



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CENTRUM SPORTOVNÍCH AKTIVIT

CENTRE OF SPORTS ACTIVITIES

**MĚŘENÍ LETOVÝCH VLASTNOSTÍ DISCGOLFOVÉHO
DISKU**

FLIGHT PROPERTIES OF DISCGOLF DISC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Valík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hanák

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Sportovní technologie**

Centrum sportovních aktivit

Student: Tomáš Valík

ID: 217744

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měření letových vlastností discgolfového disku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Proveďte literární rešerši. 2) Navrhněte způsob a postup měření pomocí Qualisys a IMU. 3) Porovnejte pilotní měření, pro ověření Vašeho návrhu měření. Případně Váš návrh upravte. 4) Proveďte měření vycházející z Vašeho návrhu a to jak pomocí Qualisys, tak pomocí IMU. 5) Zhodnocení výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1]<https://www.qualisys.com/info/scientific-papers/>

Termín zadání: 28.1.2022

Termín odevzdání: 3.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Petr Hanák

doc. PaedDr. Pavel Korvas, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

I přes rostoucí popularitu discgolfu po celém světě není mnoho možností, jak porovnávat jednotlivé hody jinak než pozorováním. Podstatou této práce byla snaha získat z letu průměrnou frekvenci otáčení upevněním inerciálních senzorů na spodní část disku. Porovnáním šesti metod vyhodnocení s referenčními hodnotami naměřenými s kamerovým systémem Qualisys dosahuje nejlepší metoda průměrné procentuální chyby 2,66%. Na základě tohoto výsledku bylo provedeno porovnání frekvence otáčení u dvou nejpoužívanějších hodů, backhandu a forehandu, jejichž průměrné hodnoty byly 14,22 a 11,46 otáček za sekundu. Dvouvýběrový t-test zamítnul nulovou hypotézu, o rovnosti středních hodnot skupin na hladině významnosti 0,05 s p-hodnotou $2,101 \cdot 10^{-18}$.

KLÍČOVÁ SLOVA

discgolf, inerciální senzory, IMU, akcelerometr, gyroskop

ABSTRACT

Even through the rising popularity of disc golf all around the world, there aren't many solutions on how to compare individual throws, other than by observing. By placing inertial sensors on the bottom plate of the disc, an average rotation frequency was obtained by an algorithm. By comparing six methods of evaluation with reference values measured with the Qualisys system, the best method returns an average percent error of 2,66%. Based on this result a test comparing two throws, backhand and forehand, was made, with average values of 14,22 and 11,46 revolutions per second. Two sample t-test rejected null hypothesis at the 0,05 significance level with p-value $2,101 \cdot 10^{-18}$.

KEYWORDS

Disc Golf, inertial sensors, IMU, accelerometer, gyroscope

VALÍK, Tomáš. *Měření letových vlastností discgolfového disku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, , Centrum sportovních aktivit, 2022, 39 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Hanák

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Tomáš Valík
VUT ID autora: 217744
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Měření letových vlastností discgolfového disku

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Hanákovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Literární řešerše	12
1.1 Discgolf	12
1.1.1 Růst popularity sportu během koronavirové krize	15
1.1.2 Dosavadní odborná dokumentace discgolfu	16
1.2 Inerciální senzory	16
2 Metody měření	18
2.1 Použité senzory	18
2.2 Rozmístění senzorů	18
2.3 Nastavení senzorů	20
2.4 Interpretace naměřených dat	20
2.5 Měření validity dat	21
2.5.1 Systém Qualisys	21
2.5.2 Zisk dat	22
2.6 Testové protokoly	22
2.7 Zajištění možnosti opakování měření	23
2.8 Statistické metody	24
2.8.1 Shapiro-Wilkův test normality	24
2.8.2 F-test	25
2.8.3 Dvouvýběrový t-test	25
2.8.4 Bonferroniho korekce	25
3 Zpracování dat	26
3.1 Vyhodnocení validity	26
3.1.1 Zisk referenčních hodnot	26
3.1.2 Zisk dat z inerciálních senzorů	27
3.2 Vyhodnocení testů	29
4 Výsledky	30
4.1 Chyba vyhodnocených dat	30
4.2 Porovnání otáček u různých hodů	31
4.3 Porovnání otáček u různého vypuštění disku	32
5 Diskuse	34
Závěr	35

Literatura	36
Seznam symbolů a zkratk	39

Seznam obrázků

1.1	Výhoziště s infocedulí, tzv. teesignem.	12
1.2	Discgolfový koš na hřišti	12
1.3	Označení pro skórování na jamce, dle [3]	13
1.4	Hod backhandem, převzato z [4]	13
1.5	Hod forehandem, převzato z [4]	13
1.6	Příklady typů disků z profilu	14
1.7	Porovnání šířky okraje u distance driveru(vlevo) a putteru(vpravo) .	14
1.8	Schéma letu disku s různým úhlem vyhození pro pravácký backhand .	15
1.9	Růst počtu aktivních členů PDGA od roku 2011, data dle [7]	16
1.10	Schéma MEMS akcelerometru, převzato a přeloženo z [14]	17
1.11	Schéma MEMS gyroskopu, převzato z [15]	17
2.1	Rozměry senzoru Physilog 5, převzato z [16]	18
2.2	Umístění senzorů na disku a zobrazení os	19
2.3	Zobrazení hodu v programu Physilog RTK	21
2.4	Rozmístění kamer pro měření validity dat	22
2.5	Umístění markerů na disku	23
2.6	Model přípravku v 3D programu (nahore), finální vytisknutý přípra- vek (dole)	24
3.1	Zpracovaný platný hod v programu QTM	27
3.2	Blokové schéma algoritmu na výpočet otáček	27
3.3	Lokální extrémy na datech osy X akcelerometru	28
4.1	Zobrazení procentuální chyby algoritmů krabicovými grafy	30
4.2	Krabicové grafy výsledků pro dva různé typy hodů	31
4.3	Krabicové grafy výsledků pro hody s různým úhlem vypuštění	33

Seznam tabulek

3.1	Přehled použitých metod	29
4.1	Tabulka výsledků pro procentuální chybu metod	31
4.2	P-hodnoty vzájemných t-testů mezi skupinami	32

Úvod

Discgolf je mladý a rychle rostoucí sport s komunitou, která se ráda neustále posunuje kupředu. K zlepšení hráči rádi využívají různých nástrojů. Ať už jde o statistiky na hřištích, úspěšnosti dohození disku do koše či dosaženou vzdálenost, discgolfisti svou hru rádi porovnávají. Přes zmíněné metriky se málo z nich zabývá samotným diskem a tím, jak se chová během letu. Znakem dobrého hráče je to, že ví, jak mu disk poletí, aby mohl navigovat úzké lesní jamky. Tato znalost a zkušenosti vychází pouze z pozorování a mimo hozenou vzdálenost není moc nástrojů, kterými let disku charakterizovat.

Pro přímé měření dat z letícího disku je třeba malého a lehkého senzoru, který neovlivní ve velké míře let. K tomuto účelu se hodí inerciální měřicí jednotka, která bude v rámci bakalářské práce připevněna k disku a bude snímat data letu. Z nich je mým cílem vyhodnotit frekvenci otáčení s co nejvyšší přesností. Referenční hodnoty pro porovnání budou získány ze současného měření s kamerovým systémem Qualisys, což dopomůže k získání procentuální chyby, kterou bude vyhodnocení zatíženo.

Pro použití v praxi budou senzory na disku využity pro dva testy, jejichž cílem bude odhalit, jestli se objevují podstatné rozdíly ve frekvenci otáčení mezi různými druhy hodů či úhly vypuštění disku z ruky. Cílem je otestovat praktičnost použití a prohloubení znalostí o letu discgolfového disku.

1 Literární rešerše

1.1 Discgolf

Discgolf je mladý sport, který v poslední době rychle roste na popularitě nejen ve světě, ale i u nás. Jeho pravidla jsou podobná klasickému golfu, kdy je cílem hráče dostat létající talíř, zvaný disk, z vyznačeného výhoziště do speciálního koše, a to na co nejméně hodů. Tímto způsobem hráči absolvují hřiště, která mají od 6 až po 18 jamek. Ta jsou u nás postavena většinou v městských parcích, lesích nebo na sídlištích a lidé je mohou navštívit na více než 120 místech po celé republice [1]. V roce 2021 již toto množství překonalo počet normovaných golfových hřišť, kterých je u nás 105 [2].



Obr. 1.1: Výhoziště s infocedulí, tzv. teesignem.



Obr. 1.2: Discgolfový koš na hřišti

Skóre, kterého hráč dosáhne na jamce, zapisuje na skórkartu, a podobně jako v již zmiňovaném golfu se využívá pro klasifikaci jamek systém tzv. paru. Ten určuje počet hodů, na které by jamka měla být zahrána. Podaří-li se ji hráči ukončit o jeden hod méně než je hodnota paru, označuje se to jako tzv. *birdie*. Dokončí-li ji však se skórem o hod více, získává tzv. *bogey*. Ostatní pojmenování jsou uvedena na Obr. 1.3.

Pro dopravení disku ke koši využívají hráči různých typů hodů, kdy nejběžněji používaným je tzv. *backhand*. Jeho pohyb spočívá v natažení paže za sebe proti směru hodu a následném tahu kolem těla, při kterém se zapojuje nejen ruka, ale taky celé tělo od nohou, přes boky až k ramenům, a disk poté opouští ruku směrem kupředu,

NÁZEV	CONDOR	ALBATROS	EAGLE	BIRDIE	PAR	BOGEY	DOUBLE BOGEY	TRIPLE BOGEY
POD/NAD PAR	-4	-3	-2	-1	E (NA PARU)	+1	+2	+3

Obr. 1.3: Označení pro skórování na jamce, dle [3]

viz. Obr 1.4. Druhým oblíbeným hodem je tzv. *forehand*. Oproti backhandu, kdy se disk drží v dlani a je uchopen všemi prsty, se malíček a prsteník krčí v dlani, prostředník a ukazovák jsou opřené o okraj disku zespod a palec jistí disk zvrchu. Postoj drží hráč otevřený a po náprahu dozadu vede pohyb loktem a disk švihem opouští ruku kupředu, viz. Obr. 1.5. Oba styly jsou podobné hodům používaným v ultimate, týmové hře s létajícím diskem, jsou však přizpůsobeny jinému rozložení hmotnosti disků, které se ke sportu využívají.



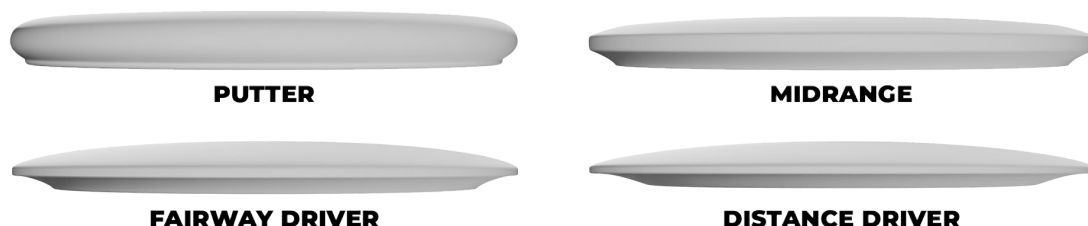
Obr. 1.4: Hod backhandem, převzato z [4]



Obr. 1.5: Hod forehandem, převzato z [4]

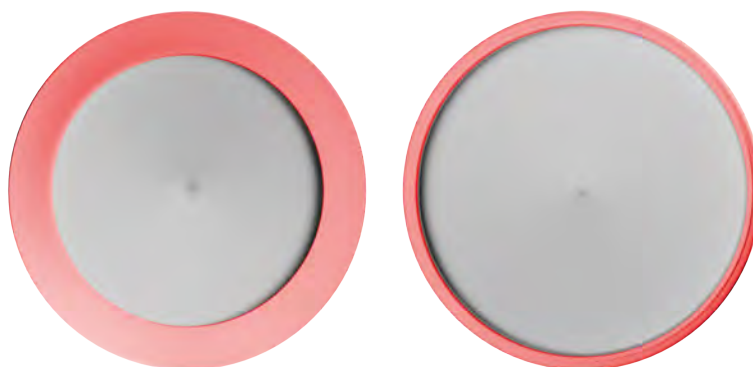
Na výběru jednoho oproti druhému ze zmiňovaných hodů záleží z důvodu otáčení, které se mu předává. Pravoruký hráč roztáčí backhand po směru, zatímco forehand proti směru hodinových ručiček. Tato skutečnost zapříčiňuje to, že se disk přirozeně sklání a padá na jinou stranu, což dovoluje hráči dostat se hodem na jinak hůře dosažitelnou pozici.

Podobně, jako se v golfu využívá různých holí pro různé potřeby, i v discgolfu hráči využívají odlišné typy disků, které jim nabízí rozdílné výsledky. Třemi základními typy jsou putter, na dohazování, midrange, na střední vzdálenost, a driver, na dlouhou vzdálenost. Poslední jmenovaný se pak ještě dělí na tzv. fairway driver a distance driver. Jejich rozdíly z profilu jsou vidět na Obr. 1.6. Obecně se jejich maximální hmotnost povolená pro soutěže pohybuje okolo 175 g, s výjimkou midrangů, které mají tuto hladinu na 180 g. Hodnoty průměru disku se pohybují u drtivé většiny mezi 21,1-21,3 cm a 21,6-21,8 cm u midrangů, což je podstatný rozdíl oproti létajícím diskům využívaným na ultimate, které mají 27 cm při stejné hmotnosti [5].



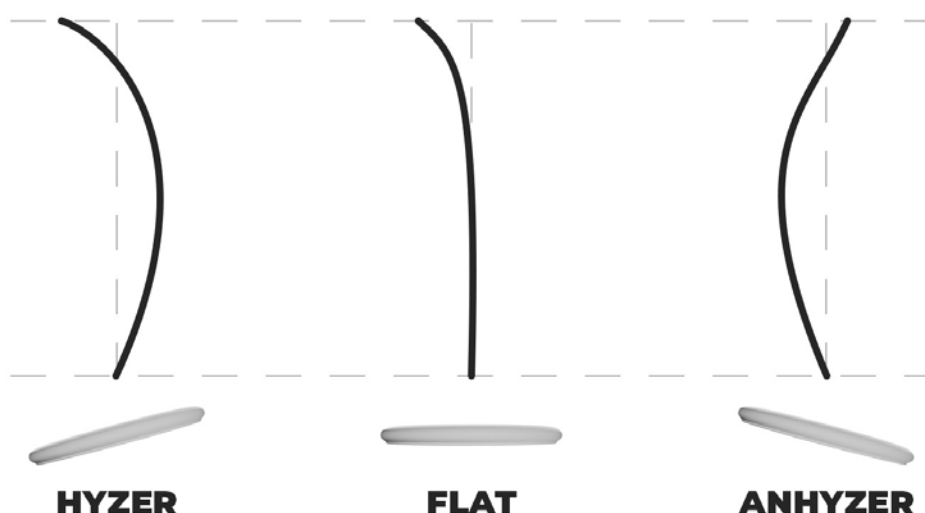
Obr. 1.6: Příklady typů disků z profilu

Jednotlivé typy disků se mezi sebou liší převážně v rozložení hmotnosti a s tím spojeným profilem, který zapříčiňuje nižší odpor vzduchu. Puttery jsou ideální na krátké vzdálenosti, jelikož jsou dobře ovladatelné a není potřeba tolik síly na jejich roztočení. Oproti tomu distance drivery je hráč schopen hodit velmi daleko, ztrácí ale určitou kontrolu a musí být dost zkušený na to, aby zvládl disk s širokým okrajem roztočit dostatečně. Rozdíl mezi okraji těchto dvou typů disků je znázorněn na Obr. 1.7.



Obr. 1.7: Porovnání šířky okraje u distance driveru(vlevo) a putteru(vpravo)

Další proměnnou, kterou hráč ovlivňuje během hry, je úhel, pod kterým disk vypustí z ruky, ten ve velké míře určí, kam disk dále poletí. Pokud je disk uchopen v ruce a vnější hrana disku je nakloněna dolů, nazývá se hod *hyzer*. Je-li hrana nakloněna vzhůru, jedná se o *anhyzer*. Jiným přístupem by se tyto typy hodů daly popsat tak, že hyzer po vypuštění letí tím směrem, kam přirozeně padá, zatímco anhyzer směřuje na opačnou stranu, než se mu podaří vyrovnat. Kontrola nad úhlem vypuštění je klíčem k úspěchu, jelikož hráči dovoluje tvarovat hody a dosáhnout tak kýženého výsledku.



Obr. 1.8: Schéma letu disku s různým úhlem vyhození pro pravácký backhand

1.1.1 Růst popularity sportu během koronavirové krize

Obrovského růstu dosáhl discgolf během pandemie právě díky své nenáročnosti. Jako individuální outdoorový sport jej lze vykonávat kdykoli, a to i o samotě. Profesionální Disc Golfová Asociace, která zaštiťuje největší turnaje kategorie *Major* a zprostředkovává mezinárodní rating, díky kterému se mohou hráči po celém světě porovnávat, zaznamenala nárůst nových členů v roce 2020 o 84% a počet hráčů s aktivním členstvím narostl o 33% [6]. V loňském roce trend lehce zmírnil, do asociace se přidalo o 67 % více hráčů a hráček s novým členstvím a aktivní členská základna tak porostla o 54,7 % na úctihodných 109 862 discgolfistů a discgolfistek po celém světě [7].



Obr. 1.9: Růst počtu aktivních členů PDGA od roku 2011, data dle [7]

1.1.2 Dosavadní odborná dokumentace discgolfu

Velký růst discgolfu se zatím moc neprojevil v počtu odborných publikací. Dosavadní práce napsané v češtině se věnují zkoumání výdeje energie při tomto sportu (Šuláková 2017 [8], Peroutka 2017 [9], Bielka 2018 [10]) nebo strategii rozvoje (Novák 2011 [11]).

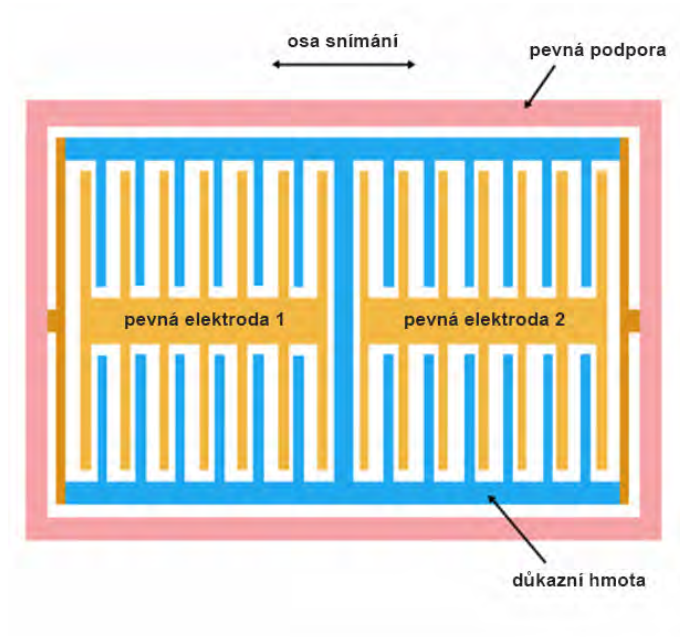
V zahraničních publikacích můžeme narazit především na práce zabývající se zraněními. Výsledkem průzkumu skupiny z Arizonské Univerzity je například to, že z 883 respondentů 81% utrpělo během hraní discgolfu zranění, kdy 46% mělo problémy z loktem a 43% s ramenem [12]. Sport je to jednoduchý a v základu zdravý, s velkým hraním však přichází na tělo velký stres. Práce technického zaměření, které by se zabývaly problematikou jako je ta této práce, dostupné nejsou.

1.2 Inerciální senzory

Pro získávání pohybových dat je využito inerciálních senzorů, které jsou složeny z akcelerometrů a gyroskopů. IMU, z anglického *Inertial measurement unit*, neboli inerciální měřicí jednotky, jsou poté složeny ze 3 navzájem kolmých akcelerometrů a 3 navzájem kolmých gyroskopů. Senzory Physilog 5, výrobce Gait Up, využívané v práci, jsou založeny na technologii MEMS, z anglického *Micro electro mechanical systems*, a díky tomu dosahují malých velikostí, které jsou ideální pro případ použití v této práci.

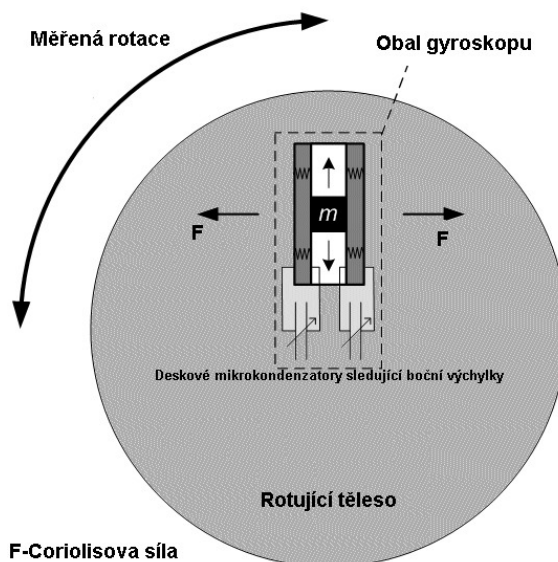
Pomocí akcelerometru získáváme hodnoty zrychlení tělesa, které jsou měřeny v metrech za sekundu na druhou (m/s^2) nebo u kapacitních akcelerometrů vyjádřeny v násobcích tíhového zrychlení g , které je závislé na zeměpisné šířce a pro Brno má hodnotu $g = 9,81275 \text{ m/s}^2$ [13]. Princip je postavený na změně kapacity, která

odpovídá zrychlení tělesa, na to však neustále působí tíhové zrychlení, budeme tak mít tuto složku zastoupenou v datech neustále.



Obr. 1.10: Schéma MEMS akcelerometru, převzato a přeloženo z [14]

Gyroskop slouží pro měření úhlové rychlosti, kterou vyjadřuje ve stupních za sekundu ($^{\circ}/s$). Vibrační gyroskopy jsou postaveny na principu zaznamenávání Coriolisovy síly, která je přímo úměrná úhlové rychlosti a působí na těleso při jeho vychýlení. Na Obr. 1.11 můžeme vidět schéma gyroskopu založeného na MEMS technologii.



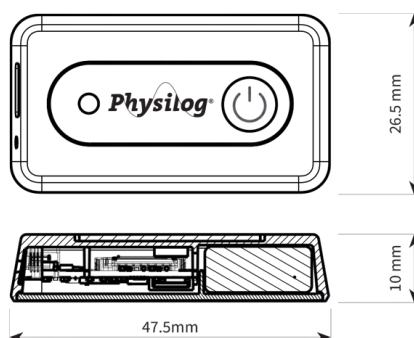
Obr. 1.11: Schéma MEMS gyroskopu, převzato z [15]

2 Metody měření

2.1 Použité senzory

Na měření byla použita inerciální měřicí jednotka Physilog 5, od výrobce Gait Up, jejíž součástí je tříosý akcelerometr a gyroskop, ze kterých budu získávat data. Klíčovými vlastnostmi byla velikost a dynamický rozsah.

Aby přilepená jednotka moc neovlivňovala let disku a měla co nejmenší odpor vzduchu, bylo třeba ji připevnit na spodní stranu disku, k čemuž byla použita oboustranná lepící páska. Zároveň musí být zajištěna jejich bezpečnost, aby nedošlo k poničení při dopadu na zem. Vnitřní hloubka disku se pohybuje u běžně používaných modelů od 11 mm u driverů po 16 mm u putterů [5]. U mnou používané měřicí jednotky je nejmenším rozměrem výška, jež je rovna 10 mm (viz. Obr. 2.1), což vystačuje při testování na driverech tak akorát. Při měření byl kladen důraz na využití prostoru, kde se nenachází moc kamení či větví, které by mohly senzory poničit. Konkrétně byla pro účely mé práce využita postupně tělocvična, fotbalové hřiště s umělou trávou a otevřené discgolfové hřiště, u kterého bylo pojištěno, že se v místě očekávaných dopadů nenachází nic, co by mohlo sensorům ublížit. Proti poškození hraje kladnou roli fakt, že disk ve většině případů dopadá na svou hranu, což zbrzdí náraz a snižuje šanci poničení.



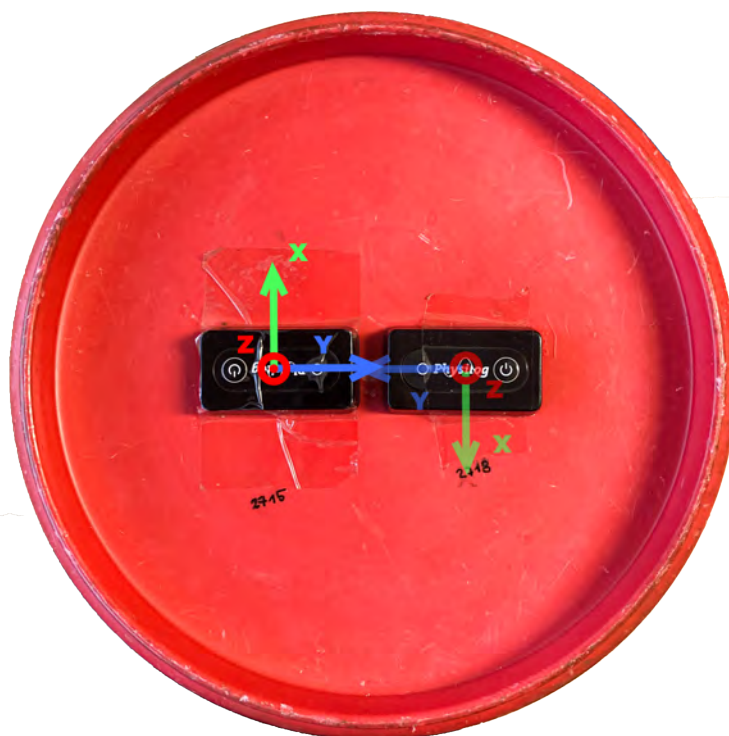
Obr. 2.1: Rozměry senzoru Physilog 5, převzato z [16]

2.2 Rozmístění senzorů

Místo, kam bude umístěna měřicí jednotka na spodní straně disku, velmi ovlivní, jaký signál akcelerometr a gyroskop naměří. Veličina, na kterou je kladen v měření důraz, je frekvence otáčení, rozložení proto bylo přizpůsobeno tomuto parametru.

Ohled byl brán také na to, že musela být jednotka co nejbližší středu, aby tolik neovlivňovala let disku.

Model Physilog 5 je primárně stavěn na analýzu chůze, oproti které je let disku velmi dynamickým pohybem. Při umístění musel být brán ohled na ořezání signálů způsobené nízkým dynamickým rozsahem. Z tohoto důvodu byla již brzy v plánování měření vyloučena varianta, kdy by byla umístěna jednotka na střed a otáčení disku analyzováno z dat gyroskopu okolo osy Z. Dynamický rozsah, kterým Physilog 5 disponuje, je roven $2000^\circ/\text{s}$ [16], ze zkušenosti je však známo, že je tato hodnota zdaleka nedostačující pro objekt, u kterého budou odhadované hodnoty dosahovat přes 10 otáček za vteřinu. Z toho důvodu byla jednotka mírně vyosena a hodnoty získávány z dat akcelerometru, které by měly na jedné z os kolísat na základě otáčení. Tímto řešením však vznikl problém nevyváženého rozložení, a bylo tak nutné přidat druhou jednotku, která disk vyváží a zároveň sloužila jako záložní zdroj dat, zobrazeno na Obr. 2.2. Pro házení to ale způsobilo větší nárůst hmotnosti. Samotný disk váží podle výrobce 174 g a po přidání dvou měřících jednotek, každé o hmotnosti 11 g [16], dojde k nárůstu o 12,64 %.



Obr. 2.2: Umístění senzorů na disku a zobrazení os

Pokročilí hráči při koupi disků na discgolf často řeší rozdíl mezi 170 a 175 gramy a z vlastní zkušenosti mohou potvrdit, že tato malá odchylka hraje v letu pocitově roli. U tohoto pokusu je však nutné se s tímto nedostatkem smířit. Použité jednotky

nabízí skvělou kombinaci jednoduchosti obsluhy, získání výsledků a samotné velikosti, konkurence totiž nenabízí menší a lehčí možnosti a u přímého měření, jako je toto, bude podobný problém v každém případě. Skutečnosti pomáhal fakt, že tato hmotnost byla soustředěna okolo středu disku a vliv tak byl menší, než kdyby byly měřící jednotky uloženy na okrajích.

2.3 Nastavení senzorů

Pro práci s měřicími jednotkami Physilog 5 poskytuje výrobce svůj software Physilog Research Toolkit, který slouží uživateli ke konfiguraci jednotlivých senzorů a zároveň také čtení a exportu naměřených dat. Pro účely mého měření, během kterého se bude konat velmi dynamický pohyb, byly nastaveny senzory na maximální rozsahy, tj. 16 g a 2000 °/s u akcelerometru a gyroskopu, respektive, a na vzorkovací frekvenci 512 Hz.

Ač byly u senzorů využity maximální rozsahy, u pohybu jako je let rotujícího disku lze čekat, že některá data nebudou použitelná kvůli jejich oříznutí. Dle mého rozmístění lze již před měřením očekávat, že se bude jednat o osu Z gyroskopu, což bylo zmiňováno již o tři odstavce výše. Dalším zdrojem dat, který trpí ořezem, je osa Y akcelerometru, dle představeného rozložení zobrazeného na Obr. 2.2, jelikož na ni během letu působí dostředivá síla a bude tak po celou dobu, co je disk ve vzduchu, zahlcená a nepoužitelná.

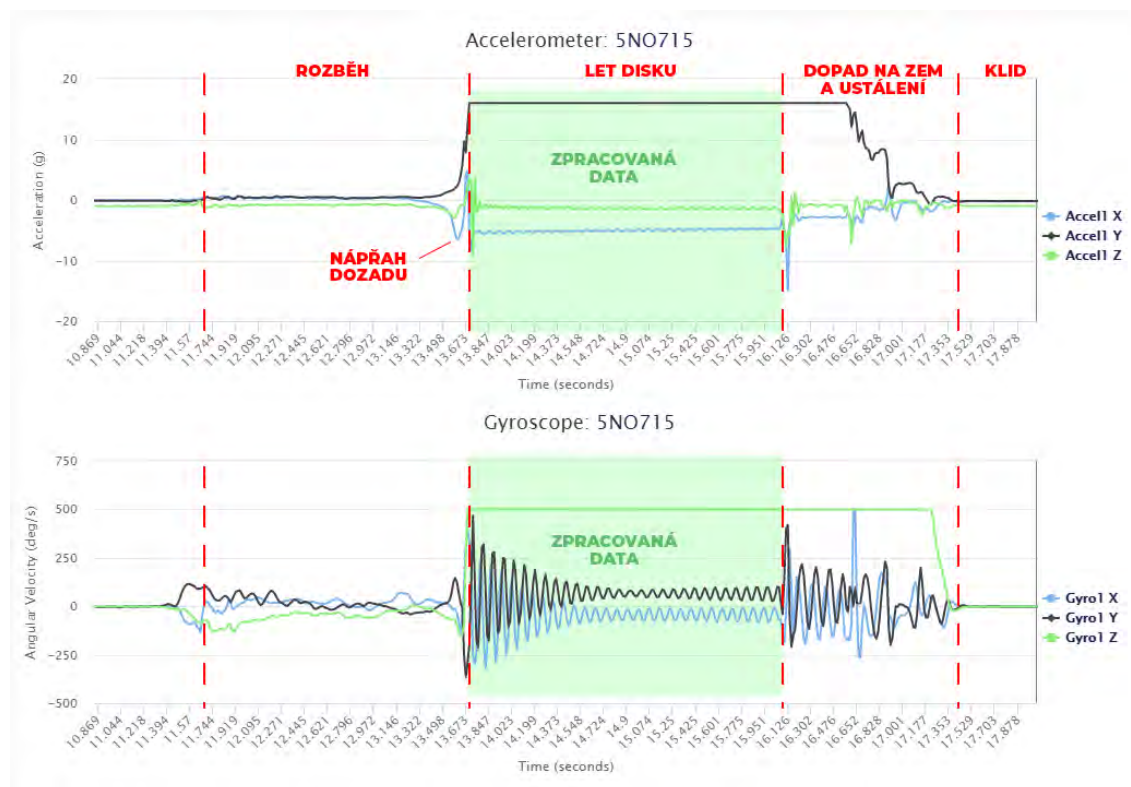
2.4 Interpretace naměřených dat

Aby bylo možné naměřené signály zpracovávat, je nutné pochopit a interpretovat, co nám která získaná osa vyjadřuje. Na Obr. 2.3 je zobrazen výstup naměřených hodnot v programu Physilog RTK s popisky. Lze vidět, kdy je jednotka při zapínání na počátku v klidu a se záporným zrychlením na ose Z, které značí, že byl disk vzhůru nohama. Dále následuje mírný pohyb při přípravě na hod, který přechází do letu disku. Během něj lze pozorovat dvě oříznuté osy, které byly zmiňované o odstavce výše. U zobrazeného hodu se jednalo o pravácký backhand, disk se tedy točil po směru hodinových ručiček. Tento fakt se projevuje na ose Z gyroskopu, která nabývá velmi vysokých hodnot a je ukazatelem toho, jaký hod člověk použil, při hodu točícím se proti směru hodinových ručiček (pravácký forehand) by totiž tyto hodnoty byly záporné.

Důležitou je pro tuto práci především osa X akcelerometru, na které se projevují otáčky. Senzor se se záporným zrychlením (dáno orientací měřící jednotky na disku) pohybuje během letu kupředu, na těchto datech lze však zároveň pozorovat kolísání.

To je způsobeno otáčením disku, kdy se senzor pohybuje chvíli po směru hodů a chvíli proti němu. Díky lokálním maximům je poté možné zjistit, kolikrát se disk za hod otočil.

Zajímavá data také ukazují osy X a Y gyroskopu. Představují, jak se disk během letu *klepe*. Na počátku hodů lze vidět vyšší amplitudy, než se disk ustálí a na konci se zase mírně zvednou při zpomalení a pádu k zemi.



Obr. 2.3: Zobrazení hodů v programu Physilog RTK

2.5 Měření validity dat

2.5.1 Systém Qualisys

Pro ověření validity vypočítaných dat ze signálů inerciálních senzorů bylo provedeno měření s 3D kinematickým kamerovým systémem Qualisys. Využívá se nejen v zábavním průmyslu pro účely motion capture, ale také pro podrobnou analýzu biomechaniky člověka, sportu a v průmyslu. Jako referenční systém byl Qualisys vybrán, jelikož disponuje 3D rozlišením 0,03 – 0,06mm [17]. Pro testování byla vybrána vzorkovací frekvence 300Hz, což je méně než u inerciálních senzorů. Kdyby byla však použita vyšší, došlo by k ořezu zorného pole, což limitovalo rozsah, na kterém lze měřit.

2.5.2 Zisk dat

Na měření bylo k dispozici 10 kamer, které byly umístěny v tělocvičně po pěti na každé straně ve směru hodu. U místa odhodu byla řada zúžena, jelikož je nebylo třeba mít tak daleko a mohly se více natočit dovnitř soustavy. Měření v tělocvičně bylo prováděno z důvodu kontrolovatelných světelných podmínek, počasí a taky kvůli tomu, že maximální měřitelná vzdálenost hodu se pohybovala okolo 10 metrů a nebylo tak třeba házet dlouhé pokusy. Podium na konci tělocvičny bylo vystláno pěnovými deskami, aby nedošlo k poničení disku, senzorů a obložení. Hody končily na nakloněných deskách opřených o lavičku na podiu, viz. Obr. 2.4, které velmi dobře brzdily dopad.



Obr. 2.4: Rozmístění kamer pro měření validity dat

Po kalibraci kamerového systému Qualisys a pěti testovacích pokusech bylo provedeno samotné měření, které se skládalo z 20 hodů. Během nich současně snímaly inerciální senzory lineární zrychlení a úhlovou rychlost a kamerový systém polohová data 4 markerů, jež byly přilepeny oboustrannou lepicí páskou na vrchní straně disku ve tvaru čtverce, jak je zobrazeno na Obr. 2.5.

2.6 Testové protokoly

Se znalostí přesnosti mého vyhodnocování frekvence otáček disku během letu jsem chtěl tento parametr využít v praxi a zjistit, jak se liší v závislosti na úhlu vypuštění



Obr. 2.5: Umístění markerů na disku

disku či typu hodu. Během obou měření bylo cílem házet disk na přibližně stejnou vzdálenost, aby se hodnoty daly srovnávat co nejlépe.

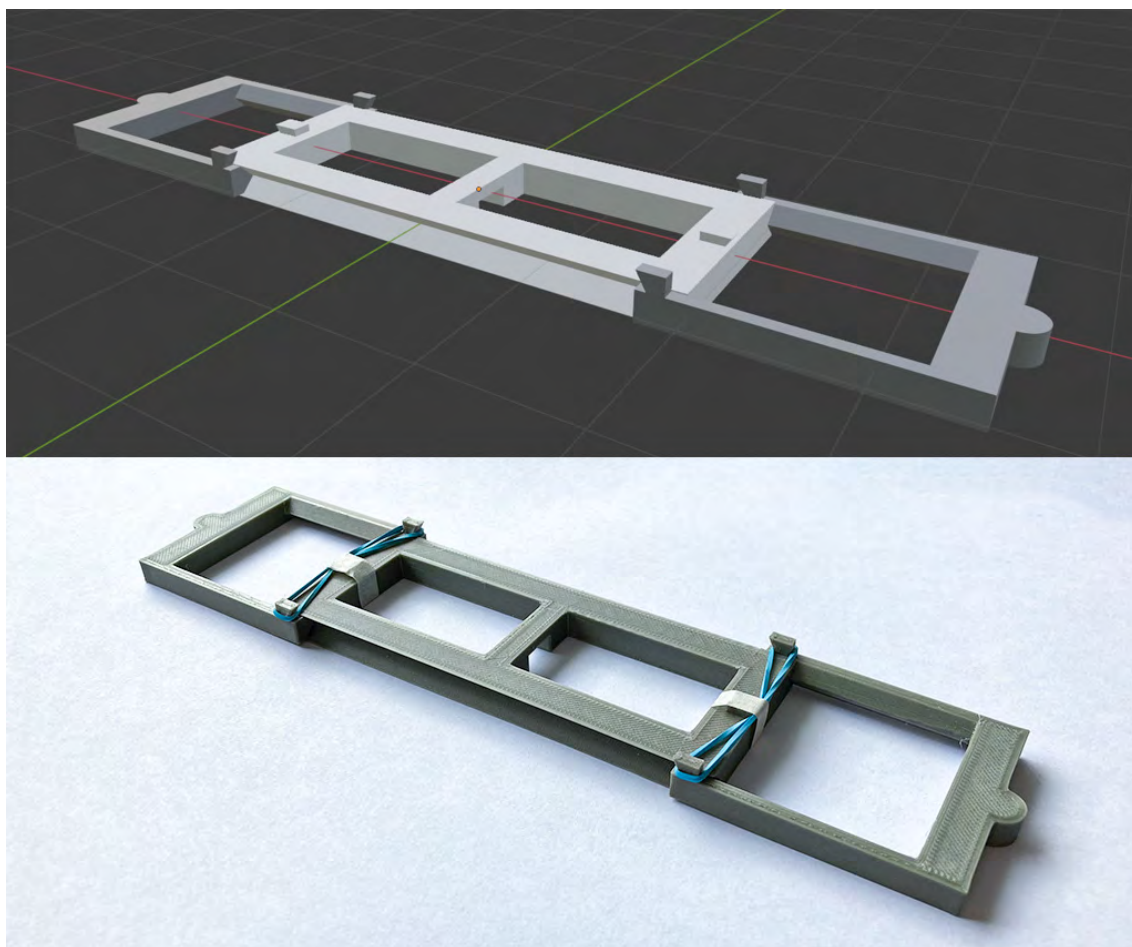
Na srovnání různých typů hodů byl použit typ disku driver a hozené vzdálenosti se pohybovaly mezi 75 a 85 metry. Pro každý typ hodu, tedy forehand a backhand, bylo provedeno 20 platných pokusů.

Porovnání hodů s jinými úhly vypuštění bylo uskutečněno na délku hodu 50 až 60 metrů se stejným typem disku jako při měření validity, putterem. Pro každý typ vypuštění, hyzer, flat a anhyzer, bylo provedeno 10 platných hodů.

2.7 Zajištění možnosti opakování měření

Pro možnost opakování měření na jiných discích bylo potřeba zhotovit přípravek, který by zajistil, aby byly senzory položeny vždy na stejném místě. Dosáhl jsem toho vytvořením 3D modelu v programu Blender, který jsem si nechal vytisknout z materiálu PLA (polylactic acid) na 3D tiskárně s technologií FDM (Fused deposition modeling). Skládá se ze středního a dvou krajních zásuvných dílů (viz. Obr. 2.6) a to proto, jelikož bylo potřeba brát ohled na variabilní vnitřní průměr jednotlivých disků, který se běžně pohybuje od 16,1 do 19,7 cm [5]. Tyto díly drží dohromady gumičky, které víceméně zajišťují rovnoměrné rozložení při vložení přípravku do disku. Finální zarovnání se ladí podle malého výstupku, který má každý disk uprostřed na spodní straně a nachází se zde, jelikož se v tomto místě při výrobě do formy vstříkuje plast. Při vkládání senzorů je třeba nezapomenout na správné natočení,

aby se nezakryl přístup ke konektoru mikro USB, mohly se senzory nabíjet a vyčítat z nich data bez nutnosti odstranění z disku.



Obr. 2.6: Model přípravku v 3D programu (nahore), finální vytisknutý přípravek (dole)

2.8 Statistické metody

2.8.1 Shapiro-Wilkův test normality

Ověření normality testovaných dat je klíčové pro možnost použití parametrických testů před těmi neparametrickými a v mé práci je k němu použit Shapiro-Wilkův test. Jeho nulová hypotéza praví, že data mají normální rozložení. Pokud je p-hodnota nižší než hladina významnosti α , hypotéza je zamítnuta a můžeme o našich hodnotách říci, že nemají normální rozložení. Je-li však p-hodnota vyšší, nulová hypotéza nemůže být zamítnuta a uvažujeme data s normálním rozložením [18]. Shapiro-Wilkův test byl pro tento účel použit na základě výsledků simulace

Monte Carlo, která říká, že právě Shapiro-Wilkův test má největší statistickou sílu před Anderson-Darlingovým, Lillieforsovým a Kolmogor-Smirnovovým testem [19]. V programu Matlab nebyla k dispozici funkce na provedení tohoto testu, použit byl kód z fóra [20].

2.8.2 F-test

Pro analýzu homogenity rozptylů dat se využívá F-test. Jeho nulovou hypotézou je tvrzení, že rozptyl jednoho souboru se rovná rozptylu druhého souboru. Tuto hypotézu zamítáme na hladině významnosti α , je-li p-hodnota nižší než tato hladina [21]. Informace o rozptylech je potřebná k vyhodnocování dvouvýběrového nepárového t-testu.

2.8.3 Dvouvýběrový t-test

Pro analýzu parametrických dat, která byla zpracovávána, byl použit dvouvýběrový nepárový t-test. Jeho výpočet je založen na aritmetických průměrech skupin, směrodatných odchylkách a velikosti. Dle výsledků F-testu se vybírá verze pro skupiny dat se shodnými či odlišnými rozptily [22]. Nulovou hypotézou je znění, že data mají stejné střední hodnoty. Zamítáme ji stejně jako u dříve zmíněných testů, pokud p-hodnota klesne pod hodnotu hladiny významnosti α .

2.8.4 Bonferroniho korekce

Při provedení mnohonásobného testování, v mém případě nepárovými t-testy, roste riziko získání falešně pozitivního výsledku. Aby se tomu zamezilo, provádí se korekční procedury, v případě této práce Bonferroniho korekce. Ta upraví hladinu významnosti, na které se poté může zamítat nulová hypotéza. Vztah pro tuto úpravu je $\alpha' = \alpha/k$, kde α' je nová hladina významnosti, α je původní hladina významnosti a k je počet provedených porovnání. Výsledné p-hodnoty poté porovnávám s novou vypočtenou hodnotou [23].

3 Zpracování dat

3.1 Vyhodnocení validity

Programu Qualisys Track Manager(dále QTM), kterým jsou data získávána, slouží i pro jejich předzpracování a export do užitečného formátu na další následné vyhodnocování. To se skládalo z vytvoření 4 trajektorií na základě zaznamenaných bodů, které bylo třeba spojit s příslušnými úseky, které se v některých případech automaticky nespojily. Pokud systém v některých snímcích body nezaznamenal, budou doplněny v následném zpracování. Na vzniklých trajektoriích byl následně určen počátek hodů na základě počátku rotace bodů, čímž se odlišuje disk vypuštěný z ruky oproti tomu ve fázi tahu kolem těla, kde je disk tažen po přímce. Konec zaznamenaných dat se vyznačoval nadále nedostupnými daty v dobu, kdy disk opustil pole kamerového systému. Konec měřeného hodu byl tedy vybrán v tu chvíli, kdy byla ještě dostupná data pro všechny 4 body.

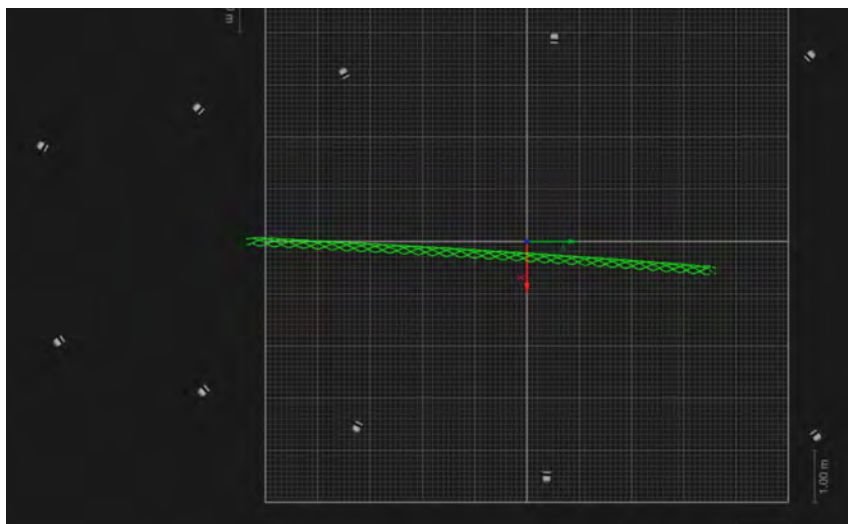
Mimo naměřené hodnoty nacházející se na těchto čtyřech trajektoriích zaznamenal systém také spoustu na místech, kde docházelo k odleskům, a to buď na podlaze, kvůli střídajícímu se počasí, nebo na protilehlých kamerách. Již před měřením byly ty patrně odlesky zamaskovány v softwaru, nicméně patrně to vzniku veškerým nezabránilo. Ve zpracovávání dat to však nakonec problém nedělalo, jelikož se hodnoty nacházely na odlehlých místech a byly tak jednoduché na odstranění.

Finální trajektorie bodů jsou znázorněny na Obr. 3.1. Z QTM byla data nadále exportována do formátu .tsv, se kterým bylo v plánu pokračovat v následném zpracování v programu Matlab. Nastaly zde však problémy s importováním dat, proto byly tyto .tsv soubory přeexportovány v programu MS Excel na formát .csv, se kterým je mi proces zpracování znám.

3.1.1 Získ referenčních hodnot

Pro získání referenčních hodnot z měření systémem Qualisys byl vytvořen skript v programu Matlab `refValues.m`, jehož úkolem je zavolat jednotlivá měření ve funkci `getRefValues.m`, uložit proměnné do tabulky a tu pak exportovat ve formátu .csv.

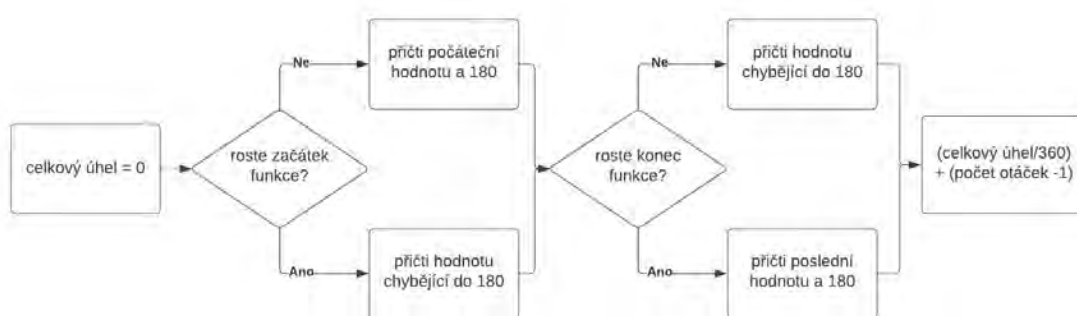
Úkolem funkce `getRefValues.m` je získat délku naměřeného letu, skutečně rotace, ale hlavně průměrné otáčky za sekundu v průběhu hodu. Po importování dat se doplní nulové hodnoty, které značí mezery v naměřených trajektoriích, pomocí lineární interpolace. Pro získání otáček je třeba zjistit úhel, který svírá rotující disk během letu s vybraným vektorem. Toho je dosaženo ve funkci `getAngle.m`, do které vstupuje vektor naproti sobě ležících bodů (úhlopříčka AC, respektive BD) a vektor



Obr. 3.1: Zpracovaný platný hod v programu QTM

$[0 \ 1 \ 0]$, který směřuje kupředu ve směru hodu. K výpočtům dochází v rovině XY, která je půdorysnou v prostoru.

Cílem je nyní zjistit, o kolik se disk otočil ve stupních. Počet extrém nalezených na signálu značí množství kompletních otáček bez jedné, ta se nemůže považovat za uskutečněnou. K této hodnotě se pak na základě podmínek o růstu či klesání začátku a konce signálu, viz. Obr. 3.2, přičítá zbývající část rotace, aby se dosáhlo, co nejpřesnější hodnoty. Z délky trvání letu a celkových otáček se získá průměrná hodnota počtu otáček za dobu letu. Tyto kroky jsou opakovány pro obě úhlopříčky, jejichž hodnoty se zprůměrují, pro zvýšení přesnosti.



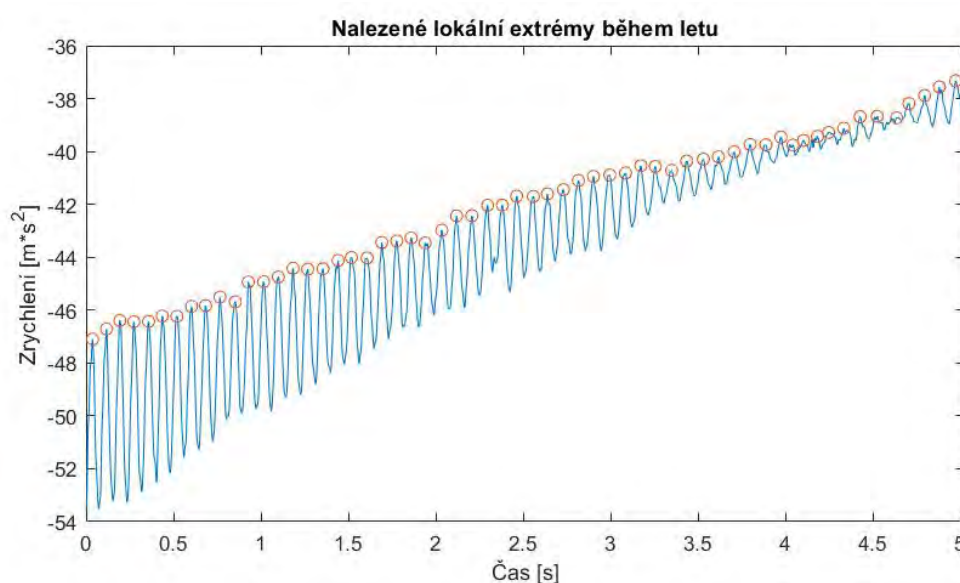
Obr. 3.2: Blokové schéma algoritmu na výpočet otáček

3.1.2 Zisk dat z inerciálních senzorů

Pro další práci s naměřenými daty inerciálními senzory Physilog 5 je třeba je nejdříve otevřít v programu Physilog RTK, ve kterém byla dříve provedena i konfigurace sen-

zorů. Zde se může signál exportovat celý do formátu .csv nebo vybrat pouze žádany úsek. V případě měření validity byla exportována pouze doba letu, v dalších pokusech, které byly provedeny pak celý signál a ořezání signálu bylo implementováno v programu Matlab.

Princip získání průměrných otáček za dobu letu byl založený na hledání časových rozdílů mezi jednotlivými extrémy na kmitajícím signálu. Starala se o to funkce `getRevs.m`, ve které byl signál nejprve vyfiltrován Butterworthovým filtrem dolní propusti čtvrtého řádu s mezní frekvencí 85 Hz. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na charakteristiku naměřeného signálu a v potaz byla brána také možnost házení mnohem více dynamických hodů než těch krátkých, které byly předvedeny během testování v tělocvičně.



Obr. 3.3: Lokální extrémy na datech osy X akcelerometru

Dále skript vypočítá časový rozdíl mezi jednotlivými lokálními maximy, viz. Obr. 3.3, který nám říká, jak dlouho trvaly jednotlivé otáčky. Obrácené hodnoty těchto intervalů vyjadřují frekvenci otáčení mezi extrémy a jejich průměrem je hledaná průměrná frekvence otáčení disku během letu.

Spolu s touto hodnotou byly pro porovnání vypočítány také průměrné otáčky vyjádřené pouze jako počet nalezených lokálních maxim za dobu letu, vysoká přesnost však očekávána nebyla.

Při pohledu na naměřená data lze vidět, že se otáčení disku projevuje na třech signálech, konkrétně lineárním zrychlením na ose X a úhlové rychlosti na osách X a Y. Cílem bylo zpočátku aplikovat algoritmus pouze na první zmiňovaný signál, pro porovnání byl ale aplikován na všechny tři, pro kontrolu zda-li bude dosaženo lepších výsledků. Celkově tak byla získána data na šesti metodách, ze kterých bylo možné

vybrat tu s největší přesností. V Tab. 3.1 je znázorněno, jaký využívají jednotlivé metody signál a princip, kde *accX* je zrychlení na ose X, *gyroX* a *gyroY* úhlová rychlost na ose X, respektive Y, pojem *intervaly* představuje metodu počítání s časovými rozdíly a *maxima* počet lokálních maxim za dobu letu

Metoda	1	2	3	4	5	6
Signál	accX	accX	gyroX	gyroX	gyroY	gyroY
Princip	intervaly	maxima	intervaly	maxima	intervaly	maxima

Tab. 3.1: Přehled použitých metod

3.2 Vyhodnocení testů

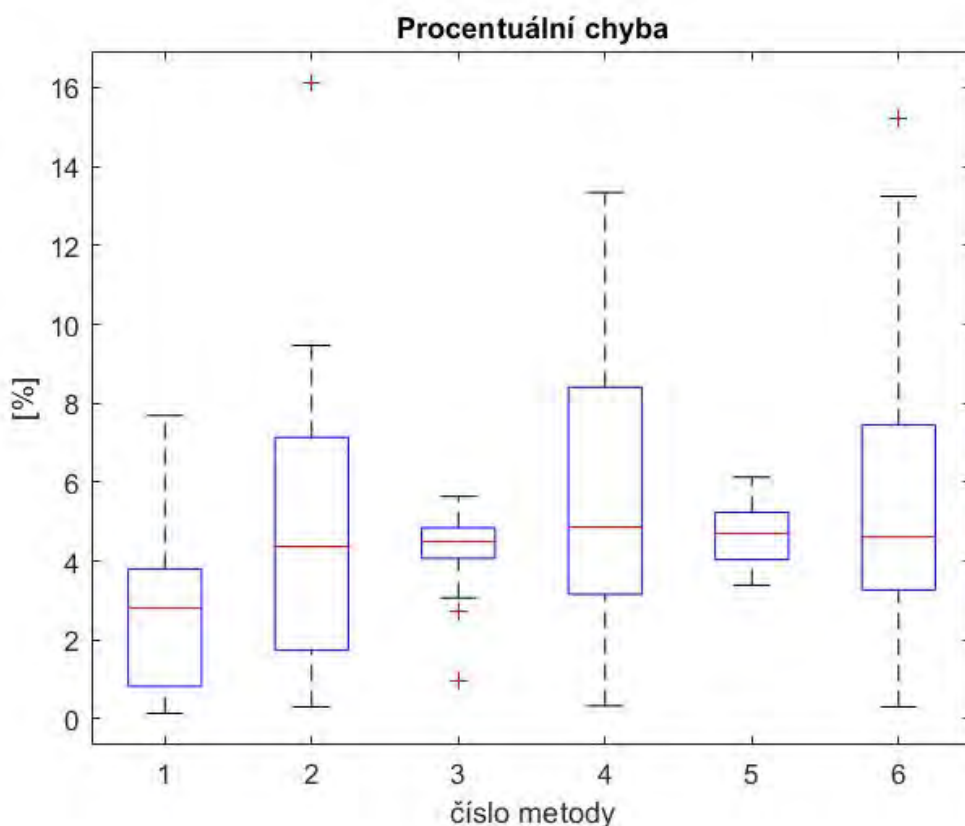
Pro získání výsledků u nadále provedených testů byl aplikován stejný algoritmus, jako u vyhodnocování validity. Zavedeny byly jen mírné úpravy, které dovolily vybrat část signálu na zpracování podle potřeby až v prostředí Matlab, nikoli ve Physilog RTK, a na vyhodnocení byla použita pouze metoda s nevyšší přesností. Na objektivní popis výsledků byly použity příslušné statistické testy.

4 Výsledky

4.1 Chyba vyhodnocených dat

Porovnáním referenčních hodnot, vypočtených z měření se systémem Qualisys, s vyhodnocenými z inerciálních senzorů, byla získána procentuální chyba, která byla vyjádřena pro 6 metod zmiňovaných v Tab. 3.1. Na základě krabicových grafů zobrazených na Obr. 4.1 jsou vidět nedostatky ve vysokém rozptylu u metod 2, 4 a 6, které vychází z jednodušších výpočtů a zřejmě jsou náchylnější chybu. Jejich směrodatná odchylka (std v Tab. 4.1) je 3,93, 3,73 a 4,17, a zaostávají za ostatními. Metody 3 a 5 získávané z časových rozdílů mezi lokálními maximy na datech gyroskopu disponují malou směrodatnou odchylkou, jejich chyba se ale konzistentně pohybuje okolo 5 %. Data získaná metodou 5 jsou všechna menší než referenční hodnoty a bylo by tak možné je vynásobit 1,05 a dostat se k chybě menší než 1 %.

V rámci této práce tato varianta vybrána nebyla a za nejlepší výsledek je považována metoda 1 s průměrnou chybou 2,66 % a směrodatnou odchylkou 1,99.



Obr. 4.1: Zobrazení procentuální chyby algoritmů krabicovými grafy

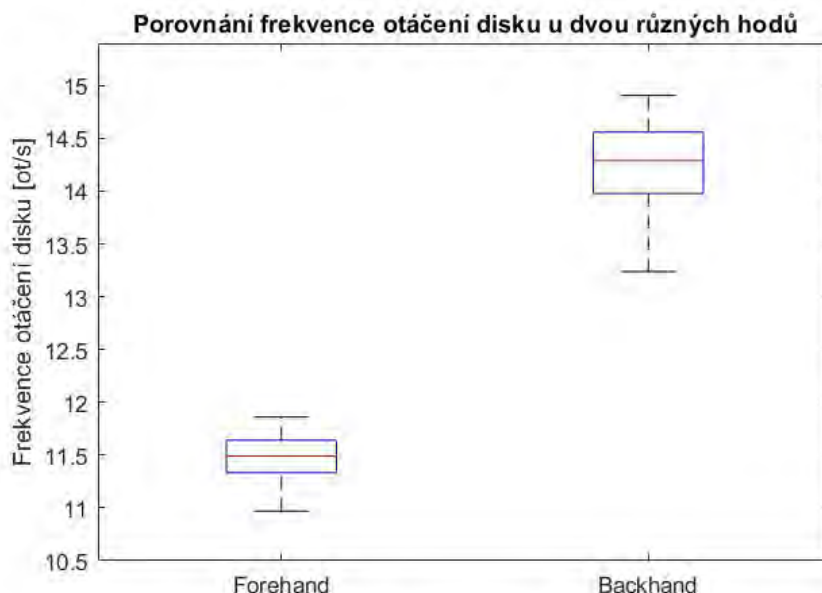
Metoda	1	2	3	4	5	6
Průměr	2,66	4,92	4,28	5,71	4,69	5,80
Medián	2,82	4,38	4,49	4,87	4,71	4,61
Std	1,99	3,93	1,07	3,73	0,75	4,17
Max	7,69	16,12	5,64	13,35	6,13	15,21

Tab. 4.1: Tabulka výsledků pro procentuální chybu metod

4.2 Porovnání otáček u různých hodů

V tomto testu bylo cílem zjistit, jestli se liší hody backhandem a forehandem v průměrných otáčkách během letu. Na první pohled lze z krabicových grafů na Obr. 4.2 vyčíst, že tomu tak je. Na data byly přesto aplikovány statistické testy pro objektivní analýzu.

Prováděny byly s hladinou významnosti 0,05. Shapiro-Wilkův test normality dat nezamítl nulovou hypotézu, že jsou data normálního rozložení p-hodnotou 0,822 pro forehand a 0,128 pro backhand. Na data byl dále aplikován F-test s nulovou hypotézou, že mají data homogenní rozptyl. Ta byla však zamítnuta s p-hodnotou 0,00222. Se znalostí normality a nerovných rozptylů jsem aplikoval dvouvýběrový nepárový t-test s nulovou hypotézou, že se střední hodnota jedné skupiny rovná střední hodnotě druhé skupiny. Tato hypotéza byla zamítnuta s velmi nízkou p-hodnotou $2,101 \cdot 10^{-18}$.



Obr. 4.2: Krabicové grafy výsledků pro dva různé typy hodů

4.3 Porovnání otáček u různého vypuštění disku

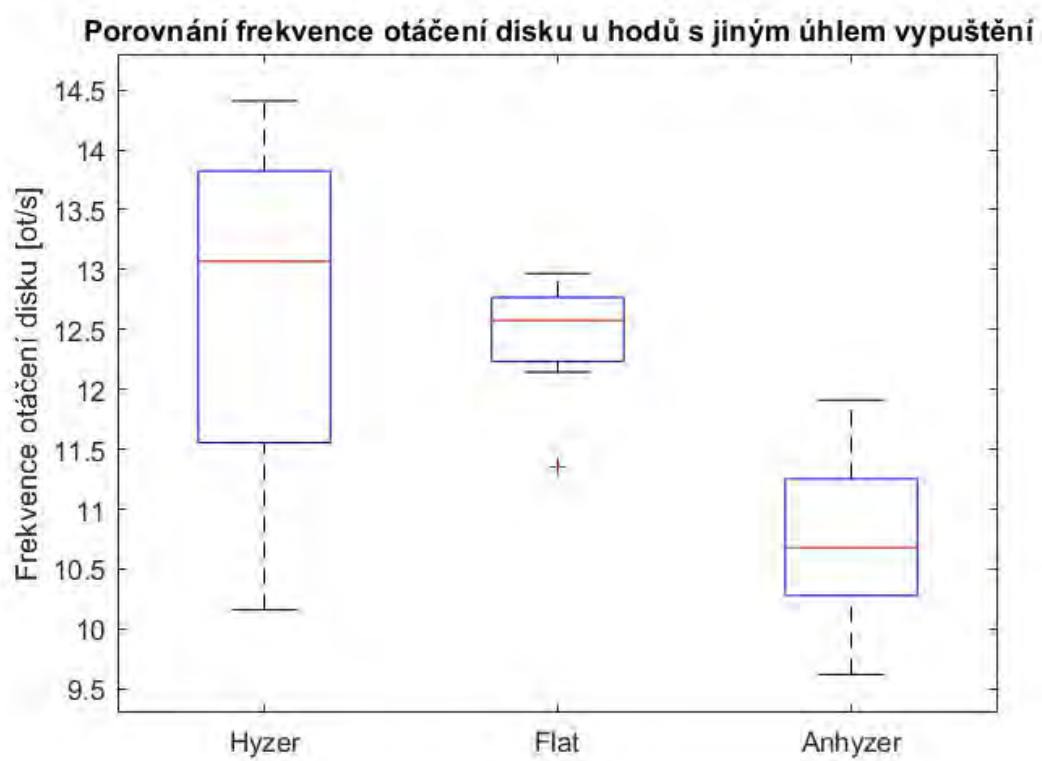
Cílem tohoto testu bylo zjistit, jak se liší mezi sebou průměrné otáčky hodů s různým úhlem vypuštění. Statistické testy byly provedeny s hladinou významnosti 0,05. Shapiro-Wilkův test normality vrátil pro jednotlivé skupiny p-hodnoty 0,215, 0,178 a 0,843 a ani u jedné nezamítl nulovou hypotézu o normalitě dat. Pro jednotlivé dvojice hodů byl proveden F-test na určení homogenity rozptylů mezi skupinami dat. Nulová hypotéza o podobnosti rozptylu nebyla zamítnuta pouze mezi druhou a třetí skupinou, tedy rovným (flat) vypuštěním a anhyzerem. Na základě těchto znalostí jsem se rozhodl použít dvouvýběrový nepárový t-test pro vzájemné porovnání skupin, jehož výsledky jsou zobrazeny v Tab. 4.2.

Z důvodu porovnávání více skupin jednotlivými t-testy bylo nutné provést korekci dle Bonferroniho. Hladina významnosti byla upravena podle vztahu $\alpha' = \alpha/k$, kde α' je nová hladina významnosti, α je hladina významnosti jednotlivých testů a k je počet porovnávání, v tomto případě 3.

Nulová hypotéza dvouvýběrových nepárových t-testů předpokládá rovnost střední hodnoty jedné skupiny se střední hodnotou druhé. Na nové hladině významnosti $\alpha' = 0,01\bar{6}$ nebyla vyvrácena pouze mezi hody typu hyzer a flat. Tento rozdíl lze vidět i na Obr. 4.3, kde hod typu anhyzer dosahuje mnohem menších otáček než druhé dva typy.

	Hyzer	Flat	Anhyzer
Hyzer	1	0,68	0,0028
Flat	0,68	1	0,000057
Anhyzer	0,0028	0,000057	1

Tab. 4.2: P-hodnoty vzájemných t-testů mezi skupinami



Obr. 4.3: Krabicové grafy výsledků pro hody s různým úhlem vypuštění

5 Diskuse

Na základě měření validity bylo zjištěno, že získané hodnoty mým algoritmem dosahují přesnosti $\pm 2,66\%$. Před hodnocením byl stanoven cíl dostat se pod 5 % a s výsledkem jsem tak velmi spokojen, jelikož se jedná o přesný ukazatel veličiny, kterou měřím.

Porovnání otáček forehandu a backhandu potvrdilo má očekávání, kdy se průměrná hodnota u backhandu rovnala 14,22 ot/s a u forehandu 11,46 ot/s. Tato data jsou významná z toho důvodu, že veřejné mínění, se kterým jsem přišel do styku, je nakloněno k opaku a jsem rád, že je na tomto výsledku jasně vidět rozdíl mezi těmito dvěma hody. Tato domněnka pravděpodobně vychází z nesprávné techniky forehandu. Běžným problémem je jev, který se v discgolfu nazývá „přervání“ disku. K tomu většinou dochází, pokud hráč předá disk mnohem dopředně rychlosti, ale dostatečně jej neroztočí. Zatímco u backhandu hráč táhne disk kolem trupu, zapojuje do něj celé tělo, viz. Obr. 1.4, a úhel vypuštění je závislý na naklonění těla, u forehandu se spoléhá více na ruku, viz. Obr. 1.5, a úhel vypuštění je velmi náchylný na hráčovu preciznost a nastavení dlaně. Jak je uvedeno na začátku tohoto odstavce, hody forehandem jsou obecně méně roztočené, proto jsou na tento problém náchylnější a dá se tím tedy vysvětlit i častější „přervávání“ forehandů, které vychází z nižších otáček, které forehandový hod generuje.

Závislost úhlu vypuštění disku na jeho otáčkách během letu vyjádřilo zajímavé výsledky. Hody hozené v anhyzeru mají výrazně nižší průměrné otáčky než druhé dvě skupiny, což potvrdily i statistické testy, viz. Tab. 4.2. Vysvětlit by se tento jev dal tím, jak se disk chová během jednotlivých hodů. Letí-li v hyzeru, je nakloněný na stranu, kam přirozeně padá a míří rychleji k zemi, naopak v anhyzeru se naklání na stranu opačnou a během letu se snaží vytočit zpátky, což jej zpomaluje. Díky tomu se udrží ve vzduchu o něco déle a doletí i dál. Během tohoto měření byla snaha házet disky na podobné vzdálenosti, tím pak mohlo být ovlivněno nutkání dát více síly do hodů hyzerem a naopak méně do anhyzerů.

Závěr

Hlavním cílem práce bylo získat pomocí inerciálních senzorů nové informace z letu discgolfového disku. Sport je stále nový, odborných publikací se tak mnoho nevyskytuje a znalosti o chování disku během letu jsou pouze odpozorované. Zatímco rychlost lze snímat radarovým měřičem nebo vzdálenost hodu laserovým rangefinderem, informace o otáčení disku byly doposud možno vypočítat pouze z vysokofrekvenčního kamerového záznamu. Přenosnou a nakonec ne tak moc zatěžující variantou bylo umístění dvou měřících jednotek zespod disku, To bylo provedeno s ohledem na jednoduchost získání informace o otáčení. Validita algoritmu na získání průměrných otáček za sekundu během letu byla provedena porovnáním dat s referenčními hodnotami získanými ze současného měření s kamerovým systémem Qualisys, který dosahuje vysoké přesnosti. Vyhodnocení dat z měřících jednotek jsem provedl šesti metodami, které využívaly dvou principů na třech různých signálech. Nejlepších hodnot dosáhla metoda 1, která vyhodnocovala otáčení z osy X akcelerometru a zjišťovala časový rozdíl mezi jednotlivými lokálními extrémy na signálu, z něhož byly vypočteny otáčky. Procentuální chyba u této metody dosahovala průměru 2,66 %, což byl výsledek nad prvotní očekávání.

Se znalostí přesnosti byly provedeny dva testy. Jeden porovnával dva různé hody (backhand a forehand) a druhý 3 různé úhly vypuštění disku (hyzer, flat, anhyzer). Výsledkem prvního byl jasný rozdíl, kdy průměrná hodnota backhandu dosahovala 14,22 ot/s oproti 11,46 ot/s u forehandu. Druhý test ukázal podobné hodnoty mezi hody v hyzeru a rovně (flat), průměrné otáčky hodů v anhyzeru byly však poměrně nižší.

Literatura

- [1] *Hřiště / iDiscgolf.cz* [online]. [cit. 2022-01-04]. Dostupné z:
<<https://www.idiscgolf.cz/hriste>>.
- [2] *Statistiky potvrdily růst počtu golfistů. Česká golfová federace* [online]. 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z:
<<https://www.cgf.cz/cz/pro-media/pro-media/aktuality/4245-statistiky-potvrdily-rust-poctu-golfistu>>.
- [3] *Par (golf). In: Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2022-06-02]. Dostupné z:
<[https://cs.wikipedia.org/wiki/Par_\(golf\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Par_(golf))>.
- [4] *Jak začít hrát discgolf / proDiscgolf.cz* [online]. [cit. 2022-01-04]. Dostupné z:
<<https://www.prodiscgolf.cz/jak-zacit-hrat-discgolf>>.
- [5] *PDGA Approved Disc Golf Discs* [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z:
<<https://www.pdga.com/technical-standards/equipment-certification/discs>>.
- [6] *2020 PDGA Year End Demographics. Professional Disc Golf Association* [online]. 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z:
<<https://www.pdga.com/pdga-documents/demographics-current/2020-pdga-year-end-demographics>>.
- [7] *2021 PDGA Year End Demographics. Professional Disc Golf Association* [online]. 2021 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z:
<<https://www.pdga.com/pdga-documents/demographics-current/2021-pdga-year-end-demographics>>.
- [8] ŠULÁKOVÁ, Radka. *Discgolf jako moderní pohybová aktivita* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z:
<https://is.muni.cz/th/qfn6s/Sulakova_DP_DG_final.pdf>. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, Katedra kineziologie.
- [9] PEROUTKA, Jiří. *Discgolf a fotbalgolf jako moderní pohybové aktivity* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z:
<https://is.muni.cz/th/hltus/Diplomova_prace_-_Bc._Jiri_Peroutka.pdf>. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, Katedra kineziologie.

- [10] BIELKA, Vít. *Discgolf* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/uih0g/Diplomova_prace_Bc._Vit_Bielka.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, Katedra kineziologie.
- [11] NOVÁK, Přemysl. *Strategie rozvoje discgolfu v ČR* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/42jjgm/?lang=en>. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Fakulta tělesné kultury.
- [12] NELSON, J. T., JONES, R. E., RUNSOM, M., & HARDY, J. (2015). *Disc Golf, a Growing Sport: Description and Epidemiology of Injuries*. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 3(6), 2325967115589076. <https://doi.org/10.1177/2325967115589076>.
- [13] *Tíhové zrychlení*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tíhové_zrychlení.
- [14] *MEMS Accelerometers*. *Silicon Sensing* [online]. 2017 [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>.
- [15] *MEMS*. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2021 [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>.
- [16] *Physilog5_Datasheet_V1.03*. *Gait Up* [online]. 2019 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://research.gaitup.com/wp-content/uploads/2020/03/Physilog5_Datasheet_V1.03.pdf.
- [17] *Arqus extreme performance motion capture camera - Qualiys* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: <https://www.qualisys.com/cameras/arqus/>.
- [18] *Shapiro-Wilk test*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shapiro-Wilk_test.
- [19] MOHD RAZALI, N. & BEE, Y. *Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests* [online]. 2011 [cit.

- 2022-05-31]. Dostupné z:
 <https://www.researchgate.net/publication/267205556_Power_Comparisons_of_Shapiro-Wilk_Kolmogorov-Smirnov_Lilliefors_and_Anderson-Darling_Tests>.
- [20] *Shapiro-Wilk and Shapiro-Francia normality tests* [online]. 2014 [cit. 2022-05-31]. Dostupné z:
 <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13964-shapiro-wilk-and-shapiro-francia-normality-tests>>.
- [21] *Matematická biologie učebnice: Test o shodnosti (homogenitě) rozptylů dvou nezávislých výběrů (F-test)* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z:
 <<https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickych-a-biologickych-dat--biostatistika\pro-matematickou-biologii--testovani-hypotez-o-quantitativnich-promennych--testy-o-parametrech-dvou-rozdeleni--test-o-shodnosti-homogenite-rozptylu-dvou-nezavislych-vyberu-f-test>>.
- [22] *Two sample t-test - MATLAB ttest2* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z:
 <<https://www.mathworks.com/help/stats/ttest2.html>>.
- [23] *Matematická biologie učebnice: Problém násobného testování hypotéz* [online]. [cit. 2022-05-31]. Dostupné z:
 <<https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickych-a-biologickych-dat--biostatistika\pro-matematickou-biologii--uvod-do-testovani-hypotez--poznámky-k-testovani-hypotez--problem-nasobneho-testovani-hypotez>>.

Seznam symbolů a zkratek

g	gram
cm	centimetr
PDGA	Professional Disc Golf Asociation
IMU	Inertial measurement unit
MEMS	Micto electro mechanichal systems
m/s²	metry za sekundu na druou, jednotka zrychlení
°/s	stupně za sekundu, jednotka úhlové rychlosti
mm	milimetr
Hz	hertz, jednotka frekvence
PLA	Polyactic acid
FDM	Fused deposition modeling
α	hladina významnosti pro nulovou hypotézu statistického testu
accX	zrychlení na ose X
gyroX	úhlová rychlost na ose X
gyroY	úhlová rychlost na ose Y
std	směrodatná odchylka
α'	hladina významnosti po úpravě Bonferroniho korekcí
ot/s	otáčky za sekundu, vyjádření frekvence otáčení