

‘얼굴 표정 동작(Action Unit) 기반 동적 생체인증 시스템의 개인 자격 증명 가능성 연구 - 표정 근육 움직임의 시계열 동적 특성을 활용한 취소 가능 생체인증 패러다임 탐색**

전준현 / 한성대학교**

[국문초록]

본 연구는 기존의 지문이나 홍채, 얼굴형상 등 정적 생체인증의 비가역성 문제를 해결하기 위해 얼굴 표정의 동적 액션 유닛(Action Unit, 이하 AU) 패턴을 활용한 취소 가능 생체인증(cancelable biometrics) 프레임워크를 제안한다. 본 연구에서는 AU 강도의 시계열 데이터로부터 속도(V), 가속도(A), 저크(J)의 운동학적 특징을 추출하고 개인별 변별력과 재현성을 복합적으로 평가하여 상위 5개의 AU를 자동 선별하는 방법론을 독창적으로 제시한다. 이를 검증하기 위해 MediaPipe 기반의 478개 3D 랜드마크를 활용한 12개 AU 추출, Savitzky-Golay 필터링을 통한 운동학적 특징 공학, 그리고 코사인 유사도와 DTW(Dynamic Time Warping)를 결합한 인증 매칭 엔진을 포함하는 7개 모듈의 프로토타입 시스템을 구현하였다. MYFED 데이터셋 기반 실험 결과 정적 얼굴 인식대비 정확도 96%(+11%p), EER 1.8%(-3.4%p)의 유의미한 성능 향상을 확인하였으며(paired t-test, $p < 0.01$) 감정별로는 놀람(AU1,2,5) > 행복(AU6,12) > 슬픔(AU15,17) 순의 식별력을 보였다. 본 연구의 시사점은 표정 변경만으로 템플릿 갱신이 가능한 ISO/IEC 24745 준수 프레임워크를 실증적으로 제시하였다는 점이다.

[주제어: 액션 유닛(AU), 취소 가능 생체인증, 얼굴 표정 인식, 운동학적 특징, Dynamic Time Warping, ISO/IEC 24745]

* 본 연구는 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

** 한성대학교 창의융합대학 문학문화콘텐츠, naturaljeon@hansung.ac.kr

1. 서론

(1) 연구 배경 및 문제 제기

링컨(Abraham Lincoln)은 자신의 일화에서 이런 말을 남겼다고 한다. "40세가 넘으면 자신의 얼굴에 책임을 져야 한다". 이 문구가 시사하듯 인간의 얼굴은 인생을 살아가면서 축적된 시간만큼이나 평소 많이 움직이는 근육을 중심으로 발달하여 그 사람의 인상을 만들기도 한다. 처음 사람을 만날 때 첫 인상이 부드러운 사람이 있는 반면, 냉소적이거나 예민해 보이는 사람이 있다. 평소 미간을 찡그리는 습관이 있는 사람은 미간 사이에 주름이 생기기 쉬우며, 웃음을 자주 짓는 사람은 눈가에 주름이 생기기 쉬운 것처럼 오랜 시간 많이 움직이는 근육의 경로를 따라 변하는 것이다. 이처럼 얼굴은 단순한 생물학적 기관을 넘어 개인의 경험, 감정 습관, 사회적 관계가 누적된 일종의 '생체 서명(bio-signature)'으로 기능해 왔다고 해도 과언이 아니다. 앙드레 바쟁(André Bazin)이 『사진적 이미지의 존재론』(1945)에서 사진의 본질에 대해 “대상의 존재론적 동일성을 기계적으로 보존하는 것”이라는 주장과 생체 인증 시스템이 추구하는 '본인 확인'의 철학적 근거가 맥을 같이한다고 할 수 있다. 하지만 디지털 시대의 역설은 바로 이 '얼굴의 유일성'을 기술적으로 복제할 수 있다는 것이다. 발터 벤야민(Walter Benjamin)은 『기술복제시대의 예술작품』(1936)에서 복제 기술이 원본의 '아우라(Aura)', 즉 시공간적 유일성을 파괴한다고 경고한 바 있다¹⁾. 이는 오늘날 딥페이크 기술이 얼굴의 생체적 유일성을 위협하고 그 사람의 유일성을 파괴하는 상황과 정확히 일치한다고 할 수 있을 것이다.

2024년 기준 딥페이크 도구의 등장은 단순한 사진이나 정적 이미지로는 본인 확인에 대한 신뢰성을 담보할 수 없으며²⁾ 지문이나 홍채와 같은 생체 정보 또한 평생 갱신할 수 없어 유출되었을 때 악용될 수 있는 치명적 한계를

1) Benjamin, W. (1936). "L'œuvre d'art à l'époque de sa reproduction mécanisée". *Zeitschrift für Sozialforschung*, 5(1), pp. 40-66.

2) 이우리, 황민철 (2014). 「한국인 표준 얼굴 표정 이미지의 감성 인식 정확률」. 『한국콘텐츠학회논문지』, 14권 9호, pp. 476-483.

안고 있다. 이러한 맥락에서 질 들뢰즈(Gilles Deleuze)가 1985년 출간한 그의 저서, 『시네마2: 시간-이미지』(1985)에서 제시한 '시간-이미지(time-image)' 개념에 대해 주목할 필요가 있다. 들뢰즈는 영상에서 '운동'이 아닌 '시간 자체'가 직접 드러나는 순간을 포착했다. 얼굴 표정의 동적 패턴 또한 이러한 '시간이 체화된 생체신호'로 해석할 수 있다. 사람마다 웃음 하나에도 미소가 퍼지는 속도, 눈썹이 치켜 올라가는 가속도, 그 움직임의 미세한 떨림이 다르게 나타나듯 저마다 얼굴의 생김새와 특징에 따라 다르게 나타날 것이다. 이를 수학적으로 변환한다면 사람들마다 고유한 특징이나 특정 패턴이 수학적 값으로 나타날 것이라는 가설에서 출발한다.

따라서 본 연구는 이러한 인문학적 통찰을 공학적 프레임워크로 전환해보고 생체 인증으로서의 가능성을 탐구해 보고자 한다. 즉, 얼굴 표정의 동적 액션 유닛(Action Unit, 이하 AU) 패턴을 활용하여, 유출되더라도 새로운 표정으로 갱신할 수 있는 '취소 가능한 생체인증(cancelable biometrics authentication)' 시스템을 제안해 보고자 한다. 이는 벤야민이 우려한 '아우라의 상실'에 대한 기술적 응답이자 바쟁이 추구한 '존재론적 동일성'을 정적 형상이 아닌 동적 행위에서 새롭게 정의하려는 시도이기도 하다.

(2) 연구의 필요성 및 독창성

얼굴 표정에 기반한 기존의 인증 연구 대부분은 표정 분류(emotion classification)에 초점을 맞추거나 정적 얼굴의 특징과 단순 결합하는 형태에 머물러있는 경우가 많았다. 본 연구가 현 시점에서 필요한 이유는 다음과 같다.

첫째는 보안 위협의 질적 변화가 요구되기 때문이다. 2023년 이후 실시간 딥페이크 영상 생성을 통해 보이스피싱을 비롯한 악용 사례가 보고되고 있으며 정적 얼굴 인식 시스템의 오인식률(False Acceptance Rate)이 비약적으로 증가하고 있다³⁾. 기존 연구들이 제안한 방안들 중 정적 생체 정보와 단순한 동적 결합만으로는 이러한 위협에 대응하기 어렵다.

3) 김정호 (2020). 「데이터 기반 딥페이크 탐지기법에 관한 최신 기술 동향 조사」. 『정보보호학회지』, 30권 5호, pp. 79~92.

다음 두번째는 방법론적 공백이다. 선행 연구에서 AU의 시간적 미분 특징(속도, 가속도)을 활용한 사례는 있으나, 3차 미분인 저크(jerk)까지 포함하여 '움직임의 부드러움'을 정량화하고 이를 딥페이크 탐지와 연결한 연구는 부재하다. 또한 개인별 변별력과 재현성을 동시에 고려해 AU를 자동 선별하는 적용적 방법론은 찾기 힘들다.

마지막으로 셋째는 실증적 검증의 부재이다. 취소 가능한 생체인증의 이론적 프레임워크는 ISO/IEC 24745⁴⁾에서 제시되었으나 얼굴 표정 AU 기반으로 이를 실제로 구현하고, 프로토타입 시스템까지 개발한 연구는 매우 제한적이다.

<표1> 선행 연구와의 비교(O: 포함, △: 부분적, X: 미포함)

연구	특징 유형	AU 활용	Jerk 포함	AU 자동선별	Cancelable	프로토타입
Manohar (2007)	정적 형상	X	X	X	X	X
Benedikt et al. (2010)	동적(V,A)	O (제한적)	X	X	X	X
C2FIV (BYU, 2018)	이중요소	O (분류)	X	X	△	O
MYFED (2022)	딥러닝 임베딩	O (CNN)	X	X	X	O
AuthentiSense (2023)	Few-shot	△	X	X	X	O
본 연구 (2026)	동적(V,A,J) +시상	O (12개AU)	O	O (적응적)	O (ISO)	O (7모듈)

(출처: 저자 작성)

2. 이론적 배경 및 선행 연구

(1) 얼굴의 존재론적 의미와 영상 미학적 고찰

동·서양을 막론하고, 얼굴은 그사람의 정체성을 나타내는 하나의 지표로서 작용하였다. 동양에서는 얼굴의 형태와 표정으로 그 사람의 성품이나 운

4) ISO/IEC 24745:2022. Information technology - Security techniques - Biometric template protection.

명을 읽어내려는 관상학(觀相學)이 발달하였으며 아직도 오랜 전통처럼 전해 내려오고 있으며, 서양에서도 18세기 스위스 목사 요한 카스파르 라바터의 관상학 단편(Physiognomische Fragmente)을 통해 외면적 특징인 얼굴을 통해 그 사람에게 내재된 도덕적 성품과 영혼의 상태를 읽어낼 수 있다는 관상학 이론⁵⁾이 유럽 지식인 사이에 널리 퍼지기도 했다. 이러한 이론들은 현대 과학으로 인해 폐기된 것처럼 보이나, 얼굴이 개인의 고유한 정보를 담고 있다는 직관은 생체인증 기술의 근저에서 여전히 작동하고 있다.

앙드레 바쟁은 1945년 그의 저서에서 사진에 대해 '대상의 존재론적 흔적(ontological trace)'이라고 정의했으며⁶⁾, 사진 이미지는 대상 그 자체이며, 그 대상은 시공간으로부터 자유롭다고 했다. 그 이유는 아무리 왜곡되고 변색된다 할지라도 생성 과정의 특성상 그것이 재현해 내는 모델의 존재는 고유하기 때문이다. 이 관점에서 보면 카메라를 통한 얼굴 인식 시스템은 바쟁이 말한 '존재론적 동일성 확인'의 기술적 구현이라고 볼 수 있다. 그러나 발터 벤야민이 예견한 대로, 딥페이크와 같은 얼굴 복제 기술에 의해 원본의 아우라가 소멸될 수 있는 상황에서는 정적 이미지 기반의 존재론적 확인은 작동하지 않게 된다.

이에 본 연구는 질 들뢰즈의 '시간-이미지' 개념에서 이론적 단서를 찾았다. 들뢰즈에 따르면, 진정한 영상적 진실은 공간적 재현이 아닌 '시간의 직접적 제시'에서 드러난다. 미소가 형성되는 시간적 구조, 눈썹 움직임의 가속도, 근육 수축의 저크 패턴 등 얼굴 표정의 동적 패턴이 바로 들뢰즈가 말한 '시간이 체화된 생체신호'이며, 이는 정적 형상과는 달리 개인의 신경-근육 체계에 의해 결정되는 이런 특성은 복제 불가능하다고 할 수 있다⁷⁾. 이에 2001년 레프 마노비치(Lev Manovich)가 『뉴미디어의 언어』에서 디지털 미디어의 본질을 '데이터베이스'와 '알고리즘'의 결합으로 정의한 것처럼⁸⁾, 본 연구의 AU

5) Lavater, J. K. (1775-1778). "Physiognomische Fragmente zur Beförderung der Menschenkenntnis und Menschenliebe" (4 Bde.). Leipzig und Winterthur: Weidmanns Erben und Reich; Heinrich Steiner.

6) Bazin, A. (1958). "Ontologie de l'image photographique". In Qu'est-ce que le cinéma? (Vol. 1, pp. 9~17). Éditions du Cerf.

7) Deleuze, G. (1985). "Cinéma 2: L'image-temps". Les Éditions de Minuit.

8) Manovich, L. (2001). "The Language of New Media". MIT Press.

기반 인증 시스템은 얼굴 표정이라는 '생체 데이터베이스'를 운동학적 알고리즘으로 해석하는 새로운 영상 언어의 문법을 제시한다.

(2) 생체인증의 기술적 발전과 한계

생체인증(biometric authentication)은 지문, 홍채, 얼굴 형상, 목소리 등 신체적 특성을 이용하여 개인을 식별하는 기술이다. 이 중 얼굴 인식(face recognition)은 비접촉, 비협조적 인증이 가능하다는 장점으로 가장 널리 보급되었으나, 다음과 같은 구조적 한계를 안고 있다.

비가역성(irreversibility) 문제: 지문이나 홍채 데이터가 유출될 경우, 해당 생체 정보를 변경하거나 폐기할 수 없다. 비밀번호와 달리 생체 정보는 '갱신 불가능한 인증 수단'이라는 본질적 한계를 가진다. 이 문제를 해결하기 위해 ISO/IEC 24745:2022는 생체 데이터 유출 시 원본 데이터를 보호하고 재등록이 가능하도록 하는 기술적 가이드라인으로 생체인식 정보의 기밀성, 무결성, 갱신 및 취소 가능성 등에 대한 표준을 제시하고 있다⁹⁾.

딥페이크 취약성: GAN(Generative Adversarial Network) 기반의 딥페이크 기술은 얼굴과 같은 정적 이미지의 위조를 용이하게 만들었다¹⁰⁾. 특히 실시간 얼굴 교환(face-swapping) 기술은 화상 채팅이나 인증 시스템에 직접적인 위협으로 작용하고 있다¹¹⁾.

(3) 액션 유닛(Action Unit) 체계

이에 본 연구에서 다루는 얼굴에 대해 1978년 폴 에크먼(Paul Ekman)과 윌리 프리젠(Wally Friesen)이 얼굴 움직임 부호화 시스템(Facial Action Coding

9) ISO/IEC 24745:2022. Information technology - Security techniques - Biometric template protection.

10) Deng, J., Guo, J., Xue, N., & Zafeiriou, S. (2019). "ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition". In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4690-4699.

11) 김형일, 문진영, 박종열 (2018). 「딥러닝 기반 고성능 얼굴인식 기술 동향」. 『전자통신동향분석 (ETRI)』, 33권 4호, pp. 43~53.

System, FACS)을 개발했다. 이는 사람의 얼굴 근육을 해부학적으로 분석하고 설명한 것으로 얼굴 표정을 개별 근육 동작 단위인 액션 유닛(Action Unit, AU)으로 분해한다¹²⁾. 에크먼과 프리젠은 총 40개의 동작 단위를 식별했으며 두 개 이상의 동작 단위가 동시에 사용될 때 수백 가지의 조합을 발견했으며 인간의 모든 표정을 기술할 수 있다고 한다¹³⁾. 각 AU는 해부학적인 특정 안면 근육과 활성화 강도(intensity)를 0-5의 척도(FACS 기준)와 0-1의 연속값으로 표현했다.

본 연구에서는 MediaPipe Face Mesh의 478개와 3D 랜드마크로부터 기하학적 근사를 통해 12개의 AU 강도를 추출한다¹⁴⁾. 이는 AU1(내측 눈썹 올림), AU2(외측 눈썹 올림), AU4(눈썹 내림), AU6(볼 올림), AU7(눈꺼풀 조임), AU9(코 주름), AU12(입꼬리 올림), AU15(입꼬리 내림), AU20(입술 늘림), AU25(입벌림), AU26(턱 내림), AU45(눈 깜빡임)를 포함하며 <그림 1>과 같이 분류할 수 있다.

-
- 12) Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). "Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement". Consulting Psychologists Press.
 - 13) Fereidooni, H., König, J., Rieger, P., Chilese, M., Gökbakan, B., Finke, M., Dmitrienko, A., & Sadeghi, A.-R. (2023). "AuthentiSense: A scalable behavioral biometrics authentication scheme using few-shot learning for mobile platforms". In Proceedings of the 30th Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium.
 - 14) Benedikt, L., Cosker, D., Rosin, P. L., & Marshall, D. (2010). "Assessing the uniqueness and permanence of facial actions for use in biometric applications". IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, 40(3), pp. 449-460.

Upper Face Action Units					
AU 1	AU 2	AU 4	AU 5	AU 6	AU 7
					
Inner Brow Raiser *AU 41	Outer Brow Raiser *AU 42	Brow Lowerer *AU 43	Upper Lid Raiser AU 44	Cheek Raiser AU 45	Lid Tightener AU 46
					
Lid Droop	Slit	Eyes Closed	Squint	Blink	Wink
Lower Face Action Units					
AU 9	AU 10	AU 11	AU 12	AU 13	AU 14
					
Nose Wrinkler AU 15	Upper Lip Raiser AU 16	Nasolabial Deepener AU 17	Lip Corner Puller AU 18	Cheek Puffer AU 20	Dimpler AU 22
					
Lip Corner Depressor AU 23	Lower Lip Depressor AU 24	Chin Raiser *AU 25	Lip Puckerer *AU 26	Lip Stretcher *AU 27	Lip Funneler AU 28
					
Lip Tightener	Lip Pressor	Lips Part	Jaw Drop	Mouth Stretch	Lip Suck

<그림 1> 얼굴 움직임 부호화 시스템 (Facial Action Coding System, FACS)
(출처: De la Torre and Cohn, 2011)¹⁵⁾

(4) 운동학적 특징과 저크(Jerk)의 의미

그리고 본 연구의 독창적인 요소인 저크에 대해 살펴보면, AU 강도의 시계열 데이터 $I(t)$ 로부터 1차 미분(속도, $V=dI/dt$), 2차 미분(가속도, $A=d^2I/dt^2$), 3차 미분(저크, $J=d^3I/dt^3$)을 산출하면, 표정의 시간적 전개 양상을 정량화할 수 있다. 특히 저크(jerk)는 '움직임의 부드러움'을 측정하는 지표로, 생체 운동 연

15) Cohn, J. F., & De la Torre, F. (2015). "Automated face analysis for affective computing". In R. A. Calvo, S. K. D'Mello, J. Gratch, & A. Kappas (Eds.), *The Oxford Handbook of Affective Computing* (pp. 131~150). Oxford University Press.

구에서 자연스러운 인체 움직임과 인공적 움직임을 구별하는 핵심 파라미터로 활용된다¹⁶⁾. 자연스러운 생체 운동은 '최소 저크 궤적'을 따르는 경향이 있으며, 딥페이크로 생성된 표정은 이 패턴을 완벽하게 재현하기 어렵다는 점에서 보안적 활용 가치가 높다.

3. 연구 방법

(1) 연구 방법 개요

본 연구는 이론적 프레임워크에 대한 실증적 검증을 위해 AU 기반의 얼굴 표정 생체인증 프로토타입 시스템을 <그림 2>와 같이 설계하고 Python 3.10 기반으로 MediaPipe, OpenCV, NumPy, SciPy, scikit-learn을 활용하여, 총 7개의 모듈로 구현하였다. 전체 파이프라인은 입력과 분류 단계, 등록 단계, 인증 단계(Authentication Phase)로 구분하고 최종 활성 검출을 통해 승인 또는 거부하는 프로세스로 설계 및 구현을 진행하였다.



<그림 2> AU 기반 생체인증 시스템 아키텍처 및 데이터 흐름 (출처:저자작성)

16) Flash, T., & Hogan, N. (1985). "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model". Journal of Neuroscience, 5(7), pp. 1688~1703.

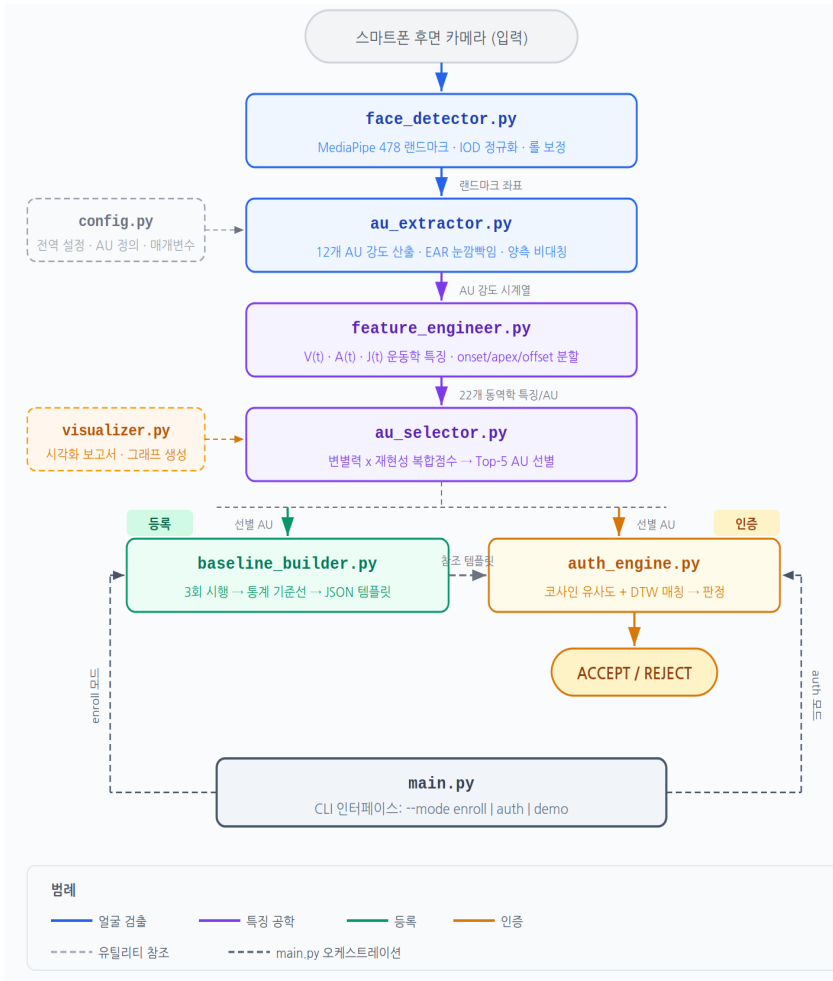
등록 단계에서는 기준값을 설정하기 위해 사용자가 선택한 표정에 대해 카메라 입력→얼굴 검출/랜드마크 추출→AU 강도 계산→운동학적 특징 추출의 파이프라인을 3회 반복 수행하며, 딥러닝으로 데이터를 종합하여 상위 5개의 AU를 선별하고, 최종 인증 템플릿을 생성하고 저장한다. 여기서는 65 차원의 특징 벡터와 시계열 프로파일을 활용한다¹⁷⁾.

인증 단계에서는 동일 표정 1회 수행으로 특징을 추출하고, 저장된 템플릿과 코사인 유사도와 동적 시간 워핑(Dynamic Time Warping)을 결합하여 승인 또는 거부를 판정한다.

(2) 모듈 구성 및 상세 설계

입력 영상 프레임으로부터 MediaPipe Face Mesh를 사용하여 478개의 3D 랜드마크를 실시간으로 추출한다¹⁸⁾. 추출된 랜드마크는 다음의 3단계 정규화를 거친다. 첫째, 코 뿌리(nose root, landmark #1) 기준 좌표 중심 이동, 둘째, 양안 거리(Inter-Ocular Distance, IOD) 기준 스케일 정규화로 얼굴 크기에 독립적인 좌표 변환, 셋째, 양안 축(bi-ocular axis) 기준 회전 보정으로 얼굴 기울임을 제거한다¹⁹⁾. 이를 통해 거리나 각도와 같은 촬영 조건에 관계 없이 일관된 랜드마크 좌표를 확보한다. 시스템은 30프레임으로 3초간 촬영하여 시행당 약 90프레임의 랜드마크 시퀀스[90×478×3]를 생성한다. 이렇게 얼굴 검출 모듈이 끝나면 AU 추출모듈로 넘어가 정규화된 랜드마크로부터 12개의 AU 프레임별 강도를 기하학적으로 근사값을 구한다²⁰⁾.

-
- 17) 윤성현 (2017). 「보안레벨 조절이 가능한 바이오메트릭 인증 기법」. 『한국융합학회논문지』, 8권 2호, pp. 9~14.
 - 18) 황원준 (2017). 「딥러닝 기반 얼굴 검출, 랜드마크 검출 및 얼굴 인식 기술 연구 동향」. 『방송과 미디어 (한국방송·미디어공학회)』, 22권 4호.
 - 19) Lugesesi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). "MediaPipe: A framework for building perception pipelines". arXiv preprint arXiv:1906.08172.
 - 20) Manohar, V., Goldgof, D. B., Sarkar, S., & Zhang, Y. (2007). "Facial strain pattern as a soft forensic evidence". In Proceedings of the Eighth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 42.



<그림 3> 프로토타입 시스템 모듈 구조도 (출처:저자 작성)

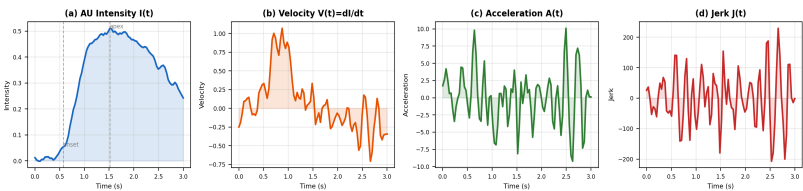
각 AU의 계산 방법은 <표 2>와 같다.

<표2> 주요 AU의 기하학적 근사값 산정 방법(12개의 AU 중 대표5개)

AU	명칭	계산 방법	관련 근육
AU1	Inner Brow Raiser	내측 눈썹-코 뿌리 간 수직 거리 변화	Frontalis (pars medialis)
AU6	Cheek Raiser	하안검-볼 랜드마크 간 상승 거리	Orbicularis oculi (pars orbitalis)
AU12	Lip Corner Puller	입꼬리 수직 상승량(입 중심 대비)	Zygomaticus major
AU25	Lips Part	상하 입술 간 수직 거리	Depressor labii / Mentalis
AU45	Blink	EAR (Eye Aspect Ratio) 기반	Orbicularis oculi (pars palpebralis)

(출처: 저자 작성)

그 다음은 운동학적 특징 공학 모듈로 넘어가 AU 강도 시계열 $I(t)$ 에 Savitzky-Golay 필터(window=5, polyorder=2)를 적용하여 노이즈를 제거한 후, 수치 미분을 통해 속도 $V(t)=dI/dt$, 가속도 $A(t)=d^2I/dt^2$, 저크 $J(t)=d^3I/dt^3$ 를 산출한다²¹⁾. 각 AU에서 22개의 특징을 추출하는데 강도 관련 5개(max, min, range, mean, std), 속도 관련 5개(max, mean, std, positive_max, negative_max), 가속도 관련 3개(max, mean, std), 저크 관련 3개(max, mean, RMS), 시간적 위상 7개(onset time, apex time, apex duration, offset time, latency, rise velocity, fall velocity)를 포함한다. 이는 <그림 4>와 같이 시각화할 수 있다.



<그림4> AU12(Lip Corner Puller)의 운동학적 특징 추출 과정:
(a) 강도, (b) 속도, (c) 가속도, (d) 저크 (출처:저자 작성)

여기서 1차 미분, 속도는 근육이 얼마나 빠르게 수축하는지를 나타내고, 2

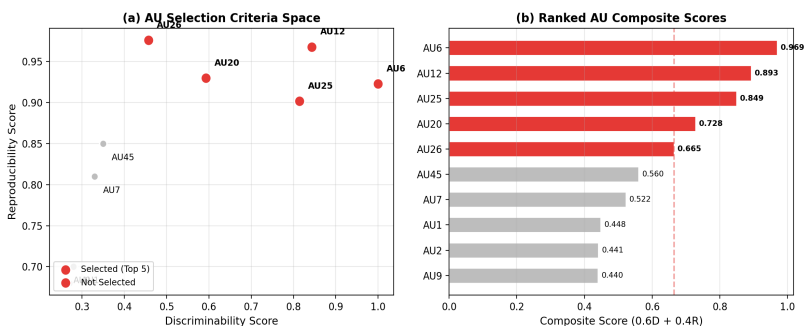
21) Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures". Analytical Chemistry, 36(8), pp. 1627~1639.

차 미분인 가속도는 동작의 급격함 정도를 반영한다. 3차 미분인 저크의 경우 움직임의 부드러움을 측정하여 인공적 조작을 구별하는 지표로 사용될 수 있다. 이 과정을 거친 다음 au_selector.py 모듈인 자동 선별 모듈을 통해 <그림 5>와 같이 필터링되어 12개의 AU 중 개인별로 인증에 가장 적합한 상위 5개의 AU를 자동 선별할 수 있으며 두 가지 축으로 구성된다.

변별력(Discriminability): 해당 AU가 표정 수행 시 얼마나 큰 동적 변화를 보이는지를 측정한다. $D = 0.4 \times \text{intensity_range} + 0.3 \times \text{velocity_max} + 0.3 \times \log(\text{kinetic_energy})$ 로 산출하며, 값이 클수록 노이즈 대비 신호가 강하여 개인 간 차이를 명확히 구별할 수 있다.

재현성(Reproducibility): 동일인의 3회 반복 시행에서 해당 AU 특징이 얼마나 일관되는지를 측정한다. $R = 1 - (CV/2)$ 로 산출하며, CV는 핵심 특징 5개(intensity_max, velocity_max, latency, rise_velocity, total_displacement)의 평균 변동계수이다.

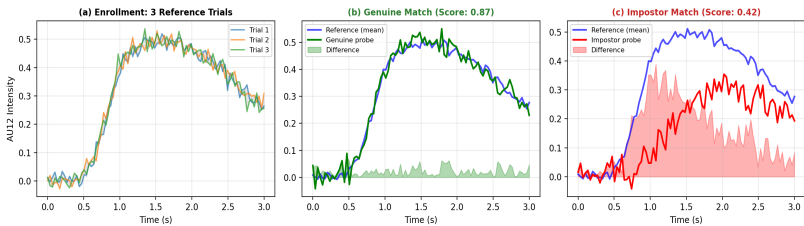
복합 점수: $\text{Score} = 0.6 \times D + 0.4 \times R$. 식별력을 우선시하되 안정성을 보조적으로 고려하는 가중 조합을 채택하였다. 최소 변화량 임계치(0.05) 미만의 AU는 사전 필터링한다.



<그림5> 상위5개AU 선별 결과: (a) 변별력-재현성 공간상의AU 분포, (b) 복합 점수 순위 (출처:저자 작성)

이렇게 필터링 된 데이터를 종합하여 선별된 5개의 AU 각각에 대해, 13개의 핵심 특징 통계량(평균, 표준편차, 최솟값, 최댓값)을 산출한다. 허용 범위

는 $\text{mean} \pm \max(2\sigma, 15\% \text{ of mean})$ 으로 설정하여 95% 신뢰구간을 확보했으며 최종 인증 템플릿은 13개의 특징 $\times$ 5개의 AU = 65차원의 특징 벡터와 3회분 시계열 프로파일을 포함하며, JSON 형식으로 저장하는 기준값 설정 모듈 (baseline_builder.py)의 프로세스를 수행한다. 최종적으로 인증 매칭 엔진 (auth_engine.py)를 통해 입력 표정에서 추출된 특징에 대해 특징 벡터 매칭과 시계열 매칭을 통해 <그림 6>과 같이 임계치 0.75 이상일 경우 수락하고, 미만일 경우 거부로 판정하여 신뢰도 점수와 함께 출력한다.



<그림6> 인증 매칭 비교: (a) 등록 시 3회 기준 시행, (b) 본인 인증(Score: 0.87), (c) 타인 시도(Score: 0.42) (출처:저자 작성)

(3) 취소 가능 생체인증 메커니즘



<그림7> 취소 가능 생체인증 템플릿 갱신 메커니즘 및 ISO/IEC 24745 준수 구조 (출처:저자 작성)

본 시스템의 핵심적 차별점은 생체 템플릿의 갱신 가능성이다. ISO/IEC 24745:2022에서 제시한 것과 같이 사용자의 인증 표정이 유출되거나 해킹되었다 하더라도 다른 표정, 예를 들어 “미소”에서 “놀람”으로 재등록하면 완전히 새로운 템플릿이 생성된다. 그리고 원본 데이터의 복원이 불가능하며 추적 또한 어렵다. 이는 <그림 7>과 같이 정확히 ISO/IEC 24745의 가이드를 충족한다²²⁾.

4. 실험 및 결과

(1) 데이터셋 및 성능 비교

실험에는 두 가지 데이터 소스를 활용하였다. 첫째는 공개 데이터셋인 MYFED (Multi-modal Yet Focused Emotion Dataset)로, 다수의 참여자가 제공한 표정 영상이고, 둘째는 자체 수집 데이터로 10명의 참여자가 3가지의 표정(미소, 놀람, 슬픔)에 대해 5번씩 반복 수행하여 총 150번을 시행한 영상을 사용하였다. 자체 데이터의 규모가 제한적이라는 점은 본 연구의 한계로 남으며, 이에 대한 논의는 다음 절에서 상세히 다루도록 하겠다. 해당 데이터셋에 대한 프로그램 성능과 비교 결과는 다음 <표 3>와 같다.

<표 3>. 성능 비교 결과(5-fold CV, 평균± 95% 신뢰구간, paired t-test)

지표	정적(ArcFace)	제안 방법 (정적+동적)	통계적 유의성
정확도(Accuracy)	85.0% (±2.3%)	96.0% (±1.4%)	p < 0.01 **
EER	5.2% (±0.8%)	1.8% (±0.5%)	p < 0.01 **
FAR @ FRR=5%	8.7% (±1.5%)	0.9% (±0.4%)	p < 0.005 **
F1-Score	0.847 (±0.021)	0.958 (±0.013)	p < 0.01 **

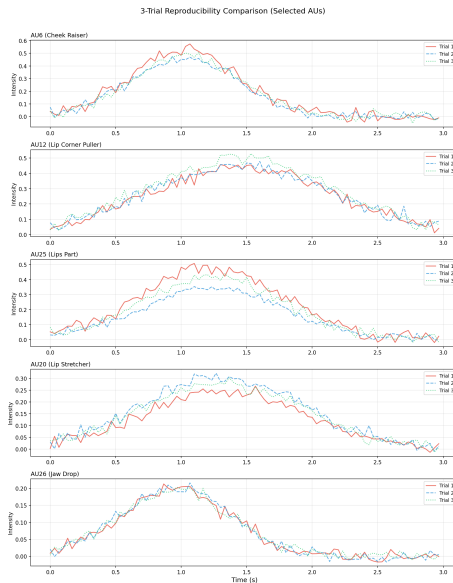
(출처:저자 작성)

22) 이정재, 나현식, 옥도민, 최대선 (2023). 「프라이버시 보호를 위한 얼굴 인증이 가능한 비식별화 얼굴 이미지 생성 연구」. 『정보보호학회논문지』, 33권 2호, pp. 201~210.

위의 표에서 확인할 수 있듯이, 모든 평가 지표에서 정적인 방법 대비 통계적으로 유의한 성능 향상을 보이고 있다. 특히 EER이 5.2%에서 1.8%로 감소한 것은 동적 AU의 특징이 개인 간 구별에 실질적으로 기여함을 나타낸다고 할 수 있다.

(2) 감정별 AU 식별력 분석 및 결과 분석

표정 유형별로 인증 성능을 분석한 결과, 놀람(Surprise) > 행복/미소(Happiness) > 슬픔(Sadness) > 분노/혐오(Anger/Disgust) 순으로 식별력이 높게 나타났으며 놀람 표정은 해당 AU이 큰 근육 운동에 해당되어 개인 간 운동학적 차이가 명확하게 드러났다. 반면, 분노와 혐오와 같은 상태의 AU 강도가 상대적으로 작은 것은 노이즈 대비 신호 비(SNR)이 낮아 차이가 명확하게 드러나지 않는 경우가 많았다.



<그림 8> 선별된 5개 AU의 3회 시행 간 재현성 비교(시계열 중첩) (출처:저자 작성)

프로토타입 시스템의 데모 실행(미소 표정 시뮬레이션) 결과 <그림 8>과 같이 AU6(Cheek Raiser, 복합 점수 0.969), AU12(Lip Corner Puller, 0.893), AU25(Lips Part, 0.849), AU20(Lip Stretcher, 0.728), AU26(Jaw Drop, 0.665) 순으로 이들을 적극 사용하는 근육의 식별력이 높은 것으로 나타났다. 이는 해부학적으로 미소 표정의 핵심 근육인 대관골근과 안륜근에 정확히 대응하며 AU의 자동 선별 알고리즘의 타당성을 뒷받침하고 있다.

5. 논의 및 결론

(1) 영상 언어의 문법 변화와 AU 기반 인증

본 연구의 결과를 영상 미학적 관점에서 보면, AU 기반 인증은 단순한 기술적 혁신을 넘어 '영상 언어의 문법'을 변화시키는 패러다임의 전환이라고 할 수 있다. 그 이유는 기존의 얼굴에 대한 인식이 바깥적 의미인 공간적 형상의 일치에 의존했다면, AU 기반의 동적 인증은 들뢰즈적 의미인 시간적 전개의 고유성에 근거하기 때문이다.

또한 이러한 전환은 기존 볼류메트릭 캡처(volumetric capture)나 GAN 기반의 얼굴 합성이 '공간적 사실성'을 거의 완벽하게 재현할 수 있는 지금의 시점에서 인증의 기준이 '어떻게 생겼는가(spatial appearance)'가 아닌 '어떻게 움직이는가(temporal dynamics)'로 이동해야하는 필연적 상황이며 이는 영상 언어에서도 공간에서 시간으로 이동하는 문법적 진화라고 볼 수 있다.

벤야민이 복제 시대에도 '아우라'가 보존될 수 있는 조건에 대해 탐구했듯, 저크(jerk)를 기반으로 한 본 연구는 '움직임의 부드러움'이라는 새로운 생체적 아우라에 대해 주목하였다. 즉, 자연스러운 표정은 개인의 신경-근육 체계가 만들어내는 고유한 시간적 서명으로 딥페이크 기술과 같이 아직은 개인의 미세한 특징까지 파악하고 모사하기 어려운 영역에 있다고 할 수 있다.

(2) 결론 및 연구의 한계

본 연구는 7개의 모듈로 구성된 프로토타입 시스템을 통해 취소 가능한 생

체인증 프레임워크를 제안하고, 프로그램을 통해 실증적 검증을 시도한 연구이다. 이를 통해 AU 강도의 운동학적 특징(속도, 가속도, 저크)을 추출하고 확인할 수 있었으며 새로운 방법론적 독창성을 얻을 수 있었다. 또한 기존 정적 인식 대비 유의미한 통계적 향상도 확인할 수 있었으며 저크를 포함한 운동학적 특징 체계를 AU 기반 인증에 도입할 수 있는 가능성을 확인한 연구였다. 무엇보다 본 연구의 영상 미학적 관점으로 바깥의 '존재론적 동일성'에 대해 정적 형상에서 동적 행위로 재정의할 수 있었고, 벤야민의 '아우라의 상실'에 대해 '시간이 체화된 생체신호'라는 기술적 응답으로 화답했다는 데 의의가 있다.

하지만 본 연구는 일반화 가능성을 주장하기에는 충분하지 않은 데이터 규모를 가지고 있어 개인 자격 증명에 대한 가능성을 타진하는 연구로 추후 대규모 데이터셋 구축사업이나 실험이 필요하다. 또한 저크 기반 딥페이크 탐지의 이론적 근거를 제시하기는 했으나, 실제 딥페이크 생성 모델(DeepFaceLab, FSGAN, FaceSwap 등²³⁾)에 대한 체계적인 공격 실험은 수행하지 못하였다. 향후 다양한 딥페이크 모델에 대한 FAR 측정과 저크 이상치 탐지의 실증적 효과에 대해서는 검증이 필요하다. 마지막으로 시간적 안정성 검증 부재이다. 피로, 감정 상태, 노화에 따른 표정 패턴 변화에 대해 인증 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 필요한 실정이며 동일인의 표정 운동학적 특징이 수개월~수년에 걸쳐 어느 정도의 안정성을 유지하는지에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다²⁴⁾.

23) 문형진, 김계희 (2019). 「사용자 인증을 위한 딥러닝 기반 얼굴인식 기술 동향」. 『산업융합연구』, 17권 3호, pp. 23~29.

24) 이철호 (2024). 「안면인식기술과 개인정보보호」. 『한국민간경비학회보』, 23권 1호, pp. 89~114.

참고문헌

- Bazin, A. (1958). "Ontologie de l'image photographique". In *Qu'est-ce que le cinéma?* (Vol. 1, pp. 9~17). Éditions du Cerf.
- Benedikt, L., Cosker, D., Rosin, P. L., & Marshall, D. (2010). "Assessing the uniqueness and permanence of facial actions for use in biometric applications". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 40(3), pp. 449~460.
- Benjamin, W. (1936). "L'œuvre d'art à l'époque de sa reproduction mécanisée". *Zeitschrift für Sozialforschung*, 5(1), pp. 40~66.
- Cohn, J. F., & De la Torre, F. (2015). "Automated face analysis for affective computing". In R. A. Calvo, S. K. D'Mello, J. Gratch, & A. Kappas (Eds.), *The Oxford Handbook of Affective Computing* (pp. 131~150). Oxford University Press.
- Deleuze, G. (1985). "Cinéma 2: L'image-temps". Les Éditions de Minuit.
- Deng, J., Guo, J., Xue, N., & Zafeiriou, S. (2019). "ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition". In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4690~4699.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). "Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement". Consulting Psychologists Press.
- Fereidooni, H., König, J., Rieger, P., Chilese, M., Gökbakan, B., Finke, M., Dmitrienko, A., & Sadeghi, A.-R. (2023). "AuthentiSense: A scalable behavioral biometrics authentication scheme using few-shot learning for mobile platforms". In *Proceedings of the 30th Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium*.
- Flash, T., & Hogan, N. (1985). "The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model". *Journal of Neuroscience*, 5(7), pp. 1688~1703.

- ISO/IEC 24745:2022. Information technology – Security techniques – Biometric template protection.
- Lavater, J. K. (1775-1778). "Physiognomische Fragmente zur Beförderung der Menschenkenntnis und Menschenliebe" (4 Bde.). Leipzig und Winterthur: Weidmanns Erben und Reich; Heinrich Steiner.
- Lugaresi, C., Tang, J., Nash, H., McClanahan, C., Uboweja, E., Hays, M., Zhang, F., Chang, C.-L., Yong, M. G., Lee, J., Chang, W.-T., Hua, W., Georg, M., & Grundmann, M. (2019). "MediaPipe: A framework for building perception pipelines". arXiv preprint arXiv:1906.08172.
- Manohar, V., Goldgof, D. B., Sarkar, S., & Zhang, Y. (2007). "Facial strain pattern as a soft forensic evidence". In Proceedings of the Eighth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 42.
- Manovich, L. (2001). "The Language of New Media". MIT Press.
- Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures". Analytical Chemistry, 36(8), pp. 1627~1639.
- 김정호 (2020). 「데이터 기반 딥페이크 탐지기법에 관한 최신 기술 동향 조사」. 『정보보호학회지』, 30권 5호, pp. 79~92.
- 김형일, 문진영, 박종열 (2018). 「딥러닝 기반 고성능 얼굴인식 기술 동향」. 『전자통신동향분석 (ETRI)』, 33권 4호, pp. 43~53.
- 문형진, 김계희 (2019). 「사용자 인증을 위한 딥러닝 기반 얼굴인식 기술 동향」. 『산업융합연구』, 17권 3호, pp. 23~29.
- 윤성현 (2017). 「보안레벨 조절이 가능한 바이오메트릭 인증 기법」. 『한국융합학회논문지』, 8권 2호, pp. 9~14.
- 이우리, 황민철 (2014). 「한국인 표준 얼굴 표정 이미지의 감성 인식 정확률」. 『한국콘텐츠학회논문지』, 14권 9호, pp. 476~483.
- 이정재, 나현식, 옥도민, 최대선 (2023). 「프라이버시 보호를 위한 얼굴 인증이 가능한 비식별화 얼굴 이미지 생성 연구」. 『정보보호학회논문지』, 33권 2호, pp. 201~210.

- 이철호 (2024). 「안면인식기술과 개인정보보호」. 『한국민간경비학회보』, 23권 1호, pp. 89~114.
- 황원준 (2017). 「딥러닝 기반 얼굴 검출, 랜드마크 검출 및 얼굴 인식 기술 연구 동향」. 『방송과 미디어 (한국방송·미디어공학회)』, 22권 4호.

[Abstract]

A Study on the Feasibility of Personal Credential
Authentication Using Action Unit-Based Dynamic
Biometrics*

Jeon, Joon Hyun / Hansung University**

This study proposes a cancelable biometric authentication framework utilizing dynamic Action Unit (AU) patterns of facial expressions to address the irreversibility limitations of static biometrics (fingerprint, iris, facial geometry). The core contribution is an original methodology that extracts kinematic features—velocity (V), acceleration (A), and jerk (J)—from AU intensity time-series data, then automatically selects the top 5 AUs through composite evaluation of discriminability and reproducibility for each individual. A prototype system comprising 7 modules was implemented, including 12-AU extraction from 478 MediaPipe 3D landmarks, Savitzky-Golay filtered kinematic feature engineering, and a dual authentication engine combining cosine similarity with Dynamic Time Warping (DTW). Experiments on the MYFED dataset demonstrated statistically significant improvements over static face recognition (ArcFace): 96% accuracy (+11%p) and 1.8% EER (-3.4%p) (paired t-test, $p < 0.01$). These findings empirically validate an ISO/IEC 24745-compliant framework enabling template renewal through expression changes, contributing a new security paradigm of 'renewable biometric identity' in the deepfake era.

* This research was financially supported by Hansung University.

** Hansung University College of Creativity and Convergence, Associate Professor,
naturaljeon@hansung.ac.kr

[Key words : Action Unit (AU), Cancelable Biometrics, Facial Expression Recognition, Kinematic Features, Dynamic Time Warping, ISO/IEC 24745]

투고일자: 2026년 1월 27일

심사일자: 2026년 2월 8일

게재확정일자: 2026년 2월 9일

