

## Лекція 11-12\_РТтаМТ

Тема: Автоматизоване планування оптимальних траєкторій переміщення мобільних мехатронних пристроїв

### План

- 11.1. Загальні положення.
- 11.2. Стисло щодо поширених алгоритмів безперешкодних (безколізійних) переміщень ММП.
- 11.3. Інформаційне забезпечення та формалізовані описи критеріїв вибору оптимальної траєкторії переміщення ММП.
- 11.4. Структурна схема розробленого програмного продукту “LSTr” та приклади його працездатності.

### 11.1. Загальні положення

На сьогодні автоматизація виробництва є одним з головних напрямів науково-технічного прогресу, головною метою якої є підвищення ефективності виробництва шляхом впровадження нових технологій, якості та надійності виготовлення продукції та створення умов для оптимального використання всіх виробничих ресурсів.

В зв'язку з цим особливу увагу в умовах виробництва приділяють використанню промислових роботів (ПР), що дозволяють забезпечити повний цикл технологічної дії схватів (Сх) ПР на об'єкт маніпулювання (ОМ) з високою точністю та продуктивністю.

На даному етапі розвитку робототехніки важливе місце посідають задачі оптимізації різних показників (геометричних, кінематичних, динамічних, траєкторних, економічних тощо), які є необхідним при проектуванні / синтезі роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ), що реалізуються в гнучких виробничих комірках (ГВК) та в інших технологічних структурах гнучкого виробництва. Важливе місце серед них посідають траєкторні задачі, розв'язування яких неможливе без планування рухів ПР в ГВК та вибір оптимальних з них за попередньо обраним критерієм / критеріями.

Для реалізації планувальних задач система управління ПР повинна бути здатною будувати квазіоптимальну траєкторію, в ідеалі - оптимальну за попередньо прийнятим критерієм та вільну від зіткнень (колізій) з іншими елементами ГВК (так звану безколізійну траєкторію).

Побудова безперешкодного, близького до оптимального шляху необхідна для мінімізації часових та енергетичних затрат за рахунок бажаного зменшення відстані та збільшення швидкості переміщень ланок маніпуляційної системи (МС) та Сх ПР.

Задача пошуку найкоротшого шляху, який оминає перешкоди, в заданому просторі станів розглядається досить давно і включає багато алгоритмів їх вирішення.

Саме тому для ефективного розв'язування цієї задачі розглядається мобільний мехатронний пристрій (ММП) як деякий аналог Сх ПР, що переміщується чітко визначеними опорними точками з ОМ або без нього. І, знаючи закони переміщення саме цього кінцевого елемента, можна говорити про те, що в кінцевому етапі ці алгоритми і отримані дані можуть бути використані для подальшого розв'язку зворотних задач кінематики, тобто за конкретним положенням Сх ПР з/без ОМ, що є технологічним роботизованим комплектом (ТРК), визначати положення, яке займає вся МС ПР, щоб не тільки на рівні кінцевого елемента визначати перетини і колізії, але й на рівні всіх ланок МС ПР.

## **11.2. Стисло щодо поширених алгоритмів безперешкодних (безколізійних) переміщень ММП**

На сьогодні існує ряд алгоритмів планування безперешкодних траєкторій, найпоширенішими з яких є наступні 9 алгоритмів, що умовно позначені як  $A_1, \dots, A_9$ :

- **A1** - KPIECE (**K**inodynamic **M**otion **P**lanning by **I**nterior-**E**xterior **C**ell **E**xploration);
- **A2** - Bi-directional KPIECE;
- **A3** - Lazy Bi-directional KPIECE;
- **A4** - PRM (probabilistic roadmap method);
- **A5** - SBL (A Single-Query Bi-Directional Probabilistic Roadmap Planner with Lazy Collision Checking),
- **A6** - RRT (Rapidly exploring random tree);
- **A7** - RRT Connect;
- **A8** - Lazy RRT;
- **A9** - EST (Expansive Space Trees).

Змістовний *аналіз визначених алгоритмів* вказує наступне:

- дані алгоритми досліджують простір станів, починаючи з початкової конфігурації  $q_{init}$  і до поки не досягнуть кінцевої конфігурації  $q_{goal}$ .
- дослідження простору проходить шляхом розповсюдження дерев, що є графічною ілюстрацією можливих переміщень  $Sx$ , що розростаються від початкової точки до кінцевої, оминаючи при цьому наявні перешкоди;
- в деяких із наведених вище алгоритмів одночасно будується два дерева  $T_{init}$  та  $T_{goal}$  (в прямому напрямку, від початкового стану  $q_{init}$ , та у зворотному напрямку, тобто від цілі  $q_{goal}$ ), зупиняючись після того, як два дерева з'єднаються;
- перевірка на колізії (зіткнення, перетини) в кожному із наведених алгоритмів проходить на різних стадіях їх роботи, але спільним є те, що у випадку виявлення перешкоди, сегмент, що її містить, видаляється, після чого процес пошуку продовжується.

За результатами роботи вказаних алгоритмів будуються безперешкодні (безколізійні) траєкторії.

Для оптимізації траєкторій використовується *алгоритм вирізання кутів*. Його стислий зміст зводиться до наступного;

- на траєкторії вибирається три суміжних вузла;
- якщо переміщення по прямій із крайнього лівого вузла в крайній правий вузол є можливим, то середній вузол відкидається;
- процес повторюється ітеративно, доки не будуть видалені всі можливі вузли;
- тому для побудови траєкторії, близької до оптимальної, бажано використовувати одразу декілька алгоритмів, співставляти отримані результати та оптимізувати отримані рішення.

### **11.3. Інформаційне забезпечення та формалізовані описи критеріїв вибору оптимальної траєкторії переміщення ММП**

Для успішної реалізації процесу планування траєкторій ММП вхідна інформація умовно поділена на постійну, змінну та умовно-змінну (рис. 11.1).

Постійна інформація містить основні відомості про аналізовані алгоритми, а саме - це існуючі алгоритми планування безперешкодних траєкторій. Джерелами постійної інформації є ресурси зі змістом та сутністю алгоритмів, а також їх програмна реалізація, що знаходиться у вільному доступі (бібліотека OMPL).

Змінна інформація містить дані про:

- сцену, що являє собою певної форми обмежений 3D-простір з наявними в ньому перешкодами;

- кінцеві та початкові координати об'єкта маніпулювання (ОМ), форма та геометричні розміри ОМ;
- кінцеві та початкові координати ММП, його форма та геометричні розміри.

*Джерелами змінної інформації* є технічне завдання, що необхідно реалізувати для досягнення поставленої мети.

В залежності від поставленого завдання, ММП пристрій може відноситись також і до умовно-змінної інформації. Це можливо в тому випадку, коли при одному ММП використовується різні ОМ.

*Джерелами умовно-змінної інформації* є конкретні виробничі умови, в яких аналізуються / проектуються відповідні траєкторії.

Результатом переміщення ММП по знайдених траєкторіях при розв'язуванні поставленої задачі є вибір оптимальних з них за попередньо прийнятими критеріями гладкості (**S**) або довжини (**L**) на 3-ох ділянках сцени (див. далі).

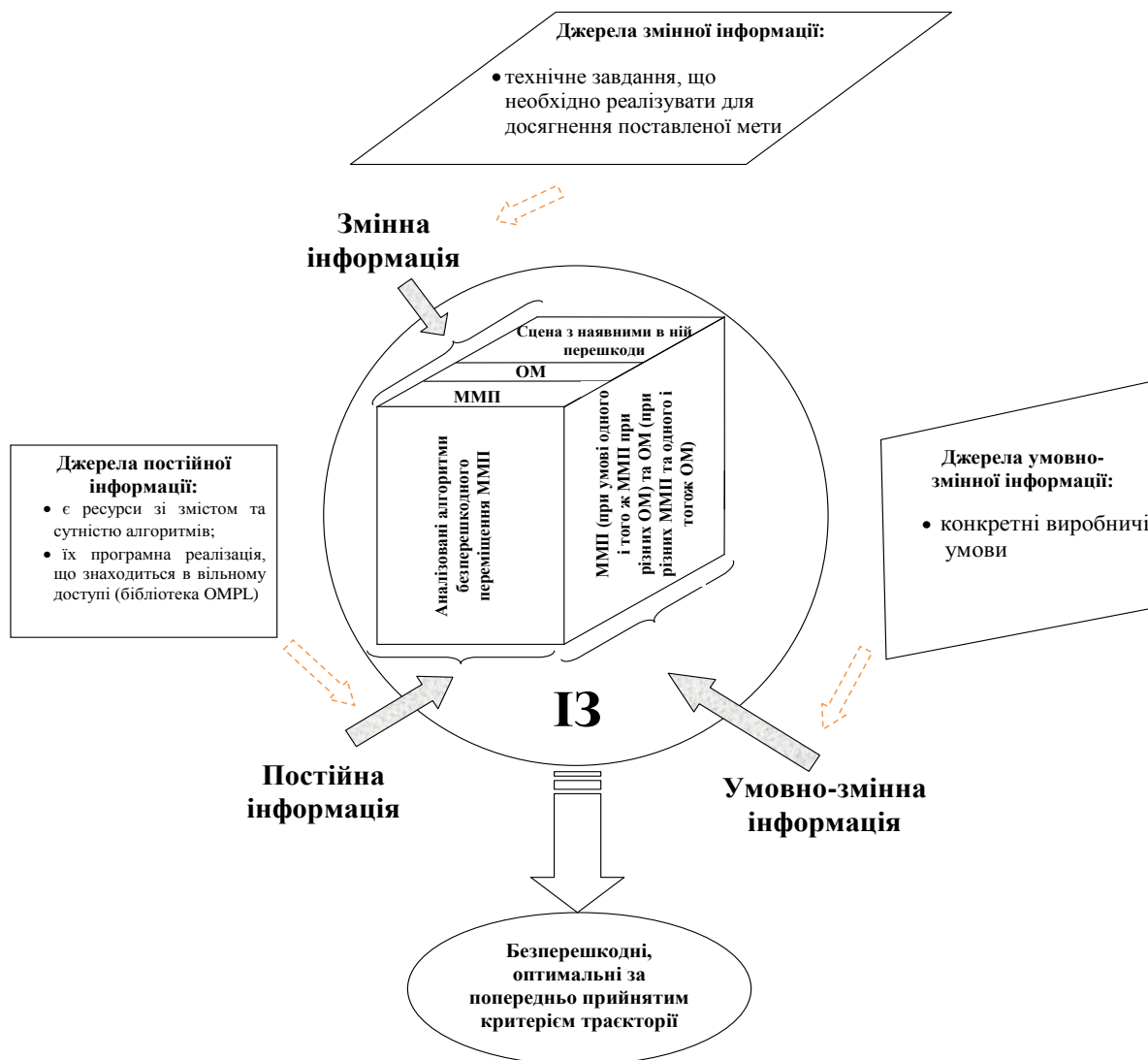


Рис. 11.1. Структура пропонованого інформаційного забезпечення

Основними вимогами, які мають бути при такому інформаційному забезпеченні, є:

- можливість безперешкодного (безколізійного) переміщення ММП за найкоротшою із можливих траєкторій;
- реалізація принципу безрозривності та плавності самих траєкторій.

Формальна постановка розв'язуваних завдань передбачає визначення запропонованої системи критеріїв, що логічно впливають із змістовної сутності аналізованих алгоритмів  $A_1, \dots, A_9$ .

В зв'язку з цим критерії, що використовуються в подальшому, є наступними:

- локальні:

- мінімальна довжина  $\min L_{A_j}$  локальних траєкторій переміщення ММП на ділянках **1-2**, **2-3** та **3-1**, кожу з яких забезпечує відповідний  $A_j$ -ий алгоритм із їх кінцевої аналізованої множини  $A = (A_j | j = \overline{1, 9})$ :

$$F_{L_{A_j}}(z_i) = \min L_{A_j}, i = \overline{1, 3}; z \in (1 - 2, 2 - 3, 3 - 1); j = \overline{1, 9} \quad (12.1)$$

де  $A_1$  – алгоритм **KPIECE**;

$A_2$  – алгоритм **Bi – directional KPIECE** ;

$A_3$  – алгоритм **Lazy Bi – directional KPIECE**;

$A_4$  – алгоритм **PRM**;

$A_5$  – алгоритм **SBL** ;

$A_6$  – алгоритм **RRT** ;

$A_7$  – алгоритм **Lazy RRT** ;

$A_8$  – алгоритм **RRT Connect** ;

$A_9$  – алгоритм **EST**;

$z_1$  – 1-ша ділянка;

$z_2$  – 2-га ділянка;

$z_3$  – 3-тя ділянка (про ці ділянки див. далі);

- найменша гладкість відпрацювання локальних траєкторій переміщення ММП на ділянках **1-2**, **2-3** та **3-1**:

$$F_{S_{A_j}}(z_i) = \min S_{A_j}, i = \overline{1, 3}; z \in (1 - 2, 2 - 3, 3 - 1); j = \overline{1, 9}; S_{A_j} \in [0, 1] \quad 12.2)$$

де  $A_1, \dots, A_9$  – наведені вище алгоритми планування траєкторій;

$z_1, z_2, z_3$  – перша, друга та третя ділянка траєкторій відповідно;

- глобальний:

- сумарна мінімальна довжина переміщення ММП з врахуванням мінімальної довжини переміщення ММП на кожній із ділянок **1-2**, **2-3** та **3-1** одним із аналізованих алгоритмів:

$$F_{L_{\min}} = \min L_{A_j(1-2)} + \min L_{A_j(2-3)} + \min L_{A_j(3-1)}, \quad (11.3)$$

де  $L_{A_j(1-2)}$  – довжина траєкторії на ділянці **1-2**;

$L_{A_j(2-3)}$  – довжина траєкторії на ділянці **2-3**;

$L_{A_j(3-1)}$  – довжина траєкторії на ділянці **3-1**.

Доречно наголосити, що глобальний критерій щодо гладкості траєкторій  $F_S$  підлягає додатковому детальному дослідженню, яке саме тут і в такій постановці не розглядається. Аналогічне можна стверджувати і щодо комбінованого критерію  $F_{LS}$ , що комплексно враховує довжини та гладкості траєкторій, тобто локальні критерії  $F_{L_{A_j}}$  та  $F_{S_{A_j}}$ .

#### 11.4. Структурна схема розробленого програмного продукту (ПП) “LSTr” та приклади його працездатності

Нижче представлено опис розроблено програмного продукту (ПП) “LSTr” та наведені результати тестових прикладів його функціонування. Для програмної реалізації змісту поставлених задач вибрана мова програмування C++ з використанням:

- графічної бібліотеки *OpenGL (Open Graphics Library)*;
- *QT*, що являє собою крос-платформовий інструментарій розробки програмного забезпечення та включає в себе всі основні класи, які потрібні при розробці елементів графічного інтерфейсу;
- бібліотеки *OMPL (Open Motion Planning Library)* для побудови самих траєкторій;
- бібліотека *Assimp (Open Asset Import Library)* для роботи з 3D-моделями;
- програма *SketchUp* для створення 3D-моделей сцен.

На рис. 11.2 зображена структурна схема функціонування розробленого ПП, що демонструє взаємозв’язок різних прикладних пакетів програмування для планування безперешкодних (безколізійних) траєкторії переміщення ММП.

На рис. 11.3 зображено інформаційне поле розробленого ПП “LSTr”. Згідно рис. 11.3 задача розбивається на три частини, розв’язок яких виконується на таких ділянках:

- 1-ша ділянка – переміщення ММП від початкового (**Initial position**) до ОМ (**Take object of manipulation**) (ділянка 1-2);
- 2-га ділянка – ММП з ОМ переміщується до цілі, де залишає ОМ (ділянка 2-3);
- 3-тя ділянка – “пустий”, тобто без ОМ в Сх, ММП повертається у початкове положення (ділянка 3-1).

Для вирішення тестових задач як приклад було створено три сцени, що включають в себе простір стану та параметри перешкод, ММП та ОМ, початкову та кінцеву ціль ММП, тобто початкові та кінцеві координати точок переміщення мехатронного мобільного пристрою.

На рис. 11.4 – 11.8 представлені результати розв’язання тестової задачі №1, що відповідає побудованій сцені 1.

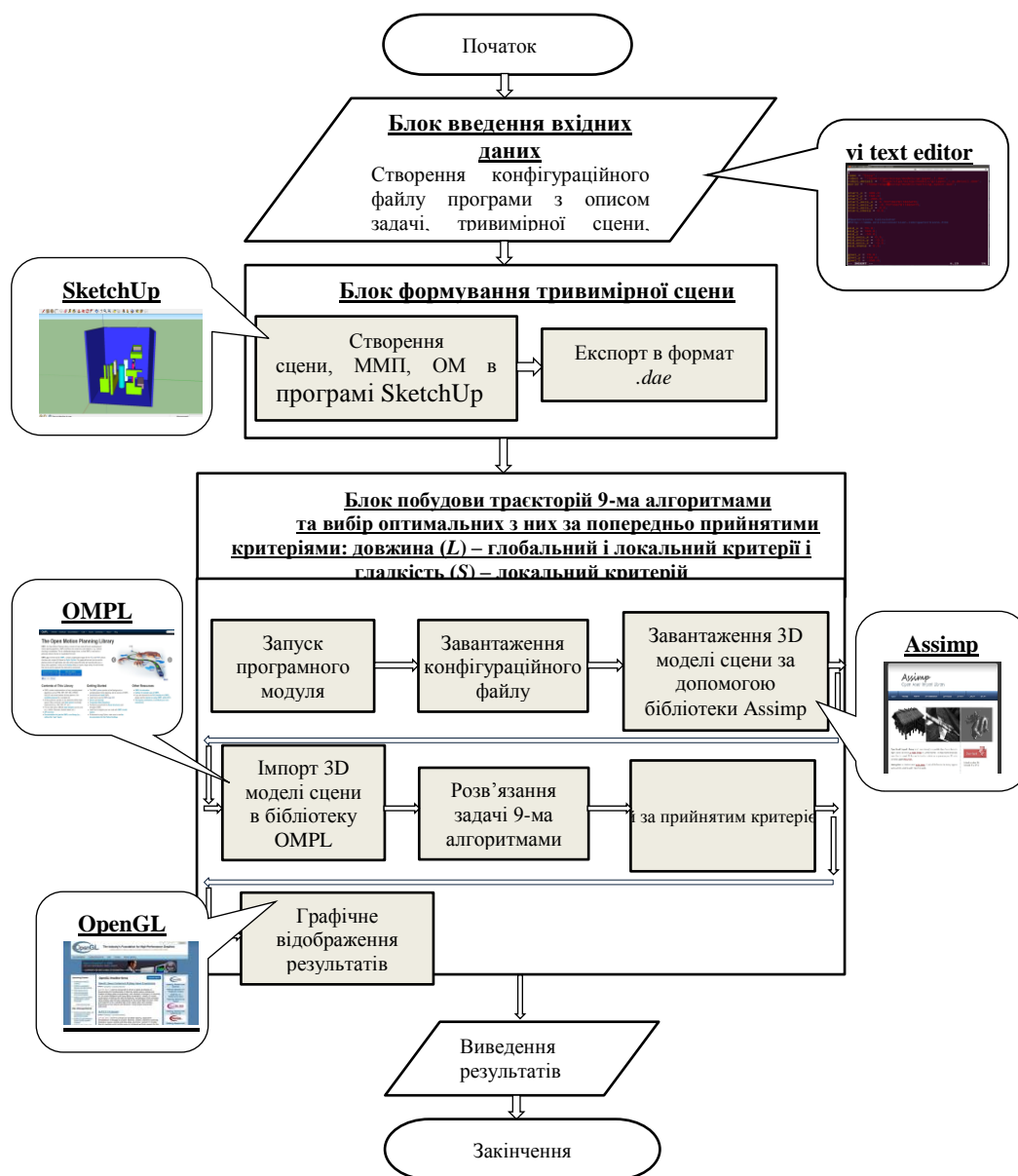


Рис. 11.2. Структурна схема функціонування розробленого ПП “LSTr”

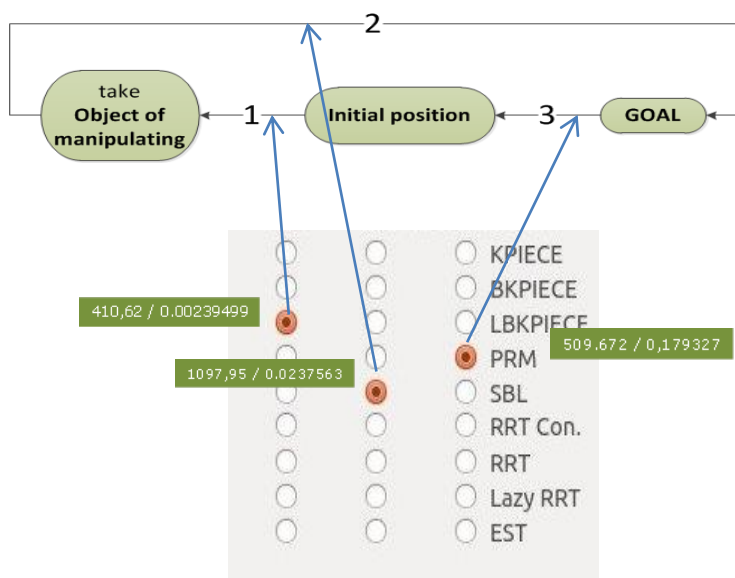


Рис. 11.3. Інформаційне поле розробленого ПП “LSTr”

На рис. 11.4 представлені результати оптимальної траєкторії за критерієм її довжини **L**, а на рис. 11.5. – за критерієм гладкості **S**.

Відповідні кінцеві параметри вказані нижче.

За рис. 11.4:

- на 1-й ділянці: найкращий результат забезпечив алгоритм **SBL** зі значенням (тут та далі величини дивнф в умовних одиницях) 336,810;
- на 2-й ділянці: найкращий результат дав алгоритм **EST** зі значенням 710,749;
- на 3-й ділянці: найкращий результат відпрацював алгоритм **EST** зі значенням 306,724.



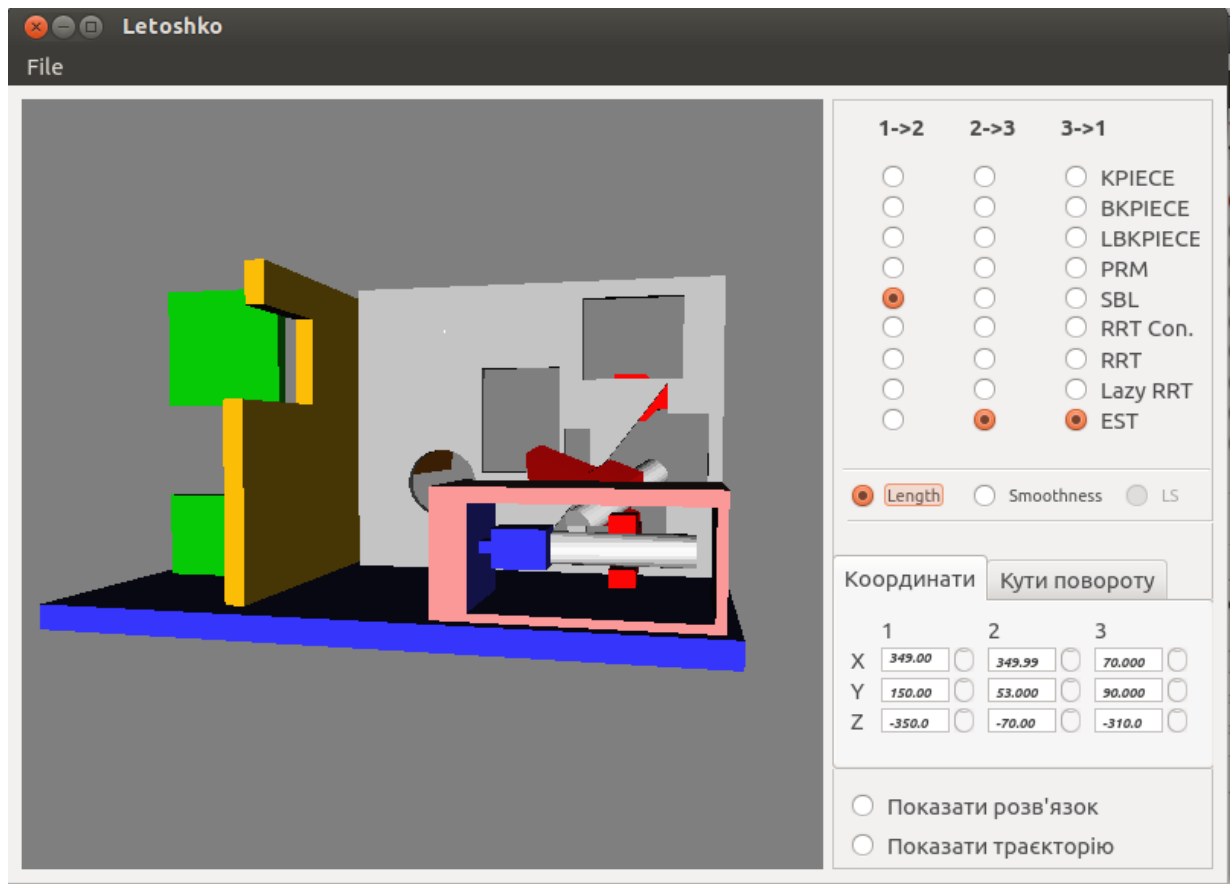


Рис. 11.4. Результат роботи аналізованих алгоритмів на сцені №1 за критерієм довжини  $L$

За рис. 11.5:

- на 1-ій ділянці: найкращий результат забезпечив алгоритм **KPIECE** зі значенням  $S_1=0,00614645$ ;
- на 2-ій ділянці: найкращий результат дав алгоритм **Lazy RRT** зі значенням  $S_2=0,00712410$ ;
- на 3-ій ділянці: найкращий результат відпрацював алгоритм **EST** зі значенням  $S_3=0,015405091$ .

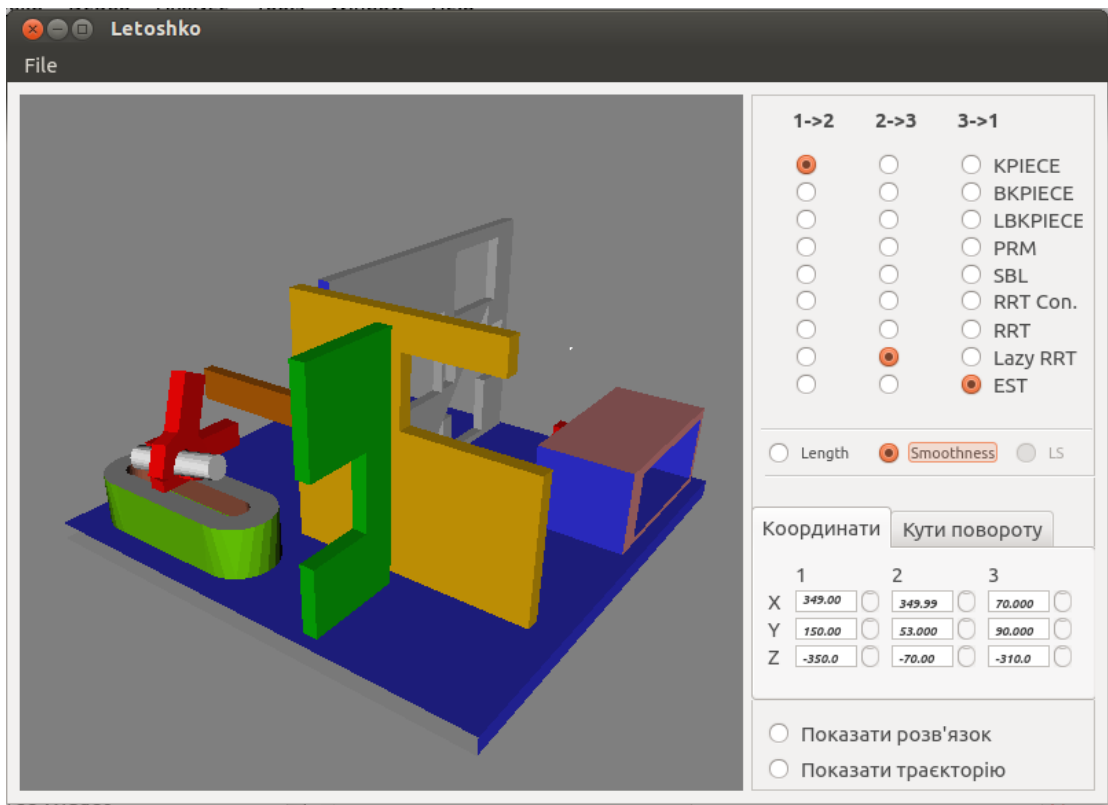


Рис. 11.5. Результат роботи аналізованих алгоритмів на сцені №1 за критерієм гладкості  $S$

Графічне представлення отриманих траєкторій за критеріями довжини  $L$  та гладкості  $S$  зображені відповідно на рис. 11.6. та рис. 11.7.

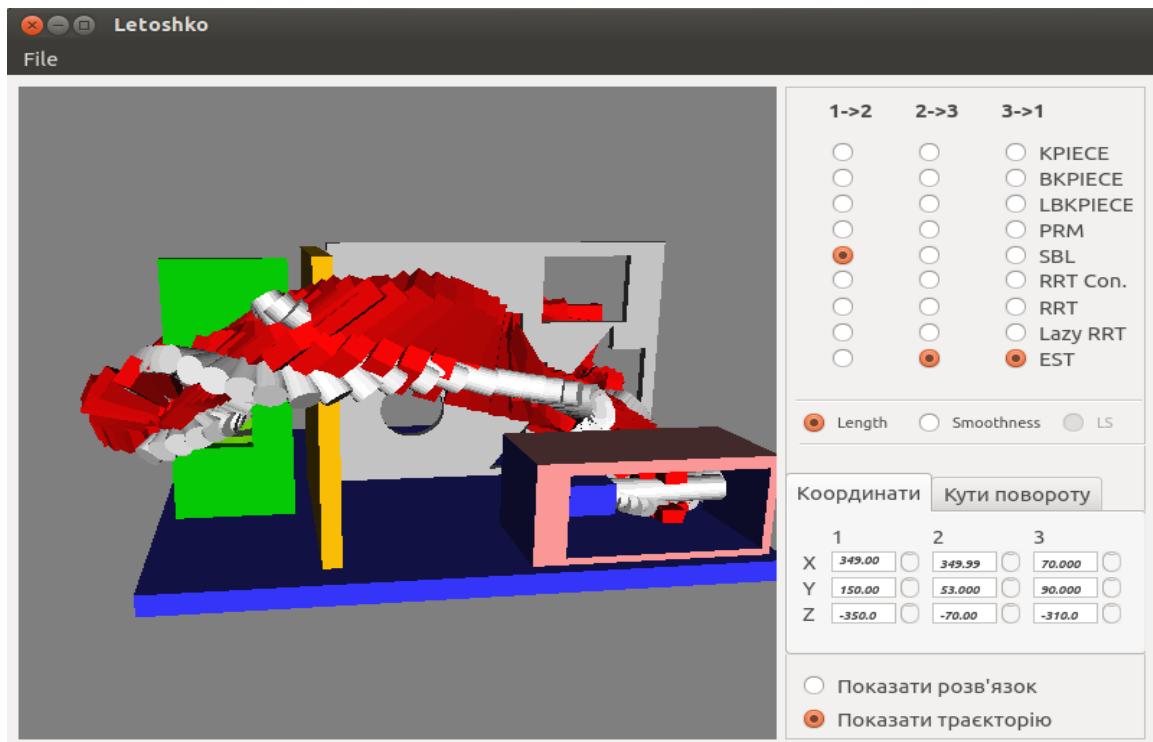


Рис. 11.6. Графічне представлення траєкторії за даними рис. 11.4

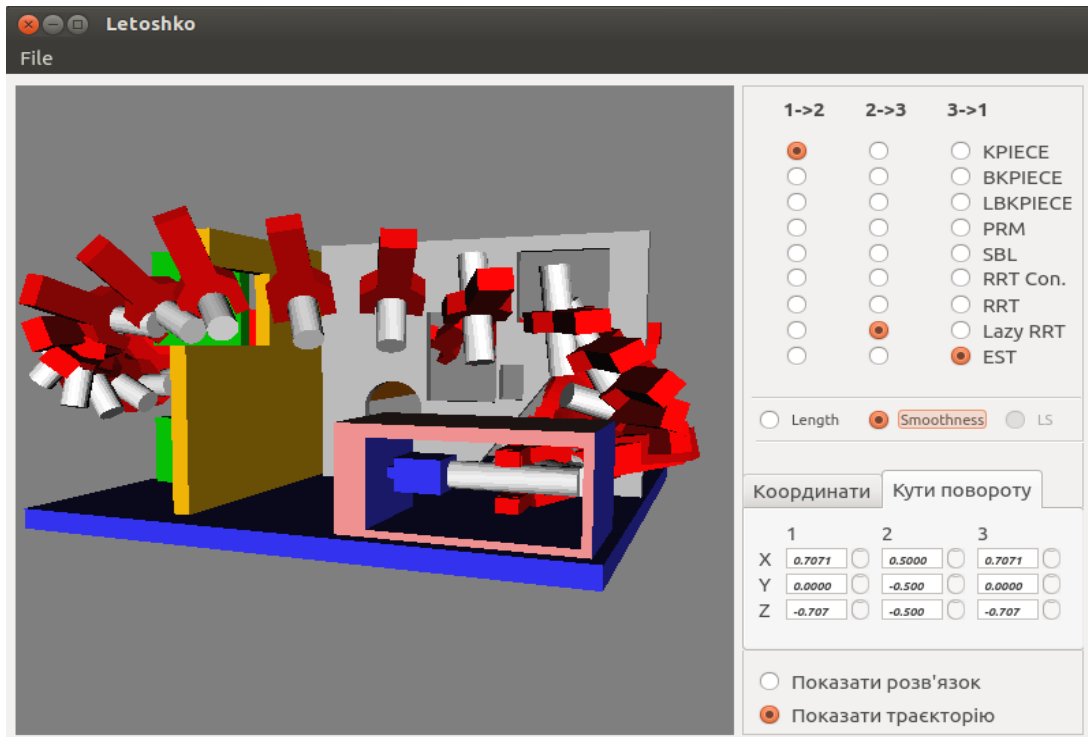


Рис. 11.7. Графічне представлення траєкторії за даними рис.12.5

Загальні результати траєкторій за всіма 9-ма алгоритмам за прийнятими критеріями довжини  $L$  та гладкості  $S$  приведені на рис. 11.8.

Solutions length:			
	1->2	2->3	3->1
KPIECE	348.298	785.637	386.727
BKPIECE	991.212	927.692	310.566
LBKPIECE	1105.07	999.944	309.764
PRM	380.023	773.353	353.567
SBL	336.81	781.414	343.405
RRT Con	397.695	827.576	320.301
RRT	362.783	927.614	319.066
Lazy RRT	353.775	859.333	326.161
EST	351.373	710.749	306.724

Solutions smoothness:			
	1->2	2->3	3->1
KPIECE	0.00614645	0.81684403	0.00035364
BKPIECE	0.00649233	0.57762842	0.00061215
LBKPIECE	0.01556398	0.33841250	0.00134936
PRM	0.01087982	0.06572647	0.00584544
SBL	0.03920195	0.01541525	0.00114600
RRT Con	0.02972639	0.00798675	0.00136550
RRT	0.02104365	0.04835968	0.00076772
Lazy RRT	0.01041575	0.00712410	0.00015978
EST	0.02201124	0.12016734	0.01540509

Рис. 11.8. Загальні результати роботи ПП "LSTr" за 9-ми алгоритмами

Як слідує із наведеного вище, створений ПП “**LSTr**” дозволяє розв’язувати задачу планування безперешкодного (безколізійного) переміщення ММП з ОМ та без нього в межах попередньо сформованих сцен.

Таким чином, представлений матеріал вказує на його **наукову новизну**, яку можна сформулювати наступним чином:

- набув подальшого розвитку підхід до визначення оптимального планування траєкторій за критеріями довжини та гладкості, що базується на основі існуючих алгоритмів безколізійного переміщення рухомих об’єктів (ММП) з врахуванням змодельованої сцени, конструктивно-геометричних параметрів ММП та ОМ, робота яких передбачає визначення локальних критеріїв довжини та гладкості, і дає можливість в подальшому розв’язувати пряму та зворотні задачі кінематики.

Виконані розробки і отримані результати розглядаються як **практичне** підґрунтя для подальшого розвитку підходу щодо планування траєкторій ПР та / або ММТ з розв’язанням прямої та зворотної задач кінематики, а в подальшому і прямої та зворотної задач динаміки. Остання є основою для розробки законів керування ланками МС ПР та його Сх.