측정기구를 사용하여 계산한 데이터와 비교를 하였다. 앞

**Table 3** Measurement result for 3 methods

	Hough transform	RANSAC	Proposed algorithm
Outer diameter (mm)	7.11	7.11	7.11
Inner diameter (mm)	3.18	3.18	3.18
Eccentricity (mm)	0.12	0.23	0.23
No. of iterations	-	1576	6
Time (ms)	2108	4989	194

**Table 4** Experimental result for normal tubes with severe noises and scraps

	Manual Measurement			Measurement result by the proposed algorithm		
	Inner circle diameter (mm)	Outer circle diameter (mm)	Eccentricity (mm)	Inner circle diameter (mm)	Outer circle diameter (mm)	Eccentricity (mm)
tube (a)	3.22	7.19	0.01	3.22	7.17	0.02
tube (b)	3.19	7.14	0.01	3.19	7.13	0.01



**Fig. 12** Search results for normal tubes with severe noises and scraps

에서 언급한 바와 같이 본 알고리즘은 내경 측정에만 적용되었고, 잡음이 별로 없는 외경은 단순한 선 스캔방법을 적용하였다. Table 4에서 보듯이 외경측정에서는 오차가 0.02mm 정도 발생하나 본 알고리즘을 적용한 내경측정에서는 오차가 발생하지 않았다. 내경과 외경측정을 고려한 편심오차는 0.01mm 정도로 발생하였다. 이 정도 수준은 생산 현장에서 요구하는 불량품 판정기준을 충분히 만족하는 정도이다.

**Table 5** Comparison of measuring performances between the proposed algorithm and the others

Used image	Specification	Hough transform	RANSAC	Proposed method
430 tube images with severe noises or scraps	Average running time per image (ms)	~2000	~5000	~200
	Eccentricity error (pixel)	2~5	0~1	0~1
	Number of successful detection	325	373	427
	Detection error for normal tubes (%)	24.4	13.25	0.7

추가적인 실험을 위해서 정품이지만 잡음이나 스크랩이 심한 430 개의 튜브를 선정하여 Hough 변환법, RANSAC 방법, 그리고 본 연구에서 제안한 퍼지탐색법을 각각 적용하여 측정실험을 수행하였다. 실험결과를 Table 5 와 같이 비교하였다. 실험을 위해 사용된 컴퓨터는 Intel Core 2 Duo 1.86GHz CPU, 1GB RAM 이고, 프로그램은 Windows 7 환경에서 Visual C++ 2008 을 사용하여 개발하였다.

Table 5 에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘을 적용한 경우가 계산시간이나 편심 계산의 정밀도, 그리고 불량품과 양품을 정확하게 판별하는 능력 모두에서 우수한 성능을 보였다.

### 5. 결론

본 논문에서는 머신비전을 이용하여 자동차의 브레이크 장치에 연결되는 유압튜브의 끝부분을 정확하게 전수검사를 할 수 있는 검사알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 튜브 영상의 내부의 일정한 영역을 ROI(region-of-interest)로 선정하고, ROI 내부의 모든 점을 탐색하는 개념이 아니라 내경의 반경과 표준편차를 입력변수로 하는 퍼지제어 기법을 도입하여 탐색시간과 내경 중심 결정오차를 줄였다. 특히 제안된 알고리즘은 튜브 영상 내부에 잡음이 많이 있거나 이물질이 있어서 내경의 중심과 내경 치수를 정확하게 계산하기 어려운 경우, 그리고 공장 내부의 진동에 의해서 기준위치가 약간씩 변하는 환경에서도 적용할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 알고리즘의 성능을 일반적으로 많이 사용되고 있는 선 스캔(line-scanning) 방식, Hough 변환 방식, 또는



RANSAC 방식과 비교하는 실험을 다수 수행하였고, 결론적으로 제안된 알고리즘의 측정성능이 우수함을 입증하였다. 제안된 알고리즘은 튜브와 같은 원 형태의 부품 내경을 측정하는 적용 외에도 타원형의 부품 혹은 다각형으로 형성된 기계부품의 측정 등에도 널리 활용될 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Bowman, C. C., 1986, "Automated Visual Inspection," in *Shape R.S. (ed.), Non-destructive Testing*, Vol. 8.
- (2) Chan, J. P. and Plamer, G. S., 1995. "Machine Vision - Applications in Industry," *IEE Colloquium on Application of Machine Vision*, pp. 1~6.
- (3) Duda, R. O. and Hart, P. E., 1972, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures," *Comm. ACM*, Vol. 15, pp. 11~15.
- (4) Ballard, D.H., 1981, "Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes," *Pattern Recognition*, Vol.13, No.2, pp.111~122.
- (5) Fischler, M. A. and Bolles, R. C., 1981, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Comm. of the ACM* 24, pp.381~395.
- (6) Lamiroy, B., Gaucher, O. and Fritz, L., 2007, "Robust Circle Detection," *Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition. ICDAR 2007*, pp.526~530.
- (7) Kim, H. S. and Lee, B. R., 2006, "Real-Time Pipe Fault Detection System using Computer Vision," *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing*.7(1), pp.30~34.
- (8) Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy sets," *Information and Control*, Vol. 8, pp.338~353.
- (9) Cho, H. S., Kim, H. S. and Lee, B. R., 2010, "Study on Vehicle Deceleration Control in School Zones by Taking Driver's Comfort into Account," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol.34, No.10, pp.1359~1366.
- (10) Kim, H. S., Naranbaatar, E. and Lee, B. R., 2011, "A Noise-Robust Measuring Algorithm for Small Tubes Based on an Iterative Statistical Method," *Trans. Of the KSME(A)*, Vol.35, No.2, pp.100~107.
- (11) Mamdani, E.H. and Assilian, S., 1974, "A Case Study on the Application of Fuzzy Set Theory to Automatic Control," *Proc. IFAC Stochastic Control Symp., Budapest*.