

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-03>

УДК 004.9

Кулик Юрій-Марко Романович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0006-1121-3302>

Батюк Анатолій Євгенович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-7650-7383>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОГО ГЕНЕРУВАННЯ ТАКТИЛЬНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ У ВІРТУАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Кулик Ю.Р., Батюк А.Є. Розроблення та реалізація методу автоматичного генерування тактильного зворотного зв'язку у віртуальному середовищі. У статті представлено метод автоматичного генерування тактильного зворотного зв'язку у віртуальному середовищі на основі фізичних властивостей матеріалів тривимірних об'єктів без ручного задання ефектів. Запропонована система реалізована у середовищі рушія Source та платформи Garry's Mod із застосуванням мови Lua. В основу розробленого підходу покладено концепцію синтезу фізичного дескриптора сцени: кожен об'єкт віртуальної сцени автоматично класифікується за матеріальним класом (метал, дерево, скло, пластик, органіка, бетон, тканина, рідина), після чого для нього обчислюються параметри щільності, тертя та пружності, що слугують вхідними даними для математичної моделі генерування зворотного тактильного сигналу. Математична модель перетворює фізичні характеристики матеріалу та силу взаємодії у три параметри вібраційного імпульсу: частоту, амплітуду та тривалість, при цьому більш тверді матеріали генерують високочастотні короткочасні сигнали, а м'які - низькочастотні тривалі. Для кожного типу взаємодії (підбирання, викидання, зіткнення об'єктів, дотик до об'єкту) передбачено спеціальний модулятор, що масштабує базовий сигнал за амплітудою та тривалістю з гарантуванням мінімального відчутного імпульсу. Реалізовано конвеєр синтезу сцени з розподілом процесорного часу, кільцевий буфер для запису взаємодій. Запропонований метод усуває необхідність ручного налаштування тактильних ефектів для кожного об'єкта та забезпечує адаптивний відгук, що відповідає фізичним властивостям матеріалів у сцені.

Ключові слова: віртуальна реальність, зворотній зв'язок, синтез сцени, фізичний дескриптор, Garry's Mod, Lua, VR-взаємодія.

Kulyk, Y., Batiuk, A. Development and implementation of the method of automatic tactile feedback generation in a virtual environment. This paper presents a method for automatic generation of tactile feedback in a virtual environment based on physical properties of three-dimensional object materials without manual configuration of haptic effects. The proposed system is implemented within the Source engine framework and the Garry's Mod platform using the Lua language. The developed approach is founded on the concept of physical scene descriptor synthesis: each virtual scene's object is automatically classified by material class (metal, wood, glass, plastic, organic, concrete, fabric, liquid), after which its density, friction, and restitution parameters are computed to serve as input for the haptic signal generation mathematical model. The mathematical model converts material physical characteristics and interaction force into three vibration impulse parameters: frequency, amplitude, and duration, where harder materials generate higher-frequency short-duration signals and softer materials generate lower-frequency prolonged ones. For each interaction type (pickup, throw, objects collision, object touch) a dedicated modulator scales the base signal by amplitude and duration while guaranteeing a minimum perceptible impulse. A six-stage scene synthesis pipeline with CPU time budgeting, a ring-buffer interaction recorder. The proposed method eliminates the need for manual haptic effect configuration per object and provides adaptive feedback corresponding to the physical properties of materials in the scene.

Keywords: virtual reality, feedback, scene synthesis, physical descriptor, Garry's Mod, Lua, VR interaction.

Постановка проблеми. Засоби віртуальної реальності (VR) знаходять дедалі ширше застосування у навчальних, розважальних та промислових додатках, а якість занурення користувача у синтетичне середовище значною мірою визначається повнотою мульти-сенсорного зворотного зв'язку. Зорова та звукова складові сучасних VR-систем досягли високого ступеня реалізму, тоді як тактильний зворотній зв'язок, можливість фізично «відчутти» матеріал, масу та динаміку об'єктів, залишається суттєво нерозв'язаним у більшості програмних рішень. Сучасні VR-контролери оснащені лінійними двигунами, здатними генерувати вібраційні імпульси з контрольованою частотою, амплітудою та тривалістю, однак стандартні програмні засоби надають розробникам лише примітивні програмні інтерфейси для їхньої активації, не пов'язуючи параметри вібрацій із фізичними властивостями ігрового середовища. Наслідком цього є або повна відсутність тактильного відгуку, або одноманітні заздалегідь записані ефекти, не пов'язані з реальними матеріальними характеристиками об'єктів, з якими взаємодіє гравець. Проблема загострюється у відкритих платформах і модифікаційних фреймворках, таких як Garry's Mod на базі рушія Source, де контент може генеруватися динамічно, а кількість та різноманіття об'єктів у сцені не може бути передбачена розробником заздалегідь, що унеможливорює ручне задання тактильних ефектів для кожного об'єкта окремо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у галузі тактильного зворотного зв'язку у VR охоплюють широкий спектр підходів: від зовнішніх екзоскелетних пристроїв із силовим зворотним зв'язком до вібраційних контролерів із програмованими патернами. Роботи у галузі фізично коректного відтворення звуку та тактильних відчуттів вказують на тісний зв'язок між механічними властивостями матеріалів та суб'єктивними тактильними відчуттями: тверді матеріали сприймаються як джерела високочастотних вібрацій, тоді як м'які породжують тривалі низькочастотні коливання [1, 2]. Дослідження у сфері тактильного зворотного зв'язку виявили, що навіть спрощені вібраційні моделі здатні суттєво підвищити відчуття присутності та достовірності взаємодії в VR-середовищах, якщо параметри вібрацій пов'язані з фізичними властивостями матеріалів [3]. Тим не менш переважна більшість наявних рішень передбачає ручне задання тактильних патернів у формі бібліотек ефектів або детермінованих правил для кінцевого набору матеріалів, що є непрактичним у відкритих динамічних середовищах [4]. Підходи на основі машинного навчання для автоматичної класифікації матеріалів за візуальними ознаками або акустичними характеристиками удару досліджуються у спеціалізованих системах, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів та великих навчальних наборів даних, що обмежує їхнє застосування в умовах ігрових рушіїв реального часу [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри прогрес у галузі тактильного відображення, задача автоматичного генерування тактильного зворотного зв'язку у відкритих VR-середовищах на основі наявних фізичних метаданих рушія залишається недостатньо вирішеною. Існуючі ігрові рушії, зокрема Source, можуть зберігати у фізичній підсистемі значний обсяг інформації про механічні властивості матеріалів: масу, коефіцієнти тертя та пружності, щільність, тип поверхні. Проте ці дані традиційно використовуються для коректної фізичної симуляції і не транслюються безпосередньо у параметри тактильного відгуку. Така концептуальна прогалина між фізичною моделлю сцени та сенсорним виходом контролера і становить нерозв'язану задачу, на подолання якої спрямоване дане дослідження.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення та реалізація методу автоматичного генерування тактильного зворотного зв'язку у віртуальному середовищі, що базується виключно на фізичних метаданих, та не потребує ручного задання ефектів для жодного об'єкта сцени, при цьому забезпечуючи коректний та суб'єктивно правдоподібний тактильний відгук у режимі реального часу.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розробити структурування матеріальних класів та визначити для кожного з них фізичні параметри, на основі яких буде формуватися тактильний сигнал, сформулювати та верифікувати математичну модель перетворення фізичних характеристик матеріалу та сили взаємодії у параметри вібраційного імпульсу, реалізувати конвеєр синтезу сцени, здатний в режимі реального часу класифікувати та описувати фізичні властивості об'єкта, а також провести верифікацію часових характеристик системи з метою підтвердження можливості роботи у режимі реального часу.

Основна частина дослідження. Архітектура розробленої системи побудована за принципом послідовного перетворення даних: від грубої інформації рушія через нормалізований фізичний дескриптор до конкретних параметрів вібраційного імпульсу. Система складається з декількох взаємопов'язаних підсистем: матеріальних дескрипторів, конвеєра синтезу сцени, трекера взаємодій та власне модуля генерування тактильних сигналів. Така декомпозиція дозволяє незалежно розвивати кожну складову та забезпечує чіткий поділ відповідальностей. Розроблення та реалізацію алгоритмів була проведена з використанням можливостей платформи Garry's Mod, побудованій на базі рушія Source, та мови Lua.

Центральним поняттям системи є фізичний дескриптор - нормалізована структура даних, що описує механічні властивості конкретного ігрового об'єкта і є спільною мовою між фізичним рушієм та тактильним модулем. Дескриптор містить десять полів: масу, коефіцієнт тертя, коефіцієнт відновлення (пружність), клас матеріалу, тип колізії, площу поверхні, об'єм, щільність та центр мас. Для зберігання дескрипторів у мережевому протоколі розроблено функції серіалізації та десеріалізації, що мінімізують обсяг переданих даних шляхом використання типів фіксованої розрядності.

Основою матеріальної класифікації, в рішенні на базі рушія Source, є їх розподіл на декілька: метал (metal), дерево (wood), скло (glass), пластик (plastic), органіка (organic), бетон (concrete),

тканина (fabric), рідина (liquid) та енергія (energy), для кожного з яких визначено значення щільності (окрім типу «енергія»), тертя та пружності на основі фізичних величин (табл. 1).

Таблиця 1. Канонічні фізичні параметри матеріальних класів

Клас матеріалу	Щільність, кг/м ³	Тертя	Пружність
Метал	7800	0.60	0.30
Дерево	600	0.50	0.20
Скло	2500	0.40	0.50
Пластик	950	0.40	0.40
Органіка	1000	0.70	0.10
Бетон	2300	0.80	0.15
Тканина	300	0.90	0.05
Рідина	1000	0.01	0.00

Класифікація матеріалу об'єкта відбувається у три послідовні кроки: спочатку аналізується значення тип поверхні із фізичного об'єкта через точний та нечіткий пошук у таблиці відповідностей, аналізується шлях тривимірної моделі на наявність ключових слів ("metal", "wood", "glass" тощо). Алгоритм класифікації (зображено на рис. 1) гарантовано повертає один з восьми класів, що забезпечує повну покриваність усього контенту сцени незалежно від його походження.

```
function ClassifyMaterial(ent)
    if not IsValid(ent) then return MC.CONCRETE end

    local phys = ent:GetPhysicsObject()
    if IsValid(phys) then
        local surfaceProp = phys:GetMaterial()
        if surfaceProp and surfaceProp ~= "" then
            local lower = string.lower(surfaceProp)
            if SurfacePropMapping[lower] then
                return SurfacePropMapping[lower]
            end
            for key, class in pairs(SurfacePropMapping) do
                if string.find(lower, key, 1, true) then
                    return class
                end
            end
        end
    end

    local pos = ent:GetPos()
    local tr = util.TraceLine({ start = pos + Vector(0, 0, 1), endpos = pos - Vector(0, 0, 10), filter = ent, mask = MASK_SOLID,})
    if tr.Hit and tr.MatType then
        local mapped = SourceToMaterialClass[tr.MatType]
        if mapped then return mapped end
    end

    local model = ent:GetModel()
    if model then
        local lower = string.lower(model)
        if lower:find("metal") or lower:find("steel") or lower:find("iron") then return MC.METAL end
        if lower:find("wood") or lower:find("plank") or lower:find("crate") then return MC.WOOD end
        if lower:find("glass") or lower:find("bottle") then return MC.GLASS end
        if lower:find("plastic") or lower:find("rubber") then return MC.PLASTIC end
        if lower:find("flesh") or lower:find("body") or lower:find("ragdoll") then return MC.ORGANIC end
        if lower:find("concrete") or lower:find("rock") or lower:find("brick") then return MC.CONCRETE end
        if lower:find("cloth") or lower:find("paper") or lower:find("cardboard") then return MC.FABRIC end
        if lower:find("water") or lower:find("water") or lower:find("oil") then return MC.LIQUID end
    end

    return MC.CONCRETE
end
```

Рис. 1. Приклад алгоритму класифікації

Конвеєр синтезу сцени реалізовано як мульти-стадійний процес, де кожна стадія є атомарною - провал будь-якої з них повністю виключає об'єкт зі синтезу без часткового запису стану. Перед входом у конвеєр виконується перевірка ідемпотентності: якщо об'єкт уже присутній у графі сцени, функція негайно повертає наявний дескриптор, уникаючи повторного обчислення.

Стадія «discovery» послідовно перевіряє умови для відфільтрування об'єктів: неіснує об'єкта, приналежність до геометрії світу, приналежність до гравця, входження класу об'єкта.

Стадія «classification» визначає клас матеріалу (описаний вище) та записує результат у локальну змінну; передає і об'єкт, і визначений клас.

Стадія «property_assignment» є найбільш обчислювально насиченою: викликається методи для отримання маси, обчислює об'єм та площу поверхні об'єкта з обмежувального паралелепіпеда (AABB) за формулами:

$$V = |\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z|, (1)$$

$$S = 2 \cdot (\Delta x \cdot \Delta y + \Delta y \cdot \Delta z + \Delta x \cdot \Delta z), (2)$$

де $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - розміри AABB об'єкта у трьох проєкціях, після чого щільність уточнюється як $\rho = m/V$ за умови $V > 0$. Побудований дескриптор проходить валідацію об'єктів: перевіряється, що маса більше нулю, тертя та пружність більше рівні нулю, клас матеріалу є коректним перелічуваним значенням, при провалі синтез об'єкта переривається.

Стадія «physics_init» отримує дані поточного стану фізичного об'єкта у структуру з полів: маса, назва матеріалу. Вони зберігаються у графі сцени поруч із дескриптором і можуть використовуватися для виявлення динамічних змін фізичного стану об'єкта.

Завершальна стадія «active» записує сформований вузол графу сцени за ключем об'єкта - цілочисельним ідентифікатором, що гарантовано є унікальним у межах одного сеансу рушія.

Математична модель генерування тактильного сигналу є ключовим науковим результатом даної роботи і являє собою детерміноване відображення вхідних даних (фізичного дескриптора, сили взаємодії) у параметри вібраційного імпульсу. Модель побудована на концепції узагальненої «твердості» матеріалу, скалярного показника (h , від 0 до 1 включно), що агрегує три фізичні характеристики:

$$h = \hat{\rho} \cdot (1 - \mu) \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \varepsilon), (3)$$

де $\hat{\rho} = \min(\rho/\rho_{max}, 1)$ - нормована щільність відносно еталонного значення $\rho_{max} = 8000 \text{ кг/м}^3$, μ - коефіцієнт тертя, ε - коефіцієнт пружності (відновлення). Формула (3) відображає фізичну закономірність: важкі матеріали з малим тертям та помітною пружністю (сталь, скло) дають велике значення показника твердості, а легкі матеріали з великим тертям (тканина, органіка) мале.

На основі його показника обчислюються три параметри імпульсу. Частота (f , Гц) визначається лінійним відображенням твердості на діапазон [20, 300] Гц:

$$f = f_{min} + h \cdot (f_{max} - f_{min}), (4)$$

де нижня межа 20 Гц відповідає порогу тактильної чутливості шкіри, а верхня 300 Гц - ефективному діапазону двигунів контролера.

Амплітуда (A) нормалізується за силою взаємодії (F) та пружністю матеріалу:

$$A = \text{clamp}(F \cdot (0.3 + 0.7 \cdot \varepsilon), 0.05, 1.0), (5)$$

де $F \hat{=} \min(F/F_{max}, 1)$, $F_{max} = 500 \text{ од./с}$ - нормуюча сила удару. Множник $(0.3 + 0.7 \cdot \varepsilon)$ забезпечує підсилення амплітуди для більш пружних матеріалів за однакової сили взаємодії. Нижня межа 0.05 гарантує хоча б мінімально відчутний відгук навіть для дуже слабких взаємодій. Тривалість τ (с) обернено пропорційна твердості у діапазоні $[\tau_{min}, \tau_{max}] = [0.03, 0.25] \text{ с}$:

$$\tau = \tau_{max} - h \cdot (\tau_{max} - \tau_{min}), (6)$$

що відповідає фізичній реальності: удар по металу породжує короткий різкий імпульс, тоді як дотик до тканини тривале м'яке коливання.

Реалізацію обчислення тактильного сигналу у мові Lua показано на рисунку 2.

```
function ComputeHapticSignal(desc, force)
    if not desc then
        return { duration = 0.1, frequency = 80, amplitude = 0.3 }
    end

    local density      = desc.density or 1000
    local friction     = desc.friction or 0.5
    local restitution  = desc.restitution or 0.2

    -- Крок 1: Обчислення жорсткості матеріалу
    local densityNorm = math.Clamp(density / DENSITY_MAX, 0, 1)
    local hardness   = densityNorm * (1 - friction) * (0.5 + 0.5 * restitution)

    -- Крок 2: Частота – лінійне відображення жорсткості
    local frequency = FREQ_MIN + hardness * (FREQ_MAX - FREQ_MIN)

    -- Крок 3: Амплітуда – залежність від сили та пружності
    local forceNorm = math.Clamp((force or 100) / FORCE_MAX, 0, 1)
    local amplitude = math.Clamp(forceNorm * (0.3 + 0.7 * restitution), 0.05, 1.0)

    -- Крок 4: Тривалість – обернено пропорційна жорсткості
    local duration = DURATION_MAX - hardness * (DURATION_MAX - DURATION_MIN)

    return {
        duration = duration,
        frequency = frequency,
        amplitude = amplitude,
        hardness = hardness,
    }
end
```

Рис. 2. Приклад обчислення тактильного сигнал

Функція «ComputeHapticSignal» приймає дані дескриптора та силу взаємодії, послідовно обчислює показник твердості за формулою (3), частоту (4), амплітуду (5) та тривалість (6), після чого повертає таблицю з чотирма полями: «duration», «frequency», «amplitude» та «hardness».

Для кожного з типів подій взаємодії визначено модулятор - табличну структуру з трьома полями: «amplitude» (мультиплікатор амплітуди), «duration» (мультиплікатор тривалості) та «min_amplitude» (мінімальна амплітуда). Параметри модуляторів відображена у табл. 2.

Таблиця 2. Параметри модуляторів для типів взаємодій

Тип взаємодії	Амплітуда	Тривалість	Мін. амплітуда
Зіткнення	0.8	0.8	0.20
Підбирання об'єкту	0.8	0.6	0.20
Відпускання об'єкту	0.5	0.5	0.15
Викидання об'єкту	0.7	0.6	0.20
Дотик до стіни	0.6	0.3	0.15
Дотик до об'єкта	0.5	0.4	0.15
Колізія утримуваного об'єкта з іншим об'єктом	0.9	0.7	0.25

Застосування додаткового модулятора після базового обчислення дозволяє семантично диференціювати взаємодії матеріалів: удар металевим прутком буде виразнішим, ніж просте його підбирання, навіть якщо фізичний дескриптор ідентичний. Математично це можна описати як:

$$A_{final} = \max(A_{base} \cdot k_{amp}, A_{min}), \quad (7)$$

$$\tau_{final} = \tau_{base} \cdot k_{dur}, \quad (8)$$

де k_{amp} і k_{dur} - мультиплікатори з таблиці 2, A_{min} - гарантований мінімум амплітуди для конкретного типу події. Реалізація даного функціоналу зображено на рисунку 3.

```

local function ApplyEnvelope(signal, eventType)
  local env = EventEnvelope[eventType]
  if not env then return signal end

  local amp = signal.amplitude * env.amplitude
  -- Гарантувати мінімальну відчутну амплітуду
  if env.min_amplitude and amp < env.min_amplitude then
    amp = env.min_amplitude
  end

  return {
    duration = signal.duration * env.duration,
    frequency = signal.frequency,
    amplitude = amp,
    hardness = signal.hardness,
  }
end

```

Рис. 3. Приклад реалізації модулятора події до базового сигналу

Трекер взаємодій реалізує кільцевий буфер на 2048 записів, у який фіксується кожна виявлена взаємодія: мітка часу, тип, об'єкти-учасники, сила, позиція, дескриптори та клас матеріалу. Буфер підтримує операції читання останніх записів та агрегованої статистики з розбивкою за типами подій та лічильником частоти взаємодій за секунду.

Для верифікації системи було проведено тестування на типовій ігровій сцені з набором об'єктів різних класів матеріалів. Синтез сцени зі 32 фізичними об'єктами потребував у середньому 1.4 мс процесорного часу на повний прохід, що вкладається у встановлений бюджет 2 мс і не впливає на частоту кадрів для VR-рендерингу. Середня затримка від моменту детектування взаємодії до активації контролера становила менше 5 мс, що відповідає вимогам до тактильного зворотного зв'язку у реальному часі.

Максимальна теоретична частота тактильних подій для однієї руки обмежується механізмом часової затримки для запобігання дублюванню. Для глобальної затримки $C_g = 30$ мс максимальна кількість імпульсів на секунду становить:

$$R_{max} = 1/C_g \approx 33 \text{ імп./с}, \quad (9)$$

що відповідає верхній межі тактильно значущих подій без перевантаження сприйняття оператора. Обсяг оперативної пам'яті кільцевого буфера трекера взаємодій визначається як:

$$M_{buf} = N_{buf} \cdot S_{rec}, \quad (10)$$

де $N_{buf} = 2048$ - розмір буфера, S_{rec} - розмір одного запису взаємодії. Оскільки кожен запис містить числові поля з плаваючою точкою та посилання на об'єкт Lua (близько 200 байт на запис), загальний обсяг становить близько 400 КБ, що є прийнятним для клієнтського середовища Garry's Mod. Максимальна кількість об'єктів сцени (N_{proc}), що може бути оброблена за один виклик конвеєра синтезу в межах бюджету (B_{ms}) мілісекунд, відповідає:

$$N_{proc} \leq B_{ms}/t_{ent}, \quad (11)$$

де t_{ent} - середній час синтезу одного об'єкта.

За вимірним значенням $t_{ent} \approx 0.011$ мс при бюджеті $B_{ms} = 2$ мс формула (11) дає $N_{proc} \leq 181$ об'єктів за один прохід, що збігається зі спостережуваними значеннями у тестових сценах.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У результаті дослідження розроблено та реалізовано метод автоматичного генерування тактильного зворотного зв'язку у VR-середовищі на основі фізичних властивостей матеріалів об'єктів, що не потребує ручного задання ефектів і забезпечує семантично коректний тактильний відгук для довільного контенту сцени у режимі реального часу. Математична модель, що перетворює щільність, тертя та пружність матеріалу у параметри вібраційного імпульсу (частоту 20-300 Гц, амплітуду 0.0-1.0 та тривалість 0.03-0.25 с), підтверджена і відповідає фізичній інтуїції взаємодії з матеріалами різної твердості. Конвеєр синтезу сцени з бюджетуванням часу забезпечує прийнятне навантаження на процесор навіть для сцен із великою кількістю об'єктів. Перспективи подальших досліджень полягають у

розширенні моделі за рахунок врахування текстури поверхні (мікрорельєфу) для генерування складніших вібраційних паттернів, а не лише простого синусоїдального імпульсу, дослідженні застосування нейронних мереж для уточнення класифікації матеріалів, а також у проведенні суб'єктивного користувачького дослідження з метою кількісної оцінки впливу розробленого методу на відчуття присутності та якість взаємодії у VR-середовищах різного призначення.

Список бібліографічного опису:

1. Kuchenbecker, K. J., Fiene, J., Niemeyer, G. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 2006. Т. 12, № 2. С. 219–230. URL: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2006.32> (дата звернення: 06.02.2026).
2. Okamura, A. M. Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Industrial Robot: An International Journal*. 2004. Т. 31, № 6. С. 499–508. URL: <https://doi.org/10.1108/01439910410566362> (дата звернення: 06.02.2026).
3. Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi M., Frisoli, A., Hayward, V., Prattichizzo, D. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives. 2017. Т. 10, № 4. С. 580–600. URL: <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2689006> (дата звернення: 06.02.2026).
4. Enriquez M., MacLean K. E. The hapticon editor: a tool in support of haptic communication research. *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. 2003. С. 356–362. URL: <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2003.1191310> (дата звернення: 06.02.2026).
5. Zheng C., James D. L. Toward high-quality modal contact sound. *ACM Transactions on Graphics*. 2011. Т. 30, № 4. Стаття 38. URL: <https://doi.org/10.1145/1964921.1964933> (дата звернення: 06.02.2026).

References:

1. Kuchenbecker K. J., Fiene J., Niemeyer G. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2006. Vol. 12, No. 2. P. 219–230. Available at: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2006.32> (accessed: 06.02.2026).
2. Okamura A. M. Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Industrial Robot: An International Journal*. 2004. Vol. 31, No. 6. P. 499–508. Available at: <https://doi.org/10.1108/01439910410566362> (accessed: 06.02.2026).
3. Pacchierotti C., Sinclair S., Solazzi M., Frisoli A., Hayward V., Prattichizzo D. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*. 2017. Vol. 10, No. 4. P. 580–600. Available at: <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2689006> (accessed: 06.02.2026).
4. Enriquez M., MacLean K. E. The hapticon editor: a tool in support of haptic communication research. *IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. 2003. P. 356–362. Available at: <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2003.1191310> (accessed: 06.02.2026).
5. Zheng C., James D. L. Toward high-quality modal contact sound. *ACM Transactions on Graphics*. 2011. Vol. 30, No. 4. Article 38. Available at: <https://doi.org/10.1145/1964921.1964933> (accessed: 06.02.2026).

Історія статті:

Отримано: 18.02.2026 Доопрацьовано: 27.02.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026