

머신 비전을 이용한 실시간 링클 측정 시스템 개발

신동근[†] · 토호앙밍* · 고성림**

(2007년 10월 29일 접수, 2008년 1월 31일 심사완료)

Development of On-line Wrinkle Measurement System Using Machine Vision

Dong Keun Shin, Hoang Minh To and Sung Lim Ko

Key Words : Roll to Roll(롤투롤), Wrinkle Measurement(링클 측정)

Abstract

Roll to roll (R2R) manufacturing process, also known as 'web processing', has been tried for producing electronic devices on a flexible plastic or metal foil. To increase the performance and productivity the R2R process, effective control and on-line supervision for web quality becomes very important. Wrinkle is one of the defects, which is incurred due to compressive stresses. A system for on-line measurement of wrinkle is developed using area scan camera and machine vision laser. The 2D image, obtained by area scan camera, is produced by Gaussian regression method to characterize the wrinkle on a transparent web. The experiment proves that 0.3mm wrinkle height can be measured successfully with 74fps.

1. 서론

RFID, Flexible display 와 같이 세계적으로 이슈가 되고 있는 분야에 있어서 문제가 되고 있는 부분 중 하나가 바로 비용적 측면이다. 그런데 이와 같은 전자 부품의 생산에 있어서, R2R 공정을 사용하게 되면 생산단가를 크게 낮출 수 있다. 그러나 현재의 R2R 생산 공정이 기술적으로 만족할 수준이 되지 못하기 때문에, 전자 부품 생산에 어려움이 있을 수 있다.

R2R 생산 공정의 정밀도와 생산성을 더욱 높이기 위한 방법으로 웹의 컨트롤에 디지털 이미지를 이용하는 방법이 연구되고 있다. 이미 많은 비전 시스템이 개발되어 있지만, 대부분 웹 표면의 결함이나 먼지 등의 측정에 한정되어 있고, 링클이나 웹의 진동과 같은 영역의 측정에는 연구개발이 미진한 실정이다.

링클(Fig. 1)은 수 많은 이유로 인해 발생하는 복잡한 현상이고, 또한 같은 이유로 예방하기 매우 어려운 부분이다.⁽¹⁾ 그러므로 R2R 공정에서 링클을 컨트롤 하기 위해서는 링클의 형상 정보를 수집할 수 있는 효과적인 측정 방법이 필요하다.

투명한(본 연구의 경우 80%정도의 투명도)웹에서 발생하는 링클을 측정하는 데에는 큰 어려움이 있다. 레이저 삼각법을 이용하는 경우에는 대부분의 레이저 빔이 웹을 통과하여 측정에 어려움이 있고, R2R 공정은 웹의 속도가 매우 빠르기 때문에(200~1000 mpm) 이 방법의 적용이 극히 제한적이다.

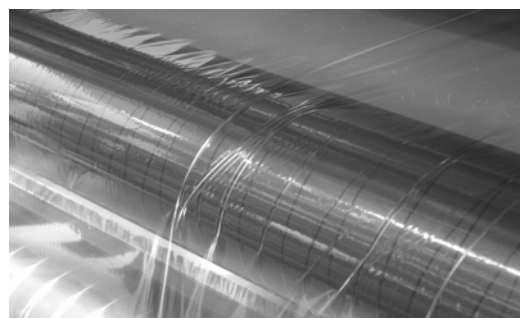


Fig. 1 Wrinkle on a web roller

[†] 책임저자, 회원, 건국대학교 기계설계학과

E-mail : fateful99@naver.com

TEL : (02)2201-3718 FAX : (02)447-5886

* 건국대학교 기계설계학과

** 건국대학교 기계설계학과

라인 스캔 카메라와 front 조명 방식을 이용한 방법에서는 링클의 발생은 감지할 수 있었다. 그러나 실제 링클의 형상 정보와는 차이가 있고, 링클의 높이와 같은 정보는 측정이 불가능하였다.

본 논문의 목적은 새로운 링클 측정 방법을 소개하는데 있다. 2 장에서는 측정 소프트웨어를 포함한 측정 시스템을 설명한다. 3 장에서는 이미지 처리에 대해서 설명하고, 4 장에서는 새로운 시스템을 실험적으로 테스트 하였다.

2. 링클 측정 시스템 개발

2.1 The Experimental Set-up

Fig. 2 는 측정 시스템의 구성을 보여주고 있다. 카메라는 659 x 494 의 해상도와 10 μm 의 픽셀사이즈를 갖는 Basler Scout sc3640-74gm 가 사용되었다. 카메라는 최대 해상도에서 초당 79 프레임레이트를 가지고, 기가 이더넷을 통해 컴퓨터와 연결된다.

레이저는 점이 아닌 선의 형태로 빔을 쏘아 낸다. 레이저 빔은 웹과 만나면 웹의 표면에 빛의 띠를 형성하게 된다. 물론 많은 양의 레이저가 투명한 웹을 통과하여 지나가지만, 웹에 맺히는 레이저의 양이 충분해 측정이 가능하게 된다. 웹 상의 빛의 띠는 링클이 없을 때는 직선으로 나타나고, 링클이 발생하면 링클의 단면을 따라 나타나게 된다 (Fig. 3).

투명한 웹의 배경 부분에는 커버를 만들어 링클의 측정에 필요 없는 정보를 차단 하여 이미지 처리에 유리하게 하였다.

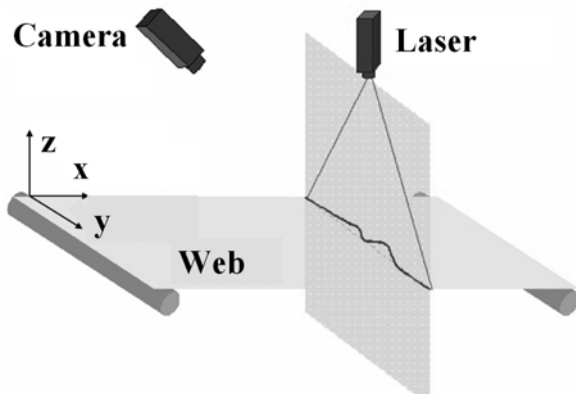


Fig. 2 Layout of the wrinkle measurement system

2.2 System Calibration

보통 좌표 보정 과정은 카메라와 프로젝터 모델의 각개의 장치에 따라 나누어 진행된다. 그러나 본 시스템의 경우 카메라와 레이저 빔은 하나의 세계좌표에 고정되어있기 때문에 DePiero 등⁽²⁾이 제안한 one step procedure를 이용해서 보정할 수 있다. 이 방법은 $z = f(u,v)$ 모델이 사용되는데, 이것은 이미지 좌표 (u, v) 로부터 높이 z 를 구하는 모델이다. 그리고 f 는 실험을 통해 얻는 보정 데이터이다. 예를 들어, f 가 2차 이면, z 는 식 (1)에 의해 계산된다. 이와 비슷한 모델 g 는 y 좌표를 계산하는데 사용된다. 참고문헌[2]에서는 많은 보정 모델들의 포착 속도와 영역 정밀도에 따른 상세한 연구 내용이 보고되어 있다. 본 시스템에서는 f 는 2차 이고 g 는 1차이다. 이것은 식 (1)과 (2)에 나타나 있다.

$$\begin{bmatrix} u^2 & v^2 & uv & u & v & 1 \end{bmatrix} M = z \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} N = y \quad (2)$$

변수 M 과 N 은 교정 장치의 z_i, u_i, v_i 의 요소들을 측정하여 구성된 연립방정식에 의해 정의된다.

식 (3)에 주어진 모델의 보정과정이 Fig. 4 에 나타나 있다. 교정 지그는 그 모서리가 세계좌표의 중심이 되고 윗면이 xy 평면으로 정의되는 플랫폼과 몇 개의 정밀한 판으로 구성된다.

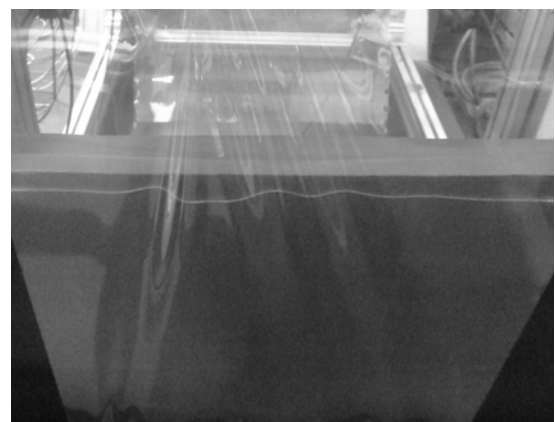


Fig. 3 Image of a laser stripe on the rolling web

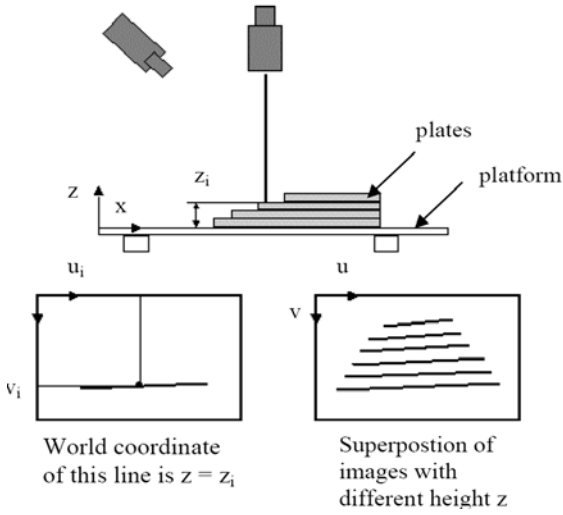


Fig. 4 Calibration of measured height by a series of horizontal plates

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_i \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^2 & v_1^2 & u_1 v_1 & u_1 & v_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_i^2 & v_i^2 & u_i v_i & u_i & v_i & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_n^2 & v_n^2 & u_n v_n & u_n & v_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ \dots \\ m_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

판들은 그림과 같이 층계를 이루고 있어서 각각 다른 높이 z_i 를 가지고 있다. 카메라가 찍은 이미지로부터 (u_i, v_i) 에 따른 z_i 를 얻을 수 있고, 식 (3)으로부터 M 을 계산할 수 있다. $y = g(u, v)$ 모델의 보정 역시 비슷한 방법으로 할 수 있는데, 플랫폼에 슬롯을 만들어 판들을 끼워 놓고 보정을 진행하면 된다. 단 y 의 세계좌표는 3차원 좌표 측정장비(coordinate measuring machine CMM)에 의해 이미 측정되어 있어야 한다.

M 과 N 을 구한 후에는 이미지의 (u, v) 값에 식 (1,2)를 적용해 y 와 z 좌표를 구할 수 있다. 이 두 요소는 롤러의 인코더로부터 얻는 웹의 진행방향 x 의 좌표와 더해져 측정위치의 3D 좌표를 형성하게 된다.

2.3 The Measurement Software

측정 소프트웨어(Fig. 5)는 Visual C++와 Pylon (the Basler's camera interface wrapper)을 이용하여 만들어 졌다. 시스템 성능에 전반적으로 영향을 끼치는 데이터 수집과 이미지 처리 과정에 대해 간단하게 설명하도록 하겠다.

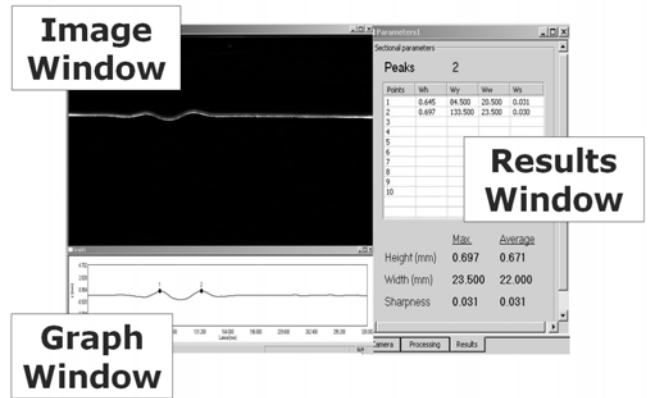


Fig. 5 The measurement software

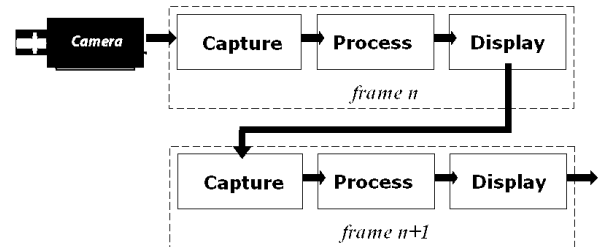


Fig. 6 Single thread processing

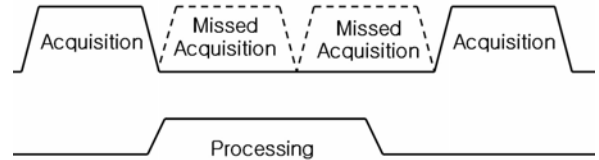


Fig. 7 Acquisition missing of single thread

카메라 회사에서 기본적으로 제공하는 소프트웨어는 싱글 쓰레드로 작동하였다. 싱글 쓰레드란 캡춰한 이미지를 처리하고 디스플레이하는데, Fig. 6 과 같이 ‘Capture(데이터 수집)→Process(이미지 처리)→Display(디스플레이)’를 순서대로 진행하게 된다. 이러한 싱글 쓰레드를 사용하게 되면, 캡춰한 이미지를 처리하고 디스플레이하는 동안에는 다음 프레임을 캡춰하지 못하는 단점이 발생한다. 즉 카메라의 최대 프레임 레이트를 사용하지 못하게 된다는 것이다 (Fig. 7).

그래서 본 프로그램은 데이터 수집(Capture)과 이미지처리에서 오버랩 모드의 멀티 쓰레드로 작동하도록 하였다. 데이터 수집 쓰레드는 카메라 버퍼를 이용 연속적으로 이루어진다. 카메라 버퍼에 이미지가 차게 되면 데이터 수집 쓰레드는

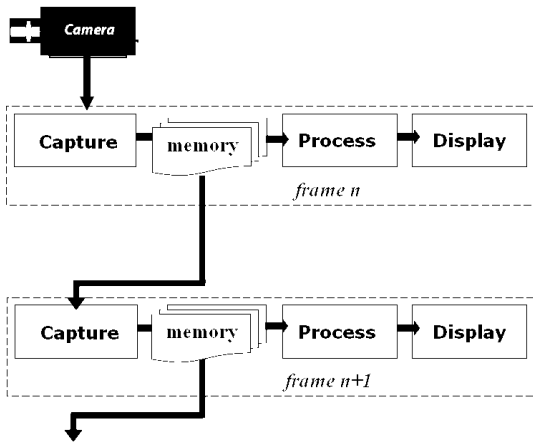


Fig. 8 Multi thread processing

데이터를 이미지 버퍼에 복사하고 이미지 처리를 시작한 후 다시 데이터를 수집하기 시작한다(Fig. 8).

이때 이미지 처리 스레드는 이미지 버퍼에 있는 데이터를 처리한 후 소프트웨어 인터페이스에 처리된 데이터의 디스플레이를 요청한다. 이미지 처리 스레드가 다음 이미지를 기다리고 있는 동안 윈도우의 message handling function 은 요청된 데이터를 출력한다. 스레드 사이에 공유된 버퍼들의 정보의 일치는 Event 와 Critical Section objects 에 의해 보장된다. 이러한 메커니즘에 의해 구동되는 이미지 처리와 디스플레이는 두 개의 연속적인 이미지 사이의 작업을 최소화 한다.

3. 데이터 처리

3.1 Image Processing

edge 감지를 위한 이미지 처리는 장치를 설치할 때 웹의 배경을 차단 하였기 때문에 매우 간단하다. 본 연구에서는 분리 가능한 3x3 행렬의 Sobel 연산자를 적용하였다.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times [1 \ 2 \ 1] = g(x) \times h(y) \quad (4)$$

convolution 은 두 개의 1 차원 행렬 g(x)와 h(y)로 나뉘어 더 빠르게 수행된다. 레이저 라인이 지나가는 부분, 즉 AOI(Area of Interest)에서만 convolution 을 진행하면 계산을 줄일 수 있다. 선명하지 못한 레이저 라인을 가지고 있던 기본

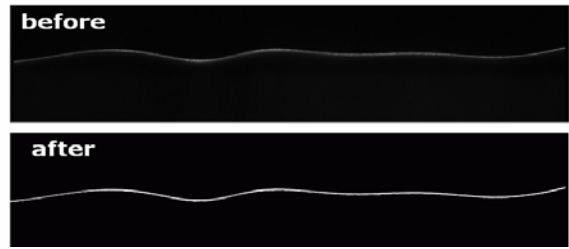


Fig. 9 The image before and after being applied the Sobel operator

이미지는 이미지 처리 후, 더 밝고 선명해져서 histogram-based threshold 으로 이미지를 데이터화하기 유리하다. 결과 이미지는 Fig. 9에 나타나 있다.

3.2 Profile Filtering

추출된 단면의 형상은 웹의 장력에 따라 그 형태가 구분된다. 장력이 높을 때는 웹의 표면은 평면과 같고, 그 단면은 직선의 형태로 간주할 수 있다(물론 링클의 peak 와 valley 는 제외한다). 이때는 단면의 기준선을 직선으로 정의하고, 링클의 높이는 기준선에서부터 peak 까지의 거리로 측정할 수 있다.

일반적으로 링클의 단면 형상은 디지털 이미지의 정밀도 한계 때문에 부드럽지 못한 커브를 그리고 있다. 일반적으로 이러한 경우에 곡률을 보상하기 위한 방법으로 λ_c (작은 곡률)와 λ_r (큰 곡률)를 cutoff 값으로 하는 Gaussian filter(ISO 11562)⁽⁵⁾를 2번 적용한다. 그러나 이 필터는 가장자리에서 뒤틀림을 유발한다. 처음과 마지막 cutoff 길이의 절반이 넘는 양이 가장자리 효과로 인해 왜곡이 일어난다. 30mm의 단면형상에서 λ_r 를 8mm로 했을 때, 각각의 가장자리에서 5mm의 손실이 일어난다. 그러므로 최종 얻게 되는 기준선의 길이는 20mm로 줄게 된다.⁽³⁻⁵⁾

이 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 Brinkmann 등⁽⁷⁾이 제안한 Gaussian regression filter(ISO/TR 16610-10:2000(E))⁽⁶⁾를 적용하였다. 가장자리 효과를 없애기 위한 방법은, Gaussian bell curve 아래를 둘러싼 영역이 항상 1이 되도록 필터의 weighting function을 증가시키는 것이다.

$$s_r(p-i) = \frac{s(p-i)}{\Delta y \cdot \sum_{i=0}^{n-1} s(p-i)} \quad (5)$$

여기서,

$$s(p-i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha\lambda_f}} \exp\left[-0.5 \cdot \left(\frac{(p-i)\Delta y}{\alpha\lambda_f}\right)^2\right] \quad (6)$$

또한, $\alpha = \pi^{-1} \cdot \sqrt{(\ln 2 / 2)}$, λ_f 는 필터의 cutoff 파장, n 은 커브를 이루고 있는 점(pixel)의 수, p 는 커브를 이루고 있는 점들의 색인(위치정보), i 는 weighting function의 위치 색인을 나타낸다.

기준선 $w(p)$ 는 모든 단면을 convolution 해서 계산한다.

$$w(p) = \sum_{i=0}^{n-1} z(i) \cdot s_r(p-i) \cdot \Delta y \quad (7)$$

더 짧은 파장 요소는(링클 포함)다음 공식에 의해 얻는다.

$$r(p) = z(p) - w(p) \quad (8)$$

여기서, $r(p)$ 는 링클 곡선, $z(p)$ 는 단면 곡선, $w(p)$ 는 기준 곡선을 나타낸다.

그러나, 이 필터를 ISO 가이드에 따라 모두 실행하는 것은 실시간 감시에 적용하기에는 너무 느릴 수 있다. 식 (5, 6, 7)로부터 n 점의 기준선을 얻기 위해서는 각 이미지 마다 n^2 번의 지수 함수를 풀어야 한다. 그러므로 카메라가 초당 m 번의 이미지를 전송한다고 한다면 $m \cdot n^2$ 번이 된다. 그러나 사실 weighting function은 이전의 convolution로부터 계산할 수 있다. n 값 대신 $2n - 1$ 값을 weighting function에 적용하고 식 (6) 값을 글로벌 배열로 채운다. 이 값들은 각 단면의 Conv. 함수 실행 식 (5, 7, 8)에 사용된다.

또한 s 의 대칭 조건을 적용하여 지수함수의 계산시간을 줄일 수 있다. 그러나 본 연구의 경우가우스는 프로그램이 실행될 때 딱 한번 불러오는 것이기 때문에 이 방법은 필요치 않다. 간단히 말하면, 모든 단면들에 대해 $2n-1$ 번의 지수함수의 계산만이 필요할 뿐이다. 이것은 convolution algorithm 속도를 매우 빠르게 할 것이다.

Fig. 10은 단면에 필터링을 적용한 예를 보여주고 있다. $\lambda_c = 1.5\text{mm}$ 와 $\lambda_f = 6\text{mm}$ 를 사용하였는데, 작은 cutoff $\lambda_c = 1.5\text{mm}$ 는 시각화의 향상을 위해 단면을 부드럽게 하는 역할을 한다. 단면의 길이가 가장자리 뒤틀림 없이 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

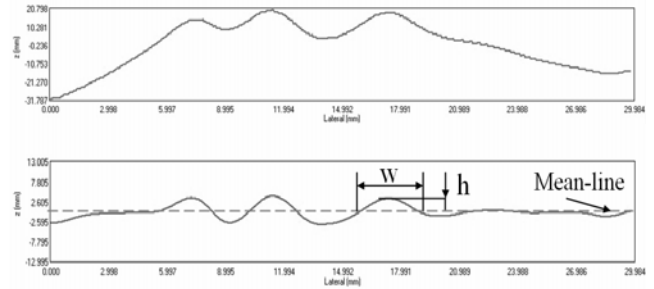


Fig. 10 A profile before and after filtered by the Gaussian regression method

3.3 Wrinkle characterization

링클의 형상을 특정 짓기 위해 몇 가지 변수들을 다음과 같이 제안하였다.

링클의 높이: 기준선으로부터 peak까지의 거리 Wz

링클의 위치: Wy

링클의 밀도: peak의 수: Wd

링클의 경사도: h/w Ws

실제 링클의 측정과 분석결과가 Fig. 11에 나타나 있다. 실험 결과 총 5개의 링클이 감지되었고, 각 링클의 정보는 Table 1에 나타나 있다.

4. 시스템 테스트

측정시스템에서는 Pentium IV 2.4GHz, 2GB RAM with 128MB graphics card의 컴퓨터가 사용되었다. 실험은 카메라의 최대 정밀도에서 초당 프레임을 측정하는 방법으로 진행되었다.

프로그램을 싱글 쓰레드(데이터수집, 이미지처리 그리고 디스플레이를 순서대로)로 실행했을 때는 초당 프레임이 44fps(프레임 생산 속도 22ms)로 줄었다. 그러나 프로그램을 더블 쓰레드(데이터 수집과 이미지처리를 동시에)로 실행했을 때는 초당 최대 프레임인 74fps에 도달하였다. 이것은 이미지 처리 시간이 최대 프레임 생산 속도 12.7ms보다 빠른 6ms이어서 프레임 속도에 영향을 끼치지 않기 때문이다.

또한 AOI를 이용해 카메라의 해상도를 반으로 줄일 경우 초당 프레임은 86fps까지 도달하였고, 모든 경우에 CPU 점유율은 50%를 넘지 않았다. 이것은 앞으로 측정 시스템이 더욱 발전하더라도 측정에 아무런 문제가 없을 것을 의미한다. 예를

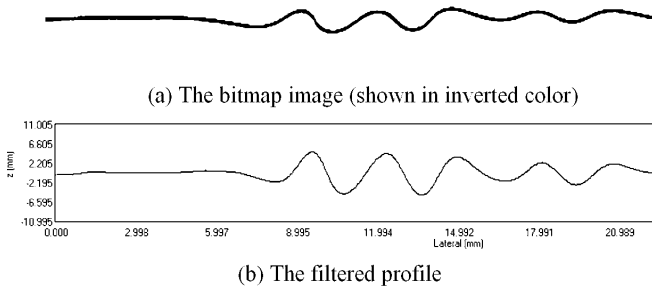


Fig. 11 A typical measurement.

Table 1 Results of a typical measurement

Number of Wrinkles	Location (Wy)	Height (Wz)	Sharpness (Ws)
Wrinkle 1	9.5	4.80	3.6
Wrinkle 2	12.3	4.74	3.38
Wrinkle 3	14.9	3.68	2.45
Wrinkle 4	18.0	2.32	1.78
Wrinkle 5	20.7	2.09	1.23

들어 여러 카메라를 이용한 링클의 분류나 3D 측정 같은 발전 가능성을 제공한다.

5. 결론

전자 소자를 인쇄하기 위한 R2R 공정에서 웹에 발생하는 링클은 치명적인 결함이다. 따라서 효과적인 링클의 제어를 위해서는 정확한 링클의 측정이 필요하다.

본 논문에서는 링클 형상 측정을 위한 레이저를 이용한 머신 비전 시스템에 대해 설명 하였다. 이 장비는 웹 공정에서 많이 이용되고 있는 라인 스캔 카메라 시스템에 비해 매우 간단하고 적은 비용으로 구축이 가능하다.

이 방법의 또 다른 이점은 링클의 높이까지 측정이 가능하다는 점이다. 링클의 높이는 R2R 머신이 웹을 제어 하는데 매우 유용한 정보가 될 것이다.

측정 소프트웨어는 링클의 실시간 감지에 사용될 수 있도록 이미지 프로세싱과 필터링 알고리즘을 동시에 하는 멀티 쓰레딩 기법을 사용하여 만

들어 졌다. 실험 결과는 소프트웨어가 카메라의 최대 정밀도와 프레임 레이트에서 아무런 문제없이 작동함을 보여준다.

본 연구에서 제작한 링클 측정 시스템은 고속이송의 R2R 공정에 적용이 가능한 장점이 있다. 500m/m 의 공정에 적용한다면, 약 10.5 Cm 마다 링클 데이터를 수집할 수 있다.

본 시스템은 앞으로도 많은 발전 가능성이 있다. 향후 계획 중 하나는 어느 정도의 시간 동안 측정된 단면들을 연결하여 3D 로 나타내는 것이다. 이렇게 하게 되면, 웹의 속도와 장력 등의 변화에 따른 링클 형상의 변화와 흐름을 분석하는데 더욱 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 '서울시 산학연 협력사업' 의 지원을 받아 수행 되었습니다.

참고문헌

- (1) Duane Smith, R., 1995, "The Winding Committee of the Finishing and Converting Division," *Roll and Web Defect Terminology*.
- (2) De Piero, F.W., Trivedi, M.T.,1996, "3-D Computer Vision using Structured Light : Design, Calibration and Implementation Issues," *Advances in Computers 43* , pp. 243~278.
- (3) Krystek, M., 1996, "A Fast Gauss Filtering Algorithm for Roughness Measurements," *Precision Engineering 19*, pp. 198~200.
- (4) Raja, J., Muralikrishnan, B., Fu, S., 2002, "Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form," *Precision Engineering 26*, pp. 222~235.
- (5) ISO 11562, 1996, "Profile Method—Metrological Characteristics of Phase Correct Filters," *Geometrical Product Specification (GPS)—Surface Texture: International Organization for Standardization*.
- (6) ISO/TR 16610, 2000, "Part 10. Robust and Spline Filtering," *Geometrical Product Specification (GPS)—Filtration*.
- (7) Brinkmann, S., Boshwinna, H., Lemke, H.W., 2001, "Assessing Roughness in Three- Dimensions Using Gaussian Regression Filtering," *Int. J. Machine Tools and Manufacture 41*, pp. 2153~2161.