

Ing. Michal Dobiš

Autoreferát dizertačnej práce

Inovatívne prístupy k navigácií robotického ramena

**na získanie akademického titulu
„doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)**

v doktorandskom študijnom programe: Robotika a Kybernetika

v študijnom odbore: 9.2.7 kybernetika

Forma štúdia: denná forma

Miesto a dátum: Bratislava 2019

Dizertačná práca bola vypracovaná na: Ústave robotiky
a kybernetiky
Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Michal Dobiš

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta
elektrotechniky a informatiky, Ústav robotiky a kybernetiky

Školiteľ: prof. Ing. František Duchoň, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta
elektrotechniky a informatiky, Ústav robotiky a kybernetiky

Oponent: prof. Ing. Václav Hlaváč, CSc.

České vysoké učení technické v Praze, Český institut informatiky,
robotiky, a kybernetiky

Oponent: prof. Ing. Luděk Žalud, PhD.

Vysoké učení technické v Brně, Ústav automatizace a měřicí
techniky

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa

oh na

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita

ANOTÁCIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Kľúčové slová: plánovanie dráh, plánovanie trajektórií, autonómne prehľadávanie neznáme prostredie, robotické ramená

V súčasnosti existuje veľké množstvo algoritmov plánovania dráh a trajektórií robotického ramena, ktoré vyžadujú znalosť pracovného prostredia robota. Práve vizuálny systém umožňuje získavať informácie o prostredí, ktoré aktuálne už nachádzajú uplatnenie v automatizovanej 3D rekonštrukcie rôznych predmetov. Rovnako vizuálne systémy môžu byť využité aj na autonómne prehľadávanie a modelovanie celého pracovného prostredia, avšak úloha navigácie robotického ramena sa v neznámom prostredí výrazne komplikuje.

Táto dizertačná práca uvádza inovatívne prístupy k navigácií robotického ramena, ktoré majú potenciálne využitie v prehľadávaní neznámeho priestoru a sú využiteľné aj v iných robotických aplikáciách. Cieľom práce je návrh vhodnej stratégie navigácie robotického ramena s minimalizáciou prejdenej vzdialenosti a zmeny orientácie kamery počas procesu prehľadávania zavedeným účelovej funkcie v metóde nasledujúceho najlepšieho pohľadu a rozšírením STOMP algoritmu plánovania trajektórií. Práca uvádza aj nový rýchlejší prístup výpočtu zosilnenia informácie pomocou knižnice FCL miesto bežne používanej metódy sledovania lúčov. Zároveň kvalita trajektórií robota v procese prehľadávania neznámeho priestoru je vyhodnotená naším novým nástrojom pre porovnávanie dráh.

Obsah

1	Tézy	5
2	Metodika vyhodnocovania trajektórií robotického ramena	5
2.1	Kritéria	6
2.2	Validácia kritérií	7
3	Rozšírenie STOMP algoritmu	11
3.1	Generátor šumu v karteziánskom priestore	11
3.2	Účelová funkcia karteziánskej vzdialenosti	12
3.3	Vyhodnotenie	13
4	Návrh algoritmu prehľadávania neznámeho priestoru	15
4.1	Generovanie kandidátov	16
4.2	Filtrovanie kandidátov	16
4.3	Výpočet zosilnenia informácie	17
4.4	Výber najlepšieho kandidáta	17
5	Experimenty	18
5.1	Vyhodnotenie výpočtu zosilnenia informácie	18
5.2	Overenie vplyvu zmien váh účelovej funkcie	19
5.3	Vplyv výberu algoritmu plánovania na kvalitu trajektórií	23
6	Prínosy dizertačnej práce	24
	Záver	25
	Literatúra	26
	Publikované práce autora	27

Úvod

Nové technológie prinášajú do oblasti robotiky a automatizácie nové príležitosti zjednodušovania práce a zefektívňovania výroby. Na trhu sa čím ďalej, tým viac vyskytujú kvalitné vizuálne systémy. Jedno z ich využití v priemysle sú aplikácie odoberania voľne umiestnených dielov vo výrobe označovaných anglickým výrazom *bin picking*. V tejto úlohe je robotické rameno navádzané, tak aby nedošlo ku kolízií ramena s prostredím. Integrátor takejto aplikácie potrebuje presne definovať všetky kolízne objekty 3D modelom na základe výkresu alebo manuálneho merania rozmerov prostredia. Často sa pri integrácii naráža na nepresnosť modelu s realitou a 3D model prostredia musí byť upravovaný. Niekedy môže byť tento proces pri integrácii vizuálneho systému zbytočne zdĺhavý a prácny.

Iné využitia vizuálnych systémov sú metódy rekonštrukcie 3D modelov na základe hĺbkového obrazu z kamery. Jednoduchý princíp je staticky umiestnená kamera, ktorá sníma objekt na dopravníku alebo na rotačnom stolíku. Flexibilitu je možné zlepšiť zložitejším prístupom umiestnením vizuálneho systému na robotické rameno. Takúto technológiu by bolo možné použiť aj na automatické modelovanie pracovného prostredia robota a tým zefektívniť integráciu vizuálnych systémov do priemyselných aplikácií.

Táto dizertačná práca sa bude zaoberať nie len autonómnym prehľadávaním priestoru, ale aj inovatívnymi prístupmi k navigácii robotického ramena.

1 Tézy

Základné tézy dizertačnej práce sú:

1. Navrhnuť vhodnú stratégiu navigácie robotického ramena pri zadanej minimálnej množine vlastností prostredia.
2. Modifikovať STOMP algoritmus plánovania trajektórií robotického ramena s polohovými obmedzeniami nástroja.
3. Určiť vhodné kritéria pre kvalitatívne hodnotenie trajektórií robotického ramena.

2 Metodika vyhodnocovania trajektórií robotického ramena

Množstvo vedeckých prác zameraných na porovnanie algoritmov plánovania trajektórií robotického ramena sa zameriavajú predovšetkým na čas a úspešnosť plánovania. Napríklad v [1] porovnávajú metódy plánovania pohybu na základe vzorkovania vzhľadom na výpočtový čas a úspešnosť. Dráhy robotického

ramena sú vyhodnocované aj v [2], kde počítajú vzdialenosť trasy ako súčet rozdielov natočenia kĺbov alebo v [3] ako euklidovskú vzdialenosť koncového bodu nástroja.

Cieľom tejto kapitoly je vyhodnotiť a určiť kritéria pre hodnotenie dráh robota. Zároveň v kapitole budú vyjadrené aj také kritéria, ktoré by mohli dokázať predikovať ako sa robot bude správať počas vykonávania navrhutej dráhy. Na základe experimentov bude hľadaná korelácia medzi naplánovanou dráhou a prejdenou trajektóriou na reálnom robote.

2.1 Kritéria

Na základe známych metrík a našich hypotéz sú definované kritéria pre porovnávanie dráh robota, ktoré môžu vyjadrovať:

CD (*Cartesian Distance*) - prejdenú vzdialenosť nástroja,

$$CD = \sum_{i=2}^n \|p_i - p_{i-1}\| \quad (2.1)$$

JD (*Joint Distance*) - prejdenú vzdialenosť v kĺbovom priestore,

$$JD = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \|q_{i,j} - q_{i-1,j}\| \quad (2.2)$$

OC (*Orientation Change*) –

- zmenu orientácie nástroja na dráhe,

$$OC = \sum_{i=2}^n \cos^{-1}(q_{xi} * q_{xi-1} + q_{yi} * q_{yi-1} + q_{zi} * q_{zi-1} + q_{wi} * q_{wi-1}) \quad (2.3)$$

CPC (*Control Pseudo Cost*) - spotrebovanú energiu počas vykonávania dráhy,

$$CPC = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m w_j (\|q_{i,j} - q_{i-1,j}\|) \quad (2.4)$$

RDM (*Robot Displacement Metric*) – prejdenú vzdialenosť na základe najväčších rozdielov medzi prejazdovými bodmi na jednotlivých článkoch robota podľa metriky definovanej v [4],

$$RDM = \sum_{i=2}^n \max_{a \in A} \{\|a(q_i) - a(q_{i-1})\|\} \quad (2.5)$$

JJ (*Joint Jerk*) - spôsobené trhy v kĺbovom priestore na dráhe,

$$JJ = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \|q_{i,j} - q_{i-1,j}\| di^3 \quad (2.6)$$

CJ (*Cartesian Jerk*) - spôsobené trhy nástroja na dráhe,

$$CJ = \sum_{i=2}^n \|p_i - p_{i-1}\| di^3 \quad (2.7)$$

JMJ (*Joint Max Jerk*) - spôsobené trhy v kĺbovom priestore s dôrazom na maximum,

$$JMJ = \max_{q_i \in Q} \left\{ \sum_{j=1}^m \|q_{i,j} - q_{i-1,j}\| di^3 \right\} \quad (2.8)$$

CMJ (*Cartesian Max Jerk*) - spôsobené trhy nástroja na dráhe s dôrazom na maximum,

$$CMJ = \max_{p_i \in P} \{\|p_i - p_{i-1}\| di^3\} \quad (2.9)$$

,kde p_i je poloha nástroja i prejazdovom bode z n a $q_{i,j}$ je hodnota natočenia j -teho kĺbu v i -tom prejazdovom bode. Prvky $q_{xi}, \dots, q_{wi}$ v rovnici 2.3 reprezentujú prvky kvaternionu nástroja v i -tom prejazdovom bode.

2.2 Validácia kritérií

Verifikácia spočíva v porovnaní naplánovaných dráh a vykonaných trajektórií na reálnom robote. Dráhy sú naplánované pomocou STOMP algoritmu [5] a vykonané na robote KUKA KR120 a radiacim systémom KRC4. Robot sa bude pohybovať medzi začiatočným a koncovým stavom, medzi ktorými bude vložená jednoduchá prekážka.

Tab. 2.1 – Priemer a rozptyl rozdielov medzi plánovanými dráhami a vykonanými trajektóriami

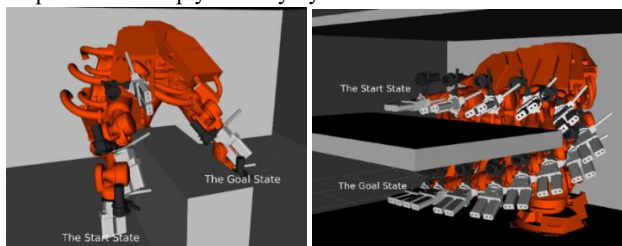
Kritérium	Priemer	Rozptyl
JD [m]	-5.75e-3	3.76e-4
CD [rad]	-4.09e-3	2.22e-5
OC [rad]	-1.24e-2	3.09e-3
RDM [m]	-3.75e-3	2.52e-5

Prvé štyri kritéria JD, CD, OC a RDM sú priamo závislé od polohy robota v kĺbovom alebo v karteziánskom priestore. Rovnice kritérií sú aplikované na

celý súbor naplánovaných dráh a nameraných trajektóriách. Na základe štatistického porovnania priemeru a rozptylu v tabuľke 2.1 možno usúdiť, že naplánované dráhy korelujú s vykonanými trajektóriami.

Hypotézou kritéria CPC je možná predikcia spotreby energie. Kritérium CPC môže zjednodušene nahradzovať dynamické parametre každého kĺbu robota jednoduchými váhami rovnice 2.4. Problémom je, že hodnoty týchto váh sú neznáme a mali by byť zrátané z dynamického modelu robota. Ďalšou obťažnosťou je predpoklad, že vhodné váhy funkcie 2.4 môžu byť rozličné v závislosti od typu pohybu, nákladu a nemusia byť konštantné v celom pracovnom priestore robota.

Našou hypotézou je, že vypočítané váhy na základe meraní v experimente č. 1 sú použiteľné aj pre iné podobné pohyby robota (tzv. „horizontálne“ obr. 2.1 vľavo) v experimentoch č. 2-4 s rozdielom v rozličných začiatočných a cieľových stavov. Experiment č. 5 (obr. 2.1 vpravo) predstavuje odlišnú skupinu pohybov tzv. „vertikálnych“. Predpokladá sa, že odchýlka od vypočítanej hodnoty kritéria a skutočnej nameranej spotreby energie bude vyššia ako v prípade experimentov č. 2, č. 3 a č. 4. Výsledky sú vyhodnotené v tab. 2.2, na základe priemeru a rozptylu odchýlky.



Obr. 2.2 Ilustrácia skupiny „horizontálnych“ (vľavo) a „vertikálnych“ (vpravo) dráh.

Tab. 2.2 Priemer a rozptyl v experimentoch 1-5

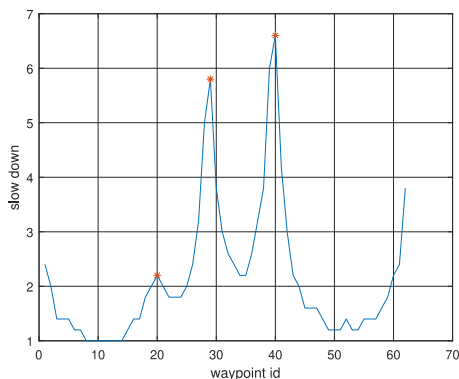
Kritérium	Priemer	Rozptyl
1	-3.38e-3	1.25e-4
2	-2.20e-2	1.14e-3
3	-3.58e-3	2.28e-3
4	-5.67e-2	2.42e-3
5	8.08e-2	5.25e-3

Ďalšou hypotézou je, že tretia diferenciencia polohy označujúca ako „pseudo-trh“, môže slúžiť na odhadnutie trhov medzi prejazdovými bodmi. Avšak tretia časová derivácia (trh) nameraných polôh vzorkovaných v čase počas vykonávania naplánovanej dráhy a vypočítaný pseudo-trh dráhy sú odlišné, keďže skutočný trh je závislý od riadiaceho systému a nastavených parametrov.

Avšak treba zvýrazniť iný aspekt v pohybe robota. Označme $X(i)$ ako počet meraných polôh robota okolo jedného prejazdového bodu z naplánovanej dráhy. Keď $X(i)$ je vypočítaný pre každý prejazdový bod, tak minimálnu hodnotu $X(i)$ označme ako $MIN_DENSITY$ a môžeme očakávať, že rýchlosť robota bude najvyššia v tomto bode. Definujme funkciu:

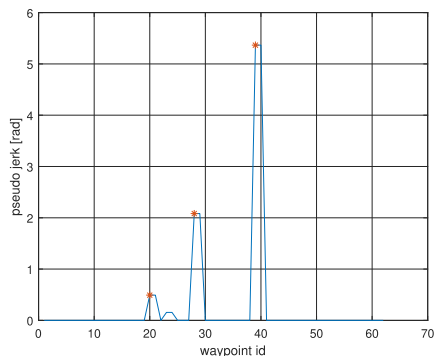
$$f(i) = \frac{X(i)}{MIN_DENSITY} \quad (2.10)$$

ktorá reprezentuje pomer medzi $X(i)$ a $MIN_DENSITY$ a jej priebeh je vykreslený na obr. 2.2. Výstup tejto funkcie budeme nazývať pojmom „spomalenie“, čo znamená, že pri vysokých hodnotách dochádza k výraznejšiemu spomaleniu.



Obr. 2.2 „Spomalenie“ robota s označenými lokálnymi vrcholmi

V každom lokálnom vrchole (vyznačené na obr. 2.2 červenými bodmi) funkcie 2.10 je možné pozorovať istú podobnosť ku lokálnym vrcholom súčtu pseudo-trhov v každom prejazdovom bode, ktoré sú zobrazené na obr. 2.3.

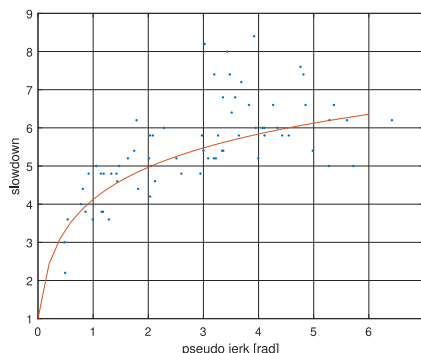


Obr. 2.3 – Súčet pseudo-trhov medzi po sebe idúcimi prejazdovými bodmi s vyznačenými lokálnymi vrcholmi

Ku každému nájdenému lokálnemu vrcholu pseudo-trhu sa priradí prislúchajúca hodnota z funkcie „spomalenia“ $f(i)$. Tieto priradené „spomalenia“ ku pseudo-trhu sú zobrazené na obr. 2.4 modrými bodkami. Koreláciu medzi týmito hodnotami je možné vyjadriť funkciou nájdenou regresnou analýzou:

$$y = 3 \log_{10} x + 4 \quad (2.11)$$

kde x označuje pseudo-trh na plánovanej dráhe a y označuje očakávané „spomalenie“ robota. Výstup z tejto funkcie je vykreslený červenou krivkou na obr. 2.4



Obr. 2.4 Závislosť medzi pseudo-trhom a skutočným „spomalením“

Podobný prístup je aplikovaný aj v karteziánskom priestore a regresnou analýzou je nájdená nasledujúca funkcia:

$$y = 1000 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{x} + \sqrt[3]{4} \quad (2.12)$$

kde x predstavuje hodnotu vrcholu karteziánskeho pseudo-trhu na naplánovanej dráhe a y predstavuje vypočítané „spomalenie“ TCP nástroja robota v karteziánskom priestore.

Tieto výsledky ukazujú, že kritéria JJ, JMJ, CJ a CMJ nemôžu byť priamo porovnávané so skutočnými vzniknutými trhmami na trajektórii. Z tohto dôvodu zavádzame nové kritéria JJP (*Joint Jerk Peaks*) vyjadrené vzťahom 2.13 a CJP (*Cartesian Jerk Peaks*) vyjadrené vzťahom 2.14.

$$JJP = \sum_{i=1}^n 3 \log_{10} P_i + 4 \quad (2.13)$$

$$CJP = \sum_{i=1}^n 1000 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{P_i} + \sqrt[3]{4} + 4 \quad (2.14)$$

Vo vzťahoch 2.13 a 2.14 i reprezentuje id vrcholu z n lokálnych vrcholov pseudo-trhov. P_i je výška tohto vrcholu.

3 Rozšírenie STOMP algoritmu

Aktuálna implementácia algoritmu STOMP neuvažuje o karteziánskych obmedzeniach polohy nástroja, pretože pracuje iba v kĺbovom priestore robota. V súčasnosti existuje algoritmus GSTOMP (*Guided STOMP*), ktorý predstavili v [6] za účelom generovania človeku prirodzených trajektórií ramena humanoidného robota. Princíp GSTOMP spočíva v tom, že počiatočná trajektória je generovaná algoritmom *Learning from Demonstration*, ktorá je upravovaná základným princípom STOMP algoritmu. Riešenie opísané v tejto kapitole nie je závislé na žiadnom algoritme tretích strán a je aplikovateľné aj na bežný STOMP algoritmus, pretože bude predstavovať jeho rozšírenie o nový generátor šumu trajektórií a účelovú funkciu pracujúcej v karteziánskom priestore.

3.1 Generátor šumu v karteziánskom priestore

Jedným rozšírením je nový generátor šumu, ktorý je nazývaný *Cartesian Normal Distribution Generator*. Z anglického názvu vyplýva, že algoritmus bude generovať šum s gauss pravdepodobnostným rozložením v karteziánskom priestore. Algoritmus tohto generátora je nasledovný:

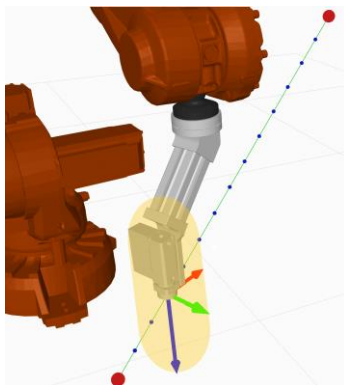
1. Pre každú časovú vzorku t počiatočnej trajektórie je vypočítaná poloha nástroja P priamou kinematickou úlohou.
2. Pre každú túto polohu P je vypočítaná zašumená poloha P' s gaussovým pravdepodobnostným rozložením v intervale parametra *stddev* podľa

rovnice 3.1. Priestor, v ktorom sa generuje táto zašumená poloha je znázornená na obr. 3.1.

3. Nová časová vzorka v kĺbovom priestore t' je vypočítaná zo zašumenej polohy P' inverznou kinematickou úlohou.
4. Ak inverzná kinematická úloha má riešenie, tak t' je vložená do výslednej novej trajektórie. Naopak, ak neexistuje riešenie, tak do výslednej trajektórie je vložená časová vzorka t z počiatočnej trajektórie.

Nasledovná rovnica 3.1 je určená pre výpočet zašumenej polohy P' . Kde T_{xyz} je transformačná matica, ktorej rotačná časť je identita a vektor translácie pozostáva z prvkov r_1 , r_2 a r_3 . Homogénne matice R_x , R_y a R_z vyjadrujú rotáciu okolo danej osi. Hodnoty r_1 až r_6 sú náhodné čísla so štandardnou odchýlkou danou parametrom $stddev$.

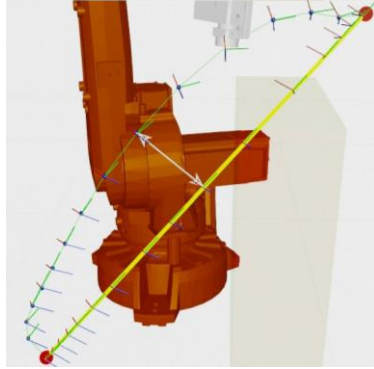
$$P' = P * T_{xyz}(r_1, r_2, r_3) * R_x(r_4) * R_y(r_5) * R_z(r_6) \quad (3.1)$$



Obr. 3.1 – Znázornenie priestoru, v ktorom sa generuje šum

3.2 Účelová funkcia karteziánskej vzdialenosti

Druhým rozšíreným STOMP algoritmu je nová účelová funkcia nazývaná *Cartesian Distance Cost Function*., ktorá porovnáva vygenerovanú trajektóriu voči najkratšej karteziánskej lineárnej trajektórie. Polohy nástroja robota P_R sú v každej časovej vzorke t (súradnicové systémy na obr. 3.2 na zelenej krivke) porovnané s polohou nástroja P_L v časovej vzorke t lineárnej trajektórie (žltá čiara na obr. 3.2).



Obr. 3.2 Ilustrácia vygenerovanej trajektórie zelenou, ktorá sa porovnáva voči lineárnej trajektórii vyznačenej žltou.

Nasledujúci vzťah 3.2 je uplatnený pre všetky časové vzorky a vyjadruje transformáciu $Diff_i$ medzi polohami P_{Li} a P_{Ri} v i -tej časovej vzorky:

$$Diff_i = P_{Li}^{-1} * P_{Ri} \quad (3.2)$$

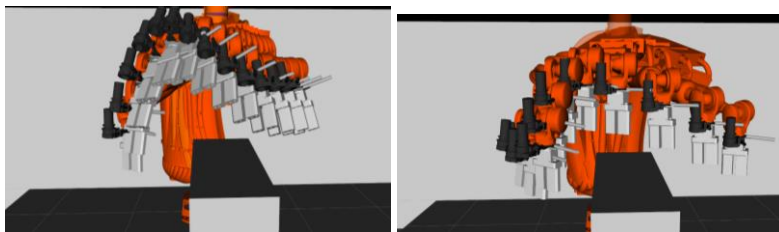
Transformačná matica $Diff_i$ sa dá rozložiť na rotačnú maticu a vektor posunu. Označme odchýlku translácie e_{ti} ako euklidovskú vzdialenosť vektoru posunu a nech e_{ri} je odchýlka rotácie vypočítaná ako uhol rotačného vektoru z rotačnej časti matice $Diff_i$. Ak tieto odchýlky prekročia toleranciu parametrov t_t alebo t_r , tak trajektória bude považovaná, že je mimo rozsahu obmedzení nástroja. Hodnota účelovej funkcie je vyjadrená nasledujúcim vzťahom:

$$C = \sum_{i=0}^n w_t \frac{e_{ti}}{t_t} + w_r \frac{e_{ri}}{t_r} \quad (3.3)$$

kde n je počet časových vzoriek, i je index konkrétnej vzorky, e_{ti} a e_{ri} sú odchýlky v danej časovej vzorke i . Konštanty tolerancie t_t a t_r v tomto vzťahu vystupujú za účelom normalizácie. Konštanty w_t a w_r predstavujú váhy na určenie, ktorá zložka bude viac preferovaná a sú nastavovateľné ako parameter. Výsledná hodnota účelovej funkcie C je súčet všetkých hodnôt v každej časovej vzorke i .

3.3 Vyhodnotenie

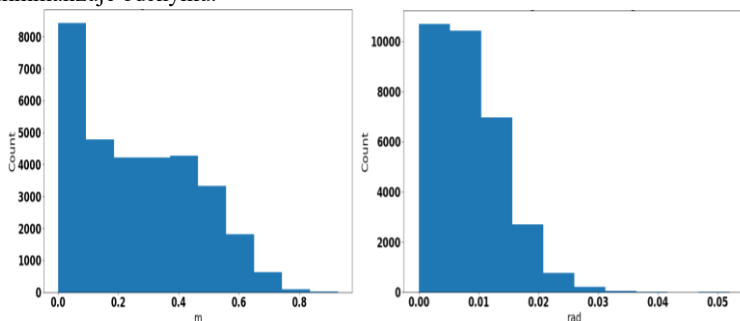
Navrhnuté riešenie je experimentálne vyhodnotené v jednoduchom prostredí pozostávajúcom z jednej prekážky medzi počiatočným a cieľovým stavom robota. Prostredia a dráha robota je ilustrovaná na obrázku 3.3. Vľavo je znázornená výsledná dráha zo STOMP algoritmom bez rozšírenia a vpravo s navrhnutými a implementovanými rozšíreniami, ktoré umožňujú uvažovať o obmedzeniach nástroja robota.



Obr. 3.3 Porovnanie STOMP algoritmu bez rozšírenia (vľavo) a s rozšíreným, ktoré uvažuje obmedzenie nástroja (vpravo)

Experiment verifikuje splnenie požiadaviek o obmedzeniach karteziánskej polohy nástroja definované toleranciou t_t s hodnotou 1m a t_r s hodnotou 0,2 rad. Parameter *stddev* v *Cartesian Normal Distribution Generator* má štandardnú odchýlku posunu 0,5m v každej osi a rotácie bude 0,1 rad okolo každej osi. Táto konfigurácia má úmyselne pomerne vysoké hodnoty, tak aby niektoré vzorky boli ľahko vygenerované aj mimo povolenej tolerance.

Obr. 3.4 ukazuje rozdiely medzi prejazdovými bodmi výslednej a najkratšej karteziánskej lineárnej trajektórie. Vľavo je zobrazený rozdiel v posune a vpravo rozdiel v rotácií. Na y-ovej osi je početnosť všetkých prejazdových bodov. Keďže naplánovaných trajektórií je 3000 a každá má 10 prejazdových bodov, tak celkový počet je 30 000. Na základe týchto histogramov sa dá prehlásiť, že vytvorená účelová funkcia spĺňa požadované vlastnosti, pretože neexistuje žiadny rozdiel, ktorý by bol väčší ako 1m alebo 0,1 radiánu. Z histogramov je aj možné pozorovať, že najviac vzoriek sa nachádza v nižších hodnotách do 0,1 metru alebo do 0,01 radiánu, pretože účelová funkcia minimalizuje odchýlku.

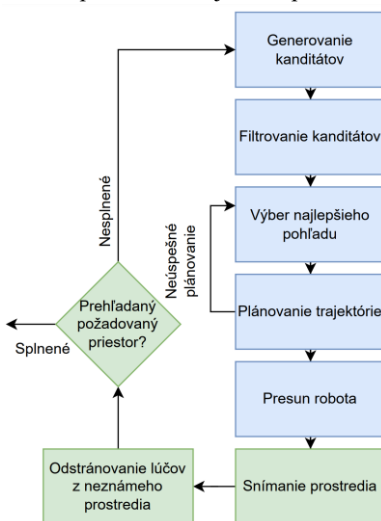


Obr. 3.4. Vľavo je histogram rozdielov posunu a vpravo histogram rozdielov rotácie

4 Návrh algoritmu prehľadávania neznámeho priestoru

Proces navrhovania a plánovania polôh robota za účelom automatizovania 3D modelovania s vhodným výberom počtu skenovacích polôh a redukciou prejdenej dráhy robota sa nazýva rozhodovanie o nasledujúcom najlepšom pohľade (NBV - *Next Best View*), ktorý bol prvý krát uvedený v [7]. Navrhnutý algoritmus NBV v tejto práci bude patriť do skupiny objemových metód NBV, ktorý je zobrazený vývojovým diagramom na obr. 4.1. Dizertačná práca sa zameriava predovšetkým na modrou vyznačené bloky.

Inovatívny prístup nášho riešenia prináša iný spôsob výpočtu zosilnenia informácie (*Information Gain*). Zatiaľ, kým v súčasných implementáciách objemových metód NBV [8 - 11] sa zvyčajne využíva pomerne výpočtovo zložitá metóda sledovania lúčov (*ray tracing*), tak v tejto práci je výpočet zosilnenia informácie nahradená výpočtom prieniku priestorov pomocou knižnice FCL (*Flexible Collision Library*) [12]. Jej výhodou je rýchlosť, preto sa často využívaná i v úlohách plánovania trajektórií pre overenie kolízie.



Obr. 4.1 Náčrt blokového diagramu algoritmu prehľadávania neznámeho prostredia

Oproti spomínaným súčasným metódam cieľom je prehľadávanie celého pracovného priestoru robota. Podobne ako v [9] bude robot bude vykonávať

inicializačnú trajektóriu na získanie počiatkovej informácie o prostredia, ale umožnený pohyb bude iba pre koncové články robota.

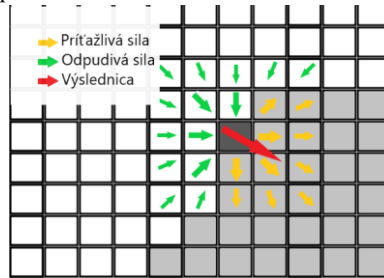
4.1 Generovanie kandidátov

Cieľom tohto prvého kroku je vytvoriť kandidátov potenciálnych pohľadov kamery, ktoré by mohli zosnímať neznáme prostredie. Algoritmus je založený na hľadaní hrán medzi známym a neznámym prostredím. Bunka ležiaca na hrane bude taká, ktorá spĺňa požadovaný pomer neznámych a známych susedných buniek a jej poloha bude označovaná ako P_c .

Smer kandidáta v P_c sa určuje princípom potenciálových polí. Odpudivou silou $\vec{F}_o$ je prehľadaný priestor a naopak neprehľadaný priestor bude pôsobiť príťažlivou silou $\vec{F}_p$. Čím bunka je bližšie ku bunke ležiacej na detegovanej hrane, tak tým väčší vplyv bude mať. Výslednica síl všetkých buniek vzhľadom na bunku ležiacu na detegovanej hrane, je určená funkciou 4.1, kde n je počet neznámych alebo prekrytých buniek, ktoré pôsobia príťažlivou silou a m je počet voľných alebo obsadených buniek, ktoré pôsobia odpudivou silou.

$$\vec{F} = \sum_{i=0}^n \vec{F}_p - \sum_{i=0}^m \vec{F}_o \quad (4.1)$$

Grafická ukážka smeru kandidáta je znázornená na obr. 4.2, kde čierna bunka reprezentuje bunku ležiacu na detegovanej hrane medzi známym (biela) a neznámym (sivá) prostredím.



Obr. 4.2 Znázornenie výslednice síl, ktorá určí smer kandidáta

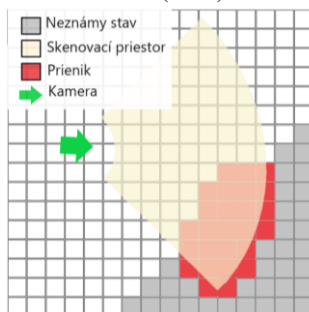
4.2 Filtrovanie kandidátov

Cieľom filtrovania bude odstraňovať prípadné zhľuky kandidátov a zároveň, takých kandidátov, ktorí počas viacerých iterácií stratili zmysel, lebo ukazujú na prehľadaný priestor. Kľúčovú úlohu môže zohrávať aj samotné poradie filtrov. Rýchlejšie filtre by mali byť radené ako prvé, aby tie pomalšie filtrovali už zredukovanú množinu. Použité filtrovanie kandidátov bude nasledovné:

1. ORF (*Out of Range Filter*) - rýchle odstraňovanie kandidátov mimo dosahu robota výpočtom L_2 euklidovskej vzdialenosti.
2. PTF (*Position Threshold Filter*) – úlohou je odstrániť zhľuky kandidátov. Z dôvodu efektívneho hľadania susedných kandidátov, sú kandidáti vkladani do k-d stromu v implementácii FLANN [13]. Kandidáti, ktorí majú rozdiel polôh a súčasne orientácií v zadanom intervale, tak budú odstránení.
3. IGF (*Information Gain Filter*) – na záver sú odstránení kandidáti, ktorých zosilnenie informácie je menšie ako zadaný prah.

4.3 Výpočet zosilnenia informácie

Zosilnenie informácie je počítané aplikovaným FCL knižnice. Princíp je vyznačený na obr. 4.3. Knižnica FCL vráti ako výsledok všetky nájdené kontakty (červenou) medzi skenovacím (žltou) a neznámym (sivou) priestorom.



Obr. 4.3 Znáznornenie prieniku neznámeho a skenovacieho priestoru pre výpočet zosilnenia informácie

Nech c je počet buniek v skenovacom priestore a c_{max} je maximálny možný počet buniek, ktoré by mohli ležať v tomto priestore, potom zosilnenie informácie I_g bude vyjadrené ako pomer medzi c a c_{max} :

$$I_g = \frac{c}{c_{max}} \quad (4.2)$$

4.4 Výber najlepšieho kandidáta

Cieľom účelovej funkcie je zohľadniť zosilnenie informácie, tak aby robot prehľadal, čo najviac priestoru, ale aj zohľadnil vzdialenosť a zmenu rotácie od aktuálnej polohy. Hodnota vzdialenosti kandidáta vstupujúcej do účelovej funkcie je definovaná ako:

$$D = 1 - \frac{\|\vec{p}_c, \vec{p}'\|}{2d_{max}} \quad (4.3)$$

kde $\|\vec{p}_c, \vec{p}'\|$ je euklidovská vzdialenosť medzi aktuálnou polohou kamery $\vec{p}_c$ a polohou kamery v kandidátovi $\vec{p}'$ v súradnicovom systéme robota. Konštanta d_{max} predstavuje maximálny dosah robota, ktorá musí byť vynásobená dvomi, pretože poloha kandidáta sa môže nachádzať v intervale od $-d_{max}$ po d_{max} .

Zmena orientácie do účelovej funkcie vstupuje ako:

$$R = 1 - \frac{\Delta r}{\pi} \quad (4.4)$$

kde Δr je zmena orientácie medzi aktuálnou polohou kamery a polohou kandidáta, ktorá môže byť maximálne rozdielna o π radiánov.

Najlepší kandidát p bude ten, ktorý bude mať najvyššie ohodnotenie účelovou funkciou $f(p)$ 4.5, ktorá je kombináciou rovníc 4.2, 4.3 a 4.4:

$$f(p) = Dw_d + Rw_r + I_g w_i \quad (4.5)$$

kde hodnoty D , R , a I_g sú škálované pomocou váh w_d , w_r , w_i . Cieľom váh je nastaviť preferencie a zvoliť, či sa budú preferovať kandidáti s vyšším zosilnením informácie alebo kandidáti, ktorí sú bližšie k aktuálnej polohe robota.

5 Experimenty

5.1 Vyhodnotenie výpočtu zosilnenia informácie

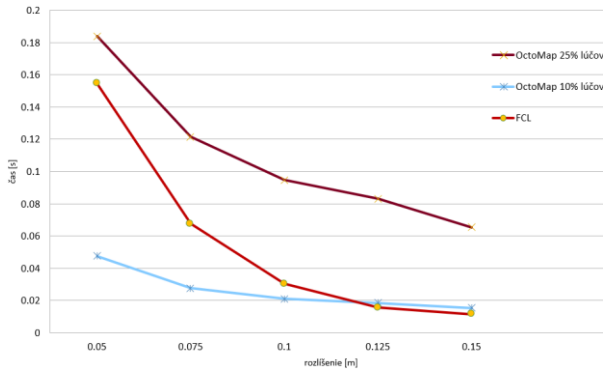
V experimente bude porovnaný výpočet zosilnenia informácie FCL voči klasickému sledovaniu lúčov na základe výpočtového času v závislosti od rozlíšenia mapy. V metóde sledovania lúčov bude využitých 100%, 50%, 25% a 10% celkového počtu lúčov. Zriadením celkového počtu lúčov môže viesť k zrýchleniu algoritmu, ale naopak aj k strate informácií. Okrem výpočtového času dôležitá je aj úspešnosť nájdenia všetkých buniek ležiacich v skenovacom priestore. Úspešnosť r sa dá teda jednoducho vyjadriť vzt'ahom 5.1, kde x_{100} je počet buniek nájdených sledovaním všetkých lúčov a x je počet buniek nájdených testovacou metódou (FCL alebo sledovanie zriadených lúčov).

$$r = \frac{x_{100}}{x} 100\% \quad (5.1)$$

Pri 5cm rozlíšení výpočtové časy FCL sú nižšie ako s využitím 25% lúčov, kde dochádza ale ku strate informácie 1,75%. S využitím iba 10% lúčov je sledovanie lúčov rýchlejšie ako FCL, avšak tu dochádza k vyššej strate až 8,11%. Pri 15 cm rozlíšení FCL dosahuje o čosi lepší výpočtový čas aj ako 10% sledovaných lúčov, u ktorých dochádza k 4,13% strate. Výpočtový čas je zobrazený na grafe 5.1 a úspešnosť je zhrnutá v tabuľke 5.1. Zaujímavá vlastnosť použitia FCL je že, pomer počtu nájdených buniek ku počtu nájdených buniek pri využití 100% lúčov je viac ako 100%. Spôsobené je to tým, že FCL hľadá všetky kontakty, aj keď ide len o dotyk s bunkou.

Tab. 5.1 Úspešnosť detekcie neznámeho priestoru

Rozlíšenie [m]	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15
FCL	114,8 %	121,6 %	125,6 %	133,2 %	151,2 %
OctoMap 100%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
OctoMap 50%	99,51 %	99,40 %	99,18 %	98,60 %	100 %
OctoMap 25%	98,25 %	98,24 %	97,78 %	98,14 %	99,06 %
OctoMap 10%	91,89 %	94,38 %	94,10 %	94,03 %	95,87 %

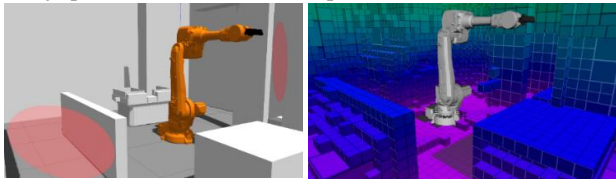


Obr. 5.1 Porovnanie výpočtového času v závislosti od rozlíšenia

5.2 Overenie vplyvu zmien váh účelovej funkcie

Cieľom tohto experimentu je vyhodnotiť dopad zmien parametrov účelovej funkcie na celkový proces prehľadávania priestoru a kvalitu trajektórií robota. Výsledky budú merané v simulačnom prostredí softvéru *Gazebo* s robotickým ramenom ABB IRB 4600 a s Kinect v2.

Na obr. 5.2 vľavo je ilustrované simulačné prostredie, kde červené zóny predstavujú prekryté miesta, ktoré v počiatočnej fáze kamera nedokáže zosnímať. Vpravo je zobrazený stav prostredia po snímaní v počiatočnej fáze, ktoré obsahuje približne 30% neznámeho prostredia.

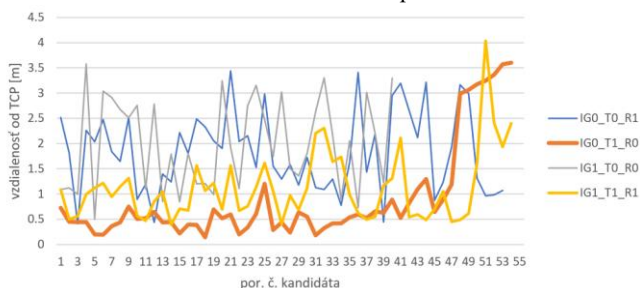


Obr. 5.2 Ilustrácia simulačného prostredia vľavo a oktálového stromu neznámeho a obsadeného priestoru po počiatočnej fáze vpravo.

Parametre účelovej funkcie budú rozložené, tak aby bolo možné jasne vyjadriť vplyv jednotlivých prvkov. Experiment bude vykonaný v štyroch meraniach s rôznymi váhami:

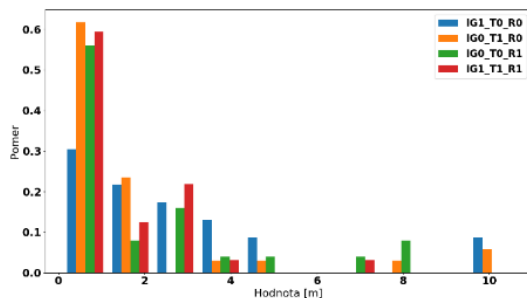
- IG1_T0_R0 - Váha zosilnenie informácie w_i 1, ostatné 0
- IG0_T1_R0 - Váha vzdialenosti w_d 1, ostatné 0
- IG0_T0_R1 - Váha zmeny rotácie w_r 1, ostatné 0
- IG1_T1_R1 - Všetky váhy rovné 1.

Graf na obr. 5.3 znázorňuje vzdialenosť zvoleného kandidáta od aktuálnej polohy kamery robota (TCP). V prípade meraniach IG1_T0_R0 a IG0_T0_R1 je táto vzdialenosť náhodná, pretože v účelovej funkcii sa neuvažuje. Naopak v prípade IG0_T1_R0 očakávané narastá vzdialenosť výberom nových kandidátov, avšak pri aktualizácii v novej iterácii môžu vzniknúť noví kandidáti, ktorí sa môžu nachádzať bližšie ako boli predošlí.

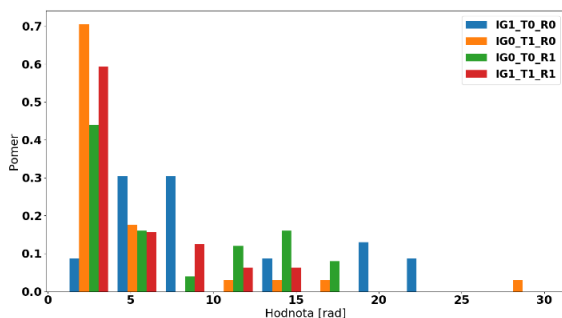


Obr. 5.3 Závislosť vzdialenosti kandidáta od TCP vzhľadom na poradové číslo zvoleného kandidáta.

Prejdená karteziánska vzdialenosť kamery je vyhodnotená kritériom CD (vzťah 2.1) a kľbová vzdialenosť kritériom JD (vzťah 2.2). Na základe histogramov 5.4 a 5.5 je vidieť, že trajektórie sú najkratšie v prípade IG0_T1_R0 a IG1_T1_R0.

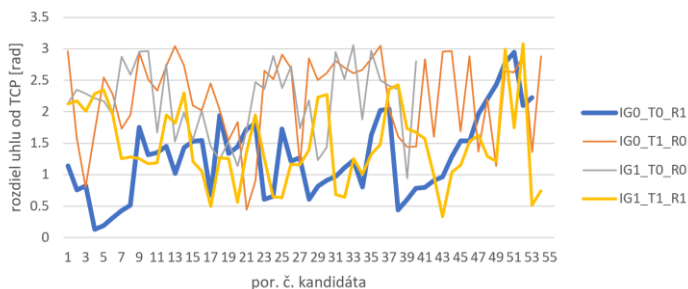


Obr. 5.4 Histogram kritéria CD (5.1)



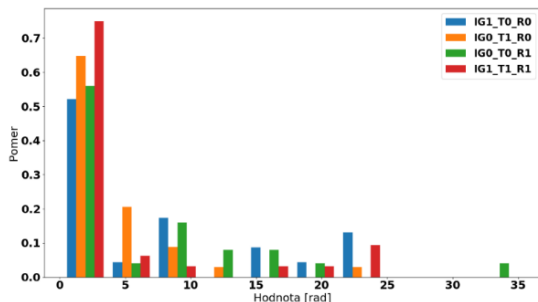
Obr. 5.5 Histogram kritéria JD (5.2)

Z pohľadu zmeny rotácie najmenšie uhly medzi kandidátom a aktuálnou polohou, by sa mali nachádzať v prípade IG0_T0_R1. V tomto prípade uhol narastá až v závere, keď už zostávajú iba kandidáti s vyšším rozdielom (obr. 5.6).



Obr. 5.6 Závislosť rozdielu uhlu medzi kandidátom a TCP vzhľadom na poradové číslo zvoleného kandidáta.

Zmena orientácie kamery počas trajektórie je vyhodnotená kritériom OC (vzťah 2.3). Paradoxne meranie IG0_T0_R1 zamerané na minimalizáciu rotácie dosahuje najhoršie výsledky (obr. 5.7). Tento jav je zapríčinený tým, že vybraný kandidát s najmenším uhlom, môže byť viac vzdialený a úloha plánovania je tak zložitejšia, čo môže viesť k častejším zmenám orientácie nástroja v trajektórii. Rovnako podobné výsledky dosahuje aj meranie IG1_T0_R0, ktoré tiež neuvažuje vzdialenosť pri výbere kandidáta.



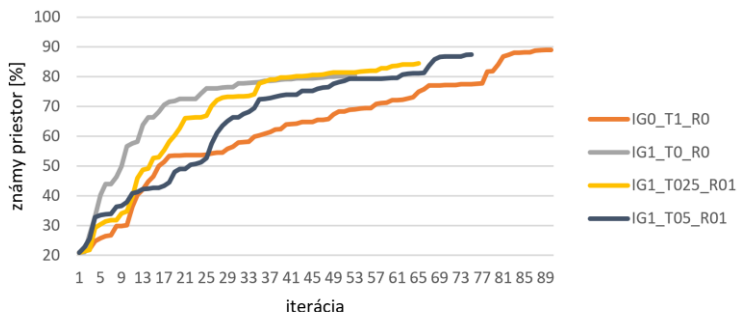
Obr. 5.7 Histogram kritéria OC (5.3)

Ďalšie testované prostredie bude komplikovanejšie, pretože v počiatočnej fáze snímání je obmedzené stenou okolo nej a po počiatočnej fáze zostane vyše 80% neznámeho priestoru. Prostredie je ilustrované na obr. 5.8, kde sú naznačené niektoré oblasti, ktoré kamera nedokáže zosnímať v počiatočnej fáze. Algoritmus NBV by mal tieto miesta prehľadať postupným získavaním nových informácií o prostredí. V experimente budú vykonané merania ako v predošlom experimente IG1_T0_R0 a IG0_T1_R0, ale aj merania označené ako IG1_T025_R01 ($w_i = 1$; $w_d = 0,25$; $w_r = 0,1$), IG1_T05_R01 ($w_i = 1$; $w_d = 0,5$; $w_r = 0,1$).



Obr. 5.8 Ilustrácia simulačného prostredia vľavo a oktálového stromu neznámeho a obsadeného priestoru po počiatočnej fáze vpravo.

Výsledky (obr. 5.9) ukazujú, že čím viac je preferované zosilnenie informácie, tak tým je potrebných menej iterácií na prehľadanie priestoru, avšak je tu zvýšené riziko uviaznutia v lokálnom maxime prehľadaného priestoru. To sa ukázalo v IG1_T0_R0 aj v IG1_T025_R01, pretože tieto merania skončili skôr s menším podielom prehľadaného priestoru. S vyššou preferenciou minimalizácie vzdialenosti si algoritmus vyžaduje viac iterácií, no celková prejdenná dráha môže byť menšia ako je znázornené v tab. 5.3.



Obr. 5.9 Pomer známeho priestoru v danej iterácii algoritmu

Tab. 5.3 Vyhodnotenie prejdenej dráhy z pohľadu viacerých kritérií.

Meranie	JD [rad]	CPC	CD [m]	OC [rad]	RDM [m]
IG1_T0_R0	628,6	199,5	217,6	696,8	220,5
IG0_T1_R0	405,0	109,4	140,4	447,6	141,2
IG1_T025_R01	428,8	130,1	140,9	399,5	144,8
IG1_T05_R01	470,5	134,7	165,9	484,2	167,9

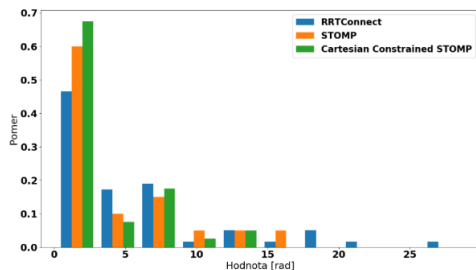
5.3 Vplyv výberu algoritmu plánovania na kvalitu trajektórií

Riešením problému s minimalizáciou zmeny rotácie kamery by mohlo byť aplikovanie rozšíreného STOMP algoritmu (CCSTOMP *Cartesian Constrained STOMP*), preto v nasledujúcom experimente bude porovnaný voči *RRTConnect* [14], ktorý bol použitý v predošlom experimente.

Nasledovné histogramy na obr. 5.10 a 5.11 ukazuje výsledky kritéria OC a CD. Už trajektórie generované pôvodným STOMP majú menšiu prejdenu vzdialenosť a zmeny orientácie kamery oproti *RRTConnect*. Použitím účelovej funkcie v CCSTOMP je možné pozorovať ďalšie zníženie. Tab. 5.4 a 5.5 zobrazujú priemer a rozptyl kritérií OC a CD a celkovú sumu všetkých trajektórií. Všetky tieto štatistické ukazovatele sú najnižšie v prípade CCSTOMP, čo znamená, že zmeny rotácie kamery boli minimalizované.

Tab. 5.4 Štatistické ukazovatele kritéria OC

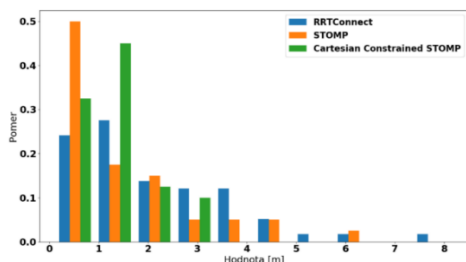
Algoritmus	Priemer [rad]	Rozptyl [rad]	Suma [rad]
RRTConnect	6,35	46,06	368,44
STOMP	4,93	24,35	197,43
CCSTOMP	3,57	13,82	142,90



Obr. 5.10 Histogram výsledkov kritéria OC pre jednotlivé trajektórie

Tab. 5.5 Štatistické ukazovatele kritéria CD

Algoritmus	Priemer [rad]	Rozptyl [rad]	Suma [rad]
RRTConnect	2,56	3,37	148,67
STOMP	1,79	2,07	71,80
CCSTOMP	1,37	0,80	54,77



Obr. 5.11 Histogram výsledkov kritéria CD pre jednotlivé trajektórie

6 Prínosy dizertačnej práce

Za prínosy dizertačnej práce môže byť považované:

- teória porovnávanie dráh robota z rôznych hľadísk,
- predikcia spotrebovanej energie alebo potenciálne možných vzniknutých trhov na dráhe ešte pred vykonaním robotom,
- rozšírenie STOMP algoritmu pre účely plánovania trajektórií s karteziánskymi obmedzeniami nástroja,
- rozšírenie STOMP algoritmu pre účely minimalizácie prejdenej dráhy a zmeny orientácie nástroja,
- prehľadávanie pracovného priestoru robotického ramena s kamerou umiestnenou na príruce s minimálnou počiatočnou informáciou o prostredí získanou pohybom koncových článkov robota,

- využitie potenciálových polí pre hľadanie potenciálnych pohľadov kamery v úlohe NBV,
- redukcia výpočtového času zosilnenia informácie v algoritmov NBV aplikovaním FCL miesto metód sledovania lúčov,
- unikátne zapojenie generátora potenciálnych pohľadov kamery, filtrovania a účelovej funkcie v NBV,
- analýza vplyvu zosilnenia informácie a minimalizácie prejdenej vzdialenosti v účelovej funkcie v úlohe NBV,
- minimalizácia prejdenej dráhy a zmeny rotácie v úlohe prehľadávania neznámeho priestoru aplikovaním rozšíreného STOMP algoritmu.

Záver

Prvou tézou dizertačnej práce bolo navrhnúť vhodnú stratégiu navigácie robotického ramena. Navrhnutý algoritmus NBV možno zaradiť medzi takzvané „objemové metódy“ (*Volumetric NBV*). Na rozdiel od iných algoritmov, ktoré využívajú pomerne výpočtovo náročné metódy sledovania lúčov (*ray casting*), tak navrhnutá implementácia prináša nový prístup výpočtu zosilnenia informácie založenej na výpočte prieniku priestorov pomocou knižnice FCL. Na základe vykonaných experimentov, je výpočet FCL rýchlejší pri vyššom rozlíšení mapy, ktoré v úlohe NBV nemusí byť príliš detailné.

Algoritmus umožňuje minimalizáciu prejdenej dráhy a rotácie kamery. Avšak na základe experimentov sa ukázalo, že preferencia minimalizácie rotácie nie je príliš vhodná. Vybraný pohľad má síce najmenšiu zmenu uhlu, ale môže byť vzdialenejší a predstavovať náročnejšiu úlohu plánovania. Preto vo výsledku môžu vznikať rôzne pretočenia. Tento problém je možné eliminovať aplikovaním rozšíreného STOMP algoritmu, ktorý zahŕňa obmedzenia nástroja (druhá téza dizertačnej práce).

Poslednou tézou bolo určiť vhodné kritéria pre kvalitatívne hodnotenie dráh robotického ramena, ktoré boli verifikované na reálnom robote. Zároveň tieto kritéria prinášajú možnú predikciu spotrebovanej energie a možných trhov počas vykonávania, čo môže byť využité v rôznych robotických aplikáciách.

Na základe experimentov v kapitole 5.3 vznikajú hypotézy, ktoré by mohli viesť k zlepšeniu algoritmu. V zložitejšom priestore, kde je väčší pomer neznámeho priestoru je vhodné preferovať minimalizáciu vzdialenosti, tak aby úloha plánovania trajektórií bola jednoduchšia. Na druhú stranu pri postupnom prehľadávaní priestoru môžu zostávať menšie neprehľadané detaily, kedy je vhodnejšie preferovať maximalizáciu zosilnenia informácie. Z tohto dôvodu potenciálnym vylepšením algoritmu by mohlo byť zavedenie adaptívnych váh na základe aktuálneho pomeru neznámeho priestoru. Druhý problém je, že

kandidát, ktorý je zahodený kvôli neúspešnému plánovaniu môže byť potenciálne dostupný v neskoršej fáze. Preto kandidát nemusí byť zahodený, ale počet neúspechov plánovania by mohlo byť zahrnuté v účelovej funkcii.

Literatúra

- [1] Paulin, S. et al., Comparison of Sampling-Based Path Planners for a Grape Vine Pruning Robot Arm. In *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*; 2015; pp. 98–103.
- [2] De Maeyer, J.; Demeester, E. Benchmarking Framework for Robotic Arc Welding Motion Planning. *Procedia CIRP* **2021**, 97, 247–252.
- [3] Larsen, L. et al., Automatic Path Planning of Industrial Robots Comparing Sampling-Based and Computational Intelligence Methods. *Procedia Manufacturing* **2017**, 11, 241–248.
- [4] LaValle, S. M. Sampling-Based Motion Planning. In *Planning Algorithms*; Cambridge University Press: New York, 2006; pp. 153–206.
- [5] Kalakrishnan, M. et al., STOMP: Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 2011.
- [6] Magyar, B. et al., Guided Stochastic Optimization for Motion Planning. *Frontiers in Robotics and AI* **2019**, 6.
- [7] Connolly, C. The Determination of next Best Views. In *Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 1985.
- [8] Zeng, R. et al., View Planning in Robot Active Vision: A Survey of Systems, Algorithms, and Applications. *Computational Visual Media* **2020**, 6 (3), 225–245.
- [9] Monica, R.; Aleotti, J.; Caselli, S. A KinFu Based Approach for Robot Spatial Attention and View Planning. *Robotics and Autonomous Systems* **2016**, 75 (2), 627–640.
- [10] Quin, P. et al., Efficient Neighbourhood-Based Information Gain Approach for Exploration of Complex 3D Environments. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 2013.
- [11] Vasquez-Gomez, J. I.; Sucar, L. E.; Murrieta-Cid, R. Hierarchical Ray Tracing for Fast Volumetric Next-Best-View Planning. In *International Conference on Computer and Robot Vision*; 2013.
- [12] Pan, J.; Chitta, S.; Manocha, D. FCL: A General Purpose Library for Collision and Proximity Queries. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 2012; pp. 3859–3866.
- [13] Muja, M.; Lowe, D. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. *VISAPP* **2009**, 2 (1), 331–340.

- [14] Kuffner, J. J.; LaValle, S. M. RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings*.

Publikované práce autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 BEŇO, Peter - DUCHOŇ, František - HUBINSKÝ, Peter - DEKAN, Martin - TÖLGYESSY, Michal - DOBIŠ, Michal. RGBD mapping solution for low-cost robot. In *Machine Vision and Applications*. Vol. 33, iss. 2 (2022), Art. no. 21 [27] s. ISSN 0932-8092 (2020: 2.012 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.370 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000750261000004 ; CC: 000750261000004 ; SCOPUS: 2-s2.0-85124253891.

ADC02 DOBIŠ, Michal - DEKAN, Martin - SOJKA, Adam - BEŇO, Peter - DUCHOŇ, František. Cartesian constrained stochastic trajectory optimization for motion planning. In *Applied Sciences [elektronický zdroj]*. Vol. 11, iss. 24 (2021), Art. no. 11712 [12] s. ISSN 2076-3417 (2020: 2.679 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.435 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/app112411712 ; CC: 000735784500001 ; WOS: 000735784500001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85120947313.

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADM01 DOBIŠ, Michal - DEKAN, Martin - DUCHOŇ, František - BEŇO, Peter - KOHÚT, Miroslav. A comparison of motion planners for robotic arms. In *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*. Vol. 23, No. 2 (2021), s. 87-94. ISSN 1454-8658 (2020: 0.973 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.209 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000667673400009 ; SCOPUS: 2-s2.0-85109158441.

ADM02 DOBIŠ, Michal - DEKAN, Martin - BEŇO, Peter - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Evaluation criteria for trajectories of robotic arms. In *Robotics*. Vol. 11, iss. 1 (2022), Art. no. 29 [24] s. ISSN 2218-6581. V databáze: DOI: 10.3390/robotics11010029 ; SCOPUS: 2-s2.0-85125070556 ; WOS: 000762863700001.

ADM03 GREGOR, Radovan - BABINEC, Andrej - DUCHOŇ, František - DOBIŠ, Michal. Hand guiding a virtual robot using a force sensor. In *Acta Mechanica et Automatica*. Vol. 15, No. 3 (2021), s. 177-186. ISSN 2300-5319 (2020). V databáze: DOI: 10.2478/ama-2021-0023 ; WOS: 000702862200009 ; SCOPUS: 2-s2.0-85117143648.

AGJ Autorské osvedčenia, patenty, objavy

AGJ01 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - PORUBSKÝ, Martin - NAGY, František - LABÁT, Dušan - BACHORÍK, Oliver - PRIŠTIÁK, Ján - MÄSIAR, Jozef -

DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Ľuboš - TREBUĽA, Marek - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal. *Robotický systém na adaptívne spájanie súčastí : Úžitkový vzor č. 9381, Dátum o zápise ÚV : 24. 11. 2021, Vestník ÚPV SR č. 22/2021*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. 9 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/51-2021>>.

AGJ02 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - PORUBSKÝ, Martin - NAGY, František - LABÁT, Dušan - BACHORÍK, Oliver - PRIŠTIK, Ján - MÄSIAR, Jozef - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej - DEKAN, Martin - CHOVANEC, Ľuboš - TREBUĽA, Marek - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal. *Robotický systém na adaptívne spájanie súčastí : Prihláška patentu č. 25-2021, Dátum o zápise : 28.7.2021, Vestník ÚPV SR č. 14/2021*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. 9 s. Dostupné na internete: <<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/Patent/Detail/25-2021>>.

AGJ03 KOVARÍKOVÁ, Zuzana - DUCHOŇ, František - CHOVANEC, Ľuboš - KOHÚT, Miroslav - DOBIŠ, Michal - NAGY, František - LABÁT, Dušan - PORUBSKÝ, Martin. *Systém robotického polohovania zváraných súčastí pomocou silovo-momentového snímača : prihláška úžitkového vzoru č. 190-2021, dátum zverejnenia prihlášky: 27.04.2022, Vestník ÚPV SR č.: 08/2022*. Banská Bystrica : Úrad priemyselného vlastníctva SR, 2021. Dostupné na internete:

<<https://wbr.indprop.gov.sk/WebRegistre/UzitkovyVzor/Detail/190-2021>>.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

BDF01 DUCHOŇ, František - KOHÚT, Miroslav - BARTOŠOVIČ, Matej - DOBIŠ, Michal - BAKYTA, Patrik - JANTOŠKA, František. Riadenie robota LWA 4P od SCHUNK v ROS. In *ATP Journal*. Roč. 24, č. 8 (2017), s. 62-63. ISSN 1335-2237.

BDF02 KOHÚT, Miroslav - BARTOŠOVIČ, Matej - DOBIŠ, Michal - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Začínáme s ROS-om (1). In *ATP Journal*. Roč. 22, č. 12 (2015), s. 32-35. ISSN 1335-2237.

BDF03 KOHÚT, Miroslav - BARTOŠOVIČ, Matej - DOBIŠ, Michal - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Začínáme s ROS-om (2). In *ATP Journal*. č. 1 (2016), s. 38-41. ISSN 1335-2237.

BDF04 KOHÚT, Miroslav - BARTOŠOVIČ, Matej - DOBIŠ, Michal - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Začínáme s ROS-om (3). In *ATP Journal*. Roč. 23, č. 3 (2016), s. 46-48. ISSN 1335-2237.

BDF05 KOHÚT, Miroslav - BARTOŠOVIČ, Matej - DOBIŠ, Michal - DUCHOŇ, František - BABINEC, Andrej. Začínáme s ROS-om (4). In *ATP Journal*. Roč. 23, č. 4 (2016), s. 40-43. ISSN 1335-2237.