



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0087985
 (43) 공개일자 2013년08월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/88 (2006.01) **G01B 11/16** (2006.01)
G06T 7/00 (2006.01)
 (21) 출원번호 **10-2012-0049321**
 (22) 출원일자 **2012년05월09일**
 심사청구일자 **2012년05월09일**
 (30) 우선권주장
 1020120008820 2012년01월30일 대한민국(KR)

(71) 출원인
한국기술교육대학교 산학협력단
 충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한국기술교육대학교)
 (72) 발명자
고진석
 충청남도 천안시 서북구 불당동 대원칸타빌 612동 1504호
임재열
 서울특별시 종로구 평창동 45 벽산평창힐스 101-202
 (74) 대리인
전용준

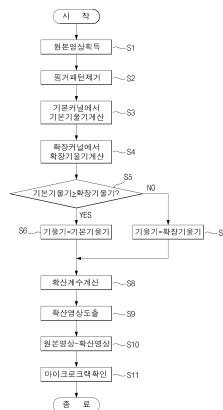
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 **핑거패턴 제거에 의한 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사 방법**

(57) 요약

본 발명에 따른 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙 검사 방법은, 확산 영상을 구축하기 이전에 핑거 패턴을 제거하는 단계를 수행함으로써, 핑거 패턴을 제거하기 위해 확산 영역을 구분하는 티칭 과정이 생략되므로 검사 시스템의 생산성 및 편의성이 향상될 수 있다. 또한, 원본 영상에서 평균 밝기와 표준편차를 고려하여 핑거 패턴 영역을 찾아내고, 핑거 패턴 영역을 평균 밝기로 대체함으로써, 핑거 패턴이 제거되어 마이크로 크랙의 검출이 보다 효과적으로 이루어질 수 있다.

대표도 - 도7



특허청구의 범위

청구항 1

머신비전을 통해 검사대상에 대한 원본 영상을 획득하는 단계와;
 상기 원본 영상으로부터 핑거 패턴을 제거하는 단계와;
 상기 핑거 패턴이 제거된 영상으로부터 기울기와 확산계수를 계산하여, 확산 영상을 구축하는 단계와;
 상기 원본 영상에서 상기 확산 영상을 차감한 후 마이크로 크랙을 확인하는 영상을 도출하는 단계를 포함하는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
 상기 핑거 패턴을 제거하는 단계는,
 상기 원본 영상의 평균 밝기를 계산하는 과정과,
 상기 원본 영상의 표준편차를 계산하는 과정과,
 상기 원본 영상에서 설정 좌표의 밝기를 상기 평균 밝기와 표준 편차를 고려한 설정 밝기와 비교하여, 핑거 패턴 영역인지 판단하는 과정과,
 상기 핑거 패턴 영역이라고 판단되면, 상기 설정 좌표의 밝기를 상기 평균 밝기로 대체하는 과정을 포함하는 비 등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서,
 상기 원본 영상에서 설정 좌표의 밝기가 상기 설정 밝기보다 크면, 핑거 패턴 영역이라고 판단하는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서,
 상기 원본 영상에서 상기 확산 영상을 차감한 후, 영상의 기울기가 평균 밝기와 표준 편차를 고려한 설정 범위를 벗어나는 픽셀의 영상만이 도출되도록 하여 마이크로 크랙을 검출하는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사 방법.

청구항 5

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서,
 상기 확산 영상을 구축하는 단계는,
 상기 핑거 패턴이 제거된 영상의 기본 커널에서 기본 기울기를 계산하는 과정과,
 상기 기본 커널보다 크기가 확장된 확장 커널에서 확장 기울기를 계산하는 과정과,
 상기 기본 기울기와 상기 확장 기울기를 비교하고, 그에 따라 확산계수를 계산하고 확산 영상을 구축하는 과정을 포함하는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서,
 상기 검사대상은 솔라셀인 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 확산 과정 이전에 핑거 패턴 제거 과정을 수행하여, 생산성 및 편의성이 향상될 수 있는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 일반적으로 산업 현장에서는 머신 버전을 이용하여 불량 자동 검사를 실시하고 있다. 상기 불량 자동 검사는 반도체, 디스플레이, 제지, 그리고 목재 등 다양한 제조업에서 사용하고 있다. (비특허문헌 [1]~[6]참조)

[0003] 최근에는 태양광 발전을 위한 솔라셀에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 현재에는 실용화 단계에 도달하였다. 상기 솔라셀의 제조 공정 중에 제품에 대한 불량 검사가 수행되는 바, 이 중 중요한 검사 항목 중 하나가 마이크로 크랙 검사이다. 상기 솔라셀에 마이크로 크랙이 있을 경우, 제조 설비 내부에서 상기 솔라셀이 파손되는 경우가 발생된다. 이러한 경우, 인-라인(in-line)으로 구성된 자동화 생산라인의 중단을 초래하게 되며, 생산라인이 한번 중단되면 다시 재개하기까지 많은 시간이 소요된다. 이는 생산성 저하와 제조 원가 상승을 초래하게 된다. 상기 솔라셀 등과 같은 다결정형 부재는 표면의 무늬가 매우 불규칙하기 때문에, 기존의 불량 검출 알고리즘을 적용하기에 많은 어려움이 있다. 따라서, 적외선 카메라를 이용하여, 적외선 영상을 통한 마이크로 크랙 검출 기법이 활용되었다. 그러나, 적외선 카메라의 가격이 비싸고, 적외선 영상 획득 속도가 느린 단점이 있다. 최근에는 상기와 같은 단점을 극복하기 위하여, 가격이 상대적으로 저렴하고, 영상획득 속도가 빠른 산업용 카메라를 적용하여 불량을 검출하는 연구가 시도되고 있다.

[0004] 도 1은 다 결정형 솔라셀에서 마이크로 크랙이 없는 영역과 마이크로 크랙이 있는 영역에 대한 영상을 나타내고 있다. 도 2는 수평방향의 마이크로 크랙과 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙을 나타내고 있다.

[0005] 상기와 같이 카메라를 통해 얻어진 영상에 대해 마이크로 크랙 검출 알고리즘을 이용하여, 마이크로 크랙을 검출하게 된다.

[0006] Tsai et al.는 비등방성 확산 모델(anisotropic diffusion model)을 이용하여 다결정형 솔라셀에 대한 불량 검출 알고리즘을 제안하였다.(비특허문헌 [7] 참조) 제안된 방법은 비등방성 확산 모델을 이용하여 불량 영상에서 마이크로 크랙을 평탄화시키고, 마이크로 크랙이 없는 부분은 영상을 보존하는 확산 과정을 수행하고, 확산 전 불량 영상과 확산된 불량 영상을 차감하여 마이크로 크랙을 검출하는 방법이다. 그러나, Tsai et al.의 연구는 동서남북 방향의 커널만을 적용하므로 대각선 방향으로 발생하는 마이크로 크랙 정보를 반영하지 못하는 문제점이 있다.

[0007] Ko and Rheem은 이중구조의 비등방성 확산 필터를 이용하여 [7]의 다결정형 솔라셀에 대한 불량검출 알고리즘의 성능을 개선시켰다.[8] 제안된 방법은 십자방향의 커널과 대각선 방향의 커널을 병렬적으로 적용하는 방식이다.

[0008] 그러나, 도 2b에 도시된 바와 같이, 카메라 렌즈와 센서의 특성으로 인하여, 영상에서 대각선 방향의 마이크로 크랙 영상이 불연속적으로 표현될 경우, 기존의 알고리즘으로는 대각선 방향의 마이크로 크랙을 불연속적으로 검출하는 문제점이 있다.

[0009] 상기 두가지 방법 모두 충분한 반복 확산이 이루어지지 않을 경우, 마이크로 크랙이 부분적으로 검출되고, 노이즈 픽셀도 남아있게 되어, 최종 불량 검출에서 오분류할 확률이 높아지는 문제점이 있다. 그러나, 정확한 검출을 위해 반복 확산 횟수를 증가시킬 경우, 전체 알고리즘 수행시간이 증가되어 생산성이 감소되는 문제점이 있다.

[0010] 또한, 확산 과정시 확산영역과 비확산 영역을 구분하지 않을 경우, 솔라셀의 핑거 패턴(finger pattern)으로 인하여 핑거 패턴에 의한 경계 효과(border effect)가 나타나게 되며, 이는 불량 검출을 어렵게 하는 요인이 된다. 따라서, 비등방성 확산과정을 수행할 때, 핑거 패턴을 제외하고 수행해야 한다. 실제 공정 장비의 검사 소프트웨어에 비등방성 확산 모델 알고리즘이 적용될 경우, 핑거 패턴 영역과 확산 영역을 구분해주는 티칭(teaching) 과정이 필요하다. 그러나, 이와 같은 과정은 양산 환경에서 새로운 모델의 솔라셀 제품이 생산될 때마다 티칭과정을 다시 수행해야 하며, 이는 검사장비 전체 운용시간을 감소시키는 요인이 된다. 또한, 이러한 작업 과정은 장비 운용 오퍼레이터의 편의성을 감소시킨다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0011] (비특허문헌 0001) [1] R.W. Conners, C.W. McMillin, K. Lin and R.E. Vasquez-Espinosa, Identifying and locating surface defects in wood, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-5, pp. 573-583, 1983.

(비특허문헌 0002) [2] L.H. Siew and R.M. Hogdson, "Texture measures for carpet wear assessment, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 10, pp. 92-105, 1988.

(비특허문헌 0003) [3] K.V. Ramana and B. Ramamoorthy, "Statistical methods to compare the texture features of machined surfaces," Pattern Recognition 29, pp. 1447-1459, 1996.

(비특허문헌 0004) [4] J. Escofet, M.S. Millan, H. Abril and E. Torrecilla, "Inspection of fabric resistance to abrasion by Fourier analysis," Proceedings of SPIE 3490, pp. 207-210, 1998.

(비특허문헌 0005) [5] T. Ohshige, H. Tanaka, Y. Miyazaki, T. Kanda, H. Ichimura, N. Kosaka and T. Tomoda, "Detect inspection system for patterned wafers based on the spatial-frequency filtering," IEEE/CHMT European International Electronic Manufacturing Technology Symposium, pp. 192-196, 1991.

(비특허문헌 0006) [6] K. Wiltschi, A. Pinz and T. Lindeberg, "Automatic assessment scheme for steel quality inspection," Machine Vision and Applications 12, pp. 113-128, 2000. P. Perona and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12, no. 7, pp. 629-639, 1990.

(비특허문헌 0007) [7] D. M. Tsai, C. C. Chang and S. M. Chao, "Micro-crack inspection in heterogeneously textured solar wafers using anisotropic diffusion," Image and Vision Computing, vol. 28, no. 3, pp. 491-401, 2010.

(비특허문헌 0008) [8] J. Ko and J. Rheem, "Anisotropic Diffusion based Micro-crack Inspection in Polycrystalline Solar Wafers," Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol. 1, pp. 524-528, 2011.

(비특허문헌 0009) [9] P. Perona and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12, no. 7, pp. 629-639, 1990.

(비특허문헌 0010) [10] S. Aja, C. Alberola and A. Ruiz, "Fuzzy anisotropic diffusion for speckle filtering," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 2, pp. 1261-1264, 2001.

(비특허문헌 0011) [11] L. Zadeh and J. Kacprzyk, "Fuzzy logic for the management of uncertainty," John Wiley & Sons, Inc. 1992.

(비특허문헌 0012) [12] H. J. Zimmermann, "Fuzzy set theory and its applications," Kluwer -Nijhoff Publishing, 2001.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명의 목적은, 핑거 패턴을 미리 제거하여 마이크로 크랙을 보다 정확하게 검출하면서도 생산성 및 편의성이 향상될 수 있는 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사 방법을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 발명에 따른 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙의 검사방법은, 머신비전을 통해 검사대상에 대한 원본 영상을 획득하는 단계와, 상기 원본 영상으로부터 핑거 패턴을 제거하는 단계와, 상기 핑거 패턴이 제거된 영상으로부터 기울기와 확산계수를 계산하여, 확산 영상을 구축하는 단계와, 상기 원본 영상에서 상기 확산 영상을 차감한 후 마이크로 크랙을 확인하는 영상을 도출하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0014] 본 발명에 따른 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙 검사 방법은, 확산 영상을 구축하기 이전에 핑거 패턴을 제거하는 단계를 수행함으로써, 핑거 패턴을 제거하기 위해 확산 영역을 구분하는 티칭 과정이 생략되므로 검사 시스템의 생산성 및 편의성이 향상될 수 있다.

[0015] 또한, 원본 영상에서 평균 밝기와 표준편차를 고려하여 핑거 패턴 영역을 찾아내고, 핑거 패턴 영역을 평균 밝기로 대체함으로써, 핑거 패턴이 제거되어 마이크로 크랙의 검출이 보다 효과적으로 이루어질 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0016] 도 1은 다결정 솔라셀의 영상이 도시된 도면이다.
- 도 2는 마이크로 크랙을 확대한 영상이 도시된 도면이다.
- 도 3은 대각선 방향의 마이크로 크랙과 수평 방향의 마이크로 크랙에 대해 T값과 K값을 변화시키며 비교한 영상이다.
- 도 4는 핑거패턴에서 반복 횟수에 따른 경계 효과를 보여준다.
- 도 5는 핑거패턴을 제거하기 전과 제거 후를 비교한 영상이다.
- 도 6은 본 실시예에 따른 기본 커널과 확장 커널이 도시된 도면이다.
- 도 7은 본 실시예에 따른 마이크로 크랙의 검사방법이 도시된 순서도이다.
- 도 8은 제어 파라미터 C_{pre} 의 변화에 따른 결과 영상이다.
- 도 9는 Tsai et al.의 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다.
- 도 10은 Ko and Rheem의 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다.
- 도 11은 본 실시예에 따른 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다.
- 도 12는 마이크로 크랙에 대해 제어 파라미터 C_{post} 값을 변화시켜 비교한 영상이다.
- 도 13은 T=7, K=30, C_{pre} =1.5, C_{post} =5일 때 각 알고리즘에 따른 결과를 비교한 영상이다.
- 도 14는 T=5, K=30, C_{pre} =1.5, C_{post} =5일 때 각 알고리즘에 따른 결과를 비교한 영상이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 이하, 본 발명의 실시예에서는 첨부된 도면을 참조하여, 다결정 솔라셀에서 마이크로 크랙을 검사하는 방법을 예로 들어 설명하나, 이에 한정되지 않고 솔라셀 이외의 검사 부재에 적용하는 것도 물론 가능하다.

[0018] 도 1은 다결정 솔라셀의 영상이 도시된 도면인 바, 도 1a는 마이크로 크랙이 없는 다결정형 웨이퍼(multi-grain wafer) 표면의 영상이고, 도 1b는 대각선 방향으로 마이크로 크랙이 존재하는 웨이퍼 표면의 영상이다.

[0019] 도 1을 참조하면, 다결정형 솔라셀의 특성으로 인하여 표면이 불규칙한 텍스처로 표현되는 것을 볼 수 있다. 다결정형 솔라셀에서의 마이크로 크랙은 영상에서 낮은 밝기와 높은 기울기 값을 갖는 것으로 알려져 있다.(비특허문헌 [7]참조) 반면에 불량인 없는 영역에서는 낮은 밝기만 갖거나 높은 기울기만을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다.

[0020] 도 2는 마이크로 크랙을 확대한 영상이 도시된 도면이고, 전광원 LED 조명(Front-light LED illumination)에서 디지털 이미지에서 마이크로 크랙의 불연속성을 보여주고 있다. 도 2a는 수평 방향의 마이크로 크랙이 연속적으로 나타난 영상이고, 도 2b는 대각선 방향의 마이크로 크랙이 불연속적으로 나타난 영상이다.

[0021] 도 2a를 참조하면, 수평방향으로 발생한 마이크로 크랙은 영상에서 연속적으로 표현된다. 도 2b를 참조하면, 대

각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙은 렌즈와 CCD센서의 특징으로 인하여 대각선 방향에서 마이크로 크랙이 연결되지 않고 불연속적으로 표현되는 것을 볼 수 있다. 도 2b에서와 같이, 영상에서 마이크로 크랙이 불연속적으로 표현될 경우, 기존의 마이크로 크랙 검출 알고리즘으로는 마이크로 크랙을 불연속적으로 검출하는 단점이 발생한다.

[0022] 도 3은 대각선 방향의 마이크로 크랙과 수평 방향의 마이크로 크랙에 대해 T값과 K값을 변화시키며 비교한 영상이다.

[0023] 도 3에서, 상기 K는 후술하는 수학식 4 및 수학식 5에서 이용되는 파라미터이다. 상기 T는 이방 확산(anisotropic diffusion) 알고리즘을 반복하는 횟수이다. 원본 영상에서 확산 영상을 차감할 때, 확산 영상은 원본 영상으로부터 확산과정을 T번 수행했다는 것을 의미한다. 도 3을 참조하면, 확산 횟수(T)가 적을수록 마이크로 크랙이 불연속적으로 검출되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 불연속적으로 마이크로 크랙을 검출하는 경우, 최종 불량 판정에서 오분류할 확률이 높아진다. 따라서, 마이크로 크랙의 형태를 유지하면서 검출하는 것이 중요하다.

[0024] 비특허문헌 [9]의 Perona-Malik의 확산 모델(diffusion model)은 전통적인 비등방성 확산 방식이고, 윤곽선을 뚜렷하게 하면서 영역 내부를 부드럽게 하고 잡음을 제거하는 데 효과적이다. 이 방식은 4방향의 십자형 커널 구조의 픽셀 정보를 이용한 확산 필터이며, 후술하는 수학식 1 내지 4가 이용된다.

수학식 1

$$I_{t+1} = I_t(x, y) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [c_t^i(x, y) \cdot \nabla I_t^i(x, y)]$$

[0025]

[0026] 여기서, t는 확산의 반복을 의미하고, $I_t(x, y)$ 는 t단계의 확산 적용 후 필터링된 영상의 (x,y)좌표에서의 밝기 값을 나타낸다. $\nabla I_t^i(x, y)$, $i=1,2,3$ and 4는 동서남북 방향의 기울기값을 의미하고, 수학식 2와 같이 표현된다.

수학식 2

$$\begin{aligned} \nabla I_t^1(x, y) &= I_t(x, y-1) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^2(x, y) &= I_t(x, y+1) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^3(x, y) &= I_t(x+1, y) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^4(x, y) &= I_t(x-1, y) - I_t(x, y) \end{aligned}$$

[0027]

[0028] 상기 비등방성 확산 방식은 상기 수학식 2와 같이 십자형 커널을 이용하여 주변 픽셀들과 기울기값을 가감처리하여 영상의 확산 작용을 수행한다. 그러나, 기울기값을 그대로 이용할 경우, 영상의 에지 정보까지 함께 확산 처리되므로 에지 보존은 이뤄질 수 없게 된다. 그러므로 상기 십자형 커널을 적용할 때 동질영역은 확산을 낮추거나 정지시키는 제어역할(edge stopping function)을 하는 $c_t^i(x, y)$ 가 필요하다.

수학식 3

$$c_t^i(x, y) = g(\nabla I_t^i(x, y))$$

[0029]

[0030] 상기 Perona-Malik의 확산 모델 방식에서 확산 계수 함수 $g(\nabla I_i(x,y))$ 는 수학식 4와 같이 표현한다. 이하, 표현의 편의성을 위하여 $\nabla I_i(x,y)$ 는 ∇I 로 표현하기로 한다.

수학식 4

$$g(\nabla I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{|\nabla I|}{K}\right)^2}$$

[0031]

[0032] 여기서, 상기 K는 상수로서, 에지 강화 임계값(edge strength threshold)으로 동작하고, 실험적으로 구해지는 값이다.

[0033] 한편, 비특허문헌 [7]의 Tsai et al.의 확산 모델은, 다결정형 솔라셀에서 마이크로 크랙이 낮은 픽셀 밝기와 높은 기울기 값을 갖는다는 정보를 이용하여 마이크로 크랙을 검출하는 방법을 제안한다. 우선 영상에서 마이크로 크랙의 부분은 평탄화시키고, 불량이 아닌 영역에 대해서는 밝기 값을 보존한다. 이후, 원본 영상과 확산된 영상을 차감시키면, 마이크로 크랙 영역의 픽셀값이 강조되어 나타나게 된다. 이를 이용하여 불량을 검출하는 방법이다. 영상에서 마이크로 크랙을 평탄화시키기 위하여 후술하는 수학식 5와 같은 확산 계수 함수($g(\nabla I, f)$)를 제안하였다.

수학식 5

$$g(\nabla I, f) = \frac{1}{1 + \left[f(x,y) \cdot \left(\frac{K}{|\nabla I(x,y)|}\right)^2 \right]}$$

[0034]

[0035] 여기서, $f(x,y)$ 는 후술하는 수학식 6과 같으며, $f(x,y)$ 는 8-bit 그레이 영상의 정규화된 값이며, 정규화 파라미터로 사용된다.

수학식 6

$$f(x,y) = \frac{I_o(x,y)}{255}$$

[0036]

[0037] 상기와 같은 확산계수 함수에 따라 영상이 확산되면, 후술하는 수학식 7과 같이 원본 영상에서 확산된 영상을 차감시킨다. 이와 같은 과정을 거치면 차감된 영상에서 마이크로 크랙 영역의 밝기가 강조되어 나타나게 된다.

수학식 7

$$\nabla I(x,y) = |I_o(x,y) - I_r(x,y)|, \quad \forall(x,y)$$

[0038]

- [0039] 상기 수학식 7은 원본 영상에서 확산된 영상을 차감시키는 식을 나타낸다.
- [0040] 상기와 같은 Tsai et al.의 방법은 십자 모양의 4방향의 픽셀 정보(수학식 2 참조)를 이용하여 확산 방정식(수학식 5 참조)을 적용한 모델이다. 그러나, 상기 Tsai et al.의 방법은 동서남북 방향의 픽셀 정보는 잘 반영하나, 대각선 방향의 픽셀 정보를 반영하지 못하는 단점이 있다. 다결정형 솔라셀에서는 마이크로 크랙이 모든 방향에서 발생될 수 있으므로, 상기 Tsai et al.의 방법으로는 마이크로 크랙의 검출에 한계가 있다.
- [0041] 비특허문헌 [8]의 Ko and Rheem은, 상기 Tsai et al. 방법의 단점을 보완하기 위하여, 대각선 방향의 격자 구조를 갖는 확산 모델을 추가로 적용하였다. 수학식 8은, 원본 영상과 기존의 동서남북 방향의 확산 모델을 적용한 영상을 차감시키는 식을 나타낸다. 수학식 9는, 원본 영상과 대각선 방향의 확산 모델을 적용한 영상을 차감시키는 식을 나타낸다.

수학식 8

[0042]
$$\nabla \mathbf{I}^{NSWZ}(x, y) = \left| \mathbf{I}_0(x, y) - \mathbf{I}_r^{NSWZ}(x, y) \right|, \quad \forall (x, y)$$

수학식 9

[0043]
$$\nabla \mathbf{I}^{diagonal}(x, y) = \left| \mathbf{I}_0(x, y) - \mathbf{I}_r^{diagonal}(x, y) \right|, \quad \forall (x, y)$$

- [0044] 상기 수학식 9에 사용되는 대각선 방향의 기울기는 수학식 10과 같다.

수학식 10

[0045]
$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{I}_t^1(x, y) &= \mathbf{I}_t(x-1, y-1) - \mathbf{I}_t(x, y) \\ \nabla \mathbf{I}_t^2(x, y) &= \mathbf{I}_t(x+1, y+1) - \mathbf{I}_t(x, y) \\ \nabla \mathbf{I}_t^3(x, y) &= \mathbf{I}_t(x+1, y-1) - \mathbf{I}_t(x, y) \\ \nabla \mathbf{I}_t^4(x, y) &= \mathbf{I}_t(x-1, y+1) - \mathbf{I}_t(x, y) \end{aligned}$$

- [0046] 상기 Ko and Rheem은, 상기 수학식 8과 상기 수학식 9를 적용한 영상을 더해서 최종 영상을 수학식 11과 같이 얻는다.

수학식 11

[0047]
$$\nabla \mathbf{I}(x, y) = \nabla \mathbf{I}^{NSWZ}(x, y) + \nabla \mathbf{I}^{diagonal}(x, y), \quad \forall (x, y)$$

- [0048] 상기와 같이, 상기 Tsai et al.의 연구는 동서남북 방향의 커널을 적용하므로 대각선 방향의 마이크로 크랙 정보를 반영하지 못하였다. 한편, 이를 개선하기 위하여 Ko and Rheem은 대각선 방향의 마이크로 크랙 정보를 반영하기 위한 이중 격자 구조의 확산 모델을 제안하였다. 그러나, 여전히 대각선 방향의 마이크로 크랙이 부분적으로 검출되는 단점이 있었다. 도 2b에 도시된 바와 같이, 렌즈와 센서의 특성으로 인하여 대각선 방향의 마이크로 크랙의 밝기가 일정하지 못하게 나타나기 때문에, 기존의 알고리즘으로는 대각선 방향의 마이크로 크랙은 부분적으로 검출된다.

- [0049] 상기와 같은 단점을 개선하기 위하여, 본 실시예에서는 원본 영상의 기본 커널에서의 기본 기울기와, 상기 기본

커널보다 크기가 확장된 확장 커널에서의 확장 기울기를 각각 계산하고, 상기 기본 기울기와 상기 확장 기울기를 비교하고 보다 큰 값을 확산계수(g) 계산식에 적용한다.

- [0050] 도 4는 본 실시예에 따른 기본 커널과 확장 커널이 도시된 도면이다. 도 5는 본 실시예에 따른 마이크로 크랙의 검사방법이 도시된 순서도이다.
- [0051] 먼저, 머신 비전 등을 통해 검사대상에 대한 원본 영상을 획득한다.(S1)
- [0052] 상기 원본 영상에 대해 핑거패턴을 제거하기 위한 전처리(Pre-processing for finger pattern removal)를 실시한다.(S2)
- [0053] 비특허문헌 [7] 및 [8]의 연구결과를 실제 머신비전 어플리케이션에 적용하기 위해서는 솔라셀의 핑거패턴을 고려해야 한다. 핑거패턴은 영상에서 밝게 표현된다. 핑거 패턴을 포함하여 확산을 수행하면, 핑거패턴 경계에서 경계선 효과가 발생한다.
- [0054] 도 4는 핑거패턴 영역을 포함하여 영상 확산을 수행한 모습을 보여주고 있다. 도 4a는 영상에서 마이크로 크랙을 확대한 부분으로 밝게 보이는 부분이 핑거 패턴이고, 어둡고 대각선으로 보이는 부분이 마이크로 크랙을 나타낸다. 도 4b는 Tsai et al.의 알고리즘을 수행한 것으로 반복적인 확산이 이루어질 수록 핑거패턴의 경계부분의 두께가 두꺼워진다. 마이크로크랙을 검출 시 이와 같은 경계선 효과(border effect) 때문에 오검출이 발생할 수 있다. 따라서, 영상 확산을 수행할 때, 핑거패턴을 제외하고 수행해야 한다.
- [0055] 실제 공정장비의 검사 소프트웨어에 이방 확산 모델 알고리즘이 적용될 경우, 핑거패턴 영역과 확산 영역을 구분해주는 티칭(teaching)과정이 필요하다. 그러나, 이와 같은 과정은 양산 환경에서 새로운 모델의 솔라셀 제품이 생산될 때마다 티칭 과정을 다시 수행해야 하며, 이는 검사장비 전체 운용시간을 감소시키는 요인이 된다. 또한, 이러한 작업과정은 장비 운용 오퍼레이터의 편의성을 감소시키게 된다. 따라서, 실제 솔라셀 불량 검사 시스템에서 오퍼레이터의 장비 운용 편의성과 전체 생산성 향상을 위하여 티칭 과정에서 확산 영역을 구분하기 보다는 별도의 확산영역 구분없이 검사영상 전체 영역을 확산하는 것이 필요하다.
- [0056] 본 실시예에서는, 다음과 같은 전처리를 통하여 영상에서 핑거패턴의 영역을 전체 평균 밝기로 대체해주는 과정을 수행한다. (S2)
- [0057] 우선 원본 영상의 평균 밝기($\mu_{\Delta I}$)와 표준 편차 밝기($\sigma_{\Delta I}$)를 후술하는 수학식 12와 수학식 13에 따라 계산한다.

수학식 12

[0058]
$$\mu_{\Delta I} = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y I_o(x, y)$$

수학식 13

[0059]
$$\sigma_{\Delta I} = \sqrt{\frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I_o(x, y) - \mu_{\Delta I})^2}$$

[0060] 이후, 후술하는 수학식 14에 따라 핑거패턴 부분을 전체 영상의 평균값으로 대체해준다.

수학식 14

[0061]
$$I_o(x, y) = \begin{cases} \mu_{\Delta I}, & \text{if } \Delta I_o(x, y) > \mu_{\Delta I} + C_{pre} \cdot \sigma_{\Delta I} \\ I_o(x, y), & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0062] 이와 같은 과정을 거친 후, 영상 확산을 수행하면, 핑거패턴이 없는 것과 유사한 결과를 얻게 된다. 상기 수학식 14에서는 C_{pre} 는 전처리 과정에서 어느 정도 밝기를 핑거패턴으로 판정할 것인지 조절해주는 파라미터이다. 영상에서 좌표의 밝기($\Delta I_0(x,y)$)가 표준 편차 밝기($\sigma_{\Delta I}$)와 C_{pre} 의 곱과 평균밝기($\mu_{\Delta I}$)의 합보다 클 경우, 핑거패턴으로 판단하는 수식이며, C_{pre} 는 평균밝기($\mu_{\Delta I}$)보다 얼마나 밝을 경우 핑거 패턴으로 판단할지 조절해주는 역할을 한다.

[0063] 상기와 같이 핑거 패턴을 제거한 영상으로부터 기울기와 확산계수를 계산하여, 확산 영상을 구축한다.

[0064] 상기 핑거 패턴을 제거한 영상으로부터 기본 커널을 3 바이(by) 크기로 설정하고, 상기 기본 커널에서 기본 기울기를 계산한다.(S3) 도 6을 참조하면, 3 바이 3 크기의 기본 커널을 설정하고, 상기 수학식 2에 따라 동서남북 방향 기울기를 계산한다.

[0065] 또한, 상기 기본 커널보다 크기가 확장된 확장 커널을 설정하고, 상기 확장 커널에서 확장 기울기를 계산한다.(S4) 본 실시예에서는, 상기 확산 영상을 구축하기 위해 상기 기본 커널과 상기 확장 커널을 사용하는 것을 예를 들어 설명하나, 상기 확장 커널을 이용하지 않고 상기 기본 커널만으로 확산 영상을 구축하는 것도 물론 가능하다.

[0066] 도 6을 참조하면, 상기 확장 커널은 5 바이 5 크기로 설정된 것으로 예를 들어 설명하나, 커널의 크기는 이에 한정되지 않는다. 상기 확장 커널에서 상기 확장 기울기를 구하는 식은 다음의 수학식 15와 같다.

수학식 15

$$\begin{aligned} \nabla I_t^1(x,y) &= |I_t(x+2,y-1) - I_t(x-2,y-1)| \\ \nabla I_t^2(x,y) &= |I_t(x+2,y+1) - I_t(x-2,y+1)| \\ \nabla I_t^3(x,y) &= |I_t(x+1,y-2) - I_t(x+1,y+2)| \\ \nabla I_t^4(x,y) &= |I_t(x-1,y-2) - I_t(x-1,y+2)| \end{aligned}$$

[0067]

[0068] 도 6에서는 수학식 2로부터 구해지는 기본 기울기와, 수학식 15로부터 구해지는 확장 기울기를 나타내고 있다. 상기 수학식 2에 따른 기본 기울기는 중심 픽셀(x,y)에서 십자형 구조의 픽셀들과의 동서남북 방향 기울기를 나타내며, 상기 수학식 15에 따른 확장 기울기는 상기 중심 픽셀 주변에서 ??(#?)형 구조의 픽셀들과의 상하좌우방향 기울기를 나타낸다. 즉, 상기 확장 기울기는 상기 중심 픽셀에 대한 동서남북 방향보다 수평 수직방향으로 확장된 방향을 나타낸다. 대각선 방향의 마이크로 크랙에서 연결 강도가 약한 부분에서는 동서남북 방향의 기울기의 역할이 미흡하다. 따라서, 확장 기울기를 이용하여 주변의 마이크로 크랙의 정보를 보다 적극적으로 반영할 수 있다.

[0069] 상기와 같이 계산된 기본 기울기와 상기 확장 기울기를 비교하고, 그에 따라 확산 계수를 계산한다.(S5-S7) 상기 기본 기울기와 상기 확장 기울기를 비교하여, 둘 중 큰 값을 갖는 기울기를 확산 계수를 구하는 데 적용한다. 즉, 상기 기본 기울기와 상기 확장 기울기 중 보다 큰 값을 상기 수학식 5에 적용한다. 상기 수학식 5로부터 구해진 확산 계수에 따라 확산 영상이 도출된다.(S9)

[0070] 상기 확산 영상이 얻어지면, 상기 원본 영상에서 상기 확산 영상을 차감한다.(S10)

[0071] 상기 원본 영상에서 상기 확산 모델을 적용한 확산 영상을 차감시킨 후, 마이크로 크랙 검출을 위한 후처리(Post-processing for defect detection)가 실시된다. 마이크로 크랙을 검출하기 위하여 임계값(threshold) 기법을 적용하였다.(비특허문헌 [7]참조) 이는 영상 밝기의 평균과 표준편차의 정보를 이용한다. 관련 수식은 후술하는 수학식 16과 같다. 상기 확산 영상은 마이크로 크랙이 없는 부분은 원래 영상과 유사하며, 마이크로 크랙이 위치하고 있는 부분은 평탄화된다. 이와 같이 변화된 확산 영상을 상기 원본 영상에서 차감하면, 마이크로 크랙이 위치하고 있는 부분은 밝아지고, 마이크로 크랙이 없는 부분은 어두워지게 된다. 차감된 영상에서 밝은 영역만 세그멘테이션 하기 위하여 영상 밝기의 평균과 표준 편차를 이용한다. 즉, 영상의 기울기가 평균 밝기와 표준 편차를 고려한 설정 범위를 벗어나는 픽셀의 영상만이 도출되도록 하여 마이크로 크랙 확인을 용이하게 한다. (S11)

수학식 16

$$B(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } \Delta I(x, y) > \mu_{\Delta I} + C_{post} \cdot \sigma_{\Delta I} \\ 255, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0072]

[0073] 여기서, $\mu_{\Delta I}$ 는 평균 밝기이고, $\sigma_{\Delta I}$ 는 표준편차 밝기이며, C_{post} 는 세그멘테이션을 조정하는 조절 파라미터이다. $\mu_{\Delta I}$ 와 $\sigma_{\Delta I}$ 는 상기 수학식 12와 수학식 13에서 각각 구해진다.

[0074] 본 실시예에 따른 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여, 기존의 Tsai et al.의 알고리즘(비특허문헌 [7]참조)과 Ko and Rheem의 이중 격자 구조의 알고리즘(비특허문헌 [8] 참조), 그리고 본 실시예의 알고리즘과 비교실험을 수행하였다. 실험에 사용된 영상의 획득 조건은 측면 45도 입사각을 갖는 확산된 백색 LED 면조명을 사용하였으며, 영상의 픽셀 해상도는 23 μm 으로 설정하여 영상을 획득하였다. 실험에 사용된 영상은 총 117장을 이용하였다. 이 중에서 마이크로 크랙 이미지는 96장이고, 불량이 없는 영상은 21장이다. 알고리즘에서 사용되는 각각의 파라미터는 반복적인 실험을 통하여 최적의 성능을 보여주는 파라미터를 선정하였다.

[0075] 도 5는 핑거패턴을 제거하기 위한 전처리 과정의 결과를 보여주고 있다. 도 5a는 원본 영상으로 영상에서 핑거패턴의 모습을 확인할 수 있다. 도 5b는 본 실시예에서 제안한 핑거패턴 제거 기법을 적용한 결과이다. 핑거패턴 제거를 위한 전처리 과정에서 C_{pre} 는 1.5로 설정하였다. 후처리 과정에서 C_{post} 는 10으로 설정하였다. 도 5c는 전처리를 적용하지 않고 이방 확산을 수행하고, 원본 영상에서 확산된 영상을 차감한 결과이다. 도 5d는 전처리를 적용하고 이방 확산을 수행하고 원본 영상에서 확산 영상을 차감한 결과이다. 이 때, 이방 확산의 반복횟수는 5번으로 설정하였다. 또한, K값은 30으로 설정하였다. 도 5c에서는 핑거패턴의 경계선 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 도 5c에 비하여 도 5d에서 핑거패턴이 많이 제거되고, 마이크로 크랙이 보다 강조되는 것을 확인할 수 있다.

[0076] 도 8은 C_{pre} 값의 변화에 따른 결과를 보여주고 있다. C_{pre} 값의 변화에 따른 효과를 비교하기 위하여 확산 반복 횟수 T는 5로 설정하였으며, K는 30으로 설정하였다. 또한, 마이크로 크랙 세그멘테이션을 위한 C_{post} 는 5로 설정하였다.

[0077] 도 9는 Tsai et al.의 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다. 도 10은 Ko and Rheem의 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다. 도 11은 본 실시예에 따른 방법에 따라 반복횟수 T값과 정규화값의 변화 결과에 따른 영상이다.

[0078] 도 9 내지 도 11은 K값과 반복횟수 T값의 변화에 따른 마이크로 크랙 검출 결과를 통해 K값과 T값의 효과를 보여주고 있다. K값과 반복횟수 T의 변화에 따른 결과를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. K값은 10에서 50까지의 범위에서 T는 1에서 7까지의 범위에 두고 비교실험을 하였다. 본 실험을 위하여 C_{pre} 는 1.5, C_{post} 는 5로 설정하였다. 도 9 내지 도 11을 참조하면, 실험결과 세가지 방법 모두 동일한 확산 횟수에서 K가 증가할 수록 노이즈 픽셀은 억제되고, 마이크로 크랙만 검출하는 것을 볼 수 있다. 그러나, K값을 너무 크게 설정하면, 마이크로 크랙도 부분적으로 검출하는 것을 볼 수 있다.

[0079] 도 12는 마이크로 크랙에 대해 제어 파라미터 C_{post} 값을 변화시켜 비교한 영상이다.

[0080] 도 12를 참조하면, 세그멘테이션 제어 상수 C_{post} 의 효과를 볼 수 있다. C_{post} 값의 변화에 따른 효과를 비교하기 위하여 확산 반복 횟수 T는 5로 설정하였으며, K는 30으로 설정하였다. 또한, 핑거패턴을 제거하기 위한 C_{pre} 는 2로 설정하였다.

[0081] 도 13은 T=7, K=30, C_{pre} =1.5, C_{post} =5일 때 각 알고리즘에 따른 결과를 비교한 영상이다. 도 14는 T=5, K=30, C_{pre} =1.5, C_{post} =5일 때 각 알고리즘에 따른 결과를 비교한 영상이다.

[0082] 도 13 및 도 14를 참조하면, 대각선 방향의 마이크로 크랙에 대해 각각의 알고리즘을 수행한 결과를 보여주고 있다. 기존의 방법에 비하여, 본 실시예에 따른 방법이 원래 마이크로 크랙과 유사한 두께로 검출하는 것을 볼 수 있다. 또한, 본 실시예에 따른 방법이 기존 방법에 비하여 연속적으로 마이크로 크랙을 검출하는 것이 가능

하다.

[0083] 상기와 같이, 본 실시예에서는 배경 영상이 불균일한 다결정형 솔라셀에서의 마이크로 크랙 검출을 위한 확장된 기울기를 사용하는 이방 확산 모델을 제안하였다. 기존의 등방 확산 모델 기반의 마이크로 크랙 검출 알고리즘이 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙을 불연속적으로 검출하는 단점을 개선하기 위하여 확장된 기울기 사용을 제안하였다.

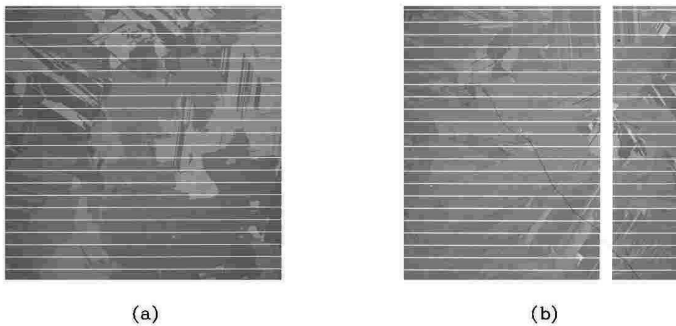
[0084] 상기 동서남북 방향의 기본 기울기와 확장 기울기를 비교하여, 상대적으로 큰 값을 확산 계수 함수에 적용한다. 따라서, 영상에서 마이크로 크랙의 연결강도가 약하게 표현되는 부분에서도 주변 픽셀 정보를 이용하여 끊임없이 효과적으로 마이크로 크랙을 검출하는 것을 확인하였다. 반복횟수가 증가하여도 검출된 마이크로 크랙의 두께가 원래의 마이크로 크랙의 두께와 차이가 없음을 확인하였다. 또한, 본 실시예의 방법은 기존의 방법에 비해서 적은 반복횟수로 우수한 성능을 보여주는 것을 볼 수 있었다. 본 실시예의 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 기존의 Tsai et al.의 알고리즘과 Ko and Rheem의 이중 격자 구조의 알고리즘, 그리고 본 실시예의 알고리즘과 비교실험을 수행한 결과 본 실시예에 따른 알고리즘의 성능이 우수한 것을 확인하였다.

[0085] 다만, 본 실시예에서는 솔라셀의 마이크로 크랙을 검출하는 것을 예를 들어 설명하였으나, 이에 한정되지 않고 솔라셀 이외의 검사 부재에 적용하는 것도 물론 가능하다.

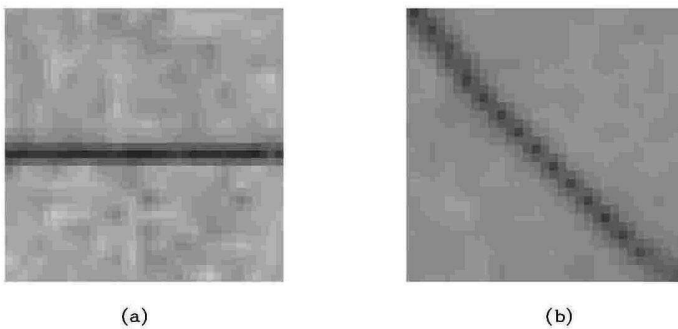
[0086] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

도면

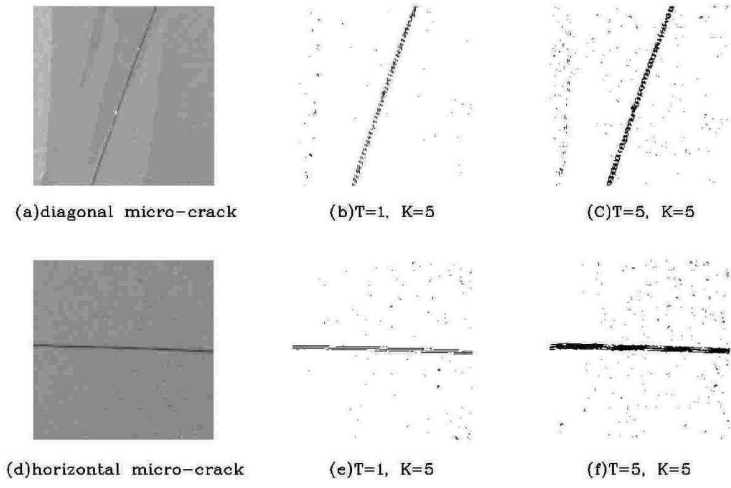
도면1



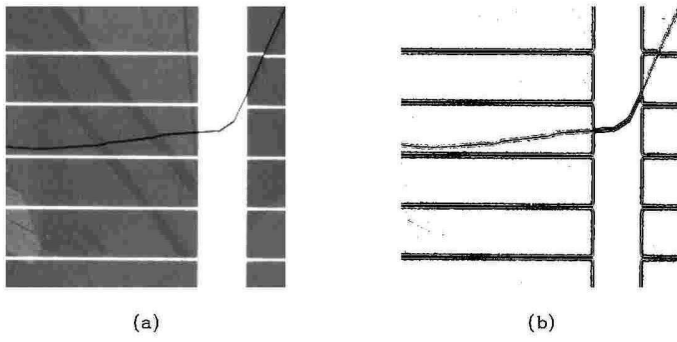
도면2



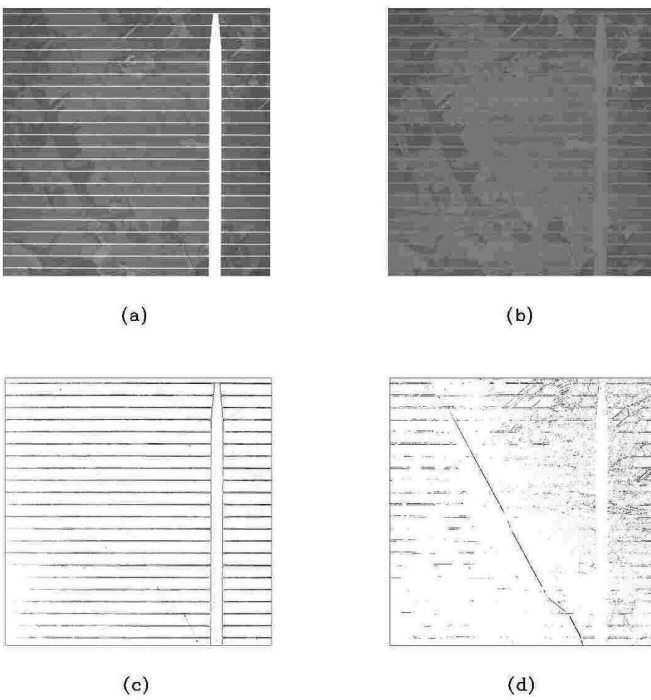
도면3



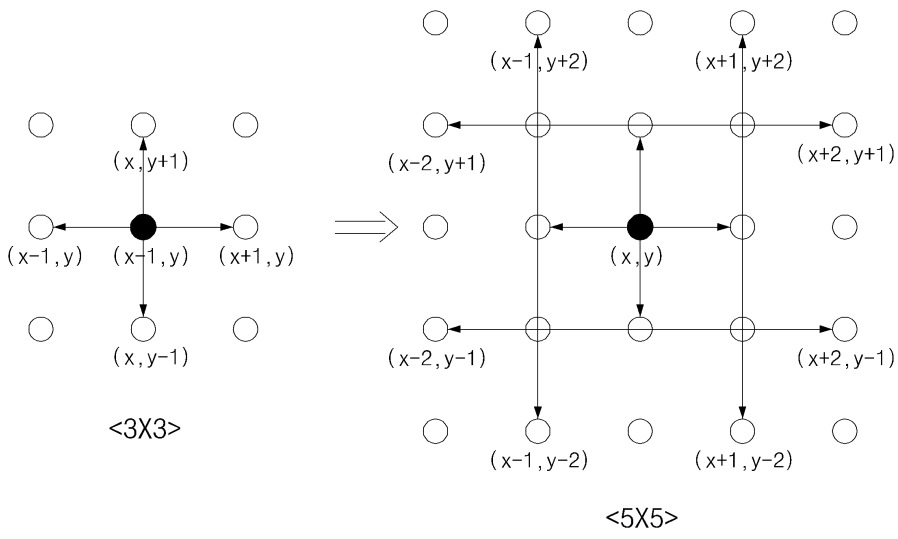
도면4



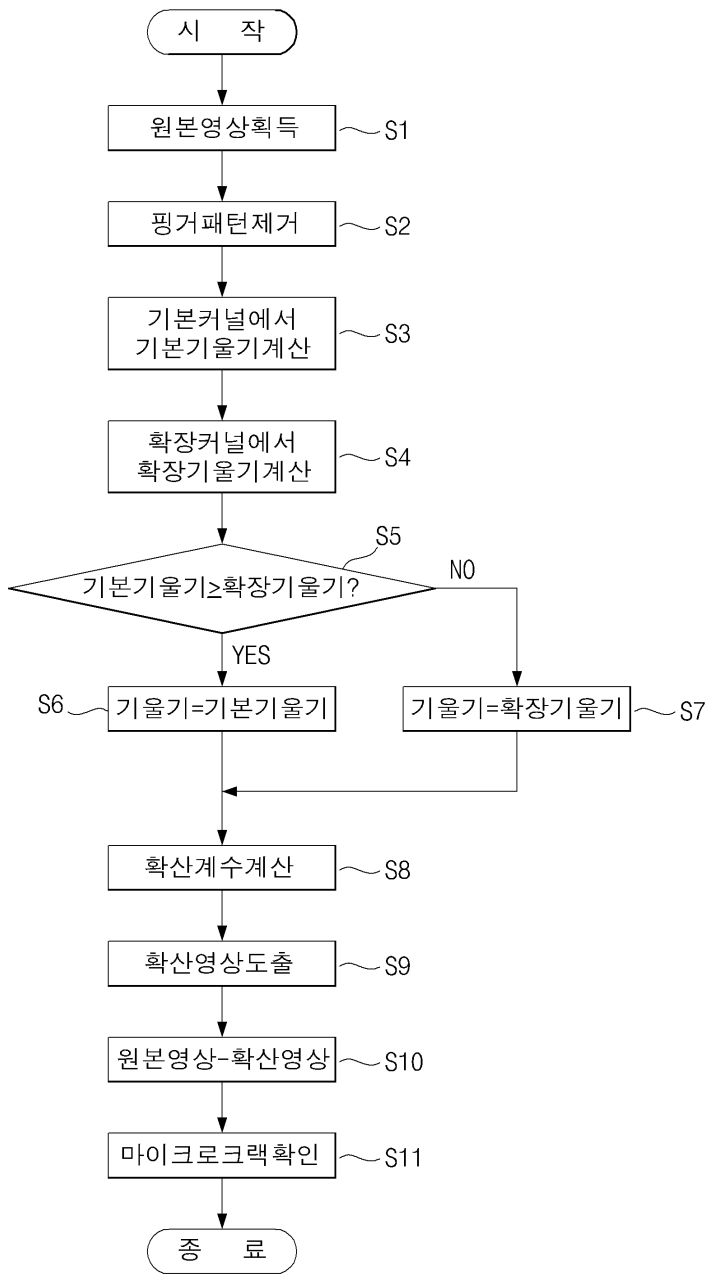
도면5



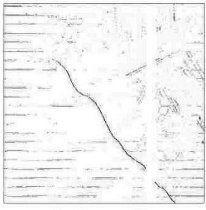
도면6



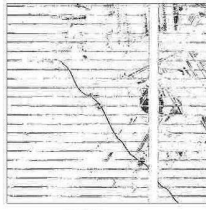
도면7



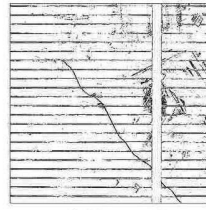
도면8



(a) $C_{pre}=1.5$



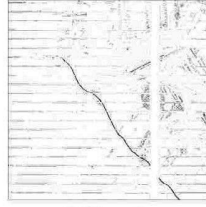
(b) $C_{pre}=3$



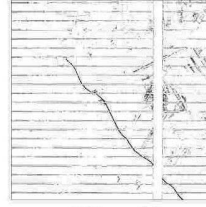
(c) $C_{pre}=4.5$



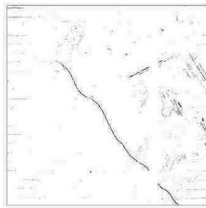
(d) $C_{pre}=1.5$



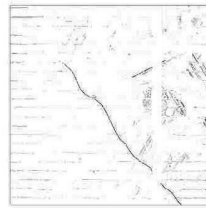
(e) $C_{pre}=3$



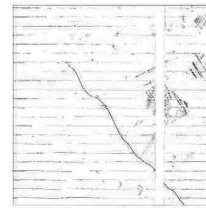
(f) $C_{pre}=4.5$



(g) $C_{pre}=1.5$

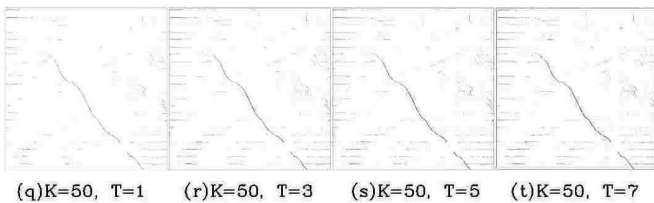
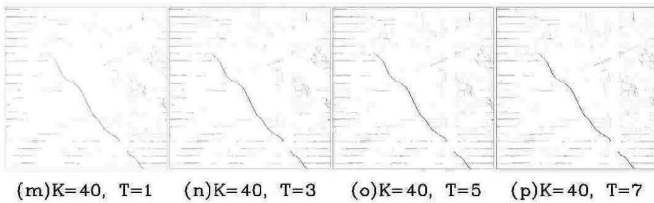
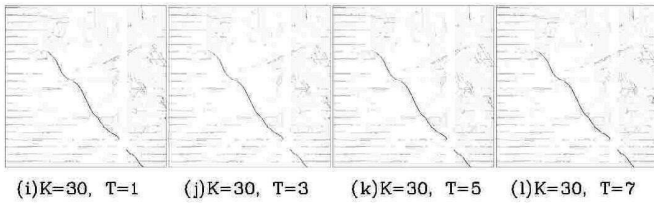
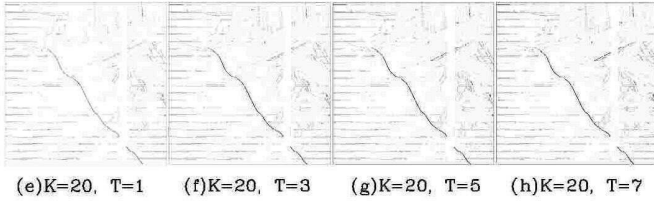
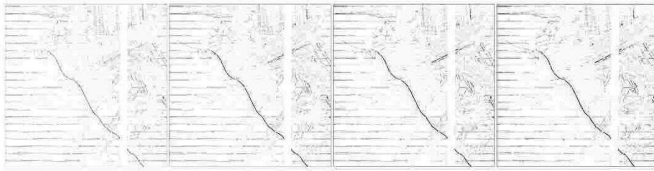


(h) $C_{pre}=3$

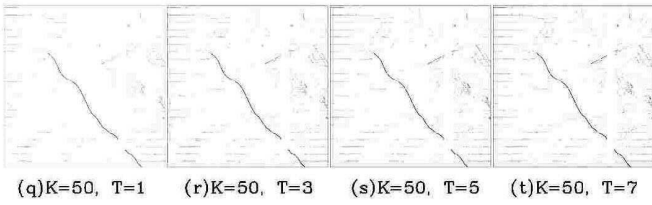
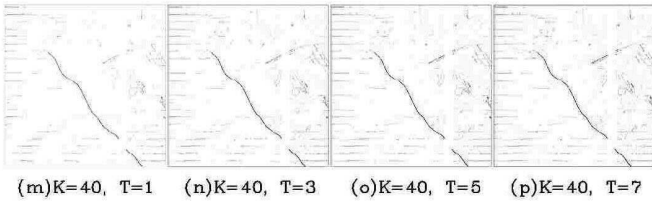
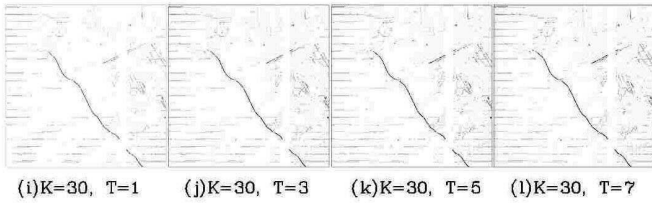
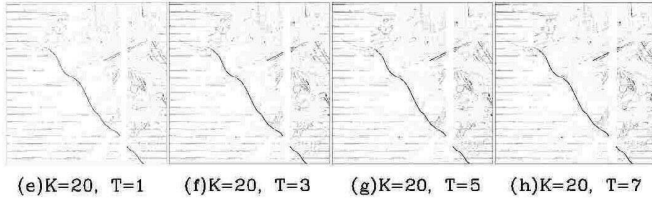
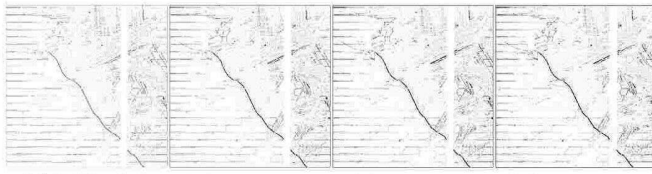


(i) $C_{pre}=4.5$

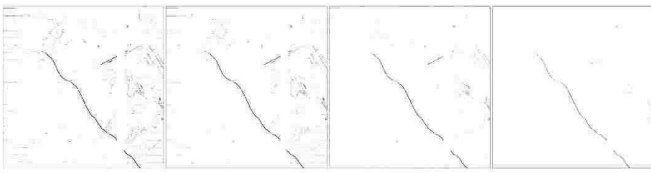
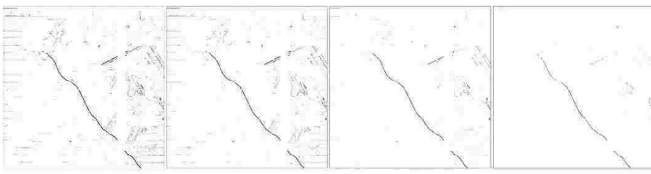
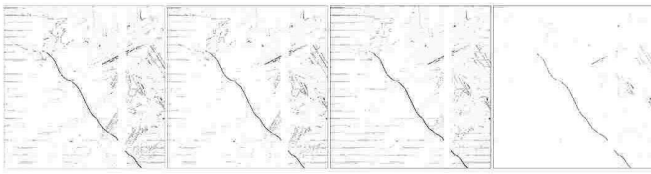
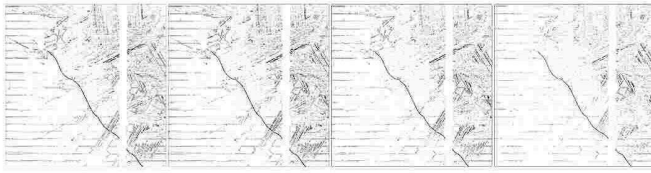
도면9



도면10



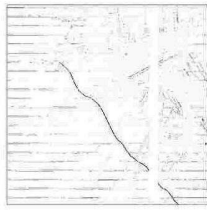
도면11



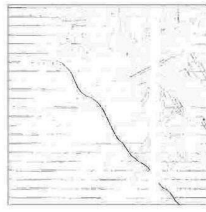
도면12



(a) $C_{post}=3$



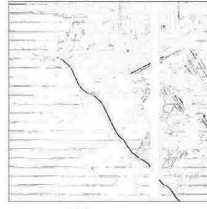
(b) $C_{post}=4$



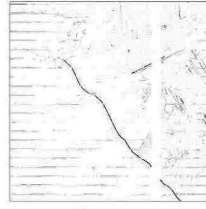
(c) $C_{post}=5$



(d) $C_{post}=3$



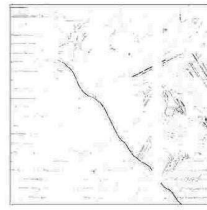
(e) $C_{post}=4$



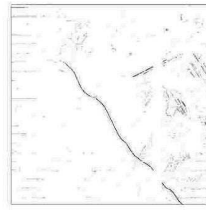
(f) $C_{post}=5$



(g) $C_{post}=3$

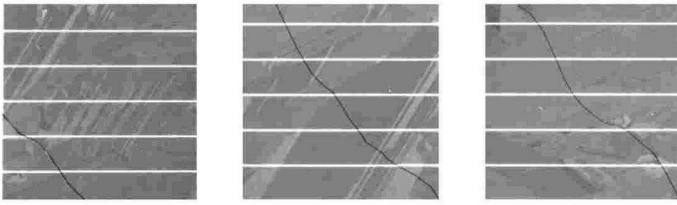


(h) $C_{post}=4$

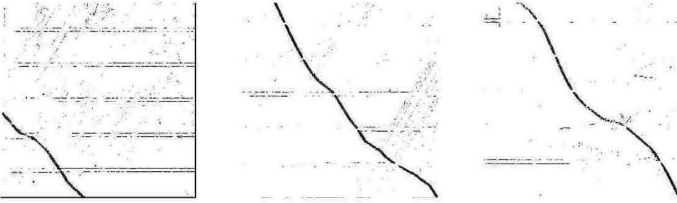


(i) $C_{post}=5$

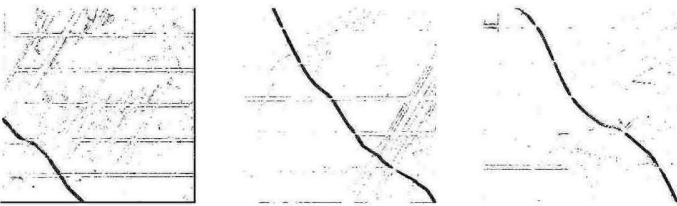
도면13



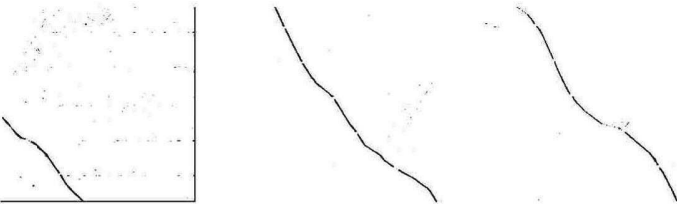
(a)(b)(c) original micro-crack



(d)(e)(f) Tsai et al.'s method

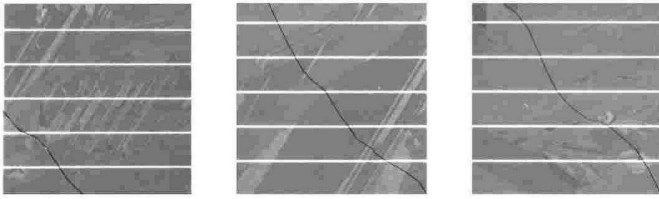


(g)(h)(i) Ko and Rheem's method

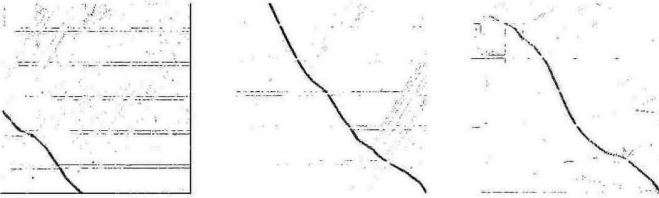


(j)(k)(l) Proposed method

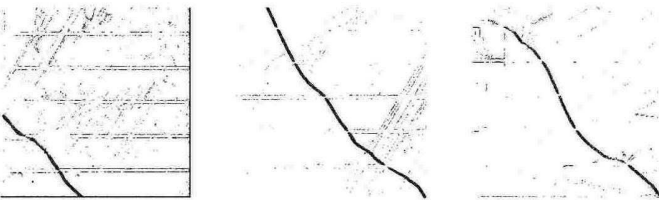
도면14



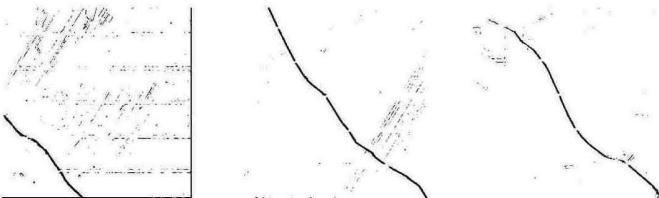
(a)(b)(c) original micro-crack



(d)(e)(f) Tsai et al.'s method



(g)(h)(i) Ko and Rheem's method



(j)(k)(l) Proposed method