

측정물의 속도에 따른 머신비전의 성능변화와 선형보상에 의한 정밀도 향상

최희남¹, 강봉수^{2*}

¹(주)세형, ²한남대학교 기계공학과

Study on Performance Variation of Machine Vision according to Velocity of an Object and Precision Improvement by Linear Compensation

Hee-Nam Choi¹, Bong-Soo Kang^{2*}

¹SeHyeong Co., Ltd.

²Department of Mechanical Engineering, Hannam University

요약 본 연구에서는 산업현장의 생산라인에서 자동검사의 편이성과 속도를 높이기 위해서 정지상태가 아닌 컨베이어에서 부품이 이동되는 과정에서 촬영한 영상 이미지에 머신비전 기법을 적용했을 때 나타나는 측정 성능변화를 실제 실험결과를 바탕으로 분석한다. 자동차 부품인 원통형 로드의 길이를 에지검출 기법으로 계측했을 시 이송속도가 높아지면 배경과 부품 이미지 경계의 불확실성이 높아지므로 인하여 이미지 길이도 작아짐을 알 수 있었다. 돌출형과 비돌출형을 포함하여 6 종류의 시편과 7 단계의 속도변화를 통해서 실험을 수행하였고 실험결과에 대해서 속도에 따른 길이측정 편이오차와 확률오차 분석을 수행하였다. 이를 통해서 속도가 증가함에 따라 편이오차와 확률오차가 증가함을 확인하였고 이 중에서 편이오차를 줄이기 위한 선형 보상법을 제시하였다. 선형 보상법으로 보정된 원통형 로드의 길이 측정값은 확률오차가 반복정밀도를 넘지않는 30 cm/s 의 속도 구간안에서는 정지상태와 동일한 정밀도를 나타내었다. 따라서 제안된 머신비전의 분석과 보정기법은 산업현장에서 머신비전 기반 자동검사의 응용성을 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract In this paper, performance analysis of machine vision techniques is presented to improve the convenience and speed of automatic inspection in the industrial field when machine vision is applied to the image not taken in the stationary state, but in the moving state on a conveyer. When the length of cylindrical rods used for automobiles was measured using the edge detection method, the conveying speed increased, and the uncertainty of the boundary between the background and the part image increased, which resulted in a shorter image of the object taken. This paper proposes a linear compensation method to predict the biased errors of the length measurements after examining the pattern of biased and random errors, respectively, with 6 different types of specimens and 7 velocity stages. The length measurement corrected by the linear compensation method had the same accuracy as the stationary state within the speed range of 30 cm/s and could enhance the application capability in automatic inspections.

Keywords : Machine Vision, Edge Detection, Repeatability, Biased Error, Linear Compensation

본 논문은 2018년 한남대학교 학술연구조성비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Bong-Soo Kang(Hannam Univ.)

Tel: +82-42-629-7983 email: bskang@hnu.kr

Received September 18, 2018

Revised (1st October 23, 2018, 2nd October 29, 2018)

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

1. 서론

자동화된 대량생산으로 제조되는 제품에 있어서 모든 생산품의 성능을 균일하게 일정수준으로 유지하는 품질 관리는 소비자의 신뢰도를 높일 수 있는 가장 중요한 요소 중의 하나이며 제품의 불량은 기업의 이미지를 저해하기도 한다. 양질의 제품생산을 보장하기 위해 가공기술의 발전에 덧붙여 정해진 성능이나 외형기준에 미달하거나 불량인 부품을 선별하는 검사기술도 많은 진보가 이루어졌다.

자동차와 같이 수 만개의 부품들로 조립되는 경우 제품의 경우 비용이나 시간면에서 부품들의 효율적인 검사 방법이 요구된다. 사람의 수작업으로 수행되는 검사작업은 부품의 수량이 많을 경우 근육의 피로와 집중력 저하로 인하여 오류를 범할 가능성이 높기 때문에 산업현장에서는 카메라 등 센서장비를 활용한 기술이 도입되고 있다. 카메라를 이용한 머신비전(machine vision) 기법은 이미지센서에 담긴 디지털 영상정보를 이용하여 제품의 치수, 형태와 관련된 검사와 분석을 수행하는 방법으로 조명을 달리할 경우 목적에 맞는 특징적인 이미지를 취할 수 있다[1]. 또한 영상데이터를 후처리하여 다양한 정보를 가공할 수 있어 결함검사, 표면검사, 용접검사 등 여러 분야에서 응용되고 있다 [2-3].

머신비전을 이용한 측정 성능에 영향을 미치는 외부 요인으로는 조명 방식 및 밝기, 렌즈의 종류 및 수차 등이 있으며 이와 관련된 연구가 많이 이루어졌으나[4-5] 대부분 측정하려는 물체는 지그에 고정되거나 정해진 위치에서 정지한 상태에서 촬영이 이루어졌다. 생산현장에서 조립되는 제품이 주로 컨베이어(conveyor) 등으로 이송되면서 흐름공정을 통해서 이루어짐을 고려하면 검사 단계에서도 정지보다는 움직이는 상태에서 이루어지는 것이 검사시간을 줄일 수 있다. 그러나 피사체가 움직일 때 촬영할 경우 이미지의 왜곡이 발생하는 문제가 생기며 이러한 피사체의 속도로 인한 머신비전의 성능변화에 대한 연구는 국내·외적으로 매우 미비하다[6-7].

본 연구에서는 컨베이어에 놓인 부품의 길이를 머신비전으로 측정하는데 있어서 부품의 이송속도를 정지상태에서부터 단계별로 증가하면서 측정된 로드길이값의 변화를 분석한다. 기존에는 작업자의 수작업 검사 혹은 제품의 외형에 맞추어 특별히 제작된 지그에 수작업으로 고정된 후 접촉식 계측기로 측정하는 반자동 공정을 사

용하였으나 1개의 제품을 검사하는데 평균 수 초 이상의 시간이 소모되므로 인하여 한 번 납품에 필요한 수 만개의 제품을 검사하는데 오랜 시간이 필요하다. 또한 생산된 제품의 길이가 정품길이에서 정해진 허용오차 (예: 0.07mm)를 벗어난 경우 불량으로 간주되며 납품 시 불량률이 섞여 들어가면 원청업체에서 납품한 모든 물량을 반품하기 때문에 검사과정에서 불량품을 발견하여 제거하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 비접촉방식으로 제품의부에 손상이 없으며 컨베이어의 이송도중에 정품검사와 분류가 동시에 수행되어 1초에 3개 이상의 자동검사가 이루어지는 이동물체 정밀측정을 위한 머신비전기법을 개발한다. 그리고 측정된 데이터를 기반으로 피사체의 속도로 인한 이미지왜곡을 효과적으로 보상할 수 있는 선형보상식을 제안하고 실제 실험결과를 통해서 그 유효성을 입증한다.

2장에서는 실험에 사용된 시편, 실험장치, 그리고 길이측정을 위한 머신비전기법을 설명한다. 3장에서는 컨베이어의 속도변화 따른 길이측정값의 변화 그리고 보상 기법과 성능향상결과가 주어지며 4장에서 결론이 제시된다.

2. 머신비전에 의한 길이측정

2.1 원통형 로드시편

본 연구에서 사용되는 시편은 자동차용 솔레노이드 밸브(solenoid valve)에 들어가는 원통형 로드(Rod)이다. Fig. 1과 같이 6개의 서로 다른 형태와 길이에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 1에서 가장 작은 로드 (24.1mm) 부터 가장 긴 로드 (39.5mm) 에 대해서 Type A, Type B 순으로 지칭하며 길이가 작은 세 개의 로드(Type A, Type B, Type C) 의 한쪽 면은 평탄하며 다른 면은 돌출부를 가진다. 반면에 상대적으로 긴 세 개의 로드 (Type D, Type E, Type F)는 돌출부가 없는 평탄면 혹은 둥근면을 가진다. 각 Rod는 CNC 및 후처리 가공을 통하여 생산되어 매끈한 금속표면을 가지며 버니어캘리퍼스(vernier caliper, 분해능: 0.02 mm)로 수동으로 측정된 시편의 길이는 Table 1과 같다.



Fig. 1. Photos of rods used for solenoid valves

Table 1. Dimensions of rod-specimens measured by vernier caliper

Type	length (mm)	End shape
Type A	24.09	Flat, Protruding
Type B	26.10	Flat, Protruding
Type C	26.30	Flat, Protruding
Type D	30.20	Flat, Protruding
Type E	37.39	Flat, Round
Type F	39.50	Round, Round

2.2 컨베이어 이송 및 카메라 측정장치

부품시편이 적층된 공급기(Feeder)에서 진동에 의해서 정렬된 상태에서 컨베이어로 투입되어 이송되면서 검사가 시작된다. Fig. 2 에서 컨베이어 좌측에서 우측으로 부품이 이송될 경우 카메라(acA1600, Basler) 좌측에 설치된 광학방식 근접센서(FS-N11P, Keyence)를 통해서 물체의 접근을 인식하고 근접센서와 카메라사이의 거리와 컨베이어의 속도를 고려해서 카메라 촬영시간을 결정한다.

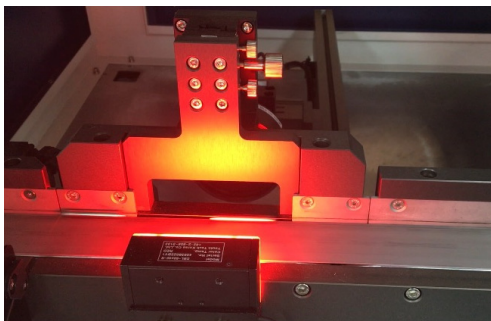


Fig. 2. Experimental setup for machine vision to measure the length of rods on a moving conveyor



Fig. 3. Gray image of a rod with line ROI

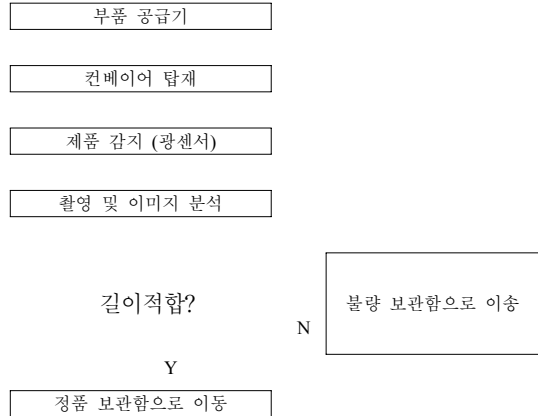


Fig. 4. Flow diagram of automatic inspection based on machine vision.

Table 2. Specification of camera system

Image sensor	1600 x 1200 (pixel)
Field of view	55.36 mm (horizontal)
Resolution (based on 2 pixels)	0.07 mm
Shutter speed	50 frame/s
Velocity of conveyor	0 ~ 0.36 m/s

컨베이어를 사이에 두고 카메라 맞은편에 적색LED 조명을 설치하여 후방조사(back-lighting)하면 Fig. 3과 같이 원통형 로드의 2차원 흑백 이미지를 얻을 수 있다. 이미지에 머신비전 기법을 적용하여 제품의 길이를 측정 한 후 불량여부를 판단하여 컨베이어 우측의 분류대에서 자동으로 정품과 불량품으로 분류한다. 전체 측정자동화를 위한 공정은 Fig. 4와 같다. 실험에 사용된 카메라 측정장치 특성은 Table 2와 같다.

2.3 에지검출을 통한 로드 길이측정

촬영한 로드의 흑백이미지를 이용하여 로드의 길이는 다음과 같이 계산된다. Fig. 3 중앙에 위치한 가로선으로 표현되는 직선 ROI (Region of Interest)에 따라 픽셀 값

Table 3. Rod lengths calculated by machine vision in stationary state

Type	mean length (Pixel)	standard deviation (Pixel)	error (mm)
Type A	696.20	0.02	0.00
Type B	754.46	0.02	0.01
Type C	760.40	0.01	0.01
Type D	872.35	0.02	0.01
Type E	1079.65	0.07	0.03
Type F	1142.70	0.02	0.03

의 변화를 살펴보면 화소의 비트심도가 8 비트인 경우 물체는 어둡기 때문에 0의 가까운 값을 가지고 배경은 밝기 때문에 255에 가까운 값을 가진다.

따라서 로드의 양 끝단 경계에서는 급격한 픽셀값의 변화가 생기므로 경계면과 직선ROI가 만나는 점의 위치는 픽셀값의 변화(gradient)에서 피크(peak)가 발생하는 지점으로 구할 수 있다. 그리고 로드의 길이는 양 경계에 해당하는 두 개 좌표 (x_1, y_1) 와 (x_2, y_2) 를 이용해서 다음과 같이 계산한다. 식(1)에서 단위는 픽셀이므로 길이단위로 바꾸려면 실험에서 구한 변환값(0.0346 mm/pixel)을 곱하여 계산할 수 있다.

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

Table 1에서 제시한 로드 시편에 대해서 정지상태에서 머신기법을 적용하여 측정된 값은 Table 3과 같다. 한 종류의 시편 당 20번의 실험을 통해서 평균과 표준편차를 구하였다. 반복정밀도(repeatability)에 해당하는 표준편차가 0.1 pixel 이내로 나타나 물체가 정지 시 머신비전의 반복신뢰도가 매우 높음을 알 수 있다. 그리고 버니어캘리퍼스로 측정된 값을(Table 1) 기준으로 오차를 계산하면 라운드면을 가진 로드의 경우(E, F)에만 1 pixel (0.0346 mm) 내에서 오차가 존재하고 다른 로드에서의 측정값은 일치한다.

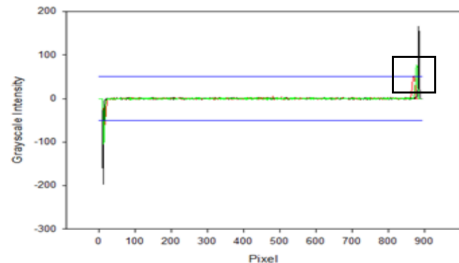
3. 속도에 의한 이미지왜곡 보정기법

3.1 속도에 의한 이미지변형

컨베이어에 놓인 로드의 이동속도가 증가하면 촬영한

물체 이미지의 영역 (Fig. 3의 어두운 영역)이 작아지게 된다. 직선 ROI를 따라 인접픽셀간의 화소값의 차이 (gradient)를 도시하면 이미지의 좌측 경계에서 음의 피크 (배경 화소값이 255 이고 이미지 화소값이 0 이면 피크값의 크기는 255가 됨)가 오른쪽 경계에서는 양의 피크가 나타난다. 피크사이의 거리가 로드의 길이인데 로드의 이동속도가 증가하게 되면 Fig. 5와 같이 피크의 절대적인 크기도 작아지고 (경계의 선명도가 떨어지는 원인으로 추정) 음의 피크와 양의 피크사이의 거리도 점점 줄어들게 된다. 따라서 측정물의 속도가 증가함에 따라 머신비전으로 측정하는 길이가 실제보다 짧게 계산된다.

6개의 로드에 대해서 6 단계의 속도구간 (9, 14, 20, 25, 30, 36 [cm/s]) 에서 실험한 결과를 Fig. 6에 도시하였다 (한 속도당 20번 수행). 예상한 대로 모든 로드에 있어서 속도가 증가하면 길이 측정값이 점점 작아짐을 알 수 있다. 해석적인 분석을 위해서 속도에 따른 측정값의 평균오차(정지상태를 기준으로)와 표준편차를 Fig. 7와 Fig. 8에 각각 분리하여 도시하였다. 평균오차의 경우 속도증가에 대해 비교적 선형적으로 증가하여 최대속도 (0.36 m/s) 에서는 16.6 pixel (0.57 mm)의 차이를 보였다. 그리고 반복정밀도에 해당하는 표준편차의 경우에는 일정속도 이상 (30cm/s)에서는 편차가 크게 증가하여 최대속도에서 2 pixel (0.07mm) 가까이 나타났다.



(b) Enlarged photo around the right peak

Fig. 5. Gradient profile of pixel values along line ROI in three velocities (①: 0 cm/s, ②: 15 cm/s, ③: 36 cm/s)

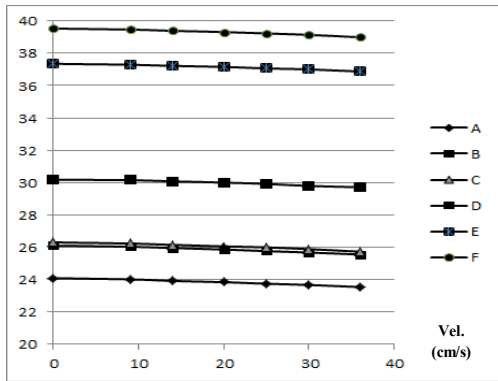


Fig. 6. Rod lengths (mm) estimated by machine vision when the velocity of rods increased

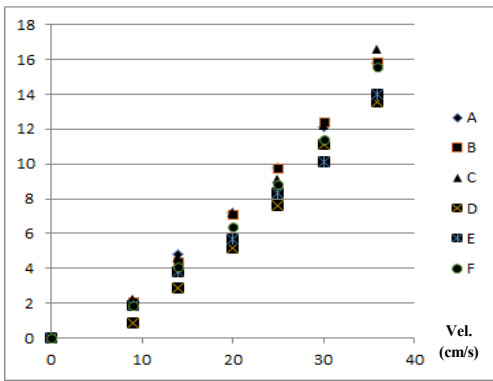


Fig. 7. Average bias (pixel) in length measurements when the velocity of rods increased

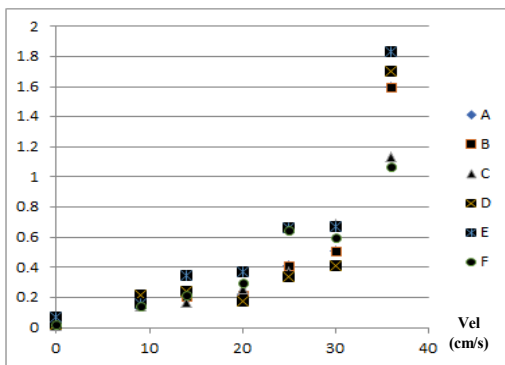


Fig. 8. Standard deviation (pixel) in measurements when the velocity of rods increased

3.2 선형보상기법

오차의 종류를 편이(bias) 오차와 확률(statical) 오차로 분류한다면 확률오차는 계측기의 비정밀성(imprecision)

으로 생기기 때문에 수학적인 보정(calibration)으로 보상이 어렵다⁽⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 편이오차에 해당하는 평균오차를 1 pixel 이하로 줄이기 위한 보상기법을 제안한다. 다만 물체의 이동속도가 30cm/s를 초과할 경우 확률오차가 1 pixel 이상 나타났기 때문에 30 cm/s 이하에서만 길이측정오차를 선형식을 통해 보정하는 기법을 제시한다.

주어진 실험데이터에 있어서 돌출형과 비돌출형으로 묶었을 때 각 묶음에서 속도에 따른 편이오차의 증가형태가 유사하기 때문에 각 묶음의 오차를 최적의 선형으로 추종하는 추세선을 구한다. 그리고 해당속도에 해당하는 추세선 보상값을 짧게 측정된 머신비전의 결과값에 합산하여 길이측정값을 보정하는 방법을 수행하였다.

Fig. 7에서 30cm/s 속도 구간안에 돌출형(Type A, Type B, Type C)의 데이터만 수집하여 최소자승법으로 속도, v (cm/s)에 대한 오차, e 의 선형추세선을 추정하면 다음과 같다.

$$e = 0.474v - 2.158 \quad [\text{pixel}] \quad (2)$$

동일하게 비돌출형 (Type D, Type E, Type F)의 데이터만 수집하여 역시 속도, v (cm/s)에 대한 오차의 선형추세선을 추정하면 다음과 같다.

$$e = 0.436v - 2.558 \quad [\text{pixel}] \quad (3)$$

3.3 보정을 통한 실험결과 및 분석

로드의 이동속도에 따른 픽셀감소수를 예측하는 식(2)과 식(3)의 결과를 머신비전의 측정값에 합산하여 보정한 결과를 각각 Fig. 9 (돌출형)과 Fig. 10 (비돌출형)에 표시하였다. 돌출형 및 비돌출형 모두 보정전(점선)에는 속도가 증가함에 따라 지속적으로 측정값이 작아졌으나 보정(실선)을 통해서 측정값이 정지상태의 값과 동일하게 유지됨을 알 수 있다.

Table 4는 오차의 크기에 대해서 보정 전·후를 비교한 데이터로서 보정전에는 로드 종류와 관계없이 0.4 mm의 오차를 보였으나 보정을 통해서 반복정밀도인 확률오차에 해당하는 0.03 mm (1 pixel) 이하로 오차가 줄어들었다. Fig. 11은 보정후에 각 속도에서 계산된 편이오차의 크기를 도시한 그림으로 돌출형의 경우 0.6 pixel 안에서 그리고 비돌출형의 경우 1 pixel 안에서 정지시의 측정값과의 차이를 보여준다.

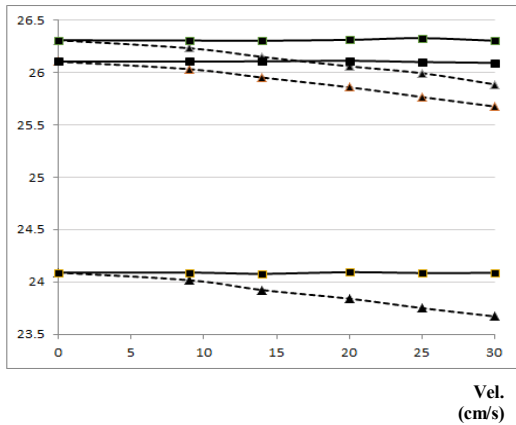


Fig. 9. Estimated length of extruded rods (mm)
 ▲: before compensation, ◻: after compensation
 (Type A, Type B, Type C)

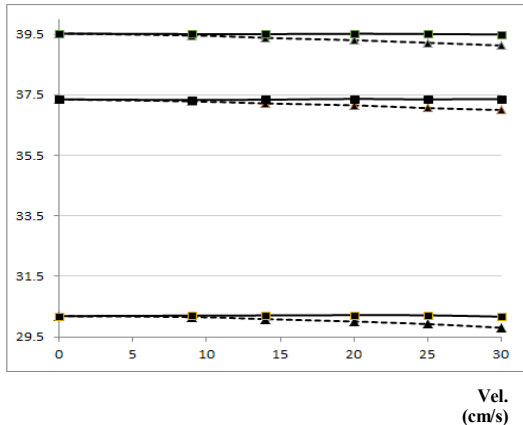
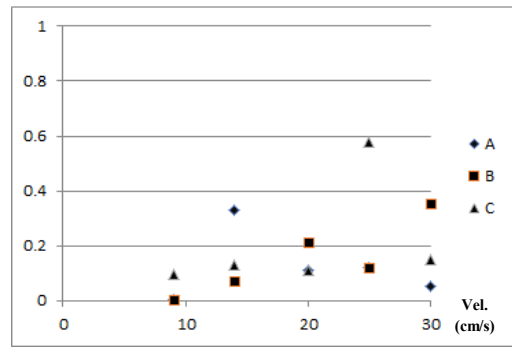


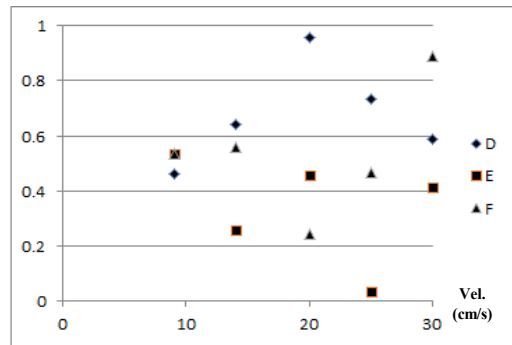
Fig. 10. Estimated length of non-extruded rods (mm)
 ▲: before compensation, ◻: after compensation
 (Type D, Type E, Type F)

Table 4. Biased errors of rod lengths after compensation

Type	before compensation max. error (mm)	after compensation max. error (mm)
Type A	0.42	0.01
Type B	0.43	0.01
Type C	0.42	0.02
Type D	0.38	0.03
Type E	0.35	0.02
Type F	0.39	0.03



(a) Extruded (Type A, Type B, Type C)



(b) Non-extruded (Type D, Type E, Type F)

Fig. 11. Biased error (pixel) of rod lengths after compensation according to the velocity of objects

4. 결론

본 연구는 정지상태가 아닌 이송중인 상태의 측정물을 검사하는 자동화시스템에서 이송속도에 따른 머신비전의 성능저하와 이에 대한 보정기법에 대한 연구를 수행하였다.

- (1) 6종류의 솔레노이드용 로드시편을 가지고 컨베이어 속도를 36 cm/s 까지 증가할 경우 에지검출방법을 통해서 측정된 길이는 정지 시 측정치와 비교할 때 최대 17 pixel (0.57 mm)의 편이오차와 2 pixel의 확률오차를 나타내었다.
- (2) 그리고 물체의 이동속도에 따른 이미지왜곡을 보상하는 기법을 적용할 경우 30cm/s의 이동속도 구간에서 편이오차는 12 pixel(0.42 mm)에서 1 pixel (0.035mm) 이내로 줄어들었다.

References

- [1] J. H. Kim, "Machine Vision Technology Trends and Future," *iCROS*, Vol. 19, No. 4, pp. 23~31, 2013.
- [2] Y. S. Jung And K. H. Park, "O-ring Size Measurement Based on a Small Machine Vision Inspection Equipment," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 41~52, 2014.
- [3] S. O. Lee, Y. S. Kim And Y. T. Do, "Vision System for Inspecting Steel Bearing Ball Surface," *iCROS*, Vol. 15, No. 9, pp. 919~922, 2009.
- [4] Y. J. Park, "The Lens Aberration Correction Method for Laser Precision Machining in Machine Vision System," *J. of Digital Convergence*, Vol. 10, No. 10, pp. 301~306, 2012.
- [5] C. H. Lee, Y. E. Lim, K. Park and S. W. Ra, "Design and Analysis of Illumination Optics for Image Uniformity in Omnidirectional Vision Inspection System for Screw Threads," *J. of KSPE*, Vol. 31, No. 3, pp. 261~268, 2014.
- [6] D.-X Zhao and Y.-X Cui, "Research on the method of tracking and measuring moving object based on machine vision," *Proc. Int. Conf. on Computational Intelligence and Software Engineering*, pp. 1~4, 2010.
- [7] M. Arsalan and A. Aziz, "Low-cost machine vision system for dimension measurement of fast moving conveyor products", *Proc. Int. Conf. on Open source systems and technologies*, pp. 22~27, 2012.
- [8] E. O. Doebelin, *Measurement Systems: Application and Design*, McGraw-Hill Book Co, 2003.

최 희 남(Hee-Nam Choi)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한남대학교 기계공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한남대학교 무인시스템 공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : (주)세형 연구원

<관심분야>
머신비전, 자동화

강 봉 수(Bong-Soo Kang)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 2월 : 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 (Post-Doc.)
- 2002년 2월 : 토론토대학 기계 및 산업공학과 (Post-Doc.)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 기계공학과

<관심분야>
자동화 및 제어, 소프트 로봇, 생체모방기구 및 인공근육