

# Розробка системи керування рухом крокуючого робота засобами SimMechanics та Unity

Виконав: Студент групи ДА-31

Видолоб Антон Валерійович

Науковий керівник: доцент, кандидат технічних наук

Чкалов Олексій Валерійович

# Мета роботи

- розгляд існуючих та побудова власної математичної моделі антропоморфного крокуючого апарата (АКА);
- розробка методики і числових алгоритмів для розв'язання задачі керування рухом АКА на основі експериментальних біомеханічних досліджень;
- створення програмного забезпечення для проведення числових досліджень та аналізу результатів математичного моделювання і оптимізації законів руху АКА.

# Можливі області використання

- Комп'ютерна анімація
- Робототехніка
- Протезування
- медицина (клінічний аналіз ходи реальної людини)

# Розв'язані задачі

- за допомогою диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду описано динаміку руху АКА, на підставі експериментальних біомеханічних даних сформульовано ритмічні, кінематичні та динамічні обмеження антропоморфного руху АКА;
- розроблено методику обробки експериментальних біомеханічних даних і на їх основі алгоритми обчислення кінематичних та динамічних характеристик ходи АКА;
- розроблено програмне забезпечення для розв'язання сформульованих задач, візуалізації та аналізу ритмічних, кінематичних, динамічних, енергетичних характеристик результатів математичного моделювання руху АКА.



# Вибір законів керування

в роботі вибрано метод копіювання ходи реальної людини, на основі даних відеореєстрації



# Рівняння руху

$$f_1(t) = R_{1x}(t) + R_{2x}(t),$$

$$f_2(t) = R_{1y}(t) + R_{2y}(t),$$

$$f_{3i}(t) = q_i - u_i + a_i(R_{1x} \cos \alpha_i + R_{1y} \sin \alpha_i), \quad i = 1, 2;$$

$$f_{4i}(t) = u_i - p_i + b_i(R_{1x} \cos \beta_i + R_{1y} \sin \beta_i), \quad i = 1, 2;$$

$$f_5(t) = -q_1 - q_2;$$

$$p_i = (x_i - x_{Ri})R_{iy} - y_i R_{ix}; \quad \omega_i = 0, \quad \text{при } x_{Ri} \in [x_{hi}^0, x_{mi}], \quad i = 1, 2,$$

$$p_i = w_i + (x_i - x_{mi})R_{iy} + (y_{mi} - y_i)R_{ix},$$

$$w_i = (x_{mi} - x_{Ri})R_{iy} - y_{mi} R_{ix} \quad \text{при } x_{Ri} \in [x_{mi}, x_{si}^0], \quad i = 1, 2.$$

$R_{ix}(t)$ ,  $R_{iy}(t)$  горизонтальна і вертикальна складові рівнодійної  $\mathbf{R}_i$  сил взаємодії  $i$ -ї ноги з поверхнею опори;  $x_{Ri}$  — абсциса точки прикладання сили  $\mathbf{R}_i$ ; « $\dot{\phantom{x}}$ » — диференціювання за часом  $t$ , символом « $^\circ$ » — значення величини (абсциса точки) за умови, що відповідна точка лежить на прямій  $OX, i=1, 2$ .

$m$  — маса корпусу;

$r$  — віддаль від ТШ до центру мас корпусу;

$J$  — момент інерції корпусу відносно осі  $OZ$  у точці ТШ;

$m_{ai}$  — маса  $i$ -го стегна;

$a_i$  — довжина  $i$ -го стегна;

$r_{ai}$  — віддаль від ТШ до центру мас  $i$ -го стегна;

$J_{ai}$  — момент інерції  $i$ -го стегна відносно осі  $OZ$  у точці ТШ;

$m_{bi}$  — маса  $i$ -ої гомілки;

$b_i$  — довжина  $i$ -ої гомілки;

$r_{bi}$  — віддаль від КШ до центру мас  $i$ -ої гомілки;

$J_{bi}$  — момент інерції  $i$ -ої гомілки відносно осі  $OZ$  у точці КШ;

$m_{fi}$  — маса  $i$ -ої ступні, яка зосереджена в точці  $A_i$ ;

$g$  — прискорення сили тяжіння;

$l_{1i} = |A_i H_i|$ ;  $l_{2i} = |A_i M_i|$ ;  $l_{3i} = |M_i S_i|$ ;  $l_i = |H_i M_i|$ ;  $\varphi_{Ai} = \angle H_i A_i M_i$ ;  $\varphi_{Mi} = \angle A_i M_i H_i$ ;  
 $(x_i, y_i), (x_{hi}, y_{hi}), (x_{mi}, y_{mi}), (x_{si}, y_{si})$ , — відповідно декартові координати точок  $A_i, H_i, M_i, S_i$  ступні  $i$ -ї ноги,  $i = 1, 2$ , в інерційній системі відліку  $OXYm$

# Ритмічні, кінематичні та динамічні обмеження на ХОДУ ЛЮДИНИ

$t \in [0, \tau_{h1})$  — переكات через п'ятку;  
 $t \in [\tau_{h1}, \tau_{m1})$  — опора на всю ступню;  
 $t \in [\tau_{m1}, T_1]$  — плесно-фаланговий переكات;  
 $t \in (T_1, \tau_{s1})$  — переكات через носок;  
 $t \in [\tau_{s1}, T)$  — перенесення ступні.

Аналогічно для фаз руху ступні 2-ї ноги

$$0 < \tau_{s2} < \tau_{m1} < T_1 < \tau_{s1} < \tau_{m2} < T$$

Вибрана послідовність ритмічних фаз характеризується наступними кінематичними умовами антропоморфного руху ніг:

$$x_{hi}(t) \equiv x_{hi}^0, y_{hi}(t) \equiv 0, y_{si} > y_{mi} > 0, \eta_{Mi}(t) = 0, t \in [\tau_i, \tau_{hi}),$$

$$x_{hi}(t) \equiv x_{hi}^0, y_{hi}(t) \equiv y_{mi}(t) \equiv y_{si}(t) \equiv 0, t \in [\tau_{hi}, \tau_{mi}),$$

$$x_{mi}(t) \equiv x_{mi}^0, y_{hi} > 0, y_{mi}(t) \equiv y_{si}(t) \equiv 0, t \in [\tau_{mi}, \tau_{i+1}),$$

$$x_{si}(t) \equiv x_{si}^0, y_{hi} > y_{mi} > 0, y_{si}(t) \equiv 0, \eta_{Mi}(t) \geq 0, t \in (\tau_{3-i}, \tau_{si}),$$

$$y_{hi} > 0, y_{mi} > 0, y_{si} > 0, \eta_{Mi}(t) \geq 0, t \in [\tau_{si}, \tau_{4-i}), i = 1, 2;$$

де  $\tau_1 = 0, \tau_2 = T_1, \tau_3 = T, \eta_{Mi}(t) = \varepsilon_i(t) - \gamma_i(t) - \varphi_{Mi}$  — кут між прямими  $H_i M_i$  і  $M_i S_i$

Умови, що визначають односторонність взаємодії ступень ніг з поверхнею опори, задаються у вигляді:

$$R_{iy} > 0, t \in [\tau_i, \tau_{i+1}) \cup [\tau_{3-i}, \tau_{si}),$$

$$R_{iy}(t) \equiv R_{ix}(t) \equiv 0, t \in [\tau_{si}, \tau_{4-i}).$$

Для реалізації ходи необхідно забезпечити непроковзування ступні:

$$|R_{ix}(t)| \leq \mu |R_{iy}(t)|, t \in [0, T], i = 1, 2,$$

де  $\mu$  — коефіцієнт тертя між ступнею і опорною поверхнею.

$$\xi(T) = \xi(0) + \mathbf{L}, \dot{\xi}(T) = \dot{\xi}(0),$$

$$x_{m2}(0) = x_{h1}^0 + l_1 - L_1, y_{m2}(0) = 0, x_{h1}(T) = x_{h1}^0 + L, y_{h1}(T) = 0,$$

де  $\mathbf{L} = (L, 0, \dots, 0)$  — вектор розмірності 11;

$$x_{mi}^0 = x_{hi}^0 + l_i, x_{si}^0 = x_{mi}^0 + l_{3i}, x_{h2}^0 = x_{h1}^0 + L_2, i = 1, 2;$$

$x_{h1}^0$  — параметр, який характеризує абсцису п'ятки ноги на початку подвійного кроку,  $x_{h1}^0 = 0$ .

У формулах декартові координати точок  $A_i, H_i, M_i, S_i$  ступні  $i$ -ої ноги визначаються співвідношеннями:

$$x_i(t) = x(t) + a_i \sin \alpha_i(t) + b_i \sin \beta_i(t),$$

$$y_i(t) = y(t) - a_i \cos \alpha_i(t) - b_i \cos \beta_i(t),$$

$$x_{hi}(t) = x_i(t) + l_{1i} \sin(\gamma_i(t) - \varphi_{Ai}),$$

$$y_{hi}(t) = y_i(t) - l_{1i} \cos(\gamma_i(t) - \varphi_{Ai})$$

$$x_{mi}(t) = x_i(t) + l_{2i} \sin \gamma_i(t), y_{mi}(t) = y_i(t) - l_{2i} \cos \gamma_i(t),$$

$$x_{si}(t) = x_{mi}(t) + l_{3i} \sin \varepsilon_i(t), y_{si}(t) = y_{mi}(t) - l_{3i} \cos \varepsilon_i(t), i=1,2$$

Таким чином, описані обмеження, притаманні ході людини в нормі.



# Matlab Simulink

- ДОСТУПНІСТЬ
- МОЖЛИВІСТЬ ОБ'ЄДНАТИ В ОДНІЙ МОДЕЛІ МЕХАНІЧНУ ЧАСТИНУ, СИСТЕМУ КЕРУВАННЯ, ЗАСОБИ ЗБОРУ І АНАЛІЗУ РЕЗУЛЬТАТІВ
- Зручний конструктор

# Моделювання ходи крокуючого апарата в середовищі MATLAB Simulink



# Unity

- підтримує фізику твердих тіл;
- простий Drag & Drop інтерфейс, який легко налаштовувати, що складається з різних вікон, завдяки чому можна проводити налагодження проекту прямо в редакторі;
- підтримує мову програмування C#.

# Моделювання ходи крокуючого апарата в середовищі Unity

# Висновки

У роботі отримано такі основні результати:

- Уточнено модель АКА, яка враховує природну ритміку руху ніг, кінематичні та динамічні обмеження, побудовані на підставі експериментальних біомеханічних досліджень ходи людини.
- Розроблено числово-аналітичну методику та алгоритми комп'ютер-но-го моделювання та оптимізації ходи АКА в середовищі MATLAB, Simulink із використанням компонентів з бібліотеки SimMechanics.
- методику візуалізації та аналізу ритмічних, кінематичних, динамічних, енергетичних характеристик руху АКА в середовищі Unity.

Сукупність отриманих результатів дозволяє ставити та розв'язувати практично важливі задачі комп'ютерної імітації руху антропоморфних крокуючих систем (людини, як в нормі, так і з протезованою ногою, та двоногого крокуючого робота з пасивними приводами в ступнях ніг).

Розроблені числово-аналітичні методики, алгоритми та програми дозволяють розраховувати динамічні і енергетичні характеристики ходи людини на основі гоніометричних даних експериментальних досліджень і використовувати їх в реабілітаційних технологіях, наприклад, в протезуванні ніг людини.