

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav konstruování a částí strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh laboratorní optické třídačky pro
třídění semen olejnin

Autor: Jan Prachenský

Vedoucí práce: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.

2022

ZDE VLOŽIT ZADÁNÍ

Anotační list

Jméno autora	JAN PRACHENSKÝ
Název BP	Návrh laboratorní optické třídičky pro třídění semen olejnin
Anglický název	Design of Laboratory Optical Sorter for Sorting Oilseeds
Rok	2022
Studijní program	TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor	bez oboru
Ústav	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí práce	Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.
Bibliografické údaje	počet stran 37 počet obrázků 37 počet tabulek 1 počet grafů 0 počet příloh 1
Klíčová slova	slunečnicová semena, webkamera, Teensy, optické třídění, krokový motor
Keywords	sunflower seeds, web camera, Teensy, optical sorting, stepper motor

Abstrakt

Práce se zabývá vytvořením laboratorního přístroje pro optické třídění semen olejnin, konkrétně slunečnicových semen. Hlavní prioritou návrhu jsou nízké pořizovací náklady.

Optické třídění v tomto stroji je poslední fází třídění semen z výstupu loupacích strojů za účelem analýzy účinnosti loupacích strojů.

Jako zařízení pro získání obrazu byly použity webové kamery, linka je ovládána pomocí desky mikropočítače Teensy. Zpracování obrazu je řešeno pouze koncepčně a není předmětem práce.

Abstract

The topic of this thesis is the design of a laboratory optical sorting machine for sorting oilseeds, in particular sunflower seeds. Main design priority is low cost of the machine.

Optical sorting in this machine is the final phase in sorting the output seeds from hulling machines with the objective of analyzing the efficiency of these hulling machines.

Web cameras have been used as image acquisition devices, the machine is controlled using a Teensy microcontroller board. Image processing is only explored conceptually and is not the subject of this thesis.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a na základě literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze

.....

Jan Prachenský

Poděkování

Děkuji svojí rodině a přátelům za nezbytnou podporu během i mimo této práce. Děkuji vedoucímu práce za mnohou zkušenou radu při jejím vypracování. Děkuji všem pracovníkům Ústavu Konstruování a částí strojů za technickou a vědomostní podporu bez které by stroj dnes nestál tak, jak stojí.

Obsah

1	Úvod	1
2	Přehled problematiky	2
2.1	Třídící stroj	2
2.1.1	Podávací ústrojí	2
2.1.2	Inspekční systém	2
2.1.3	Separální systém	4
2.2	Předchozí optická třídička	5
2.3	Pozorované spektrum světla	6
2.4	Barva	7
2.4.1	Barevné prostory	7
2.5	Příklady průmyslových optických třídiček	11
2.5.1	Cimbria - SEA CHROMEX	11
2.5.2	NRT ColorPlus	11
2.5.3	PELENC - Selectiv' Process Vision 2	12
2.5.4	TOMRA 5A	12
2.5.5	KEY Technology - Manta	13
3	Vlastní konstrukční návrh	14
3.1	Požadavky	14
3.2	Přehled zařízení	15
3.3	Podávací ústrojí	16
3.3.1	Potřebný podtlak	19
3.4	Pozorovací/separační ústrojí	20
3.4.1	Koncept pozorování	20
3.4.2	Vozík	20
3.4.3	Vodorovný posuv vozíku	23
3.4.4	Pracovní cyklus pozorovacího ústrojí	23
3.5	Rám	24
3.6	Pohony a jejich řízení	25
3.6.1	Krokové motory	25
3.6.2	Řídicí program	28
4	Kontrolní výpočty vybraných konstrukčních uzlů	30
4.1	Závitová dvojice hlavního posuvu	30

5	Koncepce rozpoznání obrazu	35
5.1	Filtrace odlesků	35
5.2	Prahování	35
5.3	Vyhodnocení	36
6	Závěr	37

Seznam obrázků

2.1	Příklad optické třídičky	3
2.2	Příklad inspekčního systému	4
2.3	Schéma separačního systému a detail modulu s tryskami	4
2.4	Schéma předchozí optické třídičky	5
2.5	Předchozí optická třídička	5
2.6	Viditelné spektrum	6
2.7	Spektrální citlivost čípků	7
2.8	RGB barevný prostor	8
2.9	HSV prostor	9
2.10	Barevný prostor CIE XYZ	10
2.11	Barevný prostor CIE L*a*b*	10
2.12	Třídička CHROMEX firmy Cimbria	11
2.13	NRT ColorPlus	12
2.14	PELLENC Selectiv' Vision 2	12
2.15	TOMRA 5A	13
2.16	KEY Technology - Manta	13
3.1	Pohled na linku	14
3.2	Blokové schéma konstrukce	15
3.3	Fotografie vstupní násypky	16
3.4	Řez pohyblivou deskou	17
3.5	Posuv pohyblivé desky	17
3.6	Podávací rameno lopatky	18
3.7	Otevírání lopatky	18
3.8	Nákres přísavky a semene	19
3.9	Příklad semen	20
3.10	Pohled na kulisu	21
3.11	Kinematické schéma kulisového mechanismu	21
3.12	Sekvence pohybu vodorovného posuvu	22
3.13	Pohled na vodorovný posuv vozíku	23
3.14	Pohled na spodní kameru	24
3.15	Pohled na nerezovou desku	25
3.16	Diagram fází bipolárního motoru	26
3.17	Řídicí deska	27
3.18	Budicí deska solenoidu	28
4.1	Schéma pro výpočet vzpěru	33

5.1	Ukázka filtru odlesku	35
5.2	Příklad vyprahování	36

Seznam tabulek

4.1	Naměřené hodnoty	30
-----	----------------------------	----

Seznam použitého značení a symbolů

T_s	$[N]$	Třecí síla
N_s	$[N]$	Přítlačná síla
G_s	$[N]$	Gravitační síla
g	$[m \cdot s^{-2}]$	Gravitační zrychlení na Zemi
f_{min}		Součinitel tření
Δp	$[MPa]$	Podtlak
D_s	$[mm]$	Průměr otvoru
I_m	$[A]$	Naměřený elektrický proud
U_m	$[V]$	Naměřené elektrické stejnosměrné napětí
n_m	$[min^{-1}]$	Naměřené otáčky
M_k	$[N \cdot mm]$	Kroutící moment
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost
Q	$[N]$	Osová síla
p	$[mm]$	Stoupání závitu
p_H	$[mm]$	Rozteč závitu
f		Součinitel tření
γ	$[^\circ]$	Úhel stoupání závitu
β	$[^\circ]$	Úhel boku závitu
φ'	$[^\circ]$	Třecí úhel
z		Počet závitů matice
σ_{ot}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Napětí z otlaku v kontaktních plochách závitové dvojice
d_2	$[mm]$	Střední průměr závitu
d_3	$[mm]$	malý průměr závitu šroubu
S_3	$[mm^2]$	Průřez dříku šroubu
σ_t	$[N \cdot mm^{-2}]$	Tahové/tlakové napětí
W_k	$[mm^3]$	Moment setrvačnosti průřezu v krutu
τ	$[N \cdot mm^{-2}]$	Nejvyšší smykové napětí v krutu
α		Součinitel pro výpočet redukovaného napětí
σ_{redHMH}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Redukované napětí podle metody HMH
$\sigma_{red\tau_{max}}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Redukované napětí podle metody τ_{max}
k_{HMH}		Bezpečnost podle metody HMH
$k_{\tau_{max}}$		Bezpečnost podle metody τ_{max}
l_0	$[mm]$	Volná délka prutu
l_A	$[mm]$	Redukovaná délka prutu
l_B	$[mm]$	Redukovaná délka prutu
A_{min}	$[mm^2]$	Nejmenší průřez prutu
J_{min}	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu
i_x	$[mm]$	Poloměr setrvačnosti průřezu
λ		Štíhlostní poměr
λ_A		Štíhlostní poměr
λ_B		Štíhlostní poměr
λ_m		Mezní štíhlostní poměr

F_{krA}	[N]	Kritická síla ve vzpěru
F_{krB}	[N]	Kritická síla ve vzpěru
F_{DA}	[N]	Dovolená síla ve vzpěru
F_{DB}	[N]	Dovolená síla ve vzpěru
k_{vzperA}		Bezpečnost na vzpěr
k_{vzperB}		Bezpečnost na vzpěr

1 Úvod

Olejnin, mezi něž patří mimo jiné i slunečnice, tvoří významný podíl zemědělské produkce v České republice. Lze z nich získat cenné plody pro potravinářský průmysl, který využívá semena vcelku nebo dělená. Semena se především využívají pro výrobu olejů dalším zpracováním semen, zejména lisováním.

Semeno slunečnice tvoří jádro bohaté na oleje a osemení, tvořené tuhou slupkou. Ta se skládá z vlákniny a obsahuje minimum oleje, její přítomnost tedy přímo snižuje hmotnostní podíl oleje v lisované směsi, v důsledku čehož je pak nižší i výtěžnost lisování. Navíc lignin obsažený ve slupce může působit abrazivně na ústrojí lisovacího zařízení, což zkracuje jeho životnost. Je tedy výhodné odstranit slupky ze semen před lisováním. Navíc slupky samotné mají využití jako tuhé palivo.

Olejnatá semena slunečnice jsou před dalším zpracováním zbavena slupky v loupacím stroji procesem, který spočívá v rychlých nárazech semen o tvrdé povrchy. Úspěšnost vyloupení semene, stejně jako zachování jeho celistvosti, závisí na parametrech nárazu, velikosti a hmotnosti semene, rychlosti a úhlu dopadu.

Dosavadní způsoby návrhů loupacích strojů nemají k dispozici potřebná data k určení optimální geometrie. Pro testování a vyhodnocení geometrie loupacího stroje je třeba vzorek tímto strojem vyloupaný roztrždit podle stanovené metodiky pro posuzování loupateľnosti. Za tímto účelem je sestavena laboratorní třídící linka.

Současná třídící linka zahrnuje tři pracovní fáze. Nejprve je na vibrační tříděnce semeno rozděleno na tři velikostní frakce a prach. Každá z velikostních frakcí je poté předána do aspirační komory, kde se prouděním vzduchu oddělí samostatné slupky od semen. Nakonec jsou takto vytříděná semena předána do optického třídícího zařízení, jež oddělí vyloupaná semena od nevylopaných pomocí zpracování obrazu. Současné optické třídící zařízení nevyhovuje plně požadavkům.

Cílem této práce je navrhnout, zkonstruovat a sestrojít nové zařízení pro optické třídění semen olejin po jejich průchodu loupacím strojem a mechanickým tříděním.

2 Přehled problematiky

2.1 Třídící stroj

Optické třídění spočívá v rozdělení tříděného materiálu na základě spektra odraženého světla povrchu tříděných částic [1] nebo na základě spektra průchozího skrze tříděný materiál [2]. Základní optická třídící linka se skládá z následujících částí [1]:

- podávací ústrojí - příjem a podávání musí být pod kontrolou pro správnou funkci rozpoznávacího systému,
- inspekční systém - měří optické vlastnosti zkoumaného materiálu a vyhodnocuje samotné třídění,
- separační systém - zajistí fyzické oddělení tříděného materiálu do jednotlivých skupin podle příkazů inspekčního systému.

2.1.1 Podávací ústrojí

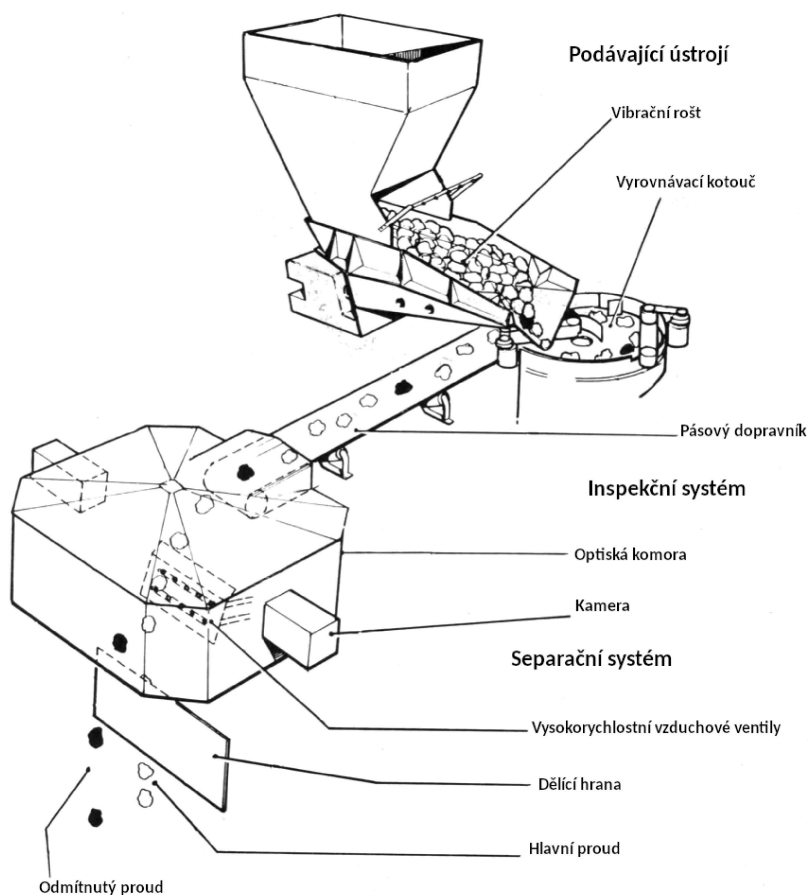
V obvyklém optickém třídícím zařízení pracuje paralelně několik jednotlivých inspekčních prostorů a separátorů. Podávací ústrojí musí vhodně dávkovat jednotlivé objekty tak, aby mělo třídící zařízení dostatek času na jeho zpracování před přivedením následujícího objektu. Mívá často podobu dopravníkového pásu nebo ploché násypky či vibračního roštu [2] [1].

2.1.2 Inspekční systém

Signál v inspekčním systému může být získáván jednobodovým snímačem nebo vícebodovým snímačem (kamerou). Signál, který snímač vrátí, závisí na několika faktorech, mimo jiné na vlastnostech světelného zdroje, snímaného povrchu i snímače samotného včetně případně použitých filtrů [1].

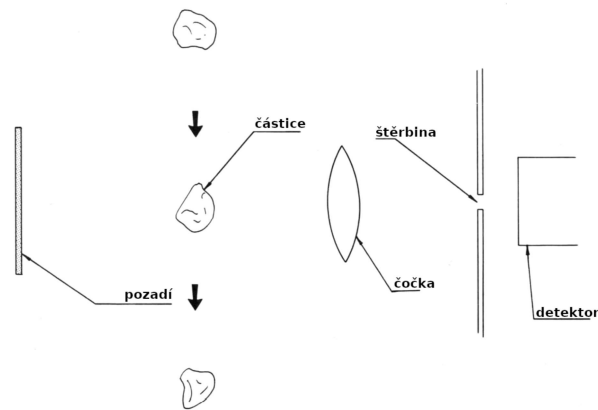
Kamery pro nahlížení tříděného materiálu za pohybu bývají zpravidla řádkové, dvou- rozměrný obraz je tvořen pohybem materiálu v zorném poli kamery. Pro přesnost zachycení obrazu tvaru je nezbytné, aby byla rychlost materiálu při pohybu zorným polem konstantní.

Světelný zdroj je pro většinu materiálů, jež nezáří samy, očividně nezbytný. Pro pozorování odrazných vlastností povrchu (barvy povrchu) je ideální dokonale jednolitý kulovitý zdroj světla obklopující pozorovaný objekt. To bývá ve většině případů nedosažitelné, proto se zdroje světla používají v několika pozicích okolo objektu tak, aby byl objekt



Obr. 2.1: Příklad optické třídičky, převzato z [1], popisky přeloženy

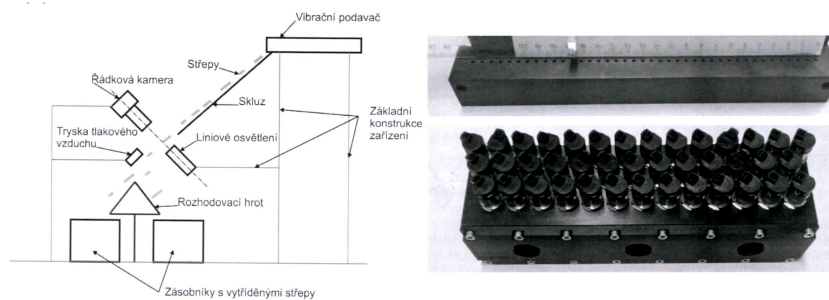
nasvícen z pohledu snímače. Konečná velikost světelného zdroje způsobuje na lesklých površích odlesky, které jsou pro přesnost měření nežádoucí. Spektrální charakteristika světelného zdroje musí být silná ve vlnových délkách, jež jsou pro pozorování důležité kvůli zajištění nízkého šumu signálu [1]. V případě měření průchozího světla je zdroj umístěn za měřeným objektem proti snímači [2].



Obr. 2.2: Příklad inspekčního systému, částice je nahlížena štěrbinou za letu proti pozadí, převzato z [1], popisky přeloženy

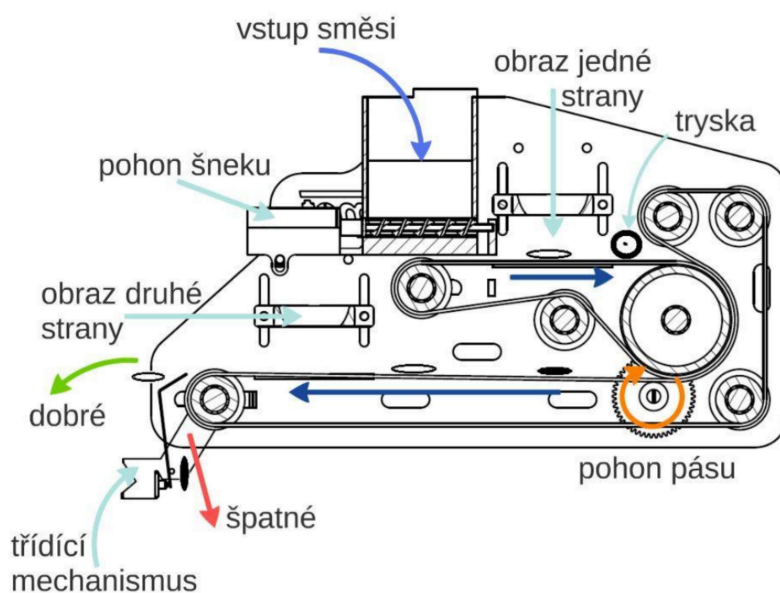
2.1.3 Separační systém

V obvyklé konfiguraci optického třídícího zařízení se inspekce provádí za volného pádu. Ve většině případů se mimo jiné díky spolehlivosti a rychlosti používá pro separaci vytříděných objektů prudký proud stlačeného vzduchu ovládaný rychlým elektromechanickým ventilem. Ten vychýlí vybrané kusy tříděného materiálu z jejich volného pádu do sběrné násypky/nádoby rozdílné od té, do níž vede původní trajektorie. Alternativu představuje užití mechanických zábran [1].



Obr. 2.3: Schéma separačního systému a detail modulu s tryskami, převzato z [2]

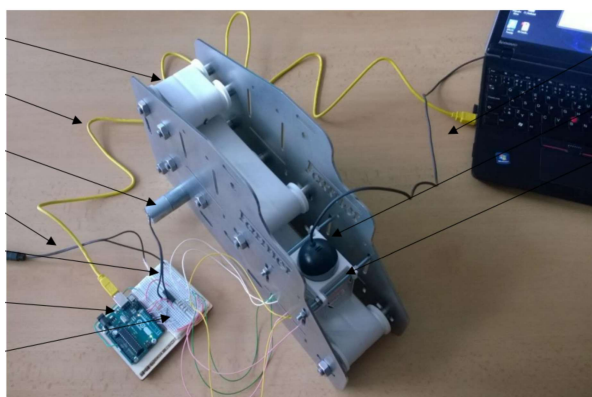
2.2 Předchozí optická třídačka



Obr. 2.4: Schéma předchozí optické třídačky, převzato z [3]

Předchozí model třídícího stroje sestával ze vstupní násypky se šnekovým dopravníkem, dvojitým pásovým dopravníkem a třídícím mechanismem. Šnekový dopravník postupně dávkuje jednotlivá semena na pásový dopravník. V horní části pásového dopravníku jsou semena snímána z jedné strany webkamerou, poté je semeno současně otočeno a předáno na spodní pásový dopravník, kde je nahlíženo webkamerou z druhé strany. třídící mechanismus tvoří pohyblivá plechová bariéra poháněná solenoidem.

Předchozí návrh splňoval funkci třídění, nicméně nevykazoval ideální spolehlivost, problematické bylo zejména podávací ústrojí tvořené šnekovým dopravníkem [3].



Obr. 2.5: Předchozí optická třídačka, částečně odstavená, převzato z [3], oříznuto

2.3 Pozorované spektrum světla

Pozorovaná část světelného spektra může být jednoduchá či vícenásobná. Lze je rozdělit do následujících skupin. [4]

Barevné

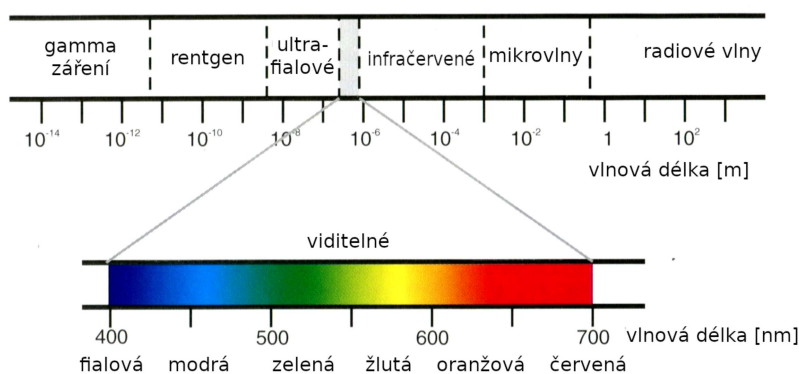
Jednoduché snímače detekují intenzitu světla v celém viditelném spektru dohromady, poskytují tedy informaci o tmavosti/světlosti pozorovaných objektů. Složitější barevné snímače používají tři pásma paralelně ke zjištění přesné barvy objektu, podobně jako je tomu u lidského oka [4]. To znamená tři nezávislé kanály pro červené, zelené a modré světlo (Red, Green, Blue → RGB). Pro přesnou reprezentaci barvy v různých intenzitách světla se hrubý signál RGB dále zpracovává [5].

Infračervené / ultrafialové

Na křemíku založené snímače jsou schopny zachytit světlo o vlnových délkách v blízké ultrafialové (≈ 380 nm) či blízké infračervené (780 až 1 000 nm) oblasti světelného spektra. Tím mohou rozšířit rozlišovací schopnost snímače za hranice barev viditelných lidským okem. Snímače využívající diody na bázi InGaAs (Indium, Gallium, Arsen) dovolují detekovat infračervené světlo v pásmu 1 až 17 μm [4].

Hyperspektrální

Moderní špičkové snímače využívají místo tří širokých pásem, používaných běžnými kamerami, stovky úzkých pásem světelného spektra. Místo jednoduché barvy objektu tedy snímají blíže jeho spektrální charakteristiku, nepřímo tudíž zjišťují chemické složení povrchu objektu. Tak lze rozlišit i povrchy, jež se lidskému zraku jinak jeví totožné [4].



Obr. 2.6: Viditelné spektrum, převzato z [6], popisky přeloženy

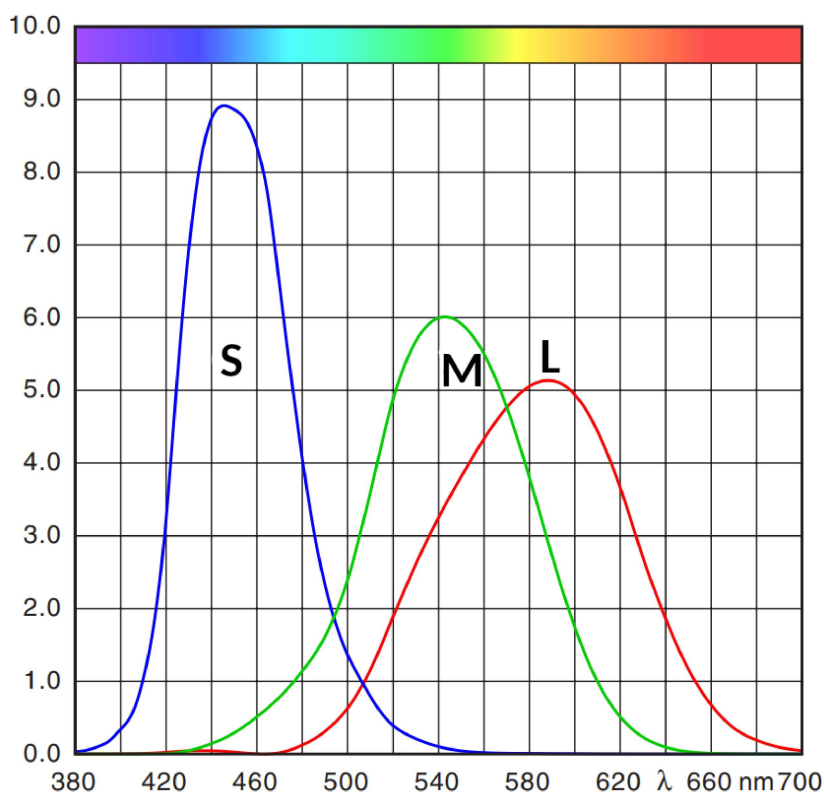
2.4 Barva

Barva je vjem, jímž mozek shrnuje jednu nebo více vlastností kombinovaného světelného vjemu z očí. I když popisují takřka tutéž informaci, jsou systémy lidského vnímání barvy, způsob, jakým jsou obrazové vjemy okem nebo kamerou získávány, a fyzikální realita barvy odlišné věci. V rámci problematiky této práce je především důležité, jak lze lidské vnímání barev skloubit se strojovým zpracováním obrazového signálu.

2.4.1 Barevné prostory

RGB

Pro účely reprezentace barvy je třeba reprezentovat barevnou informaci pomocí jednoho nebo více čísel. Lidské oko používá ke zjištění barvy tři druhy světločivých buněk, čípků, každý typ pro jednu ze tří základních barev: červenou, zelenou a modrou (L, M a S). Tyto barvy pak představují špičky jejich spektrálních citlivostí, (viz obr. 2.7).

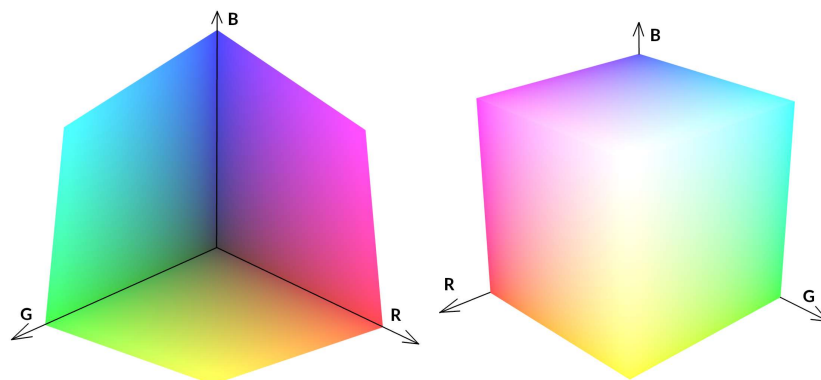


Obr. 2.7: Spektrální citlivost čípků, převzato z[7], popisky upraveny

S tím takřka přirozeně souvisí aditivní systém míchání barev, kde kombinace červeného, zeleného a modrého světla v rovné míře tvoří světlo bílé. Pokud se intenzity světla jednotlivých základních barev vyjádří v číslech, získáváme třísouřadnicový systém barev-

ného prostoru RGB (Red, Green, Blue). V tomto prostoru pracuje většina počítačových monitorů, digitálních kamer a fotoaparátů. Prostor lze reprezentovat jako krychli.

Nevýhodu ovšem představuje obtížné rozlišení jinak přirozeně podobných barev v různých odstínech, a proto se bez dalších úprav pro naše účely zpracování obrazu nehodí.

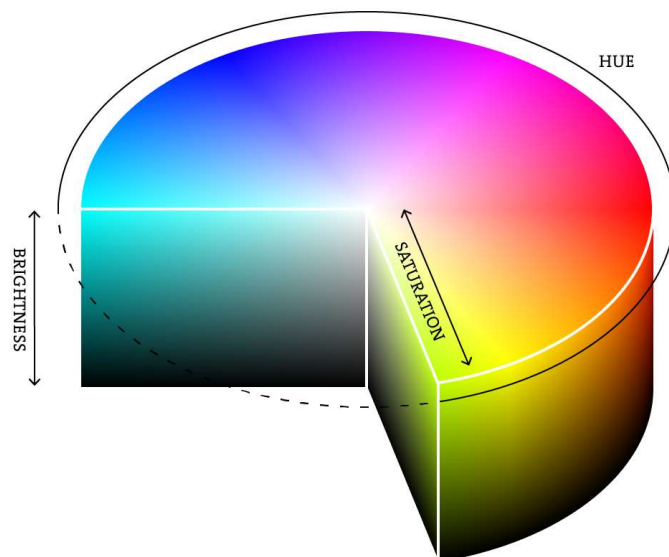


Obr. 2.8: RGB barevný prostor

HSL

Barevný prostor RGB, třebaže má biologické realitě cítění barev nejbliže, ovšem neodpovídá lidskému vnímání barev. Tomu je blíže například prostor HSL, respektive HSV nebo HCL. Zde je barva určena polohou v prostoru zadaném cylindrickými souřadnicemi. Těmito jsou odstín, sytost a světlost (Hue, Saturation/Chroma, Value/Lightness) [6].

V tomto prostoru je ale sytá barva stejně „světlá“ jako bílá, tudíž se nehodí pro rozpoznání barev napříč odstíny.

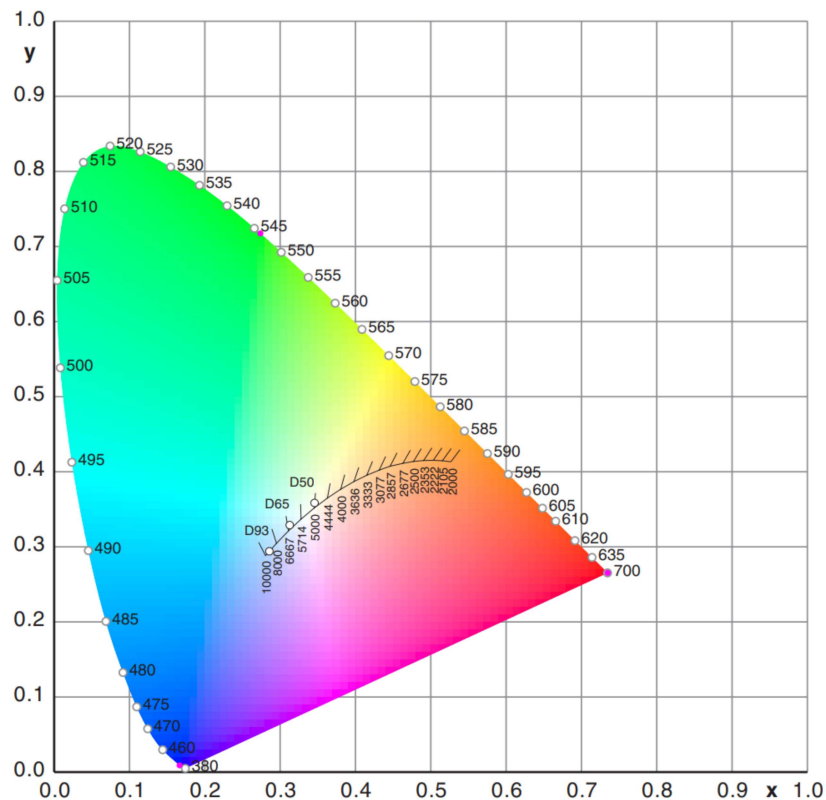


Obr. 2.9: HSV prostor, převzato z [8]

CIE XYZ

Prostor XYZ je barevný prostor vyvinutý CIE (Mezinárodní komisí pro osvětlování) pro popis barev nezávisle na konkrétním strojním vybavení a zahrnuje veškeré barvy běžně vnímatelné člověkem. Diagram chromatičnosti je tvořen průsečnou rovinou o světelnosti 1 skrze XYZ prostor a je ohraničen křivkou tvořenou čistě spektrálními barvami a fialovou úsečkou spojující konce viditelného spektra [7].

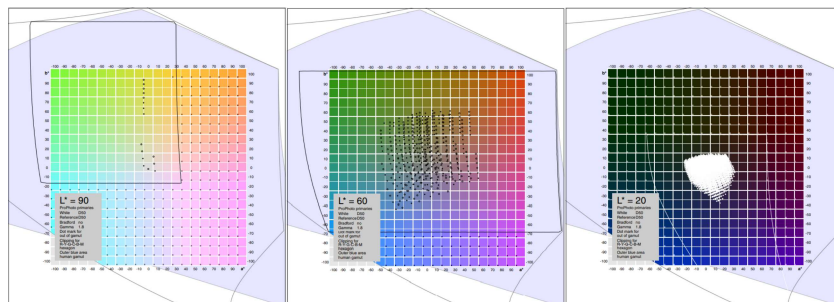
I když je tento prostor věrný jak pozorování barev, tak i jejich fyzikální podstatě, není sám o sobě o mnoho vhodnější pro rozpoznávání barev napříč odstíny, protože plná sytá barva je na stejné úrovni světelnosti jako bílá, podobně jako je tomu u HSL.



Obr. 2.10: Barevný prostor CIE XYZ, převzato z [7]

CIE L*a*b*

Prostor L*a*b* byl vyvinut CIE pro lepší popis lidského vnímání změny barvy. Tři souřadnice jsou L* (pro světlost - od černé po bílou), a* (pro barevnost červená x zelená) a b* (pro barevnost modrá x žlutá). Tyto barvy nejsou fyzikálně základní, lépe však odpovídají tomu, jak o barvách člověk přemýšlí. Tento prostor je nelineárním zobrazením základního prostoru CIE XYZ. Nachází využití v mnoha aplikacích pro práci s grafikou a fotografiemi při vyhledávání podobných barev a proto je vhodný pro naše potřeby [9].



Obr. 2.11: Barevný prostor CIE L*a*b*, převzato z [10]

2.5 Příklady průmyslových optických třídaček

2.5.1 Cimbria - SEA CHROMEX

Třídačky CHROMEX jsou určeny pro třídění zrní, ořechů, semen, malých kusů plastů či kovů. Linka používá řádkové RGB kamery doplněné o infračervené kamery, v případě modelů řady CHROMEX UV i o ultrafialové kamery. K nasvícení využívá LED osvětlení. Separace je zajištěna pneumatickými tryskami. Podávání se řeší násypkami. Tříděný materiál je urychlován pomocí nakloněné roviny, po níž sklouzává vlastní vahou, nahlížen je v letu. Nejvyšší model z řady má až 28 kamer, sedm násypek na vstupu i výstupu, příkon 3,5 kW, má hmotnost 1,65 t a spotřebuje 58,5 litru stlačeného vzduchu za sekundu (0,4 MPa). Kamery jsou nastaveny na prostorové rozlišení 0,06 mm a zachycují snímky s frekvencí 18 kHz [11].



Obr. 2.12: Třídačka CHROMEX od firmy Cimbria, včetně schématu (vlevo) převzato z [11]

2.5.2 NRT ColorPlus

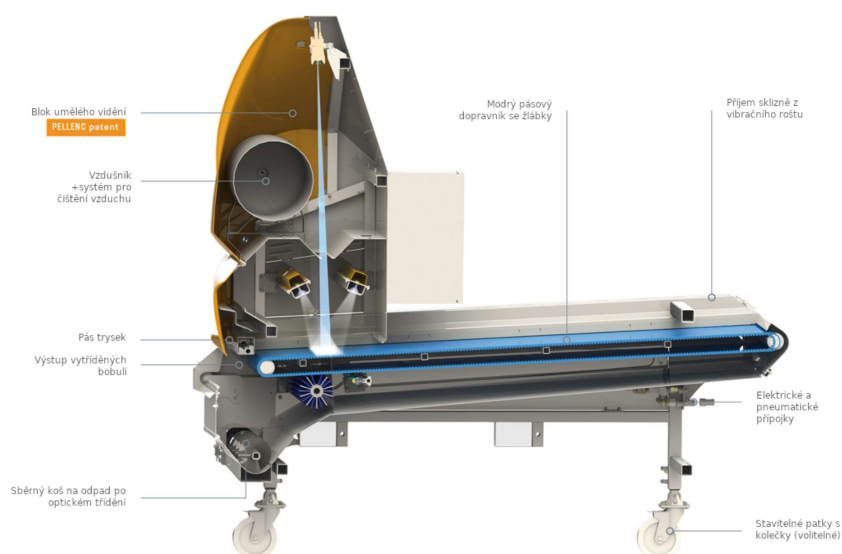
Třídačky National Recovery Technologies ColorPlus jsou určeny pro třídění plastových nádob podle materiálu pro účely recyklace. Třídačka používá průsvit k lepší identifikaci průsvitných materiálů, jako např. PET. Linka používá řádkové RGB kamery se snímací frekvencí 5 kHz. Materiál je urychlován pásovým dopravníkem a je nahlížen v letu. Separaci zajišťují spodní pneumatické trysky. Výrobce uvádí kapacitu až 16 000 lb/h (7,25 t/h) [12].



Obr. 2.13: NRT ColorPlus, schéma převzato z [13], řez převzat z [14], oříznuto

2.5.3 PELLENC - Selectiv' Process Vision 2

Třídíčky Vision 2 jsou určeny pro třídění bobulí vinné révy. Materiál je nahlížen pouze ze shora na pásovém dopravníku, který se pohybuje rychlostí 2,4 m/s. Pásový dopravník má na povrchu pásu žlábký pro kontrolu nad polohou materiálu. Separace je zajištěna pomocí pneumatických trysek ze shora. Odmítnutý materiál je ze stroje odebírán šroubovým dopravníkem. V základní konfiguraci linka váží 0,82 t, má příkon 4,5 kW a má kapacitu až 12 t/h. [15]



Obr. 2.14: PELLENC Selectiv' Vision 2, převzato z [15], popisky přeloženy

2.5.4 TOMRA 5A

Třídíčky TOMRA 5A jsou určeny ke třídění brambor a výrobků z brambor za účelem odstranění cizího materiálu. Materiál je spouštěn volným pádem z podávacího pásového dopravníku a je nahlížen v letu. Linka je vybavena kamerami ve viditelném a blízkém

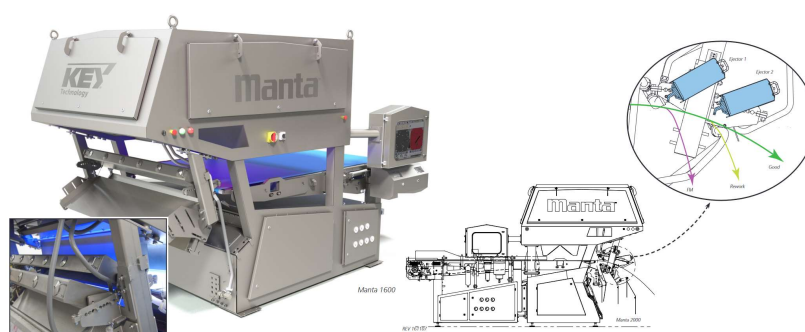
infračerveném spektru, nahlížení se uskutečňuje z obou stran proudu materiálu. Prostorové rozlišení kamer je 1 mm. Separaci je zajišťují pneumatické trysky. Nejvyšší model v řadě 5A má příkon 2 kW a jeho kapacita činí až 55 t/h.[16]



Obr. 2.15: TOMRA 5A, převzato z [16]

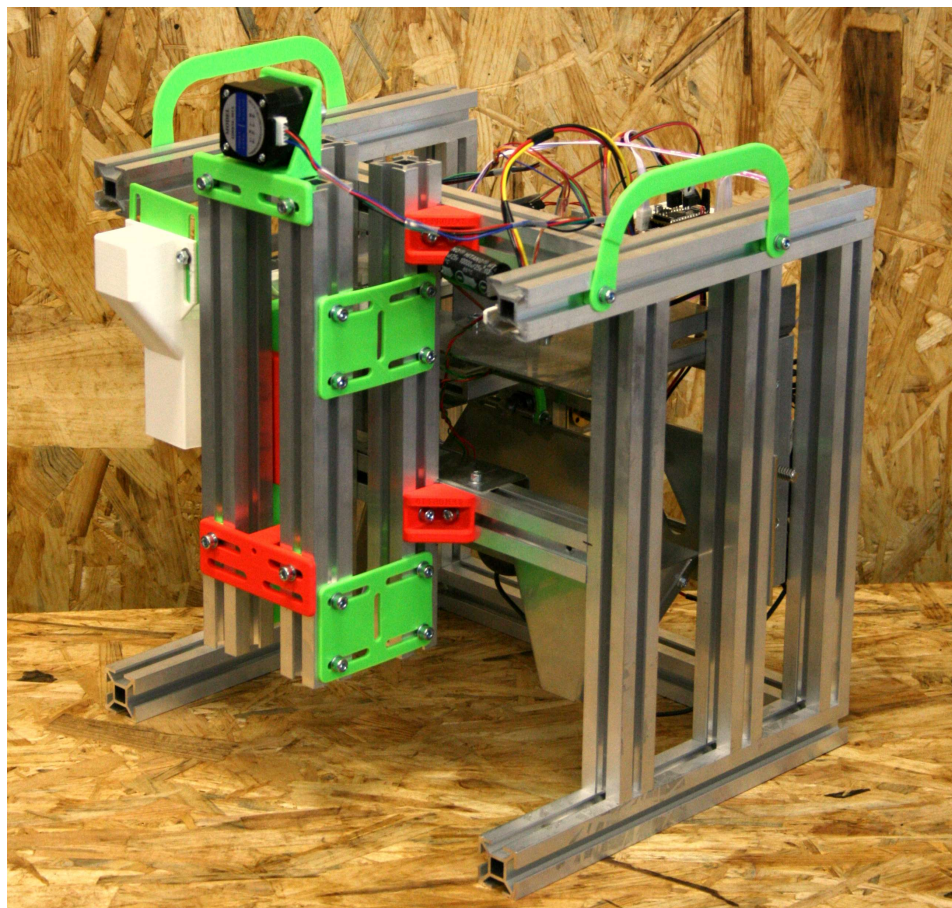
2.5.5 KEY Technology - Manta

Třídíčky Manta jsou určeny ke třídění zrní nebo zeleniny. Mohou být vybaveny RGB, ultrafialovými a/nebo infračervenými kamerami. Navíc k rozpoznání materiálu využívají fluorescenční lasery, umožňující sledovat nejen odrazivé, ale i emisní spektrum zkoumaného materiálu. Separace může být u těchto linek i třícestná[17], přidáním druhé řady pneumatických trysek do separačního systému, za účelem separace opravitelných zmetků. Podávání zajišťuje pásový dopravník, materiál je nahlížen v letu. Nejvyšší model z řady Manta má kapacitu až 20 t/h [18].



Obr. 2.16: KEY Technology - Manta, schéma třícestné separace(vpravo), převzato z [17]

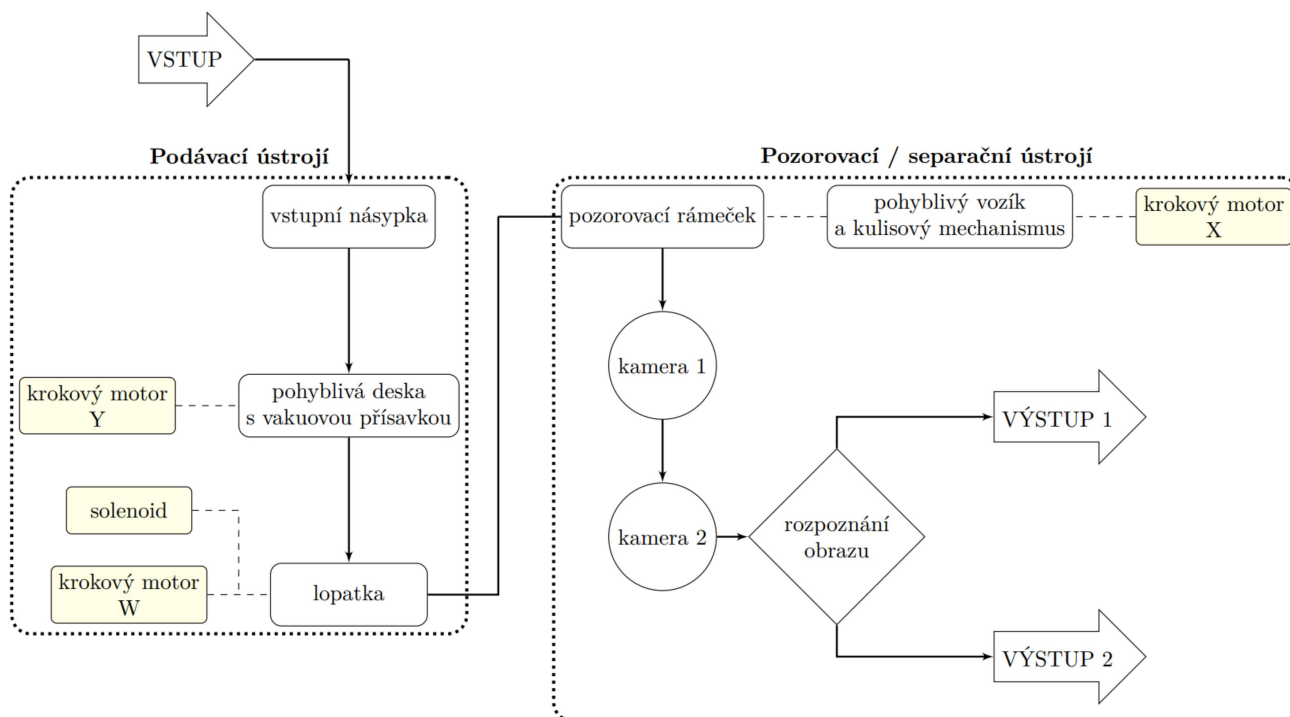
3 Vlastní konstrukční návrh



Obr. 3.1: Pohled na sestavenou linku, zde stojící samostatně bez napájení a napojení na zbytek stroje

3.1 Požadavky

Hlavním požadavkem bylo navázání na předchozí dva procesy v třídící lince, třídění na vibračním roštu a následnou aspiraci, dotřídění největších frakcí na vyloupaná a nevy-loupaná semena, to vše za udržení nízkých pořizovacích nákladů. Odrazový můstek pro návrh nové optické třídící linky představoval především model předchozí optické třídící [3]. Vzhledem k tomu, že třídící linka nebude zpracovávat materiál pro přímé využití, ale pouze v rámci měření v laboratoři, není kladen důraz na rychlost třídění.



Obr. 3.2: Blokové schéma konstrukce, šipky značí cestu zkoumaného semene strojem

3.2 Přehled zařízení

Optická třídící linka se skládá z podávacího a pozorovacího/separačního ústrojí (viz obr. 3.2). Hlavní části podávacího ústrojí jsou:

- vstupní násypka,
- pohyblivá deska s vakuovou přísavkou,
- polohovatelná lopatka s otevíratelným košem.

Hlavní části pozorovacího/separačního ústrojí tvoří:

- pohyblivý vozík s pozorovacím rámečkem,
- kamery a osvětlení,
- kulisový mechanismus,
- výstupní násypky.

Ústrojí jsou uložena do hliníkového nosného rámu.

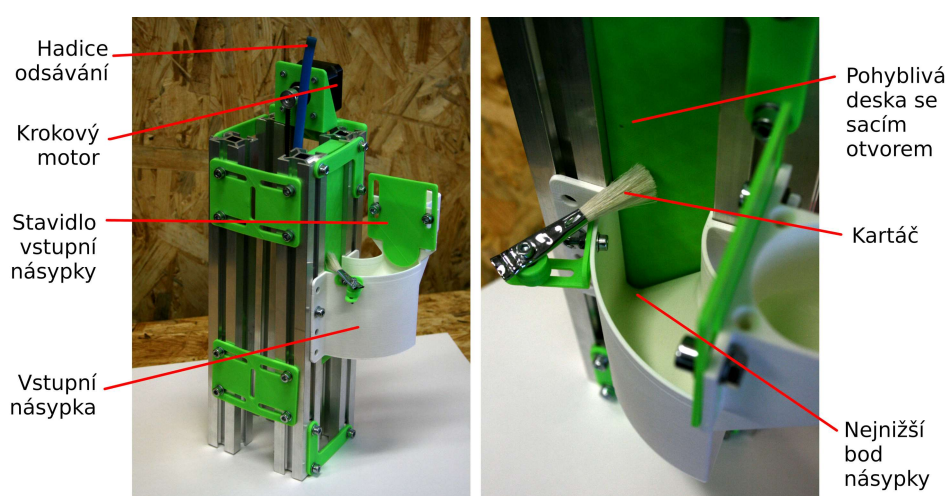
Popisu jednotlivých částí se budou blíže věnovat následující kapitoly.

3.3 Podávací ústrojí

Podávací ústrojí přijímá semena a následně jednotlivá semena dávkuje do pozorovacího/separačního ústrojí (viz obr. 3.2).

Předchozí optická třídící linka používala k podávání semen násypku se šroubovým dopravníkem. Během vývoje se šroubový dopravník potýkal s nespolehlivostí a mechanickým poškozováním semen [3]. Podávací ústrojí nové linky bylo původně vyvíjeno separátně, nicméně posléze bylo začleněno do návrhu optické třídičky.

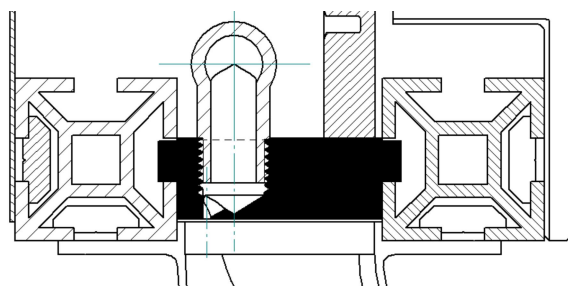
Pro větší šetrnost bylo podávací ústrojí navrženo jako vakuová přísavka schopná díky svojí konstrukci vytáhnout jednotlivé kusy semen z násypky. Podtlak není dostatečně silný, aby poškodil slunečnicová semena, ale zároveň udrží na přísavce semeno v plně vertikální poloze. Z přísavky je semeno předáno do koše lopatky s otevíratelným dnem, které jej nechá z malé výšky volně spadnout na pozorovací sklo.



Obr. 3.3: Fotografie vstupní násypky s popisky důležitých částí

Vakuová přísavka má podobu 1,5 mm velkého válcového otvoru v jinak hladkém povrchu pohyblivé desky. Tato deska slouží mimo jiné jako stěna podávací násypky. Ta má geometrii navrženu tak, aby semena vlastní vahou klouzala do nejnižšího bodu násypky, umístěného v jedné přímce s osou pohybu otevřeného konce přísavky. Pohyblivá deska sjede do dolní úvrati, zde okamžik setrvá a pak vyjede do horní úvrati. Cestou se nahodile přisaje jedno semeno. Při cestě vzhůru se může stát, že semeno již přisáté k desce vynese nahoru jedno nebo dvě semena další. To je nežádoucí a při cestě vzhůru jsou tato přebytečná semena vychýlena ze svojí pozice staticky umístěným jemným kartáčem a padají volně zpět do prostoru násypky. Takto je zajištěno, že bude vždy nabráno nejvýše jedno semeno ke zkoumání. Správné nastavení kartáčku je nutné provést ručně. Když se deska nachází v horní úvrati, je do kontaktu s deskou natočeno rameno nesoucí koš lopatky. Lopatka má na horním okraji vytvořeno zkosení. Vzniklý klín při pohybu desky směrem dolů odtáhne semeno od přísavky a o se zachytí v koši lopatky. Rameno s lopatkou je poté natočeno do polohy nad podávací šachtou. Pokud je pozorovací rám

v poloze pod podávací šachtou, může být dno lopatky otevřeno a semeno spadne na pozorovací sklo. Zpětná pružina dno opět uzavře. Rameno lopatky se začne natáčet zpátky k pohyblivé desce, aby mohlo nabrat další semeno.



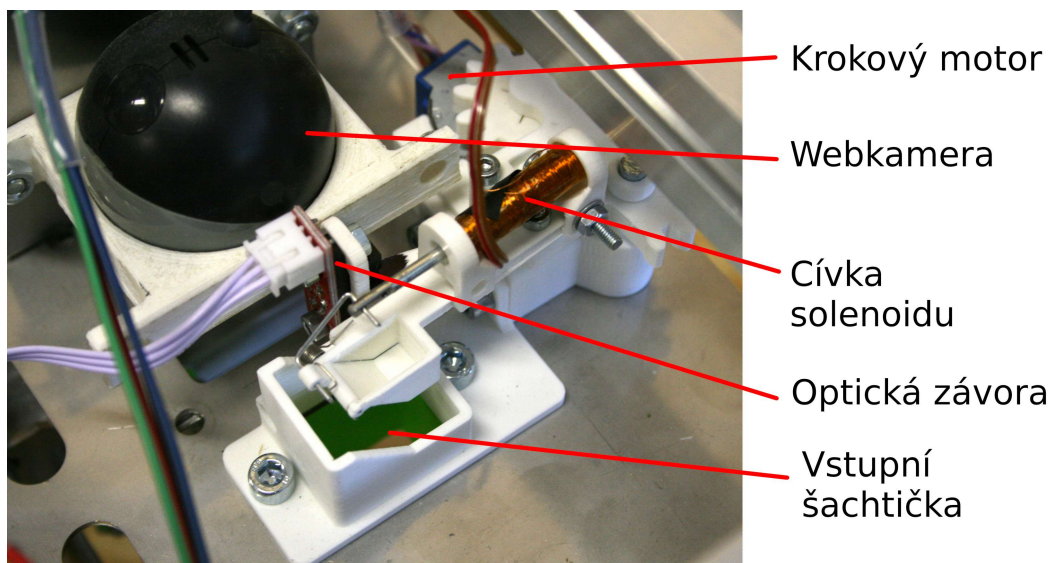
Obr. 3.4: Řez pohyblivou deskou (vyplněno černě)

Pohyblivá deska je poháněna bipolárním krokovým motorem bez převodovky, pomocí ozubeného řemene a řemenice nasazené na hřídeli motoru. V dolní úvrati je umístěn modul optické závory, který slouží k nulování pozice desky.

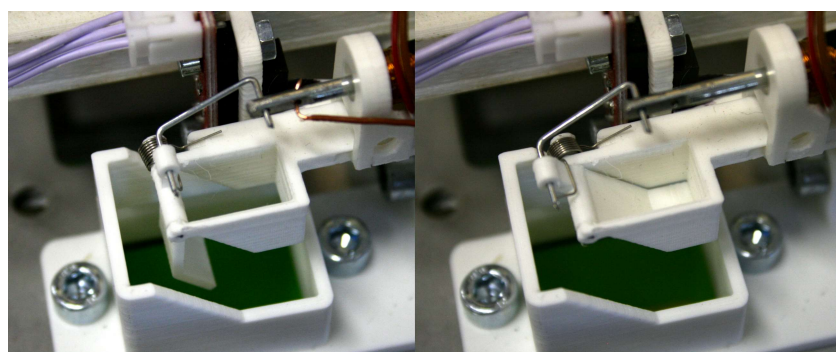


Obr. 3.5: Posuv pohyblivé desky, ozubený řemen je zachycen vlastními zuby kolem čepů ve drážce, napnut je pomocí uchycení spodní řemeničky

Deska je vertikálně lineárně vedena v drážkách hliníkových kombi profilů. Volné uložení hladkého PLA plastu desky na hladkém povrchu hliníkových profilů vykazuje minimální tření. Rameno s lopatkou pohání malý unipolární krokový motor, upravený na bipolární k zachování kompatibility s použitými budiči. Motor obsahuje vlastní převodovku a jeho výstupní hřídel není pevně uložena, rameno je tedy nasazeno na pevné ose a s motorem jej spojuje jednoduchý zubový převod s jednotkovým převodovým poměrem. Pohyblivé dno koše lopatky je poháněno tažným ručně navíjeným solenoidem, který při připojení napětí zatáhne za táhlo spojené s dnem, a tak otevře dno proti působení pružiny. Při odpojení napětí solenoid ztrácí sílu a dno se opět uzavírá.



Obr. 3.6: Podávací rameno lopatky, rameno je ve výchozí poloze nad vstupní šachtičkou a černá clona na rameni přerušuje optickou závoru

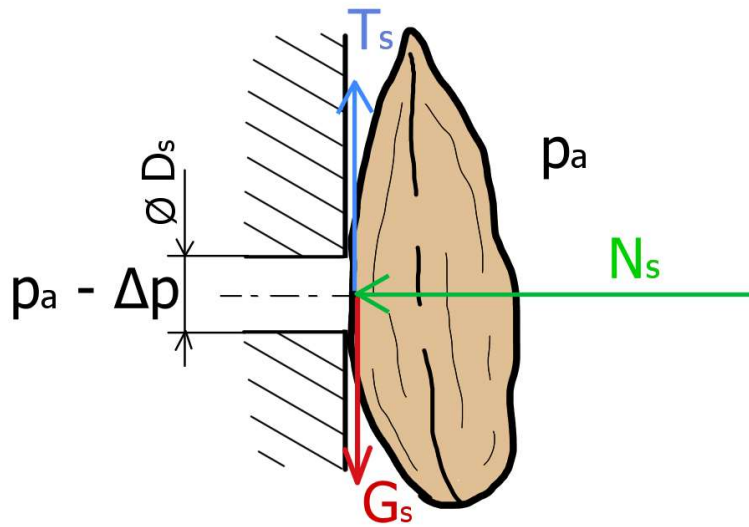


Obr. 3.7: Podávací lopatka se zavřeným (vpravo) a otevřeným (vlevo) košem. Otevřená poloha je pro potřeby fotografie zajištěna drátkem, v pracovním cyklu je otevřena solenoidem jen 200 ms

3.3.1 Potřebný podtlak

Pro udržení semene na přísavce je třeba vyvinout dostatečnou přídržnou sílu N_s pomocí podtlaku Δp tak, aby byla překonána gravitační síla G_s působící na semeno, viz rovnice 3.5. Lze počítat se součinitelem tření minimálně $f_{min} = 0,3$, přičemž ten se se stoupající vlhkostí zvyšuje. Hmotnost semen v největších frakcích je řádově v oblasti 0,1 g, s přihlédnutím k vlivu vlhkosti na hmotnost semen a bezpečnosti výpočtu odhaduji hmotnost nejtěžšího semene na $m_{max} = 0,2 \text{ g}$. [23]

Přítlačná síla je dána podtlakem oproti okolní atmosféře a velikostí otvoru přísavky. Vzhledem k velikosti nejmenších semen přijatelných strojem byla navržena velikost sacího otvoru $\varnothing D_s = 1,5 \text{ mm}$.



Obr. 3.8: Nákres řezu přísavky a semene s vyznačením hlavních sil

$$T_s = N_s \cdot f_{min} \quad (3.1)$$

$$T_s = \Delta p \cdot D_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot f_{min} \quad (3.2)$$

$$G_s = g \cdot m_{max} \quad (3.3)$$

$$T_s \geq G_s \quad (3.4)$$

$$\Delta p \cdot D_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot f_{min} \geq g \cdot m_{max} \quad (3.5)$$

$$\Delta p \geq \frac{g \cdot m_{max}}{D_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot f_{min}} \quad (3.6)$$

$$\Delta p \geq \frac{9,80665 \cdot 0,0002}{0,0015^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,3} \quad (3.7)$$

$$\Delta p \geq 3699,6 \text{ Pa} \doteq 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \quad (3.8)$$

Vývěva použitá pro vytvoření podtlaku tedy musí být schopna vyvinout podtlak minimálně 3,7 kPa.

3.4 Pozorovací/separační ústrojí

Pozorovací a separační ústrojí přebírá jednotlivá semena z podávacího ústrojí (viz obr. 3.2), zajišťuje jak jejich samotné pozorování, tak i jejich separaci pomocí jedné pohybové soustavy.

3.4.1 Koncept pozorování

Slupka semene slunečnice se přirozeně dělí na dvě poloviny. Po vyloupání v loupačce jsou v tříděné směsi mimo jiné zcela vyloupaná semena bez slupky, částečně vyloupaná semena s polovinou nebo částí slupky a zcela celistvá nevylopaná semena (viz obr. 3.9). Kvůli částečně vyloupaným semenům je nutné snímat semeno ze dvou stran.

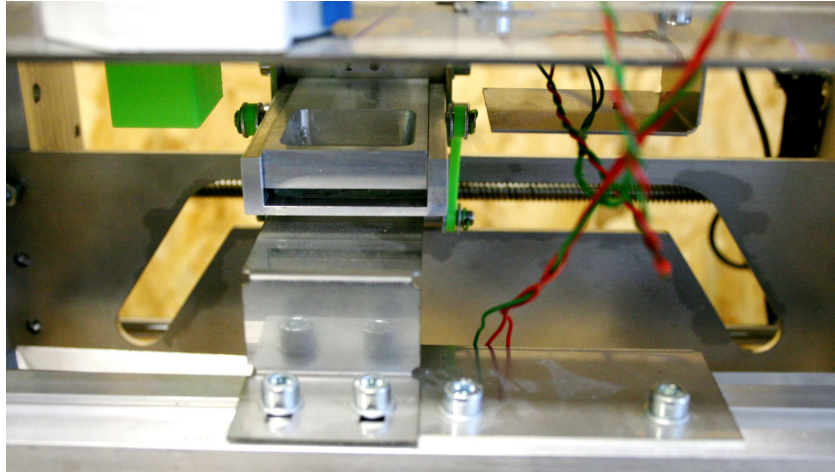


Obr. 3.9: Příklad semen, na obrázcích lze vidět semena vyloupaná plně (vpravo nahoře), částečně (první a druhý sloupec zleva) i zcela nevylopaná (vpravo dole). Zelený podklad je použit pro ilustrační účely

Semeno je tedy umístěno na skleněnou desku tvořící dno pozorovacího rámečku tak, že je snímáno kamerou nejprve z jedné, potom z druhé strany. Kamery jsou umístěny nehybně, pohybuje se deska se semenem. Sklo se po pozorování naklopí a semeno spadne do příslušné násypky (viz obr. 3.12).

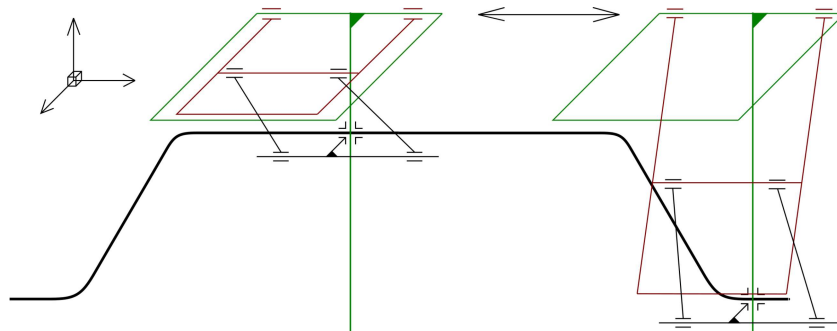
3.4.2 Vozík

Vozík sestává ze sklopného pozorovacího rámu, vodorovného rámu, hlavní desky nesené uložením a svislého kamene s kladkou sledující drážku v kulise.

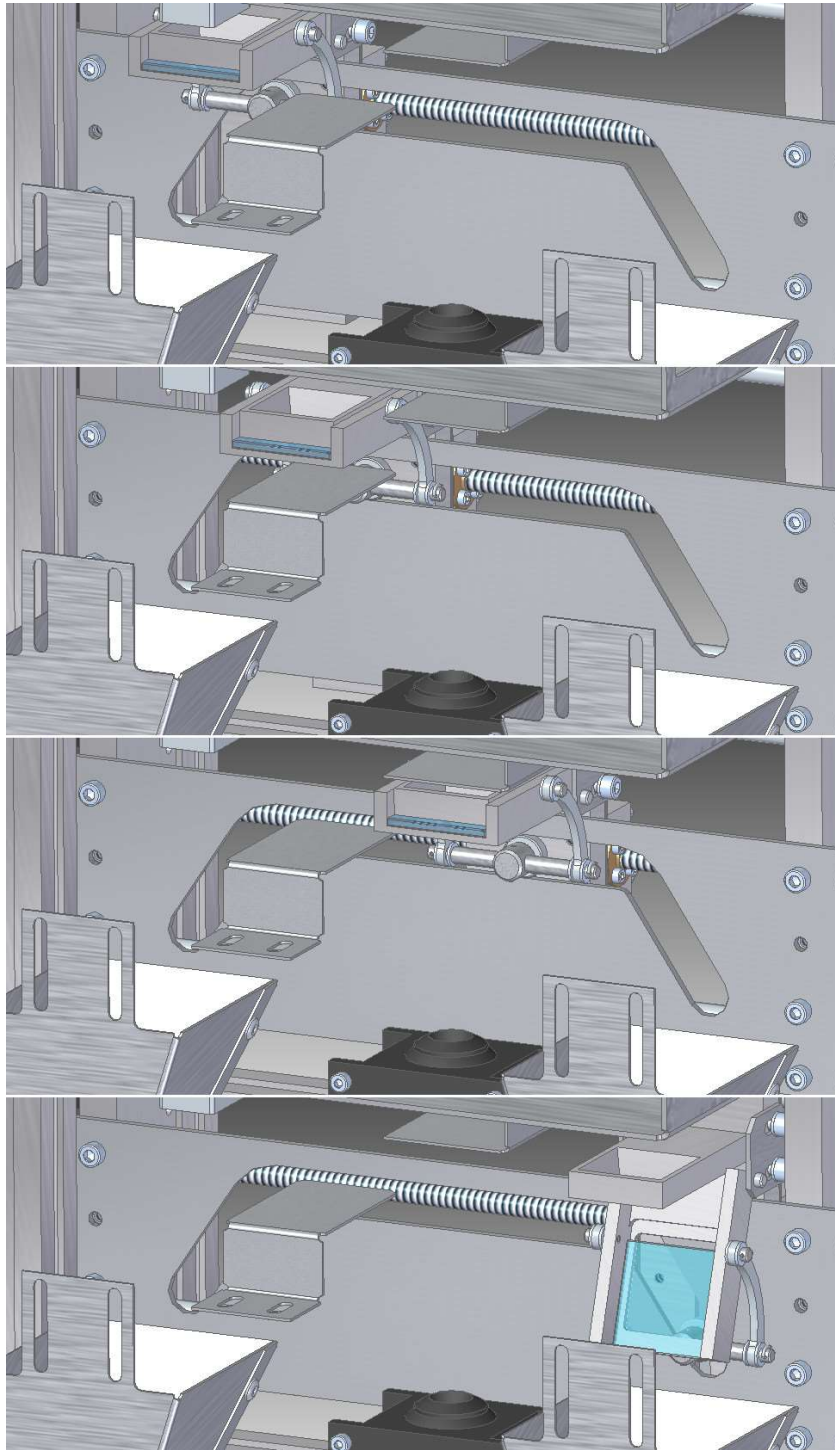


Obr. 3.10: Pohled na kulisu, podsestava podávacího ústrojí byla pro lepší viditelnost odebrána

Hlavní deska je nesena vodorovným posuvem vozíku. Ve spodní části desky je vyfrézována drážka, v níž se pohybuje kluzný kámen z hliníku ve tvaru kvádrů. Kámen nese osu s radiálním kuličkovým ložiskem které sleduje výšku dráhy v kulise a tím pohybuje svisle kamenem při vodorovném posuvu vozíku (viz obr. 3.11 a 3.12). Ložisko je zajištěno osazením na ose. Konec osy nese v díře kolmé na svoji osu příčnou hřídelku zajištěnou kolíkem. Hřídelka má na obou koncích obrobena sesazení s válcovými zakončeními. Ta slouží jako kyvné čepy pro zahnutá raménka nesoucí a zdvihající sklopný rám. Ten je jinak zavěšen po stranách hlavní desky vozíku pomocí plechových výpalků s oválnými drážkami umožňujícími jemné nastavení polohy vozíku a doladění nepřesností. Sklopný rám ve své horní poloze uzavírá sklem otvor ve vodorovném rámu. V dolní poloze po něm nesené semeno volně sklouzává ven do násypky. Vodorovný rám je pevně spojen s hlavní deskou vozíku.



Obr. 3.11: Prostorové kinematické schéma kulisového mechanismu (axonometrie), vozík s pozorovacím rámečkem zobrazen zeleně, sklopná deska se sklem zobrazena červeně



Obr. 3.12: Sekvence pohybu vodorovného posuvu, náhled z programu SolidEdge, některé části byly pro lepší viditelnost skryty

3.4.3 Vodorovný posuv vozíku

Vozík nesoucí pozorovací rámeček je nesen dvojicí vodicích tyčí na kuličkových lineárních ložiscích. Ty jsou axiálně zajištěna pojistnými kroužky. Vodicí tyče jsou uloženy v deskách na obou koncích posuvu. Pohon zajišťují krokový motor a pohybový šroub s mosaznou maticí pevně spojenou s vozíkem. Šroub je s krokovým motorem spojen pružnou spirálovou spojkou. Spojka vyrovnává nerovnosti v uložení a zachycuje silové rázy z pohonu. Šroub má čtyřchodý trapézový závit Tr8x8(P2). Na volném konci je uložen v kluzném plastovém pouzdře. S deskami nesoucími vodicí tyče a motor je pevně spojena kulisa s drážkou. Kulisa je nesena rámem.



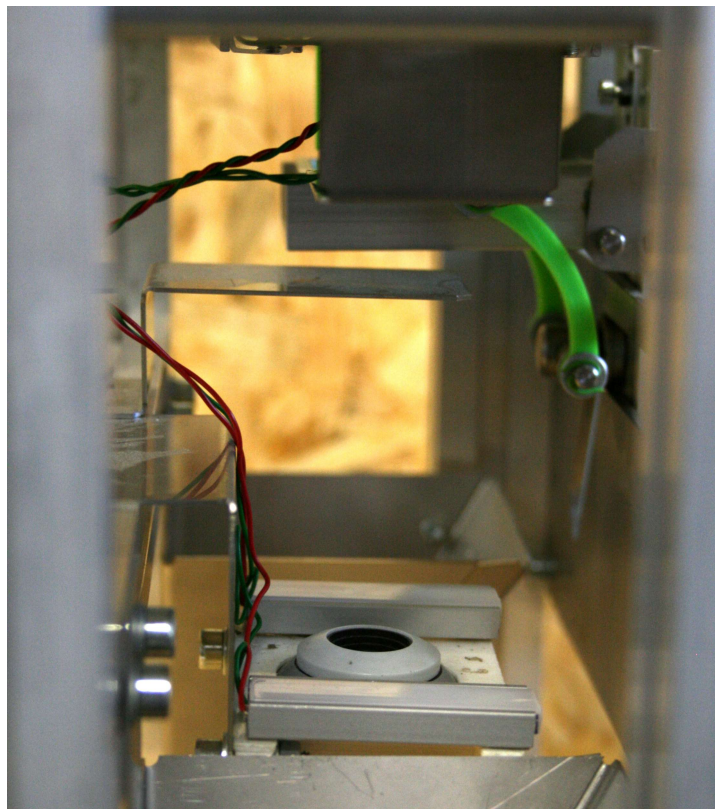
Obr. 3.13: Pohled na vodorovný posuv vozíku, lze vidět pozici krokového motoru, vodicí tyče a lineární kuličková ložiska, také trapézovou závitovou tyč a matici

3.4.4 Pracovní cyklus pozorovacího ústrojí

Pracovní cyklus je shrnut v diagramu na obr. 3.2. Vozík začíná v poloze pod vstupní šachtíčkou. Zde zachytí do pozorovacího prostoru, tvořeného okrajem otvoru ve vodorovném rámu a sklem sklopného rámu, semeno. Vozík je posunut do polohy pod horní kamerou, semeno je nasvíceno a snímáno z horní strany. Poté je vozík posunut do polohy nad spodní kamerou, semeno je nasvíceno a snímáno kamerou zespodu skrz sklo. Po vyhodnocení obrazu z kamer je podle rozhodnutí vozík posunut do jedné z krajních pozic, kde drážka v kulise klesá, tím pádem dojde ke sklopení rámu a semeno volně sklouzává a padá do příslušné násypky, kde je zachyceno nádobou nebo dalším dopravníkem podle sestavení nadřazeného zařízení.

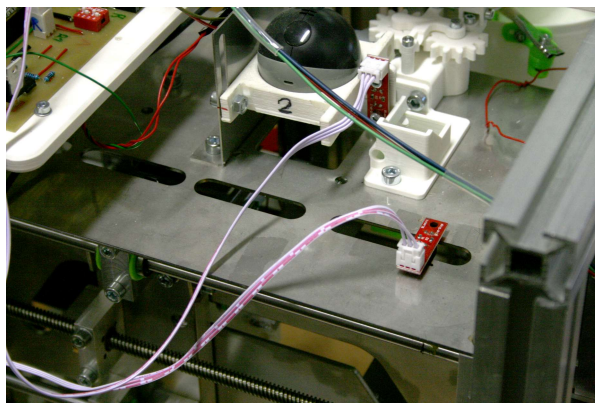
3.5 Rám

Nosný rám stroje, viditelný na obr. 3.1, je sestaven z hliníkových extrudovaných kombi profilů stejné délky. Kombi profil má na každé straně drážku ve tvaru T, do které lze buď upnout konec profilu pomocí přitažných montážních přípravků, nebo zasunout tvarovanou matici pro uchycení dalších součástí. Tato přestavitelnost výrazně usnadnila vývoj konstrukce.



Obr. 3.14: Pohled na spodní kameru s jejím osvětlením (dole), lze také vidět zelené zahnuté nosníky umožňující vozíku vyhnout se plechům tvořícím pozadí pro kamery

Horní webkamera, podsestava otočného ramene s lopatkou a koncový snímač vodorovného posuvu vozíku jsou umístěny na nerezové desce (viz obr. 3.15) tvořící patro nad prostorem pohybu vozíku. Řídicí deska je nesena na samostatném plastovém nosiči pevně spojeném s rámem stroje. Spodní webkamera je uchycena na příčnicku proti kulise (viz obr. 3.14). Obě kamery jsou připevněny šrouby v oválných drážkách, tedy je možné je posouvat ve směru osy jejich pohledu, a tím zajistit správné přiblížení jejich záběru. Proti kamerám jsou umístěny plechy působící jako pozadí pro kamery.



Obr. 3.15: Pohled na nerezovou desku, vpravo je vidět pozice koncového spínače pro vodorovný posuv vozíku

3.6 Pohony a jejich řízení

Stroj má množství pohyblivých částí a podsestav, jež je třeba pohánět a řídit. K převodu pohybů z motorů používá různé převody.

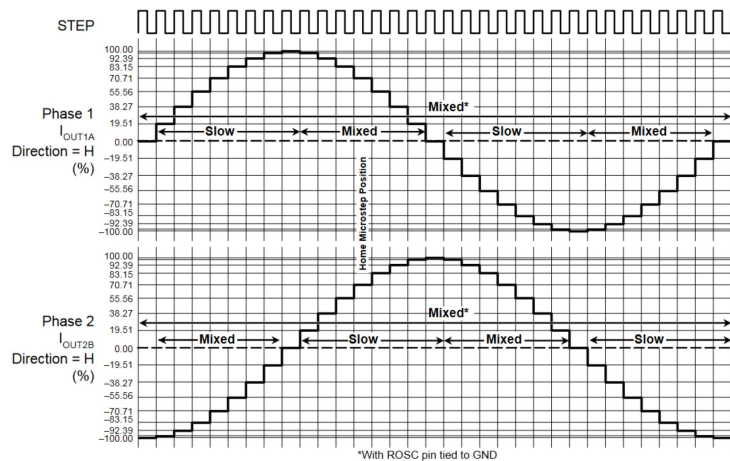
3.6.1 Krokové motory

Snadno dostupné servomotory, obsahující jak elektromotor, tak ústrojí a sensoriku k určení přesné polohy pohonu, postrádají potřebné výkony a rozsah pohybu, který je potřeba pro pohon v tomto stroji. Průmyslové jednotky jsou příliš nákladné a kladou vyšší nároky na řízení, takže navzdory jasným výhodám uzavřené regulace, jež serva mohou nabízet, nejsou pro tento účel vhodné. Krokové motory oproti tomu mají jednoduchou konstrukci, tedy i nízkou cenu a lze je řídit levnými moduly. Pokud je dodržen nárok na chlazení a motor není přetížen, lze se do určité míry spolehnout i na přesnost polohování. Použití krokových motorů ale přináší problém v podobě chybějící zpětné vazby.

Řízení krokového motoru

Bipolární krokový motor se řídí přiváděním střídavého napětí na cívky statoru, přičemž vlny jsou fázově posunuty o čtvrt periody. S jednou periodou vlny souhlasí natočení osy rotoru o jeden krok. Počet zubů na statoru určuje počet kroků na otáčku. Základním způsobem je možné krokový motor budít obdélníkovou vlnou, kterou lze triviálně vytvořit mikropočítačem přímo. Takto buzený motor je ale náchylný k přeskokování kroků. Blíž k ideální sinusoidě má řízení používající mikrokroky. V takovém případě se sinusoida aproximuje na konečný počet úseků s částečným proudem [19].

Motor lze budít buď z mikropočítače přes výkonové tranzistory přímo, nebo pomocí budiče. Ten přijímá příkazy od mikropočítače ve formě 2 bity širokého signálu, STEP a DIR, respektive krok a směr. Mikropočítač tedy pouze udává počet kroků, potažmo



Obr. 3.16: Diagram fází bipolárního motoru řízeného budičem A4988, převzato z [20]

mikrokroků a směr, ve kterém se má motor natočit, a budič obstará správné nastavení napětí na cívkách motoru. Další výhodou použití budiče spočívá v tom, že budič krokových motorků je zpravidla vybaven nastavitelným omezovačem proudu tekoucího motorem. To je výhodné především, když není motor v pohybu a vinutí cívky má pouze nízkou ohmickou rezistivitu.

Zpětná vazba

Krokový motor není schopen vracet informaci o aktuální poloze svého rotoru, prakticky je tedy nutné se spolehnout na to, že zadané kroky byly úspěšně provedeny, a odpočítávat je od známé polohy. Tu lze zjistit například pomocí koncového spínače.

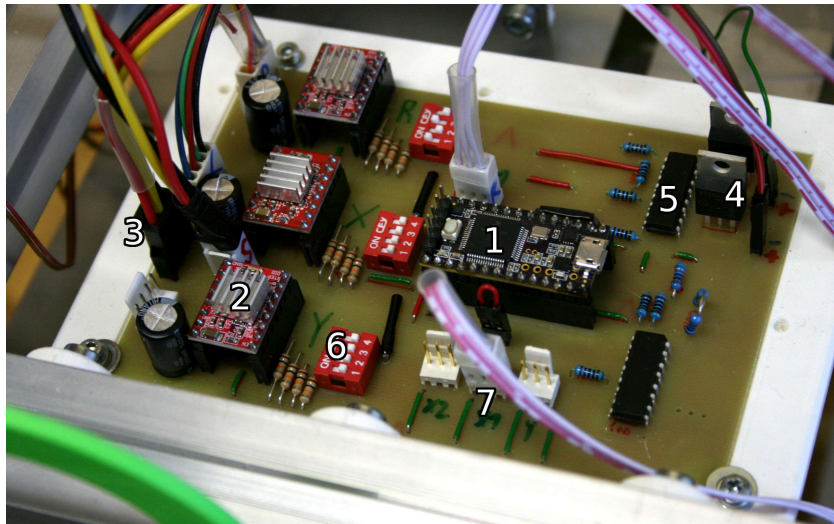
Provedení

Pro řízení byla z důvodu snadné implementace a nízkých nákladů vybrána platforma mikropočítače Arduino. Kvůli zvýšeným nárokům na taktovou frekvenci mikropočítače, vyvolaným potřebou řídit současně více než jeden krokový motor, byla vybrána deska Teensy 3.2. Jakožto budičí obvody pro krokové motory byly vybrány široce dostupné A4988 ve formě samostatných připravených modulů, což značně zjednodušilo realizaci řídicí desky a do budoucna umožňuje snadnou výměnu v případě selhání těchto komponent.

Řídicí deska Hlavní řídicí deska byla navržena pomocí programu KiCAD. Sjednocuje komponenty pro řízení stroje (viz obr. 3.17). Těmito jsou:

- deska Teensy 3.2 (1),
- moduly budičích obvodů A4988 (2),
- přívod hlavního napájení (3),

- unipolární tranzistory ovládající osvětlení (4),
- optočleny konvertující 3,3V signál na 10V signál (5),
- manuální nastavení mikrokroku (6),
- konektory pro koncové spínače/optické závory (7).

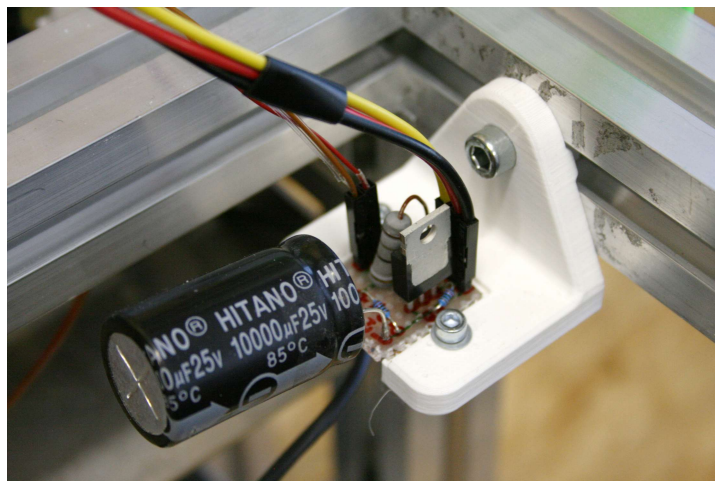


Obr. 3.17: Řídicí deska

Moduly A4988 jsou schopny až 16 mikrokroků na krok, nastavení se provádí přivedením buď vysoké, nebo nízké logické úrovně napětí, resp. 1 nebo 0 na vývody MS1 až MS3 podle tabulky v dokumentaci. Na vyhotovené desce to vždy zajišťuje rezistor zapojený na logickou 1 a přepínač zapojený na logickou 0 (svod na zem). Protože není třeba během provozu mikrokrok přestavovat, uvolní se tím vývody na desce mikropočítače.

Koncová poloha pojezdů se zjišťuje koncovými snímači v podobě optických závor, při jejichž přerušení změní napětí, které je snímáno na vstupním vývodu mikropočítače. Vybrány byly moduly s již vyhotoveným zapojením a konektorem.

Budicí deska solenoidu Solenoid je schopen odebrat větší proud než použité krokové motory, je nutné jej kontrolovaně budit. Sestavený budicí obvod ovládá přívod napětí 24 V na cívku solenoidu pomocí unipolárního tranzistoru. Ten je ovládán 10V signálem z hlavní desky. Nabíjení vyrovnávacího kondenzátoru je omezeno předřazeným rezistorem na maximální proud 1 A. Tento odpor také pomáhá zamezit dlouhodobému proudění vysokých proudů solenoidem, pokud zůstane tranzistor z libovolného důvodu otevřen. Kondenzátor je vybaven vybíjecím rezistorem, ten zajistí, že v poměrně velkém kondenzátoru nezůstane po odpojení hlavního napájení náboj, jenž by se mohl nechtěně vybit při údržbě stroje. Na bráně tranzistoru je zapojen další rezistor, ten při odpojení signálu budicího obvodu stáhne bránu tranzistoru na úroveň 0V, čímž tranzistor uzavře.



Obr. 3.18: Budicí deska solenoidu

3.6.2 Řídicí program

Řídicí program je napsán v jazyce pro Arduino, který používá syntax jazyka C++. Velká výhoda tohoto jazyka spočívá v tom, že stejný program lze z jednoho zdrojového kódu zkompilovat na jakoukoli Arduino kompatibilní desku [21]. Pro řízení krokových motorků je použita knihovna `TeensyStep` [22], jež zajišťuje hlídání polohy motorů odpočítáváním kroků, jejich pozvolné zrychlování a zpomalování. Funkce knihovny lze volat se zadáním požadované polohy konkrétního motoru. Knihovna obsahuje funkce pro synchronní pohyb motorů, ale tato funkce zde není využita. Ručně byla implementována metoda vynulování poloh pojezdů tak, aby během nulování nedošlo k nežádoucí kolizi pojezdu. Program také obstarává sériovou komunikaci prostřednictvím rozhraní USB vestavěného na desce mikro počítače. Přes toto rozhraní je také linka řízena z počítače, který provádí samotné rozpoznání obrazu.

Na začátku programu jsou nastaveny konstantní parametry pro řízení pohonů, tedy počet impulzů na jednotku délky posuvu, maximální rychlost v impulzech za sekundu a maximální zrychlení. V hlavní smyčce programu je nejprve zpracován případný příchozí příkaz ze sériové linky, poté jsou nastaveny pohony na požadované cílové polohy podle příkazu.

Příkaz je obecně ve formátu `A123`, kde `A` je byte odpovídající písmenu latinky v ASCII tabulce označující příkaz a kde `123` je jeden nebo více bytů značící(ch) parametr příkazu. Implementované příkazy jsou:

H vypíše do sériové linky krátkou nápovědu pro ruční řízení.

X123, Y123, W123 posune pohon `X` (horizontální posun vozíku), `Y` (vertikální posun podávací desky), nebo `W` (natočení ramene s lopatkou) do požadované polohy. V programu jsou zapsány konstanty limitních poloh stroje a při jejich překročení v příkazu program použije bližší krajní polohu. Vypíše do sériové linky označení pohonu a cílovou polohu jako potvrzení přijetí příkazu.

ZX,ZY,ZW provede nulovací metodu pro příslušný pohon a vypíše do sériové linky zprávu o provedení nulování. Během něj mikropočítač neprovádí žádnou další činnost a tedy ani nepřijímá další příkazy.

L1,L2 přepíná osvětlení 1 a 2. Vypíše příkaz do sériové linky jako potvrzení.

S aktivuje na zlomek sekundy solenoid ovládající dno lopatky. Vypíše příkaz do sériové linky jako potvrzení.

D přepne stroj do demo režimu kde stroj provádí pracovní cykly naslepo bez instrukcí, slouží k ověření funkce mechanismu.

4 Kontrolní výpočty vybraných konstrukčních uzlů

Vzhledem k funkci stroje a očekávanému provoznímu zatížení lze považovat celou konstrukci za bezpečně předimenzovanou. Kontrolní výpočty zde provedené jsou uvedeny pro úplnost práce.

4.1 Závitová dvojice hlavního posuvu

Měření pohonu

Digitálním multimetrem bylo změřeno napětí stejnosměrného zdroje napájejícího pohony. Proud odebíraný motorem byl změřen zapojením digitálního multimetru do série s celou deskou, byl odečten proud odebíraný zbytkem desky při klidu motorů. Během klidu nejsou motory napájeny. Otáčky pohybového šroubu byly změřeny optickým tachometrem a odpovídají nastaveným otáčkám v programu.

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty

I_m	U_m	n_m
0,22 A	24 V	600 min ⁻¹

Kroutivý moment a osová síla

$$M_k = \frac{P_m}{\omega} = \frac{I_m \cdot U_m}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60}} = \frac{0,22 \cdot 24}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 600}{60}} = 84,034 \text{ Nmm} \quad (4.1)$$

Závitová tyč má čtyřchodý lichoběžníkový rovnoramenný závit Tr8x8(P2). Maximální dosažitelná osová síla v závitu je tedy

$$Q = \frac{M_k \cdot 2 \cdot \pi}{p} = \frac{84,034 \cdot 2 \cdot \pi}{8} \doteq 66 \text{ N} \quad (4.2)$$

Úhly šroubovice, třecí úhel

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{i \cdot p_H}{\pi \cdot d_2} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{4 \cdot 2}{\pi \cdot 7} \right) = 19,991^\circ \quad (4.3)$$

$$\beta = 15^\circ \quad (4.4)$$

$$\beta_n = \operatorname{arctg} (tg\beta \cdot \cos\gamma) = \operatorname{arctg} (tg15^\circ \cdot \cos19,991^\circ) = 14,134^\circ \quad (4.5)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \left(\frac{f}{\cos\beta_n} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,1}{\cos14,134^\circ} \right) \quad (4.6)$$

Součinitel tření ocel-bronz odhaduji na základě [24] $f = 0,1$.

Otlačení závitů

Matice má bez zkosení délku 12 mm, počet činných závitů je tedy

$$z = \frac{H}{p} = \frac{12}{8} = 1,5 \quad (4.7)$$

Otlak ploch závitů je

$$\sigma_{ot} = \frac{Q}{z \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot i} = \frac{66}{1,5 \cdot \pi \cdot 7 \cdot 1 \cdot 4} = 500,2 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Podle [25] odhaduji dovolené napětí v tlaku v ploše závitu na $\sigma_{otd} = 8 \text{ MPa}$, tím pádem vychází bezpečnost $k \doteq 16$, což znamená, že v závitové dvojici nehrozí poškození otlačení.

Tah/tlak v dřívku závitu

$$\sigma_t = \frac{Q}{S_3} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{66 \cdot 4}{\pi \cdot 5,5^2} = 2,778 \text{ N/mm}^2 \quad (4.9)$$

Krut v dřívku závitu

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} = \frac{\pi \cdot 5,5^3}{16} = 32,668 \text{ mm}^3 \quad (4.10)$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{84,034}{32,668} = 2,572 \text{ N/mm}^2 \quad (4.11)$$

Redukované napětí a bezpečnost

Podle metody HMM

$$\alpha = \sqrt{3} \quad (4.12)$$

$$\sigma_{redHMM} = \sqrt{\sigma_t^2 + \alpha^2 \cdot \tau^2} = \sqrt{2,778^2 + 3 \cdot 2,572^2} = 5,251 \text{ N/mm}^2 \quad (4.13)$$

Podle metody τ_{max}

$$\alpha = 2 \quad (4.14)$$

$$\sigma_{red\tau_{max}} = \sqrt{\sigma_t^2 + \alpha^2 \cdot \tau^2} = \sqrt{2,778^2 + 4 \cdot 2,572^2} = 5,847 \text{ N/mm}^2 \quad (4.15)$$

Na základě [24] odhaduji dovolené napětí pro ocel C15 (ekvivalent ČSN 12 020), ze kterých se závitové tyče vyrábí [26], na $\sigma_D = 75 \text{ N/mm}^2$ tedy vychází bezpečnosti

$$k_{HMM} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{redHMM}} = \frac{75}{5,251} = 14,28 \quad (4.16)$$

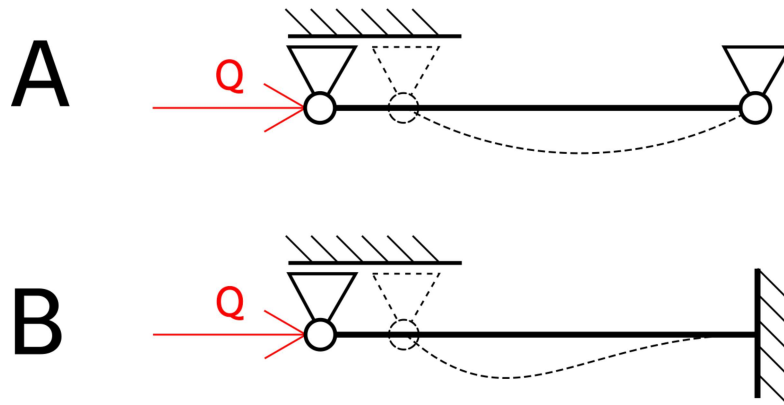
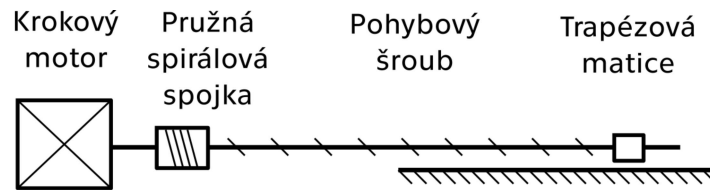
$$k_{\tau_{max}} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red\tau_{max}}} = \frac{75}{5,847} = 11,117 \quad (4.17)$$

$$k = 12,83 \quad (4.18)$$

Přetržení dřívku tedy nehrozí.

Vzpěr

Vůle v matici není přesně známa, počítám tedy s variantou, kde ji modeluji jako kloub (A), a s variantou, kde představuje vetknutý konec (B). Druhý konec šroubu je uložen v pružné spojce, jež natočení umožňuje, tedy počítám s ní jako s kloubovým uložením. Délka prutu je odvozena z nejdelší nepodepřené délky v krajní poloze mechanismu, tedy 240 mm. Redukovaná délka prutu je potom $l_A = \frac{l_0}{\sqrt{2}} = \frac{240}{\sqrt{2}} = 169,71 \text{ mm}$ a $l_B = l_0 = 240$ respektive [24].



Obr. 4.1: Schéma pro výpočet vzpěru

Pro nelegované oceli, jako je 12 020, lze počítat s mezním štíhlostním poměrem $\lambda_m = 100$ [24].

Je třeba určit štíhlostní poměr λ .

$$A_{min} = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5,5^2}{4} \doteq 23,76 \text{ mm}^2 \quad (4.19)$$

$$J_{min} = \frac{\pi \cdot d_3^4}{64} = \frac{\pi \cdot 5,5^4}{64} \doteq 44,92 \text{ mm}^4 \quad (4.20)$$

$$i_x = \sqrt{\frac{J_{min}}{A_{min}}} = \sqrt{\frac{44,92}{23,76}} = 1,375 \text{ mm} \quad (4.21)$$

$$\lambda_A = \frac{l_A}{i_x} = \frac{169,71}{1,375} \doteq 123 \quad (4.22)$$

$$\lambda_A > \lambda_m \quad (4.23)$$

$$\lambda_B = \frac{l_B}{i_x} = \frac{240}{1,375} \doteq 175 \quad (4.24)$$

$$\lambda_B > \lambda_m \quad (4.25)$$

Tedy je nutné zkontrolovat vzpěr. Kritická síla podle Eulera je

$$F_{krA} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l_B^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 44,92}{169,71^2} \doteq 3232,6 \text{ N} \quad (4.26)$$

$$F_{krB} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l_B^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 44,92}{240^2} \doteq 1616,3 \text{ N} \quad (4.27)$$

Bezpečnost ve vzpěru stanovím jako poměr dovolené a zatěžující síly, dovolená síla je kritická síla snížená bezpečností pro kalené oceli $k_{ko} = 3$ [24].

$$F_{DA} = \frac{F_{krB}}{k_{ko}} = \frac{3232,6}{3} \doteq 1077,5 \text{ N} \quad (4.28)$$

$$F_{DB} = \frac{F_{krB}}{k_{ko}} = \frac{1616,3}{3} \doteq 538,76 \text{ N} \quad (4.29)$$

$$k_{vzperA} = \frac{F_{DA}}{Q} = \frac{1077,5}{66} \doteq 16 > 1 \quad (4.30)$$

$$k_{vzperB} = \frac{F_{DB}}{Q} = \frac{538,76}{66} \doteq 8 > 1 \quad (4.31)$$

Kontrola na vzpěr je tedy splněna pro variantu A i pro méně výhodnou variantu B.

Závitová dvojice splňuje všechny provedené pevnostní kontroly se značnou mírou bezpečnosti.

5 Koncepce rozpoznání obrazu

Obraz zachycený kamerami je nejprve třeba vyfiltrovat kvůli eliminaci odlesků na skle. Poté budou následovat konverze do prostoru CIE $L^*a^*b^*$ a vyprahování podle jednotlivých kanálů. Přesné hodnoty prahování je nutné nejprve ručně stanovit.

5.1 Filtrace odlesků

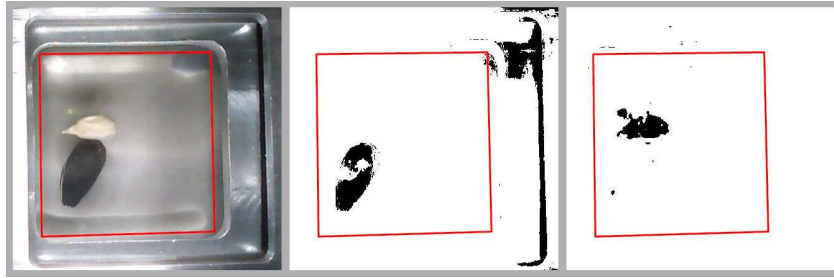
Linka je vybavena dvěma sadami samostatně ovladatelných LED světel. Ta jsou dostatečně silná na překonání vnějších rušivých zdrojů světla, tudíž celkové zakrytí pozorovacího prostoru není nezbytné. Odlesky od zabudovaných světel jsou nevyhnutelné, lze je ale eliminovat pořízením dvou obrazů ve stejné poloze rámečku, vždy s jedním LED světlem rozsvíceným. Ty jsou následně porovnány bod po bodu, resp. pixel po pixelu a je vybrána vždy nižší hodnota, tedy tmavší pixel. Příklad na ukázkou proveden v grafickém editoru GIMP na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Ukázka filtru odlesku, zleva nasvícení jedním světlem, druhým světlem, nakonec kombinace obou obrázků výběrem nejtmašších bodů. Přítomnost více semen v pozorovacím rámečku je pouze pro ilustraci.

5.2 Prahování

Vybrání semen z obrazu lze provést vyprahováním hodnot jednotlivých kanálů. Tmavé slupky lze definovat jako shluk pixelů, které mají nižší hodnotu kanálu L^* než prahová hodnota, v tomto příkladu 30. Obdobně lze definovat vyloupenuté semeno jako shluk pixelů s hodnotou kanálu b^* vyšších než v tomto příkladu 9. Lze pozorovat na obr. 5.2. Konkrétní prahové hodnoty závisí na nastavení expozice kamer, uvedené hodnoty jsou pro ilustraci. Prahování bylo provedeno v programu GNU Octave.



Obr. 5.2: Příklad vyprahování, červený rámeček označuje relevantní oblast, vlevo vstupní obraz, uprostřed černě pixely pod prahem 30 na kanálu L^* a vpravo černě pixely nad prahem 9 na kanále b^*

5.3 Vyhodnocení

Nakonec je třeba spočítat počty pixelů v obou takto získaných shlucích a na základě těchto dvou hodnot z obou kamer vyhodnotit jednu z následujících možností a adekvátně vyslat příkaz lince:

- semeno je vyloupnuté →přemístit na výstup 1 a opakovat cyklus,
- semeno je nevylopnuté nebo jen částečně vyloupnuté →přemístit na výstup 2 a opakovat cyklus,
- pozorovací rámeček je prázdný →opakovat cyklus, pokud se stane opakovaně nahlásit prázdnou vstupní násypku.

6 Závěr

Podle zadání byla navržena a sestavena optická třídící linka pro třídění semen olejnin. Byla provedena rešerše průmyslových řešení a technik zpracování obrazu pro účely optického třídění. Následně byla navržena koncepce metody zpracování obrazu pro třídění na navržené lince.

Byl navržen a zpracován koncept konstrukce nové linky. Byl proveden rozbor možných návrhů mechanismu, výsledkem byl použitý kulisový mechanismus. Byl sestaven pracovní počítačový model sestavy v programu SIEMENS SolidEdge. Byla vytvořena výrobní dokumentace pro výrobu obráběných součástí. Některé díly byly vyrobeny bez výrobní výkresové dokumentace přímo z počítačových 3D modelů součástí aditivní technologií 3d tisku. Byla odzkoušena navržená metoda jednotlivého výběru semen z násypky pomocí vakuové přísavky, a postupnou iterací návrhů byla navržena geometrie podávacího ústrojí.

Na základě vypracovaného návrhu byly vyrobeny a nakoupeny potřebné součásti a linka byla dle dokumentace sestavena. Po prvním sestavení byly prováděny zlepšující úpravy, drobné změny konstrukce a geometrie některých 3d tisknutých dílů, například vstupní násypky.

Byla sestavena elektronika pro ovládání použitých pohonů, během návrhu elektroniky byly sestaveny dočasné prototypy, aby bylo možné ověřit funkci jednotlivých částí použitých řídicích obvodů během vývoje. Návrh a dokumentace sestavené elektroniky byly provedeny v programech KiCAD.

Byl napsán program řídicí pohyby pohonů. Program přijímá příkazy po sériové lince, tedy zařízení lze ovládat z připojeného PC, jež bude zajišťovat zpracování obrazu.

Byla zpracována a na příkladu demonstrována koncepce zpracování obrazu pro třídění olejnatých semen na základě prahování kanálů L^* a b^* v prostoru CIE $L^*a^*b^*$. Tato koncepce může sloužit jako vhodný začátek návrhu budoucího programu pro zpracování obrazu z této linky.

Oproti předchozí optické třídícíce má nová třídícíka spolehlivější dávkování za cenu nižší propustnosti. Stará třídícíka používala jako pozadí dopravníkový pás. Nová třídícíka umožňuje relativně snadnou změnu barvy pozadí, neboť jde o samostatné díly nezávislé na zbytku fungování stroje. Tím rozšiřuje možnosti použití stroje i pro jiná semena. Nová třídícíka je osazena silnějším osvětlením. Rám nové třídícíky lze snadněji přestavovat a upravovat pro budoucí vylepšení a úpravy stroje.

Na navržené a vyrobené třídícíce je možné vypracovat další vylepšení. Řídicí elektronika se spoléhá na přepětovou ochranu napájecího zdroje, nabízí se integrace pojistky přímo do řídicí desky, aby bylo zabráněno poškození elektroniky. Nosiče kamer byly převzaty z předešlé linky, nabízí se podsestavy předělat způsobem, který umožní nastavení polohy kamer bez nářadí nebo jen na jeden šroub.

Pro úplnost práce byla provedena pevnostní kontrola závitové dvojice jako nejvíce namáhané části stroje, Kontrola byla splněna s vysokou mírou bezpečnosti.

Bibliografie

1. MAUGHAN, William Storey. Automatic Optical Sorting Machines. In: MUNDY, J.C. (ed.). *Electro-optical Equipment in Mechanical Handling and Sorting*. 1974. ISBN 0 85298 307 7.
2. KRČMAŘÍK, David. Zařízení pro třídění skleněných střepů podle barvy = Equipment for sorting cullet by colour. *Sklář a keramik*. 2016, s. 153–156. ISSN 0037-637X.
3. NEDBÁLEK, Tomáš. *Optická třídička semen*. 2017. DP. Ústav konstruování a částí strojů.
4. GUNAWARDENA, Charith. *Optical Sorting Technology*. 2021-10-06. Dostupné také z: <https://opticalsorting.org/technology>.
5. MOESLUND, Thomas B. *Introduction to Video and Image Processing: Building Real Systems and Applications [online]: Undergraduate Topics in Computer Science*. London: Springer London, 2012. ISBN 9781447125037.
6. TILLEY, R.J.D. *Colour and the optical properties of materials: an exploration of the relationship between light, the optical properties of materials and colour*. 2nd ed. Chichester: Willey, 2011. ISBN 978-0-470-74696-7.
7. HOFFMAN, Gernot. *CIE Color Space* [online]. 2015 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <http://docs-hoffmann.de/ciexyz29082000.pdf>.
8. SHIFFMAN, Daniel. *Color / Tutorials* [online]. 2008 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://py.processing.org/tutorials/color/>.
9. CONTRIBUTORS, Wikipedia. *CIELAB color space* [online]. 2021-10-21. Ver. 1051090283 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=CIELAB_color_space&oldid=1051090283.
10. HOFFMAN, Gernot. *CIE Lab Color Space* [online]. 2019 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <http://docs-hoffmann.de/cielab03022003.pdf>.
11. CIMBRIA.COM. *SEA CHROMEX brochure* [online]. 2017 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.cimbria.com/content/dam/public/grain-and-protein/cimbria/brochures/SEA_Chromex_GB.pdf.
12. NRT. *NRT ColorPlus* [online]. 2016 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.nrtsorters.com/equipment/colorplus/>.
13. NRT. *In-Flight Sorting* [online]. 2017 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.inflightssorting.com/>.

14. NRT. *NRT ColorPlus brochure* [online]. 2016 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.nrtsorters.com/wp/wp-content/uploads/2016/01/NRT-ColorPlus.pdf>.
15. PELLENC. *Optical Sorting – Vision 2* [online]. 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://pellencus.com/products/winery/sorting-berry-by-berry-selectiv-process-vision-2/>.
16. TOMRA. *TOMRA 5A brochure* [online]. 2020 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.tomra.com/-/media/documents/food-brochures/new-brochures-2020/sorting-equipment-brochures-en/tomra-food-tomra-5a-eu-hrnc.pdf>.
17. TECHNOLOGY, KEY. *Three-way Sorting on Manta* [online]. 2018 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.key.net/en/wp-content/uploads/2018/11/BR_Manta-3-way_US.pdf.
18. TECHNOLOGY, KEY. *Manta brochure* [online]. 2018 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: https://www.key.net/en/wp-content/uploads/2018/11/BR_Manta_US.pdf.
19. COLLINS, Danielle. *What is microstepping?* [Online]. 2017 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>.
20. MICROSYSTEMS, Allegro. *A4988 Datasheet* [online]. 2020 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/media/Files/Datasheets/A4988-Datasheet.ashx>.
21. COPEL, Flavio. *Introduction to the Arduino Programming Language* [online]. 2020 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://flaviocopes.com/arduino-programming-language/>.
22. NIGGL, Lutz. *TeensyStep* [online]. 2019 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://luni64.github.io/TeensyStep/index>.
23. HOIDEKR, Jan. *Inovace technologie loupání a metodika loupateľnosti semen olejnin*. 2021. DISERTAČNÍ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
24. LEINVEBER, Jan. *STROJNICKÉ TABULKY*. Ed. VÁVRA, Pavel. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
25. PETELE, Miroslav. *Pohybové šrouby* [online]. 2003 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://mitcalc.com/doc/powerscrew/help/cz/PowerScrew.htm>.
26. S.R.O., Valenta ZT. *Trapézové závitové tyče* [online]. 2020 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.valentazt.cz/trapezove-tyce.html#trapezove-tyce-ocel-c15>.

Seznam příloh

- 1) Výkresová dokumentace sestavy a částí pro výrobu, v elektronické podobě