

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Реалізація технології Motion capture за допомогою мобільних пристроїв

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи СТМм-22-1

Анастасія ДОВБЕНКО

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи, технології
і комп'ютерні засоби мультимедіа

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Олександр СУПРУН

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Володимир КАРТАШОВ

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформаціїКафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних системРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Довбенко Анастасії Дмитрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Реалізація технології Motion capture за допомогою мобільних пристроїв затверджена наказом університету від "20" 12 2023 р. № 1371 СТ
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08 січня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи 1. Дослідити види та тенденції розвитку технології motion capture
2. Огляд сучасних програмних засобів з використанням штучного інтелекту
3. Огляд існуючих програмних засобів вдосконалення та корекції траєкторії руху
4. Доопрацювання та фінальна корекція отриманих результатів. Етап композитингу

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

ВСТУП

- 1 Розвиток та види motion capture
- 2 Огляд програм з ШІ для motion capture
- 3 Тестування програм для перенесення рухів на об'єкти
- 4 Редагування скелету mocap у Blender

ВИСНОВКИ**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ****ДОДАТКИ**

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

1. Основні відомості про роботу;
2. Motion capture і його системи;
3. Методи захвату руху;
4. Алгоритм роботи програм з ШІ;
5. Тестування програм;
6. Результати тестування;
7. Якість відстеження руху;
8. Редагування скелету motion capture;
9. Висновки;
10. Імпортований у Blender скелет з манекеном;
11. Недолік у вигляді перетину рук на 110 кадрі;
12. Налаштування положення рук.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Розвиток та види motion capture	21.11.23-27.11.23	
2	Огляд програм з ШІ для motion capture	28.11.23-02.12.23	
3	Тестування програм для перенесення рухів на об'єкти	04.12.23-09.12.23	
4	Редагування скелету mocap у Blender	11.12.23-20.12.23	
5	Графічна частина роботи	21.12.23-23.12.23	
6	Перевірка керівником	24.12.23-26.12.23	
7	Перевірка на норм. контроль	27.12.23-28.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	29.12.23-02.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	03.01.24-08.01.24	

Дата видачі завдання 20.12.2023 р.

Студент _____



(підпис)

Анастасія ДОВБЕНКО

Керівник роботи _____

(підпис)

доц. Олександр СУПРУН

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи має: 85 с., 64 рис., 50 джерел, 3 додатки.

MOTION CAPTURE, КАМЕРА, ПРОГРАМА, АНІМАЦІЯ, KEYFRAME, KINETIX, СИСТЕМИ, МЕТОДИ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, WEB-ДОДАТОК, BLENDER, ROKOKO, PLASK, DEERMOTION, 3D-ОБ'ЄКТ.

Об'єкт дослідження – методи і системи для захоплення руху тіла.

Предмет дослідження – функціональність систем motion capture і їхні можливості для створення рухомих персонажів у іграх, відео або анімації.

Мета роботи – дослідити основні програми для захоплення руху, які можна застосовувати для створення тривимірної анімації, а також з'ясувати особливості їх використання, переваги та недоліки.

Методи дослідження: використання аналітичних методів, включаючи огляд літератури та аналіз існуючих систем захоплення руху, практичне дослідження і аналіз отриманих результатів.

У роботі наведені методи і системи захоплення руху, виділені області у яких вони використовуються (медицина, спорт, архітектура тощо), включаючи технології, які використовуються для запису і аналізу руху об'єктів або людей з метою створення реалістичних і динамічних анімацій. Поетапно розписаний алгоритм роботи програм для захоплення руху на базі штучного інтелекту, також розглянуті варіанти вирішення проблем, пов'язаних із зовнішніми факторами, такими як освітлення та фон. Проаналізовано вплив калібрування на точність motion capture, виокремлюючи його ключову роль у стабільному та точному відтворенні рухів. Зазначено, що шум може стати фактором, який впливає на якість захоплення руху, і розглянуто, якими способами його можуть мінімізувати різні програми. Наведені приклади додатків і програм на браузерній платформі з використанням

motion capture, як із штучним інтелектом, так і без. Проведене тестування програм для захоплення руху дозволило виявити якості, незручності, переваги та недоліки, спростивши вибір оптимального інструменту залежно від конкретних завдань. Докладно розглянуто редагування захоплення руху у програмі Blender. Детально розглянуто процес редагування motion capture у програмі Blender, зазначаючи його значущість у полі анімації та виокремлюючи переваги цього інструменту для творчого підходу до оптимізації та покращення анімаційних сцен. Результати цього дослідження можуть служити основою для подальшого вдосконалення та розвитку систем захоплення руху в анімаційній індустрії та суміжних галузях.

REPORT

Explanatory note of the qualifying paper has: 85 p., 64 pic., 50 sources, 3 supplements.

MOTION CAPTURE, CAMERA, PROGRAM, ANIMATION, KEYFRAME, KINETIX, SYSTEMS, METHODS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, WEB APPLICATION, BLENDER, ROKOKO, PLASK, DEEPMOTION, 3D OBJECT.

The object of the research is methods and systems for capturing body movement.

The subject-matter of the research is the functionality of motion capture systems and their possibilities for creating moving characters in games, video or animation.

The purpose of the work is to investigate the main motion capture programs that can be used to create 3D animation, as well as to find out the specifics of their use, advantages and disadvantages.

The methods of the research: use of analytical methods, including literature review and analysis of existing motion capture systems, practical research and analysis of the obtained results.

The paper presents methods and systems of motion capture, highlights the areas in which they are used (medicine, sports, architecture, etc.), including technologies used to record and analyse the movement of objects or people in order to create realistic and dynamic animations. A step-by-step algorithm for motion capture programs based on artificial intelligence is described, and options for solving problems related to external factors, such as lighting and background, are also considered. The impact of calibration on motion capture accuracy is analysed, highlighting its key role in stable and accurate motion reproduction. It is noted that noise can become a factor that affects the quality of motion capture, and it is considered in what ways various programs can minimize it. Examples of applications and programs on the browser platform using motion capture, both with and without artificial intelligence, are given. The conducted testing of programs

for motion capture made it possible to identify qualities, inconveniences, advantages and disadvantages, simplifying the choice of the optimal tool depending on specific tasks. Motion capture editing in Blender is covered in detail. The process of editing motion capture in Blender is examined in detail, noting its importance in the field of animation and highlighting the benefits of this tool for a creative approach to optimizing and enhancing animation scenes. The results of this study can serve as a basis for further improvement and development of motion capture systems in the animation industry and related fields.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

MoCap – motion capture або захват руху;

3D – різновид комп'ютерної графіки;

VR – віртуальна реальність;

ШІ – штучний інтелект;

ОС – операційні системи;

ПЗ – програмне забезпечення.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	10
1 РОЗВИТОК ТА ВИДИ MOTION CAPTURE	12
1.1 Системи й методи захвату руху.....	12
1.2 Застосування motion capture.....	20
1.3 Популярність MoCap	22
1.4 Захват руху та штучний інтелект	24
1.5 Motion capture у художніх фільмах.....	26
2 ОГЛЯД ПРОГРАМ З ШІ ДЛЯ MOTION CAPTURE.....	30
2.1 Алгоритм роботи програм з ШІ для mocap	30
2.2 Перелік програм для захоплення руху.....	32
2.3 Методи, які використовуються у роботі нейромереж.....	45
3 ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМ ДЛЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ РУХІВ НА ОБ'ЄКТИ.....	51
4 РЕДАГУВАННЯ СКЕЛЕТУ МОСАР У BLENDER.....	62
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТКИ.....	87
ДОДАТОК А.....	88
ДОДАТОК Б.....	97
ДОДАТОК В	100

ВСТУП

Захват руху, відомий ще як motion-трекінг, це технологія, яка використовується для запису рухів об'єктів, людей або тварин в реальному часі і перетворенню їх у цифровий формат. За останні десятиліття системи motion capture стали ключовим елементом у розвитку інтерактивних технологій.

Системи захоплення руху, передусім, розроблялися для сфери кіноіндустрії, але згодом його застосування значно розширилося. Технології mocap зараз використовуються не тільки для створення 3D анімації в кіно та комп'ютерних іграх, але також знайшли застосування у медицині (для аналізу рухів людей, які зазнали травм), спорті (для відстеження ефективності рухів спортсменів), архітектурі та інших сферах. Незважаючи на те, що захоплення руху існує вже давно, історично він використовувався лише для захоплення широких рухів тіла. Тепер ці системи достатньо чутливі, щоб уловлювати найдрібніші деталі обличчя та пальців, ефективно фіксуючи всю гру актора.

Сучасні системи захоплення руху займають важливе місце у нашому повсякденному житті, стаючи невід'ємною частиною різних сфер. Ці технології надають можливість відстежувати та аналізувати рухи з високою точністю, а їх застосування навіть в ергономіці меблів та аксесуарів, таких як рюкзаки, підкреслює їхню універсальність та вплив на різні аспекти сучасного життя.

У даній кваліфікаційній роботі детально розглянуто різні методи і системи захоплення руху, їхнє застосування у різних сферах. Увага приділена технологіям, які використовуються для motion capture. Оскільки одним із важливих аспектів розгляду є різноманітність методів захоплення руху, таких як оптичні системи з використанням камер та маркерів, інерційні системи, що використовують акселерометри, а також системи на основі комп'ютерного зору. Кожен із цих підходів має свої переваги та застосовується залежно від конкретних вимог проекту.

Розглянуто додатки та програми для захоплення руху, у яких системи mocap демонструють свою ефективність. Від медичних досліджень до створення

захоплюючих віртуальних світів, про те, як системи захоплення руху формують майбутнє технологічного розвитку і впливають на повсякденне життя.

Проаналізовано також технологічні інновації у сфері алгоритмів обробки даних, які відіграють ключову роль підвищення точності motion capture. Розвиток машинного навчання та штучного інтелекту робить значний внесок у поліпшення алгоритмів відстеження руху та розпізнавання образів.

Ціллю роботи є дослідження програм з можливістю захоплення руху для створення якісної анімації 3D-об'єкту, який може бути використаний у будь-якій сфері розважального контенту (кіно, анімації, ігор і VR) і значно спростити роботу працівників різних індустрій.

Саме тому тема дипломної роботи є актуальною.

1 РОЗВИТОК ТА ВИДИ MOTION CAPTURE

1.1 Системи й методи захвату руху

Захоплення руху (англ. Motion capture, скорочено MoCap) – метод анімації персонажів та об'єктів, при якому анімація створюється не вручну, а шляхом оцифрування рухів реального об'єкта (відеозапису за допомогою спеціальних датчиків) та подальшого перенесення їх на тривимірну модель. Ця технологія дозволяє полегшити процес анімації, так як людське тіло (та тваринне) влаштовано доволі складно, тому набагато легше, а інколи і дешевше, записувати рухи акторів та переносити їх на тривимірні моделі, ніж анімувати їх вручну.

Існує два основні види систем motion capture [1]:

- Маркерна система mocap – використання спеціального обладнання. На людину надягають костюм із датчиками, вона робить необхідні рухи, дані з датчиків фіксуються камерами і надходять до комп'ютера. Ці дані зводяться в єдину тривимірну модель, що точно відтворює рухи актора, на основі якої одразу або пізніше створюється анімація персонажа.

- Безмаркерна технологія не потребує спеціальних датчиків чи спеціального костюма. Безмаркерна технологія заснована на технологіях комп'ютерного зору та розпізнавання образів. В даному випадку не потрібно спеціального обладнання, спеціального освітлення та простору. Зйомка здійснюється за допомогою звичайної камери, веб-камери або камери смартфона та персонального комп'ютера. Потім відео завантажується у спеціальну програму, яка зчитує рухи і переносить їх на тривимірну модель.

Сучасна маркерна система mocap умовно складається з трьох основних компонентів:

- Маркери. Для захоплення руху на об'єкти або людське тіло наносяться маркери, такі як кульки, що світяться, оптичні маркери або інерційні датчики. Ці маркери є точками відліку для системи захоплення руху.

– Камери. Системи захоплення руху використовують кілька камер, щоб спостерігати за об'єктами чи акторами. Камери реєструють рухи маркерів і передають дані на комп'ютер.

– Спеціалізоване програмне забезпечення. Дані з камер обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням, яке аналізує положення маркерів та створює цифрову анімацію на основі цих даних.

Існує декілька методів захоплення руху, кожен з яких має свої особливості застосування в залежності від цілі та вимог:

Основна кімната проведення захисту <https://meet.google.com/fqm-wytd-hii> Оптичний (Optical Motion Capture). Цей метод використовує оптичні камери для відстеження маркерів, розташованих на об'єкті або тілі актора. Маркери можуть бути активними (з вбудованими джерелами світла) або пасивними (відбивають світло) і використовуються для точного вимірювання рухів. Активні маркери, зображені на (рис. 1.1, запозичено [2]) зазвичай забезпечують більш високу точність та працюють в умовах поганого освітлення. Пасивні маркери відображають промені від камери, яка оснащена інфрачервоною підсвіткою. Камери реєструють відбите світло і визначають положення маркерів. Ці системи вимагають хорошого освітлення та мають обмеження при відстеженні прихованих частин тіла. Системи Vicon та OptiTrack – приклади оптичних систем захоплення руху.



Рисунок 1.1 – Активні маркери оптичного методу захоплення руху [2]

– Інерційний (Inertial Motion Capture). Актори носять інерційні датчики, які вимірюють прискорення та кутову швидкість їхніх рухів. Інерційні системи дозволяють захоплювати рухи у реальному часі та не вимагають великого обсягу обладнання. Приклади включають системи Xsens (рис. 1.2, який запозичено [49]) і повномасштабні інерційні костюми.

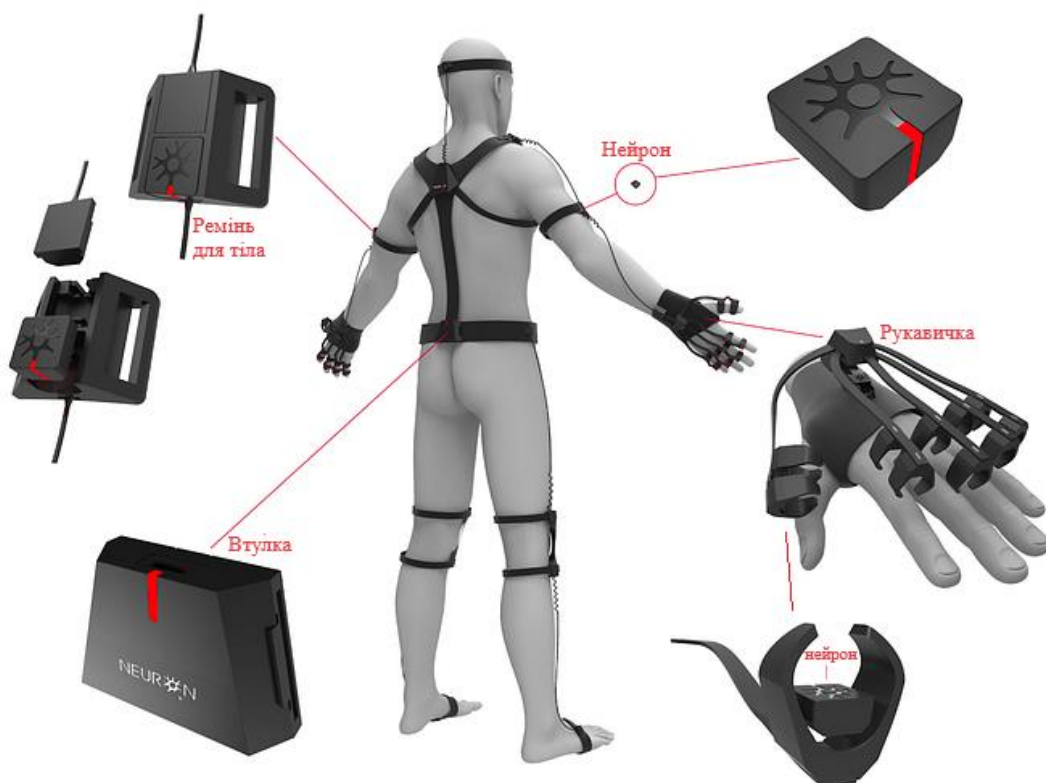


Рисунок 1.2 – Обладнання для Inertial motion capture [49]

– Магнітний (Magnetic Motion Capture). Даний метод використовує електромагнітні датчики, розміщені на об'єкті, які реагують на зміни магнітного поля. Системи магнітного захоплення руху дозволяють точно вимірювати рухи в тривимірному просторі (рис. 1.3, який запозичено з [50]). Популярні приклади – Polhemus та Ascension Technology.

– Ультразвуковий (Ultrasound Motion Capture). Використовує ультразвукові датчики для вимірювання відстані та руху об'єктів [5]. Підходить для захоплення руху внутрішніх органів та м'яких тканин у медичних дослідженнях (рис. 1.4, запозичено [35]).



Рисунок 1.3 – Магнітний захват руху [50]

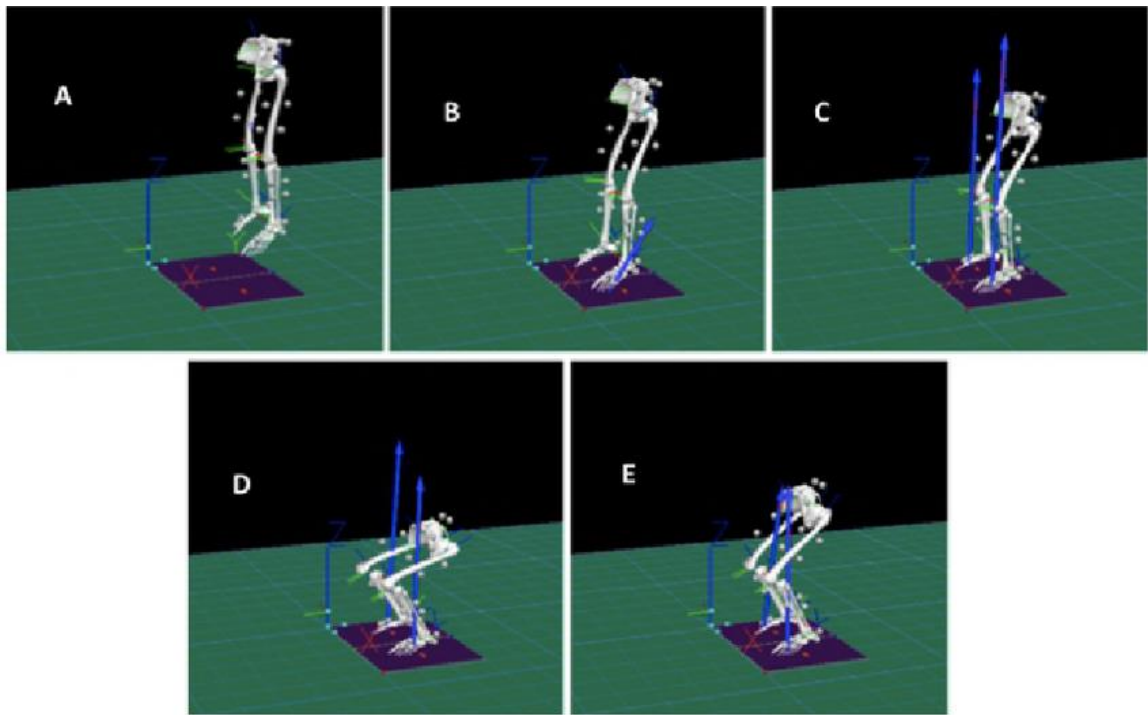


Рисунок 1.4 – На рисунку показано 3D-захоплення руху з допомогою ультразвуку під час приземлення після стрибку. А – початкове згинання коліна при старті з платформи; В – удар носка ноги о землю; С – удар п’яти об землю; D – згинання коліна після приземлення; Е –розгинання та стабілізація коліна [35].

– Захоплення руху рук (Hand Motion Capture). Цей метод включає захоплення рухів рук і пальців (рис. 1.5, який запозичено [13]). Використовується для створення реалістичних анімацій жестів та рухів рук, також застосовується у віртуальній реальності та керуванні жестами.



Рисунок 1.5 – Hand Motion Capture [13]

– Механічний (Mechanical Motion Capture). Ця система використовує механічні пристрої та датчики, щоб реєструвати рух (рис. 1.6). Прикладом може бути «екзоскелет», який одягається на актора і реєструє рухи його суглобів та кінцівок. Механічні системи можуть забезпечувати високу точність і надійність у захопленні руху, але можуть бути менш рухливими та менш зручними для акторів.

– Гіроскопічний (Gyroscope Motion Capture). Включає використання гіроскопів для вимірювання кутової швидкості і орієнтації об'єктів або акторів. Гіроскопи – це датчики, (які зображено на рис. 1.7, який запозичено [16]) які реєструють зміни кутової швидкості та можуть визначати, як об'єкт чи частина тіла обертається чи повертається у просторі [9]. Цей метод захоплення руху надає інформацію про рухи, пов'язані з обертанням, і може бути корисним для реєстрації рухів, які не включають зміну положення у просторі. Часто використовується у поєднанні з іншими методами захоплення руху, такими як оптичні системи, для забезпечення повнішої інформації про рух.



Рисунок 1.6 – Механічна система захоплення руху



Рисунок 1.7 – Гіроскопічний датчик EightOS [16]

– Інфрачервоний (Infrared Motion Capture). У цьому методі використовують інфрачервоні маркери та камери, обладнані інфрачервоними фільтрами для відстеження руху (рис. 1.8, запозичено [17]). Персонажі або об'єкти, що підлягають захопленню руху, носять інфрачервоні маркери, які випромінюють інфрачервоне випромінювання [6]. Спеціальні інфрачервоні камери обладнані інфрачервоними

фільтрами, які дозволяють бачити лише інфрачервоне випромінювання від маркерів. Камери встановлюються навколо актора або об'єкта, щоб захоплювати рух з усіх боків. Камери реєструють положення інфрачервоних маркерів у просторі [12]. Ці дані передаються в комп'ютер для аналізу та створення анімації. Цей метод широко використовується в індустріях, таких як кіно, відеоігри, медичні дослідження та багато іншого, де потрібний високий ступінь реалізму та точності в анімації руху.



Рисунок 1.8 – Infrared Motion Capture [17]

– Використання keyframes (Keyframe Motion Capture). Це метод, який поєднує в собі техніки захоплення руху та створення анімації з використанням ключових кадрів (keyframes) [10]. У цьому методі рух актора чи об'єкта захоплюються у вигляді ключових моментів, а потім між цими ключовими моментами анімація інтерполюється. Інтерполюється, означає, що програмне забезпечення створює плавні переходи між ключовими моментами руху. Це забезпечує безперервний та реалістичний характер руху. Motion Capture з використанням keyframes може бути особливо корисним у ситуаціях, де потрібен

високий рівень контролю за анімацією, і коли ключові моменти руху є критично важливими для результату.

1.2 Застосування motion capture

Мосар з'явився для поліпшення та спрощення створення реалістичної анімації й моделювання рухів об'єктів та персонажів. Згодом, технологія захоплення руху стала невід'ємною часткою багатьох індустрій й почала використовуватися у таких галузях, як: медицина, спорт, наукові розробки й дослідження тощо.

У кіно і телевізійних проектах motion capture використовується для створення реалістичної анімації персонажів, створення цифрових двійників або для вражаючих спецефектів, таких як рухи монстрів, супергероїв чи створення тварин (приклад зображений на рис. 1.9, який запозичено [42]) та істот за допомогою мосар акторів у костюмах.

В ігровій індустрії захоплення руху допомагає створенню натуральних рухів персонажів, покращуючи реалізм. Якщо раніше анімація об'єктів виконувалася вручну з допомогою аніматорів [4], через що витрачалося багато часу та ресурсів, то зараз мосар дозволяє створювати рухи швидше і реалістичніше.

Індустрія анімації та розваг. У ній motion capture також використовується для анімації персонажів та створення спецефектів [11]. Для анімації героїв на живих виступах (театр або концерт), створення анімації для тематичних парків й атракціонів.

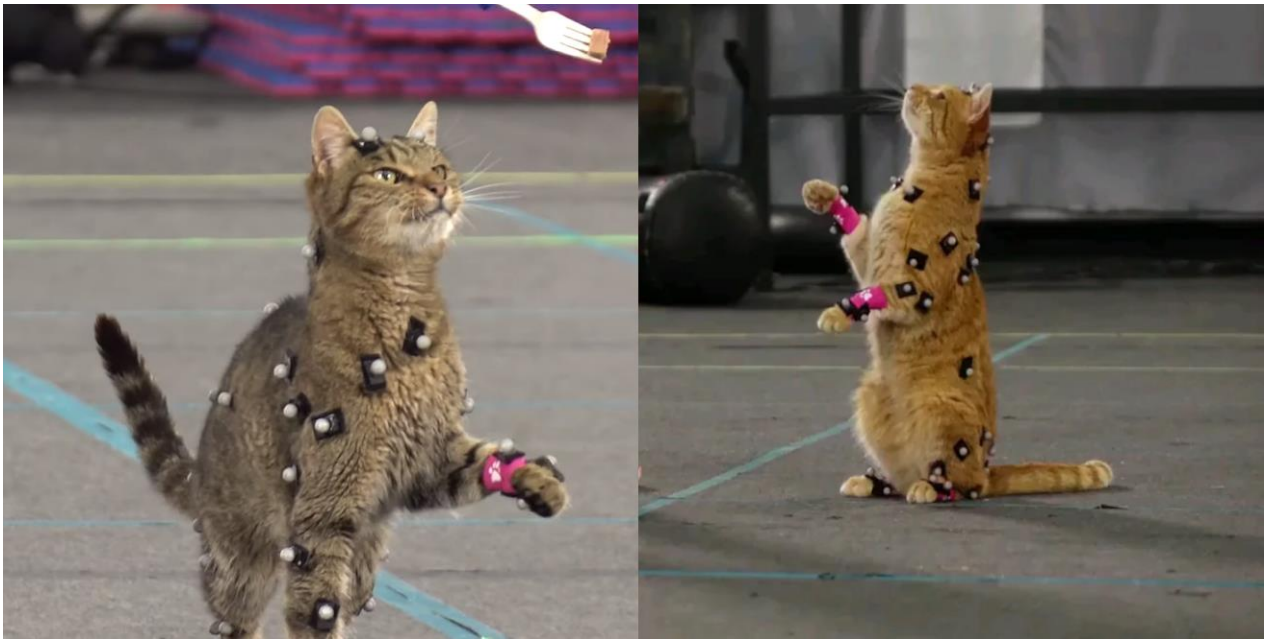


Рисунок 1.9 – MoCap котів [42]

Motion capture у спорті використовується для аналізу руху спортсменів й покращення їх тренувань, для створення тренажерів й симуляторів руху, оцінки фізичної підготовки й рухових навичок.

Аналіз руху людей у архітектурних та інженерних проектах використовується для оптимізації дизайну та безпеки. Також у будівництві mocap може бути використаний для візуалізації проектів та створення анімацій, дозволяючи архітекторам та клієнтам краще розуміти майбутні будівлі та споруди. Як приклад, програма Canvas (рис. 1.10, запозичено [43]) з motion capture дає змогу спеціалістам із покращення дому за лічені хвилини сканувати 3D-простір і отримувати точні готові CAD-моделі та плани поверхів.

У військовій і правоохоронній діяльності mocap використовується для симуляції тактичних та стратегічних рухів для навчання і тренувань.



Рисунок 1.10 – Сканування будинку у 3D-простір за допомогою Canvas [43]

1.3 Популярність MoCap

Популярність захоплення руху зростає з кожним днем і причин для цього багато.

По-перше, motion capture це економія часу і витрат. Він значно скорочує час та кількість зусиль, які необхідні для анімації персонажів й об'єктів вручну. Це рентабельно для багатьох галузей, так як прискорює процес анімації й знижує необхідність у великому обсязі ручної роботи. Хоча інвестування у обладнання для захоплення руху може бути високим, але згодом це дозволяє заощадити кошти.

По-друге, точність. Захват руху надає точні дані про рух, що підвищує його цінність у дослідження та розробках додатків, де точний аналіз має рішуче значення. Наприклад для біомеханічних досліджень [18], для вивчення поведінки тварин.

По-третє, в кіновиробництві mocap використовується для інтеграції реальних акторів й декорацій з віртуальним середовищем, що оптимізує процес виробництва й зменшує необхідність у постпродакшн.

Звісно, захоплення руху зробили популярним кіно та відеоігри. Так як багато людей грають в відеоігри, вони цінують якісну анімацію й рівень реалізму у іграх. Саме motion capture робить взаємодію користувачів з контентом більш природною.

Молодь цікавиться й віртуальною реальністю (VR), де захоплення руху грає важливу роль у створенні реалістичних віртуальних світів [8] і взаємодії із ними (рис. 1.11). Соціальні мережі та контент для YouTube і TikTok, де користувачі за допомогою мовар створюють креативні або забавні ролики для привернення уваги глядачів.



Рисунок 1.11 – Захоплення руху у VR [36]

Ще одною причиною популярності motion capture, стала його доступність. Так як зараз існує багато додатків для захоплення руху онлайн із ШІ, багато з них є безкоштовними і не потребують спеціального обладнання та навичок у порівнянні з іншими технологіями, такими як 3D-рендерінг або програмне забезпечення для розпізнавання обличчя.

Motion capture дозволяє розробляти анімованих персонажів та віртуальних асистентів, які можуть полегшити взаємодію з комп'ютерними системами та зробити їх більш доброзичливими [27].

Крім того, відеоролики тосар забезпечують більш ефективно запам'ятовування інформації, аніж традиційні відео. Глядачі, які дивилися тосар-відео, з більшою ймовірністю запам'ятають інформацію, представлену у відео, за два тижні, ніж ті, хто дивився традиційне відео.

1.4 Захват руху та штучний інтелект

Технології не стоять на місці й розвиваються з неймовірною швидкістю. На даний момент штучний інтелект (ШІ) став частиною нашого життя: створення картин, фото за описом, пошук ідей, написання текстів, створення відео та анімації, – все це зараз можна зробити за допомогою ШІ.

Захват руху з допомогою ШІ є простим й, часто, безкоштовним способом почати робити анімацію. Людині не потрібен спеціальний костюм або камера, достатньо звичайного одягу, бажано, щоб він облягав, для більш якісного відстеження руху [15]. І звичайна камера смартфона чи web-камера.

Програми з ШІ мають широкий спектр функціональності й можуть виконувати певні задачі:

- Аналіз пози й жестів, для визначення положення та орієнтації частин тіла для ідентифікації специфічних рухів і вираження обличчя;
- Розпізнавання рухів та жестів, наприклад махання рукою, підняття ноги, присідання тощо;
- Кінематичний аналіз, аналіз швидкості, прискорення і траєкторії;
- Класифікація рухів. Розрізняти біг, стрибки, танці, ходьбу тощо;
- Розпізнання обличь, аналіз емоцій;
- Взаємодія у реальному часі;
- Створення анімації;
- Моніторинг та діагностика;
- Автоматизація. Програми з ШІ можуть автоматично виявляти і відстежувати рухи без необхідності у налаштуваннях вручну;

- Обробка великого об'єму даних, що дозволяє захоплювати багато рухів одночасно та працювати з великими групами людей;
- Інтеграція з іншими додатками [39].

Звісно, дані, які генеруються штучним інтелектом, не такі точні, як дані зібрані за допомогою костюму для тосар. Наприклад, ШІ зчитує рух всього тіла, але не включно з точним рухом рук чи міміки. Руки чи ноги можуть несподівано опинитися не там, де повинні бути (опинитися за спиною, залізти одна в одну).

Також програми з ШІ мають і інші недоліки, серед яких:

- Обмеження у просторі і часі. Часто є обмеження на об'єм відео у часі або об'ємі і для необмеженого часу потрібно купувати рго версію;
- Не підходить для специфічних задач. Деякі незвичні рухи можуть бути важкими для програм з ШІ, особливо якщо потребується висока точність та деталізація;
- Залежність від освітленості та навколишнього середовища;
- Проблеми з конфіденційністю даних;
- Обмежений доступ і висока вартість. Деякі програми можуть бути доступні для обмеженої кількості людей або дорого коштувати;
- Проблеми з інтеграцією у інші додатки й платформи;
- Складні налаштування. Іноді додатки потребують калібрування і складних налаштувань, для яких необхідні певні навички і обладнання;
- Необхідність пост-обробки. Захоплені дані можуть вимагати додаткової пост-обробки та редагування, щоб досягти певних ефектів;
- Вимоги до обладнання. Часто виникає необхідність у такому спеціалізованому обладнанні, як високоякісні камери, інерційні вимірювачі тощо;
- Високе обчислювальне навантаження. Обробка та аналіз даних про рух потребує значних обчислювальних ресурсів, що може призвести до високих вимог щодо продуктивності комп'ютерів.

Не дивлячись на недоліки, додатки для захоплення руху з ШІ являються потужними інструментами, які сприяють розвитку візуальних ефектів, анімації

тощо. З подальшим розвитком технологій і досліджень, недоліки можуть бути подолані, а застосування додатків стане більш доступним і різноманітним.

1.5 Motion capture у художніх фільмах

Здебільшого, MoCap асоціюється з іграми та фільмами, а не з мультиплікацією. Захоплення руху не часто використовується у створенні мультфільмів, бо в них більш поширені традиційні методи анімації, такі як малювання або 3D-анімація. Причин для цього багато: мультфільми зазвичай стилізовані і мають унікальні характеристики персонажів, яких важко досягнути за допомогою motion capture; присутні незвичні і фантастичні елементи, які важко захопити з реальності; дотримання традиції і певного стилю, до якого входить анімація вручну [25].

Наприклад, мультфільм «Мавка» українського виробництва також малювався вручну, захватом руху виступали очі художника-аніматора (рис. 1.12). Рухи були змальовані з балерини Катерини Кухар, а потім перенесені на персонажа власноруч.



Рисунок 1.12 – Кадри створення «Мавки»

Але все ж таки існують художні фільми, де використовувався motion capture:

1. «Полярний експрес» (рис. 1.13). Він був першим художнім фільмом, повністю створеним з використанням анімації захоплення руху. Усі дитячі ролі зіграли дорослі актори, які працювали зі збільшеним у декілька разів реквізитом, для правдоподібності рухів.



Рисунок 1.13 – Кадр з художнього фільму «Полярний експрес»

2. «Веселі ніжки» (рис. 1.14). Режисер хотів аби кожен пінгвін для танцювальних сцен рухався по-своєму. Він використав метод захоплення руху з маркерами, одягнувши костюм з датчиками на танцюристів, що дало можливість одночасно записувати до 17 танцюристів. Під час виробництва компанія Animal Logic, що спеціалізується на спецефектах, розробила новий інструмент захоплення руху, який дозволяв вставляти персонажів у реальному часі у реалістичний простір. Цікаво виглядає суміш рухів людей з анімованими персонажами пінгвінів.

3. «Beowulf» (рис. 1.15). У фільмі були використані технології захоплення руху та комп'ютерної графіки для створення візуальних ефектів та анімації. Набір розміром приблизно 8 на 10 метрів, більше 200 сучасних камер та костюми, оснащені приблизно 70 датчиками, це обладнання, яке було використано, щоб

надати графічний аспект представлення персонажів, цього достатньо, щоб розпізнати акторів, які грають своїх персонажів.



Рисунок 1.14 – Кадр з мультфільму «Веселі ніжки» [32]



Рисунок 1.15 – Кадр з фільму «Beowulf»

Висновки по розділу: під час розгляду систем захвату руху були визначені методи та технології, які використовуються для захоплення рухів людини. Основними видами виділено маркерну і безмаркерну систему, де розглянуто їх використання і основні відмінності. Виділено декілька основних методів захвату руху, а саме: оптичний, інерційний, магнітний, ультразвуковий, захват руху рук, механічний, інфрачервоний, гіроскопічний та використання keyframes. Для кожного методу розглянуті інструменти і випадки їх використання, а також технологія взаємодії з людиною. Захоплення руху стає невід’ємним елементом в різних сферах життя, взаємодіє зі штучним інтелектом, впливає на розвиток художніх фільмів. Зростання популярності захоплення руху було зумовлене поєднанням технологічного розвитку та розширення його застосування у різних сферах, що зробило його важливим інструментом для створення реалістичної анімації, досліджень та освіти. Окремо виділено захоплення руху за допомогою ШІ, виділені переваги даного методу та недоліки. Технологія MoCap значно збагачує створення реалістичних анімаційних персонажів, граючи ключову роль в покращенні візуального контенту в кінематографії, іграх тощо. Розповсюдженими прикладами використання захвату руху стали певні кадри із фільмів «Веселі ніжки», «Полярний експрес» та «Beowulf». На сьогоднішній день через широке застосування захоплення руху, виходить більше новинок у кіноіндустрії, де візуальні ефекти вражають глядачів, також інші індустрії підхоплюють нові технології, що відкриває нові можливості в сучасному технологічному суспільстві.

2 ОГЛЯД ПРОГРАМ З ШІ ДЛЯ MOTION CAPTURE

2.1 Алгоритм роботи програм з ШІ для mocap

Програми для захоплення руху з ШІ працюють, використовуючи спеціалізовані алгоритми і технології комп'ютерного зору, аналізу даних і машинного навчання. Процес роботи цих програм виглядає так:

1. Сбір даних. Процес роботи додатків з ШІ починається зі збору даних про рух. Це може виконуватися за допомогою датчиків або без них. Дані можуть являти собою послідовність зображень або потік відео.

2. Виявлення ключових точок. Програми визначають ключові точки всередині зображень або відео, які репрезентують анатомічні особливості людини або об'єктів, що рухаються на екрані. Ці ключові точки можуть включати суглоби, кінцівки, голову та інші анатомічні частини [30].

3. Відстеження руху. Після виявлення ключових точок, програми використовують алгоритми відстеження руху для виявлення того, як ці точки переміщуються і які рухи виконують. Це може бути виявлення напрямку, швидкості, прискорення тощо.

4. Аналіз даних. Дані про рух аналізуються з використанням методів машинного навчання і ШІ. Сюди може входити класифікація рухів, визначення пози і жестів, аналіз кінематики та динаміки руху.

5. Генерація анімації. На основі аналізу даних і результатів роботи ШІ програми створюється анімація, яка відповідає захопленому руху [33].

6. Інтерпретація даних. Отримані у результаті дані також можуть бути використані для управління віртуальними персонажами, створення інтерактивних програм, навчання ІІ або інших цілей [28].

7. Корекція та покращення. У програму може входити набір інструментів для корекції та покращення анімації, щоб зробити рух більш реалістичним або він відповідав певному задуманому стилю.

Додатково програмам може знадобитися:

– Калібрування та налаштування. Програми для motion capture можуть вимагати початкового калібрування, щоб визначити відносне положення та орієнтацію камер та датчиків, дозволяючи системі правильно інтерпретувати рухи у реальному світі [37]. Калібрування впливає на точність захоплення руху, оскільки цей процес визначає співвідношення між вхідними даними від сенсорів та реальними рухами об'єкта чи особи. Точність motion capture залежить від того, наскільки ефективно визначаються параметри калібрування, такі як положення і орієнтація сенсорів [38]. Невірна орієнтація може призвести до зміщень у відтворенні руху та зниженню точності;

– Врахування навколишнього середовища. У деяких випадках програми можуть враховувати навколишнє середовище, щоб уникати перешкод або адаптувати поведінку об'єктів залежно від контексту [34]. Це може бути важливо, наприклад, для автономних роботів або віртуальних об'єктів, що взаємодіють із оточенням. Неправильне врахування факторів навколишнього середовища, таких, як освітлення і фонові об'єкти, може спричинити появу шуму та зайвих артефактів у захопленому русі;

– Обробка шуму та помилок. Для точного захоплення руху програми можуть включати методи обробки шуму та корекції помилок [19], щоб справлятися з неточностями даних, викликаних рухом камер, освітленням або іншими факторами. Використання різних фільтрів (наприклад, фільтр Калмана або фільтр низьких частот) для підготовки даних від сенсорів, що дозволяє відфільтровувати випадкові шуми та непередбачені зміни в значеннях [24]. Програми можуть мати розроблені алгоритми, які автоматично визначають та виправляють помилки, такі як невірні ідентифікації точок або аномалії у зафіксованому русі;

– Екстраполяція та інтерполяція. Використання алгоритмів екстраполяції використовується для прогнозування майбутніх значень [20] на основі попередніх даних. Інтерполяція використовується для заповнення пропущених або пошкоджених значень;

– Синхронізація. Іноді потребується врахування даних від різних джерел (наприклад, сенсорів на руках і ногах) та їхня синхронізація для уникнення розходження та невідповідностей у зафіксованому русі [22].

Для досягнення найкращих результатів у захопленні та аналізі руху програми для захоплення руху зі ШІ можуть використовувати різні методи:

- Нейронні мережі;
- Комп’ютерний зір;
- Інерційні вимірювачі [23];
- Сенсори і маркери;
- Алгоритм оптимізації;
- Зіставлення рухів із моделями.

Ці методи можуть використовуватися як самостійно, так і у комбінації, в залежності від потреб та завдань додатку для motion capture.

2.2 Перелік програм для захоплення руху

Для motion capture є такі програми із ШІ:

1. Radical (рис. 2.1). Radical – це програма для анімації в реальному часі для створення 2D і 3D анімацій:

- Доступність: безкоштовно та платно;
- Пробний період: відсутній;
- Вартість: 8\$ на місяць (96\$ на рік);
- Розробник: ТОВ «Radical Dynamics LLC»;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Основні характеристики: анімація в реальному часі, фальсифікація персонажів і підтримка захоплення руху;
- Випадки використання: підходить для створення анімації об’єктів для ігор, фільмів та інтерактивних медіа.

Безкоштовна реєстрація та можливість створити анімацію, є можливість переглянути скелет об'єкту, корегування освітленості, зміна неба та кольору підлоги, перегляд об'єкту з усіх боків. Такі функції, як: клонування, видалення, поворот і зміна позиції об'єкту, збереження файлу на комп'ютер у форматі FBX – доступні у платній версії.



Рисунок 2.1 – Анімація у Radical [31]

2. Deermotion (рис. 2.2). Deermotion пропонує інструменти захоплення руху та анімації на основі штучного інтелекту [14]:

- Розробник: DeerMotion Inc;
- Доступність: безкоштовно та платно (9\$-83\$), є бета-версія Motion GPT;
- Пробний період: відсутній;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Основні характеристики: motion capture в реальному часі, анімація на основі фізики та керування персонажами;
- Випадки використання: використовується для створення реалістичних анімацій персонажів в іграх і симуляторах.

Безкоштовна реєстрація, можливість трекінгу обличчя, рук, можливість редагування положення рук, ніг тощо (рис. 2.3). Зручний сайт, є можливість завантажити результат мовар у форматі FBX, BVH, DMPE та MP4. Для відео анімації можна змінювати фон, є можливість створення власного персонажа або використання вже запропонованих.



Рисунок 2.2 – Анімація у Deermotion [44]

Animation Settings	Current	New
Face Tracking ⓘ	✓	<input checked="" type="checkbox"/>
Hand Tracking ⓘ	✓	<input checked="" type="checkbox"/>
Root Joint At Origin (Legacy) ⓘ	✗	<input type="checkbox"/>
Upper Body Only ⓘ	✗	<input type="checkbox"/>
Physics Filter ⓘ	✓	<input checked="" type="checkbox"/>
Foot Locking ⓘ	Auto	Auto ▾
Fallback Pose ⓘ	A-Pose	A-Pose ▾
Motion Smoothing ⓘ	0.0	<input type="text" value="0.0"/>
Eye Tracking Sensitivity ⓘ	0.5	<input type="text" value="0.5"/>
Speed Multiplier ⓘ	1x	<input type="text" value="1"/>
Custom Character	✓	✓




Output Formats			
			
BVH	FBX	MP4	DMPE

Рисунок 2.3 – Налаштування у Deermotion

3. Rokoko (рис 2.4). Rokoko Vision – безкоштовний інструмент захоплення руху з штучним інтелектом [21]:

- Розробник: Rokoko Electronics Inc;
- Доступність: безкоштовно та платно;
- Пробний період: 14 днів у версії plus;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері та додаток на комп'ютер;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Ключові характеристики: безмаркерний захват руху, візуалізація в реальному часі та інтеграція з різноманітним програмним забезпеченням для 3D;
- Випадки використання: популярні в анімації, іграх і віртуальному виробництві.

Не дуже зручний веб-додаток. Є можливість збереження результату у форматі у форматі FBX.

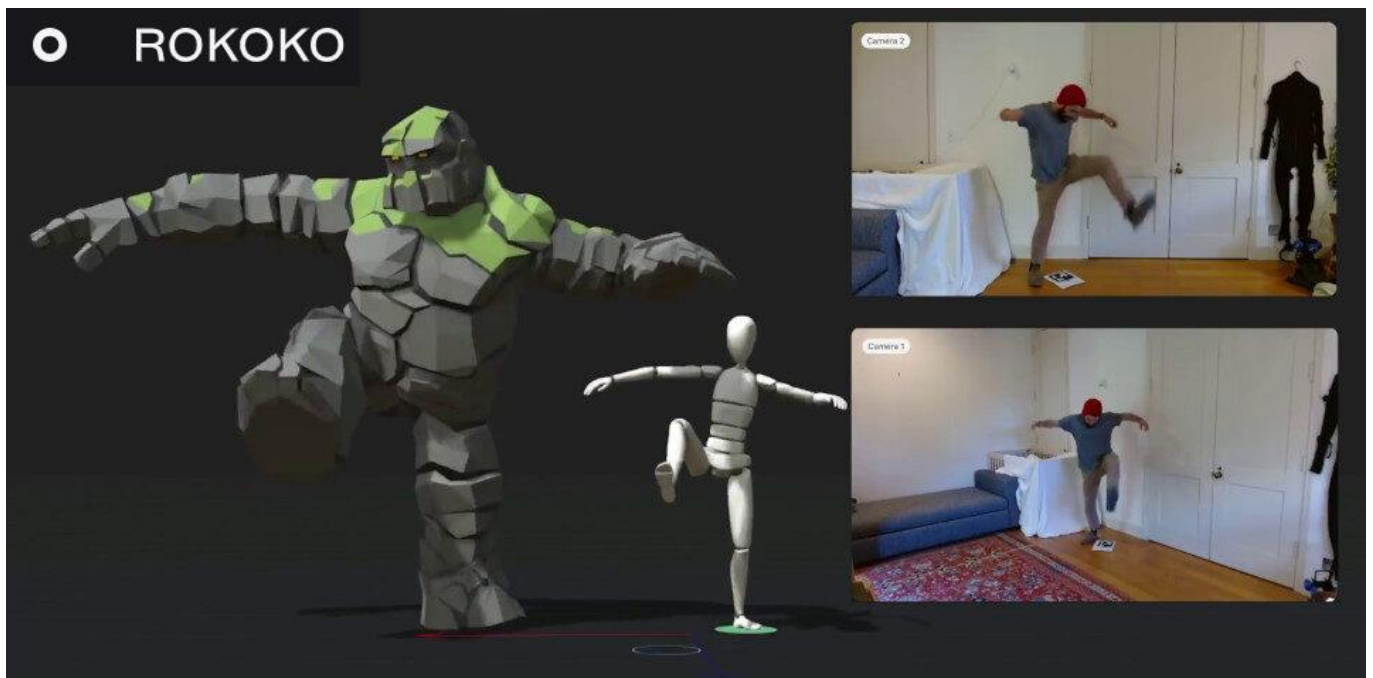


Рисунок 2.4 – Анімація у Rokoko

4. Plask (рис 2.5). Plask – набір інструментів анімації на основі відео та штучного інтелекту, ідеальний для швидкого створення прототипів і революції у робочому процесі 3D [29]:

- Розробник: команда Plask;
- Доступність: безкоштовно;
- Пробний період: відсутній;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері;
- Основні характеристики: анімація в реальному часі, графіка та інтерактивне мультимедіа;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Випадки використання: підходить для інтерактивного мистецтва, генеративної графіки та мультимедійних проєктів.

Безкоштовна реєстрація, відносна зручність веб-додатку, можливість збереження результату у форматі FBX. Є вже готові персонажі, яких можна використовувати: манекен, зомбі, лицар, персонаж авангарду та дівчинка. Також можна завантажити власного персонажа і вже для нього створювати анімацію на основі відео.

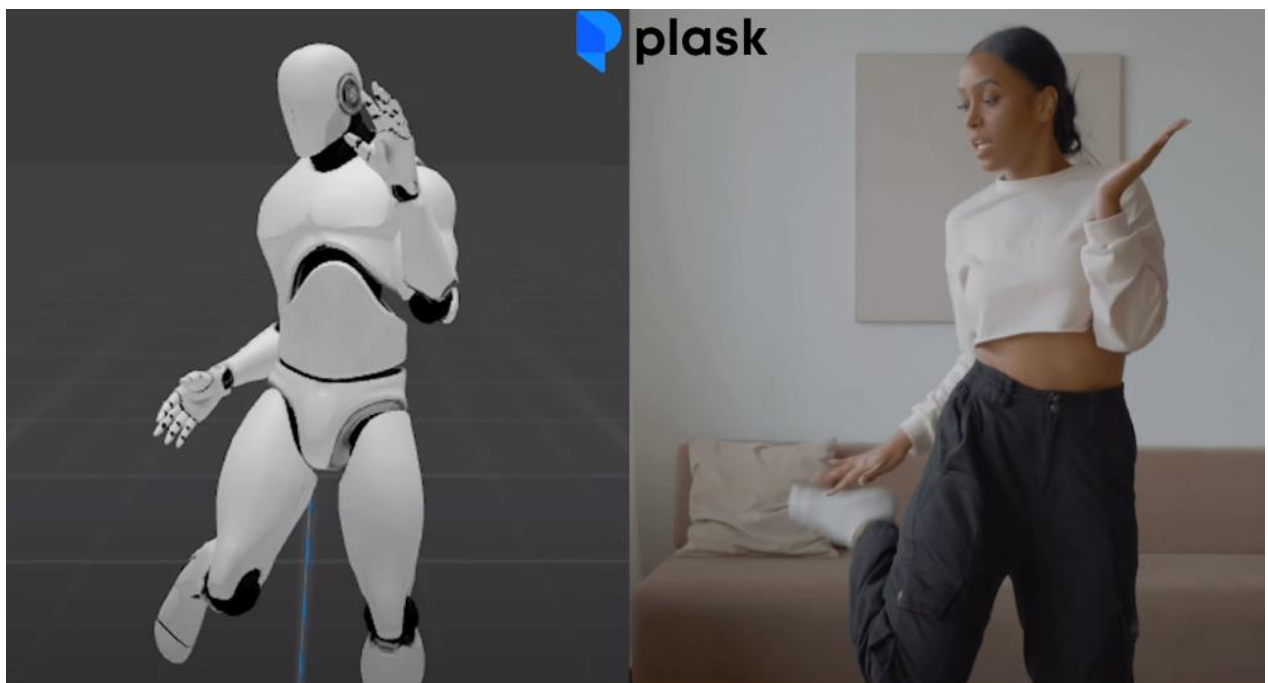


Рисунок 2.5 – Анімація у Plask

5. Kinetix (рис. 2.6). Kinetix – це інструмент для створення 3D без коду, який працює на основі штучного інтелекту:

- Доступність: безкоштовно;
- Пробний період: відсутній;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Обмеження: відео на 10 сек;
- Основні характеристики: використання AI motion capture для перетворення відео в 3D-анімацію;
- Випадки використання: підходить для анімацій, ігор.

Обов'язкова реєстрація, доволі зрозумілий сайт, недолік – не видаляє чернетки. Можливість збереження результату у форматі FBX.



Рисунок 2.6 – Анімація у Kinetix

6. Wonder Dynamics (рис. 2.7). Нейросітка Wonder dynamics створена для автоматичної генерації та анімації відео з 3D персонажами[3]:

- Розробник: Wonder Studio;
- Доступність: платно;
- Пробний період: відсутній;

- Вартість: Lite 203.8\$ на рік або 19.99\$ на місяць. Pro 1019.88\$ на рік 99.99\$ на місяць;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері, додаток для смартфона;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Випадки використання: підходить для анімацій, розважального контенту, мультимедійних проєктів.

Можна редагувати матеріал на всіх етапах за допомогою команд конструктора. Основні функції системи:

- Мосар для тіла;
- Робота з мімікою обличчя;
- Motion capture рук;
- Можливість створення «масок»;
- Автоматичне визначення рухів актора на основі кадрів із однієї камери.

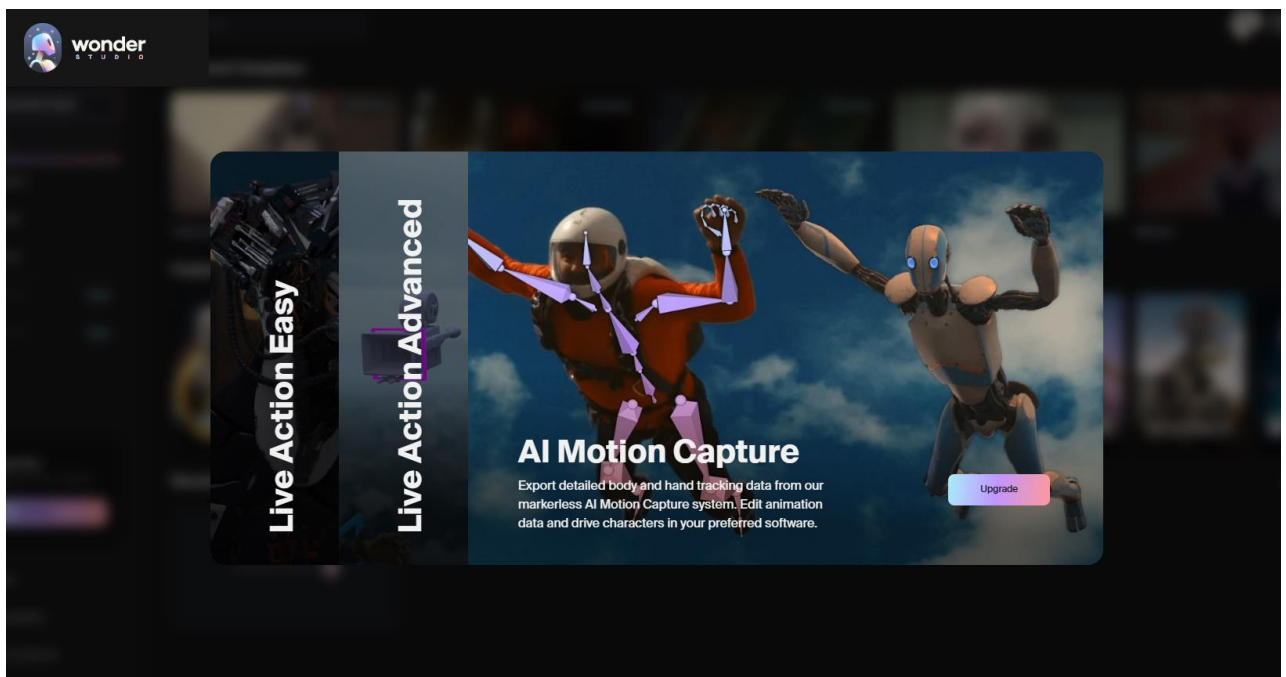


Рисунок 2.7 – Wonder Dynamics

7. Move ai (рис. 2.8). Програмне забезпечення із штучним інтелектом, яке здатне аналізувати відео і отримувати високоточну інформацію про рухи, перетворюючи їх у реалістичні цифрові дані:

- Доступність: закритий бета-доступ (рис. 2.9);
- Особливості: для користувачів iPhone;
- Платформа: веб-додаток у будь-якому браузері, додаток на комп'ютер для Windows, Linux та Mac;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Основні характеристики: використання AI тосар для перетворення відео в 3D-анімацію;
- Випадки використання: підходить для анімацій, ігор.

Програма може зчитувати рухи з однієї камери, двох та в режимі реального часу. Застосунок працює з більшістю iPhone, починаючи з iPhone 8 і закінчуючи останньою моделлю iPhone 15 під управлінням iOS 16 і вище. Отримані дані 3D-анімації можуть бути експортовані у будь-яку програму, включаючи Blender, Maya и Unreal Engine, де вони можуть бути спроектовані на існуючого персонажа.

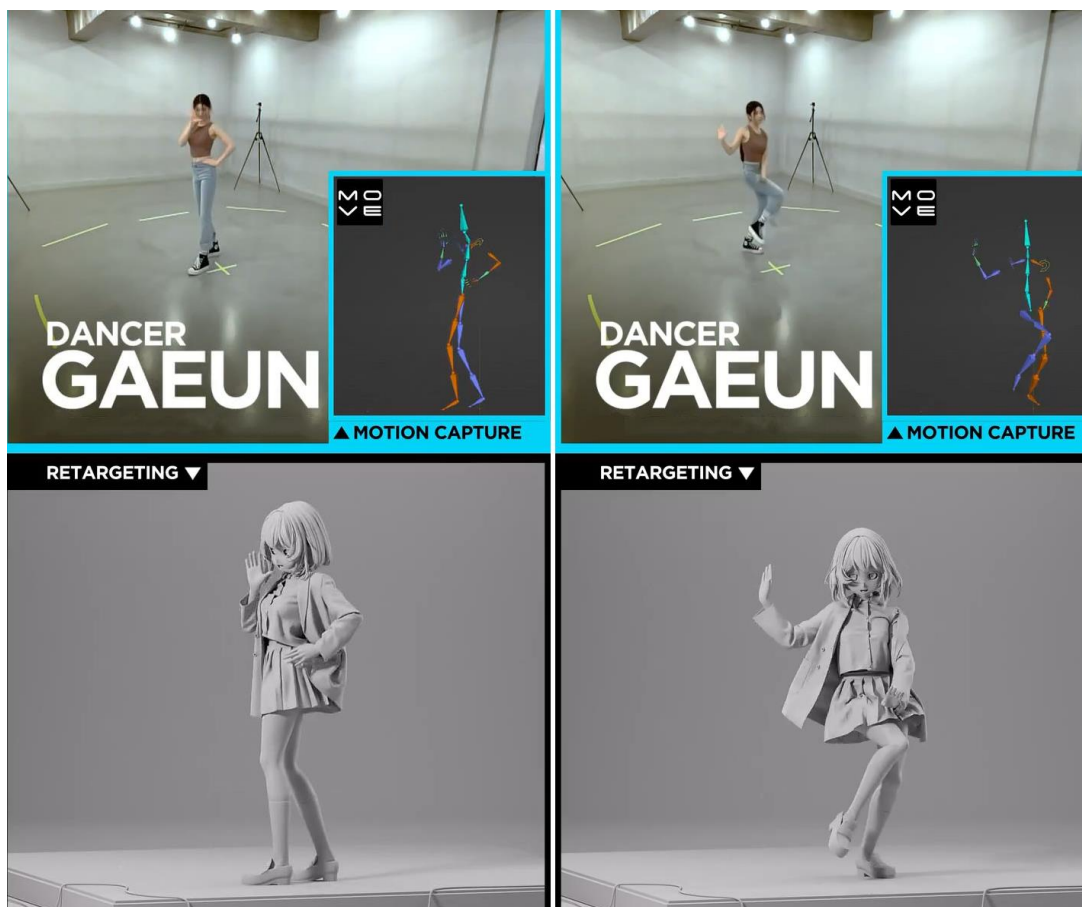


Рисунок 2.8 – Результат зчитування руху в Move

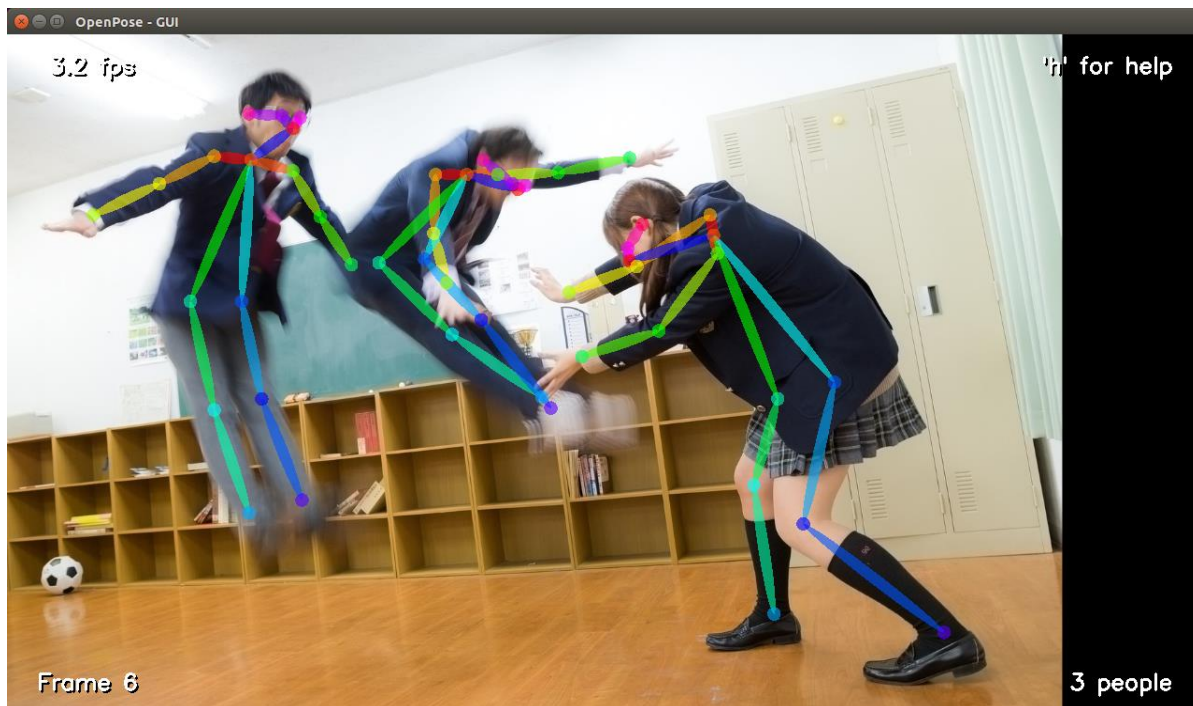


Рисунок 2.10 – MoCap в OpenPose [45]

9. OptiTrack Motive (рис. 2.11). Motive – це програма, яка працює з обладнанням OptiTrack:

- Розробник: NaturalPoint, Inc;
- Доступність: платно, безстрокова ліцензія, в залежності від напрямку захвату руху, ліцензія коштує від 999\$ до 9,999\$ на рік;
- Пробний період: відсутній;
- Платформа: ОС Windows та Linux;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Випадки використання: для створення ігор, анімації та фільмів.

Для використання OptiTrack потрібно спеціалізоване обладнання, включаючи оптичні камери, маркери, софтболи для калібрування та інші компоненти. Кількість та тип обладнання залежатимуть від конкретних вимог вашого проекту.

10. Cartoon Animator 5 (рис. 2.12). Додаток захвату руху для 2D-анімації

- Розробник: Reallusion;
- Доступність: платно, ліцензія 149\$;
- Пробний період: 30 днів;

- Платформа: ОС Windows;
- Мова інтерфейсу: англійська, іспанська, французька, німецька тощо;
- Випадки використання: створення 2D-анімації.

У Cartoon Animator 5 є можливість додавання мови та музики до анімаційних проєктів. Наявні бібліотеки ресурсів, включаючи персонажі, фони та об'єкти. Інструменти для редагування та налаштування анімацій.

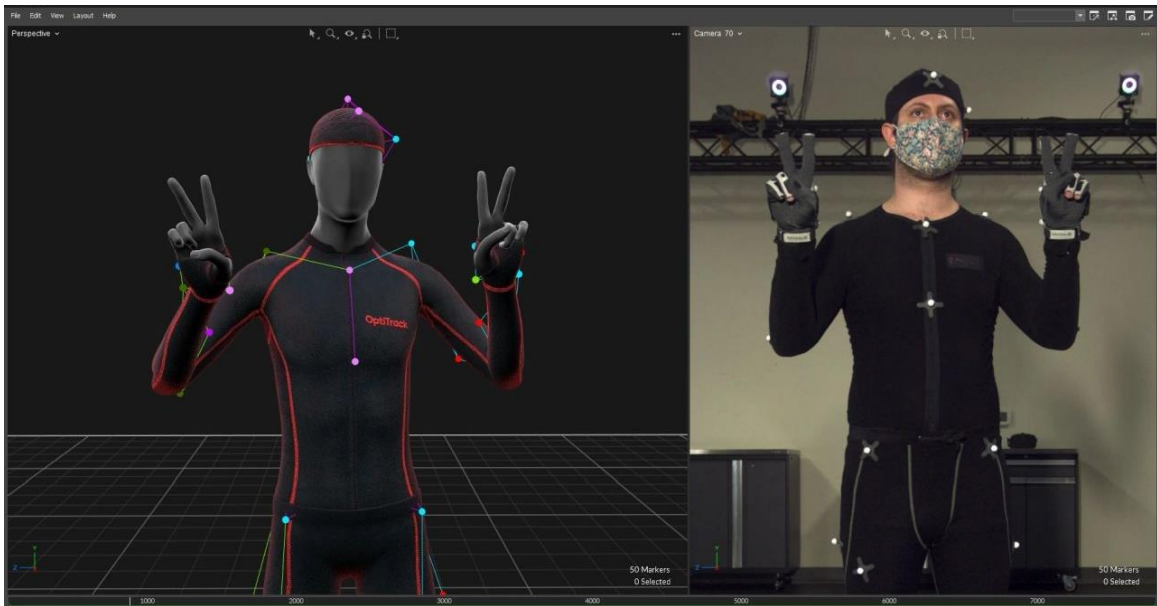


Рисунок 2.11 – Захоплення руху у OptiTrack Motive [46]

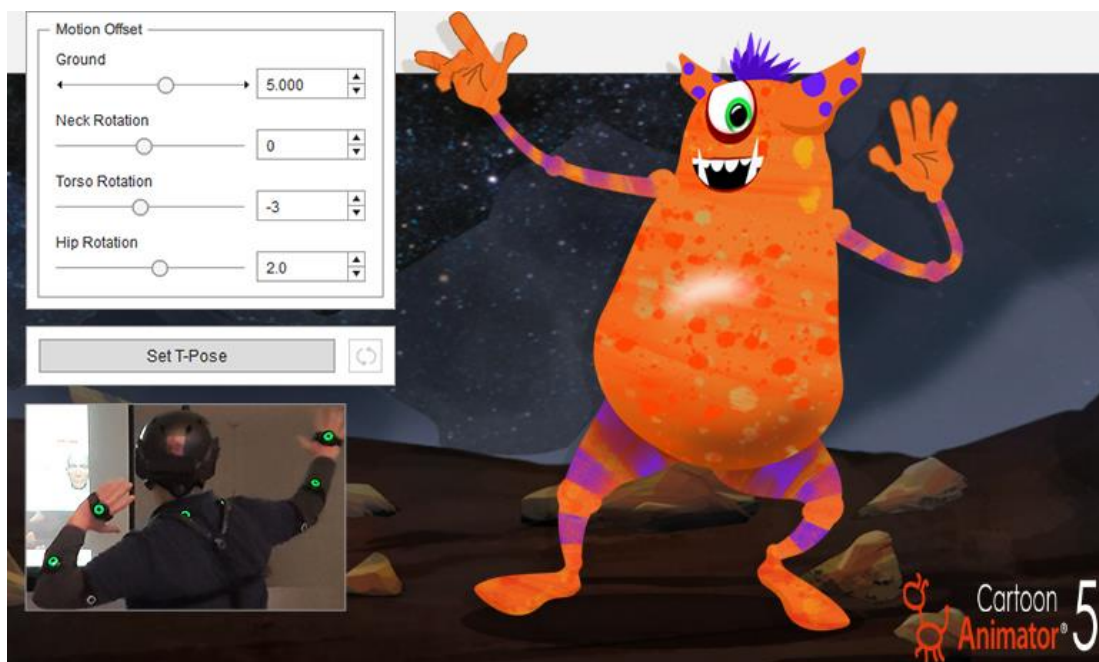


Рисунок 2.12 – Робота у Cartoon Animator 5

11. Autodesk MotionBuilder (рис. 2.13). Це популярне програмне забезпечення для анімації захоплення руху, яке дозволяє використовувати широкий спектр інструментів для налаштування нюансів руху моделі з максимальною швидкістю, точністю та узгодженістю:

- Розробник: Autodesk;
- Доступність: платно, ліцензія 2,145€ на рік;
- Пробний період: 30 днів;
- Платформа: ОС Windows;
- Мова інтерфейсу: англійська, іспанська, французька, німецька тощо.
- Випадки використання: підходить для анімацій, ігор.

Це програмне забезпечення для захоплення руху в реальному часі пропонує інтерактивний і дисплей, що налаштовується, який допомагає захоплювати живий рух, редагувати і відтворювати складну анімацію персонажів.

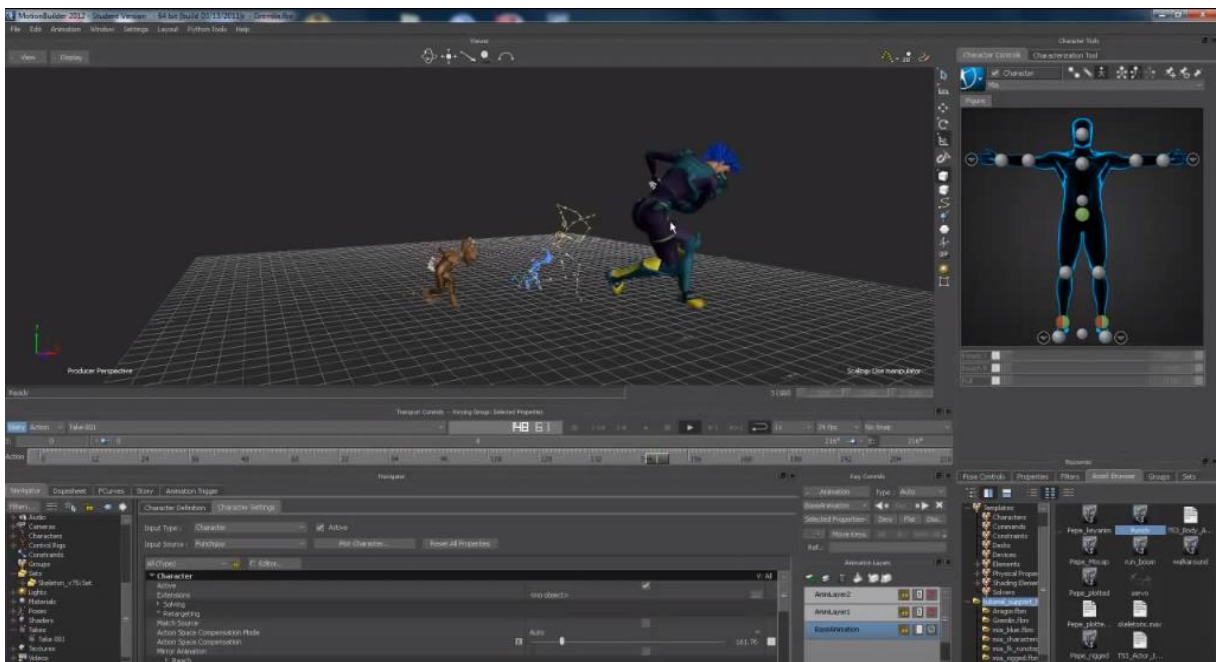


Рисунок 2.13 – Autodesk MotionBuilder [47]

12. iPi Motion Capture (рис. 2.14). iPi Motion Capture – це програмне забезпечення для захоплення руху, яке відстежує 3D-рух людського тіла та створює 3D-анімацію:

- Розробник: iPi Soft LLC;
- Доступність: платно, в залежності від рівня 195\$-1995\$;
- Пробний період: 30 днів;
- Платформа: ОС Windows;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Випадки використання: інтерактивне мистецтво.

Захоплення руху з використанням звичайних веб-камер і смартфонів. Є можливість запису і анімації руху в реальному часі. Має плагін Live link для Unreal Engine 5.0 та зручний інтерфейс. Не потребує високотехнологічного програмного або апаратного забезпечення.

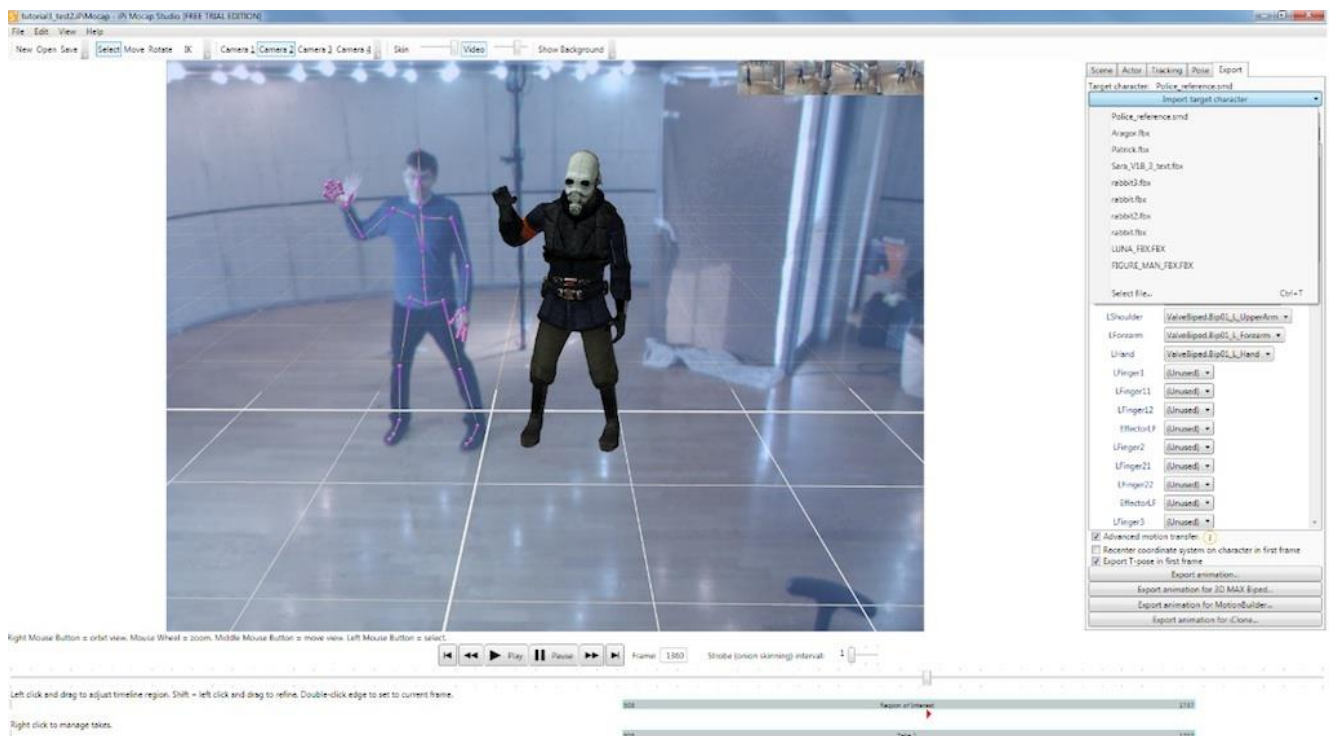


Рисунок 2.14 – Захват руху в iPi Motion Capture [48]

13. ThreeDPoseTracker (TDPT). Це програмний інструмент, який використовується для захоплення руху та відстеження рухів людського тіла у 3D-просторі (рис. 2.15):

- Розробник: DIGITAL STANDARD CO., LTD;
- Доступність: безкоштовно та платно;

- Пробний період: відсутній;
- Платформа: iOS, для iPhone SE (2-го покоління) та iPhone 11 або новіше, версія для Windows 10;
- Мова інтерфейсу: англійська;
- Випадки використання: для використання із системами віртуальної реальності (VR).

TDPT може захоплювати рух у режимі реального часу під час відтворення відео. Більш точне захоплення руху може бути досягнуто в умовах яскравого освітлення, наприклад, при сонячному світлі, ніж при нічній зйомці. Є такі функції, як обертання, переміщення, збільшення/зменшення, перемикання фонового дисплея тощо. Експорт у форматах VMD та BVH.



Рисунок 2.15 – Motion capture у ThreeDPoseTracker

2.3 Методи, які використовуються у роботі неймереж

Якщо функція дає положення чогось як функції часу, то перша похідна дає його швидкість, а друга похідна – прискорення. Отже, диференціюється положення, щоб отримати швидкість, і диференціюється швидкість, щоб отримати прискорення.

Наприклад йо-йо рухається прямо вгору і вниз. Його висота над землею, як функція часу, задається функцією, де t – в секундах, а $H(t)$ – в сантиметрах (рис 2.16). При $t = 0$ він знаходиться на висоті 30 см над землею, а через 4 секунди – на висоті 18 см [40].

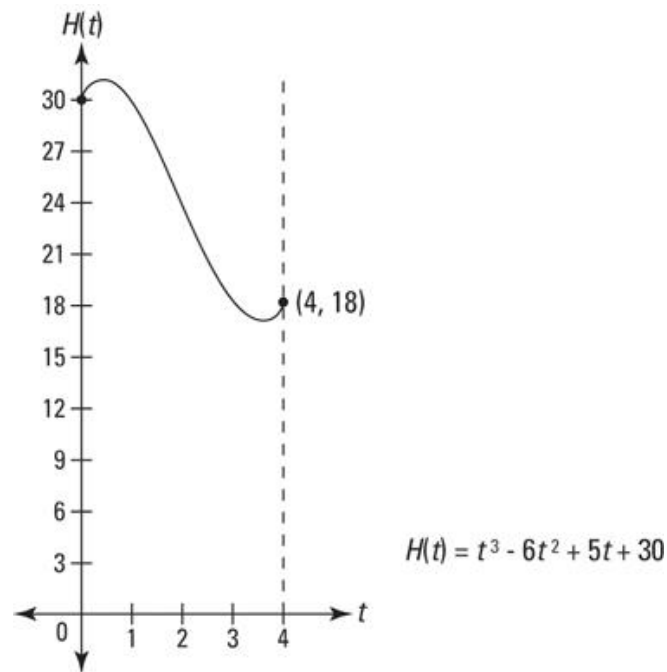


Рисунок 2.16 – Графік висоти йо-йо, від 0 до 4 секунд.

Швидкість, $V(t)$ є похідною від положення (висоти, в даній задачі), а прискорення, $A(t)$, є похідною від швидкості.

Співвідношення швидкості переміщення (velocity) та швидкості руху (speed). Слова наче синоніми, але є різниця.

Для функції швидкості, зображеної на рисунку 2.17, рух угору визначається як позитивна швидкість, а рух вниз визначається як від’ємна швидкість – це стандартний спосіб обробки швидкості в більшості математичних задач та задач з фізики. (Якщо рух горизонтальний, то рух праворуч – це позитивна швидкість, а рух ліворуч – негативна.)

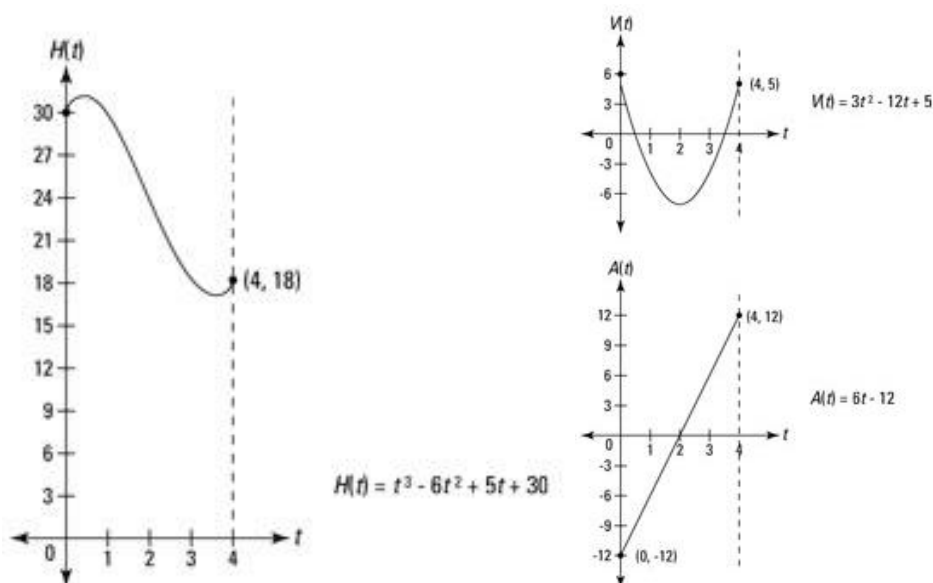


Рисунок 2.17 – На графіках показані функції зросту, швидкості та прискорення його від 0 до 4 секунд.

Швидкість, з іншого боку, завжди позитивна (або дорівнює нулю). Наприклад, якщо автомобіль їде зі швидкістю 50 миль на годину, говорять, що його швидкість становить 50, і розуміється позитивні 50, незалежно від того, їде він праворуч чи ліворуч.

Якщо для швидкості переміщення (velocity) має значення напрямок, то для швидкості руху (speed) це не так. Наприклад, якщо об'єкт рухається вниз (або вліво) все швидше і швидше, його швидкість руху зростає [7], але його швидкість переміщення зменшується, тому що його швидкість переміщення стає більш від'ємною (а більш від'ємні – це менші числа). Це здається дивним, але саме так це працює.

І ще: прискорення визначається як швидкість зміни швидкості переміщення, а не швидкості руху. Отже, якщо об'єкт сповільнюється, рухаючись у низхідному напрямку, і, таким чином, має зростаючу швидкість, оскільки швидкість стає менш негативною, то об'єкт має позитивне прискорення.

Максимальна і мінімальна висота. Максимальна і мінімальна висота $H(t)$ припадають на локальні екстремуми, які зображені на рисунку 2.16. Щоб їх знайти, потрібно встановити похідну від $H(t)$ – тобто $V(t)$ – рівною нулю і розв'язати.

Ці два числа є нулями $V(t)$ і t -координатами (тобто часовими координатами) максимального і мінімального значення $H(t)$, які ви можна побачити на рисунку 2.17. Іншими словами, це час, коли йо-йо досягає своїх максимальних і мінімальних висот. Підставити ці числа в $H(t)$, щоб отримати висоти:

$$H(0,47) \approx 31,1$$

$$H(3,53) \approx 16,9$$

Таким чином, йо-йо піднімається на висоту приблизно 31,1 см над землею при $t \approx 0,47$ секунди і до 16,9 см. При $t \approx 3,53$ секунди.

Загальний робочий об'єм визначається як кінцева позиція за вирахуванням початкової позиції. Отже, оскільки йо-йо починається на висоті 30 і закінчується на висоті 18, то зміщення $= 18 - 30 = -12$. Воно від'ємне, тому що рух йде вниз.

Середня швидкість задається загальним переміщенням, поділеним на час, що минув. Таким чином: середня швидкість $= -(12/4) = -3$. Ця від'ємна відповідь говорить про те, що йо-йо в середньому знижується на 3 см в секунду.

Максимальна і мінімальна швидкість йо-йо в інтервалі від 0 до 4 секунд визначаються за допомогою похідної від $V(t)$: Потрібно встановити похідну від $V(t)$ – тобто $A(t)$ – рівною нулю і вирішити:

$$V'(t) = A(t)$$

$$A(t) = 6t - 12$$

$$6t - 12 = 0$$

$$6t = 12$$

$$t = 2$$

Потім обчислити $V(t)$ при критичному числі 2 і в кінцевих точках інтервалу – 0 і 4:

$$V(0) = 5$$

$$V(2) = -7$$

$$V(4) = 5$$

Так, йо-йо має максимальну швидкість 5 см на секунду двічі – на початку і в кінці інтервалу. Він досягає мінімальної швидкості – 7 см на секунду при $t = 2$ секундах.

Загальна пройдена відстань. Загальна пройдена відстань визначається шляхом додавання відстаней, пройдених на кожному відрізку подорожі йо-йо: верхній етап, нижній етап та другий етап вгору.

По-перше, йо-йо піднімається з висоти 30 см приблизно до 31,1 см (там, де знаходиться перша точка розвороту). Це відстань близько 1,1 см. Далі він знижується приблизно з 31,1 до приблизно 16,9 (висота другої точки розвороту). Ця відстань складає 31,1 мінус 16,9, або близько 14,2 см. Нарешті, йо-йо знову піднімається приблизно з 16,9 см до своєї остаточної висоти 18 см. Це ще 1,1 см. Потрібно додати ці три відстані, щоб отримати загальну пройдену відстань: $\sim 1,1 + \sim 14,2 + \sim 1,1 \approx 16,4$ см.

Середня швидкість визначається загальною пройденою відстанню, поділеною на витрачений час. Таким чином:

$$\text{Середня швидкість} = \frac{16.4}{4} = 4.1 \text{ см в секунду}$$

Прискорення і уповільнення. Об'єкт прискорюється щоразу, коли швидкість і прискорення обчислень позитивні або обидва негативні. І об'єкт сповільнюється, коли швидкість і числення мають протилежні знаки.

Якщо подивитися на всі три графіки на малюнку 2.17. Від $t = 0$ до приблизно $t = 0,47$ (коли швидкість дорівнює нулю) швидкість позитивна, а прискорення негативне, тому йо-йо сповільнюється (поки не досягне максимальної висоти).

Коли $t = 0$, уповільнення є найбільшим (12 см на секунду в секунду; графік показує прискорення від'ємне 12, але це називають уповільненням, тому 12 є позитивним). Приблизно від $t = 0,47$ до $t = 2$ і швидкість, і прискорення негативні, тому йо-йо знову сповільнюється (поки не досягне дна на найнижчій висоті).

Нарешті, приблизно від $t = 3,53$ до $t = 4$ і швидкість, і прискорення позитивні, тому йо-йо знову прискорюється. Йо-йо досягає свого найбільшого прискорення 12 см на секунду при $t = 4$ секунди.

Варто звернути увагу, що три графіки на рис.2.17 пов'язані між собою. Від'ємний відрізок графіка $A(t)$ – від $t = 0$ до $t = 2$ – відповідає спадному відрізку графіка $V(t)$ і увігнутій вниз ділянці графіка $H(t)$. Додатний інтервал графіка $A(t)$ – від $t = 2$ до $t = 4$ – відповідає зростаючому інтервалу на графіку $V(t)$ і увігнутому

інтервалу вгору на графіку $H(t)$. Коли $t = 2$ секунди, $A(t)$ має нуль, $V(t)$ – локальний мінімум, а $H(t)$ – точку перегину.

Висновки по розділу: розібрані основні процеси роботи програм для захвату руху з використанням штучного інтелекту, серед яких: збір даних, виявлення ключових точок, відстеження руху, аналіз даних, генерація анімації, інтерпретація даних, корекція та покращення. Виявлені додаткові процеси які необхідні для гарної роботи програми і методи для кращого результату захвату руху. Виявлені основні і додаткові процеси роботи програм для захвату руху з використанням ШІ. Розглянуті програми для захвату руху, а саме: Radical, Deepmotion, Rokoko, Plask, Kinetix, Wonder Dynamics, Move ai, OpenPose, OptiTrack, Motive, Cartoon Animator 5, Autodesk MotionBuilder, iPi Motion Capture, ThreeDPoseTracker. Розглянуто їхні основні характеристики і випадки використання, із переліку програм було обрано 5 для використання та створення власного захвату руху, серед яких: Radical, Deepmotion, Rokoko, Plask, Kinetix. Причинами обрання цих програм стали: їхня доступність, відома якість роботи, швидкість виконання. Представлені алгоритми програм штучного інтелекту, що використовуються для захоплення руху, демонструють сучасні підходи до аналізу руху через високоточні обчислення.

3 ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМ ДЛЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ РУХІВ НА ОБ'ЄКТИ

Для того, щоб розпочати роботу з програмами для захоплення руху, було знято відео танцю (рис. 3.1) тривалістю 15 секунд на фронтальну камеру смартфона Xiaomi Redmi S2 із якістю FHD 1080p, 30кадр/сек.

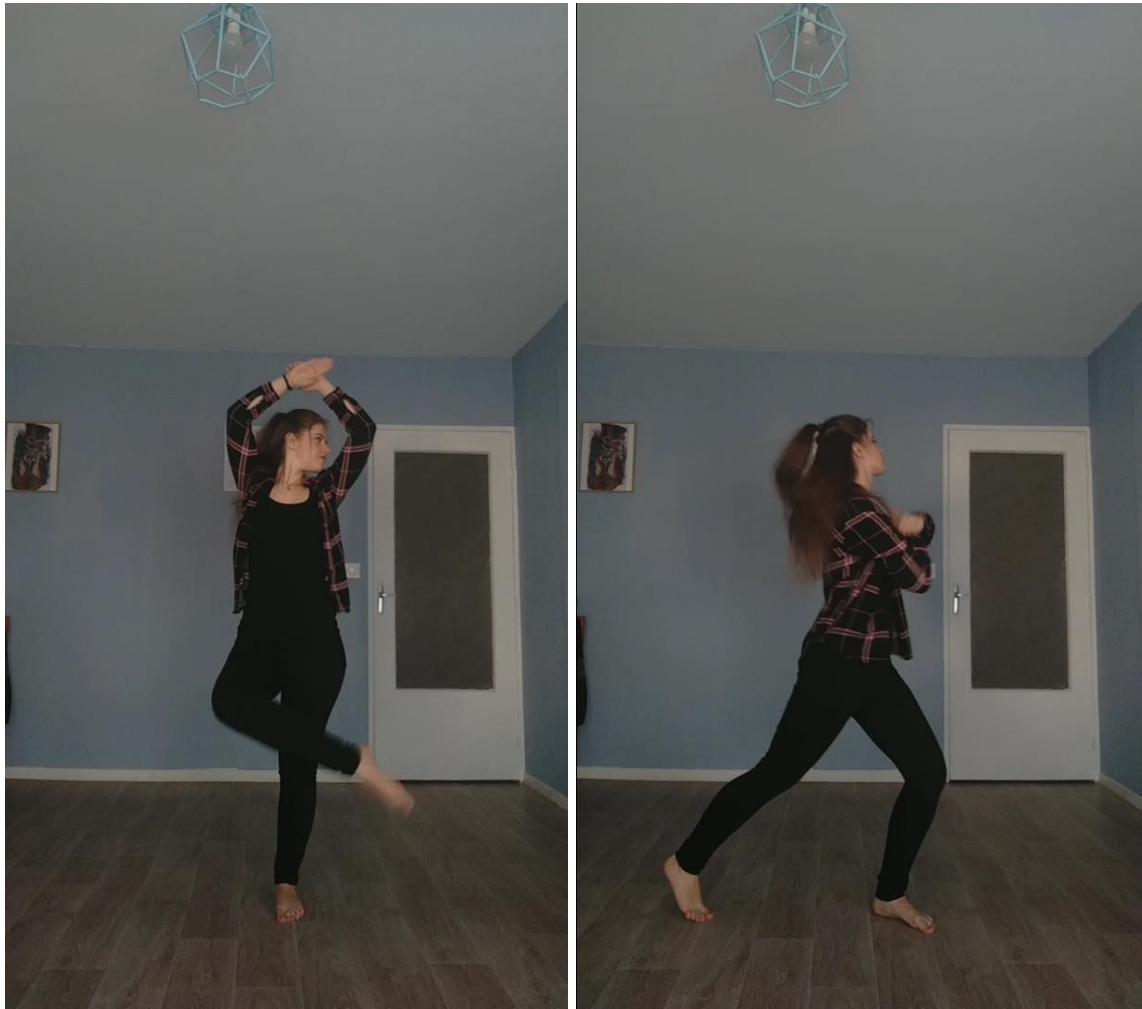


Рисунок 3.1 – Фрагменти відзнятого відео

Завантаживши відео на комп'ютер і знайшовши програми для захоплення руху, було розпочато роботу з цими програмами. Розглянемо детальніше кожну:

1. Radical. Спочатку було необхідно зареєструватися на сайті даної програми. Наступним кроком йде завантаження записаного відео, для цього необхідно зробити такі кроки: Create – Upload video (video to 3D motion capture).

Відкривається нове вікно, у якому необхідно дати назву проекту, назву сцені, за бажанням – опис і завантажити власне відео з комп'ютера. Потім програма починає аналіз відео, на цьому етапі необхідно зачекати. Після обробки можна побачити відео із роботом, який повторює рухи з відео. Результат можна побачити на (рис. 3.2.)

Якість мотар: 7/10. Хоча основні рухи програма змогла виділити, але положення другої руки не вірне – насправді вона знаходиться за тілом, а у скелета залишається на місці. Нога повинна махати попереду другої ноги, а у скелета вона махає позаду. Такі недоліки, як рух пальців – це нормально.

Переглянувши скелет об'єкту та погравшись з освітленістю і його кольором, потрібно було зберегти проект, але на жаль, у безкоштовній версії програми збереження файлу на комп'ютер у форматі FBX – недоступно.

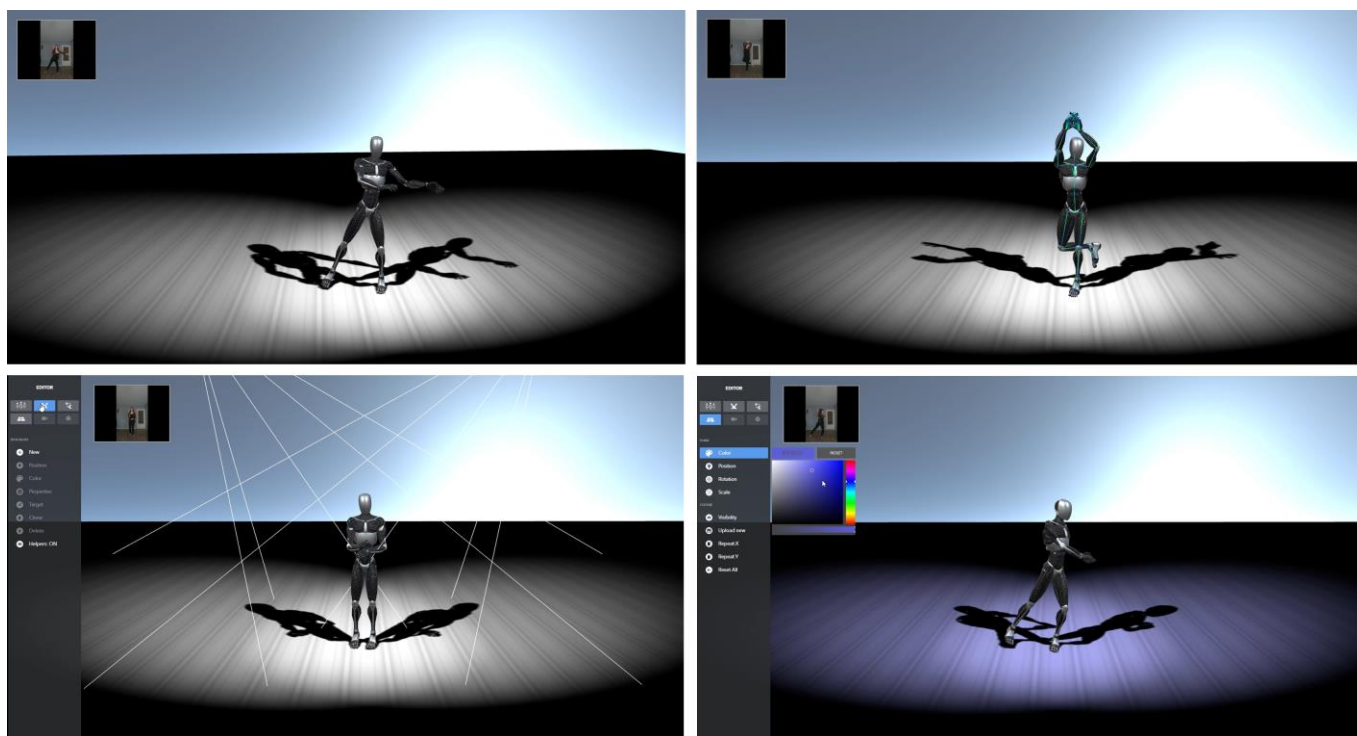


Рисунок 3.2 – Результат обробки відео у Radical

2. Deermotion. Першим етапом була реєстрація на сайті, потім огляд сайту для розуміння як працювати із ним далі. Знайшовши куди завантажити відео і

завантаживши його, програма відкрила налаштування, які потрібно було обрати.

Серед них:

- Трекінг обличчя (обрано);
- Трекінг рук (обрано);
- Тільки верхня частина тіла (не обрано);
- Фізичний фільтр (обрано);
- Швидкість 1x;
- Вибрати формат або формати завантаження результату між FBX, BVH, DMPE і MP4 (обрано FBX і MP4).

Наступним етапом було обрання самого персонажу, який надає Deepmotion. У першому випадку був вибір між персонажем чоловіка та жінки, потім обрання між статурами: більш худий чи повний. Можна ввести зріст та вагу і воно само налаштує. Далі йде обрання заднього фону серед запропонованих або можна завантажити свій варіант (рис. 3.3).

Обравши усі необхідні налаштування, починається обробка відеофрагменту, в залежності від об'єму та тривалості відео, обробка має різний час. На обробку ролика тривалістю 15 сек. та вагою приблизно 37Мб знадобилося хвилин 5-7.

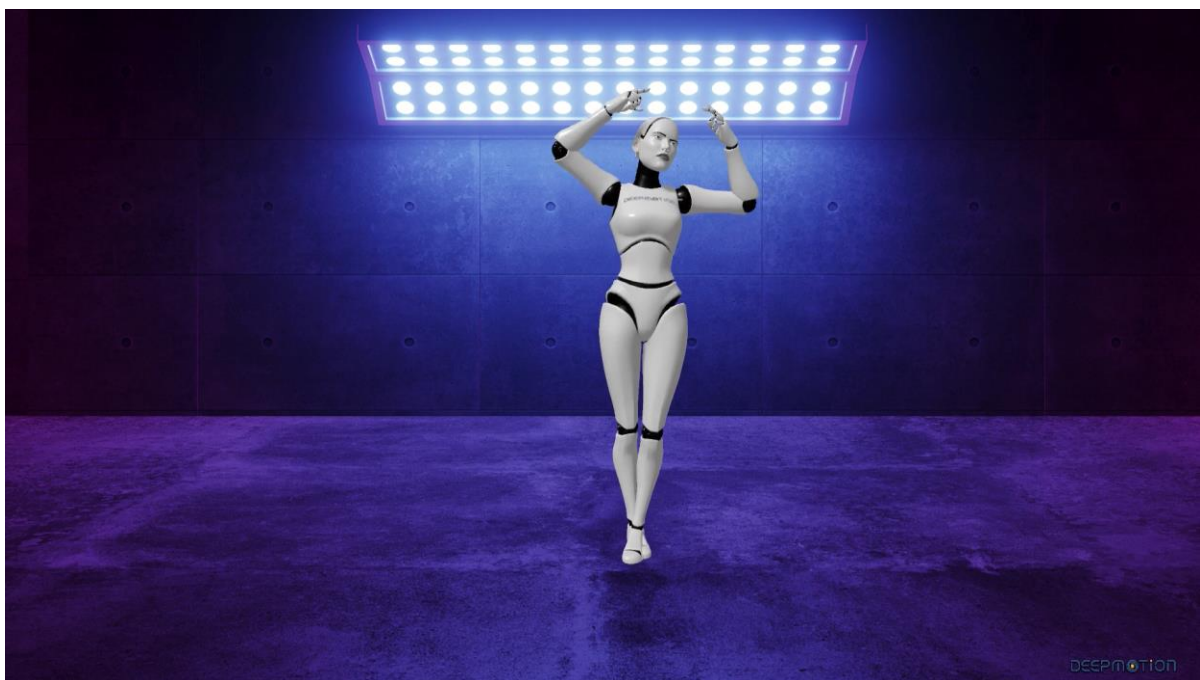


Рисунок 3.3 – Фрагмент із відео з персонажем Deepmotion

Після того, як програма обробила відео, показується попередній результат. Його можна змінити, тобто скоригувати рухи на більш правильний варіант. Це можна робити як у 2D, так і у 3D версії (рис. 3.4). Так як на попередньому результаті права нога була у невірному положенні, була спроба скоригувати це, перенісши коліно та стопу перед лівою ногою. Й зміна розташування ліктів і лівої руки у більш правильне положення.

Якість MoCap можна оцінити як 7/10. Є трекінг обличчя, не ідеальний, але це через доволі далеке розташування обличчя від камери, нестачі освітлення та якості відео. Рухи рук дуже дивні і мало схожі на оригінал, нога залазить в іншу й стає у дивне положення, не зважаючи на редагування.

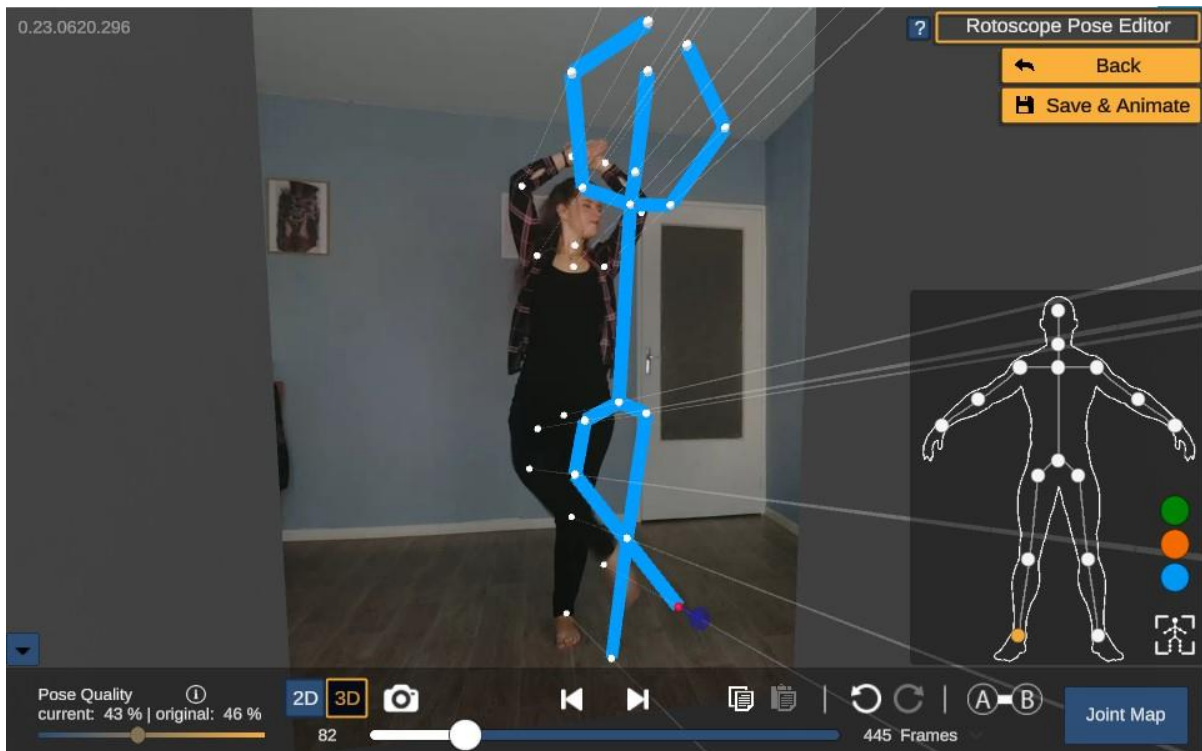


Рисунок 3.4 – Коригування рухів у Deermotion

Також у Deermotion є можливість створити власного персонажа. Серед налаштувань для створення персонажа можна обрати:

- Стать та статуру;
- Колір та довжину волосся;
- Колір та розріз очей;

- Колір та форму бровей;
- Форму та колір губ;
- Одяг.

Потім, знов завантаживши відео з потрібними рухами, обрати створеного персонажа, перенести на нього ці рухи з допомогою програми і налаштувати параметри для motion capture.

Із створеним персонажем якість захоплення руху дещо краще, є рух пальців, але під кінець відео кисті рук стають у дивне положення, на деяких моментах заходять одна в одну (рис. 3.5). Все це можна виправити, але вже в іншому додатку. Завантаживши результат у форматі FBX його можна перенести у програми для 3D та відредагувати положення кінцівок власноруч.



Рисунок 3.5 – Створений персонаж у Deermotion з накладеним на скелет захопленим рухом

3. Rokoko. Ця програма є доволі популярною, дуже часто саме її використовують для захоплення рух, а потім переходять у Blender, Autodesk Maya, 3D Max або Unreal Engine.

Зайшовши на сайт Rokoko та зареєструвавшись, почалися розшуки, як працювати з програмою та куди потрібно завантажити відео. Знайшовши потрібну кнопку і додавши власне відео, був отриманий результат (рис. 3.6), який завантажено на комп'ютер у форматі FBX.

Якість захоплення руху: 6/10. Рухи різкі і нечіткі. На моменті, коли обидві руки підіймаються в гору, у персонажа одна опиняється за спиною (рис. 3.7). Дуже часто рухи входять у тіло, або одна рука проходить крізь іншу.



Рисунок 3.6 – Створене захоплення руху у Rokoko

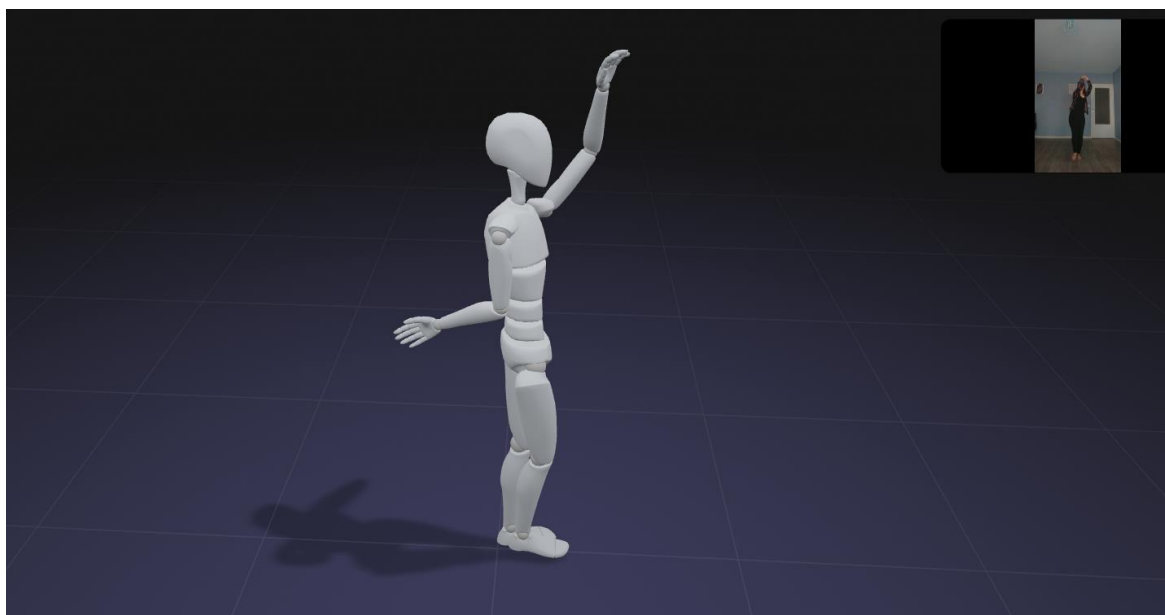


Рисунок 3.7 – Недоліки захоплення руху у Rokoko

4. Plask. Для початку роботи із цією програмою також потрібно зареєструватися на сайті. Далі програма відкриває робочий простір сервісу у якому є бібліотека, яку можна використовувати та в яку можна додавати власних персонажів чи відео.

Для початку обравши манекен (рис. 3.8) та завантаживши у бібліотеку Plask відзняте відео, яке програма одразу обробляє і покадрово визначає усі рухи, обирається дія – вилучити рухи. Давши назву вилученим рухам, йде процес очікування обробки інформації, час якого залежить від об'єму відео.

Щоб обраний персонаж опинився у робочу просторі, необхідно перетягнути його шар на робочий простір, де він опиниться у стандартній позі.

Потім потрібно перетягнути вилучені рухи у шар з персонажем. У результаті отримується анімація манекену. У цьому ж просторі можна програти анімацію натиснувши play, навіть з різною швидкістю, за необхідності.

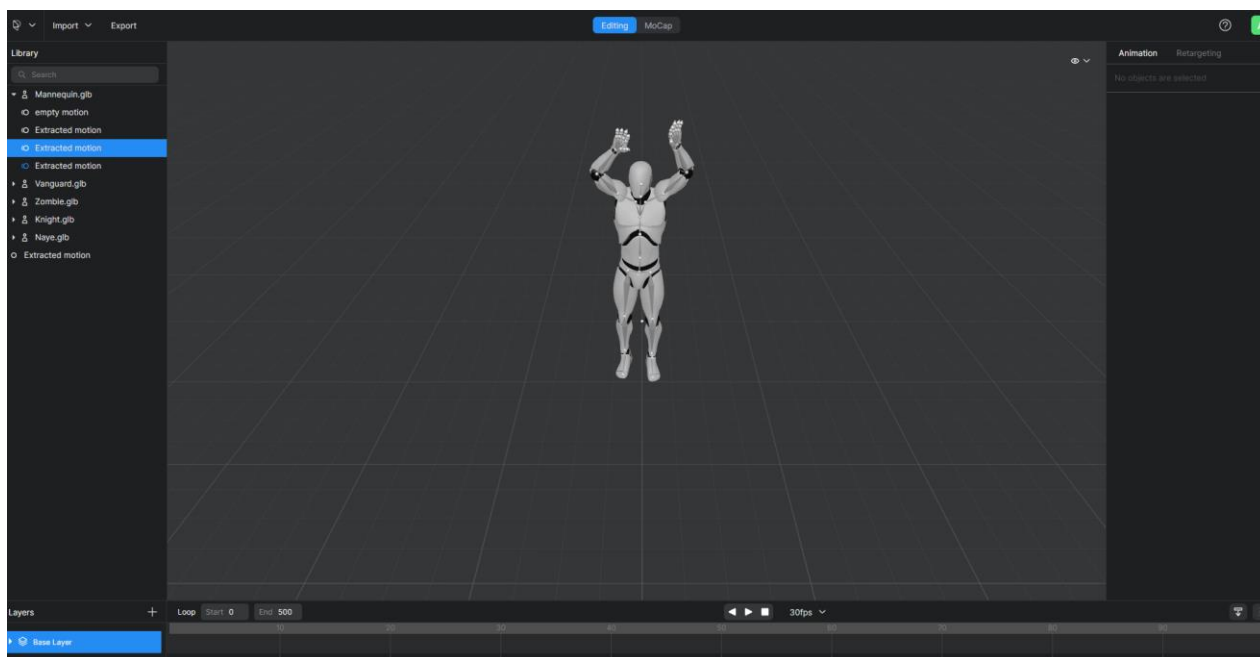


Рисунок 3.8 – MoCap на манекені у Plask

Якщо хочеться, аби анімація відбувалася із іншим персонажем, так само необхідно перетягнути вилучені рухи у шар із іншим персонажем, наприклад Ная (рис. 3.9). Або завантаживши власного персонажа, перенести файл з захопленими рухами на нього.

Отриманий результат можна завантажити як 3D-об'єкт. Під час експорту необхідно обрати файл з рухами, бо інакше завантажиться лише персонаж та обрати формат FBX, GLB або BVH. І вже потім можна працювати з цим анімованим персонажем у будь-якому 3D додатку.



Рисунок 3.9 – MoCap на персонажі Ная у Plask

Окрім завантаження власного відео, у Plask є можливість зробити тосар за допомогою веб-камери. Для цього потрібно відкрити вкладку тосар, яка знаходиться вгорі робочого простору і розпочати запис відео у самій програмі, перед цим надавши доступ програмі до веб-камери, можна обрізати його або залишити як є, потім йде повторення усіх дій, які були зроблені після завантаження власного відео з комп'ютера.

Якість motion capture можна оцінити на 8 з 10. Рухи дуже плавні, інколи навіть занадто, але це добре для танцю, у інших програмах не доставало плавності. Навіть рука один раз опинилася позаду тіла як і на відео, але часто є підвисання, руки не завжди там де вони повинні бути та знов таки проблема, що одна нога заходить у іншу (рис. 3.10).

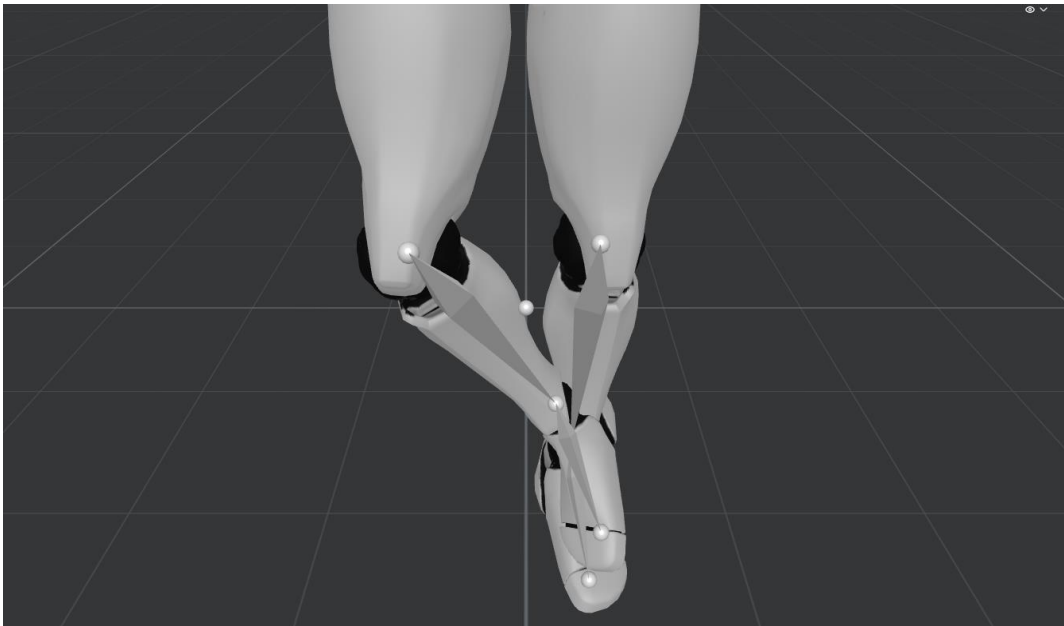


Рисунок 3.10 – Проблеми з захоплення руху

5. Kinetix. Перейшовши на сайт studio kinetix, першим етапом також є реєстрація або вхід за допомогою пошти чи фейсбуку. Наступним кроком потрібно клацнути на кнопку «створити емоцію» і дати їй назву. Далі з'являється вибір режиму створення емоції:

- Запис відео у самій програмі;
- Завантаження файлу з комп'ютера чи телефона (дивлячись з якого пристрою сидіти);
- Бібліотека Kinetix. Можна обрати серед представлених на сайті рухів один і він застосується до вбудованого персонажу (манекену);
- Вставити посилання на відео;
- Суміш. Мається на увазі, що можна поєднати декілька рухів із бібліотеки Kinetix (рис. 3.11). Обрати рух рук з одного варіанту (для кожної руки окремо), рух ніг з іншого, рух тіла з третього і рух для кистей рук (окремо для лівої та правої). У результаті отримати новий рух.

Після обрання режиму (у нашому випадку – завантаження відео), йде повернення на головний екран, де створена емоція збережена у якості чернетки. Під час завантаження відео, якщо воно тривалістю більше 10 сек., пропонується обрізати його.

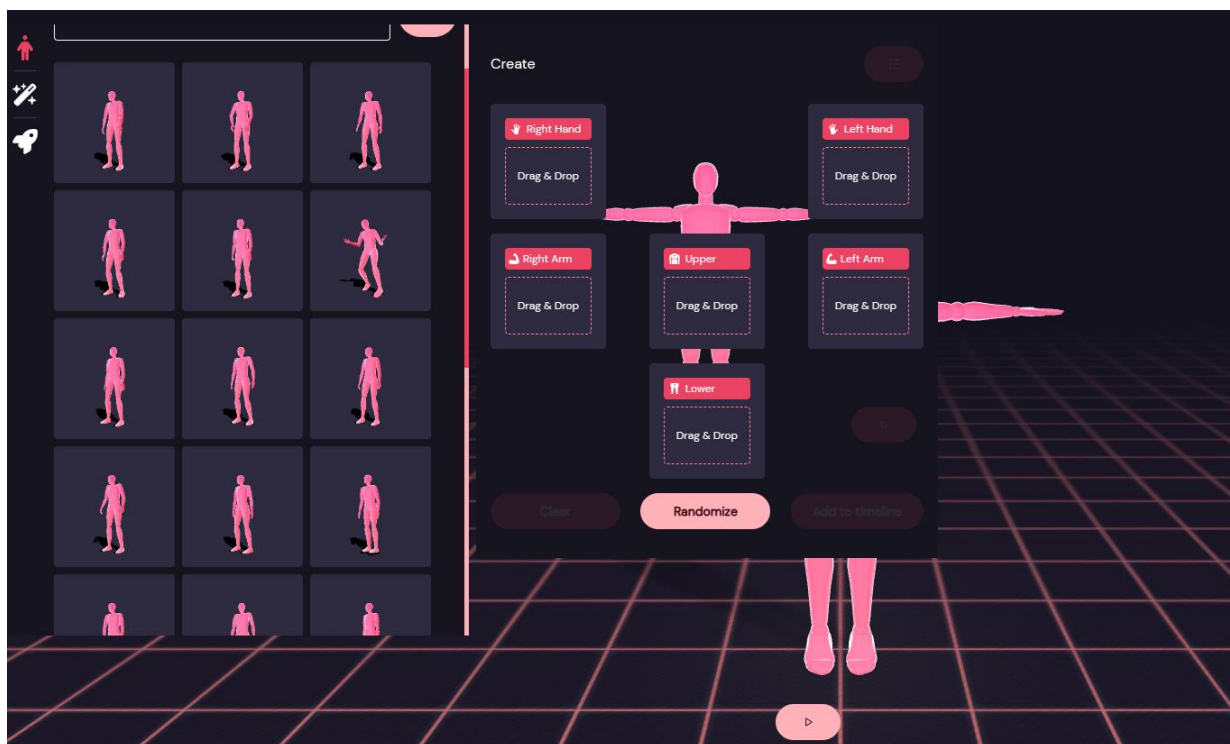


Рисунок 3.11 – Суміш рухів у Kinetix

Натиснувши двічі на чернетку відкривається проект із згенерованою анімацією перенесеною з відео на манекен за допомогою захоплення руху. Після відкриття, пропонується додати стиль бета-версії, наче манекен танцюючий п'яний або щоб манекен рухався наче робот. Цей стиль можна додати за бажанням, але так як він працює у якості бета-версії, дуже якісної анімації не вийде. Руки можуть почати входити у тіло і рухи будуть відрізнятися від оригіналу.

Отриману анімацію можна програти та роздивитися з усіх боків. Після чого можна зберегти як чернетку або зберегти як емоцію. Після обрання – зберегти як емоцію – потрібно обрати значок (заставку), тобто зображення одного фрагменту, потім підтвердити його або повернутися відредагувати. Далі пропонується перевірити, чи задовільний рух і попереджається, що після збереження як об'єкту відредагувати його вже буде неможливо. Збережений об'єкт тепер знаходитиметься у розділі «мій інвентар». Також його можна скачати як 3D файл, файл для завантаження надсилається на пошту, де потім можна його скачати архівом. У архіві буде два 3D файл формату FBX і GLB.

Якість захопленого руху 8 з 10. Основна частина рухів передана, недоліки: ліва рука залишається на місці не рухається на певному фрагменті, рвані різкі рухи кінцівок, лікті мають не зовсім вірне положення у просторі (рис. 3.12).

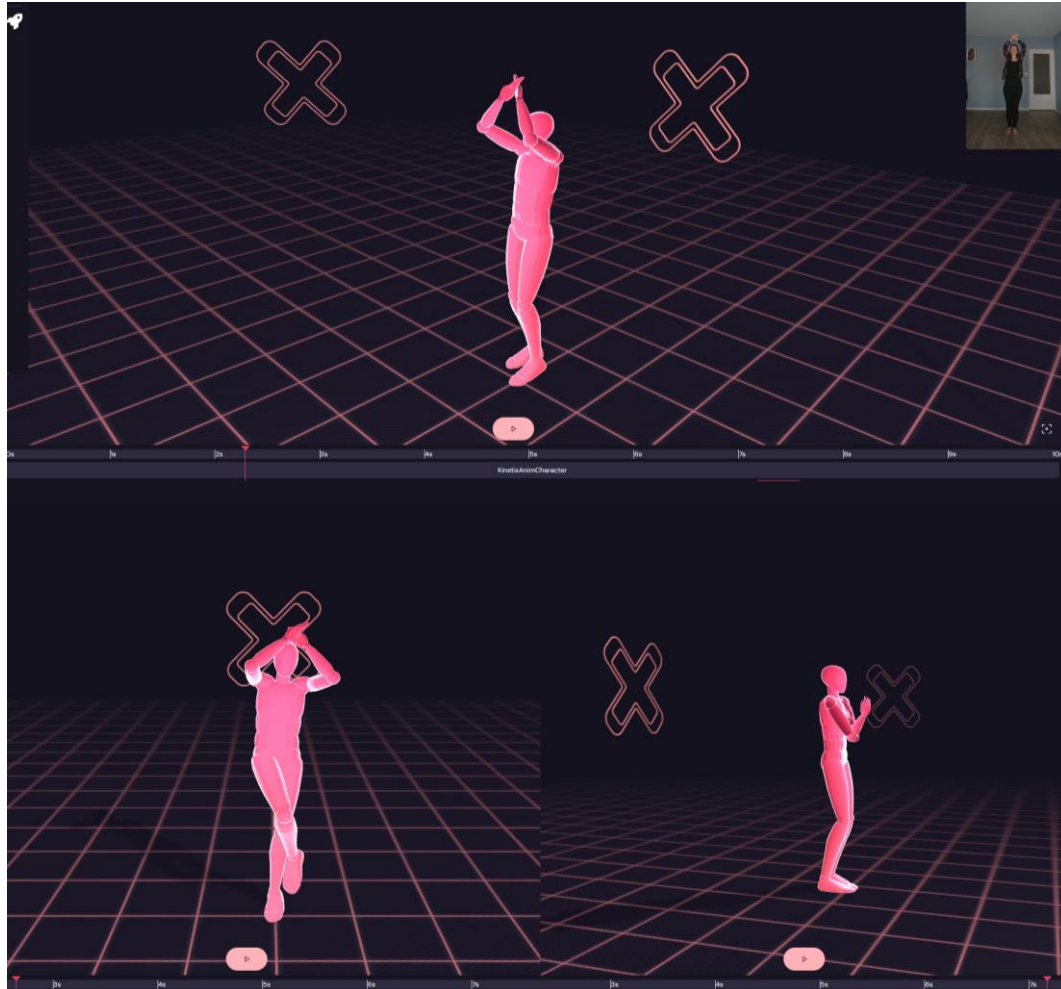


Рисунок 3.12 – Результат motion capture у Kinetix

Висновок по розділу: у результаті тестування п'ятьох програм, зрозуміло, що для найкращої результату анімації, її необхідно підправити власноруч [26] і вже потім анімованого персонажа можна буде використати у запланованому проєкті: у відео, у грі або у віртуальній реальності. Серед недоліків, які були помічені під час тестування є: входження ноги у ногу, різкі рухи, невірне розташування і положення рук в певні проміжки часу. Краще серед усіх програм впорався Kinetix. Основною перевагою програм є те, що для motion capture можна використовувати дешеву камеру або камеру смартфона, та не супер професійне освітлення.

4 РЕДАГУВАННЯ СКЕЛЕТУ МОСАР У BLENDER

Важливим етапом створення анімації є процес редагування анімованого скелету, створеного програмою для захоплення руху, це етап, який визначає якість та реалістичність створюваних анімацій. Редагування є необхідним так як motion capture може мати недоліки, деякі деталі рухів потрібно налаштувати власноруч, як і переходи між рухами. Редагування може додати індивідуальні риси та стиль до рухів. Коригування положення кісток і суглобів, через анатомічні спотворення, які можуть виникнути під час захоплення руху. Також можна зменшити кількість кадрів або згладити деталі, що корисно для покращення продуктивності додатків.

У рамках цієї роботи для виконання редагування скелету було прийнято рішення скористатися програмою Blender [41]. Цей вибір був обумовлений не тільки функціональністю та багатими можливостями Blender, але і його простотою у використанні, а також тим, що програма є абсолютно безкоштовною, що робить її доступною для широкого кола користувачів.

Серед п'яти випробуваних програм для motion capture, описаних у попередньому розділі, було обрано анімований скелет програми Kinetix. Рішення на користь Kinetix було прийнято через його достатньо гарну якість анімації, досягнутої в результаті процесу захоплення руху. Ще одним фактором, який вплинув на вибір, стало обмеження у часі для відео з якого захоплюється рух (охоплення 10 секунд відеоматеріалу), що у свою чергу значно зменшує обсяг кадрів, що вимагають редагування, і забезпечує більш ефективний і зручний робочий процес.

Після скачування 3D-об'єкту з mocap з сайту Kinetix, його необхідно перенести у Blender. Для цього, після відкриття Blender необхідно обрати «File» – «Import» – «FBX(.fbx)» (рис. 4.1), а потім у вікні, яке відкриється, відкрити папку в якій знаходиться необхідний файл і обрати його. У результаті у робочий простір програми завантажиться манекен з анімованим скелетом (рис. 4.2)

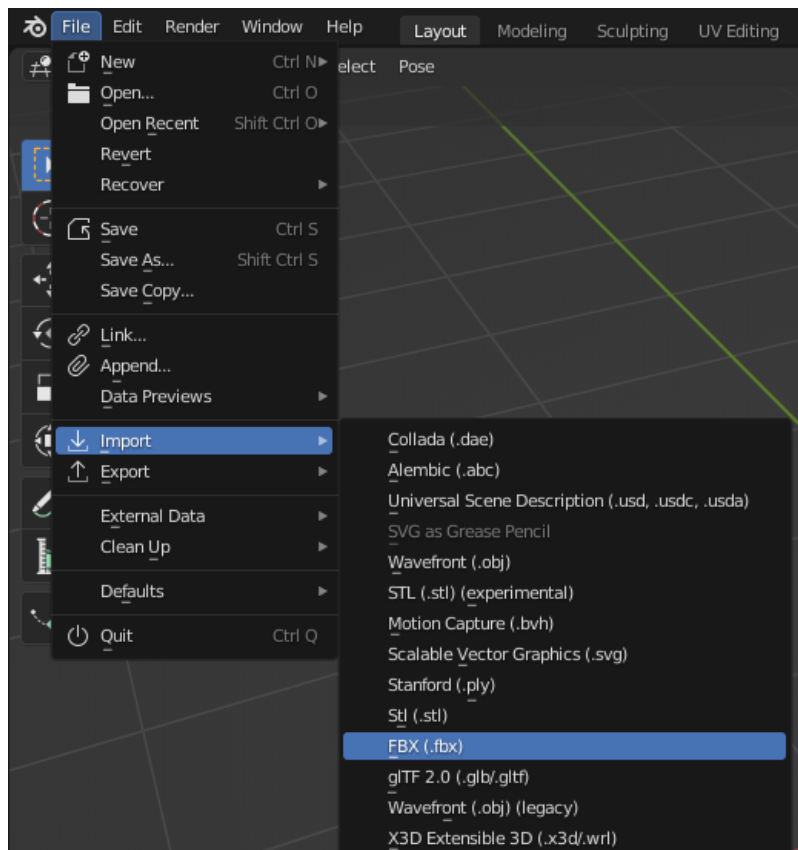


Рисунок 4.1 – Імпорт скелету у Blender

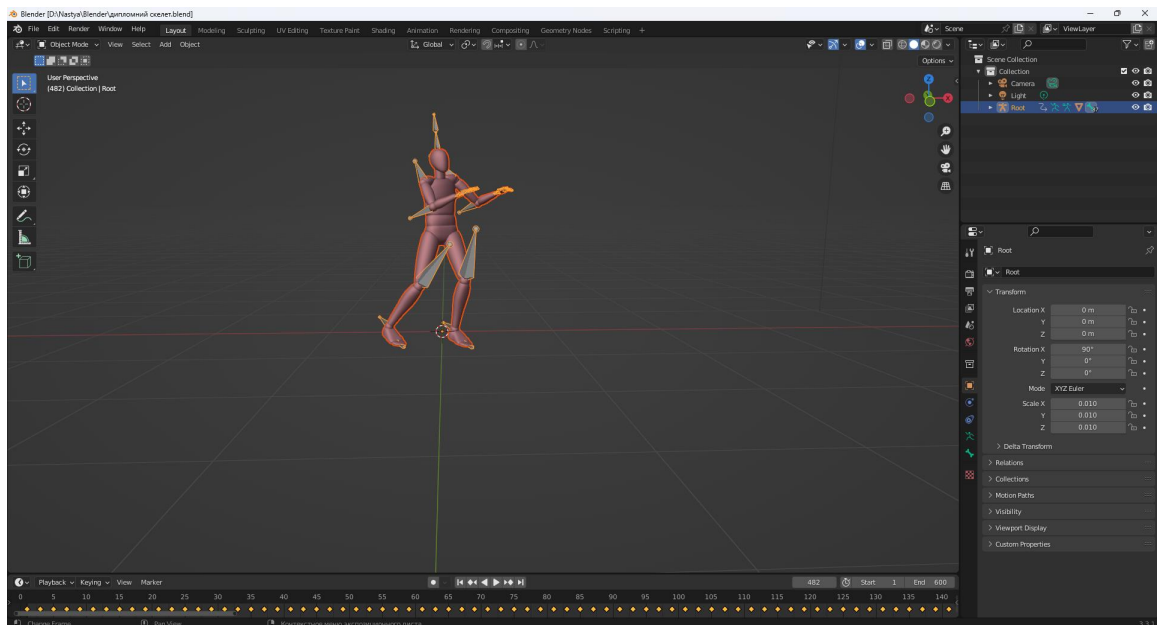


Рисунок 4.2 – Імпортований у Blender скелет з манекеном

Після імпортування першим етапом є перегляд анімації та пошук недоліків. Потім було вирішено переглядати анімацію на різних кінцівках окремо. Робота була розпочата з ніг, приблизивши ноги та ввімкнувши програш анімації, було знайдено

перший недолік на 73 кадрі. Стопа почала входити у іншу стопу (рис. 4.3) і так впродовж 73-113 кадрів. Для редагування було необхідно перейти у режим «Pose mode», виділити кістку яку необхідно коригувати і змінити її положення. Трохи повернувши коліно, стегно і стопу, бачимо, що стопи більше не перетинаються. Натиснувши клавішу «I» на клавіатурі для вибраних кісток фіксуємо положення і поворот. Щоб менше редагувати, так як впродовж 75-113 кадрів ноги знаходяться в одному положенні, для кісток видаляємо ключі на цих кадрах і дивимося результат.



Рисунок 4.3 – Перший недолік анімації

На 90 кадрі стопа знов заходить у стопу. Повторюємо дію з поворотом стегна, фіксуємо кадр і дивимося результат. На 105 кадрі знов повторюємо дії і тепер у результаті отримуємо, що протягом 73-113 кадрів стопи не перетинаються (рис. 4.4).

Продовжуємо перегляд ніг, чи не перетинаються вони протягом наступних кадрів (усього кадрів 597).

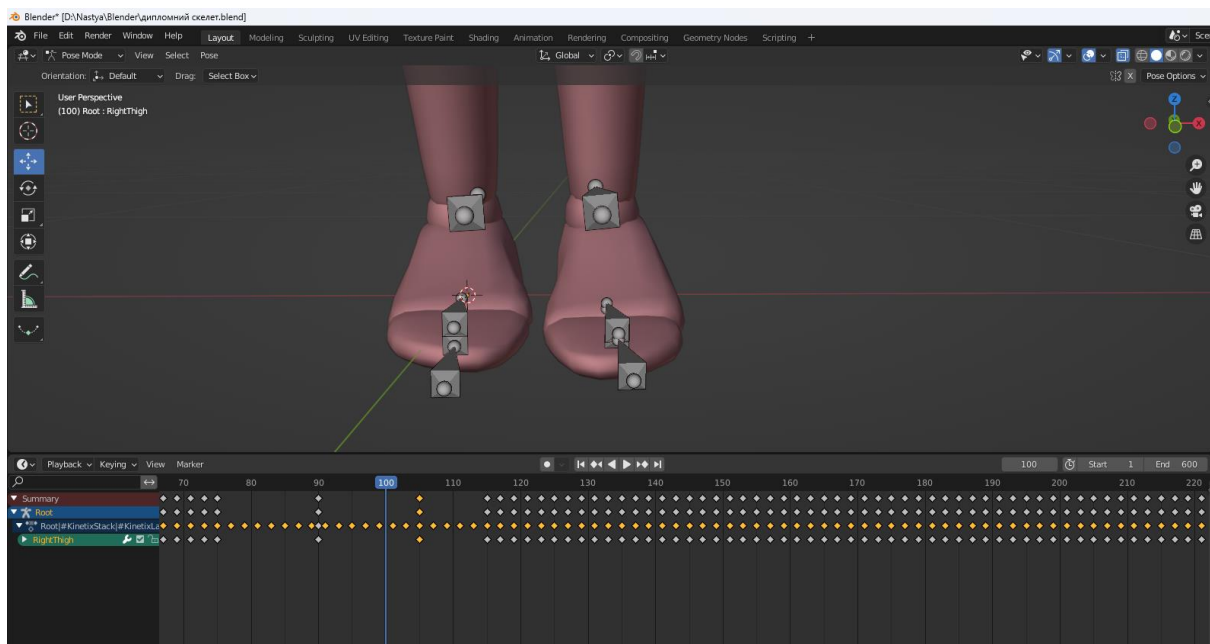


Рисунок 4.4 – Результати редагування стоп

На 217 кадрі виникає та сама проблема із додаванням того, що ліва нога стає навшпиньки (рис. 4.5). Почнемо редагування з 189 кадру, у лівій ноги змінимо положення стопи і повністю положення правої ноги.

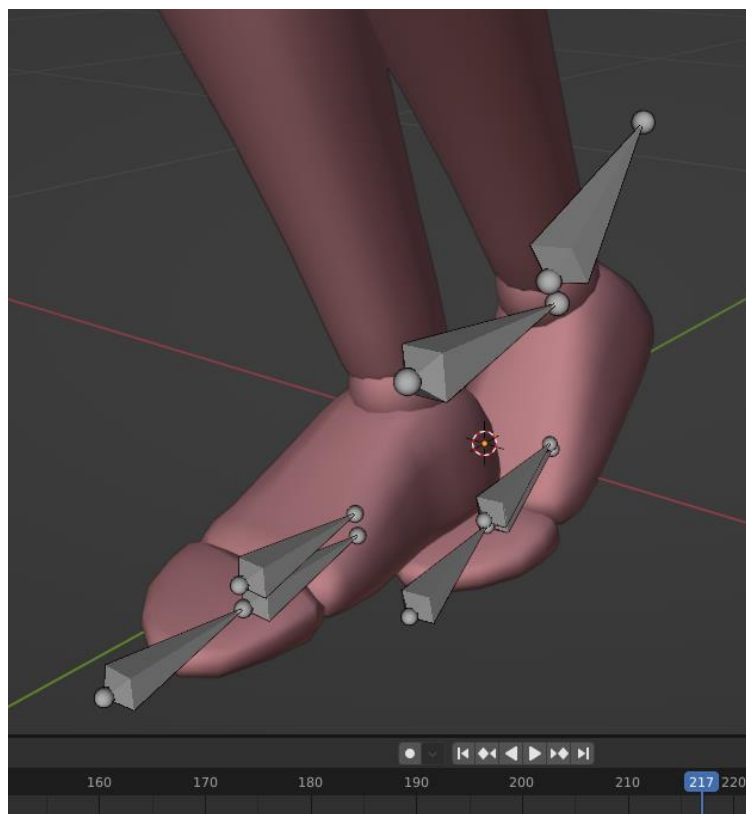


Рисунок 4.5 – Недолік на 217 кадрі

Для зміни положення лівої стопи знадобилося повернути стегно, потім коліно, потім стопу і трохи відредагувати положення пальців. Зафіксувати все це на 221 кадрі. Для лівого стегна зробивши ще ключовий кадр на 229, положення лівої ноги більш менш стабілізувалося. Для стабілізації також знадобилося видалити keyframes на 206-240 кадрах, для коліна на 200-243 кадрах, як і для стопи й пальців ноги.

Переходимо у редагування правої ноги, для стегна видаляємо keyframes на 188-278 кадрах. На 188 створюємо власний ключовий кадр, на якому трохи повернули стегно, потім те ж саме на 211 кадрі, 221-му, 229-му на якому ще повертаємо коліно. Для коліна видаляємо 230-278 кадри, на 247 кадрі трохи змінюємо положення стегна та коліна, робимо власний ключовий кадр. На 261 кадрі знов змінюємо кут нахилу стегна по осі Y, і на 277 те ж саме для стегна та коліна. Для правого стегна і коліна видаляємо ще 279-288 кадри, аби стопи не перетиналися ще й там. Тепер ноги мають нормальне положення (рис. 4.6).

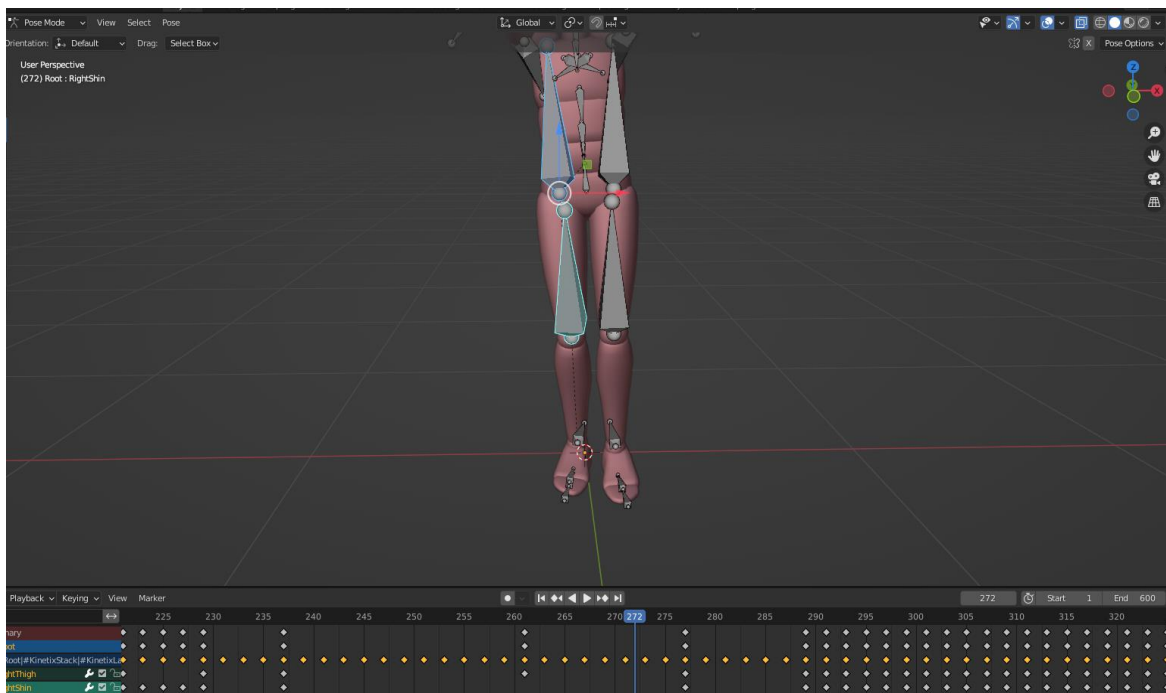


Рисунок 4.6 – Редагування недоліку перетину стоп

Дивимося анімацію ніг до кінця ключових кадрів на наявність ще якихось спотворень. Далі із ногами все добре, тому зберігаємо проект і переходимо дивитися на руки. На 70 кадрі видно одразу два спотворення, а саме перетин кистей рук та

входження лівої руки у тіло (рис. 4.7). Починаємо редагування з лівого плеча, а потім лікті обох рук, щоб надати їм більш вірне положення як у відео. Так як руки, на відміну від ніг, не такі статичні, роботи буде більше, вони набагато частіше перетинаються і редагувати доволі не просто. Keyframes також не так легко видаляти.

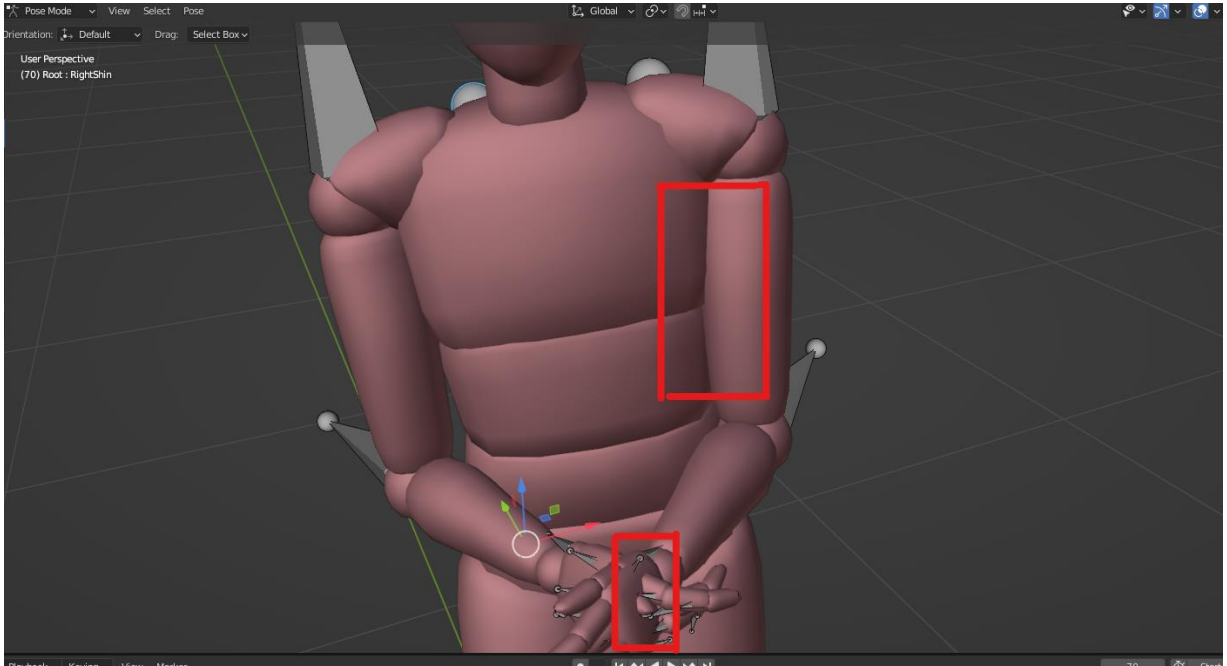


Рисунок 4.7 – Рука входить у тіло та кисті рук перетинаються

Видаливши кадри 71-109 для плечей, ліктів, пальців і кістей обох рук, на 71 та 109 кадри зроблений новий keyframe з редагуванням усіх кісток рук для правильного положення рук (рис. 4.8).

На рис. 4.9 видно, що на наступному 110 кадрі, руки знов перетинаються (утворюючи логотип Kinetix). Видаляємо keyframes на 111-122 кадрах, виглядає вже трохи ліпше. На 117 кадрі зап'ястя проходять одна крізь одну тому редагуємо і дивмося результат. Додавши ще два ключових кадри все виглядає добре.

Змінимо положення правої руки, видаляємо keyframes на 137-150 кадрах, а на 143 кадрі змінюємо положення плеча і ліктя, щоб рука була над головою як і потрібно (рис. 4.10). Обов'язково зберігаємо налаштування натиснувши клавішу «I» і обрав положення та поворот.

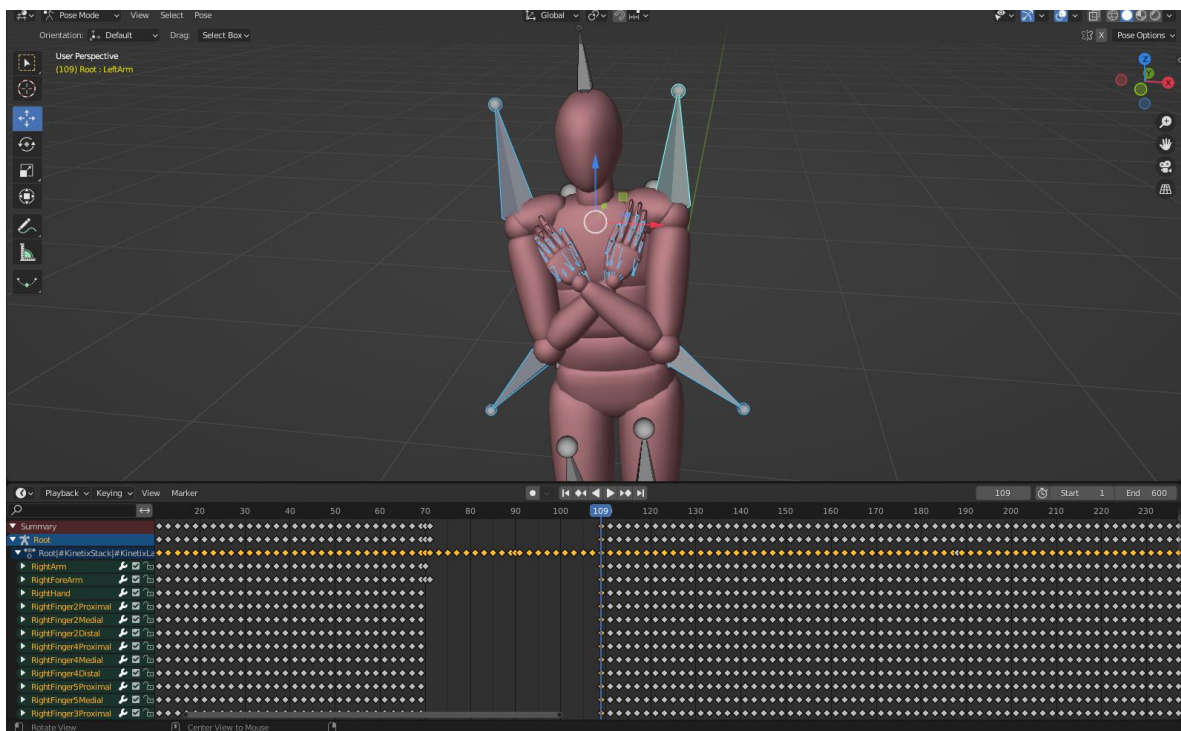


Рисунок 4.8 – Відредаговане положення рук

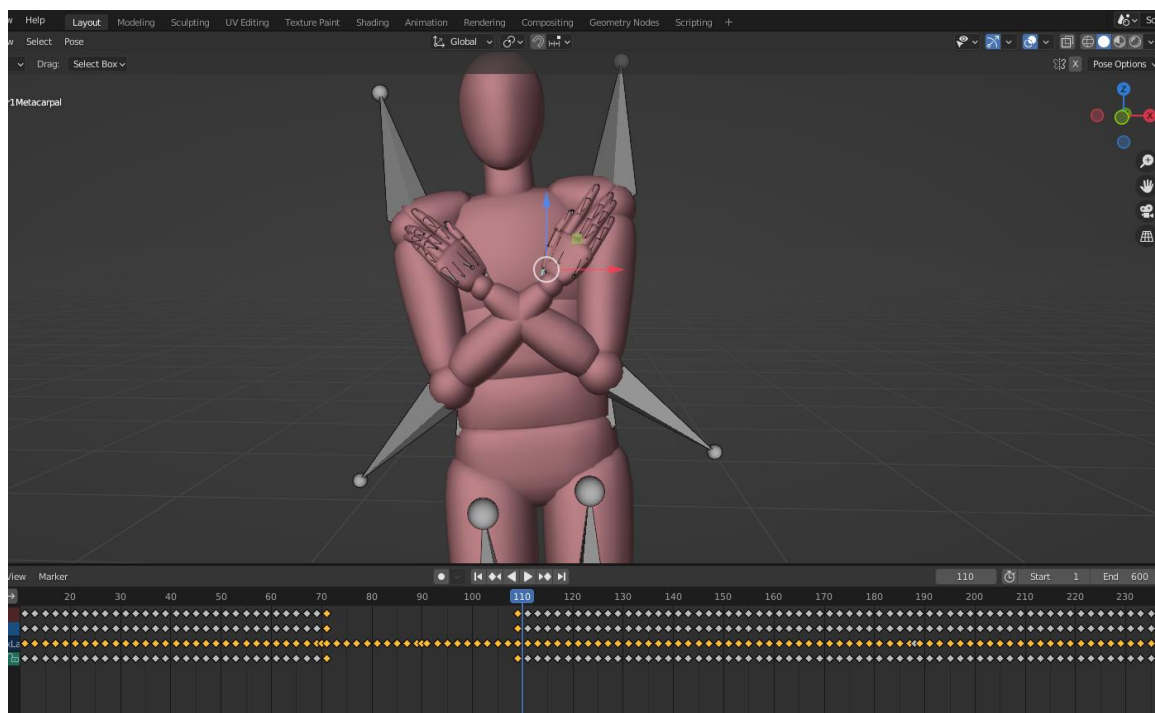


Рисунок 4.9 – Перетин на 110 кадрі

На 171 кадрі, ліва рука входить у тулуб, тому для лівого плеча на 171-189 кадрах видаляємо keyframes і ставимо його у нормальне положення. Потім с 200 по 300 кадр редагуємо по черзі поворот ліктів обох рук, щоб зап'ястя та пальці не

перетиналися один з одним під час підйому обох рук над головою (рис. 4.11). Зберігаємо кожну зміну та зберігаємо увесь проект. Продовжуємо дивитися наступні кадри і перевіряємо наявність недоліків.

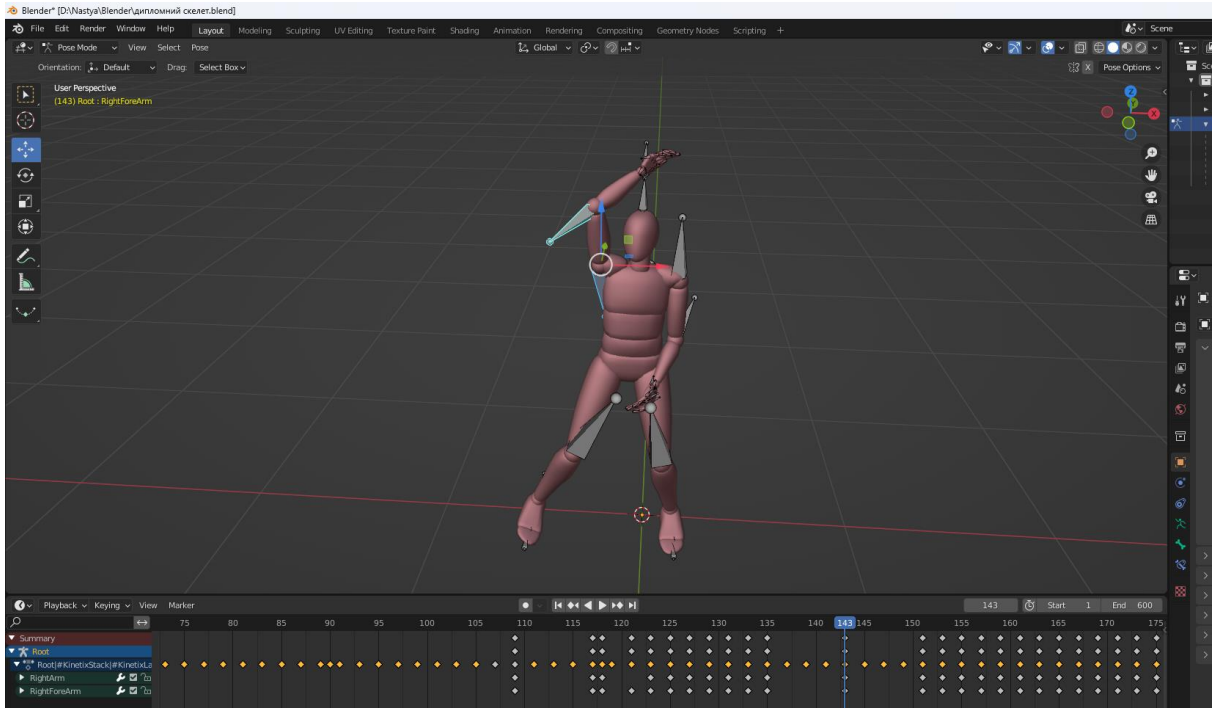


Рисунок 4.10 – Зміна положення правої руки

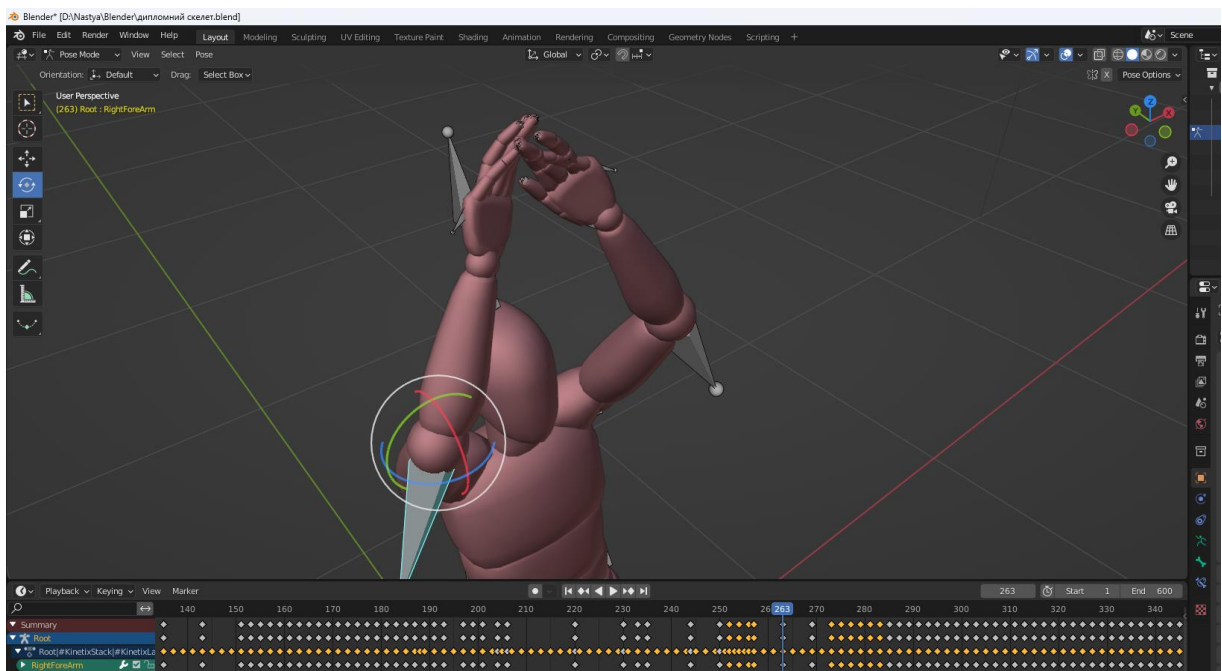


Рисунок 4.11 – Редагування ліктів

На 421-426 кадрах перетин кістей рук, виправляємо цей момент, повертаємо лікті і плечі, щоб руки біли ближче, хрест на хрест, одна над одною (рис. 4.12). Потім теж саме на 587-597 кадрах і зберігаємо keyframes.

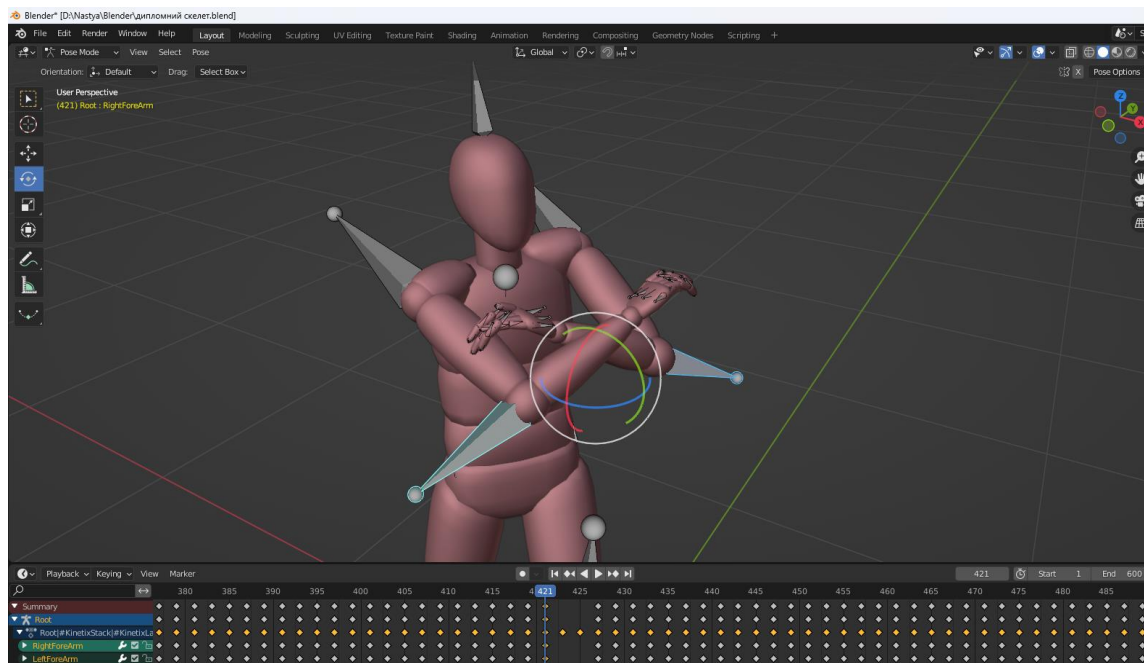


Рисунок 4.12 – Налаштування положення рук

Далі подивимося на положення пальців. Частіше за все проблеми виникають з мізинцем та великим пальцем, вони у дивному положенні або входять у інші пальці (рис. 4.13). Проблема починається вже з першого фрейму, тому для обробки оберемо діапазон у 60 кадрів. Спочатку краще виправити пальці на правій руці. Видалимо на усіх шістдесяти кадрах поворот мізинця, виправимо його положення на першому і 60 кадрі, щоб він не залазив у інші пальці. Фіксуємо keyframes та переглядаємо інші пальці на цьому проміжку. Для інших пальців правої руки видаляємо keyframes повороту пальців на 60 кадрах. Створюємо п'ять ключових кадрів для великого пальця, три для безіменного, три для вказівного та п'ять для середнього. Тепер пальці розташовані вірно відносно один одного.

Перейдемо на ліву руку. Спочатку необхідно знов передивитися рух пальців на 60 кадрах для пошуку похибок руху. На рис. 4.14 можна побачити, що похибок багато, особливо у великого пальця та мізинця. Для всіх пальців видаляємо 60

кадрів їхнього повороту. Спочатку редагуємо великий палець, створюючи на 1, 31, 47, 55 і 60 keyframes. Для вказівного створюємо keyframes на 1, 17, 51 та 60 кадрах, для середнього на 1, 8, 13, 17, 48 і 60, для безіменного на 6, 8, 13, 31, 45, 55 та 60, а для мізинця на 1, 14, 24, 38, 45, 50 і 60. Результат можна побачити на рис. 4.15. Зберігаємо відредагований проект.

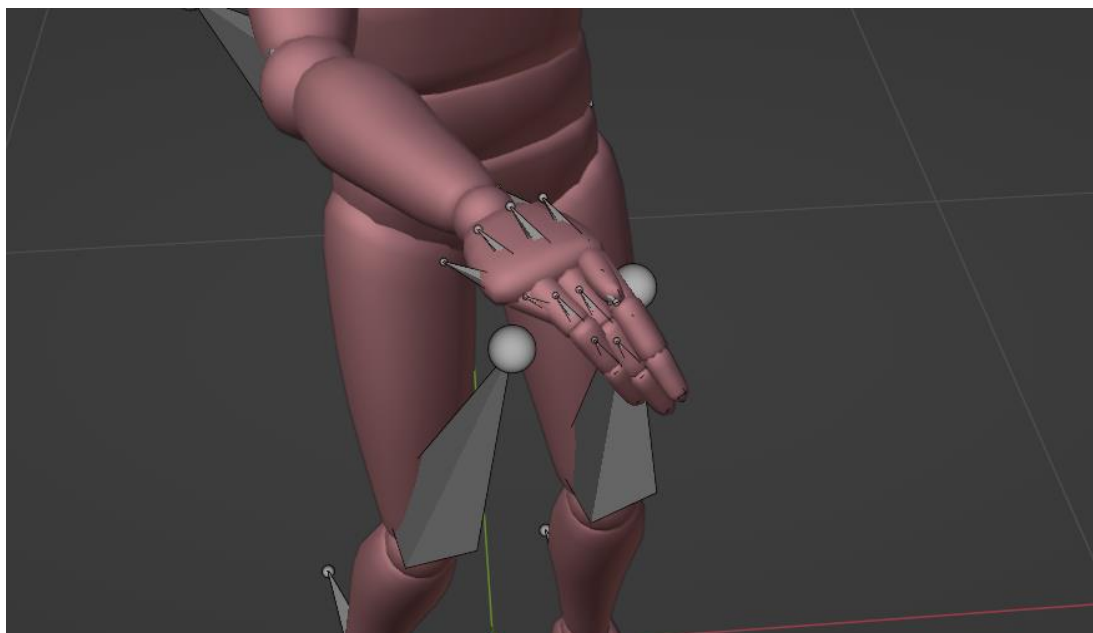


Рисунок 4.13 – Проблема з пальцями правої руки

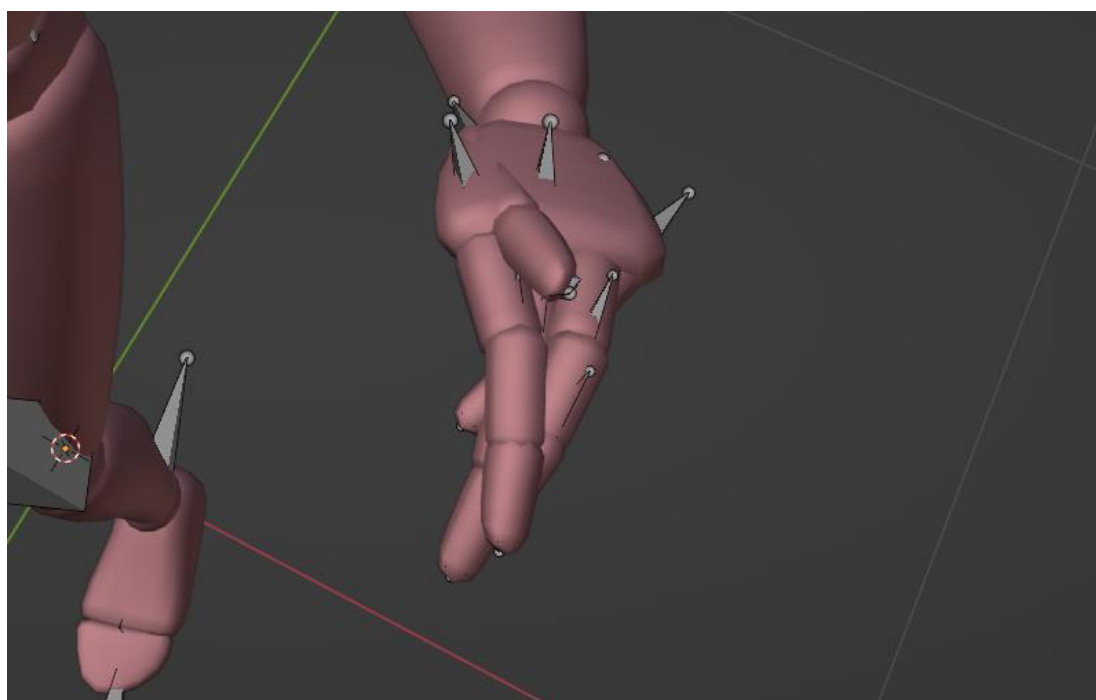


Рисунок 4.14 – Проблема з пальцями лівої руки

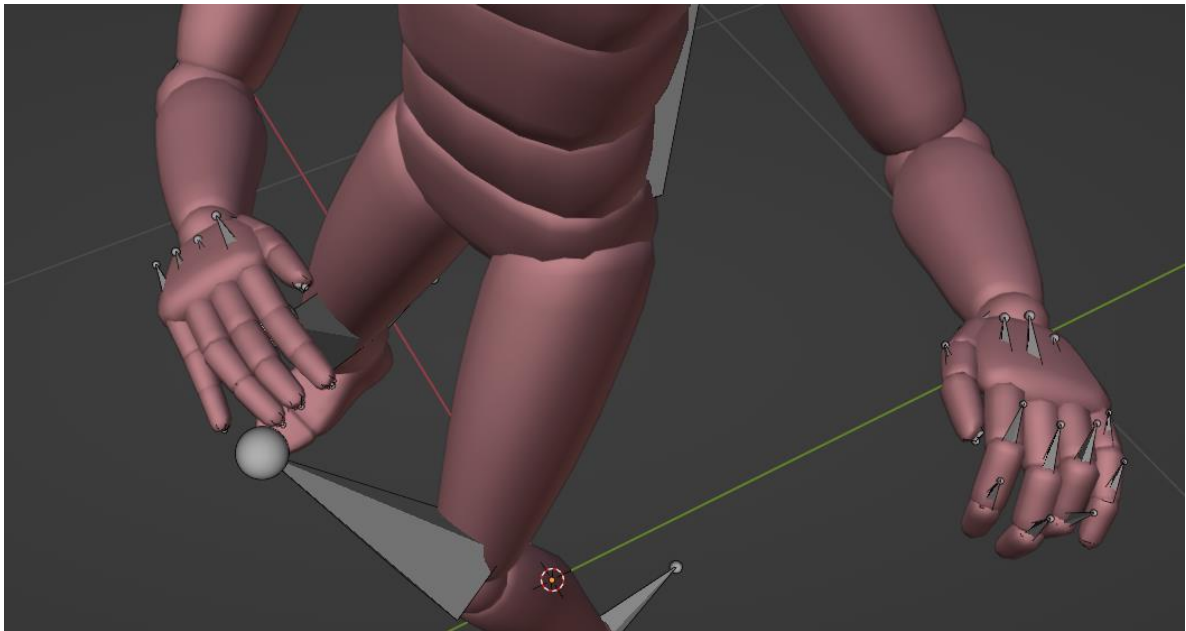


Рисунок 4.15 – Відредаговані пальці

На час редагування даних, отриманих у результаті захоплення руху програмою, впливає декілька факторів:

- Якість motion capture. Якщо отримані дані мають помилки або неточності, то процес редагування стає більш трудомістким, потрібно уважно корегувати кожен кадр ля досягнення бажаного результату;

- Антомічні особливості. Іноді якісь особливості будови тіла чи незвичні рухи можуть не відповідати персонажу, на якому робиться тосар і редагування може потребувати ретельного налаштування програми і орієнтації кісток, щоб адаптувати анімацію до певних індивідуальних особливостей персонажа;

- Адаптація. В залежності від призначення анімації, може знадобитися адаптація рухів під специфічні вимоги проекту. Наприклад зміна пози або динаміки руху;

- Естетика та реалізм. Для отримання високого рівня реалістичності рухів персонажа необхідним є додаткове тонке налаштування, що може включати: регулювання переходів між позами, згладжування рухів, кліпання очей, рух пальців або їхнє незмінне положення тощо;

- Складність рухів. Якщо захвачені рухи є складними або мають динамічні елементи, як стрибки, обертання чи фізичні взаємодії, то редагування стає більш трудомістким процесом, оскільки потрібна більш детальна корекція;

- Обсяг даних. Якщо анімація триває довго або включає велику кількість кадрів, редагування кожного кадру може зайняти багато часу. Це особливо правильно, якщо необхідно провести додаткову обробку або оптимізацію анімації;

- Необхідність у додаткових ефектах. Деякі проекти можуть потребувати додавання спецефектів, освітлення або взаємодії з навколишнім середовищем. Ці додаткові елементи можуть потребувати додаткового часу для редагування.

Звісно, для гарної анімації скелету з Kinetix є ще багато роботи: налаштування пальців із вірним положенням у просторі, це і редагування ніг, щоб вони не робили зайві рухи на міліметри у бік, потрібно стабілізувати положення тіла, щоб воно було рівним і не завалювалося у бік. Але все це вимагає багато часу на обробку. В рамках цієї роботи часу на більш деталізоване редагування не вистачає.

Окрім редагування, тосар можна перенести на іншого персонажа, створеного власноруч або скачаного на просторах Інтернету. Blender має кілька способів перенесення анімації з одного персонажа на інший. Один із них – використання функції «Data Transfer» («Передача даних»). Цей метод дозволяє передавати дані між об'єктами, включаючи анімацію.

Покрокове перенесення даних:

- Відкриття двох об'єктів. Відкрити файл із першим персонажем, що містить анімацію, та файл із новим персонажем, на який треба перенести анімацію;

- Обрання цільового об'єкту. Віділити файл із персонажем, на який потрібно перенести анімацію;

- Перехід у режим «Object Mode»;

- Додавання модифікатора Data Transfer. У правій панелі (де зазвичай розміщуються налаштування об'єкта), вибрати вкладку «Modifiers» (налаштування модифікатора, іконка з «гайковим ключем»). Натиснути «Add Modifier» і вибрати «Data Transfer» зі списку (рис. 4.16);

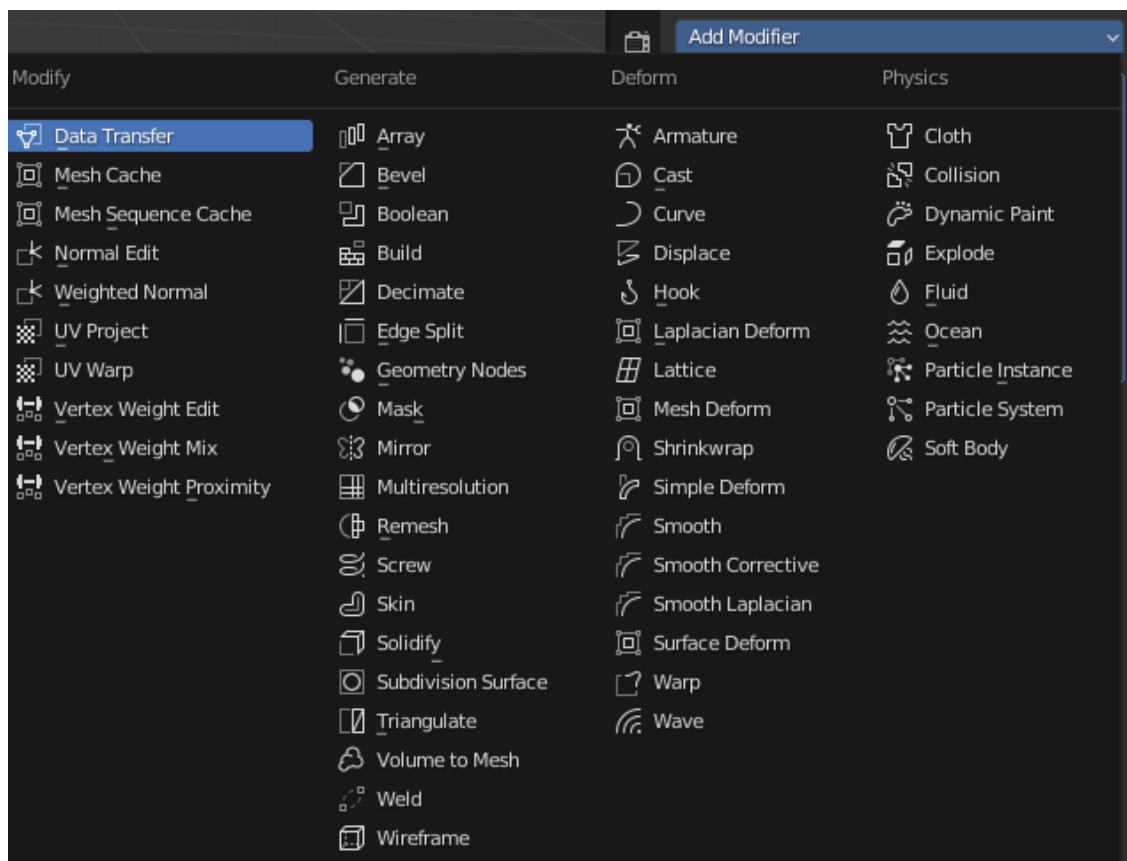


Рисунок 4.16 – Додавання модифікатора Data Transfer

- Налаштування параметру Data Transfer. У меню модифікатора в рядку «Source» (об’єкт-джерело) вибрати об’єкт, з якого потрібно передати дані, включаючи анімацію (рис. 4.17). І у розділі «Data to Transfer» вказати «Vertex Data», а потім «Vertex Groups»;
- Застосування модифікатора. Натиснути «Apply» для використання модифікатора;
- Перевірка результату. Після застосування модифікатора, потрібно перевірити анімацію на новому персонажі тому що іноді можуть бути потрібні додаткові корекції вручну, особливо якщо персонажі мають різну анатомію.

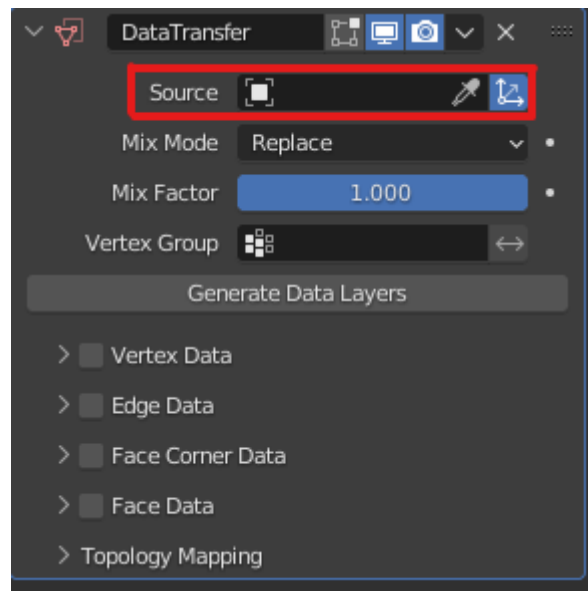


Рисунок 4.17 – Обрання об'єкту в меню модифікатора

Другий спосіб перенесення анімації з одного персонажа на інший за допомогою копіювання даних об'єкту з одного на інший. Цей метод може бути менш точним, але достатньо ефективним. Процес його застосування:

- Відкрити обидва об'єкти. Тобто файл із вихідним персонажем (джерелом анімації) та файл із новим персонажем (цільовим об'єктом);
- Перейти в режим «Object Mode»;
- Вибрати цільовий об'єкт, на який потрібно перенести анімацію;
- Через Shift вибрати джерело анімації (об'єкт, у якого вже є потрібна анімація);
- Натиснути Ctrl+L на клавіатурі. Це викликає меню зв'язування об'єктів;
- Обрати «Animation Data» (дані анімації) (рис. 4.18). Завдяки цьому скопіюється анімація з джерела на цільовий об'єкт;
- Перевірити результат. В режимі «Pose Mode» або «Object Mode» необхідно програти анімацію на цільовому об'єкті, щоб переконатися, що анімація успішно скопійована.

Метод зв'язування об'єктів через Ctrl+L також може копіювати інші дані, тому потрібно бути уважним при використанні, щоб не порушити інші аспекти сцени. Завжди рекомендується додатково перевірити та коригувати результати.

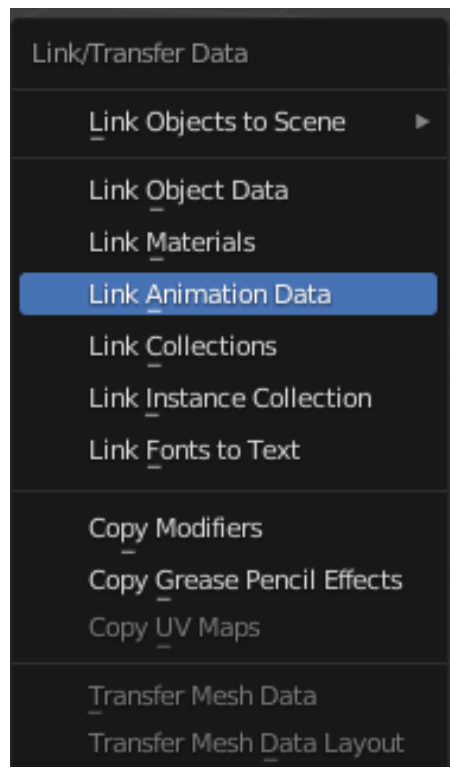


Рисунок 4.18 – Меню зв’язування об’єктів

Проте не завжди анімація може переноситися з одного на другого персонажа, є декілька причин:

- Різна топологія моделей. Якщо топологія (структура меша) персонажів істотно відрізняється, Blender може зіштовхнутися з труднощами під час спроби передачі між ними. Наприклад, якщо в одного персонажа більше чи менше кісток, ніж в іншого;

- Різні імена кісток. Якщо імена кісток в арматурах відрізняються, Blender може не зможти автоматично зв’язати кістки між двома моделями. Імена кісток в обох моделях повинні бути ідентичними або принаймні порівнянними;

- Різні імена груп вершин. Якщо в анімації використовуються групи вершин (vertex groups) для керування вагою кісток, потрібно бути впевненим, що у обох моделей є аналогічні групи вершин;

- Різні розміри моделей. Якщо моделі мають різні масштаби, це також може впливати на передачу анімації. Перед передачею даних рекомендується привести моделі до схожого масштабу;

– Проблеми з ієрархією кісток. Якщо обидва персонажі мають різні ієрархії кісток (порядок вкладеності кісток), Blender може не правильно інтерпретувати анімацію;

– Проблеми з фреймами та діапазонами анімації. Повинно, щоб кадри були правильно встановлені від початку до кінця анімації і що вони відповідали обом моделям;

– Конфлікти з іншими модифікаторами. Деякі інші модифікатори на моделях можуть впливати на успішність передачі даних. Іноді можна спробувати видалити або тимчасово вимкнути інші модифікатори.

У процесі роботи, під час спроби перенесення анімації з одного персонажа на інший, виявилось три причини, через які неможливо було пренести анімацію. Перша причина – різна топологія моделей, у анімованого персонажа 87 кісток, а у цільового 65 (рис. 4.19) .

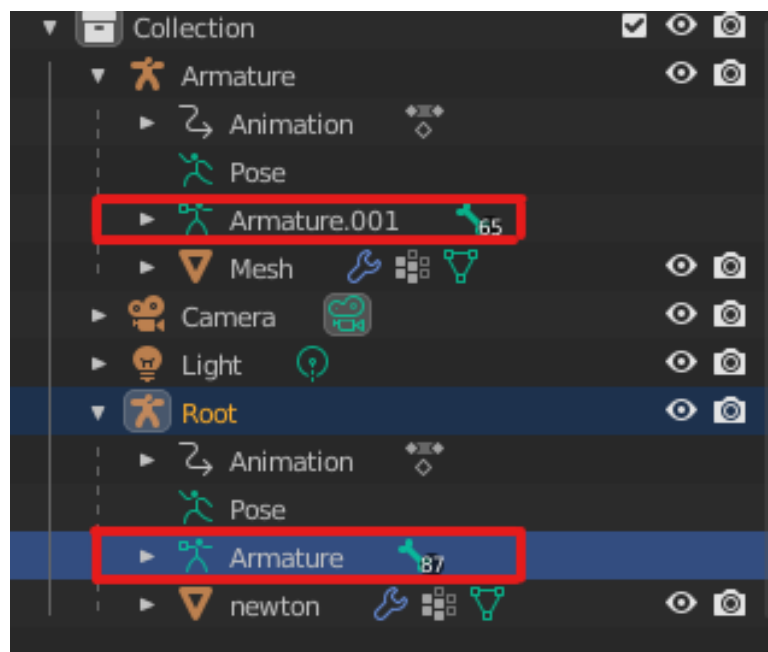


Рисунок 4.19 – Різна кількість кісток персонажів

Другою причиною є різні імена кісток моделей (рис. 4.20) , а третьою – моделі мають різні розміри, модель з захватом руху дещо більша за другого персонажа, на якого мала перенестися анімація. Тому, якщо є стикання з проблемою передачі

анімації, рекомендується уважно перевірити кожен із перерахованих аспектів, щоб унеможливити можливі причини невдачі. При необхідності ручна корекція анімації може знадобитися для кращих результатів.



Рисунок 4.20 – Різні назви кісток двох моделей

Висновок до розділу: виконана робота показує, що редагування скелету не проста та кропотлива робота, в процесі якої можуть виникнути складності, виправити які не просто та доволі тяжко. Программою для редагування був обраний Blender, через доступність та відкритість ПЗ, широкий вибір інструментів для редагування, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Для зміни положення анімації можна рухати keyframe на певній шкалі або видаляти та створювати нові. У результаті роботи вийшла модель з виправленою анімацією. Також під час редагування були виявлені причини неможливості перенесення захвату руху на іншого персонажа у даній програмі і виявлення, що для цього необхідні більш міцні інструменти.

ВИСНОВКИ

Захоплення руху (Motion Capture) з'явилося для поліпшення та спрощення створення реалістичної анімації та моделювання рухів об'єктів та персонажів. Ця технологія стала невід'ємною частиною різних галузей, включаючи кіно, ігрову індустрію, медичні дослідження, спорт, анімацію та інші сфери.

Motion capture забезпечує високий рівень реалізму в анімації та зменшує необхідність вручну створювати кожен рух. Це робить його не тільки потужним інструментом для професійних індустрій, але й гарним інструментом для створення реалістичної анімації в розважальних цілях. Захоплення руху покращує якість анімації, забезпечує натуральність рухів та заощаджує час, який раніше був потрібний для ручної анімації. Він також знаходить застосування у різних наукових та дослідницьких галузях, де аналіз руху відіграє важливу роль.

Завдяки програмам і додаткам, зараз творці можуть використовувати можливості дешевих веб-камер або мобільних пристроїв для захоплення руху у реальному часі, що відкриває можливості для розробників і невеликих студій, дозволяючи їм використовувати доволі якісний захват руху у своїх проектах, не витрачаючи на це багато коштів.

У роботі розглянуто методи та системи захоплення руху, а також галузі їх застосування. Дослідження включає розгляд технологій захоплення руху за допомогою додатків та програм, як з використанням штучного інтелекту, так і без нього. Робота охоплює приклади додатків, де застосовується захоплення руху, включаючи галузі медицини, спорту, архітектури та інших галузей.

Наведено детальний опис того, як працюють системи захоплення руху, що дозволило зрозуміти основні принципи та механізми їх функціонування. Це включало аналіз роботи програм, які використовуються для запису та аналізу рухів об'єктів або людей з метою створення реалістичних і динамічних анімацій.

Зроблено тестування п'яти програм, що дало досвід з використання motion capture на практиці. Результати тестування допомогли виявити як позитивні, так і

негативні аспекти кожної програми, що може бути важливим під час вибору відповідного інструменту у конкретній ситуації.

Окрему увагу приділено редагуванню захопленого руху у Blender. Цей етап роботи є важливою частиною процесу створення анімацій, де аналітичний погляд і навички редагування відіграють ключову роль. Процес редагування Blender був детально описаний, що може служити керівництвом для тих, хто займається створенням анімації з використанням цього програмного забезпечення.

Використання штучного інтелекту стало розвитком для систем захоплення руху, що збільшило точність та адаптивність. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє системам «навчатися» на основі зібраних даних, що суттєво підвищує їх ефективність та здатність адаптуватися до різноманітних сценаріїв.

Напрямок дослідження у цій галузі є покращення технологій захоплення руху для натурального та реалістичного відтворення людських рухів. Це особливо актуально у контексті розробки віртуальної реальності, де високий рівень реалізму рухів відіграє ключову роль створенні переконливої візуальної картини.

Таким чином, системи motion capture є не тільки важливим інструментом для індустрії розваг та анімації, але й відіграють істотну роль у передових технологіях, формуючи майбутнє віртуальних та доповнених реальностей, а також роблять внесок у наукові дослідження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – 329 с.
2. *403 Forbidden*. URL: https://cdn.open-pr.com/W/7/W710747441_g.jpg (дата звернення: 22.11.2023).
3. 9 Motion Capture Software to Bring Your Characters to Life Like Never Before. Geekflare. URL: <https://geekflare.com/motion-capture-software/> (date of access: 22.11.2023).
4. A Comparative Example Between The Use Of Pca And Mds For Image Classification / Hernandez, W., Mendez, A., Flor-Unda, O., Camejo, I.M., Kolendovska, M.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17-19 of June, № 9152565, pp.1353–1358.
5. Algorithm For Generating Refined Frequency Estimates In Atmospheric Radio Sounding Systems / Kartashov V., Hernandez W., Hernandez-Balbuena D., M. Kolendovska, Konovalenko O., Melnyk V.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17-19 of June 2020, № 9152562, pp. 79–82.
6. Application of Fast Frequency Shift Measurement Method for INS in Navigation of Drones / D. Avalos-Gonzalez, D.H. Balbuena, V. Tyrsa, V.M. Kartashov, M. Kolendovska, S. Sheiko, O. Sergiyenko, V. Melnyk, F.N. Murrieta-Rico // IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3159–3164.
7. Avalos-Gonzalez, D., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Tyrsa, V., Kartashov V.M., V., Rivas-Lopes, M., Murrieta-Rico, F.N. Constraints definition and application optimization based on geometric analysis of the frequency measurement method by pulse coincidence// Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (USA), 2018, V.126, pp. 184–193.

8. Bindiganavale R, Badler NI (1998) Modeling and motion capture techniques for virtual environments, Springer: Lecture notes in artificial intelligence, pp 70–82. Chap. Motion abstraction and mapping with spatial constraints.

9. Bruderlin A, Williams L (1995) Motion signal processing. In: SIGGRAPH '95: Proceedings of the SIGGRAPH '95 conference, pp. 97–104.

10. Burtnyk N, Wein M (1980) Computer-generated key-frame animation. J Soc Motion Telev Eng, pp. 149–153.

11. C. Wu, K. Varanasi, and C. Theobalt (2012). Full body performance capture under uncontrolled and varying illumination: a shading-based approach. In European Conference on Computer Vision (ECCV).

12. Cesar Sepulveda-Valdez; Oleg Sergiyenko; Vera Tyrsa; Wendy Flores-Fuentes; Julio César Rodríguez-Quiñonez; Fabian Natanael Murrienta-Rico ; Jesús Elías Miranda-Vega; Paolo Mercorelli; Marina Kolendovska. «Geometric analysis of a laser scanner functioning based on dynamic triangulation.» 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 17-19 of June 2020, pp. 1398–1403, doi:10.1109/ISIE45063.2020.9152268.

13. *College of Engineering / Michigan State University.* URL: https://www.egr.msu.edu/reidtama/sites/default/files/content/mo_cap.JPG (дата звернення: 23.11.2023).

14. DeepMotion - AI Motion Capture & Body Tracking. DeepMotion - AI Motion Capture & Body Tracking. URL: <https://www.deepmotion.com/> (date of access: 02.12.2023).

15. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision/ O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez, IGI Global, 2016, 341 p.

16. *Dmitry Paranyushkin.* URL: <https://paranyushkin.com/wp-content/uploads/2023/02/sensor-closeup-2-gwangju-eightos-600x338.jpg> (дата звернення: 24.11.2023).

17. *Engine CMS v5.0.* URL: https://audiomotion.enginecms.co.uk/media/view_image/371303 (дата звернення: 18.12.2023).

18. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission, /Oleynikov, V., Zubkov, O., Kartashov, V., Sheiko, S., Babkin, S.//2019 IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2019 - Proceedings, 2019, №9061337, pp. 175–178.

19. Features of acoustic noise of small unmanned aerial vehicles / Semenets, V.V., Kartashov, V.M., Leonidov, V.I. // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), 2020, 79(11), pp. 985–995.

20. Geometric Analysis Of A Laser Scanner Functioning Based On Dynamic Triangulation/Sepulveda-Valdez, C., Sergiyenko, O., Tyrsa, V, Mercorelli, P., Kolendovska, M.// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 29th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2020; Delft; Netherlands; 17-19 of June 2020, № 9152268, pp. 1398–1403.

21. Intuitive and affordable motion capture tools for character animation. Intuitive and affordable motion capture tools for character animation. URL: <https://www.rokoko.com/> (date of access: 17.12.2023).

22. Ivanov, M., Sergiyenko, O., Mercorelli, P., Hernandez, W.c, Rodriguez Quinonez, J.C.d, Katashov V., Kolendovska, M., Iryna, T. [Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS](#). IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 2019, № 8781209, pp. 1162–1167.

23. Kartashov, V.M., Oleynikov V.N, Zubkov, O.V., Korytsev I.V., Babkin, S. I., Sheiko, S.A., Kolendovskaya, M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles; Telecommunications and Radio Engineering, 2020. Vol. 79, Iss, 9, pp.769–780.

24. Kartashov, V.M., Sidorov, G.I., Sheiko, S.A., Kolendovska, M.M., Sergienko O.Yu. Principles of Construction and Assessment of technical Characteristics of multi-Frequency atmospheric Sodar in the Humidity Measurement Mode / Telecommunications and Radio Engineering. – New York, 2020. – Vol. 79, №4, pp. 323–333. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i4.50 (статья).

25. Kitagawa M., Windsor B. MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture. – Oxford, England: Focal Press, 2008. – 216 p.

26. Lee J, Shin SY (1999) A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In: SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 39–48.

27. Motion Capture In Virtual Reality. AXIS. URL: <https://axisxr.gg/motion-capture-in-virtual-reality/> (date of access: 25.11.2023).

28. Oleynikov V.N., Kartashov, V.M., Babkin, S. I., Zubkov, O.V., Korytsev I.V., Sheiko, S.A., Seleznov I.S. Structure and Parameter Unmanned Aerial Vehicles Sound Fields/ Telecommunications and Radio Engineering.– New York, 2020.– Vol. 79, №17, pp.1539–1550. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.50 (статья).

29. Plask Motion: AI-powered Mocap. Plask Motion. URL: <https://plask.ai/> (date of access: 17.12.2023).

30. R. Barzel, J. F. Hughes, and D. N. Wood (1996). Plausible motion simulation for computer graphics animation. In Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation.

31. RADiCAL - AI-powered 3D animation. RADiCAL - AI-powered 3D animation. URL: <https://radicalmotion.com/> (date of access: 17.12.2023).

32. Rockwell J. Penguin, Shmenguin! Those Are Savion Glover's Happy Feet! (Published 2006). The New York Times. URL: <https://www.nytimes.com/2006/12/28/movies/28happ.html> (date of access: 17.12.2023).

33. Shchehelska Y. P. The specificities of the augmented reality technologies' application as an instrument for the transformation of printed production into a three-dimensional one in the promotional communications' practice. *Printing and Publishing*. 2019. T. 1, № 77, pp. 101–110. URL: <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2019-1-77-101-110> (date of access: 26.11.2023).

34. Simple Motion Capture With AI – No Suit Needed. CineD. URL: <https://www.cined.com/simple-motion-capture-with-ai-no-suit-needed/> (date of access: 24.11.2023).

35. URL: https://cloudfront.jove.com/files/ftp_upload/50595/50595fig5.jpg (дата звернення: 23.11.2023).

36. URL: <https://i0.wp.com/www.auganix.org/wp-content/uploads/2022/09/Sandbox-VR-Vicon.jpg?w=750&ssl=1> (дата звернення: 03.12.2023).

37. V. M. Kartashov, V. N. Oleynikov, S. A. Sheyko, I. V. Koryttsev, S. I. Babkin, O. V. Zubkov, «Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition». Telecommunications and Radio Engineering, 2019, V. 78, Iss. 9, pp. 771–781. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i9.30.

38. V.M. Semenets, V.M. Kartashov, V.I. Leonidov. Features of Acoustic Noise of Small Unmanned Aerial Vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. – New York, 2020.– Vol. 79, №11, pp. 985–995. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.80 (стаття).

39. Y. Zhang, L. An, T. Yu, X. Li, K. Li, and Y. Liu (2020). 4D association graph for realtime multi-person motion capture using multiple video cameras. In International Conference on Computer Vision (ICCV).

40. Zegarelli M. Calculus II for Dummies. Wiley & Sons, Limited, John, 2023. 400 p.

41. Ресурс з комп'ютерної графіки [Blender]. – 2015. Режим доступу до ресурсу: <https://www.blender.org/> (дата звернення: 10.12.2023).

42. Motion capturing cats. That's it. That's the post. - before & after. *before & after*. URL: <https://beforesandafters.com/2021/04/13/motion-capturing-cats-thats-it-thats-the-post/> (date of access: 24.11.2023).

43. What can I do with my scan? - Canvas FAQ. Canvas FAQ. URL: <https://support.canvas.io/article/9-so-what-do-i-get-after-i-m-done-with-my-scan> (date of access: 21.12.2023).

44. URL: <https://pbs.twimg.com/media/E8cBxXmWYAMdDXe?format=jpg&name=small> (дата звернення: 27.11.2023).

45. *KOUSEI IKEDA.* URL: <http://ikekou.jp/dogear/wp-content/uploads/2017/05/e7cfde10-b2e9-f3d4-cb84-b5a1c26922c1.png> (дата звернення: 27.11.2023).

46. 80 Level. URL: https://cdn.80.lv/api/upload/content/6f/images/60ec96c93569a/widen_920x0.jpg (дата звернення: 27.11.2023).

47. URL: <https://d3a2gvihmbqfjo.cloudfront.net/08/084cac1cf71b4cf0a7ff915f68ff6d54/084cac1cf71b4cf0a7ff915f68ff6d54.png> (дата звернення: 27.11.2023).

48. *You are being redirected...* URL: <https://www.animationmagazine.net/wordpress/wp-content/uploads/iPi-Motion-Capture-2-post-510x286.jpg> (дата звернення: 27.11.2023).

49. *CGI Coffee - Revelations of a computer graphics apprentice.* URL: https://cgicoffee.com/blog/content/images/20170407194958-perception_neuron_system.jpg (дата звернення: 27.11.2023).

50. URL: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRHZVH1ictN87eEU7rJu8bVJPqbp73wh8lFfVIbAry6NvvX1O6Y> (дата звернення: 27.11.2023).