



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

APLIKACE LANOVÉHO ROBOTY

APPLICATION OF CABLE ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Bulenínec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Bulenínek

ID: 154686

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Aplikace lanového robota

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte rešerši týkající se polohování ve 3D prostoru, lanových robotů s možností manipulace s objektem a jejich využitím
- 2) Seznamte se se softwarem Automation Studio V4 a produkty pro řízení pohybu a vizualizace od společnosti B&R.
- 3) Navrhněte a realizujte řídicí algoritmy lanového robota pro manipulaci s objektem a detekci kolize.
- 4) Implementujte řídicí algoritmus do řídicího systému lanového robota.
- 5) Vytvořte rozšíření vizualizace na dotykovém panelu s možností řízení lanového robota.
- 6) Na ukázkovém příkladu ověřte jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Firemní literatura B&R: Automation Studio V4

[2] Firemní literatura B&R: Produkty pro řízení pohybu a vizualizace společnosti B&R

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 15.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

Konzultant: Ing. Roman Mužík, B&R Brno

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá úpravami lanového robota na manipulátor. Mechanické úpravy spočívajú najmä v pridaní akčného člena na pohybujúcu sa platformu s možnosťou prenášať objekty. Hlavná časť práce predstavuje návrh a implementáciu algoritmu pre detekciu kolízií lanového robota s objektmi v jeho pracovnom poli.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Lanový robot, Manipulátor, Detekcia kolízií, Obalové telesá, Vákuové prísavky

ABSTRACT

The thesis deals with the changes of a cable robot to a manipulator. The mechanical changes are mostly about adding an active part to a moving platform with the ability to transfer objects and the effort to exchange the silicon cables for metal ones. The main part of the thesis is the proposed design and implementation of the algorithm for detection of a possible collision of the cable robot with an object in its working space.

KEYWORDS

Cable robot, Manipulator, Collision detection, Bounding box, Vacuum pads

BULENÍNEC, Martin *Aplikace lanového robota*: diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace, 2017. 71 s. Vedúci práce bol prof. Petr Pivoňka, CSc.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Aplikace lanového robota“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor(ka) uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý(-á) následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	10
1 Aplikácie lanových robotov	11
1.1 Manipulátory pre prenášanie objektov	11
1.2 Manipulátory pre polohovanie platformy	14
2 Mechanické úpravy	20
2.1 Akčný člen	20
2.1.1 Návrh prísaviek	21
2.1.2 Návrh ejektoru	23
2.1.3 Kompresor	25
2.2 Kladky	26
2.2.1 Otočné kladky	27
3 Programové úpravy	30
3.1 Popis objektu	30
3.2 Obalové telesá	30
3.2.1 Osovo zarovnané obalové telesá	30
3.2.2 Osovo orientované obalové telesá	31
4 Realizácia programových úprav	33
4.1 Vytvorené funkcie v knižnici	33
4.1.1 Funkcia pre vytvorenie obalového telesa - <i>AABBcreate</i>	33
4.1.2 Funkcia pre detekciu kolízie dvoch obalových telies - <i>AABB-</i> <i>Collision</i>	34
4.1.3 Funkcia pre detekciu kolízie obalového telesa a lana - <i>CableA-</i> <i>ABBCollision</i>	36
4.1.4 Funkčný blok pre nájdenie cesty bez kolízie - <i>FindPath</i>	41
4.1.5 Funkcia pre správu objektov v pracovnom poli - <i>AddRemU-</i> <i>pObstacle</i>	44
4.1.6 Funkcia pre ovládanie ejektora - <i>VacuumControl</i>	46
4.2 Úprava hlavného programu	47
4.2.1 Čakanie na nový pohyb - <i>sReady</i>	48
4.2.2 Riešenie nájdenej cesty - <i>sFindPath</i>	49
4.2.3 Vyriešenie kolízneho stavu - <i>sCollision</i>	50
4.3 Popis vizualizácie	51

5 Záver	54
Literatúra	56
Zoznam príloh	58
A Pneumatická schéma prísavky	59
B Katalógový list ejektoru	60
C Katalógový list hadice	61
D Katalógový list kompresoru	62
E Katalógový list rolny - typ 22C	63
F Výkres - otočná kladka	64
G Výkres - Otočný držiak kladky	65
H Výkres - Pevný držiak otočnej kladky	66
I Výkres - Držiak pevnej kladky	67
J Výkres - Držiak pevnej kladky 2	68
K Výkres - Čap kladky	69
L Výkres - Čap v otočnom držiaku	70
M Priložené CD	71

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Lanový manipulátor <i>ROBOCRANE</i> [3]	11
1.2	Lanový manipulátor s 9 stupňami voľnosti z TU v Poľsku [7]	12
1.3	Platforma zo spodnej strany robota z TU v Poľsku [7]	12
1.4	Systém <i>CoGiRo</i> pre preskladávanie paliet [5]	13
1.5	Systém <i>CoGiRo</i> pre prenášanie objektov prepojením lán [5]	14
1.6	Virtuálny tréningový systém <i>WARP</i> [3]	15
1.7	Rehabilitačný systém s 2 stupňami voľnosti [3]	15
1.8	Systém <i>SKYCAM</i> pre polohovanie kamery [3]	16
1.9	Najväčší vesmírny teleskop na svete <i>FAST</i> [8]	16
1.10	Platforma teleskopu <i>FAST</i> [9]	17
1.11	Modul vesmírneho modulárneho robota - jeden z troch [6]	17
1.12	Vesmírny modulárny robot použitý na čistenie solárnych panelov [6]	18
1.13	Vesmírny modulárny robot na prieskum lávových tunelov [6]	18
1.14	Platforma vesmírneho lanového robota na prieskum povrchu [6]	19
1.15	Polohovanie objektu vo veternom tuneli <i>SACSO</i> [3]	19
2.1	Robot pred začatím diplomovej práce [1]	20
2.2	Prísavky na platforme robota	23
2.3	Ejektor použitý na lanovom robotovi	23
2.4	Efekt ventouriho trubice	24
2.5	Použitý kompresor	25
2.6	Zobrazenie situácie pre výpočet dĺžky lana	28
2.7	3D model navrhovanej kladky	29
3.1	Znázornenie princípu aktualizácie osovo zarovnaného obalového telesa [2]	31
3.2	Správne (vľavo) a nesprávne ohraničenie objektu orientovanou obálkou [2]	31
3.3	Znázornenie hľadania opisu objektu orientovanou obálkou [2]	32
4.1	funkcia <i>AABBcreate</i>	33
4.2	funkcia <i>AABBCollision</i>	34
4.3	Vývojový diagram funkcie <i>AABBCollision</i>	35
4.4	Simulačné zobrazenie kontroly a úpravy výšky objektu pomocou funkcie <i>AABBCollision</i>	36
4.5	funkcia <i>cableAABBCollision</i>	36
4.6	Náčrt spôsobu detekcie kolízie v rovine XY	37
4.7	Náčrt spôsobu detekcie kolízie v rovine XZ	38
4.8	Vývojový diagram funkcie <i>CableAABBCollision</i>	39

4.9	Simulačné zobrazenie kontroly a úpravy výšky objektu pomocou funkcie <i>CableAABBCollision</i>	40
4.10	funkčný blok <i>FindPath</i>	41
4.11	Vývojový diagram bloku <i>FindPath</i>	43
4.12	funkcia <i>AddRemUpObstacle</i>	44
4.13	Spôsob pridávania nového objektu	46
4.14	funkcia <i>VacuumControl</i>	47
4.15	Zjednodušený diagram stavového automatu robota	48
4.16	Vývojový diagram vykonávaného programu v stave <i>sReady</i>	49
4.17	Vývojový diagram vykonávaného programu v stave <i>sFindPath</i>	50
4.18	Vývojový diagram vykonávaného programu v stave <i>sCollision</i>	51
4.19	Obrazovka pre ovládanie manipulátora	52
4.20	Okno signalizujúce kolíziu v koncovom bode alebo neriešiteľnú kolíziu	53

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Teoretické prídržné sily v závislosti na tlaku pri priemere prísaviek 32mm	22
2.2	Bežne používané koeficienty trenia [14]	22
2.3	Tabuľka bežných hladín hlučnosti	26
4.1	Popis premenných funkcie <i>AABBcreate</i>	33
4.2	Popis premenných funkcie <i>AABBCollision</i>	34
4.3	Popis premenných funkcie <i>CableAABBCollision</i>	37
4.4	Popis premenných funkcie <i>FindPath</i>	42
4.5	Popis premenných funkcie <i>AddRemUpObstacle</i>	44
4.6	Popis premenných funkcie <i>VacuumControl</i>	47

ÚVOD

Cielom práce je vytvoriť reálnu aplikáciu lanového robota. Diplomovú prácu vypísala firma B&R Brno. Bola zadaná požiadavka, aby bolo možné lanového robota použiť ako manipulátor.

Počiatočný stav robota je taký, že dokáže pohybovať platformou zavesenou na 8 silónových lanách v jeho pracovnom priestore, má šesť stupňov voľnosti. Pohyb platformy sa programuje v G - kóde ako CNC systém. Aj keď je polohovanie objektu hotové, pre úpravy, či už mechanické alebo softwarové, je nutné pochopiť celý program použitý v robotovi. Následne je nutné vykonať zmeny.

Z mechanickej stránky ide o pridanie akčného člena, pomocou ktorého bude možné prenášať objekty v pracovnom poli. V práci budú analyzované dostupné možnosti vhodné na použitie v robotovi. Taktiež je snaha nahradiť silónové laná kovovými pre vyššiu presnosť polohovania a mechanickú odolnosť. To si ale vyžiada použitie kladiek namiesto teraz použitých keramických priechodiek. Bude sa tak musieť aj upraviť spôsob výpočtu dĺžky lana zahŕňajúci aj polomer kladky.

Hlavný problém súvisiaci s aplikáciou lanového robota v podobe manipulátora budú kolízne stavy. Pozícia lán je nastavená tak, že nie je možné, aby sa medzi sebou prekrížili. V prípade objektov v pracovnom poli robota ale môže dochádzať k stretu objektu a platformy a najmä objektu s jedným alebo viacerými lanami. Ešte pred tým by ale bolo potrebné dokázať detekovať samotné rozmiestnenie objektov v pracovnom poli. Práca sa ale problematikou vyhľadávania objektov nezaobera. Základný predpoklad pre prácu je známe rozmiestnenie objektov.

Z hľadiska využiteľnosti a možnosti funkciu manipulátora používať aj pri bežných propagačných podujatiach na ktoré bol primárne určený, je nutné vymyslieť a aplikovať spôsob správy objektov. Pre užívateľa by mala byť umožnená jednoduchá manipulácia s objektom s automatickou aktualizáciou jeho parametrov. Z vyššie popísaných skutočností vyplýva, že kvôli jednoduchému zadávaniu objektov do pracovného poľa robota bude potrebné voliť metódu pracujúcu s jednoduchými vstupmi.

1 APLIKÁCIE LANOVÝCH ROBOTOV

Princíp paralelných lanových robotov spočíva v polohovaní platformy v pracovnej oblasti robota. Snaha použiť lanové roboty v praxi je najmä pre ich jednoduché použitie na veľkú pracovnú oblasť, jednoduchosť zmeny konfigurácie a rovnako tak aj pre ich schopnosť vyvinúť vysokú rýchlosť. V tejto kapitole bude predstavených niekoľko aplikácií v praxi používaných lanových robotov, prípadne ich možné použitie.

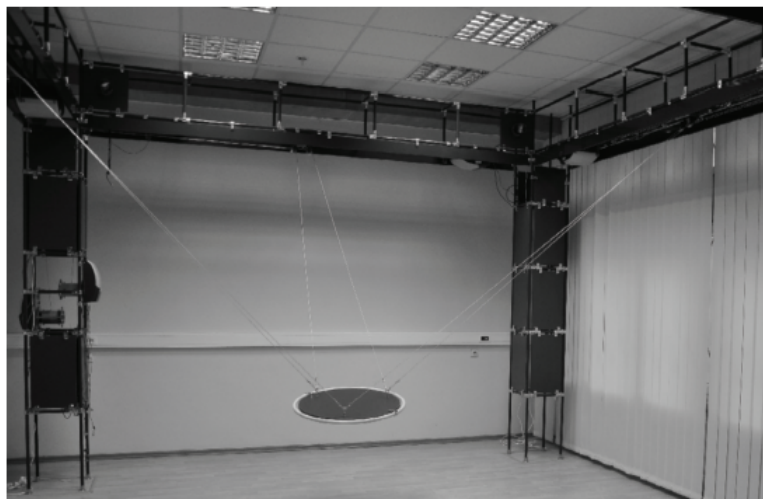
1.1 Manipulátory pre prenášanie objektov

Jedna z prirodzených foriem použitia lanového robota je vo forme jednoduchého manipulátora určeného na prenášanie alebo manipuláciu s objektami v jeho pracovnom poli. Jedným z lanových robotov používaných ako manipulátor je robot *ROBOCRANE* vyvinutý Národným inštitútom štandardov a technológie už v osemdesiatych rokoch.[3] Konceptne je postavený na princípe stewartovej platformy, kde sa pomocou 6 mechanických piestov uchytených v pevnej základni pohybuje platformou na ich druhých koncoch. Mechanizmus stewartovej platformy sa využíva napríklad pre letecký simulátor na nakláňanie kabíny. V prípade robota *ROBOCRANE* je však pevná časť na hornej pozícii a namiesto mechanických piestov sú použité laná držiace platformu. Na polohovanú platformu je možné pripevniť akčný člen. V prípade obrázku 1.1 je to naberač na ramene.

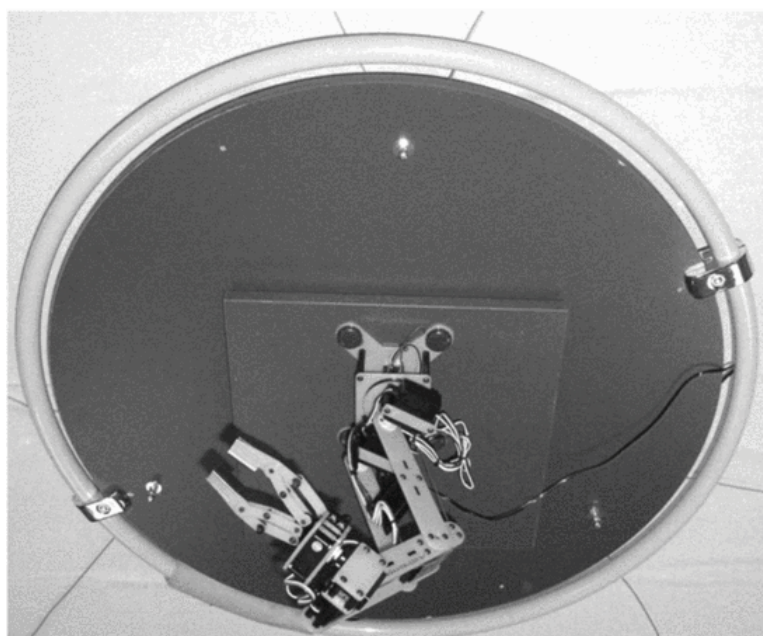


Obr. 1.1: Lanový manipulátor *ROBOCRANE* [3]

Na rovnakom princípe je postavený manipulátor na Technickej univerzite v Poľsku [7]. Slúži ako pomocný manipulátor pre nebezpečné materiály a ovláda ho operátor. Rozmermi pokrýva celé laboratórium v ktorom je umiestnený. Na polohovanej platforme má podobne ako *ROBOCRANE* umiestnený manipulátor na uchopenie predmetov.



Obr. 1.2: Lanový manipulátor s 9 stupňami voľnosti z TU v Poľsku [7]



Obr. 1.3: Platforma zo spodnej strany robota z TU v Poľsku [7]

V Európe najväčší lanový robot je od firmy Tecnia. Robot má názov *CoGiRo* a tiež funguje ako manipulátor. Platformu má ale kocku, na ktorej má pripevnené laná vychádzajúce z horných rohov konštrukcie. Je použiteľný napríklad na manipuláciu s paletami vďaka vidlici pripevnenej na polohovanej kocke (obr. 1.4). Je ale tiež použiteľný na dvíhanie objektov spôsobom, že platformu tvorí samotný objekt. Laná sa dajú jednoducho prichytiť na iný objekt a operátor ho potom dokáže podľa potreby polohovať, ako je zobrazené na obrázku 1.5 [5].



Obr. 1.4: Systém *CoGiRo* pre preskladávanie paliet [5]



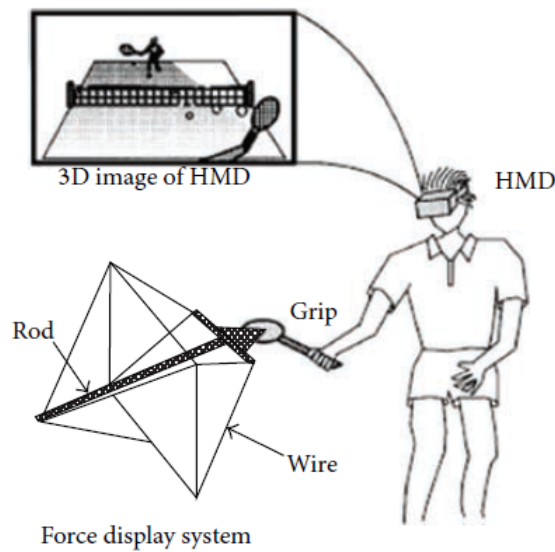
Obr. 1.5: Systém *CoGiRo* pre prenášanie objektov prepojením lán [5]

1.2 Manipulátory pre polohovanie platformy

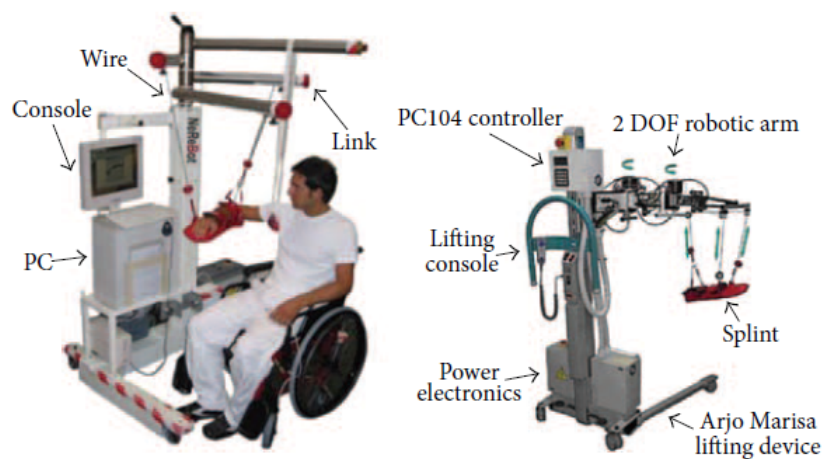
Vo svojej podstate je každý lanový robot manipulátor, pretože podobne ako manipulátor *CoGiRo* využívajúci možnosť odopnúť laná, samotná platforma môže byť objektom určeným na polohovanie.

Lanový robot *FALCON 7* je súčasťou systému *WARP*. Ide o virtuálny tréningový systém zobrazený na obrázku 1.6. Robot je tu použitý pre jeho schopnosť vyvinúť vysokú rýchlosť.[3] Taktiež v zdravotníctve majú lanové roboty uplatnenie. Pre dobrú citlivosť z hľadiska sily, pružnosť a jednoduchosť bol použitý lanový robot s dvomi stupňami voľnosti pre rehabilitáciu ramena.

SPIDERCAM v Nemecku alebo *SKYCAM* v USA sú systémy používané na polohovanie kamery pri športových podujatiach. Na rovnakom základe sú lanové roboty použité aj pre polohovanie prijímača pred obrovskými vesmírnymi teleskopmi.[3] Najväčší vesmírny teleskop dostavali v roku 2016 v Číne. Ide o projekt *FAST* (500-meter Aperture Spherical radio Telescope), kde priemer hlavného reflektoru je 520m. Prijímač je zavesený na 6 oceľových lanách, ktoré nesú 100 metrov vysoké veže s rádiom 600 metrov. Pri najmenej rýchlosti 3mm/s dokáže manipulátor polohovať



Obr. 1.6: Virtuálny tréningový systém *WARP* [3]



Obr. 1.7: Rehabilitačný systém s 2 stupňami voľnosti [3]

prijímač s presnosťou na 2mm [8]. Na obrázku 1.10 je zobrazená samotná polohovaná platforma teleskopu *FAST*. Reálne je síce polohovaná šiestimi lanami, ale na platforme je uchopená vždy dvojica lán spolu. Dokáže tak polohovať len obmedzene v 3 stupňoch voľnosti. Pre polohovanie v ostatných osiach má táto platforma v sebe ďalšiu mechanickú stewartovu platformu.[9]

Aj v oblasti vesmírnych projektov sa počíta s lanovými robotmi. Pri skúmaní povrchu planét sa môže v dnešnej dobe využívaný rover dostať do problémov pri zložitom teréne. Je možné použiť jednoduchú modulárnu konštrukciu lanového ro-

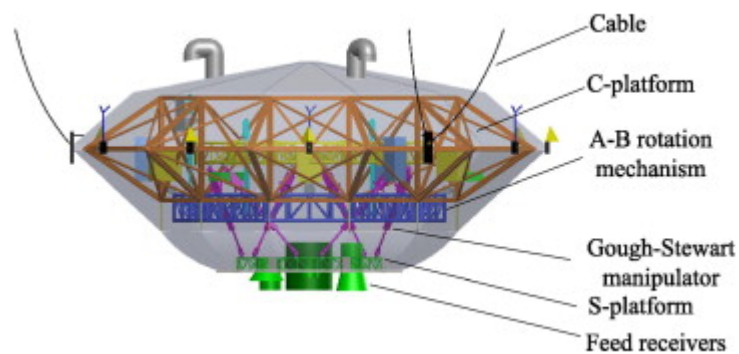


Obr. 1.8: Systém *SKYCAM* pre polohovanie kamery [3]



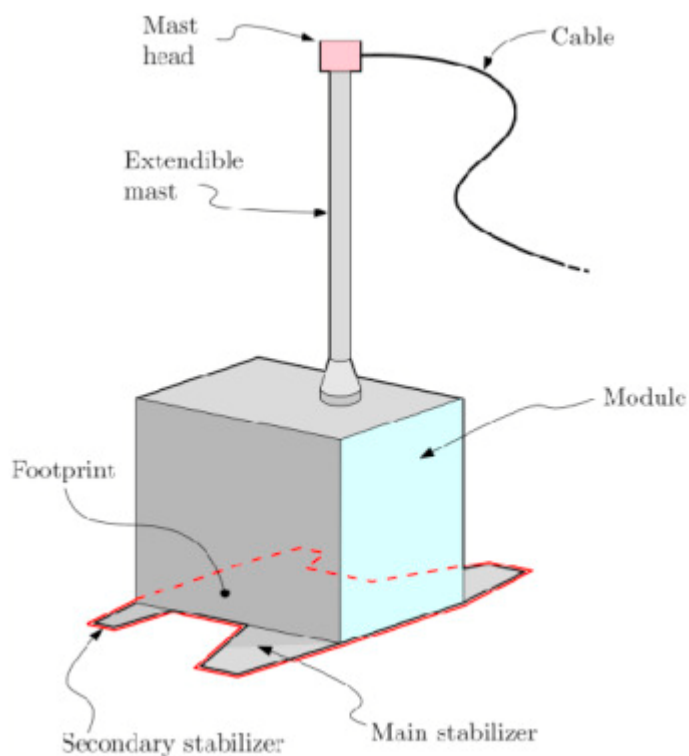
Obr. 1.9: Najväčší vesmírny teleskop na svete *FAST* [8]

bota s tromi lanami na miestach, na ktoré sa doteraz používané prieskumné roboty nedostanú - kopce, lávové tunely alebo priepasti. Hlavná myšlienka je tá, že si rover dokáže poskladať zo základných modulov lanového robota okolo neprístupného terénu sám. Uvažuje sa aj pre použitie tejto formy robota na Marse v prípade potreby vybudovania solárnej elektrárne, kde je hlavným problém tvorba prachu. Takýto robot by mal úlohu čistiť solárne panely. Vo vesmíre je ešte možné použitie lano-



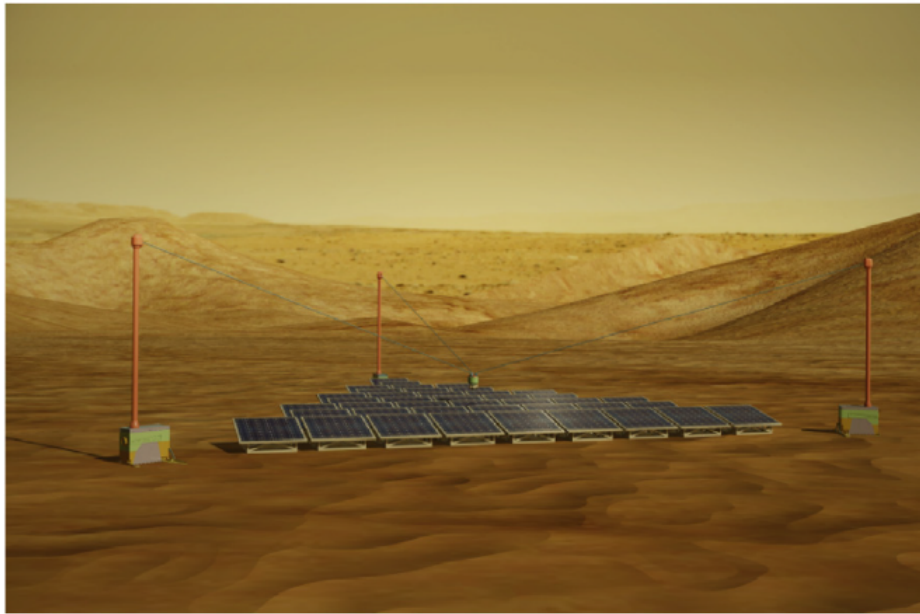
Obr. 1.10: Platforma teleskopu *FAST* [9]

vých robotov pre simulovanie procesov pri nízkej gravitácii, typicky pre simuláciu spájania vesmírnych modulov.[6]

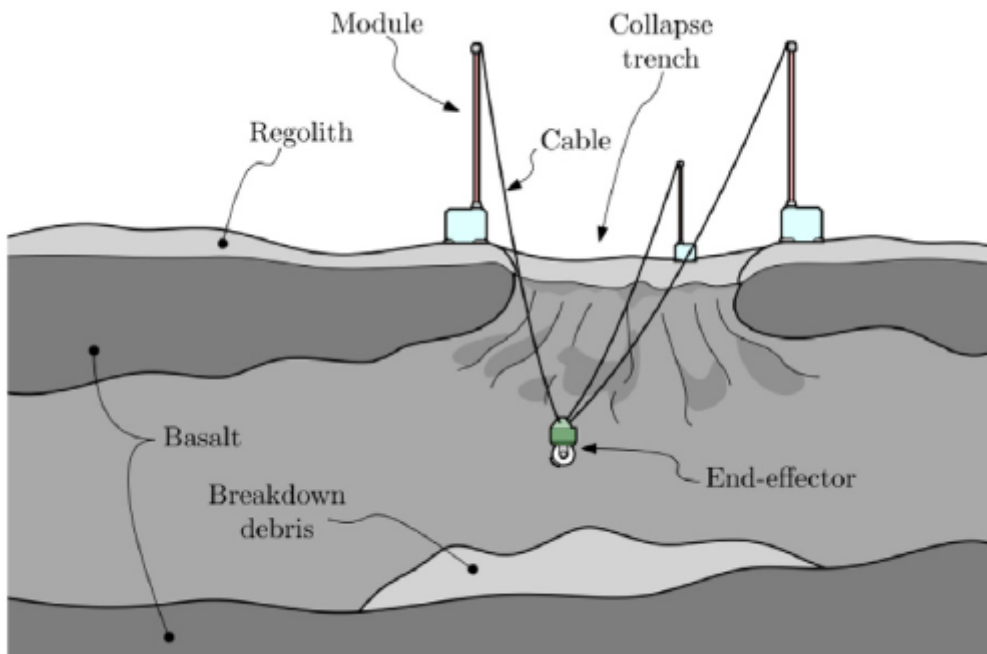


Obr. 1.11: Modul vesmírneho modulárneho robota - jeden z troch [6]

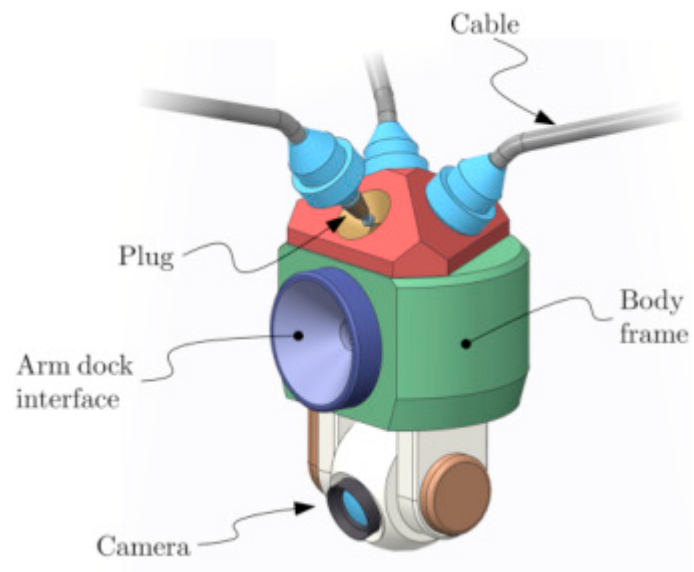
V neposlednom rade sú roboty používané pre polohovanie objektov vo veterných tuneloch *SACSO*. [3]



Obr. 1.12: Vesmírny modulárny robot použitý na čistenie solárnych panelov [6]



Obr. 1.13: Vesmírny modulárny robot na prieskum lávových tunelov [6]



Obr. 1.14: Platforma vesmírneho lanového robota na prieskum povrchu [6]



Obr. 1.15: Polohovanie objektu vo veternom tuneli *SACSO* [3]

2 MECHANICKÉ ÚPRAVY

Lanový robot používaný v diplomovej práci je kompletne popísaný v [1]. Platformu polohuje pomocou 8 motorov, ktoré navíjajú laná na kladky na ich hriadeloch. Robot je polohovateľný v 6 osiach.



Obr. 2.1: Robot pred začatím diplomovej práce [1]

2.1 Akčný člen

Aby mohol robot prenášať objekty, potrebuje tieto objekty niečím uchopiť. Najjednoduchšou možnosťou by bolo pripevniť ku kocke vidlice podobné ako má robot *CoGiRo* v kapitole 1.1 na prenášanie paliet. Značne by sa ale takýmto spôsobom obmedzili kladné vlastnosti robota, najmä rýchlosť. Je preto nutné objekt aktívne držať počas celej doby manipulácie. Rozhodovalo sa medzi použitím elektromagnetu, vákuovej prísavky alebo elektrogripperu. Možná rýchlosť a zrýchlenie robota závisí na hmotnosti samotnej platformy a prenášaného objektu. V prípade prenášaného objektu môže dôjsť k výraznému navýšeniu váhy a robot nebude môcť dosahovať veľké zrýchlenia a najmä spomaľovania kvôli chýbajúcim brzdným odporom [1]. No

pre prezentačné účely je žiadúca aj ukážka rýchlosti a zrýchlenia aspoň vo chvíľach bez prenášania objektu. Použitie elektromagnetu je preto obmedzujúce z hľadiska vyššej váhy platformy a rovnako aj pre možnosť manipulovať len s kovovými objektmi. Elektrogripper by bol použiteľný aj pre nekovové objekty, je tu však opäť nevýhoda z hľadiska jeho veľkosti a váhy. Pokiaľ by sa použil malý gripper, nastalo by obmedzenie na veľkosť prenášaných objektov. Najvhodnejšie riešenie sa javilo použitie prísaviek. Váha prísaviek samotných je relatívne malá a výkon závisí najmä na použitom ejektore a kompresore, ktoré je možné umiestniť mimo pohybujúcu sa platformu.

2.1.1 Návrh prísaviek

Pri návrhu prísaviek je najvhodnejšie presne vedieť, aké predmety budú prísavkou prenášané. V prípade lanového robota nebola požiadavka na prenášanie konkrétneho predmetu a tak sa volila prísavka najmä s ohľadom na veľkosť platformy. Z rady ZP3E sa volila prísavka s najmenším možným priemerom 32mm. Z praktického hľadiska je vhodné použiť aspoň dve prísavky vedľa seba, čo zabraňuje prípadnému pootočeniu prenášaného objektu.

$$Ft = \Delta P \cdot A \quad (2.1)$$

Výpočet teoretickej prídržnej sily [14] Ft - teoretická prídržná sila

ΔP - rozdiel tlakov

A - aktívna plocha prísavky

Teoretickú prídržnú silu prísavky je možné vypočítať podľa vzťahu 2.1. V tabuľke 2.1 sú vyčíslené hodnoty prídržných síl v závislosti na vytvorenom podtlaku.

$$F = m \cdot (g + a) \cdot S \quad (2.2)$$

$$F = m \cdot \left(g + \frac{a}{\mu}\right) \cdot S \quad (2.3)$$

Výpočet prídržnej sily s ohľadom na hmotnosť objektu [14] F - prídržná sila

g - gravitačné zrýchlenie

a - zrýchlenie systému

μ - koeficient trenia

S - bezpečnostný faktor

Podľa vzťahu 2.2 a 2.3 sa určí možná hmotnosť objektu, na ktorý je prídržná sila dostatočujúca. V tomto prípade je potrebné počítat s horšou variantou so zahrnutím

Tab. 2.1: Teoretické prídržné sily v závislosti na tlaku pri priemere prísaviek 32mm

P [kPa]	F [N]
-85	68,3
-80	64,3
-75	60,3
-70	56,3
-65	52,2
-60	48,2
-55	44,2
-50	40,2
-45	36,2

vplyvu horizontálneho posuvu, kde je nutné počítat s koeficientom trenia. Opäť ale ide o teoretický predpoklad, nakoľko koeficient trenia je len predpokladaná hodnota a môže sa líšiť od koeficientu trenia skutočného objektu. Tabuľka 2.2 zobrazuje typicky používané koeficienty trenia pre rôzne druhy materiálov. Ďalší neurčitý parameter je bezpečnostný faktor. Výrobcovia prísaviek všeobecne odporúčajú použiť hodnotu bezpečnostného faktoru 2, v prípade operácii s relatívne rýchlym pohybom až 2,5.[14] Keďže sú použité dve prísavky, aktívna plocha prísaviek je dvojnásobná a teda aj prídržná sila prísaviek bude dva krát väčšia. Po aplikácii vzťahu 2.3 je možné určiť maximálne možné hmotnosti prenášaných objektov. Napríklad pre materiál suchého plastu a pri tlaku -60 kPa bude jedna prísavka pri maximálnom zrýchlení schopná niesť 800 gramový objekt, dve prísavky unesú 1,6kg.

Tab. 2.2: Bežne používané koeficienty trenia [14]

druh povrchu	koeficient trenia μ [-]
olejnätý	0,1
vlhký až mokrý	0,2 - 0,4
sklo, kameň, suchý plast	0,5
drsňý	0,6



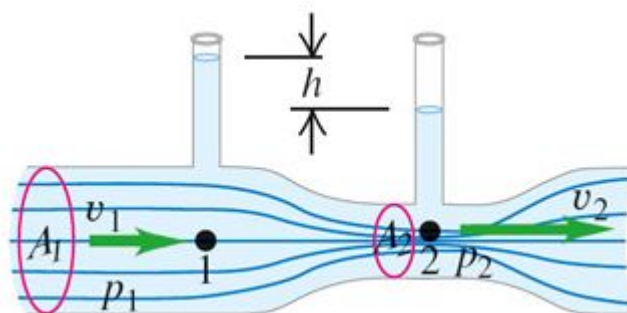
Obr. 2.2: Prísavky na platforme robota

2.1.2 Návrh ejektoru



Obr. 2.3: Ejektor použitý na lanovom robotovi

Ejektor je zariadenie využívajúce princíp venturiho trubice (obr.2.4), kde zúžením prierezu dôjde k zvýšeniu rýchlosti prúdenia kvapaliny. Pri použití Bernoulliho rovnice (2.4) v kombinácii s rovnicou kontinuity je zrejmé, že vyššia rýchlosť je kompenzovaná znížením tlaku.



Obr. 2.4: Efekt ventouriho trubice

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = konst \quad (2.4)$$

$$vS = konst \quad (2.5)$$

p - tlak

v - rýchlosť prúdenia kvapaliny

ρ - hustota kvapaliny

S - plocha prierezu trubice

Je dôležité vhodne zvoliť umiestnenie ejektoru. Výrobcovia doporučujú umiestňovať ejektor čo najbližšie k samotným prísavkám. Dôvodom je minimálne množstvo vzduchu medzi prísavkou a ejektorom. Čím menej vzduchu je potrebné odsáť, tým rýchlejšie je vytvorený podtlak. Do úvahy pri tomto predpoklade prichádzali dve možnosti - na platformu alebo nad pracovné pole robota. V prípade uchytenia na platformu by bol potrebný minimálny čas na prisatie predmetu. Takto volené miesto by ale znamenalo zlý prístup k nastavovacím prvkom ejektoru a potrebu riešiť pohyblivý prívod elektrických signálov aj prívod stlačeného vzduchu. Vhodnejšie je umiestniť ejektor nad stred pracovnej plochy robota. Bude potrebný dlhší čas na vytvorenie vákua, z ejektoru ale bude potrebné priviesť na platformu len jednu elastickú hadicu. Rovnako bude lepší prístup k ejektoru pre jeho prípadné prenastavenie.

$$t_{63} = \frac{v \cdot 60}{Q} \quad (2.6)$$

$$t_{95} = 3 \cdot t_{63} \quad (2.7)$$

p - tlak

v - rýchlosť prúdenia kvapaliny

ρ - hustota kvapaliny

S - plocha prierezu trubice

Aby boli dosiahnuté čo najkratšie časy prisatia, bol volený ejektor s najvyšším sacím prietokom z rady ZK-2. ZK2A15K5RW-06-B. Podľa katalógového listu (príloha B) má ejektor sací prietok 89l/min. Na prepojenie ejektoru a prísaviek je použitá pohyblivá hadica s priemerom 6mm (príloha C). Pri zohľadnení rozmerov pohyblivej hadice a prepojek medzi prísavkami vychádza objem odsávaného vzduchu na 0,021 litra. Z (príloha B) vieme pomocou vzťahu 2.6 a 2.7 určiť charakteristické časy pre dosiahnutie 63% a 95% z požadovaného výkonu. Čas $t_{63} = 42,6ms$ a čas $t_{95} = 127,8ms$, čo je pre požiadavky tejto diplomovej práce dostačujúce.

Ovládanie ejektora je pomocou digitálnych vstupov a na signalizáciu vytvorenia vákua je rovnako použitý digitálny výstup. Snímač tlaku ZK2-LVW30-A je súčasťou ejektoru a dokáže zároveň plniť regulačnú funkciu. Je možné nastaviť medzné hodnoty pre hysteréziu požadovaného vákua a snímač ovláda vstup ejektoru. Šetrí tak potrebné množstvo vstupnej energie.

2.1.3 Kompresor



Obr. 2.5: Použitý kompresor

Posledným krokom potrebným pre použitie prísaviek je výber kompresoru. Pre túto aplikáciu sú potrebné 3 parametre: výstupný prietok vzduchu, rozmery a hlučnosť. Ejektor má maximálny odber vzduchu 90l/min (príloha B). Kompresor bude v

spodnej časti robota za doskou s elektrickým rozvádzačom a rozmery tohoto priestoru sú 67x37x67.

Tab. 2.3: Tabuľka bežných hladín hlučnosti

Lp [dB]	úroveň	príklad
0	prah počutelnosti	ticho
20	extrémne nízka	šumenie listov
40	veľmi nízka	chod chladničky
60	stredne hlasitá	normálny rozhovor
80	veľmi hlasitá	mestská doprava, nákladné auto
100	extrémne vysoká	symfonický orchester, traktor
120	prah bolesti	štartujúce prúdové lietadlo

Dostatočne výkonný tichý a zároveň malý kompresor nebolo možné nájsť a musel nastať kompromis. Pevne daný bol priestor, ktorý by sa dal zväčšiť posunutím rozvádzačovej dosky len o niekoľko centimetrov. Bol zvolený kompresor SILVERSTONE SILENCED 4l (príloha D), ktorý má vhodné rozmery 54x32x37, hlučnosť 52 dB a jeho deklarovaný výtlačný prietok 75 l/min. Pri vzatí do úvahy úspornú funkciu ejektoru a fakt, že prísavky nebudú vyťažované naplno je tento výtlačok dostačujúci. Ak by v budúcnosti výtlačok nepostačoval, je možné ho kompenzovať pridaním ďalšej vzduchovej nádoby.

2.2 Kladky

Ako je spomínané v [1], silónové laná sú pružné a čím ďalej od stredu pracovnej oblasti sa platforma nachádza, tým je polohovanie nepresnejšie. Pomohlo by použitie kovových lán, pri čom ale bude potrebné zmeniť v SW robota aproximáciu lana [1]. Tiež bude nutné použiť iné navíjacie kladky, nakoľko pri testoch sa zistilo, že pri použití stávajúcich dochádza k trvalej deformácii lana. Bude potrebné použiť kladky s väčším priemerom, prípadne zmeniť celý koncept navíjania lana. Rovnako bude potrebný vyšší moment na dostatočné napnutie lán. Teraz je použitý maximálny moment 0,9 Nm, ktorý pre kovové laná nestačí. Použité motory by dokázali fungovať s momentom až 1,3 Nm, je tu však obmedzenie zo strany použitých zdrojov, ktoré by už vyššie zaťaženie nezvládli.[1] V priebehu diplomovej práce ale prišla požiadavka na výrobu nového lanového robota, v ktorom sa použijú Acoposy P3, ktoré majú zdroje v sebe a tento problém by nemal nastať. Pre použitie ocelových lán je ale potrebné vymeniť stávajúce keramické priechodky, slúžiace na vedenie

lana z navíjacej kladky k platforme. Kovové laná tieto priechodky rýchlo opotrebojú. Je teda návrh použiť na tento prechod kladky. Nastávajú dve možnosti. Buď použiť kladky ktoré budú na otáčajúcej sa základni, alebo kladky, ktoré budú mať dostatočne veľký výstupný uhol a budú ukotvené na pevnom držiaku.

2.2.1 Otočné kladky

Najprv sa vyskúšali pevné kladky s veľkým výstupným uhlom, pretože bola možnosť zapožičať od firmy Matis rolny, v praxi slúžiace na lineárne vedenie (Príloha E). Lano sa ale po kladke nepredvídateľne pohybovalo, čo viedlo k zhoršeniu presnosti polohovania a náhodnému padaniu lán z kladiek. Preto boli navrhnuté otočné kladky ktoré sa dali na zákazku vyrobiť.

Pre použitie otočných kladiek je podstatné dostať lano do osi otáčania kladky na držiaku. Na túto funkciu bola zvolená bežne dostupná kladka, ktorá sa pevne nastaví voči polohe navíjacej kladky na motore. Od pevnej kladky prechádza lano dutým čapom v ložisku, ktoré spája otočnú a pevnú časť držiaka. Otočná kladka by zároveň mala mať dostatočne hlbokú a úzku drážku na lano, aby si ju lano pri zmene polohy platformy mohlo aj s držiakom otočiť a nespadnúť a zároveň aby sa otočila s čo najmenšou nepresnosťou. Hĺbka drážky bola zvolená na 4 mm a jej šírka na 1,2 mm. Výkresy kladky a držiakov sú v (príloha F - príloha L). Pri použití otočnej kladky sa následne musí upraviť výpočet pre dĺžku lana, ktorý bude zohľadňovať polomer kladky. Výroba kladiek sa ale zdržala a v dobe odovzdania práce ešte neboli kladky dodané výrobcom a otestované.

Nový výpočet dĺžky lana popísaný ďalej:

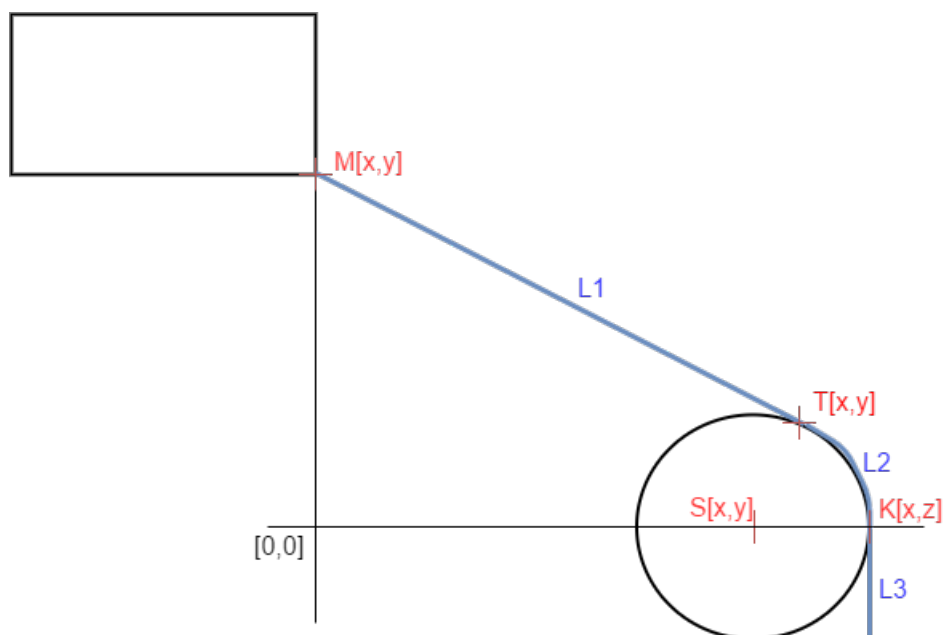
$$(x - S_x)^2 + (x - S_x)^2 = r^2 \quad (2.8)$$

$$(T_x - S_x)(x - S_x) + (T_y - S_y)(y - S_y) = r^2 \quad (2.9)$$

$$a = (M_y - S_y)^2 + 1 \quad (2.10)$$

$$b = -2\{(M_y - S_y)^2 \cdot S_y \cdot (\frac{r^4}{(M_x - S_x)^2} + S_x^2) + S_x(\frac{r^2}{(M_x - S_x)} + S_x) + S_y\} \quad (2.11)$$

$$c = S_y^2\{S_y(1 + S_y - 2S_x^2 - 2M_y(S_x^2 + 1)) - S_x + 1 + M_y^2(\frac{r^4}{(M_x - S_x)^2} + 3S_x^2)\} + 2\frac{r^2 S_x M_y S_y}{(M_x - S_x)} + S_x^2 - r^2 \quad (2.12)$$



Obr. 2.6: Zobrazenie situácie pre výpočet dĺžky lana

$$T_y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.13)$$

$$T_x = \frac{r^2 - (M_y - S_y)(T_y - S_y)}{M_x - S_x} + S_x \quad (2.14)$$

$$L1 = \sqrt{(M_y - T_y)^2 + T_x^2} \quad (2.15)$$

$$L2 = \frac{\pi r \cos^{-1}\left(\frac{(T_x - K_x)^2 + (T_y - K_y)^2}{2r^2} - 1\right)}{180} \quad (2.16)$$

$$L3 = konst \quad (2.17)$$

$$L = L1 + L2 + L3 \quad (2.18)$$

a, b, c - hodnoty pre výpočet koreňov pomocou determinanta odvodené zo známych bodov z obr...

S_{xy} - súradnice stredu kladky

M_{xy} - súradnice bodu uchytenia lana na platforme v rovine pre počítanie dĺžky lana

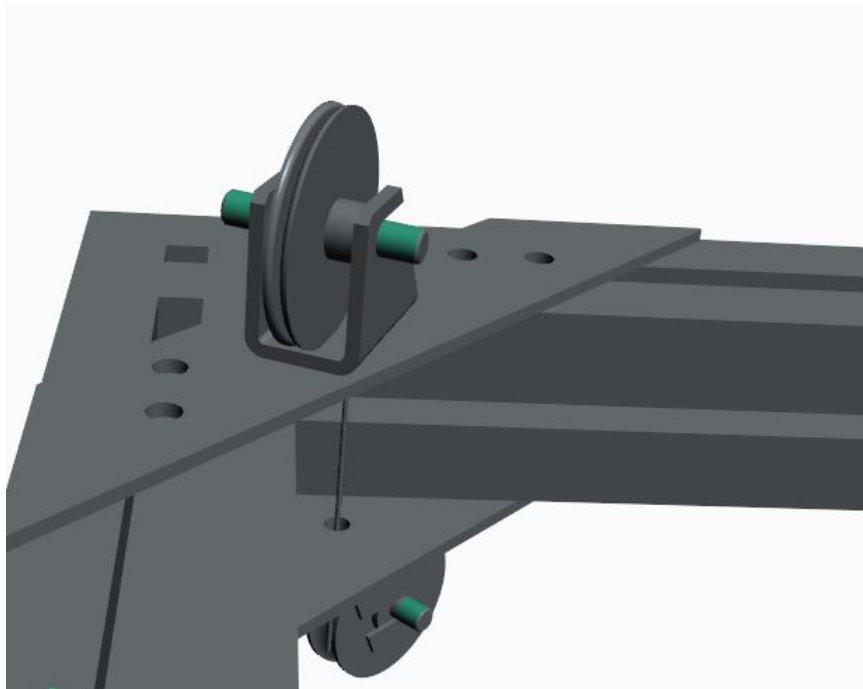
K_{xy} - súradnice bodu na kladke od ktorého sa začína lano podľa kladky ohýbať

T_{xy} - súradnice dotyčnice na kladke

r - polomer kladky

$L1, L2, L3, L$ - vypočítané dĺžka lana v jednotlivých častiach a celková dĺžka lana

Pre výpočet potrebnej dĺžky lana sa najprv určí rovina, v ktorej je kladka otočená. Ďalej sa už počíta v tejto rovine ako v rovine XY tak, že os kladky je kolmá k tejto rovine. Situácia pre výpočet je znázornená na obr.2.6. Klúčovou úlohou je zistiť bod dotyčnice T . Rovnica kružnice ktorú tvorí kladka je 2.8 a rovnica dotyčnice k tejto kružnici prechádzajúca bodom M je 2.9. Riešením dostaneme sústavu rovníc kde jedna je kvadratická a má teda dve riešenia. Nás zaujíma to, ktoré je nad bodom K . Najprv teda určíme koeficienty a, b a c kvadratickej rovnice. Výpočtom 2.13 dostaneme súradnicu bodu T v smere Y . Ak ide o bod ktorý nás zaujíma, dopočítame súradnicu T v smere X 2.14, ak nie zopakujeme výpočet riešenia kvadratickej rovnice s opačným znamienkom pred odmocninou ako v predchádzajúcom prípade. Úloha sa tak rozdelila na tri jednoduché časti. Dĺžka $L1$ sa vypočíta podľa pytagorovej vety 2.15, veľkosť oblúku $L2$ spočítame podľa vzťahu 2.16 a $L3$ je vždy rovnaká. Sčítaním jednotlivých segmentov dostaneme celkovú potrebnú dĺžku lana.



Obr. 2.7: 3D model navrhovanej kladky

3 PROGRAMOVÉ ÚPRAVY

Keďže robot má byť použitý ako manipulátor, hlavná požiadavka z firmy B&R je implementovať do robota schopnosť predísť kolíziám. Práca nie je zameraná na vyhľadávanie objektov v pracovnom poli, ale vychádza zo známych pozícií a rozmerov prekážok. Je potrebné zvoliť popis objektu a s ním súvisiacu metódu detekcie kolízie.

3.1 Popis objektu

Pre detekciu kolízie je potrebné mať najprv k dispozícii popis objektu. Je možné použiť maticu reprezentujúcu akúsi mapu pracovného priestoru robota, pričom každý prvok matice reprezentuje maximálnu výšku objektu v pracovnom poli. Je to najjednoduchší spôsob, avšak značne neefektívny v prípade využitia pamäte a počtu jednotlivých matematických operácií pre každú bunku mapy a najmä nepraktický z hľadiska využitia robota ako manipulátora, kedy je potrebné uvažovať aj o možnosti prenášania objektu. Je preto vhodnejšie použiť na popis objektov iný spôsob.

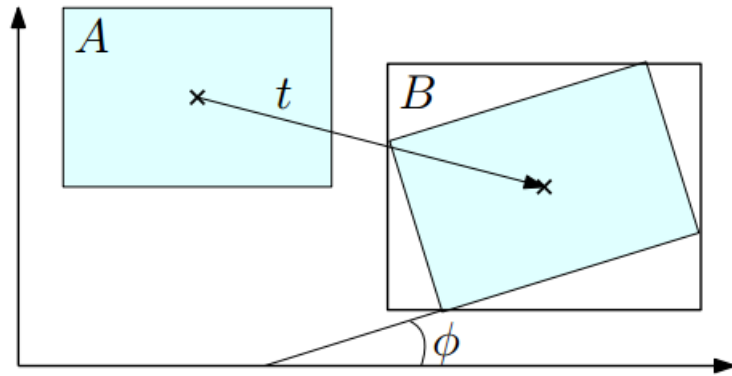
3.2 Obalové telesá

Metóda popisu objektu pomocou obalových telies je jedna z najjednoduchších. V [2] je predstavených niekoľko druhov obalových telies, ktorými je možné objekt opísať. Najjednoduchšie sa javia byť osovo zarovnané obalové telesá alebo orientované obalové telesá.

3.2.1 Osovo zarovnané obalové telesá

Ide o popis objektu ohraňovaním kuboidom. Princíp je zobrazený na obr 3.1. Objekt je popísaný jeho stredom a polovičnými šírkami v každej osi. Tento popis je relatívne jednoduchý, avšak už z názvu vyplýva možná nepresnosť popisu objektu, ktorého hranice sú vždy rovnobežné s osami. To na druhú stranu zjednodušuje situáciu v prípade riešenia kolíznych stavov, kedy môžeme automaticky predpokladať, že objekt sám o sebe nebude pri jednoduchom dvíhaní platformy do vyššej výšky prekážať.

Pre detekciu kolízie medzi dvomi obalovými telesami sa porovnáva, či je vzdialenosť stredov väčšia ako súčet ich polovičných šírok v každom smere. V prípade že je aspoň v jednom prípade výsledok testu v logickej 1, ku kolízii dvoch kuboidov nedochádza.

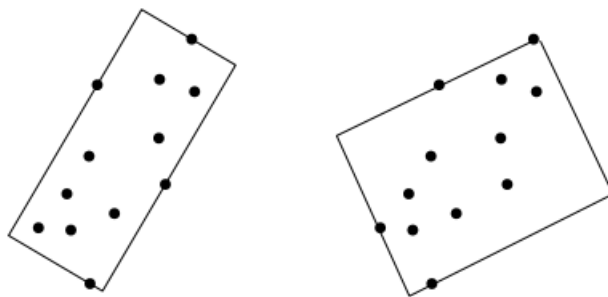


Obr. 3.1: Znáznornenie princípu aktualizácie osovo zarovnaného obalového telesa [2]

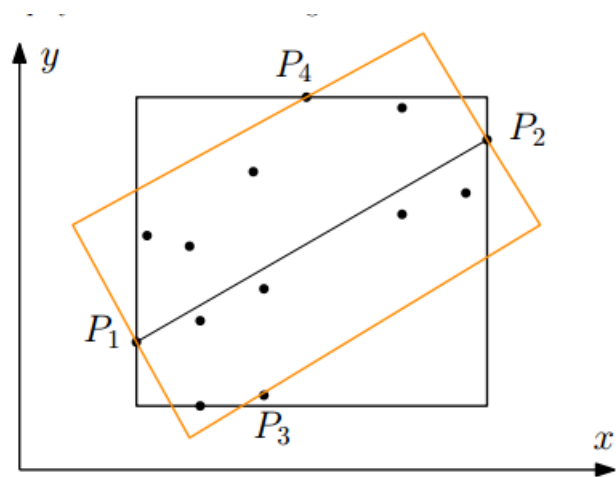
3.2.2 Osovo orientované obalové telesá

Princíp zostáva podobný ako pri osovo zarovnaných obalových telesách, avšak objekt je reprezentovaný navyše tromi vektormi (rotačnou maticou) reprezentujúcimi natočenie kuboidu. Náročné je vhodne stanoviť správnu orientáciu obalového telesa. Jedna z časovo menej náročných metód vhodného popisu orientovaného obalového telesa je popísaná v [2]. Vychádza z postupného natáčania a zmenšovania výsledného kuboidu v jednotlivých osiach.

V tomto štádiu diplomovej práce sa však počíta s riešením kolízneho stavu len jednoduchým zdvihnutím platformy. V prípade použitia sofistikovanejšej metódy hľadania trasy, kedy by malo zmysel riešiť možné vyhýbania sa do strán, by táto metóda bola využiteľná. S terajším konceptom by to bolo zbytočné komplikovanie.



Obr. 3.2: Správne (vľavo) a nesprávne ohraničenie objektu orientovanou obálkou [2]



Obr. 3.3: Znáznorenie hľadania opisu objektu orientovanou obáľkou [2]

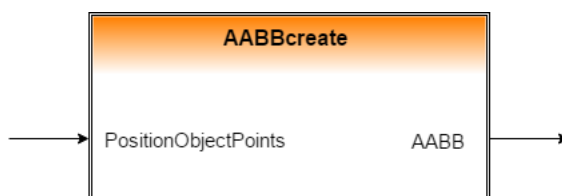
4 REALIZÁCIA PROGRAMOVÝCH ÚPRAV

V nasledujúcich kapitolách budú popísané algoritmy pridané do robota pre detekciu kolízie, nájdenie cesty bez kolízie a správu objektov v pracovnom poli s predstavením vizualizácie a spôsobu ovládania manipulátora.

4.1 Vytvorené funkcie v knižnici

Pre detekciu kolízie bola zvolená metóda osovo zarovnaných obalových telies pre jej jednoduchosť. Pri použití orientovaných telies by bola výrazne náročnejšia detekcia kolízie lana s objektom a správa objektov v pracovnom poli.

4.1.1 Funkcia pre vytvorenie obalového telesa - *AABBcreate*



Obr. 4.1: funkcia *AABBcreate*

Tab. 4.1: Popis premenných funkcie *AABBcreate*

Premenná	Popis
positionObjectPoints	pozícia rohov objektu v priestore
AABB	Vytvorené obalové teleso

Funkcia je využívaná pri vkladaní nových objektov do pracovného poľa a tiež je potrebné pre konkrétnu pozíciu platformy v priestore vypočítať vždy nové obalové teleso.

Do funkcie vstupuje zoznam pozície rohov objektu a výstupom je súradnica stredu a polovičné dĺžky obalového telesa (kapitola 3.2.1). Pozície rohov ako vstup boli zvolené kvôli jednoduchému využitiu bloku inverznej transformácie z [1]. Pri vkladaní objektu sa tieto body raz prepočítajú z iných parametrov obsluhu vhodnejších, postup je popísaný v kapitole 4.1.5.

Funkcia vyhľadá minimálne a maximálne hodnoty rohov v osiach X,Y a Z a potom vypočíta podľa vzťahu 4.1 stred obalového telesa.

$$center_{x/y/z} = min_{x/y/z} + \frac{max_{x/y/z} - min_{x/y/z}}{2} \quad (4.1)$$

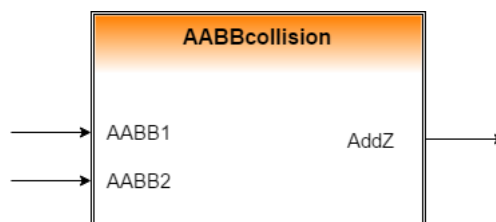
$$halfwidth_{x/y/z} = \frac{max_{x/y/z} - min_{x/y/z}}{2} \quad (4.2)$$

$center_{x/y/z}$ - stred obalového telesa

$halfwidth_{x/y/z}$ - polovičné dĺžky obalového telesa

$min_{x/y/z}, max_{x/y/z}$ - minimálne a maximálne hodnoty rohov v jednotlivých súradniciach

4.1.2 Funkcia pre detekciu kolízie dvoch obalových telies - *AABBCollision*

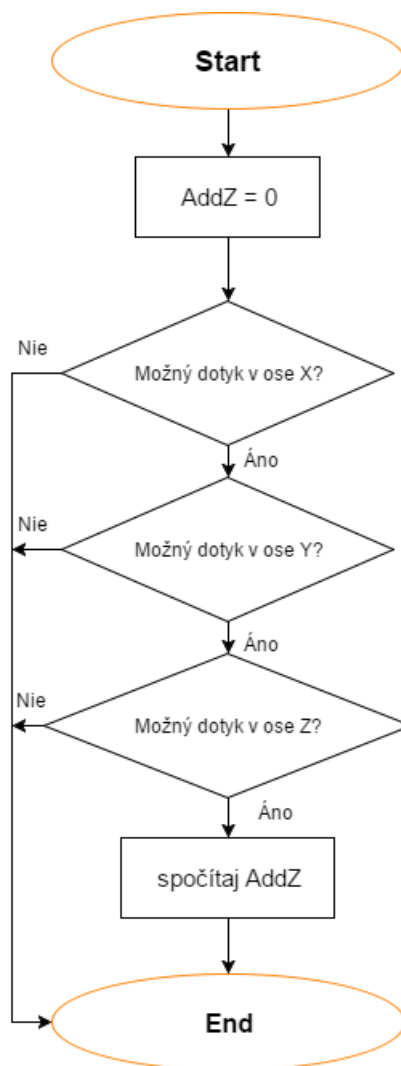


Obr. 4.2: funkcia *AABBCollision*

Tab. 4.2: Popis premenných funkcie *AABBCollision*

Premenná	Popis
AABB1	obalové teleso objektu 1 (platformy)
AABB2	obalové teleso objektu 2
AddZ	hodnota o ktorú je potrebné zvýšiť výšku

Funkcia je priama implementácia metódy detekcie kolízie osovo zarovnaných objektových telies (kapitola 3.2.1). Vstupmi sú dve obalové telesá a výstupom je vypočítané minimálne navýšenie výšky potrebné pre prechod ponad objekt bez kolízie s tým, že platforma je reprezentovaná prvým a prekážka druhým vstupujúcim obalovým telesom. Vzťah pre výpočet hodnoty potrebnej pre zväčšenie aktuálnej výšky je rovnica 4.3 a algoritmus funkcie je znázornený v diagrame na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Vývojový diagram funkcie *AABBCollision*

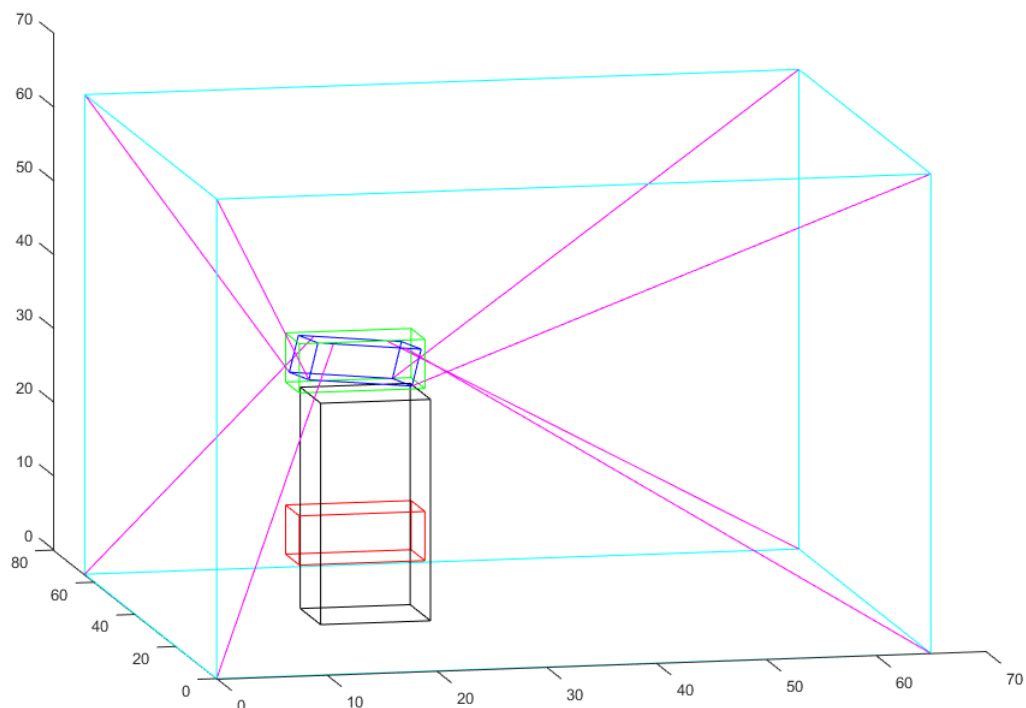
$$AddZ = AAB B2_z + AAB B2_{hwz} + AAB B1_{hwz} - AAB B1_z; \quad (4.3)$$

AddZ - hodnota o ktorú je potrebné navýšiť aktuálnu výšku pre stav bez kolízie

$AAB B1/2_z$ - Z súradnice stredov obalového telesa 1 prípadne 2

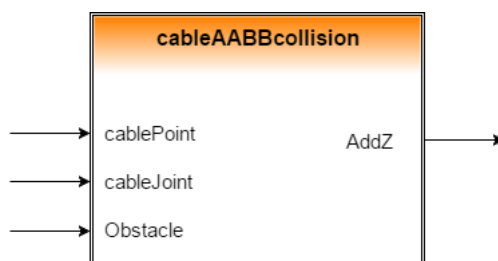
$AAB B1/2_{hwz}$ - polovičné dĺžky pre os Z obalových telies 1 prípadne 2

Na obrázku je simulačne znázornený výstup funkcie pre počítanie kolízie dvoch objektov. Červený objekt reprezentuje pôvodne zamýšľaný stav v detekovanej kolízii. Modrý kváder reprezentuje platformu robota s reálnym natočením po prepočítaní novej výšky, zelený kváder je jeho spočítané obalové teleso pomocou funkcie *AABBCreate*.



Obr. 4.4: Simulačné zobrazenie kontroly a úpravy výšky objektu pomocou funkcie *AABBCollision*

4.1.3 Funkcia pre detekciu kolízie obalového telesa a lana - *CableAABBCollision*

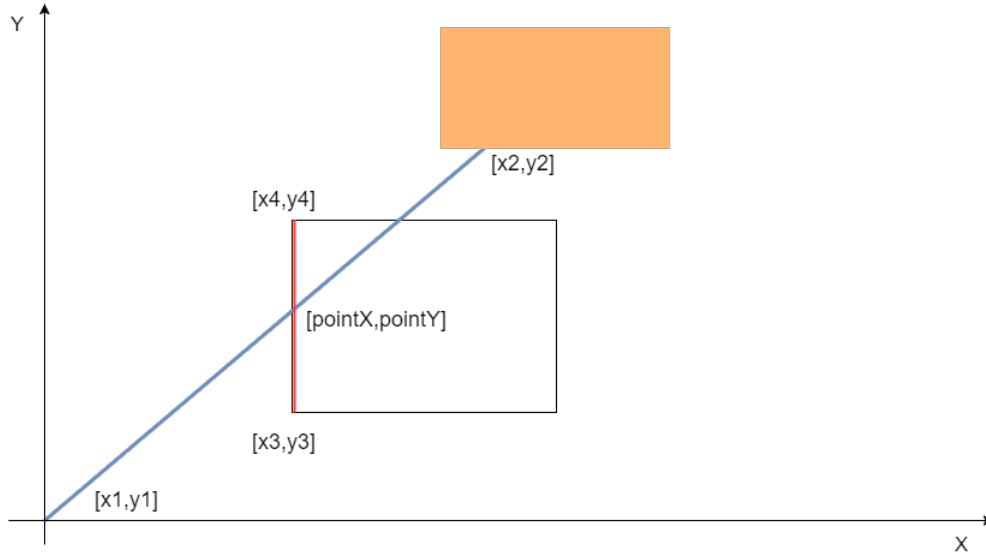


Obr. 4.5: funkcia *cableAABBCollision*

Do funkcie vstupujú súradnice pevného ukotvenia lana, priestorové súradnice lana na platforme a obalové teleso prekážky. V prípade použitia otočných kladiek z kapitoly 2.2.1 by musel byť vstup práve vypočítaný bod dotyčnice na kladke. Výstupom je opäť ako pri kolízii dvoch telies minimálne navýšenie výšky.

Tab. 4.3: Popis premenných funkcie *CableAABBCollision*

Premenná	Popis
cablePoint	súradnice pevného konca lana (bodu na kladke)
cableJoint	súradnice pohyblivého konca lana (na platforme)
Obstacle	obalové teleso prekážky
AddZ	hodnota o ktorú je potrebné zvýšiť výšku



Obr. 4.6: Náčrt spôsobu detekcie kolízie v rovine XY

$$pointX = \frac{(y2 - y1)((x4 - x3)x1 + (x4 - x3)(y3 - y1) - (y4 - y3)x3)}{(y2 - y1)(x4 - x3) - (x2 - x1)(y4 - y3)} \quad (4.4)$$

$$pointY = \frac{pointX(y2 - y1) + y1(x2 - x1) - x1(y2 - y1)}{x2 - x1} \quad (4.5)$$

$$pointZ = \frac{(z2 - z1)pointX - (z2 - z1)x1 + z1(x2 - x1)}{x2 - x1} \quad (4.6)$$

$$AddZ = \frac{ABS(cPoint_x - cJoint_x)(obstacle_z + obstacle_{hwz})}{ABS(pointX - cPoint_x)} cJoint_z \quad (4.7)$$

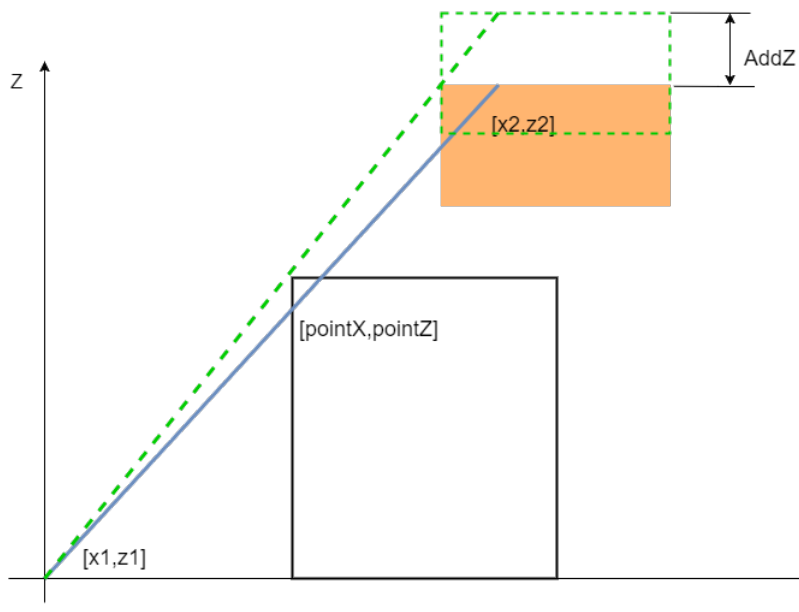
$$(4.8)$$

$pointX/Y/Z$ - súradnice X/Y/Z priesečníku lana a hrany prekážky (obr.4.6 a 4.7)

$AddZ$ - hodnota o ktorú je potrebné navýšiť aktuálnu výšku pre stav bez kolízie

$x1/2/3/4$ - súradnice X bodov 1/2/3/4 naznačené na OBR

$y1/2/3/4$ - súradnice Y bodov 1/2/3/4 naznačené na OBR

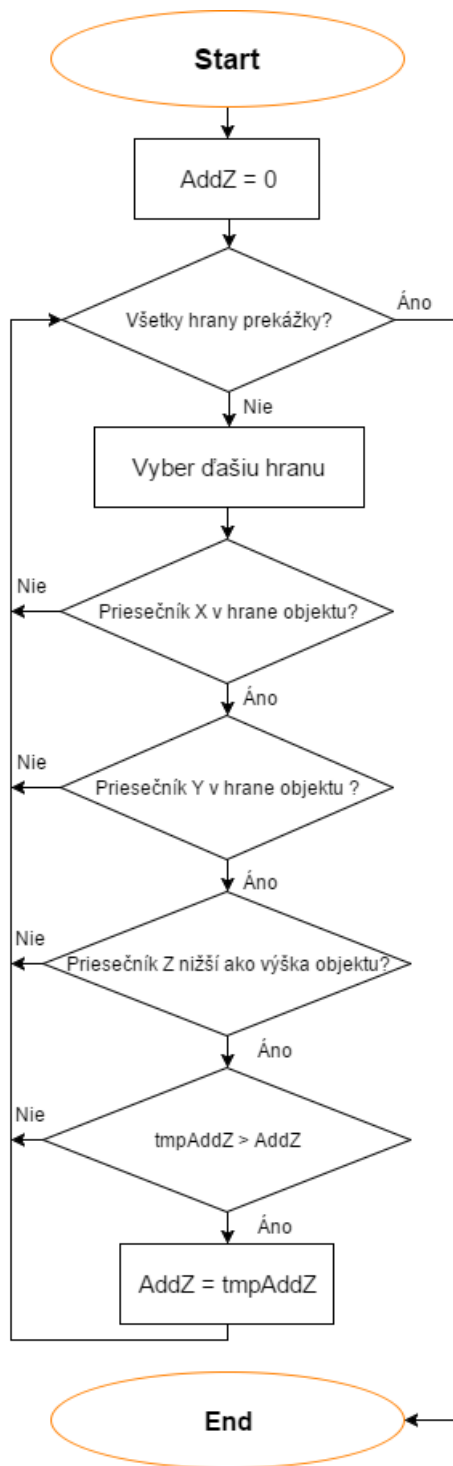


Obr. 4.7: Náčrt spôsobu detekcie kolízie v rovine XZ

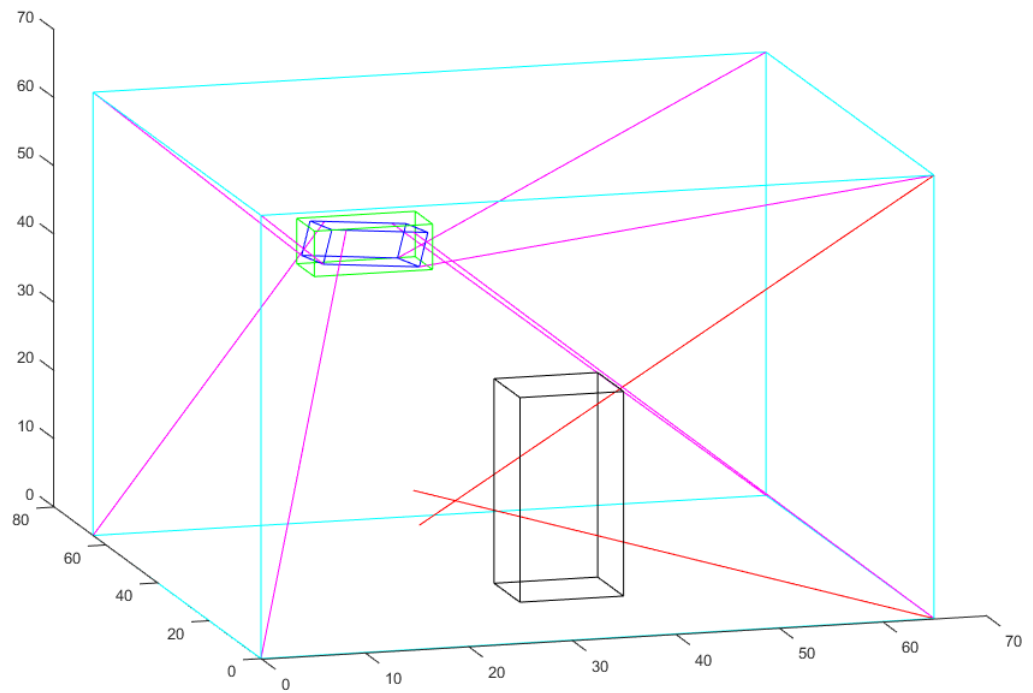
cPoint - súradnice ukotvenia lana - pevné v ráme prípadne bod dotyčnice na kladke

cJoint - súradnice ukotvenia lana na platforme v priestore

obstacle - obalové teleso prekážky

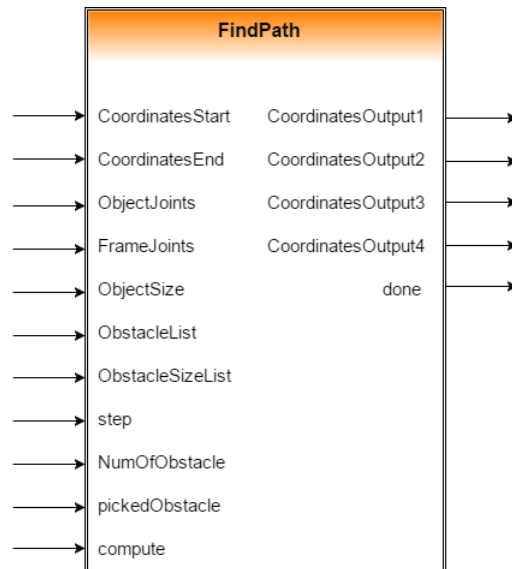


Obr. 4.8: Vývojový diagram funkcie *CableAABBCollision*



Obr. 4.9: Simulačné zobrazenie kontroly a úpravy výšky objektu pomocou funkcie *CableAABBCollision*

4.1.4 Funkčný blok pre nájdenie cesty bez kolízie - *FindPath*



Obr. 4.10: funkčný blok *FindPath*

Funkčný blok je praktické využitie funkcií vytvorených pre detekciu jednotlivých typov kolízií a rovnako aj inverznej transformácie z [1]. V robotovi je využívaná pre ručné ovládanie platformy, pretože pre automatiku kde sú z nejakých dôvodov používané práve definované pohyby by strácalo zmysel meniť trajektóriu platformy. Preto sa počíta len s lineárnym pohybom z bodu A do bodu B.

Najprv sa rozhoduje, či ide aj o smer v rovine XY, alebo objekt len mení výšku. V prípade zmeny výšky samotnej sa kontroluje iba koncová pozícia. Ak mení aj iné osi X alebo Y, podľa smernice priamky tvorenej začiatočného a koncového pohybu sa určí, v ktorom smere sa mení poloha miernejšie. Tento krok je kvôli presnejšiemu rozdelení trasy na kontrolovanie, v krajnom prípade kedy zostáva jedna zo súradníc rovnaká, pri výpočte smernice priamky by dochádzalo k delení nulou a limitne by tak bola smernica nekonečná.

Podľa smeru sa potom po zvolenom kroku kontrolujú kolízie. Kontroluje sa kolízia platformy a objektov v pracovnom poli, lán a objektov a v prípade prenášaného objektu sa kontroluje aj jeho kolízia s ostatnými prekážkami ako aj kolízia s lanami. Po detekcii kolízie sa porovná potrebná zmena výšky a vyberie sa najvyššia, nakoľko je to minimálna zmena v konkrétnom prípade pre prechod bez kolízie (kapitola 4.1.3). Len v prípadoch vzniku kolízie lana a prenášaného objektu by zmena výšky nepomohla a vyhlási sa neriešiteľný stav. Ak sa prenáša objekt a dôjde ku kolízií, po vypočítaní novej výšky je potrebné znovu otestovať kolíziu prenášaného objektu a

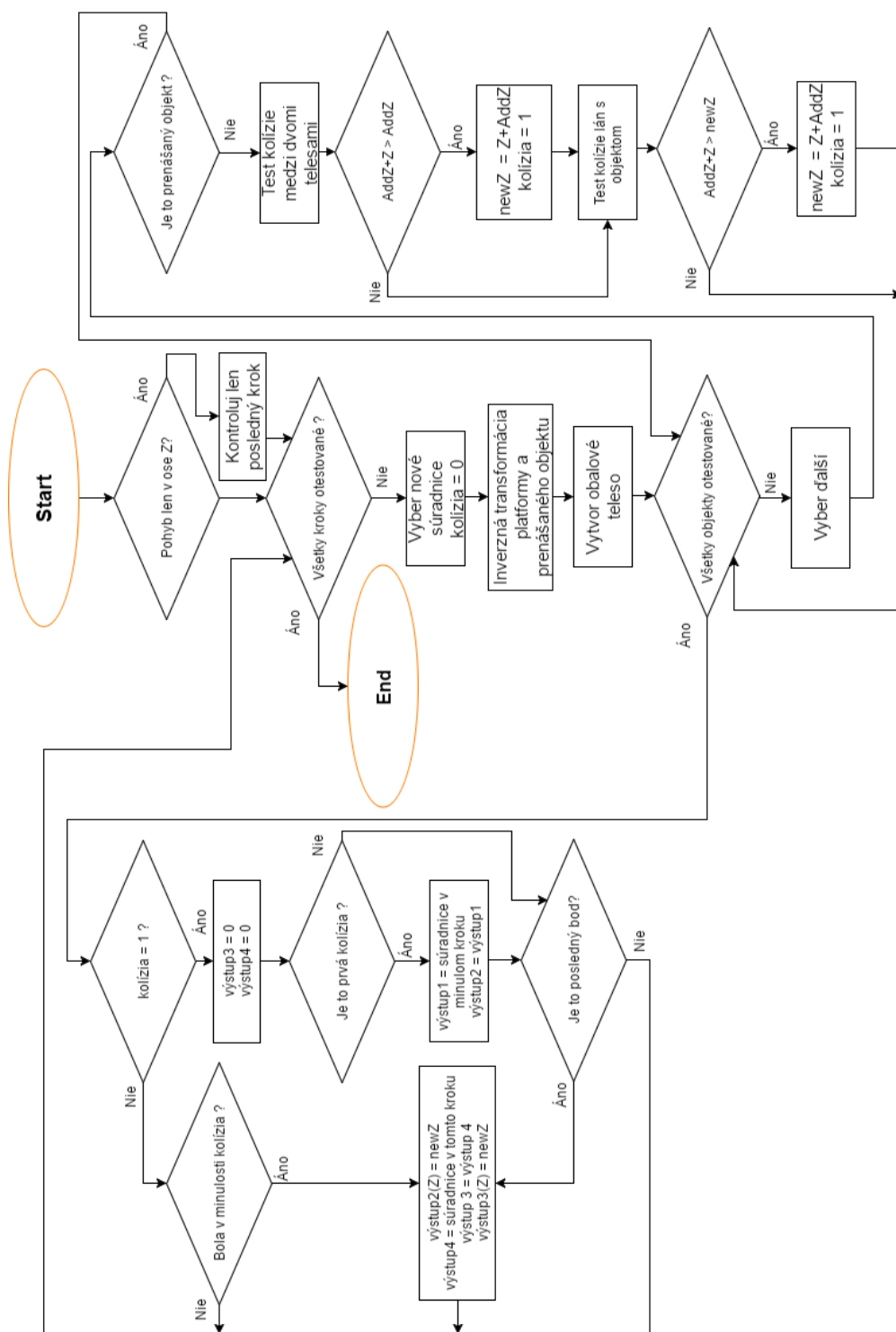
Tab. 4.4: Popis premenných funkcie *FindPath*

Premenná	Popis
CoordinatesStart	súradnice začiatku cesty
CoordinatesEnd	súradnice konca cesty
ObjectJoints	súradnice uchytenia lán na platforme vzhľadom k polohovanému bodu (stred)
FrameJoints	súradnice uchytenia lán na pevných koncoch v priestore
ObjectSize	súradnice rohov platformy vzhľadom k polohovanému bodu
ObstacleList	zoznam obalových telies v priestore
ObstacleSizeList	zoznam súradníc rohov obalových telies vzhľadom k polohovanému bodu
step	krok na ktorý sa rozdelí plánovaná trasa
NumOfObstacle	celkový počet prekážok
PickedObstacle	číslo uchopenej prekážky
compute	príkaz na spustenie výpočtu
CoordinatesOutput1	výstupné súradnice - posledná v ceste pred kolíziou
CoordinatesOutput2	výstupné súradnice - posledná v ceste pred kolíziou s novou výškou
CoordinatesOutput3	súradnica od ktorej sa môže platforma vrátiť na pôvodnú trasu
CoordinatesOutput4	súradnice pre vrátenie sa na pôvodnú trasu s pôvodnou výškou
done	signalizácia ukončenia výpočtu

lán, pretože pri zdvihnutí zovrie lano s platformou ostrejší uhol a teda aj priestor medzi lanami pod platformou sa zmenší. Ak by pri tejto potrebnej výške došlo ku kolízii, opäť je to v danej situácii neriešiteľný stav a musí prísť k zmene trasy objektu. Tento problém by v budúcnosti mohli vyriešiť metódy na plánovanie cesty, kde sa postupne testujú rôzne miesta s rôznym natočením a vyberá sa najvhodnejšia cesta. Momentálne však aj z princípu nie je predpoklad prenášať objekty výrazne väčšie ako je platforma a tak k tomuto stavu nedochádza často.

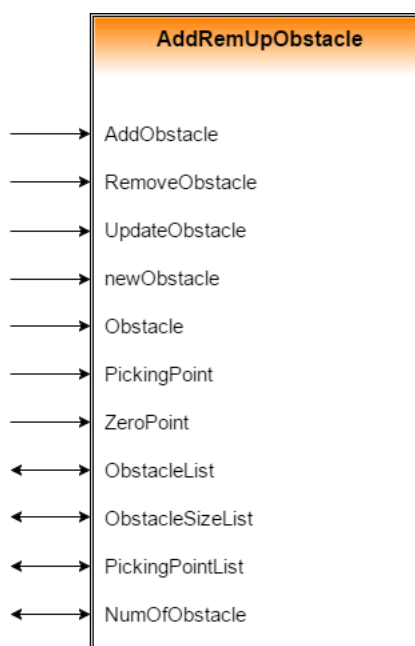
Výstupom z funkcie sú 4 súradnice bodov, ktoré zaistia prechod okolo prekážky bez kolízie. Výstupné body sa určujú postupne. Súradnice prvého bodu a XY súradnice druhého bodu sa určia pri prvej kolízii. Výška druhého výstupného bodu a zvyšné súradnice bodov sa určia v prípade, kedy už nedochádza na zvyšku trasy ku kolíziám. V prípade, že je v kolízii aj posledný bod trasy, nastaví sa posledné dva body rovnako a to s minimálnou výškou bez kolízie. Postup riešenia tohoto stavu v robotovi je ďalej popísaný v kapitole 4.2. Algoritmus funkčného bloku *FindPath* je

na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Vývojový diagram bloku *FindPath*

4.1.5 Funkcia pre správu objektov v pracovnom poli - *Add-RemUpObstacle*



Obr. 4.12: funkcia *AddRemUpObstacle*

Tab. 4.5: Popis premenných funkcie *AddRemUpObstacle*

Premenná	Popis
AddObstacle	príkaz na pridanie novej prekážky
RemoveObstacle	príkaz na vymazanie zvolenej prekážky
UpdateObstacle	príkaz pre aktualizáciu zvolenej prekážky
newObstacle	rozmery novej prekážky
Obstacle	číslo zvolenej prekážky na aktualizáciu alebo vymazanie
PickingPoint	uchopovací bod novej prekážky
ZeroPoint	nulový bod pre zadávanie novej prekážky
ObstacleList	zoznam obalových telies v priestore
ObstacleSizeList	zoznam súradníc rohov obalových telies vzhľadom k polohovanému bodu
PickingPointList	zoznam uchopovacích bodov
NumOfObstacle	celkový počet prekážok

Aby bolo zadávanie prekážok jednoduché aj pre prípadnú obsluhu a najmä pre

predchádzanie nesprávnemu napolohovaniu vo východzej pozícii bol zvolený nasledujúci koncept práce s objektom. Funkcia je pomyselné rozdelená na tri časti : pridávanie nového objektu, odobratie objektu zo zoznamu a aktualizácia pozície objektu. V pamäti sú vytvorené tri zoznamy parametrov týkajúce sa objektu v pracovnom poli. Jeden zoznam je reprezentácia objektu v podobe obalového telesa pre detekciu kolízií. V druhom zozname je uložený uchopovací bod bližšie popísaný v podkapitole 4.1.5. V poslednom zozname sú uložené súradnice rohov objektu v súradnicovom systéme platformy vzhľadom k uchopovaciemu bodu. Užívateľ tak v prípade potreby preniesť konkrétny objekt len vyberie číslo prekážky ktorú chce uchopiť a robot prejde na pozíciu uchopovacieho bodu objektu automaticky.

Pridávanie nového objektu

V pracovnom priestore je určený inicializačný bod pre pridávanie prekážky. Ten si môže užívateľ ľubovoľne zadať z displeja. V rovine XY sú to súradnice ľavého dolného rohu prekážky v priestore. Užívateľ vloží objekt na túto pozíciu a zadá maximálnu dĺžku, šírku a výšku objektu. Následne napolohuje platformu do pozície, z ktorej chce objekt uchopiť. Jediná podmienka je, že pri tomto procese musia byť súradnice osí alfa, beta a gama v nulovej pozícii. Je to z toho dôvodu, aby sa dali jednoducho dopočítať body potrebné pre výpočet inverznej transformácie.[1] Tlačítkom vo vizualizácii sa spustí táto časť funkcie. Súradnice uchopovacieho bodu sú aktuálne súradnice platformy. Z rozmerov zadaných užívateľom sa podľa vzťahov 4.9 a 4.10 vypočítajú súradnice rohov vzhľadom k uchopovaciemu bodu. Uchopovací bod a súradnice rohov sa vložia ako vstup do inverznej transformácie a použitím funkcie *AABBcreate* sa vytvorí obalové teleso okolo prekážky. Obalové teleso, uchopovací bod ako aj súradnice rohov sa vložia do príslušných zoznamov za posledný objekt a navýši sa celkové číslo počtu objektov.

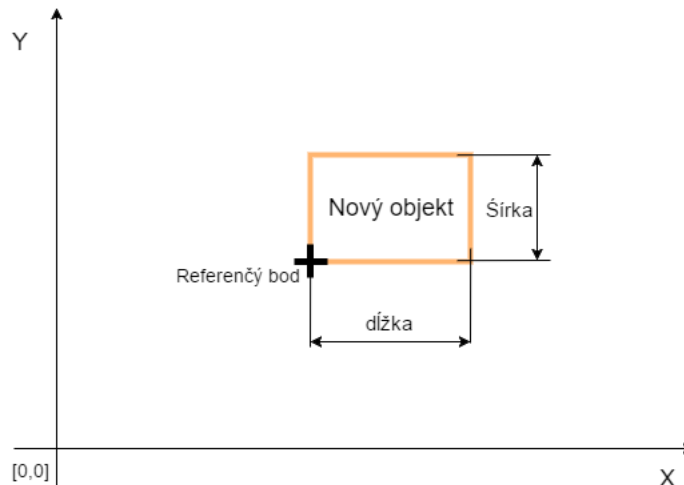
$$ObstacleSize_{1,3,5} = ZeroPoint_{x,y,z} - PickingPoint_{x,y,z} \quad (4.9)$$

$$ObstacleSize_{2,4,6} = ZeroPoint_{x,y,z} - PickingPoint_{x,y,z} + newObstacle_{l,w,h} \quad (4.10)$$

ObstacleSize_{1,2,3,4,5,6} - hodnota vzdialeností rohov od stredu platformy(6 hodnôt, pretože v každej z troch osí je vzdialenosť na jednu a na druhú stranu)

ZeroPoint - súradnice referenčného bodu

newObstacle_{l,w,h} - hodnoty zadávaného objektu - l -dĺžka, w - šírka, h - výška



Obr. 4.13: Spôsob pridávania nového objektu

Odobratie objektu

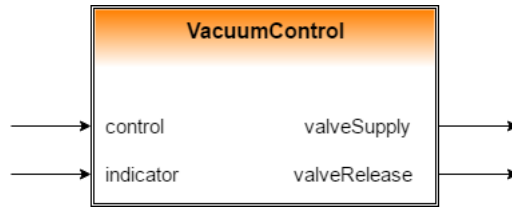
V tejto časti funkcie sa len prepíšu zoznamy prekážok tak, že na miesto objektu ktorý je potrebné odobrať sa vložia hodnoty poslednej prekážky v zozname a hodnota počtu objektov sa zníži. Iné prípady sú len vtedy, keď je mazaný objekt posledný v zozname a teda nie je potrebné jeho miesto zaplňať, alebo ak v zozname už iný objekt nie je, objekt sa vymaže a počet prekážok sa vynuluje.

Aktualizácia pozície objektu

Pre prípad prenesenia objektu do novej pozície je potrebné aktualizovať jeho obalové teleso a uchopovací bod. Do uchopovacieho bodu sa vložia aktuálne súradnice platformy v momente uvolnenia objektu. Pre tento prípad je dôležitý zoznam rohov vzhľadom k uchopovaciemu bodu, lebo platforma už môže mať rôzne súradnice osí alfa beta a gama. Na detekciu kolízií sa používa metóda osovo zarovnaných obalových telies a preto ak by sa vypočítalo nové obalové teleso len z toho predchádzajúceho, postupne by dochádzalo k jeho zväčšovaniu. Je nutné vypočítať inverznú transformáciu a prepočítať pozíciu rohov prekážky a z nich potom určiť nové obalové teleso funkciou *AABBcreate*. Takto je zaručená minimálna veľkosť obalového telesa pre detekciu kolízie. Nové hodnoty obalového telesa sa po výpočte zapíšu do zoznamu.

4.1.6 Funkcia pre ovládanie ejektora - *VacuumControl*

Pre vytvorenie vakuu je potrebné priviesť na jeden zo vstupov ejektora, resp. snímača ktorý ejektor zároveň riadi logickú 1. Počas doby ktorú potrebujeme mať objekt



Obr. 4.14: funkcia *VacuumControl*

Tab. 4.6: Popis premenných funkcie *VacuumControl*

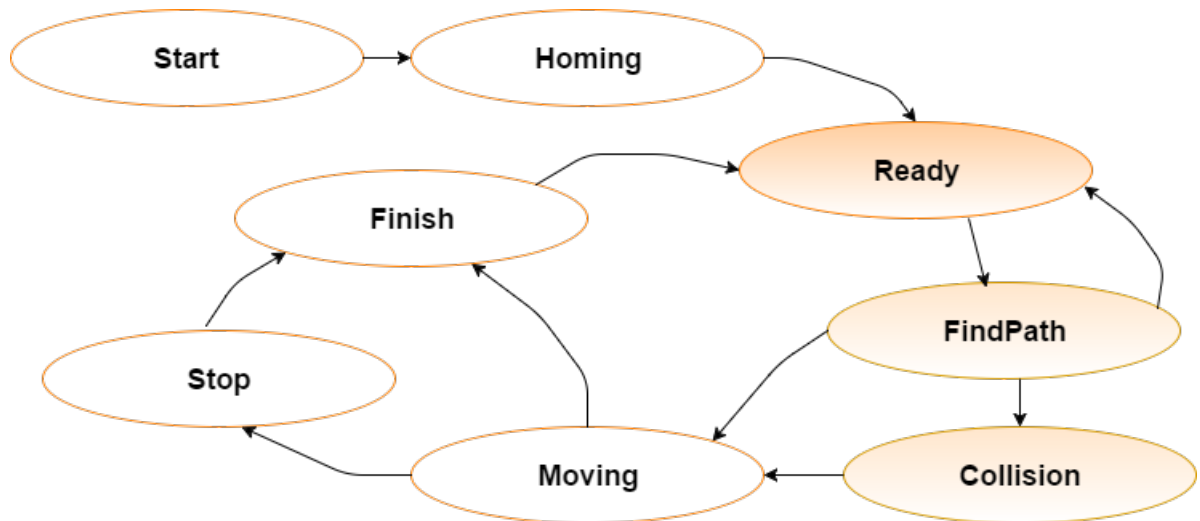
Premenná	Popis
control	príkaz na vytvorenie vákua
indicator	signalizácia vytvoreného vákua
valveSupply	výstup pre vytvorenie vákua
valveRelease	výstup pre aktiváciu odľuku

prisatý musí byť stále tento vstup aktívny. Inak by hrozilo nekontrolované upustenie objektu. Pri potrebe pustiť predmet však nestačí priviesť na tento vstup logickú 0. Vo väčšine prípadov zostane predmet stále prisatý. Preto sa používa aj druhý vstup, ktorým sa aktivuje odľuk a objekt sa uvoľní. Na monitorovanie vákua slúži digitálny výstup zo snímača. Aktívnou úrovňou signalizuje vytvorenie vákua.

Aby bolo možné ovládať ejektor jednou premennou, vo funkcii je naprogramovaná vyššie popísaná rutina. Zároveň je vytvorená aj pre použitie ejektora v automatickom režime. Pri behu G-kódu je potrebné použiť pri konkrétnych pozíciách prísavky. Na tento účel sú využívané M-funkcie. Ide o funkcie, ktoré prerušia beh G-kódu a začnú vykonávať svoj predpis. M-funkcie môžu byť synchronne a asynchronne. Synchronne M-funkcie sa vykonávajú paralelne s G-kódom, asynchronne G-kód zastavia až pokiaľ nie sú ukončené. Boli preto nadefinované dve M-funkcie - jedna na prisatie a druhá na uvoľnenie objektu. M-funkcie využívajú práve funkciu *VacuumControl*.

4.2 Úprava hlavného programu

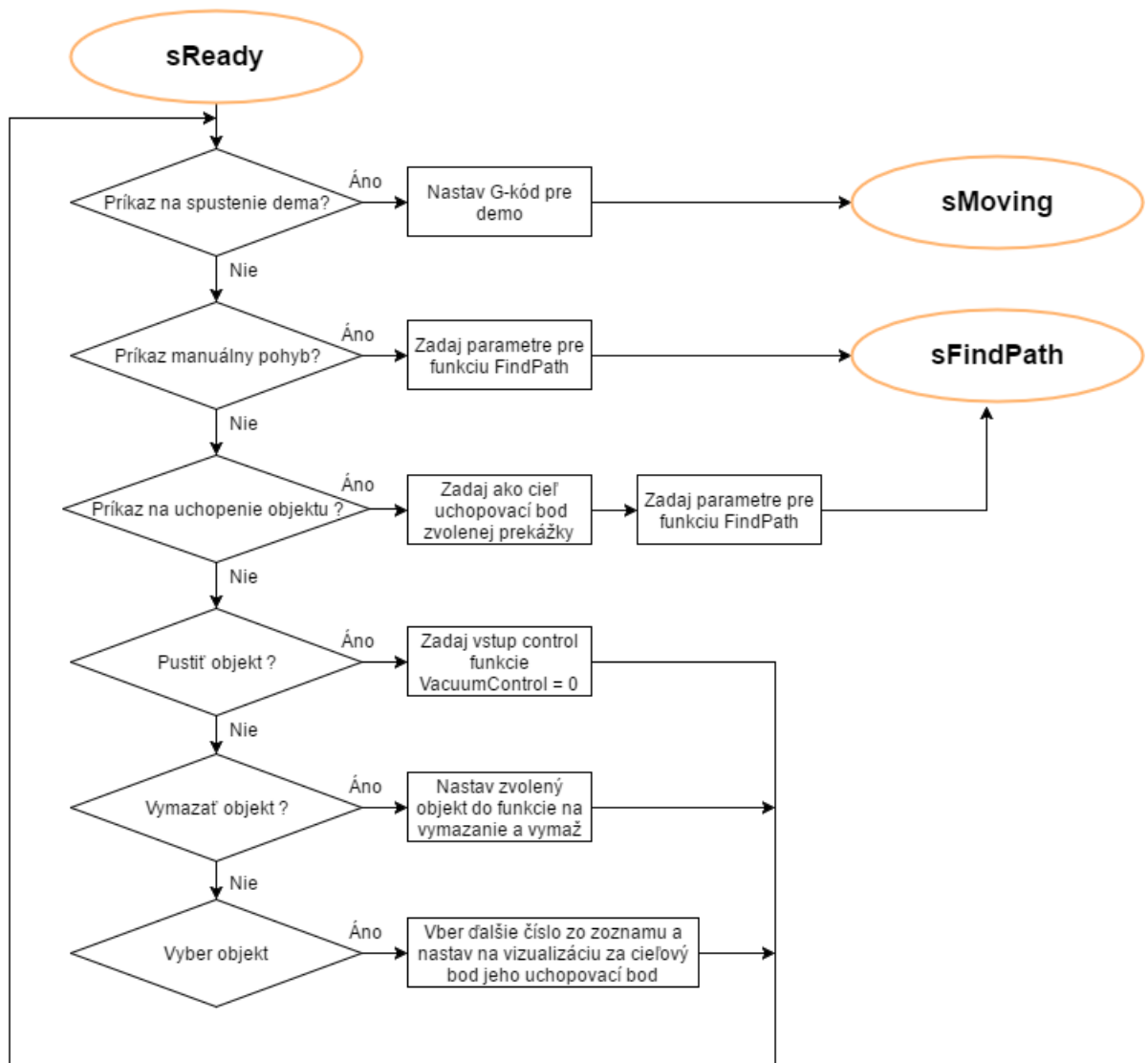
Hlavný program tvorí stavový automat [1]. Pre účel detekcie kolízií boli pridané alebo upravené len určité kroky. Zjednodušená funkcia automatu bez alarmov, zapínania a vypínania je znázornená na obrázku 4.15. Zmenený bol len krok *sReady* a boli pridané kroky *sFindPath* a *sCollision* popísané nižšie.



Obr. 4.15: Zjednodušený diagram stavového automatu robota

4.2.1 Čakanie na nový pohyb - *sReady*

Tento krok bol aj v pôvodnom stavovom automate, bolo potrebné ale upraviť prípad manuálneho zadania pohybu. Zadajú sa vstupy a výstupy pre funkčný blok hľadania cesty a spustí sa jej výpočet. Po jeho ukončení sa prechádza do kroku *sFindPath*. Len v tomto kroku je zároveň možné pridávať, odoberať a uchopovať objekty zo zoznamu. Zamedzí sa tak možným zmenám v pohybe platformy, kedy už robot počíta s vopred naplánovanou trasou. Celkovo sú tri možnosti manipulácie s objektom. Z automatického režimu, ktorý sa až na M-funkcie nijako nezmení. V prípade jeho spustenia sa spustí demo program a beží až do zastavenia. Z manuálneho režimu sa ovládajú prísavky priamo. V prípade uchopenia objektu ale robot nepočíta s prenášaním uchopeného objektu, pretože nie je zaručené jeho uchytenie v uchopovacom bode. Tento režim je len pre úplnú manuálnu ovládateľnosť prvkov. Na samotnú manipuláciu s objektom potom slúži samostatný režim, kde platforma prisaje vždy zvolený objekt. Bez ohľadu v akej je robot pozícii, pokiaľ má voľné prísavky a zvolí sa prisatie, platforma vždy prejde nad tento objekt a prisaje sa.

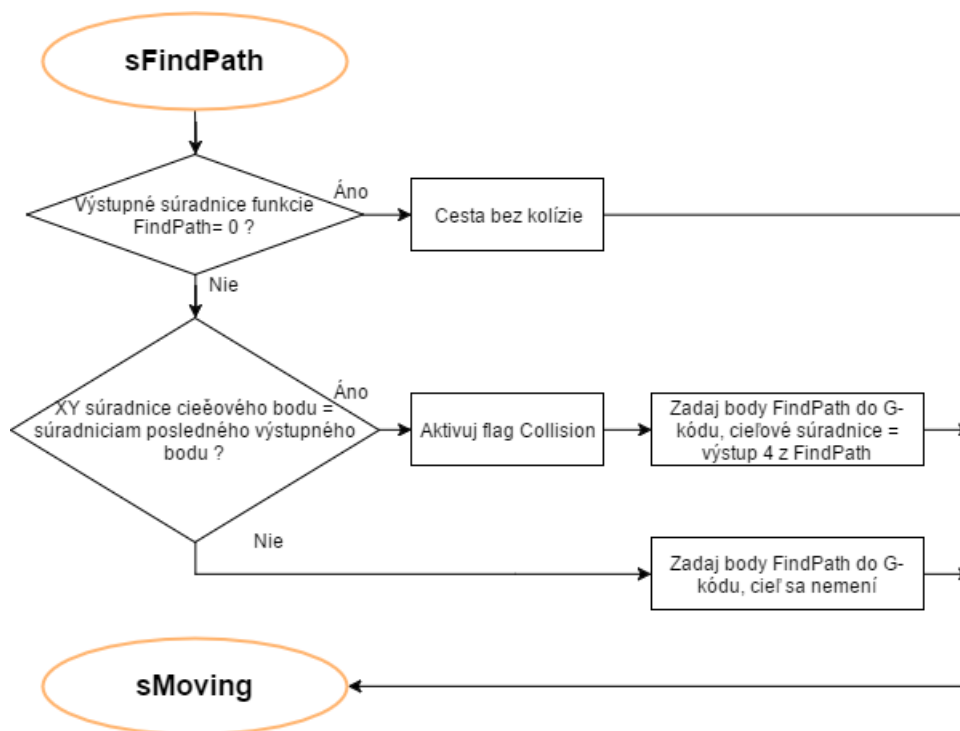


Obr. 4.16: Vývojový diagram vykonávaného programu v stave *sReady*

4.2.2 Riešenie nájdenej cesty - *sFindPath*

V kroku sa vyhodnocuje výsledok funkcie *FindPath*. Môže nastať viacero možností. Ak je cesta bez kolízie, výstupy z funkcie budú nulové. Do G kódu sa teda zapíšu len hodnoty cieľovej pozície. Ak došlo ku kolízii ale posledný výstupný bod sa líši od cieľovej pozície, do G kódu sa postupne zadajú výstupy z funkcie *FindPath* a nakoniec cieľový bod. Ak je hodnota *Z* súradnice posledného bodu rovná 9999, znamená to, že cesta nebola nájdená. Prípad nastáva najmä pri kolízii prisátého objektu s lanami, kedy by jednoduché zvýšenie výšky situáciu ešte zhoršilo, prípadne pokiaľ je nájdená cesta mimo rozsah pracovného poľa robota. Poslednou možnosťou je rovnaká hodnota *XY* súradníc posledného výstupného bodu funkcie *FindPath* a cieľového bodu.

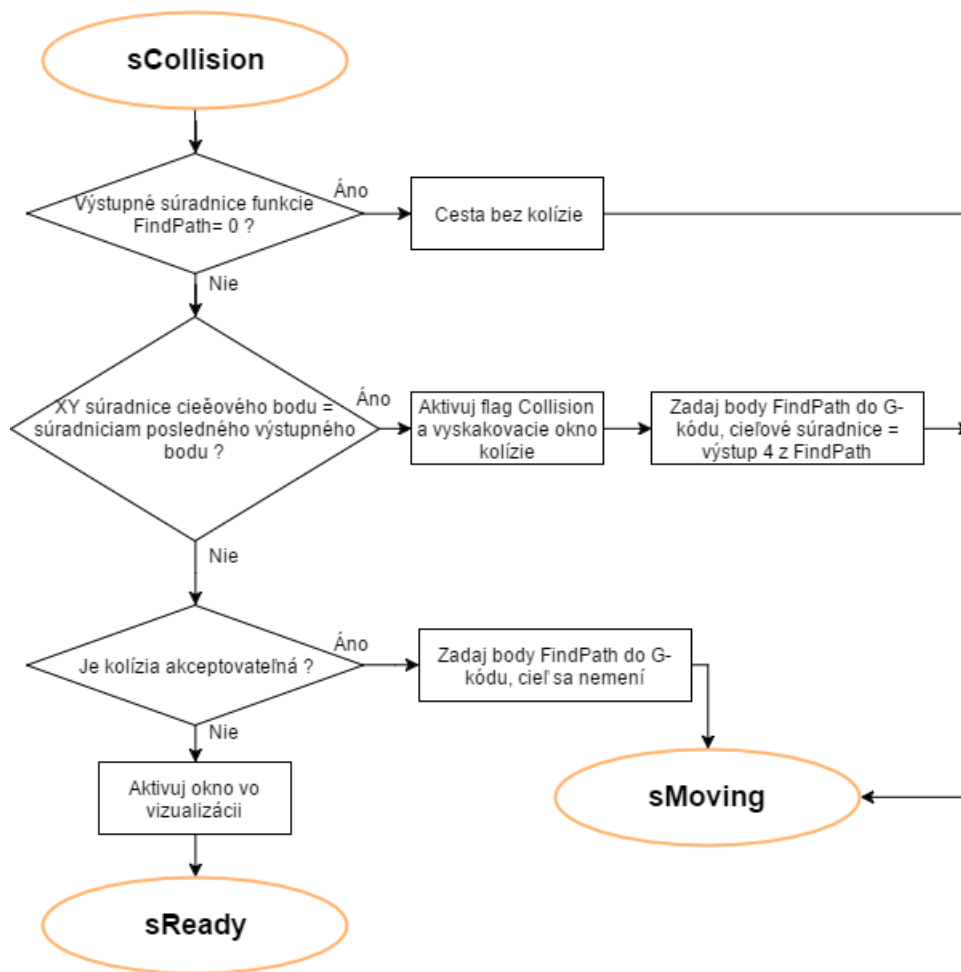
V tomto prípade ide o kolíziu cieľového bodu. Do G kódu sa zapíše ako cieľový bod posledný výstupný bod z funkcie *FindPath* a platforma prejde do cieľového bodu na najnižšiu možnú výšku. Aktivuje sa vnútorný bit kolízie a prechádza sa do stavu *sCollision*.



Obr. 4.17: Vývojový diagram vykonávaného programu v stave *sFindPath*

4.2.3 Vyriešenie kolízneho stavu - *sCollision*

Aktivovaný bit *collision* zobrazí na displeji pop-up okno, v ktorom je užívateľ vyzvaný aby učinil rozhodnutie. Pop-up okno je zobrazené na obrázku 4.18. Môže akceptovať túto pozíciu ako dosiahnutie cieľového bodu. Program potom prejde opäť do stavu *sReady* a cyklus pokračuje. Užívateľ ale má možnosť prevziať na seba zodpovednosť a prejsť napriek kolízii do pôvodnej cieľovej pozície. Týmto potvrdením sa do G kódu zapíše cieľová pozícia a platforma klesá do cieľovej pozície. Tento krok je v programe z dôvodu možnej nepresnosti metódy obalových telies. Reálne môže užívateľ vedieť, že lano alebo platforma nenarazí. Je ale povinný toto vedomie potvrdiť. Po dokončení pohybu sa potvrdením dostane program opäť do kroku *sReady*.



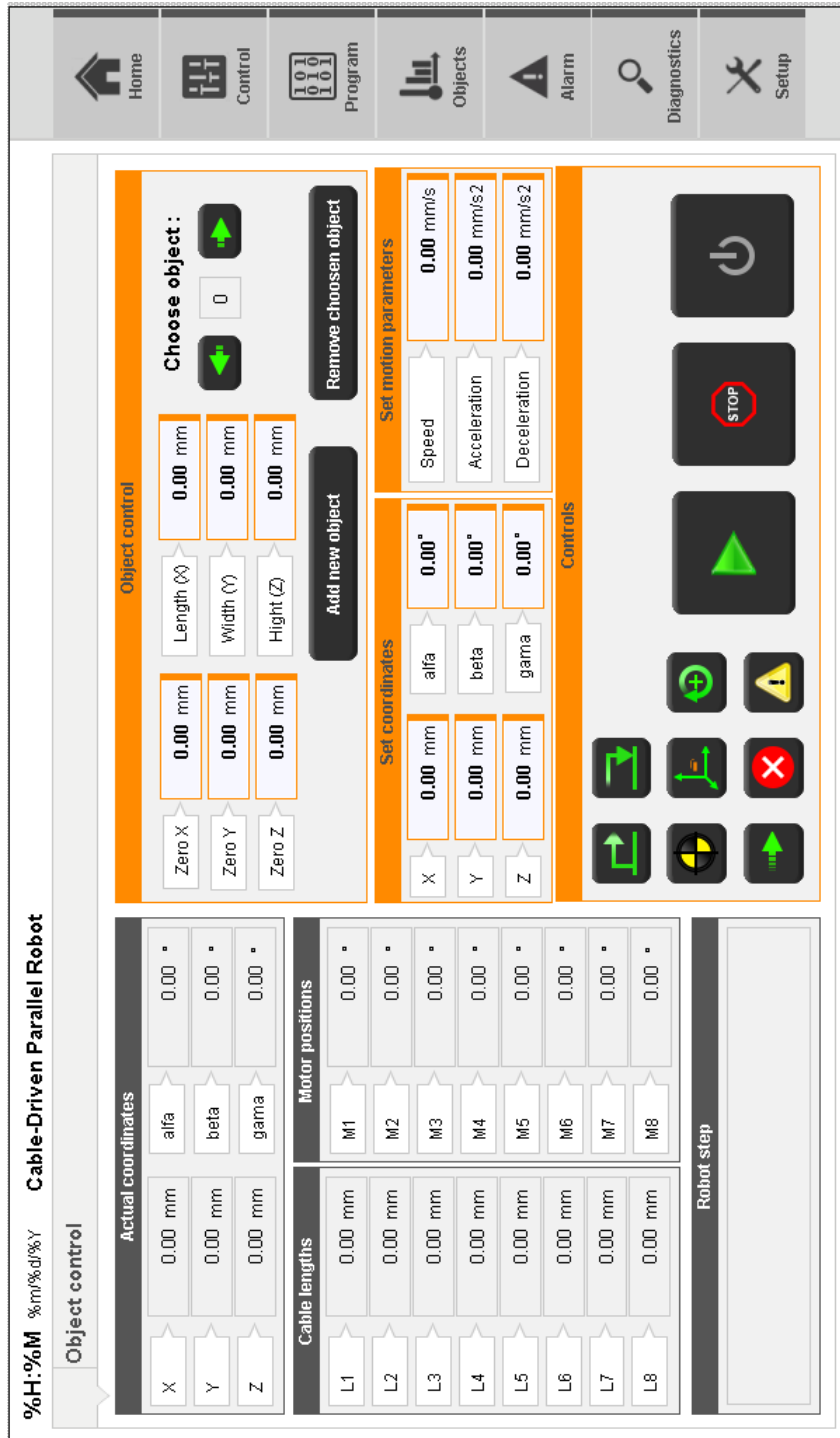
Obr. 4.18: Vývojový diagram vykonávaného programu v stave *sCollision*

4.3 Popis vizualizácie

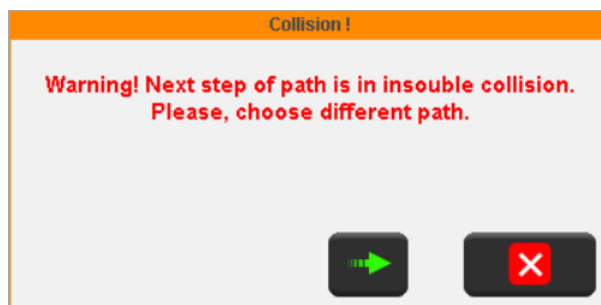
Lanový robot používaný v práci slúži ako výstavný exponát. Z tohoto dôvodu bol celý koncept stavaný na čo najjednoduchšej ovládateľnosti. Pri výstavách sa odhlásil užívateľ a robot predvádzal demo program. Prípadní záujemci mohli prerušiť jeho pohyb a následne ho znovu spustiť, ale je snaha, aby boli zásahy ľudí minimálne. Detekciu kolízie ale nie je možné predviesť demo programom, pretože aj keby tam fungovala, efekt by sa stratil. Preto ak by chcela firma poukázať na schopnosť robota pohybovať sa bez kolízií, musí niekto robota riadiť ručne. V ideálnom prípade si zákazník sám začne robota pohybovať a bude sa snažiť ho do týchto stavov dostať. Či už si funkčnosť bude overovať zákazník sám, alebo mu ju bude predvážať niekto z firmy, malo by byť ovládanie čo najjednoduchšie.

Obrazovka je na obrázku 4.19. Oproti pôvodnej obrazovke ručného režimu sa zmenila len minimálne. Tlačidlá  a  slúžia na uchopenie alebo uvoľnenie

objektu. Zvyšné tlačidlá v sekcii *Controls* sa nezmenili. Pribudla sekcia *Object control*. Slúži na správu objektu ako je jeho pridanie, zmazanie a výber iného objektu zo zoznamu.



Obr. 4.19: Obrazovka pre ovládanie manipulátora



Obr. 4.20: Okno signalizujúce kolíziu v koncovom bode alebo neriešiteľnú kolíziu

Na obrázku 4.20 je zobrazené pop-up okno, ktoré sa zobrazí v prípade, že posledný bod trasy je v poruche. Ako bolo spomínané v 4.2.3, môže nastať jav, kedy je uchopovací bod v kolíznom stave z pohľadu metódy obalových telies. Užívateľ tak môže potvrdiť takýto stav zeleným tlačidlom a robot prejde do tohoto bodu. Okno sa zobrazí aj v prípade neriešiteľnej kolízie popísanej v 4.1.3. V tomto prípade ale okno slúži len ako informácia pre užívateľa, že robot do tohoto miesta bez kolízie nevie prejsť. Či už zatvorením okna alebo potvrdením kolízie sa vynuluje flag *collision*, čím sa posunie program do stavu *sReady*.

5 ZÁVER

Aby bolo možné použiť robota ako manipulátor boli navrhnuté mechanické úpravy popísané v kapitole 2. Ako akčný člen manipulátoru boli zvolené prísavky. Dá sa nimi prenášať objekt s hmotnosťou až 1,5 kg, pri vysokých rýchlostiach ale robot takúto záťaž nezvláda. Po elektrickej stránke dochádza k preťaženiu pri brzdení a z mechanickej stránky sa pri vysokých rýchlostiach prejavuje zotrvačnosť a aj pri ľahšom objekte dochádza k rozkmitaniu platformy. Pri prezentácii sa preto používajú plné rýchlosti len keď robot neprenáša žiadny objekt. Maximálny čas vytvorenia vákua je 130 ms čo je dostačujúce.

Pre možnosť použitia kovových lán by bolo potrebné z mechanickej strany zmeniť aj celý spôsob navíjania lana na motory na navijak s väčším polomerom, aby nedochádzalo k nadmernému ohýbaniu lana. Pre použitie kovových lán by ale hlavne bolo potrebné použiť vyššie momenty v motoroch, čo pri vysokých rýchlostiach opäť nezvládajú zdroje. Rozhodlo sa teda, že na tomto robotovi sa zatiaľ ponechajú súčasné prvky a silónové laná, a pri stavbe ďalšieho robota sa budú aplikovať ďalšie vylepšenia. Tiež bol vyvinutý spôsob výpočtu potrebnej dĺžky lana, ktorý zahŕňa aj polomer otočnej kladky. Boli ale navrhnuté otočné kladky aj pre dlhšiu životnosť použitých silónových lán a aj ako testovacie kladky pred vytváraním robota s kovovými lanami ktorý ich bude potrebovať. Výroba kladiek sa však oneskorila a robot bol posledný mesiac žiadaný exponát na výstavách. Preto kladky ani úprava prepočtu dĺžky lana tak neboli na reálnom robotovi v čase odovzdania práce overené.

Jadro práce spočíva vo vyriešení problému detekcie kolízií. Bol použitý jednoduchý algoritmus osovo zarovnaných obalových telies. Bola vytvorená funkcia ktorá počíta obalové teleso na základe parametrov definujúcich rozmery a polohu platformy v priestore. Objekty v poli sú tiež popísané parametrami obalových telies a výstupom funkcie pre detekciu kolízie platformy s objektom je zároveň hodnota potrebnej zmeny výšky pre stav bez kolízie. Bola vyvinutá funkcia pre detekciu kolízie objektu popísaným obalovým telesom a lana ktorého reprezentujú jeho dva pevné body. Rovnako ako pri detekcii kolízie platformy aj, v tomto prípade má funkcia výstupnú hodnotu potrebnú zmenu výšky. Funkcie tak tvoria základ detekcie kolízie. Následne boli funkcie zapuzdrené do bloku *FindPath*, ktorý pri zadaní počiatočného a koncového bodu skontroluje plánovanú trasu a v prípade kolíznych stavov sa ju snaží vyriešiť pomocou zdvihnutia platformy do postačujúcej pre prechod bez kolízie. Výstupom tejto funkcie sú práve 4 body, ktorými navedie platformu na bezkolíznu trasu. V prípade kolízie ktorá takýmto spôsobom vyriešiteľná nie je, vyzve užívateľa prostredníctvom vizualizácie pre zmenu trasy.

Jedným z dôvodov pre výber jednoduchej metódy detekcie kolízie je jej jednoduchý popis objektov. Predpoklad je, že užívateľ musí zadať parametre objektu.

Vďaka osovo zarovnaným obalovým telesám tak stačí aby zadal referenčný bod a dĺžku, šírku a výšku objektu. Objekty je ale potrebné prenášať a preto pri zadávaní nového objektu musí zároveň napoložovať platformu do bodu, v ktorom bude chcieť objekt uchopiť. Odmenou za to je jednoduchá následná manipulácia. Ak potom v budúcnosti bude chcieť objekt vziať, len vyberie číslo objektu a robot tento objekt uchopí. Vďaka tomuto riešeniu má užívateľ jednoduchú manipuláciu a zároveň robot vie všetky informácie vďaka ktorým dokáže predchádzať kolíziám, čím bolo splnené zadanie diplomovej práce.

Funkciu *FindPath* je možné použiť aj mimo jej terajší účel. Pokiaľ by programátor potreboval naučiť robota určité polohy v blízkosti prekážok, môže funkciu použiť aby si zistil tie body, ktoré by ho z hľadiska programovanej úlohy reálne nezaujímali ale musel by ich (prípadne iné ktoré zabezpečia chod bez kolízie) hľadať.

Takto navrhnutý manipulátor je síce funkčný, v budúcnosti by ale určite pomohlo použiť sofistikovanejšiu metódu na hľadanie trasy. V tomto prípade šlo o overenie funkčnosti blokov detekcie kolízie, ale ak sa objekt nachádza relatívne blízko pevného konca lana, platforma musí enormne zmeniť výšku. Ak by ale išla najprv nad kolízny objekt, potrebná výška by mohla byť výrazne nižšia. Problém je to ale zložitejší pretože lán je 8, dolné laná ktoré začne obmedzujú pracovný priestor sú 4. Pri viacerých objektoch v poli by bolo potom potrebné nájsť čo najvhodnejšiu trasu s použitím vytvorených blokov detekcie kolízie.

LITERATÚRA

- [1] RAJNOHA, A. *Polohování objektu ve 3D prostoru pomocí paralelního lanového robota*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 104 s.
- [2] GRULICH, J. *Detekce kolize objektů v 3D prostoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68 s.
- [3] TANG, Xiaoqiang. *An Overview of the Development for Cable-Driven Parallel Manipulator*. Advances in Mechanical Engineering [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2014, 2014 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1155/2014/823028. ISSN 1687-8132.
- [4] ALIKHANI, A, S BEHZADIPOUR, A ALASTY a SAS VANINI. *Design of a large-scale cable-driven robot with translational motion*. Robotics And Computer-Integrated Manufacturing [online]. PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE, 1104, 27(2), 357-366 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.07.019. ISSN 0736-5845.
- [5] *Vers la manipulation précise de grandes pièces dans de très grands espaces de travail*. TECNALIA [online]. Valérie AUFRAY [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/cable_tecnalia_cnrs.pdf
- [6] SERIANI, S., P. GALLINA a A. WEDLER. *A modular cable robot for inspection and light manipulation on celestial bodies*. Acta Astronautica [online]. Elsevier, 2016, 123, 145-153 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.020. ISSN 0094-5765.
- [7] BACZYNSKI, Janusz a Michal BACZYNSKI. *Simple cable-driven manipulator system as laboratory assistant*. [online]. China, 2010 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5552063/>
- [8] HUI LI a RUI YAO. *Optimal Orientation Planning and Control Deviation Estimation on FAST Cable-Driven Parallel Robot*. Advances in Mechanical Engineering [online]. 2014, 2014 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1155/2014/716097. ISSN 1687-8132.
- [9] Xiaoqiang Tang, Zhufeng Shao. *Trajectory generation and tracking control of a multi-level hybrid support manipulator in FAST*. Mechatronics, Volume 23, Issue 8, December 2013, Pages 1113-1122, ISSN 0957-4158, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.09.002>.

- [10] ZHANG, Nan a Weiwei SHANG. *Dynamic trajectory planning of a 3-DOF under-constrained cable-driven parallel robot*. Mechanism and Machine Theory [online]. Elsevier, 1604, 98, 21-35 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.11.007. ISSN 0094-114X.
- [11] LAHOUAR, Samir, Erika OTTAVIANO, Said ZEGHOUL, Lotfi ROMDHANE a Marco CECCARELLI. *Collision free path-planning for cable-driven parallel robots*. Robotics and Autonomous Systems [online]. Elsevier B.V, 2009, 57(11), 1083-1093 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.robot.2009.07.006. ISSN 0921-8890.
- [12] JOSE, Kelin a Dilip Kumar PRATIHAR. *Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods*. Robotics and Autonomous Systems [online]. Elsevier B.V, 1606, 80, 34-42 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.robot.2016.02.003. ISSN 0921-8890.
- [13] ISMAIL, Mourad, Samir LAHOUAR a Lotfi ROMDHANE. *Collision-free and dynamically feasible trajectory of a hybrid cable-serial robot with two passive links*. Robotics and Autonomous Systems [online]. Elsevier B.V, 1606, 80, 24-33 [cit. 2017-01-03]. DOI: 10.1016/j.robot.2016.03.001. ISSN 0921-8890.
- [14] *How do you size a vacuum cup? Pneumatictips [online]*. KEN KORANE [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.pneumatictips.com/size-vacuum-cup/>

ZOZNAM PRÍLOH

A	Pneumatická schéma prísavky	59
B	Katalógový list ejektoru	60
C	Katalógový list hadice	61
D	Katalógový list kompresoru	62
E	Katalógový list rolny - typ 22C	63
F	Výkres - otočná kladka	64
G	Výkres - Otočný držiak kladky	65
H	Výkres - Pevný držiak otočnej kladky	66
I	Výkres - Držiak pevnej kladky	67
J	Výkres - Držiak pevnej kladky 2	68
K	Výkres - Čap kladky	69
L	Výkres - Čap v otočnom držiaku	70
M	Priložené CD	71

A PNEUMATICKÁ SCHÉMA PRÍSAVKY

1

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

2

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

3

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

4

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

5

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

6

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

7

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

8

ZPE-T06-03AS
ZPE-T06-03AS

A

B

C

D

E

F

1

2

3

4

5

6

7

8

Sestava úprav. stlačeného vzduchu

1: KQ2106-03AS
2: AC90D-F03M-V1-A
3: KQ2106-03AS
4: ZK2A1KSRW-06-B
5: ZK2-LW30-A
6: TCU0604B-1
7: KQ2106-00A

Sestava dířavek

8: ZP3E-32UMN
9: ZP3EA-TAL14
10: ZP3EA-H1A
11: ZP3EA-A10
12: ZP3E-A10
13: ZP3E-32UMN
14: ZP3EA-TAL14
15: ZP3EA-SW10
16: ZP3EA-H1A
17: ZP3EA-P1
18: ZP3EA-A10

Sestava dířavek

1: KQ2106-03AS
2: AC90D-F03M-V1-A
3: KQ2106-03AS
4: ZK2A1KSRW-06-B
5: ZK2-LW30-A
6: TCU0604B-1
7: KQ2106-00A

A

B

C

D

6

E

8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18

A

B

C

D

E

F

B KATALÓGOVÝ LIST EJEKTORU

Vacuum Unit **Series ZK2**

Specifications

General Specifications

Operating temperature range		-5 to 50 °C (with no condensation)
Fluid		Air
Vibration resistance <small>Note 1)</small>	30 m/s ²	Without pressure sensor/switch for vacuum With pressure sensor
	20 m/s ²	With switch for vacuum
Impact resistance <small>Note 2)</small>	150 m/s ²	Without pressure sensor/switch for vacuum With pressure sensor
	100 m/s ²	With switch for vacuum

Note 1) The characteristics are satisfied when tested for 2 hours in each of the X, Y and Z directions at 10 to 500 Hz without energisation. (Initial value)

Note 2) The characteristics are satisfied when tested one time in each of the X, Y and Z directions without energisation. (Initial value)

Valve Common Specifications

Valve model <small>Note 3)</small>	ZK2-VA□R	ZK2-VA□K	ZK2-VA□J
Type of actuation <small>Note 4)</small>	Self-holding supply valve Release valve N.C. [Link]	Supply valve N.C. Release valve N.C.	Supply valve N.C. Without release valve
Valve configuration	Pilot operated dual 2 port		Pilot operated 2 port
Operating pressure range	0.3 to 0.6 MPa		
Valve construction	Poppet seal		
Manual override	Push type		
Rated voltage	24 V DC, 12 V DC		
Power consumption	0.35 W		
Lead wire (ZK2-LV□-A)	Cross section: 0.2 mm ² (AWG24)		
	Insulator O.D.: 1.4 mm		

Note 3) Refer to ⑤ Valve assembly on page 26 for the valve model number.

Note 4) ZK2-VA□R: After instantaneous energisation of the supply valve (20 ms or more), ON state is maintained without energisation. Supply valve turns off simultaneously when the release valve turns on.

ZK2-VA□K: Supply valve turns off when it is not energised. Select this type when energy saving switch is used.

Ejector Specifications

Item	Model	ZK2□07	ZK2□10	ZK2□12	ZK2□15
Nozzle diameter	[mm]	0.7	1.0	1.2	1.5
Max. suction flow <small>Note 5)</small>	Port exhaust	[l/min (ANR)]	34	56	74
	Silencer exhaust/Complex exhaust	[l/min (ANR)]	29	44	61
	High-noise reduction silencer exhaust	[l/min (ANR)]	32	48	70
Air consumption <small>Note 5)</small>	[l/min (ANR)]	24	40	58	90
Maximum vacuum pressure <small>Note 5)</small>	[kPa]	-91			
Supply pressure range	[MPa]	0.3 to 0.6			
Standard supply pressure <small>Note 5)</small>	[MPa]	0.35			0.4 (0.37)

Note 5) Values are based on standard of SMC measurements. They depend on atmospheric pressure (weather, altitude, etc.) and measurement method.

Note 6) The value in () is for without valve. For nozzle size 07 to 12, the value is common to the ejectors with valve and without valve.

Maximum Number of Manifold Stations that Can Operate Simultaneously Note 7)

Item	Model (Nozzle size)	ZK2□07	ZK2□10	ZK2□12	ZK2□15	
Air pressure supply (PV) port Ø 8, Ø 5/16"	Complex exhaust	Supply from one side	8	5	4	3
		Supply from both sides	10	7	5	5
	Individual port exhaust	Supply from one side	8	6	6	3
		Supply from both sides	10	9	9	6

Note 7) As long as the number of stations operated simultaneously is the value on the table or less, then the manifold is available up to 10 stations.

How to Order

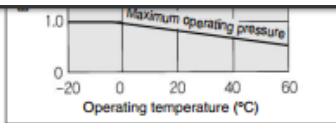
Specifications/
Flow Rate Characteristics

Port Layout

Construction

Manifold

C KATALÓGOVÝ LIST HADICE



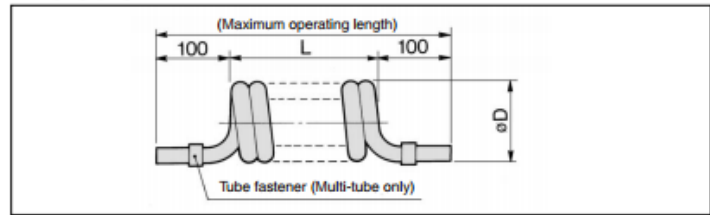
⚠️ Precautions

Be sure to read before handling. Refer to pages 15-18-3 to 4 for Safety Instructions and Common Precautions on the products mentioned in this catalog, and refer to pages 15-1-10 to 11 for Precautions on every series.

⚠️ Caution

- Please consult with SMC regarding use with any fluids other than air.
- Refer to the burst pressure characteristics curve for other temperatures. Furthermore, abnormal temperature rises caused by adiabatic compression may result in the burst of the tube.

Dimensions



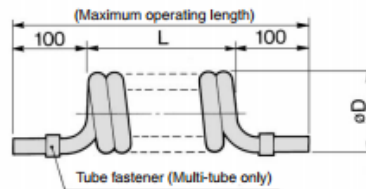
Model	Specifications		Tubing size (mm)		Coil (mm)		No. of cores	No. of coil windings per tube length	Max. operating length (m)	Standard unit of packing
	O.D.	I.D.	L	øD						
TCU0425B-1	4	2.5	210	18	1	52	1.5	5 tubes/case		
TCU0425B-2			280	28	2	35				
TCU0425B-3			265	28	3	22				
TCU0604B-1	6	4	325	24	1	54	2	5 tubes/case		
TCU0604B-2			37	2	27	1.5				
TCU0604B-3			305	3	17	1				
TCU0805B-1	8	5	330	31	1	41	2			

• Dimensions are changeable due to material.

Made to Order

Change of coil turns, Change of color

(Please contact SMC for specifications in detail, dimensions and delivery.)



Model	Specifications		Tubing size (mm)		Coil (mm)		No. of cores	No. of coil windings per tube length (N)	Max. operating length (mm)
	O.D.	I.D.	L	øD					
TCU0425□-1-N-X6	4	2.5	N x 4	18	1	3 to 90	L x 5.9 + 200		
TCU0425□-2-N-X6			N x 8	28	2	3 to 90	L x 4.4 + 200		
TCU0425□-3-N-X6			N x 12	28	3	3 to 63	L x 2.9 + 200		
TCU0604□-1-N-X6	6	4	N x 6	24	1	3 to 90	L x 5.3 + 200		
TCU0604□-2-N-X6			N x 12	37	2	3 to 66	L x 3.8 + 200		
TCU0604□-3-N-X6			N x 18	37	3	3 to 44	L x 2.5 + 200		
TCU0805□-1-N-X6	8	5	N x 8	31	1	3 to 90	L x 5.2 + 200		
TCU0805□-2-N-X6			N x 16	42	2	3 to 40	L x 3 + 200		
TCU1065□-1-N-X6	10	6.5	N x 10	52	1	3 to 45	L x 5 + 200		
TCU1065□-2-N-X6			N x 20	52	2	3 to 35	L x 3 + 200		
TCU1208□-1-N-X6	12	8	N x 12	67	1	3 to 35	L x 5 + 200		
TCU1208□-2-N-X6			N x 24	67	2	3 to 30	L x 3 + 200		

• □: B (Black), W (White), R (Red), BU (Blue), Y (Yellow), G (Green), C (Clear), YR (Orange)

D KATALÓGOVÝ LIST KOMPRESORU

Bezolejový kompresor SILVERSTONE SILENCED 4L

Tento nízkotlaký kompresor je určen pro tlaky od 0 do 8 bar, vždy bez použití oleje. Díky použitým materiálům jsou tyto kompresory na vysoké technické úrovni, spolehlivé, s dlouhou životností a minimální potřebou údržby.

Charakteristiky

- kompresor s krytem z hliníkové slitiny,
- lehký a kompaktní, unikátní systém ojnic pro dokonalou rovnováhu,
- tepelné zpracování komponent pro prodlouženou životnost a výkon,
- pokročilá kompresní technologie,
- ventily z nerezavějící oceli,
- spolehlivý elektromotor zkonstruovaný vždy pro konkrétní typ.

SILVERSTONE SILENCED 4L:

Výkonný, tichý a bez vibrací! Nejtišší ve své třídě a s hezkým designem a rukojetí pro pohodlný transport.

TECHNICKÉ ÚDAJE

typ	nádrž (l)	válce (ks)	sání (l/min)	tlak (bar)	výkon (kW)	rozměry (cm)	hlučnost (dB)
SILVER. SIL.	4	1	100	8	0,35	54x32x37	52

BEZPEČNOSTNÍ OPATŘENÍ

1. Kompresor přemisťujte s využitím vhodných prostředků, aby nedošlo k nadměrné námaze horních a dolních končetin.
2. Kompresorem, který je v provozu, nehýbejte, vibrace přenášené do rukou / paží mohou představovat zdravotní riziko.
3. Pokud kompresor nefunguje, neprovádějte na něm žádné opravy, elektrické ani mechanické. Kontaktujte ihned svého dodavatele.
4. Kompresor nepoužívejte v prostředí, v němž neprobíhá řádná cirkulace vzduchu.
5. Proudem vzduchu nemiňte na plameny, zdroje tepla, osoby ani zvířata.
6. Stroj nevystavujte, zvláště ve velmi teplém klimatu nebo v letních měsících, delší dobu slunečním paprskům, aby nedošlo k přehřátí plastových dílů. Provozní teplota se má pohybovat v rozmezí od +5 °C do + 45 °C.
7. Zajistěte, aby stroj nemohly spustit děti ani zvířata.
8. Nepoužívejte kompresor ve vlhkém nebo prašném prostředí.
9. Nemanipulujte s bezpečnostními a ovládacími prvky.

E KATALÓGOVÝ LIST ROLNY - TYP 22C

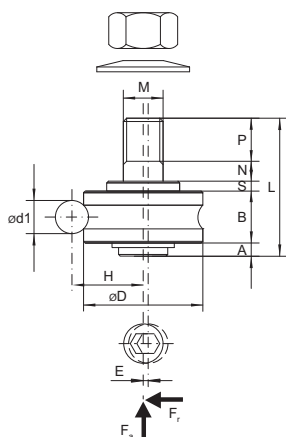
GD/GS

Vodící a podpůrné rolny

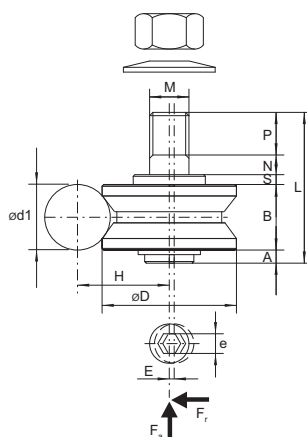
Z ložiskové oceli 100Cr6
Dvouřadá kuličková ložiska



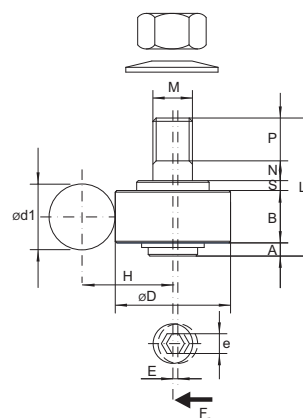
Vodící rolny vel. 17



Vodící rolny vel. 22-58



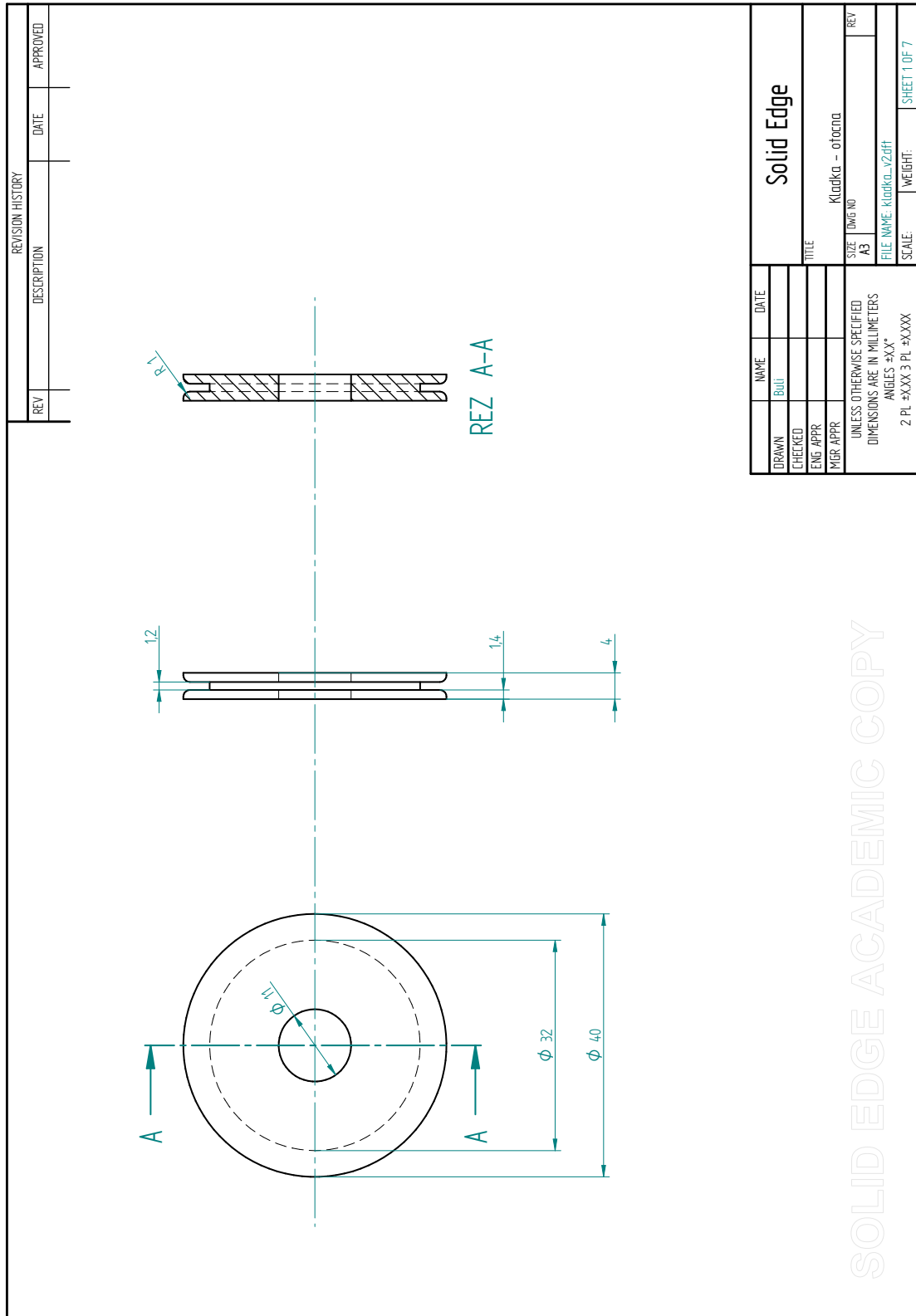
Podpůrné rolny vel. 34-50



Označ.	Rozměry [mm]											F _a [N]	F _r [N]	Kolejnice	Hmotnost [g]	
	A	B	S	N	P	L	M	H	D	E	e					ød1
Vodící rolny																
17C	2	8	1,5	2,5	4,5	18,5	4	10,5	17			6	256	520	GD6	
17E	2	8	1,5	2,5	4,5	18,5	4	10,5	17	0,5		6	256	520	GD6	
22C	2,5	5,5	2,5	4	5,5	25,5	6	14,5	22		2	10	292	292	GD10/GS10	30
22E	2,5	5,5	2,5	4	5,5	25,5	6	14,5	22	2	2	10	292	292	GD10/GS10	65
30C	3	7	2	5	9	33	8	18,3	30		3	10	387	960	GD10/GS10	
30E	3	7	2	5	9	33	8	18,3	30	2	3	10	387	960	GD10/GS10	
38C	3,5	8,5	2,5	8	12	43	10	22,3	38		5	10	552	1225	GD10/GS10	150
38E	3,5	8,5	2,5	8	12	43	10	22,3	38	2	5	10	552	1225	GD10/GS10	
41C	4	10	2,5	6	13	46	12	28	41		5	20	836	1680	GD20/GS20	165
41E	4	10	3	6	13	46	12	28	41	2	5	20	836	1680	GD20/GS20	
58C	4	12,5	6	11	13	59	16	35	58		6	20	4238	4238	GD20/GS20	430
58E	4	12,5	6	11	13	59	16	35	58	3	6	20	4238	4238	GD20/GS20	
Podpůrné rolny																
34AC	2	17	3	4	15	41	10	22	34		5	10		1300	GD10/GS10	150
34AE	2	17	3	4	15	41	10	22	34	1	5	10		1300	GD10/GS10	150
36AC	0,5	20	3	4	15	42,5	12	28	36		5	10		1600	GD20/GS20	190
36AE	0,5	20	3	4	15	42,5	12	28	36	1	5	10		1600	GD20/GS20	190
50AC	2,5	25	6,5	10	14	58	16	35	50		8	20		3500	GD20/GS20	480
50AE	2,5	25	6,5	10	14	58	16	35	50	1,5	8	20		3500	GD20/GS20	480

Matky a podložky jsou součástí dodávky. Nerezová provedení na poptávku.

F VÝKRES - OTOČNÁ KLADKA



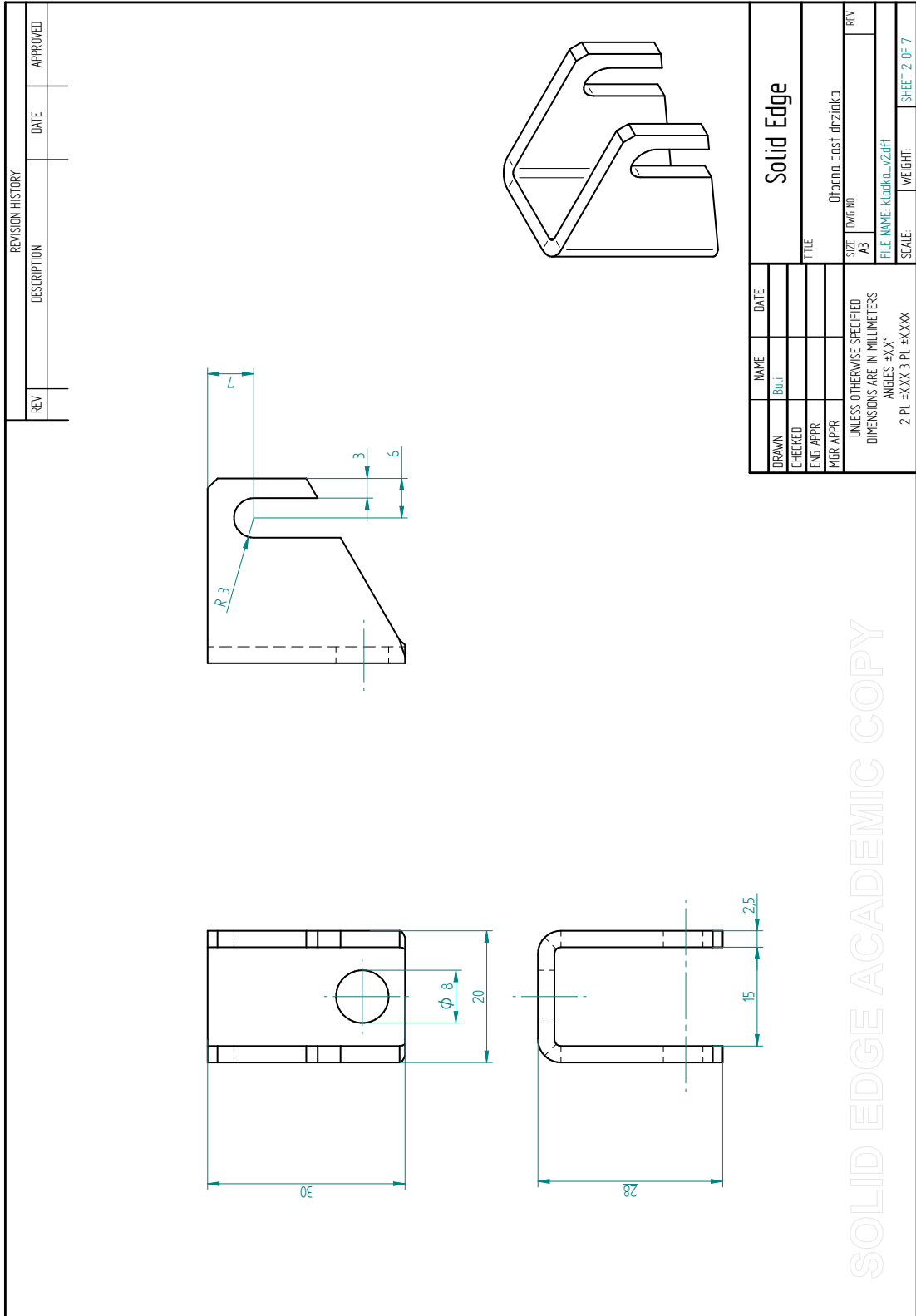
REVISION HISTORY		
REV	DESCRIPTION	DATE

APPROVED

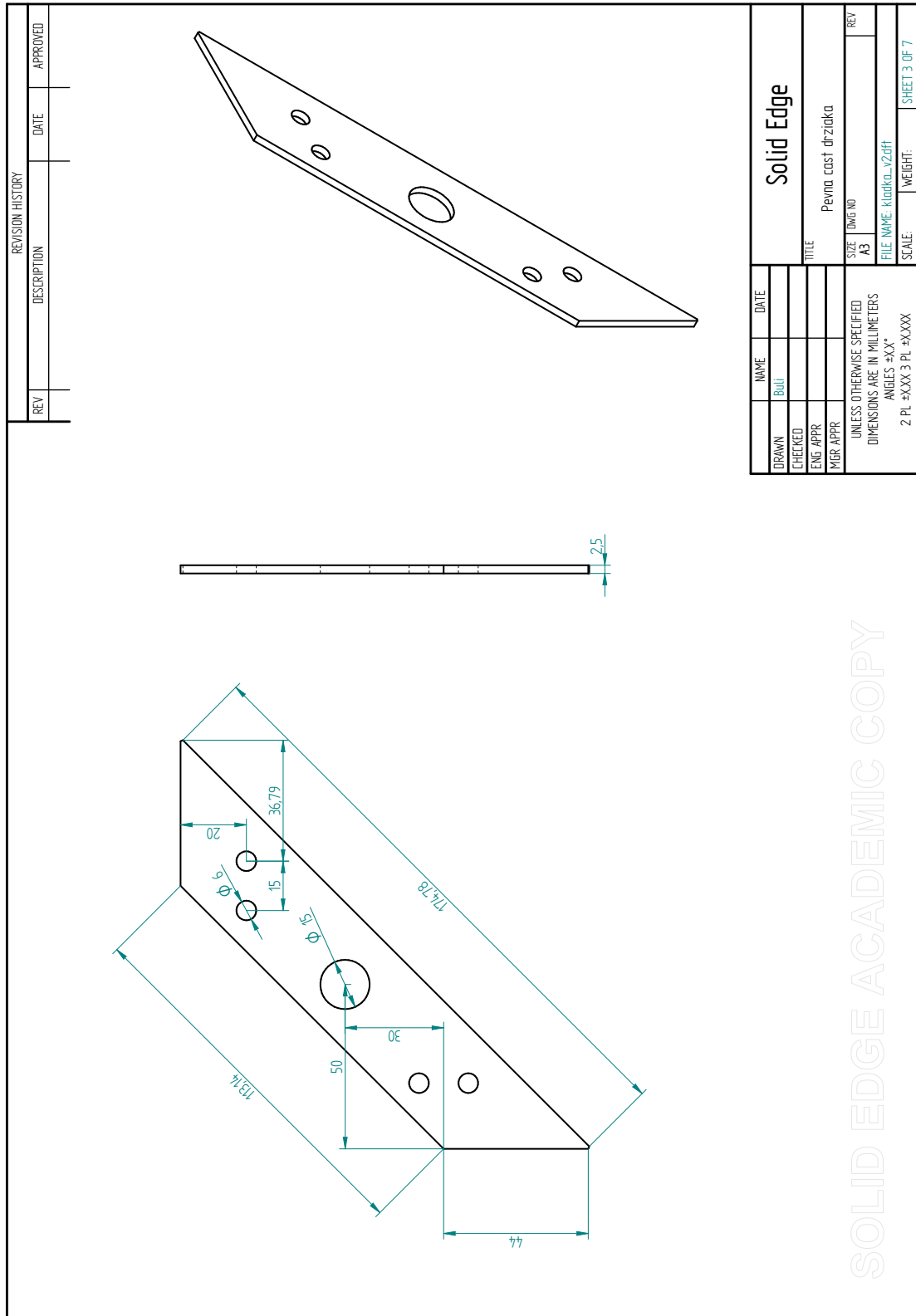
NAME	DATE	Solid Edge	
DRAWN Bujl			
CHECKED		TITLE	
ENG APPR			
MGR APPR			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX°		SIZE: DMG NO	REV
2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX		FILE NAME: Kladka_v2.dft	
		SCALE:	WEIGHT:
			SHEET 1 OF 7

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

G VÝKRES - OTOČNÝ DRŽIAK KLADKY



H VÝKRES - PEVNÝ DRŽIAK OTOČNEJ KLADKY



I VÝKRES - DRŽIAK PEVNEJ KLADKY

REVISION HISTORY		DATE	APPROVED
REV	DESCRIPTION		

Top view dimensions: 25, 26, 5, 10, 4, 7

Side view dimensions: 11, 1

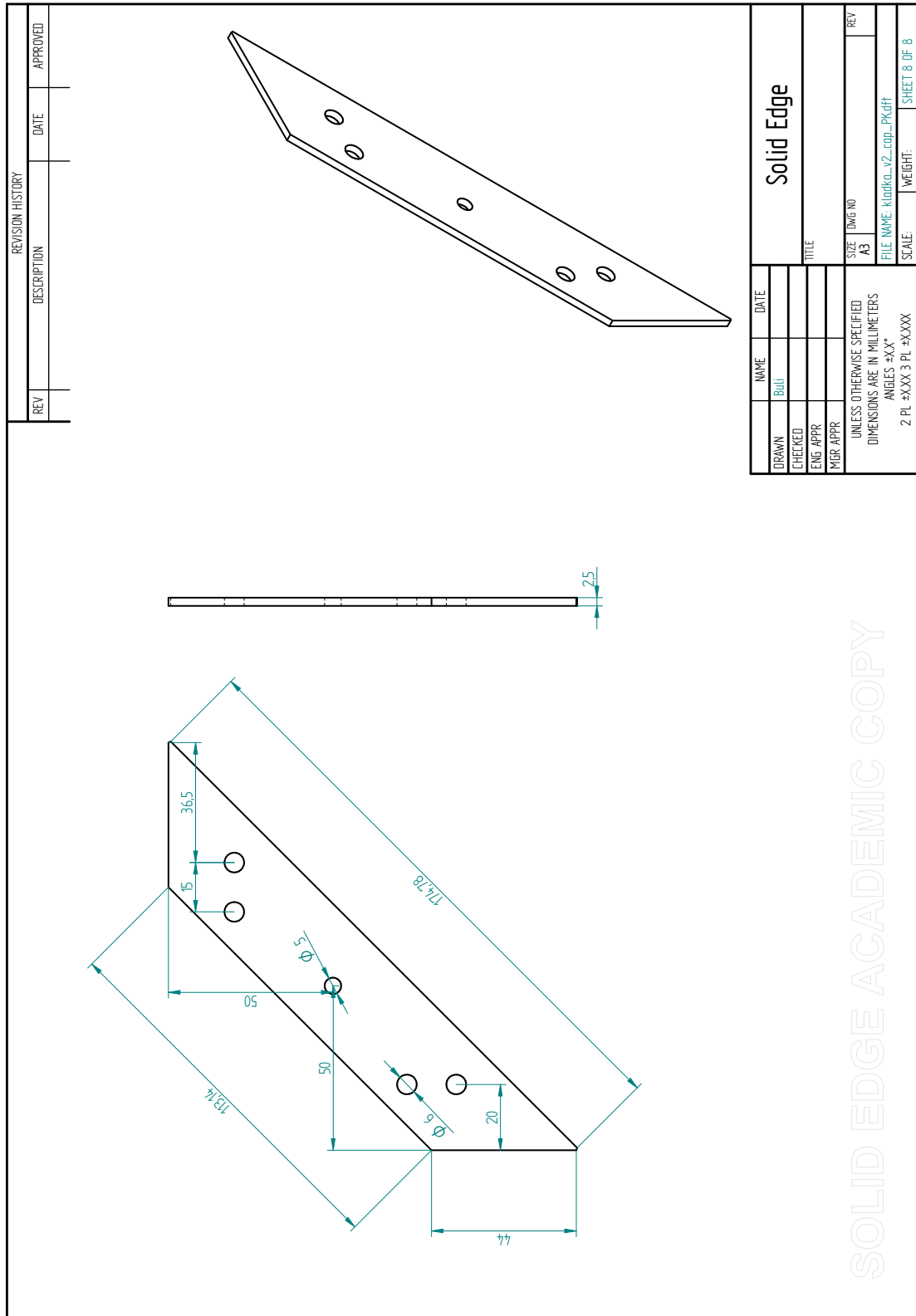
3D perspective view

DRAWN	CHECKED	ENG APPR	MGR APPR	NAME	DATE

Solid Edge	
TITLE	Drziak pevnej kladky
SIZE	DWG NO
A3	
FILE NAME	Kladko_v2.dft
SCALE	WEIGHT
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX° 2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX	
SHEET 6 OF 7	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

J VÝKRES - DRŽIAK PEVNEJ KLADKY 2



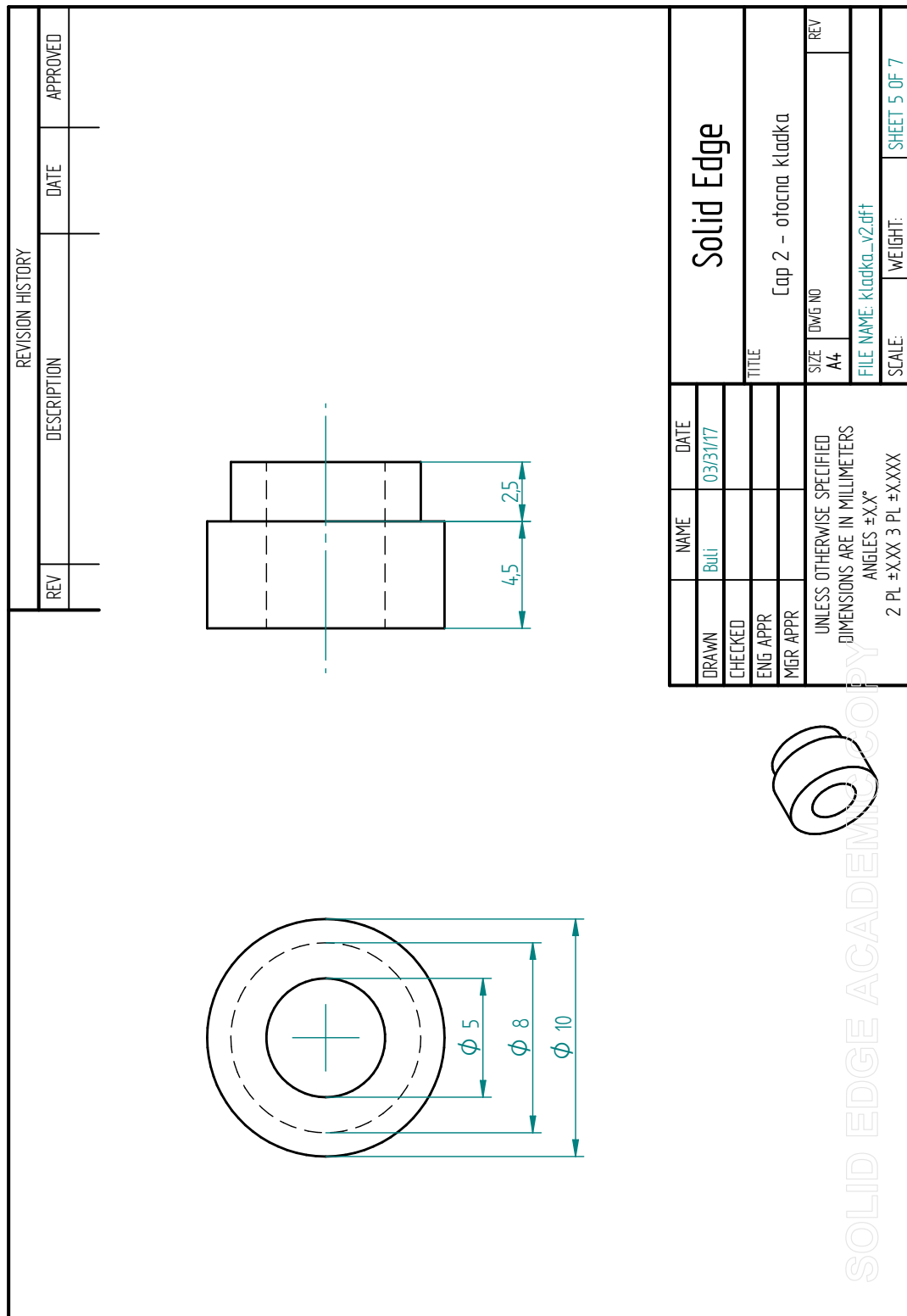
K VÝKRES - ČAP KLADKY

REVISION HISTORY			
REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

DRAWN	Buli	DATE	03/31/17	Solid Edge	
CHECKED		TITLE		Cap 1 - otocna kladka	
ENG APPR		SIZE	DWG NO	REV	
MGR APPR		A4		FILE NAME: kladka_v2.dft	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX°				SCALE:	WEIGHT:
2 PL ±XXX 3 PL ±XXXX					SHEET 4 OF 7

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

L VÝKRES - ČAP V OTOČNOM DRŽIAKU



M PRILOŽENÉ CD

CD obsahuje elektronickú verziu diplomovej práce, prílohy a funkcie vytvorené v AutomationStudios