



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
FAKULTA DOPRAVNÍ

ÚSTAV LETECKÉ DOPRAVY



Filip Havrda

**Implementace simulátoru vestibulárních iluzí do IFR  
výcviku**

Bakalářská práce

**2021**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta dopravní  
děkan  
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621** ..... **Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Filip Havrda**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – PIL – Profesionální pilot**

Název tématu (česky): **Implementace simulátoru vestibulárních iluzí do IFR výcviku**

Název tématu (anglicky): Implementation of a Vestibular Illusion Simulator into IFR Training

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je určit, zda-li navození vestibulární iluze při simulátorovém létání, které je implementované v jedné hodině simulátorového letu, významně přispěje k odolnosti pilota vůči vlivům vestibulární iluze.
- Proveďte analýzu současného stavu v oblasti vestibulárních iluzí a s tím spojeného letecko - lékařského výcviku.
- Navrhněte a proveďte experiment s využitím simulátoru vestibulárních iluzí a se současným sběrem letových dat pro ověření zvyšování odolnosti pilota vůči vlivům vestibulární iluze.
- Získaná data vyhodnotte prostřednictvím vhodných metod.
- Výsledky interpretujte a diskutujte, formulujte závěry práce.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Boril, Jan, et al. "Increasing flight safety using flight sensory illusions on a spatial disorientation simulator." 2016.  
Boril, Jan, et al. "Spatial Disorientation Impact on the Precise Approach in Simulated Flight." 2020.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.**  
**Ing. Lenka Hanáková**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **9. srpna 2021**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Filip Havrda  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020



## **Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěl v první řadě poděkovat doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph.D. a Ing. Lence Hanákové za odborné vedení práce, za jejich čas strávený konzultacemi, vstřícný a vždy chápavý přístup a podporu při dokončení bakalářské práce. Dále mé velké díky patří i Bc. Lianě Karapetjan za odborné konzultace a pomoc při kompletaci dat z měření. Rád bych touto cestou rovněž poděkoval Ústavu leteckého zdravotnictví Praha za spolupráci a poskytnutí dezorientačního simulátoru pro účely měření. V neposlední řadě patří mé velké poděkování rodině, která mě vždy podporovala a umožnila celé studium.



## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 4. srpna 2021

Filip Havrda



**Název práce: Implementace simulátoru vestibulárních iluzí do IFR výcviku**

*Autor:* Filip Havrda

*Obor:* Profesionální pilot

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Počet stran:*

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D. a Ing. Lenka Hanáková

*Abstrakt:* Předmětem této práce je implementace simulátoru vestibulárních iluzí do IFR výcviku. Cílem práce je určit, zda-li navození vestibulární iluze při simulátorovém létání, které je implementované v jedné hodině simulátorového letu, významně přispěje k odolnosti pilota vůči vlivům vestibulární iluze. Praktická část je zaměřena na statistickou analýzu měření, pomocí kterých jsou vyvozeny výsledky a uvedena doporučení pro budoucí práce stejné problematiky.

*Klíčová slova:* prostorová dezorientace, vestibulární iluze, IFR, GYRO-IPT II



**Title: Implementation of a Vestibular Illusion Simulator into IFR Training**

*Author:* Filip Havrda

*Field:* Professional pilot

*Type of work:* Bachelor's thesis

*Leaders:* doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D. and Ing. Lenka Hanáková

*Abstract:* The subject of this work is the implementation of a vestibular illusion simulator into IFR training. The aim of this work is to determine whether the induction of vestibular illusion during simulator flying, which is implemented in one hour of simulator flight, will significantly contribute to the pilot's resistance to the effects of vestibular illusion. The practical part is focused on the statistical analysis of measurements, which are used to derive results and make recommendations for future work on the same issues.

*Key words:* spatial disorientation, vestibular illusion, IFR, GYRO-IPT II



## Seznam obrázků:

- 1 Primární příčiny nehod
- 2 Vestibulární systém ve vztahu k pohybu letadla ve vzduchu
- 3 Vnitřní ucho
- 4 Půlkruhové kanálky
- 5 Otolitické orgány
- 6 Grafická ilustrace somatogravické iluze
- 7 Graveyard spin a Graveyard spiral
- 8 Průběh iluze náklonu
- 9 Přehled nehod souvisejících s SD na časové ose
- 10 Stoupající trend nehod SD
- 11 První profil
- 12 Odletová mapa
- 13 Mapa na přiblížení
- 14 Třetí profil
- 15 Dezorientační simulátor Gyro IPT II
- 16 Pracoviště simulátoru
- 17 Pohled do palubní kabiny s nakonfigurovaným kokpitem letounu Z-142
- 18 Subjektivní názor respondentů na otázku č. 4
- 19 Subjektivní názor respondentů na otázku č. 5
- 20 Subjektivní názor respondentů na otázku č. 6
- 21 Obrázek grafu
- 22 Obrázek grafu
- 23 Obrázek grafu
- 24 Obrázek grafu
- 25 Obrázek grafu
- 26 Obrázek grafu
- 27 Boxplot
- 28 Boxplot





## Seznam tabulek:

- 1 Tabulka I
- 2 Tabulka II
- 3 Tabulka III
- 4 Tabulka IV



## **Seznam použitých zkratk:**

SD – Spatial disorientation – Prostorová dezorientace

MPL – Multi-Crew Pilot Licence – Vícečlenný pilotní průkaz

ATPL – Airline Transport Pilot Licence – Průkaz dopravního pilota letounu

CPLA – Commercial Pilot Licence – Průkaz obchodního pilota letounu

UPRT – Upset Prevention and Recovery Training – Výcvik vybírání nezvyklých poloh

IFR – Instrument Flight Rules – Let podle přístrojů

IR – Instrument Rating – Doložka přístrojové kvalifikace

IMC – Instrument Meteorological Conditions – Přístrojové meteorologické podmínky

PANS – Procedures for Air Navigation – Postupy pro leteckou navigaci

BASI – Bureau of Air Safety – Úřad pro vyšetřování letecké bezpečnosti

ATSB – Australian Transport Safety Bureau – Australský úřad pro bezpečnost dopravy

PF – Pilot Flying – Kapitán

FO – First Officer – První důstojník

LOC – Lost of Control – Ztráta kontroly

VMC – Visual Meteorological Conditions – Denní vizuální podmínky

ASAGA – Airplane State Awareness During Go-Around – Ztráta povědomí o stav letadel při nezdařilém přiblížení či go-aroundu



## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	12
<b>2. Teoretické základy práce</b> .....	13
<b>2.1 Analýza současného stavu</b> .....	13
<b>2.2 Lidský faktor v letectví</b> .....	14
<b>2.3 Prostorová orientace</b> .....	15
<b>2.4 Prostorová dezorientace</b> .....	16
<b>2.5 Vestibulární aspekty prostorové orientace</b> .....	18
<b>2.5.1 Vnitřní ucho</b> .....	19
<b>2.5.2 Půlkruhové kanálky</b> .....	19
<b>2.5.3 Otolitické orgány</b> .....	21
<b>2.6 Iluze způsobené prostorovou dezorientací</b> .....	21
<b>2.6.1 Somatogravická iluze</b> .....	22
<b>2.6.2 Somatogyrální iluze</b> .....	23
<b>2.6.3 Iluze náklonu</b> .....	25
<b>2.6.4 Coriolisova iluze</b> .....	27
<b>2.6.5 Iluze nadměrného G</b> .....	27
<b>2.7 Přehled nehod ve spojitosti s prostorovou dezorientací</b> .....	28
<b>2.7.1 Ztráta kontroly nad letadlem ve spojitosti s SD</b> .....	30
<b>3 Metody</b> .....	34
<b>3.1 Subjekty</b> .....	34
<b>3.2 Procedury</b> .....	34
<b>3.3 Vybavení</b> .....	40
<b>3.4 Závěrečný dotazník</b> .....	43
<b>3.5 Metody hodnocení dat</b> .....	46
<b>3.6 Shrnutí kapitoly</b> .....	48
<b>4 Presentace výsledků</b> .....	48
<b>5 Diskuse výsledků</b> .....	51
<b>6 Závěr</b> .....	52



## 1. ÚVOD

Prostorová dezorientace a s tím spojené letové iluze, patří mezi nejčastější faktory přispívající k leteckým nehodám a incidentům, ale její skutečnou prevalenci je obtížné stanovit. Důvodem je fakt, že mnoho nehod, kde je prostorová dezorientace uváděna jako pravděpodobný faktor, jsou fatální, a proto jeho role nemůže být potvrzena s úplnou jistotou. Dalším důvodem je skutečnost, že v mnoha případech prostorové dezorientace, kdy k nehodě nedojde je nehlášených. Tato práce by měla poskytovat alespoň základní vysvětlení různých typů iluzí a snaží se navrhnout experimentální ověření, zdali u zkoušených pilotů jedna hodina simulátorového létání významně přispěje k odolnosti vůči vestibulárním iluzím. Tato práce se zabývá analýzou současného stavu, kvantifikací určitých iluzí, vestibulárním aspektům a v neposlední řadě statistikou nehod způsobených v souvislosti s prostorovou dezorientací. To bude sloužit k podpoře lepší informovanosti o výskytu SD a možná i pomůže snížit stigma, které by si někteří piloti mohli s těmito událostmi spojit. Jak naznačují jiné studie, pravděpodobně se s prostorovou dezorientací setkají všichni piloti během celoživotního létání – ať už profesionální nebo neprofesionální, zkušený nebo nezkušený. Otevřenější přístup k uznání a diskuse o SD a jejich různých příčinách bude cenným příspěvkem a snad i přispěje k lepšímu pochopení tohoto běžného lidského faktoru. Autor v seznamu použité literatury uvádí všechny používané zdroje pro téma této práce. Některé z nich nejsou přímo citovány v textu, avšak bylo k nim přihlíženo v tvorbě práce.



## 2. Teoretické základy práce

### 2.1 Analýza současného stavu

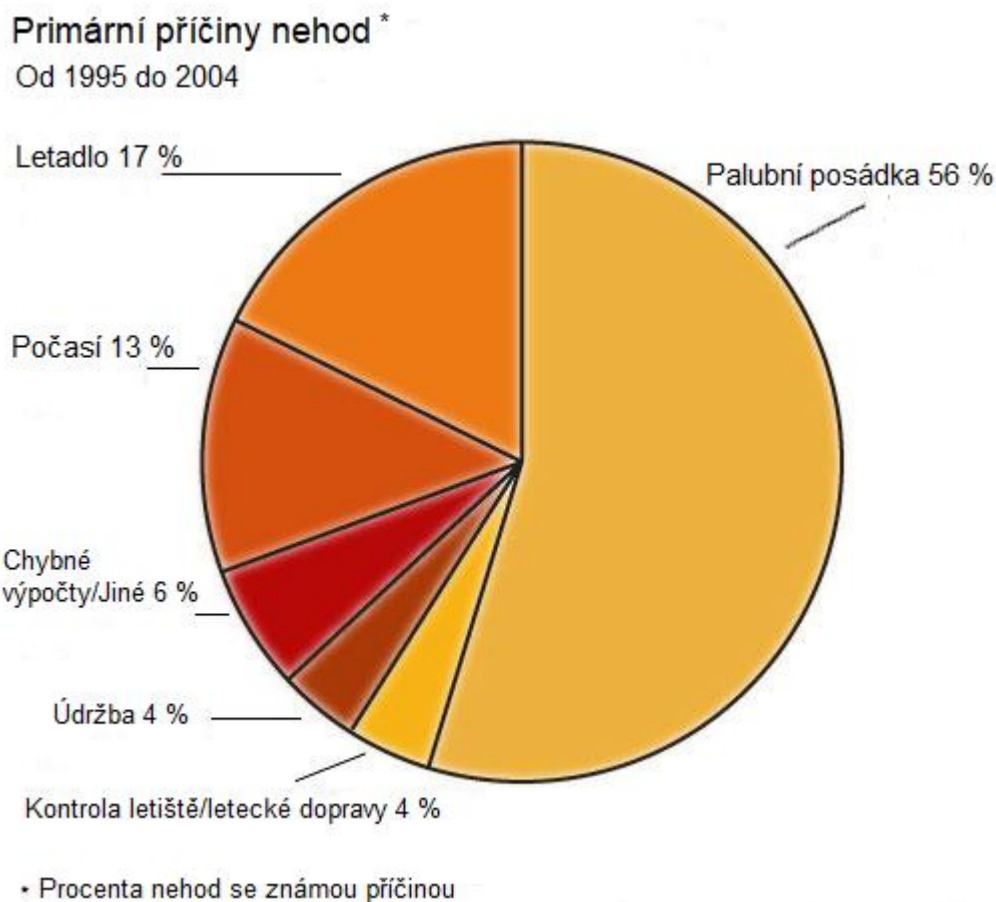
Tématu vlivu leteckých iluzí na bezpečné provedení letu v civilní letecké dopravě se v dnešní době nepřikládá tolik pozornosti, kolik by si tato oblast zasloužila. Přitom prostorová dezorientace (SD), jakožto nejčastější letová iluze, je faktorem, který přispívá k leteckým nehodám již po celá desetiletí. Úsilí k zmírnění incidentů způsobených SD nejsou absolutně úměrné nebezpečí, které pro piloty i nadále představuje. I přes desítky neštěstí a incidentů SD nezískala respekt a povědomí, které vyžaduje od příslušných autorit a pilotů, a to především kvůli historicky nepřesnému hlášení v rámci vyšetřování nehod a nedostatečnému hlášení údajů SD ve výzkumu. Je prezentováno pouze několik desítek výzkumných studií a několik jednotek případových studií nehod, které zachycují roli SD v leteckých katastrofách od roku 1913. Přitom je známo, že letové iluze a speciálně prostorová dezorientace přispívá k velkému množství všech leteckých katastrof se značnou úmrtností [4]. Pravdou je, že se letovým iluzím jako takovým nelze zcela vyhnout. Objevují se jak u zkušených, tak i u začínajících pilotů. V dnešní době se pro řešení v takovéto nastalé situaci používá pravidlo, že pilot by měl ve své snaze o potlačení letové iluze vyřadit své smysly a věřit pouze přístrojům. Navzdory této skutečnosti, že dnešní piloti mají nástroje/vizuální displeje, které pomáhají udržovat orientaci, je zřejmé, že extrémní požadavky letectví na piloty převyšují lidské smyslovo-percepčně-kognitivní schopnosti [8]. Ve skutečnosti občas nové technologie hrají přispívající faktor v SD. I přes tento fakt, je téma letových iluzí zpracováno pouze v teoretické části výcviku. Přitom včasné rozpoznání takovéto situace by mohlo mít stěžejní důsledky pro bezpečné provedení letu. S narůstajícími požadavky na bezpečnost v letectví není doposud zpracován žádný výcvik, jehož cílem by bylo piloty seznámit s nejčastějšími druhy iluzí, jejich včasným rozpoznáním, a především praktickým nácvikem na certifikovaném simulátoru uzpůsobeným na simulaci letových iluzí. V roce 2019 sice vstoupilo v platnost Prováděcí nařízení komise (EU) 2018/1974, které ukládá povinnost pilotům zahajujícím výcvik MPL, ATPL(A) či CPL(A) absolvovat výcvik prevence ztráty kontroly nad řízením a obnovení kontroly nad řízením (UPRT), ale to v našem případě řeší až důsledek různých letových iluzí. A to i přes fakt, že letové iluze jsou dobře známé a detailně popsány v různých odborných pracích věnujícím se této problematice. Samotný okruh iluzí, ať už vestibulárních či optických, je zpracován pouze v teoretické části výcviku. Praktický nácvik iluzí v civilním IFR výcviku, v modulovém či integrovaném výcviku pro žadatele IR či ATPL,



není tedy nijak legislativně zakotven a zůstává tak v rukou letecký škol a jejich instruktorů. Cílem samotného kursu výcviku v létání k přístrojové kvalifikaci (letoun) je vycvičit piloty na úroveň odborné způsobilosti nezbytnou k řízení letounů při letech IFR a za meteorologických podmínek pro let podle přístrojů (IMC) v souladu s Dokumentem 8168 PANS – OPS ICAO. Let podle pravidel podle přístrojů IFR je dle definice let, při kterém pilot vede letadlo výhradně podle informací získaných z palubních přístrojů, což umožňuje provádět lety v noci a za nepříznivých meteorologických podmínek. Polohu letadla vyhodnocuje pomocí odchylek palubních zařízení (např. umělý horizont) a na základě toho provádí korekce ve směru či výšce. Během letu IFR je pilot zodpovědný za dodržování bezpečné vzdálenosti od překážek (kromě radarového vektorování). Situace v armádách po celém světě je však úplně jiná. Např. všichni čeští vojenští piloti jsou povinni (v souladu s příslušnými normami NATO) alespoň jednou za pět let provést demonstrační výcvik letových iluzí [1]. Tento fakt je samozřejmě dán povahou provozu ve vojenském letectví, kdy se letadla pohybují nejen mnohdy většími rychlostmi nežli letadla dopravní, ale i složitostí prováděných manévřů. Na první pohled by se tedy mohlo zdát, že problematika letových iluzí civilní sféru dopravního letectví netrápí, ale opak je však pravdou [30]. Lidé nebyli fyziologickou podstatou k létání, a proto k pochopení, proč k letovým iluzím dochází, je důležité se nejdříve podívat na problematiku lidského faktoru. Podrobnými příklady a statistikami leteckých nehod se práce zabývá v kapitole 2.7.

## 2.2 Lidský faktor v letectví

Lidský faktor jako disciplína se zabývá hlavně lidmi, jejich problémy, jejich životními a pracovními podmínkami. Je to také o vztahu ke strojům, prostředí, ve kterém se vyskytují, a také o vztahu k ostatním lidem. Protože chyba je lidská a pro člověka přirozená, musí být tato chybovost snížena na nejnížší možnou úroveň rizika. Je důležité si uvědomit, že lidé nejsou stroje a stroje nejsou lidé. A protože každý člověk může udělat chybu a každý stroj se může porouchat, je důležité, aby oba tyto články pracovali v co největší symbióze. Co do jisté míry stroje neumí je improvizace – člověk je pak posledním článkem, který může situaci v případě potřeby zachránit. Podle statistik je až 70 % leteckých nehod způsobeno lidmi [46] – viz obrázek 1. Mezi selhání lidského faktoru se řadí i selhání prostorové orientace. Kterému se budeme věnovat v dalších kapitolách.



Obrázek 1: Primární příčiny nehod [46].

## 2.3 Prostorová orientace

Prostorová orientace definuje naši přirozenou schopnost udržovat orientaci těla nebo držení těla ve vztahu k okolnímu prostředí (fyzickému prostoru) v klidu a během pohybu. Geneticky vzato, lidé jsou navrženi tak, aby udržovali prostorovou orientaci na zemi. Trojrozměrné prostředí letu je neznámé pro lidské tělo, vytváří smyslové konflikty a iluze, které znesnadňují a někdy znemožňují dosažení prostorové orientace. Celosvětové statistiky ukazují, že může dojít k 5 až 10 % všech leteckých nehod v důsledku prostorové dezorientace, z nichž 90 % je smrtelných [21].

Prostorové orientace za letu je obtížné dosáhnout, protože četné podněty sensorů (vizuální, vestibulární a proprioceptivní) se liší velikostí, směrem a frekvencí [38]. Jakékoli



rozdíly nebo nesrovnalosti mezi vizuálními, vestibulárními a propioceptivními smyslovými vstupy vedou ke smyslovému nesouladu, který může vytvářet iluze a vést k prostorové dezorientaci. Dobrá prostorová orientace závisí na účinném vnímání, integraci a interpretaci vizuálních, vestibulárních (orgány rovnováhy ve vnitřním uchu) a propioceptivních (receptory umístěné v kůži, svalech, šlachách a kloubech) smyslových informací [21].

Lidé cítí polohu a pohyb v trojrozměrném prostoru prostřednictvím interakce různých tělních propioceptorů, včetně svalů, šlach, kloubů, zraku, dotyku, tlaku, sluchu a vestibulárního systému. Zpětná vazba od těchto systémů je mozkiem interpretována jako údaje o poloze a pohybu. Vestibulární systém umožňuje člověku určit orientaci těla, vycítit směr a rychlost pohybu a udržovat rovnováhu. Když je omezený vizuální vstup, jak je běžné v mnoha letových situacích, vestibulární smysl se stává důležitým pro shromažďování informací. Vestibulární systém je však navržen tak, aby fungoval na zemi v prostředí 1G, a proto může během některých letových manévřů poskytnout letovým posádkám chybné nebo dezorientující informace [6, 38].

## 2.4 Prostorová dezorientace

Prostorová dezorientace (SD) nastává, když pilot falešně vnímá pohyb nebo orientaci letadla vzhledem k Zemi [39, 40]. Dezorientaci lze chápat i jako pilotní reakci během letu, kdy je pilot nucen soustředit pozornost na obtížné meteorologické podmínky nebo další část úkolu, která mu nedovoluje kontrolovat celou letovou situaci. Piloti se musí soustředit se na různé aspekty letových údajů tj rychlost, nadmořská výška, správnost úkonů, které je činí náchylnějšími k prostorové dezorientaci. Základní příčinou SD je nedostatečná (např. nepozorovaná nebo nejednoznačná) zpětná vazba ze smyslových systémů člověka zapojených do prostorové orientace, především vestibulárního a vizuálního systému [43].

V literatuře je popsána řada jevů SD (např. Gillingham a Previc [41] nebo Previc a Ercoline [42]), což ukazuje, že SD se může pilotovi prezentovat různými způsoby. Podle průzkumu mezi vojenskými posádkami závisí smyslové iluze nejčastěji zaznamenávané za letu na podmínkách prostředí, typu letadla a typu provozu [44]. Samotný iluzorní vjem však nemusí přenášet bezpečnostní riziko, pokud si je pilot tohoto pocitu vědom. V tomto ohledu je užitečné a více než vhodné, rozlišovat mezi skrytou (typ I), rozpoznanou (typ II) a ochromující SD (typ III) [39, 45]:





### **1) TYP I (SKRYTÁ)**

Dezorientovaný pilot nevnímá žádné náznaky prostorového dezorientace. Jinými slovy si nemyslí, že je něco špatně. To, co vidí – nebo si myslí, že vidí – potvrzují jeho další smysly.

Dezorientace typu I je nejnebezpečnějším typem dezorientace. Pilot, který si není vědom problému, nedokáže rozpoznat nebo opravit dezorientaci, což obvykle vyústí ve fatální nehodu, přičemž:

- a) Pilot může vidět správně fungující přístroje a neexistuje žádné podezření na poruchu.
- b) Nemusí existovat žádný náznak poruchy ovládní letadla. Letadlo funguje normálně.

Příkladem tohoto typu SD by mohla být iluze vnímání výšky/hloubky, kdy pilot provede takzvaný kontrolovaný let do země či překážky neboli CFIT kvůli ztrátě situačního povědomí [45].

### **2) TYP II (ROZPOZNANÁ)**

U prostorové dezorientace typu II pilot vnímá problém (vyplývající z prostorové dezorientace). Pilot to však nemusí rozpoznat jako prostorovou dezorientaci:

- a) Pilot může mít pocit, že některý ovládací prvek nefunguje správně.

Aviatik může poruchu přístroje vnímat jako graveyard spiral, což je klasický příklad dezorientace typu II. Pilot neopravuje naklápění letadla, jak ukazuje indikátor polohy, protože jeho vestibulární indikace přímého letu jsou silné a věří v selhání přístrojů [45].

### **3) TYP III (OCHROMUJÍCÍ)**

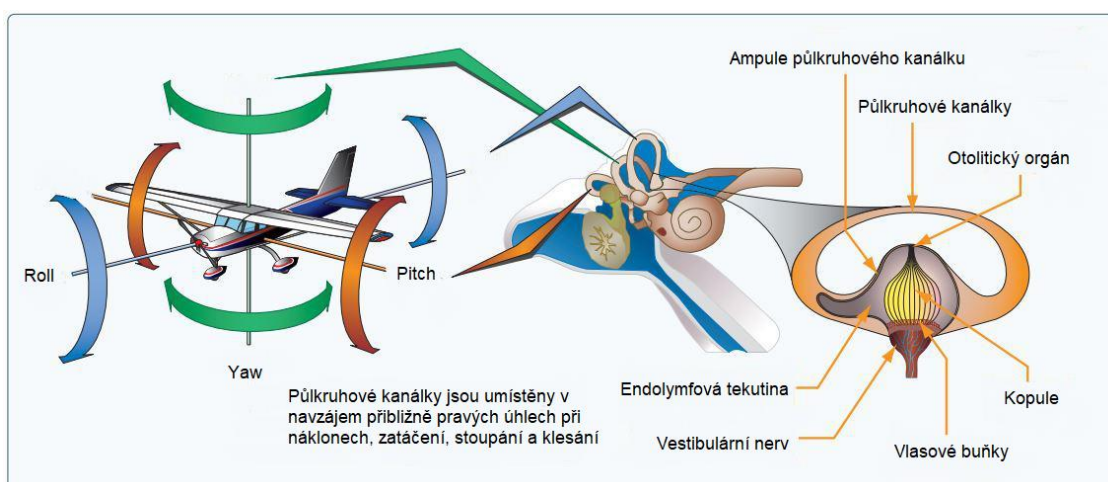
Při prostorové dezorientaci typu III pilot zažívá tak obrovský pohybový pocit, že se nedokáže zorientovat pomocí vizuálních podnětů nebo leteckých přístrojů. Prostorová dezorientace typu III nemusí být fatální, pokud kopilot získá kontrolu nad letadlem [45].

Z rozdělení těchto typů SD můžeme vidět, že důvod nevědomosti o tom, že u pilota nastal nějaký typ dezorientace, může vést k fatálním následkům. Pilotův výkon v takovém případě vznikne z důvodu percepční dezinformace. Co je rovněž důležité je fakt, že pilot může letět nevědomý si své dezorientace, dokud nebude pozdě na nápravné opatření – v tom je velké potenciální nebezpečí. Existují letové manévry, které jsou náchylnější k prostorovým

dezorientacím. Když si toho pilot je vědom, pak je možné využít jeho dříve nabitě zkušenosti a proměnit je v dřívější reakce a korekce. V takovém případě provádí pilot manévry s vědomím vnímavosti a vestibulární dezinformace může kontrolovat prostřednictvím opravných informací vycházející z letových přístrojů a indikátorů.

## 2.5 Vestibulární aspekty prostorové orientace

Pro pochopení, proč dochází k letovým iluzím je rovněž důležité se blíže podívat na vestibulární aspekty prostorové dezorientace – viz obrázek 4.

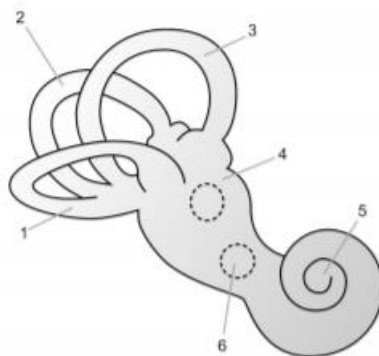


Obrázek 2: Vestibulární systém ve vztahu k pohybu letadla ve vzduchu [48].

Vnitřní ucho obsahuje vestibulární systém, který je také známý jako orgán rovnováhy. Vestibulární systém obsahuje dvě odlišné struktury: půlkruhové kanály, které detekují změny úhlového zrychlení, a otolitové orgány (utricle a saccule), které detekují změny lineárního zrychlení a gravitace. Půlkruhové kanály a otolitické orgány poskytují mozku informace o poloze a pohybu našeho těla – viz obrázek 2. Spojení mezi vestibulárním systémem a očima pomáhá udržovat rovnováhu a udržovat oči zaměřené na předmět, zatímco se pohybuje hlava nebo se otáčí tělo [21].

### 2.5.1 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho se nachází v dutinách skalní kosti, které se souběžně nazývají jako kostěný labyrint [47]. To je ilustrováno na obrázku 3. Kostěný labyrint se skládá ze tří polokruhovitých kanálků, dále z předsíně a hlemýždě a je vyplněn tekutinou tzv. perilymfou. Uvnitř této tekutiny je vlastní smyslový orgán – blanitý labyrint, tvořený dvěma váčky. Na kulovitý váček se napojuje hlemýžď a vejčitý váček je spojen se třemi polokruhovitými kanálky. Vlásokvé buňky jsou funkční jednotkou vestibulárního systému a jejich úkolem je registrovat zrychlení.



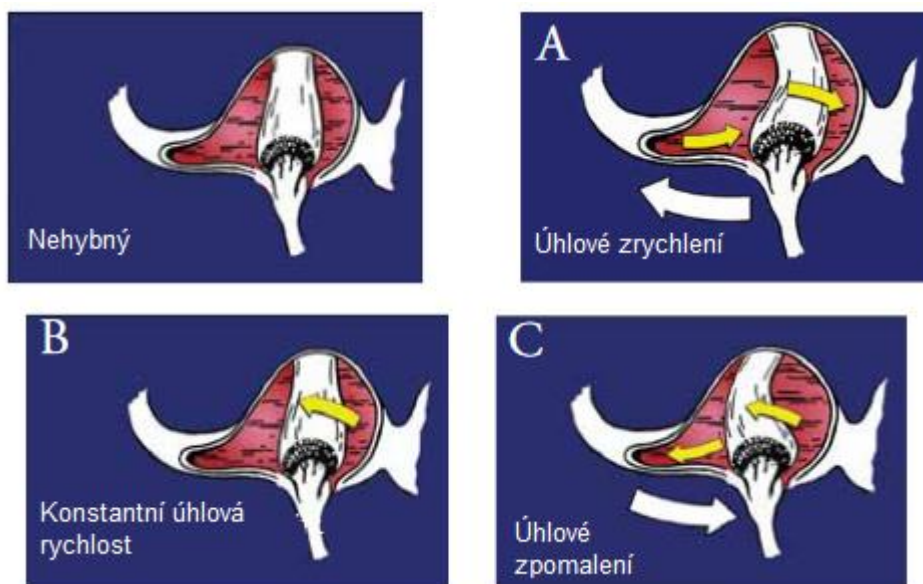
Obrázek 3: Vnitřního ucho: 1 - boční kanálek; 2 - zadní kanálek; 3 - přední kanálek; 4 – vejčitý váček; 5 - hlemýžď; 6 - kulovitý váček [47].

### 2.5.2 Půlkruhové kanálky

Půlkruhové kanály jsou tři půlkruhové propojené trubice umístěné uvnitř každého ucha, které jsou ekvivalentem tří gyroskopů umístěných ve třech rovinách kolmých (v pravých úhlech) na sebe. Každá rovina odpovídá klopení, naklonění nebo vybočení pohybů letadla. Každý kanál je naplněn tekutinou zvanou endolymfa a obsahuje snímač pohybu s malými chloupky, jehož konce jsou zality v želatinové struktuře zvané kupule. Kupule a chloupky se pohybují, když se tekutina pohybuje uvnitř kanálu v reakci na úhlové zrychlení. Pohyb chloupků je podobný pohybu mořských řas způsobených oceánskými proudy.

Když je hlava nehybná a letoun je rovný a vyrovnaný, tekutina v kanálech se nepohybuje a chloupky stojí přímo vzhůru, což naznačuje mozku, že nedochází k žádnému rotačnímu zrychlení (otočení). Pokud otočíte letadlo nebo hlavu, kanál se pohybuje hlavou, ale

tekutina uvnitř se kvůli své setrvačnosti nepohybuje. Při pohybu kanálu se s ním pohybují také vlasce uvnitř a jsou ohnuty v opačném směru zrychlení stacionární tekutinou (A) - viz. obrázek 4. Tento pohyb vlasců vysílá signál do mozku, který naznačuje, že se hlava otočila. Problém začíná, když budete pokračovat v otáčení letadla konstantní rychlostí (jako v koordinované zatáčce) po dobu delší než 20 sekund [21].



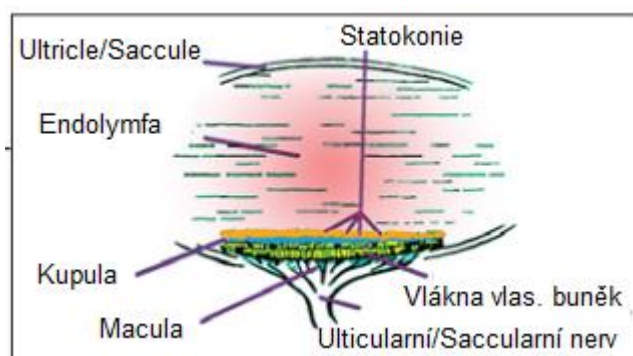
Obrázek 4: Půlkruhové kanálky

V tomto druhu otáčení se tekutina uvnitř kanálu začne zpočátku hýbat, potom tření způsobí, že dohoní stěny rotujícího kanálku (B). Když k tomu dojde, chloupky uvnitř kanálu se vrátí do své vzpřímené polohy a vyšlou chybný signál do mozku, že tah se zastavil i když tah ve skutečnosti pokračuje.

Pokud se pak začnete otáčet ze zatáčky a vrátíte se na vodorovný let, tekutina uvnitř kanálu se bude nadále pohybovat (kvůli své setrvačnosti) a chloupky se nyní pohybují v opačném směru (C) a vysílají do mozku chybný signál, který naznačuje, že se otáčíte opačným směrem, i když ve skutečnosti zpomalujete z původní zatáčky.

### 2.5.3 Otolitické orgány

V každém uchu jsou umístěny dva otolitové orgány, kulovitý váček (saccule) a utrikulus (utricle), které jsou nastaveny navzájem v pravém úhlu. Utricle detekuje změny lineárního zrychlení v horizontální rovině, zatímco saccule detekuje změny gravitace v vertikální rovině. Setrvačné síly vyplývající z lineárních zrychlení nelze odlišit od gravitační síly; gravitace tedy také může stimulovat utricule a saccule. Tyto orgány se nacházejí na základně (vestibulu) půlkruhových kanálů a jejich struktura se skládá z malých váčků (makuly) pokrytými vlákny vlasových buněk, které vyčnívají do překrývající se želatinových membrán (kupuly) zakončené drobnými kameny s vápníkem připomínajícími křídou zvané otoconia.



Obrázek 5: Otolitické orgány

## 2.6 Iluze způsobené prostorovou dezorientací

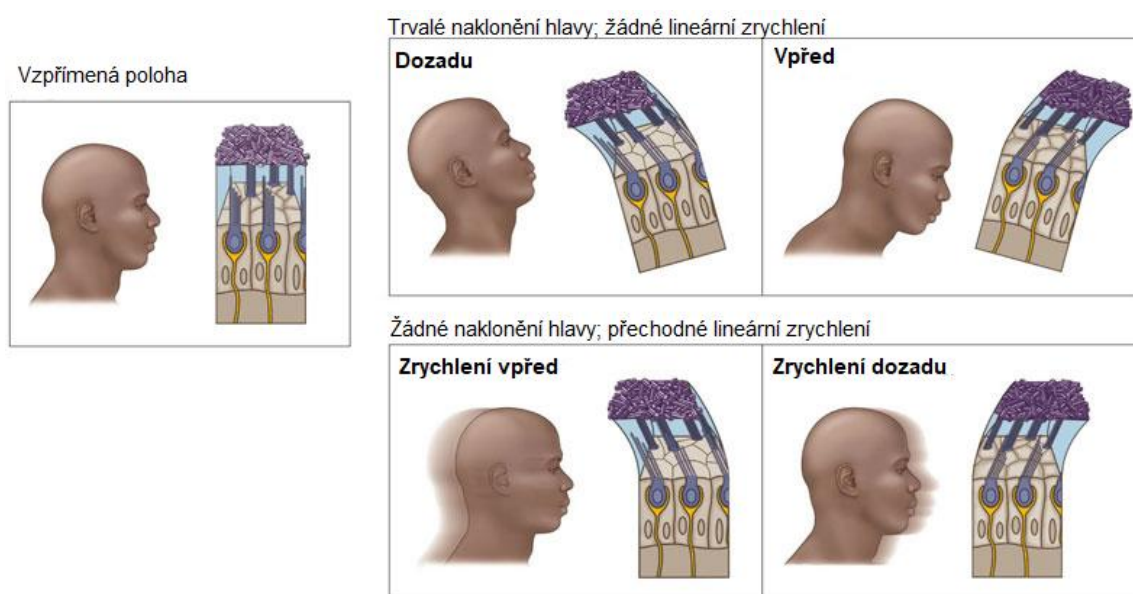
Komplexní analýza všech potenciálních iluzí přesahuje rámec této bakalářské práce. Zaměříme se na běžnější příklady a zvážíme některé skutečné případy, kdy tyto iluze vyústily v nehodu nebo incident.

Jak již bylo diskutováno dříve, vestibulární systém se skládá z orgánů rovnováhy v obou vnitřních uších. Jsou navrženy pro detekci pohybu během operací na povrchu Země a jako takové je jejich inherentní omezení činí náchylnými k chybám během letu. Některé z běžnějších vestibulárních iluzí, které mohou nastat, jsou:

- Somatogravická iluze (iluze klopení);
- Somatogyrální iluze (spirála);
- Iluze náklonu;
- Coriolisova iluze; a
- Iluze nadměrného G

## 2.6.1 Somatogravická iluze

Somatogravická iluze je známá také pod jinými popisnými termíny, jako je iluze vzletu v temné noci, iluze stoupání a inverzní iluze [41, 51, 54]. Jádrem této iluze je silný pocit stoupání při zrychlování letadel, který by byl zaznamenán např. při vzletu. K iluzi obvykle dochází ve špatných vizuálních podmínkách, jako je noční provoz nebo přístrojové meteorologické podmínky (IMC). Během vzletu za takových podmínek vestibulární systém (zejména otolitické orgány) přesně zaregistruje lineární zrychlení zahrnuté v procesu vzletu. Graficky znázorněné lineární zrychlení ve vztahu k vestibulárnímu aparátu můžeme vidět na obrázku 6.



Obrázek 6: Grafická ilustrace somatogravické iluze [50].

Při absenci vizuálních informací, které by potvrdily skutečnou dráhu letu letadla, však mozek místo toho předpokládá, že lineární zrychlení je ve skutečnosti stoupání. Pilot nevědomý si této iluzi pak potlačí dopředu kontrolní sloupek řízení, aby překonal pocit přílišného stoupání a dosáhl normálního pocitu. Tento manévr pak vede k klopení letadla, a protože k této iluzi obvykle dochází při nízkých výškách při vzletu, inherentní riziko spočívá v tom, že letadlo letí směrem do země. Taková iluze silného náběhu během nočního vzletu je potenciálně velmi nebezpečná a během let vedla k několika nehodám. Zpráva tehdejšího Úřadu pro vyšetřování letecké bezpečnosti (BASI), nyní součásti australského úřadu pro bezpečnost dopravy (ATSB), zkoumala nehody při vzletu za temné noci v Austrálii mezi lednem 1979 a květnem 1993 a zjistila, že z 35 nehod v tomto období 15 z nich (42 procent) zahrnovalo jako hlavní faktor prostorovou dezorientaci (SD) (BASI,

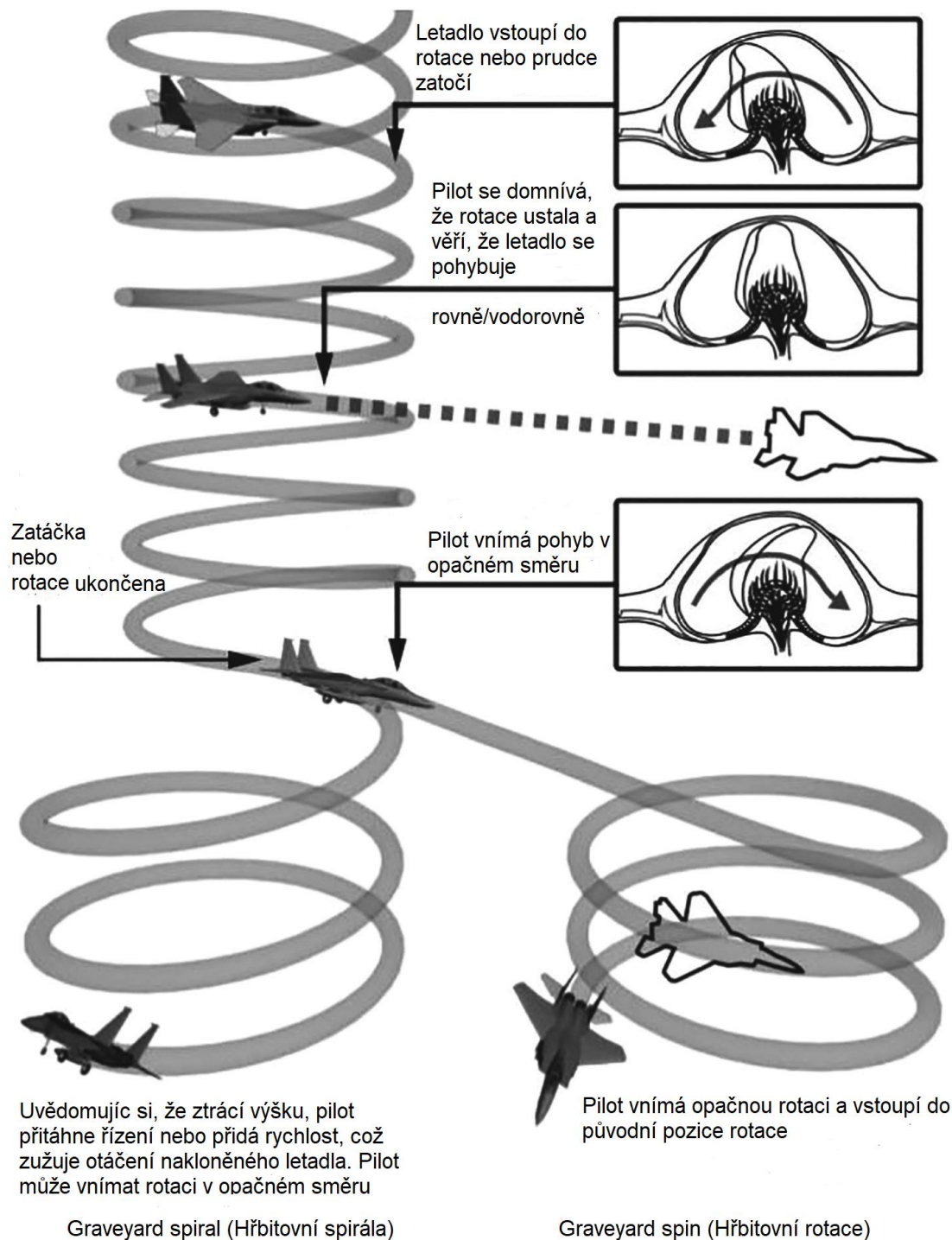


1995). V této zprávě byla citována podobná studie amerického Národního výboru pro bezpečnost dopravy, v níž 78 procent z 291 nočních vzletových nehod v období 1983 až 1993 zahrnovalo SD. Opačná forma této iluze může nastat během letu, když dojde k náhlému zpomalení. Pokud k tomu dojde za špatných vizuálních podmínek, může pilot zažít pocit silného klopení. To může vést pilota k nechtěnému stažení zpět na kontrolní sloupek, v mylném přesvědčení, že to zabrání stoupání a udržení vodorovného letu. Letadlo se však ve skutečnosti zvedne a může se ve skutečnosti zastavit. Pokud je nadmořská výška dostatečná a pilot rozpozná, co se stalo, je možná obnova polohy letadla. Situace se však může rychle zhoršit, pokud se pilot stane skutečně dezorientovaným a zmateným. Následkem může být ztráta kontroly a smrtelná nehoda, jak už bylo řečeno výše [50].

## 2.6.2 Somatogyrální iluze

Somatogyrální iluze je také známá jako graveyard spin nebo spiral [51] – viz obrázek 7. Je to opět funkce toho, jak vestibulární systém funguje. Během vstupu do spirálové zatáčky nebo spinu (záměrně nebo nechtěně) vestibulární systém (zejména půlkruhové kanály) zaregistruje počáteční úhlové zrychlení. To samozřejmě předpokládá, že vstup do zatáčky je nad prahem pro aktivaci půlkruhových kanálů. Jakmile je spirála nebo spin stabilizován, úhlové zrychlení bude směřovat k nule, s otáčením konstantní rychlostí (tj. bez zrychlení). V této situaci nebudou půlkruhové kanály stimulovány, protože registrují pouze změnu úhlové rychlosti. Kanály pak efektivně signalizují, že nedochází k žádnému obratu. Vizuální systém, který je dominantním orientačním mechanismem, však přejíždí signály vestibulárního systému a potvrzuje probíhající zatáčku, protože vnější vizuální svět se otáčí, jak zatáčka pokračuje. Pokud však existují špatné vizuální podněty, může pilot zažít pocit, že se již neotáčejí. Je-li spirálové otáčení nebo otáčení zastaveno a je ovlivněn návrat k přímému a vodorovnému letu, mohou půlkruhové kanály zaregistrovat změnu úhlové rychlosti související se zastavením otáčení. To pak může v pilotovi vytvořit iluzi, že se nyní otáčejí opačným směrem než původní zatáčka. Tento silný pocit falešné rotace může při absenci dobrých vizuálních podnětů vést k opětovnému vstupu do původního obratu nebo roztočení. To může zrušit falešný pocit rotace, přičemž pilot nyní věří, že letadlo letí rovně a ve správné úrovni, ale ve skutečnosti se znovu dostali do původní zatáčky nebo rotace a v důsledku toho ztrácejí výšku. Pokud nebude tato nebezpečná situace rozpoznána a nebudou provedena vhodná opatření k zotavení, nevyhnutelně dojde

k nárazu na zem. Spojení mezi zrakovým a vestibulárním systémem (jak již bylo zmíněno dříve) je během somatogyrální iluze velmi zřejmé. Po zotavení ze spinu nebo prodloužené spirálové zatáčky signalizují půlkruhové kanály falešný pocit rotace v opačném směru.



Obrázek 7: Graveyard spin a Graveyard spiral [56].



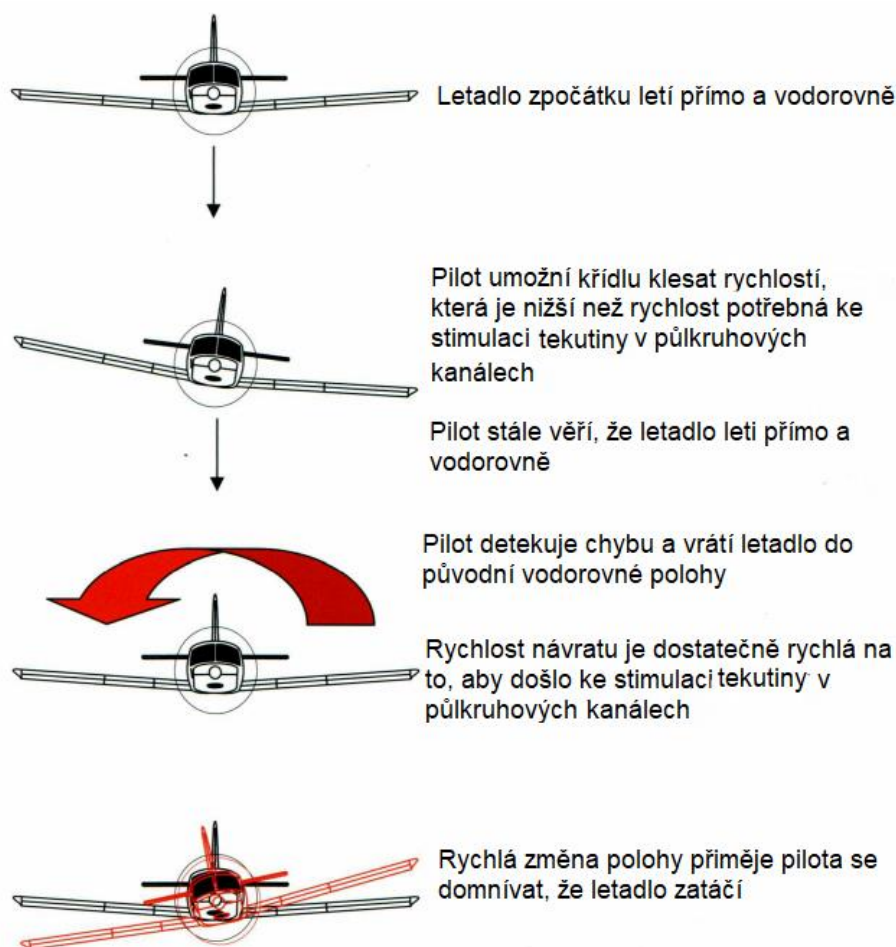


Tento vestibulární vstup pak může vyústit v sérii nedobrovolných oscilačních pohybů očí známých jako nystagmus. To pak může vést k okulogyrální iluzi, kde se zdá, že se zorné pole pohybuje, a tím má tendenci posilovat falešný pocit rotace. Ve skutečnosti pak pilot získá zjevně potvrzující vizuální důkaz rotace, což může vést pilota k opětovnému vstupu do původní zatáčky. Tento kombinovaný efekt činí tuto iluzi extrémně nebezpečnou. Vestibulární stimulace obecně vede k vizuálním změnám, jako je nystagmus. Vizuální efekty vestibulární stimulace odrážejí velmi těsné spojení mezi těmito dvěma systémy, které jsou pro normální orientaci kriticky důležité. Jakmile pocit nystagmu vyprchá, mohou být pilotovi k dispozici jasné vizuální informace. Pohled na nástroje může odhalit, že původní zatočení letadla bylo opět zadáno. Pilot se pak může vzpamatovat, ale při tom může znovu získat falešný pocit rotace a znovu podlehnout iluzi neúmyslným opětovným vstupem do původní zatáčky. Nystagmus se pak může znovu objevit a až když vyprchá, pilot uvidí, co se děje, a pak se vzpamatuje. Je však vidět, že tento cyklus otáčení, zotavování, otáčení a zotavování může pokračovat až do dopadu na zem, přičemž pilot zažívá několik epizod iluze. Pilot může být samozřejmě zcela dezorientovaný a zmatený a ztratit veškerou kontrolu nad letadlem. Utažení zatáčky může také zhoršit pocit falešné rotace. Jedná se o obzvláště nebezpečnou iluzi, která si vyžádala mnoho životů [21, 50].

### 2.6.3 Iluze náklonu

Náklon byl uznán jako nejběžnější forma dezorientace [51, 52, 53]. Pokud pilot během své kariéry zažije dezorientaci, téměř jistě tuto formu. Naštěstí epizody náklonů mají obecně menší četnost. Naklonění se projevuje falešným pocitem převrácení. Je to velmi běžné a je tak nazýváno, protože může způsobit, že se piloti nakloní na druhou stranu, aby zrušili falešný pocit náklonu na stranu opačnou. K naklonění může dojít v podmínkách dobrých vizuálních podnětů. Typická situace, ve které může dojít k předklonu, zahrnuje pilot letícího letadla, upraveného pro přímý a vodorovný let. Z jakéhokoli důvodu (náráz větru atd.) Může jedno křídlo poklesnout a letadlo pak může vstoupit do mírné zatáčky. Toto otočení je rychlostí úhlového zrychlení menší než práh pro aktivaci půlkruhových kanálů. Výsledkem toho je, že pilot (který je obecně v kokpitu hlavou dolů, například studuje mapu) věří, že jsou stále původním směrem a ve stejné výšce, zatímco letadlo je v zatáčce. Jakmile se pilot podívá nahoru a ven z letadla nebo na přístroje, rozpozná neúmyslný obrát a provede okamžitá opatření k obnovení skutečného přímého a vodorovného letu. Zásadním prvkem zde však je, že návrat k přímému a vodorovnému letu se obecně provádí rychlostí

úhlového zrychlení větší, než je práh pro aktivaci půlkruhových kanálů. První vstup, který kanály dostanou, je, když se letadlo vrátí k přímému a vodorovnému letu. Kanály však nyní registrují zjevnou změnu z přímého a vodorovného letu na zatáčku v opačném směru. Pokud tedy byla počáteční neúmyslná zatáčka doleva, pilot nyní sedí v rovném a rovném letadle, přičemž kanály nyní signalizují zjevnou zatáčku doprava. Aby se kabina letadla skutečně srovnala do původní rovné a vodorovné polohy, letadlo se nakloní ve směru počáteční zatáčky (v tomto případě doleva). Může to znít bizarně – pilot vidí letadlo letící rovně a ve správné výšce a zároveň tomu odpovídá i jeho pocit, ale uvědomuje si, že se přiklání k jedné straně. Naštěstí, pokud je tato situace zvládnuta, falešný pocit náklonu se ztratí a sklon k jedné straně již není zapotřebí. Je však zřejmé, že existuje potenciál pro rozvoj dezorientace a zmatku a v nejhorším případě se pilot může stát neschopným stroj ovládat a ztratit kontrolu nad letadlem [50]. Jak taková iluze nastane můžeme vidět na obrázku 6.



Obrázek 8: Průběh iluze náklonu [6]



## 2.6.4 Coriolisova iluze

Coriolisův fenomén (také známý jako zkřížená stimulace) je závažný pocit pádu způsobený pohybem hlavy letadla mimo rovinu otáčení, současně stimulující jednu sadu půlkruhových kanálků a deaktivující další sadu. Coriolisova iluze se projevuje velmi silným a nepříjemným pocitem pádu, který má často rychlý nástup. Pád může být natolik závažný, že může vést k pocitu nevolnosti. Iluze je způsobena tím, že pilot přemístí hlavu ven z roviny otáčení letadla. K tomu může dojít, když předkloníte hlavu dolů (abyste se podívali například na mapu), nebo zakloníte nahoru (pro pohled na overhead panel) nebo jí nakloníte do strany (pro pohled z okna kokpitu). To vytváří téměř nesnesitelný pocit, že se letadlo kloní, klopí, a zatáčí najednou. Tato iluze může pilota rychle dezorientovat a může ztratit kontrolu nad letadlem [21]. Například pilot může provádět koordinovanou zatáčku v rámci svého přiblížení k zemi. Kanály v rovině otáčení této zatáčky budou signalizovat úhlové zrychlení, ale další dvě sady kanálů, sedící v různých osách, nebudou signalizovat nic. Pokud pak pilot pohne hlavou, jako je pohled zpět do zatáčky, dolů do kokpitu nebo nahoru do nebe (jako při hledání jiného provozu), výsledkem je to, co je známé jako křížová stimulace půlkruhových kanálků. Soubor kanálků, které původně signalizovaly zatáčku, jsou nyní mimo rovinu otáčení zatáčky a signalizují zpomalení. Současně se do této roviny otáčení v důsledku pohybu hlavy přivede nová sada kanálů a tyto kanály signalizují zrychlení. Mozek poté přijímá dvě sady protichůdných signálů, jedna signalizující zrychlení a druhá signalizující zpomalení. Výsledkem je komplexní série pádových pocitů, které pilot najednou zažívá, což může být extrémně silné a dezorientující. Stupeň pocitu pádu je spjat s velikostí počátečního obratu, směru pohybu hlavy a rychlosti, kterou se pohyb hlavy provádí [50].

## 2.6.5 Iluze nadměrného G

Iluze nadměrného G je potenciálně velmi nebezpečnou iluzí, zvláště pokud k ní dochází během operací s nízkou výškou a vysokou rychlostí [49]. V takovém nastavení může iluze vést k chybným řídicím vstupům, což může být katastrofální vzhledem k omezenému času, který je k rozpoznání a zotavení z iluze možný. Iluze nadměrného G je komplikovaný jev, který zahrnuje více vstupů do vestibulárního systému. Z praktického hlediska se může pilot, který vstoupí do zatáčky na úrovni G větší než normální (+1 Gz3), a poté se ohlédne



zpět do zatáčky, setkat s jevem, kdy má pocit, že se počáteční úhel sklonu zmenšuje. Během obratu o +2 Gz může pilot zaznamenat zjevný náklon směrem k zemi, pod úhlem alespoň 10 až 20 stupňů. Aby byl zachován požadovaný úhel náklonu, může pilot aplikovat více náklonu, přičemž nezamýšleným důsledkem je významný fenomén přesahu. To pak může vést k dramatické ztrátě nadmořské výšky a/nebo zastavení, což může vést k nárazu na zem, pokud pilot situaci rychle nerozpozná a rychle se z ní nevzpamatuje [50].

## 2.7 Přehled nehod ve spojitosti s prostorovou dezorientací

V lednu 2004 havaroval Boeing 737-300, let Flash Airlines 604, pár minut po startu z egyptského letiště Šarm aš-Šajchu. Odlet se uskutečnil za temné noci nad Rudým mořem a bylo zde jen málo, pokud vůbec nějaké, viditelných vizuálních bodů, které by se daly použít k orientaci. Kapitán (Pilot Flying, PF) zahájil dlouhou levou stoupající zatáčku, ale v této zatáčce letoun ve skutečnosti provedl pomalý přechod z levého náklonu do pravého náklonu (20°, pomalu a postupně).

První důstojník (FO) informoval kapitána, že odbočují doprava (přepis z černé skříňky):

**FO:** Odbočujeme do prava, pane.

**Kapitán:** Cože?

**FO:** Letadlo odbočuje doprava.

**Kapitán:** Odbočuje doprava? Jak odbočuje doprava?

V tomto okamžiku kapitán stále pokračoval v náklonu doprava. Letoun se nakonec naklonil asi o 110° doprava, než byly provedena podstatná nápravná opatření v opačném směru. To už bylo příliš pozdě na to, aby se zabránilo nárazu do Rudého moře. Během této události se zdálo, že kapitán nebyl schopen určit, jakým směrem má naklonit sloupek řízení, aby obnovil ustálený horizontální let – v jednom okamžiku se dokonce pokusil zapojit autopilota, aby získal pomoc při srovnání. Vyšetřování dospělo k závěru, že pilot byl prostorově dezorientovaný [57].

Tato událost a závěry vyšetřování byly překvapivé pro mnoho bezpečnostních expertů studujících komerční proudovou dopravu: prostorová dezorientace (SD) nebyla

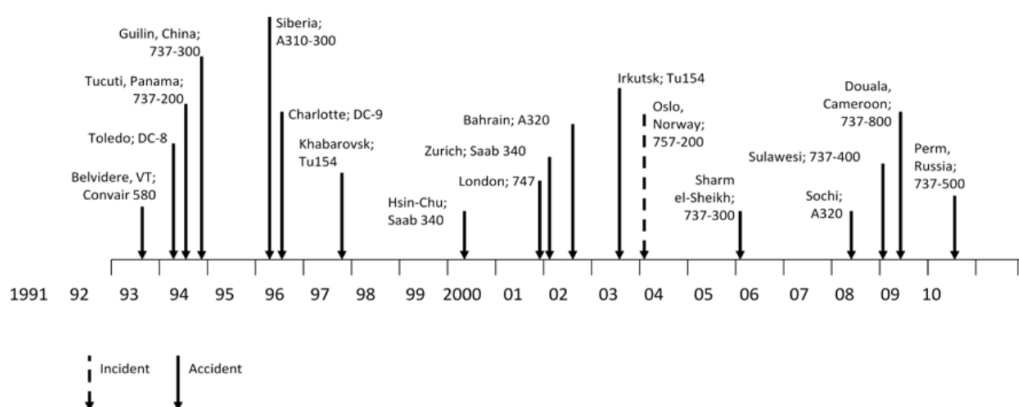


považována za významné nebezpečí v civilním provozu. Bylo známo, že SD představuje riziko ve vysokorychlostních, vysoce manévrovatelných vojenských letadlech, ale v relativně stabilní světě komerčních proudových transportů SD nebyl považován za hrozbu.

V tomto okamžiku se zdálo, že událost společnosti Flash Air byla „jednorázovou“ událostí. V roce 2007 se bohužel staly další dvě podobné nehody 737 (Adam Air v Sulawesi; Kenya Airways v Douala, Kamerun).

V roce 2008 se Boeing blíže podíval na vliv SD při nehodách v obchodní dopravě. Pro tento kontext se stanovila jasná definice SD a hledaly se nehody a závažné incidenty, které této definici vyhovují. V některých případech zprávy o nehodách, zejména zprávy z doby před rokem 1990, neposkytovaly dostatečné podrobnosti k jednoznačnému zařazení události do kategorie SD. Toto rozsáhlé vyhledávání však identifikovalo 16 nehod souvisejících s SD a jednu velkou událost v období 1991-2007; zhruba jedna událost/rok (viz obrázek 9). Také v roce 2008 došlo k další nehodě 737 (Aeroflot Nord v Permu v Rusku), která měl stejný podpis PF v souvislosti s neschopností udržet úroveň křídel v rovnovážné poloze. Od roku 2008 jsou další nehody a incidenty po celém světě spojeny s SD - např. Afriqiyah A330 v Tripolisu v Libyi v květnu 2010 a Scat CRJ-200 poblíž Almaty v Kazachstánu v lednu 2013 [37].

## SD Events – Commercial Transports



Obrázek 9: Přehled nehod souvisejících s SD na časové ose



## 2.7.1 Ztráta kontroly nad letadlem ve spojitosti s SD

Ztráta kontroly (LOC) je hlavní příčinou nehod dopravních letadel. Přestože tyto studie uváděly prostorovou dezorientaci (SD) jako příčinu nebo faktor, nikdo z nich ji dále neanalyzoval. Jak bylo vysvětleno již v předchozích kapitolách, SD lze definovat jako neschopnost pilota udržet povědomí o jeho (a letadlové) orientaci, poloze a trajektorie vzhledem k Zemi. Záměrně používáme slovo „neschopnost“ namísto „selhání“, aby se zabránilo negativní konotaci [30].

Newman et al. v analýze [58] prozkoumal 278 nehod LOC od autorů Belcastro et al. [59] a zjistili 40 nehod v souvislosti s SD. Newman [30] v nové studii rozšiřuje tyto údaje a zkoumá výsledky těchto neštěstí, které se týkají SD v dopravních letadlech. Byla zde zkoumána každá zpráva o nehodě, zda neobsahuje důkazy o SD. Z 549 nehod se zjistilo, že 38 nehod mělo SD jako jejich primární příčinu, 56 mělo SD jako přispívající faktor a 458 byly nehody LOC bez zapojení SD. Z 94 SD neštěstí došlo k 6 incidentům, 7 vážným incidentům, 6 neúrazovým nehodám, 4 smrtelným nehodám a 71 smrtelným nehodám s 3078 smrtelnými následky [60, 61]. V kontextu této analýzy číslo smrtelných nehod zahrnuje i pozemní úmrtí.

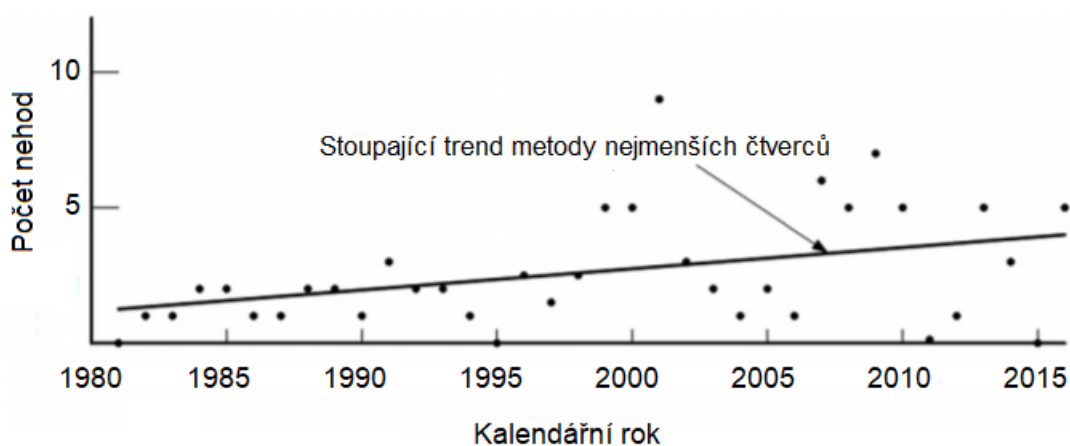
Pro účely této analýzy byla prostorová orientace rozdělena na 2 typy (namísto 3). Typ I, kde pilot neví, že ztratil orientaci a typu II, kde si je vědom, že orientace byla ztracena. Z 94 neštěstí SD bylo pravděpodobně 64 typu I a 15 typu II SD nehod. Došlo k 15 nehodám, které měly nedostatečné informace k rozhodnutí, jestli se jedná o typ I nebo II. V této studii byl typ SD založen výhradně na povědomí pilota. K necelým 3 % nehod SD došlo za denních vizuálních podmínek (VMC), zatímco za nočních přístrojových podmínek (IMC) došlo v 55 % případech. K 18 % došlo za nočních vizuálních podmínek a 24 %, které se staly během denních vizuálních podmínek.

Úmrtí jsou extrémnější: k méně než 1 % úmrtí došlo za denních vizuálních podmínek a 70 % během nočních přístrojových podmínek. Bylo zde 15 % nehod, které se staly během nočních vizuálních podmínek a 14 % nehod, které se staly za podmínek VMC ve dne.

Tabulka I ukazuje, že rozdělení 94 neštěstí SD podle fáze letu se liší od 458 nehod LOC bez účasti SD. Jak je vidět, SD způsobuje více neštěstí během stoupání (18% vs. 11%), ale relativně méně úmrtí (18% vs. 22%) než LOC. To neplatí pro počáteční stoupání, obvykle do 1500 ft [60, 61], kde SD má méně čísel i úmrtí než LOC (16% vs. 31%)

Tabulka I				
Fáze letu	Procenta nehod		Procenta úmrtí	
	SD	LOC	SD	LOC
Počáteční stoupání	16 %	31 %	9 %	24 %
Stoupání	18 %	11 %	18 %	22 %
Let v hladině	21 %	17 %	27 %	31 %
Klesání	4 %	5 %	3 %	4 %
Přiblížení	14 %	23 %	18 %	13 %
Přistání	2 %	8 %	-	2 %
Go-around či nezdař. Přiblížení	21 %	4 %	21 %	4 %
Další	3 %	1 %	3 %	1 %

Obrázek ukazuje chronologický trend prostorově-dezorientačních nehod. Jak se u relativně vzácných událostí očekává, dochází k značnému meziročnímu rozptylu. Přesto se celková trendová linie mírně zvyšuje. Expozice (počet letů nebo letové hodiny) bohužel není k dispozici pro mnoho celosvětových údajů, zejména pro lety mimo leteckou společnost. Lze tedy říct, že počet nehod SD se zvyšuje.



Obrázek 10: Stoupající trend nehod SD

Tabulka II ukazuje výsledky těch nehod, způsobených ztrátou kontroly. Součástí 47 „neřízených sestupů na země“ je 14 klasických spirálových ponorů do povrchu. Z SD neštěstí, 79 % má za následek katastrofický výsledek. Přibližně 6 % má za následek bezproblémové přistání.



<b>Tabulka II</b>				
	<b>Nehody</b>		<b>Úmrtí</b>	
<b>Výsledky prostorové dezorientace</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>
Nekontrolovaný sestup do povrchu	47	50,00 %	2128	69,40 %
Srážka s překážkami nebo terénem	22	23,40 %	862	28,10 %
Rozpad za letu	5	3,20 %	76	2,50 %
Nezvyklá poloha	8	8,5		
Přelet dráhy	2	2,10 %		
Oscilace stoupání nebo náklonu letadla	1	1,10 %		
Odchylna nadmořské výšky	1	1,10 %		
Pokles pod minimum	1	1,10 %		
Přistání mimo letiště	1	1,10 %		
Nebezpečná ztráta výšky	1	1,10 %		
Bezpečné přistání	5	1,10 %		
Celkem	94	100 %	3066	100 %

Tabulka III ukazuje počáteční příčinu. Nehoda má jednu iniciační příčinu a sloupce jsou součtem celkových součtů. Přibližně 40 % nehod SD bylo způsobeno dezorientací pilota. Zbytek měl nějaké další iniciační spouštěče, z nichž nejběžnější je například sensorická chyba.

<b>Tabulka III</b>				
	<b>Nehody</b>		<b>Úmrtí</b>	
<b>Primární příčina nehod z prostorové dezorientace</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>
Prostorová dezorientace	38	40,40 %	1328	43,30 %
Přístroje/Senzory	27	28,70 %	785	25,50 %
Palubní posádka	15	16,90 %	417	13,60 %
Požár za letu/Kouř	2	2,10 %	161	5,30 %
Zastavení letadla	1	1,10 %	145	4,70 %
Organizační faktory	1	1,10 %	70	2,30 %
Nárazy větru, turbulence apod.	2	2,10 %	58	1,90 %
Navigační systémy	1	1,10 %	50	1,50 %
Počasí (Viditelnost atd.)	1	1,10 %	21	0,70 %
Elektrické systémy	2	2,10 %	17	0,60 %
Palubní kontrolky nebo autopilot	2	2,10 %	12	0,40 %
Námraza	2	2,10 %	2	0,10 %
Celkem	94	100 %	3066	100 %





Tabulka IV ukazuje faktory, které k nehodě přispívají. Nutno dodat, že neštěstí může mít více faktorů, které nehodám přispívají. Jednou z technik vyvinutých Belcastrem et al. [59], byl vývoj sekvencí prekurzorů, které nakonec vedly k nehodám.

<b>Tabulka IV</b>				
	<b>Nehody</b>		<b>Úmrtí</b>	
<b>Faktory nehod způsobených SD</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>	<b>Počet</b>	<b>Procenta</b>
Nesprávné obnovení polohy	19	20,20 %	847	27,60 %
Zapojení pilota	29	30,9 %	810	26,40 %
Přístroje/Senzory	27	28,70 %	785	25,60 %
Pád (ztráta vztlaku)	10	10,60 %	668	21,80 %
Palubní kontrolky	10	10,60 %	367	12,09 %
Nárazy větru, turbulence apod.	3	3,20 %	58	1,90 %
Námraza	3	2,10 %	4	0,10 %

Při kontrole bylo zaznamenáno několik častých scénářů. U dopravních letadel zahrnují významné scénáře SD následující: ztráta povědomí o stavu letadel při nezdařilém přiblížení či go-aroundu (ASAGA) [63] nebo odletu; zmatený pitot-statické zmatení [64]; nebo pokus o vzlet s nesprávnou konfigurací. Ztráta povědomí o stavu letadel při nezdařilém přiblížení nebo odletu je v poslední době běžnější, zejména s příchodem velkých dálkových dvoumotorových transportů. Taková letadla mají mnohem větší výkon než předchozí letadla se třemi nebo čtyřmi motory. To platí zejména po dlouhém letu s nižší hmotností v důsledku spalení paliva. Dopravní letouny mají obvykle pro každého pilota samostatné pitot-statické systémy s volitelným třetím systémem, který je k dispozici jako záložní. Některá letadla upozorňují na rozdíly mezi těmito dvěma systémy. Bez takové takové funkce mohou být piloti z výkonu letounu zmatení [64]. Pokud se posádka pokusí o vzlet s nesprávným nastavením klapek nebo s nesprávně nastaveným trimem, může být pilot krátce po vzletu zmaten z abnormálních řídicích sil nebo neobvyklého výkonu. Některá letadla poskytují varování, pokud k tomu dojde, protože se na začátku vzletu zvyšuje tah. Některé scénáře SD jsou pravděpodobnější v nepřepavních operacích (např. v lehkých letadlech nebo vrtulnicích): neplánované či zhoršující se podmínky podle přístrojů během letu za viditelnosti; nedostatek dovedností létání podle přístrojů; nesprávné vnímání vizuální scény, nebo rozptýlení. Tyto scénáře jsou pravděpodobnější v nepřepavních operacích, protože přepravní jsou obvykle provozovány podle pravidel letu podle přístrojů s přísnějšími omezeními než nepřepavní operace.



## 3 Metody

Tato kapitola se věnuje vestibulárním iluzím a s tímto fenoménem souvisejícím experimentem. Popisuje metody, které byly při experimentu použity, a v neposlední řadě analýzu dat a způsob jejich hodnocení.

### 3.1 Subjekty

Subjekty v tomto experimentu byly v letectví aktivní a zkušení piloti, kteří neměli předchozí zkušenosti s dezorientačním simulátorem GYRO IPT-II. Všech 16 subjektů se přihlásilo dobrovolně, což potvrdili podpisem formuláře před zahájením experimentu. Subjekty disponují v rámci své odbornosti a mnohdy i zaměstnáním 1. třídou zdravotní způsobilosti, zrak a sluch tudíž měli na normální úrovni. Věk subjektů se pohyboval mezi 23-75 lety. Měření se zúčastnili muži i ženy ze všech druhů komerční letecké dopravy.

### 3.2 Procedury

Pro účely tohoto projektu došlo k vytvoření třech letových profilů, které odpovídaly a byly založeny na klasických osnovách simulátorového IFR výcviku. Každý tento profil trval půl hodiny a probíhaly na mezinárodním letišti Daniela K. Inouye (IATA: HNL, ICAO: PHNL; Daniel K. Inouye International Airport). Profily sloužily ke zkoumání prostorových iluzí za letu. Zkoumaly se konkrétně somatogravická, somatogyrální, Coriolisova a iluze náklonu.

Co se týče samotných profilů, první zahrnoval tu část IFR simulátorového výcviku, kde se trénuje let podle přístrojů, klesání a stoupání, zatáčení, let vodorovně, změna rychlostí letounu apod. Iluze (tak, jako ve všech experimentálních letových profilech) byly naplánovány tím způsobem, aby nastávaly po dostatečné časové prodlevě. Tím se zajistilo co nejmenší ovlivnění navzájem. Podstata prvního profilu byla taková, že instrukce přicházely dle specifických časů a podmínek, např. překročení parametru stoupání, čímž se spustila daná iluze. Podrobnosti prvního profilu jsou popsány na obrázku 2.1, hlasové povely jsou pod označením DF\_x\_y\_z detailněji popsány ve sloupci Note.



Druhý letový profil přesunul svoji pozornost na část výcviku, kde pilot provádí za pomoci mapy s postupy mj. holding nebo base turn a létá pomocí radionavigace, přičemž druhý profil není součástí této bakalářské práce, proto zde nebude blíže popsán. Mapy, které byly dány k dispozici pilotům, byly pozměněny tak, aby vyhovovaly jak simulátoru, tak povaze experimentu.

Třetí profil se věnuje té části IFR výcviku na simulátoru, kde pilot (majíc opět k dispozici mapy, avšak trochu pozměněné od těch v profilu druhém) předvede, zda je schopen provést předchozí dovednosti, a sice provést let od úspěšného vzletnutí do přistání.

Tento profil započal na dráze 04R. Pak měl pilot nalétnout na dráhu R-125 směrem od VOR HNL, a aby nedošlo k plýtvání časem, pilot neletěl celou naplánovanou odletovou trať, nýbrž dostal instrukce pravou zatáčkou letět zpět na VOR HNL – po jeho minutí se pak měl vydat směrem na ILS approach Rwy 04R. Poté měl provést go-around v DA(H) a po neúspěšném přiblížení pokračovat v letu na bod ALANA, kde měl vyčkávat. Potom, co pilot provedl vyčkávání, mohl subjekt pokračovat na NDB EWABE – let tímto končil.

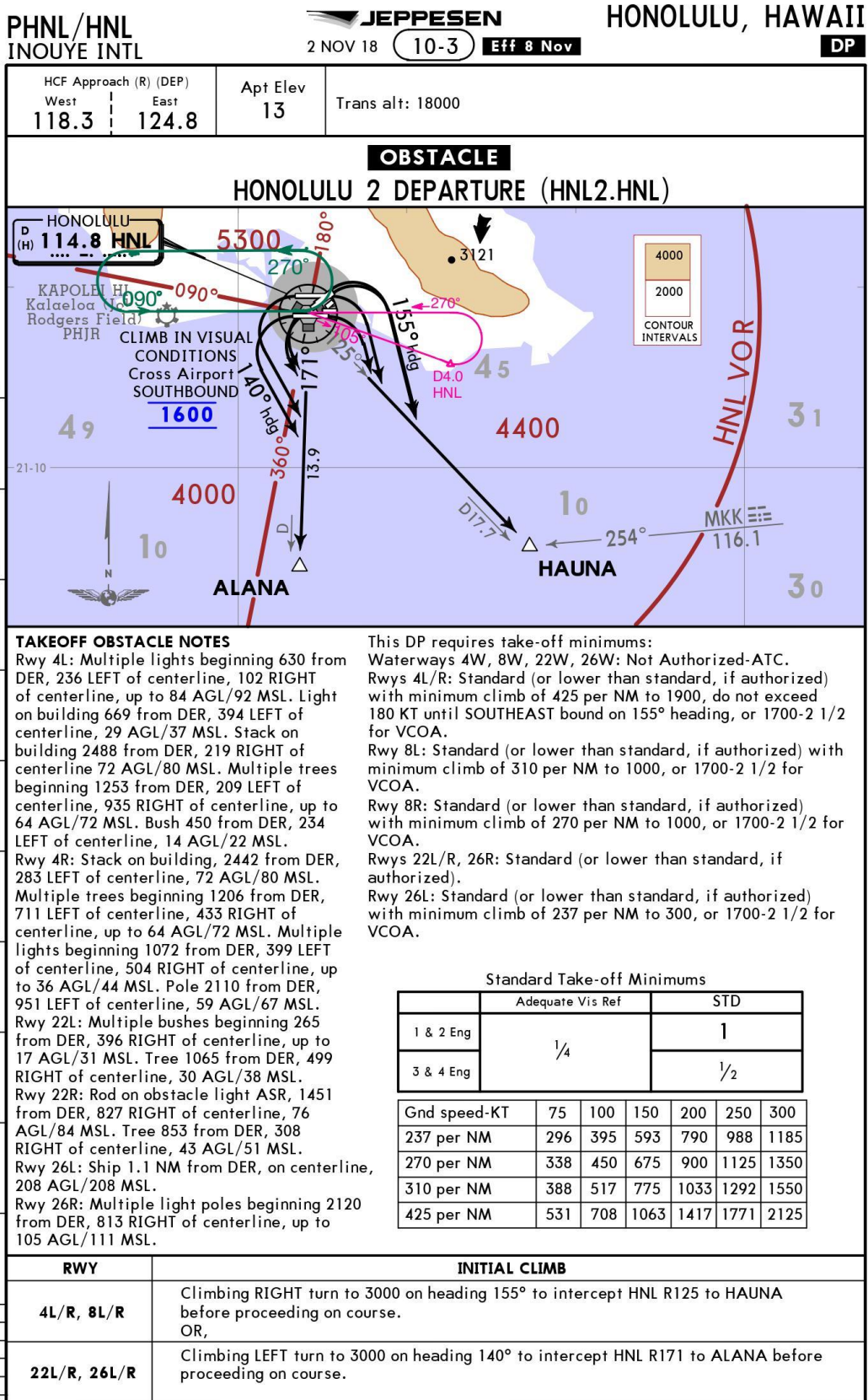
Iluze přicházely v určeném pořadí, kdy první (somatogyrální) nastala po tom, co měl pilot po odletu zatočit zpět na VOR HNL. Při přiblížení, zatímco pilot prováděl turn, přišla na řadu iluze náklonu, v DA(H) byla naprogramována somatogravická iluze a ke Coriolisově iluzi došlo ve vyčkávání nad bodem ALANA, po první zatáčce na trať odletu.

Odletová mapa byla v podstatě stejná jako v profilu druhém, akorát neměla vyznačený baseturn a vyčkávání. Druhá mapa, kterou měl pilot k dispozici, tedy mapa na přiblížení, je zobrazena na obrázku. Třetí profil je podrobněji rozebrán na obrázku.

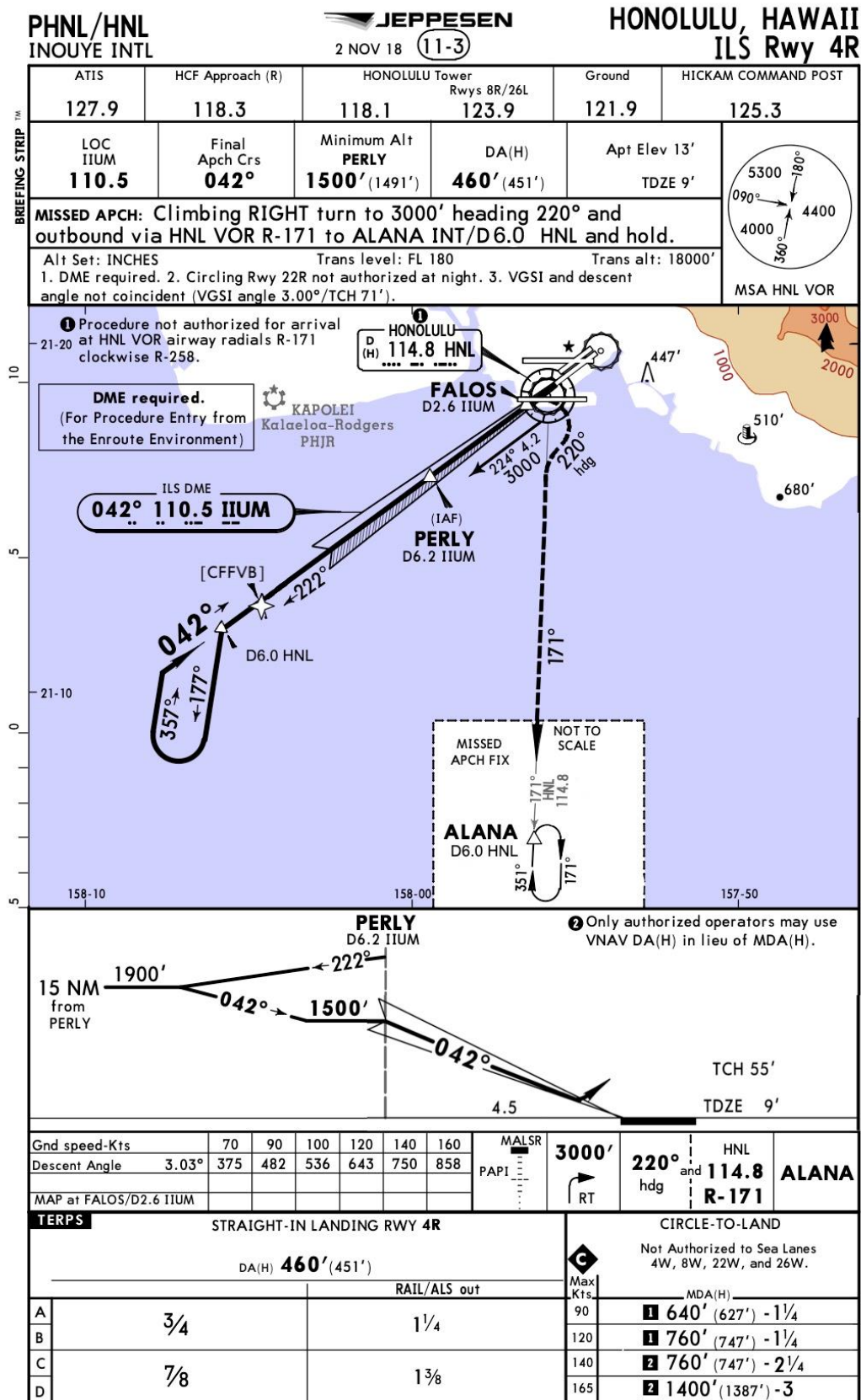


1	2	3	4	ID podmíněk	Poznámky/Note
		0		1_1	
0:20	20	20	5	DF_1_1_1	Oscar Kilo Romeo Alpha Lima, turn left heading 0 9 0
1:20	55	80	6	DF_1_1_2	Oscar Alpha Lima, descend 2 thousand 5 hundred feet altitude, maintain five hundred feet per minute
2:40	74	160	3	DF_1_1_3	Oscar Alpha Lima, turn left heading 3 6 0
		163	1	HyperJMP to SGY	
3:43	60	224	3	DF_1_1_4	Oscar Alpha Lima, turn left heading 1 1 0
		227	1	Roll < -5	
		228	40,1	Yaw -60; 1.5	SGY L
	0,9	269	1	Heading < 210	
4:31	5	275	3	DF_1_1_6	Oscar Alpha Lima, level off and fly present heading
		278	1	Roll > -15	
		279	5,1	Yaw 0; 12	SGY STOP
5:25	46,9	331	6	DF_1_1_7	Oscar Alpha Lima, climb altitude 3 thousand feet, maintain rate of climb 7 hundred feet per minute
6:10	39	376	3	DF_1_1_8	Oscar Alpha Lima, turn left heading 0 3 0
7:30	77	456	5	DF_1_1_9	Oscar Alpha Lima, make a right 3 60, maintain 45 degree bank turn
8:35	60	521	6	DF_1_1_10	Oscar Alpha Lima, contact Honolulu Approach, 1 1 8 decimal 3
		527	1	HyperJMP to LNS	
9:07	26	554	9	DF_1_1_11	Oscar Kilo Romeo Alpha Lima, starting from this heading, make a right, turn 20 degree banked, level turn and hold the turn until I'll tell you to roll out
		563	1	Roll > 5	
		564	11	Roll 3; 0.3; 0.3	LNS R
	-11	564	32,1	Yaw 16; 0.5	
	0,9	597	1	Heading > 270	
9:49		598	4	DF_1_1_12	Oscar Alpha Lima, roll to wings level and maintain your heading
		602	1	Roll < 15	
		603	1,9	Roll -3; 4; 10	LNS STOP
	-1,9	603	8,1	Yaw 0; 2	
	-6,2	604,9	17,1	Roll 0; 0.2; 0.1	
12:15	74	696	3	DF_1_1_13	Oscar Alpha Lima, reduce speed to eight zero knots
12:40	52	751	6	DF_1_1_14	Oscar Alpha Lima, turn left heading 1 4 0 and descend altitude 2 thousand 5 hundred feet
14:00	74	831	5	DF_1_1_15	Oscar Alpha Lima, Contact Honolulu Tower 1 1 8 decimal 1
14:30	25	861	4	DF_1_1_16	Oscar Alpha Lima, increase speed to one zero zero knots
15:20	45	910	3	DF_1_1_17	Oscar Alpha Lima, turn left heading 0 6 0
		913	1	HyperJMP to COR	
16:14	51	965	5	DF_1_1_18	Oscar Alpha Lima, turn right heading 2 4 0 and climb altitude 3 thousand feet
		970	1	Roll > 10	
		971	30,1	Yaw 60; 2	COR R
16:54	-9,1	992	3	DF_1_1_19_5	Oscar Alpha Lima, turn right heading 3 6 0
	7	1002	1	Heading > 220	
16:57		1003	4	DF_1_1_20	Oscar Alpha Lima, can you check that the COM speaker is off ?
17:01		1007	3	DF_1_1_21	It is on the left side console towards the rear.
		1010	1	Heading > 5	
		1011	1	Roll < 15	
		1012	60,1	Yaw 0; 1	COR STOP
18:10	6,9	1079	4	DF_1_1_22	Oscar Alpha Lima, turn left heading 2 0 0
18:40	27	1110	7	DF_1_1_23	Oscar Alpha Lima, descend altitude 1 thousand 6 hundred feet and maintain rate of descent 5 hundred feet per minute
22:20	213	1330	3	DF_1_1_24	Oscar Alpha Lima, turn left heading 1 4 0
23:20	57	1390	5	DF_1_1_25	Oscar Alpha Lima, contact Honolulu approach, 1 2 4 decimal 8
		1395	1	HyperJMP to SGR	
23:55	30	1426	7	DF_1_1_26	Oscar Kilo Romeo Alpha Lima, descend altitude 5 hundred feet, at 6 5 knots, flaps full
		1433	1	Altitude < 550	
		1434	1	Airspeed < 70	
24:03		1435	5	DF_1_1_27	Oscar Alpha Lima, Go around and climb straight ahead attitude 3 thousand feet
		1440	1	Airspeed > 70	
		1441	6,1	Pitch 12 4 1.3	SGR
		1447	15,4	Pitch 0; 1; 0.3	

Obrázek 11: První profil



Obrázek 12: Odletová mapa



Obrázek 13: Mapa na přiblížení



1	2	3	4	ID podmíněk	Poznámky/Note
		0		3_1	
0:27	27	27	7	DF_3_1_1	OSCAR KILO ROMEO ALFA LIMA runway 0 4 cleared for take off, climb altitude 3 thousand feet
		34	1	Heading > 160	
3:15		35	5	DF_3_1_2	OSCAR ALFA LIMA contact Honolulu Approach 1 2 4 decimal 7
3:30	15	55	4	DF_3_1_3	OSCAR KILO ROMEO ALFA LIMA, good day, radar contact
		59	1	Heading > 140	
		60	1	Altitude > 2800	
5:58	14	75	5	DF_3_1_4	OSCAR ALFA LIMA turn Right inbound Hotel November Lima V O R
		80	1	Roll > 5	
		81	40,1	Yaw 60; 1.5	SGY R
	0,9	122	1	Roll < 8	
		123	5,1	Yaw 0; 12	SGY STOP
7:48	44,9	173	9	DF_3_1_5	OSCAR ALFA LIMA after passing Hotel November Lima V O R, cleared for localizer approach runway 0 4 right, report established.
		182	1	Heading <> 227 237	
		183	1	HyperJMP to LNS	
		184	1	Distance > 6 from VOR	
		185	1	Heading <> 182 192	
	40	226	1	Roll > 5	
		227	11	Roll 3; 0.3; 0.3	LNS R
	-11	227	32,1	Yaw 16; 0.5	
	0,9	260	1	Roll < 8	
		261	1,9	Roll -3; 4; 10	LNS STOP
	-1,9	261	8,1	Yaw 0; 2	
	-6,2	262,9	17,1	Roll 0; 0.2; 0.1	
		280	1	HyperJMP SGR	
		281	1	Altitude < 550	
		282	1	Pitch > 5	
		283	6,1	Pitch 12 4 1.3	SGR
		289,1	15,4	Pitch 0; 1; 0.3	
	0,5	305	1	HyperJMP to COR	
		306	1	Distance > 8 from VOR	
		307	1	Distance < 7 from VOR	
		308	1	Roll > 5	
		309	30,1	Yaw 60; 2	COR R
	0,9	340	1	Heading > 91	
28:20		341	9	DF_3_1_6	OSKAR ALPHA LIMA, this is Joe, could you please check you have the speaker off? The button is located on the left panel slightly behind you
		350	1	Roll < 8	
		351	60,1	Yaw 0; 1	COR STOP
28:48	4,9	416	4	DF_3_1_7	OSCAR ALFA LIMA climb altitude 4 thousand feet
		420	1	Distance > 8 from VOR	
31:08	55	476	6	DF_3_1_8	OSCAR ALFA LIMA, after passing ALANA, continue direct Hotel November N D B
31:53	55	537	8	DF_3_1_9	OSCAR ALFA LIMA after passing Hotel November N D B, cleared for localizer approach, runway 0 8 Left

Obrázek 14: Třetí profil

### 3.3 Vybavení

Experiment byl prováděn na dezorientačním simulátoru GYRO IPT-II na Ústavu leteckého zdravotnictví v Praze (ULZ). Simulátor je interaktivní, flexibilní a multifunkční tréninkový systém navržený pro splnění všech výcvikových požadavků pro všechny piloty, od začátečníků až po úplné profesionály. Skládá se z jednomístné pilotní kabiny namontované na propracovanou pohyblivou základnu – viz obrázek. Zařízení může sloužit začínajícím pilotům v IFR výcviku, ale i zkušeným letcům pro výcviku prostorové dezorientace.

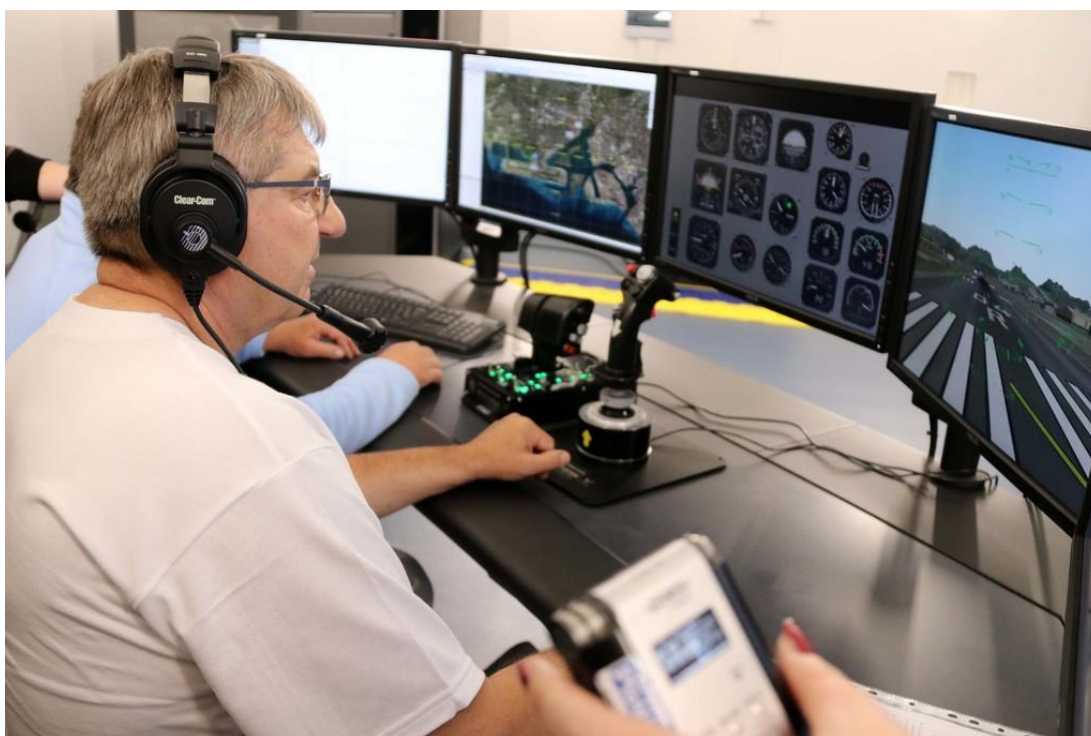


Obrázek 15: Dezorientační simulátor Gyro IPT II.

Kabina a softwarové vybavení je konfigurováno tak, aby bylo možné demonstrovat letové parametry a přístrojové desky různých typů letadel (od cvičných letadel, přes vrtulníky až po stíhačky). V kabině je sedadlo pilota s pásy, interaktivním systémem zpětné vazby, přístrojovou deskou a realistickou distribucí zvuku. Unikátní základna se 6stupňovou volností pohybu (4 + 2) umožňuje demonstraci výšky, náklonu, bočení a výšky kabiny a také kombinace výšky + klopení a výšky + náklonu. Tyto kombinované pohyby jsou regulovány pokročilým systémem řízení pohybu, který je schopen generovat pokyny pro přesné víceosé pohyby, které vytvářejí potřebná lineární a úhlová zrychlení. Zrychlení lze



generovat v lidských detekovatelných i nezjistitelných (podprahových) zónách pro virtuální demonstraci celé řady vestibulárních iluzí ve vysoké kvalitě. Celý systém simulátoru je řízen z pracoviště instruktora, které je umístěno poblíž a je propojeno se simulátorem pomocí kabelů a signálů. Pracoviště instruktora je vybaveno všemi nepostradatelnými nástroji, jako jsou počítače, monitory, alternativní ovládací konzole, komunikační a záznamové zařízení pro řízení a monitorování všech provozních stavů a režimů simulátoru, jak můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 16: Pracoviště simulátoru

Simulátor disponuje několika provozními mody:

**Letový mód** – slouží k měření a navigační výcvik, výcvik pilotů měny, přechodu cvičných letadel, výcvik selhání identifikace / využití, a nouzové postupy školení.

**Profilový mód** – slouží k provádění plně interaktivní, realistické letové iluze vyvinuté speciálně pro výcvik prostorové dezorientace, lékařského výzkumu nebo nácviku obnovy prostorové orientace.

**Záznamový mód** – slouží k přehrání záznamu již provedených letů s cílem usnadnit výcvik skupinové slétanosti, demonstrovat konkrétní manévry, nebo uvést pilota do nezvyklé polohy, kterou zažil během předchozího letu.

**Manuální mód** – používá se pro údržbu, kalibraci a případné desenzibilizaci vůči zdravotním potížím způsobeným podrážděním vestibulárního aparátu (kinetóza)

Kabina simulátoru je určena pro jednoho pilota, který je k sedadlu upevněn pomocí pětibodového poutacího systému. Pro účely měření byla použit model letounu Zlín Z-142, který se velmi často využívá k leteckému výcviku. Jeho palubní desku můžeme vidět na obrázku.



Obrázek 17: Pohled do palubní kabiny s nakonfigurovaným kokpitem letounu Z-142

Tento SD simulátor má pohybovou základnu se třemi osami (náklon  $\pm 30^\circ$ , rozteč  $\pm 15^\circ$  a nepřetržitě  $360^\circ$  vybočení) a vizuální zobrazení mimo okno. Simulátor je vybaven systémem sběru dat, takže jsou snadno k dispozici letová data v reálném čase ze stavu letového profilu subjektu zaznamenané pro analýzu. Schopnost řízení uzavřené smyčky vytváří interaktivní prostředí, takže pilot může udržovat kontrolu nad simulátorem, zatímco je vystaven řadě somatogyrálních a některých vizuálních iluzí. Pro snazší experimentování. Při indukci žádoucího scénáře dezorientace lze pohybovou základnu Gyro-IPT také naprogramovat tak, aby ji změnila pozice nezávislá na řídicích vstupech pilota (páčka). Na rozdíl od běžného letového simulátoru umožňuje Gyro-IPT operátorovi programovat trvalé a přechodné pohyby, které nejsou v souladu s pohyby generovanými



simulačním modelem letadla [15]. Součástí simulátoru je mapová databáze, která obsahuje letiště PNHL a OTHH společně s přilehlým okolím.

### 3.4 Závěrečný dotazník

Součástí experimentu byl i dotazník, který se vyplňoval zvláště pro každý letový profil a subjektům měření bylo položeno celkově šest následujících otázek:

- 1) Letový profil 1 (jednoduché úkony – např. změna HDG)
- 2) Letový profil 2 (náročnější úkony – např. base turn)
- 3) Letový profil 3 (náročné úkony – např. přesné přiblížení)
- 4) Začlenit výcvik vestibulární iluzí do IFR výcviku – Ano/Ne a proč?
- 5) Do jaké fáze IFR výcviku začlenit nácvik proti letovým iluzím?
- 6) V případě začlenění, jaký profil použít?

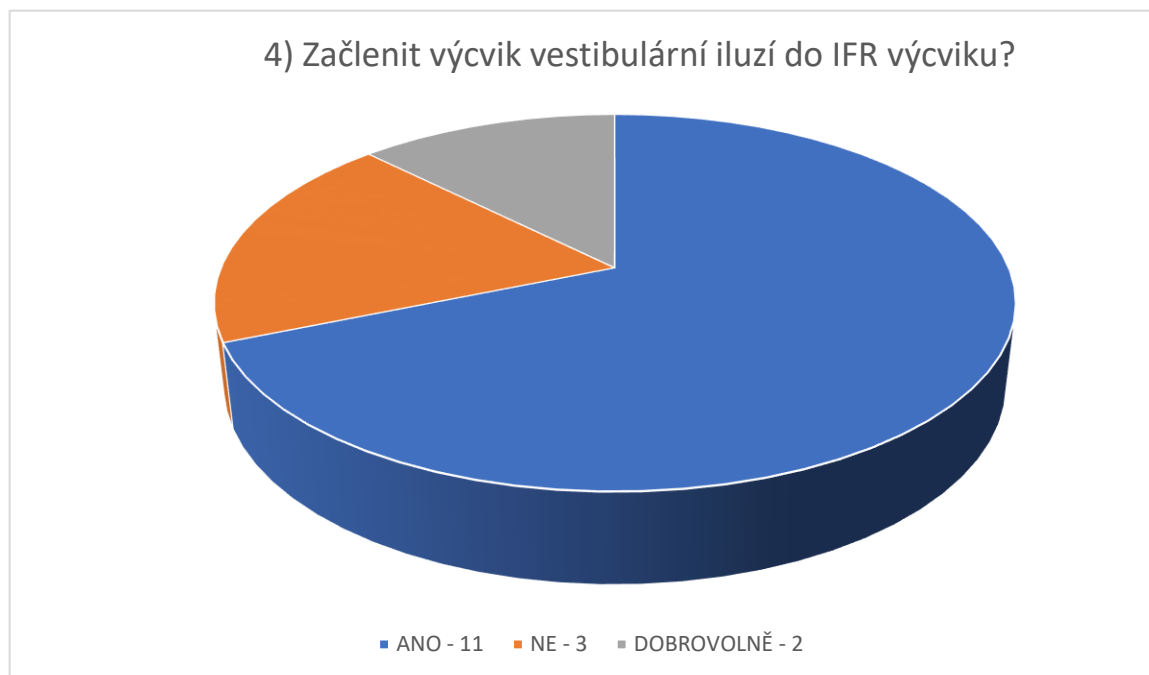
V prvních třech bodech měly subjekty měření popsat své dojmy z letových profilů, což není důležité pro rozsah této práce, a proto se jimi nadále nebudeme zabývat. Samotné začlenění (a tedy i fáze) by se týkalo simulátorového IFR výcviku.

**Otázka 4:** Začlenit výcvik vestibulární iluzí do IFR výcviku – Ano/Ne a proč? Obrázek.

11 pilotů, tedy 68,75 % by bylo pro začlenění výcviku vestibulárních iluzí do IFR výcviku. Na otázku „Proč?“ se subjekty vesměs shodovali na tom, že vidí velký přínos v ukázce a nácviku iluzí, protože za normálních podmínek je nemožné to studentům ukázat ve výcviku.

3 piloti, tedy 18,75 %, by začlenění do IFR výcviku nedoporučila. Na otázku „Proč?“ se subjekty shodly v tom, že ani praktický nácvik v jedné hodině simulátorového letu by jim významně nepomohl lépe zvládat iluze, a tudíž jim to přijde zbytečné.

2 piloti, tedy 12,5 %, by byli pro začlenění na dobrovolné bázi. Na otázku „Proč?“ se subjekty shodly na případné finanční náročnosti výcviku.



Obrázek 18: Subjektivní názor respondentů na otázku č. 4

**Otázka 5:** Do jaké fáze IFR výcviku začlenit nácvik proti letovým iluzím? Obrázek.

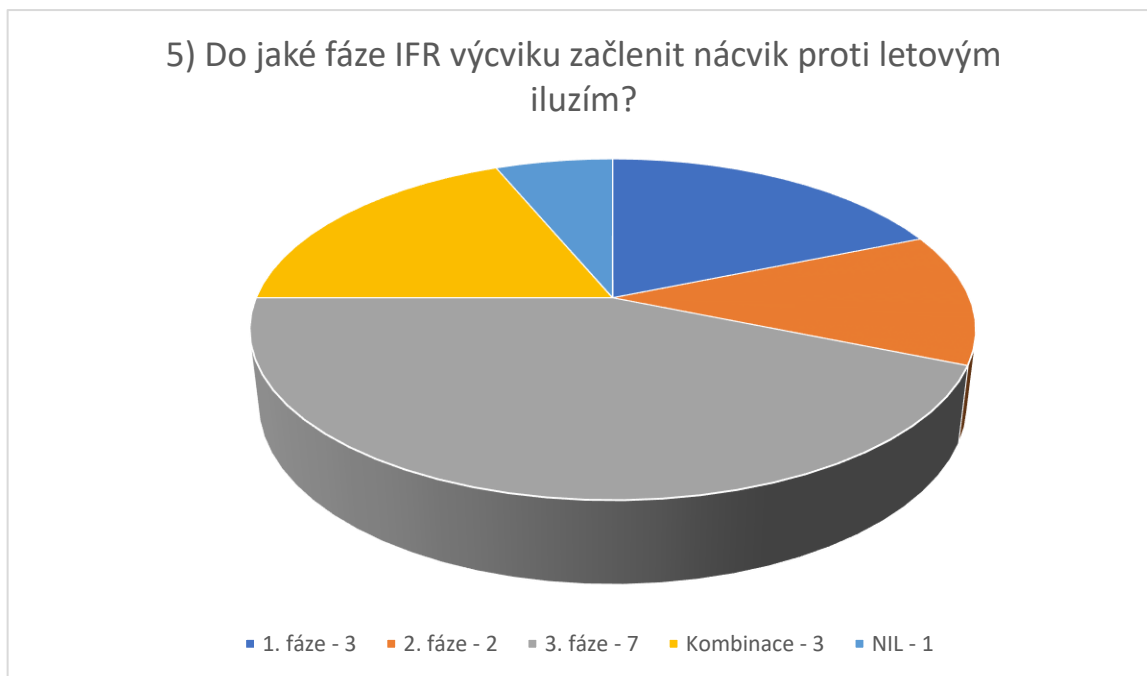
3 piloti, tedy 18,75 %, by začlenili výcvik proti letovým iluzím do 1. fáze výcviku, která odpovídá úplnému začátku výcviku. Subjekty se shodovaly na tom, že by bylo studenty vhodné seznámit s vestibulárními iluzemi na samém začátku z důvodu lepšího povědomí o potenciálních nebezpečích pro let.

2 piloti, tedy 12,5 %, by začlenili výcvik do 2. fáze výcviku, která odpovídá cca polovině výcviku. I zde se subjekty vesměs shodovali a panovalo zde přesvědčení, že student má v této fázi již základy IFR létání, a tudíž je schopný lépe pochopit podstatu nebezpečí.

7 pilotů, tedy 43,75 %, by začlenilo výcvik do 3. fáze výcviku, která odpovídá úplnému závěru výcviku. Panoval zde názor, že jsou studenti dostatečně seznámeni se všemi fázemi letu, a tudíž jsou schopní lépe posoudit potenciální nebezpečí, poněvadž už tolik nezápasí s řízením letadla a IFR procedurami.

3 piloti, tedy 18,75 %, by začlenilo nácvik proti letovým iluzím do všech fází výcviku. Subjekty se shodovaly na tom, že každá fáze výcviku má své potenciální nebezpečí, a tudíž by je studentům představovali průběžně.

1 pilot, tedy 6,25 %, nesouhlasil v předchozí otázce (číslo 4) se samotným začleněním do výcviku, a tudíž mu přišlo zbytečné odpovídat na tuto otázku.



Obrázek 19: Subjektivní názor respondentů na otázku č. 5

**Otázka 6:** V případě začlenění, jaký profil použít? Obrázek.

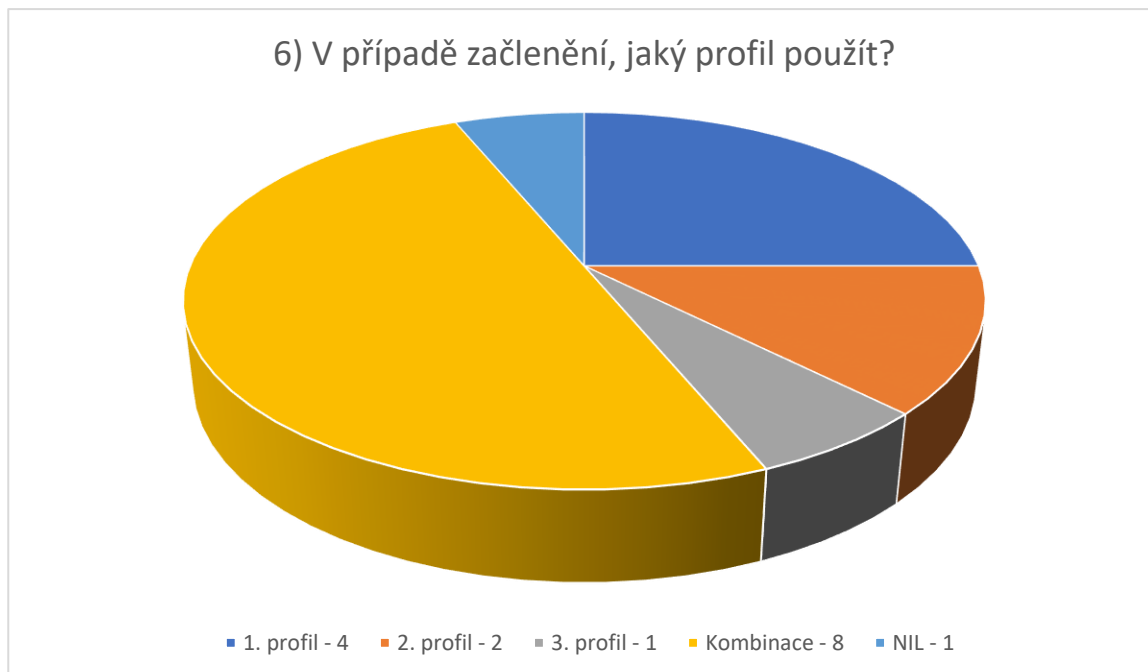
4 piloti, tedy 25 %, by pro nácvik vestibulárních iluzí použila 1. profil. Mezi subjekty panoval názor, že ukázka při jednodušších fázích letu (např. změna HDG) je dostatečná.

2 piloti, tedy 12,5 %, by použila 2. profil. Subjekty se shodovaly na to, že 1. profil je pro studenty pro nácvik moc jednoduchý a 3. profil naopak příliš složitý.

1 pilot, tedy 6,25 %, by použil 3. profil. Důvodem byla dostatečná složitost profilu, a tudíž i dostatečná ukázka potencionálního nebezpečí.

8 pilotů, tedy 50 %, by bylo pro kombinaci všech anebo alespoň dvou profilů. Subjekty se vesměs shodly na tom, že by ukázka vestibulárních iluzí byla vhodná v každé části letu.

1 pilot, tedy 6,25 %, nesouhlasil v předchozí otázce (číslo 4) se samotným začleněním do výcviku, a tudíž mu přišlo zbytečné odpovídat na tuto otázku.



Obrázek 20: Subjektivní názor respondentů na otázku č. 6

### 3.5 Metody hodnocení dat

Dezorientační simulátor GYRO IPT II umožňuje nahrávání různých parametrů jako je např. – výšku, HDG, pohyby letounu (klopení, klonění, zatáčení), pohyby plošiny, pohyby řídicí páky apod. Data z jednotlivých profilů byla k dispozici v programu Microsoft Excelu. Pro následné vyhodnocení dat a statistické vyhodnocení byl použit výpočetní analytický program Matlab verze R2020b.

Využitím logické cyklické funkce „for“ byla z excelovských souborů vybírána data. Pro účely experimentu bylo rozhodnuto, že se porovnájí data pro první a třetí profil – mezi profily byla hodina letu, která odpovídá testované hypotéze, zdali hodina simulátorového letu na dezorientačním simulátoru signifikantně přispěje k odolnosti pilota.

Pro záměr této práce byla vybrána následující data: altitude a heading. Zmíněná data u prvního a třetího profilu byla porovnána v jedné vestibulární iluzi, kterou byla somatogyrální iluze. V obou výše zmíněných profilech somatogyrální iluze nastala jako první, a proto se nejvíce hodí pro statistické vyhodnocení – piloti nemohli být ovlivněni předešlými iluzemi.



Počátkem předem dané a naprogramované iluze byl určen čas  $t_s$  a konec byl zvolen jako  $t_f$ . Počátkem a koncem jest myšleno otáčení se platformy dezorientačního simulátoru až do jeho úplného zastavení. Pro účely experimentu bylo nutné porovnat pouze ten letový úsek, kde byl pilot ovlivněný letovou iluzí, a proto bylo stanoveno časové okno  $t_s + 60$  s a  $t_f$ . Sledovaná data tedy končila s koncem simulace letové iluze.

Pro analýzu hodnot parametru altitude byla použita směrodatná odchylka. Ta nám ukazuje, jak jsou hodnoty proměnné rozptýleny kolem průměru. Malá směrodatná odchylka nám říká, že hodnoty proměnné jsou koncentrovány kolem průměru. Pro účely experimentu byla použita z důvodu zachování jednotky veličiny. Můžeme jí vypočítat tímto způsobem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Pro analýzu hodnot parametru heading nelze použít klasický výpočet směrodatné odchylky. Jelikož se jedná o úhlovou veličinu a v případech, kdy se heading pohyboval kolem hodnoty  $360^\circ / 0^\circ$  by hodnoty klasické směrodatné odchylky ukazovaly nesmyslně velké chybové hodnoty, které neodpovídají realitě (např. mezi headingem  $355^\circ$  a  $005^\circ$  je v reálném světě odchylka pouze  $10^\circ$  avšak klasická směrodatná odchylka rozdíl chápe jako rozdíl  $350^\circ$ ).

Řešení této problematiky přináší výpočet směrodatné odchylky (resp. rozptylu) cyklickou metodou. Kruhový (cirkulární) rozptyl (circular variance) je jednoduše  $S^2_{\text{circ}} = 1 - R/N$ , neboli  $S^2_{\text{circ}} = 1 - r^*$ . Je důležité poznamenat, že  $S^2_{\text{circ}}$  (stejně jako  $r^*$ ) leží vždy mezi nulou a jedničkou včetně, čímž je velmi rozdílný od své lineární analogie, která může nabývat jakoukoliv kladnou hodnotu.

Kruhová (cirkulární) směrodatná odchylka (circular standard deviation) je definována jako:

$$sd = \sqrt{-2 \ln(r^*)}$$



### 3.6 Shrnutí kapitoly

Celý experiment probíhal na ÚLZ v Praze, kde se subjektu vysvětlila studie a experiment, načež byl následně podepsán souhlas se zpracováním dat a souhlas s účastí.

Celková doba měření jednoho subjektu trvala cca čtyři až pět hodin a probíhala následovně. Subjektu byl vysvětlen simulátor a bylo mu umožněno se s ním seznámit při 20 minut dlouhém letu.

Po seznámení subjektu se zařízením proběhla krátká porada a poté měl subjekt za úkol zalétnout předem připravený první profil. Během něho byla zaznamenávána letecká data pro účely této práce. Po skončení profilu následovala pauza a subjektivní hodnocení právě nabitých dojmů z prvního profilového letu do dotazníku.

Tímto stylem experiment pokračoval do zalétnutí posledního, tedy třetího profilu. Subjekt měl opět možnost pauzy, po které následovalo kompletní doplnění dotazníku a experiment byl tímto ukončen.

## 4 Prezentace výsledků

Pro účely vyhodnocení dat, byly vybrány konkrétní letové ukazatele, na kterých se dále zkoumal průběh letových iluzí a případné zlepšení či zhoršení v jejich odolnosti. Ze všech letových parametrů, který je simulátor schopný změřit, byla vybrána altitude a heading. V rámci zkoumaného prvního a třetího profilu se vyhodnocovala výše zmíněná data pro somatogyrální iluzi.

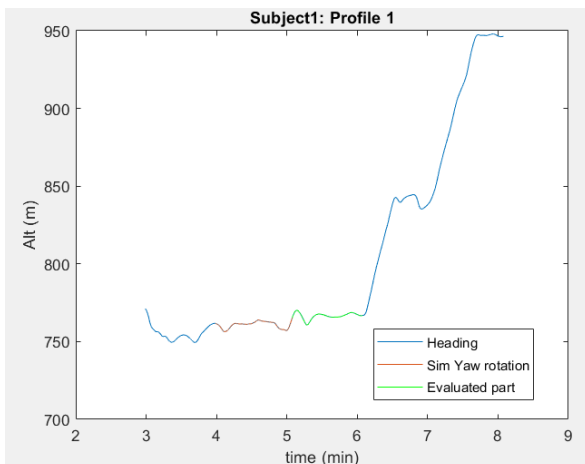
Grafy reprezentují hodnoty zkoumaných veličin jednotlivých profilů. Z těchto hodnot byla počítána směrodatná odchylka blíže popsána v kapitole 3.5.

Na obrázcích 21 a 22 vidíme porovnání hodnot veličiny altitude prvního a třetího profilu. Sledovaná část je zobrazena zelenou linkou.

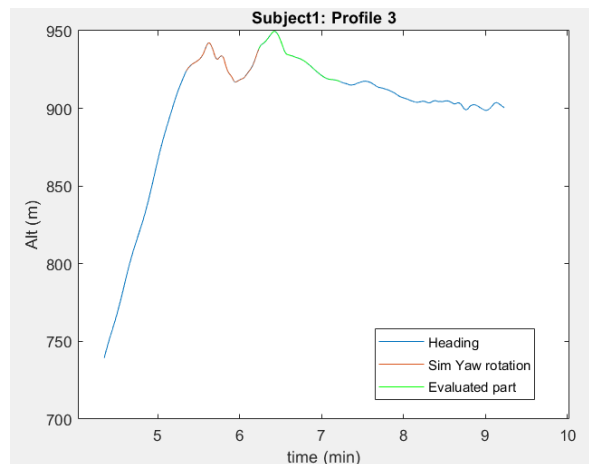
Na obrázcích 23 a 24 vidíme porovnání hodnot veličiny heading prvního a třetího profilu v souvislosti s problematikou vyhodnocení směrodatné odchylky zmíněné v kapitole 3.5. Sledovaná část je i v tomto případě zobrazena zelenou linkou.

Řešení výše zmíněné problematiky vidíme na obrázcích 25 a 26.

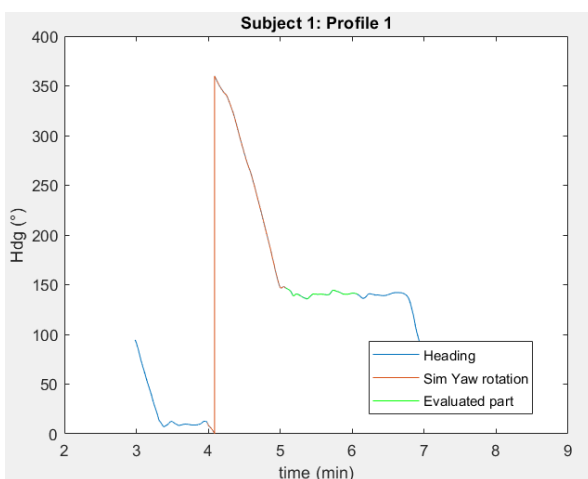




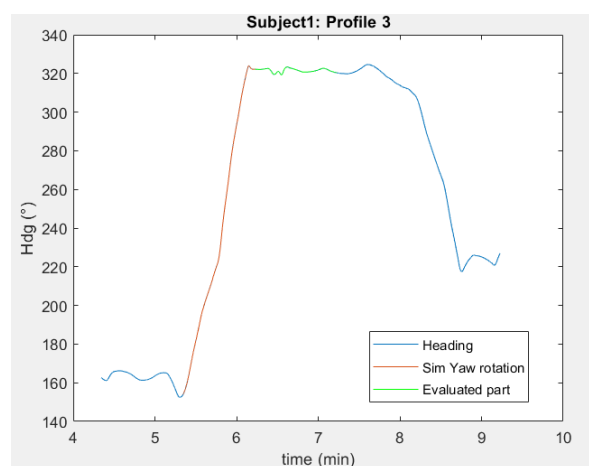
Obrázek 21.



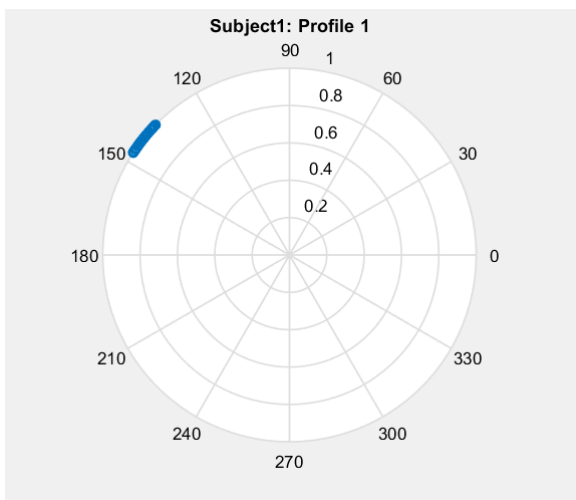
Obrázek 22.



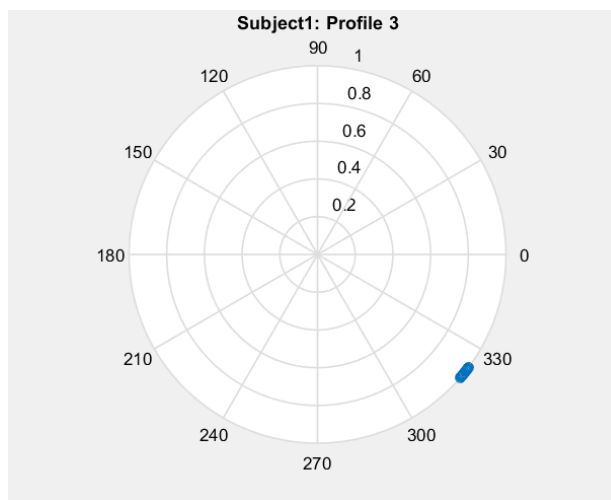
Obrázek 23.



Obrázek 24.

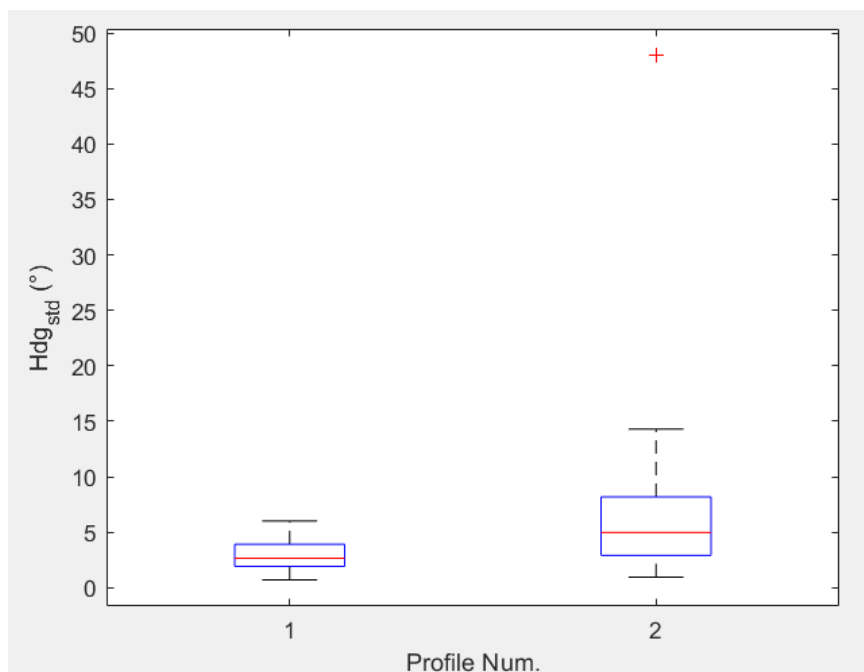


Obrázek 25.

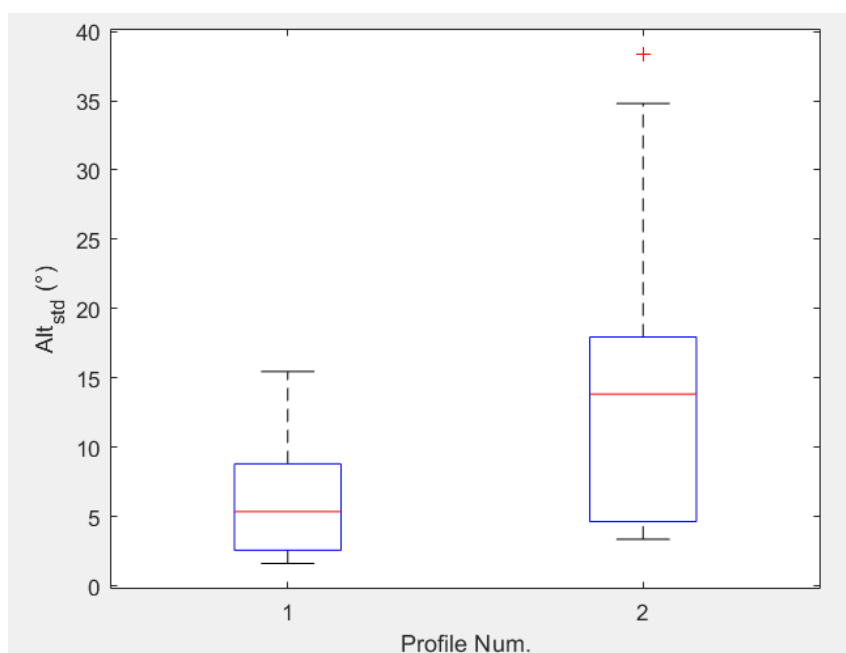


Obrázek 26.

Pro vyhodnocení výsledků byl použit balíček statistických funkcí programu Matlab. První formou analýzy je tzv. „boxplot“ neboli krabicový graf. Jedná se o grafické zobrazení výběru veličin, slouží k vytvoření představy o rozložení dat. Už na tomto zobrazení 27 a 28 je patrné, že se mediány výběrů liší. Vstupními hodnotami pro následující grafy jsou výše zmiňované směrodatné odchylky dat jednotlivých profilů.



Obrázek 27.



Obrázek 28.



Na základě krabicových diagramů ale není možné určit, zdali je rozdíl statisticky významný či nikoliv. K ověření statistické významnosti byl použit Wilcoxonův test. Do příkazového okna programu Matlab se test zapisuje jako „signrank“. Jedná se o neparametrický párový test, předpokládá data, která nepochází z normálního rozdělení. Používá se k analýze párových dat, tedy dat, mezi kterými existuje určitá forma závislosti. Vyhovuje tedy předmětu výzkumu této práce. Test byl prováděn při standardní hladině významnosti 5 %, výsledek testu je uváděn v tzv. p-hodnotě. Nulová hypotéza programu zní, že se mediány výběrů rovnají nebo jen statisticky nevýznamně liší. Alternativní hypotézou je poté opačné tvrzení. Výsledná p-hodnota, menší, než hladina významnosti v našem případě tedy zamítá nulovou hypotézu. Existuje tedy statisticky významný rozdíl mediánů výběrů dat profilů jedna a tři.

## 5 Diskuse výsledků

Na základě statistických testů provedených v programu Matlab pak lze vyvodit závěr, že se piloti ve sledovaných veličinách (altitude, heading) staticky významně zhoršili, čímž byla v tomto případě vyloučena hypotéza, že při takto zvolených profilech se po hodině simulátorového létání piloti zlepšili v odolnosti vůči vestibulárním iluzím. V rámci řešení současného stavu nebyl dohledán žádný podobný experiment, který by použil tento přístup v odolnosti dopravního pilota v civilní dopravě k vestibulárním iluzím.

Cílem práce tedy bylo určit, zdali navození vestibulární iluze při simulátorovém létání, které je implementované v jedné hodině simulátorového letu signifikantně přispěje k odolnosti pilota vůči vlivům vestibulární iluze. V následujících řádcích je rozebráno, zda je tato metoda vhodná v odolnosti pilota vůči vestibulárním iluzím, či nikoliv.

Experimentu se zúčastnili zkušení piloti, kteří byli držiteli doložky IR s mnohaletými zkušenostmi v civilní letecké dopravě. Mnoho z nich bylo i držiteli licence leteckého instruktora. Lze tedy předpokládat, že si díky svým zkušenostem vytvořili odolnost ještě před samotným testováním.

Subjekty věděli, že je čeká dezorientační simulátor způsobující letové iluze a díky této vědomosti a zkušenostem z předchozích let se pravděpodobně více fixovali na letové přístroje a svým subjektivním pocitům nepřisuzovali takovou důležitost.



Za zmínku stojí i fakt, že byl porovnáván první a třetí profil, který se signifikantně lišil svojí náročností. Při prvním profilu, kdy piloti plnili pouze jednoduché příkazy se jednoznačně soustředí lépe na letové přístroje než v profilu třetím. Tam subjekty plnily náročné příkazy a pokyny, které do určité míry kopírovaly podmínky z normálního provozu, kde je pro pilota mnohem složitější rozložení pozornosti než-li u profilu jedna.

V neposlední řadě je důležité zmínit, že experiment trval téměř pět hodin a subjekty tak musely z fyziologické podstaty člověka ve svých výkonech zhoršit. Důvodem mohla být jednak únava a jednak zhoršená pozornost.

Z dotazníkového šetření však plyne, že většina subjektů by výcvik se zaměřením na vestibulární doporučila. Na základě jejich předchozích zkušeností tedy můžeme konstatovat, že při lepší exekuci experimentu a zvolení méně zkušených subjektů by hypotézu mohla potvrdit. K tomu je ale nutná další studie.

## 6 Závěr

Práce měla v teoretické části za úkol poskytnout analýzu současného stavu a přístupu v oblasti vestibulárních iluzí a s tím spojené letecko-lékařské rešerše. Praktická část se věnovala návrhu a provedení experimentu s využitím simulátoru vestibulárních iluzí a se současným sběrem letových dat pro ověření zvyšování odolnosti pilota vůči vlivům vestibulární iluze a s tím spojenou implementací do IFR výcviku.

Analýza současného stavu, byla založena pouze na volně dostupných zdrojích. Ve většině případů byly vybírány často citované práce. Práce tedy přinesla spolehlivé informace a statistické analýzy, každopádně jak již bylo zmíněno v analýze současného stavu, problémem vestibulárních iluzí se spíše zabývá vojenská sféra letectví a do povědomí jako o hrozbě pro civilní letectví se dostává až v posledních letech s přesnějším vyhodnocováním leteckých neštěstí, tudíž s největší pravděpodobností není možné se dostat ke všem zdrojům, protože jednotlivé armády si to z povahy a charakteru věci budou nechávat nově nabitě poznatky pro sebe. Jednou z dalších limitací byla současná situace ohledně epidemie ve světě způsobená SARS-CoV-2 a s tím spojené komplikace s měřením dat a získávání informací. Další limitací by mohli být nevhodně zvolené profily pro účely této práce a oslovení subjektů s mnohaletými zkušenostmi v letectví. V neposlední řadě se jako limitace uvažuje i sám autor práce.



Práce byla i přes všechny výše zmíněné limitace vypracována s nejlepším vědomím a svědomím, ve snaze dohledat všechny dostupné články věnující se této problematice a zpracovat je do uceleného formátu. Práce si kladla za cíl fenomén vestibulárních iluzí a s tím spojené problematiky dát do souvislosti se statistikou nehod způsobenou právě s tímto fenoménem v civilní letecké dopravě.

Jak už bylo uvedeno výše, práce se snažila dát do širšího povědomí vestibulární iluze ve spojení s civilní leteckou dopravou. Jako jedna z mála se k této problematice staví právě tímto stylem, a proto by mohla sloužit jako vodítko pro další vědecké práce. Z analýzy však vyplynulo, že ačkoli o tématu problematiky vestibulárních iluzí vzniká mnoho článků pro účely armády, tak v civilní sféře letectví se tomuto fenoménu autoři nevěnují natolik, jak by si letové iluze zasloužili s přihlédnutím k statistikám o ztrátě prostorové orientace. Na základě toho je proto doporučením pro další výzkum hledat nové a lepší profily pro trénink odolnosti vůči vestibulárním iluzím a analyzovat do hloubky nehody spojené s prostorovou dezorientací. Rád bych se dalšímu výzkumu problematiky věnoval v diplomové práci.



## Seznam použité literatury:

- [1] BORIL, Jan, Vladimír SMRZ, Jan LEUCHTER a Erik BLASCH. Increasing flight safety using flight sensory illusions on a spatial disorientation simulator. In: 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-5 [cit. 2020-11-18]. ISBN 978-1-5090-2523-7. Dostupné z: doi:10.1109/DASC.2016.7778095
- [2] BORIL, Jan, Jan LEUCHTER, Vladimír SMRZ a Erik BLASCH. Aviation simulation training in the Czech Air Force. In: 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-22 [cit. 2020-11-18]. ISBN 978-1-4799-8940-9. Dostupné z: doi:10.1109/DASC.2015.7311648
- [3] BORIL, SMRZ a JALOVECKY. Possibilities of Assessing Objectively a Flight Illusion Effect on a Pilot's Spatial Orientation. *Advances in Military Technology* [online]. 2018, 13(1) [cit. 2020-11-18]. ISSN 18022308. Dostupné z: doi:10.3849/aimt.01212
- [4] GIBB, Randy, Bill ERCOLINE a Lauren SCHARFF. Spatial Disorientation: Decades of Pilot Fatalities. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* [online]. 2011, 82(7), 717-724 [cit. 2020-11-18]. ISSN 00956562. Dostupné z: doi:10.3357/ASEM.3048.2011
- [5] PETRU, Antonin a Petr FRANTIS. Concept of improving pilot's sensory illusion resistance. In: *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015* [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-4 [cit. 2020-11-18]. ISBN 978-8-0723-1977-0. Dostupné z: doi:10.1109/MILTECHS.2015.7153654
- [6] JEPPESEN, *Atlantic Flight Training, Human performance and limitation: JAA ATPL training*. Ed. 2. Neu-Isenburg, Germany: Jeppesen, 2007.
- [7] CHEUNG, Bob. Spatial Disorientation: More Than Just Illusion. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* [online]. 2013, 84(11), 1211-1214 [cit. 2020-11-19]. ISSN 00956562. Dostupné z: doi:10.3357/ASEM.3657.2013
- [8] Szczepanski, C., Skibniewski, W., Gasik, M., & Truszczynski, O. (2000). Standard flight simulator as a spatial disorientation training device. *Modeling and Simulation Technologies Conference*. Dostupné z: doi:10.2514/6.2000-4077
- [9] DAIKER, Ronald, Kathryn BALLARD a Kyle K. ELLIS. Evaluation of Low Cost, User-Centered Alerting Devices for the Mitigation of Flight Crew Spatial Disorientation. In: *AIAA Scitech 2020 Forum* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020, 2020-01-06, s. - [cit. 2020-11-16]. ISBN 978-1-62410-595-1. Dostupné z: doi:10.2514/6.2020-0411
- [10] Bles, Willem. (2008). *Spatial Disorientation Training - Demonstration and Avoidance (entrainement a la desorientation spatiale - Demonstration et reponse)*. 132.
- [11] Previc, F. H., & Ercoline, W. R. (Eds.). (2004). *Spatial Disorientation in Aviation*. Dostupné z: doi:10.2514/4.866708
- [12] Young, L. R. (2003). *Spatial orientation*. In P. S. Tsang & M. A. Vidulich (Eds.), *Human factors in transportation. Principles and practice of aviation psychology* (p. 69–113). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.



- [13] Dariusz, Bogusz. (2018). Spatial Disorientation Simulator. Safety & Defense. 4. 10-16. 10.37105/sd.3.
- [14] [https://www.skybrary.aero/index.php/Vestibular\\_System\\_and\\_Illusions\\_\(OGHFA\\_BN\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Vestibular_System_and_Illusions_(OGHFA_BN))
- [15] Johnson P.A., Estrada A., Braithwaite M., G., Manning J., C. Assessment of Simulated Spatial Disorientation Scenarios in Training U.S. Army Aviators. RTO, Human Factors & Medicine Panel, San Diego, CA, 12 –22.10.1998 r.
- [16] Kowalczyk, Krzysztof & Kluch, Wieslaw & Mikuliszyn, Romuald & Gasik, Marek. (2003). Spatial Disorientation Experiments and Training in Polish Air Force Institute of Aviation Medicine. 5.
- [17] Leland R.A., Requirements For An Effective, Low Cost Spatial Disorientation Trainer. AeroMedical Training Institute, Philadelphia, PA, 2000 (Interim Report).
- [18] Nuttall, J. B. (1958). THE PROBLEM OF SPATIAL DISORIENTATION. Journal of the American Medical Association, 166(5), 431. doi:10.1001/jama.1958.02990050001001
- [19] Orientation/Disorientation Training of Flying Personnel: A Working Group Report. AGARD-R625. Edited by A.J. Benson, NATO, Neuilly-surSeine, France 1974.
- [20] JPeters, R.A.: Dynamics of the vestibular system and their relation to motion perception, spatial disorientation, and illusions. NASA-CR-1309. National. Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, 1969.
- [21] <https://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/spatiald.pdf>
- [22] <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a356535.pdf>
- [23] NEWMAN, David. An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents. Australia, 2007. ISBN 978-1-921165-52-8.
- [24] LEDEGANG, Wietse D. a Eric L. GROEN. Spatial Disorientation Influences on Pilots' Visual Scanning and Flight Performance. Aerospace Medicine and Human Performance. 2018, 89(10), 873-882. DOI: 10.3357/AMHP.5109.2018. ISSN 2375-6314.
- [25] PETRU, Antonin a Petr FRANTIS. Using virtual reality for sensory illusion training. 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). IEEE, 2017, 2017, 632- 635. DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988834. ISBN 978-1-5090-5666-8.
- [26] SÁNCHEZ-TENA, Miguel Ángel, Cristina ALVAREZ-PEREGRINA, Ma Carolina VALBUENA-IGLESIAS a Pablo Ruisoto PALOMERA. Optical Illusions and Spatial Disorientation in Aviation Pilots. Journal of Medical Systems. 2018, 42(5). DOI: 10.1007/s10916- 018-0935-4. ISSN 0148-5598.
- [27] Zhdanko, I. M., Blaguinin, A. A., Chistov, S. D., & Lyashedko, S. P. (2019). Aviation Accidents Due to Spatial Disorientation and Positional Illusions over the Period from 2009 to 2013. Human Physiology, 45(7), 725–729. doi:10.1134/s036211971907020x



- [28] Shao, B. S., Guindani, M., & Boyd, D. D. (2014). Causes of fatal accidents for instrument-certified and non-certified private pilots. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 370–375. doi:10.1016/j.aap.2014.07.013
- [29] Collins, W. E. and C. Dollar. "FATAL GENERAL AVIATION ACCIDENTS INVOLVING SPATIAL DISORIENTATION: 1976-1992." (1996).
- [30] Newman, R. L., & Rupert, A. H. (2020). The Magnitude of the Spatial Disorientation Problem in Transport Airplanes. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 91(2), 65–70. doi:10.3357/amhp.5442.2020
- [31] Petru, A., & Frantis, P. (2015). Concept of improving pilot's sensory illusion resistance. *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015*. doi:10.1109/miltechs.2015.7153654
- [32] Newman, M., Lawson, B., Rupert, A., & McGrath, B. (2012). The Role of Perceptual Modeling in the Understanding of Spatial Disorientation During Flight and Ground-based Simulator Training. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. doi:10.2514/6.2012-5009
- [33] Vestibular stimuli may degrade situation awareness even when overt spatial disorientation is not experienced BD Lawson, SJ Kass, RS Kennedy, ER Muth, SA Smith - RTO HFM Symposium, 2002
- [34] Szczepanski, C., Skibniewski, W., Gasik, M., & Truszczynski, O. (2000). Standard flight simulator as a spatial disorientation training device. *Modeling and Simulation Technologies Conference*. doi:10.2514/6.2000-4077
- [35] ON DYNAMICS OF A SPATIAL DISORIENTATION TRAINER FOR PILOT TRAINING Zorana Dančuo. 1, Vladimir Kvrđić. 1, Boško Rašuo. 2, Jelena Vidaković
- [36] Shao, B. S., Guindani, M., & Boyd, D. D. (2014). Causes of fatal accidents for instrument-certified and non-certified private pilots. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 370–375. doi: 10.1016/j.aap.2014.07.013
- [37] Mumaw, Randall J., et al. "A new tool for analyzing the potential influence of vestibular illusions." *ISASI Forum*. Vol. 49. No. 1. 2016.
- [38] [https://www.skybrary.aero/index.php/Vestibular\\_System\\_and\\_Illusions\\_\(OGHFA\\_BN\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Vestibular_System_and_Illusions_(OGHFA_BN))
- [39] Benson AJ. Spatial disorientation—general aspects. In: Ernsting J, King P, editors. *Aviation medicine*. London: Butterworths; 1999:419–436.
- [40] Bles W. *Spatial Disorientation Training Demonstration and Avoidance*. Soesterberg (Netherlands): TNO; 2008.
- [41] Gillingham KK, Previc FH. *Spatial orientation in flight* (No. AL-TR-1993-0022). Brooks AFB (TX):Armstrong Lab; 1993
- [42] Previc FH, Ercoline WR, editors. *Spatial disorientation in aviation*. Reston (VA): American Institute of Astronautics and Aeronautics; 2004.





- [43] Ledegang, W. D., & Groen, E. L. (2018). Spatial Disorientation Influences on Pilots' Visual Scanning and Flight Performance. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 89(10), 873–882. doi:10.3357/amhp.5109.2018
- [44] Holmes SR, Bunting A, Brown DL, Hiatt KL, Braithwaite MG, Harrigan MJ. Survey of spatial disorientation in military pilots and navigators. *Aviat Space Environ Med*. 2003; 74:957–965.
- [45] Previc FH, Ercoline WR, editors. *Spatial disorientation in aviation*. Reston (VA): American Institute of Astronautics and Aeronautics; 2004.
- [45] <http://www.caa.co.za/Aviation%20Medicine%20General%20Information/Disorientation.pdf>
- [46] Caldwell, J 2012, 'Crew schedules, sleep deprivation, and aviation performance,' *Current Directions in Psychological Science*, vol. 21, no. 2, pp. 85-89. Web.
- [47] JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 10. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2013. ISBN 978-80-7182-333-9.
- [48] <https://fly8ma.com/topic/spatial-disorientation/>
- [49] Ercoline, William R., et al. "Post-roll effects on attitude perception:" the Gillingham Illusion". *Aviation, space, and environmental medicine* 71.5 (2000): 489-495."
- [50] Newman, David G., and AFAIM FAICD. *An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents*. No. B2007/0063. Canberra City,, Australia: Australian Transport Safety Bureau, 2007.
- [51] Benson, A. (1988a). Spatial disorientation – common illusions. In J. Ernsting & P. King (Eds.), *Aviation medicine* (pp. 297-317). London: Butterworths & Co. Ltd.
- [52] Holmes, S., Bunting, A., Brown, D., Hiatt, K., Braithwaite, M., & Harrigan, M. (2003). Survey of spatial disorientation in military pilots and navigators. *Aviat Space Environ Med*, 74, 957-965.
- [53] Sipes, W., & Lessard, C. (2000). A spatial disorientation survey of experienced instructor pilots. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Eng Med Biol Mag*, 19 (Pt 2), 35-42.
- [54] Campbell, R., & Bagshaw, M. (2002). *Human performance and limitations in aviation*. In (3rd ed., pp. 87-90). Oxford: Blackwell Science.
- [55] <https://cdn.sinauer.com/wolfe4e/essay12.01.html>
- [56] Seedhouse E., Brickhouse A., Szathmary K., Williams E.D. (2020) Information Processing. In: *Human Factors in Air Transport*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13848-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13848-6_6)
- [57] Nooij, S.A.E., Groen, E.L. (2011) Rolling into spatial disorientation: simulator demonstration of the post-roll (Gillingham) illusion. *Aviation, space, and environmental medicine* 82 (5), 505-512



[58] Newman RL. Spatial disorientation: magnitude of the problem. Spatial Orientation Multiple Expert Workshop; January 2017; Pensacola, FL. Seattle (WA): Crew Systems; 2017. Technical paper TP-17-02

[59] Belcastro CM, Groff L, Newman RL, Foster JV, Cryder DA, Klyde DH. Preliminary analysis of aircraft loss of control accidents: worst case precursor combinations and temporal sequencing. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference; January 2014; National Harbor, MD. Reston (VA): AIAA; 2014.

[60] National Transportation Safety Board. Notification and reporting of aircraft accidents or incidents and overdue aircraft and preservation of aircraft wreckage, mail, cargo, and records. Title 49, Code of Federal Regulations, Part 830.2. Washington (DC, USA): NTSB; 2016.

[61] International Civil Aviation Organization Aircraft accident and incident investigation. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. Montreal, Quebec (Canada): ICAO; 2016

[62] SOLDÁN, Vladimír. Letové postupy a provoz letadel. Jeneč: Letecká informační služba Řízení letového provozu České republiky, 2007. ISBN 978-80-239-8595-5 [cit. 2021-05-05]

[63] Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile. Study on aeroplane state awareness during go-around. Paris (France): Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile; August 2013.

[64] Newman RL. Pitot-static accidents: a tale of two airplanes. Seattle (WA, USA): Crew Systems; July 2016. Report No.: TN-16-10.