

B5: Piano Tales Master

BROB - ZÁKLADY ROBOTIKY

2019

DOKUMENTACE PROJEKTU

ca58028



UAMT FEKT VUT

Lukáš Zezula
Dominik Říčánek
Vedoucí projektu:
ing. Adam Ligocki

Obsah

Analýza zadání	2
Zadání	2
Úvod	2
Nástin řešení	3
1 MECHANICKÁ ČÁST	4
Návrh v prostředí AutoCAD	5
Popis částí modelu	6
Konstrukce mechanické části	8
2 ELEKTRONICKÁ ČÁST	10
Úvod	11
Návrh řídícího obvodu	12
Solenoid	12
Požadavky na řídící obvod	12
Návrh v prostředí Matlab Simulink	12
Měření obvodových veličin v řídícím obvodu	14
Ustálené stavy obvodových veličin	14
Měření maximálních hodnot obvodových veličin	14
Deska plošných spojů	15
3 PROGRAMOVÁ ČÁST	16
Úvod	17
Volba programovacího jazyka	17
Propojení s elektronickou částí	17
Popis programu a počáteční kalibrace	18
Popis programu	18
Kalibrace	18
4 Shrnutí a závěr	20
5 Přílohy a zdroje	22
Přílohy	23
Literatura	24

Analýza zadání

Zadání

Vytvořte robota, který bude hrát Piano Tales. Navrhněte stroj, který pomocí Vámi zvoleného HW (snímače a výpočetní jednotky a motorků) bude schopen hrát a porazit člověka ve hře Piano Tales. Referenčním výsledkem bude <https://www.youtube.com/watch?v=fqOW84ZTL7k> který se pokusíme porazit. Na závěr vznikne krátké propagační video na youtube obsahující logo VUT. Projekt bude veden pomocí GITu. Dokumentace bude vytvořená v LaTeXu.

Úvod

Cílem projektu, jak je patrné ze zadání, bylo realizovat robota, který by hrál hru Piano Tales a dosahoval lepších výsledků než člověk a ideálně se přiblížil, nebo dokonce překonal referenční výsledek.

Hra Piano Tales funguje tak, že po obrazovce ve čtyřech lajnách jezdí obdélníky, jejichž stisknutím se zvýší skóre a rychlosť s jakou se pohybují. Hra se tedy neustále ztěžuje. Jakmile nezachytíte již zmínovaný obdélník nebo kliknete mimo jeho plochu, hra končí. Krom těchto obdélníků, které mají pevně definované rozměry, jezdí po obrazovce i delší obdélníkové úseky, které mají stálou šířku, ale jejich délka se různí (viz. Obrázek 1). Tyto úseky se liší i barevně. Zatímco obdélníky jsou vždy striktně černé, tak barva úseků se mění od černé na začátku úseku po světlejší odstíny modré na konci. Přidržením těchto úseků od počátku do konce se skóre zvýší více než při pouhém stisknutí.



Obrázek 1: Ukázka hrací plochy hry Piano Tales

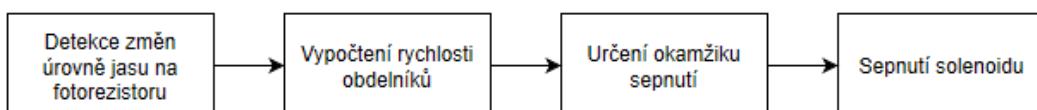
Nástin řešení

Oproti videu, přiloženému k zadání, jsme neměli k dispozici tablet, kolem kterého by se dali pohodlně rozmiřit servomotory, a proto jsme museli použít smartphone, který má podstatně menší rozměry. Toto vedlo na nutnost pracovat s menšími prvky, které by ovládaly dotykový display a složitější mechanickou konstrukci.

Nejhodnější se ukázalo použití elektromagnetů, konkrétně push type solenoidů, které byly pomocí mechanické konstrukce umístěny nad smartphonem tak, aby po přivedení napětí na řídící obvod stiskly specifické místo na dotykovém displayi.

Ke snímání průběhů obdélníků byly použity fotorezistory. Ty byly umístěny dostatečně blízko displaye a ve speciálně vytvořeném pouzdru, aby se minimalizoval vliv okolního osvětlení.

Zjednodušený princip, s jakým výsledný robot hraje hru, lze vidět na Obrázku 2. Obdélník, mající černou barvu, se pohybuje po světle modrému pozadí kolem fotorezistoru. To zapříčiní změnu odporu, kterou zachycuje mikroprocesor a měří čas mezi přechody modrá-černá, černá-modrá. Z tohoto času a známých rozměrů obdélníku se vypočte rychlosť, s kterou se obdélník pohybuje. Po započítání dopravního zpoždění, které je dáno zejména časem potřebným k sepnutí solenoidu, se určí okamžik, kdy přesně má být přiveden z mikroprocesoru spínací signál na vstup řídícího obvodu.



Obrázek 2: Zjednodušený princip funkce robotu

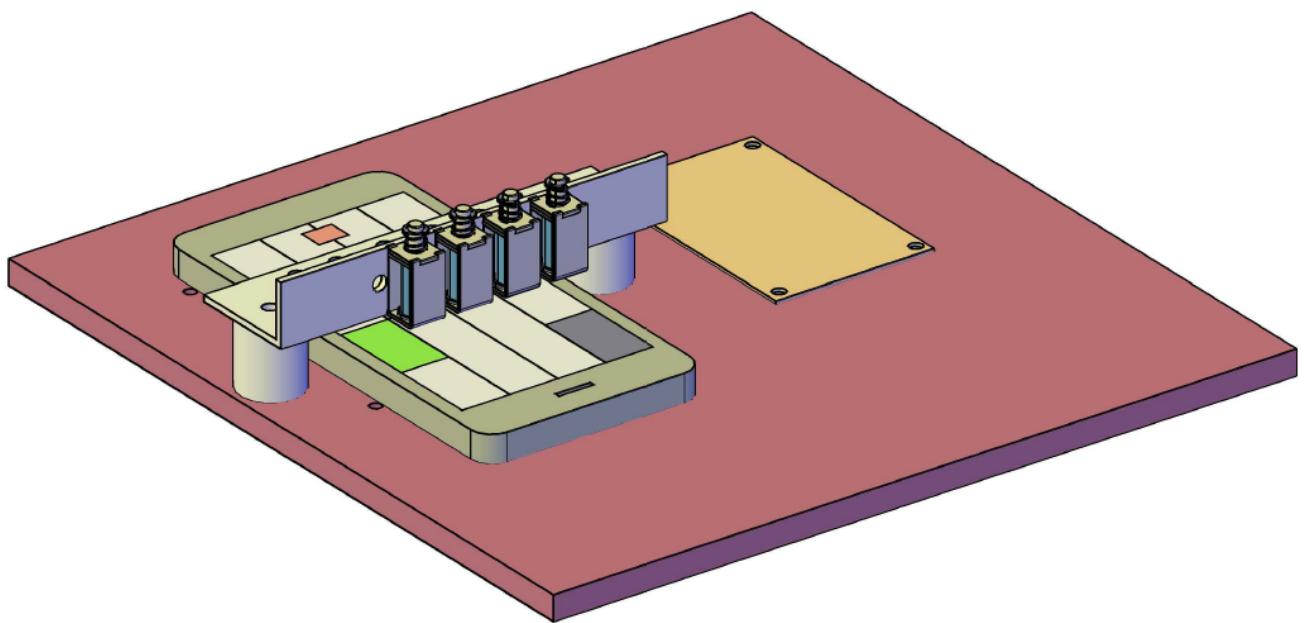
1

ČÁST

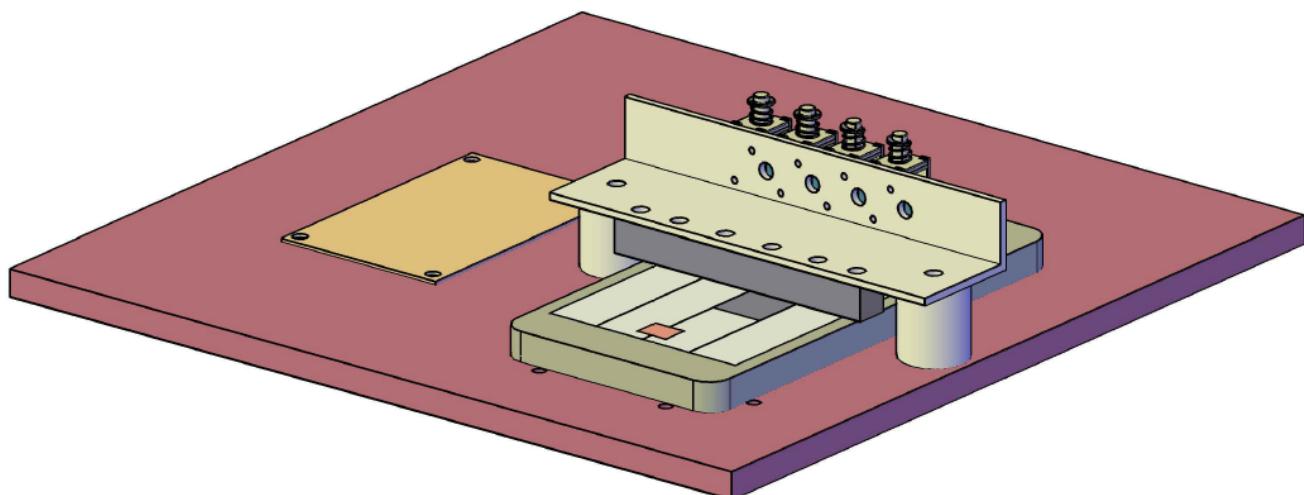
B5: Piano Tales Master MECHANICKÁ ČÁST

1 MECHANICKÁ ČÁST	4
Návrh v prostředí AutoCAD	5
Konstrukce mechanické části	8

Návrh v prostředí AutoCAD



Obrázek 3: Model mechanické části v prostředí AutoCAD jiho-západní pohled



Obrázek 4: Model mechanické části v prostředí AutoCAD severo-západní pohled

Popis částí modelu

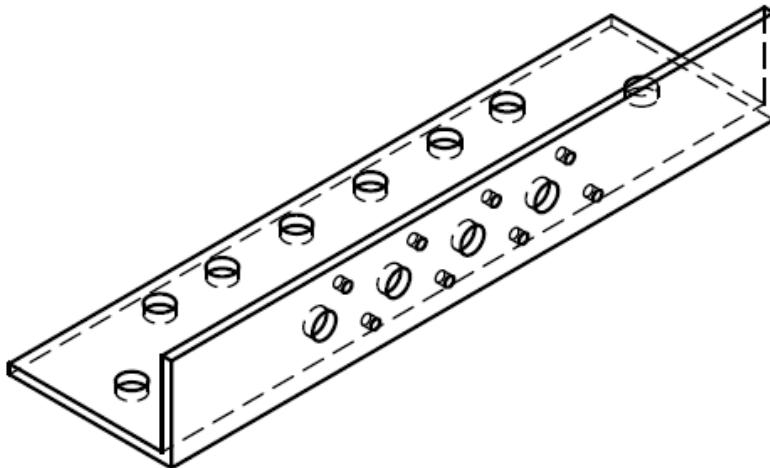
Model byl pomyslně rozdělen na 5 částí. Konkrétně se jedná o podstavu, L-profil, válcové spojky, solenoidy a pouzdro na fotorezistory. Tyto části jsou navrženy tak, aby byly demontovatelné (spoje jsou realizovány pouze šrouby a případně maticemi). Jak na sebe jednotlivé části navazují můžeme vidět na Obrázku 3 a 4. Oranžový obdélníkový profil představuje plošný spoj.

podstava

Uchycením všech částí konstrukce pevně na podstavu čtvercového tvaru jsme předešli nežádoucím posuvům a docílili větší stability konstrukce. Více o nákresu a rozměrech podstavy viz. Příloha 1.

L-profil

Tento profil ukotvuje solenoidy a pouzdro na fotorezistory. Je připevněn na válcové spojky, aby byl ve správné výšce nad smartphonem. Náčrt L-profilu lze vidět na Obrázku 5. Více o nákresu a rozměrech L-profilu viz. Příloha 1.



Obrázek 5: Náčrt L-profilu

válcové spojky

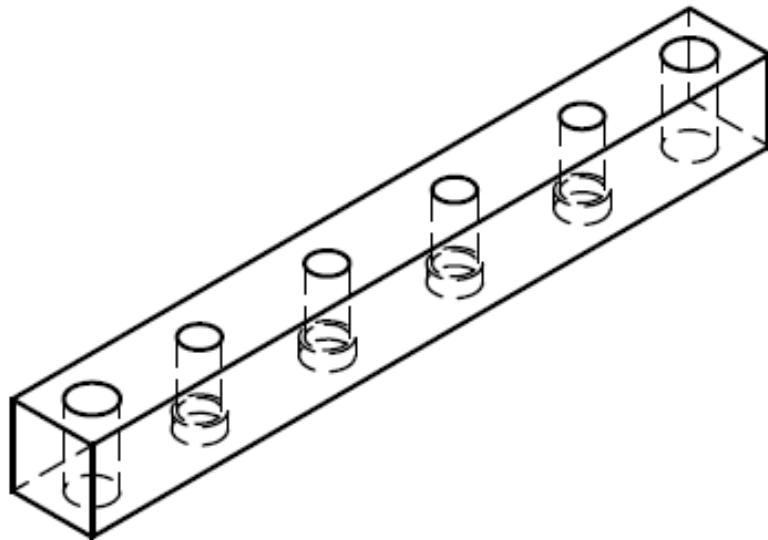
Jejich hlavní funkce spočívá v přichycení L-profilu k podstavě ve správné výšce tak, aby při sepnutí solenoidu došlo k interakci stylusů, umístěných na solenoidech, s dotykovým displayem. Rozměry válcových spojek byly tedy voleny tak, aby při zahrnutí tloušťky smartphonu (cca 9mm), výšky stylusu (cca 9,5mm) a zdvihu solenoidu (cca 3,5mm) došlo po přivedení napětí k již zmíněnému dotyku. Více o nákresu a rozměrech válcových spojek viz. Příloha 1.

solenoidy

Jak již bylo zmíněno v [Nástinu řešení](#) museli být použity součástky, které by se dali umístit kolem poměrně malého smartphonu. Pro tento účel jsme vybrali push type solenoidy se zdvihem okolo 3,5mm a rozměry takovými, aby se na šířku smartphonu (cca 74mm) vlezly alespoň 4 tyto solenoidy. Konkrétní rozměry solenoidů lze vyčíst z datasheetu viz. Příloha 4. 3D model solenoidu byl převzat ze stránek GRABCAD COMMUNITY. [1]

pouzdro na fotorezistory

Jeho hlavní význam spočívá v odstínění okolního osvětlení a ukotvení fotorezistorů na požadované místo. Je přichyceno k L-profilu a umístěno v takové výšce nad smartphonem, aby fotorezistory dostatečně dobře snímaly změny jasu na display i a zároveň nebyly příliš ovlivněny osvětlením místnosti. Fotorezistory jsou v pouzdru zapuštěny cca 1mm a jsou vzdáleny od smartphonu cca 4mm. Náčrt pouzdra lze vidět na Obrázku 6. Více o nákresu a rozměrech pouzdra na fotorezistory viz. Příloha 1.



Obrázek 6: Náčrt pouzdra na fotorezistory

Konstrukce mechanické části

Všechny části konstrukce byly nařezány, obroušeny a byly do nich navrtány díry a závity dle výkresové dokumentace (viz. Příloha 1).

Jako materiál pro podstavu byl zvolen akryl, hlavně díky jeho dostupnosti a kvalitním izolačním vlastnostem. Závity, které se nacházejí kolem smartphonu a lze je vidět na Obrázku 3 a 4, slouží pro šrouby M4, které nebyly zašroubovány na doraz proto, aby se mezi ně dal zasunout smartphone a tím byl pevně uchycen na jedno místo. K podstavě byla přišroubována deska plošných spojů.

Válcové spojky a L-profil byly odříznuty z hliníkových profilů (konkrétně typ AlMgSi0,5). K válcovým spojkám je z jedné strany šroubem M5 přišroubovaná podstava a z druhé L-profil. K L-profilu je poté pomocí šroubů M5 a matic přichyceno pouzdro na fotorezistory a tyto jsou připájeny na kousek univerzálního pájivého pole, odkud potom vedou dráty na plošný spoj.

Do rámu solenoidů byly do předchystaných děr vyřezány závity M2 a následně jsme solenoidy přišroubovali k L-profilu. Napájecí kabely solenoidů jsme protáhli příslušnými dírami a přivedli na desku plošných spojů. Stylusy byly, vzhledem k jejich malým rozměrům a faktu, že by nevydržely obrábění, k solenoidům přilepeny tekutým kovem (WURTH tekutý kov FE1).

Na závěr bylo nutné zajistit, aby se přívodní drátky fotorezistorů nemohly dotknout hliníkového L-profilu. Toho bylo dosaženo umístěním odstřížek plastových slámek kolem zmíněných drátek.

Vybrané snímky z konstrukce mechanické části lze vidět na Obrázku 7 a 8



Obrázek 7: Fotka spodní části L-profilu s přichycenými solenoidy a pouzdrem na fotorezistory



Obrázek 8: Fotka mechanické konstrukce - severo-západní pohled

2

ČÁST

B5: Piano Tales Master ELEKTRONICKÁ ČÁST

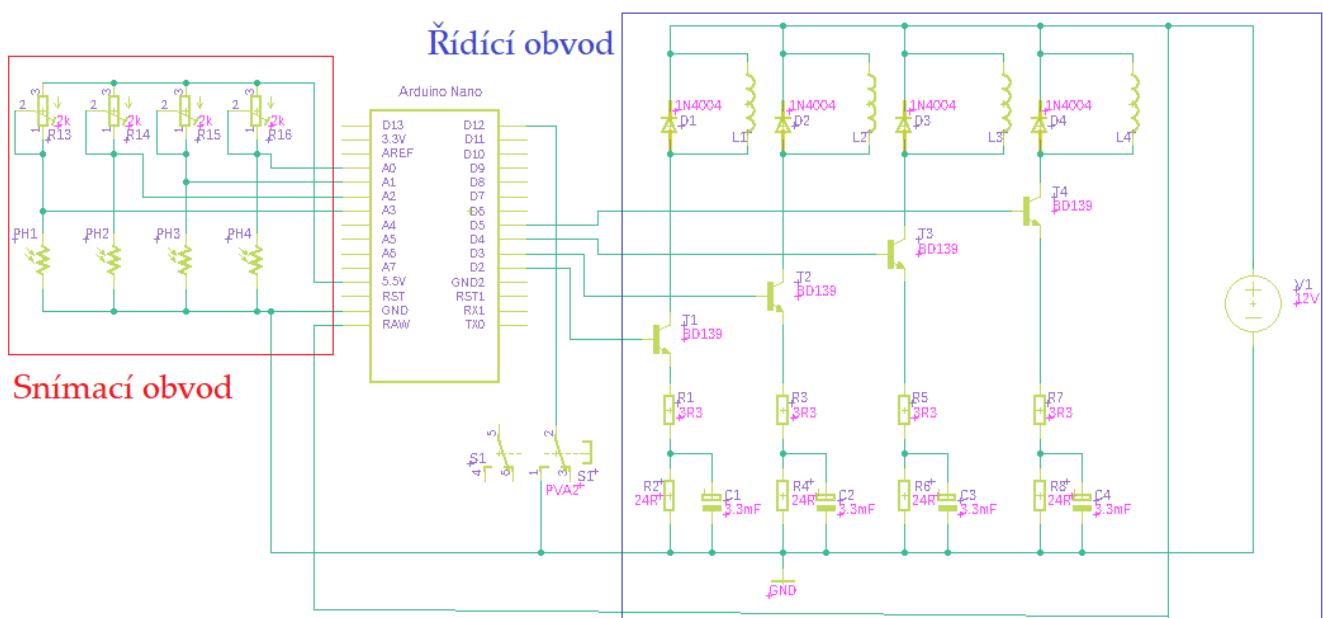
2 ELEKTRONICKÁ ČÁST	10
Úvod	11
Návrh řídícího obvodu	12
Měření obvodových veličin v řídícím obvodu	14
Deska plošných spojů	15

Úvod

Schéma celé elektronické části projektu lze vidět na Obrázku 9. Elektronickou část lze pomýšlně rozdělit na dva samostatné obvody: snímací a řídící. Snímací obvod je vyznačen vlevo v růžovém rámečku a řídící obvod vpravo v modrém rámečku.

Snímací obvod slouží k zachycení změn jasu na fotorezistoru. Princip jeho funkce je velice jednoduchý. Fotorezistor tvoří s potenciometrem odporový dělič, na který je přivedeno 5,5V napětí z Arduina. Jakmile pod fotorezistorem probíhá černý obdelník na displayi smartphonu, jeho odpor, důsledkem snížení intenzity dopadajícího světla, vzroste. To zapříčiní vzrůst úbytku napětí na fotorezistoru, který měří AD převodník Arduina. Naopak při průběhu světla modrého pozadí pod fotorezistorem je intenzita dopadajícího světla větší, což zapříčiní snížení odporu fotorezistoru. Důsledkem toho na něm úbytek napětí poklesne. Jelikož byly použity levné fotorezistory, které nemají garantované průběhy odporu v závislosti na intenzitě světla, musí být výsledné napěťové děliče nastaveny na přibližně stejné výstupní hodnoty napětí pomocí potenciometrů.

Řídícím obvodem se budeme zabývat v následující části textu.



Obrázek 9: Schéma celé elektronické části projektu

Návrh řídícího obvodu

Solenoid

Solenoid je v podstatě cívka, což znamená, že má nějaký odpor vinutí a indukčnost. Odpor vinutí udává výrobce jako $4,5\Omega$ a rovněž udává napětí potřebné k sepnutí jako 5V a proud tekoucí solenoidem jako 1,1A (více informací lze získat z datasheetu viz. Příloha 4). Změrili jsme však, že tyto podmínky jsou značně předimenzované. Skutečný proud při kterém solenoid sepne byl vyhodnocen ze série měření jako 400mA, což ovšem vedlo ke snížení rychlosti sepnutí. Proud, při kterém solenoid rozepne, byl 50mA. Z tohoto měření vyplynul zajímavý poznatek. Proud, který je potřeba k sepnutí solenoidu, je mnohem větší než ten, který je potřeba k udržení solenoidu v sepnutém stavu. Výrobce bohužel neudává indukčnost solenoidu, tak byla orientačně změřena jako $2,2\mu\text{H}$. Základní představy o principu funkce solenoidu byly převzaty z článku na stránkách SCIENCING. [4]

Požadavky na řídící obvod

V požadavcích na řídící obvod je zřejmý technický rozpor. Potřebujeme spínat indukčnost dostatečně rychle, aby byl obvod použitelný i pro pozdější fáze hry, ale to vede na nepříjemné zvýšení proudu. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici pouze zdroj s maximálním proudem 2A znamenalo by to, že by jsme v jednu chvíli mohli ovládat pouze jeden, maximálně dva solenoidy. Toto je pro praktickou funkčnost naprosto nepřípustné.

Řešení tohoto problému vedlo na separaci v čase, kdy pro sepnutí solenoidu pustíme do obvodu velkou proudovou špičku (cca 1A) a poté udržujeme stálou hodnotu proudu (cca 150mA) pro udržení solenoidu v sepnutém stavu. Nejjednodušší, a hlavně nejlevnější, možností jak toho dosáhnout bylo využití přechodových dějů v obvodu.

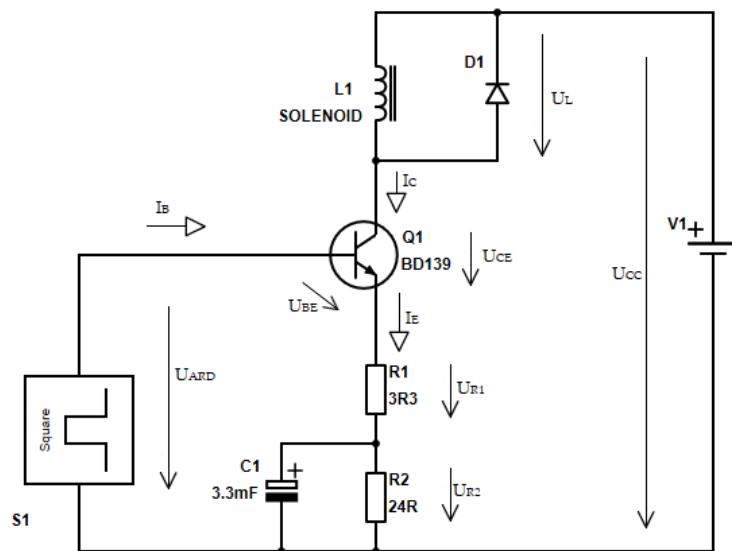
Návrh v prostředí Matlab Simulink

Výsledný návrh řídícího obvodu pro spínání solenoidu můžeme vidět na Obrázku 10. Po připojení napájecího napětí (12V) se obvod, velmi zjednodušeně řečeno, chová jako proudový zdroj.

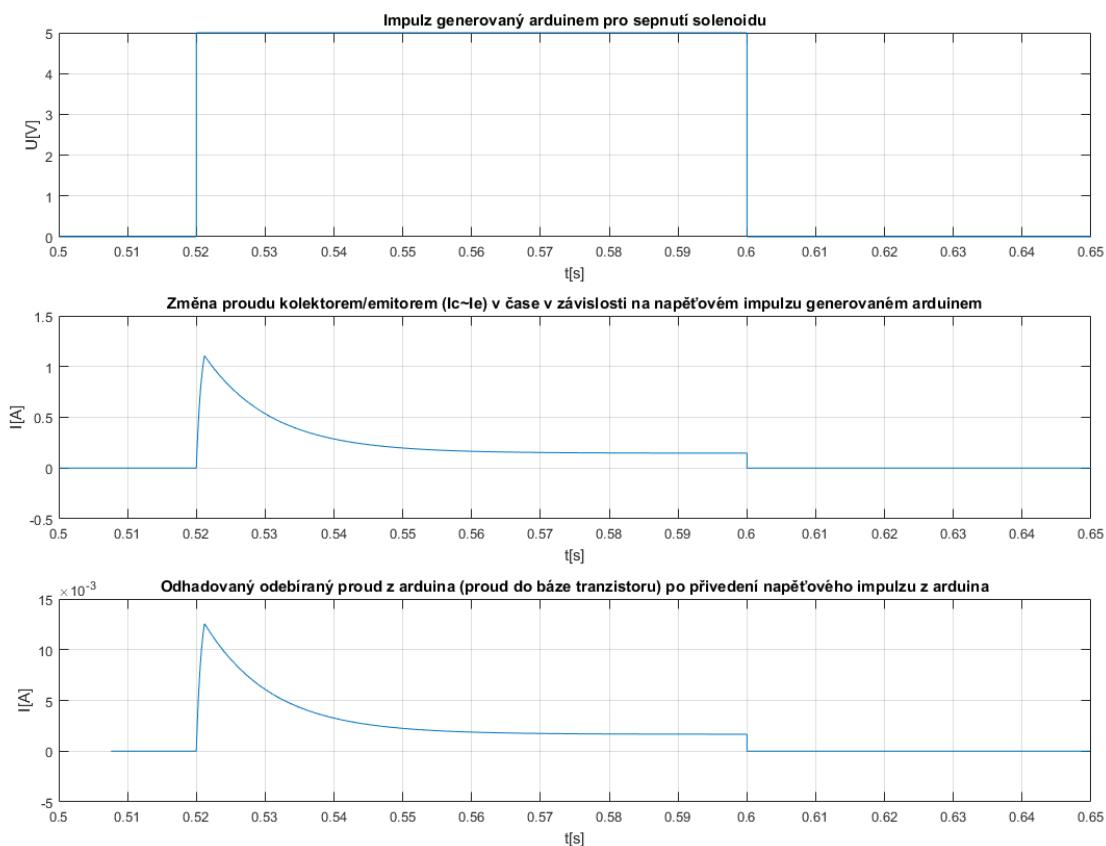
Po přivedení napětí z Arduina mezi bázi tranzistoru a zem má tendenci téct proud. Skokové změny proudu na cívce nelze dosáhnout, ale vzhledem k malé indukčnosti solenoidu proud roste po velmi strmé exponenciále. Pomalu se začíná nabíjet kondenzátor, který má poměrně velkou kapacitu, což zapříčinuje exponenciální klesání proudu až na ustálenou hodnotu (cca 150mA). Tímto způsobem byla vytvořena proudová špička, která zapříčiní sepnutí solenoidu, a následná ustálená hodnota proudu udržuje solenoid v sepnutém stavu.

Pokud odpojíme napětí, přivedené mezi bázi a zem, tranzistorem přestává téct proud a indukčnost má tendenci vytvořit napěťovou špičku. Z toho důvodu je k ní antiparalelně zavedena usměrňovací dioda, která zabrání překročení napětí 0,6V. Kondenzátor se vybíjí přes odpor do země.

Výsledné průběhy můžeme vidět na Obrázku 11. Pro datasheet k použitému tranzistoru viz. Příloha 4. Pro simulační schéma v Simulinku a matlabovský spouštěcí skript viz. Příloha 3.



Obrázek 10: Schéma řídícího obvodu pro spínání solenoidu

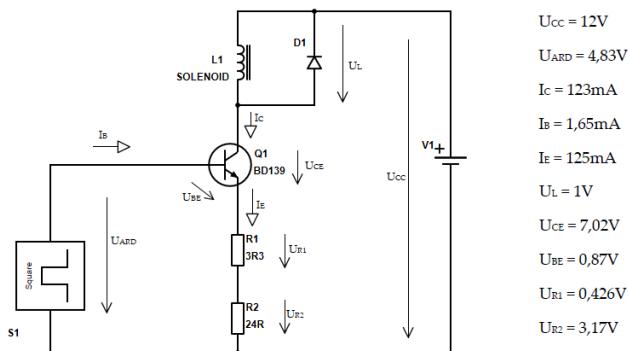


Obrázek 11: Průběhy proudů řídícího obvodu v čase vytisknuté z Matlabu

Měření obvodových veličin v řídícím obvodu

Ustálené stavy obvodových veličin

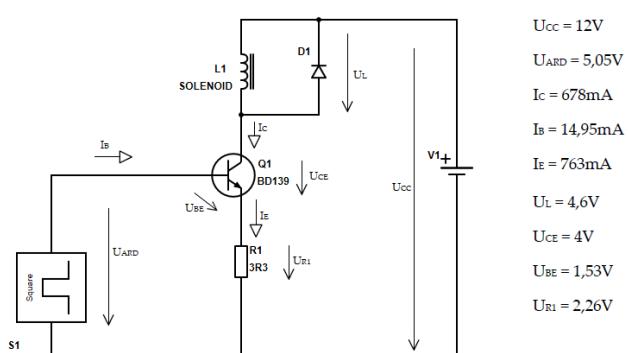
Následující odstavec dává přehled o hodnotách, na kterých se ustálí obvodové veličiny po odeznení přechodových dějů při přivedení napětí z Arduina mezi bázi a zem. Můžeme uvažovat zjednodušené schéma viz. Obrázek 12. Hodnoty byly naměřeny ručním multimetrem dostupným v laboratoři robotiky.



Obrázek 12: Schéma řídícího obvodu simulující ustálené hodnoty obvodových veličin

Měření maximálních hodnot obvodových veličin

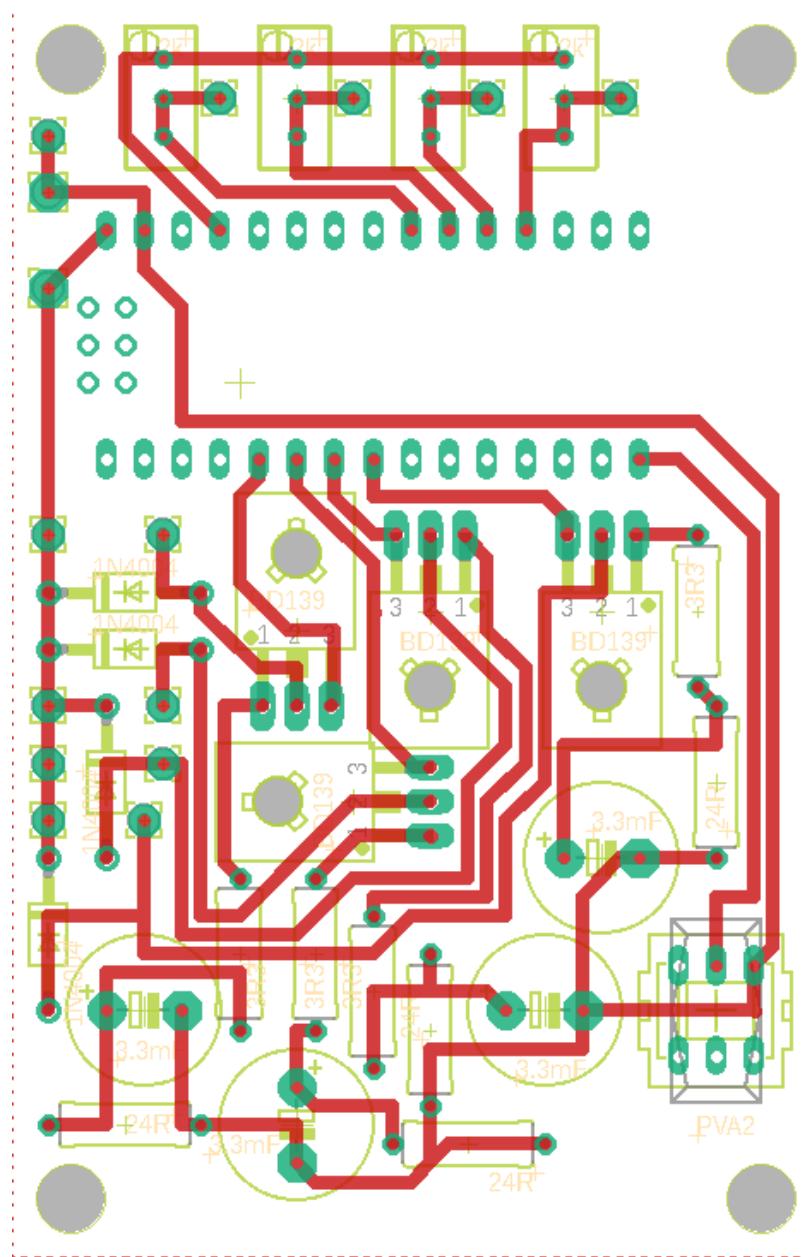
Následující odstavec dává přehled o hodnotách, kterých dle daného zapojení (viz. Obrázek 10) dosahují obvodové veličiny v extrému. Podstatná pro nás je zejména hodnota proudu odebíraného z Arduina, která nesmí překročit 20mA. Můžeme uvažovat zjednodušené schéma dávající přehled o maximálních hodnotách viz. Obrázek 13.



Obrázek 13: Schéma řídícího obvodu simulující maximální hodnoty obvodových veličin

Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl proveden v prostředí Eagle (viz. Příloha 2) dle návodu uvedeném na webu předmětu Robotika [5]. Návrh můžeme také vidět na Obrázku 14



Obrázek 14: Návrh desky plošných spojů

3

ČÁST

B5: Piano Tales Master PROGRAMOVÁ ČÁST

3 PROGRAMOVÁ ČÁST	16
Úvod	17
Popis programu a počáteční kalibrace	18

Úvod

Problém, který jsme museli vyřešit byl, jak co nejrychleji zajistit snímání hrací plochy a samotné automatické hraní hry za pomoci mechanických prvků. Zde jsme měli na výběr z vícero možností:

1. Použít kameru s rychlostí snímání alespoň stejnou, nebo větší než je rychlosť FPS na smartphonu a vyhodnocovat každý snímek digitálně za pomoci počítačového vidění
2. Použít analogové senzory a vyhodnocovat úrovně signálu.

Jelikož jsme se domnívali, že software na zpracovávání obrazu bychom si museli sami vytvořit (což by mohl být projekt sám o sobě), zvolili jsme cestu analogových senzorů, jejichž výstupní signál zpracováváme přes čtyři AD převodníky v Arduinu. Dalo by se spekulovat, která z možností by byla vhodnější, nicméně obě mají své pro a proti a obě by ve výsledku zabrali stejné množství času.

Volba programovacího jazyka

Náš projekt běží na identické kopii Arduino nano (konkrétně je to Nano3), takže jsme mohli programovat v C nebo C++. Zvolili jsme C++, protože se na náš projekt docela hodilo objektové programování, které jsme si chtěli i vyzkoušet v rámci něčeho praktického. Ve výsledku je hlavičkový soubor header.h napsán v C++ a celý robot je ovládán metodami v hlavní smyčce (viz. Příloha 6).

Propojení s elektronickou částí

Jak je patrné z Obrázku 9, na AD převodníky (piny A0, A1, A2 a A3) jsou připojeny signály z fotorezistorů. Řídící obvody jsou ovládány z digitálních výstupů (piny D2, D3, D4 a D5). Na pinu D12 se nachází tlačítko a na pinu D11 kontrolní LED dioda. Tyto dvě položky mají svůj význam při kalibraci před započetím hry.

Popis programu a počáteční kalibrace

Popis programu

Jak už bylo zmíněno v [úvodu k elektronické části](#) na vstup AD převodníků přichází napěťové úrovně, měnící se podle barvy a jasu plochy pod fotorezistorem. Program při příchodu nástupné hrany napěťového signálu zapíše čas do paměti a detekuje příchod sestupné hrany. Při sestupné hraně opět zapíše do paměti čas a rozhodne, zdali se jedná o obdélník nebo delší obdélníkový úsek. Pokud se jedná o obdélník, tak ze známých rozměrů obdélníku a odečtených hodnot času vypočte rychlosť s kterou se obdélník pohybuje. Z té určí čas sepnutí a uvolnění solenoidu. Sepnutí se provádí přivedením logické 1 na patřičný digitální výstup a inverzně k tomu uvolnění se provádí přivedením logické 0.

Problém, který se vyskytl a stále není dokonale odladěný je stisk delších obdélníkových úseků. Designeri hry nám však pomohli tím, že tyto úseky mají jako jediné postupný přechod z černé na modrou (na rozdíl od obyčejných obdélníků, které mají přechod skokový). Toho jsme využili a definovali jsme tři úrovně signálu. Rychlosť přechodů mezi těmito úrovněmi potom určuje, zdali se jedná o obdélník nebo delší úsek. Důvod, proč tento problém zatím není úplně vyřešen, je ten, že některé úseky jsou příliš krátké, a tak se snímaný signál nezdrží v oblasti detekce dost dlouho. Držení těchto úseků však není nutné, takže jsme tomuto problému nedávali příliš velkou prioritu.

Dalším problémem, na který jsme narazili, byly nekonsistentní snímače. Ačkoliv byly všechny fotorezistory stejného typu, měl každý jinou závislost odporu na intenzitě dopadajícího světla. Tento problém jsme vyřešili použitím potenciometrů v odporovém děliči.

Kalibrace

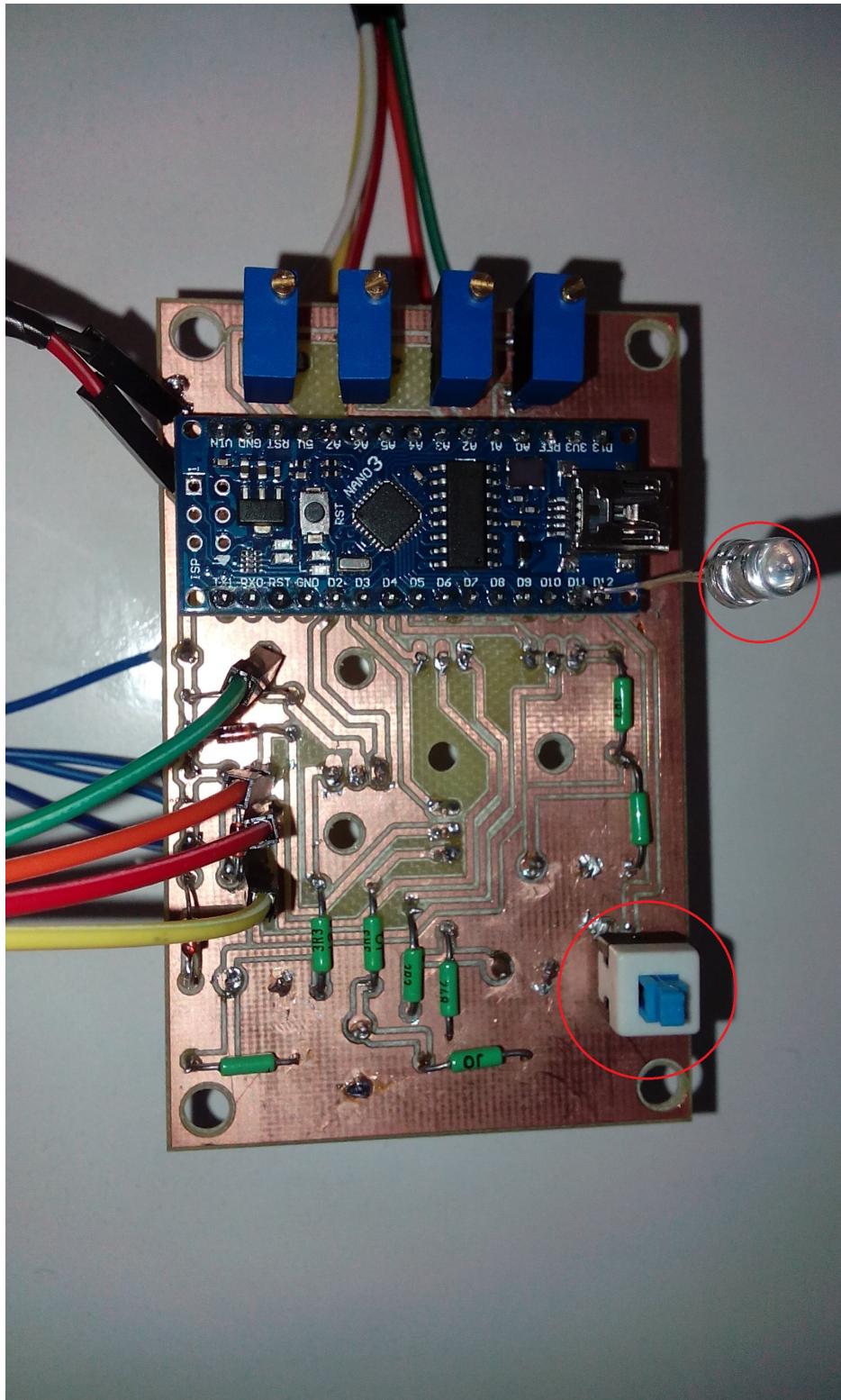
Absolutní kalibrace Piano Tales Mastera je nutná, pokud se s ním nějak hrubě hýbalo nebo se dlouho nepoužíval. Je potřeba připojit Arduino do počítače a vyrovnat úrovně všech senzorů k referenčnímu senzoru (první zprava), to jde udělat velmi lehce pomocí Arduino IDE plotter.

Před započetím hry je nutné Piano Tales Mastera zkalibrovat. A to z důvodu použitých fotorezistorů jako senzorů. Ty se můžou vychylovat podle změn okolního jasu.

Kalibrace se provádí ihned po zapnutí nebo restartu mikrokontroleru a pro novou kalibraci se musí model restartovat znova. Hned po zapnutí se rozsvítí kontrolní LED dioda a program čeká na stisknutí tlačítka. Jako referenční senzor ke kalibraci se používá první senzor zprava.

Nejprve pod referenční senzor dáme černý obdélník a zmáčkneme tlačítko. LED se na chvíli zhasne a posléze znova rozsvítí. Posuneme pod referenční senzor pozadí hrací plochy a znova zmáčkneme tlačítko. Tentokrát LED zabliká, to signalizuje, že je program připraven k chodu a mělo by všechno běžet v pořádku, po následovném stisku tlačítka LED zhasne a Piano Tales Master počítá s tím, že hra už běží.

Kdykoliv za chodu programu je možné Piano Tales Mastera stiskem tlačítka pozastavit a opětovným stiskem jej znova spustit. Detail pozice tlačítka a kontrolní LED diody můžeme vidět na Obrázku 15.



Obrázek 15: Fotografie desky plošných spojů s detailem na kontrolní LED diodu a tlačítko

4

ČÁST

B5: Piano Tales Master Shrnutí a závěr

4 Shrnutí a závěr

20

Z hlediska mechanické části projektu se nám podařilo dosáhnout nadočekávané přesnosti. Při sepnutí solenoidů dojde vždy ke stisknutí displaye smartphonu a zároveň, díky možnosti mírného promáčknutí stylusu, nedochází k tomu, že by reakční síla tlačila proti generovanému magnetickému poli. Solenoidy rovněž zvládají spínat i rychlosti, na kterých dochází k chybám snímačů.

Díky návrhu elektronické části se nám podařilo pomocí zdroje 12V/2A ovládat najednou všechny čtyři solenoidy, a navíc jsme dosáhli i úspory energie (z původně odebíraných 1.1A na solenoid se proud snížil na cca 150mA na solenoid).

V momentě, kdy je tato dokumentace dotvářena dokáže model hrát hru, běžící rychlostí 10,5 Tiles/s (Světový rekord je 17 Tiles/s). Musíme pamatovat, že největším nedostatkem celého projektu je rychlosť FPS smartphonu, na kterém hru hrajeme. Už od 8 Tiles/s jsou obdélníky rozmanité.

Pokud se k Piano Tales Masterovi ještě v budoucnu vrátíme určitě by jsme rádi vylepšili detekci delších obdélníkových úseků, upravili kalibraci tak, aby byla netečná k hrubému zacházení s modelem a okolnímu jasu a doladili program tak, aby zvládal hrát co nejdéle.

Funkční model Piano Tales Mastera si lze prohlédnou na přiloženém videu (viz. Příloha [7](#)).

Poznámka na konec. Skutečný název hry, kterou robot hraje je Piano Tiles 2, avšak v zadání je uveden název Piano Tales. Drželi jsme se tedy striktně názvu uvedeném v zadání.

5

ČÁST

B5: Piano Tales Master Přílohy a zdroje

5 Přílohy a zdroje	22
Přílohy	23
Literatura	24

Přílohy

- (1) Mechanická část - Návrh modelu v prostředí Autocad a nákresy jednotlivých částí v pdf
- (2) Deska plošných spojů - Vytvořená v prostředí Eagle (přiloženo včetně schématu)
- (3) Řídící obvod - Návrh v prostředí Matlab Simulink a spouštěcí m-file
- (4) Datasheety - Přiložené datasheety pro elektronické komponenty
- (5) Zdrojové kódy dokumentace v Latexu
- (6) Zdrojové kódy řídícího programu
- (7) Video demonstrující funkčnost modelu

Literatura

- [1] GRABCAD COMMUNITY, *3D model použitého solenoiu*
<https://grabcad.com/library/tag/rob-11015>
- [2] Overleaf, *Návody k prostředí LATEX*
<https://www.overleaf.com/learn>
- [3] MathWorks, *Návody k prostředí Matlab*
<https://www.mathworks.com/>
- [4] SCIENCING, *Článek popisující princip funkce solenoidu*
<https://sciencing.com/a-solenoid-work-4567178.html>
- [5] Robotika, *Web předmětu Robotika, navštěvovaný zejména kvůli návodům k gitu*
<https://sites.google.com/site/vutrobotika/home>