

研究論文

자동시각검사환경하에서 공정 목표치의 설정*

서순근 · 이성재

동아대학교 산업시스템공학과

Determination of Target Value under Automatic Vision Inspection Systems

Seo, Sun-keun , Lee, Sung-Jae

Department of Industrial & Systems Engineering Dong-A University

Keywords: Automated Visual Inspection(AVI), AVI Error Distribution, Target Value, Cost Model

Abstract

This paper deals with problem of determining process target value under automated visual inspection(AVI) system. Three independent error sources - digitizing error, illumination error, and positional error - which have a close relationship with the performance of the AVI system, are considered. Assuming that digitizing error is uniformly or normally distributed and illumination and positional errors are normally distributed, respectively, the distribution function for the error of measured lengths is derived when the length of a product is measured by the AVI system. Then, Optimal target values under two error models of AVI system are obtained by minimizing the total expected cost function which consists of give away, rework and penalty cost.

To validate two process setting models, AVI system for drinks filling process is made up and test results are discussed.

1. 서론

최근 생산 공정이 자동화되면서 제품의 생산속도는 급속히 증가하고 있고, 이로 인하여 생산공정 중에 제품을 검사하는데 할당되는 시간은 짧아지고 있다. 따라서 수동적인 검사방식으로는 빠른 생산속도에 적응하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황

에서 실시간(real-time)내에 모든 제품을 검사하고, 검사결과를 이용해서 공정을 관리할 수 있는 자동검사방식의 도입에 대한 필요성이 증대되고 있는데, 그 이유로는 높은 수준의 품질을 유지할 수 있다는 점과 비용절감 효과를 기대할 수 있다는 점, 그리고 사람이 검사작업을 수행하기 힘들거나 위험한 상황, 통계적 공정관리(statistical process control;

* 이 논문은 2000학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었음

SPC)나 자동공정관리(automatic process control; APC)체계에서 필요한 데이터를 수집하기가 용이하기 때문이다(정원, 1995).

자동시각을 이용한 연구분야에는 로봇제어, 자동검사, 문자 및 색깔인식 등으로 나눌 수 있으며, 대부분이 흑백화상을 대상으로 한 연구이고, 칼라화상을 대상으로 한 국내 연구는 최근에 이르러서야 소수의 대학 및 기업, G7연구과제로서 수행되었다(이문규와 윤찬균, 1995). 또한 극치점 인식에 대한 알고리즘과 방법의 효율성 비교 및 형상의 매칭(장동식, 1991), 라인스캔 시스템의 구성요소 선택시 고려사항(장동식과 김용덕, 1996), 인라인화의 장애요인이 되는 측정의 정밀도 향상과 통계적 공정관리에 의한 데이터 분석 방법을 제시하고 통합시스템을 구축하여 CIM으로의 접근방법 제시(정원과 정연구, 1995), 형상특징 추출방법 비교 및 CAD자료를 이용한 시스템 접목(김의석과 정무영, 1993), 패턴인식 시스템의 유연 생산 자동화 체계에의 활용방법(위영광 등, 1998), 자동차 제조공정에서의 엔진 및 프레스 공정의 품질 검사 시스템 개발(정원, 1998, 1999)에 관한 연구가 진행되었다.

일반적으로, 생산 공정에서는 제조된 제품 중에서 가능하면 많은 제품들이 설계 품질 규격을 만족하도록 하기 위해서 품질 특성치의 공정 평균이 제품의 규격 하한치보다는 어느 정도 높게, 규격 상한치보다는 낮게 유지되도록 관리한다. 왜냐하면, 품질 특성치가 공정 평균을 중심으로 산포하기 때문이다. 즉, 제품의 품질 특성치는 기계의 작동 조절 장치의 세팅값에 따라서 변화하는데, 주입기의 경우 용기에 담는 내용물의 양을 조절 장치로 조정할 수 있으므로 조절 장치의 세팅값이 공정 평균값이 되며 이 세팅값을 목표

치(target value)라고 하고, 이 세팅값을 경제적으로 결정하는 것을 바로 목표치 결정문제(target value problem)라고 부른다.

Springer(1951)는 품질특성이 감마분포를 따르며 규격 상한과 규격 하한이 정해져 있고 상한을 초과하거나 하한에 미달되는 제품의 생산비용이 일정하다는 가정하에서 공정 평균을 설정하였고, Bettes(1962)는 품질특성이 정규분포를 따르고 분산을 알고 있다는 가정하에서 최적 규격상한과 공정 평균을 동시에 결정하는 문제를 다루었다. 또한, Hunter와 Kartha(1977)는 규격하한만이 존재하며 합격한 제품의 순이익함수는 투입량에 따라 선형적으로 감소하지만 규격에 미달되면 할인시장에 헐값으로 판매하는 경우의 모형을 제시하고 기대이익을 최대화 하는 공정 평균의 설정문제를 연구하였고, Nelson(1979)은 Springer의 해를 구할 수 있는 계산도표를 제시하였으며, Golhar(1987)는 규격 하한이 주어진 경우 규격에 미달하는 제품을 재가공할 경우 기대이익을 최대화 하는 문제를 다루었다.

목표치 결정에 영향을 주는 경제적 요소로는 투입 내용물비, 재가공비, 불량품 출고로 인한 비용 등이 있다. 설계 품질의 규격 하한치가 주어진 공정에서 목표치를 규격 하한보다 높게 설정할수록 합격률은 증가하지만, 합격 판정을 받기 위해 필요한 내용물의 양보다 많은 양이 투입됨으로 손실이 발생한다. 반대로 목표치를 낮게 설정하면 내용물의 과다투입에 따른 손실은 막을 수 있지만 불합격률의 증가로 인하여 재가공비가 많이 들게 된다. 이러한 상황에서 공정평균을 어떻게 설정하는가에 따라서 총비용이 변화하므로 본 논문에서는 자동검사시스템이 가진 기기 고유의 오차 특성을 고려하여 자동검사

환경하에서 검사의 오류를 고려한 총기대비용을 설정하고 이를 최소로 하는 목표치를 설정하는 새로운 모형의 제시와 이의 타당성을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. 공정목표치 설정모형

2.1 자동검사시 고려해야 할 오차요인

자동검사시스템의 경우에 시스템의 성능은 주위의 환경적 요인에 의해서 영향을 받는다. 이런 요인들 중 하드웨어적으로 이미 결정되어 있는 것도 있으며 빛의 밝기, 대비 등과 같이 시스템 설계과정에서 조절이 가능한 요인들도 있다(Galbiati, 1990). 이러한 요인들 중에서 성능에 크게 영향을 미치는 것을 그 크기에 따라 정리하면 화상평면(image plane)의 디지털화로 인한 오차(digitization error), 빛의 밝기나 대비와 같은 조명에 의한 오차(illumination error), 검사하려는 제품의 위치변동으로 인한 오차(positional error), 카메라의 위치변동으로 인한 오차(parallax), 전기적인 잡음(electrical noise)을 들 수 있다(Ho, 1983). 물론 이러한 오차 요인 외에도 검사 대상물의 특성과 환경에 따른 다른 요인들도 있지만 일반적으로 발생할 수 있는 전술된 오차만을 고려하고 그 밖의 다른 오차들은 중점 고려대상에서 제외되고 있다.

본 연구에서는 위에서 열거했던 5가지의 오차요인 중 화상평면의 디지털화로 인한 오차, 조명에 의한 오차, 검사하려는 제품의 위치변동으로 인한 오차 3가지만을 고려하여 관측값에 포함된 오차로서 모형화하였으며, Griffin과 Villalobos(1992)는 이 3가지 오차

요인이 다른 오차요인에 비해서 상대적으로 시스템의 성능에 영향을 끼치는 정도가 매우 크다고 하였다. 즉, 세 가지 오차요인이 정규분포를 따른다고 가정한 경우에 실제값 X 는 평균이 T 이고 분산이 σ_x^2 인 정규분포($X \sim N(T, \sigma_x^2)$)를 따르고 검사과정을 거친 측정값 Y 의 분포는 $X=x$ 인 조건부확률분포로서 평균이 x 이고 분산이 σ_y^2 인 정규분포($Y|_{X=x} \sim N(x, \sigma_y^2)$)를 따르며, X 와 Y 의 결합확률밀도함수 $h(x, y)$ 는 $f_X(x)$ 와 $g(y|x)$ 으로부터 구할 수 있다. 즉 X 의 확률밀도함수는 식 (1)과 같고, $Y|_{X=x}$ 의 조건부 확률밀도함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \quad (1)$$

$$g(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-x}{\sigma_y}\right)^2} \quad (2)$$

오차요인 중 디지털화로 인한 오차는 일양분포($\epsilon_1 \sim U(-s, s)$), 조명과 위치이동으로 인한 오차($\epsilon_2 \sim N(0, \sigma_1^2)$, $\epsilon_3 \sim N(0, \sigma_2^2)$)는 정규분포를 따르는 것으로 가정할 경우에 측정값 Y 는 중합정리(convolution theorem)를 이용하여 정규분포와 일양분포의 결합분포로 나타낼 수 있으므로 $Y|_{X=x}$ 의 조건부 확률밀도함수는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} g(y|x) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(y-z, z) dz \\ &= \int_{y-s}^{y+s} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{(z-x)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot \frac{1}{2s} dz \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2s} \cdot B \quad (3)$$

단, s : 화소의 크기

Φ : 표준정규분포의 누적분포함수

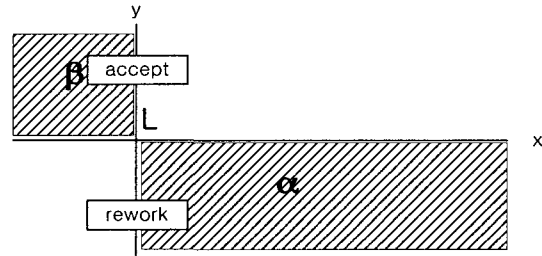
$$z = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (\sim N(0, \sigma_z^2)), \quad \sigma_z^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

$$B = \Phi\left(\frac{y+s-x}{\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{y-s-x}{\sigma_z}\right)$$

2.2 검사오차를 고려한 목표치 설정 모형

검사 대상물이 자동검사과정을 거쳐 양·불량을 판정받게 되는데, 이 과정에서 2가지 형태의 오류가 발생하게 된다. 검사과정을 거친 제품이 양품인데 불량품이라고 판정하는 생산자 위험(Type I error)과 불량품인 경우에 양품으로 판정하는 소비자 위험(Type II error)이 발생한다(Tang and Schneider, 1987). 즉, 생산자 위험의 경우는 판매를 할 수 있는 제품을 불량이라고 판정하여 필요없는 재가공에 따른 재가공 비용이 발생하며, 소비자 위험의 경우는 불량품을 양품으로 판정함으로 소비자가 불량품을 구매하여 야기되는 불량품 판매로 인한 비용이 발생하게 된다.

본 논문에서는 <그림 1>과 같이 목표치 모형에서 일반적인 규격하한(L)만이 존재하는 경우를 고려하여 측정값 y 가 규격하한보다 큰 경우에는 합격으로 판정하고, 작은 경우에는 불량으로 판정하여 재가공을 하고, 재가공을 한 경우 완벽한 작업을 한 경우와 원래의 작업이 반복되는 경우를 생각할 수 있는데 여기서는 완벽한 작업을 한 경우로 한정하였다.



<그림 1> 제시된 모형에서의 재작업 및 채택영역

이러한 상황에서 생산자 위험율(α)은 식 (4)와 같이 표현되며, 소비자 위험율(β)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \int_{-\infty}^L \int_L^{\infty} h(x, y) dx dy \quad (4)$$

$$\beta = \int_L^{\infty} \int_{-\infty}^L h(x, y) dx dy \quad (5)$$

본 연구에서는 상기 상황에서 관련 발생 비용을 고려한 모형을 수립하고 이 총기대비용을 최소로 하는 공정의 평균을 설정하고자 한다. 총기대비용을 구성하는 세부항목으로는 검사판정기준에 합격하면서 규격하한 이상으로 내용물이 투입되어 발생하는 과다투입비용(give-away cost, $C_1(T)$)과 불량품으로 판정한 경우, 즉 양품을 불량품으로 판정한 경우와 불량품을 불량으로 판정한 경우에 발생하는 재가공비용(rework cost, $C_2(T)$), 불량품 출하시에 발생하는 소비자 불만을 보상하는데 드는 불량품 판매로 인한 비용(penalty cost, $C_3(T)$)으로 구성되어 있으며, 규격하한만을 고려한 경우의 과다투입비용은 식 (6), 재가공비용은 식 (7), 불량품 판매로 인한 비용은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_1(T) = c_a \int_L^\infty \int_L^\infty (x-L)h(x, y)dx dy \quad (6)$$

$$C_2(T) = c_r \int_{-\infty}^L \int_{-\infty}^\infty h(x, y)dx dy \quad (7)$$

$$C_3(T) = c_p \int_L^\infty \int_{-\infty}^L h(x, y)dx dy \quad (8)$$

식 (6)의 c_a 는 투입 내용물의 단위당 비용, 식 (7)의 c_r 은 제품 단위당 재가공비용, 식 (8)의 c_p 는 제품 단위당 불량품 판매로 인한 비용을 나타내며 제품의 종류, 특성에 따라서 이러한 단위비용이 결정된다. 그리고 재가공시 완벽한 작업이 가능한 경우에 총기대비용($C(T)$)은 위의 3가지 비용의 합으로 나타낼 수 있으므로 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} C(T) = & c_a \int_L^\infty \int_L^\infty (x-L)h(x, y)dx dy \\ & + c_r \int_{-\infty}^L \int_{-\infty}^\infty h(x, y)dx dy \\ & + c_p \int_L^\infty \int_{-\infty}^L h(x, y)dx dy \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 자동검사환경하에서의 목표치 설정 모형

본 연구의 모형과 실험에서 채택하고 있는 기본적인 가정으로 자동검사체계에서 발생하는 디지털화로 인한 오차(ϵ_1), 조명에 의한 오차(ϵ_2), 제품의 위치 변동에 의한 오차(ϵ_3)의 분포로서 정규분포 또는 일양분포로 설정하고자 한다. 그리고, 본 논문에서 실험의 대상은 음료수를 비롯한 액체와 고체를 충전하는 공정으로서 검사대상 항목은 충전된 내용물의 길이가 되므로, y 축(수직축)에 대한 것만을 고려하였다.

디지털화로 인한 오차값의 경우에 Ho (1983)는 일양분포를 가정하고 있으며 이를 실험을 통하여 모형의 타당성을 입증하고 있으므로, 본 연구에서는 조명에 의한 오차를 일양분포와 수학적 처리가 용이한 정규분포 두 가지를 가정하여 두 경우의 목표치 모형을 설정하고 실험장치를 구성한 후 실험자료를 획득하여 가정된 오차 모형의 타당성에 대하여 검증하고자 한다.

자동검사시스템에서 길이를 측정하는 경우에 이전의 연구에서는 각 화소의 크기에 따른 오차 모형을 이용하여 실험을 행하고 있는데, 본 연구에서는 각 화소의 오차에 대한 고려가 아니라 전체 길이에 대한 측정에서 발생하는 오차를 검사오차로 모형화하고자 하므로 개개의 화소에서 발생하는 오차를 길이에서 발생하는 오차로 통합하였다. Y 는 검사과정을 거친 측정값으로 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = X + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (10)$$

여기서 $X(X \sim N(T, \sigma_x^2))$ 는 실제값으로 평균이 T 이고 분산이 σ_x^2 인 정규분포를 따른다.

즉, 본 연구에서는 위의 식 (10)을 이용하여 모든 오차항이 정규분포를 따르는 경우와 정규분포와 일양분포의 결합인 경우를 대상으로 재가공시 완벽한 가공이 가능할 때의 비용 모형을 구축하고 총기대비용을 최소화하는 공정의 목표치를 설정하고자 한다.

2.3.1 모든 오차항이 정규분포인 경우(모형 I)

각 오차항 ϵ_i 가 $N(0, \sigma_i^2)(i=1,2,3)$ 이므로 식 (10)의 측정값 Y 의 분포는 $X = x$ 인

조건부확률분포의 경우에 평균이 x 이고 분산이 $\sigma_y^2 (= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)$ 인 정규분포를 따르며, X 와 Y 의 결합확률밀도함수 $h(x, y)$ 는 식 (11)과 같다.

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left\{\frac{(x-T)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-x)^2}{\sigma_y^2}\right\}} \quad (11)$$

위의 식 (11)에서 나타난 σ_x, σ_y 는 과거의 자료 또는 실험을 통해서 값을 추정할 수 있으며, 생산자 위험율과 소비자 위험율의 계산시에 중적분 형태가 포함되어 있으므로 계산식을 단순화시키기 위해서 X 와 Y 의 결합확률밀도함수 $h(x, y)$ 를 측정값 Y 의 확률밀도함수 $f_Y(y)$ 와 X 의 $Y=y$ 인 조건부 확률밀도함수 $g(x|y)$ 의 곱으로 표현하면 $f_Y(y)$ 와 $g(x|y)$ 를 식 (12)와 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{ab}}{2\pi} e^{-\frac{b(y-x)^2}{2} - \frac{a(x-T)^2}{2}} dx = \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{(y-T)^2}{1/a+1/b}}}{[2\pi(1/a+1/b)]^{1/2}} \quad (12)$$

$$g(x|y) = \frac{h(x, y)}{f_Y(y)} = \left[\frac{a+b}{2\pi}\right]^{1/2} e^{-\frac{1}{2}(a+b)(x-A)^2} \quad (13)$$

단, $a=1/\sigma_x^2$, $b=1/\sigma_y^2$

$$A = (by+aT)/(a+b)$$

즉, 측정값 Y 의 확률밀도함수 $f_Y(y)$ 는

평균이 T 이고 분산이 $1/a+1/b$ 인 정규분포를 따르며($Y \sim N(T, 1/a+1/b)$) $Y=y$ 인 X 의 조건부 확률밀도함수 $g(x|y)$ 는 평균이 $\frac{y/a+T/b}{1/a+1/b}$ 이고 분산이 $\frac{1}{a+b}$ 인 정규분포($X|_{Y=y} \sim N\left(\frac{y/a+T/b}{1/a+1/b}, \frac{1}{a+b}\right)$)를 따른다.

식 (12)와 식 (13)을 이용하여 생산자 위험율과 소비자 위험율을 계산하면 아래와 같이 식 (14)와 식 (15)로 나타낼 수 있다.

식 (12)와 식 (13)을 이용하여 생산자 위험율과 소비자 위험율을 계산하면 아래와 같이 식 (14)와 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \int_{-\infty}^L \int_L^{\infty} h(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^L f_Y(y) \Phi[\sqrt{a+b}(A-L)] dy \quad (14)$$

$$\beta = \int_L^{\infty} \int_{-\infty}^L h(x, y) dx dy = \int_L^{\infty} f_Y(y) \Phi[\sqrt{a+b}(L-A)] dy \quad (15)$$

본 연구에서는 재가공시 완벽한 작업이 됨을 가정하고 있으므로 총기대비용($C(T)$)은 과다투입비, 재가공 비용, 불량품 판매로 인한 손실 비용의 합으로 표현되므로 각각의 비용 요소들은 다음과 같은 식 (16) ~ 식 (18)로 나타낼 수 있으며 이는 식 (6) ~ 식 (8)로부터 계산된 것이다.

(i) 과다투입비

제조 공정에서 재료 혹은 용액이 규격하한보다 많이 투입되어 발생하는 비용으로서 즉 이것은 제품에 내용물이 과잉 투입되므로서 생산자에게 부과되는 손실비용이다.

$$C_1(T) = c_a \int_L^{\infty} \int_L^{\infty} (x-L)h(x, y) dx dy$$

$$= c_a \int_L^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{a+b}} \phi\left(\frac{L-A}{1/\sqrt{a+b}}\right) + (A-L) \Phi\left(\frac{A-L}{1/\sqrt{a+b}}\right) \right] f_Y(y) dy \quad (16)$$

(ii) 재가공비

제조공정을 통하여 생산된 제품은 검사공정을 거치면서 양·불량의 판정을 받게 되므로 다음 두 가지 경우의 재가공이 발생할 수 있다. 즉, 실제 제조공정을 거쳐 나온 제품이 규격하한에 미치지 못하여 검사공정에서 불량으로 판정받게 되는 경우와 제조 공정을 통하여 생산된 제품이 규격하한을 초과하는 양품인데 검사공정에서 검사기기의 오차요인으로 인해 불량으로 판정한 경우 재가공을 하게 되는데 이 때 발생하는 비용은 다음과 같다.

$$C_2(T) = c_r \int_{-\infty}^L \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dx dy \\ = c_r \Phi\left(\frac{L-T}{\sqrt{1/a+1/b}}\right) \quad (17)$$

(iii) 불량품 판매로 인한 비용

제조 공정을 통하여 생산된 제품이 규격하한에 미치지 못하는 불량인데 이 제품이 검사 공정을 거치면서 검사기기의 오차요인에 의해 양품이라는 판정을 받아 시장에 출하될 때 소비자 클레임이 발생하게 되는데 이때의 생산자가 입게되는 손실비용을 의미한다.

$$C_3(T) = c_p \int_L^{\infty} \int_{-\infty}^L h(x, y) dx dy \\ = c_p \int_L^{\infty} f_Y(y) \Phi[\sqrt{a+b}(L-A)] dy \quad (18)$$

따라서 총기대비용은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(T) = C_1(T) + C_2(T) + C_3(T) \quad (19)$$

위의 식 (19)의 총기대비용을 최소로 하는 목표치를 설정하기 위해서는 품질특성치의 분산과 검사 과정에서의 측정오차의 분산이 알려져 있거나 과거의 경험이나 실험을 통하여 사전 파악되어야 한다.

그리고 제품의 종류와 특성에 따라서 단위 비용요소(c_a, c_r, c_p)의 값이 정해지면 총기대비용은 표준정규누적분포가 포함된 적분구조이므로 해석적인 방법으로는 풀 수가 없다. 여기서는 FORTRAN의 IMSL을 이용하여 수치적분하며, 'golden section search and parabolic interpolation'을 이용하여 최적 목표치 T^* 를 구하였다(Forsythe, et al., 1977).

2.3.2 정규분포와 일양분포의 결합인 경우 (모형 II)

모든 오차요인 중 디지털화로 인한 오차요인을 일양분포로 가정하고 나머지 조명과 위치 이동에 의한 오차를 정규분포로 가정한 경우(즉, $\epsilon_2 \sim N(0, \sigma_1^2)$, $\epsilon_3 \sim N(0, \sigma_2^2)$), 측정값 Y 의 분포는 정규분포와 일양분포의 결합분포로서 나타낼 수 있다. 즉 실제값 X 의 분포는 모형 I과 동일하게 평균 T 이고 분산이 σ_x^2 인 정규분포를 따르므로 식 (1)과 같으며, 측정값 Y 는 정규분포와 일양분포의 결합분포로서 식 (3)과 같고, X 와 Y 의 결합확률밀도함수 $h(x, y)$ 는 식 (20)이 된다.

$$h(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B \quad (20)$$

여기서 $\sigma_z^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ 이며 생산자 위험율과

소비자 위험율은 전절과 같이 식 (4)과 식 (5)를 이용하여 계산하면 식 (21)과 식 (22)로 표현된다.

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_{-\infty}^L \int_L^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy \quad (21)$$

$$\beta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_L^{\infty} \int_{-\infty}^L e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy \quad (22)$$

모형 II의 비용 모형은 식 (16) ~ 식 (18)과 유사하게 식 (23) ~ 식 (25)로 나타낼 수 있다.

(i) 과다투입비

$$C_1(T) = c_a \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_L^{\infty} \int_L^{\infty} x \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy - c_a L \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_L^{\infty} \int_L^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy \quad (23)$$

(ii) 재가공비

$$C_2(T) = c_r \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_{-\infty}^L \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy \quad (24)$$

(iii) 불량품 판매로 인한 비용

$$C_3(T) = c_p \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x \cdot s} \int_L^{\infty} \int_{-\infty}^L e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-T}{\sigma_x}\right)^2} \cdot B dx dy \quad (25)$$

총기대비용은 이들 3가지 비용의 합으로 구성되므로 식 (19)와 같이 표현할 수 있다. 이 경우 총기대비용을 구성하는 것이 표준정규확률밀도함수와 표준정규누적분포함수의 곱의 형태를 가진 중적분구조이기 때문에 해석적인 방법으로는 풀 수 없으므로 여기서는 다차원 적분구조를 가지고 있는 함수를 적분하는 컴퓨터알고리즘과 모형 I의 최적화방법을 이용하였다.

대상 공정은 내용물을 용기에 담아 포장하여 제품을 생산하는 공정이며 길이 단위당 내용물 비용은 10원이고 이 제품은 적어도 100mm 이상을 용기에 담아야 시장에 출하될 수 있다. 본 공정에서는 모든 제품이 자동검사를 통하여 전수 검사하여 합격된 제품만을 시장에 출하하며 100mm 미만으로 판정된 불량품 제품은 재충전을 위하여 충전 공정으로 보낸다. 이 경우의 재가공비는 100원이며 불량품판매로 인한 손실은 제품 1개당 1,000원이고, 용액 충전 공정과 자동검사 공정의 분산은 각각 0.5, 0.4이다.

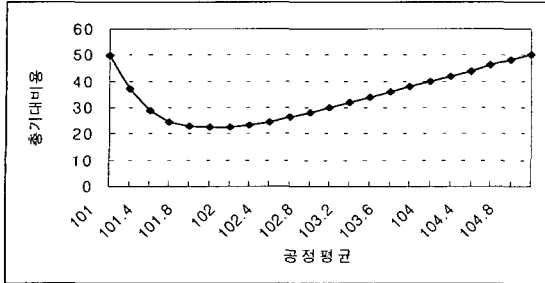
전절에서 제시한 절차에 따라서 모형 I에 적용하여 최적 공정 평균과 이 때의 최소 총기대비용, 개개의 요소 비용과 생산자 및 소비자 위험율을 구하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 수치예의 출력치 : 모형 I

T^*	$C(T)$	$C_1(T)$	$C_2(T)$	$C_3(T)$	α	β
101.93	22.43	19.14	2.10	1.19	1.90%	0.12%

위에서 구한 공정 평균이 총기대비용을 최소로 하는 것임을 입증하기 위하여 공정 평균의 변화에 대하여 도시하면 <그림 2>와 같으므로 수치해석적으로 설정된 T^* 가 비용을 최소로 하는 최적값임을 파악할 수 있다. 또한 검사오차를 고려하지 않은 기존의 모형($c_p = 0, \alpha = \beta = 0$ 인 경우)보다는 공정평균이 0.34만큼 더 높은 값을 가지며 총기대비용은 0.11만큼 더 발생되지만 거의 차이가 없다.

3. 수치예



<그림 2> 총기대비용 곡선 : 모형 I

동일한 공정을 대상으로 모형II에 적용할 경우, 조명에 의한 오차와 제품의 위치변동으로 인한 오차의 합인 분산은 0.32이고 수직축 한 화소의 크기는 0.5mm일 경우에 모형 II에 적용하여 최적 공정 평균과 이 때의 최소 총기대비용, 개개의 요소 비용과 생산자 및 소비자 위험율을 구한 결과값을 <표 2>와 같이 정리할 수 있다.

<표 2> 수치예의 출력치 : 모형 II

T^*	$\alpha(T)$	$C_1(T)$	$C_2(T)$	$C_3(T)$	α	β
101.94	22.47	19.28	2.05	1.14	1.86%	0.11%

또한 전술된 공정 평균이 총기대비용을 최소로 하는 것임을 파악하기 위하여 공정 평균의 변화에 대하여 총기대비용의 변화를 모형 I과 같은 방법으로 확인한 결과, 수치해석적으로 설정된 T^* 가 비용을 최소로 하는 최적값임을 파악할 수 있었다. 그리고 검사 오차를 고려하지 않은 기존의 모형보다 공정 평균이 0.34만큼 더 높은 값을 가지며 총기대비용은 2.08만큼 더 많이 발생되지만 큰 차이가 아니다.

3.1 민감도 분석

공정 평균 목표치가 총비용을 구성하는 과다투입비, 재가공비, 불량품 출하로 인한 손실비용 계수와 대상 공정과 자동검사공정의 분산에 따라 어떻게 변화하는지를 파악하기 위해 수치 실험을 실시하였다.

<표 3> 비용 계수 변화에 따른 공정 평균의 변화 ($\sigma_x^2 = 1$, $\sigma_y^2 = 1$)

c_r/c_a \ c_p/c_a	1	3	5	10
20	1.49	1.70	1.89	2.23
30	1.73	1.89	2.02	2.31
50	2.00	2.11	2.20	2.41
100	2.32	2.39	2.45	2.59

모형 I의 경우에 비용 계수 및 대상 공정의 분산(σ_x^2)과 검사공정의 분산(σ_y^2)에 따른 공정 평균의 변화에 대한 민감도 분석 결과 중 $d(=(T-L)/\sigma_x)$ 값을 <표 3>과 <표 4>에 정리하였으며, 여기서 d 는 충전 공정의 공정 평균에서 규격하한을 뺀 값에 대상 공정의 표준편차를 나눈 값을 의미한다.

<표 3>의 결과를 보면 비용요소의 비가 클수록 즉, c_p 와 c_r 이 증가할수록 공정평균이 규격하한에서 멀어짐을 파악하였는데 이것은 불량품 출하로 인한 손실비용이 다른 두 가지 비용에 비하여 상대적으로 크기 때문이다.

또한 <표 4>에서 대상 충전 공정의 분산이 작아지거나 자동검사시스템의 분산과 대상 충전 공정 분산의 비가 커질수록 d 값이 커짐을 알 수 있으며, 실질적으로 σ_x^2 와

σ_y^2/σ_x^2 이 커질수록 공정 평균은 규격하한으로부터 멀어지고 있었다.

<표 4> σ_x^2 과 σ_y^2 의 변화에 따른 공정 평균의 변화($c_a = 1, c_r = 10, c_p = 100$)

$\sigma_y^2/\sigma_x^2 \backslash \sigma_x^2$	1	2	3	4
0.3	2.41	2.24	2.13	2.05
0.5	2.48	2.31	2.20	2.12
0.7	2.53	2.35	2.24	2.16
1.0	2.59	2.40	2.29	2.20

모형 II의 경우는 모형 I의 경우보다 공정 평균은 조금 높은 값을 가지지만 유사한 형태를 나타내고 있으며, 화소의 크기(s)를 크게 설정하면 공정평균이 규격하한으로부터 멀어지지만 충전 공정 및 자동검사공정의 오차분산이 커질수록 화소의 크기에 따른 공정 평균에 대한 영향은 크지 않음을 파악하였다.

4. 실험 및 결과 분석

본 연구에서 구축된 자동시각검사 시스템은 CCD 카메라, DSP 화상 처리보드 및 586 컴퓨터로 구성되어 있고, 2 CCD 카메라의 유효 화소수는 768(H)×494(V)이며 활성 영역은 4.8(H)mm×3.6(V)mm이다. DSP 화상처리 보드의 프로세서는 32 MHz의 속도를 가지며 640(H)×480(V)의 이미지 크기를 갖는다. 시스템의 사양을 기초로 해상도를 체크할 경우에 $uz = fx$ 라는 비례 관계식을 이용할 수 있다(Haralick and Shapiro, 1992).

카메라의 활성 영역과 화상 처리 보드의 이미지 크기로부터 $u = 4.8/640 = 0.0075$ mm이며 렌즈의 초점거리(f)는 6mm이고 화상처리 대상의 최소 크기(x)는 0.5mm이므로 대상 물체와의 최대 거리(z)는 350mm가 된다.

<표 5> 실험개요

고 려 사 항	조건	내 용
화소의크기	고정	0.5 mm
조명의방식	고정	산란광
검사제품	변화	명암도 차이(30,41,57)
조명의밝기	변화	조도(70,150,230(lux))
검사물과의 거리	고정	350 mm
렌즈의종류	고정	6 mm
내용물의 용량	변화	길이(60,80,100(mm))

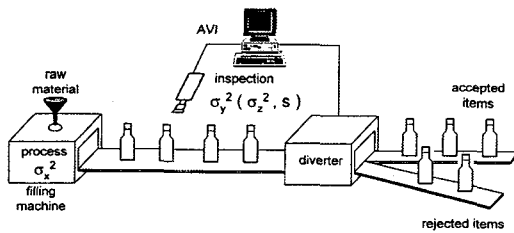
본 연구에서 대상으로 삼은 물체는 유리제품의 음료수 병으로서 주요 측정치는 내용물의 양을 길이로 환산하였을 때 내용물의 높이 즉 내용물의 아랫부분 시작에서 윗부분 내용물의 끝이 추정하는 값이므로 2차원 평면상에서 x 축에 대한 고려는 하지 않고 y 축에 대한 측정만을 실시하였다. 검사물체는 x 축과 평행한 위치에 있도록 설정하며, 발생 오차의 모형화시 x 축에 대한 오차는 무시하였다. 화소의 크기는 0.5mm로 설정하고 이 때의 카메라와 검사대상물의 거리를 350mm로 고정하였으며, 조명은 실험 대상물의 특성에 따라서 방식을 정해야 하는데 여기서는 산란광을 이용하여 실험하였다.

또한 2절의 세 가지 오차중 제품의 위치변동으로 인한 오차는 현재 실험장치로 구현하기가 곤란하므로 제외하였다. 실험에서 고려

하는 사항에 대한 조건들을 정리하면 <표 5>와 같이 나타낼 수 있다.

4.1 실험의 구성

본 실험에서 데이터를 얻기 위해서 먼저 CCD 카메라를 통해서 화상을 획득하고 획득한 화상으로부터 필요한 정보, 즉 용기에서 용액의 시작선과 끝선을 찾기 위해서 화상 예리화 과정을 거치는데 이 때 사용한 연산자는 소벨 연산자(Sobel operator)로서, 이것은 차분(differencing) 효과와 평활화 효과를 동시에 만족시킨다는 장점을 가지고 있다(김희승, 1993). 예리화된 화상에서 임계치를 기준으로 경계선을 추출하는데 이 때 사용하는 임계치는 사전정보로서 히스토그램을 이용하여 설정하고 이 임계치를 기준으로 화상을 이진화하여 용액의 시작선과 끝선의 정보를 획득하며(Haralick and Shapiro, 1992), 획득된 정보를 이용하여 검사 대상물의 양·불량을 판정한다. 판정기준은 미리 규정된 값으로서 앞의 경우에서 사용한 규격하한이 판정기준이 되며 구축된 시스템의 개략도는 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 자동검사시스템을 채택한 충전공정

4.2 모형의 적합도 검정과 분석

모형의 타당성 검증을 위하여 분산의 추정

과 모형의 적합도 검정 과정을 거치게 되는데 전술된 실험조건에 따른 실험을 통하여 50개의 데이터를 획득하였으며 제시한 모형의 분포와 실험을 통해 측정된 자료의 분포에 대하여 χ^2 -적합도 검정을 실시하였다.

모형 I의 경우 최우추정법(method of maximum likelihood)으로 구한 디지털화로 인한 오차와 조명에 의한 오차 합의 분산

$$(\hat{\sigma}_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - x)^2}{n} = 0.165)$$

을 이용하여 유의수준 5%에서 검정을 실시한 결과 가정한 분포와 적합하다고 판2단되었다.

또한 모형 II의 경우도 적률추정법(method of moment)에 의해 추정된 조명에 의한 오

$$\text{차의 분산값} (\hat{\sigma}_z^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - x)^2}{n} - \frac{(2s)^2}{12}$$

$= 0.08167)$ 을 이용하여 유의수준 5%에서 검정한 결과 가정한 분포와 적합하지 않는다고 판단할 증거가 부족하였다.

4.3 공정 평균 목표치의 설정

음료수 제조공장에서 음료수를 용기에 담아 포장하여 제품을 생산하는 공정이 대상공정이 되는데, 길이 단위당 투입음료 비용은 5원이고 이 제품은 적어도 50mm 이상을 용기에 담아야 시장에 출하될 수 있다. 이 공정에서는 모든 제품이 자동시각검사방식을 통하여 전수 검사하여 합격된 제품만을 시장에 출하하며 50mm 미만으로 판정된 불량품 제품은 다시 충전 공정으로 보낸다. 이 때, 재가공비는 500원이고, 용액 충전 공정의 분산은 1.0이고 수직축 한 화소의 크기는 0.5mm이다. 불량품 출하로 인하여 소비자불만이 발생하였을 경우는 2000원을 보상한다. 그리고 검사공정의 전체 오차에 대한 분산과

조명에 의한 오차 분산값을 전술된 실험을 통해서 추정된 값을 사용하여 본 상황에 적용하였다.

모형 I ($\sigma_y^2 = 0.165$)을 적용하면 공정목표치와 총기대비용은 각각 53.085와 17.072이며, 모형 II ($\sigma_z^2 = 0.08167$)를 적용하면 공정목표치와 총기대비용은 각각 53.103과 17.074로 거의 차이가 없지만 모형 II에서 디지털화로 인한 오차가 일양분포를 따르므로 두 값이 모두 조금 높음을 알 수 있다.

5. 결론

자동화된 생산 공정에서는 실시간내에 제품을 검사하고 이 결과를 이용하여 공정을 관리할 수 있는 자동검사방식의 도입에 대한 필요성이 더욱 더 증가하고 있는 실정이며 관련 컴퓨터산업의 발달에 기인하여 자동검사방식의 도입 효과는 증대되고 있다. 또한 이러한 자동화된 생산 공정하에서는 생산 제품중에서 거의 모든 제품들이 설계 품질 규격을 경제적으로 만족하도록 하기 위해서 품질 특성치의 공정 평균값을 설정해야 한다.

본 논문에서는 이런 자동검사방식중에서 컴퓨터비전을 이용한 환경하에서 검사기기의 오차요인(디지털화로 인한 오차, 조명에 의한 오차, 검사 대상물의 위치 이동으로 인한 오차)을 고려하여 충전공정의 공정목표치를 경제적으로 설정하는 두 가지 모형을 제시하고 이러한 경우 최적 공정목표치를 구할 수 있도록 전산프로그램을 작성하였다. 즉, 검사공정에 전술된 세 종류의 오차가 존재하는 경우에 이러한 오차요인들이 수치해석적으로 계산 정확도가 떨어지는 중적분형태를 피할

수 있는 정규분포를 따르는 오차모형과 컴퓨터비전을 이용한 자동검사체계의 기존 연구에서 실증적으로 규명된 정규분포와 일양분포를 따르는 오차모형을 제시하고 이를 이용한 목표치 설정 모형을 수립하였다. 또한 제시된 모형을 예증하기 위해 수치예에 적용하였으며 이를 대상으로 비용요소와 분산의 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 그리고, 음료수 충전 공정에 적용 가능한 자동검사장치를 구성하고 이를 이용한 실험을 통하여 획득한 실제 측정치의 분포가 가정한 분포에 적합하는지를 적합도 검정을 통하여 확인하였다.

그런데 본 연구에서 고려한 두 가지 모형에서 가정한 분포가 실험을 통하여 분석한 결과 통계학적으로 분포적합도가 극히 높지는 않았는데 이것은 실험을 통하여 획득한 자료가 가지는 값의 종류가 많지 않았고 3차원 대상물의 처리를 2차원 방식으로 실험함으로써 인하여 깊이 정보의 상실과 실험이 가지고 있는 고유한 한계에 의한 것으로 판단되므로 이를 해결하기 위한 후속 연구가 요망된다.

참고문헌

- [1] 김의석, 정무영(1993), “단일영상정보를 이용한 FMS용 부품인식시스템”, 「대한산업공학회지」, 19권, 4호, pp. 23-40.
- [2] 김희승(1993), 「영상인식」, 도서출판 생능, pp. 27-30.
- [3] 위영량, 김문화, 장동식(1998), “유연 생산 자동화를 위한 Robust 패턴인식 시스템”, 「대한산업공학회지」, 24권, 2호, pp. 223-240.

- [4] 이문규, 윤찬균(1995), “역전과 신경망을 이용한 케이블의 색깔 인식”, 「산업공학 Interfaces」, 8권, 1호, pp. 5-13.
- [5] 장동식(1991), “자동검사 시스템을 위한 컴퓨터 비전의 연구”, 「산업공학 Interfaces」, 4권, 2호, pp. 43-51.
- [6] 장동식, 김용덕(1996), “실시간 자동 검사를 위한 라인 스캔 컴퓨터 비전 시스템의 연구”, 「산업공학 Interfaces」, 9권, 1호, pp. 73-82.
- [7] 정 원(1995), “자동시간검사에 의한 통계적 공정관리 시스템”, 「산업공학 Interfaces」, 8권, 4호, pp. 99-107.
- [8] 정 원, 정연구(1995), “전자부품의 품질향상을 위한 인라인 자동검사시스템”, 「품질경영학회지」, 23권, 3호, pp. 33-44.
- [9] 정 원, 신현명(1998), “영상처리기법에 의한 실시간 엔진 품질검사시스템”, 「대한산업공학회지」, 24권, 3호, pp. 397-406.
- [10] 정 원(1999), “자동차 프레스공정의 자동검사/계측시스템”, 「한국경영과학회지」, 16권, 2호, pp. 79-92.
- [11] Bettes, D. C.(1962), “Finding an Optimum Target Value in Relation to a Fixed Lower Limit and an Arbitrary Upper Limit”, *Applied Statistics*, Vol. 11, No. 2, pp. 202-210.
- [12] Forsythe, G. E., Malcolm, M. A. and Moler, C. B.(1977), *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall.
- [13] Galbiati, Jr., L. J.(1990), *Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals*, Prentice-Hall, pp. 39-47.
- [14] Golhar, D. Y.(1987), “Determination of the Best Mean Contents for a Canning Problem”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 82-84.
- [15] Griffin, P. M. and Villalobos, J. R.(1992), “Process Capability of Automated Visual Inspection Systems”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 22, No. 3, pp. 441-448.
- [16] Haralick, R. M. and Shapiro, L. G. (1992), *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley.
- [17] Ho, C. S.(1983), “Precision of Digital Vision Systems”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-5, No. 6, pp. 593-601.
- [18] Hunter, W. G. and Kartha, C. P. (1977), “Determining the Most Profitable Target Value for a Production Process”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 176-181.
- [19] Nelson, L. S.(1979), “Nomograph for Setting Process to Minimize Scrap Cost”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 48-49.
- [20] Springer, C. H.(1951), “A Method of Determining the Most Economic Position of a Process Mean”, *Industrial Quality Control*, Vol. 8, No. 1, pp. 36-39.
- [21] Tang, K. and Schneider(1987), H., “The Effects of Inspection Error on a Complete Inspection Plan”, *IIE Transactions*, Vol. 19, No. 4, pp. 421-428.