



Contents lists available at [Journal ELORA](#)

JRTI (Jurnal Riset Tindakan Indonesia)

ISSN: 2502-079X (Print) ISSN: 2503-1619 (Electronic)

Journal homepage: <https://jrti.eloracenter.org/jrti>



Digital human animation: evolusi penelitian, struktur pengetahuan, dan frontier teknologi berbasis scopus

Saftrian Mukhlizul Fuad*), Bayu Ramadhan Fajri
Universitas Negeri Padang

Article Info

Article history:

Received Aug 02th, 2025

Revised Aug 20th, 2025

Accepted Sep 10th, 2025

Keyword:

Digital human animation,
Analisis bibliometrik.
Virtual reality,
Motion capture

ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan memetakan evolusi, struktur intelektual, dan tema frontier riset digital human animation melalui pendekatan bibliometrik. Data diperoleh dari basis data Scopus dengan strategi Boolean search yang menggabungkan istilah digital human, virtual character, animation, motion capture, dan computer graphics, kemudian disaring berdasarkan tahun terbit (2021–2025), jenis sumber jurnal, jenis dokumen artikel, dan tahap publikasi final, sehingga diperoleh 329 artikel yang dianalisis menggunakan Biblioshiny (R Bibliometrix) dan VOSviewer. Hasil analisis menunjukkan tren produksi ilmiah yang meningkat konsisten dari 26 artikel pada 2021 menjadi 98 artikel pada 2025, dengan ACM Transactions on Graphics dan IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics sebagai jurnal paling produktif. China dan Amerika Serikat teridentifikasi sebagai negara paling produktif sekaligus pusat kolaborasi internasional. Analisis co-occurrence keyword mengungkap tiga kluster tematik utama, yaitu kluster virtual reality–animation–motion capture, kluster three dimensional computer graphics–rendering, dan kluster human–biomechanics yang berorientasi biomedis. Peta tematik (thematic map) menunjukkan bahwa virtual reality dan motion capture berperan sebagai basic theme, animation dan interactive computer graphics sebagai niche theme yang terspesialisasi, sementara human dan avatar menempati posisi motor theme. Tren topik terbaru mengindikasikan pergeseran perhatian riset ke arah 3D Gaussian splatting, 3D reconstruction, dan rendering neural sebagai frontier teknologi yang belum banyak dieksplorasi dalam jendela lima tahun terakhir. Penelitian ini berkontribusi memberikan peta jalan (roadmap) riset digital human animation yang berguna bagi peneliti, praktisi, dan pengambil kebijakan dalam merumuskan agenda riset masa depan.



© 2025The Authors.

This is an open access article under the CC BY-NC-SA license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>)

Corresponding Author:

Saftrian Mukhlizul Fuad,
Univeristas Negeri Padang
Email: saftrian@unp.ac.id

Introduction

Perkembangan teknologi computer graphics dan kecerdasan buatan telah mengubah secara fundamental cara manusia direpresentasikan dalam ruang digital. Digital human animation, sebagai bidang yang menggabungkan pemodelan tiga dimensi, motion capture, dan pembelajaran mendalam, kini menjadi tulang punggung berbagai aplikasi mulai dari industri hiburan, pendidikan, kesehatan, hingga metaverse. Fenomena ini tampak nyata dari lonjakan riset bertema avatar, virtual human, dan character animation yang secara global dipicu oleh

kematangan teknologi neural rendering, motion synthesis berbasis deep learning, dan perangkat virtual reality konsumen yang semakin terjangkau.

Pada level global, publikasi bertema digital human animation tidak lagi terbatas pada laboratorium computer graphics tradisional, melainkan telah merambah ke bidang biomekanika, human-computer interaction, hingga rehabilitasi medis. Dataset yang dianalisis dalam penelitian ini menunjukkan bahwa produksi artikel jurnal bertopik ini meningkat dari 26 artikel pada tahun 2021 menjadi 98 artikel pada tahun 2025, sebuah indikasi kuat bahwa bidang ini tengah memasuki fase pertumbuhan yang signifikan dan menarik minat komunitas ilmiah lintas disiplin.

Secara regional, penelitian digital human animation memperlihatkan pola kolaborasi yang tersentralisasi pada kawasan tertentu. Berdasarkan hasil pemetaan afiliasi penulis pada dataset ini, Tiongkok (110 dokumen) dan Amerika Serikat (66 dokumen) mendominasi produktivitas riset, diikuti oleh Inggris, Korea Selatan, dan Jerman. Pola ini mencerminkan konsentrasi sumber daya riset baik infrastruktur komputasi, laboratorium motion capture, maupun pendanaan industri kreatif dan teknologi pada negara-negara dengan ekosistem riset computer graphics dan kecerdasan buatan yang matang. Kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, secara eksplisit tidak muncul sebagai kontributor signifikan dalam pemetaan afiliasi ini, sebuah kesenjangan regional yang layak dicermati.

Fenomena nasional turut memperkuat urgensi kajian ini. Indonesia, dengan populasi digital yang besar dan industri kreatif yang berkembang pesat termasuk animasi, gim, dan konten metaverse belum menunjukkan jejak kontribusi riset yang terlihat dalam basis data Scopus untuk topik digital human animation. Ketimpangan antara potensi industri kreatif nasional dan produktivitas riset akademik pada bidang ini menegaskan perlunya pemetaan pengetahuan yang dapat menjadi rujukan strategis bagi pengembangan riset domestik.

Permasalahan penelitian yang mengemuka adalah belum tersedianya peta pengetahuan (knowledge map) yang komprehensif mengenai struktur intelektual, evolusi tematik, dan arah frontier riset digital human animation, khususnya pada jendela waktu terkini pascapandemi (2021–2025) ketika akselerasi teknologi generative AI dan neural rendering berlangsung sangat cepat. Tanpa pemetaan semacam ini, peneliti dan institusi berisiko merumuskan agenda riset yang tumpang tindih dengan tema yang sudah jenuh (basic theme) alih-alih mengarah pada celah riset yang benar-benar baru.

Berdasarkan hasil analisis awal terhadap struktur keyword dan tren topik dalam dataset, teridentifikasi bahwa sebagian besar riset masih berkuat pada tema inti seperti virtual reality, motion capture, dan animation, sementara topik yang lebih mutakhir seperti 3D Gaussian splatting, rendering neural berbasis radiance field, dan rekonstruksi tiga dimensi presisi tinggi baru mulai muncul pada tahun 2024–2025 dengan frekuensi yang masih relatif kecil. Kesenjangan riset (research gap) inilah yang menjadi titik tolak argumentasi ilmiah dalam artikel ini.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk menyediakan basis argumentasi yang objektif dan berbasis data mengenai ke mana arah riset digital human animation bergerak, tema mana yang telah matang (motor theme), tema mana yang mulai jenuh (basic theme), dan tema mana yang berpotensi menjadi frontier riset (niche/emerging theme). Pemetaan ini penting bagi perumusan kebijakan riset, penentuan prioritas pendanaan, maupun perancangan kurikulum pendidikan tinggi yang relevan dengan perkembangan teknologi digital human.

Novelty dari penelitian ini terletak pada penggunaan jendela waktu yang sangat mutakhir (2021–2025), pengintegrasian analisis co-occurrence, thematic mapping, conceptual structure map (MCA), analisis siklus hidup publikasi, dan analisis kolaborasi negara secara simultan dari satu dataset Scopus yang divalidasi ketat melalui kriteria inklusi-eksklusi eksplisit, sehingga menghasilkan gambaran yang koheren mengenai lanskap riset digital human animation kontemporer.

Berdasarkan uraian di atas, tujuan penelitian ini adalah: (1) memetakan tren dan produktivitas ilmiah riset digital human animation periode 2021–2025; (2) mengidentifikasi struktur pengetahuan dan kluster tematik melalui analisis co-occurrence dan conceptual structure map; (3) mengidentifikasi pola kolaborasi negara dan aktor dominan dalam bidang ini; serta (4) merumuskan agenda riset masa depan berdasarkan celah riset yang teridentifikasi secara empiris.

Analisis terhadap tren topik (trend topics) dan peta tematik (thematic map) yang dihasilkan dari dataset ini mengungkap beberapa kesenjangan riset yang bersifat empiris. Pertama, tema-tema seperti virtual reality, motion capture, dan animation telah menempati posisi basic theme dan motor theme dengan frekuensi kemunculan yang sangat tinggi (masing-masing 169, 76, dan 143 kemunculan pada Index Keywords), menandakan bahwa tema-tema ini telah mapan dan matang secara keilmuan.

Kedua, tema seperti 3D Gaussian splatting, rendering (computer graphics), dan 3D reconstruction yang pada peta tren topik (Gambar 9) baru muncul secara jelas pada tahun 2024–2025 masih berada pada tahap awal perkembangan dengan frekuensi kemunculan yang jauh lebih rendah dibandingkan tema inti. Hal ini konsisten dengan posisi splatting dan gaussians pada sudut kanan atas conceptual structure map (Gambar 6) yang terpisah cukup jauh dari klaster utama, mengindikasikan tema ini sebagai area riset yang secara konseptual masih spesifik dan belum terintegrasi luas dengan tema arus utama.

Ketiga, dari perspektif geografis, peta kolaborasi negara (Gambar 3) menunjukkan bahwa kontribusi riset sangat terkonsentrasi pada segelintir negara maju di Asia Timur, Amerika Utara, dan Eropa Barat, sementara kawasan Asia Tenggara termasuk Indonesia tidak teridentifikasi sebagai kontributor pada dataset ini. Kesenjangan partisipasi geografis semacam ini menjadi celah riset yang relevan untuk didorong melalui kolaborasi internasional maupun penguatan kapasitas riset domestik.

Keempat, analisis pada Words' Frequency over Time (Gambar 11) memperlihatkan bahwa istilah deep learning, meskipun tumbuh secara kumulatif, masih berada pada level keterhubungan yang jauh lebih rendah dibandingkan virtual reality dan animation. Hal ini mengindikasikan bahwa integrasi teknik-teknik deep learning generatif mutakhir ke dalam riset digital human animation khususnya untuk motion synthesis dan facial animation berbasis model generatif masih menjadi area yang terus berkembang dan belum sepenuhnya jenuh.

Novelty penelitian ini dibangun dari tiga pilar hasil bibliometrik. Pertama, penelitian ini mengidentifikasi secara eksplisit pergeseran frontier teknologi dari pendekatan animasi berbasis motion capture konvensional menuju pendekatan neural rendering dan 3D Gaussian splatting yang baru muncul pada 2024–2025, sebuah pergeseran yang belum banyak didokumentasikan dalam kajian bibliometrik sebelumnya mengingat sifatnya yang sangat mutakhir.

Kedua, integrasi model siklus hidup publikasi (life cycle analysis) dengan kurva pertumbuhan kumulatif (Gambar 12 dan 13) memberikan perspektif kuantitatif mengenai tahap pertumbuhan bidang ini yang, berdasarkan pemodelan pada dataset, menunjukkan titik puncak (peak) pertumbuhan tahunan pada estimasi tahun 2025,5 dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,901. Pendekatan pemodelan siklus hidup ini melengkapi analisis tren konvensional yang umumnya hanya bersifat deskriptif.

Ketiga, novelty juga terletak pada penggabungan analisis Three-Field Plot (Gambar 8) yang menghubungkan referensi yang disitasi (cited references), penulis (authors), dan kata kunci gabungan (merged keywords) dalam satu visualisasi, sehingga memungkinkan identifikasi fondasi teoretis-metodologis (misalnya rujukan pada metode NeRF, model difusi, dan optimisasi Adam) yang menjadi landasan bagi klaster riset animasi dan virtual reality kontemporer.

Method

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain analisis bibliometrik kuantitatif-deskriptif yang bertujuan memetakan performa ilmiah (science mapping) dan struktur intelektual (intellectual structure) suatu bidang kajian berdasarkan data metadata publikasi ilmiah. Desain ini dipilih karena kemampuannya menyajikan gambaran objektif mengenai evolusi topik, aktor dominan, dan pola kolaborasi tanpa bias subjektif peneliti.

Basis Data dan Waktu Pengambilan Data

Basis data yang digunakan adalah Scopus (Elsevier), dipilih karena cakupannya yang luas terhadap jurnal bereputasi internasional pada bidang computer science dan engineering. Data diekspor pada tanggal 13 Juli 2026 dalam format CSV lengkap dengan metadata bibliografis (judul, abstrak, penulis, afiliasi, kata kunci, sitasi, dan referensi).

Strategi Pencarian (Boolean Search)

Strategi pencarian menggunakan kombinasi Boolean berikut:

(("digital human" OR "digital human animation" OR "virtual human" OR "virtual character" OR avatar OR "digital avatar" OR humanoid) AND (animation OR "computer animation" OR "character animation" OR "human animation" OR "facial animation" OR "skeletal animation" OR "motion capture" OR mocap OR "motion synthesis" OR "human motion synthesis" OR "body animation") AND ("computer graphics" OR simulation OR rendering OR visualization OR "virtual reality" OR "augmented reality"))

Strategi pencarian ini dirancang untuk menjangkau publikasi pada irisan tiga domain konsep: (1) representasi manusia digital (digital human/avatar/virtual character), (2) teknik animasi dan pergerakan (animation/motion

capture/motion synthesis), dan (3) konteks teknologi grafis (computer graphics/rendering/virtual reality/augmented reality).

Kriteria Inklusi, Eksklusi, dan Proses Seleksi

Proses seleksi dilakukan secara bertahap sebagaimana didokumentasikan pada dokumen protokol pencarian. Pencarian awal dengan string Boolean di atas menghasilkan 3.418 dokumen. Kriteria inklusi pertama berupa pembatasan rentang tahun publikasi 2021–2025 menghasilkan 1.110 dokumen. Kriteria inklusi kedua berupa pembatasan jenis sumber (source type) jurnal menghasilkan 370 dokumen. Kriteria inklusi ketiga berupa pembatasan jenis dokumen (document type) artikel menghasilkan 337 dokumen. Kriteria inklusi keempat berupa pembatasan tahap publikasi (publication stage) final menghasilkan 329 dokumen yang menjadi dataset akhir penelitian ini.

Validasi silang terhadap file CSV hasil ekspor Scopus mengonfirmasi bahwa seluruh 329 dokumen dalam dataset final memang berstatus Document Type "Article" dan Publication Stage "Final", sehingga konsisten dengan alur seleksi yang dijelaskan pada dokumen metode. Tidak ditemukan inkonsistensi jumlah dokumen antara dokumen metode dan file CSV Scopus, sehingga hierarki sumber data mengikuti prioritas CSV Scopus sebagai rujukan utama tanpa perlu penyesuaian angka.

Tabel 1. Tahapan Seleksi Dokumen Berdasarkan Protokol PRISMA

Tahap	Kriteria	Jumlah Dokumen
Identification	Pencarian awal database Scopus dengan string Boolean (13 Juli 2026)	3.418
Screening 1	Penyaringan rentang tahun publikasi 2021–2025	1.110
Screening 2	Penyaringan jenis sumber: jurnal (journal)	370
Eligibility	Penyaringan jenis dokumen: artikel (article)	337
Included	Penyaringan tahap publikasi: final (final publication stage)	329

Diagram PRISMA di atas disusun berdasarkan informasi eksplisit yang tersedia pada dokumen protokol pencarian. Alasan pengeluaran dokumen pada setiap tahap penyaringan (misalnya alasan spesifik pengeluaran 981 dokumen non-jurnal atau 33 dokumen non-artikel) tidak dirinci lebih lanjut dalam dokumen yang tersedia, sehingga informasi tersebut tidak dapat diverifikasi berdasarkan dataset penelitian dan tidak digunakan dalam interpretasi lebih lanjut selain angka agregat pada setiap tahap.

Perangkat Lunak dan Teknik Analisis

Analisis data dilakukan menggunakan Biblioshiny (antarmuka grafis paket Bibliometrix pada R) untuk menghasilkan analisis tren publikasi, analisis sitasi, analisis sumber, analisis penulis, analisis negara, thematic map, conceptual structure map (MCA), dendrogram, tiga bidang (three-field plot), tren topik, kurva pertumbuhan kumulatif, dan model siklus hidup publikasi. Analisis co-occurrence network keyword dilakukan menggunakan VOSviewer. Kedua perangkat lunak ini merupakan alat standar dalam kajian bibliometrik Scopus Q1 dan telah banyak digunakan dalam literatur ilmiah terdahulu.

Teknik analisis bibliometrik yang diterapkan meliputi: analisis tren publikasi tahunan (publication trend analysis), analisis sitasi (citation analysis), analisis sumber (source analysis), analisis penulis (author analysis), analisis negara (country analysis), analisis co-occurrence kata kunci (keyword co-occurrence analysis), pemetaan tematik (thematic mapping), analisis struktur konseptual (conceptual structure analysis melalui Multiple Correspondence Analysis/MCA), analisis kluster hierarkis (hierarchical clustering/dendrogram), dan analisis siklus hidup publikasi (publication life-cycle analysis).

Analisis bibliographic coupling, co-citation, overlay visualization, dan density visualization tidak dapat disajikan dalam penelitian ini karena berkas visualisasi untuk jenis analisis tersebut tidak termasuk dalam dataset yang tersedia. Sesuai dengan prinsip keterverifikasian data yang mendasari metodologi penelitian ini, analisis-analisis tersebut tidak dipaksakan dan tidak disajikan hasil fiktifnya.

Prosedur Validasi Data

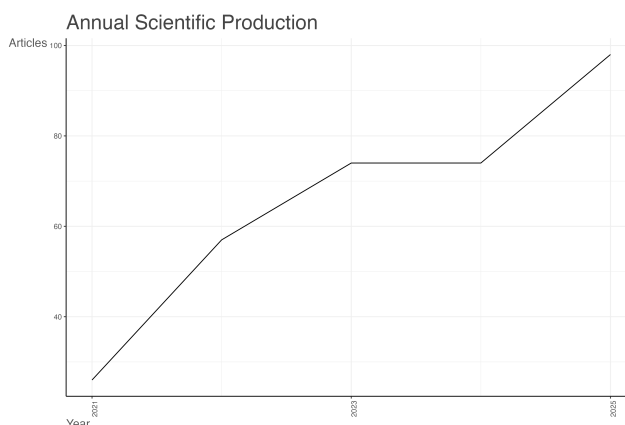
Validasi data dilakukan dengan membandingkan jumlah dokumen, rentang tahun, dan hasil filtering antara file CSV Scopus dan dokumen protokol pencarian. Sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya, kedua sumber tersebut konsisten pada angka 329 dokumen final sehingga CSV Scopus dapat digunakan sebagai sumber data utama tanpa penyesuaian. Validasi tambahan dilakukan dengan memeriksa kesesuaian pola visual (jumlah artikel per tahun, term dominan pada word cloud, dan sebaran negara) antara hasil ekstraksi langsung dari CSV dan visualisasi Biblioshiny/VOSviewer yang tersedia; seluruh pola yang diperiksa menunjukkan kesesuaian, tanpa ditemukan indikasi inkonsistensi data yang material.

Results and Discussions

Bagian ini menyajikan hasil analisis bibliometrik secara sistematis, dimulai dari analisis tren publikasi, analisis sitasi, analisis sumber dan penulis, analisis negara, hingga analisis struktur pengetahuan (co-occurrence, thematic map, conceptual structure map) dan analisis frontier riset (tren topik dan siklus hidup publikasi).

Tren Produksi Ilmiah

Gambar 1 menunjukkan tren produksi ilmiah tahunan yang meningkat secara konsisten, dari 26 artikel pada 2021 menjadi 57 artikel pada 2022, 74 artikel pada 2023 dan 2024, serta melonjak menjadi 98 artikel pada 2025. Pola pertumbuhan ini menegaskan bahwa digital human animation bukan sekadar tema riset yang stabil, melainkan bidang yang tengah berada pada fase akselerasi (growth phase) dalam siklus hidup keilmuannya.



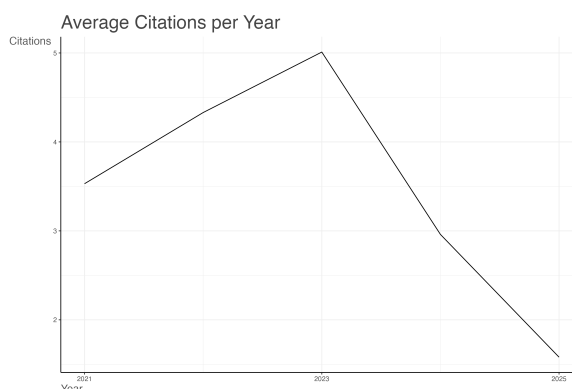
Gambar 1. Annual Scientific Production Digital Human Animation (2021–2025)

Pola pertumbuhan semacam ini konsisten dengan teori difusi inovasi (diffusion of innovation) yang menjelaskan bahwa adopsi teknologi baru dalam hal ini teknik neural rendering dan motion synthesis berbasis deep learning cenderung menunjukkan kurva pertumbuhan eksponensial pada fase awal sebelum akhirnya melandai ketika bidang mencapai kematangan. Dibandingkan dengan kajian bibliometrik pada bidang computer graphics secara umum, akselerasi pada topik spesifik digital human animation ini tergolong tajam, mengindikasikan bahwa faktor pendorong eksternal kemungkinan besar kematangan model generative AI pascatahun 2022 turut mempercepat produktivitas riset pada bidang ini.

Implikasi teoritis dari temuan ini adalah perlunya kerangka konseptual yang mengakomodasi konvergensi antara computer graphics tradisional dan kecerdasan buatan generatif sebagai dua kekuatan pendorong pertumbuhan bidang. Implikasi praktisnya, institusi riset dan pendanaan perlu mengantisipasi permintaan sumber daya komputasi (GPU, motion capture studio) yang meningkat seiring pertumbuhan jumlah publikasi.

Analisis Sitasi

Rata-rata sitasi per artikel menunjukkan pola meningkat dari sekitar 3,5 pada 2021 menuju puncak sekitar 5 pada 2023, kemudian menurun tajam menjadi sekitar 1,5 pada 2025. Pola menurun pada tahun-tahun terakhir ini merupakan fenomena umum dalam analisis sitasi (citation window effect), karena artikel yang baru terbit secara alami belum memiliki cukup waktu untuk disitasi secara luas oleh komunitas ilmiah, bukan indikasi menurunnya kualitas atau relevansi riset.



Gambar 2. Rata-Rata Sitasi per Artikel per Tahun (2021–2025)

Total sitasi kumulatif pada dataset ini tercatat sebesar 4.234 sitasi dengan rata-rata 12,87 sitasi per dokumen. Dokumen paling banyak disitasi adalah artikel berjudul "A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control" yang terbit pada jurnal Nature tahun 2023 dengan 398 sitasi, jauh melampaui dokumen lain dalam dataset. Tingginya sitasi pada artikel ini mengindikasikan daya tarik riset yang mengintegrasikan neuroteknologi (brain-computer interface) dengan kendali avatar digital, sebuah persimpangan disiplin yang relatif jarang namun berdampak besar terhadap komunitas ilmiah lintas bidang.

Perbandingan dengan dokumen berpengaruh lain seperti "AvatarCLIP: Zero-Shot Text-Driven Generation and Animation of 3D Avatars" (177 sitasi, ACM Transactions on Graphics, 2022) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis model bahasa dan visual generatif (text-to-3D) juga menjadi sumber pengaruh ilmiah yang signifikan. Implikasi teoritisnya, riset digital human animation ke depan berpotensi besar memperoleh dampak ilmiah tinggi ketika mengintegrasikan modalitas non-tradisional (sinyal neural, teks bahasa alami) ke dalam proses animasi karakter digital, bukan sekadar penyempurnaan teknik animasi murni.

Analisis Sumber (Jurnal)

Tabel 2. Sepuluh Jurnal Paling Produktif

Jurnal	Jumlah Artikel
ACM Transactions on Graphics	32
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	29
Computer Graphics Forum	16
Sensors	14
IEEE Access	13
Computer Animation and Virtual Worlds	11
Frontiers in Virtual Reality	11
Applied Sciences (Switzerland)	10
Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques	9
Computers and Graphics	8

Dataset penelitian ini mencakup 134 jurnal unik, dengan ACM Transactions on Graphics (32 artikel) dan IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (29 artikel) sebagai dua jurnal paling dominan. Dominasi kedua jurnal ini mencerminkan posisi mereka sebagai wadah publikasi utama (flagship venue) bagi riset computer graphics dan visualisasi tingkat dunia, termasuk untuk topik digital human animation.

Menariknya, kemunculan Sensors dan IEEE Access dalam sepuluh besar mengindikasikan bahwa riset digital human animation tidak lagi eksklusif milik komunitas grafis komputer, melainkan telah merambah ke komunitas sistem sensor dan rekayasa terapan, khususnya untuk aplikasi motion capture berbasis wearable sensor dan sistem rehabilitasi. Persebaran ke jurnal multidisiplin ini memperkuat argumen bahwa digital human animation merupakan bidang riset yang secara struktural bersifat interdisipliner.

Analisis Penulis

Total penulis unik yang teridentifikasi dalam dataset berjumlah 1.290 penulis, sedangkan penulis paling produktif hanya berkontribusi pada 7 artikel dari total 329 artikel. Rasio yang rendah ini (kurang dari 3% kontribusi individual dari penulis paling produktif sekalipun) mengindikasikan bahwa bidang digital human animation belum didominasi oleh sekelompok kecil peneliti inti (invisible college), melainkan tersebar luas pada komunitas riset yang relatif terfragmentasi. Pola ini konsisten dengan karakteristik bidang yang masih berada pada fase pertumbuhan, sebagaimana ditunjukkan pada analisis tren publikasi, di mana belum terbentuk kelompok riset dominan tunggal yang mengendalikan arah keilmuan.

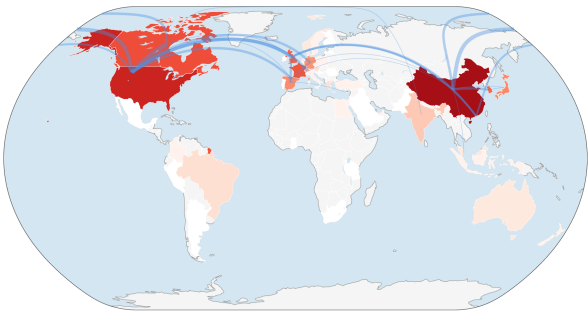
Tabel 3. Sepuluh Penulis Paling Produktif

Penulis	Jumlah Artikel
Liu Y.	7
Zhang Y.	7
Wang X.	7
Liu C.	7
Zhang J.	7
Ye Y.	6
Zhang Z.	6
Kim J.	6
Yu J.	6
Li Y.	6

Total penulis unik yang teridentifikasi dalam dataset berjumlah 1.290 penulis, sedangkan penulis paling produktif hanya berkontribusi pada 7 artikel dari total 329 artikel. Rasio yang rendah ini (kurang dari 3% kontribusi individual dari penulis paling produktif sekalipun) mengindikasikan bahwa bidang digital human animation belum didominasi oleh sekelompok kecil peneliti inti (invisible college), melainkan tersebar luas pada komunitas riset yang relatif terfragmentasi. Pola ini konsisten dengan karakteristik bidang yang masih berada pada fase pertumbuhan, sebagaimana ditunjukkan pada analisis tren publikasi, di mana belum terbentuk kelompok riset dominan tunggal yang mengendalikan arah keilmuan.

Analisis Negara dan Kolaborasi Internasional

Gambar 3 dan tabel di atas secara konsisten menunjukkan bahwa China dan Amerika Serikat merupakan dua kekuatan utama (dominant countries) dalam produktivitas riset digital human animation, ditandai dengan intensitas warna merah tua pada choropleth map yang merepresentasikan volume dokumen tertinggi. Inggris, Korea Selatan, dan Jerman menempati posisi negara berkembang (developing countries) dalam konteks bidang ini, dengan produktivitas yang cukup signifikan namun belum menyamai dua negara teratas.



Gambar 3. Peta Sebaran dan Kolaborasi Negara dalam Riset Digital Human Animation

Tabel 4. Sepuluh Negara Paling Produktif Berdasarkan Afiliasi Penulis

Negara	Jumlah Dokumen (Kemunculan Afiliasi)
China	110
United States	66
United Kingdom	28
South Korea	28
Germany	26
Switzerland	20
France	17
Canada	16
Spain	11
Japan	10

Garis kolaborasi (collaboration arcs) pada peta menunjukkan intensitas hubungan riset lintas negara yang paling menonjol antara Amerika Serikat dengan kawasan Eropa Barat (Inggris, Spanyol) dan antara Tiongkok dengan Jepang serta Amerika Serikat, mengindikasikan bahwa Amerika Serikat dan Tiongkok berfungsi sekaligus sebagai pusat kolaborasi (collaboration hub) bagi jejaring riset global pada bidang ini. Adapun angka pasti Total Link Strength (TLS) antarnegara tidak dapat diverifikasi secara numerik dari berkas visualisasi peta yang tersedia, sehingga interpretasi dibatasi pada pola visual ketebalan garis kolaborasi tanpa mengklaim nilai TLS spesifik, sesuai dengan prinsip keterverifikasian data yang dianut penelitian ini.

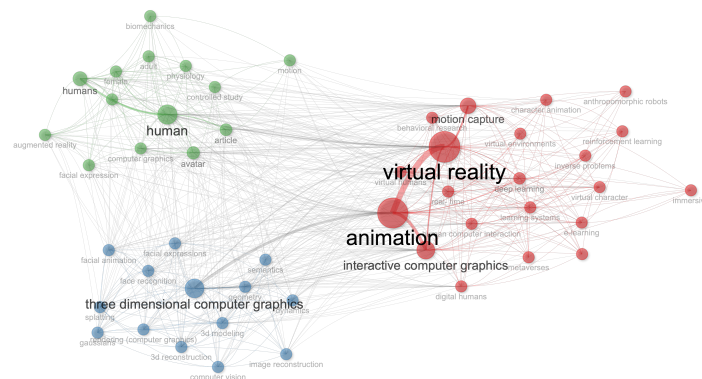
Ditinjau dari perspektif kesenjangan geografis, kawasan Asia Tenggara termasuk Indonesia tidak tampak dalam choropleth map sebagai kontributor riset yang teridentifikasi pada dataset ini. Fenomena negara dengan produktivitas tinggi namun sitasi rendah tidak dapat dipastikan pada level negara dari dataset yang tersedia karena data sitasi pada level agregasi negara tidak diekstraksi secara terpisah dalam berkas yang tersedia, sehingga informasi tersebut tidak digunakan dalam interpretasi lebih lanjut.

Implikasi teoritis dari pola ini adalah bahwa perkembangan riset digital human animation sangat dipengaruhi oleh sentralitas ekosistem inovasi teknologi (silicon-valley-style innovation hubs di Amerika Serikat dan basis manufaktur-teknologi di Tiongkok). Implikasi praktisnya, negara berkembang seperti Indonesia perlu

mendorong skema kolaborasi riset internasional dengan negara-negara pusat (core countries) tersebut untuk mempercepat transfer pengetahuan dan kapasitas riset domestik pada bidang digital human animation.

Analisis Kata Kunci: Co-occurrence Network

Analisis co-occurrence network pada Gambar 4 mengidentifikasi tiga kluster tematik utama yang ditandai dengan warna berbeda. Kluster merah, yang merupakan kluster terbesar dan paling padat, berpusat pada node virtual reality, animation, dan motion capture, serta terhubung erat dengan interactive computer graphics, character animation, deep learning, dan learning systems. Kluster ini merepresentasikan inti keilmuan (core cluster) bidang digital human animation kontemporer, di mana teknik animasi konvensional mulai berpadu dengan pendekatan pembelajaran mendalam.



Gambar 4. Jaringan Co-occurrence Kata Kunci (VOSviewer)

Kluster hijau berpusat pada node human dan humans, terhubung dengan istilah-istilah yang berorientasi biomedis seperti biomechanics, physiology, controlled study, dan facial expression. Kluster ini mengindikasikan adanya subkomunitas riset yang menempatkan digital human animation dalam konteks studi biomekanik dan fisiologis manusia, kemungkinan besar untuk kepentingan validasi realisme pergerakan avatar terhadap pergerakan manusia asli.

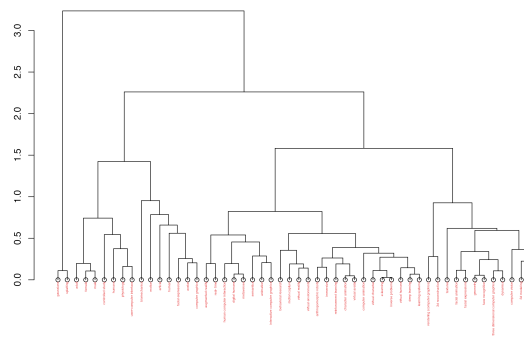
Kluster biru berpusat pada node three dimensional computer graphics, dengan keterhubungan pada rendering (computer graphics), 3d modeling, 3d reconstruction, gaussians, dan splatting. Kluster ini merepresentasikan sisi teknis-komputasional dari bidang ini, yaitu teknik-teknik representasi dan rendering geometri tiga dimensi yang mendasari proses animasi digital human.

Jumlah node, jumlah link, dan nilai Total Link Strength secara pasti tidak dapat diverifikasi dari berkas gambar VOSviewer yang tersedia karena data numerik pendukung (file network data VOSviewer) tidak turut diunggah; oleh karena itu interpretasi dibatasi pada pola visual kluster warna dan ukuran node sebagaimana tampak pada Gambar 4, tanpa mengklaim angka node, link, atau TLS yang spesifik.

Keterhubungan ketiga kluster ini menunjukkan bahwa digital human animation merupakan bidang riset yang secara struktural mengintegrasikan tiga dimensi keilmuan: dimensi interaktif-perilaku (kluster merah), dimensi biomedis-fisiologis (kluster hijau), dan dimensi teknis-komputasional (kluster biru). Implikasi teoritisnya, kerangka konseptual riset digital human animation ke depan perlu mengakomodasi sifat multidimensi ini, bukan memandangnya semata sebagai cabang dari computer graphics.

Analisis Hierarkis (Dendrogram)

Dendrogram pada Gambar 5 memperkuat temuan co-occurrence network dengan menunjukkan struktur hierarkis pengelompokan kata kunci. Pada tingkat pemisahan tertinggi, dataset terbagi menjadi dua percabangan utama: cabang kiri yang didominasi istilah biomedis-deskriptif (adult, female, male, humans, physiology, biomechanics) dan cabang kanan yang mencakup istilah teknis-aplikatif (virtual reality, animation, motion capture, deep learning) beserta istilah rendering tiga dimensi (three dimensional computer graphics, textures, computer vision).

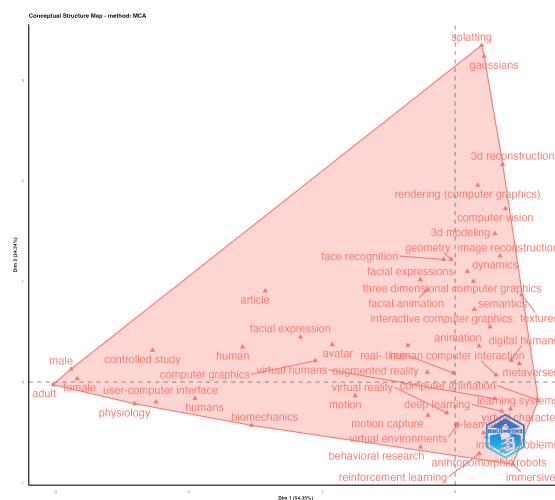


Gambar 5. Dendrogram Klaster Hierarkis Kata Kunci

Pada level pemisahan yang lebih rendah, subklaster seperti splatting-gaussians dan 3d reconstruction-3d modeling tampak menyatu pada jarak yang relatif dekat, mengindikasikan bahwa istilah-istilah tersebut cenderung muncul bersamaan dalam artikel yang sama, sebuah pola yang konsisten dengan tren kemunculan teknik 3D Gaussian splatting sebagai teknik rendering baru yang erat kaitannya dengan rekonstruksi tiga dimensi presisi tinggi.

Conceptual Structure Map (MCA)

Peta struktur konseptual melalui Multiple Correspondence Analysis (Gambar 6) menjelaskan variansi sebesar 54,35% pada dimensi pertama dan 24,34% pada dimensi kedua, sehingga kedua dimensi ini secara kumulatif menjelaskan sekitar 78,69% variansi keseluruhan struktur konseptual dataset. Sebaran istilah menunjukkan bahwa splatting dan gaussians terletak paling jauh di sudut kanan atas peta, terpisah signifikan dari kluster utama yang berisi istilah seperti human, virtual reality, animation, dan avatar di bagian tengah-bawah peta.

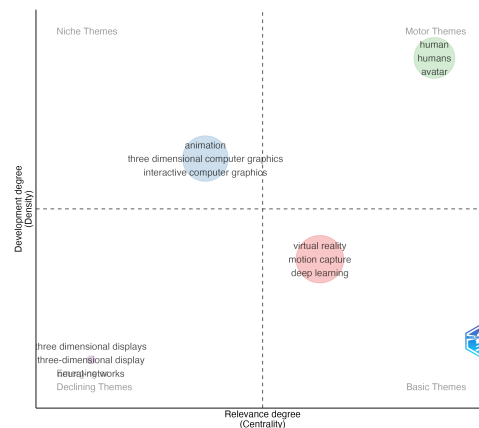


Gambar 6. Conceptual Structure Map Berbasis Multiple Correspondence Analysis (MCA)

Posisi splatting dan gaussians yang terisolasi ini secara konseptual menegaskan bahwa 3D Gaussian splatting merupakan pendekatan teknis yang relatif baru dan belum terintegrasi erat dengan wacana keilmuan arus utama bidang digital human animation, sehingga secara empiris dapat dikategorikan sebagai frontier riset yang masih dalam tahap awal konsolidasi konseptual.

Thematic Map

Thematic map pada Gambar 7 memetakan tema riset ke dalam empat kuadran berdasarkan derajat sentralitas (relevance) dan derajat kepadatan (development degree). Kluster human-humans-avtar menempati kuadran motor themes (kanan atas), menandakan tema ini memiliki sentralitas dan kepadatan pengembangan yang tinggi sekaligus posisi yang mencerminkan tema inti yang matang dan berpengaruh besar terhadap struktur keilmuan bidang ini secara keseluruhan.



Gambar 7. Thematic Map: Kuadran Motor Themes, Niche Themes, Basic Themes, dan Declining Themes

Klaster virtual reality–motion capture–deep learning menempati kuadran basic themes (kanan bawah), yaitu tema dengan sentralitas tinggi namun kepadatan pengembangan internal yang relatif moderat, mengindikasikan bahwa tema ini bersifat transversal dan menjadi rujukan umum bagi banyak subtema lain tanpa membentuk klaster yang sangat terspesialisasi.

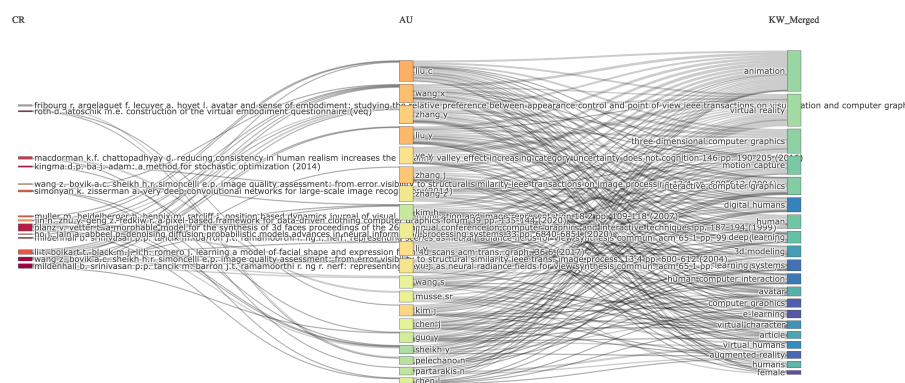
Klaster animation—three dimensional computer graphics—interactive computer graphics menempati kuadran niche themes (kiri atas), yaitu tema dengan kepadatan pengembangan tinggi namun sentralitas yang lebih rendah dibandingkan klaster basic themes. Posisi ini mengindikasikan bahwa tema animasi dan grafis komputer interaktif telah berkembang menjadi subbidang yang matang secara internal namun cenderung terspesialisasi dan kurang terhubung luas dengan tema-tema lain di luar klasternya.

Klaster three dimensional displays, three-dimensional display, dan neural networks menempati kuadran declining themes (kiri bawah) dengan sentralitas dan kepadatan yang sama-sama rendah, mengindikasikan tema ini kurang mendapat perhatian riset yang signifikan pada jendela waktu 2021–2025 dibandingkan tema-tema lain dalam dataset.

Implikasi teoritis dari pemetaan tematik ini adalah bahwa strategi riset ke depan sebaiknya diarahkan pada penguatan interkoneksi antara klaster niche themes (animasi dan grafis interaktif) dengan klaster motor themes (representasi manusia digital), mengingat kedua klaster ini secara konseptual saling melengkapi namun belum sepenuhnya terintegrasi berdasarkan posisi kuadrannya yang terpisah.

Three-Field Plot: Keterhubungan Referensi, Penulis, dan Tema

Visualisasi three-field plot pada Gambar 8 menghubungkan tiga elemen bibliometrik sekaligus: referensi yang disitasi, penulis, dan kata kunci gabungan. Pada sisi kiri, tampak bahwa referensi-referensi fondasional seperti karya mengenai Neural Radiance Fields (NeRF) untuk sintesis pandangan (Mildenhall et al.), model difusi probabilistik (Ho, Jain, dan Abbeel), metode optimisasi Adam (Kingma dan Ba), serta metode structural similarity index untuk penilaian kualitas citra (Wang, Bovik, Sheikh, dan Simoncelli) menjadi rujukan yang menghubungkan banyak penulis dan tema sekaligus.

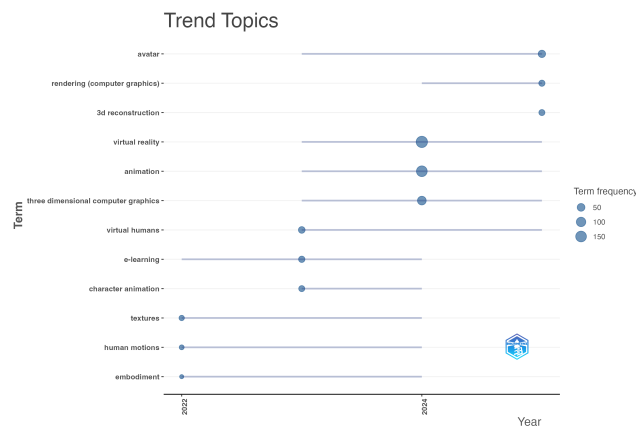


Gambar 8. Three-Field Plot: Cited References (CR) – Authors (AU) – Merged Keywords (KW)

Pola ini mengindikasikan bahwa fondasi metodologis riset digital human animation kontemporer sangat bergantung pada perkembangan teknik-teknik generative modeling dan neural rendering yang sebenarnya berasal dari komunitas riset computer vision dan machine learning yang lebih luas, bukan murni berasal dari tradisi computer graphics klasik. Penulis-penulis produktif seperti Liu C., Wang X., dan Zhang Y. tampak terhubung dengan tema animation, virtual reality, dan three dimensional computer graphics secara bersamaan, menegaskan pola penulis yang bekerja lintas subtema dalam satu payung besar digital human animation.

Tren Topik (Trend Topics)

Analisis tren topik pada Gambar 9 menyajikan istilah berdasarkan median tahun kemunculan dan frekuensi kemunculannya (ukuran bubble). Istilah embodiment, human motions, dan textures berpusat pada tahun 2022 dengan frekuensi relatif kecil, mengindikasikan tema-tema ini merupakan topik yang lebih menonjol pada awal jendela waktu penelitian. Istilah virtual reality dan animation menunjukkan bubble terbesar berpusat pada tahun 2024, menegaskan posisinya sebagai tema dominan sepanjang periode penelitian.

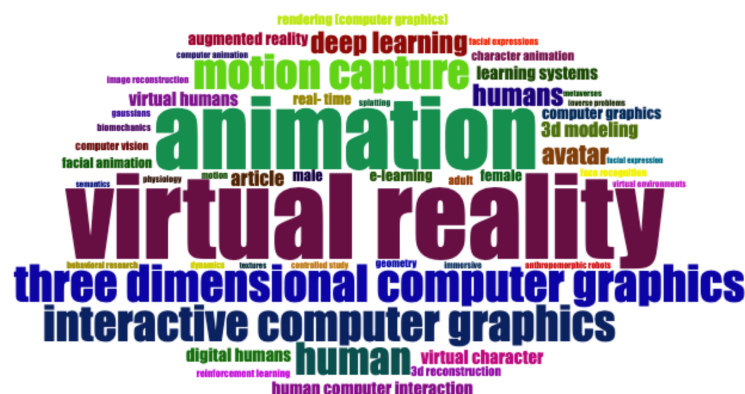


Gambar 9. Trend Topics Riset Digital Human Animation (2021–2025)

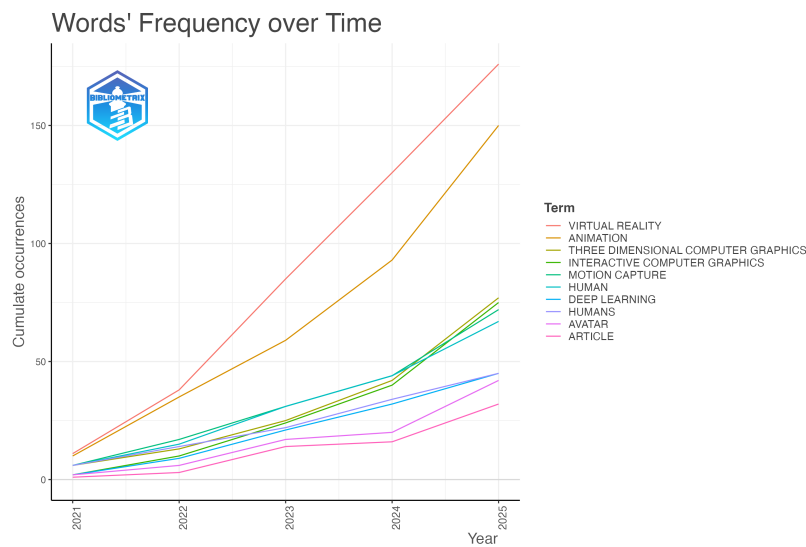
Paling relevan untuk identifikasi frontier riset adalah istilah avatar, rendering (computer graphics), dan 3d reconstruction yang median tahun kemunculannya berada paling akhir (mendekati 2025) meski dengan ukuran bubble yang bervariasi. Rendering (computer graphics) dan 3d reconstruction khususnya baru menunjukkan aktivitas signifikan mendekati akhir jendela waktu penelitian, memperkuat temuan pada conceptual structure map bahwa teknik rendering neural dan rekonstruksi tiga dimensi presisi tinggi merupakan frontier teknologi yang paling mutakhir dalam dataset ini.

Word Cloud dan Frekuensi Kata Kunci Kumulatif

Word cloud pada Gambar 10 secara visual menegaskan dominasi virtual reality, animation, motion capture, dan deep learning sebagai istilah dengan frekuensi kemunculan tertinggi dalam dataset, konsisten dengan hasil analisis Index Keywords pada tahap audit dataset. Gambar 11 memperkuat temuan ini secara kuantitatif-temporal: virtual reality mencapai lebih dari 175 kemunculan kumulatif pada 2025, diikuti animation dengan sekitar 150 kemunculan, sementara three dimensional computer graphics, interactive computer graphics, motion capture, dan human berada pada kisaran 65–75 kemunculan kumulatif.



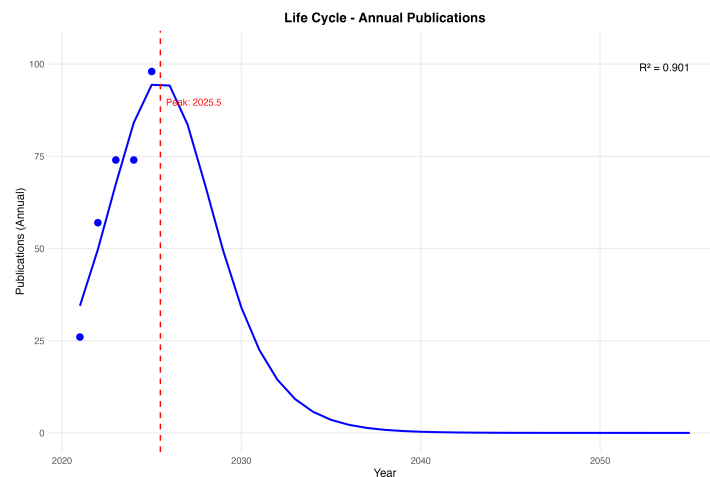
Gambar 10. Word Cloud Kata Kunci Dominan



Gambar 11. Frekuensi Kumulatif Kata Kunci Sepanjang Waktu (2021–2025)

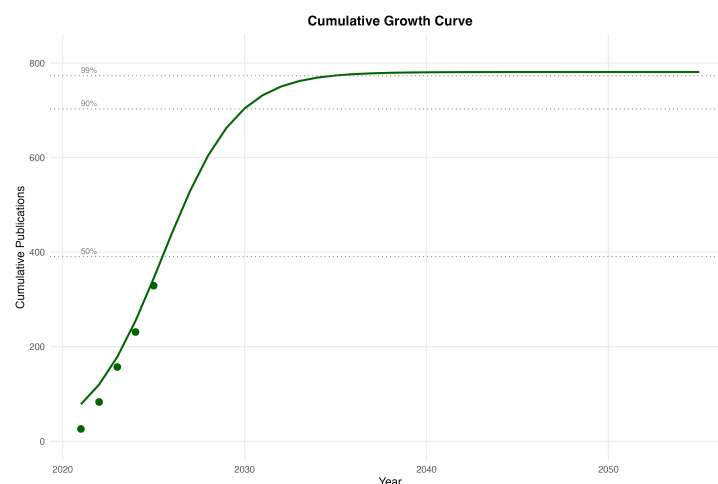
Pola pertumbuhan kumulatif yang landai pada 2021–2023 dan kemudian menajam pada 2024–2025 untuk hampir seluruh istilah utama mengindikasikan bahwa akselerasi riset digital human animation memang terjadi secara serentak pada seluruh subtema utama, bukan hanya pada satu tema tunggal, sebuah pola yang memperkuat argumen bahwa bidang ini tengah mengalami fase pertumbuhan kolektif lintas subtema.

Model Siklus Hidup dan Proyeksi Pertumbuhan Kumulatif



Gambar 12. Model Siklus Hidup (Life Cycle) Publikasi Tahunan

Model siklus hidup publikasi tahunan (Gambar 12) menghasilkan estimasi titik puncak pertumbuhan (peak) pada tahun 2025,5 dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,901, menunjukkan kesesuaian model yang tinggi terhadap data observasi 2021–2025. Perlu ditegaskan secara akademik bahwa proyeksi penurunan tajam setelah tahun 2025,5 hingga mendekati nol pada dekade 2030-an sebagaimana tergambar pada kurva merupakan hasil ekstrapolasi model matematis (kemungkinan model logistik atau model difusi Bass) yang dilatih hanya dari lima titik data tahunan (2021–2025). Proyeksi jangka panjang tersebut bersifat spekulatif secara statistik mengingat keterbatasan jumlah titik data, sehingga tidak dapat diinterpretasikan sebagai prediksi pasti bahwa riset digital human animation akan menyusut drastis pada dekade mendatang, melainkan sekadar artefak pemodelan kurva pertumbuhan berbasis data historis terbatas.



Gambar 13. Kurva Pertumbuhan Kumulatif Publikasi

Kurva pertumbuhan kumulatif (Gambar 13) menunjukkan bahwa dataset publikasi diproyeksikan mencapai 50% dari total pertumbuhan model pada rentang akhir 2020-an dan mendekati 90% pada awal 2030-an, mengikuti pola kurva-S (S-curve) yang khas pada model difusi inovasi. Sekali lagi, angka-angka proyeksi ini merupakan hasil pemodelan matematis berbasis data historis 2021–2025 dan bukan data observasi aktual untuk tahun-tahun setelah 2025, sehingga interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati sebagai indikasi arah tren, bukan sebagai kepastian angka publikasi di masa depan.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa meskipun model matematis mengindikasikan kemungkinan pelambatan pertumbuhan riset dalam jangka panjang, data aktual hingga 2025 justru menunjukkan percepatan (98 artikel, tertinggi dalam dataset), sehingga peneliti dan pengambil kebijakan sebaiknya memperlakukan estimasi puncak 2025,5 sebagai sinyal untuk memperkuat momentum riset saat ini, alih-alih sebagai indikasi bahwa bidang ini akan segera jenuh.

Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil bibliometrik dalam penelitian ini menggambarkan digital human animation sebagai bidang riset yang mengalami konvergensi tiga arus keilmuan: computer graphics klasik (rendering, 3D modeling), kecerdasan buatan generatif (deep learning, neural rendering), dan studi perilaku-fisiologis manusia (biomechanics, human-computer interaction). Konvergensi ini tercermin secara konsisten pada tiga metode analisis independen co-occurrence network, dendrogram, dan conceptual structure map yang seluruhnya menghasilkan pengelompokan tiga kluster yang serupa secara substantif meskipun menggunakan algoritma clustering yang berbeda.

Temuan mengenai dominasi Tiongkok dan Amerika Serikat sebagai negara paling produktif sejalan dengan pola umum yang banyak dilaporkan dalam kajian bibliometrik bidang teknologi tinggi lainnya, di mana kedua negara ini secara konsisten menempati posisi teratas produktivitas riset akibat investasi besar pada riset dan pengembangan kecerdasan buatan serta infrastruktur komputasi. Namun demikian, pola kolaborasi yang tergambar pada peta negara menunjukkan bahwa kolaborasi lintas negara pada bidang digital human animation masih relatif terbatas pada jejaring inti negara maju, sebuah kondisi yang berpotensi memperlambat difusi pengetahuan ke kawasan berkembang termasuk Asia Tenggara.

Pergeseran fokus riset dari motion capture konvensional menuju teknik-teknik berbasis pembelajaran mendalam yang tampak jelas dari posisi deep learning dalam kluster inti co-occurrence network dan pertumbuhan kumulatifnya yang konsisten pada Gambar 11 merefleksikan pergeseran paradigma yang lebih luas dalam bidang computer graphics, dari pendekatan berbasis aturan eksplisit (rule-based) menuju pendekatan berbasis data (data-driven). Pergeseran ini sejalan dengan tren serupa yang telah didokumentasikan secara luas dalam bidang computer vision dan natural language processing pascamunculnya arsitektur deep learning generatif.

Kemunculan 3D Gaussian splatting sebagai tema yang terisolasi secara konseptual pada conceptual structure map namun mulai menunjukkan pertumbuhan pada trend topics merupakan indikator kuat bahwa bidang ini tengah memasuki fase transisi teknologi. Teknik rendering berbasis Gaussian splatting, yang memungkinkan rekonstruksi dan rendering adegan tiga dimensi secara real-time dengan kualitas fotorealistik, berpotensi

menjadi paradigma dominan berikutnya dalam representasi digital human, menggantikan sebagian pendekatan berbasis mesh dan tekstur tradisional yang selama ini mendominasi kluster biru pada co-occurrence network.

Dari perspektif teoretis, temuan-temuan ini memperkuat argumen bahwa digital human animation tidak dapat lagi dipandang sebagai subbidang tunggal dalam computer graphics, melainkan sebagai bidang interdisipliner yang memerlukan kerangka konseptual terintegrasi yang mengakomodasi dimensi teknis (rendering, modeling), dimensi kecerdasan buatan (generative modeling, deep learning), dan dimensi humanistik-biomedis (biomechanics, embodiment, human-computer interaction) secara simultan.

Perbandingan dengan pola sitasi menunjukkan bahwa artikel-artikel berpengaruh tinggi dalam dataset ini (misalnya artikel Metzger dkk. tentang neuroprostesis untuk kendali avatar) justru berasal dari persimpangan disiplin yang tidak lazim dalam kasus ini, neuroteknologi dan animasi digital human mengindikasikan bahwa dampak ilmiah tertinggi dalam bidang ini cenderung dihasilkan oleh riset yang berani melintasi batas disiplin konvensional, bukan oleh penyempurnaan inkremental pada teknik yang sudah mapan.

Simpulan

Penelitian ini memetakan lanskap riset digital human animation periode 2021–2025 berdasarkan analisis bibliometrik terhadap 329 artikel jurnal terindeks Scopus. Hasil analisis menunjukkan tren pertumbuhan publikasi yang konsisten meningkat, dengan ACM Transactions on Graphics dan IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics sebagai jurnal paling produktif, serta Tiongkok dan Amerika Serikat sebagai negara dengan kontribusi riset tertinggi sekaligus pusat kolaborasi internasional. Struktur pengetahuan bidang ini terbagi ke dalam tiga kluster utama yang konsisten teridentifikasi melalui co-occurrence network, dendrogram, dan conceptual structure map: kluster interaktif-perilaku (virtual reality, animation, motion capture), kluster biomedis-fisiologis (human, biomechanics), dan kluster teknis-komputasional (three dimensional computer graphics, rendering). Pemetaan tematik mengungkap bahwa human–avatar berperan sebagai motor theme, virtual reality–motion capture sebagai basic theme, dan animation–interactive computer graphics sebagai niche theme yang terspesialisasi. Frontier riset yang teridentifikasi secara empiris mengarah pada teknik 3D Gaussian splatting dan rekonstruksi tiga dimensi presisi tinggi, yang mulai menunjukkan pertumbuhan signifikan pada 2024–2025 namun masih terisolasi secara konseptual dari wacana keilmuan arus utama. Temuan ini memberikan basis empiris bagi perumusan agenda riset masa depan yang lebih terarah pada integrasi teknik rendering neural generasi terbaru dengan kerangka konseptual digital human animation yang sudah mapan. Berdasarkan celah riset yang teridentifikasi, beberapa agenda penelitian masa depan dapat dirumuskan. Pertama, penelitian mendatang perlu mengeksplorasi lebih dalam integrasi teknik 3D Gaussian splatting dengan animasi karakter digital manusia secara real-time, mengingat posisi teknik ini yang masih terisolasi secara konseptual namun menunjukkan tren pertumbuhan yang meningkat. Kedua, mengingat kesenjangan kolaborasi internasional yang teridentifikasi pada analisis negara, penelitian mendatang perlu mendorong kolaborasi riset lintas kawasan, khususnya melibatkan negara-negara di Asia Tenggara yang belum terepresentasikan dalam peta kolaborasi global bidang ini. Ketiga, penelitian mendatang dapat melengkapi analisis bibliometrik ini dengan analisis bibliographic coupling dan co-citation menggunakan berkas data VOSviewer yang lebih lengkap, guna memperoleh gambaran struktur pengetahuan yang lebih komprehensif termasuk identifikasi Total Link Strength secara kuantitatif. Keempat, mengingat tingginya dampak ilmiah pada riset yang melintasi disiplin non-tradisional (misalnya neuroteknologi dan animasi avatar), penelitian mendatang perlu didorong untuk mengeksplorasi persimpangan digital human animation dengan bidang-bidang yang belum banyak terwakili dalam dataset ini, seperti neuroscience terapan dan interaksi manusia-robot berbasis representasi digital.

Referensi

- Ahuja, K., Ofek, E., Gonzalez-Franco, M., Holz, C., & Wilson, A. D. (2021). CoolMoves: User motion accentuation in virtual reality. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 5(2), Art. No. 3463499. <https://doi.org/10.1145/3463499>
- Alabau, A., Fabra, L., Martí-Testón, A., Muñoz, A., Solanes, J. E., & Gracia, L. (2024). Enriching user-visitor experiences in digital museology: Combining social and virtual interaction within a metaverse environment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(9), Art. No. 3769. <https://doi.org/10.3390/app14093769>
- Alam, M. S., Lamberton, J., Wang, J., Leannah, C., Miller, S., Palagano, J., Bastion, M. D., Smith, H. L., Malzkun, M., & Quandt, L. C. (2024). ASL champ!: A virtual reality game with deep-learning driven sign recognition. *Computers and Education: X Reality*, 4, Art. No. 100059. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2024.100059>

- Bertiche, H., Madadi, M., & Escalera, S. (2021). PBNS: Physically based neural simulation for unsupervised garment pose space deformation. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6), Art. No. 198. <https://doi.org/10.1145/3478513.3480479>
- Bharadwaj, S., Zheng, Y., Hilliges, O., Black, M. J., & Abrevaya, V. F. (2023). FLARE: Fast learning of animatable and relightable mesh avatars. *ACM Transactions on Graphics*, 42(6), Art. No. 204. <https://doi.org/10.1145/3618401>
- Bhavana, S., & Vijayalakshmi, V. (2022). AI-based metaverse technologies advancement impact on higher education learners. *WSEAS Transactions on Systems*, 21, 178–184. <https://doi.org/10.37394/23202.2022.21.19>
- Braun, P., Grafelmann, M., Gill, F., Stolz, H., Hinckeldeyn, J., & Lange, A.-K. (2022). Virtual reality for immersive multi-user firefighter training scenarios. *Virtual Reality and Intelligent Hardware*, 4(5), 406–417. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.08.006>
- Campo, A., Michalko, A., Van Kerrebroeck, B., Stajic, B., Pokric, M., & Leman, M. (2023). The assessment of presence and performance in an AR environment for motor imitation learning: A case-study on violinists. *Computers in Human Behavior*, 146, Art. No. 107810. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2023.107810>
- Cao, C., Agrawal, V., De La Torre, F., Chen, L., Saragih, J., Simon, T., & Sheikh, Y. (2021). Real-time 3D neural facial animation from binocular video. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4), Art. No. 87. <https://doi.org/10.1145/3450626.3459806>
- Casado-Elvira, A., Trinidad, M. C., & Casas, D. (2022). PERGAMO: Personalized 3D garments from monocular video. *Computer Graphics Forum*, 41(8), 293–304. <https://doi.org/10.1111/cgf.14644>
- Chen, S., Zhang, Z., Zhou, Y., Sun, W., & Min, X. (2023). A no-reference quality assessment metric for dynamic 3D digital human. *Displays*, 80, Art. No. 102540. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102540>
- Chen, X., Jiang, T., Song, J., Rietmann, M., Geiger, A., Black, M. J., & Hilliges, O. (2023). Fast-SNARF: A fast deformer for articulated neural fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(10), 11796–11809. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2023.3271569>
- Choi, J.-Y., Ha, E., Son, M., Jeon, J.-H., & Kim, J.-W. (2024). Human joint angle estimation using deep learning-based three-dimensional human pose estimation for application in a real environment. *Sensors*, 24(12), Art. No. 3823. <https://doi.org/10.3390/s24123823>
- Combe, T., Fribourg, R., Detto, L., & Norm, J.-M. (2024). Exploring the influence of virtual avatar heads in mixed reality on social presence, performance and user experience in collaborative tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(5), 2206–2216. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3372051>
- Dang, M., Noreika, D., Ryu, S., Sima, A., Ashton, H., Ondris, B., Coley, F., Nestler, J., & Fabbro, E. D. (2021). Feasibility of delivering an avatar-facilitated life review intervention for patients with cancer. *Journal of Palliative Medicine*, 24(4), 520–526. <https://doi.org/10.1089/jpm.2020.0020>
- Davis, D. Z., & Stanovsek, S. (2021). The machine as an extension of the body: When identity, immersion, and interactive design serve as both resource and limitation for the disabled. *Human-Machine Communication*, 2(1), 121–135. <https://doi.org/10.30658/hmc.2.6>
- Debarba, H. G., Chague, S., & Charbonnier, C. (2022). On the plausibility of virtual body animation features in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(4), 1880–1893. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3025175>
- Fraser, A. D., Branson, I., Hollett, R. C., Speelman, C. P., & Rogers, S. L. (2022). Expressiveness of real-time motion captured avatars influences perceived animation realism and perceived quality of social interaction in virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, Art. No. 981400. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.981400>
- Ghosh, A., Dabral, R., Golyanik, V., Theobalt, C., & Slusallek, P. (2023). IMoS: Intent-driven full-body motion synthesis for human-object interactions. *Computer Graphics Forum*, 42(2), 1–12. <https://doi.org/10.1111/cgf.14739>
- Gong, L., Chen, B., Xu, W., Liu, C., Li, X., Zhao, Z., & Zhao, L. (2022). Motion similarity evaluation between human and a tri-co robot during real-time imitation with a trajectory dynamic time warping model. *Sensors*, 22(5), Art. No. 1968. <https://doi.org/10.3390/s22051968>
- Gorisse, G., Wellenreiter, S., Fleury, S., Lecuyer, A., Richir, S., & Christmann, O. (2023). I am a genius! Influence of virtually embodying Leonardo da Vinci on creative performance. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(11), 4328–4338. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3320225>
- Higgins, D., Fribourg, R., & McDonnell, R. (2021). Remotely perceived: Investigating the influence of valence on self-perception and social experience for dyadic video-conferencing with personalized avatars. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, Art. No. 668499. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.668499>
- Hong, F., Zhang, M., Pan, L., Cai, Z., Yang, L., & Liu, Z. (2022). AvatarCLIP: Zero-shot text-driven generation and animation of 3D avatars. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), Art. No. 3530094. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530094>

- Hu, K., Haworth, B., Berseth, G., Pavlovic, V., Faloutsos, P., & Kapadia, M. (2023). Heterogeneous crowd simulation using parametric reinforcement learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(4), 2036–2052. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3139031>
- Hu, Z., Ding, Y., Wu, R., Li, L., Zhang, R., Hu, Y., Qiu, F., Zhang, Z., Wang, K., Zhao, S., Zhang, Y., Jiang, J., Xi, Y., Pu, J., Zhang, W., Wang, S., Chen, K., Zhou, T., Chen, J., Song, Y., Lv, T., & Fan, C. (2023). Deep learning applications in games: A survey from a data perspective. *Applied Intelligence*, 53(24), 31129–31164. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-05094-2>
- Karuzaki, E., Partarakis, N., Patsiouras, N., Zidianakis, E., Katzourakis, A., Pattakos, A., Kaplanidi, D., Baka, E., Cadi, N., Magnenat-Thalmann, N., Ringas, C., Tasiopoulou, E., & Zabulis, X. (2021). Realistic virtual humans for cultural heritage applications. *Heritage*, 4(4), 4148–4171. <https://doi.org/10.3390/heritage4040228>
- Keller, M., Werling, K., Shin, S., Delp, S., Pujades, S., Liu, C. K., & Black, M. J. (2023). From skin to skeleton: Towards biomechanically accurate 3D digital humans. *ACM Transactions on Graphics*, 42(6), Art. No. 253. <https://doi.org/10.1145/3618381>
- Koushik, V., & Kane, S. K. (2022). Towards augmented reality coaching for daily routines: Participatory design with individuals with cognitive disabilities and their caregivers. *International Journal of Human Computer Studies*, 165, Art. No. 102862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102862>
- Li, C., Li, W., Huang, H., & Yu, L.-F. (2022). Interactive augmented reality storytelling guided by scene semantics. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), Art. No. 3530061. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530061>
- Li, G., Meka, A., Mueller, F., Buehler, M. C., Hilliges, O., & Beeler, T. (2022). EyeNeRF: A hybrid representation for photorealistic synthesis, animation and relighting of human eyes. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), Art. No. 166. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530130>
- Li, Z., Chen, L., Liu, C., Zhang, F., Li, Z., Gao, Y., Ha, Y., Xu, C., Quan, S., & Xu, Y. (2021). Animated 3D human avatars from a single image with GAN-based texture inference. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 95, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.01.002>
- Liu, S., Lever, G., Wang, Z., Merel, J., Eslami, S. M. A., Hennes, D., Czarnecki, W. M., Tassa, Y., Omidshafiei, S., Abdolmaleki, A., Siegel, N. Y., Hasenclever, L., Marris, L., Tunyasuvunakool, S., Song, H. F., Wulfmeier, M., Muller, P., Haarnoja, T., Tracey, B., Tuyls, K., Graepel, T., & Heess, N. (2022). From motor control to team play in simulated humanoid football. *Science Robotics*, 7(69), Art. No. abo0235. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abo0235>
- Metzger, S. L., Littlejohn, K. T., Silva, A. B., Moses, D. A., Seaton, M. P., Wang, R., Dougherty, M. E., Liu, J. R., Wu, P., Berger, M. A., Zhuravleva, I., Tu-Chan, A., Ganguly, K., Anumanchipalli, G. K., & Chang, E. F. (2023). A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*, 620(7976), 1037–1046. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06443-4>
- Pan, Y., Zhang, R., Cheng, S., Tan, S., Ding, Y., Mitchell, K., & Yang, X. (2023). Emotional voice puppetry. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5), 2527–2535. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3247101>
- Panariello, D., Grazioso, S., Caporaso, T., Palomba, A., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2022). Biomechanical analysis of the upper body during overhead industrial tasks using electromyography and motion capture integrated with digital human models. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(2), 733–752. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00862-9>
- Partarakis, N., Zabulis, X., Foukarakis, M., Moutsaki, M., Zidianakis, E., Patakos, A., Adami, I., Kaplanidi, D., Ringas, C., & Tasiopoulou, E. (2022). Supporting sign language narrations in the museum. *Heritage*, 5(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/heritage5010001>
- Patotskaya, Y., Hoyet, L., Olivier, A.-H., Pettré, J., & Zibrek, K. (2023). Avoiding virtual humans in a constrained environment: Exploration of novel behavioural measures. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 110, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.01.001>
- Peng, H.-Y., Zhang, J.-P., Guo, M.-H., Cao, Y.-P., & Hu, S.-M. (2024). CharacterGen: Efficient 3D character generation from single images with multi-view pose canonicalization. *ACM Transactions on Graphics*, 43(4), Art. No. 84. <https://doi.org/10.1145/3658217>
- Ponton, J. L., Yun, H., Andujar, C., & Pelechano, N. (2022). Combining motion matching and orientation prediction to animate avatars for consumer-grade VR devices. *Computer Graphics Forum*, 41(8), 107–118. <https://doi.org/10.1111/cgf.14628>
- Ponton, J. L., Yun, H., Aristidou, A., Andujar, C., & Pelechano, N. (2023). SparsePoser: Real-time full-body motion reconstruction from sparse data. *ACM Transactions on Graphics*, 43(1), Art. No. 5. <https://doi.org/10.1145/3625264>
- Qiu, Z., Li, Y., He, D., Zhang, Q., Zhang, L., Zhang, Y., Wang, J., Xu, L., Wang, X., Zhang, Y., & Yu, J. (2022). Sculptor: Skeleton-consistent face creation using a learned parametric generator. *ACM Transactions on Graphics*, 41(6), Art. No. 213. <https://doi.org/10.1145/3550454.3555462>

- Rogers, S. L., Broadbent, R., Brown, J., Fraser, A., & Speelman, C. P. (2022). Realistic motion avatars are the future for social interaction in virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, Art. No. 750729. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.750729>
- Starke, S., Starke, P., He, N., Komura, T., & Ye, Y. (2024). Categorical codebook matching for embodied character controllers. *ACM Transactions on Graphics*, 43(4), Art. No. 142. <https://doi.org/10.1145/3658209>
- Stefanidi, E., Partarakis, N., Zabulis, X., Adami, I., Ntoa, S., & Papagiannakis, G. (2022). Transferring traditional crafts from the physical to the virtual world: An authoring and visualization method and platform. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(2), Art. No. 35. <https://doi.org/10.1145/3484397>
- Tessler, C., Guo, Y., Nabati, O., Chechik, G., & Peng, X. B. (2024). MaskedMimic: Unified physics-based character control through masked motion inpainting. *ACM Transactions on Graphics*, 43(6), Art. No. 209. <https://doi.org/10.1145/3687951>
- Vilchis, C., Perez-Guerrero, C., Mendez-Ruiz, M., & Gonzalez-Mendoza, M. (2023). A survey on the pipeline evolution of facial capture and tracking for digital humans. *Multimedia Systems*, 29(4), 1917–1940. <https://doi.org/10.1007/s00530-023-01081-2>
- Xiang, D., Bagautdinov, T., Stuyck, T., Prada, F., Romero, J., Xu, W., Saito, S., Guo, J., Smith, B., Shiratori, T., Sheikh, Y., Hodgins, J., & Wu, C. (2022). Dressing avatars. *ACM Transactions on Graphics*, 41(6), Art. No. 222. <https://doi.org/10.1145/3550454.3555456>
- Xiang, D., Prada, F., Bagautdinov, T., Xu, W., Dong, Y., Wen, H., Hodgins, J., & Wu, C. (2021). Modeling clothing as a separate layer for an animatable human avatar. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6), Art. No. 199. <https://doi.org/10.1145/3478513.3480545>
- Yang, L., Kim, B., Zoss, G., Gözcü, B., Gross, M., & Solenthaler, B. (2022). Implicit neural representation for physics-driven actuated soft bodies. *ACM Transactions on Graphics*, 41(4), Art. No. 3530156. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530156>
- Ye, Y., Liu, L., Hu, L., & Xia, S. (2022). Neural3Points: Learning to generate physically realistic full-body motion for virtual reality users. *Computer Graphics Forum*, 41(8), 183–194. <https://doi.org/10.1111/cgf.14634>
- Zhang, J., Chen, K., & Zheng, J. (2022). Facial expression retargeting from human to avatar made easy. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(2), 1274–1287. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3013876>
- Zhang, L., Qiu, Q., Lin, H., Zhang, Q., Shi, C., Yang, W., Shi, Y., Yang, S., Xu, L., & Yu, J. (2023). DreamFace: Progressive generation of animatable 3D faces under text guidance. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), Art. No. 138. <https://doi.org/10.1145/3592094>
- Zhang, L., Zeng, C., Zhang, Q., Lin, H., Cao, R., Yang, W., Xu, L., & Yu, J. (2022). Video-driven neural physically-based facial asset for production. *ACM Transactions on Graphics*, 41(6), Art. No. 208. <https://doi.org/10.1145/3550454.3555445>
- Zhang, M., Wang, T. Y., Ceylan, D., & Mitra, N. J. (2021). Dynamic neural garments. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6), Art. No. 3480497. <https://doi.org/10.1145/3478513.3480497>
- Zhang, Z., Ji, Y., Tang, D., Chen, J., & Liu, C. (2024). Enabling collaborative assembly between humans and robots using a digital twin system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 86, Art. No. 102691. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102691>
- Zhang, Z., Wu, Y., Pan, Z., Li, W., & Su, Z. (2022). A novel animation authoring framework for the virtual teacher performing experiment in mixed reality. *Computer Applications in Engineering Education*, 30(2), 550–563. <https://doi.org/10.1002/cae.22472>
- Zhao, X., Wang, L., Sun, J., Zhang, H., Suo, J., & Liu, Y. (2023). HAvatar: High-fidelity head avatar via facial model conditioned neural radiance field. *ACM Transactions on Graphics*, 43(1), Art. No. 6. <https://doi.org/10.1145/3626316>
- Zheng, Z., Zhao, X., Zhang, H., Liu, B., & Liu, Y. (2023). AvatarReX: Real-time expressive full-body avatars. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), Art. No. 158. <https://doi.org/10.1145/3592101>
- Zhou, K., Cai, R., Ma, Y., Tan, Q., Wang, X., Li, J., Shum, H. P. H., Li, F. W. B., Jin, S., & Liang, X. (2023). A video-based augmented reality system for human-in-the-loop muscle strength assessment of juvenile dermatomyositis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5), 2456–2466. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3247092>