Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra techniky a kybernetiky

Autoreferát disertační práce

Počítačové modelování pohybu zemědělské techniky po pozemku

Autor práce: Ing. Martin Filip

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Bartoš Ph.D.

České Budějovice 2024

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá problematikou optimalizace počtu odvozních souprav a nakladačů při manipulaci, svozu a přepravě balíků píce, nebo slámy z pozemku na místo skladování tak, aby bylo dosaženo co nejnižší spotřeby lidské práce. Automatizovaný rozhodovací proces umožňuje zvolit optimální počet odvozních souprav a nakladačů tak, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům manipulačních prostředků při čekání na přepravní techniku, nebo naopak aby nevznikaly ztrátové časy odvozních souprav nedostatečnou kapacitou nakladačů. Základní funkcí optimalizačního programu je zpracování obrazového snímku reálného pozemku vytvořeného v Google Maps, detekování jeho hranic a na základě odhadů výnosu píce nebo slámy odhadnout přibližné rozmístění velikostně předem definovaných balíků a určení centroidů, tedy míst, kde by měla být přistavena odvozní souprava při nakládání. Centroid je současně místo, ze kterého jsou nejkratší pojezdové vzdálenosti pro nakladač. K centroidům jsou postupně přiřazovány balíky s nejnižší vzdáleností až do naplnění skupiny. Jedná se o stav, kdy počet balíků ve skupině odpovídá přepravní kapacitě odvozního prostředku.

Další funkcí optimalizačního algoritmu je naplánování pojezdových tras v centroidu, a na základě vstupní hodnoty průměrné rychlosti nakladače, je vypočítaný potřebný čas pro pojezd tohoto stroje. K celkovému pracovnímu času nakladače je přičten i čas potřebný na jízdu z prostoru uskladnění stroje k pozemku, a také čas potřebný pro pojezd z místa vstupu na pracovní plochu k centroidu, i doba jízdy od zpracovaného centroidu k dalším centroidům, včetně doby pojezdu ze sklizených ploch zpět na místo, kde bude nakladač odstaven. K pojezdu nakladače je dále přičtena hodnota potřebného času zdvihu všech balíků v centroidech a jejich uložení na odvozní prostředek a doba prostojů manipulátoru, čímž je zjištěn celkový čas práce nakladače.

Pracovní čas odvozních souprav je vypočten z dálky trasy (násobené průměrnou rychlostí těchto strojů) z místa uskladnění strojů k centroidu, doby nakládání a času potřebného na pojezd k místu skladování balíků, včetně doby potřebné na složení balíků z odvozní soupravy. Čas nakladačů a odvozních souprav je vyhodnocován souběžně, v synchronizaci a je vypočítáváno, zda dochází ke ztrátovým časům, které jsou postupně připočítávány k pracovním časům. Optimalizační program postupně počítá různé varianty pro (n) nakladačů, (n) odvozních souprav, vyhodnocuje, která varianta spotřebuje nejméně času a je tedy optimální z pohledu nejnižší spotřeby času.

Klíčová slova: Optimalizace spotřeby pracovního času, nakladače, odvozní soupravy, simulace.

Obsah

Úvod 5

1 Rešerše literárních zdrojů: algoritmy pro pohyb zemědělských strojů 6

1.1 Optimalizace pohybu zemědělského stroje po pozemku 6

1.2 Optimalizace současného pohybu několika zemědělských strojů po pozemku 9

1.3 Algoritmy pro dekompozici pracovní oblasti 9

1.4 3D algoritmy pro pohyb zemědělských strojů 11

2 Metodika 12

3 Výsledky popis algoritmu 14

3.1 Výsledky – měření vstupních hodnot 22

3.2 Vybrané výsledky – simulace 23

4 Diskuse 26

Závěr 29

Seznam použité literatury 30

Úvod

Rostlinná produkce je jedním ze základních stavebních kamenů lidské společnosti. Vedle přímé produkce základních potravin nabízí možnost dalšího zhodnocení svých produktů ve formě vstupních surovin (především krmiv) pro živočišnou výrobu, nebo třeba materiálu pro výrobu energií. Stále se zvyšující nároky na množství rostlinné produkce jsou do značné míry umožněny díky výkonným strojním zařízením, které nahradily manuální lidskou práci a které jsou na trhu k dispozici. Provoz těchto zařízení se řídí stejnými pravidly, jako většina jiných lidských činností – snahou o co největší minimalizaci nákladů a maximalizaci zisku, eliminaci negativních dopadů hospodářské činnosti na životní prostředí, snahou vytvořit trvale udržitelný systém atp.

Prudký rozvoj techniky, ke kterému došlo v uplynulých desetiletích, by nebyl možný bez významného technického pokroku na poli elektroniky. Bez sofistikovaného systému řízení a automatizace se dnes většina zemědělských podniků neobejde – zejména těch, které se orientují na živočišnou produkci. V provozech orientovaných na rostlinnou produkci se s elektronickými systémy setkáme nejčastěji u moderních strojů pro polní práce, kde jsou významným pomocníkem šetřícím čas i peníze. V současnosti se také jeví jako velice perspektivní oblast tzv. precizní zemědělství, které by bez elektroniky vůbec nemohlo fungovat.

Pokrok v oblasti elektroniky zcela logicky vyústil k prudkému zvýšení výkonu a snížení ceny počítačů, které posléze pronikly do většiny lidských činností. Ve vědě a výzkumu jsou počítače využívány intenzivně například k řízení experimentů a zpracování experimentálních dat. V posledních cca dvou desetiletích se značně rozšířilo využití počítačů také k realizaci počítačových simulací. Numerické řešení matematického modelu umožňuje predikovat chování zvoleného systému za předem daných vstupních podmínek. Jako ukázku je možno zmínit například všem dobře známé počítačové modely navržené k předpovědi počasí, se kterými se setkáváme v televizních relacích, komplikované modely pohybu těles v kosmickém prostoru nebo návrhy strojních zařízení pomocí počítače. Počítačové modelování – relativně nová vědní oblast – se tak stalo prostředkem, jak ušetřit nemalé finanční prostředky, a to díky možnosti zvolit to nejlepší řešení z celé řady možných postupů.

1 Rešerše literárních zdrojů: algoritmy pro pohyb zemědělských strojů

1.1 Optimalizace pohybu zemědělského stroje po pozemku

Podle realistických odhadů se bude počet lidí obývajících planetu Zemi v roce 2050 pohybovat kolem devíti miliard osob (Gilpin, 2015). Požadavky na zajištění dostatečného množství potravin tak bude v následujících letech představovat klíčový problém pro většinu států tohoto světa. Klíčovou úlohu přitom budou hrát moderní technologie, především elektronika a automatizace. Vývoj v posledních letech potvrzuje trend intenzivního pronikání moderních technologií do zemědělských podniků, který je motivován zejména těmito faktory:

1) Snižování nákladů na pracovní sílu.
2) Náhrada za pracovní sílu, která není na pracovním trhu k dispozici.
3) Intenzifikace výroby spojená s vyššími zisky zemědělských podniků.
4) Optimalizace zemědělské činnosti.

V zemědělských podnicích se tak často setkáváme s velice sofistikovanými zařízeními, jako jsou automatizované dojicí roboty, moderní traktory nebo komplikované informační systémy. Vedení podniku se pak snaží o logickou a ekonomicky výhodnou provázanost všech využívaných strojů, a to nejen v rámci jedné pracovní operace, ale také v rámci těchto operací navzájem (předseťová příprava půdy, setí, postřik, sklizeň, hnojení).

Mění se také kvalifikační struktura zaměstnávaných osob. Zatímco ještě před dvaceti lety pracovalo v zemědělství mnoho lidí s malou nebo žádnou kvalifikací, v současnosti jsou často požadovány specializované profese s komplexním přehledem ve většině oblastí zemědělské činnosti. Rutinní aktivity přebírají „programovatelné stroje," nad jejichž činností člověk pouze dohlíží a jen v odůvodněných případech je přebírá pod svou kontrolu.

Také pohyb zemědělských strojů při provádění polních prací zcela závisel na obsluze. Ta se zpravidla rozhodovala spíše podle zažitých zvyklostí než podle objektivních hledisek. S postupným zaváděním senzorů do vozidel a s možnostmi výpočetně optimalizovat pohyb zemědělské techniky po pozemku se ukazuje, nakolik je tento postup neefektivní. Ve studii Bochtis (2013) se například uvádí, že optimalizací trajektorie zemědělských strojů došlo ke snížení mimopracovních přejezdů o více než 58 procent a velikost ošetřené plochy za jednotku času se zvýšila o téměř 20 procent. Vysoký

aplikační potenciál výpočetní techniky v zemědělské produkci potvrdil také například Darnhofer et al. (2012).

V případě, kdy byly realizovány operace vyžadující časté doplňování materiálu, jako je například rozmetání hnoje, povedlo se výpočetními metodami snížit neproduktivně uražené vzdálenosti o 15,7 až 43,5 procent, přičemž celková uražená vzdálenost se snížila o 5,8 až 11,8 procenta. Detailní popis algoritmu, který byl pro tuto studii využit, je uveden ve článku (Jensen, 2015).

Výhody plánování polních operací jsou diskutovány v řadě publikací, jako je například Bochtis (2014), Casoli et al. (2014), Hameed (2012), Liu (2018) a další. Ekonomické hledisko je detailněji diskutováno například v publikacích Abbaspour-Gilandeh (2007), Bottarelli et al. (2019), Hameed (2013 b), Lacour (2014), Lee (2016), Prakash (2014) nebo Safa (2013).

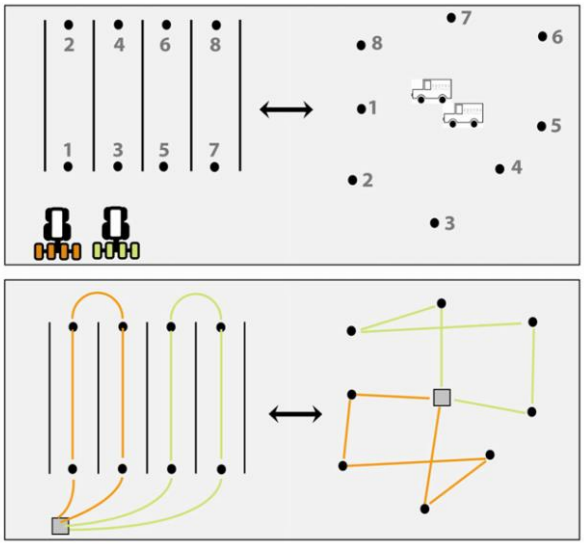
Algoritmy, které lze k optimalizaci pohybu strojů použít, nejsou omezeny jen na oblast zemědělství, ale nalézají uplatnění také v jiných oblastech lidské činnosti. Galceran a Carreras (2013) například uvádějí jejich možné využití u těžebních a sklízecích strojů, u zařízení pro čištění a nátěr povrchů různých předmětů, systémy pro autonomní mapování atp. V obecné rovině pak tyto algoritmy mají jisté charakteristické rysy, kterými jsou (Galceran a Carreras, 2013):

1) zařízení musí navštívit všechny body ošetřované oblasti,
2) zařízení musí pracovní oblast kompletně pokrýt svým pohybem,
3) zařízení musí pokrýt celou oblast s minimálním překryvem jednotlivých cest,
4) zařízení se pohybuje mezi body bez opakování,
5) zařízení se musí vyhnout všem překážkám,
6) k pohybu jsou využívány trajektorie jednoduchých tvarů,
7) zařízení využije optimální dráhu s respektem k požadavkům uvedeným v předchozích bodech.

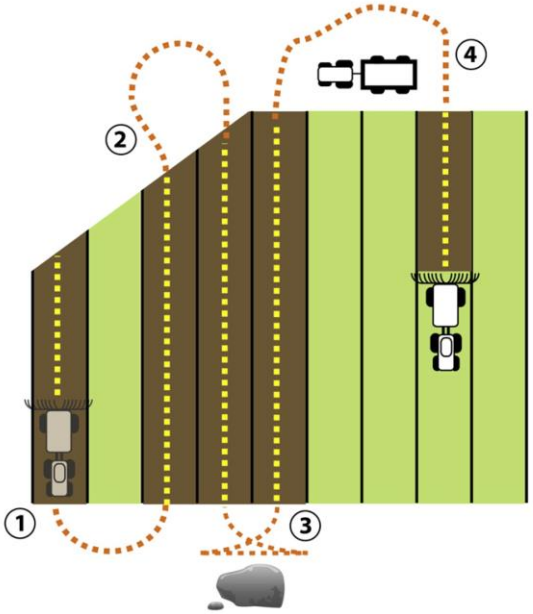
Při realizaci skutečných polních prací samozřejmě nemusí být všechny uvedené předpoklady splněny a vyvíjený algoritmus může vycházet z méně náročných požadavků. Většina autorů vychází ze známého algoritmu obchodního cestujícího, který je převeden spárováním pracovních oblastí na tzv. VRP algoritmus (Vehicle Routing Problem) – viz obrázek 1.1, který je následně řešen v různých modifikacích metodami numerické matematiky. Tento přístup vyžaduje také definování způsobu, jakým je prováděno otáčení zemědělských strojů na souvrati (viz obrázek 1.2).

V současnosti jsou do těchto algoritmů implementovány moderní výpočetní metody, jako jsou například genetické algoritmy, neuronové sítě nebo principy Fuzzy logiky – například Miodragović (2012), Mittal (2013), Nazarahari (2019) nebo Yakoubi (2016).

Některé algoritmy nejsou omezovány jen na oblast polních prací. Jensen et al. (2012) vytvořili jeden z prvních algoritmů, který tyto základní algoritmy rozšiřuje a pokouší se do nich implementovat také operace, které souvisejí s logistikou mezi podnikem a polem.



Obrázek 1.1: Korespondence mezi pohybem zemědělských strojů při vykonávíní polních prací a systémy VRP (Bochtis 2008)



Obrázek 1.2: Ukázky možného otáčení stroje na souvrati (Bochtis, 2008)

1.2 Optimalizace současného pohybu několika zemědělských strojů po pozemku

Většina publikovaných prací nahlíží na problém tak, aby byla zajištěna optimální trajektorie jedné pracovní jednotky (Jensen, 2013; Jensen, 2015). Při provádění polních prací se však obvykle využívá několik pracovních strojů, které můžeme rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří stroje, které přímo vykonávají pracovní operaci, do druhé pak „servisní“ pracovní jednotky, které zpravidla zajišťují odvoz nebo navážení materiálu. Obě skupiny strojů spolu vzájemně interagují (např. souběžná jízda sklízecí mlátičky a dopravního prostředku při vysypávání sklizeného zrna).

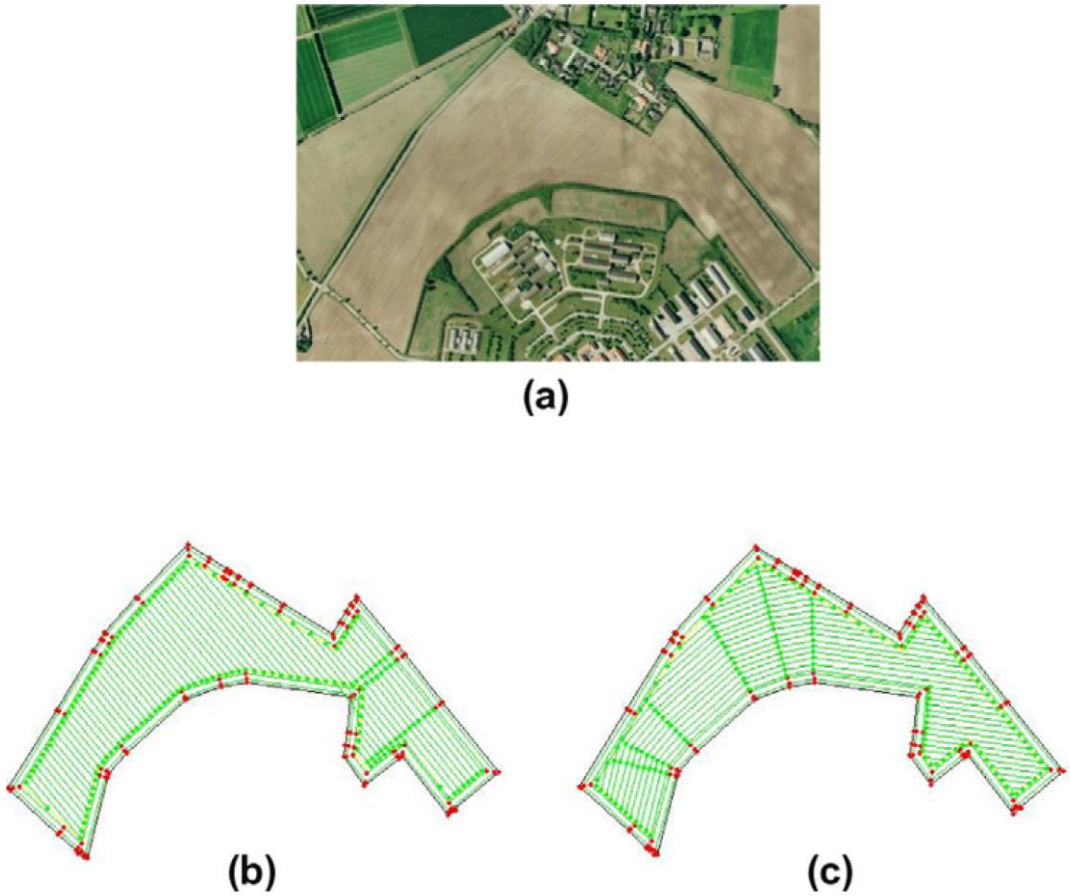
Problematikou optimalizace paralelní činnosti zemědělských strojů se zabývala například pracovní skupina pod vedením Bochtise (2010 a) prezentovala algoritmus, který umožňuje přibližně stanovit polohy servisních strojů a redukovat tak čas potřebný například pro zajištění odvozu sklizeného materiálu. Navržený algoritmus má malé výpočetní nároky a může být efektivně využit i při výpočtech pro skupinu s větším počtem strojů. Na druhou stranu je díky svým omezujícím předpokladům stále poměrně vzdálen reálným situacím a dá se předpokládat, že jeho vývoj ještě není zdaleka dokončen.

Otázkou zůstává, zda je zvolený přístup vhodný. Cílem vývoje v této oblasti je totiž optimalizace pracovních cest všech použitých strojů, která je velice závislá na reálné situaci přímo na poli, zde však selhává. S dalším pronikáním automatizace do zemědělské činnosti je možno očekávat vývoj nových algoritmů založených na jiných principech, které budou určovat optimální trajektorie zemědělských strojů podle aktuální situace, tj. v reálném čase. V současnosti je však takový přístup v praxi nepoužitelný, protože náročnost výpočtu vzrůstá exponenciálně s počtem použitých strojů, jak ukázal Vougioukas (2009). Chování celého systému je navíc významně ovlivněno celou řadou vnějších parametrů, které není možné předem přesně stanovit a které mají do značné míry náhodný charakter – například intenzita dopravy mezi polem, na kterém jsou práce realizovány, a skladem (zrna, hnoje atp.), se kterým servisní pracovní jednotky komunikují.

1.3 Algoritmy pro dekompozici pracovní oblasti

V reálných situacích nemusí pracovní plocha představovat pouze konvexní útvar, ale zpravidla se jedná o konkávní obrazec (viz obrázek 1.3) s menším či větším počtem

„nepřekonatelných“ překážek. Při provádění polních prací je vhodné takový prostor vhodně rozdělit do menších a zpravidla přehlednějších celků.



Obrázek 1.3: Příklad konkávní 2D pracovní oblasti (a) a ilustrativní generované trajektorie s využitím přímočarých (b) a zakřivených (c) tras (Hameed, 2013a).

Oksanen a Visala (2009) prezentovali efektivní algoritmus pro rozklad pracovní plochy do několika menších pracovních oblastí, na které je možno následně aplikovat algoritmy pro nalezení optimální trasy. Algoritmus usnadní práci jak v případě využití robotů, tak v případě nasazení zemědělských strojů vyžadujících obsluhu člověkem. Podrobně se problematikou dekompozice pracovní oblasti do několika dílčích oblastí zabývá také práce, kterou publikovali autoři Jin a Tang (2010). Vedle časové náročnosti prováděných operací jsou uvedeny také konkrétní příklady, které jsou analyzovány s využitím výpočetních metod a ověřeny v praxi. Náročnost algoritmu je $O(n^3 \log(n))$, kde n označuje počet vrcholů pozemku – je tedy výpočetně poměrně náročná a pro pozemky s větším počtem překážek a složitými tvary je obtížně použitelná.

Nevýhodou uvedené studie je také řada zjednodušujících předpokladů, které snižují aplikovatelnost výsledků v praxi.

V publikaci Galceran a Carreras (2013) je popsán základní algoritmus pro dekompozici pracovní oblasti, který je založen na pomyslném pohybu přímky v definovaném směru, přičemž tento pohyb začíná z jedné strany pracovní oblasti. V okamžiku, kdy se pohybující se přímka stane tečnou k překážce, dojde ke vzniku zpravidla tří pracovních oblast. V okamžiku, kdy pohybující se přímka překážku překoná, dojde k sloučení některých pracovních oblastí v jeden celek. Tento postup je používán opakovaně, dokud nedojde k pokrytí celé pracovní oblasti. Výše popsaný algoritmus je samozřejmě možno zobecnit pro obecnější křivky.

1.4 3D algoritmy pro pohyb zemědělských strojů

Většina výše prezentovaných algoritmů je založena na předpokladu, že se jedná o rovinný povrch. V zemědělské praxi však není tento předpoklad často splněn a je potřeba uvažovat komplikovanější uspořádání. I pro tyto případy byly vyvinuty algoritmy, které umožňují pokrýt celou pracovní oblast. Nicméně i v této oblasti je další intenzivní vývoj otázkou několika dalších let.

Pomocí modelů uvažujících 3D reliéf povrchu je možno výpočet významně zpřesnit. Pokud například uvážíme rozpětí pracovních nástrojů dnešních strojů (např. ramena postřikovače mají standardně rozpětí 24 metrů) a přesnost současných navigačních přístrojů, která dosahuje až 2 centimetrů, je zřejmé, že přesnost 2D algoritmů není dostatečná. Sklon pozemku povede k vícenásobnému ošetření některých úseků, respektive k jejich neobdělání.

Studie, kterou publikovali autoři Jin a Tang (2011), se podrobně zabývá čtyřmi aspekty, které ovlivňují výsledky získané pomocí 3D algoritmu:

1) modelování reliéfu terénu,
2) analýza nákladů na provedení operací,
3) rozklad pracovní oblasti,
4) vývoj algoritmu pro nalezení optimální trajektorie stroje.

Autoři porovnali teoretické výsledky s výsledky, které byly dosaženy při skutečných pracích, a uvádějí, že čas potřebný k otáčení na souvrati se snížil o 10,3 procenta, 24,7 procenta se podařilo ušetřit na ztrátách v důsledku eroze a 81,2 procenta na nepřímých nákladech. Celkově došlo ke snížení nákladů o 22 procent.

2 Metodika

Cílem disertace je optimalizace počtu odvozních souprav a nakladačů při manipulaci, svozu a přepravě balíků píce, nebo slámy z pozemku na místo skladování tak, aby bylo dosaženo co nejnižší spotřeby lidské práce. Automatizovaným rozhodovacím procesem bychom měli být schopni zvolit optimální počet odvozních souprav a nakladačů tak, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům manipulačních prostředků při čekání na přepravní techniku, nebo naopak aby nevznikaly ztrátové časy odvozních souprav nedostatečnou kapacitou nakladačů.

Optimalizační program bude vytvořen v programu Python a jeho základní funkcí bude zpracování obrazového snímku reálného pozemku vytvořeného v Google Maps, detekování jeho hranice a na základě odhadů výnosu píce nebo slámy vypočítat přibližné rozmístění velikostně předem definovaných balíků (velikost balíků a výnos hmoty budou vstupní hodnoty optimalizačního programu) a určit centroidy, tedy místa, kde by měla být přistavena odvozní souprava při nakládání. Centroid bude současně místo, ze kterého budou nejkratší pojezdové vzdálenosti pro nakladač. K centroidům budou postupně přiřazovány balíky s nejnižší vzdáleností až do naplnění skupiny. Jedná se o stav, kdy počet balíků ve skupině odpovídá přepravní kapacitě odvozního prostředku. Přepravní kapacita odvozních souprav bude jedním ze vstupních údajů optimalizačního programu. Dalším cílem optimalizačního algoritmu bude naplánování pojezdových tras v centroidu, a na základě vstupní hodnoty průměrné rychlosti nakladače (vstupní hodnota programu), bude vypočítaný potřebný čas pro pojezd tohoto stroje. K celkovému pracovnímu času nakladače bude přičten i čas potřebný na jízdu z prostoru uskladnění stroje k pozemku, a také čas potřebný pro pojezd z místa vstupu na pracovní plochu k centroidu, i doba jízdy od zpracovaného centroidu k dalším centroidům, včetně doby pojezdu ze sklizených ploch zpět na místo, kde bude nakladač odstaven. K pojezdu nakladače bude dále přičtena hodnota potřebného času zdvihu všech balíků v centroidu a jejich uložení na odvozní prostředek, doba prostojů manipulátoru, čímž bude zjištěn celkový čas práce nakladače. Průměrná doba zdvihu a uložení balíků bude vstupní hodnoty optimalizačního programu. Pracovní čas odvozních souprav bude vypočten z dálky trasy (násobené průměrnou rychlostí těchto strojů) z místa uskladnění strojů k centroidu, doby nakládání a času potřebného na pojezd k místu skladování balíků, včetně doby potřebné na složení balíků z odvozní sou-

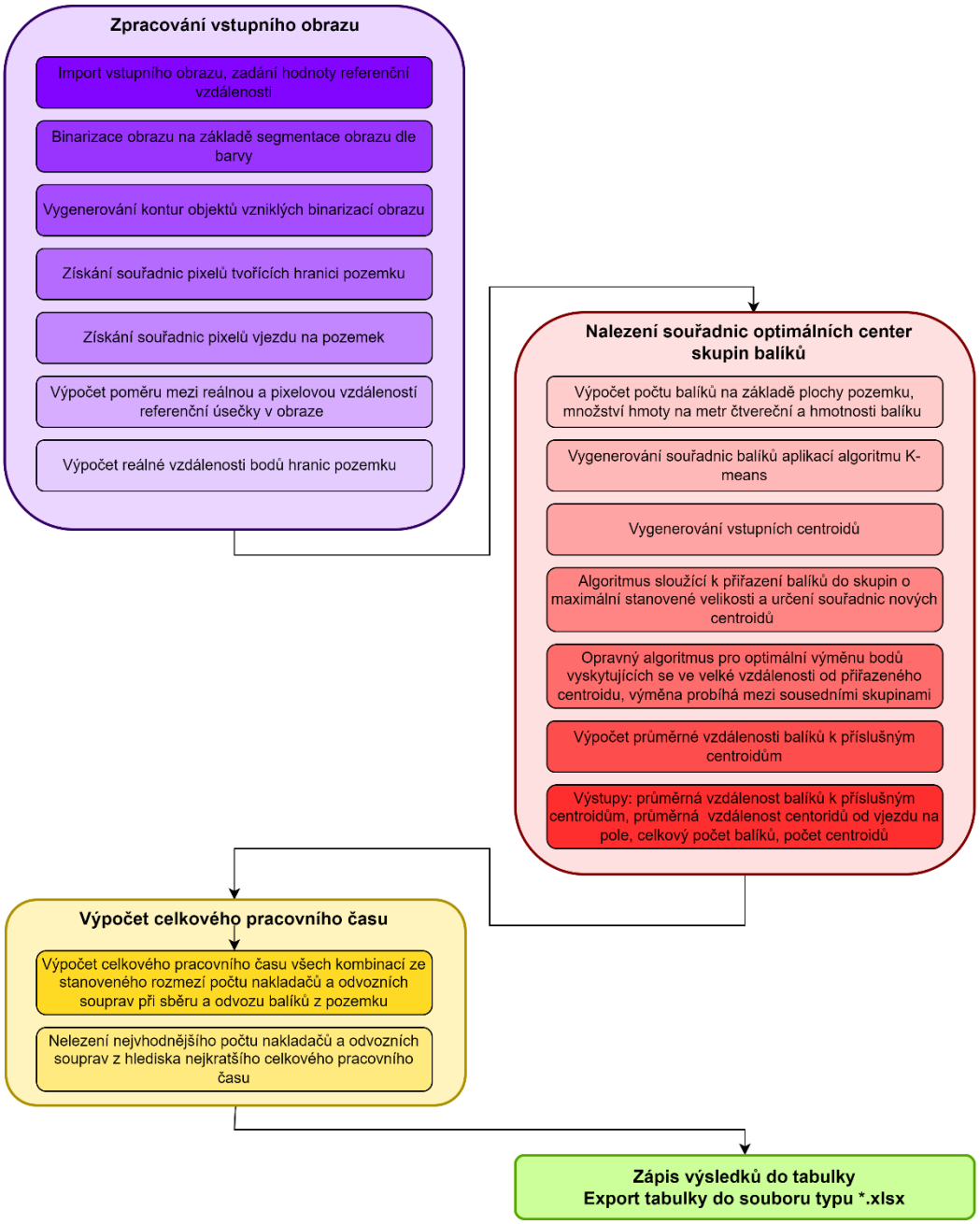
pravy. Čas nakladačů a odvozních souprav bude vyhodnocován souběžně, v synchronizaci a bude vypočítáváno, zda dochází ke ztrátovým časům, které budou postupně připočítávány k pracovním časům. Optimalizační program bude postupně počítat různé varianty pro (n) nakladačů, (n) odvozních souprav, vyhodnotí, která varianta spotřebuje nejméně času a je tedy optimální z pohledu nejnižších ztrát.

Vstupní hodnoty pro výpočet průměrné doby zdvihu balíků, jejich ukládání na odvozní soupravu, průměrné pojezdové rychlosti budou zjištěny na základě terénního měření, které bude sloužit i k porovnání simulovaných hodnot s reálným provozem. Měření bude probíhat na pozemcích podniku KOOPRODUKT a.s. Lišov. Balíky sena, nebo slámy budou na pokusném pozemku lokalizovány pomocí ortofotomapy získané spojením digitálních snímků vyfocených dronem DJI M300.

Ortomapa bude vytvořena v programu ArcGis a bude určena souřadnicová poloha balíků. Délka pojezdu manipulačních prostředků, včetně celkových spotřeb času budou monitorovány pomocí mobilního GPS sledovacího systému ITineris od společnosti AGRI-PRECISION s.r.o. Data budou zpracovaná v programu WayQuest, který je propojený se systémem LPIS a ostatními stroji v podniku. Přesto, že zmiňovaná technologie je schopna vypočítat průměrnou rychlost stroje, není zde možné zvlášť odlišit operační časy, kdy manipulátor zdvihá balík, anebo ukládá na odvozní soupravu. Operační časy budou odečteny ze záznamů z digitálního video snímku pořízeného za pomoci kamery Canon Legria HF G25.

Operační časy budou rozděleny na pojezdové a nepojezdové. Pojezdové časy budou definovány jako ty, při kterých nakladač mění zeměpisnou polohu. U nepojezdových časů budou v pohybu pouze hydraulické okruhy. Nepojezdové časy budou rozděleny na zdvih balíku a ukládání na odvozní soupravu. Průměrná doba zdvihu balíků bude následně vypočtena jako suma času spotřebovaného na zdvih všech balíků, dělené počtem zdvihů. Průměrná doba ukládání balíků bude vypočtena jako suma času spotřebovaného na uložení všech balíků dělené počtem ukládacích cyklů. Průměrná rychlost jízdy manipulátoru bude vypočtena z délky projeté trasy zjištěné pomocí GPS monitoringu dělené sumou času spotřebovanou na pojezd.

3 Výsledky popis algoritmu



Obrázek 3.1: Schématický popis funkce algoritmu

Vstupní obraz pozemku pro simulaci byl vytvořen v rozhraní Google Maps vložením bodů, které ohraničují zpracovávanou plochu. Plocha Byla vyplněna barvou RGB (255, 82, 82) s průhledností 75 %. Místo vjezdu na pracovní plochu bylo vyznačeno čarou o délce 4 metry, v těsné blízkosti pozemku. Čára označující vjezd byla označena barvou RGB (103, 58, 183). Pro potřeby výpočtu velikosti plochy bylo vyznačeno

v mapě měřítko o délce 100 metrů, které je standartně nastavené v modré barvě a udávaná vzdálenost je měřena ze středu tečky až na konec čárkované čáry. Celá podkladová mapa byla uložena pomocí aplikace Výstřižky.

Pro získání souřadnic bodů obrysu pozemku a jejich zasazení do reálných rozměrů bylo zapotřebí nejprve vstupní obraz zpracovat aplikací vytvořeného skriptu, kdy dochází nejprve k vytvoření třídy Coords v rámci jejíž inicializace je zapotřebí zadat dva vstupy v podobě cesty do adresáře obrázku a hodnoty v něm vyznačené referenční vzdálenosti. Při vyvolání objektu dané třídy nejprve dochází k načtení obrazu, vytvoření jeho kopie sloužící pro jeho zpracování a rozdělení obrazu do tří matic představujících jednotlivé barevné kanály prostoru BGR. Následně je zjištěna šířka a výška obrazu, referenční vzdálenosti je přiřazena proměnná self.l prázdné listy pro budoucí doplnění souřadnic kontury pozemku a další pomocné proměnné.

Hlavní část objektu je tvořená funkcí pro získání souřadnic bodů vyznačujících hranice pozemku a jejich přepočítání do reálné velikosti. V rámci činnosti funkce dochází nejprve k výpočtu proměnné scale představující poměru mezi reálnou a pixelovou vzdáleností referenční úsečky v obraze pomocí funkce getScale.
Následuje získání souřadnic vjezdu na pozemek aplikací funkce getEntrance, následně je vstupní obraz binarizován funkcí filtercolor1, dochází k jeho segmentaci na sledovaný pozemek a okolí na základě barevných vlastností jednotlivých pixelů, kdy body náležící pozemku získají hodnotu 255 a body okolí 0. Pro úpravu vzniklého obrazu jsou využity morfologické transformace otevření, při které dochází k odstranění malých segmentů, jež nemají spojitost s pozemkem a uzavření, v rámci, něhož jsou zaplněny malé nespojitosti, či díry uvnitř větších objektů. Po tomto kroku jsou vygenerovány kontury objektů vzniklých segmentací obrazu funkcí findContours z knihovny OpenCV (funkce z této knihovny budou dále již označovány prefixem cv2. psaným před názvem funkce), přičemž ústředním je polygon kopírující pozemek, během tohoto procesu však mohou vzniknout i nepatrné nespojité objekty představující například barvící se vrcholky listnatých stromů. Výběr kontury sledovaného objektu je proveden na základě jeho velikosti, kdy nejdelší kontura obsahuje nejvíce bodů. Získané body společně s referenční vzdáleností vyjádřenou úsečkou v obrazu jsou zakresleny do kontrolního obrazu funkcí cv2.drawContours a následně funkcí getPoints rozděleny do skupiny x a y. Všechny body ve skupině x jsou posunuty o minimální hodnotu z této skupiny tak, že nová minimální hodnota je 0. Stejná operace byla provedená také pro

skupinu souřadnic y i souřadnice vstupního bodu. V posledním kroku dochází k vynásobení hodnot všech bodů proměnnou scale, čímž získáváme reálné vzdálenosti hranic pozemku.

Funkce getscale se zaměřuje na zpracování graficky vytvořené referenční vzdálenosti, nejprve dochází k binarizaci obrazu na základě segmentace barev, kdy jsou získány pixely splňující podmínku, že hodnota červeného kanálu je menší než 100, hodnota modrého kanálu je větší než 220 a zároveň zeleného kanálu je větší než 120. Poté získáváme kontury všech objektů ve vzniklém obrazu, následně je získán index největší kontury a následně jsou prozkoumány kontury všech objektů, a pokud splní podmínku, že obsahují méně bodů, než kontura největšího objektu a zároveň žádný jejich bod neleží v největším objektu, tak jsou jejich souřadnice rozděleny do skupiny x a y, ty jsou připojeny ke skupinám bodů z ostatních podmínku splňujících objektů a dále dochází k výpočtu středu těchto objektů. Největší objekt a s ním i objekty v něm ležící jsou uvedenou podmínkou odfiltrovány, protože nejsou součástí úsečky referenční vzdálenosti, ale pouze součástí značky popisující reálnou velikost. Novým největším objektem ve skupině je tečka, v jejímž středu začíná referenční vzdálenost. Proto je posuzována vzdálenost právě od jejího středu ke středům ostatních objektů k nalezení nejvzdálenějšího bodu, který představuje konec referenční vzdálenosti, načež je posuzována vzdálenost všech bodů objektu s nejvzdálenějším středem. Proměnná scale je vypočítána jako podíl vstupní vzdálenosti zadané uživatelem, jejíž hodnota je uvedena ve značce referenční vzdálenosti, a délky referenční úsečky.

Souřadnice vjezdu na pozemek jsou získány pomocí funkce getEntrance, jež je založená na totožném principu jako funkce getScale, pouze se liší podmínka pro binarizaci, která je stanovená tak, že červený kanál musí mít hodnotu větší, než 90, modrý kanál větší než 170 a zároveň zelený kanál musí mít hodnotu menší, než 100.

Získané souřadnice obrysu pozemku je nutné upravit, protože při zpracování obrazu pomocí balíku OpenCV je počáteční bod 0,0 situován v levém horním rohu, zatímco při zobrazení grafů funkcí z balíku MathplotliB souřadnice 0,0 vychází z levého spodního rohu. Úprava souřadnic se týká pouze jejich složky y, od které je odečtena maximální hodnota y ze všech bodů obrysu a vypočtená hodnota je uvedena v absolutní hodnotě. Dále je vytvořenou funkcí Randpoints získána plocha pozemku a souřadnice pomocných bodů rozmístěných po pozemku ve vysoké hustotě, na jejímž základě jsou aplikací algoritmu Kmeans vygenerováno rozmístění balíků o daném počtu, který vy-

chází z podílu hmotnosti sklízené hmoty na ploše a hmotnosti balíku. Množství sklízené hmoty je vyjádřeno jako součin plochy pozemku a výnosu hmoty na metr čtvereční. Matice získaných souřadnic balíků je transponována a rozdělena na skupinu x-ových a y-nových složek. Dále vypočítáme počet skupin balíků jako podíl mezi počtem balíků a kapacitou odvozní soupravy. Poté dochází k vygenerování vstupních centroidů vytvořenou funkcí getStartCentroid.

V následném kroku je aplikován algoritmus vytvořený na základě principu Kmeans. Nejprve jsou vytvořené prázdné listy obsahující stejný počet prázdných listů, jako je požadovaný počet skupin. Dále je vstupní počet balíků i vstupní skupiny souřadnic balíků uložen jako pomocné proměnné. Následně je definována proměnná i=-1, která je v každém průběhu cyklu while zvětšena o 1 a znázorňuje index aktuálně řešeného balíku. Uvnitř cyklu jsou definovány prázdné množiny pro uložení vzdáleností každého balíku od všech centroidů a jejich indexů. Po vypočtení vzdáleností sledovaného balíku od všech centroidů dochází k jejich seřazení od nejmenší po největší, přičemž na základě těchto hodnot jsou zároveň setřízeny i indexy centroidů. Poté dochází k zařazení balíků ke skupině, k jejímuž centroidu má nejblíže. Pokud je tato skupina již zaplněna, dochází k porovnání vzdálenosti sledovaného balíku se vzdálenostmi všech členů skupiny od centroidu skupiny, když je některý ze členů ve větší vzdálenosti, než je sledovaný balík, dojde k jeho nahrazení a takto nahrazený balík je přiřazen na konec vstupní skupiny balíků, aby došlo k jeho opětovnému zpracování.

V případě, že ve skupině není vzdálenější člen, než sledovaný balík dochází k pokusu o zařazení do skupiny druhého nejbližšího centroidu. Tento proces je opakován, dokud není balík zařazen do jedné ze skupin. Po rozřazení všech balíků jsou vypočítány nové souřadnice centroidů skupin a celý proces rozdělování balíků se od začátku opakuje. Pro zamezení situace, kdy se již centroidy nové generace neliší od centroidů předchozích, je zavedeno pravidlo, které při nulovém rozdílu poloh centroidů vzniklých v kole n a n-1, či n a n-2 zvětší hodnotu proměnné same o 1, a v opačném případě přiřadí této proměnné hodnotu 0. Když same dosáhne hodnoty 3 je celý cyklus ukončen.

Po proběhnutí algoritmu může nastat situace, že body, které se již nevejdou do skupiny nejbližšího centroidu a zároveň jejich vzdálenost je větší, než jsou vzdálenosti všech členů skupiny, dojde tedy k zařazení do skupin vzdálenějších centroidů. Tyto body mohou být od přiřazené skupiny ve výrazně větší vzdálenosti, než je průměr ve skupině, případně také opticky odděleny jinou skupinou. Pomocí vytvořeného algoritmu je tento problém efektivně řešen v rámci procesu, kdy je posuzován vektor vzdáleností

každého balíku od všech centroidů, pokud se sledovaný bod nenachází ve skupině centroidu, ke kterému má nejblíže, a zároveň vzdálenost od přiděleného centroidu je větší než 110 % vzdálenosti od nejbližšího centroidu, dochází k hledání bodu ze skupiny nejbližšího centroidu vhodného pro záměnu. K tomu je posuzována vzdálenost všech bodů nejbližšího centroidu od aktuálního centroidu. Následně je vybrán k výměně bod ze skupiny nejbližšího centroidu, který je nejblíže k aktuálnímu centroidu. Pokud je nejbližší centroid od aktuálního centroidu vzdálen více než druhý nejbližší centroid, probíhá tato výměna se skupinou bodů druhého nejbližšího centroidu.

V závěru jsou znovu přepočítány souřadnice všech centroidů a poté dochází k výpočtu průměrné vzdálenosti od bodů ve skupinách k příslušným centroidům a průměrné vzdálenosti od vjezdu na pole k centroidům.

Funkce randpoints využívá pro ověření polohy náhodně vygenerovaných bodů vůči pozemku funkce z knihovny shapely. Nejprve jsou vstupní souřadnice pozemku převedeny příkazem zip do formátu tuple ze kterého je funkcí Polygon vytvořen polygon field představující pole. Poté jsou zjištěny maximální hodnoty souřadnic x a y. Následuje for cyklus generující hodnoty i z rozsahu 0-max(x) a do něj vnořený cyklus, který proměnné j přiřazuje hodnoty z rozsahu 0-max(y). V podcyklu dochází ke generování bodů o souřadnicích x0 a y0, kdy x je tvořeno součtem i a poloviny hodnoty náhodně vygenerované funkcí random, Y je vytvořené stejným způsobem, pouze místo i je brána proměnná j. Poté příkazem field.contains (point(x0, y0)) dochází k ověření, zda se právě vygenerovaný bod nachází v polygonu, pokud ano, tak je bod připojen k množině výstupních bodů. Po dokončení cyklů je příkazem field.area zjištěna plocha pozemku.

Pro získání inicializačních centroidů s pravidelnějším rozložením v rámci pozemků tato funkce využívá KMeans algoritmus z knihovny sklearn, který vygeneruje souřadnice požadovaného počtu centroidů skupin bodů bez omezení počtu bodů na skupinu. Výsledné pole bodů je transponováno a množinám xc a yc je přiřazena první a druhá množina z transponovaného pole.

Výpočty celkové spotřeby času potřebnou na naložení, odvoz píce, nebo slámy z pozemku a jeho složení budou provedeny pomocí vzorce 3.1. Výpočet vychází z doby trvaní cyklů od 1 do $n-1$, kde n je počet celých cyklů, násobené počtem odvozních souprav a nakladačů pracujících na přepravě a manipulaci balíků píce, nebo slámy, přičtené jsou odjezdové cykly, následně je připočten poslední úplný cyklus násobený

počtem odvozních souprav, který odváží zbývající skupiny balíků a nakladačů, následně je přičten počet odvozních souprav odvážející zbylé balíky násobený dobou nakládky jedné soupravy a počtem nakladačů, dále je přičtena doba potřebná pro jízdu na zpracovávaný pozemek násobený dvojnásobkem počtu nakladačů (cesta tam i zpět) a počtem odvozních souprav, a v poslední řadě je odečten rozdíl mezi dobou nakládky jedné soupravy a doby nakládky poslední skupiny balíků násobené počtem nakladačů:

$$T_{mot} = T_x(\,S_o + N_a) + T_a + T_y(S_{oz} + N_a) + S_{oz}.T_n.N_a + T_c(2N_a + S_o) - (T_n - T_{np}).N_a \tag{3.1}$$

T_{mot} Celková spotřeba času $[s]$

T_x Doba trvaní cyklů od 1 do $n-1$, kde n je počet celých cyklů $[s]$

S_o Počet odvozních souprav

N_a Počet nakladačů

T_a Doba trvání odjezdových cyklů $[s]$

T_y Doba trvání posledního celého cyklu $[s]$

S_{oz} Počet souprav odvážejících zbylé skupiny balíků

T_{np} Doba nakládky poslední skupiny balíků $[s]$

T_n Doba nakládky jedné soupravy $[s]$

T_c Doba jízdy na pozemek $[s]$

Cyklus představuje dobu začínající nakládkou první soupravy a končící jejím návratem z vykládky. T_x je doba trvání cyklů od 1 do $n-1$, kde n je počet celých cyklů a vypočteme ze vzorce 3.2. Výpočet vychází z rozdílu mezi celkovým počtem skupin balíků a zbytkem skupin balíků po vydělení počtem souprav, děleným počtem souprav, následně je odečtena jednotka, a to celé je násobeno součinem počtu odvozních souprav dobou nakládky jedné soupravy k němuž jsou přičteny ztrátové časy:

$$T_x = \left(\left(\frac{\mathrm{p_c} - p_{cz}}{S_o}\right) - 1\right).(S_o.T_n + T_r) \tag{3.2}$$

T_x Doba trvaní cyklů od 1 do $n-1$, kde n je počet celých cyklů $[s]$

$\mathrm{p_c}$ Celkový počet skupin balíků

p_{cz} Zbytek skupin balíků po vydělení počtem souprav

S_o Počet odvozních souprav

T_n Doba nakládky jedné soupravy [s]

T_r Rozdíl doby nakládání počtu souprav $S_o - 1$ a otáčky první odvozní soupravy (prostoje) [s]

Dobu nakládky jedné soupravy vypočteme ze vztahu 3.3. Vztah vychází z výpočtu času spotřebovaného na pojezd z centroidu k průměrně vzdálenému balíku a zpět, k tomu je přičten čas potřebný na zdvih balíku a uložení na odvozní soupravu, celé je to vyděleno počtem nakladačů a celé je to následně násobeno rozdílem mezi počtem balíků ve skupině a počtem balík, které ve skupině zbyly, k tomu celému je připočten čas potřebný na pojezd a naložený zbylých balíků ze skupiny, vzhledem k tomu, že počet zbývajících balíků musí být menší než počet nakladačů, může být každý zbývající balík naložen jedním z nakladačů, tedy dochází k naložení zbývajících balíků současně:

$$T_n = (b - b_z).\frac{\frac{2s_c}{v_2} + u_1 + z}{N_a} + \left(\frac{2s_c}{v_2} + u_1 + z\right) \tag{3.3}$$

T_n Doba nakládky jedné soupravy [s]

b Počet balíků ve skupině

b_z Zbytek balíků ve skupině po vydělení počtem nakladačů

s_c Průměrná vzdálenost balíků k příslušným centroidům ve skupinách

v_2 Průměrná pojezdová rychlost nakladače pohybujícího se po poli [$m.s^{-1}$]

u_1 Doba naložení balíků na odvozní soupravu [s]

z Doba zdvihu balíku [s]

N_a Počet nakladačů

Dobu odjezdových cyklů vypočteme ze vztahu 3.4. Odjezdové cykly vypočteme jako sumu od jedné do počtu odvozních souprav násobené dobou nakládání jedné soupravy, následně je přičten čas potřebný na pojezd průměrné vzdálenosti od centroidů k místu skládky a dobu složení nákladu:

$$T_a = \sum_{n=1}^{S_o} \mathrm{n} \,.\, \mathrm{T_n} + \frac{s}{v_1} + \mathrm{T}_v \tag{3.4}$$

T_a Odjezdové cykly $[s]$

v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky $[m.s^{-1}]$

S_o Počet odvozních souprav

$\mathrm{T_n}$ Doba nakládky jedné soupravy $[s]$

T_v Doba vykládky jedné soupravy $[s]$

Doba jízdy na pozemek vychází ze vztahu 3.5. Výpočet je založený na průměrné vzdálenosti centroidů od místa skládky, která je dělena průměrnou rychlostí pojezdu soupravy.

$$T_c = \frac{s}{v_1} \tag{3.5}$$

T_c Doba jízdy na pozemek $[s]$

v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky $[m.s^{-1}]$

s Průměrná vzdálenost centroidů od místa vykládky $[m]$

Prostoje vypočteme ze vztahu 3.6. Prostoje definujeme jako rozdíl doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu a doby nakládání násobené počtem odvozních souprav zmenšené o jedna:

$$T_r = T_o - (S_o - 1).T_n \tag{3.6}$$

T_r Rozdíl doby nakládání a otáček odvozních souprav (prostoje) $[s]$

T_o Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu $[s]$

S_o Počet odvozních souprav

T_n Doba nakládky jedné soupravy $[s]$

Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu definujeme pomocí vztahu 3.7. Výpočet vychází

z dvojnásobku dráhy, která je určená průměrnou vzdáleností centroidu od místa skládky dělená pojezdovou rychlostí soupravy a k tomu je přičtena doba potřebná ke složení balíků:

$$T_o = \frac{2s}{v_1} + T_v \tag{3.7}$$

T_o Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu $[s]$

s Průměrná vzdálenost centroidů od místa vykládky $[m]$

v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky $[m.s^{-1}]$

T_v Doba vykládky jedné soupravy $[s]$

Doba vykládky odvozená ze vztahu 3.8. Vypočteme jako počet balíků na odvozní soupravě, násobený dobou potřebnou na zdvih, uložení a časem potřebným pro ujetí trasy 5 metrů:

$$T_v = b.\left(u_1 + z + \frac{5}{v_2}\right) \tag{3.8}$$

T_v Doba vykládky jedné soupravy $[s]$

b Počet balíků

u_1 Doba potřebná pro uložení balíku $[s]$

z Doba zdvihu balíku $[s]$

v_2 Průměrná rychlost pohybu nakladače po poli $[m.s^{-1}]$

3.1 Výsledky – měření vstupních hodnot

Měření vstupních hodnot pro výpočet pojezdové rychlosti nakladače, zdvihu a uložení balíků proběhlo dne 24. 7. 2020 na pozemku o výměře 9,24 ha v těsné blízkosti policejní střelnice Slabec.

Práce byla zahájena v 9:48 a ukončená 13:17. Práce byla přerušena pauzou na oběd od 10:35 až do 12:05. Celková doba práce byla 118 minut. Na pracovišti byl přítomný jeden nakladač a dvě odvozní soupravy s kapacitou 10 balíků. Balíky byly odváženy do skladovacích prostor zemědělského podniku v Lišově, který je vzdálený 1800 m. Počet balíků na pozemku byl 94.

Pracovní plocha byla nafocena dronem a ke každému balíku bylo přiděleno číslo. Pracovní časy zdvihu, uložení balíků a pojezdů byly rozepsány ve 412 úkonech. Trasa

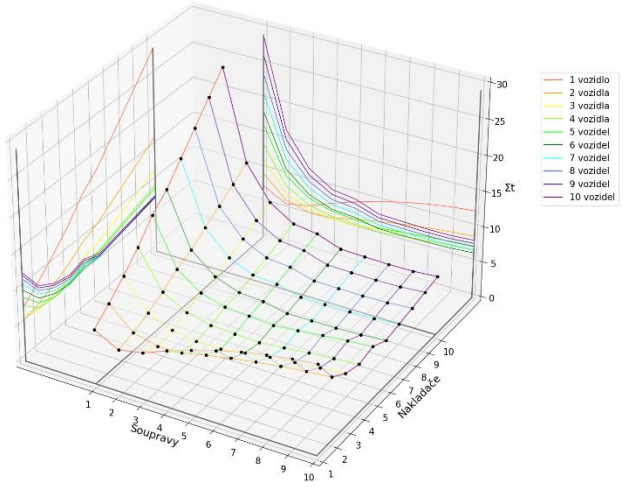
ujetá nakladačem byla v čase 9:48-10:35 3,7 km a nebyl měřen příjezd k pozemku. Trasa nakladače v časovém pásmu 12:05-13:17 byla 6,5 km a nebyl měřen příjezd ke zkusné ploše ani odjezd do prostoru pro odstavení stroje. Maximální rychlost pohybu po pozemku byla 15 $km.h^{-1}$. Celkový čas pojezdu byl 5237 s a průměrná rychlost pojezdu očištěná od nepojezdových operací byla vypočtena 7,01164789001 $km.h^{-1}$. Celkový čas zdvihů byl u 111 položek 520 s a průměrná doba zdvihu 1 balíku byla vypočtena 4,684684685 s. Celková doba uložení balíků byla 808 s u 111 položek a průměrná doba uložení jednoho balíku byla vypočtena 7,279279279 s. Nepojezdový čas ostatní byl 555 s a souvisel s vyprošťováním zapadlé odvozní soupravy na pozemku a udílení pokynů.

3.2 Vybrané výsledky – simulace

Simulace má nastaveny stejné vstupní parametry rychlostí pojezdu nakladače, odvozních souprav i vzdálenosti od místa vykládky jako práce, která byla měřena. Průměrná rychlost odvozních souprav 7 $m.s^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku 1,95 $m.s^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční 0,26 $kg.m^{-2}$, rozměry balíků 1,2×0,7×2,1 m, slisovatelnost hmoty 160 $kg.m^{-3}$, vzdálenost vjezdu od místa vykládky 1800 m.

Tabulka 3.1: Výsledky plocha 1 vzdálenost 1800 m od místa skládky – nejvhodnější varianty

	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	**Varianta – minimální doba celého procesu**
Celková spotřeba času [h]	5,493	6,213
Doba realizace [h]	0,699	0,415
Počet souprav	5	9
Počet nakladačů	3	6
Prostoje nakladačů [h]	0,000	0,000
Prostoje souprav [h]	0,079	0,000

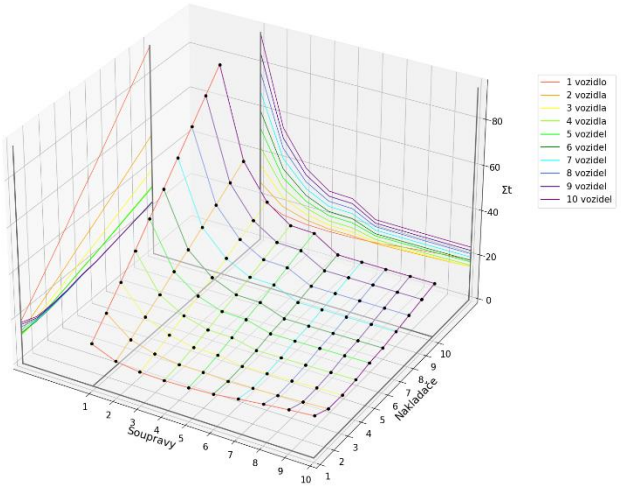


Obrázek 3.2: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 1 (pole 1, vzdálenost 1800 m od skladovacích prostor)

Následující simulace se dotýká stejného pozemku, i stejného nastavení, změněno je pouze místo skládky balíků do odloučeného pracoviště ve Slověnicích. Vzdálenost místa skládky od vjezdu na pozemek byl měřený na portálu Mapy.cz. Průměrná rychlost odvozních souprav 7 $m.s^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku 1,95 $m.s^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční 0,26 $kg.m^{-2}$, rozměry balíků 1,2×0,7×2,1 m, slisovatelnost hmoty 160 $kg.m^{-3}$, vzdálenost vjezdu od místa vykládky 8600 m.

Tabulka 3.2: Výsledky plocha 1 vzdálenost 8600 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 2)

	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	**Varianta – minimální doba celého procesu**
Celková spotřeba času [h]	12,840	18,108
Doba realizace [h]	2,543	1,187
Počet souprav	4	10
Počet nakladačů	1	6
Prostoje nakladačů [h]	0,581	3,022
Prostoje souprav [h]	0,000	0,000



Obrázek 3.3: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 2 (pole 1, vzdálenost 8600 m od místa skládky)

4 Diskuse

Měření vstupních hodnot bylo provedeno 24. 7. 2020 při manipulaci a odvozu balíků sena na pozemku v těsné blízkosti policejního výcvikového prostoru Slabec s jedním nakladačem a dvěma odvozními soupravami o ložné kapacitě 10 balíků. Spotřeba času nakladače bez doby potřebné na příjezd a odjezd byla 1,966 h. Spotřeba času u nakladače na pozemku z výsledků simulace 1 (1 nakladač, dvě odvozní soupravy), která nejvíce odpovídala měřenému pokusu, byla vypočítána na hodnotu 1,881 h, což je méně o 4,323 %. Rozdíl mezi referenční a vypočítanou hodnotou může být z velké části způsoben neproduktivními přejezdy, které jsou nad rámec optimální trasy, ale také naměřené hodnoty ovlivnil neproduktivní čas (270 s) spojený s vyprošťováním zapadlé odvozní soupravy, který byl naměřen v rámci pokusu, ale v simulaci není nijak zohledněn. S určitou mírou nepřesnosti lze konstatovat, že referenční hodnoty odpovídají predikcím v simulaci. Simulace 1 ukazuje potencionální úsporu v případě, že by práci manipulace a odvozu balíků sena oproti 1 nakladači a 2 odvozním soupravám vykonávali tři stroje pro manipulaci a 5 pro dopravu balíků. Jeden nakladač s 2 odvozními soupravami dosáhl spotřeby času 1,881 h u nakladačů na poli a celková spotřeba včetně odvozních souprav a cest z a na pozemek 5,866 h. Varianta se 3 nakladači a 5 odvozními soupravami spotřebovala 1,707 h u nakladačů při práci na pozemku (u všech třech dohromady) a celkový čas činnosti včetně odvozních souprav a cest z a na pozemek 5,493 h. Celková úspora by mohla dosáhnout na pozemku 1 oproti reálně zvolené variantě (1 nakladač, 2 odvozní soupravy) 0,373 h, tedy dosahuje o 6,359 % nižších hodnot. Doba trvání realizace varianty s jedním nakladačem a dvěma odvozními soupravami dosahuje více než 1,955 h a s použitím 3 nakladačů a 5 odvozních souprav pouze 0,699 h. Celková doba realizace může být také významným faktorem při volbě varianty, především s ohledem na počasí, anebo následné práce na pozemku. Z výsledků simulace 1 je zjevné, že při použití jedné odvozní soupravy je nejvhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje 7,591 hodin práce všech strojů. V případě použití jedné odvozní soupravy a deseti nakladačů spotřeba času dosáhne až hodnoty 28,956 h, což je o 281,45 % vyšší hodnota. Je zřejmý rostoucí trend spotřeby času, a že jedna odvozní souprava je v případě simulace 1 nedostatečný počet, při kterém přidáním většího množství nakladačů nezkracuje dobu realizace, ale pouze jsou navyšovány ztráty prostřednictvím neproduktivních časů manipulátorů. Z výsledků (simulace 1) je dále zjevné, že při použití dvou

odvozních souprav je nejvhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje 5,866 hodin práce všech strojů. Další navyšování počtu nakladačů zvyšuje celkovou spotřebu času. V případě použití dvou odvozních souprav a deseti nakladačů spotřeba času dosáhne až hodnoty 16,573 h, což je o 182,53 % vyšší hodnota, ale oproti variantě s jednou odvozní soupravou a deseti nakladači je trend spotřeby času klesající. Tyto hodnoty potvrzují fakt, že jedna odvozní souprava je v případě simulace1 nedostačující a přidání další přepravní jednotky snižuje celkovou spotřebu času. Z výsledků (simulace 1) je dále zjevné, že při použití tří odvozních souprav již není nejvhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, protože při této variantě celková spotřeba času dosahuje 6,515 hodin práce všech strojů a přidáním dalšího nakladače celková spotřeba času klesá na hodnotu 5,554. Další navyšování (tři a více) počtu nakladačů (u varianty s třemi odvozními soupravami) opět zvyšuje celkovou spotřebu času, kdy u 10 nakladačů by teoreticky dosáhla 11,95 h.

Simulace 2 má stejné nastavení vstupních parametrů, které vychází z realizované manipulace a odvozu balíků z pozemků u výcvikového střediska Slabec (pozemek 1), s výjimkou místa uskladnění balíků. Místo uskladnění je uvažováno ve vesnici Slověnice, kde firma Kooprodukt a. s. vlastní skladovací prostory. Vzdálenost pracovní plochy od skladu je 8600 m. Výsledky simulace 2 prokazují, že se vzrůstající vzdáleností skladovacích prostor se zvyšuje celková spotřeba času, a především u odvozních souprav. Nejnižší spotřeba času je při použití 4 odvozních souprav a jednoho nakladače, a to 12,84 h, což je o 133,75 % více než u simulace 1, která uvažovala trasu ke skladovacím prostorám o 6800 m kratší. Nejkratší doba realizace manipulace a svozu je u druhé simulace 1,187 h při použití 10 odvozních souprav a 6 nakladačů s celkovou spotřebou času 18,108 h. Minimální doba trvání celého procesu je tedy o 186,02 % více než u simulace 1, kde hodnota dosahovala 0,415 h a rovněž spotřeba času vzrostla z 6,213 h (u simulace 1) o 191,45 %. Je zřejmé, že se vzrůstající vzdáleností od skladovacích prostor je nutné posilovat zejména množství odvozních souprav, v případě, že je dosaženo maximálního počtu nastaveného ve vstupních hodnotách, nemá smysl dále navyšovat počty nakladačů (z 6 na 7, nebo více), protože již nedochází ke zkracování celkové doby realizace. Pouze zvyšujeme ztrátové časy nakladačů. Z výsledků simulace 2 je zjevné, že při použití pouze jedné odvozní soupravy je nejvhodnější manipulaci realizovat jen jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje

18,914 h práce všech strojů, což je oproti 7,591 h vypočteným u simulace 1, při stejném počtu strojů o 149,16 % více. V případě použití jedné odvozní soupravy a deseti nakladačů spotřeba času dosáhne až hodnoty 93,685 h. Z hodnot simulace 1 a 2 je patrné, že se vzrůstající vzdáleností skladovacích prostor roste potřeba odvozních souprav a spotřeba času dosahuje významně vyšších hodnot. Pro simulaci 2 je tedy volba 1 odvozní soupravy extrémně nevhodná. Z výsledků simulace 2 je zřejmé, že u varianty se 2 odvozními soupravami se snižuje (oproti variantě s 1 odvozní soupravou) celková spotřeba času na hodnotu 14,493 h, což je o 23,37 % méně, ale další zařazení nakladačů není možné bez výrazného zhoršení bilance ztrátových časů. Navyšování počtu nakladačů je vhodné až od nasazení 6 odvozních souprav, kdy při použití 1 nakladače je celková spotřeba času 13,751 a při nasazení 2 nakladačů klesá na hodnotu 13,417, tedy o 2,43 % méně. Skladovací prostor vzdálenější o 6800 m tedy snížil možnost nasazení většího množství nakladačů. Zatímco u simulace 1 bylo vhodné nasazení druhého nakladače již u 3 odvozních souprav, u simulace 2 to bylo až u 6 odvozních souprav.

Simulace jednoznačně definují lokální minima spotřeby času a na základě nich lze zvolit optimální variantu počtu nakladačů a odvozních souprav. Slabým místem simulací jsou vstupní hodnoty, které pracovník musí zadat, aby získal výsledky. V případě, že hodnoty výnosů, rychlosti pojezdu odvozních souprav, nebo nakladačů budou nepřesné, může dojít k chybám ve výpočtu a k volbě nevhodné varianty. Zjevnou nevýhodou je, že výstup z této práce je pouhý odhad pozic balíků, předpokládaných tras a spotřeb času. Není tedy možné podle těchto tras reálně jezdit a skutečné pojezdy budou neustále v dikci řidiče. Každý řidič pracuje podle svých schopností a výsledek může být pokaždé trochu jiný. Při měření pokusu byl na odpolední část vyměněn řidič nakladače a bylo zřejmé, že se rychlost nakládky snížila. Lze tedy předpokládat, že ani simulace z této práce nemohou být nikdy úplně přesné. Na druhou stranu pro optimalizaci počtu odvozních souprav a nakladačů to stále může být dostačující. Abychom byli schopni jezdit podle navržených pojezdových tras, bylo by nutné přesně lokalizovat balíky. To by bylo možné buď snímkováním plochy s balíky pomocí dronu a propojení těchto snímků s mapami, nebo přímím označováním pomocí GPS lokátoru již v průběhu lisování. V praxi se však na manipulace a odvoz balíků sena a slámy používají starší stroje, které dovybavit GPS navigací by bylo nereálné a takový přístup je tedy spíše otázkou budoucnosti.

Závěr

Zemědělství je základním kamenem lidské společnosti, na který jsou kladeny stále větší nároky. Lidská společnost je dynamicky rostoucí a dosahuje již téměř 8 miliard obyvatel, přičemž jejich počet se za posledních 60 let více než zdvojnásobil. Významně vzrůstá potřeba produkce základních potravin a současně je nutný důraz na minimalizaci vstupních surovin, především fosilních zdrojů. Jedním ze způsobů, jak zvýšit efektivitu je zavádění nových technologií. Technika aplikovaná v praxi, proměnila celou společnost a umožnila nahrazení lidské práce stroji. Stroje zvyšují množství produkce, její kvalitu, snižují cenu, významně zlepšují ekonomickou efektivitu a minimalizují negativní dopady hospodářské činnosti na životní prostředí. Prudký rozvoj, ke kterému došlo v předešlých desetiletí umožnil rozvoj elektrotechniky. Počítače jsou schopny ovládat prakticky všechny stroje a umožnili nástup čtvrté průmyslové revoluce. V zemědělství se aplikují technologie GPS, autonomní stroje a mnohé zařízení umožňující sběr a zpracování informací, které lze následně využít například pro variabilní hnojení, postřikování, nebo zpracování půdy. Nové technologie jsou však finančně náročné na pořízení, a proto se implementují především v sektorech s nejvyšší přidanou hodnotou, kde je investice brzy návratná. Oblast manipulace a odvozu balíků sena, nebo slámy je z tohoto pohledu málo perspektivní a tyto činnosti vykonávají stroje staré i několik desítek let. Takto staré manipulátory a odvozní soupravy není možné dovybavit autonomním ovládáním a nelze tedy v praxi využít plného potenciálu optimalizace a nechat tyto stroje jezdit podle připraveného algoritmu. Lze ovšem jednoduchými výpočty optimalizovat počet nakladačů a odvozních souprav tak aby nedocházelo ke zbytečným prostojům. Je zřejmé, že volbu počtu strojů ovlivňuje nejen množství balíků na pozemku, ale i například i vzdálenost skladovacích prostor, pojezdová rychlost nakladačů a odvozních souprav. Odhadnout správně množství techniky není jednoduchý úkol vzhledem k velkému množství proměnných a v praxi se běžně stává, že nakladač čeká na návrat odvozních souprav, nebo naopak. Jednoduchá optimalizace na základě odhadu tak může snížit spotřebu času i o desítky procent.

Seznam použité literatury

Abbaspour-Gilandeh, Y., Omid, M., Keyhani, A., 2007. *Simulation Program for Predicting Tractor Field Performance.* World Appl. Sci. J. 2, 552–558. https://doi.org/10.13140/2.1.4307.0409

Bochtis, D.D., Vougioukas, S.G. (2008). *Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern*. Biosyst. Eng. 101, 1–12.

Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Busato, P., Berruto, R., (2013). *Benefits from optimal route planning based on B-patterns.* Biosyst. Eng. 115, 389–395. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.04.006

Bochtis, D.D., Sørensen, C.G.C., Busato, P. (2014). *Advances in agricultural machinery management: A review*. Biosyst. Eng. 126, 69–81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012

Bottarelli, L., Bicego, M., Blum, J., Farinelli, A., (2019). *Orienteering-based informative path planning for environmental monitoring*. Eng. Appl. Artif. Intell. 77, 46–58. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.015

Casoli, P., Gambarotta, A., Pompini, N., Riccò, L., 2014. *Development and application of co-simulation and "control-oriented" modeling in the improvement of performance and energy saving of mobile machinery*. Energy Procedia 45, 849–858. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.090

Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B., (2012). *Chapter 13 Simulation models in Farming Systems Research: potential and challanges*. Farming Syst. Res. into 21st Century New Dyn. 281–306. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2.

Galceran, E., Carreras, M., (2013). *A survey on coverage path planning for robotics*. Rob. Auton. Syst. 61, 1258–1276. https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004

Gilpin, L., (2015). *How Big Data Is Going to Help Feed Nine Billion People by 2050*. TechRepublic. [online] [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: http://www.techrepublic.com/article/how-big-data-is-going-to-help-feed-9-billion-people-by-2050/

Hameed, I.A., Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Vougioukas, S., (2012). *An object-oriented model for simulating agricultural in-field machinery activities*. Comput. Electron. Agric. 81, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.003

Hameed, I.A., Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Jensen, A.L., Larsen, R., (2013 a). Optimized driving direction based on a three-dimensional field representation. Comput. Electron. Agric. 91, 145–153. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.009

Hameed, I.A., Bochtis, D., Sørensen, C.A. (2013 b). *An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas.* Int. J. Adv. Robot. Syst. 10. https://doi.org/10.5772/56248

Jensen, M.A.F., Bochtis, D., Sorensen, C.G., Blas, M.R., Lykkegaard, K.L., (2012*). In-field and inter-field path planning for agricultural transport units*. Comput. Ind. Eng. 63, 1054–1061. https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.004

Jensen, M.A.F. (2013). *Algorihms for Operational Planning of agricultural field operations 23*.

Jensen, M.F., Bochtis, D., Sørensen, C.G. (2015). *Coverage planning for capacitated field operations, part II: Optimisation*. Biosyst. Eng. 139, 149–164. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.002

Jin J., Tang, L. (2010). *Optimal Coverage Path Planning for Arable Farming on 2D Surfaces*. Trans. ASABE 53, 283–295. https://doi.org/10.13031/2013.29488

Jin, J., Tang, L. (2011). *Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming*. Journal of Field Robotics 28 (3), 424–440, https://doi.org/10.1002/rob.20388

Lee, J.W., Kim, J.S., Kim, K.U. (2016). *Computer simulations to maximise fuel efficiency and work performance of agricultural tractors in rotovating and ploughing operations*. Biosyst. Eng. 142, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.012

Liu, C., Zhao, X., Du, Y., Cao, C., Zhu, Z., Mao, E. (2018). *Research on static path planning method of small obstacles for automatic navigation of agricultural machinery*. IFAC-PapersOnLine 51, 673–677. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.119

Miodragović, R., Tanasijević, M., Mileusnić, Z., Jovančić, P. (2012). *Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory*. Expert Syst. Appl. 39, 8940–8946. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.013

Mittal, G.S. (2013). *Artificial Neural Network (ANN) Based Process Modeling, Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00018-5

Nazarahari, M., Khanmirza, E., Doostie, S., (2019). *Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm*. Expert Syst. Appl. 115, 106–120. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.008

Oksanen, T.; Visala, A. (2009). *Coverage path planning algorithms for agricultural field machines*. J. Field Robot. 26, 651–668.

Prakash, N., Loganathan, M., (2014). *Energy Efficient Autonomous Field Vehicle for Complete Coverage 3*, 1325–1328.

Safa, M., Samarasinghe, S. (2013). *Modelling fuel consumption in wheat production using artificial neural networks*. Energy 49, 337–343.

Vougioukas, S., (2009). *A framework for motion coordination of small teams of agricultural robots*. In: van Henten, E.J., Goense, D., Lokhorstpp, C. (Eds.), Proceedings of the Precision Agriculture ‘09, pp. 585–593.

Yakoubi, M. A., Laskri, M. T. (2016). The path planning of cleaner robot for coverage region using Genetic Algorithms. J. Innov. Digit. Ecosyst. 3, 37–43. https://doi.org/10.1016/j.jides.2016.05.004

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: **Ing. Martin Filip**

Narození: 10. září 1979, Lišov
Bydliště: Žižkova 106/12, 373 72 Lišov
Kontakt: +420 724 826 700
marv.tops@seznam.cz

Rodinný stav: ženatý, manželka Marie
syn Jaroslav, dcery Marie a Jiřina

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ

Programování.
CNC obráběcí stroje.
3D tisk.

VZDĚLÁNÍ

od 2014 **Jihočeská univerzita v Č. Budějovicích – Zemědělská fakulta**
DSP Fytotechnika, Obecná produkce rostlinná

2012-2014 **Česká zemědělská univerzita v Praze – Fakulta lesnická a dřevařská**
obor Lesní inženýrství, titul Ing.

2009-2012 **Česká zemědělská univerzita v Praze – Fakulta lesnická a dřevařská**
obor Hospodářská a správní služba v lesním hospodářství, titul Bc.

1997-1999 **Střední odborné učiliště nábytkářské Lišov**
obor Technik dřevařské a nábytkářské výroby

1994-1997 **Střední odborné učiliště nábytkářské Lišov**
obor Truhlář

VĚDECKO-VÝZKUMNÁ ČINNOST

Člen týmu několika grantů, například:

OP PIK CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0024484

Výzkum a vývoj inteligentního čajovaru pro přípravu čaje s přidanými složkami (2021–2023 – člen řešitelského týmu)

TAČR TREND FW03010447 Vývoj inteligentního systému pro zvyšování užitkovosti dojeného skotu s využitím metod umělé inteligence. (2021–2025)

GAJU 094/2016/Z Optimalizace produkčních funkcí a environmentálních dopadů zemědělství (20162018, *člen řešitelského týmu*)

TRIO FV30234 Výzkum a vývoj procesu laserového potisku skleněných ploch malého až velkého formátu pro potřeby současného stavebnictví. (2018-2020, *člen řešitelského týmu*)

PEDAGOGICKÁ ČINNOST

Výuka od roku 2015 – přednášky v předmětech Mechanizace rostlinné výroby, Stroje pro obiloviny a pícniny, Stroje pro šetrnou rostlinnou produkci, Stroje pro zemní a lesní práce, Stroje pro zpracování půdy a Technologie a technika rostlinné produkce, Zemědělská technika I, Zemědělská technika II.

Vedoucí 40 obhájených bakalářských prací.

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Články v impaktovaném časopise:

Kriz, P., et al. (2021). Experimental Investigation into the Influence of Plasma Technology on Seed Surface Wettability. *Appl. Sci.* 11, 9994. DOI: 10.3390/app11219994.

Xiao, M., et al. (2021): Fault diagnosis of rolling bearing based on back propagation neural network optimized by cuckoo search algorithm, *Multimedia tools and applications*, DOI: 10.1007/s11042-021-11556-x.

Brabenec, T., et al. (2021): Residues from Water Precipitation via Ferric Hydroxide Threaten Soil Fertility, *Sustainability*, Volume 13, Issue 8, DOI10.3390/su13084327.

Maroušek J., at al. (2020): Advances in the agrochemical utilization of fermentation residues reduce the cost of purpose-grown phytomass for biogas production, *Energy Sources*, Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects, Doi: 10.1080/15567036.2020.1738597.

Maroušek J., et al. (2020): Advances in nutrient management make it possible to accelerate biogas production and thus improve the economy of food waste processing, *Energy Sources*, Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects, Doi: 10.1080/15567036.2020.1776796.

Filip, M., et al. (2020): Advanced Computational Methods for Agriculture Machinery Movement Optimization with Applications in Sugarcane Production, *Agriculture*, vol. 10, issue 10, Doi: 10.3390/agriculture10100434.

Kocira, S., et al. (2020): Biochemical and economical effect of application biostimulants containing seaweed extracts and amino acids as an element of agroecological management of bean cultivation, nature research, *Scientific Reports*, vol. 10, issue 1, DOI: 10.1038/s41598-020-74959-0.

Zhou, S., et al. (2020): Remaining Useful Life Prediction and Fault Diagnosis of Rolling Bearings Based on Short-Time Fourier Transform and Convolutional Neural Network, Shock and Vibration, vol. 2020, DOI: 10.1155/2020/8857307.

Kunes R., et al. (2022): A Review: Comparison of Approaches to the Approval Process and Methodology for Estimation of Ammonia Emissions from Livestock Farms under IPPC. Atmosphere 13, no. 12: 2006.

Články v recenzovaném časopise

Zoubek, T., et al. (2017). Natural compaction of plowed soil: Evolution in time. *Mechnanization in agriculture & Conserving of the resources*, LXIII, pp. 79-91.

Pšenka, M., et al. (2016). Analysis of the noise exposure of milking parlour operators during working shift at different technological solutions. *MendelNet* 2016, pp. 264-268.

Šístková, M., et al. (2016). Krmné linky ve velkochovech brojlerů. *Náš chov 12*, LXXVI, pp. 15-16.

Šístková, M., et al. (2016). Krmné linky ve velkochovech nosnic v závislosti na použité technologii. *Náš chov 12*, LXXVI, pp. 17-19.

Celjak, I., et al. (2017). Ověření parametrů souprav techniky určených pro minimalizaci. *Mechanizace 4*, LXVII., pp. 24-28.

Fríd, M., et al. (2017). Harvest of cereals and oilseeds rape by combine harvesters New Holland CX 8090 and New Holland CR 9080, *Agricultural Engineering*, 2, pp. 19-24.

Filip, M., et al. (2016). Súčasnosť a budúcnosť technológií obrábania pôdy. *Naše pole 11*, pp. 44-45.

Příspěvek ve sborníku konference

Zoubek T., et al. (2017): Natural compaction of plowed soil: Evolution in time, V. International scientific congress Agricultural Machinery 2017, volume 2, pp. 110–112, ISSN 2535-0269. Varna 21-24.6.2017, Bulgaria.

Patent

ISOTHERM s.r.o., (2020): Povrchová úprava plošného konstrukčního dílu a způsob její výroby. Smolík, P., Fekete, L., Goldfinger, M., Chlaň, I., Minařík, J., Bartoš, P., Rajchard, J., Zoubek, T., Filip, M., Kuneš, R., patent č. 308218.

Průmyslový vzor – Evropský

ISOTHERM s.r.o., (2020): Transparentní plošný konstrukční díl. Smolík, P., Fekete, L., Goldfinger, M., Chlaň, I., Minařík, J., Zoubek, T., Filip, M., Kuneš, R., Bartoš, P., Havelka, Z., průmyslový vzor Společenství č. 008057053

Užitný vzor

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, (2019): Zařízení pro snížení tepelného stresu hospodářských zvířat. Šoch M., Filip M., Zoubek T., Zábranský L., Olšan P., užitný vzor č. 33255

Prototyp

ISOTHERM s.r.o., (2020): Potisk velkého formátu. Smolík, P., Fekete, L., Goldfinger, M., Chlaň, I., Minařík, Zoubek, T., Filip, M., Kuneš, R., Bartoš, P., Havelka, Z., prototyp.

ISOTHERM s.r.o., (2019): Potisk středního formátu. Smolík, P., Fekete, L., Goldfinger, M., Chlaň, I., Minařík, Zoubek, T., Filip, M., Kuneš, R., Bartoš, P., Havelka, Z., prototyp.

ISOTHERM s.r.o., (2018): Potisk malého formátu. Smolík, P., Fekete, L., Goldfinger, M., Chlaň, I., Minařík, Zoubek, T., Filip, M., Kuneš, R., Bartoš, P., Havelka, Z., prototyp.

Kniha

Havelka, Z., Olšan, P., Kuneš, R., Stehlík, R., Bumbálek, R., Zoubek, T., Filip., M., Šístková, M., a Bartoš, P. (2021). Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích pro intenzivní chovy drůbeže a prasat. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. ISBN: 978-80-7394-889-4