

적응성 방향 미분의 에지 검출에 의한 효율적인 접촉각 연산

양명섭* · 이종구** · 김은미*** · 박철수****

요 약

본 연구는 투명 성질을 가진 물방울의 윤곽선에 대한 효율적인 검출을 통해 분석 장비의 자동 측정에 대한 정확성을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 투명성질을 가지는 원의 윤곽선 검출을 위해 밝기 분포에 대한 국소적 미분 대신에 적응성 방향 미분(Adaptive Directional Derivative ; ADD)이라는 비국소적 연산자를 도입함으로써 에지의 램프 폭의 변화에 무관하게 에지 검출에 적용할 수 있는 MADD(Modified Adaptive Directional Derivative) 알고리즘을 사용한다. 이 방법은 램프 구간 내에서 방향 미분 값을 가중치로 사용하여 픽셀들의 위치를 평균한 방향 미분의 국소 중심(Local Center of Directional Derivative ; LCDD)등의 위치를 찾는 추가적인 과정 없이, 정확한 에지 픽셀의 위치가 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수의 위치로 자연스럽게 결정될 수 있다. 제시된 에지 검출 방법을 표면분석 기술인 접촉각 연산에 적용하여 실험 및 결과 분석을 통해 제안 기법의 타당성 및 효율성을 검증한다.

An Efficient Contact Angle Computation using MADD Edge Detection

Myung Sup YANG* · Jong Gu LEE** · Eun Mi KIM*** · Cherl-Soo Pak****

ABSTRACT

In this paper, we try to improve the accuracy of automatic measurement for analysis equipment by detecting efficiently the edge of a waterdrop with transparency. In order to detect the edge of a waterdrop with transparency, we use an edge detecting technique, MADD (Modified Adaptive Directional Derivative), which can identify the ramp edges with various widths as the perfectly sharp edges and respond effectively regardless of enlarging or reducing the image. The proposed edge detecting technique by means of perfect sharpening of ramp edges employs the modified adaptive directional derivatives instead of the usual local differential operators in order to detect the edges of image. The modified adaptive directional derivatives are defined by introducing the perfect sharpening map into the adaptive directional derivatives. Finally we apply the proposed method to contact angle arithmetic and show the efficiency and validity of the proposed method.

Key words : Edge Detection, ADD(Adaptive Directional Derivative), Contact Angle Arithmetic

* 초당대학교 컴퓨터과학과

** 전북대학교 컴퓨터과학과

*** 호원대학교 컴퓨터·게임학부

**** 대불대학교 교양학부

1. 서 론

입력된 영상을 신호처리하여 제품의 검사나 분류에 응용하는 MV(Machine Vision)기술은 자동화 생산라인에서 제품의 불량검사에 필수적으로 사용됨으로써 생산성 향상과 비용절감에 기여하고 있다. 특히, 전기, 전자, 기계 및 통신관련 제품의 생산 및 검사에서 컴퓨터에 연결된 고성능 카메라를 활용하여 수량, 치수, 마킹, 표면 상태 등의 제품의 특징을 측정함으로써 제품에 내포된 결함을 식별할 수 있다. 최근 산업용 로봇 및 공장 자동화 부분의 설비 투자가 증가하면서 이에 대한 중요성도 갈수록 증가하고 있다.

MV 기술 중 지정한 형상의 위치과악 및 대상을 확인하기 위한 에지 검출 기법은 물체를 인식하는 가장 일반적인 실험 패턴 중 하나이며 중요한 문제이다. 즉 에지는 대상물과 배경의 경계를 나타내는 특징으로 대개 영상 밝기의 불연속이나 그 미분치의 불연속점에 존재하며 이 정보를 이용한 인식기술을 의미한다. 현재까지 에지를 검출하는 여러 가지 기법들과 연산자들이 제안되었다[1~3]. 그러나 단순한 에지 성분만 가지고는 원하는 물체의 경계선을 검출하기는 어렵다. 특히 투명성질을 가지는 물체의 경우는 더욱 어렵다[4]. 따라서 본 논문에서는 투명성질을 가지는 원의 윤곽선 검출을 위해 밝기 분포에 대한 국소적 미분 대신에 적응성 방향 미분(Adaptive Directional Derivative ; ADD)이라는 비국소적 연산자를 도입함으로써 에지의 램프 폭의 변화에 무관하게 에지 검출에 적용할 수 있는 MADD(Modified Adaptive Directional Derivative) 알고리즘을 사용한다[5]. 이 방법은 램프 구간 내에서 방향 미분 값을 가중치로 사용하여 픽셀들의 위치를 평균한 방향 미분의 국소 중심(Local Center of Directional Derivative ; LCDD)등의 위치를 찾는 추가적인 과정 없이, 정확한 에지 픽셀의 위치가 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수의 위치로 자연스럽게 결정될 수 있다.

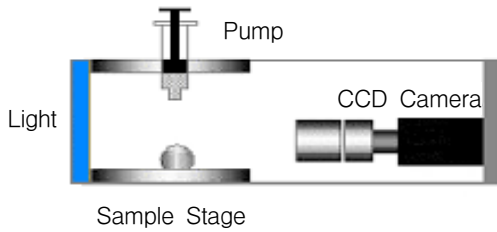
본 논문에서는 첫 번째로 MADD를 기반으로 하는 에지 검출과 최외각 차분 연산 결과를 AND 연산에 의하여 최종 윤곽선을 검출하여 요구하는 원의 윤곽선을 찾는 방법을 제안하였다. 두 번째로 검출된 원의 포인트를 최소제곱오차(Least Squares Error ; LSE) 방법을 사용하는 CFA(Circle Fitting Algorithm)에 적용하여 시편의 접촉각(Contact Angle)을 연산하는 시스템을 제시하고 실험 분석을 통해 제안 기법의 타당성 및 효율성을 검증한다.

본 논문의 구성은 제 2장에서 접촉각 연산을 위한 머신 시스템의 구성에 대해서 살펴보고 제 3장에서는 제안된 에지 검출 기법을 설명한다. 제 4장에서는 접촉각 연산 방법을 설명한다. 제 5장에서는 구현에 의한 실험 및 결과를 분석하고 마지막으로 제 6장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

2. 시스템 구성

접촉각은 액체가 고체 표면 위에서 열역학적으로 평형을 이룰 때 가지는 각이다. 표면과 시편사이에서 이루는 접촉각의 측정은 접착(adhesion), 표면처리 그리고 폴리머 표면 분석과 같은 많은 분야에서 잘 알려진 분석 기술로서, 수Å 단위의 단일층 변화에도 민감한 표면 분석 기술이다. 접촉각(θ)은 고체표면의 젖음성(wettability)을 나타내는 척도로서, 낮은 접촉각은 높은 친수성(hydrophilic)과 높은 표면 에너지를 나타내고 높은 접촉각은 낮은 친수성(hydrophobic)과 낮은 표면 에너지를 나타낸다. 평평한 고체표면에 접촉한 액체의 접촉각은 액체-고체-기체 접합점에서 물방울 곡선의 끝점과 고체 표면의 접촉점에서 측정된다.

본 논문에서 제시된 에지 검출과 실험분석을 위한 시스템의 전체적인 구조는 (그림 1)과 같이 물방울과 시편의 친수성을 측정하기 장비로 실린지 펌프와 샘플을 위한 스테이지 그리고 조명과 렌즈가 부착된 CCD 카메라로 구성된다.



(그림 1) 시스템 구성

이 시스템은 측정하고자하는 시편과 물방울의 친수성에 따라 다양한 모양의 물방울이 형성된다. 따라서 물방울의 모양을 검출하는 것이 본 시스템의 중요 기능이다. 시스템의 동작은 컴퓨터에 연결하여 매 프레임마다 캡처하여 연속적으로 연산 처리한다. 프로세싱 과정은 먼저 획득된 영상에서 물방울의 윤곽선 포인트를 검출한다. 검출된 포인트를 *LSE* 방법을 사용하는 *CFA*에 적용하여 형성된 물방울의 실제 원을 검출한다. 다음으로 검출된 원의 방정식과 베이스라인의 접촉점에서 기울기를 구하여 접촉각을 연산한다.

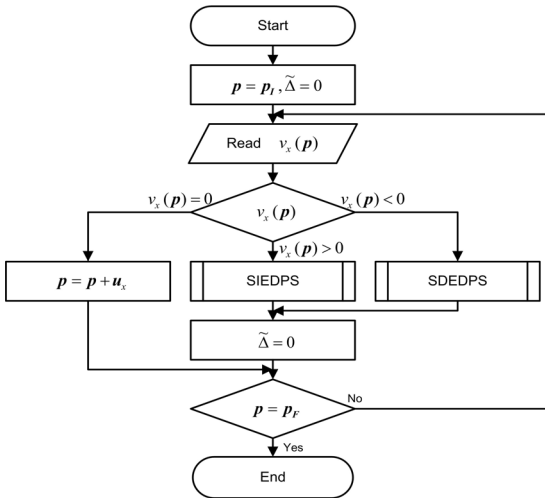
3. MADD 에지 검출 알고리즘

본 논문에서는 실제 이미지에서 이러한 에지의 속성을 찾아내고 그 정확한 위치를 지정하기 위하여 수정된 적응성 방향 미분(Modified Adaptive Directional Derivative ; MADD)을 사용한다[5]. MADD는 밝기 분포에 대한 국소적 미분 대신에 적응성 방향 미분(Adaptive Directional Derivative ; ADD)이라는 비국소적 연산자를 도입함으로써 에지의 램프 폭의 변화에 무관하게 적용할 수 있는 알고리즘을 기반으로 램프 에지의 엄격하게 단조적인 밝기 변화를 최적의 단순 계단 함수에 대응시키는 완전 선명화 사상으로 명명되는 개연적 대응관계를 이용하여 수정한 것이다. 이 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수는 실제 밝기 분포와의 평균제곱오차(Mean Square Error ; MSE)가 최소화

되도록 결정되고, 이렇게 결정된 계단 함수에서의 방향 미분 값을 원래의 밝기 분포에 지정함으로써 정의된다. ADD 대신에 MADD를 이용하면, 램프 구간 내에서 방향 미분 값을 가중치로 사용하여 픽셀들의 위치를 평균한 방향 미분의 국소 중심(Local Center of Directional Derivative ; LCDD)[6] 등의 위치를 찾는 추가적인 과정 없이, 정확한 에지 픽셀의 위치가 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수의 위치로 자연스럽게 결정될 수 있다. MADD를 이용한 에지 검출 알고리즘은 수평과 수직의 두 방향에 대한 실행을 결합함으로써 완성되는데, 이 두 방향에서의 에지 검출이 중첩되어 에지가 이중으로 표시되는 결점을 보완하기 위한 정교한 에지 다듬기 과정이 더해져야 한다.

에지 검출의 전체 과정은 이미지의 모든 수평선과 수직선을 따라 $\tilde{\Delta}_x$ 와 $\tilde{\Delta}_y$ 를 각각 산정하는 것으로 이루어진다. (그림 2)로 제안한 에지 검출 알고리즘이다. *x* 방향으로 엄격하게 단조 증가하는 구간에 대하여 에지 픽셀을 검출하기 위하여 적용되는 SIEDPS(Strictly Increasing Edge Detection by Perfect Sharpening) 프로시저를 도입하는데, 이 프로시저는 수평선이 끝나는 픽셀인 \mathbf{p}_F 에서 중단 되도록 코딩된다. *y*방향으로 엄격하게 단조 증가하는 구간에 대해서도 위 프로시저의 *x* 방향을 *y* 방향으로 바꾸어 SIEDPS 프로시저를 적용할 수 있다. 엄격하게 단조 감소하는 구간에 대해서 적용할 SDEDPS(Strictly Decreasing Edge Detection by Perfect Sharpening) 프로시저를 도입할 수 있는데, 이는 SIEDPS 프로시저에서 $v_\theta(\mathbf{p})$ 를 $-v_\theta(\mathbf{p})$ 로 바꿈으로써 간단히 얻어진다.

이미지에서 하나의 수평선 또는 수직선 전체에 대하여 에지 픽셀을 검출하는 알고리즘을 구성하려면 $v_\theta(\mathbf{p}) > 0$ 와 $v_\theta(\mathbf{p}) < 0$ 인 픽셀들을 위해서는 각각 SIEDPS와 SIEDPS 프로시저를 서브프로시저로서 결합하고, $v_\theta(\mathbf{p}) = 0$ 인 픽셀들을 위해서는 출력 없이 지나가는 서브프로시저를 포함해야 한다.

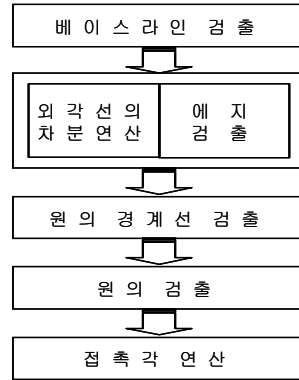


(그림 2) 에지 검출 알고리즘

따라서 램프의 완전 선명화에 의한 에지 검출(Edge Detection by Perfect Sharpening of Ramps, EDPSR) 알고리즘은 SIEDPS나 SDEDPS 프로시저에 의하여 에지 램프에 걸쳐 밝기 변화가 전체의 절반이 되는 픽셀을 에지 픽셀로 결정하여 출력하는 알고리즘으로 주어진다. 이러한 알고리즘을 이미지의 모든 수평선과 수직선에 걸쳐서 적용함으로써 전체 이미지에 대한 완전한 에지 검출 알고리즘이 구성된다.

4. 제안된 방법의 접촉각 연산

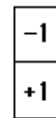
본 논문에서 제안된 방법은 (그림 3)과 같은 과정을 수행하여 원의 윤곽선을 검출하여 실제의 원을 계산한다. 먼저 전처리 과정에서 노이즈를 제거하고 베이스라인 검출과정을 수행한다. 다음으로 제 3장에서 제안된 알고리즘을 이용하여 에지의 검출과 외각선 검출을 위한 좌·우·상 방향의 스캔에 의한 차분 연산을 수행하여 최외각 성분을 구한 후 두 성분의 AND 연산으로 원의 경계선을 검출한다.



(그림 3) 연산과정

4.1 기준선(baseline) 검출

영상의 기준선을 검출을 하기 위하여 수평 선분을 구한다. 기준선 검출은 (그림 4)와 같이 수평선분을 찾는 2x1 마스크 연산자 기법을 이용하여 구현하였다. 이 연산자를 사용한 이유는 검출해야 할 기준선이 수평 선분이고 이 선분은 기울기가 거의 없기 때문이다.



(그림 4) 연산자

이 연산자는 위아래에 위치한 두개의 화소를 고려 아래 화소값이 위 화소값 보다 임계값 T 이상 크면 위화소를 **TRUE**로 표시한다.

다음은 의사 코드이다. 여기에서 $f(x, y)$ 는 명암 영상이고 $O(x,y)$ 는 출력 영상 T 는 임계값이다.

$$\text{If } f(x, y+1) - f(x, y) > T \text{ then } O(x, y) = \text{TRUE}$$

$$\text{Else } O(x, y) = \text{FALSE}$$

수평 선분 검출에 의한 에지 성분은 여러 개의 선분들을 가지고 있다. 따라서 각 선분의 길이를

누적하여 히스토그램을 계산한다. 식 (1)과 같이 x 축으로 투영(projection)한다.

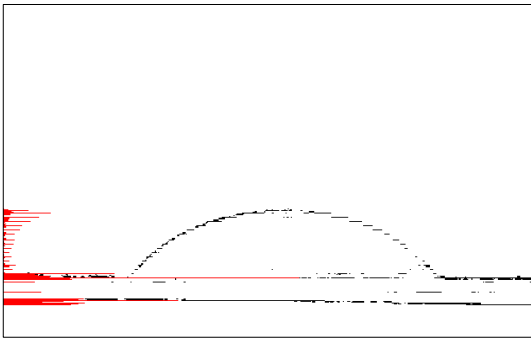
$$H(x) = \sum_{y=0}^N f(x, y) \quad (1)$$

위의 식에서 $f(x, y)$ 는 수평선분의 명암 영상, $H(x)$ 는 x축 투영을 나타낸다.

기준선 판단은 동일 직선상의 선분의 집합이 제일 많은 선분 즉, 히스토그램의 최대 피크 값을 계산하여 판단한다(그림 5), (그림 6).



(그림 5) 원영상

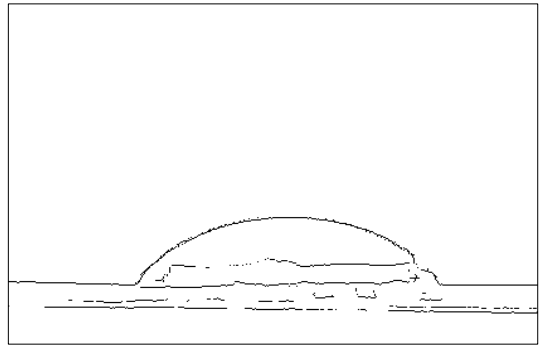


(그림 6) 기준선 검출

4.2 윤곽선 검출

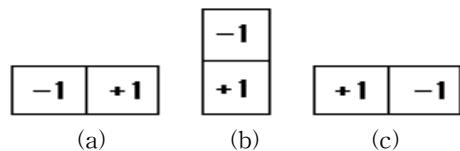
물체의 윤곽선 검출을 위하여 단순히 에지 연산에 의하여 검출하는 것은 원하지 않는 많은 정보

를 포함하게 된다. 특히 투명성질의 영상은 중간에 많은 불필요한 정보를 가지고 있다(그림 6). 따라서 본 논문에서는 외각선을 검출하기 위하여 먼저 MADD에지 알고리즘을 이용하여 에지 성분을 검출한다(그림 7).



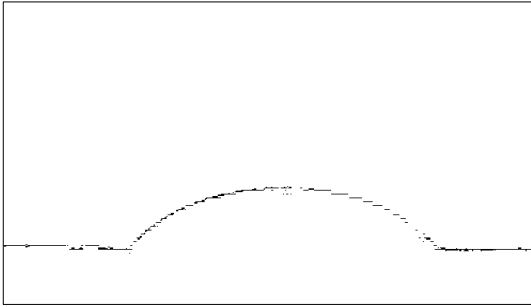
(그림 7) MADD 연산

다음으로 영상 내에 존재하는 물체의 최외각 차분 연산 정보를 구한다. 이 연산을 수행하는 이유는 검출하려는 원의 외각선 정보가 중요하기 때문이다. 이를 위해서는 첫 번째로 (그림 8)의 (a)연산자를 적용하여 왼쪽 방향에서 오른쪽 방향으로 스캔하면서 외각의 차분 정보를 구한다. 이 연산에서는 처음 존재하는 차분값만 취한다. 두 번째로 (c) 연산자를 적용하여 오른쪽에서 왼쪽방향으로 차분 연산을 수행한다. 세 번째로 (b)연산자를 적용하여 상에서 하방향으로 차분 연산을 수행한다(그림 9).

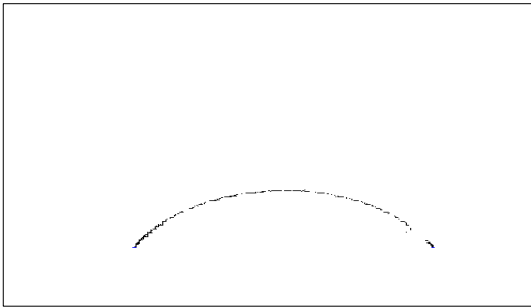


(그림 8) 연산자

마지막으로 검출된 베이스라인을 기준으로 MADD 연산 결과와 최외각 차분 연산결과를 AND연산하여 최종적으로 원의 윤곽선을 검출한다(그림 10).



(그림 9) 외각선 차분연산



(그림 10) AND 연산

4.3 원의 검출

AND연산 성분에서 원을 검출하기 위해서 CFA 알고리즘을 이용하여 검출한다. CFA에서 원의 방정식 파라미터들은 LSE 방법을 사용하여 계산한다. 원의 방정식은 중심점(x_0, y_0)과 반경 r 로 식 (2)과 같다.

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r^2 \quad (2)$$

식 (2)로부터 식 (3)과 같이 $E(\text{error function})$ 를 정의 할 수 있다.

$$E=\sum_{i=0}^n [(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-r^2]^2 \quad (3)$$

여기서 n 은 경계선 픽셀의 수이며 (x_i, y_i) 는 경계선의 위치를 나타낸다.

$z=x_0^2+y_0^2-r^2$ 을 사용하여 식 (3)을 정리하면 함수

E 는 식 (4)와 같다.

$$E=\sum_{i=0}^n (x_i^2-2x_ix_0+y_i^2-2y_iy_0+z)^2 \quad (4)$$

함수 E 를 최소화하여 x_0, y_0, z 값을 구하기 위해서 각 항에 대하여 미분하면 그 값은 0이 된다.

$$\frac{\partial E}{\partial x_0}=2\sum_{i=1}^n (x_i^2-2x_ix_0+y_i^2-2y_iy_0+z)(-2x_i)=0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_0}=2\sum_{i=1}^n (x_i^2-2x_ix_0+y_i^2-2y_iy_0+z)(-2y_i)=0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z}=2\sum_{i=1}^n (x_i^2-2x_ix_0+y_i^2-2y_iy_0+z)=0 \quad (7)$$

식 (5)~식 (7)으로부터 x_0, y_0, z 값을 구할 수 있으며 반경 r 은 식 (8)과 같다.

$$r=(x_0^2+y_0^2-z)^{1/2} \quad (8)$$

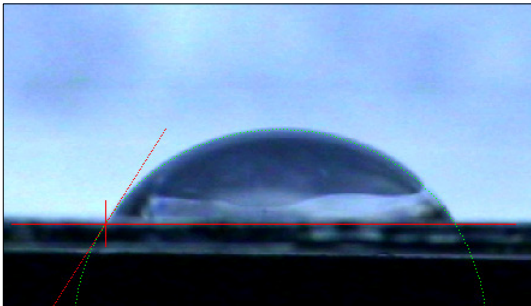
위의 식에서 구해진 원의 방정식($x^2+y^2=r^2$)과 기준선(x_1, y_1)과의 접점에서 기울기를 구하여 접촉각을 연산한다.

5. 실험 및 결과

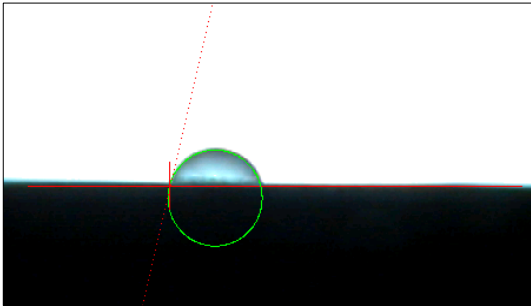
본 연구의 구현은 PC 기반 Visual C++을 이용하여 구현하였으며 500 x 400 크기의 컬러 카메라 영상에 대하여 정적 접촉각과 동적 접촉각 연산으로 구분하여 실험하였다. 구현된 시스템에서 동적 접촉각은 최대 8 fps까지 연산 처리하였다. 그리고 제안된 방법에 의하여 구한 원의 윤곽선 영상에서 실제의 원을 찾기 위하여 CFA를 적용하여 구현하였다.

정적 접촉각 실험에서 원을 찾는 실험 결과와 원의 방정식에서 기준선과의 접점에서의 기울기를 구하는 실험결과는 (그림 11), (그림 12)와 같다. 그림에서와 같이 제안된 방법에 의하여 검출된 윤

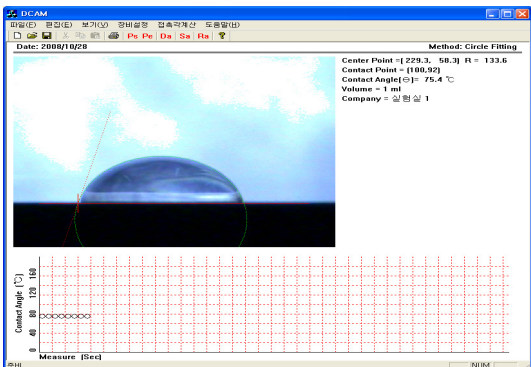
곽선에서 실제의 원을 찾는데 있어서 우수한 결과를 보인다. (그림 11)의 경우는 배경 영상에 잡음이 있어도 우수한 결과를 보이고 있다. (그림 13)은 시간에 따른 변화를 관찰하기 위해서 동적으로 접촉각을 연산하는 과정을 보인다.



(그림 11) 접촉각 연산 1



(그림 12) 접촉각 연산 2



(그림 13) 시간에 따른 동적 접촉각 연산

6. 결 론

본 논문에서는 분석장비의 자동측정을 위한 효율적인 원의 윤곽선 검출에 의한 접촉각 연산 알고리즘을 제시하였다. 제안된 방법은 카메라 영상의 2D 데이터를 MADD 에지 검출 알고리즘과 최외각 차분 연산에 의한 경계선 검출 기법을 적용하여 윤곽선을 검출하였다. 그리고 검출된 윤곽선 성분에서 *LSE* 방법을 사용하는 *CFA*에 적용하여 실제의 원을 검출하여 접촉각을 연산하였다. 제안 기법의 타당성 및 효율성을 검증하기 위하여 실험은 정적 및 동적으로 접촉각 연산을 수행하였으며, 실험 결과는 투명성질을 가지는 영상과 잡음 등에도 견고함을 보이며 또한 측정 에러도 아주 작음을 알 수 있었다. 향후 연구과제로는 다양한 실험 조건에서도 편차가 없는 재현성이 우수한 시스템으로 개선하는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] R. A. Boie and I. Cox, "Two Dimensional Optimum Edge Recognition using Matched and Wiener Filters for Machine Vision", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 450-456, 1987.
- [2] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698, 1986.
- [3] R. J. Qian and T. S. Huang, "Optimal Edge Detection in Two-Dimensional Images", IEEE Trans. Image Processing, Vol. 5, No. 7, pp. 1215-1220, 1996.
- [4] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi and Braian G. Schunck, Machine Vision, McGraw Hill, 1995.
- [5] Eun Mi Kim, Cheryl Soo Pakh, and Jong Gu Lee, "Optimal Edge Detection Using Perfect

Sharpening of Ramp Edges”, LNCS 3982 : Computational Science and Its Applications, pp. 1190-1199, 2006.

[6] E. M. Kim and C. S. Pahk, “Strict Monotone of an Edge Intensity Profile and a New Edge Detection Algorithm”, LNCS 2690 : Intelligent Data Engineering and Automated Learning, pp. 975-982, 2003.



김은미

1993년 전북대학교 전자계산학과 (이학석사)
1997년 오사카대학 정보공학과 (공학박사)
1997년~현재 원대학교 컴퓨터·게임학부 교수



양명섭

1995년 전북대학교 전자계산학과 (이학석사)
1999년 전북대학교 전자계산학과 (이학박사)
2000년~현재 초당대학교 컴퓨터과학과 조교수



박철수

1986년 서울대학교 물리학과 이학사
1988년 서울대학교대학원 물리학과 이학석사
1991년 서울대학교대학원 물리학과 이학박사

1994년 대불대학교 물리학과 전임강사
2003년 대불대학교 안경광학과 부교수



이종구

1998년 전북대학교 대학원 전산통계학과 졸업 (이학석사)
2008년 전북대학교 대학원 전산통계학과 졸업 (이학박사)