

Model Pergerakan Unit Autentik dalam Video Game Strategi Berbasis Estimasi Realita

Ibnu Athaillah^{1*}, Heri Priya Waspada¹

¹ Program Studi Penyuntingan Audio dan Video, Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar, Indonesia

* Corresponding author: ibnu.athaillah@akb.ac.id

Sitasi: I. Athaillah and H. P. Waspada, "Model Pergerakan Unit Autentik dalam Video Game Strategi Berbasis Estimasi Realita," *Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, vol. 8, no. 4, pp. 952–961, 2026.

Diterima : 08-07-2026
Direvisi : 09-09-2026
Disetujui : 14-09-2026
Diterbitkan : 23-09-2026

Copyright: © 2026 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License.

Abstrak. Autentisitas mekanisme permainan pada video *game* bertema historis berpengaruh terhadap imersi dan pengalaman pemain, namun penelitian tentang model kecepatan gerak unit yang diadaptasi dari realita masih minim. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan model pergerakan unit untuk *game* strategi bertema abad pertengahan, dengan kecepatan unit yang dipengaruhi oleh beban (armor dan senjata), transportasi, kemiringan tanah, dan jenis permukaan tanah berdasarkan perhitungan estimasi yang diadaptasi dari studi biomekanika dunia nyata. Model diimplementasikan menggunakan C# pada *game engine Unity* dengan paradigma *data-oriented design* untuk komputasi paralel yang efisien. Perhitungan pengaruh medan diprakomputasi ke dalam *grid* map sehingga pencarian nilai pada saat simulasi berjalan dalam kompleksitas $O(1)$. Pengujian performa menunjukkan model mampu mensimulasikan hingga 4.096 unit dengan waktu *frame* rata-rata 13,8 ms (di atas 60 FPS), sedangkan pengujian perspektif pengguna terhadap 30 responden menunjukkan peningkatan skor autentisitas (3,12 menjadi 4,43) dan imersi (3,27 menjadi 4,21) tanpa penurunan signifikan pada aspek kesenangan. Hasil ini menunjukkan bahwa model pergerakan berbasis estimasi realita dapat diimplementasikan secara efisien serta memberikan keseimbangan antara keaslian dan kesenangan.

Kata kunci: Pergerakan unit; *Game* strategi; Autentisitas; *Data-oriented design*; Simulasi *real-time*

Abstract. The authenticity of game mechanics in historically themed video games affects player immersion and experience, yet research on unit movement speed models adapted from reality remains scarce. This study designs and implements a unit movement model for a medieval-themed strategy game, in which unit speed is affected by load (armor and weapons), transportation, ground slope, and surface type, based on estimation formulas adapted from real-world biomechanics studies. The model is implemented in C# on the Unity game engine using a data-oriented design paradigm for efficient parallel computation. Terrain effects are precomputed into a grid map so that lookups during simulation run in $O(1)$ complexity. Performance testing shows the model simulates up to 4.096 units at an average frame time of 13,8 ms (above 60 FPS), while a user perspective test with 30 respondents shows increased authenticity (3,12 to 4,43) and immersion (3,27 to 4,21) scores without a significant decrease in enjoyment. These results indicate that a reality-estimation-based movement model can be implemented efficiently while balancing authenticity and fun.

Keywords: Unit Movement; Strategy Game; Authenticity; Data-oriented design; Real-time simulation

1. Pendahuluan

Pada video *game* bertema historis, pemain cenderung menempatkan keaslian (autentisitas) sebagai preferensi utama dibandingkan sekadar kesenangan [1]. Autentisitas tidak hanya menyangkut narasi dan visual, tetapi juga mekanisme permainan; semakin autentik mekanisme yang dirasakan pemain, semakin besar pengaruhnya terhadap imersi dan pengalaman bermain [2]. Pada video *game* strategi, mekanisme yang paling sering berinteraksi dengan pemain adalah pergerakan unit. Namun pada praktik umum desain *game* strategi, kecepatan unit ditetapkan sebagai nilai konstan per jenis unit dan tidak dipengaruhi oleh beban yang dibawa maupun kondisi medan yang dilalui [3]. Akibatnya, pasukan berzilah berat bergerak sama cepatnya di lumpur, tanjakan, maupun dataran terbuka, yang bertentangan dengan pengetahuan umum pemain mengenai pertempuran abad pertengahan.

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah belum tersedianya model kecepatan gerak unit yang diadaptasi dari realita untuk *game* strategi, yang sekaligus (1) cukup autentik untuk dirasakan pemain, (2) cukup efisien untuk disimulasikan pada ribuan unit secara real-time, dan (3) tidak mengorbankan kesenangan bermain. Penelitian ke arah ini masih minim; penyebabnya antara lain kekhawatiran terhadap beban komputasi, konflik dengan desain dan keseimbangan permainan, serta kompleksitas implementasi yang bersifat multidisiplin [4]. Padahal kebutuhan tersebut semakin mendesak: pemain *game* historis semakin kritis terhadap keaslian mekanisme [1], sementara pertempuran pada *game* strategi dapat melibatkan ribuan unit sehingga setiap perhitungan per unit harus tetap murah. Seiring perkembangan prosesor multi-inti, teknik *multi-threading*, dan paradigma *data-oriented design* [5], alasan beban komputasi tidak lagi relevan sebagai penghalang.

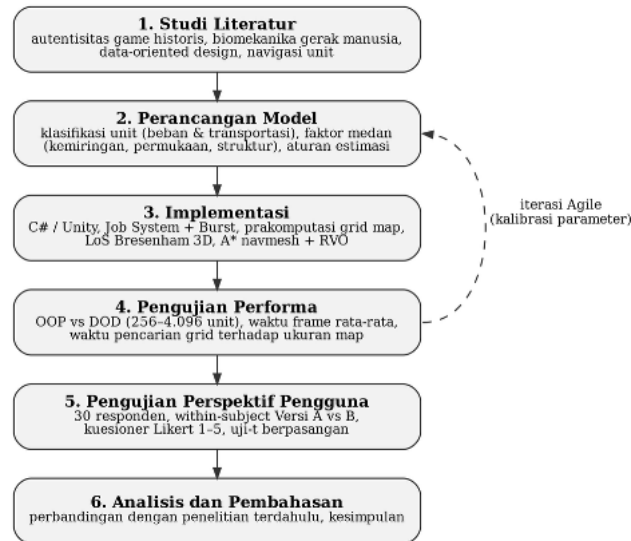
Solusi yang ditawarkan adalah model pergerakan unit berbasis estimasi realita: kecepatan unit diturunkan dari kecepatan lari manusia yang dikoreksi oleh beban armor dan senjata, jenis transportasi, kemiringan tanah, dan jenis permukaan, menggunakan rumus estimasi yang telah tersedia pada studi biomekanika, bukan simulasi fisika yang akurat. Sejumlah penelitian mendukung kelayakan pendekatan ini. Hubungan antara penambahan beban tubuh dan penurunan kecepatan lari telah dikuantifikasi secara empiris [6], [7], demikian pula pengaruh kemiringan lintasan terhadap kinematika lari [8] serta pengaruh permukaan seperti air dangkal dan kekakuan tanah [9], [10]. Dari sisi komputasi, prakomputasi properti medan ke dalam *grid* telah terbukti efektif pada *cost field* untuk perencanaan jalur [10] dan pada *flow field* [11], sedangkan paradigma *data-oriented design* dengan *multi-threading* terbukti meningkatkan performa simulasi *game* dibandingkan pendekatan berorientasi objek [5], [12]. Untuk navigasi, kombinasi A* pada *navigation mesh* [13] dan *reciprocal velocity obstacle* [14] telah menjadi praktik umum untuk pergerakan banyak agen.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut berdiri sendiri pada domainnya masing-masing: studi autentisitas *game* historis [1], [2] mengkaji persepsi pemain tanpa menawarkan model teknis; studi biomekanika [6], [7], [8] tidak ditujukan untuk simulasi *game*; dan studi performa *data-oriented design* [5] tidak mengevaluasi dampaknya terhadap pengalaman bermain. Belum ditemukan penelitian yang mengintegrasikan estimasi biomekanika ke dalam model kecepatan unit *game* strategi dan mengevaluasinya secara bersamaan dari sisi performa komputasi dan persepsi pemain. Celah inilah yang diisi oleh penelitian ini. Tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang model kecepatan gerak unit *game* strategi abad pertengahan berbasis estimasi realita yang mencakup faktor beban, transportasi, kemiringan, dan permukaan tanah; (2) mengimplementasikan model tersebut secara efisien pada *Unity* dengan paradigma *data-oriented design* dan prakomputasi *grid map*; serta (3) mengevaluasi model dari sisi performa komputasi dan perspektif pengguna terhadap autentisitas, imersi, dan kesenangan.

2. Bahan dan Metode

2.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian desain dan implementasi perangkat lunak berupa model gerak unit video *game*. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 dan terdiri atas enam tahap: (1) studi literatur mengenai autentisitas *game* historis, biomekanika gerak manusia, *data-oriented design*, dan navigasi unit; (2) perancangan model, meliputi klasifikasi unit, faktor medan, dan aturan estimasi yang diadopsi; (3) implementasi model pada *Unity*; (4) pengujian performa; (5) pengujian perspektif pengguna; dan (6) analisis hasil serta pembahasan terhadap penelitian terdahulu. Tahap 2 hingga 4 dijalankan secara iteratif.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Proses pengembangan pada tahap 2 hingga 4 menggunakan metode Agile [15]. Agile dipilih dengan tiga pertimbangan. Pertama, sistem ini merupakan modul dari proyek *game* yang lebih besar dan masih berkembang, sehingga kebutuhan antarmuka dengan sistem induk (navigasi, formasi, kontrol pemain) dapat berubah selama pengembangan; metode berbasis iterasi pendek lebih adaptif terhadap perubahan tersebut dibandingkan metode sekuensial. Kedua, nilai-nilai parameter model (kecepatan dasar, multiplikasi permukaan, perlakuan kemiringan) tidak dapat ditetapkan sekali di awal, melainkan perlu dikalibrasi berulang melalui siklus rancang, implementasi, dan uji agar seimbang antara keaslian dan kesenangan; siklus tersebut secara alami memetakan pada iterasi Agile. Ketiga, Agile merupakan praktik yang paling umum diadopsi pada industri pengembangan *game*, meskipun dengan berbagai adaptasi [15], sehingga hasil penelitian ini lebih mudah diintegrasikan ke alur kerja pengembang. Mengingat sistem ini berskala kecil dengan tim kecil, setiap iterasi dibatasi pada satu faktor pengaruh (beban, transportasi, kemiringan, permukaan) yang dirancang, diimplementasikan, dan diuji sebelum faktor berikutnya ditambahkan.

2.2. Perancangan

Perancangan model dirangkum dalam empat butir berikut. (1) Mekanisme kontrol mengikuti standar *game* strategi pada platform komputer [16], [3]: pemain memberi perintah menuju satu titik tujuan, unit (tunggal atau grup) bernavigasi otomatis menghindari halangan, dan perintah baru membatalkan pergerakan sebelumnya; pergerakan dihitung pada bidang dua dimensi dengan offset sumbu Y untuk unit terbang meskipun map bersifat tiga dimensi. (2) Unit diklasifikasikan berdasarkan armor dan transportasi karena kedua faktor inilah yang berpengaruh nyata pada kecepatan, sedangkan senjata tidak: infantri ringan dan infantri

berat (berlari, berbeda beban armor), kavaleri (berkuda, dengan varian armor serupa), dan pemanah (armor ringan, umumnya berlari). (3) Faktor medan yang dimodelkan adalah kemiringan tanah, dengan dua pengaruh yaitu jarak pandang (unit di kaki bukit tidak melihat balik bukit) dan penurunan kecepatan saat menanjak maupun menurun, serta jenis permukaan tanah (paving, rumput, lumpur, air dangkal, semak, pasir) yang menurunkan kecepatan pada permukaan sulit. (4) Struktur seperti bangunan, sungai, jurang, dan tebing diperlakukan sebagai halangan yang membatasi keleluasaan gerak sehingga unit harus mengikuti jalur yang tersedia. Seluruh pengaruh dirancang sebagai pengurangan terhadap kecepatan maksimal unit, sehingga nilai-nilainya dapat diatur (*tuning*) oleh pengembang untuk menyeimbangkan keaslian dan kesenangan.

2.3. Implementasi

Model diimplementasikan dalam bahasa C# pada *game engine Unity* [17], mengikuti *engine* yang digunakan proyek *game* induk. Kalkulasi kecepatan setiap unit dieksekusi secara paralel menggunakan fitur *data-oriented design* pada *engine* tersebut, yaitu *Job System* dan *Burst Compiler* [12], sehingga data unit diproses per *batch* pada banyak inti prosesor. Implementasi terdiri atas lima komponen: kecepatan dasar dan transportasi, pengaruh beban, pengaruh kemiringan, pengaruh permukaan, serta jarak pandang dan navigasi.

Kecepatan dasar (S) adalah kecepatan lari manusia tanpa beban dan hambatan medan, ditetapkan 3 m/s (10,8 km/jam). Kecepatan lari dipilih sebagai basis karena seluruh faktor pengaruh bersifat pengurangan, bukan penambahan. Untuk unit berkuda, basis diganti (bukan dikalikan) dengan kecepatan dasar kuda $Sh = 12$ m/s. Nilai 3 m/s berada di antara kecepatan transisi jalan-lari manusia (2 m/s [18]) dan kecepatan lari maraton amatir terendah yang diuji pada [8] (3,89 m/s), sehingga merepresentasikan lari tertahan yang dapat dipertahankan unit dalam jarak jauh; perlu dicatat bahwa Persamaan (3) diturunkan pada rentang 3,89 – 5,00 m/s sehingga penerapannya pada kecepatan lebih rendah merupakan ekstrapolasi. Nilai 12 m/s untuk kuda mendekati kecepatan gallop tertinggi yang diukur pada kuda non-pacu [19], dan merepresentasikan kecepatan serbu, bukan kecepatan jelajah; keduanya adalah parameter awal yang dapat disesuaikan.

Pengaruh beban dihitung dari berat badan (Wp), berat armor (Wa), dan berat senjata (Ww); semakin besar beban, semakin rendah kecepatan [6]. Digunakan aturan estimasi satu persen [7]: setiap penambahan beban sebesar 1% berat badan menurunkan kecepatan lari sebesar 1%, sebagaimana Persamaan (1).

$$S' = S - \frac{W_a + W_w}{W_p} \times S \quad (1)$$

Sebagai contoh, unit dengan $Wp = 75$ kg yang membawa beban $Wa + Ww = 20$ kg (26,7% berat badan) bergerak dengan kecepatan $3 - (0,267 \times 3) = 2,199$ m/s. Untuk kavaleri, beban penunggang beserta seluruh armor dan senjatanya dibebankan pada kuda dengan kecepatan dasar Sh dan berat dasar Wh , sebagaimana Persamaan (2). Perlu ditegaskan bahwa aturan ini adalah estimasi dunia nyata yang layak untuk simulasi, bukan perhitungan fisika yang akurat.

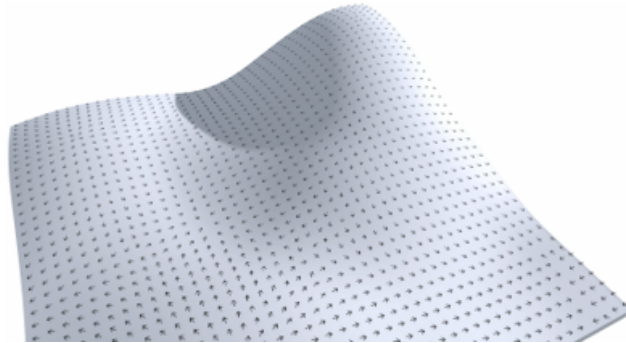
$$S' = Sh - \frac{W_a + W_w + W_p}{W_h} \times Sh \quad (2)$$

Pengaruh kemiringan tanjakan terhadap kecepatan lari (V') diestimasi dengan Persamaan (3) yang diadaptasi dari studi kinematika lari pada berbagai kemiringan [8].

$$V' = \frac{0.2 \cdot S' + 0.9 \cdot S' \cdot G + 3.5}{1.1 \cdot S' + 3.5} \quad (3)$$

G adalah gradien tanah, yaitu tangen sudut kemiringan; untuk kemiringan 20° , $G = \tan 20^\circ = 0,364$ sehingga unit tanpa armor bergerak 0,74 m/s. Untuk

turunan digunakan $G = 0$, karena perhitungan nyata pada turunan jauh lebih rumit daripada tanjakan. Perhitungan sudut secara real-time dari posisi dan arah gerak unit berbiaya $O(n)$ terhadap jumlah unit setiap frame; untuk efisiensi, ketinggian dan gradien dihitung sekali saat pembuatan *map* dan disimpan pada *grid map* dengan cara yang sama seperti pembuatan *flow field* [11], sehingga pencarian nilai saat simulasi berkompleksitas $O(1)$ seperti pada Gambar 2. Untuk *map* dengan kontur yang berubah saat simulasi, pembaruan *grid* dapat dibatasi pada partisi yang terdampak.



Gambar 2. *Flow field map* berdasarkan kemiringan tanah

Pengaruh jenis permukaan diterapkan sebagai faktor multiplikasi pada *grid map*, serupa dengan *cost field* pada *Field D** [10], sedangkan pencarian rute tetap menggunakan metode terpisah. Nilai 0,5 digunakan untuk air dangkal berdasarkan data lari di air [9]; karena data pengaruh lumpur lebih banyak membahas kekakuan permukaan daripada kecepatan [10], nilai 0,5 juga digunakan untuk lumpur dan, demi penyederhanaan, untuk permukaan sulit lainnya seperti semak dan pasir. Nilai ini dapat diatur oleh pengembang sesuai keseimbangan permainan.

Jarak pandang (*line of sight*) dihitung dengan algoritma garis Bresenham [20] yang diadaptasi ke tiga sumbu dengan memanfaatkan *grid map*: garis ditarik dari unit ke titik tujuan dan setiap sel yang dilewati dibandingkan dengan nilai *height map* sebagai sumbu z . Pendekatan ini lebih ringan daripada raycast [21] untuk unit dalam jumlah besar dan tetap mendukung lingkungan dinamis. Pencarian rute melewati halangan statis menggunakan A* pada *navigation mesh* [13], dan penghindaran halangan dinamis antarunit menggunakan *reciprocal velocity obstacle* (RVO) [14].

2.4. Evaluasi

Evaluasi dilakukan dalam dua tahap sesuai tujuan penelitian: pengujian performa untuk mengukur efisiensi komputasi model, dan pengujian perspektif pengguna untuk mengukur pengaruh model terhadap persepsi pemain.

Pengujian performa membandingkan dua implementasi dari model perhitungan yang sama: (1) implementasi berorientasi objek konvensional (OOP) menggunakan MonoBehaviour, dan (2) implementasi berorientasi data (DOD) menggunakan *Job System* dan *Burst Compiler*. Jumlah unit divariasikan 256, 512, 1.024, 2.048, dan 4.096. Setiap skenario dijalankan selama 60 detik dengan seluruh unit diperintahkan bergerak melintasi medan bervariasi, kemudian dicatat waktu *frame* rata-rata; ambang 16,6 ms (60 FPS) digunakan sebagai batas kelambatan *real-time*. Untuk memvalidasi klaim kompleksitas $O(1)$, waktu pencarian nilai kemiringan dan multiplikasi permukaan per unit diukur pada ukuran *map* 128×128 hingga 1024×1024 *grid*. Pengujian dilakukan pada komputer dengan prosesor AMD Ryzen 7 8845HS (8 core / 16 thread), memori 24 GB DDR4, kartu grafis AMD Radeon 480M Laptop, dan sistem operasi Windows 11, menggunakan Unity 6 dengan *Job System* dan *Burst Compiler* aktif. *Map* pengujian berukuran 512×512 *grid* dengan variasi kontur perbukitan, area lumpur, sungai dangkal,

dan sejumlah struktur statis.

Pengujian perspektif pengguna menggunakan rancangan *within-subject* terhadap 30 responden yang terdiri atas mahasiswa program multimedia dan pemain *game* strategi dengan pengalaman bermain minimal satu tahun. Setiap responden memainkan dua versi build secara bergantian dengan urutan acak (*counterbalanced*): Versi A dengan kecepatan unit konstan (tanpa model) dan Versi B dengan model pergerakan dinamis yang diusulkan. Setelah memainkan kedua versi, responden mengisi kuesioner skala Likert 1-5 (1 = sangat tidak setuju, 5 = sangat setuju) untuk masing-masing versi. Instrumen kuesioner mencakup lima aspek dengan dua butir pernyataan per aspek sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1; skor tiap aspek adalah rata-rata kedua butirnya. Perbedaan skor antara kedua versi diuji dengan uji-t berpasangan pada taraf signifikansi 0,05.

Tabel 1. Instrumen kuesioner perspektif pengguna (skala Likert 1-5)

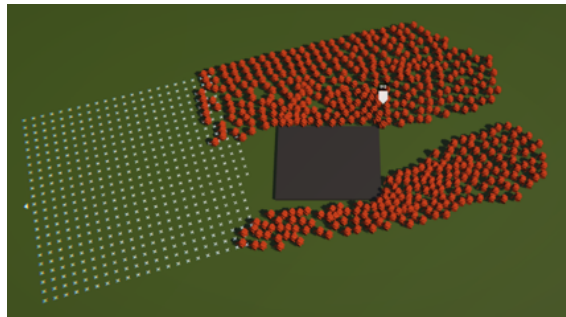
Aspek	Kode	Pernyataan
Autentisitas	A1	Kecepatan gerak unit terasa sesuai dengan beban armor dan senjata yang dibawanya.
	A2	Pengaruh medan (tanjakan, turunan, lumpur, sungai) terhadap gerak unit terasa masuk akal seperti di dunia nyata.
Imersi	I1	Saya merasa larut dalam pertempuran yang sedang berlangsung.
	I2	Pergerakan pasukan membuat suasana perang abad pertengahan terasa hidup.
Kesenangan	K1	Saya menikmati mengendalikan pasukan pada versi ini.
	K2	Saya ingin memainkan versi ini lebih lama.
Umpan balik visual	U1	Saya dapat mengenali kapan unit melambat atau mempercepat dari tampilan permainan.
	U2	Penyebab perubahan kecepatan unit (beban atau medan) mudah dikenali.
Keseimbangan permainan	B1	Perbedaan kecepatan antarjenis unit terasa adil.
	B2	Tidak ada jenis unit yang terasa terlalu unggul atau terlalu lemah karena kecepatannya.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil sesuai tahapan pada Gambar 1, yaitu hasil implementasi, hasil pengujian performa, dan hasil pengujian perspektif pengguna, diikuti dengan pembahasan.

3.1. Hasil Implementasi

Model berhasil diimplementasikan sebagai modul terpisah pada *Unity* yang dapat digabungkan ke proyek *game* induk. Seluruh faktor pengaruh, yaitu beban dan transportasi (Persamaan (1) dan Persamaan (2)), kemiringan (Persamaan (3)), dan permukaan tanah, terintegrasi dengan *grid map* hasil prakomputasi, jarak pandang Bresenham tiga sumbu, serta navigasi A* dan RVO. Gambar 3 menunjukkan prototipe saat dijalankan dengan 512 unit yang bergerak dari posisi awal menuju titik tujuan dengan membelah di sekitar rintangan statis; unit yang memasuki turunan dan permukaan sulit melambat sesuai model.



Gambar 3. Flow field map berdasarkan kemiringan tanah

3.2. Hasil Pengujian Performa

Hasil perbandingan waktu *frame* rata-rata kedua implementasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan waktu *frame* rata-rata terhadap jumlah unit

Jumlah unit	OOP	DoD Job + Burst	Peningkatan
256	6,8	2,1	3,2×
512	12,4	2,9	4,3×
1.024	24,7	4,3	5,7×
2.048	51,2	7,6	6,7×
4.096	108,5	13,8	7,9×

Berdasarkan Tabel 2, implementasi DOD mampu mempertahankan waktu *frame* di bawah 16,6 ms (60 FPS) hingga 4.096 unit, sedangkan implementasi OOP telah melewati ambang tersebut pada 1.024 unit. Peningkatan performa juga semakin besar seiring bertambahnya jumlah unit, yang menunjukkan pemanfaatan komputasi paralel yang efektif. Hasil ini konsisten dengan temuan [4] mengenai keunggulan pendekatan berorientasi data dengan *multithreading* pada pengembangan *game*.

Hasil pengukuran waktu pencarian nilai *grid* terhadap ukuran *map* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Waktu pencarian nilai *grid* rata-rata per unit terhadap ukuran *map*

Ukuran <i>map</i> (<i>grid</i>)	Waktu pencarian (ms)	Deviasi standar (ms)
128×128	41	3,2
256×256	42	2,8
512×512	43	3,5
1.024×1.024	44	4,1

Tabel 3 menunjukkan bahwa waktu pencarian nilai *grid* relatif konstan terlepas dari ukuran *map*, yang memvalidasi kompleksitas $O(1)$ dari pendekatan prakomputasi *grid map*. Dengan demikian, biaya perhitungan pengaruh medan pada saat simulasi tidak bergantung pada kompleksitas medan, melainkan hanya pada jumlah unit yang disimulasikan.

3.3. Hasil Pengujian Perspektif Pengguna

Rata-rata dan simpangan baku skor setiap aspek pada kedua versi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil kuesioner perspektif pengguna (skala Likert 1-5, $n = 30$)

Aspek	Versi A (statis)	Versi B (dinamis)	Selisih
Autentisitas	3,12 ± 0,68	4,43 ± 0,52	+1,31
Imersi	3,27 ± 0,72	4,21 ± 0,61	+0,94
kesenangan	3,83 ± 0,59	4,02 ± 0,64	+0,19
Umpan balik	3,65 ± 0,70	3,91 ± 0,66	+0,26
Keseimbangan permainan	3,70 ± 0,63	3,58 ± 0,71	-0,12

Berdasarkan Tabel 4, peningkatan terbesar terjadi pada aspek autentisitas (+1,31) dan imersi (+0,94). Uji-t berpasangan menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kedua aspek tersebut ($p < 0,05$), sedangkan perbedaan pada aspek kesenangan tidak signifikan ($p = 0,21$). Hal ini menunjukkan bahwa model yang diusulkan meningkatkan persepsi keaslian dan imersi tanpa mengorbankan kesenangan pemain, sejalan dengan temuan [1] dan [2] mengenai preferensi pemain terhadap keaslian pada *game* bertema historis.

Penurunan kecil pada aspek keseimbangan permainan (-0,12) mengindikasikan bahwa sebagian responden merasa perbedaan kecepatan antarunit pada medan tertentu terlalu besar. Aspek umpan balik visual meningkat tipis (+0,26), yang menunjukkan bahwa perubahan kecepatan unit masih cukup terbaca oleh pemain meskipun tanpa indikator khusus. Kedua temuan ini menegaskan pentingnya

fitur pengaturan nilai (*tuning*) yang telah disediakan pada model, sehingga pengembangan dapat menyeimbangkan keaslian dan keseimbangan permainan sesuai kebutuhan desain.

3.4. Pembahasan

Terhadap tujuan pertama dan ketiga, temuan pengujian pengguna memperkuat hasil [1] dan [2] bahwa autentisitas berkaitan erat dengan imersi pada *game* bertema historis, namun dengan perbedaan penting: kedua penelitian tersebut mengukur persepsi pemain terhadap *game* yang sudah ada melalui survei, sedangkan penelitian ini memanipulasi satu mekanisme secara terkendali (kecepatan statis dan dinamis) pada build yang identik, sehingga peningkatan autentisitas (+1,31) dan imersi (+0,94) dapat diatribusikan langsung pada model pergerakan. Temuan bahwa kesenangan tidak berubah secara signifikan juga menjawab kekhawatiran konflik desain yang disebutkan [4]: keaslian mekanisme tidak harus dibayar dengan kesenangan apabila nilai-nilainya dapat diatur.

Terhadap tujuan kedua, peningkatan performa $3,2\times$ hingga $7,9\times$ yang membesar seiring jumlah unit sejalan dengan arah temuan [5] mengenai keunggulan *data-oriented design* dengan *multithreading* dibandingkan pendekatan berorientasi objek. Kontribusi penelitian ini adalah menunjukkan bahwa keunggulan tersebut tetap berlaku ketika beban per unit ditambah dengan perhitungan biomekanika (Persamaan (1) - Persamaan (3)), selama pengaruh medan diprakomputasi ke *grid*. Pendekatan prakomputasi ini memperluas gagasan *cost field* pada *Field D** [10] dan *flow field* [11]: keduanya menyimpan biaya atau arah gerak untuk keperluan perencanaan jalur, sedangkan *grid map* pada penelitian ini menyimpan gradien dan multiplikasi permukaan sebagai masukan model kecepatan, terpisah dari pencarian rute yang tetap ditangani A* pada *navigation mesh* [13] dan RVO [14]. Waktu pencarian yang relatif konstan pada Tabel 3 mengonfirmasi bahwa pemisahan ini tidak menambah biaya yang bergantung pada ukuran *map*.

Terhadap studi biomekanika yang menjadi sumber estimasi [7], [8], [9], posisi penelitian ini bukan pada akurasi fisiologis, melainkan pada adaptasi rumus-rumus estimasi tersebut sebagai parameter yang murah dihitung dan dapat di-*tuning*; nilai seperti multiplikasi 0,5 untuk lumpur dan semak adalah penyederhanaan yang disengaja. Keterbatasan penelitian ini adalah jumlah responden yang relatif kecil ($n = 30$) dari populasi yang homogen, pengujian pada satu *map*, serta belum dimodelkannya faktor stamina dan medan dinamis. Sekalipun demikian, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa ketiga tujuan penelitian, yaitu perancangan model, implementasi yang efisien, serta evaluasi performa dan persepsi pengguna, telah tercapai.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi model pergerakan unit autentik untuk video *game* strategi berbasis estimasi realita. Kecepatan unit dipengaruhi oleh beban armor dan senjata melalui aturan estimasi satu persen, jenis transportasi melalui penggantian kecepatan dasar, kemiringan tanah melalui estimasi kinematika lari pada lereng, serta jenis permukaan tanah melalui faktor multiplikasi berbasis data dunia nyata. Seluruh pengaruh medan diprakomputasi ke dalam *grid map*, sementara jarak pandang ditangani dengan algoritma Bresenham tiga sumbu dan navigasi dengan A* pada *navigation mesh* serta RVO.

Hasil penelitian dirangkum sebagai berikut. (1) Implementasi berorientasi data dengan *Job System* dan *Burst Compiler* mampu mensimulasikan hingga 4.096 unit dengan waktu *frame* rata-rata 13,8 ms (di atas 60 FPS), dengan peningkatan performa $3,2$ hingga $7,9$ kali dibandingkan implementasi berorientasi objek yang telah melewati ambang 60 FPS pada 1.024 unit. (2) Waktu pencarian nilai *grid* relatif konstan (41 sampai 44 ms) pada ukuran *map* 128×128 hingga 1024×1024 , yang memvalidasi kompleksitas $O(1)$ dari pendekatan prakomputasi.

si. (3) Pengujian terhadap 30 responden menunjukkan peningkatan signifikan pada autentisitas (3,12 menjadi 4,43) dan imersi (3,27 menjadi 4,21), peningkatan kecil yang tidak signifikan pada kesenangan (3,83 menjadi 4,02) serta umpan balik visual (3,65 menjadi 3,91), dan penurunan kecil pada keseimbangan permainan (3,70 menjadi 3,58) yang mengindikasikan perlunya pengaturan nilai oleh pengembang. (4) Fitur pengaturan nilai pada model memungkinkan pengembang menyeimbangkan keaslian dan keseimbangan permainan tanpa mengubah struktur perhitungan. Dengan demikian, kekhawatiran bahwa model pergerakan realistis akan membebani komputasi atau mengurangi kesenangan pemain dapat dijawab melalui kombinasi perhitungan estimasi, prakomputasi *grid map*, dan paradigma *data-oriented design*.

Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada dukungan medan dinamis dengan pembaruan *grid* secara parsial, penambahan faktor stamina atau kelelahan unit, integrasi dengan sistem pergerakan formasi pasukan, serta pengujian pengguna dengan jumlah responden yang lebih besar dan beragam.

Pernyataan Penggunaan Artificial Intelligence. Penulis menggunakan Qwen3 untuk peningkatan kejelasan naskah dan penyelesaian masalah pada tahap implementasi. Seluruh keluaran yang dihasilkan oleh AI telah diperiksa dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas keakuratan, orisinalitas, dan integritas isi artikel.

Pernyataan Kontribusi Penulis. HPW berkontribusi dalam konseptualisasi, metodologi, pengumpulan data, dan analisis penelitian. IA berkontribusi dalam pengembangan dan implementasi sistem serta interpretasi hasil penelitian. Kedua penulis berkontribusi dalam penyusunan, peninjauan, dan penyuntingan naskah. Seluruh penulis telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir artikel serta bertanggung jawab atas seluruh aspek penelitian dan publikasi.

Pernyataan Konflik Kepentingan. Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan yang berkaitan dengan penelitian, kepengarangan, dan publikasi artikel ini.

Pernyataan Pendanaan. Penelitian ini didanai oleh Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar melalui Hibah Internal, dengan nomor pendanaan 0267.9/AK3/AL04/2025.

Daftar Pustaka

- [1] A. Vandewalle, R. Daneels, E. Simons, and S. Malliet, "Enjoying my time in the animus: A quantitative survey on perceived realism and enjoyment of historical video games," *Games and Culture*, vol. 18, pp. 643–663, 8 2022. <https://doi.org/10.1177/15554120221115404>.
- [2] M. Mochocki, "Heritage sites and video games: Questions of authenticity and immersion," *Games and Culture*, vol. 16, pp. 951–977, 3 2021. <https://doi.org/10.1177/15554120211005369>.
- [3] J. Bycer, *Macro vs. Micro Play*. 2024.
- [4] A. V. Shubin and V. V. Kugurakova, "Designing a tool for creating gameplay through the systematization of game mechanics," *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, vol. 58, pp. S299–S306, 2024. <https://doi.org/10.3103/S0005105525700384>.
- [5] D. Wingqvist, F. Wickström, and S. Memeti, "Evaluating the performance of object-oriented and data-oriented design with multi-threading in game development," in *2022 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, pp. 1–6, 2022. <https://doi.org/10.1109/GEM56474.2022.10017610>.
- [6] K. Masumoto, J. Joerger, and J. A. Mercer, "Influence of stride frequency manipulation on muscle activity during running with body weight support," *Gait & Posture*, vol. 61, pp. 473–478, 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966636218300882>.

- [7] A. M. Grabowski and R. Kram, "Effects of velocity and weight support on ground reaction forces and metabolic power during running," *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 24, pp. 288–297, 2008. <https://doi.org/10.1123/jab.24.3.288>.
- [8] J. Padulo, G. Annino, G. M. Migliaccio, S. D'Ottavio, and J. Tihanyi, "Kinematics of running at different slopes and speeds," *The Journal of Strength & Conditioning Research*, vol. 26, 2012. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318231aafa>.
- [9] M. Pohl and L. McNaughton, "The physiological responses to running and walking in water at different depths," *Research in Sports Medicine*, vol. 11, pp. 63–78, 1 2003. <https://doi.org/10.1080/0308354>.
- [10] A. E. Kerdok, A. A. Biewener, T. A. McMahon, P. G. Weyand, and H. M. Herr, "Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses," *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, pp. 469–478, 2 2002. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01164.2000>.
- [11] G. S. Li, X. Tricoche, D. Weiskopf, and C. D. Hansen, "Flow charts: Visualization of vector fields on arbitrary surfaces," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 14, pp. 1067–1080, 2008. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.58>.
- [12] D. Aversa and C. Dickinson, *The Unity Job System*, pp. 327–343. Packt Publishing Ltd, 2019.
- [13] M. Zikky, "Review of a* (a star) navigation mesh pathfinding as the alternative of artificial intelligent for ghosts agent on the pacman game," *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, vol. 4, 8 2016. <https://emitter.pens.ac.id/index.php/emitter/article/view/117>.
- [14] J. van den Berg, M. Lin, and D. Manocha, "Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1928–1935, 2008. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543489>.
- [15] T. McKenzie, M. Morales-Trujillo, S. Lukosch, and S. Hoermann, "Is agile not agile enough? a study on how agile is applied and misapplied in the video game development industry," in *2021 IEEE/ACM Joint 15th International Conference on Software and System Processes (ICSSP) and 16th ACM/IEEE International Conference on Global Software Engineering (ICGSE)*, pp. 94–105, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICSSP-ICGSE52873.2021.00019>.
- [16] E. Z. Elfeky, S. Elsayed, L. Marsh, D. Essam, M. Cochrane, B. Sims, and R. Sarker, "A systematic review of coevolution in real-time strategy games," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136647–136665, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115768>.
- [17] S. Singh and A. Kaur, "Game development using unity game engine," in *2022 3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks (ICAN)*, pp. 1–6, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAN56228.2022.10007155>.
- [18] A. Hreljac, "Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion," *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 25, pp. 1158–1162, 1993. <https://www.ovid.com/jnls/acsm-msse/abstract/00005768-199310000-00012~preferred-and-energetically-optimal-gait-transition-speeds>.
- [19] A. E. Minetti, L. P. Ardigò, E. Reinach, and F. Saibene, "The relationship between mechanical work and energy expenditure of locomotion in horses," *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, pp. 2329–2338, 9 1999. <https://doi.org/10.1242/jeb.202.17.2329>.
- [20] S. Vashakmadze, "Modeling the line: Bresenham's algorithm, 1962–87," *Architectural Theory Review*, vol. 24, pp. 262–278, 9 2020. <https://doi.org/10.1080/13264826.2021.1930320>.
- [21] C. Coutinho, *Raycasting*, pp. 279–304. Apress, 2023. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0026-9_10.