

2022 February | Vol. 8

02



# 융합연구리뷰

Convergence Research Review

## 고전-양자 융합 머신러닝 방법론을 이용한 양자정보과학기술 연구

방정호(한국전자통신연구원 선임연구원)

## 인공지능 및 입체영상 시각화 기술을 이용한 첨단 영상유도수술(IGS, Image-Guided Surgery)

강민구(한국과학기술연구원 선임연구원)

한형섭(한국과학기술연구원 선임연구원)

# CONTENTS

- 01 편집자 주
- 03 고전-양자 융합 머신러닝 방법론을 이용한 양자정보과학기술 연구
- 25 인공지능 및 입체영상 시각화 기술을 이용한 첨단 영상유도수술(IGS, Image-Guided Surgery)



융합연구정책센터  
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review  
2022 February vol.8 no.2

발행일 2022년 2월 7일

발행인 김현우

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4977 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4785



## 고전-양자 융합 머신러닝 방법론을 이용한 양자정보과학기술 연구

양자정보과학이란 20세기 양자물리학과 정보과학이 융합되면서 생긴 분야로 양자컴퓨터 소재실험, 양자 얽힘 전송 장치 제작 등 정보이론과 양자역학을 포함한 실험적인 주제들을 연구하는 분야를 말한다. 구글과 IBM에서 개발하고 있는 양자컴퓨터가 대표적이다. 양자정보과학기술은 양자역학을 기반으로 지금까지의 디지털 정보 처리 기술의 패러다임을 변화시키는 혁신적인 기술로 큰 기대를 받고 있다.

양자정보과학 연구가 가속화됨에 따라 양자물리학과 머신러닝 이론을 융합한 양자머신러닝이 양자정보과학 부문에 새로운 연구분야의 하나로 확립되었다. 본 호 1부에서는 양자머신러닝을 활용한 연구들을 소개한다. 고전-양자 융합 머신러닝을 통한 양자알고리즘 개발에 대한 연구와 양자통신과 양자컴퓨팅에 활용되는 정보 단위인 큐비트의 상태를 정밀하게 평가하고 측정할 수 있는 머신러닝 기술에 대한 내용을 다룬다.

양자정보과학이 경제, 국가 안보, 정보통신산업 그리고 나아가 미래 과학기술 발전의 판도를 바꿀 게임 체인저로 여겨짐에 따라, 최근 양자정보과학에 대해 세계 각국은 대규모 투자와 기술개발을 하고 있다. 우리나라도 중장기적인 전략 수립과 과감한 투자를 통해 양자과학기술에서의 선도적 역할을 할 수 있기를 기대해 본다.

## 인공지능 및 입체영상 시각화 기술을 이용한 첨단 영상유도수술 (IGS, Image-Guided Surgery)

의료영상의 점진적인 발달로 3차원의 영상정보를 획득할 수 있게 되어 그동안 의사의 의학적 지식과 의료경험에만 의존하던 방식에 비해 질병을 더 정확하게 진단할 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 이를 활용한 영상유도수술이 가능해짐으로써 수술의 통증과 합병증을 줄일 수 있게 되었다. 임상철(2015) 논문에 따르면, 1993년 독일에서 212명을 대상으로 비과영역의 영상유도수술을 시행한 결과, 중앙, 과거 수술 및 출혈로 인해 외과적 표지자가 불확실한 경우 해당 수술이 유용하였으며 합병증 발생률을 2% 정도 낮추었다고 한다.

영상유도수술은 의료영상 데이터와 시각화 도구를 활용하여 수술하는 방법으로 환자의 해부학적 3D 영상자료와 환자를 일치시켜 실시간으로 수술 부위를 3D 영상으로 확인하면서 수술하는 것을 의미한다. 맨눈으로 확인하기 어려운 병변의 위치와 수술 부위를 정확하게 볼 수 있어 수술의 정확도를 높일 수 있으며 수술 시 절개부위를 최소화할 수 있고, 수술 후 합병증 발생 비율을 낮출 수 있다.

첨단 과학기술, 의료장비와 더불어 입체영상 기술의 발전은 현대 의학에 큰 변화를 일으키고 있다. 본 호 2부에서는 전통적인 의료영상을 비롯하여 인공지능 및 3D 입체영상 시각화 기술을 적용한 영상유도수술, 증강현실 기반 영상유도수술 기술 그리고 차세대 의료영상 시각화 기술의 동향을 소개한다.

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 February vol.8 no.2



# 01

## 고전-양자 융합 머신러닝 방법론을 이용한 양자정보과학기술 연구

방정호(한국전자통신연구원 선임연구원)

\*도움주신 분 : 이상민(한국표준과학연구원, 양자광학 실험전문가)

# I 서론: 머신러닝과 양자정보과학

## 1. 양자정보과학기술에의 주요 이슈

양자컴퓨터와 같은 용어는 이미 매우 대중적인 용어가 되었다. 양자정보과학이 정착되던 초창기 단계에서는 부정확한 용어의 남용이나 다소 과하게 긍정적인 기술개발 비전이 설파되는 경우도 종종 있었으나, 최근에는 전 세계적으로 양자정보에서의 연구역량 및 이해도가 크게 제고되었고 중요한 학술적 결과물들의 검증까지도 구체적으로 공개됨에 따라 일반 대중들 또한 정확하고 올바른 지식에 쉽게 접근할 수 있게 되었다. 이에, 실제로 영화나 드라마, 웹툰 등 시나리오에 양자기술은 단골 소재가 되고 있다.

양자정보과학의 본격적인 연구가 시작된 이래로 컴퓨팅, 센싱, 통신 등 전반에서 상당한 성과를 이루었다. 특히 방법론적 체계, 동작원리 및 기작 등을 이해하고자 하는 여러 가지 기반연구는 최근까지도 매우 활발히 진행되고 있고, 앞으로도 그럴 것이다. 하지만, 실제 물리계를 통한 구현, 그리고 활용 가능한 요소기술들을 패키징하는 작업 등과 관련한 문제들은 산재해 있다. 이에, 최근에는 양자정보과학에서의 범용양자컴퓨터 개발과 같은 광범위하고 장기적인 비전보다는 국소적 혹은 목적-중심형 개발지표에 중점을 둔 연구가 우선적으로 수행되어야 한다는 여론이 지배적이고<sup>1)</sup>, 집중해야 할 문제 역시 점점 더 구체화되고 있다.

첫 번째로는 최근 양자 결맞음성(Quantum Coherence)을 정밀하게 제어하고 측정하는 방법에 대한 문제 관련 논의가 활발하다. 양자 시스템은 환경과의 상호작용을 통해 곧 양자 결맞음을 잃고 고전 통계를 따르는 고전 시스템으로 퇴화된다. 이를 양자 결풀림(Quantum Decoherence)이라고 한다. 일반적으로 완벽하게 고립된 물리 시스템을 구성하는 일은 거의 불가능하다. 이에, 양자 결풀림을 극복하고 양자정보처리에 유용한 양자성을 최대한 활용하기 위해서는 정교한 양자제어기술의 발전이 필수적이다. 해당 문제는 기술적 문제임과 동시에 원리적 문제이기도 하기 때문에 해결이 쉽지 않다.

두 번째로는 새로운 양자알고리즘의 부재 또한 양자제어기술 발전과 더불어 시급한 문제들 중 하나이다. 즉, 획기적이고 유용한 양자제어 등의 기술개발과 더불어 양자컴퓨팅 등과 같은 기술들이 완성된다 하더라도, 이를 적용하기 위한 새로운 양자알고리즘(혹은 유용한 양자 프로토콜) 등이 존재하지 않으면, 기술 발전 또한

1) 구글 머신을 비롯해 최근 등장하고 있는 양자우월성 연구에서의 대부분 성공은 해당 맥락에서의 연구결과로 이해할 수 있겠다.

무의미하다고 볼 수 있다. 안타깝게도 현재까지는 알려진 몇 개의 유용한 양자알고리즘을 제외하고 최근까지 획기적이고 새로운 형태의 양자알고리즘은 개발되고 있지 못한 실정이다. 이는 대체적으로 새로운 양자알고리즘 개발이 새로운 핵심적 연산 모듈 개발보다는, 기존에 알려진 유용한 양자연산 및 그와 같은 연산 모듈<sup>2)</sup>의 구조적 특성을 활용하는데 주로 의존하고 있기 때문이다.

앞서 기술한 양자정보과학기술에서의 문제들을 해결하기 어려운 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선, 유용하다고 판단되는 양자효과를 적극 활용하기 위해서는 양자이론에 대한 심도 깊은 이해가 필요한데, 양자이론 자체가 난해하고 복잡하다. 다음으로, 접근방식이 매우 제한적이다. 현재까지는 기존의 유용한 양자연산의 구조적 특성을 활용하여 제어/측정 대상의 파라미터를 최적화하고, 적용 가능한 문제들을 탐색하여 양자이득을 계산해보는 방식이 대부분이다. 따라서 연구 방법론을 조금 더 다양화하고자 하는 시도가 필요하다.

## 2. 양자머신러닝

머신러닝은 데이터의 분류 및 가공은 물론 보다 진화한 방법론 형태(AI 등)로 고차원적 지식체계 구축까지 다양한 형태의 응용이 가능하다. 특히, 딥러닝 혹은 강화학습 등과 같은 연구테마는 물리, 화학 등 과학기술 영역 전반에 접목되어 큰 파장을 불러일으키고 있다. 이에, 머신러닝과 양자물리학이론을 융합하고자 하는, 이른바 ‘양자머신러닝’ 연구가 최근 매우 활발히 진행되고 있다(그림 1).



\*출처: 방정호, 유석원, 이진형(2013)

2) 예를 들어, 양자 푸리에 변환(quantum Fourier transform) 혹은 질의(query) 오라클 기반의 양자진폭증폭(quantum amplitude amplification)과 같은 양자연산 구조

현재 양자머신러닝은 양자정보과학 내 서브분야로 확립된 상황이다. 특히, 양자머신러닝은 양자컴퓨팅/알고리즘 연구 전반에 새로운 키워드를 제공하는 등 뜨거운 감자로 급부상하고 있다[1].

양자머신러닝 자체적으로 중요한 연구주제는, 머신러닝의 기반이론을 양자물리학 영역으로 확대함으로써 기존의 고전학습대비<sup>3)</sup> 의미있는 속도향상(즉, 양자 속도향상)을 얻을 수 있을지, 또 그것이 가능하다면 어떤 물리작업으로 이를 설명할 수 있는지 등이다[1]. 반면, 대상 양자시스템의 제어/측정 등에 진보된 머신러닝 기술을 활용하고자 하는 연구도 함께 진행되고 있다[2]. 이 같은 형태의 연구는 분명 ‘제어/측정 대상인 양자시스템이 다루는 문제에 대한 선행지식 없이 머신러닝을 통해 스스로 원하는 작업을 수행하자’와 같은 직관에 착안된 것임이 분명하다. 또한, 구성된 시스템은 이미 그 자체로 양자시스템이자 유용한 양자연산이므로 대상 시스템의 머신러닝 과정에서 알려진(혹은 알려지지 않은) 양자효과를 자연스럽게 활용할 수 있을 것으로 기대되었다. 이에, 고전(즉, 머신러닝 알고리즘 및 소프트웨어) 그리고 양자(즉, 제어/측정 대상으로서의 양자시스템)를 융합한 형태의 일종의 통합머신 개념으로써의 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[3].

융합연구리뷰에서는 앞서 기술한 ‘새로운 양자알고리즘의 부재’ 및 ‘머신러닝을 활용한 양자계 제어/측정’ 측면에서의 연구현안을 염두에 두고, 최근 저자가 수행한 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터를 이용한 양자알고리즘의 자동설계[3] 및 미지(unknown) 큐비트상태의 정밀추정 관련 연구[4, 5]에 대해 리뷰해 보고자 한다.

본문에서는 먼저, 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터의 기본모형을 구성하고, 이를 Deutsch-Jozsa(DJ) 작업에 적용하는 문제를 다루었다. 특히, 설계된 기본 모형이 해당 문제를 해결하는 양자알고리즘을 사전정보 없이 학습 가능한지 여부와 학습 효율성 여부를 조사하였다. 해당 연구를 통해 얻은 중요한 직관은, 주어진 문제해결을 위한 학습대상 양자알고리즘의 양자속도향상이 학습에서의 속도향상으로 이어질 수 있다는 점이다.

다음으로, 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터의 기본 아키텍처에 기반하여 미지의 순수양자상태 추정에 대한 내용을 다루었다. 기본적으로 미지의 양자상태를 추정 혹은 특정하기 위해서 양자상태 단층분석(Quantum State Tomography) 방법론이 주로 사용된다. 하지만 해당 기법은 (양자상태)자원수 대비 정확도 측면에서의 효율한계가 존재한다. 이에, 이론 한계치, 즉  $O(1/N)$ 에 가까운 자원효율성<sup>4)</sup>을 갖는 양자계 제어/측정 방법론 개발을 위한 연구가 최근 활발하다. 특히, 소규모 측정결과를 지속적으로 갱신하여 최종 결과에 이르도록 하는, 이른바 순차적응 알고리즘(Adaptive Algorithm)에 대한 관심이 증대되고 있다. 하지만, 이 역시 비교적

3) “고전(classical)”이라는 단어는 “양자(quantum)”라는 단어와 대비시키기 위함임을 분명히 한다. 기반이론이 양자정보과학의 등장 이전/이후 등의 구분을 위한 목적으로만 사용한다.

4)  $O(1/N)$ 의 표현은 양자상태 추정에서의 평균 양자 부정도(infidelity) 스케일을 의미하고, N은 측정에 사용되는 총 샘플 수이다.

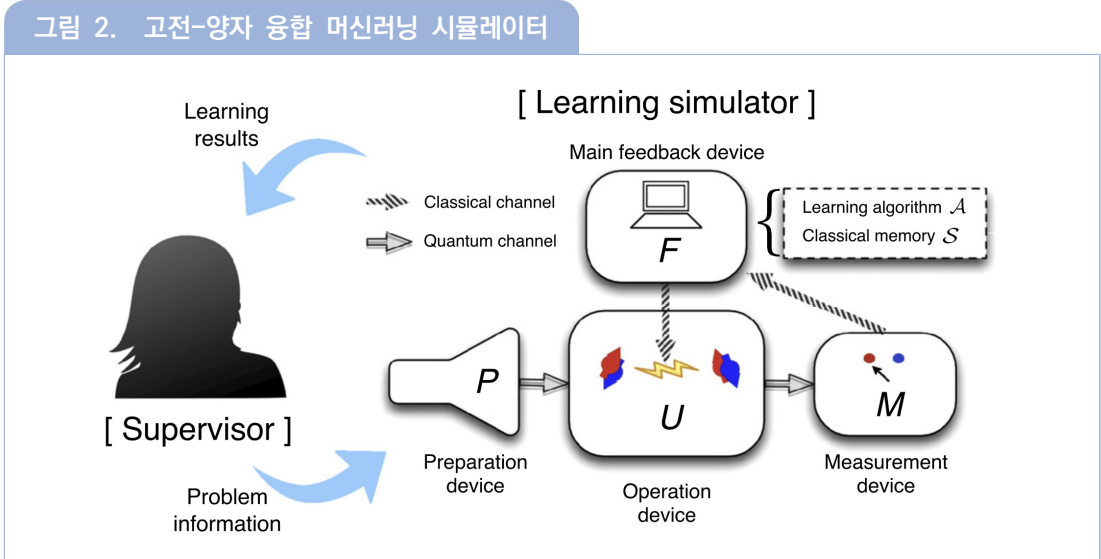


많은 데이터(측정결과)들을 지속적으로 갱신해야 하며, 시간소요가 많은 (고전)최적화 과정이 요구되는 등 구현 측면에서 난이도가 큰 편이다. 이러한 상황을 개선하고자, 최근 국내 연구진들은 단일측정기반 학습 알고리즘(SSML, Single-Shot Measurement and Learning)을 개발/활용하여, 미지(unknown)의 큐빗상태를 추정(혹은 재생성)하는 새로운 방법론을 제시하였다[4, 5]. 제시된 방법론의 동작여부 및 특성은 광자편광기반 양자광학계 기반 검증실험을 통해 분석되었다.

## II 고전-양자 융합 머신러닝을 통한 양자알고리즘 개발

### 1. 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터

서론에서 기술한 양자시스템의 (자동)제어/측정을 위한 시스템은 구조적으로는 양자정보처리 및 머신러닝 과정을 결합한 형태로 구상할 수 있겠다. 양자정보처리는 기본적으로 준비(Preparation), 연산(Operation), 그리고 측정(Measurement), 이렇게 세 요소들로 이루어진다. 준비요소는 대상 양자시스템이 어떤 기준이 되는 초기상태에 있도록 준비하는 것을 의미하고, 양자연산은 전달된 양자시스템이 원하는 양자상태로 변환될 수 있도록 제어하는 과정을 포함한다. 일반적으로는 유니타리(Unitary) 변환을 의미하며, 기본연산자들로 집합구성이 가능하다. 마지막으로, 측정을 수행함으로써 최종 결과를 얻는다. 이에, '준비-연산-측정'의 세 요소들은 머신러닝의 실행요소에 속하고 이들 과정의 조작 변수 및 그 값들은 머신러닝의 지식베이스에 속한다. 여기에서, 이와 같은 개념으로 정의된 고전-양자 융합 학습머신의 기본모형 구성을 위해서 학습요소(Learning)를 추가한다(그림 2). 학습요소는 머신러닝을 위한 학습알고리즘(A)과 지식베이스에 해당하는 데이터들을 저장할 고전메모리(S)로 구성되어 있다. 학습요소는 측정 후 목적하는 결과를 얻을 때까지 다른 장치들, 특히 연산요소를 갱신한다. 따라서, 본 연구에서 구성하고자 하는 학습 머신 기본모형은 다음과 같다: (1) 수행자(Supervisor)는 원하는 작업을 위한 학습조건 및 정보를 제공한다. (2) 학습조건 및 정보에 따라, 준비요소는 적합한 초기상태를 준비한다. 준비된 초기상태는 연산요소를 거쳐 측정요소에 의해 측정된다. (3) 양자 측정 이후 그 결과는 바로 양자학습요소로 전송되고 머신러닝이 이루어진다. 이 과정에서 양자학습요소는 연산요소를 개선한다.



\*출처: Bang et al.(2014)

연산요소는  $SU(d)$  유니타리 연산으로 표현 가능하다(여기서  $d$ 는 힐버트 공간의 차원). 일반적인 수학적 표현으로는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U(a) = e^{-ia \cdot G}$$

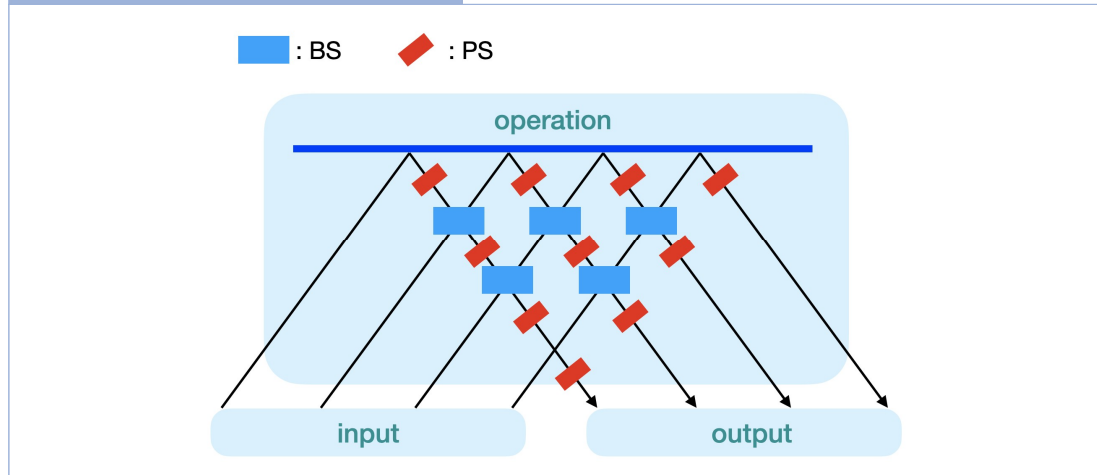
여기에서 벡터  $a$ 는  $d^2 - 1$ 개의 변수<sup>5)</sup>들을 갖는 실수벡터로 표현 가능하며 양자연산요소의 실제 물리계의 제어변수에 대응한다. 이를 종종 결맞음 벡터(Coherence Vector)라고 부른다.  $G$ 는  $SU(d)$  그룹 생성자(Generator)로써 시스템에 따라 정의되는 고정된 장비에 해당한다. 실제 머신러닝 과정에서는 시스템은  $a$ 를 제어하며 머신러닝을 수행한다.

앞서 기술한 연산요소의 변수들은 실제 양자물리계의 제어변수들로 대응 가능하다. 예를 들어, 양자광학기반 간섭계를 생각해보자. 쉬운 예로, 광경로 기반의  $d=4$  힐버트 공간에서의 양자연산을 생각해 볼 수 있겠다. 이때, 빔살 가르개(BS, Beam Splitter)와 위상 변환기(PS, Phase Shifter)를 이용할 수 있다. 이때, 6개의 BS, 10개의 PS를 이용하여 총 16개의 제어변수를 조작하여 양자연산을 구성/조작 가능하다<sup>6)</sup>.

5)  $d^2 - 1$ 은 Bloch 벡터 차원을 의미한다. 즉, 단일 큐비트의 경우  $d=2$ 이고, Bloch 벡터 차원은  $2^2 - 1 = 3$ 으로 3개의 그룹 생성자와 3개의 coherent 벡터 성분을 갖는다.

6) 조작 변수가  $d^2 - 1 = 15$ 보다 한 개 많은 이유는  $\hat{U}_1$ 이  $SU(d)$ 가 아닌  $U(d)$ 의 연산으로 global 위상을 포함하고 있기 때문이다.

그림 3. 광경로 기반 양자연산구현



\*출처: 저자 작성

## 2. 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터를 이용한 Deutsch-Jozsa 알고리즘 학습

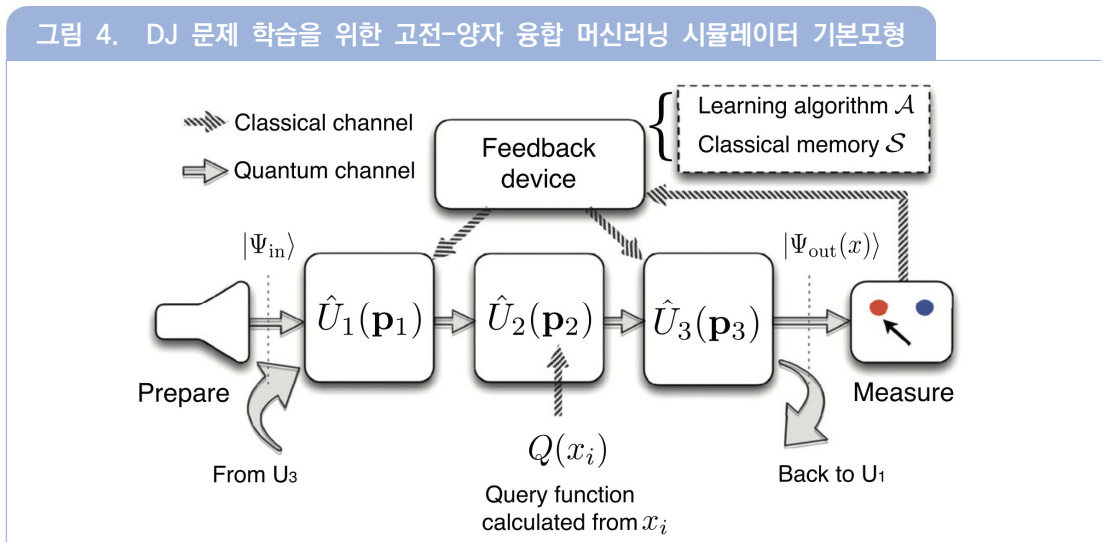
본 연구에서 앞서 디자인한 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터가 실제 동작하는지, 또 얼마나 효율적인지 등을 분석하기 위해 ‘Deutsch-Jozsa(DJ) 문제’ (혹은, 보다 일반적인 용어로, ‘n-비트 오라클 결정문제’)를 다루었다.

DJ 문제는 주어진 이진(binary) 함수를 판별하는 문제이다. 먼저, 다음과 같은 이진함수를 생각해 보자.

$$f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}.$$

여기에서, DJ 문제는  $f$ 가 “상수함수(constant)” 혹은 “균형함수(balanced)”인지 판별하는 문제이다. 상수함수는 모든 입력값에 대해 “0” 또는 “1” 중 오직 하나의 출력값으로 정의되는 함수이고, 균형함수는 절반의 입력값에 대해서는 “0” 그리고 나머지 절반의 입력값에 대해서는 “1”의 출력값을 주는 함수로 정의된다. 이 같은 함수판별 문제는 잠음신호의 판별 및 오류보정 등에 활용되는 중요한 문제이다. 일반적으로는 DJ 문제를 해결하기 위해 총  $2^{n-1}$  번의 입력/출력의 평가과정이 소요된다. 즉,  $O(2^n)$ 의 오라클-질의 복잡도를 가진다. 하지만, 양자효과를 활용할 경우 해당 문제는 단 한번의 입출력 평가로 주어진 함수를 판별 가능하다. 해당 양자알고리즘을 Deutsch-Jozsa 알고리즘이라고 한다.

이제, 고전-양자 융합 학습 시뮬레이터에 기반한 기초학습 모델(그림 4)이 DJ 알고리즘을 학습할 수 있는지에 대해 조사해 보고자 한다. 우선, 입력-목적 관계쌍 집합,  $T = \{(x_i, y)\}$ 를 구성한다. 여기에서, 입력 정보에 해당하는  $x_i$  들은 모두 주어진  $n$ 비트 입력에 대해 존재 가능한 이진함수들이며, 목적 정보에 해당하는  $y$ 는 'c'와 'b', 즉 각각 '상수함수'와 '균형함수'를 의미한다.

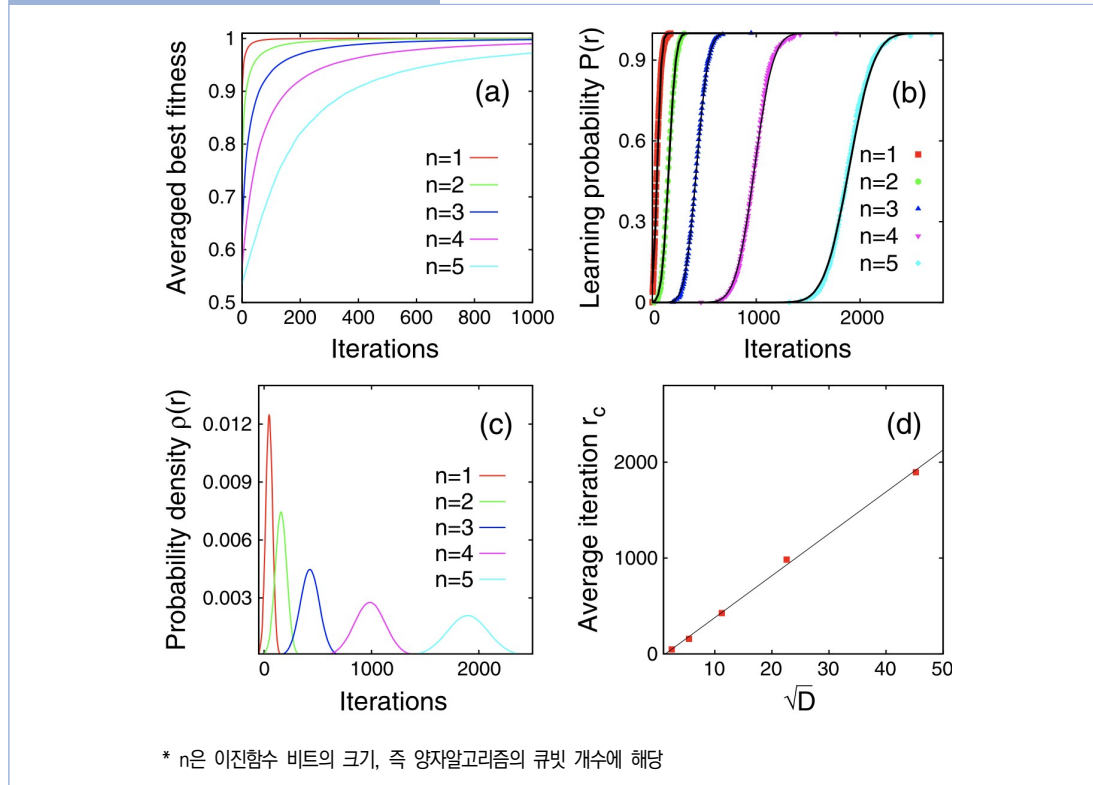


\*출처: Bang et al.(2014)

이때,  $\hat{U}_1, \hat{U}_3$ 는 학습 대상인 조작 가능한 양자 연산자이다.  $\hat{U}_2$ 는  $\hat{U}_f$ 와 동일하지만, 입력 정보에 해당하는 함수  $x_i$ 를 전달받아 그에 맞는 양자 연산을 수행한다. 여기에서 제어 변수의 개수  $D$ 는  $\hat{U}_1, \hat{U}_3$ 에 각각  $d^2 - 1$ 개로 총  $2(d^2 - 1)$ 이다. 즉,  $2(d^2 - 1)$ 차원 벡터 공간에서의 최적화 문제이다.

DJ 문제를 해결하는 양자알고리즘을 학습하는 고전-양자 융합 머신러닝 시뮬레이터의 동작과 관련하여 관심을 갖는 부분은 크게 다음의 세 가지로 요약할 수 있다. 즉, '학습은 어떤 경우든 종료될 수 있는가?', '양자 학습이 완료된 후 확인된 양자알고리즘은 신뢰할 수 있는가?', '고전-양자 융합 시뮬레이터의 학습은 기존 (고전)학습 대비 효과적인가?'이다. 이 질문들은 각각 '안정성', '신뢰성' 그리고 '효율성'과 같은 특성들과 관련이 있다. 이와 같은 질문들에 답하기 위해, 전산모사를 수행하였다. 전산모사 결과, 양자 학습 기계는 모두 유한한 시간 내에 양자 학습을 완료하였으며, 수립된 양자 연산들은 원래의 DJ 알고리즘과 형태는 다소 다르지만, 정확히 동일하게 동작하는 알고리즘으로 분석되었다. 이와 같은 전산모사의 결과들을 (그림 5)에 요약하여 나타내었다.

그림 5. DJ 문제 학습 전산모사



\*출처: Bang et al.(2014)

위 <그림 5>로 요약된 전산모사 결과와 함께 양자 학습의 동작 특성을 하나하나 분석해 보자. 먼저, <그림 5(a)>에서 문제 사이즈  $n$ 에 대하여, 학습이 진행되어감에 따라 최적화 수치인 적합도(fitness)값이 증가함을 볼 수 있다. 여기에서 적합도는 학습 과정에서 <그림 4>의 학습대상 연산들이 DJ 문제 해결을 위한 알고리즘으로써 얼마나 적합한지에 대해 0부터 최대 1(전부 구별해 냄, 즉, 시뮬레이터는 DJ 알고리즘에 해당함)까지의 수치로 정의되었다. 보다 구체적으로, 주어진  $T$ 에 대해 얼마나 상수함수와 균형함수를 잘 구분해 내는지에 대한 성공 빈도수로 정의되었다. 문제 사이즈  $n$ 이 증가함에 따라, 적합도 값은 최대값인 1로 수렴함에 주목하자.

<그림 5(b)>는 학습 수행의 반복 횟수에 따른 학습 확률(Learning Probability),  $P(n)$ 를 나타내었다. 학습 확률 총 학습 반복회수(iteration) 내에 학습이 완료될 확률을 나타낸다. 이는 학습이 완료될 때까지의 전산모사를 총  $N$ 회 시행한 후, 해당 반복회수 내에 완료된 전산모사 수에 대한 누적분포로 구할 수 있다. 어느 경우여라도 학습 확률  $P(n)$ 는 1에 수렴함에 주목하자. 이는 곧 (적어도 DJ 문제를 해결하기 위한)

고전-양자 융합 시뮬레이터는 안정적으로 동작하고 있음을 뜻한다. 이론적으로 추출한 분석 함수를 바탕으로 각 문제 사이즈  $n$ 에 따른 평균 학습 수렴시간을 추정할 수 있다. <그림 5(c)>에 평균 학습시간 추정을 위한 가우시안 함수를 각  $n$ 에 대해 표시하였다.

이제, 고전-양자 융합 시뮬레이터의 수렴도 및 학습효율을 알아볼 수 있다. 여기에서,  $r_c$ 는 학습이 수렴하기까지의 평균 반복회수에 해당하고 이를 '동작 특성 상수'로 정의하자.  $D$ 는 제어변수의 총 개수를 의미한다(즉, 탐색공간의 차원에 해당한다). 따라서 동작 특성 상수  $r_c$ 의 값은 평균 수렴 난이도에 해당하며, 이 값은 당연히도 제어 변수의 총 개수, 같은 의미로, 탐색공간의 차원과 관계가 있다. 위의 <그림 5(d)>에 DJ 알고리즘의 학습을 위한 양자 학습 기계의 동작 특성 상수 추정 그래프가 나타나 있다. 일반적인 경우, 주어진 제어변수의 총 수  $D$  대비 학습시간은 지수함수적으로 증가하는 반면, 해당 작업의 경우 대략 제곱근(Square Root) 정도의 증가를 보인다. 이와 같은 비약적 학습 속도 향상은 발견된 양자 알고리즘의 학습 속도 향상에 기인한다. 이는 본 연구에서 제안된 형태의 양자학습기계의 학습대상, 즉 양자연산요소가 다양한 양자효과를 스스로 다룰 수 있기 때문에 가능하다고 볼 수 있겠다. 해당 결과는, 새로운 양자 알고리즘의 개발이라는 응용 측면과 더불어, 양자연산요소의 양자성이 주는 장점을 다시한번 확인할 수 있다는 점에서 중요하다.

## III 단일측정 기반 머신러닝 방식을 이용한 큐비트(순수)상태 정밀추정

### 1. 단일측정기반 학습 알고리즘

머신러닝 과정은 기본적으로 되먹임(feedback) 방식으로 이루어진다고 가정한다. 되먹임 방식을 통해 학습요소는 (양자)측정결과를 평가하고 그 결과로부터 적절하게 연산요소의 제어변수를 조작한다. 이와 같은 머신러닝 과정을 위해서는 다음 조건이 만족되어야 할 것이다.

- 정밀한 측정기술
- 되먹임을 통한 조작변수 제어
- 제어변수의 갱신을 위한 학습 알고리즘

이중 학습 알고리즘에 따라 머신러닝 과정의 수렴 및 효율성이 결정된다. 기존의 머신러닝에서 사용하는 여러 가지 형태의 학습 알고리즘은 대개 출력 및 목적 신호와의 동기화를 통한 이른바 ‘오차함수의 최소화 과정’이라고 이해할 수도 있겠다. 이때, 보편적인 가정은 ‘측정을 통해 출력값을 그대로 파악할 수 있다’는 것이다.

이러한 학습 방법론은 머신러닝 시뮬레이터에 그대로 사용할 수 없다. 이는 학습 대상으로 채택된 물리계가 양자 법칙을 따르고 있기 때문이다. 고전 물리학과 양자 물리학의 가장 큰 차이는 측정의 역할에 있다. 고전 물리학에서 측정은 물리계가 갖고 있는 물리량을 상태 변화 없이 수행될 수 있어서, 위의 학습 알고리즘을 사용할 수 있다. 하지만, 양자 물리학에서 측정은 양자 상태가 붕괴(collapse)되는 비가역적(irreversible) 변화를 동반한다. 따라서 측정 전의 양자 신호인 양자 상태가 무엇이었는지를 알 수 없기 때문에 고전 학습론을 양자 학습에 적용하는 것은 원리적으로 불가능하고 새로운 학습 알고리즘이 필요하다.

머신러닝 작업을 구현하기 위해 단일측정기반 학습 알고리즘(SSML, Single-Shot Measurement Learning)을 개발/활용하였다. SSML은 유한공간 고전 메모리를 활용한다. 구체적으로, 메모리는  $N$ -비트의 저장공간을 가지며 반복적 학습 수행에서 “성공” 혹은 “실패” 형태로 단일 양자측정 결과를 저장한다. 해당 메모리의



사이즈가 유한하기 때문에 지난 데이터들은 최신의 데이터로 머신러닝이 수행되는 동안 지속적으로 갱신된다. 제어변수, 즉 벡터  $a$ 의 갱신규칙은 구체적으로 다음과 같다.

$$a \leftarrow a + \frac{N_F}{N} r$$

여기서  $N_F$ 는 고전 메모리에 저장된 총 “실패”의 수에 해당하고,  $r$ 은 무작위 변수로 이루어진 벡터이다. 이 같은 갱신률은 다음과 같은 의미로 이해될 수 있다. 즉, 실패에 해당하는 측정결과 비중이 클수록, 더 큰 정도의 제어변수 변화를 부여한다. 여기에서, 무작위 변수  $r$ 의 사용에 주목할 필요가 있는데, 이는 조작변수의 갱신에 그 어떤 사전정보도 활용되지 않는다는 것을 의미한다. 이는 머신러닝이 가지는 가장 큰 특성 중 하나이다. 학습은 고전 메모리의 크기  $M_H$ 의 모든 공간에 “성공” 데이터로 채워질 경우 완료된다. 이를 종료조건 (Halting Condition)으로 정의한다. 따라서, 학습이 완료되었을 때, 학습 및 작업의 정확도는  $M_H$ 의 사이즈에 비례한다. 하지만,  $M_H$ 의 사이즈가 클 경우, 종료조건을 만족시키고 학습을 완료하기가 더 어려워진다. 즉, 학습을 완료하기까지의 시간이 오래 걸린다. 이와 같은 학습에의 정확도 및 완료시간 사이의 트레이드 오프 (tradeoff) 조건을 염두에 두고,  $M_H$ 의 사전 설정이 가능하다.

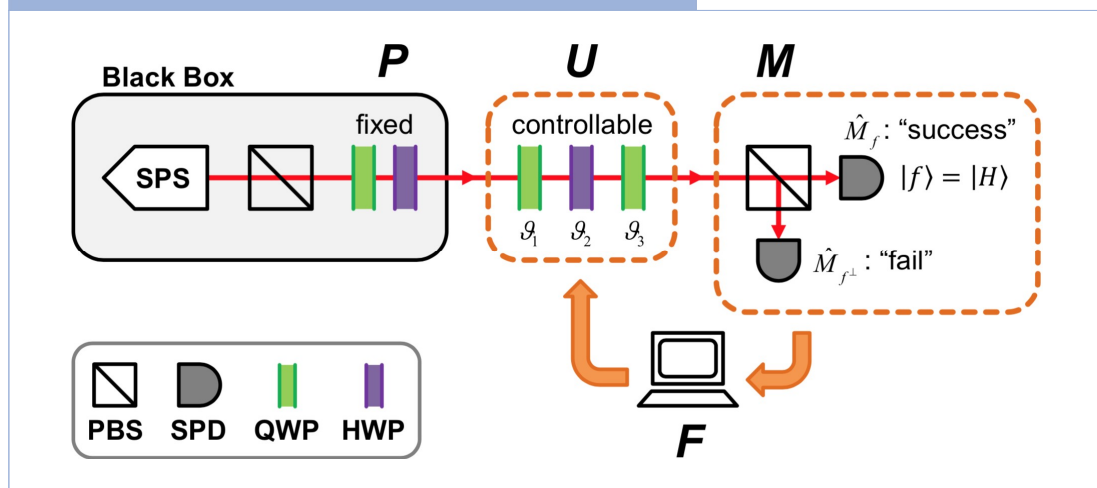
## 2. SSML기반 고전-양자 학습머신을 이용한 미지(unknown) 양자상태 정밀추정

앞서 기술한 고전-양자 학습머신을 미지의 양자상태 추정을 목적으로 활용하고자 한다면 우선, 문제구성은 다음과 같다. 미지 양자상태  $|\psi\rangle$ 가 주어진다고 가정하자. 즉, 양자상태 준비요소는 사전에 주어진다고 가정한다. 이때, 이 양자상태 준비요소에 대한 정보는 알 수 없다. 이 사실은 상태  $|\psi\rangle$ 에 대한 정보가 전혀 없다는 사실과 동치이다. 이때,  $|\psi\rangle$ 의 정보(혹은 다른 표현으로, 가정한 준비요소의 모든 정보)를 최소한 적은 리소스를 사용해 높은 정확도로 추정하는 것이 최종 목표이다. 이와 같은 문제에서 학습머신의 활용 아이디어는 매우 간단하다. 즉, (1) 주어진 미지의(unknown) 상태  $|\psi\rangle$ 를 잘 아는(known) 특정 상태, 이를테면  $|0\rangle$ , 으로 변환하는  $U$ 를 학습한다. (2) 학습이 완료되면,  $U|\psi\rangle = |0\rangle$ 의 관계가 보장된다. 따라서, 학습이 완료된 시점에서 미지의(unknown) 상태  $|\psi\rangle$ 를 아는(known)  $\{U, |0\rangle\}$  정보를 통해 다음과 같이 알아낼 수 있다:

$$|\psi\rangle = U^\dagger |0\rangle$$

앞서 기술한 SSML의 동작특성 분석을 위해 실제 광학계 구현을 염두에 두고, 전산모사를 수행하였다. 이를 위해, SSML을 통한 양자상태 추정 문제를 구성하고, 사용되는 리소스, 즉 최종 학습결과를 특정하기 위한 총 시간, 대비 결과의 정확성에 대한 분석을 시도하였다. 기본적으로 목적 상태는 큐비트의 순수상태로 가정하였다.

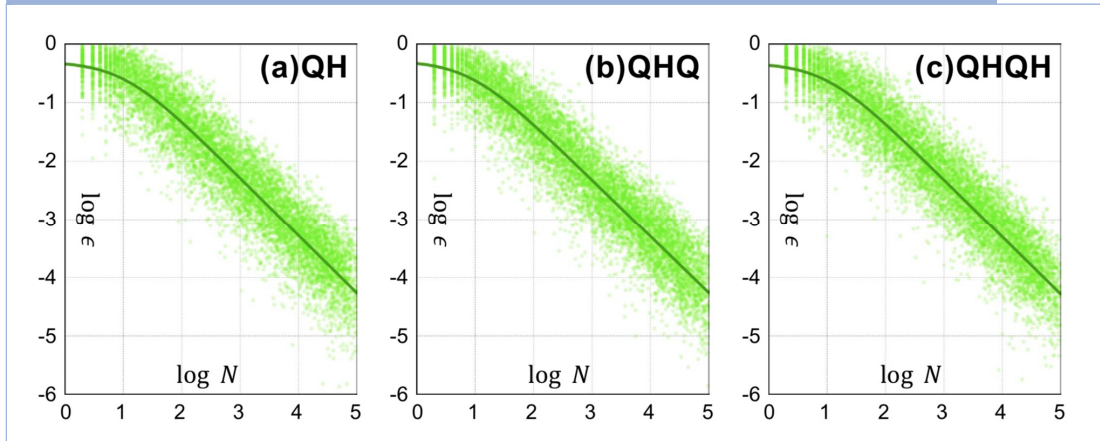
그림 6. 단일측정기반 학습(SSML) 광학계 구현 개념도



\* 출처: 저자 작성

본격적인 큐비트상태 추정에 앞서, 먼저 U를 구성하기 위한 파장판(WP, Wave-Plate)들의 개수에 따른 학습결과 양상을 조사하였다. 일반적으로 큐비트상태 추정을 위한 조작변수 WP는 3개로 적합하지만(즉, Quarter WP - Half WP - Quarter WP) 조작 오류에의 민감도 등의 특성을 조사하기 위해 (a) QH(2개 조작변수), (b) QHQ(3개 조작변수), (c) QHQH(4개 조작변수) 조합에 따른 학습 성능을 비교하였다. 결과는 <그림7>에 나타나 있다.

그림 7. WP조합에 따른 리소스( $\times 10^4$ ) 대비 학습정확도 비교/분석 전산모사 결과:  
(a) QH, (b) QHQ, (c) QHQH



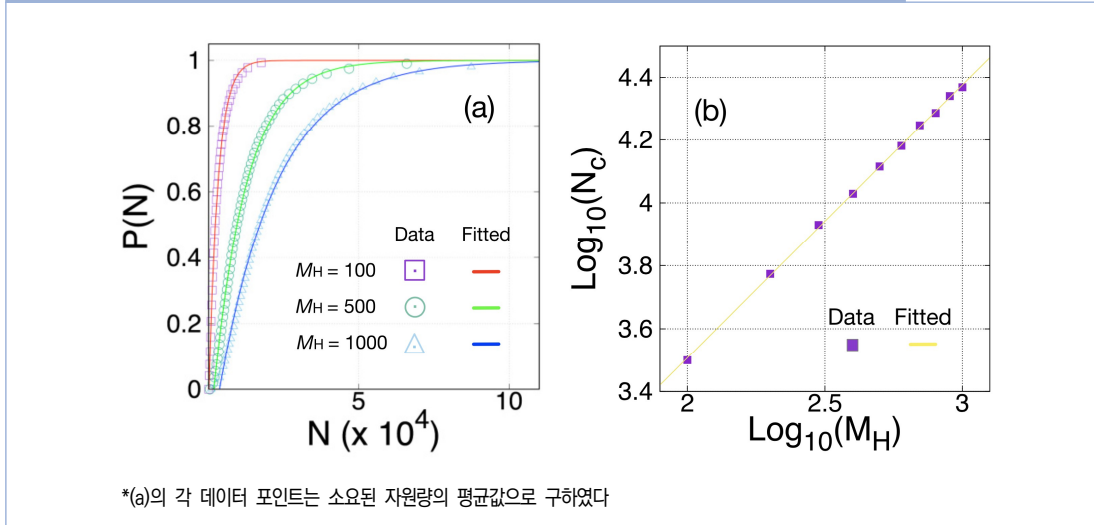
\*출처: 저자 작성

전산모사 결과, 세 경우 모두 최적화된 형태의 리소스 대비 정확도를 얻는 것이 가능했다. 하지만, 실제 실험의 경우 QH 조합으로는 일반적인 형태의 모든 경우에서의 학습이 불가능하고, QHQH 조합의 경우 조작오류에 대한 민감도가 더 심하게 축적됨을 관측할 수 있었다. 하여, QHQ의 최소 조합이 적합함을 유추하였다. 이 같은 결과는 이론 분석과도 일치한다.

다음으로, 보다 일반적인 분석을 위해 다수 학습시행의 누적분포로 정의된 학습 확률(Learning Probability)을 분석하였다. 앞서 언급했듯이, 학습 확률은 임의로 주어진 목적상태에 대해 사용한 리소스(혹은 시간) 내에 학습이 완료될 확률로 정의되었다. 따라서 평균 학습시간이 정규분포를 따른다고 가정할 때<sup>7)</sup>, 학습이 완료되기까지의 평균 리소스 혹은 학습시간을 구하는 것이 가능하다. 전산모사에서는 학습 종료조건을 위한 고전 메모리의 사이즈  $M_H=100, 500, 1000$ 에 대해 각각 학습확률을 분석하였다(그림 8(a)). 전산모사 결과, 데이터는  $1 - e^{-n/n_c}$  와 일치함을 알 수 있다. 이는 평균적으로 학습이 '지수함수'의 속도로 1에 접근한다는 것을 의미한다. <그림8(b)>에는 학습이 완료되기까지 소요되는 평균 자원량( $n_c$ )과 고전 메모리  $M_H$ 사이의 관계를 나타내었다.

7) 실제로는 가정이 아니라 이론적으로 이를 증명 가능하다

그림 8. (a)  $M_H=100, 500, 1000$ 에 따른 학습 확률  $P(N)$  전산모사 결과, (b)  $M_H$ 에 따른 평균 자원소요량 그래프



\*출처: Lee et al.(2018)

그림 9. 앞서 얻은 학습 확률을 통해 분석한 평균 리소스(학습시간) 결과

Halting condition $M_H$	$N_c (\bar{N}_{\text{data}})$	Halting condition $M_H$	$N_c (\bar{N}_{\text{data}})$
100	$\approx 3158 (\approx 3354)$	600	$\approx 15162 (\approx 15240)$
200	$\approx 5942 (\approx 6096)$	700	$\approx 17657 (\approx 17777)$
300	$\approx 8513 (\approx 8780)$	800	$\approx 19327 (\approx 19464)$
400	$\approx 10692 (\approx 10951)$	900	$\approx 21915 (\approx 22112)$
500	$\approx 13037 (\approx 13255)$	1000	$\approx 23377 (\approx 23381)$

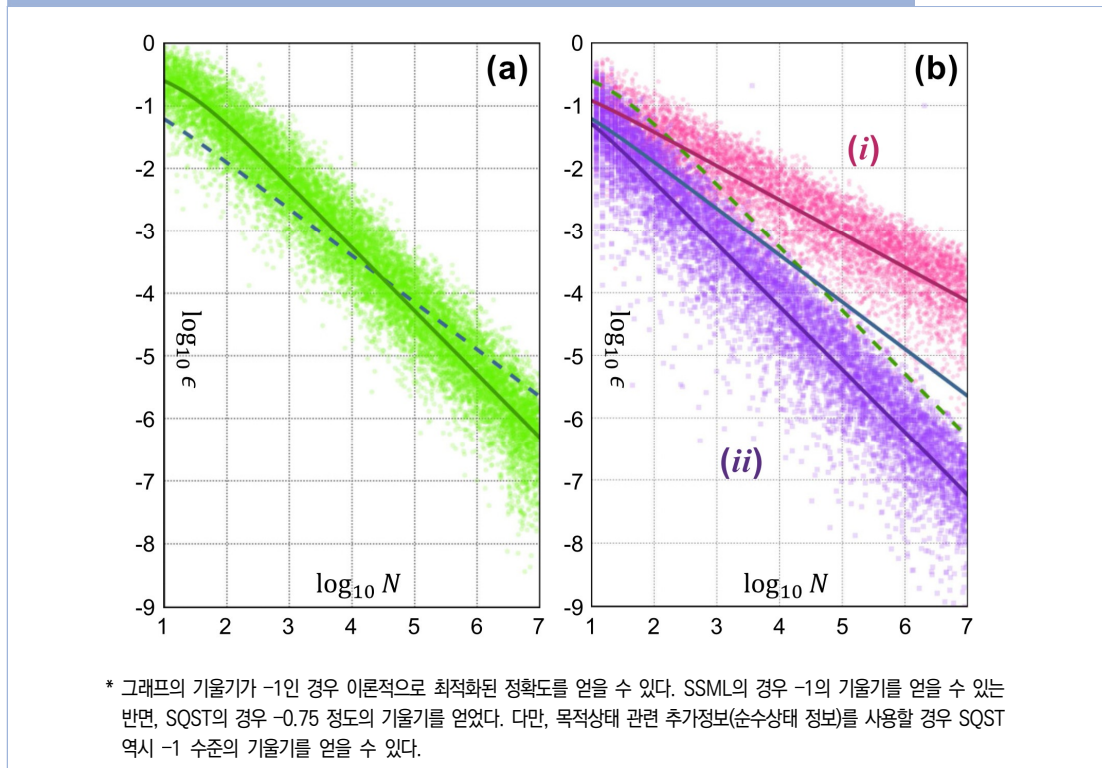
\* 종료조건  $M_H$ 는 고전 메모리 사이즈를 의미하고,  $N_c$ 는 학습확률을 분석하여 얻은 평균 학습반복회수(즉 리소스 혹은 학습시간)을 의미한다.  $N_{\text{data}}$ 는 데이터를 평균하여 얻은 결과를 나타낸다.

\* 출처: 저자 작성

해당 결과는 통상 양자상태추정 방식인 SQST(Standard Quantum State Tomography)방식과 비교되었다. 비교를 위한 전산모사 결과, 일반적인 경우 놀랍게도 SSML의 경우 동일 리소스의 소모 대비 보다 높은 수준의 정확도를 얻을 수 있었다. 하지만, 현재 버전의 SSML은 순수 양자상태 추정의 예제에 적용 가능한 반면

SQST 방법은 혼합 상태까지 적용 가능하다. 따라서, SQST 방식을 순수상태 추정의 경우로 한정하면(혹은 다른 말로, 목적상태에 대한 추가정보 사용이 가능하다면) SSML과 동일한 수준의 정확도가 확보된다.

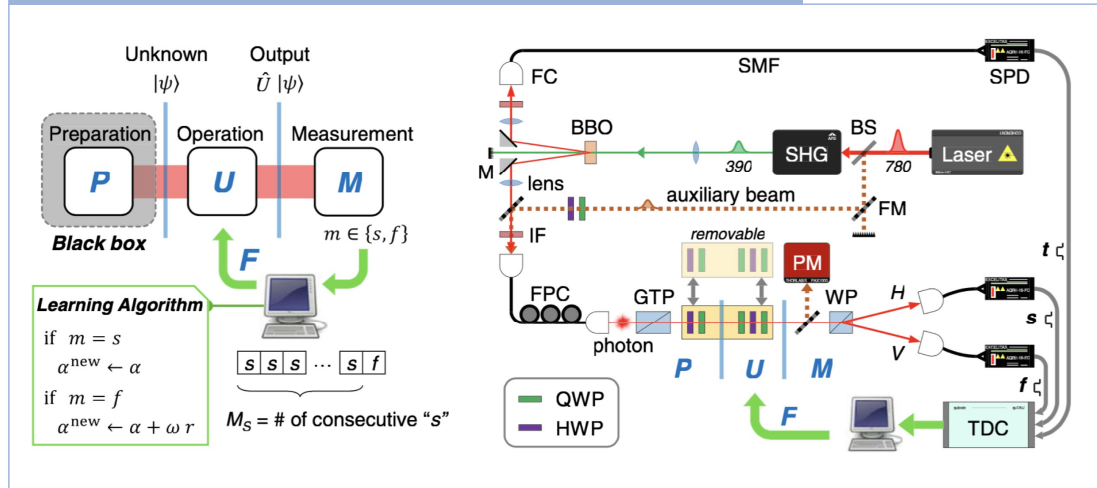
그림 10. 최종 소모한 학습 리소스(N) 대비 최종 학습 결과에의 에러 분석  
(a) SSML 결과, (b) SQST 결과



\*출처: Lee et al.(2018)

앞서 기술한 기본 아이디어를 실제 구현하고 그 결과를 분석하기 위해, 본 연구에서는 광자편광기반의 검증실험을 시도하였다. 특히, SSML을 통한 큐비트상태 추정 문제를 구성하고 사용되는 양자상태 자원 리소스 대비 결과의 정확성에 분석을 위한 실험세팅을 구성하였다(그림 11). 해당 실험에서 기본적으로 학습의 목적상태는 큐비트의 순수상태로 가정하였다.

그림 11. (좌) 큐비트 양자상태 추정을 위한 SSML 구현 기본모형, (우) 광자편광기반 양자광학계 구현을 위한 실험세팅

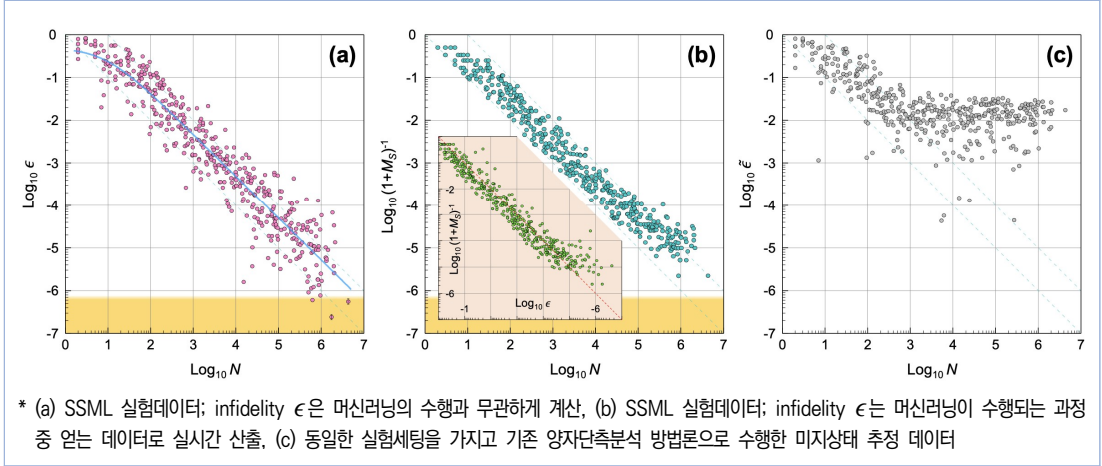


\*출처: Lee et al.(2021)

먼저, 큐비트상태는 광자의 편광모드(수평 혹은 수직)로 기술되도록 하였다. 그리고 실험에서 가장 중요한 연산요소  $U$ 를 구성하기 위해서 조작 가능한 파장판(WP, Wave-Plate)들을 도입/세팅하였다. 일반적으로 큐비트상태 추정을 위한 WP는 3개로 적합하지만(Quarter WP, Half WP, Quarter WP), 본 실험세팅에서는 조작 오류에의 민감도, 제어변수 개수에 따른 학습양상, 기준상태 준비 등까지 모두 고려하였다. 양자측정은 편광 빔살가르개를 통해 각기 다른 광자의 편광에 따라 서로 다른 방향의 광자측정기에 도달할 수 있도록 하여 수행하였다.

본 실험을 통해서  $10^{-5}$  레벨 이하의 오류 수준에서의 큐비트상태 추정 정확도를 확보하였다. 특히, 본 실험에서 확보한 자원효율성은  $O(N^{-0.983(19)})$  수준으로, 이론한계치  $O(N^{-1})$ 에 매우 근접하였다. 실제 실험 결과는 <그림 12>에 나타나 있다.

그림 12. 미지상태 추정 큐비트상태 자원리소스(광자) vs 추정 부정확도(infidelity,  $\epsilon$ ) log-log 그래프



\*출처: Lee et al.(2021)

## IV 결론: 고전-양자 융합 학습머신 및 SSML의 활용

융합연구리뷰에서 소개한 연구결과는 최근 머신러닝의 활용 측면에서 머신러닝을 이용한 ‘새로운 알고리즘 개발’ 그리고 ‘양자상태추정’이라는 새로운 영역을 발굴했다는데 의의가 있다. 우선, ‘새로운 알고리즘 개발’이라는 측면에서 고전-융합 머신러닝 시뮬레이터의 활용은 학습 대상의 양자알고리즘의 속도향상이 학습에서의 속도향상에 그대로 기여할 수 있음을 보였다는 측면에서 의미가 있다. 이는 현재 양자머신러닝 분야의 최신 연구맥락과도 일치하는 부분이 있다. 다음으로 머신러닝을 이용한 ‘양자상태추정’ 연구관점에서 제안된 방법론은 대상 시스템의 개별 양자측정으로 해당 작업의 수행이 가능하다는 것이 중요한 포인트이다. 정보 이론 관점에서 두 정보추출 방법론, 즉 ‘최적화된 데이터들의 통계처리 방법론’ 그리고 ‘소수 데이터들을 바탕으로 한 순차적 갱신 방법론’ 중에서 후자의 경우가 실용적일 수 있다는 결과를 시사한다는 점에서도 매우 중요한 결과로 평가할 수 있겠다.

방법론 측면에서 본 연구결과들의 또 다른 시사점은 바로 이론/소프트웨어 관점에서도 기술을 보완/강화할 수 있는 여지가 상당부분 존재한다는 점이다. 실험 및 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이, 동일한 세팅에서도 최종 결과에서의 정확도는 결국 방법론과 구체적 알고리즘의 차이에서 비롯되었다. 실제로, 알고리즘 개발이나 고품질의 큐비트 제어/측정 등에 대한 문제는 원리적 그리고 기술적 문제들이 교묘하게 결합되어 있기 때문에 편향된 접근으로는 명료한 결론에 도달하기 쉽지 않다. 결국, 적어도 이상적으로 추구하는 양자기술의 완성을 위해서는, ‘양자원리에 대한 보다 깊은 이해를 바탕으로 한 방법론 연구’와 ‘최적화 등을 포함하여 대상 양자시스템을 보다 정밀하게 다루는 기술력 제고’가 상호 보완적으로 이루어져야만 한다.

앞서 소개한 연구들은 연구는 보다 일반적인 구조화를 통해 더욱 발전할 수 있을 것으로 보인다. 특히, 제안된 학습머신은 구조적으로 원하는 목적을 수행하는 양자연산을 포함하고 있고, 학습을 마친 이후 이를 분석하여 원하는 목적을 보다 효과적으로 수행하는 새로운 연산모듈을 구조화 할 수 있게끔 설계되어 있다. 즉, 원하는 목적수행에 어떠한 양자효과가 필요한지, 심지어는 이와 같은 양자효과를 포함하는 연산은 어떤 형태로 구성되어야 하는지 등에 대한 수고를 줄일 수 있을 것으로도 기대한다.



## 저자 \_ 방정호(Jeongho Bang)

### • 학력

한양대학교 양자정보/컴퓨팅 박사  
한양대학교 물리학 학사

### • 경력

現) 한국전자통신연구원 ICT창의연구소 선임연구원

## 참고문헌

- 1) Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., Lloyd, S., (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549, 195-202.
- 2) Hentschel, A., Sanders, B. C., (2010). Machine Learning for Precise Quantum Measurement. *Physical Review Letters*, 104, 063603.
- 3) Bang, J. H., Ryu, J. H., Yoo, S. K., Pawłowski, M., Lee, J. H., (2014). A Strategy for Quantum Algorithm Design Assisted by Machine Learning. *New Journal of Physics*, 16, 073017.
- 4) Lee, S. M., Lee, J. H., Bang, J. H., (2018). Learning Unknown Pure Quantum States. *Physical Review A*, 98, 052302.
- 5) Lee, S. M., Park, H. S., Lee, J. H., Kim, J. W., Bang, J. H., (2021). Quantum State Learning via Single-Shot Measurements. *Physical Review Letters*. 126, 170504.
- 6) 방정호·유석원·이진형. (2013). 양자정보와 기계학습의 만남. *한국물리학회*, 2013년 5월 22권 5호, 물리학과 첨단기술, DOI: 10.3938/PhiT.22.016



# 02

## 인공지능 및 입체영상 시각화 기술을 이용한 첨단 영상유도수술 (IGS, Image-Guided Surgery)

강민구(한국과학기술연구원 선임연구원)  
한형섭(한국과학기술연구원 선임연구원)

# I 서론

의료분야에서 첨단 의료영상 기술이 등장하기 전 임상자들은 인간의 눈에 의지하여 질병에 대한 반응을 감지했다. 인간의 눈은 촉진과 함께 오늘날까지도 다양한 병변을 발견하는 가장 기본적인면서도 주요한 수단이다. 그러나 오늘날 현대인들은 입과 같이 단순히 보고 만지는 수준으로는 병변을 확인하기 어려운 복잡한 질병으로부터 생명을 위협받고 있으며, 이러한 질병을 확인하기 위한 도구로써 의료영상 기술이 지속적으로 발전해 오고 있다.

1895년 엑스레이의 출현은 현대 영상 기술의 출현을 의미하며, 외과적 개입 없이도 의료영상 촬영을 통해 복잡한 인체 내부 장기의 시각화가 가능하다는 것을 세상에 알렸다. 오늘날에는 방사선영상(X-ray), 컴퓨터단층영상(CT, Computed Tomography), 자기공명영상(MRI, Magnetic Resonance Imaging), 초음파영상(ultrasound)과 같은 의료영상이 전 세계 많은 크고 작은 병원에서 진단을 위한 주요 수단으로 사용되고 있다(Mondal et al., 2020).

전통적인 의료영상은 2차원(2D) 평면적 영상정보의 특성으로 인하여 데이터의 직관적이고 총괄적 해석이 어려워 그 활용성이 떨어지는 한계가 있었다. 그러나 최근, 첨단 IT 기술을 적용한 의료영상 시각화 기술이 눈부신 발전을 이루었고, 과거 영상의학과 전문의가 2D 의료영상을 직접 보며 판독하는 방식으로부터 나아가 인공지능을 기반으로 한 질병의 자동 진단, 장기의 해부학적 3차원 영상 재현이 가능한 수준에 이르게 되었다.

특히, 외과적 수술 분야에서는 의료영상 시각화 기술의 발전 덕분에 외과의사들이 최소침습수술(MIS, Minimally Invasive Surgery, 절개 부위를 최소화하여 시행하는 수술)을 할 수 있도록 돕는 영상유도수술(IGS, Image-Guided Surgery) 및 수술 내비게이션 기술이 새로운 외과적 수술의 동향이 되고 있으며, 이를 통해 수술의 통증과 합병증을 줄이고, 회복시간을 최대한 단축하고자 하는 노력과 필요성이 점차 커지고 있다(Peters, 2006; Klimek, 1998).

그러나 현재 IGS 기술에서 사용되는 의료영상데이터는 여전히 2D 평면 모니터를 통해 제공되는 실정으로 외과의는 모니터로 제공되는 2차원 데이터를 본인의 공감각적 능력에 의존, 3차원으로 재해석하여 수술을 시행해야 하고, 그로 인해 개인의 이해 수준과 경험 혹은 숙련도 등에 따라 수술의 결과에 큰 편차가

발생하는 문제가 있다. 이러한 이유로 IGS 분야는 최근 착용형 증강현실 및 첨단 3D 디스플레이 기술을 활용하여 실제 환자의 몸에 가상현실 영상을 중첩하는 기술을 도입하고 있다. 또한 이 기술을 직접적으로 사용하게 될 의사들 간의 편차를 최소화하기 위한 연구개발도 활발히 진행되고 있다(Gregory et al., 2020).

융합연구리뷰에서는 인공지능 및 3D 입체영상 시각화 기술을 적용한 첨단 IGS 기술을 조명하고자 한다. 본문에서 설명하기에 앞서 기본적인 의료영상의 특징과 시각화 기술, 외과적 수술 분야의 IGS에 대해 소개하며, 이어서 이상적인 IGS 기술의 고도화를 위한 핵심요소기술에 대해 서술한다. 또한 관련 최신기술의 동향, 향후 발전 방향에 대해 논의하고자 한다. 마지막으로 인공지능 및 3D 입체영상 시각화 기술을 적용한 첨단 IGS 기술 분야의 혁신을 조명한다.

## II 본론

### 1. 의료영상, DICOM 파일 소개 및 영상유도수술(IGS)을 위한 의료용 내비게이션 시스템

#### 1.1. 의료영상의 종류와 송수신 시스템

의료영상이란 의료를 목적으로 병원에서 다루는 디지털 영상으로, 과거 영상의학과 전문의가 직접 보며 판독하는 2D 디지털 이미지에서부터 증강현실같이 첨단 시각화 기술을 이용하는 IGS 기술에 이르기까지 의료영상의 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 의료영상은 영상 촬영 원리에 따라 크게 가시광선(ex. 현미경, 내시경 등), 방사선(ex. X-ray, CT 등), 자기장(ex. MRI 등), 초음파, 근적외선 등으로 구분되며, 대표적인 의료영상의 획득 방법과 특성은 아래와 같다.

- 가시광선을 이용한 의료영상은 현미경과 내시경을 통해 획득하며 가장 직관적이고 기본적인 의료영상이다. 현재는 상용 현미경과 결합한 미세 내시경 시스템의 개발로, 현미경을 통해 장기 속 세포들의 미세한 변화까지 관측할 수 있다.
- 방사선을 이용한 의료영상은 주로 인체 내 병변 위치를 찾기 위한 것으로, 체내의 밀도와 성질에 따라 입사, 반사, 투과되는 특징을 이용하여 획득된다. 대표적으로 X-ray, CT, PET(Positron Emission Tomography) 등이 있으며 촬영된 영상은 디지털화되어 의료 정보로 저장된다.
- 자기장을 이용한 의료영상은 근육과 지방 등 신체를 구성하고 있는 연부조직(soft tissue) 안의 수소 원자들이 자기장에 의해 회전하는 속도의 차이로 발생하는 원리를 이용하여 획득된다. 인체 내부의 조직을 3D 입체적 영상으로 획득할 수 있으며 MRI 영상이 대표적이다.

표 1. 의료영상 데이터의 분류 및 기술적 특징



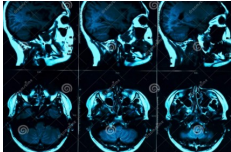
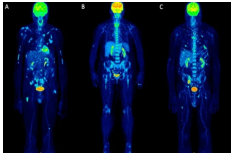
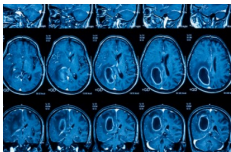
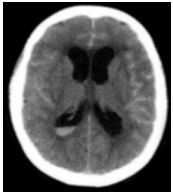
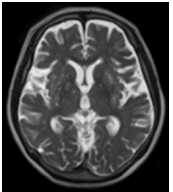
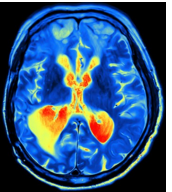
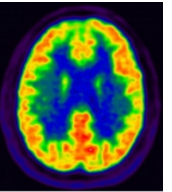

의료영상	대표 이미지	기술적 특징
미세 현미경	 <p>*출처: 의사신문(2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수술 중 실시간 모니터링 가능</li> <li>미세 수술 보조 도구로 최소 절개 수술을 가능케 함(출혈량 감소)</li> <li>치아, 디스크 수술에 주로 활용</li> </ul>
내시경	 <p>*출처: 연합뉴스(2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>장기에 직접 삽입하여 염증이나 종양 등을 발견 및 진단</li> <li>CCD(전하 결합 소자, Charged-Coupled Device, 빛을 받아 전하로 변환하여 디지털 형태의 이미지로 바꾸는 센서) 카메라와 조직검사, 지혈, 절제술 등 시행 가능 채널이 있어 이상 부위(병변) 절제 및 출혈 시 지혈 가능</li> </ul>
X-ray	 <p>*출처: El Dorado Imaging 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>물질에 대해 강한 투과력을 가진 <math>10^{-11} \sim 10^{-9} \text{m}</math> 사이인 전자기파 사용</li> <li>신체 조직에 투과하여 투과된 X-ray의 밝기 차이로 영상을 만들어냄</li> </ul>
CT	 <p>*출처: Kuo et al.(2019)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X선을 이용하여 뼈와 연부조직의 횡단면(가로) 영상을 획득하여 진단에 이용하는 검사</li> <li>여러 장의 2D X-ray 이미지를 합쳐 한 장의 3D 영상 이미지로 만들(움직이는 장기, 혈관 관찰 용이)</li> </ul>
PET	 <p>*출처: Sachpekidis et al. (2019)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>방사성 포도당 신체 주입 후 360도로 촬영, 3D 영상 이미지 획득 가능</li> <li>방사성 포도당이 암세포에서 비정상적으로 높아 PET에서 밝게 나옴</li> <li>암 조기진단에 유용</li> </ul>
MRI	 <p>*출처: Sachpekidis et al. (2019)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자력에 의해 발생하는 자기장을 이용하여 인체 내부를 촬영</li> <li>가로, 세로, 정면 단면 모두 촬영</li> <li>근육, 인대, 신경(뇌질환, 디스크) 등 촬영에 사용</li> </ul>

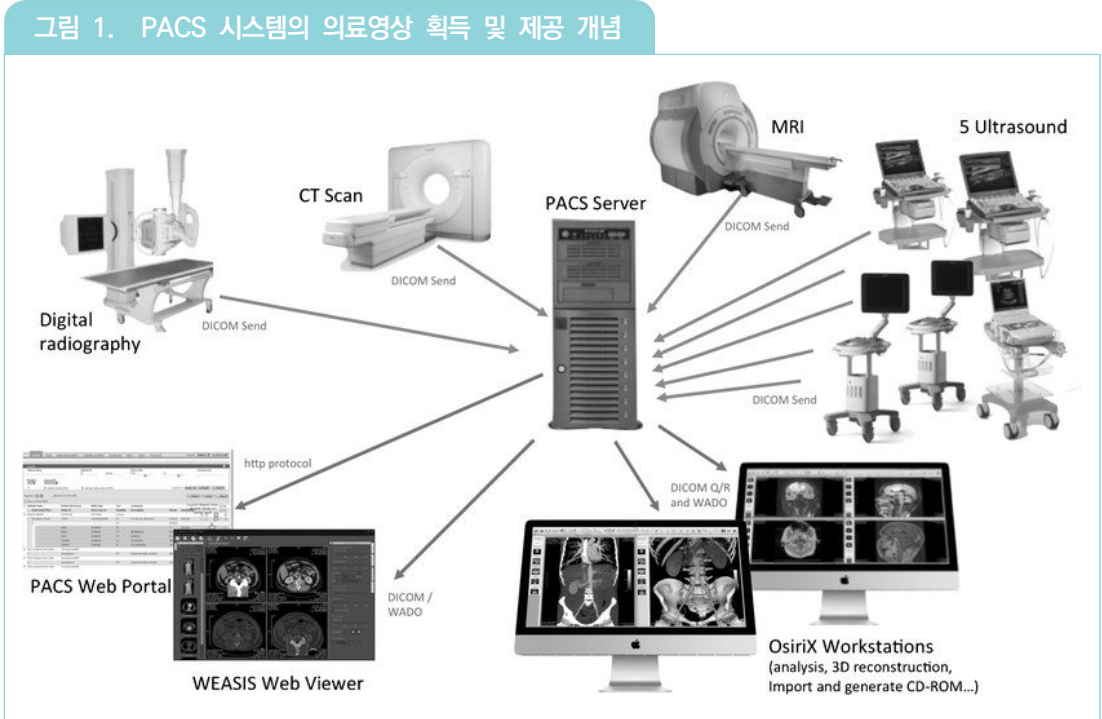
표 2. 주요 의료영상 데이터의 특성 요약

	CT	MRI	fMRI	PET	SPECT
대표 이미지	 *출처: 나래의료재단 블로그	 *출처: 나래의료재단 블로그	 *출처: Psychology Software Tools 사이트	 *출처: Carson-DeWitt(2022)	 *출처: Artms 사이트
활동성	측정 불가	측정 불가	측정 가능	측정 가능	측정 가능
비용	낮음	높음	높음	낮음	낮음
해상도	낮음	높음	높음	낮음	낮음
검사속도	10~20분	30분~1시간	30분~1시간	1~2시간	30분~1시간
특징	x-선 노출	강한 자기장	강한 자기장	$\gamma$ -선 노출	$\gamma$ -선 노출
조영제	필요시 사용	필요시 사용	필요시 사용	방사성 의약품	방사성 의약품

이러한 방법으로 촬영한 의료영상은 디지털 데이터 형태로 저장하기 위해 샘플링(sampling)과 양자화(quantization) 과정을 거치게 된다. 샘플링 과정에서는 빛이 이차원 배열의 이미지 센서 판에 도달했을 때의 빛이 가진 강도와 파장에 따라 아날로그 전압값으로 변환된다. 이렇게 전기 신호로 바뀐 빛의 정보는 양자화 과정에서 사람이 적절한 색상 범위로 볼 수 있도록 적정 디지털 값으로 변환되고, 이로써 의료영상 데이터가 얻어진다.

디지털 영상 신호처리 과정을 거친 의료영상데이터는 PACS(Picture Archiving and Communication System, 의료영상저장전송시스템)라는 시스템(Ratib et al., 2016) <그림 1>에 의해서 저장 및 전송이 이뤄지며, DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine) 파일 형태의 국제 표준 규약에 맞게 가공되어 저장 및 활용된다.





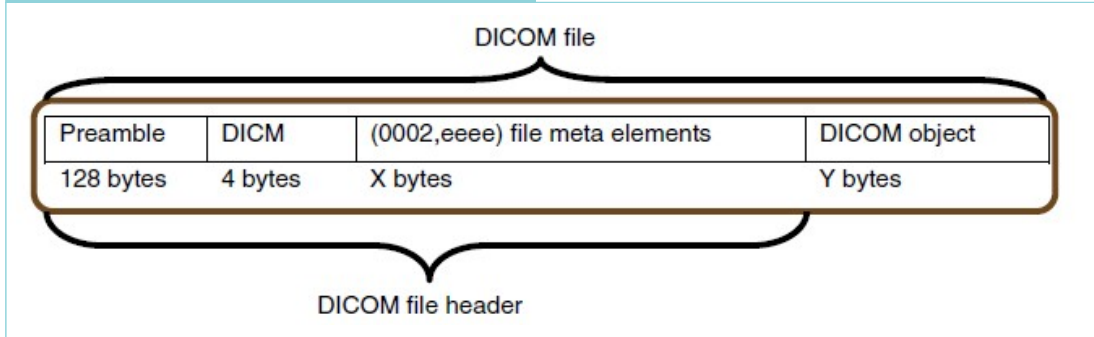
\*출처: Ratib et al.(2016)

DICOM 파일은 데이터 처리 관점에서 보관, 백업, 전송뿐만 아니라 이차적인 영상의 가공 및 후처리에 있어서 편리하다는 장점이 있으며, 의료 전문의의 관점에서는 PACS 서버로부터 원하는 의료영상에 원격으로 접근할 수 있고 다양한 후처리 기능이 부가된 말단의 전용 뷰어 프로그램의 이용이 가능하다는 장점이 있다.

## 1.2. DICOM 국제 표준 및 의료 영상 시각화 도구

DICOM은 의료영상의 저장, 출력, 전송 과정에 사용되는 표준을 총칭하는 용어로서 북미영상의학회(RSNA, Radiological Society of North America)에서 1990년대에 의료용 이미지에 대한 국제 표준으로 정하였다. DICOM 도입 전에는 다양한 의료영상 촬영 장비 제조사마다 각기 다른 방식으로 정보를 저장 및 관리했기 때문에 영상처리 과정 중에 제조사 간의 호환성 문제가 대두되었다. 이에 따라, 정보를 효율적으로 통합 관리 및 조회하기 위해 표준이 요구되어 DICOM 국제 규격이 개발되었다. DICOM은 일반 영상과 달리 날짜, 장비, 환자 정보, 판독 결과 등의 정보를 함께 저장한다(Lee et al., 2001).

그림 2. DICOM의 데이터 포맷 구성 예시

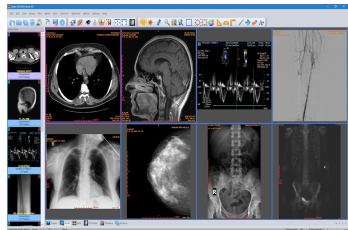


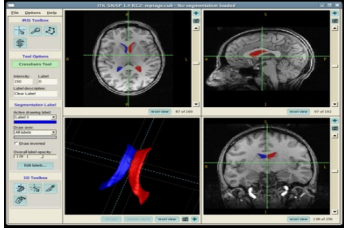
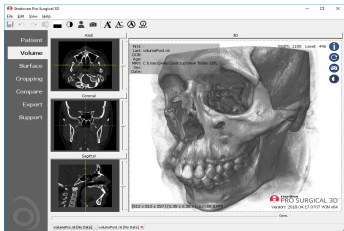

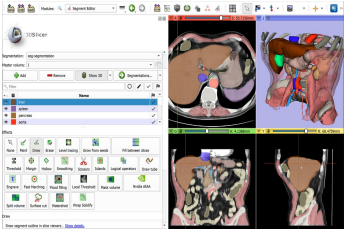
\*출처: Pianykh(2012)

DICOM 형식은 크게 Header와 Object 두 부분으로 나눌 수 있다. 우선 Header에는 촬영한 영상에 대한 정보를 담은 메타 데이터가 기록되어 있다. 예를 들어 환자의 정보나 영상의 차원(dimension) 및 규모(scale) 정보 등이 있으며, 또한 3차원 의료영상을 제대로 해석할 수 있도록 3차원 픽셀인 복셀(voxel)에 대한 정보를 포함하고 있다. 복셀 정보는 영상에서 필요 부분을 추출할 때 기준 방향을 구하거나 픽셀 및 복셀의 실제 크기 등 변환 연산에 필요하다. Object는 압축된 비트맵(bitmap) 또는 압축되지 않은 형식(jpeg, gif) 등의 영상 정보를 담고 있다.

DICOM으로 변환된 의료정보 데이터는 손쉽게 영상신호 후처리를 통하여 활용 목적에 따른 맞춤형 시각화가 가능하며, 이를 위한 다양한 전용 의료영상 뷰어 소프트웨어들이 출시되어 현장에서 활용되고 있다. 현재 대표적인 의료영상 시각화 소프트웨어 및 뷰어에 대한 정보는 다음과 같다.<표 3>

표 3. 의료영상 데이터 시각화 도구 예시

제품/서비스명 (회사명)	대표 이미지	기술적 특징
Sante DICOM Viewer	 <p>*출처: Santesoft 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다중 평면 재구성(MPR, MultiPlanar Reformatted) 모드 및 초음파 영역 교정 모듈 지원</li> <li>• 간단한 사용방법 및 직관적인 사용자 Interface 보유</li> </ul>

제품/서비스명 (회사명)	대표 이미지	기술적 특징
ITK-SNAP	 <p>*출처: itksnap 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRI, CT 데이터 작업에 많이 사용</li> <li>• 명암 대비(Contrast) 조절을 통해 특정 영역만 보는 등 기본 이미지 프로세싱 지원</li> <li>• 원하는 영역 분할(Segmentation)을 통해 여러 장을 쌓으면 3D화 가능</li> </ul>
Pro Surgical 3D	 <p>*출처: Stratovan 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주로 외과 의사 대상 프로그램</li> <li>• 3D 재건 기능을 통해 세부 사항 식별 서포트</li> <li>• 빠른 3D 재구성 및 렌더링 가능</li> </ul>
postDICOM	 <p>*출처: PostDICOM 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D 렌더링, MPR, MIP 및 이미지 융합 등 고급 이미징 옵션 탑재</li> <li>• Windows 대부분 버전에 호환성 우수, Mac OS, iOS 및 OS와 같은 다른 운영 체제와도 호환성이 좋음</li> </ul>
3D Slicer	 <p>*출처: Slicer Community 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전신 기관에 대한 3D 시각화가 가능하며 MRI, CT, 및 현미경을 포함한 다중 양식 이미징 가능</li> <li>• 분석에는 세분화, 등록 및 다양한 정량화 기능 포함되어 활용성 우수</li> <li>• Python 및 C++에서 사용 및 확장 가능, Slicer에는 Python 콘솔이 내장됨</li> </ul>

### 1.3 최소침습수술을 위한 영상유도수술

IGS는 앞서 살펴본 하나 이상의 의료영상 데이터와 시각화 도구를 활용하여 수술을 수행하는 방법으로, 의사가 자동화된 시스템을 통하여 환자의 해부학적 3D 영상정보를 실시간으로 안내받음으로써 수술의 성공률을 높이고 수술에서 발생하는 침습을 최소화하여 합병증을 효과적으로 예방할 수 있는 첨단 외과적 수술 내비게이션 기술이다(임상철, 2015; Knott et al., 2006; Kingdom, 2004).

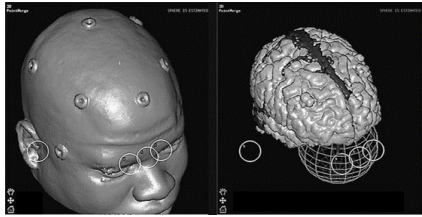
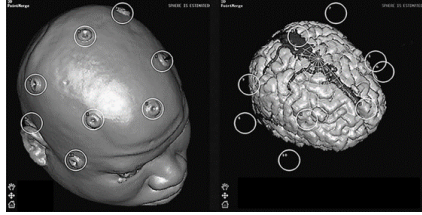
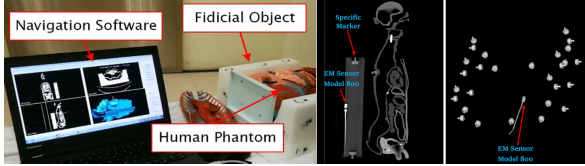
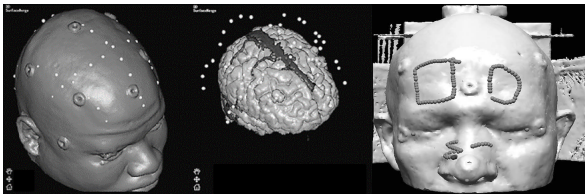
전통적인 외과 수술이 의료영상의 평면적 데이터를 바탕으로 의사 개인의 공감각에 의존하여 실제 병변에 접근하는 방식이라면, IGS 기술은 자동차의 이동식 위성 위치 확인 시스템(GPS, Global Positioning System)과 마찬가지로, 카메라 또는 전자기장을 사용하여 환자의 해부도 및 환자과 관련된 의사의 정확한 움직임을 촬영하고 수술실의 컴퓨터 모니터에 중계하는 방식이다. IGS 시스템을 통해 기존 의료영상에서 맨눈으로는 확인하기 어려운 자세한 병변의 위치와 현재 수술 부위를 동시에 보여줄 수 있으며, 목표하는 위치로 효과적으로 안내받을 수도 있다.

예를 들어, 절개 또는 드릴링이 필요한 외과 수술 시 매우 좁거나 숨겨져 있는 수술 부위를 3D 영상으로 실시간 시각화하여 제공함으로써 의사가 보다 신속하고 정확하게 수술이 가능하도록 지원할 수 있다. 또한 수술 전 촬영한 환자의 MRI 또는 CT 이미지를 수술대 위 환자의 신체에 증강현실 또는 혼합현실 기술을 이용하여 3D 입체영상으로 재현함으로써 외과의사가 수술을 위한 디지털 지도처럼 활용할 수도 있다(Krauel et al., 2021).

이러한 IGS의 핵심은 수술 의사가 실시간으로 환자의 몸에서 현재의 위치를 정확히 확인하고 환자의 수술 시야를 3차원으로 확보하는 것이다. 이를 위해, 수술 시작 전에 수술 전 의료영상과 환자를 일치시키는 정합(registration) 과정이 필요하다. 정합이란 IGS 시스템을 통해 재현되는 환자의 의료영상과 실제 수술 부위의 위치를 정확히 일치시키는 과정으로 외과적 내비게이션 시스템의 정확도에 매우 중요한 인자라 할 수 있다(Sauer, 2006).

영상-환자 정합 방식은 다음 <표 4>와 같이 크게 3가지로 나누어지는데 PPR(Paired Point Registration), Automatic Registration, CBR(Contour Based Registration)이 있으며, 기준 마커(fiducial marker)의 부착 여부로 나눌 수 있다(Eggers et al., 2006).

표 4. 영상-환자 정합 방식 기술 분류

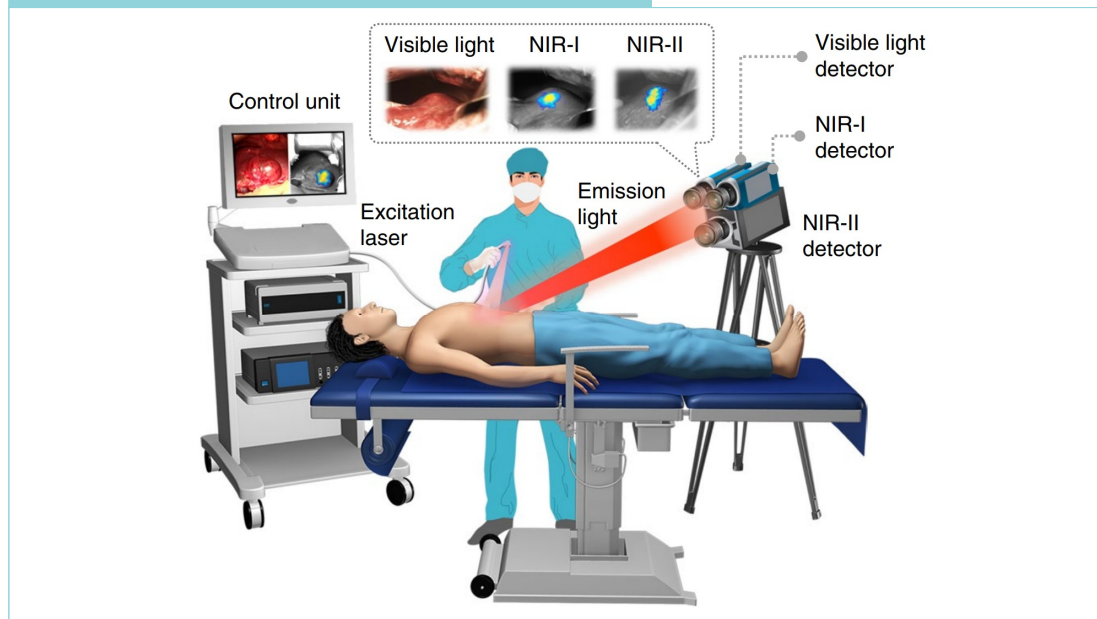
	대표 이미지	Fiducial marker 부착	특이사항
PPR	<p>Anatomic fiducial registration</p>  <p>*출처: Mascott et al.(2006)</p>	없음	정확도 낮음
	<p>Skin affixed fiducial registration</p>  <p>*출처: Mascott et al.(2006)</p>	부착	fiducial marker 영향 큼
Automatic Registration	 <p>*출처: Lin et al.(2020)</p>	없음	fiducial marker 변경 불가
CBR	 <p>*출처: Mascott et al.(2006), Knott et al.(2006)</p>	없음	3차원 신체 정보 필요

- Anatomic fiducial registration 방식은 환자의 해부학적 구조물을 기준으로 직접 정합하는 방법으로 가장 간단한 방법이지만 정합의 정확도가 떨어져서 실제로는 잘 사용되지 않는다(Mascott et al., 2006).
- Skin affixed fiducial registration 방식은 수술 전 환자의 피부에 복수의 기준 마커를 붙인 후 의료영상을 촬영한 다음 수술 시 마커를 기준으로 정합하는 방식이다. 비교적 정확하고 빠르지만, 피부와 연부조직에 부종이 발생하거나 움직임이 있을 경우에 정합의 정확도가 떨어지는 단점이 있다(Knott et al., 2006).

- Automatic Registration 방식은 기준 마커가 표시된 프레임을 환자 주변에 위치시킨 채 수술 전 의료영상을 촬영한 후 그 위치 그대로 수술을 시행함으로써 특별한 정합 과정이 필요 없는 방법이다. 정합이 빠르고 쉽다는 장점이 있지만, 한번 고정된 프레임의 위치와 기준 마커의 배치 변경이 불가능하다는 단점이 있다(Knott et al., 2006; Kingdom et al., 2004).
- CBR 방식은 수술 전 촬영한 의료영상으로부터 환자의 3D 모델 데이터를 만들고, 이를 수술실에서 탐색침 (probe)이나 레이저 장비를 통해 획득한 실제 환자의 윤곽 정보를 비교하여 정합하는 방법이다. CBR 방식은 기준 마커를 부착해야하는 번거로움이 없기 때문에 비교적 간편하면서도 정확하다. 다만, 다른 방식에 비해 고가라는 단점이 있다(Mascott et al., 2006; Knott et al., 2006).

한편, 병변 및 해부학적 구조물 또는 수술기구의 위치를 확인하기 위해서는 추적 장치가 필요하다(Hu et al., 2020) <그림 3>. 추적 장치는 정합한 데이터에 환자 좌표계를 정의하고, 환부와 수술 도구의 움직임을 실시간으로 추적하는 역할을 한다.

그림 3. 내비게이션 시스템의 광학 추적 장치 개략도



\*출처: Hu et al.(2020)

추적 장치의 종류 중 실제 임상에서는 광학 추적 장치와 자기장 추적 장치가 가장 널리 사용된다(표 5). 광학 추적 장치는 적외선을 이용하여 광학 마커(optical marker)의 동작 방식에 따라 능동형과 수동형으로 다시 나눈다. 능동형은 수술 기구 및 도구에 부착된 발광 다이오드에서 방출하는 적외선을 카메라에서 추적하는 방식이고, 수동형은 수술 기구 및 도구에 부착된 반사체에서 반사되는 적외선을 적외선 카메라로 추적하는 방식이다. 광학 추적 장치는 거의 모든 기구 및 도구를 수술 중에 등록하여 내비게이션 시스템에 즉각 사용할 수 있고, 상대적으로 충분한 정확도를 얻을 수 있는 장점이 있다(Kingdom et al., 2004). 그러나 카메라와 optical marker의 사이를 다른 물체가 가리면 추적이 불가능한 단점이 있다. 자기장 추적 장치(전자기식)는 자기장 전송자에서 발생한 자기장을 수술 기구 및 도구에 포함된 수신기가 감지하여 자기장 범위 안에서 위치를 추적한다. 자기장 방식은 상대적으로 저렴하며, 광학 추적 장치와 달리 자기장 전송자와 수신기 사이에 물체가 놓여도 작동되는 장점이 있다. 그러나 자기장 수신기가 포함된 기구만이 사용 가능하며, 자기장 신호를 방해하는 금속 등에 의해 정확도가 떨어지는 단점이 있다(Widmann, 2007; 임상철, 2015).

표 5. 추적 장치 기술 분류

위치 추적 방식	광학식		전자기식
	가시광선	적외선	
특징	상대적으로 높은 정밀도 (0.2~0.3mm)		광선 차단 문제에서 자유로움
문제점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 센서 위치에 따른 인식 불능</li> <li>• 수술 도구가 강성이 있어 굽거나 휘지 않아야 함</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 좁은 동작 범위</li> <li>• 자기장을 간섭하는 종류의 금속 물질 사용 제한</li> </ul>

\*출처: 저자 정리

이 밖에도 IGS를 위한 내비게이션 시스템 정확도에 관여하는 요인으로는 영상 슬라이스 간격, 영상 재건 알고리즘, 스캐너 기술, 표면 재건 시 배경 노이즈 등이 있다(Dubach et al., 2010). 정합 방식에 있어서 fiducial marker를 적용한 시스템에서는 fiducial 수, 위치 및 배치 또한 고려해야 할 주요 요인이다(Knott et al., 2006). 또한, 현재 기술개발 수준에서, 수술 시 발생하는 연부조직의 움직임은 내비게이션 시스템의 정확도를 떨어뜨리는 불가피한 원인이 되기도 한다. 예를 들어, 개두술에서 발생하는 뇌의 이동 등은 현재 기술로 내비게이션 시스템에 즉각적으로 반영되기 어렵다. 이러한 관점에서 조직의 움직임이 없는 부비동 내시경 수술은 현재 IGS 기술수준의 내비게이션 시스템 활용에 적합하다고 할 수 있다(Mosges & Klimek, 1993; Fried et al., 1997; Metson et al., 2000).

## 2. 의료분야의 인공지능 및 3D 모델 변환기술의 활용

### 2.1. 인공지능을 활용한 의료영상 데이터 분석 기술

의료영상 분야는 1990년대 PACS의 등장으로 대량의 디지털 의료영상 정보가 생성되면서 이를 기반으로 한 병변 검출, 장기 혹은 경계 검출 및 진단 지원 등의 연구가 활발하게 이루어졌다. 그러나 알고리즘 개발 과정에서 개발자의 지식을 넘어서는 의료진의 직관 또는 경험이 실제로 반영되기 어려웠고, 이에 따라 알고리즘의 정확도가 임상 적용엔 어려움이 있는 수준에 한동안 머물러 있었다(Kim et al., 2020; Hong et al., 2020).

그러나 2012년 제프리 힌튼(Geoffrey Hinton) 교수가 인공신경망(ANN, Artificial Neural Network) 기반의 딥러닝 기술을 발표하며, 의료영상 분야 또한 인공지능을 기반으로 재도약의 계기를 마련했다. 딥러닝은 인간의 개입 없이 방대한 양의 데이터로부터 인간의 사고로는 도달하기 어려운 성능을 내는 우수한 알고리즘을 유추해 낼 수 있다. 2012년 국제 이미지 인식 기술 대회(ILSVRC, ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge)에서 제프리 힌튼 교수팀이 알렉스넷(AlexNet)을 사용하여 1,000개의 카테고리에 대해 84.7%의 인식률로 경쟁자들과 10%의 에러율 차이를 보이며 압도적으로 우수함으로써 딥러닝 기술의 우수성을 입증한 바 있다. 현재 인공지능 기술은 4차 산업혁명 기술의 중추로서 현재 산업 전반에 많은 기술적 변화를 가져오고 있으며, 그중 의료영상분야는 검출, 진단, 영상분할, 영상정합 등에서 딥러닝 기술이 가장 활발하게 적용되는 대표적인 분야다.


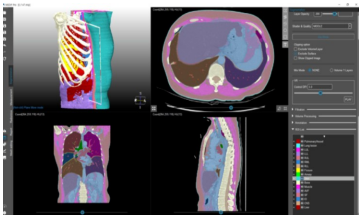
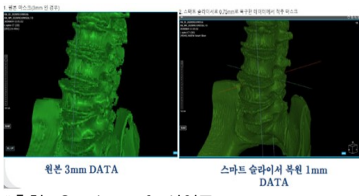
의료영상분야에서 딥러닝 모델 개발 과정에는 데이터 수집, 전처리, 학습과 검증 등 고려해야 할 중요 요소가 많다. 특히, 의료영상 데이터는 시각화를 통해 생체 정보를 효과적으로 분석하기 위해 영상을 분류, 분할, 정합 등의 고차원 처리 프로세스가 수행된다. 더불어, 의료영상은 대량의 데이터 획득에 어려움이 있고, 머신러닝에 필요한 레이블 정보를 얻는 것은 더욱 어렵다. 또한, 제도적, 사회적 이슈로 인해 PACS 시스템 데이터의 접근이 어렵고, 특히, 병변의 위치가 PACS에서 얻는 데이터에서는 레이블링(Labeling) 되어있지 않은 경우가 많아 필요한 데이터 자원을 최소화하며 이를 효율적으로 관리 및 운영할 수 있는 시스템 개발에 대한 연구도 필요하다. 또한, 대부분의 입체 영상의 크기가 고용량이므로 이를 빠르게 처리할 수 있는 연산 능력을 지닌 환경과 알고리즘의 구축뿐만 아니라 객체의 크기가 작을 경우 이를 잘 검출할 수 있는 기술의 개발도 필요하다(이예하 외, 2014).

그러나 통제된 상황에서 촬영되는 의료영상은 일반 영상에 비해 정제가 쉽고, 이에 따라 상대적으로 적은 수의 학습 데이터로도 높은 성능을 보일 수 있어 타 분야에서보다 발전의 기회가 더욱 크다고 할 수 있다.



예를 들어, 2016년 구글에서 발표한 당뇨병성 망막증의 진단 관련 논문에서 약 10만 건 이상의 영상을 학습에 활용했지만 6만 장의 학습 데이터 이상에서는 성능 향상이 없었음을 보였다. 이 밖에도 글로벌 규제의 완화 움직임과 산업의 적극적 투자 등 관련 기술의 상용화를 위한 뒷받침 또한 활발하게 이루어지고 있는 시점이다.

아래 <표 6>은 딥러닝 기술을 활용한 의료영상 데이터 분석 기술의 대표적 예시를 나타낸다.

표 6. 인공지능을 활용한 의료영상의 병변 검출, 경계 검출, 영상 분할 기술 예시		
제품/서비스명 (회사명)	대표 이미지	기술적 특징
루닛 인사이트 MMG (루닛)	 *출처: Lunit 사이트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AI 유방암 진단보조 솔루션</li> <li>• 유방암 의심 부위 97% 정확도로 검출</li> <li>• 의심 부위 위치 정보, 의심 정도를 수치로 표기</li> <li>• 미국 FDA 정식 허가(Clearance) 취득</li> </ul>
메딕프로 (메디컬아이피)	 *출처: Medical IP 사이트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CT 영상에서 30가지 해부학 구조물을 자동 분할하는 AI 모듈</li> <li>• 소프트웨어(SW) 내에서 자동 분할 결과물을 그물(mesh) 형태로 변환 및 디자인 가능</li> <li>• 이를 기반으로 VR·AR, 메디컬 메타버스, 의료용 3D 프린팅 모델 제작 가능</li> <li>• 국내 식약처, 미국 FDA, 유럽 CE(Conformite European) 글로벌 인증 획득</li> </ul>
에이뷰 모델러 (코어라인 소프트웨어)	 *출처: Corelinesoft 사이트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Magic Cut 영상분할 기능</li> <li>• AI 기반 DICOM을 1mm이하 정밀한 데이터로 복원하는 Smart Slicer 기능</li> <li>• AI 기반 척추뼈 완전자동분할 기능</li> <li>• 미국 FDA 인증 완료</li> <li>• Smart Slicer 복원 이미지 3D 프린팅 하여 환자 맞춤형 임플란트 제작 가능</li> </ul>

## 2.2 3D 모델 변환을 활용한 첨단 의료영상 기술

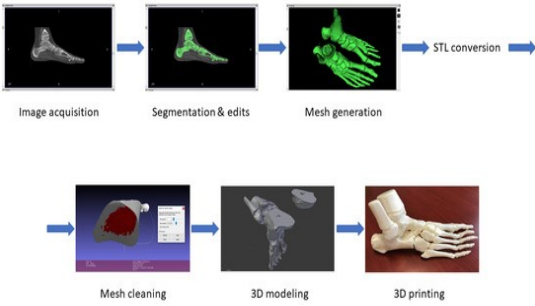
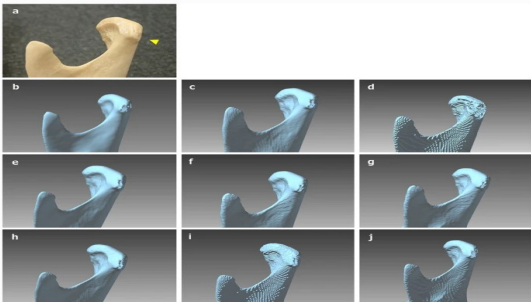
DICOM 국제 표준 파일의 등장 이후 고해상도의 2D 디지털 이미지로부터 3D 모델로 변환하고, 이를 시각화하여 활용하는 연구가 2010년대 초반부터 활발하게 진행되어왔다. 최근에는 생체계측, 해부계측, 생역학 자료를 기반으로 한 분석 데이터를 바탕으로 누적된 의료영상 데이터베이스로부터 표준 체형의 인체 모델,

나이에 따른 인체 모델, 실제와 동일한 기제로 움직이는 인체 모델들 등 다양한 인체 모델을 3D 파일 형태로 변환하고, 이를 시각화하여 활용하는 첨단 의료영상 기술이 실제 현장에 적용되어 검증하는 수준에 있다(Nguyen et al., 2016; Bücking et al., 2017).

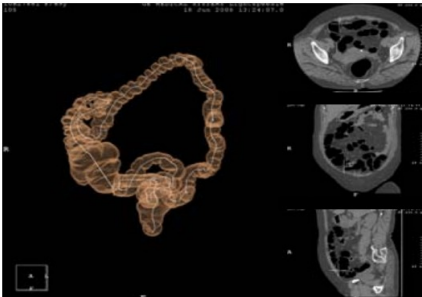
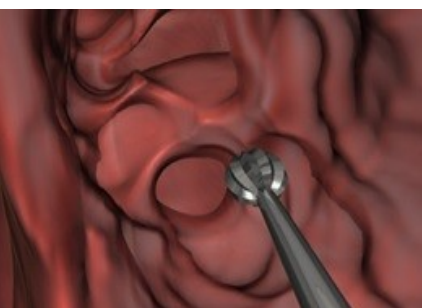
메디컬 3D 프린팅 기술은 이러한 연구의 일환으로써 가장 먼저 실용화가 진행된 대표 기술 중 하나이다. DICOM 파일로부터 변환된 3D 파일의 3D 프린팅을 통하여 개별 환자의 해부학적 구조를 손쉽게 반영할 수 있으며, 심미적, 기능적 결과 모두를 만족하면서도 저렴한 비용으로 가시적인 3D 모델을 제작해 볼 수 있어서 복잡한 골절, 기형, 뼈 종양 및 관절 재건에 대해 수술 계획을 수립하거나 의사가 환자에게 치료 계획을 설명할 때 환자의 이해도를 높이고, 수술에 대한 신뢰를 강화하는 데도 유용하게 사용될 수 있다.

이러한 활용을 위해서는 먼저 DICOM 이미지로부터 3D 모델로 파일 형식의 변환이 필요한데, 3D 프린팅 분야에서는 주로 CAD(Computer-Aided Design, 컴퓨터 지원 설계) 파일 형태로 변환된다. 현재 3D CAD 데이터는 약 100여 가지 파일 형식이 존재하며, 이중 가장 많이 사용되는 형식은 STL(STereoLithography) 파일 형식으로 상용(유료) 및 오픈소스(무료) 소프트웨어가 많이 제공되고 있어 누구나 쉽게 활용할 수 있다.

표 7. DICOM 파일 - 3D 프린팅 모델 변환 기술 예시

대표 이미지	기술적 특징
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DICOM CT 이미지를 3D 프린팅 모델로 변환</li> <li>• 오차는 0.68%~0.45%(Osti et al., 2019)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 인간의 하악골의 관절구(Dry human mandibular condyle)를 9개의 STL 모델 기반으로 3D 모델링 수행</li> <li>• 모델별로 약간의 차이가 발견되었으나 MDCT 슬라이스 두께 내의 차이였음(Kamio et al., 2020)</li> </ul>

DICOM 파일로부터 변환된 3D 파일을 기반으로 소화기학, 일반외과학, 신경외과학, 방사선과학 등의 학과에서는 가상 내시경, 가상 수술환경 시뮬레이터 등의 비침습적 진료 기술의 개발이 활발히 진행되고 있다. 전통적인 광학 내시경 기반의 진단은 다른 의료영상을 만드는 방법들보다 고화질의 영상을 얻을 수 있지만, 환자에게 불편과 고통을 주며 출혈, 감염 등과 같은 부작용이 발생할 수 있고 진단범위도 제한적이다. 그러나 CT, MRI와 같은 전산화 단층 촬영 장치로 인체 내부에 대한 연속된 단면 영상을 얻어낸 후 인체의 3차원적 구조를 재구성하고, 이를 가상 내시경을 통해 관찰함으로써 내시경 카메라로 보는 것과 같은 효과를 제공함과 동시에 기존 내시경을 이용한 진단법의 단점을 보완할 수 있다.

표 8. 가상 내시경 의료분야 활용 예시	대표 이미지	기술적 특징
 <p>*출처: 김형중(2009)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내시경을 직접 삽입하지 않고도 장기와 같은 복잡한 형상의 3D 시각화 구현 시간이 적고 언제든지 이미지를 다시 재현 가능</li> <li>• CT에 포함된 다른 복부의 장기에 대한 평가가 가능하며, 대장내시경을 시행할 수 없거나 대장 폐색이 있다면 기존 대장내시경을 대체 가능한 기술</li> </ul>	
 <p>*출처: 모닝경제(2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가상 수술환경 시뮬레이터를 활용한 내시경 부비동 수술</li> <li>• 실제 환자에서의 고해상도 CT 영상 기반 이미지로, 병변의 노출 정도, 해부학적 특징 지표, 병변 위치 등을 실제 수술 장면 묘사 가능</li> <li>• 환자 맞춤형 시뮬레이터 개발로 복잡한 부비동 내시경 수술의 리하설로 수술 합병증과 후유증을 최소화(김형중, 2009)</li> </ul>	

초음파 영상의료 분야에서는 최근 초음파 탐색침(probe)에 모터를 장착하여 특정 구간을 연속으로 촬영하도록 함으로써 대상물체에 대한 3D 볼륨 데이터를 획득할 수 있는 3차원 초음파 영상 장치가 개발되고 있다. 그러나 초음파 영상 장치로 획득되는 3D 모델은 영상의 특성상 CT나 MRI 영상을 이용하여 만들어낸 3D

볼륨 데이터처럼 직육면체가 아닌 부채꼴 형태로 변환되므로 기존의 렌더링 방법만을 이용해서 3D 볼륨 데이터로 바로 가시화하기 어렵다. 또한, 현재 개발된 기술은 초당 2세트 정도의 볼륨 데이터를 생성하는 수준이기 때문에 아직은 장치를 통한 3D 모델의 애니메이션 동작까지 획득하기는 힘든 수준이다. 따라서 초음파 영상 기반 3차원 모델 변환 기술의 활용성을 넓히기 위해서는 향후 초음파 볼륨 데이터의 효과적인 전처리 기술, 직교 좌표에서 부채꼴 공간 좌표로 변환하는 좌표 변환 기술, 초음파 데이터의 특성을 이용한 고속 볼륨 데이터 렌더링 기술 등의 고도화가 필요하다.

표 9. 3차원 초음파 영상 의료산업 활용 예시

대표 이미지	기술적 특징
 <p>*출처: 메드월드뉴스(2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 자궁 속 태아의 모습을 입체 동영상으로 보여줄 수 있는 입체동영상 초음파 기기를 도입해, 태아 기형의 양상과 같은 태아의 구체적인 정보와, 선명하고 친근감 있는 뱃속 아기 사진을 획득 가능</li> <li>• 따라서 태아의 얼굴 형태를 실물과 흡사한 사진과 영상으로 표현, 태아 얼굴과 사지에 생길 수 있는 형태 이상을 쉽게 진단할 수 있으며 복부벽 결손, 신경관 결손의 위치와 크기를 측정할 수 있어 자궁 내 태아의 위치 이상과 태아의 정확한 형태 판별에 도움</li> </ul>
 <p>*출처: 후생신보(2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3차원 경식도 심장초음파(TEE, Transesophageal echocardiography) 기기를 활용해 이를 수술실에서 실시간으로 승모판막 성형술 등의 심장 수술에 적용</li> <li>• 심장의 구조 및 기능에 대한 이해가 가능하게 되어 외과위가 수술적 판단을 내리는데 필요한 정보를 훨씬 용이하게 제공</li> <li>• 3D TEE를 승모판막 성형수술 중에 적용하면서 승모판막과 힘줄끈(Cordae Tendinae)의 해부학적 이상 및 그에 따른 승모판막 폐쇄부전에 대한 보다 상세한 입체적 정보를 외과위에게 제공</li> </ul>

이 밖에도 DICOM 파일로부터 변환된 3D 파일은 가상현실(VR)·증강현실(AR)과 같은 첨단 영상 시각화 장치를 이용하여 전통적인 임상진료를 대체하는 가상진료 시스템의 개발에 활용되거나, 환자의 인체 모델에 들어맞는 생체재료 및 의료 기구를 가상으로 설계하고 검증하는 전산모사 시스템을 개발하는데 활용될 수

있으며, 디지털 트윈(digital twin), 메타버스(metaverse)와 같은 첨단 IT 기술의 빠른 발전과 함께 그 활용성이 더욱 커지고 있는 시점이다.

표 10. 가상 인체 모델 구축 활용 예시

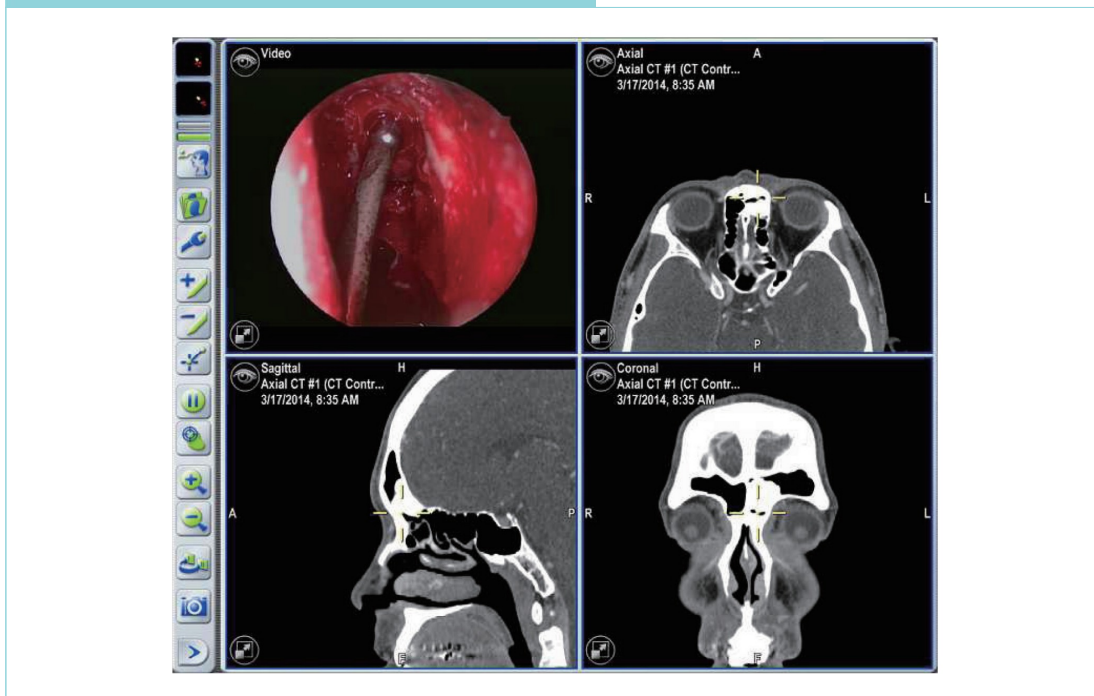
대표 이미지	기술적 특징
 <p>*출처: 디쏘시스템 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 볼류메트릭 라이팅(Volumetric Lighting) 기법을 활용하여 인체를 버추얼 트윈(virtual twin) 이미지로 구현하고, 이를 통하여 약물이 질병에 미치는 영향, 수술 결과 등 치료의 전 과정을 시각화 및 예측 가능 시스템</li> <li>• 심장과 뇌를 증강현실로 구현한 모델로, 미래의 환자 상태를 재현하고, 치료 방안을 테스트하는 용도로 사용 가능</li> </ul>
 <p>*출처: Medical IP 사이트</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 인공지능 기반 3차원 의료영상 분석과 해부학 VR·AR 기술을 접목하여 의학 메타버스 구현</li> <li>• AI 소프트웨어를 활용한 CT 영상의 3D 모델링 및 분석, 3D 모델링 기반 인체 영상 분할, 분할 데이터 기반 VR·AR 해부학 콘텐츠 활용 실습, 3D 프린팅 해부학 모델 제작 등 의료영상을 3D로 구현하고 가상현실을 통해 인체 내부를 직접 분석 가능</li> <li>• 3D 모델링 및 가상현실 연계 디지털 트윈 기술을 의과대 학생 대상의 의학 교육, 의료진 대상의 수술 계획 등에 활용</li> </ul>

### 3. 증강현실 기반 영상유도수술 및 의료영상 3D 시각화 기술

#### 3.1 증강현실 기반 영상유도수술 기술

전통적인 IGS 시스템은 축상(Axial), 관상(Coronal), 사상(Sagittal), 세 단면(임상철, 2015) <그림 4>으로 구성된 복수의 평면 재구성(MPR, Multi-Planar Reconstruction) 화면을 기본 구성으로 한다.

그림 4. 전통적인 IGS 시스템의 화면 구성 예시



\*출처: 임상철(2015)

따라서 수술실의 인원이 내비게이션 화면을 확인하면서 구두로 집도의에게 설명해 주는 것이 아니라면 집도의들은 수술 중 지원 모니터를 보기 위해 수술 부위로부터 고개를 돌릴 수밖에 없다. 더군다나 환부의 위치나 모양, 접근 방법 등이 자동차 도로와 같이 정형화되어 있지 않기 때문에, 음성으로만 정보를 전달하는 것은 한계가 있다. 환부에서 시선을 돌리는 움직임은 외과 의사에게 불편을 초래할 수 있으며 기술적 어려움과 잠재적 오류로 이어질 수 있다(홍재성, 2019).

그러나 앞서 살펴본 DICOM 파일로부터 변환된 3D 모델을 이용하면, IGS 시스템에서 제공하는 내비게이션 화면에 볼륨 데이터로부터 사용자가 원하는 입의시점에 색상을 입힌 3차원 컴퓨터 그래픽 영상을 표현할 수 있다. 아울러, 외부 환경이 보이는 직시형(see-through) 헤드 마운티드 디스플레이(HMD, Head-Mounted-Display)와 같은 증강현실 디스플레이 장비를 통하여 해당 컴퓨터 그래픽 영상을 시각화하면, 집도의가 수술 영역에서 눈을 떼지 않고도 3차원으로 시각화되는 의료영상을 참고하며 수술 작업에 집중할 수 있다. 본 장에서는 증강현실 기반 IGS 기술과, 이상적인 증강현실 IGS를 위한 첨단 3D 디스플레이 활용 기술의 소개 및 최신기술 동향 그리고 향후 발전 방향에 대하여 알아본다.

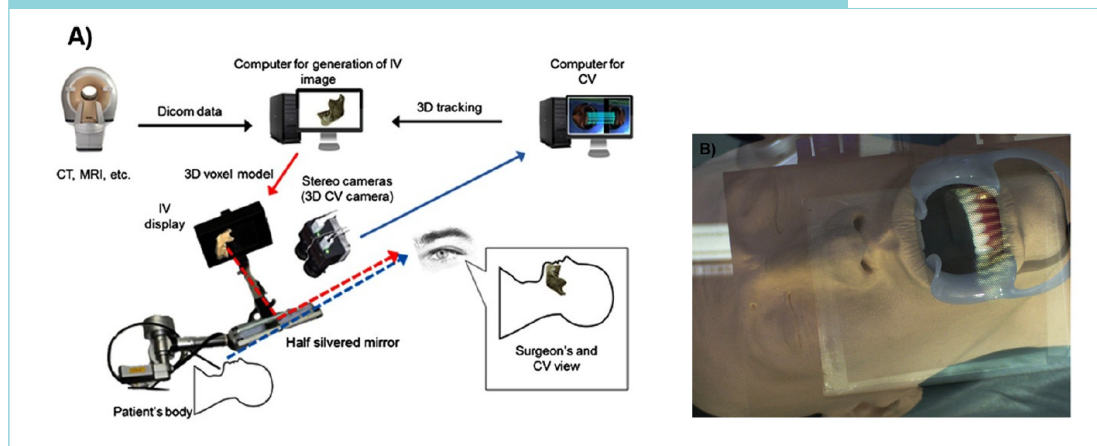
정확하고 신속한 바늘 생검을 위하여 노스캐롤라이나 대학에서는 see-through HMD 기반 증강현실 시스템을 개발했다. 외부 위치추적 센서를 이용해 초음파 탐색침(probe), 생검용 바늘 및 HMD의 위치를 추적하였고, 이를 이용하여 초음파 영상과 삽입된 생검용 바늘의 위치를 착용한 HMD의 화면에 중첩하여 표시하였다. 해당 기술로 HMD를 착용한 의사는 불필요하게 시선을 돌려 별도의 초음파 영상용 모니터를 확인할 필요 없이, 환부에 시선을 그대로 두고 생검용 바늘의 삽입 방향 및 위치를 초음파 영상을 참고하여 실시간으로 파악할 수 있었다(Rosenthal et al., 2002; 홍재성, 2019) <그림 5>.



\*출처: Rosenthal et al.(2002)

동경대학 연구팀은 집적 영상(IV, Integral Videography) 기술을 활용한 첨단 3D IGS 시스템을 개발하였다 (Liao et al., 2004). 해당 시스템에서는 IV 기술로 시각화되는 3D 의료영상 모델을 환부 위의 반투명 거울에 반사하여 환부에 3D 모델이 중첩되어 표시되도록 하였다. 해당 기술은 거치형 증강현실 디스플레이 방식으로, 머리에 아무런 기기를 착용하지 않고도 증강된 의료영상 및 수술용 가이드 정보를 참조할 수 있는 장점이 있다. 유사한 증강현실 내비게이션 시스템 연구(Suenaga et al., 2015) <그림 6>에서는 추가로 스테레오 비전을 이용하여 특수 마커를 사용하지 않고도 증강현실 가이드 영상이 피실험자의 환부에 자동 정합 및 중첩되어 표시될 수 있도록 하였고, 유의미한 임상 결과를 확인하였다.

그림 6. 동경대학의 Integral Videography 기반 증강현실 IGS 시스템

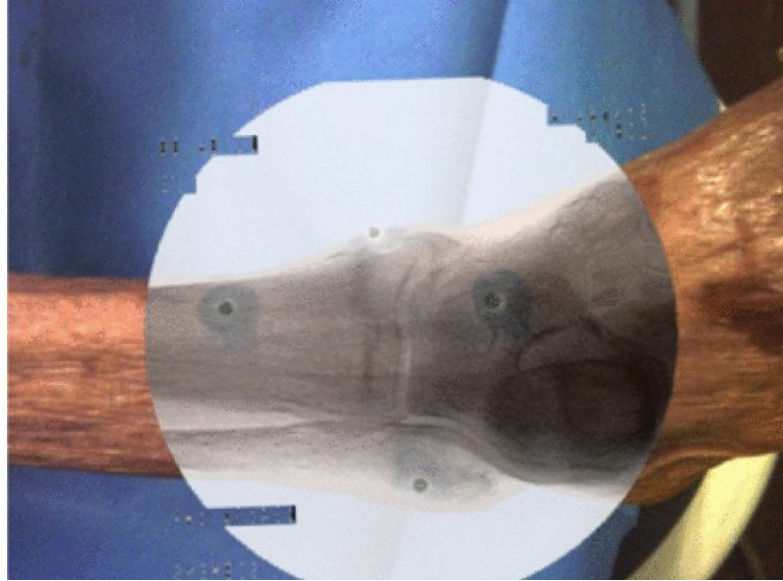


\*출처: Suenaga et al.(2015)

원한공과대학에서는 C-arm(뼈와 관절 부위를 실시간으로 연속으로 투시할 수 있는 X-ray 투시 장치)과 RGB 카메라를 결합해 RGB 카메라 영상 위에 X-ray 영상을 중첩하여 표시하는 증강현실 시스템을 개발하였다. 일반적으로 정형외과에서 시행하는 골수내정 고정술에서는 수술에 사용하는 도구의 상대적 위치를 파악하기 위해 반복적으로 X-ray 촬영을 하게 되는데, 이는 환자와 수술자의 방사선 노출을 증가시키는 원인으로 지적되어 왔다(홍재성, 2019). 그러나 해당 시스템을 이용하면 사전에 정렬된 두 대의 카메라를 이용해 구현된 1mm 이내의 오차로 중첩된 증강현실 영상정보를 통하여 시술 시 X-ray 촬영 횟수를 유의미하게 줄일 수 있었다(Navab et al., 2010) <그림 7>.



그림 7. 만현공과대학의 RGB 카메라 영상 위 X-ray 영상을 중첩 표시하는 증강현실 시스템



\*출처: Navab et al(2010)

### 3.2 증강현실 기반 IGS 기술의 향후 극복 과제

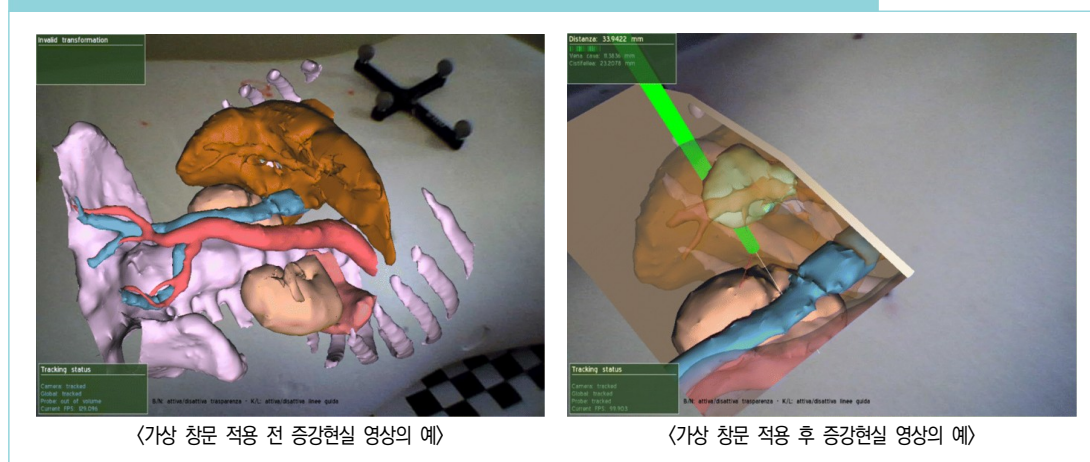
앞서 살펴본 선행연구들을 바탕으로 기술의 발전을 거듭하여 현재 증강현실 기반 IGS 기술은 의료현장에서 실증을 통한 검증 및 보완연구를 수행하는 단계에 있다. 하지만 여전히 기술의 높은 도입비용 대비 낮은 기대효과, 이상적인 기술구현의 어려움, 사용의 불편감 등으로 인한 실질적인 기술의 상용화에는 어려움이 있는 수준이며, 기술의 단점을 극복하기 위한 고도화 연구, 상용화 연구가 절실히 필요한 시점이다.

증강현실 기반 IGS 기술의 가장 대표적인 문제는 가상영상의 부정확한 깊이감 재현이다(De Paolis & De Luca, 2019). 예를 들어, 특별한 영상 신호처리가 적용되지 않은 증강현실 디스플레이의 경우 증강현실 영상으로 재현되는 3D 모델이 환자의 몸에 정확하게 중첩되어 시각화되더라도 이 증강현실 영상은 언제나 환자 앞에 있는 것처럼 보인다. 증강현실 영상이 환자를 가리기 때문에 가려짐에 의한 입체감 인지 충돌이 발생하기 때문이다. 즉, 인간의 시각 시스템을 모방하여 다양한 깊이 인식 단서를 정확하게 제공하지 않으면 오히려 깊이감 인지 기체의 혼선이 발생하고, 이로 인하여 실질적으로 IGS가 수술에 부정적인 결과를 초래할 수 있다(Sielhorst et al., 2006).

인간의 시각 시스템에서 깊이 인식은 서로 다른 설득력, 정밀도, 상호작용 방식을 가진 다양한 깊이 단서에 의존하기 때문에 매우 복잡한 기제로 동작이 일어난다(Cutting & Vishton, 1995). 따라서 인간의 시각 시스템을 모방하여 입체감을 재현하는 증강현실 기반 3D 디스플레이 장치에서 완벽한 입체감 재현은 사실상 불가능에 가깝다. 그러나 이것과 별개로 강력한 시각적 깊이 인지 단서들의 통제 및 이들의 자연스러운 상호작용이 가능해야 의료현장에서 외과 의사들이 거부감 없이 IGS 기술을 자연스럽게 활용할 수 있을 것이다.

이러한 관점에서 깊이감 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 Bichlmeier, Navab 연구진은 환자 내부를 가상의 창문을 통하여 보는 듯한 느낌을 주도록 하는 연구를 수행하였다(Bichlmeier & Navab, 2006) <그림 8>. 창문 프레임은 시각화된 뼈와 조직의 파편을 일부 덮으며, 움직임 시차 및 폐색(occlusion) 영역에 의한 깊이 인지를 가능하게 하여 디스플레이 장치의 부정확한 입체감을 시각적으로 교정한다.

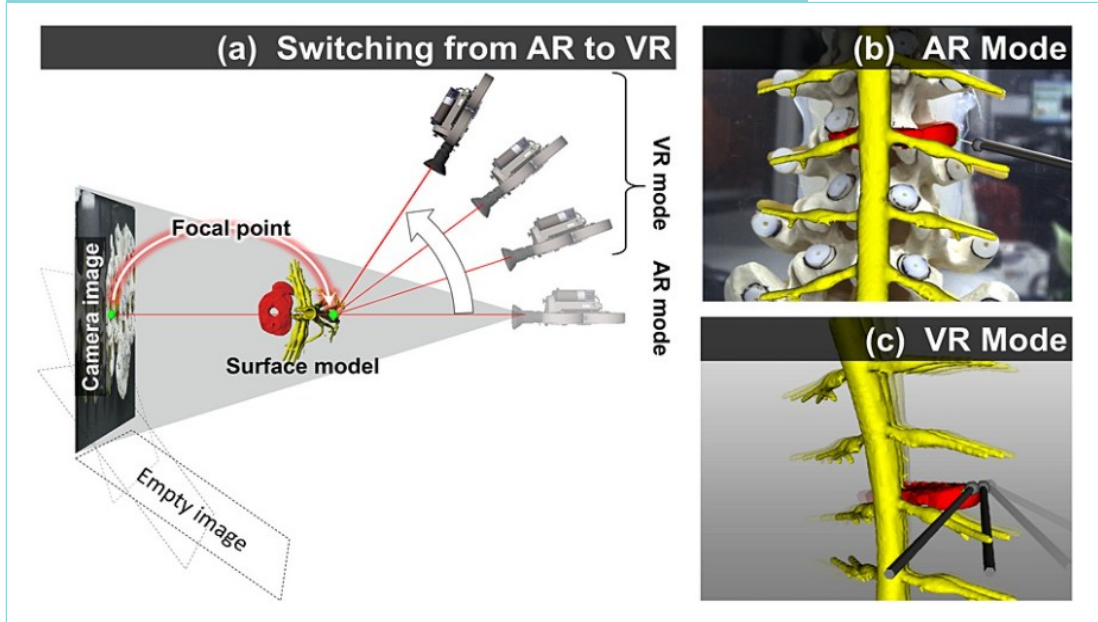
그림 8. 가상 창문을 이용한 증강현실 영상의 입체감 지각 오류 보정 연구



\*출처: De Paolis & De Luca(2019)

대구경북과학기술원의 연구진은 전통적인 증강현실 기반 IGS 내비게이션 시스템의 부정확한 깊이감 인식 문제를 저감하기 위하여 증강현실 화면을 가상현실 화면으로 손쉽게 전환하는 기술을 개발하여 의사가 선택적으로 화면을 선택할 수 있도록 하였다(Choi et al., 2016) <그림 9>. 증강현실 화면에서는 DICOM으로부터 변환된 3D 모델과 환자를 동시에 볼 수 있는 장점이 있고, 가상현실 화면에서는 불필요한 시각정보를 차단하여 3D 의료 영상의 깊이감 인지를 제고하는 방식이다. 또한 수술 도구의 끝과 가장 근거리의 인체 조직까지의 거리나 각도 등을 실시간으로 계산하여 제공하는 기술을 통하여 증강현실 영상의 부족한 깊이감 인지 단서를 시각적으로 보완하는 기술을 개발하였다.

그림 9. 대구경북과학기술원의 증강현실-가상현실 화면 전환 시스템



\*출처: Choi et al.(2016)

부정확한 깊이감 재현 문제 외에도 현재 증강현실 기반 IGS 기술은 특히 착용형 시스템에 있어서 장시간 머리에 착용해야 하는 불편함에 따른 육체적 피로, HMD를 통해 제공되는 Stereoscopic 3D 영상의 수렴-조절 거리 불일치로 인한 시각피로의 문제(Shibata et al., 2011)가 커다란 기술적 단점으로 지목되고 있다. 그리고 무엇보다 양안 동공거리 등 사용자 개인 변인에 따라 양안시차로부터 지각되는 입체감의 왜곡이 발생 가능한 기술의 태생적 한계가 있으므로 정교한 수술이 요구되는 분야에 적용이 어려운 등 기술의 활용성이 여전히 제한적이라 할 수 있다(Conдино et al., 2019).

### 3.3. 첨단 3D 의료영상 시각화 기술

이상적인 3D IGS를 위한 내비게이션 시스템은 의사가 환자의 해부학적 구조를 한눈에 식별 가능하도록, 환자의 의료영상에서 복원된 3D 모델을 정확하고 사실적인 3D 입체영상으로 재현할 수 있어야 한다. 또한 장시간 사용에도 신체적 그리고 정신적으로 불편함이 없어야 하며, 무엇보다 수술 과정에 있어 3D IGS 기술의 도입이 간섭요인이 되지 않아야 비로소 의료현장에서 외과의들의 큰 거부감 없이 기술이 활용될 것이다. 이를 위해 현재 3D IGS 분야에서는, see-through HMD를 이용한 증강현실 시스템 외에도 다양한 3D 디스플레이

장치를 이용한 첨단 3D 내비게이션 시스템 개발이 활발히 진행되고 있다.

먼저 Sony, Barco의 경우 한 대의 모니터에서 좌/우안 영상을 동시에 송출하되, 3D 전용 필터가 적용된 특수안경을 사용자가 착용함으로써 각 안구에 분리된 좌/우안 영상을 지각할 수 있도록 하는 Stereoscopic 3D 방식의 3D IGS용 디스플레이를 개발하였다. 해당 디스플레이는 패널(panel)의 해상도 또는 주사율이 실질적으로 반으로 감소하는 단점이 있으며, 무엇보다 양안시차에 의존한 깊이 단서 제공으로 운동시차가 제한되고 눈의 수렴-조절 거리가 일치하지 않아서 장시간 시청하면 시각적 피로감이 발생하는 전형적인 Stereoscopic 3D 디스플레이의 문제가 있다.

3D PluraView의 경우 조금 더 진보된 형태의 Stereoscopic 3D 디스플레이 장치로, 해상도 혹은 주사율의 저하를 막기 위해 두 대의 모니터에서 각각 좌/우안 영상을 따로 송출하였고 편광 반투명 거울(polarizing beam splitter mirror)을 사용하여 송출된 좌/우안 영상을 공간적으로 결합하는 방법을 개발하였다. 그러나 편광 반투명 거울에 의해 밝기가 감소하고, 사용하는 디스플레이 패널 수가 늘어남에 따라 시스템의 부피가 크고 단가가 비싼 단점이 있다.

Olympus, Leica Microsystems의 경우 3D 현미경 시스템으로 접안렌즈를 통해 각 안구에 해당하는 좌/우안 영상을 송출하여 Stereoscopic 3D를 구현하고, 시술/수술 중 시선을 옮기는 것을 최소화하기 위해 영상 투과식(video see-through) 타입으로 HMD 기반 증강현실을 제공하는 방법을 개발하였다. 집도 의사는 HMD 장치를 통해 내비게이션 시스템을 직접 제어하며 증강현실 영상을 관찰할 수 있고, 보조 인력은 추가적인 Stereoscopic 3D 디스플레이 장치를 통해 내비게이션 상황을 함께 관찰할 수 있는 특징이 있다.

Augmedics는 X-ray로 촬영된 의료영상을 증강현실로 시각화하는 HMD 타입의 내비게이션 시스템을 개발하였다. 근안용 디스플레이(NED, Near-Eye Display) 기술을 사용하여 광학 투과식(optical see-through) 타입의 증강현실 재현이 가능하고, 증강현실 영상을 보다 정밀하게 정합하기 위하여 적외선 카메라와 수동형 optical marker를 사용하였다. 증강된 가상영상은 6 자유도를 제공하는 장점이 있다.

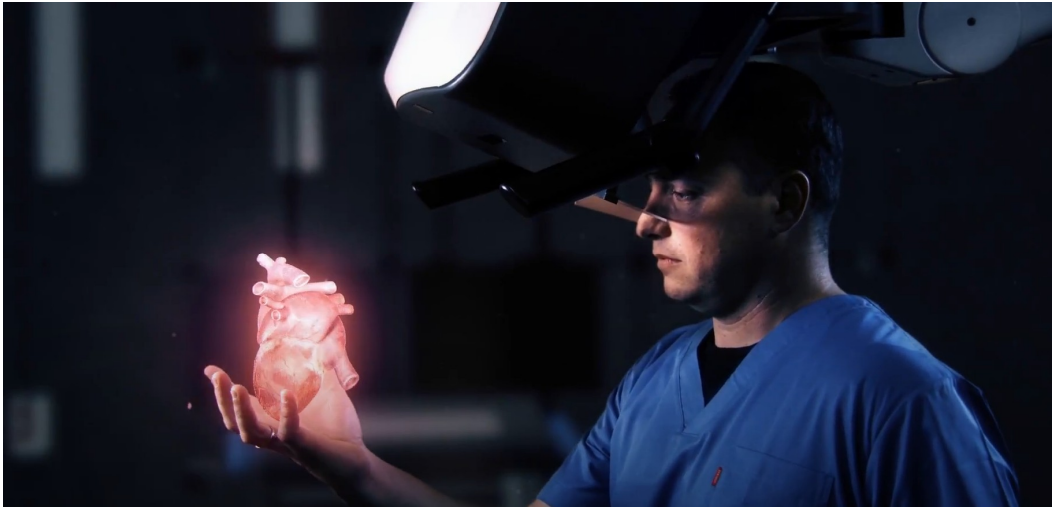
VOXON은 고속으로 왕복하여 움직이는 스크린에 초당 4000장의 단면 영상을 투영하고, 인간 눈의 잔상효과를 이용하여 체적 입체영상을 시각화하는 Volumetric 3D 타입의 시스템을 개발하였다. 시청자는 아무런 보조 기기의 착용이 필요 없으며, 자유로운 위치에서 그리고 360도 전방향 입체영상 시청이 가능하다. 다만, 고속으로 왕복하여 이동하는 스크린의 특성상 진동, 내구, 소음 등의 물리적 운동에 의한 불가피한 단점이 존재하고, 눈의 잔상효과에 의지하는 시각화 장치이기 때문에 재현되는 입체 영상의 밀도, 휘도, 대비, 선명도 등 영상 품질이 절충되는 단점이 있다.



대표 이미지	기술적 특징 요약	적용된 기술 분류
 <p>Leica Microsystems, ARveo 8 *출처: Leica-microsystems 사이트</p>	<p>31" FHD 현미경을 포함한 51" 4k 3D 의료용 모니터 시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 양안에 각각 고해상도 영상과 피사계 심도(DOF, Depth Of Field)가 높은 영상을 투영</li> <li>• AR 형광으로 신경외과를 위한 향상된 시각화 제공</li> <li>• 보조 모니터 3D 영상: 전용 원편광 필터 안경 착용</li> <li>• 보조 모니터 2D 영상: 전용 원편광 필터 안경 미착용</li> <li>• PACS, DICOM에 최적화</li> <li>• KARL STORZ의 video 시스템과 PIP 디스플레이 포맷</li> </ul>	<p>Stereoscopic Wearable AR</p>
 <p>Augmedics, vXion *출처: Augmedics 사이트</p>	<p>HMD 형태의 의료용 AR 내비게이션 시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1280x720 pixel resolution</li> <li>• X-ray 기반 영상 제공</li> <li>• Tracking 카메라(6 DoF)가 장착된 투과형 NED</li> <li>• Tracking을 위한 적외선 카메라와 수동형 optical marker 사용</li> <li>• DICOM을 사용한 USB 및 LAN 연결을 통한 통신</li> </ul>	<p>Stereoscopic Wearable AR</p>
 <p>VOXON, VX1 *출처: Voxon 사이트</p>	<p>스크린의 잔상효과를 이용한 전방향 3D 영상 시청 시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 디스플레이 크기: 18cm x 18cm x 8cm</li> <li>• 200 million voxels</li> <li>• 360도 전방향 시청</li> <li>• DICOM, KV6, 표준 3D 파일 등 다양한 포맷</li> <li>• DICOM을 사용한 USB 연결</li> </ul>	<p>Volumetric Auto</p>

이스라엘의 스타트업 RealView Imaging의 경우는 최근 자사의 Digital Light Shaping 기술을 이용한 홀로그래피(Holography) 시스템 Hologscope-i를 발표하였다. Hologscope-i는 의사에게 자연스러운 3D 시각화 경험을 제공하는 세계 최초이자 유일한 의료용 홀로그래피 시스템으로 Stereoscopy 방식이 아닌 빛의 간섭 효과를 이용한 진정한 홀로그래피를 구현하였다. 해당 기술은 수렴-조절 거리 불일치 문제에서 자유롭기 때문에 장시간 시청해도 무리가 없으며, 동적 3D 모델의 표현이 가능하고, 손동작 인식 기능을 통하여 홀로그램을 직관적으로 제어할 수 있는 등의 지금까지 소개된 의료용 3D 입체영상 시각화 장치 중 가장 진보된 기술로 보도되고 있다. 그러나 해당 기술 또한 의사의 머리 위에 매달린 형태의 근안용 디스플레이(NED) 장치를 통해 홀로그램을 시청하는 방식으로 의사의 시청 위치가 장치로부터 벗어 날 수 없는 단점이 있으며, 재현되는 홀로그램 또한 장치로부터 미리 설계된 고정거리로 제한될 것으로 보인다.

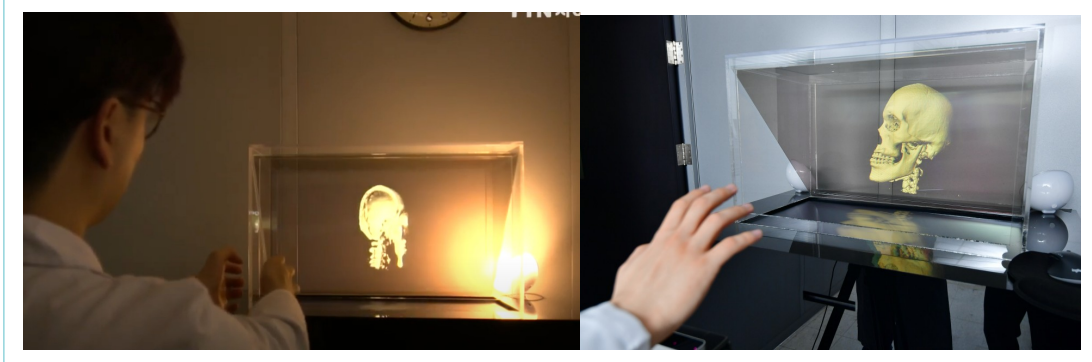
그림 10. RealView Imaging의 세계 최초 의료용 홀로그래피 시스템



\*출처: RealView Imaging 사이트

국내 기업으로는 이안하이텍이 최근 한국과학기술연구원과 글로벌 경쟁력 있는 의료보조용 메디컬 홀로그램 시스템 개발을 위한 공동 연구 계획을 발표했다(메디컬투데이, 2021). 한국과학기술연구원이 개발한 의료용 3D 시각화 시스템은 초다시점(SMV, Super Multi-View) 3D 디스플레이 패널에서 재현되는 입체 영상을 반투명 거울을 이용하여 허공에 띄운 형태로 구성되며, 인공지능 기반의 사용자 위치 및 동작 인식 기술로 시각화 장치 및 재현되는 3D 모델이 자동으로 조절되는 특징을 가진다(YTN science, 2021). 해당 기술을 이용하면 의사는 특수한 기기를 착용하지 않고도 비교적 넓은 범위 안에서 위치나 자세와 상관없이 고품질의 입체 영상을 시청할 수 있으며, 간단한 손동작만으로 입체영상을 제어할 수 있다. 그러나 자동 조절 기능은 사용자가 시스템 구조물 전면부에 부착된 인식용 카메라의 범위 밖으로 사라지면 동작하지 않고, SMV 특성상 수렴-조절 거리 불일치 문제를 완벽히 해소하기 어려운 점 등이 해당 기술의 한계점이라 할 수 있다.

그림 11. 이안하이텍-KIST 공동 개발 의료용 3D 시각화 시스템



\*출처: (좌) YTN science(2021), (우) 저자 작성



### III 결론

지금까지 기본적인 의료영상의 종류에서부터 이를 가공하여 저장 및 전송하는 방법, 그리고 최소침습수술을 위한 외과적 수술 분야의 IGS 기술의 현황과 문제점, 그리고 첨단 인공지능 기술 및 3D 영상 시각화 기술을 적용한 차세대 의료영상 시각화 기술 분야의 동향까지 모두 살펴보았다. 전통적으로 의료영상은 질병 진단의 영역에 머물러 있었으나 의료영상의 디지털화, 파일 형식의 국제표준화, 저장 및 전송 시스템의 개발, 그리고 시각화 도구의 발전 덕분에 그 활용성이 다양한 의료분야로 점차 확대되고 있다. 특히 인공지능, 증강현실, 3차원 영상 시각화 기술 등 첨단 4차 산업혁명 기술의 적용으로 의료영상은 외과적 수술 분야에서 진단의 수단만이 아닌 이상적인 IGS 구현을 위한 해부학적 내비게이션 지도로 활용되고 있음을 알 수 있었다.

현재 증강현실 기반 IGS 기술은 상용 AR/VR HMD 기기의 발전과 함께 가장 먼저 의료현장에 적용되어 임상 등 실증 연구가 활발히 진행되고 있는 첨단 3D IGS 기술 중 하나이다. 증강현실 기반의 IGS 기술은 내시경이나 현미경을 사용하는 수술의 경우에 특히 효과적인 IGS 대안이 될 것으로 전망된다. 다만 환자-영상 정합이나 수술 도구의 추적을 위해서 값비싼 센서의 사용, 오랜 시간 정교한 시스템 환경 구성 및 준비 등이 필요한데 이러한 비용을 어떻게 절감할 것인가가 해당 기술의 보급에 있어서 중요한 난관이 될 것으로 보인다. 이 밖에도 기기의 착용에 따른 신체적 불편함, 완전하지 않은 입체감 표현과 부정확한 깊이감 제공 등은 해당 기술이 태생적으로 실효성이 낮은 원인으로 지적되기도 한다.

이상적인 3D IGS 기술은 의사로부터 환자의 해부학적 구조에 대한 이해를 돕고, 수술 기구와 환자의 생체 조직 사이의 공간 관계를 정확하고 파악할 수 있도록 하며, 수술 가이드 정보를 직접적으로 시각화하여 지원할 수 있다. 이를 통해 궁극적으로 외과 의사는 개인의 숙련도에 무관하게 기술적 도움으로 수술 전과 수술 중에 환자의 3차원적 병변을 매우 빠르고 정확하게 이해할 수 있을 것이며, 결과적으로 수술의 성공률 제고와 함께 합병증 발생을 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해 현재 홀로그래피, 초다시점(SMV) 등 첨단 3D 영상 시각화 기술을 이용한 첨단 3D IGS 기술 개발에 대한 사회적 관심이 증가하고 있으며, 재현되는 3차원 의료영상에 대한 감각적 부작용이 없는 이상적인 기술이 개발된다면 향후 많은 병원과 수술 현장에서 IGS 기술의 보편적으로 사용될 수 있을 것이다.

저자\_ 강민구(Min Koo Kang)

• 학력

광주과학기술원 컴퓨터비전 박사  
광주과학기술원 영상신호처리 석사  
인하대학교 전자공학 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 인공지능연구단 선임연구원

저자\_ 한형섭(Hyung Seop Han)

• 학력

University of Oxford Medical Science 박사  
University of Iowa Biomedical Engineering 석사  
University of Iowa Biomedical Engineering 학사

• 경력

現) 한국과학기술연구원 생체재료연구센터 선임연구원

## 참고문헌

### 〈국내문헌〉

- 1) 김형중, "가상내장내시경 : CT Colonography (CTC) : Virtual Colonography," 대한내과학회지, 2009;77:20.
- 2) 이예하, 김현준, 김국배, 김남국, "의료영상 분석을 위한 딥러닝 기반의 특징 추출 방법," 대한의학영상정보학회지 2014;20:1-12.
- 3) 임상철. "영상유도 부비동 내시경수술," Korean Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, 2015;305-312.
- 4) 홍재성, "의료용 증강현실 및 가상현실," 대한영상의학회지, 2019;226-238

### 〈국외문헌 및 도서〉

- 5) Mondal, S. B., Tsen, S. W. D., & Achilefu, S. (2020). Head-Mounted Devices for Noninvasive Cancer Imaging and Intraoperative Image-Guided Surgery. *Advanced Functional Materials*, 30(37), 2000185.
- 6) Gregory, T. M., Gregory, J., Sledge, J., Allard, R., & Mir, O. (2018). Surgery guided by mixed reality: presentation of a proof of concept. *Acta orthopaedica*, 89 (5), 480-483.
- 7) Ratib, O., Roduit, N., Nidup, D., De Geer, G., Rosset, A., & Geissbuhler, A. (2016). PACS for Bhutan: a cost effective open source architecture for emerging countries. *Insights into imaging*, 7 (5), 747-753.
- 8) Lee, J. W., Ahn, J. Y., Kim, J. H., Kang, H. S. & Park, K. S. "Image Processing Model on PACS Environment Based DICOM", *대한PACS학회지* 2001;7:49-52
- 9) Krauel, L., Valls-Esteve, A., Tejo-Otero, A., & Fenollosa-Artés, F. (2021). 3D-Printing in surgery: Beyond bone structures. A review. *Annals of 3D Printed Medicine*, 4, 100039.
- 10) Sauer, F. (2006, January). Image registration: enabling technology for image guided surgery and therapy. In 2005 IEEE engineering in medicine and biology 27th annual conference (pp. 7242-7245). IEEE.
- 11) Knott, P. D., Batra, P. S., & Citardi, M. J. (2006). Computer aided surgery: concepts and applications in rhinology. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 39(3), 503-522.
- 12) Kingdom T. T & Orlandi R. R. (2004). Image-guided surgery of the sinuses: current technology and applications. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 37(2), 381-400.
- 13) Eggers, G., Mühling, J., & Marmulla, R. (2006). Image-to-patient registration techniques in head surgery. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 35(12), 1081-1095.

- 14) Mascott, C. R., Sol, J. C., Bousquet, P., Lagarrigue, J., Lazorthes, Y., & Lauwers-Cances, V. (2006). Quantification of true in vivo(application) accuracy in cranial image-guided surgery: influence of mode of patient registration. *Operative Neurosurgery*, 59(suppl\_1), ONS-146.
- 15) Knott, P. D., Batra, P. S., & Citardi, M. J. (2005). Contour-Based and Paired-Point Registration in a Model for Image-Guided Surgery. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2(133), P114-P115.
- 16) Hu, Z., Fang, C., Li, B., Zhang, Z., Cao, C., Cai, M., ... & Tian, J. (2020). First-in-human liver-tumour surgery guided by multispectral fluorescence imaging in the visible and near-infrared-I/II windows. *Nature biomedical engineering*, 4(3), 259-271.
- 17) Widmann, G. (2007). Image-guided surgery and medical robotics in the cranial area. *Biomedical imaging and intervention journal*, 3(1).
- 18) Dubach, P., Eichenberger, A., & Caversaccio, M. (2010). Radiation dose reduction in computer assisted navigation for functional endoscopic sinus surgery--cadaver head experiments and clinical implementation. *Rhinology*, 48(3), 339-343.
- 19) Kim, Y. J., & Kim, K. G. (2020). Development of an Optimized Deep Learning Model for Medical Imaging. *Journal of the Korean Society of Radiology*, 81(6).
- 20) Hong, J. Y., Park, S. H., & Jung, Y. J. (2020). Artificial intelligence based medical imaging: An overview. *Journal of radiological science and technology*, 43(3), 195-208.
- 21) Bücking, T. M., Hill, E. R., Robertson, J. L., Maneas, E., Plumb, A. A., & Nikitichev, D. I. (2017). From medical imaging data to 3D printed anatomical models. *PloS one*, 12(5), e0178540.
- 22) Osti, F., Santi, G. M., Neri, M., Liverani, A., Frizziero, L., Stilli, S., ... & Trisolino, G. (2019). CT conversion workflow for intraoperative usage of bony models: From DICOM data to 3D printed models. *Applied Sciences*, 9(4), 708.
- 23) Kamio, T., Suzuki, M., Asaumi, R., & Kawai, T. (2020). DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. *3D Printing in Medicine*, 6(1), 1-12.
- 24) Rosenthal, M., State, A., Lee, J., Hirota, G., Ackerman, J., Keller, K., ... & Fuchs, H. (2002). Augmented reality guidance for needle biopsies: an initial randomized, controlled trial in phantoms. *Medical Image Analysis*, 6(3), 313-320.
- 25) Liao, H., Hata, N., Nakajima, S., Iwahara, M., Sakuma, I., & Dohi, T. (2004). Surgical navigation by autostereoscopic image overlay of integral videography. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 8(2), 114-121.

- 26) Suenaga, H., Tran, H. H., Liao, H., Masamune, K., Dohi, T., Hoshi, K., & Takato, T. (2015). Vision-based markerless registration using stereo vision and an augmented reality surgical navigation system: a pilot study. *BMC medical imaging*, 15(1), 1–11.
- 27) Navab, N., Heining, S. M., & Traub, J. (2009). Camera augmented mobile C-arm(CAMC): calibration, accuracy study, and clinical applications. *IEEE transactions on medical imaging*, 29(7), 1412–1423.
- 28) De Paolis, L. T., & De Luca, V. (2019). Augmented visualization with depth perception cues to improve the surgeon's performance in minimally invasive surgery. *Medical & biological engineering & computing*, 57(5), 995–1013.
- 29) Sielhorst, T., Bichlmeier, C., Heining, S. M., & Navab, N. (2006, October). Depth perception—a major issue in medical AR: evaluation study by twenty surgeons. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* (pp. 364–372). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 30) Bichlmeier, C., & Navab, N. (2006, October). Virtual window for improved depth perception in medical AR. In *International Workshop on Augmented Reality environments for Medical Imaging and Computer-aided Surgery(AMI-ARCS)* (pp. 1–5).
- 31) Choi, H., Cho, B., Masamune, K., Hashizume, M., & Hong, J. (2016). An effective visualization technique for depth perception in augmented reality-based surgical navigation. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 12(1), 62–72.
- 32) Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D. M., & Banks, M. S. (2011, February). Visual discomfort with stereo displays: effects of viewing distance and direction of vergence-accommodation conflict. In *Stereoscopic Displays and Applications XXII* (Vol. 7863, p. 78630P). International Society for Optics and Photonics.
- 33) Mosges, R., & Klimek, L. (1993). Computer-assisted surgery of the paranasal sinuses. *The Journal of Otolaryngology*, 22(2), 69–71.
- 34) Peters, T. M. (2006). Image-guidance for surgical procedures. *Physics in Medicine & Biology*, 51(14), R505.
- 35) Klimek, L., Mösges, R., Schlöndorff, G., & Mann, W. (1998). Development of computer-aided surgery for otorhinolaryngology. *Computer Aided Surgery: Official Journal of the International Society for Computer Aided Surgery (ISCAS)*, 3(4), 194–201.
- 36) Fried, M. P., Kleefield, J., Gopal, H., Reardon, E., Ho, B. T., & Kuhn, F. A. (1997). Image-guided endoscopic surgery: results of accuracy and performance in a multicenter clinical study using an electromagnetic tracking system. *The Laryngoscope*, 107(5), 594–601.

- 37) Metson, R. B., Cosenza, M. J., Cunningham, M. J., & Randolph, G. W. (2000). Physician experience with an optical image guidance system for sinus surgery. *The Laryngoscope*, 110(6), 972-976.
- 38) Condino, S., Carbone, M., Piazza, R., Ferrari, M., & Ferrari, V. (2019). Perceptual limits of optical see-through visors for augmented reality guidance of manual tasks. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(2), 411-419.
- 39) Tran, M. H., & Vu, H. M. Q. (2016, November). A research on 3D model construction from 2D DICOM. In 2016 International Conference on Advanced Computing and Applications(ACOMP) (pp. 158-163). IEEE.
- 40) Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In *Perception of space and motion* (pp. 69-117). Academic Press.
- 41) Kuo, W., Häne, C., Mukherjee, P., Malika, J., Yuh, E. L. (2019). Expert-level detection of acute intracranial hemorrhage on head computed tomography using deep learning. *PNAS*, 116 (45), 22737-22745.
- 42) Sachpekidis, C., Goldschmidt, H., Dimitrakopoulou-Strauss, A. (2020). Positron Emission Tomography(PET) Radiopharmaceuticals in Multiple Myeloma. *Molecules*, 25 (1), 134.
- 43) Pianykh, O. S. "Digital Imaging and Communication in Medicine(DICOM) ; A practical Introduction and Survival Guide (2nd edition), 2012, Springer

#### 〈기타자료〉

- 44) 김기원. (2017.11.22.). [전시]김한겸 고대구로병원 병리과 교수, 12월3일 까지 현미경 전시회. 의사신문. <http://www.doctorstimes.com/news/articleView.html?idxno=190769>
- 45) 김길원. (2020.09.09.). [명의에게 묻다] 젊은층 노리는 대장암...첫 대장내시경검사는 '언제'. 연합뉴스. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200908104100508>
- 46) 김동주. (2021.12.02.). KIST, 이안하이텍에 '메디컬 홀로그램 기술' 이전...시스템 개발 공동 연구. 메디컬투데이. <https://mdtoday.co.kr/news/view/1065572487145982>
- 47) 김원철. (2005.06.30). 3D입체에 동영상 추가한 4D 초음파기기 도입. 메드월드뉴스. <https://www.medworld.co.kr/news/articleView.html?idxno=6752>
- 48) 나미경. (2018.03.12.). 가상현실(VR)로 수술 전 리허설 한다. 모닝경제. <https://www.menews.co.kr/news/articleViewAmp.html?idxno=4985>

- 49) 양혜영. (2021.12.09.). 3D 홀로그램 보며 집도...새 수술시대 열린다. YTN사이언스.  
[https://science.ytn.co.kr/program/program\\_view.php?s\\_mcd=0082&s\\_hcd&key=202112091128405086](https://science.ytn.co.kr/program/program_view.php?s_mcd=0082&s_hcd&key=202112091128405086)
- 50) RealView Imaging 사이트. <https://realviewimaging.com/>
- 51) 이상섭. (2008.05.13.) 건국대병원, 3D 경식도 심장초음파 가동. 후생신보. <http://www.whosaeng.com/20670>
- 52) 나래의료재단 블로그, <https://m.blog.naver.com/naraemedical01/222016923246>
- 53) 나래의료재단 블로그, <https://m.blog.naver.com/naraemedical01/222016923246>
- 54) 디쓰시스템 사이트. <https://www.3ds.com/ko/newsroom/media-alerts/dassault-systemes-showcase-virtual-twin-experience-human-body-ces-2022>
- 55) Artms 사이트. <https://www.artms.ca/quantm-99/>
- 56) Augmedics 사이트. <https://augmedics.com/>
- 57) BARCO 사이트. 출처: <https://www.barco.com/ko/products/surgical-displays>
- 58) Corelinesoft 사이트. <https://www.corelinesoft.com/aview-modeler/>
- 59) El Dorado Imaging 사이트. <https://eldoradoimaging.business.site>
- 60) Itksnap 사이트. <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>
- 61) Leica-microsystems 사이트.  
<https://www.leica-microsystems.com/products/surgical-microscopes/p/arveo-8/>
- 62) Lunit 사이트. <https://www.lunit.io/ko/products/insight-mmg>
- 63) Medical IP 사이트. <https://medicalip.com/>
- 64) Medical IP 사이트. <https://medicalip.com/>
- 65) Olympus 사이트. 출처: <https://olympusmedical.com.sg/products/3d-imaging-solution>
- 66) PostDICOM 사이트. <https://www.postdicom.com/>
- 67) Psychology Software Tools 사이트, <https://pstnet.com/products/e-prime-extensions-for-fmri/>
- 68) Rosalyn Carson-DeWitt, (2022). PET/CT Scan, Western New York Urology Associates.  
<https://www.wnyurology.com/content.aspx?chunkid=120481>
- 69) Santesoft 사이트. <https://www.santesoft.com/index.htm>
- 70) Slicer Community 사이트. <https://slicer.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- 71) SONY 사이트. [https://pro.sony/ko\\_KR/products/surgical-monitors](https://pro.sony/ko_KR/products/surgical-monitors)
- 72) Stratovan 사이트. <https://www.stratovan.com/products/pro-surgical-3d>
- 73) Venturebeat 사이트. <https://venturebeat.com/2020/03/27/huiying-medical-claims-its-ai-can-detect-coronavirus-from-ct-scans-with-96-accuracy/>
- 74) Voxon 사이트. <https://voxon.co>
- 75) 3d-pluraview 사이트. 출처: <https://www.3d-pluraview.com/en/specifications>

# 융합연구리뷰

Convergence Research Review 2022 February vol.8 no.2

이 보고서는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임

(No. NRF-2012M3C1A1050726)