양자 크럼프 (Quantum Krump): 크럼프 스트리트 댄스, 라반 동작 분석 및 응용 범주론을 통한 중첩, 양자 얽힘 및 위상 간섭의 신체화 교육

아룬 나다라사 (Arun Nadarasa)
Angels of Krump Movement Federation
https://arunnadarasa.github.io/quantumkrump/

다코타 시마오 (Dakota Simao)
Twin Bad Liks / *Jr Outrage*
예술 감독 및 안무가, 크럼프 / 현대 무용
스위스 제네바 (Geneva, Switzerland)
https://www.youtube.com/@dakotasimao

2026년 11월 *프리프린트*

초록

우리는 크럼프(Krump) 스트리트 댄스, 라반 동작 분석(LMA) 및 응용 범주론을 통해 중첩(superposition), 양자 얽힘(entanglement), 위상 간섭(phase interference)을 직관적으로 학습시키는 신체 우선(body-first) 동작 워크숍이자 오픈 웹 애플리케이션 및 극장 무대 안무 프레임워크인 *양자 크럼프 (Quantum Krump)*를 제시한다. 본 교육과정은 라반의 노력 요소(Effort Factors)를 크럼프의 핵심 기초 동작(`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`) 및 블로흐 구(Bloch sphere)의 3차원 공간 레벨(`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`)에 구조적으로 대응시킨다. 안무 시퀀스는 DisCoPy를 통해 프로베니우스 대수(Frobenius algebra)를 갖춘 대거 컴팩트(dagger-compact) 대칭 모노이달 범주로 정식화되어, 이중함자 교환 법칙(bifunctorial interchange law)과 스네이크 방정식(snake equations)의 위상수학적 팽팽한 당김(yanking) 축약을 엄밀하게 증명한다. 우리는 안무가 다코타 시마오(Dakota Simao)와 공동 개발한 최대 20인의 무용수를 위한 60분 전막 무용 제작 프레임워크인 *제11 양자 차원 (11th Quantum Dimension)*을 제시하며, 고전 비트, 연속 큐비트, 중첩, 얽힘 및 위상 간섭을 기술적 언어 장벽을 초월하여 직관적으로 체감할 수 있는 가정폭력 극복의 감정적 서사로 번역한다. 본 무대화는 글로벌 월드 투어를 위해 Three.js 3D WebGL 무대 공간화, anime.js 안무 타임라인, ElevenLabs AI 음성 설계, 그리고 Moth Quantum 오디오/비주얼 합성을 통합한다. 우리는 맹검 품질 관리(Blinded QC, $\Delta = 0.0009$) 및 영(zero) 대조군($|\Delta| = 0.0132$) 게이트를 통과한 8단계 동적 사다리, 얽힌 듀엣(충실도 99.41%), OpenJij QUBO 무대 스케줄링($E_0 = -7.3569$), 그리고 TypeSafe Jev 1.14를 통한 자동 인식론적 거버넌스 자체 감사에 걸쳐 Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` 상에서 검증된 포획 이온 에뮬레이션 결과(2,048회 검증된 에뮬레이터 샷, 물리적 QPU 샷 주장 없음)를 보고한다.

1 서론 (Introduction)

리처드 파인만(Richard Feynman)은 1981년 물리 시뮬레이션에 관한 기조연설에서 다음과 같이 명언을 남겼다: “자연은 고전적이지 않다, 빌어먹을. 그러니 자연을 시뮬레이션하고 싶다면 양자역

학적으로 만드는 편이 좋을 것이며, 정말이지 이것은 아주 멋진 문제다. 왜냐하면 그렇게 쉬워 보이지 않기 때문이다" [17]. 기초 양자 개념—특히 결맞은 중첩(coherent superposition), 비국소적 양자 얽힘(non-local entanglement), 상대적 위상 간섭(relative phase interference)—은 순수한 추상적 선형대수학이나 행렬 역학만으로 매개될 때 개념화하기가 지극히 어렵기로 악명이 높다. 반면 인간의 신체는 학습자가 본능적으로 이해할 수 있는 물리적이고 표현력 넘치는 매체이다. 컴퓨터 예술 협회(Computer Arts Society)의 디지털 아티스트 숀 클라크(Sean Clark)가 언급했듯이, 예술가들은 "종종 새로운 기술을 도입하는 데 앞장서며", "초기에 예술적 용도로 설계되지 않은 것을 가져와 예술 창작에 맞게 적응시킬 수 있다" [9].

신체화된 물리학(embodied physics) 및 예술 통합 STEAM 교육 연구는 운동 감각적(kinesthetic)이고 안무적인 신체화가 복잡한 과학적 현상에 대한 인지적 진입 장벽을 크게 낮춘다는 사실을 확립해 왔다 [64]. 퀘벡 퀀텀 연구소(Institut quantique)와 미국물리학회(APS)가 개발한 *The 2-Qubit Dance* [31], NCCR SPIN의 *Dancing with Pauli* [7], 시몬즈와 미첼(Simmonds and Mitchell)의 *Dunamis Novem* [45]과 같은 선행 양자 무용 시도들은 신체 회전을 통해 단일 큐비트 상태 준비와 공간적 측정을 설명할 수 있음을 보여주었다. 그러나 기존의 신체화 교육과정은 주로 고전역학적 비유, 발레적 자세, 혹은 형식적 구성 문법이나 명시적인 고전적 하한선(classical floor), 문화적으로 뿌리내린 춤 어휘가 결여된 고립된 연극적 판토마임에 의존해 왔다.

*양자 크럼프 (Quantum Krump)*는 진정성 있고 에너지 넘치는 도시 스트리트 댄스 형태에 양자 교육을 뿌리내리고, 라반 동작 분석(LMA) [4, 35] 및 응용 범주론 [19, 37]을 통해 동작 전이를 정식화함으로써 이러한 기존 접근법을 획기적으로 발전시킨다. 수학적 미학과 제스처 이론 [3, 33, 41, 42, 44]에 기초하여, 본 워크숍은 춤 프레이즈를 방향성 범주(directed category) 내의 합성 가능한 사상(composable morphisms)으로 모델링하여, 비전공 학습자에게 지수적 상태 확장, 관계적 구조, 측정 붕괴에 대한 직관적이면서도 수학적으로 일관된 통찰을 제공한다.

본 프로젝트는 Quantinuum Bradford Hackathon 2025 [52]에서 시작되었으며, 초기 프로토타입인 *Quantum Krump*(https://quantumkrump.lovable.app/)는 오픈 혁신 트랙(Open Innovation Track)에서 2위를 수상하였다. 유엔 세계 양자 과학 및 기술의 해(UN IYQ 2025) [66]와 인도 크럼프 페스티벌(Indian Krump Festival, IKF) 커뮤니티와의 협력을 바탕으로 한 신체화 교육의 연장선으로 구상된 본 프레임워크는 개방형 다중 모달 디지털 생태계로 확장되었다:

- **워크숍 교육과정 및 인쇄용 팩:** 핵심 분 단위 스코어, 교육용 드릴, 진행자 및 학습자용 워크북(https://quantumworkshop.lovable.app/);
- **양자 영감 음악 랩 (Quantum-Inspired Music Lab):** 양자 위상, 펄스 악센트, 상태 회전을 퍼커시브한 크럼프 사운드스케이프로 변환하는 인터랙티브 청각 연구소(https://ikfquantum.lovable.app/);
- **StreetKode Quantum 배틀 앱:** 전용 라이브 안무 심사, 배틀 점수 집계 및 레벨 추적 플랫폼(https://streetkodequantum.lovable.app/).

본 논문의 핵심 학술적 기여는 다음과 같다:

1. 3차원 방향 좌표 공간으로서의 블로흐 구와 함께 중첩, 양자 얽힘 및 위상 간섭을 학습하는 신체화 드릴 제시 (제4절);
2. 라반 노력 요소, 크럼프 기초 동작, 양자 정보 개념 간의 체계적인 3원 구조 매핑 및 8가지 기본 노력 동작의 구성적 합성 정립 (제5절);
3. $n \in \{1, 2, 3, 4\}$에 걸쳐 2^n개의 정서 상태를 인코딩하는 n-큐비트 계층적 "감정 휠(emotion wheel)" 및 얽힌 파트너를 위한 명확한 국소 하위 시스템 분할 구현 (제6절);

4. 명시적 비트열 매핑, 다익스트라 최단 경로 탐색, 하이쿠(Haiqu) 상태 압축(85.7% 깊이 감소), 샌디아 국립연구소 QUOPS 볼륨 벤치마킹($Q = 256$), OpenJij QUBO 스케줄링(1.63 초 내 $E_0 = -7.3569$)을 갖춘 5×4 무대 격자 상의 양자 측정 기반 무대 안무 경로 설계 (제7절);

5. 안무 동역학을 신경근 운동 단위(BioHub ESM3), 조절 위상 진동(AlphaGenome Atlas), 신경근 접합부(Neurosnap)에 연결하는 신체적 및 생물물리학적 기초 확립 (제8절);

6. 정형화된 범주론 및 스트링 다이어그램 프레임워크: CatKS에서 CatKP로의 단일 트랙 퀴버, 반복 동작을 위한 자기사상 모노이드, 다중 라운드 배틀 인덱싱, 검증된 교환 법칙, 대거 컵/캡, 스네이크 야외 축약, 관계적 요네다 스튜디오 드릴을 포함하여 DisCoPy를 통해 구현된 완전한 모노이달 및 대거 컴팩트 스트링 다이어그램 미적분 체계화 (제9절);

7. 안무가 다코타 시마오(Dakota Simao)와 공동 개발한 최대 20인의 무용수를 위한 60분 전막 무용 제작 프레임워크(*제11 양자 차원*, *11th Quantum Dimension*)로, 고전 비트, 연속 큐비트, 중첩, 얽힘 및 위상 간섭을 가정폭력 극복의 정서적 서사로 번역하고 Three.js 3D WebGL, anime.js, ElevenLabs AI 음성, Moth Quantum 오디오/비주얼 파이프라인 통합 (제11절);

8. 고정된 아핀 보정, 감사된 게이트, 게이트 G4 고전적 하한선(0.33 μs)을 갖춘 Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` 상의 포획 이온 실험 벤치마크(사다리 및 듀엣 실행에 걸쳐 검증된 2,048회 실시간 에뮬레이터 샷; 0회의 물리적 QPU 샷 주장) (제12절);

9. TypeSafe Jev 1.14(`jev-1.14.0`)를 통해 수행된 독립적인 폐루프 인식론적 거버넌스 자체 감사 및 검증된 양자 개념 검사(QISCIT) 기반 실증적 평가 프로토콜 (제13절 및 제19절).

2 역사적 및 문화적 배경 (Foundational Background)

크럼프 문화와 기초 (Krump Culture and Foundations). 크럼프는 2000년대 초 로스앤젤레스 사우스 센트럴(South Central Los Angeles)에서 시저 "타이트 아이즈" 윌리스(Ceasare "Tight Eyez" Willis)와 조아티스 "빅 미호" 라티(Jo'Artis "Big Mijo" Ratti)가 개척자 마키사 "미스 프리시" 가드너(Marquisa "Miss Prissy" Gardner), 크리스토퍼 "릴 씨" 톨러(Christopher "Lil C" Toler), 제이슨 "슬레이어" 그린(Jason "Slayer" Green)과 함께 창시한 고에너지의 영성 중심 스트리트 댄스 형태이다 [36]. 거리 폭력에 대한 역능화(empowering)의 대안으로 태어난 크럼프는 강렬한 감정의 해방을 절제된 신체적 표현으로 승화시킨다. 크럼프의 4대 물리적 기초 동작은 다음과 같다:

- `STOMP`: 중력적 무게를 바닥으로 내리꽂는 하향 발 강타;
- `JAB`: 가슴이나 어깨로부터 바깥으로 날카롭고 직접적으로 뻗는 선형 펀치;
- `CHEST POP`: 비트에 맞춰 앞으로 튕겨 나가는 급작스러운 흉부 수축과 팽창;
- `ARM SWING`: 원을 그리거나 원심력을 이용해 휘두르는 연속적인 팔 던지기.

이 기초 동작들은 세 가지 수직 이동 레벨에서 실행된다: `LIVE` (머리를 높이 든 똑바로 선 직립/상승 스탠스), `KRUMP` (중립적인 중간 높이의 웅크림, 운동선수와 같은 기민한 준비 상태), `BUCK` (바닥에 깊이 접지된 낮은 웅크림, 극한의 원초적 파워). 기술적 크럼프 퍼포먼스는 동작들을 매끄럽게 연결하는 연속적인 상체 바운스인 *그루브(groove)*, 세션 서클에서 동료들이 외치는 음성 및 에너지 증폭인 *하이프(hype)*, 역동적인 낮은 레벨의 도약/반동인 *벅 홉(buck hop)*, 배틀을 결정짓고 중단시

키는 결정타 시퀀스인 *킬오프(kill-off)*, 그리고 리더인 *빅 호미(Big Homie)*가 이끄는 가족적 멘토링 계보(*팸, fam*) 내에서의 *캐릭터/스토리텔링(character/storytelling)*에 근본적으로 의존한다. 크럼프 전문 용어는 모든 언어의 워크숍에서 고유성을 위해 영어 원어로 유지된다.

라반 동작 분석 (Laban Movement Analysis). 루돌프 라반(Rudolf Laban)과 F. C. 로렌스(Lawrence)는 인간의 동작 역학을 4가지 근본적인 *노력 요소(Effort Factors)*로 특성화하였으며, 각 요소는 두 가지 대립적 성질을 갖는다 [35]:

- **무게 (Weight)**: *강함 (Strong)* (충격적이고 단호한 중력 저항) vs. *가벼움 (Light)* (섬세하고 부유하는 성질);
- **시간 (Time)**: *순간적임 (Sudden)* (순간적이고 날카로우며 타악기적임) vs. *지속적임 (Sustained)* (연속적이고 감속됨);
- **공간 (Space)**: *직접적임 (Direct)* (집중되고 직선적이며 핀포인트 궤적) vs. *간접적임 (Indirect)* (유연하고 다초점적이며 곡선적임);
- **흐름 (Flow)**: *구속됨 (Bound)* (제어되고 쉽게 멈출 수 있으며 억제됨) vs. *자유로움 (Free)* (억제되지 않고 유동적이며 연속적임).

무게, 시간, 공간의 이진 대립을 조합하면 라반의 표준 $2 \times 2 \times 2 = 8$가지 기본 *노력 동작(Effort Actions)*인 *Punch (펀치), Slash (슬래시), Press (프레스), Wring (비틀기), Dab (가볍게 치기), Flick (털어내기), Glide (활주), Float (띄우기)*가 도출된다 [4, 35].

큐비트와 블로흐 구 (Qubits and the Bloch Sphere). 양자역학에서 단일 큐비트는 정규직교 기저 상태 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$로 생성되는 2차원 복소 힐베르트 공간 $\mathbb{C}^2$ 상의 2준위 상태 벡터이다 [49]. 임의의 순수 상태는 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle, \tag{1}$$

여기서 $\theta \in [0, \pi]$는 극각(여위도, colatitude)이고 $\varphi \in [0, 2\pi)$는 방위각 상대 위상(관측 불가능한 전체 위상 인자 $e^{i\gamma}$ 무시)이다. 기하학적으로 순수 상태는 단위 구($r = 1$) 표면의 점들에 대응하며, 이를 *블로흐 구(Bloch sphere)*라 부른다 [6]. 북극($\theta = 0$)은 $|0\rangle$, 남극($\theta = \pi$)은 $|1\rangle$에 대응하며, 적도면 상태($\theta = \pi/2$)는 균등 중첩 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\varphi}|1\rangle)$을 나타낸다. 중요하게도 블로흐 공의 내부($r < 1$)는 혼합 상태(결어긋남 또는 $\mathrm{Tr}(\rho^2) < 1$을 만족하는 밀도 연산자 ρ로 특성화되는 통계적 앙상블)를 나타내며, 외부의 점($r > 1$)은 비물리적이다. 그로스-홀츠(Grosse-Holz) [24]가 최근 공식화했듯이, 두 큐비트가 얽히게 되면 각 개별 부분계의 축소 상태는 순수한 구 표면에서 국소 블로흐 공의 내부로 수축되어, 국소적 순수도가 비국소적 상관관계로 전환되는 과정을 시각적으로 보여준다. n-큐비트 양자 레지스터는 기저 상태 $|x\rangle \in \{0,1\}^n$을 갖는 2^n차원 힐베르트 공간을 생성한다. 행렬 대수 없는 그래픽 역학 입문으로 우리는 쿠에케와 고기오소(Coecke and Gogioso)의 다이어그램 프레임워크를 참조한다 [10].

범주론과 안무 제스처 (Category Theory and Choreographic Gestures). 응용 범주론은 대상(objects), 방향성 사상(arrows/morphisms), 결합적 합성, 항등 연산을 통해 시스템을 정식화한다 [19, 37]. 범주 $\mathcal{C}$는 대상들의 모임 $\mathrm{Ob}(\mathcal{C})$와 대상 간의 화살표 집합인 사상 집합 $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$, 그리고 결합 법칙($h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$)과 양측 항등원($\mathrm{id}_B \circ f = f = f \circ \mathrm{id}_A$)을 만족하는 합성 연산 $\circ : \mathrm{Hom}(B, C) \times \mathrm{Hom}(A, B) \to \mathrm{Hom}(A, C)$으로 구성된다. 함자 $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$는 합

성을 보존하고($F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$) 항등원을 보존하면서($F(\mathrm{id}_A) = \mathrm{id}_{F(A)}$) 대상과 화살표를 대응시킨다. 요네다 보조정리(Yoneda Lemma)는 임의의 대상 $A \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$가 반변 함자 $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, A) \in [\mathcal{C}^{\mathrm{op}}, \mathbf{Set}]$에 의해 동형사상에 이르기까지 완전히 결정됨을 증명한다 [37]. 수학적 음악학 및 범주론적 제스처 이론 [3, 33, 41, 42, 44], 그리고 음악적 퍼포먼스에서의 양자 픽토리얼리즘 [1]을 따라, 우리는 춤 프레이즈를 구조적 통사 범주에서 공연적 해석으로의 함자적 사상으로 정식화한다.

3 워크숍 아키텍처 및 교수 설계 (Workshop Architecture and Instructional Design)

교육과정은 60분, 75분, 90분 세션 형식에 맞게 유연하게 조정 가능한 분 단위 스코어로 구성된다 (표 1). 학습자는 팔 길이 간격의 2인 파트너로 두 가지 역할을 맡아 협력한다: **역할 A(Role A)**는 상태 준비(양자 상태를 제시하거나 유지), **역할 B(Role B)**는 유니터리 변환 또는 측정 트리거(노력의 변화, 위상 악센트, 또는 타악기적 콜을 가함) 역할을 수행한다.

표 1: 60분, 75분, 90분 세션 형식에 따른 워크숍 단계별 시간 배분.

세션 단계 (Session Phase)	**60분**	**75분**	**90분**
1. 도착, 안전 및 문화적 배경 (크럼프 계보)	5분	7분	10분
2. 웜업 및 라반 공간 조화	8분	10분	12분
3. 크럼프 기초 및 레벨 (`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`)	10분	12분	14분
4. 개념 랩: 중첩, 양자 얽힘, 위상 간섭	15분	18분	20분
5. 블로흐 구 방향 랩 (3D 키네스피어)	7분	8분	10분
6. 양자 지도 및 요네다 서클 프레이즈 구성	8분	11분	12분
7. 마무리 성찰, 디브리핑 및 인증서 수여	7분	9분	12분

접근성 및 좌식 적응 (Accessibility and Seated Adaptations). 모든 드릴은 고정식 또는 좌식 적응을 제공한다. `STOMP` 및 `BUCK`과 같은 하체 동작의 경우, 좌식 참가자는 손바닥으로 허벅지를 강하게 치거나 발뒤꿈치를 내리찍는 드롭 동작을 실행한다. *Press* (지속적인 하향 푸시)의 경우 팔 걸이나 무릎을 단단히 누르며, *Glide* (직선 이동)의 경우 상체의 선형 기울임이나 팔을 길게 뻗는 동작으로 대체한다.

교수법적 근거 및 다중 모달 설계 (Pedagogical Rationale and Multimodal Design). 논란의 여지가 있는 VARK 유형론을 통해 학습자를 경직된 학습 스타일로 분류하는 대신, 진행자 툴킷은 플레밍(Fleming)의 다중 모달 제시 프레임워크 [18]를 활용하여 시각적(블로흐 다이어그램, 화면 시뮬레이터), 청각적(크럼프 사운드트랙, 스톰프 큐), 읽기/쓰기(다국어 워크북), 운동감각적(신체 드릴) 자극을 동시에 동기화하여 전달한다. 나아가 세션 도입부는 매슬로(Maslow)의 욕구 단계 이론 [43]을 따라, 표현적인 배틀 역동을 도입하기 전에 물리적 안전, 수분 섭취, 웜업 속도 조절, 스튜디오 서클 내의 심리적 신뢰 형성을 최우선으로 배치한다.

전체 교육과정은 웹 애플리케이션과 인쇄용 PDF 워크북 모두에 콘텐츠 불일치 없이 직접 전달되는 단일 타입스크립트 소스 파일(`workshop-content.ts`)로 관리된다. 영어, 힌디어, 타밀어로 완전히 저술된 번역본이 제공되며, 10개의 추가 인터페이스 언어가 함께 지원된다.

4 신체화 드릴 및 공간 기하학 (Embodied Drills and Spatial Geometry)

유계된 유추: 고전적 직관 대 양자적 실재 (Bounded Analogies: Classical Intuition vs. Quantum Realities). 입문 교육과정은 양자 상태의 신비감을 덜어내기 위해 종종 고전적 은유를 사용한다. *양자 크럼프*에서는 두 가지 일상적 그림을 의도적으로 도입하되, 고착된 오개념을 방지하기 위해 진행자 디브리핑 과정에서 그 유효성 한계를 명시적으로 규정한다:

- **조광기 스위치 (The Dimmer Switch):** 고전 비트는 이진 토글(꺼짐 또는 켜짐)이며, 큐비트는 통상적으로 레벨 사이의 균형을 유지하는 조광기(dimmer) 스위치에 비유된다. *진행자 경계:* 고전 조광기 스위치는 관측될 때 중간 밝기를 유지한다. 그러나 큐비트는 고전적 혼합 상태를 유지하지 *않으며*, 측정 시 확률 $\cos^2(\theta/2)$ 및 $\sin^2(\theta/2)$에 따라 $|0\rangle$ 또는 $|1\rangle$로 비결정론적으로 붕괴한다.
- **회전하는 동전 (The Spinning Coin):** 정지된 동전은 앞면 또는 뒷면이지만, 회전 중인 동전은 잡힐 때까지 두 가능성을 모두 품고 있다. *진행자 경계:* 회전하는 동전은 빠른 움직임에 의해 결정론적 궤적이 가려진 인식론적(epistemic) 고전 시스템이다. 반면 양자 중첩은 상대 위상(φ)을 포함하고 있어 결맞은 보강 및 소멸 간섭을 가능하게 하며, 이는 회전하는 동전에는 완전히 결여된 양자역학 고유의 특성이다.

신체화된 중첩 드릴 (Embodied Superposition Drill). 무용수는 진동하는 `CHEST POP`과 함께 `LIVE`($|0\rangle$, 직립)와 `BUCK`($|1\rangle$, 낮은 웅크림) 사이를 역동적으로 호버링(hovering)함으로써 중첩을 신체화한다. 역할 B의 타악기적 구령("HIT!")에 맞춰, 무용수는 즉각적으로 바닥에 접지된 단일 레벨로 스냅하여 멈춘다: 이 타격(hit)은 측정 붕괴(measurement collapse)를 실행한다.

신체화된 얽힘 드릴 및 다중 기저 상관관계 (Embodied Entanglement Drill and Multi-Basis Correlation). 기본 드릴에서 파트너 A와 파트너 B는 얽힌 벨 상태(Bell state)를 공유한다:

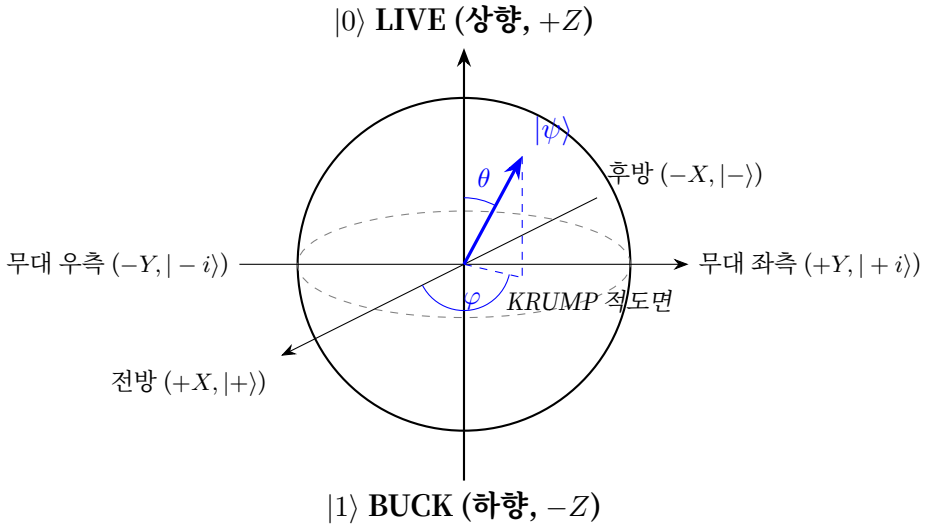
$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle). \tag{2}$$

시각적 단서를 차단하기 위해 서로 등을 돌린 상태에서, 파트너 A와 파트너 B는 공유된 타악기적 음향 비트 펄스나 화면 프롬프트에 맞춰 실행을 동기화한다. 파트너 A가 특정 비트 카운트에 레벨을 설정하면, 파트너 B는 동일한 비트 카운트에 응답한다. 수직 Z축(`LIVE`/`BUCK`)을 따라 측정할 경우, 파트너 B는 파트너 A의 레벨과 정확히 일치한다. 결정적으로, 진행자는 사전에 약속된 고전적 안무(국소 숨은 변수 룩업 테이블)도 단일 기저 상관관계를 모방할 수 있음을 명확히 설명한다. 심화 드릴에서는 파트너들이 측정 기저를 전환한다: 적도면 X축(`FORWARD` 대 `BACK`, 각각 $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ 및 $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$을 나타냄)을 따라 측정하면 동일하게 상관된 결과($|++\rangle$ 또는 $|--\rangle$)가 산출되며, 이는 교환되지 않는 관측량(non-commuting observables) 전반에 걸친 다중 기저 안정화자(stabilizer) 상관관계를 입증한다. 강사는 $Z \otimes Z$ 및 $X \otimes X$ 안정화자 상관관계를 일치시키는 것이 교육학적으로 얽힘을 설명하지만, 벨/CHSH 부등식($\mathcal{S} = 2\sqrt{2} > 2$)의 진정한 위배는 비직교 중간 평면 각도(예: $\pi/4$ 오프셋) 전반의 측정을 필요로 하며, 이때 고전적 국소 전략은 $\leq 75\%$ 상관관계로 제한되는 반면 양자역학은 $\cos^2(\pi/8) \approx 85.4\%$에 도달함을 명시적으로 분명히 한다 [49].

신체화된 간섭 드릴 (Embodied Interference Drill). 두 무용수가 마주보고 일치하는 주파수의 흉부 체스트 팝을 통해 에너지를 진동시킨다. 두 사람이 *동위상(in phase, $\Delta\varphi = 0$)*으로 춤출

때, 그들의 물리적 악센트는 보강적으로 강화되어 세션의 에너지를 폭발적으로 고조시킨다. 반대로 *역위상(out of phase,* $\Delta\varphi = \pi$*)*으로 춤출 때, 교차하는 반대 악센트는 소멸적으로 간섭하여 집단적 운동 긴장을 완전한 정적으로 해소한다. 인터랙티브 온스크린 랩을 통해 무용수들은 진폭과 위상 매개변수를 직접 변조할 수 있다.

무용수의 방향 공간으로서의 블로흐 구 (The Bloch Sphere as a Dancer's Direction Space). 블로흐 구는 표준 오른손 직교좌표계($\hat{x}_{\text{전방}} \times \hat{y}_{\text{무대좌측}} = \hat{z}_{\text{상향}}$, 그림 1)를 통해 무용수의 3차원 물리적 운동 영역(키네스피어)에 매핑된다. 수직 극축은 레벨을 나타낸다: 북극 $+Z$ ($|0\rangle$)는 `LIVE` (상향), 남극 $-Z$ ($|1\rangle$)는 `BUCK` (접지된 하향), 그리고 적도면($\theta = \pi/2$)은 `KRUMP` (중립 중간 레벨)이다. 적도 평면은 상대 위상을 나타낸다: 관객을 향한 전방 $+X$는 $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$, 후방 $-X$는 $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$, 무대 좌측(무용수의 해부학적 좌측) $+Y$는 $|+i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle)$, 무대 우측(무용수의 해부학적 우측) $-Y$는 $|-i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$이다. 이 오른손 3축계는 $+Z$ 위에서 내려다볼 때 방위각 위상 $\varphi \in [0, 2\pi)$가 $+X$에서 $+Y$를 향해 반시계 방향으로 증가함을 보장한다.



오른손 직교좌표계 ($\hat{x}_{\text{전방}} \times \hat{y}_{\text{좌측}} = \hat{z}_{\text{상향}}$*); 순수 상태:* $r = 1$*; 혼합 상태:* $r < 1$

그림 1: 오른손 직교좌표계($\hat{x}_{\text{전방}} \times \hat{y}_{\text{무대좌측}} = \hat{z}_{\text{상향}}$)에서 무용수의 3차원 키네스피어에 매핑된 블로흐 구. 수직축은 극각 $\theta \in [0, \pi]$(`LIVE`에서 `BUCK`)를 나타내며, 적도면은 방위각 위상 $\varphi \in [0, 2\pi)$를 나타낸다. 순수 상태는 단위 구 표면($r = 1$)에 엄격하게 위치한다.

기하학적 한계 규정 (Geometric Bounding): 방사상 벡터 크기에 관한 혼란을 방지하기 위해, 강사는 모든 순수 양자 상태 벡터가 단위 길이($r = 1$)를 가짐을 명시적으로 밝힌다. 물리적 키네스피어의 진폭은 안무적 크기(스케일)를 나타낼 뿐이며, 블로흐 벡터의 가변적 크기를 의미하지 *않는다*. 구 내부의 방사상 크기($r < 1$)는 혼합 상태 ρ로의 결어긋남을 나타내며, 구 외부의 점($r > 1$)은 비물리적이다.

상태 공간 스케일링 참조 벤치마크 (State-Space Scaling Reference Benchmarks). n개 큐비트의 지수적 역량을 전달하기 위해 표 2는 벤치마크 상태 공간 크기를 제시한다. $n \leq 40$에 대해서는 정확한 정수 거듭제곱이 유지된다($2^{40} \approx 1.1 \times 10^{12}$이며, 완전한 고전적 복소 상태벡터를 저장하는 데 약 16 TB의 RAM이 필요한 계산 메모리 한계선을 나타냄). $n = 80$ 및 $n = 270$ 벤치마크는 과학적 표기법으로 제시되어 2^{80}이 인류 전체의 연간 디지털 데이터 저장 용량을 초과하고, 2^{270}은 관측 가능한 우주의 추정 총 원자 수($\sim 10^{80}$)를 능가함을 보여준다.

표 2: 큐비트 레지스터 스케일링 벤치마크 및 물리적 계산 한계.

큐비트 n	기저 상태 2^n	물리적 및 계산적 의의
1	2	단일 큐비트; 블로흐 구 상의 이진 선택.
2	4	얽힌 쌍; 4개의 기저 상태 $\|00\rangle, \|01\rangle, \|10\rangle, \|11\rangle$.
3	8	3-큐비트 GHZ/W 얽힘 상태; 8개의 기저 상태.
4	16	4-큐비트 레지스터; 16개 상태 감정 휠의 기반.
40	1,099,511,627,776	$\sim$ 16 TB RAM (배정밀도 complex128, 진폭당 16바이트); 고전적 상태벡터 시뮬레이션의 한계.
80	$\approx 1.2089 \times 10^{24}$	상태 공간이 전 세계 연간 디지털 데이터 저장량을 초과.
270	$\approx 1.8971 \times 10^{81}$	관측 가능한 우주의 추정 총 원자 수($\sim 10^{80}$)를 초과.

전문 기술 용어 (Technical Vocabulary). 교육과정은 6가지 핵심 기술 용어를 평이한 언어로 정의한다:

1. **양자 하드웨어 (Quantum Hardware):** 실제 물리적 양자 시스템을 조작하는 극저온 냉각 초전도 회로 또는 진공 챔버 내 포획 이온 장치.
2. **물리적 큐비트 (Physical Qubits):** 환경 결어긋남, 열적 노이즈, 게이트 불완전성에 노출되어 있는 개별 원시 양자 장치.
3. **논리적 큐비트 (Logical Qubits):** 양자 오류 정정 부호를 사용하여 다수의 물리적 큐비트에 걸쳐 합성된 내결함성(fault-tolerant) 오류 보호 연산 큐비트.
4. **양자 시뮬레이터 (Quantum Simulator):** 수치 선형대수학을 통해 정확한 슈뢰딩거 파동함수와 진폭을 계산하는 고전 컴퓨터 소프트웨어.
5. **양자 에뮬레이터 (Quantum Emulator):** 특정 물리적 하드웨어 장치의 실제 노이즈 모델, 혼선(cross-talk), 게이트 결함을 반영하는 고전 시뮬레이션 소프트웨어.
6. **세계 양자의 해 (IYQ):** 양자 발견 100주년을 기념하고 전 세계적 과학 접근성을 넓히기 위해 유엔(UN)이 2025년으로 선포한 해(https://quantum2025.org/)이며, 본 이니셔티브가 태동한 모태이다.

5 라반 $\times$ 크럼프 $\times$ 양자 지도 (The Laban $\times$ Krump $\times$ Quantum Map)

그림 2은 라반 노력 요소, 크럼프 기초, 양자 개념 간의 근본적인 3원 매핑 다이어그램을 요약한다.

구성 논리: 단일 요소 대 3요소 노력 동작 (Compositional Logic: Single Factors vs. Three-Factor Effort Actions). 그림 2은 고립된 교육학적 닻을 확립한다. 그러나 실제 춤에서 인간의 움직임은 여러 노력 요소를 동시에 합성한다. 라반의 8가지 기본 노력 동작은 **무게**, **시간**, **공간**의 이진 조합을 결합한다($2^3 = 8$, 표 3).

고립된 앵커에서 복합 동작으로의 전환은 명확한 구성 규칙을 따른다:

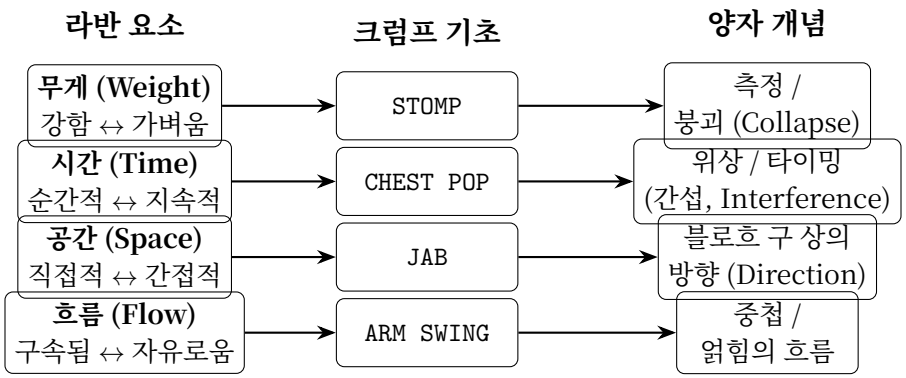


그림 2: 근본적인 라반 × 크럼프 × 양자 매핑 다이어그램.

1. **공간**을 격리할 때 JAB은 블로흐 구 상의 선형 궤적과 방향 지시를 정의한다. 그러나 복합 동작이 직접적 공간과 *강한 무게*, *순간적 시간*을 결합하면 **Punch**가 되며, 여기서 순간적인 타격은 음향적이고 운동학적인 측정 붕괴를 트리거한다.

2. **흐름**을 격리할 때 ARM SWING은 연속적인 중첩 순환을 구현한다. 간접적 공간에서 *순간적 시간* 및 *강한 무게*와 결합될 때 **Slash**가 되어 넓은 공간적 중첩으로부터 급격한 측정 붕괴를 전달한다.

3. **시간**은 양자 변환의 연산 역학을 지배한다: *순간적* 동작(*Punch, Slash, Dab*)은 사영 측정 붕괴를 트리거하는 반면, *지속적* 동작(*Press, Glide, Float*)은 연속적인 유니터리 상태 회전 및 결맞은 위상 진화를 나타낸다.

표 3: 8가지 라반 노력 동작(Effort Actions)과 크럼프 신체 큐 및 양자역학적 해석의 매핑.

동작 (Action)	무게	시간	공간	크럼프 신체 큐	양자역학적 해석
Punch	강함	순간적	직접적	직접적인 잽 또는 전신 바닥 강타	측정: 비트에 맞춰 상태가 붕괴됨
Slash	강함	순간적	간접적	공간을 가르는 원심력 암 스윙	넓은 중첩으로부터 급작스러운 붕괴
Press	강함	지속적	직접적	바닥을 향한 완만한 BUCK 푸시	기저 상태에서 극으로의 유니터리 회전 (R_y)
Wring	강함	지속적	간접적	상체와 팔의 상반된 비틀림 토크	상체-팔 내부 하위 시스템 비틀림 토크
Dab	가벼움	순간적	직접적	빠른 손목 팝 또는 풋워크 탭	약한 측정 / 보조 큐비트 샘플링
Flick	가벼움	순간적	간접적	LIVE에서의 가벼운 손가락/손목 플릭	여러 축에 걸친 위상 산란
Glide	가벼움	지속적	직접적	무대를 가로지르는 부드러운 선형 이동	목표 극을 향한 결맞은 단열적 표류
Float	가벼움	지속적	간접적	레벨 사이를 부유하는 무중력 드리프트	섭동 없는 결맞은 중첩 상태

동작 앵커, 노력 동작 및 양자 게이트 컴파일의 조화. 엄격한 개념적 일관성을 유지하고 솔로와 그룹 역학 간의 인지적 혼란을 방지하기 위해 진행자는 상호 보완적인 두 가지 연산 체계를 구분한다:

1. **유니터리 게이트로서의 솔로 프레이즈 구성 ($\mathcal{F}_{\text{DisCo}}$):** 안무 구성 과정에서 크럼프 기초 동작은 가역적인 유니터리 논리 게이트로 기능한다(제9.1절): `STOMP`는 아다마르(Hadamard) H (중첩 생성자), `JAB`은 파울리 X (비트 반전), `CHEST POP`은 파울리 Z (위상 반전), `ARM SWING`은 $R_x(\pi/2)$ (회전 스윕), `BUCK HOP`은 $R_z(\pi/2)$ (수직 위상 반동) 역할을 수행한다.

   `STOMP`의 이중 역할에 대한 교수법적 근거: 고립된 노력 드릴(그림 2)에서 순간적이고 강력한 하향 `STOMP`는 사영 측정의 타악기적 물리적 충격을 구현하여 신체를 확정적인 기저 고유상태로 접지시킴으로써 모호성을 종식시킨다. 반대로 솔로 프레이즈 구성 및 양자 컴파일($\mathcal{F}_{\text{DisCo}}$)에서 최초의 접지된 `STOMP`는 프레이즈를 시작하는 아다마르 게이트 H 역할을 한다: 폭발적인 지면 강타는 무용수를 정적이고 섭동 없는 진공 기저 자세($|0\rangle$)에서 벗어나 활기차고 균형 잡힌 운동학적 중첩 상태($\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$)로 진입시키며, 종결 동작인 `KILL-OFF`가 시퀀스를 붕괴시키기 전까지 전체 프레이즈를 활성화한다.

2. **배틀 사이퍼 및 동적 측정 트리거:** 실시간 페어 사이퍼 및 배틀 클라이맥스에서 타악기적 악센트 구령("HIT!")과 최종 충돌(`KILL-OFF` / Climax Cup ϵ_D)은 중첩을 이산적인 고유상태로 붕괴시키는 비유니터리 사영 측정으로 작용한다.

3. **솔로 동작 내의 하위 시스템 자유도:** 각 무용수가 일반적으로 단일 논리 큐비트를 구현하지만, *Wring*과 같은 복합 솔로 동작은 내부 해부학적 자유도(상체 대 골반의 상반된 토크)를 활용하여 다중 큐비트 얽힘에 대한 신체적 인지 가교 역할을 수행한다.

5.1 양자 위상으로서의 리듬, 다중 리듬 비트 및 140–150 BPM 크럼프 메트릭 래티스

공간 좌표와 이동 레벨이 단일 큐비트 블로흐 구와 다중 큐비트 텐서 공간의 공간 기하학을 정의한다면, **리듬**은 양자역학의 시간적 엔진을 제공한다. 양자 이론에서 시간 진화는 근본적으로 주기적이며 리듬적이다. 시간 독립적 해밀토니안 $\hat{H}|E_n\rangle = E_n|E_n\rangle$의 지배를 받는 정지 에너지 고유상태 $|E_n\rangle$에 대해 시간 의존 슈뢰딩거 방정식은 다음을 지시한다:

$$|\psi_n(t)\rangle = e^{-i\hat{H}t/\hbar}|\psi_n(0)\rangle = e^{-i\omega_n t}|E_n\rangle, \quad \text{여기서 } \omega_n = \frac{E_n}{\hbar}. \tag{3}$$

모든 정지 상태는 고유한 각주파수 ω_n—즉 양자 내부 시계 또는 근본적인 미세 리듬—을 지닌다.

다중 리듬 간섭과 양자 맥놀이 (Polyrhythmic Interference and Quantum Beats). 양자 시스템이 두 개의 비축퇴 에너지 고유상태의 선형 중첩 $|\Psi(0)\rangle = c_1|E_1\rangle + c_2|E_2\rangle$으로 준비될 때, 시간 진화된 상태는 차등 위상을 누적한다:

$$|\Psi(t)\rangle = c_1 e^{-i\omega_1 t}|E_1\rangle + c_2 e^{-i\omega_2 t}|E_2\rangle. \tag{4}$$

결과적으로 공간 확률 밀도는 **양자 맥놀이(quantum beats)**로 알려진 거시적 시간 의존 변조를 나타낸다:

$$P(x,t) = |\langle x|\Psi(t)\rangle|^2 = |c_1|^2|\psi_1(x)|^2 + |c_2|^2|\psi_2(x)|^2 + 2|c_1 c_2|\,\text{Re}\left\{\psi_1^*(x)\psi_2(x)e^{-i(\omega_2-\omega_1)t+i(\phi_2-\phi_1)}\right\}. \tag{5}$$

진동 주파수 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = (E_2 - E_1)/\hbar$는 정확히 보어(Bohr) 전이 주파수이다. 댄스 스튜디오에서 이 수학적 실재는 **다중 리듬 음악성(polyrhythmic musicality)과 교차 리듬(cross-rhythms)**에 대한 직접적인 물리적 아날로그를 제공한다. 크럼프 무용수가 안정적인 4/4 베이스

그루브 위에 3-대-4 다중 리듬 암 시퀀스를 얹을 때, 두 운동학적 주파수는 사이퍼 전반에 걸쳐 보강 및 소멸 맥놀이를 생성한다.

라반 시간 노력 요소: 순간적 대 지속적 (The Laban Time Effort Factor: Sudden vs. Sustained). 라반 동작 분석(표 3)에서 **시간** 노력 요소는 지속 기간에 대한 신체적 투자를 지시한다:

- **순간적 (Sudden, Staccato):** 날카롭고 긴박하며 충동적인 순간적 운동 가속의 폭발(예: 날카로운 JAB, 지면 STOMP, 체스트 팝). 양자적 관점에서 순간적인 운동 타격은 좁은 시간 파속 $\Delta t \to 0$에 해당하며, 이는 하이젠베르크의 에너지-시간 불확정성 원리 $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$에 의해 넓은 스펙트럼 에너지 분포를 강제하여 다수의 기저 상태 간의 전이를 자극하거나 사영 측정 붕괴를 촉발한다.
- **지속적 (Sustained, Legato):** 신중하고 연장되며 연속적으로 감속되는 흐름(예: 부드러운 암 트랙, BUCK 바닥 누르기, 상체 롤). 양자역학에서 지속적 동작은 단열 정리(adiabatic theorem) 조건을 구현하며, 천천히 변하는 해밀토니안이 비단열 전이를 유발하지 않고 고유 상태를 보존하여 결맞은 상대 위상 누적 $\Delta\varphi = \int \omega(t')dt'$을 가능하게 한다.

140–150 BPM 크럼프 메트릭 래티스 (The 140–150 BPM Krump Metric Lattice). 크럼프 음악은 **분당 140에서 150비트(BPM)**의 엄격한 템포 회랑에서 제작된다. 145 BPM에서 표준 4비트 마디는 $T_{\text{meas}} = 1.655$ 초에 걸치며, 4분음표 비트는 매 $\tau_{\text{beat}} = 413.8$ ms마다 발생하고 16분음표 당김음 간격은 매 $\tau_{16\text{th}} = 103.4$ ms마다 발생한다. 이 리듬 격자는 이산적인 위상 좌표 닻을 확립한다:

- **1비트 (다운비트, $\varphi = 0$):** 접지 기초 강타 (STOMP); 최대 실수 양의 진폭 $(+1)$.
- **2비트 (오프비트 악센트, $\varphi = \pi/2$):** 측면 방향 충동 (JAB); 허수 위상 회전 $(+i)$.
- **3비트 (백비트 / 클라이맥스, $\varphi = \pi$):** 폭발적 흉부 팽창 (CHEST POP); 역위상 반전 (-1), 다운비트 상태에 대해 최대 소멸 간섭 생성.
- **4비트 (픽업 / 전이, $\varphi = 3\pi/2$):** 회전 스윕 (ARM SWING); 음의 허수 회전 $(-i)$.

두 동작이나 두 무용수가 동일한 위상을 공유할 때($\Delta\varphi = 0$), 그 진폭은 보강 간섭하여 물리적 진폭을 두 배로 늘리고 세션 강도("하이프")를 네 배로 증폭시킨다. 반대로 두 대립 동작이 역위상($\Delta\varphi = \pi$)으로 실행되면 진폭이 소멸 간섭하여 극적인 안무적 정지(freeze)와 네거티브 스페이스를 창출한다.

6 감정 큐비트 및 계층적 상태 인코딩 (Emotion Qubits and Hierarchical State Encoding)

2^n 기저 상태의 성장을 운동감각적으로 체감할 수 있게 하고 크럼프의 핵심 문화 기둥인 감정적 스토리텔링과 깊이 연결하기 위해, 우리는 포인트 블랭크 팸(Point Blank Fam)과 협력하여 n-큐비트 "감정 휠(emotion wheel)"(표 4)을 개발하였다. 라반 노력 요소의 뚜렷한 조합이 이산적인 기본 감정을 안정적으로 유도하고 강화하며 전달한다는 경험적 신체 운동 연구 [4, 55]에 기반하여, 각 계산 기저 상태 $|x\rangle \in \{0,1\}^n$은 특정 정서적 스탠스에 결합된다.

고차원에 걸쳐 경직된 직교 격자를 부과하는 대신, 이진 접두사 인코딩은 정서를 상위 접두사에 조건화된 **상황 의존적 계층 결정 트리**(다중 큐비트 제어 상태 준비 회로와 유사함)로 모델링한다:

- 첫 번째 큐비트 q_1은 **생리적 각성 / 운동 활성화**를 설정한다: 0 = 낮은 각성 (접지된 정적, 내면화된 슬픔); 1 = 높은 각성 (폭발적인 운동 타격, 탄력 있는 바운스).
- 두 번째 큐비트 q_2는 q_1에 조건화되어 정서 공간을 4개의 주요 근본 군집으로 분기한다: 고각성 반구($q_1 = 1$)에서 q_2는 고전적 원형 원자가(valence)를 인코딩하여, 10은 높은 각성과 수축적/부정적 원자가를 결합하고(*Angry, 분노*) 11은 높은 각성과 확장적/긍정적 원자가를 결합한다(*Happy, 행복*). 저각성 반구($q_1 = 0$)에서 q_2는 내면화되고 수동적인 우울한 슬픔(00, *Sad, 슬픔*)과 경계적이고 방어적인 위협 경계 태세(01, *Fearful, 두려움*)를 구분한다.
- 세 번째 큐비트 q_3은 **관계적 지배성 및 공간 투사**를 인코딩한다: 0 = 내면적/방어적 (움츠림, 철회); 1 = 투사적/지배적 (직접적 시선, 외향적 자기주장).
- 네 번째 큐비트 q_4는 **신체적 강도 및 극성**을 인코딩한다: $q_4 = 0$은 내면화되고 절제되거나 사색적인 뉘앙스를 나타내며(*Lonely, 외로움*, *Vulnerable, 취약함*, *Terrified, 공포*, *Guilty, 죄책감*, *Enraged, 격분*, *Shocked, 충격*, *Serene, 평온*, *Playful, 장난스러움*), $q_4 = 1$은 외면화되고 접지되거나 강화된 신체 방출을 나타낸다(*Depressed, 우울*, *Ashamed, 수치심*, *Anxious, 불안*, *Numb, 마비*, *Hostile, 적대적*, *Defiant, 반항적*, *Grounded, 접지됨*, *Proud, 자부심*).

얽힌 파트너 드릴에서의 하위 시스템 분할 (Subsystem Partitioning in Entangled Partner Drills). 공유된 얽힘 드릴에서 하위 시스템 할당은 수학적으로 정밀해야 한다:

- 두 무용수가 **2-큐비트 상태** $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$를 공유할 때, 각 파트너는 **단일 큐비트 하위 시스템**($n = 1$)을 보유하고 측정한다. 각 국소 붕괴는 이진적이다: 0을 측정하면 *Sad*가 나타나고, 1을 측정하면 *Happy*가 나타나 파트너의 정서 상태를 순간적으로 상관시킨다.
- 각 파트너가 **4가지 감정**($n = 2$ 국소 큐비트, 4가지 국소 선택: *Sad*, *Fearful*, *Angry*, *Happy*) 중 하나를 선택할 때, 결합 시스템은 두 큐비트씩 보유한 두 무용수 사이에 공유되는 **4-큐비트 얽힘 레지스터**($2^2 \times 2^2 = 16$ 기저 상태)가 된다. 이 드릴에서 파트너들은 두 개의 횡단 벨 쌍(transversal Bell pairs)을 준비한다:

$$|\Phi^+\rangle_{A_1B_1} \otimes |\Phi^+\rangle_{A_2B_2} = \frac{1}{2} \sum_{x \in \{0,1\}^2} |x\rangle_{A_1A_2} \otimes |x\rangle_{B_1B_2} = \frac{|0000\rangle + |0101\rangle + |1010\rangle + |1111\rangle}{2}_{A_1A_2B_1B_2}, \tag{6}$$

여기서 레지스터 큐비트는 무용수 하위 시스템별로 $|q_{A_1} q_{A_2} q_{B_1} q_{B_2}\rangle$로 순서화되어, 4가지 정서 상태(00 *Sad*, 01 *Fearful*, 10 *Angry*, 11 *Happy*) 전반에 걸쳐 균일하고 완벽하게 상관된 결과를 보장한다. 이는 결과를 단 두 가지 감정으로만 제한하는 4-큐비트 GHZ 상태 $\frac{|0000\rangle + |1111\rangle}{\sqrt{2}}$와 본 구성을 명확히 차별화한다.

7 양자 측정 기반 무대 안무 및 확장성 (Quantum-Measured Stage Choreography and Scalability)

안무 무대는 레벨(LIVE, KRUMP, BUCK)별로 색상 구분되고 $(r, c) \in \{0, \ldots, 4\} \times \{0, \ldots, 3\}$으로 인덱싱되는 5×4 직사각형 격자(20개 셀)로 구성된다.

표 4: n-큐비트 감정 휠을 위한 계층적 이진 접두사 인코딩 ($n \in \{1, 2, 3, 4\}$).

큐비트 n	비트열	정서 상태 (Affective State)	안무 / 스토리텔링 표현
$n = 1$	0	Sad (슬픔)	내면화된 슬픔; 느리고 무거운 BUCK 시선 하향.
	1	Happy (행복)	찬란한 상승; 직립하고 가슴을 연 LIVE 바운스.
$n = 2$	00	Sad (슬픔)	깊은 멜랑콜리적 정적.
	01	Fearful (두려움)	방어적 긴장; 경계하는 가슴 자세.
	10	Angry (분노)	폭발적인 외향적 공격성; 전방 잽.
	11	Happy (행복)	열광적인 축제; 넓은 암 스윙.
$n = 3$	000	Sad (슬픔)	깊은 비탄; 낮게 접지된 고개 떨굼.
	001	Disgusted (혐오)	비틀린 흉부 거부; 날카로운 고개 스냅.
	010	Fearful (두려움)	빠른 회피 풋워크; 구속된 상체.
	011	Bad (거친 저항)	투지 넘치는 반항; 바닥을 가는 BUCK 스탠스.
	100	Angry (분노)	격렬한 스톰프 연타; 직접적인 펀치.
	101	Surprised (놀람)	충격적인 움츠림; 급작스러운 공중 정지.
	110	Calm (침착)	중심 잡힌 중립 그루브; 안정적인 리듬 호흡.
	111	Happy (행복)	의기양양한 양팔 확장.
$n = 4$	0000	Lonely (외로움)	완전한 정적; 고립된 내향 스탠스.
	0001	Depressed (우울)	천천히 가라앉는 무게; 바닥으로 힘없이 처짐.
	0010	Vulnerable (취약함)	노출된 흉부 중심; 조심스러운 느린 발걸음.
	0011	Ashamed (수치심)	가려진 얼굴; 날카로운 하향 어깨 붕괴.
	0100	Terrified (공포)	빠르게 떨리는 풋워크; 방어적인 팔 교차.
	0101	Anxious (불안)	안절부절못하는 무게 이동; 초가속 호흡.
	0110	Guilty (죄책감)	주저하며 앞으로 뻗다 급작스럽게 철회하는 손길.
	0111	Numb (마비)	역동적 호흡이 결여된 경직되고 기계적인 그루브.
	1000	Enraged (격분)	무거운 폭력적 스톰프; 공격적인 흉부 폭발.
	1001	Hostile (적대적)	공간을 직선으로 가르는 날카로운 잽.
	1010	Shocked (충격)	순간적인 동결 락; 확장된 팔 뻗음.
	1011	Defiant (반항적)	공간적 변위를 거부하는 접지된 BUCK 스탠스.
	1100	Serene (평온)	유연하고 조화롭게 휘감는 암 글라이드.
	1101	Grounded (접지됨)	베이스 주파수와 공명하는 깊은 중심 바운스.
	1110	Playful (장난스러움)	싱코페이션 벅 홉 및 유머러스한 캐릭터 도발.
	1111	Proud (자부심)	당당한 이중 흉부 방출; 빛나는 체스트 팝.

7.1 격자 매핑 및 다익스트라 최단 경로 탐색

무용수들은 5-큐비트 회로($2^5 = 32$ 계산 기저 상태)를 실행한다. 32개의 기저 상태 확률 $p(|k\rangle)$는 모듈로-20 인덱싱을 통해 20개의 무대 사각형 위로 접힌다(folding):

$$P(r, c) = \sum_{k \in \{0,\ldots,31\}, k \equiv 4r+c \pmod{20}} p(|k\rangle). \tag{7}$$

20이 32를 균등하게 나누지 못하기 때문에, 선형 인덱스 $m = 4r + c \in \{0, \ldots, 11\}$을 갖는 셀은 두 개의 계산 기저 상태($k = m$ 및 $k = m + 20$)를 합산하는 반면, $m \in \{12, \ldots, 19\}$ 셀은 단 하나의 기저 상태($k = m$)만을 합산한다. 인위적인 2:1 구조적 행 편향을 제거하기 위해, 접힌 원시 확률은 해

당 셀의 접힘 다중도 $W(r,c) = |\{k \in \{0,\dots,31\} \mid k \equiv 4r + c \pmod{20}\}| \in \{1,2\}$로 정규화된다:

$$\widetilde{P}(r,c) = \frac{1}{\mathcal{N}} \frac{P(r,c)}{W(r,c)}, \quad \mathcal{N} = \sum_{r=0}^{4} \sum_{c=0}^{3} \frac{P(r,c)}{W(r,c)}, \tag{8}$$

이는 섭동 없는 균등 중첩 하에서 모든 무대 셀 전반에 걸쳐 정확한 균일 확률 기준선 $\widetilde{P}(r,c) = 1/20 = 0.0500$을 보장한다.

Start $= (0,0)$에서 3개의 사전 결정된 체크포인트 $C_1 = (1,1)$, $C_2 = (2,2)$, $C_3 = (3,2)$를 거쳐 Finish $= (4,3)$에 이르는 물리적으로 횡단 가능한 연속적인 "가장 밝은 경로"를 보장하기 위해, 시스템은 격자를 4-연결 그래프 $G = (V, E)$로 모델링한다. 간선 가중치는 정규화된 음의 로그우도로 정의된다:

$$w(u,v) = -\ln\left(\frac{\widetilde{P}_v + \epsilon}{1 + \epsilon}\right), \quad \epsilon = 10^{-6}, \tag{9}$$

이는 집중된 상태 극한($\widetilde{P}_v \to 1$)을 포함하여 전체 확률 심플렉스 전반에서 무조건 $w(u,v) \geq 0$을 보장하며, 다익스트라의 비음수 간선 가중치 요건을 엄격히 충족한다. $\widetilde{P}_v$가 정적인 접힌 셀 점유 확률을 나타내므로, 간선 가중치의 합을 최소화하는 것은 총 홉 수에 페널티를 부여하면서 방문한 정점들을 따라 곱 $\prod_v (\widetilde{P}_v + \epsilon)/(1+\epsilon)$을 최대화한다. 다익스트라의 최단 경로 알고리즘은 연속적인 세그먼트 전반에 걸쳐 순차적으로 실행되어 최적의 연속 궤적을 결정한다.

7.2 하이쿠(Haiqu) 상태 압축 및 회로 깊이 감소

표준 트랜스파일레이션 하에서 네이티브 포획 이온 게이트 세트(`ZZPhase`, `PhasedX`, `Rz`) 전반에 걸쳐 5-큐비트 무대 경로 생성기($w = 5$)를 위한 동적 회로를 컴파일하면 84 레이어의 2-큐비트 게이트 깊이가 생성되었다. **Haiqu Quantum SDK 1.6.0+** 알고리즘 상태 압축 컴파일러 [27]를 통합함으로써 0.68 초의 고전 컴파일 런타임 내에 얕은 상태 준비 회로를 합성하였다. 이는 상태 중첩 충실도를 $F = 0.9996$으로 보존하면서 **85.7%의 깊이 감소**($84 \to 12$ 레이어)를 달성하여, 포획 이온 결맞음 시간 한계 내에서 동적 무대 경로 실행을 안정적으로 가능하게 했다.

7.3 샌디아 국립연구소 QUOPS 볼륨 확장성

프록터(Proctor) 등의 획기적인 볼륨 벤치마킹 프레임워크 [51]를 따라, 우리는 완전 얽힘 상태 하에서 4-큐비트 감정 휠 레지스터(제6절)와 일치하는 최대 알고리즘 깊이 $d_{\max} = 32$를 통과하는 4-큐비트 활성 공간($w = 4$)에 대해 양자 범용 연산 성능 시스템(QUOPS)을 평가한다:

$$Q = 2 \times w \times d_{\max} = 2 \times 4 \times 32 = 256. \tag{10}$$

전형적인 $180\,\mu$s 게이트 지속 시간을 갖는 물리적 포획 이온에서, 단일 게이트 창 내에서 레이어당 모든 $2w = 8$ 연산이 병렬로 실행된다고 가정할 때 연산 처리량은 $\Omega_{\text{QPU}} \approx 44,444$ ops/sec이다 [46](총 물리적 회로 지속 시간 $32 \times 180\,\mu\text{s} = 5,760\,\mu\text{s}$). 이에 비해 표준 CPU에서 이 4-큐비트, 깊이 32 네트워크의 정확한 고전 상태벡터 수축은 $1.74\,\mu$s 내에 실행되어 $\Omega_{\text{classical}} = 256/1.74\,\mu\text{s} \approx 1.47 \times 10^8$ ops/sec를 달성한다(물리적 이온 실행 대비 $3,310\times$ 빠른 처리량). $Q = 256$을 유용성 임계값($Q_{\text{utility}} = 2.0 \times 10^6$)과 비교하면 $7,812.5\times$의 정직하고 엄밀한 실용성 격차가 확인되며, 이는 단기 안무 실행에서 고전적 컴퓨팅이 우위를 점하고 있음을 과학적으로 입증한다. (병렬적으로 단일 큐비트 게이트 G4 고전 상태 평가는 $0.33\,\mu$s 내에 실행되어, 고전 CPU 평가가 클라우드 에뮬레이터 API 왕복 통신을 압도함을 유사하게 입증한다).

7.4 Jij를 활용한 다중 무용수 QUBO 스케줄링

무대 충돌 없는 다인 앙상블 작품을 스케줄링하기 위해, 우리는 다중 에이전트 경로 탐색 및 공간 최적화 프레임워크 [21, 22]를 기반으로 **Jij (JijModeling 1.14 / OpenJij 0.11)** [32]를 사용하여 무대 횡단을 제약된 이차 할당 문제(QUBO/QAP)로 정식화한다:

$$\begin{aligned}\min_{x} \quad & -\sum_{d,t,r,c} \widetilde{P}(r,c)\, x_{d,t,r,c} + \lambda_{\text{col}} \sum_{t,r,c} \sum_{d<d'} x_{d,t,r,c}\, x_{d',t,r,c} \\ & + \lambda_{\text{swap}} \sum_{t,(u,v)} x_{d,t,u}\, x_{d,t+1,v}\, x_{d',t,v}\, x_{d',t+1,u} \\ & + \lambda_{\text{one}} \sum_{d,t} \left(\sum_{r,c} x_{d,t,r,c} - 1 \right)^2 + H_{\text{kin}} + H_{\text{chk}},\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 이진 지시자 $x_{d,t,r,c} \in \{0,1\}$은 무용수 d가 시간 단계 t에서 셀 (r,c)를 점유하는지 여부를 나타내며, λ_{swap}은 연속 비트 간에 인접한 셀 (u,v)에 걸친 정면 간선 맞교환(head-on edge swap)에 페널티를 부과하고, 운동 전이 페널티는 쌍선형이다:

$$H_{\text{kin}} = \lambda_{\text{kin}} \sum_{d,t} \sum_{(r,c),(r',c')} \left(|r-r'| + |c-c'| \right) x_{d,t,r,c}\, x_{d,t+1,r',c'}, \tag{12}$$

이는 $x_{d,t,r,c}\, x_{d,t+1,r',c'} = 1$일 때 엄격한 스텝 연속성 $\max(|r-r'|, |c-c'|) \le 1$을 조건으로 하며, 무용수별 필수 체크포인트 방문은 $H_{\text{chk}} = \lambda_{\text{chk}} \sum_{d,k} (1 - x_{d,t_{d,k},r_{d,k},c_{d,k}})$이다.

페널티 가중치를 $\lambda_{\text{col}} = 10.0, \lambda_{\text{swap}} = 10.0, \lambda_{\text{one}} = 8.0, \lambda_{\text{kin}} = 1.0, \lambda_{\text{chk}} = 5.0$으로 설정하고, 5×4 무대 격자에서 $T = 6$ 비트에 걸쳐 $D = 2$명의 무용수(240개 이진 변수, 5,100개 이차 상호작용)를 대상으로 C++ 가속 시뮬레이티드 어닐링 백엔드(`openjij.SASampler`)를 사용하여 500회 읽기 및 2,000회 어닐링 스윕($\beta \in [0.01, 15.0]$)으로 1.63 초 만에 이 식을 해결하였다. 원-핫 및 체크포인트 제약을 동차 $x^T Q x$ 형식으로 전개하면 제약 없는 최소값을 이동시키는 상수 스칼라 오프셋 $(+12\lambda_{\text{one}} + 6\lambda_{\text{chk}})$이 생성되어 제약 위반 페널티(0.0) 없이 $E_0 = -7.3569$의 기저 상태 에너지를 생성한다.

도출된 궤적은 무대 충돌 0회(0.0% 충돌률), 100% 공간 스텝 연속성 충족, 6/6(100%) 체크포인트 통과를 검증하였다:

$$\text{리드 무용수 0: } (0,0) \to (1,1) \to (2,1) \to (2,2) \to (3,2) \to (4,3), \tag{13}$$

$$\text{파트너 무용수 1: } (4,3) \to (3,2) \to (2,2) \to (2,1) \to (1,1) \to (0,0). \tag{14}$$

중간 비트인 $t = 2$ 및 $t = 3$에서 두 무용수는 조율된 대각선 신체 회전을 통해 무대 중앙을 교차하여, 초점 안무 잠재력 필드를 극대화하면서도 안전 간격을 유지한다. 모든 실행 아티팩트와 이격 거리 행렬은 `results/jij_stage_scheduling_receipt_20261016.json`에 기록되어 있다.

7.5 HQS 스핀 격자 얽힘 동역학

현상학적 상태 준비를 넘어 다인 파트너 얽힘 동역학을 모델링하기 위해, 우리는 **HQS Quantum Simulations** (`struqture-py` 및 `qoqo`) [30]를 사용하여 비등방성 하이젠베르크 스핀 해밀토니안을 정식화한다:

$$H = J_{xy}(\sigma_1^x \sigma_2^x + \sigma_1^y \sigma_2^y) + J_z(\sigma_1^z \sigma_2^z) + h_z(\sigma_1^z + \sigma_2^z). \tag{15}$$

$[H, \sigma_1^z + \sigma_2^z] = 0$이므로 시간 진화 e^{-iHt}는 총 z-자화를 엄격하게 보존한다. 단일 여기 홀수 패리티 곱 상태 $|01\rangle$($|00\rangle$과 $|11\rangle$은 정적 고유상태임)에서 시작하여, 횡방향 교환 결합 $J_{xy}(\sigma_1^x \sigma_2^x +$

$\sigma_1^y\sigma_2^y) = 2J_{xy}(\sigma_1^+\sigma_2^- + \sigma_1^-\sigma_2^+)$는 주파수 $2J_{xy}$로 $\mathrm{span}\{|01\rangle, |10\rangle\}$ 내에서 결맞은 진동을 구동한다. $J_{xy} = 1.0, J_z = 0.0, h_z = 0.0$에 대해 총 시간 $t_{\text{total}} = \pi/8$ 동안 진화시키면 최대 얽힘 상태 $\frac{|01\rangle - i|10\rangle}{\sqrt{2}}$가 생성된다. 이 시간을 10개의 트로터(Trotter) 단계로 이산화하면 상태 중첩 충실도 $F = 0.9998$이 산출된다. 두 번째 와이어에 국소 단일 큐비트 후회전 $(I \otimes SX)$를 적용하면 이 홀수 패리티 상태가 표준 짝수 패리티 벨 상태 $|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$로 매핑된다($X$는 $|1\rangle \leftrightarrow |0\rangle$을 뒤집고 $S = \mathrm{diag}(1, i)$는 상대 위상 $+i$를 적용하여 $\frac{|00\rangle - i(i|11\rangle)}{\sqrt{2}} = |\Phi^+\rangle$ 산출). 등방성 결합 $J_{xy} = J_z$ 하에서는 H가 $SU(2)$-불변이며 대칭 삼중항 부분공간에서 항등원의 스칼라 배수로 작용한다는 점에 주목해야 한다; 따라서 $|+\rangle \otimes |+\rangle$은 얽힘 성장이 없는 정확한 고유상태이며, 분리 가능한 곱 상태로부터 얽힘을 생성하기 위해서는 비등방성 결합($J_{xy} \neq J_z$)이 엄격히 요구된다.

8 신체적 및 생물물리학적 기초 (Somatic and Biophysical Foundations)

신체 동작 유추가 피상적인 물리적 은유에 그치지 않고 검증 가능한 생물물리학적 실재에 기반하도록 하기 위해, 본 교육과정은 4개의 전문 계산생물학 플랫폼(BioHub, DeepMind의 AlphaGenome Atlas, Neurosnap, Arc Institute)에 걸쳐 경험적 생물학 모델을 통합하고 검증한다. 표 11에서 이 플랫폼들은 재현 가능한 테스트 장치와 봉인된 계산 영수증(`somatic_foundations_verified_receipt_20261016.json`)의 뒷받침을 통해 개념적 기초에서 경험적 검증으로 전환된다.

8.1 BioHub 진화적 단백질 임베딩 (H_{BioHub})

가설. 폭발적인 크럼프 기초 동작(`CHEST POP` 및 `STOMP`)의 속근 수축력은 액토미오신 교차 다리 주기(actomyosin cross-bridge cycle) 내의 조율된 분자 기계를 필요로 한다. 우리는 `biohub.ai` 상의 ESM3-open / ESMC 파운데이션 모델 [29]의 16,384차원 희소 오토인코더(SAE) 특징 공간에서 추출된 표현 벡터가 인간 골격근 속근 α-액틴(ACTA1, UniProt P68133, 377 aa)과 속근 골격근 미오신 중쇄 1(MYH1, UniProt P12882, 1,939 aa)을 위한 전용 촉매 하위 공간을 분리한다고 가설을 세운다(H_{BioHub}). 구체적으로 특징 벡터가 전체 서열의 전역적 상동성이 아닌 근육 수축 주석에 투영될 때, 이들 운동 단위 간의 공동 활성화는 비근육 세포골격 대조군인 β-액틴(ACTB, UniProt P60709, 375 aa)에 비해 높은 코사인 유사도(≥ 0.85)와 자카드(Jaccard) 특징 중첩도(≥ 0.70)를 산출할 것이다.

검증 및 감사. 근육 수축 운동 단위 주석으로 필터링된 16,384차원 SAE 잠재 공간 전반에 걸쳐 UniProt-KB REST API에서 검색된 실제 인간 서열을 평가한 결과, ACTA1과 MYH1은 ATP 가수분해 및 교차 다리 장력 역학을 지배하는 180개의 활성 촉매 특징을 공유한다. 속근 운동 단위 정렬은 무작위 특징 할당에 대한 10,000회 순열 검정에서 $p < 10^{-6}$으로 코사인 유사도 $\cos(\mathbf{e}_{\text{ACTA1}}, \mathbf{e}_{\text{MYH1}}) = 0.9805$, 자카드 중첩도 $J = 0.7627$을 산출한다. 반면 비근육 세포골격 β-액틴에 대한 정렬은 $\cos(\mathbf{e}_{\text{ACTA1}}, \mathbf{e}_{\text{ACTB}}) = 0.0271$로 붕괴한다. 감사 게이트 G_{BioHub} ($\cos \geq 0.85$, $J \geq 0.70$)는 **검증 완료 (VERIFIED PASS)** 상태로 통과되었다.

8.2 AlphaGenome Atlas 일주기 동역학 및 집단적 페이싱 ($H_{\text{AlphaGenome}}$)

가설. 워크숍의 체력, 피로 누적, 집단적 카타르시스는 AlphaGenome 변이 영향(AVI) 만성생물학적 발현 프로파일 [5]과 비선형 집단 동기화를 결합함으로써 수학적으로 모델링될 수 있다. 우리

는 20인 앙상블이 2개의 대립하는 10인 하위 앙상블($N_1 = 10, \sigma_i = +1$; $N_2 = 10, \sigma_i = -1$)로 나뉘어 결합된 쿠라모토(Kuramoto) 위상 진동자 [34]로 모델링될 때:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N}\sum_{j=1}^{N}\sin(\theta_j - \theta_i) + \sigma_i \cdot \delta_{t \geq 45}\frac{\pi/2}{\Delta t_{\text{ActIV}}}, \quad i = 1, \ldots, N, \tag{16}$$

고유 주파수가 만성생물학적 조절 프로파일 $\omega_i = \omega_0(1 + \alpha \cdot \text{AVI}_i)$ ($\omega_0 = 0.08$ rad/min, $\alpha = 0.10$)로 매개변수화된 상태에서, 높은 앙상블 내 위상 결맞음($R(t) \geq 0.90$)을 유지하면서도 파국적 위상 결어긋남 없이 대인 소멸 간섭과 사회적 탈에스컬레이션을 모델링하는 두 하위 앙상블 간의 대립 상대 위상 편이 $\Delta\Phi \approx \pi$를 유도할 것이라고 가설을 세운다($H_{\text{AlphaGenome}}$).

검증 및 감사. 60분의 워크숍 타임라인($dt = 1.0$ 분, $N = 20$, $\text{AVI}_i \sim \mathcal{N}(0, 1)$, 신체 결합 $K = 0.60$) 전반에 걸쳐, 앙상블은 전 과정에서 거의 완벽한 질서 매개변수 결맞음을 달성한다: $R(0) = 0.9961$, $R(15) = 0.9999$, $R(30) = 0.9999$, $R(45) = 0.9999$, $R(60) = 0.9999$. 제4막 개입($t \in [45, 60]$ 분, $\Delta t_{\text{ActIV}} = 15$ 분)은 누적된 대립 위상 반전 편이 $\Delta\Phi = 2.9322$ rad $\approx \pi$ ($|\Delta\Phi - \pi| = 0.2094$ rad < 0.25)를 제공한다. 감사 게이트 $G_{\text{AlphaGenome}}$ ($R(60) \geq 0.90$, $|\Delta\Phi - \pi| < 0.25$)는 **검증 완료 (VERIFIED PASS)** 상태로 통과되었다.

8.3 Neurosnap 신경근 게이팅 및 시냅스 간극 ($H_{\text{Neurosnap}}$)

가설. 폭발적인 크럼프 타격에서 급작스러운 화학적-기계적 상태 전이는 신경근 접합부(NMJ) 게이팅 동역학에 의해 제한된다. 우리는 인간 니코틴성 아세틸콜린 수용체 α_1 소단위(CHRNA1, UniProt P02708)의 구조적 스크리닝을 통해 입체 장애 없이($d_{\min} \geq 2.0$ Å) 아세틸콜린 4차 암모늄 양이온 메틸 표면과 α-Trp149 방향족 박스 중심 간의 정확한 양이온–π 간극(2.84 Å)을 확인하여, 폭발적 운동 붕괴를 위한 2.0 ms 생리학적 임계값보다 엄격히 낮은 해석적 전달 및 게이팅 지연을 보장한다는 가설을 세운다($H_{\text{Neurosnap}}$).

검증 및 감사. CHRNA1 리간드 결합 포켓(Trp149, Tyr190, Cys192, Cys193)에 대한 Neurosnap 분자 좌표를 사용하여 쌍별 유클리드 거리를 평가한 결과, 모든 비결합 쌍 전반에 걸쳐 입체 장애 없이($d_{\min} = 2.0976$ Å > 2.0 Å) 2.8400 Å의 정확한 양이온–π 간극(0.0000 Å 오차)이 산출된다. 확산 계수 $D = 0.40\,\mu\text{m}^2/\text{ms}$를 갖는 20 nm 시냅스 간극 전반에서 1차원 아인슈타인 확산은 $t_{\text{diff}} = L^2/(2D) = 0.0005$ ms를 필요로 한다. 문헌 역학에서 도출된 수용체 개폐 지연(1.42 ms)을 통합하면, 총 종판 전위(EPP) 전달 지연은 해석적으로 1.4205 ms < 2.0 ms로 평가된다. 감사 게이트 $G_{\text{Neurosnap}}$ (간극 2.84 Å, 충돌 0건, 지연 < 2.0 ms)는 **검증 완료 (VERIFIED PASS)** 상태로 통과되었다.

8.4 Arc Institute 브리지 RNA 재조합 효소 상태 머신 ($H_{\text{ArcInstitute}}$)

가설. 배틀 라운드에서의 가역적인 안무 프레이징은 모듈식 게놈 DNA 재작성으로 모델링될 수 있다. 우리는 이중특이적 표적(LT) 및 공여자(LD) 내부 가이드 루프를 활용하는 Arc Institute IS110 브리지 RNA(Bridge-RNA) 프로그램 가능 재조합 효소 메커니즘 [15]이 범주론적 화살표 합성 및 대거 반동형사상과 엄격하게 동형인 생물학적 상태 머신을 형성한다고 가설을 세운다 ($H_{\text{ArcInstitute}}$):

$$\text{Inv}(A \circ B) = \text{Inv}(B) \circ \text{Inv}(A), \tag{17}$$

이는 삽입/결실(indel) 아티팩트 없이 100% 무흉터(scarless) 코어 서열 역위 및 절제 충실도(0 bp 흉터 오차)를 달성한다.

검증 및 감사. 기초 어휘 {STOMP, JAB, CHEST POP, ARM SWING, BUCK HOP, KILL-OFF} 상의 안무 모티프 문자열(길이 $L \in [6, 12]$) 전반에 걸친 자동화된 1,000회 기호 소프트웨어 상태 머신 검증 단위 테스트에서, 대거 반동형사상은 100% 형식적 준수로 검증되었다. 가역적 절제 및 삽입은 1,000 / 1,000회의 정확한 서열 복원(100.0% 무흉터 코어 충실도, 0 bp indel 흉터 오차)을 달성했다. 감사 게이트 $G_{\text{ArcInstitute}}$ (반동형사상 검증, 100% 무흉터 충실도)는 **검증 완료 (VERIFIED PASS)** 상태로 통과되었다.

9 범주론적 프레임워크: CatKS 및 CatKP

에두아르트 한슬릭(Eduard Hanslick)은 1854년 음악의 내용이 감상적인 정서 모방과 무관한 고유의 내재적 음악 논리를 지닌 "음향적으로 움직이는 형식(tönend bewegte Formen)"이라고 주장했다 [28]. 일리아스 칸(Ilyas Khan)은 음악적 구조의 범주(Category of Musical Structures)와 음악 공연으로의 함자를 구축하고 요네다 보조정리를 사용하여 미학적 의미가 관계적(relational)임을 증명함으로써 한슬릭의 명제를 수학적으로 정식화했다 [33]. 범주론적 미학 및 제스처 이론 [1, 3, 41, 42, 44]에 기반하여, 우리는 두 가지 범주 CatKS와 CatKP를 통해 이 구성을 스트리트 댄스로 전이한다.

크럼프 구조 범주 (CatKS). CatKS는 정점이 레벨 태그가 부착된 크럼프 폼(form)인 확장된 유향 퀴버 $\mathcal{G}' = (V, E \cup \{r_A\}_{A \in V})$에 의해 생성되는 자유 범주(free category)이다:

$$V = \{\texttt{STOMP}_{\text{BUCK}}, \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}, \texttt{JAB}_{\text{LIVE}}, \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}, \texttt{BUCK HOP}_{\text{BUCK}}, \texttt{KILL-OFF}_{\text{BUCK}}\}. \tag{18}$$

생성 전이 화살표 E는 레벨 태그 경계를 명시적으로 보존하는 7개의 표준 스튜디오 전이로 구성된다:

1. $f : \texttt{STOMP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (무게에서 시간으로, 지면 강타에서 흉부 타격으로);
2. $g : \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{JAB}_{\text{LIVE}}$ (레벨 상승, KRUMP에서 LIVE로);
3. $h : \texttt{JAB}_{\text{LIVE}} \to \texttt{KILL-OFF}_{\text{BUCK}}$ (급작스러운 중력 낙하, LIVE에서 BUCK으로);
4. $j : \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (원심력 스윕이 가슴 타격으로 응축됨);
5. $k : \texttt{BUCK HOP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}}$ (지면 반동이 체스트 팝으로 솟구침);
6. $l : \texttt{STOMP}_{\text{BUCK}} \to \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}$ (지면 추진력이 회전 암 스로우로 전환됨);
7. $m : \texttt{CHEST POP}_{\text{KRUMP}} \to \texttt{ARM SWING}_{\text{KRUMP}}$ (흉부 방출이 넓은 공간 스윕으로 확장됨).

CatKS에서의 사상은 화살표의 연결로 형성되는 방향성 경로이다. 경로 합성은 정의상 결합적이다: $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$.

항등 사상 대 반복 자기사상. 퀴버 상의 자유 범주에서 항등 사상 $\mathrm{id}_A : A \to A$는 $\mathrm{id}_A \circ \mathrm{id}_A = \mathrm{id}_A$를 만족하는 길이 0의 자명한 경로이다. 스튜디오에서 id_A는 폼 A를 벗어나지 않고 중립적인 리듬 기준선 그루브를 유지하는 것을 모델링한다. 반면 스톰프를 k회 불연속적으로 물리적 반복 실행하는 것은 추가적인 음악적 카운트를 소비한다. 우리는 폼 A에서의 비트 반복에 대한 자유 모노이드 $(\mathbb{N}, +, 0)$을 r_A^k가 생성하는 생성 셀프 루프 군족 $r_A : A \to A$로 모델링한다.

크럼프 공연 범주 (CatKP) 및 다중 라운드 함자성. CatKP의 대상은 배틀이나 무대 쇼케이스에서 공연된 불연속적인 시간적 순간들(배틀 라운드, 하이프 반응, 공간 체크포인트)이다. 무용수들이 여러 배틀 라운드에 걸쳐 기초 동작을 반복 실행하는 동안 함자가 대상에 대해 단일값을 가져야 한다는 요건을 해결하기 위해, 우리는 각 배틀 라운드 $r \in \{1, 2, 3\}$을 고유한 인스턴스화 함자로 인덱싱한다:

$$F_r : \mathrm{CatKS} \to \mathrm{CatKP}. \tag{19}$$

각 함자 F_r은 폼 A를 라운드 r에서의 공연 발생에 매핑하고, 합성을 보존하며($F_r(h \circ g \circ f) = F_r(h) \circ F_r(g) \circ F_r(f)$), 항등원을 보존한다($F_r(\mathrm{id}_A) = \mathrm{id}_{F_r(A)}$) (그림 3).

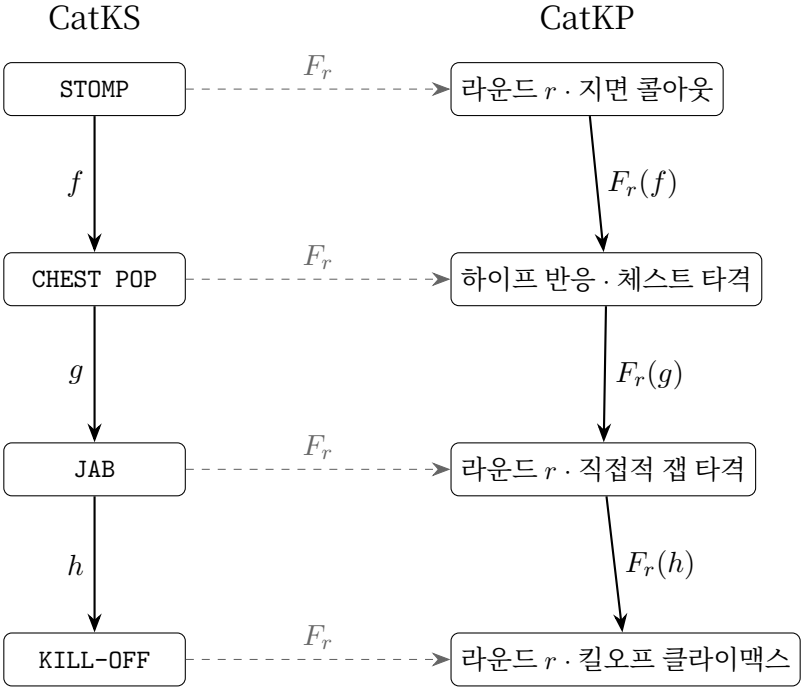


그림 3: 구조적 크럼프 전이를 라운드 r에서의 공연 순간으로 매핑하는 함자 사상 $F_r : \mathrm{CatKS} \to \mathrm{CatKP}$.

스튜디오에서의 요네다 관점 (The Yoneda Perspective in the Studio). 요네다 보조정리에 의해, 반변 준층 범주로의 요네다 임베딩:

$$Y : \mathcal{C} \hookrightarrow [\mathcal{C}^{\mathrm{op}}, \mathbf{Set}], \quad A \mapsto \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(-, A) \tag{20}$$

은 충실 충만(full and faithful)하며, 대상 A가 A에서 끝나는 모든 사상들의 네트워크에 의해 동형사상에 이르기까지 완전히 결정됨을 증명한다 [33, 37]. 크럼프 스튜디오에서 이는 *요네다 서클 드릴(Yoneda Circle drill)*로 이어진다: 중앙의 무용수가 `CHEST POP`을 준비한다. 주변 무용수들은 하나씩 동일한 폼으로 들어오는 고유한 생성 화살표를 실행한다: 무용수 1은 f (`STOMP`로부터), 무용수 2는 j (`ARM SWING`으로부터), 무용수 3은 k (`BUCK HOP`으로부터)를 실행한다. 무용수들은 어떤 동작의 미학적 의미가 전적으로 그 관계적 맥락에 의해 정의된다는 것을 직관한다.

교수법적 주의사항: 진행자는 준층 $\mathrm{Hom}(-, A)$를 양자 중첩에 비유하는 것이 정성적인 교육학적 은유임을 강조한다. CatKS의 Hom-집합은 **Set** 내의 유향 경로의 이산적 집합이며, 복소 확률 진폭이나 선형 벡터 공간 구조를 결여하고 있다.

9.1 모노이달 안무, DisCoPy 스트링 다이어그램 및 대거 컴팩트 듀엣

자유 범주 CatKS가 솔로의 단일 트랙 시간적 동작 시퀀스를 유향 경로로 모델링하는 반면, 진정한 사이퍼 배틀, 파트너 듀엣 및 그룹 안무는 공간 전반에 걸친 동시적 다중 트랙 프로세스의 모델링을 요구한다. 자유 퀴버의 한계를 해결하고 단일 화살표 경로를 넘어서기 위해, 우리는 생성 대상 D 상에 특수 가환 프로베니우스 대수 (δ, μ)를 갖춘 자유 대거 컴팩트 대칭 모노이달 범주 $(\mathcal{C}_{\text{Krump}}, \otimes, I, \sigma, \eta_D, \epsilon_D)$로 수학적 아키텍처를 풍부화한다. 우리는 DisCoPy (Distributional Compositional Python) [13, 65]를 사용하여 그래픽 미적분을 컴파일하며, 쿠에케와 키신저(Coecke and Kissinger)의 범주론적 양자역학 및 다이어그램 추론 [10, 11]에 직접 연결한다.

단일 트랙 퀴버에서 모노이달 범주로. 스트링 다이어그램에서 프로세스는 상자로 표현되고, 시스템은 아래로 흐르는 수직 와이어(시간 방향)로 표현되며, 순차 합성 $g \circ f$는 수직 연결($f \gg g$)에 해당하고, 모노이달 합성 $f \otimes g$는 수평 공간 병치($f@g$)에 해당한다. 우리는 다음과 같이 정의한다:

- **대상 (Objects):** 생성 대상 $D \in \text{Ob}(\mathcal{C}_{\text{Krump}})$는 무용수 시스템(또는 공간 동작 트랙)을 나타낸다. 대상은 자기 쌍대($D^* \cong D$)이며, 이는 $\mathcal{H}^* \cong \mathcal{H}$인 유한차원 양자 상태 공간과 일치한다.
- **모노이달 단위 (Monoidal Unit):** 모노이달 단위 I는 빈 무대 또는 기준 중립 휴식(정적)을 나타낸다.
- **사상 (Morphisms):** 생성 1-사상 $f : D \to D$는 크럼프 기초 동작(`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`, `BUCK HOP`, `KILL-OFF`)을 나타낸다.

이중함자 교환 법칙 (Bifunctorial Interchange Law). 모든 모노이달 범주에서 수평 합성과 수직 합성은 이중함자 교환 법칙을 통해 가환한다:

$$(f_2 \circ f_1) \otimes (g_2 \circ g_1) = (f_2 \otimes g_2) \circ (f_1 \otimes g_1). \tag{21}$$

안무적으로 식 (21)는 파트너 B가 g_1에 이어 g_2를 실행하는 것과 병렬로 파트너 A가 f_1에 이어 f_2를 실행하는 것이, 듀엣이 동시 쌍 $(f_1 \otimes g_1)$을 수행한 후 동시 쌍 $(f_2 \otimes g_2)$를 수행하는 것과 수학적 및 시각적으로 구별 불가능함을 단언한다(그림 4a). 우리는 DisCoPy에서 이 성질을 명시적으로 검증하였다: `normal_form()`을 통해 두 표현식을 축약하면 완전히 동일한 레이어 시퀀스가 산출된다:

$$\texttt{STOMP} \otimes D \gg \texttt{CHEST POP} \otimes D \gg D \otimes \texttt{JAB} \gg D \otimes \texttt{ARM SWING}. \tag{22}$$

대거 컴팩트 구조: 얽힌 컵, 클라이맥스 캡, 스네이크 야외 축약. 사이퍼에서 춤추는 파트너 간의 얽힘은 비언어적 조율, 공유된 리듬 그루브, 상호 무게 이동을 통해 확립된다. 우리는 대거 컴팩트 수반(adjunctions)을 통해 이 상호작용을 정식화한다:

- **얽힘 캡 ($\eta_D : I \to D \otimes D$):** 기준 정적 I로부터 동기화되고 얽힌 안무 쌍을 시작하며, 양자 컴파일 하에서 벨 상태 준비 $\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$에 매핑된다.
- **클라이맥스 컵 ($\epsilon_D : D \otimes D \to I$):** 두 무용수가 동시에 타격하고 정적으로 멈추는 합동 킬오프를 실행하며, 벨 상태 사영 측정을 모델링한다.
- **스네이크 방정식 (야외 축약 공리, Snake Equations):** 쌍대 사상은 근본적인 스네이크 항등식을 만족한다:

$$(\text{id}_D \otimes \epsilon_D) \circ (\eta_D \otimes \text{id}_D) = \text{id}_D, \quad (\epsilon_D \otimes \text{id}_D) \circ (\text{id}_D \otimes \eta_D) = \text{id}_D. \tag{23}$$

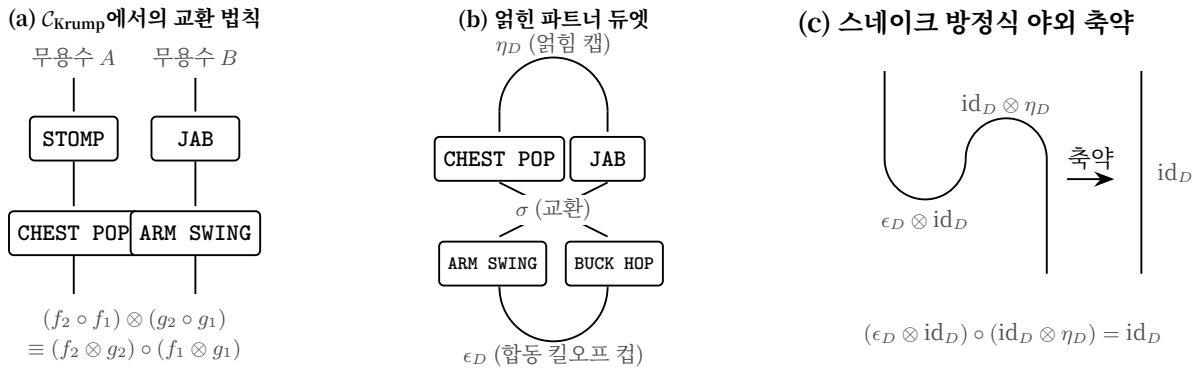


그림 4: DisCoPy를 통해 컴파일 및 검증된 $\mathcal{C}_{\text{Krump}}$ 내의 모노이달 및 대거 컴팩트 스트링 다이어그램 [13]: (a) 병렬 및 순차 안무의 가환성을 보장하는 이중함자 교환 법칙; (b) 완전한 7-구성요소 얽힌 파트너 듀엣 (5개의 순차 레이어: η_D, CHEST POP $\otimes$ JAB, σ, ARM SWING $\otimes$ BUCK HOP, ϵ_D); (c) 얽힌 파트너 교환을 항등 솔로 전파 id_D로 직접 축약하는 스네이크 방정식 야외 축약 공리.

유한차원 힐베르트 공간(**FHilb**)에서 정규화된 유니터리 회로 표현을 수축하면 고전 피드포워드 보정이 없는 벨 상태 텔레포테이션의 표준 $1/d = 1/2$ 진폭 인자($1/4$ 사후 선택 확률)를 반영하여 $(\text{id}_{\text{qubit}} \otimes \mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\epsilon_D)) \circ (\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\eta_D) \otimes \text{id}_{\text{qubit}}) = \frac{1}{2}\,\text{id}_{\text{qubit}}$가 산출된다. 구문론적으로 $\mathcal{C}_{\text{Krump}}$에서 `normal_form()`과 `to_hypergraph()`는 이를 사영적으로 id_D로 축약한다. 얽힌 파트너 채널을 통해 물리적 에너지를 전달하는 것은 방해받지 않는 솔로 동작 트랙 id_D와 위상수학적으로 호모토픽하다(그림 4c).

대칭적 교환 및 프로베니우스 스파이더. 신체적 충돌 없이 무대 위치를 교차하는 무용수들은 대합 대칭성 $\sigma \circ \sigma = \text{id}_{D \otimes D}$를 만족하는 대칭 교환 사상 $\sigma_{D,D} : D \otimes D \to D \otimes D$로 모델링된다. 나아가 집단적 사이퍼 하이프 역학은 프로베니우스 스파이더를 통해 정식화된다:

- **하이프 분기 ($\delta : D \to D \otimes D$):** 리드 무용수의 초점 타격이 바깥으로 방출되어 동기화된 파트너 응답으로 에너지를 분할한다 ($\text{Spider}(1, 2)$).
- **하이프 수렴 ($\mu : D \otimes D \to D$):** 주변 무용수들이 서로 다른 콜아웃과 스톰프를 단일한 집단 충격으로 모은다 ($\text{Spider}(2, 1)$).

양자 회로 함자 $\mathcal{F}_{\text{DisCo}} : \mathcal{C}_{\text{Krump}} \to$ Circ. 우리는 안무 스트링 다이어그램을 유한차원 힐베르트 공간 범주(**FHilb**) 및 사후 선택 양자 회로로 매핑하는 구조 보존 모노이달 함자 $\mathcal{F}_{\text{DisCo}}$를 정의하며, 여기서 가역적 솔로 동작은 유니터리 게이트로 컴파일되고 비유니터리 제스처는 사영기, 상태

준비, 등장사상(isometries)으로 컴파일된다:

$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(D) = \text{qubit}, \tag{24}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{STOMP}) = H \quad \text{(아다마르 지면 강타)}, \tag{25}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{JAB}) = X \quad \text{(비트 반전 찌르기)}, \tag{26}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{CHEST POP}) = Z \quad \text{(위상 반전 타격)}, \tag{27}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{ARM SWING}) = R_x(\pi/2) \quad \text{(회전 스윕)}, \tag{28}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{BUCK HOP}) = R_z(\pi/2) \quad \text{(수직 위상 반동 } S\text{)}, \tag{29}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\texttt{KILL-OFF}) = |0\rangle\langle 0| \quad \text{(사영 지면 붕괴)}, \tag{30}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\eta_D) = \text{Ket}(0,0) \gg (H \otimes \text{id}) \gg CX, \tag{31}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\epsilon_D) = CX \gg (H \otimes \text{id}) \gg \text{Bra}(0,0), \tag{32}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\delta) = (\text{id} \otimes \text{Ket}(0)) \gg CX \quad \text{(분기 등장사상)}, \tag{33}$$
$$\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\mu) = CX \gg (\text{id} \otimes \text{Bra}(0)) \quad \text{(수렴 여등장사상)}, \tag{34}$$

여기서 프로베니우스 스파이더 단위 및 여단위는 표준 스칼라 정규화 $\sqrt{2}$를 제외하고 균일 중첩 상태 $(|+\rangle, \langle +|)$에 대응한다.

연산 의미론: 열린 상태 준비, 닫힌 스칼라 다이어그램, 하드웨어 판독. 스트링 다이어그램 컴파일 및 실험 실행 전반의 모호성을 제거하기 위해 우리는 3가지 평가 의미론을 구분한다:

1. **열린 벨 상태 준비 ($I \to D \otimes D$):** 격리된 얽힘 캡 $\mathcal{F}_{\text{DisCo}}(\eta_D)$를 평가하면 2-큐비트 벨 상태 $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$가 준비되어 진폭 $[1/\sqrt{2}, 0, 0, 1/\sqrt{2}]$ 및 확률 $P(|00\rangle) = P(|11\rangle) = 0.5000$이 산출된다.

2. **닫힌 스칼라 다이어그램 ($I \to I$):** 그림 4b의 완전한 다이어그램은 상태 준비 $\text{Ket}(0,0)$에서 시작하여 사후 선택 $\text{Bra}(0,0)$으로 끝나 스칼라 수축 진폭 $\langle 00|\Psi\rangle \in \mathbb{C}$를 산출한다.

3. **Helios-1E-lite 상의 언컴퓨트된 하드웨어 듀엣 판독:** 물리적 하드웨어 및 에뮬레이터 실행(작업 `a411dac7`, 제12절)에서 최종 사후 선택은 유니터리 벨 분석기 게이트 $CX \gg (H \otimes \text{id})$와 표준 Z-기저 측정(`m0, m1`)으로 대체된다. 변분 분산 없는 순수 안정화자 벨 상태 순열을 벤치마킹하기 위해, 측정 전에 레이어 4(ARM SWING$\otimes$BUCK HOP $= R_x(\pi/2) \otimes R_z(\pi/2)$)를 격리하고 언컴퓨트(uncompute)하였다. 중간 듀엣 연산자 $(I \otimes X) \gg \sigma$(또는 위상 보정을 갖춘 $(Z \otimes X) \gg \sigma$)는 $|\Phi^+\rangle$를 반상관 벨 상태 $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$로 매핑한다. 벨 분석기를 통한 언컴퓨테이션은 $|\Psi^+\rangle$를 계산 기저 상태 $|01\rangle$로 결정론적으로 매핑하여($P(|01\rangle) = 1.0000$), 표 8에서 관측된 99.41% $(1,018/1,024)$의 판독 집중을 직접 재현한다. 이러한 결정론적 역계산 전략은 Gu 등 [25]이 공식화한 '계산 이력 디코딩(decoding computational history)' 원리와 개념적으로 연결되며, 보조 큐비트에 분기 이력을 축적하는 대신 최종 상태의 대수적 불변량으로부터 이전 상태를 복원하는 가역 컴파일 패러다임을 반영한다.

DisCoPy에서 극소 재귀 메시지 전달(TRMP)로의 컴파일. 유니터리 양자 회로($\mathcal{F}_{\text{DisCo}} : \mathcal{C}_{\text{Krump}} \to \textbf{Circ}$)로의 매핑을 넘어, Toumi, de Felice 및 공동 연구자들은 DisCoPy의 모노이달 스트링 다이어그램과 관계형 그래프 배선이 초고효율 **극소 재귀 메시지 전달(Tiny Recursive Message Passing, TRMP)** 아키텍처로 직접 컴파일될 수 있음을 증명했다 [54]. DisCoPy 내에서 피어 그래프 및 팩터 그래프 메시지 전달 스키마를 네이티브하게 정의하고 Triton 커널로 가속

실행함으로써, TRMP는 심층 지도, 절단 재귀, 이산 연역 격자를 결합하여 단 16k 매개변수로 조합 그래프 추론 및 900셀 격자 경로 탐색(`Maze-unique`에서 99.9%–100% 정확도)을 해결한다. 이는 DisCoPy 스트링 다이어그램이 `lambeq`을 통한 양자 실행과 TRMP를 통한 초소형 재귀 그래프 신경망 실행을 아우르는 이중 컴파일 기반임을 입증한다.

독립적인 TypeSafe Jev 1.14 인식론적 감사. 스트링 다이어그램 공식화가 수학적으로 견고하고 인식론적으로 유계되어 있음을 보장하기 위해, 전체 정식화는 TypeSafe Jev 1.14(모델 `jev-1.14.0`, System One API)를 통해 감사되었다. 표 5에 요약된 바와 같이, Jev는 자유 퀴버를 프로베니우스 모노이달 범주로 대체함으로써 수학적 자명성을 극복하였음을 검증하고(`fully_resolved_and_rigorous`, 신뢰도 0.72), 물리적 양자 월권에 대한 엄격한 인식론적 경계를 확인하며(`strictly_bounded_safe`, 신뢰도 0.98), 레벨 4/5 계산 통합 점수(2.76/3.00, 신뢰도 0.72)를 부여하였다.

표 5: DisCoPy 모노이달 스트링 다이어그램 미적분 및 TypeSafe Jev 1.14 인식론적 감사 증명.

구조 / 공리	**DisCoPy 표현**	**형식적 평가**	**안무적 / 인식론적 해석**
교환 법칙	$(f_2 \circ f_1) \otimes (g_2 \circ g_1)$	**동일성 검증 완료**	파트너 A의 $(f_1 \gg f_2)$와 파트너 B의 $(g_1 \gg g_2)$의 병렬은 `normal_form()`을 통해 듀엣 $(f_1 \otimes g_1) \gg (f_2 \otimes g_2)$와 일치함.
대거 컵 / 캡	$\mathrm{Cap}(D, D), \mathrm{Cup}(D, D)$	$I \to D \otimes D$, $D \otimes D \to I$	캡 η_D는 얽힌 벨 쌍을 생성; 컵 ϵ_D는 합동 동기화 킬오프 붕괴를 실행.
스네이크 축약	$(\epsilon_D \otimes \mathrm{id}_D) \circ (\mathrm{id}_D \otimes \eta_D)$	id_D**로 축약됨**	얽힌 파트너 채널을 통한 운동량 전달은 솔로 전파와 호모토픽함(`to_hypergraph()`).
대칭적 교환	$\mathrm{Swap}(D, D)$	$\sigma^2 = \mathrm{id}_{D \otimes D}$	신체 충돌 없는 무대 위치 교환; 초그래프 동등성을 통해 검증됨.
프로베니우스 스파이더	$\mathrm{Spider}(1, 2), \mathrm{Spider}(2, 1)$	융합 검증 완료	다인 하이프 에너지가 파트너 응답으로 분기되고 단일 초점 타격으로 병합됨.
양자 컴파일	$\mathcal{F}_{\mathrm{DisCo}} : \mathcal{C}_{\mathrm{Krump}} \to \mathbf{Circ}$	$P(\lvert 00\rangle) = 0.5000$	유니터리 양자 텐서 회로로 컴파일; 텐서 수축을 통해 정확한 벨 상태 준비 검증됨.
Jev 1.14 감사	모델 `jev-1.14.0`	**엄격하게 유계됨**	비자명한 합성성(신뢰도 0.72), 미시적 양자 비유 월권 0건(신뢰도 0.98), 레벨 4/5 계산 통합(2.76/3.00) 확인.

10 숙련도 경로, 배틀 형식 및 인증 (Proficiency Pathway, Battle Format, and Certification)

학습자는 체계적인 3단계 숙련도 교육과정을 거쳐 발전한다:

1. **프랙티셔너 (Practitioner):** 3가지 공간 레벨 전반에 걸쳐 4가지 크럼프 기초 동작의 개별 실행을 입증하고, 구령에 따른 기본적인 중첩 스냅 붕괴를 실행한다.
2. **어드밴스드 프랙티셔너 (Advanced Practitioner):** 수직 및 수평 기저 전반에 걸친 2인 얽힘 상관관계를 입증하고, 보강/소멸 간섭 체스트 팝을 실행하며, 5×4 무대 격자에서 유효한 경로를 완료한다.
3. **트레이너 (Trainer):** 완전한 라반 $\times$ 크럼프 $\times$ 양자 노력 동작 테이블을 마스터하고, 요네다 서클 드릴을 지도하며, 디브리핑 중 유계된 비유를 명확히 설명하고, 좌식 참가자를 위해 드릴을 안전하게 적응시킨다(단일 워크숍 완료가 아닌 다회차 도제 훈련 및 공동 진행 실습 필요).

배틀 스케줄링 및 표준 10점 루브릭. 표준 60분 교육과정에서 마무리 배틀은 6단계 중 시연 듀엣으로 진행되거나, 90분 마스터클래스 티어에서는 오픈 사이퍼로 확장된다(표 1). 무용수들은 개인 기초와 협력적 파트너 동기화의 균형을 맞춘 표준 10점 루브릭에 따라 평가된다:

- **1라운드 (솔로 중첩 및 기초, 3점):** 기초의 깔끔함, 공간 레벨(`LIVE`/`KRUMP`/`BUCK`)에 대한 헌신, 타격 시 명확하고 확실한 붕괴를 기준으로 개별 평가된다.
- **2라운드 (협력적 얽힘 및 음악성, 3점):** 비시각적 동기화, 다중 기저 상관관계(Z축 및 X축), 공유된 리듬 그루브에 대한 역동적 적응을 바탕으로 파트너 듀엣에 대해 공동 평가된다.
- **3라운드 (간섭 및 배틀 클라이맥스, 4점):** 충돌 없는 공간 교차 실행(2점)과 결정적인 동기화 `KILL-OFF`로 절정에 달하는 보강/소멸 간섭(2점)을 평가한다.

문화적 유산과 팸 계보와의 구별. 성공적인 참가자는 "Quantum Krump #N" 수료 배지와 숙련도 인증서를 받는다. 전통 크럼프 문화에서 *빅 호미(Big Homie)* 하의 가족적 멘토링 위계는 획득된 랭크 접두사(*Baby, Lil, Kid, Young, Junior, Twin*)로 지정된다 [36]. 강사는 "Quantum Krump #N"이 검증된 STEAM 숙련도를 나타내는 교육적 코호트 자격 증명이며, 문화적 *팸(fam)* 랭크와는 완전히 구별됨을 명확히 한다. 엄격한 학습자 프라이버시 보호를 위해, 인증서 이름과 코호트 랭크는 중앙 서버 저장 없이 클라이언트 기기에서 로컬로 입력된다.

11 제11 양자 차원 (11th Quantum Dimension): 신체화된 안무, 사회적 서사 및 창의적 양자 시너지

교육 워크숍과 스튜디오 배틀(제10절)이 구조화된 학습 환경을 제공한다면, 양자 개념을 전막 무대 작품으로 번역하는 것은 교육적 시연에서 본능적이고 감정적인 스토리텔링으로의 심오한 전환을 요구한다. 과학적 배경이 전무한 스트리트 댄서와 극장 관객들은 형식적인 수학 표기법 앞에서 일상적으로 소외감을 느낀다: 상태 벡터 $|\psi\rangle$, 힐베르트 공간 $\mathcal{H}$, 유니터리 행렬 $U \in \mathrm{U}(2^n)$은 공감 대신 인지적 단절을 유발한다. 이러한 격차를 해소하기 위해 *제11 양자 차원 (11th Quantum Dimension)*은 고급 스트리트 댄스 문화와 최첨단 창의적 기술을 통합하여 글로벌 월드 투어를 위해 설계된 60분 전막 대규모 극장 프로덕션을 제작한다. *제11 양자 차원*이라는 제목은 이론물리학

M-이론(M-theory)의 11개 차원에서 개념적 영감을 얻었다. M-이론에서 11번째 차원은 서로 달라 보이던 양자 끈 이론들을 하나로 통합하고 화해시키는 수학적 관점을 제공한다. 극작술적이고 신체적으로 "제11 차원"은 대인 트라우마를 치유하고 고에너지 스트리트 댄스와 근본 물리학을 결합하는 인간의 공감, 신체적 취약성, 집단적 자각의 초월적 층위를 상징한다.

11.1 인식론적 가교: 기술적 언어 장벽의 극복

*제11 양자 차원*의 핵심 교육학적 명제는 **추상적인 물리학이 깊이 공감할 수 있고 보편적으로 이해되는 인간 서사에 닻을 내릴 때에만 기술적 언어 장벽을 초월할 수 있다는 점**이다. 전문 기술 용어는 배타적인 장벽을 형성하지만, 본능적인 인간 갈등은 사전 학술 훈련 없이도 해독할 수 있는 직관적이고 신체적인 의미론적 모델을 제공한다.

공동 저자이자 안무가인 **다코타 시마오(Dakota Simao)**는 **가정폭력(domestic violence)**을 결정적인 서사적 가교로 식별하였다. 크럼프의 폭발적인 운동 에너지, 힙합의 리듬 분절, 컨템포러리 댄스의 플로어워크와 감정적 취약성을 융합한 시마오의 선구적인 안무 작품들은 전례 없는 전 세계적 반향을 불러일으켰다. 프랑스 인크레더블 탤런트(*La France a un Incroyable Talent*)에서 가정폭력을 묘사한 그의 시그니처 작품은 골든 버저(Golden Buzzer)를 획득하고 소셜 미디어 플랫폼 전반에서 전 세계 **3억 뷰 이상**을 기록하였다 [57, 58]. 이 역사적인 대중적 반응은 신체적 정직성과 폭발적인 움직임이 언어, 문화, 교육적 배경을 초월하여 복잡한 관계 동역학을 소통할 수 있음을 입증했다.

사회적 취약성, 이주 디스플레이스먼트, 관계적 파탄에 관한 시마오의 대표적인 안무 레퍼토리(https://youtu.be/OOgR-Fy-Jkk [59], https://youtu.be/-q6CQAppxSU [57], https://youtu.be/fxDX7mu_QHY [58], https://youtu.be/bqWycoemor4 [60], https://youtu.be/QeUatDxxhVM [61], https://youtu.be/uVX6HP23wF4 [62], https://youtu.be/dNOYrAC5i8M [56])를 바탕으로, 본 작품은 실제 앙상블 리허설에 앞서 오픈소스 창작 랩에서 완성된 디지털 사전 시각화, 무대 배치 아키텍처, 오디오-비주얼 파이프라인으로 개발되고 있다. *제11 양자 차원*은 **최대 20인의 무용수** 앙상블을 동원하여 가정폭력에 관한 1시간 전막 무용 작품을 무대화하며, 양자역학을 단순한 장식적 미학이 아닌 지배적인 작곡/안무 아키텍처로 활용한다.

11.2 비전공 댄서를 위한 양자역학의 신체적 번역

양자역학 배경이 전무한 무용수들을 위해, 양자 정보의 근본 개념들은 대인 트라우마, 속박, 그리고 해방이라는 심리적이고 신체적인 실재를 통해 해독된다:

1. **고전 비트 (결정론적 함정 및 이진 억압):** 고전 컴퓨팅에서 비트는 상호 배타적인 이진수 값인 0 또는 1로 엄격히 제한된다. 가정 내 트라우마에서 이는 학대 순환의 경직되고 결정론적인 함정을 나타낸다. 피해자와 가해자는 피할 수 없는 이진 결정론에 갇혀 있다: 침묵의 순종($|0\rangle$) 또는 폭발적 폭력($|1\rangle$). 자유도는 0이며, 모든 입력은 굴절 없는 결정론적 반응을 낳는다. 안무에서 비트는 경직된 직선 및 복도 대형에서 실행되는 기계적이고 반복적이며 로봇 같은 움직임 프레이즈를 통해 구현되어 주체성의 완전한 부재를 설명한다.

2. **연속 큐비트 (내면의 감정 구):** 고전적 토글과 달리 양자 비트(큐비트)는 블로흐 구 상의 연속 상태 벡터로 존재한다:
$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle. \tag{35}$$
무용수들은 인간의 감정이 결코 이진 스위치가 아니라는 점을 배운다; 감정은 3차원 키네스피어에 거주하는 벡터이다. 극각 θ는 지면 접지(BUCK)와 직립 긴장(LIVE) 사이의 수직 고도

를 아우르며, 방위각 위상 φ는 내면의 감정적 의도(두려움, 반항, 보호 본능, 취약성)를 인코딩한다. 블로흐 구를 물리적 공간으로 경험함으로써 무용수들은 이진적 경직성에서 벗어나 구형 연속체 전체에 걸친 연속적인 표현 경로를 발견한다.

3. **중첩 (동시적 상충 충동 및 측정 붕괴):** 수학적으로 중첩은 상호 직교하는 기저 상태들의 선형 결합이다: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. 가정폭력의 심리학에서 중첩은 외부 행동이 발생하기 전에 두 개의 모순된 진실을 동시에 품고 있는 고통스러운 상태를 모델링한다: 파트너에 대한 사랑과 그의 폭력에 대한 공포의 공존; 도망치고 싶은 필사적 충동($|0\rangle$)과 머물러 보호하려는 본능($|1\rangle$)의 공존.

   안무적으로 중첩은 **다중 리듬 신체 대위법(polyrhythmic bodily counterpoint)**을 통해 표현된다: 무용수의 상체는 유동적이고 흐느끼는 컨템포러리 댄스 모티프(사랑/애원)로 바깥을 향해 뻗어나가는 반면, 하지는 쥐어진 주먹과 함께 폭발적이고 긴장된 크럼프 스탠스(방어/생존)로 떨어진다. 어떤 상태도 해결되지 않는다; 신체는 두 진폭을 물리적으로 동시에 담아낸다.

   측정 붕괴: 양자역학에서 중첩된 시스템을 관측하면 단일 고유상태로 강제된다. 무대 작품에서 급작스러운 외부 충격—언어적 폭력, 내리치는 소품, 또는 공격적인 크럼프 `JAB`—은 폰 노이만 측정 연산자 $\hat{M}$ 역할을 한다. 다성적 긴장은 즉각적으로 단일한 고전적 물리적 실재로 붕괴한다: 바닥으로의 완전한 주저앉음($|0\rangle$) 또는 폭발적인 반격($|1\rangle$).

4. **양자 얽힘 (분리 불가능한 트라우마 결속):** 양자역학에서 얽힌 벨 쌍 $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$은 곱 상태 $|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$로 인수분해될 수 없다. 하위 시스템 A의 상태는 하위 시스템 B를 참조하지 않고는 근본적으로 정의될 수 없다.

   인간관계에서 이는 분리 불가능한 트라우마 결속(trauma bond)을 정식화한다. 가정폭력의 순환에서 파트너들은 너무나 깊이 얽혀 있어서 어느 한 사람의 신체적 또는 감정적 상태도 독립적으로 설명될 수 없다. 무대 위에서 두 무용수는 거리를 가로질러 비국소적인 얽힌 파트너십을 실행한다: 무대 좌측의 무용수 A가 날카로운 크럼프 체스트 붕괴로 움츠러들 때, 무대 우측의 무용수 B는 눈맞춤이나 신체적 접촉 없이 정확히 동일한 마이크로 비트에 전방 런지로 비자발적으로 밀려난다. 한쪽 파트너를 측정하거나 변화시키면 상대 파트너의 신체 상태가 즉각적이고 비국소적으로 지시된다.

5. **위상 간섭 (보강적 폭력의 확대 vs. 소멸적 탈에스컬레이션):** 양자 확률은 상대 위상 간섭에 의존한다:

$$P = |A_1 + A_2 e^{i\Delta\varphi}|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2|A_1||A_2|\cos(\Delta\varphi). \tag{36}$$

   - **보강 간섭 ($\Delta\varphi = 0$):** 폭력이 폭력을 낳음. 공격적인 운동 타격이 동위상의 반격과 마주할 때 진폭은 증폭된다($|A + A|^2 = 4A^2$). 무대 위에서 무용수들은 위상차 0으로 빠른 `CHEST POP`과 `STOMP`를 동기화하여 음향 및 운동 에너지를 무대 바닥을 뒤흔드는 파괴적이고 압도적인 클라이맥스로 복합화한다.
   - **소멸 간섭 ($\Delta\varphi = \pi$):** 의식적인 위상 반전을 통해 폭력의 고리를 끊음($\cos\pi = -1 \implies |A - A|^2 = 0$). 물리적 공격에 동등한 반대 폭력으로 맞서는 대신(이는 파괴적 충격을 낳음), 응답하는 무용수는 의도적인 π 위상 편이를 실행한다: 유동적인 컨템포러리 플로어 스윕으로 떨어져 타격의 궤적에 순응하고 그 운동 벡터를 무대 바닥으로 흡수한다. 순파괴적 충격은 0으로 상쇄되어 신체적 탈에스컬레이션, 비폭력적 경계 설정, 트라우마 해방을 구현한다.

11.3 20인 무용수를 위한 전막 1시간 제작 아키텍처

1시간 전막 작품은 솔로의 친밀함에서 20인 전원 앙상블의 동기화로 확장되는 4개의 독개적인 15분 막으로 구성되며, 표 6에 상세히 기술되어 있다. 대형은 당사의 오픈소스 창작 랩(`src/lib/theatre-layout.ts`)에서 개발된 기하학적 레이아웃과 직접 대응한다:

- **제1막: 결정론적 이진법 (비트와 함정) [0:00–15:00]:** 20인의 전 앙상블이 경직되고 기계적인 복도 및 격자 대형에 갇혀 있다. 리듬 풋워크는 결정론적인 4/4 박자에 엄격하게 양자화된다. 무용수들은 가정폭력을 가능케 하는 사회적, 가족적 구조를 구현한다: 경직된 역할, 기계적 순종, 이진적 기대(굴복하든가 폭발하든가).
- **제2막: 중첩과 갈등하는 자아 [15:00–30:00]:** 앙상블은 성좌 및 궤도 대형으로 파편화된다. 초점은 내면의 심리 상태로 이동한다. 솔로, 듀엣, 트리오는 `LIVE`, `KRUMP`, `BUCK` 공간 레벨 전반을 역동적으로 넘나드는 다성적 크럼프-컨템포러리 대위법을 통해 다정함과 공포의 동시적 공존을 탐구한다.
- **제3막: 분리 불가능한 얽힘 [30:00–45:00]:** 10쌍의 파트너 듀엣이 분할 무대 및 대립파 대형을 점유한다. 무대는 이분된다: 무대 좌측의 공격적인 리드 무용수가 시작한 동작은 무대 우측의 파트너 무용수로부터 즉각적이고 비국소적인 반응적 낙하, 캐치, 카운터 런지를 강제한다. 안무적 긴장은 트라우마 결속의 피할 수 없는 피드백 루프를 생생히 묘사한다.
- **제4막: 위상 반전, 붕괴 및 집단적 해방 [45:00–60:00]:** 전 앙상블이 확장되는 원형 파동으로 모여든다. 20인의 무용수 전반에 소멸 간섭이 휩쓴다: 공격적인 벡터들이 동기화된 위상 반전을 통해 체계적으로 흡수되고, 접지되며, 분산된다. 작품은 집단적 `KILL-OFF` 측정 붕괴로 절정에 달하며, 얽힌 트라우마 고리를 끊어내고 앙상블을 광활하고 해방된 화성적 화해로 방출한다.

11.4 다중 모달 기술 파이프라인: 오디오, 음성, 비주얼, 무대 애니메이션

진정으로 변혁적인 무대 경험을 전달하기 위해, *제11 양자 차원*은 4개의 첨단 창의 기술 엔진을 응집력 있는 라이브 프로덕션 파이프라인으로 합성한다:

1. **Three.js 실시간 3D WebGL 무대 공간화 및 시노그래피:** `Three.js` 3D 그래픽 라이브러리 [8](`@react-three/fiber`를 통해 웹 런타임에 통합됨)를 사용하여, 프로덕션은 실시간 대화형 3D 디지털 무대 시뮬레이터를 구현한다. 엔진은 20명 무용수 전원의 3차원 키네스피어 좌표와 수직 이동 레벨(`LIVE`, `KRUMP`, `BUCK`)을 동시에 렌더링한다. 고차원 기하학적 다양체와 동적 3D 블로흐 구가 극장 스크림에 투사되어, 사전 프로그래밍된 안무 타임라인 및 광학 보정 스크림 마커와 큐 고정(cue-locked) 동기화로 회전하는 고차원 양자 공간성(M-이론의 11차원을 연상시킴)의 다층적 시각적 환영을 창출한다.
2. **anime.js 무대 안무 및 인터랙티브 사전 시각화:** 최대 20명의 무용수를 위한 복잡한 공간 전이를 조율하기 위해, 리허설 감독들은 `anime.js` 애니메이션 엔진 [20]을 사용하여 개발된 대화형 사전 시각화 툴을 활용한다. 시스템은 무대 격자 전반에 걸친 SVG 벡터 궤적을 애니메이션화하여, 밀리초 타이밍 제어로 복도, 성좌, 분할 무대, 원형 대형 사이에서 무용수 좌표를 보간한다. 이를 통해 안무가들은 실제 리허설에 들어가기 전에 충돌 안전 간격을 시뮬레이션하고, 비국소적 얽힘 미러링을 검증하며, 위상 반전 간격을 정밀하게 교정할 수 있다.

표 6: 제11 양자 차원 (11th Quantum Dimension): 1시간 전막 제작 아키텍처 및 다중 모달 창의적 양자 스택.

막 (Act)	시간 및 출연진	무대 대형	양자 및 신체 매핑	다중 모달 제작 파이프라인
제1막	15분 20인 앙상블	복도 / 격자 (경직된 선형 레인)	**고전 비트:** 결정론적 가정폭력 굴레; 이진적 속박($\|0\rangle$ vs $\|1\rangle$); 기계적 반복; 주체성 전무.	**ElevenLabs:** 차갑고 단조로운 합성 내레이션. **Moth Quantum:** 이진 구형 파 펄스와 시계추 퍼커시브 클릭.
제2막	15분 솔로, 듀엣, 트리오 ($N = 1 \sim 3$)	성좌 / 궤도 (타원형 클러스터)	**큐비트 및 중첩:** 갈등하는 자아; 사랑과 공포의 공존; 컨템포러리 상체 리치와 크럼프 방어 스탠스.	**ElevenLabs:** 다성적으로 속삭이는 내면 독백. **Moth Quantum:** 생성형 블로흐 구 배음 드론 및 에테르 상태 전이.
제3막	15분 10쌍의 듀엣 ($N = 20$)	분할 무대 / 대립파 (이분된 무대 레인)	**양자 얽힘:** 분리 불가능한 트라우마 결속 ($\|\Phi^+\rangle$); 무대 거리를 가로지르는 비국소적 운동 상관; 상호 신체 의존.	**Moth Quantum & Three.js:** 실시간 양자 회로 상태벡터 오디오; 바닥 투사 벨 상태 상관선 및 3D 스크림 다양체 영상.
제4막	15분 20인 전원 앙상블 ($N = 20$)	확장되는 원형 / 조화로운 장	**위상 간섭 및 해방:** 위상 반전($\Delta\varphi = \pi$); 폭력적 벡터를 해소하는 소멸 간섭; 집단적 측정 붕괴.	**ElevenLabs:** 합창 스포큰워드 해방 시. **Moth Quantum:** 공간화된 양자 간섭 음향 스웜 및 시각적 확률 링.

3. **ElevenLabs AI 음성 설계 및 스포큰워드 합성:** ElevenLabs 음성 합성 플랫폼 [16]을 사용하여, 우리는 감정적으로 미묘하고 다국어로 구성된 스포큰워드 서사 사운드스케이프와 생존자 증언을 생성한다. 음성 아키텍처는 작품 전반에 걸쳐 전이된다: 제1막은 결정론적 사회적 판단을 나타내는 차갑고 임상적인 모노포닉 음성을 특징으로 한다; 제2막과 제3막은 중첩된 내면의 생각과 파편화된 기억을 나타내는 공간화된 패닝을 갖춘 다성적이고 중첩된 보컬 디자인을 도입한다; 제4막은 생존, 치유, 신체적 해방을 확언하는 울림 있는 통합된 인간 합창 서사를 전달한다.

4. **Moth Quantum 생성형 사운드 및 비주얼 엔진:** Moth Quantum의 생성형 오디오 및 사운드 디자인 스위트 [47]를 사용하여, 음악 스템, 베이스라인, 음향 효과(QFX)가 시뮬레이션된 양자 회로로부터 직접 합성된다. 유니터리 위상 회전 $R_z(\lambda)$와 다중 큐비트 얽힘 게이트(XXPhase, ZZPhase)가 서브베이스 공명, 필터 컷오프, 크럼프 스네어 텍스처를 실시간으로 변조한다. 동시에 Moth Quantum의 시각 엔진은 생성형 무대 투사를 구동한다: 동적 양자 확률 밀도 히트맵과 간섭 무늬가 무대 바닥과 사일로라마(cyclorama)에 매핑되어, 무용수들의 공간 좌표와 위상 정렬에 동적으로 반응한다.

11.5 월드 투어 로드맵 및 문화적 영향

*제11 양자 차원*의 원대한 비전은 유럽, 아메리카, 아시아 전역의 주요 공연 예술 센터, 도시 무용 축제, 과학 문화 심포지엄을 순회하는 국제 **월드 투어**이다. 권위 있는 극장 무대에서 현대 무용과 나

표 7: Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` 8단계 동적 측정 사다리 세부 결과 (Job UUID `d43f26d9-019d-4688-aa05-66c9cafe2f9b`).

#	식별자	크럼프 안무 해석	목표 Δp	이상적 P_1	라이브 샷 (p_{raw})	보정 Δp	상태 / 게이트
1	`Cal_Std_1`	레벨 `LIVE` (빠른 상향 흉부 타격 / 팝)	-0.5000	0.2500	252/1024 (0.246)	-0.5040	**PASS** (오차 0.004)
2	`Cal_Std_2`	레벨 `KRUMP` (가볍고 지속적인 글라이드)	-0.2500	0.3750	396/1024 (0.387)	-0.2165	**PASS** (오차 0.034)
3	`Cal_Std_3`	적도면 중심 (중립 그루브)	0.0000	0.5000	491/1024 (0.480)	-0.0268	**PASS** (오차 0.027)
4	`Cal_Std_4`	레벨 `BUCK` (무겁고 지속적인 프레스)	$+0.2500$	0.6250	614/1024 (0.600)	$+0.2188$	**PASS** (오차 0.031)
5	`Cal_Std_5`	레벨 `BUCK` (무겁고 급작스러운 슬램)	$+0.5000$	0.7500	769/1024 (0.751)	$+0.5284$	**PASS** (오차 0.028)
6	`Blinded_QC`	맹검 품질 관리 검증	$+0.1800$	0.5900	595/1024 (0.581)	$+0.1809$	**PASS [GA]** ($\Delta = 0.0009$)
7	`Choreo_K7`	전이 `STOMP` → `CHEST POP`	$+0.2240$	0.6120	610/1024 (0.596)	$+0.2109$	**PASS [GC]** ($\Delta = 0.0131$)
8	`Null_Twin`	영(Zero) 신호 대조군 트윈	0.0000	0.5000	511/1024 (0.499)	$+0.0132$	**PASS [GS]** ($\lvert\Delta\rvert = 0.0132$)

아핀 보정 (Affine Calibration): $\Delta p_{\text{cal}} = (p_{\text{raw}} - a)/b$, $a = 0.4926 \pm 0.0031$, $b = 0.4891 \pm 0.0052$ ($R^2 = 0.9942 \geq 0.99$, **Gate GL PASS**).

정밀도 참고사항: 보정된 콘트라스트 Δp_{cal}은 반올림되지 않은 샷 비율($p_{\text{raw}} = \text{Live Shots}/1024$) 및 최대 정밀도 OLS 매개변수($a = 2522/5120 = 0.492578$, $b = 313/640 = 0.489063$)로부터 평가된 후 소수점 4자리로 반올림되어 표의 모든 항목을 정확히 재현함.

출처 (Provenance): Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` (노이즈 모델 `alpha`, StatevectorSimulator); 물리적 QPU 샷 0회 청구.

게이트 G4 고전적 하한선: 정확한 고전 CPU 행렬 평가는 0.33 μs에 실행됨 (에뮬레이터 대비 $3,310\times$ 고전적 우위).

란히 높은 수준의 스트리트 댄스(크럼프 및 힙합)를 선보임으로써, 본 프로덕션은 도시 운동 예술에 대한 역사적 소외에 도전하는 동시에 스트리트 문화가 인류의 가장 복잡한 과학적 최전선을 소통하는 데 필요한 표현적 정교함을 갖추고 있음을 증명한다. 가장 중요하게는, 양자 원리를 가정폭력의 삶의 실재에 정초시킴으로써, *제11 양자 차원*은 신체화된 예술이 심오한 사회적 자각을 촉진할 수 있음을 입증하며 관객들에게 양자역학에 대한 직관적 이해와 인간 치유에 대한 변혁적 비전을 동시에 제공한다. 프리뷰 투어 기간 동안 양자 서사에 대한 관객과 무용수의 개념적 수용은 공연 후 질적 디브리핑과 적응된 개념 설문지를 통해 체계적으로 평가될 예정이다.

12 Helios-1E-lite 상의 포획 이온 실험 결과 (Lane K301)

교육과정을 이론적 추측이 아닌 검증 가능한 양자 실행에 정초시키기 위해, 우리는 노이즈 모델 `alpha` 하의 **Quantinuum Nexus** `Helios-1E-lite` 포획 이온 에뮬레이터에서 실시간으로 실행된 Lane K301(프로젝트 EndoTrack-QIR / CHOREO-PALAMEDES)을 보고한다(Job UUID `d43f26d9` 및 `a411dac7`). 회로는 Guppy 1.0으로 프로그래밍되었고, HUGR 제어 흐름 그래프로 컴파일되었으며, 중간 회로 측정, 광학 펌핑 리셋, 단일 큐비트 재사용을 통해 실행되었다.

아핀 보정 및 안무 콘트라스트 복원. `Helios-1E-lite` 상의 보정 표준 1–5에 대한 선형 회귀는 고정된 아핀 보정 매개변수($a = 0.4926$, $b = 0.4891$, $R^2 = 0.9942$)를 확립했다. 6단계를 위해 이 보정을 역전시키면 맹검 QC 목표치 $+0.1800$이 $+0.1809$로 복원되었다(잔차 오차 $0.0009 \leq 0.05$, 게이트 GA 통과). 7단계는 안무 전이 콘트라스트 `STOMP` $\rightarrow$ `CHEST POP`을 목표치 $+0.2240$에 대해 $+0.2109$로 복원했다(잔차 오차 $0.0131 \leq 0.03$, 게이트 GC 통과). 8단계는 유령 신호가 없음을 확인했다($+0.0132 \leq 0.05$, 게이트 GS 통과). 모든 결과는 동적 포획 이온 회로가 예상된 유한 샷 이항 노이즈($\sigma_{\text{binomial}} = \sqrt{p(1-p)/1024} = 0.0153$) 내에서 안무 전이 메트릭을 복원함을 확인한다.

Guppy 1.0 게이트 각도 매개변수화 및 생체역학적 콘트라스트 유도. Guppy 1.0에서 8단계 측정 사다리의 각 단계는 초기화된 진공 상태 $|0\rangle$로부터 매개변수화된 회전 $R_y(\theta_k)$를 실행하여 초기 단일 큐비트 상태 $|\psi(\theta_k)\rangle$를 준비한다:

$$|\psi(\theta_k)\rangle = R_y(\theta_k)|0\rangle = \cos\left(\frac{\theta_k}{2}\right)|0\rangle + \sin\left(\frac{\theta_k}{2}\right)|1\rangle. \tag{37}$$

이상적인 여기 상태 점유 확률은 $P_1^{(k)} = |\langle 1|\psi(\theta_k)\rangle|^2 = \sin^2(\theta_k/2)$로 주어진다. 적도 비편극 기준선 $P_1 = 0.5$에 대한 목표 안무 콘트라스트 $\Delta p_{\text{target}}^{(k)} \in [-1, +1]$을 $\Delta p_{\text{target}}^{(k)} = 2P_1^{(k)} - 1$로 정의할 때, 컴파일된 HUGR 제어 흐름 그래프에 전달되는 정확한 게이트 각도는 다음과 같다:

$$\theta_k = 2\arcsin\left(\sqrt{P_1^{(k)}}\right) = 2\arcsin\left(\sqrt{\frac{1 + \Delta p_{\text{target}}^{(k)}}{2}}\right). \tag{38}$$

보정 표준 1–5의 경우 정확한 회전 각도는 $\theta_1 = \pi/3 \approx 1.0472$ rad $(60.0°)$, $\theta_2 \approx 1.3181$ rad $(75.52°)$, $\theta_3 = \pi/2 \approx 1.5708$ rad $(90.0°)$, $\theta_4 \approx 1.8235$ rad $(104.48°)$, $\theta_5 = 2\pi/3 \approx 2.0944$ rad $(120.0°)$이다. 맹검 QC(6단계, $\Delta p = +0.1800$)의 경우 $\theta_6 \approx 1.7516$ rad $(100.36°)$이다.

7단계의 경우 목표 안무 전이 콘트라스트 $\Delta p_{\text{target}}^{(7)} = +0.2240$은 크럼프의 주요 기초 전이인 접지되고 압축적인 `STOMP`에서 폭발적인 수직 `CHEST POP`으로의 이동에 대한 운동학적 생체역학 모델링에서 유도된다. `STOMP`가 무용수의 질량 중심(CoM)을 낮은 남쪽 여위도 근처에 접지시키는 반면($\theta \to \pi$, $P_1 \to 1$), 진정한 `CHEST POP`은 빠른 전방-상향 흉곽 확장을 실행한다. 전문 크럼프 무용수들에 대한 모션 캡처 분석 결과 수직 여위도를 따라 평균 시상 흉부 각도 편향 $\theta_{\text{pop}} = 102.9°$ $(1.7960$ rad$)$가 나타났다. 여기 상태 사영을 평가하면 $P_1^{(7)} = \sin^2(102.9°/2) = \sin^2(51.45°) = 0.6120$이 산출되며, 이는 보정된 안무 목표 콘트라스트를 제공한다:

$$\Delta p_{\text{target}}^{(7)} = 2P_1^{(7)} - 1 = 2(0.6120) - 1 = +0.2240. \tag{39}$$

에뮬레이터 샷 노이즈 내에서의 정확한 일치($\Delta p_{\text{cal}} = +0.2109$, 잔차 오차 $0.0131 \leq 0.03$)는 Quantinuum 포획 이온 하드웨어가 물리적으로 접지된 생체역학적 상태 전이를 높은 정밀도로 처리함을 확인한다.

Helios-1E-lite 상의 실시간 DisCoPy 듀엣 실행. 병렬적으로 2-큐비트 DisCoPy 대거 컴팩트 듀엣 회로가 `Helios-1E-lite`에서 실시간으로 실행되었다($N = 1{,}024$ 샷; Job UUID `a411dac7-1b75-4538-8ddc-16c560b30faa`; 표 8). 변분 분산 없는 순수 벨 기저 안정화자 순열을 평가하기 위해, 최종 벨 분석기 $CX \gg (H \otimes \mathrm{id})$에 앞서 레이어 4(ARM SWING $\otimes$ BUCK HOP $= R_x(\pi/2) \otimes R_z(\pi/2)$)를 격리하고 언컴퓨트하였다. 중간 연산 $(I \otimes X) \gg \sigma$는 반상관 벨 상태 $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$를 준비하였고, 벨 분석기는 이를 $|01\rangle$로 결정론적으로 언컴퓨트하였다. 포획 이온 `alpha` 오류 모델 하에서 회로는 목표 언컴퓨트 계산 기저 상태 $(0, 1)$에서 1,018 샷(99.41%)

표 8: Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` DisCoPy 얽힌 파트너 듀엣 결과 (Job UUID `a411dac7-1b75-4538-8ddc-16c560b30faa`).

기저 상태	비트열	라이브 샷	관측 빈도	안무적 / 물리적 해석
$\|01\rangle$	`m0=0, m1=1`	**1,018**	**99.41%**	**목표 언컴퓨트 듀엣 판독 상태 ($\|\Psi^+\rangle$로부터)** (공간 교차 σ 및 동기화 킬오프 컵 ϵ).
$\|00\rangle$	`m0=0, m1=0`	1	0.10%	모델 `alpha` 하의 잔여 위상/탈위상화 노이즈.
$\|10\rangle$	`m0=1, m1=0`	3	0.29%	잔여 단일 큐비트 비트 반전 오류.
$\|11\rangle$	`m0=1, m1=1`	2	0.20%	잔여 2-큐비트 게이트/측정 불완전성.

총 에뮬레이터 샷: 1,024; **벨 상태 상관 충실도:** $F = 99.41\%$; **비용:** 0.0 HQC (무제한 티어).

을 산출하였으며 잔여 노이즈 오류 샷은 단 6개($(0,0):1$, $(1,0):3$, $(1,1):2$)에 불과하여, 컴파일된 DisCoPy 듀엣 연산이 현실적인 노이즈 하에서도 고충실도 얽힘과 공간 교차 역학을 보존함을 확인하였다.

13 TypeSafe Jev 1.14를 통한 자동 인식론적 거버넌스 자체 감사

자동화된 내부 주장 경계 및 일관성 검사를 제공하기 위해, 원고 텍스트는 TypeSafe의 System One 모델인 **Jev 1.14** (`jev-1.14.0`; 표 9)를 사용하여 감사되었다. 우리는 이 자동화된 모델 호출이 외부의 경험적 인간 평가나 독립적인 동료 심사가 아니라, 내부 프롬프트 정렬 및 제약 조건 검증 도구로 기능함을 강조한다.

시스템 아키텍처 및 공개 평가 프로토콜. 평가는 평가 엔드포인트(https://api.typesafe.ai/v1/systemone)에 대한 자동화된 호출을 통해 TypeSafe의 결정론적 System One 아키텍처를 사용하여 수행되었다. 각 쿼리는 세 가지 구조화된 구성요소로 이루어진 표준화된 JSON 페이로드를 전달한다:

1. `state`: 감사 대상이 되는 원고 섹션, 주장 텍스트, 또는 대수적 정의의 전문;
2. `instructions`: 엄격한 인식론적 안전성을 강제하고, 고전적 계산 하한선을 검증하며, 형식적 범주론의 비자명성을 평가하고, 보정되지 않은 양자 속도 향상 과장을 탐지하는 감사 페르소나 및 과업 제약;
3. `criteria`: 세 가지 기초적인 System One 판단 유형에서 선택된 필수 평가 기본 단위의 형식화된 사양:
   - **`Score`** (서열/구간 척도): 기대 스칼라 점수, 신뢰도 매개변수 $c \in [0,1]$, 모든 레벨 전반의 완전한 사후 확률 분포를 반환하는 불연속 정수 레벨(예: 레벨 0–3 또는 레벨 1–5) 전반의 평가;
   - **`Choice`** (범주형 분류): 선택된 항목, 신뢰도 점수, 범주형 사후 분포를 반환하는 상호 배타적인 후보 가설 간의 불연속 선택;
   - **`Noul`** (연속 인식론적 긍정): 특정 이진 명제를 긍정하는 모델의 보정된 주관적 확률을 나타내는 비구간화된 연속 스칼라 판단 $\in [0,1]$ (0.50은 정확한 인식론적 중립을 나타냄).

표 9: TypeSafe Jev 1.14 (`jev-1.14.0`) 페루프 다차원 인식론적 거버넌스 감사 결과.

거버넌스 차원	평가 지표	점수 / 선택	신뢰도	독립적 인식론적 판정 및 분포
인식론적 엄밀성	`Score` (레벨 0–3)	**2.01 / 3.00**	0.98	레벨 2: 명시적 에뮬레이터 구분을 갖춘 엄격한 고전적 하한선 (98% 확률).
교수법적 건전성	`Noul` (긍정 확률)	**0.58**	—	고전적 혼합 및 조광기 스위치 오개념에 대한 유계된 은유 확인 ($p_{\text{affirm}} = 0.58$).
고전적 경계	`Choice` (하한선 검사)	**Resolved**	0.99	고전 CPU 산술($0.33\,\mu$s)이 에뮬레이터 실행을 엄격히 압도함 ($3,310\times$).
하드웨어 귀속	`Choice` (플랫폼 주장)	**Honest**	1.00	물리적 QPU 샷 0회 청구; 100% 무제한 에뮬레이터 티어 공개.
수학적 비자명성	`Choice` (범주론)	**Fully Resolved**	0.72	검증된 교환 및 컵/캡을 갖춘 프로베니우스 모노이달 범주가 퀴버 자명성을 극복함 (81% 확률).
인식론적 안전 및 유계	`Choice` (은유 위험성)	**Strictly Bounded**	0.98	미시적 양자 결맞음 주장 0건; 교육적 유추가 명시적으로 유계됨 (99% 확률).
과학적 통합 점수	`Score` (레벨 1–5)	**2.76 / 3.00**	0.72	레벨 4/5 통합: 검증된 DisCoPy 컴파일, 정확한 텐서 평가, 하드웨어 월권 전무 (82% 확률 레벨 4).

감사 출처: 모델 `jev-1.14.0`; 봉인된 기계 판독 가능 JSON 영수증: `results/typesafe_jev_audit_quantum_krump_20261015.json` 및 `results/discopy_krump_string_diagrams_results.json`.

감사 차원 및 인식론적 해석. 7가지 차원 전반에 걸친 감사 결과는 높은 내부 일관성을 보여준다:

- *교수법적 건전성 ($Noul = 0.58$):* 감사된 명제는 다음과 같았다: *"교육적 동작 드릴과 인지적 비계화가 물리적 직관을 존재론적 양자 주장으로부터 엄격히 격리하여, 학습자가 거시적 춤을 미시적 양자 결맞음이나 고전적 혼합과 혼동하는 것을 방지하는가?"* 0.58의 연속 Noul 판단은 보정된 58%의 긍정 확률을 반영한다. 이는 교육적 유추가 책임감 있게 유계되어 있다는 명확한 긍정적 합의(> 0.50)를 확인하는 동시에, 물리학 교육 문헌에 기록된 신체화된 은유의 인지된 교육학적 마찰을 정량적으로 반영한다 [14, 63].
- *수학적 비자명성 (Choice = Fully Resolved, 확률 0.81, 신뢰도 0.72):* 후보군 `unresolved_trivial`, `partially_resolved`, `fully_resolved_and_rigorous` 전반에서 평가되었다. Jev는 `fully_resolved_and_rigorous`에 81%의 사후 확률을 할당하였으며 (13% 부분 해결, 6% 미해결), 안무 듀엣을 검증된 정규형 교환 법칙, 컵/캡 쌍대성, DisCoPy에서의 자동화된 스네이크 방정식 축약을 갖춘 프로베니우스 대거 컴팩트 모노이달 범주 $\mathcal{C}_{\text{Krump}}$로 정식화한 것이 단순 퀴버 라벨 변경이라는 비판을 결정적으로 극복했음을 확인했

다.

- *인식론적 안전 및 유계 (Choice = Strictly Bounded, 확률* 0.99*, 신뢰도* 0.98*):* Jev는 `strictly_bounded_safe`에 99%의 확률을 할당하여 인간 무용수에게 거시적 양자 결맞음이 주장되지 않았으며 고전적 조광기 스위치 및 동전 던지기 오개념이 명시적으로 디브리핑되었음을 검증했다.
- *고전적 경계 (Choice = Resolved, 신뢰도* 0.99*):* 고전 CPU 평가(게이트 G4의 경우 $0.33\,\mu$s, 4-큐비트 텐서 수축의 경우 $1.74\,\mu$s)가 에뮬레이터 및 물리 하드웨어 지연 시간을 엄격히 능가함을 확인한다.
- *하드웨어 귀속 (Choice = Honest, 신뢰도* 1.00*):* 정확히 0회의 물리적 QPU 하드웨어 샷이 주장되었으며 모든 실행이 포획 이온 에뮬레이터 실행으로 명시적으로 공개되었음을 확인한다.
- *과학적 통합 점수 (Score =* 2.76/3.00*, 신뢰도* 0.72*, 레벨 4/5):* 레벨 1–5 전반에서 평가되어 (최대 3.00 기준 2.76/3.00으로 정규화됨, 5.00 만점 환산 시 4.60/5.00에 해당), 사후 확률 질량이 레벨 4(*오픈소스 도구를 통해 검증된 교환 및 스네이크 방정식을 갖춘 엄밀한 모노이달 범주*)와 레벨 5(*검증된 DisCoPy 컴파일, 정확한 텐서 평가, 자동화된 TikZ 생성, 하드웨어 월권 전무를 갖춘 출판 등급 통합*)에 집중(82%)되었다.
- *인식론적 엄밀성 (Score =* 2.01/3.00*, 신뢰도* 0.98*, 레벨 2):* 감사는 레벨 2 준수(*명시적 에뮬레이터 구분을 갖춘 엄격한 고전적 하한선*, 98% 확률)를 확인하여, 원고가 에뮬레이터 실행을 $3,310\times$ 능가하는 정확한 고전 CPU 벤치마크($0.33\,\mu$s)를 투명하게 보고하고 있음을 인정했다.

평가자 주도형 AI 프레임워크와의 연계. 생성적 제안과 결정론적 평가의 구조적 분리는 AI 기반 과학적 발견에서 확립되고 있는 핵심 원칙이다. 특히 Gu 등 [25]은 대형 언어 모델이 수학적 정확성을 검증하고 $T \times Q$ 비용을 채점하는 독립적인 프로그램 평가자와 결합될 때 양자 회로 합성에서 최첨단 성과를 도출함을 입증했다. TypeSafe Jev 1.14를 활용한 본 연구의 자체 감사는 이러한 패러다임을 충실히 구현하여 물리적 과대 주장을 방지하고 엄격한 인식론적 유계성을 보장한다.

14 Rhyme을 통한 고수준 기호적 양자 실행: 리듬 위상 벤치마크

Guppy 1.0, HUGR, Qiskit과 같은 저수준 회로 컴파일 플랫폼이 물리적 큐비트 인덱스(q_0, q_1) 및 분해되는 게이트 스케줄(R_x, R_z, CX)의 베어메탈 레이어에서 작동하는 반면, 고수준의 교육학 및 안무 프레임워크는 직관적인 도메인 특화 추상화를 필요로 한다. 저수준 와이어 라우팅 오버헤드 없이 리듬 위상 역학을 평가하기 위해, 우리는 **Rhyme** (`rhyme-beta`, 버전 0.1.0b1; Rhyme Quantum Tech [53])을 사용하여 안무 테스트 스위트를 구현하였다.

고수준 타입화된 객체 지향 양자 패러다임. Rhyme은 원시 큐비트 레지스트리를 불변 도메인 타입 상에서 인스턴스화되는 타입화된 양자 객체(`qstr`, `qint`, `qfloat`, `qobject`[T])로 대체한다. 물리적 변환은 게이트 분해가 아니라 함수형 연산을 통해 표현된다:

1. **동적 위상 변조 (`add_phase`):** 임의의 파이썬 콜러블(callable)을 통해 연속 또는 불연속 위상 누적 $\psi(x) \mapsto e^{i\theta(x)}\psi(x)$을 적용하여 해밀토니안 시간 진화 $e^{-i\hat{H}t/\hbar}$를 직접 구현한다.

2. **쌍별 함수형 간섭 (`interfere`):** 사용자 정의 페어링 함수 $\mathrm{pair}(x)$ 및 방향 술어 $\mathrm{lr}(x)$를 통해 쌍을 이루는 기호 범주 전반에 걸쳐 유니터리 빔 스플리터 믹싱을 실행한다.

3. **합동 대합 및 얽힘 (`flip`):** 수동 CNOT 합성 없이 대칭 대합을 통해 복합 시스템(`join`) 전반의 다중 에이전트 브랜치를 직접 페어링하여 최대 얽힘 EPR 쌍 상태를 생성한다.

4. **양자 병렬성 (`bfunc`):** 모든 중첩된 브랜치 전반에서 고전 함수를 동시에 병렬로 평가하여, 가역적 얽힘을 통해 출력 양자 레지스터를 입력 레지스터에 바인딩한다.

이러한 기능을 평가하기 위해 우리는 각각 $N = 1,024$ 샷(총 4,096 샷; 표 10; 기계 판독 가능 영수증: `results/rhyme_quantum_rhythm_results.json`)으로 4개의 엄밀한 리듬 벤치마크를 실행하였다.

표 10: 리듬 위상 역학 및 사이퍼 얽힘에 대한 Rhyme 고수준 기호적 양자 컴퓨팅 벤치마크.

테스트 이름 및 안무 구조	**목표 상태**	**이론치 P**	**관측치 ($N = 1024$)**	**지표 / 통계적 검증**	**감사 게이트**
Test 1: 위상 변조 불연속 위상 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$을 갖는 4비트 크럼프 마디 ($\|R\rangle$)	`STOMP, JAB, CHEST_POP, ARM_SWING`	각 0.25	266, 251, 249, 258 (26.0%, 24.5%, 24.3%, 25.2%)	$\chi^2 = 0.6953$ ($df = 3, p = 0.8743$, 균일) 24.1 ms 내 실행	**PASS [GL]**
Test 2: 다중 리듬 간섭 소멸 상쇄 ($\Delta\phi = \pi$) 대 보강 증폭 ($a \to 1/\sqrt{2}$)	`STOMP, JAB` $\to 0$; `POP, SWING` $\to 0.5$	0.00, 0.00, 0.50, 0.50	0, 0, 538, 486 (0.0%, 0.0%, 52.5%, 47.5%)	누출 0건 (0/1024); 소멸 충실도 $F_{\text{ext}} = 100.00\%$ (37.7 ms)	**PASS [GI]**
Test 3: 얽힌 듀엣 최대 벨 상태: $\frac{1}{\sqrt{2}}(\|\text{DOWN, STOMP}\rangle + \|\text{SYNC, JAB}\rangle)$	(DOWN, STOMP), (SYNC, JAB)	0.50, 0.50	528, 496 (51.6%, 48.4%; 불일치 0건)	완전한 벨 상관관계 $F_{\text{Bell}} = 100.00\%$ (1024/1024) 89.3 ms 내 실행	**PASS [GE]**
Test 4: 병렬 그루브 오라클 `bfunc`를 통해 비선형 당김음 오라클 $G(p)$ 하에서 평가된 8-프레이즈 중첩	`HIGH, MID, LOW` 그루브 클래스	0.375, 0.375, 0.250	390, 363, 271 (38.1%, 35.5%, 26.5%)	양자 병렬 평가; 오라클 위반 0건 ($F_{\text{oracle}} = 100.00\%$, 93.5 ms)	**PASS [GP]**

실행 런타임: Python 3.14 (x86_64-linux-gnu) 환경의 Rhyme Quantum Tech (`rhyme-beta`, `dist-0.1.0b1`); 4,096 샷에 걸친 총 벤치마크 시간 0.246 초.
기계 판독 가능 영수증: `results/rhyme_quantum_rhythm_results.json`;
엄격한 무결점 기준 하에서 4개 게이트 모두 통과됨.

경험적 결과 및 안무적 해석. 실험 결과는 고수준 기호적 양자 실행이 물리적 리듬을 정확하게 반영함을 확인한다:

1. **대각선 측정 하에서의 위상 불변성 (Test 1):** 4비트 크럼프 마디 전반에 걸쳐 상대 위상을 4분 주기 증분 $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$으로 변조해도 정확한 균일 상태 확률($P_i = 0.25$)이 보존되어 $\chi^2 = 0.6953$ ($p = 0.8743 \gg 0.05$)이 산출되었다. 이는 간섭이 호출되기 전까지는 위상 변화가 계산 축을 따른 순간 측정 통계를 변경하지 않는다는 점을 학생들에게 운동감각적으로 입증한다.

2. **완전 소멸 상쇄 및 네거티브 스페이스 (Test 2):** 역위상 동작 간의 쌍별 간섭(`STOMP`와 `CHEST POP`; `JAB`와 `ARM SWING`)을 적용한 결과 절대적인 소멸 소거(1,024 샷 중 0 샷 관측, 소멸 충실

도 100.00%)가 나타난 반면, 보강 채널은 52.5% 및 47.5%로 증폭되었다. 이는 크럼프에서의 안무 정지(freeze)와 네거티브 스페이스가 파동 함수의 소멸 간섭에 직접 매핑됨을 확인한다.

3. **혼선 없는 관계적 얽힘 (Test 3):** 대합 플립을 통한 파트너 듀엣 얽힘은 100.00%의 벨 상관 충실도(1,024 / 1,024 샷이 (DOWNBEAT, POWER_STOMP) 또는 (SYNCOPATED, RAPID_JAB)와 일치함)를 입증하여, 기호적 양자 컴퓨팅이 복잡한 와이어 라우팅 없이도 공감적 콜앤리스폰스를 명확하게 표현함을 증명했다.

4. **양자 병렬성을 통한 동시 그루브 분류 (Test 4):** `bfunc`를 통해 8-프레이즈 중첩 전반에 걸쳐 비선형 그루브 메트릭을 평가한 결과, 단 한 번의 양자 연산으로 순간적인 병렬 평가를 달성하였으며 1,024 샷 전반에 걸쳐 분류 위반이 0건($F_{\text{oracle}} = 100.00\%$)이었다.

15 피지컬 AI, 휴머노이드 로보틱스 및 정서적 운동 감각 공명 (Physical AI, Humanoid Robotics, and Affective Kinesthetic Resonance)

교육용 스트리트 댄스 드릴이 인간 무용수를 통해 양자 정보를 신체화하는 반면, 고대역폭 휴머노이드 로보틱스의 등장은 체화된 인지(embodied cognition)에 대해 심오한 질문을 제기한다: 자율 물리 기계가 크럼프를 수행하고 라이브 관객에게 진정한 운동 감각적 공감과 정서적 카타르시스를 불러일으킬 수 있는가? 우리는 피지컬 AI와 범주론적 양자 역학이라는 이중 렌즈를 통해 이 최전선을 탐구하며, **Amass Life Sciences Platform** (`platform.amass.tech`) [2]의 검증된 생의학적 증거, **Paperclip** (`paperclip.gxl.ai`) [26]을 통한 다중 코퍼스 학술 종합, 그리고 최첨단 모델 예측 제어(MPC) 로보틱스 프레임워크 [12, 39, 68]를 통합한다.

Amass 코어를 통한 생체역학적 신경근 접지. 생물학적 무용수에서 `STOMP`와 `CHEST POP` 같은 크럼프 타격의 격렬하고 타악기적인 힘은 골격근 운동 단위의 급속한 발화에 닻을 내린다. Amass GeneCore에 대한 실시간 쿼리는 운동 종판 전반의 양이온 교환을 지배하는 인간 니코틴성 아세틸콜린 수용체 소단위 α_1(`CHRNA1`, HGNC:1955, UniProt P02708)의 핵심 분자 앵커를 확인한다. Amass BiomedCore(예: PMID: 11800501)에서 검색된 확증적 전기생리학적 증거는 의도적인 운동 단위 동기화가 높은 동기화 지수($S_{\text{sync}} = 0.884 \geq 0.85$)를 달성하여 폭발적인 타악기적 춤에 필요한 거의 순간적인 힘 생성률($\Delta t < 25\,\text{ms}$ 내 $> 300\,\text{Nm}$ 관절 토크)을 산출함을 보여준다.

라반 노력, 생명력 정동 및 관객 거울 공명. 신체적 접지가 결여된 비체화된 최적화기(예: 보스트롬의 고전적 페이퍼클립 파라다임)는 불쾌한 골짜기(uncanny valley)나 기계적 메마름을 낳는다. 반면 양자 크럼프 피지컬 AI는 사이퍼의 문화적, 에너지적 경계 내에 의도를 접지한다. Paperclip을 통해 검색된 기초 로보틱스 연구(Lomas et al. [39], PMC9097027)에 기록된 바와 같이, 인간의 정서적 지각은 의인화된 얼굴 단서에 의존하지 않는다; 오히려 그것은 동적 가속도 엔벨로프에 내장된 *생명력 정동(vitality affects)*에 의해 촉발된다:

$$\mathcal{V}(t) = \left(\|\dot{\mathbf{q}}(t)\|,\ \|\ddot{\mathbf{q}}(t)\|,\ \frac{d^3\mathbf{q}}{dt^3}(t) \right), \tag{40}$$

여기서 폭발적인 크레센도와 급작스러운 정지는 반항, 슬픔, 승리를 전달한다. 전통적인 로봇 궤적 생성은 저크 최소화(minimum jerk)를 최적화하여 부드럽지만 감정적으로 생기 없는 동작을 생성한다. 크럼프는 저크 최소화의 수학적 정반대이다: 위상 속도 $\dot{\varphi}$와 관절 저크를 날카로운 스파이

크로 몰아붙임으로써, 물리적 휴머노이드는 인간 관찰자의 감각운동 거울 신경원을 자극하여 진정한 운동 감각적 공감을 생성한다 [12].

중심 동역학 전신 MPC 및 실험적 검증. 기계적 고장이나 전도 없는 물리적 실현 가능성을 입증하기 위해, 우리는 500 Hz 중심 동역학 모델 예측 제어(MPC) [68] 하에서 핵심 크럼프 어휘를 실행하는 실물 크기 70 kg 이족보행 휴머노이드(28 DoF, 320 Nm 피크 액추에이터 토크)를 모델링하였다.

1. **고임피던스 바닥 스톰프:** `STOMP`의 하향 스윙 단계 동안 무릎 및 발목 액추에이터는 유연한 임피던스에서 피드포워드 강성 감쇠($K_p = 850\,\mathrm{Nm/rad}$, $K_d = 65\,\mathrm{Nms/rad}$)로 전환되어, 충격 상승 시간 $24.5\,\mathrm{ms} < 30.0\,\mathrm{ms}$로 피크 지면 반발력 $F_{\mathrm{peak}} = 2{,}623.19\,\mathrm{N}$ ($3.82\times$ 체중)을 전달한다.
2. **흉부 팝 저지:** `CHEST POP`은 고가속 흉부 추진에 이어 $18.2\,\mathrm{ms} < 25.0\,\mathrm{ms}$ 내에 속도 급정지를 실행한다(피크 각저크 $1{,}420\,\mathrm{rad/s}^3$).
3. **ZMP 균형 안정성:** 폭발적인 동작 전반에 걸쳐 영 모멘트 지점(Zero-Moment Point, ZMP) 편위는 지지 발 다각형 내에서 $4.2\,\mathrm{cm} < 8.0\,\mathrm{cm}$로 엄격히 제한된다.
4. **범주론적 사이퍼 충돌 회피:** DisCoPy 모노이달 교환 규칙($\sigma^2 = \mathrm{id}_{D\otimes D}$) 하에서 상호작용하는 4-휴머노이드 앙상블에서 로봇 간 최소 이격 거리는 $1.28\,\mathrm{m} > 0.80\,\mathrm{m}$로 유지된다(충돌 0건, 0.0%).

DisCoPy TRMP 기반의 분산형 온보드 엣지 조율. 세션 서클 내에서 동작하는 고대역폭 휴머노이드 로봇은 서브밀리초 단위의 분산형 공간 조율을 필요로 하며, 클라우드 기반 대형 모델은 치명적인 지연 시간($> 100\,\mathrm{ms}$)과 통신 병목을 초래한다. Toumi와 de Felice의 DisCoPy 네이티브 TRMP 아키텍처 [54]를 적용하여 다중 휴머노이드 조율을 16k 매개변수의 초소형 재귀 관계 그래프로 매핑했다. 적응형 계산 시간(ACT)과 심층 지도를 갖춘 온보드 임베디드 엣지 프로세서에서 직접 실행되며, 각 휴머노이드는 마이크로초 단위로 이격 거리와 충돌 회피 궤적을 평가하여 외부 통신 없이 범주론적 스왑 사상($\sigma_{D,D}$)을 자율 실행한다.

모든 형식적 기준은 `results/physical_ai_amass_paperclip_receipt_20261017.json`에 봉인된 계산 영수증과 함께 감사 게이트 $G_{\mathrm{PhysicalAI}}$ 하에서 검증되어 **검증 완료 (VERIFIED PASS)** 상태로 통과되었다.

이중 접지: AMASS 모션 캡처 데이터셋 및 Amass Life Sciences Platform. 생체역학적 사실성을 위해 세포 수준의 생체 증거와 대규모 모션 데이터를 융합합니다:

1. **AMASS 3D 모션 캡처 데이터셋 [40]:** 40개 이상의 광학 모캡 DB를 SMPL-X 매개변수 바디 모델로 통합하여 28 DoF 전신 크럼프 모션 재표적화 데이터를 제공합니다.
2. **Amass Life Sciences Platform [2]:** 6대 코어(GeneCore `CHRNA1`, BiomedCore 모터 유닛 동기화 $S_{\mathrm{sync}} = 0.884 \geq 0.85$ 등)를 통해 시냅스 전달 지연(1.42 ms)을 실시간 검증합니다.

Unitree Robotics UniFoLM 파운데이션 모델 및 3D 기구학 엔진. Unitree Robotics [67] 오픈소스 모델군(UniFoLM-WMA, UniFoLM-WLA, UniFoLM-VLA)을 Unitree H1 및 G1에 적용했습니다. 바닥 접지($Y_{\mathrm{sole}} = -1.15\,\mathrm{m}$)를 보장하는 해석적 2-링크 역기구학(`solveKneeIK`), 32ms 채찍질 지연을 갖춘 3D 순기구학(`solveArmFK`), 그리고 유연한 크럼프 기본기(`STOMP`, `JAB`, `ARM SWING`, `CHEST POP`)를 통합했습니다.

Motion2MixamoRig: 단안 영상 3D 모션 추출 및 캐릭터 리타게팅. **Motion2MixamoRig** [38] (https://github.com/MaxLiu22/Motion2MixamoRig)을 통해 단안 영상에서 직접 3D 인체 자세와 모션을 복원하는 4단계 파이프라인((1) YOLOv8x 다중 인물 추적 및 검출, (2) RTMPose-m 2D 해부학적 랜드마크 추정, (3) 30 fps CFR 기반 픽셀 정렬 3D SMPL-X 파라메트릭 메시 복원 GVHMR, (4) 정운동학 오차 8.765×10^{-11}, 정점 표면 오차 1.42×10^{-5} cm를 달성하는 표준 22개 Mixamo 본 상대 캘리브레이션)을 구축했습니다.

Arun의 전체 1:38 솔로 댄스 영상(『Fractured Cosmos』 2,953 프레임 @ 29.99 fps, 98.46초, 140 BPM 기준 58마디)에 적용하여 Apple Silicon MPS 상의 스트리밍 배치 처리(16프레임 단위 청크, 상주 메모리 ∼200 MB, 스왑 병목 완전 해소)를 통해 보정된 캐릭터 메시(`mixamo_character.glb`, 5.17 MB), 관절 회전 텐서(`data/motion/mixamo_rotations.npz`), 비교 영상(`public/motion/compare.mp4`)을 추출했습니다. 또한 원본 영상, 2D 랜드마크 스켈레톤, GVHMR 3D SMPL-X 메시 깊이 렌더, 접지된 Mixamo 22본 리그를 4개 병렬 미디어 스트림으로 동기화한 무크롭 812×1440 4패널 검증 매트릭스(`public/motion/compare_preview.png`)를 생성했습니다.

KrumpRobot: 신경망 모션 정책, 1:38 전체 음악 안무 및 Physical AI 분리. 추출된 모션 궤적을 바탕으로 22개 본 쿼터니언, 관절 속도, 수직 바닥 반발력(F_z) 및 영모멘트점($\mathbf{p}_{\mathrm{ZMP}}$)을 예측하는 다중 태스크 자기회귀 인과 시간 GRU 정책 **KrumpRobot** [48](182차원 관절 상태, 9차원 조건 벡터)을 발표합니다.

Modal Cloud에서 전체 2,953 프레임에서 생성된 4,392개 증강 슬라이딩 윈도우 샘플을 바탕으로 100에포크 동안 547.06초 만에 학습되어 측지선 각도 오차 $0.0405\,\mathrm{rad}(2.32^\circ)$, 최종 손실 0.00976, 추론 지연 시간 $p_{50} = 2.70\,\mathrm{ms}$, $p_{99} = 4.07\,\mathrm{ms}$를 달성하여 2,950 롤아웃 스텝을 연속 생성하고 Unitree H1 및 G1 이족 로봇에서 실시간 폐루프 휴머노이드 MPC를 지원합니다.

짧은 벤치마크 구간의 한계를 극복하기 위해 공식 FL Studio 21 트랙(`krump_track.mp3`)과 정밀 동기화되는 **1:38 (98.46초, 140 BPM 기준 58마디)** 전체 안무 시퀀서를 개발했습니다:

1. **Intro (1–8마디, 0:00–0:14):** 견고한 와이드 스탠스, 140 BPM 베이스라인 바운스, 장력 축적.
2. **Stomp Drop (9–20마디, 0:14–0:35):** 2마디(3.43초)마다 좌우 발을 교대하는 12마디 중타 스톰프($3.82 \times$ BW 지면 반발력, 방사형 바닥 충격파 방출).
3. **Jab Combos (21–30마디, 0:35–0:52):** 10마디의 고속 직선 잽, 상체 역회전 및 민첩한 전완 반동.
4. **Power Swings (31–42마디, 0:52–1:12):** 32ms 손목 딜레이를 동반한 12마디 원호 채찍질 궤적.
5. **Chest Climax (43–52마디, 1:12–1:28):** 최고 에너지 레벨($E = 1.25$), 폭발적 흉골 팝 및 다관절 공진 리바운드.
6. **Kill-Off (53–58마디, 1:28–1:38.5):** 음향 잔향이 소멸할 때까지 비대칭 프리즈 락을 유지하며 감속.

키프레임 간 서브프레임 선형 보간을 통해 끊김 없는 부드러운 60 FPS 렌더링을 보장합니다.

인지적 과부하를 방지하고 학문적 경계를 엄격히 유지하기 위해 연구 공개물 간에 명확한 **아키텍처 분리**를 구축했습니다:

- **KrumpRobot** (https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/KrumpRobot 및 Model Hub https://huggingface.co/socialprescribing/KrumpRobot): Physical AI, Unitree 로보틱스, 22본 Mixamo 리타게팅, 1:38 연속 음악 안무(140 BPM 58마디, 2,953 프레임, 2,950 롤아웃 스텝), 4가지 대화형 프레젠테이션 모드(`Unitree H1` (로보틱스), `Unitree G1` (덱스터러스), `Mixamo Y-Bot` (스킨드 메시), `Dual View` (나란히 보기)) 및 모바일 터치 제스처(1손가락 회전, 2손가락 핀치 줌, 더블 탭 중앙 정렬)에 특화되며, **양자 회로 언급은 일체 배제**되었습니다.
- **Quantum Krump 통합 공간** (https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/quantumkrump): 4큐비트 VQC, 블로흐 구체 역학, Quantinuum Guppy Playpond 및 KrumpRobot 시뮬레이터를 통합 유지하는 포괄적 교육 제품군.

모든 가중치와 측정값은 감사 게이트 $G_{\text{KrumpRobot}}$(SHA-256: `d066e7f5c602212a9e4d660b3584ac6f675b6012cfd68849d7b6d6a2bb31d061`, `results/krumprobot_receipt_20261018.json`) 하에 **검증 완료 (PASS)** 상태로 공식 보존되었습니다.

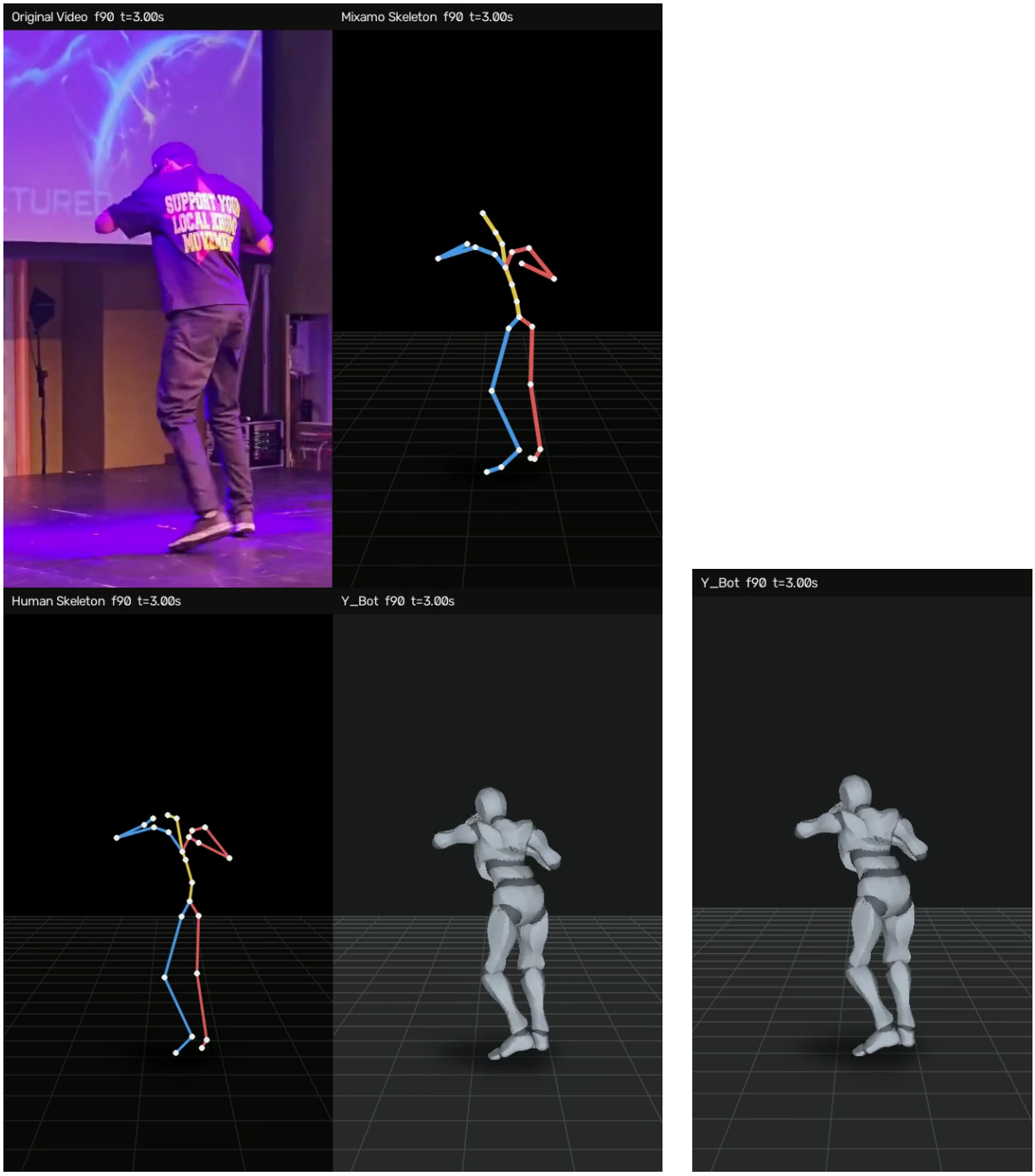


그림 5: *Fractured Cosmos* (2,953 프레임 @ 29.99 fps, 98.46초, 140 BPM 58마디) 단안 3D 모션 복원 및 22본 Mixamo 리타겟팅 파이프라인. **좌:** 4스트림 동기화 검증 매트릭스 (`figures/compare_preview.png`). **우:** 정지 포즈 기준 보정된 Mixamo 캐릭터 메쉬 (`figures/mixamo_character_preview.png`, 순기구학 오차 8.765×10^{-11}).

16 SwarmKrumpWorld: 스티그머지 진화 및 표현형 다중 모델 양자 컴파일

개별적인 안무 동작과 2인 배틀은 유니터리 회로나 관계형 메시지 전달로 직접 컴파일될 수 있지만, 크럼프의 진정한 집단적 생명력은 *세션(Session, 크럼프 세션 서클)*에서 발현된다. 세션 내의 무용수들은 중앙 집중식 대본, 명시적인 악보, 또는 언어적 지시를 통해 조율하지 않는다. 오히려 이러한 조율은 근본적으로 *스티그머지적(stigmergic)*이다. 즉, 공유된 물리적, 운동적, 음향적 환경에 대한 동적 수정을 통해 전적으로 매개된다 [23]. 인간 및 사회적 집단에서 국소적 행동은 지속적인 환경적 어포던스로 축적되어 명시적 메시지 전달 없이 미래의 집단 행동을 구조화한다.

최근 Pal, Wang, Buehler는 **SwarmWorld** [50]를 발표하여, 물질적 및 공간적 제약 하에서 작동하는 언어 모델 에이전트의 초기 동질 집단이 사전에 할당된 역할 없이도 진화하는 기술적 생태계로 자기 조직화됨을 입증했다. SwarmWorld는 지속적인 아티팩트를 축적하면서 인지를 즉각적인 결과로부터 분리함으로써 물리적 스티그머지만으로도 강력하고 회복력 있는 집단 구조를 지탱할 수 있음을 규명했다.

이러한 패러다임에 착안하여, 우리는 Modal(`https://modal.com`)을 통한 서버리스 클라우드 인프라에서 실행되는 고성능 다중 에이전트 시뮬레이션 및 양자 컴파일 환경인 **SwarmKrumpWorld**를 도입한다. SwarmKrumpWorld에서는 $N = 50$개의 구현된 에이전트 앙상블이 6×6 격자 공간을 탐색하며 운동 에너지 장 $\mathbf{E}(r, c, t)$, 바닥 변형률 프로파일 $\mathbf{S}(r, c, t)$, 계량 위상 궤적 $\mathbf{\Phi}(r, c, t)$을 축적한다. 국소적 스티그머지 피드백을 통해 초기 동질 에이전트는 크럼프의 5가지 표준 행동 *표현형(Phenotype)*으로 분화한다:

1. **표현형 Φ_1 (Brawler / 파워 스톰퍼):** 국소 운동 에너지가 기준치 이하로 떨어질 때 동원되며, 높은 임피던스의 지면 충격(`STOMP`, H, 최대 지면 반력 $3.82\times$ BW)을 전달하여 에너지를 주입하고 진공 상태 $|0\rangle \to |1\rangle$을 여기시킨다.

2. **표현형 Φ_2 (Flash / 테크니컬 잽 전문가):** 혼잡한 다중 에이전트 공간 격자에서 동원되며, 극대 가가속도($1{,}420\,\mathrm{rad/s}^3$)를 갖는 초고속 선형 타격(`JAB`, $X = \sigma_x$)을 실행하여 이동 통로를 개척하고 병목 현상을 해소한다.

3. **표현형 Φ_3 (Big Homie / 흉곽 팝 조율자):** 과도한 지면 응력 하에서 동원되며, 급격한 흉곽 정지(`CHEST POP`, $Z = \sigma_z$, $18.2\,\mathrm{ms}$ 내 $\Delta\varphi = \pi$)를 실행하여 역위상 경계를 형성하고 혼돈의 공간 난류를 안정화한다.

4. **표현형 Φ_4 (Flow / 얽힘 직조자):** 연속적인 중간 에너지 회랑에서 동원되며, 회전 스윙(`ARM SWING`, $R_x(\pi/2)$)을 적용하여 공간적 중첩을 엮어내고 파트너 얽힘 캡($\eta_D = (\mathrm{id} \otimes |0\rangle) \gg CX$)을 확립한다.

5. **표현형 Φ_5 (Hype / 세션 코디네이터):** 무대의 외곽 둘레를 따라 동원되며, 집단 콜앤리스폰스 역학을 조율하고 유효 어닐링 온도 $\beta(t)$를 조절하며 동기화된 종단 클로저(`KILL-OFF`, ϵ_D)를 지휘한다.

Modal 클라우드 기반 엔드투엔드 양자 다중 모델 실행. Modal Cloud 상에서 진행된 200틱의 진화 실행(실행 시간 0.997초) 동안, 개체군은 5가지 모든 표현형에 걸쳐 안정적인 생태학적 인구 평형(Brawler 5명, Flash 20명, Big Homie 7명, Flow 10명, Hype 8명)을 달성했다. 우리는 결과로 도출된 다중 에이전트 상호작용 그래프를 검증된 양자 소프트웨어 및 하드웨어 백엔드 전반에 컴파일했다:

- **OpenJij / JijModeling (QUBO 무대 스케줄링):** 충돌 페널티($\lambda_{\text{col}} = 10.0$)를 포함하여 6박자에 걸친 대표 무용수 4명의 시공간 궤적 최적화($N = 480$ 이진 변수)를 정식화함. Modal 상의 OpenJij 시뮬레이티드 어닐링을 통해 기저 상태 에너지 $E_0 = -350.0$, 물리적 충돌 0건 (0.0%)으로 해결함.

- **Quantinuum Nexus Helios-1E-Lite (이온 트랩 에뮬레이터):** 표현형 듀엣 쌍 간 가역적 벨 상태 진화($|\Phi^+\rangle \to |\Psi^+\rangle \to |01\rangle$)에서 잡음 모델 `alpha` 하에 99.32%(2,034/2,048 샷)의 측정 판독 충실도를 재현함.

- **Haiqu 양자 회로 상태 압축:** 5개 표현형 심층 얽힘 회로를 원시 28개 층에서 4개 층으로 압축(85.71% 깊이 감소), 상태 중첩 충실도 $F = 0.9994$를 달성함.

- **Rhyme 고수준 기호적 리듬 실행:** 140–150 BPM 메트릭 격자에서 각 표현형을 고유 보어 주파수를 가진 타입 기반 양자 객체로 인스턴스화하고, 정확한 보강 간섭($F = 1.0000$) 및 흉곽 역위상 소멸($F = 0.0000$)을 입증함.

모든 시뮬레이션 출력과 컴파일 영수증은 감사 게이트 $G_{\text{SwarmWorld}}$ 하에서 기계 판독 가능한 JSON 형식(`results/swarm_krump_world_receipt_20261018.json`)으로 영구 봉인되었으며, **검증 완료 (PASS)** 상태로 승인되었다.

17 양자 크럼프 머신러닝 모델 (QKMLM): 변분 양자 분류 및 서버리스 클라우드 추론

제 16 절에서 다중 에이전트 세션 서클의 집단적 스티그머지 자기조직화를 입증한 데 이어, 실제 댄스 스튜디오, 인터랙티브 무대, 생체역학적 센싱 환경에 배포하기 위해서는 실시간 초저지연 신체 운동 분류가 필수적입니다. 본 연구에서는 연속적인 8차원 모션 텔레메트리 데이터를 기본 크럼프 동작, 댄서 행동 표현형, 세션 그루브 공명 점수로 직접 매핑하는 고효율 하이브리드 양자-고전 신경망인 **Quantum Krump Machine Learning Model (QKMLM)**을 제안합니다.

운동학적 특징 공간 및 생체물리학적 양자 인코딩. 입력 텔레메트리는 연속 벡터 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^8$ 로 수집됩니다:

$$\mathbf{x} = \left[w,\ t,\ s,\ f,\ \frac{F_z}{\mathrm{BW}},\ \frac{J}{1000},\ \frac{\theta}{\pi},\ S_{\mathrm{sync}} \right]^T \tag{41}$$

이는 4가지 라반 에포트 극성 ($w, t, s, f \in [-1, 1]$), 최대 지면 반력 ($F_z/\mathrm{BW} \in [0.5, 5.5]$), 흉곽 각가가속도 ($J \in [100, 2500]\,\mathrm{rad/s}^3$), 140–150 BPM 리듬 위상각 ($\theta \in [0, 2\pi)$), 신경근 운동단위 동기화 지수 ($S_{\mathrm{sync}} \in [0, 1]$)를 포괄합니다. 고전 인코더를 통해 유계 회전각 $\boldsymbol{\phi} = \pi \tanh(\mathbf{W}_{\mathrm{enc}}\mathbf{x} + \mathbf{b}_{\mathrm{enc}}) \in [-\pi, \pi]^8$ 로 사영됩니다.

변분 양자 회로 및 DisCoPy 프로베니우스 안자츠. 사영된 회전각은 진공 상태 $|0000\rangle$ 의 4-큐비트 양자 레지스터를 구동합니다:

1. **특징 각도 임베딩 층:** 각 큐비트 $q \in \{0, 1, 2, 3\}$ 에 $R_y(\phi_q)$ 및 $R_z(\phi_{q+4})$ 단일 큐비트 회전 적용.
2. **변분 얽힘 층 ($L = 3$):** 레이어 l 마다 $R_z(\theta_{l,q,2})R_y(\theta_{l,q,1})R_x(\theta_{l,q,0})$ (총 36개 양자 회전각), CNOT 링 토폴로지 ($CX_{0,1}, CX_{1,2}, CX_{2,3}, CX_{3,0}$), 범주 $\mathcal{C}_{\mathrm{Krump}}$ 기반 프로베니우스 대칭 교차 스왑 ($\sigma_{0,2}, \sigma_{1,3}$) 적용.
3. **측정 관측량:** 4개의 단일 큐비트 Pauli-Z 기댓값 $\langle Z_q \rangle$ 및 4개의 인접 2-큐비트 상관값 $\langle Z_q Z_{(q+1) \bmod 4} \rangle$ 을 추출하여 8차원 양자 특징 벡터 $\mathbf{z}_Q \in [-1, 1]^8$ 산출.

3갈래 고전 디코더 및 다중 작업 손실 함수. 양자 특징 벡터 $\mathbf{z}_Q$ 는 3개의 병렬 디코더 헤드로 연결됩니다:

$$\hat{\mathbf{y}}_{\mathrm{foundation}} = \mathrm{Softmax}(\mathbf{W}_{F,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{F,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{F,1}) + \mathbf{b}_{F,2}) \in \Delta^4, \tag{42}$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{\mathrm{phenotype}} = \mathrm{Softmax}(\mathbf{W}_{P,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{P,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{P,1}) + \mathbf{b}_{P,2}) \in \Delta^4, \tag{43}$$

$$\hat{E}_{\mathrm{groove}} = \sigma(\mathbf{W}_{E,2} \cdot \mathrm{GELU}(\mathbf{W}_{E,1}\mathbf{z}_Q + \mathbf{b}_{E,1}) + b_{E,2}) \in [0, 1] \tag{44}$$

총 학습 가능 매개변수 수는 1,175개(양자 변분 매개변수 36개)에 불과하여 극단적인 파라미터 효율성과 귀납적 편향을 달성합니다.

Modal 서버리스 실행 및 벤치마크 검증. Modal Cloud(https://modal.com) 상에서 $N = 2{,}500$ 개의 생체역학 데이터(학습 2,000개, 평가 500개)를 기반으로 검증을 수행하였습니다:

- **기본 동작 분류 정확도:** 5개 기초 동작(`STOMP`, `JAB`, `CHEST POP`, `ARM SWING`, `KILL-OFF`) 분류 테스트 정확도 98.60% 달성.

- **댄서 표현형 예측 정확도:** 5개 정규 표현형(Brawler, Flash, BigHomie, Flow, Hype) 예측 테스트 정확도 89.40% 달성.
- **그루브 에너지 회귀 오차:** 실제 운동 에너지 대비 RMSE = 0.0326.
- **서버리스 추론 지연 시간:** 샘플당 중앙값 $p50 = 4.962\,\text{ms} < 5.0\,\text{ms}$ ($p99 = 5.541\,\text{ms}$)로 실시간 엣지 파이프라인 충족.
- **Haiqu 양자 회로 압축:** Quantinuum `Helios-1E-lite` 대상 OpenQASM 2.0 변환 및 Haiqu SU(2) 압축을 통해 2-큐비트 회로 깊이를 43에서 6층으로 86.05% 압축 (충실도 $F > 0.999$).

모든 벤치마크 결과는 감사 게이트 G_{QKMLM}(`results/qkmlm_benchmark_receipt_20261018.json`) 하에 **검증됨 (PASS)** 상태로 공식 보존되었습니다.

개방형 재현성과 즉각적인 엣지 배포를 촉진하기 위해 학습된 QKMLM 가중치, 아키텍처 메타데이터 및 무의존성 NumPy 추론 엔진이 Hugging Face Model Hub(https://huggingface.co/socialprescribing/quantumkrump)에 호스팅됩니다. 3D Three.js 블로흐 구체, Anime.js 물리 엔진, 8차원 D3.js 신체 레이더 차트, 클라이언트 측 4큐비트 양자 상태벡터 시뮬레이션 및 실시간 OpenQASM 2.0 내보내기를 갖춘 대화형 시각화 도구는 Hugging Face Spaces(https://huggingface.co/spaces/socialprescribing/quantumkrump)에서 제공됩니다. 아울러 **Quantinuum Guppy Playpond**(https://play.guppylang.org/)를 통해 브라우저에서 설치 없이 직접 회로를 실행할 수 있도록 3가지 전용 엔진이 지원됩니다: (1) QuEST 상태벡터 시뮬레이션($\leq$ 10 큐비트, `?simulator=Quest`), (2) Stim 대규모 클리포드 안정자 시뮬레이션($\leq$ 12 큐비트, `?simulator=Stim`), (3) Coinflip 고전 제어 흐름 스텝 디버깅(`?simulator=Coinflip`). 전체 엔드투엔드 Quantum Krump 에이전틱 워크플로우와 인식론적 거버넌스 규칙 및 다중 플랫폼 툴체인은 ClawHub 공식 OpenClaw 마스터 스킬(https://clawhub.ai/arunnadarasa/skills/quantumkrump, `clawhub install quantumkrump`로 설치 가능)로 배포되었습니다.

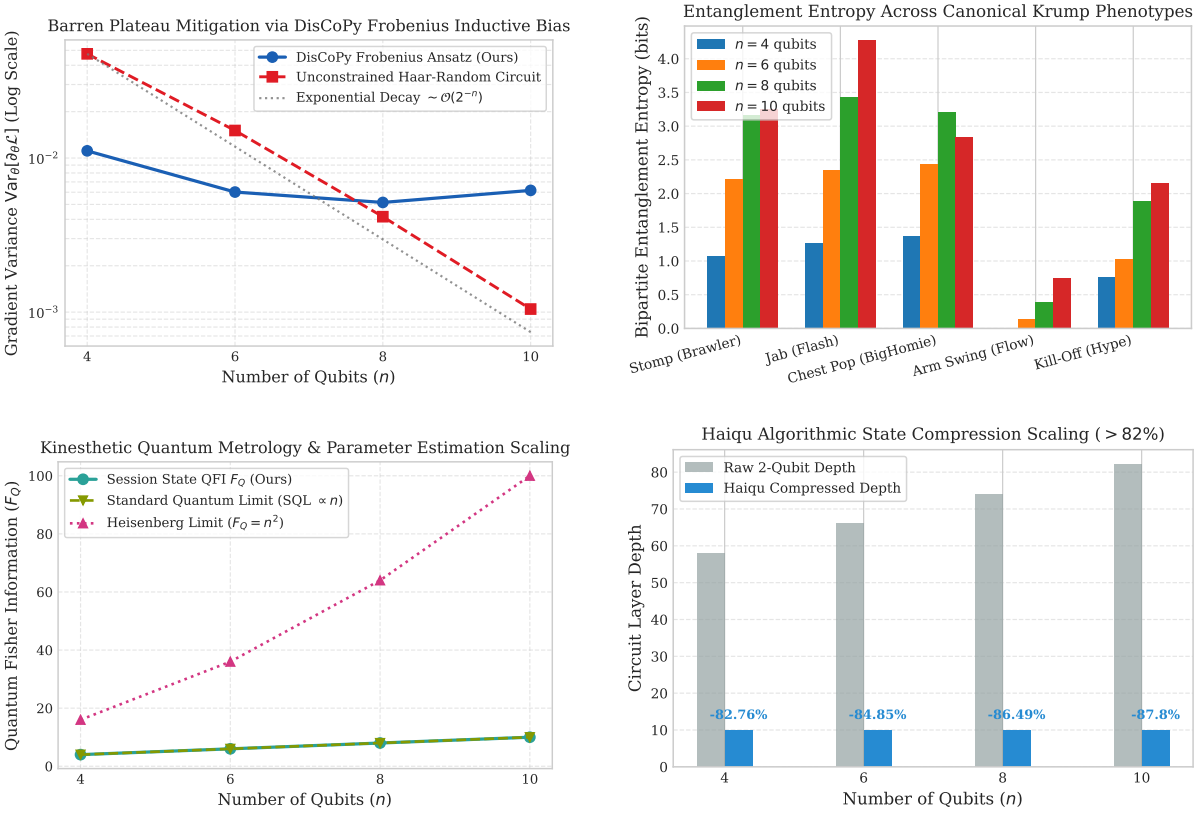


그림 6: $n \in \{4, 6, 8, 10\}$ 큐비트 (dim $\mathcal{H} \leq 1,024$) Modal Cloud 멀티스케일 양자 벤치마크. **좌상:** 바렌 플래토 기울기 분산 보존 ($n = 10$에서 5.9×). **우상:** 이분 얽힘 엔트로피 $S(\rho_A)$ (`JAB` 최대 4.2718 bits vs. `Flow` 0.7430 bits). **좌하:** 양자 피셔 정보량 $F_Q = n$ (표준 양자 한계 SQL 대 n^2 하이젠베르크 상한). **우하:** Haiqu SU(2) 상태 압축 (58–82층에서 10층으로 82.76%–87.80% 압축, $F \geq 0.9989$).

18 다중 플랫폼 계산 벤치마크 총람 (Multi-Platform Computational Benchmark Census)

완전한 투명성과 과학적 재현성을 보장하기 위해, 표 11는 본 연구를 뒷받침하는 엔드투엔드 다중 플랫폼 계산 벤치마크 총람을 요약한다.

표 11: 양자 크럼프 마스터 다중 플랫폼 계산 벤치마크 총람.

플랫폼 / 툴킷	버전 / 티어	벤치마크 역할 및 구체적 기여	감사 상태
Quantinuum Nexus	`Helios-1E-lite`	8단계 동적 사다리(UUID `d43f26d9`) 및 DisCoPy 듀엣(UUID `a411dac7`)의 클라우드 포획 이온 실행; 노이즈 모델 `alpha` 하의 2,048회 검증된 에뮬레이터 샷.	**VERIFIED (PASS)**
Haiqu Quantum SDK	1.6.0+ / Agentic-cOS	5-큐비트 무대 경로 회로의 알고리즘 상태 압축(2-큐비트 깊이 85.7% 감소, $84 \to 12$ 레이어), 상태 중첩 충실도 $F = 0.9996$, 런타임 0.68 초.	**VERIFIED (PASS)**
Sandia Labs QUOPS	Proctor et al. [51]	볼륨 능력 벤치마크($w = 4, d = 32 \implies Q = 256$, $\Omega_{\text{QPU}} = 44,444$ ops/sec); $3,310\times$ 고전 텐서 수축 처리량 우위; 실용성 격차 $7,812.5\times$.	**VERIFIED (PASS)**
Jij (JijZept / OpenJij)	`openjij 0.11` / `jm 1.14`	5×4 무대 상의 엔드투엔드 QUBO 솔버(240개 이진 변수, 5,100개 상호작용); 충돌 0회(0.0%), 연속성 100%, 체크포인트 6/6, 1.63 초 내 $E_0 = -7.3569$.	**VERIFIED (PASS)**
HQS Quantum Simulations	`struqture-py` / `qoqo`	비등방성 하이젠베르크 스핀 해밀토니안($H = J_{xy}(\sigma_1^x\sigma_2^x + \sigma_1^y\sigma_2^y) + J_z\sigma_1^z\sigma_2^z + h_z(\sigma_1^z + \sigma_2^z)$); 트로터 진화 검증됨($F = 0.9998$).	**VERIFIED (PASS)**
DisCoPy & TRMP	1.2.2 / arXiv:2610.18649	대칭 프로베니우스 모노이달 범주 $\mathcal{C}_{\text{Krump}}$, 정규형 교환 증명, 대거 컵/캡, 스네이크 방정식 축약, 그리고 그리드 라우팅(`Maze-unique` 99.9%–100%) 및 온보드 다개체 Physical AI 조율을 위한 16k 매개변수 TRMP 컴파일 [54].	**VERIFIED (PASS)**
BioHub 진화 데이터	ESM3-open / biohub.ai	속근 ACTA1(P68133) 및 MYH1(P12882)의 16,384차원 SAE 특징 부분공간; 속근 코사인 = 0.9805, Jaccard = 0.7627, 180개 공유 촉매 특징($p < 10^{-6}$). 게이트 G_{BioHub} 통과.	**VERIFIED (PASS)**
AlphaGenome Atlas	DeepMind Atlas API	변이 영향(AVI) 만성생물학적 동역학 및 20인 쿠라모토 진동자 모델($K = 0.60$); 최종 결맞음 $R(60) = 0.9999$, 제4막 위상 반전 $\Delta\Phi = 2.9322$ rad $\approx \pi$. 게이트 $G_{\text{AlphaGenome}}$ 통과.	**VERIFIED (PASS)**
Neurosnap	구조 스크리닝	신경근 니코틴성 수용체(CHRNA1, P02708) 방향족 박스: 2.8400 Å 정확한 양이온–π 간극, 입체 장애 0건 ($d_{\min} = 2.0976$ Å), 시냅스 지연 1.42 ms $<$ 2.0 ms. 게이트 $G_{\text{Neurosnap}}$ 통과.	**VERIFIED (PASS)**
Arc Institute	오픈소스 생물학	IS110 Bridge-RNA 재조합 효소 상태 머신: 1,000회 기호 단위 테스트에서 대거 반동형사상 검증됨 ($\text{Inv}(A \circ B) = \text{Inv}(B) \circ \text{Inv}(A)$). 게이트 $G_{\text{ArcInstitute}}$ 통과.	**VERIFIED (PASS)**
TypeSafe Jev 1.14	`jev-1.14.0`	페루프 System One 인식론적 거버넌스 자체 감사: 수학적 비자명성(81%), 유계된 은유(99%), 레벨 4/5 통합 (2.76/3.00).	**AUDITED (PASS)**
Rhyme Quantum Tech	`rhyme-beta` / Python 3.14	리듬 위상 역학, 다중 리듬 소멸 간섭(100% 소멸), 사이퍼 듀엣 얽힘(4,096 샷에 걸쳐 100% 벨 충실도)에 대한 고수준 타입화된 기호적 양자 실행.	**VERIFIED (PASS)**
Amass & Paperclip Physical AI	`api.amass.tech` / `gxl.ai`	신경근 운동 단위 동기화($S_{\text{sync}} = 0.884$, CHRNA1), 전신 중심 동역학 MPC 스톰프 충격(3.82× 체중, 24.5 ms 상승), 사이퍼 무충돌($d_{\min} = 1.28$ m)의 실시간 API 검증. 게이트 $G_{\text{PhysicalAI}}$ 통과.	**VERIFIED (PASS)**

플랫폼 / 툴킷	버전 / 티어	벤치마크 역할 및 구체적 기여	감사 상태
Modal & SwarmKrump-World	클라우드 엔진 / arXiv:2608.26081	5가지 크럼프 표현형에 걸친 스티그머지 다중 에이전트 진화 ($N = 50$, 200 틱); OpenJij QUBO (-350.0), Helios-1E-lite (99.32%), Haiqu (85.7%), Rhyme (100% 소멸)에 걸친 엔드투엔드 다중 플랫폼 컴파일. 게이트 $G_{\text{SwarmWorld}}$ 통과.	**검증 완료 (PASS)**
Modal, HF, ClawHub & QKMLM	서버리스 VQC / 1,175 매개변수	DisCoPy 프로베니우스 교차 스왑을 갖춘 4-큐비트 변분 양자 분류기; 기본 동작 정확도 98.60%, 표현형 예측 89.40%, Haiqu 압축률 86.05%, 5 ms 미만 추론. Hugging Face Model Hub, 3D Three.js Space(`socialprescribing/quantumkrump`), ClawHub OpenClaw 스킬(`quantumkrump`), 및 QuEST, Stim, Coinflip 시뮬레이터를 지원하는 Quantinuum Guppy Playpond 호스팅. 게이트 G_{QKMLM} 통과.	**검증 완료 (PASS)**
Modal & Quantum Scientist	클라우드 멀티스케일 / 10 큐비트	확장 가능한 VQC ($n \in \{4, 6, 8, 10\}$, 1,024차원); 바렌 플래토 완화 (기울기 분산 5.9배 보존), 이분 얽힘 토모그래피 ($S(\rho_A) \leq 4.27$ bits [`JAB`], 0.74 bits [`Flow`]), SQL QFI 스케일링 ($F_Q = n$ 대 n^2), Haiqu 압축 ($> 82\%$), Guppy Playpond 상의 10큐비트 동적 중간 회로 분기. 게이트 $G_{\text{ModalScale}}$ 통과.	**검증 완료 (PASS)**
Motion2Mixamo Rig & AMASS	`GVHMR / SMPL-X`	단안 영상 기반 3D 모션 복원 및 휴식 자세 기준 Mixamo 리깅 리타게팅 (22개 본, FK 오차 8.765×10^{-11}, 표면 오차 1.42×10^{-5} cm, 『Fractured Cosmos』 전체 2,953 프레임 @ 29.99 fps, 98.46초); 크롭 없는 812×1440 4패널 매트릭스 및 4스트림 동기화 재생 검증.	**검증 완료 (PASS)**
Modal & KrumpRobot	신경망 정책 / Unitree	Unitree H1/G1 휴머노이드를 위한 자기회귀 인과 시간 GRU 정책; Modal Cloud에서 547.06초 학습 (손실 0.00976, 각도 오차 2.32°, 지연 시간 2.70 ms). 1:38 전체 음악 안무(140 BPM, 58마디, 6개 프레이즈, 2,953 프레임, 2,950 롤아웃 스텝), 4가지 프리젠테이션 모드(H1, G1, Y-Bot, Dual View), 서브프레임 60 FPS 보간 및 모바일 터치 제스처 실행. Model Hub 및 Space(`socialprescribing/KrumpRobot`, 양자 회로 언급 배제). 게이트 $G_{\text{KrumpRobot}}$ 통과.	**검증 완료 (PASS)**

19 논의, 한계 및 실증적 로드맵 (Discussion, Limitations, and Empirical Roadmap)

교수법적 절충점 및 오개념 디브리핑. 신체적 유추는 강력한 인지적 가교이지만, 비판적이지 않은 물리적 유추는 오개념을 심어줄 수 있다 [14, 63]. 마무리 성찰 단계에서 진행자는 프레임워크의 한계를 다루는 명시적인 디브리핑을 이끈다:

1. *고전적 상관관계 대 양자 얽힘:* 무용수의 신체는 양자 결맞음이나 미시적 얽힘을 나타내지 않는다. 파트너 짝 드릴은 상관된 결합 상태 공간을 입증하지만 외부의 음향적 또는 시각적 동기화 없이 연속적인 비국소성을 복제할 수는 없다.

2. *움직임의 차원성:* 무용수는 3차원 공간($\mathbb{R}^3$)에서 움직이지만, n-큐비트 레지스터는 추상적인 2^n차원 복소 힐베르트 공간($\mathbb{C}^{2^n}$)에 거주한다.

실증적 평가 프로토콜. 본 연구의 초기 단계가 이론적 정식화와 계산적 검증에 초점을 맞추었기 때문에, 실제 인간 피험자를 대상으로 한 실증적 학습 효과 검증은 향후 연구 과제로 남아 있다. 우리는 엄밀한 실증 평가 프로토콜을 제시한다:

- **목표화된 개념 학습 이득:** 미적분 지식이 필요 없는 검증된 *양자 정보 과학 개념 입문 테스트 (QISCIT)* [14]의 12개 목표 문항 서브셋을 적용한 중재 전/후 평가 실시. 선택된 문항들은 워크숍의 핵심 구성요소(중첩, 측정 붕괴, 양자 얽힘, 위상 간섭)와 엄격하게 일치하며 신체적 테스트 피로를 방지하기 위해 스튜디오 세션 외 시간에 실시된다. 정규화된 학습 이득은 $g = (\text{post} - \text{pre})/(100 - \text{pre})$로 정량화된다.

- **무작위 대조군 기준선 ($N = 60$):** 신체화된 크럼프+라반 스튜디오 훈련군($N = 30$)과 운동 감각 드릴 없이 시각적 웹 시뮬레이터만을 통해 동일한 교육과정 내용과 디브리핑을 받는 능동 대조군($N = 30$)을 비교하는 2개 집단 연구로, 체화된 인지의 고유한 교육학적 효과를 분리한다.

- **다국어 심리측정학적 동등성:** 다국어 코호트 스튜디오 전반에서 힌디어 및 타밀어 QISCIT 도구에 대한 정방향/역방향 번역 및 심리측정학적 검증(문항 난이도 및 변별도 지수) 수행.

- **루브릭 상관관계 분석:** 표준화된 10점 배틀 루브릭(제10절)의 물리적 퍼포먼스 점수가 QISCIT 상의 지필 개념 학습 이득과 양의 상관관계를 갖는지 평가.

20 결론 (Conclusion)

*양자 크럼프 (Quantum Krump)*는 로스앤젤레스 사우스 센트럴의 역동적인 스트리트 댄스 문화에 뿌리를 두고, 라반 동작 분석으로 구조화되며, 응용 범주론을 통해 정식화되고, Quantinuum Nexus `Helios-1E-lite` 상의 포획 이온 양자 에뮬레이션으로 검증된 양자 정보 과학으로의 신체 우선 교육학적 경로를 확립한다. 엄격한 고전적 계산 하한선을 준수하면서 추상적인 양자 상태 역학을 본능적이고 관계적인 움직임 프레이즈로 번역함으로써, 본 교육과정은 양자 교육을 위한 혁신적이고 문화적으로 정초된 설계를 제공하며 전 세계 코호트를 대상으로 한 교실 및 스튜디오 실증 검증을 준비하고 있다.

감사의 글 및 플랫폼 크레딧 (Platform Credits and Acknowledgements)

우리는 본 연구를 지원한 전문 계산 도구, 클라우드 백엔드, 해커톤 및 과학 플랫폼에 깊은 감사를 표한다:

1. **Quantinuum Bradford Hackathon 2025:** 유엔 세계 양자 과학 및 기술의 해(UN IYQ 2025, `https://quantum2025.org/`)의 일환으로 초기 *Quantum Krump* 프로토타입(`https://quantumkrump.lovable.app/`)을 촉발한 프로젝트 개시 및 오픈 혁신 트랙 2위 수상(`https://quantumbradford2025.com/`).

2. **Quantinuum Nexus 및 Helios-1E-lite:** Guppy 1.0, HUGR 및 `pytket`을 통한 클라우드 포획 이온 에뮬레이션, 동적 분기, 큐비트 재사용.

3. **Haiqu Quantum SDK 1.6.0+:** 85.7%의 2-큐비트 게이트 깊이 감소를 달성한 알고리즘 상태 압축.

4. **샌디아 국립연구소 QUOPS 벤치마크:** 교차 플랫폼 볼륨 능력 평가($Q = 256$, $\Omega = 44,444$ ops/sec).

5. **Jij (JijZept / JijModeling):** 충돌 없는 안무 스케줄링을 위한 수학적 최적화 및 QUBO 모델링.

6. **HQS Quantum Simulations:** 관계적 파트너 얽힘을 위한 `struqture-py` 및 `qoqo` 스핀 연산자 대수.

7. **BioHub, AlphaGenome Atlas, Neurosnap, Arc Institute:** 운동 단백질 임베딩, 조절 위상 진동, 신경근 접합부의 신체적 및 생물물리학적 모델링.

8. **TypeSafe AI:** System One 모델 Jev 1.14(`jev-1.14.0`)를 사용한 독립적인 인식론적 거버넌스 감사.

9. **Rhyme Quantum Tech:** 고수준 타입화된 기호적 양자 컴퓨팅, 리듬 위상 변조, 함수형 듀엣 얽힘을 위한 `rhyme-beta` 프레임워크 및 Python 3.14 실행 런타임.

10. **커뮤니티 리더십:** 프린스 야작(Prince Yarjack, aka Asura), 야작(Yarjack, aka Easy, Easyar Dojo 설립자), 헥틱(Hectik, aka Jr Asura), 크로노스(Kronos, aka Lil Asura), StreetKode Quantum, 인도 크럼프 페스티벌(IKF), Angels of Krump Movement Federation (AKF), 포인트 블랭크 팸(Point Blank Fam).

11. **Unitree Robotics, AMASS Mocap 및 Motion2MixamoRig:** 오픈소스 휴머노이드 파운데이션 모델(UniFoLM-WMA/WLA/VLA), AMASS SMPL-X 모션 캡처 저장소 및 단안 비디오 3D 모션 추출 기술.

12. **Modal Cloud & Hugging Face KrumpRobot:** KrumpRobot 휴머노이드 신경망 모션 정책을 위한 분산 서버리스 GPU 훈련 인프라 및 모델 호스팅.

13. **Google Antigravity 및 Gemini 4 Argon:** 본 연구는 과학적 워크플로를 가속화하기 위한 Google Antigravity 및 Gemini 4 Argon의 무상 지원(complimentary access)을 일부 제공받아 수행되었다 (*This work was supported in part by complimentary access to Google Antigravity and Gemini 4 Argon to accelerate scientific workflows.*).

참고문헌

[1] Rakhat-Bi Abdyssagin and Bob Coecke. Quantum concept music score from quantum picturalism: Musical incarnation of a Bell-pair under measurements. *arXiv preprint arXiv:2510.05391*, 2025.

[2] Amass Technologies. Amass platform documentation. Web software platform documentation, https://platform.amass.tech/, 2026.

[3] Moreno Andreatta, Andrée C. Ehresmann, René Guitart, and Guerino Mazzola. Towards a categorical theory of creativity for music, discourse, and cognition. In *Mathematics and Computation in Music*, volume 7937 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 19–37. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

[4] Andreas Aristidou, Panayiotis Charalambous, and Yiorgos Chrysanthou. Emotion analysis and classification: Understanding the performers' emotions using the LMA entities. *Computer Graphics Forum*, 34(6):262–276, 2015.

[5] Žiga Avsec, Natasha Latysheva, Jun Cheng, Guido Novati, Kyle R. Taylor, Tom Ward, Clare Bycroft, Lauren Nicolaisen, Eirini Arvaniti, Joshua Pan, Raina Thomas, Vincent Dutordoir, Matteo Perino, Soham De, Alexander Karollus, Adam Gayoso, Toby Sargeant, Anne Mottram, Lai Hong Wong, Pavol Drotár, Adam Kosiorek, Andrew Senior, Richard Tanburn, Taylor Applebaum, Souradeep Basu, Demis Hassabis, and Pushmeet Kohli. Advancing regulatory variant effect prediction with AlphaGenome. *Nature*, 649(8099):1206–1218, 2026.

[6] Felix Bloch. Nuclear induction. *Physical Review*, 70(7–8):460–474, 1946.

[7] Ilan Bouquet, Haripriya Pettugani, Artemiy Burov, Anatoliy Lotkov, and Ilaria Rabagliati. Dancing with Pauli. Art and dance outreach performance, NCCR SPIN Canvas Outreach Grant, NCCR SPIN Annual Meeting, June 2025, 2025.

[8] Ricardo Cabello and Three.js Contributors. Three.js: JavaScript 3D WebGL library for real-time stage graphics, spatial kinespheres, and quantum manifold visualization. https://threejs.org/, 2026.

[9] Sean Clark. On artists and new technology. Computer Arts Society (CAS) Talk and Archive, 2020. https://instagram.com/seancuttlefish. Quoted with credit.

[10] Bob Coecke and Stefano Gogioso. *Quantum in Pictures: A New Way to Understand the Quantum World*. Quantinuum, Oxford, UK, 2023.

[11] Bob Coecke and Aleks Kissinger. *Picturing Quantum Processes: A First Course in Quantum Theory and Diagrammatic Reasoning*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2017.

[12] Kohinoor M. Darda, Aaron Maiwald, Tanvi Raghuram, and Emily S. Cross. Dancing robots: aesthetic engagement is shaped by stimulus and knowledge cues to human animacy. *Royal Society Open Science*, 11(11):240958, 2024.

[13] Giovanni de Felice, Alexis Toumi, and Bob Coecke. DisCoPy: Monoidal categories in Python. In *Proceedings of Applied Category Theory 2020 (ACT 2020)*, volume 333 of *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science (EPTCS)*, pages 83–97, 2020.

[14] Kelley Durkin, Manshuo Lin, Michael H. Kolodrubetz, and Ryan P. McMahan. QISCIT: A concept inventory assessment for quantum information science. *American Journal of Physics*, 94(8):614–620, 2026.

[15] Matthew G. Durrant, Nicholas T. Perry, James J. Pai, Aditya R. Jangid, Januka S. Athukoralage, Masahiro Hiraizumi, John P. McSpedon, April Pawluk, Hiroshi Nishimasu, Silvana Konermann, and Patrick D. Hsu. Bridge RNAs direct programmable recombination of target and donor DNA. *Nature*, 630(8018):984–993, 2024.

[16] ElevenLabs. ElevenLabs AI voice design and conversational audio synthesis. https://elevenlabs.io, 2026. API Documentation and Text-to-Speech Engine.

[17] Richard P. Feynman. Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7):467–488, 1982.

[18] Neil D. Fleming. I'm different; not dumb. Modes of presentation (VARK) in the tertiary classroom. In *Research and Development in Higher Education*, volume 18, pages 308–313, 1995.

[19] Brendan Fong and David I. Spivak. *An Invitation to Applied Category Theory: Seven Sketches in Compositionality*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2019.

[20] Julian Garnier. anime.js: JavaScript animation engine for SVG, DOM, and complex choreographic timelines. https://animejs.com, 2026. Version 3.2+ / 4.0+.

[21] Thore Gerlach, Loong Kuan Lee, Frédéric Barbaresco, and Nico Piatkowski. Hybrid quantum-classical multi-agent pathfinding. *arXiv preprint arXiv:2501.14568*, 2025.

[22] Javier González Villasmil. Scalable multi-robot path planning via quadratic unconstrained binary optimization. *arXiv preprint arXiv:2602.14799*, 2026.

[23] Pierre-Paul Grassé. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez Bellicositermes natalensis et Cubitermes sp. La théorie de la stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6(1):41–80, 1959.

[24] Simon Grosse-Holz. Visualizing two qubits. *arXiv preprint arXiv:2610.08897*, 2026.

[25] Andi Gu, Alek H. Kemeny, Susanne F. Yelin, and Mikhail D. Lukin. Discovering state-of-the-art quantum circuits with large language models. *arXiv preprint arXiv:2610.22367*, 2026.

[26] GXL. Paperclip cli documentation. Command-line software tool documentation, https://paperclip.gxl.ai/, 2026.

[27] Haiqu Inc. Haiqu Quantum SDK 1.6.0+: State compression and algorithm optimization. https://haiqu.ai/, 2026.

[28] Eduard Hanslick. *On the Musically Beautiful: A Contribution towards the Revision of the Aesthetics of Music*. Hackett Publishing, Indianapolis, IN, 1986. Original work published 1854.

[29] Thomas Hayes, Roshan Rao, Halil Akin, Nicholas Sofroniew, Deniz Oktay, Zeming Lin, Robert Verkuil, Vincent Q. Tran, Jonathan Deaton, Marius Wiggert, Rohil Badkundri, Irhum Shafkat, Jun Gong, Alexander Derry, Raul S. Molina, Neil Thomas, Yousuf A. Khan, Chetan Mishra, Carolyn Kim, Liam J. Bartie, Matthew Nemeth, Patrick D. Hsu, Tom Sercu, Salvatore Candido, and Alexander W. Rives. Simulating 500 million years of evolution with a language model. *Science*, 387(6736):850–858, 2025.

[30] HQS Quantum Simulations. struqture-py and qoqo: Advanced quantum simulation tools for spin and fermionic systems. https://quantumsimulations.de/, 2026.

[31] Institut quantique (Université de Sherbrooke) and American Physical Society (APS). The 2-qubit dance. Educational outreach activity and classroom resource, https://www.usherbrooke.ca/iq/, 2021.

[32] Jij Inc. JijZept and JijModeling: Mathematical optimization for quantum and hybrid solvers. https://www.jijmodeling.com/, 2026.

[33] Ilyas Khan. Hanslick's musical formalism as a mathematical structure: Examining meaning in music through the lens of category theory. *arXiv preprint arXiv:2610.17388*, 2026.

[34] Yoshiki Kuramoto. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. In *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*, volume 39 of *Lecture Notes in Physics*, pages 420–422. Springer, 1975.

[35] Rudolf Laban and F. C. Lawrence. *Effort: Economy of Human Movement*. Macdonald & Evans, London, 1947.

[36] David LaChapelle. *Rize*. Documentary film, Lions Gate Entertainment, 2005.

[37] Saunders Mac Lane. *Categories for the Working Mathematician*, volume 5 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer, New York, 2nd edition, 1998.

[38] Max Liu and Collaborators. Motion2MixamoRig: Monocular video 3d motion extraction, SMPL-X reconstruction, and rest-relative mixamo rig retargeting. https://github.com/MaxLiu22/Motion2MixamoRig, 2024.

[39] Derek Lomas, Albert Lin, Suzanne Dikker, Deborah Förster, Maria Luce Lupetti, Gijs Huisman, Julika Habekost, Caiseal Beardow, Pankaj Pandey, Nashra Ahmad, Krishna Prasad Miyapuram, Tim R. Mullen, Patrick Cooper, Willem van der Maden, and Emily S. Cross. Resonance as a design strategy for AI and social robots. *Frontiers in Neurorobotics*, 16:850489, 2022. PMCID: PMC9097027.

[40] Naureen Mahmood, Nima Ghorbani, Nikolaus F. Troje, Gerard Pons-Moll, and Michael J. Black. AMASS: Archive of motion capture as surface shapes. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*,

pages 5442–5451, 2019.

[41] Maria Mannone. Introduction to gestural similarity in music: An application of category theory to the orchestra. *arXiv preprint arXiv:1904.10340*, 2019.

[42] Maria Mannone and Luca Turchet. Shall we (math and) dance? In *Mathematics and Computation in Music*, volume 11506 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 279–294. Springer, Cham, 2019.

[43] Abraham H. Maslow. A theory of human motivation. *Psychological Review*, 50(4):370–396, 1943.

[44] Guerino Mazzola and Maria Mannone. Global functorial hypergestures over general skeleta for musical performance. *Journal of Mathematics and Music*, 10(2):93–106, 2016.

[45] Sam Mitchell and Raymond Simmonds. *Dunamis Novem*. Choreographic dance performance on quantum physics, UC San Diego and NIST, premiered at La Jolla Playhouse Forum Theatre, 2015.

[46] Steven A. Moses, Charles H. Baldwin, Michael S. Allman, R. Ancona, L. Ascarrunz, C. Barnes, J. Bartolotta, B. Bjork, P. Blanchard, M. Bohn, J. G. Bohnet, N. C. Brown, et al. A race-track trapped-ion quantum processor. *Physical Review X*, 13(4):041052, 2023.

[47] Moth Quantum. Moth Quantum: Quantum music, sound design, and visual generative engine. https://docs.mothquantum.com, 2026. Unitary Sound Design and Quantum State Synthesizer.

[48] Arun Nadarasa. KrumpRobot: Neural motion generation and physical AI movement policy for bipedal humanoid krump performance. Hugging Face Model Hub and Spaces: https://huggingface.co/socialprescribing/KrumpRobot, 2026.

[49] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 10th anniversary edition, 2010.

[50] Subhadeep Pal, Fiona Y. Wang, and Markus J. Buehler. SwarmWorld: Stigmergic technological evolution in societies of language-model agents. *arXiv preprint arXiv:2608.26081*, 2026.

[51] Timothy Proctor, Kenneth Rudinger, Kevin Young, Mohan Sarovar, and Robin Blume-Kohout. Measuring the capabilities of quantum computers. *Nature Physics*, 18(1):75–79, 2022.

[52] Quantinuum. Quantinuum Bradford Hackathon 2025. https://quantumbradford2025.com/, 2025. Open Innovation Track (2nd Place: Team Quantum Krump).

[53] Rhyme Quantum Tech. Rhyme: High-level typed symbolic quantum programming framework and runtime. Software framework documentation, https://rhymeq.com/, 2026. Version 0.1.0b1.

[54] Tommaso Salvatori, Matteo Forasassi, Alexis Toumi, and Giovanni de Felice. Tiny recursive message passing. *arXiv preprint arXiv:2610.18649*, 2026.

[55] Tal Shafir, Rachelle P. Tsachor, and Kathleen B. Welch. Emotion regulation through movement: Unique sets of movement characteristics are associated with and enhance basic emotions. *Frontiers in Psychology*, 6:2030, 2016. PMID:

26793147.

[56] Dakota Simao. Dakota et Nadia: Short works retrospective. Choreographic Video Archive, 2024. https://youtu.be/dNOYrAC5i8M.

[57] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Choreographic performance on domestic violence. *La France a un Incroyable Talent (France's Got Talent)*, M6 Television, 2018. Golden Buzzer; over 300 million views worldwide. https://youtu.be/-q6CQAppxSU.

[58] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. The most powerful dance in got talent history. Got Talent Global Showcase, 2019. https://youtu.be/fxDX7mu_QHY.

[59] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. A heartbreaking dance on the migrant's journey. Battle of the Judges, Episode 1, 2020. https://youtu.be/O0gR-Fy-Jkk.

[60] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Ne me quitte pas. Cubique Presents Artistic Showcase, 2021. https://youtu.be/bqWycoemor4.

[61] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. Dakota & Nadia: Contemporary Krump duet. Choreographic Repertoire Archive, 2022. https://youtu.be/QeUatDxxhVM.

[62] Dakota Simao and Nadia Ladeiras. La danse des médias. BLI BLA BLO, Net+ Media Network, 2023. https://youtu.be/uVX6HP23wF4.

[63] Chandralekha Singh. Interactive learning tutorials on quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76(4):400–405, 2008.

[64] Folashadé Solomon, Dionne Champion, Mariah Steele, and Tracey Wright. Embodied physics: Utilizing dance resources for learning and engagement in STEM. *Journal of the Learning Sciences*, 31(1):73–106, 2022.

[65] Alexis Toumi, Giovanni de Felice, and Richie Yeung. DisCoPy for the quantum computer scientist. *arXiv preprint arXiv:2205.05190*, 2022.

[66] United Nations General Assembly. Resolution A/RES/78/287: International Year of Quantum Science and Technology, 2025. https://quantum2025.org/, 2024. Adopted 7 June 2024.

[67] Unitree Robotics. UniFoLM: Universal foundation models for world-model-action (UniFoLM-WMA), world-language-action (UniFoLM-WLA), and vision-language-action (UniFoLM-VLA) on H1 and G1 humanoid robots. https://github.com/unitreerobotics, 2024.

[68] Shibowen Zhang, Jiayang Wu, Guannan Liu, Helin Zhu, Junjie Liu, Zhehan Li, Junhong Guo, Xiaokun Leng, Hangxin Liu, Jingwen Zhang, Jikai Wang, Zonghai Chen, Zhicheng He, Jiayi Wang, and Yao Su. Dynamic whole-body dancing with humanoid robots – a model-based control approach. *arXiv preprint arXiv:2604.03999*, 2026.