

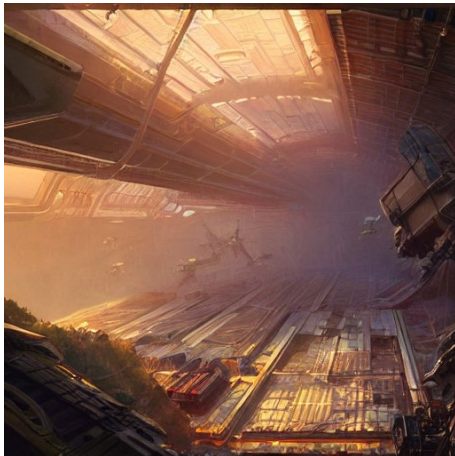
# 양자머신러닝을 통한 이미지 분류

Daiwei Zhu, Jason Iaconis

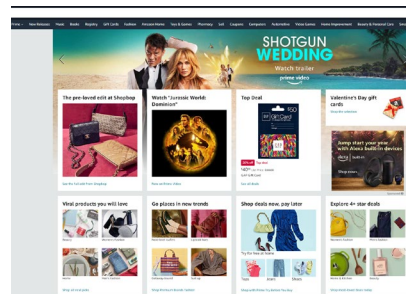
## Introduction:

파인만 교수의 우주선이 미지의 행성에 추락했습니다. 그의 여행가방을 포함하여 많은 짐들이 사고중에 폭발했습니다. 맵소사 - 그가 가장 좋아하는 티셔츠가 여행가방 안에 있었어요!

운 좋게도 파인만 교수의 우주선은 거대한 화물선입니다. 화물칸에는 산더미 같은 물건들이 있는데 Xbox, 기타, 건조 숙성 A5 와규 립아이, 캘리포니아 킹 사이즈 침대, 그리고 당연히 티셔츠도 있습니다. (이국적인 휴일처럼 들리죠?)



파인만 교수에게 여전히 문제가 없다는 말은 아닙니다. 화물칸의 크기를 보세요. 화물칸 AI 시스템이 작동 중일 때 항목을 검색하는 것은 매우 쉬웠습니다. 그가 해야 할 일은 AI의 검색 인터페이스를 통해 검색하는 것이었습니다.



하지만 이제 충돌로 인해 전체 AI 시스템이 사라졌기 때문에 파인만 교수는 모든 것을 수동으로 찾아야 합니다. 벌써 사흘째인데 아직도 티셔츠가 없군요. 운 좋게도 그는 IonQ 양자 컴퓨터도 가지고 있었고 충돌에서 살아남았습니다. 파인만 교수는 기발한 아이디어를 내놓았습니다. 당신이 화물칸에서 유용한 품목을 분류하는 데 도움이 되는 이미지 분류 알고리즘을 설계하게 하는 것이죠. 네, 우리에게 남은 것은 IonQ 양자 컴퓨터뿐이므로 알고리즘은 양자 이미지 분류 알고리즘이 될 것입니다.

자, 파인만 교수가 티셔츠를 찾는 것을 돕기 위해 당신이 해야 할 일은 다음과 같습니다.

## IonQ 챌린지 #2: 데이터셋과 큰 그림

이미지 분류의 첫 번째 단계는 카메라로 촬영한 이미지를 양자 회로로 인코딩하는 것입니다. 이런 방식으로 양자 컴퓨터는 항목을 "볼" 수 있습니다.

당신에게는 이미지 데이터셋(**Fashion-MNIST**)가 제공됩니다. 귀하의 임무는 이미지를 가능한 한 손실없이 양자 상태로 인코딩하는 데이터 로딩 체계를 만드는 것입니다. 파인만 교수는 고전적인 컴퓨팅 리소스를 많이 갖고 있지 않기 때문에 인코딩된 이미지는 회로 마지막에서 간단한 측정으로 해석할 수 있어야 합니다.

**Link:** <https://drive.google.com/file/d/11Vo2dJ4g--5hnsfuhCMvCO6EFcniNx4q/view?usp=sharing>

데이터 전처리가 허용되지만, 파동 함수에 상태를 최대한 많이 직접 저장하는 답안(예: 고전 연산 처리를 많이 사용하지 않는 솔루션)이 더 선호됩니다.

### Newcomer Track

#### Task 1:

몸 풀기로 일반적으로 곱상태 인코딩(Product state encoding)으로 알려진 인코딩을 구현해 보겠습니다. 구체적으로 말하면, 8 차원 벡터  $\vec{v} = \sum v_i \vec{e}_i$ 를 8 큐비트를 이용하여 다음과 같은 상태에 인코딩합니다:

$|\psi\rangle = \prod_{i=0}^7 R_x^{(i)}(f(v_i))|0\rangle$ , 여기서  $R_x^{(i)}$ 는  $i$  번째 큐비트에 적용되는 단일 큐비트  $x$  회전을 나타냅니다.  $f(x)$ 는 값을 게이트의 회전 각도에 매핑하는 함수입니다.

이 인코딩 방식을 사용하여 8 차원 벡터  $[1,5,2,6,3,7,4,8]$ 을 인코딩하는 Qiskit(또는 Cirq) 회로를 작성하세요. 인코딩 방법을 설명하고 회로를 시뮬레이션한 다음 양자 회로의 측정값에서 8 차원 벡터를 재구성해보세요.

**힌트:** 0에서 1 사이의 숫자 한 개를 인코딩하려면  $x$  축을 따라 단일 큐비트를 회전하면 됩니다.  $|\psi\rangle = R_x(0.5\pi)|0\rangle$ . 그런 다음 큐비트 측정을 통해서 얻은 1을 얻을 확률로 인코딩된 값을 얻을 수 있습니다.

#### Task 2:

두 번째 위밍업으로 좀 더 어려운 인코딩을 시도해 보겠습니다. 동일한 8 차원 벡터  $[1,5,2,6,3,7,4,8]$ 를 3 큐비트 양자 상태  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=0}^7 v_i |i\rangle$ 의 진폭으로 인코딩해 보세요. 여기서  $|i\rangle$ 는 기저 상태들이고  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 는 정규화 인자입니다.

인코딩 방법을 설명하고 회로를 시뮬레이션한 다음 양자 회로의 측정값에서 8 차원 벡터를 재구성해보세요.

### Task 3:

위의 두 가지 방식은 이미지 인코딩의 두 가지 예일 뿐이며 각각 장단점이 있습니다. 이제 이미지 인코딩의 개념에 대한 워밍업이 완료되었으니 더 자세히 살펴보겠습니다.

a) Task 1 과 2 에서 구현한 두 가지 인코딩 방법의 장단점에 대해 논의하세요.

b) 이 두 가지 방법의 장점과 단점 사이의 균형을 찾는 새로운 방법을 제안해보세요. 새로운 방식이 어떻게 작동하는지 설명하세요. 인코딩된 이미지에 따라 양자 회로가 어떻게 구성되는지, 그리고 양자 회로의 측정 결과에 따라 이미지가 어떻게 재구성되는지 설명하세요.

### Task 4:

이제 위에서 개발한 방법을 사용하여 아래의 작은 3x3 이미지를 양자 상태로 로드하겠습니다.

0	0.5	0
0.8	1	0.8
0	0.5	0

인코딩 체계를 시연하고 시뮬레이터를 사용하여 체계를 실행하세요.

힌트: 여기서는 양자 게이트가 예리가 없으며 시뮬레이터가 지원하는 한 가능한 많은 큐비트를 사용할 수 있다고 가정할 수 있습니다.

## Advanced Track

### Task 5:

아쉽지만 실제 이미지를 처리하려면 여전히 더 많은 노력이 필요합니다. 실제 양자 하드웨어는 오류/잡음에 취약합니다. 또한 사용 가능한 큐비트 수도 제한되어 있습니다. 반면에 실제 이미지는 매우 클 수 있습니다. 예를 들어 Fashion-MNIST 의 이미지는 28x28 픽셀을 가지고 있습니다. 현재 사용 가능한 하드웨어(2Q 게이트 충실도가 ~96%인 11 큐비트 머신)와 호환되는 28x28 Fashion-MNIST 이미지를 인코딩하는 새로운 방식을 제안해보세요. 귀하의 계획은 작업 3 에서 제안한 것의 확장일 수도 있고 다른 것일 수도 있습니다. 회로 구성 방법과 회로 측정을 통해 이미지를 복구하는 방법을 설명하십시오.

힌트: 손실 인코딩을 사용하여도 괜찮지만 이미지 내의 정보가 보존될 때 최고의 성능을 발휘합니다. 이미지의 인덱스만 인코딩하지는 마세요!

**Task 6:**

시뮬레이터를 사용하여 제안한 인코딩을 시연한 다음 제공된 데이터세트를 사용하여 실제 QPU HW 에서 인코딩을 실행하세요. 제안한 방법의 타당성을 설명하고 실제 QPU 결과에서 재구성된 이미지를 5 개 이상 보여주세요. QPU 리소스, 시스템 노이즈 및 재구성된 이미지의 품질을 고려하여 설명하세요.

**Task 7:**

제공된 데이터세트(Fashion-MNIST)에서 이진 분류를 수행하도록 매개변수화된 양자 회로를 훈련합니다. 구체적으로 말하면 다음 순서를 수행하여 신발 이미지 50 개와 티셔츠 이미지 50 개를 구별합니다.

힌트: 권장하는 순서:

1. 매개변수화된 양자 회로를 이미지로 인코딩된 회로와 통합합니다 (Task 5 참고).
2. 이진 분류를 수행하기 위해 집적 회로의 측정 결과를 해석하는 방법을 설계합니다. 예를 들어 한 개 특정 큐비트를 연산 기반에서 측정합니다. 그런 다음  $\langle Z \rangle > 0$  인 경우 긍정적인 추론을 할당하고  $\langle Z \rangle \leq 0$  인 경우 부정적인 추론을 할당합니다.
3. 추론 오류(추론과 라벨 간의 불일치)를 최소화하도록 매개변수화된 양자 회로를 훈련합니다. 훈련을 위해서는 비용 함수가 필요하며 가능한 옵션에는 평균 제곱 오차(MSE), 교차 엔트로피 손실 등이 포함됩니다.

양자 회로 교육을 위한 다음 저장소가 도움이 될 수 있습니다.

[https://github.com/daiweionq/open\\_access\\_teaching\\_notebooks](https://github.com/daiweionq/open_access_teaching_notebooks)

요구사항:

1. 자신의 방법과 훈련과정, 결과를 제대로 설명해야 합니다.
2. 시뮬레이터에서 훈련을 수행해야 합니다.
3. 시뮬레이터에서 훈련된 매개변수화된 회로를 사용하여 QPU 에서 최소 10 개의 이미지 추론을 수행해야 합니다.

**최종 참고 사항:** 이 문제의 목표는 기계 학습 문제에 대한 양자 컴퓨팅 접근 방식을 탐색하는 것입니다. 이를 위해 최종 점수는 프로그램의 양자성 정도를 고려합니다. 최종 솔루션에서는 최소한의 고전적 처리가 포함된 창의적인 솔루션이 선호됩니다.