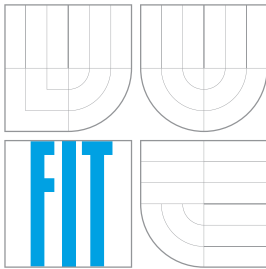


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

HEXAGONÁLNÍ PLATFORMA SE SERVOŘÍZENÍM

HEXAGONAL PLATFORM WITH SERVO CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Bc. TOMÁŠ KORGÓ

prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK

BRNO 2014

Abstrakt

Cílem práce je ukázka využití běžných modelářských RC serv a způsob jejich ovládání pomocí počítače. Pro demonstraci schopností serv je vytvořena Stewartova platforma, která využívá modelářské serva pro polohování platformy. V práci jsou vysvětleny principy vnitřního fungování serv, jejich vlastností, schopností a způsob jejich ovládání pomocí počítače. V praktických kapitolách je důkladně zdokumentovaný proces návrhu a tvorby funkční Stewartovy platformy, spolu s jejími specifickými vlastnostmi ovlivňujícími její návrh. Zároveň je tato platforma podrobena testům a na základě výsledků je ukázané, jaké jsou různé technické parametry této platformy, výhody a nevýhody využití modelářských serv pro její pohon. Návrh platformy, zdrojové kódy a jejich dokumentace, je vytvořený způsobem, aby byla vhodná pro umístění na různě veřejně dostupné internetové stránky agregující návody pro domácí tvorbu různých projektů a pro umožnění dalšího využití poznatků v praxi.

Abstract

Goal of the thesis is to show the possibilities of using ordinary hobbyist RC servos and means of their control by a computer. For demonstration of the capabilities of servos, we have created Stewart platform which is using hobbyist servos to position the platform. In the thesis there is explained principle of the inner working of a servo, their properties, abilities and also means of their control by a computer. In practical chapters of the thesis there is documented process of designing and implementing of functional Stewart platform along with specific properties of this platform which influence its design. This platform is also reviewed and based on the results we will show technical properties of the platform, advantages and disadvantages of using ordinary hobbyist servos to control the platform. Design of the platform and its documentation is created with respect to intent to make the design, source codes, documentation available to public on webpages focused on aggregating of instructables and tutorials to make usage of outputs possible in practice.

Klíčová slova

Hexagonální platforma, servo, Arduino, stewartova platforma, polohování platformy, inverzní kinematika

Keywords

Hexagonal platform, servo, Arduino, stewart platform, platform positioning, inverse kinematic

Citace

Tomáš Korgo: Hexagonální platforma se servořízením, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

Hexagonální platforma se servořízením

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka

.....

Tomáš Korgo
26. května 2014

© Tomáš Korgo, 2014.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	2
2	Súčasný stav a východiská pre návrh a implementáciu	4
2.1	Servo	4
2.2	PWM a riadenie serva pomocou PWM	10
2.3	Arduino	13
2.4	Stewartova platforma	16
3	Implementácia	24
3.1	Návrh a tvorba hardvérovej časti Stewartovej platformy	24
3.2	Zapojenie komponentov	36
3.3	Návrh softvéru	38
4	Výsledná platforma, testy jej vlastností	44
5	Záver	48

Kapitola 1

Úvod

Práca je zameraná na ukážku využitia modelárskych serv, ktoré sú bežne dostupné v modelárskych obchodoch aj na iné ako modelárske účely, a to v robotike s využitím počítača ako nástroja na riadenie. Servá, princípy ich práce a vlastnosti sú v práci podrobne opísané. Ukážka využitia v robotike je uskutočnená pomocou Stewartovej platformy, ide o šesťuholníkovú pohyblivú platformu – platformu, ktorú je možné rôzne posúvať a otáčať vo všetkých smeroch. Je to paralelný robot skladajúci sa z pevnej základne, na ktorej sú umiestnené riadiace prvky pohybujúce pohyblivou platformou – v tomto prípade ide o modelárske servá, a ktorý umožňuje manipuláciu s predmetom umiestneným na pohyblivej platforme umiestnenej paralelne k základni, pričom pohyb platformy je možný v 6-tich smeroch. Na túto pohyblivú platformu je možné umiestniť fotoaparát a tento vďaka nej polohovať. Jednotlivé servá sú riadené pomocou ľahko dostupnej prototypovacej platformy Arduino. Táto platforma je programovaná pomocou počítača a slúži ako prostriedok vykonávajúci riadenie a umožňujúci odoslanie správneho riadiaceho signálu servám.

Stewartova platforma je už aj v súčasnosti používaný nástroj v rôznych oblastiach, sú dostupné rôzne komerčné produkty využívajúce Stewartovu platformu. Taktiež z akademickej sféry a od autorov rôznych podomácky vytvorených platforiem je dostupné množstvo ukážok funkcie týchto platforiem, ale iba málo z nich použitý návrh zverejnilo alebo ho zverejnilo nekomerčne. Navyše sa tieto dostupné návody a návrhy často potýkajú s problémom nekompletnej dokumentácie, neuvedením zdrojových kódov potrebných pre riadenie platformy a množstvom iných vážnych nedostatkov. Preto je výsledný návrh platformy vytvorený v tejto práci zverejnený a kvalitne zdokumentovaný, nakoľko som sa vyvaroval opätovnému uskutočneniu tých istých chýb, ako som spozoroval u iných autorov. Taktiež je podľa môjho názoru potrebné, aby bol v dokumentácii uvedený aj postup návrhu, špecifiká, ktoré je nutné dodržať pre kvalitný návrh platformy, aby si záujemca o danú platformu bol schopný dostupnú platformu správne prispôsobiť pre vlastné potreby.

Táto téma je pre mňa nadmieru zaujímavá, nakoľko ako dlhoročný letecký modelár mám značné skúsenosti s použitím serv a ich schopnosťami z bežného používateľského hľadiska, ale presné princípy ich práce, technické vlastnosti a taktiež možnosti využitia v iných oblastiach boli pre mňa oblasťou s minimálnymi praktickými skúsenosťami. Taktiež ma práca zaujala aj tým, že sa nejedná čisto o softwarové riešenie, ale je nutný aj návrh fyzického zariadenia, čo je činnosť, ktorá ma vždy zaujímala.

V nasledujúcej kapitole práce sa nachádza súčasný stav skúmanej oblasti a popis teoretických a praktických východísk. V tejto časti sú podrobne opísané servá, princípy ich funkčnosti, zoznam ich hlavných súčastí, aké sú typy serv a taktiež ako sa riadia. Je tu opísaný systém riadenia pulznou moduláciou, aké má vlastnosti, kde sa bežne používa a

ako sa pomocou pulznej modulácie riadia servá. Následne je čitateľ oboznámený s prototypovacou platformou Arduino, jej základnými vlastnosťami a príčinami, prečo bola zvolená práve táto platforma. Nakoniec sa v tejto kapitole pozrieme na Stewartovu platformu, jej tvar, vlastnosti, súčasné využitie, ukážeme aj iných paralelných robotov a porovnáme ich so Stewartovou platformou, popíšeme základný princíp riadenia Stewartovej platformy. V tretej kapitole práce je opísaná implementácia a návrh. Táto kapitola sa v jednotlivých podkapitolách venuje návrhu platformy, zapojeniu a implementácii softvérovej časti. V podkapitole venovanej návrhu platformy sa nachádza podrobne zdokumentovaný postup návrhu platformy, umiestnenia a upevnenia riadiacich prvkov. Sú tu vysvetlené rôzne parametre navrhovanej platformy, prečo boli zvolené tak ako boli zvolené. Taktiež sú tu položené isté matematické základy definujúce vlastnosti a schopnosti platformy. V druhej podkapitole je ukázané ako zapojiť servá k arduinu, sú tu uvedené potrebné schémy prepojení serv a Arduina, a taktiež k napájaniu elektrickou energiou. V poslednej podkapitole je zbežne opísaný implementovaný riadiaci program Arduina, jeho jednotlivé funkcie – čo vykonávajú a prečo ich bolo nutné implementovať.

V štvrtej kapitole sa nachádza ukážka vzhľadu a funkcie výslednej platformy, sú tu testy jej reálnych vlastností, v závere je zhrnuté dosiahnutie požadovaných cieľov.

Kapitola 2

Súčasný stav a východiská pre návrh a implementáciu

V tejto kapitole sa nachádzajú východiská použité pre praktickú časť práce. Je tu podrobne vysvetlené fungovanie serv, súčiastky, z ktorých sa skladajú, spôsob ich riadenia. Venujeme sa tu taktiež pulznej modulácii, ktorá sa využíva na riadenie serv, Arduinu ako použitej vývojovej platforme. Arduino predstavuje mikropočítač, ktorý je plne autonómny a vykonáva výpočty a riadenie platfomy, preto aj platforma je samostatne plne funkčná a riadenie je ľahko rozširiteľné o ďalšie funkcie. Nakoniec sa v tejto kapitole venujeme Stewartovej platforme, nachádza sa tu opis jej tvaru, vlastností, oblastí využitia tejto platformy v súčasnosti a porovnáme ju s inými paralelnými robotmi.

2.1 Servo

Servomotor je motor, ktorý vďaka signálom chybovej spätnej väzby vie zistiť a kontrolovať pozíciu otočenia výstupnej osi, občas aj rýchlosť otáčania výstupnej osi. Servomechanizmus je označenie úzko späté so servomotorom, servomechanizmus označuje akékoľvek zariadenie využívajúce chybovú spätnú väzbu pri riadení efektoru. To znamená, že servomotor je servomechanizmus, využíva mechanizmus uzavretej slučky, ktorá pomocou signálu obsahujúceho aktuálnu pozíciu otočenia výstupnej osi a zo vstupu získaného riadiacieho signálu reprezentujúceho požadovanú polohu výstupnej osi kontroluje svoj pohyb do požadovanej pozície a jej udržanie. Mechanizmus využívajúci otvorenú slučku vykonáva sériovo príkazy, nie je schopný reagovať na aktuálny stav, keďže neobsahuje spätnú väzbu. Servomotor nie je riadený priamo riadiacim signálom od používateľa, ale servomotor vo všeobecnosti obsahuje kontroler, ktorý na základe vstupného signálu od používateľa a signálu reprezentujúceho aktuálnu polohu (prípadne rýchlosť) výstupnej osi vypočíta odchýlku–chybu, až táto odchýlka je vhodným spôsobom prekonvertovaná na riadiaci signál pre motor. Riadiaci signál pre servomotor môže byť digitálny alebo analógový. Pojem servo je všeobecne používaná skratka pre servomechanizmus, keďže aj servomotor je servomechanizmus, tak aj naň je táto skratka platná.[12]

Servá môžu mať mnoho rôznych foriem, veľkostí. Servá sa široko uplatňujú v rôznych oblastiach, ako napríklad CNC stroje, na pozicionovanie antén, diaľkovo-ovládané lietadlá, moderné pevné disky obsahujú magnetický servomechanizmus, fotoaparáty pre autofokus, v priemyselných strojoch na vykonávanie komplexných pohybov a ešte mnohé iné. Servá zvyčajne používajú elektrickú energiu na tvorbu mechanickej sily, ale taktiež existujú aj

servá využívajúce iné princípy, ako napríklad hydraulický, magnetický, pneumatický. Zároveň je potrebné servá deliť podľa typu výsledného pohybu – ten môže byť rotačný alebo lineárny, zvyčajne sa jedná o rotačný pohyb (keďže servomotory sú najrozšírenejší zástupcovia servomechanizmov a servomotory sú zvlášť vhodne usporodbené na tvorbu rotačného výsledného pohybu). Lineárne servá zvyčajne používajú buď lineárny motor, alebo bežný (prípadne krokový) motor pričom jeho rotačný pohyb je premenený na pohyb lineárny.

Servomotorom sú podobné krokové motory – motor, ktorý má celú otáčku okolo osi rozdelenú na viacero častí. Motoru je možné signálom prikázať, aby sa posunul na určitú časť alebo sa otočil o určité množstvo častí, ale keďže krokové motory neobsahujú žiadnu spätnú väzbu, tak nie sú servomechanizmom, ich riadenie je typu otvorenej slučky. Avšak krokové motory sa často využívajú pri tvorbe komplexných servomechanizmov, vďaka tomu, že sa v rámci daného servomechanizmu rozširujú o prvky umožňujúce spätnú väzbu. Servá predstavujú vysokovýkonnú alternatívu voči krokovým motorom, nakoľko krokové motory aj keď majú isté vlastnosti umožňujúce kontrolovať pozíciu otočenia osi, bez spätnej väzby je ich pozicionovanie spoľahlivé iba ak je záťaž hlboko v ich limitoch, v opačnom prípade by mohlo prísť k preskočeniu krokov, čo by znamenalo chybu v riadení pozície.

Modelárske servá

Modelárske servá, ktoré sú využívané v tejto práci, predstavujú zástupcov kategórie takzvaných RC serv, skratka RC znamená “radio control”, tj. diaľkovo ovládaný, spojenie RC servo vzniklo na základe toho, že servá sa používajú v modelárstve prakticky výhradne na ovládanie diaľkovo ovládaných modelov, či už sa jedná o modely lodí, lietadiel alebo helikoptér, všetky sú ovládané pomocou serv rovnakého typu, líšia sa prakticky iba vo veľkosti. Týmto servám sa budeme detailne venovať v ďalšej časti.

Na obrázku č. 2.1 vidíme ukážku klasického RC serva. Na bočných stranách serva je vidieť upevňovacie otvory, pomocou ktorých sa servo upevňuje do modelu. V balení serv sú vždy pribalené samorezné skrutky vhodné na upevňovanie daného serva do väčšiny materiálov. Väčšie servá, respektíve servá s obsiahlejším príslušenstvom, obsahujú v balení aj protivibračné vložky do upevňovacích otvorov, aby sa eliminoval prenos vibrácií zo serv a na servá. Vo vrchnej časti serva sa nachádza výstupná os, tá má na sebe ozubenie pre umožnenie pevného pripojenia rôznych pák, do ktorých sú vyvedené tiahla ovládacích prvkov modelov. Páka sa taktiež zaistuje voči odpadnutiu z osi pomocou skrutky. Pri kúpe serva sú rôzne základné typy pák súčasťou balenia, tieto základné páky bývajú z pomerne mäkkého plastu, ktorý je pre mnoho použití nedostatočne pevný, čo sa prejavilo aj v prípade nami navrhovanej platformy. Pre tieto prípady je možnosť zaobstarať rôzne pevnejšie páky, typicky sa jedná o páky z hliníku alebo jeho zliatin, poprípadne modelármi zameranými na helikoptéry sú veľmi obľúbené páky z uhlíku, ktoré vynikajú pevnosťou pri zachovaní nízkej hrúbky, nízkou váhou a v neposlednom rade estetickou stránkou.[2]

Bežne dostupné RC servá sa hlavne líšia kvalitou, váhou, veľkosťou a samozrejme cenou. V kategórii kvality sú podstatné technické parametre ako je rýchlosť, sila, odber prúdu, týmto parametrom sa budeme neskôr venovať presnejšie. Veľmi podstatným kvalitatívnym parametrom serv je aj kvalita spracovania, kvalitnejšie servá ponúkajú spravidla kvalitnejšie súčiastky, lepšie materiály obalu serva, kovové alebo karbonitové ozubenie, ložiská na jednotlivých osiach a podobne. Tieto parametre dokážu veľmi ovplyvniť kvalitu funkcie serva pri určitých prípadoch nasadenia. Lacné a nekvalitné servá často trpia rôznymi problémami, napríklad: veľmi nízky počet možných polôh otočenia výstupnej osi, nedostatočne pevné upevnenie výstupnej osi spôsobujúce nadbytočnú vôľu na páke, nízka rýchlosť



Obrázok 2.1: Pohľad na bežné RC servo.¹

a taktiež problémy s dlhodobou výdržou daných serv. Treba ale poznamenať, že nie vždy je potrebné nasadzovať kvalitné servo, respektíve použitie menej kvalitného serva s horšími vlastnosťami neovplyvňuje dostatočne negatívne plnenie jeho funkcie, ale podstatnou výhodou je jeho nižšia cena (takéto servá môžu byť použité na rôzne doplnkové funkcie, napríklad na ovládanie bombovnic pri maketách lietadiel, poprípade do lietadiel určených na rôzne formy “dog fightingu” – boju lietadiel, kde je riziko poškodenia lietadla pomerne vysoké). Ďalšou výhodou kvalitnejších serv (aj niektorých extrémne rozšírených lacných serv ako je napríklad servo HS55) je dostupnosť niektorých náhradných dielov ako sú napríklad ozubené kolesá, vďaka tomu je možné staršie servá s opotrebovaným ozubením zreparovať bez potreby kúpy nového náhradného serva. Rôzne servá majú aj rôzny rozsah pohybov, tento rozsah je zvyčajne z rozsahu 90° až 180°, často sa aj odvíja od kvality serva. Váha a veľkosť (a sila serva) sú parametre úzko previazané a je to prvý a najpodstatnejší parameter, podľa ktorého sa bežne vyberá servo pri nákupe. Preto sú servá väčšinou v obchodoch rozdelené do váhových kategórií (tieto kategórie nie sú štandardizované, ale väčšina predajcov serv podľa nich delí predávaný tovar):

- Mikro servá – váha serva sa nachádza v rozmedzí 0-10g
- Mini servá – váha serva sa nachádza v rozmedzí 10-30g
- Štandardné servá – váha serva sa nachádza v rozmedzí 30-50g
- X-tra veľké servá – váha serva je viac ako 50g

Potrebná kategória serva sa určí podľa prípadu nasadenia serva – je nutné správne odhadnúť potrebnú silu serva (a výkon serva dostatočne naddimenzovať), určiť maximálnu možnú váhu serva pre dané nasadenia a podľa toho vybrať vhodnú váhovú kategóriu a uistiť sa, že dané servo spĺňa požiadavky na silu.

Parameter sila serva je definovaný takto: je to maximálne množstvo rotačnej sily, ktorú je schopné servo dosiahnuť. Tento parameter by mal byť výrobcami špecifikovaný jednou z týchto dvoch jednotiek – oz/in alebo kg/cm. Sila serva v kg/cm označuje, akú tlačnú/ťahovú silu je schopné servo dosiahnuť na konci páky serva dlhej 1cm. Napríklad servá HS422, ktoré sú použité v navrhutej platforme majú silu definovanú výrobcami takto: 4.8V 3.3kg/cm 6.0V 4.1kg/cm, čiže pri napätí 5V je sila serva 3.44kg/cm, pri použití páky dlhej 2.5cm je sila serva na konci páky 1.37kg. Ďalší podstatný parameter výkonu serva je jeho rýchlosť: rýchlosť serva je čas nevyhnutný na otočenie výstupnej osi serva o daný počet stupňov.

¹ zdroj: http://www.servocity.com/assets/images/HS-5056MG_servo.jpg

Štandardne sa udáva v $s/60^\circ$, nami použité servá majú výrobcom udané tieto hodnoty: 4.8V 0.21s/60° 6.0V 0.16s/60° bez záťaže. [13]

Existujú ešte aj rôzne špecifické RC servá, ktoré sú určené na zvláštnu funkciu pre ktorú sú prispôbené, napríklad servo pre ovládanie podvozku disponuje veľkou silou, lepším pomerom váha-sila než bežné servá, ale zároveň je násobne pomalšie ako bežné servá, poprípade sú rôzne extra rýchle servá určené do helikoptér, veľmi ploché servá, ktoré sú určené na ovládanie pohyblivých prvkov na krídlach lietadiel s nízkym profilom, servá pre robotov (dokážu cez signálnu linku vrátiť aktuálnu polohu).

RC servá sa vo všeobecnosti skladajú z 5-tich hlavných častí – ozubeného prevodu, potenciometru, motoru, obalu, riadiacej elektroniky. Na obrázku 2.2 je ukázané ako servo vyzerá po demontovaní, teraz nasleduje popis jednotlivých častí.[12]

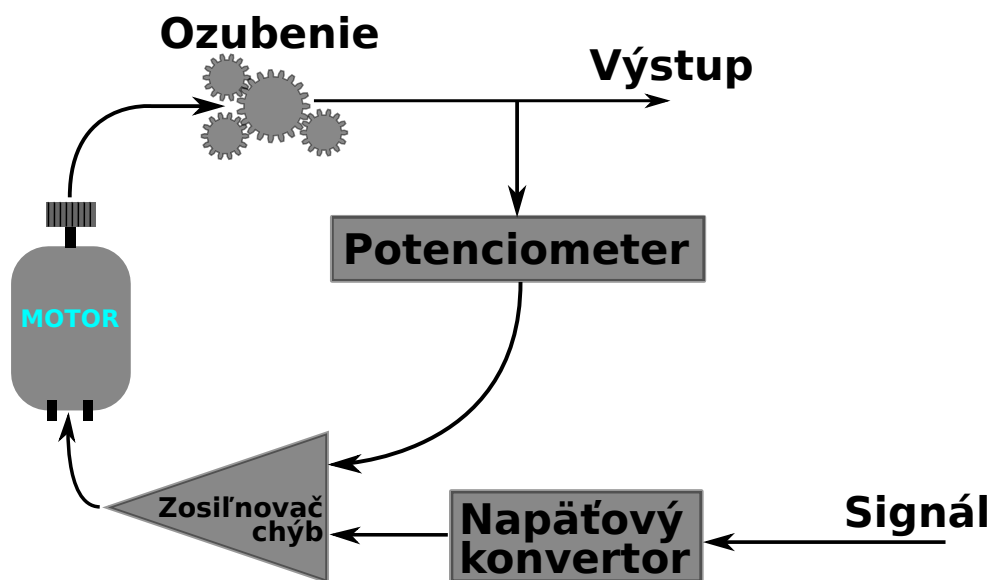
- Ozubený prevod – redukuje vysoké otáčky motoru na nízke otáčky potrebné pre výsledné ovládanie, zároveň tieto prevody zvyšujú silu serva, vďaka tomu aj veľmi slabý motor dokáže vyvinúť pomerne veľkú silu na výstupnej osi.
- Potenciometer – RC servá používajú pre zistenie aktuálnej polohy výstupnej osi pre spätnú väzbu pozíciu potenciometru, tento potenciometer je zároveň hriadeľou výstupnej osi alebo je s ňou prepojený ozubeným kolieskom, čiže stupeň jeho otočenia je zároveň vždy aj stupňom otočenia výstupnej osi. Kvalita a presnosť tohto potenciometra priamo ovplyvňuje jemnosť a presnosť pohybov serva, zároveň je to súčiastka, ktorá sa kazí na serve najčastejšie. Väčšinu serv je možné s minimálnym množstvom úprav upraviť na servo s nekonečnou rotáciou – zvyčajne stačí odstrániť mechanickú záťažku a potenciometer nahradiť rezistori s pevným odporom, vďaka tomu servo vždy po obdržaní riadiaceho signálu začne vykonávať rotáciu do určitého smeru, výhodou je, že rýchlosť otáčania je riadená obdržaným signálom.
- Motor – v RC servách sa nachádza jednosmerný motor, ktorý slúži na pohon, rýchlosť otáčania motora a smer je riadený PWM signálom z riadiacej elektroniky.
- Plastový obal – obal, ktorý drží celé servo v celku, chráni vnútorné prvky pred mechanickým poškodením.
- Riadiaca elektronika – táto elektronika obdržiava signály od používateľa, zároveň vďaka priamemu prepojeniu s potenciometrom vie aj aktuálne otočenie výstupnej osi serva. Vypočíta chybovú odchylku, ktorú následne vhodne prekonvertuje na napäťové signály poskytované motoru.



Obrázok 2.2: Pohľad do vnútra serva. 1. *gears* = ozubený prevod, 2. *potentiometer* = potenciometer, 3. *motor* = motor, 4. *electronics* = riadiaca elektronika²

Princíp fungovania serva

V tejto podkapitole sa nachádza zhrnutie princípu práce RC serva pomocou blokového diagramu bežného serva:



Obrázok 2.3: Blokový diagram bežného serva

²zdroj: http://lizarum.com/assignments/physical_computing/images/basics/components/servo/insides.png

Napájací zdroj Aj keď nie je špecificky označený v blokovom diagrame (keďže nie je priamou súčasťou serva), servo potrebuje napájanie, aby fungovalo. Väčšina RC serv je navrhnutá tak, aby pracovali v rozsahu napätí 4.8V-6V (tieto napätia sú odvodené z napájania pomocou štyroch respektíve piatich nabíjajúcich batérii typu AA s napätím 1.2V). Je možné nájsť aj špecifickejšie servá určené pre nižšie, respektíve vyššie napätia. Čím je vyššie napájacie napätie, tým je servo silnejšie a rýchlejšie, ale po presiahnutí limitov určených výrobcom, môže dôjsť (a rýchlo aj dôjde) k poškodeniu serva.

Signálna linka Taktiež sa nazýva aj kontrolná linka serva, je pripojená ku riadiacemu kontroleru (prijímač v modeli, Arduino, PWM modulátor, počítač, . . .), ktorý posiela zakódované pulzy, tie označujú, na akú pozíciu by sa mala výstupná os otočiť. Táto procedúra je známa ako modulácia šírkou pulzu. Cez túto linku sú posielané servu príkazy od používateľa. Servá očakávajú impulz každých 20ms, a dĺžka tohto impulzu označuje, ako sa má výstupná os serva otočiť. Napätie na signálnej linke by malo byť z rozsahu 3V-5V pre indikáciu impulzu. Požadované impulzy môžu byť vytvorené pomocou časovacieho integrovaného obvodu alebo od mikrokontroleru. Spôsob riadenia serva je presnejšie rozobraný v nasledujúcej podkapitole.

Napáťový konvertor Tento dekodovací obvod prekonvertováva vstupný impulz na jemu odpovedajúce napätie, ktoré ďalej posiela do zosilňovača chyby.

Potenciometer Potenciometer sa v serve správa ako senzor pozície, ktorý zisťuje pozíciu otočenia výstupnej osi serva. Hriadeľ potenciometra je výstupnou osou serva (alebo je s ňou prepojená pomocou ozubených koliesok). Keď sa točí os serva, točí sa aj potenciometer a tým je zmenený aj jeho odpor. Každý uhol otočenia je adekvátny určitému odporu potenciometra, tento aplikovaný odpor medzi napájacími vetvami potenciometra produkuje na výstupe napätie proporcionálne veľké voči odporu, toto napätie je ďalej posielané do zosilňovača chyby pre porovnanie.

Zosilňovač chýb Je napáťový komparátor, ktorý na vstupe prijíma vstupné napätie z napáťového konvertora a potenciometru. Rozdiel medzi týmito dvoma napätiami je zosilnený a použitý pre napájanie motoru, ktorý otáča výstupnou osou (a taktiež potenciometrom). Ak je napáťový rozdiel pozitívny, motor sa točí do jednej strany, ak záporný, tak sa točí do opačnej strany, až dokým sa napáťový rozdiel neminimalizuje, čo značí, že sme dosiahli správnu pozíciu otočenia výstupnej osi. Čím vyšší je napáťový rozdiel, tým silnejšie tento obvod napája motor a núti ho otáčať sa rýchlejšie, ak je rozdiel malý, tak sa motor točí pomaly.

Motor a ozubený prevod Rotácia motora sa pomocou ozubeného prevodu preniesie na adekvátne otočenie výstupnej osi serva. [12]

V posledných rokoch sa veľmi rozširujú tzv. “digitálne servá”, ktoré oproti klasickým “analogovým” servám poskytujú určité výhody (ale aj nevýhody). Digitálne servá sa od analogových serv fyzicky nelíšia, skladajú sa z tých istých častí, rozdiel je iba v riadiacej elektronike. V analogovom serve v stave klúdu nie je servomotoru posielané žiadne napätie, keď riadiaca jednotka obdrží signál pre zmenu otočenia alebo na servo bola aplikovaná dostatočná sila, aby sa vychýlilo z danej pozície, riadiaca jednotka pošle motoru v serve

napäťové impulzy (maximálneho možného napätia) o rôznej dĺžke s pevnou frekvenciou 50hz, dĺžka impulzu riadi výkon a rýchlosť motoru. Preto impulzy poskytované motoru pri malej chybovej odchylke sú veľmi krátke a nedostatočne často sa opakujúce, z toho vyplýva tzv. “mŕtva zóna”, v ktorej sa servo nepohybuje vôbec, alebo iba veľmi neochotne. Digitálne servá na druhú stranu posielajú motoru signály s ďaleko vyššou frekvenciou 300hz, samozrejme dĺžka impulzov je voči analógovému servu adekvátne kratšia, vyššia frekvencia ale spôsobí, že motor má vyššiu stimuláciu pre pohyb aj pri nízkych odchýlkach polohy. Toto zároveň spôsobí to, že motor rýchlejšie reaguje na signál, čo spôsobuje lepšiu akceleráciu/-deakceleráciu, rýchlejšie reakcie na signály od používateľa, lepšie udržovanie danej pozície, lepšie rozlíšenie a menšiu mŕtvu zónu. Hlavnou nevýhodou digitálnych serv je vyššia spotreba energie a taktiež vyššia cena oproti analógovým servám. Digitálne servá majú vcelku zaujímavú vlastnosť – kvôli vyššej frekvencii vydávajú pisklavé tóny pri pohyboch. Kvalitné digitálne servá umožňujú aj dodatočné naprogramovanie riadiacej elektroniky, vďaka čomu je možné zmeniť interpretáciu vstupného signálu riadiacou elektronikou.[3]

2.2 PWM a riadenie serva pomocou PWM

PWM je skratka pre “pulse width modulation”, ide o moduláciu šírkou impulzu, v texte sa ďalej bude používať skratka PWM. PWM je modulované pomocou obdĺžnikovými vln. Táto modulácia ovplyvňuje frekvenciu a striedu (“duty cycle”) signálu. PWM signál sa charakterizuje pomocou týchto dvoch parametrov, amplitúda signálu zostáva stabilná v priebehu času. Frekvencia je určená v Hz a strieda sa zvyčajne udáva v %. [7]

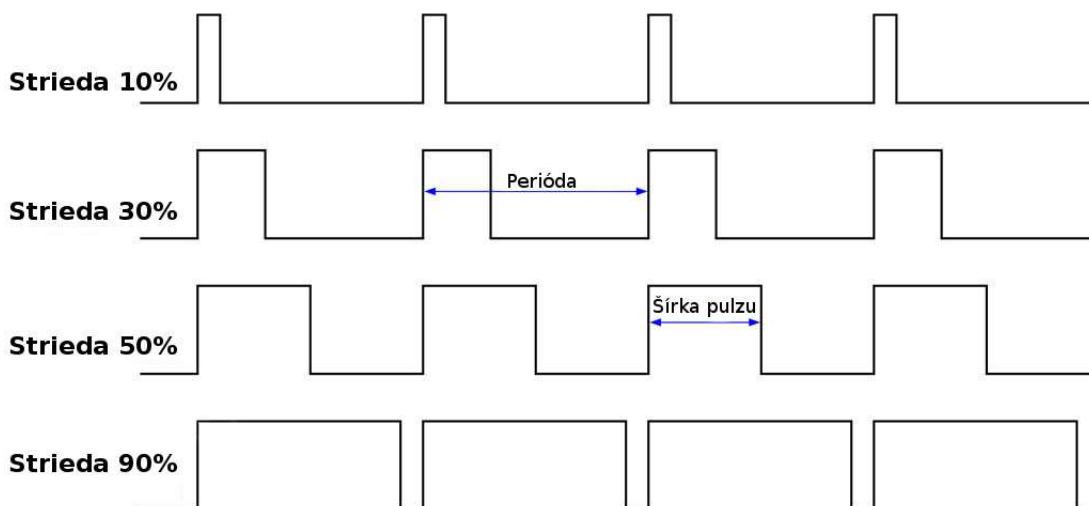
Na obrázku 2.4 si vysvetlíme pojmy frekvencie a striedy signálu. Frekvencia signálu PWM v Hz, určuje ako často sa opakuje strieda signálu, perióda (“period”) je vypočítaná pomocou vzorca:

$$t_{(p)} = \frac{1}{f}$$

kde $t_{(p)}$ predstavuje čas jednej periódy signálu v sekundách a f je frekvencia PWM signálu v Hz. Strieda predstavuje šírku impulzu (z toho pochádza aj názov modulácia šírkou impulzu), je to percentuálna časť jednej periódy, počas ktorej je signál na vysokej úrovni. Ako vidíme na obrázku 2.4, všetky štyri signály majú rovnakú periódu (frekvenciu), líšia sa iba v striede, pri rôznych striedach sa mení šírka impulzu (“pulse width”), kde šírka impulzu je časové vyjadrenie dĺžky striedy vypočítané pomocou vzorca:

$$t_{(pw)} = t_{(p)} * \frac{dc}{100}$$

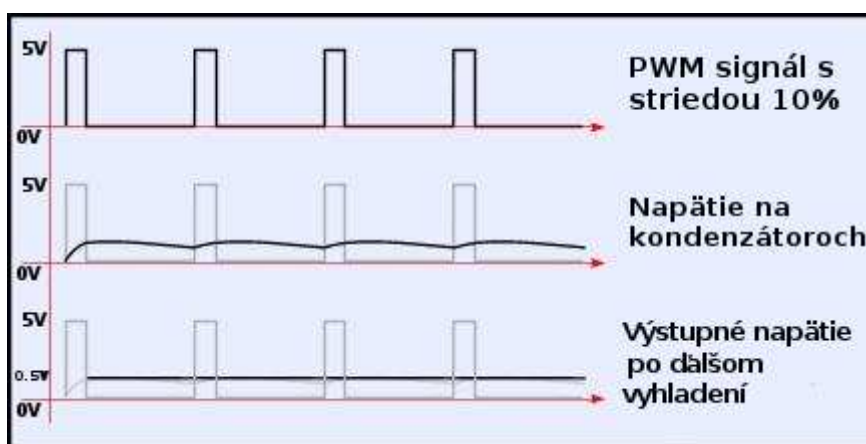
kde $t_{(p)}$ je dĺžka periódy, dc predstavuje striedu udanú v %.



Obrázok 2.4: Ukážka rôznych PWM signálov³

PWM sa používa na rôzne účely:

Regulovanie napájania Jedno z najčastejších použití je regulovanie napájania poskytovaného záťaži. Táto záťaž môže byť napríklad LED, kde vďaka PWM sme schopní regulovať jas danej LED diódy, poprípade na regulovanie výkonu poskytnutého jednosmernému motoru. Idea regulovania výkonu pomocou PWM je pomerne jednoduchá, pri 100% striede bude poskytnutý výkon 100%, keďže PWM signál bude tvoriť neustále vysoká úroveň signálu. Ale pri rôznych striedach sa mení poskytovaný výkon PWM signálom, keďže sa mení šírka impulzu, počas ktorého poskytujeme napájanie záťaži. Bežne sa PWM signál privádza do záťaže cez pomocný kondenzátor a dodatočnú filtráciu, vďaka ktorej je poskytované napätie vyhladené a premenené na výšku napätia adekvátnu k pracovnej perióde a výške vysokej úrovne signálu. Toto je demonštrované na obrázku 2.5. Takýmto spôsobom riadi aj riadiaca elektronika serva výkon motora v serve.[7]

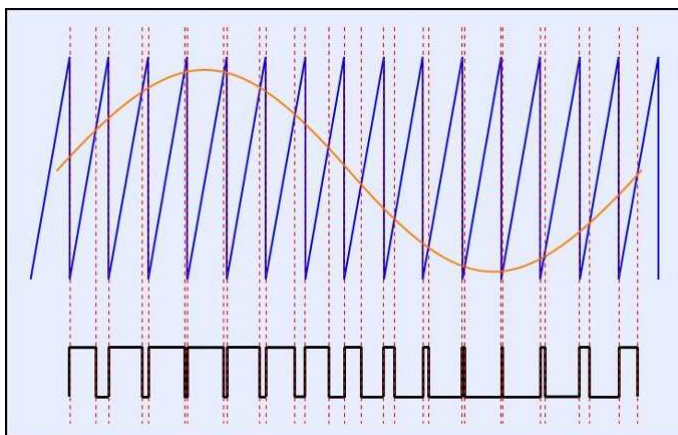


Obrázok 2.5: Ukážka použitia PWM signálu pre regulovanie napájania

³zdroj: http://d32zx1or0t1x0y.cloudfront.net/2011/06/atmega168a_pwm_02_lrg.jpg

Prenos digitálneho signálu Pomocou PWM môžeme namodulovať digitálny signál do PWM signálu. Pre to využijeme vhodnú frekvenciu PWM signálu, jednotlivé binárne hodnoty budeme v PWM signále modulovať dvoma rôznymi hodnotami striedy, napríklad hodnotami 20% pre nízku úroveň, 80% pre vysokú úroveň. Hodnoty 0% a 100% nie sú vhodné, tento PWM signál by pri dlhšom počte za sebou idúcich rovnakých hodnôt 0 resp. 1 sťažoval udržanie správneho časovania. Navyše je prenos digitálneho signálu cez PWM možné spojiť aj so schopnosťou napájať pripojené koncové zariadenie, keď sa na prepojenie použijú dva káble posielajúce vhodný PWM signál.[7]

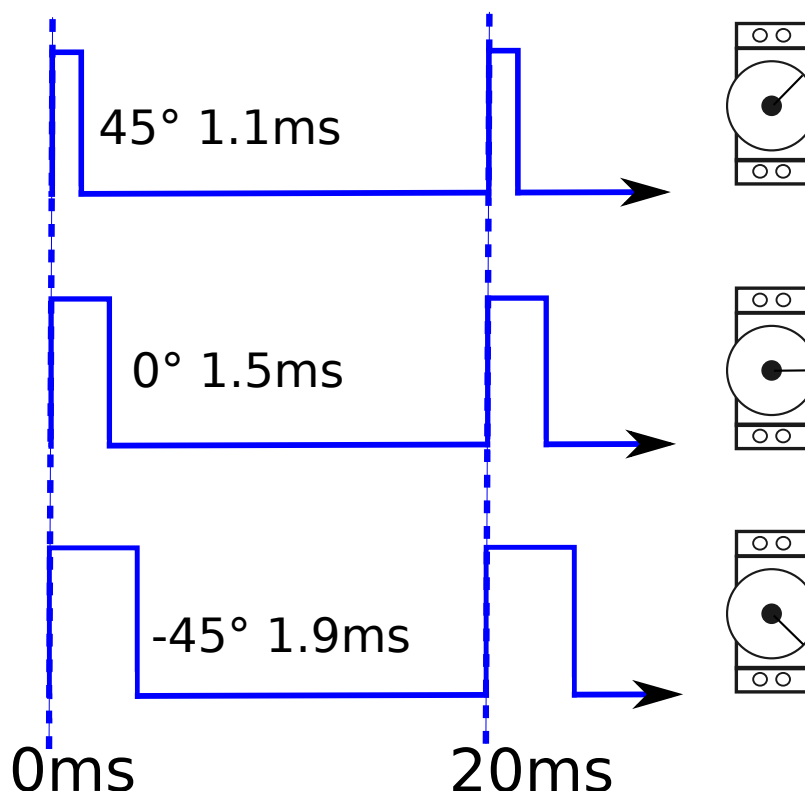
Prenos analógového signálu Pomocou PWM je možné modulovať aj analógový signál. Metóda určenia výšiek striedy pri danej frekvencii a analógovom signále je viacero, pre jednoduchú názornú ukážku si ukážeme modulovanie križovaním na obrázku 2.6.



Obrázok 2.6: Ukážka modulácie analógového signálu pomocou PWM

Na riadenie RC serv sa používa PWM. Frekvencia riadiaceho PWM signálu je 50Hz, čo znamená, že dĺžka periódy je 20ms. V prípade, že servo neobdrží žiadny impulz, prestáva držať svoju pozíciu, ak je na páku serva aplikovaný dostatočný tlak, tak sa vychýli bez toho, aby sa ju motor snažil vrátiť naspäť. Vo všeobecnosti sú servá k PWM signálu pomerne zhovievavé, aj signál s vyššou frekvenciou ako je 50Hz vyhodnotia správne, pre servá je v týchto prípadoch podstatná iba šírka impulzu, taktiež zvyčajne tolerujú aj dlhšiu dobu periódy, niektoré servá fungujú správne aj pri frekvencii 30Hz. Štandardom je spomínaných 50Hz, miera tolerancie k odchýlkam je rôzna a závisí iba od výrobcu daného serva, preto sa na ňu nie je vhodné spoliehať. Šírka impulzu pri servách v základných rozsahoch sa udáva zvyčajne od $1000\mu s$ po $2000\mu s$, kde $1500\mu s$ je vždy stredová pozícia otočenia serva. Servá podporujú aj takzvaný “overdrive” čo znamená, že pracujú s väčším rozmedzím šíriek impulzu, napríklad od $600\mu s$ - $2400\mu s$, zvyčajne je celkový rozsah pohybu s pomocou “overdrive” približne 120° - 180° . Špecifické hodnoty rozsahu je nutné nájsť v dokumentácii serva (alebo manuálnym otestovaním). Základný rozsah sa udáva 90° , čiže $\pm 45^\circ$ od stredovej pozície, preto výrobca zvyčajne udáva počet μs impulzu potrebných na otočenie o 45° . Servo HS422 použité pre tvorbu platformy má od výrobcu definovaný základný rozsah pohybov takto: 45° otočenie je ekvivalentné impulzu šírky $400\mu s$. Definujme stredovú polohu serva ako 0° otočenie, potom pre otočenie na pozíciu -45° je nutné vyslať servu signál so šírkou impulzu $1100\mu s$ a pre otočenie na pozíciu 45° to je šírka impulzu $1900\mu s$, toto servo podporuje aj širší rozsah pohybov, ale presný rozsah možných dĺžok impulzov sa nenachádza v

oficiálnej dokumentácii od výrobcu, preto jeho zistenie je možné iba manuálne. [12]



Obrázok 2.7: Ukážka riadiaceho signálu PWM pre riadenie serva HS422 v základnom rozsahu

Samotný výstupný PWM signál je generovaný jednoducho pomocou digitálneho výstupu Arduina (alebo iného zariadenia). Digitálny výstup už sám z princípu je dvojúrovňový, tak ako je nevyhnutné pre tvorbu PWM signálu. Preto pre odoslanie vysokej úrovne PWM signálu stačí poslať na výstup zo zariadenia “1”, pre nízku úroveň odošleme “0”. Zostáva už iba riadenie dĺžky impulzov. V prípade generovania pomocou počítača, je dĺžka odvodená od hlavných riadiacich hodín. Určitý počet hodinových cyklov bude na výstup odosielaná “1” pre reprezentovanie striedy, následne bude odosielaná “0” tak dlho, aby sa dodržala dĺžka periódy. Hodiny sú veľmi presné a je možné sa nimi riadiť pri generovaní PWM signálu.

2.3 Arduino

Pre riadenie hexagonálnej platformy som zvolil platformu Arduino. Arduino je “open-source” prototypovacia platforma pre elektroniku s jednoduchým, ľahko použiteľným a flexibilným hardvérom a softvérom. Arduino môže byť použité na vývoj interaktívnych objektov získavajúcich vstup z rôznych prepínačov, senzorov a na riadenie rôznych svetiel, motorov a iných fyzických prvkov. Projekty založené na Arduine môžu bežať samostatne alebo môžu aj komunikovať so softvérom bežiacim na počítači, čo značne rozširuje možnosti platformy. Keďže platforma má verejne dostupné zdrojové súbory, jednotlivé dosky platformy Arduino si je možné postaviť aj svojpomocne alebo využiť možnosť kúpy už skompletovanej dosky.

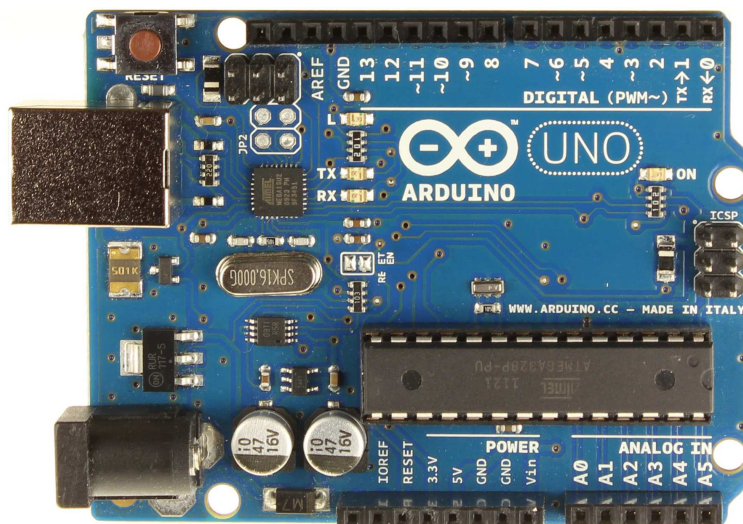
Arduino využíva na programovanie jazyk, ktorý je implementáciou jazyka Wiring, kód v tomto jazyku sa ďalej prekompilováva do jazyka AVR C a následne do binárneho súboru natívneho pre danú dosku.[10]

Existuje mnoho rôznych dostupných platforiem s mikrokontrolerom, ktoré by boli použiteľné pre navrhnutú hexagonálnu platformu. Arduino bolo zvolené hlavne z týchto dôvodov:

- Cenová dostupnosť – dosky Arduino sú relatívne lacné oproti mnohým iným platformám s mikrokontrolerom, pri ručnej výrobe je cena ešte nižšia než pri kúpe skompletovaných modulov.
- Multiplatformovosť – IDE pre Arduino je napísané v jazyku Java, ktorý je multiplatformný, a taktiež aj ovládače pre dosky podporujú všetky tri hlavné verzie operačných systémov.
- Programovacie prostredie – programovacie prostredie Arduino IDE má pomerne dosť funkcií, ale zároveň je aj veľmi jednoduché na ovládanie. Platforma pracuje s jazykom AVR C, v IDE prostredí sa využíva jazyk C++ využívajúci knižnicu Wiring, čo veľmi zjednodušuje tvorbu kódu oproti použitiu čistého jazyka AVR C. Taktiež je dostupné obrovské množstvo knižníc pre prácu s rôznymi vstupmi a výstupmi. Pre potreby práce so servami je dostupná knižnica Servo, ktorá obsahuje funkcie pre prácu so servami a umožňuje ich jednoduché použitie v Arduino projektoch.
- Hardvér – hardvér platformy je dobre zdokumentovaný, a je možné ho ľahko prispôbovať špecifickým potrebám. Pre platformu Arduino existuje obrovské množstvo doplnkových senzorov, napr. komplexné tzv. shieldy (WiFi shield, Ethernet shield,...), senzory(GPS, vzdialenosti, LCD,...) a taktiež rôzne jednoduché ovládacie prvky (joysticky, tlačítka, prepínače,...). Cez rôzne zahraničné obchody je možné tieto doplnkové senzory zaobstaráť za veľmi nízku cenu pričom výber je obrovský, doplnkové senzory je samozrejme možné zaobstaráť aj u domácich predajcov, ale za menej výhodné ceny.
- Rozšírenie a komunita – Arduino je jedna z najrozšírenejších platforiem s dobrou dokumentáciou základných funkcií jazyka, množstvom praktických ukážok a návodov, od komunity je dostupných množstvo knižníc a návodov pre rôzne komplexnejšie prípady použitia. [11]

Keďže navrhovaná hexagonálna platforma má byť zverejná pre ďalšie použitie, bolo nutné zvoliť takú riadiacu platformu, aby celý projekt mohol osloviť čo najväčšie množstvo záujemcov, tu pomáha nízka cena Arduina, jednoduchosť použitia, jeho rozšírenie a dostupnosť.

Platforma Arduino ponúka viacero typov hardvérových dosiek líšiacich sa vo veľkosti výbavy, použitom mikrokontroleri, množstvom a typom výstupov, prepojením s PC, veľkosťami interných pamätí, špecifickým určením a podobne. Zvolil som základnú dosku Arduino UNO, ktorá disponuje dostatočnou výbavou za najvýhodnejšiu cenu.



Obrázok 2.8: Arduino UNO⁴

Arduino UNO:

- mikrokontroler ATmega328
- pracovné napätie 5V, vstupné napätie z externého zdroja 7-12V
- počet digitálnych vstupno/výstupných pinov 14, z toho 6 pinov je použiteľných pre PWM
- počet analógových vstupov 6
- flash pamäť 32 KB (0.5KB je použité bootloaderom), na túto pamäť sa ukladá riadiaci program
- SRAM 2KB
- EEPROM 1KB – táto pamäť uchováva dáta aj po odpojení napájania
- frekvencia 16MHz

Pre zjednodušenie práce a rozšírenie možností vytvorenej Stewartovej platformy bola táto rozšírená o LCD displej umožňujúci zobrazenie doplnkových údajov a ovládanie pomocou IrDA.

LCD je pripojený k Arduinu pomocou I²C rozhrania. I²C zbernica poskytuje komunikačný prostriedok na komunikáciu medzi integrovanými obvodmi v rámci jednej dosky plošných spojov. I²C umožňuje komunikáciu s periférnymi zariadeniami ku ktorým sa prístupuje občasne. Toto rozhranie je extrémne nenáročné na hardvérové prostriedky, má ale nízku rýchlosť prenosu dát, je určené na krátku vzdialenosť, umožňuje komunikáciu s viacerými zariadeniami na jednej zbernici, keďže natívne umožňuje adresovať zariadenia. Komunikácia prebieha prostredníctvom dvoch liniek – *SDA* a *SCL*. *SDA* linka je dátová linka, *SCL* je linka časovania. Zariadenia sú rozdelené na “master” a “slave”, kde “master” riadi časovanie a inicializuje komunikáciu. Adresa zariadenia je predefinovaná a zvyčajne ju je možné meniť iba na hardvérovej úrovni úpravou dosky.[5]

⁴zdroj: http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg

Pre komunikáciu a riadenie LCD displeja cez I2C je nutné použiť doplnkovú riadiacu knižnicu, nakoľko základná knižnica na ovládanie LCD displeja predpokladá priame pripojenie LCD displeja k digitálnym pinom Arduina. Táto knižnica poskytuje rovnaké rozhranie ako aj originálna knižnica <LCD.h>, ktorá je súčasťou základných knižníc Arduina, na rozdiel od nej, táto umožňuje pripojenie LCD displeja aj pomocou I2C rozhrania (a viacerých iných komunikačných rozhraní), a nie len priamo do digitálnych pinov Arduina. Táto knižnica je šírená pod licenciou Creative Commons Attribution-ShareAlike, čo znamená, že táto knižnica je open source a je ju možné použiť. Knižnica aj s dokumentáciou je dostupná na internete.⁵

IrDA ovládanie pracuje na princípe komunikácie pomocou infračerveného svetla, toto svetlo je neviditeľné, nakoľko jeho frekvencia sa nachádza pod viditeľným spektrom. Dáta sa zakódujú na pulzy infračerveného svetla a odošlú pomocou vysielача, prijmač pomocou fotodiód je schopný prijať tieto svetelné pulzy, dekodovať ich a získať pôvodné dáta. Táto komunikácia môže byť jednosmerná (diaľkové ovládanie TV) alebo obojsmerná (komunikujúce telefóny). IrDA je schopné vysokých rýchlostí, potrebné súčiastky na komunikáciu sú veľmi lacné, s malou spotrebou elektrickej energie, krátkym dosahom.[15]

Pre príjem a spracovanie tohto signálu je potrebné taktiež využiť knižnicu vyvinutú Arduino komunitou, ide o knižnicu IrRemote. Táto knižnica je šírená pod licenciou GNU GPG, čiže je taktiež open source, nachádza sa na internete.⁶

2.4 Stewartova platforma

Definícia a popis Stewartovej platformy

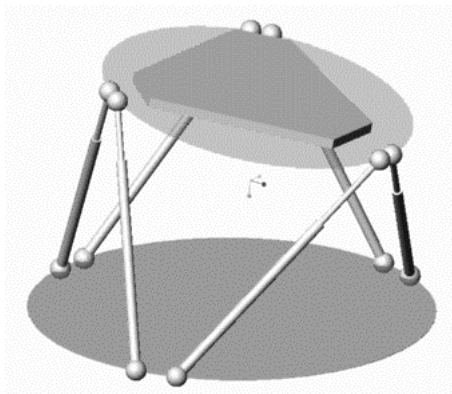
Stewartova platforma bola Stewartom v roku 1965 definovaná takto: je to mechanizmus, ktorý má 6osí pohybu, ktoré sú riadené akoukoľvek kombináciou šiestich motorov upevnených o základňu. Táto definícia je nejednoznačná a nešpecifikuje žiaden presný tvar celého mechanizmu, preto je tvarov Stewartovej platformy viacero. Avšak momentálne najpoužívanejší tvar Stewartovej platformy ako prvý použil na tvorbu stroja na testovanie pneumatík — a taktiež ho patrične zdokumentoval — iný autor niekoľko rokov pred tým, ako Stewart vydal svoju prácu, konkrétne išlo o V. E. Gougha, preto sa občas používa aj pojem Gough-Stewartova platforma. [8, 9]

Stewartova platforma (SP) je paralelný robot – to znamená, že platforma je prepojená so základňou pomocou viacerých od seba nezávislých nôh pričom na ovládanie platformy pracujú paralelne. Paralelný robot má oproti sériovým robotom podstatnú výhodu v tom, že nepresnosti riadiacich prvkov sa priemerujú na rozdiel od sériových robotov, kde sa chyby sčítavajú, avšak sérioví roboti majú výhodu vo vyššom rozsahu pohybov, čo je dané sériovou prácou jednotlivých riadiacich prvkov. Šesť osí pohybu znamená to, že platforma sa dokáže pohybovať v 3 lineárnych smeroch $[x,y,z]$ a 3 angulárnych smeroch, kde ide o rotáciu okolo jednotlivých osí $[x,y,z]$. Stewartove platformy sa často označujú ešte dvoma číslami, napr. SP 6-6 kde prvé číslo znamená počet prípojných bodov na základni a druhé číslo znamená počet prípojných bodov na platforme. Pôvodná Stewartova platforma bola typu 6-3, tento spôsob sa ale časom ukázal ako zbytočne komplikovaný a postupne sa prešlo na platformy typu 6-6. Taktiež sa z viacerých možných tvarov rozšíril jeden určitý do takej miery, že v súčasnosti sa iné tvary takmer nevyužívajú (samozrejme samotný tvar pohyblivej

⁵ zdroj: <https://bitbucket.org/fmalpartida/new-liquidcrystal/wiki/Home>

⁶ zdroj: <https://github.com/shirriff/Arduino-IRremote/wiki>

platformy a základne sa môže líšiť, nemusí byť šesťuholníkový ani trojuholníkový, podstatný je tvar rozloženia prípojných bodov nôh).[9]



Obrázok 2.9: Najbežnejšia Stewartova platforma typu 6-6⁷

Ako z obrázku vyplýva, rozloženie prípojných bodov na pohyblivej platforme aj na základni je $\sim 120^\circ$, prípojné body platformy s prípojnými bodmi základne sú voči sebe otočené o $\sim 60^\circ$. Veľkosť platformy a základne sa môže líšiť, pomer veľkosti je obmedzovaný iba schopnosťou guľových čapov v prípojných bodoch plniť svoju funkciu. Ideálna Stewartova platforma tohto typu by mala v pohyblivej platforme, aj v základni iba tri prípojné body, adekvátne dve nohy by mali spoločný prípojný bod. V tomto prípade by bolo riadenie platformy najmenej zložité, avšak toto rozloženie je mechanicky neuskutočniteľné, nakoľko je nevyhnutné, aby prípojné body mali dostatočnú voľnosť pohybu v dvoch osiach otáčania. Preto sa používa šesť prípojných bodov aj na platforme, aj na základni.

V súčasnosti sa Stewartova platforma využíva na rôzne účely, kde ide o pozicionovanie v 6tich osiach pohybu. Jedno z najrozšírenejších použití je pri leteckej simulácii, kde je pre dostatočnú realistikosť simulácie nutných všetkých 6 osí pohybu. Viacero leteckých spoločností využíva simulátory založené na Stewartovej platforme, kde na platforme je uložená replika kabíny so všetkými ovládacími prvkami a radou zobrazovacích prvkov. Taktiež sa tieto platformy používajú v automobilovom priemysle na simuláciu, vo výrobných procesoch, na pozicionovanie teleskopov, satelitných antén, v lekárstve na ortopedické účely a v rôznych iných odvetviach. Zároveň sa používajú u rôznych sériových robotov ako koncový efektor pre rozšírenie schopností daného robota.

Aj v súčasnosti existuje niekoľko dostupných verzií Stewartovej platformy riadenej RC servami (alebo ekvivalentným spôsobom). Vybrali sme tri verzie, ktoré su najdokonalejšie spracované a zdokumentované. Všetky tieto tri verzie ovplyvnili vývoj našej platformy. Teraz si ich zbežne ukážeme a zhodnotíme.

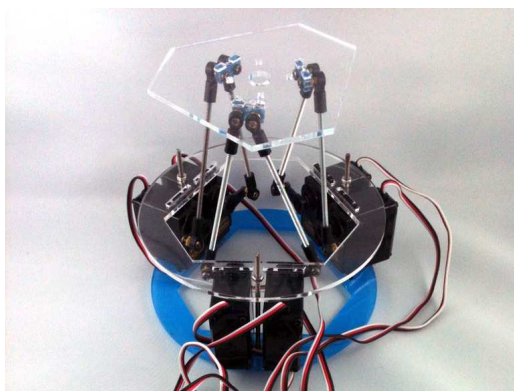
Prvá platforma pochádza z dielne Marginally Clever⁸. Túto platformu je vidieť na obrázku 2.10. Táto platforma je komerčne dostupná, cenovo dosť náročná – cena je 600 Kanadských dolárov. Autor ale zároveň zverejnil aj šablóny výrezov a riadiaci softvér, takže je možné platformu vytvoriť aj v domácich podmienkach. Tento návrh nepoužíva bežné modelárske servá, ale krokové motory a exotickejši riadiaci hardvér, vzhľadom na dĺžku použitých pák má vynikajúce rozsahy pohybov, veľkosťou je väčšia než nami vytvorená platforma. Nosnosť do bodu poškodenia je uvedená 1500g, ktorá je značne menšia než

⁷zdroj: <http://www.brad.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/pix/flsim1.gif>

⁸zdroj: <https://www.marginallyclever.com/shop/stewart-platforms/rotary-stewart-platform-v2>



Obrázok 2.10: Stewartova platforma vytvorená od Marginally Clever



Obrázok 2.11: Druhá verzia Stewartovej platformy pochádzajúca od autora Marginally Clever

nosnosť našej platformy. Kvalita dokumentácie je veľmi slabá, dostatočná iba v prípade kúpy celého kitu zariadenia.

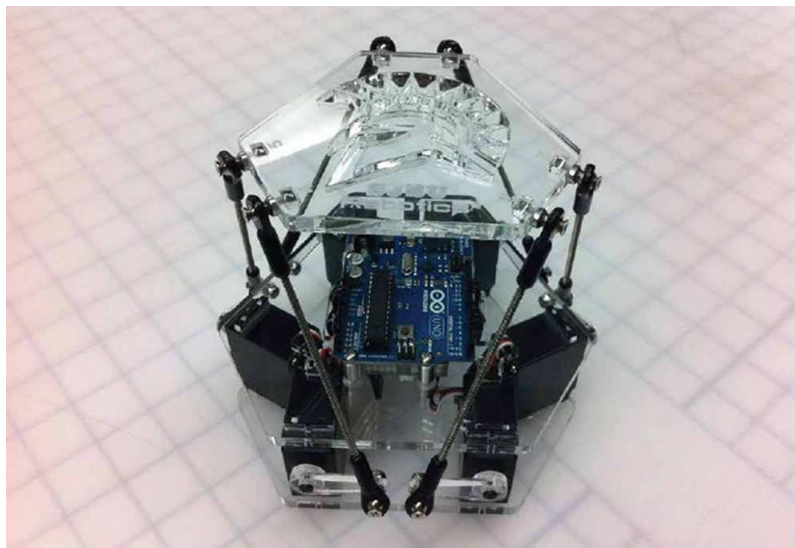
Druhá platforma pochádza taktiež z dielne Marginally Clever, ide o predchodcu prvej spomínanej platformy⁹. Túto platformu je možné vidieť na obrázku 2.11.

Tento dizajn je veľmi nekompletný, dokumentácia takmer neexistuje. Autor v tomto prípade zverejnil šablóny a zdrojový kód. Popis hodnôt použitých v tomto riadiacom programe a postup prispôbenia platformy a jej riadenia je prakticky neexistujúci. Táto platforma už využíva RC servá a Arduino. Autor nezverejnil žiadne merania vlastností tejto platformy, takže nie je možné uskutočniť porovnanie s nami vytvorenou platformou. Na základe rozvrhnutia komponentov a typu návrhu je isté, že platforma má veľký rozsah pohybov, avšak nízku nosnosť a pomerne malú presnosť (tá ale závisí aj od riadiaceho softvéru).

Posledný návrh je zároveň aj najdokonalejší. Pochádza od tímu s názvom FullMotion-

⁹zdroj: <https://www.thingiverse.com/thing:64396>

Dynamics, je verejne dostupný¹⁰



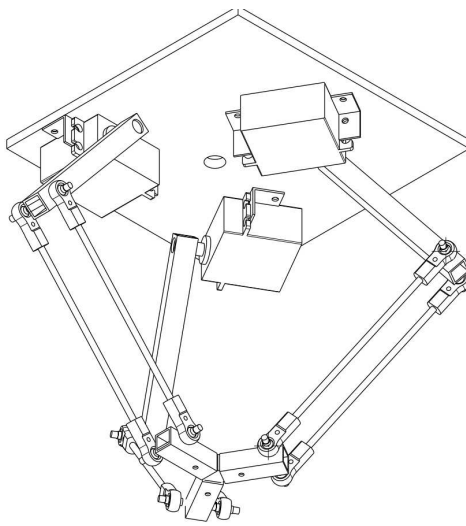
Obrázok 2.12: Verzia platformy od FullMotionDynamics

Tento návrh je najdokonalejší, má najkvalitnejšiu dokumentáciu. Autori zverejnili aj šablóny na výrez, zdrojový kód riadenia a taktiež aj prepracovaný postup stavby. Zdrojový kód je okomentovaný, význam niektorých premenných nie je dostatočne názorne vysvetlený, postup riadenia a vzorce použité na výpočet polôh nie sú zdokumentované. Autori taktiež nezverejnili žiadne reálne testy vytvorenej platformy, v zverejnenom zdrojovom kóde majú vážne chyby v použitých vzorcoch na výpočet polôh, vďaka ktorým je výsledné riadenie platformy extrémne nepresné a niektoré premenné nie sú nadefinované, a nie je ani ozrejmene ako ich správne dodefinovať, zdrojový kód je preto nemožné priamo použiť bez veľkých zmien.

Keďže nie je v súčasnosti dostupná žiadna verzia platformy, ktorá by bola dostatočne jednoduchá, kvalitne zdokumentovaná s funkčnými zdrojovými kódmi, je potrebné vytvoriť novú verziu platformy sľňajúcu dané kritériá a predovšetkým ju patrične zdokumentovať. Táto platforma taktiež musí spĺňať požiadavky uvedené v ďalšej kapitole.

Okrem Stewartovej platformy je rozšírený ešte jeden typ paralelného robota – ide o delta robota. Na obrázku 2.13 je ukázaný zväčšený pohľad delta robota. Od Stewartovej platformy sa hlavne líši v tom, že potrebuje iba 3 ovládacie prvky a narozdiel od Stewartovej platformy nedokáže ovládať orientáciu koncového efektoru – pohyblivej platformy, to znamená, že pracuje iba v 3 lineárnych osiach pohybu. Pre udržanie orientácie platformy sa používa princíp rovnobežníka medzi jednotlivými nohami robota. Na rozdiel od Stewartovej platformy, pri delta robotovi sa základňa nachádza zvyčajne nad platformou, aby mohol pod platformou napríklad bežať pohyblivý pás so súčiastkami. Sú najčastejšie používané na balenie, zdvíhanie a polozenie na inej pozícii a taktiež disponujú vysokou rýchlosťou, preto sú vhodné napríklad na osádzanie dosiek plošných spojov a podobné činnosti, kde je potrebná rýchlosť a dostatočná presnosť a nie je nutné využiť všetkých 6 osí pohybu. Taktiež je možné schopnosti delta robota rozšíriť o ďalšie doplnkové osi pohybu pomocou rôznych úprav návrhu. [1]

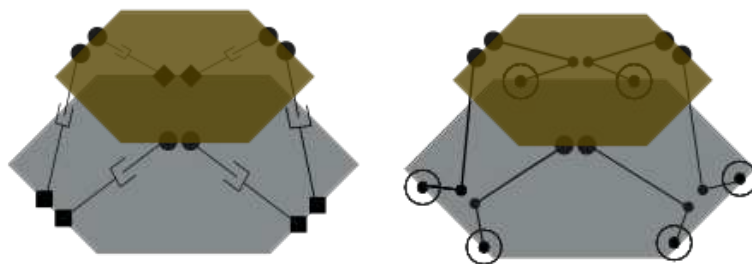
¹⁰ zdroj: <http://x-sim.de/forum/download/file.php?id=2034>



Obrázok 2.13: Ukážka delta robota
zdroj:<http://www.gfx3.de/>

Riadenie Stewartovej platformy

Základná Stewartova platforma predpokladá zhotovenie prepájacích nôh pomocov prvku, ktorý dokáže regulovať svoju dĺžku. Preto sa návrh tejto platformy prispôbil, aby bolo možné použiť servá, na ktoré je pripojená noha s pevnou dĺžkou ako je demonštrované na obrázku 2.14. Toto ovplyvňuje hlavne zložitosť riadiacich výpočtov pre pozíciu platformy. Keďže výslednú pozíciu platformy ovplyvňuje počiatočná pozícia jednotlivých prípojných bodov a vzdialenosť medzi nimi tj. dĺžka nohy. Avšak pri platforme riadenej servom, dĺžka tiahla prepojujúceho servo s prípojným bodom je pevná, čiže vzdialenosť prípojného bodu na platforme a prípojného bodu na základni určuje iba otočenie serva. [9]



Obrázok 2.14: Rotačne riadená platforma a základná Stewartova platforma s lineárnym riadením

Sú dva základné spôsoby riadenia: “inverse kinematics” a “forward kinematics”, ide o spätnú a doprednú kinematiku. Dopredná kinematika znamená, že vieme nastavené riadiacich prvkov (v našom prípade otočenie serv), a z týchto údajov sa vypočítava pozícia koncového efektora (v našom prípade pozícia platformy). Inverzné riadenie ako názov napovedá, pracuje opačne, poznáme pozíciu koncového efektora a z tejto pozície vypočítame nastavenie riadiacich prvkov. Pre riadenie platformy využijeme inverznú kinematiku, ktorej sa budeme ďalej venovať. Pri opise riadenia platformy vychádzame z dokumentu “The

Mathematics of the Stewart Platform”.

Základňu budeme považovať za referenčnú štruktúru s navzájom ortogonálnymi osami x, y, z . Platforma má vlastné ortogonálne osi x', y', z' . Počiatočná poloha platformy môže byť vyjadrená ako tri translačné posunutia s ohľadom na základňu – pre každú os základne prislúcha jeden posuv. Tri rotačné posuvy potom definujú orientáciu platformy s ohľadom na základňu. Pre ich vyjadrenie využijeme množinu Eulerových uhlov: rotácia okolo osi z Ψ , rotácia okolo osi y θ , rotácia okolo osi x φ . Pre jednotlivé rotácie si vyjadríme rotačné matice:

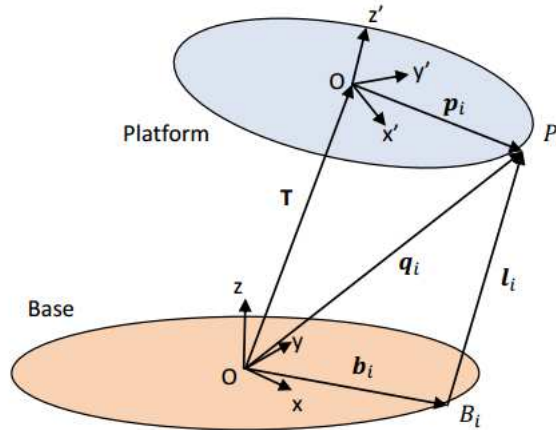
$$R_z(\Psi) = \begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$R_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Kompletná rotačná matica relatívna k základni znie takto:

$${}^P R_B = R_z(\Psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\varphi) =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \Psi \cos \theta & -\sin \Psi \cos \varphi + \cos \Psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \Psi \sin \varphi + \cos \Psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \Psi \cos \theta & \cos \Psi \cos \varphi + \sin \Psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \Psi \sin \varphi + \sin \Psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2.1)$$



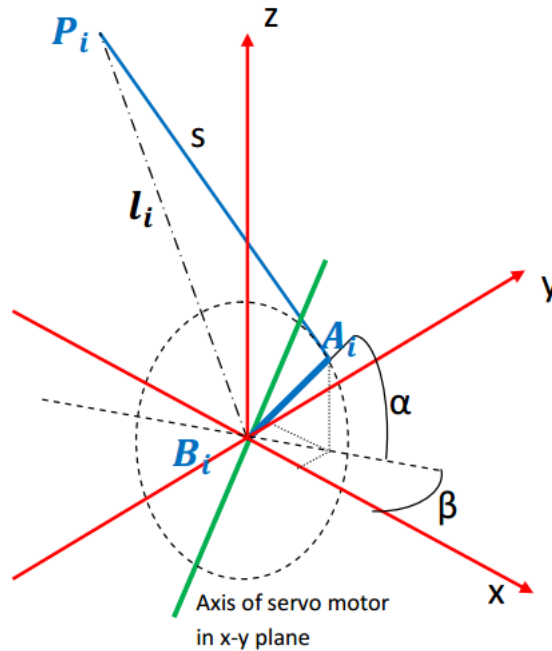
Obrázok 2.15: Diagram Stewartovej platformy pre i -tu nohu

Definujeme dĺžku i -tej nohy takto:

$$l_i = T + {}^P R_B \cdot p_i - b_i \quad (2.2)$$

T je vektor posunu, p_i je vektor definujúci koordináty i -teho upevňovacieho bodu P_i s ohľadom na základňu platformy, b_i predstavuje vektor definujúci koordináty i -teho upevňovacieho bodu B_i na základni. Týchto rovníc je 6 keďže platforma má 6 nôh. Nakolko

platforma je riadená servom, musíme pridať ešte výpočty zohľadňujúce tento fakt, jedná sa o výpočty vypočítavajúce uhol otočenia serva.



Obrázok 2.16: Detail na riadenie pomocou serva

Vysvetlíme si teraz jednotlivé premenné na obrázku 2.16:

- a je dĺžka páky serva (vzdialenosť medzi osou otáčania páky bodom, v ktorom je pripojené tiahlo)
- A_i predstavuje bod prepojenia páky serva s tiahlom (nohou) i -teho serva pričom má koordináty $\mathbf{a} = [x_a, y_a, z_a]^T$ v sústave základne
- B_i predstavuje os, okolo ktorej sa otáča páka i -teho serva (výstupná os serva) s koordinátami $\mathbf{b} = [x_b, y_b, z_b]^T$ v sústave základne
- P_i predstavuje pripájacie body tiahel i -teho serva k pohyblivej platforme s koordinátami $\mathbf{p} = [x_p, y_p, z_p]^T$ v sústave platformy
- s predstavuje dĺžku tiahla prepájajúceho páku serva s prípojnym bodom v platforme
- l_i predstavuje dĺžku i -tej nohy vypočítanú podľa vzorca 2.2
- α je uhol vychýlenia páky serva od horizontálnej úrovne
- β je uhol páky serva relatívne k osi x

Následne sme schopní vyjadriť funkciu vypočítavajúcu uhol vychýlenia páky α :

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{l^2 - (s^2 - a^2)}{\sqrt{(2a(z_p - z_b))^2 + (2a[\cos\beta(x_p - x_b) + \sin\beta(y_p - y_b)])^2}} - \tan^{-1} \frac{2a[\cos\beta(x_p - x_b) + \sin\beta(y_p - y_b)]}{2a(z_p - z_b)} \quad (2.3)$$

Pre zistenie správnych rozsahov pohybov je ešte nutné definovať základnú pozíciu – pozíciu v ktorej je platforma paralelne so základňou vo výške h_0 nad základňou a nie je aplikovaný žiaden iný posuvný alebo rotačný pohyb a páky serv sú v horizontálnej pozícii.

$$h_0 = \sqrt{s^2 + a^2 - (x_p - x_b)^2 - (y_p - y_b)^2} - z_p \quad (2.4)$$

Z tejto pozície je následne nutné vypočítať hodnotu α_0 pomocou vzorca 2.3.

Teraz ešte definujeme vzorce pre výpočet šírky impulzu posielaného servu pre danú pozíciu, tieto rovnice sú dve, keďže nepárne servá majú páky namontované opačne ako párne servá čo spôsobuje, že sa točia opačne. Pre párne servá je rovnica:

$$W_i = W_i^0 + (\alpha_i - \alpha_0)r \quad (2.5)$$

a pre nepárne servá je rovnica

$$W_i = W_i^0 - (\alpha_i - \alpha_0)r \quad (2.6)$$

W_i predstavuje šírku impulzu, pri ktorej je páka i -teho serva v horizontálnej polohe (W_i slúži na “trim”). r je pomocná konštanta, ktorá by sa mohla nazvať multiplikátor šírky pulzu, slúži na prevod uhlu α na odpovedajúcu šírku pulzu. Pre definovanie využijeme hodnotu časovania t pre určitý uhol γ (napríklad bežne používaných 45°), vzorec je potom takýto:

$$r = \frac{t \cdot 360}{\gamma \cdot 2\pi} \quad (2.7)$$

Výsledok 2.7 je počet μs potrebných pre otočenie o jeden radián.

Teraz môžeme zhrnúť celý postup riadenia:

1. Zadanie jednotlivých konštánt pozičných informácií o platforme b_i, p_i, s, a, β_i , ktoré vyplývajú z konštrukcie platformy
2. Zadanie konštánt základných polôh serv W_i^0 a výpočet konštanty r
3. Výpočet hodnoty h_0 pomocou vzorca 2.4
4. Zadanie hodnôt požadovanej pozície platformy $(x \ y \ z \ \Psi \ \theta \ \varphi)$
5. Výpočet efektívnych dĺžok nôh l_i pre požadovanú pozíciu platformy pomocou 2.2
6. Výpočet uhlov otočenia serv α_i pomocou 2.3
7. Výpočet dĺžok pulzov pre jednotlivé servá s využitím vzorcov 2.5 a 2.6
8. Odoslanie PWM signálu servám
9. Návrat do štvrtého kroku pre opakovanie celého procesu [6]

Parametre, ktoré neboli v tejto časti vysvetlené a závisia od konštrukcie platformy, budú vysvetlené v nasledujúcej kapitole zaoberajúcej sa implementáciou. Konkrétne ide o parametre b_i, p_i, β_i .

Kapitola 3

Implementácia

V tejto časti práce sa nachádza opis celej návrhovej a implementačnej časti tvorby Stewartovej platformy. Je tu rozobraná hardvérová časť platformy, postup jej návrhu, rôzne implementačné detaily a špecifiká. Následne aj proces fyzického zhotovenia platformy. V tejto kapitole sa budeme taktiež venovať zapojeniu serií k arduinu a doplnkových hardvérových rozhraní. V poslednej podkapitole si rozoberieme softvérovú časť platformy, opíšeme celý riadiaci program s dôrazom na riadenie platformy, budeme sa tu venovať aj implementovanej riadiacej knižnici pre ovládanie platformy cez USB.

3.1 Návrh a tvorba hardvérovej časti Stewartovej platformy

Táto podkapitola je zameraná iba na postup návrhu jednotlivých častí Stewartovej platformy, sú tu vysvetlené všetky špecifiká pri návrhu súčastí z ktorých sa skladá Stewartova platforma a ktoré je potrebné dodržať, vplyv zmien jednotlivých rozmerov, taktiež sú tu uvedené všetky problémy, s ktorými sme sa stretli počas návrhu platformy, prečo vznikli, a ako boli vyriešené.

Definícia cieľov a základných proporcií Stewartovej platformy

Za cieľ práce bolo zvolené zhotovenie hexagonálnej Stewartovej platformy riadenej pomocou modelárskych serií určenej na polohovanie digitálneho fotoaparátu. Platforma musí umožňovať jej ovládanie pomocou USB prepojenia s počítačom, na ktorom bude vykonávaný riadiaci program využívajúci vytvorenú ovládaciú knižnicu. Požiadavka na polohovanie fotoaparátu so sebou prináša viacero obmedzení oproti všeobecnej požiadavke o vytvorenie polohovateľnej platformy, preto je jej silno podriadená celá fáza návrhu, a tým pádom aj fáza následnej implementácie. Polohovaný fotoaparát bude predstavovať zástupca z kategórie digitálnych zrkadloviek s rôznymi objektívmi, čiže je nutné počítať s pomerne veľkou záťažou – váha bežného tela zrkadlovky sa pohybuje v rozmedzí 500 – 1000g, váha objektívu je ešte variabilnejší 200 – 2000g. Pre splnenie cieľov návrhu musí platforma splniť tieto požiadavky:

- vhodné rozmery platformy – platforma by mala mať dostatočné rozmery pre osadenie fotoaparátu, ale zároveň by nemala byť nadrozmerná.
- nosnosť – ako už bolo spomínané vyššie, záťaž platformy je dosť vysoká, preto navrhnutá platforma musí byť schopná túto váhu zvládnuť – manipulovať s ňou, dlhodobo

udržiavať, nemôže spôsobovať žiadne nadmerné deformácie súčiastok, pretože to by mohlo ovplyvniť všetky parametre platformy.

- schopnosť polohovať fotoaparát s dostatočnou presnosťou – od platformy je požadované aby umožňovala polohovať fotoaparát s dostatočným množstvom rôznych polôh, zároveň je nevyhnutné aby pohyb bol dostatočne jemný v celom rozsahu polôh platformy. Jemnosť posunov musí byť čo najvyššia, platforma musí umožniť vykonanie translačných pohybov aj o vzdialenosť $1mm$ a ideálne aj menšiu, pri rotačných pohyboch je žiadaná jemnosť pohybov menej ako 1° . Toto je jedna z hlavných požiadaviek na platformu.
- reprodukovateľnosťou polôh – platforma musí byť schopná opätovne dosahovať určené polohy s dostatočnou presnosťou.
- udržovateľnosťou zadanej polohy – platforma musí byť schopná udržať zadanú polohu s čo najnižším množstvom rušivých elementov – neustálych vibrácií od serv, zvukov a podobne.
- stabilita – platforma musí byť dostatočne stabilná, aby zvládla manipuláciu s nákladom. Taktiež je nutné, aby platforma nevykonávala rôzne nežiadúce pohyby – takpovediac, aby “nepobehovala po stole”. Pri pohyboch platformy nemôže hroziť prevrhnutie aj v prípade zaťaženia fotoaparátom s dlhším objektívom.

Pre polohovacie nástroje určené na polohovanie fotoaparátov a videokamerier často vznikajú aj ďalšie požiadavky, ktoré vytvorená platforma nespĺňa respektíve spĺňa iba obmedzene – napríklad pre videokamery je podstatné aby zmena polohy platformy počas nakrúcania bola čo najplynulejšia, sprevádzaná iba minimom zvukov a podobne. K príčinám nesplnenia týchto požiadaviek, respektíve možnostiam ich zlepšenia sa opäť vrátíme v adekvátnych častiach práce. Tieto doplnkové požiadavky ale nie sú vyžadované od tejto implementácie platformy, preto nie sú uvedené v cieľoch.

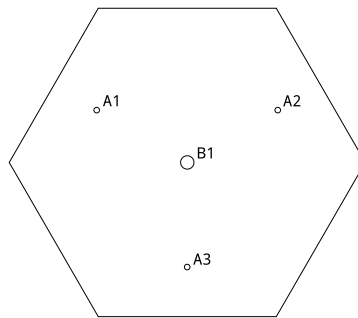
Po určení si cieľov nasleduje začiatok vlastného návrhu platformy a zvolenie ďalšieho postupu návrhu. Ako prvé nasledovalo rozhodnutie o voľbe výrobného procesu pre hlavné súčasti z ktorých sa platforma skladá a zároveň taktiež zvoliť aj základný stavebný materiál. Pretože je požadovaná presnosť súčastí pomerne vysoká, a navyše väčšina zo súčastí obsahuje mnoho otvorov rôznych tvarov, čo je náročné zhotoviť vlastnoručne, možnosť manuálnej tvorby bola zavrhnutá a namiesto nej bolo zvolené riešenie pomocou stroja. Tuto vyvstali dve hlavné možnosti, ktoré sú dostupné – 3D tlač a výrez pomocou laseru. 3D tlač sa tiež rýchlo zavrhlá, nakoľko je 3D tlač vhodná predovšetkým na objekty pre ktoré nie je možné definovanie pomocou 2D, navyše 3D tlač je finančne náročnejšia a pevnosť vytvoreného objektu by nedosahovala pevnosti vyrezaného objektu z plastu pomocou laseru. Preto voľba padla na vyrezanie, nasledovala voľba materiálu, tu môžeme zvoliť prakticky iba z dvoch použiteľných možností, plastu a dreva (preglejky) (materiály ako koža alebo kov nie sú plne vhodné). Tu je voľba obtiažnejšia, pri správnom spôsobe zhotovenia a kvalite materiálu, výrez z preglejky dosahuje pevnosť veľmi podobnú pevnosti plastu, taktiež aj preglejka dovoľuje dosiahnuť pomerne vysokú presnosť výrezov. Finančný rozdiel tiež nie je dostatočne veľký, preto finálne rozhodnutie padlo na zákle osobnej preferencie, kde bolo zvolené vypracovanie z plastu. Tu je pomerne široké množstvo možností – sú rôznej hrúbky, farby, transparentnosti,.. Pre našu platformu bolo použité základné $4mm$ hrubé transparentné plexisklo.

Pre nákras návrhu platformy bol zvolený CAD nástroj QCAD. Tento nástroj je multiplatformný, open-source a disponujúci dostatkom funkcií pre tvorbu celého návrhu [14]. Tento nástroj podporuje iba 2D nákresy, čo je pre potreby návrhu tejto platformy dostatočné, nakoľko stroje na vyrezávanie z plastu pracujú taktiež v 2D prostredí. Pomocou tohto nástroja boli vytvorené všetky nákresy, QCAD natívne pracuje s vektorovým formátom DXF, ale dokáže taktiež importovať nákresy z bežného vektorového formátu SVG, exportovať nákresy dokáže vo formáte DXF, PDF popri prípade ich vie aj previesť a exportovať do bežných bitmapových formátov.

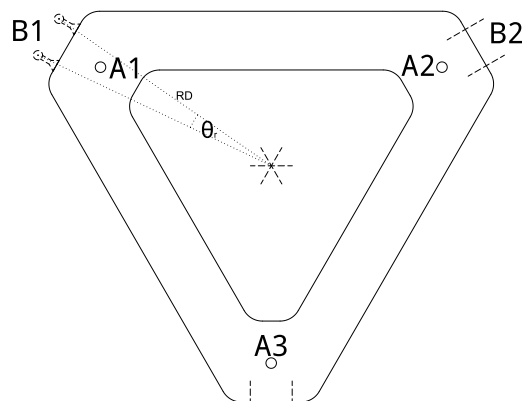
Pri určovaní rozmerov platformy bolo treba najskôr zvoliť vhodný rozmer pohyblivej platformy na ktorú sa umiestni fotoaparát. Po preštudovaní bežných veľkostí fotoaparátov, sme zvolili za predpokladaný rozmer digitálnej zrkadlovky rozmer $13 \times 7.5 \text{ cm}$. Tvar pohyblivej platformy bol zvolený v tvare hexagónu, tento tvar nie je nevyhnutné dodržať, rovnako dobre by poslúžila aj platforma v tvare kruhu, poprípade platforma s tromi zväčšenými stranami pri zachovaní rovnakej vzdialenosti k upevňovacím bodom. Tento tvar bol zvolený pretože je ľahký na tvorbu, jeho tvary budú konzistentné s tvarom základne a poskytuje dostatok priestoru pre fotoaparát. Základný rozmer strany hexagónu bol zvolený 8 cm . Pri tomto rozmere hexagónu vznikne okolo stredu dostatočne veľký plne vyplnený obĺžnikový priestor s rozmermi $12 \times 7 \text{ cm}$. Voľba väčších rozmerov platformy by nepriniesla žiadne dodatočné výhody v podobe stability respektíve pevnosti upevnenia fotoaparátu. Pevnosť upevnenia fotoaparátu ovplyvňuje sila dotiahnutia upevňovacej skrutky a taktiež materiál podložky na ktorej je umiestnený fotoaparát, týmto sa budeme venovať podrobnejšie v adekvátnej časti práce. Od tohto rozmeru sa odvíja aj voľba ostatných častí Stewartovej platformy, detailný postup návrhu si vysvetlíme v ďalšej podkapitole.

Návrh pohyblivej platformy

Tak ako aj pri procese riadenia Stewartovej platformy, aj jej celý návrh sa odvíja od pohyblivej platformy, preto si jej návrh dôkladne rozoberieme ako prvý. Pre jednoduchšie vysvetlenie tu nasleduje finálny návrh pohyblivej platformy.



Obrázok 3.1: Vrchná časť pohyblivej platformy, veľkosť je zmenšená v pomere 2:5
A1 – A3 predstavujú upevňovacie body, pomocou ktorých sa prepojí vrchná časť pohyblivej platformy so spodnou
B1 je otvor pre upevňovaciu skrutku na fotoaparát



Obrázok 3.2: Spodná časť pohyblivej platformy, veľkosť je zmenšená o 25%. Časti vyznačené prerušovanou čiarou sa nachádzajú iba v tomto náhľade pre názornosť, nie sú vyrezané.

$A1 - A3$ predstavujú upevňovacie body, pomocou ktorých sa prepojí táto časť pohyblivej platformy s vrchnou časťou

$B1 - B3$ predstavujú dvojice bodov, v ktorých sú pripevnené čapy do ktorých vedú tiahla z pák seriév. RD je vzdialenosť od stredu pohyblivej platformy po upevňovací bod.

Ako bolo spomínané v predchádzajúcej časti, hlavný rozmer strán hornej časti pohyblivej platformy je 8cm . Tento rozmer bol zvolený aby boli rozmery platformy dostatočné na to, aby poskytovali dostatočne rozmerný podstavec pre fotoaparát ale zároveň nebol zbytočne veľký. Dodatočná veľkosť samotného podstavca by neprinášala žiadne ďalšie výhody – nezlepšila by ani stabilitu celej platformy, ani stabilitu a pevnosť upevnenia fotoaparátu. Dodatočná veľkosť by sa ale prejavila na zvýšenej cene a na zväčšených celkových rozmeroch platformy. Pevnosť upevnenia fotoaparátu by sa nezlepšila, tá závisí hlavne od toho, ako silno je zatiahnutá upevňovacia skrutka. Taktiež pre zlepšenie upevnenia je veľmi vhodné dať medzi fotoaparát a plast vrchnej časti platformy nejaký vhodný protišmykový, aspoň čiastočne mäkký materiál, napríklad gumu. Tento materiál veľmi výrazne zlepšuje pevnosť upevnenia fotoaparátu. Keďže samotný povrch plastu kladie minimálny odpor, fotoaparát sa po ňom veľmi ľahko kľže, čo spôsobí že aj pri pomerne silnom utiahnutí skrutky sa fotoaparát otáča okolo tejto upevňovacej skrutky čo okamžite spôsobuje nepresnosti, keďže vzniká neželaný pohyb fotoaparátu. Tento problém ale táto vrstva protišmykového materiálu veľmi účinne vyrieši, v prípade že nie je tak hrubá a mäkká, že by umožnila dodatočné nakláňanie fotoaparátu. V nami vytvorenej platforme sme použili na túto funkciu 2.5mm vysokú penu. Táto je upevnená o platformu pomocou obojstrannej lepiacej pásky čo zaručuje že sa táto pena nebude nijak pohybovať a bude plniť svoju funkciu. Tento materiál tu zároveň plní aj ďalšie funkcie, v prípade že by z vrchnej časti pohyblivej platformy vyčnievali hlavičky upevňovacích skrutiek, tento materiál zabráni tomu aby sa o ne mohol fotoaparát poškríbať a taktiež keďže je mäkký, aspoň jemne pohlcuje vibrácie. V prípade potreby čo najvyššieho obmedzenia vibrácií, je možné tento materiál zvoliť vyšší a mäkkší a fotoaparát slabšie upevniť, v tomto prípade bude táto podložka pohlcovať väčšinu vibrácií, ale pri pohyboch platformy nebude poskytovať dostatočnú oporu a fotoaparát bude vďaka zotrvačnosti vykonávať nežiadúce náklony.

Teraz zdôvodníme príčinu rozdelenia pohyblivej časti platformy na dve časti. Vzdialenosť upevňovacích bodov od stredu pohyblivej platformy priamo ovplyvňuje viaceré vlastnosti – rozsah pohybov, presnosť, nosnosť.

- Rozsah pohybov je ovplyvnený kvôli tomu, že sa upevňovacie body nachádzajú bližšie

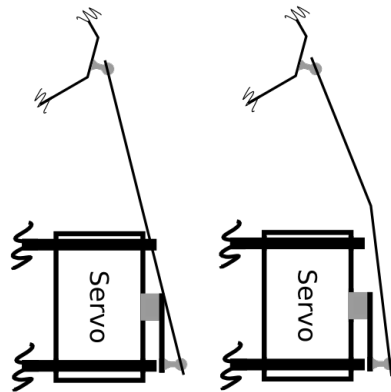
osi otáčania, pre názornosť uvedieme príklad: servo spôsobí posunutie z súradnice pripevňovacieho bodu o $T_z = 1\text{cm}$, zvolíme dve vzdialenosti upevňovacích bodov $RD = 3$ a $RD' = 6$. Pomocou vzorca $\arcsin(\frac{T_z}{RD})$ a $\arcsin(\frac{T_z}{RD'})$ získame hodnotu o koľko stupňov sa otočila rovina tohto bodu, v prípade RD ide o hodnotu 9.6° a v prípade RD' ide o hodnotu 19.47° . Z tohto príkladu jasne vyplýva, že rozsah pohybu klesá takmer lineárne so stúpajúcou vzdialenosťou. Preto treba tento parameter vhodne prispôbiť požiadavkám na rozsah pohybov, ideálne aby bol zvolený tak, aby maximálne rozsahy pohybov boli iba jemne väčšie než požadovaný rozsah pohybov.

- Presnosť priamo závisí od vzdialenosti bodov, nakoľko pohyb serva nie je dokonale plynulý. Servo má určitú maximálnu presnosť, požiadavka na zmenu polohy menšiu než je táto presnosť nezmení polohu serva vôbec, tento rozsah sa nazýva “mŕtva zóna”. Tento údaj je občas udávaný v dokumentácii serva, v prípade použitých serií je “mŕtva zóna” široká $8\mu\text{s}$. Preto so stúpajúcou vzdialenosťou medzi stredom pohyblivej časti platformy a upevňovacím bodom taktiež klesá vplyv tejto mŕtvej zóny. Pri malej vzdialenosti bude pohyb platformy vďaka tomuto obmedzeniu “sekaný”, naopak pri dostatočne veľkej vzdialenosti bude vplyv mŕtvej zóny dostatočne eliminovaný a pohyb bude plynulý a jemný.
- Nosnosť je ovplyvnená akonáhle záťaž presahuje rozmermi veľkosť týchto bodov. Vďaka tomuto presahu pôsobí záťaž ako páka, taktiež to spôsobí, že záťaž je potom rozložená nerovnomerne, tento vplyv sa zosilňuje pri pohyboch platformy, počas ktorých sa pohybuje ťažisko pohyblivej časti platformy a záťaž sa do strán – ide o pohyb a rotáciu v osiach x a y . Preto čím je väčšia vzdialenosť, tým je rozloženie rovnomernejšie a platforma zvládne aj vyššiu záťaž respektíve väčší rozsah pohybov bez toho, aby na niektorú nohu vznikol dostatočný tlak na to, aby spôsobil nežiadúci pohyb alebo zabránil dosiahnutiu požadovanej polohy.

Z predchádzajúcich dôvodov jasne vyplýva, že voľba vzdialenosti bodov predstavuje kompromis, ale vo všeobecnosti je vhodné zvoliť takú vzdialenosť, aby ňou dovolovaný rozsah pohybu pokrýval požadovaný rozsah, a vzdialenosť bola čo najväčšia. Pri návrhu ale treba rátať aj s upevňovacími čapmi, ktorých dĺžka túto vzdialenosť ešte predĺži. Použité čapy predĺžia túto vzdialenosť o 0.5cm , čo by spôsobilo že vzdialenosť k upevňovacím bodom by bola približne 7.5cm , to by zväčšilo aj základňu Stewartovej platformy. Preto bola zvolená možnosť spraviť pohyblivú platformu zloženú z dvoch vrstiev, vrchná vrstva bude tvoriť podstavu pre fotoaparát, spodná vrstva bude menšia, priestorovo menej náročného tvaru, a s vhodnou vzdialenosťou od stredu pohyblivej platformy 6.2cm . Tento prístup zároveň prináša istú mieru univerzálnosti, vrchná podstava sa dá meniť a nahradiť podľa potreby nejakou inou, stačí dodržať vhodné rozmiestnenie upevňovacích otvorov. Obidve časti su spolu spojené pomocou skrutiek, pre ktoré sú určené otvory $A1 - A3$ ako je vidieť na obrázkoch 3.1 a 3.2. Na spodnej časti pohyblivej platformy sú vyznačené dvojice bodov $B1 - B3$, v týchto miestach sa z bočnej strany navrtávajú otvory, do ktorých sa upevnia čapy tiahel. Vzdialenosť týchto dvoch bodov môže byť aj väčšia, nemá vplyv na rozsah pohybov platformy a minimálny vplyv na stabilitu platformy, vzdialenosť týchto dvoch bodov bola zvolená tak, aby veľkosť tejto spodnej časti bola čo najkompaktnejšia. Je ale nevyhnutné dodržať určitú minimálnu vzdialenosť medzi týmito dvoma bodmi – takú vzdialenosť, aby si čapy tiahel navzájom nezavadzali ani v najkrajnejších možných polohách nastavenia platformy, vo väčšine prípadov postačí vzdialenosť $2 - 3\text{mm}$ medzi týmito čapmi. Taktiež je vidieť, že v strede tejto časti je pomerne veľký otvor, tento je tam umiestnený tak, aby bol umožnený

prístup k upevňovacej skrutke fotoaparátu.

Táto vzdialenosť taktiež ovplyvňuje veľkosť základne, nakoľko použité guľové čapy majú v osi x pomerne dosť obmedzený pohyb ($\pm 30^\circ$), taktiež ak je vzdialenosť od stredu základne po výstupnú os väčšia než je vzdialenosť medzi stredom pohyblivej platformy a upevňovacími bodmi nastane ďalšie obmedzenie rozsahu pohybu. Vznikne situácia, pri ktorej je uhol medzi týmito dvoma bodmi na osi x (keď si obidva body premietneme na os y , ich pozície v rovine sa budú líšiť iba hodnotami x a z) dostatočne veľký na to, aby páka pri vychýlení do spodnej strany spôsobila to, že tiahlo narazí do páky serva alebo do základni. Tomuto sa dá predchádzať vhodným zohnutím tiahla ako je vidieť na obrázku 3.3. Na tomto obrázku je vľavo vidieť vzniknutý problém, tiahlo prechádza základňou aj pákou čo je mechanicky nemožné. Jednoduché a pomerne účinné riešenie tejto situácie je vidieť na pravej časti obrázku, kde je tiahlo zohnuté v správnej výške – pri vychýlení páky serva do najnižšej možnej polohy je tiahlo zohnuté tesne nad úrovňou základne platformy. Tento jednoduchý úkon značne zväčší rozsah pohybu.

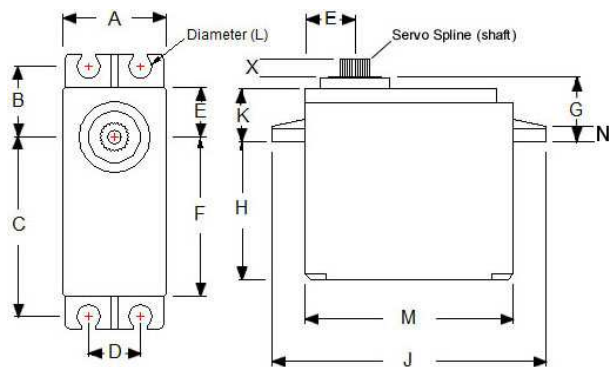


Obrázok 3.3: Detailný pohľad na vzniknutý problém s tiahkami a jeho riešenie.

Návrh základne

Základňa obsahuje veľké množstvo prvkov – servá, Arduino, obvod napájania a dodatočné rozhrania – v prípade zhotovenej platformy ide o IrDA a LCD displej, preto je jej návrh značne pracnejší a náročnejší. V základni je umiestnených mnoho upevňovacích otvorov a otvorov určených na vedenie kabeláže. Základňa sa skladá z dvoch častí podobne ako pohyblivá platforma, tieto dve časti sú spolu spojené pomocou troch vzpier. Pre názornosť je možné vidieť všetky potrebné označenia rozmerov serva na obrázku 3.4 a návrh spodnej časti základne na obrázku 3.5. Zoznam otvorov v spodnej časti základne:

- $A0 - A5$ sú otvory pre upevňovaciu časť serva, tá by mala zapadnúť do tohto otvoru čo najpresnejšie pre zamedzenie nežiadúcich pohybov serva. Šírka tohoto otvoru je určená rozmerom A serva, výška má hodnotu rozmeru N . Taktiež je nevyhnutné nezabudnúť a vyrezať aj priestor pre malú západku nachádzajúcu sa v strede upevňovacej časti.
- $B1 - B3$ sú otvory, cez ktoré sa priskrutkuje vzpera, pomocou týchto vzpier budú spojené obidve časti základne. Vzpera predstavuje plastový hranol, tak vysoký ako je rozmer serva M , tento rozmer je ale vhodné zmenšiť o $2mm$, aby pri utiahnutí vznikalo



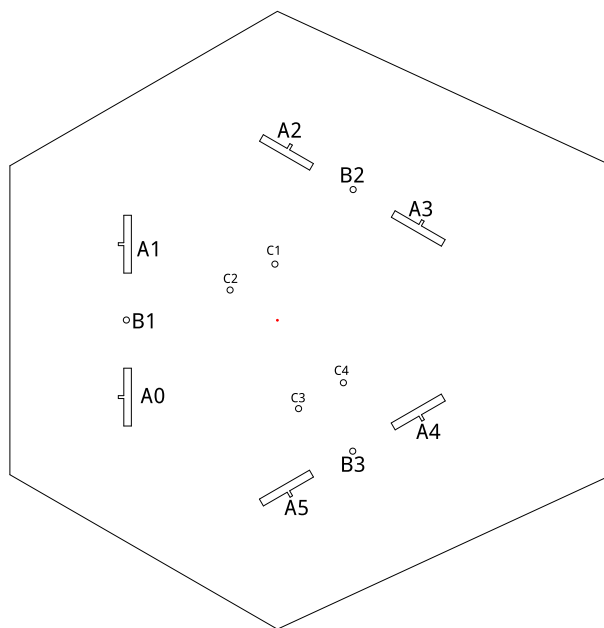
Obrázok 3.4: Bežné servo a označenia jeho rôznych rozmerov

na servo dostatočné pnutie, toto pnutie bude zabráňovať nežiadúcim pohybom serva v prípade, že otvory $A0 - A5$ nie sú dostatočne presne vyrezané.

- $C1 - C4$ sú otvory na upevnenie dosky slúžiacej na napájanie serií a doplnkových rozhraní. Pre správne umiestnenie týchto otvorov, je nutné poznať presné rozmery tejto dosky a taktiež rozmer H serií, nakoľko je nevyhnutné umiestniť túto dosku tak, aby nezavadzala upevneniu žiadneho serva.

Ako je z obrázku 3.5 jasné, táto časť nemá tvar pravidelného hexagónu, ale je mierne asymetrická, taktiež je rozmerovo značne väčšia, než pohyblivá platforma. Tieto zmeny boli vykonané pre zlepšenie stability celej Stewartovej platformy. Po umiestnení fotoaparátu s objektívom na platformu, sa ťažisko platformy nachádza veľmi vysoko, a pohyby (najmä translačné) spôsobujú že ťažisko sa na osi x a y približuje k okrajom spodnej časti základne, čo spôsobuje značne zníženú stabilitu platformy. Preto bola veľkosť tejto spodnej časti zväčšená pre dosiahnutie zlepšenej stability, tento krok je veľmi účinný, so stúpajúcou váhou zaťaženia sa stáva prakticky nevyhnutný pre dosiahnutie dostatočnej stability platformy. Asymetria vyplynula zo špecifických požiadavok na našu platformu, nakoľko fotoaparát s pripevneným objektívom nanešťastie nemá ťažisko v osi pohyblivej platformy – na upevňovacej skrutke, ale je posunutú smerom ku objektívu (miera posunutia ťažiska samozrejme najviac závisí od váhy objektívu). Preto bolo zvolené toto asymetrické riešenie, nakoľko vieme že váha nebude nikdy umiestnená v osi platformy, ale zároveň vieme, že vždy bude otočená na platforme rovnakým smerom. Bol zvolený špecificky tento smer asymetrie pretože upevňovacie body pohyblivej platformy sa nachádzajú priamo nad “stredom” tejto asymetrickej časti, taktiež v tejto pozícii sa upevňovacie body nachádzajú najďalej od osi platformy, navyše pri tomto usporiadaní sú pod fotoaparátom priamo umiestnené dva upevňovacie body, takže túto nadmernú váhu nesú takmer úplne tieto dve servá. Pri inom otočení ($\pm 30^\circ$) by táto záťaž bola viac sústredená na jedno servo, respektíve pri otočení $\pm 60^\circ$ od nami zvolenej pozície, by síce väčšiu časť váhy niesli 4ri servá, ale vzdialenosť upevňovacích bodov pohyblivej platformy na osi x od osi tejto platformy by bola značne kratšia – 3.3cm a 2.5cm oproti 6.3cm v nami zvolenej polohe, preto je výhodnejšie použiť zvolené otočenie.

Na spodnú časť je taktiež nutné umiestniť protišmykové nožičky. Tieto nožičky je najvhodnejšie umiestniť do jednotlivých rohov spodnej strany základne, v tejto pozícii sú najúčinnnejšie. Budú zvyšovať stabilitu platformy ale predovšetkým zamedzia nežiaducemu posúvaniu platformy – toto vzniká nakoľko základňa aj so servami je ľahšia než pohyblivá platforma s fotoaparátom. Preto pri translačných pohyboch v osiach x a y má základňa

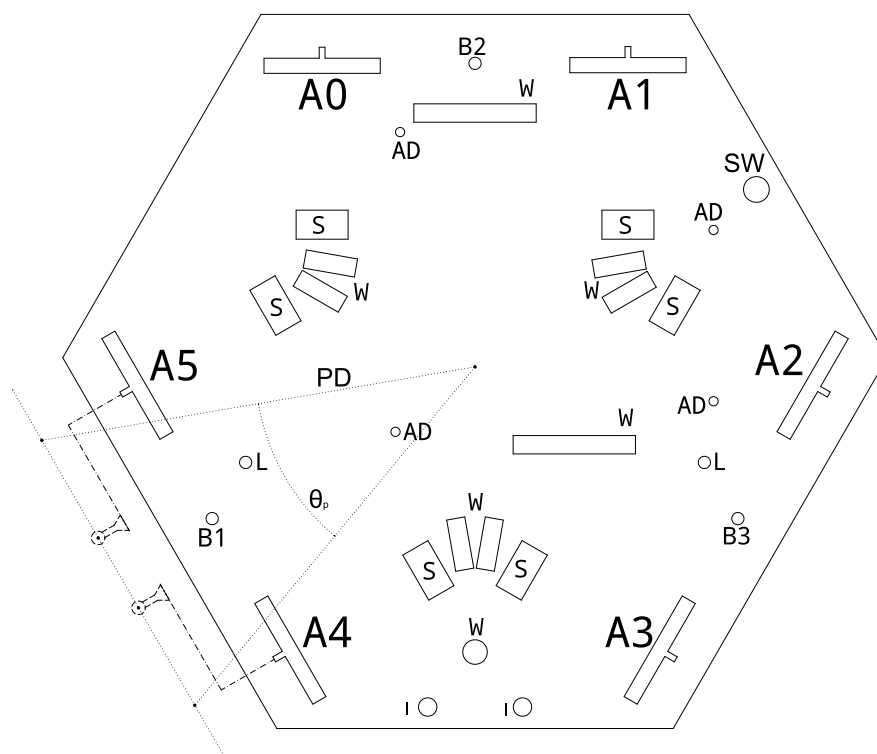


Obrázok 3.5: Spodná časť základne zmenšená o 60%

tendenciu “behať po podložke”, nakoľko je jednoduchšie pohnúť ľahkou základňou než ťažkou platformou. Tento problém riešia tieto protišmykové nožičky, ktoré zabránia tomuto pohybu dostatočným zvýšením trenia, samotná plastová základňa má veľmi nízke trenie, preto kladie iba malý odpor, navyše ak je výška upevňovacích častí serva pri ich kolmom uložení na základňu vyššia, než je hrúbka použitého materiálu, tieto časti budú pretŕčať zo spodnej strany, a budú sa správať ako nožičky – nakoľko majú malú plochu a vznikne malé trenie medzi nimi a podložkou, platforma by mala veľmi silné tendencie vykonávať nežiadúce pohyby, použitie dodatočných protišmykových nožičiek je v tomto prípade absolútne nevyhnutné.

Zoznam otvorov na vrchnej časti základne ukázanej na obrázku 3.6:

- *A0* – *A6* sú otvory pre upevňovaciu časť serva
- *B1* – *B3* sú otvory, cez ktoré sa priskrutkuje vzpera, pomocou týchto vzpier budú spojené obidve časti základne.
- *S* sú otvory pre káble vedúce zo seriev. Vzďialenosť a veľkosť tohto otvoru je nutné zvoliť podľa fyzických proporcií serva a rozmerov jeho konektoru.
- *W* sú otvory pre kabeláž, z estetického, a funkčného hľadiska (napájací obvod sa nachádza na spodnej časti základne, taktiež aby kabeláž nezavadzala tiahlam, pákam a podobne) je nutné všetku kabeláž prevliecť cez tieto otvory tak, aby sa nachádzala v priestore medzi servami kde nemôže prekážať. Z estetického hľadiska je možné túto kabeláž tu vyviazať pomocou elektrikárskej zdrhovacej pásky.
- *AD* do týchto otvorov sa umiestnia distančné stĺpiky pre upevnenie Arduina. Doska Arduina je priskrutkovaná o tieto distančné stĺpiky, ktoré zabezpečia dostatok



Obrázok 3.6: Vrchná časť základne zmenšená o 15%

priestoru pod doskou na vedenie kabeláže.

- L otvory pre upevnenie hranolov o ktoré je pripevnený LCD displej.
- SW otvor pre vypínač napájania platformy, jeho vypnutím dôjde k prerušeniu napájania serv a doplnkových rozhraní.
- I otvory pre upevnenie IrDA prijímača.

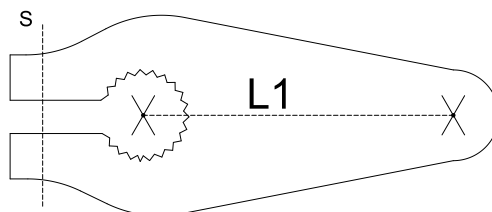
Pre správne určenie pozície otvorov $A0$ – $A5$ je nutné správne zvoliť vzdialenosť PD , táto vzdialenosť sa odvíja od veľkosti RD na pohyblivej časti platformy ako už bolo spomínané vyššie. Tento proces je aj zároveň opačný – v prípade že by vznikla vzdialenosť PD taká, že by platforma nebola uskutočniteľná – veľkosť seriev by bola príliš veľká a servá by si zavádzali, potom je nutné túto vzdialenosť zväčšiť na realizovateľnú úroveň a adekvátne zväčšiť aj vzdialenosť RD . Po zvolení tejto vzdialenosti je nutné od nej odrátať veľkosť určenú parametrom G serva a výškou upevňovacieho čapu a hrúbkou páky, približne v tejto vzdialenosti by sa mala nachádzať spodná časť otvoru pre servá. Vzdialenosť medzi jednotlivými servami v dvojici je obmedzená iba tým, aby sa oba otvory nachádzali na základni a poskytovali dostatok priestoru pre páky, táto vzdialenosť ale obmedzuje maximálnu možnú dĺžku použitých pák a tým aj rozsahov pohybu, čím je väčšia vzdialenosť medzi servami, tým je možné použiť väčšie páky. Medzi pákami je podstatné nechať dostatok priestoru aby si nezavádzali pri pohybe seriev ani po namontovaní čapov na páky. Hrana výrezu základne by mala byť vzdialená od spodnej časti upevňovacieho otvoru o rozmer K . Preto je nutné základný rozmer strany základne vhodne zmenšiť, respektíve postačí upraviť na tento roz-

mer v troch smeroch v ktorých sú pripevnené servá, platforma len nebude plne pravidelná, žiadny iný následok to neprinesie.

Umiestňovanie ostatných komponentov je pomerne jednoduché. Pri ich umiestňovaní je treba dodržiavať iba jedno základné pravidlo: zachovať skonštruovateľnosť základne. Otvory pre upevňovanie komponentov je treba umiestniť tak, aby k nim bol prístup a nepretŕčali tam, kam nemajú – nie je vhodné umiestniť upevňovací otvor priamo nad servo a podobne. Taktiež je absolútne nevyhnutné poskytovať komponentom dostatočnú vzdialenosť medzi nimi aby si navzájom nezavadzali, netreba zabudnúť aj na to, že je potrebné poskytnúť dostatok miesta aj pre kabeláž, neschopnosť doviesť jeden kábel na miesto kde ho treba dokáže platformu absolútne znefunkčniť a vyžiada si ďalšie zmeny návrhu. Je treba dávať pozor na všetky káble vedúce von z platformy a miesto z kadiaľ a ako budú vyvedené, predovšetkým USB kábel Arduina dokáže veľmi dobre prekážať tiahlam. Taktiež kábel privádzajúci napájanie je vhodnejšie neviest' pomedzi páky seriev, ale z bočnej strany medzi servami aby nemohol zavádzať pohybu pák.

Návrh pák, tiahel a postup zhotovenia platformy

Páky priamo dodané so servom sú vyrobené z pomerne mäkkého a ohybného plastu čo je pre naše potreby nežiadúce. Preto vznikla nutnosť tieto páky vytvoriť vlastné, respektíve zaobstarať hliníkové alebo uhlíkové páky, ktoré by tento problém vyriešili. Nakoľko hliníkové a uhlíkové páky sú zbytočne finančne náročné riešenie, boli vytvorené vlastné páky špecificky pre nami vytvorenú platformu. Pri navrhovaní pák bolo okrem rozmerov nevyhnutné brať ohľad na to, aby sa páka po vyrezaní dala osadiť na servo a dostatočne pevne upevniť.



Obrázok 3.7: Šablóna výrezu páky serva (pre lepšiu názornosť je páka zväčšená o 200%), prerušované čiary a čiary tvoriace “X” nie sú súčasťou návrhu

Návrh páky začal určením celkovej dĺžky páky – vzdialenosti od výstupnej osi serva po koniec páky. Táto vzdialenosť vyplýva zo vzdialenosti medzi susednými servami, celková dĺžka páky musí byť menšia než je polovica tejto vzdialenosti aby si páky nezavadzali pri otáčaní. Následne je nutné určiť umiestnenie otvoru na pripevnenie čapu tiahla, tento otvor musí byť dostatočne vzdialený od okrajov tak, aby sa neoslabila pevnosť páky a nehrozilo zlomenie v tomto bode, použitý plast je pomerne tvrdý a zároveň veľmi krehký, preto je zlomenie pomerne časté. Vzdialenosť výstupnej osi serva a upevňovacieho bodu čapu sa nazýva efektívna dĺžka páky serva – na obrázku 3.7 to predstavuje vzdialenosť $L1$. V prvej verzii návrhu pák bol otvor pre čap značne väčší – priemer mal $1.3mm$ nakoľko toto je rozmer potrebný pre upevňovaciu skrutku na čap. Ale počas výrezu dochádzalo k veľkej deformácii tohto otvoru – môj osobný názor je ten, že priemer otvoru je príliš malý

a dochádzalo k celkovému prehrievaniu materiálu od laseru a preto vznikli deformácie – otvor zvláštnych, často kónických tvarov, neoddelený výrezaný materiál ale “zapečený” v otvore a podobne. Preto bolo zvolené takéto riešenie, naznačil sa jediný bod, na základe neho sa manuálne vyvrta otvor pre čap. V tejto prvej verzii bol tento otvor zdeformovaný približne v štyroch pákach, v dvoch dostatočne na to aby absolútne neplnil svoju funkciu. Otvor pre os serva je spravený “zúbkatý” aby bolo upevnenie istejšie a nemohla sa páka pretáčať. Systém upevnenia som zvolil taký, aký sa používa aj na univerzálnych hliníkových pákach – do predĺženej ľavej časti páky je spravený výrez pre umožnenie ohybu okolo osi serva. Následne sa priečne cez túto predĺženú časť navíta diera, ňou prejde skrutka, na druhej strane bude jej matka, toto je vidieť na obrázku kde táto skrutka nesie označenie *S*. Doťahovaním tejto skrutky dochádza k zvyšovaniu tlaku na os serva a tým k upevneniu. Ako už bolo spomínané, tento plast je veľmi krehký, čo sa prejavilo v prvom návrhu pák kde bola zvolená nedostatočná hrúbka materiálu okolo osi serva a dochádzalo k ich lámaniu počas doťahovania, samotný systém doťahovania sa osvedčil, upevnené páky držia výborne, majú iba minimálnu vôľu pohybu. Preto vo finálnom návrhu je hrúbka materiálu okolo výstupnej osi serva väčšia.

Tiahla sa skladajú z troch častí – samotného oceľového drôtu a dvoch upevňovacích guľových čapov, ktoré sa upevnia do páky serva, respektíve pohyblivej platformy. Na drôt je potrebné nakoncoch vyrezať závit, ktorý bude pasovať do upevňovacieho čapu. Tento závit je potrebný preto, aby sa pomocou neho pevne upevnil čap, a hlavne sa pomocou neho dá jemne doladovať celková dĺžka tiahla – stačí otáčať čapom a vďaka závitú sa bude celková dĺžka tiahla predlžovať respektíve skracovať. Taktiež je vhodné pred naskrutkovaním čapu dať na závit bežnú matku, po naskrutkovaní čapov a nastavení správnej dĺžky tiahla tieto matky pevne dotiahneme až po upevnené čapy, táto matka ich zakončuje proti nežiadúcemu otáčaniu. Celková dĺžka tiahla je veľmi variabilná. Minimálnu možnú dĺžku je možné zistiť tak, že všetky servá sa uvedú do najnižšej polohy (-90°), pohyblivá časť platformy sa umiestni tesne nad najvyšší bod základne, v našom prípade tesne nad horný okraj dosky s LCD displejom, potom sa zmeria vzdialenosť od otvoru na páke serva po adekvátny otvor na platforme, toto je minimálna vzdialenosť. Pri tejto dĺžke by bolo skonštruovanie pomerne problematické, taktiež by začali pri pohyboch a záťaži pôsobiť sily nežiadúcimi smermi pretože uhol zvieraný medzi pákou serva v základnej polohe a tiahlom by bol veľmi nízky, toto má za následok aj zníženú presnosť pohybu. Z týchto dôvodov vyplýva, že je vhodné túto vzdialenosť predĺžiť tak, aby tento uhol bol v rozmedzí $55 - 70^\circ$. Horná hranica dĺžky je obmedzená iba klesajúcou stabilitou platformy nakoľko zvyšovanie pohyblivej platformy zvyšuje aj ťažisko platformy, taktiež so vzrastajúcou dĺžkou tiahel sa zvyšuje aj nepresnosť pohybov, nakoľko sa viac prejavuje prirodzená ohybnosť materiálu z ktorého je tiahlo vytvorené. Preto v našej implementácii platformy sme zvolili celkovú dĺžku tiahla 12cm čo predstavuje zvieraný uhol 63° . Taktiež ako už bolo spomínané pri opise návrhu základne, je potrebné tiahlo vhodným spôsobom zohnúť. Tým sa aj jemne zmení celková dĺžka tiahla – vstupom pre riadenie je vzdialenosť osí čapov.

Predtým než zrejším postup stavby platformy je ešte nutné spomenúť, že pri akomkoľvek návrhu je nutné dbať aj na maximálnu presnosť výrezu a prispôbovať jej všetky rozmery. Rezba laserom má maximálnu presnosť rezu (šírka rezu) 0.3mm . Tento fakt je pre mnoho rezov nepodstatný a môže byť zanedbaný, ale pre otvory ako sú napríklad výrezy pre upevňovacie časti serv, výrez v páke pre os serva, výrezy pre skrutky, dokáže byť tento rozdiel dostatočný na to, aby spôsobil neželané problémy. Taktiež pri manuálnom vrtaní do tohto plastu treba byť veľmi opatrný, má nízku teplotu tavenia a vďaka treniu pri vrtaní dochádza k nataveniu vrtaného materiálu, v prípade zaseknutia vrtáku počas vrtania do-

chádza prakticky okamžite k zatvrdnutiu tohto materiálu, čo okamžite zalepí vrták a ten je potom nemožné jednoducho vytiahnuť. Táto situácia ide riešiť len veľmi zložito, a môže viesť k znehodnoteniu daného výrezu.

Teraz popíšeme postup stavby platformy.

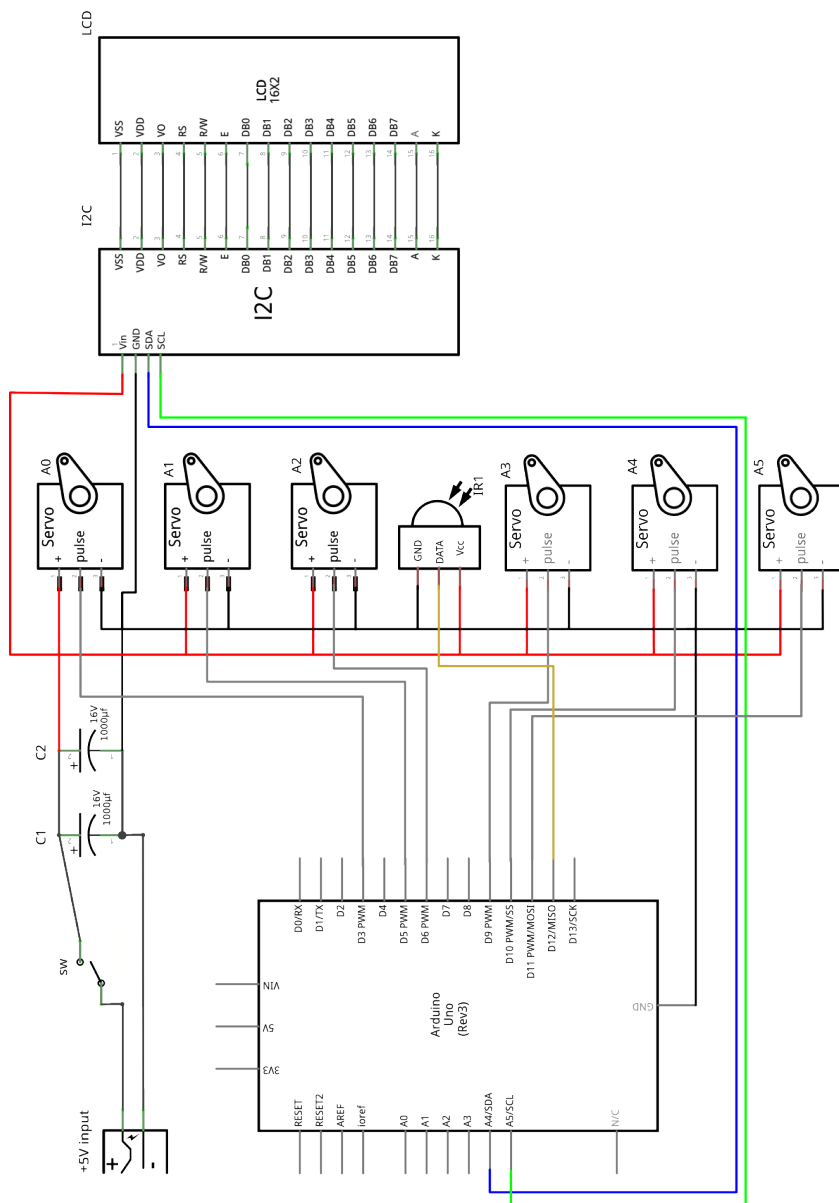
1. Vytvorenie 6 kusov tiahel – narezanie drôtu na potrebnú dĺžku, narezanie závitov na oba konce drôtu, naskrutkovanie čapov. Po ich zložení je potrebné zohnúť ich a nastaviť na správnu dĺžku, všetkých 6 tiahel musí mať rovnakú dĺžku, rozdiely v dĺžke spôsobia nepresnosť pohybu pohyblivej platformy. Zároveň aj pripevníme páku serva o spodnú časť tiahla.
2. Príprava spodnej časti pohyblivej platformy. Vyvrtanie všetkých otvorov pre upevnenie čapov tiahel, tieto otvory treba vrtáť s extrémnou opatrnosťou aby nedošlo k znehodnoteniu výrezu. K čapom boli dodané upevňovacie skrutky, tieto ale v tomto prípade boli nahradené pomocou klincov, nakoľko sú dlhšie, ich upevnenie v materiáli je pevnejšie. Zároveň priložené skrutky sú veľmi tenké – 1.5mm a z nekvalitného materiálu, pri ich skrútkovaní občas došlo k “odkrúteniu” skrutky. K tomu došlo preto, lebo pri skrútkovaní vzniklo trenie dostatočne veľké na to aby veľmi jemne natopilo materiál, ktorý následne túto skrutku dokonale zalepil a zabránil jej ďalšiemu otáčaniu, preto pri skrútkovaní do tohto plastu, je potrebné aby skrútkovanie prebiehalo veľmi opatrne a pomaly.
3. Pripevnenie hornej časti pohyblivej platformy o spodnú časť, stačí zaskrutkovať tri skrutky, je veľmi vhodné použiť skrutky so skosenou hlavou, jemne navítať otvory vrtákom, ktorý má rovnaký priemer ako má hlava skrutky, vďaka tomu je možné skrutku zatiahnuť tak, že nebude vytráčať z plastu a tým pádom nebude zavadzať a nebude hroziť poškriabanie fotoaparátu o hlavu skrutky.
4. Vytvorenie a pripevnenie napájacej dosky o spodnú časť základne. Skrátenie signálových káblov a káblu uzemnenia na potrebnú dĺžku a vytvorenie koncoviek.
5. Pripevnenie IrDA prijímača a prevlečenie jeho káblov cez pripravené otvory.
6. Pripevnenie vzpier do spodnej časti základne.
7. Príprava serií – vloženie upevňovacích častí serií do otvorov A0 – A5 na hornej časti základne, pri tom je nutné aj prevliecť kábel serva cez potrebné otvory aby káble trčali do spodnej strany
8. Zapojenie káblov serií, je nutné dodržať správne otočenie konektoru, pri opačnom otočení servá nefungujú, treba si dať obzvlášť pozor na toto správne otočenie, nakoľko pre otočenie konektoru by bolo treba opätovne rozobrať celú platformu.
9. Uloženie hornej časti základne na správne miesto. Popri pokladaní je potrebné previesť káble vedúce k Arduinu cez pripravené otvory, a zapojiť ich. Taktiež treba zapojiť napájanie IrDA prijímača a LCD displeja do napájacej dosky. Teraz je vhodný čas upratať a vhodne vyviazať kabeláž.
10. Upevnenie vzpier aj v hornej časti základne, teraz by servá mali byť pevne upevnené, nemali by sa pohybovať, ak sa pohybujú, je možné ich dodatočne upevniť pomocou tavnej pištole.

11. Zaskrutkovanie dištančných stĺpikov do otvorov *JD* na hornej časti platformy, na tieto stĺpiky sa položí Arduino a pripevní sa pomocou skrutiek o stĺpiky. Zároveň aj zapojíme všetku kabeláž do Arduina.
12. Umiestnenie a pripevnie vypínača napájania do otvoru *SW*
13. Teraz pripevníme LCD displej – do otvorov *L* pripevníme hranoly, o tieto hranoly priskrutkujeme LCD displej, zapojíme do neho potrebnú kabeláž.
14. Prepojíme pohyblivú platformu so základňou – upevníme páky seriev na tiahle o servá tak, že ich pripojíme na servá, ktoré sú na pozícii otočenej o $\pm 60^\circ$. Páky musia smerovať tak, že sú v čo najhorizontálnejšej pozícii a upevňovací čap na páke je uložený bližšie k druhému servu, nie smerom od neho.

3.2 Zapojenie komponentov

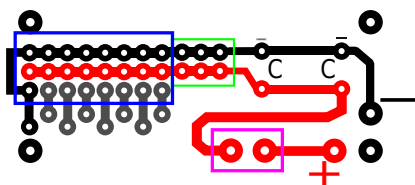
Pre vytvorenie funkčnej Stewartovej platformy je taktiež nutné správne zapojenie rôznych komponentov. Ide predovšetkým o napájanie platformy a o jednotlivé vstupno-výstupné komponenty.

Hlavný problém, ktorý je potrebné pre vytvorenie platformy riešiť je napájanie seriev. Odber prúdu servami značne prevyšuje schopnosti napájania pomocou dosky Arduina. Arduino dokáže na výstupnom napájacom pine $+5V$ poskytnúť prúd maximálne $200mA$, toto je pre potreby seriev nedostatočné, nakoľko podľa dokumentácie [4] je odber prúdu pri otáčaní bez záťaže $150mA$. Platforma obsahuje 6 seriev, to znamená že odber prúdu by pri 6tich servách bol $I_p = I_s * n$, kde I_p je celkový prúd odoberaný servami, I_s je prúd odoberaný jedným servom, n je počet seriev. Po dosadení do rovnice a jej vyriešení zistíme, že by odoberaný prúd servami bez záťaže mal byť maximálne $900mA$ čo značne prevyšuje schopnosti napájania Arduina. Tento prúd určený výrobcom je horná hranica, reálny odoberaný prúd bez záťaže je značne nižší, ako bude uvedené v poslednej kapitole kde sa venujeme testovaniu. Preto je nutné obstaráť externé napájanie seriev. Pre napájanie bol zvolený externý spínaný adaptér poskytujúci požadované napätie $+5V$, tento adaptér je schopný poskytovať stály prúd do $2000mA$, čo predstavuje prúd $330mA$ na servo. Táto hodnota by mala byť dostatočná, navyše adaptér je krátkodobo schopný poskytnúť aj vyšší prúd. Pre zjednodušenie manipulácie s platformou, sa tento adaptér pripája pomocou bežného $2.5mm$ napájacieho konektoru. Platforma disponuje aj vypínačom napájania, ktorý spôsobí, že po vypnutí servá a všetky doplnkové komponenty zostanú bez napájania.



Obrázok 3.8: Základná schéma celkového zapojenia platformy.

Ako už bolo spomínané a je vidieť zo schémy, servá disponujú troma pripájacími káblami + – *pulse*. Preto bolo potrebné navrhnuť plošný spoj, ktorý bude umožňovať správne pripojenie seriív a napájania. Tento plošný spoj je navrhnutý takto:



Obrázok 3.9: Navrhnutá doska plošných spojov. Pre lepšiu ilustráciu sa tu nachádzajú pridané označenia a rôzne farby

Na túto dosku je najskôr privedené napájanie $+5V$ zo vstupného konektoru na body $+$ a $-$. Hneď po privedení napájania do dosky, napájanie kladnej vetvy prechádza vypínačom, ten je na tomto nákrese pripojený do bodov vyznačených purpurovým obdĺžnikom. Potom napájanie prechádza dvoma filtračnými kondenzátormi označenými C . Tieto kondenzátory sú elektrolitické, pri ich zapájaní je preto potrebné dodržať správnu polaritu. Tieto kondenzátory musia zvládäť napätie vyššie ako $5V$ a mať čo najvyššiu kapacitu, v tomto prípade boli použité dva kondenzátory $16V$ s kapacitou $1000\mu f$. Tieto kondenzátory majú dostatočnú kapacitu aby pokryli spotrebu serva pri špičkovom vysokom odbere prúdu, servá sú náročné na stabilné a dostatočne silné napájanie, ak im zdroj nezvládne poskytnúť dostatok prúdu, servá žiaľbohu začnú vykonávať takmer náhodné pohyby. Preto je potrebné za každých okolností poskytovať dostatočne silné napájanie.

Po vyhladení kondenzátormi nasledujú výstupné piny napájania respektíve signálu. V zelenom dutinkové pole, do ktorého sú pomocou kolíkov pripájané dodatočné komponenty, LCD displej (presnejšie jeho I2C riadenie) a IrDA príjmač. Následne nastupuje pole kolíkov, do ktorého sú pripojené servokonektory, to je označené modrou farbou. Tu sú všetky tri vetvy, záporná – čierna časť, kladná – červená časť, a signálna – sivá časť. Do spodnej polovice signálnej časti sú priletované káble, ktoré vedú do Arduina na pripojenie seriiev. Na obrázku taktiež môžeme vidieť jednu špecialitu, posledný kábel vedúci do arduina nevedie signál, ale je pripojený na zápornú vetvu tj. na uzemnenie. Pre správnu funkciu seriiev, a celej platformy je nevyhnutné, aby bolo uzemnenie externého napájacieho adaptéru spojené so zemou na Arduine, tento kábel sa pripája do dutinky na Arduine označenej GND . Pre servá sú pripravené dutinky v časti s digitálnym výstupom, tieto majú dodatočné označenie symbolizujúce schopnosť posielania PWM signálu. V prípade použitého Arduina UNO ide o piny s označením $\{3, 5, 6, 9, 10, 11, 12\}$. Pre PWM signál na ostatných digitálnych pinoch by bolo nevyhnutné použiť špeciálne knižnice, vytvorené komunitou a nepodporované výrobcom Arduina. Preto sú všetky servá zapojené presne do týchto pinov. Poradie serv nie je nevyhnutné dodržať, ale pre zjednotenie výpočtu polôh je vhodné pripojiť servá v jednom smere – či už po/proti smeru hodinových ručičiek.

LCD displej je pripojený prostredníctvom I2C rozhrania, nie priamo na digitálne piny, po pripojení seriiev by ich bol nedostatok. I2C rozhranie sa pripája prostredníctvom SDA a SCL dutiniek, tie sa na Arduine UNO nachádzajú na analógových pinoch – SCL na pine $A5$, SDA na pine $A4$. Pre pripojenie IrDA príjmača je okrem napájania potrebné pripojiť iba jeden kábel do digitálneho vstupu, v našom prípade sme zvolili dutinku s číslom 12.

3.3 Návrh softvéru

V tejto podkapitole sa budeme venovať návrhu softvérovej časti platformy. Ide predovšetkým o riadiaci softvér platformy, o pomocné funkcie, spomenieme tu použité doplnkové knižnice pre prácu s LCD displejom pripojeným pomocou I2C rozhrania a knižnice pre komunikáciu pomocou IrDA, samozrejme bude vysvetlená aj vytvorená knižnica umožňujúca riadenie platformy z programu implementujúceho našu knižnicu.

Riadiaci program Arduina – riadenie platformy

Opíšeme si riadiaci program Arudina. Riadenie je napísané v jazyku Wiring, ide o zjednodušený jazyk $C/C++$. Projekt v tomto jazyku musí obsahovať dve základné funkcie `setup()`, `loop()`. Funkcia `setup` sa vykoná po spustení Arduina pred volaním funkcie `loop`. Táto funkcia je veľmi vhodná na inicializáciu hardvérových komponentov, nadviazanie spojenia a

podobne. Funkcia `loop` sa vykoná následne po vykonaní funkcie `setup`, na rozdiel od nej je táto funkcia donekonečna opakovaná.

Ako je zvyčajné v jazyku C/C++, aj tuto sa v úvode nachádzá pripojenie knižníc, v našom prípade ide o: `Servo.h`, `IRremote.h`, `Wire.h`, `LiquidCrystal_I2C.h`. Knižnica `servo` je súčasťou distribúcie Arduina, umožňuje pohodlnú prácu so servami. Knižnica `wire` taktiež patrí do knižníc distribuovaných s Arduinom. Zvyšné knižnice nie sú súčasťou oficiálnej distribúcie Arduina, ale pochádzajú z externých zdrojov od komunity, ako už bolo spomínané slúžia pre riadenie LCD displeja a pre prijímanie IrDA signálu.

Aby sme mohli opísať implementovaný princíp riadenia, je nutné dodefinovať niektoré parametre, ktoré závisia od konštrukcie platformy.

Agoritmus 1:

```

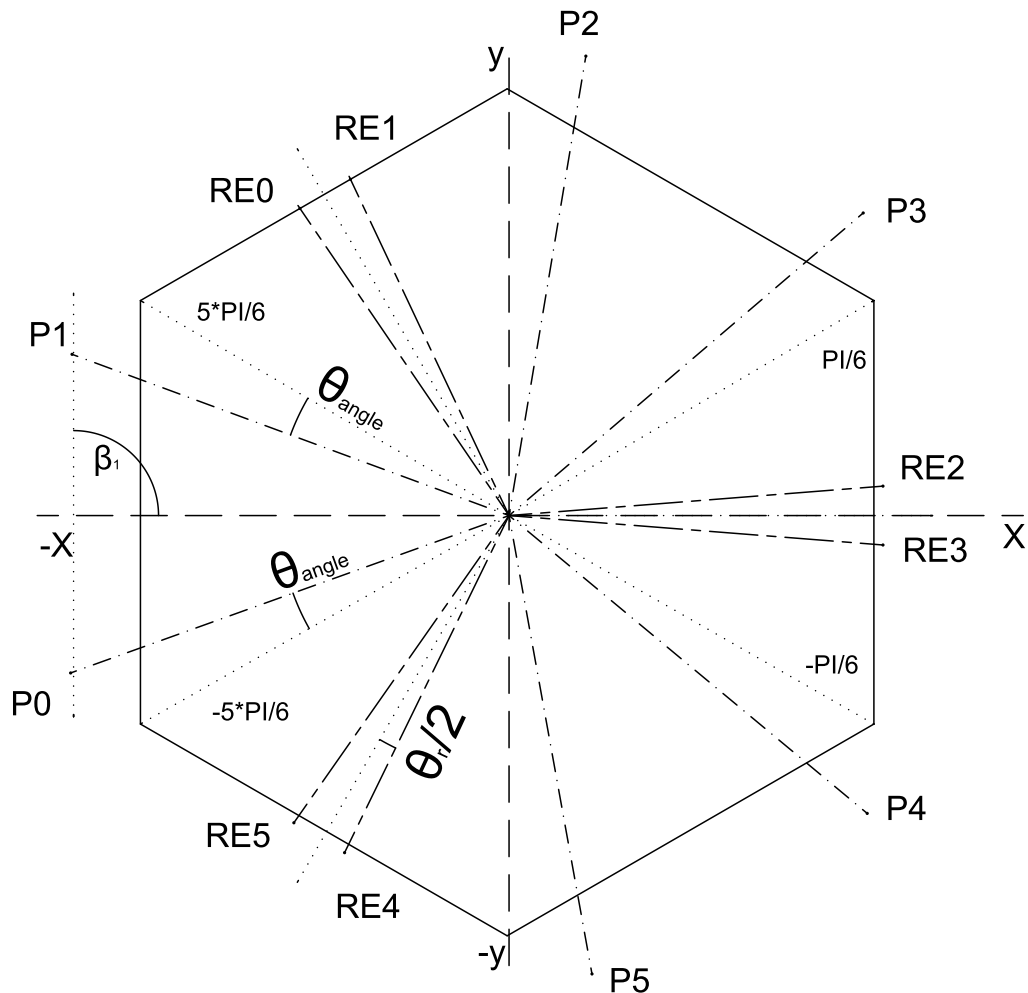
    theta_r = radians(8), theta_p = radians(37.5),
    p[2][6] = {
        {
            -PD*cos(deg30-theta_angle), -PD*cos(deg30-theta_angle),
            PD*sin(theta_angle), PD*cos(deg30+theta_angle),
            PD*cos(deg30+theta_angle), PD*sin(theta_angle)
        },
        {
            -PD*sin(deg30-theta_angle), PD*sin(deg30-theta_angle),
            PD*cos(theta_angle), PD*sin(deg30+theta_angle),
            -PD*sin(deg30+theta_angle), -PD*cos(theta_angle)
        }
    },
    re[3][6] = {
        {
            -RD*sin(deg30+theta_r/2), -RD*sin(deg30+theta_r/2),
            -RD*sin(deg30-theta_r/2), RD*cos(theta_r/2),
            RD*cos(theta_r/2), -RD*sin(deg30-theta_r/2),
        }, {
            -RD*cos(deg30+theta_r/2), RD*cos(deg30+theta_r/2),
            RD*cos(deg30-theta_r/2), RD*sin(theta_r/2),
            -RD*sin(theta_r/2), -RD*cos(deg30-theta_r/2),
        }, {
            0, 0, 0, 0, 0, 0
        }
    };

```

- **theta_r** - Uhol zvieraný prípojnými bodmi v pohyblivej platforme. Tento uhol je vyznačený na obrázku 3.2, tu je označený ako uhol θ_r . Tento uhol je nevyhnutný pre výpočet základných pozícií prípojných bodov.
- **theta_p** - Uhol zvieraný medzi výstupnými osami dvoch susediacich serií. Tento uhol je vyznačený na obrázku 3.6 a je označený ako θ_p . Slúži na výpočet aktuálnej hodnoty pozície výstupných osí serií.

- `theta.angle` - Výpočet je uskutočnený pomocou $\frac{\pi - \text{theta.p}}{2}$
- `RD` - Vzďialenosť od stredu pohyblivej platformy po upevnené tiahlo. Táto vzdialenosť je vyznačená na obrázku 3.2.
- `PD` - Vzďialenosť od stredu základne po výstupnú os serva. Táto vzdialenosť je vyznačená na obrázku 3.5.
- `p[] []`, `re[] []` - Dvozmerné pole pozícií upevňovacích bodov pohyblivej platformy (`re`) a pozícií výstupnej osi serva na základni (`p`), ich výpočtu sa ďalej budeme venovať podrobnejšie. Pole `p` neobsahuje informáciu o veľkosti v osi `z`, nakoľko táto je vždy nulová.

Teraz je podstatné si vysvetliť postup výpočtu hodnôt `p` a `re` nakoľko tieto sú nevyhnutným vstupom pre riadenie platformy a doposiaľ neboli vysvetlené.



Obrázok 3.10: Nákres rozvrhnutia jednotlivých prípojných bodov, tento nákres tvorí podklad pre výpočet súradníc bodov. Prepony vzniknutých trojuholníkov majú dĺžku `PD` respektíve `RD`

Pre výpočet týchto polôh nám stačia základné goniometrické rovnice, nakoľko vieme dĺžku prepony (PD respektíve RD) a potrebný uhol otočenia, vytvorenie rovníc je následne jednoduchou úlohou ako vyplýva z nákresu rozmiestnenia prípojných bodov. Pri tvorbe nákresu pre zjednodušenie tvorby rovníc je potrebné dodržať umiestnenie jednotlivých bodov tak, ako sú umiestnené reálne, a zároveň je v tejto chvíli možné zvoliť akým smerom bude smerovať os x (to samozrejme ovplyvní aj os y). Toto bolo využité pri tvorbe rovníc vytvorenej platformy, keďže je základňa asymetrická a bolo potrebné dosiahnuť špecifické smerovanie osi x . Tieto rovnice následne zapíšeme do polí \mathbf{p} , \mathbf{re} , a dodržiujeme potrebné poradie zápisu do polí.

Funkcia `loop` sa vykonáva v nekonečnom cykle a obsahuje tri hlavné časti:

- Prvá časť slúži na spracovanie dát prišlých cez sériové rozhranie. V tejto časti sa podľa príslého riadiaceho znaku zvolí požadovaná akcia. Pri obdržianí a odosielaní hodnoty cez sériové rozhranie prichádza k prevodu hodnôt typu *float* na *int*, pre lepšie zachovanie presnosti je číselná hodnota najskôr vynásobená konštantou 100 a po prevode na *int* následne vydelená touto konštantou, čiže zostáva zachovaná presnosť udania hodnoty na stotiny, to je pre potreby riadenia platformy absolútne dostatočná hodnota.
- Druhá časť sa stará o vypisovanie aktuálnej pozície platformy v prípade, že je zapnuté vykresľovanie a je dostupný LCD displej. Táto časť zaobstaráva zobrazenie dát každých 1.5s, pričom dôjde k zobrazeniu striedavo aktuálneho vektora posunutia a aktuálneho vektora rotácie.
- Tretia časť slúži na riadenie pomocou IrDA v prípade že je dostupné IrDA a je zapnuté riadenie podľa IrDA.

Hlavná funkcia riadenia zmeny pozície platformy je `setPos(float[])`. Táto funkcia dostáva ako parameter pole obsahujúce žiadanú zmenu pozície pohyblivej platformy, prvé tri prvky obsahujú hodnotu translačného pohybu, druhé tri prvky poľa žiadaný rotačný pohyb. Je volaná vždy, keď príde ku zmene pozície. Počas implementácie riadenia platformy vyplynulo, že niektoré z riadiacich výpočtov spomínaných v predchádzajúcej kapitole nie sú správne. Špecificky ide o vzorce určené na výpočet α 2.3, na výpočet r 2.7, tj. multiplikátoru prevodu uhlu na dĺžku pulzu servu. Fakt, že zo v súčasnosti dostupných niekoľkých verziách riadenia platformy nie je ani jedna správna, iba zdôraznilo potrebu tvorby tejto práce. Preto tu nasleduje upravený postup výpočtu, ktorý poskytuje správne výsledky. Tento výpočet začína zistením žiadanej pozície pripevňovacích bodov na pohyblivej platforme. Pre získanie aktuálnej pozície i -teho prípojného bodu na platforme použijeme tento vzorec:

$$P'_i = T + {}^P R_B \cdot p_i \quad (3.1)$$

kde T je vektor posunu – skladá sa z vektoru počiatočného translačného posuvu platformy (nakoľko platforma môže mať domácu pozíciu posunutú aj v osiach x a y , v osi z je vždy nevyhnutné definovať vertikálne posunutie platformy voči základni), a z vektoru žiadaného posuvu platformy. Vektor p_i definuje počiatočné koordináty i -teho upevňovacieho bodu P_i . Týchto rovníc je 6, keďže platforma má 6 prípojných bodov.

Výsledkom výpočtu riadenia Stewartovej platformy riadenej pomocou RC serií je uhol α , keďže tento uhol sme schopní v ďalšom kroku riadenia priamo previesť na impulz vhodnej dĺžky pre servo. Z predchádzajúcich údajov sú pre nás neznáme iba A_i a α . Pre zistenie uhlu α je nevyhnutné zistiť pozíciu bodu A_i . Pozíciu bodu A_i vieme vypočítať, ak poznáme

hodnotu α , preto túto pozíciu získame tak, že hľadáme takú hodnotu α , pre ktorú bude vzdialenosť A_i a P_i rovnaká (respektíve odchýlka je dostatočne malá) ako je veľkosť s . Finálnu pozíciu bodu A_i získame takto:

1. Zvolíme si hodnotu α z rozsahu možného pohybu serva
2. Vypočítame pozíciu bodu A_i pri zvolenej hodnote α .
 - $A_i[x] = a * \cos(\alpha_i) * \cos(\beta_i) + B_i[x]$
 - $A_i[y] = a * \cos(\alpha_i) * \sin(\beta_i) + B_i[y]$
 - $A_i[z] = a * \sin(\alpha_i)$
3. Keďže v tejto chvíli vieme pozíciu pripevňovacieho bodu platformy, aj pripevňovacieho bodu na páke serva, môžeme vypočítať vzdialenosť týchto dvoch bodov.
 - $s' = \sqrt{(P_i[x] - A_i[x])^2 + (P_i[y] - A_i[y])^2 + (P_i[z] - A_i[z])^2}$
4. Porovnáme odchýlku $err = |s' - s|$ s vopred určenou požadovanou konštantou presnosti výpočtu, napríklad pri hodnote 0.01, je možný maximálny rozdiel vo vzdialenosti 0.25mm čo je menej než je maximálna presnosť nastavenia polohy servami, kvôli rôznym nepresnostiam v systéme (vôla na ozubení serva, vôla v upevnení páky, mechanické ohnutie páky serva, vôla v upevňovacom čape tiahla, a iné). V prípade, že je táto odchýlka menšia ako požadovaná presnosť, pokračujeme ďalším krokom postupu kde vypočítame dĺžku signálu odosielaného servu. Ak je odchýlka vyššia, vrátíme sa ku kroku 1 a vhodne zvolíme ďalšiu hodnotu α .

Po zistení hodnôt α je nutné previesť tieto na pulz do serva správnym spôsobom. Pre párne servá je rovnica:

$$W_i = W_i^0 + \alpha_i r \quad (3.2)$$

a pre nepárne servá je rovnica

$$W_i = W_i^0 - \alpha_i r \quad (3.3)$$

W_i predstavuje šírku impulzu, pri ktorej je páka i-teho serva v horizontálnej polohe (W_i slúži na "trim"). Vzorec na výpočet r je v tomto prípade takýto:

$$r = \frac{t}{\gamma}$$

Teraz môžeme zhrnúť celý postup riadenia:

1. Zadanie jednotlivých konštánt pozičných informácií o platforme $b_i, p_i, T, s, a, \beta_i$, ktoré vyplývajú z konštrukcie platformy, výpočet b_i a p_i bude ukázaný v ďalšej kapitole venovanej návrhu, riadeniu, a softvérovej implementácii.
2. Zadanie konštánt základných polôh serv W_i^0 a výpočet konštanty r
3. Zadanie hodnôt požadovanej pozície platformy ($x \ y \ z \ \Psi \ \theta \ \varphi$)
4. Výpočet požadovanej polohy platformy – výpočet pozícií prípojných bodov platformy 3.1
5. Výpočet uhlov otočenia serv α_i

6. Výpočet dĺžok pulzov pre jednotlivé servá s využitím vzorcov 3.2 a 3.3
7. Odoslanie PWM signálu servám
8. Návrat do štvrtého kroku pre opakovanie celého procesu

Voľba α a algoritmus jej hľadania je v tomto prípade najnáročnejšia funkcia vykonávaná počas riadenia. Možnosti obmedzenia prehľadávaného stavového priestoru v ktorom sa hľadá sú široké. V implementovanom riešení sa počiatočná hodnota α_i zvolí podľa poslednej známej hodnoty pre toto servo, v ďalších iteráciách je to stredná hodnota v zvolenom rozsahu min a max , následne sa vykoná potrebný výpočet pozície. Ak je dĺžka tiahla väčšia, vieme že upevňovací bod sa nachádza niekde medzi zvolenou hodnotou α a aktuálnou hodnotou hornej hranice hľadania, o opačnom prípade je to samozrejme naopak. Tento fakt nám umožňuje značne znížiť stavový priestor, v prípade voľby aktuálnej hodnoty α vždy z polovice rozsahu min a max by bol počet iterácií v triede logaritmickej zložitosti, vďaka tomu, že vieme že nová pozícia α sa vo väčšine prípadov bude nachádzať neďaleko aktuálnej pozície, voľbou tejto začiatkovej hodnoty výpočtu taktiež znižujeme náročnosť výpočtu.

Pre riadenie platformy bola vytvorená doplnková knižnica pre uľahčenie komunikácie s platformou a jej riadenie. Táto knižnica je napísaná v jazyku C++ ako bolo definované v požiadavkách, je navrhnutá tak, aby fungovala aj v prostredí OS Unix, aj v prostredí OS MS Windows. Knižnica pri vytvorení objektu platformy nadviaže spojenie s Arduinom cez sériové rozhranie, tuto si je potrebné uvedomiť, že nadviazanie spojenia spôsobí reset vykonávania programu na Arduine, a jeho samotné zavádzanie trvá približne 2.5s. Preto je po nadviazaní spojenia so sériovým rozhraním potrebné počkať 2.5s predtým než začneme Arduinu posilať nejaké riadiace dáta. Táto vlastnosť sa dá obísť zložito na softvérovej úrovni, alebo jednoduchšie na hardvérovej úrovni pridaním jedného kondenzátoru s hodnotou $10\mu f$ medzi *RESET* a $5V$. Táto knižnica má definované rozhranie, pri volaní funkcie z tohto rozhrania sa pošle adekvátny riadiaci znak do Arduina, to následne vykoná danú akciu, respektíve obdrží dáta a zmení polohu pohyblivej platformy. Knižnica v prostredí Windows využíva doplnkovú knižnicu pre umožnenie komunikácie cez sériové rozhranie, v prostredí os Unix je to veľmi jednoduché, a nie je potrebné využívať žiadnu doplnkovú knižnicu.

Kapitola 4

Výsledná platforma, testy jej vlastností

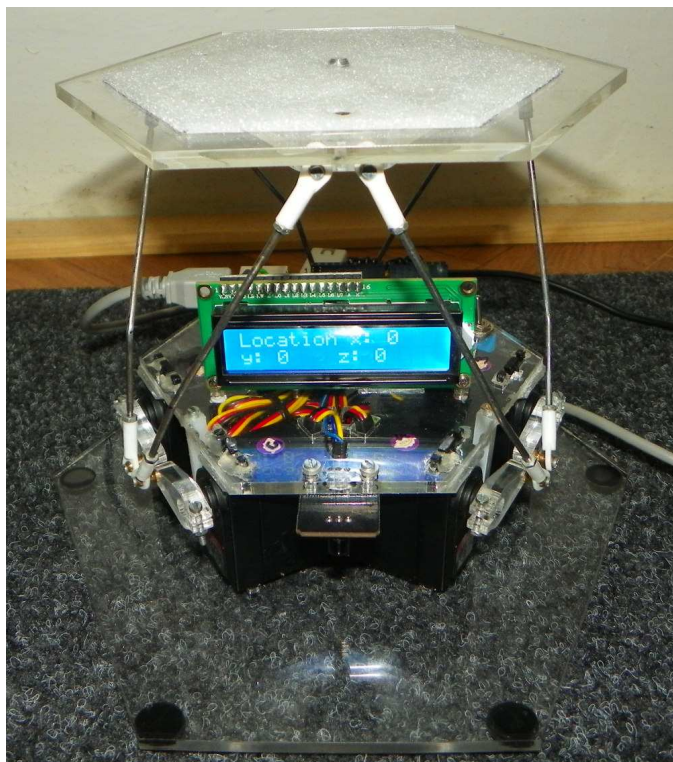
Pre zhotovenie je nyhnutné zaobstarať všetky potrebné súčiastky, konkrétne ide o:

- riadiace časti: Arduino UNO (800Kč), servá (280Kč/ks)
- súčiastky potrebné pre zapojenie: dutinky, piny, kondenzátory, vypínač, napájací konektor, napájací adaptér, káble. Orientačná cena 250Kč
- súčiastky potrebné pre stavbu: výrez z plastu (600Kč z 4mm plastu), oceľový drôt a guľové čapy potrebné pre tiahla, skrutky (rozmary M3, M2) 200Kč
- doplnkové súčiastky: LCD displej s I2C rozhraním(250Kč), IrDA príjmač (30Kč), zmršťovacia bužírka, nožičky, upevňovacia skrutka na fotoaparát 100Kč

Celková cena súčiastok potrebných na vytvorenie tejto platformy je približne 3900Kč. V tejto cene samozrejme nie sú zahrnuté náklady na potrebné nástroje na stavbu. Z hľadiska nákladov je možné túto platformu považovať za lacné zariadenie, najdrahšie položky sú servá a Arduino, obidve položky sú univerzálne a využiteľné aj na prípadné iné projekty. Po zaobstaraní všetkých súčiastok je možné platformu zhotoviť podľa postupu v predchádzajúcej kapitole. Pre stavbu su nevyhnutné rôzne nástroje, rôzne skrutkovače, vrtáčka, pájkovačka, kliešte, kombinačky, posuvné meradlo, nôž, geometrické potreby. Výsledná náročnosť zhotovenia platformy nie je príliš veľká, túto činnosť zvládne aj menej technicky zručná osoba nakoľko väčšina otvorov je vhodne navrhnutá a nie sú potrebné úpravy. Preto najnáročnejšia úloha, ktorú je treba vykonať je tvorba dosky napájania a jej pájkovanie, vyvrtanie otvorov do pohyblivej časti platformy a vzpier. Vykonanie týchto úkonov je nevyhnutné, a nie je možné sa im vyhnúť ani úpravou návrhu. Výslednú zhotovenú platformu je možné vidieť na obrázku 4.1.

Zhotovenú platformu bolo potrebné po dokončení stavby otestovať aby sme dokázali zhodnotiť splnenie cieľov z predchádzajúcej kapitoly.

- vhodné rozmery platformy – výsledné plošné rozmery platformy nie sú o veľa väčšie než samotného fotoaparátu, preto môžeme povedať že tento cieľ bol splnený.
- nosnosť – tento parameter je pomerne náročné otestovať v hraničných hodnotách nakoľko by sa tento parameter mal určovať tak, že sa zvyšuje záťaž až do hodnoty pri ktorej dôjde k narušeniu funkčnosti platformy. Túto hodnotu sme preto nezisťovali. Preto bolo vykonané testovanie s váhou väčšou ako je predpokladaná záťaž,



Obrázok 4.1: Fotografia výslednej vytvorenej Stewartovej platformy

zvolená bola záťaž 1500g. S touto záťažou musela platforma manipulovať, test trval 15 minút počas ktorých platforma vykonávala každé 4s náhodný pohyb z celého rozsahu jej pohybov. Bolo teda vykonaných presne 225 zmien polôh počas ktorých neboli spozorované žiadne komplikácie. Tieto plne náhodné pohyby predstavujú pre platformu najvyššiu záťaž, nakoľko v tomto prípade platforma vykoná veľké množstvo pohybu, v reálnom nasadení budú jej pohyby obmedzené skôr na určitú oblasť rozsahu a množstvo vykonaného pohybu bude menšie. Teoretické maximum nosnosti serv v základnej polohe a plne rovnomernom rozložení záťaže je $1.6\text{Kg}/\text{servo}$, to znamená 9.6Kg , táto hodnota je iba teoretická a silno nadhodnotená (aj výrobcom), pri akejkoľvek zmene ťažiska by došlo k lokálnemu preťaženiu serva. Reálna odhadovaná nosnosť je 2.5Kg s udržanou schopnosťou manipulácie a plným rozsahom pohybov, s menším rozsahom pohybov by bola nosnosť väčšia.

- schopnosť polohovať fotoaparát s dostatočnou presnosťou – tento parameter je potrebné rozdeliť na dva parametre: presnosť a jemnosť. Parameter jemnosti – množstvo možných polôh platformy je dostatočné, platforma sa dokáže pohnúť s požadovanou jemnosťou menej ako 1mm a 1° . Parameter presnosti – presnosť pozície na ktorú sa platforma posunie, v tomto parametri má platforma deficit voči očakávaným výsledkom. Odklon reálnej polohy od žiadanej polohy je približne 15-20%, príčina tejto nepresnosti je neznáma. Presnosť a jemnosť polohy bola meraná pomocou laseru. Na vrchol platformy bol upevnený papier so štvorcovou sieťou, kolmo nad platformou bol pripevnený laser, ktorého lúč dopadal v základnej polohe pohyblivej platformy do jej osi. Pri pohyboch platformy sa posun premietol do polohy lúču na štvorcovej sieti. Takto dosahovaná presnosť merania bola pod 0.5mm . Pri meraní presnosti otočenia

a pohybu v osi z bol laser upevnený na pohyblivú platformu tak, že zdroj lúča sa nachádzal nad osou platformy, štvorcová sieť bola umiestnaná na stenu. Vďaka známej vzdialenosti od osi po stenu, a výškovej zmeny v bode dopadu lúča je možné vypočítať reálny uhol otočenia.

- reprodukovateľnosťou polôh – znovudosahovanie určitej polohy platformy je výborné, odchylka pri znovudosahovaní polohy je menej ako 0.5mm. Test prebiehal za pomoci laseru a štvorcovej siete ako v predchádzajúcom kroku, platforma mala určenú základnú polohu, následne opakovane prechádzala na náhodnú polohu a späť do základnej polohy a bol meraný rozdiel v dosiahnutých polohách.
- udržateľnosťou zadanej polohy – so stúpajúcou záťažou platformy dochádza k neustálemu behu serií, tieto sú neustálym zdrojom jemných vibrácií, tomuto faktoru nie je možné nijak zabrániť, jedine skrátením pák serií alebo ich nahradením za silnejšie servá s pevnejšou silou udržania polohy. Poloha platformy sa po nastavení danej polohy a jej ustálení po pohybe nemení, tento fakt bol skúšaný s maximálnou otestovanou záťažou, tj. 1500g.
- stabilita – zmeny vykonané na platforme oproti prvým verziám návrhu významne zlepšili stabilitu celej platformy. Poloha platformy sa po vykonaní pohybu ustáli rýchlo – záleží od vzdialenosti vykonaného pohybu a váhy záťaže.

Posledným skúmaným faktorom bola spotreba energie platformy pri pohybe. Tento parameter bol meraný umiestnením multimetra do napájacieho obvodu. Merania boli uskutočnené predovšetkým pri pohybe 6tich serií, nakoľko pri pohyboch platformy prakticky vždy dochádza k pohybu všetkých 6tich serií, merania pre pohyb jedného serva sú vykonané iba orientačne pre porovnanie. Boli odmerané tieto parametre:

- spotreba bez záťaže pri pomalom plynulom pohybe ($+5\mu s$ pulzu servu každé 4ms): pri jednom serve bola spotreba energie z rozsahu $\langle 0.08A-0.13A \rangle$, pri šiestich boli hodnoty z rozsahu $\langle 0.25A-0.44A \rangle$
- spotreba so záťažou platformy 1Kg pri pomalom plynulom pohybe: jedno servo $\langle 0.2A-0.27A \rangle$, 6serv $\langle 0.31A-0.56A \rangle$
- spotreba bez záťaže pri prudkom pohybe medzi MIN a MAX pozíciami: jedno servo $\langle 0.1A-0.18A \rangle$, 6serv $\langle 0.3A-0.7A \rangle$
- spotreba so záťažou platformy 1Kg pri prudkom pohybe medzi MIN a MAX pozíciami: jedno servo $\langle 0.25A-0.37A \rangle$, 6serv $\langle 0.57A-0.85A \rangle$

Z výsledkov testov spotreby vyplýva že odber energie je nízky, a servá dokazujú svoju vysokú účinnosť. Spotreba je udávaná v rozsahu, nakoľko je veľmi premenlivá – záleží od váhy, aktuálnej pozície páky, veľkosti vypočítanej chyby pozície. Taktiež je tým zdôraznená potreba dostatočne dimenzovaného zdroju napájania, keďže je vidieť že prúdová špička sa značne líši od priemerného odoberaného prúdu. Vytvorená platforma splnila zadané požiadavky (až na zníženú mieru presnosti), a potvrdili sa predpoklady o jej schopnostiach. Možnosti na ďalšie zlepšenie parametrov platformy sú takéto:

- výmena serv za silné digitálne servá s kovovým ozubením a kovovou pákou. Aktuálne je vôľa v serve na ozubení, taktiež dochádza k ohybu plastovej osi serva, upevnenie plastovej páky serva taktiež nie absolútne pevné. Negatívum tohto kroku je drastické

zvýšenie ceny, približne na dvojnásobok až trojnásobok ceny platformy. Tento krok by ale mal značný vplyv na všetky parametre platformy.

- tvorba platformy zo 6mm plastu, náhrada železných tiahel za tiahla z oceľového drôtu, kvalitnejšie a pevnejšie guľové čapy tiahel – stúpne cena platformy, vplyv na vlastnosti bude menší ako výmeny serv a pák.
- úprava návrhu platformy s ohľadom na vznikajúce sily a jeho spresnenie

Možnosti vylepšenia platformy sú teda pomerne široké, toto dáva možnosť ďalšieho vývoja a možného vylepšovania vytvorenej platformy. Ďalšie prípadné vylepšovanie bude zjednodušené, nakoľko táto dokumentácia poskytuje pomerne silný základ pre zjednodušenie a urýchlenie tvorby nového návrhu. Posledným zisťovaným parametrom je rozsah pohybov platformy, tento rozsah udáva maximálnu hodnotu, pri ktorej je zachovaná maximálna presnosť riadenia, pri vyšších hodnotách už je niektoré servo v maximálnej/minimálnej polohe, preto sa už nedokáže dostatočne pootočiť čo spôsobí nepresnosť. Tu sú namerané výsledky: $x = \langle -35.6, 35.6 \rangle$, $y = \langle -35.6, 35.6 \rangle$, $z = \langle -20, 20 \rangle$, $rot(x) = \langle -21.5, 21.5 \rangle$, $rot(y) = \langle -18, 18 \rangle$, $rot(z) = \langle -31, 31 \rangle$. Tieto hodnoty sú pri translačných pohyboch udané v mm, pri rotačných v bežných stupňoch. Išlo iba o pohyb vykonávaný v rámci danej jednej osi, pri kombináciách by boli rozsahy značne iné.

Kapitola 5

Záver

Cieľom práce bol návrh, opis a vytvorenie šesťuholníkovej platformy riadenej pomocou modelárskych serií použiteľnej na polohovanie fotoaparátu, zvolená bola Stewartova platforma, nakoľko táto platforma má veľmi dobré schopnosti polohovania, umožňuje pohyb až v 6tich osiach a je ľahko prispôsobiteľná na ovládanie pomocou serií.

Platforma bola úspešne navrhnutá, zhotovená a otestovaná. Taktiež je tu kvalitne zdokumentovaný postup návrhu a proces riadenia platformy. Všetky body zadania práce boli splnené, v práci sú dopodrobna opísané všetky podstatné vlastnosti modelárskych serií a ich riadenia, sú tu opísané všetky aspekty Stewartovej platformy – jej schopnosti, vlastnosti, spôsob riadenia, je tu uvedený proces návrhu, implementácie a otestovania vlastností vytvorenej platformy.

Vypracovaná platforma dosahuje aj viaceré zaujímavé výsledky – jej nosnosť je značne viac než 1.5kg pričom váha samotnej platformy je 450g, jemnosť jednotlivých pohybov je na úrovni milimetrov, spotreba energie celou platformou je aj pri záťaži okolo 5W, rozsah pohybov platformy je široký, napríklad rotácia okolo osi $z = \pm 31^\circ$, posun v osiach $x, y = \pm 35\text{mm}$.

Počas vypracovávania práce som sa naučil obrovské množstvo nových vecí, utvrdil som sa v tom, že návrh hardvéru je veľmi náročný a je to silná výzva nakoľko je potrebné myslieť na všetky chyby, záludnosti a detaily vopred. Počas tvorby práce ma asi najviac prekvapila všeobecná neochota a nekomunikatívnosť firmami vyrábajúcich plastové výrezy a nimi spôsobené oneskorenia.

V práci by som chcel pokračovať tým, že by som zlepšil presnosť platformy, zdokonalil dokumentáciu tvorby a implementácie, vylepšil riadiaci softvér platformy. Na obsah tejto práce je možné nadviazať a zdokonaľiť riadiaci softvér platformy, rozšíriť ju o ďalšie funkcie ako je napríklad automatické polohovanie na základe vstupu z akcelerometru, rozšíriť možnosti ovládania platformy, vylepšit možnosti riadiacej knižnice. Taktiež je možné skvalitniť návrh platformy – vyčíslit vznikajúce sily a následne prispôbiť návrh týmto silám pre zlepšenie vlastností platformy.

Výsledky práce sú zverejnené na stránke <http://www.instructables.com/>, kde je možné nájsť najst' vytvorený návod na stavbu pod názvom "Arduino controlled Stewart Platform". Tento obsahuje postup stavby, vypracované návrhy, a odkaz na verejné git repository obsahujúce všetky zdrojové kódy a súbory.

Literatura

- [1] Bonev, I.: Delta Parallel Robot – the Story of Success.
<http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>, 2001 [cit. 2014-01-12].
- [2] Engineering, B. P.: Servomotor information.
<http://www.bpesolutions.com/bpemanuals/Servo.Info.pdf>, 2007 [cit. 2014-01-10].
- [3] Futaba: Futaba Digital FET Servos.
<http://www.futaba-rc.com/servos/digitalservos.pdf>, [cit. 2014-01-11].
- [4] Hitec: Announced Specification of HS-422 standard deluxe servo.
<http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Robotics/hs422-31422S.pdf>, [cit. 2014-01-10].
- [5] Kalinsky, D.; Kalinsky, R.: Introduction to I2C [online].
<http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023816/Introduction-to-I2C>, 2001-07-31 [cit. 2014-05-20].
- [6] Kolektív autorov: The Mathematics of the Stewart Platform.
<http://www.wokinghamu3a.org/Maths%20of%20the%20Stewart%20Platform%20v5.pdf>, 2013 [cit. 2014-01-11].
- [7] Lazaridis, G.: PWM Modulation [online].
http://pcbheaven.com/wikipages/PWM_Modulation/, 2009-03-10 [cit. 2014-01-11].
- [8] Stewart, D.: Platform with six degrees of freedom.
<http://www.iri.upc.edu/people/thomas/deposit/Stewart.pdf>, 1965 [cit. 2014-01-10].
- [9] Szufnarowski, F.: Stewart platform with fixed rotary actuators: a low cost design study. <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~fszufnar/publications/Szufnarowski2013.pdf>, 2013 [cit. 2014-01-10].
- [10] WWW stránky: Arduino Homepage [online]. <http://www.arduino.cc>, [cit. 2014-01-10].
- [11] WWW stránky: Arduino Introduction [online].
<http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>, [cit. 2014-01-10].
- [12] WWW stránky: Servo tutorial [online].
http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/servo_tutorial.html, [cit. 2014-01-11].

- [13] WWW stránky: UNDERSTANDING RC SERVOS,DIGITAL, ANALOG,CORELESS, BRUSHLESS [online].
<http://www.rchelicopterfun.com/rc-servos.html>, [cit. 2014-01-11].
- [14] WWW stránky: QCAD.org [online]. <http://www.qcad.org/en/>, [cit. 2014-04-05].
- [15] WWW stránky: IrDA [online]. <http://irdajp.info/what.html>, [cit. 2014-05-20].