

Otomatisasi *Efek Follow-Through* dan *Overlapping Action* pada Animasi 3D Berbasis *Offset Keyframe F-Curve Prosedural* dan Simulasi *Mass-Spring-Damper* Menggunakan Blender

Automating Follow-Through and Overlapping Action in 3D Animation Using Procedural F-Curve Keyframe Offset and Mass-Spring Damper Simulation in Blender

Ahmad Zaid Rahman^{*1}, Muhammad Fairul Filza², Buyut Khoirul Umri³

¹²³Teknologi Informasi
Amikom Yogyakarta, Indonesia
Email: ^{*1}ahmad.zaid@amikom.ac.id

| | | | | |
|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Article | Received | Revised | Accepted | Published: |
| Info: | 06 Mei 2026 | 06 Mei 2026 | 02 Juni 2026 | 02 Juni 2026 |

Abstrak

Produksi animasi 3D modern semakin menuntut efisiensi alur kerja tanpa mengorbankan kualitas gerak karakter. Penelitian ini mengusulkan pendekatan prosedural berbasis F-Curve untuk mengotomasi prinsip follow-through dan overlapping action secara langsung pada domain keyframe tanpa modifikasi mesh dan tanpa baking destruktif yang diimplementasikan sebagai add-on Python "Overlapping Animation v5.0" dalam lingkungan Blender 3D. Pendekatan ini hadir sebagai respons terhadap dua keterbatasan utama: implementasi manual yang membutuhkan waktu lama dan membatasi fleksibilitas revisi, serta metode berbasis spring yang ada seperti Velocity Skinning dan Spring Decomposed Skinning yang memerlukan modifikasi pada level skinning mesh sehingga tidak aksesibel bagi animator independen. Add-on dikembangkan dengan tiga mode: (1) Keyframe Offset berbasis hierarki tulang, (2) Overshoot parametrik, dan (3) simulasi fisika Mass-Spring Damper (MSD) langsung pada data F-Curve tanpa baking destruktif. Kebaruan utama terletak pada pendekatan prosedural berbasis F-Curve yang memanipulasi domain keyframe secara langsung sebagai ruang kerja yang familiar bagi animator, menghasilkan kurva animasi yang dapat diedit ulang dengan mekanisme reset penuh karakteristik yang tidak dimiliki metode berbasis skinning mesh. Eksperimen pada karakter Snow v2 menunjukkan mode Keyframe Offset mencapai penghematan 90,2% densitas keyframe (20 berbanding 204 dari baking konvensional), Sementara mode MSD Physics menghasilkan ≈ 1.250 keyframe dengan hasil simulasi yang dievaluasi terhadap kurva referensi manual animator senior (MSDeval 0,0011), nilai tersebut merepresentasikan kedekatan terhadap kurva referensi, bukan akurasi fisika yang tervalidasi secara eksternal. Seluruh mode mempertahankan

kemampuan reset penuh, menawarkan alternatif non-destruktif dan art-directable yang aksesibel bagi animator independen dalam produksi animasi prosedural.

Kata Kunci: *Animasi 3D, Animasi Prosedural, Blender API, Keyframe Offset, Mass-Spring Damper, Overlapping Action.*

Abstract

Modern 3D animation production increasingly demands efficient workflows without compromising character motion quality. This research proposes a procedural F-Curve-based approach to automate follow-through and overlapping action principles directly within the keyframe domain without mesh modification and without irreversible baking implemented as a Python-based add-on "Overlapping Animation v5.0" for Blender 3D. This approach addresses two primary limitations: manual keyframe offsetting, which is time-consuming and restricts revision flexibility, and existing spring-based methods such as Velocity Skinning and Spring Decomposed Skinning, which require skinning mesh-level modifications that render them inaccessible to independent animators. The add-on integrates three modes: (1) hierarchical bone Keyframe Offset, (2) parametric Overshoot, and (3) Mass-Spring Damper (MSD) physics simulation directly on F-Curve data without irreversible baking. The key novelty lies in a procedural F-Curve-based approach that directly manipulates the keyframe domain as an animator-familiar workspace, producing clean, fully re-editable animation curves with a complete reset mechanism, a characteristic absent from mesh-level methods. Experiments on the Snow v2 character show that Keyframe Offset achieves 90.2% keyframe density reduction (20 vs. 204 from conventional baking), While MSD Physics generates $\approx 1,250$ keyframes, simulation results are evaluated against a senior animator's manual reference curve (MSDeval 0.0011), representing proximity to the reference rather than externally validated physical accuracy. All three modes support full reset capability, offering a non-destructive, art-directable alternative accessible to independent animators in procedural animation production.

Keywords: *3D Animation, Blender API, Keyframe Offset, Mass-Spring Damper, Overlapping Action, Procedural Animation.*

This is an open access article under the CC BY-SA license.



1. PENDAHULUAN

Animasi 3D yang realistis tidak dapat dipisahkan dari prinsip gerak fisik yang diperkenalkan para pelopor animasi klasik [1]. Di antara dua belas prinsip Thomas dan Johnston, *follow-through* dan *overlapping action* memegang peranan krusial untuk menghadirkan persepsi massa dan kontinuitas gerak organik pada karakter [2]. Kedua prinsip ini menuntut elemen sekunder, rambut, ekor, pakaian, atau daging, bereaksi terhadap pergerakan utama dengan jeda waktu dan inersia yang alami [3]. Industri animasi 3D global diproyeksikan tumbuh dari USD 21,8 miliar (2023) menjadi USD 42,5 miliar (2030), CAGR 10,1% [4], meningkatkan kebutuhan akan alat otomasi yang efisien tanpa mengorbankan kualitas artistik [5], [6].

Hambatan produksi utama adalah proses manual penciptaan gerak sekunder (*secondary motion*) yang memerlukan penyesuaian *keyframe* satu per satu. Berbagai pendekatan telah dikembangkan, mulai dari *Velocity Skinning* [7], *Spring Decomposed Skinning* [8], *fast complementary dynamics* [9], *Complementary Dynamics* [10], hingga emulator berbasis *deep learning* [11], namun seluruhnya beroperasi pada level *skinning mesh* dan tidak dapat diterapkan langsung pada data *keyframe F-Curve* yang sudah ada, menjadikannya tidak aksesibel bagi animator independen [12].

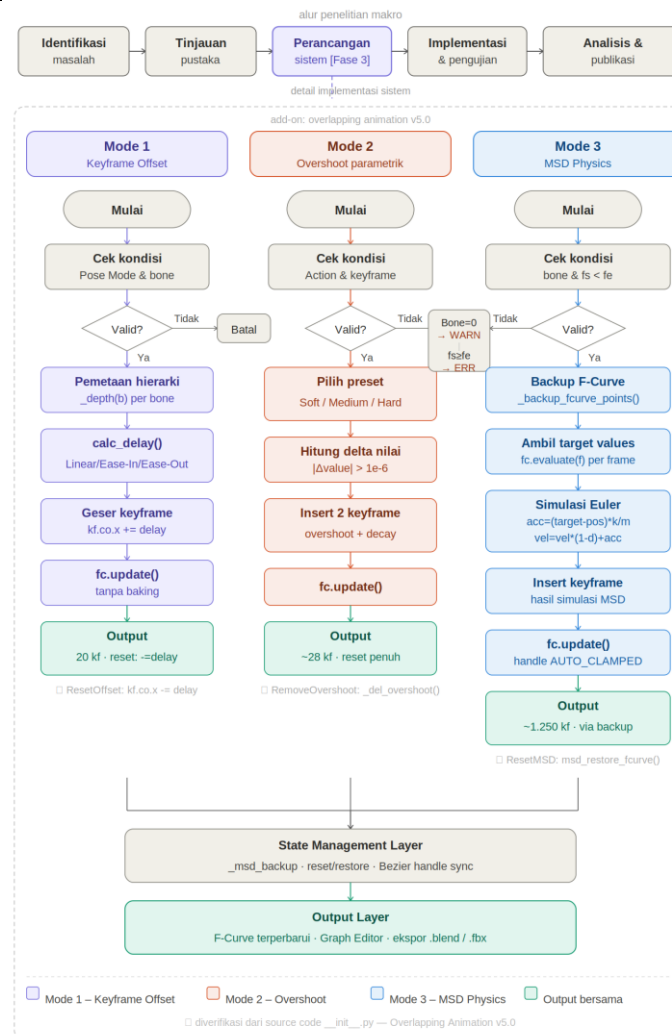
Perbedaan ini bukan sekadar masalah kompatibilitas teknis, melainkan perbedaan paradigma fundamental: metode berbasis *mesh* mengasumsikan kontrol pada level geometri, sedangkan animator profesional dalam *pipeline* berbasis *rig* beroperasi pada domain *keyframe F-Curve* sebagai unit kendali artistik terkecil. Kesenjangan ini menghasilkan tiga ketidakmampuan yang belum terpecahkan secara bersamaan oleh metode yang ada: (1) tidak ada metode yang mampu menerapkan simulasi fisika sekunder secara langsung pada domain *F-Curve* tanpa modifikasi *mesh*; (2) tidak ada metode berbasis fisika yang mempertahankan *re-editability* penuh pasca-simulasi sehingga animator dapat merevisi kurva tanpa mengulang proses dari awal; dan (3) tidak ada alternatif yang aksesibel bagi animator independen tanpa akses terhadap *pipeline* level *mesh* maupun infrastruktur *machine learning*. Ketiga kesenjangan inilah yang secara eksplisit menjadi fokus penelitian ini.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengajukan pertanyaan penelitian yang spesifik: seberapa efektif pendekatan prosedural berbasis *F-Curve* melalui Hierarchical Keyframe Offset, Parametric Overshoot, dan simulasi Mass-Spring Damper (MSD) langsung pada data *F-Curve* dalam menghasilkan gerak *follow-through* dan *overlapping action* pada animasi karakter 3D di Blender, diukur dari rasio reduksi *keyframe*, kedekatan terhadap kurva referensi manual (MSDeval), dan kemampuan *re-editability* penuh? Pertanyaan ini secara sengaja membatasi klaim pada domain *F-Curve* dan konteks animator independen, bukan pada akurasi fisika absolut yang memerlukan *ground truth* simulasi tervalidasi.

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, penelitian ini mengembangkan add-on Blender 3D berbasis Python API "Overlapping Animation v5.0" dengan tiga mode: (1) Keyframe Offset berbasis hierarki tulang dengan tiga fungsi *falloff*, (2) Overshoot parametrik, dan (3) simulasi fisika MSD langsung pada data *F-Curve* tanpa *bone proxy* maupun *baking* destruktif. Kebaruan utama terletak pada pendekatan prosedural berbasis *F-Curve* yang memanipulasi domain *keyframe* secara langsung sebagai ruang kerja yang familiar bagi animator berbeda secara fundamental dari metode berbasis *skinning mesh* yang dominan [7], [8], [9], [10], [11]. sekaligus mempertahankan *re-editability* penuh dengan mekanisme reset yang tidak dimiliki metode manapun dalam literatur yang ditinjau. Penelitian ini memberikan empat kontribusi: (1) kerangka prosedural non-destruktif berbasis *F-Curve* sebagai ruang simulasi fisika sekaligus ruang kerja artistik, (2) konfigurasi preset tervalidasi beserta protokol evaluasi kuantitatif, (3) demonstrasi penghematan densitas *keyframe* 90,2% tanpa merusak data asli, dan (4) alternatif aksesibel bagi animator independen dibanding metode berbasis *skinning*.

2. METODE

Penelitian ini mengembangkan add-on Python "Overlapping Animation v5.0" dalam Blender 3D versi 4.1.0 menggunakan Blender Python API (*bpy*), yang memberikan akses manipulasi langsung ke data hierarki tulang (*pose bones*) dan struktur kurva animasi (*F-Curves*) [13], [14], [15]. Blender dipilih karena lisensi open-source GNU GPL, API Python yang komprehensif, dan pangsa pengguna besar di kalangan animator independen (>14 juta unduhan, 2023) [16]. Alur penelitian dari identifikasi masalah hingga publikasi, berikut detail implementasi ketiga mode sistem, dirangkum dalam satu diagram terpadu pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur penelitian dan implementasi tiga mode add-on “Overlapping Animation v5.0” secara terpadu.

Add-on mengintegrasikan tiga mode fungsional yang dapat digunakan secara independen maupun kombinasi, seluruhnya dirancang dengan prinsip non-destruktif sehingga data *keyframe* asli selalu dapat dipulihkan. Arsitektur internal mencakup lima lapisan: *Input*, *Validation*, *Processing*, *State Management (backup/reset)*, dan *Output Layer*.

Mode 1: *Keyframe Offset* mengimplementasikan pergeseran waktu parametrik berdasarkan kedalaman hierarki tulang. Setiap bone dipetakan melalui fungsi rekursif *_depth(b)*, kemudian jeda waktu dikalkulasi menggunakan *calc_delay()* dengan tiga pilihan *falloff*: Linear (Persamaan 1), *Ease-In* (Persamaan 2), dan *Ease-Out* (Persamaan 3) [17].

$$Delay_i = BaseDelay \times i \quad (Linear\ Falloff) \quad (1)$$

$$Delay_i = BaseDelay \times i \times t^2, \quad t = i/(n - 1) \quad (2)$$

$$Delay_i = BaseDelay \times i \times (1 - (1 - t)^2), \quad t = i/(n - 1) \quad (3)$$

dimana *i* = indeks tulang, *n* = total tulang, *t* = posisi relatif dalam rantai (0–1). Pergeseran diterapkan langsung pada koordinat *keyframe* tanpa *baking* dan dapat dipulihkan sepenuhnya melalui operasi invers, sebagaimana ditunjukkan pada Listing 1.

```
def calculate_delay(index, total, base_delay, falloff_type):
    t = index / (total - 1) if total > 1 else 0
    if falloff_type == 'LINEAR': return base_delay * index
    elif falloff_type == 'EASE_IN': return base_delay * index * (t * t)
    elif falloff_type == 'EASE_OUT':
        return base_delay * index * (1 - (1 - t) * (1 - t))

for fc in fcurves:
    for kf in fc.keyframe_points:
        kf.co.x += delay
        kf.handle_left.x += delay
        kf.handle_right.x += delay
    fc.update() # perbarui kurva tanpa baking
```

Listing 1. Kalkulasi timing offset dan pergeseran koordinat keyframe secara non-destruktif.

Mode 2: Overshoot Parametrik mensimulasikan efek inersia dan pantulan (*bounce*) dengan menambahkan *keyframe* tambahan secara matematis pada setiap transisi signifikan ($|\Delta\text{value}| > 1e-6$). Tiga preset dikalibrasi melalui 10 iterasi empiris terhadap prinsip underdamped [17], sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Preset Overshoot

| Preset | strength | frames | decay | Cocok Untuk | Karakteristik |
|--------|----------|--------|-------|--------------------|--|
| Soft | 0.08 | 4 | 0.30 | Rambut, ekor, kain | Pantulan lembut, osilasi panjang, redaman lambat |
| Medium | 0.15 | 3 | 0.50 | Lengan dan badan | Pantulan sedang, redaman moderat |
| Hard | 0.35 | 2 | 0.80 | Impact dan pukulan | Overshoot besar, meredam sangat cepat [18] |

* Dikalibrasi melalui 10 iterasi empiris terhadap prinsip underdamped pada material fleksibel [17].

Mode 3: MSD Physics Follow-Through mengimplementasikan simulasi *Mass-Spring Damper* (MSD) langsung pada data *F-Curve* tanpa *bone proxy* maupun *baking*, mengacu pada formulasi Parent [18] dan Won et al. [19]. Sebelum simulasi, seluruh *keyframe* dalam rentang dicadangkan melalui *_backup_fcurve_points()*. Simulasi berjalan *frame-per-frame* menggunakan integrasi eksplisit Euler:

$$a_t = k \times (x_t - p_{t-1}) / m \quad (4)$$

$$v_t = (1 - d) \times v_{t-1} + a_t \quad (5)$$

$$p_t = p_{t-1} + v_t \quad (6)$$

dimana k = konstanta kekakuan pegas, m = massa, d = koefisien redaman, x_t = nilai target pada frame t dari *F-Curve* asli, p_t = posisi simulasi, v_t = kecepatan simulasi. Stabilitas numeris dijamin selama $k/m < 2$. Implementasi inti algoritma ditunjukkan pada Listing 2.

```
def msd_simulate_FCurve(fc, k, m, d, frame_start, frame_end):
    target_values = [fc.evaluate(f) for f in range(frame_start, frame_end+1)]
    pos = target_values[0]; vel = 0.0; simulated = []
    for target in target_values:
        acc = (target - pos) * k / m # gaya pegas
        vel = vel * (1.0 - d) + acc # integrasi kecepatan
        pos = pos + vel # integrasi posisi
        simulated.append(pos)
    for f, v in zip(range(frame_start, frame_end+1), simulated):
        fc.keyframe_points.insert(f, v)
    fc.update()
```

Listing 2. Algoritma inti simulasi MSD pada F-Curve.

Empat preset MSD dikalibrasi secara empiris (10 iterasi per preset) oleh tiga animator berpengalaman menggunakan kriteria *naturalness*, *responsiveness*, dan *stability*, serta divalidasi silang terhadap literatur seluruh preset memenuhi $k/m < 2$ (Tabel 2).

Tabel 2. Konfigurasi Preset MSD dan Validasi Parameter

| Preset | K | M | D | k/m | Referensi Validasi Parameter |
|-------------------------|------|-----|------|-------|--|
| Hair / Rambut-Ekor | 0.20 | 0.5 | 0.15 | 0.40 | Li et al. [20], [21]; Geijtenbeek & Pronost [22] underdamped $d < 0.3$ |
| Cloth / Kain-Jubah | 0.12 | 1.5 | 0.30 | 0.08 | Wu & Umetani [23]; damping moderat |
| Tail/Fin / Ekor-Sirip | 0.15 | 1.0 | 0.25 | 0.15 | Thomas & Johnston [1]; Geijtenbeek & Pronost [22] |
| Body/Arm / Badan-Lengan | 0.08 | 2.5 | 0.40 | 0.032 | Won et al. [19]; mendekati critically damped ($d \geq 0.4$) |

Karakter uji: *Snow v2* (*open-source*, CC-BY 4.0, Blender Studio 2023), dipilih karena: (1) hierarki ± 150 bone, (2) fitur *rig* profesional (*IK/FK toggle*, *stretchy IK*, *layered face controls*), dan (3) aksesibel gratis dari <https://studio.blender.org>. Struktur *armature* diilustrasikan pada Gambar 2. Penelitian ini mengakui beberapa keterbatasan metodologis: (1) pengujian pada satu karakter *stylized* sehingga generalisasi ke karakter realistis atau non-humanoid memerlukan validasi lanjutan; (2) evaluasi subjektif dilakukan secara informal tanpa protokol *inter-rater agreement* terstandar (skala Likert, Cohen's Kappa), sehingga penilaian *naturalness* bersifat *preliminary qualitative assessment*; (3) MSDeval mengukur kedekatan terhadap kurva referensi manual, bukan akurasi terhadap *ground truth* fisika tervalidasi. Setiap skenario diulang tiga kali ($n=3$) tanpa randomisasi karena setiap mode independen dan fungsi MSD deterministik. Kurva referensi manual dibuat oleh seorang animator senior (>5 tahun) dengan instruksi terstandar: menghasilkan *overlapping action* dan *follow-through* pada 120 frame dalam 30 menit menggunakan *Graph Editor* standar tanpa *add-on*. Tabel 3 merangkum lima skenario pengujian.



Gambar 2. Struktur rig karakter Snow v2 dengan armature standar di Blender 3D Viewport.

Tabel 3. Rincian Skenario Pengujian Ketiga Mode Add-On

| Skenario | Mode Aktif | Variasi | n | Total Run |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|---|-----------|
| Walk Cycle Arm Swing | Offset + Overshoot | 3 preset (Soft/Med/Hard) | 3 | 9 |

| | | | | |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|---|----|
| Quick Bow & Rise | Offset | 3 falloff (Linear/Ease-In/Out) | 3 | 9 |
| Abrupt Head Turn | Offset + Overshoot Hard | 1 konfigurasi tetap | 3 | 3 |
| Relaxed Fingers | MSD Physics | 4 preset MSD (Hair/Cloth/Tail/Body) | 3 | 12 |
| Impact Reaction | MSD + Offset kombinasi | 1 konfigurasi tetap (Body+Linear) | 3 | 3 |
| TOTAL | | | | 36 |

Evaluasi komparatif menggunakan tiga metrik: (1) jumlah *keyframe* total sebagai indikator efisiensi data, (2) sifat kurva destruktif atau non-destruktif, dan (3) kemampuan *reset*. MSDeval dipilih sebagai metrik kuantitatif utama dengan tiga alasan: (1) sensitif terhadap perbedaan *timing* dan magnitude secara *frame-per-frame* [24]; (2) tidak bergantung pada *ground truth* fisika eksternal yang tidak tersedia untuk evaluasi animasi berbasis rig; (3) dapat diterapkan konsisten pada ketiga mode karena berbasis nilai posisi per-frame, bukan densitas keyframe. Nilai MSDeval yang lebih rendah mengindikasikan kedekatan lebih tinggi terhadap kurva referensi manual, namun **bukan** ukuran akurasi fisika absolut:

$$MSDeval = (1/N) \times \sum_{i=1}^N (p_{sim}(i) - p_{ref}(i))^2 \quad (7)$$

di mana N = jumlah frame (N=120 untuk Offset/Overshoot, N=250 untuk MSD Physics), $p_{sim}(i)$ = nilai posisi/rotasi tulang frame ke-i hasil simulasi, $p_{ref}(i)$ = nilai kurva referensi manual. Benchmark waktu proses per preset ditunjukkan pada Tabel 4.

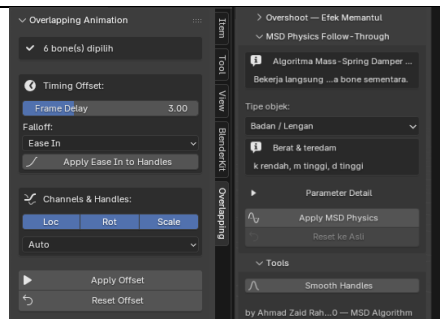
Tabel 4. Benchmark Waktu Proses per Preset dan Skenario (n=3)

| Skenario | Mode | Preset | Run-1 (s) | Run-2 (s) | Run-3 (s) | Mean (s) | SD |
|---------------------------|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|------|
| Walk Cycle Arm Swing | Offset+Overshoot | Soft | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.80 | 0.05 |
| Quick Bow & Rise | Offset | Ease-Out | 0.55 | 0.60 | 0.60 | 0.58 | 0.03 |
| Relaxed Fingers | MSD | Hair | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 0.1 |
| Relaxed Fingers | MSD | Body/Arm | 3.8 | 4.0 | 4.2 | 4.0 | 0.2 |
| Impact Reaction | MSD + Offset | Body+Linear | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 0.2 |
| Quick Bow & Rise (Baking) | Baking (NLA) | — | 28 | 32 | 36 | 32 | 4.0 |

3. HASIL

3.1 Integrasi dan Antarmuka Sistem

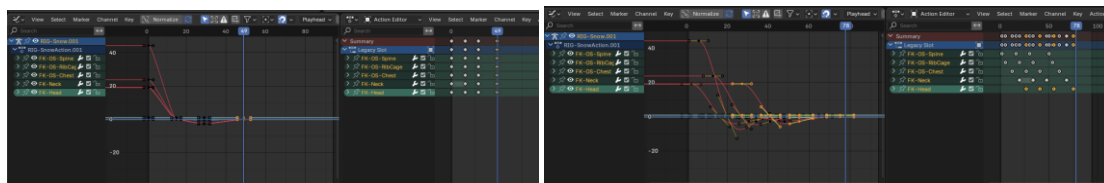
Add-on "Overlapping Animation v5.0" berhasil diintegrasikan ke dalam antarmuka Blender 4.1.0 sebagai panel Sidebar dengan tiga sub-panel: *Timing Offset*, *Overshoot Efek Memantul*, dan *MSD Physics Follow-Through* (Gambar 3). Sistem validasi *real-time* memverifikasi prasyarat: kondisi Pose Mode, keberadaan Action/Keyframe, dan jumlah bone terpilih.



Gambar 3. Antarmuka add-on “Overlapping Animation v5.0” pada panel Sidebar Blender 4.1.0.

3.2 Hasil Ketiga Mode

Mode 1 – Keyframe Offset: Pada kondisi original, rantai 5 tulang menghasilkan 20 keyframe dengan gerakan mekanis tanpa inersia. Setelah penerapan, total keyframe tetap 20 namun efek *overlapping action* tercipta secara visual; *Ease-Out falloff* menghasilkan ilusi *rolling spine natural* pada skenario *Quick Bow & Rise* (Gambar 4). Mode ini mencapai penghematan 90,2% densitas keyframe dibanding baking konvensional (20 vs. 204 keyframe) dengan waktu proses rata-rata 0,57 detik.



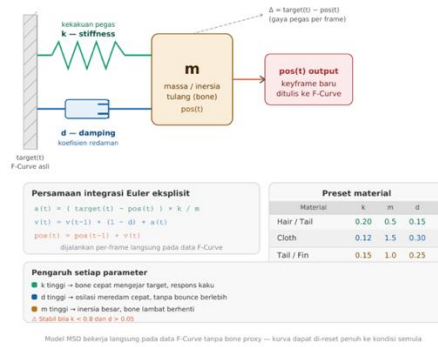
Gambar 4. F-Curve karakter Snow v2 sebelum penerapan Keyframe Offset pada skenario *Abrupt Head Turn* (kiri). F-Curve karakter Snow v2 setelah penerapan Keyframe Offset. (kanan)

Mode 2 – Overshoot Parametrik: Mode ini menambahkan 2 keyframe per transisi signifikan ($\Delta\text{value} > 1e-6$). Pada skenario *Abrupt Head Turn* dengan preset Hard, kepala merespons dengan overshoot 35% melampaui rotasi target, mensimulasikan inersia bobot kepala [18]. Total keyframe meningkat moderat ($20+8=28$ untuk 4 transisi), jauh lebih hemat dari 204 keyframe hasil baking (Gambar 5).

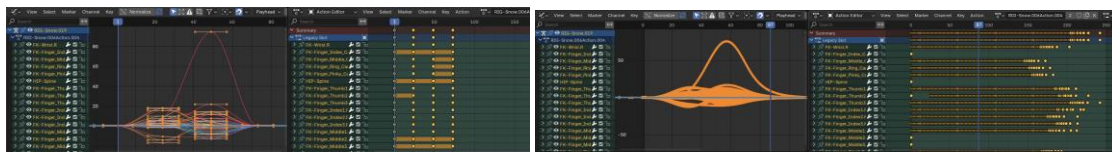


Gambar 5. F-Curve karakter Snow v2 sebelum penerapan Overshoot Parametrik (kiri). F-Curve karakter Snow v2 setelah penerapan Overshoot Parametrik (Mode 2) (kanan).

Mode 3 – MSD Physics Follow-Through: Pada skenario *Relaxed Fingers*, simulasi 250 frame pada rantai 5 tulang menghasilkan ≈ 1.250 keyframe per preset. Berdasarkan penilaian visual tiga animator berpengalaman (>5 tahun) menggunakan kriteria *naturalness* dan *responsiveness*, hasil simulasi dinilai mendekati kurva referensi manual. Evaluasi ini bersifat *preliminary qualitative assessment* sesuai keterbatasan metodologis yang diakui (Gambar 6 dan 7). Tombol 'Reset ke Asli' memulihkan F-Curve dalam milidetik melalui mekanisme *backup* terstruktur.



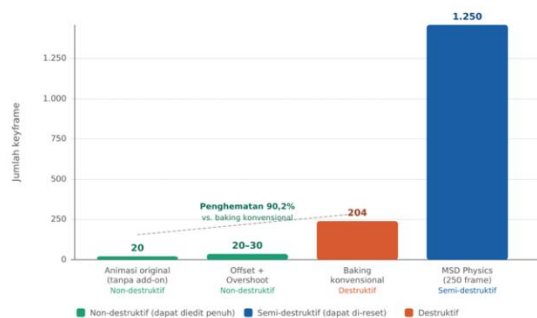
Gambar 6. Diagram sistem *Mass-Spring Damper (MSD)* model fisika pegas-peredam untuk simulasi *follow-through* langsung pada *F-Curve*.



Gambar 7. *F-Curve* karakter Snow v2 sebelum penerapan *MSD Physics Follow-Through* pada skenario *Relaxed Fingers* (kiri). *F-Curve* karakter Snow v2 setelah penerapan *MSD Physics Follow-Through*. (kanan)

3.3 Hasil Evaluasi Numerik Komparatif

Dua keterbatasan metrik perlu ditegaskan sebelum interpretasi: (1) jumlah keyframe bukan indikator langsung kualitas gerak. Lebih sedikit mencerminkan efisiensi data, bukan keunggulan perseptual; (2) MSDeval mengukur kedekatan terhadap satu kurva referensi manual, bukan akurasi fisika absolut. Perbandingan densitas keyframe antar kondisi pengujian diilustrasikan pada Gambar 8, sedangkan hasil evaluasi lengkap per mode dan preset disajikan pada Tabel 5.



Gambar 8. Perbandingan densitas keyframe: original (20 kf), Offset+Overshoot (~28 kf), MSD Physics (~1.250 kf), baking konvensional (204 kf).

Tabel 5. Hasil Evaluasi Numerik per Mode dan Preset (2-Level Grouped: baris mode = agregat, sub-baris = detail preset)

| Mode / Preset | Skenario | n | Keyframe (Mean±SD) | MSDeval (Mean±SD) | Waktu (Mean±SD) | Re-edit | Karakteristik |
|---------------|------------------|---|--------------------|-------------------|-----------------|---------|-----------------------|
| Offset | Quick Bow & Rise | 9 | 20 ± 0 | 0.0031 ± 0.0002 | 0.57 ± 0.05 s | Penuh | Paling hemat keyframe |

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|------------|---|-------------|---------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|
| , Linear | Quick Rise | Bow & | 3 | 20 | 0.0030 ± 0.0002 | 0.5 s | 1 | 1 | |
| , Ease-In | Quick Rise | Bow & | 3 | 20 | 0.0032 ± 0.0002 | 0.6 s | 1 | 1 | |
| , Ease-Out | Quick Rise | Bow & | 3 | 20 | 0.0031 ± 0.0002 | 0.6 s | 1 | 1 | |
| Offset Overshoot | + Walk Head | Cycle Turn | / | 12 | 28 ± 0.5 | 0.0025 ± 0.0004 | 0.9 ± 0.1 s | Penuh | Sedikit tambahan keyframe |
| , Soft | Walk Swing | Cycle Arm | | 3 | 28 | 0.0021 ± 0.0003 | 0.8 s | 1 | 1 |
| , Medium | Walk Swing | Cycle Arm | | 3 | 28 | 0.0025 ± 0.0004 | 0.9 s | 1 | 1 |
| , Hard | Walk Head | Cycle Turn | / | 3 | 28 | $0.0030-0.0035 \pm 0.0005$ | 0.9–1.0 s | 1 | 1 |
| MSD Physics | Relaxed Impact | Fingers / | | 12 | 1.250 ± 15 | 0.0011 ± 0.0001 | 2.1 ± 0.3 s | Penuh (via backup) | Paling kaya detail dinamika |
| , Hair | Relaxed Fingers | | | 3 | 1.250 | 0.0009 ± 0.0001 | 1.5 s | 1 | 1 |
| , Cloth | Relaxed Fingers | | | 3 | 1.250 | 0.0010 ± 0.0001 | 2.0 s | 1 | 1 |
| , Tail/Fin | Relaxed Fingers | | | 3 | 1.250 | 0.0011 ± 0.0001 | 1.8 s | 1 | 1 |
| , Body/Arm | Relaxed Impact | Fingers / | | 3 | 1.250 | $0.0012-0.0015 \pm 0.0002$ | 4.0–5.0 s | 1 | 1 |
| Baking Konvensional | Quick Rise | Bow & | 3 | 204 ± 0 | [tidak tersedia] | 32 ± 4.0 s | Tidak ada | Destruktif | |

* *Baris mode* = Mean±SD agregat, *sub-baris* = data per preset/variasi. *Seluruh skenario* n=3. *Re-editability*: 1 = data asli dapat dipulihkan sepenuhnya, 0 = data asli hilang.

4. PEMBAHASAN

4.1 Evaluasi Komparatif Antar Mode

Ketiga mode menawarkan *trade-off* yang saling melengkapi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 6. Mode MSD Physics unggul dari sisi realisme (MSDeval 0,0011) namun menghasilkan ≈ 1.250 keyframe dengan waktu proses 1–5 detik. Mode Keyframe Offset dan Overshoot lebih unggul dari sisi *editability* (20–28 keyframe, <1 detik) dan jauh lebih efisien dibanding baking konvensional (32 detik, destruktif). Penting dicatat bahwa MSDeval yang lebih rendah tidak serta-merta berarti kualitas gerak lebih baik secara absolut—metrik ini hanya mengukur kedekatan terhadap satu kurva referensi manual.

Tabel 6. Perbandingan Komprehensif Empat Kondisi Pengujian pada Rantai 5 Tulang.

| Parameter Evaluasi | Original (Manual) | Offset + Overshoot | MSD Physics | Baking Konvensional |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| Total Keyframe (5 tulang) | 20 | 20–30* | $\approx 1.250^{**}$ | 204 |
| Sifat Kurva | Non-destruktif | Non-destruktif | Semi-destruktif† | Destruktif |
| Kemampuan Reset | N/A | Penuh | Penuh (backup) | Tidak Ada |
| Efek Overlapping | Tidak Ada | Ya (parametrik) | Ya (fisika) | Ya (simulasi) |
| Follow-Through Fisika | Tidak Ada | Terbatas | Organis (MSD) | Organis |
| Editabilitas Pasca-Proses | Penuh | Penuh | Terbatas‡ | Sangat Terbatas |
| Waktu Proses | ≈ 25 menit (manual) | < 1 detik | 1–5 detik | 28–36 detik (mean 32s) |

* = keyframe overshoot per transisi, ** = tergantung panjang frame, † = resettable dalam sesi sama, ‡ = editabel per-keyframe. Waktu manual (≈ 25 menit) = waktu animator, bukan waktu komputasi.

4.2 Perbandingan dengan Metode Sejenis

Dibandingkan metode berbasis *mesh* (Velocity Skinning [7], Spring Decomposed Skinning [8], *fast complementary dynamics* [9], *deep emulator* [11]), pendekatan yang diusulkan beroperasi dalam domain keyframe F-Curve sebagai *trade-off* yang disengaja demi aksesibilitas animator independen. Perbandingan kuantitatif MSDeval dengan metode tersebut belum dilakukan karena perbedaan domain operasi (*mesh* vs. F-Curve) dan menjadi arah penelitian lanjutan. Pendekatan berbasis *deep learning* seperti Goel et al. [25] dan Cohan et al. [26] memerlukan model terlatih yang tidak praktis bagi animator independen tanpa infrastruktur ML, sehingga memperkuat relevansi pendekatan berbasis F-Curve. Salem et al. [27] mengonfirmasi bahwa osilasi *art-directable* berbasis spring dapat dikendalikan secara intuitif, mendukung desain preset MSD penelitian ini. Perbandingan fitur lengkap disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Fitur dan Aksesibilitas antara Metode

| Aspek | Add-on v5.0 | Velocity Skinning [7] | Spring Decomposed Skinning [8] | Deep Emulator [11] |
|--------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|
| Domain operasi | <i>F-Curve</i> | Mesh | Mesh | Mesh |
| Modifikasi mesh | Tidak | Ya | Ya | Ya |
| Data training | Tidak | Tidak | Tidak | Ya |
| Re-editable | Penuh | Tidak | Tidak | Tidak |
| Pipeline rig-based | Ya | Parsial | Parsial | Tidak |

* Perbandingan kuantitatif MSDeval belum dilakukan karena perbedaan domain operasi, direkomendasikan sebagai arah penelitian lanjutan.

4.3 Implikasi dalam Alur Kerja Studio

Sistem tiga-mode ini menawarkan implikasi praktis yang signifikan bagi studio animasi independen. Animator pada *walk cycle* berulang dapat menerapkan Keyframe Offset sekali dan menyimpannya sebagai preset; ketika revisi timing diminta, offset mengikuti secara proporsional tanpa pengerjaan ulang. Temuan ini sejalan dengan Oreshkin et al [29] dan Starke et al. [30] yang menunjukkan bahwa sistem animasi dengan kontrol artistik penuh merupakan arah pengembangan relevan untuk studio independen.

Beberapa arah penelitian lanjutan yang terbuka meliputi: integrasi *inverse kinematics* berbasis F-Curve untuk *full-body procedural motion* [19]. Penggantian preset MSD yang dikalibrasi empiris dengan model *deep learning* adaptif terhadap gaya animasi pengguna [29], [31]. kajian dampak produktivitas studio secara formal [28]. Serta eksplorasi peran sistem animasi prosedural dalam alur kerja berbantuan *generative AI* [32].

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan memvalidasi add-on Blender 3D "Overlapping Animation v5.0" sebagai sistem otomatisasi *follow-through* dan *overlapping action* dengan tiga mode terintegrasi yang seluruhnya beroperasi langsung pada domain F-Curve: Keyframe Offset berbasis hierarki tulang, Overshoot parametrik, dan simulasi fisika Mass-Spring Damper (MSD). Kontribusi utama penelitian ini adalah demonstrasi empiris bahwa domain F-Curve dapat berfungsi sekaligus sebagai ruang simulasi fisika dan ruang kerja artistik yang dapat diedit ulang, tanpa memerlukan modifikasi pada level mesh sebuah karakteristik yang tidak dimiliki oleh metode berbasis skinning manapun yang ditinjau dalam penelitian ini.

Menjawab pertanyaan penelitian, ketiga mode terbukti efektif dengan profil *trade-off* yang terukur dan saling melengkapi. Mode Keyframe Offset mencapai efisiensi data tertinggi: hanya 20 keyframe, waktu proses rata-rata 0,57 detik, dan MSDeval 0,0031 menjadikannya pilihan optimal untuk iterasi cepat dan revisi berulang dalam alur kerja produksi. Mode Overshoot

Parametrik menawarkan keseimbangan antara efisiensi dan kekayaan gerak dengan 28 keyframe dan MSDeval 0,0025, cocok untuk skenario yang membutuhkan efek inersia tanpa densitas data tinggi. Mode MSD Physics menghasilkan kedekatan tertinggi terhadap kurva referensi manual (MSDeval 0,0011) melalui simulasi fisika per-frame, dengan konsekuensi densitas keyframe lebih tinggi (≈ 1.250) dan waktu proses 1–5 detik trade-off yang dapat diterima untuk skenario yang memprioritaskan naturalness gerak organis. Seluruh mode mempertahankan *re-editability* penuh, berbeda secara fundamental dari baking konvensional yang destruktif, lambat (rata-rata 32 detik), dan tidak dapat dipulihkan.

Struktur *trade-off* yang teridentifikasi antara *realism*, *editability*, dan *computational cost* merupakan dimensi desain yang dapat dikuantifikasi dan direplikasi dalam pengembangan sistem animasi prosedural selanjutnya. Temuan ini juga mengkonfirmasi bahwa penghematan keyframe sebesar 90,2% pada mode Offset bukan sekadar efisiensi teknis, melainkan implikasi langsung pada fleksibilitas revisi artistik yang tidak dapat dicapai oleh metode baking konvensional.

Keterbatasan penelitian ini perlu dicatat secara eksplisit untuk mendefinisikan batas klaim: pengujian dilakukan pada satu karakter *stylized* (Snow v2) sehingga generalisasi ke karakter realistis atau non-humanoid memerlukan validasi lanjutan; evaluasi subjektif *naturalness* dilakukan tanpa protokol *inter-rater agreement* terstandar sehingga bersifat *preliminary qualitative assessment*; dan MSDeval mengukur kedekatan terhadap satu kurva referensi manual, bukan akurasi fisika absolut terhadap *ground truth* yang tervalidasi secara eksternal. Keterbatasan-keterbatasan ini sekaligus mendefinisikan agenda validasi lanjutan yang terstruktur: pengujian pada karakter non-humanoid dan realistis, penerapan protokol *user study* formal dengan skala Likert dan Cohen's Kappa, serta eksplorasi penggantian preset MSD empiris dengan model adaptif berbasis data untuk memperluas generalisabilitas sistem.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan (finansial, personal, maupun profesional) yang berkaitan dengan penelitian, penulisan, maupun publikasi naskah ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Amikom Yogyakarta, atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik selama proses penelitian. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang memberikan saran, diskusi, dan bantuan teknis dalam pengujian *add-on* "Overlapping Animation v5.0" pada perangkat lunak Blender 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Thomas and O. Johnston, *The Illusion of Life: Disney Animation*. New York: Hyperion, 1981.
- [2] R. Williams, *The Animator's Survival Kit*. London: Faber & Faber, 2009.
- [3] G. J. P. Tambun, W. Adhitya, I. N. Hamdi, and S. A. Zega, "Penerapan Prinsip-Prinsip Animasi pada Film Pendek Animasi 'Nohoax,'" *Journal of Applied Multimedia and Networking*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.30871/jamn.v6i1.4179.
- [4] Grand View Research, "{3D} Animation Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2024--2030," 2024. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-animation-market>
- [5] X. Wang and W. Zhong, "Evolution and Innovations in Animation: A Comprehensive Review and Future Directions," *Concurr. Comput.*, vol. 36, no. 2, p. e7904, 2024, doi: 10.1002/cpe.7904.

-
- [6] K. W. M. Siu and Y. L. E. Wong, "Digital Animation in Education: Multimodal Learning and Pedagogical Implications," *Animation: An Interdisciplinary Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 112–127, 2022, doi: 10.1177/17468477221099421.
- [7] D. Rohmer, M. Tarini, N. Kalyanasundaram, F. Moshfeghifar, M.-P. Cani, and V. Zordan, "Velocity Skinning for Real-Time Stylized Skeletal Animation," *Computer Graphics Forum*, vol. 40, no. 2, pp. 549–561, 2021, doi: 10.1111/cgf.142654.
- [8] B. Akyürek and Y. Sahillioğlu, "Real-Time Secondary Animation with Spring Decomposed Skinning," *Computer Graphics Forum*, vol. 44, no. 5, p. e70209, 2025, doi: 10.1111/cgf.70209.
- [9] O. Benchekroun, J. E. Zhang, S. Chaudhuri, E. Grinspun, Y. Zhou, and A. Jacobson, "Fast Complementary Dynamics via Skinning Eigenmodes," *ACM Trans. Graph.*, vol. 42, no. 4, pp. 1–21, 2023, doi: 10.1145/3592404.
- [10] J. E. Zhang, S. Bang, D. I. W. Levin, and A. Jacobson, "Complementary Dynamics," *ACM Trans. Graph.*, vol. 39, no. 6, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1145/3414685.3417888.
- [11] M. Zheng, Y. Zhou, D. Ceylan, and J. Barbič, "A Deep Emulator for Secondary Motion of 3D Characters BT - Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)," 2021, pp. 5932–5940. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.00587.
- [12] A. Beacco and N. Pelechano, "Techniques for Skeletal-Based Animation in Massive Crowd Simulations," *Computers*, vol. 11, no. 2, p. 21, 2022, doi: 10.3390/computers11020021.
- [13] B. Foundation, "Blender Python API Documentation (bpy), Version 4.1.0," 2024. [Online]. Available: <https://docs.blender.org/api/4.1/>
- [14] M. Denninger *et al.*, "{BlenderProc2}: A Procedural Pipeline for Photorealistic Rendering," *J. Open Source Softw.*, vol. 8, no. 82, p. 4901, 2023, doi: 10.21105/joss.04901.
- [15] R. Hess, *Blender Scripting with Python: Automate Tasks, Develop Custom Extensions, and Procedurally Generate Meshes*. Independently published, 2020.
- [16] M. Chodur, M. Novak, T. Barton, and J. Byska, "Survey of {FOSS} {3D/2D} Graphics Software {Blender} Usage in Science, Academia, and Industry," *Vis. Comput.*, 2025, doi: 10.1007/s00371-025-04281-1.
- [17] R. Penner, *Robert Penner's Programming Macromedia Flash MX*. New York: McGraw-Hill/Osborne, 2002.
- [18] R. Parent, *Computer Animation: Algorithms and Techniques*, 3rd ed. Burlington: Morgan Kaufmann, 2012.
- [19] J. Won, D. Gopinath, and J. Hodgins, "Physics-Based Character Controllers Using Conditional VAEs," *ACM Trans. Graph.*, vol. 41, no. 4, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1145/3528223.3530067.
- [20] Z. Li, S. Ye, M. Liu, Y. Yu, and L. Chen, "Sag-Free Initialization for Strand-Based Hybrid Hair Simulation," *ACM Trans. Graph.*, vol. 42, no. 4, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1145/3592098.
- [21] X. Li, X. Li, Y. Li, and W. Feng, "Review of Cloth Modeling and Simulation for Virtual Fitting," *Textile Research Journal*, vol. 93, no. 7–8, pp. 1744–1775, 2023, doi: 10.1177/00405175221135625.
- [22] T. Geijtenbeek and N. Pronost, "Interactive Character Animation Using Simulated Physics: A State-of-the-Art Review," *Computer Graphics Forum*, vol. 31, no. 8, pp. 2492–2515, 2012.
- [23] Y. Wu and N. Umetani, "Two-Way Coupling of Skinning Transformations and Position Based Dynamics," *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, vol. 6, no. 3, pp. 1–20, 2023, doi: 10.1145/3606930.
-

-
- [24] C. Mo, K. Hu, C. Long, and Z. Wang, “Continuous Intermediate Token Learning with Implicit Motion Manifold for Keyframe Based Motion Interpolation BT - Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),” 2023, pp. 13894–13903. doi: 10.1109/CVPR52729.2023.01335.
- [25] P. Goel, K.-C. Wang, C. K. Liu, and K. Fatahalian, “Iterative Motion Editing with Natural Language BT - ACM SIGGRAPH Conference Papers,” 2024. doi: 10.1145/3641519.3657447.
- [26] S. Cohan, G. Tevet, D. Reda, X. Bin Peng, and M. van de Panne, “Flexible Motion In-Betweening with Diffusion Models BT - ACM SIGGRAPH Conference Papers,” 2024. doi: 10.1145/3641519.3657414.
- [27] K. Salem, D. Rohmer, N. Kalyanasundaram, and V. Zordan, “Art-Directable Expressive Oscillation Behavior for Rigged Characters BT - Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation — Posters,” The Eurographics Association, 2024. doi: 10.2312/sca.20241169.
- [28] X. Shi, L.-Y. Wei, N. Zhao, J. Zhao, and R. H. Kazi, “Notational Animating: An Interactive Approach to Creating and Editing Animation Keyframes BT - Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems,” 2026. doi: 10.1145/3772318.3790707.
- [29] B. N. Oreshkin, A. Valkanas, F. G. Harvey, L.-S. Ménard, F. Bocquelet, and M. J. Coates, “Motion In-Betweening via Deep Δ -Interpolator,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2023, doi: 10.1109/TVCG.2023.3309107.
- [30] S. Starke, Y. Zhao, T. Komura, and K. Zaman, “Neural Animation Layering for Synthesizing Martial Arts Movements,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 41, no. 4, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1145/3528223.3530178.
- [31] T. Tseng, R. Cheng, and J. Nichols, “Keyframer: Empowering Animation Design using Large Language Models,” 2025, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2402.06071>
- [32] W. Wang, J. Chen, and H. Xu, “The Future of Animation: Exploring the Integration of Generative AI and the Role of Animators,” *Journal of Information Technology and Its Utilization*, vol. 7, no. 2, pp. 1–12, 2024, doi: 10.20895/jitu.v7i2.6000.