

Visualisasi Objek 3D menggunakan *Interactive Holographic Projection*

Dr. Surya Sumpeno, S.T., M.Sc.
Departemen Teknik Komputer
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia
surya@te.its.ac.id

Fernanda Daymara Hasna
Departemen Teknik Komputer
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia
fernanda.hasna16@mhs.te.its.ac.id

Ahmad Zaini, S.T., M.Sc.
Departemen Teknik Komputer
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia
zaini@te.its.ac.id

Abstrak—Kemudahan anak-anak dalam mengakses teknologi dapat memberikan dampak negatif seperti kecanduan, pengaksesan konten yang tidak sesuai, hingga masalah kesehatan fisik dan mental [1]. Agar manfaatnya tetap dapat dirasakan maka konten yang diakses diarahkan pada bidang edukasi, salah satunya tentang perkembangan peradaban manusia yang masih dianggap membosankan untuk dipelajari [2]. Museum sebagai sarana dalam mempelajarinya justru tidak layak untuk dikunjungi, dimana 435 dari museum yang tercatat berada dalam kondisi yang memprihatinkan menurut Direktorat Pelestarian Cagar Budaya dan Permuseuman Kemdikbud [3]. Maka dari itu, dibuatlah sistem *interactive holographic projection* untuk menyampaikan informasi secara efektif dan interaktif sehingga menarik untuk dipelajari. Metode yang digunakan yaitu objek museum ditampilkan dalam bentuk hologram dan dapat digerakkan oleh pengguna menggunakan sensor pengindera tangan Leap Motion. Hasil pengujian menunjukkan bahwa gestur tangan dapat memberikan respons yang bersesuaian sebesar 90.71%, dengan 72.00% berhasil diaktifkan menggunakan salah satu tangan dan 97.50% menggunakan kedua tangan. Hal ini didukung dengan percobaan langsung oleh responden dengan *success rate* sebesar 87.00%. Berdasarkan kuesioner terhadap 61 responden, 47.50% responden sangat setuju bahwa sistem ini dapat membantu pembelajaran perkembangan peradaban manusia dan 68.9% sangat setuju bahwa sistem ini dapat mendukung perkembangan museum dan pendidikan di Indonesia.

Kata Kunci—Perkembangan peradaban manusia, Hologram, Interactive holographic projection.

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dan internet memudahkan anak-anak dalam mengakses beragam informasi yang beredar. Namun disamping manfaat yang diberikan, kemudahan ini memberikan dampak negatif seperti kecanduan, pengaksesan konten yang tidak sesuai, hingga masalah kesehatan fisik dan mental [1]. Agar tetap mendapatkan manfaat dari teknologi, maka diperlukan suatu sistem berbasis teknologi untuk mengakses konten bermanfaat seperti edukasi tentang perkembangan peradaban manusia yang masih dianggap sebagai hal yang membosankan untuk dipelajari [2].

Museum sebagai salah satu sarana pembelajaran berada dalam kondisi memprihatinkan. Hal ini disampaikan oleh Firda Arda Ambas selaku Direktur Pelestarian Cagar Budaya dan Permuseuman Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud), dimana hampir dari serempat dari 435 museum yang tercatat termasuk ke dalam kategori tidak layak untuk

menyimpan koleksi sejarah dan jarang dikunjungi masyarakat [3]. Sedangkan sudah seharusnya museum harus selalu dikembangkan menjadi lebih menyenangkan, berkesan, dan lebih mudah dipahami oleh pengunjungnya [4].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa media informasi berbasis teknologi digital terkait perkembangan peradaban manusia di museum di Indonesia tidak banyak diaplikasikan dan tidak interaktif. Hal ini menyebabkan informasi yang disampaikan kurang maksimal dan kurang diminati masyarakat. Maka dari itu, dibuatlah sebuah media alternatif dalam edukasi perkembangan peradaban manusia dengan *interactive holographic projection*, yaitu objek museum ditampilkan dalam bentuk hologram dan dapat digerakkan oleh pengguna menggunakan sensor pengindera tangan. Dengan adanya sistem ini, diharapkan informasi yang disampaikan akan lebih menarik dan lebih mudah dipahami dibandingkan metode konvensional.

II. PENELITIAN SEBELUMNYA

Beberapa penelitian tentang proyeksi hologram 3D secara interaktif telah dilakukan oleh beberapa pihak. Penelitian pertama berjudul *"Interactive Aerial Projection of 3D Hologram Object"* oleh Jiono Mahfud dan Takafumi Matsumaru [5]. Penelitian ini mencoba konsep dan desain dari sistem *interactive aerial projection* yang dilakukan dengan *prototype demonstration*, dimana berfokus untuk menampilkan objek 3D di udara dan manipulasi objek 3D dari *finger movement*. Sistem yang berhasil dibuat pada penelitian ini terdiri dari *Reconstruction of 3D Object* dengan menggunakan *pyramid hologram device*, *Projection of 3D Hologram Object in the Mid-Air* dengan *concave mirror* berbentuk parabola, dan *Interactive Manipulation of 3D Hologram Object* dengan *leap motion*. Sistem ini berhasil dibangun meskipun dengan *workspace* dan interaksi yang terbatas. [5]

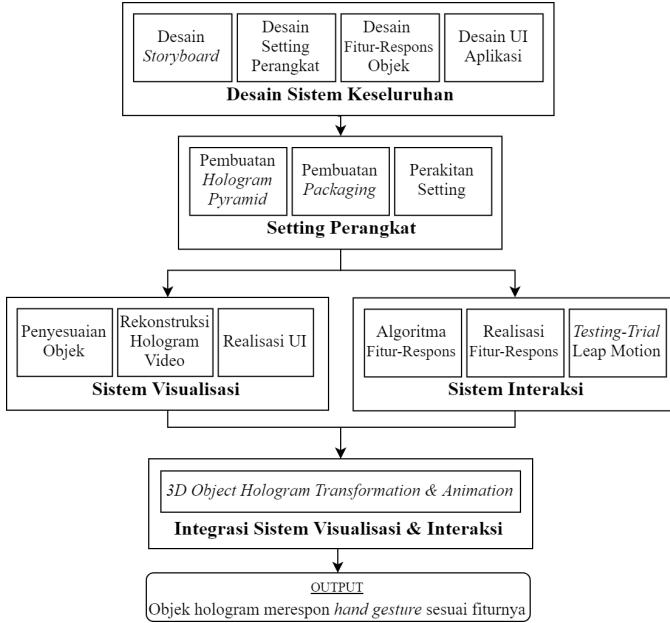
Penelitian kedua dilakukan oleh Safa AMEUR dkk. berjudul *"A Comprehensive Leap Motion Database for Hand Gesture Recognition"* [6]. Penelitian ini berkaitan dengan *3D dynamic gesture recognition* berdasarkan posisi ujung jari dan telapak tangan, dimana berfokus pada proses pembuatan dataset baru yang digunakan dalam penyusunan sebuah sistem kontrol. Dataset yang dibuat berpedoman dari *general commands* (yang umum diterapkan pada *leap motion*) sebagai parameter

training. Metode ini berhasil diterapkan dengan nilai akurasi yang cukup tinggi, sehingga dapat diterapkan untuk mengembangkan *feature* baru. [6]

Penelitian terakhir berjudul "Factors Affecting Usability of Interactive 3D Holographic Projection System for Experiential Learning" oleh Hnsifu Huang dkk. [7]. Penelitian ini berkaitan dengan informasi yang dapat disajikan dalam mendukung *interactive experiential learning* yang menghasilkan pedoman untuk *3D display and control of interactive experience*. Hasil penelitian ini dapat membantu penyampaian informasi lebih efektif dan efisien. Sistem *3D holographic projection interactive* ini dapat memberikan output yang berbeda dibandingkan dengan pembelajaran konvensional dengan dengan buku. Penelitian ini pun juga mengemukakan bahwa hasil dari penelitian ini dapat diterapkan pada pembelajaran digital seperti *virtual museum exhibition*. [7]

III. METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menerapkan interaksi berdasarkan *hand gesture* pada hologram 3D. Sistem ini dikemas dalam satu set yang terdiri dari *pyramid projector*, Leap Motion, *display monitor* beserta komputer server. Berdasarkan metodologi pada gambar 1, terdapat dua sub-sistem yang membangun tujuan dari penelitian ini, yaitu sistem virtualisasi mengenai rekonstruksi objek 3D menjadi bentuk hologram dan sistem interaksi tentang bagaimana pengguna dapat memberikan input terhadap objek hologram. Agar kedua sub-sistem ini dapat berfungsi bersamaan, maka dibutuhkan perancangan desain *Storyboard* penggunaan serta setting perangkat.

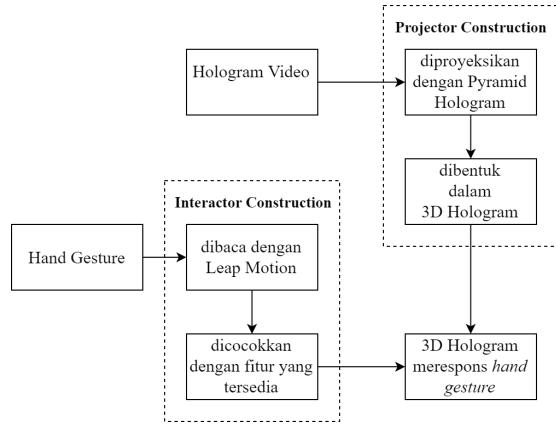


Gambar 1: Metodologi penelitian.

A. Skenario Penggunaan Perangkat

Pada sistem ini, objek hologram diperlihatkan melalui pанtulan dari monitor terhadap pyramid hologram. Pengguna yang berdiri di depan perangkat dapat menggerakkan objek

hologram melalui Leap Motion pada sisi tersebut. Jika gestur yang diberikan sesuai dengan fitur yang dibangun, maka objek menampilkan respons yang bersesuaian. Alur kerja dari sistem ini dijelaskan melalui gambar 2.



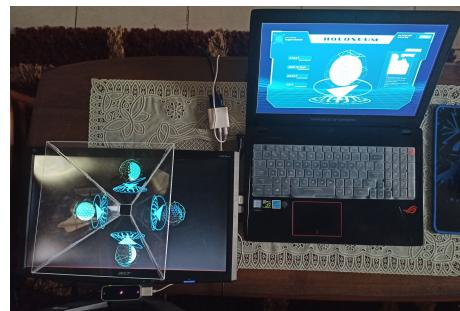
Gambar 2: Alur kerja penggunaan perangkat.

B. Setting Perangkat

Pada penelitian ini, dibutuhkan perangkat yang memiliki spesifikasi seperti pada tabel 1. *Display monitor* menopang *pyramid hologram* yang terbuka ke atas sesuai pada gambar 3 menampilkan objek hologram. *Server computer* melakukan proses komputasi dan juga berfungsi sebagai *information monitor* untuk menampilkan menu aplikasi. Leap Motion diletakkan pada salah satu sisi untuk menangkap *hand gesture* pengguna.

Tabel 1: Spesifikasi perangkat yang digunakan.

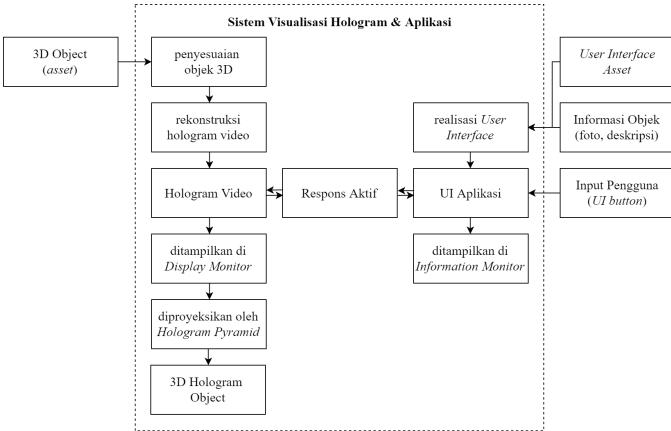
Display Monitor	
1. Nama	Monitor Acer X193HQ
2. Resolusi	1366 x 768 (18.5 inch)
Server Computer	
1. Nama	Asus ROG Strix GL553VD
2. Processor	Intel Core i7-7700HQ
3. Graphic Card	NVIDIA GeForce GTX 1050
4. Resolusi	1920 x 1080 (15.6 inch)
Pyramid Hologram	
1. Material	Akrilik Transparan 2 mm
2. Ukuran	24 x 24 x 12 cm
Leap Motion Controller	
1. Ukuran	8 x 3 x 1.2 cm (3.1 x 1.2 x 0.5 inch)
2. Interaction Area	60 cm from above controller 60 cm & 150° from each side's width 60 cm & 120° from each side's depth



Gambar 3: Setting perangkat yang dibangun.

C. Sistem Visualisasi Hologram

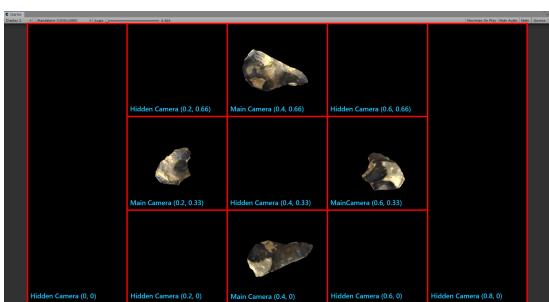
Sistem visualisasi yang diterapkan pada penelitian ini berkaitan dengan penyajian program di *display* dan komputer server. Alur dalam membangun sistem visualisasi ini ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4: Alur kerja sistem visualisasi hologram.

Penyesuaian objek 3D terjadi melalui beberapa proses. Proses pertama yaitu memodifikasi detail objek berdasarkan elemen penyusunnya, seperti menambah atau mengurangi elemen penyusun dan memindah titik tengahnya. Proses kedua bertujuan untuk mengatur objek dan membangun fitur lengkap. Objek yang telah di-import diposisikan pada tengah *camera setting* dan diatur ukurannya melalui *scale*. Kemudian mengatur nilai standard, menambahkan komponen *rigidbody* dan *collider* agar dapat berinteraksi dengan asset Leap Motion dan membangun fitur respons berdasarkan gesturnya. Penyesuaian terakhir dilakukan untuk memberikan efek hologram pada material objek 3D.

Objek 3D yang telah disesuaikan selanjutnya direkonstruksi menjadi *hologram video* untuk menyesuaikan tampilan pada monitor dengan mengatur penempatan objek 3D tepat di setiap sisi *pyramid hologram*. Untuk menampilkan 4 posisi objek pada 1 *game view* seperti gambar 5, pengaturan yang diterapkan pada penelitian ini berupa sebuah objek 3D yang dikelilingi oleh 4 *main camera* yang berbeda dan 7 *hidden camera* untuk menampilkan *background hitam*.



Gambar 5: Pengaturan *viewport* untuk *hologram video*.

Objek yang ditampilkan pada *display monitor* juga ditampilkan informasinya melalui *information monitor*. Bagian pertama berupa *Main Menu* atau Menu Utama merupakan

tampilan awal saat aplikasi tersebut dijalankan. Terdiri dari tombol *Start* untuk menuju *Main Scene*, *How to Play* untuk menunjukkan cara permainan, *About* untuk menunjukkan informasi mengenai produk dan *developer*, dan *Exit* untuk keluar dari aplikasi yang ditunjukkan pada gambar 6a.

Sedangkan *Main Scene* adalah *scene* utama atau *gameplay* yang menampilkan objek hologram beserta informasi dan foto aslinya. Terdapat pula tombol *Next* dan *Previous* berfungsi untuk mengganti objek yang ditampilkan, baik pada *display monitor* maupun *information monitor*. Icon "animasi" menunjukkan apakah objek hologram tersebut memiliki animasi yang dapat diputar sesuai dengan gestur yang bersesuaian.



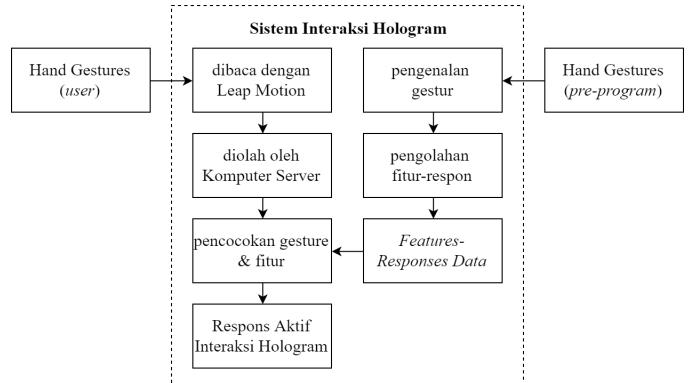
(a) Main Menu.

(b) Main Scene.

Gambar 6: Tampilan aplikasi.

D. Sistem Interaksi Pengindera Tangan

Sistem interaksi yang diterapkan pada penelitian ini berkaitan dengan proses deteksi pola tangan dan aktivasi fitur-respons yang dibangun. Alur kerja dari sistem interaksi yang diterapkan ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7: Alur kerja sistem interaksi pengindera tangan.

Pola tangan dapat diketahui apabila kondisi setiap *hand object elements* yang membangunnya dalam keadaan aktif. Setiap *detector* hanya dapat mendeteksi satu jenis elemen, sehingga jika ingin mendeteksi beberapa elemen sekaligus membutuhkan *detector logic gate* selayaknya *logic gate* AND dan OR maupun negasinya. Gestur tangan yang dibangun pada penelitian ini ditunjukkan melalui gambar 8.

1) *Algoritma Eksplorasi Objek*: Eksplorasi objek yang dapat dilakukan oleh pengguna adalah dengan menggenggam objek untuk melihat objek hologram dari segala sisi menggunakan gestur 8a dan 8b. Objek hologram yang dieksplorasi akan merespon gestur secara berputar pada porosnya maupun bergerak pada area yang telah ditentukan berdasarkan perubahan posisi dan rotasi pada tangan yang didapatkan dari perpindahan (selisih) antar *frame*. Persamaan 1 digunakan

untuk menghitung nilai posisi sedangkan persamaan 2 untuk mendapatkan nilai rotasi.

$$\begin{aligned}\vec{V}_C &= \vec{V}_B - \vec{V}_A \\ &= (\vec{V}_B.x - \vec{V}_A.x, \vec{V}_B.y - \vec{V}_A.y, \vec{V}_B.z - \vec{V}_A.z)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\vec{Q}_A \cdot \vec{Q}_A^{-1} \cdot \vec{Q}_C &= \vec{Q}_A^{-1} \cdot \vec{Q}_B \\ \vec{I} \cdot \vec{Q}_C &= \vec{Q}_A^{-1} \cdot \vec{Q}_B \\ \vec{Q}_C &= \vec{Q}_A^{-1} \cdot \vec{Q}_B\end{aligned}\quad (2)$$

2) *Algoritma Zoom Object*: *Zoom Object* adalah fitur yang dapat memperbesar dan memperkecil objek hologram hingga mencapai nilai maksimal yang telah ditentukan melalui gestur 8c. Fitur ini membantu pengguna untuk melihat detail objek dalam ukuran yang berbeda berdasarkan jarak antara kedua tangan yang diwakili jari telunjuk (*index finger*). Jarak antara kedua tangan digunakan untuk menghitung rasio skala perbesaran sesuai persamaan 3.

$$ScaleValue = \frac{distanceValue}{maxDistance} \cdot maxScale \quad (3)$$

3) *Algoritma Aktivasi Animasi Objek*: Fitur ini memungkinkan pengguna untuk mengaktifkan dan melihat pergerakan animasi dari objek yang bersesuaian menggunakan salah satu gestur 8d, 8e, ataupun 8f. Pada penelitian ini, objek yang dapat dilihat animasinya adalah *primeval axe* dan *gramophone* yang ditunjukkan melalui ikon "animated" pada *information monitor*.

4) *Algoritma Reset to Default*: *Reset to default* adalah fitur yang mengembalikan objek pada posisi, rotasi, dan ukuran semula sesuai dengan *defaultnya* dengan gestur 8g. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk melihat objek secara keseluruhan secara otomatis tanpa harus menyesuaikannya satu persatu (tanpa memindah, memutar, maupun memperkecil secara manual).

5) *Algoritma Pergantian Objek*: Pengguna dapat memilih objek sebelum maupun objek setelah dari objek yang ditampilkan saat ini. Objek hologram dan informasi yang disampaikan dapat diubah melalui gestur 8h dan 8i tanpa memilih tombol pada *information monitor*.

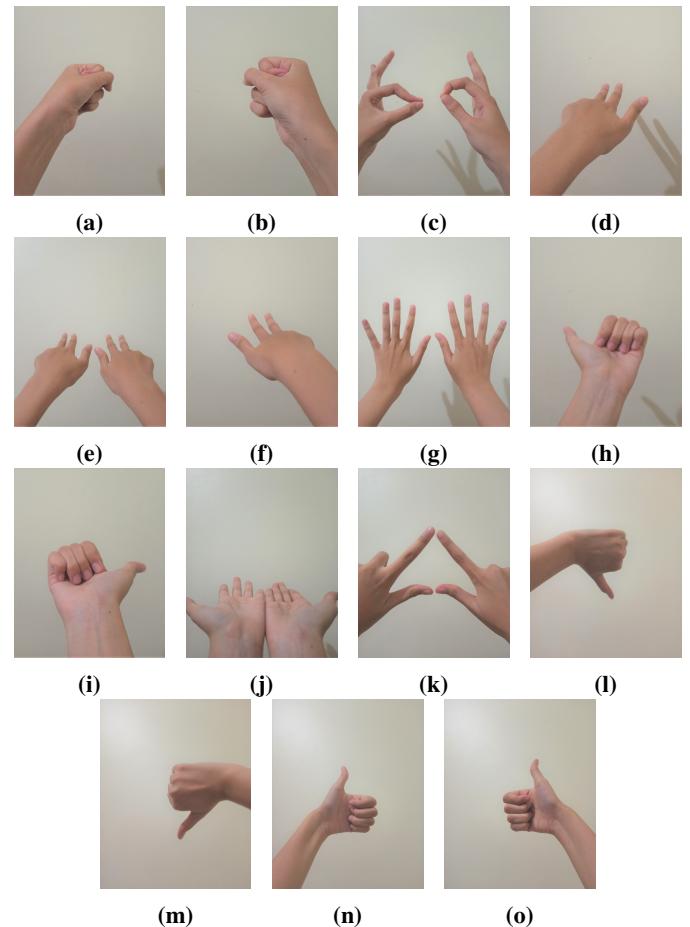
6) *Algoritma Menampilkan Menu Help*: Saat berada dalam *Main Scene*, pengguna dapat menampilkan menu *Help* untuk membuka cara penggunaan perangkat berupa melihat variasi gestur yang dimiliki dan keterangan *layout* informasi objek pada *information monitor*. Pengguna dapat mengakses fitur ini melalui gestur 8j tanpa memilih tombol pada *information monitor*.

7) *Algoritma Menampilkan Main Menu*: Fitur ini serupa dengan Algoritma Menampilkan Menu *Help*, hanya saja menu yang ditampilkan adalah *Main Menu* atau dapat dikenal juga untuk keluar dari *Main Scene*. Gestur pada algoritma ini serupa dengan gestur *high five* pada Algoritma *Reset to Default* (gambar 8g), yang membedakan adalah jarak *thumb finger* dan *index finger* menentukan aktivasi respons (gambar 8k). Jarak

antar *thumb finger* dan *index finger* pada kedua tangan dengan persamaan 1.

8) *Algoritma Membatalkan atau Menyetujui Pilihan*:

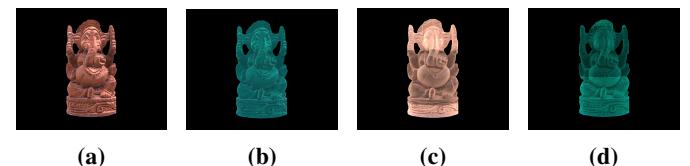
Ketika *Main Scene* dijalankan, pengguna dapat menampilkan menu *Help* dan *Main Menu* yang terdapat beberapa tombol. Pengguna juga dapat mengakses tombol tersebut menggunakan gestur yang bersesuaian. Tombol untuk membatalkan pilihan (*back* dan *cancel*) dapat diakses menggunakan gestur 8l dan 8m. Sedangkan tombol untuk menyetujui pilihan (OK) dapat diakses menggunakan gestur 8n dan 8o.



Gambar 8: Gestur tangan yang pada sistem interaksi.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

A. Pengujian Penyajian Objek Hologram



Gambar 9: Perlakuan untuk efek hologram.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efek ilusi hologram manakah yang cocok diterapkan pada objek 3D yang

akan diproyeksikan pada *pyramid hologram*. Pengujian penyajian objek hologram dilakukan dengan memberikan 4 perlakuan yang berbeda pada setiap objek 3D dan menganalisa hasil proyeksinya sesuai pada gambar 9. Pengujian dihitung dengan memberikan nilai untuk setiap perlakuan hologram terhadap masing-masing objek berdasarkan tingkat ketegasan objek hologram yang ditampilkan, dimana SB=3 poin, B=2 poin, KB=1 poin. Hasil pengujian dicantumkan pada tabel 2.

Tabel 2: Hasil pengujian penyajian hologram.

No	Objek	Efek Hologram (poin)			
		A	B	C	D
1.	<i>Hand Axe</i>	3	1	2	1
2.	<i>Primeval Axe</i>	2	1	3	1
3.	<i>Buddha Statue</i>	2	1	3	2
4.	<i>Ganesha Statue</i>	2	1	3	3
5.	<i>Brass Lamp</i>	2	1	3	2
6.	<i>Ceramic Pot</i>	3	1	3	1
7.	<i>Typewriter</i>	3	1	3	1
8.	<i>Gramophone</i>	2	1	2	1
Total		19	8	22	12
Effectivity		79.16%	10.00%	91.67%	45.83%

Dari hasil pengujian penyajian objek hologram didapatkan efek hologram dengan tingkat efektivitas tertinggi senilai 91.67% pada efek hologram ketiga, yaitu kombinasi dari warna asli objek yang dapat memperlihatkan detail yang lebih baik dan cahaya semi-transparan yang memperlihatkan panjang, tinggi, dan lebar sebagai objek tiga dimensi yang bervolume.

B. Pengujian Deteksi Pengindera Tangan

Pengujian deteksi pengindera tangan bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengenali gestur tangan pengguna dan memberikan respons sesuai dengan fitur yang telah dirancang. Melalui pengujian ini, performansi pengindera tangan juga dapat diukur dengan memperhitungkan kemampuan baca bervariasi pola tangan. Berdasarkan 10 iterasi pengujian pada setiap gestur tangan sesuai gambar 8, didapatkan hasil sesuai tabel 3.

Tabel 3: Hasil pengujian deteksi pengindera tangan.

No	Interaksi dan Pola Tangan	Tangan (iterasi)			Total
		Kiri	Kanan	Kedua	
1.	Mengeksplorasi objek	10	10	-	20
2.	Memperbesar objek	-	-	10	10
3.	Memperkecil objek	-	-	10	10
4.	Mengaktifkan animasi	9	9	10	28
5.	Mengembalikan objek	-	-	9	9
6.	Menampilkan objek sebelumnya	10	-	-	10
7.	Menampilkan objek setelahnya	-	10	-	10
8.	Membuka Menu <i>Help</i>	-	-	8	8
9.	Membuka <i>Main Menu</i>	-	-	8	8
10.	Membatalkan pilihan	4	3	-	7
11.	Menyetujui pilihan	3	4	-	7
Total		36	36	55	127
Completion Rate		72.00%	72.00%	97.50%	90.71%

Dari hasil pengujian deteksi pengindera tangan dengan total iterasi sebanyak 160 iterasi, didapatkan nilai sebesar 90.71% gestur dapat dikenali oleh sistem dimana 72.00% interaksi dapat dipicu oleh masing-masing tangan kiri dan tangan kanan serta sebesar 97.50% keberhasilan oleh kedua tangan secara bersamaan (kanan dan kiri).

C. Pengujian Performansi Sistem

Pengujian performansi sistem bertujuan untuk mengetahui *minimum requirement* yang dibutuhkan agar sistem dapat bekerja dengan cara *server computer* dengan spesifikasi sesuai pada tabel 4. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali iterasi pada tiap *server computer* dengan skenario berupa mengeksplorasi masing-masing objek hologram yang ditampilkan, memutar objek, mengganti objek, dan menjalankan animasi.

Tabel 4: Spesifikasi *server computer* pengujian performansi.

Spesifikasi	PC 1	PC 2	PC 3
Nama Produk	Asus ROG Strix G351GT	Asus ROG Strix GL553VD	Notebook Asus X450CP
Processor	Intel Core i7-9750H	Intel Core i7-7700HQ	Intel Core i3-3217U
Graphic Card	NVIDIA GeForce GTX 1650	NVIDIA GeForce GTX 1050	AMD Radeon R5 M240
Storage Unit	512 GB SSD	1TB HDD + 128 GB SSD	500 GB HDD
RAM	16 GB	16 GB	10 GB
Sistem Operasi	Windows 10 Home Edition 64-bit	Windows 10 Education 64-bit	Windows 10 Pro 64-bit

Tabel 5: Hasil pengujian performansi.

(a) *Server computer 1*.

Itr	Frame Rate (fps)		
	Avg.	Min.	Max.
1	58.12	22.69	81.04
2	55.81	24.65	76.98
3	59.12	25.79	79.39
4	54.84	24.64	81.64
5	57.93	24.24	80.44

(b) *Server computer 2*.

Itr	Frame Rate (fps)		
	Avg.	Min.	Max.
1	57.39	27.56	96.58
2	57.87	30.48	88.19
3	56.58	24.00	91.51
4	57.57	21.64	88.89
5	57.10	23.11	86.74

(c) *Server computer 3*.

Itr	Frame Rate (fps)		
	Avg.	Min.	Max.
1	45.73	11.71	66.95
2	36.56	11.20	64.17
3	43.82	11.54	65.86
4	39.51	10.05	63.39
5	38.27	10.29	61.50

1) *Pengujian Performansi pada PC 1:* Hasil pengujian pada *Server computer 1* yang merupakan *server* dengan spesifikasi tertinggi pada penelitian ini dicantumkan melalui tabel 5a. Selisih antara nilai minimum dan maksimum setiap iterasi pun terhitung kecil dan stabil. Perubahan terbesar terjadi pada awal dan akhir sewaktu aplikasi dijalankan dikarenakan adanya peralihan *game scene* ketika pengguna memasukin *Main Scene* dan *Main Menu*. Pada saat pengujian, perubahan *frame* saat objek dieksplorasikan memperlihatkan pergerakan objek yang halus dan stabil.

2) *Pengujian Performansi pada PC 2:* Hasil pengujian pada *server computer 2* yang merupakan *server* utama yang digunakan dalam pembuatan sistem *interactive holographic projection* ditunjukkan melalui tabel 5b. Di antara ketiga *server computer* yang digunakan, PC 2 memiliki spesifikasi yang tidak jauh berbeda dengan PC 1. Hasil pengujian antara keduanya pun tidak jauh berbeda, secara umum pun pergerakan objek ketika dieksplorasikan terlihat cukup stabil meskipun tidak sebaik pada PC 1. Beberapa lonjakan *frame rate* terjadi saat ada perubahan suatu gestur interaksi, seperti objek yang berhenti setelah aktivasi animasi selesai diputar.

3) Pengujian Performansi pada PC 3: Hasil pengujian pada *server computer* 3 yang merupakan *server* dengan spesifikasi terendah pada penelitian ini ditunjukkan melalui tabel 5a. Selisih antara nilai minimum dan maksimum antar iterasinya terhitung besar serta nilai rata-rata yang cenderung lebih rendah dibandingkan *server computer* sebelumnya. Pergerakan objek terhadap gestur tangan yang diberikan terhitung kurang responsif dan terlihat loncatan pergerakan terhadap objek tersebut. Penggunaan PC 3 sebagai *server computer* tidak dapat memaksimalkan kinerja sistem dengan baik dikarenakan daya komputasinya yang rendah.

Dari hasil pengujian performansi sistem, sistem *interactive holographic projection* dapat bekerja dengan baik seminimalnya pada *computer server* dengan spesifikasi *processor* Intel Core i7-7700HQ, *graphic card* NVIDIA GeForce GTX 1050 dengan RAM sebesar 16 GB.

D. Pengujian Kebermanfaatan Sistem

Pengujian kebermanfaatan sistem oleh pengguna bertujuan untuk mengevaluasi fungsi sistem secara keseluruhan (tanpa mengetau detail sistem) dapat diterima oleh pengguna [8].

1) Pengujian Efektivitas Sistem: Pengujian efektivitas sistem dilakukan dengan penggunaan sistem oleh 4 responden secara langsung. Responden diberikan 9 skenario yang terdiri dari 13 tugas mengenai keseluruhan sistem, dari penyajian hologram, interaksi gestur tangan, maupun *interface* aplikasi, kemudian keberhasilannya tergantung dari banyaknya tugas yang sukses dilakukan. Hasil pengujian dicantumkan melalui tabel 6.

Tabel 6: Hasil pengujian efektivitas sistem.

No	Skenario Pengujian	Responden (tugas)				Total
		A	B	C	D	
1.	Skenario 1	1	1	1	1	4
2.	Skenario 2	1	1	1	1	4
3.	Skenario 3	8	8	8	8	32
4.	Skenario 4	2	2	2	2	8
5.	Skenario 5	2	2	2	2	8
6.	Skenario 6	2	2	2	2	8
7.	Skenario 7	2	1	2	2	7
8.	Skenario 8	1	1	1	1	4
9.	Skenario 9	1	0	1	1	3
10.	Skenario 10	0	0	1	1	2
11.	Skenario 11	1	0	2	0	3
12.	Skenario 12	0	0	1	0	1
13.	Skenario 13	1	0	1	1	3
Total		22	18	25	22	87
Completion Rate		88.0%	72.0%	100%	88.0%	87.0%

Dari hasil pengujian efektivitas sistem dengan *completion rate* sebesar 87.0%, 87 tugas yang dilakukan responden dapat direspon balik oleh sistem sesuai dengan fitur yang dibangun. Sedangkan 12 tugas lainnya tidak dapat memberikan respons yang bersesuaian dikarenakan detektor gestur harus mengenali posisi *hand object* dengan tepat (terlalu sensitif).

2) Pengujian Kepuasan Pengguna: Pengujian kepuasan pengguna dilakukan dengan cara menyebarkan kuesioner daring yang dilengkapi dengan video skenario. Pada pengujian kuesioner ini, 61 responden diberikan 30 pernyataan untuk mengetahui tingkat persetujuannya sesuai dengan opsi sangat

setuju (SS), setuju (S), netral (N), tidak setuju (ST), dan sangat tidak setuju (STS). Hasil pengujian dicantumkan pada tabel 7.

Tabel 7: Hasil pengujian kepuasan pengguna.

Pernyataan	Jawaban				
	STS	TS	N	S	SS
Pernyataan 1	37.7%	0%	0%	0%	62.3%
Pernyataan 2	32.8%	0%	0%	0%	67.2%
Pernyataan 3	39.3%	0%	0%	0%	60.7%
Pernyataan 4	0%	4.9%	29.5%	55.7%	9.8%
Pernyataan 5	0%	1.6%	23%	45.9%	29.5%
Pernyataan 6	0%	6.6%	21.3%	44.3%	27.9%
Pernyataan 7	1.6%	19.7%	32.8%	37.7%	8.2%
Pernyataan 8	1.6%	9.8%	34.4%	31.1%	23%
Pernyataan 9	0%	6.6%	18%	54.1%	21.3%
Pernyataan 10	1.6%	13.1%	34.4%	39.3%	11.5%
Pernyataan 11	0%	0%	9.8%	41%	49.2%
Pernyataan 12	0%	0%	6.6%	42.6%	50.8%
Pernyataan 13	0%	4.9%	16.4%	44.3%	34.4%
Pernyataan 14	0%	0%	8.2%	41%	50.8%
Pernyataan 15	0%	0%	11.5%	45.9%	42.6%
Pernyataan 16	0%	1.6%	14.8%	41%	42.6%
Pernyataan 17	0%	1.6%	11.5%	37.7%	49.2%
Pernyataan 18	0%	3.3%	16.4%	55.7%	24.6%
Pernyataan 19	0%	3.3%	9.8%	32.8%	54.1%
Pernyataan 20	0%	0%	13.1%	31.1%	55.7%
Pernyataan 21	0%	1.6%	8.2%	31.1%	59%
Pernyataan 22	1.6%	0%	13.1%	44.3%	41%
Pernyataan 23	0%	0%	8.2%	23%	68.9%
Pernyataan 24	0%	0%	8.2%	49.2%	42.6%
Pernyataan 25	0%	1.6%	9.8%	42.6%	45.9%
Pernyataan 26	0%	0%	9.8%	42.6%	47.5%
Pernyataan 27	0%	0%	18%	47.5%	34.4%
Pernyataan 28	0%	8.2%	16.4%	39.3%	36.1%
Pernyataan 29	0%	0%	8.2%	37.7%	54.1%
Pernyataan 30	0%	0%	3.3%	27.9%	68.9%

Pada pernyataan 1-3 dengan jawaban sangat setuju (SS) sebesar 37.7%, 32.8%, dan 39.3% menyatakan bahwa proyeksi hologram dengan piramida, sensor pengindera tangan Leap Motion, maupun *interactive holographic projection* telah umum diketahui oleh masyarakat.

Pernyataan 4-15 dengan dominasi jawaban setuju (S) menandakan bahwa implementasi sistem visualisasi pada perangkat ini cukup memuaskan. Hasil positif juga didapatkan pada pernyataan 16-25 dengan dominasi jawaban sangat setuju (SS) yang menandakan bahwa implementasi sistem interaksi pada perangkat ini cukup memuaskan.

Pernyataan 26-28 mengenai tingkat respons balik responden setelah menjawab pernyataan sebelumnya dominasi jawaban setuju (S) dengan nilai 42.6%, 47.542.6%, dan 39.342.6% yang menandakan bahwa sistem yang dikembangkan pada penelitian ini dapat membantu pembelajaran perkembangan peradaban manusia secara lebih menarik dan mengesankan. Sedangkan pernyataan 29-30 mengenai potensi penerapan *interactive holographic projection* dapat membantu pendidikan di Indonesia didominasi jawaban sangat setuju 54.1% dan 68.9%.

3) Pengujian Real Time Response Sistem: Pengujian *real time response* sistem bertujuan untuk mengetahui tingkat kecepatan respons yang diberikan sistem sesuai dengan gestur yang diaktifkan secara kualitatif. Penilaianya bersifat subyektif berdasarkan hasil pemikiran dan perasaan dari responden

yang mencoba langsung perangkat pada Pengujian Performansi Sistem dan Pengujian Efektivitas Sistem.

Pada Pengujian Performansi Sistem dengan *server computer* 1, perubahan *frame* saat gestur diberikan memperlihatkan pergerakan objek yang halus dan stabil. Sistem dapat menanggapi gestur secara instan dan terhitung cepat karena tidak dirasakan *delay* akibat adanya komputasi sistem.

Pada Pengujian Performansi Sistem dengan *server computer* 2, perubahan *frame* saat gestur diberikan memperlihatkan pergerakan objek yang cukup stabil meskipun tidak sebaik pada *server computer* 1. Meskipun ditemukan beberapa loncatan objek, hal ini masih dalam batas yang wajar dan lebih baik dibandingkan pada *server computer* 3.

Hasil ini juga didapatkan pada Pengujian Efektivitas Sistem. Responden menyatakan bahwa sistem ini dapat menanggapi gestur dan memberikan respons yang baik serta dapat memaklumi beberapa ketidakstabilan.

Pada Pengujian Performansi Sistem dengan *server computer* 3, perubahan *frame* saat gestur diberikan memperlihatkan adanya loncatan pergerakan terhadap objek yang diinteraksikan. Sistem menanggapi gestur yang diberikan terhitung kurang responsif yang mengakibatkan adanya rentang waktu antara pemberian gestur dan pergerakan objek tersebut. Hal ini mengurangi kesan *real time* terhadap gestur yang dilakukan dan dapat mengurangi pengalaman pengguna dalam menggunakan sistem ini.

Dari hasil pengujian *real time response* sistem disimpulkan bahwa respons yang ditampilkan sistem berlangsung lumayan cepat dan dalam batas wajar. Hal ini dapat memaksimalkan pengalaman pengguna karena sistem dapat menanggapi gestur dan memberikan respons dengan baik dan stabil.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap implementasi sistem yang dibuat pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- 1) Efek hologram yang efektif diterapkan berupa kombinasi dari warna asli objek dengan ilusi cahaya semi-transparan dengan nilai efektivitas sebesar 91.67%.
- 2) Gestur dapat dikenali dan memberikan respons yang sesuai dengan nilai rata-rata 90.71%.
- 3) Gestur yang melibatkan satu tangan, baik kiri atau kanan, dapat memicu respons dengan nilai rata-rata 72.00%. Sedangkan gestur yang melibatkan kedua tangan sekaligus memiliki tingkat efisiensi sebesar 97.50%.
- 4) Agar sistem dapat berjalan dengan efektif, seminimalnya spesifikasi *server computer* yang digunakan adalah CPU Intel Core i7-7700HQ, GPU NVIDIA GeForce GTX 1050 dan RAM 16 GB.
- 5) Sebanyak 87.0% skenario yang dilakukan responden dapat direspon balik oleh sistem sesuai dengan fitur yang dibangun.
- 6) Teknologi *interactive holographic projection* dapat membantu pembelajaran perkembangan peradaban manusia di Indonesia secara lebih menarik dan mengesankan berdasarkan pendapat responden :

- a) Sebanyak 42.6% setuju dan 47.5% sangat setuju bahwa sistem ini dapat membantu pembelajaran perkembangan peradaban manusia.
- b) Sebanyak 47.5% setuju dan 34.4% sangat setuju bahwa sistem ini dapat meningkatkan ketertarikan dalam mempelajari perkembangan peradaban manusia.
- c) Sebanyak 39.3% setuju dan 36.1% sangat setuju bahwa sistem ini lebih mengesankan daripada melihat koleksi museum secara langsung.
- d) Sebanyak 37.7% setuju dan 54.1% sangat setuju bahwa sistem ini dapat diimplementasikan di museum di Indonesia.
- e) Sebanyak 27.9% setuju dan 68.9% sangat setuju bahwa sistem ini dapat mendukung perkembangan museum dan pendidikan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sundus, "The impact of using gadgets on children," *Journal of Depression and Anxiety*, vol. 7, no. 1, pp. 1–3, 2018.
- [2] A. R. Wirawan, "Rendahnya minat belajar sejarah di sekolah," Nov 2018. [Online]. Available: <http://www.adhicipta.com/rendahnya-minat-belajar-sejarah-di-sekolah/>
- [3] "Kemendikbud sebut seperempat museum di ri tak layak," Jun 2019. [Online]. Available: <https://www.cnnindonesia.com/gaya-hidup/20190622142656-275-405527/kemendikbud-sebut-seperempat-museum-di-ri-tak-layak>
- [4] C.-W. Sheng and M.-C. Chen, "A study of experience expectations of museum visitors," *Tourism Management*, vol. 33, no. 1, pp. 53–60, 2012.
- [5] J. Mahfud and T. Matsumaru, "Interactive aerial projection of 3d hologram object," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2016, pp. 1930–1935.
- [6] S. Ameur, A. B. Khalifa, and M. S. Bouhlel, "A comprehensive leap motion database for hand gesture recognition," in *2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)*. IEEE, 2016, pp. 514–519.
- [7] H. Huang, C.-w. Chen, and Y.-w. Hsieh, "Factors affecting usability of interactive 3d holographic projection system for experiential learning," in *International Conference on Learning and Collaboration Technologies*. Springer, 2018, pp. 104–116.
- [8] A. A. Sawant, P. H. Bari, and P. Chawan, "Software testing techniques and strategies," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 2, no. 3, pp. 980–986, 2012.