

Europe Quantum Brief 덴마크 양자기술의 활용 사례(Use Cases)



Europe Quantum Brief
덴마크 양자기술의 활용 사례(Use Cases)

- [발행일] 2025년 3월
[저 자] 박 기 범, 이 정 원
[발행인] 이 정 원
[발행처] 한-유럽 양자과학기술협력센터 (KE-QSTCC)
[주 소] Korea-Europe Quantum Science Technology Cooperation Center
Rue de la Science 14A
1040 Brussels, Belgium
[자 문] 박 기 민 (Palacký University Olomouc)
[문 의] 박 기 범
E-mail: bhak@k-erc.eu

※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 가공·인용할 때는 원문출처를 명시하셔야 합니다.
※ 본 자료는 KE-QSTCC 웹페이지(<https://k-erc.eu/ke-qstcc/>)를 통해서도 보실 수 있습니다.



01	개요	1
02	양자 센싱 (활용사례 1~5)	2
03	양자 통신 (활용사례 6~9)	7
04	양자 컴퓨팅 (활용사례 10~16)	11
05	요약 및 시사점	18
06	참고문헌	20

01 개요

덴마크 양자 기술 분야의 활용 사례(Use Cases)에 대한 리뷰의 의의

- 덴마크 양자 생태계에서 검토된 16가지 활용 사례를 통해, 다양한 산업 분야에서 양자 기술이 초기 연구 단계에서 시작하여 혁신 과정을 거쳐 궁극적으로 물류, 의료, 금융 등에서 상업화되는 전 개발 과정을 살펴봄
 - 본 사례들은 기술 성숙도가 낮은 연구 초기 단계에 해당하지만, 양자 기술에 대한 관심과 투자가 급격히 증가하고 있는 현황을 반영
- 본 리뷰가 다양한 분야의 독자 및 관련 연구자들에게 양자 기술에 대한 관심을 불러일으키고, 연구 참여 및 기술 개발을 주도할 파트너십 구축의 계기가 되기를 기대

표 1-1 • 덴마크 양자기술의 16가지 활용 사례(Use Cases)

분야	활용 사례 내용
양자센싱	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 사례 1. 원자 양자 시계 기반의 정밀한 시간동기화(Accurate Timing) ▪ 사례 2. MRI 스캔의 영상 품질 향상 ▪ 사례 3. 네비게이션을 위한 양자 자이로스코프(Gyroscopes) ▪ 사례 4. GPS 성능 향상을 위한 중력장 매핑(Gravity Field Mapping) ▪ 사례 5. 양자 센싱을 위한 포논 결정 공진기(Phononic Crystal Resonators)
양자통신	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 사례 6. 사이버 보안을 위한 초고속 양자 난수 생성기 ▪ 사례 7. 양자 키 분배(QKD)를 활용한 에너지 그리드 보안 강화 ▪ 사례 8. 디바이스 독립성을 갖춘 초고보안 양자 통신의 개척 ▪ 사례 9. 덴마크 양자 통신 인프라
양자컴퓨팅	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 사례 10. 양자 기술과 AI를 활용한 최적 경로 계획 ▪ 사례 11. 양자 컴퓨터를 이용한 효소 반응 시뮬레이션 ▪ 사례 12. 물류 최적화를 위한 양자 컴퓨팅 활용 ▪ 사례 13. 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 기반 제품·공정 설계 ▪ 사례 14. 양자 기술 기반 AI를 활용한 백신 설계 가속화 ▪ 사례 15. 성층권 기구의 최적 운영 관리 ▪ 사례 16. 양자 최적화 기반 실시간 트레이딩

02 양자 센싱 (활용사례 1~5)

양자 센서는 압력, 자기장, 중력, 시간 등 다양한 물리적 특성을 중첩(superposition), 얽힘(entanglement), 양자 간섭(quantum interference)과 같은 양자역학적 원리를 활용하여, 기존의 고전적 센서로는 도달하기 어려운 높은 정확도, 해상도 및 안정성을 달성할 수 있음

[사례 1] 원자 양자 시계 기반의 정밀한 시간동기화(Accurate Timing)

최종 사용자: Telecom Network Operators 양자기술 공급자: DFM(Danish National Metrology Institute)

정밀한 시간동기화의 필요성 및 이슈

- (사이버 보안) 다양한 분야(항공, 국방, 통신 등)에서 내비게이션 기술에 대한 의존도가 높아짐에 따라, 스푸핑(Spoofing)과 같은 사이버 테러(GPS 신호 조작을 통한 위치·시간 왜곡)에 대한 대비가 필요
- (위성 전파의 오차 보정) 덴마크의 정밀한 시간 동기화는 해외에서 전송되는 약한 신호(라디오파 또는 글로벌 내비게이션 위성 시스템)에 의존하고 있기 때문에, 정확한 시간 정밀도를 확보하려면 위성 궤도를 따라 전파되는 과정에서 발생하는 오차를 보정이 필수적
- (로컬 클록) 차세대 5G 통신망, 스마트 에너지 그리드 및 주식 시장의 고속 거래 등은 수십 나노초 수준의 초정밀 시간 동기화를 요구하기 때문에 로컬 클록(Local Clock)*이 필수

* 로컬 클록은 특정 위치에 설치된 시간 측정 시스템으로, 양자 실험 및 양자 통신 시스템에서 시간 추적 및 조정에 활용

시간동기화 문제점 해결을 위한 양자 기술 적용 분야 및 활용 방안

- (원자시계) DFM(덴마크 국가 측정 연구소)은 수소 메이저(hydrogen maser; 수소 원자의 양자 전이 기반으로 작동) 원자시계를 활용하여 UTC(DFM)(덴마크의 표준시)*을 운영하고 UTC(전세계 표준시) 유지 과정에도 기여



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

* DFM은 UTC(DFM)를 기준으로 정밀하고 추적 가능한 시간 정보를 인터넷(NTP 및 NTS)을 통해 밀리초(ms) 수준의 정확도로 배포하며, 정확도 향상을 위해 광섬유 연결(fibre connections)을 활용하여 정밀도 10배 이상을 기대

- (Stabilaser) DFM은 분자 양자 전이에서 주파수 안정성을 확보하는 고정밀 레이저 광원인 Stabilaser(Optical Frequency Comb, Vescent Technologies Inc)를 기반으로 광학 시계를 개발하여, 기존 원자시계(수소 메이저 및 세슘 시계) 시스템보다 간단하면서도 동등한 수준의 안정성을 구현

■ [사례 2] MRI 스캔의 영상 품질 향상

최종 사용자: Hvidovre Hospital - DRCMR 양자기술 공급자: Niels Bohr Institute

- MRI 스캐너 필드 모니터링 기술의 필요성 및 이슈
 - (자기장 불안정성) MRI는 강력한 자기장과 라디오파를 이용하여 신체 내부 구조를 정밀하게 촬영하는 첨단 기기로서, 스캔 중 발생하는 자기장 불안정성은 영상 품질 저하의 주요 원인
 - (자기장 측정) 스캔 중 자기장을 실시간으로 측정하고 이를 영상 생성에 활용하면 영상 품질 향상에 기여할 수 있음이 입증되었으나, MRI 스캐너에 전자식 자기장 센서를 도입할 경우 장치의 복잡성이 증가하는 문제가 발생
- 필드 모니터링 기술 문제점 해결을 위한 양자 기술 적용 분야 및 활용 방안
 - (양자 자기계측기) 덴마크 자기 공명 연구 센터(DRCMR, Hvidovre 병원)는 닐스 보어 연구소와 협력하여 새로운 양자 자기계측기*를 개발했으며, 이는 높은 자기장 환경에서 광학적 자기계측이 가능한 최초의 사례로 보고됨
 - * 양자 자기계측기는 원자 세슘 기체를 이용한 레이저 분광법을 기반으로, 탐침 내부에서 레이저 빛이 세슘 기체를 통과할 때 광학적 흡수율을 측정하는데, 자기장의 세기에 따라 세슘 원자가 미세하게 다른 파장에서 빛을 흡수하는 원리를 통해 MRI 스캐너 내에서 전자기 간섭 없이 정밀한 자기장 계측이 가능하게 함
 - (프로토타입 배포) 소형화되고 이동성이 뛰어난 프로토타입이 개발되어 Hvidovre 병원의 MRI 스캐너에서 성공적인 테스트 수행(스캔 과정 특정 상황에서 발생하는 자기장 불안정성을 감지)
 - (상업적 전망) 전 세계적으로 MRI 스캐너가 광범위하게 사용되고 있다는 점을 고려할 때, 이 혁신 기술이 진입할 시장 규모는 상당할 것으로 예상되고 의학계 발전 및 정밀한 자기장 측정이 필요한 다양한 분야에서 추가적인 혁신을 기대

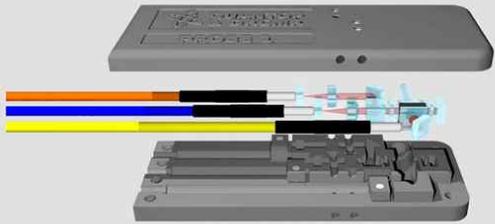
그림 2-2 • 광학 프로브 설계



CASE OVERVIEW

- TECHNOLOGY TYPE**
Quantum sensing
- BUSINESS SECTOR**
Health care (clinical and scientific MR imaging)
- TIME TO MARKET**
2-3 years for use in research, 10 years for use in clinic

INSTITUTION WEBSITE
www.nbi.ku.dk/english



[광학 탐침 설계의 분해도]
세슘 기체가 포함된 셀은 원자 밀도를 증가시키기 위해 노란색 광섬유에서 전달되는 고휘력 레이저 빔에 의해 가열됨. 탐침용 레이저 빛은 파란색 광섬유로부터 조사되고, 주황색 광섬유를 통해 되돌아 와서 검출됨.

[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

[사례 3] 네비게이션을 위한 양자 자이로스코프(Gyroscopes)

최종 사용자: DLR - German Aerospace Center 양자기술 공급자: NKT Photonics

- 관성 센서 및 자이로스코프 기술의 필요성 및 이슈
 - (위치 탐색) 자이로스코프와 기타 관성 센서를 사용하면 GPS나 지형지물과 같은 외부 입력에 의존하지 않고도 모든 방향의 회전과 가속도를 추적하여 사용자가 위치를 파악할 수 있도록 해줌
- 관성 센서 및 자이로스코프 기술에 대한 양자 기술 적용 분야 및 활용 방안
 - (양자 자이로스코프) 독일 항공우주센터(DLR)가 NKT Photonics의 광섬유 레이저를 활용하여 개발한 양자 자이로스코프(레이저 냉각 기술을 통한 저온 원자를 기반으로 작동되고 일상 환경에서도 최상의 안정성을 유지할 수 있도록 설계)는 소형 위성*에 탑재되어 시연에 성공
 - * 이 위성은 2027년 발사를 목표로 우주 공간에서 위성의 회전 상태 및 방향을 제어하는 데 사용될 예정이고, 가까운 미래에는 양자 네비게이션 기술이 선박 및 잠수함에 탑재되어 활용도를 확대할 전망
 - (원자 간섭계) 양자 자이로스코프 중 원자 간섭계(Atom interferometry)*를 활용한 시스템은 현재 가장 정밀한 관성 센서로서, 개별 원자(일반적으로 알칼리 금속 원자)를 레이저 빔으로 냉각하고 정밀하게 조작하여 구현함
 - * 원자 간섭계는 원자의 파동적 성질을 활용하여 원자를 두 가지 상태의 중첩(superposition) 상태로 배치하고 이때 원자가 이동하는 경로에서 가속도나 회전과 같은 외부 요인이 작용하면 간섭 패턴의 변화가 발생
 - (루비듐-87) 원자 간섭계에서 가장 널리 사용되는 루비듐-87 원소를 조작하려면 선풍이 좁고 빔 품질이 뛰어난 780nm 고출력 레이저 빔*이 필요
 - * NKT Photonics는 기존 레이저의 우수한 성능을 유지하면서도 루비듐-87에 적합한 파장으로 변환할 수 있는 기술을 개발하였으며, 양자 자이로스코프 운영에 필요한 모든 광학 제어 시스템을 최적화(고정밀·소형화·견고성)하여 다양한 양자 기술 응용 분야에 적용

그림 2-3 Koheras Basik laser module과 Koheras modular fiber laser platform

<p>CASE OVERVIEW</p> <p>TECHNOLOGY TYPE Quantum sensing</p> <p>BUSINESS SECTOR Commercial Shipping, Aerospace and Defence, Sub-surface Navigation</p> <p>TIME TO MARKET Within 2 years</p>	<p>Koheras Basik laser module 양자 센싱을 구현하는 핵심 기반 기술</p> 	 <p>Koheras modular fiber laser platform 레이저, 증폭기 및 변조기가 완전히 구성된 상태</p>
--	---	--

[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

❖ [사례 4] GPS 성능 향상을 위한 중력장 매핑(Gravity Field Mapping)

최종 사용자: 덴마크 기후 데이터청을 대표하는 DTU Space 양자기술 공급자: ONERA, French Aerospace Lab

- 중력장 매핑 기술에 대한 필요성 및 이슈
 - (중력장 정보) 중력장에 대한 정확한 정보는 GPS 기반(GPS-based)* 및 GPS 불가능(GPS-denied)** 내비게이션 시스템에서 중요
 - * GPS 및 기타 위성 내비게이션 시스템(Galileo)에서 위성의 정확한 위치는 국지적인 중력장의 영향을 받으므로, 중력장에 대한 정보가 정밀할수록 위성 궤도 예측이 개선되며, 실시간 GPS 애플리케이션의 정확성이 향상
 - ** GPS 작동이 불가능한 환경에서는 전통적인 관성 내비게이션 시스템(출발점에서 측정된 가속도를 적분하여 특정 시점의 위치를 예측)을 활용하지만, 중력장에 대한 부정확한 정보는 가속도 값에 영향을 미쳐 위치 오차를 발생
 - (항공) 기존 항공 기반 중력 측정 방식은 지속적이고 일관된 오류(systematic error)가 존재하여 비행 전후 센서 보정이 필요했으며, 이에 활용되는 중력장 정보의 정확도가 매우 낮음
- 중력장 매핑 기술에서 양자 기술의 적용 분야 및 활용 방안
 - (절대적 측정) 양자 기술을 기반으로 한 중력 센서는 지속적이고 일관된 오류가 존재하지 않는 "절대적(absolute)" 측정이 가능하며, 외부 보정 절차 없이도 정확한 데이터를 제공
 - ※ 다만, 항공기 움직임으로 인한 가속도를 감지하는 능력이 제한되므로, 이러한 가속도 값은 GPS 측정을 통해 확보
 - (양자 중력계) 프랑스 국립항공우주연구소(ONERA)가 개발한 냉각 원자 간섭계(Cold-Atom Interferometry) 원리 기반의 양자 중력계는 DTU Space와의 협력을 통해 항공 플랫폼에서의 중력 측정을 성공적으로 시연(2017, 2019, 2023년)
 - * ① 중력에 의한 자유 낙하 중 초저온 루비듐-87 원자 구름의 양자 상태를 세 번의 레이저 펄스로 조사 ② 이는 원자의 에너지 구조 중에서 아주 미세하게 갈라진 두 개의 가장 낮은 에너지 상태(hyperfine ground states)를 커플(Couple) 시킴 ③ 형광 검출을 통해 두 상태($|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$)에 있는 원자들의 개체 수를 측정 ④ 자유 낙하 중 원자들이 받은 가속도는 두 상태에 있는 원자의 비율과 관련이 있기 때문에 이를 통해 중력 가속도를 도출

그림 2-4 ◦ 양자중력계(ONERA)



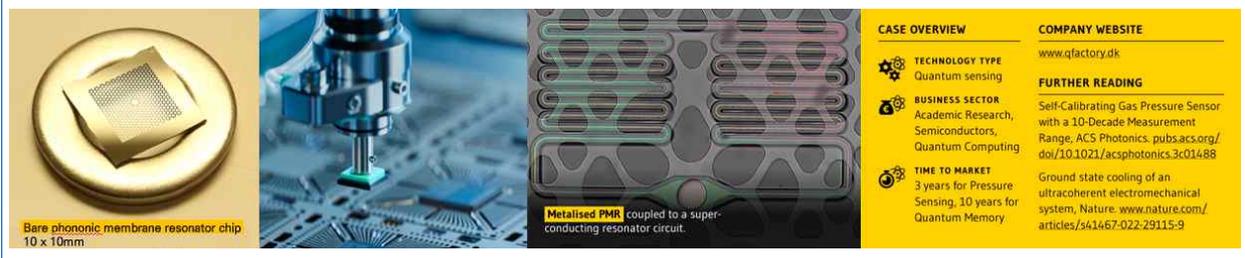
[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

☐ [사례 5] 양자 센싱을 위한 포논 결정 공진기(Phononic Crystal Resonators)

최종 사용자: 반도체 산업 및 양자 컴퓨터 제조자 양자기술 공급자: QFactory

- 포논닉 멤브레인 공진기(PMR) 기술에 대한 필요성 및 이슈
 - (상업화) PMR은 포논닉 크리스털 설계를 갖춘 박막 구조로, 기계적 공진에서 역대 최저의 노이즈를 실현하고 양자 수준의 감도를 구현할 수 있으면서도 생산 비용은 낮게 유지
 - (광범위 응용) 증력과 검출 성능 향상뿐만 아니라 단백질 및 바이러스의 3D 이미징을 위한 원자 규모 MRI 장비 등 다양한 분야에서의 활용 가능성
 - (고진공 환경 필요성) 고품질의 디지털 장치 및 CPU를 생산하기 위해서는 고진공 환경(공기 입자로 인한 오염을 방지)에서 다양한 공정 변수의 정밀한 측정 및 제어가 필요하기 때문에 진공 압력 제어를 통한 공정의 최적화는 필수적
 - (양자 정보 저장의 필요성) 양자 컴퓨터와 양자 네트워크에서 초전도 큐비트는 비교적 짧은 결맞음(coherence) 시간을 가지기 때문에 양자 정보 저장 측면에서 한계를 야기
- 포논닉 멤브레인 공진기(PMR) 기술에서 양자 기술의 적용 분야 및 활용 방안
 - (고진공 환경의 구현) 진공 챔버 내에 PMR을 배치하면 공진기에 미치는 "거대 원자"의 공기 저항 영향을 측정하여 압력을 추정할 수 있으며, 이는 현재 상용화된 최고 성능의 압력 게이지와 동일한 수준의 정밀도를 제공하면서도 훨씬 낮은 비용으로 제조할 수 있는 기술
 - ※ 현재 닐스 보어 연구소와의 협력을 통해 성능 안정성을 연구 중이며, 3년 이내에 제품 프로토타입이 개발될 예정
 - (장시간의 양자 정보 저장) PMR은 현재까지 보고된 최장 결맞음 시간(초전도 양자 컴퓨터의 작동 온도에서 100밀리초 이상의 결맞음 시간을 달성)을 제공하고, 초전도 회로와 효과적으로 결합이 가능하여 칩 기반의 소형화된 확장성 높은(양자 정보 저장·검색·전송이 가능) 솔루션을 제공
 - ※ 닐스 보어 연구소에서 PMR을 이용하여 기존 기록을 뛰어넘는 결맞음 시간을 실험적으로 입증(2020년)하였고 이후 양자 메모리로 기능화하는 연구가 지속적으로 진행 중(상용 제품 출시는 10년 이내로 목표)

그림 2-5 • Bare phononic membrane resonator chip & Metalised PMR



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

03 양자 통신 (활용사례 6~9)

양자 통신의 핵심 기술인 양자 키 분배(QKD)는 단일 광자의 양자 상태(예: 편광)를 이용하여 암호키를 안전하게 공유하는 방식으로, 외부에서 도청을 시도하면 광자의 양자 상태가 필연적으로 변하여 도청 시도가 즉시 탐지되므로, 향후 양자컴퓨터 공격에도 안전한 강력한 보안성을 제공

■ [사례 6] 사이버 보안을 위한 초고속 양자 난수 생성기

최종 사용자: Quantum Telecommunications Italy 양자기술 공급자: Alea Quantum Technologies

- 초고속 양자 난수 생성기 기술에 대한 필요성 및 이슈
 - (사이버 보안) 양자 컴퓨터의 등장으로 사이버 보안에 중대한 위협(기존의 암호화 알고리즘은 쉽게 해독되고, 제한된 엔트로피의 키를 사용하는 포스트 양자 보안 방식의 안전성도 불충분)에 직면하게 됨
 - (사이버 테러) 향후에 초래될 심각한 위협으로 HNDL(Harvest Now, Decrypt Later)는 오늘날 정부 기밀 데이터를 수집하고 미래에 양자 컴퓨터를 이용해 암호를 해독하려는 공격
- 초고속 양자 난수 생성기 기술의 적용 분야 및 활용 방안
 - (AQT) 덴마크 기업 AQT(Alea Quantum Technologies)는 양자 컴퓨터가 기존의 암호를 쉽게 해독할 수 있는 미래를 대비해 사이버 보안 솔루션으로, 양자 광학 기술을 기반으로 한 QRNG(양자 난수 생성기)를 개발하여 경쟁력 있는 가격으로 제공
 - (광자 하위 시스템) AQT는 레이저와 광 검출기만으로 구성된 가장 단순한 광자 하위 시스템(simplest photonic subsystem)*을 사용하여 양자 측정을 구현
 - (QCI.dk 및 QTI) Alea의 QRNG는 QCI.dk(덴마크의 양자 키 분배 네트워크)에서 실제 활용 중이고, QTI(Quantum Telecommunications Italy)의 QKD 시스템에 통합

그림 2-6 ◉ 양자 QRNG 프로토타입



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

☐ [사례 7] 양자 키 분배(QKD)를 활용한 에너지 그리드 보안 강화

최종 사용자: Energinet 양자기술 공급자: Celare Quantum Communications

- QKD를 활용한 에너지 그리드 보안 강화 기술에 대한 필요성 및 이슈
 - (에너지 그리드) 전력망이라고도 불리는 에너지 그리드(전기를 생산해서 소비자에게 배전하는 전기 에너지 전달 시스템 전체를 의미)에 대한 사이버 보안(양자 컴퓨터에 의한 암호 체계 혼란 방지)은 안정적인 전기 공급을 위해 필수
 - (QKD) 양자 키 분배(QKD)는 암호화 키를 안전하게 분배하기 위해 양자 물리학을 기반으로 하는 기술로서, 에너지 그리드 데이터를 보호하는데 적합한 시스템
 - (광섬유 활용) 덴마크의 5,000개 이상의 변전소들은 전력선과 함께 설치된 광섬유로 연결되어 있기 때문에 이는 QKD 시스템 구축을 위한 기반으로 활용 가능
- QKD를 활용한 에너지 그리드 보안 강화 기술에 대한 양자 기술 적용 및 활용 방안
 - (Energinet) QKD를 에너지 그리드 보안에 활용하는 가능성 검증을 위해, DTU(덴마크 기술대학교)와 Energinet은 2023년 Fyn 섬에 위치한 두 개의 변전소 간에 QKD 시스템*을 구현
 - * QKD와 100Gbps 암호화 데이터 트래픽이 동일한 광섬유를 공유하며, QKD에는 1,550nm, 네트워크 트래픽에는 1,300nm 파장의 서로 다른 빛을 사용하여 간섭을 방지함으로써, 양자 서비스와 기존 통신 서비스를 동일한 광섬유 인프라에서 동시에 제공하여 비용을 절감할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해 양자 안전 암호화 솔루션이 에너지 그리드 보호에 효과적임을 입증
 - (Celare) DTU의 연구를 바탕으로 Celare가 개발한 QKD 시스템은 연속 변수 양자 키 분배(CV-QKD) 방식*을 도입
 - * 약한 레이저를 통해 양자 상태를 송신하고, 수신자는 이 빛의 전자기장 특성 (예: 진폭, 위상)을 연속적인 값으로 측정하여 암호키를 생성, 최대 100km 거리의 도시 간 통신을 커버할 수 있음. CV-QKD는 고속 데이터 전송에 사용되는 기존 통신 장비와 유사한 구조를 가지므로, 이미 개발된 부품을 그대로 활용할 수 있어 비용 절감이 가능하며, QKD와 데이터 트래픽이 동일한 광섬유를 공유하여 기존 통신망과도 완벽히 통합 가능

그림 2-7 • QKD 시스템



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

■ [사례 8] 디바이스 독립성을 갖춘 초고보안 양자 통신의 개척

최종 사용자: Danish Defence - Project QRYPTON 양자기술 공급자: Sparrow Quantum

- 디바이스 독립성을 갖춘 초고보안 양자 통신 기술에 대한 필요성 및 이슈
 - (하드웨어 독립형 보안방식) 기존의 QKD 방식에서는 제3자가 송신기나 수신기에 접근하면 암호 키에 대한 정보 획득을 통해, 프로토콜의 보안이 무너지게 되지만, 장치 독립형 시스템(DI-QKD)에서는 도청자가 하드웨어에 완전히 접근하더라도 원리적으로 보안을 보장
 - (Sparrow Quantum 기업) 양자 키 분배(QKD) 기반의 해킹 불가능한 장치 독립형 시스템(DI-QKD; 하드웨어 장치가 손상되더라도 통신을 안전하게 유지) 개발을 위해 단일 광자(Single Photon) 기술을 제공
 - (QRYPTON 프로젝트) 덴마크 국방부가 지원하는 프로젝트로, Sparrow Quantum은 Cryptomathic 및 닐스 보어 연구소와 협력하여 장치 독립형 양자 키 분배(DI-QKD)* 기술 선도 및 측정 장치 독립형 QKD(MDI-QKD)* 시스템의 프로토타입 개발
- * (DI-QKD) Device-Independent Quantum Key Distribution, (MDI-QKD) Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution
- 디바이스 독립성을 갖춘 초고보안 양자 통신 기술의 적용 분야 및 활용 방안
- (단일 광자원) DI-QKD 구현을 위해, Sparrow Quantum은 탁월한 품질과 효율성을 갖춘 컴팩트한 광섬유 결합형 단일 광자원 기술을 개발 중이며, 이는 표준 19인치 랙 형태의 휴대 가능한 플러그 앤 플레이 시스템으로 설계됨
- * 장점 ① (해킹 불가능한 보안) 장치가 손상되더라도 해킹이나 도청을 방지 ② (고속 데이터 전송) 결정론적 단일 광자원을 활용하여 빠르고 안전한 통신 구현 ③ (장치 독립성) 하드웨어 장치의 무결성에 의존하지 않는 보안 보장 ④ (확장성) 다양한 산업 분야에 쉽게 적용 가능

그림 2-8 • 단일 광자원 시스템



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

☐ [사례 9] 덴마크 양자 통신 인프라

최종 사용자: 덴마크 정부 양자기술 공급자: DTU - Technical University of Denmark

- 덴마크 양자 통신 인프라에 대한 필요성 및 이슈
 - (사이버 보안을 위한 양자 기술) 양자 컴퓨터의 등장으로 기존 암호화 방식이 위기에 처할 가능성에 대비하여, 양자 키 분배(QKD) 기술은 암호화 키의 안전한 공유 문제를 해결함으로써 미래 사이버 보안의 필수 요소로 자리매김
- 덴마크 양자 통신 인프라에 대한 적용 분야 및 활용 방안
 - (QCI.DK) 덴마크 양자 통신 인프라(QCI.DK)는 정부 주도 파일럿 프로젝트로, 안전한 통신을 위한 양자 키 분배(QKD) 노드(Node) 네트워크* 구축을 목표로 함
 - * 네트워크 트래픽 암호화, 가상 사설망(VPN) 등 데이터 암호화 서비스에 활용될 미래형 키 분배 시스템으로, 통신 기업 GlobalConnect가 보유한 기존 광섬유 인프라를 기반으로 운영되며, 코펜하겐 수도권 내 5개 정부 기관(데이터 센터 및 백업 센터)뿐만 아니라 오덴세까지 연결
 - (SPoF 방지) 코펜하겐 내 정부 네트워크는 높은 연결성 및 이중화를 시연하여, 다수 기관 간 양자 보안 통신을 구현하고 단일 장애 지점(SPoF) 방지를 목표로 운영됨
 - (장거리 QKD 백본 서비스) 코펜하겐과 오덴세 간 장거리 통신은 QKD의 물리적 거리 제한으로 인해 중간에 신뢰할 수 있는 노드*를 통해 키를 분배하고 다시 암호화하는 방식으로 수행되므로, 중간 노드 자체의 보안성과 신뢰성 확보가 필수적
 - (GlobalConnect 통신사) 장거리 QKD 백본 서비스는 금융 부문에서 대형 지점 간 양자 보안 통신, 그리고 의료 부문에서 병원 간 환자 데이터 통신 등에 활용 가능
 - (사후양자 공개키) QKD가 적용된 백본 인프라는 사용자가 네트워크에서 애플리케이션 수준의 사후양자(Post-quantum) 공개키 암호화를 적용할 수 있도록 하며, 이를 통해 데이터가 백본망을 지나는 동안 QKD 기반 암호 키로 보호되는 다층 암호화를 구현 가능

그림 2-9 • 덴마크 양자 통신 인프라



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

04 양자 컴퓨팅 (활용사례 10~16)

양자 컴퓨팅은 '큐비트(qubit)' 를 사용하여 중첩 및 얽힘과 같은 양자역학적 현상을 계산에 직접 활용하는 혁신적인 컴퓨팅 기술로, 다양한 방식(양자 시뮬레이터, 양자 어닐러, 게이트 기반 등)으로 빠르게 발전하고 있으며, 향후 5년 내 오류 정정이 가능한 초기 양자 컴퓨터 개발이 예상되고, 10~15년 내에는 RSA-2048 암호 체계를 단 24시간 안에 해독할 수 있는 강력한 양자 컴퓨터가 등장할 것으로 기대

[사례 10] 양자 기술과 AI를 활용한 최적 경로 계획

최종 사용자: TDC Net 양자기술 공급자: KPMG

- 양자 기술과 AI를 활용한 최적 경로 계획 시스템의 필요성 및 이슈
 - (통신망 기술자 차량 운영 관리) 통신망 회사는 많은 기술자 차량을 현장에 파견하기 때문에 효율적인 일정 및 경로 관리*가 필수
 - * 기술자의 작업 배치 및 차량 운용의 계획은 복잡성이 매우 높고 예측 불가능한 상황이 빈번하게 발생
 - (실시간 최적화 시스템) 짧은 시간 내에 최적 해법을 도출할 수 있는 실시간 최적화 시스템이 제안됨
- 양자 기술과 AI를 활용한 최적 경로 시스템의 적용 분야 및 활용 방안
 - (QIO) KPMG는 양자 기술 기반 최적화(QIO)와 인공지능(AI) 기술을 결합하여 통신망 기술자 차량 운영 관리 문제를 해결하는 2단계 솔루션을 개발했으며, 이를 통해 주행 거리 25% 이상, 기술자 대기 시간 15% 이상 절감 효과를 달성
 - ① (1단계) 작업 할당 단계로서, QIO는 작업을 이진화(Binarisation)하여 '작업장 일정 계획(Job Shop Scheduling)'을 시간기술거리 등을 고려하여 수행
 - ② (2단계) 운영연구 도구(Google Maps)를 사용하여 할당된 작업에 대해 최적 경로를 탐색*
 - * 양자 기반 하드웨어 및 소프트웨어는 작업을 기술자에게 최적 분배하는 문제를 처리하며, 고전 컴퓨터는 차량 경로 설정 작업을 담당

그림 2-10 양자기술과 AI를 활용한 차량 운영 관리 시스템

CASE OVERVIEW

- TECHNOLOGY TYPE**
Quantum computing
- BUSINESS SECTOR**
Logistics
- TIME TO MARKET**
Proof-of-concept now, timeframe to deploy in production: 1-2 years

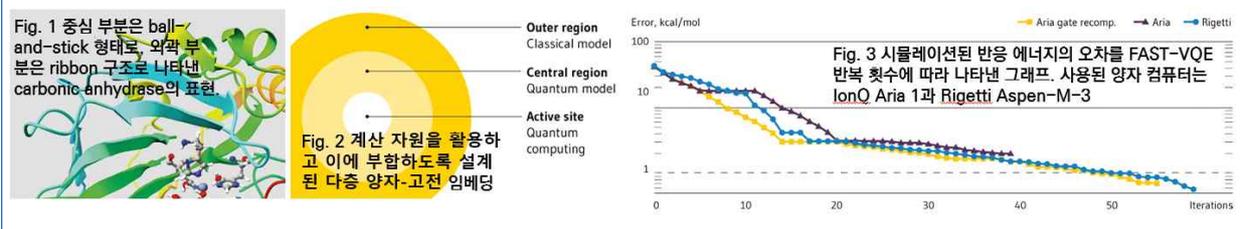
[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

[사례 11] 양자 컴퓨터를 이용한 효소 반응 시뮬레이션

최종 사용자: Novonesis 양자기술 공급자: Kvantify

- 양자 컴퓨터를 이용한 효소 반응 시뮬레이션의 필요성 및 이슈
 - (효소 연구) 효소는 생화학 반응의 촉매로 높은 특이성을 가지며, 목표 응용 분야에 적합한 효소를 식별하거나 설계하기 위해서는 반응 과정에 대한 정밀한 지식이 필수적이나, 효소의 복잡한 분자 구조로 인한 기존 계산 방식에 한계를 극복하기 위해 양자 컴퓨팅 기반 계산 기법이 필요
 - (DFT) 밀도 범함수 이론(DFT)은 전자 구조를 고전 컴퓨터에서 양자역학적으로 모델링하는데 사용되지만, 정량적으로 모델링의 정밀한 정확도(1 kcal/mol 수준)를 달성하는데 제약이 따름
- 양자 컴퓨터를 이용한 효소 반응 시뮬레이션의 적용 분야 및 활용 방안
 - (효소 반응 계산) Kvantify와 Novonesis는 최신 양자 하드웨어를 사용하여 효소(탄산탈수효소 반응, Fig. 1)의 반응 계산을 위해 양자 하드웨어를 고성능 컴퓨터 통합하여 하이브리드 양자-고전 접근법*을 수행
 - * 양자 컴퓨팅은 효소의 활성 부위를 최대한 정확하게 예측(Kvantify의 독자적인 양자 알고리즘인 FAST-VQE가 활성 부위의 파동함수 임베딩에 활용)하고, 그 외의 중심 영역은 DFT로, 외곽 영역은 고전적인 방법으로 모델링 (Fig. 2)하는데, 이를 통한 수화 반응 시뮬레이션결과는 양자-고전 접근법이 최신 양자화학기술인 CASCI의 기준값과 매우 잘 일치함을 입증
 - (FAST-VQE) Fig. 3의 수렴 그래프는 FAST-VQE(이온 트랩과 초전도 방식의 두 가지 양자 컴퓨터에서 실행)가 충분한 반복을 통해 1 kcal/mol 이하의 화학 정확도 달성이 가능함을 입증
 - (게이트 재컴파일 기술) 현재의 양자 하드웨어는 회로 깊이에 제한이 있어 반복 알고리즘의 실행에 제약이 있기 때문에 이에 대한 해결을 위해 양자 알고리즘을 가능한 가장 적은 게이트 수로 변환하는 게이트 재컴파일 기술(Gate recompilation technique)개발이 이루어짐
 - (다계층 임베딩 기법) 양자 알고리즘은 바이오 산업에 활용되어 에너지 효율적이며 친환경적인 효소 기반 공정의 개발 가속화 가능성을 열어주고, 단기적 양자-고전 하이브리드 시뮬레이션을 통해 신약 개발이나 배터리 기술 등 다양한 분야에서 기술 진보 이끌

그림 2-11 양자 컴퓨터를 이용한 효소 반응 시뮬레이션



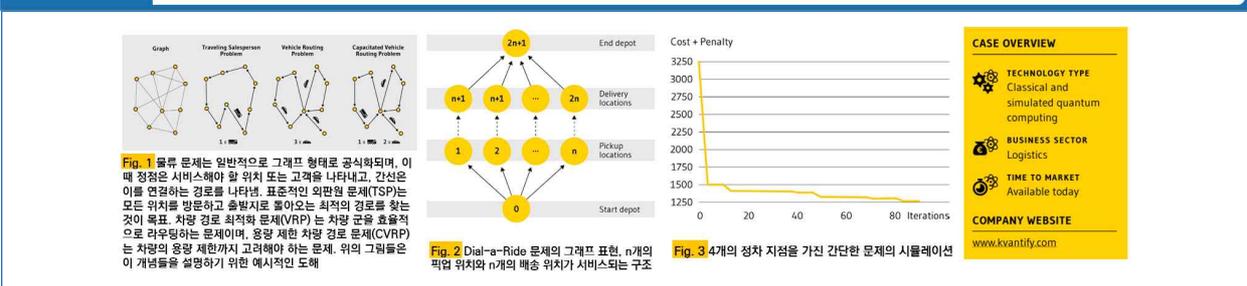
[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

[사례 12] 물류 최적화를 위한 양자 컴퓨팅 활용

최종 사용자: Frogne 양자기술 공급자: Kvantify

- 물류 최적화를 위한 양자 컴퓨팅 활용의 필요성 및 이슈
 - (물류) 글로벌 차원에서 사회를 지탱하는 핵심적인 체계로, 운송* 공급망 유지 보장이 필수적
 - * 화물가상업용 항공기·정기선 해운·기차·트럭·택시 등이 포함되고 이러한 운송 시스템은 대규모 차량 운용과 원활한 운영에 의존함
 - (물류 계획) 조합 최적화(NP-Complete 문제)로서, 휴리스틱(Heuristics) 기법을 통해 현재보다 더 나은 해를 찾는 것만으로도 충분한 경우가 많고, 양자 알고리즘이 새로운 해결책을 제공할 수 있을 것으로 기대
- 물류 최적화를 위한 양자 컴퓨팅의 적용 분야 및 활용 방안
 - (Dial-a-Ride*) 이동 시간, 거리 또는 다른 목적 함수를 최소화하는 해법 탐색을 목표로 함(Fig. 2)
 - * 차량 군이 여러 승객 또는 화물을 각기 요청된 위치에서 픽업 및 배송해야 하는 상황에서, 효율적인 경로와 일정을 계획해야 하는 문제
 - ① (첫번째 단계) 고전적인 해법으로 혼합 정수 계획 방식*을 도입하여 최대 14개의 화물 인스턴스까지는 최적 해를 구할 수 있지만, 그 이상은 휴리스틱 기법 필요
 - * 일부 변수는 연속적인 값을 가질 수 있지만, 다른 일부 변수는 반드시 정수여야 한다는 제약 조건을 가진 최적화 문제를 푸는 방식
 - ② (두번째 단계) 양자 컴퓨팅 해법으로 near-term 변분 양자 고유값 해법(VQE)을 고려할 수 있고, 이후 양자 컴퓨팅이 가능해지면 VQE와 결합된 Grover 알고리즘*이 더 효과적
 - * 정렬되지 않은 방대한 데이터베이스에서 원하는 특정 항목을 찾는 문제에 대해, 기존의 어떤 고전 알고리즘보다 이차적으로(quadratically) 빠른 속도 향상을 제공하는 대표적인 양자 알고리즘
 - (HOBO) 고차 이진 최적화(HOBO) 방식으로 인코딩된 문제에 대해 자체 개발한 코드를 사용하여 정지 지점이 4개인 경우(8큐비트 상태)를 VQE 시뮬레이션 수행 (Fig. 3).
 - (응용 확장) 조합 최적화 문제는 물류 분야를 넘어 큰 영향력과 활용 가능성을 가지는데, 현재 성능도는 낮아서 HOBO 인코딩으로는 최대 7개의 정지 지점까지만 dial-a-ride 문제를 다룰 수 있지만, 약 2033년경에는 최대 250개의 정지 지점을 처리할 수 있을 것으로 예측

그림 2-12 • 물류 최적화를 위한 양자 컴퓨팅



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

[사례 13] 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 기반 제품·공정 설계

최종 사용자: Henkel, Ciech, DLR(독일 우주항공 센터) 양자기술 공급자: MQS(Molecular Quantum Solutions)

- 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 기반 제품·공정 설계의 필요성 및 이슈
 - (기존 컴퓨팅 병목 현상) 기존 컴퓨터의 양자 화학 계산(새로운 혁신적 화학물질)은 한계를 가짐
- 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 기반 제품·공정 설계의 적용 분야 및 활용 방안
 - (열역학 및 반응성 분자 시뮬레이션) MQS는 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 엔진을 개발하여, 제형 개발과 공정 설계를 통해 실험적 연구·개발(제약·화학·촉매·재료) 시간을 90% 이상 단축
 - (제약 및 생명과학) MQS는 양자 화학과 ML/AI 모델을 결합한 Cebule* 양자 화학 엔진을 개발하여, 제약·생명과학·화학·재료 산업의 제형 개발 및 공정 설계에 적용
 - * Cebule는 제형 개발을 위한 양자 화학·기계 학습·양자 컴퓨팅을 조합한 다층적 접근 방식으로, 특정 활성 성분을 다양한 용매에 혼합할 때 용해도 및 점도의 설정 등을 계산
 - (Cebule의 핵심 구성 요소) ① QGANs* ② 양자 컴퓨터 기반 양자 화학 계산 ③ QGNNs*
 - * QGANs(Quantum Generative Adversarial Networks): 기존 GAN(생성자-판별자 경쟁 모델)에 양자 컴퓨팅 결합 시스템, 복잡한 데이터 분포(예: 분자 특성)의 분석 향상 기대. QGNNs(Quantum Graph Neural Networks): 기존 GNN(그래프 데이터 처리 모델)에 양자 컴퓨팅 원리 결합, 그래프 형태 데이터(예: 분자 구조) 내 양자적 상호작용/패턴을 효과적 포착 및 분석 정확도 향상 기대.
 - (Cebule의 양자 컴퓨터 실행) MQS의 양자 컴퓨팅 관련 특허 3개가 Cebule에 통합되어 Cebule의 여러 계산 파이프라인이 양자 컴퓨터에서 실행될 때 성능 향상 기대
 - (상업적 잠재력) MQS는 다양한 산업(바이오제약·농화학·화장품)* 분야에서 제형 개발을 진행하여 성공적인 산업화를 입증하였고, 이에 더해 유럽에 위치한 고효율 CPU-GPU-QPU(양자 처리 장치) 인프라를 기반으로 지속적인 발전을 계획

* Henkel (계면활성제 제형), Ciech (농약 제형), 독일 항공우주 센터(DLR) (물 시뮬레이션) 등

그림 2-13 양자 화학 및 양자 컴퓨팅 기반 제품·공정 설계



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

☐ [사례 14] 양자 기술 기반 AI를 활용한 백신 설계 가속화

최종 사용자: DTU Digital Biotech Lab 양자기술 공급자: ORCA Computing, power by Sparrow Quantum

- 양자 기술 기반 AI를 활용한 백신 설계의 필요성 및 이슈
 - (백신 설계) 새로운 백신 개발을 위해서는 면역 체계에 작용하는 펩타이드 설계가 중요 한데, 전통적인 방법에서는 타겟 펩타이드 설계·합성에 한계가 있어 신약 개발 속도를 저하 시킴
 - (양자 컴퓨팅 필요성) 기존의 AI 기반의 모델링은 속도와 정확성에 제약을 갖기 때문에, Jenkins 교수 팀(DTU)은 AI 기반 시스템에 양자 컴퓨팅을 도입하여, de novo 방식으로 타겟 백신형 펩타이드를 생산
- 양자 기술 기반 AI를 활용한 백신 설계의 적용 분야 및 활용 방안
 - (PT-1) 영국 기업 ORCA 컴퓨팅의 1세대 양자 컴퓨팅 시스템인 PT-1은 양자 및 고전적 컴퓨팅을 결합하여 펩타이드를 생성하는 시뮬레이션 수행 결과, 면역체계 타겟 펩타이드 설계의 속도를 향상시킨 것으로 입증
 - (PT-2) Sparrow Quantum의 첨단 광자 칩 기술이 적용된 PT-2(2024년 10월에 출시된 ORCA의 차세대 시스템)는 계산 성능을 약 4,000배 향상시키며, 실용적인 양자 응용 기술 발전에 기여할 것으로 기대
 - ※ AI-양자 컴퓨팅 통합 방식의 이점 ① 제한된 데이터 환경에서도 펩타이드 합성 및 디스커버리 속도 향상 ② 다양한 펩타이드 생성 및 효과적인 백신 후보 탐색 가능성 향상 ③ ORCA의 PT-2 시스템은 기존의 고성능 컴퓨팅(HPC) 인프라와 확장 가능한 하드웨어 통합 가능
 - (세계 보건 혁신) DTU 와 ORCA 컴퓨팅 및 Sparrow Quantum의 협업은 양자 AI를 활용한 백신 설계의 새로운 도약을 의미하며, 인공지능과 최첨단 양자 컴퓨팅 하드웨어를 결합함으로써 더 빠르고 효과적인 치료제 개발의 가능성을 열어줌

그림 2-14☐ 양자 기술 기반 AI를 활용한 백신 설계



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

■ [사례 15] 성층권 기구의 최적 운영 관리

최종 사용자: Involve 양자기술 공급자: qool

- 성층권 기구의 최적 운영 관리의 필요성 및 이슈
 - (기존 모니터링의 한계) 빠르게 변화하는 상황(산불·교통·물류·국방 작전) 모니터링에 제약
 - (위성) 특정 위치의 이미지를 일정한 간격으로만 촬영할 수 있어 데이터에 중요한 공백이 발생
 - (드론) 제한적인 범위에 비행시간이 짧기 때문에 지속적·고해상도 모니터링이 불가
 - (성층권 기구) 이탈리아 항공우주 기업인 Involve는 기존의 문제를 해결하기 위해 자율적인 성층권 기구* 군집을 활용하는 방식을 개발하여 초고해상도 이미지를 실시간으로 제공
- * (장점) 위성의 revisit time 뿐만아니라 드론의 짧은 운용 시간이 발생하지 않고, 고도 조정 및 최대 60일간 특정 위치 유지 가능
(단점) 빠른 계산을 통한 성층권 기구를 포착과 많은 수의 기구를 제어하는 연산은 기존 컴퓨터로 수행하기에 한계
- 양자 기술을 이용한 성층권 기구의 최적 운영 관리의 적용 분야 및 활용 방안
 - (양자 알고리즘 기반 솔루션) 기구 군집 관리의 최적화 문제 해결을 위해, qool은 QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) 양자 알고리즘을 활용한 솔루션 개발
 - ※ QUBO는 이진 변수(0/1 결정)를 이용하여 문제를 이차식으로 표현, 기존 컴퓨터는 물론 디지털 및 양자 어닐러에서 효율적으로 풀기에 적합하며, 이를 통해 실시간 기구 위치 최적화, 연산 시간 획기적 단축, 다수 기구의 효율적 제어가 가능
 - (qool과 Involve의 협업) 4가지 장점 ① (속도) 기존보다 10~100배 빠른 계산 ② (정확성) 최적의 솔루션 탐색 ③ (비용 절감) 약 10배 저렴한 비용으로 고해상도 모니터링 가능 ④ (검증*) 성공적인 테스트를 완료
 - * Involve의 성층권 플랫폼 Stratostats는 100회 이상의 성공적인 테스트를 완료(초기 실험에서는 양자 에뮬레이터를 활용한 테스트)하였고, qool은 2025년까지 Fujitsu의 디지털 어닐러 또는 D-Wave의 양자 어닐러를 활용한 추가 검증을 계획하고 있으며, Involve와 협력하여 Proof-of-Concept 실험도 예정
 - (지구 관측) 지구 관측의 확장성 문제를 해결하고, 실시간으로 고해상도 지도를 유지

그림 2-15 양자 기술을 이용한 성층권 기구의 최적 운영 관리



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

☐ [사례 16] 양자 최적화 기반 실시간 트레이딩

최종 사용자: Jyske Bank 양자기술 공급자: Qpurpose

- 양자 최적화 기반 실시간 트레이딩의 필요성 및 이슈
 - (실시간 트레이딩) 시장의 변화를 예측하고 특정 거래 또는 거래 집합에 내재된 리스크를 평가
 - (Jyske Bank) 실시간 트레이딩을 지원하는 도구* 개발을 위해 양자 알고리즘을 활용
 - * ① 단기 및 장기 가격 예측 도구 ② 리스크 평가 (특히 Hedging 전략 수립을 지원)하는 도구
- 양자 최적화 기반 실시간 트레이딩의 적용 분야 및 활용 방안
 - (새로운 트레이딩 도구*) 양자 알고리즘기반으로 초기에는 고성능 컴퓨팅(HPC) 환경에서 시뮬레이션을 실행하였으나, 향후에는 양자 컴퓨터에서 활용할 계획
 - * 기대 결과 ① 트레이딩의 효율성 및 정확성 향상 ② 더 정교한 실시간 시장 대응 가능 ③ 효율적인 헤지 전략을 수립하여 비용 절감 ④ 트레이딩 수익 증가 및 규제 자본 보유액 감소
 - (양자기반 대안 솔루션) 기존 금융 분석 및 리스크 평가 도구인 몬테카를로 시뮬레이션*을 대체할 방법으로 가우시안 보손 샘플링법*을 개발하여 기존보다 훨씬 빠른 연산 속도를 제공하고, 기존 방법 대비 지수적으로 빠른 속도 개선을 보임
 - * (몬테카를로 시뮬레이션) 기존에 널리 활용되는 방법으로 다양한 유형의 과거 데이터를 통계적으로 분석하여 변수 값을 추정 (가우시안 보손 샘플링) Qpurpose와 덴마크 남부대학교(SDU)가 협력하여 개발한 양자 컴퓨팅 기법(특정 확률 분포에서 샘플을 생성)으로 가우시안 가중치 적분 계산에 매우 유용하여, 금융 상품 분석 및 리스크 평가에 적절
 - ※ 양자 기반 기법을 활용하면, 단기적인 금융 변수 예측 시 기존 방식 대비 몇 베이시스 포인트(basis points) 수준으로 오차를 감소시키고 정확도를 향상 시켜서 실제 Jyske Bank의 트레이딩 수익의 증가 효과
 - (확장 가능성) Jyske Bank의 모든 자산군(asset class)에서 양자 소프트웨어를 배포하고, 더 정교한 헤지 전략을 개발하여, 향후 다양한 분야에서 활용*될 가능성이 있음
 - * ① 실시간 에너지 가격 책정 ② 연금 및 보험사의 리스크 분석 ③ 다양한 산업에서의 프로세스 최적화

그림 2-16 양자 최적화 기반 실시간 트레이딩



[출처] 16 Danish Quantum Use Cases (2024)

05 요약 및 시사점

덴마크의 양자기술 활용 사례는 다양한 산업에서 양자 기술을 적용한 혁신적 시도를 포함

표 1-2 덴마크 양자기술의 활용 사례의 분야·핵심기술·효과 요약

	활용사례	적용분야	핵심기술	효과
1	정밀한 시간 동기화	통신, 국방, 금융	원자 시계, 광섬유 기반 시간 신호 전달	나노초 수준의 시간 동기화 실현
2	MRI 영상 품질 향상	의료	양자 자기계측기(세슘 원자 기반)	자기장 불안정성 해결/MRI 영상 개선
3	양자 자이로스코프 기반 내비게이션	우주항공, 군사	레이저 냉각 원자 간섭계	정밀한 내비게이션 가능
4	GPS 성능 향상을 위한 중력장 매핑	항공, 내비게이션	양자 중력 센서(냉각 원자 간섭계)	중력장 정보를 통한 GPS 정확성 향상
5	포논 결정 공진기를 이용한 양자 센싱	반도체, 양자 컴퓨터	PMR	양자정보저장 성능 향상, 고진공 환경
6	초고속 양자 난수 생성기	사이버 보안	양자광학 기반 QRNG	양자 컴퓨터 시대의 보안 문제 해결
7	QKD기반 에너지 그리드 보안 강화	전력망 보호	CV-QKD	에너지 그리드 내 보안 강화
8	디바이스 독립형 초고보안 양자 통신	국방, 보안	DI-QKD	하드웨어 보안 취약점 제거, 해킹 방지
9	양자 통신 인프라 구축(QCI.DK)	보안 인프라	QKD 네트워크	정부 및 금융 데이터 보안 강화
10	양자 기술 및 AI 기반 최적 경로 계획	물류, 통신망 운영	QIO 및 AI 결합	차량운영 실시간 최적화 시스템
11	양자 컴퓨터기반 효소 반응 시뮬레이션	바이오, 신약 개발	하이브리드 양자-고전 시뮬레이션	효소 반응 예측 정확성 향상
12	양자 컴퓨팅 기반 물류 최적화	물류, 공급망	HOBO, VQE	물류 비용 절감, 운영 효율 극대화
13	양자 화학을 활용한 제품·공정 설계	화학, 신소재	양자 화학 및 ML/AI 결합 (Cebule)	신소재 개발 시간 단축
14	양자 AI 기반 백신 설계	바이오, 신약 개발	AI-양자 컴퓨팅 융합	백신 후보 물질 탐색 속도 향상
15	성층권 기구 운영 최적화	지구 관측, 국방	QUBO 기반 최적화	성층권 기구 운영 효율 극대화
16	양자 최적화 기반 실시간 트레이딩	금융	양자 기반 가우시안 보손 샘플링	트레이딩 수익 증대, 리스크 평가 향상

※ (1-5) 양자센싱 (6-9) 양자통신 (10-16) 양자컴퓨팅

한국에 대한 시사점

- (양자기술 인프라 구축 및 실용화 촉진) 한국 퀀텀 이니셔티브 및 양자법 기반의 현 정책과 노력*을 바탕으로, 정부와 민간 부문의 협력을 강화하고 양자 기술 실용화에 장기적 투자
 - * 양자 암호통신망 시범 구축, 양자컴퓨팅 인프라 구축, 예산 확대·신규 사업 추진, 국제 협력 활성화연구 거점 조성
- (양자 센서 기술 확보 및 상용화) 일반적으로 센싱 분야의 양자 기술 상용화가 빠를 것으로 파악되고 있어, 한국의 양자 센싱 연구*에 지속적 투자 및 지원 필요
 - * (KRISS) 다이아몬드 양자센서를 개발하여 일상 환경에서 자기장과 온도의 변화를 동시에 감지, (KIST) 분산형 양자센서를 시각 동기화초미세 압 진단·배터리 불량 측정·지진 감자·자기장 측정 등 다양한 분야에서 활용, (SK텔레콤) 양자 기반 가스센싱 시스템을 국내 최초로 실증
- (양자 기술 기반의 사이버 보안 강화) QRNG 개발* 및 QKD 기반 양자암호화 서비스 제공** 등의 연구 성과를 바탕으로 투자 확대 및 연구 협력 활성화 필요
 - * (SK텔레콤) 5x5mm 크기의 초소형 QRNG 칩을 개발하여 자율주행차·스마트폰·드론 등 다양한 IoT 기기에 적용 (한국원자력연구원/ETRI) 방사성 동위원소 니켈-63에서 나오는 베타선을 이용한 QRNG를 개발
 - ** (KT) QKD와 양자내성암호(PQC)를 결합한 하이브리드 양자암호통신을 개발하여 보안성을 향상 시키고, 또한 국가 양자 테스트베드 운영을 위한 통합 관제 플랫폼을 구축하여 다양한 양자암호통신 장비를 효율적으로 관리
- (양자 컴퓨팅과 AI 융합) 한국의 현 연구 현황*의 지속적 추진 및 오류 수정 기술과 AI 융합 개발 촉진
 - * (연세대학교) 국내 최초이자 세계에서 다섯 번째로 127큐비트급 양자컴퓨터를 도입하여 의료 분야에 활용 (KIST) 양자컴퓨팅 및 나노신경망 모사기술 개발 (ETRI) 양자기술연구분부를 설립하여 양자컴퓨팅을 통해 인공지능 컴퓨팅 성능 향상 노력 (KAIST) NbO₂의 확률적 금속-절연체 전이 현상을 이용하여 차세대 확률론적 컴퓨팅의 핵심 반도체 소자를 개발
- (양자 연구 및 스타트업 생태계 조성) 전문 인력 육성과 양자기술 스타트업 지원 및 글로벌 협력 강화를 통해 산업 경쟁력을 확보



ERHVERVSSTYRELSEN. (2024) *16 Danish Quantum Use Cases*

<https://erhvervsstyrelsen.dk/16-danish-quantum-use-cases>

Danmarks Nationale Metrologiinstitut. (2023) *UTC(DFM) On Your Device*

<https://dfm.dk/en/ntp/>

Businesswire. (2024) *Vescent Brings Optical Clocks to the Market with DFM*

<https://www.businesswire.com/news/home/20240122716582/en/Vescent-Brings-Optical-Clocks-to-the-Market-with-DFM>

University of Copenhagen. (2024) *Young Researcher Has Created a Sensor that Detects Errors in MRI Scans*

<https://science.ku.dk/english/press/news/2024/young-researcher-has-created-a-sensor-that-detects-errors-in-mri-scans>

Hans Stærkind, Kasper Jensen, Jörg H. Müller et al. (2024) *High-Field Optical Cesium Magnetometer for Magnetic Resonance Imaging*

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.5.020320>

DLR Galileo Competence Center. *QYRO - A Quantum-Based Gyroscope*

<https://www.dlr.de/en/gk/research-transfer/projects-missions/qyro>

DTU (2023) *Navigation Quantum Sensor Being Tested in Greenland*

<https://www.dtu.dk/english/newsarchive/2023/06/navigation-quantum-sensor-being-tested-in-greenland>

Christoph Reinhardt, Hossein Masalehdan, Sandy Croatto et al. (2024) *Self-Calibrating Gas Pressure Sensor with a 10-Decade Measurement Range*

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsp Photonics.3c01488>

Yannick Seis, Thibault Capelle, Eric Langman et al. (2022) *Ground State Cooling of*



an Ultracoherent Electromechanical System

<https://www.nature.com/articles/s41467-022-29115-9>

Dino Solar Nikolic, Cosmo Lupo, Runjia Zhang et al. (2023) *Multi-Gbps Quantum Randomness Source Based on Direct Detection and Vacuum States*

<https://www.arxiv.org/abs/2310.02354>

Cédric Bruynsteen, Tobias Gehring, Cosmo Lupo et al. (2023) *100-Gbit/s Integrated Quantum Random Number Generator Based on Vacuum Fluctuations*

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.4.010330>

DTU (2024) *Quantum Encryption May Secure the Danish Energy Grid*

<https://www.dtu.dk/english/newsarchive/2024/02/quantum-encryption-may-secure-the-danish-energy-grid>

Nitin Jain, Hou-Man Chin, Adnan A. E. Hajomer et al. (2024) *Future Proofing Network Encryption Technology with Continuous-variable Quantum Key Distribution*

<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-32-24-43607&id=563513>

Mujtaba Zahidy, Mikkel T. Mikkelsen, Ronny Müller et al. (2024) *Quantum Key Distribution using Deterministic Single-photon Sources over a Field-installed Fibre Link*

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00800-x>

DTU (2024) *Første Stop på Danmarks Nye Kvantesikre Linje Etableret*

<https://www.dtu.dk/nyheder/alle-nyheder/foerste-stop-paa-danmarks-nye-kvantesikre-linje-etableret?id=0ad612ff-b78d-4fc4-9527-d5daaea34b1f>



Kaur Kristijuhan, Mark Nicholas Jones (2023) *Resource Efficient Method for Representation and Measurement of Constrained Electronic Structure States with a Quantum Computer*

<https://www.arxiv.org/abs/2303.01122>

Clara F. Cores, Kaur Kristijuhan, Mark Nicholas Jones (2024) A Joint Optimization Approach of Parameterized Quantum Circuits with a Tensor Network

<https://www.arxiv.org/abs/2402.12105>

ORCA Computing (2024) *Quantum Enhanced Vaccine Design on the ORCA PT Series*

<https://orcacomputing.com/quantum-enhanced-vaccine-design-on-the-orca-pt-series/>

Involve. We Monitor Everything Moving at Human Speed

<https://drive.google.com/file/d/1KTSKwSMJdbrpur2SoMjD-wiis2cd-vN6/view>

qool. Welcome to the qool Era

<https://drive.google.com/file/d/1MAqn8SKtVmcEWgzpzcrypR3o6aSoq4rq/view>