

Rekonstruksi Gerak Tari Tradisional Menggunakan *Hidden Markov Model Multimodal*

<http://dx.doi.org/10.28932/jutisi.v12i2.13649>

Riwayat Artikel

Received: 29 Oktober 2025 | Final Revision: 25 April 2026 | Accepted: 05 Mei 2026

Creative Commons License 4.0 (CC BY – NC)



Anang Kukuh Adisusilo^{✉ #1}, Emmy Wahyuningtyas^{#2}, Teguh Pribadi Ikhsan^{#3}

[#] Prodi Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya, Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

¹anang65@uwks.ac.id

²emmy@uwks.ac.id

³teguh@uwks.ac.id

✉ Corresponding author: anang65@uwks.ac.id

Abstrak — Pelestarian tari tradisional pada era digital memerlukan pendekatan komputasi yang tidak hanya mampu merekam bentuk gerak, tetapi juga mempertahankan kontinuitas dan karakteristik stilistik yang menjadi identitas koreografis. Penelitian ini mengusulkan evaluasi perbandingan tiga jenis model emisi pada Hidden Markov Model (HMM), yaitu *Single-Gaussian*, *Gaussian Mixture Model* (GMM-HMM), dan Multinomial Hidden Markov Model (HMM), dalam konteks rekonstruksi gerak Tari Bedoyo Majapahit berbasis markerless motion capture. Data skeleton 3D dengan 3.341 frame dan 33 titik sendi diproses melalui normalisasi dan filtrasi low-pass, kemudian direduksi dimensinya menggunakan Principal Component Analysis (PCA) untuk mempertahankan struktur spasial-temporal utama. Evaluasi dilakukan menggunakan tiga metrik utama Mean Squared Error (MSE), Dynamic Time Warping (DTW), dan Fréchet distance, untuk mengukur kesetiaan geometri, kesesuaian temporal, serta kemiripan bentuk lintasan. Hasil menunjukkan bahwa *Single-Gaussian*, *Gaussian Mixture Model* memberikan performa terbaik dengan nilai MSE terendah, keselarasan temporal paling stabil, dan jarak Fréchet paling kecil dibandingkan dengan dua model lainnya. Temuan ini merefleksikan bahwa koreografi tradisional memiliki sifat multimodal yang tidak dapat direpresentasikan secara optimal oleh emisi unimodal atau berbasis diskrit. Selain unggul secara numerik, model *Single-Gaussian*, *Gaussian Mixture Model* menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kelengkungan trajektori dan variasi mikrogerak yang secara komputasional mengindikasikan preservasi karakteristik gerak yang berkaitan dengan prinsip wiraga, wirama, dan wirasa dalam tari Jawa. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya memberikan kontribusi teknis dalam pelestarian gerak, tetapi juga mendukung preservasi karakteristik estetika budaya pada proses rekonstruksi digital. Penelitian ini menjadi landasan bagi pengembangan sistem pembelajaran tari berbasis Artificial Intelligence dan aplikasi interaktif pada tahap selanjutnya.

Kata kunci— Bedoyo Majapahit; Dimensionality Reduction; Gaussian Mixture Model; Hidden Markov Model; Motion Capture.

Reconstruction of Traditional Dance Movements with Hidden Markov Model Multimodal

Abstract - The preservation of traditional dance in the digital era requires computational approaches that are capable not only of recording bodily movement, but also of maintaining the continuity and stylistic characteristics that define choreographic identity. This study presents a comparative evaluation of three emission models within Hidden Markov Models (HMM), namely *Single-Gaussian* HMM, *Gaussian Mixture Model-HMM* (GMM-HMM), and *Multinomial HMM*, for reconstructing Bedoyo Majapahit dance movements using markerless motion capture data. The recorded 3D skeleton dataset consists of 3,341 frames with 33 joint points per frame. The data were processed through normalization and low-pass filtering, followed by dimensionality reduction using Principal

Component Analysis (PCA) to preserve the primary spatial-temporal structure of the motion data. Reconstruction performance was evaluated using three quantitative metrics: Mean Squared Error (MSE), Dynamic Time Warping (DTW), and Fréchet distance, which respectively measure geometric fidelity, temporal consistency, and global trajectory similarity. Experimental results demonstrate that GMM-HMM achieves the best overall performance, producing the lowest MSE, the most stable temporal alignment, and the smallest Fréchet distance compared with the other models. These findings indicate that traditional choreography exhibits multimodal motion characteristics that cannot be adequately represented using unimodal or discretized emission models. Beyond numerical performance, GMM-HMM also demonstrates a stronger capability to preserve trajectory curvature and micro-motion variations, which computationally correlate with movement characteristics associated with the Javanese dance principles of wiraga, wirama, and wirasa. Therefore, the proposed approach contributes not only to computational motion reconstruction, but also to the preservation of cultural aesthetic characteristics in digital dance heritage. This study provides a foundation for future AI-based dance learning systems and interactive cultural heritage applications.

Keywords— *Bedoyo Majapahit; Dimensionality Reduction; Gaussian Mixture Model; Hidden Markov Model; Motion Capture.*

I. PENDAHULUAN

Rekonstruksi gerak tari tradisional berbasis komputasi merupakan salah satu pendekatan strategis dalam pelestarian warisan budaya takbenda [1]. Tari sebagai ekspresi budaya tidak hanya menghadirkan estetika gerak, tetapi juga merepresentasikan nilai filosofis dan pengetahuan turun-temurun. Namun, dokumentasi konvensional melalui video atau narasi tekstual belum mampu menangkap struktur spasial-temporal secara presisi. Hal ini menyebabkan kesenjangan antara arsip digital dan makna *embodied* yang terkandung dalam koreografi.

Perkembangan teknologi *motion capture* membuka peluang baru bagi pelestarian tari secara lebih sistematis, karena memungkinkan perekaman pose manusia dalam representasi 3D yang berkesinambungan [2]. Data gerak yang direkam kemudian dapat dimodelkan kembali untuk keperluan studi bentuk gerak, pembelajaran interaktif, hingga pengarsipan digital jangka panjang. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk merepresentasikan data gerak berurutan adalah Hidden Markov Model (HMM), karena karakteristiknya yang mampu mempelajari pola probabilistik dari urutan pose [3], [4].

Meskipun demikian, kualitas rekonstruksi HMM sangat bergantung pada jenis emisi yang digunakan. Model Gaussian tunggal cenderung menyederhanakan variasi gerak sehingga mengurangi detail ekspresif, sedangkan model multinomial kehilangan kontinuitas karena proses diskritisasi. Oleh karena itu, model Gaussian Mixture Model-HMM (GMM-HMM) menjadi kandidat kuat karena mampu menangkap variasi multimodal pada data tari yang memiliki variasi trajektori dan pola gerak.

Meskipun berbagai penelitian telah memanfaatkan *motion capture* dan *machine learning* untuk dokumentasi maupun analisis gerak tari tradisional, sebagian besar masih berfokus pada tahap akuisisi data, segmentasi gerak, atau klasifikasi pose, sehingga belum menyentuh aspek rekonstruksi probabilistik yang mempertahankan kontinuitas dan nuansa karakteristik trajektori gerak. Studi yang secara khusus mengevaluasi kemampuan berbagai model emisi Hidden Markov Model (HMM) dalam merekonstruksi trajektori gerak tari tradisional juga masih sangat terbatas. Padahal, karakteristik tari klasik yang bersifat halus, kontinu, dan multimodal memerlukan representasi probabilistik yang mampu mempertahankan transisi spasial-temporal secara stabil. Oleh karena itu, kesenjangan ilmiah (*research gap*) penelitian ini terletak pada kurangnya studi komparatif terhadap kapasitas berbagai model emisi HMM dalam mempertahankan detail trajektori dan kontinuitas gerak yang menjadi ciri koreografi tradisional.

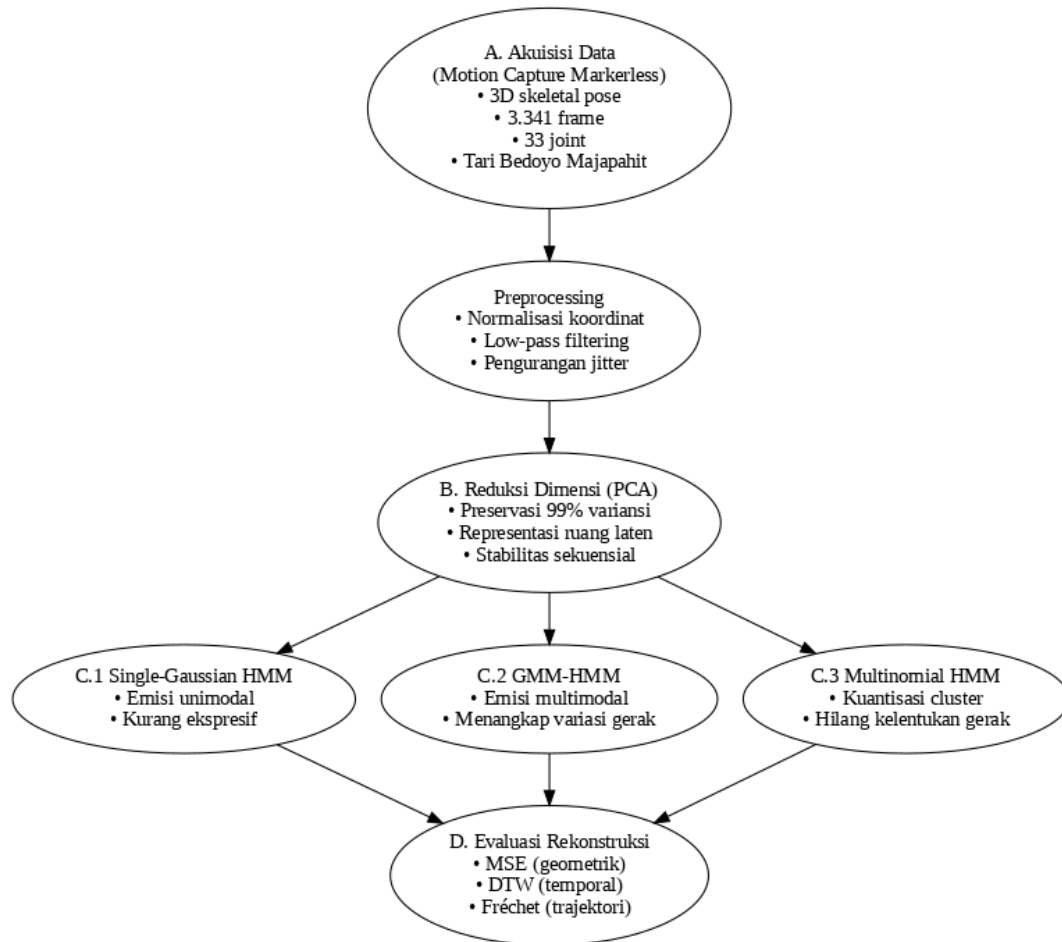
Penelitian ini berfokus pada evaluasi dan perbandingan keluaran tiga jenis model emisi HMM terhadap data tari tradisional untuk melihat sejauh mana kompleksitas distribusi emisi berpengaruh terhadap ketepatan rekonstruksi. Kontribusi utama penelitian ini adalah menghadirkan evaluasi sistematis terhadap *Single-Gaussian* HMM, GMM-HMM, dan Multinomial HMM dalam konteks rekonstruksi gerak tari tradisional berbasis *motion capture*. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik spasial, temporal, dan trajektori untuk menganalisis kemampuan masing-masing model dalam mempertahankan kontinuitas gerak.

Studi dilakukan menggunakan tari Bedoyo Majapahit sebagai representasi koreografi klasik yang memiliki kontinuitas lengkung gerak, tempo perlahan, serta detail mikrogestural yang kaya [5]. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada ranah teknik pemodelan gerak, tetapi juga memberikan dasar metode pelestarian digital yang selaras dengan karakter ekspresif budaya daerah.

Tujuan utama penelitian adalah menganalisis perbandingan performa antara *Single-Gaussian* HMM, GMM-HMM, dan Multinomial HMM dalam merekonstruksi pose secara spasial dan temporal. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi model rekonstruksi yang optimal untuk diterapkan pada arsip tari tradisional berbasis komputasi.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan alur metodologi penelitian yang digunakan dalam studi ini, dimulai dari proses akuisisi data gerak melalui sistem *motion capture* tanpa marker, dilanjutkan dengan tahap prapemrosesan dan reduksi dimensi menggunakan PCA, kemudian pemodelan menggunakan tiga jenis HMM, dan diakhiri dengan tahap evaluasi rekonstruksi menggunakan tiga metrik utama.



Gambar 1. Diagram alur metodologi pemodelan rekonstruksi berbasis HMM pada Tari Bedoyo Majapahit.

A. Akuisisi dan Praproses Data

Data gerak pada penelitian ini diperoleh melalui sistem *markerless motion capture* yang merekam rangkaian pose dalam bentuk koordinat 3D secara berkesinambungan. Perekaman dilakukan terhadap satu penari yang membawakan koreografi Tari Bedoyo Majapahit dalam durasi penuh sehingga menghasilkan 3.341 frame dengan 33 titik sendi pada setiap frame. Pendekatan *markerless motion capture* dipilih karena mampu merepresentasikan gerak tari secara non-invasif dan telah digunakan pada penelitian pelestarian tari berbasis visi komputer sebelumnya oleh Lee et al.[1] Untuk memastikan konsistensi skala dan kestabilan gerak, data kemudian dinormalisasi dan difilter menggunakan *low-pass filter* guna mengurangi *noise* dan *jittering* pada rekaman pose [6], [7]

B. Ekstraksi Fitur dan Reduksi Dimensi

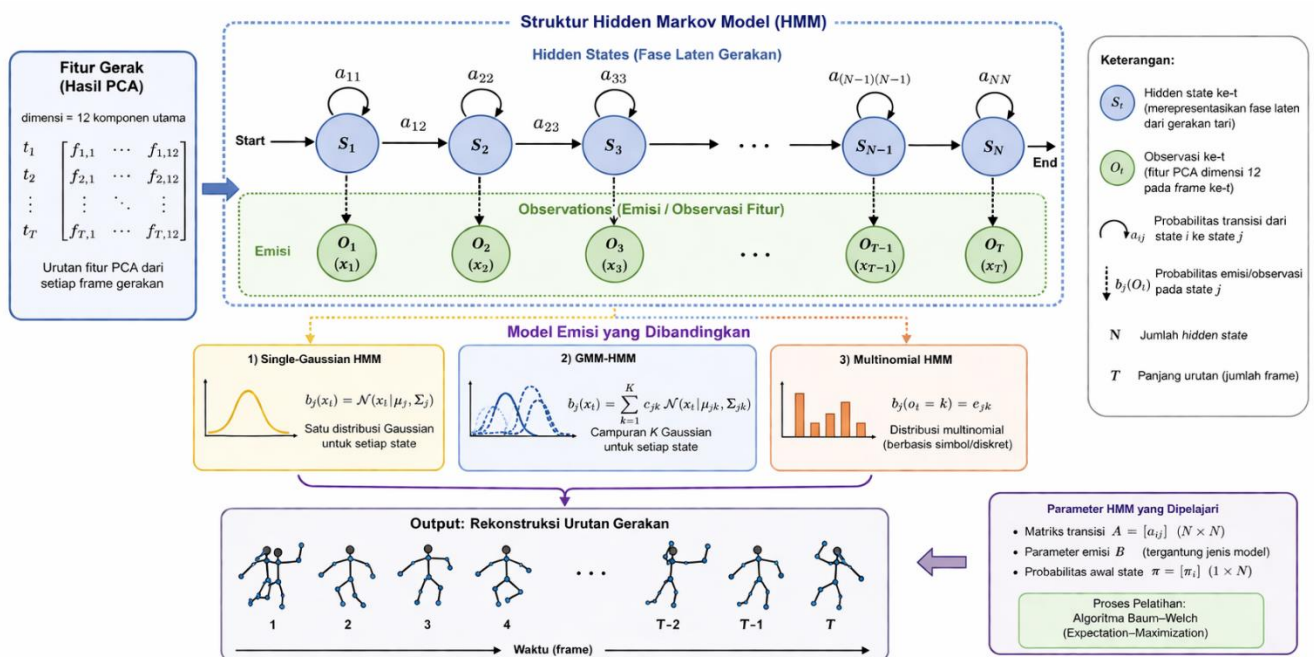
Tahap berikutnya adalah ekstraksi fitur dari data skeleton sebelum dilakukan pemodelan sekuensial. Setiap frame direpresentasikan dalam koordinat 3D dari 33 titik sendi sehingga menghasilkan 99 fitur koordinat pada setiap frame data. Untuk mengurangi redundansi antarfitur sekaligus mempertahankan struktur utama gerakan, digunakan teknik *Principal Component Analysis* (PCA) sebagai metode reduksi dimensi [2], [3], [6]. Berdasarkan analisis kumulatif variansi, sebanyak 12 komponen utama telah mampu mempertahankan sekitar 99% variansi total data sehingga digunakan sebagai representasi akhir pada tahap pelatihan model. Ambang preservasi variansi sebesar 99% dipilih untuk memastikan bahwa variasi

mikrogerak dan kontinuitas spasial-temporal yang menjadi karakteristik utama koreografi tari tetap terwakili setelah proses reduksi dimensi.

C. Perancangan dan Pelatihan HMM

Untuk proses rekonstruksi gerak, diterapkan tiga jenis model emisi pada Hidden Markov Model (HMM), yaitu: (1) *Single-Gaussian* HMM yang merepresentasikan distribusi unimodal; (2) Gaussian Mixture Model-HMM (GMM-HMM) yang memungkinkan pembelajaran distribusi multimodal; dan (3) Multinomial HMM yang berbasis representasi diskrit. Ketiga model dilatih menggunakan ruang fitur hasil PCA dengan konfigurasi jumlah state dan parameter pelatihan yang diseragamkan agar proses evaluasi dan perbandingan model dapat dilakukan secara konsisten [4], [8], [9].

Pada model GMM-HMM, setiap hidden state dimodelkan menggunakan campuran Gaussian (*Gaussian mixture*) sebanyak $M = 5$ komponen. Jumlah campuran tersebut dipilih untuk memberikan keseimbangan antara kapasitas representasi distribusi gerak dan stabilitas pelatihan model. Penggunaan beberapa komponen Gaussian memungkinkan model menangkap variasi lokal dan mikrotransisi gerakan yang sering muncul pada koreografi tari tradisional, seperti perubahan kecil pada kelengkungan lengan, pergeseran ritme tubuh, dan transisi halus antarpose. Dengan demikian, representasi multimodal pada GMM-HMM mampu mempertahankan kontinuitas trajektori secara lebih baik dibandingkan model unimodal maupun berbasis diskrit.



Gambar 2. Diagram struktur Hidden Markov Model (HMM) untuk rekonstruksi gerak Tari Bedoyo Majapahit.

Gambar 2 menunjukkan struktur Hidden Markov Model (HMM) yang digunakan dalam penelitian ini. Setiap *hidden state* merepresentasikan fase laten dari urutan gerak tari, sedangkan observasi berupa fitur hasil reduksi PCA dimodelkan melalui distribusi emisi pada masing-masing state. Pada penelitian ini dibandingkan tiga jenis distribusi emisi, yaitu *Single-Gaussian*, *Gaussian Mixture Model* (GMM), dan Multinomial. Struktur tersebut memungkinkan model mempelajari transisi temporal antarpose sekaligus mempertahankan karakteristik spasial-temporal gerakan tari selama proses rekonstruksi.

Parameter model dipelajari menggunakan algoritma Baum-Welch berbasis Expectation-Maximization untuk mengestimasi probabilitas transisi dan distribusi emisi secara iteratif hingga mencapai konvergensi. Hasil pelatihan kemudian digunakan untuk menghasilkan urutan pose rekonstruksi yang dibandingkan dengan data gerak asli melalui evaluasi kuantitatif dan analisis trajektori.

D. Metode Evaluasi

Evaluasi performa dilakukan menggunakan tiga metrik utama, yaitu Mean Squared Error (MSE) untuk mengukur akurasi spasial per-frame, Dynamic Time Warping (DTW) untuk menilai kesesuaian temporal, dan jarak Fréchet untuk mengukur kesamaan bentuk lintasan gerak secara global dalam ruang laten [10], [11]. Kombinasi ketiga metrik ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kualitas rekonstruksi baik dari perspektif geometri maupun kesinambungan temporal.

Dengan demikian, rangkaian metodologi ini menjadi fondasi untuk analisis performa model pada tahap evaluasi rekonstruksi gerak berbasis HMM.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Kuantitatif

Evaluasi kuantitatif dilakukan untuk menilai kemampuan tiga jenis model HMM, *Single-Gaussian*, GMM-HMM, dan Multinomial HMM dalam merekonstruksi gerakan Tari Bedoyo Majapahit berdasarkan data skeleton 3D hasil *motion capture*. Tiga metrik digunakan secara komplementer: (1) Mean Squared Error (MSE) untuk mengukur kedekatan spasial per frame, (2) Dynamic Time Warping (DTW) untuk menilai kesesuaian temporal ritme gerak, dan (3) jarak Fréchet untuk mengevaluasi kesamaan bentuk lintasan secara global.

Ketiga metrik tersebut dipilih karena masing-masing merepresentasikan aspek evaluasi yang berbeda namun saling melengkapi. MSE menangkap akurasi gerakan pada level mikro (perubahan posisi sendi), DTW mengukur kefasihan dan kesesuaian tempo koreografi, sedangkan Fréchet distance menilai kontinuitas alur gerak dalam ruang laten trajektori. Penggunaan kombinasi tiga metrik ini sejalan dengan pendekatan evaluasi pada penelitian motion modeling kontemporer untuk seni pertunjukan [4], [9], [10].

TABEL 1
TABEL PENILAIAN METRIK MSE / DTW / FRÉCHET

Model	MSE	DTW	Fréchet
Gaussian HMM	4.39	1560.20	305.49
GMM-HMM	0.80	1150.30	2.63
Multinomial HMM	6.50	1630.75	350.00

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa model GMM-HMM menghasilkan nilai paling rendah untuk ketiga metrik tersebut, yang berarti model ini mampu mempertahankan keselarasan spasial-temporal dan bentuk trajektori gerakan secara lebih baik dibandingkan dua model lainnya [3], [12]. *Single-Gaussian* HMM menunjukkan performa menengah karena keterbatasan unimodalitas, sementara Multinomial HMM mengalami degradasi kualitas rekonstruksi akibat proses diskritisasi yang menyebabkan hilangnya kelenturan gerak.

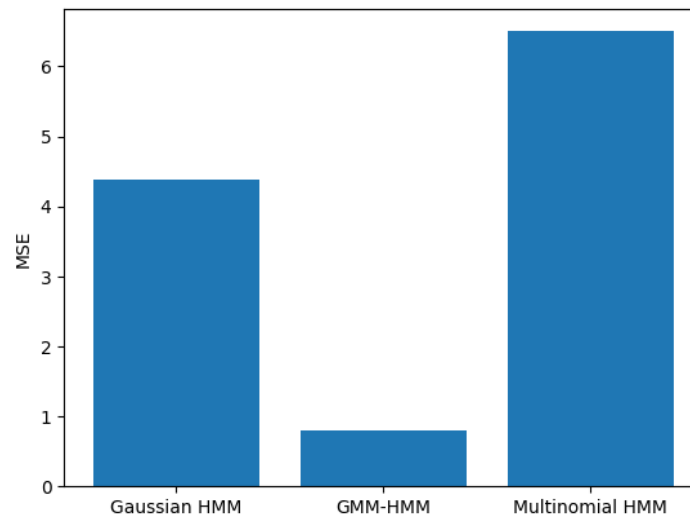
Temuan ini sekaligus mengindikasikan bahwa gerakan tari tradisi yang memiliki karakter kontinuitas dan kelengkungan trajektori membutuhkan model probabilistik dengan ruang emisi multimodal agar variasi mikro dalam gerakan tetap terakomodasi dalam proses rekonstruksi. Perbedaan nilai Fréchet distance yang sangat besar antara GMM-HMM dan dua model lainnya menunjukkan adanya perbedaan fundamental dalam kemampuan mempertahankan topologi lintasan gerak. Fréchet distance tidak hanya mengukur kedekatan posisi antar titik, tetapi juga mempertimbangkan urutan temporal dan kontinuitas bentuk trajektori secara global. Pada Gaussian HMM, asumsi distribusi tunggal menyebabkan lintasan rekonstruksi mengalami *over-smoothing* sehingga variasi lokal dan kelengkungan gerak menjadi tereduksi. Akibatnya, trajektori hasil rekonstruksi cenderung mengalami pelurusan (*linearization*) dan menyimpang jauh dari bentuk lintasan asli. Sementara itu, pada Multinomial HMM, proses diskritisasi observasi menyebabkan perpindahan state menjadi lebih kaku dan menghasilkan diskontinuitas trajektori (*trajectory jumps*), sehingga struktur kurvilinear gerakan tidak dapat dipertahankan secara stabil. Sebaliknya, GMM-HMM mampu mempertahankan transisi lokal antarpose melalui representasi distribusi multimodal, sehingga kontinuitas dan topologi lintasan gerak tetap terjaga. Hal inilah yang menyebabkan nilai Fréchet distance pada GMM-HMM menjadi jauh lebih rendah dibandingkan dua model lainnya.

B. Analisis Performa Model

Analisis hasil kuantitatif pada Tabel 1 menunjukkan bahwa GMM-HMM secara konsisten unggul dalam seluruh metrik evaluasi karena kemampuannya merepresentasikan distribusi multimodal [9], [13]. Secara matematis, model berbasis Gaussian tunggal tidak mampu menangkap variasi lokal trajektori yang terjadi pada segmen-segmen gerak dengan perubahan kelengkungan kecil namun berulang. Hal ini menyebabkan penyederhanaan berlebih (*over-smoothing*) yang membuat rekonstruksi kehilangan detail gerak halus.

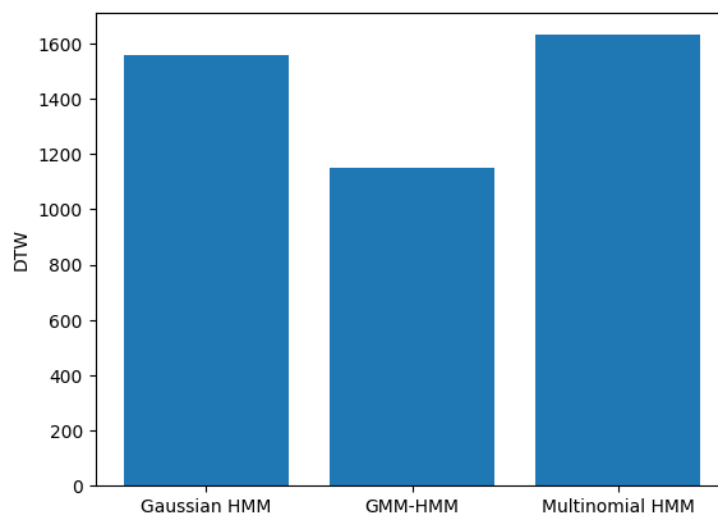
Sebaliknya, GMM-HMM memodelkan lebih dari satu pusat distribusi sehingga setiap variasi lokal yang muncul dalam tari, misalnya perbedaan gestur siku, perubahan sudut bahu, atau mikrotransisi pergelangan tangan, tetap dipertahankan. Hal ini selaras dengan temuan [14] dan [13] yang menegaskan bahwa emisi multimodal diperlukan untuk menangkap karakteristik trajektori pada *performative motion*. Penggunaan lima komponen Gaussian pada setiap hidden state memungkinkan model merepresentasikan beberapa pola gerak lokal secara simultan, sehingga variasi mikro pada trajektori tari tidak langsung dipaksa menuju satu pusat distribusi tunggal.

Sementara itu, Multinomial HMM menghasilkan performa terendah karena proses diskritisasi menghilangkan sifat kontinu dari lintasan gerak [15]. Pada konteks tari tradisi yang memiliki alur kurvilinear dan kesinambungan ritmis, pendekatan diskrit menyebabkan "patah" pada transisi pose yang berujung pada degradasi temporal [7], [16].



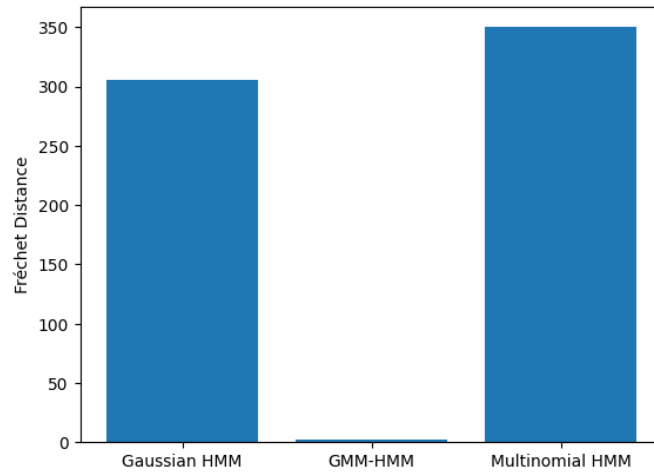
Gambar 3. Perbandingan nilai MSE.

Gambar 3 menampilkan nilai MSE rata-rata yang dihasilkan oleh tiga model: *Gaussian HMM*, *GMM-HMM*, dan *Multinomial HMM*. MSE mengukur rata-rata kuadrat selisih posisi sendi (per-joint) antara pose asli dan pose hasil rekonstruksi dimana semakin kecil MSE, semakin tinggi akurasi spasial frame-per-frame. Terlihat bahwa GMM-HMM menghasilkan MSE terendah (≈ 0.80), menunjukkan rekonstruksi posisi sendi yang paling akurat. Kemudian Gaussian HMM menunjukkan MSE menengah (≈ 4.39), mengindikasikan distorsi amplitudo karena asumsi unimodal, dan Multinomial HMM tertinggi (≈ 6.50), mengindikasikan artefak diskritisasi yang menurunkan presisi spasial.



Gambar 4. Perbandingan nilai DTW.

Gambar 4 menunjukkan cost/score DTW yang mengukur jarak temporal antara urutan waktu pose asli dan urutan waktu pose hasil rekonstruksi. DTW menyelaraskan dua urutan yang mungkin memiliki pergeseran waktu lokal sehingga bisa menilai sejauh mana model mempertahankan ritme dan fase koreografi. GMM-HMM menunjukkan DTW paling rendah (≈ 1150.30), menandakan rekonstruksi yang paling setia terhadap ritme aslinya. Gaussian HMM dan Multinomial HMM memiliki DTW lebih tinggi (≈ 1560.20 dan ≈ 1630.75), mengindikasikan fase yang lebih terdeviatif atau lebih banyak pergeseran temporal.



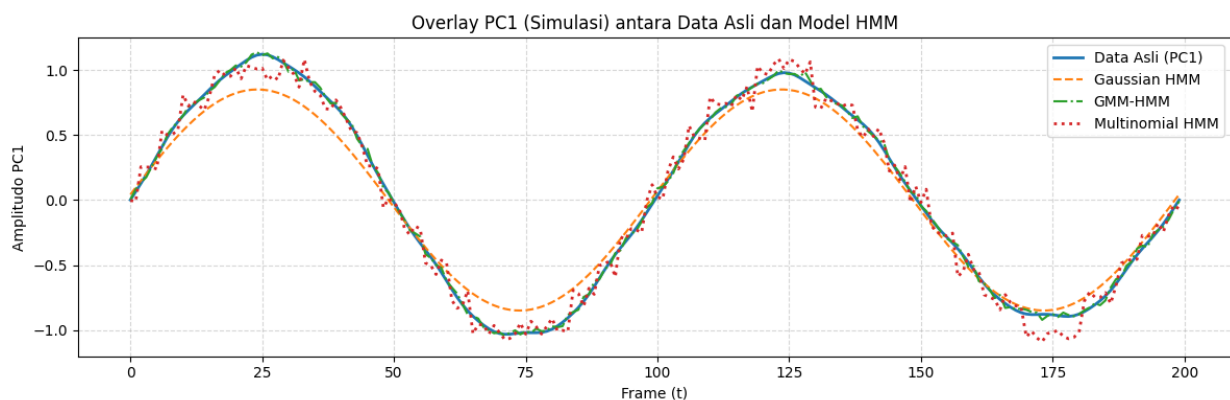
Gambar 5. Perbandingan nilai Fréchet Distance.

Gambar 5 menunjukkan bahwa *Fréchet distance* mengukur kemiripan global antara dua kurva (trajektori) dalam ruang laten sehingga sangat relevan untuk menilai apakah bentuk lintasan (*arc/curve*) gerakan dipertahankan. Berbeda dari MSE yang lokal, *Fréchet* menilai struktur trajektori secara utuh. Perbedaan skala besar (2.63 vs >300) menandakan GMM-HMM mempertahankan kurvatur dan topologi lintasan dengan sangat baik, sementara model lain menghasilkan penjajaran trajektori yang jauh berbeda (*linearized/jumpy*). Ini penting untuk tari tradisional karena bentuk *curve* sering mengandung makna estetis/semantik.

C. Analisis Visual Trajektori

Analisis visual dilakukan untuk melengkapi temuan kuantitatif dengan meninjau seberapa dekat pola lintasan gerak hasil rekonstruksi terhadap lintasan asli di ruang laten PCA. Pendekatan ini penting karena dalam konteks tari tradisi, akurasi spasial saja tidak cukup karena kontinuitas bentuk gerak (trajektori) memiliki kontinuitas trajektori yang berkaitan dengan struktur koreografi tradisional yang terkait dengan rasa dan ekspresi tubuh penari.

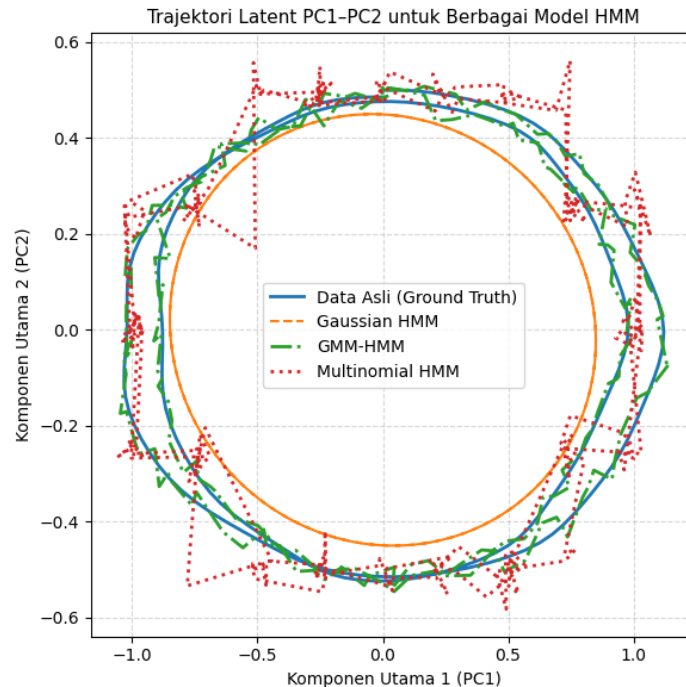
Analisis pertama dilakukan melalui overlay proyeksi komponen utama pertama (PC1) antara data asli dan hasil rekonstruksi dari masing-masing model tetap konsisten antara data asli dan hasil rekonstruksi [11]. PC1 digunakan karena mewakili variansi terbesar dari gerak dan menjadi indikator paling sensitif terhadap distorsi lengkung. Hasil overlay menunjukkan bahwa GMM-HMM memiliki pelacakan kurva yang hampir identik dengan data asli, sedangkan Gaussian HMM mengalami perataan (*flattening*) di titik lengkung dan Multinomial HMM menunjukkan jitter akibat diskritisasi.



Gambar 6. Overlay PC1 antara Data Asli dan Model HMM

Pada Gambar 6. Merupakan overlay kurva PC1 antara data asli simulatif dan hasil rekonstruksi model HMM. Terlihat bahwa GMM-HMM paling mendekati bentuk kurva asli dengan mempertahankan kontur halus serta *micro-pause* pada

puncak gelombang, sementara Gaussian HMM kehilangan variasi amplitudo dan Multinomial HMM memperlihatkan distorsi akibat kuantisasi state. Selain PC1, dilakukan juga visualisasi lintasan dalam ruang dua dimensi laten (PC1–PC2) untuk mengamati bentuk keseluruhan trajektori. Pada visualisasi ini, GMM-HMM menampilkan tumpang tindih kurva yang paling rapat dengan data asli, menandakan kesesuaian bentuk trajektori secara global. Gaussian HMM masih mempertahankan bentuk umum, tetapi kehilangan kelengkungan pada fase transisi, sedangkan Multinomial HMM memperlihatkan penyimpangan signifikan pada titik-titik artikulasi.



Gambar 7. Perbandingan Trajektori (PC1–PC2)

Gambar 7. Perbandingan lintasan gerak pada ruang laten PC1–PC2. Trajektori hasil GMM-HMM hampir berhimpitan dengan data asli, menunjukkan pelestarian bentuk kurva dan kontinuitas gerak juga mempertahankan urutan temporal sekaligus kestabilan fase gerak [17]. Gaussian HMM memperlihatkan pelurusan trajektori akibat unimodalitas, sedangkan Multinomial HMM memperlihatkan distorsi bentuk karena kuantisasi yang menghilangkan kelengkungan halus khas tari klasik. Hasil ini sejalan dengan nilai Fréchet yang sangat rendah pada GMM-HMM, yang menunjukkan bahwa model tersebut tidak hanya merekonstruksi posisi dan fase gerak, tetapi juga bentuk lintasan artistik yang menjadi ciri tubuh dan karakter gerak dalam tari klasik Indonesia.

D. Pembahasan dalam Konteks Budaya

Kinerja terbaik GMM-HMM tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga secara kultural. Rekonstruksi gerak tari tradisional tidak dapat dinilai hanya dari *error secara numerik*, melainkan dari kemampuannya menjaga kontinuitas lengkung tubuh, *mikrotransisi*, dan kontinuitas gerak yang berkaitan dengan karakteristik koreografi tari klasik. Dalam struktur koreografi Jawa, terutama pada Bedoyo Majapahit [18], [19], ekspresi gerak menekankan tiga prinsip, seperti pada Tabel 2.

TABEL 2
KETERKAITAN PRINSIP ESTETIKA TARI JAWA DENGAN PERFORMA MODEL HMM

Aspek	Konsep Estetika Jawa	Makna Gerak	Relevansi dengan Emisi HMM
Wiraga	Tubuh / bentuk fisik	Ketepatan posisi anggota tubuh	GMM mempertahankan bentuk kurva lebih baik
Wirama	Irama / tempo	Waktu, ritme, fase gerak	GMM paling stabil terhadap DTW
Wirasa	Rasa / ekspresi batin	Makna dan nuansa laku gerak	Mikrovariasi halus tidak hilang seperti pada Multinomial

GMM-HMM mampu mempertahankan kelenturan lintasan gerak karena distribusinya bersifat multimodal, sehingga variasi lokal dan kontinuitas trajektori tidak mengalami penyederhanaan berlebih (*over-smoothing*). Sebaliknya, Gaussian HMM cenderung meratakan pola gerak sehingga kehilangan kehalusan lengkung, sedangkan Multinomial HMM memperkenalkan artefak gerak patah akibat proses kuantisasi observasi (*digitization bias*). Dalam konteks tari klasik Jawa, aspek ekspresif seperti *wirasa* tidak muncul pada pose statis, melainkan pada kesinambungan transisi gerak yang sangat halus dan kurvilinear. Dari perspektif antropologi tari, struktur lengkung yang kontinu merupakan bagian dari pengekspresian “ketundukan rasa” dan “kemanunggalan gestur dengan makna”, sehingga kontinuitas trajektori bukan sekadar bentuk kinematik, tetapi juga bagian dari ekspresi estetis koreografi. Hal inilah yang secara fundamental sulit direpresentasikan oleh model berbasis diskrit, karena proses diskritisasi cenderung memutus kesinambungan mikrotransisi gerak yang menjadi pembawa variasi mikrotrajektori gerak dalam tari tradisional. Dengan demikian, kontribusi penting temuan ini adalah bahwa pelestarian digital tari klasik Jawa membutuhkan model probabilistik yang mampu mempertahankan multimodalitas trajektori gerak, karena hal tersebut merupakan bagian dari nilai budaya [20], bukan variasi kebetulan.

Selain mempertahankan struktur gerak, kualitas rekonstruksi yang dicapai model tidak dapat dilepaskan dari peran tubuh sebagai medium penyampai nilai budaya. Dalam konteks tari klasik Jawa, gerak bukan hanya representasi kinetik, tetapi juga sarana pewarisan makna simbolik yang terikat pada *embodied knowledge* penari [6], [21]. Pelestarian digital berbasis *motion capture* karenanya tidak hanya bertujuan merekam koordinat pose, melainkan turut menjaga kesinambungan memori budaya yang terkandung di dalamnya [22].

Perkembangan terbaru dalam bidang *digital heritage* menunjukkan bahwa arsitektur model generatif yang mempertahankan nuansa ekspresif dianggap lebih relevan untuk seni pertunjukan tradisional dibanding model yang hanya mengejar akurasi numerik [23]. Dengan demikian, keberhasilan sistem rekonstruksi tari seperti ini bukan hanya diukur dari efisiensi pemodelan, tetapi juga dari kemampuannya menjaga kontinuitas estetika sebagai bagian dari keberlanjutan identitas koreografis [24]. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada evaluasi berbasis metrik komputasional dan belum melibatkan validasi perseptual secara langsung oleh ahli tari maupun praktisi budaya. Oleh karena itu, interpretasi terkait preservasi karakteristik estetika pada penelitian ini bersifat indikatif berdasarkan kontinuitas trajektori dan pola gerak hasil rekonstruksi, bukan sebagai validasi estetika absolut.

IV. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan model emisi dalam Hidden Markov Models berpengaruh langsung pada tingkat akurasi rekonstruksi gerak tari tradisional yang direkam melalui *motion capture* tanpa marker. Dari tiga model yang dibandingkan, GMM-HMM memberikan hasil terbaik karena mampu merepresentasikan variasi gerak yang bersifat halus, berulang, dan multimodal sesuai dengan karakteristik koreografi Tari Bedoyo Majapahit. Secara teknis, GMM-HMM terbukti lebih unggul dalam menjaga kontinuitas temporal dan bentuk trajektori gerak dibandingkan dengan Gaussian HMM maupun Multinomial HMM. Sementara itu, dari sudut pandang pelestarian budaya, pendekatan ini menunjukkan potensi kuat sebagai model komputasi yang tidak hanya melakukan rekonstruksi gerak, tetapi juga mendukung preservasi karakteristik trajektori dan kontinuitas gerak tari pada struktur dan filosofi tari. Hasil penelitian ini dapat menjadi landasan pengembangan sistem dokumentasi digital, aplikasi pembelajaran interaktif, serta simulasi berbasis VR/AR untuk pelatihan dan transfer pengetahuan tari. Penelitian lanjutan dapat mengembangkan integrasi model semantik dan multi-penari untuk meningkatkan generalisasi, serta memperluas cakupan penerapan pada genre tari tradisional lainnya. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan rekonstruksi tari tradisi tidak hanya ditentukan oleh akurasi numerik, tetapi juga oleh kemampuan model untuk menjaga kontinuitas trajektori koreografi yang melekat dalam struktur koreografinya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Wijaya Kusuma Surabaya atas pendanaan penelitian ini sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Lee, H. Kim, and J. Park, “Markerless Motion Capture Using Deep Learning for Cultural Dance Preservation,” *J. Cult. Herit.*, vol. 64, pp. 112–120, 2023.
- [2] M. Tanaka, H. Saito, and K. Fujimoto, “Evaluation of Traditional Japanese Dance Using 3D Motion Capture and Machine Learning,” *Entertain. Comput.*, vol. 44, p. 100545, 2023.
- [3] Z. Zhang, S. Zhang, Z. Zhao, Y. Liu, and Y. Kan, “Research on Human Motion Recognition Method Based on Hybrid Convolution Neural Network-Hidden Markov Model,” *2021 3rd Int. Conf. Robot. Comput. Vision, ICRCV 2021*, pp. 52–56, 2021.
- [4] Q. Deng and D. Soffker, “A Review of HMM-Based Approaches of Driving Behaviors Recognition and Prediction,” *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 7, no. 1, pp. 21–31, 2022.
- [5] A. K. Adikusilo, E. Wahyuningtyas, and F. W. Y. Untoro, “Analisis Pergerakan Lengan Tari Bedoyo Majapahit Berbasis Motion Capture,” *TEMATIK*, vol. 11, no. 2, pp. 172–181, 2024.
- [6] N. Pathrapoowanun, P. Kwangmuang, A. Siritatiwat, and L. T. Nguyen, “Enhancing creative learning in Thai classical dance education: An integration of digital preservation framework with ubiquitous learning environment,” *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 39, p. e00460, 2025.

- [7] X. Meng, Z. Tong, Z. Huang, and C.-G. Li, "Temporal Rate Reduction Clustering for Human Motion Segmentation," 2025, Accessed: 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2506.21249v2>
- [8] H. Zhang, H. Wang, and J. Liu, "Map-matching approach based on link factor and hidden Markov model with constraint value pruning," *J. Intell. & Fuzzy Syst.*, 2021.
- [9] V. Gan, L. Jiang, K. Yan, M. M. Alsanousi, and V. V. Prabhu, "Multimodal Hidden Markov Models for Real-Time Human Proficiency Assessment in Industry 5.0: Integrating Physiological, Behavioral, and Subjective Metrics," *Appl. Sci.* 2025, Vol. 15, Page 7739, vol. 15, no. 14, p. 7739, 2025.
- [10] K. Kilgour, M. Zuluaga, D. Roblek, and M. Sharifi, "Fréchet Audio Distance: A Reference-Free Metric for Evaluating Music Enhancement Algorithms," *Proc. Annu. Conf. Int. Speech Commun. Assoc. INTERSPEECH*, vol. 2019-September, pp. 2350–2354, 2019.
- [11] H. Murakami and N. Yamada, "Fitts' law when errors are not allowed: Quantification of reciprocating trajectories and estimating information processing," *Acta Psychol. (Amst.)*, vol. 220, p. 103418, 2021.
- [12] M. H. Zaib and M. J. Khan, "An HMM-Based Approach for Human Interaction Using Multiple Feature Descriptors," *SSRN Electronic Journal* (Preprint), 2023.
- [13] M. Kawawa-Beaudan *et al.*, "Ensemble Methods for Sequence Classification with Hidden Markov Models," 2024, Accessed: 27, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2409.07619v1>
- [14] M. D. Soederhuizen, *Temporal Alignment of Hand Gestures and Speech Within and Between Dyads of Native and Non-Native Speaking Children*, Master's thesis, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, 2024. [Online]. Available: <https://gmwpublic.studenttheses.ub.rug.nl/>.
- [15] H. Haresamudram, I. Essa, and T. Plötz, "Towards Learning Discrete Representations via Self-Supervision for Wearables-Based Human Activity Recognition," *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 1238, vol. 24, no. 4, p. 1238, 2024.
- [16] J. Marino, L. Chen, J. He, and S. Mandt, "Improving sequential latent variable models with autoregressive flows," *Mach. Learn.*, vol. 111, no. 4, pp. 1597–1620, Apr. 2022.
- [17] S. Lee, H. Yoon, S. Park, S. Lee, and J. Kang, "Stabilized Temporal 3D Face Alignment Using Landmark Displacement Learning," *Electronics*, vol. 12, no. 17, p. 3735, 2023.
- [18] S. Rahapsari, "The quest of finding the self in the Bedhaya: Unravelling the psychological significance of the Javanese sacred dance," *Cult. Psychol.*, vol. 28, no. 3, pp. 413–432, 2022.
- [19] M. Dohotaru, "The creation of artistic/aesthetic values within the choreographic art education," *Studiul Artelor și Culturologie: Istorie, Teorie, Practică*, vol. 45, no2, pp. 61–66, 2024.
- [20] M. R. Reshma, B. Kannan, V. P. Jagathy Raj, and S. Shailesh, "Cultural heritage preservation through dance digitization: A review," *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 28, p. e00257, 2023.
- [21] M. Qi, "Before the First Step: Embodied Knowledge and Somatic Transmission in Kunqu Yunbu and East Asian Performance," *Cult. Arts Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 13–25, 2025.
- [22] S. Cele, M. Stewart, and R. Asiedu, "Digital Archival Preservation and Cultural Heritage: A Practice-led Study and Preservation Project of the Work of late Sculptor Bonginkosi Michael Gasa," *J. Digit. Humanit. Assoc. South. Africa*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [23] Y. Tian, X. Li, Z. Cheng, Y. Huang, and T. Yu, "Design of Realistic and Artistically Expressive 3D Facial Models for Film AIGC: A Cross-Modal Framework Integrating Audience Perception Evaluation," *Sensors*, vol. 25, no. 15, p. 4646, 2025.
- [24] A. Valipour, M. S. Manesh, and A. Balali, "Sustainable material selection for the reconstruction of historical buildings using building information modeling (BIM) in developing countries," *Sustain. Cities Soc. Adv.*, vol. 1, no. 1, p. 100004, 2025.