SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Evidenčné číslo: FEI-104376-104853

PLÁNOVANIE TRAJEKTÓRIE PRE ROBOT S KINEMATICKOU ŠTRUKTÚROU SCARA

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2024 **Bc. Michal Bíro**

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Evidenčné číslo: FEI-104376-104853

PLÁNOVANIE TRAJEKTÓRIE PRE ROBOT S KINEMATICKOU ŠTRUKTÚROU SCARA

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program:	Robotika a kybernetika
Názov študijného odboru:	kybernetika
Školiace pracovisko:	Ústav robotiky a kybernetiky
Vedúci záverečnej práce:	Ing. Michal Dobiš, PhD..

Bratislava 2024 **Bc. Michal Bíro**

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný program:	Robotika a kybernetika
Autor:	Bc. Michal Bíro
Diplomová práca:	Plánovanie trajektórie pre robot s kinematickou štruktúrou SCARA
Vedúci záverečnej práce:	Ing. Michal Dobiš, PhD..
Miesto a rok predloženia práce:	Bratislava 2024

Kľúčové slová: SCARA, plánovanie trajektórie, RRT

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Programme:	Robotics and cybernetics
Author:	Bc. Michal Bíro
Master's thesis:	Trajectory planning for a SCARA kinematic structure robot
Supervisor:	Ing. Michal Dobiš, PhD..
Place and year of submission:	Bratislava 2024

Abstract

Keywords: SCARA, trajectory planning, RRT

Pod’akovanie

Chcel by som sa pod’akovať môjmu vedúcemu práce ...

Obsah

Zoznam obrázkov a tabuliek

Zoznam algoritmov

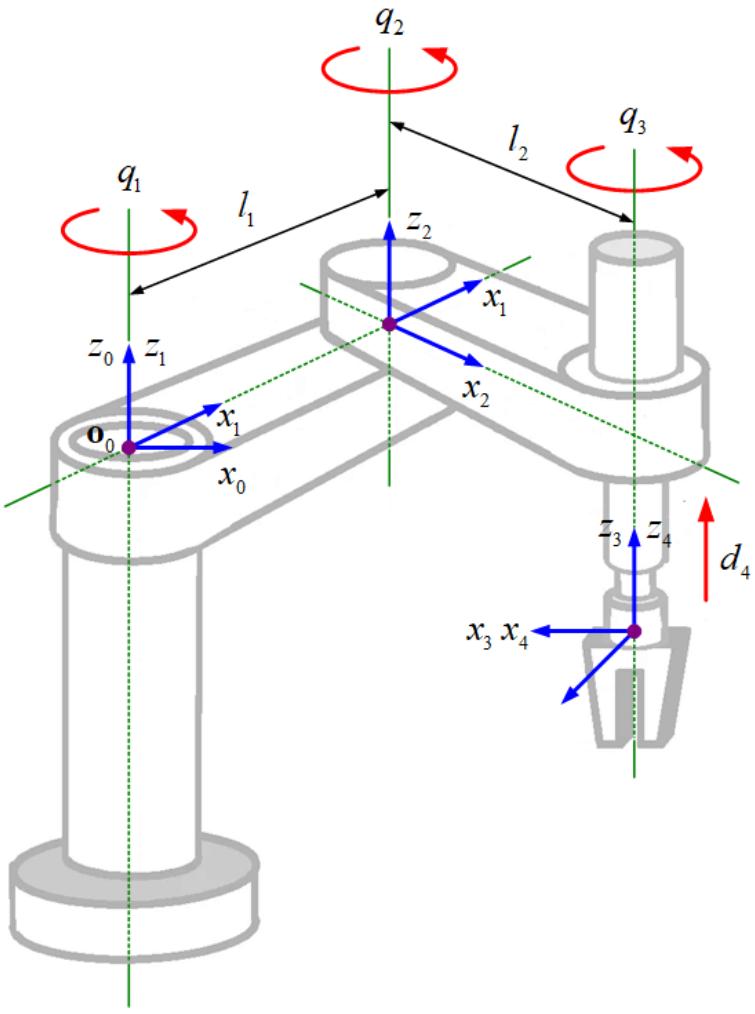
Zoznam výpisov

Úvod

1 Kinematika robota

1.1 SCARA

Scara robot je typ priemyselného robotického systému, ktorý bol vyvinutý na vykonávanie presných a opakujúcich sa úloh. Navrhol ho v roku 1979 vedec Hiroshi Makino z Yamanashi Univerzity[**<empty citation>**]. Názov SCARA je akronym (Selective Compliance Assembly Robot Arm), ktorý značí, že vertikálna poddajnosť (compliance) je väčšia ako poddajnosť v horizontálnom smere. Jeho hlavnou úlohou je najčastejšie presúvanie objektov z jedného miesta na druhé. Scara roboty majú obvykle 4 stupne voľnosti a svojou konštrukciou pripomínajú ľudskú ruku. (obr. 1.1). Ide o 3 rotačné a 1 posúvny kĺb, ktoré zabezpečujú pohyb robota vo všetkých



Obr. 1.1: SCARA robot - smery pohybov[**<empty citation>**]

osiach x, y a z. Umiestnením otáčavých kĺbov v jednej rovine je pohyb robota v porovnaní s robotickými ramenami so 6 stupňami voľnosti, značne znevýhodnený. Taktiež nosnosť týchto

robotov je značne obmedzená, z dôvodu konštrukčných parametrov ako je nosnosť ložiska. Kinematická štruktúra SCARA robotov však prináša aj výhody, pre ktoré sú tieto roboty veľmi obľúbené a často používané.

SCARA robot disponuje tromi rotačnými kĺbmi a jedným posuvným kĺbom, ktoré mu umožňujú pohyb v priestore vo všetkých troch osiach x, y a z. Tento dizajn umožňuje robotovi vykonávať presné a opakujúce sa úlohy aj keď umiestnenie rotačných kĺbov v jednej rovine obmedzuje jeho pohybovú schopnosť v porovnaní s robotmi s robotickými ramenami so 6 stupňami voľnosti. Napriek tomu, vďaka svojej kinematickej štruktúre, SCARA roboty prinášajú niekoľko výhod, ktoré ich robia obľúbenými vo viacerých odvetviach priemyslu.

Jednou z hlavných výhod je ich schopnosť dosiahnuť vysokú presnosť a rýchlosť pri vykonávaní úloh. Navyše, ich nízka hmotnosť, jednoduché ovládanie a kompaktné rozmery prispievajú k ich širokému uplatneniu. Okrem toho, SCARA roboty sú často cenovo dostupnejšie v porovnaní s inými typmi robotov, čo ich robí atraktívnou voľbou pre mnohé spoločnosti.

Vďaka týmto vlastnostiam sa SCARA roboty využívajú v rôznych odvetviach priemyslu, vrátane montáže, balenia, manipulácie s chemikáliami, potravinárskej výroby, laboratórií, farmaceutického priemyslu a automobilového priemyslu. Ich schopnosť vykonávať opakujúce sa úlohy s vysokou presnosťou a efektívnosťou ich robí dôležitým nástrojom v moderných výrobných prostrediach.

V našej práci sa nebudeme venovať len klasickej štruktúre SCARA robota so 4 stupňami voľnosti ale budeme skúmať a overovať riešiteľnosť daného problému aj pomocou iných kinematických štruktúr. Z dôvodu zníženia ceny robota budeme testovať, či je pre náš problém potrebný robot so 4 stupňami voľnosti(3 rotačné kĺby, 1 posuvný kĺb) alebo vieme štruktúru ešte viacej zjednodušiť. Našim cieľom je identifikovať najefektívnejšiu kinematickú štruktúru pre danú aplikáciu a zvážiť výhody a nevýhody rôznych prístupov.

1.2 Kinematická štruktúra nášho robotického ramena

Robotické rameno s kinematickou štruktúrou SCARA, ktorému sa v tejto práci venujeme je súčasťou komplexného robotického riešenia. Ide o robota Brightpick Autopicker (obr. 1.2) skladajúceho sa z mobilného podvozku, na ktorom je umiestnená zdvižná plošina s krabicami slúžiacimi na uskladnenie tovaru a skompletizovanie objednávky. Na stĺpe, po ktorom sa táto plošina pohybuje v smere osi z, je umiestnené naše robotické rameno. Jeho úlohou je presun tovaru z krabice s tovarom do krabice s objednávkou. Poslednou časťou tohoto robota je skener, ktorý slúži na určenie pozície prenášaného objektu v krabici.

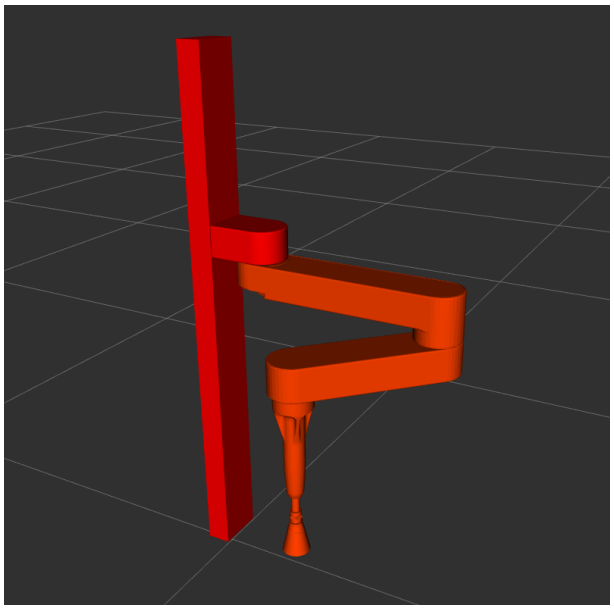
Pre vývoj algoritmu plánovania trajektórie sa budeme zaoberať iba vybranou časťou tohoto komplexného riešenia a to konkrétne robotickým ramenom. Samotné robotické rameno sa

Obr. 1.2: Brightpick Autopicker

skladá z 2 ramien a 2 rotačných kĺbov (obr. 1.2). V porovnaní s klasickou kinematickou štruktúrou SCARA (obr. 2.2) nemá tretí rotačný kĺb, ktorý by zabezpečil rotáciu efektora - teda rotáciu samotného prenášaného objektu. Taktiež neobsahuje posuvný kĺb, ktorý by zabezpečil pohyb v smere osi z. Tento pohyb totiž zabezpečuje zdvižná plošina, na ktorej sú umiestnené krabice s tovarom. Pre potreby našej úlohy si teda kinematickú štruktúru môžeme zjednodušiť na 2 stupne voľnosti - 2 rotačné kĺby. Plánovanie trajektórie budeme riešiť len od bodu uchytenia objektu efektorom robota (počiatočný bod trajektórie) po dosiahnutie bodu uloženie objektu do krabice (koncový bod trajektórie). Toto obmedzenie nám umožní lepšie optimalizovať pohyb a

rameno	dĺžka [mm]	rozsah [rad]
link1	360	0 - $\pi/2$
link2	260	0 - 2π

Tabuľka 1.1: Parametre ramena



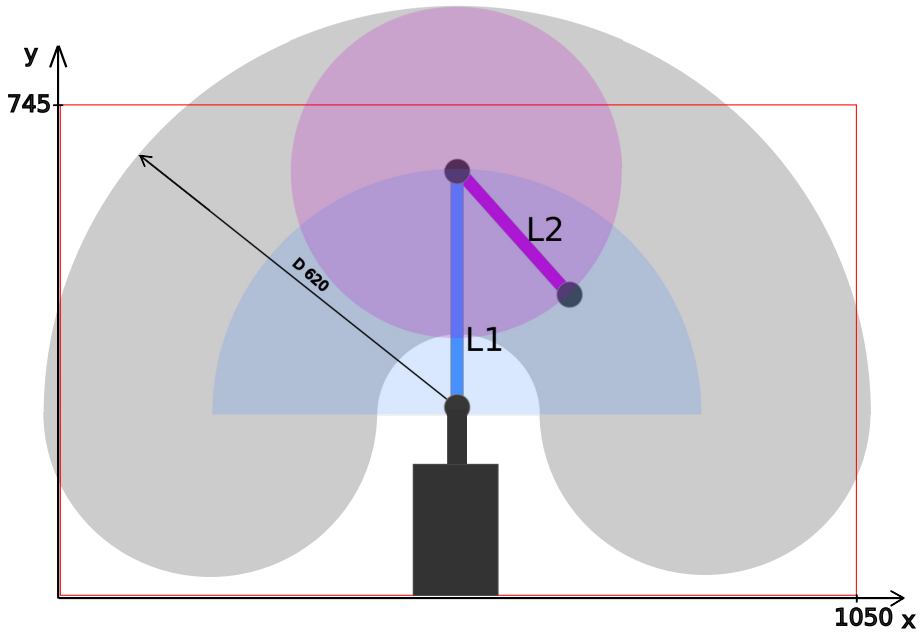
Obr. 1.3: Model robota - Rviz

zvážiť výhody a nevýhody kinematickej štruktúry.

Parametre robotického ramena sú uvedené v tabuľke 1.1. Parametre robota sa prejavujú v jeho pracovnom priestore (obr. 2.3), kde môžeme vidieť rozsah pohybu a dosiahnuteľných polôh nášho robotického ramena v 2D priestore. Modrou farbou je označené prvé rameno, rozsah jeho pohybu je vyznačený rovnakou farbou. Druhé rameno robota je označené fialovou farbou, čo platí aj pre rozsah jeho pohybu. Všetky dosiahnuteľné polohy robotickým ramenom sú označené sivou farbou. Pracovný priestor robota aj s uchopeným prenášaným objektom je na obrázku označený červenou farbou. Tento priestor je určený rozmermi celého robota, konkrétne zdvižnou plošinou, ktorej sú umiestnené krabice s tovarom a objednávkou. Pri prenášaní objektu z jednej krabice do druhej nesmie objekt ani robotické rameno vyjsť z toho priestoru aby nedošlo ku kolízii, keďže mimo tohoto rozsahu nevieme zaručiť voľný priestor.

1.2.1 2 stupne voľnosti

Prvou testovanou štruktúrou bude s 2 rotačnými kĺbmi , čo zodpovedá 2 stupňom voľnosti. V tejto kinematickej štruktúre sa budú otáčať 2 ramená robota a nástroj na uchytenie objektu , ktorý sa nachádza na konci kinematického reťazca bude fixný. Pri tejto konfigurácii je kritické



Obr. 1.4: Pracovný priestor robotického ramena

testovať schopnosť robota preniesť objekty rôznych tvarov a rozmerov zo štartovacej konfigurácie do cieľovej. Osobitnú pozornosť je potrebné venovať väčším podlhovastým objektom, kde môže nastať problém. Robot by mohol mať obmedzenú schopnosť otáčania objektov v rámci svojich dvoch rotácií ramien, čo by mohlo spôsobiť, že nedokáže dosiahnuť požadovanú konfiguráciu. Ďalším potenciálnym problémom môže byť kolízia so stĺpom, na ktorom je robotické rameno upevnené.

Testovanie na rôznych objektoch umožní identifikovať tieto obmedzenia a prípadne navrhnúť riešenia, ako ich prekonať. Zároveň bude možné získať dôležité informácie o výkonnosti a schopnostiach tohto typu kinematickej štruktúry v reálnych pracovných podmienkach.

1.2.2 3 stupne voľnosti

Druhá testovaná kinematická štruktúra sa bude líšiť od prvej pridaním ďalšieho rotačného kĺbu, ktorý umožní otáčať nástrojom na uchytenie objektu. Táto úprava by mala zlepšiť schopnosť robota nájsť vhodnú trajektóriu pre presun objektu zo štartovacej do cieľovej pozície. Počas testovania tejto konfigurácie budeme sledovať hlavne parametre, ako je čas, za ktorý robot prejde danú trajektóriu, a jej efektivitu.

Dôležité je zaznamenať dáta, ktoré nám umožnia zhodnotiť, či pridaný rotačný kĺb prináša dostatočný prínos voči prvej konfigurácii. Tieto údaje nám pomôžu posúdiť, či investícia do efektívnejšieho robota s väčšími možnosťami je opodstatnená z hľadiska finančnej efektívnosti v porovnaní s lacnejším robotom, ktorý má obmedzené možnosti.

Kombinácia dosiahnuteľnosti cieľovej polohy pri rozličných rozmeroch objektov, časo-

vých dát a analýza efektivity bude kľúčová pri rozhodovaní, ktorá kinematická štruktúra je najvhodnejšia pre danú aplikáciu z hľadiska nákladov a výkonnosti.

2 Algoritmy plánovania trajektórie

Algoritmus plánovania trajektórie je matematický postup alebo procedúra, ktorá určuje optimálnu cestu alebo pohyb medzi počiatočným a koncovým bodom v priestore. Cieľom algoritmu plánovania trajektórie je nájsť optimálnu trajektóriu, ktorá spĺňa určité kritériá, ako sú bezpečnosť, efektivita, minimálny čas, minimalizácia spotrebovanej energie, alebo minimalizácia vplyvu na okolie. Tieto kritériá môžu byť definované podľa konkrétnej aplikácie a požiadaviek.

V tejto kapitole sa budeme venovať analýze rôznych algoritmov využívaných v oblasti robotiky. Na základe tejto analýzy budeme schopní určiť, ktorý z týchto algoritmov najlepšie vyhovuje našim potrebám a zabezpečí optimálnu kombináciu medzi presnosťou a rýchlosťou výpočtu. Vybraný algoritmus bude slúžiť ako základ pre úspešnú implementáciu a funkčnosť nášho systému pre plánovanie trajektórií.

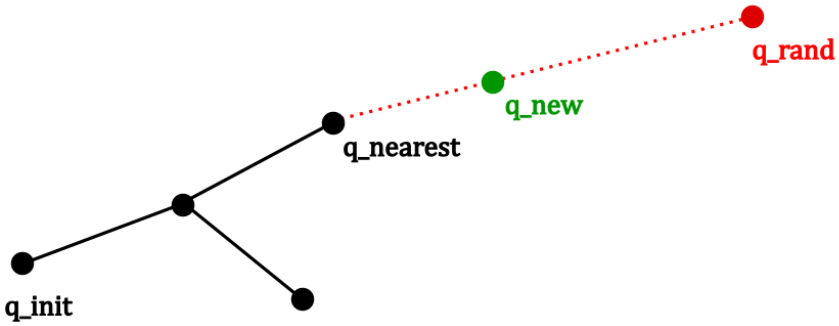
2.1 RRT

Algoritmus RRT – z anglického Rapidly-exploring Random Tree, by sa dal do slovenčiny preložiť ako rýchlo rastúci náhodný strom. Algoritmus je v oblasti robotiky veľmi rozšírení a obľúbený vďaka svojej schopnosti rýchlo prehľadávať vysoko dimenzionálny konfiguračný priestor, v ktorom zohľadňuje prekážky v priestore ako aj dynamiku telesa.

Ide o algoritmus založený na prehľadávaní konfiguračného priestoru C , kde sa v iteráciách vytvárajú náhodné uzly - q, ktorých spájaním vznikajú nové potenciálne cesty. Každý uzol q reprezentuje pozíciu a orientáciu telesa v 2D alebo 3D priestore []. Pri plánovaní trajektórie je generovaný kontinuálny rad uzlov (obr. 1.2), ktorý začína v počiatočnom stave q_{init}, a postupne sa rozrastá až dosiahne koncový stav q_{goal}. Generovanie stromu prebieha v iteráciách kedy sa vždy vygeneruje náhodná konfigurácia q_{rand} a nájde sa k nej najbližší uzol patriaci stromu. Od daného uzla je následne vo vzdialenosti v od uzla $q_{nearest}$ vytvorený nový uzol q_{new}. Proces rozrastania stromu sa končí v momente ak sa q_{new} nachádza v okolí cieľovej konfigurácie q_{goal}, ktoré je definované vzdialenosťou d.

Ak neuvažujeme voľný konfiguračný priestor C_{free} treba v procese generovania taktiež overovať kolíziu s danými prekážkami v priestore - C_{obs}. Novo generovaný uzol stromu sa nesmie nachádzať v priestore prekážky - C_{obs}, a ani cesta medzi dvoma susednými uzlami nesmie kolidovať s prekážkou. Pokiaľ uzol spĺňa tieto podmienky, je zaradený do štruktúry stromu, v opačnom prípade je vyradený a proces pokračuje ďalej.

Ide o neoptimálne riešenie, keďže body v konfiguračnom priestore sú generované náhodne



Obr. 2.1: Vizualizácia princípu RRT algoritmu

a výsledný tvar trajektórie vzniká ako najkratšia cesta medzi nami vygenerovanými bodmi. Na zlepšenie trajektórie existuje viacero možností, ktoré ponúkajú suboptimálne riešenia problému, jedným z nich je napríklad RRT*.

Algoritmus RRT môže mať nevýhodu v generovaní neoptimálnych výsledkov, pretože generuje body v konfiguračnom priestore náhodne a tvorí trajektóriu ako najkratšiu cestu medzi týmito bodmi. Na zlepšenie výslednej trajektórie existuje niekoľko možností, medzi ktorými je aj RRT*.

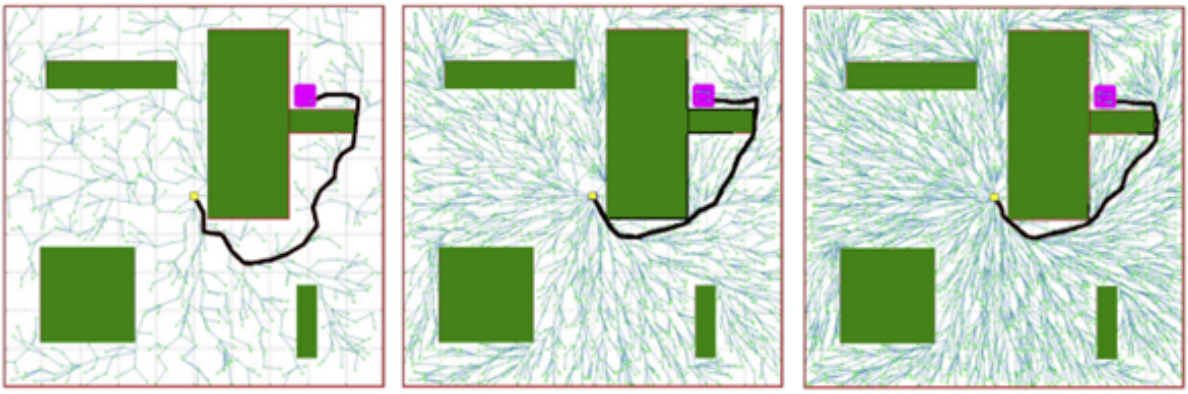
2.2 RRT*

Jedná sa o modifikáciu RRT algoritmu, ktorej cieľom je v porovnaní s pôvodným RRT nájsť kratšiu trajektóriu. Hlavnou úpravou oproti jednoduchému RRT algoritmu je výpočet vzdialenosti z počiatočného do aktuálneho uzlu a následné overenie, či neexistuje v okolí uzol, ktorého vzdialenosť by bola menšia ako vzdialenosť momentálneho prepojenia. Ak táto situácia nastane, algoritmus vyberie prepojenie uzlov , ktoré vytvoria kratšiu trasu. Algoritmy sa tiež líšia ukončovacou podmienkou, kde pre RRT* je určený jasný počet iterácií. Od počtu iterácií závisí výsledný tvar trajektórie, kde so zvyšujúcim sa počtom je algoritmus schopný nájsť kratšie a plynulejšie trasy (obr. 2.2).

Tieto úpravy a rozdiely umožňujú algoritmu RRT* dosiahnuť lepšie výsledky v porovnaní s pôvodným RRT, čo ho robí atraktívnou voľbou pre úlohy, kde je kritické dosiahnutie čo najlepšej trajektórie v danom priestore. Je dôležité zohľadniť aj možnosť zvýšenia času výpočtu pri použití algoritmu RRT*. Aj keď má RRT* potenciál nájsť kratšie a plynulejšie trasy ako klasický RRT, zvyšuje sa časová náročnosť algoritmu vzhľadom na výpočet vzdialeností a overovanie optimality spojení medzi uzlami.

Pri navrhovaní algoritmu pre plánovanie trajektórií je preto dôležité hľadať rovnováhu medzi kvalitou výsledných trajektórií a časovou náročnosťou výpočtu. Niekedy môže byť ak-

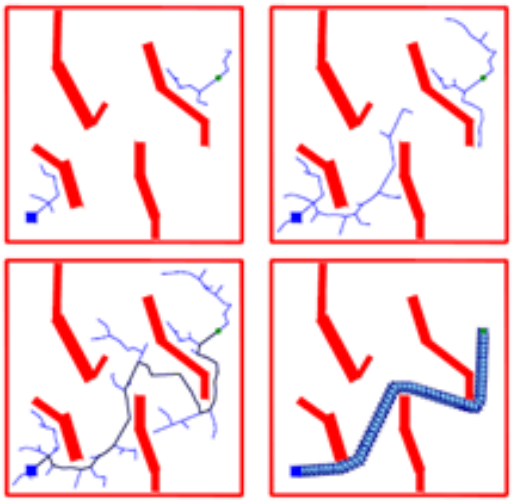
ceptovateľné mať mierne suboptimálnu trajektóriu, ak to znamená výrazné zrýchlenie výpočtu.



Obr. 2.2: Vplyv počtu iterácií na výslednú trajektóriu [**<empty citation>**]

2.3 RRT - connect (prepojený)

Algoritmus RRT Connect (spojenie) je ďalšou modifikáciou algoritmu RRT. V procese rozširovania stromovej štruktúry vytvára dva stromy z počiatočnej a koncovej konfigurácie, ktoré sa šíria v konfiguračnom priestore, až kým nedôjde k ich spojeniu a vytvoreniu cesty. (obr. 2.3).



Obr. 2.3: Prepojenie 2 stromov [**<empty citation>**]

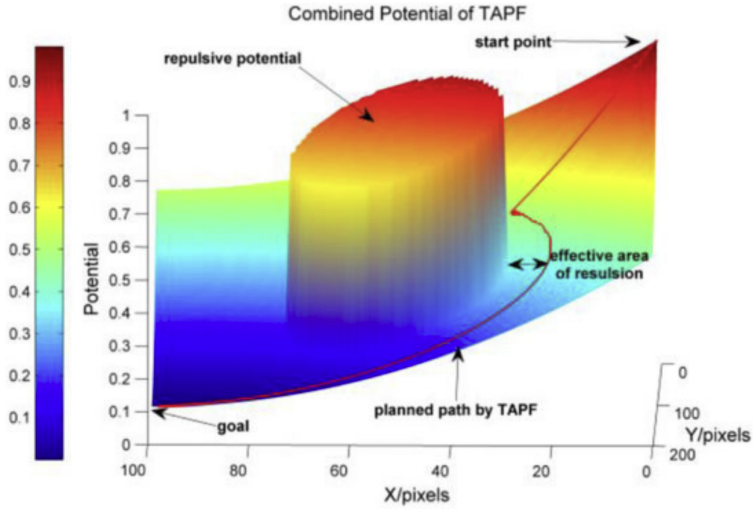
Tento algoritmus má výhodu v tom, že nájdenie trajektórie je často ľahšie dosiahnuteľné jedným z dvoch možných smerov pohybu medzi dvoma bodmi, čo závisí od prekážok v priestore C_{obs}. Použitím algoritmu RRT Connect sa zvyšuje pravdepodobnosť úspešného nájdenia trajektórie od počiatočného bodu ku koncovému.

Tento prístup umožňuje efektívnejšie prehľadávanie konfiguračného priestoru, pretože vytvára dva stromy, ktoré sa šíria smerom k cieľu. Tým sa zvyšuje šanca na rýchlejšie nájdenie vhodnej trajektórie, najmä v prípade, že existuje jasný smer pohybu medzi počiatočným a koncovým bodom.

2.4 Potenciálové pole

Plánovanie trajektórie na základe potenciálového poľa využíva koncept odpudivých a príťažlivých polí. Príťažlivé pole generuje veľmi nízke hodnoty so stredom v cieľovom bode, ktoré sa so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od cieľa zvyšujú. Odpudivé pole naopak generuje veľmi vysoké hodnoty v okolí prekážok v priestore. Kombináciou týchto dvoch polí dostávame tzv. potenciálové pole(obr. 2.4) so silným sklonom ku cieľu, čo umožňuje generovanie trajektórie s tendenciou vyhýbať sa prekážkam.

Tento prístup k plánovaniu trajektórie je intuitívny a efektívny v situáciách, kde je cieľ jasne definovaný a potrebné je vyhnúť sa prekážkam v priestore. Použitie potenciálového poľa môže viesť k vytvoreniu plynulej a bezpečnej trajektórie, ktorá dosahuje cieľový bod s minimálnym rizikom kolízií.



Obr. 2.4: Potenciálové pole [**<empty citation>**]

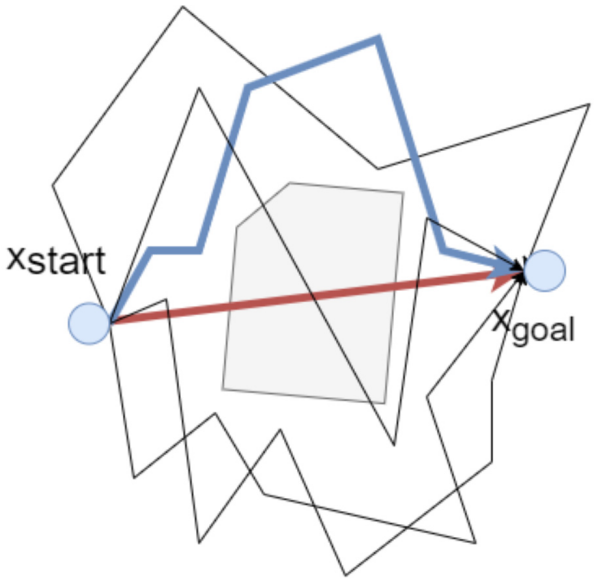
2.5 STOMP algoritmus

Algoritmus STOMP (Stochastic Trajectory Optimized Motion Planner) funguje na základe iteratívneho procesu, ktorý sa skladá z niekoľkých krokov. Počiatočná trajektória je generovaná ako lineárna interpolácia medzi počiatočným a koncovým bodom. STOMP pracuje s fixným počtom krokov na trajektóriu, nazývaných "timesteps", a tiež s definovaným počtom iterácií,

v ktorých algoritmus hľadá trajektóriu. Následne je generovaný šum, ktorý je aplikovaný na každý bod trajektórie, čo umožňuje prehľadávanie konfiguračného priestoru v okolí počiatočnej trajektórie(obr. 2.5).

Každá vygenerovaná trajektória je potom ohodnotená pomocou účelovej funkcie. V prípade, že priestor obsahuje veľké množstvo prekážok, môže nastať situácia, kedy algoritmus nenájde riešenie. Zvýšením hodnoty šumu sa zväčší priestor prehľadávania a zvýši sa pravdepodobnosť nájdenia bezkolíznej trasy, avšak za cenu zníženej optimalizácie trajektórie. Toto môže byť riešené zvýšením počtu iterácií, avšak to môže mať za následok zvýšenie výpočtového času algoritmu.

Zvolenie správnych parametrov a vyváženie medzi priestorom prehľadávania, optimalizáciou trajektórie a výpočtovým časom je kľúčové pre úspešné použitie algoritmu STOMP v plánovaní trajektórie v prostredí s prekážkami.



Obr. 2.5: Generované trajektórie [**<empty citation>**]

3 Výber algoritmu

Hlavnou časťou našej práce je implementácia algoritmu na hľadanie trajektórie pre pohyb objektu v priestore. Výber správneho algoritmu je preto kľúčový. Je nevyhnutné vybrať taký algoritmus, ktorý najlepšie zodpovedá našej úlohe.

Pri rozhodovaní o vhodnom algoritme je dôležité zohľadniť nielen schopnosť algoritmu nájsť optimálnu trajektóriu, ale aj jeho rýchlosť výpočtu. Vzhľadom na to, že náš robotický systém pracuje v reálnom čase, je kľúčové zvoliť algoritmus, ktorý dokáže rýchlo generovať trajektórie bez zbytočného oneskorenia.

V tejto kapitole sa budeme bližšie venovať algoritmu plánovania trajektórie, ktorý sme sa rozhodli zvoliť na riešenie nášho problému a vysvetlíme si dôvody jeho výberu. Taktiež si predstavíme existujúce riešenie, na ktorom budeme v našej práci stavať, rozširovať a upravovať ho podľa potrieb našej úlohy. Na záver si vysvetlíme, ako budeme pristupovať k plánovaniu trajektórie pri jednotlivých kinematických štruktúrach, ktoré budeme testovať.

3.1 RRT

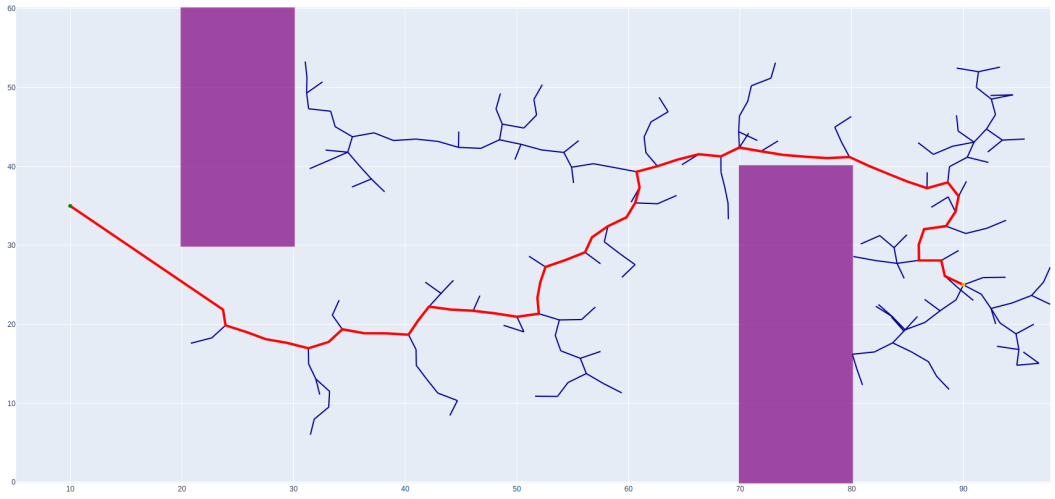
Analýzou jednotlivých typov algoritmov pre plánovanie trajektórie sme dospeli k záveru, že najvhodnejšou voľbou pre našu úlohu bude RRT algoritmus. Tento výber sme urobili najmä pre jeho schopnosť rýchlo prehľadávať konfiguračný priestor. RRT algoritmus je vhodný nielen pre svoju rýchlosť, ale aj pre jeho univerzálnosť, pretože ho vieme využiť ako v kartézskom súradnicovom systéme, tak aj v kĺbovej súradnicovej sústave. Táto flexibilita bude dôležitá pri implementácii plánovania trajektórie pre rôzne kinematické štruktúry.

Ďalšou výhodou RRT algoritmu je jeho jednoduchá a rýchla modifikovateľnosť podľa našich potrieb. V našej práci budeme tiež porovnávať RRT algoritmus s jeho modifikáciou, RRT*. Budeme sa snažiť nájsť optimálne riešenie z hľadiska času výpočtu a kvality výslednej trajektórie.

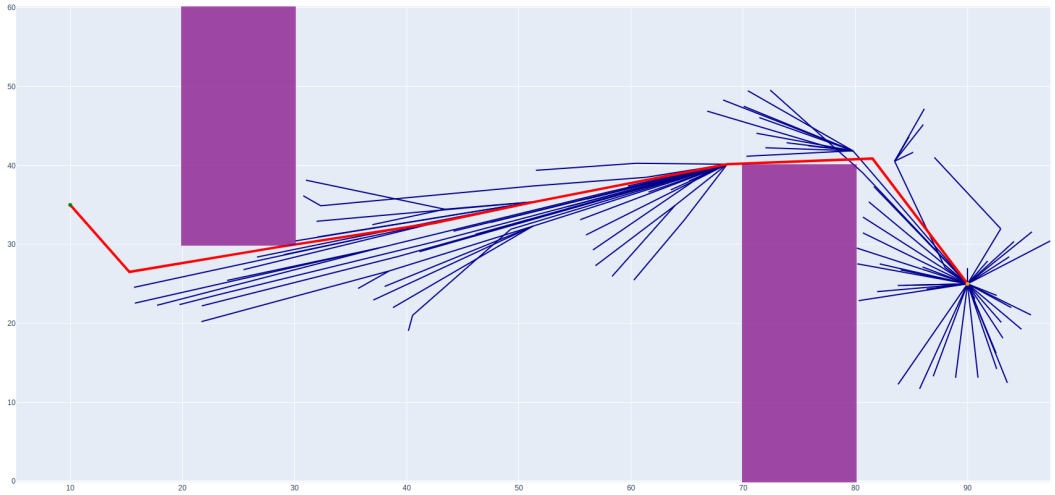
3.2 Riešenie RRT - python

RRT algoritmus je široko využívaný a populárny, a preto existuje mnoho dostupných implementácií v rôznych programovacích jazykoch. V našej práci budeme pracovať v jazyku Python, preto sme sa rozhodli analyzovať rôzne voľne dostupné implementácie tohto algoritmu v tomto jazyku.

Z dostupných riešení a implementácií RRT algoritmu v jazyku Python sme sa rozhodli použiť implementáciu od autorov knižnice rrt-algorithms []. Obsahuje samotný RRT algoritmus (obr. 3.1) ako aj jeho modifikácie - RRT* (obr. 3.2) a RRT connect (obr. 3.3).



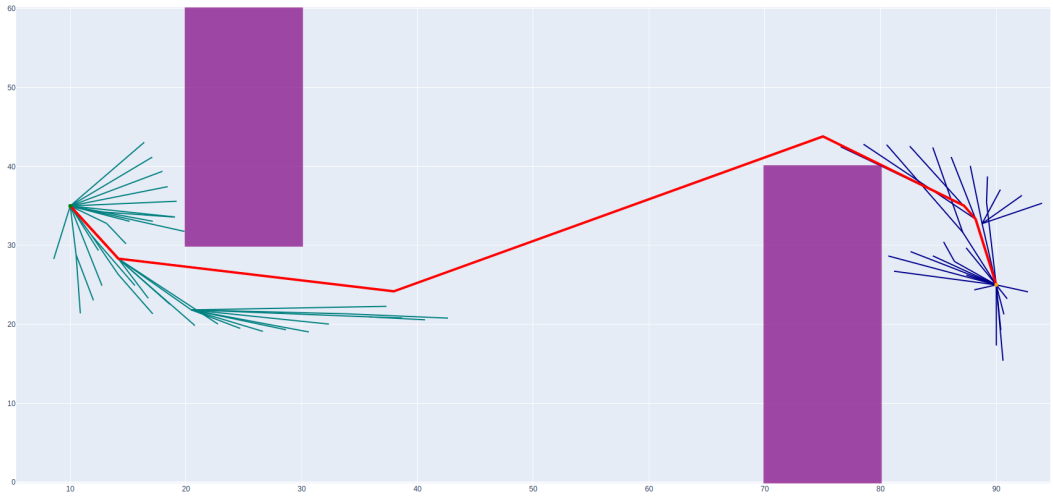
Obr. 3.1: RRT - dvojrozmerný priestor



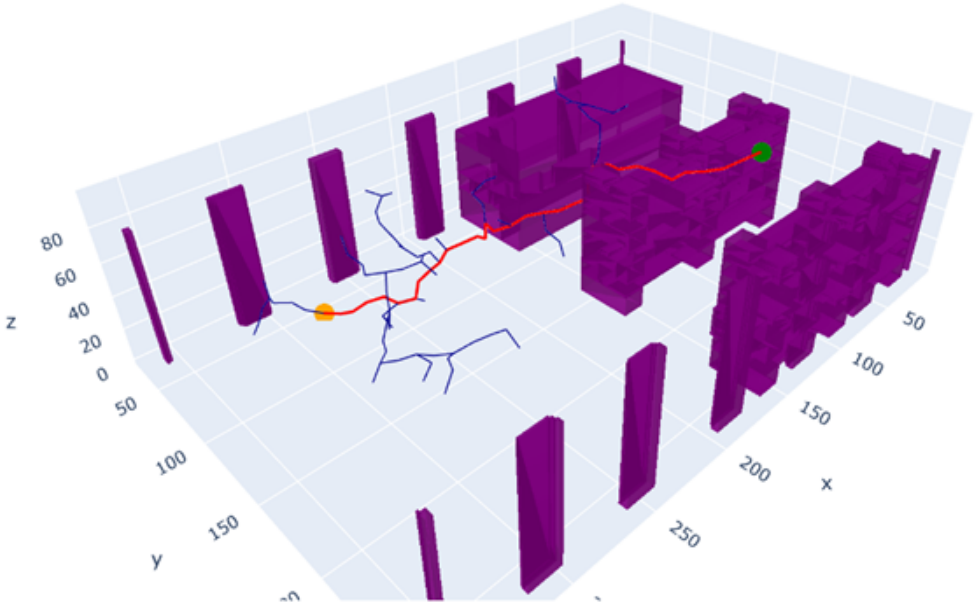
Obr. 3.2: RRT* - dvojrozmerný priestor

Riešenie, na ktorom budeme stavať, je vytvorené pre plánovanie v kartézskom súradnicovom systéme a to v dvoj aj v trojrozmernom priestore (obr. 3.4). Algoritmu je potrebné zadať rozsah prehľadávaného priestoru, počiatočný a koncový bod a ak sa v priestore nachádzajú prekážky, ich pozície v prehľadávacom priestore. Ako možeme vidieť na obrázkoch 3.1, 3.2, 3.3, táto implementácia pracuje iba s hmotným bodom, neuvažuje teda rozmery prenášaného objektu.

Pre riešenie našej úlohy bude potrebné rozšíriť tento algoritmus tak, aby neuvažoval o prenášanom objekte ako o hmotnom bode, ale aby bral do úvahy aj jeho rozmery. Prístup, ktorý je možné zvoliť je kontrola kolízii v generovaných bodoch na základe ktorej bude tento bod uznaný za nevyhovujúci a bude generovaná nová bezkolízna konfigurácia. Objekt bude v pries-



Obr. 3.3: RRT connect - dvojrozmerný priestor



Obr. 3.4: RRT - trojrozmerný priestor

tore definovaný bodom, v ktorom je uchopený robotickým ramenom - v našom prípade to bude geometrický stred objektu, a jeho orientáciou v priestore. Stred bude definovaný súradnicami x, y pracovného priestoru v kartézskom súradnicovom systéme. Orientácia objektu bude reprezentovaná ako uhol medzi osou objektu a osou x v stupňoch.

Plánovanie bude prebiehať na rozdielnych kinematických štruktúrach, preto je dôležité zvoliť správny prístup pre každú z nich a prispôsobiť algoritmus ich individuálnym potrebám.

3.2.1 3 stupne voľnosti

Plánovanie trajektórie pri kinematickej štruktúre s 3 stupňami voľnosti budeme riešiť primárne v kartézskom súradnicovom systéme. Pre implementáciu nášho algoritmu použijeme RRT v trojrozmernom konfiguračnom priestore, pričom osi x a y budú reprezentovať osi x a y v pracovnom priestore robota. Os z konfiguračného priestoru bude zodpovedať natočeniu objektu okolo jeho stredu, ktorý nám bude reprezentovať bod uchytenia objektu. Rozsah konfiguračného priestoru (tab. 3.1) bude zodpovedať rozsahu pracovnému priestoru robota v osiach x, y a rozsahu maximálnej rotácie objektu v priestore.

x [mm]	y [mm]	z [°]
0 - 1050	0 - 745	0 - 360

Tabuľka 3.1: Rozsah konfiguračného priestoru - kartézsky súradnicový systém

Pri kinematickej štruktúre s 3 stupňami voľnosti budeme tiež testovať plánovanie trajektórie v kĺbovom priestore. Tieto dáta budeme neskôr používať na porovnanie plánovania trajektórie v kĺbovom a kartézskom priestore. Budeme sledovať čas výpočtu algoritmu, úspešnosť nájdenia cesty a kvalitu trajektórie.

Plánovanie trajektórie v kĺbovom priestore nám umožní preskúmať, ako dobre sa algoritmus dokáže prispôsobiť špecifikám kinematickej štruktúry robota a aký vplyv má voľba priestoru na výslednú trajektóriu. Porovnanie výsledkov s plánovaním trajektórie v kartézskom priestore nám poskytne ucelený obraz o výkonnosti a efektívnosti oboch prístupov.

Osi konfiguračného priestoru x,y a z budú odpovedať otočeniam jednotlivých kĺbov robotického ramena (tab. 3.2) .

x [°]	y [°]	z [°]
0 - 180	0 - 360	0 - 360

Tabuľka 3.2: Rozsah konfiguračného priestoru - kĺbový súradnicový systém

3.2.2 2 stupne voľnosti

Plánovanie trajektórie pri štruktúre s 2 stupňami voľnosti, ktoré predstavujú 2 rotačné kĺby robotického ramena, nám neumožňuje plánovať v kartézskom priestore, pretože nie každá konfigurácia by bola dosiahnuteľná. Z tohto dôvodu je nevyhnutné použiť plánovanie v kĺbovom konfiguračnom priestore. Pôjde o dvojrozmerný konfiguračný priestor, kde osi x a y budú predstavovať rotácie jednotlivých kĺbov. Rozsah konfiguračného priestoru, ktorý odpovedá rozsahu pohybu jednotlivých kĺbov je uvedený v tabuľke 3.2.

x [°]	y [°]
0 - 180	0 - 360

Tabuľka 3.3: Rozsah konfiguračného priestoru - kĺbový priestor

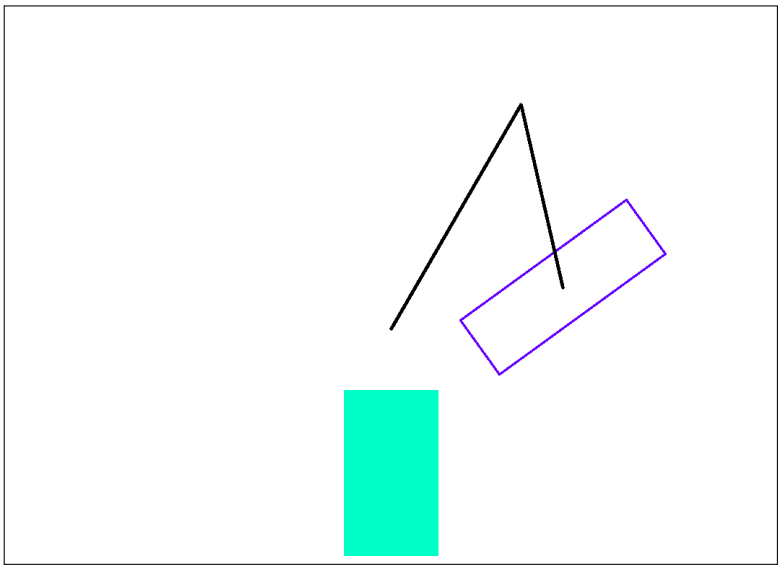
4 Implementácia algoritmu

Kým v predošlej kapitole (kap. 3) sme si v jednoduchosti vysvetlili ako budeme pristupovať ku plánovaniu trajektórie pri jednotlivých kinematických štruktúrach a opísali sme si konfiguračný priestor pre jednotlivé štruktúry, v tejto kapitole si bližšie vysvetlíme, čo bolo potrebné implementovať do pôvodného kódu aby vyššie spomenuté prístupy fungovali.

Ukážeme si fundamentálne funkcie, na ktorých stojí náš algoritmus a vysvetlíme si ich úlohy a prístup, ktorý sme pri ich implementácii zvolili.

4.1 Vizualizácia

Pre potreby vývoju nášho algoritmu bolo v prvom rade potrebné vytvoriť vizualizáciu prenášaného objektu v priestore. Pôvodné riešenie uvažovalo len hmotný bod, ktorého pohyb v priestore sa dá jednoducho zobraziť v grafe. Pri našom probléme má však prenášaný objekt svoj, tvar, rozmery a orientáciu v priestore. Z toho dôvodu bola vytvorená vizualizácia, ktorá nám zobrazuje priemet pracovného priestoru robota v osiach x, y (obr. 4.1). Obsahuje prenášaný predmet, prekážku, ktorá predstavuje stĺp, na ktorom je robotické rameno uchytené v prípade plánovania trajektórie v kĺbovom priestore aj samotné robotické rameno. Pracovný priestor spolu s prekážkami a objektom sme vizualizovali v mierke 1 mm = 1 $pixel$.



Obr. 4.1: Vizualizácia pracovného priestoru

Táto vizualizácia spĺňala v prvom rade kontrolnú funkciu, či vygenerovaná trajektória spĺňa dané požiadavky - sa objekt pri pohybe vyhýba prekážkam a nevychádza z pracovného priestoru.

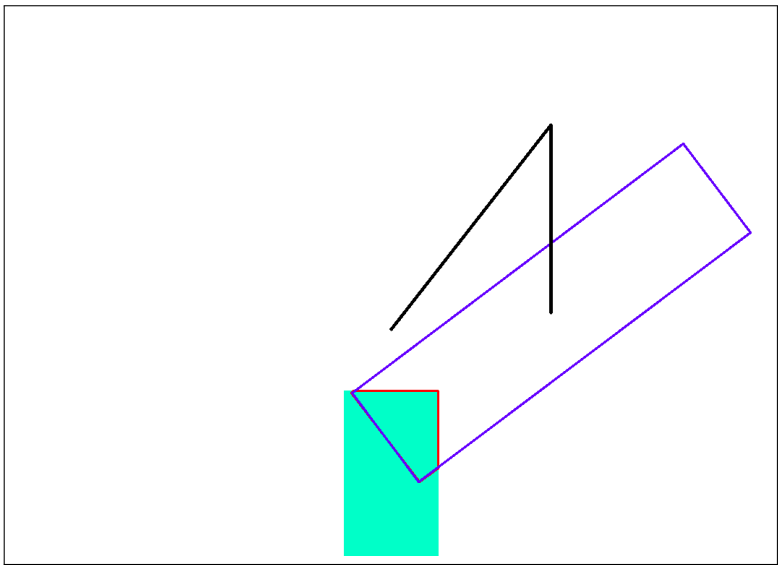
Prenášaný objekt sme si vizualizovali ako obdĺžnik. Ide o univerzálny geometrický tvar najlepšie odpovedajúci väčšine tovaru, ktorý by sa mohol v sklade nachádzať. Takmer každá krabička alebo iný objekt sa nám do roviny xy premietne práve ako obdĺžnik. Objekt sme teda definovali pozíciou jeho stredu, výškou, šírkou a uhlom otočenia.

Pre vypracovanie tejto časti sme využili knižnicu openCV.

4.2 Objekt v kolízii

Hmotný bod prenášaný priestorom má v porovnaní s objektom veľkú výhodu práve v tom, že vieme presne povedať kde v priestore sa nachádza. Tým pádom vieme jednoducho určiť , či je v kolízii s prekážkami alebo opustil pracovný priestor. Pri objekte vieme takýmto spôsobom kontrolovať len jeden jeho bod, ktorým je definovaný a to je v našom prípade jeho stred. Úlohu kontroly kolízie objektu s prekážkami to teda výrazne komplikuje aj vzhľadom na to, že náš objekt mení v priestore aj svoju orientáciu.

Preto bolo potrebné vytvoriť funkciu, ktorej úlohou bude zistiť či sa náš objekt v danej konfigurácii nenachádza v kolízii alebo neopustil pracovný priestor robota. Touto funkciou je $collision\_check()$. Ide o základnú funkciu na ktorej stojí celý náš algoritmus a je identická pre všetky kinematické štruktúry. Pracuje v kartézskom súradnicovom systéme. Na základe vstupných údajov, ktorými sú pozícia stredu objektu - súradnice x a y, rozmery objektu - šírka a výška, a natočenie objektu nám vráti informáciu o tom či sa objekt nachádza v bezkolíznej pozícii.



Obr. 4.2: Objekt v kolízii

Pre kontrolu kolízie objektu s prekážkami v priestore sme použili knižnicu shapely. Pomo-

cou jej funkcií sme boli schopní na základe parametrov objektu získať pozíciu jeho rohov v priestore a tiež overiť prienik 2 objektov - prenášaného a prekážky, čo nám slúžilo na zistenie kolízie(obr. 4.2).

Do tejto funkcie sme zahrnuli kontrolu situácie, že prenášaný objekt opustí pracovný priestor robota. Keďže nevieme zaručiť, že priestor mimo pracovné priestoru robota bude voľný, treba ho považovať za obsadený. V prípade, že objekt opusti pracovný priestor je táto konfigurácie tiež považovaná za kolíziu.

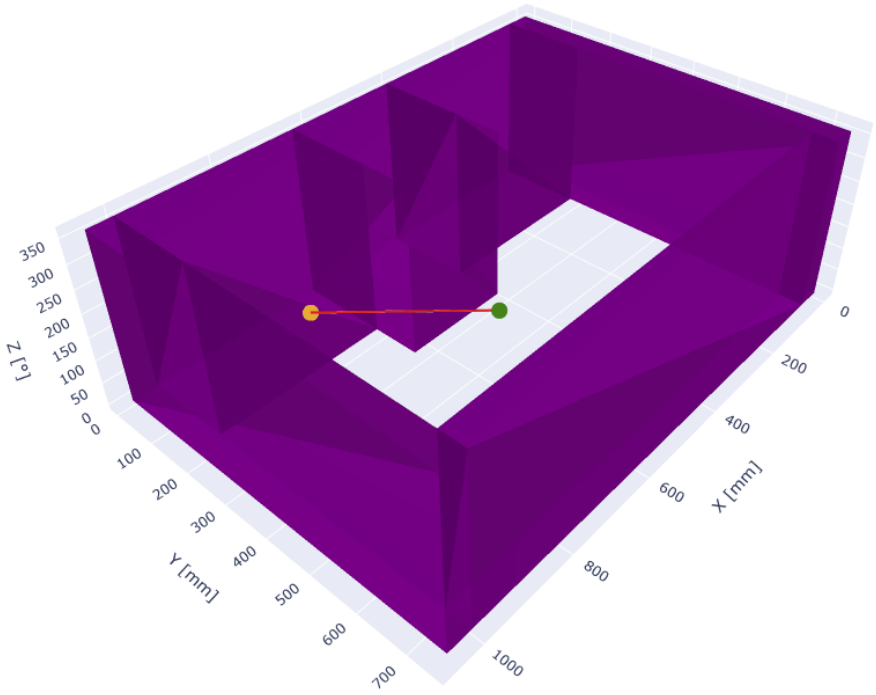
4.3 Overenie dosiahnuteľnosti pozície

Generovanie trajektórie prebieha v krokoch, kedy sú postupne generované nové konfigurácie alebo inak povedané pozície, ktorými objekt prechádza od počiatku k cieľu (kapitola 2.1). Prvým krokom je určiť, či sa vygenerovaný nachádza v bezkolíznej konfigurácii, k čomu slúži funkcia $collision\_check()$. Druhým krokom je zistiť, či sa objekt z bodu, v ktorom sa práve nachádza dokáže dostať do nového bodu, ktorý bol vygenerovaný. Ak by ho objekt z danej pozície nemohol dosiahnuť napr. kvôli prekážke v ceste, tento bod nemôže byť pridaný do generovaného stromu. V prípade hmotného bodu ide o priame spojenie 2 bodov priamkou. Ak sa priamka pretína s prekážkou tak táto pozícia nie je dosiahnuteľná.

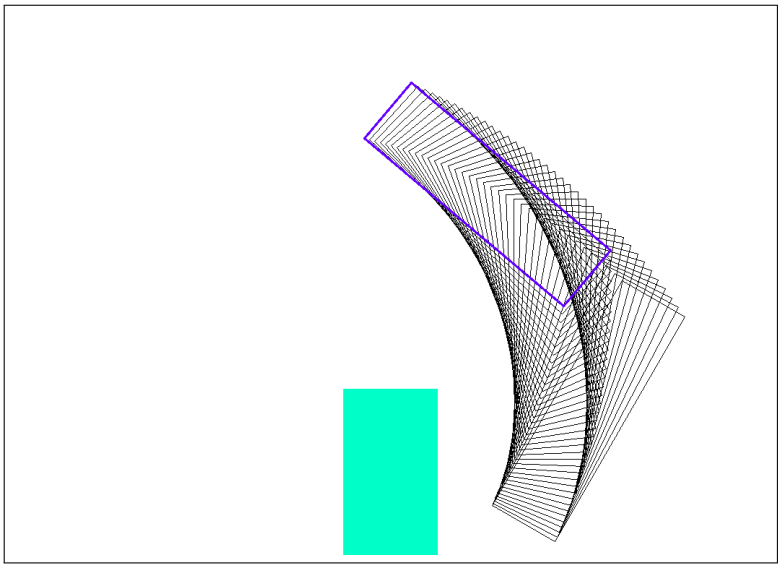
Pri objekte treba uvažovať jeho pohyb v priestore. Každá pozícia, ktorou objekt pri danom pohybe prejde musí byť bezkolízna. Na obrázkoch 4.3 a 4.4 môžeme vidieť porovnanie medzi pracovným a konfiguračným priestorom. Kým v konfiguračnom priestore je pohyb opísaný priamkou v trojrozmernom priestore, v pracovnom priestore ide o pohyb obdĺžnika, kedy sa menia jeho pozícia v osiach x, y aj uhol natočenia.

Pre simuláciu pohybu v priestore sme použili lineárne vzorkovania. Poznáme počiatočnú a koncovú pozíciu, ktoré nám definujú pohyb - prejdenú vzdialenosť a smer. Vypočítame si veľkosť úsečky medzi danými 2 pozíciami v konfiguračnom priestore. Na základe nami zvolenej veľkosti vzorky si rozdelím danú uhlopriečku na daný počet vzoriek. Postupne inkrementujeme jednotlivé prvky počiatočnej pozície (x,y,$uhol$) o hodnotu, ktorá odpovedá veľkosti vzorky v danej osi. Tým dosiahneme prechodové pozície, pričom v každej z nich kontrolujeme, či sa objekt nenachádza v kolízii. Ak sú všetky prechodové pozície vyhodnotené ako bezkolízne vieme, že daný cieľový bod je dosiahnuteľný. Túto úlohu zabezpečuje funkcia $linear\_sampling\_collision\_check()$.

OBRAZOK - linearne vzorkovanie



Obr. 4.3: Spojenie 2 bodov v konfiguračnom priestore



Obr. 4.4: Pohyb objektu v pracovnom priestore

4.4 Kontrola dosiahnuteľnosti cieľa

Ukončovacia podmienka algoritmu býva vo väčšine prípadov určená vzdialenosťou generovaného bodu v strome od cieľovej pozície, keď sa generovaný bod dostane do blízkosti cieľa je vytvorené prepojenie a algoritmus je ukončený. Ďalšou možnosťou je použiť ako ukončovacia podmienku maximálny počet iterácií. Algoritmus prehľadáva priestor až dokým nie je

vygenerovaný daný počet bodov a až následne hľadá prepojenie s cieľom. Táto ukončovacia podmienka sa dá použiť napríklad pri RRT*, kedy je počtu iterácií úmerná kvalita výslednej trajektórie. Pri algoritme RRT-connect sú generované 2 stromy a ukončenie algoritmu nastane pri ich spojení.

V našom algoritme využíva určitú kombináciu jednotlivých prístupov. Jedným so vstupných parametrov, ktorý si definujeme pri spustení algoritmu je pravdepodobnosť, s ktorou si bude algoritmus v priebehu generovania stromu kontrolovať dosiahnuteľnosť cieľa. V prípade, že je cieľ z daného bodu dosiahnuteľný je vygenerovaná trajektória a algoritmus je ukončený. Na kontrolu dosiahnuteľnosti cieľa z posledného generovaného bodu nám slúži funkcia $linear\_sampling\_collision\_check()$.

Z dôvodu jednoduchosti pracovného priestoru (obsahuje len jednu prekážku) vo väčšine prípadov prenášaných objektov bude možné nájsť priame spojenie hneď z počiatočnej do cieľovej pozície. Za účelom zvýšenia rýchlosti výpočtu algoritmu v daných prípadoch si algoritmus hneď na začiatku skontroluje dosiahnuteľnosť cieľa, čím sa preskočí celý proces generovania stromu.

Algoritmu je tiež stanovený maximálny počet iterácií. V prípade dosiahnutia maximálneho počtu iterácií je overená dosiahnuteľnosť cieľa z daného bodu. Ak spojenie neexistuje algoritmus je ukončený a trajektória nebola nájdená.

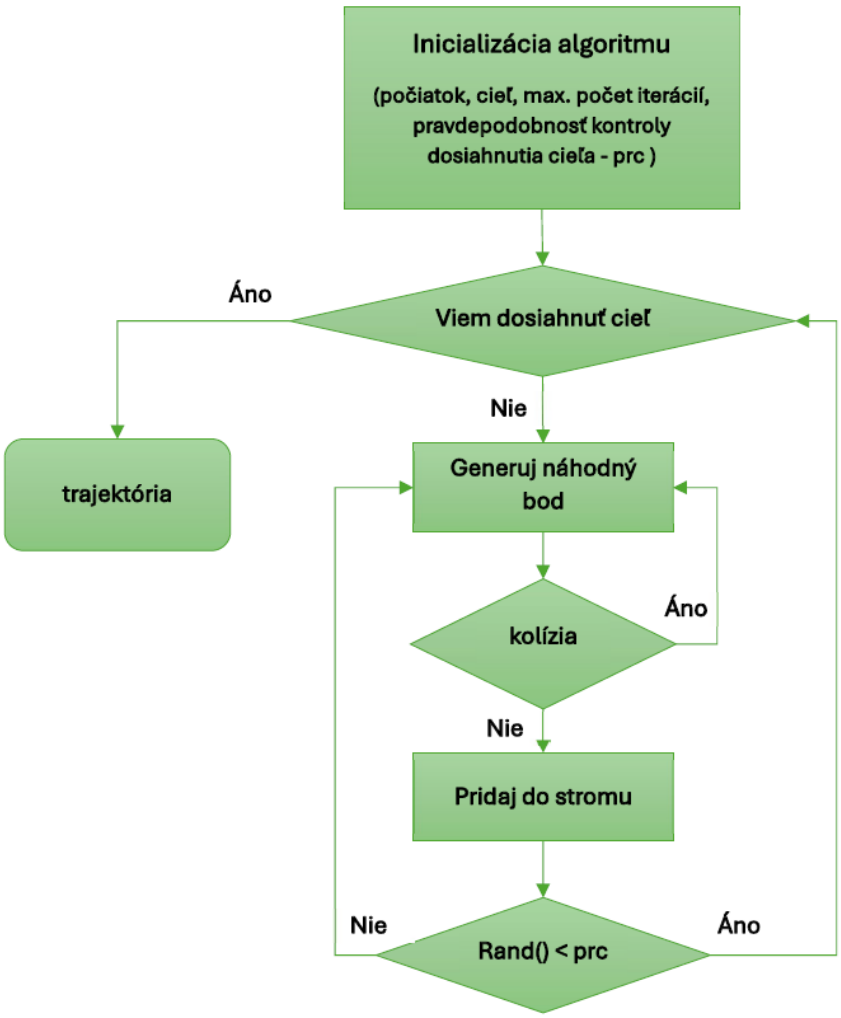
4.5 3 stupne voľnosti

Plánovanie trajektórie objektu pri troch stupňoch voľnosti ponúka väčšie možnosti pohybu v priestore, väčšiu množinu potenciálnych pozícií, do ktorých sa môže teleso dostať. Hlavný rozdiel je v treťom kĺbe, ktorý poskytuje možnosť otáčať objektom v jeho danej pozícii a tým sa vyhýbať kolíziám s prekážkami a vyjdeniu z pracovného priestoru. Plánovanie bude prebiehať v kartézskom aj kĺbovom súradnicovom systéme. Program je potrebné prispôsobiť pre oba prípady zvlášť, každý si vyžaduje iné prístupy a úpravy, keďže každý súradnicový systém má svoje vlastné charakteristiky a obmedzenia

4.5.1 Kartézsky súradnicový systém

Plánovanie v kartézskom súradnicovom systéme je z programovej stránky najjednoduchšie riešenie, ktoré sme implementovali. Ide o pôvodné riešenie rozšírené len o už spomenuté funkcie $collision\_check()$ a $linear\_sampling\_collision\_check()$. Princíp fungovania môžeme vidieť na obrázku 4.5.

Za účelom zrýchlenia algoritmu sme sa rozhodli o jednoduché obmedzenie konfiguračného priestoru. To sme implementovali tak, že sme vytvorili prekážky v konfiguráciách o ktorých sme si istý že objekt nemôže dosiahnuť alebo nechceme aby sa strom rozvíjal daným smerom. Pre

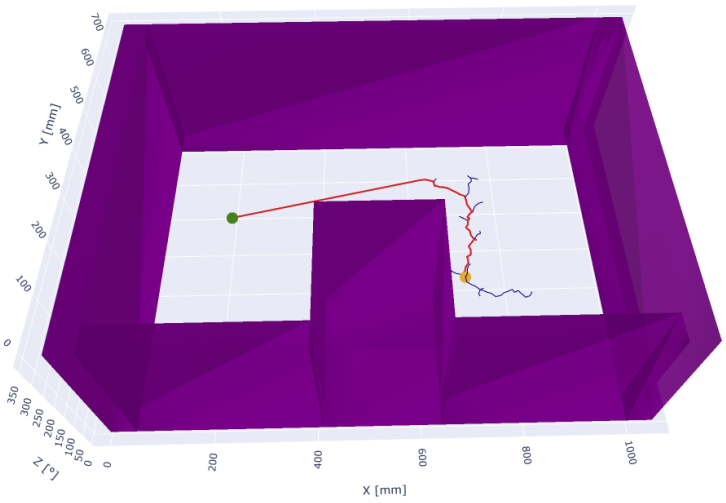


Obr. 4.5: RRT algoritmus

toto obmedzenie je potrebné poznať rozmery objektu. Porovnáme si jeho šírku a výšku a vyberieme si jeho menší rozmer. O tento rozmer rozšírime hranice konfiguračného priestoru v osiach x a y a všetky možné rotácie v daných bodoch. Výsledok obmedzenia konfiguračného priestoru môžeme vidieť na obrázku . Výsledkom je zrýchlenie algoritmu keďže nie sú generované nové pozície v daných kolíznych konfiguráciách a algoritmus má tendenciu hľadať bližšie v okolí cieľovej pozície. Toto obmedzenie nám pomôže hlavne v situáciách ak sa jedná o objekt väčších rozmerov.

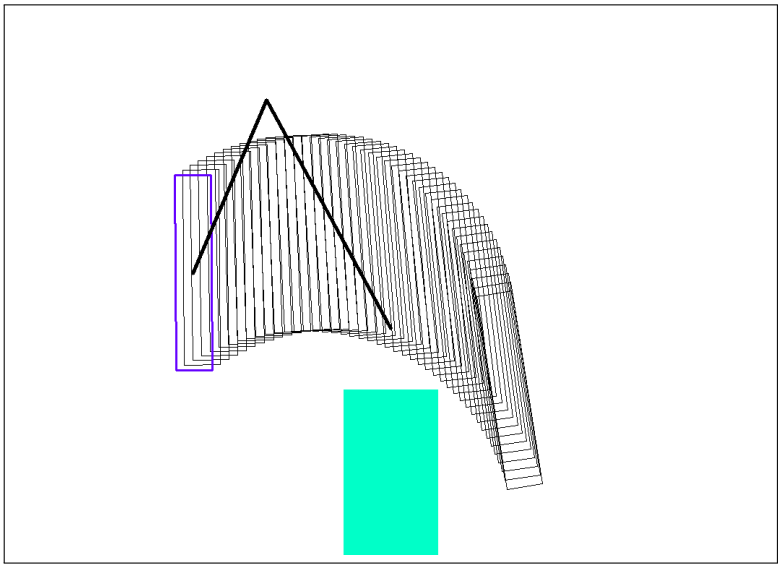
4.5.2 Kĺbový súradnicový systém

Použitie kĺbového súradnicového systému ako konfiguračného priestoru pre plánovanie trajektórie so sebou prináša určité výhody. Hlavnou výhodou je väčšia pravdepodobnosť nájde-



Obr. 4.6: Obmedzenie konfiguračného priestoru

nia priameho spojenia z počiatočného bodu do cieľovej pozície. Situácie kedy sa v kartézskom systéme nachádza medzi počiatkom a cieľom prekážka sa do kĺbového súradnicového systému premietne iným spôsobom. Tu je možné nájsť priame bezkolízne spojenie medzi danými 2 bodmi keďže priamy pohyb v kĺbovom priestore sa v kartézskom zobrazí ako pohyb po kružnici (obr. 4.7).

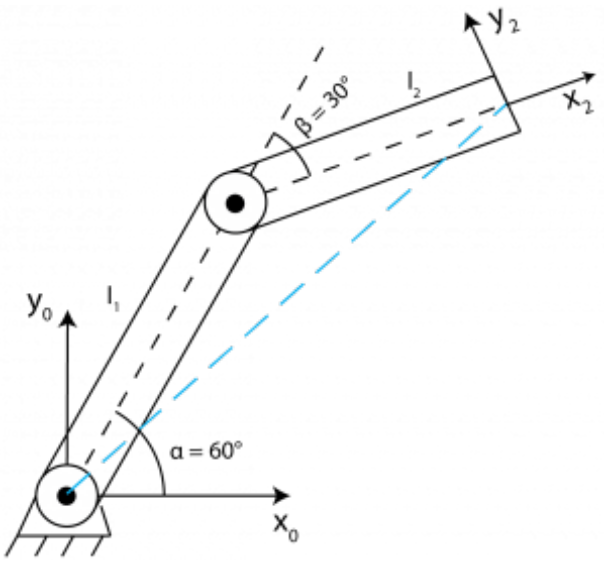


Obr. 4.7: Pohyb objektu v pracovnom priestore

Z dôvodu odlišnosti medzi konfiguračným a pracovným priestorom, keďže každý využíva iný súradnicový systém bolo potrebné implementovať funkcie, ktoré by zabezpečili prechod z jedného do druhého.

Pre tieto potreby bolo potrebné implementovať funkcie na výpočet priamej a inverznej kinematiky. Počiatočná a koncová pozícia sú v úlohe definované v pracovnom priestore (kartézsky súradnicový systém). Na ich prepočet do kĺbového systému je použitá inverzná kinematika, ktorej výstupom sú natočenia jednotlivých kĺbov v daných pozíciach. Použitie funkcie $collision\_check()$ si vyžaduje aby boli známe súradnice stredu objektu v pracovnom priestore. Z toho dôvodu je potrebný výpočet pozície koncového efektora ramena pomocou priamej kinematiky z kĺbových súradníc daného bodu.

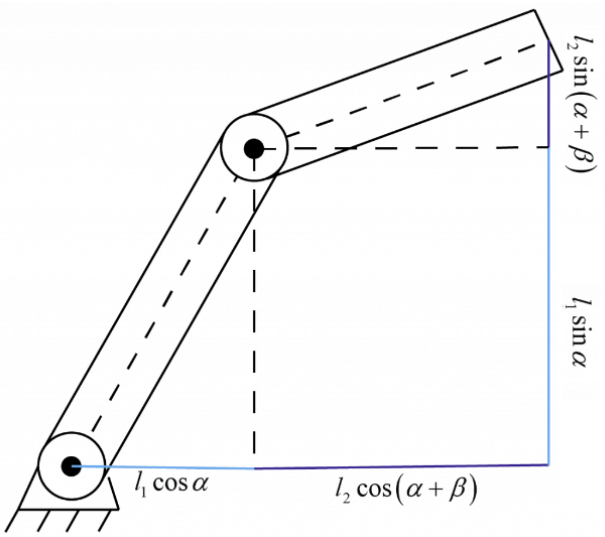
Funkcie na výpočet priamej a inverznej kinematiky sme si implementovali sami. Nebolo potrebné používať žiadnu knižnicu keďže sa jedná len o jednoduché rameno s 3 kĺbmi umiestnenými v jednej rovine. Funkcie bolo možné vytvoriť pomocou jednoduchých vzorcov.



Obr. 4.8: Robotické rameno s dvoma stupňami voľnosti [**FKIK**]

Priama kinematika slúži na získanie súradníc pozície koncového bodu robotického ramena na základe natočenia kĺbov ramena (obr. 4.8). Na výpočet koncovej pozície nám stačí poznať hodnoty natočenia prvého a druhého kĺba. Tretí kĺb sa nachádza v koncovom bode ramena a preto jeho rotácia neovplyvňuje pozíciu koncového bodu. Tú získame pomocou nasledovných rovníc 4.1 a 4.2 [**FKIK**].

$$\begin{aligned} x' &= l_1 cos\alpha \\ x'' &= l_2 cos(\alpha + \beta) \\ y' &= l_1 sin\alpha \\ y'' &= l_2 sin(\alpha + \beta) \end{aligned} \tag{4.1}$$



Obr. 4.9: Súradnice koncového bodu [**FKIK**]

$$\begin{aligned} x &= l_1 cos\alpha + l_2 cos(\alpha+\beta) \\ y &= l_1 sin\alpha + l_2 sin(\alpha+\beta) \end{aligned} \tag{4.2}$$

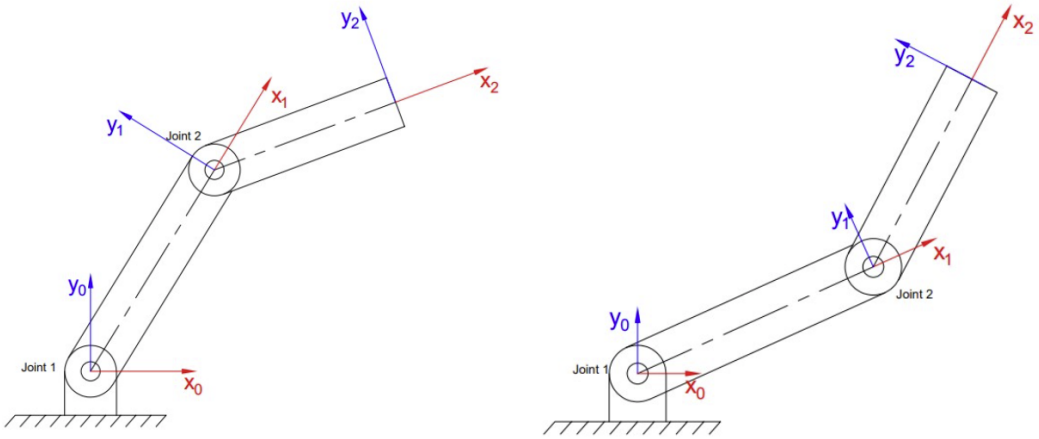
Pri priamej kinematike je tiež dôležité nezabudnúť že od natočenia prvých dvoch kĺbov je závislá orientácia koncového efektora, v ktorom je umiestnený tretí kĺb. Teda orientácia uchyteného objektu sa bude meniť aj bez rotácie tretieho kĺba, ten naopak túto rotáciu dokáže vyrovnávať v rámci rozsahu svojho pohybu. Natočenie koncového efektora získame ako súčet hodnôt prvého a druhého kĺba (rovnica 4.3).

$$uhol = \alpha + \beta \tag{4.3}$$

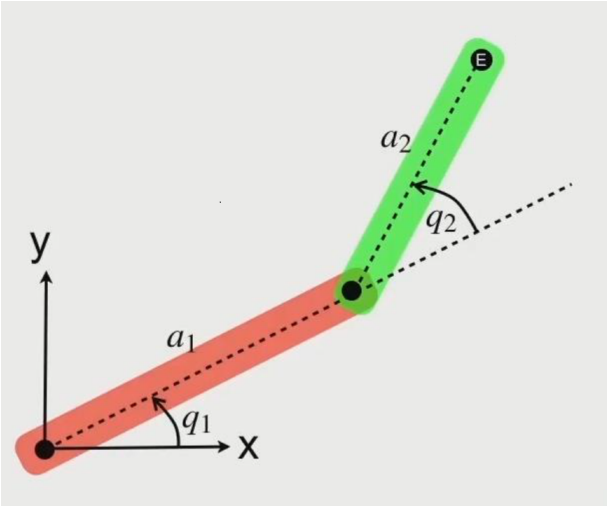
Inverzná kinematika, ako vyplýva z názvu, spĺňa opačný účel ako priama kinematika. Na základe súradníc koncového bodu robota získame natočenia kĺbov robota. Pre každú pozíciu však existujú potenciálne 2 riešenia - s kĺbom hore a kĺbom dole (obr. 4.10).

Výpočet inverznej kinematiky robíme pomocou rovníc 4.4 pre kĺb dole a rovníc 4.5 pre riešenie s kĺbom hore [**prezentacia**].

$$\begin{aligned} q_2 &= cos^{-1}\frac{x^2+y^2-a_1^2-a_2^2}{2a_1a_2} \\ q_1 &= tan^{-1}\frac{y}{x} - tan^{-1}\frac{a_2 sinq_2}{a_1 + a_2 cosq_2} \end{aligned} \tag{4.4}$$



Obr. 4.10: Dve možné riešenia [**FKIK**]



Obr. 4.11: Inverzná kinematika - kĺb dole [**prezentacia**]

$$
\begin{aligned}
q_2 &= -cos^{-1}\frac{x^2+y^2-a_1^2-a_2^2}{2a_1a_2} \\
q_1 &= tan^{-1}\frac{y}{x} + tan^{-1}\frac{a_2 sinq_2}{a_1 + a_2 cosq_2}
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

Nevýhodou kĺbového súradnicové systému v porovnaní s kartézskym je obtiažnosť obmedzenia konfiguračného priestoru. Kým v kartézskom systéme sme vedeli jednoducho konfiguračný priestor obmedziť o polohy, do ktorých sa objekt určite nedostane v kĺbovom systéme je táto úloha zložitejšia keďže nevieme jasne určiť, ktoré natočenia kĺbov budú pre danej veľkosti objektu v kolízii. Tým sa nám konfiguračný priestor zväčší aj o kolízne pozície, ktoré nie je možné identifikovať iným spôsobom ako pomocou funkcie $collision\_check()$. To má za následok nárast výpočtového času algoritmu.

4.6 2 stupne voľnosti

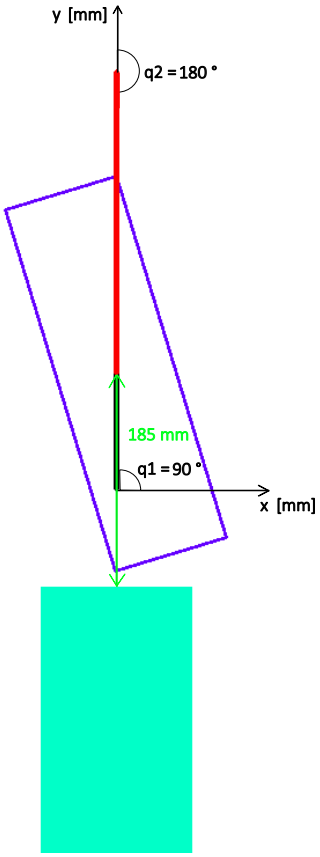
Plánovanie trajektórie pre kinematickú štruktúru s dvoma stupňami voľnosti nám už neponúka možnosť výberu konfiguračného priestoru medzi kartézskym a kĺbovým. Vzhľadom k absencii tretieho kĺbu, umiestneného v efektore robotického ramena nie je možné dosiahnuť ľubovoľnú pozíciu objektu v priestore. Z toho dôvodu je nutné použiť pre plánovanie konfiguračný priestor s kĺbovým súradnicovým systémom. Pôjde o dvojrozmerný konfiguračný priestor kde osi x a y predstavujú natočenia jednotlivých kĺbov $q1$ a $q2$.

Absencia možnosti otáčať objektom v ľubovolnom bode pracovného priestore značne limituje možnosti plánovacieho algoritmu. Vo väčšine prípadov prenášaných objektov väčších rozmerov algoritmus nebude schopný nájsť riešenie z dôvodu zlej orientácie objektu. Výsledok je teda závislý od orientácia telesa v počiatočnej polohe kde dochádza k uchyteniu objektu.

Za účelom eliminácie týchto situácií a tak rozšírenia možností danej kinematickej štruktúry sme sa rozhodli implementovať algoritmus, ktorý by nám dovolil zmeniť počiatočnú orientáciu objektu v priestore do takej pozície aby bolo možné nájsť trajektóriu k cieľu. Ide o princíp predrotácie a zabezpečuje ho funkcia $pre\_rot()$. Pre použitie tohoto princípu bude samozrejme potrebné použiť v koncovom bode ramena ďalší motor, ktorý by túto rotáciu zabezpečil. Išlo by však o motor určený len na polohovanie a nebolo by ho možné riadiť v reálnom čase v procese prenášania objektu. Výhodou by bola nižšia cena nákladov.

Prvým krokom v princípe predrotácie je identifikácia prípadov, v ktorých je potrebné túto funkciu použiť. Pomocou geometrie sme si vypočítali aké musia byť parametre objektu aby bolo nutné použiť predrotáciu. V procese prechodu z počiatocnej do cieľovej pozície nastáva jedna kritická situácia kedy druhé rameno robota musí preniesť objekt okolo stĺpa, na ktorom je upevnený. Tento moment nastáva pri konfigurácii $q_1 = 90°$ a $q_2 = 180°$. V prípade, že uhlopriečka objektu je totožná s orientáciou druhého ramena robota, roh objektu sa nachádza v pozícii kedy najviac zasahuje do priestoru. V tomto bode sme vypočítali hraničnú veľkosť uhlopriečky telesa, ktorej hodnota sa rovná $370mm$ (obr. 4.12). Ak je uhlopriečka telesa menšia ako táto hodnota, nájdenie výsledku nie je závislé od orientácie telesa. Veľkosť uhlopriečky telesa nám teda slúži ako podmienka pre použitie predrotácie.

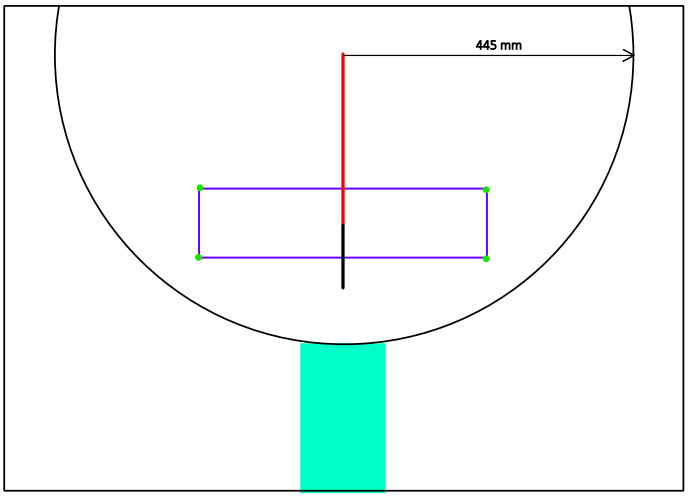
Druhým krokom je zistenie aká musí byť orientácia objektu aby bolo možné nájsť riešenie. Zároveň treba overiť či je táto orientácie dosiahnuteľná vrámci pracovného priestoru robotu. Na zistenie potrebnej orientácie objektu sme si vytvorili tvz. bezkolíznu kružnicu. Ide o pomyselnú kružnicu, ktorej stred sa nachádza v pozícii druhého rotačného kĺbu ramena pri konfigurácii $q_1 = 90°$ a $q_2 = 180°$. Jej polomer je definovaný vzdialenosťou druhého kĺbu ramena od stĺpa v smere osi x, čo sa rovná $445mm$. Ak sa všetky pozície rohov objektu nachádzajú pri danej konfigurácii v bezkolíznej kružnici vieme povedať, že objekt pri danej orientácii bude schopný



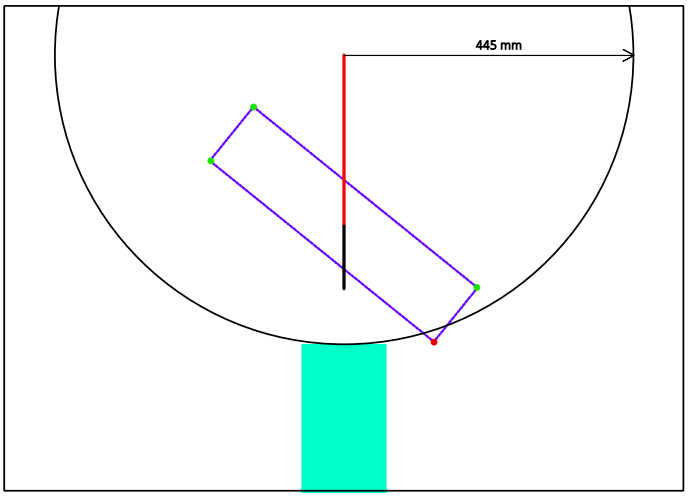
Obr. 4.12: Hraničná situácia prechodu

obísť prekážku a teda dosiahnuť cieľovú konfiguráciu. Na obrázkoch 4.13 a 4.14 môžeme vidieť ako orientácia toho istého objektu ovplyvní možnosť dosiahnutia cieľa.

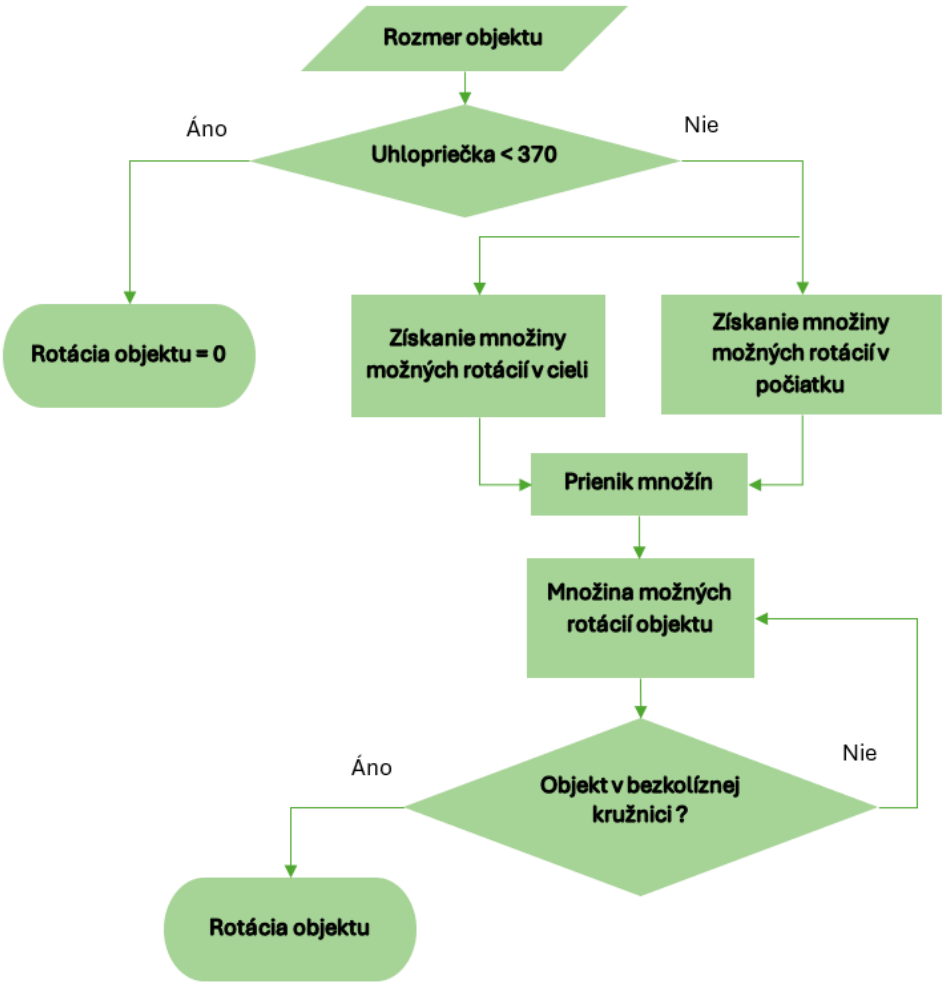
Proces hľadania tejto orientácie teda prebieha v nasledujúcich krokoch. Získame množinu všetkých dosiahnuteľných polôh v počiatočnej pozícii. Postupne inkrementujeme natočenie objektu v danej polohe a kontrolujeme, či sa nenachádza v kolízii. Podobne postupujeme aj v cieľovej pozícii. Následne tieto dve množiny porovnáme a získame ich prienik. To nám poskytne výslednú množinu orientácií objektu, v ktorých sa nebude nachádzať v kolízii v počiatku ani v cieli. Následne overíme v danej množine existuje konfigurácia, v ktorej by sa objekt nachádzal vo vnútri bezkolíznej kružnice. V prípade, že existuje takáto konfigurácia algoritmus si zapamätá aká musí byť orientácia v počiatočnom bode a po uchytení objektu je natočení do požadovanej orientácie. Následne je zavolaný RRT algoritmus, ktorého výstupom je výsledná trajektórie s už natočeným objektom.



Obr. 4.13: Bezkolízna kružnica - bezkolízny stav



Obr. 4.14: Bezkolízna kružnica - kolízny stav



Obr. 4.15: Princíp predrotácie

5 Experiment

5.1 Opis experimentu

5.2 2 stupne voľnosti

5.2.1 RRT

5.2.2 RRT*

5.3 3 stupne voľnosti

5.3.1 Kĺbový priestor

5.3.2 Kartézsky priestor

5.3.3 RRT*

5.4 Typy objektov

- experiment s 5 typmi objktov v krabici

Záver

Conclusion is going to be where?
Here.