

## Sistem pelacakan posisi pengguna menggunakan marker-based AR dalam menjelajahi galeri museum VR

### *User position tracking system using marker-based AR for exploring VR museum galleries*

Pius Dian Widi Anggoro<sup>\*</sup>)

Jurusan Teknik Informatika, STMIK AKAKOM Yogyakarta  
Jalan Janti No.143, Banguntapan, Bantul, D.I.Yogyakarta, Indonesia 55198

---

**Cara sitasi:** P. D. W. Anggoro, "Sistem pelacakan posisi pengguna menggunakan marker-based AR dalam menjelajahi galeri museum VR," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 7 no. 4, pp. 134-140, 2019. doi: 10.14710/jtsiskom.7.4.2019.134-140, [Online].

---

**Abstract** - *This study examines the user position tracking system using marker-based AR on smartphones camera. The tracking system uses a homographic algorithm integrated into the Galeri Museum VR application. In the test, the user performed exploration interactions by 6 degrees of freedom in ten different positions in the museum gallery. The physical space used in this study was 4 x 4 m<sup>2</sup> and a marker attached to the wall in front of the user. This system results errors in XYZ field (0.102 m, 0.047 m, 0.044 m). If the camera's orientation is not directing to the marker and the user is moving, jitter appears because of the untracked marker. The use of marker-based AR successfully applied to track the position of users who perform natural locomotion interactions in the VR environment.*

**Keywords** - 6DOF; augmented reality; marker based; position tracking; virtual reality

**Abstrak** – *Penelitian ini mengkaji sistem pelacakan posisi pengguna menggunakan marker-based AR pada smartphone berkamera. Sistem pelacakan menggunakan pengembangan algoritme homografi yang diintegrasikan ke aplikasi Galeri Museum VR. Pengujian dilakukan pada pengguna yang melakukan interaksi penjelajahan dengan 6 derajat kebebasan di sepuluh posisi yang berbeda di galeri museum. Ukuran ruangan fisik yang digunakan dalam pengujian adalah 4 x 4 meter persegi dan satu penanda ditempel pada dinding di depan pengguna. Sistem ini mampu menghasilkan galat bidang XYZ (0,102 m, 0,047 m, 0,044 m). Jika orientasi kamera tidak mengarah ke penanda dan pengguna bergerak, muncul jitter karena penanda tidak terlacak. Penggunaan marker-based AR dapat diterapkan untuk melacak posisi pengguna yang melakukan interaksi perpindahan posisi di lingkungan VR.*

**Kata kunci** - 6DOF; augmented reality; marker based; position tracking; virtual reality

---

<sup>\*</sup>Penulis korespondensi (Pius Dian Widi Anggoro)  
Email: [piusanggoro@akakom.ac.id](mailto:piusanggoro@akakom.ac.id)

#### I. PENDAHULUAN

Teknologi *Virtual Reality* (VR) telah banyak diterapkan di beberapa sektor seperti hiburan, pendidikan, dan militer. VR dapat membantu mensimulasikan sesuatu yang sulit untuk dihadirkan secara langsung dalam dunia nyata. Dalam bidang penerbangan, dengan menggunakan VR para pilot dapat berlatih menerbangkan pesawat secara virtual. Pilot dapat mensimulasikan menerbangkan pesawat dengan kondisi yang serupa dengan dunia nyata. Hal ini meminimalisir resiko terjadinya kecelakaan saat latihan. Penerapan VR yang lain pada bidang pendidikan, misalnya digunakan untuk mempelajari sejarah masa lampau melalui museum dengan menghadirkannya secara virtual [1].

Aplikasi museum digital yang telah tersedia pada sebagian besar *smartphone* saat ini dapat menjadi salah satu solusi yang digunakan untuk membantu masyarakat mengakses informasi tentang museum. Hal ini didukung dengan pengguna *smartphone* di Indonesia yang bertumbuh dengan pesat. Lembaga riset digital marketing Emarketer, memperkirakan pada 2018 jumlah pengguna aktif *smartphone* di Indonesia lebih dari 100 juta orang. Dengan jumlah sebesar itu, Indonesia menjadi negara dengan pengguna aktif *smartphone* terbesar keempat di dunia setelah Cina, India, dan Amerika. Namun, hal ini berbanding terbalik dengan antusiasme masyarakat untuk mengunjungi museum yang masih rendah [2]. Jumlah kunjungan masyarakat Indonesia ke museum (wisatawan domestik) hanya dua persen dari jumlah penduduk pertahun [3].

Teknologi VR dengan biaya yang terjangkau dapat menjadi harapan untuk meningkatkan daya tarik masyarakat agar mengunjungi museum. Cara klasik dimana pengunjung harus berkunjung ke museum secara fisik dan didampingi oleh pemandu untuk mendapatkan informasi telah berubah. Interaksi dengan mengamati objek-objek museum dalam lingkungan virtual secara lebih detail telah meningkat. Agar mencapai tingkat interaksi ini, pengguna atau pengunjung museum, perlu dibantu dalam membangun interaksi yang alami antara dunia nyata dan lingkungan

museum virtual. Pengguna harus merasa berada di dalam lingkungan dan suasana museum yang sesungguhnya serta dapat bernavigasi dengan menjelajahi, mengamati, dan mengeksplorasi. Masukan melalui perangkat kendali diperlukan agar interaksi dapat terjadi secara alami [4]. Jika tidak dapat berkunjung langsung ke museum, untuk mendapatkan sebuah informasi mengenai situs sejarah, pengunjung dapat mengakses museum melalui aplikasi VR, pengguna dapat merasakan kunjungan yang sebenarnya dan mendapatkan informasi yang diperlukan.

Sistem interaksi dalam museum VR perlu dirancang di awal supaya pengguna tidak mengalami masalah kegunaan (*usability*) seperti disorientasi dan ketidakmampuan memanipulasi objek [5], begitu juga metode untuk pengujian dalam sistem VR [6]. Padahal untuk merancang sistem interaksi yang lebih baik, sangat diperlukan dukungan persepsi, navigasi, dan eksplorasi. Masalah fungsi *usability* saat pengguna menggunakan sistem VR saat ini telah diteliti dalam [7] dan [8] dalam studi tentang desain pengalaman pengguna. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa saat proses perancangan aplikasi VR perlu memiliki pendekatan desain interaksi yang alami [9]. Pemahaman tentang konsep *usability* yang menyertai aplikasi VR diperlukan dan tidak menggunakan metode interaksi manusia dengan komputer (IMK) yang konvensional.

Dalam lingkungan virtual pengguna disarankan berinteraksi langsung dengan objek tanpa menggunakan tombol, misalnya saat bernavigasi. Interaksi navigasi memberi pengalaman pengguna berupa kesan berjalan dalam lingkungan virtual atau antarmuka perpindahan (*locomotion*) [10]. Interaksi ini dapat menciptakan pengalaman berjalan dalam mengeksplorasi lingkungan virtual sekaligus menjaga pengguna tetap berada di batas lingkungan fisik [11], [12]. Interaksi navigasi dalam VR memungkinkan gerakan pengguna yang realistis dalam perspektif lingkungan virtual. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk navigasi pengguna yang realistis dalam ruang terbatas [13]-[15]. Cheng et al. [16] mengusulkan metode yang mensimulasikan pengalaman navigasi dengan menggunakan peralatan tambahan. Studi untuk gerakan navigasi seperti mendorong dinding, membuka pintu, dan berjalan dalam lingkungan virtual, juga telah disimulasikan menggunakan ruangan dengan dukungan perabotan yang menyerupai kenyataan [17], [18]. Penelitian yang telah dilakukan tersebut menggunakan sistem perangkat tambahan untuk mendukung interaksi pengguna yang alami. Penelitian tersebut menyediakan lingkungan yang dapat melacak posisi pengguna yang berjalan di dalam ruangan saat mengenakan HMD, tanpa menggunakan perangkat tambahan supaya dapat diimplementasikan dengan biaya yang terjangkau.

Vasylevska et al. [19] mengusulkan sebuah ruang fleksibel yang bisa memberi kesan berjalan tak terbatas di ruang virtual, namun dengan kondisi ruang nyata yang terbatas. Sistem ini memiliki keterbatasan untuk digunakan dalam aplikasi umum karena perlu ukuran ruang yang sedikit besar. Penelitian ini kemudian

disempurnakan dalam [20], yang memeriksa perilaku pengguna yang berjalan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan dan menganalisis koordinat dalam HMD untuk meningkatkan kehadiran di lingkungan virtual. Sistem ini menghasilkan kajian bahwa kehadiran dan pengalaman pengguna yang alami menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan kendali konvensional untuk navigasi virtual, hanya kedua sistem ini menggunakan platform desktop VR yang memerlukan spesifikasi komputer tinggi.

Saat pengguna bernavigasi dalam lingkungan virtual perlu fungsi untuk melacak posisinya. Penggunaan simulasi pelacakan posisi dengan bantuan optik dan memastikan bahwa pengguna seolah-olah melakukan interaksi berjalan dan merasakan pengalaman berjalan telah dilakukan [21]. Penelitian tersebut memanipulasi posisi untuk memberikan informasi tentang ilusi berjalan melalui perwakilan tubuh di lingkungan virtual, padahal pengguna dalam keadaan duduk. Penelitian yang memberikan pengalaman pengguna serupa dengan berjalan tanpa mengharuskan bergerak dalam platform *mobile* juga telah dilakukan [22]. Metode pelacakan posisi yang dikembangkan dalam penelitian ini ditujukan untuk sistem VR berbasis *mobile*, melalui pengalaman interaksi pengguna yang berjalan dalam lingkungan nyata untuk menjadi data masukkan dalam interaksi penjelajahan di lingkungan virtual.

Seperti halnya [8]-[22] yang menghadirkan interaksi alami manusia dengan objek, penelitian ini mengkaji pengembangan sistem pelacakan posisi yang dapat digunakan oleh pengguna saat menjelajah dan melakukan pengamatan objek museum tiga dimensi di lingkungan VR. Sistem menggunakan penanda yang diimplementasikan pada aplikasi VR di perangkat *smartphone*, dengan sistem interaksi alami hingga enam derajat kebebasan (6 *degree of freedom*). Sistem VR yang dikembangkan menggunakan sensor *gyroscope* serta kamera yang telah terintegrasi di *smartphone*. Platform VR yang digunakan adalah *mobile* VR, dengan perangkat *Head Mounted Display* (HMD) berbiaya murah. Lingkungan eksperimental untuk interaksi alami dalam penelitian ini disajikan dalam bentuk galeri museum VR, dengan objek tiga dimensi yang digunakan adalah potongan relief candi Mendut dan arca Budha dengan tekstur yang detail.

## II. METODE PENELITIAN

Sistem pelacakan posisi pengguna (pengunjung museum) diimplementasikan dalam aplikasi Galeri Museum VR yang menggunakan platform *mobile* Android. Aplikasi terpasang pada perangkat *smartphone* dan dijalankan menggunakan perangkat *headset* HMD yaitu Google Cardboard VR. Aplikasi mengakses data dari sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Data ini digunakan untuk menentukan orientasi dari HMD pengguna. Aplikasi mengakses data video secara *realtime* dari sensor kamera. Penanda yang terdeteksi dianalisis untuk menghasilkan koordinat referensi sistem (Gambar 1). Hasil dari koordinat



**Gambar 1.** Penanda yang digunakan

referensi ini digunakan untuk menentukan posisi dari pengguna yang dipresentasikan melalui posisi kamera dalam lingkungan virtual.

Aplikasi Galeri Museum VR (Gambar 2) yang digunakan untuk penelitian dikembangkan menggunakan Google Cardboard for Unity SDK yang sudah terintegrasi pada *Game Engine Unity 3D* versi 2017.3.1. Pustaka untuk pelacakan penanda menggunakan Vuforia versi 7.0.47.

Dalam penelitian ini, dikembangkan algoritme dalam aplikasi Galeri Museum VR yang digunakan untuk menentukan posisi pengguna. Untuk menguji akurasi dari algoritme pelacakan pengguna ini, sistem dibandingkan dengan hasil dari pelacakan secara *realtime* menggunakan kamera video resolusi tinggi dan dievaluasi dalam tampilan grafik tiga dimensi.

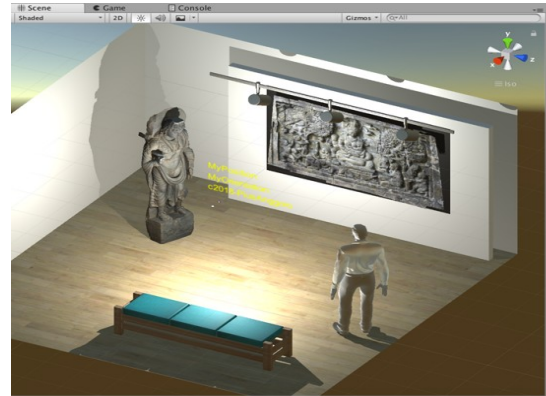
### A. Deteksi koordinat penanda dengan AR

Sistem pelacakan obyek pada gambar bergerak (video) saat ini telah banyak diterapkan dan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan metode *Augmented Reality* (AR) untuk pelacakan dan pendeteksian penanda. Setelah penanda terdeteksi, algoritme pelacakan dikembangkan untuk mendapatkan posisi kamera. Hasil perhitungan posisi kamera yang diperoleh merupakan posisi pengguna (Gambar 3).

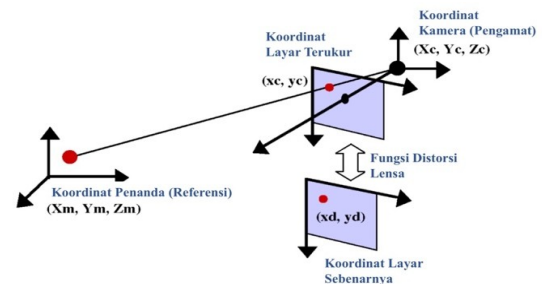
Proses awal menggunakan pustaka/library Vuforia AR untuk mendeteksi penanda yang dimulai dengan penangkapan citra video dengan kamera. Setiap *frame* gambar dikonversi menjadi skala keabuan. Deteksi tepi dari konten gambar dilakukan untuk mendapatkan fitur sudut. Hasil deteksi fitur sudut dicocokkan dengan database dari penanda. Jika sesuai, fitur luasan penanda diambil serta hasil perhitungan posisi dan orientasi penanda digunakan untuk proses berikutnya.

### B. Deteksi koordinat kamera (pengguna)

Proses komputasi dilakukan untuk mendapatkan parameter ekstrinsik. Parameter ekstrinsik kamera  $K$  atau parameter eksternal  $[R|t]$  adalah matriks  $3 \times 4$  yang berhubungan dengan transformasi euclidean dari sistem koordinat dunia ke sistem koordinat kamera.  $R$  merupakan matriks rotasi  $3 \times 3$  dan  $t$  adalah matriks translasi (Persamaan 1). Pengembangan algoritme dalam penelitian ini fokus pada memperkirakan hasil pada komputasi matriks ini.



**Gambar 2.** Lingkungan virtual galeri museum VR



**Gambar 3.** Skema pelacakan posisi pengguna

$$K = [R|t] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Transformasi homografi dilakukan untuk menghasilkan matriks  $3 \times 3$  homogen menghubungkan bidang 3D dari penanda dengan proyeksi gambar dua dimensi (2D) dan dinyatakan pada Persamaan 2. Jika terdapat sebuah bidang  $Z = 0$ , maka homografi  $H$  memetakan suatu titik  $M = (X, Y, 0)^T$  ke bidang  $Z$ . Pemetaan  $h: P^2 \rightarrow P^2$ , dengan  $P$  adalah proyeksi  $P = K[R|t]$ , adalah homograf jika memenuhi Persamaan 3.

$$(x, y, 1)^T = M \alpha PX \quad (2)$$

$$PX = K [R^1 R^2 R^3 t] [x \ y \ 0 \ 1]^T = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

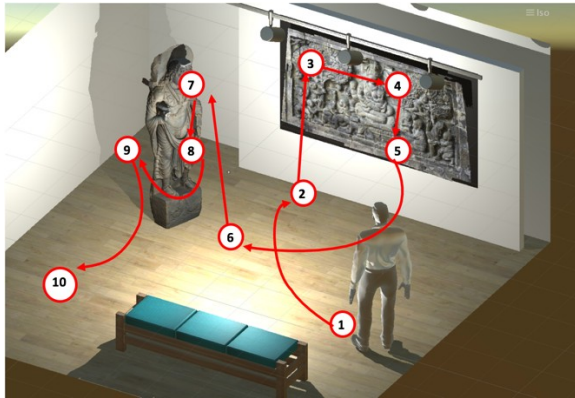
$$H = K [R^1 R^2 t] \quad (4)$$

Hasil perhitungan antara homografi  $H$  dengan posisi kamera  $K$ , berisi informasi yang sama, sehingga mudah untuk saling berpindah. Kolom satu dan dua dari matriks homografi juga merupakan kolom satu dan dua dari matriks posisi kamera (Persamaan 4).

### C. Pengujian akurasi pelacakan pengguna

Pengguna dalam pengujian ini melakukan tugas eksplorasi (*user task*) ke sepuluh titik posisi dengan interaksi alami seperti layaknya mengeksplorasi ruangan museum dalam dunia nyata. Posisi yang harus





Gambar 4. Alur tugas pengguna

dieksplorasi ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis yang dilakukan pada akhir penelitian untuk mengukur tingkat akurasi dari pelacakan posisi berdasarkan penanda berdasarkan nilai galat yang dihasilkan. Pengukuran nilai galat ini adalah nilai koordinat posisi pengguna hasil perhitungan yang disimpan dalam berkas *log* dibandingkan dengan nilai sebenarnya dalam pengukuran posisi pengguna di dunia nyata. Pengukuran nilai posisi sebenarnya menggunakan alat bantu perekaman video dengan resolusi tinggi.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, posisi penanda ditempelkan pada dinding yang berada di depan pengguna. Penanda dalam bentuk citra relief candi Mendut dengan resolusi  $1500 \times 1050$  piksel saat dicetak dan yang disimpan dalam database Vuforia AR. Setelah penentuan posisi penanda diperoleh, dilanjutkan untuk memperkirakan parameter posisi kamera yang berhubungan secara langsung dengan sistem koordinat referensi sistem dalam aplikasi. Dari perhitungan satu set matriks 3D yang bersesuaian, parameter posisi kamera yang ada di dalam matriks proyeksi kamera dapat ditemukan. Sumber data berasal dari dua sensor berbeda (gyroskop dan kamera) yang memiliki presisi dan frekuensi pencuplikan yang berbeda. Fakta ini menghasilkan fenomena *jitter* beberapa kali selama aplikasi dijalankan.

Proses perhitungan untuk mendapatkan posisi pengguna telah dapat diimplementasikan dalam kode semu (Gambar 5). Berdasarkan konsep homografi, estimasi posisi pengguna dalam enam derajat kebebasan (6-DOF) telah dapat dideteksi untuk memenuhi kinerja *realtime* untuk aplikasi Galeri Museum VR sesuai [23].

#### A. Sistem pelacakan posisi pengguna

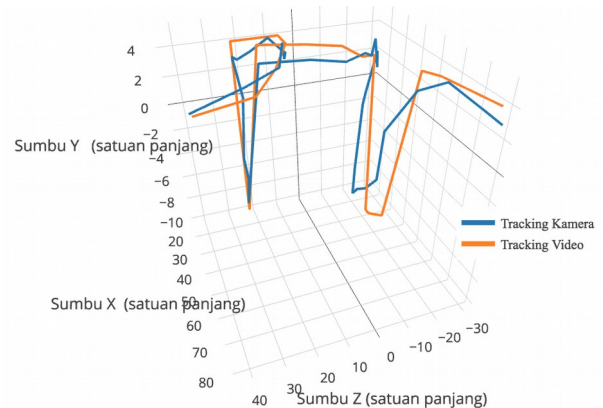
Tantangan yang muncul adalah mengevaluasi keakuratan pelacakan posisi pengguna menggunakan metode estimasi posisi kamera. Kamera yang digunakan terintegrasi pada *smartphone* dan ikut bergerak bersamaan dengan pengguna (paralel) yang menimbulkan kurangnya data pembanding untuk mengevaluasi. Sistem rekaman video resolusi tinggi digunakan untuk menghasilkan data pembanding posisi

```

1 // inisialisasi awal koordinat
2 WordResult koordinatDunia = (WordResult) penandaTerdeteksi;
3 Word dataPelacakan = (Word) koordinatDunia.getTrackable();
4
5 // perhitungan konversi posisi penanda ke posisi kamera
6 Matrix34F posisiPenanda = penandaTerdeteksi.getPose();
7 Matrix44F matriksPenanda = Tool.convertPose2GLMatrix(posisiPenanda);
8 Matrix44F inverseMatriksPenanda
9     = SampleMath.Matrix44FInverse(matriksPenanda);
10 Matrix44F invTransposeMatriksPenanda
11     = SampleMath.Matrix44FTranspose(inverseMatriksPenanda);
12
13 // perhitungan posisi kamera
14 float kameraXYZ = invTransposeMatriksPenanda.getData();
15 Vec3F posisiKamera = new Vec3F(kameraXYZ);
16
17 // perhitungan orientasi kamera
18 float arahKameraXYZ = invTransposeMatriksPenanda.getData();
19 Vec3F arahKamera = new Vec3F(arahKameraXYZ);
20 float pelacakanPenandaXYZ = matriksPenanda.getData();
21 Vec3F pelacakanPenanda = new Vec3F(pelacakanPenandaXYZ);
22 float sudutXYZ = (float) Math.acos(SampleMath.Vec3FDot(arahKamera)
23     / Math.sqrt(SampleMath.Vec3FDot(arahKamera)));
24 Vec3F pelacakanSudut = new Vec3F(sudutXYZ);
25
26 // proses menyimpan data ke log file
27 fileData = File.AppendText("log.txt");
28 var logPosisi = string.Format("\n {0} {1} \n", posisiKamera, pelacakanSudut);
29 fileData.Write(logPosisi);

```

Gambar 5. Pseudocode pelacakan posisi pengguna

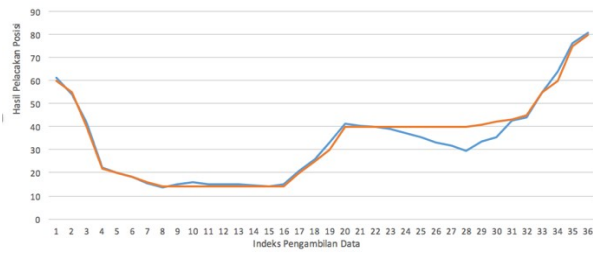


Gambar 6. Hasil pelacakan posisi pengguna

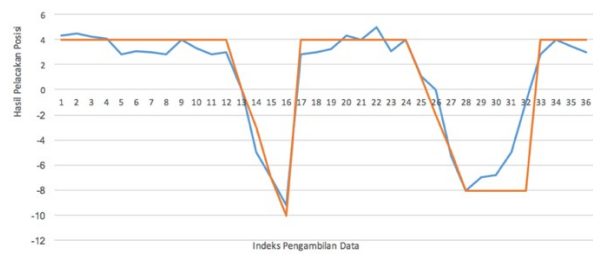
pengguna. Bagian translasi dari posisi kamera dilakukan secara manual, yaitu mengamati dan mencatat posisi pengguna dari rekaman video dari tiga lokasi. Hasil dari rekaman video digunakan untuk menghitung nilai galat dari sistem pelacakan posisi ini. Metode untuk pembanding ini menyerupai pelacakan posisi pengguna dengan metode *outside-in*, yang memerlukan peralatan tambahan seperti dalam [16].

Lintasan kamera dalam ruang 3D dan proyeksinya pada bidang XYZ telah dapat ditampilkan (Gambar 6). Bidang X menunjukkan koordinat posisi pengguna secara mendatar (maju-mundur) antara pengguna dengan penanda, sedangkan bidang Z menunjukkan koordinat posisi mendatar (kanan-kiri) pengguna terhadap penanda dan bidang Y merupakan jarak vertikal (naik-turun) pengguna dengan penanda.

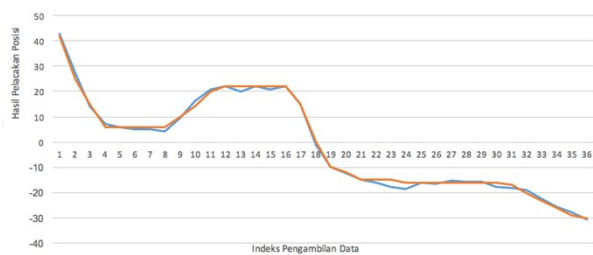
Penanda di tempel pada dinding, dengan ruangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah  $4 \times 4 \text{ m}^2$ . Panjang dan lebar ruangan di konversi ke dalam satuan *unity* menjadi 80 satuan panjang sesuai aturan Sketchfab dengan pusat origin O (0,0,0) berada di tengah penanda [24]. Perhitungan posisi relatif pengguna yang telah dilakukan menghasilkan 36 data posisi. Serangkaian grafik translasi untuk setiap sumbu XYZ dari pusat sistem koordinat pada aplikasi Galeri Museum VR ditampilkan berurutan dan dibandingkan dengan data



(a) Vektor translasi kamera pada sumbu X



(b) Vektor translasi kamera pada sumbu Y



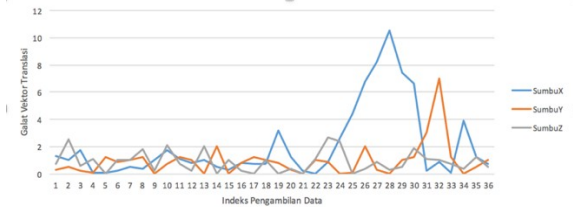
(c) Vektor translasi kamera pada sumbu Z

**Gambar 7.** Hasil translasi kamera untuk setiap sumbu koordinat

yang diperoleh dari hasil pelacakan dengan rekaman video (Gambar 7).

Berdasarkan data pergerakan posisi pengguna yang terdeteksi, pada sisi kanan bawah menunjukkan penyimpangan antara pelacakan posisi pengguna dari aplikasi (warna biru) dengan pelacakan secara realtime dari luar aplikasi berupa video. Pada posisi tersebut kamera dari smartphone tidak dapat menangkap penanda. Penelitian ini belum melakukan analisis hasil pengalaman pengguna seperti [20], yang menggunakan metode jaringan syaraf tiruan.

Penanda harus tetap terlihat selama proses pelacakan posisi berlangsung. Saat pengguna mulai mengeksplorasi arca, menuju posisi keenam pada Gambar 4, orientasi kamera *smartphone* tidak mengarah ke penanda sehingga menghasilkan deteksi posisi pengguna yang kurang akurat. Dalam Gambar 7, pencatatan posisi ke-21 hingga ke-32 menunjukkan hasil deteksi posisi yang menyimpang. Walaupun fitur *extended tracking* yang disediakan oleh pustaka Vuforia AR telah digunakan, tetapi pelacakan posisi pengguna cenderung berhenti jika penanda tidak terlihat dan pengguna bergerak dalam waktu yang cepat. Fenomena ini ditandai dengan munculnya *jitter*. *Jitter* membuat pengguna mengalami kesulitan ketika berinteraksi dalam aplikasi VR melalui *smartphone* dan dapat membuat pengguna mengalami *cybersickness* [25].



**Gambar 8.** Hasil perhitungan galat translasi kamera

**Tabel 1.** Galat translasi kamera hasil pelacakan posisi

	$e^k_{translasiX}$	$e^k_{translasiY}$	$e^k_{translasiZ}$
Maksimum	0,525	0,350	0,135
Minimum	-	-	-
Rata-rata	0,102	0,047	0,044
Simpangan	0,133	0,062	0,039

Galat hasil perhitungan setiap komponen sumbu koordinat dari translasi posisi kamera terhadap data rekaman video ditunjukkan pada Gambar 8. Perhitungan menggunakan metode  $t^k_{estimasi} - t^k_{sebenarnya}$  merupakan bagian translasi estimasi dan sebenarnya dari kamera yang menunjukkan posisi pengguna. Galat yang terkait dihitung menggunakan Persamaan 5. Rangkuman hasil statistik galat dari data vektor translasi dinyatakan dalam Tabel 1. Galat rata-rata untuk bidang xyz adalah 0,102 m, 0,047 m, dan 0,044 m.

$$e^k_{translasi} = \left| t^k_{estimasi} - t^k_{sebenarnya} \right| \quad (5)$$

$$\left( e^k_{translasiX}, e^k_{translasiY}, e^k_{translasiZ} \right)^T$$

Posisi pengguna yang teramati saat menggunakan rekaman video resolusi tinggi memunculkan tantangan untuk mengukur orientasi kamera secara manual yang tidak dapat memperoleh data yang akurat sehingga data orientasi tidak digunakan dalam penelitian ini. Galat posisi kamera yang diperoleh adalah kecil (Tabel 1) dan lintasan sebenarnya dari pengguna saat mengerjakan tugas telah diikuti dengan benar. Di sisi lain, ketepatan dalam mendeteksi penanda untuk melakukan pelacakan posisi berkurang dengan meningkatnya jarak pusat kamera dengan pusat penanda (jarak terjauh pengguna dalam penelitian ini mempunyai radius 4 meter). Hal ini disebabkan semakin jauh penanda, maka gambar penanda yang tertangkap kamera *smartphone* semakin mengecil dan susah untuk teridentifikasi.

Untuk mengatasi ini, kamera *smartphone* dengan resolusi tinggi diperlukan atau dapat juga dengan menggunakan penanda yang tidak hanya satu, terutama pada bidang yang berbeda, misalnya dinding depan dan dinding samping, seperti dalam [26] untuk melokalisasi robot. Namun, tantangan yang muncul berikutnya adalah ketika jumlah penanda meningkat, proses komputasi untuk translasi dan orientasi dari kamera juga akan meningkat. Sebagai konsekuensinya, diperlukan spesifikasi perangkat *smartphone* yang lebih tinggi dibandingkan satu penanda.

## B. Aplikasi galeri museum VR

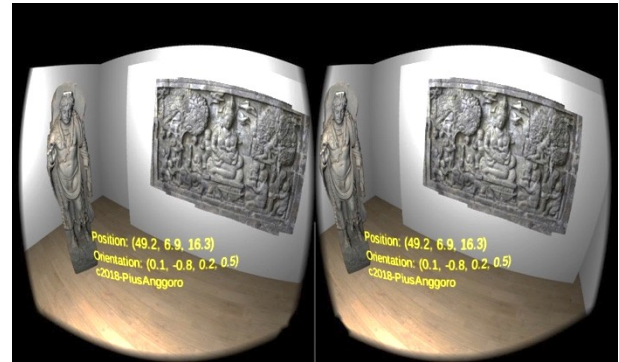
Tampilan aplikasi Galeri Museum VR saat dijalankan ditunjukkan pada Gambar 9. Sistem pelacakan posisi 6-DOF dapat berlangsung secara *realtime* dalam lingkungan VR yang sesuai dengan perspektif pengguna. Posisi dalam lingkungan virtual dapat berubah sesuai dengan pelacakan posisi 6-DOF di dunia nyata. Pengguna dapat berinteraksi secara alami, bergerak maju ataupun mundur, serta menggerakkan kepala. Perlu pengujian dengan fungsi *usability* kepada pengguna menggunakan sistem VR ini seperti [7] dan [8] dalam studi ini untuk menguji desain pengalaman pengguna. Pengguna dapat melakukan eksplorasi dalam lingkungan virtual yang terdapat dalam aplikasi Galeri Museum VR, layaknya mengeksplorasi galeri museum dalam dunia nyata.

Gerakan bebas 6-DOF membuat pengguna dapat mengeksplorasi lingkungan virtual berupa panel relief candi Mendut dan arca Budha Bodhisatva. Dalam kajian ini, hasil pengujian pengguna adalah seperti yang dilakukan dalam [13]-[15] yang menunjukkan bahwa navigasi dengan berjalan secara alami menghasilkan pengalaman pengguna terbaik. Ruang yang digunakan dalam penelitian ini hanya satu ruangan dan perlu penelitian lebih lanjut untuk penggunaan *marker-based AR* jika ruang galeri museum dalam lingkungan virtual ditambah atau diperbesar (*roomscale*), seperti dalam [21] dan [22] yang menggunakan metode *roomscale* untuk sistem VR berbasis komputer desktop.

*Smartphone* yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai kemampuan dan spesifikasi yang menengah. Sistem ini diharapkan dapat dipasang pada *smartphone* yang saat ini beredar sehingga dapat dilakukan pengujian interaksi berbasis pengguna seperti dalam [17]. Setelah pengujian pengguna untuk navigasi berjalan saat menjelajahi museum dilakukan, hasil kajian ini dapat digunakan untuk mendesain interaksi alami yang lain (gerakan tangan dan posisi badan) saat pengguna mengeksplorasi museum VR yang diharapkan dapat meningkatnya kunjungan pengguna ke museum walaupun secara virtual.

## IV. KESIMPULAN

Sistem pelacakan posisi pengguna dengan metode *marker-based AR* telah dapat diimplementasikan di *smartphone* Android dengan memanfaatkan kamera yang terintegrasi menggunakan satu gambar penanda yang ditempelkan pada dinding untuk mendukung pengalaman pengguna saat menjelajah dan melakukan pengamatan objek museum tiga dimensi pada aplikasi Galeri Museum VR. Pergerakan posisi pengguna dalam enam derajat kebebasan di ruangan 4 x 4 m<sup>2</sup> dapat dilacak dengan tingkat galat yang rendah (0,102 m, 0,047 m, 0,044 m). Akurasi dalam menentukan posisi pengguna dipengaruhi oleh orientasi kamera terhadap penanda yang digunakan.



(a) Pada posisi awal



(b) Pada saat mengeksplorasi relief



(c) Pada saat mengeksplorasi arca

**Gambar 9.** Tampilan aplikasi Galeri Museum VR saat dijalankan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada STMIK AKAKOM Yogyakarta yang telah memberi dukungan untuk penelitian ini dan kepada Samsung R&D yang berkenan meminjamkan perangkat *smartphone*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Munster, D. Clinton, T. Jakel, and E. Murphy, "Next mega tech trend is virtual reality," 2015. [Online]. Available: <https://piper2.bluematrix.com/sellside/EmailDocViewer?encrypt=052665f6-3484-40b7-b972>
- [2] -, "Statistik Kepariwisata 2015," Dinas Pariwisata DIY, Yogyakarta, Indonesia, 2015.
- [3] I. A. E. R. Juwita, "Strategi pemasaran museum wayang kekayon yogyakarta dalam meningkatkan



- jumlah pengunjung,” *Jurnal Tata Kelola Seni*, vol. 1, no. 1, pp. 60-74, 2015.
- [4] O. D. E. 6DOF; Augmented Reality; Marker based; Position Tracking; Virtual Reality Wulansari, A. R. Irawati, and D. K. Anggraeny, “Rancang bangun pemandu virtual berbasis mobile untuk museum lampung menggunakan augmented reality,” *Jurnal Komputasi*, vol. 2, no. 1, pp. 10-17, 2014.
- [5] I. E. Sutherland, “A head-mounted three dimensional display,” in *Proceedings of Fall Joint Computer Conference*, San Francisco, USA, Dec. 1968, pp. 757-764. doi: [10.1145/1476589.1476686](https://doi.org/10.1145/1476589.1476686)
- [6] S. A. Aseeri, “Virtual reality interaction using mobile devices,” thesis, King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia, 2014. doi: [10.25781/KAUST-7Z81K](https://doi.org/10.25781/KAUST-7Z81K)
- [7] W. Hürst and M. Helder, “Mobile 3D graphics and virtual reality interaction,” in *the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, Lisbon, Portugal, Nov. 2011, pp. 1-8. doi: [10.1145/2071423.2071458](https://doi.org/10.1145/2071423.2071458)
- [8] F. M. Caputo, I. M. Ciortan, D. Corsi, M. D. Stefani, and A. Giachetti, “Gestural interaction and navigation techniques for virtual museum experiences,” in *the 2016 Advanced Visual Interfaces for Cultural Heritage*, Bari, Italy, Jun. 2016, pp. 32-35.
- [9] G. J. Kim, *Designing virtual reality systems: the structured approach*. London: Springer, 2012.
- [10] L. LaValle, *Virtual reality*. Cambridge University Press: Illinois, 2017.
- [11] D. Valkov, F. Steinicke, G. Bruder, and K. H Hinrichs, “Traveling in 3d virtual environments with foot gestures and a multi-touch enabled,” in *the 2010 Virtual Reality International Conference*, Laval, France, Apr. 2010, pp 171-180.
- [12] A. Kim, N. Darakjian, and J. M. Finley, “Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 14, no. 1, 2017. doi: [10.1186/s12984-017-0225-2](https://doi.org/10.1186/s12984-017-0225-2)
- [13] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed, “Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality,” *ACM Transaction on Computer-Human Interaction*, vol. 2, no. 3, pp. 201-219, 1995. doi: [10.1145/210079.210084](https://doi.org/10.1145/210079.210084)
- [14] M. Nabiyouni, A. Saktheeswaran, D. A. Bowman, and A. Karanth, “Comparing the performance of natural, semi-natural, and non-natural locomotion techniques in virtual reality,” in *the 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Arles, France, Mar. 2015, pp. 3-10. doi: [10.1109/3DUI.2015.7131717](https://doi.org/10.1109/3DUI.2015.7131717)
- [15] M. Usoh et al., “Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments,” in *the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Los Angeles, USA, Jul. 1999, pp. 359-364. doi: [10.1145/311535.311589](https://doi.org/10.1145/311535.311589)
- [16] L. P. Cheng, P. Lühne, P. Lopes, C. Sterz, and P. Baudisch, “Haptic turk: a motion platform based on people,” in *the 2014 IEEE Haptics Symposium*, Houston, USA, Feb. 2014, pp. 3463-3472. doi: [10.1109/HAPTICS.2014.6775553](https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2014.6775553)
- [17] L. P. Cheng et al., “TurkDeck: physical virtual reality based on people,” in *the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, Charlotte, USA, Nov. 2015, pp. 417-426. doi: [10.1145/2807442.2807463](https://doi.org/10.1145/2807442.2807463)
- [18] M. C. Whitton et al., “Comparing VE locomotion interfaces,” in *the IEEE Virtual Reality*, Bonn, Germany, Mar. 2005, pp. 123-130. doi: [10.1109/VR.2005.1492762](https://doi.org/10.1109/VR.2005.1492762)
- [19] K. Vasylevska, H. Kaufmann, M. Bolas, and E. A. Suma, “Flexible spaces: dynamic layout generation for infinite walking in virtual environments,” in *the IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Orlando, USA, Mar. 2013, pp. 39-42. doi: [10.1109/3DUI.2013.6550194](https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550194)
- [20] E. Rubia and A. Diaz-Estrella, “Natural locomotion based on foot-mounted inertial sensors in a wireless virtual reality system,” *Presence*, vol. 24, no. 4, pp. 298-321, 2015. doi: [10.1162/PRES\\_a\\_00236](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00236)
- [21] A. Harris, K. Nguyen, P. T. Wilson, M. Jackoski, and B. Williams, “Human joystick: Wii-leaning to translate in large virtual environments,” in *the 13th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, Shenzhen, China, Nov. 2014, pp. 231-234. doi: [10.1145/2670473.2670512](https://doi.org/10.1145/2670473.2670512)
- [22] E. Kokkinara, K. Kilteni, K. J. Blomand, and M. Slater, “First person perspective of seated participants over a walking virtual body leads to illusory agency over the walking,” *Scientific Reports*, vol. 6, 2016. doi: [10.1038/srep28879](https://doi.org/10.1038/srep28879)
- [23] A. W. Ismail, M. Billingham, M. S. Sunar, and C. S. Yusof, “Designing an augmented reality multimodal interface for 6DOF manipulation techniques,” in *the 2018 Intelligent Systems Conference*, Nov. 2018, pp. 309-322. doi: [10.1007/978-3-030-01054-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01054-6_22)
- [24] J. James, “VR editor: world scale,” Sketchfab Help Center, 2018, [Online]. Available: <https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/211640363-VR-Editor>
- [25] J. P. Stauffert, F. Niebling, and M. E. Latoschik, “Effects of latency jitter on simulator sickness in a search task,” in *the 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, Reutlingen, Germany, Mar. 2018, pp. 121-127. doi: [10.1109/VR.2018.8446195](https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446195)
- [26] A. S. Kundu, O. Mazumder, A. Dhar, P. K. Lenka, and S. Bhaumik, “Scanning camera and augmented reality based localization of omnidirectional robot for indoor application,” *Procedia Computer Science*, vol. 105, pp. 27-33, 2017. doi: [10.1016/j.procs.2017.01.183](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.183)