



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

의류학석사 학위논문

머신비전과 자수를 이용한  
섬유기반회로 생산자동화기법 개발

2021년 2월

서울대학교 대학원

의류학과

안 지 선






# 머신비전과 자수를 이용한 섬유기반회로 생산자동화기법 개발

지도교수 김 성 민

이 논문을 의류학석사 학위논문으로 제출함  
2020년 10월

서울대학교 대학원  
의류학과  
안 지 선

안지선의 석사 학위논문을 인준함  
2021년 01월

위 원 장 전 재 훈   
부위원장 박 주 민   
위 원 김 성 민 



## 국문초록

본 연구에서는 자수법을 기반으로 섬유회로 설계를 위한 CAD 프로그램을 개발하고 머신비전 기술을 이용하여 섬유회로의 반복 제작을 자동화하는 프로세스를 개발하였다. 이를 위해 디바이스 배치에 따라 유연하게 변하는 섬유회로를 설계할 수 있는 전용 소프트웨어를 개발하였다. 그리고 머신비전 기술의 적용을 위해 디바이스의 배치 상태를 고품질의 이미지로 획득하는 장치를 제조하였고 이미지로부터 디바이스의 종류, 좌표, 배향을 인식할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 회로의 말단에 위치한 커넥터를 인식하고 연결하는 경로를 자동적으로 생성하는 알고리즘을 개발하여 다중 회로의 연결 과정을 자동화하고자 하였다. 본 연구에서 개발한 CAD 소프트웨어와 머신비전 프로세스를 활용하면 효율적인 자수 회로의 설계가 가능해져서 동일 회로의 반복 제조, 회로와 회로의 연결이 자동화 되므로 보다 다양한 스마트 의류의 구현이 가능해질 것으로 기대된다. 본 연구는 소프트웨어와 단순한 하드웨어의 도입만으로 스마트 의류 생산 프로세스의 효율을 높일 수 있었다는데 의의가 있다. 개발된 시스템을 기존의 의복 대량 생산 시스템에 접목한다면 스마트 의복의 대량생산에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 스마트 의류, 이미지 분석, 머신비전, 전도성 자수, 생산 자동화

**학 번** : 2019-23158

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구의 배경 .....	1
제 2 절 연구의 목적 .....	6
제 2 장 선행 연구 .....	7
제 1 절 전도성 자수를 이용한 스마트 의류의 생산 ...	7
제 2 절 머신비전을 이용한 생산자동화 .....	10
제 3 장 연구 방법 .....	14
제 1 절 회로 설계 .....	14
1.1. 디바이스 데이터베이스 구축 .....	15
1.2. 섬유회로 설계 인터페이스 제작 .....	18
1.3. 자수 경로 생성 .....	19
제 2 절 머신 비전의 적용 .....	22
2.1. 이미지 획득장치 제작 및 이미지의 사전 처리 .....	22
2.2. 디바이스 인식과 회로 재구성 .....	29
2.3. 다중 회로 연결 .....	36
제 4 장 연구 결과 및 고찰 .....	39
제 1 절 소프트웨어 개요 .....	39
1.1. 디바이스 데이터베이스 .....	41

1.2. 테스트 회로 설계 .....	44
<b>제 2 절 회로 생산 .....</b>	<b>47</b>
2.1. 디바이스 인식 .....	48
2.2. 단일 회로 생산 .....	51
2.3. 다중 회로 연결 .....	57
<b>제 5 장 결론 및 제언 .....</b>	<b>59</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>61</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>66</b>



## 표 목 차

[표 1] 전도성 실의 속성 .....	48
[표 2] 경로별 저항 측정 결과 .....	56

## 그림 목 차

[그림 3-1] 섬유회로 설계 프로세스 .....	14
[그림 3-2] 디바이스 데이터베이스 입력창 .....	17
[그림 3-3] 백색영역비 .....	17
[그림 3-4] 디바이스 배치 각도의 정의 .....	19
[그림 3-5] 스마트 의류 디바이스 단자의 구조 .....	20
[그림 3-6] 봉합 스티치 .....	20
[그림 3-7] 절연 스티치 .....	21
[그림 3-8] 포토 부스 설계도 .....	23
[그림 3-9] 포토 부스 .....	23
[그림 3-10] 격자 간격의 중횡비와 이미지의 관계 .....	24
[그림 3-11] 점격자 이미지 .....	26
[그림 3-12] Component Labeling의 설명도 .....	28
[그림 3-13] 선격자 구성 .....	29
[그림 3-14] 붉은점을 이용한 자수들의 중점 도출 .....	31
[그림 3-15] 자수들 붉은점의 이진화 이미지 .....	31
[그림 3-16] 디바이스의 종류 인식 프로세스 .....	32
[그림 3-17] 템플릿 이미지와 “Angle” 인덱스 .....	34
[그림 3-18] Device Angle 계산 알고리즘의 순서도 .....	34
[그림 3-19] 디바이스 데이터베이스에 등록된 커넥터 .....	36
[그림 3-20] 커넥터 인식을 위한 이미지 분석 프로세스 .....	38
[그림 4-1] 소프트웨어 기본화면 .....	40
[그림 4-2] 이미지 분석 파라미터 입력창 .....	41

[그림 4-3] 디바이스 데이터베이스 .....	42
[그림 4-4] 스티치의 자동 적용 .....	44
[그림 4-5] 자수기 파라미터 입력창 .....	45
[그림 4-6] 회로 설계의 예 .....	46
[그림 4-7] 디바이스 이미지의 이미지 분석 결과 .....	49
[그림 4-8] 첫 번째 디바이스 인식 결과 .....	50
[그림 4-9] 두 번째 디바이스 인식 결과 .....	51
[그림 4-10] 단일회로의 생산 프로세스 .....	52
[그림 4-11] Locate Device 기능의 예 .....	53
[그림 4-12] Align Device 기능의 예 .....	53
[그림 4-13] 회로 생산 결과 .....	55
[그림 4-14] 커넥터 인식 결과 .....	57
[그림 4-15] 커넥터 연결 경로 생성 결과 .....	58

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구의 배경

스마트 의류란 외부자극을 감지하고 감지된 자극에 따라 반응함으로써 착용자와 주변 환경 간 상호작용을 가능하게 하는 의류로(Gehrke et al., 2019) 의복처럼 착용할 수 있으면서도 컴퓨팅을 수행하므로 웨어러블 컴퓨팅, 웨어러블 디바이스로도 불린다. 스마트 의류는 차별점 희석, 수요 정체 등의 요인으로 인한 스마트 기기의 성장 둔화세 속에서 새로운 성장동력으로 주목받고 있다. 스마트 의류 수요의 증가에 따라 그 개발 및 생산기술에 관한 관심도 커지고 있는데, 전통적 의복과 같은 유연성과 내구성을 지닌 스마트 의류의 구현을 위해 Human-machine 인터페이스와 전원 장치를 의복 환경에 접목하는 기술에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다(Linz et al., 2008).

스마트 의류의 경우 섬유와 전자요소의 융합이 필요하다는 점에서 일반적인 웨어러블 컴퓨팅과 구별되는 특징이 있다(Kumar & Vigneswaran, 2015). 스마트 의류는 크게 섬유요소와 정보를 수집하고 처리하며 전력을 공급하는 전자부품요소로 나뉘는데(Dias, 2015), 각 요소를 개선하는 기술이 스마트 의류와 관련하여 가장 활발하게 연구되었다. 환경과 상호작용하는 인터페이스, 회로, 센서와 액추에이터(actuator)가 섬유의 형태로 개발되었으며, 정보를 처리하고 각 요소에 전원을 공급하는 전자부품의 소형화, 경량화 또한 상당히 진전되었다. 이에 따라 개선된 섬유요소와 전자부품요소를 결합하는 기술에 대한 필요성은 더욱

증대되고 있다. 전기적 흐름을 보존하면서도 유연한 섬유와 단단한 전자 부품요소가 매끄럽게 융합되어야만 완전한 스마트 의류의 구현이 가능하기 때문이다(Agcayazi et al., 2018).

전자부품요소를 섬유와 융합하는 기법에는 납땜, 전도성 접착제, 전도성 자수 등이 단독으로 혹은 혼합되어 사용되고 있다(Agcayazi et al., 2018). 납땜의 경우 사용자의 피부에 지속적으로 접촉되었을 때의 유독성과 기계적 성질로 인한 결합 부위의 내구성이 그 한계로 지적되고 있으며(Post et al., 2000), 전도성 접착제의 경우 높은 전도성과 결과물의 유연함이 장점이지만 접착제가 원단에 스며들어 합선을 일으킬 위험성이 있다. 반면 전도성 실의 자수는 다른 연결 기술에 비해 유해성이 적고 섬유에 열적 부담을 주지 않으며 의복과 가장 유사하고 세탁성이 좋아 비교적 안정적이라고 평가되고 있다(Gehrke et al., 2019).

자수는 틀에 천을 팽팽하게 고정하고 고정된 틀의 영역 안에서 바늘을 통해 다양한 스티치(Stitch)를 적용하는 방식으로(Tao, 2001) 다수의 세계 고대 문명에서 발원된 전통적인 섬유 장식기법이다(Mecnika et al., 2015). 스티치의 종류와 재료의 조합이 무궁무진하여 예로부터 장식적 용도에 활발하게 이용됐으며 오늘날까지도 기성복에서부터 오트 쿠튀르(Haute Couture)에 이르는 전반적인 패션상품의 생산에서 섬유의 표면을 장식하기 위한 기술로 사용되어 오고 있다(Mecnika et al., 2015). CAD 소프트웨어의 발전과 공정의 기계화를 통해 대량생산에도 적극적으로 활용되고 있으며, 최근에는 원단과 실에 형상기억합금, 케블라, 탄소 섬유 등 특수 소재를 적용하여 스마트 소재를 생산하는 기술로도 주목받고 있다.

전도성 실을 이용한 자수는 MIT Media Lab의 연구를 통해 2000년에 처음으로 시도되었다(Post et al., 2000). 자수는 제작, 편성 등의 기법

과는 달리 실이 모든 방향으로 자유롭게 정렬될 수 있는 섬유제조기술로 (Tao, 2001) 전극, 전도성 경로, 절연 등 회로 구성의 필수요소를 실이라는 매체를 통해 모두 구현할 수 있다는 점에서 회로 생산에 최적화된 기법이다. 땀의 길이와 수, 간격의 조절을 통해 결과물의 전기적 특성을 수치적으로 제어할 수 있으며, 전기적 특성이 서로 다른 실을 겹쳐서 자수함으로써 저항, 커패시터, 인덕터 등의 디바이스를 대체할 수 있다(Post et al., 2000). 또한 심미적으로 의복과 가장 유사한 형태의 회로를 제조할 수 있으며 섬유와 스티치의 변주를 통해 창의적 디자인의 구현이 가능하다. 이와 더불어 재봉을 중심으로 편성되어 있는 현대의 의복 생산 공정에 자연스럽게 융합이 가능하다는 점에서 산업에의 적용에 있어 비용적 이점을 지니고 있는 기술이다. 결과물의 우수한 내구성과 의류제품으로서의 세탁성 또한 다수의 선행연구에 의해 입증되었다(Ankhili et al., 2019; Molla et al., 2018, October).

스마트 의류의 대중화를 실현하기 위한 핵심 생산기술 중 하나인 자수법이 산업에 실질적으로 적용되기 위해서는 다음의 과제가 우선적으로 해결되어야 한다. 첫째, 섬유회로의 설계 과정이 효율화 되어야 한다. 현재 자수를 위한 다양한 CAD 소프트웨어가 개발되어 있지만 이것은 장식성의 구현을 목적으로 설계되어 있기 때문에 전류의 흐름과 전극 간의 연결성, 절연성을 목표로 하는 전자회로의 설계에는 적합하지 않다. 자수로 회로를 제작하는 데에는 디바이스와 원단의 연결, 전도성 경로, 절연 등 특정 기능을 구현하는 스티치가 반복적으로 사용된다. 하지만 미적요소의 구현이 목적인 현재의 자수용 CAD 소프트웨어는 매우 높은 자유도를 지니도록 설계되어 있어, 기능성이 중심인 회로 설계의 관점에서는 불필요한 중복조작을 하게 한다. 또한, 디바이스나 단자를 별도로 인식하지 않기 때문에 단자 간의 연결성을 보장하는 경로를 설계하기 위해서는

아주 미세한 조정을 요하는 수작업이 추가적으로 필요하게 된다.

둘째, 서로 다른 물성의 재료들을 결합하는 것에서 파생되는 여러 단계의 제조과정을 최적화해야 한다(Diaz, 2015). 회로는 단자사이의 전기적 흐름을 보존해 주는 경로를 설계대로 정확히 제조해야만 정상적으로 작동하게 된다. 자수법을 이용하여 회로를 제작할 경우, 경로를 제작하는 과정은 자수기에 의해 자동적으로 이루어질 수 있지만 디바이스를 섬유에 연결하거나 서로 다른 회로를 연결하는 등 특정한 지점을 연결하는 과정에는 현재의 자동화 시스템이 수행할 수 없는 작업의 복잡도와 정밀함이 요구된다. 특히 자수용 데이터 파일에 따라 자동적으로 자수를 수행하는 자수기를 이용하여 디바이스의 연결을 시도할 경우 디바이스가 설계된 위치에 정확하게 위치해야만 바늘과 디바이스가 충돌하는 것을 막을 수 있다. 스마트 의류의 대중화를 위해 같은 회로의 대량 생산을 가정할 경우, 크기와 모양이 다양한 디바이스를 정해진 위치에 반복적으로 정확하게 놓는 작업의 중요성은 더욱 커지며 여기엔 매우 높은 기술력이 필요하다. 디바이스 배치의 효율화를 위해 디바이스에 인식 센서를 부착하거나(Dias, 2015) 로봇팔과 같은 기계 장치를 사용하는 것이 제안된 바 있으나(France, 2018) 스마트 의류에 사용될 디바이스의 종류와 크기 등의 속성이 다양한 것을 고려하였을 때 이러한 접근방식을 실제 산업에 적용하기에는 많은 비용과 시간이 소요될 것으로 예상된다. 특정한 지점의 연결에 수반되는 수작업은 줄이고 작업의 흐름을 최적화 할 수 있는 기법을 개발하는 것은 스마트 의류의 실질적인 구현을 위해 필수적으로 선결되어야 하는 과제이다.

본 연구는 전용 CAD 프로그램과 머신비전기술을 이용한 프로세스의 개발을 통해 자수법을 기반으로 한 섬유회로의 설계와 제작을 효율화하고자 한다. 자수섬유회로의 설계를 위한 프로그램을 개발하기 위해, 먼

저 회로 설계에 필요한 작업들을 체계화할 것이다. 그리고 정립된 설계 프로세스를 기준으로 하며, 자주 사용되는 조작을 자동적으로 반영하는 전용의 인터페이스를 개발하고자 한다. 회로 설계에만 필요한 작업들이 자동적으로 수행될 수 있도록 하면 섬유회로설계에서의 불필요한 중복 조작과 미세한 수작업이 줄어들 수 있을 것으로 본다. 다음으로 섬유회로 제작의 자동화를 위해 머신비전을 적용할 것이다. 머신비전은 이미지 분석을 통해 추출한 정보를 바탕으로 기기를 제어하는 기술이다. 본 연구에서는 작업시점의 디바이스의 배치를 고품질의 이미지로 획득하고 이를 분석하여 디바이스를 실제로 연결할 수 있는 자수를 유연하게 수행할 수 있는 머신비전 프로세스를 개발할 것이다. 이를 위해 이미지 획득 장치를 제조할 것이며 획득한 이미지에서 디바이스의 종류와 좌표, 배향을 인식할 수 있는 이미지 분석 알고리즘을 개발할 것이다. 또한 이미지 분석으로 얻어낸 디바이스의 레이아웃에 따라 유연하게 변하는 회로제작을 시도할 것이다. 이를 통해 기존의 자수기로 수행하기 어려웠던 디바이스와 원단의 자동연결 및 동일 회로의 반복적인 제작이 가능해질 것으로 본다. 마지막으로 서로 다른 회로를 연결하는 과정을 효율화하기 위해 커넥터(Connector)를 회로 말단에 배치하여 자수한 후 이를 인식하는 알고리즘을 개발하고자 한다. 커넥터를 인식하고 이를 연결하는 경로를 자동적으로 생성하는 과정을 통해 서로 다른 회로의 연결 과정을 자동화하는 기술을 구현하고자 한다.



## 제 2 절 연구의 목적

본 연구의 목적은 자수섬유회로의 설계를 효율화하고 머신비전 기술을 이용하여 설계된 섬유회로의 반복적인 제작과 다중 회로의 연결을 자동화하는 데에 있다.

첫째, 섬유회로 설계에 필요한 작업을 체계화하고 섬유회로 제작에 필수적인 스티치를 자동으로 구현하는 인터페이스를 개발함으로써 자수 기반의 섬유회로 설계과정을 효율화한다.

둘째, 디바이스와 원단의 결합 및 서로 다른 회로 간의 연결 과정을 최적화할 수 있는 머신비전 기반의 생산 프로세스를 정립한다.

셋째, 섬유회로의 반복 생산을 위해 디바이스 종류, 위치, 배향을 인식하는 이미지 분석 알고리즘을 개발하고 단자들을 연결하는 경로를 재구성하는 시스템을 구현한다.

넷째, 다중 회로 연결을 자동화할 수 있는 프로세스를 개발하고 이를 구현할 수 있는 이미지 분석 알고리즘을 개발한다.

## 제 2 장 선행 연구

### 제 1 절 전도성 자수를 이용한 스마트 의류의 생산

Post et al.(2000)은 섬유기반의 컴퓨팅을 구현하기 위하여 스테인리스 스틸과 폴리에스터를 합성한 전도성 실을 이용한 자수를 시도하였으며 직물에 전극을 자수하는 기술로서의 “전도성 자수(e-broidery stitch)”를 처음으로 정의하였다. 수치적 제어가 가능한 자수기법을 전도성 실을 이용해 적용함으로써 센서, 스위치, 회로 등의 다양한 전기적 요소를 구현하는 데 성공하였으며 자수에 사용 가능한 재료의 특성을 분석하고 전도성 자수 작업 프로세스를 정립하였다. 기존의 유연한 회로(flexible circuit)와 자수섬유회로의 내구성, 유연성, 세탁성을 비교함으로써 자수법이 스마트 의류를 제조하는데 적합한 기술이라는 것을 밝히고자 하였다.

Linz et al., (2006)은 특수 제작된 유연한 디바이스를 전도성 자수를 통해 연결하는 메커니즘을 개발하였다. 50 $\mu$ m 폴리아미드 포일과 17 $\mu$ m 구리, 5 $\mu$ m 니켈, 금, 15 $\mu$ m solder resist를 이용하여 직접 제조한 유연성을 지닌 디바이스(flex circuit)를 배치하고 18개의 단자를 전도성실을 이용한 자수를 통해 연결하였고 결과물에 다양한 세척조건을 적용하고 연결의 전도도를 측정하여 연결의 내구성을 검증하였다. 이 연구에서는 디바이스의 배치를 제어하기 위해 디바이스가 배치될 위치를 표시하는 비전도성 자수를 별도로 적용하는 방식이 제안되었는데, 위치 표시만을 위해 자수를 적용하는 것이 비경제적이며 비전도성 자수와 디바이스의 배

치 그리고 전도성 자수가 분절되어 이루어져 전체적인 작업의 효율성을 떨어뜨린다는 단점이 있었다. 또한, 디바이스의 배치가 수작업으로 이루어지기 때문에 반복 생산을 가정하였을 경우 오차가 발생할 확률이 높으며 특수 제작한 유연한 디바이스에만 적용이 가능하므로 기술의 활용성에도 한계가 있다.

Ankhili et al.(2019)는 자수를 기반으로 ECG 전극과 연결되는 전도성 섬유 경로를 제작한 후에 이를 세탁으로부터 보호하기 위한 방법을 연구하였다. 본 연구에서는 두 가지 은도금 전도성 실의 성능을 비교하였으며 전도성 경로를 위해 적합한 자수 패턴을 검증하였다. 또한, 세탁으로부터 회로를 보호할 수 있는 캡슐화(encapsulation) 기법들의 성능을 비교 분석하였다. 본 선행연구는 실의 종류, 자수의 패턴, 캡슐화 기법 등 자수와 관련이 있는 파라미터(Parameter)의 영향력을 과학적으로 비교 분석하여 섬유회로의 성능을 개선하고자 했다.

Eichinger et al. (2007)은 PCB(Printed Circuit Board) 설계 툴인 Eagle의 자동 라우팅 결과물을 자수파일로 변환하는 프로그램을 C#을 통해 구현함으로써, 장식성 중심의 자수용 CAD 프로그램을 이용해 섬유회로를 설계하는 다단계의 과정을 간소화하였다. Eagle에 탑재되어 있는 PCB 설계 규칙모음(rule set), 부품 라이브러리, 자동 라우팅(Auto Routing)을 자수섬유회로의 설계에 활용함으로써 회로 설계의 과정을 효율화하였지만 스마트 의류 구현의 핵심과제인 디바이스와 의류의 연결 과정은 고려되지 않았다는 한계가 있다.

Hamdan et al.(2018)은 자수섬유회로 생산의 자동화를 위해 머신비전 기술을 처음 사용하였다. 사용자가 전도성 경로를 원단에 펜으로 그리면 해당 디자인의 이미지를 분석하여 자수용 파일로 변환시키는 알고리즘을 개발하였다. 이미지 분석 기술을 이용하여 다양한 디자인을 빠르

게 자수로 제작할 수 있는 방법을 제안하였지만 디바이스를 정확하게 배치하는 과정은 여전히 수작업으로 이루어져 자동화 기술로서는 한계가 있었다.

Tsolis et al.(2014)는 웨어러블 섬유 안테나 관련 연구들을 검토하는 문헌 연구를 수행하였다. 섬유 안테나 제조를 위해 데님, 폴리스, 가죽 등 회로의 기판으로 사용 가능한 섬유 물질들의 유전적(dielectric) 특성을 조사하였다. 그리고 직조, 편성, 잉크젯 프린트, 자수 등 섬유 안테나를 제조하는 다양한 기법을 성능, 제조과정의 경제성, 세탁성의 측면에서 비교, 분석하였다. 대량생산에 적용이 비교적 쉽고 오차범위 1mm 이내의 정확도를 지니고 있으며 세탁성이 우수하다는 측면에서, 섬유 안테나를 제조하는 방법으로서의 자수법의 장점이 강조되었다.

전도성 자수를 이용한 연구는 전도성 자수가 처음 도입된 2000년 이후부터 꾸준히 이루어져 왔으며 그 장점 또한 많은 연구를 통해 입증되었다. 하지만 전도성 자수를 통해 스마트 의류를 구현하기 위한 선결과제인 설계 및 제조 프로세스의 개선에 기술을 적용하고자 하는 시도는 매우 드물게 이루어져 왔으며, 특히 하드웨어와 소프트웨어의 융합을 통해 많은 수작업을 자동화하는 데 성공한 머신비전 기술의 적용은 거의 이루어지지 않았다.

## 제 2 절 머신비전을 이용한 생산 자동화

본 절에서는 머신비전 기술 혹은 이미지 프로세싱 알고리즘을 적용하여 제조 프로세스를 효율화하고자 했던 이전 연구들을 다루고 있다. 머신비전이란 고품질의 이미지의 획득과 이미지 프로세싱을 이용해 인간의 시각적 판단을 기계가 수행할 수 있도록 하는 것으로, 접촉이 없고 비침습적인 방식으로 인간의 감독 없이도 효율적이고 자동적으로 각종 판단을 수행할 수 있다(Tsai & Hsieh, 2017). 머신비전은 자동 검사, 물체 인식, 추적, 의료 영상처리, 자동차 자동 주행 등 다양한 산업에의 적용을 위해 폭넓게 연구되어 왔는데(Le et al., 2020), 본 연구에서는 스마트 의류의 제조와 관련이 있는 의복 생산 프로세스와 PCB 정렬 프로세스의 자동화를 위해 머신비전이 활용된 연구를 중심으로 다룰 것이다.

Lim and Kim(2011)은 다양한 직물의 구조를 자동으로 인식하기 위해 하드웨어와 소프트웨어가 융합된 시스템을 개발하였다. CCD 카메라와 현미경, 전동 스테이지로 이루어진 직물 이미지 획득장치를 제작하고 25개의 사각형으로 이루어진 격자와 Isoparametric mapping을 이용한 카메라 캘리브레이션 알고리즘을 개발하였다. 투과형 조명을 통해 수집한 이미지의 분석을 통해 위사와 경사의 교차점을 도출하였으며 반사형 조명을 통해 수집한 이미지의 분석을 통해 교차점에서 노출되는 실이 경사인지 위사인지를 결정하였다. 교차점에서의 경사와 위사의 색상값의 차이의 정도를 기준으로 두 개의 형상 파라미터를 추출하고 ANN(Artificial Neural Network)를 이용하여 직물의 구조를 최종적으로

결정짓는 알고리즘을 개발하였다. 이미지 분석과 머신러닝 알고리즘을 결합하여 직물을 구조를 자동적으로 인식하고자 하였으며 하드웨어와 소프트웨어가 유기적으로 연결되는 시스템을 개발하였다.

Ko and Kim(2013)은 산업용 CCD 카메라를 통해 획득한 이미지를 분석하여 다양한 원단에 대한 의복 패턴의 가장 효율적인 배치를 도출하는 소프트웨어를 개발하였다. 무늬가 있는 원단에 의복 패턴을 배치할 때 완성된 의복에서의 무늬의 연결성을 고려해야 하는데 이러한 판단을 수행하는 데 도움이 되는 시스템을 구현하였다. 12 x 9개의 검은 사각형으로 구성된 캘리브레이션 판과 Corner search 알고리즘, Isoparametric mapping을 이용한 캘리브레이션 알고리즘을 개발하였으며 Gray level profile analysis를 이용하여 직물 내에 반복되는 무늬를 도출하는 알고리즘을 개발하였다. 삼차원 형상에 드래이프 시뮬레이션을 할 수 있도록 함으로써 반복되는 직물의 무늬 연결을 유지하면서 패턴이 합복될 수 있도록 하는 최적의 의복패턴 배치를 도출하는 소프트웨어를 개발하였다. 이미지 분석과 삼차원 드래이프 시뮬레이션을 결합하여 의복의 설계 프로세스를 최적화하려는 시도로써, 원재료의 손실을 줄이고 생산 효율성을 향상시키는 데 실질적으로 기여할 수 있는 기술을 개발하였다.

Wang et al.(2010)는 컴퓨터 비전 기술을 통해 직물의 교차 반복 패턴, 밀도, 표면 거칠기와 같은 직조 직물의 질감적인 특성을 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 직물의 스캐닝을 통해 직물 샘플 이미지를 획득하고 2D spatial domain integral projection 알고리즘을 이용해 경사와 위사의 교차점을 찾았다. 수직, 수평 projection을 통해 얻은 윤곽을 바탕으로 1D Fast Fourier Transform을 이용하여 더 경제적으로 직물의 실 번수를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 다음으로 3D fabric image를 통해 직물의 표면의 거칠기를 특정하기 위해 2D Fast Fourier

Transform (2DFFT) 기반의 프랙탈 차원의 파라미터를 개발하고 정확도를 검증하였다. 본 선행연구는 시뮬레이션과 스캔을 통해 고해상도의 3차원 직물 이미지를 획득하고 분석을 통해 직물의 질감적인 특성의 수치화를 시도하였다.

Zhang et al.(2020)은 양말제조를 위한 산업용 편직 기계의 바늘이 생산 도중 휘어지거나 부러지면서 원단의 손상을 일으키는 문제를 해결하기 위해 전용 머신비전 시스템을 개발하였다. 가우시안 필터(Gaussian Filter)와 Sobel operator, Thresholding 등 전통적 이미지 분석 기법을 이용하여 이미지를 사전처리하였다. 그리고 Vertical Projection 알고리즘을 이용하여 처리된 이미지를 보정하고 단일 바늘 별로 이미지를 분할하여 불량바늘과 정상바늘로 분류하기 위한 사전 작업을 수행하였다. 최종적으로 HOG(Histogram of Oriented Gradients) 특징 추출법과 SVM(Support Vector Machine) 알고리즘을 바탕으로 한 기계학습을 통해 바늘 이미지를 분류하였다. 해당 시스템을 이용해 실험한 결과 시스템이 불량바늘을 인지하는 속도는 0.348초로 이는 1초에 300회 회전하는 바늘 실린더가 약 1.5회 미만 회전하기 전에 불량바늘을 감지할 수 있다는 것을 의미하며, 이를 통해 원단의 손상을 사전에 방지할 수 있다는 결론이 도출되었다. 해당 연구에서는 원단의 손상을 일으키는 근본적인 원인을 해결하기 위해 머신비전 기술을 활용하였으며, 목표 이미지의 획득과 분석, 하드웨어의 제어까지 포함하는 전반적인 생산 흐름을 아우르는 머신비전 프로세스를 실제로 구축하고 검증하였다는데 의의가 있다.

PCB를 대상으로 한 머신비전 관련 연구는 자동 품질 검사의 영역에서 가장 활발하게 연구됐으며 본 연구의 주제와 밀접한 관련이 있는 PCB의 정밀 포지셔닝(positioning)과 자동 정렬을 위한 연구는 비교적 최근에 와서 이루어지고 있다. Tsai and Hsieh(2017)은 전자제품의 자동

조립을 위한 기술인 PCB의 자동 배치와 정렬을 위해 이미지 분석과 Expectation Maximization(E-M) 바탕의 Template matching 알고리즘을 개발하였다. Canny Edge Detector를 이용하여 오브젝트의 Edge를 추출하였으며 E-M 알고리즘의 E-단계에서 기준 이미지와 실제 이미지를 비교하여 공통된 Edge 포인트를 찾고 겹치는 Edge 포인트에 가중치를 부여하였다. M-단계에서는 spiral search 알고리즘을 통해 가중치가 부여된 Edge 포인트와 가장 짧은 거리에 있는 테스트 이미지의 가장자리 점을 찾아 물체의 중심, 방향 및 크기를 계산한다. E-단계와 M-단계의 반복을 통해 최적의 값을 구하고 이 값에 따라 PCB 이미지의 정렬을 구현하였다.

Le et al.(2020)은 RST(Rotation, Scale and Translation) 템플릿 매칭(Template Matching) 알고리즘을 이용한 PCB 정렬 프로세스를 개발하였다. 이미지 분석을 통해 PCB에 있는 cross-hair 마크를 감지하고 감지된 마크의 좌표 및 각도 값을 기준 이미지의 값과 비교한 후 도출된 차이를 실제 PCB가 있는 전동 스테이지에 전달하여 PCB와 기준 이미지의 위치를 일치시킬 수 있는 시스템을 구현하였다. 또한 템플릿 매칭 알고리즘의 한계로 지적되고 있는 시스템의 고비용과 낮은 효율성을 개선하기 위해 전체 RST 프로세스를 GPU에 내장되어 있는 CUDA에서 병렬로 구현하였고 1280 x 960 픽셀 해상도의 이미지 기준으로 매칭에 걸리는 시간을 32배 단축시켰다.

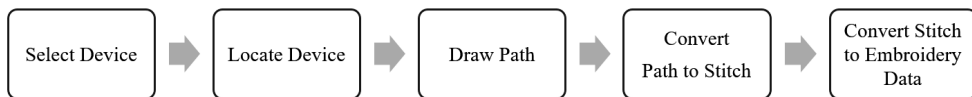
머신비전 기술은 의류의 생산과 PCB의 정렬을 효율화하는 기술을 개발하는 데 활발하게 응용됐지만 스마트 의류의 대량생산에 관한 연구에서 머신비전 기술의 활용은 아직 시도되지 않았으며, 특히 자수법이 필수적으로 요구하는 디바이스의 위치 인식에서 머신비전 기술을 활용한 연구는 아직 없다.



## 제 3 장 연구 방법

### 제 1 절 회로 설계

본 연구에서는 섬유기반회로의 설계과정을 효율화할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 섬유회로를 설계하는 전반적인 프로세스는 [그림 3-1]과 같다. 먼저 회로에 필요한 적절한 디바이스를 선정하고 원하는 좌표에 배치한다. 다음으로 디바이스의 배치를 통해 위치가 확정된 각 단자를 연결하는 전도성 경로를 설계한다. 자수기법을 통해 제작하기 위해서는 완성된 회로가 스티치로 변환되어야 한다. 실의 종류, 땀의 길이, 땀의 적용 횟수 등 자수기에서 변용 가능한 파라미터를 활용하여 회로를 스티치로 변환한다. 마지막으로 각 스티치를 실제 자수기가 읽고 명령대로 동작할 수 있도록 하는 자수용 데이터로 변환한다. 본 연구에서는 이와 같은 일련의 과정을 효율화하고자 섬유회로 설계 전용의 소프트웨어를 개발하였다. 연결에 사용될 디바이스의 정보가 저장된 데이터베이스와 대화식 회로 설계 인터페이스를 통해 디바이스를 배치하고 경로를 설계하는 과정을 보다 직관적으로 디자인 할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 또한, 완성된 결과를 자동으로 자수데이터로 변환될 수 있도록 하여 설계가 하드웨어의 제어까지 연결될 수 있도록 했다.



[그림 3-1] 섬유회로 설계 프로세스

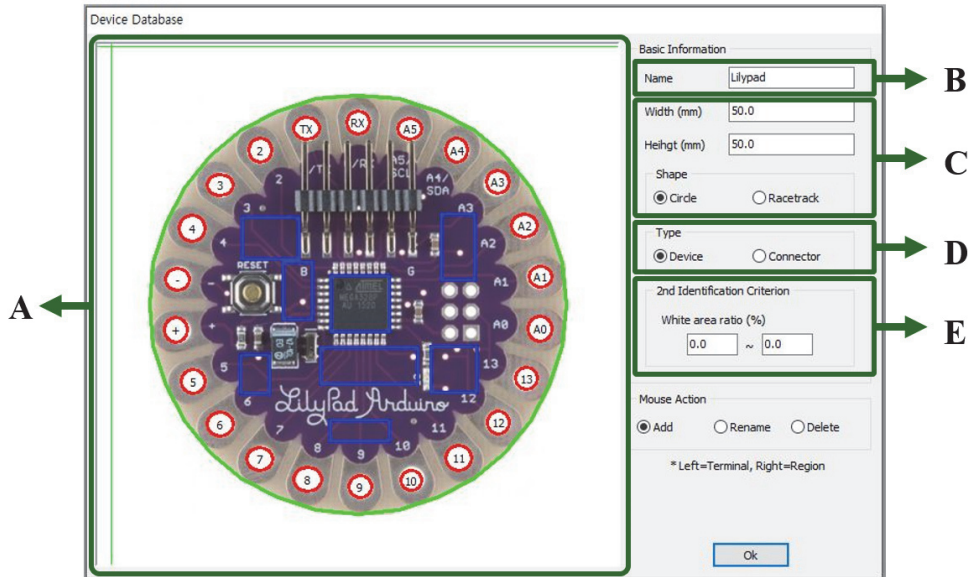
## 1.1. 디바이스 데이터베이스 구축

본 연구에서 정의한 디바이스는 스마트 의류의 전자부품요소에 해당하는 것으로 섬유회로에서 자극 감지, 정보 처리, 전력을 공급하는 역할 등을 담당하는 요소이다.

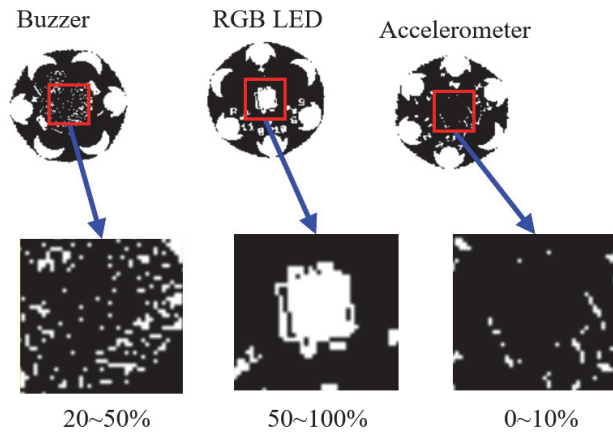
디바이스 라이브러리는 회로에 사용될 디바이스의 정보를 사전에 등록하여 활용하기 위한 도구이다. 디바이스가 데이터베이스에 등록된 이후에는 별도의 절차 없이 소프트웨어 내에서 사용될 수 있으므로 디바이스의 선택 및 배치 작업이 단순해지며, 비표준 디바이스나 이제 막 개발되어 실험단계에 있는 디바이스 등 다양한 디바이스가 설계에 바로 사용될 수 있다. 데이터베이스의 가장 궁극적인 목적은 향후 머신비전을 통해 디바이스를 소프트웨어 상에서 인식하는 기능을 구현하기 위한 이미지 분석의 기준을 마련하는 데에 있다. 본 연구에서는 모폴로지 기반의 이미지 처리(Morphological Image Processing)와 전통적인 룰 기반의 이미지 분석을 통해 디바이스를 인식하고자 하였다. 디바이스 데이터베이스에는 디바이스 구분하는 기준으로 사용할 수 있는, 디바이스의 시각적 정보를 저장할 수 있다. 본 연구에서는 디바이스의 실제 크기, 기하학적 형태, 디바이스 내 단자의 위치, 단자의 크기, 단자의 기능을 사용자에게 입력받아 디바이스 데이터베이스에 저장할 수 있도록 설계하였다.

디바이스 데이터베이스 입력창의 전반적인 구성은 [그림 3-2]와 같다. [그림 3-2]의 A는 소프트웨어의 메인화면을 통해 등록된 디바이스의 이미지를 확인하고 단자의 영역과 기능을 입력할 수 있는 부분이다. 해당 영역에서는 마우스 드래그 동작을 통해 붉은색으로 표시되는 단자 영역을 입력한 후 팝업창을 통해 단자의 기능을 명명할

수 있다. 해당 정보를 통해 디바이스의 영역을 기준으로 한 단자의 상대적인 크기와 좌표가 데이터베이스에 저장되며 해당 정보를 통해 디바이스의 영역과 디바이스의 배치 각도만 확정되면 단자의 위치를 도출할 수 있다. 그리고 [그림 3-2]에서 디바이스 내에 파란색 사각형으로 지정된 영역은 디바이스의 배치 각도를 파악하기 위해 본 연구에서 개발한 판별 기준인 “균일색 영역(Even Color Zone)”으로 사용자가 색의 변화가 균일한 영역을 직관적으로 판단해서 지정할 수 있다. 이 영역은 향후 이미지 분석에서 디바이스가 배치된 각도를 인식해서 최종 단자의 위치를 파악할 수 있게 한다. B는 등록하는 디바이스의 이름을 명명하는 부분이다. C는 이미지 분석을 통해 디바이스를 인식할 때 제1의 기준이 될 디바이스의 실제 크기와 기하학적 형태를 입력받는 부분이다. 크기와 형태는 디바이스를 구분할 수 있는 가장 대표적인 시각적 정보이다. 해당 부분에서 입력받은 크기와 형태는 디바이스 인식을 위한 이미지 분석에서 제1의 기준으로 활용된다. D는 입력된 개체의 분류가 디바이스인지, 회로와 회로를 연결할 때 사용되는 객체인 커넥터인지 분류하는 부분이다. E는 크기가 같아 디바이스 인식의 제 1 분류 기준만으로 구분할 수 없는 서로 다른 디바이스들의 구분을 가능하게 해주는 제 2의 분류 기준인 “백색영역비(Pixel to White Ratio)”를 입력하는 영역이다. 백색영역비는 디바이스 이미지를 이진화했을 때 흰색 영역의 비율을 의미한다. 서로 다른 기능을 하는 디바이스라면 크기가 같아 하더라도 디바이스 표면의 명도 분포가 [그림 3-3] 같이 완벽하게 같지 않으므로 백색영역비를 기준으로 디바이스의 구별이 가능해진다.



[그림 3-2] 디바이스 데이터베이스 입력창



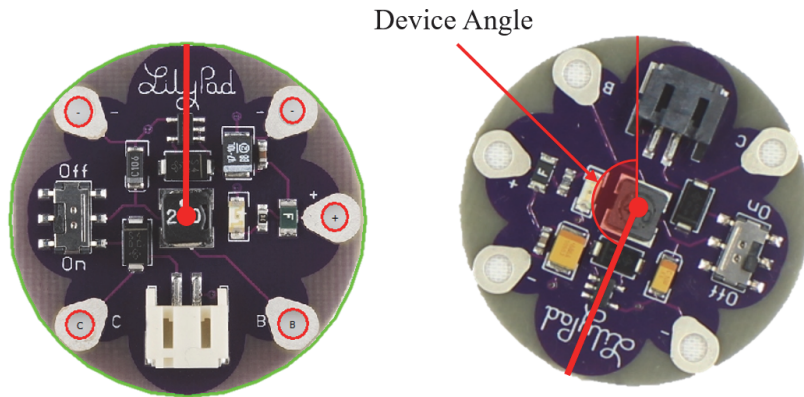
[그림 3-3] 백색영역비

## 1.2. 섬유회로 설계 인터페이스 제작

본 연구에서는 사용자가 원하는 섬유회로를 효율적으로 설계할 수 있도록 하기 위해 그래픽 기반의 전용 인터페이스를 개발하였다.

섬유회로 설계의 첫 단계인 디바이스의 선정을 위해 저장된 디바이스 데이터베이스가 표시되도록 하였으며 마우스 입력을 통해 디바이스를 선정함으로써 회로의 설계가 시작되도록 하였다. 디바이스의 배치와 경로의 설계 또한 마우스 입력을 통해 이루어진다. 설계에 필요한 디바이스의 포인트 앤 클릭(Point and Click)과 원하는 위치로의 드래그 앤 드롭(Drag and Drop)을 통해 보다 직관적으로 디바이스를 선정하고 활성 영역에 배치할 수 있으며 메뉴 변경을 통해 배치된 디바이스의 삭제가 가능하다.

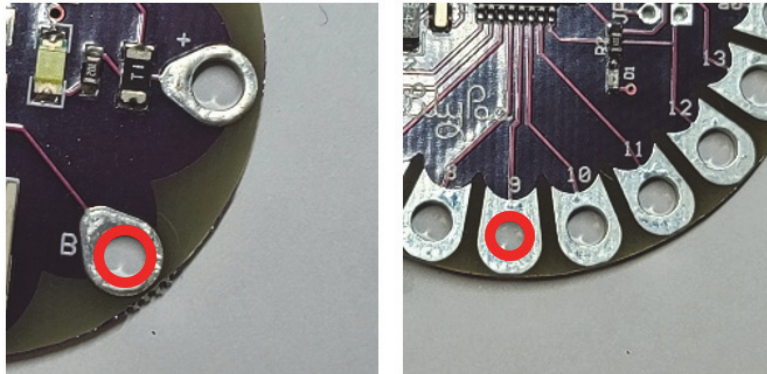
경로의 설계에 있어서 주요한 영향력을 가지는 기하학적 파라미터는 디바이스의 배치 각도([그림3-4]), 즉 배향이다. 디바이스의 좌표가 고정되어 있다고 하더라도 디바이스의 배향에 따라 단자의 좌표는 전혀 다르게 변화한다. 본 연구에서 개발한 회로설계 인터페이스에서는 디바이스를 배치한 후 마우스 우클릭 입력을 통해 배치된 디바이스의 회전이 가능하다. 단자들을 연결하는 경로가 설계된 후에도 디바이스의 회전과 이동이 가능하며 조작과 동시에 단자를 연결하는 경로도 재구성되어 디바이스의 회전 및 위치 변경에 따라 경로의 재설계하는 조작이 필요하지 않도록 했다. 이와 더불어 단자 간 연결이 이루어지지 않아 전기적으로 유효하지 않은 경로가 설계되면 별도의 팝업창을 통해 사용자에게 알려주도록 하였다.



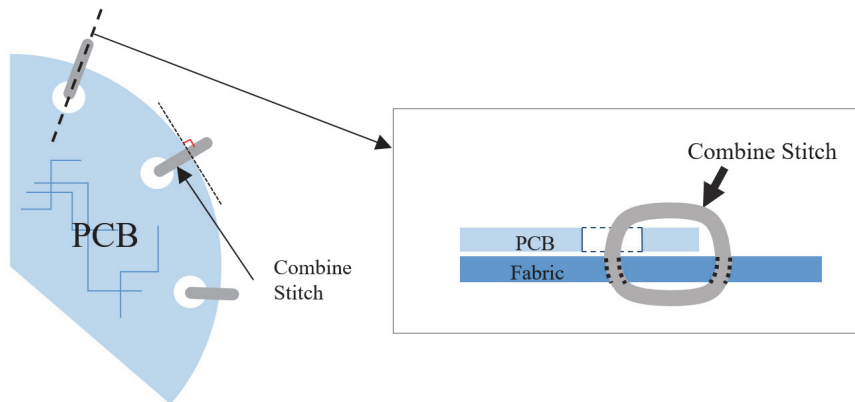
[그림 3-4] 디바이스 배치 각도의 정의

### 1.3. 자수 경로 생성

전도성 실을 이용한 자수를 통해 회로를 생산하기 위해서는 디바이스와 원단을 연결하는 합봉 스티치(combine stitch)와 전류의 흐름을 잇는 전도성 경로를 구성하는 경로 스티치(path stitch) 두 가지 종류의 스티치가 사용된다. 스마트 의류를 위하여 개발된 디바이스에는 디바이스의 고정을 위해 [그림 3-5]와 같은 은으로 둘러싸인 구멍이 설계되어 있으며 전도성 실을 이용해 해당 구멍을 관통하는 스티치를 적용함으로써 디바이스와 원단을 고정하면서 동시에 전류가 흐르는 단자를 생산할 수 있게 된다(Buechley et al., 2008). 본 연구에서는 [그림 3-6]과 같이 일정한 길이의 단일 스티치를 같은 좌표에 반복적으로 적용하는 것으로 합봉 스티치를 정의하였으며 최적의 봉합 스티치의 각도는 단자의 중심에서 디바이스의 접선과 수직하는 방향으로 결정된다. 경로 스티치는 전류가 흐르는 길에 해당하는 것으로 전도성 실로 홈질(running stitch) 하는 것으로 정의하였다.



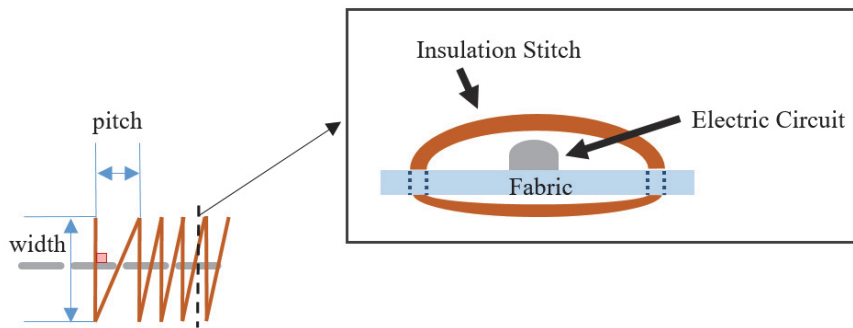
[그림 3-5] 스마트 의류 디바이스 단자의 구조



[그림 3-6] 통합 스티치

원단에 전도성 실을 이용하여 경로를 생성하였을 경우 생활 속 마찰이나 세탁 등으로 인해 경로가 손상될 위험이 있으며 다수의 경로가 인접할 경우 합선의 위험이 크다. 이를 해결하기 위해서 선행연구에서는 다양한 절연 방법이 개발되고 그 성능이 비교되었는데 본 연구에서는 전도성 경로 위를 비전도성실로 새틴 스티치(satin stitch)하는

방식(Ankhili et al., 2019)을 사용하여 절연 효과를 구현하였다. 절연 스티치는 경로와 직교하는 스티치와 이 스티치 사이를 대각선으로 연결하는 스티치의 조합으로 이루어져 있으며 직교하는 스티치의 너비(width)와 간격(pitch)은 조절이 가능하다. 절연 스티치의 도식은 [그림 3-7]과 같다.



[그림 3-7] 절연 스티치

설계된 경로가 스티치로 자동 변경되면 최종 스티치 파일은 자수기 부착된 자수틀의 x, y 이동량을 제어할 수 있는 데이터 파일인 DST(Data Stitch Tajima)형식으로 변환되어 저장되며, 이를 통해 자수기를 제어하여 설계대로 자수를 수행할 수 있게 된다.

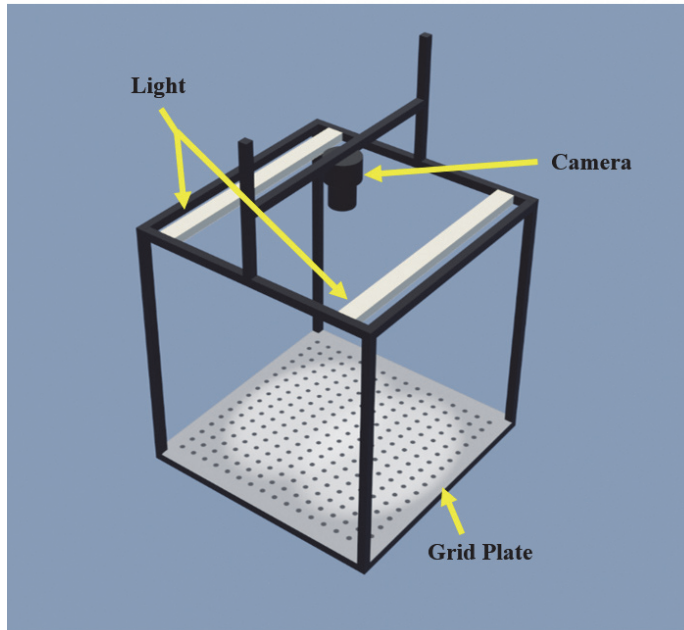


## 제 2 절 머신비전의 적용

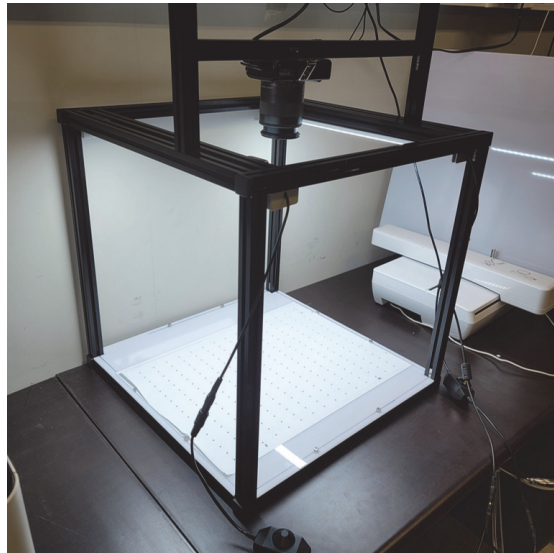
### 2.1. 이미지 획득장치 제작 및 이미지의 사전처리

이미지 분석을 통해 기기제어를 하는 머신비전 기술을 구현하기 위해서는 핵심 데이터인 이미지를 안정적으로 획득하는 것이 중요하다. 따라서 이미지의 획득을 위한 장치를 설계하였다. 본 연구에서 개발한 이미지 획득 장치는 크게 카메라, 두 개의 조명 그리고 캘리브레이션을 위한 점격자판으로 구성되어 있다.

이미지 획득을 위해 검은색 철재 프로파일(profile)로 이루어진 정육면체의 골조를 가진 포토 부스를 [그림 3-8]과 같이 설계하였다. 총 15개의 프로파일이 사용되었으며 카메라는 상단 중앙에 견고하게 고정시켜 일정한 조건에서 이미지를 수집할 수 있도록 했다. 디지털 이미지의 수집에는 CCD(Charge Coupled Device)인 제조사 Canon의 EOS M 모델이 사용되었으며 자동 초점 기능이 있는 52mm의 EF-M 렌즈가 적용되었다. 바닥과 CCD 렌즈 사이의 수직거리는 41.2cm 이고, 수집하는 이미지의 해상도는 약 450만 픽셀(2592 X 1728)이다. 조명은 제조사 RAMI의 포토박스 모델 RM-PB4040에 내장된 밝기 조절이 가능한 직선 형태의 조명 두 개를 사용하였다.



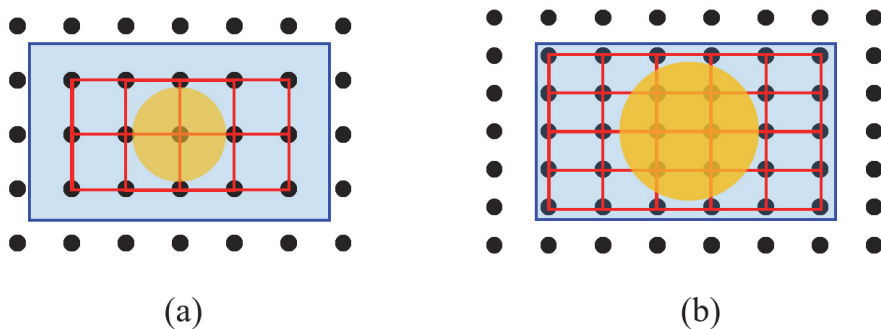
[그림 3-8] 포토 부스 설계도



[그림 3-9] 포토 부스

카메라로 촬영된 이미지에는 렌즈의 수차, 장비 조정 오류 등 다양한 요인에 의해 실제의 왜곡이 발생한다(Weng et al., 1992). 머신비전의 경우 이미지 분석을 통해 얻은 정보를 바탕으로 기계의 제어를 수행하므로 자료가 되는 이미지가 실체를 정확하게 반영하는 것이 중요하며, 따라서 카메라의 왜곡을 보정하는 캘리브레이션 과정이 필수적이다. 본 연구에서는 두 방향으로 직교하는 격자를 기준으로 하여 디바이스를 촬영한 이미지의 좌표와 대상의 실제 좌표 간의 관계를 파악하는 기법을 활용하여 캘리브레이션을 수행하였다(Zhang, 1999).

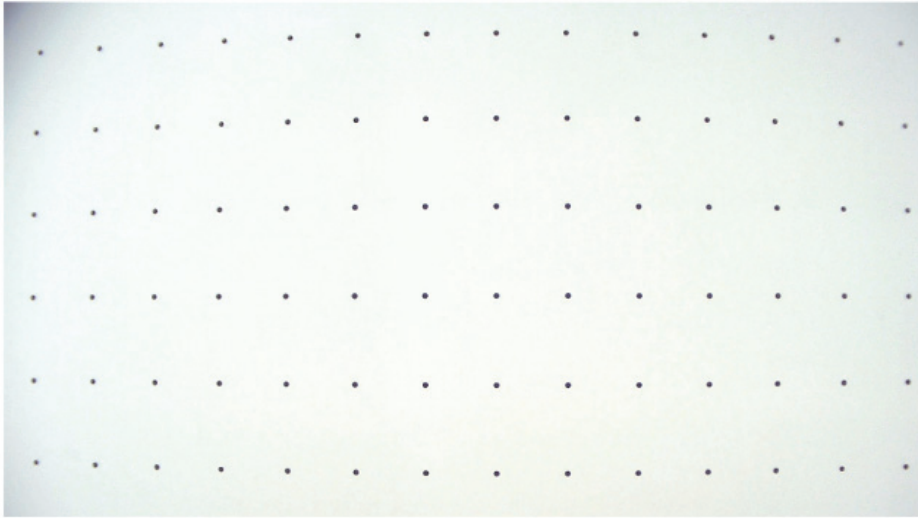
본 연구에서의 고품질의 이미지란 디바이스를 가장 크고 선명하게 포착한 이미지이다. 이미지 분석을 위해서는 디바이스가 반드시 격자 내부에 위치해야 하므로 이미지 상에서 격자 밖의 영역을 최대한 줄여야 디바이스를 최대한 확대해서 찍을 수 있다. [그림 3-10]의 (b)와 같이 격자 간격의 중횡비가 이미지의 비율과 유사할수록 화면 내에 가득 격자를 채울 수 있다. 따라서 연구에 사용될 이미지의 비율과 유사한 3대 2의 간격으로 점을 배치하였다. 최종적으로 가로 15개, 세로 17개의 점으로 이루어져 있으며 가로 방향으로 26mm, 세로 방향으로 16mm의 간격으로 점이 배치되어 있는 직사각형 형태의 격자가 설계되었다.



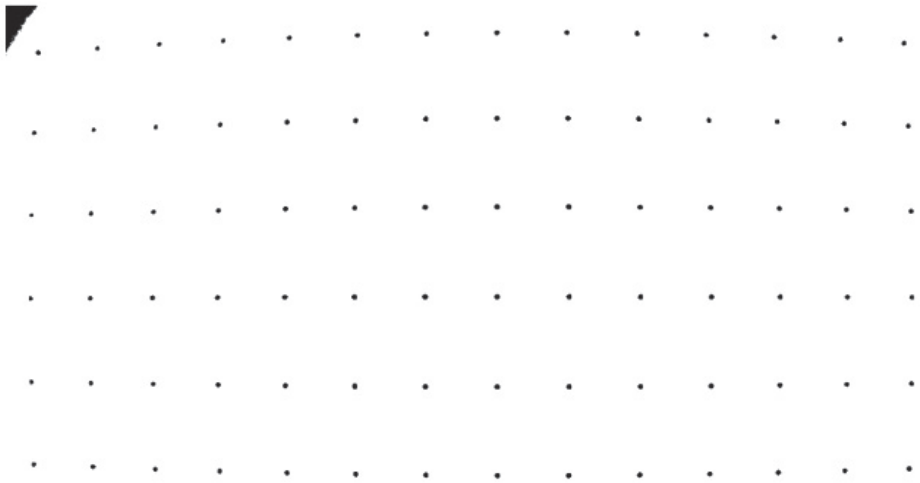
[그림 3-10] 격자 간격의 중횡비와 이미지의 관계

(a) 중횡비 1:1      (b) 중횡비 3:2

캘리브레이션 프로세스는 다음과 같다. 먼저 [그림3-11]의 (a)와 같이 점격자의 이미지를 포토부스에서 획득한다. 추출된 이미지는 thresholding을 통해 [그림3-11]의 (b)와 같이 흑백이미지로 이진화된다. Thresholding이란 연속적인 색조를 지닌 색채이미지의 픽셀에서 임계값을 기준으로 범위 내에 있는 픽셀을 전경, 범위 밖에 있는 픽셀을 배경으로 분리하는 기법으로(Russ, 2007) 인식에 방해가 되는 정보를 제거하여 분석의 정확도와 효율성을 높인다. 본 연구에서는 지정된 threshold보다 낮은 값의 픽셀은 모두 검정색으로 변환시키고 높은 값의 픽셀은 하얀색으로 변환시켜 이진화함으로써 분석의 효율을 높이고자 하였다.



(a) Original Image

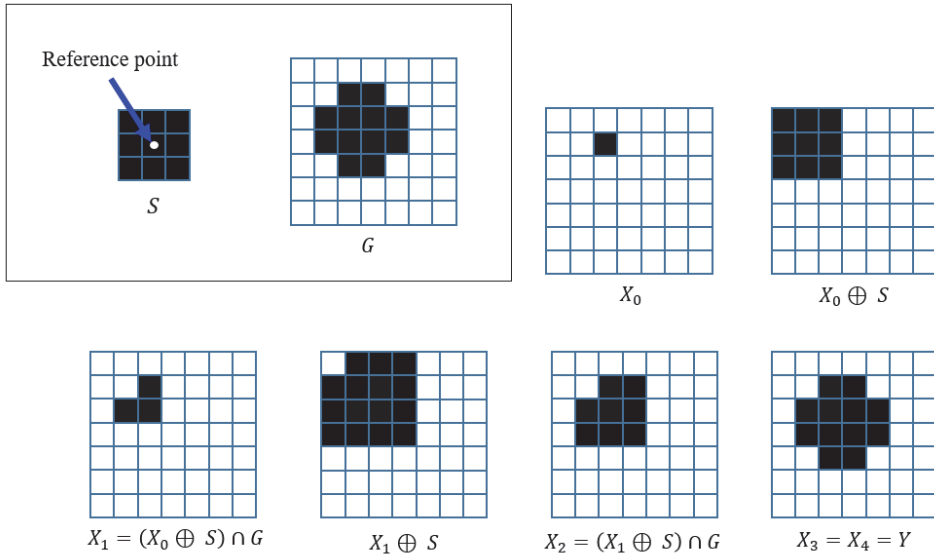


(b) After Thresholding

[그림 3-11] 점격자 이미지

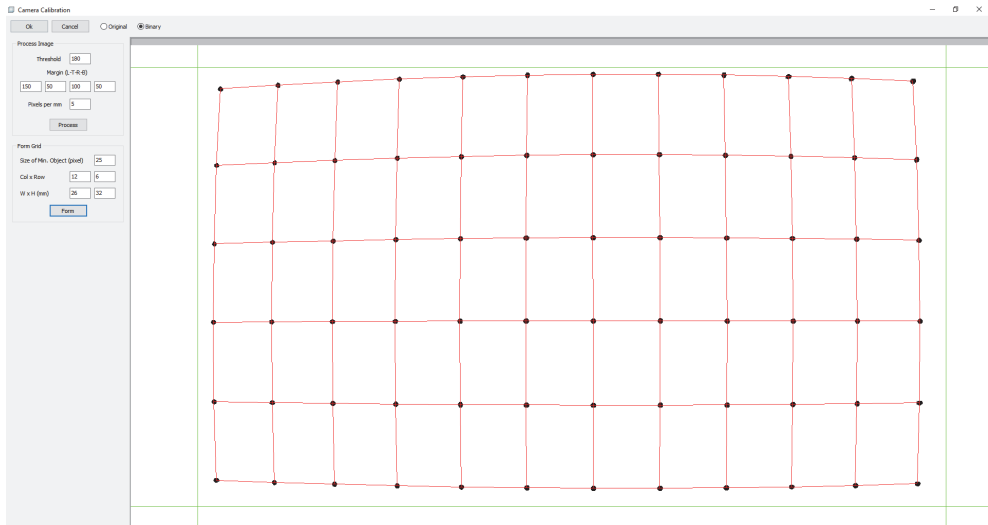
Thresholding을 통해 이진화된 이미지에 component labeling을 적용하여 연결된 픽셀을 하나의 점으로 인식하도록 한다. Component labeling은 반복 연산을 통해 서로 인접한 픽셀에 같은 라벨을 부여하여 하나의 요소로 인식하는 알고리즘이다. Beyerer(2016)가 component labeling 알고리즘을 설명하기 위해 그린 설명도에서 목표 component인  $G$ 를 점으로 변형하면 [그림 3-12]와 같이 표현할 수 있다. 식 (1)의  $X_0$ 는 최종적으로 구하고자 하는 component에 속하는 점 중 하나로 연산의 시작점이며  $S$ 는 연산자로 [그림 3-12]과 같이 정의되었다. [그림 3-12]의  $G$ 는 연산의 대상이 되는 점의 집합이며  $Y$ 는 labeling이 완료되어 하나의 요소로 인식된 점의 집합이다.  $X_0$ 을 시작으로 식 (1)과 같은 연산을 반복적으로 수행하며 labeling 후 [그림 3-12]의 맨 마지막 도식과 같이  $X_k$ 와  $X_{k-1}$ 이 같으면 연산을 중단한다. 위와 같은 labeling 알고리즘을 거치면 이진화 된 이미지의 검은 픽셀의 집합을 점으로 저장할 수 있으며 저장된 점 객체에 순서대로 숫자를 부여하여 메모리에 저장할 수 있다.

$$X_k = (X_{k-1} \oplus S) \cap G, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$



[그림 3-12] Component Labeling의 설명도(Beyerer et al., 2016)

Labeling이 끝난 후 각 점을 실제 격자 순서대로 정렬하고 연결하여 [그림 3-13]과 같은 선격자로 변형한 후, isoparametric mapping(Lim & Kim, 2011, Ko & Kim, 2013)을 통해 왜곡된 선격자의 좌표와 실제 정상 격자의 좌표값의 관계를 도출한다. 도출된 관계성을 획득한 이미지에 적용하면 이미지의 좌표값을 실제 좌표값과 일치하게 보정할 수 있다. 배율 환산은 1mm 당 5개의 픽셀로 설정하였다.



[그림 3-13] 선격자 구성

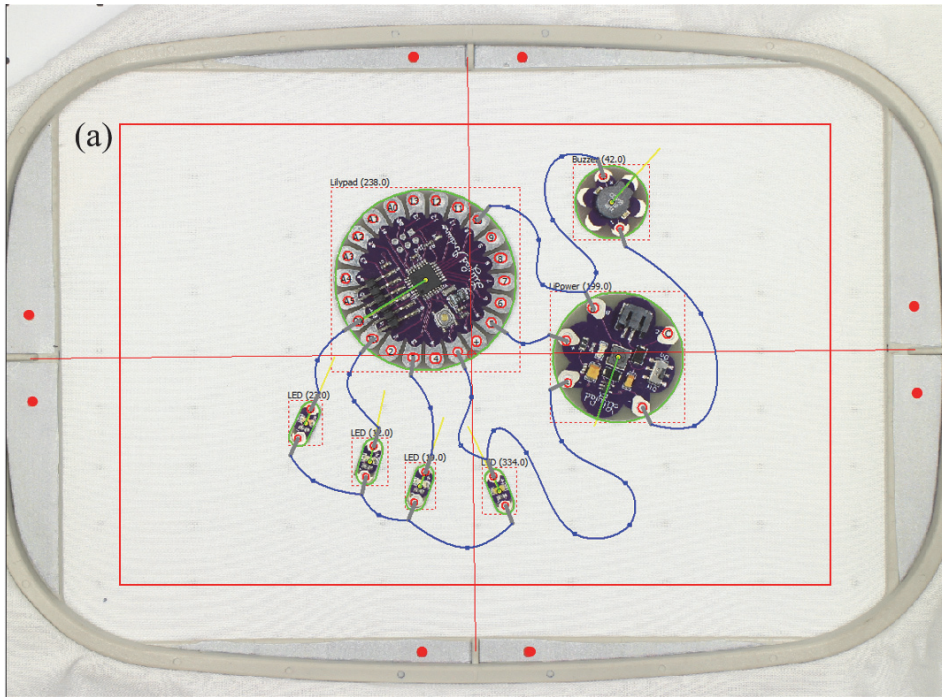
## 2.2. 디바이스 인식과 회로 재구성

정상적으로 작동하는 회로를 구성하기 위해서는 단자 간의 연결성을 확보해야 하며 따라서 단자의 정확한 위치를 파악하는 것이 매우 중요하다. 디바이스의 단자의 좌표는 디바이스의 위치와 배향이 변경되면 유동적으로 변경되므로 섬유회로의 자동생산을 위해서는 디바이스의 배치를 제어하여 단자의 위치를 아는 것이 필수적이다. 선행연구에서는 디바이스를 배치하는 작업 자체를 자동화하려고 시도했지만(Linz et al., 2006) 본 연구에서는 이미지 분석을 통해 디바이스의 좌표와 배향을 인식함으로써 디바이스의 배치에 따르는 단자의 위치 변화를 빠르게 파악하는 것을 목표로 하였다. 1.1 항에서 설명한 바와 같이 데이터베이스에는 디바이스의 영역을 기준으로 한 모든 단자의 좌표와 영역이 저장되어 있다. 따라서 디바이스의 종류와 자수들을 기준으로 한 디바이스의 좌표, 디바

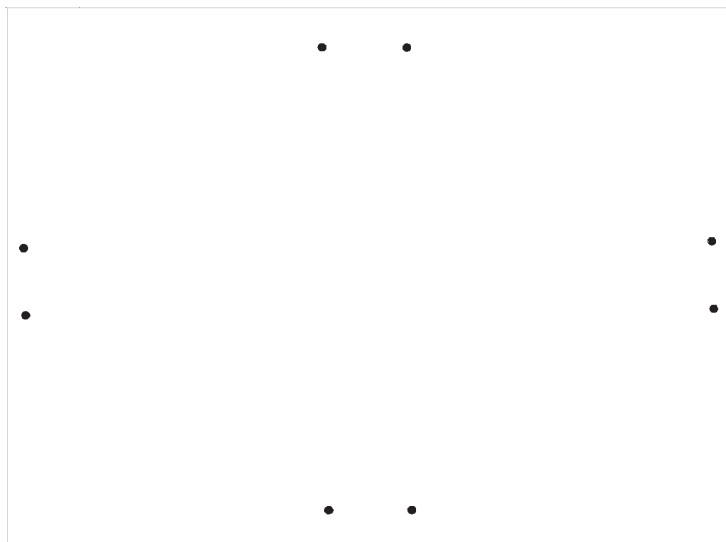


이스의 배향을 이미지 분석을 통해 인식하고 여기에 데이터베이스에 저장되어 있는 단차 정보를 적용하면 최종 목표인 현재 단차의 좌표를 도출할 수 있다.

먼저 획득한 이미지를 자수틀을 기준으로 정렬하기 위한 프로세스를 개발하였다. 자수에 사용될 자수틀에 [그림 3-14]와 같은 붉은색 점을 표시하고 디바이스 이미지 획득 시 함께 추출하였다. [그림 3-14]의 (a)는 디바이스 인식을 위한 알고리즘이 적용될 영역이며 사용자가 지정할 수 있다. 전체 이미지에서 (a)를 제외한 영역에 한해 픽셀의 RGB 값에서 R값을 기준으로 thresholding 하여 이미지를 [그림 3-15]와 같이 이진화한다. Component labeling을 통해 연결된 픽셀로 이루어진 점을 인식한 후 가까이에 있는 두 점 사이를 등분하는 점 중 가장 멀리 있는 점을 잇는 직선을 [그림 3-14]와 같이 만들고 두 직선이 교차하는 점을 구한다. 자수틀의 중점에 해당하는 이 점을 중심으로 하여 향후 자수 경로 데이터의 생성이 이루어진다.

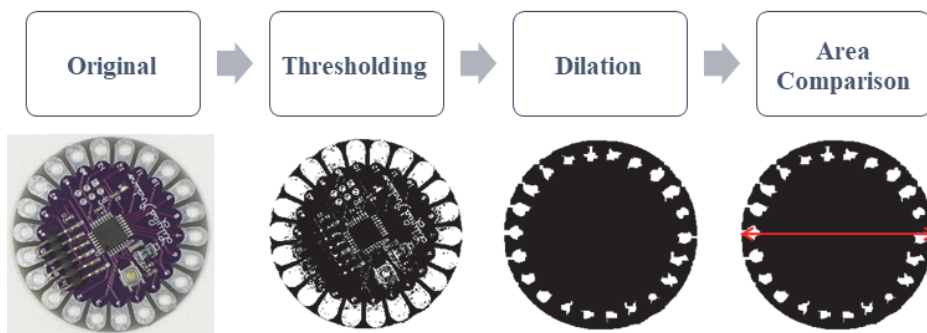


[그림 3-14] 붉은점을 이용한 자수틀의 중점 도출



[그림 3-15] 자수틀 붉은점의 이진화 이미지

다음으로 디바이스의 종류를 인식하기 위한 이미지 분석을 수행하였으며 그 흐름은 [그림 3-16]과 같다. Thresholding을 통해 이진화된 이미지에 바로 component labeling을 수행하면 디바이스의 경계에 해당하는 픽셀이 삭제되어 정확한 디바이스의 경계의 추출이 어려울 수 있다. 따라서 검정색 픽셀과 맞닿아 있는 하얀색 픽셀값을 검정색으로 변경하여 전경을 확장시키는 dilation(Russ, 2007)기법을 이용하여 이진화된 검정색 픽셀 영역을 강조하는 과정을 거친다. 이 과정을 통해 열려있는 디바이스 이미지의 경계가 막혀 보다 정확하게 디바이스의 경계를 추출하는 것이 가능해진다. Component labeling을 이용하여 맞닿아 있는 검정색 픽셀의 집합을 하나의 요소로 인식하고 요소의 면적을 데이터베이스에 등록된 정보와 대조하면 디바이스의 종류를 결정할 수 있다. 크기가 같은 서로 다른 디바이스를 구분하기 위해서는 데이터베이스에 저장된 백색영역비 값을 대조한다. 디바이스의 종류가 결정되면 해당 영역의 중심을 계산하여 영역의 센터를 찾고 해당 값을 디바이스의 위치 좌표로 저장한다.

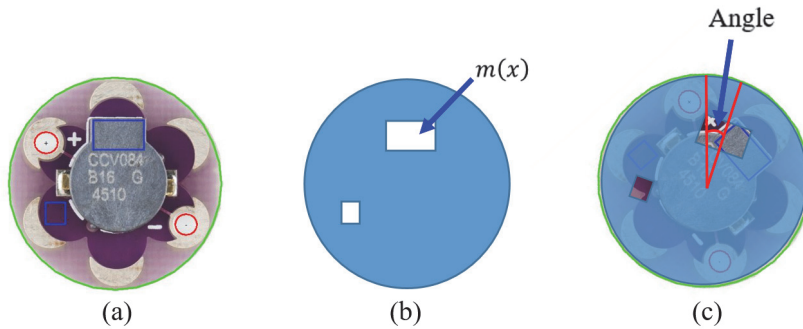


[그림 3-16] 디바이스의 종류 인식 프로세스

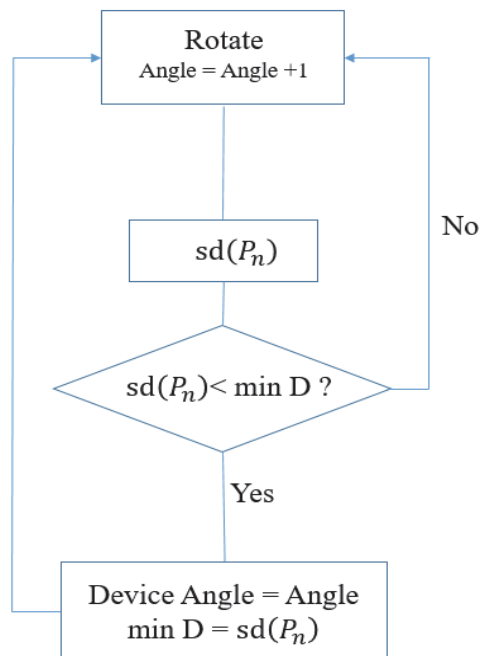
앞에서 언급하였듯, 디바이스의 종류와 좌표가 고정되어도 디바이스의 배향에 따라 단자의 위치는 변화한다. 따라서 본 연구에서는 디바이스의 배치 각도를 파악하기 위해 템플릿 매칭(template matching) 기반의 알고리즘이 개발되었다. 템플릿 매칭은 특정 목적을 위해 별도로 설정된 템플릿 이미지와 테스트 이미지와의 픽셀 단위의 비교 연산을 통해 결과를 도출하는 기술로(Brunelli, 2009) 이미지의 배율, 회전각에 굉장히 예민하다는 특징이 있지만(Huang and Pan., 2015), 적은 데이터 샘플로도 대상의 좌표, 각도 그리고 배율을 매우 높은 정밀도로 얻을 수 있다는 장점을 지닌 기술이다(Le et al., 2020).

본 연구에서 개발한 알고리즘은 디바이스 데이터베이스에 등록된 이미지를 템플릿으로 하여 일정 각도로 회전 후, 템플릿의 균일색 영역과 디바이스 이미지의 균일색 영역이 서로 일치하는지를 판별함으로써 디바이스의 각도를 찾고자 하였다. 먼저 [그림 3-17]의 (a)와 같은 데이터베이스의 이미지를 템플릿으로 하고, 지정된 균일색 영역을 제외한 영역에 [그림 3-17]의 (b)와 같이 마스크(mask)를 적용한다. 마스크란 분석의 기준이 되는 부분을 제외하는 기법으로, 다양한 배경 속에서 기준 영역을 찾게 하는 템플릿 매칭기법이다. [그림 3-17]의 (b)와 같이 마스크를 적용한 템플릿 이미지를 디바이스의 중심점을 기준으로 1°씩 회전하면서, 기준 영역 내의 위치한 픽셀값을 비교하는 연산을 수행한다. 수행된 연산을 순서대로 나타내면 [그림 3-18]와 같다. 템플릿의 회전각에 해당하는 인덱스 “Angle”에 1을 더한 후  $sd(P_n)$  값을 계산하고, 이 값이 “min D”보다 작을 경우 인덱스 “Device Angle”에 이 때의 “Angle” 값을 저장하고 다음 단계로 넘어간다. 이 때 “min D”의 초기값은 RGB 공간에서 존재할 수 있는 거리의 최대값인 442로 설정하여 알고리즘이 실행될 수 있도록 하고, “Angle”의 값이 초기값 0에서 360이 될 때까지

1씩 가산하며 전체 연산을 반복한다. 최종적으로 “Device Angle”에는 템플릿 내 영역의  $sd(P_n)$  값이 최소일 때의 “Angle”의 값이 저장되게 된다.



[그림 3-17] 템플릿 이미지와 “Angle” 인덱스



[그림 3-18] Device Angle 계산 알고리즘의 순서도

알고리즘에서 템플릿과 실제 이미지의 유사성을 나타내는 값은 식 2 - 5를 통해 계산된다. 식 2는 RGB 값을 세 개의 축으로 하는 삼차원 공간에서 사용자가 지정한 영역  $m(x)$  내에 있는 모든 이미지 픽셀의 포인트이다. 식 3을 통해 삼차원 공간에서의  $m(x)$  내의 점의 분포의 무게 중심을 구하고 식 4, 5를 통해 각 점과 무게중심 사이의 표준편차인  $sd(P_n)$ 를 산출한다.

The point set  $P$  of  $m(x)$  is the set of all image point of area user defined

$$P \in m(x) \quad P_n = \begin{pmatrix} R_n \\ G_n \\ B_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{pmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n R_k \\ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n G_k \\ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n B_k \end{pmatrix} \quad (3)$$

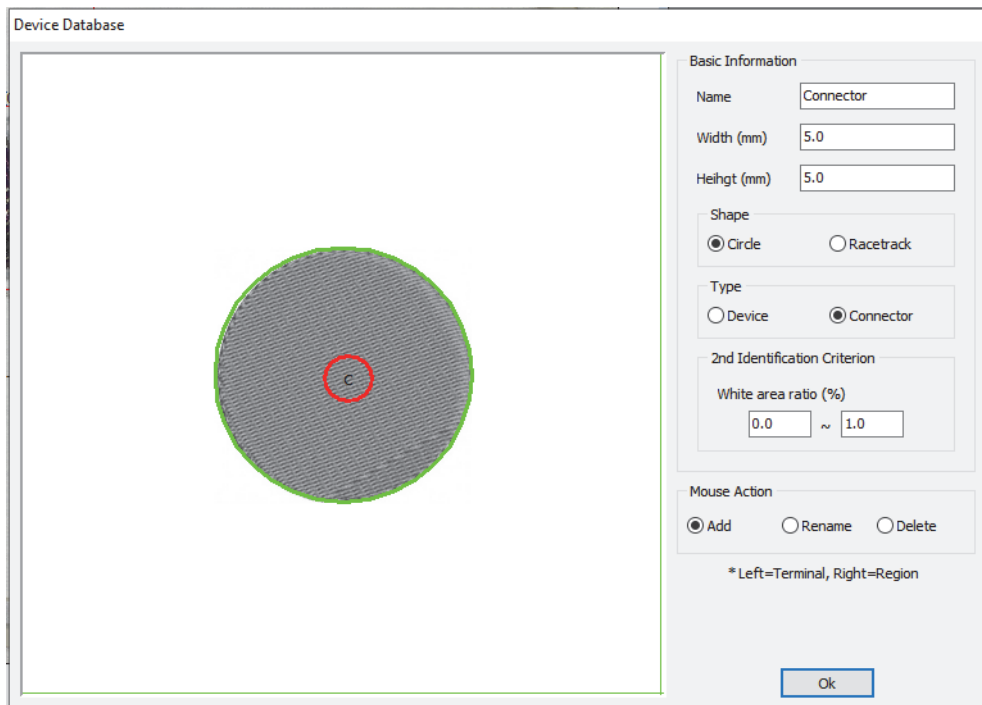
$$d(P_n) = \sqrt{(R_c - R_n)^2 + (G_c - G_n)^2 + (B_c - B_n)^2} \quad (4)$$

$$sd(P_n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d(P_n)^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d(P_n) \right)^2} \quad (5)$$

인식된 디바이스의 단자의 최종 좌표를 알게 되면 초기에 설계한 가상의 단자 위치를 실제 단자의 위치로 변경함으로써 실질적인 제작을 위한 회로의 재구성이 가능해진다.

### 2.3. 다중 회로 연결

자수법의 활용이 확장되기 위해서는 서로 다른 회로의 연결 과정을 효율화하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 회로 간 연결 작업의 개선을 위해 전도성 실을 통한 자수로 제조가 가능한 커넥터를 개발하였다. 커넥터는 지름 5mm의 원형이며 [그림 3-19]와 같다. 디바이스 데이터베이스에 내장되어 디바이스와 같이 사용자가 적절한 위치에 배치하여 설계에 활용할 수 있다. 커넥터는 연결이 필요한 경로의 말단에 배치하여 사용한다.

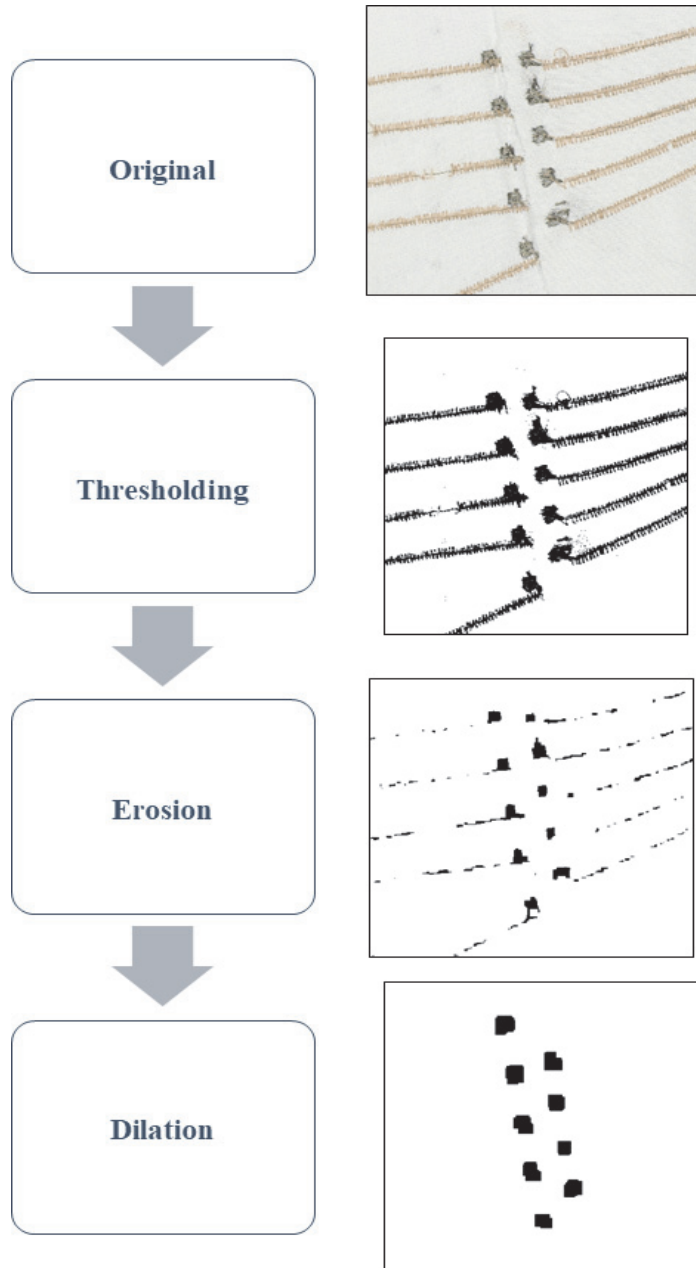


[그림 3-19] 디바이스 데이터베이스에 등록된 커넥터

커넥터를 연결하는 경로를 도출하기 위한 커넥터의 인식은 [그림 3-20]와 같은 분석을 통해 이루어진다. 연결하고자 하는 경로의 말단에 설계되어 자수가 완료된 원형의 커넥터는 포토부스를 통해 이미지 데이터로 저장된다. 원본 이미지는 thresholding을 통해 흑백이미지로 변환된다. 커넥터는 경로와 경로의 연결을 위해 필요한 것이므로 반드시 경로와 맞닿아 있는데 여기서 커넥터 요소만을 추출하기 위해 erosion 과정을 거친다. Erosion은 하얀색 픽셀과 맞닿아 있는 검정색 픽셀을 하얀색으로 치환하여 요소의 전경을 축소하는 기법이며(Russ, 2007), 이를 통해 커넥터와 경로가 맞닿아 있는 지점의 픽셀값 일부를 제거할 수 있다. erosion 후에 dilation을 거치면 커넥터와 경로 사이의 빈틈을 열면서도 커넥터의 픽셀을 보존할 수 있다. 다음으로 component labeling을 통해 픽셀의 집합을 하나의 요소로 추출하여 커넥터 객체로 저장한다.

커넥터의 인식을 마친 후에는 가장 가까이에 있는 커넥터를 연결하는 경로를 생성해야 한다. 앞에서 결정한 커넥터의 중심을 기준으로 연결되지 않은 커넥터 사이의 거리를 계산하고 가장 가까이에 있는 커넥터의 중심을 연결하는 직선을 생성한다. 생성된 직선은 경로 스티치로 자동 변경되며 제작을 위해 자수기를 제어할 수 있는 자수용 데이터로 변환하여 저장할 수 있다.





[그림 3-20] 커넥터 인식을 위한 이미지 분석 프로세스

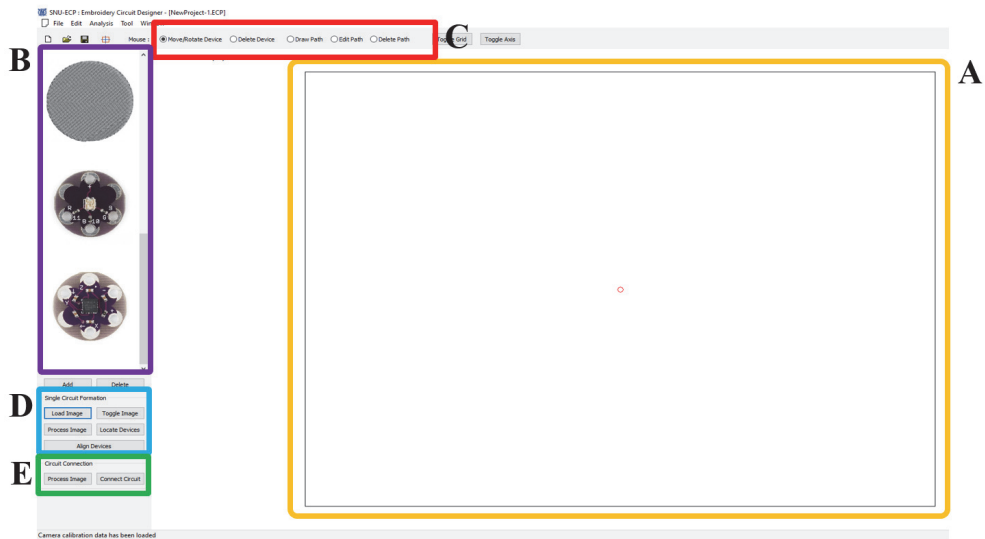
## 제 4 장 연구 결과 및 고찰

### 제 1 절 소프트웨어 개요

본 연구에서 개발한 소프트웨어의 기본적인 구성은 [그림 4-1]과 같으며 소프트웨어는 SNU-ECD(Electric Circuit Designer)로 명명하였다. 소프트웨어는 Embarcadero C++ Builder 2010 (Windows 용)을 사용하여 개발하였다.

[그림 4-1]의 A는 디바이스의 배치와 경로의 생성이 이루어지는 활성영역이다. B는 디바이스 데이터베이스로 “Add”와 “Delete” 메뉴를 통해 디바이스를 등록하고 삭제할 수 있다. B의 디바이스 데이터베이스에서 원하는 디바이스를 포인트 앤 클릭(Point and Click)하고 A의 활성영역으로 드래그 앤 드롭(Drag and Drop) 하여 디바이스를 배치할 수 있다. C는 활성영역에서의 마우스 액션을 라디오 버튼 선택을 통해 지정할 수 있는 영역이다. 사용 가능한 마우스 액션에는 “디바이스 이동 및 회전”, “디바이스 삭제”, “경로 그리기”, “경로 수정”, “경로 삭제”가 있다. D는 디바이스의 인식을 위해 이미지를 로드하고 이미지 분석을 위한 파라미터를 입력하며 디바이스 인식과 경로 재구성을 명령할 수 있는 영역이다. 이미지 분석을 위한 파라미터는 사용자에게 입력받을 수 있도록 설계되었으며 입력창은 [그림 4-2]와 같다. “Gray Level Threshold”는 이미지의 이진화를 위해 RGB로 이루어진 색채값을 흑 또는 백으로 치환하는데 임계치가 되는 값이다. “No. of Dilation”은 이진화된 이미지에

dilation을 적용할 횟수를 부여하는 메뉴이다. 다음으로 상, 하, 좌, 우의 여백을 지정함으로써 분석할 활성 영역을 정할 수 있으며 마지막으로 “Minimum Object” 메뉴를 통해 디바이스로 인식할 픽셀 집합 원소 개수의 최솟값을 지정하여 작은 픽셀 집합은 분석에서 제외함으로써 디바이스 인식의 효율을 높인다. E는 다중 회로의 연결을 위한 이미지 분석의 파라미터를 입력하는 영역이며 버튼을 통해 커넥터를 연결하는 경로의 생성을 명령할 수 있다.



[그림 4-1] 소프트웨어 기본화면

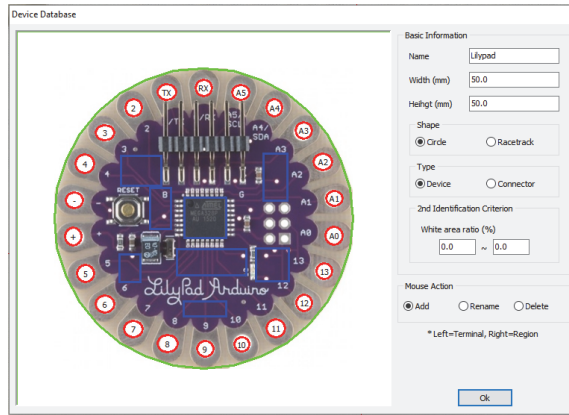
Parameters for Image Processing	
Gray Level Threshold	160
No. of Dilation	2
Left Margin (mm)	30.0
Top Margin (mm)	30.0
Right Margin (mm)	30.0
Bottom Margin (mm)	30.0
Minimum Object (pixel)	250
<input type="button" value="Ok"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

[그림 4-2] 이미지 분석 파라미터 입력창

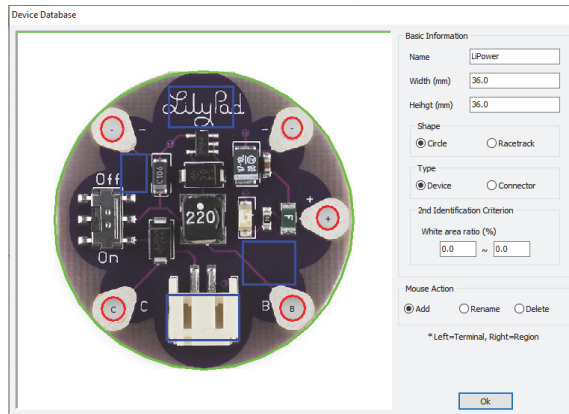
### 1.1. 디바이스 데이터베이스

스마트 의류에의 적용을 위해 릴리패드 아두이노(Lilypad Arduino), 애드어프루트(Adafruit), 타이니릴리(TinyLily) 등 다양한 디바이스들이 개발되어 있다. 본 연구에서는 현재 가장 보편적으로 사용되고 있으며 재봉이 가능한 형태의 PCB(Printed Circuit Board)인 릴리패드 아두이노를 대상으로 하였고(Buechley et al., 2008), 그 외의 다른 디바이스 또한 등록 가능하다.

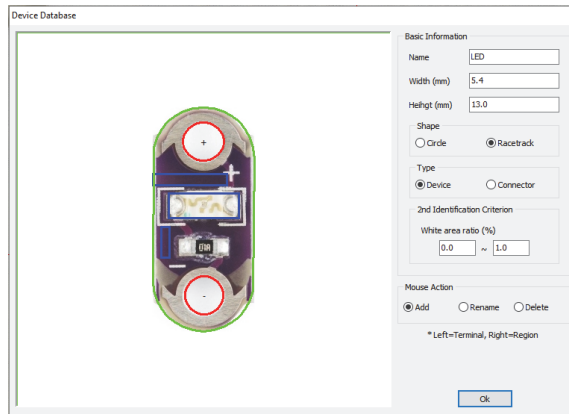
본 연구에서 사용하게 될 6개의 디바이스(Lilypad Arduino, LiPower, LED, Buzzer, RGB LED, Accelerometer)를 데이터베이스에 입력한 결과는 [그림 4-3]과 같다. [그림 4-3]의 (d), (e), (f)의 경우 디바이스의 크기와 기하학적 형태가 일치하므로 제 2의 분류 기준인 백색영역비가 각각 2~40%, 50~100%, 40~50%로 입력된 것을 확인할 수 있다.



(a)

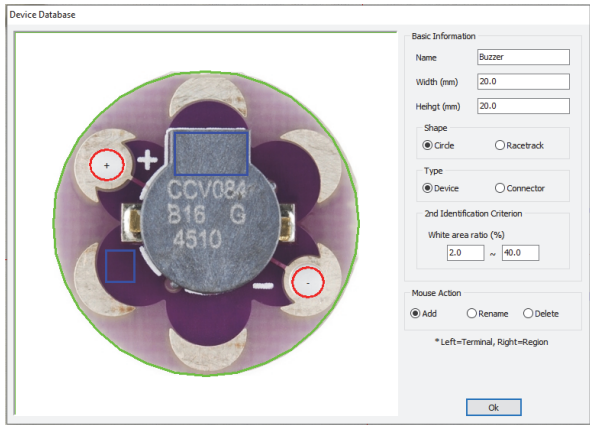


(b)

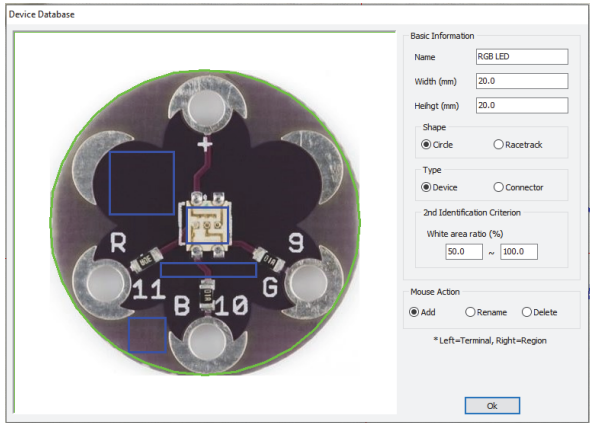


(c)

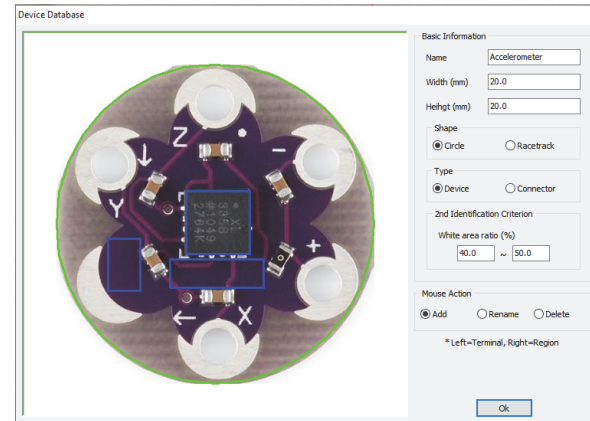
[그림 4-3] 디바이스 데이터베이스



(d)



(e)



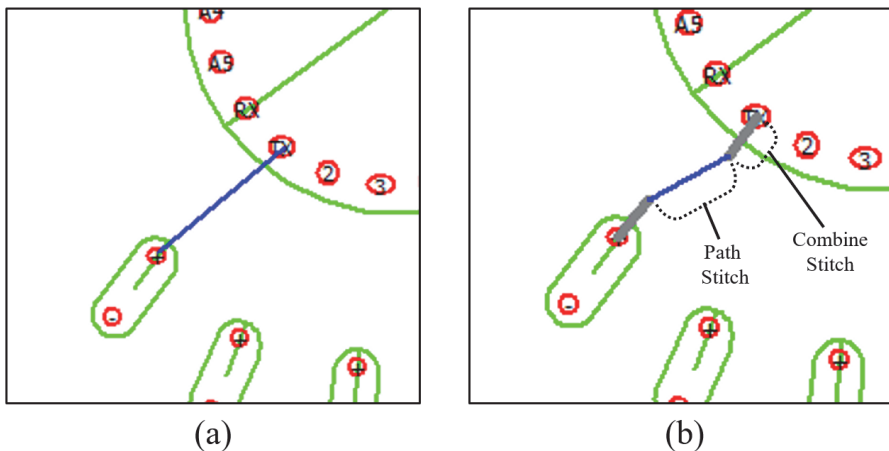
(f)

[그림 4-3] 디바이스 데이터 베이스

## 1.2. 테스트 회로 설계

본 절에서는 개발한 소프트웨어를 이용하여 회로의 설계를 수행하였다. 회로의 설계에는 디바이스를 선정 및 배치하고 이들의 단자를 연결하는 전도성 경로를 생성하며 해당 설계와 같은 실물을 제작하기 위해 해당 경로를 자수용 데이터로 변환하는 과정이 포함된다. 본 연구에서는 앞서 디바이스 데이터베이스에 등록된 6종의 디바이스 중 연산의 수행을 담당하는 릴리패드 아두이노와 전력을 공급할 릴리패드 LiPower 그리고 액추에이터(actuator)의 역할을 수행하는 릴리패드 LED, 릴리패드 Buzzer와 이를 연결하는 12개의 경로로 이루어진 단일 회로의 설계를 시도하였다.

디바이스를 활성영역에 배치하고 회전한 후 단자와 단자를 선택하여 이를 연결하는 경로를 생성할 수 있다. 단자와 단자를 클릭하면 디바이스의 단자를 원단에 연결하는 봉합 스티치와 경로 스티치가 [그림 4-4]과 같이 자동적으로 적용된다.

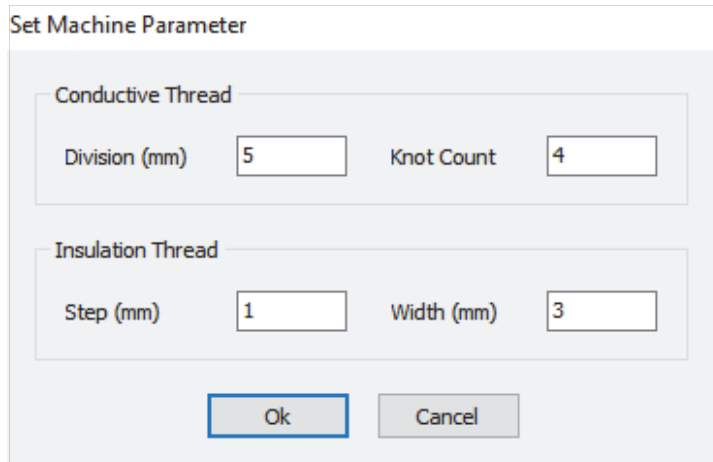


[그림 4-4] 스티치의 자동 적용

(a) 경로 생성

(b) 스티치 자동 변환

최종적으로 스티치로 완성된 경로는 “save file as embroidery data” 기능을 통해 자수 데이터인 dst 파일형식으로 변환된다. 변환되기 전 [그림 4-5]와 같은 별도의 창을 통해 전도성 경로 스티치의 한 땀의 길이와 스티치의 반복 횟수, 절연 스티치의 땀의 간격(pitch)과 길이(width)를 사용자에게 입력받을 수 있도록 설계되었다. SNU-ECD를 이용해 본 연구에서 설계한 테스트 회로는 [그림 4-6]과 같다.



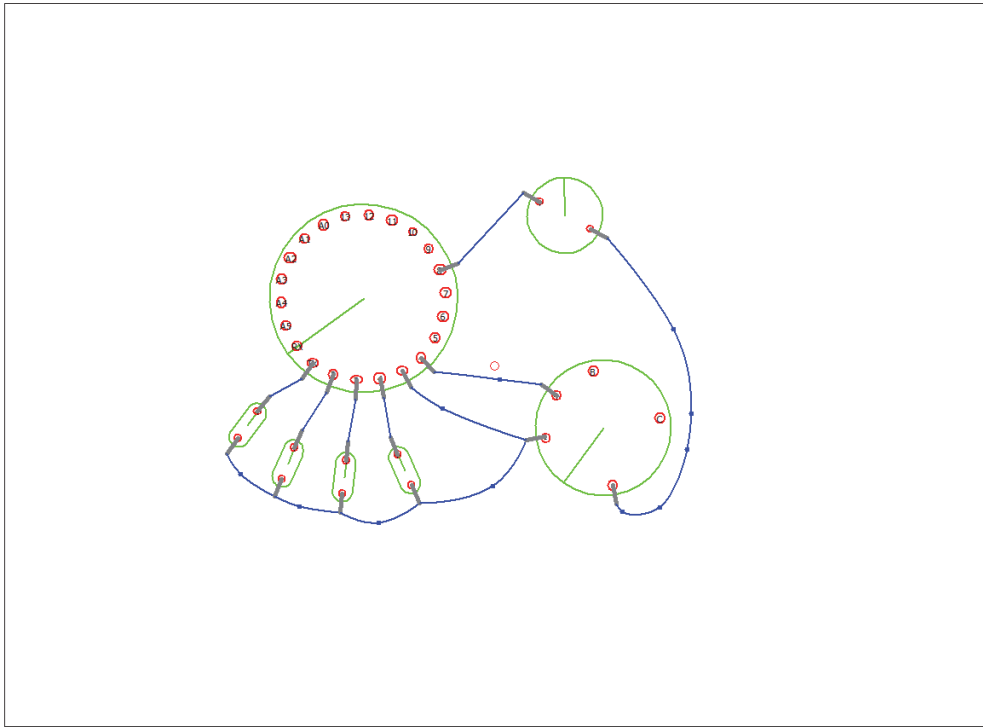
The image shows a dialog box titled "Set Machine Parameter". It is divided into two sections: "Conductive Thread" and "Insulation Thread".

- Conductive Thread:** Contains two input fields: "Division (mm)" with the value "5" and "Knot Count" with the value "4".
- Insulation Thread:** Contains two input fields: "Step (mm)" with the value "1" and "Width (mm)" with the value "3".

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "Ok" and "Cancel".

[그림 4-5] 자수기 파라미터 입력창





[그림 4-6] 회로 설계의 예

## 제 2 절 회로 생산

본 절에서는 1 절에서 등록된 디바이스들에 대해 소프트웨어 상에서 인식을 시도하고 1 절에서 설계한 단일의 회로를 3회에 걸쳐 반복적으로 제작하였으며 커넥터를 통한 다중 회로의 연결 경로 생성을 시도하였다.

회로의 제작에는 제조사 Brother의 자수기 NV 2600 모델이 사용되었으며 자수기와 호환이 가능한 가로 130mm, 세로 180mm 크기의 자수틀이 사용되었고 최대 자수속도는 350 spm 였다. 모든 스티치에서 밑실로는 폴리에스터 100%의 120D 자수용 실이 사용되었고 전도성 경로 스티치와 합봉 스티치를 위한 윗실에는 전도성 실이, 절연 스티치를 위한 윗실에는 밑실과 같은 실이 사용되었다. 다양한 전도성 실이 개발되어 있지만 본 연구에서는 가볍고 유연하며 금속소재의 실에 비해 기계적 안정성이 뛰어나고(Chui et al., 2016) 자수기에 적용이 가능한 은도금된 폴리아미드 소재의 전도성 실을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 제조사 소이텍스(Soitex)의 전도성 실의 속성은 [표 1]과 같다.

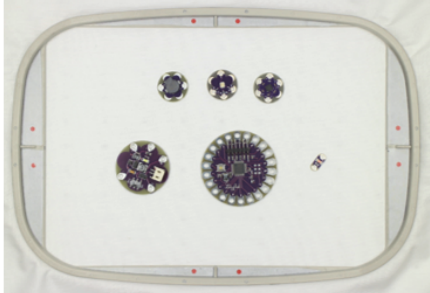
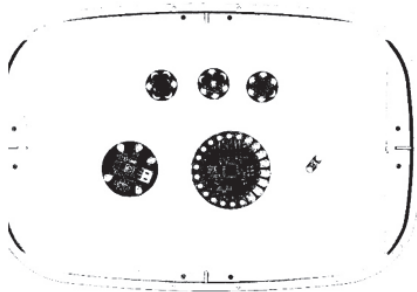
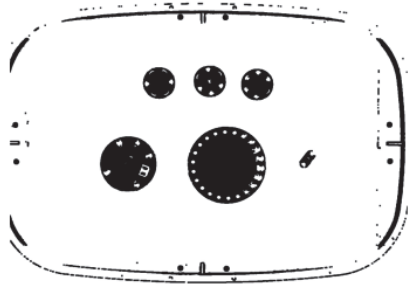
[표 1] 전도성 실의 속성

항목	속성
성분(Contents)	Polyamide plated with silver
두께(Thickness)	140D (0.06mm)
저항(Resistance)	4.0~5.0Ω
허용 전류(Allowable Current)	0.18 A

디바이스가 부착되고 자수가 적용될 원단에는 면 100 % 20수의 평직 원단이 사용되었으며 이미지 분석의 정확도를 높이기 위해 흰색의 원단을 일괄적으로 사용하였다.

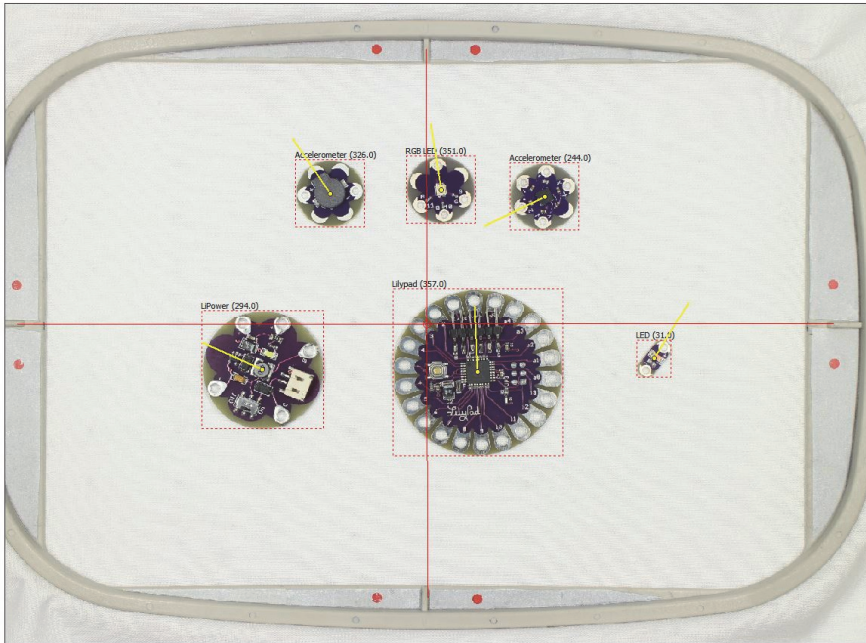
## 2.1. 디바이스 인식

먼저 본 연구에서 개발한 프로그램을 통해 총 6종의 서로 다른 디바이스의 인식을 시도하였다. 자수틀에 고정시킨 원단에 디바이스 6종을 배치한 후 포토부스에서 획득한 원본이미지는 임계치 160을 기준으로 thresholding 되고 2회의 dilation이 이루어졌으며 그 결과는 [그림 4-7]와 같다.

	Result
Original	
After Thresholding	
After Dilation	

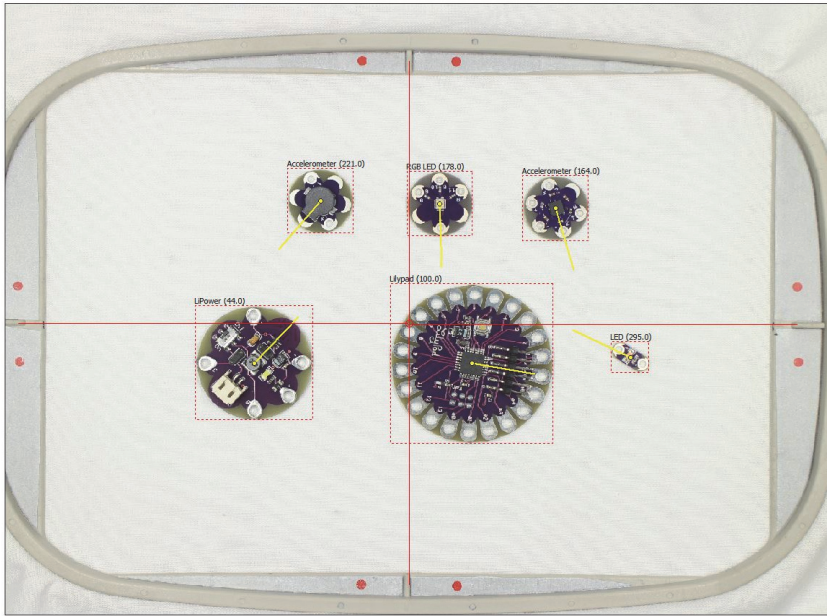
[그림 4-7] 디바이스 이미지의 이미지 분석 결과

이미지 분석을 통해 디바이스의 종류와 위치, 배향을 인식한 결과는 [그림 4-8]과 같다. 모든 디바이스의 종류를 올바르게 인식하였으며 크기가 같은 Buzzer, RGB LED, Accelerometer의 경우에도 백색영역비를 이용한 분석을 통해 구분에 성공하였다. 무작위하게 배치된 각 디바이스의 배향도 정확하게 인식하였다.



[그림 4-8] 첫 번째 디바이스 인식 결과

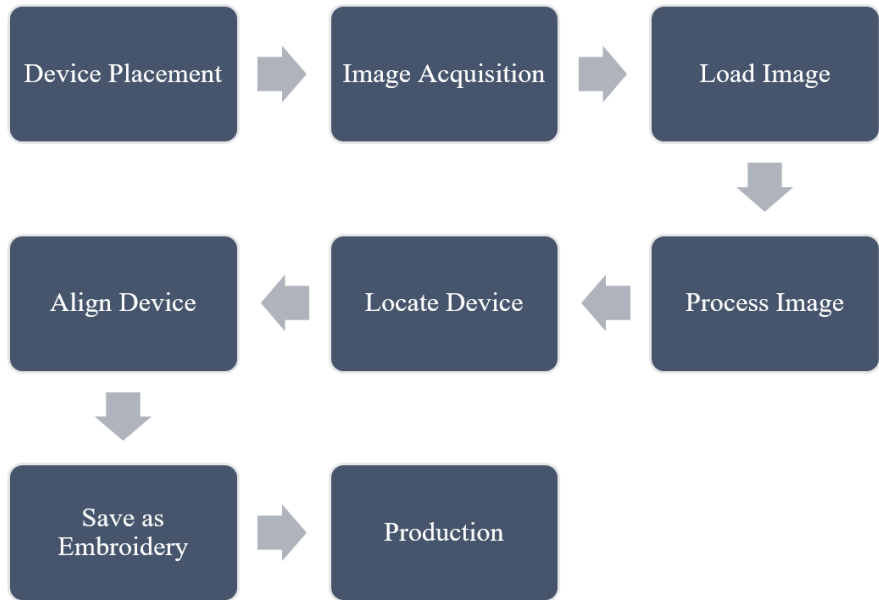
같은 조건에서 무작위하게 설정되었던 디바이스의 배향만을 변경하여 다시 인식을 시도해 보았고 그 결과는 [그림 4-9]과 같다.



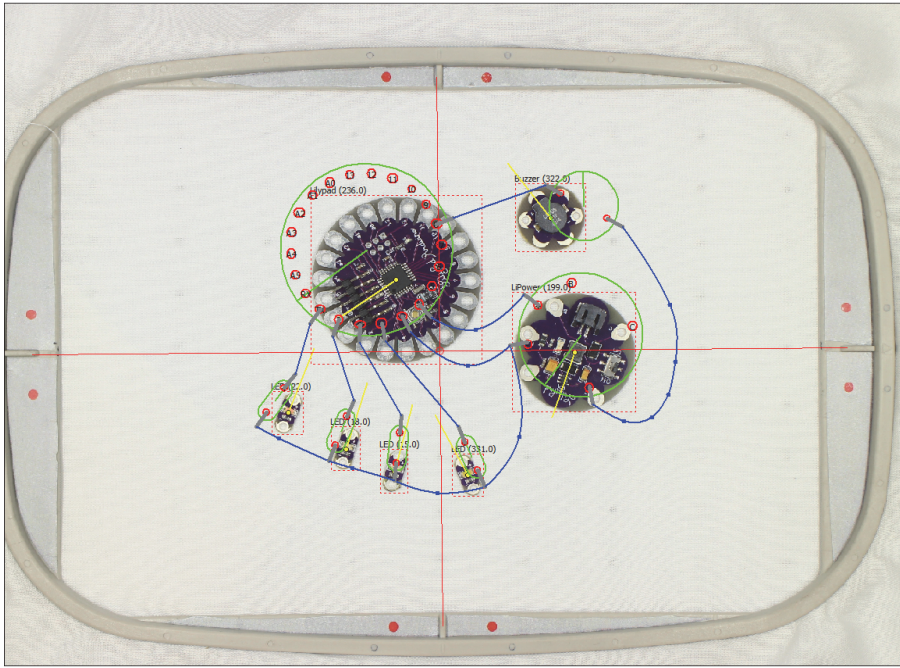
[그림 4-9] 두 번째 디바이스 인식 결과

## 2.2. 단일 회로 생산

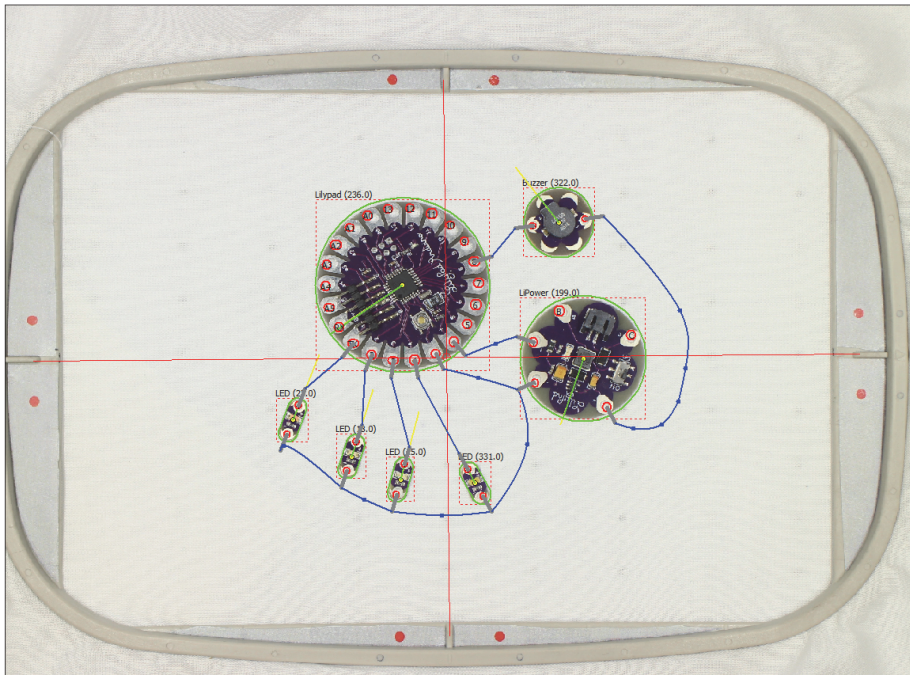
앞 절에서 설계한 단일회로의 제작을 3회 반복하여 시도하였다. 단일회로의 생산 프로세스는 [그림 4-10]과 같다. 앞 절에서 완성된 설계에 따라 자수틀을 기준으로 디바이스를 대략 배치하고 배치된 디바이스를 포토부스에서 이미지로 저장한다. 소프트웨어에서 해당 이미지를 불러온 후 이미지를 분석하여 디바이스의 종류를 인식한다. [그림 4-11]와 같이 “Locate Device” 명령을 통한 이미지 분석을 통해 디바이스의 배향을 인식한 후 [그림 4-12]과 같이 “Align Device” 명령을 통해 설계도의 단자를 이미지의 단자와 일치시켜 경로를 재구성한다.



[그림 4-10] 단일회로의 생산 프로세스



[그림 4-11] Locate Device 기능의 예

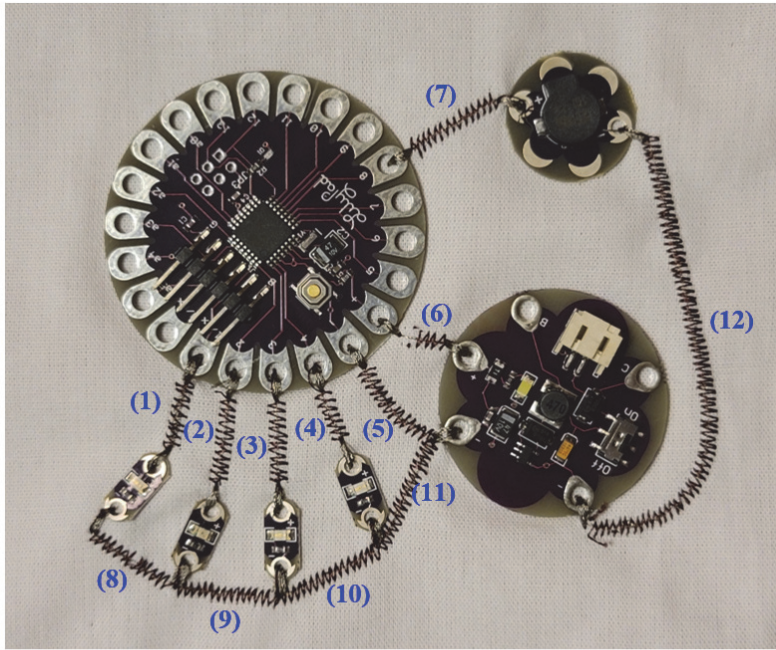


[그림 4-12] Align Device 기능의 예

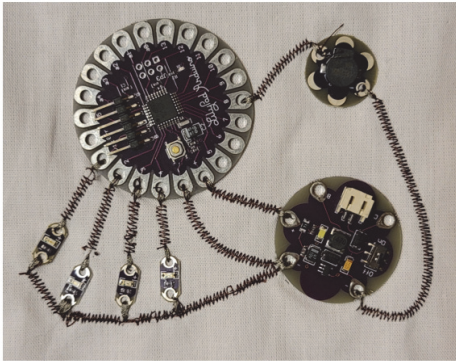


재구성된 경로는 자수용 데이터 파일로 변환되며 해당 파일을 자수기에서 불러오고 디바이스가 배치된 자수틀을 자수기와 결합하면 자수기는 파일의 명령에 따라 배치된 디바이스를 연결하는 경로를 자동적으로 자수한다. 이와 같은 프로세스를 거쳐 세 개의 단일 회로를 생산하였고 결과물은 [그림 4-13]와 같다.

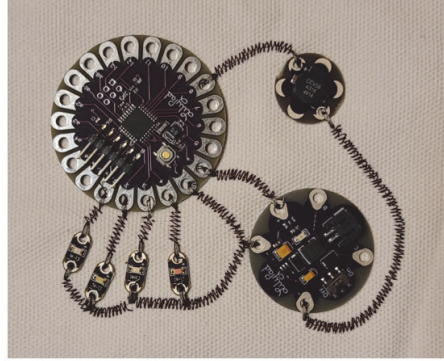
생산된 단일 회로의 유효성을 검증하기 위해 단자 간 경로의 저항을 측정하는 실험을 수행하였다. [그림 4-13]의 (a)와 같이 생산된 단일 회로는 서로 다른 디바이스 간의 단자를 연결하는 12개의 경로를 보유하고 있다. 세 개의 표본에 대해서 12개 경로의 저항을 측정한 결과는 [표 2]와 같다. 모든 경로의 저항이 측정되었으며 이를 통해 생산된 모든 경로가 단자와 단자 간의 전기적 연결을 구현함을 검증할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

[그림 4-13] 회로 생산 결과

- (a) 회로1
- (b) 회로2
- (c) 회로3

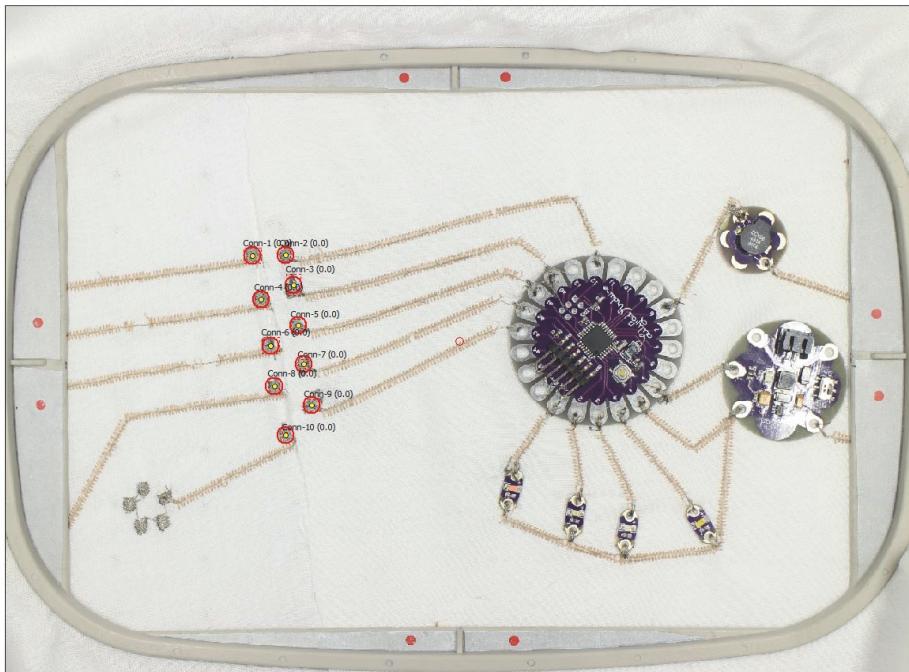
[표 2] 경로별 저항 측정 결과

(단위 : Ω)

경로명	회로 1	회로 2	회로 3
1	2.6	7.7	4.3
2	5.9	7.9	5.8
3	6.1	7.4	5.8
4	4.8	5.6	5.9
5	6.8	13.3	8.4
6	4.5	7.0	7.9
7	7.2	9.6	11.4
8	6.9	6.8	4.5
9	5.8	5.2	5.0
10	5.9	7.2	5.7
11	7.1	13.8	9.6
12	26.7	30.3	30.0

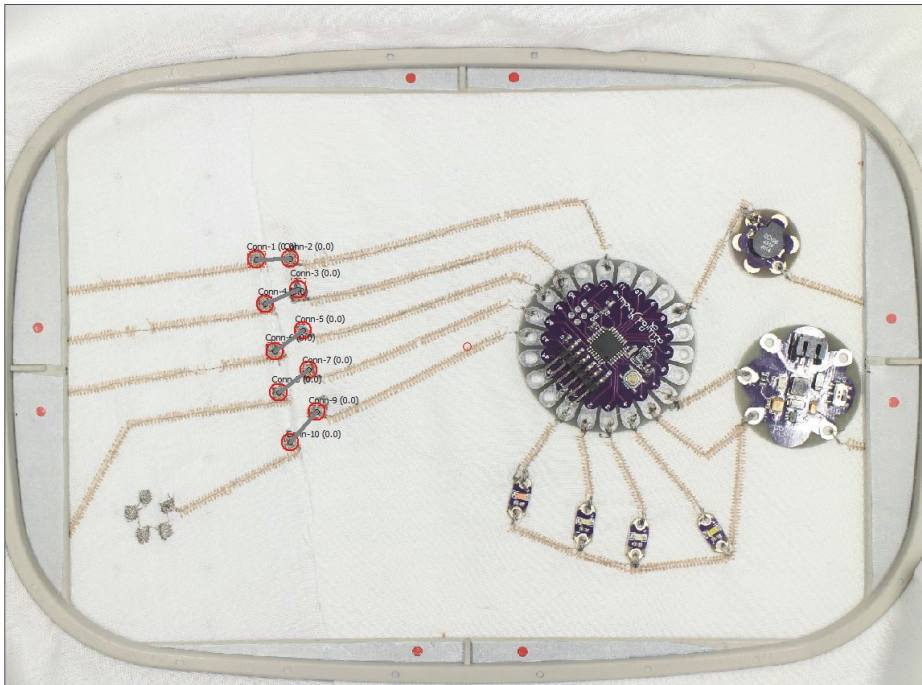
### 2.3. 다중 회로 연결

단일 회로가 보유하는 5개의 경로 말단에 5개의 커넥터 개체를 생성하고 5개의 커넥터를 보유하고 있는 다른 회로와의 연결을 시도하였다. 포토 부스에서 획득한 원본 이미지를 분석한 결과는 [그림 4-14]와 같으며, 10개의 커넥터를 성공적으로 인식함을 확인하였다.



[그림 4-14] 커넥터 인식 결과

다음으로 인식된 각 커넥터에 대해서 인접한 커넥터간의 경로의 자동 생성을 시도하였으며 그 결과는 [그림 4-15]과 같다. 가장 가까이에 있는 커넥터를 연결하는 경로가 정확하게 생성됨을 확인하였다.



[그림 4-15] 커넥터 연결 경로 생성 결과

## 제 5 장 결론 및 제언

본 연구에서는 자수법을 기반으로 하여 섬유회로 설계 전용의 CAD 프로그램을 개발하고 섬유회로의 반복 제조를 자동화하는 프로세스를 개발하였다. 먼저 섬유회로의 설계에 필수적인 스티치와 자주 사용되는 조각을 추출하여 이를 자동 적용하는 회로설계 전용의 인터페이스를 개발하였다. 다음으로 머신비전 기술의 적용을 위해 작업시점의 디바이스의 배치를 고품질의 이미지로 획득하는 장치를 제조하고 디바이스의 종류와 좌표, 배향을 인식할 수 있는 이미지 분석 알고리즘을 개발하였으며 이를 통해 특정 시점의 디바이스의 배치에 따라 기존의 경로를 재구성할 수 있는 기능을 구현하였다. 또한 회로 말단에 위치하는 커넥터를 인식하고 이를 연결하는 경로를 자동적으로 생성하는 알고리즘을 개발함으로써 다중 회로의 연결 과정을 자동화할 수 있는 시스템을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 섬유회로제작 전용의 소프트웨어를 이용하면 라이브러리에 다양한 디바이스를 등록한 후 원하는 위치에 쉽게 배치할 수 있으며 이를 연결하는 경로를 보다 직관적으로 설계할 수 있다. 스마트 텍스트타일을 위해 개발되어 있는 표준 디바이스 외에도 다양한 비표준 디바이스가 등록되어 설계에 활용될 수 있다. 센서, 액추에이터 등 회로 성능에 결정적인 디바이스들이 새로 개발되었을 경우 바로 섬유에 적용될 수 있으므로 디바이스의 혁신이 스마트 의류의 혁신으로까지 빠르게 연결될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 완성된 회로의 설계도가 합봉, 경로 스티치와 절연성을 구현하는 절연 스티치로 자동 변환되고 자수기를 통해 생산할 수 있는 자수용 데이터로 변환되기 때문에 고가의 자수 프로그램이나 스티치에 대한 전문적인 지식이 없이도 섬유회로를 설계하고

생산할 수 있어 디자이너, 개발자들의 창의적인 아이디어가 더욱 쉽게 제품화될 수 있을 것이다.

이와 더불어 본 연구에서는 단단한 디바이스와 유연한 섬유를 결합하는 데서 필연적으로 파생되는 복잡한 생산 과정을 머신비전 기술을 통해 효율화하였다. 초기 단계의 설계와 실제 디바이스의 배치가 약간 다르더라도 시스템을 통해 실제 디바이스의 연결성을 구현하는 적절한 자수 데이터가 자동적으로 생성되기 때문에, 디바이스 배치를 위한 값비싼 추가 설비 없이도 섬유회로의 대량생산이 가능해질 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 회로와 회로를 연결하는 과정이 편리해지면서 연산, 센싱(sensing), 전원 등 기능에 따라 회로를 모듈화하고 자유롭게 배치한 후 연결하는 것이 가능해진다. 연결의 혁신은 의복의 내부와 외부로 회로를 분리하거나 개개인의 체형에 맞춘 개인화된 스마트 의류를 제작하는 등 지금보다 더 폭넓은 형태의 스마트 의류의 생산을 가능케 할 것이다.

본 연구는 소프트웨어와 단순한 하드웨어만으로 산업용 기계를 제어할 수 있는 프로세스를 개발하여 현 설비의 새로운 활용 가능성을 창출하였다는 데 그 의의가 있다. 소프트웨어와 간단한 하드웨어를 적용하는 것으로 이미 구축되어 있는 의복의 대량생산을 위한 설비들이 스마트 의복의 생산을 위한 영역에 융합될 수 있을 것으로 기대된다.

추후 딥러닝을 활용한 이미지 사전처리의 자동화, 회로의 전기적 특성의 자동 계산법 등을 연구하여 자동화의 범위를 확장해 나가는 방향으로 주제를 발전시켜 나갈 예정이다. 또한, 인식할 수 있는 부품의 다양성을 늘리고 전도성 경로의 겹침 등을 허용하는 재봉기법을 적용함으로써 더욱 복잡하면서도 높은 기능성을 지닌 섬유 회로의 설계와 제작이 가능해 질 수 있도록 관련 연구를 지속할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- Agcayazi, T., Chatterjee, K., Bozkurt, A., & Ghosh, T. K. (2018). Flexible interconnects for electronic textiles. *Advanced Materials Technologies*, 3(10), 1700277.
- Ankhili, A., Zaman, S. U., Tao, X., Cochrane, C., Koncar, V., & Coulon, D. (2019). How to Connect Conductive Flexible Textile Tracks to Skin Electrocardiography Electrodes and Protect Them Against Washing. *IEEE Sensors Journal*, 19(24), 11995–12002.
- Beyerer, J., León, F. P., & Frese, C. (2015). *Machine vision: Automated visual inspection: Theory, practice and applications(pp. 607-648)*. Berlin: Springer.
- Brunelli, R. (2009). *Template matching techniques in computer vision: theory and practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Buechley, L., Eisenberg, M., Catchen, J., & Crockett, A. (2008). The LilyPad Arduino: using computational textiles to investigate engagement, aesthetics, and diversity in computer science education. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 423–432.
- Chui, Y.-T., Yang, C.-X., Tong, J.-H., Zhao, Y.-F., Ho, C.-P., & Li, L. L. (2016). A systematic method for stability assessment of Ag-coated nylon yarn. *Textile research journal*, 86(8), 787–802.
- Dias, T. (2015). *Electronic textiles: Smart fabrics and wearable technology*. Cambridge: Woodhead Publishing.



- Eichinger, G. F., Baumann, K., Martin, T., & Jones, M. (2007). *Using a PCB layout tool to create embroidered circuits*. Paper presented at the 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers, Washington, D.C..
- France D. (2018, Aug). Embroidered Textiles. *The ZSK Embroidery Technology Magazine*. Retrieved from [https://www.zskmachines.com/wp-content/uploads/2018/12/Pages-from-Carl-Autumn2018\\_low.pdf/](https://www.zskmachines.com/wp-content/uploads/2018/12/Pages-from-Carl-Autumn2018_low.pdf/)
- Gehrke, I., Tenner, V., Lutz, V., Schmelzeisen, D., & Gries, T. (2019). *Smart Textiles Production: Overview of Materials, Sensor and Production Technologies for Industrial Smart Textiles*. MDPI.
- Hamdan, N. A.-h., Voelker, S., & Borchers, J. (2018, April). *Sketch&stitch: Interactive embroidery for e-textiles*. Paper presented at the Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montreal.
- Huang, S.-H., & Pan, Y.-C. (2015). Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Computers in industry*, *66*, 1-10.
- Ko, E., & Kim, S. (2013). Garment pattern nesting using image analysis and three-dimensional simulation. *Fibers and Polymers*, *14*(5), 860-865.
- Kumar, L. A., & Vigneswaran, C. (2015). *Electronics in textiles and clothing: Design, products and applications*. Florida: CRC Press.
- Le, M.-T., Tu, C.-T., Guo, S.-M., & Lien, J.-J. J. (2020). A PCB Alignment System Using RST Template Matching with CUDA on

- Embedded GPU Board. *Sensors*, 20(9), 2736.
- Lim, J., Kim, S. J. (2011). Analysis of woven fabric structure using image analysis and artificial intelligence. *Fibers and Polymers* 12(8), 1062-1068.
- Linz, T., Kallmayer, C., Aschenbrenner, R., & Reichl, H. (2006, April). *Fully untegrated EKG shirt based on embroidered electrical interconnections with conductive yarn and miniaturized flexible electronics*. Paper presented at the International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks(BSN'06), Cambridge.
- Linz, T., Vieroth, R., Dils, C., Koch, M., Braun, T., Becker, K. F.,... & Hong, S. M. (2008). Embroidered interconnections and encapsulation for electronics in textiles for wearable electronics applications. *Advances in science and technology*, 60, 85-94.
- Mecnika, V., Scheulen, K., Anderson, C., Hörr, M., & Breckenfelder, C. (2015). Joining technologies for electronic textiles. *Electronic Textiles(pp. 133-153)*. Amsterdam: Elsevier.
- Molla, M. T. I., Compton, C., & Dunne, L. E. (2018, October). *Launderability of surface-insulated cut and sew E-textiles*. Paper presented at the Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers, Singapore.
- Post, E. R., Orth, M., Russo, P. R., & Gershenfeld, N. (2000). E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing. *IBM Systems journal*, 39(3.4), 840-860.
- Russ, J. C. (2007). *The image processing handbook - fifth edition*(pp.

- 397–508), Florida: CRC Press.
- Tao, X. (2001). *Smart fibres, fabrics and clothing: fundamentals and applications*, Amsterdam: Elsevier.
- Tsai, D.-m., & Hsieh, Y.-c. (2017). Machine vision-based positioning and inspection using expectation - maximization technique. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *66*(11), 2858–2868.
- Tsolis, A., Whittow, W. G., Alexandridis, A. A., & Vardaxoglou, J. (2014). Embroidery and related manufacturing techniques for wearable antennas: challenges and opportunities. *Electronics*, *3*(2), 314–338.
- Wang, X., Georganas, N. D., & Petriu, E. M. (2010). Fabric texture analysis using computer vision techniques. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *60*(1), 44–56.
- Weng, J., Cohen, P., & Herniou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, *14*(10), 965–980.
- Zhang, K., Butler, C., Yang, Q., & Lu, Y. (1996, June). *A fibre optic sensor for the measurement of surface roughness and displacement using artificial neural networks*. Paper presented at IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference
- Zhang, Z. (1999, September). *Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations*. Paper presented at the Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision, Greece.

Zhang, Z., Bai, S., Xu, G.-s., Liu, X., Wang, F., Jia, J., & Feng, Z. (2020). Research on the knitting needle detection system of a hosiery machine based on machine vision. *Textile research journal*, 0040517519899173.

## Abstract

# Development of Automated Manufacturing Method for Textile Circuit using Machine Vision and Embroidery

Jiseon Ahn

Dept. of Textiles, Merchandising and Fashion Design

The Graduate School

Seoul National University

This study presents a CAD program for the embroidered textile circuits and an automated production process of textile circuits using machine vision technique. To this end, a novel interface for textile circuit design was developed that automatically perform the operations redundantly used. For the application of machine vision technique, a

system that acquires a high-quality image of the device layout at the point of the operation was designed. An algorithm was proposed that can recognize the type, coordinates, and orientation of the device from the image. To enable the embroidery, the conductive path was automatically modified from the original design to connect recognized devices and translated into embroidery data. The process of connecting multiple circuits was automated by the proposed algorithm that recognizes the connectors from the image and creates the path connecting them.

Using the CAD software and machine vision system presented in this study, the multi-stage process of design and production of embroidered textile circuits could be seamlessly integrated. By implementing the repetitive production of the same textile circuit and automated connection of circuits, application of textile circuits is expected to be expanded. This study achieved the optimization of the flow of the textile circuit production process through the deployment of software and relatively accessible hardware. By applying the proposed system to a current clothing manufacturing environment, the existing facilities that realize mass production of clothing could be utilized for the production of the smart textile as well.

**keywords : Smart Textile, Machine Vision, Electrical Embroidery, Automated Production, Image Analysis**

***Student Number : 2019-23158***