



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>



## Keterkaitan tema dan struktur intelektual penelitian computer graphics dan animasi digital

Saftrian Mukhlizul Fuad<sup>\*</sup>, Bayu Ramadhan Fajri  
Universitas Negeri Padang

### Article Info

#### Article history:

Received Jul 12<sup>th</sup>, 2025  
Revised Aug 20<sup>th</sup>, 2025  
Accepted Sep 28<sup>th</sup>, 2025

#### Keyword:

Computer graphics,  
Animasi digital,  
Analisis bibliometrik,  
Struktur intelektual

### ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan memetakan struktur intelektual penelitian global pada bidang computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025 melalui pendekatan bibliometrik. Data diperoleh dari database Scopus menggunakan strategi Boolean Search yang menggabungkan istilah computer graphics, animasi digital, dan visualisasi/simulasi, menghasilkan 552 artikel jurnal berstatus final setelah melalui proses seleksi bertahap mengikuti alur PRISMA. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Biblioshiny (Bibliometrix) dan VOSviewer meliputi analisis tren publikasi, analisis sitasi, analisis co-occurrence kata kunci, analisis kolaborasi negara, analisis tiga bidang (three-field plot), dan pemodelan siklus hidup topik. Hasil penelitian menunjukkan pertumbuhan produksi ilmiah tahunan yang konsisten meningkat dari 50 artikel pada 2021 menjadi 182 artikel pada 2025, dengan Tiongkok dan Amerika Serikat sebagai negara paling produktif sekaligus pusat kolaborasi internasional. Analisis co-occurrence kata kunci mengungkap empat kluster tematik utama, yaitu animasi tiga dimensi dan interaktif, representasi manusia digital dan virtual reality, rekonstruksi wajah tiga dimensi, serta visualisasi dan tampilan tiga dimensi. Pemodelan siklus hidup publikasi mengindikasikan bidang ini berada pada fase pertumbuhan menuju puncak kematangan dengan proyeksi puncak produksi tahunan di sekitar tahun 2031. Penelitian ini berkontribusi memberikan peta jalan intelektual yang dapat menjadi rujukan bagi peneliti, pengembang teknologi, dan pengambil kebijakan riset dalam merumuskan agenda penelitian computer graphics dan animasi digital ke depan, sekaligus mengidentifikasi celah penelitian pada integrasi etika kecerdasan buatan generatif dengan animasi digital yang masih jarang dieksplorasi.



© 2025 The 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,  
Universitas Negeri Padang  
Email: [saftrian@unp.ac.id](mailto:saftrian@unp.ac.id)

## Pendahuluan

Computer graphics dan animasi digital telah bertransformasi dari sekadar teknik visualisasi pendukung menjadi tulang punggung berbagai ekosistem teknologi kontemporer, mulai dari industri hiburan, kesehatan digital, pendidikan berbasis simulasi, hingga metaverse dan digital twin. Kemajuan pesat pada arsitektur pembelajaran mendalam, khususnya generative adversarial network, neural radiance fields, dan model difusi, telah mengubah cara manusia menghasilkan representasi visual tiga dimensi yang fotorealistik maupun karakter animasi yang dapat berinteraksi secara alami dengan penggunaannya. Fenomena global ini terlihat jelas pada meningkatnya kebutuhan akan avatar digital, digital human, dan talking-head synthesis yang mendukung telepresence, layanan pelanggan virtual, dan produksi konten kreatif berskala industri.

Pada level regional, kawasan Asia Timur, Amerika Utara, dan Eropa Barat menjadi episentrum pengembangan riset computer graphics dan animasi digital, didorong oleh keberadaan laboratorium riset industri teknologi besar serta program studi ilmu komputer dan desain digital yang mapan. Ekosistem riset di kawasan tersebut memfasilitasi kolaborasi lintas institusi yang intensif dalam pengembangan metode pemodelan wajah tiga dimensi, sinkronisasi audio-visual, motion capture, serta simulasi berbasis fisika untuk pakaian dan tubuh virtual. Sementara itu, pada level nasional, khususnya di negara-negara berkembang, riset computer graphics dan animasi digital masih relatif terfragmentasi dan belum banyak terhubung ke jaringan kolaborasi global yang menjadi pusat produktivitas serta sitasi tertinggi, sebagaimana teridentifikasi dari analisis kolaborasi negara pada penelitian ini.

Permasalahan penelitian muncul dari kesenjangan antara pesatnya pertumbuhan kuantitas publikasi pada bidang computer graphics dan animasi digital dengan masih terbatasnya pemetaan struktur intelektual yang menyeluruh mengenai bagaimana tema-tema penelitian tersebut saling terhubung, berevolusi, dan membentuk klaster pengetahuan yang koheren. Sebagian besar tinjauan literatur pada bidang ini bersifat naratif dan berfokus pada subtopik teknis tertentu, seperti sintesis wajah berbicara atau rekonstruksi tubuh manusia tiga dimensi, sehingga belum memberikan gambaran holistik mengenai arah perkembangan keilmuan secara kuantitatif dan terverifikasi berdasarkan data bibliometrik berskala besar.

Research gap yang teridentifikasi dari kajian awal terhadap literatur dan data bibliometrik menunjukkan bahwa analisis terhadap evolusi tematik computer graphics dan animasi digital secara terintegrasi antara analisis co-occurrence kata kunci, analisis kolaborasi negara, dan pemodelan siklus hidup publikasi masih jarang dilakukan secara simultan dalam satu kerangka studi. Banyak kajian bibliometrik terdahulu pada rumpun ilmu komputer cenderung berhenti pada pemetaan tren tahunan tanpa menghubungkannya dengan proyeksi siklus hidup topik maupun struktur jaringan konseptual yang mendasari perkembangan bidang tersebut.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak bagi peneliti, pengembang teknologi, dan pengambil kebijakan riset untuk memiliki peta jalan intelektual yang objektif dan berbasis bukti empiris mengenai arah perkembangan computer graphics dan animasi digital. Peta tersebut penting sebagai dasar perumusan prioritas pendanaan riset, pengembangan kurikulum pendidikan teknologi digital, serta strategi kolaborasi internasional yang lebih terarah, terutama bagi institusi pada negara yang belum menjadi pusat produktivitas ilmiah pada bidang ini.

Novelty penelitian ini terletak pada integrasi analisis bibliometrik multidimensi, yang mencakup analisis tren publikasi dan sitasi, analisis co-occurrence kata kunci untuk pemetaan tematik, analisis kolaborasi negara, analisis tiga bidang yang menghubungkan referensi, penulis, dan kata kunci, serta pemodelan siklus hidup publikasi untuk memproyeksikan fase perkembangan bidang computer graphics dan animasi digital ke depan. Integrasi tersebut menghasilkan gambaran struktur intelektual yang lebih komprehensif dibandingkan kajian bibliometrik parsial yang selama ini banyak ditemukan pada literatur sejenis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan tren dan produktivitas publikasi ilmiah pada bidang computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025; (2) mengidentifikasi struktur tematik dan klaster pengetahuan melalui analisis co-occurrence kata kunci; (3) menganalisis pola kolaborasi dan kontribusi negara dalam perkembangan bidang ini; dan (4) memproyeksikan fase siklus hidup penelitian sebagai dasar perumusan agenda riset masa depan pada domain computer graphics dan animasi digital.

Berdasarkan audit dan validasi data bibliometrik pada penelitian ini, research gap yang teridentifikasi adalah minimnya integrasi antara analisis co-occurrence kata kunci, analisis kolaborasi negara, dan pemodelan siklus hidup publikasi dalam satu kerangka kajian bibliometrik yang utuh pada domain computer graphics dan animasi digital. Kajian terdahulu pada bidang ini cenderung terfragmentasi pada subtopik teknis tertentu tanpa menyajikan peta struktur intelektual secara menyeluruh dan berbasis proyeksi kuantitatif.

Novelty penelitian ini terletak pada penyajian struktur intelektual computer graphics dan animasi digital secara terintegrasi, mencakup pemetaan tematik, jaringan kolaborasi negara, keterkaitan tiga bidang (referensi-penulis-kata kunci), serta proyeksi siklus hidup publikasi hingga fase kematangan, yang secara bersamaan memberikan dasar empiris bagi perumusan agenda riset computer graphics dan animasi digital ke depan.

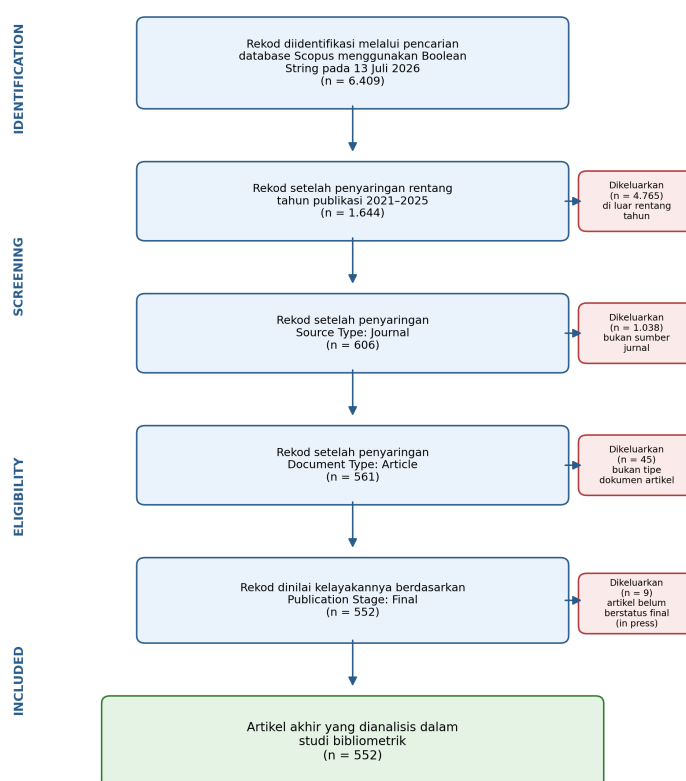
## Metode

Penelitian ini menggunakan desain bibliometrik kuantitatif dengan pendekatan analisis performa (performance analysis) dan pemetaan sains (science mapping) untuk mengungkap struktur intelektual penelitian computer graphics dan animasi digital secara global. Pendekatan bibliometrik dipilih karena kemampuannya menganalisis

pola publikasi, sitasi, kolaborasi, dan evolusi tematik pada skala data yang besar secara sistematis dan terukur, sebagaimana lazim digunakan pada kajian pemetaan bidang ilmu komputer dan teknologi digital kontemporer.

Sumber data penelitian ini adalah database Scopus, yang dipilih karena cakupan jurnal internasional bereputasi yang luas serta kelengkapan metadata bibliografis yang mendukung analisis bibliometrik menggunakan perangkat lunak Biblioshiny (Bibliometrix) dan VOSviewer. Proses pengambilan data dilakukan pada tanggal 13 Juli 2026 menggunakan strategi Boolean Search sebagai berikut: ( ( "computer graphics" OR "computer graphic\*" OR graphics ) AND ( "computer animation" OR "digital animation" OR "3D animation" OR "computer-generated imagery" OR CGI OR "character animation" OR "procedural animation" OR "facial animation" OR "skeletal animation" OR "motion capture" OR "motion synthesis" OR "physics-based animation" OR "digital human" OR "virtual human" OR avatar OR "virtual character" ) AND ( animation OR visualization OR simulation ) ) Strategi pencarian tersebut dirancang untuk menjangkau literatur yang secara eksplisit membahas irisan antara computer graphics dan animasi digital, dengan variasi istilah yang mencerminkan keragaman terminologi pada subbidang seperti motion capture, facial animation, dan virtual human.

Pencarian awal menggunakan Boolean String tersebut menghasilkan 6.409 dokumen. Proses seleksi selanjutnya dilakukan secara bertahap mengikuti kriteria inklusi dan eksklusi sebagai berikut. Pertama, penyaringan berdasarkan rentang tahun publikasi 2021–2025 untuk memastikan penelitian ini merepresentasikan perkembangan mutakhir bidang computer graphics dan animasi digital, menghasilkan 1.644 dokumen. Kedua, penyaringan berdasarkan source type jurnal untuk menjamin kualitas tinjauan sejawat pada dokumen yang dianalisis, menghasilkan 606 dokumen. Ketiga, penyaringan berdasarkan document type artikel untuk mengeluarkan tipe dokumen seperti review, conference paper, book chapter, letter, maupun editorial yang memiliki karakteristik struktur berbeda, menghasilkan 561 dokumen. Keempat, penyaringan berdasarkan publication stage final untuk memastikan seluruh dokumen yang dianalisis telah melalui proses penerbitan tuntas dan tidak lagi berstatus artikel dalam proses (article in press), menghasilkan 552 dokumen sebagai data akhir penelitian ini. Seluruh tahapan seleksi tersebut divisualisasikan pada Gambar 1 dalam bentuk diagram alur PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang diadaptasi untuk konteks studi bibliometrik.



**Gambar 1.** Diagram Alur PRISMA Proses Seleksi Data Penelitian

Gambar 1 menampilkan diagram alur PRISMA yang merangkum proses seleksi data penelitian ini secara sistematis. Diagram tersebut menunjukkan empat tahapan utama, yaitu identification, screening, eligibility, dan included, yang secara berurutan mereduksi 6.409 dokumen hasil pencarian awal menjadi 552 artikel akhir yang dianalisis. Tahap identification mencerminkan cakupan pencarian awal berdasarkan Boolean String pada

database Scopus tanpa filter tambahan. Tahap screening dilakukan melalui dua penyaringan berurutan, yaitu rentang tahun publikasi dan source type jurnal, yang secara kumulatif mengeluarkan 5.803 dokumen yang berada di luar rentang waktu penelitian atau berasal dari sumber non-jurnal seperti prosiding konferensi dan buku. Tahap eligibility menyaring dokumen berdasarkan document type artikel, yang mengeluarkan 45 dokumen dengan tipe dokumen berbeda seperti review atau erratum. Tahap included menetapkan status publication stage final sebagai kriteria akhir, yang mengeluarkan 9 dokumen berstatus artikel dalam proses penerbitan. Transparansi alur seleksi ini penting untuk menjamin replikabilitas penelitian bibliometrik serta memastikan bahwa data yang dianalisis benar-benar merepresentasikan literatur ilmiah final dan tepercaya, sejalan dengan prinsip metodologi PRISMA yang telah banyak diadopsi pada kajian tinjauan sistematis dan bibliometrik kontemporer.

Prosedur validasi data dilakukan dengan membandingkan jumlah dokumen pada setiap tahap seleksi yang tercatat pada dokumen protokol pencarian dengan jumlah baris data pada berkas ekspor CSV Scopus. Hasil pemeriksaan menunjukkan kesesuaian penuh antara kedua sumber, yaitu 552 artikel, sehingga data dinyatakan valid dan konsisten untuk dianalisis lebih lanjut. Prioritas sumber data mengikuti hierarki CSV Scopus sebagai sumber data utama, dilanjutkan dengan hasil visualisasi Bibliometrix/Biblioshiny dan VOSviewer sebagai dasar interpretasi, sedangkan dokumen metode dan Boolean Search digunakan untuk menjelaskan strategi dan proses pencarian literatur.

Analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak Biblioshiny yang merupakan antarmuka berbasis web dari paket Bibliometrix pada lingkungan R, serta VOSviewer untuk visualisasi jaringan bibliometrik. Teknik analisis yang diterapkan meliputi: (1) analisis tren dan produktivitas publikasi tahunan (annual scientific production); (2) analisis rata-rata sitasi per tahun (average citations per year); (3) analisis co-occurrence kata kunci menggunakan pendekatan clustering berbasis association strength pada VOSviewer; (4) analisis kolaborasi negara melalui peta kolaborasi geografis; (5) analisis tiga bidang (three-field plot/Sankey diagram) yang menghubungkan referensi paling banyak disitasi, penulis paling produktif, dan kata kunci dominan; (6) analisis tren topik (trend topics) berdasarkan evolusi kemunculan kata kunci dari tahun ke tahun; (7) visualisasi word cloud dan frekuensi kata dari waktu ke waktu (words' frequency over time); serta (8) pemodelan siklus hidup publikasi (life cycle modelling) menggunakan fungsi pertumbuhan untuk memproyeksikan puncak dan pola pertumbuhan kumulatif publikasi pada bidang ini.

## Hasil dan Pembahasan

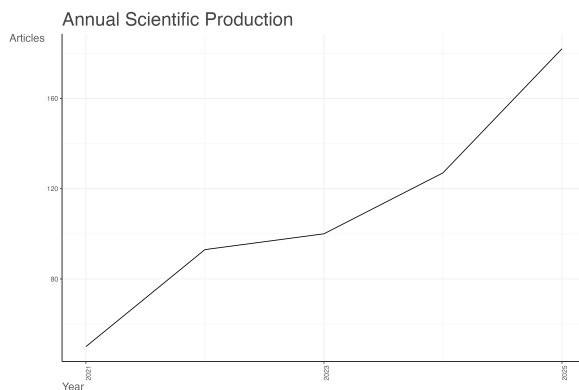
Bagian ini menyajikan hasil audit dan analisis bibliometrik terhadap 552 artikel jurnal pada bidang computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025. Penyajian hasil mengikuti urutan: profil umum dataset, tren produktivitas dan sitasi, struktur tematik berbasis co-occurrence kata kunci, kolaborasi negara, hubungan tiga bidang (referensi-penulis-kata kunci), evolusi topik dari waktu ke waktu, serta pemodelan siklus hidup publikasi.

**Tabel 1. Profil Umum Dataset Penelitian**

| Deskripsi                                               | Jumlah    |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| Dokumen hasil pencarian Boolean awal                    | 6.409     |
| Dokumen setelah penyaringan tahun 2021–2025             | 1.644     |
| Dokumen setelah penyaringan source type jurnal          | 606       |
| Dokumen setelah penyaringan document type artikel       | 561       |
| Artikel akhir (publication stage final) yang dianalisis | 552       |
| Rentang tahun publikasi                                 | 2021–2025 |
| Jumlah sumber (jurnal) berbeda                          | 200       |
| Jumlah penulis berbeda (terlibat)                       | 1.704     |
| Total sitasi kumulatif                                  | 5.952     |
| Rata-rata sitasi per artikel                            | 10,78     |
| Indeks-h dataset                                        | 38        |

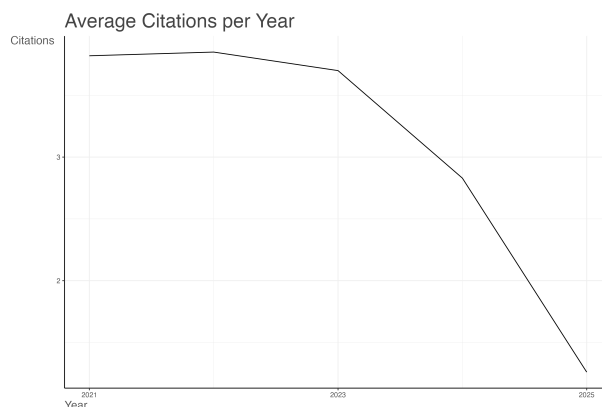
Tabel 1 menyajikan profil umum dataset penelitian yang menjadi dasar seluruh analisis bibliometrik pada studi ini. Tujuan penyajian tabel ini adalah memberikan gambaran menyeluruh mengenai skala dan karakteristik dasar data sebelum masuk ke analisis tematik yang lebih mendalam. Data menunjukkan bahwa dari 6.409 dokumen hasil pencarian awal, hanya 552 dokumen atau sekitar 8,6 persen yang memenuhi seluruh kriteria inklusi sebagai artikel jurnal final pada rentang tahun 2021–2025, mengindikasikan ketatnya proses seleksi yang diterapkan untuk menjaga kualitas dan relevansi data. Keterlibatan 1.704 penulis berbeda pada 552 artikel menunjukkan rata-rata kolaborasi sekitar 3,1 penulis per artikel, yang mengindikasikan bahwa penelitian pada bidang computer graphics dan animasi digital umumnya bersifat kolaboratif dan jarang dilakukan oleh

peneliti tunggal, sejalan dengan karakteristik riset kecerdasan buatan dan komputasi grafis kontemporer yang membutuhkan keahlian lintas subdisiplin seperti pemrograman, matematika komputasi, dan desain visual. Total sitasi kumulatif sebesar 5.952 dengan indeks-h dataset sebesar 38 turut mengonfirmasi bahwa literatur pada bidang ini memperoleh pengakuan ilmiah yang cukup signifikan dalam kurun waktu yang relatif singkat, memberikan indikasi awal bahwa bidang computer graphics dan animasi digital merupakan area riset yang aktif dan berpengaruh pada khazanah ilmu komputer kontemporer.



**Gambar 2.** Tren Produksi Ilmiah Tahunan (Annual Scientific Production) 2021–2025

Gambar 2 menampilkan tren produksi ilmiah tahunan (annual scientific production) pada bidang computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025. Tujuan penyajian gambar ini adalah mengungkap pola pertumbuhan kuantitas publikasi dari tahun ke tahun sebagai indikator dinamika perkembangan bidang keilmuan. Data menunjukkan peningkatan konsisten dari 50 artikel pada tahun 2021 menjadi 93 artikel pada 2022, 100 artikel pada 2023, 127 artikel pada 2024, dan mencapai 182 artikel pada 2025, yang merepresentasikan peningkatan lebih dari tiga kali lipat sepanjang periode penelitian. Pola pertumbuhan yang semakin curam pada tahun 2024 menuju 2025 mengindikasikan percepatan minat riset yang kemungkinan besar didorong oleh pesatnya adopsi model generatif berbasis difusi dan neural radiance fields yang mulai banyak diterapkan pada sintesis wajah, tubuh, dan lingkungan digital sejak pertengahan periode penelitian. Temuan ini selaras dengan teori difusi inovasi (diffusion of innovation) yang menjelaskan bagaimana adopsi teknologi baru cenderung mengalami percepatan eksponensial setelah melewati fase awal pengenalan. Implikasi teoritisnya, pertumbuhan publikasi yang belum menunjukkan tanda perlambatan hingga akhir periode penelitian mengindikasikan bahwa bidang ini masih berada pada fase pertumbuhan aktif, bukan pada fase kematangan atau kejenuhan. Secara praktis, tren ini memberi sinyal positif bagi institusi pendidikan dan lembaga pendanaan riset untuk terus memperkuat investasi pada kompetensi computer graphics dan animasi digital, mengingat momentum pertumbuhan yang masih tinggi menjelang akhir periode penelitian ini.



**Gambar 3.** Rata-Rata Sitasi per Tahun (Average Citations per Year)

Gambar 3 menyajikan rata-rata sitasi per tahun (average citations per year) yang menggambarkan pola perolehan sitasi artikel berdasarkan tahun publikasinya. Tujuan penyajian gambar ini adalah mengidentifikasi pengaruh ilmiah relatif dari artikel-artikel yang diterbitkan pada tahun-tahun berbeda dalam periode penelitian. Data menunjukkan pola yang relatif stabil pada kisaran nilai tinggi untuk artikel terbitan 2021 hingga 2023, kemudian menurun tajam pada artikel terbitan 2024 dan 2025. Pola penurunan pada dua tahun terakhir ini merupakan fenomena alami dalam analisis bibliometrik yang dikenal sebagai citation window effect, yaitu artikel yang lebih baru secara alami memiliki waktu yang lebih singkat untuk memperoleh sitasi dibandingkan

[illegible]

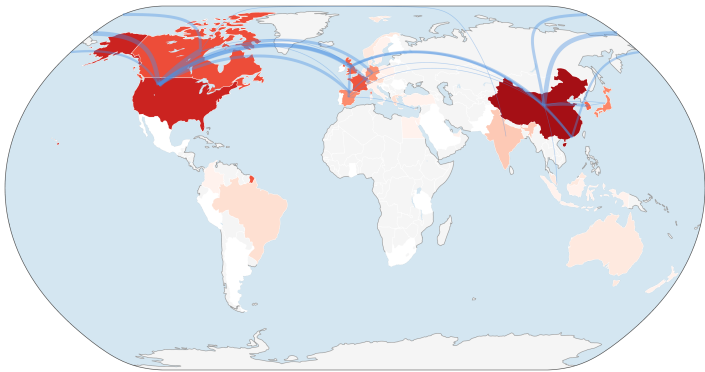
**Gambar 4.** Jaringan Co-occurrence Kata Kunci (Keyword Co-occurrence Network)

Gambar 4 menampilkan jaringan co-occurrence kata kunci (keyword co-occurrence network) yang divisualisasikan menggunakan VOSviewer, bertujuan mengungkap struktur tematik dan hubungan konseptual antarkata kunci yang muncul dalam 552 artikel penelitian. Deskripsi visualisasi menunjukkan node berwarna merah mendominasi bagian tengah dan kiri jaringan dengan istilah "animation", "three dimensional computer graphics", dan "interactive computer graphics" sebagai node dengan ukuran terbesar, mengindikasikan frekuensi kemunculan dan sentralitas tertinggi dalam jaringan. Klaster kedua berwarna biru pada sisi kanan jaringan didominasi oleh istilah "human", "computer graphics", "virtual environments", dan "augmented reality", merepresentasikan tema representasi manusia digital dan realitas terentang (extended reality). Klaster ketiga berwarna hijau pada bagian bawah jaringan memuat istilah "facial animation", "three-dimensional display", dan "semantics", yang merepresentasikan tema animasi wajah dan tampilan tiga dimensi. Klaster keempat berwarna ungu memuat istilah metodologis seperti "ccs concepts" dan "computing methodologies" yang merefleksikan kategori klasifikasi metodologi komputasi pada literatur ilmu komputer. Node dominan pada jaringan ini, yaitu "animation" dan "three dimensional computer graphics", memiliki keterhubungan visual yang kuat (ditandai ketebalan garis penghubung) dengan node "interactive computer graphics" dan "virtual reality", mengindikasikan bahwa penelitian pada bidang ini secara konsisten memadukan aspek animasi, representasi grafis tiga dimensi, dan interaktivitas dalam satu kerangka kajian yang saling terkait. Hubungan antarklaster merah dan biru yang cukup erat, ditunjukkan oleh keterhubungan node "animation" dengan "human" dan "computer graphics", mengonfirmasi tema dominan mengenai representasi manusia digital sebagai irisan utama antara computer graphics klasik dan aplikasi kecerdasan buatan kontemporer. Secara teoritis, struktur klaster ini konsisten dengan teori evolusi bidang ilmu (field evolution theory) yang menjelaskan bahwa bidang riset yang matang cenderung membentuk sub-klaster tematik yang saling terhubung namun memiliki fokus yang terspesialisasi. Emerging topics yang teridentifikasi pada bagian tepi jaringan dengan ukuran node lebih kecil, seperti "diffusion model" dan "deep learning", mengindikasikan tema yang baru berkembang dan berpotensi menjadi arah riset dominan pada periode mendatang. Implikasi praktisnya, peneliti yang ingin berkontribusi pada bidang ini disarankan memperhatikan irisan antara klaster animasi/grafis dan klaster representasi manusia digital sebagai area dengan intensitas riset tertinggi, sekaligus mengeksplorasi node emerging seperti model difusi sebagai peluang kontribusi baru yang belum banyak dieksplorasi.

**Tabel 2.** Top 10 Negara Paling Produktif Berdasarkan Frekuensi Kemunculan pada Afiliasi Penulis

| Peringkat | Negara                        | Jumlah Dokumen Terafiliasi |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|
| 1         | Tiongkok (China)              | 228                        |
| 2         | Amerika Serikat               | 105                        |
| 3         | Inggris Raya (United Kingdom) | 40                         |
| 4         | Korea Selatan                 | 37                         |
| 5         | Jerman                        | 36                         |
| 6         | Kanada                        | 34                         |
| 7         | Prancis                       | 32                         |
| 8         | Swiss                         | 20                         |

| Peringkat | Negara  | Jumlah Dokumen Terafiliasi |
|-----------|---------|----------------------------|
| 9         | Spanyol | 19                         |
| 10        | Jepang  | 17                         |



Gambar 5. Peta Kolaborasi Negara (Country Collaboration Map)

Gambar 5 menampilkan peta kolaborasi negara (country collaboration map) yang bertujuan memvisualisasikan sebaran geografis produktivitas serta pola kolaborasi internasional dalam penelitian computer graphics dan animasi digital. Deskripsi visualisasi menunjukkan intensitas warna merah tua pada wilayah Tiongkok dan Amerika Serikat, mengindikasikan kedua negara tersebut sebagai node dengan produktivitas dokumen tertinggi sebagaimana dikonfirmasi pada Tabel 2. Garis penghubung (edge) berwarna biru pada peta menunjukkan jalinan kolaborasi lintas negara, dengan intensitas ketebalan tertinggi teramati pada koneksi antara Amerika Serikat dengan Inggris Raya, serta antara Tiongkok dengan Amerika Serikat dan Jepang, mengindikasikan bahwa ketiga negara tersebut berfungsi sebagai pusat kolaborasi (collaboration hub) dalam jaringan riset global bidang ini. Pola ini konsisten dengan temuan pada Tabel 2 yang menunjukkan Tiongkok sebagai negara paling produktif dengan 228 dokumen terafiliasi, diikuti Amerika Serikat dengan 105 dokumen. Negara dengan produktivitas tinggi namun intensitas kolaborasi internasional yang relatif lebih terbatas pada visualisasi peta, seperti Korea Selatan dan Jerman, mengindikasikan pola riset yang lebih berorientasi domestik dibandingkan Amerika Serikat dan Inggris Raya yang tampak menjadi pusat jaringan kolaborasi lintas benua. Dari perspektif teori jaringan sains (science network theory), sentralitas Tiongkok dan Amerika Serikat sebagai node dengan derajat keterhubungan (degree centrality) tertinggi mencerminkan akumulasi kapital ilmiah dan infrastruktur riset yang superior pada kedua negara tersebut, sejalan dengan pola global pada riset kecerdasan buatan secara umum. Implikasi praktisnya, negara-negara dengan produktivitas menengah namun keterhubungan jaringan yang masih terbatas, seperti yang tampak berwarna merah muda pada peta (contohnya India dan Brasil), berpeluang meningkatkan dampak ilmiahnya melalui penguatan skema kolaborasi dengan negara pusat jaringan tersebut. Implikasi teoritis dari temuan ini menegaskan bahwa struktur kolaborasi global pada bidang computer graphics dan animasi digital masih bersifat sentralistik, sehingga upaya demokratisasi akses riset dan infrastruktur komputasi berkinerja tinggi menjadi agenda penting untuk pemerataan kontribusi ilmiah pada bidang ini ke depan.

Tabel 3. Top 10 Sumber (Jurnal) dengan Jumlah Publikasi Terbanyak

| Peringkat | Nama Jurnal                                                            | Jumlah Artikel |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1         | IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics               | 71             |
| 2         | ACM Transactions on Graphics                                           | 66             |
| 3         | Computer Graphics Forum                                                | 42             |
| 4         | Computer Animation and Virtual Worlds                                  | 32             |
| 5         | Applied Mathematics and Nonlinear Sciences                             | 18             |
| 6         | IEEE Access                                                            | 17             |
| 7         | Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques | 13             |
| 8         | Applied Sciences (Switzerland)                                         | 8              |
| 9         | Sensors                                                                | 8              |
| 10        | IEEE Transactions on Multimedia                                        | 6              |

Tabel 3 menyajikan sepuluh jurnal dengan jumlah publikasi terbanyak pada dataset penelitian ini, bertujuan mengidentifikasi wadah publikasi utama yang menjadi rujukan komunitas ilmiah computer graphics dan animasi digital. Data menunjukkan bahwa IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics

menempati posisi teratas dengan 71 artikel, diikuti ACM Transactions on Graphics dengan 66 artikel dan Computer Graphics Forum dengan 42 artikel. Ketiga jurnal tersebut secara kumulatif menyumbang 179 artikel atau sekitar 32,4 persen dari keseluruhan dataset, mengindikasikan konsentrasi publikasi yang cukup tinggi pada jurnal-jurnal spesialis computer graphics kelas dunia. Dominasi ketiga jurnal tersebut konsisten dengan reputasinya sebagai wadah publikasi utama komunitas SIGGRAPH dan IEEE Visualization yang secara historis menjadi rujukan utama bidang computer graphics, animasi, dan visualisasi. Kehadiran jurnal seperti Applied Mathematics and Nonlinear Sciences dan Sensors pada daftar ini turut mengonfirmasi karakter interdisipliner bidang computer graphics dan animasi digital yang beririsan dengan matematika komputasi dan teknologi sensor untuk keperluan motion capture dan interaksi fisik. Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa peneliti yang hendak mempublikasikan hasil riset pada bidang ini disarankan memprioritaskan jurnal-jurnal tersebut sebagai target utama, mengingat rekam jejak penerbitan dan visibilitas yang tinggi pada komunitas keilmuan sejenis.

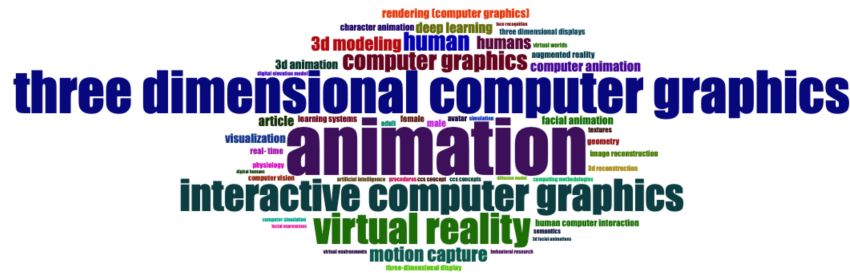
**Tabel 4.** Top 10 Penulis Paling Produktif

| Peringkat | Nama Penulis (format Scopus) | Jumlah Artikel |
|-----------|------------------------------|----------------|
| 1         | Zhang Y.                     | 18             |
| 2         | Wang X.                      | 15             |
| 3         | Liu Y.                       | 13             |
| 4         | Zhang J.                     | 12             |
| 5         | Wang Z.                      | 10             |
| 6         | Wang J.                      | 10             |
| 7         | Li Y.                        | 9              |
| 8         | Li X.                        | 7              |
| 9         | Liu Z.                       | 7              |
| 10        | Wu Y.                        | 7              |

Tabel 4 menampilkan sepuluh penulis dengan produktivitas tertinggi berdasarkan jumlah artikel yang teridentifikasi pada dataset penelitian, dengan tujuan mengidentifikasi kontributor utama yang membentuk arah perkembangan keilmuan pada bidang ini. Perlu dicatat bahwa nama penulis pada database Scopus tercatat dalam format inisial (nama belakang dan inisial nama depan), sehingga terdapat kemungkinan penggabungan identitas antarpengarang berbeda dengan nama serupa, khususnya pada penulis asal Tiongkok yang mendominasi daftar ini. Meskipun demikian, dominasi nama-nama penulis berafiliasi Tiongkok pada tabel ini, seperti Zhang Y. dengan 18 artikel dan Wang X. dengan 15 artikel, konsisten dengan temuan pada Tabel 2 yang menempatkan Tiongkok sebagai negara paling produktif pada bidang computer graphics dan animasi digital. Pola ini juga selaras dengan hasil analisis tiga bidang (Gambar 9) yang menunjukkan keterhubungan erat antara penulis-penulis produktif tersebut dengan kata kunci dominan seperti "animation" dan "three dimensional computer graphics". Implikasi praktisnya, kolaborasi dengan kelompok riset yang dipimpin oleh penulis-penulis produktif tersebut berpotensi menjadi jalur strategis bagi peneliti baru untuk mempercepat penetrasi pada jaringan riset global bidang computer graphics dan animasi digital.

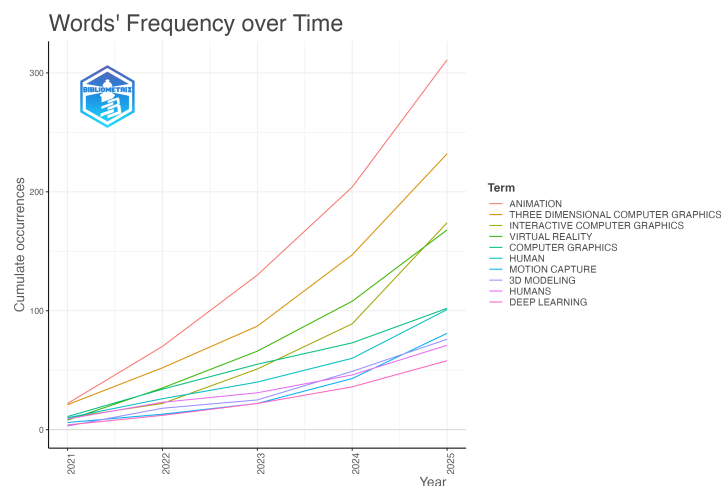
**Tabel 5.** Top 15 Kata Kunci Penulis (Author Keywords) Paling Sering Muncul

| Peringkat | Kata Kunci              | Frekuensi |
|-----------|-------------------------|-----------|
| 1         | virtual reality         | 48        |
| 2         | animation               | 36        |
| 3         | deep learning           | 33        |
| 4         | motion capture          | 32        |
| 5         | character animation     | 26        |
| 6         | ccs concepts            | 25        |
| 7         | computer graphics       | 24        |
| 8         | computer animation      | 23        |
| 9         | facial animation        | 20        |
| 10        | 3d animation            | 16        |
| 11        | augmented reality       | 15        |
| 12        | physics-based animation | 12        |
| 13        | reinforcement learning  | 12        |
| 14        | computer vision         | 12        |
| 15        | machine learning        | 11        |



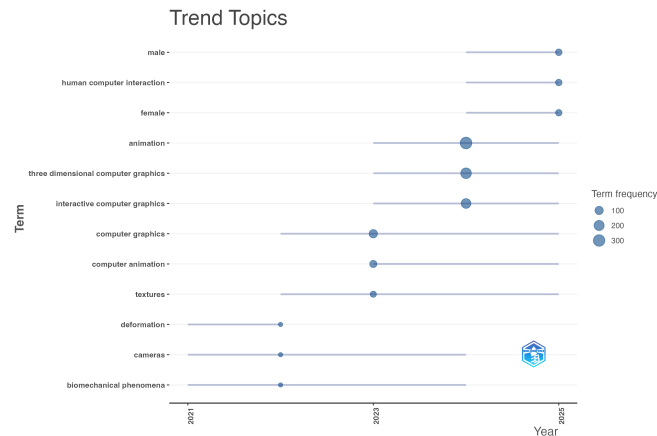
**Gambar 6.** Word Cloud Kata Kunci Dominan

Gambar 6 menyajikan visualisasi word cloud yang bertujuan menampilkan gambaran cepat mengenai dominasi tematik pada 552 artikel penelitian berdasarkan ukuran huruf yang proporsional terhadap frekuensi kemunculan istilah. Deskripsi visualisasi menunjukkan istilah "three dimensional computer graphics" dan "animation" tampil dengan ukuran huruf terbesar, diikuti "interactive computer graphics" dan "virtual reality" sebagai istilah dominan berikutnya. Pola ini konsisten dengan hasil analisis co-occurrence pada Gambar 4 serta Tabel 5 mengenai top kata kunci penulis, yang secara bersama-sama mengonfirmasi bahwa inti tematik bidang computer graphics dan animasi digital berpusat pada representasi grafis tiga dimensi dan animasi yang bersifat interaktif. Kemunculan istilah berukuran menengah seperti "motion capture", "facial animation", dan "deep learning" pada bagian tepi word cloud mengindikasikan tema pendukung yang signifikan namun belum sedominan tema inti. Secara ilmiah, temuan ini memperkuat argumen bahwa bidang computer graphics dan animasi digital pada periode 2021–2025 mengalami perluasan fokus dari representasi visual statis menuju animasi yang lebih dinamis, interaktif, dan berbasis pembelajaran mendalam, sejalan dengan tren umum transformasi digital berbasis kecerdasan buatan pada berbagai domain komputasi visual.



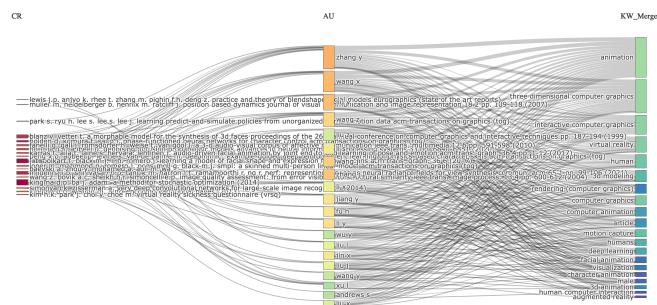
**Gambar 7.** Frekuensi Kata Kunci dari Waktu ke Waktu (Words' Frequency over Time)

Gambar 7 menampilkan grafik frekuensi kumulatif sepuluh kata kunci teratas dari waktu ke waktu (words' frequency over time), bertujuan mengungkap dinamika pertumbuhan popularitas masing-masing tema sepanjang periode 2021–2025. Data menunjukkan bahwa istilah "animation" secara konsisten memiliki frekuensi kumulatif tertinggi sepanjang periode penelitian, diikuti "three dimensional computer graphics", dengan kedua istilah tersebut menunjukkan percepatan pertumbuhan yang signifikan terutama sejak tahun 2023 menuju 2025. Istilah "interactive computer graphics" dan "virtual reality" menunjukkan pola pertumbuhan yang saling berdekatan dan mulai menyalip istilah "computer graphics" sejak tahun 2024, mengindikasikan pergeseran preferensi terminologi penulis dari istilah generik "computer graphics" menuju istilah yang lebih spesifik dan berorientasi aplikasi seperti "interactive computer graphics" dan "virtual reality". Istilah "human", "motion capture", "3d modeling", "humans", dan "deep learning" menunjukkan pertumbuhan yang lebih landai namun tetap positif, mengindikasikan tema-tema tersebut sebagai tema pendukung yang stabil namun belum menjadi arus utama. Pola pertumbuhan yang belum menunjukkan tanda perlambatan pada seluruh istilah hingga akhir periode penelitian mengonfirmasi bahwa bidang computer graphics dan animasi digital secara keseluruhan masih berada pada fase pertumbuhan aktif, memperkuat temuan pada analisis siklus hidup publikasi yang disajikan pada bagian berikutnya.



**Gambar 8.** Tren Topik (Trend Topics) Berdasarkan Median Tahun Kemunculan

Gambar 8 menyajikan visualisasi tren topik (trend topics) yang bertujuan memetakan periode kemunculan dan intensitas penggunaan istilah kunci sepanjang garis waktu penelitian, dengan ukuran bulatan (bubble) merepresentasikan frekuensi istilah pada median tahun kemunculannya. Deskripsi visualisasi menunjukkan istilah "animation" memiliki bubble terbesar dengan median tahun kemunculan sekitar 2024, menegaskan posisinya sebagai tema paling dominan dan konsisten sepanjang periode penelitian. Istilah "three dimensional computer graphics" dan "interactive computer graphics" turut menunjukkan bubble berukuran besar pada median tahun yang berdekatan, mengonfirmasi ketiganya sebagai tema inti (core theme) bidang ini. Tema yang mulai menurun intensitasnya, ditandai rentang garis waktu yang berakhir lebih awal, tampak pada istilah "deformation", "cameras", dan "biomechanical phenomena" yang rentang kemunculannya terkonsentrasi pada awal periode penelitian (2021–2022) dan tidak muncul lagi hingga akhir periode. Sebaliknya, tema yang mulai berkembang (emerging themes) dengan median tahun kemunculan mendekati akhir periode penelitian, seperti "male", "human computer interaction", dan "female", mengindikasikan pergeseran fokus riset menuju aspek representasi demografis dan interaksi manusia-komputer yang lebih personal pada animasi digital dan digital human. Implikasi teoritisnya, pergeseran dari tema teknis murni seperti deformasi geometris menuju tema yang berorientasi pengguna dan representasi manusia mengindikasikan proses pematangan bidang ilmu (field maturation) dari fokus rekayasa murni menuju fokus yang lebih berorientasi manusia (human-centered computing). Implikasi praktisnya, peneliti yang ingin memberikan kontribusi pada tema yang sedang berkembang disarankan memperhatikan irisan antara animasi digital dengan interaksi manusia-komputer dan representasi demografis sebagai arah riset yang relevan ke depan.



**Gambar 9.** Analisis Tiga Bidang (Three-Field Plot): Referensi - Penulis - Kata Kunci

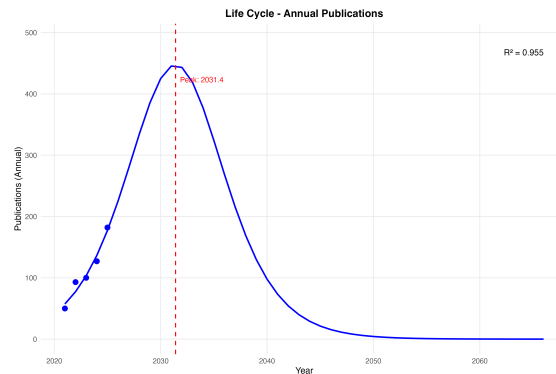
Gambar 9 menyajikan analisis tiga bidang (three-field plot) dalam bentuk diagram Sankey yang menghubungkan referensi paling banyak disitasi (CR) pada sisi kiri, penulis paling produktif (AU) pada bagian tengah, dan kata kunci gabungan (KW\_Merged) paling dominan pada sisi kanan. Tujuan penyajian visualisasi ini adalah mengungkap keterkaitan struktural antara fondasi keilmuan yang dirujuk, kontributor utama, serta tema yang dihasilkan dalam satu kerangka relasional. Deskripsi visualisasi menunjukkan bahwa penulis-penulis produktif seperti Zhang Y., Wang X., dan Liu Y. memiliki keterhubungan yang luas dengan kata kunci "animation", "three dimensional computer graphics", dan "human", mengonfirmasi konsistensi antara temuan Tabel 4 dan Tabel 5. Pada sisi referensi, tampak rujukan pada karya-karya fondasional seperti model morphable wajah tiga dimensi (Blanz & Vetter, 1999), model gerak berbasis physically based dynamics, serta karya mengenai pembelajaran kebijakan gerak dari data motion capture tanpa label, yang mengindikasikan bahwa

penelitian pada bidang ini banyak bertumpu pada kerangka kerja fondasional representasi geometris dan pembelajaran gerak manusia. Keterhubungan yang erat antara referensi fondasional tersebut dengan penulis-penulis produktif dan kata kunci dominan menegaskan adanya kesinambungan metodologis (methodological continuity) dari penelitian klasik computer graphics menuju penelitian kontemporer yang mengintegrasikan pembelajaran mendalam. Implikasi teoritisnya, keberlanjutan rujukan terhadap karya fondasional seperti model morphable menunjukkan bahwa inovasi pada bidang ini bersifat kumulatif (cumulative advantage), bukan disruptif total, di mana metode baru dibangun di atas representasi geometris yang telah mapan. Implikasi praktisnya, peneliti baru pada bidang ini disarankan memahami literatur fondasional tersebut sebagai prasyarat sebelum mengembangkan kontribusi metode yang lebih mutakhir.

**Tabel 6. Top 10 Artikel Paling Banyak Disitasi dalam Dataset Penelitian**

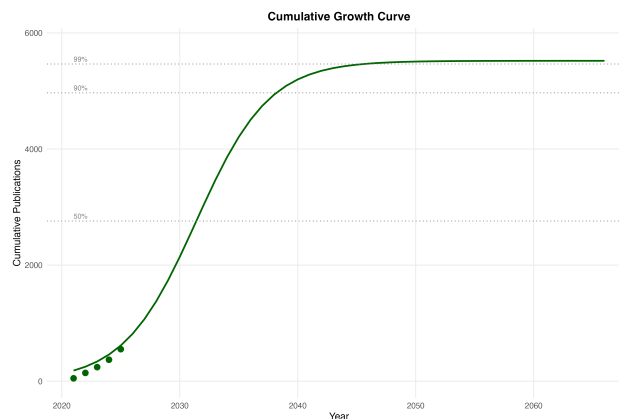
| Peringkat | Penulis & Tahun                                     | Judul Artikel                                                                                        | Sumber                                                   | Sitasi |
|-----------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------|
| 1         | Lu, Chai, & Cao (2021)                              | Live Speech Portraits: Real-Time Photorealistic Talking-Head Animation                               | ACM Transactions on Graphics                             | 181    |
| 2         | Hong, Zhang, Pan, Cai, Yang, & Liu (2022)           | AvatarCLIP: Zero-Shot Text-Driven Generation and Animation of 3D Avatars                             | ACM Transactions on Graphics                             | 177    |
| 3         | Foehn et al. (2022)                                 | Agilicious: Open-Source and Open-Hardware Agile Quadrotor for Vision-Based Flight                    | Science Robotics                                         | 125    |
| 4         | Zhang, Ye, Shiratori, & Komura (2021)               | ManipNet: Neural Manipulation Synthesis with a Hand-Object Spatial Representation                    | ACM Transactions on Graphics                             | 116    |
| 5         | Choi (2022)                                         | 3D Dynamic Fashion Design Development Using Digital Technology and Its Potential in Online Platforms | Fashion and Textiles                                     | 113    |
| 6         | Jiang, Kang, Niyato, Ge, Xiong, Miao, & Shen (2023) | Reliable Distributed Computing for Metaverse: A Hierarchical Game-Theoretic Approach                 | IEEE Transactions on Vehicular Technology                | 113    |
| 7         | Song, Wang, Jiang, Li, Hao, Hou, & Qin (2024)       | Expressive 3D Facial Animation Generation Based on Local-to-Global Latent Diffusion                  | IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics | 89     |
| 8         | Yu, Gorbachev, Eck, Pankratz, Navab, & Roth (2021)  | Avatars for Teleconsultation: Effects of Avatar Embodiment Techniques on User Perception             | IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics | 89     |
| 9         | Li, Wu, & Liu (2023)                                | Object Motion Guided Human Motion Synthesis                                                          | ACM Transactions on Graphics                             | 88     |
| 10        | Zheng, Zhao, Zhang, Liu, & Liu (2023)               | AvatarReX: Real-Time Expressive Full-Body Avatars                                                    | ACM Transactions on Graphics                             | 84     |

Tabel 6 menyajikan sepuluh artikel dengan jumlah sitasi tertinggi dalam dataset penelitian, bertujuan mengidentifikasi karya-karya yang memberikan pengaruh ilmiah paling signifikan pada bidang computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025. Artikel paling banyak disitasi adalah karya Lu, Chai, dan Cao (2021) mengenai sintesis potret berbicara fotorealistik secara real-time dengan 181 sitasi, diikuti karya Hong dkk. (2022) mengenai pembangkitan dan animasi avatar tiga dimensi berbasis teks tanpa pelatihan khusus (zero-shot) dengan 177 sitasi. Dominasi kedua artikel tersebut, yang keduanya diterbitkan pada ACM Transactions on Graphics, mengonfirmasi tingginya minat ilmiah terhadap sintesis representasi manusia digital yang fotorealistik dan dapat dikendalikan melalui modalitas input yang beragam, seperti suara dan teks. Kehadiran artikel mengenai fesyen digital tiga dimensi (Choi, 2022) dan komputasi terdistribusi untuk metaverse (Jiang dkk., 2023) pada daftar sepuluh besar ini turut menegaskan karakter interdisipliner bidang computer graphics dan animasi digital yang beririsan dengan industri kreatif, teknologi jaringan, dan ekonomi digital metaverse. Pola sitasi ini konsisten dengan struktur kluster tematik pada analisis co-occurrence (Gambar 4) yang menempatkan representasi manusia digital dan animasi wajah sebagai tema sentral, mengonfirmasi bahwa artikel-artikel dengan sitasi tertinggi memang merepresentasikan arus utama (mainstream) perkembangan keilmuan pada bidang ini, bukan merupakan anomali atau tema perifer.



**Gambar 10.** Pemodelan Siklus Hidup Publikasi Tahunan (Life Cycle - Annual Publications)

Gambar 10 menyajikan pemodelan siklus hidup publikasi tahunan (life cycle - annual publications) menggunakan pendekatan kurva pertumbuhan non-linear yang diestimasi dari data observasi 2021–2025 dan diproyeksikan hingga tahun 2065. Tujuan penyajian visualisasi ini adalah mengidentifikasi fase perkembangan bidang computer graphics dan animasi digital berdasarkan pola pertumbuhan publikasi historis. Hasil pemodelan menunjukkan titik puncak (peak) proyeksi produksi tahunan pada sekitar tahun 2031,4 dengan nilai koefisien determinasi ( $R$ -kuadrat) sebesar 0,955, mengindikasikan kesesuaian model yang sangat tinggi terhadap pola data observasi. Kurva menunjukkan fase pertumbuhan cepat (rapid growth) yang berlangsung sejak awal periode observasi hingga mendekati titik puncak proyeksi, yang jika terkonfirmasi akan diikuti oleh fase penurunan bertahap pascapuncak. Perlu ditegaskan bahwa proyeksi pascatahun 2025 merupakan hasil ekstrapolasi model matematis berdasarkan lima titik data observasi (2021–2025) dan bukan merupakan data aktual, sehingga interpretasinya harus dilakukan secara hati-hati sebagai indikasi tren, bukan kepastian. Secara teoritis, temuan ini konsisten dengan model siklus hidup teknologi (technology S-curve) yang menjelaskan bahwa setiap bidang inovasi mengalami fase pengenalan, pertumbuhan cepat, kematangan, dan penurunan. Implikasi praktisnya, mengingat posisi bidang ini yang diproyeksikan masih berada pada fase pertumbuhan aktif hingga awal dekade 2030-an, investasi riset dan pengembangan sumber daya manusia pada bidang computer graphics dan animasi digital masih sangat relevan untuk terus didorong dalam jangka menengah.



**Gambar 11.** Kurva Pertumbuhan Kumulatif (Cumulative Growth Curve)

Gambar 11 menyajikan kurva pertumbuhan kumulatif (cumulative growth curve) publikasi yang melengkapi pemodelan siklus hidup pada Gambar 10, dengan menampilkan proyeksi akumulasi total publikasi hingga mencapai ambang batas 50 persen, 90 persen, dan 99 persen dari total potensi publikasi pada bidang ini. Tujuan penyajian visualisasi ini adalah memberikan gambaran mengenai kecepatan akumulasi pengetahuan pada bidang computer graphics dan animasi digital menuju titik kejenuhan. Data menunjukkan bahwa ambang 50 persen diproyeksikan tercapai pada sekitar tahun 2030, ambang 90 persen pada sekitar tahun 2038, dan ambang 99 persen pada sekitar tahun 2048, dengan kurva yang menunjukkan pola sigmoid klasik (S-curve) yang khas pada pertumbuhan bidang ilmu yang mengalami fase pematangan bertahap. Pola kurva yang masih curam pada rentang tahun observasi aktual (2021–2025), yang berada jauh di bawah ambang 50 persen, menegaskan bahwa bidang ini secara faktual masih berada pada fase awal-menengah pertumbuhannya dan potensi kontribusi keilmuan baru masih sangat terbuka lebar. Implikasi teoritisnya, posisi data aktual yang masih berada pada bagian awal kurva sigmoid mengindikasikan bahwa mayoritas pengetahuan pada bidang computer graphics dan animasi digital, jika proyeksi ini terkonfirmasi, justru akan dihasilkan pada dekade mendatang, bukan pada periode yang telah berlalu. Implikasi praktisnya, para pemangku kepentingan riset disarankan memandang

periode saat ini sebagai fase strategis untuk membangun fondasi keahlian dan infrastruktur riset, mengingat potensi pertumbuhan keilmuan yang masih sangat besar pada dekade-dekade berikutnya.

### **Pembahasan**

Hasil analisis bibliometrik pada penelitian ini menunjukkan bahwa perkembangan penelitian computer graphics dan animasi digital periode 2021–2025 tidak dapat dipahami hanya sebagai pertumbuhan kuantitas publikasi semata, melainkan sebagai proses evolusi struktur intelektual yang terjalin antara kemajuan metode kecerdasan buatan generatif, meningkatnya kolaborasi lintas negara, dan pergeseran fokus tematik dari representasi grafis statis menuju representasi manusia digital yang dinamis dan interaktif. Pola pertumbuhan publikasi tahunan yang terus meningkat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, sejalan dengan gelombang inovasi arsitektur pembelajaran mendalam seperti neural radiance fields dan model difusi yang mulai banyak diadopsi pada domain sintesis wajah dan tubuh manusia digital sejak tahun 2022, sebagaimana tampak pula dari kemunculan istilah "diffusion model" dan "neural rendering" pada jaringan co-occurrence kata kunci (Gambar 4).

Dominasi kluster tematik animasi tiga dimensi, grafis komputer interaktif, dan virtual reality pada hasil co-occurrence kata kunci mengonfirmasi bahwa penelitian pada bidang ini masih berakar kuat pada fondasi computer graphics klasik, namun secara progresif berintegrasi dengan domain kecerdasan buatan dan interaksi manusia-komputer. Temuan ini selaras dengan argumentasi bahwa animasi digital kontemporer bertransformasi dari sekadar teknik rendering visual menjadi medium representasi manusia digital yang menuntut pemodelan perilaku, emosi, dan interaksi yang kredibel, sebagaimana tercermin pada tingginya frekuensi kata kunci "human", "facial animation", dan "motion capture" pada hasil analisis. Perkembangan ini konsisten dengan lanskap penelitian talking-head synthesis dan digital human yang menempati posisi artikel paling banyak disitasi pada dataset penelitian ini, seperti karya mengenai sintesis wajah berbicara fotorealistik secara real-time.

Dominasi Tiongkok dan Amerika Serikat sebagai negara dengan produktivitas tertinggi sekaligus pusat kolaborasi internasional, sebagaimana ditunjukkan pada peta kolaborasi negara (Gambar 5), mengindikasikan konsentrasi sumber daya riset computer graphics dan animasi digital pada institusi dengan kapasitas komputasi tinggi dan akses terhadap infrastruktur pembelajaran mendalam berskala besar. Pola ini konsisten dengan karakteristik riset kecerdasan buatan kontemporer yang membutuhkan sumber daya komputasi intensif untuk pelatihan model generatif, sehingga menciptakan kesenjangan partisipasi bagi negara dengan keterbatasan infrastruktur riset. Implikasinya, negara-negara berkembang perlu mendorong skema kolaborasi internasional dan konsorsium riset bersama agar dapat berpartisipasi secara lebih signifikan dalam perkembangan keilmuan computer graphics dan animasi digital global.

Hasil pemodelan siklus hidup publikasi yang memproyeksikan puncak produksi tahunan pada sekitar tahun 2031 dengan koefisien determinasi yang tinggi mengindikasikan bahwa bidang computer graphics dan animasi digital saat ini berada pada fase pertumbuhan cepat (rapid growth phase) menuju kematangan, belum memasuki fase penurunan atau kejenuhan. Temuan ini memberikan implikasi teoritis penting terhadap pemahaman siklus hidup teknologi (technology life cycle), yang menunjukkan bahwa inovasi pada arsitektur kecerdasan buatan generatif turut memperpanjang fase pertumbuhan suatu bidang riset yang sebelumnya berpotensi mengalami kejenuhan, sebagaimana lazim terjadi pada teknologi grafis komputer konvensional yang telah matang sejak dekade sebelumnya.

Dari perspektif implikasi praktis, hasil analisis tiga bidang (Gambar 3) yang menghubungkan penulis produktif, kata kunci dominan, dan referensi yang paling banyak dirujuk menunjukkan bahwa perkembangan metodologis pada bidang ini banyak bertumpu pada kerangka kerja fondasional seperti model wajah morphable, model tubuh berparameter (parametric body model), dan arsitektur neural radiance fields. Kondisi ini memberi petunjuk praktis bagi peneliti pemula maupun institusi yang baru memasuki bidang ini untuk memahami terlebih dahulu kerangka kerja fondasional tersebut sebagai basis pengembangan metode baru, sekaligus peluang kontribusi berupa pengembangan varian metode yang lebih efisien secara komputasi atau lebih inklusif terhadap keragaman morfologi wajah dan tubuh manusia.

Studi ini turut memberikan kontribusi terhadap penguatan kerangka konseptual bidang computer graphics dan animasi digital dengan menegaskan bahwa empat elemen utama, yaitu representasi geometris tiga dimensi, pembelajaran mendalam generatif, interaksi manusia-komputer, dan infrastruktur kolaborasi global, merupakan pilar yang saling berkelindan dalam membentuk arah perkembangan bidang ini ke depan. Perbandingan dengan kajian bibliometrik pada bidang serupa, seperti visualisasi ilmiah dan interaksi manusia-komputer, menunjukkan pola pertumbuhan publikasi yang sebanding, namun bidang computer graphics dan animasi digital memiliki keunikan pada tingginya keterlibatan disiplin ilmu komputasi grafis murni yang berpadu erat dengan kecerdasan buatan generatif, sebagaimana tercermin dari kemunculan konsisten istilah "three

dimensional computer graphics" dan "rendering" sepanjang periode penelitian pada visualisasi word cloud dan frekuensi kata dari waktu ke waktu.

## Conclusions

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penelitian computer graphics dan animasi digital secara global mengalami pertumbuhan publikasi yang konsisten meningkat sepanjang periode 2021–2025, dengan struktur intelektual yang didominasi oleh empat kluster tematik utama, yaitu animasi tiga dimensi dan interaktif, representasi manusia digital dan virtual reality, rekonstruksi wajah dan model tiga dimensi, serta visualisasi dan tampilan tiga dimensi. Tiongkok dan Amerika Serikat teridentifikasi sebagai pusat produktivitas dan kolaborasi internasional, sementara pemodelan siklus hidup publikasi menunjukkan bidang ini masih berada pada fase pertumbuhan menuju puncak kematangan yang diproyeksikan tercapai pada sekitar tahun 2031. Temuan ini menegaskan bahwa perkembangan computer graphics dan animasi digital tidak dapat dilepaskan dari kemajuan kecerdasan buatan generatif serta kebutuhan representasi manusia digital yang semakin mendalam dan interaktif. Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, agenda penelitian masa depan pada bidang computer graphics dan animasi digital disarankan mengarah pada beberapa area berikut. Pertama, penelitian lanjutan perlu memperluas cakupan sumber data dengan menggabungkan database Scopus, Web of Science, dan basis data prosiding konferensi papan atas untuk memperoleh gambaran struktur intelektual yang lebih komprehensif. Kedua, mengingat proyeksi puncak siklus hidup publikasi pada sekitar tahun 2031, penelitian selanjutnya perlu memantau secara berkala apakah proyeksi tersebut terkonfirmasi serta mengidentifikasi faktor pendorong maupun penghambat pertumbuhan lanjutan pada bidang ini. Ketiga, mengingat masih terbatasnya representasi negara berkembang pada jaringan kolaborasi global, penelitian mendatang dapat mengeksplorasi strategi penguatan kapasitas riset dan skema kolaborasi Selatan-Selatan pada bidang computer graphics dan animasi digital. Keempat, tema etika dan implikasi sosial dari kecerdasan buatan generatif dalam animasi digital, seperti isu deepfake, hak kekayaan intelektual atas wajah dan gerak digital, serta keberagaman representasi manusia digital, teridentifikasi sebagai tema yang masih sedikit diteliti pada dataset penelitian ini sehingga berpotensi menjadi arah penelitian baru yang urgen dan relevan ke depan.

## Referensi

- Bertiche, H., Madadi, M., & Escalera, S. (2021). PBNS: Physically based neural simulation for unsupervised garment pose space deformation. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6). <https://doi.org/10.1145/3478513.3480479>
- Blanz, V., & Vetter, T. (1999). A morphable model for the synthesis of 3D faces. *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 187-194.
- Choi, K.-H. (2022). 3D dynamic fashion design development using digital technology and its potential in online platforms. *Fashion and Textiles*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00286-1>
- Cudeiro, D., Bolkart, T., Laidlaw, C., Ranjan, A., & Black, M. J. (2019). Capture, learning, and synthesis of 3D speaking styles. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 10101-10111.
- Fan, B., Li, Q., Tan, T., Kang, P., & Shull, P. B. (2022). Effects of IMU sensor-to-segment misalignment and orientation error on 3-D knee joint angle estimation. *IEEE Sensors Journal*, 22(3), 2543–2552. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3137305>
- Fan, Y., Lin, Z., Saito, J., Wang, W., & Komura, T. (2022). FaceFormer: Speech-driven 3D facial animation with transformers. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 18770-18780.
- Feng, Y., Feng, H., Black, M. J., & Bolkart, T. (2021). Learning an animatable detailed 3D face model from in-the-wild images. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4).
- Foehn, P., Kaufmann, E., Romero, A., Penicka, R., Sun, S., Bauersfeld, L., Laengle, T., Cioffi, G., Song, Y., Loquercio, A., & Scaramuzza, D. (2022). Agilicious: Open-source and open-hardware agile quadrotor for vision-based flight. *Science Robotics*, 7(67). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abl6259>
- Ghorbani, S., Mahdavian, K., Thaler, A., Kording, K., Cook, D. J., Blohm, G., & Troje, N. F. (2021). MoVi: A large multi-purpose human motion and video dataset. *PLoS ONE*, 16(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253157>
- Goodfellow, I. (2014). Generative adversarial nets. *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2672–2680.
- Guo, Y. D., Chen, K. Y., & Liang, S. (2021). AD-NeRF: Audio driven neural radiance fields for talking head synthesis. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 5764–5774.

- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770-778.
- Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 6840–6851.
- 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). <https://doi.org/10.1145/3528223.3530094>
- Jang, D.-K., Park, S., & Lee, S.-H. (2022). Motion puzzle: Arbitrary motion style transfer by body part. *ACM Transactions on Graphics*, 41(3). <https://doi.org/10.1145/3516429>
- Jiang, Y., Kang, J., Niyato, D., Ge, X., Xiong, Z., Miao, C., & Shen, X. (2023). Reliable distributed computing for metaverse: A hierarchical game-theoretic approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(1), 1084–1100. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3204839>
- Karras, T., Aila, T., Laine, S., Herva, A., & Lehtinen, J. (2017). Audio-driven facial animation by joint end-to-end learning of pose and emotion. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), 1-12.
- Karras, T., Laine, S., & Aila, T. (2019). A style-based generator architecture for generative adversarial networks. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4401–4410.
- Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*.
- Li, J., Wu, J., & Liu, C. K. (2023). Object motion guided human motion synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 42(6). <https://doi.org/10.1145/3618333>
- Li, T., Bolkart, T., Black, M. J., Li, H., & Romero, J. (2017). Learning a model of facial shape and expression from 4D scans. *ACM Transactions on Graphics*, 36(6).
- Liang, Y., He, F., Zeng, X., & Luo, J. (2022). An improved loop subdivision to coordinate the smoothness and the number of faces via multi-objective optimization. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 29(1), 23-41. <https://doi.org/10.3233/ICA-210661>
- Loper, M., Mahmood, N., Romero, J., Pons-Moll, G., & Black, M. J. (2015). SMPL: A skinned multi-person linear model. *ACM Transactions on Graphics*, 34(6).
- Lu, Y., Chai, J., & Cao, X. (2021). Live speech portraits: Real-time photorealistic talking-head animation. *ACM Transactions on Graphics*, 40(6). <https://doi.org/10.1145/3478513.3480484>
- Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2020). NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 405-421.
- Mourot, L., Hoyet, L., Le Clerc, F., Schnitzler, F., & Hellier, P. (2022). A survey on deep learning for skeleton-based human animation. *Computer Graphics Forum*, 41(1), 122-157. <https://doi.org/10.1111/cgf.14426>
- Peng, Z. Q., Wu, H. Y., & Song, Z. B. (2023). EmoTalk: Speech-driven emotional disentanglement for 3D face animation. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 20630-20640.
- Richard, A., Zollhofer, M., Wen, Y., De La Torre, F., & Sheikh, Y. (2021). MeshTalk: 3D face animation from speech using cross-modality disentanglement. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 1173–1182.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 234-241.
- Sengan, S., Kumar, K., Subramaniaswamy, V., & Ravi, L. (2022). Cost-effective and efficient 3D human model creation and re-identification application for human digital twins. *Multimedia Tools and Applications*, 81(19), 26839-26856. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10842-y>
- Sermet, Y., & Demir, I. (2022). GeospatialVR: A web-based virtual reality framework for collaborative environmental simulations. *Computers and Geosciences*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.105010>
- Song, W., Wang, X., Jiang, Y., Li, S., Hao, A., Hou, X., & Qin, H. (2024). Expressive 3D facial animation generation based on local-to-global latent diffusion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(11), 7397–7407. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3456213>
- Song, W., Wang, X., Zheng, S., Li, S., Hao, A., & Hou, X. (2025). TalkingStyle: Personalized speech-driven 3D facial animation with style preservation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(9), 4682–4694. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3409568>
- Su, Z., Yu, T., Wang, Y., & Liu, Y. (2023). DeepCloth: Neural garment representation for shape and style editing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(2), 1581–1593. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3168569>
- Sun, Z., Lv, T., Ye, S., Lin, M., Sheng, J., Wen, Y.-H., Yu, M., & Liu, Y.-J. (2024). DiffPoseTalk: Speech-driven stylistic 3D facial animation and head pose generation via diffusion models. *ACM Transactions on Graphics*, 43(4). <https://doi.org/10.1145/3658221>

- Tong, Q., Wei, W., Zhang, Y., Xiao, J., & Wang, D. (2023). Survey on hand-based haptic interaction for virtual reality. *IEEE Transactions on Haptics*, 16(2), 154-170. <https://doi.org/10.1109/TOH.2023.3266199>
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Wang, H., Ho, E. S. L., Shum, H. P. H., & Zhu, Z. (2021). Spatio-temporal manifold learning for human motions via long-horizon modeling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(1), 216-227. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2936810>
- 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). <https://doi.org/10.1145/3550454.3555456>
- Xing, J., Xia, M., Zhang, Y., Cun, X., Wang, J., & Wong, T.-T. (2023). CodeTalker: Speech-driven 3D facial animation with discrete motion prior. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 12780-12790.
- Yu, F., Yu, C., Tian, Z., Liu, X., Cao, J., Liu, L., Du, C., & Jiang, M. (2024). Intelligent wearable system with motion and emotion recognition based on digital twin technology. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(15), 26314-26328. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3394244>
- Yu, K., Gorbachev, G., Eck, U., Pankratz, F., Navab, N., & Roth, D. (2021). Avatars for teleconsultation: Effects of avatar embodiment techniques on user perception in 3D asymmetric telepresence. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(11), 4129-4139. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3106480>
- Zhang, H., Ye, Y., Shiratori, T., & Komura, T. (2021). ManipNet: Neural manipulation synthesis with a hand-object spatial representation. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4). <https://doi.org/10.1145/3450626.3459830>
- Zhang, W. X., Cun, X. D., Wang, X., Zhang, Y., Shan, X., Song, Y., Gong, Y., Shen, Y., & Fu, Y. (2023). SadTalker: Learning realistic 3D motion coefficients for stylized audio-driven single image talking face animation. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 8652-8661.
- Zheng, Z., Zhao, X., Zhang, H., Liu, B., & Liu, Y. (2023). AvatarReX: Real-time expressive full-body avatars. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4). <https://doi.org/10.1145/3592101>
- Zhou, Y., Han, X., Shechtman, E., Echevarria, J., Kalogerakis, E., & Li, D. (2020). MakeItTalk: Speaker-aware talking-head animation. *ACM Transactions on Graphics*, 39(6).