

Rancang Bangun dan Evaluasi Sistem Web Augmented Reality Berbasis Persistent Multi-Marker dan Spatial Anchoring untuk Simulasi Kaligrafi Huruf Hijaiyah

Hasna Minatul Mardiah ^{1*}, Muhamad Veva Ramadhan ², LM. Irsyal Shidiq ³,
Hasbi Nurwahid Ash Shiddiey ⁴

^{1, 2, 3, 4} UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Indonesia

* hasnamardiyah06@gmail.com

Abstrak

Pembelajaran huruf hijaiyah dan kaligrafi dasar bahasa Arab memerlukan media yang mampu memvisualisasikan penyusunan huruf dari kanan ke kiri secara interaktif. Penelitian ini bertujuan merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi secara fungsional sistem Web Augmented Reality (WebAR) berbasis peramban yang mampu mempertahankan beberapa huruf hasil pemindaian pada kanvas persisten dan menyusunnya menjadi kata berbahasa Arab. Penelitian menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan model Multimedia Development Life Cycle (MDLC) yang meliputi tahap *concept*, *design*, *material collecting*, *assembly*, *testing*, dan *distribution*. Sistem dikembangkan menggunakan TypeScript, Vite, Three.js, MindAR, model GLTF, Web Audio API, dan Web Speech API. Data dikumpulkan melalui observasi terhadap respons sistem menggunakan instrumen uji *black-box*, kompatibilitas perangkat, pengukuran jarak, pencahayaan, kebisingan, dan log performa peramban, kemudian dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berhasil menjalankan seluruh tujuh skenario pengujian fungsional, mempertahankan objek setelah penanda keluar dari bidang pandang, serta menyusun huruf secara otomatis dari kanan ke kiri. Sistem bekerja optimal pada jarak 15–30 cm dan pencahayaan 300–500 lux. Persentase penerimaan transkrip suara mencapai 97% pada kebisingan 30 dB dan 94% pada 45 dB, sedangkan kinerja perenderan bertahan pada 54–60 FPS hingga sepuluh model persisten. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem WebAR yang dikembangkan layak secara fungsional sebagai media simulasi penyusunan huruf hijaiyah berbasis persistent multi-marker, meskipun efektivitasnya terhadap hasil belajar masih memerlukan pengujian lebih lanjut.

Kata Kunci: Huruf Hijaiyah, Persistent Multi-Marker, Pengenalan Ucapan, Spatial Anchoring, WebAR

Pendahuluan

Huruf hijaiyah merupakan dasar pembacaan bahasa Arab dan Al-Qur'an sekaligus unsur utama dalam pembentukan kaligrafi Arab. Penguasaan huruf hijaiyah tidak hanya berperan dalam kemampuan membaca, tetapi juga menjadi fondasi bagi peserta didik untuk memahami struktur penulisan bahasa Arab secara benar. Dalam pembelajaran kaligrafi, peserta didik tidak hanya dituntut mengenali bentuk setiap huruf secara terpisah, tetapi juga memahami proporsi, arah goresan, perubahan morfologi, serta keterhubungan antarkarakter yang ditulis dari kanan ke kiri. Kompleksitas tersebut sering kali sulit dipahami apabila proses pembelajaran hanya mengandalkan media konvensional berupa buku atau gambar statis. Oleh karena itu, diperlukan media pembelajaran yang mampu menyajikan proses penyusunan huruf secara bertahap dan lebih mudah dipahami. Media

digital interaktif dapat membantu menampilkan proses tersebut secara visual sehingga peserta didik memperoleh pengalaman belajar yang lebih konkret. Selain itu, aplikasi kaligrafi bergerak telah menunjukkan potensi dalam mendukung latihan visual dan pembelajaran secara mandiri (Aldayel, 2024). Kajian pembelajaran bahasa juga menempatkan Augmented Reality (AR) sebagai media yang mampu menggabungkan konteks visual, objek ruang, dan aktivitas bahasa dalam satu pengalaman belajar yang lebih interaktif (Parmaxi & Demetriou, 2020; Shadiev & Liang, 2024).

Teknologi Augmented Reality (AR) memungkinkan objek digital ditampilkan secara langsung pada lingkungan nyata sehingga pengguna dapat berinteraksi dengan objek virtual tanpa kehilangan konteks lingkungan sekitarnya. Karakteristik tersebut menjadikan AR sebagai salah satu teknologi yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, termasuk pendidikan. Dalam proses pembelajaran, AR mampu memperjelas konsep yang bersifat abstrak, meningkatkan keterlibatan peserta didik, serta menyediakan representasi visual yang sulit diwujudkan melalui media cetak maupun media pembelajaran konvensional. Walaupun demikian, penerapan AR tidak hanya bergantung pada kemampuan teknologi dalam menampilkan objek virtual, tetapi juga dipengaruhi oleh kualitas interaksi, kesiapan perangkat, desain antarmuka, serta pengendalian beban kognitif pengguna agar pengalaman belajar tetap efektif (Akçayir & Akçayir, 2017; Alzahrani, 2020; Buchner et al., 2021). Hasil meta-analisis selama sepuluh tahun penelitian mengenai AR dalam pendidikan menunjukkan bahwa teknologi ini memberikan dampak positif terhadap respons belajar, peningkatan pengetahuan, keterampilan, serta performa peserta didik. Namun demikian, besarnya manfaat tersebut tetap dipengaruhi oleh kesesuaian konteks pembelajaran dan kualitas rancangan sistem yang dikembangkan (Chang et al., 2022).

Pengembangan media pembelajaran berbasis AR untuk huruf hijaiyah telah menghasilkan berbagai aplikasi dengan fokus yang beragam, mulai dari pengenalan alfabet, tanda baca, hingga kosakata bahasa Arab. Sistem berbasis Android mampu menampilkan huruf hijaiyah secara interaktif sebagai media pembelajaran bagi anak-anak sehingga proses pengenalan huruf menjadi lebih menarik (Rahmat et al., 2018). Penelitian lain mengembangkan aplikasi yang tidak hanya memperkenalkan huruf hijaiyah, tetapi juga tanda baca sebagai bagian dari pembelajaran pada jenjang taman kanak-kanak (Hafidhoh et al., 2023; Adrian et al., 2026). Selain itu, media kartu berbasis AR juga telah dimanfaatkan sebagai sarana pembelajaran kosakata bahasa Arab sehingga peserta didik dapat menghubungkan objek virtual dengan materi yang dipelajari (Ramadhani & Arifin, 2024). Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa teknologi AR layak diterapkan sebagai media edukasi karena mampu meningkatkan visualisasi materi pembelajaran. Temuan tersebut juga sejalan dengan pengembangan AR pada bidang jaringan komputer yang memperlihatkan bahwa representasi objek tiga dimensi dapat mendukung proses pembelajaran berbasis objek secara lebih efektif (Hamzah et al., 2021).

Sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada kemunculan satu objek virtual setelah satu penanda dipindai. Pendekatan tersebut memang efektif untuk memperkenalkan objek secara individual, tetapi belum mendukung penyusunan beberapa objek dalam satu ruang pembelajaran yang berkesinambungan. Keberadaan objek sebelumnya umumnya tidak dilaporkan tetap bertahan ketika penanda keluar dari bidang pandang kamera sehingga pengguna belum memperoleh kanvas visual yang memungkinkan penyusunan rangkaian huruf secara bertahap. Selain itu, sebagian besar

aplikasi masih dikembangkan sebagai aplikasi bergerak yang memerlukan proses instalasi terlebih dahulu. Kondisi tersebut berpotensi menjadi hambatan bagi pengguna yang memiliki keterbatasan ruang penyimpanan atau ingin mengakses aplikasi secara cepat. Sebaliknya, Web Augmented Reality (WebAR) menawarkan kemudahan akses melalui peramban tanpa memerlukan instalasi aplikasi khusus. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem WebAR dapat dimanfaatkan untuk visualisasi, pelatihan, maupun penyampaian informasi secara lebih fleksibel karena dapat dijalankan langsung melalui web (Layona et al., 2018; Roy & Kanjilal, 2021; McNally & Koviland, 2024).

Kesenjangan penelitian juga terlihat pada belum terintegrasinya proses penyusunan huruf, pemertahanan objek virtual di ruang, dan umpan balik suara dalam satu alur pembelajaran. Beberapa penelitian telah memanfaatkan AR untuk membantu visualisasi teks Arab sehingga memudahkan proses membaca, namun fokus utamanya masih berbeda dengan kebutuhan simulasi penyusunan kaligrafi huruf hijaiyah secara bertahap (Ouali et al., 2023). Padahal, dalam pembelajaran kaligrafi, peserta didik tidak hanya memerlukan visualisasi bentuk huruf, tetapi juga perlu memahami urutan penyusunan huruf hingga membentuk sebuah kata serta memperoleh umpan balik terhadap hasil yang telah disusun. Oleh karena itu, integrasi antara penyusunan huruf, persistensi objek, dan evaluasi pengucapan menjadi aspek yang masih belum banyak dilaporkan pada penelitian sebelumnya. Perbandingan karakteristik penelitian terdahulu dan sistem yang dikembangkan pada penelitian ini disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Komparasi Karakteristik Penelitian Terdahulu dan Sistem yang dikembangkan

Studi	Platform	Fokus interaksi	Objek persisten	Evaluasi ucapan
Rahmat et al. (2018)	Android	Huruf tunggal berbasis penanda	Tidak dilaporkan	Tidak dilaporkan
Hafidhoh et al. (2023)	Aplikasi bergerak	Huruf dan tanda baca	Tidak dilaporkan	Tidak dilaporkan
Ramadhani & Arifin (2024)	Kartu AR	Kosakata bahasa Arab	Tidak dilaporkan	Tidak dilaporkan
Adrian et al. (2026)	Aplikasi bergerak	Pengenalan huruf hijaiyah	Tidak dilaporkan	Tidak dilaporkan
Penelitian ini	WebAR	Susunan model 3D kanan-ke-kiri	Ada	Ada, berbasis transkrip suara

Berdasarkan tabel 1, dapat diketahui bahwa sebagian besar penelitian terdahulu telah memanfaatkan teknologi *Augmented Reality* sebagai media pembelajaran huruf hijaiyah maupun kosakata bahasa Arab. Namun, seluruh penelitian yang dibandingkan masih berfokus pada penyajian objek secara individual dan belum melaporkan kemampuan sistem dalam mempertahankan objek virtual setelah penanda keluar dari bidang pandang kamera. Selain itu, fitur penyusunan huruf secara berurutan dari kanan ke kiri serta evaluasi ucapan berbasis transkrip suara juga belum diintegrasikan dalam satu sistem. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa penelitian ini tidak hanya mengembangkan media WebAR berbasis peramban, tetapi juga menghadirkan kombinasi fitur yang mendukung simulasi penyusunan kaligrafi huruf hijaiyah secara lebih interaktif dan berkelanjutan.

Berdasarkan perbandingan dengan penelitian terdahulu, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi beberapa fitur yang belum dilaporkan secara bersamaan pada media pembelajaran huruf hijaiyah berbasis *Augmented Reality*. Sistem yang dikembangkan menerapkan *persistent multi-marker* sehingga model huruf tetap

dipertahankan meskipun penanda tidak lagi berada dalam bidang pandang kamera. Selanjutnya, mekanisme *spatial anchoring* memungkinkan model dipindahkan dari jangkar penanda menuju koordinat dunia terakhir dan disusun secara otomatis mengikuti arah penulisan bahasa Arab dari kanan ke kiri. Sistem juga mengintegrasikan validasi terhadap 23 kosakata dengan pengenalan ucapan berbasis Web Speech API sehingga pengguna memperoleh umpan balik visual dan suara dalam satu alur interaksi. Selain itu, evaluasi sistem tidak hanya mencakup pengujian fungsional, tetapi juga karakteristik teknis yang meliputi jarak deteksi, iluminasi, tingkat kebisingan, dan kecenderungan kecepatan penyegaran pada peramban. Kontribusi tersebut menempatkan penelitian ini pada irisan pengembangan antarmuka AR bergerak, kerangka WebAR, dan interaksi sadar lingkungan yang masih menjadi tantangan dalam pengembangan AR modern (Cao et al., 2023; Ferrao et al., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang, membangun, dan mengevaluasi sistem Web Augmented Reality (WebAR) untuk simulasi pembentukan kaligrafi huruf hijaiyah. Evaluasi difokuskan pada pengujian kelayakan fungsional dan karakteristik teknis sistem yang meliputi kemampuan deteksi penanda, persistensi objek, kondisi operasional, pengenalan ucapan, serta performa perenderan pada peramban. Adapun pengaruh penggunaan sistem terhadap hasil belajar, motivasi, maupun kemampuan kaligrafi peserta didik tidak menjadi ruang lingkup penelitian ini dan perlu dikaji lebih lanjut pada penelitian berikutnya.

Metode

Jenis dan Desain Penelitian

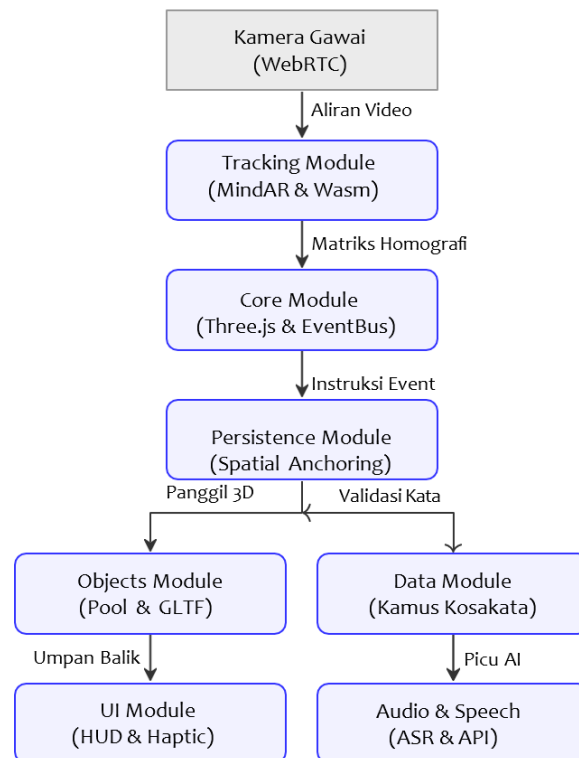
Penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) untuk menghasilkan produk perangkat lunak sekaligus mengevaluasi fungsi utamanya. Model pengembangan yang digunakan ialah *Multimedia Development Life Cycle* (MDLC), yang terdiri atas tahap *concept*, *design*, *material collecting*, *assembly*, *testing*, dan *distribution*. Pemilihan R&D sesuai dengan tujuan penelitian yang berorientasi pada pengembangan media dan pengujian produk, sebagaimana digunakan pada sejumlah pengembangan media AR pendidikan (Hamzah et al., 2021; Adrian et al., 2026).

Objek penelitian berupa sistem WebAR Hijaiyah yang memuat 28 model huruf tiga dimensi, penanda visual, audio pelafalan, 23 kosakata validasi, dan antarmuka penyusunan huruf. Pengujian dilakukan pada kategori gawai Android kelas menengah, perangkat iOS, dan komputer jinjing melalui peramban modern. Unit analisis berupa respons fungsi aplikasi, latensi deteksi, kestabilan pelacakan, penerimaan transkrip suara, dan kecepatan penyegaran grafis.

Tahapan Pengembangan MDLC

Tahap *concept* menetapkan pengguna sasaran, kebutuhan pembelajaran huruf hijaiyah, dan skenario pemindaian berurutan. Tahap *design* menghasilkan alur antarmuka, struktur modul, aturan komposisi kanan-ke-kiri, dan rancangan umpan balik audio-visual. Tahap *material collecting* menghimpun model GLTF, penanda huruf, rekaman audio, serta daftar kosakata. Tahap *assembly* mengintegrasikan TypeScript, Vite, Three.js, MindAR, Web Audio API, dan Web Speech API. Tahap *testing* mencakup pengujian kotak hitam dan pengukuran lingkungan. Tahap *distribution* dilakukan melalui layanan web sehingga produk dapat diakses dari peramban tanpa paket instalasi.

Arsitektur pada Gambar 1 membagi sistem menjadi modul pelacakan, inti grafis, persistensi, objek, data, antarmuka, audio, dan pengenalan suara. Pembagian tersebut mendukung pemisahan tanggung jawab komponen dan mengurangi konflik pemrosesan antara deteksi penanda, perenderan, serta umpan balik. Pendekatan modular sejalan dengan kebutuhan kerangka AR bergerak yang harus mengelola antarmuka, pelacakan, perenderan, dan kecerdasan interaksi secara bersamaan (Cao et al., 2023).



Gambar 1. Arsitektur modular dan aliran data sistem WebAR Hijaiyah

Kamera mengirimkan aliran video melalui antarmuka Web Real-Time Communication (WebRTC) menuju MindAR untuk mendeteksi penanda yang digunakan sebagai acuan penempatan objek virtual. Peristiwa deteksi kemudian diteruskan ke modul inti dan modul persistensi untuk diproses lebih lanjut. Model GLTF diambil dari *object pool*, ditempatkan pada koordinat penanda yang terdeteksi, kemudian dipindahkan ke kanvas persisten ketika penanda keluar dari bidang pandang kamera. Selanjutnya, sistem memperbarui posisi model pada sumbu horizontal sehingga susunan huruf mengikuti arah penulisan bahasa Arab dari kanan ke kiri (*right-to-left/RTL*). Alur tersebut menunjukkan bahwa setiap modul memiliki fungsi yang saling terintegrasi, mulai dari proses akuisisi citra, pelacakan penanda, pengelolaan objek virtual, hingga penyajian umpan balik kepada pengguna. Pemisahan fungsi antar modul juga membantu menjaga kestabilan proses pelacakan dan perenderan sehingga sistem tetap mampu mempertahankan objek virtual pada posisi terakhir yang telah ditentukan. Konsep pemisahan antara proses penambatan (*anchoring*) dan perenderan ini berkaitan dengan kebutuhan registrasi ruang yang stabil pada sistem AR dan pendekatan *visual-inertial tracking* (Piao & Kim, 2017; Li et al., 2023).

Instrumen, Teknik Pengumpulan Data, dan Analisis

Data dikumpulkan melalui observasi langsung terhadap respons aplikasi dan pencatatan keluaran sistem. Setiap skenario fungsi dijalankan sesuai urutan tindakan pada lembar uji. Jarak penanda diatur menggunakan penggaris, intensitas cahaya dicatat

dengan *lux meter*, tingkat kebisingan dicatat dengan *sound level meter*, sedangkan latensi, kecepatan penyegaran (*frames per second/FPS*), dan keluaran pengenalan ucapan otomatis (*Automatic Speech Recognition/ASR*) diperoleh dari log performa peramban. Pengukuran tidak melibatkan data identitas pengguna atau penilaian psikologis peserta.

Tabel 2. Instrumen dan Indikator Pengumpulan Data

Instrumen	Variabel/indikator	Satuan atau keluaran
Lembar uji <i>black-box</i>	Kesesuaian keluaran tujuh fungsi utama	Status <i>Pass/Fail</i>
Penggaris dan log waktu	Jarak kamera serta latensi deteksi	cm dan ms
<i>Lux meter</i>	Intensitas iluminasi lingkungan	lux
<i>Sound level meter</i> dan log ASR	Kebisingan serta transkrip yang memenuhi ambang 0,75	dB dan persentase
Log performa peramban	Kecepatan penyegaran saat objek bertambah	FPS
Catatan kompatibilitas	Kategori perangkat dan peramban	Berhasil/tidak berhasil

Berdasarkan Tabel 2, instrumen penelitian dirancang untuk mengevaluasi sistem secara menyeluruh, baik dari aspek fungsional maupun karakteristik teknis. Lembar uji *black-box* digunakan untuk memastikan setiap fungsi utama berjalan sesuai spesifikasi, sedangkan pengukuran jarak, iluminasi, dan tingkat kebisingan bertujuan mengidentifikasi kondisi operasional yang memengaruhi kinerja sistem. Selain itu, log performa peramban dimanfaatkan untuk mengamati perubahan kecepatan penyegaran (*frame rate*) ketika jumlah objek virtual bertambah, sementara catatan kompatibilitas digunakan untuk memastikan aplikasi dapat dijalankan pada berbagai perangkat dan peramban. Kombinasi instrumen tersebut memberikan data yang diperlukan untuk mengevaluasi kelayakan fungsional serta performa teknis sistem WebAR yang dikembangkan.

Analisis data dilakukan secara deskriptif. Keberhasilan fungsi dihitung dengan membagi jumlah skenario berstatus *Pass* dengan jumlah seluruh skenario, kemudian dikalikan 100%. Data jarak, iluminasi, kebisingan, dan FPS disajikan dalam tabel atau grafik untuk menunjukkan kecenderungan operasional. Nilai persentase pengenalan suara ditafsirkan sebagai proporsi transkrip yang memenuhi ambang kepercayaan 0,75, bukan sebagai ukuran klinis ketepatan makharijul huruf.

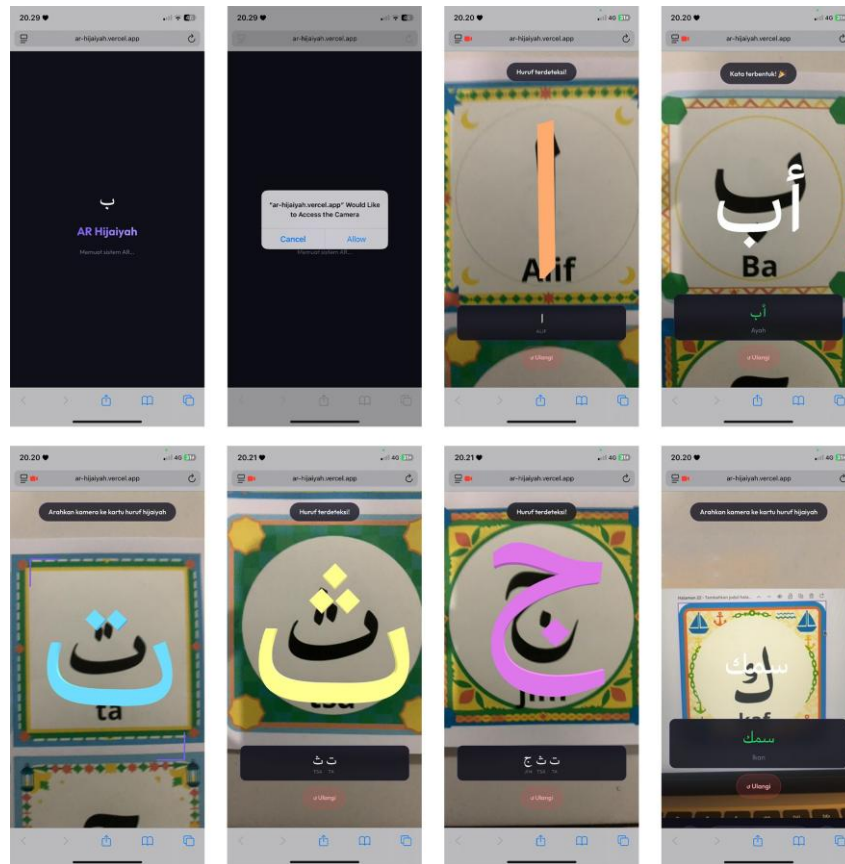
$$\text{Keberhasilan fungsi (\%)} = (\text{jumlah skenario Pass} / \text{jumlah seluruh skenario}) \times 100\%$$

Hasil dan Pembahasan

Implementasi dan Distribusi Sistem

Hasil pengembangan penelitian ini berupa aplikasi Web Augmented Reality (WebAR) Hijaiyah yang dirancang untuk memvisualisasikan penyusunan huruf hijaiyah secara interaktif melalui teknologi berbasis peramban. Aplikasi dikembangkan agar dapat digunakan tanpa proses instalasi sehingga pengguna cukup mengaksesnya melalui tautan proyek menggunakan peramban yang mendukung WebAR. Antarmuka awal memuat permintaan izin akses kamera, petunjuk pemindaian penanda, area tampilan model tiga dimensi, kontrol untuk mengulangi proses penyusunan huruf, serta umpan balik berupa tampilan huruf dan audio pelafalan. Rancangan antarmuka tersebut dibuat agar pengguna dapat mengikuti setiap tahapan penggunaan aplikasi secara berurutan, mulai dari proses pemindaian hingga memperoleh hasil visualisasi dan umpan balik yang diberikan sistem. Dengan pendekatan berbasis web, proses distribusi dan pembaruan aplikasi dapat dilakukan secara lebih mudah tanpa mengharuskan pengguna memasang versi terbaru

secara manual. Produk hasil pengembangan dapat diakses melalui <https://ar-hijaiyah.vercel.app/>.



Gambar 2. Antarmuka Sistem dan Umpan Balik Visual pada Skenario Pemindaian Huruf

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian antarmuka saat sistem memuat kamera, mengenali penanda, menampilkan model huruf, dan memberikan umpan balik. Distribusi melalui web menghilangkan kebutuhan mengunduh paket aplikasi dan memungkinkan pemutakhiran aset dilakukan pada sisi layanan. Temuan tersebut konsisten dengan penelitian WebAR yang menekankan akses lintas perangkat dan penyampaian informasi langsung melalui peramban (Roy & Kanjilal, 2021; McNally & Koviland, 2024).

Model tiga dimensi diprapiat (*preloaded*) ke dalam object pool sejak aplikasi dijalankan sehingga objek yang diperlukan telah tersedia sebelum proses pemindaian dilakukan. Strategi ini mengurangi proses instansiasi berulang selama aplikasi digunakan dan membantu menjaga kelancaran proses perenderan ketika pengguna memindai beberapa penanda secara berurutan. Dengan demikian, waktu respons sistem menjadi lebih stabil dan pengalaman interaksi pengguna dapat dipertahankan meskipun jumlah objek virtual bertambah. Pendekatan tersebut juga mendukung mekanisme persistent multi-marker karena objek yang telah ditampilkan dapat dipertahankan tanpa harus dibuat ulang setiap kali penanda dikenali kembali. Kerangka WebAR sadar lingkungan yang menggunakan WebXR dan Three.js juga menunjukkan pentingnya pengelolaan perenderan serta interaksi secara efisien pada peramban agar aplikasi tetap memberikan performa yang baik pada berbagai perangkat (Ferrao et al., 2023).

Validasi Fungsional

Setelah proses pengembangan selesai dilakukan, tahap berikutnya adalah melakukan validasi fungsional untuk memastikan bahwa seluruh fitur yang dirancang telah berjalan sesuai dengan spesifikasi sistem. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan aplikasi dalam menjalankan fungsi-fungsi utama yang mendukung proses penyusunan huruf hijaiyah, mulai dari proses pemindaian penanda hingga pemberian umpan balik kepada pengguna. Hasil pengujian fungsional sistem disajikan pada tabel 3. Pengujian tersebut mencakup akses kamera, kemunculan model tiga dimensi, persistensi objek setelah penanda keluar dari bidang pandang, penyusunan huruf berikutnya, validasi kosakata, pengenalan suara, serta pengaturan ulang kanvas. Seluruh skenario menghasilkan keluaran yang sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

Tabel 3. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

ID	Tindakan uji	Keluaran yang diharapkan	Status
BB-01	Membuka tautan HTTPS pada peramban	Kamera aktif setelah izin diberikan	Pass
BB-02	Memindai satu penanda huruf	Model 3D huruf muncul	Pass
BB-03	Mengeluarkan penanda dari bidang kamera	Model bertahan pada posisi terakhir	Pass
BB-04	Memindai penanda huruf berikutnya	Susunan bergeser mengikuti arah RTL	Pass
BB-05	Menyusun rangkaian yang terdaftar	Kosakata tervalidasi dan audio diputar	Pass
BB-06	Mengucapkan kosakata melalui mikrofon	Transkrip diperiksa dan umpan balik tampil	Pass
BB-07	Menekan tombol “Ulangi”	Kanvas dan <i>buffer</i> kata dikosongkan	Pass

Berdasarkan tabel 3, seluruh skenario pengujian fungsional memperoleh status Pass, sehingga persentase keberhasilan fungsi mencapai 100% atau tujuh dari tujuh skenario yang diuji. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap fungsi utama, mulai dari akses kamera, deteksi penanda, persistensi objek, penyusunan huruf, validasi kosakata, pengenalan suara, hingga proses pengaturan ulang kanvas, telah berjalan sesuai dengan spesifikasi yang dirancang. Meskipun demikian, keberhasilan fungsional hanya menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan seluruh mekanisme operasional secara benar dan belum dapat diinterpretasikan sebagai bukti peningkatan efektivitas pembelajaran. Penelitian pengembangan media AR sebelumnya juga menempatkan pengujian fungsional sebagai tahap awal untuk memastikan kelayakan sistem sebelum dilakukan evaluasi bersama pengguna dalam konteks pembelajaran yang sesungguhnya (Hamzah et al., 2021; Hafidhoh et al., 2023; Adrian et al., 2026).

Fitur paling membedakan terletak pada skenario BB-03 dan BB-04. Model tidak langsung dihapus ketika penanda hilang, kemudian sistem menggeser susunan saat huruf baru ditambahkan. Mekanisme tersebut membentuk papan komposisi visual yang tidak ditemukan sebagai fitur terlapor pada studi pembandingan di Tabel 1. Penambahan ruang yang konsisten menjadi unsur penting agar objek virtual dipersepsikan tetap terkait dengan lingkungan nyata (Alimamy & Jung, 2025).

Karakteristik Jarak dan Iluminasi

Penelitian ini juga mengevaluasi karakteristik operasional sistem untuk mengetahui kondisi lingkungan yang mendukung kinerja deteksi penanda secara optimal. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi jarak antara kamera dan penanda guna mengidentifikasi pengaruhnya terhadap stabilitas deteksi dan waktu respons sistem. Hasil pengukuran

berdasarkan variasi jarak disajikan pada Tabel 4. Berdasarkan hasil tersebut, sistem bekerja paling stabil pada rentang jarak 15–30 cm. Jarak kurang dari 10 cm menghasilkan bidang pandang yang terlalu sempit, sedangkan jarak lebih dari 50 cm mengurangi jumlah detail penanda yang dapat diekstraksi oleh sistem. Kondisi tersebut menyebabkan latensi meningkat dari 410–425 ms pada jarak 15–20 cm menjadi 3.500 ms pada jarak 50 cm.

Tabel 4. Respons Deteksi Berdasarkan Jarak Kamera

Jarak (cm)	Latensi (ms)	Status	Interpretasi
< 10	Tidak terdeteksi	Gagal	Penanda tidak tertangkap utuh
15	410	Optimal	Fitur penanda tajam
20	425	Optimal	Koordinat stabil
30	1.200	Moderat	Deteksi masih dapat digunakan
50	3.500	Marginal	Muncul getaran objek
> 60	Tidak terdeteksi	Gagal	Resolusi piksel penanda terlalu rendah

Kecenderungan pada tabel 4 menunjukkan bahwa performa deteksi sangat dipengaruhi oleh kualitas citra penanda yang diterima kamera. Pada jarak 15–20 cm, ukuran penanda masih cukup besar sehingga fitur visual dapat dikenali secara stabil dan latensi tetap rendah. Sebaliknya, peningkatan jarak menyebabkan jumlah detail citra yang dapat diekstraksi semakin berkurang sehingga proses estimasi posisi objek menjadi lebih lambat dan kurang stabil. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa latensi meningkat secara signifikan pada jarak 50 cm dan sistem gagal mendeteksi penanda ketika jaraknya melebihi 60 cm. Temuan ini sejalan dengan karakteristik pelacakan visual yang memerlukan fitur citra berukuran cukup besar, memiliki kontras yang baik, dan stabil untuk memperkirakan pose kamera. Penelitian mengenai *visual-inertial simultaneous localization and mapping* juga menunjukkan bahwa kualitas citra, oklusi, serta keterbatasan fitur berpengaruh terhadap kestabilan registrasi objek AR (Piao & Kim, 2017; Li et al., 2023; Pan et al., 2024).

Hasil iluminasi pada tabel 5 memperlihatkan kegagalan pada kondisi kurang dari 50 lux, kondisi marginal sekitar 150 lux, dan hasil optimal pada 300–500 lux. Pencahayaan lebih dari 1.000 lux masih dapat digunakan, tetapi pantulan pada permukaan penanda dapat mengurangi konsistensi deteksi.

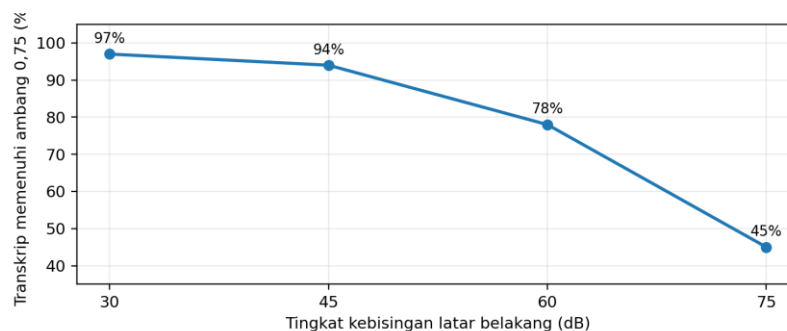
Tabel 5. Kestabilan Pelacakan Berdasarkan Iluminasi

Kondisi	Lux	Status	Interpretasi
Gelap	< 50	Gagal	Kontras rendah dan derau meningkat
Redup	± 150	Marginal	Titik fitur tidak konsisten
Pencahayaan ruang	300–500	Optimal	Penanda terdeteksi utuh
Cahaya sangat terang	> 1.000	Moderat	Pantulan dapat menutup sebagian fitur

Berdasarkan tabel 5, kualitas pencahayaan memberikan pengaruh langsung terhadap kemampuan sistem dalam mendeteksi penanda. Intensitas cahaya yang terlalu rendah menyebabkan kontras citra berkurang sehingga fitur penanda sulit dikenali oleh sistem. Sebaliknya, pencahayaan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan pantulan pada permukaan penanda sehingga sebagian fitur visual tertutup dan proses deteksi menjadi kurang konsisten. Oleh karena itu, rentang pencahayaan 300–500 lux menjadi kondisi operasional yang paling sesuai untuk memperoleh kestabilan pelacakan. Temuan tersebut menegaskan bahwa kualitas registrasi WebAR tidak hanya ditentukan oleh kode aplikasi, tetapi juga oleh kualitas informasi visual yang diterima kamera. Kerangka AR bergerak dan sistem perenderan sadar lingkungan sama-sama menempatkan kualitas sensor serta pencahayaan sebagai komponen penting dalam mempertahankan hubungan antara objek virtual dan lingkungan (Cao et al., 2023; Ferrao et al., 2023).

Respons Pengenalan Suara terhadap Kebisingan

Untuk mengetahui pengaruh tingkat kebisingan terhadap kinerja fitur pengenalan suara, dilakukan pengujian pada beberapa kondisi lingkungan dengan intensitas kebisingan yang berbeda. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengenali ucapan pengguna dan memberikan umpan balik yang sesuai. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 3 dalam bentuk persentase transkrip yang memenuhi ambang kepercayaan sebesar 0,75 pada empat tingkat kebisingan. Nilai yang diperoleh mencapai 97% pada 30 dB, 94% pada 45 dB, 78% pada 60 dB, dan 45% pada 75 dB. Penurunan persentase setelah tingkat kebisingan melebihi 60 dB menunjukkan bahwa fitur pengenalan suara bekerja lebih optimal pada lingkungan yang relatif tenang sehingga umpan balik suara dapat diberikan secara lebih konsisten.



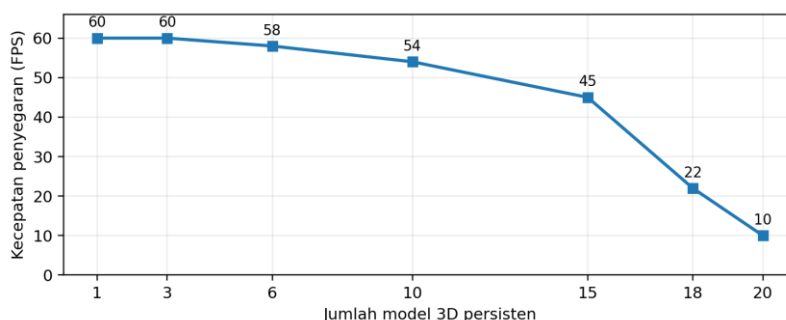
Gambar 3. Persentase Transkrip yang Memenuhi Ambang Kepercayaan Berdasarkan Kebisingan

Interpretasi hasil pada gambar 3 menunjukkan bahwa tingkat kebisingan lingkungan berpengaruh terhadap kemampuan layanan Automatic Speech Recognition (ASR) dalam mengenali pengucapan pengguna. Persentase penerimaan transkrip yang masih tinggi pada kebisingan 30–45 dB mengindikasikan bahwa sistem mampu memberikan umpan balik suara secara konsisten pada kondisi ruang belajar yang relatif tenang. Namun, penurunan yang cukup besar pada tingkat kebisingan 60 dB dan 75 dB menunjukkan bahwa suara latar mulai mengganggu proses pengenalan ucapan sehingga akurasi transkrip ikut menurun. Hasil tersebut dibatasi pada penerimaan transkrip oleh layanan ASR dan bukan merupakan penilaian fonetik klinis terhadap ketepatan pengucapan huruf hijaiyah. Web Speech API membandingkan sinyal suara dengan model pengenalan bahasa sehingga hasilnya masih dipengaruhi oleh kualitas mikrofon, peramban, koneksi jaringan, dan tingkat kebisingan lingkungan. Penelitian AR untuk bantuan membaca teks Arab memperlihatkan potensi integrasi visual dan bahasa, sedangkan tinjauan mengenai pembelajaran bahasa berbasis AR menekankan pentingnya umpan balik yang jelas serta evaluasi performa bahasa yang sesuai dengan tujuan pembelajaran (Ouali et al., 2023; Parmaxi & Demetriou, 2020; Shadiev & Liang, 2024).

Kinerja Perenderan Multi-Objek

Guna mengevaluasi performa sistem dalam menangani beberapa objek virtual secara bersamaan, dilakukan pengujian terhadap perubahan kecepatan penyegaran (*frame rate*) seiring bertambahnya jumlah model tiga dimensi yang ditampilkan. Pengujian ini bertujuan mengidentifikasi batas operasional sistem agar aplikasi tetap memberikan pengalaman visual yang lancar ketika fitur persistent multi-marker digunakan. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil tersebut, kecepatan penyegaran tetap berada pada

kisaran 54–60 FPS ketika satu hingga sepuluh model ditampilkan secara bersamaan. Nilai tersebut menurun menjadi 45 FPS pada 15 model, kemudian turun lebih signifikan menjadi 22 FPS pada 18 model dan 10 FPS pada 20 model. Hasil ini menunjukkan bahwa batas operasional yang masih memberikan pengalaman penggunaan yang nyaman pada perangkat uji berada hingga sekitar 15 model persisten, sedangkan jumlah objek yang lebih banyak memerlukan pengurangan kompleksitas geometri atau pembatasan jumlah objek aktif untuk mempertahankan performa sistem.



Gambar 4. Perubahan Kecepatan Penyegaran Berdasarkan Jumlah Model 3D Persisten

Kecenderungan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa bertambahnya jumlah objek virtual secara langsung meningkatkan beban komputasi selama proses perenderan. Meskipun penggunaan *object pooling* mampu mengurangi biaya pembuatan objek secara berulang, setiap model tiga dimensi tetap memerlukan proses perenderan oleh GPU sehingga penambahan jumlah objek akan memengaruhi kecepatan penyegaran tampilan. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem masih mampu mempertahankan performa yang nyaman hingga sekitar 15 model persisten, sedangkan jumlah objek yang lebih besar menyebabkan penurunan FPS secara signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa optimasi jumlah objek aktif masih menjadi aspek penting dalam pengembangan aplikasi WebAR berbasis peramban. Kajian mengenai kerangka AR bergerak juga menempatkan optimasi perenderan, penggunaan memori, dan latensi sebagai kendala utama pengalaman pengguna pada perangkat bergerak (Cao et al., 2023). Selain itu, sistem pelacakan kolaboratif dan *visual-inertial odometry* menekankan perlunya keseimbangan antara ketahanan algoritma dan biaya komputasi agar aplikasi AR dapat berjalan secara waktu nyata pada berbagai perangkat (Li et al., 2023; Pan et al., 2024).

Implikasi dan Keterbatasan Penelitian

Implikasi praktis penelitian terletak pada tersedianya simulasi penyusunan huruf yang dapat diakses tanpa instalasi. Persistensi objek membantu pengguna mempertahankan konteks visual antarkarakter, sedangkan susunan kanan-ke-kiri menghubungkan bentuk huruf dengan struktur kata. Temuan kajian sistematis menunjukkan bahwa AR berpotensi mendukung pemahaman, keterlibatan, dan performa ketika visualisasi terintegrasi dengan tugas belajar yang terarah (Ibanez & Delgado-Kloos, 2018; Garzon et al., 2019; Garzon, 2021). Penggunaan media tersebut tetap memerlukan petunjuk, pembatasan informasi, dan rancangan aktivitas untuk mencegah beban kognitif berlebih (Alzahrani, 2020; Buchner et al., 2021).

Implikasi pedagogis belum dapat disimpulkan hanya dari kelulusan fungsi. Penelitian eksperimental AR menunjukkan bahwa pencapaian dan efikasi diri dapat meningkat ketika teknologi ditempatkan dalam skenario pembelajaran yang tepat, bukan sekadar digunakan

sebagai atraksi visual (Sirakaya & Alsancak Sirakaya, 2018). Evaluasi lanjutan perlu melibatkan siswa dan guru untuk mengukur kemudahan penggunaan, ketepatan materi, retensi kosakata, dan kemampuan menyusun huruf.

Keterbatasan penelitian mencakup pengujian pada kategori perangkat dan versi peramban yang terbatas, tidak adanya uji pengguna serta statistik inferensial, ketergantungan pengenalan suara pada layanan peramban, dan penggunaan jarak antarmodel yang masih tetap. Perbedaan lebar tiap huruf dapat menimbulkan tumpang tindih geometri. Pengembangan berikutnya perlu menerapkan *dynamic 3D kerning*, penambahan berbasis bidang melalui WebXR, penyederhanaan model, pengujian berulang pada perangkat lebih luas, serta pengenalan suara luring. Evaluasi bersama pengguna harus membandingkan hasil belajar sebelum dan sesudah penggunaan agar kontribusi pendidikan dapat dibuktikan.

Kesimpulan

Penelitian R&D ini menghasilkan sistem WebAR untuk simulasi pembentukan kaligrafi huruf hijaiyah dengan fitur *persistent multi-marker*, *spatial anchoring*, komposisi kanan-ke-kiri, audio, dan pemeriksaan transkrip suara. Seluruh tujuh skenario fungsional berstatus *Pass*. Pelacakan bekerja paling stabil pada jarak 15–30 cm dan iluminasi 300–500 lux. Persentase transkrip yang memenuhi ambang 0,75 mencapai 97% pada 30 dB dan 94% pada 45 dB, kemudian menurun pada lingkungan yang lebih bising. Perenderan bertahan pada 54–60 FPS hingga sepuluh model dan 45 FPS pada 15 model.

Implikasi penelitian ialah tersedianya media simulasi visual yang dapat diakses melalui peramban tanpa instalasi dan dapat mempertahankan konteks susunan huruf. Keterbatasan utama meliputi cakupan perangkat yang terbatas, belum adanya pengujian efektivitas belajar, ketergantungan layanan pengenalan suara, serta jarak antarmodel yang belum adaptif. Penelitian selanjutnya direkomendasikan mengembangkan *dynamic 3D kerning*, WebXR berbasis deteksi bidang, optimasi model, pengujian kompatibilitas lebih luas, dan eksperimen bersama peserta didik untuk mengukur usabilitas, retensi, serta hasil belajar.

Acknowledgment

References

- Adrian, D., Muktiadi, R., Sugiyanto, S., & Wijaya, E. S. (2026). Implementation of Augmented Reality (AR) as a Learning Medium For Introducing Hijaiyah Letters: A Case Study at UMP Kindergarten. *Jurnal E-Komtek*, 9(2), 474–487. <https://doi.org/10.37339/e-komtek.v9i2.2614>
- Akcayir, M., & Akcayir, G. (2017). Advantages and Challenges Associated with Augmented Reality for Education: A Systematic Review of the Literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Aldayel, M. (2024). Khatti: An Interactive Mobile Application for Training of Arabic Calligraphy. *Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2024): Integrating People and Intelligent Systems*, 119, 714–724. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004536>

- Alimamy, S., & Jung, T. (2025). The AR Cloud: Navigating Metaverse Augmentation Technologies for Enhanced Co-Creation of Value Within Services. *Journal of Service Research*, 28(4), 580–597. <https://doi.org/10.1177/10946705241265753>
- Alzahrani, N. M. (2020). Augmented Reality: A Systematic Review of its Benefits and Challenges in E-Learning Contexts. *Applied Sciences*, 10(16), Article 5660. <https://doi.org/10.3390/app10165660>
- Buchner, J., Buntins, K., & Kerres, M. (2021). The Impact of Augmented Reality on Cognitive Load and Performance: A Systematic Review. *Computers and Education Open*, 2, Article 100036. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100036>
- Cao, J., Lam, K.-Y., Lee, L.-H., Liu, X., Hui, P., & Su, X. (2023). Mobile Augmented Reality: User Interfaces, Frameworks, and Intelligence. *ACM Computing Surveys*, 55(9), 1–36. <https://doi.org/10.1145/3557999>
- Chang, H.-Y., Binali, T., Liang, J. C., Chiou, G.-L., Cheng, K.-H., Lee, S. W.-Y., & Tsai, C.-C. (2022). Ten Years of Augmented Reality in Education: A Meta-Analysis of (Quasi-) Experimental Studies to Investigate the Impact. *Computers & Education*, 191, Article 104641. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104641>
- Ferrao, J., Dias, P., Sousa Santos, B., & Oliveira, M. (2023). Environment-Aware Rendering and Interaction in Web-Based Augmented Reality. *Journal of Imaging*, 9(3), Article 63. <https://doi.org/10.3390/jimaging9030063>
- Garzon, J. (2021). An Overview of Twenty-Five Years of Augmented Reality in Education. *Multimodal Technologies and Interaction*, 5(7), Article 37. <https://doi.org/10.3390/mti5070037>
- Garzon, J., Pavon, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic Review and Meta-Analysis of Augmented Reality in Educational Settings. *Virtual Reality*, 23(4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9>
- Hafidhoh, N., Lestariningsih, T., Atmaja, A. P., Fajar, M. S., Sumafta, I. B., & Izzah, D. N. (2023). Recognition of Hijaiyah Letters with Punctuation Using Augmented Reality. *TIERS Information Technology Journal*, 4(1), 25–31. <https://doi.org/10.38043/tiers.v4i1.4348>
- Hamzah, M. L., Rizal, F., & Simatupang, W. (2021). Development of Augmented Reality Application for Learning Computer Network Device. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(12), 47–64. <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i12.21993>
- Ibanez, M. B., & Delgado-Kloos, C. (2018). Augmented Reality for STEM Learning: A Systematic Review. *Computers & Education*, 123, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>
- Layona, R., Yulianto, B., & Turnadi, Y. (2018). Web Based Augmented Reality for Human Body Anatomy Learning. *Procedia Computer Science*, 135, 457–464. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.197>

- Li, J., Zhou, X., Yang, B., Zhang, G., Wang, X., & Bao, H. (2023). RLP-VIO: Robust and Lightweight Plane-Based Visual-Inertial Odometry for Augmented Reality. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 34(2), Article e2046. <https://doi.org/10.1002/cav.2046>
- McNally, K. F., & Koviland, H. (2024). A Web-Based Augmented Reality System. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 11(6). <https://doi.org/10.4108/eetsis.5481>
- Ouali, I., Ben Halima, M., & Wali, A. (2023). An Augmented Reality for an Arabic Text Reading and Visualization Assistant for the Visually Impaired. *Multimedia Tools and Applications*, 82(28), 43569–43597. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14880-6>
- Pan, X., Huang, G., Zhang, Z., Li, J., Bao, H., & Zhang, G. (2024). Robust Collaborative Visual-Inertial SLAM for Mobile Augmented Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(11), 7354–7363. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3456152>
- Parmaxi, A., & Demetriou, A. A. (2020). Augmented Reality in Language Learning: A State-of-the-Art Review of 2014–2019. *Journal of Computer Assisted Learning*, 36(6), 861–875. <https://doi.org/10.1111/jcal.12486>
- Piao, J.-C., & Kim, S.-D. (2017). Adaptive Monocular Visual-Inertial SLAM for Real-Time Augmented Reality Applications in Mobile Devices. *Sensors*, 17(11), Article 2567. <https://doi.org/10.3390/s17112567>
- Rahmat, R., Akbar, F., Syahputra, M., Budiman, M., & Hizriadi, A. (2018). An Interactive Augmented Reality Implementation of Hijaiyah Alphabet for Children Education. *Journal of Physics: Conference Series*, 978(1), Article 012102. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/978/1/012102>
- Ramadhani, U. H., & Arifin, M. B. U. B. (2024). Augmented Reality Flashcards for Arabic Vocabulary Learning. *Indonesian Journal of Islamic Studies*, 12(2). <https://doi.org/10.21070/ijis.v12i2.1756>
- Roy, S. G., & Kanjilal, U. (2021). Web-Based Augmented Reality for Information Delivery Services: A Performance Study. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 41(3), 167–174. <https://doi.org/10.14429/djlit.41.3.16428>
- Shadiev, R., & Liang, Q. (2024). A review of Research on AR-Supported Language Learning. *Innovation in Language Learning and Teaching*, 18(1), 78–100. <https://doi.org/10.1080/17501229.2023.2229804>
- Sirakaya, M., & Alsancak Sirakaya, D. (2018). Effects of Augmented Reality on Student Achievement and Self-Efficacy in Vocational Education and Training. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*, 5(1), 1–18. <https://doi.org/10.13152/IJRVET.5.1.1>