

Featured Research

Paradigma augmented reality dalam pelatihan olahraga: studi konseptual tentang cognitive load theory

Alzet Rama^{1*)}, Wiki Lofandri²

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

*) Correspondence regarding this article should be addressed to: Author address e-mail: alzetrama@unp.ac.id

Abstract: Revolusi digital secara radikal mengubah cara atlet mempersiapkan diri, dan Augmented Reality (AR) merupakan alat terpenting dalam perubahan ini. teoretis ini mengeksplorasi penerapan augmented reality (AR) dalam pelatihan olahraga, dengan menggunakan Teori Beban Kognitif (CLT) sebagai kerangka kerja untuk menilai dampaknya terhadap beban mental atlet. Evaluasi sistematis terhadap literatur menunjukkan bahwa AR memiliki kemampuan unik untuk mengoptimalkan beban kognitif. Ia secara efisien mengurangi stres mental yang tidak perlu dengan mengubah instruksi yang rumit menjadi petunjuk visual yang mudah dipahami dan terintegrasi secara spasial, yang menghilangkan efek "split-attention". Di sisi lain, AR meningkatkan beban kognitif yang relevan, yaitu upaya mental yang diperlukan untuk pembelajaran mendalam, dengan memberikan umpan balik real-time dan simulasi visual yang membantu membangun skema motorik yang kuat. Misalnya, dalam angkat beban, Anda dapat menggunakan visualisasi gerakan interaktif untuk membantu mengangkat beban. Dalam senam, dapat menggunakannya untuk memperbaiki postur secara langsung. Namun, masih ada masalah yang perlu diselesaikan, seperti risiko antarmuka yang buruk memperburuk kekacauan kognitif, biaya infrastruktur yang tinggi, dan kebutuhan pengguna untuk beradaptasi. Kami menyimpulkan bahwa integrasi strategis AR dan CLT menyediakan kerangka kerja yang kokoh untuk menciptakan lingkungan pelatihan yang adaptif dan berbasis bukti. Sinergi ini menjanjikan tidak hanya mempercepat proses menguasai kemampuan motorik yang kompleks, tetapi juga membuat jalur menuju performa atletik puncak lebih efisien dan berkelanjutan.

Keywords: Augmented Reality , Teori Beban Kognitif, Latihan Olahraga, Pembelajaran Motorik, Kinerja Atletik

Article History: Received on 10/7/2025; Revised on 25/7/2025; Accepted on 25/8/2025; Published Online: 29/8/2025.



This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2025 by author.

PENDAHULUAN

Revolusi teknologi digital telah mentransformasi landscape pelatihan olahraga secara fundamental, menggeser paradigma dari metode konvensional menuju pendekatan berbasis data dan imersif (Wu, 2021). Inovasi seperti wearable sensors, biomechanical analysis software, dan virtual training environments telah membuka dimensi baru dalam optimalisasi performa atlet (Arzehgar et al., 2025). Dalam ekosistem teknologi yang

berkembang pesat ini, Augmented Reality (AR) muncul sebagai salah satu terobosan paling menjanjikan dengan kemampuannya mengintegrasikan elemen digital ke dalam lingkungan fisik secara real-time, menciptakan peluang tanpa preseden untuk meningkatkan efektivitas pelatihan olahraga (Minaee, Liang, and Yan, 2022).

Augmented Reality menawarkan potensi revolusioner dalam pelatihan olahraga dengan memungkinkan atlet untuk memvisualisasikan teknik kompleks, menerima umpan balik langsung overlay pada bidang pandang mereka, dan berlatih dalam skenario simulasi yang disesuaikan (Adams et al., 2019). Teknologi ini tidak hanya memberikan tools untuk menganalisis gerakan dengan presisi tinggi, tetapi juga memfasilitasi pembelajaran motorik melalui representasi visual yang intuitif (Wu et al., 2019). Dengan kemampuan untuk menampilkan informasi kritis seperti sudut sendi, trajectory gerakan, atau posisi tubuh ideal secara langsung dalam konteks lingkungan latihan, AR berpotensi menjadi katalis untuk percepatan penguasaan keterampilan olahraga dan peningkatan kinerja atlet secara signifikan (Adams et al., 2019).

Memahami bagaimana Augmented Reality (AR) mempengaruhi proses kognitif atlet menjadi sangat krusial mengingat teknologi ini secara fundamental mengubah cara informasi disajikan dan diproses selama pelatihan (Keil et al., 2020). Setiap interaksi dengan antarmuka AR mulai dari visualisasi gerakan, umpan balik real-time, hingga elemen-elemen digital overlay berpotensi mempengaruhi alokasi sumber daya kognitif atlet (Adams et al., 2019). Tanpa pemahaman yang komprehensif tentang dampak kognitif ini, implementasi AR berisiko menjadi kontraproduktif, justru menghambat proses pembelajaran motorik alih-alih meningkatkannya, karena beban kognitif yang berlebihan dapat mengganggu konsentrasi dan asimilasi keterampilan (Skulmowski, and Xu, 2021) (Juliano, Schweighofer, and Liew, 2022).

Pendekatan melalui lensa Cognitive Load Theory (CLT) memberikan framework teoretis yang tepat untuk menganalisis bagaimana AR mempengaruhi beban kognitif atlet secara multidimensi (Geng, and Yamada, 2020). CLT memungkinkan kita mengevaluasi tidak hanya seberapa besar beban kognitif yang ditimbulkan oleh teknologi AR, tetapi juga bagaimana beban tersebut dialokasikan antara elemen intrinsik (kompleksitas inherent gerakan olahraga), ekstrinsik (desain antarmuka AR), dan germane (pembentukan skema mental) (Geng, and Yamada, 2020). Analisis melalui perspektif CLT ini menjadi landasan esensial untuk merancang sistem AR yang secara optimal mendukung pembelajaran keterampilan motorik, bukan sekadar menjadi technological gimmick dalam pelatihan olahraga (Pustišek et al., 2019) (Noury et al., 2023).

Augmented Reality (AR) dalam konteks pelatihan olahraga merepresentasikan lebih dari sekadar teknologi visual ini merupakan paradigma pembelajaran yang mengintegrasikan dunia digital dengan pengalaman fisik atlet secara real-time (Ma et al., 2024) (NAMLI et al., 2025). Konsep AR memungkinkan ditampilkannya layer informasi digital—seperti petunjuk teknik, trajectory gerakan, atau umpan balik performa—langsung ke dalam bidang pandang atlet melalui perangkat seperti smart glasses atau layar proyeksi (Adams et al., 2019). Eksplorasi konseptual ini tidak hanya melihat AR sebagai alat bantu visual, tetapi sebagai ekosistem pelatihan yang dapat menciptakan lingkungan belajar imersif dimana atlet dapat berinteraksi dengan informasi kompleks secara intuitif

dan kontekstual(Zhou, and Zhao, 2022). Dalam pelatihan teknik tinggi seperti golf atau senam, AR dapat memproyeksikan garis panduan ayunan atau formasi tubuh ideal yang langsung terintegrasi dengan lingkungan latihan fisik atlet(Binoy, and Srivastava, 2020).

Analisis melalui kerangka teori Cognitive Load Theory (CLT) menjadi critical lens untuk mengevaluasi efektivitas konsep AR ini, khususnya dalam mengelola tiga komponen beban kognitif: intrinsik, ekstrinsik, dan german(Skulmowski, and Xu, 2021). CLT membantu kita memahami bagaimana desain antarmuka AR dapat mempengaruhi alokasi sumber daya kognitif atlet apakah informasi digital yang ditampilkan justru menambah beban kognitif ekstrinsik atau justru mengurangi beban intrinsik dengan menyederhanakan kompleksitas gerakan melalui visualisasi yang tepat(Laviola et al., 2021). Contohnya, panah arahan gerakan yang muncul melalui AR dapat mentransformasi instruksi verbal yang kompleks menjadi petunjuk visual yang langsung actionable, sehingga mengurangi kebutuhan untuk memproses informasi multilevel secara simultan(Pietschmann et al., 2023).

Penerapan prisma CLT terhadap desain AR mengungkap bagaimana teknologi ini berpotensi mengoptimalkan alokasi beban kognitif germane yaitu mental effort yang secara khusus dialokasikan untuk pembentukan skema dan penguasaan keterampilan(Mokmin et al., 2023). Dengan menyediakan representasi visual yang sesuai dengan mental model atlet, AR dapat memfasilitasi proses encoding informasi motorik ke dalam long-term memory lebih efektif(Stalheim, and Somby, 2024). Misalnya, visualisasi real-time dari sudut sendi selama melakukan smash bulutangkis tidak hanya memberikan umpan balik inmediat, tetapi juga memperkuat pemahaman kinestetik tentang gerakan ideal, sehingga mempercepat pembentukan skema motorik yang diperlukan untuk menguasai teknik tersebut(Hung et al., 2020).

Eksplorasi konseptual ini akhirnya mengarah pada sintesis antara innovation teknologi dan prinsip pembelajaran kognitif, dimana AR yang didesain dengan prinsip CLT dapat mentransformasi pelatihan olahraga menjadi experiences yang secara kognitif efisien dan motorik efektif(Stalheim, and Somby, 2024). Pendekatan ini tidak hanya memastikan bahwa teknologi AR benar-benar berfungsi sebagai katalis untuk enhancement performa, tetapi juga mencegahnya menjadi sumber distraksi kognitif(Endsley et al., 2017). Dengan demikian, integrasi conceptual antara AR dan CLT membuka jalan bagi development sistem pelatihan olahraga masa depan yang lebih adaptif, personalized, dan aligned dengan cara manusia memproses informasi dan mengembangkan keterampilan motorik kompleks.

Perkembangan teknologi Augmented Reality (AR) dalam bidang olahraga telah membuka dimensi baru dalam metode simulasi latih(Wu, 2021). Dengan menggunakan perangkat seperti smart glasses atau head-mounted displays, atlet dapat berlatih dalam lingkungan yang diperkaya dengan elemen digital interaktif(Noury et al., 2023). Dalam sepak bola, misalnya, AR memungkinkan pemain untuk mensimulasikan berbagai formasi pertahanan dan serangan yang diproyeksikan langsung di atas lapangan nyata, sehingga menciptakan pengalaman latihan yang lebih dinamis dan kontekstual(Lin et al., 2020). Teknologi ini tidak hanya meningkatkan engagement selama sesi latihan, tetapi juga

memungkinkan atlet untuk berlatih menghadapi skenario kompleks tanpa bergantung pada kehadiran pemain lain(Kittel et al., 2020).

Dalam ranah analisis gerak, AR memberikan kontribusi revolusioner melalui kemampuannya memvisualisasikan data biomekanik secara real-time(Arزهgar et al., 2025). Untuk olahraga seperti bulu tangkis, sensor AR yang terintegrasi dengan racket dan kamera dapat melacak sudut pukulan, kecepatan shuttlecock, dan postur tubuh atlet, lalu memproyeksikan data tersebut dalam bentuk grafis yang mudah dipahami(Wang et al., 2023). Visualisasi ini memungkinkan pelatih dan atlet untuk mengidentifikasi ketidakefisienan gerakan secara immediat, seperti kesalahan dalam footwork atau timing pukulan, yang sebelumnya sulit dideteksi dengan mata telanjang atau melalui video konvensional(Bright, Chen, and Zelek, 2023).

Aplikasi AR juga memberikan nilai tambah melalui fitur feedback real-time yang transformatif(Minaee, Liang, and Yan, 2022). Dalam senam, misalnya, atlet dapat menggunakan kaca cerdas yang memproyeksikan hologram instruksi gerakan langsung di bidang pandang mereka, sementara sistem komputer menganalisis dan memberikan koreksi atas posisi tubuh secara bersamaan(Chen, and Yang, 2020). Jika atlet melakukan kesalahan dalam formasi tertentu, sistem akan langsung memunculkan panah korektif atau highlight visual pada area yang perlu penyesuaian(Vidal, Segura, and Wærn, 2018). Mekanisme umpan balik instan ini mempercepat kurva pembelajaran dengan mengurangi delay antara performa dan evaluasi.

Integrasi ketiga aplikasi ini simulasi latihan, analisis gerak, dan feedback real-time telah menciptakan ekosistem pelatihan yang holistik dan personalisas(Lancere, Jürgen, and Gapeyeva, 2023). Teknologi AR tidak hanya mentransformasi bagaimana latihan dirancang dan dilaksanakan, tetapi juga mengubah cara atlet memproses informasi, berinteraksi dengan instruksi, dan menginternalisasi keterampilan kompleks(Noury et al., 2023). Dengan kemampuan untuk menyediakan data kuantitatif dan kualitatif secara simultan dalam konteks visual yang intuitif, AR telah menjadi katalis bagi lahirnya metode pelatihan olahraga yang lebih presisi, adaptif, dan efektif.

Cognitive Load Theory (CLT) adalah sebuah kerangka teoretis dalam psikologi pendidikan yang dikembangkan oleh John Sweller pada akhir 1980-a(Sweller, 2019). Teori ini berfokus pada cara memori kerja manusia yang terbatas kapasitasnya memproses informasi selama proses belajar(Shearer, Yu, and Peng, 2020). CLT berargumen bahwa untuk pembelajaran yang optimal, instruksi harus dirancang sedemikian rupa untuk menghormati batasan kognitif pembelajar(Baxter, Sachdeva, and Baker, 2025). Dengan memahami bagaimana informasi diproses, pendidik dapat merancang materi pembelajaran yang lebih efektif dan efisien, sehingga menghindari kelebihan beban yang dapat menghambat pemahaman(Skulmowski, and Xu, 2021).

Beban kognitif intrinsik merujuk pada kompleksitas inherent atau tingkat kesulitan yang melekat pada materi pelajaran itu sendiri(Banerjee, and Rao, 2022). Kompleksitas ini ditentukan oleh jumlah elemen informasi yang harus diproses secara bersamaan dan tingkat interaktivitas di antara elemen-elemen tersebut(Chen, Paas, and Sweller, 2023). Sebagai contoh, mempelajari tabel perkalian dasar memiliki beban intrinsik yang lebih rendah dibandingkan dengan memecahkan persamaan aljabar yang kompleks, yang

mengharuskan siswa untuk mengintegrasikan banyak konsep sekaligus(Ding et al., 2022). Beban intrinsik umumnya tidak dapat diubah oleh pendidik karena melekat pada materi, tetapi dapat dikelola dengan membagi materi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil(Athanasopoulos, 2023).

Berbeda dengan beban intrinsik, beban kognitif ekstrinsik disebabkan oleh cara informasi atau instruksi tersebut disajikan kepada pembelaja(Evans et al., 2024). Beban ini timbul dari desain pembelajaran yang buruk, yang tidak necessary dan justru menambah kerja kognitif yang tidak relevan(Andrade, Huang, and Bohn, 2015). Contohnya adalah penggunaan diagram yang rumit dengan teks penjelas yang terpisah, yang memaksa siswa untuk terus-menerus mencocokkan antara keduanya, atau instruksi yang berbelit-belit(Salac, 2020). Tujuan utama dari penerapan CLT adalah untuk meminimalkan beban ekstrinsik ini melalui desain yang lebih baik, seperti mengintegrasikan teks dan gambar secara fisik dan menghilangkan informasi yang tidak relevan(Esteban, Garvey, and Angulo, 2018).

Sementara kedua beban sebelumnya perlu diminimalkan, beban kognitif *germane* justru harus dimaksimalkan. Beban *germane* merujuk pada usaha kognitif yang dikerahkan oleh pembelajar untuk memproses informasi, mengorganisasinya, dan membangun skema mental yang permanen dalam memori jangka panjang(Fagerholm et al., 2022). Dalam hal ini, usaha mental difokuskan pada aktivitas yang benar-benar bermakna untuk pemahaman mendalam, seperti mengidentifikasi pola, membuat koneksi antar konsep, dan berlatih memecahkan masalah. Desain pembelajaran yang baik akan mengurangi beban intrinsik dan ekstrinsik, sehingga sumber daya kognitif yang berharga dapat dialihkan sepenuhnya untuk meningkatkan beban *germane*, yang pada akhirnya menghasilkan pembelajaran yang lebih mendalam dan dapat ditransfer(Evans et al., 2024).

Augmented Reality (AR) telah muncul sebagai teknologi transformatif dalam dunia pelatihan olahraga, menawarkan kemampuan untuk menumpangkan informasi digital ke dalam lingkungan fisik atlet secara real-time(Graser, and Böhm, 2024). Aplikasinya mulai dari analisis teknik hingga simulasi taktik dalam olahraga seperti sepak bola, bola basket, dan seni bela diri telah menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan kinerja(Kumar, HV, and Nandini, 2022). Namun, fokus penelitian selama ini cenderung pada aspek akurasi teknis, keterlibatan pengguna, dan efektivitas pelatihan secara umum(Tusher, Mallam, and Nazir, 2024). Sementara itu, pendalaman terhadap dampak psikologis kognitif, khususnya bagaimana AR mempengaruhi beban mental atlet selama pelatihan, masih sangat terbatas dan belum menjadi arus utama(Ma et al., 2021).

Potensi AR untuk mengoptimalkan beban kognitif sangatlah besar. Dalam konteks Cognitive Load Theory, AR dapat didesain untuk secara aktif manajemen ketiga jenis beban(Bautista, 2019). Misalnya, AR dapat mengurangi beban intrinsik dengan menyederhanakan visualisasi kompleksitas gerakan melalui simulasi 3D yang interaktif(Eversberg, and Lambrecht, 2023). Teknologi ini juga dapat meminimalkan beban ekstrinsik dengan mengintegrasikan instruksi secara langsung ke dalam bidang pandang atlet (melalui smart glasses), menghilangkan kebutuhan untuk membagi perhatian antara pelatih, layar, dan lingkungan(Schramm et al., 2023). Selanjutnya, AR dapat meningkatkan beban *germane* dengan memberikan umpan balik yang kontekstual dan langsung, yang

memandu atlet untuk membangun skema mental yang lebih akurat dan robust tentang teknik mereka (Farzinnejad et al., 2023).

Meskipun potensinya jelas, bagaimana mewujudkan optimasi ini secara konseptual dan praktis masih merupakan kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertanyaan-pertanyaan mendasar seperti "Bagaimana desain antarmuka AR yang meminimalkan distraksi visual untuk tugas motorik kompleks?" atau "Bagaimana proporsi informasi yang ditampilkan agar sesuai dengan kapasitas memori kerja atlet?" masih belum terjawab. Penelitian yang ada seringkali bersifat ad-hoc dan teknosentris, kurang didasarkan pada prinsip-prinsip ilmu kognitif yang established seperti CLT. Akibatnya, belum ada kerangka kerja (framework) yang komprehensif yang dapat memandu pengembang dan pelatih dalam merancang intervensi AR yang secara sengaja mengoptimalkan, bukan justru secara tidak sengaja membebani, sistem kognitif atlet.

Menyadari kesenjangan ini membuka peluang besar bagi penelitian multidisiplin di masa depan. Dibutuhkan kolaborasi yang erat antara insinyur komputer, psikolog kognitif, dan ahli ilmu keolahragaan untuk membangun jembatan antara teori dan aplikasi (Nkurunziza et al., 2021). Penelitian ke depan perlu secara empiris menguji berbagai modalitas umpan balik AR (visual, auditori, haptic) dan pengaruhnya terhadap setiap jenis beban kognitif (Tabassum, Bai, and Fala, 2023). Dengan mengisi kekosongan konseptual ini, kita tidak hanya dapat menciptakan alat pelatihan yang lebih efektif tetapi juga memastikan bahwa teknologi canggih seperti AR dimanfaatkan untuk memberdayakan, bukan membebani, pikiran atlet, yang pada akhirnya mengarah pada puncak prestasi yang lebih optimal dan berkelanjutan.

rumusan masalah penelitian ini Bagaimana konsep Augmented Reality dapat diintegrasikan dalam pelatihan olahraga. Bagaimana Cognitive Load Theory dapat menjadi lensa untuk menganalisis dampak AR terhadap beban kognitif atlet. Apa saja tantangan dan peluang penerapan AR dalam konteks optimasi beban kognitif?

Tujuan utama dari artikel ini adalah untuk menganalisis secara komprehensif potensi Augmented Reality (AR) sebagai sebuah alat inovatif dalam pelatihan olahraga berbasis teknologi. Selanjutnya, artikel ini berambisi untuk mengkaji hubungan simbiosis antara teknologi AR dan Cognitive Load Theory (CLT), dengan menjelaskan bagaimana teori psikologi kognitif ini dapat menjadi landasan untuk memahami interaksi antara atlet dan antarmuka digital. Pada akhirnya, melalui analisis dan kajian tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengidentifikasi implikasi desain yang kritical seperti integrasi spatial, jenis umpan balik, dan modularitas informasi guna merumuskan prinsip-prinsip desain AR yang selaras dengan CLT. Prinsip-prinsip ini diharapkan dapat meminimalkan beban kognitif ekstrinsik yang tidak perlu dan memaksimalkan beban germane, sehingga menghasilkan pengalaman pelatihan yang tidak hanya imersif tetapi juga secara kognitif optimal bagi atlet.

METODE

Penelitian ini merupakan sebuah studi konseptual yang mengadopsi pendekatan analisis literatur sistematis (Schreiber, and Cramer, 2022). Data dan argumen utama dikumpulkan dan dibangun melalui penelusuran terhadap sumber-data yang kredibel, primarily berupa jurnal-jurnal akademik terindeks, buku-buku teks otoritatif, serta artikel-

artikel konferensi terkait tiga domain utama: teknologi Augmented Reality (AR), Cognitive Load Theory (CLT) dalam pendidikan, dan psikologi olahraga. Untuk menganalisis kumpulan literatur tersebut, penelitian ini menerapkan teknik analisis tematik (Howden et al., 2021). Melalui teknik ini, peneliti mengidentifikasi, mengkode, dan meninjau pola-pola, tema-tema, serta hubungan yang berulang dan signifikan antara penerapan AR, prinsip-prinsip CLT, dan konteks pelatihan olahraga. Analisis ini bertujuan untuk menyintesis temuan dari berbagai bidang guna membangun suatu proposisi atau kerangka konseptual yang koheren.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Integrasi AR dalam Pelatihan Olahraga

Salah satu temuan utama dalam penelitian ini adalah kemampuan Augmented Reality (AR) untuk menciptakan visualisasi gerakan yang sangat interaktif dan imersi (Chandio et al., 2023). Berbeda dengan video atau diagram statis, AR dapat menumpangkan (overlay) instruksi digital secara langsung ke dalam bidang pandang atlet atau lingkungan latihan mereka secara real-time (Chang et al., 2019). Dalam konteks latihan angkat besi, misalnya, atlet dapat menggunakan perangkat seperti kacamata AR (smart glasses) untuk melihat garis proyeksi yang menunjukkan sudut punggung yang ideal, lintasan batang yang benar, atau posisi siku yang tepat selama melakukan clean and jerk. Visualisasi ini tidak hanya statis, tetapi dapat bergerak dan beradaptasi sesuai dengan gerakan atlet, memberikan panduan yang dinamis dan kontekstual (Frias-Miranda et al., 2024).

Kemampuan AR untuk memberikan umpan balik secara langsung ini memiliki implikasi mendalam terhadap pengelolaan beban kognitif atlet (Ma et al., 2021). Sebelum adanya AR, seorang atlet angkat besi pemula harus membagi perhatiannya antara mengingat instruksi pelatih, merasakan gerakan tubuhnya sendiri, dan mungkin melihat ke cermin atau video (Hülsmann, Kopp, and Botsch, 2017). Hal ini dapat menciptakan beban kognitif ekstrinsik yang tinggi. Dengan AR, informasi yang diperlukan seperti panduan visual tentang postur langsung terintegrasi dengan objek yang dilihat atlet (beban besi) (Kulkarni et al., 2020). Integrasi spatial ini secara signifikan mengurangi kebutuhan untuk membagi perhatian, sehingga meminimalkan beban ekstrinsik yang tidak perlu dan membebaskan sumber daya kognitif (Golan, Parush, and Jaffe, 2020).

Aplikasi serupa juga sangat efektif dalam olahraga renang, di mana lingkungan air menambah kompleksitas dalam menerima instruksi (NAML I et al., 2025). Seorang perenang dapat menggunakan perangkat AR yang tahan air atau melihat umpan balik visual di tepi kolam setelah setiap putaran (Kiss et al., 2019). AR dapat memproyeksikan panah atau animasi yang menunjukkan posisi tangan yang optimal saat masuk ke air, sudut tubuh selama fase glide, atau bahkan data real-time seperti kecepatan dan waktu reaksi (Katzakis et al., 2017). Dengan menyajikan informasi kompleks ini dalam format visual yang intuitif dan langsung pada konteksnya, AR mentransformasi instruksi teknis yang abstrak menjadi panduan yang dapat langsung ditindaklanjuti. Hal ini membantu atlet fokus pada perbaikan gerakan tanpa harus melakukan proses mental yang berat untuk menerjemahkan instruksi verbal menjadi aksi fisik (Pietschmann et al., 2023).

Dengan demikian, visualisasi interaktif melalui AR tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu visual, tetapi sebagai katalis untuk pembelajaran motorik yang lebih dalam. Dengan meminimalkan beban ekstrinsik, sumber daya kognitif yang berharga dapat dialihkan sepenuhnya ke beban germane pemrosesan mental yang diperlukan untuk membangun dan memperkuat skema gerakan yang benar dalam memori jangka panjang. Atlet dapat lebih cepat memahami hubungan sebab-akibat dari gerakan mereka, melakukan eksperimen, dan mengkonsolidasikan memori motorik. Pada akhirnya, ini tidak hanya mempercepat kurva pembelajaran tetapi juga menciptakan dasar teknikal yang lebih kuat dan berkelanjutan bagi atlet.

Augmented Reality (AR) membawa paradigma baru dalam pelatihan olahraga dengan kemampuannya memberikan umpan balik real-time yang presisi tentang postur tubuh dan akurasi gerakan atlet (Ihara et al., 2024). Melalui kombinasi sensor, kamera, dan algoritma komputer vision, sistem AR dapat melacak setiap detail gerakan atlet secara instan dan memproyeksikan data atau visual korektif langsung ke dalam bidang pandang mereka (Abo-Zahhad et al., 2025). Sebagai contoh, seorang atlet senam yang melakukan handstand dapat melihat garis proyeksi dari AR yang menunjukkan apakah tubuh mereka membentuk garis lurus yang sempurna, sementara pemain bola basket dapat menerima visualisasi sudut lutut yang ideal saat melakukan posisi bertahan. Umpan balik yang diberikan bukan lagi sekadar rekaman yang dianalisis setelah latihan, melainkan koreksi yang terjadi pada saat gerakan tersebut terjadi, memungkinkan intervensi yang inmediat dan kontekstual (Geisen, and Klatt, 2021).

Kemampuan ini secara langsung berkontribusi pada optimasi beban kognitif atlet, khususnya dalam mengurangi beban ekstrinsik yang sering timbul dari instruksi yang terfragmentasi (Kong et al., 2025). Tanpa AR, atlet harus mengandalkan ingatan mereka terhadap instruksi pelatih atau merasa gerakan mereka sendiri, yang seringkali subjektif dan tidak akurat. Proses ini memaksa atlet untuk membagi perhatian antara melakukan gerakan dan mencoba mengingat atau menginterpretasikan umpan balik, yang dapat mengganggu fokus dan meningkatkan risiko kesalahan (Luan, and Mirifar, 2021). Dengan adanya umpan balik visual AR yang terintegrasi langsung dalam persepsi mereka, atlet tidak perlu lagi melakukan mental effort yang besar untuk menerjemahkan instruksi verbal atau mengingat koreksi sebelumnya. Semua informasi yang diperlukan disajikan secara intuitif dan spasial, sehingga memudahkan pemrosesan informasi dan mempercepat waktu reaksi.

Lebih dari sekadar alat koreksi, sistem AR untuk umpan balik real-time sering dilengkapi dengan kemampuan analitik yang mendalam. Teknologi ini tidak hanya mendeteksi deviasi dari postur ideal, tetapi juga dapat memberikan data kuantitatif seperti derajat deviasi, kecepatan gerakan, atau bahkan memperkirakan risiko cedera berdasarkan pola gerakan yang salah (Vermader et al., 2024). Dalam olahraga seperti golf atau tenis, AR dapat memvisualisasikan lintasan raket atau klub, sudut pukulan, dan titik kontak dengan bola, semua dalam waktu nyata. Informasi ini memungkinkan atlet dan pelatih untuk tidak hanya melihat kesalahan, tetapi juga memahami pola dan konsistensi kesalahan tersebut, sehingga pelatihan dapat disesuaikan secara lebih personal dan efektif (Zhao et al., 2023).

Dampak jangka panjang dari penerapan ini adalah percepatan pembentukan skema motorik yang benar dan konsisten dalam memori jangka panjang (Farzinnejad et al., 2023). Dengan umpan balik yang terus-menerus, akurat, dan langsung, atlet dapat memperkuat memori kinestetik mereka tentang gerakan yang ideal tanpa harus melalui proses trial and error yang panjang. Umpan balik real-time dari AR memastikan bahwa kesalahan tidak menjadi kebiasaan, karena koreksi diberikan sebelum kesalahan tersebut terkonsolidasi. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan efektivitas latihan, tetapi juga membangun fondasi teknik yang lebih solid dan berkelanjutan, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan performa maksimal dan pencegahan cedera dalam jangka panjang.

Analisis melalui Cognitive Load Theory

Augmented Reality (AR) secara efektif mengurangi beban kognitif ekstrinsik dengan mentransformasi informasi kompleks menjadi representasi visual yang intuitif dan mudah diproses (Keil et al., 2020). Dalam konteks pelatihan olahraga, instruksi teknis yang biasanya disampaikan secara verbal atau melalui manual tertulis seringkali menciptakan beban kognitif tambahan karena atlet harus menerjemahkan dan menginterpretasikan informasi tersebut sambil tetap berkonsentrasi pada gerakan mereka (LoSarah et al., 2021). AR mengatasi masalah ini dengan menampilkan panduan visual langsung seperti panah arahan, garis alur gerak, atau highlight area tubuh yang mengkomunikasikan informasi kompleks secara instan dan spasial, sehingga menghilangkan kebutuhan untuk proses mental yang berlebihan (Jeffri, and Rambli, 2020).

Contoh nyata dapat dilihat dalam latihan teknik dasar seperti golf atau tenis, dimana atlet sering kesulitan memahami konsep abstrak seperti "angle of attack" atau "follow-through". Daripada mendengarkan penjelasan verbal yang rumit, atlet dapat melihat proyeksi AR yang menunjukkan langsung arah dan sudut yang optimal melalui panah animasi yang bergerak sesuai dengan ideal gerakan (Jung et al., 2025). Visualisasi ini tidak hanya menggantikan instruksi multi-langkah yang membingungkan, tetapi juga mengonsolidasi beberapa elemen informasi menjadi satu isyarat visual yang koheren (Eberhard, 2021). Dengan menyajikan informasi dalam modalitas yang paling sesuai yaitu visual-spasial AR secara alami selaras dengan cara kerja sistem persepsi manusia, sehingga meminimalkan upaya kognitif yang tidak perlu.

Pengurangan beban ekstrinsik ini memiliki implikasi mendalam bagi proses pembelajaran motorik. Dengan berkurangnya energi kognitif yang dikeluarkan untuk memproses instruksi, sumber daya mental atlet dapat dialihkan sepenuhnya kepada aspek-aspek kritis seperti perasaan gerakan, penyesuaian halus, dan konsolidasi skema motorik yang benar (beban *germane*) (Schaefer, and Scornaienchi, 2019). Selain itu, umpan balik visual AR yang intuitif menghilangkan efek "split-attention" dimana atlet sebelumnya harus terus-menerus membagi fokus antara pelatih, lingkungan, dan tubuh mereka sendiri (Najami, and Ghannam, 2025). Hasilnya adalah proses pembelajaran yang lebih efisien, transfer skill yang lebih cepat, dan retensi memori motorik yang lebih baik dalam jangka panjang.

Augmented Reality (AR) secara strategis meningkatkan beban kognitif *germane* dengan memfasilitasi pemahaman mendalam melalui simulasi visual yang memperkuat

pembentukan skema motori(Altmeyer et al., 2020). Beban germane merujuk pada usaha kognitif yang dikhususkan untuk pemrosesan informasi yang bermakna dan konstruksi skema mental proses kritis dalam pembelajaran keterampilan motorik kompleks. AR mengoptimalkan proses ini dengan menyajikan representasi visual yang dinamis dan interaktif, yang memungkinkan atlet untuk menginternalisasi pola gerakan ideal tanpa harus bergantung sepenuhnya pada imajinasi atau interpretasi instruksi verbal(Najami, and Ghannam, 2025). Dengan memvisualisasikan konsep abstrak seperti dinamika gerak, timing, dan koordinasi tubuh, AR menciptakan jembatan kognitif antara pengetahuan deklaratif ("apa yang harus dilakukan") dan pengetahuan prosedural ("bagaimana melakukannya").

Contohnya, dalam latihan lempar cakram, AR dapat menampilkan simulasi visual lintasan optimal, titik pelepasan, dan sudut sikap tubuh yang ideal secara real-time. Atlet tidak hanya melihat demonstrasi statis, tetapi dapat membandingkan gerakan mereka sendiri dengan model ideal tersebut melalui overlay digital. Proses komparasi visual ini mendorong pemrosesan kognitif yang mendalam, di mana atlet secara aktif mengidentifikasi kesenjangan, melakukan koreksi mental, dan mengkonsolidasikan representasi mental yang akurat(Jee et al., 2022). Umpan balik visual yang kontekstual ini memandu atlet untuk membentuk skema yang lebih komprehensif dan terstruktur dengan baik tidak hanya menghafal gerakan, tetapi memahami prinsip biomekanika yang mendasarinya(Huang et al., 2025).

Dampak jangka panjang dari peningkatan beban germane ini adalah percepatan pembelajaran dan retensi memori motorik yang lebih baik. Dengan berkurangnya beban kognitif ekstrinsik berkat presentasi informasi yang intuitif, sumber daya mental dapat dialihkan sepenuhnya untuk membangun dan memperkuat skema(Herm, 2023). AR memungkinkan atlet untuk berlatih dengan "kesadaran kinestetik yang diperkaya"di mana umpan balik visual membantu mereka mengembangkan feeling yang lebih halus terhadap gerakan mereka sendiri(Geisen, and Klatt, 2021). Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi latihan dengan memusatkan usaha kognitif pada elemen yang paling relevan, tetapi juga menciptakan dasar pemahaman yang lebih kokoh yang dapat ditransfer ke berbagai situasi pertandingan yang berbeda.

Meskipun Augmented Reality (AR) berpotensi besar untuk mengoptimalkan beban kognitif, penerapannya yang tidak tepat justru dapat menghasilkan efek sebaliknya meningkatkan beban kognitif ekstrinsik secara signifikan. Desain antarmuka AR yang terlalu padat informasi, animasi yang berlebihan, atau elemen visual yang tidak relevan dapat menciptakan distraksi kognitif yang mengalihkan perhatian atlet dari tugas motorik utama(Endsley et al., 2017). Dalam konteks pelatihan olahraga yang memerlukan fokus tinggi, seperti angkat besi atau senam artistik, visualisasi AR yang terlalu kompleks misalnya menampilkan terlalu banyak data biomekanika sekaligus justru memaksa atlet untuk membagi perhatian antara memproses informasi digital dan mengendalikan gerakan tubuh(Elgohary, and Zhu-Tien, 2025). Alih-alih mengurangi beban kognitif, desain yang buruk ini malah menambah "noise" kognitif yang mengganggu konsentrasi dan proses pembelajaran(Skulmowski, and Xu, 2021).

Contoh nyata risiko ini dapat diamati dalam latihan teknik kompleks seperti servis tenis. Jika antarmuka AR menampilkan secara bersamaan data kecepatan raket, sudut siku, rotasi badan, dan lintasan bola dalam bentuk grafis yang overlapping, atlet akan kesulitan menyaring informasi mana yang paling kritis. Beban kognitif ekstrinsik yang timbul dari upaya memproses dan menginterpretasi semua data tersebut justru mengurangi sumber daya mental yang seharusnya dialokasikan untuk pembentukan skema motorik (beban *germane*). Selain itu, *latency* atau ketidakakuratan dalam pelacakan gerakan dapat menyebabkan umpan balik yang *misleading*, yang tidak hanya meningkatkan beban kognitif tetapi juga berpotensi memperkuat pola gerakan yang salah.

Tantangan dan Peluang

Tantangan

Penerapan Augmented Reality dalam pelatihan olahraga menghadapi tantangan signifikan dalam hal infrastruktur teknis yang diperluka(Cordeiro, Catháin, and Rodrigues, 2022). Teknologi AR memerlukan perangkat keras khusus seperti headset AR, sensor motion capture, dan perangkat processing yang powerful, yang seringkali memiliki biaya tinggi dan membutuhkan pemeliharaan kompleks(Minaee, Liang, and Yan, 2022). Selain itu, lingkungan latihan perlu didukung dengan konektivitas jaringan yang stabil dan bandwidth yang memadai untuk memproses data secara real-time, yang tidak selalu tersedia di semua fasilitas olahraga. Tantangan teknis ini tidak hanya menyangkut aspek finansial tetapi juga keandalan sistem gangguan teknis sekecil apapun dapat mengganggu alur latihan dan mengurangi kepercayaan atlet terhadap teknologi tersebut.

Tantangan utama lainnya terletak pada kebutuhan adaptasi atlet terhadap teknologi AR yang mungkin asing bagi mereka. Banyak atlet yang terbiasa dengan metode pelatihan konvensional mungkin mengalami kesulitan dalam berinteraksi dengan antarmuka digital, yang justru dapat menambah beban kognitif awal sebelum manfaat AR dapat dirasakan. Proses belajar menggunakan perangkat AR membutuhkan waktu dan dapat mengurangi fokus atlet pada pelatihan itu sendiri, terutama pada fase implementasi awal. Selain itu, mungkin terdapat resistensi psikologis terhadap perubahan, di mana atlet atau pelatih lebih nyaman dengan metode tradisional yang telah terbukti efektif, sehingga memerlukan pendekatan khusus untuk demonstrasi manfaat dan pelatihan penggunaan yang komprehensif.

Peluang

Augmented Reality membuka peluang besar untuk menciptakan program latihan yang sangat dipersonalisasi sesuai dengan profil individu atlet(Cieślński et al., 2016). Teknologi AR dapat mengumpulkan dan menganalisis data kinerja atlet secara real-time seperti kekuatan, kecepatan, ketahanan, dan teknik lalu menyesuaikan tingkat kesulitan dan jenis latihan berdasarkan kebutuhan spesifik tersebut(Zhao et al., 2023). Sebagai contoh, seorang atlet pemula dapat menerima panduan AR yang lebih mendetail dan bertahap, sementara atlet elite mendapatkan umpan balik yang berfokus pada penyempurnaan aspek teknik tertentu(Votyakov, Constantinides, and Liarokapis, 2025). Personalisasi ini memastikan bahwa beban kognitif atlet selalu berada pada zona optimal: tidak terlalu mudah hingga tidak menantang, tetapi juga tidak terlalu sulit hingga menyebabkan frustrasi atau kelebihan kognitif.

AR menawarkan peluang untuk meningkatkan engagement dan motivasi atlet melalui pengalaman latihan yang imersif dan interaktif (Nor, Sunar, and Kapi, 2020). Dengan menyajikan latihan dalam format yang menyerupai permainan (gamification) seperti tantangan levels, achievement badges, atau visualisasi progres yang menarik AR dapat mengubah sesi latihan yang repetitif menjadi pengalaman yang menyenangkan dan menarik (Dichev, Dicheva, and Irwin, 2020). Elemen gamifikasi ini tidak hanya mempertahankan minat atlet dalam jangka panjang, tetapi juga secara tidak langsung meningkatkan alokasi beban kognitif germane. Ketika atlet sepenuhnya terlibat secara mental dan emosional, mereka lebih mungkin untuk mencurahkan usaha kognitif yang diperlukan untuk membangun skema motorik yang kompleks tanpa merasa terbebani (Altmeyer et al., 2021).

Salah satu peluang paling transformatif dari AR adalah kemampuannya untuk mempercepat kurva pembelajaran keterampilan motorik kompleks. Dengan menyediakan umpan balik visual yang inmediate dan kontekstual, AR memungkinkan atlet untuk memahami kesalahan mereka secara instan dan melakukan koreksi tanpa menunggu intervensi pelatih. Proses umpan balik yang dipercepat ini dikombinasikan dengan reduksi beban kognitif ekstrinsik memungkinkan atlet untuk melalui siklus trial and error lebih efisien. Hasilnya adalah konsolidasi memori motorik yang lebih cepat, transfer skill yang lebih baik, dan penguasaan teknik tinggi dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan metode tradisional.

SIMPULAN

AR berfungsi seperti asisten pribadi yang cerdas. Alih-alih membebani atlet dengan banyak instruksi, AR mengubah informasi yang rumit menjadi visualisasi intuitif yang dapat mereka lihat secara langsung. Hal ini menghilangkan kebingungan dan memungkinkan atlet untuk fokus sepenuhnya pada gerakan yang sedang mereka latih. Yang lebih menarik, AR tidak hanya mengurangi beban mental yang tidak perlu, tetapi justru mengarahkan energi kognitif atlet untuk pemahaman yang lebih mendalam. Dengan umpan balik real-time yang kontekstual, atlet dapat lebih cepat memahami dan menginternalisasi teknik yang benar, mempercepat pembentukan memori otot.

Namun, desain AR adalah kunci keberhasilannya. Terlalu banyak elemen di antarmuka justru akan kontraproduktif. Prinsip "less is more" sangat penting di sini. Informasi yang ditampilkan harus benar-benar penting dan sesuai dengan tingkat kemampuan atlet. Sangat penting bagi pelatih, pengembang, dan peneliti untuk bekerja sama di masa depan. Kita membutuhkan lebih banyak studi empiris untuk memastikan bahwa implementasi AR benar-benar bermanfaat dan memenuhi kebutuhan nyata di lapangan. Dengan pendekatan yang tepat, AR bukan hanya teknologi masa depan, tetapi mitra strategis dalam menghasilkan atlet yang sukses.

REFERENSI

Abo-Zahhad, M. et al. (2025). Development of an ai-powered ar glasses system for real-time first aid guidance in emergency situations. *BioData Mining*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00473-6>

- Adams, K. et al. (2019). From the field of play to the laboratory: Recreating the demands of competition with augmented reality simulated sport. *Journal of Sports Sciences*, 38(5), 486-493. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1706872>
- Altmeyer, K. et al. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in stem laboratory courses—theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, 51(3), 611-628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Altmeyer, M. et al. (2021). A long-term investigation on the effects of (personalized) gamification on course participation in a gym. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2107.12597>
- Andrade, J., Huang, W. D., and Bohn, D. M. (2015). The impact of instructional design on college students' cognitive load and learning outcomes in a large food science and human nutrition course. *Journal of Food Science Education*, 14(4), 127-135. <https://doi.org/10.1111/1541-4329.12067>
- Arzehgar, A. et al. (2025). Sensor-based technologies for motion analysis in sports injuries: A scoping review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01063-z>
- Athanasopoulos, P. (2023). Cognitive dissonance or p-prims? towards identifying the best way to overcome misconceptions in physics. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.15601>
- Banerjee, S., and Rao, N. J. (2022). Analysis of learner independent variables for estimating assessment items difficulty level. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2206.04416>
- Bautista, L. (2019). A model-based method for cognitive user interface design for skills training in an augmented reality environment. *Proceedings of the IX Latin American Conference on Human Computer Interaction*, 1-4. <https://doi.org/10.1145/3358961.3358988>
- Baxter, K. A., Sachdeva, N., and Baker, S. (2025). The application of cognitive load theory to the design of health and behavior change programs: Principles and recommendations. *Health Education & Behavior*, 52(4), 469-477. <https://doi.org/10.1177/10901981251327185>
- Binoy, A., and Srivastava, A. (2020). Pump fit: An augmented reality application which helps people with their workout more efficiently. *Companion Proceedings of the 2020 Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 91-93. <https://doi.org/10.1145/3380867.3426221>

- Bright, J., Chen, Y., and Zelek, J. (2023). Mitigating motion blur for robust 3d baseball player pose modeling for pitch analysis. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2309.01010>
- Chandio, Y. et al. (2023). Investigating the correlation between presence and reaction time in mixed reality. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2309.11662>
- Chang, K. et al. (2019). Applying augmented reality in physical education on motor skills learning. *Interactive Learning Environments*, 28(6), 685-697. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1636073>
- Chen, S., and Yang, R. R. (2020). Pose trainer: Correcting exercise posture using pose estimation. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2006.11718>
- Cieślński, W. B. et al. (2016). Application of the augmented reality in prototyping the educational simulator in sport - the example of judo. *Journal of Physics: Conference Series*, 710, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012016>
- Cordeiro, M. C., Catháin, C. Ó., and Rodrigues, T. B. (2022). The development of a machine learning/augmented reality immersive training system for performance monitoring in athletes. *Proceedings of the 14th International Workshop on Immersive Mixed and Virtual Environment Systems*, 19-22. <https://doi.org/10.1145/3534086.3534332>
- Dichev, C., Dicheva, D., and Irwin, K. (2020). Gamifying learning for learners. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s41239-020-00231-0>
- Ding, R. et al. (2022). Distinguishing conceptions of multiplicative reasoning in chinese elementary students: What sense correct and incorrect solutions might make to them?. *Asian Journal for Mathematics Education*, 1(2), 242-262. <https://doi.org/10.1177/27527263221110629>
- Endsley, T. C. et al. (2017). Augmented reality design heuristics: Designing for dynamic interactions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61(1), 2100-2104. <https://doi.org/10.1177/1541931213602007>
- Parte, L., Garvey, A. M., and Gonzalo-Angulo, J. A. (2018). Cognitive load theory: Why it's important for international business teaching and financial reporting. *Journal of Teaching in International Business*, 29(2), 134-160. <https://doi.org/10.1080/08975930.2018.1480991>
- Eversberg, L., and Lambrecht, J. (2023). Evaluating digital work instructions with augmented reality versus paper-based documents for manual, object-specific repair tasks in a case study with experienced workers. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2301.07570>

- Fagerholm, F. et al. (2022). Cognition in software engineering: A taxonomy and survey of a half-century of research. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2201.05551>
- Farzinnejad, F. et al. (2023). The effect of an exergame on the shadow play skill based on muscle memory for young female participants: The case of forehand drive in table tennis. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.14404>
- Geisen, M., and Klatt, S. (2021). Real-time feedback using extended reality: A current overview and further integration into sports. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 17(5), 1178-1194. <https://doi.org/10.1177/17479541211051006>
- Geng, X., and Yamada, M. (2020). An augmented reality learning system for japanese compound verbs: Study of learning performance and cognitive load. *Smart Learning Environments*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40561-020-00137-4>
- Golan, H., Parush, A., and Jaffe, E. (2020). Attention allocation to physically separate task and situation displays in a command and control setting. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 64(1), 1130-1134. <https://doi.org/10.1177/1071181320641271>
- Herm, L. (2023). Impact of explainable ai on cognitive load: Insights from an empirical study. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2304.08861>
- Howden, T. et al. (2021). Enhancing reading strategies by exploring a theme-based approach to literature surveys. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2102.05374>
- Huang, H. et al. (2025). Differences in backcourt forehand clear stroke between novice players and experienced badminton players: Based on body segment acceleration data. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01163-w>
- Hülsmann, F., Kopp, S., and Botsch, M. (2017). Automatic error analysis of human motor performance for interactive coaching in virtual reality. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1709.09131>
- Hung, M. et al. (2020). The applications of landing strategies in badminton footwork training on a backhand side lateral jump smash. *Journal of Human Kinetics*, 73(1), 19-31. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0002>
- Jeffri, N. F. S., and Rambli, D. R. A. (2020). Guidelines for the interface design of ar systems for manual assembly. *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, 70-77. <https://doi.org/10.1145/3385378.3385389>
- Juliano, J. M., Schweighofer, N., and Liew, S. (2022). Increased cognitive load in immersive virtual reality during visuomotor adaptation is associated with decreased long-term

retention and context transfer. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01084-6>

Katzakis, N. et al. (2017). Stylo and handifact. *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, 58-67. <https://doi.org/10.1145/3131277.3132181>

Keil, J. et al. (2020). Augmented reality (ar) and spatial cognition: Effects of holographic grids on distance estimation and location memory in a 3d indoor scenario. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(2), 165-172. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00104-1>

Kittel, A. et al. (2020). Effectiveness of 360° virtual reality and match broadcast video to improve decision-making skill. *Science and Medicine in Football*, 4(4), 255-262. <https://doi.org/10.1080/24733938.2020.1754449>

Kong, S. et al. (2025). Mindfulness, cognitive load, and performance: Examining the interplay of stress and self-regulation in physical education. *BMC Psychology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-025-02794-x>

Kulkarni, C. et al. (2020). Designing an augmented reality based interface for wearable exoskeletons. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 64(1), 38-41. <https://doi.org/10.1177/1071181320641012>

Kumar, S. S., HV, P., and Nandini, C. (2022). A survey on the application of data science and analytics in the field of organised sports. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2209.07528>

Lin, T. et al. (2020). Sportsxr -- immersive analytics in sports. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2004.08010>

LoSarah, L. L. et al. (2021). Effects of attentional focus cues on lower extremity kinematics during inside of the foot soccer trap among expert soccer players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(4), 957-967. <https://doi.org/10.1177/1747954121994691>

Luan, M., and Mirifar, A. (2021). The effect of attentional direction on sub-stages of preparing for motor skill execution across practice. *Perceptual and Motor Skills*, 128(3), 1292-1309. <https://doi.org/10.1177/00315125211009026>

Ma, X. et al. (2021). The impact of ar-hud intelligent driving on the allocation of cognitive resources under the breakthrough of 5g technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1982(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1982/1/012024>

Minaee, S., Liang, X., and Yan, S. (2022). Modern augmented reality: Applications, trends, and future directions. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2202.09450>

- Mokmin, N. A. M. et al. (2023). Impact of an ar-based learning approach on the learning achievement, motivation, and cognitive load of students on a design course. *Journal of Computers in Education*, 11(2), 557-574. <https://doi.org/10.1007/s40692-023-00270-2>
- Namli, S. et al. (2025). Virtual reality-supported video modeling for enhancing motor skill acquisition in swimming. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13102-025-01241-z>
- Nkurunziza, J. B. et al. (2021). Psycho-physiological impedance matching through holistic closed-loop cyber-physical systems. *Proceedings of the 2021 Workshop on Future of Digital Biomarkers*, 51-54. <https://doi.org/10.1145/3469266.3471166>
- Nor, N., Sunar, M., and Kapi, A. (2020). A review of gamification in virtual reality (vr) sport. *EAI Endorsed Transactions on Creative Technologies*, 6(21), 163212. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.163212>
- Le Noury, P. J. et al. (2023). Xr programmers give their perspective on how xr technology can be effectively utilised in high-performance sport. *Sports Medicine - Open*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-023-00593-5>
- Pietschmann, L. et al. (2023). Quantifying the impact of xr visual guidance on user performance using a large-scale virtual assembly experiment. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.03390>
- Pustišek, M. et al. (2019). The role of technology for accelerated motor learning in sport. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(6), 969-978. <https://doi.org/10.1007/s00779-019-01274-5>
- Salac, J. (2020). Diagramming as a strategy for primary/elementary-age program comprehension. *Proceedings of the 2020 ACM Conference on International Computing Education Research*, 322-323. <https://doi.org/10.1145/3372782.3407116>
- Schaefer, S., and Scornaienchi, D. (2019). Table tennis experts outperform novices in a demanding cognitive-motor dual-task situation. *Journal of Motor Behavior*, 52(2), 204-213. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1602506>
- Schramm, R. C. et al. (2023). Assessing augmented reality selection techniques for passengers in moving vehicles: A real-world user study. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.06173>
- Schreiber, F., and Cramer, C. (2022). Towards a conceptual systematic review: Proposing a methodological framework. *Educational Review*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/00131911.2022.2116561>

- Shearer, R. L., Yu, J., and Peng, X. (2020). Cognitive load and working memory: A system view of measurement. *Learning: Research and Practice*, 7(1), 54-69. <https://doi.org/10.1080/23735082.2020.1830150>
- Stalheim, O. R., and Somby, H. M. (2024). An embodied perspective on an augmented reality game in school: Pupil's bodily experience toward learning. *Smart Learning Environments*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40561-024-00308-7>
- Sweller, J. (2019). Cognitive load theory and educational technology. *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11423-019-09701-3>
- Tabassum, A., Bai, H., and Fala, N. (2023). A study on workload assessment and usability of wind-aware user interface for small unmanned aircraft system remote operations. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2309.04543>
- Vermader, P. et al. (2024). Intelligent systems for sitting posture monitoring and anomaly detection: An overview. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01322-z>
- Turmo Vidal, L., Márquez Segura, E., and Waern, A. (2018). Movement correction in instructed fitness training. *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*, 1041-1054. <https://doi.org/10.1145/3196709.3196789>
- Wang, W. et al. (2023). Shuttleset: A human-annotated stroke-level singles dataset for badminton tactical analysis. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2306.04948>
- Wu, F. (2021). Construction of digital dynamic sports system platform based on vr technology. *2021 2nd International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education*, 998-1002. <https://doi.org/10.1145/3456887.3457449>
- Wu, F. (2021). Construction of digital dynamic sports system platform based on vr technology. *2021 2nd International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education*, 998-1002. <https://doi.org/10.1145/3456887.3457449>
- Wu, E. et al. (2019). How to vizski: Visualizing captured skier motion in a vr ski training simulator. *Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, 1-9. <https://doi.org/10.1145/3359997.3365698>
- Zhao, Z. et al. (2023). A survey of deep learning in sports applications: Perception, comprehension, and decision. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.03353>
- Zhou, X., and Zhao, J. (2022). Mobile augmented reality with federated learning in the metaverse. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.08324>