



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**Ústav mechaniky, biomechaniky
a mechatroniky**

**Plánování trajektorie spolupracující
skupiny všesměrových vozítek s koly
Mecanum**

**Trajectory planning of a cooperating
group of omnidirectional robots with
Mecanum wheels**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2022**

Manuel Monteiro

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Monteiro** Jméno: **Manuel** Osobní číslo: **492406**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Plánování trajektorie spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum

Název bakalářské práce anglicky:

Trajectory planning of a cooperating group of omnidirectional robots with Mecanum wheels

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s kinematikou kola Mecanum a jeho využití pro všesměrová vozítka.
2. Vytvořte simulační model vozítka s koly Mecanum.
3. Navrhněte trajektorii spolupracující skupiny vozítek při přepravě vozidla.
4. Výsledky ověřte simulačními experimenty.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Li, Y.; Ge, S.; Dai, S.; Zhao, L.; Yan, X.; Zheng, Y.; Shi, Y. Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation. *Sensors* 2020, 20(75)
- [2] Gfrerrer, A.: Geometry and kinematics of the Mecanum wheel, *Computer Aided Geometric Design*, 2008, 25(9), pp. 784–791
- [3] Valášek, M., Stejskal, V., Březina, J.: *Mechanika B*, Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha 2006

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Beneš, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Beneš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora: Manuel Monteiro

Název práce: Plánování trajektorie spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum

Anglický název: Trajectory planning of a cooperating group of omnidirectional robots with Mecanum wheels

Rozsah práce:

43 stran

22 obrázků

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 105 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Klíčová slova: Mecanum kola, kinematika spolupracujících robotů, plánování trajektorie, simulační model

Key words: Mecanum wheels, kinematics of cooperating robots, trajectory planning, simulation model



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá plánováním trajektorie spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum. Na začátku práce je popsáno možné využití těchto vozítek. Následně je popsána kinematika vozítek s koly Mecanum. Na základě popisu kinematiky je vytvořen simulační model spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum. Na závěr jsou výsledky tohoto simulačního modelu experimentálně ověřeny.

Abstract

This bachelor thesis focuses on the trajectory planning of a cooperating group of omnidirectional robots with Mecanum wheels. Possible use of such robots is given at the beginning of this thesis. The kinematics of omnidirectional robots with Mecanum wheels is presented. The simulation model is designed based on the kinematic description of a cooperating group of omnidirectional robots with Mecanum wheels. Finally, the results of the simulation model are experimentally verified.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Plánování trajektorie spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

V Praze, dne

.....

Podpis



Poděkování

Mnohokrát děkuji Ing. Petru Benešovi, PhD. za vedení a veškerou pomoc, kterou mi poskytl v rámci tvorby této bakalářské práce. Díky také patří mé rodině a přátelům za podporu během studia.



Obsah

1 Úvod	8
1.1 Cíl práce	10
2 Problematika všesměrových kol	11
2.1 Stručná historie všesměrových kol	11
2.2 Kinematika vozítek s koly Mecanum	11
2.2.1 Vektorová metoda	12
2.2.2 Maticová metoda.....	14
2.2.3 Určení schopnosti všesměrového pohybu.....	15
2.2.4 Kinematický rozbor více všesměrových vozítek	19
3 Simulační model.....	22
3.1 Popis programu.....	22
3.1.1 Zadání geometrie	22
3.1.2 Zadání parametrů simulace.....	22
3.1.3 Zadání počátečních podmínek	22
3.1.4 Výpočty.....	22
3.1.5 Návrh trajektorie	24
3.1.6 Vizualizace.....	24
3.2 Výstupy simulačního modelu	24
3.2.1 Konfigurace 1.....	25
3.2.2 Konfigurace 2.....	26
3.2.3 Konfigurace 3.....	27
4 Simulační experiment	30
4.1 Výběr vhodného vozítka.....	30
4.2 Zprovoznění vozítka	31
4.3 Provedení experimentu.....	33
4.3.1 Experiment s prvním vozítkem.....	35
4.3.2 Experiment s druhým vozítkem	36
5 Závěr.....	37
Reference	39
Seznam příloh.....	43



1 Úvod

V posledních letech je možné sledovat rostoucí trend automatizace v mnoha odvětvích. V tomto automatizačním procesu si své uplatnění také našli robotické platformy, které ke svému pohybu využívají všesměrových kol [1]. Vozítka s těmito koly mají tři stupně volnosti v rovině (dopředu/dozadu, vlevo/vpravo, a rotace na místě) [2], což jim poskytuje vysokou manévrovatelnost, avšak za cenu horší energetické účinnosti [3]. Vyšší manévrovatelnost může zvýšit využití prostoru a efektivitu přepravy, a právě tyto přednosti vedly k rozmachu automaticky řízených vozíků neboli automated guided vehicle (AGV) s všesměrovými koly [4].

AGV jsou především využívány v logistice, kde většinou přepravují zboží menších rozměrů. Výzvou však je přepravovat nadrozměrné náklady. Nabízí se dvě řešení, potřeba větších a silnějších AGV, nebo možná spolupráce více menších a slabších AGV. Mnoha studiemi bylo dokázáno, že druhý ze zmíněných příkladů je všestrannější a ekonomicky výhodnější, jelikož první způsob řešení vyžaduje různé platformy pro specifické účely, což činí takovouto automatizaci ekonomicky nevýhodnou. Dále mohou mít větší rozměry negativní vliv na manévrovatelnost [5].

Pro spolupracující systém je zapotřebí zajištění komunikace mezi jednotlivými roboty, nebo preferovaně je možné pohyb jednotlivých robotů řídit na základě lokálních měření [5]. Příkladem spolupracujících robotů je přeprava skříně železničního vagónu na Obr. 1 v továrně společnosti Siemens pomocí čtyř mobilních platforem KUKA omniMove [4].



Obr. 1 Přeprava skříňě železničního vagónu [6]

Čtyři robotické platformy s všesměrovými koly by také mohly být použity při automatizaci parkování v parkovacích domech, kde by po zvednutí vozidla přes kola vozidlo následně dopravily na volné parkovací místo. Automatizace parkování v parkovacích domech přináší mnohé benefity, jako je například úspora prostoru, a tím i financí především v hustě obydlených oblastech, úspora paliva, vyšší bezpečnost, snížení nehod atd. [7][8][9]

Typický parkovací dům první generace s automatizovaným parkováním používá robotizované rameno k přesunu vozidel, druhá generace automatizovaných parkovacích domů používá k přesunu vozidel systém vozíků a kolejnic [9]. U těchto systému existují tzv. jediný body selhání (single point of failure – SPOF), které mohou v případě poruchy vyřadit z provozu celý systém. Tyto parkovací systémy mají také problémy týkající se servisování, kdy je třeba odstavit celý systém, nebo jeho podstatnou část [9].

Systém založený na čtyřech robotických platformách se všesměrovými koly by pravděpodobně měl shodné výhody se systémem nové generace, který využívá jedné velké robotické platformy pro celé vozidlo oproti systémům první a druhé generace. Mezi tyto výhody například patří rychlejší přeprava vozidel za předpokladu více operujících robotických platform, ale především zjednodušení servisních zásahů a významná eliminace jednoho bodu selhání [9].



Navíc by systém se čtyřmi jednotlivými platformami oproti systému s jednou velkou platformou mohl přinést výhody v podobě rozlišování velikosti automobilů, což by dále mohlo vést k ještě lepšímu využití prostoru.

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je navrhnout trajektorii spolupracující skupiny všesměrových vozítek s koly Mecanum ve vytvořeném simulačním modelu a tuto trajektorii experimentálně ověřit. Následující úkoly je potřeba splnit pro úspěšné naplnění hlavního cíle.

- Seznámit se s kinematikou vozítek s koly Mecanum
- Vytvořit simulační model
- Navrhnout vhodnou trajektorii
- Zprovoznit vozítko s koly Mecanum
- Experimentálně ověřit funkčnost simulačního modelu



2 Problematika všesměrových kol

2.1 Stručná historie všesměrových kol

První patent na všesměrové kolo pochází již z roku 1919 a byl udělen J. Grabowieckému v USA, avšak modernější a také rozšířenější kolo Mecanum bylo patentováno Švédským vynálezcem Bengtem Ilonem v první polovině 70. let minulého století [1].

Všesměrová kola se skládají z náboje kola, na kterém jsou po obvodu umístěny válečky [2][10], jejichž osa svírá s osou náboje kola úhel 0 až 90° a které pasivně rotují kolem své osy [2][10][11]. Osy kol Omni svírají s osou náboje 90° a kol Mecanum typicky 45° [2]. Nadále bude v této práci popsáno kolo Mecanum, jelikož tato kola mají díky své geometrii vyšší únosnost [2][12], což dokládá skutečnost, že většina všesměrových AGV v průmyslu je právě těmito koly vybavena [2][4].

2.2 Kinematika vozítek s koly Mecanum

Obecný kinematický model vozítka s libovolným počtem kol Mecanum je možné odvodit na základě [11]. Celkový kinematický model vozítka je možné získat syntézou dílčích pohybů jednotlivých kol a znalosti daných omezení.

Pro usnadnění řešení jsou zavedeny následující předpoklady:

1. Celý systém, především kolečka, jsou tuhá tělesa, nepřítomnost mechanických deformací.
2. Celý rozsah pohybů je uskutečněn pouze v rovině, zanedbání vlivu nerovného podkladu.
3. Zanedbání prokluzu válečků, tzn. mezi válečky a podkladem je dostatečné tření.
4. Místo dotyku mezi válečky a podkladem je umístěno přímo pod středem náboje kola.

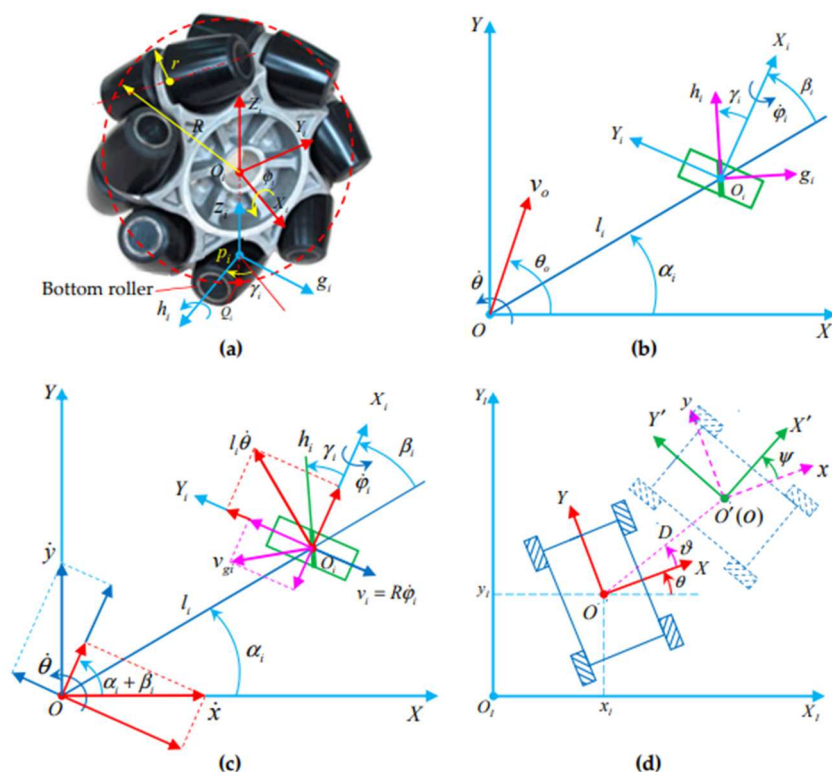
Tyto předpoklady nejsou ve skutečnosti naplněny, avšak například v [5] rozdíl mezi experimentálními hodnotami a simulací, která používá kinematické rovnice stejné jako budou odvozeny pomocí [11], je minimální. Minimalizace



vlivu prokluzu je například možná pomocí hřídelového enkodéru [2] a dále se touto problematikou zabývají práce [4] a [13]. O skutečném umístění místa dotyku pojednává [10]. Zahrnutí těchto poznatků by v porovnání se zvýšenou náročností nepřineslo adekvátní zpřesnění výsledků, a proto jsou dále v této práci zanedbány.

2.2.1 Vektorová metoda

Existuje vozítko s libovolným počtem kol n , kde i -té kolečko je upevněno k vozítku pod určitým úhlem, viz Obr. 2.



Obr. 2 Odvození kinematiky kola Mecanum [11]

R je poloměr náboje kola a r je poloměr válečků. Jsou zavedeny dva pravotočivé kartézské souřadnicové systémy, systém $O_i - X_i Y_i Z_i$ a $P_i - g_i h_i z_i$. O_i reprezentuje střed i -tého kolečka, Z_i reprezentuje kolmici s podkladem procházející již zmíněným středem kolečka O_i . P_i je střed válečku, který je v kontaktu se zemí a tento kontaktní bod je označen Q_i . Na základě čtvrtého předpokladu ze začátku kapitoly 2.2 leží P_i a Q_i pod bodem O_i . Kolmý směr k podkladu procházející středem válečku P_i je označen z_i . Rotační osa kolečka je označena X_i a válečku h_i . Velikost úhlových rychlostí jsou označeny jako $\dot{\phi}_i$ a $\dot{\phi}_l$.



K určení polohy O_i od počátku O vozítka je využito vektoru \mathbf{l}_i a úhlu α_i . Úhel mezi \mathbf{l}_i a \mathbf{X}_i , označený β_i , lze na základě anglického překladu nazvat jako montážní přístupový úhel lokálního souřadnicového systému kolečka. Okamžitá rychlost středu vozítka je \mathbf{v}_o a svírá s osou \mathbf{X} úhel θ_0 . $\dot{\theta}$ je úhlová rychlost vozítka při pohybu v rovině. Úhel mezi průmětem \mathbf{X}_i a \mathbf{h}_i do roviny podkladu označený γ_i , kde absolutní velikost úhlu γ_i náleží do intervalu $(0^\circ, 90^\circ)$, je definován jako úhel sklonu válečků.

S pomocí těchto definic je možné vyjádřit vztah mezi rychlostí kolečka a válečku (1), který se pasivně otáčí.

$$\mathbf{v}_{oi} = \mathbf{v}_{pi} + \mathbf{v}_i \quad (1)$$

V tomto vztahu je \mathbf{v}_{oi} rychlostní vektor středu i -tého kola, \mathbf{v}_{pi} je rychlostní vektor válečku v bodě dotyku s podkladem a \mathbf{v}_i je vektor relativní rychlosti bodu P_i a O_i . $\boldsymbol{\omega}_o$ a $\boldsymbol{\omega}_p$ představují úhlové rychlosti aktivního kolečka a pasivního válečku a lze je vyjádřit pomocí následujícího vztahu (2).

$$\boldsymbol{\omega}_o = \dot{\theta}\mathbf{Z}_i + \dot{\phi}_i\mathbf{X}_i, \boldsymbol{\omega}_p = \boldsymbol{\omega}_o + \dot{\phi}_i\mathbf{h}_i \quad (2)$$

Na základě (2) lze psát následující vztahy (3).

$$\mathbf{v}_{pi} = \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{Q}_i\mathbf{P}_i = -r(\dot{\phi}_i\mathbf{Y}_i - \dot{\phi}_i\mathbf{g}_i), \mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega}_o \times \mathbf{P}_i\mathbf{O}_i = -(R-r)\dot{\phi}_i\mathbf{Y}_i \quad (3)$$

A dále s pomocí (1) a (3) lze získat vztah (4).

$$\mathbf{v}_{oi} = -R\dot{\phi}_i\mathbf{Y}_i + r\dot{\phi}_i\mathbf{g}_i \quad (4)$$

Pokud se vozítka pohybuje v rovině, vztah mezi středem kola O_i a počátkem O na vozítku lze \mathbf{v}_{oi} také popsat vztahem (5).

$$\mathbf{v}_{oi} = \mathbf{v}_o + \dot{\theta}\boldsymbol{\xi}\mathbf{l}_i \quad (5)$$

Kde $\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, což má za následek posunutí vektoru \mathbf{l}_i o 90° proti směru hodinových ručiček.

Pravé strany rovnic (4) a (5) si jsou rovny a lze tedy psát (6).

$$-R\dot{\phi}_i\mathbf{Y}_i + r\dot{\phi}_i\mathbf{g}_i = \mathbf{v}_o + \dot{\theta}\boldsymbol{\xi}\mathbf{l}_i \quad (6)$$



Definice vektorů poskytuje následující vztahy (7).

$$\mathbf{h}_i \cdot \mathbf{g}_i = 0, \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{Y}_i = \sin \gamma_i \quad (7)$$

Jelikož válečky rotují pasivně, jejich úhlová rychlost $\dot{\phi}_i$ je neřízená proměnná. Proto za použití vztahů (7) je $\dot{\phi}_i$ z rovnice (6) eliminováno, a to vynásobením obou stran rovnice vektorem \mathbf{h}_i .

$$-R(\sin \gamma_i)\dot{\phi}_i = \mathbf{h}_i^T \mathbf{v}_o + \mathbf{h}_i^T \dot{\theta} \boldsymbol{\xi} \mathbf{l}_i \quad (8)$$

Z předchozího vztahu (8) lze jednoduše získat rovnici inverzní kinematiky i -tého kola (9).

$$\dot{\phi}_i = -\frac{1}{R(\sin \gamma_i)} [\mathbf{h}_i^T \boldsymbol{\xi} \mathbf{l}_i \quad \mathbf{h}_i^T] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \mathbf{v}_o \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pro inverzní kinematiku celého vozítka s n koly pak platí následující vztah (10).

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\boldsymbol{\phi}} = [\dot{\phi}_1 \quad \dot{\phi}_2 \quad \dots \quad \dot{\phi}_n] \\ \mathbf{S} = \text{diag} \left(\frac{1}{\sin \gamma_1}, \frac{1}{\sin \gamma_2}, \dots, \frac{1}{\sin \gamma_n} \right) \\ \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \boldsymbol{\xi} \mathbf{l}_1 & \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \boldsymbol{\xi} \mathbf{l}_2 & \mathbf{h}_2^T \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{h}_n^T \boldsymbol{\xi} \mathbf{l}_n & \mathbf{h}_n^T \end{bmatrix} \\ \mathbf{J} = -\frac{1}{R} \mathbf{S} \mathbf{M} \\ \mathbf{t} = [\dot{\theta} \quad \mathbf{v}_o]^T \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{J} \mathbf{t} \end{array} \right. \quad (10)$$

V tomto vyjádření $\dot{\boldsymbol{\phi}}$ je matice úhlových rychlostí kol, \mathbf{J} je jakobián inverzní kinematiky, který zahrnuje matici \mathbf{S} úhlu sklonu váleček a matici \mathbf{M} montážních přístupových úhlů. Matice \mathbf{t} je takzvaná rotační matice vozítka.

2.2.2 Maticová metoda

S využitím Obr. 2 lze odvodit také následující výraz (11).



$$\begin{cases} \dot{x} \sin(\alpha_i + \beta_i) - \dot{y} \cos(\alpha_i + \beta_i) - l_i \dot{\theta} \cos \beta_i = R \dot{\varphi}_i - v_{gi} \cos \gamma_i \\ \dot{x} \cos(\alpha_i + \beta_i) + \dot{y} \sin(\alpha_i + \beta_i) + l_i \dot{\theta} \sin \beta_i = -v_{gi} \sin \gamma_i \end{cases} \quad (11)$$

$(\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta})^T$ je pohybový stav vozítka ve vlastním lokálním souřadnicovém systému, v_{gi} je rychlost středu válečku i -tého kola v kontaktu s podkladem. Protože se válečky otáčejí pasivně, v_{gi} je neřízená proměnná, a proto je třeba ji ze vztahu (11) vyloučit a získat následující vztah (12).

$$\dot{x} \cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) + \dot{y} \sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) + l_i \dot{\theta} \sin(\beta_i + \gamma_i) = -R \dot{\varphi}_i \sin \gamma_i \quad (12)$$

Jeho mírnou úpravou lze obdržet vztah (13).

$$[\cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad \sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad l_i \sin(\beta_i + \gamma_i)] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + R \dot{\varphi}_i \sin \gamma_i = 0 \quad (13)$$

Pohybový stav vozítka ve vlastním lokálním souřadnicovém systému může být také zkoumán v globálním souřadnicovém systému (viz Obr. 2) pomocí následujícího vyjádření (14).

$$[\cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad \sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad l_i \sin(\beta_i + \gamma_i)] \mathbf{Rot}(\theta) \dot{\zeta}_I + R \dot{\varphi}_i \sin \gamma_i = 0 \quad (14)$$

Kde

$$\mathbf{Rot}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\dot{\zeta}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} = \mathbf{Rot}^{-1}(\theta) \dot{\zeta} = \mathbf{Rot}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

2.2.3 Určení schopnosti všesměrového pohybu

Pokud by vozítko s n všesměrovými koly nemohlo dosáhnout 3° volnosti v rovině, postrádala by montáž takových kol smysl. Z tohoto důvodu je nutné zkoumat vztah mezi konfigurací kol a všesměrovým pohybem vozítka, který je uveden v [11]. Na základě předchozí kapitoly 2.2.1 lze odvodit, že jakobián inverzní kinematiky vozítka s n ($n \geq 3$) koly Mecanum má rozměry $n \times 3$. Pokud má jakobián všechny 3 sloupce lineárně nezávislé, jinými slovy jeho hodnota



je 3, vozítko dosáhne 3° volnosti pohybu v rovině. Jakobián $J_{n \times 3}$ lze zapsat následujícím způsobem.

$$J_{n \times 3} = \begin{pmatrix} J_{3 \times 3} \\ J_{(n-3) \times 3} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Za předpokladu, že k matici $J_{3 \times 3}$ existuje inverzní matice, tj. jedná se o matici regulární, je na základě teorie matic nejjednodušší maticí $J_{3 \times 3}$ s existující inverzní maticí jednotková matice E_3 .

$$J_{3 \times 3} \rightarrow E_3 \quad (16)$$

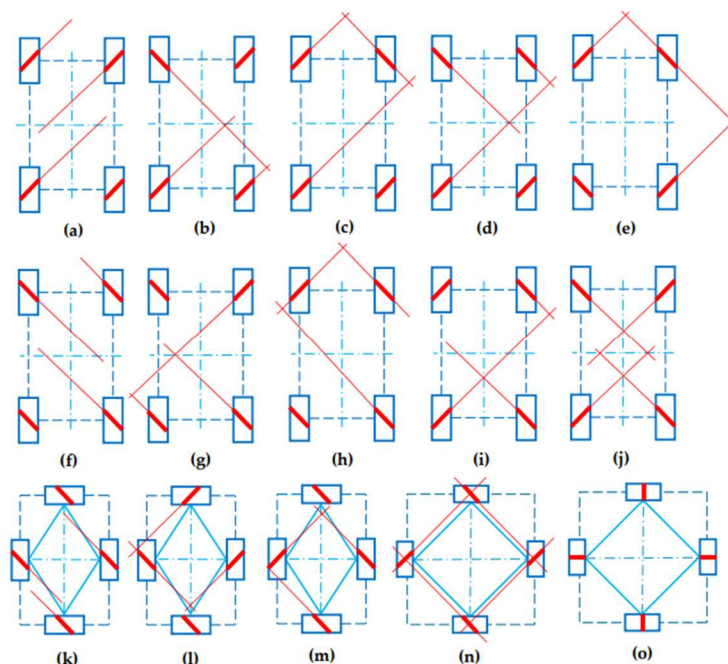
Po rozšíření tohoto poznatku na celý jakobián $J_{n \times 3}$ lze psát vztah (17).

$$J_{n \times 3} \rightarrow \begin{pmatrix} E_3 \\ (n-3) \times 3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Z tohoto vyplývá, že vozítko s n Mecanum kolečky je schopno všesměrového pohybu, pokud jakobián inverzní kinematiky tří libovolných kol je regulární matice a lze dokázat, že toto pravidlo platí v libovolném souřadnicovém systému.

Pomocí jakobiánu lze tedy určovat schopnost všesměrového pohybu pro různé konfigurace a počty Mecanum kol. V této práci bude nadále probrána pouze symetrická obdélníková konfigurace, jelikož se jedná o nejrozšířenější konfiguraci využívanou v průmyslu [4][11].

Možné konfigurace zobrazuje Obr. 3, kde tlusté červené úsečky zobrazují válečky, které jsou v kontaktu s podkladem. Vlastnosti jednotlivých konfigurací zobrazuje tabulka na Obr. 4, na které lze vidět, že ne všechny tyto konfigurace umožňují všesměrový pohyb. Nadále budou v této práci vyšetřeny pouze konfigurace (e) a (j), jelikož se jedná o nejrozšířenější symetrické obdélníkové konfigurace.



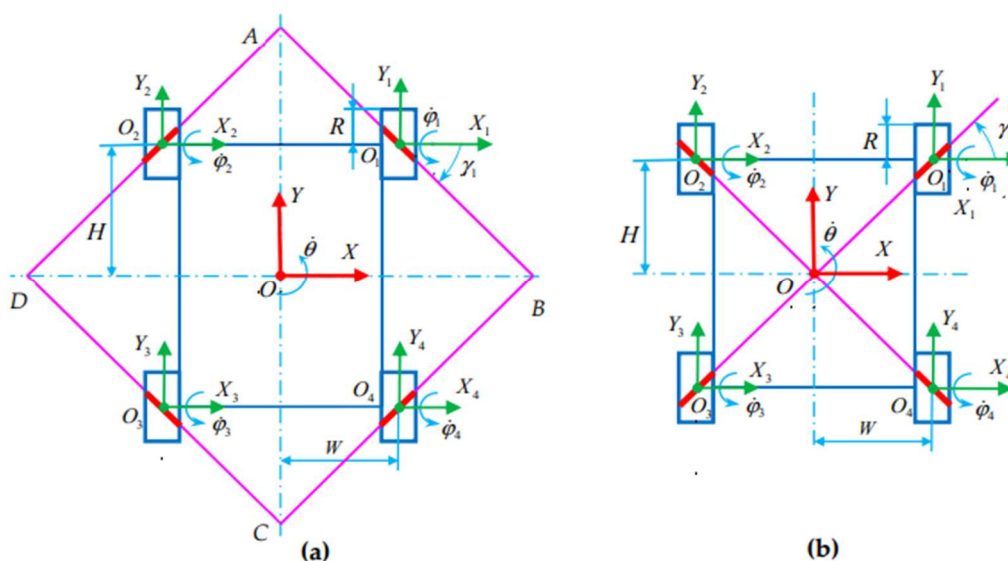
Obr. 3 Přehled konfigurací se čtyřmi koly Mecanum [11]

Configurations in Figure 8	a	b	c	d	e	f	g	h	i	J	k	l	m	n
Intersections	0	2	2	2	2	0	2	2	2	2	0	2	2	2
Column rank	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3	3
Column full Rank	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y/N	N	Y	Y	Y
Omnidirectional motion capacity	n	B	B	B	G	n	B	B	B	G/n	n	B	B	G

Note: Y = the Jacobian matrix is a column full-rank matrix, N = not; n = the mobile robot system does not have omnidirectional mobility capacity; B = the omnidirectional motion capacity is not good; G = good motion capacity.

Obr. 4 Tabulka vlastností různých konfigurací se čtyřmi koly Mecanum [11]

Ve zkoumaných konfiguracích na Obr. 5 mají všechna kolečka stejné parametry a platí, $|\gamma_i| = 45^\circ$ pro $i = 1,2,3,4$.



Obr. 5 Souřadnicové systémy a geometrie dvou vybraných symetrických konfigurací [2]



Konfigurace (a) na Obr. 5 je považována za optimální konfiguraci. S využitím kinematické analýzy konfigurace (a) pro jedno kolečko z části 2.2 lze vyjádřit následující vztah (18) mezi úhly α_1 a β_1 .

$$\alpha_1 + \beta_1 = 0 \quad (18)$$

Po dosazení vztahu (18) do (13) lze získat (19).

$$[\cos \gamma_1 \quad \sin \gamma_1 \quad l \sin(\beta_1 + \gamma_1)] \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + R \dot{\phi}_1 \sin \gamma_1 = 0 \quad (19)$$

Úpravou rovnice (19) lze získat rovnici (20).

$$\dot{\phi}_1 = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & W - \frac{H}{\tan \gamma_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Podobně lze získat i rovnice (21), (22) a (23) pro zbylá kola.

$$\dot{\phi}_2 = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -W - \frac{H}{\tan \gamma_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{\phi}_3 = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -W + \frac{H}{\tan \gamma_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\dot{\phi}_4 = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & W + \frac{H}{\tan \gamma_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (23)$$

S připomenutím, že $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = -\gamma = -45^\circ$ viz (a) na Obr. 5 a dosazením do předcházejících rovnic lze získat (24).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\cot \gamma & 1 & W + H \cot \gamma \\ \cot \gamma & 1 & -W - H \cot \gamma \\ -\cot \gamma & 1 & -W - H \cot \gamma \\ \cot \gamma & 1 & W + H \cot \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & W + H \\ 1 & 1 & -(W + H) \\ -1 & 1 & -(W + H) \\ 1 & 1 & W + H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Z rovnice (24) vyplývá, že jakobián inverzní kinematiky má následující tvar (25).



$$J = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & W + H \\ 1 & 1 & -(W + H) \\ -1 & 1 & -(W + H) \\ 1 & 1 & W + H \end{bmatrix} \quad (25)$$

Lze ověřit, že hodnost této matice je 3 a tedy konfigurace (a) z Obr. 5 splňuje podmínku všesměrovosti.

Konfigurace (b) na Obr. 5 je zobrazena v extrémní situaci, kdy se osy všech válečků v kontaktu s podkladem protínají v jednom společném průsečíku v počátku O , což vede k tomu, že $W - H \cot \gamma = 0$. Při provedení stejné analýzy jako pro konfiguraci (a) lze získat následující vztah (26).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} \cot \gamma & 1 & W - H \cot \gamma \\ -\cot \gamma & 1 & -(W - H \cot \gamma) \\ \cot \gamma & 1 & -(W - H \cot \gamma) \\ -\cot \gamma & 1 & W - H \cot \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = -\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Je tedy zřejmé, že jakobián inverzní kinematiky pro konfiguraci (b) nemá hodnost 3 a proto nespĺňuje podmínku pro všesměrový pohyb. Samozřejmě toto je extrémní případ a u konfigurace (b) lze také dosáhnout průsečíků os válečků v kontaktu se zemí mimo počátek O viz Obr. 3 (j), avšak tyto průsečíky jsou stále blízko středu vozítka, což vede k nízkému řídicímu momentu potřebnému k rotaci vozítka a z tohoto důvodu se tato práce nadále zaměří pouze na konfiguraci (a).

2.2.4 Kinematický rozbor více všesměrových vozítek

Kinematický rozbor skupiny vozítek s koly Mecanum lze odvodit na základě [4]. Na Obr. 6 je v globálním souřadnicovém systému $X_I O_I Y_I$ zobrazena skupina m ($m = 1, 2, \dots, j, \dots, k$) spolupracujících vozítek, která přepravuje náklad. Jejich vzájemné polohy jsou neměnné. Za účelem snadného popisu pohybu spolupracujících vozítek je výhodné v určitém místě zavést jejich společný souřadnicový systém $X_s O_s Y_s$. Lokální souřadnicový systém j -tého vozítka s n_j ($n_j = 1, 2, \dots, i, \dots, k$) koly Mecanum je označen $X_j O_j Y_j$.

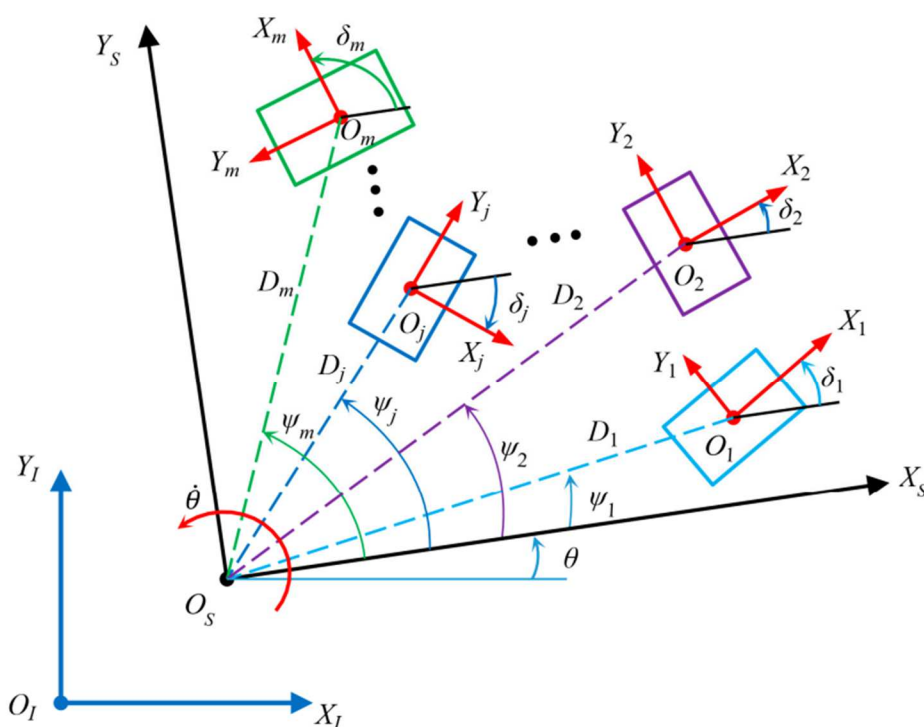
Relativní poloha souřadnicových systémů $X_s O_s Y_s$ a $X_j O_j Y_j$ jednotlivých vozítek je určena geometrickými parametry skupiny spolupracujících vozítek. Nechť



$\dot{\phi}_{jn_j}$ značí matici rotace kol J_j jakobián a ζ_j pohybový stav v lokálním souřadnicovém systému j -tého vozítka, pak lze rovnici inverzní kinematiky j -tého vozítka vyjádřit jako rovnici (27).

$$\dot{\phi}_{jn_j} = J_j \dot{\zeta}_j \quad (27)$$

Po provedení transformace z lokálního souřadnicového systému $X_j O_j Y_j$ j -tého vozítka do společného souřadnicového systému $X_s O_s Y_s$, kde vystupuje pohybový stav $\zeta_s = [\dot{x}_s \dot{y}_s \dot{\theta}_s]^T$, lze rovnici inverzní kinematiky j -tého vozítka vyjádřit pomocí rovnice (28).



Obr. 6 Skupina spolupracujících robotů [4]

$$\dot{\phi}_{jn_j} = J_j K_j \dot{\zeta}_s \quad (28)$$

$$\begin{aligned} K_j = \mathbf{R}(\delta_j) \mathbf{T}(D_j, \psi_j) &= \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \sin \delta_j & 0 \\ -\sin \delta_j & \cos \delta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -D_j \sin \psi_j \\ 0 & 1 & D_j \cos \psi_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \sin \delta_j & D_j \sin(\delta_j - \psi_j) \\ -\sin \delta_j & \cos \delta_j & D_j \sin(\delta_j - \psi_j) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

Dále je pak možné vyjádřit inverzní kinematiku v globálním souřadnicovém systému pomocí rovnice (30).



$$\dot{\phi}_{jn_j} = J_j K_j \mathbf{Rot}(\theta) \dot{\zeta}_l \quad (30)$$

Rovnice inverzní kinematiky celé skupiny složené z m ($m = 1, 2, \dots, j, \dots, k$) lze pak psát následovně (31).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{1n_1} \\ \dot{\phi}_{2n_2} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{jn_j} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{mn_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 K_1 \\ J_2 K_2 \\ \vdots \\ J_j K_j \\ \vdots \\ J_m K_m \end{bmatrix} \mathbf{Rot}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{y}_l \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (31)$$



3 Simulační model

Na základě předešlé části této práce a se základy programování byl v prostředí Matlab verze R2021b vytvořen simulační model spolupracujících všesměrových vozítek libovolné konfigurace.

3.1 Popis programu

3.1.1 Zadání geometrie

V této části skriptu musí uživatel zadat geometrické parametry vozítka, ze kterého je složena spolupracující skupina s předpokladem, že ve skupině spolupracují pouze vozítka stejného typu a rozměrů, pro který má být vypočítána inverzní kinematika. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.3, jedná se o vozítko konfigurace (a) z Obr. 5. Uživatel postupně zadá poloměr kola Mecanum označený písmenem R , poté rozchod vozítka W a dále rozvor vozítka H . Nakonec musí být vyplněna poloha jednotlivých vozítek ve společném souřadnicovém systému $X_s O_s Y_s$. Za tímto účelem je zde proměnná G , což je matice ve tvaru $(n \times 3)$, kde n značí počet vozítek ve skupině. První sloupec obsahuje polohu v ose X_s , druhý polohu v ose Y_s a poslední sloupec úhel natočení δ , jak je znázorněno na Obr. 6.

3.1.2 Zadání parametrů simulace

V této části uživatel vyplní časový krok dt a konečný čas simulace.

3.1.3 Zadání počátečních podmínek

V této části uživatel zadá počáteční polohu společného souřadnicového systému $X_s O_s Y_s$ v globálním souřadnicovém systému $X_l O_l Y_l$, jak je znázorněno na Obr. 6.

3.1.4 Výpočty

Do této části uživatel za běžné situace nijak nezasahuje. Nejprve se určí celkový počet kroků t v simulaci a také počet kroků odpovídající jedné vteřině kvůli animaci. Za účelem zpřehlednění skriptu byla použita vlastní funkce



s názvem `Funkce_G`. Vstupem této funkce jsou již zmíněné geometrické parametry z kapitoly 3.1.1. Výstupem této funkce je největší vzdálenost vozíků od středu souřadnicového systému v ose X_S a Y_S , dále matice inverzní kinematiky (25) a poté matice dopředné kinematiky J^+ (32) [12].

$$J^+ = -\frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{W+H} & -\frac{1}{W+H} & -\frac{1}{W+H} & \frac{1}{W+H} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Případně by bylo také možné použít funkci `pinv(J)`, která by vrátila stejnou matici, a to bez znalostí kinematických poměrů.

Následuje výpočet matice obsahující jednotlivé úhly ψ , nejprve je úhel ψ vypočítán funkcí arkus tangens, a kvůli omezení definičního oboru této funkce v intervalu $(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2})$ je pomocí cyklu `for` přičten správný násobek π a v případě umístění vozítka v počátku je úhlu ψ přiřazena nula, aby bylo zabráněno případné chybě ve výpočtu. Následně je vypočítán vektor **D** obsahující vzdálenost vozítek od počátku společného souřadnicového systému $X_S O_S Y_S$.

Na dalších řádcích jsou připraveny matice **K** na základě (29) a matice směrových kosinů **MSC** (33) na základě [14] o rozměrech $(3 \cdot n) \times 3$. Funkce `G` poté končí dalším cyklem `for`, ve kterém jsou vypočteny příslušné polohy v těchto maticích.

$$MSC = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \sin \delta_j & 0 \\ \sin \delta_j & \cos \delta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Následuje předběžný návrh rozměrů nákladu a vozítek, které jsou potřebné pro animaci. Poté jsou zpracovány počáteční podmínky a určeny počáteční polohy jednotlivých vozíků v globálním souřadnicovém systému $X_I O_I Y_I$. Dále jsou předpřipraveny matice poloh a rychlostí v různých souřadnicových systémech.



3.1.5 Návrh trajektorie

V této části uživatel zadává rychlost převáženého předmětu v souřadnicovém systému $X_sO_sY_s$ a tím navrhuje trajektorii. Základem této části programu je cyklus if, elseif, else a rozhodujícím parametrem je čas.

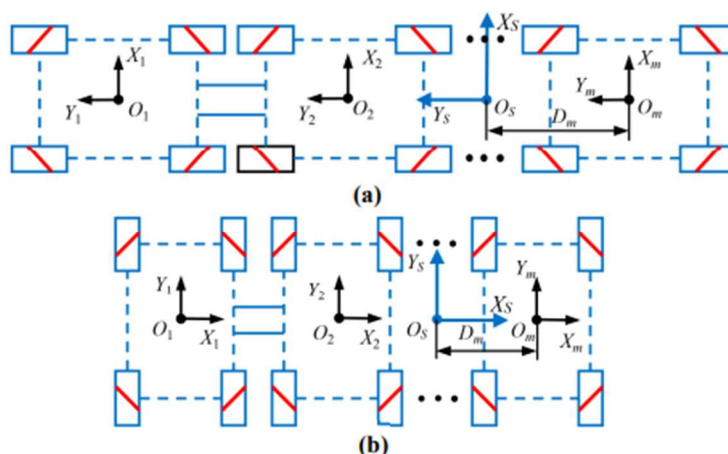
3.1.6 Vizualizace

Tato část programu vykresluje grafy rychlostí v souřadnicovém systému $X_sO_sY_s$ a polohy v globálním souřadnicovém systému $X_I O_I Y_I$, které také tvoří základ pro animaci pohybu nákladu a vozíku v globálním souřadnicovém systému.

3.2 Výstupy simulačního modelu

Za silnou stránku vytvořeného simulačního modelu lze považovat možnost výpočtu dopředné kinematiky pro libovolnou konfiguraci spolupracujících vozítek a také relativně jednoduchou změnu požadované konfigurace pouhým přepsáním matice G z kapitoly 3.1.1.

První verze simulačního modelu byla schopna vypočítat pouze dopřednou kinematiku čtveřice vozítek, která byla umístěna do tvaru obdélníku kolem počátku souřadnicového systému $X_sO_sY_s$. Po konzultacích s vedoucím bakalářské práce byl vytvořen konečný univerzální simulační model. V následující části budou popsány tři navržené konfigurace, které byly zpracovány v simulačním modelu. Pochopitelně by bylo možné předvést mnohem více konfigurací, jako je například konfigurace tandemová nebo paralelní na Obr. 7. V konfiguraci 3 bude ukázáno, že model dokáže zpracovat libovolnou konfiguraci.



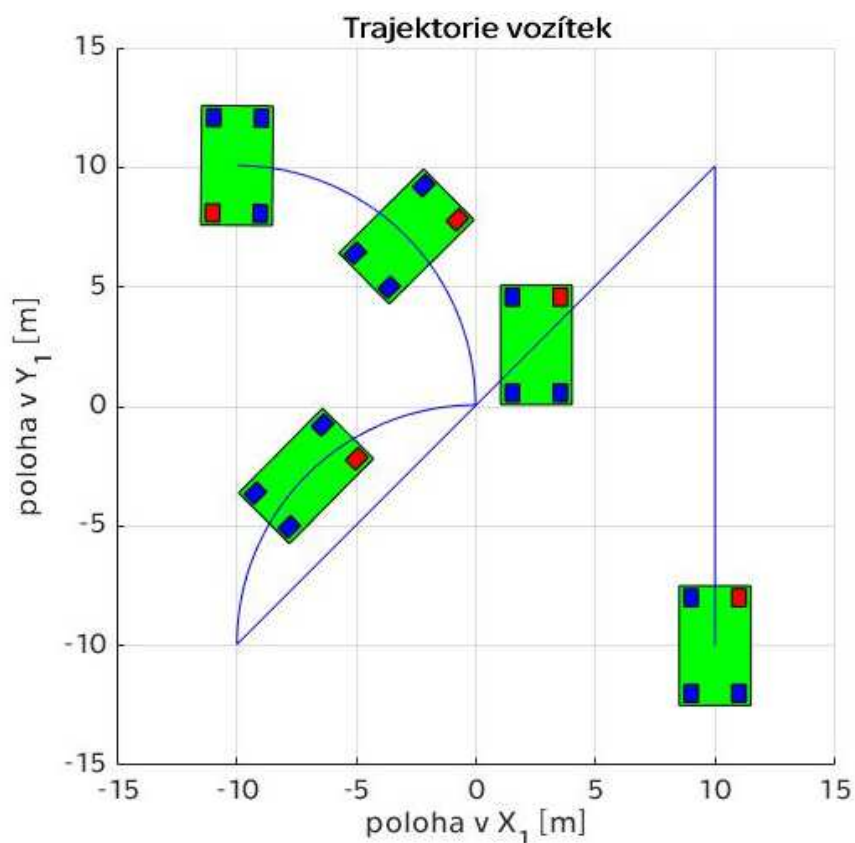
Obr. 7 (a) tandemová konfigurace, (b) paralelní konfigurace [4]

Pro všechny tyto konfigurace byla v simulačním modelu navržena stejná trajektorie. Nejprve se převážený náklad pochybuje rychlostí 1 m/s po dobu 20 s přímo ve směru osy Y_s , následuje diagonální pohyb rychlostí -0.5 m/s v osách X_s a Y_s po dobu 40 s. Třetím pohybem je pohyb po čtvrtkružnici, kdy osa Y_s směřuje do směru jízdy, tečná rychlost je 0.785 m/s a úhlová rychlost $-4.5^\circ/s$. Následuje další pohyb po čtvrtkružnici se stejnou tečnou rychlostí a opačnou úhlovou rychlostí než v předešlém pohybu, avšak nyní směřuje do směru jízdy záporný směr osy X_s . Posledním pohybem je rotace na místě rychlostí $9^\circ/s$ po dobu 20 s.

Tato trajektorie je zobrazena modrou nepřerušovanou čarou na Obr. 8, Obr. 9 a Obr. 10, zelenou barvou je zobrazen náklad, červenou barvou je zobrazeno jedno vybrané vozítko, jehož úhlové rychlosti motorů lze vidět na Obr. 11, Obr. 12 a Obr. 13. Modrou barvou jsou pak zobrazeny zbylá vozítka.

3.2.1 Konfigurace 1

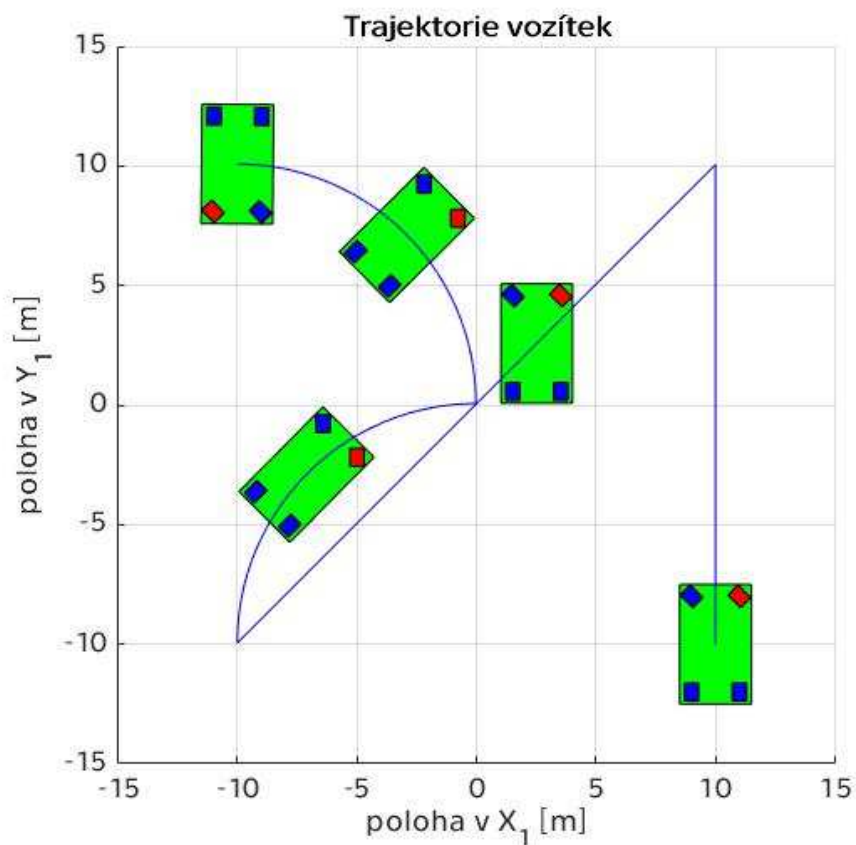
První a nejjednodušší konfigurace se skládá ze čtyř vozítek umístěných ve tvaru obdélníku okolo počátku souřadnicového systému $X_s O_s Y_s$, kde všechny vozítka svírají stejný, a to nulový úhel právě s tímto souřadnicovým systémem. Tato konfigurace reprezentuje situaci, ve které je převáženým předmětem čtyřkolové vozidlo, vozítka se nacházejí pod jeho koly a přední kola směřují přímo.



Obr. 8 Trajektorie vozítek v konfiguraci 1

3.2.2 Konfigurace 2

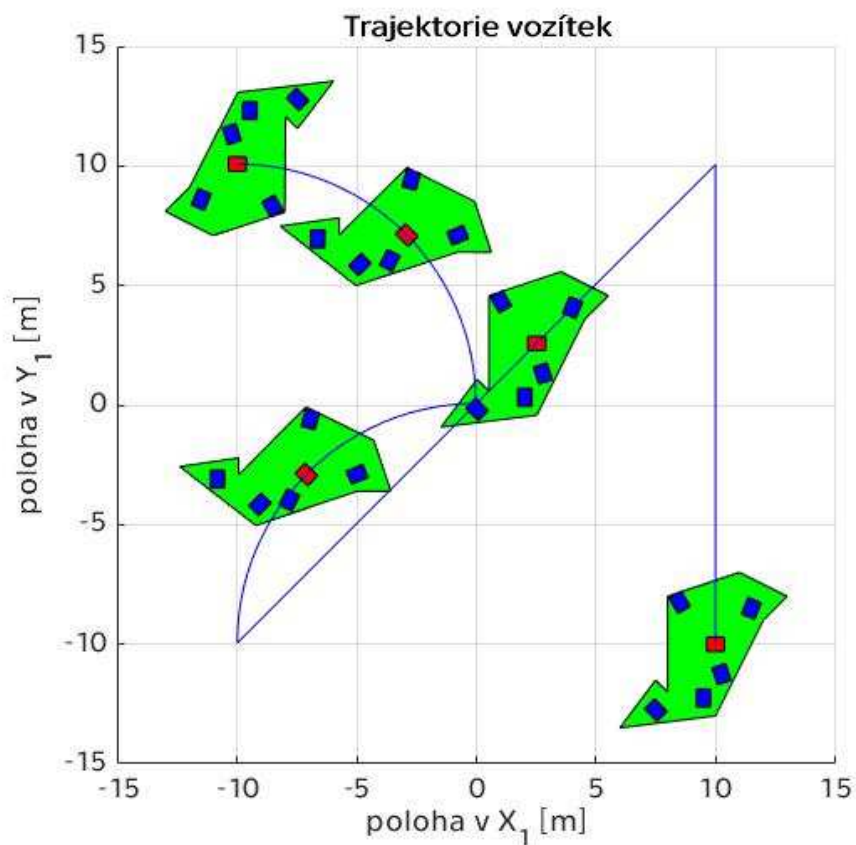
Konfigurace 2 se od konfigurace 1 liší natočením přední dvojice vozítek o úhel $\delta=45^\circ$ a jejím cílem je poukázat na možnost simulačního modelu měnit natočení jednotlivých vozítek vůči převáženému nákladu. Tato konfigurace také představuje převážení čtyřkolového vozidla s vozítky nacházejícími se pod jeho koly, avšak v této situaci jsou kola natočena, což je ve skutečném světě více než pravděpodobné. Například při představě parkovacího domu, kam řidič přijede, s vozidlem zaparkuje na předem určeném místě, nesrovná volant, vystoupí a vozítka toto vozidlo převezmou a odvezou na místo určené k dlouhodobému parkování.



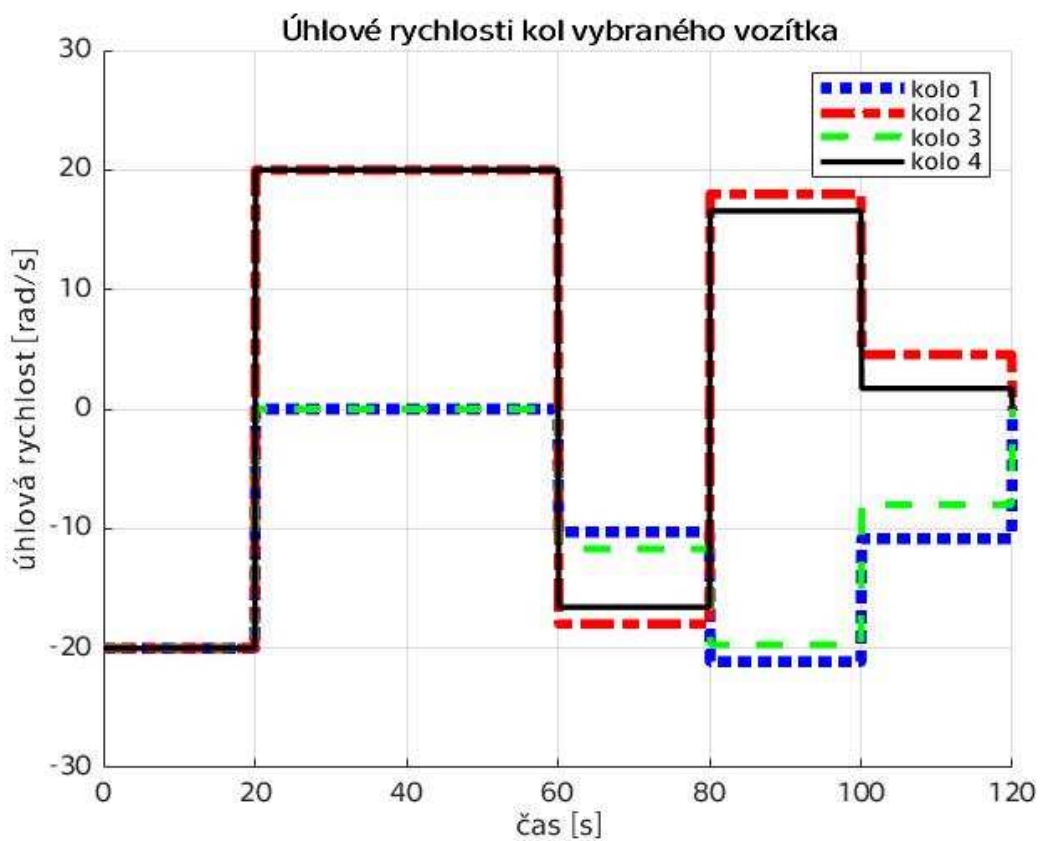
Obr. 9 Trajektorie vozítek v konfiguraci 2

3.2.3 Konfigurace 3

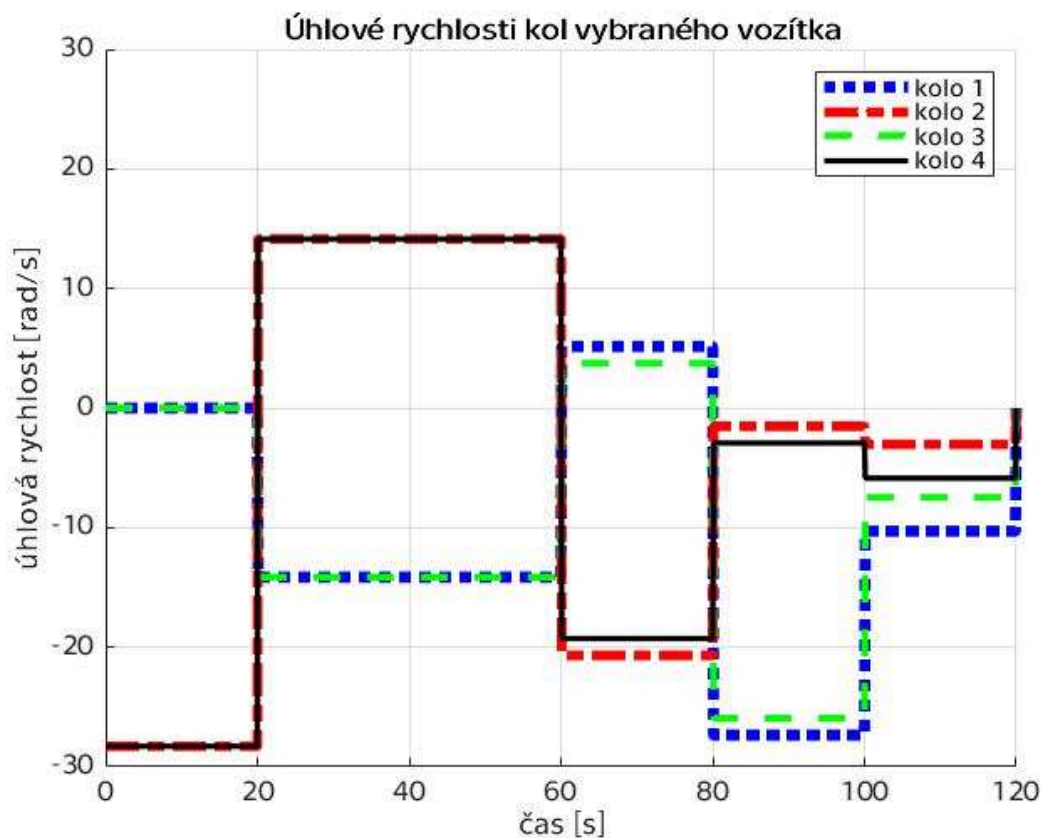
Konfigurace 3 využívá všestrannosti vytvořeného simulačního modelu naplno. Skládá se z šesti náhodně umístěných vozítek. Podobně vypadající konfigurace by mohla být ve skutečnosti využita například při přepravě geometricky nepravidelných předmětů.



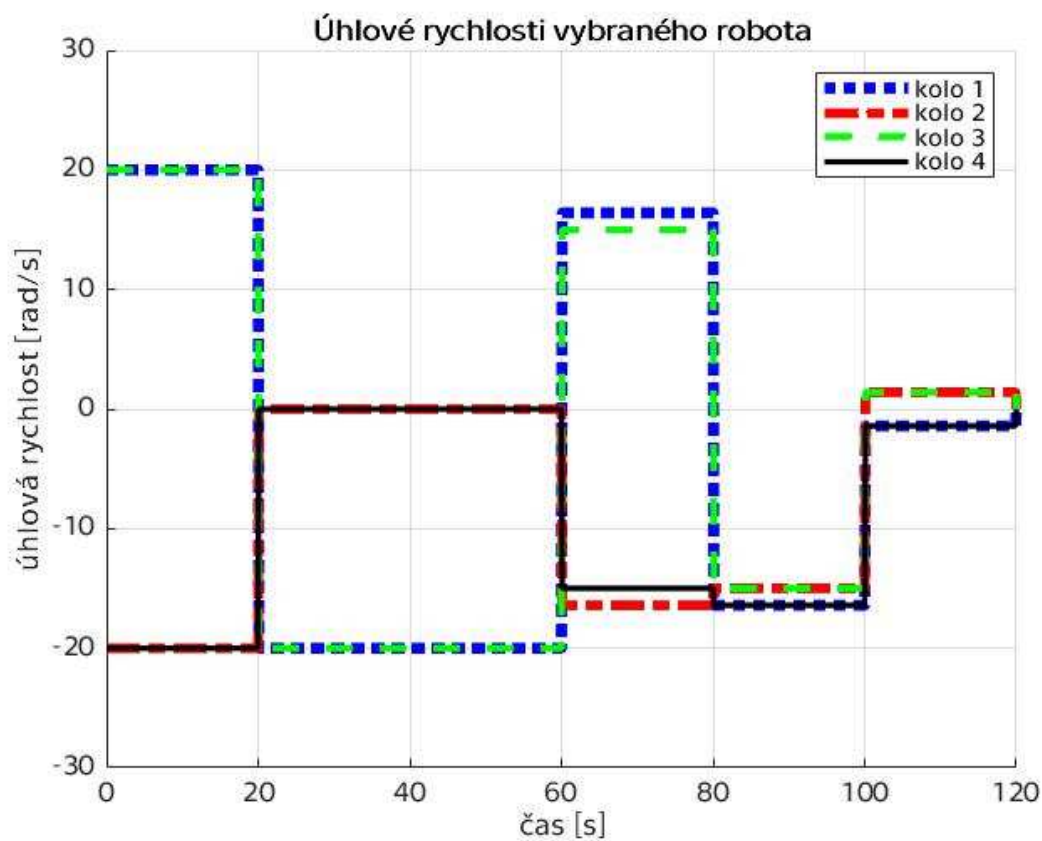
Obr. 10 Trajektorie vozítek v konfiguraci 3



Obr. 11 Úhlové rychlosti kol vybraného robota z konfigurace 1



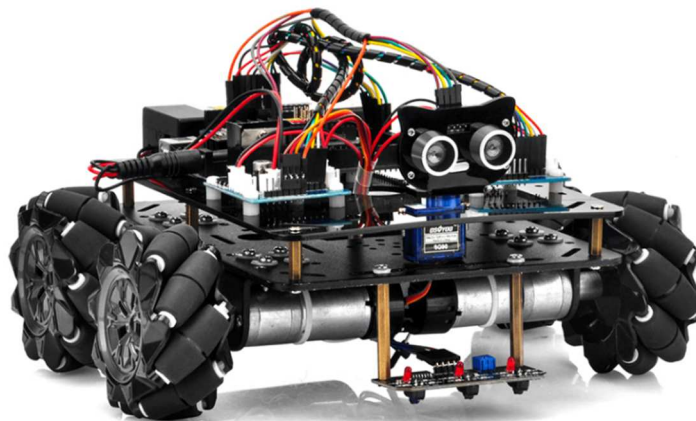
Obr. 12 Úhlové rychlosti kol vybraného robota z konfigurace 2



Obr. 13 Úhlové rychlosti kol vybraného robota z konfigurace 3



4 Simulační experiment



Obr. 14 Vozítko značky Osoyoo [15]

4.1 Výběr vhodného vozítka

Za účelem uskutečnění reálného experimentu bylo zapotřebí vybrat, případně navrhnout vlastní vozítko s koly Mecanum. Z důvodu časových úspor bylo nakonec rozhodnuto o pořízení vozítka jako celku. Požadavkem na platformu byla nízká cena, možnost vlastního naprogramování, ideálně s deskou kompatibilní s opensource elektronickou platformou Arduino a dále také přítomnost stejnosměrných motorů s enkodéry, které u finančně nenáročných vozítek často chybí.

Na základě těchto požadavků nakonec bylo vybráno vozítko značky Osoyoo, která nabízí mnoho produktů v rámci takzvaného konceptu STEM [16]. Konkrétně se jedná o model Z012318MC na Obr. 14. Součástí balení je vše, co je potřeba pro úspěšné složení a funkčnost tohoto vozítka: základní komponenty, baterie, propojovací USB kabel, ale i mnoho součástek, které v rámci této práce nebudou potřeba, jako například wifi modul či ultrazvukový senzor, které mohou být užitečné při budoucích projektech [15].

Toto vozítko disponuje deskou Osoyoo Mega 2560 na Obr. 15, jež by měla být plně kompatibilní s deskou Arduino Mega 2560. K dispozici nabízí 54 digitálních vstupů/výstupů, z nichž 15 umožňuje pulzně šířkovou modulaci, a 16 analogových vstupů [17]. Hřídelové enkodéry jsou vybaveny dvojicí Hallových sond [18] pro určení rychlosti a směru otáčení.

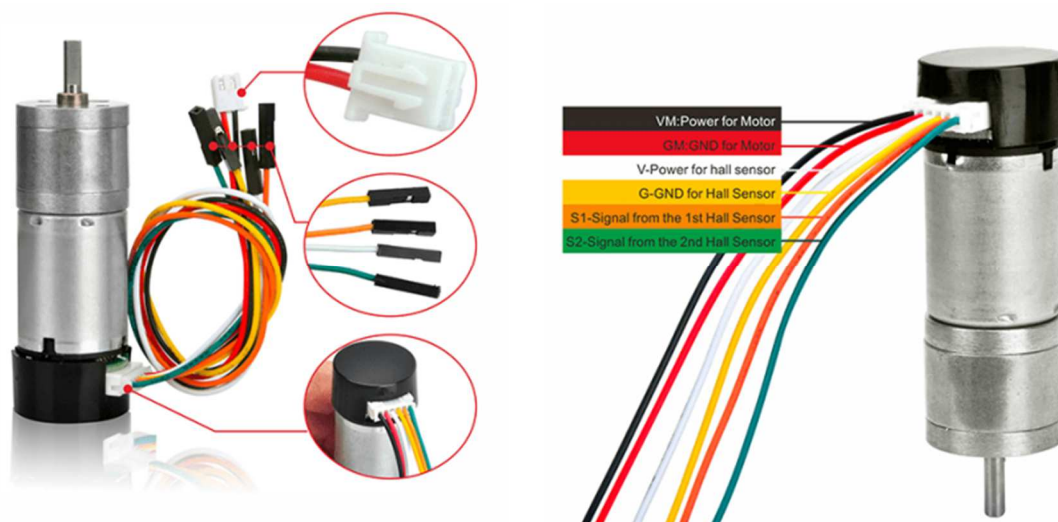


Obr. 15 Deska Osoyoo Mega 2560 [17]

4.2 Zprovoznění vozítka

Vozítko bylo prvně sestaveno dle podrobného, avšak ne vždy zcela správného návodu výrobce [19]. Poté byl nahrán testovací program, aby byla ověřena správná funkčnost vozítka.

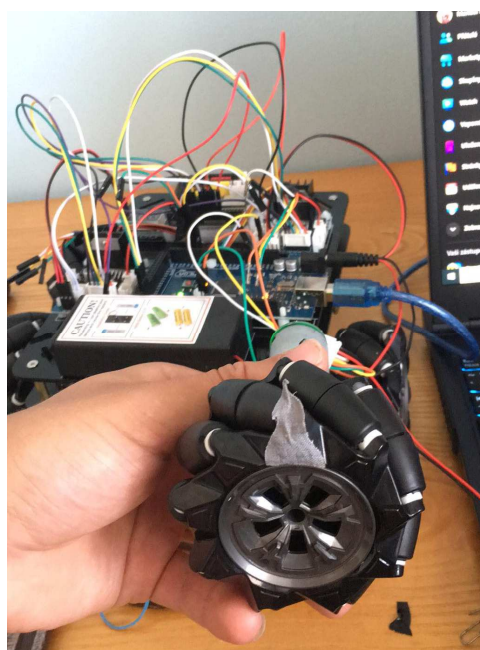
Po úspěšném testování následovalo zprovoznění inkrementálních enkodérů, jimiž jsou sice motory vybaveny, avšak v rámci původní koncepce výrobce nejsou nijak využity. Zde nastali první komplikace. Nejmenší komplikací byl fakt, že vodiče enkodérů jsou zakončeny pomocí female pinů, které není možné zasunout do female pinů desky Osoyoo. Na obrázku od výrobce je prohozeno označení napájecího a uzemňovacího vodiče enkodéru, což vedlo k nefunkčnosti zapojených enkodérů dle tohoto označení. Dále se objevil problém s nahráváním programů z prostředí Arduino IDE na desku Osoyoo Mega 2560 i přes tvrzení o 100% softwarové a hardwarové kompatibilitě [17]. Diskuse na komunitních fórech platformy Arduino a videa naznačují možný problém s takzvanými klony oficiálních desek [20][21]. Řešením, které nebylo nikde zmíněno, bylo přejmenovat soubor Board.txt tak, aby nebyl programem Arduino IDE nalezen. Bohužel výrobce uvádí pouze velmi strouhou dokumentaci ke stejnosměrným motorům a enkodérům. Nikde neuvádí typ enkodérů, převodový poměr motorů nebo počet pulzů na otáčku PPR (z anglického pulses per revolution) ani napájecí napětí enkodérů.



Obr. 16 Hřídelový enkodér [19]

Na základě vizuální podobnosti (viz Obr. 16) s jinými enkodéry z [22][23] byly enkodéry prvně připojeny k napětí 3,3 V a později 5 V. Počet pulzů na otáčku byl experimentálně určen za pomoci [23] z počtu pulzů na deset otáček. Výsledkem tohoto experimentu byla výsledná hodnota počtu pulzů na otáčku stanovena jako 224.

Po úspěšném otestování funkčnosti všech enkodérů (viz Obr. 17) bylo nutné sestavit zpětnovazební řízení [23] a mírně upravit program z [24]. Pro správnou funkci je nutné použít piny, jež umožňují využití tzv. přerušení (interrupts), která jsou velmi užitečná právě v situacích, kdy má program běžící na



Obr. 17 Určení pulzů na otáčku hřídelového inkrementálního enkodéru



mikrokontroleru automaticky zaznamenat nějaký vnější podnět, jako je například pulz z rotačního enkodéru. Tvorba programu, který by zaznamenával tyto vnější impulzy bez přerušení pouze pomocí takzvaného pollingu, který spočívá v nepřetržitém snímání vstupů ze senzorů, je obtížná [25]. Na desce Osoyoo Mega 2560 se nachází celkem 6 pinů s přerušením, což je dostačující počet, jelikož na každý enkodér připadá jeden pin s přerušením. V tuto chvíli bylo možné začít ovládat vozítka na základě vlastních požadavků, avšak nejdříve bylo potřeba nastavit rozumně parametry PID regulátoru. To bylo provedeno nejprve nastavením proporcionalní, poté integrační, a nakonec derivační složky na základě pozorování, jak dobře jednotlivá nastavení sledují požadovanou polohu pomocí sériové linky v programu Arduino IDE.

Po prvním hrubém nastavení PID regulátoru byly vyzkoušeny základní pohyby a zhodnocena jejich přesnost, která nebyla příliš vysoká z důvodů nízké přesnosti výroby a smontování vozítka, nevhodně nastaveného regulátoru a prokluzu mezi podkladem a koly Mecanum. Snahou tedy bylo tyto nepřesnosti eliminovat, což se částečně povedlo znovusmontováním vozítka a přenastavením regulátoru.

4.3 Provedení experimentu

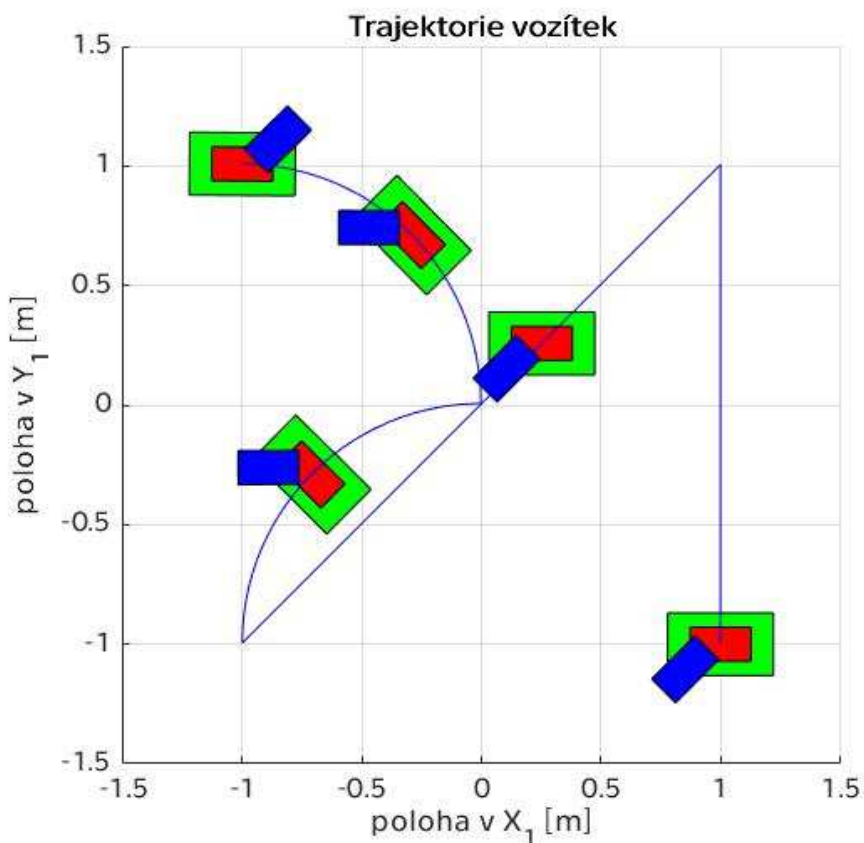
Za účelem provedení experimentu bylo nejprve nutné změřit určující rozměry vozítka R , W , H z části 3.1.1 pomocí posuvného měřítka. Tyto rozměry byly následně vloženy do simulačního modelu v programu Matlab (viz Obr. 18), kde také bylo navrženo testovací rozmístění vozítek. První vozítko, odpovídající červenému obdélníku na Obr. 19, je umístěno v samotném počátku souřadnicového systému $X_s O_s Y_s$ bez natočení, druhé vozítko, na Obr. 19 vyplněné modrou barvou, je umístěno v souřadnicích $X_s = -0.1475$ m, $Y_s = -0.105$ m a jeho natočení $\delta = \frac{\pi}{4}$.

```
2 %% zadání geometrie
3 R=0.0385; % [m] poloměr mecanum koleček
4 W=0.102; % [m] 0.5*rozchod vozítka
5 H=0.0475; % [m] 0.5*rozvor vozítka
6 G=[0 0 0; -0.1475 -0.105 pi/4];%umístění podvozků
```

Obr. 18 Snímek ze simulačního modelu se zadanou geometrií



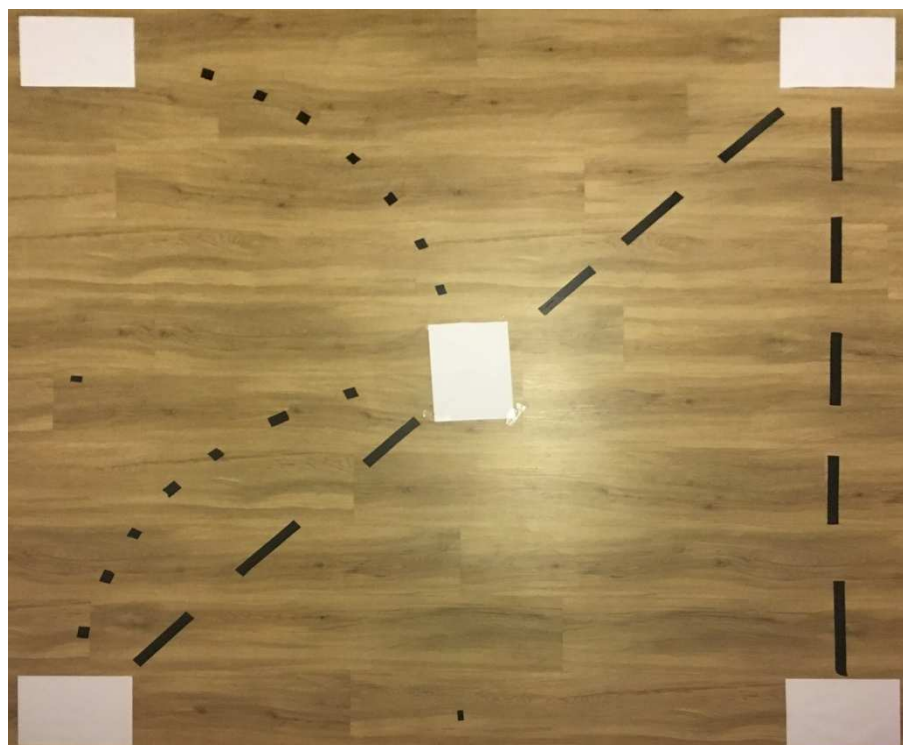
Tyto souřadnice odpovídají levému dolnímu rohu papíru A4, orientovaného na šířku. Toto umístění bylo zvoleno pro lepší vyhodnocení experimentu. Jelikož bylo k dispozici pouze jedno vozítko, nebylo možné vyzkoušet více vozítek současně a přepravovat na nich skutečný náklad. Z tohoto důvodu se dvojice vozítek na Obr. 19 také překrývá.



Obr. 19 Trajektorie vozítek z experimentu

Dále byla upravena trajektorie z kapitoly 3.2 na trajektorii, kterou bylo možné otestovat na ploše přibližně 2,5x2,5 m, jak lze pozorovat na Obr. 19.

Požadovaná trajektorie nákladu byla pomocí černé lepicí pásky vyznačena na podkladu (viz Obr. 20), na kterém byly pozorovány relativně dobré vlastnosti vozítka, aby bylo možné ji porovnat se skutečnou trajektorií. Experiment probíhal po částech, rozdělených na základě dílčích pohybů. Na začátku každé části bylo vozítko umístěno do teoreticky přesné výchozí polohy, poté byl uskutečněn pohyb s údaji o úhlových rychlostech jednotlivých kol z navržené trajektorie v programu Matlab. V rámci experimentu také byly vytvořeny videozáznamy dílčích pohybů, které jsou součástí přílohy bakalářské práce.



Obr. 20 Vyznačená trajektorie během experimentu

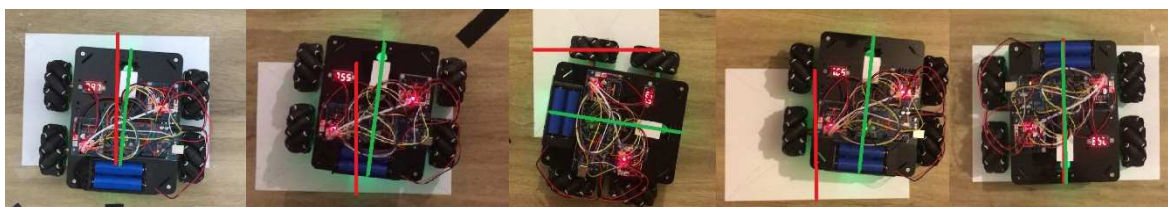
4.3.1 Experiment s prvním vozítkem

První pohyb vozítko zvládalo velmi dobře a opakovaně dosahovalo odchylky v konečné poloze do 0,1 m. U druhého pohybu se plně prokázala nedostatečná přesnost geometrie smontovaného vozítka. Levé přední a pravé zadní kolo byly v porovnání se zbylými dvěma koly umístěny výše, což viditelně vedlo ke špatnému kontaktu s podkladem a častému prokluzu. Tato nepřesnost vedla k tomu, že vozítko postupem času mírně měnilo směr natočením do směru pohybu hodinových ručiček a končilo přibližně 0.5 m nad konečnou očekávanou polohou. Po podložení uchycení stejnosměrných motorů postižených kol se povedlo docílit lepší přesnosti, avšak i nadále byla u tohoto pohybu opakovaně sledována nízká přesnost. Oba pohyby po kružnici byly relativně přesné s odchylkami v konečné poloze okolo 0,1 m. Poslední pohyb dosahoval společně s prvním pohybem největší přesnosti. Dosažené koncové polohy lze porovnat s očekávanými polohami na Obr. 21, kde červená úsečka znázorňuje očekávanou orientaci a zelená orientaci dosaženou.

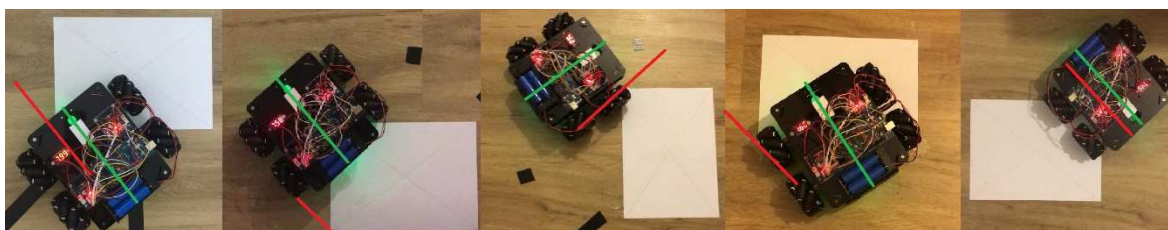


4.3.2 Experiment s druhým vozítkem

První pohyb probíhal u druhého vozítka většinou obstojně, s odchylkou v konečné poloze do 0,2 m. Druhý pohyb měl podobnou odchylku a většinu pokusů skončil nad přesnou polohou. Videozáznam naznačuje, že tato odchylka by mohla být způsobena přejezdem přes papír, na kterém pravděpodobně nedochází k takovému prokluzu, jako je tomu na okolním povrchu. Oba pohyby po čtvrtkružnicích opět dosahovali uspokojivé přesnosti okolo 0,2 m. Poslední pohyb dosahoval opět vysoké přesnosti jako u prvního vozítka. Dosažené koncové polohy lze porovnat s očekávanými polohami na Obr. 22, kde červená úsečka znázorňuje očekávanou orientaci a zelená orientaci dosaženou.



Obr. 21 Koncové polohy z experimentu s 1. vozítkem



Obr. 22 Koncové polohy z experimentu s 2. vozítkem



5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo sestavit simulační model, který umožňuje plánování kinematiky skupiny vozítek s koly Mecanum při přepravě nákladu a tyto výsledky experimentálně ověřit.

V úvodu je popsáno možné využití vozítek s koly Mecanum. Následuje popis kinematiky vozítka a skupiny vozítek s koly Mecanum s ověřením všesměrovosti použitého vozítka na základě odborné literatury. Na základě tohoto popisu byl vytvořen univerzální simulační model v prostředí Matlab, který na základě geometrických parametrů skupiny vozítek a uživatelem navržené trajektorie vypočítá úhlové rychlosti kol všech vozítek ve skupině. Součástí simulačního modelu je také animace pohybu skupiny vozítek na základě dopředné kinematiky.

Pro experimentální ověření výsledků ze simulačního modelu bylo nutné složit a upravit komerčně dostupné vozítka založené na open-source platformě Arduino. Zabudované, avšak nevyužité inkrementální hřídelové enkodéry byly zprovozněny za účelem přesného ovládní natočení kol a zapojeny do obvodu zpětnovazebního řízení. Následovala implementace a úprava řídicího kódu vozítka a současné naladění PID regulátoru. V rámci experimentu byly otestovány trajektorie dvou vozítek a byl pořízen videozáznam.

I přes veškerou snahu se nepodařilo u všech pohybů docílit vysoké přesnosti. Důvodem těchto nepřesností s největší pravděpodobností je nedostatečná geometrická přesnost vozítka, prokluz mezi koly Mecanum a podkladem. Možným negativním faktorem také může být nedokonale nastavený PID regulátor. I přes občasnou nepřesnost pohybů je možné potvrdit správnost simulačního modelu. Vozítka se vždy pohybovala správným směrem a u některých pohybů dosahovala opakovaně uspokojivé přesnosti.

Potenciální rozvoj této práce lze vidět právě ve zvýšení přesnosti, nejspíše využitím přesněji vyrobeného vozítka, vhodnou volbou kol Mecanum a podkladu pro minimalizaci prokluzu. Například společnost KUKA dosahuje u svých všesměrových platforem přesnosti ± 5 mm [26].



Dalším vylepšením by mohlo být propojení simulačního modelu v programu Matlab s Arduinem IDE pro snadný přenos dat ze simulačního modelu. Bylo by také vhodné skutečně vyzkoušet více vozítek k přepravě skutečného nákladu, případně skupinu vozítek vybavit senzory pro určování vzájemné polohy, které by sloužili jako vstup do simulačního modelu.



Reference

- [1] R. Rojas, 'A short history of omnidirectional wheels'. [Online]. Available: <http://robocup.mi.fu-berlin.de/buch/shortomni.pdf>
- [2] Y. Tian, S. Zhang, J. Liu, F. Chen, L. Li, and B. Xia, 'Research on a new omnidirectional mobile platform with heavy loading and flexible motion', *Advances in Mechanical Engineering*, Sep. 2017, doi: [10.1177/1687814017726683](https://doi.org/10.1177/1687814017726683).
- [3] L. Xie, C. Henkel, K. Stol, and W. Xu, 'Power-minimization and energy-reduction autonomous navigation of an omnidirectional Mecanum robot via the dynamic window approach local trajectory planning', *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Jan. 2018, doi: [10.1177/1729881418754563](https://doi.org/10.1177/1729881418754563).
- [4] Y. Li *et al.*, 'Kinematic Modeling of a Combined System of Multiple Mecanum-Wheeled Robots with Velocity Compensation', *Sensors*, vol. 20, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2020, doi: [10.3390/s20010075](https://doi.org/10.3390/s20010075).
- [5] A. Rauniyar, H. C. Upreti, A. Mishra, and P. Sethuramalingam, 'MeWBots: Mecanum-Wheeled Robots for Collaborative Manipulation in an Obstacle-Clustered Environment Without Communication', *J Intell Robot Syst*, vol. 102, no. 1, p. 3, Apr. 2021, doi: [10.1007/s10846-021-01359-5](https://doi.org/10.1007/s10846-021-01359-5).
- [6] KUKA - Robots & Automation, Siemens Plant in Krefeld. KUKA omniMove at Siemens plant Krefeld, (Oct. 02, 2014). [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EvOrFgSmQoc>
- [7] T. Y. Nirwan *et al.*, 'INTRODUCTION TO VERTICAL MULTISTAGE CAR PARKING SYSTEM', *IPASJ International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, vol. 04, issue 04, pp. 16 - 19, Apr. 2016, ISSN 2321-6441.



- [8] M. Mubashirin and S. Mahmud, 'Automated car parking system', Thesis, BRAC Univeristy, 2016. Accessed: Aug. 09, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.bracu.ac.bd/xmlui/handle/10361/8412>
- [9] A. K. Nayak, H. C. Akash, and G. Prakash, 'Robotic Valet Parking System', in *2013 Texas Instruments India Educators' Conference*, Apr. 2013, pp. 311–315. doi: 10.1109/TIIEC.2013.62.
- [10] A. Gfrerrer, 'Geometry and kinematics of the Mecanum wheel', *Computer Aided Geometric Design*, vol. 25, no. 9, pp. 784–791, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.cagd.2008.07.008.
- [11] Y. Li, S. Dai, L. Zhao, X. Yan, and Y. Shi, 'Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot', *Symmetry*, vol. 11, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/sym11101268.
- [12] H. Taheri, B. Qiao, and N. Ghaeminezhad, 'Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot', *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, pp. 6–9, Mar. 2015, doi: 10.5120/19804-1586.
- [13] L. Gracia and J. Tornero, 'Kinematic modeling of wheeled mobile robots with slip', *Advanced Robotics*, vol. 21, no. 11, pp. 1253–1279, Jan. 2007, doi: 10.1163/156855307781503763.
- [14] M. Valášek, Stejskal, and J. Březina, *Mechanika B. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze*, 2006. ISBN 80-01-02919-0.
- [15] 'M1 Metal Chassis Mecanum Wheel Robotic (for Arduino Mega2560) Introduction (Model ZZ012318MC) « osoyoo.com'. <https://osoyoo.com/2019/11/08/omni-direction-mecanum-wheel-robotic-kit-v1/> (accessed Aug. 13, 2022).
- [16] 'osoyoo.com'. <https://osoyoo.com/> (accessed Aug. 13, 2022).



- [17] 'Osoyoo Mega2560 Board — Fully compatible with Arduino Mega2560 Rev.3 « osoyoo.com'.
<https://osoyoo.com/2017/08/30/osoyoo-mega2560-board-fully-compatible-with-arduino-mega2560-rev-3/> (accessed Aug. 13, 2022).
- [18] 'DC Encoder Motor Robotic Car Speed Encoder 9V for Arduino Raspberry Pi Platform DIY', OSOYOO.Store.
<https://osoyoo.store/products/dc-motor-robotic-car-speed-encoder-9v-for-arduino-raspberry-pi-platform-diy> (accessed Aug. 13, 2022).
- [19] 'Manual V1.3metal-mecanum'. Aug. 11, 2021. [Online]. Available:
<https://osoyoo.com/manual/V1.3metal-mecanum.pdf>
- [20] nattynerdy, 'avrdude: stk500v2__ReceiveMessage(): timeout', *Stack Overflow*, Sep. 12, 2018. <https://stackoverflow.com/q/19645441> (accessed Aug. 13, 2022).
- [21] R. Brewer, *Chinese Generic Mega 2560 Timeout Error fix!*, (Apr. 26, 2016). [Online Video]. Available:
<https://www.youtube.com/watch?v=tAzjO4v7oF4&list=LLDn5ewJDzz53liwWmZTgQnQ&index=3>
- [22] Nikodem Bartnik, *Encoded Motor With Arduino*, (2019). [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zZ40o9QnoUY>
- [23] Curio Res, *How to control a DC motor with an encoder*, (2021). [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dTGITLnYAY0>
- [24] Curio Res, *How to control multiple DC motors with encoders*, (2021). [Online Video]. Available:
https://www.youtube.com/watch?v=3ozgxPi_tI0



- [25] 'attachInterrupt() - Arduino Reference'.
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/external-interrupts/attachinterrupt/> (accessed Aug. 13, 2022).
- [26] 'KUKA omniMove, technologie pohonu', *KUKA AG*.
<https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%c5%beby/mobilita/kuka-omnimove,-technologie-pohonu>
(accessed Aug. 13, 2022).



Seznam příloh

- Příloha 1 Videozáznam z experimentu s prvním vozítkem
- Příloha 2 Videozáznam z experimentu s druhým vozítkem
- Příloha 3 Funkce__G
- Příloha 4 Simulační model s konfigurací 1
- Příloha 5 Simulační model s konfigurací 2
- Příloha 6 Simulační model s konfigurací 3
- Příloha 7 Simulační model s konfigurací z experimentu