



## **Středoškolská technika 2023**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

# **MANIPULÁTOR S PARALELNÍ KINEMATICKOU STRUKTUROU**

**Vojtěch Jiří Kutílek**

VOŠ SPŠ a JŠ s právem státní jazykové zkoušky  
Masarykova 197, 284 11  
Kutná Hora

## **Anotace**

Ve své práci SOČ jsem se zabýval vývojem vlastní paralelní kinematické struktury. Od obvyčejného nápadu jsem práci vypracoval do finální podoby. Základní nástřel na papíře a výpočty. Následovalo modelování a vymyšlení detailů. Následoval 3D tisk a samotná montáž, úpravy a vylepšení. Jde zde popsán vývoj vlastního softwaru a elektroniky.

## **Klíčová slova**

Paralelní kinematická struktura; delta; 3D tisk; návrh; Arduino; krokový motor; OnShape

## **Annotation**

In my science project, I focused on the development of my own parallel kinematic structure. Starting from a simple idea, I worked on the project until its final form. The initial sketches and calculations. This was followed by modeling and designing of details, as well as 3D printing, assembly, modifications, and improvements. The development of my own software and electronics is also described.

## **Keywords**

Parallel kinematic structure; delta; 3D printing; design; Arduino; stepper motor; OnShape

## Obsah

1. Úvod.....	- 1 -
2. Průzkum .....	- 2 -
3. 3D návrh.....	- 3 -
Struktura.....	- 4 -
Hlavní kříž.....	- 5 -
Hlavní rám.....	- 5 -
Páka.....	- 6 -
Táhlo.....	- 6 -
Kloubový mechanismus .....	- 6 -
Spodní kříž .....	- 7 -
Nosný rám .....	- 8 -
Profily.....	- 9 -
Rohová spojka 60°.....	- 9 -
Rohová spojka 90°.....	- 10 -
Pracovní plocha.....	- 11 -
4. 3D tisk .....	- 12 -
Nepovedený výtisk.....	- 13 -
5. Kompletace mechanismů .....	- 14 -
Kloubové mechanismy .....	- 15 -
Finální konstrukce.....	- 16 -
6. Elektronika .....	- 17 -
7. Ovladač.....	- 20 -
8. Software .....	- 21 -
Arduino ide.....	- 21 -
Display editor .....	- 23 -
Vlastní prog. Jazyk.....	- 24 -
9. Seznamy .....	- 25 -
Seznam přiložených souborů .....	- 25 -
Seznam elektronických součástek.....	- 25 -
Seznam mechanických dílů.....	- 26 -
10. Závěr.....	- 27 -
11. Citace.....	- 28 -

# 1. ÚVOD

Už od prvního ročníku jsem uvažoval, že bych se chtěl věnovat kinematice a robotickým systémům. Během výuky jsme se učili o typech kinematických struktur. Mě jedna uvízla v mysli a nemohl jsem ji z ní dostat. Byla to právě paralelní struktura. Už jsem kdysi podobné systémy zahlédl u 3D tisku, ale zde se jednalo o průmyslovou aplikaci. Zároveň jsem uvažoval, jak složité může být navrhnout si ji od píky. Po malém průzkumu a jednom úžasném videu od firmy ABB jsem se rozhodl, že chci mít maturitní práci právě na toto téma.

Na papíře vše vypadalo dost jednoduše, vytvořil jsem si základní „scketch“ a pomocí online kalkulačky odhadl, jaké rozměry vlastně požaduji. Jak to u podobných struktur bývá tak malá změna délky jedné části může vést k velkému zhoršení přesnosti a opačně. Odhadovaná přesnost v ideální struktuře byla 0.3 mm na jeden krok motoru. V průběhu vývoje jsem narazil na velké množství konstrukčních problémů. Tím myslím různé mechanické nedostatky, nebo špatné volby materiálu a technologií. Dále v dokumentu se o těchto chybách dočtete.

Práce byla už od začátku určena od studenta studentům. Smysl celé práce je přinést žákům odborných předmětů se zaměřením automatizace nový pohled na další strukturu. V hodinách se žáci normálně vzdělávají o této, a podobných strukturách, ale vše jen teoreticky, protože podobné struktury jsou velice drahé. Zde jsem viděl potenciál a rozhodl jsem se postavit levnou verzi. Tato skutečnost se později negativně projevila na vlastnostech.

Celá má práce je založena na třech krokových motorech, 3D tištěných dílech a pár ne až tak precizně vyrobených táhlech.

Veškeré modelování a náhledy práce jsem vytvářel v online softwaru OnShape.

Naštěstí jsem měl po ruce učitele a známý, kteří mi dosti poradili, a navrhly unikátní pohledy na problémy.

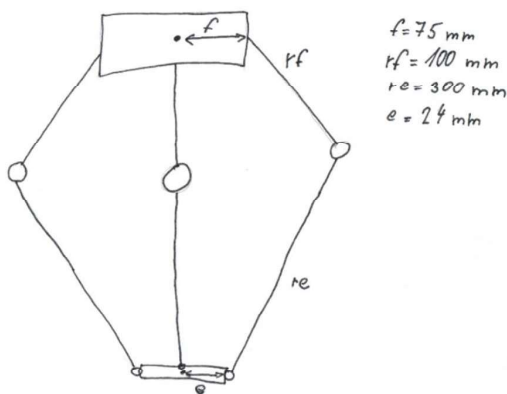
Veškeré soubory budou přiloženy společně s tímto dokumentem.

## 2. PRŮZKUM

Když jsem dostal tento nápad, okamžitě jsem se pustil do průzkumu na internetu, jak to vlastně funguje. Bohužel jsem byl zlákan krásnými demonstračními videi a úplně zapomenul na tu práci, kterou bude vývoj vlastní struktury obnášet. Říkal jsem si, že to jsou přece jen tři motory a pár táhel. Co na tom může být složité? Po pár hodinách přemýšlení a koukání se na opravdové průmyslové verze této struktury jsem si uvědomil, že za touto vizuálně jednoduchou konstrukcí musí být o to složitější výpočty. Našel jsem si krásnou online kalkulačku na tyto struktury a zkusil do ní jen tak nahodile zadat délky táhel. Výsledek se zdál celkem obstojný. Později jsem si však všiml, že je v té kalkulačce i okénko pro počet kroků motoru. V něm samozřejmě bylo ohromné číslo. A vzhledem k tomu že jsem plánoval použít obyčejné krokové motory bez dodatečných převodovek, které mají 3 200 kroků na 1 otočku při 1/16 kroku, tak jsem musel s délkami dosti experimentovat. Nakonec jsem se rozhodl, že nejlepší bude namalovat si to na papír.

Base radius (f)	<input type="text" value="75.0"/> mm	Distance from center of machine base to center of each motor shaft.
Bicep length (rf)	<input type="text" value="100.0"/> mm	Distance from motor shaft to elbow
Forearm length (re)	<input type="text" value="300.0"/> mm	Distance from elbow to the wrist
End Effector radius (e)	<input type="text" value="24.0"/> mm	Distance from wrists to tool
Base to floor distance (b)	<input type="text" value="400.0"/> mm	Distance from floor to base
Steps per turn	<input type="text" value="3200"/>	The motor precision. 1.8 deg steppers are 200 steps per turn. At 1/16th microstepping that's 3200 steps per turn.
Rectangular cuboid envelope	X=-78.231 to 78.231 mm Y=-78.231 to 78.231 mm Z=-377.824 to -221.362 mm	How big a box can the end effector reach? (end effector can actually move more than this)
motor angle limits	theta 1=-42.92 to 98.73 theta 2=-49.49 to 98.61 theta 3=-49.49 to 98.61	How must the motors turn to move throughout the rectangular cuboid?
Center	(0,0,-299.593)	Where is the middle of the envelope relative to the base (0,0,0)?
Home	(0,0,-277.198)	Where is the tool when the arms are parallel to the floor?
Resolution	+/-0.316mm	How precise can the movements be?

Obrázek 1 - Online kalkulačka délek táhel

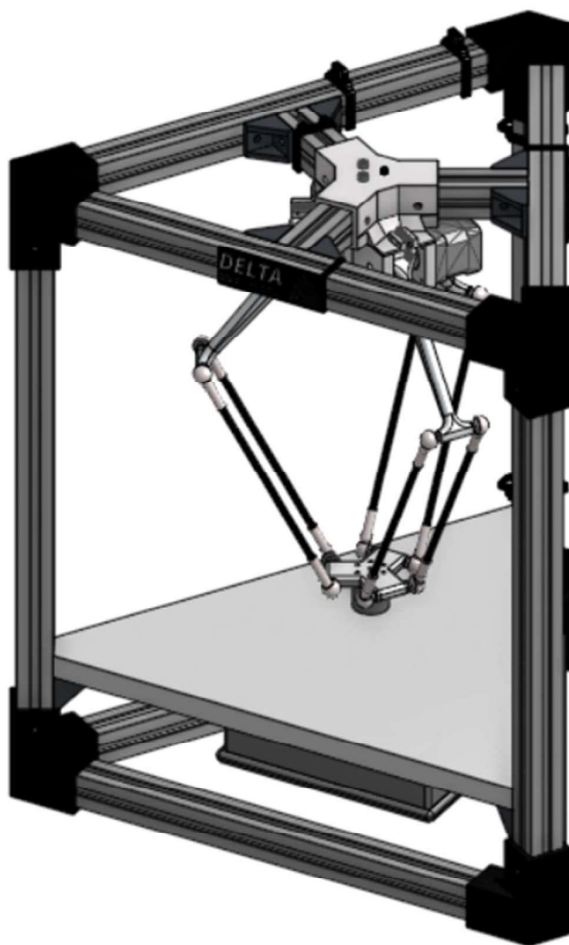


Obrázek 2 - Náčrtek struktury

### 3. 3D NÁVRH

Dalším krokem po náčrtku bylo přenést 2D obrazy třídimenzionálního modelu. Pro tuto činnost jsem využil online nástroj pro rýsování a modelování OnShape.

Všechny délky a ostatní rozměry v této části uvádět nebudu. Budou uvedeny v technických nákresech v příloze tohoto dokumentu.



*Obrázek 3 - Celá konstrukce a struktura*

## Struktura

Tímto mám na mysli samotnou konstrukci, nikoliv však nosný rám. Ten bude zmíněn později.

Skládá se z hlavního kříže, tří pák, šesti táhel, dvanácti kloubových mechanismů a spodního pohyblivého kříže.



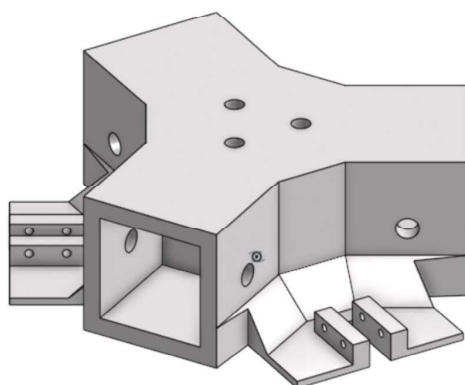
*Obrázek 4 - Složená struktura*

## Hlavní kříž

Tato část slouží k uchycení motorů a ložisek, která nesou společně s motory váhu táhel a případného nákladu.

Je tvořena šesti paprsky, které mají po dvojicích mezi sebou odklon o  $120^\circ$ .

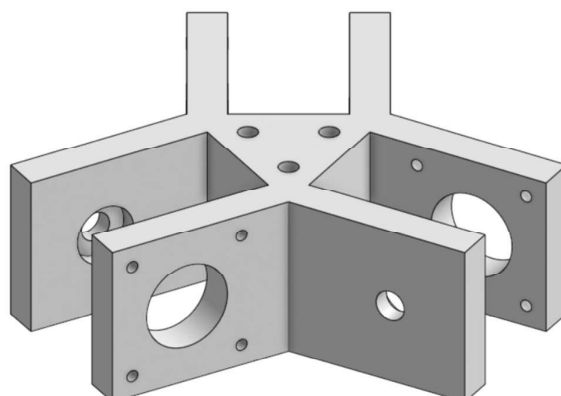
Skrze celý díl jsou tři díry sloužící k průchodu instalačních závitových tyčí.



Obrázek 5 - Hlavní kříž

## Hlavní rám

Díl držící motory a páky na svých specifických místech. Je připevněn k hlavnímu kříži pomocí závitových tyčí. Disponuje třemi výstupky o odklonu  $120^\circ$ , které mají v sobě díry pro průchod páky a hřídele motoru. Taky je v něm uložena ložisko, aby byl uvolněn axiální tlak působící vlivem páky na motor.

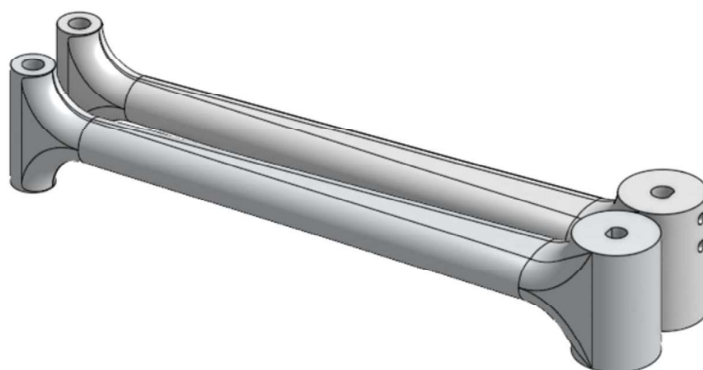


Obrázek 6 - Hlavní rám



## Páka

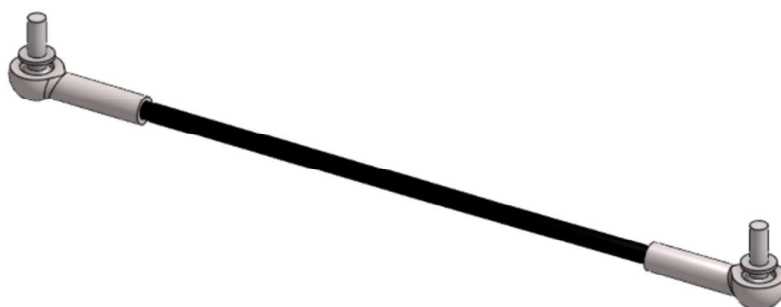
Slouží k pohybu s táhly. Má dvě díry. Jednu pro zasunutí kolíků od kloubových mechanismů dole a druhou ve tvaru D pro připevnění na hřídel motoru. Druhá díra je tohoto tvaru D jen do půlky součásti a poté se mění v normální kruhový otvor pro připevnění nosné hřídele. Celá součást má tvar I. Tuto část jsem později musel ještě upravit, a to o vylepšený tvar D díry a dodatečné dvě díry pro jisticí šrouby hřídele, protože u první generace táhel došlo k rychlému vymačkání D díry a páka tedy neseděla přesně na hřídeli motoru.



Obrázek 7 - Páka

## Táhlo

Táhlo spojuje dva kloubové mechanismy a přenáší tah na spodní kříž. Toto táhlo jsem si vymodeloval jen z důvodů vizualizace a testování celkové konstrukce. V konstrukci jsem poté použil karbonové trubičky.

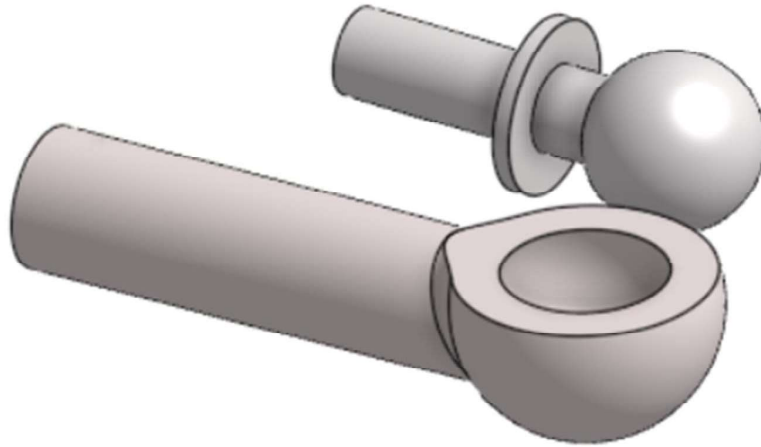


Obrázek 8 - Táhlo s kloubovými mechanismy

## Kloubový mechanismus

Vhledem k počtu kloubů, které by byly potřeba pořídit a finančním možnostem, jsem se rozhodl si tyto klouby vyrobit. Skládají se ze dvou částí, kuličky a mističky. Kulička má válcový výstupek a zarážku, který poté pasuje do děr ostatních komponentů. Mistička je vlastně dutá koule, které bylo kousek nad středem uříznuto dno. Takovéto provedení zaručuje,

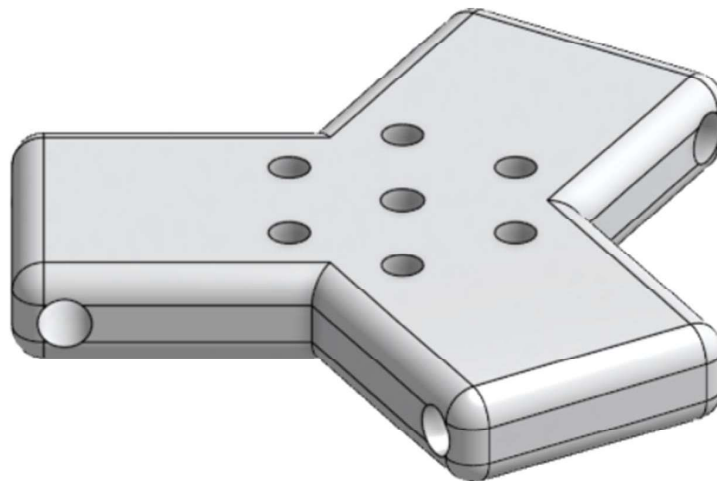
aby mystička nepadla z kuličky. Dále je mystička opatřena válcovým dutým výstupkem, který se napojuje na táhlo.



*Obrázek 9 - Mystička a kulička kloubového mechanismu*

## **Spodní kříž**

V této části se sčítají veškeré síly působící na ni skrze táhla. Je tvořena třemi výstupy, které mají odklon  $120^\circ$ . Výstupy se ve středu součásti sbíhají. Na kocích výstupů jsou díry pro kuličkové části kloubových mechanismů. Ve středu je 7 děr pro připevnění případného nástroje.

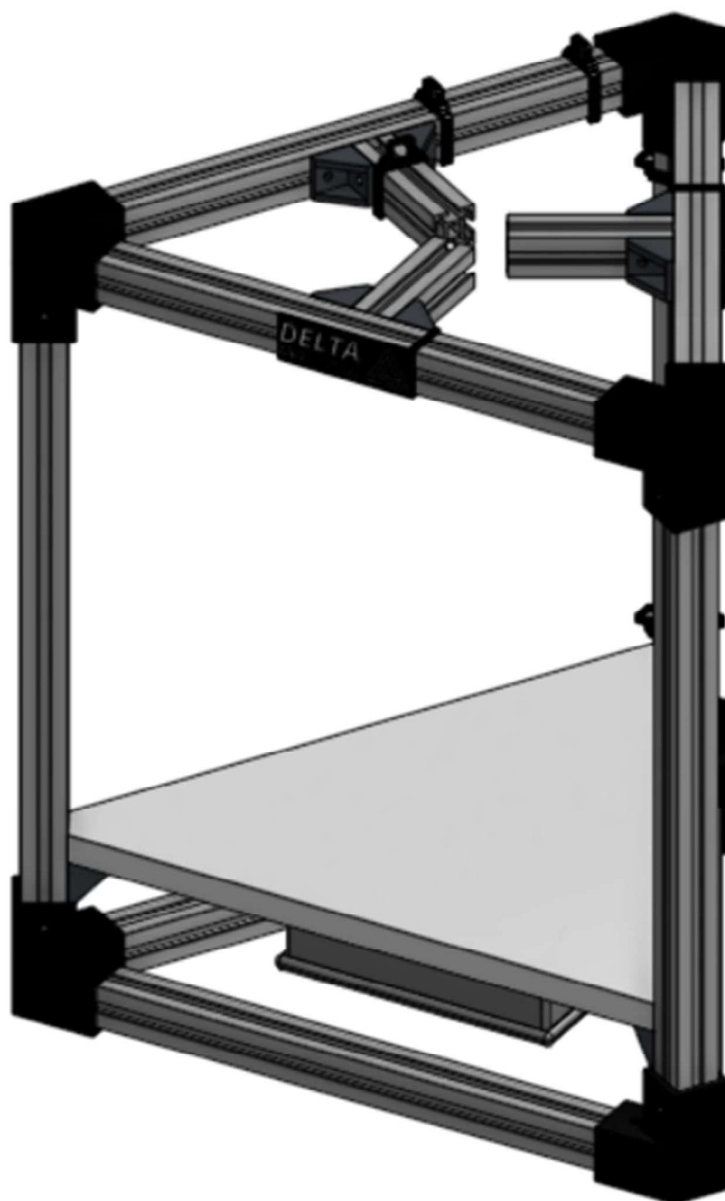


*Obrázek 10 - Spodní kříž*

## Nosný rám

Nosným rámem je myšlena konstrukce, která nese celou váhu robota a tvoří i „uzavřený“ prostor, ve kterém se může robot pohybovat.

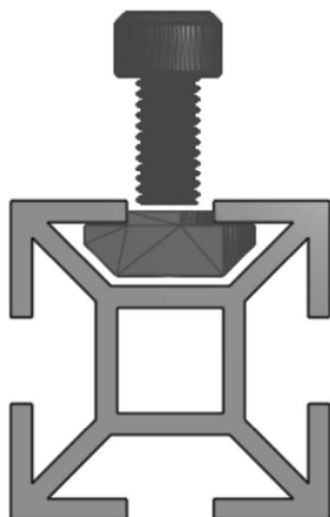
Je vytvořen z šesti rohových spojek 60°, devíti rohových spojek 90°, centrálním nosným dílem, pracovní plochou a dvanácti profily různých délek typu Kombi 30x30.



Obrázek 11 - Celá konstrukce rámu

## Profily

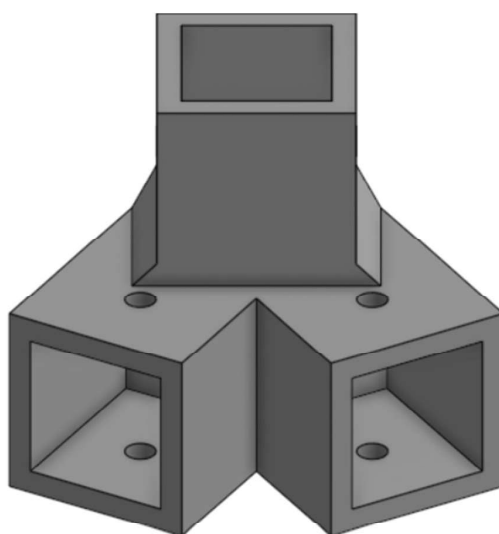
Pro účely vizualizace a odlaďování v prostředí OnShape jsem si vytvořil virtuální kopie systému Kombi o rozměrech 30x30 mm. Kromě toho jsem do ní přidal T matice a šrouby, kterými jsou profily vzájemně spojovány.



Obrázek 12 - Řez profilem, T matice a šroub M6x12

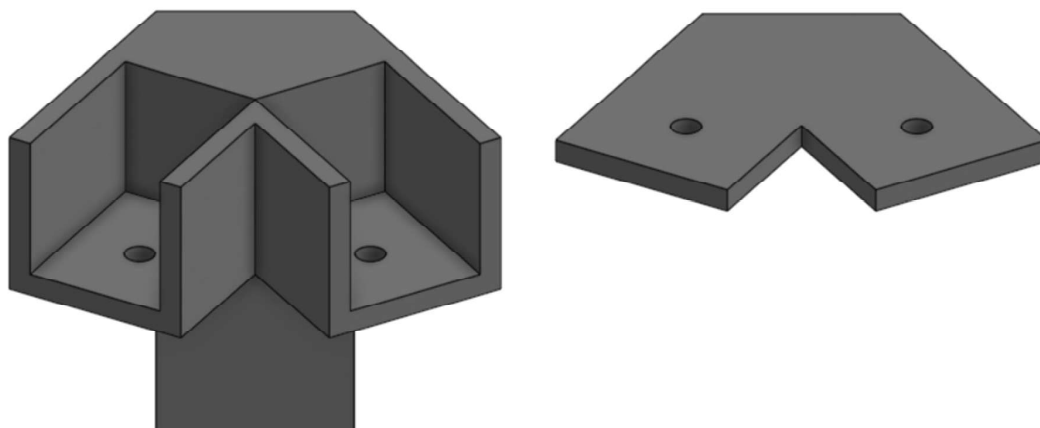
## Rohová spojka 60°

Tato spojka zaručuje přesné úhly, ve kterých mají být profily umístěny. Zároveň profily pevně spojuje. Je tvořena dvěma čtvercovými dírami pro zasunutí profilů, které jsou k sobě odkloněny o 60° a jednou čtvercovou dírou která je otočena směrem pryč od obou děr, a to tak že s nimi je v pravém úhlu. Dále jsou v dílu díry pro montáž šroubů držící profily na místě. Tyto díry jsou vždy dvě naproti sobě u každé díry na profil.



Obrázek 13 - Rohová spojka 60°

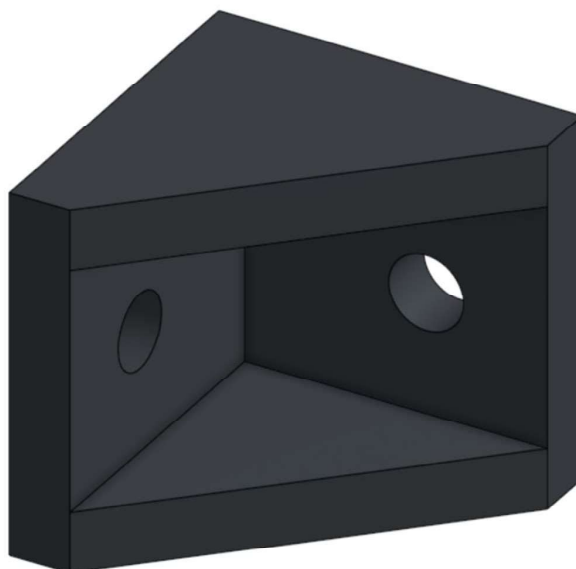
Kvůli montážním důvodům jsem vždy třetí spojku v trojúhelníku musel upravit, a to tak že jsem jednu stranu odmazal. Aby poté celý rám nebyl oslaben, jsem vytvořil klapku, která se po kompletaci přilepí k modifikované spojce.



*Obrázek 14 - Upravená rohová spojka 60° a klapka*

## **Rohová spojka 90°**

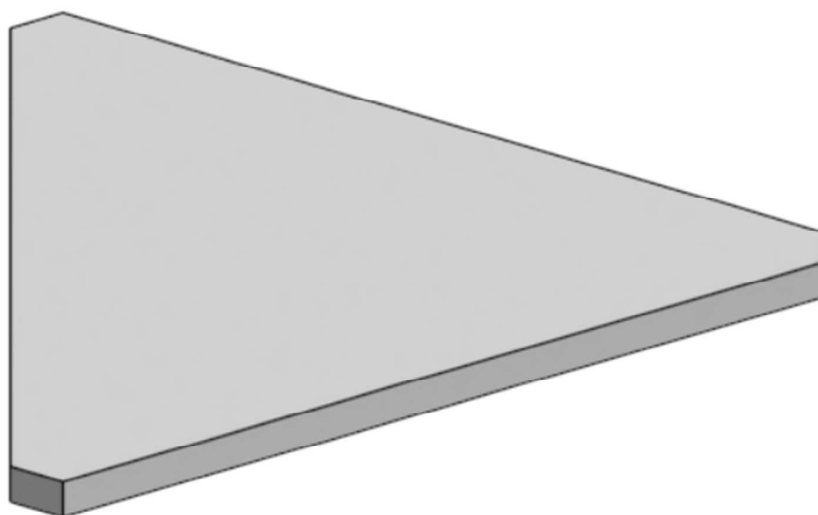
Pod úhlem 90° spojuje dva profily Kombi 30x30.



*Obrázek 15 - Rohová spojka 90°*

## Pracovní plocha

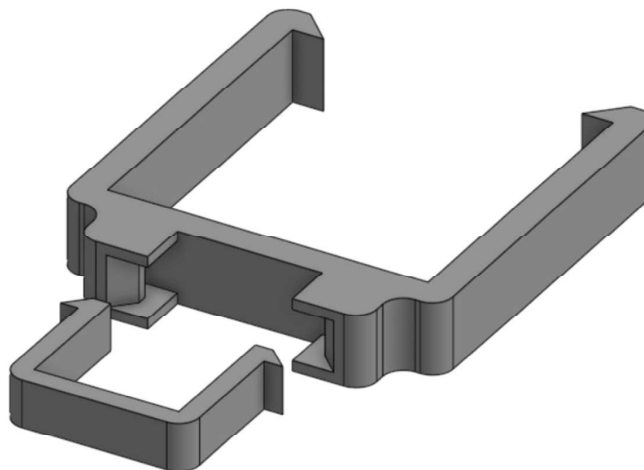
Na této ploše může uživatel vymýšlet různé aplikace. Je vyrobena z laminované dřevotřískové desky. Její výroba byla problematická, kvůli malým tolerancím. Tento díl jsem si tedy nechal vyrobit u zkušeného truhláře, který díl vyrobil v rámci tolerancí.



Obrázek 16 - Pracovní plocha

## Držák kabeláže

Aby byla kabeláž co nejjistější vytvořil jsem tyto držáky, které se nasunou na profily rámu. Kabel se poté nacvakne druhou menší částí. Kabely tak pevně drží podél rámu.



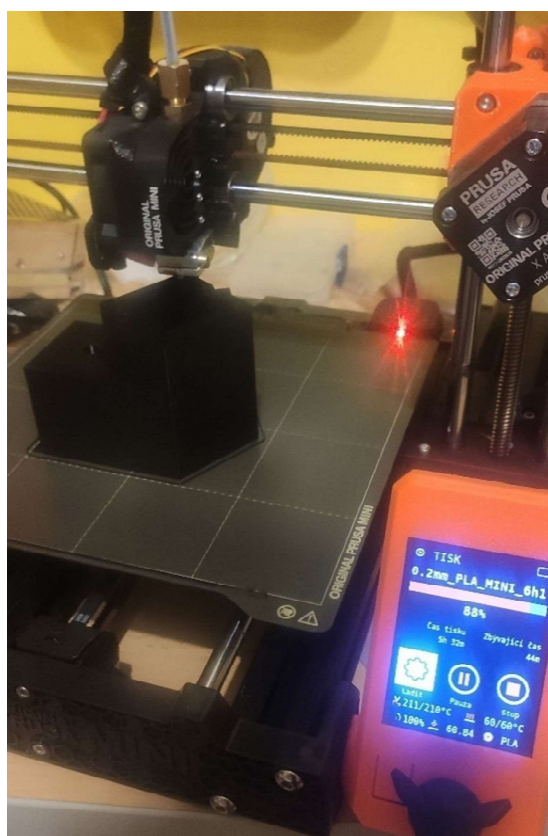
Obrázek 17 - Držák kabeláže

## 4. 3D TISK

Nyní když jsem měl všechny díly vymodelované, bylo na čase je vytisknout. Zvolil jsem si technologii FDM, protože je jednoduchá, a i ekonomicky přívětivá. Vzhledem k množství dílů jsem rozdělil tisk na dvě tiskárny *Prusa Mini+* a *Prusa MK3s*. Jako materiál jsem si zvolil PLA, které díky jeho nízké teplotě tavení a bez zápachovému tisku je ideální s ohledem na to, že většinu dílů tisknu doma. Bohužel mezi negativní vlastnosti PLA patří jeho měkkost a malá mechanická odolnost. Tato negativní vlastnost se později projevila v díře páky ve tvaru D, ve které krokový motor vymáčkal uložení hřídele a vznikly tak velké vůle.



Obrázek 20 - Tisk pák na Prusa MK3S



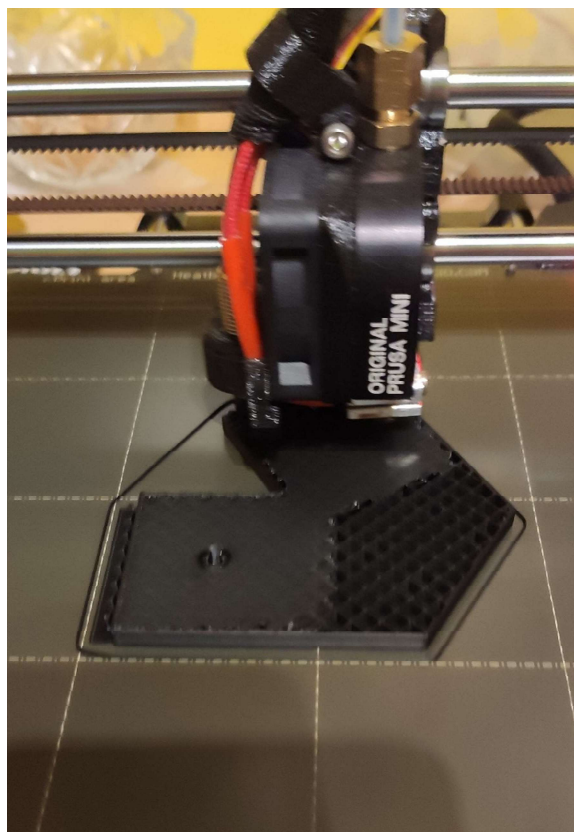
Obrázek 18 - Tisk rohové spojky 60° na Prusa Mini+



Obrázek 19 - Filamenty PLA od C-tech

## Nepovedený výtisk

Vlivem zavanutí studeného vzduchu na tiskový plát 3D tiskárny se díl na jedné straně odlepil a přizvedl. Výsledkem by byl nerovný povrch dílu. Naštěstí se mi podařilo zrušit tisk v čase a nevznikl žádný malér. Mohlo to, avšak dopadnout i hůř, když by se díl od podložky odlepil úplně a třeba i natavil na trysku a topné těleso tiskárny.



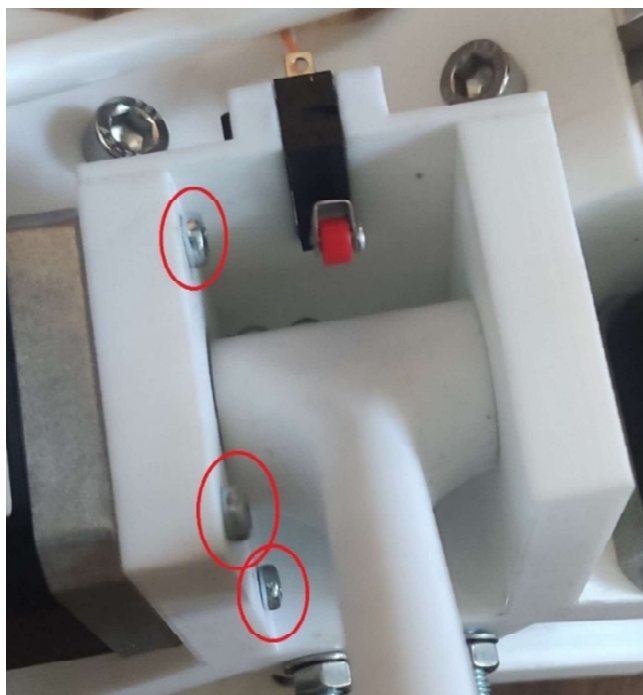
*Obrázek 21 - Foto nepovedeného výtisku*

Mám k dispozici pouze jedinou fotografii, která zachycuje tuto událost, avšak na této fotce není odlepená část výtisku dostatečně patrná.



## 5. KOMPLETACE MECHANISMŮ

Montáž probíhala celkem rychle a během ní jsem si kolikrát říkal, že jsem daný díl nenavrhl dost šťastně a že má své nedostatky. Jako příklad uvedu hlavní kříž. Neuvědomil jsem si, že poté až budu připevňovat krokový motor, tak nebudu mít přístup šroubovákem ke hlavičkám šroubů. Nicméně díl byl už vytištěný a byla by škoda ho zahodit. Vymyslel jsem tedy, že tyto šrouby našroubuji rukou a poté dotáhnu „bitem“ a kleštěmi. Tato metoda fungovala a ušetřila mi cca 7 hodin tisku nového kříže.



Obrázek 22 - Blbě umístěné montážní šrouby



Obrázek 23 - Trojúhelníkové základny

## Kloubové mechanismy

Další menší problém byl s vytištěnými kloubovými mechanismy, které nebyly „*print in place*“. Celý počáteční nápad byl, že tyto dva díly do sebe zalisují ve svěráku. Původně jsem si tuto metodu zkoušel a fungovala, ale nyní když jsem měl takhle nalísovat 12 mechanismů tak se projevila měkkost a křehkost materiálu PLA. Kuličky se ulamovali, nebo se i zdeformovali pod vlivem tlaku při lisování. Deset mechanismů přežilo a dva byli zničené.

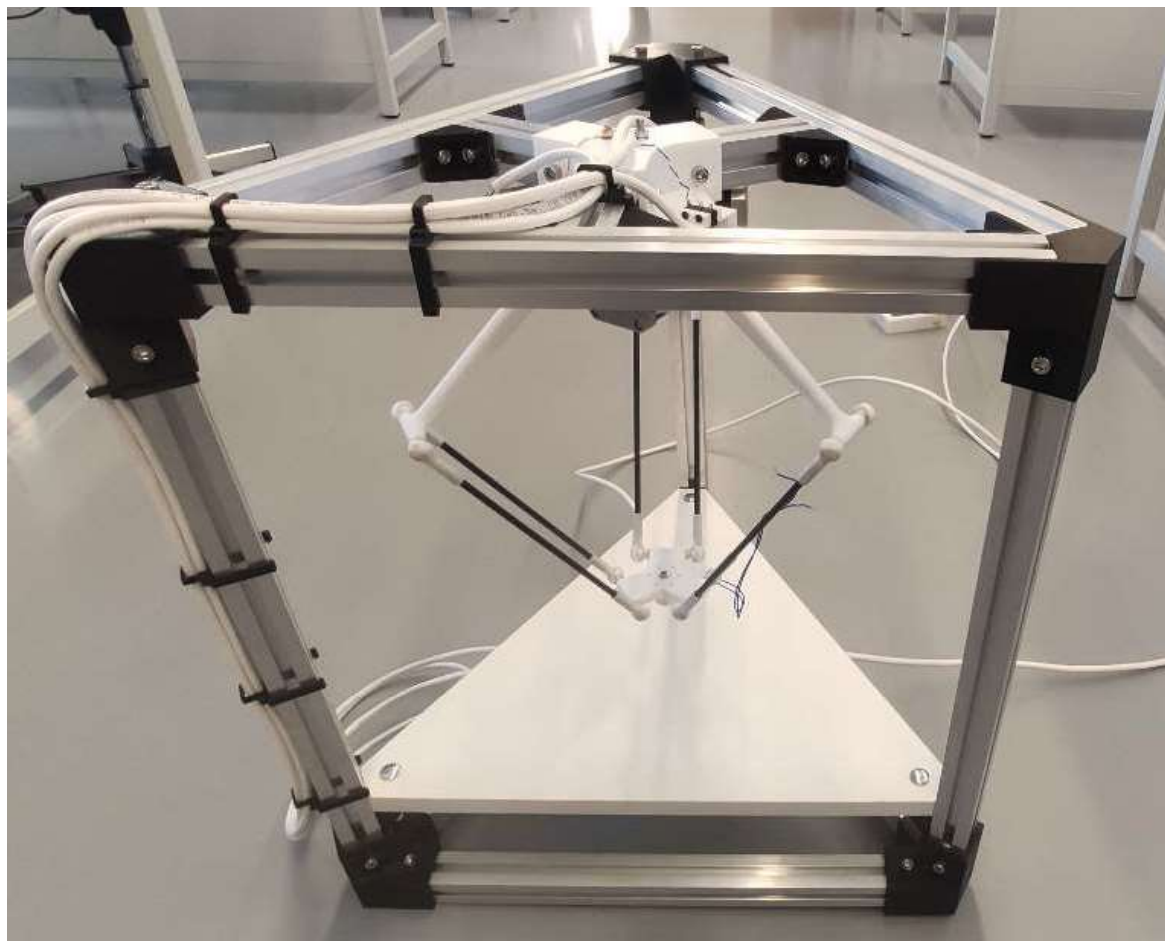


Obrázek 24 - Rozlomený kloubový mechanismus

Jenomže protože jsem už mystičky přilepil ke karbonovým tyčkám, tak to znamenalo, že musím celé táhlo vyhodit a zkusit to znovu. To by byla totální ztráta času. Přilepil jsem tedy ke kuličkám ulomený zbytek a zkusil jsem jejich vlastnosti. Bohužel už nebyli, co by měli být, ale pro moji aplikaci postačovali. Pokračoval jsem tedy v kompletaci.

## Finální konstrukce

Po přibližně deseti hodinách čisté stavby jsem získal kompletní konstrukci.



*Obrázek 25 - Hotová konstrukce*

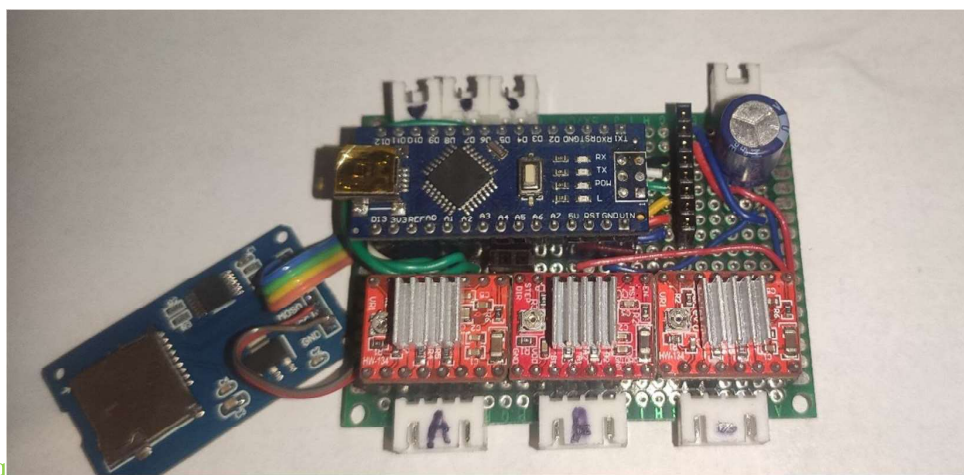
## 6. ELEKTRONIKA

Hlavním srdcem celé elektroniky v mé práci o paralelní kinematickou strukturu je mikrokontrolér Arduino Micro, který je napájen ze „step-down“ měniče. Pro řízení krokových motorů jsem použil tři řadiče, z nichž každý řídí jeden motor. Dále je součástí zapojení i expandér I/O vstupů, který mi umožňuje pracovat s větším počtem vstupů a výstupů, a to jak pro řízení motorů, tak pro další možné úpravy a vylepšení.

Pro usnadnění ovládání struktury jsem přidal dotykový display „Nextion“. Díky němu mohu snadno ovládat a monitorovat celou strukturu přímo na místě. Navíc jsem rozšířil práci o čtečku SD karet, která mi umožňuje automatické řízení struktury podle předem napsaného programu.

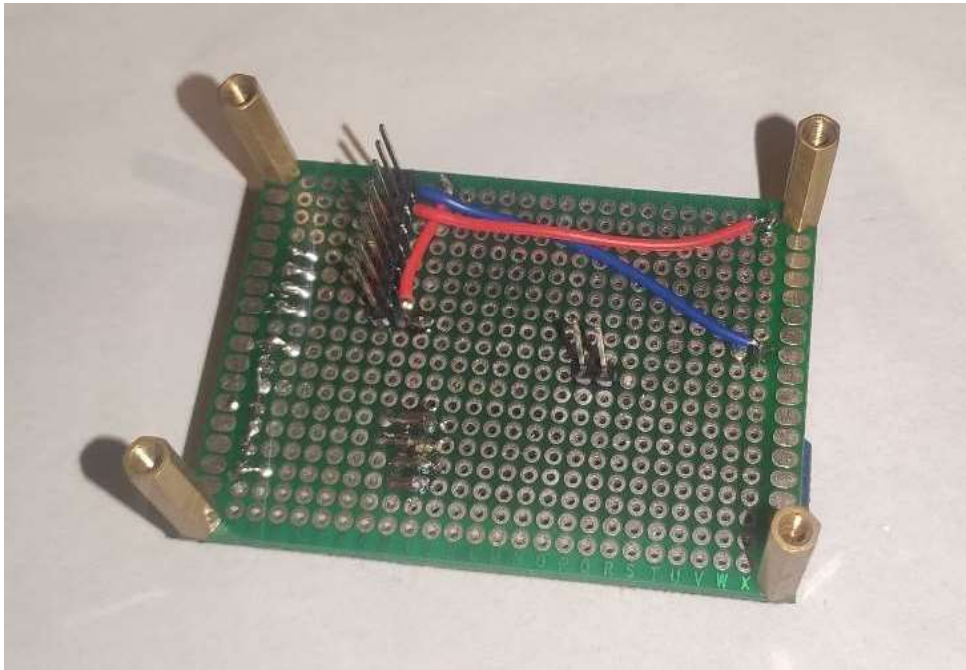
Celkově jsem se snažil vytvořit flexibilní řídicí systém, který umožňuje jednoduché ovládání paralelní kinematické struktury, a také snadné úpravy a vylepšení systému v budoucnosti.

Protože schéma zapojení je dosti rozsáhlé přikládám ho v plné velikosti do přílohy.



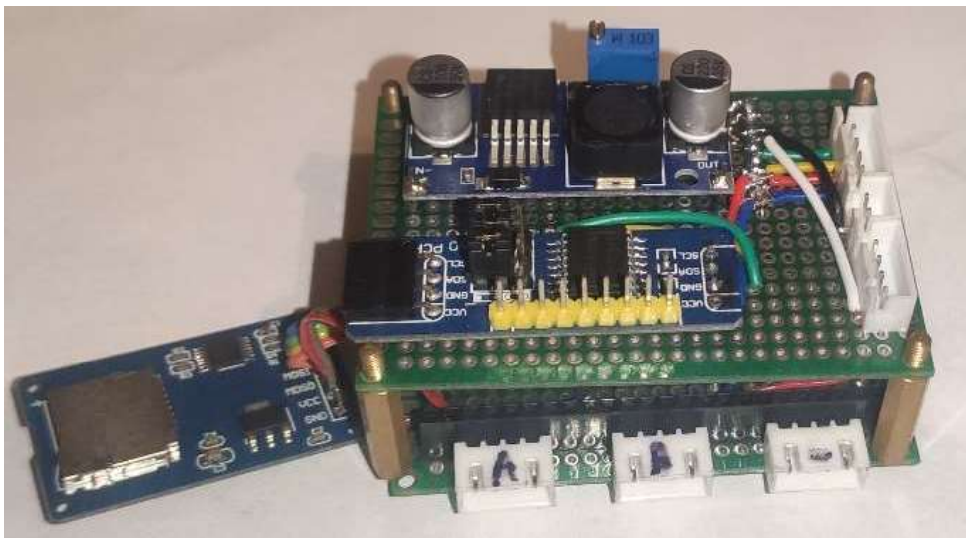
Obrázek 26 - Spodní deska řízení

Protože jsem hodlal použít hodně modulů a konektorů, rozhodl jsem se umístit je všechny na tištěný spoj, aby bylo jednodušší zapojování a aby byly moduly pevně upevněné. Původně jsem zamýšlel, že si vyleptám velkou desku se všema cestičkami. V průběhu designování a odladování jsem si na „prototype board“ vše zapájel a propojil drátky. Z důvodů nedostatku času jsem se později rozhodl, že desku na míru leptat nebudu a nechám to tak jak to je.



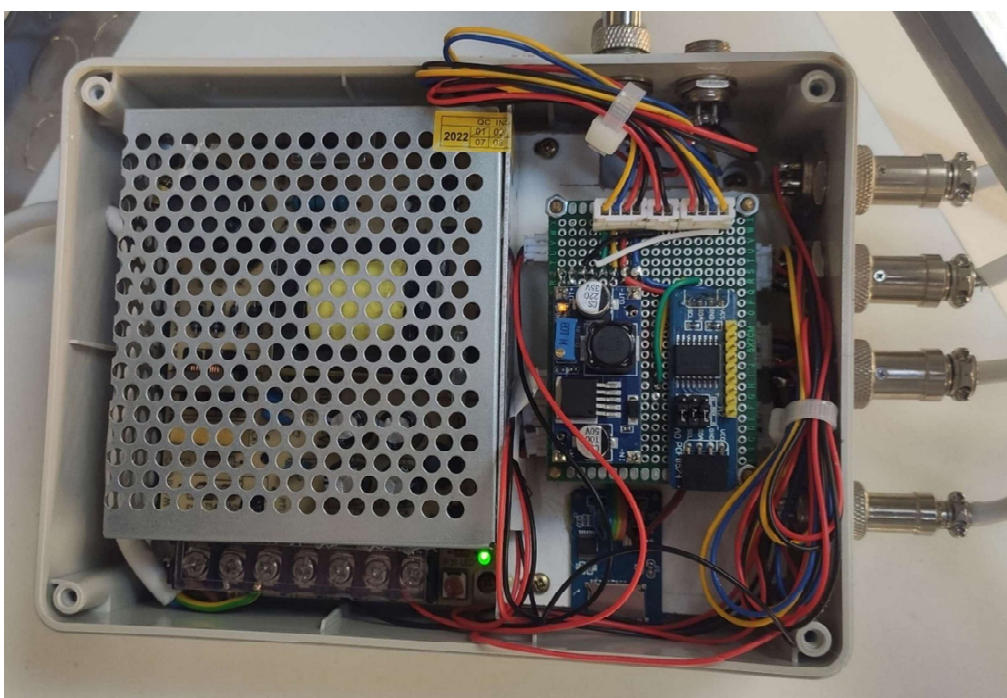
*Obrázek 27 - Horní deska řízení a ukázka propojení*

Jak jsem již zmiňoval v předchozím odstavci, tak deska disponuje množstvím konektorů, a to pro motory, napájení, display a různá čidla. Jsou zde pro usnadnění pozdější kompletace. Navíc když bude potřeba nějaký motor vyměnit, tak jen se jednoduše odpojí konektor a motor se může s kabelem odstranit.



*Obrázek 28 - Horní deska řízení*

Arduino je společně s průmyslovým napájecím zdrojem umístěno v plastovém boxu, vybaveném o bytelné konektory. Do boxu vede pětimetrová síťová napájecí šňůra, která dodává celému systému potřebné množství energie.

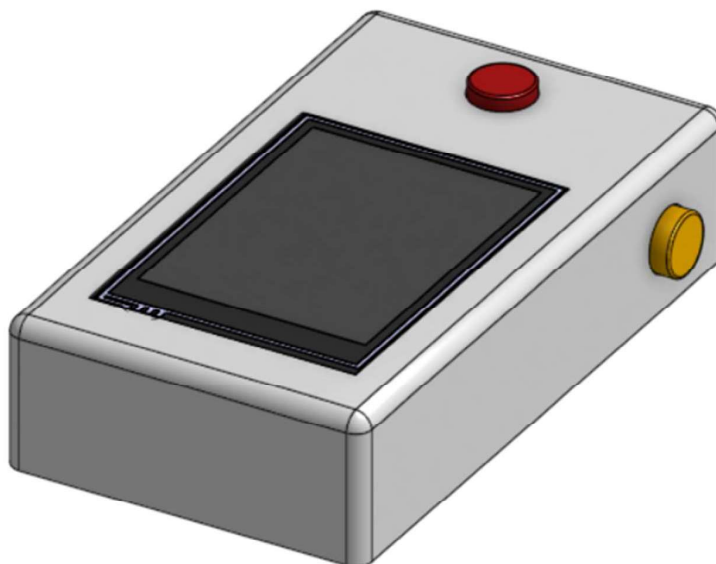


*Obrázek 29 - Zapojení*

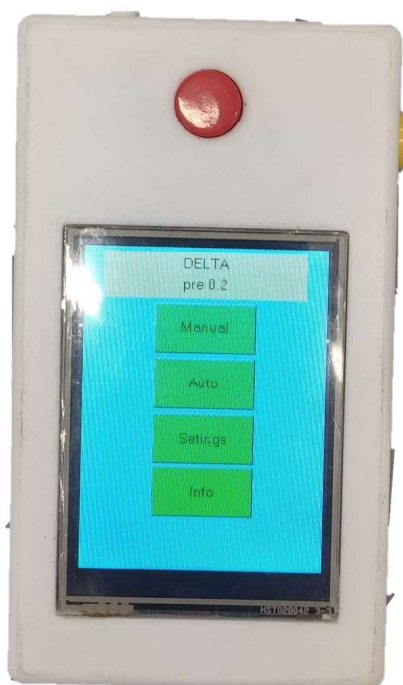
Důvodů pro volbu kovových konektorů jsem měl dosti, ale mezi ty největší byla potřeba spolehlivost spojení. Zároveň tyto konektory mají šroubovací krycí matku, která chrání přechod a zároveň pevně spojuje oba kusy konektoru, takže je není možno omylem rozpojit.

## 7. OVLADAČ

Aby bylo možno se strukturou ručně pohybovat vytvořil jsem ovladač, který je vybavený displejem Nextion, E-stopou a dead man-em. Dead man složí jako pojistka, aby uživatel nemohl omylem šáhnout na displej a pohnout strukturou, když nechce.



Obrázek 30 - Model ovladače



Obrázek 31 – Zkompletovaný ovladač

## 8. SOFTWARE

Kompletní software běžící na mikrokontroléru Arduino, je napsán v jazyce Wiring a je rozdělen do funkcí, které provádějí výpočty, kalibrace, pohyby a další operace. Po zapnutí robota se provádí automatická kalibrační sekvence, kterou lze později opakovat. Poté program komunikuje s displejem, který má vlastní mikrokontrolér. Na základě přijatých parametrů a příkazů se provádějí akce funkcí, které řídí pohyb a zapínání a vypínání výstupů. V automatickém režimu se příkazy a parametry načítají ze SD karty a robot je poté vykonává. Program obsahuje definice přerušení pro E-STOP a povolení pohybu.

### Arduino ide

Pro ukázkou zde uvedu dvě důležité části kódu. Celý program ve formátu .ino se nachází v příloze.

```
399 void Calibration () {
400   while (1) {
401     if (digitalRead(limitA) == HIGH) {
402       MoveA++;
403     }
404     if (digitalRead(limitB) == HIGH) {
405       MoveB++;
406     }
407     if (digitalRead(limitC) == HIGH) {
408       MoveC++;
409     }
410     stepperA.moveTo(MoveA);
411     stepperB.moveTo(MoveB);
412     stepperC.moveTo(MoveC);
413     Run();
414     if ((digitalRead(limitA) == LOW) and (digitalRead(limitB) == LOW) and (digitalRead(limitC) == LOW)) {
415       Serial.println("HOME");
416       break;
417     }
418     delay(5);
419   }
420   stepperA.setCurrentPosition(0 + 13 * krok);
421   stepperB.setCurrentPosition(0 + 13 * krok);
422   stepperC.setCurrentPosition(0 + 13 * krok);
423   stepperA.moveTo(0 * krok);
424   stepperB.moveTo(0 * krok);
425   stepperC.moveTo(0 * krok);
426   Run();
427 }
```

Obrázek 32 - Ukázka části kódu pro kalibraci

Následující segment kódu slouží pro základní kalibraci a nastavení počátečního úhlu pro motor, který je vybaven bez rotačního enkodéru. Tento krok je nezbytný pro správnou funkci motoru a jeho přesné umístění v prostoru.



```

494 // inverse kinematics
495 // helper functions, calculates angle theta1 (for YZ-plane)
496 int delta_calcAngleYZ(float x0, float y0, float z0, float theta) {
497     float y1 = -0.5 * 0.57735 * E; // E/2 * tg 30
498     y0 -= 0.5 * 0.57735 * e; // shift center to edge
499     // z = a + b*y
500     float a = (x0 * x0 + y0 * y0 + z0 * z0 + rf * rf - re * re - y1 * y1) / (2 * z0);
501     float b = (y1 - y0) / z0;
502     // discriminant
503     float d = -(a + b * y1) * (a + b * y1) + rf * rf * (b * b * rf + rf);
504     if (d < 0) return -1; // non-existing point
505     float yj = (y1 - a * b - sqrt(d)) / (b * b + 1); // choosing outer point
506     float zj = a + b * yj;
507     theta = 180.0 * atan(-zj / (y1 - yj)) / pi + ((yj > y1) ? 180.0 : 0.0);
508     return 0;
509 }
510
511 // inverse kinematics: (x0, y0, z0) -> (theta1, theta2, theta3)
512 // returned status: 0=OK, -1=non-existing position
513 int delta_calcInverse(float x0, float y0, float z0, float theta1, float theta2, float theta3) {
514     theta1 = theta2 = theta3 = 0;
515     int status = delta_calcAngleYZ(x0, y0, z0, theta1);
516     //Serial.print("theta1: "); Serial.println(theta1);
517     theta1out = theta1;
518     if (status == 0) status = delta_calcAngleYZ(x0 * cos120 + y0 * sin120, y0 * cos120 - x0 * sin120, z0, theta2); // rotate coords to +120 deg
519     //Serial.print("theta2: "); Serial.println(theta2);
520     theta2out = theta2;
521     if (status == 0) status = delta_calcAngleYZ(x0 * cos120 - y0 * sin120, y0 * cos120 + x0 * sin120, z0, theta3); // rotate coords to -120 deg
522     //Serial.print("theta3: "); Serial.println(theta3);
523     theta3out = theta3;
524     return status;
525 }

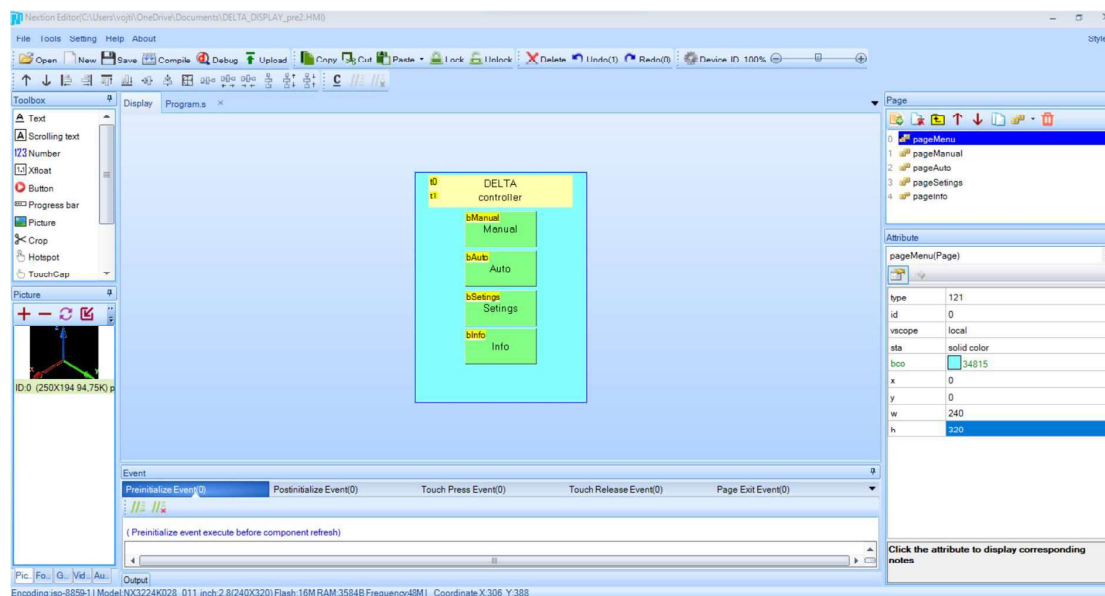
```

*Obrázek 33 - Ukázka části kódu pro přepočítání souřadnic*

V této části kódu je implementován algoritmus pro převod klasických kartézských souřadnicových hodnot na odpovídající úhlové pozice jednotlivých motorů. Tento převod umožňuje přesné řízení polohy a orientace koncové hlavy v prostoru.

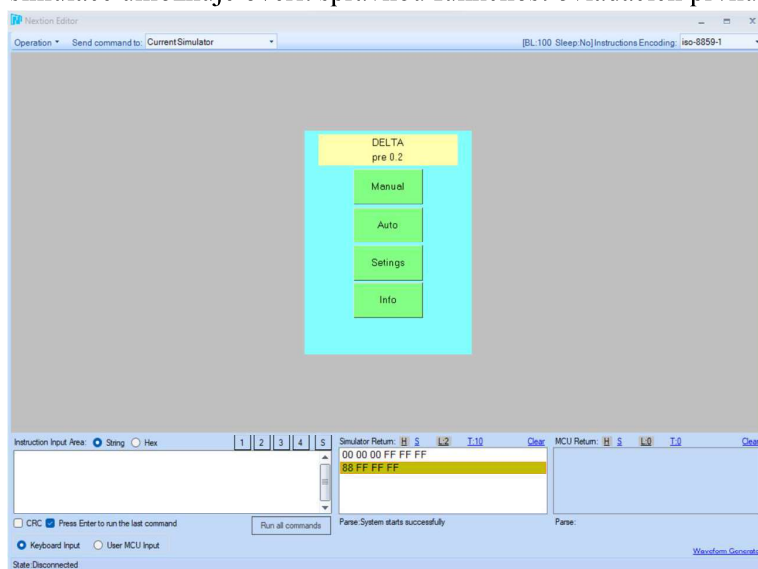
## Display editor

Jedná se o plně vybavený modul s dotykovou plochou. Celý uživatelský rozhraní bylo vytvořeno pomocí programu Nextion Editor od výrobce displeje. Zde lze jednoduše vytvářet různá tlačítka a nastavit pro ně, že při jejich uvolnění display odešle hexadecimální adresu tlačítka a jeho stav po sběrnici I2C.



Obrázek 34 - Nextion Editor

Součástí programu je simulace HMI (rozhraní mezi člověkem a strojem), která slouží k testování menu a monitorování odezvy tlačítek při stisknutí a výpisu jejich adres. Tato simulace umožňuje ověřit správnou funkčnost ovládacích prvků.



Obrázek 35 - Testovací okno Nextion Editoru

## Vlastní prog. Jazyk

Pro účely řízení robota z SD karty jsem vytvořil vlastní algoritmus. Při návrhu jsem vycházel z osvědčeného G-kódu, avšak přizpůsobil jsem ho konkrétním potřebám mého projektu a doplnil jsem nové funkce, které v klasickém G-kódu chybí. Tento nový jazyk jsem pojmenoval "DELTA++". Název vychází z faktu, že je určen specificky pro tento konkrétní projekt a zároveň obsahuje prvky programovacího jazyka C++.

Zde je vysvětlení jednotlivých příkazů.

d - delay [d100; = 100 ms delay]

m - move [m10/10/10; = pohyb na souřadnice x/y/z]

s - set [s1; = sepne výstup 1 do stavu HIGH]

r - reset [r1; = restuje výstup 1 do stavu LOW]

w - wait [w1; = počká než se na vstupu 1 neobjeví náběžná hrana]

t - text [t1/string; = zobrazí text "string" na 1. řádek display pendantu, maximální délka stringu je 30 znaků][3 texové řádky]

c - clear [c; = vyčistí textový výstup na pendantu]

a - angle [a60/60/60; = nastaví motory do úhlů A/B/C]

h - home [h; = aktivuje kalibrační rutinu a nastaví se do home pozice]

Díky těmto příkazům jsem mohl sestavit tento jednoduchý ukázkový program:

```
m30/-300/10;
```

```
d1000;
```

```
m20/-250/20;
```

```
d1000;
```

## 9. SEZNAMY

### Seznam příložených souborů

1. Delta\_Final.ino – Celý program pro Arduino.
2. Delta\_Dispatch\_Final.HMI – Projekt vizualizace v Nextion Editoru.
3. Delta\_Model\_Assembly\_Final.3mf – Kompletní model sestaveného robota.
4. Delta\_Pendant\_Assembly\_Final.3mf – Kompletní model sestaveného ovladače.
5. DELTA\_MAIN\_BOARD.pdf – Zapojení elektroniky.
6. Delta\_Documentation.pdf – Technické výkresy dílů.

### Seznam elektronických součástek

1. Krokový motor NEMA 17 17HS8401
2. A4988 driver pro krokové motory
3. Arduino Nano R3, ATmega328
4. MicroSD Card modul SPI
5. JST-XH 2.5mm konektor do DPS
6. AISHI ERS1CM471F12OT 470uF  $\pm 20\%$  16V kondenzátor elektrolytický
7. Dutinková lišta 2,54 mm jednořadá přímá
8. Dupont kolíková lišta 2,54 mm
9. Step-down měnič s LM2596
10. PCF8574 I2C 8bit I/O Expandér
11. Konektor 12mm GX12 - 4p, panel
12. Konektor 12mm GX12 - 4p, kabel
13. Konektor 12mm GX12 - 2p, kabel
14. Konektor 12mm GX12 - 2p, panel
15. Konektor 16mm GX16 - 4 piny, kabel
16. Konektor 16mm GX16 - 4 piny, panel
17. JST-XH-2 2.5mm 2pin konektor s 20cm vodiči
18. JST-XH-4 2.5mm 4pin konektor s 20cm vodiči
19. Nextion orig. NX3224T028 2.8" 320 x 240 TFT displej
20. Mikrospínač TC-1212T 12x12x7.3mm
21. 50x70mm oboustranná PCB prototypová deska
22. Mikrospínač s pákou a kladkou 10T85 $\mu$  5A 250VAC
23. Přidržený elektromagnet KK-P20/15 12V 3kg
24. MOSFET modul, IRF520, 24VDC 5A
25. Distanční sloupek M-F M3 25mm, mosaz
26. Distanční sloupek M-F M3 6mm mosaz

## Seznam mechanických dílů

1. Al profil - Kombi stojka 30x30 elox
2. KOMBI 30 - Kámen M6
3. Šroub Imbus M6x12 pro KOMBI
4. Krabice GEWISS GW44207 190x140x70mm IP56

## 10. ZÁVĚR

Během projektu jsem se věnoval návrhu, konstrukci, sestrojení a testování prototypu kinematické struktury. Cílem bylo navrhnout a vytvořit strukturu, která splňuje požadavky na přesnost, rychlost a plynulost pohybu.

V průběhu projektu jsem se setkal s několika technickými výzvami, které jsem musel řešit pomocí inovativních řešení a zlepšování svých znalostí v oblasti paralelní kinematiky, návrhu a konstrukce struktur.

Výsledkem projektu je paralelní kinematická struktura, která ne úplně splňuje stanovené parametry a je základem pro další pokročilé projekty v této oblasti.

Rád bych poděkoval lektorům a konzultantům dříve zmíněné, kteří mi poskytli podporu a vedení během projektu. Doufám, že tento projekt inspiruje další projekty v této oblasti.

Na závěr bych chtěl ještě dodat, že tento projekt není úplně bez much, a že ho budu po zbytek mého studia na střední škole zdokonalovat.

## 11. CITACE

Seznam použité literatury:

ScienceDirect. ScienceDirect [online]. Copyright © [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089812211630147X>

A4988 Stepper Motor Driver with Arduino Tutorial (4 Examples). Homepage - Makerguides.com [online]. Copyright © 2021 makerguides.com [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://www.makerguides.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>

Welcome to Ohio University [online]. Copyright ©2 [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/williams/html/PDF/DeltaKin.pdf>

Delta Robot Forward/Inverse Kinematics Calculations. Marginally Clever Robots – Start robotics here [online]. Copyright © [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://www.marginallyclever.com/other/samples/fk-ik-test.html>

Delta robot kinematics - Tutorials. HyperTriangle :: Home [online]. Copyright © 2013 vBulletin Solutions, Inc. All rights reserved. [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://hypertriangle.com/~alex/delta-robot-tutorial/>

In-Depth Tutorial to Interface Micro SD Card Module with Arduino. Last Minute Engineers - [online]. Copyright © 2022 LastMinuteEngineers.com. All rights reserved. [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/arduino-micro-sd-card-module-tutorial/>

Arduino: read a specific line from SD card - #4 by system - Programming Questions - Arduino Forum. Arduino Forum [online]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/arduino-read-a-specific-line-from-sd-card/433656/4>

AccelStepper: AccelStepper Class Reference. AirSpayce [online]. Dostupné z: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/classAccelStepper.html#a9d917f014317fb9d3b5dc14e66f6c689>

Arduino NANO Pinout Diagram | Microcontroller Tutorials. Teach Me Microcontrollers | Arduino, PIC, Raspberry Pi, Beaglebone Black [online]. Copyright © Copyright 2022, All Rights Reserved [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: <https://www.teachmemicro.com/arduino-nano-pinout-diagram/>

Modelica-Based Modeling and Control of a Delta Robot - YouTube. YouTube [online]. Copyright © 2023 Google LLC [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=z8tY-uiuxzM&ab\\_channel=MitsubishiElectricResearchLabs%28MERL%29](https://www.youtube.com/watch?v=z8tY-uiuxzM&ab_channel=MitsubishiElectricResearchLabs%28MERL%29)

Control 2 Stepper Motor using an Arduino, Easy Driver and Serial Monitor - Tutorial - YouTube. YouTube [online]. Copyright © 2023 Google LLC [cit. 20.03.2023]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=dfgyuOC3OI&ab\\_channel=Brainy-Bits](https://www.youtube.com/watch?v=dfgyuOC3OI&ab_channel=Brainy-Bits)