

양자 얽힘 이론을 통한 회화의 감성 구조 분석

빈센트 반 고흐(Vincent Van Gogh) 작품을 중심으로

Analyzing the Emotional Structure of Paintings with Quantum Entanglement Theory

focusing on the works of Vincent Van Gogh

주 저 자 : 김철기 (Kim, Cheol Ki)

부산대학교 디자인학과 교수
ckkim@pusan.ac.kr

<https://doi.org/10.46248/kids.2025.2.617>

접수일 2025. 05. 20. / 심사완료일 2025. 06. 01. / 게재확정일 2025. 06. 09. / 게재일 2025. 6. 30.

Abstract

This study analyzes the emotional structure in Van Gogh's paintings through the lens of information and quantum entanglement theory. Color, brushstroke, and composition are defined as core affective elements, from which entropy-based features are extracted to form emotion vectors. These vectors are mapped onto 3-qubit quantum states, and von Neumann entropy and negativity are used to quantify entanglement. GHZ/W state fidelity analysis evaluates the holistic or fragmented nature of emotion. Results show increasing color-brush entanglement and decreasing color-composition entanglement over time, indicating a strategic restructuring of affective expression. Cluster centers exhibited high GHZ fidelity and zero W fidelity, suggesting a unified emotional structure. This research introduces a novel quantum entanglement-based framework for modeling and quantifying emotional complexity in visual art.

Keyword

Emotional structure(감성구조), Quantum theory(양자이론), Painting analysis(회화분석)

요약

본 연구는 고흐 회화의 감성 구조를 정보 이론 및 양자 얽힘 이론의 관점에서 분석하였다. 색채, 붓질, 구도를 감성 요소로 정의하고, 각 요소의 정보 엔트로피를 계산하여 감성 벡터를 구성하였다. 이 벡터를 3큐비트 양자 상태로 매핑하고, von Neumann 엔트로피 및 네거티비티 지표를 활용하여 얽힘 구조를 정량화하였다. 특히 GHZ 및 W 상태와의 유사도 분석을 통해 감성 구조의 단일성 또는 분산성을 평가하였다. 분석 결과, 후기 고흐 작품일수록 색채-붓질 간 얽힘은 강화되고 색채-구도 간 얽힘은 약화되며, 감성이 구조적으로 재편됨을 보여준다. 클러스터 중심 벡터들은 GHZ 상태와 높은 유사도를 보였고, W 상태 유사도는 0으로 감성 요소들이 통합적으로 작동함을 시사한다. 본 연구는 회화 감성을 양자 얽힘 기반의 정보 구조로 모델링하고, 감성 복잡성을 정량화하는 새로운 분석 프레임워크를 제안한다.

목차

1. 서론

- 1-1. 연구 배경
- 1-2. 연구 목적 및 방법

2. 이론적 배경

- 2-1. 감성의 구조와 시각예술
- 2-2. 양자이론의 핵심개념
- 2-3. 양자인지이론과 감성모델링

3. 분석 방법 및 실험 결과

- 3-1. 분석 방법
- 3-2. 실험 결과

4. 논의

5. 결론

참고문헌

1. 서론

1-1. 연구 배경

회화에서 느껴지는 감성은 단순히 색채나 형태의 물리적 자극에 의해 결정되지 않는다. 오히려 그것은 관람자의 시각 구조와 작품 속 시각 요소들이 복합적으로 상호작용하면서 생성되는 다차원적 심리경험이다. 이러한 감성은 선형적인 원인-결과 관계로는 설명하기 어려우며, 다양한 요소들이 동시에 영향을 주고받는 비선형적 얽힘 구조 속에서 발생한다고 볼 수 있다. 이러한 현상을 설명하기 위해 본 연구는 양자이론의 개념을 도입하여 회화의 감성 분석에 새로운 해석 프레임워크를 제안하고자 한다.

전통적으로 회화의 감성 분석은 시각예술 심리학과 미학 이론을 중심으로 발전해왔다. 아른하임(Arnheim, 1974)¹⁾은 시각적 질서와 균형, 대비가 지각된 감정에 강한 영향을 미친다고 보았고, 고프리치(Gombrich, 1960)²⁾는 시각적 재현이 인간의 예측과 기대 구조에 기반한다고 지적하며 감성의 '형식적 유도' 가능성을 제시했다. 또한 베리리언트(Berleant, 1991)³⁾는 감성은 작품 자체가 아니라 작품과 관람자 사이의 상호작용, 즉 "예술적 장(場, field)"에서 생겨난다고 주장했다. 이들은 공통적으로 감성이 단일 요인이 아닌 복잡한 관계성 속에서 발생함을 강조했으며, 감성의 "구조"를 탐색할 필요성을 제기했다.

이러한 감성의 구조적 복잡성은 양자이론의 '중첩(superposition)', '간섭(interference)', 그리고 '얽힘(entanglement)' 개념과 이론적으로 유사한 특성을 지닌다. 감성의 상태는 특정 색채나 붓터치, 구도 하나로 환원되지 않으며, 오히려 서로 다른 요소들의 중첩된 조합과 그 안에서의 관계적 맥락에 따라 결정된다. 예를 들어, 어두운 남색 배경과 거친 붓질은 슬픔을 암시할 수 있지만, 동일한 요소가 다른 구도나 인물 표현과 결합되면 고요함이나 권위를 전달하기도 한다. 이러한 해석의 다중성과 불확정성은 양자역학에서 입자의 상태가 특정값으로 '결정'되기 전까지 여러 가능성의 상태로 공존한다는 개념과 상응한다(Nielsen & Chuang,

2010)⁴⁾. 특히, 양자 얽힘은 감성 요소 간의 관계를 설명하는 데 강력한 개념적 도구가 된다. 얽힘 상태에 있는 양자 입자는 독립적으로 존재하지 않고, 한 입자의 상태가 다른 입자의 상태를 즉각적으로 결정짓는다(Susskind & Friedman, 2014)⁵⁾. 이는 회화에서 색채와 구도, 붓터치가 서로 의존적이며, 전체 감성 상태에 공동으로 영향을 미친다는 점과 개념적으로 유사하다. 감성 요소들이 얽혀 있을 때, 하나의 요소를 변화시키면 전체 감성 상태가 바뀌며, 이는 감성의 전체성(holism)을 보여준다. 따라서 감성을 단순한 요인들의 집합이 아닌, 상호 얽힘 구조로 모델링하는 접근은 회화 감성의 본질을 보다 정밀하게 설명할 수 있는 이론적 가능성을 제시한다.

최근에는 양자인지이론(quantum cognition)과 양자 감성모델링이 심리학 및 예술 분석 분야에 응용되기 시작했다. 브루즈(Busemeyer & Bruza, 2012)⁶⁾는 인간의 판단이 고전 확률 이론이 아닌 양자 확률 구조를 따른다는 가설을 제시하며, 인간의 직관적 감성 역시 확률적 얽힘 구조를 가질 수 있음을 주장했다. 차터지(Chatterjee, 2014)⁷⁾는 미적 감응이 뇌의 복합적 해석 메커니즘에서 비롯된다고 분석하며, 감성 지각을 일종의 신경학적 간섭 구조로 해석했다. 이는 감성 상태가 단순히 입력-출력 모델로 설명되지 않고, 중첩된 가능성과 얽힌 정보의 해체 과정을 거친다는 점에서 양자적 해석과 맥을 같이한다. 이와 같이 감성의 비결정성, 맥락의존성, 얽힘적 관계는 양자이론의 핵심 개념들과 높은 유사성을 보이며, 이는 회화 감성 분석에서 양자적 접근이 타당함을 뒷받침한다(Busemeyer & Bruza, 2012)⁸⁾. 이러한 양자 개념에 대한 체계적 이

1) Arnheim, R., 『Art and visual perception: A psychology of the creative eye』, University of California Press, 1974, pp.17-31

2) Gombrich, E. H., 『Art and illusion: A study in the psychology of pictorial representation』, Princeton University Press, 1960, pp.62-77

3) Berleant, A., 『Art and engagement』, Temple University Press, 1991, pp.23-42

4) Nielsen, M. A., & Chuang, I. L., 『Quantum computation and quantum information (10th Anniversary ed.)』, Cambridge University Press, 2010, pp.82-98

5) Susskind, L., & Friedman, A., 『Quantum mechanics: The theoretical minimum』, Basic Books, 2014, pp.134-149

6) Busemeyer, J. R., & Bruza, P. D., 『Quantum models of cognition and decision』, Cambridge University Press, 2012, pp.45-67

7) Chatterjee, A., 『The aesthetic brain: How we evolved to desire beauty and enjoy art』, Oxford University Press, 2014, pp.88-103

8) Busemeyer, J. R., & Bruza, P. D., 『Quantum models of cognition and decision』, Cambridge University Press, 2012, pp.164-179

해는 양자 관련 연구들(Nielsen & Chuang, 2010; Susskind & Friedman, 2014)⁹⁾¹⁰⁾의 이론적 설명을 통해 명확히 정립될 수 있다.

본 연구는 이러한 이론적 기반 위에서, 회화 작품의 시각 요소들을 양자 상태로 변환하고, 이들 간의 얽힘 정도와 감성 적합성을 계량화함으로써 감성 분석의 새로운 패러다임을 구축하고자 한다. 이를 통해 단순한 분류나 예측을 넘어, 감성의 '구조'와 '과정'을 분석하고 시각화함으로써 과거의 미학적 접근에 과학적 근거를 뒷받침하는 것이 가능해질 것이다.

1-2. 연구 목적 및 방법

본 연구의 목적은 회화 감성의 복잡한 생성 메커니즘을 보다 정교하게 이해하기 위해, 양자이론의 개념을 도입하여 감성 상태를 양자적 얽힘 구조로 모델링하는 이론적·실험적 접근을 제안하는 것이다. 기존 분석들이 감성 요소를 독립적인 변수로 처리하며 상호작용을 간과한 데 반해, 본 연구는 색채, 구도, 붓터치 등의 요소들이 서로 얽혀 있는 다차원적 상태 공간 내에서 감성 전체성을 구성한다고 가정한다. 이를 통해 감성은 단순히 외부 자극의 총합이나 선형적 자극 반응의 결과 아니라, 비선형적 상호작용과 관계적 맥락에 따라 '형성'되는 것으로 설명된다.

이러한 양자 얽힘 기반 감성 모델의 실증 분석을 위해, 본 연구는 분석 대상으로 빈센트 반 고흐(Vincent van Gogh)의 회화를 선정하였다. 고흐는 19세기 후기 인상주의를 대표하는 작가로, 작품 전반에 걸쳐 감정의 강도, 방향성, 다양성이 뚜렷하게 드러나는 화풍을 구축하였으며, 특히 색채의 정서적 상징성, 불규칙하고 파동성 있는 붓터치, 시선의 흐름을 유도하는 독특한 구도 전략 등을 지속적으로 실험해왔다. 이러한 특성은 감성 요소들이 분리되지 않고 얽힌 구조로 표현되는 전형적인 사례를 제공하며, 감성 얽힘 분석의 이상적 조건을 갖춘 조건으로 판단된다.

이를 실현하기 위해 다음과 같은 절차로 연구를 수행하였다. 첫째, 데이터 수집 및 감성 특징 추출을 위

해 고흐의 시대별 대표작(네덜란드, 파리, 아를, 생레미, 오베르)을 197점을 수집하고, 각 이미지에서 색채 엔트로피, 붓질 엔트로피, 구도 엔트로피를 각각 추출하여 감성 벡터를 구성하였다.

둘째, 양자 상태 매핑 및 얽힘 지표 계산 단계이다. 정규화된 감성 벡터는 3큐비트 양자 상태로 매핑되며, Qiskit 기반 시뮬레이션을 통해 전체 시스템 엔트로피, 부분 상태 엔트로피, 그리고 각 요소 간 네거티비티(negativity)를 계산하여 얽힘 특성을 정량화하였다.

셋째, 감성 궤적 시각화 및 클러스터링 분석 단계이다. 감성-얽힘 지표를 UMAP 및 t-SNE 기반으로 2차원 임베딩하여 시대별 감성 궤적을 시각화하고, 클러스터링을 통해 대표적 감성 유형을 분류하였다. 각 클러스터 중심은 GHZ 및 W 상태와의 유사도 분석을 통해 감성 구조의 양자적 성격을 해석하였다.

본 연구는 감성을 구성하는 요소들의 얽힘 구조를 계량화하고 시각화함으로써, 단순한 감성 예측을 넘어 감성의 생성 원리와 구조적 특성을 탐색하는 새로운 접근을 제시한다.

2. 이론적 배경

2-1. 감성의 구조와 시각예술

감성은 단순한 자극-반응 구조로 환원되지 않는 복합적 정보 구조이며, 인지적 해석, 지각적 맥락, 정서적 반응이 동시에 작용하는 다차원적 심리 과정이다. 특히 회화와 같은 시각예술에서 감성은 단지 색채나 형태의 물리적 속성에 의해 자동적으로 발생하지 않는다. 오히려 그것은 관람자와 작품 간의 상호작용적인 해석 행위, 즉 지각과 의미부여의 복합적 과정 속에서 구성된다.

시각예술에 대한 감성 반응은 고정된 정서가 아니라, 지각 구조(perceptual structure), 문화적 경험, 심리적 상태, 시간적 맥락 등에 따라 동적으로 생성되는 의미의 장(場)이다. 같은 작품이라 하더라도, 조명, 배치, 관람자의 위치 또는 감정 상태에 따라 전혀 다른 감정적 해석이 발생할 수 있다. 이는 감성이 물리적 자극의 기계적 결과가 아닌, 해석적 과정(interpretive process)의 산물임을 시사한다.

심리학자 루돌프 아르하임(Arnheim, 1974)¹¹⁾은

9) Nielsen, M. A., & Chuang, I. L., 『Quantum computation and quantum information (10th Anniversary ed.)』, Cambridge University Press, 2010, pp.82-98

10) Susskind, L., & Friedman, A., 『Quantum mechanics: The theoretical minimum』, Basic Books, 2014, pp.134-149

11) Arnheim, R., 『Art and visual perception: A

이러한 시각적 감성의 구조에 대해 일찍이 강조하였다. 그는 예술 작품이 지각 구조, 즉 시각적 균형, 대비, 질서 등을 통해 감정적 의미를 형성한다고 보았으며, 감성은 외부 자극보다 그것이 지각되는 구조에 의해 더 강하게 결정된다고 주장하였다. 이는 감성을 형식(form)의 힘으로 이해한 대표적 사례다. 한편, 고프리치(Gombrich, 1960)¹²⁾는 시각예술을 인간의 예측 구조와 연결지으며, 우리가 감성적으로 반응하는 이유는 예술이 우리의 기대를 충족하거나 위반하기 때문이라고 보았다. 이러한 관점은 감성이 단순한 반응이 아니라, 예측과 해석의 인지 과정임을 강조한다.

또한 아놀드 베를리언트(Berleant, 1991)¹³⁾는 감성을 작품 자체에서 찾지 않고, 관람자와 예술작품 사이의 관계에서 발생하는 '예술적 장(artistic field)' 개념을 도입하였다. 그는 감성은 수동적으로 수용되는 대상이 아니라, 작품에 대한 참여적 행위(engagement) 속에서 생성된다고 주장하며, 감성을 하나의 역동적 상호작용 결과로 보았다. 이처럼 감성은 물리적 대상에 고정된 특성이 아니라, 관람자와 작품 사이에서 '생성'되는 과정적인 성격을 지닌다.

본 연구는 이러한 예술심리학적 이론들을 바탕으로, 감성을 단일한 결과값이 아닌 복잡하게 얽힌 다차원 구조로 이해한다. 회화 속 시각 요소들은 개별적으로 감성을 유발하기보다, 서로 맥락 속에서 의미를 형성하고 감정을 구성한다. 예를 들어, 동일한 색상도 위치, 대비, 텍스처에 따라 전혀 다른 감정을 환기할 수 있다. 즉, 감성은 요소 간 상호작용과 지각적 조직화의 결과이며, 관계적 구조(relational structure)로 접근해야 한다. 이러한 관점은 감성의 비결정성, 중첩 가능성, 그리고 얽힘 구조를 설명하는 데 있어 고전적 모델보다 양자이론적 모델의 적용 가능성을 시사한다. 감성을 독립 변수의 합산이 아닌, 상호작용의 결과로 발생하는 전일적(holistic) 상태로 본다면, 감성은 복잡계이자 확률적 구조로 해석될 수 있다. 따라서 본 연구는 시각예술에서 감성을 단순히 분류하거나 예측하는 수준을 넘어, 그 구조적 생성원리와 얽힘 메커니즘을 해석하고자 한다.

psychology of the creative eye, University of California Press, 1974, pp.17-31

12) Gombrich, E. H., 『Art and illusion: A study in the psychology of pictorial representation』, Princeton University Press, 1960, pp.62-77

13) Berleant, A., 『Art and engagement』, Temple University Press, 1991, pp.23-42

2-2. 양자이론의 핵심개념

양자이론(quantum theory)은 본래 원자 및 소립자의 미시세계에서 발생하는 비직관적 현상들을 설명하기 위해 발전한 물리학의 이론 체계이다. 그러나 그 개념들은 단순한 물리적 세계에 국한되지 않고, 최근에는 복잡계 이론, 인지과학, 심리학, 정보이론 등 다양한 분야에 적용되며 비결정적이며 상호작용적인 시스템을 설명하는 이론적 토대로 확장되고 있다. 본 연구에서는 회화 감성의 구조적 복잡성을 설명하기 위한 수단으로 양자이론의 주요 개념을 도입한다.

특히 감성은 하나의 고정된 상태가 아닌 여러 해석 가능성과 정서적 반응이 공존하는 다중성의 상태로 존재하며, 이는 양자역학의 대표적인 개념들과 깊은 유사성을 보인다. 다음은 감성 분석에 응용 가능한 핵심 양자 개념들이다.

첫째, 중첩(superposition) 개념으로서, 양자 상태는 고전적인 이분법적(0 또는 1) 상태가 아닌, 두 상태가 동시에 존재하는 중첩 상태로 표현된다. 예를 들어, 1 큐비트는 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 형태로 기술되며, 관측되기 전까지는 두 상태 모두의 성분을 포함한다. 이와 유사하게, 감성 상태도 슬픔, 기쁨, 경이감 등 특정 감정으로 고정되어 있지 않으며, 다양한 정서적 가능성이 중첩된 채 존재하다가 관람자의 시선, 해석, 맥락적 경험에 따라 특정 감정으로 '붕괴(collapse)'된다. 이는 회화 감성의 다의성, 맥락 의존성, 불확정성을 이론적으로 정당화할 수 있는 근거를 제공한다.

둘째, 간섭(interference) 개념으로서, 중첩된 상태들은 서로 영향을 주고받으며 간섭 현상을 유발한다. 이는 고전 확률에서는 관찰되지 않는 현상으로, 두 상태의 결합이 단순한 합 이상의 결과를 만들어내는 것을 의미한다. 감성 요소 간의 간섭 또한 마찬가지이다. 예를 들어, 어두운 색조와 거친 붓질이 각각은 슬픔과 분노를 유발할 수 있지만, 특정 구도와 결합되었을 때는 오히려 권위, 침묵, 혹은 존엄으로 해석될 수 있다. 이는 감성의 생성이 요소의 단순 합이 아닌, 관계적 구조의 간섭 결과로 발생함을 보여주며, 감성 모델링에 있어 비선형성을 설명하는 유효한 틀이 된다.

셋째, 얽힘(entanglement) 개념으로서, 양자 얽힘은 두 개 이상의 입자가 하나의 상태로 얽혀 있을 때, 한 입자의 상태가 다른 입자의 상태에 즉각적이고 비국소적인 영향을 미치는 현상이다. 얽힘 상태에서는 개별 입자의 상태를 독립적으로 정의할 수 없으며, 오직 전체 시스템의 상태로만 기술된다. 회화 감성에서 색채, 구도, 붓질 등의 요소는 독립적으로 작용하지 않는

다. 하나의 감성 상태는 이들 요소 간의 상호작용, 즉 감성 요소의 얽힘 구조 속에서 나타난다. 색채의 변화는 붓질의 해석을 바꾸고, 구도의 위치 변화는 전체 감정의 방향을 전환시킨다. 이러한 감성 요소 간의 얽힘 구조는 감성을 단순히 요소들의 합산이 아닌, 전체적 상태로 이해하게 한다.

넷째, 밀도 행렬과 엔트로피(density matrix & entropy) 개념으로서, 양자 시스템은 순수 상태뿐만 아니라 혼합 상태로도 존재할 수 있으며, 이러한 상태는 밀도 행렬을 통해 표현된다. 이를 통해 전체 시스템뿐 아니라 부분 시스템의 정보량, 얽힘 정도, 정보 손실 등을 수리적으로 계산할 수 있다. 이는 감성 분석에 있어 색채, 붓질, 구도 등의 부분 상태 엔트로피를 비교하고, 전체 감성 상태의 복잡성을 계량화하는 데 유용하다. 또한, 부분 전치(partial transpose)를 통해 계산되는 네거티브리티(negativity)는 요소 간 얽힘 강도를 수치화할 수 있는 주요 지표로 활용된다.

다섯째, 상태 공간과 관측(hilbert space & measurement) 개념으로서, 모든 양자 상태는 힐베르트 공간(Hilbert space)의 벡터로 표현되며, 이 상태는 외부 자극(관측)을 통해 특정 기저 상태로 붕괴된다. 이때, 붕괴는 확률적으로 발생하며, 어떤 상태로 관측될지는 사전에 완전히 결정할 수 없다. 이는 감성의 해석 역시 특정 자극(작품), 관람자(관측자), 맥락(기저 기준)에 따라 다르게 현실화된다는 점과 유사하다. 감성의 관측은 고정된 결과가 아니라 다양한 확률 분포 속에서 특정 해석이 실현되는 행위로 이해할 수 있다.

2-3. 양자인지이론과 감성모델링

전통적인 인지이론은 인간의 사고, 판단, 감정 등을 고전 확률 이론에 기반하여 설명해 왔다. 하지만 실제 인간의 선택과 감정 반응은 이러한 고전적 모델의 예측을 자주 위반한다. 대표적으로, 순서효과(order effects), 맥락 효과(context effects), 결정적 선택 위반(disjunction effects) 등은 고전 확률의 독립성과 완전성을 전제로 할 때 설명이 어려운 현상이다. 이러한 인지적 비합리성 또는 비선형성의 설명을 위해 등장한 이론이 양자인지이론(quantum cognition theory)이다. 양자인지이론은 인간의 사고와 판단, 감성 반응이 고전 확률이 아닌 양자 확률 구조(quantum probability structure)를 따를 수 있다는 가설에 기반한다(Busemeyer & Bruza, 2012)¹⁴⁾. 이 이론은 인지

상태가 중첩되어 있으며, 외부 자극이나 질문이 가해질 때 특정 상태로 '붕괴'된다는 관점에서 출발한다. 감성 역시 단일 감정이 아닌 여러 감정의 중첩된 상태로 존재하다가 특정 자극이나 해석 행위를 통해 하나의 감정으로 현실화된다는 점에서, 이러한 양자적 해석은 감성 모델링에 이론적으로 적합한 설명들을 제공한다.

양자인지이론의 핵심은 두 가지다. 첫째, 중첩 상태로서의 인지/감성 개념이다. 이는 감성 상태가 특정한 기쁨이나 슬픔으로 고정되어 있는 것이 아니라, 여러 해석 가능성과 감정 잠재성을 동시에 보유한 불확정 상태로 존재한다는 것을 의미한다. 둘째, 얽힘 개념이다. 감성을 구성하는 하위 요소들(예: 색채, 구도, 붓질)은 독립적으로 존재하지 않고, 서로의 상태에 영향을 미치며, 관람자가 하나의 요소를 해석할 때 그 결과가 다른 요소에 즉각적 영향을 줄 수 있다. 이는 고전적 상관관계 이상의 개념으로, 감성 요소 간의 비고전적 상호의존성을 설명한다.

감성모델링 관점에서 이와 같은 양자이론의 도입은 단순한 비유적 확장이 아니라, 실제 분석 가능한 수학적 구조를 제공한다. 예컨대, 회화 이미지의 감성 특징 벡터를 양자 상태로 표현하고, 그 상태의 밀도 행렬을 구성함으로써 전체 시스템의 엔트로피 및 얽힘 정도를 정량화할 수 있다. 이러한 분석은 감성 요소들 간의 상호작용을 '관찰 가능한' 수치로 환원시키며, 감성의 복잡성과 구조성을 탐색할 수 있는 도구를 제공한다. 또한, 최근 차터지(Chatterjee, 2014)¹⁵⁾는 미적 감응(aesthetic response)이 단순한 감각 반응이 아니라, 뇌의 다양한 영역이 병렬적으로 작동하는 복합적 정보 처리 결과라는 점을 제시하였다. 이처럼 감성이 '선형적인 자극-반응'이 아닌, '다중 경로의 병렬 간섭' 구조 속에서 생성된다는 점은, 감성 지각의 양자적 간섭 모델로의 해석 가능성을 강화한다.

따라서 본 연구는 양자인지이론의 이러한 통찰을 회화 감성 분석에 적용하여, 고전적 감성 분류를 넘어서 감성의 구조적 얽힘, 중첩된 가능성 상태, 맥락적 전이성을 이론적-계량적으로 해석하는 새로운 접근을 제안하고자 한다. 이는 회화 감성을 단지 정서적 반응의 결과가 아니라, 정보적 상호작용의 산물로 바라보는 관점을 가능하게 하며, 감성 분석의 패러다임 전환을 시도

models of cognition and decision』, Cambridge University Press, 2012, pp.1-22

15) Chatterjee, A., 『The aesthetic brain: How we evolved to desire beauty and enjoy art』, Oxford University Press, 2014, pp.88-103

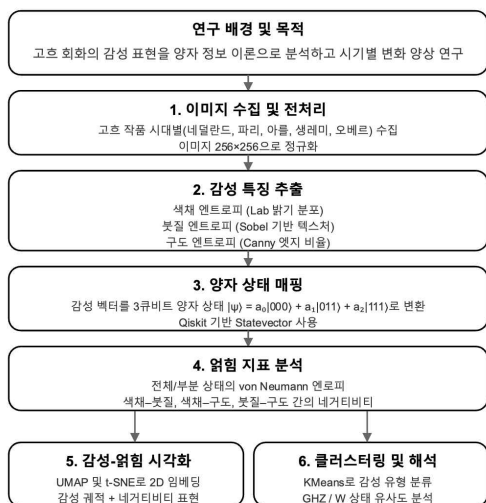
14) Busemeyer, J. R., & Bruza, P. D., 『Quantum

하는 데에 이론적 기반을 제공한다.

3. 분석 방법 및 실험 결과

3-1. 분석 방법

본 연구는 고흐의 회화 작품에 나타나는 감성 요소들(색채, 붓질, 구도)을 기반으로 양자 정보 이론적 감성 벡터를 구성하고, 이들 요소 간의 얽힘 구조를 정량적으로 분석함으로써 고흐 회화의 시대에 따른 감성적 진화 과정을 새로운 관점에서 조명하고자 한다. 실험은 Colab의 Python 환경에서 프로그래밍되었으며, 전체 연구 절차는 [그림 1]과 같이 ① 이미지 수집 및 전처리, ② 감성 특징 추출, ③ 양자 상태 매핑, ④ 얽힘 지표 분석, ⑤ 감성-얽힘 시각화, ⑥ 클러스터링 및 정합성 분석의 6단계로 구성된다.



[그림 1] 연구의 흐름도

[그림 1]에 제시된 6단계 과정을 차례로 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 실험 데이터의 수집을 위하여 고흐의 예술적 여정을 네덜란드, 파리, 아를, 생레미, 오베르의 5개 시기로 구분하고, Vincent Van Gogh Gallery 웹 사이트¹⁶⁾에서 각 시기를 대표하는 작품들의 고해상도 이미지를 수집하였다. 분석의 일관성을 위

해 모든 이미지는 원본의 시각적 정보를 최대한 보존하며 256×256 크기로 표준화하였다.

둘째, 본 연구는 회화의 감성 요소를 정량화하기 위한 핵심 단계로서, 색채(color), 붓질(brush), 구도(composition)의 세 감성 요소 각각에 대응하는 정보 엔트로피 기반 지표를 개발하였다. 감성 표현은 시각적 구성 요소 간의 다양성과 복잡성에서 비롯되며, 이러한 감성적 복잡성을 계량화하기 위해 Shannon 엔트로피에 기반한 정보 이론적 접근을 도입하였다. 색채 엔트로피는 Lab 색공간의 밝기 채널(L*)에 대한 히스토그램 분포를 통해 도출되며, 시각적 명암 대비의 폭과 균형, 즉 색상의 다양성과 분포 균등도를 반영한다. 붓질 엔트로피는 Sobel 연산자로 추출된 텍스처 변화량 (gradient)의 분포로부터 계산되며, 이는 붓터치의 방향성, 진폭, 텍스처 복잡성을 나타낸다. 구도 엔트로피는 Canny 엣지 검출을 통해 도출된 윤곽선 픽셀의 비율을 기반으로 하며, 화면 내 시각 요소의 분포 구조 및 구성 밀도를 반영한다. 각 지표는 감성 요소가 시각적 자극으로 전달되는 방식의 정보적 다양성 (informational diversity)과 불확정성(uncertainty)을 정량적으로 측정하며, 이후 양자 상태 매핑과 얽힘 분석의 기반 벡터로 활용된다. 감성 벡터는 총 3차원(색채, 붓질, 구도)의 정보 엔트로피 기반 좌표로 구성되며, 이를 통해 회화 감성의 구조적 차이를 비교할 수 있는 수치적 프레임이 형성된다.

셋째, 감성 요소 간의 상호작용을 고전적 상관관계의 수준을 넘어, 양자 얽힘 구조로 해석하고자 한다. 이를 위해 앞서 추출한 감성 벡터-색채, 붓질, 구도에 대한 정보 엔트로피 값을 각각 하나의 큐비트에 대응시켜 3큐비트 양자 상태(quantum state)로 변환한다. 이 변환은 단순한 값의 치환이 아니라, 감성 요소들이 서로 얽혀 복합적 감성 상태를 구성하는 구조를 양자 역학적 중첩 개념을 통해 모델링하는 시도이다. 구현을 위하여 IBM의 양자 시뮬레이션 프레임워크인 Qiskit의 Statevector 클래스를 활용하여, 감성 벡터를 정규화된 복소수 진폭 벡터로 표현하였다. 그리고 추출된 세가지 감성 벡터 $[a_0, a_1, a_2]$ 를 각각 $|000\rangle$, $|011\rangle$, $|111\rangle$ 의 세 기저 상태에 매핑한 후 3큐비트 양자 상태로 변환하여 중첩상태를 정의하였다.

$$|\psi\rangle = a_0|000\rangle + a_1|011\rangle + a_2|111\rangle$$

이러한 표현은 감성 요소들이 독립적으로 존재하는 것이 아니라, 함께 얽혀 있는 하나의 감성 상태로 존재함을 수리적으로 묘사하는 구조이다. 즉, 감성 요소 간의 상호작용성과 통합성을 양자 상태 공간 내에서 정

16) 구글, 빈센트 반 고흐 갤러리, www.vggallery.com, (2025.05.03.)

량적으로 해석할 수 있도록 한다. 특히 이 모델은 얽힘 지표(von Neumann 엔트로피, 네거티비티 등)를 계산할 수 있는 수학적 기반을 제공하며, 감성 상태의 전일성(holism) 또는 분산성(fragmentation)을 판단할 수 있는 결정적 정보 구조를 구성하게 된다.

넷째, 감성 요소들을 3큐비트 양자 상태로 매핑한 이후, 해당 상태의 내부 구조와 상호작용 패턴을 정량적으로 분석하기 위해 얽힘 지표(entanglement measures)를 산출하였다. 이때 핵심적으로 사용된 지표는 전체 혼합도의 지표인 von Neumann 엔트로피와, 쌍별 얽힘 강도를 측정하는 네거티비티(negativity)이다. 이 값은 감성 상태가 순수한지 혼합된지 여부, 즉 감성 구조의 복잡성과 불확실성 정도를 나타낸다. 순수 상태(예: 단일 감성 주제)의 경우 엔트로피가 0에 수렴하고, 다양한 감성 요소가 얽힌 복합적 상태일수록 엔트로피가 증가한다. 특히 색채-붓질(Q0Q1), 색채-구도(Q0Q2), 붓질-구도(Q1Q2) 사이의 쌍별 얽힘 강도를 측정함으로써 감성 요소 간 상호작용의 패턴을 포착하였다. 이 지표는 감성 요소 쌍 간의 비고전적 상호의존성을 수치적으로 표현하며, 값이 0이면 얽힘이 없고, 값이 클수록 얽힘이 강한 상태로 간주된다. 이를 통해 감성 표현에서 어떤 요소 조합이 중심적 얽힘 구조를 형성하는지, 반대로 어떤 쌍은 독립적으로 작동하는지를 비교할 수 있다. 이러한 분석은 단순한 감성 강도의 비교를 넘어, 감성 구조 내 요소 간 정보 교환의 비대칭성, 상호작용 강도의 방향성 등을 해석할 수 있는 계량적 기반을 제공하며, 감성의 복잡성에 대한 보다 정교한 이해를 가능하게 한다.

[표 1] 감성 요소와 양자 상태 매핑

감성 요소	큐비트 조합 ($q_2 q_1 q_0$)	기저 상태 $ q_2 q_1 q_0\rangle$	해석
색채	000	$ 000\rangle$	감성 정보의 시작점(기본 상태)
붓질	011	$ 011\rangle$	색은 배제, 붓질과 구도 성 표현 강조
구도	111	$ 111\rangle$	감성 요소가 모두 활성화된 통합 상태

다섯째, 감성 요소로부터 도출된 3차원의 정보 엔트로피 값과, 해당 양자 상태에서 산출된 3종의 네거티비티 지표를 통합하여, 총 6차원의 감성-얽힘 벡터를 구성하였다. 이 고차원 벡터는 개별 회화 작품의 감성 구조를 다차원적으로 표현하는 정보 단위로, 감성 요소

간의 복잡한 상호의존성과 얽힘 수준을 동시에 포함한다. 그러나 이러한 벡터는 인간의 시각 인지 범위를 넘는 고차원 구조이기 때문에 UMAP(Uniform Manifold Approximation and Projection)과 t-SNE(t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding)라는 두 가지 비선형 차원 축소 기법을 활용하여, 이 감성-얽힘 벡터를 2차원 공간으로 투영하였다. 이는 감성 상태 간의 상대적 거리와 구조적 유사성을 시각적으로 해석할 수 있도록 하는 전처리 단계에 해당한다.

차원 축소 후의 시각화에서는 각 작품의 위치를 점으로 표현하고, 이를 시기(period)별로 구분하여 색상과 범례를 부여하였다. 특히 각 시기의 작품 집합에서 평균 위치를 계산하여 시기별 감성 중심점을 산출하고, 이들을 순서대로 연결하여 고흐 회화작품의 감성 궤적(emotional trajectory)을 도식화하였다. 이는 감성 구조가 시간의 흐름에 따라 어떻게 이동하고 재구성되는지를 시각적으로 추적할 수 있도록 한다.

또한 각 작품의 점 크기는 색채-붓질, 붓질-구도, 색채-구도 간의 네거티비티 값을 반영하여, 감성 요소 간 얽힘 강도의 상대적 차이를 직관적으로 표현하였으며, 점의 색상은 특정 쌍의 네거티비티 값을 색조로 매핑하여 시각적 중첩성을 강조하였다. 이와 같은 시각화는 단순한 좌표상의 분포를 넘어, 감성 얽힘 구조의 전일성 또는 분산성의 시각적 패턴을 정성적으로 해석할 수 있는 기반을 제공한다.

여섯째, 개별 작품마다 도출된 감성-얽힘 벡터가 내포하는 구조적 차이를 분석하기 위해, 비지도 학습 기반 클러스터링 기법을 적용하였다. 구체적으로, 6차원의 감성-얽힘 벡터(3종 정보 엔트로피 + 3종 네거티비티)를 입력으로 하여 K-평균(K-Means) 알고리즘을 수행함으로써, 유사한 감성 구조를 공유하는 작품들을 자동적으로 분류하였다. 이 과정은 시기나 주제에 대한 선입견 없이, 감성 표현의 구조적 유사성에 기반한 내재적 유형화를 가능하게 하며, 회화 감성의 비정형적 흐름을 통계적으로 드러낼 수 있는 분석적 기초를 제공한다.

각 클러스터의 중심 벡터는 해당 그룹이 평균적으로 표현하고 있는 감성 구조의 전형적 양상을 의미하며, 이 중심 벡터를 3큐비트 양자 상태로 재매핑한 후, 두 가지 대표적인 얽힘 상태와의 양자 상태 유사도(fidelity)를 비교하였다. 하나는 GHZ 상태로, 모든 큐비트가 얽혀 있는 전일적 구조를 나타내며 $(|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{2}$ 로 정의된다. 다른 하나는 W 상태로, 하나의 감성 요소만이 활성화된 세 가지 상태

의 중첩이며, $(|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)/\sqrt{3}$ 로 표현된다. 이러한 GHZ/W 상태 유사도 분석을 통해, 각 감성 클러스터가 통합적 감성 구조를 가지는지, 아니면 부분적 감성 요소 중심 구조를 가지는지를 판별할 수 있다. GHZ 유사도가 높고 W 유사도가 낮은 경우, 감성 요소들이 전일적으로 얽혀 하나의 복합적 정서 상태를 구성하고 있음을 의미하며, 이는 고호 회화의 통합적 감성 표현을 반영한다. 반면, 특정 클러스터에서 W 유사도가 상대적으로 높게 나타난다면, 해당 감성 구조는 일부 요소 중심의 감성 조합으로 해석될 수 있다. 이러한 클러스터링 및 얽힘 유사도 분석은 고호의 감성 표현이 단일 요소에 의존하지 않고, 색채, 붓질, 구도가 상호 얽혀 하나의 정합된 감정 장(場, field)을 형성하는 경향을 보인다는 것을 정량적으로 확인할 수 있는 절차이다.

3-2. 실험 결과

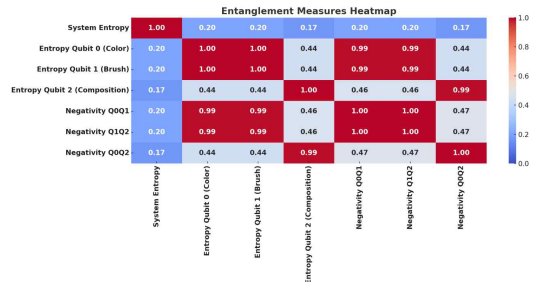
본 장에서는 고호의 회화 작품을 분석 대상으로 하여, 색채(color), 붓질(brush), 구도(composition)라는 세 감성 요소 간의 양자 얽힘 구조를 다양한 방식으로 실험하고 분석한 결과를 제시한다. 실험은 Qiskit 기반 시뮬레이션으로 감성 요소들을 양자 상태로 변환하고, 이들 사이의 얽힘 정도를 네거티브리티(negativity) 및 엔트로피(entropy) 지표로 측정하여 분석하였다.

3-2-1. 얽힘 지표간 상관관계 분석

얽힘 지표 간 상관관계를 분석하기 위해 색채, 붓질, 구도의 세 감성 요소 각각에 대한 Qubit 상태의 부분 엔트로피(entropy qubit 0, 1, 2)와 세 가지 얽힘 조합(Q0Q1, Q1Q2, Q0Q2)에 대한 네거티브리티 지표를 도출하고, 이를 기반으로 상관계수 행렬을 계산하였다. [그림 2]는 이들 지표 간의 상관관계를 시각화한 히트맵으로, 각 요소 간의 통계적 연동성을 직관적으로 보여준다.

가장 주목할 만한 결과는 색채(Qubit 0)와 붓질(Qubit 1) 간의 완전한 동조이다. 이 두 요소의 엔트로피는 상관계수 1.00을 기록했으며, 이들은 Negativity Q0Q1 지표와도 각각 0.99의 높은 상관을 보였다. 이는 색채와 붓질이 단순한 병렬적 감성 자극 요소가 아니라, 서로 긴밀하게 얽혀 있는 감성 구성의 핵심 축(core axis)으로 작동하고 있음을 강하게 시사한다. 이와 같은 얽힘은 고호 회화의 감성 표현이 색채의 분포와 붓질의 방식 간 협응적 상호작용을 통해 형

성됨을 실증적으로 보여준다.



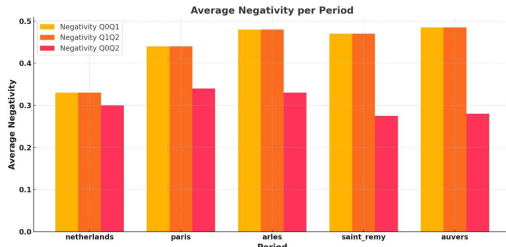
[그림 2] 얽힘 지표 간 상관관계 히트맵

반면, 구도(Qubit 2)는 색채 및 붓질과의 얽힘이 다소 약하게 나타났다. Entropy Qubit 2는 각각 Qubit 0 및 1과 0.44의 상관관계를 보였고, Negativity Q0Q2와 Q1Q2는 각각 0.46~0.47 수준에 머물렀다. 이는 구도가 감성 표현에 있어 독립적 요소로 작용할 가능성을 제시하며, 시선 유도, 공간 구조, 시각적 긴장감 등 고차원의 인지적 기능을 담당할 수 있음을 의미한다. 전체 시스템 엔트로피(System Entropy)는 각 부분 상태 및 얽힘 지표와의 상관계수가 모두 0.17~0.20으로 낮은 수준이었다. 이는 감성 표현의 복잡성이 단일 요소의 정보량이나 단순 얽힘 정도의 합으로 환원되지 않으며, 감성 상태가 부분 요소 간의 관계성과 그 구조적 상호작용 속에서 구성된다는 점을 보여준다. 감성은 부분의 합 이상, 즉 전일적(holistic) 성격을 갖는 시스템으로 해석되어야 한다.

3-2-2. 얽힘 지표간 상관관계 분석

고호의 창작 시기를 Netherlands, Paris, Arles, Saint-Rémy, Auvers의 다섯 단계로 구분하고, 각 시기별로 세 가지 얽힘 조합(Q0Q1, Q1Q2, Q0Q2)의 평균 네거티브리티(negativity)를 계산하였다. [그림 3]은 시기별 평균 얽힘 값을 시각화한 막대그래프로, 감성 구조의 시대적 변화 양상을 확인할 수 있다.

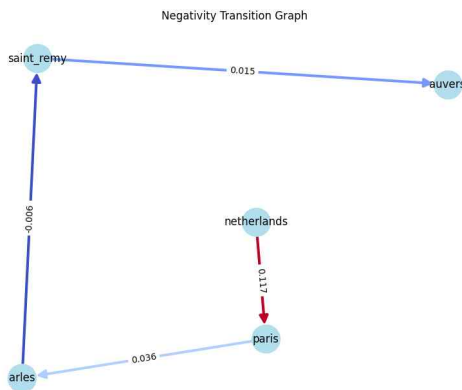
Q0Q1(색채-붓질)과 Q1Q2(붓질-구도)는 전체적으로 시간의 흐름에 따라 상승하는 경향을 보였으며, 특히 Paris 시기 이후부터 급격한 얽힘 강화가 관측되었다. Arles 시기에서는 이들 값이 0.48 수준까지 상승하여, 감성 요소 간의 통합성이 극대화된 시점으로 판단된다. 이 같은 결과는 후기 회화에서 감성 요소 간의 복합적 상호작용이 정점에 이르렀음을 보여준다.



[그림 3] 시대별 감성 요소들 간의 평균 얽힘 강도

반면 Q0Q2(색채-구도)는 Paris 시기까지는 상승세를 보였으나, 이후 Saint-Rémy와 Auvers 시기에서 급감하는 비선형 패턴을 보였다. 이는 감성 구조가 후기 시기에서 일부 요소(특히 붓질 중심)로의 선택적 집중화(entropic selectivity)가 진행되었음을 의미하며, 구도와 색채 간의 얽힘 약화는 감성 표현 방식의 전환을 시사한다.

3-2-3. 전이 그래프 기반 얽힘 변화 분석



[그림 4] 고희 회화 작품에서 시기별 감성 얽힘 지표(네거티브리티)의 전이 그래프

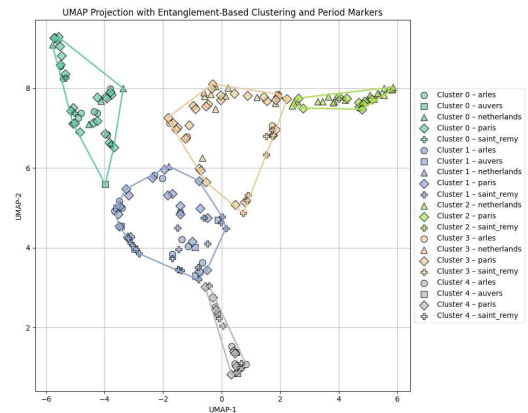
시기 간 감성 얽힘 변화의 역학적 측면을 살펴보기 위해, 각 인접 시기 간 네거티브리티 변화량을 계산하여 유향 그래프로 구성하였다. [그림 4]는 각 시기를 노드로 하여 인접 시기 간 변화량을 간선으로 연결하고, 색상과 두께로 변화 방향과 크기를 표현한 것이다.

분석 결과, Netherlands → Paris 구간에서는 $\Delta =$

+0.117의 큰 증가폭이 관찰되었으며, 이는 초기 감성 표현이 급속히 구조화된 얽힘 기반 표현으로 전환되었음을 시사한다. Paris → Arles 구간에서는 완만한 상승($\Delta = +0.036$)이 이어졌고, Arles → Saint-Rémy 구간에서는 미세한 감소($\Delta = -0.006$)가 관찰되었다. 마지막으로 Saint-Rémy → Auvers 구간에서는 소폭의 재상승($\Delta = +0.015$)이 이루어졌다. 이는 감성 표현의 얽힘 구조가 단순 선형적으로 증가한 것이 아니라, 시대에 따라 강화, 안정화, 선택적 재편, 수렴의 과정을 반복적으로 거쳤음을 보여준다.

3-2-4. 클러스터링 기반 감성 분석

얽힘 기반 감성 표현 구조의 유형화를 위해, 각 작품에 대해 추출한 감성-얽힘 벡터(색채, 붓질, 구도 및 각 조합 간 네거티브리티)를 바탕으로 K-Means 클러스터링을 수행하였다. 이후 이를 UMAP 기반의 2차원 임베딩 공간에 투영하여 시각화하였다. [그림 5]는 클러스터별 구성을 색상으로 구분하고, 각 작품의 시기를 마커 형태로 함께 표기함으로써 시대와 감성 구조 유형 간의 관계를 시각적으로 표현한 결과이다.



[그림 5] 고희의 시대별 회화 작품에 대한 얽힘 기반 클러스터링 UMAP 투영 시각화

총 5개의 클러스터가 비교적 뚜렷한 경계를 유지하며 분리되었으며, 각 클러스터는 감성 얽힘의 패턴에 따라 고유한 내적 응집력을 보였다. 예컨대 Cluster 1은 주로 Paris 및 Saint-Rémy 시기의 작품이 포함되며, 얽힘 강도가 높은 통합형 감성 구조로 해석되었다. 반면 Cluster 3은 Netherlands 및 Arles 시기의 작품을 포함하고, 분산적이고 이질적인 구조를 보이며 감성

얽힘의 초기 혹은 과도기적 유형으로 볼 수 있다.

특히 Arles 시기의 작품은 여러 클러스터(0, 1, 3, 4)에 동시에 등장하여, 동일한 시대 내에서도 다양한 감성 얽힘 패턴이 공존했음을 보여준다. 이는 고흐의 감성 표현이 일관된 양식에 고정되지 않고 실험적이고 다변적인 방향으로 진화했음을 반영한다.

3-2-5. GHZ/W 상태 유사도 분석

얽힘 기반 감성 클러스터의 구조적 특성을 정밀하게 분석하기 위해, 각 클러스터의 중심 벡터(centroid vector)에 대해 이상적인 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger) 상태 및 W 상태와의 유사도(fidelity)를 계산하였다. GHZ 상태는 세 qubit(색채, 붓질, 구도)이 전역적으로 동시에 얽힌 이상적 구조를 나타내며, W 상태는 특정 qubit에 얽힘이 편향된 비균형 상태를 의미한다. 분석 결과(표 2), 모든 클러스터에서 W 상태와의 유사도는 0.0으로 나타났으며, GHZ 상태에 대해서만 의미 있는 유사도가 도출되었다. 이는 고흐의 감성 구조가 특정 감성 요소에 편중된 구조보다는 세 요소가 균형 있게 얽혀 있는 전일적 감성 구조를 기반으로 형성되었음을 강하게 시사한다.

[표 2] 감성 클러스터 중심의 GHZ/W 유사도

클러스터	GHZ유사도	W유사도
0	0.8613	0.0
1	0.6600	0.0
2	0.6873	0.0
3	0.7508	0.0
4	0.4272	0.0

Cluster 0은 가장 높은 GHZ 유사도(0.8613)를 기록하였으며, 이는 색채, 붓질, 구도가 완전하게 얽힌 이상적 감성 구조를 나타낸다. 해당 클러스터는 다양한 시기를 아우르며, 보편적이고 조화로운 감성 표현 양식을 반영한다고 해석할 수 있다.

Cluster 3(0.7508)과 Cluster 2(0.6873)는 상대적으로 높은 유사도를 보이며, 부분 전일성(Partial holism)을 갖춘 감성 구조로 간주된다. 세 감성 요소 간의 균형은 유지되나, 특정 요소가 다소 강조되는 경향도 나타날 수 있다.

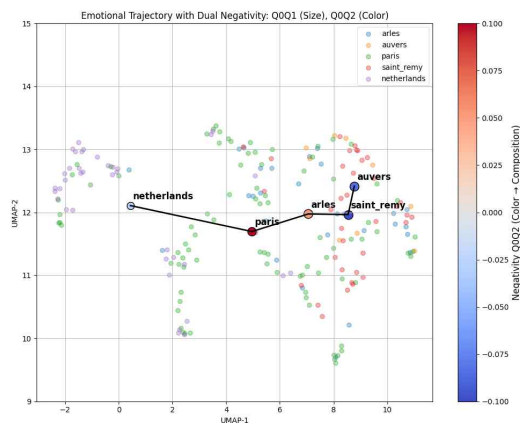
반면, Cluster 4(0.4272)는 가장 낮은 GHZ 유사도

를 보이며, 얽힘의 전일성이 다소 붕괴된 상태를 시사한다. 이 클러스터는 Arles 이후 시기의 작품에 집중되어 있으며, 색채와 붓질 중심의 선택적 얽힘(selective entanglement)을 반영하는 구조로 판단된다.

이와 같은 분석은 고흐 회화 감성이 단순한 시각적 특성이 아니라, 감성 요소 간 얽힘의 구조적 구성 방식에 의해 형성되었음을 입증하며, 클러스터 간의 정성적 차이를 양자 정보 기반 수치로 정량화할 수 있는 강력한 방법론임을 보여준다.

3-2-6. 이중 네거티비티 기반 감성 궤적 분석

고흐 회화의 감성 구조가 시간에 따라 어떻게 변화했는지를 시각적으로 분석하기 위해, 이중 얽힘 기반 감성 궤적(dual negativity emotional trajectory)을 구성하였다. 분석은 색채-붓질(Q0Q1)과 색채-구도(Q0Q2) 간의 네거티비티를 각각 점 크기와 색상으로 매핑하여, 각 작품을 2차원 UMAP 공간에 임베딩하는 방식으로 진행되었다. [그림 6]은 각 작품의 감성 상태를 시각화한 결과로, 감성 얽힘 구조의 시계열적 이동 양상을 직관적으로 보여준다.



[그림 6] 이중 네거티비티 기반 감성 궤적

감성 궤적은 전체적으로 좌측하단(Netherlands)에서 시작하여, 우측상단(Auvers)으로 이동하는 곡선을 그리며 전개된다. 이는 고흐의 감성 구조가 시간의 흐름에 따라 점차 정제되고 응축되는 방향으로 진화했음을 시사한다. 특히 Netherlands → Paris 구간에서 궤적의 이동 폭이 크고, 점의 크기(Q0Q1)가 커지며 색상(Q0Q2)은 붉은 계열로 변화하는 점은, 감성 얽힘이

급격하게 강화되고 확장된 전환점임을 나타낸다.

Arles → Saint-Rémy 구간에서는 점 크기는 계속 커지거나 색상은 점차 푸른색으로 변화한다. 이는 색채-붓질 간 얹힘(Q0Q1)은 강화되는 반면, 색채-구도 간 얹힘(Q0Q2)은 감소함을 보여준다. 마지막으로 Saint-Rémy → Auvers 구간에서는 푸른색이 유지되면서 점의 크기만이 커지며, 감성 구조가 붓질 중심으로 수렴되었음을 의미한다.

이러한 궤적은 감성 요소 간 얹힘이 단일 경향으로 일관되게 강화되거나 약화된 것이 아니라, 특정 얹힘 축이 선택적으로 강화되고 다른 축은 약화되며 감성 구조가 재조정되는 양상을 보였음을 의미한다. 이중 얹힘 시각화는 감성 표현의 다차원적 구조 변화와 선택적 집중 경향을 동시에 드러낼 수 있는 유효한 분석 도구로 기능하며, 감성 진화의 내러티브를 정량적·시각적으로 복원하는 데 중요한 시사점을 제공한다.

3-2-7. 감성의 정합성 분석

감성 표현의 일관성과 통합성을 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 감성 정합성(emotional coherence)을 감성 요소 간 얹힘의 구조적 일관성 및 정보 분포의 균형성이라는 관점에서 정의하였다. 이를 위해 네 가지 기준 지표—① 얹힘 분산도, ② von Neumann 엔트로피 분포, ③ GHZ 상태 유사도 ④ 감성 궤적의 연속성—를 기반으로 각 감성 클러스터의 정합성을 평가하였다.

첫째, 얹힘 분산도 분석에서는 세 감성 요소 간의 네거티브티(Q0Q1, Q1Q2, Q0Q2)가 유사한 수준으로 고르게 나타나는 클러스터를 고정합성(high coherence) 구조로 간주하였다. 반대로 특정 조합만 높고 나머지가 낮은 클러스터는 선택적 얹힘 패턴으로 해석하여 정합성이 낮은 것으로 평가하였다.

둘째, 각 요소의 부분 엔트로피와 전체 시스템 엔트로피를 비교한 결과, 감성 정합성이 높은 클러스터에서는 부분 엔트로피가 비교적 균형 있게 분포하고, 시스템 엔트로피 또한 평균 이상의 값을 유지하였다. 이는 감성 요소 간의 정보량이 특정 항목에 편중되지 않고 통합적으로 분산되어 있다는 것을 의미한다.

셋째, GHZ 상태 유사도는 감성 구조가 전역적으로 얹힘 이상적 정합 상태에 얼마나 가까운지를 정량화한 지표로 사용되었다. 이 유사도 값이 높을수록 감성 요소 간 결합이 조화롭고 통합된 상태로 해석하였다.

넷째, 시각화 기반 궤적 일관성의 경우, UMAP 및 t-SNE 기반 감성-얹힘 궤적에서, 시기별 감성 중심점이 부드럽고 연속적인 이동 경로를 보이는 경우, 감성 정합성이 유지되고 있는 흐름으로 해석하였다. 반대로 궤적이 급격히 분산되거나 일부 시기의 중심점이 불균형하게 위치할 경우, 감성 구조의 비정합성(discordance)이 발생한 시기로 간주하였다. 이상의 기준을 종합하여 각 클러스터의 정합성을 [표 3]과 같이 등급화하였다.

[표 3] 감성 클러스터별 정합성 등급

클러스터	GHZ유사도	얹힘 분산	정합성등급	해석요약
0	0.8613	고르게높음	High	고밀도 통합 감성 구조
1	0.6600	Q0Q2낮음	Mid	색채-붓질 중심 비대칭구조
2	0.6873	전체낮음	Low	얹힘 약한 단일 정서 구조
3	0.7508	중간분포	Mid-High	조화로운 감성 통합 구조
4	0.4272	Q0Q2매우 낮음	Low	선택적 요소 중심 감성 표현

분석 결과, Cluster 0은 가장 높은 정합성을 가진 감성 클러스터로 나타났으며, 고흐 작품 전반에 걸쳐 출현하는 통합적 감성 구조를 반영한다. 반면 Cluster 4는 특정 감성 요소(색채-붓질)만을 중심으로 한 선택적 얹힘을 보여주며, 후기 작품에서 나타나는 정제되고 응축된 감성 표현의 특성을 내포한다. 또한, 감성 클러스터 중심 간의 궤적이 UMAP 공간 내에서 연속적으로 이어지는 경우, 해당 클러스터는 감성 표현이 시계열적으로 일관성을 유지하고 있음을 의미하며, 시각적 궤적의 흐름도 감성 정합성을 평가하는 하나의 지표로 활용될 수 있음을 확인하였다.

4. 논의

본 연구는 고흐의 회화 작품을 대상으로 감성 요소(색채, 붓질, 구도) 간의 얹힘 구조를 양자 정보 이론의 관점에서 정량화하고, 이를 시대별로 비교함으로써 감성 표현의 역학적 변화를 계량적으로 분석하였다. 3장에서 제시한 실험 결과는 감성 상태가 단순한 감성 요소들의 총합이 아닌, 시각적 요소들 간의 비선형적 상호작용과 얹힘 구조 속에서 발생한다는 점을 실증적으

로 보여주었다.

감성 엔트로피 분석 결과, 각 요소는 시기별로 개별적으로 변화할 뿐 아니라, 요소 간 얽힘의 양상도 동적으로 재조정됨이 확인되었다. 특히 얽힘 히트맵 분석은 감성 요소 간의 상관성이 단순한 동시 발생(co-occurrence)이 아니라, 정보 이론적 상호의존성이라는 구조적 특징을 지닌다는 사실을 드러냈다. 이는 고흐의 감정 표현이 무작위적 감정 표출이 아닌, 내적으로 조직화된 감성 구조에 기초하고 있음을 시사한다.

시기별 얽힘 지표 분석에서는 Paris 시기를 전환점으로 하여 전체적인 네거티브티 값(Q0Q1, Q0Q2, Q1Q2)이 급격히 상승하였다. 이는 초기 시기(Netherlands)의 감성 표현이 요소별로 분리되어 있다가, 이후 시기부터 감성이 전일적으로 통합된 얽힘 구조로 진화했음을 의미한다. 그러나 이후 시기(예: Saint-Rémy, Auvers)에서는 전체 얽힘 수준이 유지되면서도 구성 방식이 점차 선택적·응축적으로 변화하였으며, 이는 감성 표현의 단순화가 아니라 정제되고 선택적으로 조절된 감정 구성 전략으로 해석된다.

감성-얽힘 벡터의 차원 축소 및 시각화(UMAP, t-SNE)를 통해 도출된 궤적 분석에서는, 시대별 감성 중심점이 연속적이고 구조적으로 이동함을 확인할 수 있었다. 동시에 동일한 시기의 작품들이 서로 다른 클러스터에 속하는 현상은, 고흐가 특정 시대에 단일한 감정 어법만을 사용한 것이 아니라, 다양한 감성 구조의 조합을 통해 복합적 정서를 구성했음을 시사한다.

클러스터링 기반 분석에서 각 클러스터는 감성 요소의 정보 복잡성 및 얽힘 강도에 따라 명확히 구분되었으며, 특히 일부 클러스터(예: Cluster 0, 4)는 특정 감성 요소가 얽힘에서 중심적 역할을 하거나 아예 배제되는 구조를 보여주었다. 이는 감성 표현이 정형화된 공식이 아니라, 상황에 따라 얽힘 구조가 선택적으로 구성되는 유동적 전략임을 시사한다. 나아가 GHZ/W 상태와의 유사도 분석에서 전 클러스터 중심이 W 상태 유사도는 0에 수렴하고, GHZ 상태와는 상이한 유사도를 보였다는 점은, 고흐 회화의 감성 구조가 균형된 얽힘이라기보다는 정합성 있는 전일적 구조를 중심으로 조직되었음을 지시한다.

이러한 분석 결과는 기존 고흐 회화에 대한 미학적·심리학적 해석과도 개념적으로 긴밀히 연결된다. 예를 들어, Arnheim(1974)¹⁷⁾은 고흐 회화의 색채 대비와

구조적 긴장이 시각적 불균형을 통해 정서를 자극한다고 보았고, Gombrich(1960)¹⁸⁾은 시각적 재현이 시각의 예측과 기대를 전복하는 방식으로 감정을 유도한다고 보았다. 특히 Berleant(1991)¹⁹⁾의 '예술적 장(field)' 개념은, 감성이 작품 내부가 아닌 관람자와 시각 요소 간 상호작용 속에서 발생하는 전일적 경험이라는 점을 강조하였다. 본 연구의 GHZ 유사도 기반 분석은 바로 이러한 감성의 통합성·상호작용성·정합성을 수리적 모델로 환원하여 입증한 결과라 할 수 있다.

결국 본 연구는 감성 표현을 단순한 색채나 붓터치의 조합으로 보는 관점을 넘어, 감성 요소들이 어떻게 얽혀 정서적 장(field)을 구성하는가를 양자정보이론적 관점에서 모델링하고 시각화함으로써, 기존 미학 담론의 정성적 해석을 구조적·계량적 분석으로 확장하였다. 이는 향후 회화 감성 분석, 예술 기반 인공지능 생성, 감성예측 시스템 설계 등에 있어 감성 구조의 얽힘 기반 모델링이라는 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 이론적·실천적 토대를 마련한다.

5. 결론

본 연구는 고흐의 회화 작품을 대상으로 색채, 붓질, 구도라는 세 가지 감성 요소 간의 얽힘 구조를 양자정보 이론의 프레임워크를 통해 정량적으로 분석하고, 감성의 전이와 재편성을 시기별로 비교·시각화하였다. 감성 요소의 엔트로피와 쌍별 네거티브티를 기반으로 구성된 감성-얽힘 벡터는 회화 감성의 내재된 구조를 계량적으로 드러내는 유효한 지표로 작동하였으며, UMAP 및 t-SNE와 클러스터링을 통해 다차원 감성 구조의 유형화와 감정 전이 궤적의 시각화가 가능함을 입증하였다.

분석 결과, 고흐의 감성 구조는 시기에 따라 선형적으로 변화한 것이 아니라, 다차원 얽힘의 재구성, 집중화, 정제화의 비선형적 궤적을 따라 진화하였다. 특히 색채-붓질 간 얽힘(Q0Q1)은 후기 시기로 갈수록 강화된 반면, 색채-구도 간 얽힘(Q0Q2)은 점차 약화되며, 감성의 구성 방식이 전략적으로 변화하였음을 확인할 수 있었다. 이러한 변화는 감성의 총량이 아닌 감성 간

California Press, 1974, pp.44-59

18) Gombrich, E. H., 『Art and illusion: A study in the psychology of pictorial representation』, Princeton University Press, 1960, pp.62-77

19) Berleant, A., 『Art and engagement』, Temple University Press, 1991, pp.23-42

17) Arnheim, R., 『Art and visual perception: A psychology of the creative eye』, University of

상호작용 구조의 선택과 조직 방식의 변동으로 설명되어야 하며, 이는 감정 표현이 양자 얽힘적 논리로 이루어진다는 이론적 가정을 뒷받침한다.

또한 GHZ/W 상태 유사도 분석을 통해, 고흐 작품의 감성 구조는 W와 같은 부분 얽힘이 아닌, GHZ에 가까운 전일적(holistic) 얽힘 구조를 지향하고 있음을 실증하였다. 이는 감성 요소들이 독립적으로 작동하기 보다는, 상호 얽혀 하나의 정서적 상태를 구성하는 방식으로 작동함을 시사하며, 감성의 복잡성을 단일 요인 중심의 분석으로 환원할 수 없음을 강조한다.

향후 연구 과제로, 본 연구는 고흐 단일 작가에 집중하였으나, 향후에는 보다 다양한 감성 요소를 반영하여 클림트, 세잔, 마티스 등 다작 화가들의 감성-얽힘 구조를 비교함으로써 시대·양식·문화적 맥락에 따른 감성 구조의 차이를 탐색할 수 있을 것이다. 또한 본 연구의 분석 모델을 인공지능모델과 결합할 경우, 특정 감성 상태를 목표로 하는 회화 스타일의 생성, 또는 미래 감성 상태의 예측이 가능한 감성 유도 생성 AI 시스템으로의 확장이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Arnheim, R., 『Art and visual perception: A psychology of the creative eye』, University of California Press, 1974.
2. Berleant, A., 『Art and engagement』, Temple University Press, 1991.
3. Busemeyer, J. R., & Bruza, P. D., 『Quantum models of cognition and decision』, Cambridge University Press, 2012.
4. Chatterjee, A., 『The aesthetic brain: How we evolved to desire beauty and enjoy art』, Oxford University Press, 2014.
5. Gombrich, E. H., 『Art and illusion: A study in the psychology of pictorial representation』, Princeton University Press, 1960.
6. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L., 『Quantum computation and quantum information (10th Anniversary ed.)』, Cambridge University Press, 2010.
7. Susskind, L., & Friedman, A., 『Quantum mechanics: The theoretical minimum』, Basic Books, 2014.
8. www.vggallery.com