



## **Středoškolská technika 2023**

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

# **ROBOTICKÝ MANIPULÁTOR SCARA**

**Tomáš Czyž**

Střední škola elektrotechnická  
Tyršova 781, Lipník nad Bečvou

**Střední škola elektrotechnická, Lipník nad Bečvou  
Tyršova 781**



## **Robotický manipulátor SCARA**

Ročníková práce

**2022/2023**

**Tomáš Czyž**

**Střední škola elektrotechnická, Lipník nad Bečvou**

## **Robotický manipulátor SCARA**

**Autor:** Tomáš Czyž, 3. EF

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Hronek

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou ročníkovou práci vypracoval samostatně. Písemná verze práce odpovídá přiložené elektronické verzi. K práci jsem použil literaturu a prameny uvedené v seznamu zdrojů. Souhlasím s tím, aby moje ročníková práce byla využívána na SŠE Lipník nad Bečvou.

V Lipníku nad Bečvou dne: 27. 3. 2023

Podpis: .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Petru Hronkovi, za podnětné připomínky a pomoc při zpracování práce.

## **Anotace**

Ročníková práce zabývá vypracováním návodu pro stavbu robotického manipulátoru vytvořeného na 3D tiskárně, součástí práce je i sw pro ovládání tohoto manipulátoru. V pracovním postupu jsou uvedeny typy šroubů, matic a dalších komponent nezbytných pro správnou funkci robota.

## **Annotation**

In this thesis, we will deal with the building instructions of a robotic manipulator created on a 3D printer, part of this thesis is dedicated to make control software for this manipulator. Workflow contains types of screws, nuts and other necessary things for the proper manipulator building.

## **Klíčová slova**

Robotický manipulátor; SCARA; Arduino; 3D tisk

## **Keywords**

Robotic arm; Scara robot; Robot; Arduino; 3D print

## Obsah

Úvod .....	7
Popis robota typu SCARA.....	8
3D tisk dílů robota .....	9
Materiál pro sestavení robota .....	10
Sestavení robota.....	11
Schéma zapojení .....	19
Dokončení montáže .....	21
Jak funguje robot SCARA .....	21
Programování robota SCARA.....	22
Dokončování robota.....	23
Závěr.....	24
Zdroje.....	25
Seznam obrázků .....	26

## Úvod

V této ročníkové práci se zabývám stavbou 3D robota řízeného prostřednictvím vývojové desky ARDUINO. Práce pokrývá celý proces jeho sestavení, od tisku jeho částí až po podklady pro vývoj grafického uživatelského rozhraní pro jeho ovládání.



## Popis robota typu SCARA

Robot má 4 stupně volnosti a je poháněn čtyřmi krokovými motory NEMA 17. Osa Z je definována přímo, ostatní souřadnice definují vzájemná natočení ramena pevné délky. Součástí je i malý servomotor pro ovládání koncového efektoru - v tomto případě chapadla robota. O řízení tohoto robota se stará deska Arduino UNO, osazené CNC štítem a čtyřmi ovladači servomotorů A4988 s možností mikrosteppingu.

Původní grafické uživatelské rozhraní bylo vytvořeno ve vývojovém prostředí Processing, toto obsahuje ovládání dopředné i inverzní kinematiky. Pomocí dopředné kinematiky můžeme ručně pohybovat každým kloubem robota, abychom dosáhli požadované polohy. Pomocí posuvníků můžeme nastavit úhel každého kloubu. Konečná poloha koncového efektoru, je dána vzájemnými úhly jednotlivých ramen a jejich délkou, hodnoty X, Y a Z jsou vypočteny a vytištěny na pravé straně obrazovky.

Pomocí inverzní kinematiky můžeme nastavit požadovanou polohu koncového efektoru a program automaticky vypočítá úhly pro každý kloub, aby se robot do požadované polohy dostal.

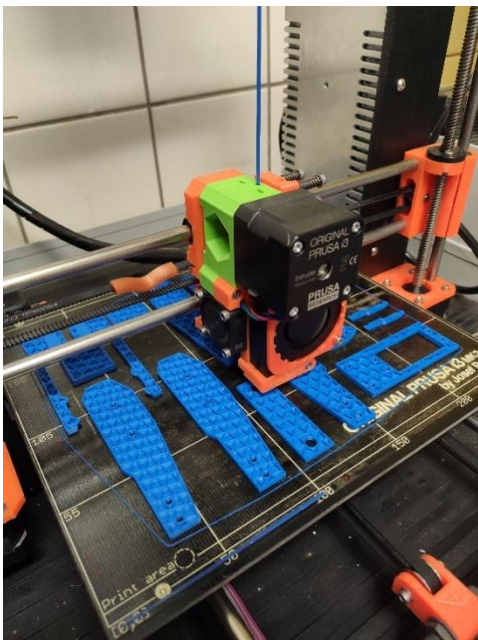
Původní program je vytvořen tak, že můžeme používat obě metody současně, na stejné obrazovce. Úhly kloubů a také hodnoty X, Y a Z koncového efektoru jsou propojené a na obrazovce jsou vždy zobrazené.

Program v ARDUINU pro řízení robota obsahuje i prostor pro uložení sekvence poloh. Pomocí tlačítka „Uložit“ v programu můžeme uložit každou polohu robota. Když stiskneme tlačítko „Run“, robot bude provádět uložené pohyby ve smyčce, od prvního po poslední, znovu a znovu. Můžeme také upravit rychlost pohybu a zrychlení z uživatelského rozhraní.

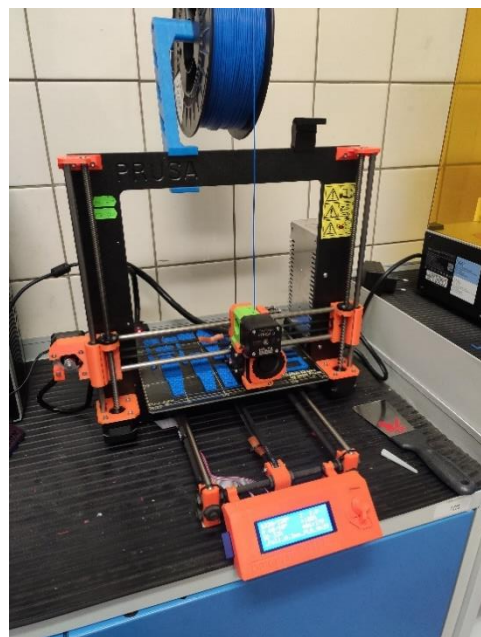
## 3D tisk dílů robota

Všechny díly vymodelované v 3D jsem si stáhl z tutoriálu, podle kterého jsem postupoval při zpracování ročníkové práce. Pro tisk všech dílů jsem použil školní 3D tiskárnu Originál Prusa i3 MK2S, což je opravdu skvělá 3D tiskárna za dostupnou cenu. Jak jsem již zmínil, díly jsou navrženy tak, aby se vešly i na menší 3D tiskárnu.

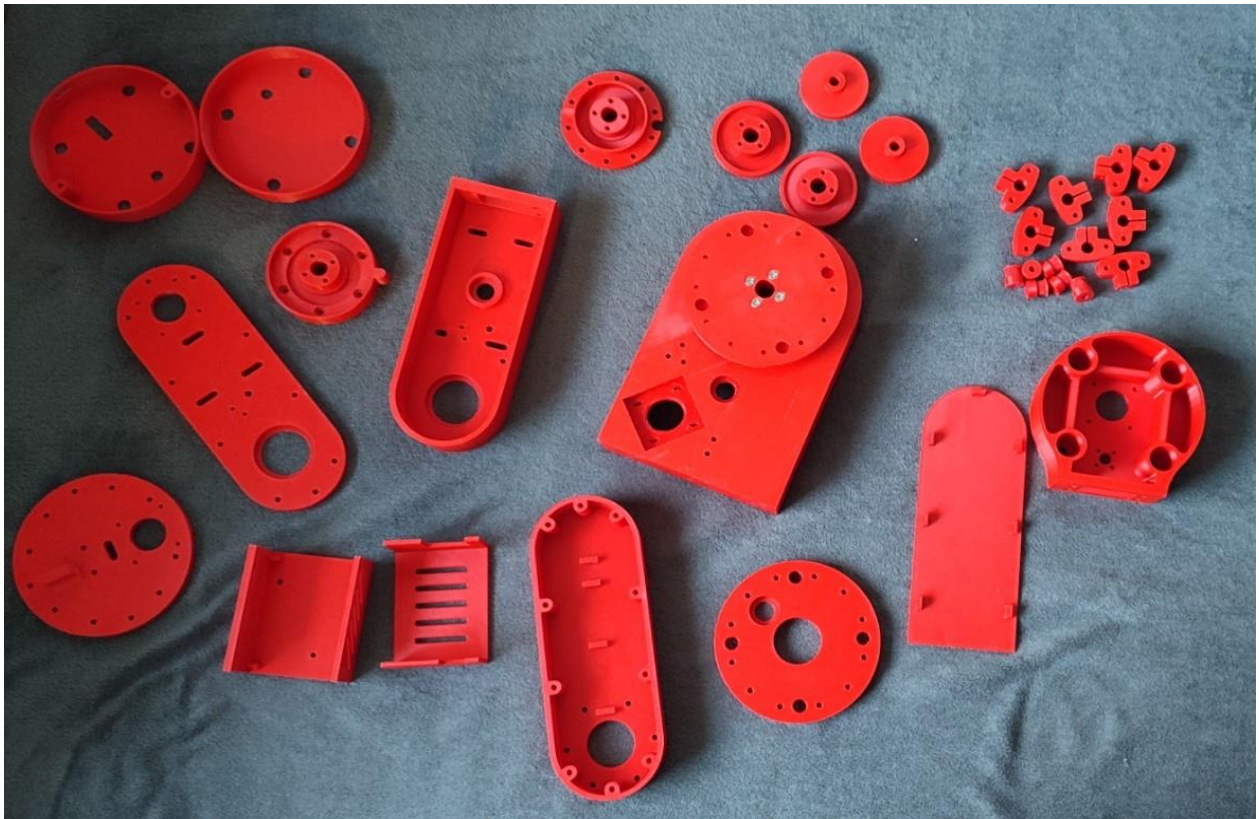
Pro tisk většiny dílů jsem použil materiál PLA, červený, na chapadlo modrý. Tisk všech dílů při rychlosti tisku 60 mm/s zabral asi 120 hodin. Nejdelší byl tisk základny, který trval přibližně 32 hodin. Rychlost tisku byla omezena schopnostmi použité tiskárny. Pokud by se použila výkonnější tiskárna a zvýšila se rychlost tisku, bylo by možno díly vytisknout rychleji.



Obrázek 2-Tiskárna Průša MK2S



Obrázek 1- Tisk dílů chapadla



Obrázek 3- Vytištěné díly vlastního robota

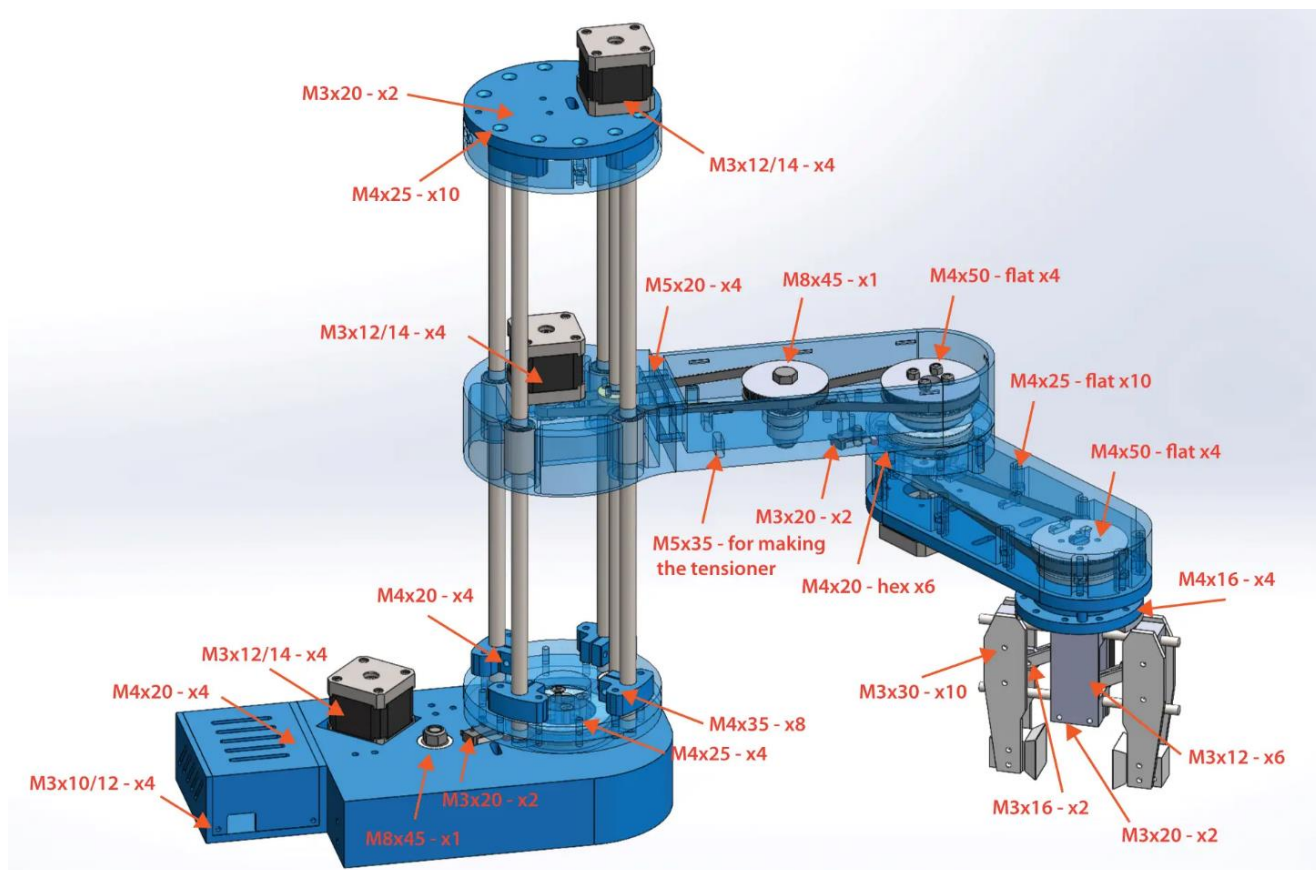
## Materiál pro sestavení robota

Kromě vytištěných dílů jsou zapotřebí pro sestavení robota ještě další mechanické díly. Zde uvádím seznam mechanických komponent potřebných pro sestavení robota:

- 4x hladká tyč –  $\phi$  10 mm 400 mm
- 1x vodící šroub – M 8x400 mm
- 4x lineární ložiska 10 mm
- 1x axiální kuličkové ložisko 40x60x13 mm
- 2x axiální kuličkové ložisko 35x52x12 mm
- 5x radiální kuličkové ložisko 8x22x7 mm
- Šrouby a matice M3, M4 a M5 různých délek

Seznam elektronických dílů:

- ARDUINO Uno
- CNC Shield v. 2
- Spínaný zdroj s krytem (24V/6A)
- Propojovací vodiče krokových motorů
- Propojovací vodiče koncových spínačů
- Propojovací vodiče servomotoru



Obrázek 4- Rozměry šroubů dle umístění

## Sestavení robota

Začneme montáží základny. Zde nejprve vložíme radiální kuličkové ložisko s vnitřním průměrem 35 mm a vnějším průměrem 47 mm, dále první axiální ložisko, které má vnitřní průměr 40 mm a vnější průměr 60 mm. Toto ložisko bude umístěno mezi kladkou a základnou.

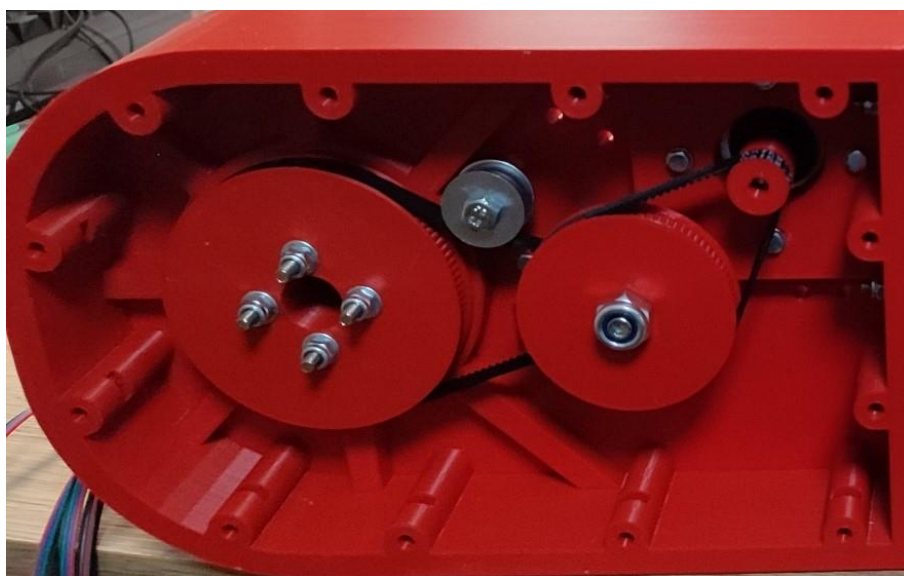
Na druhé straně základny použijeme další axiální ložisko stejné velikosti spolu s kloubovou spojkou.

Poté můžeme řemenici a horní část spojit pomocí čtyř šroubů M4 o délce 55 mm. Zde musíme použít samojistící matice a vhodně je utáhnout tak, aby byl spoj pevný a mohl se volně otáčet.

Dále musíme nainstalovat střední kladku. Tato kladka je spojena s kloubovou kladkou řemenem GT2/300. Pro instalaci této kladky používáme dvě kuličková ložiska 608, jedno na horní a druhé na spodní straně základny. Poté pomocí šroubu M8x45, podložky a samojistící matice můžeme zajistit kladku na místě.



Obrázek 5- Sestavená základna



Obrázek 6- Pohled do základny

Dále musíme nainstalovat krokový motor pro tento kloub. Motor bude ovládat střední kladku s řemenem GT2/200. Pro připevnění k základně potřebujeme čtyři šrouby M3.

Před utažením šroubů musíme řemen co nejvíce napnout. Pro lepší sestavení jsem vyměnil šroub M8 pro střední kladku s hlavou dole, aby se vešel do základny.

V tomto okamžiku bychom měli zkontrolovat, zda jsou ozubené řemeny dostatečně napnuté. Pokud ne, můžeme použít napínací kladky, abychom je lépe „našponovali“. Zde používám šroub M5x35, podložky a matice k výrobě napínací kladky. Lze je připevnit na drážky po obou stranách ozubeného řemenu tak řemen můžeme „došponovat“ podle potřeby. Skončíme zajištěním kladek na obou stranách. Tím je první kloub dokončen.

Pokračujeme instalací mikropsínače pro tento kloub. Než ho zajistíme na místě, připájíme k němu vodiče, protože po sestavení nebude k vývodům přístup. Potřebujeme šrouby M3x20 a matici k zajištění mikropsínače na místě. Kloubová spojka prochází tak blízko spínače, že jsem nakonec vytvořil závit ze spodní části koncového spínače a použil oba šrouby pro jeho zajištění. Tímto způsobem je přepínač dostatečně bezpečný a může správně fungovat.

Jako další můžeme začít sestavovat osu Z. Nejprve na horní straně spojky musíme zajistit spodní část desky v ose Z. Na horní části zajistíme čtyři svorky pro hladké tyče. Poté hladké tyče vložíme na místo. Měly by těsně přiléhat a zasahovat až k části spojky. Po srovnání tyče utáhneme svorkami pomocí šroubů a matic M4. V tomto okamžiku musíme vložit ložisko pro vodící šroub. Abychom tuto část dokončili, stačí zasunout jednoduchý kryt, který vše skryje a robotovi dodá čistší vzhled.

Dále pokračujeme sestavením prvního ramene robota. Rameno bude sestaveno ze dvou částí sešroubovaných dohromady. První část je místo, kde potřebujeme nainstalovat lineární ložiska, kterými budou procházet hlazené tyče vedení osy Z. Jejich vložení na místo může být poněkud obtížné, protože „sedí“ docela těsně. Ve skutečnosti to závisí na tom, jak přesně tiskárna dokáže vytisknout díly. Proto doporučuji při tisku dílů použít funkci Horizontální roztažení a upravit ji podle vaší tiskárny.

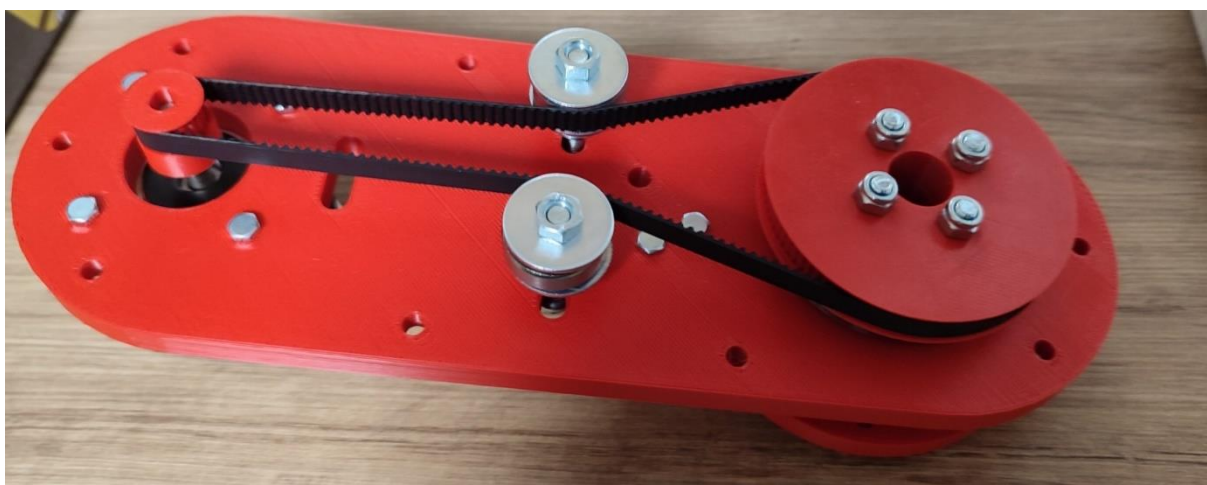
Nyní je čas spojit dvě části prvního ramene dohromady. Pro tento účel použijeme čtyři šrouby M5x25. Dále nainstalujeme druhý krokový motor. Zde použijí 3D tištěnou řemenici GT2 s 20 zuby. Tuto řemenici jsem vyrobil pomocí parametrického návrhu. Zde také musíme zajistit matici vodícího šroubu na místě.

Poté nainstalujeme ozubené řemeny a kladky pro druhý spoj. Zde potřebujeme jeden ozubený řemen o délce 400 mm a jeden o délce 300 mm. Postup jejich instalace je stejný jako u prvního spoje. Zde pro druhý a třetí kloub používáme menší ložiska oproti prvnímu kloubu. Radiální kuličkové ložisko má vnitřní průměr 30 mm a vnější průměr 42 mm a axiální ložisko má vnitřní průměr 35 mm a vnější průměr 52 mm. Před instalací druhé spojky musíme do šestihranných drážek vložit šest šroubů M4x20, tyto budou sloužit pro připevnění druhého ramene ke kloubu. V případě potřeby můžeme pro napínání řemenů použít stejnou metodu, jaká byla vysvětlena dříve u napínacích kladek. Nakonec zajistíme druhý mikropsínač na místě a sestava ramene číslo jedna je dokončena.

Pokračujeme připojením druhého ramene ke spojce kloubu. Zde používáme šrouby v kloubové spojce, které jsme nainstalovali dříve, k zajištění horní části druhého ramene. V tuto chvíli je dobré vyzkoušet, jakou mají klouby vůli. Případně zkontrolujeme napnutí ozubených řemenů. Pokračujeme v montáži druhého ramene. Zde nejprve musíme nainstalovat krokový motor pro třetí kloub.



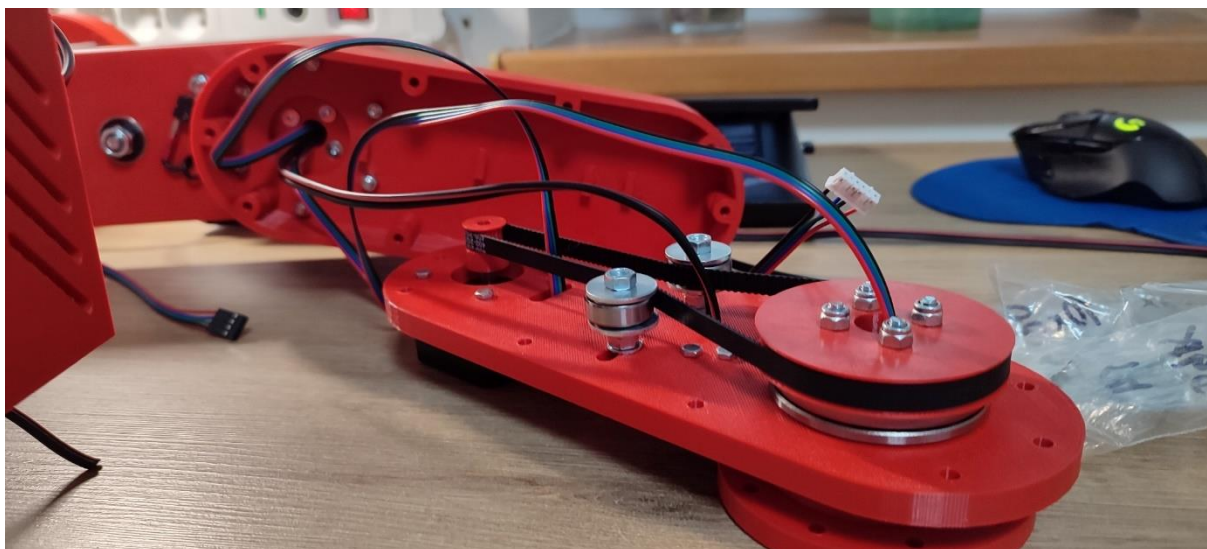
*Obrázek 7- Krokový motor třetího kloubu*



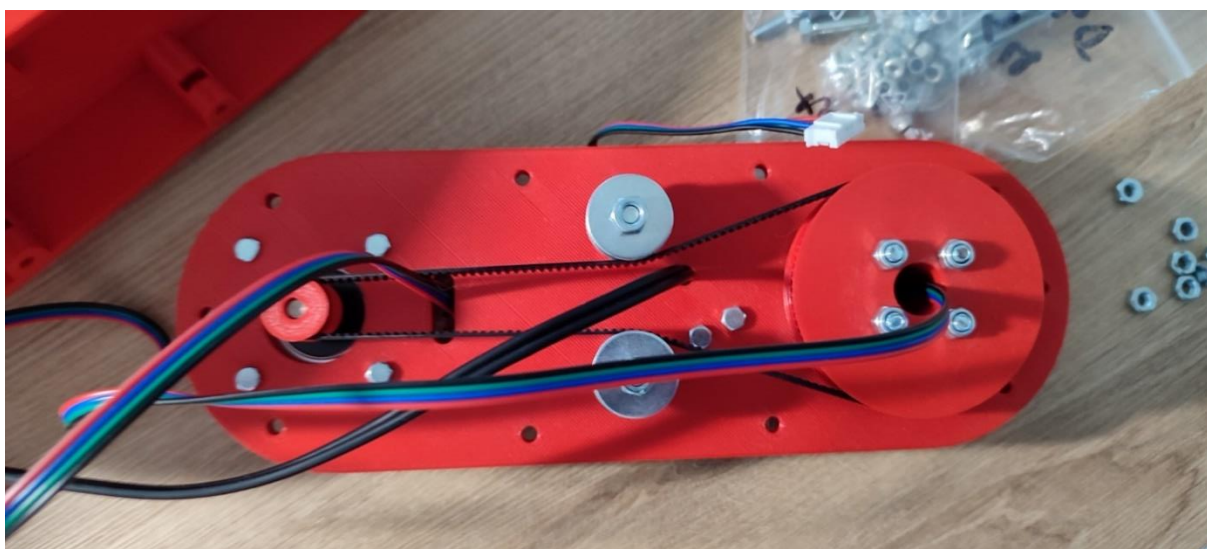
*Obrázek 8- Detail napnutí ozubeného řemenu a napínacích kladek*

V tomto případě použijeme menší krokový motor, takže rameno je o něco lehčí. Stále je to krokový motor NEMA 17, ale s kratší délkou 24 cm.

Opět použijeme stejný postup pro instalaci řemenů a řemenice pro třetí kloub, zde je pouze jeden převod s ozubeným řemenem 400 mm. Dále, než připojíme tuto spodní část ramene k horní části, musíme propojit motor a mikropsínač a protáhnout jejich vodiče druhým spojem.



*Obrázek 10- Vedení kabelů kloubem*



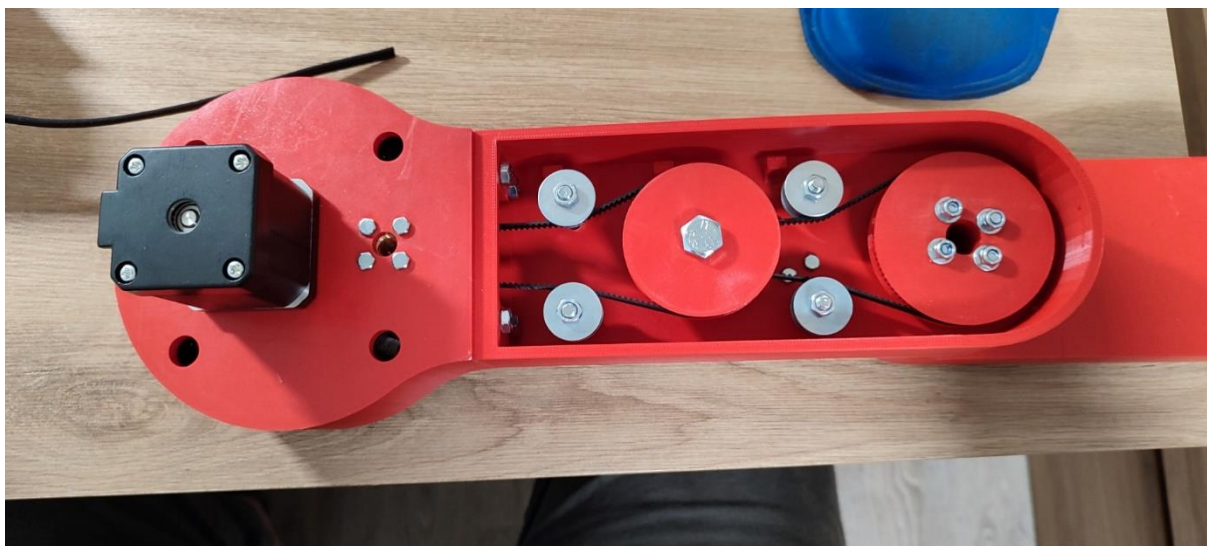
*Obrázek 9 - Napnutí řemene a průchod kabelů*

V tomto okamžiku je nutné vložit vodiče pro koncový efektor. V mém případě jsem vložil 4vodičový kabel od krokového motoru, který použiji pro pohon servomotoru chapadla, který vyžaduje 3 vodiče.

Dále do drážek horního ramene vložíme matice M4, které budou sloužit k upevnění spodní části. Těsně před uzavřením tubusu bychom měli protáhnout vodiče pod háčky určenými pro uchycení vodičů tak, aby zůstaly daleko od pohyblivých částí.

Vodiče vycházející z druhého kloubu se mohou ve skutečnosti zachytit o matice na kladce, proto jsem vyrobil jednoduchý držák, který vodiče přidrží dál od matic.





*Obrázek 11- Sestava prvního ramene*

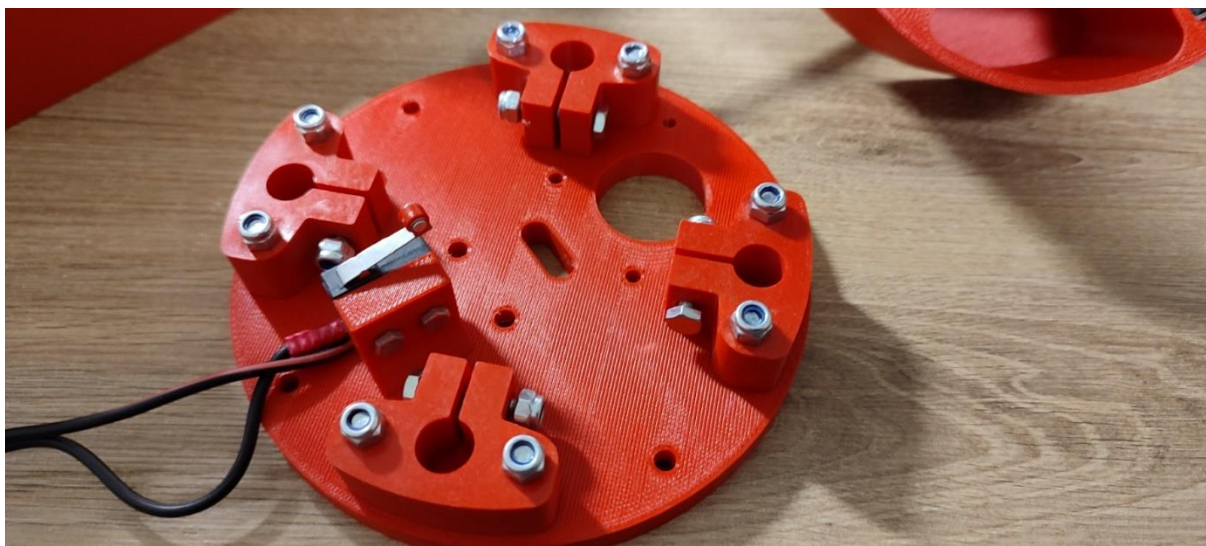


*Obrázek 12- Vedení vodičů, pomocný držák.*

Vodiče je nutné uspořádat tak, aby procházely na jedné straně ramene, tím se zabrání kontaktu s pohyblivými částmi. Nakonec vložíme kryt prvního ramene. Kryt je připevněn k ramenu pomocí západkového spoje. Takto je sestava ramen robota dokončena.

Celou sestavu vložíme na tyče osy Z.

Poté připravíme horní desku osy Z, která drží horní konec sestavy vodičích tyčí. Zde nejprve nainstalujeme mikropsínač pro osu Z a připevníme svorky k desce.



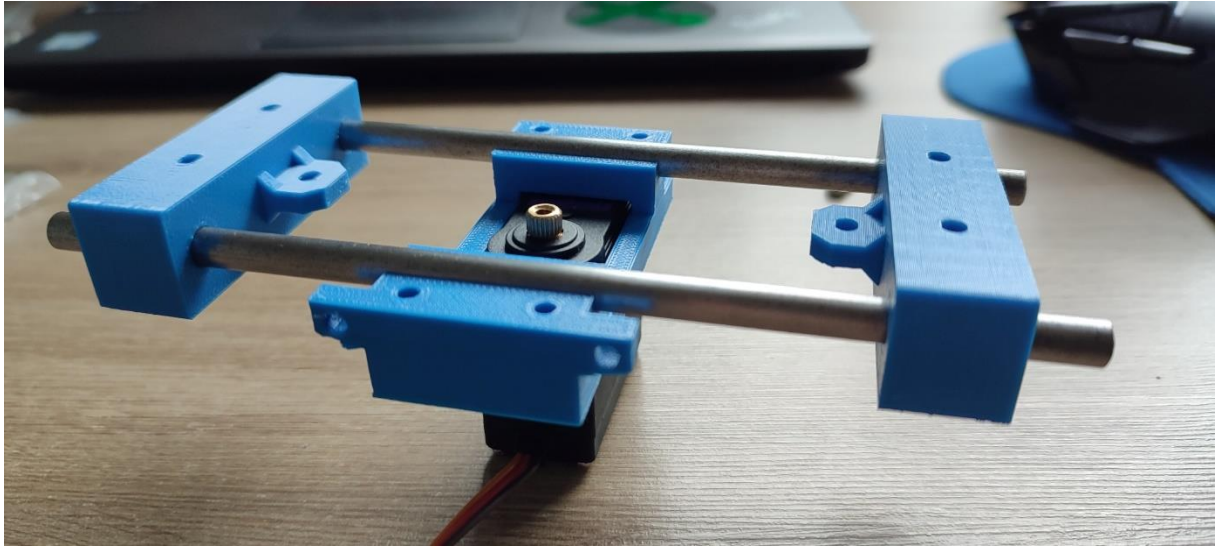
*Obrázek 13- horní deska osy Z*

Před nasazením horní desky na místo nejprve vložíme kryt stejně jako spodní, poté můžeme pomocí svorek upevnit horní desku k tyčím.

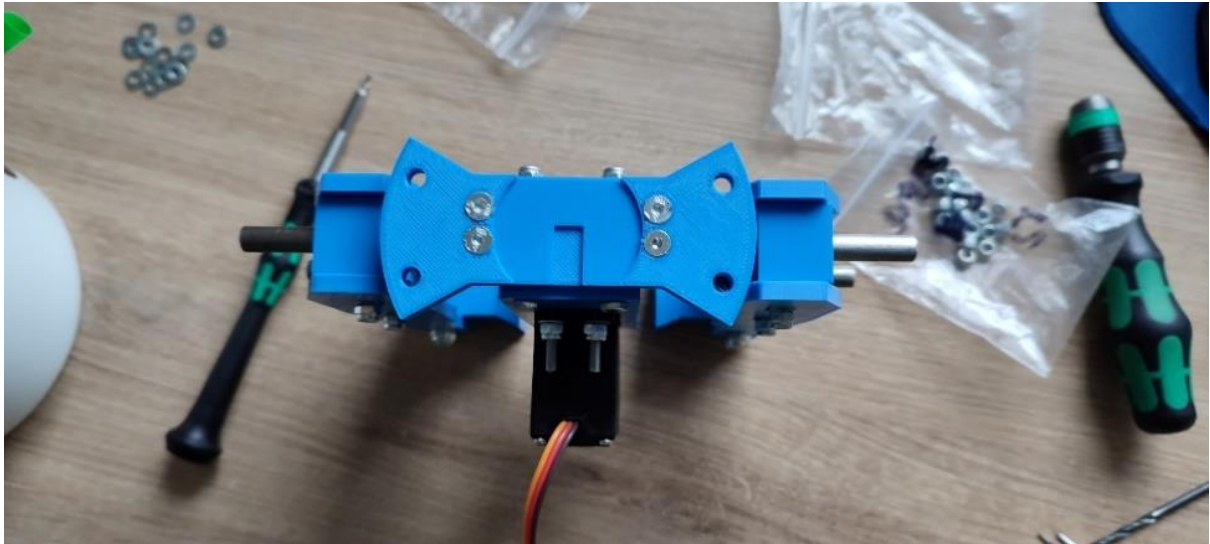
Dále umístíme vodící šroub na místo. Ten, který jsem měl k dispozici, byl o něco delší, tak jsem ho pomocí ruční pilky na kov zkrátil na 38 cm. Dále připevníme čtvrtý krokový motor. Zde použijeme hřídelovou spojku s redukcí z 5 mm na 8 mm pro připojení motoru k vodícímu šroubu. Nakonec protáhneme vodiče krytem a pomocí dvou šroubů kryt zajistíme s horní deskou.

Nyní je čas pro vysvazkování vodičů. Vodiče si před nejdříve označíme. Pro vysvazkování lze použít pásky suchého zipu, nebo spirálovou trubici.

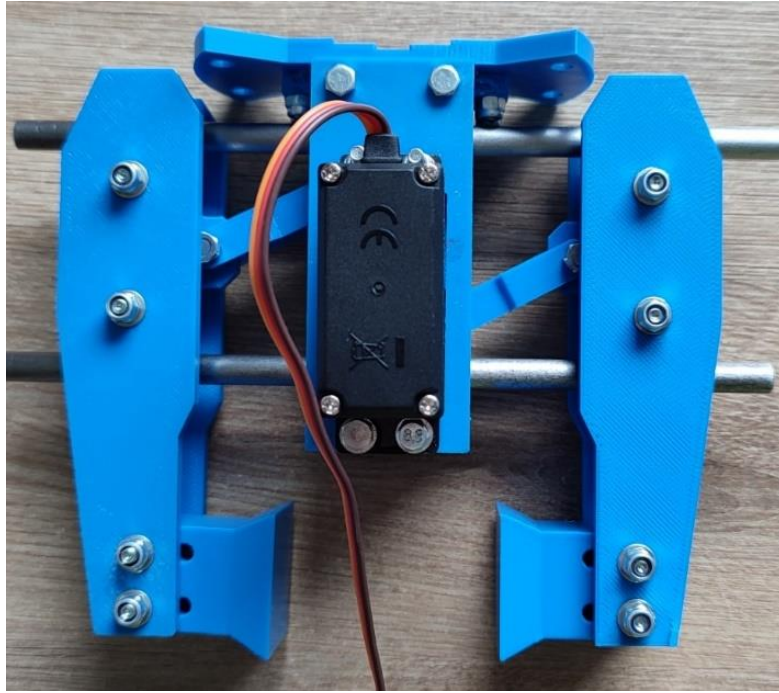
Nyní zbývá vyrobít koncový efektor robota. Můžeme vlastně vyrobít a připojit jakýkoli druh koncového efektoru k robotu. Rozhodl jsem se vyrobít jednoduché chapadlo, které je poháněno servomotorem MG996R. Chapadlo je založeno na dvou 6 mm hlazených tyčích, které slouží jako paralelní vedení a po kterých se obě strany chapadla posouvají.



*Obrázek 15- Vedení chapadla*



*Obrázek 14- Uchycení chapadla*



Obrázek 16 - Sestavené chapadlo

Dvě posuvné strany jsou spojeny se servem pomocí několika 3D tištěných dílů, šroubů a matic M3. Prostor pro zajištění šroubů a matic je poměrně těsný, takže na montáž těchto dílů je potřeba pečlivosti a trpělivosti. Design tohoto manipulátoru umožňuje instalaci různých efektorů. Mohou být širší nebo užší, nebo mohou mít specifický tvar. Chapadlo připevníme k ramenu robota pomocí šroubů a matic M4. Nakonec zapojíme servomotor k vodičům, které jsme nainstalovali dříve.

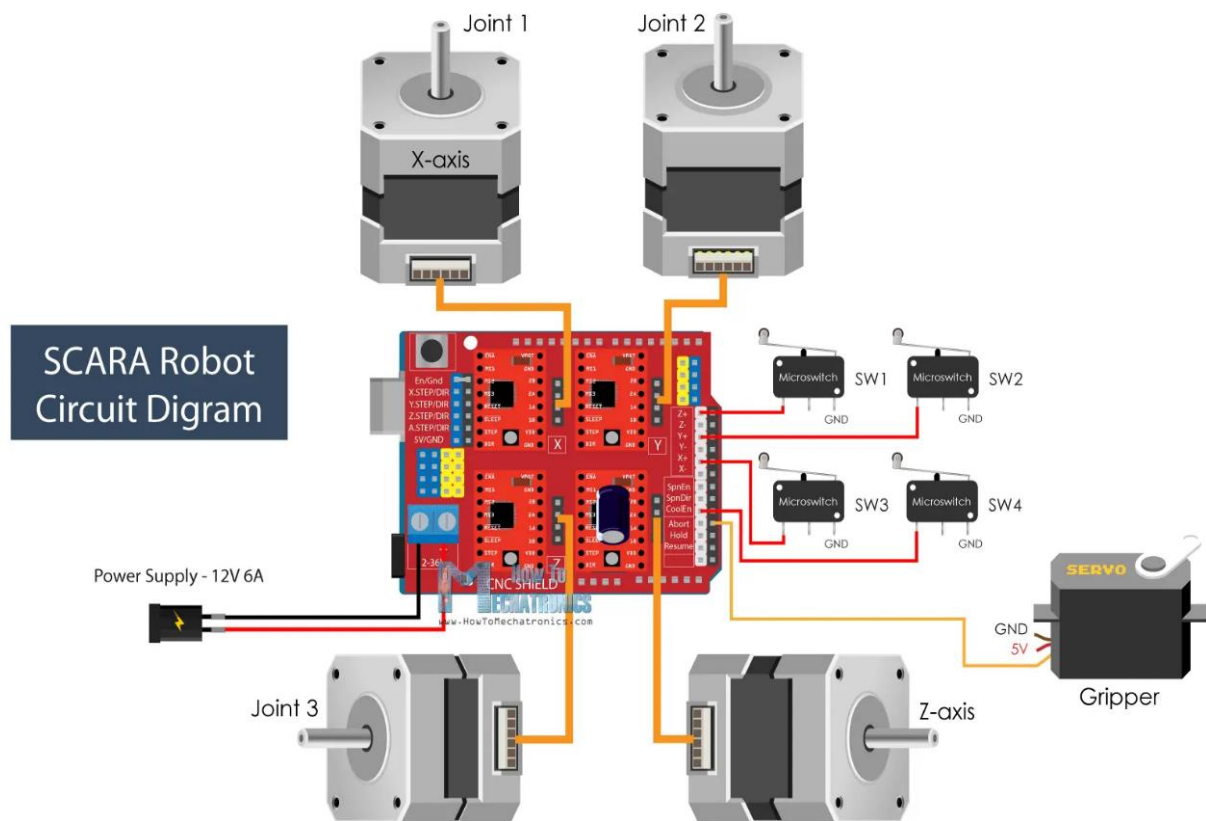
A je to, robotické rameno je kompletně sestaveno. Nyní zbývá připojit elektronické komponenty tohoto projektu.

## Schéma zapojení

Použijeme desku Arduino UNO v kombinaci s CNC štítem a čtyřmi krokovými drivery A4988.

Místo Arduino UNO bychom mohli použít také Arduino MEGA v kombinaci s řadičem RAMPS 3D tiskárny, nebo Raspberry PI v kombinaci s odpovídající deskou driverů.

Krabička pro Arduino UNO je navržena i pro umístění CNC desky, při instalaci vodičů je zde ale docela těsně.



Obrázek 17- Schéma zapojení robota

Komponenty potřebné pro elektronickou část:

- Krokový motor – NEMA 17
- Driver krokových motorů A4988
- Arduino CNC Shield
- Arduino Uno
- Servo MG996R
- Koncový spínač
- Zdroj 12V 4A

Pro napájení robota je zapotřebí 12V zdroj schopný poskytnout minimálně 4A, lépe 12V/6A. Proud závisí na tom, jak se nastaví omezení proudu driverů krokových motorů, Toto je potřeba provést dle použitých krokových motorů, nejlépe na cca 30-50% maximálního proudu.

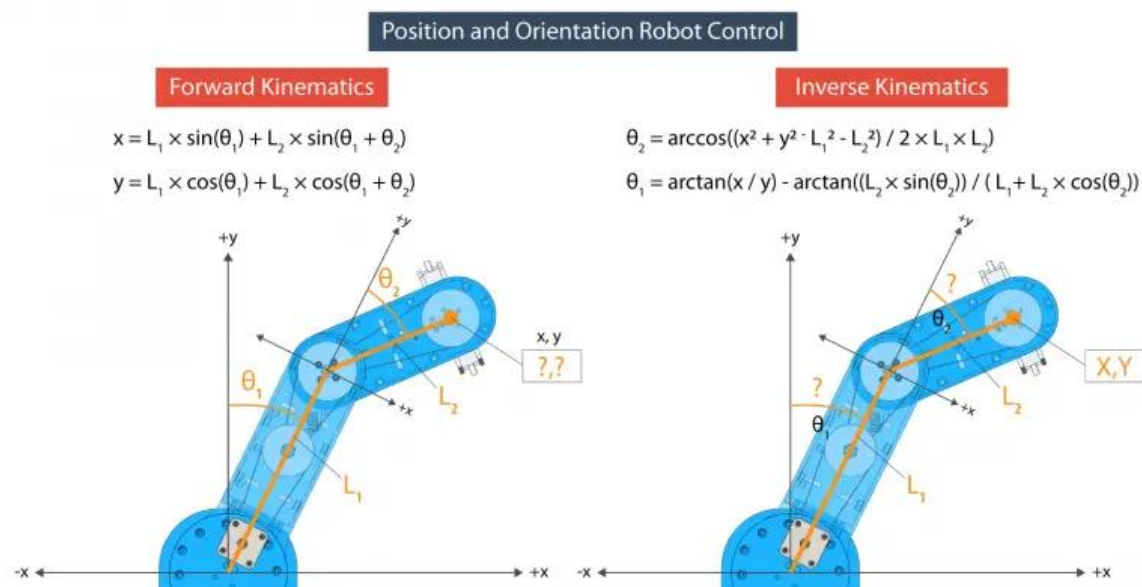
## Dokončení montáže

Robotický manipulátor je nyní dokončen a je potřeba mu zajistit pevnou základnu. Pro tento účel poslouží MDF deska s tloušťkou 25 mm. Na spodní straně desky základny vyvrtáme 12 otvorů dle výkresu základny. Na spodní straně je zapustíme, protože použijeme šrouby s plochou hlavou, aby lícovaly s povrchem dřeva. Vložíme matice M4 do drážek základny a poté připevníme dřevěnou základnu k základně robota.

## Jak funguje robot SCARA

Existují dva způsoby ovládání robotů z hlediska umístění a orientace, a to použití dopředné nebo inverzní kinematiky. Dopředná kinematika používá pro určení cílového bodu úhly jednotlivých ramen a jejich délky.

Pomocí inverzní kinematiky můžeme vypočítat kloubové úhly podle zadaných souřadnic.



Obrázek 18- Rovnice pro Dopřednou a Inverzní kinematiku

## Programování robota SCARA

Robot scara zjednodušuje programování díky tomu, že osa Z přímo definuje polohu, pro výpočty zůstávají osy X a Y, nemusíme tedy počítat kinematiku v prostoru, ale stačí v rovině.

```
// FORWARD KINEMATICS
void forwardKinematics() {
    float theta1F = theta1 * PI / 180; // degrees to radians
    float theta2F = theta2 * PI / 180;
    xP = round(L1 * cos(theta1F) + L2 * cos(theta1F + theta2F));
    yP = round(L1 * sin(theta1F) + L2 * sin(theta1F + theta2F));
}
```

Obrázek 19- Dopředná kinematika C++

S dopřednou kinematikou tedy vypočítáme hodnotu X a Y koncového efektoru podle nastavených kloubových úhlů dvou ramen robotů, theta1 a theta2, a také jejich délek L1 a L2.

Na druhou stranu u inverzní kinematiky vypočítáme kloubové úhly theta2 a theta1 podle dané polohy nebo souřadnic X, Y.

```
/ INVERSE KINEMATICS
void inverseKinematics(float x, float y) {
    theta2 = acos((sq(x) + sq(y) - sq(L1) - sq(L2)) / (2 * L1 * L2));
    if (x < 0 & y < 0) {
        theta2 = (-1) * theta2;
    }

    theta1 = atan(x / y) - atan((L2 * sin(theta2)) / (L1 + L2 * cos(theta2)));

    theta2 = (-1) * theta2 * 180 / PI;
    theta1 = theta1 * 180 / PI;

    // Angles adjustment depending in which quadrant the final tool coordinate x,y is
    if (x >= 0 & y >= 0) { // 1st quadrant
        theta1 = 90 - theta1;
    }
    if (x < 0 & y > 0) { // 2nd quadrant
        theta1 = 90 - theta1;
    }
    if (x < 0 & y < 0) { // 3d quadrant
        theta1 = 270 - theta1;
        phi = 270 - theta1 - theta2;
        phi = (-1) * phi;
    }
    if (x > 0 & y < 0) { // 4th quadrant
        theta1 = -90 - theta1;
    }
    if (x < 0 & y == 0) {
        theta1 = 270 + theta1;
    }
}
```

Obrázek 20 - Inverzní kinematika rozdělení kvadrantů výpočtu

V závislosti na tom, ve kterém kvadrantu je poloha nastavena, rozdělíme provádění programu. Pro tuto konfiguraci robota ve skutečnosti počítáme inverzní kinematiku pouze se dvěma články. Třetí úhel, který nazývám „phi“, se používá pro nastavení orientace chapadla.

Uživatelské rozhraní jsem vytvářel ve Visual studiu pomocí programovacího jazyku C#.

## Dokončování robota

Po nahrání kódu do Arduina a resetu by měl robot provést cyklus „home“ kde najede na koncové body, a nastaví se do výchozí pozice. Můžeme připojit jakýkoli druh koncového efektoru. Například můžeme k robotovi připojit hot end 3D tiskárny a udělat z robota 3D tiskárnu nebo připojit laserovou hlavu a udělat z něj laserovou řezačku.



## Závěr

Rád bych vám sdělil několik poznámek o tomto projektu. Zjistil jsem, že robot není tak tuhý, jak jsem očekával. Předpokládám, že problém je v tom, že téměř celý robot SCARA, osa Z a ramena jsou podepřeny pouze prvním kloubem. Celá hmotnost a setrvačné síly vznikající při pohybu mohou způsobit značné namáhání základny, kde se nachází první kloub, a protože je to jen plast, má tendenci se trochu ohýbat. Tyto pásy také nemají vůli, takže tím také snižujeme tuhost robota. Myslím si však, že celkový projekt je dostatečně názorný, abychom se naučili, jak roboti fungují, a dodá nám odvalu postavit si robota i pro sebe.

## Zdroje

SCARA Robot | How To Build Your Own Arduino Based Robot. *How To Mechatronics* [online]. Copyright © 2023 HowToMechatronics.com. All rights reserved. [cit. 15.04.2023]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/projects/scara-robot-how-to-build-your-own-arduino-based-robot/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1- Tisk dílů chapadla .....	9
Obrázek 2-Tiskárna Průša MK2S .....	9
Obrázek 3- Vytisknuté díly vlastního robota.....	10
Obrázek 4- Rozměry šroubů dle umístění.....	11
Obrázek 5- Sestavená základna.....	12
Obrázek 6- Pohled do základny .....	12
Obrázek 7- Krokový motor třetího kloubu.....	14
Obrázek 8- Detail napnutí ozubeného řemenu a napínacích kladek .....	14
Obrázek 9 - Napnutí řemene a průchod kabelů.....	15
Obrázek 10- Vedení kabelů kloubem.....	15
Obrázek 11- Sestava prvního ramene.....	16
Obrázek 12- Vedení vodičů, pomocný držák.....	16
Obrázek 13- horní deska osy Z .....	17
Obrázek 14- Uchycení chapadla .....	18
Obrázek 15- Vedení chapadla .....	18
Obrázek 16 - sestavené chapadlo.....	19
Obrázek 17- Schéma zapojení robota.....	20
Obrázek 18- Rovnice pro Dopřednou a Inverzní kinematiku .....	21
Obrázek 19- dopředná kinematika C++ .....	22
Obrázek 20 - Inverzní kinematika rozdělení kvadrantů výpočtu .....	22