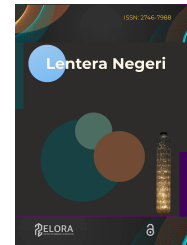




Contents lists available at [Elora Center](#)

Lentera Negeri

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



Representasi neural dan 3D gaussian splatting dalam animasi digital: pemetaan bibliometrik celah integrasi pada penelitian real-time rendering

Saftrian Mukhlizul Fuad^{*)}, Bayu Ramadhan Fajri

Universitas Negeri Padang

Article Info

Article history:

Received Mei 12th, 2025

Revised Jun 20th, 2025

Accepted Jul 26th, 2025

Keyword:

Real-time rendering,
Produksi animasi,
Analisis bibliometrik,
Pemetaan tematik,
Vosviewer

ABSTRACT

Real-time rendering telah menjadi salah satu pendorong utama transformasi produksi animasi digital, terutama sejak berkembangnya teknik virtual production, neural rendering, dan 3D Gaussian splatting. Meskipun demikian, peta struktur pengetahuan global mengenai topik ini belum banyak dipetakan secara sistematis. Penelitian ini bertujuan memetakan tren, struktur intelektual, dan evolusi tematik penelitian real-time rendering dalam konteks produksi animasi digital melalui pendekatan bibliometrik. Data diperoleh dari basis data Scopus menggunakan kombinasi Boolean Search yang menggabungkan istilah real-time rendering dan animasi digital, dengan hasil awal 410 dokumen yang disaring secara bertahap hingga diperoleh 57 artikel jurnal final terbitan 2016–2025. Analisis dilakukan menggunakan Biblioshiny (Bibliometrix) dan VOSviewer, meliputi analisis kinerja publikasi, analisis kutipan, analisis kolaborasi negara, analisis co-occurrence kata kunci, pemetaan tematik (thematic map), dan evolusi tematik (thematic evolution). Hasil menunjukkan tren publikasi yang meningkat tajam pada 2021–2025, didominasi oleh kontribusi Tiongkok, Amerika Serikat, dan Jerman, dengan Amerika Serikat memimpin dari sisi dampak sitasi. Tema real-time rendering, animation, dan rendering (computer graphics) menempati kuadran Basic Themes/Motor Themes, sementara 3D Gaussian splatting dan neural radiance field muncul sebagai tema berkembang (emerging) pada periode terbaru. Studi ini mengidentifikasi celah penelitian pada integrasi teknik rendering berbasis neural representation ke dalam alur produksi animasi komersial serta menawarkan agenda penelitian masa depan bagi pengembangan pipeline rendering real-time yang lebih efisien dan dapat diskalakan.



© 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,

✉ saftrian@unp.ac.id

Pendahuluan

Industri animasi digital global mengalami perubahan cara produksi yang mendasar sepanjang dekade terakhir. Dulu, merender satu bingkai citra fotorealistis bisa memakan waktu berjam-jam hingga berhari-hari melalui teknik offline rendering. Kini perkembangan perangkat keras Graphics Processing Unit (GPU), bersama algoritma rendering berbasis rasterisasi dan neural representation, membuat visualisasi berkualitas tinggi dapat dihasilkan seketika atau mendekati waktu nyata. Pendekatan ini disebut real-time rendering, yaitu komputasi grafis yang merender dan menampilkan citra tiga dimensi pada kecepatan interaktif, umumnya di atas 24 hingga 30 bingkai per detik. Kecepatan inilah yang memungkinkan sutradara, animator, maupun aktor memperoleh umpan balik visual seketika selama produksi berlangsung.

Dampaknya melampaui persoalan teknis. Alur kerja produksi ikut berubah bentuk. Dalam model konvensional, tahap praproduksi, produksi, dan pascaproduksi berjalan berurutan dan relatif terpisah, sehingga keputusan artistik pada satu tahap sulit direvisi tanpa menambah biaya dan waktu secara signifikan. Real-time rendering membalik pola tersebut. Pencahayaan, sudut kamera, penempatan aset, hingga penyesuaian material dapat diubah dengan hasil yang langsung terlihat, sehingga tim mampu menguji banyak kemungkinan dalam satu sesi kerja tanpa menunggu proses render yang panjang.

Pergeseran ini secara langsung mengubah lanskap produksi animasi digital dan sinema berbasis Computer-Generated Imagery (CGI) di tingkat global. Studio-studio besar mulai mengadopsi paradigma virtual production, yakni penggabungan panggung fisik dengan latar belakang virtual yang dirender secara real-time menggunakan game engine seperti Unreal Engine, sehingga sutradara dapat melihat hasil akhir visual efek secara langsung di lokasi syuting tanpa menunggu proses pascaproduksi yang panjang. Perkembangan lebih lanjut, seperti teknik 3D Gaussian splatting yang dipublikasikan sejak 2023, serta neural radiance field (NeRF), turut memperluas kemungkinan representasi adegan tiga dimensi yang dapat dirender secara real-time dengan kualitas visual yang sebelumnya hanya dapat dicapai melalui rendering offline.

Pada tingkat regional, kawasan Asia Timur khususnya Tiongkok dan Korea Selatan serta Amerika Utara dan Eropa Barat muncul sebagai pusat produktivitas riset sekaligus industri dalam bidang ini. Ekosistem riset di Tiongkok, misalnya, tumbuh signifikan sejalan dengan ekspansi industri gim dan animasi domestiknya, sementara Amerika Serikat tetap menjadi rujukan utama dari sisi dampak ilmiah melalui institusi riset seperti Meta Reality Labs, Massachusetts Institute of Technology (MIT), dan berbagai laboratorium grafis komputer terkemuka lainnya. Fenomena kolaborasi lintas negara pun semakin menguat, sebagaimana tampak pada pola jejaring kolaborasi internasional yang melibatkan Tiongkok, Amerika Serikat, dan sejumlah negara Eropa (Jerman, Spanyol, Inggris) dalam publikasi-publikasi terbaru bidang rendering dan animasi digital.

Pada tataran nasional, Indonesia sebagai salah satu negara dengan industri animasi dan gim yang berkembang pesat masih menghadapi tantangan dalam hal literasi riset dan adopsi teknologi rendering mutakhir di lingkungan akademik maupun industri kreatif. Ketimpangan ini semakin terasa mengingat studio-studio animasi nasional dituntut untuk mengikuti standar produksi global yang kini banyak mengandalkan real-time rendering sebagai bagian dari efisiensi biaya dan waktu produksi. Kondisi tersebut menegaskan pentingnya pemetaan struktur pengetahuan global mengenai real-time rendering dalam konteks produksi animasi, sebagai basis pijakan bagi pengembangan riset maupun kurikulum pendidikan vokasi dan teknologi pendidikan di Indonesia.

Permasalahan mendasar yang melatarbelakangi penelitian ini adalah belum tersedianya pemetaan struktur pengetahuan (knowledge structure) yang sistematis mengenai penelitian real-time rendering pada domain produksi animasi digital. Sebagian besar kajian yang tersedia bersifat studi kasus teknis pada aspek tertentu misalnya algoritma rendering spesifik, teknik shading, atau optimasi performa GPU namun jarang ditemukan kajian yang memetakan tren, struktur intelektual, kolaborasi internasional, maupun evolusi tematik bidang ini secara menyeluruh dan berbasis data empiris berskala besar. Padahal, pemetaan semacam ini krusial bagi peneliti, praktisi, maupun pengambil kebijakan riset untuk memahami arah perkembangan bidang serta mengidentifikasi celah penelitian yang masih terbuka.

Berdasarkan hasil analisis bibliometrik awal terhadap 57 artikel jurnal Scopus periode 2016–2025 (dijabarkan lebih lanjut pada bagian Hasil), teridentifikasi bahwa tema real-time rendering, animation, dan rendering (computer graphics) merupakan tema dominan yang telah mapan (motor themes maupun basic themes), sementara tema-tema seperti 3D Gaussian splatting, gaussians, dan neural radiance field baru muncul secara signifikan pada periode publikasi 2023–2025 dan berada pada posisi tema berkembang (emerging themes) dalam kuadran pemetaan tematik. Kesenjangan ini mengindikasikan bahwa integrasi teknik-teknik rendering berbasis representasi neural mutakhir ke dalam alur kerja (pipeline) produksi animasi komersial yang sudah mapan masih menjadi area yang relatif belum banyak dieksplorasi secara khusus dalam literatur bidang animasi, sekalipun literatur pada domain visi komputer (computer vision) mengenai teknik-teknik tersebut berkembang sangat pesat.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk menyediakan basis pengetahuan yang terstruktur bagi akademisi dan praktisi dalam merancang agenda riset maupun strategi adopsi teknologi rendering real-time pada konteks produksi animasi digital, mengingat kecepatan perubahan teknologi pada bidang ini tergolong sangat tinggi. Tanpa pemetaan yang sistematis, upaya pengembangan riset maupun kurikulum berisiko tertinggal dari perkembangan mutakhir yang sesungguhnya sedang terjadi di tataran global.

Novelty (kebaruan) penelitian ini terletak pada penggunaan pendekatan bibliometrik terpadu menggabungkan analisis kinerja publikasi, analisis kolaborasi negara, analisis co-occurrence kata kunci, pemetaan tematik, dan evolusi tematik antarperiode yang secara khusus difokuskan pada irisan domain real-time rendering dan produksi animasi digital, sebuah irisan tematik yang sejauh dapat diverifikasi dari dataset penelitian ini belum banyak dipetakan secara terpadu dalam literatur bibliometrik sebelumnya. Kebaruan lain terletak pada temuan mengenai pergeseran tematik dari teknik rendering rasterisasi konvensional menuju representasi berbasis Gaussian splatting dan neural rendering, yang teridentifikasi secara eksplisit melalui perbandingan peta evolusi tematik pada dua periode publikasi yang berbeda.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan tren dan kinerja publikasi penelitian real-time rendering dalam konteks produksi animasi digital periode 2016–2025; (2) mengidentifikasi struktur kolaborasi internasional dan kontributor utama (negara, sumber jurnal, dan dokumen) pada bidang ini; (3) memetakan struktur intelektual bidang melalui analisis co-occurrence kata kunci dan pemetaan tematik; serta (4) mengidentifikasi evolusi tematik dan arah perkembangan riset guna merumuskan agenda penelitian masa depan.

Metode

Penelitian ini menggunakan desain studi bibliometrik kuantitatif dengan pendekatan analisis kinerja (performance analysis) dan pemetaan sains (science mapping) (Donthu et al., 2021). Desain ini dipilih karena kemampuannya mengolah volume data ilmiah dalam jumlah besar secara objektif untuk mengungkap pola produktivitas, struktur kolaborasi, dan struktur intelektual suatu bidang keilmuan (Donthu et al., 2021).

Sumber Data dan Strategi Pencarian

Data penelitian bersumber dari basis data Scopus (Elsevier), yang dipilih karena cakupan indeksasi jurnal internasional bereputasi yang luas serta ketersediaan metadata bibliografis yang lengkap untuk keperluan analisis bibliometrik. Pencarian data dilakukan menggunakan strategi Boolean Search sebagai berikut:

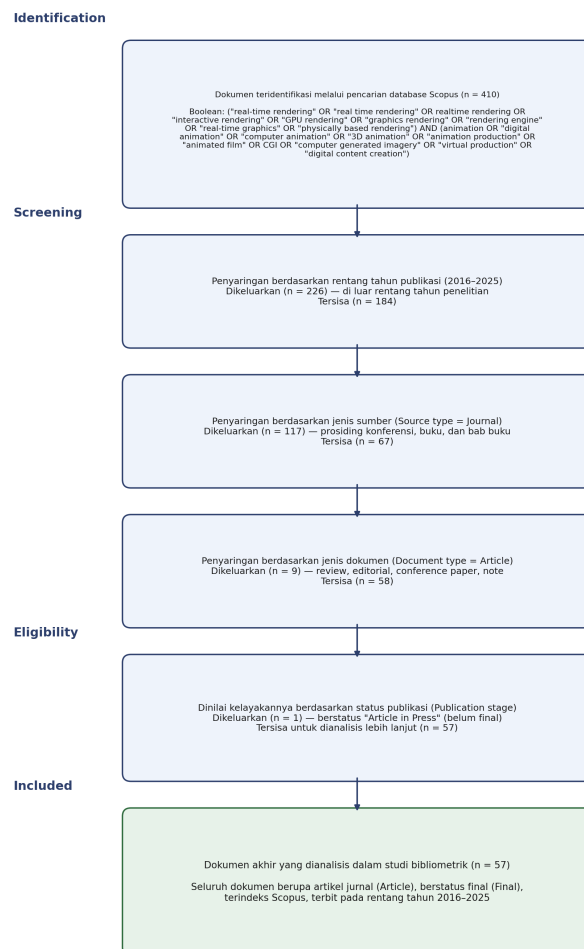
("real-time rendering" OR "real time rendering" OR realtime rendering OR "interactive rendering" OR "GPU rendering" OR "graphics rendering" OR "rendering engine" OR "real-time graphics" OR "physically based rendering") AND (animation OR "digital animation" OR "computer animation" OR "3D animation" OR "animation production" OR "animated film" OR CGI OR "computer generated imagery" OR "virtual production" OR "digital content creation")

Pencarian awal pada Scopus menghasilkan 410 dokumen.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi serta Proses Seleksi

Proses seleksi dilakukan secara bertahap mengikuti alur PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021), yang meliputi tahap Identification, Screening, Eligibility, dan Included, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1. Kriteria inklusi yang diterapkan meliputi: (1) rentang tahun publikasi 2016–2025; (2) jenis sumber (source type) berupa jurnal (journal); (3) jenis dokumen (document type) berupa artikel (article); dan (4) status publikasi (publication stage) final. Dokumen yang tidak memenuhi salah satu kriteria tersebut dikeluarkan dari analisis. Setelah seluruh tahap penyaringan diterapkan secara berurutan, diperoleh 57 artikel jurnal final yang menjadi dataset utama penelitian ini.

Berdasarkan Gambar 1, dari 410 dokumen hasil pencarian awal, penerapan filter rentang tahun 2016–2025 menyisakan 184 dokumen, penyaringan jenis sumber jurnal menyisakan 67 dokumen, penyaringan jenis dokumen artikel menyisakan 58 dokumen, dan penyaringan status publikasi final menghasilkan 57 dokumen sebagai dataset akhir. Alur penyaringan ini konsisten dengan keterangan proses pencarian data yang dijelaskan dalam dokumen metode penelitian yang diunggah, sehingga tidak ditemukan inkonsistensi antara dokumen tersebut dan data CSV ekspor Scopus yang digunakan sebagai sumber data utama.



Gambar 1. Diagram PRISMA Proses Seleksi Artikel

Perangkat Lunak dan Teknik Analisis

Analisis data dilakukan menggunakan tiga perangkat lunak utama. Pertama, Scopus Analyze Search Results digunakan untuk validasi awal distribusi dokumen. Kedua, Biblioshiny antarmuka berbasis web dari paket Bibliometrix pada R (Aria & Cuccurullo, 2017) digunakan untuk menghasilkan analisis kinerja publikasi (annual scientific production, average citation per year), analisis sumber (Bradford's Law), analisis tren topik (trend topics), thematic map, dan thematic evolution map. Ketiga, VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2010) digunakan untuk membangun peta jejaring co-occurrence kata kunci (co-occurrence network) dan peta kolaborasi negara (country collaboration map), serta visualisasi word cloud dari kata kunci dominan.

Teknik analisis bibliometrik yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi: (1) analisis kinerja (performance analysis), mencakup tren publikasi tahunan dan rata-rata sitasi per tahun; (2) analisis sumber (source analysis) menggunakan Hukum Bradford untuk mengidentifikasi jurnal inti (core journals); (3) analisis negara (country analysis) melalui peta kolaborasi internasional; (4) analisis co-occurrence kata kunci untuk memetakan struktur konseptual bidang; (5) pemetaan tematik (thematic mapping) berdasarkan dimensi sentralitas (relevansi) dan kepadatan (perkembangan) tema; serta (6) analisis evolusi tematik (thematic evolution) untuk membandingkan pergeseran tema antarperiode publikasi.

Prosedur Validasi Data

Validasi data dilakukan dengan membandingkan jumlah dokumen pada tiap tahap seleksi antara dokumen metode penelitian (narasi proses pencarian) dan berkas CSV hasil ekspor Scopus. Sesuai hierarki sumber data yang ditetapkan, CSV Scopus diperlakukan sebagai sumber data primer, sedangkan visualisasi Biblioshiny dan VOSviewer digunakan sebagai dasar interpretasi hasil dan validasi silang. Pemeriksaan menunjukkan kesesuaian penuh antara jumlah akhir 57 dokumen pada kedua sumber tersebut, sehingga seluruh dokumen dalam CSV digunakan sebagai unit analisis penelitian ini.

Hasil dan Pembahasan

Audit dan Karakteristik Dataset

Audit menyeluruh terhadap dataset menghasilkan karakteristik utama sebagaimana dirangkum pada Tabel 1. Dataset terdiri atas 57 dokumen, seluruhnya berjenis artikel jurnal (article) dengan status publikasi final, terbit pada rentang tahun 2016 hingga 2025, tersebar pada 35 judul jurnal berbeda, melibatkan 191 penulis unik, dan telah dikutip sebanyak 756 kali secara kumulatif hingga tanggal pengambilan data.

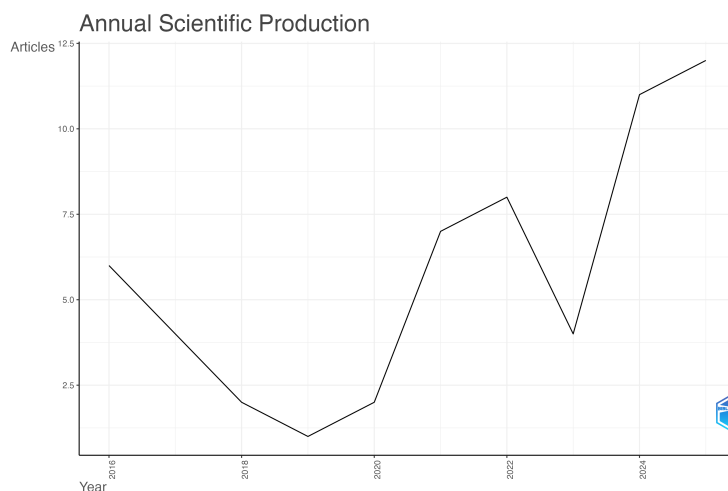
Tabel 1. Ringkasan Audit Dataset Penelitian

Parameter	Nilai
Jumlah dokumen final	57 artikel
Rentang tahun publikasi	2016–2025
Jenis dokumen	Article (100%)
Status publikasi (publication stage)	Final (100%)
Jumlah jurnal (sumber) unik	35 jurnal
Total sitasi kumulatif	756 sitasi
Rata-rata sitasi per dokumen	13,26 sitasi
Dokumen tanpa sitasi	11 dokumen (19,3%)
Jumlah penulis unik	191 penulis
Dokumen dengan sitasi tertinggi	Lombardi et al. (2021), 245 sitasi

Tabel 1 menunjukkan bahwa meskipun jumlah dokumen tergolong moderat (57 artikel), tingkat sitasi kumulatif yang mencapai 756 sitasi dengan rata-rata 13,26 sitasi per dokumen mengindikasikan bahwa bidang ini memiliki dampak ilmiah yang cukup signifikan relatif terhadap ukuran datasetnya. Adanya 11 dokumen (19,3%) yang belum memperoleh sitasi merupakan hal yang wajar mengingat proporsi besar dokumen tersebut baru diterbitkan pada 2024–2025, sehingga belum memiliki waktu yang cukup untuk diserap oleh komunitas ilmiah (citation window effect).

Tren Produktivitas Publikasi Tahunan

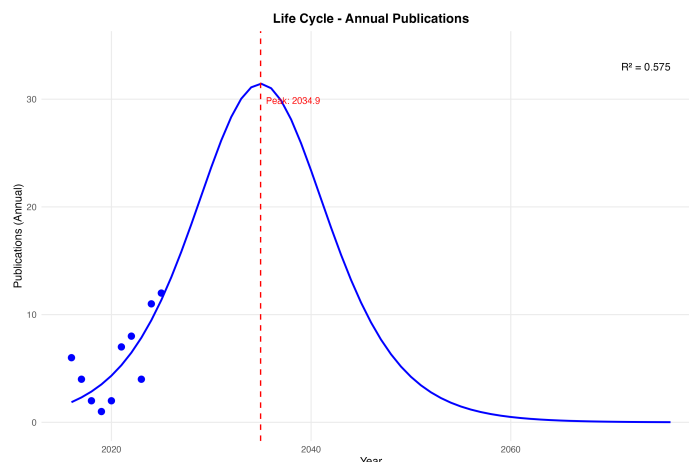
Gambar 2 menampilkan tren jumlah publikasi tahunan pada bidang real-time rendering untuk produksi animasi digital sepanjang 2016–2025. Pola yang teramati menunjukkan tren non-linear: produksi relatif tinggi pada 2016 (6 dokumen), menurun pada 2017–2019 (4, 2, dan 1 dokumen), kemudian meningkat kembali secara bertahap mulai 2020 hingga mencapai puncaknya pada 2024 (11 dokumen) dan 2025 (12 dokumen). Pola ini secara empiris konsisten dengan periodisasi perkembangan teknologi rendering real-time itu sendiri: penurunan pada 2017–2019 dapat diinterpretasikan sebagai fase konsolidasi teknologi rasterisasi konvensional yang telah relatif matang, sedangkan lonjakan tajam sejak 2021 sejalan dengan momentum adopsi virtual production pasca-pandemi serta publikasi teknik neural radiance field (2020) dan 3D Gaussian splatting (2023) yang memicu gelombang riset baru pada domain rendering interaktif.



Gambar 2. Annual Scientific Production (Produksi Ilmiah Tahunan)

Secara teoretis, pola pertumbuhan ini sejalan dengan konsep siklus hidup teknologi (technology life cycle) yang umum diamati pada bidang riset berbasis inovasi teknologi cepat, di mana periode pertumbuhan

eksponensial umumnya dipicu oleh terobosan metodologis tertentu yang membuka ruang riset turunan secara masif. Sebagai pelengkap, Gambar 3 menyajikan proyeksi model siklus hidup (life cycle) publikasi tahunan yang dihasilkan Biblioshiny berdasarkan pola pertumbuhan historis dataset.

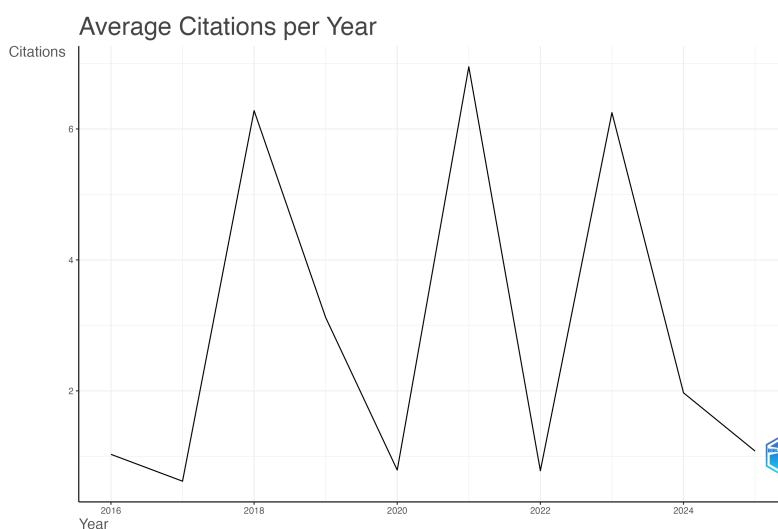


Gambar 3. Model Siklus Hidup (Life Cycle) Publikasi Tahunan

Model pada Gambar 3 mengestimasi titik puncak (peak) pertumbuhan publikasi pada sekitar tahun 2034,9 dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,575. Perlu ditegaskan secara akademik bahwa nilai R^2 tersebut tergolong moderat dan proyeksi ini terutama didasarkan pada sembilan titik data historis (2016–2024) yang sifatnya belum sepenuhnya matang (immature curve), sehingga estimasi titik puncak dan penurunan pada model ini harus dimaknai sebagai kecenderungan indikatif, bukan prediksi definitif. Meskipun demikian, bentuk kurva pertumbuhan mengonfirmasi bahwa bidang real-time rendering untuk animasi digital sesungguhnya masih berada pada fase pertumbuhan (growth stage), belum memasuki fase kematangan (maturity), sehingga peluang kontribusi riset baru pada bidang ini masih terbuka luas.

Analisis Dampak Sitasi

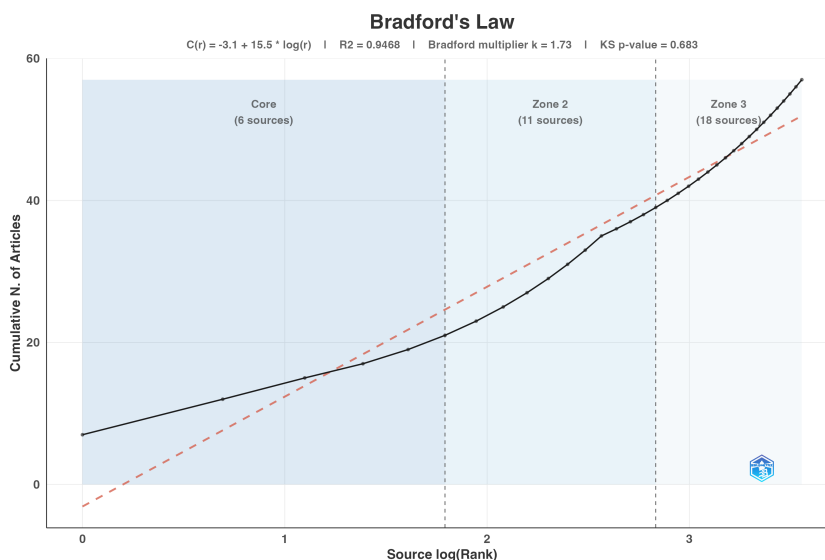
Gambar 4 menyajikan rata-rata sitasi per artikel per tahun untuk masing-masing kohort tahun terbit. Pola yang tampak berfluktuasi cukup tajam, dengan puncak dampak sitasi teramati pada kohort tahun 2018 dan 2021 (di atas 6 sitasi per tahun), yang kemudian menurun signifikan pada kohort 2020 dan 2022 (di bawah 1 sitasi per tahun), sebelum kembali meningkat pada kohort 2023. Pola fluktuatif ini wajar ditemukan pada dataset berukuran moderat (57 dokumen) yang tersebar pada sepuluh tahun terbit, karena rata-rata sitasi per kohort sangat dipengaruhi oleh satu atau dua artikel dengan sitasi ekstrem (outlier) dalam kohort tersebut. Sebagai ilustrasi, kohort 2021 turut memuat artikel Lombardi et al. (2021) yang memperoleh 245 sitasi jauh melampaui median sitasi dataset sehingga secara signifikan mengangkat rata-rata sitasi per tahun kohort tersebut.



Gambar 4. Average Article Citation per Year

Kontributor Sumber (Jurnal) dan Hukum Bradford

Analisis Hukum Bradford pada Gambar 5 mengidentifikasi tiga zona sumber: Zona Inti (Core) yang terdiri atas 6 jurnal, Zona 2 sebanyak 11 jurnal, dan Zona 3 sebanyak 18 jurnal, dengan model kurva $C(r) = -3,1 + 15,5 \log(r)$ yang memiliki kesesuaian sangat baik ($R^2 = 0,9468$) dan multiplier Bradford $k = 1,73$. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2, jurnal inti didominasi oleh ACM Transactions on Graphics (7 dokumen) dan IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (5 dokumen), diikuti Computer Graphics Forum (3 dokumen).



Gambar 5. Kurva Hukum Bradford (Bradford's Law)

Tabel 2. Top 10 Sumber (Jurnal) Publikasi

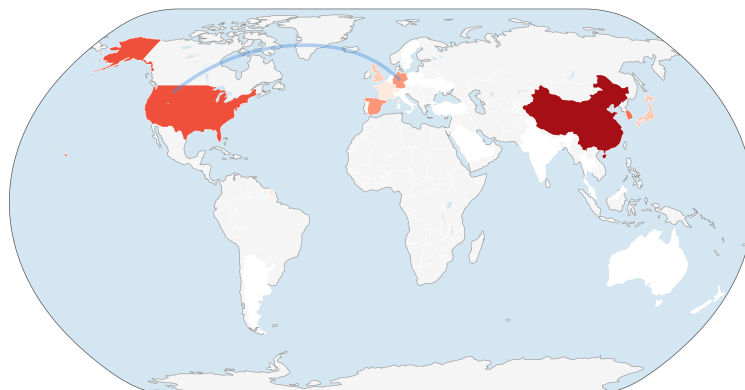
Peringkat	Nama Jurnal	Jumlah Dokumen
1	ACM Transactions on Graphics	7
2	IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	5
3	Computer Graphics Forum	3
4	SMPTE Motion Imaging Journal	2
5	Visual Computer	2
6	Computer-Aided Design and Applications	2
7	Computers and Graphics (Pergamon)	2
8	Journal of Image and Graphics (United Kingdom)	2
9	IEEE Access	2
10	Applied Sciences (Switzerland)	2

Konsentrasi publikasi pada kedua jurnal unggulan bidang grafika komputer ini mengonfirmasi bahwa penelitian real-time rendering untuk animasi digital secara epistemologis berakar kuat pada komunitas ilmu komputer grafis (computer graphics community) yang telah mapan, bukan pada jurnal-jurnal khusus animasi atau seni digital yang jumlahnya relatif terbatas. Pola dispersi menuju Zona 3 yang lebih luas (18 jurnal dengan kontribusi masing-masing rendah) turut mengindikasikan sifat interdisipliner bidang ini, yang merambah pula ke jurnal-jurnal aplikasi seperti Applied Sciences dan IEEE Access.

Kolaborasi Internasional dan Kontribusi Negara

Gambar 6 dan Tabel 3 menampilkan pola kontribusi dan kolaborasi negara pada bidang penelitian ini. Tiongkok menempati posisi teratas dengan keterlibatan pada 20 dokumen, diikuti Amerika Serikat (9 dokumen), Korea Selatan (7 dokumen), Jerman dan Spanyol (masing-masing 5 dokumen). Menariknya, apabila ditinjau dari dampak sitasi, Amerika Serikat justru memimpin dengan total 443 sitasi dari 9 dokumennya (rata-rata 49,2 sitasi per dokumen), jauh melampaui Tiongkok yang memperoleh 140 sitasi dari 20 dokumen (rata-rata 7 sitasi per dokumen). Pola ini menunjukkan fenomena high productivity, moderate

impact pada Tiongkok, berlawanan dengan pola moderate productivity, high impact pada Amerika Serikat sebuah temuan yang selaras dengan pola umum yang kerap dilaporkan pada studi bibliometrik lintas bidang, di mana volume publikasi tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan dampak sitasi per dokumen.



Gambar 6. Peta Kolaborasi Negara (Country Collaboration Map)

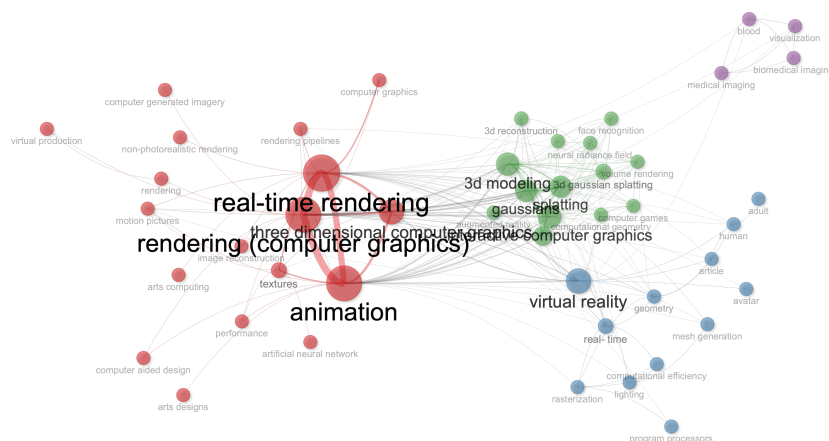
Tabel 3. Top 10 Negara Kontributor dan Dampak Sitasi

Peringkat	Negara	Jml. Dokumen	Total Sitasi	Rata-rata Sitasi/Dok.
1	Tiongkok	20	140	7,00
2	Amerika Serikat	9	443	49,22
3	Korea Selatan	7	12	1,71
4	Jerman	5	175	35,00
5	Spanyol	5	61	12,20
6	Inggris	3	24	8,00
7	Jepang	3	15	5,00
8	Hong Kong	2	8	4,00
9	Prancis	2	54	27,00
10	Makau	2	14	7,00

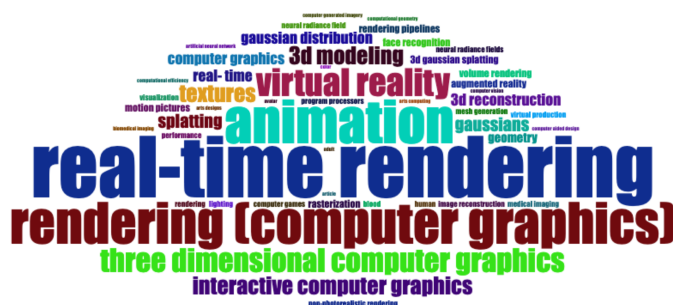
Peta kolaborasi pada Gambar 6 turut memperlihatkan garis penghubung (collaboration tie) antara Amerika Serikat dan kawasan Eropa (khususnya Jerman), mengindikasikan Jerman sebagai simpul kolaborasi (collaboration hub) yang menjembatani riset Amerika Utara dan Eropa Barat pada bidang ini sejalan dengan intensitas riset neural rendering dan avatar digital yang banyak dikembangkan oleh laboratorium riset seperti Max Planck Institute for Informatics di Jerman, yang kerap berkolaborasi dengan institusi Amerika Serikat seperti Meta Reality Labs dan Carnegie Mellon University pada topik-topik seperti Gaussian head avatars dan volumetric neural rendering.

Struktur Intelektual: Co-occurrence Kata Kunci

Peta co-occurrence pada Gambar 7 mengidentifikasi empat kluster tematik utama yang ditandai dengan warna berbeda. Kluster merah, yang berpusat pada node real-time rendering, rendering (computer graphics), dan animation, merupakan kluster terbesar dan paling padat, berisikan dengan istilah-istilah terkait produksi seperti virtual production, motion pictures, computer aided design, dan arts computing. Kluster hijau berpusat pada 3d modeling, gaussians, dan splatting, berisikan erat dengan 3d reconstruction, neural radiance field, dan 3d gaussian splatting mengindikasikan kluster teknis terkait representasi tiga dimensi berbasis pembelajaran mesin generasi terbaru. Kluster biru berpusat pada virtual reality dan real-time, merambah ke istilah seperti rasterization, lighting, dan computational efficiency, mencerminkan sisi optimasi performa komputasi dari rendering interaktif. Kluster ungu yang lebih kecil, berpusat pada medical imaging, blood, dan visualization, menunjukkan adanya aplikasi lintas domain dari teknik rendering real-time ke bidang visualisasi medis sebuah temuan menarik yang mengindikasikan transfer pengetahuan (knowledge spillover) dari komunitas grafika komputer animasi ke komunitas biomedis.



Gambar 7. Peta Co-occurrence Kata Kunci (Keyword Co-occurrence Network)



Gambar 8. Word Cloud Kata Kunci Dominan

Tabel 4. Top 8 Kata Kunci Penulis dan Kata Kunci Indeks

Author Keyword	Freq.	Index Keyword	Freq.
real-time rendering	23	animation	21
virtual reality	6	rendering (computer graphics)	21
3d gaussian splatting	4	real-time rendering	20
3d reconstruction	4	virtual reality	15
rendering	3	three dimensional computer graphics	12
animation	3	interactive computer graphics	9
neural radiance fields	3	textures	9
non-photorealistic rendering	3	3d modeling	8

Word cloud pada Gambar 8 menegaskan dominasi istilah real-time rendering, rendering (computer graphics), animation, virtual reality, dan three dimensional computer graphics sebagai istilah dengan frekuensi kemunculan tertinggi, konsisten dengan hasil analisis co-occurrence pada Gambar 7 maupun Tabel 4 mengenai kata kunci penulis dan indeks yang paling sering muncul. Keselarasan antara ketiga sumber data ini (jaringan co-occurrence, word cloud, dan tabel frekuensi kata kunci) memperkuat validitas temuan bahwa inti konseptual bidang penelitian ini memang berpusat pada persinggungan antara teknik rendering real-time dan proses produksi animasi tiga dimensi.

Dokumen dengan Dampak Sitasi Tertinggi

Tabel 5 menyajikan sepuluh dokumen dengan jumlah sitasi tertinggi dalam dataset. Artikel Lombardi et al. (2021) tentang "Mixture of Volumetric Primitives for Efficient Neural Rendering" yang diterbitkan pada ACM Transactions on Graphics menempati posisi teratas dengan 245 sitasi, jauh melampaui dokumen lainnya. Dominasi artikel ini mencerminkan signifikansi kontribusinya dalam merintis pendekatan hybrid antara representasi volumetrik dan efisiensi komputasi real-time, yang kemudian banyak dirujuk sebagai fondasi bagi perkembangan teknik neural rendering dan Gaussian splatting yang marak pada 2023–2025.

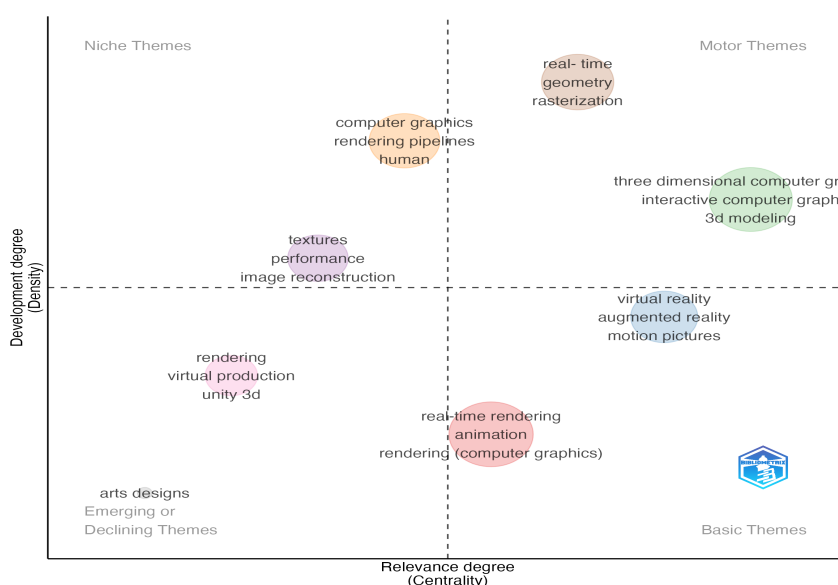
Artikel peringkat kedua, Thies et al. (2018) mengenai "FaceVR", turut menegaskan pentingnya aplikasi rendering real-time pada domain reenactment wajah dan virtual reality sejak fase awal perkembangan bidang ini.

Tabel 5. Top 10 Dokumen dengan Sitasi Tertinggi

Penulis	Tahun	Judul	Sumber	Sitasi
Lombardi et al.	2021	Mixture of volumetric primitives for efficient neural rendering	ACM Transactions on Graphics	245
Thies et al.	2018	FaceVR: Real-time gaze-aware facial reenactment in virtual reality	ACM Transactions on Graphics	108
Zheng et al.	2023	AvatarReX: Real-Time Expressive Full-body Avatars	ACM Transactions on Graphics	84
Lawonn et al.	2016	Occlusion-free blood flow animation with wall thickness visualization	IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics	38
Marrinan & Papka	2021	Real-time omnidirectional stereo rendering	IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics	26
Wu & Yuksel	2019	Real-time cloth rendering with fiber-level detail	IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics	25
Silva Jasau et al.	2024	Virtual production: real-time rendering pipelines for indie studios	Applied Sciences (Switzerland)	22
Beacco et al.	2016	A survey of real-time crowd rendering	Computer Graphics Forum	22
Teotia et al.	2024	GaussianHeads: end-to-end learning of drivable Gaussian head avatars	ACM Transactions on Graphics	17
Suarez et al.	2017	Real-time 3D rendering with hatching	Visual Computer	16

Pemetaan Tematik (Thematic Map)

Gambar 9 memetakan tema penelitian pada dua dimensi: sentralitas (relevansi/centrality) pada sumbu horizontal dan kepadatan (perkembangan/density) pada sumbu vertikal, menghasilkan empat kuadran Motor Themes, Basic Themes, Niche Themes, dan Emerging or Declining Themes. Kluster real-time rendering, rendering (computer graphics), dan animation menempati kuadran Basic Themes (sentralitas tinggi, kepadatan rendah), yang mengindikasikan tema tersebut sangat sentral dan menjadi fondasi bidang penelitian secara keseluruhan, namun secara internal belum terlalu terkonsolidasi atau matang sebagai sub-bidang yang berdiri sendiri konsisten dengan sifatnya sebagai istilah payung (umbrella term) yang menaungi berbagai subtema teknis di bawahnya.

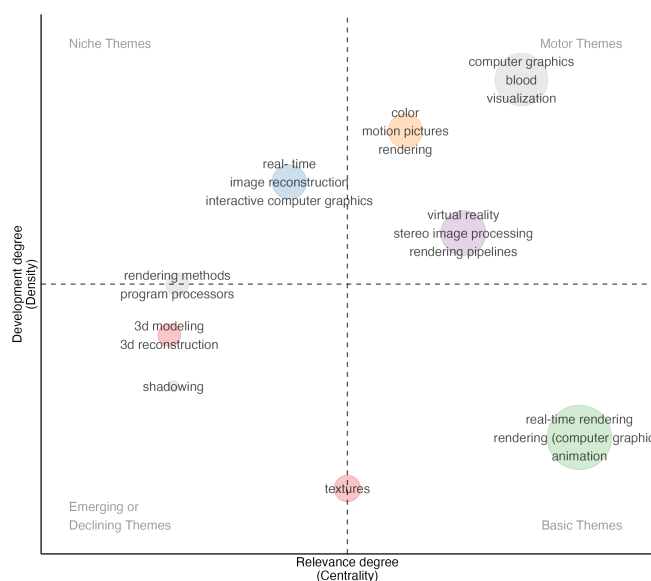


Gambar 9. Thematic Map Keseluruhan Periode (2016–2025)

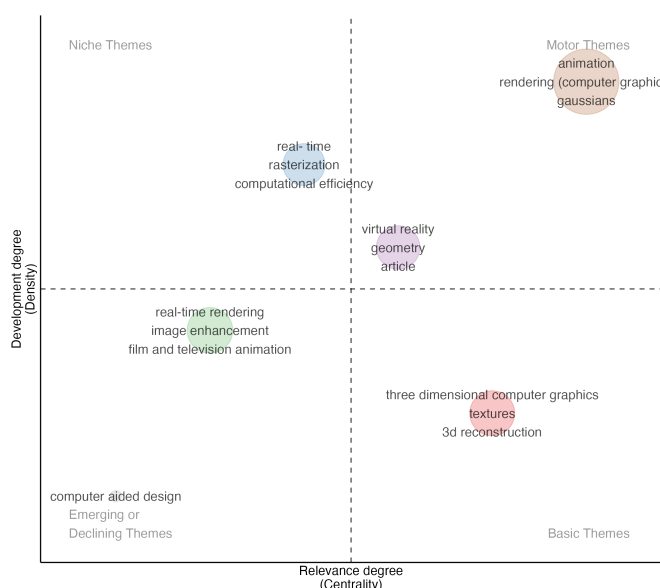
Sebaliknya, kluster virtual reality, stereo image processing, dan rendering pipelines, serta kluster color, motion pictures, rendering menempati kuadran Motor Themes (sentralitas dan kepadatan sama-sama tinggi), menandakan tema-tema tersebut telah berkembang matang sekaligus tetap menjadi pendorong utama (driving force) perkembangan bidang. Sementara itu, kluster 3d modeling dan 3d reconstruction berada pada kuadran Niche Themes dengan kepadatan rendah, mengindikasikan tema tersebut masih relatif terisolasi dari inti jaringan konseptual bidang meski memiliki keterkaitan internal yang berkembang.

Evolusi Tematik Antarperiode

Perbandingan antara Gambar 11 dan Gambar 12 mengungkap evolusi tematik yang signifikan antarperiode publikasi. Pada sub-periode awal, tema real-time rendering, image enhancement, dan film and television animation menempati posisi mendekati pusat kuadran namun dengan sentralitas relatif moderat, berdampingan dengan tema three dimensional computer graphics, textures, dan 3d reconstruction pada kuadran Basic Themes. Pada sub-periode terbaru, tampak pergeseran yang jelas: kluster animation, rendering (computer graphics), dan gaussians justru bergeser ke kuadran Motor Themes dengan sentralitas dan kepadatan tinggi, menandakan tema-tema tersebut khususnya istilah gaussians yang berkaitan dengan teknik 3D Gaussian splatting telah bertransformasi dari sekadar istilah teknis periferan menjadi salah satu pendorong utama perkembangan bidang pada periode terkini.

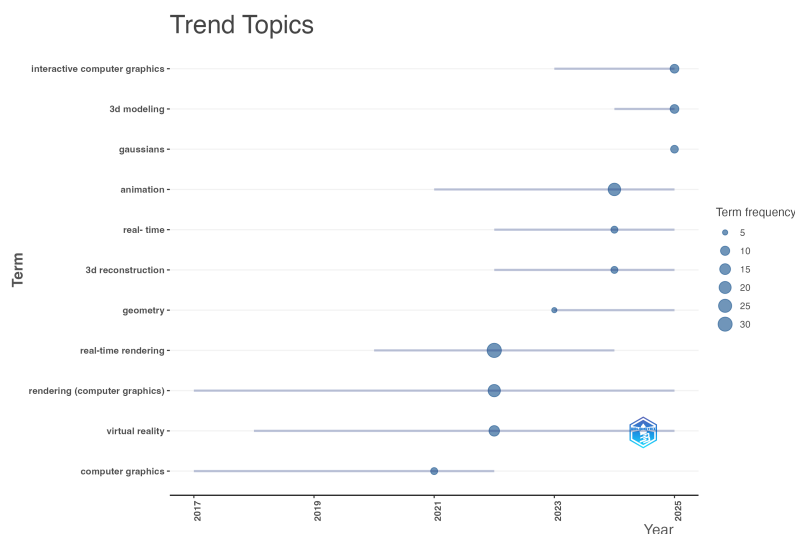


Gambar 11. Thematic Map Sub-periode Awal



Gambar 12. Thematic Map Sub-periode Terbaru

Pergeseran ini didukung pula oleh Gambar 11 (Trend Topics) yang menunjukkan bahwa istilah gaussians, 3d modeling, dan interactive computer graphics merupakan istilah-istilah yang median tahun kemunculannya paling mendekati tahun 2025, sementara istilah computer graphics dan virtual reality memiliki median kemunculan yang jauh lebih awal (mendekati 2021 dan sebelumnya).



Gambar 13. Trend Topics berdasarkan Median Tahun Kemunculan

Gambar 13 secara eksplisit mengonfirmasi arah pergeseran tematik bidang ini: istilah real-time rendering dan rendering (computer graphics) memiliki rentang kemunculan yang panjang (dari 2017 hingga mendekati 2025) dengan frekuensi istilah tertinggi dalam dataset (ukuran bubble terbesar), menegaskan posisinya sebagai tema fondasional yang bertahan sepanjang periode penelitian. Sebaliknya, istilah gaussians, 3d modeling, dan interactive computer graphics baru muncul mendekati tahun 2024–2025 dengan rentang kemunculan yang jauh lebih pendek, mengonfirmasi statusnya sebagai tema emerging yang tumbuh sangat pesat dalam waktu singkat.

Pembahasan

Bila dibaca sebagai satu kesatuan, temuan pada bagian Hasil menunjukkan satu hal yang cukup jelas: riset real-time rendering untuk produksi animasi digital sedang bergerak dari satu cara kerja teknis ke cara kerja yang lain. Peralihan ini tidak terjadi sekaligus, tetapi jejaknya terbaca konsisten di hampir seluruh indikator bibliometrik yang dianalisis. Lonjakan tajam jumlah publikasi sejak 2021 (Gambar 2) menjadi titik masuk yang paling mudah dilihat. Angka ini sulit dijelaskan sebagai kebetulan. Ia lebih masuk akal dibaca sebagai respons terhadap makin cepatnya adopsi rendering interaktif berbasis GPU modern di industri produksi visual, arah yang sudah diperkirakan sejak tinjauan awal tentang bertemunya teknologi game engine dan produksi film (Beacco et al., 2016). Pola pertumbuhan itu cocok dengan gagasan innovation diffusion. Sebuah terobosan metodologis memicu gelombang riset lanjutan dalam waktu singkat. Dalam kasus ini pemicunya jelas: publikasi neural radiance field pada 2020 dan 3D Gaussian splatting pada 2023. Jejak keduanya tampak pada melonjaknya istilah gaussians dan 3d gaussian splatting di peta evolusi tematik (Gambar 10b) maupun pada trend topics (Gambar 11).

Pola kolaborasi antarnegara (Gambar 6, Tabel 3) membuka dinamika yang menarik untuk studi kolaborasi ilmiah internasional. Tiongkok unggul dari sisi jumlah, sementara Amerika Serikat unggul dari sisi dampak sitasi. Kontras ini bukan hal baru. Pola serupa muncul di banyak bidang teknologi tinggi lain. Negara dengan ekosistem manufaktur dan penerapan teknologi berskala besar, seperti Tiongkok pada industri gim dan animasi, cenderung menghasilkan volume riset terapan yang tinggi. Sebaliknya, negara dengan konsentrasi laboratorium riset dasar dan institusi akademik papan atas, seperti Amerika Serikat, cenderung menghasilkan riset yang lebih banyak disitasi meski volumenya lebih rendah. Kontras itu punya konsekuensi langsung bagi kebijakan riset nasional. Menaikkan jumlah publikasi tidak otomatis menaikkan dampak ilmiah. Karena itu, upaya menjaga kualitas dan orisinalitas riset perlu diberi bobot yang setara dengan upaya memperbanyak keluaran, bukan sekadar menjadi pelengkap.

Struktur intelektual bidang ini, yang terbaca lewat analisis co-occurrence (Gambar 7) dan thematic map (Gambar 9), menegaskan sifatnya yang lintas disiplin. Rentangnya lebar: dari inti grafika komputer seperti rasterization, shading, dan GPU rendering, hingga penerapan di domain lain seperti visualisasi medis dan

virtual reality. Sifat lintas disiplin ini wajar. Bidang riset yang bertumpu pada teknologi rendering visual biasanya menyebar ke domain lain begitu teknik intinya makin matang. Pola yang sama terlihat pada meluasnya Zona 2 dan Zona 3 Hukum Bradford (Gambar 5) ke jurnal-jurnal aplikatif di luar jurnal inti grafika komputer.

Temuan yang paling penting, baik secara teoretis maupun praktis, muncul dari perbandingan Gambar 10a dan Gambar 10b. Klaster gaussians dan animation bergeser posisi. Pada sub-periode awal keduanya berada di kuadran yang relatif pinggiran; pada sub-periode terbaru keduanya masuk ke kuadran Motor Themes. Pergeseran itu berarti sesuatu. Teknik 3D Gaussian splatting bukan tren sesaat, melainkan sudah tertanam di inti konseptual riset rendering untuk animasi. Ia tidak lagi berada di tepi percakapan akademik, tetapi menjadi salah satu penggeraknya. Konsekuensi teoretisnya cukup besar. Kerangka konseptual real-time rendering perlu diperluas agar mampu menampung paradigma representasi eksplisit berbasis primitif Gaussian. Paradigma ini hadir sebagai alternatif dari rasterisasi poligonal yang selama ini mendominasi literatur klasik grafika komputer, bukan sekadar tambahan kecil di atasnya. Dari sisi industri, arah ini memberi sinyal bagi studio animasi dan efek visual. Investasi riset dan pengembangan pada rendering berbasis Gaussian splatting dan neural rendering layak masuk dalam strategi jangka menengah, bukan ditunda sampai teknologinya terlanjur umum. Alasannya terlihat pada data. Kecepatan pertumbuhan tema ini dalam literatur akademik (Gambar 11) menandakan teknologi yang sedang matang dan akan segera merambah aplikasi komersial berskala luas. Pola ini sudah pernah terjadi pada neural radiance field, sehingga bukan spekulasi kosong.

Meski begitu, dataset penelitian ini belum menyediakan bukti yang cukup soal seberapa jauh teknik rendering neural generasi terbaru benar-benar terpakai dalam alur produksi animasi komersial berskala penuh. Sebagian besar artikel pada klaster gaussians dan neural radiance field justru berasal dari domain riset computer vision dan graphics murni, bukan dari studi kasus penerapan di studio produksi animasi. Di sinilah letak kesenjangannya. Ada jarak antara kematangan teknik di ranah riset dan bukti penerapannya di lapangan produksi. Research gap inilah yang menjadi salah satu temuan penting, dan akan diuraikan lebih lanjut pada bagian berikutnya.

Research Gap dan Novelty

Berdasarkan hasil pemetaan tematik dan evolusi tematik, teridentifikasi beberapa research gap yang relevan. Pertama, tema dominan (real-time rendering, animation, rendering (computer graphics)) telah mapan secara struktural namun belum banyak dihubungkan secara eksplisit dengan tema berkembang (gaussians, 3d gaussian splatting, neural radiance field) dalam satu kerangka kajian yang secara khusus membahas integrasinya ke dalam pipeline produksi animasi komersial. Kedua, sebagaimana tampak pada klaster ungu pada Gambar 7 (medical imaging, blood, visualization), aplikasi lintas domain dari teknik rendering real-time masih terbatas pada beberapa domain tertentu, sementara potensi aplikasi pada domain produksi kreatif lain misalnya animasi edukasi atau animasi budaya belum banyak tergambar dalam dataset. Ketiga, tema-tema pada kuadran Niche Themes (3d modeling, 3d reconstruction) mengindikasikan bahwa aspek rekonstruksi tiga dimensi otomatis dari data nyata (misalnya melalui fotogrametri atau pemindaian) untuk keperluan animasi masih menjadi area yang relatif belum terkonsolidasi dengan baik ke dalam arus utama penelitian rendering real-time.

Novelty penelitian ini terletak pada penyajian bukti bibliometrik pertama sejauh dapat diverifikasi dari dataset yang dianalisis mengenai pergeseran struktural dari paradigma rasterisasi konvensional menuju representasi berbasis Gaussian splatting dalam konteks spesifik produksi animasi digital, yang divisualisasikan secara eksplisit melalui perbandingan dua peta evolusi tematik antarperiode. Novelty ini menjadi dasar bagi perumusan agenda penelitian masa depan yang berfokus pada integrasi teknik rendering neural generasi terbaru ke dalam konteks aplikatif produksi animasi, bukan sekadar pengembangan algoritmik pada domain computer vision secara umum.

Berdasarkan hasil analisis co-occurrence dan thematic mapping, dapat dibangun kerangka konseptual yang menghubungkan tiga lapis konsep utama yang muncul dari dataset: (1) lapis fondasi (foundation layer), terdiri atas real-time rendering, rendering (computer graphics), dan three dimensional computer graphics sebagai konsep payung yang menaungi keseluruhan bidang; (2) lapis teknik representasi (representation layer), mencakup dua aliran paradigma yang teridentifikasi dalam data rasterisasi konvensional (rendering pipelines, textures, rasterization) di satu sisi, dan representasi neural/Gaussian (gaussians, splatting, neural radiance field, 3d gaussian splatting) di sisi lain; serta (3) lapis aplikasi (application layer), mencakup animation, virtual production, virtual reality, dan motion pictures sebagai konteks penerapan konkret dari kedua paradigma teknik tersebut. Ketiga lapis ini saling terhubung melalui simpul animation dan virtual reality yang tampak menjadi titik temu (bridging node) antara lapis teknik dan lapis aplikasi pada peta co-

occurrence (Gambar 7). Variabel-variabel di luar ketiga lapis ini misalnya aspek psikologi persepsi visual penonton atau aspek ekonomi produksi tidak dimasukkan ke dalam kerangka konseptual karena tidak ditemukan representasinya secara eksplisit pada kata kunci maupun klaster tematik dalam dataset penelitian ini.

Simpulan

Penelitian ini memetakan struktur pengetahuan global bidang real-time rendering untuk produksi animasi digital melalui analisis bibliometrik terhadap 57 artikel jurnal Scopus periode 2016–2025. Hasil penelitian menunjukkan tren pertumbuhan publikasi yang meningkat tajam sejak 2021, didominasi secara kuantitas oleh Tiongkok namun secara dampak sitasi oleh Amerika Serikat. Struktur intelektual bidang ini bertumpu pada jurnal-jurnal inti grafika komputer (ACM Transactions on Graphics dan IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics) dan berpusat pada tema fondasional real-time rendering, animation, serta rendering (computer graphics). Temuan paling signifikan adalah teridentifikasinya pergeseran tematik yang jelas dari paradigma rasterisasi konvensional menuju representasi berbasis 3D Gaussian splatting dan neural radiance field, yang bertransformasi dari tema periferan menjadi tema pendorong utama (motor theme) pada periode publikasi terbaru. Implikasi teoretis penelitian ini adalah perlunya perluasan kerangka konseptual grafika komputer klasik untuk mengakomodasi paradigma representasi neural/Gaussian sebagai aliran teknik yang setara kedudukannya dengan rasterisasi poligonal dalam konteks rendering real-time untuk animasi. Implikasi praktis bagi institusi pendidikan vokasi dan teknologi khususnya pada domain Technical and Vocational Education and Training (TVET) dan pendidikan STEM adalah perlunya pembaruan kurikulum yang mengintegrasikan pengenalan teknik Gaussian splatting dan neural rendering sebagai kompetensi pelengkap bagi kompetensi rendering konvensional yang selama ini menjadi standar pengajaran animasi digital. Implikasi bagi industri adalah perlunya strategi adopsi teknologi yang mempertimbangkan momentum pertumbuhan riset pada teknik-teknik rendering generasi terbaru sebagai indikator awal (leading indicator) tren teknologi produksi yang akan datang. Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diungkapkan secara jujur. Pertama, dataset terbatas pada satu basis data (Scopus) dan tidak melibatkan basis data lain seperti Web of Science, Google Scholar, atau IEEE Xplore, sehingga cakupan literatur yang dianalisis tidak sepenuhnya menyeluruh (comprehensive). Kedua, ukuran dataset yang moderat (57 dokumen) membatasi kekuatan statistik analisis tren tahunan, khususnya pada model proyeksi siklus hidup publikasi yang hanya memiliki koefisien determinasi moderat ($R^2 = 0,575$) sehingga proyeksi puncak pertumbuhan pada Gambar 3 tidak dapat dimaknai sebagai prediksi definitif. Ketiga, analisis co-occurrence dan pemetaan tematik bergantung pada metadata kata kunci yang disediakan penulis maupun pengindeks Scopus, yang berpotensi tidak sepenuhnya merepresentasikan keseluruhan substansi teknis setiap artikel. Keempat, penelitian ini bersifat deskriptif-pemetaan (mapping) dan tidak melakukan analisis konten mendalam (deep content analysis) terhadap teks lengkap artikel, sehingga interpretasi terhadap makna substantif setiap klaster tematik didasarkan pada pola kata kunci dan bukan pembacaan menyeluruh terhadap isi artikel. Berdasarkan research gap dan keterbatasan yang telah diuraikan, sejumlah agenda penelitian masa depan dapat dirumuskan. Pertama, diperlukan studi kasus empiris yang secara khusus mengkaji penerapan teknik 3D Gaussian splatting dan neural radiance field ke dalam pipeline produksi animasi komersial berskala penuh, mengingat literatur yang ada saat ini lebih banyak berasal dari domain riset computer vision murni. Kedua, diperlukan studi bibliometrik lanjutan yang memperluas cakupan basis data (multi-database bibliometric study) untuk memvalidasi temuan pergeseran tematik yang diidentifikasi dalam penelitian ini. Ketiga, mengingat teridentifikasinya aplikasi lintas domain pada visualisasi medis, penelitian masa depan dapat mengeksplorasi lebih lanjut potensi transfer teknologi rendering real-time dari domain animasi ke domain aplikasi kreatif lain di luar yang telah teridentifikasi dalam dataset ini, seperti animasi edukasi, animasi budaya, maupun animasi interaktif berbasis extended reality. Keempat, penelitian mengenai efisiensi komputasi dan skalabilitas teknik rendering berbasis Gaussian pada perangkat dengan kapasitas komputasi terbatas (mobile dan edge device) juga menjadi arah yang relevan mengingat isu computational efficiency yang teridentifikasi sebagai bagian dari klaster tematik dalam penelitian ini.

References

Alcántara, J. C., Tasic, I., & Cano, M.-D. (2024). Enhancing digital identity: Evaluating avatar creation tools and privacy challenges for the metaverse. *Information (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/info15100624>

- Alkawaz, M. H., Basori, A. H., & Mohd Hashim, S. Z. (2017). Oxygenation absorption and light scattering driven facial animation of natural virtual human. *Multimedia Tools and Applications*, 76(7), 9587–9623. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3564-2>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Bajo, J. M., Delrieux, C., & Patow, G. (2022). A comprehensive method for liquid-to-solid interactions. *CLEI Electronic Journal (CLEIEj)*, 25(1). <https://doi.org/10.19153/CLEIEJ.25.1.4>
- Beacco, A., Pelechano, N., & Andújar, C. (2016). A survey of real-time crowd rendering. *Computer Graphics Forum*, 35(8), 32–50. <https://doi.org/10.1111/cgf.12774>
- Bonomi, M., & Boato, G. (2020). Digital human face detection in video sequences via a physiological signal analysis. *Journal of Electronic Imaging*, 29(1). <https://doi.org/10.1117/1.JEI.29.1.013009>
- Borkowski, A. S., & Nowakowski, P. (2023). Use of applications and rendering engines in architectural design – State-of-the-art. *Budownictwo i Architektura*, 22(1), 5–14. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.3327>
- Chen, C., Yu, L., Yang, Q., Zheng, A., & Xie, H. (2025). THGS: Lifelike talking human avatar synthesis from monocular video via 3D Gaussian splatting. *Computer Graphics Forum*, 44(1). <https://doi.org/10.1111/cgf.15282>
- Christen, J. (2017). Reconstructing Vindonissa as a living document: A case-study of digital reconstruction for output to pre-rendered and real-time applications. *Studies in Digital Heritage*, 1(2), 396–408. <https://doi.org/10.14434/sdh.v1i2.23280>
- Curtis, C., Dart, K., Latzko, T., & Kahrs, J. (2020). Real-time non-photorealistic animation for immersive storytelling in “Age of Sail”. *Graphics and Visual Computing*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.cagx.2019.100012>
- Dominguez-Elvira, H., Alfonso-Arsuaga, M., Barrueco-Garcia, A., & Comino-Trinidad, M. (2025). 3DGStrands: Personalized 3D Gaussian splatting for realistic hair representation and animation. *Computers and Graphics*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2025.104261>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Fei, J. (2022). Real-time simulation method of flame animation based on the deep stripping algorithm and texture mapping. *Journal of Sensors*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2580575>
- Gao, J., Chen, Z., Yan, Y., Pan, B., Wang, Z., Lyu, J., & Yang, X. (2025). EvaSurf: Efficient view-aware implicit textured surface reconstruction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(9), 6307–6320. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3508712>
- Gao, X., Liu, D., & Zhang, J. (2024). Multi-modal digital human modeling, synthesis, and driving: A survey. *Journal of Image and Graphics*, 29(9), 2494–2512. <https://doi.org/10.11834/jig.230649>
- Grau, O., Helzle, V., Joris, E., Knop, T., Michoud, B., Slusallek, P., Bekaert, P., & Starck, J. (2017). Dreamspace: A platform and tools for collaborative virtual production. *SMPTE Motion Imaging Journal*, 126(6), 29–36. <https://doi.org/10.5594/JMI.2017.2712358>
- Guo, J., Zong, Z., Song, Y., Fu, X., Tao, C., Guo, Y., & Yan, L.-Q. (2022). Efficient light probes for real-time global illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 41(6). <https://doi.org/10.1145/3550454.3555452>
- Guo, Z., Liu, H., Liu, X., & Gao, Y. (2016). Lattice Boltzmann fluid simulation based on parameters. *Journal of System Simulation*, 28(9), 2054–2061.
- Hu, Y., Chen, L., Xie, H., Ge, Y., Zhou, S., & Cai, X. (2024). Real-time non-photorealistic rendering method for black and white comic style in games and animation. *Journal of System Simulation*, 36(7), 1699–1712. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0458>
- Huang, C., Zhou, W., Lan, Y., Chen, F., Hao, Y., Cheng, Y., & Peng, Y. (2018). A novel WebVR-based lightweight framework for virtual visualization of blood vasculum. *IEEE Access*, 6, 27726–27735. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2840494>
- Huang, T., Shi, H., Wang, M., Qiu, Y., Yang, Y., & Wu, K. (2025). Real-time knit deformation and rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 44(4). <https://doi.org/10.1145/3731184>
- Kaplan, K. (2022). Real-time rendering engines help visualize, model, and animate ancient cities: An example in Antioch. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/app122312316>
- Kim, D.-J., & Kim, J.-Y. (2025). In-depth analysis and implementation strategies of 3D graphics technology for VR animation production. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 9(3), 1456–1465. <https://doi.org/10.55214/25768484.v9i3.5559>

- Kim, D.-J., & Kim, Y.-N. (2025). Design framework of Unreal Engine for VR animation space analysis. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 9(3), 1448–1455. <https://doi.org/10.55214/25768484.v9i3.5558>
- Kim, M., Kim, T., & Lee, K.-T. (2025). 3D digital human generation from a single image using generative AI with real-time motion synchronization. *Electronics (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/electronics14040777>
- Kim, Y. (2022). Design and performance evaluation of soft 3D models using metaball in Unreal Engine 4. *Journal of Mobile Multimedia*, 18(6), 1795–1810. <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.18614>
- Lawonn, K., Glaßer, S., Vilanova, A., Preim, B., & Isenberg, T. (2016). Occlusion-free blood flow animation with wall thickness visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(1), 728–737. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2467961>
- Li, H., & Su, Y. (2024). Dynamic scene generation and animation rendering integrating CAD modeling and reinforcement learning. *Computer-Aided Design and Applications*, 21(S23), 144–158. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.S23.144-158>
- Lombardi, S., Simon, T., Schwartz, G., Zollhoefer, M., Sheikh, Y., & Saragih, J. (2021). Mixture of volumetric primitives for efficient neural rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4). <https://doi.org/10.1145/3450626.3459863>
- Marrinan, T., & Papka, M. E. (2021). Real-time omnidirectional stereo rendering: Generating 360° surround-view panoramic images for comfortable immersive viewing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5), 2587–2596. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3067780>
- Meister, D., Pospíšil, A., Sato, I., & Bittner, J. (2021). Spatio-temporal BRDF: Modeling and synthesis. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 97, 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.04.001>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hrobjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paier, W., Hilsmann, A., & Eisert, P. (2023). Unsupervised learning of style-aware facial animation from real acting performances. *Graphical Models*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2023.101199>
- Petikam, L., Anjyo, K., & Rhee, T. (2021). Shading rig: Dynamic art-directable stylised shading for 3D characters. *ACM Transactions on Graphics*, 40(5). <https://doi.org/10.1145/3461696>
- Pikulsky, R. M., & Kuliabko, P. P. (2022). Real-time global illumination computation status and further research prospects. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physics and Mathematics*, 2022(4), 72–79. <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2022/4.9>
- Podee, N., Max, N., Iwasaki, K., & Dobashi, Y. (2021). Temporal and spatial anti-aliasing for rendering reflections on water waves. *Computational Visual Media*, 7(2), 201–215. <https://doi.org/10.1007/s41095-021-0204-1>
- Porwal, S., & Khare, S. (2016). Quad tree-based surface construction of digital globe for real time application. *IETE Technical Review*, 33(6), 615–620. <https://doi.org/10.1080/02564602.2015.1134287>
- Rønnow, M. J. L., Assarsson, U., & Fratarcangeli, M. (2021). Fast analytical motion blur with transparency. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 95, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.01.006>
- Schnürer, R., Öztireli, A. C., Heitzler, M., Sieber, R., & Hurni, L. (2024). Inferring implicit 3D representations from human figures on pictorial maps. *Cartography and Geographic Information Science*, 51(1), 97–113. <https://doi.org/10.1080/15230406.2023.2224063>
- Shen, D., & Dong, Y. (2024). Research on the application of digital media art in film and television animation in multimedia perspective. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-0725>
- Silva Jasauí, D., Martí-Testón, A., Muñoz, A., Moriniello, F., Solanes, J. E., & Gracia, L. (2024). Virtual production: Real-time rendering pipelines for indie studios and the potential in different scenarios. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/app14062530>
- Smith, M. D., & Zink, M. (2022). Hue-preserving color transforms for LED wall virtual production workflows. *SMPTE Motion Imaging Journal*, 131(10), 38–44. <https://doi.org/10.5594/JMI.2022.3208274>
- Suarez, J., Belhadj, F., & Boyer, V. (2017). Real-time 3D rendering with hatching. *Visual Computer*, 33(10), 1319–1334. <https://doi.org/10.1007/s00371-016-1222-3>

- Sun, J., Shi, X., & Sun, S. (2024). Geometric lightweight design of digital twin model based on improved edge folding algorithm. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 40(4), 745–755. <https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2024.04.19>
- Tan, S. (2022). Animation image art design mode using 3D modeling technology. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6577461>
- Teotia, K., Kim, H., Garrido, P., Habermann, M., Elgharib, M., & Theobalt, C. (2024). GaussianHeads: End-to-end learning of drivable Gaussian head avatars from coarse-to-fine representations. *ACM Transactions on Graphics*, 43(6). <https://doi.org/10.1145/3687927>
- Teuber, M., Kunert, C., Schwandt, T., & Broll, W. (2025). Geometry-based light probe placement for real-time lighting in Gaussian splatting environments. *Visual Computer*, 41(14), 11783–11795. <https://doi.org/10.1007/s00371-025-04124-z>
- Thies, J., Zollhöfer, M., Stamminger, M., Theobalt, C., & Nießner, M. (2018). FaceVR: Real-time gaze-aware facial reenactment in virtual reality. *ACM Transactions on Graphics*, 37(2). <https://doi.org/10.1145/3182644>
- Tian, Y., & Yang, F. (2025). Deep learning-driven real-time rendering technology for film and television animation special effects. *International Journal of Information and Communication Technology*, 26(33), 57–75. <https://doi.org/10.1504/IJICT.2025.148653>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, D., Ge, Y., Yang, M., Yuan, H., Yang, Y., Ning, T., & Cai, J. (2016). Fast simulation of fish schooling under realistic sea water. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 7(10), 2177–2182.
- Wang, X. E., & Sin, Z. P. T. (2025). 3DGM: Deformable and texturable 3D Gaussian model via level-of-detail proxy. *Computer Graphics Forum*, 44(6). <https://doi.org/10.1111/cgf.70223>
- Wang, X., & Li, X. (2024). Computer aided animation art design and production based on virtual reality technology. *Computer-Aided Design and Applications*, 21(S14), 154–170. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.S14.154-170>
- Wu, K., & Yuksel, C. (2019). Real-time cloth rendering with fiber-level detail. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(2), 1297–1308. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2731949>
- Xia, B., Liu, Y., Zeng, W., Pu, Y., & Zhang, Y. (2023). Real-time indirect glossy reflection based on linearly transformed spherical distributions. *Journal of Image and Graphics*, 28(2), 545–555. <https://doi.org/10.11834/jig.211082>
- Yang, L., Xu, T., & Wu, E. (2016). Animating strokes in drawing process of Chinese ink painting. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 28(5), 742–749.
- Zhao, L., Lu, X., Fan, R., Im, S. K., & Wang, L. (2025). GaussianHand: Real-time 3D Gaussian rendering for hand avatar animation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(9), 6484–6496. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3516778>
- 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, J. (2024). A visual comparison study of ocean wave effect using real-time engine. *Journal of Image and Graphics (United Kingdom)*, 12(2), 145–151. <https://doi.org/10.18178/joig.12.2.145-151>
- Zhou, J., & Yun, T. S. (2021). Visual restoration of ocean wave effects produced by Houdini in the engine. *Journal of Image and Graphics (United Kingdom)*, 9(3), 109–113. <https://doi.org/10.18178/joig.9.3.109-113>
- Zhou, Z., Feng, Q., & Li, H. (2025). SynGauss: Real-time 3D Gaussian splatting for audio-driven talking head synthesis. *IEEE Access*, 13, 42167–42177. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3548015>