

적대적 생성 신경망 기반 비공기압 타이어 디자인 시스템

¹성주용, ²이현준, ^{3*}이성철

Non-pneumatic Tire Design System based on Generative Adversarial Networks

¹JuYong Seong, ²Hyunjun Lee, ^{3*}Sungchul Lee

요약

자동차 타이어의 휠과 트레드 사이에 탄성중합체 또는 다각형의 스포크를 채우는 방식으로 제작하는 비공기압 타이어는 자동차 관련 학계 및 항공우주 업계의 중요한 연구 주제가 되고 있다. 본 연구에서는 생성형 적대 신경망을 기반으로 비공기압 타이어 디자인을 생성하는 시스템 개발했다. 특히 비공기압 타이어의 종류와 사용 환경, 제작 방식, 공기압 타이어와의 차이점 그리고 스포크 디자인에 따른 하중 전달의 변화 등 디자인에 영향을 미칠만한 변수들에 대한 조사를 실시했다. 이 연구는 OpenCV를 통해 다양한 스포크 형태의 이미지를 만들고, projected GANs에 학습시켜 비공기압 타이어 디자인에 사용될 스포크를 생성했다. 디자인된 비공기압 타이어는 사용 가능 및 불가능으로 레이블링하고, 이를 Vision Transformer 이미지 분류 AI 모델에 학습시켜 분류하도록 하였다. 최종적으로 분류 모델의 평가를 통해 0에 가까운 loss의 수렴, 99%의 정확도를 확인했다. 차후 도형 및 스포크 이미지와 알고리즘을 이용한 디자인이 아닌, 완전 자동화 시스템의 개발과 더 나아가 3D의 물리적 해석 없이 사용 가능한 디자인을 생성하는 것을 목표로 한다.

Abstract

The design of non-pneumatic tires, which are created by filling the space between the wheel and the tread with elastomeric compounds or polygonal spokes, has become an important research topic in the automotive and aerospace industries. In this study, a system was designed for the design of non-pneumatic tires through the implementation of a generative adversarial network. We specifically examined factors that could impact the design, including the type of non-pneumatic tire, its intended usage environment, manufacturing techniques, distinctions from pneumatic tires, and how spoke design affects load distribution. Using OpenCV, various shapes and spoke configurations were generated as images, and a GAN model was trained on the projected GANs to generate shapes and spokes for non-pneumatic tire designs. The designed non-pneumatic tires were labeled as available or not, and a Vision Transformer image classification AI model was trained on these labels for classification purposes. Evaluation of the classification model show convergence to a near-zero loss and a 99% accuracy rate confirming the generation of non-pneumatic tire designs.

Keywords: Generative Adversarial Networks, Non-Pneumatic Tire, Design, OpenCV, AI

¹ 선문대학교 컴퓨터공학부 석사과정(Humphery27@sunmoon.ac.kr)

² AI Networks 대표/연구소장(hjlee@ainetwork.co.kr)

³ 교신저자 선문대학교 컴퓨터공학과 교수(sungchul@sunmoon.ac.kr)

I. 서론

공기압 타이어는 1800년대 후반 영국에서 발명된 이후로 단단한 바퀴보다 편한 승차감과 낮은 에너지손실 등의 장점으로 100년 이상 세계 타이어 시장을 지배하고 있다[1]. 타이어는 차량 및 도로와 상호작용하는 유일한 구성요소이며, 하중을 전달 지면 반발력을 생성 그리고 지면의 가진(Excitation)을 완충하는 역할을 한다. 또한 차량의 조향 안전성, 운전 편의성, 승차감 및 기타 차량 성능 측면에서도 지대한 영향을 미친다. 최근 앞선 요소들에 대한 요구를 충족하기 위한 지속적인 발전으로 타이어의 발전으로 모든 측면에서의 요구 사항은 나날이 엄격해지고 있다. 하지만 현대에 들어서도 여전히 공기압 타이어는 펑크와 파열 등의 사고가 발생할 위험이 존재하며[2], 공기압과 트레드(Tread)의 지속적인 관리가 요구되고 있다. 또한 최근 교통사고 관련 학계의 데이터에 따르면 고속도로 교통사고의 약 70%가 공기 타이어 누출로 인해 발생하는 것으로 보고되었다. 이와 더불어 차량 속도가 160km/h 를 초과하는 경우 타이어의 누출로 인한 차량 사고와 관련된 사망률은 100%에 이른다[3]. 이 문제를 해결하기 위해 공기압에 의존하지 않는 비공기압 타이어 기술에 자동차 관련 학계 및 항공우주업계의 지속적인 투자와 관심으로 이어지고 있다.

비공기압 타이어는 휠(Wheel)과 트레드(Tread) 사이에 열가소성 탄성중합체(Elastomer), 다각형 도형, 스포크(Spoke)형태의 기둥을 채우는 방식으로 제작된다[4]. 이 특징은 휠과 트레드 사이 구조물을 통한 탄성 구조로 공기압을 대체한다는 것이다. 더 나아가 공기압 타이어의 동적 특성 및 접지 압력의 기계적 한계를 극복하고 독립적인 설계를 할 수 있고, 다양한 재료를 유연하게 접목할 수 있어 전통적 재료인 고무 및 관련 첨가제 외에도 강도가 높고 탄성이 우수한 폴리머(polymer)소재와 재활용 가능한 친환경적인 소재의 선택도 가능하다. 이 특성은 런 플랫 타이어나 공기 누출과 같은 문제가 발생하지 않기 때문에 극한 환경에서의 운전 안전성과 지속 가능성을 강화하는데 있어 지대한 영향을 미치고 있다. 이에 따라 중장비와 같은 비포장도로, 군용 장비가 다니는 험지 그리고 공기압에 문제가 발생했을 때 즉각적인 조치가 어려운 우주환경같이 공기압이 조절되기 어려운 경우에 매우 유용하다. 최근 앞선 장점들을 극대화하기 위해 최대한 많은 에너지를 분산시켜 최소한의 하중을 받는 스포크의 형태에 대한 연구가 진행되고 있다[5][6]. 특히 비공기압 타이어의 경우 국부 응력의 하중을 최소화하는 것이 중요한데, 이는 스포크의 형태에 따라 안정성, 비용, 승차감, 방탄능력 등 다양한 요소에 영향을 준다. 하지만 타이어의 디자인에는 다년간의 경험과 숙련된 전문가의 노하우를 요구하고, 구조화된 규칙을 찾는 데 많은 비용과 노력이 소모된다. 따라서 본 논문은 생성형 AI은 적대적 생성 신경망(Generative Adversarial Networks, GANs)[7]을 기반으로 사람의 노력과 비용을 최소화하고, 가장 적절한 스포크 디자인을 생성하는 것에 초점을 두고 진행했다.

GANs는 최근 이미지 생성 및 변환, 이미지 합성[8], 디자인[9], 게임 개발[10], 의료 영역[11] 등 다양한 분야에서 폭 넓게 활용되고 있다. 이러한 기술은 컴퓨터에 인간의 인지 능력을 부여함으로써 이전에는 해결할 수 없던 문제를 해결하는 데 사용되고 있다. GANs는 비지도 학습을 기반 생성 모델로 이미지 생성에 획기적인 발전을 이루고 있다. 우리는 다양한 GANs 모델 중 projected GANs 을 활용하여 도형 및 스포크 형태의 이미지를 학습시켰다. Projected GANs는 다른 GANs에 비해 우수한 표현력과 빠른 수렴속도를 갖은 생성형 모델이다[12]. 우리는 학습된 projected GANs 이 무작위로 생성한 도형 및 스포크를 활용하여 새로운 NPT 디자인 생성하고, 생성된 디자인은 한국자동차연구원의 협조를 받아 사용 가능 및 불가능 여부를 레이블링 했다. 그 다음 레이블링된 데이터를 vision transformer (ViT)[13]에 적용하여 분류 모델을 생성하고, 이를 GUI에 적용함으로써 사용 가능한 디자인만 생성하도록 하였다. 우리의 자동화된 NPT 디자인 생성은 디자인 생산 과정을 더욱 효율적으로 만들고, 향후 타이어 산업에 변화를 일으킬 수 있는 가능성을 제시한다. 이 과정을 통해 AI가 타이어 디자인에 대한 복잡한 결정을 내릴 수 있는 능력을 개발하고, 비공기압 타이어의 디자인 프로세스를 혁신적으로 변화시킬 것이다. 또한 비공기압 타이어의 효율성, 성능, 안전성 및 지속 가능성을 향상시킬 수 있으며, 타이어 산업과 관련 분야에서 중요한 전환점을 창출할 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다: 첫 번째로 우리는 비공기압 타이어에 대한 조사를 진행했다. 크게 비공기압 타이어의 장점, 유형, 제작 방식, 스포크 형태에 따른 성능 변화 등을

조사했다. 두 번째로 생성형 적대 신경망의 메커니즘, 아키텍처 디자인 그리고 실제 디자인에 사용된 사례에 대해 조사했다. 세 번째로 연구의 진행 방법에 대해 소개한다. 연구 방법은

데이터 수집 과정, projected GANs 적용, 비공기압 타이어 디자인 알고리즘, 디자인 생성 편의를 위한 GUI 프로그램, 비공기압 타이어 디자인 사용 여부에 따른 레이블링, ViT를 이용한 레이블링 자동화 순으로 진행된다. 그리고 마지막으로 앞선 일련의 과정에 대한 흐름도와 결과에 대해 논의하고 본 논문을 마무리한다.

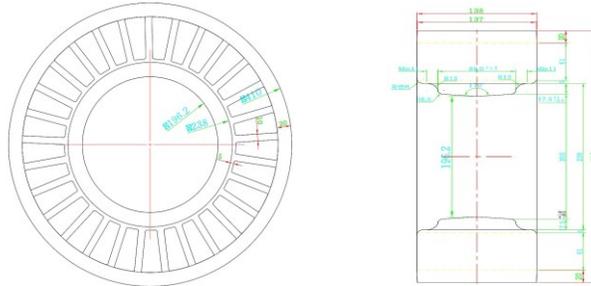


Figure 1. Design and analysis of non-pneumatic tire
그림 1. 비공기압 타이어 설계 및 해석도

II. 배경 및 관련 연구

2.1 비공기압 타이어 (Non-pneumatic tire, NPT)

공기압 타이어는 펑크 사고, 공기 누출, 심지어 파열이 발생할 수 있는 위험성이 있다. 이에 따라 최근 NPT가 주목받고 있다. NPT는 air-free tire, airless tire, resilient tire, structurally supported tire and elastic wheel 등으로 불리고 있으며, 공기압을 채우는 전통적인 방식과 다르게 tread와 rim 사이에 탄성중합체, 다각형 그리고 스포크를 채우는 방식을 채택하고 있으며 이에 대한 예시는 Figure 1에서 확인할 수 있다. 이 방식을 적용한 NPT는 런 플랫폼 타이어나 공기 누출과 같은 문제를 겪지 않기 때문에 유지 관리가 간단하다. 더 나아가, 길 위에서의 잠재적인 위험이 줄어든다. 이러한 장점들은 중장비와 같은 비포장도로, 군용 장비가 다니는 험지 그리고 공기압에 문제가 발생했을 때 즉각적인 조치가 어려운 우주 환경같이 공기압이 조절되기 어려운 경우에 유용하다[14]. 앞서 말했듯 NPT는 유체의 압력에 의존하지 않으며 차량으로 수직 하중을 전달하여 차량의 방향 제어를 제공하는 구동력을 생성하기 때문에 전단빔과 탄성구조로 구성된 지지구조가 타이어의 성능을 결정한다[15]. 비공기압 타이어는 스트립 스포크 타이어, 다공성 메쉬 지지 구조 타이어, 돌출된 트레드 구조가 있는 비정형 지지 구조 타이어로 각각 스포크형, 멀티홀형, 볼록형으로 분류된다. 독립적인 단위로 기능하는 비공기압 타이어는 솔리드형 타이어로 분류된다[16]. 또 다른 유형은 특정 인공 구조에 기반한 초재료 비공기압 타이어다. 이 유형의 타이어는 점차적으로 상당한 잠재력을 가진 새로운 구조로 발전하고 있다. 비공기압 타이어는 아직 초기 개발 단계에 있지만, 앞으로 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대되고 있다.

2.2 Generative Adversarial Networks

GANs[7]은 고품질 이미지 생성, 생성된 이미지의 다양성, 훈련의 안정성에 우수한 성능을 보이기 때문에 딥러닝 연구자들의 지속적인 주목을 받고 있다. 이는 GANs가 컴퓨터 비전[17], 자연어 처리[18], 시계열 합성[19], 의미 분할[20] 등 다양한 분야에 적용할 수 있는 모델이지만 특히 합성 이미지 데이터 생성에 성공했기 때문이다. Figure 2와 같이 GANs는 두 개의 합성곱 신경망(CNN)을 사용하는 게임 이론적 AI 모델로, 각각 생성기(generator)와 판별기(discriminator) 역할을 하여 이미지를 생성하고 이미지가 진짜인지 가짜인지 판단하며, 두 CNN 사이의 내쉬 균형[21]을 찾으려고 한다. 간단하게 말해서, GAN은 두 개의 신경망이 서로 경쟁하며 이미지를

생성하고 판단하는 모델이다. GAN 은 합성 이미지 데이터 생성에 널리 사용되고 있다. 합성 이미지 데이터는 다양한 머신러닝 작업에 사용될 수 있으며, 실제 데이터를 수집하기 어렵거나 비용이 많이 발생하는 경우에 특히 유용하다.

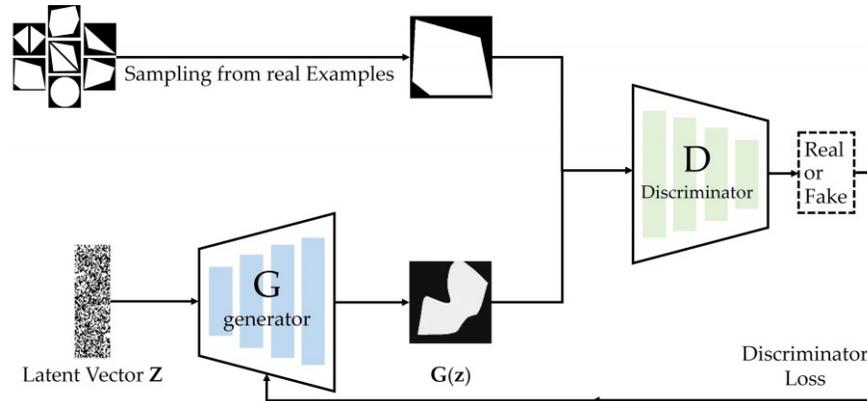


Figure 2. Architecture of generative adversarial networks

그림 2. 생성형 적대 신경망 아키텍처

2.3 Artificial Intelligence & Polygon Design

도시와 같은 건축 환경에서는 다각형에 불규칙한 노이즈가 생기는 경우가 많다. Urban design [22]과 같은 분야에서는 이를 해결하기 위해 다각형 정규화에 초점을 두고 연구를 진행하고 있다. Lasith Niroshan et al.[23]은 다각형의 가장자리를 정규화 하기 위해 데이터에 기반한 딥러닝 접근 방법인 Poly-GAN 을 소개했다. 이 연구는 open street map 벡터 데이터[24]와 irregular building footprints 를 활용했다. Poly-GAN 은 training phase 와 predicting phase 로 나뉘며 training phase 의 경우 OSM-GAN[25]의 예측 건물 다각형을 활용하여 노이즈 데이터를 생성하였고 실제 데이터와 함께 학습에 사용되었다. predicting phase 는 OSM-GAN 변경 감지 프로세스로 불규칙한 건물 면적을 얻은 후 전처리를 통해 지리 참조 좌표를 저장한다. 하지만 OSM-GAN 의 경우 중복된 좌표가 생성되기 때문에 Ramer-Douglas-Peucker(RDP)을 활용하여 중복되는 좌표를 전처리 후 다각형 및 도면 예측에 사용했다. 이를 통해 다면화 된 건축 환경 객체를 정확하고 최소한의 표현으로 생성하는 데 어려움을 겪는 기존 지도 제작 정규화/일반화 알고리즘의 한계를 해결한다.

CNN 은 컴퓨터 비전 분야에서 인스턴스 및 세그먼트 분할에 굉장히 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 픽셀 별 분류를 수행하는 과정에서 높은 정확도로 규칙적인 건물 경계를 묘사하는데 문제가 있음을 발견했다. 이에 따라 Zorzi et al.[26]는 건물 세분화 마스크의 자동 정규화 및 다각형화를 위한 머신러닝 기반 접근법을 제안했다. 먼저 FCN 을 활용하여 건물 세분화 맵을 예측한 뒤 GANs 를 사용하여 건물 경계를 보다 사실적으로 만들기 위한 정규화를 실시했다. 정규화 된 마스크는 CNN 을 통해 학습함으로써 건물 모서리에 대한 예측을 하였다. 다양한 건물 데이터 세트를 통한 실험으로 시각적으로 만족스러운 건물 윤곽선을 생성할 수 있음을 입증했다.

옷 디자인 영역에는 머신러닝을 기반으로 패션 디자이너 없이 디자인을 생성하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 이는, 일반인들은 사용할 수 있으며 실제 의류 제작 과정을 반영하지 않았다. 따라서 Natsumi Kato et al.[27]는 GAN 을 활용해 실제 의류 제작과정을 반영하여 패션 디자이너 없이 디자인을 생성하는 것이 아닌 디자이너를 위한 의류 패턴을 생성하는 것에 대한 연구를 진행했다. 해당 연구를 통해 디자인 패턴을 생성하기 위해서는 이미지의 품질보다는 패턴 제작자의 지식이 생성된 이미지로부터 패턴을 그리기 쉽다는 것을 발견했다.

III. 연구방법

3.1 OpenCV 활용 도형 데이터 생성



Figure 3. Example of polygon and spokes images used to train projected GANs
그림 3. Projected GANs 학습에 사용된 도형 및 스포크 이미지 예시



Figure 4. Example shapes and spoke images generated by Projected GANs
그림 4. Projected GANs 가 생성한 도형 및 스포크 이미지 예시

우리는 2D 이미지의 한계로 인해 물리적 특성과 구조의 복잡성을 반영하지 못할 것을 고려했다. 따라서 NPT의 디자인 중 Multi-hole type의 lunar rover, Convex type 그리고 solid type을 제외했다. 그 외 단순한 hole과 line으로 이루어진 Spoke type 중 tweel, uptis와 multi-hole type 중 honeycomb 타이어 디자인[16]에 초점을 두고 연구를 진행했다. tweel, uptis, honeycomb 형태의 타이어를 디자인하기 위해 그림 3과 같이 기본 도형인 삼각형, 사각형, 오각형, 육각형, 데칼코마니 모양의 도형과 각 도형 합친 이미지 그리고 스포크 모양의 다양한 이미지를 각 1000장씩 생성했다. 도형의 생성에는 OpenCV를 활용했다. 컴퓨터비전은 컴퓨터가 이미지와 비디오를 이해하고 처리할 수 있도록 프로그래밍하는 작업이다[28]. Open Source Computer Vision Library (OpenCV)는 이미지 처리와 컴퓨터 비전 작업을 위한 많은 함수와 알고리즘이 제공되는 라이브러리로 인텔 팀에서 처음 개발했다. C++, python, java 등의 다양한 언어에서 사용이 가능하며, Windows, Linux, MacOS, iOS, Android 등 다양한 플랫폼에서 지원되는 라이브러리이다. 이를 이용해 이미지 및 비디오 입출력 및 이미지 처리[29], 객체 감지 및 추적[30], 얼굴 인식[31], 기계 학습(Machine Learning) 및 딥러닝(Deep Learning) 등 다양한 기능을 제공한다. 또한 실시간 이미지 처리에도 적합해 자동차, 로봇, 산업 자동화 등의 분야에서도 활용되고 있다[32]. 우리는 앞서 설명한 OpenCV의 함수를 사용하여 다양한 도형과 스포크 형태의 이미지를 생성했다. 원과 타원을 제외한 도형은 중복되지 않는 이미지를 생성하기 위해 빈 공간 위에 무작위 좌표에 점을 찍은 뒤 선을 잇는 방식을 사용했다. 생성된 각 이미지의 확장자를 png로 통일했으며, 컴퓨팅 파워 및 시간적 리소스의 한계로 고해상도 보다 비교적 작은 이미지의 크기인 256*256 픽셀로 크기를 조정했다. 생성된 도형 및 스포크의 예시는 Figure 3에서 확인할 수 있다. 추가적으로 도형의 모양에 대한 다양성을 유지하기 위해 Pearson Correlation Coefficient[33]와 Structural Similarity Index(SSIM)[34] 등의 공식을 이용하여 이미지의 구조적 유사도를 계산하여 80% 이상의 유사도를 갖는 도형은 제거 후 Projected GANs 학습에 사용했다.

3.2 비공기압 타이어 (Non-pneumatic tire, NPT)

Projected GANs는 feature pyramids, random projections과 pretrained networks[35]를 통해 다른 GAN보다 빠르게 고품질, 고해상도 이미지를 생성할 수 있다[12]. Feature pyramids는 multi-scale feedback을 discriminators에게 적용하는 방식이다. Multi-scale discriminators는 L_1 로 표기되며 총 4개의 pretrained feature network를 사용된다. 독립된 discriminator에 각기 다른 scale의 feature를 투영합니다($L_1 = 64^2, L_2 = 32^2, L_3 = 16^2, L_4 = 8^2$). Projected GANs는 앞서 설명한 방법을 통해 모두 같은 scale(4^2)에 feature를 투영했을 때 보다 나은 성능이 나오는 것을 입증했다. Random projection은 Cross-Channel Mixing (CCM)과 Cross-Scale Mixing (CSM) 두 가지 방식을 사용한다. 이 두 방법은 판별기가 특징 공간의 모든 부분은 균일하게 활용하도록 하기 위한 전략이다.

CCM 은 1×1 컨볼루션을 사용하여 feature 의 정보를 보존한다. CSM 은 scale 간 mixing 을 위해 3×3 컨볼루션과 선형 업샘플링을 통해 U-Net[36] 아키텍처를 생성했다. 위 두 가지 방법은 이미지의 full potential of perceptual feature spaces 를 활용하는 것이 중요하다. 이 방식을 위해 Projected GAN 은 ImageNet[37]이 학습된 EfficientNet[38], 다양한 사이즈의 ResNets[39], 비전 트랜스포머 아키텍처(ViTBase)[13]와 그 효율적인 후속 모델인 DeiT-small distilled[40]를 활용했다. 우리는 OpenCV 를 활용하여 제작한 도형을 이용하여 해당 GANs 를 학습시켰다.

Table 1. pseudocode for the non-pneumatic tire (NPT) design algorithm

표 1. 비공기압 타이어 디자인 알고리즘 수도코드

Input:
Number of regular polygon points: n
Polygon image: I_{data}
Procedure:
interior_angle = $360 / n$ // Calculation interior angle of regular polygon
for 0, 360, interior_angle // Increment interior angle by 0 to 360
axis_x, axis_y = $\cos(\text{radians}(\theta)) * r, \sin(\text{radians}(\theta)) * r$ // Calculate the coordinates to paste the polygon
npt = attach((axis_x, axis_y), I_{data}) // Attach a polygon with calculated coordinates axis_x, axis_y on top of a blank background image
Output:
Non-pneumatic tire design

학습된 모델을 GUI 프로그램에 적용하여 무작위 모양의 도형을 생성하는데 사용했다. GAN 을 통해 생성된 도형은 Figure 4 에서 확인할 수 있다.

3.3 NPT 디자인 생성 알고리즘

우리는 2D 이미지의 한계로 인해 물리적 특성과 구조의 복잡성을 반영하지 못하는 multi-hole 타입 중 lunar rover 와 convex type 그리고 solid type 을 제외했다. 그 외 단순한 hole 과 line 으로 이루어진 Spoke 타입 중 tweel, uptis 와 multi-hole 타입 중 honeycomb 타이어 디자인을 생성했다 타이어 디자인의 실제 설계도는 Figure 1 에서 확인할 수 있다. NPT 의 trim 과 tread 사이에 들어간 스포크와 hole 에 projected GANs 에 의해 무작위로 생성된 이미지를 사용했다. NPT 를 디자인을 하기 위해서 Table 1 과 같이 비공기압 타이어 디자인을 위한 알고리즘을 개발하였다. 입력으로는 도형의 이미지와 도형을 찍을 포인트의 개수를 받았다. 각도, 반지름 그리고 삼각함수를 이용하여 도형이 찍힐 좌표를 계산한 뒤 해당하는 좌표에 도형을 붙여넣어 NPT 를 생성했다.

3.4 Application

NPT 디자인 프로그램 코드를 애플리케이션으로 만들기 위해 'pyinstaller[41]' 라이브러리를 사용했다. pyinstaller 는 파이선으로 작성된 코드를 실행 가능한 독립적인 프로그램(exe)로 변환해주는 오픈소스 패키지이다. 일반적으로 프로그램을 배포할 시 해당 프로그램이 필요로 하는 라이브러리와 모듈을 함께 배포해야 한다. 이 방식은 프로그램을 사용하는 사용자가 해당 라이브러리와 모듈들을 설치하고 환경을 구성하는 작업이 필요하다. 그러나 pyinstaller 를 사용하면 이런 문제를 해결할 수 있으며 프로그램이 사용하는 모든 라이브러리와 모듈들을 포함해 하나의 독립 실행 파일로 만들어주므로 별도의 설치나 환경 구성 작업이 필요 없어지고 이를 통해 사용자가 프로그램을 쉽게 배포하고 실행할 수 있다. 또한 많은 옵션을 제공해 사용자가 세부적인 설정을 변경하고 최적화할 수 있다.

3.5 비공기압 타이어 디자인 생성 GUI 프로그램

Tkinter[42]는 python 의 기본 GUI(Graphical User Interface) 라이브러리이다. tkinter 는 모든 운영체제에서 동작하는 크로스 플랫폼 라이브러리이며, 다양한 위젯(버튼, 레이블, 텍스트 상자 등)을 제공해 사용자 인터페이스를 만드는 데에 유용하다. 대부분의 일반적인 GUI 요구사항을

충족하는 다양한 위젯과 이벤트 처리 메커니즘을 제공하기 때문에 사용자 친화적인 UX/UI 를 개발이 가능하다. NPT 디자인 GUI 프로그램은 Projected GAN 이 생성하는 무작위 도형을 기반으로 NPT 를 디자인하도록 설계되었다. 본 논문의 GUI 에는 다른 GAN 에 비해 우수한 성능과 생성 능력을 보여준 Projected GAN 을 사용하였지만, pkl 을 선택할 수 있도록 GUI 를 만들었기 때문에 python 을 사용해 학습한 객체 저장 모듈로 파이선에서 사용하는 모든 객체를 파일에 저장 가능하여 인공지능 분야에서는 주로 가중치 등의 파라미터 값이나 학습시킨 모델을 저장할 때 사용한다. 현재 제작한 GUI 는 초당 1 개의 NPT 디자인을 생성한다. 생성 결과는 출력 폴더와 Labelling GUI 를 통해 확인할 수 있다. NPT 디자인 GUI 는 기본적으로 ViT 에 의해 사용 가능한 타이어만 분류하도록 시스템을 설계했으나, ViT 가 분류하지 못한 타이어의 경우 디자이너가 추가적으로 분류 작업을 용이하게 수행하도록 하기 위해서 Labelling GUI 를 제작하였다. Labelling GUI 는 크게 사용 가능과 불가능으로 분류를 할 수 있도록 제작하였고 이는 Fig 5 를 통해 확인 가능하다. 레이블링은 Korea Automotive Technology Institute (Katech)에 협조를 받아 진행했으며 레이블링 된 이미지는 차후 도형을 이용하지 않는 시스템과 디자이너의 개입이 없는 NPT 디자인에 사용될 예정이다. Fig 5 에서는 GAN 과 알고리즘을 사용하여 생성된 NPT 디자인과 레이블링을 위한 GUI 예시를 확인할 수 있다.

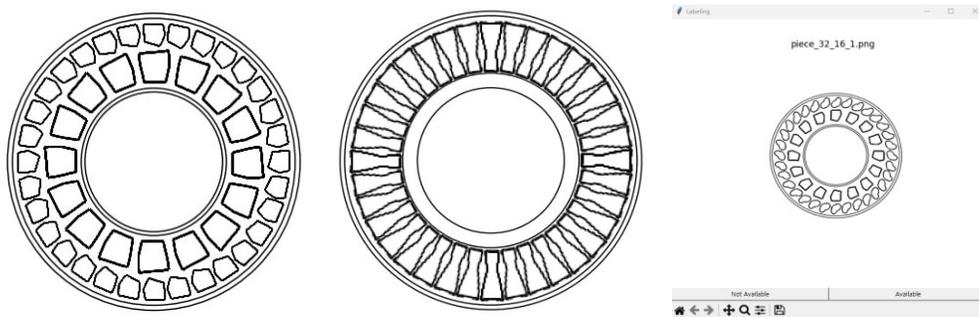


Figure 5. Generated design by program and labeling GUI
그림 5. 프로그램을 통해 생성된 디자인 및 레이블링 GUI

3.6 Vision Transformer

Vision Transformer (ViT) [13]은 인간의 시각 시스템과 유사한 방식으로 이미지를 처리하는 비지도학습 딥러닝의 한 종류이다. ViT 은 최근 이미지 분야의 혁신을 이끌고 있으며 이미지뿐만 아니라 음성인식, 자연어 처리에도 우수한 성능을 보여주고 있다. ViT 은 입력 이미지를 작은 창 단위로 나누고, 각 창에 대한 특징을 추출하는 필터를 적용하는 방식으로 작동한다. 이 과정을 반복함으로써 이미지의 고차원적인 특징을 추출한다. 본 논문에서는 tkinter 를 통해 제작한 GUI 를 이용하여 생성된 타이어에 대해 레이블링을 진행했다. 레이블링은 크게 두 가지 범주인 제작 또는 사용 가능과 불가능한 디자인으로 분류했다. 분류된 NPT 이미지 데이터는 ViT 모델에 학습시켜 생성되는 타이어를 자동으로 분류하는 모델로 사용했다. 본 논문에서는 사전 학습된 ViT huge 모델을 사용했다.

ViT 는 자연어 처리 분야에서 아주 성공적으로 적용된 Transformer 를 기반으로 제작되었다. ViT 는 vision 분야가 CNN[43]에 의존할 필요 없이 이미지 패치 시퀀스에 pure transformer 를 적용하는 것만으로도 이미지 분류 작업을 매우 잘 수행할 수 있음을 보여주었다. ViT 의 학습에 사용된 타이어 이미지 데이터는 총 이만 장이며 사용 가능과 불가능 각각 1:1 의 비율로 되어있다. 데이터는 학습 70%, 검증 15%, 테스트 15%로 나누어 진행했다. Learning rate 는 0.0001 로 설정하였고 optimizer 는 Adam, loss function 은 binary cross entropy 를 사용하였다. 학습 결과는 아래 Figure 6 를 통해 확인하다. 모델의 성능에 대한 지표로는 loss, accuracy 그리고 confusion matrix[44]와 ROC-AUC 곡선[45]를 사용했다. 정확도는 말 그대로 테스트 데이터를 입력했을 때 모델이 정답을 예측한 비율을 말하며 높은 수치일수록 좋다. Loss 는 실제 정답과 모델이 예측한 값 사이의 오차를 의미하며, 이를 최대한 0 에 수렴하도록 하는 것이 모델 학습의

목표이다. Confusion matrix 는 분류 알고리즘의 성능을 평가할 때 사용하는 테이블이다. 이 평가지표는 실제 값과 예측 값을 시각화 하여 성능을 예측한다. True available and unavailable 은 실제 사용 가능과 불가능한 데이터를 의미하며 Predicted available and unavailable 은 예측한 사용 가능과 불가능한 데이터를 의미한다. 실제 값의 레이블과 예측한 값의 레이블을 비교하여 틀린 비율을 통해 모델을 평가한다. ROC-AUC 곡선은 이진 클래스 모델의 성능을 시각적으로 평가하기 위한 도구 중 하나다. ROC-AUC 곡선은 threshold 그리고 민감도와 특이도 사이의 관계를 통해 모델의 예측 정확도를 측정하게 된다.

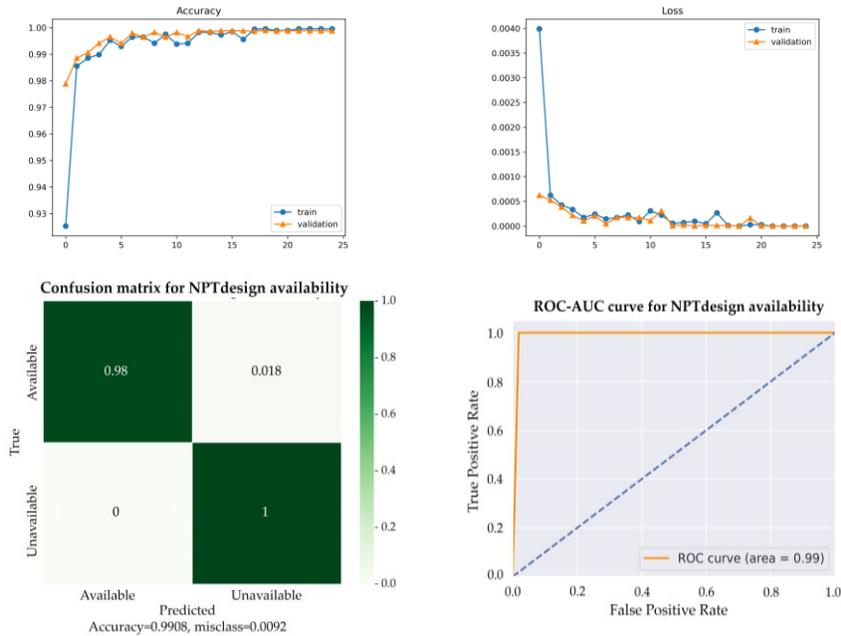


Figure 6. Evaluation metrics for non-pneumatic tire design available and unavailable classification models
 그림 6. NPT 디자인 사용 가능 및 불가능 분류 모델에 대한 평가지표

민감도는 실제 정답과 정답이라고 예측한 비율(True positive rate, TPR)을 의미한다. 특이도는 실제 오답과 오답이라고 예측한 비율(True negative rate)을 의미한다. ROC-AUC 곡선을 시각화 할 때는 x 축을 1-특이도(False positive rate, FPR)로 두고 y 축을 민감도로 둔다. 이 때 계산된 TPR 과 FPR 의 비율을 그래프에 나타냈을 때 선이 좌상단에 위치할수록 좋은 분류모델임을 나타낸다. 본 논문에서 학습한 모델은 100 번의 epochs 동안 loss 는 0 에 가깝게 수렴하는 모습을 보였고 정확도는 99%로 사용 가능과 불가능을 잘 분류하는 모습을 보여주었다. 학습 후 테스트 데이터를 통해 진행한 분류의 0.99 AUC 를 보여주며 ROC-AUC 곡선 이상적인 그래프가 그려지는 것을 Figure 6 에서 확인할 수 있다. 다음 평가 지표를 통해 모델이 NPT 의 사용 가능성의 유무를 잘 판단함을 확인했다.

IV. 연구 결과

위 과정의 전체적인 흐름은 Figure 7 과 같이 진행된다.

1) OpenCV 를 사용하여 다양한 형태의 도형 이미지를 생성한다. 도형은 삼각형, 사각형, 오각형 등 다각형으로 이루어져 있고, 원형, 타원, 스포크 형태도 포함되어 구성되어 있다. 각 종류마다 1,000 장의 이미지를 생성하여 총 20,000 장의 이미지가 수집 및 저장되었다.

2) 최대한 다양한 모양의 도형 이미지를 학습시키기 위해 생성된 이미지를 이미지 구조적 유사도 계산 알고리즘에 적용하여 전처리했다. 적용된 알고리즘은 Pearson correlation coefficient,

Structural Similarity Index(SSIM), Bag of Visual Words (BoVW) 등이며, 이미지의 구조적인 유사도를 계산하는 알고리즘을 사용하여 0.8 이상의 유사도를 갖는 이미지는 모두 제거했다. 전처리된 이미지는 데이터의 증폭 및 새로운 전처리 과정에 지속적으로 적용된다.

3) 앞선 과정을 통해 생성된 도형 및 스포크 이미지는 생성형 AI 인 Projected GANs, Alias-free GANs[46] 그리고 다양한 도메인을 학습하여 각 도메인을 합성하는 Star GANs[8]와 같은 합성 및 생성형 AI 에도 추가적으로 학습을 진행했다. 적용되어 학습되었다. 본 논문에서는 Projected GANs 에 학습 결과만 명시했다. 학습된 모델은 GUI 에 pkl 파일로 적용되어 무작위 모양의 도형과 스포크 이미지를 생성한다.

4) GANs 를 통해 생성된 도형과 스포크 이미지를 디자인 알고리즘에 적용하여 새로운 NPT 디자인을 생성한다. 생성 과정은 Table 1 에 명시되어 있다. 처음 타이어에 들어갈 도형 및 스포크의 개수와 이미지를 입력으로 받는다. 그 다음 원의 한 바퀴인 360° 와 개수를 나눠 증가시킬 각도를 계산한다. 반복문을 통해 360° 가 될 때까지 각도만큼 증가시킨다.

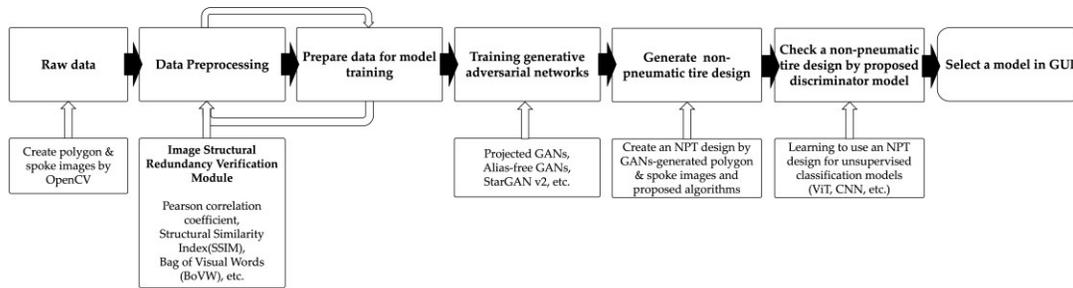


Figure 7. System architecture of non-pneumatic tire design

그림 7. 비공기압 타이어 디자인 시스템 아키텍처

삼각함수를 사용하여 각 각도별 이미지가 붙여 넣어질 좌표를 계산한다. 최종적으로 계산된 좌표마다 도형 및 스포크가 붙여 넣어져 디자인이 생성되고 마무리된다.

5) 생성된 NPT 디자인은 레이블링 GUI 를 통해 사용 가능과 불가능으로 분류된다. 분류는 Korea Automotive Technology Institute (Katech)에 협조를 받아 진행되었다. 레이블링된 이미지를 활용하여 ViT, CNN 과 머신러닝 등에 적용하여 자동 분류를 하도록 학습시켰다. 본 논문에는 그 중 성능이 가장 우수했던 ViT 만 명시했다. 분류 모델의 평가지표는 Figure 6 에서 확인할 수 있다.

6) 최종적으로 가장 성능이 우수했던 모델을 종합하여 어플리케이션화 함으로써 본 논문의 연구를 마무리했다. 이 실험을 통해 우리는 인간의 개입 없이도 고해상도의 디테일과 현실적인 특성을 갖춘 비공기압 타이어 디자인이 가능함을 보여주었다. 이러한 결과물은 자동차 산업 및 공학 분야에서 혁신적인 디자인과 시뮬레이션을 위한 중요한 도구로 사용될 것으로 기대된다.

V. 결론 및 한계점

이 연구에서는 비공기압 타이어 이미지의 레이블링을 위한 GUI 와 디자인 알고리즘을 통해 NPT 디자인 시스템을 성공적으로 개발하였다. 이 GUI 를 사용하여 타이어 이미지에 레이블을 부여하는 데 기여하고자 했으며, 이미지 분류 및 딥러닝 모델 훈련에 필요한 데이터 수집 작업을 시작하는 데 중요한 역할을 했다. 레이블링 GUI 는 사용자가 이미지를 효과적으로 검토하고 클래스 레이블을 할당할 수 있도록 설계되었다. GUI 로 분류한 이미지는 분류 모델을 통해 자동적으로 분류하도록 학습했으며, 최종적으로 분류 모델은 0 에 가까운 loss 의 수렴, 99%의 정확도, 0.99 area under the curve(AUC)를 보여주어 사람의 노력과 부가적인 비용 없이 비공기압 타이어 디자인이 생성되는 것을 확인했다. 이와 더불어 분류 모델이 평가한 결과를 사용자는

타이어 디자인에 대한 도메인 지식을 활용하여 정확한 레이블을 지정할 수 있다. 이 작업을 통해 수집된 데이터는 머신 러닝 모델의 훈련 및 성능 향상을 위한 중요한 자원이 될 것으로 기대되며 더 정확한 이미지 분류 및 디자인 감지 모델을 개발하는 데 활용될 것이다.

하지만 유한 요소 모델과 같은 방식의 보다 복잡하고 과학적 수치를 활용한 분석이 불가능하기 때문에 여전히 전문가에 의존적이라는 한계가 있다. 우리는 디자인에 필요한 전문가의 지식과 비용, 그리고 유한 요소 모델과 같은 과학적 분석 기법을 대체할 수 있도록 지속적인 연구를 해 나갈 것이다.

VI. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 디자인산업기술개발사업('20019083', '비공압 타이어 디자인 기술개발')의 지원으로 이루어졌습니다.

VII. 참고문헌

- [1] Gent, Alan Neville and Walter, Joseph D., Pneumatic Tire, Mechanical Engineering Faculty Research, 854, 2006
- [2] Karpenko, M., Prentkovskis, O., Skačkauskas, P., "Comparison Analysis Between Pneumatic and Airless Tires by Computational Modelling for Avoiding Road Traffic Accidents.", Reliability and Statistics in Transportation and Communicatio, Riga, Latvia, pp. 295-305, October 2022., https://doi.org/10.1007/978-3-031-26655-3_28
- [3] W. Wang, S. Yan, S.G. Zhao, Experimental verification and finite element modeling of radial truck tire under static loading, J. Reinf. Plast. Comp. 32, 490–498., 2013
- [4] Sardinha, M., Fátima Vaz, M., Ramos, T. R., Reis, L., "Design, properties, and applications of non-pneumatic tires: A review", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 237, No. 11, pp. 2277-2297, May 2023., <https://doi.org/10.1177/14644207231177302>
- [5] Xiaochao Jin, Cheng Hou, Xueling Fan, Yongle Sun, Jinan Lv, Chunsheng Lu, "Investigation on the static and dynamic behaviors of non-pneumatic tires with honeycomb spokes", Composite Structures, Vol. 187, pp. 27-35, March 2018., <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.044>
- [6] Jackowski, Jerzy, Marcin Wiczorek, Marcin Zmuda, "Energy consumption estimation of non-pneumatic tire and pneumatic tire during rolling." Journal of KONES, Vol. 25, No.1, pp. 159-168, 2018., <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2463>
- [7] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y., "Generative adversarial nets", Advances in neural information processing systems, Montreal, Quebec, Canada, pp. 2672-2680, Jun 2014., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>
- [8] Choi Y, Uh Y, Yoo J, Ha JW., "Stargan v2: Diverse image synthesis for multiple domains." Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition., Seattle, WA, USA, pp. 8185-8194, June 2020., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01865>
- [9] Singh, M., Bajpai, U., V, V. and Prasath, S., "Generation of fashionable clothes using generative adversarial networks: A preliminary feasibility study.", International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 32, No. 2, pp.177-187, April 2020, <https://doi.org/10.1108/IJCST-12-2018-0148>
- [10] Schrum, Jacob, Vanessa Volz, and Sebastian Risi., "Cpnn2gan: Combining compositional pattern producing networks and gans for large-scale pattern generation.", Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference., pp. 139-147, New YorkNYUnited States, Apr 2020., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.01703>
- [11] Baur, Christoph, Shadi Albarqouni, and Nassir Navab., "Generating highly realistic images of skin lesions with GANs.", OR 2.0 Context-Aware Operating Theaters, Computer Assisted Robotic Endoscopy, Clinical Image-Based Procedures, and Skin Image Analysis., Granada, Spain, pp. 260-267, September 2018.
- [12] Sauer, A., Chitta, K., Müller, J., & Geiger, A., "Projected gans converge faster.", Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 17480-17492., Nov 2021., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.01007>

- [13] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Deghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S. and Uszkoreit, J., "An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale.", arXiv preprint arXiv:2010.11929., Jun 2021., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
- [14] Jackowski, J., Żmuda, M. and Wieczorek, M., "Comparative analysis of small size non-pneumatic tires and pneumatic tires-radial stiffness and hysteresis, selected parameters of the contact patch." *Maintenance & Reliability/Eksploatacja i Niezawodnosc*, Vol. 25, No. 3, pp. 1-22, July 2023., <https://doi.org/10.17531/ein/167362>
- [15] Ju, J., Veeramurthy, M., Summers, J.D. and Thompson, L., "Rolling Resistance of a Nonpneumatic Tire Having a Porous Elastomer Composite Shear Band ", *Tire Science and Technology*, Vol. 41, No. 3, pp. 154-173, July 2013., <https://doi.org/10.2346/tire.13.410303>
- [16] Deng, Y., Wang, Z., Shen, H., Gong, J. and Xiao, Z., "A comprehensive review on non-pneumatic tyre research." *Materials & Design*, Vol. 227, pp. 111742, March 2023., <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111742>
- [17] Iglesias, G., Talavera, E. and Díaz-Álvarez, A., 2023., "A survey on GANs for computer vision: Recent research, analysis and taxonomy.", *Computer Science Review*, Vol. 48, pp. 100553, May 2023., <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100553>
- [18] Touseef Iqbal, Shaima Qureshi, "The survey: Text generation models in deep learning", *Computer and Information Sciences*, Vol. 34, No. 6, pp. 2515-2528, May 2023., <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.04.001>
- [19] Zhang, D., Ma, M. & Xia, L. A comprehensive review on GANs for time-series signals. *Neural Comput & Applic* 34, Vol. 34, pp. 3551–3571, January 2022., <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06888-0>
- [20] Jeong JJ, Tariq A, Adejumo T, Trivedi H, Gichoya JW, Banerjee I., "Systematic Review of Generative Adversarial Networks (GANs) for Medical Image Classification and Segmentation.", *J Digit Imaging. Journal of Digital Imaging*, Vol. 35, No. 2, pp. 137-152, April 2022., <https://doi.org/10.1007/s10278-021-00556-w>
- [21] Nash, John. "Non-cooperative games." *Annals of mathematics*, Vol. 54, No. 2, pp. 286-295, September 1951., <https://doi.org/10.2307/1969529>
- [22] Fedorova, Stanislava., "GANs for urban design.", arXiv preprint arXiv:2105.01727, May 2021., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.01727>
- [23] Niroshan, L. and Carswell, J.D., "Poly-GAN: Regularizing Polygons with Generative Adversarial Networks.", In *International Symposium on Web and Wireless Geographical Information Systems*, Vol. 13912, pp. 179-193, Jun 2023., https://doi.org/10.1007/978-3-031-34612-5_13
- [24] OpenStreetMap, Available: <https://www.openstreetmap.org>
- [25] Niroshan, Lasith, Carswell, James D., "OSM-GAN: Using Generative Adversarial Networks for Detecting Change in High-Resolution Spatial Images", *Springer International Publishing*, Vol. 143, pp. 95-105, June 2022., https://doi.org/10.1007/978-3-031-08017-3_9
- [26] Zorzi, S., Bittner, K. and Fraundorfer, F., "Machine-learned regularization and polygonization of building segmentation masks." *International Conference on Pattern Recognition*, MiCo Milano Congress Center, ITALY, pp. 3098-3105, January 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.12587>
- [27] Kato, N., Osono, H., Oomori, K., Ooi, C.W. and Ochiai, Y., "Gans-based clothes design: Pattern maker is all you need to design clothing." In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference*, New York, NY, United States, March 2019, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1145/3311823.3311863>
- [28] OpenCV, available: <https://opencv.org/>
- [29] Suarez, Gloria Bueno García Oscar Deniz. *Learning image processing with OpenCV*. 2013.
- [30] Chandan, G., Jain, A. and Jain, H., "Real time object detection and tracking using Deep Learning and OpenCV.", In *2018 International Conference on inventive research in computing applications (ICIRCA)*, Coimbatore, India, pp. 1305-1308, July 2018, <https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597266>
- [31] N. Boyko, O. Basytiuk and N. Shakhovska, "Performance Evaluation and Comparison of Software for Face Recognition, Based on Dlib and Opencv Library," *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, Aug 2018, pp. 478-482, <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478556>.

- [32] Montatore, M., "Real-time object recognition in industrial automation processes", Diss. Politecnico di Torino, pp. 101, 2022.
- [33] Sedgwick, Philip. "Pearson's correlation coefficient.", pp. 345, July 2012, <https://doi.org/10.1136/bmj.e4483>
- [34] Zhou Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, April 2004, <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>.
- [35] Kieffer, B., Babaie, M., Kalra, S. and Tizhoosh, H.R., 2017, November. "Convolutional neural networks for histopathology image classification: Training vs. using pre-trained networks.", In 2017 seventh international conference on image processing theory, tools and applications (IPTA), Montreal, Canada, pp. 1-6, Oct 2017, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.05726>
- [36] Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T., "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation.", In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 2015, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>
- [37] ImageNet Dataset, Available: <https://www.image-net.org/>
- [38] Tan, M., Le, Q., "Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks.", In International conference on machine learning, Long Beach Convention Center, Long Beach, pp. 6105-6114, May 2019, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.11946>
- [39] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition", 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, pp. 770-778, June 2016, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
- [40] Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., Jégou, H., "Training data-efficient image transformers & distillation through attention.", In International conference on machine learning, pp. 10347-10357, Jan 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.12877>
- [41] Pyinstaller, Available: <https://pyinstaller.org/en/stable/>
- [42] Tkinter, Available: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>
- [43] O'Shea, K. and Nash, R., "An introduction to convolutional neural networks.", arXiv preprint arXiv:1511.0845, Nov 2015., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08458>
- [44] Visa, S., Ramsay, B., Ralescu, A.L. and Van Der Knaap, E., 2011. "Confusion matrix-based feature selection.", Maics, Vol. 710, No. 1, pp. 120-127, January 2011,
- [45] Bradley, A.P., "The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms.", Pattern recognition, Vol. 30, No. 7, pp. 1145-1159, July 1997, [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2)
- [46] Karras, T., Aittala, M., Laine, S., Härkönen, E., Hellsten, J., Lehtinen, J. and Aila, T., 2021. Alias-free generative adversarial networks., Advances in Neural Information Processing Systems 34, May 2022, pp.852-863.

저자소개



성주용 (Ju Yong Seong)

2023 년: 선문대학교 대학원 석사과정

관심분야: 통계학, 머신러닝, 인공지능, 패턴인식



이현준 (Hyunjun Lee)

2010 년 : 선문대학교 대학원 (이학석사)

2013 년 : 선문대학교 대학원 (이학박사)

관심분야: 데이터베이스, 신호처리, 인공지능



이성철 (Sungchul Lee)

2012 년 : University of Nevada, Las Vegas (이학석사)

2018 년 : University of Nevada, Las Vegas (이학박사)

관심분야: 인공지능(AI), 웹/앱 어플리케이션, 블록체인
