



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ŘEŠIČE RUBIKOVY KOSTKY

DESIGN OF RUBIK'S CUBE SOLVER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Palán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Petr Palán**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce řešiče Rubikovy kostky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rubikova kostka je populární mechanický hlavolam, který má většinou tvar krychle. Nejznámější je varianta 3x3x3, která se skládá z celkem 26 kostek a 54 barevných ploch. Existuje více než 43 triliónů permutací jejího rozloženého stavu, nicméně jakkoliv rozloženou kostku lze složit do 20 tahů. Realizace konstrukce levného řešiče, který bude schopen složit Rubikovu kostku může pomoci začátečníkům s bezproblémovým složením.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cíle práce je konstrukční návrh a realizace mechanické části řešiče pro Rubikovu kostku velikosti 3x3x3 užitím mikropočítače a 3D tisku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- analyzovat problém a provést bibliografickou rešerši existujících řešení a výroby,
- vypracovat koncepční návrhy možných řešení,
- realizovat a otestovat mechanické části řešiče.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

BROWN, H. T. 507 Mechanical Movements: Mechanisms and Devices. 18th Edition. Wexford College Press, 2010. ISBN 978-1-60386-311-7.

TOSHNIWAL, E. S. a Y. GOLHAR. Rubik's Cube Solver: A Review. In: 2019 9th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-19) [online]. IEEE, 2019, s. 1-5 [cit. 2023-10-12]. ISBN 978-1-7281-3506-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICETET-SIP-1946815.2019.9092272.

DAN, V., G. HARJA a I. NASCU. Advanced Rubik's Cube Algorithmic Solver. In: 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA) [online]. IEEE, 2021, 2021-2-4, s. 90-94 [cit. 2023-10-12]. ISBN 978-1-6654-0469-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICARA51699.2021.9376564.

SONG, CH. Dual Arm Rubik's Cube Solver Robot. In: 2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST) [online]. IEEE, 2022, 2022-12-9, s. 1545-1549 [cit. 2023-10-12]. ISBN 979-8-3503-2000-8. Dostupné z: doi:10.1109/IAECST57965.2022.10062245.

ANDREW, A. M., W. FARIDAH, W. H. TAN, S. RAGUNATHAN, A. S. N. AMIRAH, N. A. N. ZAINAB a F. S. LEE. Prototype Design for Rubik's Cube Solver. In: BAHARI, Muhammad Syahril, Azmi HARUN, Zailani ZAINAL ABIDIN, Roshaliza HAMIDON a Sakinah ZAKARIA, ed. Intelligent Manufacturing and Mechatronics [online]. Singapore: Springer Singapore, 2021, s. 39-50 [cit. 2023-10-12]. Lecture Notes in Mechanical Engineering. ISBN 978-981-16-0865-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-16-0866-7_3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Rubikova kostka je jedním z nejznámějších hlavolamů světa, rozvinula se do nespočetně variant a v jejím skládání se soutěží po celém světě. Rekordní čas jejího složení již však už dávno nedrží člověk, ale robot. Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem a následnou realizací mechanické části řešiče pro Rubikovu kostku. Je provedena rešerše existujících řešičů na jejíž základě jsou pak navrženy jednotlivé koncepční návrhy. Zvolená varianta je následně rozvedena v konstrukčním návrhu. Ta ovládá individuálně 5 stěn kostky a tím zajišťuje možnost jejího složení bez nutnosti jejího dalšího polohování a zároveň zde vzniká prostor pro pohodlné vložení kostky. Konstrukce je následně zrealizována pomocí 3D tisku. Ke vzniklé konstrukci je poté připojena elektronická část a užitím mikropočítače je proveden jednoduchý program napsaný za účelem testování konstrukce. Výsledkem testování je, že konstrukce je funkční, ale je zde prostor ke zdokonalení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rubikova kostka, 3D tisk, Arduino UNO, řízení pohonů

ABSTRACT

The Rubik's Cube is one of the most famous puzzles in the world, it has evolved into countless variations and in its solving is competed all over the world. However, the record time for its solution is no longer held by a human, but by a robot. This bachelor thesis deals with the structural design and subsequent implementation of the mechanical part of the solver for the Rubik's Cube. A research of existing solvers is carried out and then individual conceptual designs are proposed. The chosen variant is then elaborated in the structural design. It individually controls 5 walls of the cube and thus ensures the possibility of its solving without the need for further positioning and at the same time there is space for comfortable insertion of the cube. The design is then realised by 3D printing. Thereafter an electronic part is connected to the created structure and a simple program written to test the structure is executed using a microcomputer. The result of the testing is that the design is functional but there is room for improvement.

KEYWORDS

Rubik's Cube, 3D printing, Arduino UNO, drive control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALÁN, Petr. *Konstrukce řešiče Rubikovy kostky*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157288>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě této práce a zároveň také své rodině a přátelům za podporu při studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením pana doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rubikova kostka	14
2.2	Robotické skládání Rubikovy kostky	16
2.2.1	CUBOTone	16
2.2.2	RCR3D	17
2.2.3	GAN Robot	18
2.2.4	Porovnání existujících řešičů	19
2.3	Pohony	20
2.3.1	Krokový motor	20
2.3.2	Servomotor	21
2.3.3	Porovnání použitelných pohonů	22
2.4	Mikropočítače	22
2.4.1	Arduino	23
2.4.2	Raspberry Pi	24
2.4.3	Porovnání použitelných mikropočítačů	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cíl práce	27
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	28
4.1	Varianta A	28
4.2	Varianta B	29
4.3	Varianta C	30
4.4	Porovnání koncepčních návrhů	31
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	32
5.1	Přenos krouticího momentu na kostku	33
5.2	Rotace stěn	34
5.2.1	Rotace bočních stěn	35
5.2.2	Rotace spodní stěny	36
5.3	Mechanismus spojky	37

5.4	Mechanismus pro vložení kostky	38
5.4.1	Rameno	39
5.4.2	Vedení	39
5.4.3	Ovládání	40
5.5	Základní deska	41
5.6	Model konstrukce řešiče	41
5.7	Řídicí systém	42
5.8	Realizace konstrukce řešiče	44
6	DISKUZE	45
7	ZÁVĚR	46
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
9.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	50
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
11	SEZNAM TABULEK	52
12	SEZNAM PŘÍLOH	53

1 ÚVOD

Rubikova kostka se řadí mezi nejznámější hlavolamy světa. Jedná se o trojrozměrný mechanický hlavolam, který v roce 1974 sestrojil maďarský architekt a profesor Ernő Rubik. Tento hlavolam je uveden jako jeden z nejlivnějších vynálezů 20. století a zároveň je širokou veřejností považován za nejprodávanější hračku. Rubik získal roku 1975 patent HU170062 na tehdy Magickou kostku (Buvös kocka), která se až po jejím rozšíření na západ začala nazývat Rubikovou. [1]

V této práci je řešena základní a nejrozšířenější varianta tohoto hlavolamu, tj. $3 \times 3 \times 3$, ta má 3 vrstvy, které se skládají ze 26 kostek a tzv. jádra. Princip hlavolamu spočívá v tom, že vyřešený hlavolam je náhodně rozložen postupným otáčením jednotlivých stěn a řešitel má za úkol ho dostat znovu do vyřešeného stavu. Počet všech možných permutací pro tuto variaci je více než 43 trilionů. [1]

Postupem času bylo vytvořeno mnoho dalších variací na tuto základní, krychlové varianty od $2 \times 2 \times 2$ až do rozměru $33 \times 33 \times 33$, čtyřboký jehlan, dvanáctistěn a také alternativy kvádrového typu např. $3 \times 3 \times 4$ [1].

Existuje několik různých soutěží na skládání Rubikovy kostky a jejich variací. Kritériem většiny z nich je dosažený čas, za který je soutěžící schopen složit kostku, ale existují i takové, kde je kritériem počet kroků použitý k vyřešení kostky. Soutěže se dále dělí na klasické skládání oběma rukama, pouze jednou či dokonce se zavázanýma očima. Nejrozšířenější je však základní varianta kostky, tedy $3 \times 3 \times 3$ skládána oběma rukama. [2]

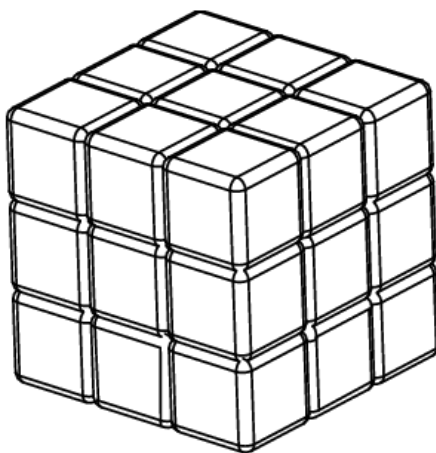
Formát této soutěže je nejčastěji tvořen 5 pokusy, z nichž je vyřazen nejhorší a nejlepší čas a ze zbylých tří je vypočten průměrný čas. Samotný pokus je rozdělen do dvou fází. V první fázi má soutěžící 15 vteřin na inspekci kostky, poté začíná skládat a teprve tento čas je brán jako čas samotného pokusu. Současný rekord pro složení Rubikovy kostky je 3,13 s, toho dosáhl roku 2023 Max Park [2]. Avšak rekord pro průměrný čas složení, tedy dle formátu soutěže, drží Yiheng Wang, a to 4,48 s, jenž stanovil téže roku 2023 [2]. [3]

S vývojem robotiky se její aplikace dostala i do řešení tohoto hlavolamu. Výsledkem této aplikace je rychlost vyřešení Rubikovy kostky, které není člověk schopen dosáhnout, ale také praktický nástroj pro názorné učení toho, jak složit tento hlavolam. Současný rekord robota je pouhých 0,38 s [4].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

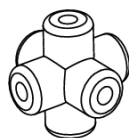
2.1 Rubikova kostka

Na obr. 2-1 je zobrazena základní varianta Rubikovy kostky, tj. krychlová varianta $3 \times 3 \times 3$, na kterou bude řešič navrhován. Ta se skládá z 26 jednotlivých kostek a jednoho jádra. Tyto kostky se dále dělí dle jejich polohy v hlavolamu, a to na 6 středových kostek, 8 rohových kostek a 12 hranových kostek [1].

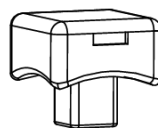


Obr. 2-1 Rubikova kostka $3 \times 3 \times 3$ [1]

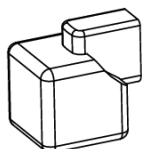
Tvary jednotlivých kostek a jádra Rubikovy kostky jsou vidět na obr. 2-2. Každá z jednotlivých kostek je na svých stěnách, které se nacházejí na vnějších stěnách hlavolamu, barevně označena. Tzn. střed má barevné označení pouze na jedné, hrana na dvou a roh na třech svých stěnách. Každá stěna vyřešeného hlavolamu, která se skládá z 9 stěn jednotlivých kostek, je označena jednou barvou. Tzn., že na celém hlavolamu nalezneme stejný počet barev jako je počet stěn, tj. 6. [1]



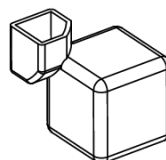
a Jádro



b Středová kostka



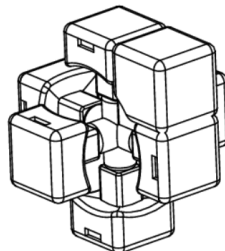
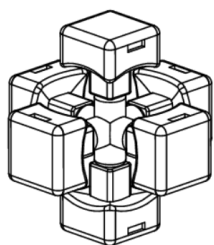
c Hranová kostka



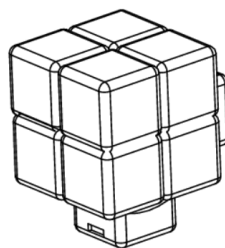
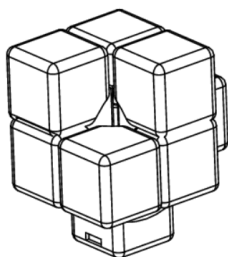
d Rohová kostka

Obr. 2-2 Jednotlivé kostky Rubikovy kostky ([1], upraveno)

Jednotlivé kostky jsou složeny do sebe dle obr. 2-3 a tvoří tak těleso Rubikovy kostky. Středové kostky jsou spojeny s jádrem pružinovými šrouby, které povolují těmto kostkám pouze rotaci. Středů tedy zaujímají stále stejnou polohu oproti ostatním středovým kostkám a určují tedy barvu stěny, ve které se nacházejí. Ostatní kostky jsou spojeny kloubovými mechanismy, které jim umožňují se pohybovat vždy s otáčením středem, a tak mohou volně přecházet mezi jednotlivými stěnami. [1]



a Spojení jádra s šesti středů b Spojení dvou středů s hranou



c Spojení tří středů s třemi hranami d Spojení tří hran s rohem

Obr. 2-3 Postupné skládání segmentů kostky ([1], upraveno)

Existuje několik metod řešení Rubikovy kostky. Z pravidla platí, že čím méně kroků je potřeba, tím je metoda komplexnější, protože obsahuje více algoritmů, které si musí člověk zapamatovat. Jedna z lehčích metod, avšak již ne ta základní, se nazývá CFOP neboli Fridrichova metoda. Pro zjednodušení zápisu jednotlivých algoritmů, ze kterých se metody skládají, byly označeny jednotlivé rotace, které lze s kostkou vykonat. Každá stěna má své označení, a to U (vrchní stěna), D (spodní stěna), F (přední stěna), B (zadní stěna), R (pravá stěna) a L (levá stěna). Pokud se v algoritmu vyskytuje samotné písmeno stěny, značí to rotaci dané stěny o 90° po směru hodinových ručiček. Dále je označena rotace stěny o 90° proti směru hodinových ručiček, a to přídatným apostrofem (například U'). Jako poslední možný krok je označena rotace stěny o 180° , která se značí přídatným číslem 2 (například F2). [5]

2.2 Robotické skládání Rubikovy kostky

Rubikova kostka $3 \times 3 \times 3$ má dohromady 54 ploch, které jsou barevně označeny podle pozice, kterou zaujímají ve složeném hlavolamu, kdy každá stěna má jednu barvu, označení se tedy skládá ze 6 barev. Každá z nich zaujímá 9 barevných ploch, 1 plochu na středové kostce, 4 na čtyřech různých rohových kostkách a 4 na čtyřech různých hranových kostkách. Hlavolam spočívá v náhodném rozložení těchto barevných ploch a jejich následném složení. Přestože existuje více než 43×10^{18} (43 trilionů) možností, do kterých je možné kostku rozložit, tak s vývojem výpočetní techniky bylo dokázáno, že jakoukoliv konfiguraci rozložené kostky lze vyřešit do 20 tahů [6]. [1]

K výpočtu sekvence pro složení Rubikovy kostky se používá Kociembův algoritmus. Ten je rozdělen do dvou fází. V první fázi je hledána sekvence, aby se kostka dostala do stavu G1, který je popsán tak, že je možné se do něj dostat ze složené kostky pohyby U, D, R2, L2, F2 a B2. V druhé fázi už je jen vyřešena kostka ze stavu G1 již zmíněnými kroky. Algoritmus poté provádí tolik iterací, dokud počet kroků v druhé fázi nedosáhne nuly. [6]

Díky tomuto algoritmu a výpočetní síle lze časy robotů výrazně snížit oproti těm lidským. To je zřetelné již při srovnání současných rekordů. Nejrychlejší složení Rubikovy kostky člověkem je za 3,13 s [2]. Ten je několikanásobně pomalejší než nejrychlejší čas dosažený robotem, který je v současnosti 0,38 s. Ten byl stanoven v roce 2018 robotem The Rubik's Contraption, jehož vytvořili studenti Massachusetts Institute of Technology, Ben Katz a Jared Di Carlo. Do tohoto času je započítán celý proces, tedy určení počátečního rozložení kostky, výpočet sekvence ke složení kostky a samotné složení kostky. Tímto časem pokořili předchozí rekord 0,637 s. Ten byl vytvořen roku 2016 robotem Sub1 Reloaded, který navrhl německý inženýr Albert Beer. [4]

2.2.1 CUBOTone

CUBOTone je tvořen pevným rámem a mechanickou konstrukcí, jejíž díly jsou vytištěny pomocí 3D tisku. Tato konstrukce je poté připevněna k rámu, který je v tomto provedení dřevěný. Hlavními prvky mechanické konstrukce jsou ohrada, do níž je vložena kostka, klec, která slouží jako protikus ohrady a zvedák. [7]

Robot využívá jeden krokový motor, který rotuje s ohradou a tím i s kostkou, a dva servomotory. První servomotor ovládá klec a její polohou určuje, zda krokový motor rotuje s celou kostkou, či zda je otočeno pouze se spodní vrstvou kostky. Druhý ovládá zvedák a tím polohuje kostku, respektive překlápí ji tak, dokud není požadovaná stěna umístěna v ohradě. [7]

Robot je řízen mikropočítačem Raspberry Pi. k němu je připojena kamera PiCamera v1.3, která obstarává obraz všech stěn kostky. Obraz z ní je zpracován a je určena počítačící konfigurace Rubikovy kostky. Následně je užitím Kociembova algoritmu určena sekvence ke složení hlavolamu. Sekvence je provedena řídicími instrukcemi Raspberry Pi, které pomocí jednotlivých kontrolerů, ovládající a napájecí samotné motory, definují chod motorů. [7]

CUBOTone je schopen složit Rubikovu kostku mezi 40–60 vteřinami. Tento robot se spíše soustředí na jednoduchost, a proto využívá pouze 3 motorů, tím vzniká spousta mezikroků pro polohování kostky do správné pozice. Cena pro jeho výrobu je přibližně 4700 Kč. [7]



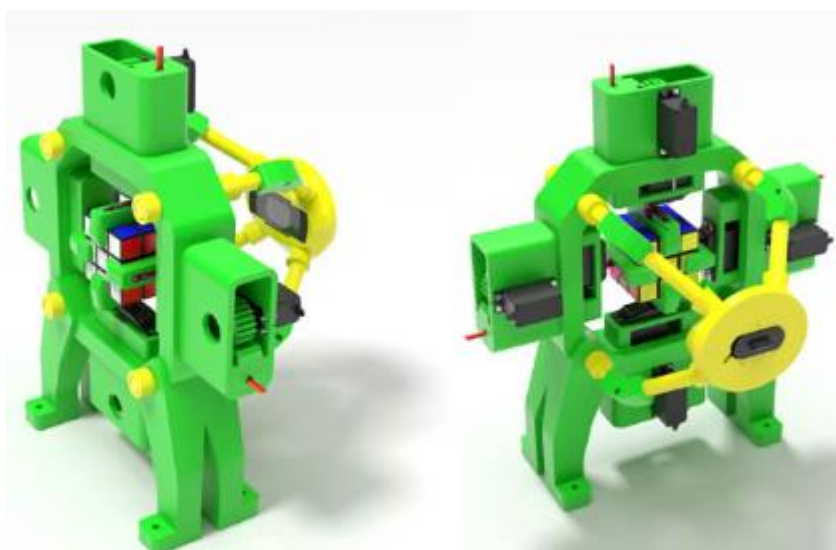
Obr. 2-4 CUBOTone [7]

2.2.2 RCR3D

RCR3D využívá pro svou konstrukci výhradně 3D tisk. Statický rám i všechny mechanické části jsou vytištěny na 3D tiskárně. Vytištění celé konstrukce zabere kolem 70 hodin a soubory pro tisk jednotlivých dílů jsou k dispozici na stránce robota. Robot využívá dohromady 8 servomotorů k vyřešení kostky, 4 z nich jsou určeny pro samotnou rotaci příslušné stěny a zbylé 4 slouží k přisunu ramen ke kostce, ty uchopí kostku po obvodové hraně stěny, konkrétně za 2 protilehlé hranové kostky, jak lze vidět na obr. 2-5. [8]

Robot znovu využívá kameru, v tomto případě webkameru, k získání obrazu, ze kterého je určena počáteční konfigurace kostky. Ke zpracování obrazu, vyhodnocení sekvence řešení kostky a samotnému řízení robota je zde využito stejně jako u předchozího robota Raspberry Pi. Ovládání a napájení samotných servomotorů je zařízeno servo kontrolorem. [8]

Princip vyřešení hlavolamu se od předchozího robota výrazně liší. Zde je možno otáčet čtyřmi stěnami, takže řešení vyžaduje znatelně méně kroků pro polohování kostky. To je zajištěno přisunem protilehlých ramen s odsunem zbylých dvou ramen a otočením celé kostky, aby bylo možno rotovat i zbylé 2 stěny, ke kterým iniciálně nepřísluší žádné ovládací rameno. Čas, za který je RCR3D schopen složit Rubikovu kostku není zveřejněn a cena jeho sestavení se pohybuje od 3500 do 4700 Kč. [8]



Obr. 2-5 RCR3D [8]

2.2.3 GAN Robot

GAN Robot je komerčně prodáván již sestavený robot. Tento robot má skládací konstrukci a všechnu potřebnou elektroniku má již instalovanou v této konstrukci, stačí jen připojit napájecí kabel, a to ho činí jednoduše přenosným. K robotu je vytvořena speciální kostka, ta definuje svoji současnou konfiguraci a také má upravené středové kostky pro zajištění lepšího spojení kostka – otočné rameno. K robotu je vyvinuta i vlastní aplikace, která propojuje kostku a robota navzájem a lze z ní robota ovládat. V aplikaci je kostka graficky vyobrazena a v reálném čase ukazuje pohyb kostky. Robot lze využít díky aplikaci i pro náhodné rozložení kostky. [9]

Pro zajištění rotací stěn k vyřešení kostky je zde uvažováno 5 servomotorů, kdy každý z nich odpovídá jedné z 5 stěn, přičemž s horní stěnou není otáčeno vůbec. Z důvodu rotace pouze pěti stěn je zde potřeba speciálního algoritmu pro výpočet sekvence na vyřešení kostky. Z tohoto důvodu je z pravidla zapotřebí více kroků k vyřešení hlavolamu. Avšak oproti předchozím řešení zde odpadají kroky pro polohování kostky. GAN Robot je schopen kostku vyřešit do 5 s. Cena samotného GAN Robota je 2300 Kč, avšak k zajištění funkce robota je potřeba ještě již zmíněná speciální kostka, jejíž cena se liší dle variant. Pro určení celkové ceny je uvažována varianta GAN356 i 3, ta stojí 1400 Kč. Celková cena je tedy 3700 Kč. [9]



Obr. 2-6 GAN Robot [9]

2.2.4 Porovnání existujících řešičů

Tato podkapitola obsahuje tabulky, ve kterých jsou porovnány konstrukce zmíněných řešičů. V Tab. 2-1 lze vidět parametry jednotlivých konstrukcí řešičů a v Tab. 2-2 je poté vidět přehled výhod a nevýhod daných řešičů.

Tab. 2-1 Porovnání jednotlivých řešičů Rubikovy kostky

Parametr	CUBOTone	RCR3D	GAN Robot
Konstrukce	3D tisk	3D tisk	Vstřikování plastů
Pohon	Servomotory a krokový motor	Servomotory	Servomotory
Řídicí systém	Raspberry Pi	Raspberry Pi	-
Určení rozložení kostky	PiCamera v1.3	Webkamera	Samotná kostka
Uchopení kostky	Obvodová hrana	Obvodová hrana	Středová kostka
Čas složení	40–60 s	-	5–15 s
Cena	5000 Kč	3500–4700 Kč	3700 Kč

Tab. 2-2 Výhody a nevýhody řešičů

Název řešiče	Výhody	Nevýhody
CUBOTone	Využití 3D tisku Dostupné modely jednotlivých dílů Pouze 3 motory Dostupnost softwaru	Robustní konstrukce Nutné polohování kostky Čas složení
RCR3D	Využití 3D tisku Dostupné modely jednotlivých dílů Využití servomotorů	Robustní konstrukce Doba 3D tisku Nutné polohování kostky
GAN Robot	Kompaktnost konstrukce Rychlost složení Vlastní mobilní aplikace Lze použít i pro rozložení kostky	Nutnost speciální kostky Software není otevřený

2.3 Pohony

2.3.1 Krokový motor

Krokový motor je bezkartáčový synchronní motor, který převádí elektrické impulsy stejnosměrného proudu na diskrétní kroky, pohyb tedy není plynulý. Typicky se skládá ze statoru, tvořeného jednotlivými vinutími a rotoru, jehož konstrukce se odvíjí dle druhu krokového motoru. Rotor je ve skříni motoru uložen rotačně přes ložiska a na jedné straně ze skříně vystupuje v podobě výstupního hřídele. Počet kroků na jednu otáčku určuje konstrukce rotoru a počet fází statoru, typicky se jedná o 200 kroků [10]. Každý elektrický impuls se rovná pootočení rotoru o jeden krok. [11]

Krokový motor s permanentními magnety

Rotor motoru je tvořen permanentním magnetem, po jehož obvodu jsou střídavě rozmístěny severní a jižní póly budících magnetů. Jedná se o typově levnější konstrukci krokových motorů, avšak s výrazně nižším počtem kroků na jednu otáčku, a to 24–48. Namagnetované póly zvyšují magnetickou indukci, proto se tento typ motoru vyznačuje velkým kroučícím momentem. [10]

Krokový motor s proměnlivou reluktancí

Rotor motoru tohoto typu je tvořen vyniklými póly (zuby) z magneticky měkkého materiálu. Tyto póly jsou vlivem postupných elektrických impulsů vtahovány pod póly statoru a tím je docílena rotace rotoru. Jedná se o prvotní konstrukci krokových motorů a v současnosti jich už není tolik využíváno. [10]

Hybridní krokový motor

Tento typ krokového motoru je v současnosti využíván nejvíce. Jedná se o konstrukční kombinaci obou předchozích druhů. Rotor je tvořen permanentními magnety, avšak ty jsou namagnetovány axiálně a ne radiálně. Rotor je obvykle složen ze dvou prstenců namagnetovaných s opačnou orientací, nalisovaných na výstupní hřídeli. Oba prstence mají vyřezané drážky, které tak tvoří jednotlivé zuby rotoru. Tento typ se vyznačuje velkým rozlišením kroků, a to 100–400. Dále převyšuje oba předchozí typy ve spolehlivosti, krouticím a přídržném momentu a dosahované rychlosti, avšak i jeho cena je vyšší. [10]

Řízení krokových motorů

Krokové motory obecně vyžadují k jejich řízení driver neboli budič. Řízení těchto motorů se dělí podle typu motoru na unipolární a bipolární. Při unipolárním řízení je nutno zajistit tok proudu vinutím pouze v jednom směru, stačí tedy pouze jeden tranzistor na vinutí. V daném okamžiku pracuje pouze polovina vinutí a tím vzniká menší krouticí moment než u bipolárních motorů. U bipolárních motorů je nutno zajistit tok proudu ve dvou směrech, a proto musí být použito dvoustavového přepínač skládajícího se ze střídavě spínaných tranzistorů. Bipolární motor tedy vyžaduje složitější řídicí systém, avšak vytváří větší krouticí moment. [10]

2.3.2 Servomotor

Klasické servomotory pro průmyslové využití se dají najít prakticky všude, v robotech, v CNC, v elektromobilech atd. Pro využití v řešiči se bude uvažovat modelářský servomotor, konkrétně rotační servomotor, ten je obdobou toho průmyslového, akorát je menší a slabší. Existují zde 2 druhy a to standardní, který má omezený pohyb na 180 ° a řízená veličina je jeho natočení a stále se otáčející, který nemá omezený pohyb a řízena je rychlost jeho rotace. [12]

Tyto servomotory se skládají ze stejnosměrného motoru, mikrokontroleru, potenciometru a převodovky. Mikrokontroler řídí stejnosměrný motor a zároveň dostává odezvu z potenciometru o poloze výstupního hřídele. Modelářské servomotory jsou řízeny pomocí pouze tří vstupních vodičů, a to vstupního napětí, řídicího signálu a uzemnění. [12]

Napájení modelářského servomotoru je zajištěno relativně nízkým napětím, pro většinu z nich bude vyhovovat 5 V z baterie či přímo z mikropočítače, který servomotor řídí. Důležitějším aspektem je proud, kterým je servomotor řízen. Ten se pohybuje v rozsahu stovek mA podle velikosti servomotoru. [12]

Řízení servomotoru

K dosažení přesného pootočení servomotoru či požadované rychlosti v případě stále se otáčejících servomotorů je nutno řídit servomotor přesně časovanými signály. Většina modelářských servomotorů očekává řídicí impuls každých 20 ms. Šířka tohoto impulsu bývá většinou 1–2 ms a ovlivňuje pozici, o kterou se motor pootočí. Toto řízení signálu se nazývá PWM (Pulse Width Modulation). [12]

2.3.3 Porovnání použitelných pohonů

V této podkapitole jsou v Tab. 2-3 uvedeny výhody a nevýhody zmíněných pohonů, na jejichž základě se bude vycházet při návrhu pohonů řešiče.

Tab. 2-3 Výhody a nevýhody pohonů

Typ pohonu	Výhody	Nevýhody
Krokový motor	Neomezený rozsah rotace Přesná polohovatelnost	Vyšší cena Nutnost použití driveru Nutnost vlastního napájení
Servomotor	Nižší cena Lze řídit přímo mikropočítačem Lze napájet přímo mikropočítačem	Omezený rozsah rotace

2.4 Mikropočítače

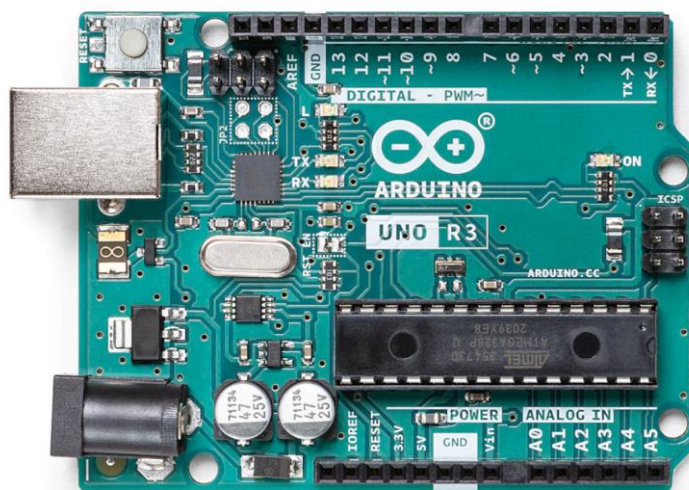
Pro řízení samotného robota musí být užito nějakého řídicího systému. Při průmyslových řešeních se za tímto účelem používá tzv. PLC (Programmable Logic Controller). Jedná se o průmyslový počítač, který se používá pro automatizaci procesů v reálném čase. Charakteristické pro něj je, že daný program vykonává v cyklech a že jeho periferie jsou přímo uzpůsobeny pro napojení na technologické procesy.

V této práci se není třeba uchýlovat k průmyslovému řešení a bude stačit klasický mikropočítač určen pro modelářské účely. Pro účely řízení navrhovaného řešiče jsou dostačující mikropočítače Arduino a Raspberry Pi.

2.4.1 Arduino

Arduino je open-source platforma, skládající se jak z hardwaru, tak softwaru. Byla vyvinuta roku 2005 v Itálii za účelem zajistit jednoduchou a lehkou cestu modelářům, jak řídit a programovat jejich vynálezy. Hardwarovou částí je Arduino deska a jako software je zde použito Arduino IDE (Integrated Development Environment). Arduino deska obsahuje mikrokontroler, vstupní a výstupní piny a řadu konektorů na propojení se senzory a různými akčními prvky. Arduino IDE je uživatelsky příjemné rozhraní, ve kterém je možné programovat užitím programovacího jazyka C či C++. [13]

Existuje několik druhů Arduino desek, přičemž nejvyužívanější a neznámější je nejspíše Arduino UNO. Jedna z nich je Arduino UNO Rev3. Ta má při ceně 589 Kč [14] hmotnost 25 g a má rozměry (68,6 × 53,4) mm. Dále využívá procesor ATmega328P s taktem 16 MHz a programovací paměť 32 KB, ze kterých si 0,5 KB nárokuje bootloader. Tato deska má 14 pinů, z nichž 6 disponuje PWM (Pulse Width Modulation) výstupem. [15]



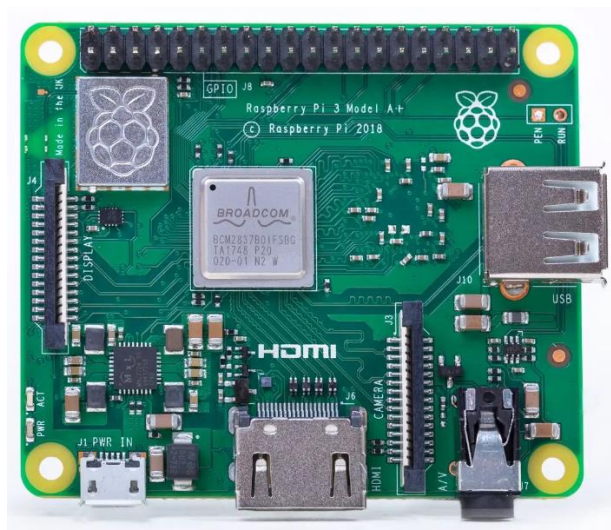
Obr. 2-7 Arduino UNO Rev3 [15]

Další je novější verze Arduino UNO R4 WiFi. Ta je o něco dražší a při ceně 625 Kč má rozměry (68,85 × 53,34) mm. Využívá procesor Renesas RA4M1 a programovací paměť 256 KB. Deska má také 14 pinů, ze kterých 6 disponuje PWM výstupem. [16]

2.4.2 Raspberry Pi

Raspberry Pi byla vyvinuta v roce 2012 Britskými vývojáři z University of Cambridge. Tento mikropočítač byl vyvinut původně pouze pro zlepšení a zefektivnění výuky, ale nakonec se velmi rychle rozšířil a dnes se využívá i pro komplexní projekty. Na rozdíl od Arduina je Raspberry Pi zmenšená verze klasických moderních počítačů a je možné k němu připojit i příslušné periferie, jako třeba monitor, klávesnici a myš. Je tedy možné se na něm připojit na internet, psát emaily a dokumenty. Jako programovací jazyk lze použít Java, C, C#, C++, Python, BASIC a Ruby. [17]

Jedna z verzí této desky je Raspberry Pi 3 Model A+. Ta má při ceně 699 Kč hmotnost 29 g a rozměry (65 × 56 × 10) mm. Využívá procesor Broadcom BCM2837B0, operační paměť RAM 512 MB, Wi-Fi a Bluetooth modul. Deska disponuje 40 piny GPIO, USB-A a Ethernet konektorem, HDMI a MIPI CSI a DSI porty. [18]



Obr. 2-8 Raspberry Pi 3 Model A+ [18]

Další, novější verze je pak Raspberry Pi 5-4 GB RAM. Ta je výrazně dražší, stojí 1615 Kč. Využívá procesor Broadcom BCM2712, operační paměť 4 GB, Wi-Fi a Bluetooth modul. Deska disponuje 40 piny GPIO, USB-A a Ethernet konektorem, dvěma microHDMI konektory a MIPI CSI a DSI porty. [19]

2.4.3 Porovnání použitelných mikropočítačů

V Tab. 2-4 jsou vypsány a určeny k porovnání některé z parametrů jednotlivých mikropočítačů.

Tab. 2-4 Porovnání jednotlivých mikropočítačů

Parametr	Arduino UNO Rev3	Arduino UNO R4 WiFi	Raspberry Pi 3 Model A+	Raspberry Pi 5-4 GB RAM
Procesor	ATmega328P	Renesas RA4M1	Broadcom BCM2837B0	Broadcom BCM2712
Operační paměť	32 KB	256 KB	512 MB	4 GB
Počet pinů	14	14	40	40
Cena	589 Kč	625 Kč	699 Kč	1615 Kč

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

V současné době jsou nekomerční řešiče konstruovány tak, že jsou velmi robustní a mají mnoho kroků polohování kostky při jejím řešení. To řeší komerční GAN Robot, který je kompaktní a není zde potřeba polohovat kostkou. Jeho konstrukce je však tvořena jako komerční řešení a je vytvořena vstřikováním plastů a jeho software je uzavřen. Na trhu je tedy nedostatek nekomerčních řešičů, jejichž konstrukce je volně dostupná a zhotovitelná v domácím prostředí, které jsou schopné kostku skládat, aniž by s ní polohovaly.

Na základě poznatků z rešeršní části bude konstrukce řešiče navrhována tak, aby byla zajištěna individuální rotace alespoň pěti stěn kostky. Tím bude eliminována nutnost manipulace s kostkou během jejího řešení, čímž by byl výrazně prodloužen čas, za který by byl řešič schopen Rubikovu kostku složit. Přenos krouticího momentu na stěnu kostky bude zajištěn pomocí ramene, které bude spojeno pouze se středovou kostkou stěny. Tím budou vyřazeny další přidavné pohyby řešiče v podobě příjezdu a odjezdu ramen, aby byl zajištěn dostatečný prostor pro otočení sousedních stěn kostky. Dojde tedy znovu k eliminaci potenciálního prodloužení času k vyřešení kostky.

K rotaci stěn bude využito krokových motorů, které mají neomezený rozsah rotace. Avšak jeden krokový motor bude zajišťovat rotaci dvou sousedních stěn Rubikovy kostky. To bude umožněno spojivým mechanismem, který bude řízen servomotorem, protože zde je jeho omezená rotace dostačující. Dále zde bude z důvodu vzájemné kolmosti nutno využít mechanický převod, který zajistí transformaci osy rotace krokového motoru do osy rotace dané stěny kostky.

Z důvodu užití krokových motorů bude nutno pro každý motor použít také jeho vlastní driver. Dále bude nutné zajistit nezávislé napájení driverů a krokových motorů dle specifikace zvoleného motoru.

Pro řízení samotného řešiče bude uvažován mikropočítač Arduino UNO Rev3. To bylo zvoleno na základě kritérií, která vyšla z interpretace samotného zadání. Z důvodu absence požadavku na výpočetní algoritmus, a též na schopnost rozpoznat počáteční rozložení kostky, je požadavek na výkon samotného mikropočítače velmi malý. Proto bylo dbáno především na cenu mikropočítače. Avšak bylo nutno zajistit, aby mikropočítač disponoval dostatečným počtem pinů pro umožnění řízení všech akčních členů řešiče. Tento požadavek i s pouhými 14 piny Arduino UNO Rev3 splňuje.

Krokové motory a servomotory budou uvažovány jako součást konstrukce, avšak z principu prototypu budou ostatní elektronické části jako mikropočítač, drivery a napájení uvažovány nezávisle na konstrukci a nebudou do ní tedy zabudovány.

Ke zhotovení samotné konstrukce řešiče bude, jak je zmíněno v zadání, využít výhradně 3D tisk. Tím bude umožněna tvorba komplexních dílů konstrukce. Přesto však bude nutno dbát na to, aby bylo možné jednotlivé díly vytisknout s dostatečnou kvalitou funkčních ploch.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je konstrukční návrh a realizace mechanické části řešiče pro Rubikovu kostku $3 \times 3 \times 3$. Konstrukce bude navržena tak, aby nebylo nutné s kostkou nijak polohovat při samotném skládání hlavolamu a bude realizována výhradně užitím 3D tisku, čímž bude zajištěna možnost pro výrobu řešiče v domácím prostředí. Řešič bude řízen pomocí mikropočítače Arduino UNO Rev3 a pro zajištění samotného pohybu bude využito krokových motorů spolu se servomotory. Mechanická část bude odzkoušena pomocí jednoduchého programu, který bude simulovat složení kostky, tedy bude rotovat s jednotlivými stěnami.

Dílejší cíle bakalářské práce:

- Vypracovat koncepční návrhy možných řešení
- Model konstrukčního návrhu řešiče
- Modely jednotlivých dílů konstrukce řešiče pro 3D tisk
- Realizovat a otestovat mechanické části řešiče
- Výkres sestavení konstrukčního návrhu řešiče

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole budou představeny koncepční návrhy konstrukce řešiče Rubikovy kostky. Varianty budou řešeny z hlediska počtu ovládaných stěn a z hlediska mechanismu převodů. Podrobnější popsání konstrukčních uzlů bude rozvedeno až ve zvoleném konstrukčním řešení.

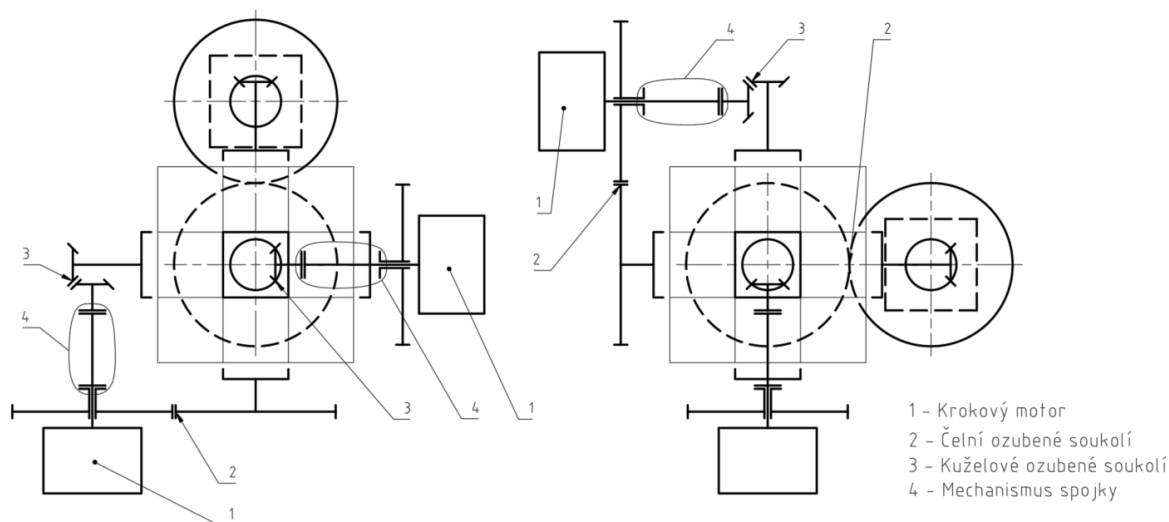
4.1 Varianta A

Jak lze vidět na obr. 4-1, ve variantě A je uvažováno individuální ovládání všech stěn Rubikovy kostky. V této variantě náleží na každý krokový motor 2 stěny kostky, mezi kterými bude přepínáno pomocí mechanismu spojky. To znamená, že v této variantě jsou uvažovány 3 krokové motory a 3 servomotory, které budou ovládat mechanismy spojek.

Konstrukce je díky obestavení kostky ze všech stran robustní a vzniká zde problém s vkládáním Rubikovy kostky do řešiče. Musela by zde být jedna stěna konstrukce vyjímatelná, což by bylo vzhledem ke složitosti mechanismu řešiče konstrukčně náročné.

Díky individuálnímu ovládání všech stěn zde lze využít Kociembova algoritmu pro výpočet sekvence k vyřešení hlavolamu. Tím by se usnadnila případná softwarová část, protože tento algoritmus je volně dostupný.

Jako mechanismu pro změnu osy rotace je zde navrženo kuželové ozubené soukolí. Pro případ pouze posunutí osy rotace je uvažováno čelní ozubené soukolí.



Obr. 4-1 Schéma varianty A

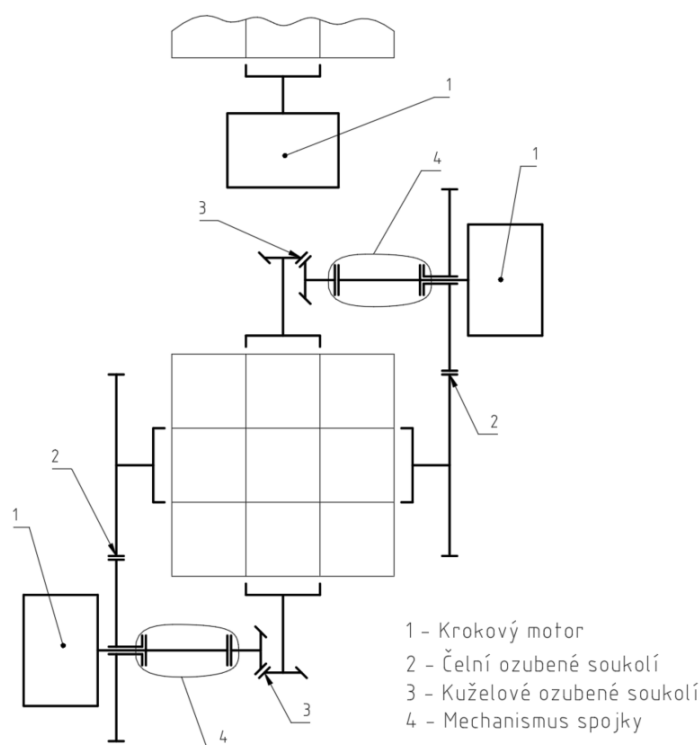
4.2 Varianta B

Jak lze vidět na obr. 4-2, tato varianta pracuje s návrhem, kdy bude individuálně ovládáno pouze 5 stěn Rubikovy kostky. To umožní výrazně kompaktnější řešení nežli v případě ovládání všech 6 stěn. V této variantě je spodní stěna kostky ovládána samostatně krokovým motorem a boční stěny jsou rozděleny stejně jako v předchozí variantě po dvojicích a je mezi nimi znovu přepínáno mechanismem spojky. Z toho vyplývá, že pro tuto variantu z hlediska pohonů bude potřeba 3 krokových motorů a pouze 2 servomotorů.

Vlivem ovládání pouze pěti stěn zde také vzniká prostor pro vkládání kostky do řešiče. Je zde nutné pouze vyřešit odjezd bočních ramen, aby tato ramena nepřekážela a kostka mohla být volně vložena do spodního ramene.

Pro tuto konstrukci řešiče by bylo možné z Kociembova algoritmu pouze vycházet a musel by se upravit, aby z něj byla získána sekvence k vyřešení hlavolamu rotací pouze pěti stěn kostky.

Jako mechanismus pro změnu osy rotace je zde znovu navrženo kuželové ozubené soukolí. Pro případ pouze posunutí osy rotace je uvažováno čelní ozubené soukolí.



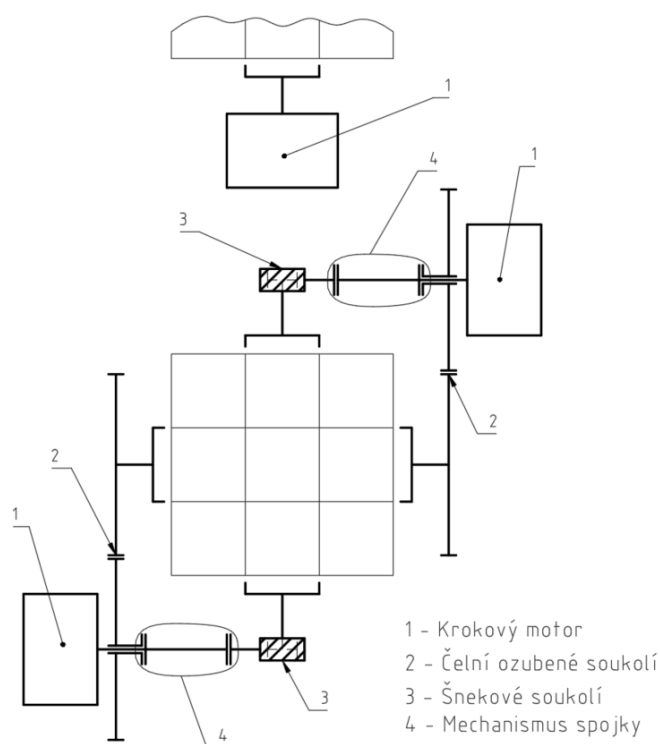
Obr. 4-2 Schéma varianty B

4.3 Varianta C

V této variantě, jak lze vidět na obr. 4-3, je znovu uvažováno individuální ovládání pouze 5 stěn kostky. To znamená, že řešení může být znovu kompaktnější oproti ovládání 6 stěn a znovu je třeba 3 krokových motorů a pouze 2 servomotorů.

Také zde vzniká volný prostor pro vkládání samotné Rubikovy kostky a stejně tak nastává problém s potřebou úpravy Kociembova algoritmu, pro výpočet sekvence k vyřešení kostky.

V této variantě je oproti té předchozí použito jiného mechanismu pro změnu osy rotace, zde je místo kuželového ozubeného soukolí uvažováno soukolí šnekové. Pro případ pouze posunutí osy rotace je zde znovu využito čelního ozubeného soukolí.



Obr. 4-3 Schéma varianty C

4.4 Porovnání koncepčních návrhů

V Tab. 4-1 jsou uvedeny jednotlivé koncepční návrhy a k nim také jejich výhody a nevýhody, na jejichž základě bude rozhodnuto, jaké řešení bude zvoleno pro konstrukční návrh.

Tab. 4-1 Výhody a nevýhody koncepčních návrhů

Varianta	Výhody	Nevýhody
A	Lze využít Kociembův algoritmus Obecně méně kroků k vyřešení kostky	3 servomotory Problém s vložením kostky Robustní konstrukce
B	Prostor pro vložení kostky Relativně kompaktní řešení	Nutno upravit Kociembův algoritmus Obecně více kroků k vyřešení kostky
C	Prostor pro vložení kostky Relativně kompaktní řešení	Nutno upravit Kociembův algoritmus Obecně více kroků k vyřešení kostky

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro samotné konstrukční řešení byl zvolen koncepční návrh B, tedy s pouze pěti řízenými stěnami kostky a s využitím kuželového soukolí pro změnu osy rotace. Konstrukce bude navrhována od spojení s kostkou po základní desku konstrukce. Jednotlivé části konstrukce budou dopodrobna rozebrány v následujících podkapitolách.

Pro tisk jednotlivých dílů konstrukce řešiče bude využita 3D tiskárna Prusa i3 MK3S+. Ta je jednou z několika modelů v řadě oceňovaných tiskáren MK3 [20]. V Tab. 5-1 lze vidět její specifikace.

Tab. 5-1 Specifikace 3D tiskárny Prusa i3 MK3S [20]

Parametr	Hodnota
Maximální rozměry tisku	(250 × 210 × 210) mm
Výška vrstvy	0,05-0,35 mm
Tryska	0,4 mm
Průměr filamentu	1,75 mm
Podporované materiály	PLA, PETG, ASA, ABS, PC, CPE a další
Maximální rychlost posuvu	200 mm·s ⁻¹
Maximální teplota trysky	300 °C
Maximální teplota podložky	120 °C
Cena	23 490 Kč

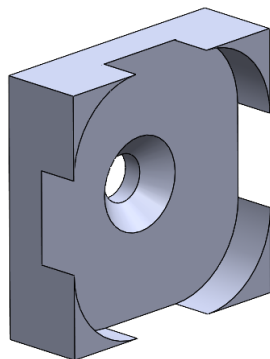
Jako materiál pro 3D tisk bude použito PLA, které je jedním ze základních materiálů určených pro 3D tisk. Zároveň je také podporovaný vybranou tiskárnou [20]. Jeho vlastnosti jsou dostačující na návrh konstrukce řešiče Rubikovy kostky.

Díly budou převážně tisknuty po vrstvách tlustých 0,2 mm s upřednostněním kvality tisku. Výplň bude tvořena přímočarým vzorem a její hustota bude nastavena na 15 %. Podpora tisku se bude využívat jen u dílů, které je budou vyžadovat. Obecně však bude kladen důraz na konstrukci dílů s funkčními plochami, aby zde nebyly podpory nutné a tím nebyla zhoršena kvalita povrchu funkčních ploch.

Při samotné konstrukci jednotlivých dílů je nutné uvažovat možné nepřesnosti vzniklé při tisknutí a také kvalitu povrchu, kterou je 3D tiskárna schopna dosáhnout.

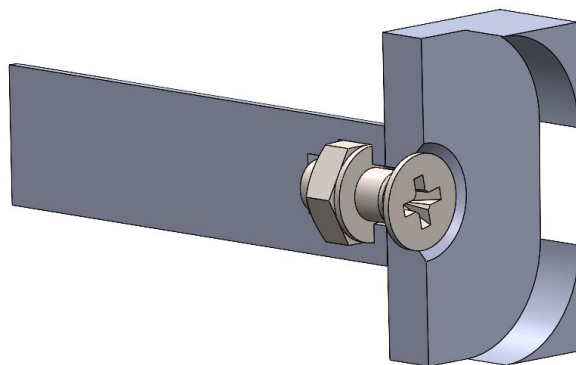
5.1 Přenos krouticího momentu na kostku

Krouticí moment potřebný k otočení stěny kostky bude přenášen pouze přes středový díl dané stěny a bude přenesen pomocí tvarového styku. Díl pro přenesení krouticího momentu je zobrazen na obr. 5-1 a je navržen specificky pro použitou kostku, tedy pro Rubikovu kostku 3×3×3 MoYu RS3 Magnetic (RS3M) 6 COLORS [21].



Obr. 5-1 Díl pro uchycení kostky

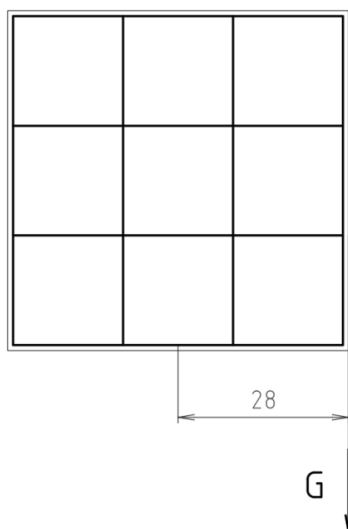
Díl je navržen tak, aby funkční plochy byly vytisknuty s dostatečnou kvalitou a nevznikaly zde problémy s nedoléháním či zasekáváním o vzniklé výstupky. Proto je konstruován odnímatelný a pro spojení s dalšími částmi bude použito šroubového spoje, to je viditelné na obr 5-2. Pro umožnění tohoto spoje musí být matice vložena do přípojného hřídele již během 3D tisku.



Obr. 5-2 Spojení dílu k uchycení kostky s hřídelí

5.2 Rotace stěn

Pro rotaci stěn bude použito krokových motorů. Pro určení zvolení konkrétního krokového motoru bude nutno experimentálně zjistit krouticí moment, který je třeba k otočení stěny. K tomu byl využit experiment dle schématu na obr. 5-3, kdy byl okolo stěny uvázán provázek, na který se následně věšela závaží, než došlo k pootočení stěny.



Obr. 5-3 Schéma experimentu pro určení krouticího momentu

K otočení stěny kostky došlo při zavěšení závaží o hmotnosti $m = 0,15 \text{ kg}$, z toho lze spočítat sílu působící na obvodu kostky využitím vzorce:

$$G = m \cdot g \quad (1)$$

Kde:

m [kg] hmotnost zavěšeného závaží

g [ms^{-2}] tíhové zrychlení

a následně lze vypočítat minimální krouticí moment k otočení stěnou kostky využitím vzorce:

$$M = G \cdot r \quad (2)$$

Kde:

G [N] tíhová síla od zavěšeného závaží

r [m] rameno působící síly ke středu otáčení

Minimální krouticí moment pro volbu krokového motoru tedy vyšel $M = 0,041 \text{ N} \cdot \text{m}$. K tomuto výsledku je ovšem nutno poznamenat, že zde bylo zanedbáno několik vlivů, a to například hmotnost provázku a posunutí ramene síly o tloušťku provázku. Avšak je také nutno poznamenat, že u zvolené kostky lze nastavit velikost přitlačné síly pružiny a tím lze tedy ovlivňovat krouticí moment nutný k otočení stěny. Proto je tento výsledek pouze orientační pro zvolení krokového motoru.

Na základě předchozího experimentu byl zvolen krokový motor Nema 17HS0423, který se vyznačuje momentem $0,42 \text{ N} \cdot \text{m}$ a tedy splňuje několikanásobně požadavek na minimální krouticí moment. Další jeho specifikace jsou vidět v Tab. 5-2.

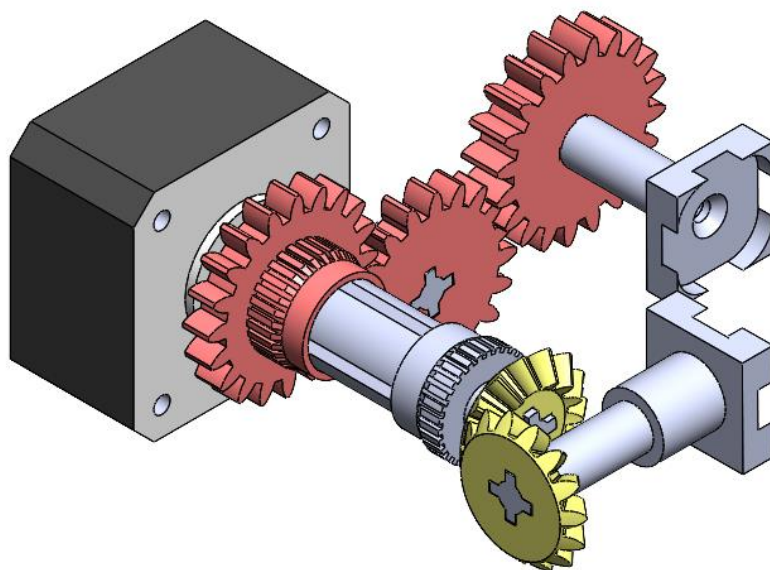
Tab. 5-2 Specifikace krokového motoru Nema 17HS0423

Parametr	Hodnota
Krouticí moment	0,42 N·m
Proud	1,5 A
Napětí	12 V
Průměr výstupního hřídele	5 mm
Délka výstupního hřídele	23 mm
Rozměry motoru	(42 × 42 × 23) mm
Cena	70 Kč

5.2.1 Rotace bočních stěn

Z důvodu zvolení dostatečně silného krokového motoru není nutno zvyšovat krouticí moment pomocí převodu a převody tedy budou sloužit pouze k transformaci osy rotace. Bude užito 2 typů převodového mechanismu, a to pouze posunujícího osu rotace a měnícího osu rotace. První ze jmenovaných je realizován čelním soukolím s přímými zuby, zde je použito třech kol pro ušetření místa pro návrh mechanismu na vložení kostky. Z tohoto důvodu je smysl rotace krokového motoru shodný se smyslem rotace výstupního hřídele, který přenáší krouticí moment na středovou kostku stěny Rubikovy kostky. Druhý převodový mechanismus má za úkol změnit osu rotace o 90° , toho je dle zvoleného koncepčního návrhu docíleno využitím kuželového soukolí s přímými zuby. Vlivem využití pouze 2 kol v soukolí zde dochází ke změně smyslu otáčení, s čímž bude nutné počítat při tvorech případné softwarové části.

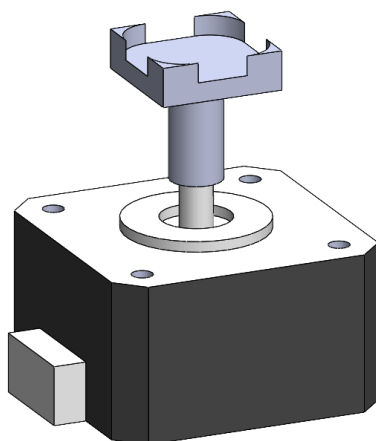
Oba zmíněné mechanismy jsou zobrazeny na obr. 5-4, přičemž čelní soukolí je zvýrazněno červenou barvou a kuželové soukolí pak barvou žlutou. Na obrázku se nachází ovládání pouze dvou bočních stěn, avšak na zbylých dvou stěnách je využito stejného mechanismu.



Obr. 5-4 Mechanismus k zajištění rotace bočních stěn

5.2.2 Rotace spodní stěny

K rotaci spodní stěny je dle zvoleného koncepčního návrhu využito samotného krokového motoru, na kterém je přímo nasazen tvarový díl zobrazen na obr. 5-5. Ten přenáší krouticí moment z krokového motoru na stěnu kostky.



Obr. 5-5 Mechanismus k zajištění rotace spodní stěny

Výstupní hřídel krokového motoru má na svém průměru vyfrézovanou jednu plochu pro přenesení vzniklého krouticího momentu. To musí být zohledněno při konstrukci všech součástí nasazených přímo na krokovém motoru a je tedy nutno vytvořit odpovídající plochu v dané součásti, aby bylo zaručeno přenesení krouticího momentu.

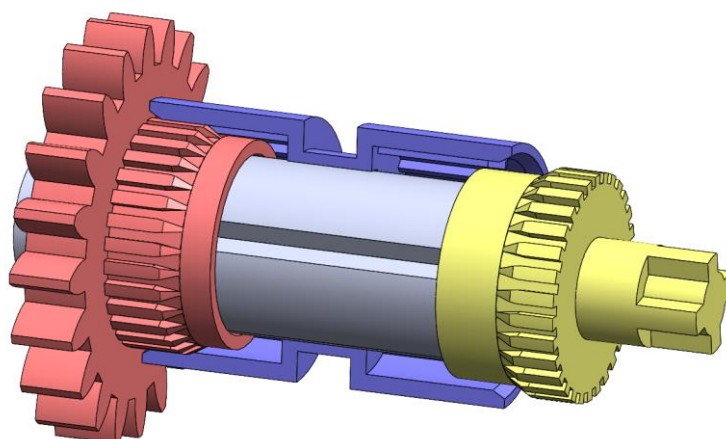
5.3 Mechanismus spojky

Pro ovládání spojkového mechanismu bylo vybráno použití servomotorů, jejichž omezená rotace je zde dostatečná. Jako servomotor byl zvolen MG966R 180 ° s kovovými převody, který má rotaci omezenou mechanickou zarážkou na 180 °. Jeho další specifikace lze vidět v Tab. 5-3.

Tab. 5-3 Specifikace servomotoru MG966R 180 °

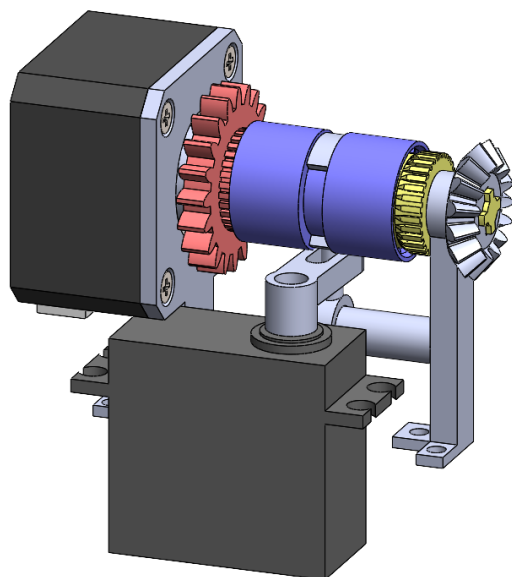
Parametr	Hodnota
Krouticí moment	1,1 N·m
Proud	500 mA
Napětí	6 V
Rozměry motoru	(43×40×19) mm
Cena	40 Kč

Mechanismus spojky je určen pro přepínání rotace mezi dvěma sousedními stěnami, které ovládá tentýž krokový motor. Samotná spojka je posuvně uložena na hřídeli, která je nasazena na výstupní hřídeli krokového motoru. Tato hřídel přenáší krouticí moment vyvozený krokovým motorem na spojku pomocí drážkování, jak lze vidět na obr. 5-6.



Obr. 5-6 Řez mechanismem spojky

Spojka je dále ovládána pomocí táhla přes servomotor, jak lze vidět na obr 5-7. Samotné táhlo má ještě pomocné vedení, které vychází z podpěry pro kuželové soukolí. Podle polohy servomotoru spojka spíná hřídel buď s čelním soukolím (červeně vyznačená součást) nebo s kuželovým soukolím (žlutě vyznačená součást). Krouticí moment je na tyto součásti přenesen tvarovým stykem, přes jemné drážkování, které má 30 jednotlivých drážek, ty jsou uzpůsobeny pro správné navedení zubů spojky, kterých je pro snadnější zapadnutí do drážek pouze 10. Tento počet je však dostatečný na přenesení krouticího momentu. Jednotlivé zuby a drážky mají sražení na náběhové straně, aby bylo zajištěno snadné zavedení zubů do drážek.



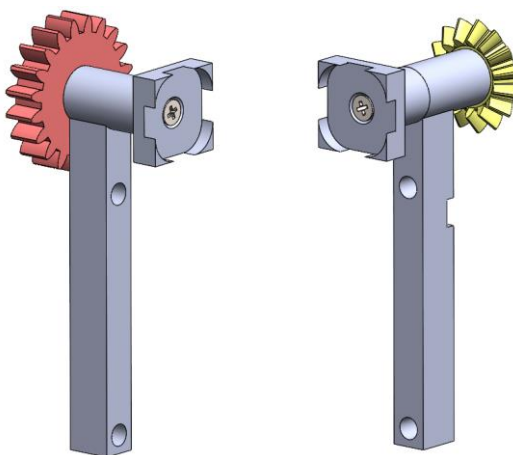
Obr. 5-7 Mechanismus spojky

5.4 Mechanismus pro vložení kostky

Tento mechanismus slouží pro odsunutí soustavy dílů, které uchopují kostku a tím vytvoří prostor pro snadné vložení případně vyjmutí kostky. Jeho jednotlivé konstrukční prvky jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.4.1 Rameno

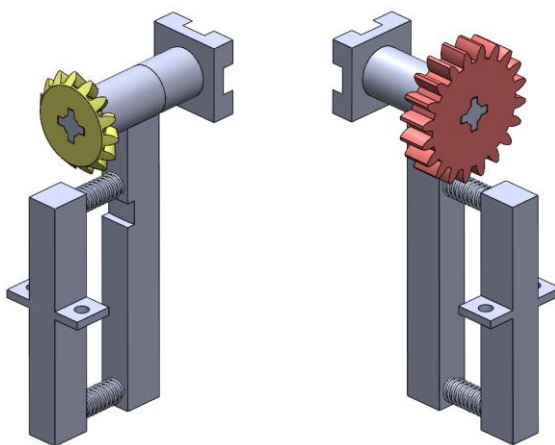
Rameno je část, která se přisouvá a odsouvá k Rubikově kostce. Jak lze vidět na obr. 5-8, řešič má 2 různé typy ramene, dle toho, na jaké soukolí rameno navazuje. Rameno se skládá z uchycení kostky spojeného šroubovým spojem s hřídelem, které je otočně uloženo v podpěře a hřídel je na druhém konci osazena ozubeným kolem. Jednotlivé typy se liší v konstrukci hřídele a podpěr a také samozřejmě osazeným ozubeným kolem. Oba typy mají ve své podpěře 2 díry pro válcové vedení, které bude řešeno v následující podkapitole.



Obr. 5-8 Konstrukce ramen řešiče

5.4.2 Vedení

Vedení je zobrazeno na obr. 5-9, je tvořeno dvěma čepy pasujícími do děr v podpěrách jednotlivých ramen. Čepy byly navrženy s co největší roztečí, aby se co nejvíce zamezilo vzpříčování. Součástí vedení jsou také tlačné pružiny, které vracejí ramena do funkční polohy, tj. do polohy, ve které jsou schopny přenést kroučící moment z krokového motoru na kostku.

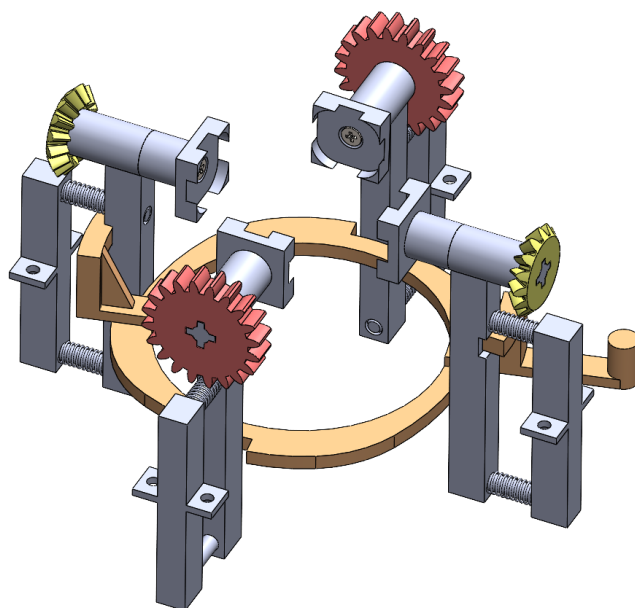


Obr. 5-9 Vedení ramen řešiče

5.4.3 Ovládání

Ovládání mechanismu pro vložení kostky je zajištěno ovládacím kroužkem. Ten je zobrazen na obr. 5-10, kde je zvýrazněn oranžovou barvou. Jedná se o vačkový mechanismus, který má 2 hlavní polohy. První je funkční poloha, která je vidět na obr. 5-10. V této poloze je páka ovládacího kroužku u podpěry pro kuželové soukolí. Tím se vačkový mechanismus tohoto kroužku dostane do spodní úvratě, čímž jsou jednotlivá ramena přitlačována pružinami ke vložené Rubikově kostce. Ovládací kroužek zároveň v této poloze zajišťuje podpěry ramen u kuželových soukolí a pomáhá zde eliminovat vliv axiální síly v něm vzniklé, aby nedošlo k odklonění ramene od kostky a následkem toho k přeskokování zubů v převodu. Druhá poloha je pro vložení kostky, kdy se páka ovládacího kroužku přesune proti směru hodinových ručiček k podpěře pro čelního soukolí. Tím se vačkový mechanismus dostane do horní úvratě a jednotlivá ramena jsou odtlačena od kostky a lze ji snadno vyjmout či vložit.

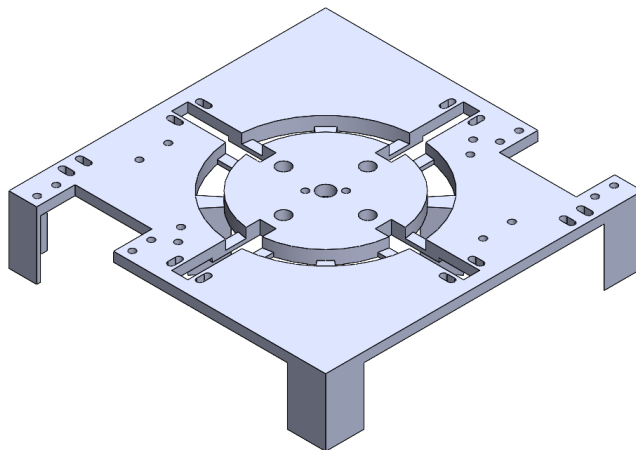
Ovládací kroužek bude uložen tak, aby se síla působící na podpěry jednotlivých ramen nacházela na ose souměrnosti jednotlivých čepů vedení. Tím dojde k eliminaci dalšího možného důvodu pro vznik vzpříčení vedení.



Obr. 5-10 Mechanismus pro vložení kostky

5.5 Základní deska

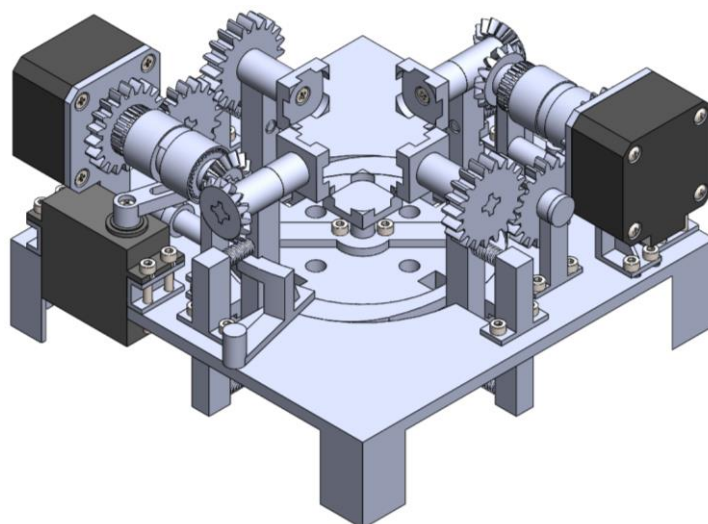
Základní deska je zobrazena na obr. 5-11. Je to konstrukční prvek řešiče, ve kterém jsou všechny již zmíněné prvky usazeny a utváří tak celek. Deska obsahuje především průchozí otvory pro šroubová spojení všech dílů s ní, výřezy pro uložení servomotorů, výřezy pro vedení podpěr a výřez pro uložení ovládacího kroužku, respektive vložky pod něj.



Obr. 5-11 Základní deska řešiče

5.6 Model konstrukce řešiče

Jednotlivé prvky popsané v předchozích podkapitolách jsou pomocí šroubových spojů a případně pomocných přídržných dílů spojeny se základní deskou a vzniká tak samotná konstrukce řešiče Rubikovy kostky, kterou lze vidět na obr. 5-12.

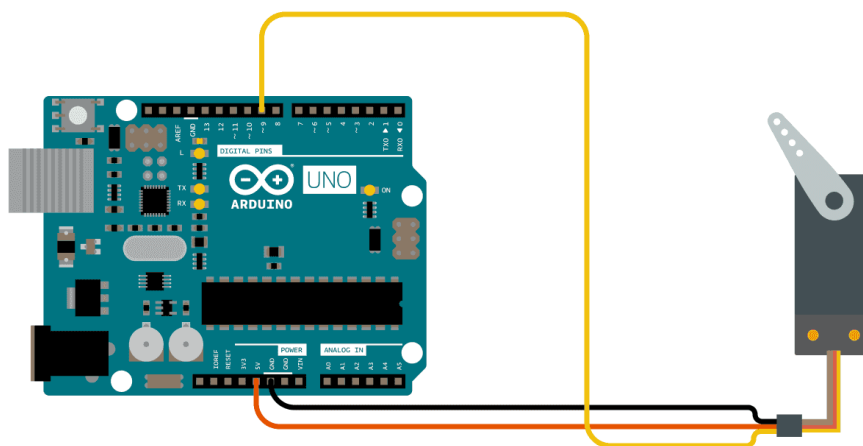


Obr. 5-12 Model řešiče Rubikovy kostky

5.7 Řídicí systém

Řešič bude řízen mikropočítačem Arduino UNO Rev3, do kterého budou nahrávány instrukce přes rozhraní Arduino IDE z připojeného počítače. Ten bude s deskou Arduina propojen přes kabel USB a tímto spojením ho bude také napájet. Program pro řízení se bude skládat pouze z jednoduchých instrukcí pro otáčení jednotlivých stěn a ovládání spojky, aby došlo k otestování mechanické funkce řešiče.

Servomotory budou řízeny přímo Arduinem pomocí třech vodičů, jak lze vidět na obr. 5-13. Ty jsou spojeny se třemi různými piny na Arduinu, červený vodič napájí servomotor napětím o hodnotě 5 V z Arduina, černý vodič slouží k uzemnění obvodu a poslední žlutý vodič slouží k samotnému řízení a Arduino jím vysílá servomotoru řídicí impulsy.



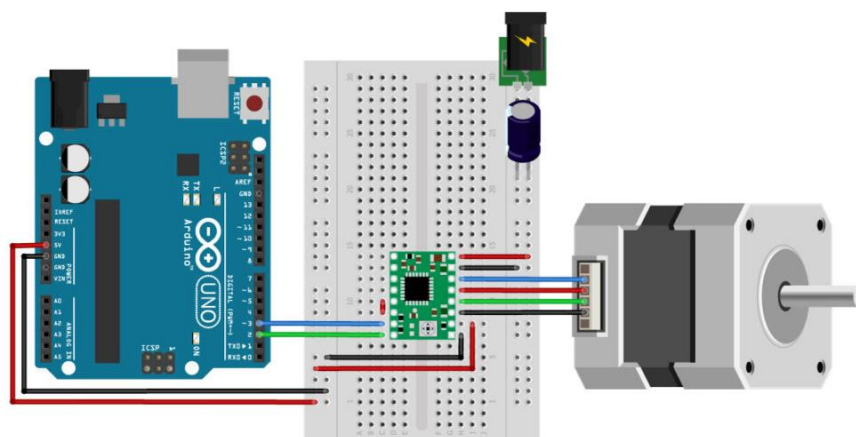
Obr. 5-13 Schéma zapojení servomotoru [22]

Řízení krokových motorů je již složitější a je k němu potřeba dalších prvků. Prvním z nich je napájení, pro tento účel bude využito spínaného zdroje o napětí 12 V a výkonu 40 W. Jeho podrobnější specifikace jsou vidět v Tab. 5-4. Tento spínaný zdroj bude využit pro napájení všech třech užitých krokových motorů.

Tab. 5-4 Parametry spínaného zdroje

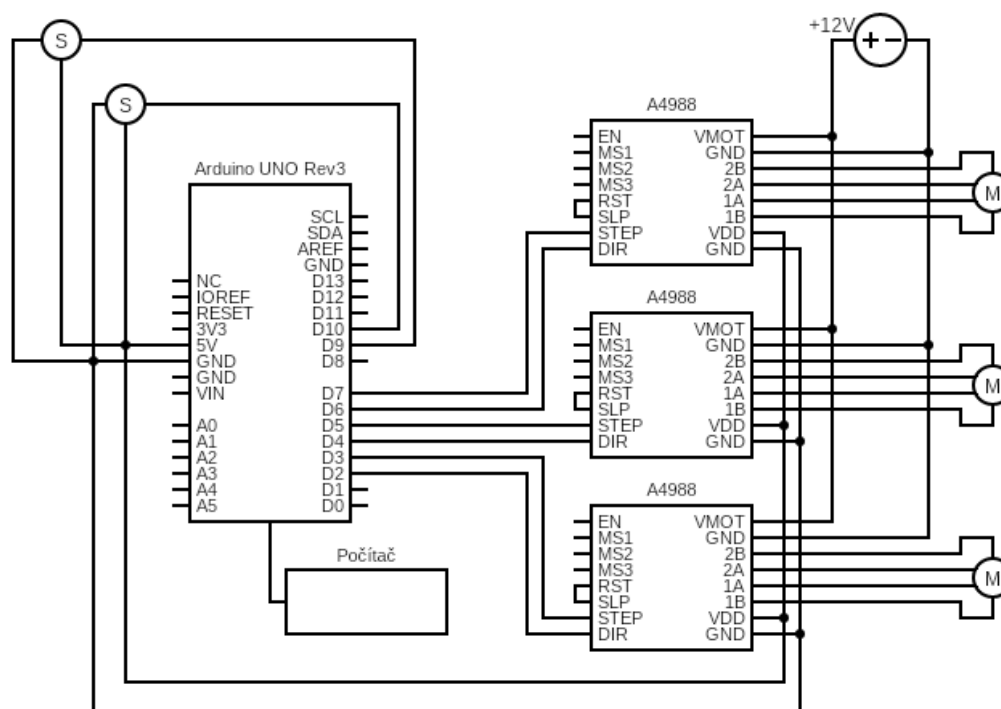
Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	100–265 V AC
Výstupní napětí	12 V DC (3,5 A)
Výkon	40 W
Rozměry	(84 × 58 × 30) mm
Pojistka	Tepelná, proti zkratu a proti přetížení
Cena	199 Kč

Druhým prvkem je driver krokového motoru, který řídí vždy pouze jeden krokový motor, tedy každý krokový motor má k sobě přiřazený driver. Za tímto účelem bude využito driveru A4988, který je obecně využíván pro řízení krokových motorů v modelářském prostředí. Pro snadnější zapojení všech prvků řešiče zde bude využito také nepájivého kontaktního pole. Krokové motory budou následně zapojeny dle schématu zobrazeného na obr. 5-14. Driver je řízen Arduinoem pouze přes 2 vodiče, kterými jsou vysílány řídicí impulsy. S krokovým motorem je naopak spojen 4 vodiči, ty se rozdělují na 2 páry, které opovídají dvěma vinutím krokového motoru.



Obr. 5-14 Schéma zapojení krokového motoru [23]

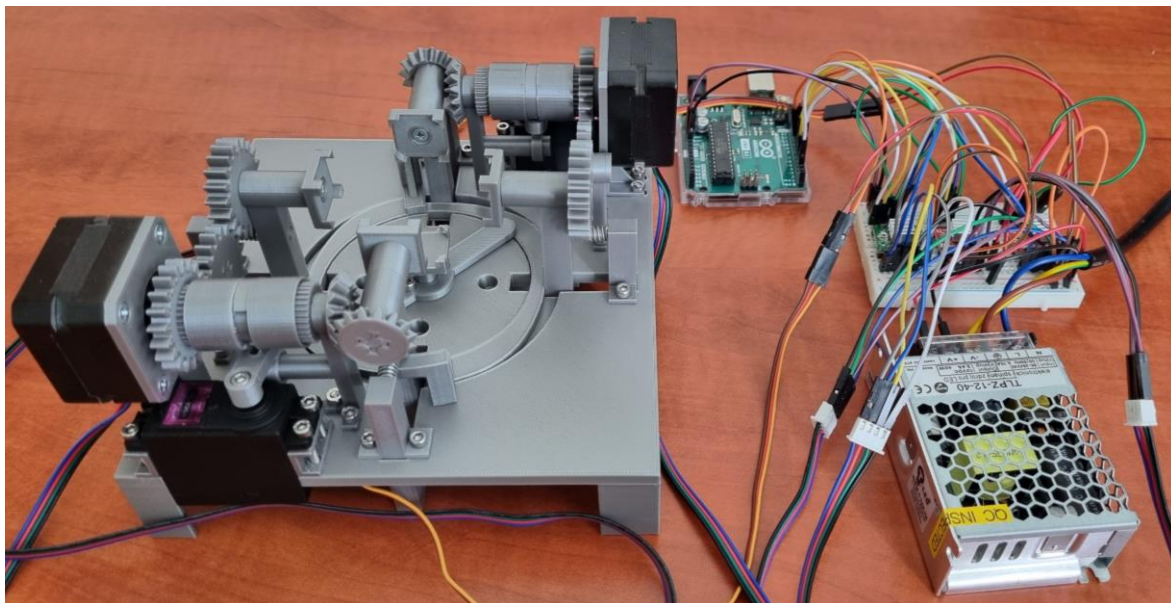
S využitím znalosti zapojení obou typů motorů budou následně zapojeny všechny elektronické prvky dle schématu na obr. 5-15.



Obr. 5-15 Schéma zapojení elektronických prvků řešiče

5.8 Realizace konstrukce řešiče

Jednotlivé díly byly vytisknuty, přičemž jejich 3D tisk trval dohromady 22 hodin a 52 minut, bylo využito 74,81 m PLA filamentu o průměru 1,75 mm, což odpovídá hmotnosti 223,1 g. Mimo šroubů a matic použitých ve šroubových spojích zde bylo využito také 8 pružin o středním průměru 5,5 mm a nezátížené délce 17,5 mm. Dále byly připojené všechny elektronické prvky, dle již zmíněného schématu, přičemž k propojení jednotlivých prvků bylo využito vodičů typu M-M (samec-samec). Výsledná konstrukce je zobrazena na obr. 5-16.



Obr. 5-16 Zhotovený model řešiče

6 DISKUZE

Výsledný konstrukční návrh slouží jako mechanická část řešiče Rubikovy kostky. Pro zhotovení funkčního automatického řešiče by musela být navržena softwarová část, která by obsahovala upravený Kociembův algoritmus a řídicí program. Upraveným Kociembovým algoritmem by byla zjištěna sekvence kroků k vyřešení kostky z počáteční konfigurace a ta by byla následně provedena díky řídicímu programu jednotlivými motory řešiče.

Konstrukce byla po jejím navržení zhotovena, aby ji bylo možné odzkoušet. Jednotlivé díly byly vytištěny na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S+. Jako materiál pro tisk bylo využito PLA. Tento materiál byl zvolen z důvodu dostupnosti a dostačujících mechanických vlastností pro konstrukci.

Již při tisku bylo jasné, že některé díly bude nutné překonstruovat pro zajištění kvality funkčních ploch. Tento problém vznikl například u dílu pro uchycení kostky a přípojné hřídele, který je ve finálním návrhu rozdělen na 2 části právě z tohoto důvodu. U některých součástí byly při tisku využity podpory, ty byly využity na nefunkčních plochách, aby vzniklá horší kvalita povrchu plochy neměla vliv na chod konstrukce, případně byla tato plocha zbrusena brusným papírem.

Po zhotovení konstrukce se přešlo k jejímu zkoušení, z něhož vyplynuly 2 hlavní problémy, které byly následně řešeny. Prvním byl vznik axiální síly v kuželovém soukolí, který při rotaci stěny odtlačoval kuželové kolo směrem od kostky a tím docházelo k přesakování zubů v převodu. To bylo řešeno zvětšením rozteče vodících čepů, zmenšením vůle ve vedení a vytvoření mechanické zarážky na ovládacím kroužku, který pomáhá tuto axiální sílu zachycovat. Druhým problémem byla funkce mechanismu spojky, zde bylo nutno zajistit snadné přepojení mezi ovládanými stěnami. Ve výsledném návrhu je k tomuto použito drážkovaných čepů a ozubené spojky, u kterých byla optimalizována oblast náběhu a také zde bylo využito mazání pro lepší kluzné podmínky. Spojka je ovládána táhlem a pro zamezení vzpříčování bylo přidáno pomocné vedení pro táhlo.

Již dva zmíněné problémy jsou i po upravení konstrukce stále jejími největšími slabinami. U obou by mohla pomoci výměna vedení tvořeného díly zhotovenými 3D tiskem, které mají díky své vrstvené struktuře sklon ke vzpříčování. Mohlo by být využito například nějakého typu komerčního lineární vedení. Dále by mohl být zlepšen samotný mechanismus spojky, který má kvůli konstrukci ze 3D tištěných dílů sklon k zadrhávání. Mohla by být navržena typově jiná spojka, či by díly pro spojkový mechanismus mohly kombinovat 3D tisk a konvenční výrobu z oceli. Při realizaci úprav by muselo být přihlíženo také na cenové hledisko změn.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce byl návrh a následná realizace mechanické části konstrukce řešiče Rubikovy kostky $3 \times 3 \times 3$ užitím mikropočítače a 3D tisku. Mezi dílčími cíli pak bylo provést rešerši existujících řešení, vypracovat koncepční návrhy možných řešení a realizovat a otestovat mechanickou část řešiče.

V práci byla provedena rešerše existujících řešičů a na jejím základě byly vypracovány koncepční návrhy řešiče. Z těch byla vybrána do konstrukčního návrhu varianta, která ovládá individuálně 5 stěn hlavolamu, to ji umožňuje vyřešit Rubikovu kostku bez dodatečného polohování a zároveň zajišťuje prostor pro pohodlné vložení kostky.

Pro pohon řešiče byly vybrány 3 krokové motory a 2 servomotory. Krokové motory jsou určeny k rotaci stěny kostky, přičemž boční stěny kostky jsou rozděleny do dvojic a každou dvojici ovládá jeden krokový motor. Pro přepínání mezi jednotlivými stěnami v těchto dvojicích byly navrženy spojkové mechanismy, které jsou ovládány servomotory.

Řešič je řízen mikropočítačem Arduino UNO Rev3. Ten řídí právě zmíněné motory, přičemž pro řízení krokových motorů jsou ještě nutné individuální drivery pro každý motor. Zde bylo využito driverů A4988. Dále bylo nutné zajistit napájení mikropočítače a motorů. Servomotory jsou napájeny přímo z desky Arduina, která je napájena z počítače, avšak krokové motory vyžadují napájení o napětí 12 V. Za tímto účelem bylo využito spínaného zdroje o výkonu 40 W.

Jednotlivé díly navržené konstrukce byly zhotoveny na 3D tiskárně z materiálu PLA a následně byla konstrukce řešiče složena a zapojena elektronická část, aby mohlo dojít k odzkoušení její funkce. Pro tento účel byl napsán jednoduchý program, který rotuje s jednotlivými stěnami. Při zkoušení se zjistilo, že konstrukce je funkční, ale stále je zde prostor pro zlepšení několika konstrukčních prvků. Dále byl zhotoven výkres sestavení konstrukce řešiče a spolu s modelem konstrukce a s modely pro tisk jednotlivých dílů konstrukce jsou uvedeny v příloze práce. Hlavní i dílčí cíle práce tedy byly splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZENG, Da-Xing, Ming LI, Juan-Juan WANG, Yu-Lei HOU, Wen-Juan LU a Zhen HUANG. Overview of Rubik's Cube and Reflections on Its Application in Mechanism. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2018, **31**(1) [cit. 2024-04-11]. ISSN 1000-9345. Dostupné z: doi:10.1186/s10033-018-0269-7
- [2] WCA. *Rekordy* [online]. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.worldcubeassociation.org/results/records>
- [3] WCA. *WCA Regulations* [online]. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.worldcubeassociation.org/regulations/>
- [4] *Rubik's robot solves puzzle in 0.38 seconds* [online]. 2018 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/technology-43331049>
- [5] *Different Rubik's Cube Solving Methods* [online]. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://ruwix.com/the-rubiks-cube/different-rubiks-cube-solving-methods/>
- [6] KOCIEMBA, Herbert. Herbert Kociemba's Homepage. *Herbert Kociemba's Homepage* [online]. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://kociemba.org/index.html>
- [7] CUBOTone. FAVERO, Andrea. *CUBOTone* [online]. 2021 [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Rubik-Cube-Solver-Robot-With-Raspberry-Pi-and-Pica/>
- [8] OTVINTA. FULLY 3D-PRINTED RUBIK'S CUBE ROBOT. OTVINTA. *Rcr3d* [online]. 2017 [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.rcr3d.com>
- [9] GANCUBE INC. GANCUBE. GANCUBE INC. *GANCUBE* [online]. 2014 [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.gancube.com>
- [10] ROY, Tanu Shree, Humayun KABIR a Md CHOWDHURY. *Simple Discussion on Stepper Motors for the Development of Electronic Device* [online]. 2014, 1089-1096 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273448791_Simple_Discussion_on_Stepper_Motors_for_the_Development_of_Electronic_Device

- [11] TME CZECH REPUBLIC, S.R.O. *KROKOVÝ MOTOR – DRUHY A PŘÍKLADY APLIKACÍ KROKOVÝCH MOTORŮ* [online]. TME CZECH REPUBLIC, S.R.O. 2020 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru/>
- [12] SPARKFUN. *Servos Explained* [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/servos#types-of-servos>
- [13] LOUIS, Leo. Working Principle of Arduino and Using it as a Tool for Study and Research. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems* [online]. 2016, 1(2), 21-29 [cit. 2024-04-20]. ISSN 24557889. Dostupné z: doi:10.5121/ijcacs.2016.1203
- [14] BASTLIK. *Arduino UNO Rev3 - originál* [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.bastlik.cz/arduino-uno-rev3/>
- [15] ARDUINO. *Arduino Uno Rev3* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- [16] ARDUINO. *Arduino UNO R4 WiFi* [online]. [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/products/uno-r4-wifi?queryID=e59b13170b5931b9d4385b300d7dc27b&_gl=1*1y27t9a*_ga*OTY1Mjc2NzcuMTcxMzYwOTE0MQ..*_ga_NEXN8H46L5*MTcxNDM3NDAYNS41LjEuMTcxNDM3NDA1NC4wLjAuMTE1MDU4NjY4
- [17] GHAEEL, Hirak. *A Review Paper on Raspberry Pi and its Applications* [online]. 2020 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: doi:10.35629/5252-0212225227
- [18] RPISHOP.CZ. *Raspberry Pi 3 Model A+ 64-bit 512MB RAM* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-3a/1114-raspberry-pi-3-model-a.html>
- [19] RPISHOP.CZ. *Raspberry Pi 5 - 4GB RAM* [online]. [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-5/6497-raspberry-pi-5-4gb-ram.html#tab-description>
- [20] PRUSA RESEARCH. *3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+* [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>

- [21] CUBEMANIA. *Kostka 3x3x3 MoYu RS3 Maglev Magnetic (RS3M Maglev) 6 COLORS* [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: [https://obchod.cubemania.cz/?2538,kostka-3x3x3-moyu-rs3-maglev-magnetic-\(rs3m-maglev\)-6-colors](https://obchod.cubemania.cz/?2538,kostka-3x3x3-moyu-rs3-maglev-magnetic-(rs3m-maglev)-6-colors)
- [22] Circuit. In: ARDUINO. *Basic servo control* [online]. Last revision 02. 09. 2022 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/static/046ce7765be1351d3201bb46e6fdb71c/29114/servo-basic-circuit.png>
- [23] Wiring diagram/schematic for A4988 stepper motor driver with Arduino and stepper motor. In: MAKERGUIDES. *How to control a stepper motor with A4988 driver and Arduino* [online]. 2019, Last updated: 2024-01-30 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/02/A4988-Arduino-stepper-motor-wiring-schematic-diagram-pinout-1-1024x551.jpg>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

G	tíhová síla
g	tíhové zrychlení
m	hmotnost
M	krouticí moment

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Rubikova kostka 3×3×3 [1]	14
Obr. 2-2	Jednotlivé kostky Rubikovy kostky ([1], upraveno).....	14
Obr. 2-3	Postupné skládání segmentů kostky ([1], upraveno)	15
Obr. 2-4	CUBOTone [7]	17
Obr. 2-5	RCR3D [8]	18
Obr. 2-6	GAN Robot [9]	19
Obr. 2-7	Arduino UNO Rev3 [15].....	23
Obr. 2-8	Raspberry Pi 3 Model A+ [18].....	24
Obr. 4-1	Schéma varianty A	28
Obr. 4-2	Schéma varianty B	29
Obr. 4-3	Schéma varianty C	30
Obr. 5-1	Díl pro uchycení kostky	33
Obr. 5-2	Spojení dílu k uchycení kostky s hřídelí.....	33
Obr. 5-3	Schéma experimentu pro určení krouticího momentu	34
Obr. 5-4	Mechanismus k zajištění rotace bočních stěn.....	36
Obr. 5-5	Mechanismus k zajištění rotace spodní stěny	36
Obr. 5-6	Řez mechanismem spojky	37
Obr. 5-7	Mechanismus spojky	38
Obr. 5-8	Konstrukce ramen řešiče	39
Obr. 5-9	Vedení ramen řešiče	39
Obr. 5-10	Mechanismus pro vložení kostky	40
Obr. 5-11	Základní deska řešiče.....	41
Obr. 5-12	Model řešiče Rubikovy kostky.....	41
Obr. 5-13	Schéma zapojení servomotoru [22]	42
Obr. 5-14	Schéma zapojení krokového motoru [23]	43
Obr. 5-15	Schéma zapojení elektronických prvků řešiče.....	43
Obr. 5-16	Zhotovený model řešiče	44

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Porovnání jednotlivých řešičů Rubikovy kostky.....	19
Tab. 2-2	Výhody a nevýhody řešičů	20
Tab. 2-3	Výhody a nevýhody pohonů	22
Tab. 2-4	Porovnání jednotlivých mikropočítačů.....	25
Tab. 4-1	Výhody a nevýhody koncepčních návrhů	31
Tab. 5-1	Specifikace 3D tiskárny Prusa i3 MK3S [20].....	32
Tab. 5-2	Specifikace krokového motoru Nema 17HS0423	35
Tab. 5-3	Specifikace servomotoru MG966R 180 °	37
Tab. 5-4	Parametry spínaného zdroje	42

12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Model konstrukčního návrhu řešiče
- Příloha 2: Soubory pro 3D tisk
- Příloha 3: Výkres sestavení