

논문 2016-53-5-12

칩 사진 상의 와이어 인식 방법

(Wire Recognition on the Chip Photo based on Histogram)

장 경 선*

(Jhang Kyoungson[®])

요 약

칩 상에서 연결을 담당하는 와이어의 인식은 칩 역공학에서 가장 중요한 부분 중 하나이다. 칩 사진에서 인식된 와이어는 칩 회로의 논리 수준 또는 기능 수준 표현을 복원하는데 사용된다. 기존의 칩 역공학에서 주로 사용되는 수작업에 의한 와이어 인식은 정확한 결과를 제공하지만, 한 칩이나 블록에 속한 와이어의 수가 수십 만개 또는 그 이상이 될 경우 너무 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 칩 상의 와이어는 그 재료에 따라 특정한 밝기나 색상 특성을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 칩 사진에 나타나는 영역의 밝기나 색상 특성을 이용하여 와이어 여부를 판단하는 2단계 방법을 제안한다. 즉, 이미지 이진화 과정과 이진 이미지에 나타나는 영역에 대한 와이어 여부를 판단하는 과정으로 이루어진다. 활용되는 기법들은 기존에 제안된 기법들을 이용한다. 둘째 단계에서, 와이어 영역의 특성을 지정해주기 위해서 사용자는 특정 와이어 영역을 선택하는 과정을 수행해야 한다. 선택된 와이어 영역의 히스토그램 특성은 다른 영역과의 히스토그램 유사도를 계산하는 데 사용된다. 첫 번째 실험은, 기존에 제안된 몇 가지 이미지 이진화 기법 중에서 둘째 단계를 위해 적절한 한 가지 기법을 선택하기 위한 것이다. 와이어 영역 판별 방법에 대한 둘째 실험은, 실험적으로 비교 가능한 기존 방법이 없는 관계로, 본 논문에서 제안하는 그레이스케일 또는 HSV 컬러를 이용하는 히스토그램 유사도 비교 방법 세 가지에 대한 비교 실험 결과를 제시한다. 제일 성능이 좋은 방법은, 와이어 영역으로 판단한 영역이 진짜 와이어 영역인 비율이 98% 이상임을 확인하였다.

Abstract

Wire recognition is one of the important tasks in chip reverse engineering since connectivity comes from wires. Recognized wires are used to recover logical or functional representation of the corresponding circuit. Though manual recognition provides accurate results, it becomes impossible, as the number of wires is more than hundreds of thousands. Wires on a chip usually have specific intensity or color characteristics since they are made of specific materials. This paper proposes two stage wire recognition scheme; image binarization and then the process of determining whether regions in binary image are wires or not. We employ existing techniques for two processes. Since the second process requires the characteristics of wires, the users needs to select the typical wire region in the given image. The histogram characteristic of the selected region is used in calculating histogram similarity between the typical wire region and the other regions. The first experiment is to select the most appropriate binarization scheme for the second process. The second experiment on the second process compares three proposed methods employing histogram similarity of grayscale or HSV color since there have not been proposed any wire recognition method comparable by experiment. The best method shows more than 98% of true positive rate for 25 test examples.

Keywords : 칩 역공학, 와이어 인식, 히스토그램, 그레이스케일 이미지, HSV, 이미지 이진화 (chip reverse engineering, wire recognition, histogram, grayscale image, HSV, image binarization)

I. 서 론

VLSI 시스템의 역공학은 “기존 시스템을 분석하고 그 요소와 그들간의 연결성을 인식하여 다른 형태나 더

상위 형태의 표현을 만들어내는 과정”을 의미한다^[1]. 일반적으로 역공학 실험은 반도체 칩의 층별 사진에 대한 분석을 통해, 칩의 논리 또는 기능 수준 표현을 복원하는 것을 목적으로 한다. 집적회로 시대 초기에 역공학은 현미경과 카메라만을 이용한 수작업을 통해 매우 단순하게 수행되었다. 그러나, VLSI공정 기술의 급속한 발전으로 인해 매우 복잡한 구조를 가지는 반도체 칩에서 수작업으로 전체 시스템을 분석하는 것이

* 정회원, 충남대학교(Chungnam National University)

© Corresponding Author(E-mail : sun@cnu.ac.kr)

Received ; January 23, 2016 Revised ; April 5, 2016

Accepted ; April 26, 2016

쉽지 않게 되었다.

최근 여러 반도체 회사들은 자사의 지적재산권을 보호하고 타 회사의 지적재산권 침해를 알아내기 위해 칩 역공학 서비스를 많이 사용하고 있다. Chipworks^[2]는 칩 역공학 서비스를 제공하는 대표적인 회사로서, 특정 시스템이나 칩의 분석을 통해 고객에게 기능수준이나 논리회로수준, 또는 칩 사진 수준의 정보를 제공한다.

칩 사진으로부터 역공학을 통해 칩의 기능을 분석하기 위해서는, 세 가지 요소 (트랜지스터, 바이어, 와이어)를 인식해야 한다. 트랜지스터와 바이어는 대개 템플릿 매칭 기법을 사용해서 비교적 쉽게 자동 인식이 가능하다^[3-4]. 그러나, 우리가 아는 한, 수작업을 대폭 줄여 줄 수 있을 정도의 성능을 가진 와이어 인식 방법은 아직 발표된 것이 없다. Degate^[5]는 사용자가 칩 사진을 보면서 수작업으로 회로의 연결관계를 구성해가도록 설계된 오픈 소스 소프트웨어로, 에지 검출에 기반한 와이어 자동 인식 기능이 추가적으로 제공된다. 칩 사진에서 검출되는 에지 영상에서 인접한 에지 픽셀들을 결합하여 선분을 만들고, 선분들 간의 병합 과정을 통해 점진적으로 와이어의 외형을 완성한다^[6]. 그러나, 이 방식은 매우 낮은 인식률로 인해 실제 환경에서 사용되기 어려우며, 2009년 이후로 Degate 소프트웨어가 더 이상 업데이트되지 않고 있다.

객체 인식 연구는 색상에 기반한 방법과 모양에 기반한 방법으로 분류된다. VLSI 칩에 사용되는 와이어는 직선뿐만 아니라 곡선으로 이루어지는 경우가 많고, 팬아웃(fanout)이나 가지 형태를 취하기도 하므로 모양에 기반한 와이어 인식은 매우 어렵다. 이에 반해, 칩 상의 와이어는 주로 특정한 물질로 제작되고 일정한 조명 하에 고해상도의 카메라를 이용하여 촬영되기 때문에, 밝기나 색상의 특징을 통해 와이어를 구별해 낼 수 있는 가능성이 높다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 와이어 인식 방법은 이미지 이진화 기법을 이용하여 영역들을 찾아내고, 찾아낸 영역들의 밝기나 색상의 유사도를 비교하는 방식을 사용한다. 이런 방식으로 칩 상의 와이어를 인식하는 방법은 제안된 바 없다.

이미지 이진화 과정에 사용될 기법을 선정하기 위해서, Otsu 임계치 기법^[7]과, k-means 클러스터링을 이용한 이미지 이진화^[8-9]와, 특정 크기의 윈도우 단위로 임계치를 결정하여 이진화를 수행하는 적응적 임계치 결정 기법^[10-11]에 대한 비교 실험을 수행하였다.

이진 이미지에서 나타나는 영역들에 대한 와이어 여부 결정을 위해, 밝기 특성에 주로 민감한 그레이스케

일 이미지 기반의 히스토그램 유사도 비교 방법과 색상 특성을 그대로 나타내주는 HSV 컬러^[12] 기반의 히스토그램 유사도 비교 방법을 사용하였다. RGB 컬러는 세 가지 성분이 모두 색상 측면에 집중되어 있어서, 영역 사이의 구별에 효과적이지 않다. 하지만, 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Value)를 세 축으로 포함하고 있는 HSV 컬러는 좀 더 영역 사이의 구별에 효과적이다. 그래서, 본 논문에서는 그레이스케일 이미지 기반의 히스토그램 유사도 비교 방법 한가지와 HSV 컬러 기반의 히스토그램 유사도 비교 방법 두 가지를 제안하여, 실험으로 비교하였다. 이와 같이 본 논문에서 제안하는 방법 간의 비교 실험만을 수행한 이유는 기존에 제안된 와이어 인식 방법이라고 할 수 있는 Degate의 와이어 인식 기능은 실제로 사용할 수 있을 정도의 인식률을 보이고 있지 않기 때문이다.

영역 간의 히스토그램 유사도를 결정하려면, 비교의 기준이 되는 와이어 영역에 대한 대표적인 히스토그램이 필요하다. 모든 칩 사진에 대해 초점이나 조명을 일률적인 조건으로 유지하기 어려우므로, 본 논문에서는 사용자의 와이어 영역 지정 동작에 의해 칩 사진 별로 대표 히스토그램을 정하는 방식을 사용한다. 이 대표 히스토그램은 다른 영역들의 히스토그램과의 유사도를 계산하여 와이어 영역 여부를 판단하는데 사용된다. 그러므로, 기존의 수작업에 의존한 역공학 방식에 비하면 사용자가 매우 적은 입력만을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 이미지 이진화 기법 선택 실험을 위해 사용된 세 가지 기존 기법에 대해 설명한다. 또한, 본 논문에서 제안하는 그레이스케일 히스토그램 기반의 히스토그램 유사도 비교 방법 한 가지와, HSV 컬러에 근거한 히스토그램 유사도 비교 방법 두 가지를 소개한다. III장에서는 세 가지 기존 기법 중에서 적합한 이미지 이진화 기법을 선정하기 위한 실험 과정과 결과를 소개한다. IV장에서는 이진 이미지 상의 영역에 대한 와이어 영역 판단 방법 세 가지에 대한 실험 결과를 제시한다. V장에서는 요약과 향후 연구를 제시한다.

II. 제안된 방법의 소개

제안된 와이어 인식 방식은 칩 사진을 이미지 이진화 단계와, 이진 이미지로부터 영역을 추출하여 와이어 영역 여부를 결정하는 단계로 구성되며, 좀 더 상세하게 나누면 아래와 같이 5단계로 나눌 수 있다.

1. RGB 이미지를 그레이스케일 이미지로 변환한다. HSV 컬러 기반 방법을 위해 RGB 이미지를 HSV 이미지로 변환한다.
2. 적절한 이미지 이진화 방법을 사용하여 RGB 이미지나 그레이스케일 이미지를 이진 이미지로 변환한다.
3. 이진 이미지에서 영역들을 추출하고, 각 영역에 대한 그레이스케일 히스토그램이나 HSV 히스토그램을 만든다.
4. 사용자가 임의의 한 와이어 영역을 선택하면, 대표 히스토그램이 결정된다.
5. 각 영역의 히스토그램과 대표 히스토그램 간의 유사도를 계산하여 와이어 여부를 판단한다.

1. 이미지 이진화 기법의 선정각 절 제목

이미지 이진화를 용이하게 하기 위해 RGB 컬러로 된 칩 사진은 우선 그레이스케일 영상으로 변환한다.

각 층별 칩 사진은 해당 층의 와이어가 돋보이는 조건에서 촬영을 하므로, 와이어 부분은 더 밝은 부분이 될 가능성이 높다. 그런 이유로, 와이어 후보 영역을 추출하기 위해, 이미지를 밝은 영역과 어두운 영역으로 분할하는 이미지 이진화 기법을 사용한다. 이미지 이진화 기법은 문자 인식의 전처리에 많이 사용된다^[13-15]. 문자 인식에서는 배경과 문자로 구분하는 이분법적인 구분이 중요한 환경이지만, 와이어 인식을 위한 칩 사진에서는 그런 구분이 분명하지 않아서, 그 기법들을 그대로 적용하기 어렵다. 그래서, 본 논문에서는 적응적인 특성을 지닌 세 가지 기존 기법에 대한 비교 실험을 통해, 와이어 인식에 적절한 이진화 기법을 선정하고자 하였다. 즉, 적응적인 히스토그램 평활화 후에 적용되는 Otsu 임계치 기법, k-means 클러스터링 기법, 적응적 임계치(adaptive thresholding) 기법이다.

Otsu 임계치 기법^[7]은 그레이스케일 이미지의 픽셀들의 명도에 대한 히스토그램 분포로부터 배경과 전경 두 부분으로 나누기에 적합한 전역적인 임계치를 결정하는 기법이다. 그런데, 전역적인 특성 때문에 그레이스케일 이미지에 바로 적용할 경우에 이진화 성능이 좋지 않기 때문에, 적절한 크기의 윈도우 단위로 적응적인 히스토그램 평활화^[16-17]를 수행한 후에 Otsu 임계치 기법을 적용한다.

k-means 클러스터링 이진화 기법^[8-9]은 k=3인 k-means 클러스터링 기법을 픽셀들의 밝기에 적용하여, 세 수준의 밝기 범위(배경, 중간 밝기, 전경)에 맞는 세 개의 이

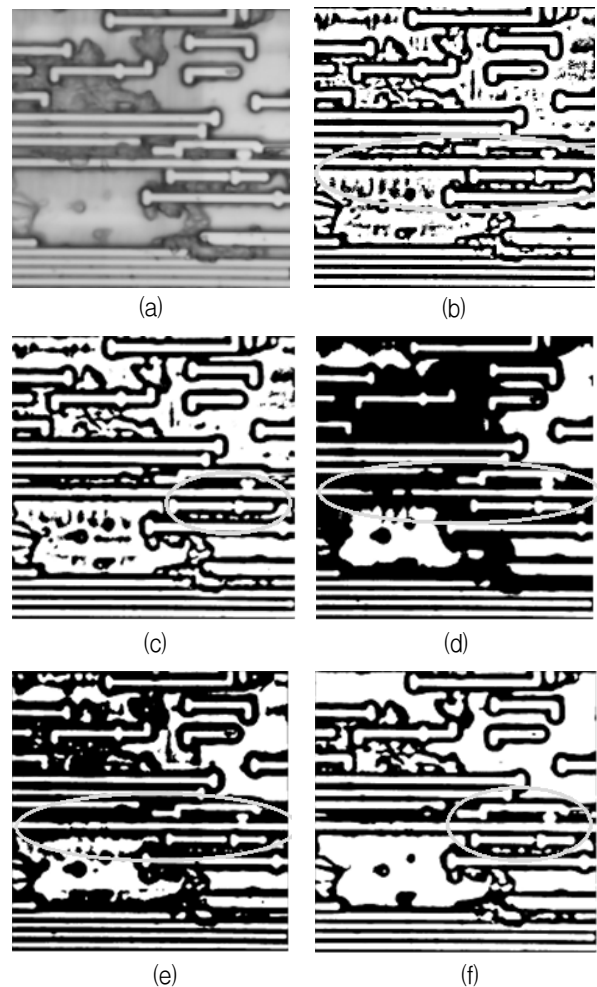


그림 1. (a) 예제 입력 (b) ws=41로 적응적 임계치 기법을 적용한 결과 (c) ws=61로 적응적 임계치 기법을 적용한 결과 (d) 3-means 클러스터링을 적용한 결과 (e) Otsu 임계치를 적용한 결과 (f) Otsu 임계치*1.3을 임계치로 적용한 결과

Fig. 1. (a) an example photo (b) adaptive thresholding with ws=41 (c) adaptive thresholding with ws=61 (d) 3-means clustering (e) Otsu threshold (f) Otsu threshold * 1.3.

미지를 얻는 것이며, 이 중에서 전경에 해당하는 이미지는 와이어 영역의 후보를 포함하는 이진 이미지로 사용할 수 있다.

적응적 임계치 기법^[10,11]도 적절한 크기의 윈도우 단위로 임계치를 설정하여 이미지 이진화를 수행하는 기법이다. 윈도우 크기(window size, ws)는 대상이 되는 물체의 크기와 유사하거나 크게 잡는 것이 효과적이다. 너무 윈도우 크기가 작을 경우에 이진화 효율이 떨어진다.

세 가지 기법을 그림 1(a)에 적용한 결과들이, 그림 1(b)-(f)에서 보여 주고 있다.

그림 1(b)는 그림 1(a)의 예제에 윈도우크기 ws를 41로 적응적 임계치 기법을 적용한 결과이다. 윈도우 크

기로 41을 선택한 이유는 와이어의 평균적인 너비가 41 픽셀 정도 되기 때문이다. 노란색 원으로 표시된 부분에서 보면 수평으로 긴 와이어 영역이 분리되지 않았고, 인접한 위 아래 와이어 영역이 잘 분리되어 있음을 볼 수 있다. 같은 임계치 기법이지만, 윈도우 크기를 61로 적용한 결과인 그림 1(c)에서 노란색 원 안에서, 인접한 수평 와이어 영역 두 개가 한 영역으로 합해져 있음을 알 수 있다. 즉, 윈도우 크기는 적절해야 한다는 것을 알 수 있다.

k-means 클러스터링 기법의 적용으로 얻은 이미지인 그림 1(d)의 노란색 원 안에서, 긴 수평 와이어 영역이 몇 개의 영역으로 분리되어 있고, 인접한 와이어 영역들도 잘 구분되어 있지 않음을 알 수 있다.

Otsu 임계치 기법을 적용하여 얻은 이진 이미지인 그림 1(e)는 적용적인 히스토그램 평활화를 윈도우 크기 41로 해서 적용하여 얻은 것인데, 인접한 와이어 영역이 구분되어 있지 않음을 알 수 있다. 인접한 와이어 영역이 구분되도록 시도하기 위해서, Otsu 임계치에 1.3 배를 한 임계치를 적용해서 얻은 그림 1(f)에서, 노란색 원에 해당하는 부분에서 인접 와이어 영역 간 구분이 되고, 긴 수평 와이어 영역이 분리되지 않고 한 영역으로 되어 있음을 알 수 있다.

이진 이미지를 얻는 기법은 이외에도 여러 가지 기법을 적용해 볼 수 있다. 그러나, 둘째 단계인 와이어 인식을 위해 바람직한 이미지 이진화 기법의 기준은 한 와이어 영역이 분리되지 않고, 인접한 두 와이어 영역이 구분되어서 가능한 모든 와이어 영역이 포함된 이진 이미지를 얻는 것으로 충분하다.

그림 1에서도 볼 수 있는 것처럼, 윈도우 크기 41인 적응적 임계치 기법이 상대적으로 바람직한 특성을 가졌음을 알 수 있다. III장은 이와 같은 세 가지 기법에 대한 비교 실험 결과를 통해 적응적 임계치 기법이 선정되는 과정을 보여준다.

2. 제안된 와이어 인식 방법들

둘째 단계인 영역들의 와이어 여부 판단은 본 장의 첫 부분에서 기술한 와이어 인식을 위한 다섯 단계 중에서, 3-5 단계에 해당한다.

단계 3에서는, 이미지 이진화를 통해 얻은 영상에서, 흰색으로 표시된 부분은 와이어 후보 영역들이며 와이어 여부의 판단의 대상이 된다. 하지만, 모든 흰색 영역을 후보 영역으로 고려하는 것은 비효율적이다. 따라서, 와이어 영역의 너비의 제곱에 해당하는 영역 보다 적은

픽셀 수를 갖는 영역은 후보 영역으로 간주하지 않는다.

단계 4는 사용자로부터 와이어 특성에 관한 정보를 받아들이는 과정으로, 사용자는 와이어 영역 중 하나를 선택한다. 그 영역에 대한 히스토그램 정보가 와이어에 대한 대표 히스토그램 정보가 된다.

단계 5에서 후보 영역의 와이어 여부 판단을 위해 히스토그램 간 유사도 비교 방법이 필요하다. 히스토그램 간 유사도 비교에는 KL 발산(Kullback Leibler Divergence)^[18]과 유사한 방법을 사용할 수도 있다. KL 발산은 확률분포함수 P로부터 확률분포함수 Q의 발산에 대한 식 (1)에서 볼 수 있는 것처럼, 히스토그램을 빈 단위로 비교하는 방식이다. 이런 방식은 평균이 조금만 쉬프트 되어도 많은 차이가 생기며, 분모가 0이 되면 불능인 결과가 발생할 수 있다. 실제로, 와이어 인식 문제에서 사용되는 히스토그램의 빈 값이 0인 경우도 자주 발생하기 때문에, KL 발산이나 그와 유사한 방법을 사용하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 빈 단위 비교가 아닌, 히스토그램에서 추출된 평균, 표준 편차, 스큐(skew)를 기반으로 유사도를 비교하는 방식^[12]을 사용한다.

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_i P(i) \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (1)$$

단계 3에서는 그레이스케일 이미지 또는 HSV 이미지에 대한 히스토그램을 만든다. 단계 5에서는 확률분포함수인 히스토그램에 대한 평균(E), 표준편차(sd), 스큐(sk)를 기준으로 유사도 비교를 수행한다. HSV 이미지는, 색상(H), 채도(S), 명도(V) 각각에 대해서 히스토그램이 구성되고, 각 성분, H, S, V에 대해서 E, sd, sk를 계산해야 한다.

히스토그램 H의 평균 E(H)은 아래와 같은 식 (2)에 의해 계산된다. 식 (2)에서 F_j 는 히스토그램 빈 j의 빈도수를 의미하며, $N(H)$ 은 특정 영역에 대한 히스토그램 H에 포함된 총 픽셀의 수를 의미한다. 각 빈의 F_j 값을 모두 합한 값과 같다.

$$E(H) = \sum_{j=0}^{255} j * F_j / N(H) \quad (2)$$

히스토그램 H에 대한 표준 편차 $sd(H)$ 는 아래와 같은 식 (3)으로 계산된다. 표준 편차는 히스토그램의 샘플들이 평균 주변에 얼마나 가까이 모여 있는 지 또는

퍼져 있는 지를 나타내는 기준으로 사용된다.

$$sd(H) = \sqrt[2]{\sum_{j=0}^{255} (E(H) - j)^2 * F_j / N(H)} \quad (3)$$

특정 영역 또는 특정 영역의 히스토그램 H에 대한 스큐 $sk(H)$ 는 확률분포함수의 비대칭성을 나타내는 기준으로 사용하는데, 계산식은 표준편차 계산식 (2)와 유사하며, 식 (4)로 계산한다.

$$sk(H) = \sqrt[3]{\sum_{j=0}^{255} (E(H) - j)^3 * F_j / N(H) \sum} \quad (4)$$

두 영역의 히스토그램 H1, H2간의 거리인 $d(H1, H2)$ 는 아래 식 (5)로 계산된다. $w1, w2, w3$ 는 평균의 차와 표준 편차의 차와 스큐의 차에 대한 가중치를 나타낸다.

본 논문에서는 아래와 같이 세 가지 방법을 적용하여 대표 와이어 영역 H1과 그 외 다른 영역 간의 히스토그램 H2 간의 유사도 또는 거리를 계산한다.

1. 그레이스케일 이미지에서의 영역 간 거리 계산 (gray 방식)
2. HSV 이미지에서의 영역 간 거리 계산(HSV 방식)
3. HSV 이미지를 사용하지만, 와이어 여부와 일관된 상관관계가 있는 요소만 고려하는 식을 사용한 거리 계산(Corr 방식)

$$d(H1, H2) = w1 * |E(H1) - E(H2)| + w2 * |sd(H1) - sd(H2)| + w3 * |sk(H1) - sk(H2)| \quad (5)$$

첫째 방법인 gray 방식은 그레이스케일 이미지에서 영역 간 비교를 위해서, 식 (5)를 사용하며 가중치는 모두 1을 사용한다.

둘째 방법인 HSV 방식은 HSV 이미지에서의 영역간 비교를 위해서는, H, S, V 요소 각각에 대한 히스토그램을 구성해야 하며, 그리고, H, S, V 각각에 대해서 거리 $d_H(H1, H2)$, $d_S(H1, H2)$, $d_V(H1, H2)$ 를 계산해야 한다. 색조 성분 상의 거리인 $d_H(H1, H2)$ 를 계산하려면, $E_H(H1)$ 와 $E_H(H2)$, $sd_H(H1)$ 와 $sd_H(H2)$, $sd_H(H1)$ 와 $sd_H(H2)$ 를 먼저 계산해야 한다. 마찬가지로,

채도 성분 거리인 $d_S(H1, H2)$ 과 명도 성분 거리인 $d_V(H1, H2)$ 의 계산을 위해서도 각각 해당하는 성분들이 계산되어야 한다.

HSV 이미지에서의 두 영역의 히스토그램 H1, H2간의 거리는 아래와 같은 식 (6)으로 계산된다. 색상(H), 채도(S), 명도(V) 성분 상의 거리인 $d_H(H1, H2)$ 와 $d_S(H1, H2)$ 와 $d_V(H1, H2)$ 를 계산할 때 사용되는 가중치인 $w1, w2, w3$ 도 모두 1로 하고, $d(H1, H2)$ 을 계산하는데 사용되는 가중치 w_H, w_S, w_V 도 모두 1로 설정하여 사용한다.

$$d(H1, H2) = w_H * d_H(H1, H2) + w_S * d_S(H1, H2) + w_V * d_V(H1, H2) \quad (6)$$

셋째 방법인 Corr 방식은 HSV 이미지에서 거리 계산에 사용하는 모든 요소의 중요도가 같지 않은 것을 참작하여, 와이어 여부와 상관관계가 제일 많은, 채도와 명도의 히스토그램 평균이 와이어 여부와 갖는 평균적인 상관관계를 가중치로 이용하였다. 즉, 아래의 식 (7)을 사용한다. 여기에서, 가중치인 w_a, w_b 는 -0.5와 -0.8을 사용하였다. 이 값은 E_S, E_V 의 와이어 여부와 상 상관관계의 평균값에 해당한다. 다른 요소인 색상도 고려할 수 있지만, 색상 보다는 채도와 명도에 의한 차이가 와이어 여부에 더 많은 영향을 미치는 것을 실험을 통해 관찰하였다.

$$d(H1, H2) = w_a * |E_S(H1) - E_S(H2)| + w_b * |E_V(H1) - E_V(H2)| \quad (7)$$

III. 이미지 이진화 기법 선택을 위한 실험

이미지 이진화 기법을 선택하기 위한 실험은, II장의 1절에서 설명한 세 가지 기법에 대해서 이루어졌다.

세 가지 이미지 이진화 기법에 대한 실험적 비교 결과는 표 1에 나타나 있다. 25개의 예제에 대해서 수행했으며, 첫 번째 열은 실험 예제 사진의 순번을 나타낸다. 둘째 열은 해당 사진을 이진화 시켰을 때 반드시 나타나야 하는 와이어 영역의 개수를 나타낸다. 그 다음 열부터는 적용적 임계치 기법(ath41, ath61), k-means 클러스터링(3mc), Otsu 기법(otsu, otsu13)을 적용한 결과들을 나타낸다.

표 1. 이미지 이진화 기법의 비교

Table1. Comparisons of Image Binarization Methods.

순번	#Wires	ath41	ath61	3mc	otsu	otsu13
1	27	27	27	28	27	27
2	34	34	33m	31m	34	34
3	33	33	33	33	33	33
4	29	29	29	29	29	29
5	33	33	33	35s	34s	35s
6	26	26	26	27s	26	27s
7	47	47	47	47	46m	47
8	45	45	45	45	45	45
9	35	35	35	35	35	35
10	37	38s	37	38s	37	38s
11	24	24	24	25s	24	25s
12	28	28	28	28	28	28
13	32	32	32	32	31m	32
14	36	36	36	34n	37s	37s
15	29	29	29	29	29	29
16	17	17	17	22s	17	18s
17	22	22	22	22	22	22
18	23	23	23	23	22m	23
19	27	27	27	27	27	27
20	25	25	25	25	25	25
21	21	21	21	21	20m	21
22	23	23	22m	22m	21m	23
23	25	24m	23m	23m	22m	23m
24	28	28	28	28	28	28
25	28	29s	29s	29s	29s	29s

표 1에서 셋째와 넷째 열에 나와 있는 ath41(ath61)은 원도우 크기 41(61)로 적응적 임계치 기법을 적용하여 얻은 이진 이미지에 나타난 와이어 영역의 개수를 나타낸다. 다섯째 열의 3mc는 k=3인 k-means 클러스터링을 이용한 이진화 기법을 적용하여 얻은 이진 이미지에 나타난 와이어 영역의 개수를 나타낸다. 여섯 번째 열인 otsu는 Otsu 임계치 기법을 적용한 결과이고, 일곱 번째 열인 otsu13은 Otsu 임계치에 1.3배한 임계치를 적용하여 얻은 이미지에 나타난 와이어 영역의 개수를 나타낸다.

바람직한 이미지 이진화 기법의 기준은 둘째 열에 있는 수만큼의 와이어 영역을 모두 포함하는 것이다. 하지만, 기법들의 한계로 둘째 열의 수와 다른 경우들이 있으며, 그 이유를, 찾아낸 와이어 영역의 수 옆에 m, s, n으로 표시해두었다. 약어에서 m은 이웃한 와이어 영역과 통합(merged)되어서, 그 수가 줄어드는 경우를 나타낸다. 약어로 s로 표시된 것은, 원래 한 와이어 영역이지만, 분리(split)되어서 와이어 영역의 수가 증가된 경우를 나타낸다. 약어로 n으로 표시된 것은 어떤 와이어 영역이 아예 이진 이미지에 나타나지 않는 경우를

나타낸다.

그림 1에는 그림 1(a)에 있는 예제 22번에 대해 이미지 이진화 기법을 적용한 결과들을 보여준다. 그림 1(b)는 그림 1(a)에 ath41을 적용한 결과이고, 그림 1(c)는 그림 1(a)에 ath61을 적용한 결과이다. 그림 1(d)는 그림 1(a)에 3mc를 적용한 결과이다. 그림 1(e)는 그림 1(a)에 otsu를 적용한 결과이고, 그림 1(f)는 otsu13을 적용한 결과를 보여준다.

이 실험 결과에 의하면, ath41이 상대적으로 우수한 이진화 기법이므로, 와이어 영역 인식에 대한 실험은 ath41로 얻어진 이진 이미지에 대해 적용한다.

IV. 와이어 인식 방법에 대한 실험 결과

제안된 와이어 인식 방법은 MATLAB 코드로 작성 구현 되었다. 해상도가 1194×1194인 칩 사진 25장에 대해서 실험을 수행하여 실험 결과를 얻었다.

제안된 세 가지 와이어 인식 방법에 대한 실험 결과는 표 2에 나타나있다. 첫째 열은 25개의 예제에 대한 순번이며, 표 2에서 둘째열 ath41은 ath41 기법으로 이진화를 수행해서 나온 각 이진 이미지에 나타난 총 와이어 영역의 수를 나타낸다. 전체 영역의 수를 나타내지 않은 것은, 이진화 방법에 따라서, 영역의 수가 달라지기 때문이다.

표 2에서 셋째와 넷째 열에 있는 gTP와 gFP는 그레이 스케일 히스토그램을 사용하는 와이어 영역 분류 방법, 즉 gray 방식을 적용한 결과이다. 다섯째와 여섯째 열의 hTP와 hFP는 HSV 이미지에 대한 히스토그램 방식, 즉 HSV 방식을 적용한 결과를 나타낸다. 일곱 번째 열과 여덟 번째 열에 있는 cTP, cFP는 HSV 이미지를 사용하지만, 식 (7)과 같은 거리 계산 식을 사용하는 Corr 방식에 의해 와이어 여부를 판단한 결과를 보여준다.

표 2에서 셋째와 넷째 열에 있는 gTP와 gFP는 그레이 스케일 히스토그램을 사용하는 와이어 영역 분류 방법은 대표 와이어 영역과의 거리를 식 (5)에 의해 계산한 결과이다. 그 거리 값이 25라는 임계치보다 적거나 같은 영역만을 와이어 영역으로 판단한다. 셋째 열의 gTP는 이렇게 와이어로 판단한 영역 중에서 실제로 와이어인 경우(True Positive)의 수를 나타낸다. 임계치 25는 실험 결과에 의해 비교적 좋은 인식율을 가져오는 값으로 선정한 것이다. 넷째 열의 gFP는 와이어로 판단했지만 실제로는 와이어 영역이 아닌 경우 (False Positive)의 수를 나타낸다.

표 2. 와이어 영역 판단 방법에 대한 실험 결과
Table2. Experimental Results for Region Classification Methods.

순번	ath41	gTP	gFP	hTP	hFP	cTP	cFP
1	27	27	5	11	1	26	0
2	34	33	4	33	17	34	0
3	33	32	1	33	6	32	0
4	29	28	5	29	8	28	0
5	33	29	9	31	7	29	2
6	26	26	3	26	1	26	0
7	47	47	0	47	1	47	0
8	45	45	0	45	1	45	0
9	35	35	0	35	5	35	0
10	38	38	0	38	0	38	0
11	24	24	1	24	5	24	0
12	28	28	3	28	3	28	0
13	32	31	0	31	1	32	0
14	36	28	0	34	8	30	0
15	29	29	1	29	6	29	0
16	17	17	1	17	0	17	2
17	22	22	3	22	4	22	0
18	23	23	1	23	0	23	0
19	27	27	3	27	2	27	1
20	25	24	0	25	2	25	0
21	21	21	2	20	0	21	0
22	23	22	5	22	0	21	2
23	24	23	2	24	4	23	2
24	28	26	1	24	7	27	0
25	29	29	1	27	2	29	0
합	735	714	51	705	91	718	9
TrueR		97.14		95.91		97.69	
TPR		93.33		88.57		98.76	

표 2에서 다섯째와 여섯째 열의 hTP와 hFP는 HSV 이미지에 대한 히스토그램 방식, 즉 HSV 방식을 적용한 결과이다. 이 방식은 대표 와이어 영역과 다른 영역 간의 거리를 계산할 때 식 (6)을 사용하며, 그 결과 값이 125라는 임계치 값보다 적거나 같은 경우에 와이어 영역으로 판단한다. 임계치 125도 역시 실험 결과에 의해 비교적 좋은 인식율을 얻을 수 있는 값으로 선정된 것이다. 다섯째 열의 hTP는 이런 영역 분류 기준으로 판단할 경우 True Positive에 해당하는 경우의 수를 나타내고, 여섯째 열의 hFP는 같은 분류 기준으로 판단할 경우에 False Positive에 해당하는 경우의 수를 나타낸다.

표 2에서 입곱 제 열과 여덟 제 열에 있는 cTP, cFP는 HSV 이미지를 사용하지만, 식 (7)과 같은 거리 계산 식을 사용하는 Corr 방식에 의해 와이어 여부를 판단한 결과를 보여준다. 이 방식에서는 대표 와이어 영역과 각 영역 간의 거리를 식 (7)에 의해 계산했을 때

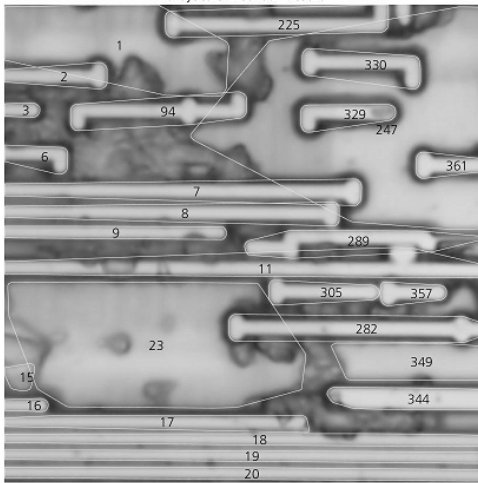
에 그 값이 -11보다 크거나 같으면 와이어 영역으로 판단한다. 이 임계치 -11은 실험 결과에 의해 비교적 나은 인식율을 갖는 값으로 선정된 것이다. 입곱 제 열의 cTP는 Corr 방식에 의할 경우에, True Positive에 해당하는 영역의 수를 나타낸다. 여덟 제 열의 cFP는 Corr 방식에 의할 경우에, False Positive에 해당하는 영역의 수를 나타낸다.

표 2의 최하단에 있는 두 행 중에서 TrueR는 전체 와이어 개수 중에서 각 방식이 찾아낸 와이어의 총수를 퍼센트로 나타낸 것이다. 즉, gray 방식은 97.14%, HSV 방식은 95.91%, Corr 방식은 97.69%이다. Corr 방식이 735개 중에서 718개를 찾아내서 가장 많이 찾아낸 것이다.

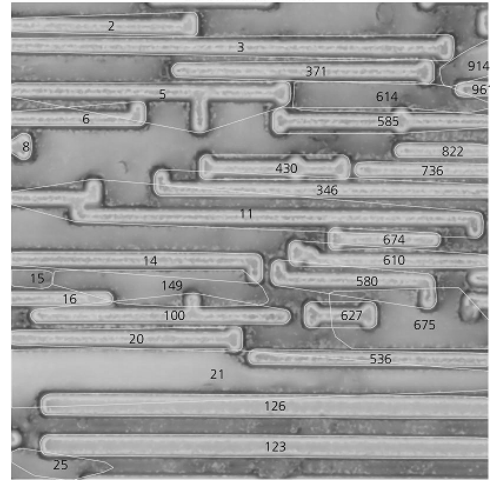
표 2의 최하단의 행인 TPR(True Positive Rate)는 TP/(TP+FP)로 계산되는데, 참으로 판단한 것 중에서 진짜 와이어인 경우의 수를 비율로 표시한 것이다. 즉, TP(True Positive)의 경우의 수를 참으로 판단한 경우의 수, 즉 TP와 FP(False Positive)의 합으로 나눈 값을 의미한다. TPR은, gray 방식은 93.33%, HSV 방식은 88.57, Corr 방식은 98.76%이다. 즉, 참으로 판단한 것 중에서 실제로 참인 것의 비율도 Corr 방식이 가장 높은 것으로 나타난다.

본 실험이 인식률보다는 주로 참 와이어 영역의 판단 능력에 치중하는 이유는 다음과 같다. 인식율은 TP/(TP+FN)으로 계산된다. 여기에서, FN(False Negative)는 와이어가 아닌 것을 와이어가 아닌 것으로 판단한 경우의 수이며, 이 와이어가 아닌 영역의 수는 매번 이진화 방법에 의해서 변하며, 그에 따라 인식율 계산식의 분모가 매번 바뀌기 때문에 인식율을 비교의 기준으로 삼기가 곤란한 측면이 있다. 그래서, 인식율 대신 TrueR과 TPR을 비교의 기준으로 삼았다.

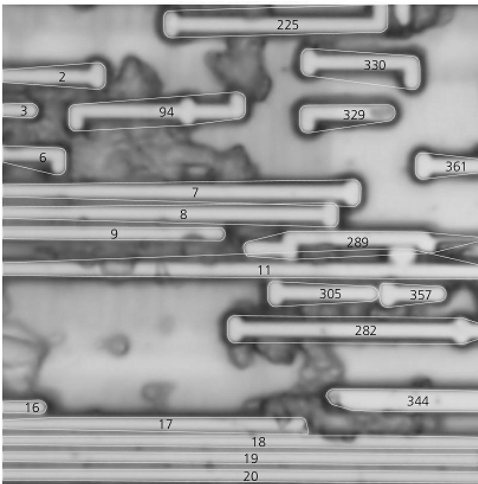
그림 1에 나와 있는 22번 예제에 대해 세 가지 와이어 영역 판단 방법을 적용한 결과는 그림 2와 같다. 22번 예제는 HSV 방식의 TPR이 100%인 경우로, Corr 방식보다 더 나은 결과를 보여주는 예제이다. 그림 2(a)는 gray 방식의 결과이며, 그림 2(b)는 HSV 방식의 결과이며, 그림 2(c)는 Corr 방식의 예제이다. 그림 2에서 노란색으로 해당 영역의 컨벡스헐(Convex Hull)이 표시되어 있는 영역이 와이어로 판단된 영역을 의미한다. 그림 2(a)에서 영역 1, 15, 23, 247, 349는 와이어 영역이 아닌데 gray 방식에 의해 와이어 영역으로 판단되었다. 그림 2(b)에서 알 수 있는 바와 같이 HSV 방식이 예제 22에 대해서는 모든 와이어 영역을 찾아냈고, FP가 0인 것을 알 수 있다. 그림 (c)를 보면 Corr 방식은 영역



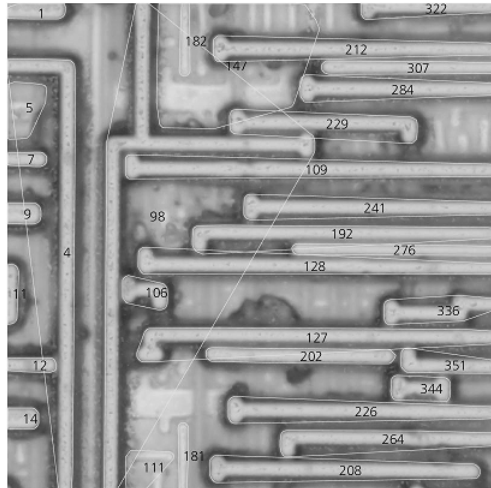
(a) gray 방식의 인식 결과



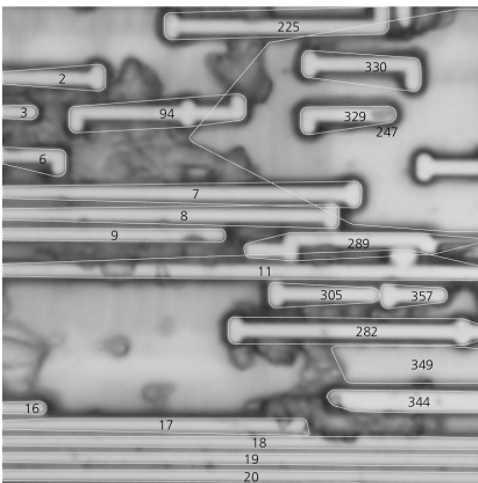
(a) 예제 24에 대한 HSV 방식 인식 결과



(b) HSV 방식의 인식 결과



(b) 예제 1에 대한 gray 방식의 결과



(c) Corr 방식의 인식 결과

그림 2. 예제 22에 대한 세 가지 방식의 인식결과
Fig. 2. Wire Classification Results of Three Methods for the example 22.

247, 349을 와이어 영역으로 잘못 판단하였고, 다른 방식과 달리 와이어 영역 361은 와이어 영역으로 판단하

그림 3. HSV 또는 gray 방식의 한계를 보여주는 결과
Fig. 3. Examples that illustrates the limitations of gray method and HSV method.

지 못하는 결과를 보여주고 있다.

예제 22에 대해서는, HSV 방식이 좋은 결과를 보이지만, 예제 1, 2, 3, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 20, 24 등에서는 좋지 않는 인식 결과를 보여준다. 예를 들어서, 예제 24는 HSV 방식이 특히 한계를 보여주는 예제인데, 그림 3(a)에서 보면, 영역 15, 21, 25, 149, 614, 675, 914를 와이어 영역으로 판단하였다. 그림 3(b)는 특히 gray 방식이 한계를 보여주는 예제 1의 결과를 보여주는데, 예제 1은 바탕 화면에 보면, 하단 층의 와이어 들이 관찰되는데, 그런 와이어 영역들(5, 111, 147, 181, 182)까지 와이어 영역으로 판단한 것을 볼 수 있다.

Corr 방식은 세 가지 방식 중에서 가장 좋은 TPR을 보이고 있다. 하지만, 색상(H) 부분을 고려하지 않는 한계를 가지고 있어서, 모든 요소를 고려하는 HSV 방식에 비하여 TPR이 낮은 경우도 있는 것으로 보인다.

그러나, 명도(V) 성분만을 고려하는 gray 방식과 비교하면 Corr 방식이 더 낮거나 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 추후에 Corr 방식이 좋지 않은 결과를 보이는 예제들에 대한 분석이 좀 더 필요하다.

V. 요약과 향후 연구

칩 상의 와이어는 구성 물질에 따라서 특정한 밝기나 색상을 띠는 경향이 있으며, 본 논문에서는 칩 사진의 이미지 이진화 단계와 이진 이미지에 있는 영역들에 대한 히스토그램 유사도를 통한 와이어 영역 분류단계를 포함하는 와이어 인식 방법을 제안하였다. 적절한 이미지 이진화 방법은 기존 방법 중에서 실험을 통하여 와이어 영역들이 가능한 모두 나타나는 이진 이미지를 생성하는 적응적 임계치 방법을 선정하였다. 이 방법을 통해 생성된 이진 이미지 상에 있는 와이어 영역에 대한 와이어 여부 판단을 위하여, 세 가지 와이어 영역 판단 방법을 제안하고 실험을 통해서 HSV 컬러 기반의 히스토그램을 사용하면서, 와이어 여부와 관련된 채도와 명도 히스토그램의 적절한 요소들의 조합을 고려하는 방법이 좋은 성능을 보임을 관찰하였다.

칩 역공학용 영상은 저작권 문제로 공개가 어려워 실험에 한계가 있지만, 추후에 제안된 방법을 다양한 이미지에 적용해 볼 필요가 있다. 또한, 칩 사진에서 영역을 추출하는 영상 분할 방법, 이진 이미지 생성 기법의 개선, 와이어 영역 판단 방법의 개선 등에 대한 연구가 더 필요하다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교 2013년 교내학술 연구비 지원 사업에 의해 지원을 받았다.

REFERENCES

[1] J. Kumagai, "Chip detectives [reverse engineering]," IEEE Spectrum, vol. 37, no. 11, pp. 43-48, 2000.
[2] Chipworks Inc., "On Chipworks." [Online]. Available: <http://www.chipworks.com/en/about-chipworks>.
[3] J. P. Lewis, "Fast Normalized Cross-Correlation," in Proceedings of Vision Interface, 1995, 1995, vol. 1995, no. 1, pp. 120-123.
[4] W. Ouyang, F. Tombari, S. Mattoccia, L. Di Stefano, and W. K. Cham, "Performance Evaluation

of Full Search Equivalent Pattern Matching Algorithms," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 34, no. 1, pp. 127-143, May 2011.
[5] M. Schobert, "Degate Website." [Online]. Available: <http://www.degate.org/screenshots/>.
[6] D. Lagunovsky and S. Ablameyko, "Straight-line-based primitive extraction in grey-scale object recognition," Pattern Recognit. Lett., vol. 20, no. 10, pp. 1005-1014, Oct. 1999.
[7] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol. 9, no. 1, pp. 62-66, 1979.
[8] Anh-Nga Lai; Guesang Lee, "Binarization by Local K-means Clustering for Korean Text Extraction," in IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2008., pp.117-122, Dec. 2008.
[9] K. Somasundaram, T. Genish, "Binarization of MRI with Intensity Inhomogeneity using K-Means Clustering for Segmenting Hippocampus," The International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA) Vol.5, No.1, February 2013.
[10] T.Romen Singh, Sudipta Roy, O.Imocha Singh, Tejmani Sinam, Kh.Manglem Singh, "A New Local Adaptive Thresholding Technique in Binarization," IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 6, No 2, November 2011.
[11] Mansuo Zhao, Yibing Yang, Hong Yan, "An adaptive thresholding method for binarization of blueprint images," Pattern Recognition Letters, Volume 21, Issue 10, September 2000, Pages 927-943.
[12] M. Stricker, M. Stricker, M. Orengo, and M. Orengo, "Similarity of color images," in Proc. SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases, 1995, vol. 2420, pp. 381-392.
[13] J. He, Q. D. M. Do, A. C. Downton and J. H. Kim, "A Comparison of Binarization Methods for Historical Archive Documents," Proceedings of the 2005 Eight International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'05).
[14] Maya R. Gupta, Nathaniel P. Jacobson, Eric K. Garcia, "OCR binarization and image pre-processing for searching historical documents," Pattern Recognition 40 (2007) pp. 389-397.
[15] Sungeun Hong, Sungsoo Hwang, and Seongdae Kim, "A License Plate Recognition System Robust to Vehicle Location and Viewing Angle," Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 49, NO. 12, December 2012, pp. 971-981.

- [16] Stephen M. Pizzer, et. al, "Adaptive Histogram Equalization and its Variations," Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 39, 1987, pp.355-368.
- [17] Mathworks, "Adaptive Histogram Equalization," <http://kr.mathworks.com/help/images/adaptive-histogram-equalization.html>.
- [18] Kullback, S.; Leibler, R.A. (1951). "On information and sufficiency". Annals of Mathematical Statistics 22 (1): 79-86.

저 자 소 개



장 경 선(정회원)

1986년 서울대학교 전자계산기공학과 학사 졸업.

1988년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업.

1995년 서울대학교 컴퓨터공학과 박사 졸업.

<주관심분야: 컴퓨터비전, 영상처리, 병렬컴퓨팅, 디지털시스템설계>