



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**FUTURISTICKÝ KOKPIT MODERNÉHO LETÚNA**

FUTURISTIC AIRCRAFT COCKPIT DESIGN

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. SLAVOMÍR SVORADA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. PETER CHUDÝ, Ph.D., MBA**

**BRNO 2024**

## Zadání diplomové práce



154975

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)  
Student: **Svorada Slavomír, Bc.**  
Program: Informační technologie a umělá inteligence  
Specializace: Softwarové inženýrství  
Název: **Futuristický kokpit moderního letounu**  
Kategorie: Uživatelská rozhraní  
Akademický rok: 2023/24

### Zadání:

1. Diskutujte historický vývoj návrhu vizualizace letových veličin v pilotní kabině.
2. Nastudujte současné trendy vizualizace letových dat.
3. Navrhněte moderní vizualizaci letových dat.
4. Návrh implementujte v prostředí dostupného leteckého simulátoru.
5. Diskutujte možné směry a budoucí vývoj v rámci zkoumané disciplíny.

### Literatura:

- Jukes, M.: Aircraft display systems. (Progress in Astronautics and Aeronautics), AIAA, 2004, ISBN 1563476576.
- Brian L. Stevens and Frank L. Lewis. Aircraft Control and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-37145-9.
- Wolfgang Langewiesche. O umění létat. Praha: Baronet a.s., 2010. ISBN 978-80-7384-307-6.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

Body zadání 1, 2 a částečně bod 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Chudý Peter, doc. Ing., Ph.D., MBA**  
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.  
Datum zadání: 1.11.2023  
Termín pro odevzdání: 17.5.2024  
Datum schválení: 9.11.2023

## Abstrakt

Táto práca sa zameriava na historický vývoj a súčasné trendy v oblasti vizualizácie letových dát v pilotnej kabíne. Na základe tejto analýzy je navrhnutá moderná vizualizácia letových dát, ktorá je následne implementovaná v leteckom simulačnom prostredí podporujúcom virtuálnu realitu. Zámerom práce bolo vytvorenie vizualizácie letových dát pre prilbový displej, pre letúny schopné vertikálneho vzletu a pristátia. Hlavným cieľom je zvýšiť efektivitu a bezpečnosť leteckej dopravy prostredníctvom inovatívnych vizuálnych prostriedkov.

## Abstract

This work focuses on the historical development and current trends in the field of flight data visualization in the cockpit. Based on this analysis, a modern flight data visualization is proposed, which is subsequently implemented in a virtual reality-supported aviation simulation environment. The aim of the work was to create flight data visualization for Helmet-Mounted Display for aircraft capable of vertical takeoff and landing. The primary goal is to enhance the efficiency and safety of aviation through innovative visual means.

## Kľúčové slová

avionika, futuristický dizajn, letové veličiny, letún, kokpit, prilbový displej, vertikálny odlet a pristátie

## Keywords

aircraft, avionics, cockpit, electric vertical takeoff and landing, flight quantities, futuristic design, helmet-mounted display

## Citácia

SVORADA, Slavomír. *Futuristický kokpit moderného letúna*. Brno, 2024. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Peter Chudý, Ph.D., MBA

# Futuristický kokpit moderného letúna

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána doc. Ing. Petera Chudého, Ph.D., MBA. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....  
Slavomír Svorada  
15. mája 2024

## Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať doc. Ing. Petrovi Chudému, Ph.D., MBA za ochotu, čas a cenné rady, ktoré mi poskytol počas tvorby tejto diplomovej práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Historický vývoj vizualizácie letových dát v kokpite letúna</b>	<b>9</b>
2.1	História kokpitu v letectve . . . . .	9
2.2	Prístroje vizualizujúce letové veličiny . . . . .	10
2.2.1	Palubné prístroje pre kontrolu letu . . . . .	11
2.2.2	Palubné prístroje pre kontrolu lietadla . . . . .	14
2.2.3	Sekundárne letové prístroje . . . . .	14
2.2.4	Pitot-statické letové prístroje . . . . .	17
2.3	Elektronický systém letových prístrojov . . . . .	18
2.3.1	Primárny letový displej . . . . .	18
2.3.2	Elektronický horizontálny indikátor polohy . . . . .	19
2.3.3	Multifunkčný letový displej . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Súčasný trendy vo vizualizácii letových údajov</b>	<b>21</b>
3.1	Head-up displej . . . . .	21
3.1.1	Architektúra HUD . . . . .	21
3.2	Rozšírená realita v letectve . . . . .	22
3.2.1	Dizajn a vizualizácia rozšírenej reality . . . . .	23
3.3	Prilbový displej . . . . .	24
3.3.1	Architektúra prilbového displeja . . . . .	24
3.3.2	Konštrukcia prilbového displeja . . . . .	25
3.3.3	Analýza súčasných trendov . . . . .	26
3.3.4	Latencia systému v prilbových displejoch . . . . .	27
3.4	Teleoperácia . . . . .	28
3.4.1	História teleoperácie . . . . .	28
3.4.2	Prevádzka s jedným pilotom . . . . .	28
3.4.3	Autonómny let . . . . .	29
3.5	Platforma pre bezpečnú analytiku vo veľkých dátach . . . . .	32
3.5.1	Technické riešenie ICARUS . . . . .	32
3.6	Letúny eVTOL . . . . .	33
3.6.1	Prístrojové panely v kabíne eVTOL . . . . .	33
3.6.2	Air taxi . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Návrh vizualizácie letových údajov</b>	<b>36</b>
4.1	Vlastný návrh . . . . .	36
4.1.1	Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej . . . . .	36

<b>5 Implementácia vizualizácie letových údajov v prostredí leteckého simulátora</b>	<b>45</b>
5.1 Postup implementácie vizualizácie letových dát pre prilbový displej . . . . .	45
5.1.1 Získavanie dát . . . . .	45
5.1.2 Vytvorenie prostredia v Unity . . . . .	47
5.1.3 Implementácia jednotlivých prvkov prilbového displeja . . . . .	48
5.1.4 Vytvorenie modelu letúna . . . . .	50
5.2 Použité aplikácie a nástroje pri tvorbe vizualizácie letových dát pre prilbový displej . . . . .	52
5.2.1 Letecký simulátor X-plane 11 . . . . .	52
5.2.2 Aplikácie pre tvorbu a vývoj vizualizácie letových dát . . . . .	53
5.2.3 Hardvér na testovanie vizualizácie letových dát . . . . .	54
<b>6 Testovanie a dosiahnuté výsledky</b>	<b>55</b>
6.1 Ciele testovania . . . . .	55
6.2 Postup testovania . . . . .	55
6.3 Výsledky testovania . . . . .	59
<b>7 Záver</b>	<b>66</b>
7.1 Budúci vývoj . . . . .	66
<b>Literatúra</b>	<b>67</b>
<b>Prílohy</b>	<b>72</b>
<b>A Eulerové uhly</b>	<b>73</b>
<b>B Sprevádzací dotazník k testovaniu</b>	<b>75</b>
<b>C Obsah priloženého pamäťového média</b>	<b>77</b>

# Zoznam obrázkov

2.1	Prvý letún Flyer I. . . . .	10
2.2	Výškomer. Prevzaté z [31]. . . . .	12
2.3	Rýchlomer. Prevzaté z [31]. . . . .	12
2.4	Variometer. Prevzaté z [31]. . . . .	12
2.5	Umelý horizont. Prevzaté z [31]. . . . .	13
2.6	Zatáčkomer. Prevzaté z [31]. . . . .	13
2.7	Kompas. Prevzaté z [51]. . . . .	14
2.8	Smerový zotrvačník. Prevzaté z [31]. . . . .	14
2.9	Ukazateľ horizontálnej situácie. Prevzaté z [21]. . . . .	15
2.10	Indikátor odchýlky od kurzu. Prevzaté z [22]. . . . .	15
2.11	Rádiový výškomer. Prevzaté z [46]. . . . .	15
2.12	Ukazovateľ uhla nábehu. Prevzaté z [36]. . . . .	16
2.13	Ukazovateľ vonkajšia teploty vzduchu. Prevzaté z [51]. . . . .	16
2.14	Pitot-statický systém. . . . .	18
2.15	Dizajn primárneho letového displeja. Prevzaté z [41]. . . . .	19
2.16	Elektronický horizontálny indikátor polohy. . . . .	20
3.1	Architektúra údajov HUD. Prevzaté z [35]. . . . .	22
3.2	HUD využívajúci AR. Prevzaté z [15]. . . . .	23
3.3	Architektúra systému HMD. Prevzaté z [4]. . . . .	25
3.4	Klasická prevádzka vs. prevádzka s jedným pilotom. Prevzaté z [25]. . . . .	30
3.5	Autonómny dron na diaľkové monitorovanie elektrickej elektrárne. Prevzaté z [43]. . . . .	31
3.6	Kokpit eVTOL spoločnosti Lilium. Prevzaté z [48]. . . . .	33
3.7	Kokpit eVTOL spoločnosti Embraer. Prevzaté z [48]. . . . .	34
3.8	Letún eVTOL spoločnosti AutoFlight. Prevzaté z [40]. . . . .	35
4.1	Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej. . . . .	37
4.2	Varovné značenie na stupnici klopenia. . . . .	38
4.3	Varovné značenie pri prekročení náklonu 60°. . . . .	38
4.4	Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej pre fázu letu odlet/pristátie. . . . .	39
4.5	Prilbový displej počas letu pre fázu letu odlet/pristátie. . . . .	39
4.6	Upravený návrh vizualizácie dát pre prilbový displej. . . . .	40
4.7	Vizualizácia dát pre prilbový displej pod výškou 500 metrov. . . . .	41
4.8	Upravený návrh vizualizácie dát pre prilbový displej pre vertikálny odlet/pristátie. . . . .	41
4.9	Ukážka vizualizácie letových dát pre prilbový displej pri dosiahnutí výšky 500 metrov. . . . .	42

4.10	Ukážka upravenej vizualizácie letových dát pre prilbový displej. . . . .	42
4.11	Nový návrh pre vertikálny odlet/pristátie s výškou letúna 0 metrov. . . . .	43
4.12	Nový návrh pre vertikálny odlet/pristátie s výškou letúna 100 metrov. . . . .	43
5.1	Skybox vytvorený v Unity. . . . .	47
5.2	Druhá ukážka skyboxu. . . . .	47
5.3	Čierno-biela fotografia terénu. . . . .	48
5.4	Vygenerovaný terén v Unity. . . . .	48
5.5	Schéma Vector3. . . . .	49
5.6	Špecifikácia obdĺžnika pomocou x, y, šírky a výšky. . . . .	49
5.7	Plocha hlavného menu. . . . .	50
5.8	Plocha počasia. . . . .	50
5.9	Plocha kamery podvozku. . . . .	51
5.10	Plocha mapy. . . . .	51
5.11	Model kokpitu letúna. . . . .	51
5.12	Rotácie lietadla. Prevzaté z [17]. . . . .	52
5.13	Joystick Thrustmaster T.16000M. . . . .	52
5.14	Kvadrokoptéra AG-4. . . . .	53
5.15	Vytvorená stupnica klopenia v grafickom editore. . . . .	53
5.16	Virtuálna realita HTC Vive. Prevzaté z [28]. . . . .	54
6.1	Porovnanie údajov v Unity s údajmi v Xplane. . . . .	56
6.2	Pristátie užívateľa na vertiport. . . . .	56
6.3	Plán prvého experimentu. . . . .	57
6.4	Plán druhého experimentu. . . . .	58
6.5	Vertiport pre vertikálne pristátie. . . . .	58
A.1	Eulerove uhly. Prevzaté z [24]. . . . .	73



# Zoznam skratiek

Skratka	Anglický názov	Slovenský názov
AI	Attitude Indicator	Umelý horizont
AOA	Angle of Attack	Ukazovateľ uhla nábehu
AR	Augmented Reality	Rozšírená realita
ASI	Airspeed Indicator	Rýchlomer
CAS	Calibrated Airspeed	Kalibrovaná vzdušná rýchlosť
CDI	Course Deviation Indicator	Indikátor odchýlky kurzu
CRT	Cathode Ray Tube	Katódová trubica
DASH	Display And Sight Helmet	Prilba na zobrazovanie
DME	Distance Measuring Equipment	Zariadenia na meranie vzdialenosti
EFIS	Electronic Flight Instrument System	Elektronický systém letových prístrojov
eVTOL	electric Vertical Takeoff and Landing	Vertikálny odlet a pristátie
FAA	Federal Aviation Administration	Federálny letecký úrad
FEA	Finite Element Analysis	Konečno-prvková analýza
HI	Heading Indicator	Smerový zotrvačník
HMD	Helmet Mounted Display	Prilbový displej
HMS	Helmet Mounted Sights	Zameriavače na prilbe
HSI	Horizontal Situation Indicator	Horizontálny indikátor situácie
IAS	Indicated Airspeed	Indikovaná vzdušná rýchlosť
IHADSS	Integrated Helmet And Display Sighting System	Integrovaný prilbový zameriavací systém
ILS	Instrument Landing System	Systém prístrojového pristátia
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Prístrojové meteorologické podmienky

IVSI	Instantaneous Vertical Speed Indicator	Indikátor okamžitej vertikálnej rýchlosti
JHMCS	Joint Helmet Mounted Cueing System	Modulárny prilbový displej
LOC	Instrument Landing System Localizer	Lokalizátor systému prístrojového pristátia
MFD	Multi-Function Display	Multifunkčný displej
MMWR	Active Millimeter Wave Rada	Aktívny radar s milimetrovými vlnami
MPH	Miles Per Hour	Míle za hodinu
OAT	Outside Air Temperature	Ukazovateľ vonkajšia teploty vzduchu
OBS	Omni Bearing Selector	Všesmerový selektor
PFD	Primary Flight Display	Primárny letový displej
SPO	Single Pilot Operation	Prevádzka s jedným pilotom
STAMP	Systems-Theoretic Accident Model and Processes	Systémovo-teoretický model nehôd a procesov
TAS	True Airspeed	Pravá vzdušná rýchlosť
UHF	Ultra High Frequency	Ultra vysoká frekvencia
VCS	Voice Communication System	Hlasový komunikačný systém
VFE	Maximum Flap Extended speed	Maximálna rýchlosť pri vysunutí klapky
VHF	Very High Frequency	Veľmi vysoká frekvencia
VN0	Maximum structural cruising speed	Maximálna konštrukčná rýchlosť
VNE	Never Exceed	Nikdy neprekračujte
VS0	Stalling speed	Pádová rýchlosť
VS1	Vertical Speed Indicator	Indikátor vertikálnej rýchlosti
VTAS	Visual Target Acquisition System	Systém vizuálneho zameriavania cieľov

# Kapitola 1

## Úvod

Letecká doprava je v dnešnej globalizovanej spoločnosti neoddeliteľnou súčasťou. Letecký priemysel zahŕňa rôzne činnosti vrátane komerčných leteckých spoločností, nákladnej dopravy, správy letísk a riadenia letovej prevádzky. Jedným z kľúčových faktorov pri vývoji je spôsob, akým sú letové informácie vizualizované a prezentované pilotom priamo v pilotnej kabíne. Historický vývoj dizajnu vizualizácie letových dát a aktuálne trendy v tejto oblasti majú zásadný vplyv na to, ako piloti vnímajú a interpretujú tieto dôležité letové informácie [9].

Táto práca sa sústreďí na detailný prieskum tejto dôležitej problematiky a analyzuje historický vývoj návrhu vizualizácie letových údajov a súčasné trendy v tejto oblasti. Na základe tejto analýzy bude vytvorený nový systém vizualizácie letových dát, ktorý by mohol výrazne ovplyvniť spôsob, akým piloti komunikujú s leteckými systémami a, ako vnímajú dôležité letové informácie.

Hlavným cieľom tejto práce je vytvoriť a implementovať systém zobrazovania údajov priamo na pilotnej prilbe (HMD), ktorý je navrhnutý pre letúny schopné vertikálneho vzletu a pristátia. Očakáva sa, že takýto systém prinesie výrazné zlepšenie efektivity a bezpečnosti leteckej dopravy. Spojenie moderného systému vizualizácie dát s HMD vytvorí inovatívny a futuristický kokpit, ktorý pilotom umožní lepšiu kontrolu a orientáciu počas letu a tým aj zvýšenie bezpečnosti letectva.

V druhej kapitole diplomovej práce je spomenutý historický vývoj vizualizácie letových dát v kokpite letúna. Na začiatku kapitoly je spomenutá história kokpitu v letectve. Následne sú v kapitole spomenuté prístroje vizualizujúce letové veličiny, kde je popísané ich rozdelenie a využitie. Po analógových prístrojoch, sú na záver spomenuté digitálne letové displeje a to PFD a MFD.

V následnej tretej kapitole sú spomenuté trendy vizualizácie letových dát v súčasnej dobe. Je tu spomenutý HUD, kde je znázornená jeho architektúra. Následne je v kapitole popísaná AR v letectve. V kapitole je ďalej spomenutý prilbový displej, kde je zmienená architektúra, analýza súčasných trendov či latencia systému. V kapitole je následne popísaná história teleoperácie, kde je podotknutá jej história či prevádzka s jedným pilotom. Na záver teleoperácie je zmienený autonómny let, kde je podotknuté využitie umelej inteligencie. Na záver, sú v kapitole spomenuté letúnu eVTOL, kde sú znázornené prístrojové panely a následne spomenuté air taxi.

Vo štvrtej kapitole je popísaný návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej. V kapitole je popísaný a znázornený prvý vlastný návrh HMD, kde sú taktiež vysvetlené jednotlivé prvky nachádzajúce sa na displeji. Neskôr sa v kapitole nachádzajú upravené návrhy vizualizácie dát pre prilbový displej a popis k nim.

Ďalšia piatá kapitola sa zaoberá implementáciou vizualizácie letových dát pre prilbový displej. V kapitole je spomenutý spôsob získavania dát z leteckého simulátora X-plane 11 a následne prijatie dát v Unity. Taktiež je v kapitole spomenuté vytváranie prostredia v Unity, konkrétne terénu a skyboxu. Po týchto krokoch nasleduje popis implementácie jednotlivých prvkov prilbového displeja. Je tu spomenutý postup a funkcie, ktoré boli použité pri tvorbe displeja. Následne je v kapitole popísané a znázornené vytvorenie modelu letúna. Na záver sú v kapitole spomenuté použité aplikácie a nástroje, ktoré boli využívané pri tvorbe vizualizácie letových dát.

Predposledná šiesta kapitola obsahuje informácie testovania a dosiahnutých výsledkov. V kapitole sú spomenuté ciele testovania a postup testovania. Sú tu spomenuté experimenty, ktoré boli vyhodnotené a spísané do dosiahnutých výsledkov.

V poslednej siedmej kapitole je zmienený záver práce. Taktiež sú tu spomenuté možné nápady do budúceho vývoja.

## Kapitola 2

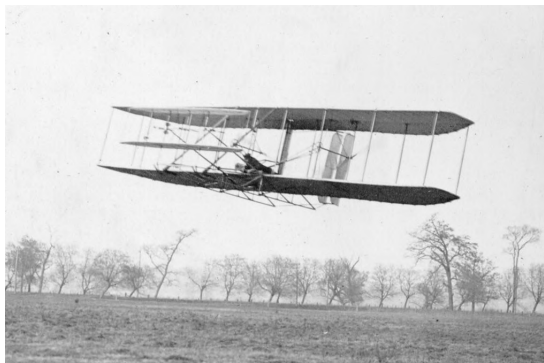
# Historický vývoj vizualizácie letových dát v kokpite letúna

Letectvo má svoje začiatky spojené s bratmi Wrightovcami, Orvilleom a Wilburom, ktorí dňa 17. decembra 1903 dosiahli zlomový moment. Ich letún Flyer I sa prvýkrát vzniesol nad pobrežím Severnej Karolíny, čím otvorilo novú éru vzdušnej dopravy. Ich úspech využilo mnoho ďalších pionierov letectva, ako napríklad Santos-Dumont alebo Bleriot. Začiatky letectva boli teda známe svojou odvahou a neustálou túžbou prekonávať hranice. Postupne prichádzali nové technologické možnosti vo vizualizácii letových dát, ktoré zaručovali zvýšenú efektivitu či bezpečnosť, ktorá je v letectve prvoradá [37].

### 2.1 História kokpitu v letectve

Kokpit je časť letúna, ktorá poskytuje výhľad dopredu a do strán a v ktorej sa nachádza pilot a ostatní členovia posádky. V dosahu posádky sa v kokpite nachádzajú všetky zobrazovacie, riadiace a komunikačné zariadenia, ktoré členovia posádky potrebujú na ovládanie a navigáciu letúna na zemi a vo vzduchu, na komunikáciu s pozemnými zariadeniami alebo inými letúnami a na monitorovanie alebo ovládanie palubných systémov a zariadení ako motory, palivové nádrže, klimatizácia atď. [50].

Prístrojový panel umiestnený pred pilotmi alebo medzi nimi, ktorý zobrazuje informácie potrebné na navigáciu a riadenie letu, bol vždy súčasťou letúnov všetkých typov. Výnimkou je letún bratov Wrightovcov, ktorých letún Flyer nemal sedadlo ani kokpit. Pilot jednoducho sedel na otvorenom priestranstve medzi lamelami a podperami, ktoré tvorili trup letúna. Model letúna Flyer je znázornený na obrázku 2.1. Môžeme povedať, že prístrojové panely zostali počas prvých tridsiatich rokov histórie letectva pomerne jednoduché. V prvých dňoch motorového lietania získavali piloti hlavné informácie, ktoré potrebovali, z vonkajšieho prostredia. Pri dobrej viditeľnosti, otvorené kokpity umožňovali pilotom získať dobrý prehľad o pohyboch letúna (zatačanie, stúpanie a klesanie) a o jeho polohe, zatiaľ čo nerušený výhľad na zem im pomáhal pri navigácii. V 30. rokoch 20. storočia však prístrojové panely vybavené širšou škálou zložitejších prístrojov začali pilotom umožňovať lety v noci a za zníženej viditeľnosti. Ďalší pokrok sa dosiahol v 50. rokoch 20. storočia, keď sa zaviedli prístroje umožňujúce lietadlám pristávať za zlých poveternostných podmienok. Tento trend pokračoval, pričom rozsiahle zdokonalenie avioniky zabezpečilo zvýšenú funkčnosť a autonómiu vzhľadom na vonkajšie prostredie [50].



Obr. 2.1: Prvý letún Flyer I.

## 2.2 Prístroje vizualizujúce letové veličiny

Letúny predstavujú jedny z najkomplexnejších technických zariadení na svete. Ich pohyb v stále sa meniacom prostredí nebies vyžaduje výnimočné technológie. Aby bola letecká prevádzka bezpečná, tak si to vyžaduje komplexné schopnosti a znalosti. Piloti absolvujú veľa hodín intenzívneho tréningu na zvládnutie rôznych, častokrát náhlych situácií, no letové prístroje sú práve tie, ktoré im majú poskytnúť nevyhnutné informácie pre úspešné zvládnutie týchto náročných úloh. Vďaka neustálemu technologickému vývoju letové prístroje získavajú na spoľahlivosti a kvalite, čo ich robí bezkonkurenčnými [22]. Každý palubný letecký prístroj musí spĺňať určité kritériá, ako sú [26]:

- malá hmotnosť a rozmery,
- dostatočná presnosť údajov,
- odolnosť voči vplyvom zrýchlenia a otrasov,
- správne tlmenie systému prístroja,
- dobré čítanie údajov prístroja za svetla ale aj za tmy,
- ľahká montáž a demontáž prístroja do lietadla,
- odolnosť voči magnetickým alebo elektromagnetickým poliam,
- jednoduchá údržba a ošetrovanie,
- dlhá životnosť prístroja,
- zobrazenie údajov vo všetkých polohách lietadla.

Tieto kritéria platia pre letecké palubné prístroje všeobecne. Avšak pri niektorých prístrojoch nebudú určité kritéria platiť. Letecké palubné prístroje sa delia na dve hlavné oblasti a to prístroje pre [26]:

1. riadenie letu,
2. kontrolu lietadla.

### 2.2.1 Palubné prístroje pre kontrolu letu

Tieto prístroje sa zameriavajú na poskytovanie informácií pilotovi o aktuálnom stave letu, ako sú rýchlosť, výška, náklon, atď. Tieto prístroje sa delia na letové a navigačné. Medzi letové prístroje patrí [26]:

- výškomer,
- rýchlomer,
- umelý horizont,
- variometer,
- zatačkomer.

#### Výškomer

Výškomer je prístroj, ktorý meria nadmorskú výšku letúna. Jednoduchý výškomer obsahuje veľkú a malú ručičku, kde veľká ručička ukazuje stovky stôp a malá ručička ukazuje tisíce stôp. V prípade, že sa tam nachádza tenká biela čiara, ukazuje v desiatkach tisíc stôp. Výškomer funguje na základe merania tlaku vzduchu pomocou statického portu. Tento vzduch je vedený do zadného púzdra výškomera. Vo vnútri je utesnené aneroidné doštičky. Keď letún stúpa, tlak vo vnútri púzdra klesá a aneroidné doštičky sa rozpínajú a zmršťujú. Vysoký statický tlak tlačí na doštičky, čo spôsobuje indikáciu poklesu nadmorskej výšky. Naopak, nízky statický tlak umožňuje doštičkám rozpínať sa. Mechanické spojenie pohybuje ihlami na čelnej strane výškomera, čo indikuje zmeny nadmorskej výšky [51]. Aby bol výškomer presný, musí sa nastaviť aktuálny miestny tlak pomocou ovládača na výškomere. Vynález výškomera si patentoval Paul Kollsman v roku 1936 [53]. Klasický výškomer je znázornený na obrázku 2.2.

#### Rýchlomer

Rýchlomer je meracie zariadenie, ktoré používa diferenciálny tlak vzduchu na zobrazenie rýchlosti letúna. Zvyčajne sa táto rýchlosť zobrazuje v uzloch, ale môže sa taktiež zobrazovať v míľach za hodinu (MPH). Rýchlomer sa skladá z 1 ručičky, ktorá sa pohybuje v smere hodinových ručičiek a značí rýchlosť letúna [33]. Rýchlostné limity sú vyjadrené farbami, kde žltý a červený ukazovateľ rýchlosti signalizujú oblasti varovania a maximálnu rýchlosť (VNE), ktorú pilot nesmie prekročiť. Na rýchlomeri sa nachádza taktiež biely oblúk, ktorý je určený pre rozsah klapiek, zelený oblúk pre normálny prevádzkový rozsah a ďalšie označenia, ktoré označujú rôzne rýchlostné limity, napríklad minimálnu rýchlosť pristátia (VS0), maximálnu rýchlosť s klapkami (VFE) a maximálnu cestovnú rýchlosť (VN0). Prekročenie tejto maximálnej rýchlosti môže mať za následok poškodenie alebo zlyhanie štruktúry letúna [51]. Rýchlomer je znázorený na obrázku 2.2.

#### Variometer

Variometer sa používa na zobrazenie, či letún stúpa, klesá alebo sa nachádza v horizontálnom lete. Rýchlosť stúpania alebo klesania sa meria v stopách za minútu (fpm). Kalibrovaný VSI by mal ukazovať nulu pri horizontálnom lete. Tento indikátor funguje na základe merania diferenčného tlaku, ale používa iba statický tlak. V prístroji sa nachádza membrána,

ktorá je spojená so statickou vedenou linkou a vzduchotesným púzdrom. Membrána prijíma vzduch bez obmedzenia, zatiaľ čo púzdro prijíma statický tlak cez obmedzený otvor. Keď je letún na zemi alebo v horizontálnom lete, tlaky vnútri membrány a prístroja sú rovnaké a ukazovateľ je v nulovej polohe. Keď letún stúpa alebo klesá, tlak vo vnútri sa okamžite mení, ale vzhľadom na obmedzený priechod zostáva tlak v púzde vyšší alebo nižší na krátky čas, čo spôsobuje, že membrána sa zmršťuje alebo roztahuje. Tento tlakový rozdiel sa zobrazuje ako stúpanie alebo klesanie na ručičke prístroja. VSI zobrazuje dve informácie a to o trende a o rýchlosti. Informácia o trende ukazuje okamžitú indikáciu zvýšenia alebo zníženia rýchlosti stúpania alebo klesania. Napríklad, ak letún udržiava horizontálnu polohu a pilot potiahne riadiacu páku dozadu, ručička VSI sa pohne nahor a indikuje stúpanie. Ak sa udržiava konštantné stúpanie, ručička sa stabilizuje a ukazuje rýchlosť stúpania. Oneskorenie medzi začiatkom zmeny rýchlosti a zobrazením presných údajov sa môže predĺžiť v dôsledku turbulencie. Niektoré letúny sú vybavené okamžitým vertikálnym indikátorom (IVSI), ktorý používa akcelerometre na kompenzáciu oneskorenia. Tieto indikátory poskytujú presnejšie a stabilnejšie údaje o rýchlosti stúpania [51].



Obr. 2.2: Výškomer.  
Prevzaté z [31].



Obr. 2.3: Rýchlomér.  
Prevzaté z [31].



Obr. 2.4: Variometer.  
Prevzaté z [31].

## Umelý horizont

Umelý horizont, znázornený na obrázku 2.5, je dôležitý letový prístroj, ktorý ponúka informácie o polohe letúna vo vzťahu k horizontu Zeme. Tento prístroj je bežne vybavený v pilotnej kabíne letúna. Umožňuje pilotom kontrolovať či letún stúpa, klesá alebo sa nakláňa. Väčšina ukazovateľov polohy používa gyroskop na poskytovanie informácií o polohe letúna. Gyroskop v indikátore je namontovaný v horizontálnej polohe a jeho činnosť závisí od tuhosti v priestore. Horizontálna lišta predstavuje skutočný horizont a zostáva vo vodorovnej rovine, aj keď sa letún nakláňa. Gyroskop sa otáča v horizontálnej rovine a odoláva vychýleniu dráhy otáčania [51]. Na prístroji sa nachádzajú referenčné čiary, ktoré predstavujú určité stupne, a menia sa, keď sa mení poloha letúna. Existujú dva typy umelých horizontov a to vákuové a elektronické. Oba typy používajú gyroskop, avšak elektronické umelé horizonty majú digitálny displej [13].

## Zatáčkomer

Zatáčkomer sníma pohyby pri nakláňaní, vybočovaní a zatáčaní a tieto pohyby zobrazuje prostredníctvom dvoch komponentov a to ručičky, ktorá symbolizuje letún a otáča sa doprava alebo doľava, a priečného relatívneho sklonomera (čiernej guľičky), ktorý je zavesený v kvapaline a nakláňa sa doľava, doprava alebo zostáva uprostred v závislosti od náklonu



letúna. Prístroj je napájaný elektricky a pri zapnutí sa jeho výstražná vlajka sklopí, aby potvrdila jeho funkčnosť. Ak by elektrický systém prestal fungovať, prístroj by poskytoval nasprávne údaje. Niektoré zatáčkomery, hlavne v starších letúnoch, sú napájané len pomocou vákuového čerpadla. Označenie "2 min" na zatáčkomery hovorí, že pri otáčaní letúna rýchlosťou 3 stupne za sekundu vykoná letún plný obrat o 360 stupňov za dve minúty [47]. Zatačkomer je znázornený na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Umelý horizont. Prevzaté z [31].



Obr. 2.6: Zatačkomer. Prevzaté z [31].

Do druhej kategórie pre palubné prístroje kontoly letu patrí navigačná. Medzi navigačné letecké palubné prístroje patrí:

- kompas,
- smerový zotrvačník.

## Kompas

Magnetický kompas, znázornený na obrázku 2.7 je jeden z najstarších a najjednoduchších nástrojov na indikáciu. Magnet sa priťahuje a udržuje magnetický tok. Existujú dva póly, severný a južný. Letecký magnetický kompas obsahuje dva malé magnety, ktoré sú pripojené ku kovovému plaváku v miske s kompasovou kvapalinou. Magnetický kompas má kartičku, ktorá je označená písmenami a číslami predstavujúcimi svetové strany a stupňové značky. Plavák a karta sú spojené cez čap, ktorý umožňuje pohyb a otočenie plaváka. Sklon plaváka nesmie prekročiť 18°, inak budú údaje nespoľahlivé. Puzdro kompasu je naplnené kompasovou kvapalinou a je zabezpečené pružnou membránou alebo kovovým vlnovcom, aby sa zabránilo úniku kvapaliny pri teplotných zmenách [51].

## Smerový zotrvačník

Smerový zotrvačník je mechanický prístroj, ktorý sa používa na uľahčenie používania magnetického kompasu. Ukazuje aktuálny smer, v ktorom je letún nasmerovaný vzhľadom na magnetický sever. Gyroskop, ktorý poháňa smerový zotrvačník, sa otáča rýchlosťou 24 000 otáčok za minútu. Smerový zotrvačník funguje na princípe tuhosti v priestore. K rotoru je pripevnená karta s kompasovým kurzom. Pri otáčaní prístroja a letúna okolo vertikálnej osi gyroskopu poskytuje karta presné informácie o kurze. HI je ľahko čitateľný a ukazuje magnetický kurz v stupňoch rovnako ako magnetický kompas. Magnetický kompas používa magnetickú ihlu a kvapalinu na určenie smeru letúna. zatiaľ čo smerový zotrvačník používa gyroskop. Magnetický kompas má taktiež niekoľko chýb, vrátane vplyvu turbulencií, ktorými nie je HI ovplyvnený. Na čelnej strane smerového zotrvačníka je tvar letúna, kde jeho

nos ukazuje na aktuálny kurz letúna. Kompasová karta môže obsahovať písmená označujúce osem svetových strán [12]. Smerový zotrvačník je znázornený na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Kompas. Prevzaté z [51].



Obr. 2.8: Smerový zotrvačník. Prevzaté z [31].

### 2.2.2 Palubné prístroje pre kontrolu lietadla

Tieto prístroje sú zamerané na poskytovanie informácií o fyzikálnom stave lietadla ako celku. Existujú dva typy prístrojov pre kontrolu lietadla. Sú to kontrola motora a kontrola draku, kde patrí polohoznak. Do kategórie kontrola motora patria palubné prístroje ako [26]:

- otáčkomer,
- tlakomer oleja,
- teplomer oleja plniaci tlak,
- teplomer hlav valcov,
- palivomer.

### 2.2.3 Sekundárne letové prístroje

Sekundárne letové prístroje v kokpite letúna predstavujú doplnkové nástroje, ktoré poskytujú pilotovi ďalšie informácie o stave letu. Tieto prístroje sú zvyčajne zamerané na detailnejšie meranie a monitorovanie parametrov letu, ako sú teplota motora, tlak v pneumatikách, alebo dokonca informácie o palube a systémoch letúna. Ich úlohou je poskytnúť pilotovi podrobnejšie údaje a dôležité informácie, ktoré môžu byť dôležité pre bezpečnosť, správne riadenie letúna a monitorovanie jeho výkonu. Sekundárne letové prístroje umožňujú pilotom mať podrobný prehľad o fungovaní letúna a zabezpečujú ešte presnejšie sledovanie jeho stavu a systémov v priebehu letu. Medzi sekundárne letové prístroje patrí [22]:

- Ukazateľ horizontálnej situácie (HSI),
- Indikátor odchýlky od kurzu (CDI),
- Rádiový výškomer,
- Zariadenia na meranie vzdialenosti (DME),
- Ukazovateľ uhla nábehu (AOA),
- Ukazovateľ vonkajšej teploty vzduchu (OAT).

## Ukazateľ horizontálnej situácie

Ukazateľ horizontálnej situácie (HSI) spája smerový zotrvačník (HI) a indikátor odchýlky od kurzu (CDI) do jedného prístroja. HSI poskytuje dôležité navigačné informácie a ukazuje aktuálny kurz letúna a požadovaný kurz. Integrovaný CDI poskytuje informácie o polohe letúna vzhľadom na požadovaný kurz a zobrazuje akúkoľvek odchýlku vľavo alebo vpravo od kurzovej čiary. HSI je znázornený na obrázku 2.9.

Pomocou tohto prístroja môžu piloti vykonávať drobné korekcie, aby zostali na kurze, najmä počas prístrojových priblížení a odletov. Niektoré prístroje HSI obsahujú indikátor sklzu, ktorý poskytuje vertikálne vedenie počas prístrojového priblíženia [22].

## Indikátor odchýlky od kurzu

Indikátor odchýlky od kurzu (CDI) ukazuje pilotovy vzťah letúna k zvolenému kurzu. Na zobrazenie línie kurzu prijíma navigačné rádio dva signály zo stanice VOR, jeden pevný a jeden premenný. Pevný signál je rovnaký bez ohľadu na zvolený radiál, zatiaľ čo každý radiál vytvára mierne odlišný premenný signál. Časť systému v pilotnej kabíne určuje, na ktorom radiále sa letún nachádza, na základe fázového rozdielu medzi pevným a premenlivým signálom. Otáčaním OBS môže pilot vycentrovať CDI alebo zvoliť požadovaný kurz [52]. Indikátor odchýlky od kurzu je znázornený na obrázku 2.9.

## Rádiový výškomer

Rádiový výškomer je zariadenie, ktoré poskytuje presné merania výšky letúna nad zemským povrchom. Tieto merania sú dôležité hlavne počas pristátia a stúpania letúna. Výškomery sú navrhnuté tak, aby mali vysokú mieru presnosti a integrity, nehladiac na terén, nad ktorým sa letún nachádza. Informácie z výškomera sa používajú na rôzne účely, vrátane navigácie, riadenia letu a výstrahy pred blížiacim sa terénom. Každý letún má až tri vysielacie jednotky rádiového výškomera, ktoré pracujú nezávisle a sú navrhnuté tak, aby vydržali 30 rokov. Rádiová výška sa vypočíta z časového intervalu, v ktorom sa signál pochádzajúci z letúna odráža od zeme. Rádiové výškomery určené na použitie v automatizovaných pristávacích systémoch musia dosahovať presnosť 3 stopy, čo predstavuje 0,9 metra [7]. Tento výškomer je znázornený na obrázku 2.9.



Obr. 2.9: Ukazateľ horizontálnej situácie. Prevzaté z [21].



Obr. 2.10: Indikátor odchýlky od kurzu. Prevzaté z [22].



Obr. 2.11: Rádiový výškomer. Prevzaté z [46].

## Zariadenia na meranie vzdialenosti

Zariadenie na meranie vzdialenosti vyžaduje pozemné aj palubné vybavenie. Zvyčajne je vybavenie DME umiestnené spolu s VOR alebo ILS/LOC. Systémy VOR a ILS vysielajú svoje navigačné signály pomocou VHF frekvencií, zatiaľ čo DME vysielá pomocou UHF frekvencií. DME rádiostanice merajú vzdialenosť medzi vysielateľom a prijímačom na základe časového intervalu medzi dotazovacím a odpoveďovým impulzom. Je to podobné, ako používanie sonarov na mapovanie oceánskeho dna ponorkami. Výsledkom merania je "šikmá vzdialenosť". Pozemné DME vysieláče sú navrhnuté na prevádzku približne 100 letúnov naraz. Ak je zariadenie preťažené veľkým počtom letúnov, najvzdialenejšie z nich nemusia byť schopné prijímať signály DME [30].

## Ukazovateľ uhla nábehu

Ukazovatele uhla nábehu sa kedysi používali iba vo vojenských stíhačkách a niektorých dopravných letúnoch. Teraz sú však tieto ukazovatele stále viac bežné aj v ľahkých jednomotorových letúnoch. Digitálne ukazovatele AOA umožňujú pilotom leteckého priemyslu bezpečnejšie a presnejšie lietanie v rôznych fázach letu. Hlavným účelom AOA je meranie uhla medzi osou krídla a relatívnym vetrom. Tieto ukazovatele upozorňujú pilotov, keď sa blížia k aerodynamickému pádu. Pádovú rýchlosť môžu ovplyvniť faktory ako hmotnosť letúna, zaťaženie, uhol náklonu, nastavenie klapiek a ďalšie faktory, ktoré majú vplyv na rýchlomer avšak na ukazovatele AOA vplyv nemajú. Tradičné ukazovatele AOA merajú informácie pomocou pohyblivej lopatky, ktorá je umiestnená v blízkosti nosa letúna. Takýto ukazovateľ môžete vidieť na obrázku 2.12. Výhodou AOA je, že môžu pilotovi ukázať optimálne uhly pre stúpanie či priblíženie [19].

## Ukazovateľ vonkajšia teploty vzduchu

Ukazovateľ vonkajšej teploty vzduchu (OAT) je jednoduché a účinné zariadenie umiestnené tak, aby snímač bol vystavený vonkajšiemu vzduchu. Snímací prvok pozostáva z bimetalového teplomera, v ktorom sú dva rozdielne materiály spájané do jedného pásu zvlneného do tvaru špirály. Jeden koniec je ukotvený v ochrannej rúrke a druhý je pripojený k ukazovateľu. Teploty OAT sú kalibrované v °C, °F alebo v oboch jednotkách [51]. OAT je znázornený na obrázku 2.13.



Obr. 2.12: Ukazovateľ uhla nábehu. Prevzaté z [36].



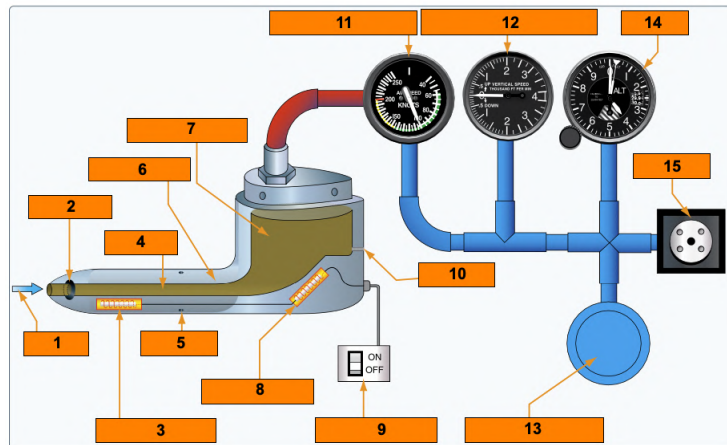
Obr. 2.13: Ukazovateľ vonkajšia teploty vzduchu. Prevzaté z [51].

### 2.2.4 Pitot-statické letové prístroje

Pitot-statický systém je komplexný mechanizmus využívajúci dvojicu tlakov a to statický a dynamický. Tieto kombinované tlaky sa používajú pre správnu funkciu rýchlomera, výškomera a indikátora vertikálnej rýchlosti. Pitotova trubica je používaná na meranie tlaku, ktorý vzniká pri pohybe letúna cez vzduch. Meria celkový tlak, ktorý sa skladá z dynamického a statického tlaku. Dynamický tlak sa vytvára vďaka pohybu letúna. Statický tlak je vždy prítomný bez ohľadu na pohyb letúna. Je to v podstate barometrický tlak v miestnej oblasti. Pitotova trubica má malý otvor na získanie celkového tlaku a malý otvor v zadnej časti na odvádzanie vlhkosti. Obe tieto otvory sa musia kontrolovať pred letom, aby neboli zablokované. Pitotova trubica sa využíva na prístroji ASI, ktorý zobrazuje dynamický tlak. Výškomer a VSI nevyužívajú pitotovu trubicu, ale iba statický tlak získaný zo statického portu [51].

Statická tlaková komora a potrubia sú dôležitou súčasťou nachádzajúce sa na stranách daného letúna. Statická komora je odvetrávaná cez malé otvory do okolitého vzduchu, aby sa dosiahol atmosferický tlak. Prístroje na palube letúna sú spojené so statickým systémom cez malé vedenia. V niektorých letúnoch je k dispozícii aj alternatívny statický zdroj, ktorý sa aktivuje v prípade zlyhania primárneho zdroja. Tento alternatívny zdroj sa zvyčajne nachádza vo vnútri pilotnej kabíny. Z dôvodu Venturiho efektu, tlak vzduchu vnútri kabíny je nižší ako vonkajší tlak. Pri používaní alternatívneho statického zdroja prístroje môžu indikovať nepresné hodnoty, ako napríklad vyššiu nadmorskú výšku, rýchlosť letu a chvilkové stúpanie. Preto je dôležité, aby pilot konzultoval letovú príručku letúna, aby určil veľkosť týchto chýb. V prípade, že letún nie je vybavený alternatívnym statickým zdrojom, môže dôjsť k poruche indikátora vertikálnej rýchlosti. Pitot-statický systém je znázornený na obrázku 2.14. Popis pitot-statického systému [51]:

- |                       |                                  |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1. nasávanie vzduchu, | 9. spínač ohrievača,             |
| 2. priehradová doska, | 10. vypúšťací otvor,             |
| 3. ohrievač,          | 11. rýchlomer (ASI),             |
| 4. pitotova trubica,  | 12. variometer,                  |
| 5. statický otvor,    | 13. alternatívny statický zdroj, |
| 6. statická komora,   | 14. výškomer,                    |
| 7. tlaková komora,    | 15. statický port.               |
| 8. ohrievač,          |                                  |



Obr. 2.14: Pitot-statický systém.

## 2.3 Elektronický systém letových prístrojov

Elektronický systém letových prístrojov (EFIS) je palubný prístrojový systém, v ktorom sa používa elektronická zobrazovacia technológia [44].

Elektronické letové displeje boli prvýkrát vyvinuté v 60. rokoch 20. storočia a v 70. rokoch 20. storočia začali počítačom riadené displeje s katódovou trubicou nahrádzať elektromechanické prístroje v komerčných dopravných lietadlách. Používanie CRT viedlo k prezývke "glass cockpit", ktorá sa stále bežne používa pre lietadlá s digitálnymi letovými displejmi. Predtým bol kokpit dopravných lietadiel preplnený prístrojmi, ale integrácia displejov v kokpite mala zjednodušiť úlohy posádky. Aj keď systémy ľahkých lietadiel nie sú také zložité, ako systémy dopravných lietadiel, súčasné displeje v kokpite majú podobné funkcie ako v dopravných lietadlách. Displeje poskytujú integrované riadenie letu, autopilota, komunikáciu a navigáciu. Veľká časť práce NASA v oblasti TSRV sa dostala do konštrukcie kokpitov civilných dopravných lietadiel kategórie Boeing 757 a 767 [2].

Neskoršie zobrazenia prístrojov sú prezentované na viacfarebných obrazovkách s tekutými kryštálmi (LCD), ktoré nahrádzajú niektoré alebo všetky konvenčné letové prístroje pre oboch pilotov [44].

### 2.3.1 Primárny letový displej

Prvým krokom k vytvoreniu PFD bola potreba prekonať obmedzenia tradičných letových prístrojov. Tieto prístroje, ako boli rýchlomery, výškomery a ďalšie, poskytovali pilotom základné informácie o stavoch letu, avšak ich interpretácia a koordinácia mohla byť v niektorých prípadoch náročná, obzvlášť vo výnimočných situáciách.

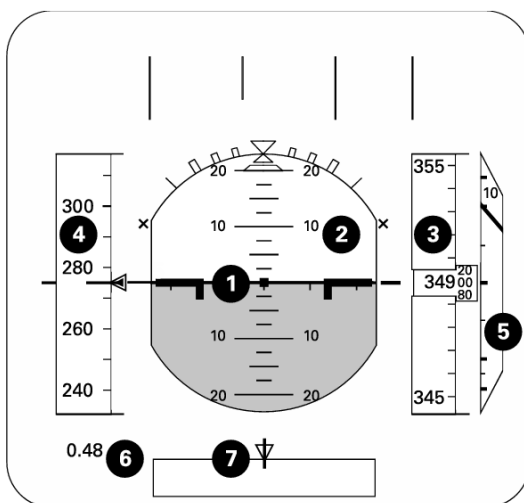
#### Popis primárneho letového displeja

Primárne letové displeje používajú počítačový generátor signálov na zobrazenie informácií, ako je poloha, kurz, rýchlosť, výška a vertikálna rýchlosť lietadla. PFD tiež zahrňuje navigačné informácie a informácie o počasí. PFD umožňuje pilotom získať všetky potrebné letové informácie s jedným pohľadom, čo znižuje potrebu neustáleho skenovania prístrojov. Výrobcovia avioniky neustále vylepšujú tieto displeje, aby poskytli pilotom ešte viac užitočných informácií [29].



Primárny letový displej v komerčnej pilotnej kabíne je príkladom sofistikovaného vizuálneho zobrazenia, ktoré kombinuje alfanumerické údaje so vzorovou vizuálnou reprezentáciou a umožňuje priamu interakciu. Páska rýchlosti na ľavej strane a páska výšky na pravej strane v kombinácii s vertikálnou rýchlosťou ukazujú pilotovi letovú spôsobilosť letúna v číselnej forme. Celkovo ide o kombináciu vizuálnych prvkov a vizuálnych vzorov, ktoré poskytujú dôležité informácie pre pilotov v extrémnych prostrediach. Rozmiestnenie letových údajov v PFD, ktoré je na obrázku 2.15 je nasledovné [41]:

1. umelý horizont,
2. zobrazovacia plocha pre náklon a sklon letúna,
3. stupnica výšky zobrazujúca aktuálnu nadmorskú výšku letúna,
4. stupnica rýchlosti zobrazujúca aktuálnu rýchlosť letúna v uzloch,
5. vertikálny displej rýchlosti zobrazujúci rýchlosť zmeny nadmorskej výšky v stopách za minútu,
6. zobrazenie rýchlosti ako Mach číslo,
7. zobrazenie natočenia letúna.



Obr. 2.15: Dizajn primárneho letového displeja. Prevzaté z [41].

### 2.3.2 Elektronický horizontálny indikátor polohy

Elektronický horizontálny indikátor polohy, často označovaný ako navigačný displej, nahrádza niekoľko rôznych prístrojov, ktoré sa nachádzajú na bežnom prístrojovom paneli letúna, a môže sa používať na zobrazenie niektorých alebo všetkých nasledujúcich informácií [44]:

- letový kurz,
- kurz alebo vybraná dráha,
- bočná odchýlka od zvolenej dráhy,

- pozemná rýchlosť, vzdialenosť a čas do cieľa,
- navigačná mapa,
- informácie o počasi.

Použitie typického EHSI v navigačnom režime a v režime počasia je znázornený na obrázku 2.16.



Obr. 2.16: Elektronický horizontálny indikátor polohy.

### 2.3.3 Multifunkčný letový displej

Systémy MFD integrujú viac funkcií do jedného displeja prostredníctvom funkčných prekrytí a okien. Je dôležité, aby tieto funkcie zdieľali zobrazovacie prvky a dosiahli tak konzistentnosť. Zobrazovacie polia by mali byť štandardizované na všetkých obrazovkách a spoločné časti zobrazenia by mali byť vždy na rovnakých miestach. Toto umožňuje používateľom vytvoriť si priestorové očakávania a znižuje pracovnú záťažnosť. Pre optimálnu rýchlosť a presnosť sa musí zabezpečiť kompatibilita prvkov zobrazenia nielen v rámci jednej obrazovky, ale aj na viacerých displejoch. Škálovanie vzdialenosti prekrytia displeja by malo byť automatické a symbolika by mala byť jasná, zreteľná a sémanticky konzistentná.

V záujme zachovania účinnosti by malo byť používanie farieb konzistentné v celom MFD a v celej pilotnej kabíne. V opačnom prípade môže dôjsť k zmätku a nesprávnej interpretácii, keď sa letová posádka pokúša integrovať informácie z viacerých zdrojov v MFD aj mimo neho. Farby môžu byť veľmi účinné pri uľahčovaní zoskupovania a spracovania informácií na elektronických displejoch [5]. Význam použitých farieb je nasledovný [1]:

- zelená: aktívny alebo vybraný režim a dynamické podmienky,
- červená: varovania,
- biela: súčasný stav a stupnice,
- žltá: upozornenia, príznaky a chyby,
- magentová: informácie o príkazoch, ukazovatele, symboly,
- čierna: prázdne oblasti alebo vypnutý systém,
- cyanová: neaktívne informácie.



## Kapitola 3

# Súčasné trendy vo vizualizácii letových údajov

V súčasnosti je fascinujúcou realitou, že moderné letúny nie sú len špičkou technológie, ale aj miestom pre revolučnú transformáciu vo vizualizácii letových údajov. Od konvenčných displejov po revolučné helmy s projekčnými systémami, letectvo vstupuje do éry, kde interpretácia a prezentácia letových údajov pre pilotov prebieha v úplne novej dimenzii.

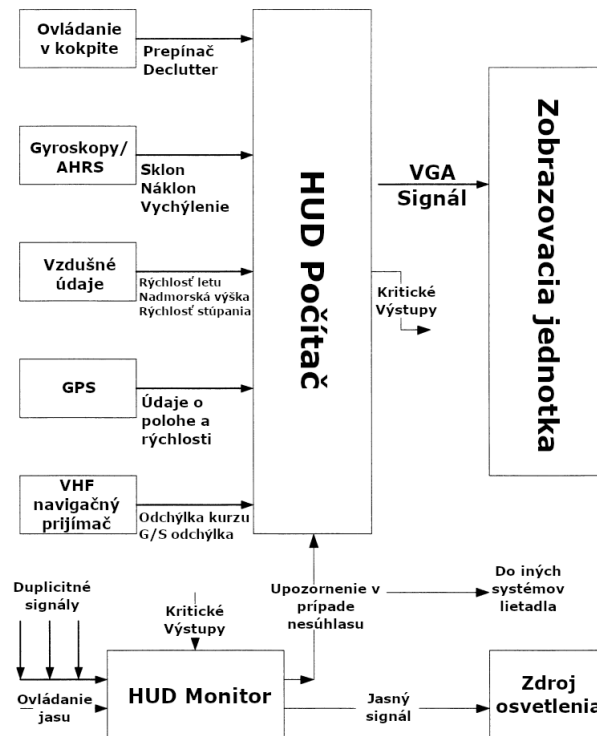
Spojením technologických pokrokov, ako je rozšírená realita, s potrebami pilotov na rýchle a presné spracovanie informácií, sa otvárajú dvere pre nové paradigmy v zobrazení letových údajov. Tieto trendy nielenže posúvajú hranice možností pre letectvo, ale tiež menia spôsob, akým piloti interagujú s komplexnými informáciami počas letu.

### 3.1 Head-up displej

S príchodom HUD sa otvorili nové možnosti a vylepšenia. HUD prináša niekoľko výhod, ktoré zdokonaľujú pilotnú skúsenosť. Jednou z hlavných výhod je zobrazenie kľúčových informácií priamo v pohľade pilota, čo znižuje potrebu odvrátiť zrak od okolia. Táto bezprostredná dostupnosť údajov zlepšuje situačné povedomie a skracuje reakčné časy. Vďaka HUD môže pilot lepšie zachovať periférne videnie, čo je kľúčové pre monitorovanie okoliťného prostredia. Navyše, HUD môže zobrazovať dôležité informácie, ako sú smerové údaje, rýchlosť, výška a ďalšie, bez nutnosti odvieť pozornosť od letovej dráhy. Týmto spôsobom prispieva HUD k bezpečnosti, efektívite a pohodliu pilotov počas letu.

#### 3.1.1 Architektúra HUD

Základným cieľom návrhu HUD pre všeobecné letectvo je navrhnúť cenovo dostupný systém s maximálnym využitím hardvéru COTS. Aby bol systém úspešný, musí byť certifikovateľný podľa FAR. Spracovanie údajov, ktoré sa majú zobraziť na HUD, prebieha v dvoch funkčných oblastiach a to elektronickej jednotke HUD a karte letových údajov. V rámci kontroly integrity údajov vykoná HUD Monitor koncové výpočty kritických údajov a overí presnosť kritických údajov zobrazených na HUD [35]. Architektúra HUD je znázornená na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Architektúra údajov HUD. Prevzaté z [35].

## 3.2 Rozšírená realita v letectve

Letectvo neustále využíva AR počas letu, výcviku a návrhu systémov. Aplikácie pre posádky majú problémy s ergonómiou a ľudským faktorom, ktoré je potrebné riešiť pri vývoji týchto aplikácií. Použitie AR môže pomôcť týmto problémom v letúne. Simulátory poskytujú metódu na riešenie úrovni výcviku a umožňujú výskumníkom zhromažďovať spätnú väzbu od pilotov. Interaktívne virtuálne kokpity a letové paluby umožňujú pilotom riadiť informácie a použiteľnosť úpravou zobrazenia kokpitu v reálnom čase. Napríklad, piloti môžu zobrazovať a manipulovať s virtuálnou mapou v 3D priestore nezávisle od veľkosti displeja [3]. Na obrázku 3.2 je znázornený HUD využívajúci prvky rozšírenej reality.

Výskumníci skúmajú využitie aplikácií rozšírenej reality pri prevádzke letúnov so zhoršenou viditeľnosťou, s cieľom predchádzať priestorovej dezorientácii, zvyšovať situačné povedomie a znižovať pravdepodobnosť nehôd. Technológia AR sa používa na zobrazenie symbolov, pokynov a prekážok v pilotnej kabíne, čo pomáha pilotom navigovať v náročných vizuálnych prostrediach. Systémy syntetického videnia sa používajú na nahradenie alebo rozšírenie displejov, aby zlepšili vizuálne podmienky letu a znížili priestorovú dezorientáciu. Kamerové systémy, ktoré umožňujú pilotom vidieť syntetické prostredie bez oklúzií sú využívané v HMD. Tieto technológie majú potenciál zlepšiť bezpečnosť letu a pomôcť pilotom lepšie orientovať sa v prostredí so zhoršenou viditeľnosťou [3].

Výskum sa zaoberá použitím rozšírenej reality v rôznych oblastiach, vrátane letectva alebo aj napríklad podvodného prostredia. V letectve môže AR pomocou prekrytia informácií a poskytnutia priamych inštrukcií znížiť pracovné zaťaženie pilotov a zlepšiť reakčný čas a vykonávanie úloh. V podvodnom prostredí sa používajú pokročilé senzory a fúzia údajov na poskytovanie jasného obrazu prostredia pre potápačov, pričom virtuálne repre-

zentácie terénu zvyšujú situačné povedomie a poskytujú podrobné údaje o podmorských podmienkach. V oboch oblastiach je možné informácie zobrazovať prostredníctvom AR aplikácií, ktoré prekryvajú kritické oblasti a umožňujú premietanie AR entít do prostredia. V budúcnosti sa očakáva integrácia AR do čelných skiel alebo HMD, čo umožní použitie technológie bez potreby externých zariadení, ako sú tablety alebo telefóny. Celkovo sa tieto technológie AR javia ako sľubné pre zlepšenie výkonu a efektívnosti vo vzduchu alebo aj pod vodou [3].

Pri implementácii AR stále existuje niekoľko výziev. Využívanie technológií AR počas letu si vyžaduje dodržiavanie prísnych výkonnostných a bezpečnostných noriem. Spoľahlivosť a vernosť systému sú pre použitie počas letu rozhodujúce. Konštruktéri tiež identifikujú problémy použiteľnosti pri práci s komplexným prostredím a hardvérom AR, ako je napríklad latencia, presnosť či modálne interakcie. AR technológie majú veľký potenciál využitia v priemyselných odvetviach, keďže umožňujú efektívne školenie a pomoc používateľom. Implementácia týchto techník výrazne zvyšuje efektívnosť, zručnosti a bezpečnosť používateľov, najmä v rizikových prostrediach. Je tiež dôležité sa zamyslieť nad zdokonalením používateľskej skúsenosti s AR a štandardizáciou týchto technológií v rôznych odvetviach. Celkovo si AR vyžaduje ďalší výskum a neustále zlepšovanie, aby sa zabezpečila úspešná adaptácia v pracovných prostrediach [3].



Obr. 3.2: HUD využívajúci AR. Prevzaté z [15].

### 3.2.1 Dizajn a vizualizácia rozšírenej reality

Rozšírená realita ponúka možnosti vylepšenia dizajnu a vizualizácie pomocou 3D modelov v reálnom prostredí. Súčasný proces navrhovania často zahŕňa stretnutia tímu inžinierov, ktorí diskutujú konštrukčné riešenia a používajú 2D obrázky a 3D modely na prezentáciu. Využitím AR môžu inžinieri v reálnom čase vizualizovať a ovládať 3D modely, čo zjednoduší spoluprácu a umožní rýchlu vizualizáciu dielov a zostáv. AR môže byť tiež použité na zlepšenie porozumenia výsledkov analýz, ako je analýza konečných prvkov alebo výpočtová dynamika tekutín. Výsledky týchto analýz sa dajú prekryť na objekty, čo umožňuje lepšie porovnanie a pochopenie ich vplyvu na celkové riešenie. Napríklad pri analýze FEA je možné vizualizovať koncentrácie napätia na konštrukčných komponentoch a pri analýze CFD je možné vizualizovať teploty, prúdenie a tlak vzduchu. Toto je veľmi užitočné pri analýze interiéru letúna, keďže zmeny prúdenia vzduchu, teploty a tlaku majú vplyv na bezpečnosť a pohodlie cestujúcich či posádky. AR taktiež umožňuje eliminovať potrebu vytvárania

fyzických prototypov alebo makiet, čo znižuje náklady a čas. Namiesto toho sa AR modely môžu aktualizovať priamo v CAD softvéri a nasadiť na zariadenia AR. Tento proces je oveľa rýchlejší a efektívnejší. Využitie AR v inžinierskom dizajne a vizualizácii prináša mnoho výhod. Zlepšuje spoluprácu a komunikáciu medzi členmi tímu, umožňuje rýchlu vizualizáciu dielov a zostáv bez potreby drahých prototypov a umožňuje lepšie porozumenie výsledkov analýz. Tento technologický pokrok prináša úsporu nákladov a času, čo môže mať pozitívny vplyv na celý proces navrhovania a optimalizácie [42].

### 3.3 Prilbový displej

Moderné HMD predstavujú vyspelené technológie, ktoré umožňujú pilotom získať informácie v reálnom čase a udržať prehľad o aktuálnej situácii. Skladajú sa z niekoľkých kľúčových komponentov, medzi ktoré patrí displej, optika, senzory a výpočtová jednotka. Displej je obvykle integrovaný do pilotnej prilby a poskytuje farebné zobrazenie s vysokým rozlíšením, ktoré sa zobrazuje v zornom poli pilota. Optický systém umožňuje pilotovi jasné a presné vnímanie displeja bez ohľadu na polohu jeho hlavy. Sensory inštalované na letúne poskytujú HMD dôležité údaje, ako sú rýchlosť letu, nadmorská výška, kurz a informácie o zameraní. Výpočtová jednotka HMD potom spracováva tieto údaje a generuje prispôbené vizuálne zobrazenie, ktoré zodpovedá konkrétnym potrebám pilota [10].

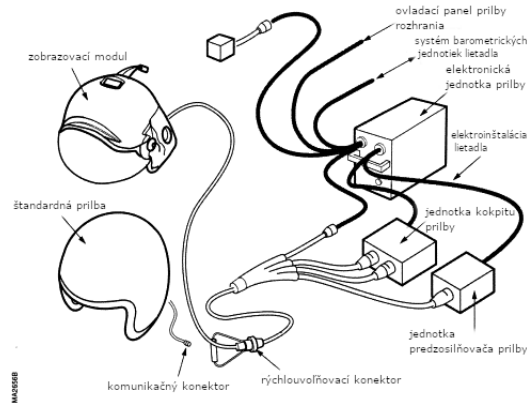
Pôvodné HMD mali jednoduchšiu konštrukciu, obsahovali menej komponentov a využívali menej pokročilú technológiu. Obyčajne disponovali displejmi s nižším rozlíšením a obmedzenými možnosťami sledovania, čo viedlo k problémom pre pilotov pri udržiavaní prehľadu o situácii a sledovaní rýchlo sa pohybujúcich cieľov. Moderné HMD vyriešili mnohé problémy, ktorým čelili piloti so staršími HMD. Ponúkajú displeje s vyšším rozlíšením, pokročilé možnosti sledovania a väčší očný reliéf, čo pilotom uľahčuje udržiavanie situačného prehľadu a sledovanie cieľov. Okrem toho moderné HMD poskytujú lepšiu integráciu so senzormi a navigačnými systémami letúna, čím sa znižuje riziko dezorientácie a nehôd [10].

#### 3.3.1 Architektúra prilbového displeja

Vývoj HMD trval viac ako 25 rokov, kým sa dosiahol stav, keď sú k dispozícii praktické zariadenia pre mnohé letecké využitie. Je však dôležité pochopiť, že výkonnosť HMD je daná konštrukciou systému HMD a nie je len funkciou samotného HMD. Hoci je konštrukcia HMD zložitá, podstata konštrukcie systému HMD je taká, že hlavné hardvérové a softvérové funkcie sú umiestnené mimo od prilby a predstavujú približne 75% nákladov na takéto systémy. Optimálna konštrukcia systému HMD sa vyvinula na základe dlhoročných letových testov a vývoja na viacerých leteckých platformách. Poznatky získané počas týchto programov boli nevyhnutné na dosiahnutie návrhov systémov HMD, ktoré spĺňajú všetky požiadavky na ne kladené. Architektúra systému HMD sa preto vyvinula na základe významného množstva práce vykonanej v priebehu niekoľkých rokov. Na obrázku 3.3 je znázornená typická konfigurácia systému HMD. Táto konfigurácia je definovaná následovne [4]:

- Jednotka elektroniky: obsahuje väčšinu funkcií mechaniky a spracovateľskej elektroniky.
- Funkcie zabudované v kabíne: elektronické funkcie, ktoré musia byť fyzicky umiestnené v blízkosti HMD.

- Rozhranie medzi prilbou a letúnom: zabezpečuje elektrické spojenie medzi letúnom a prilbou.
- Prilbový displej: zobrazovací modul namontovaný na leteckej prilbe.



Obr. 3.3: Architektúra systému HMD. Prevzaté z [4].

Funkcie jednotlivých podsystémov v systéme HMD sa dajú rozdeliť nasledovne [4]:

- Rozhrania systému lietadlo/HMD: poskytuje rozhrania s ovládacími prvkami HMD, senzormi a inými subsystémami.
- Spracovanie: riadenie rozhrania, spracovanie údajov, riadenie hardvéru a riadenie generátora symbolov.
- Generovanie symbolov: môže byť buď externé, alebo viac efektívne, v rámci systému HMD.
- Pohon displeja: funkcie pohonu špecifického zobrazovacieho zariadenia. Konvertuje signály prijaté z externých zdrojov obrazu a z generátora grafiky do formy vhodnej na riadenie zobrazovacieho zariadenia namontovaného na prilbe.
- Sledovanie prilby: podsystém zabudovaný v systéme HMD, ktorý meria a vysiela orientáciu a polohu prilby vzhľadom na os letúna.

### 3.3.2 Konštrukcia prilbového displeja

Konštrukcia HMD môže byť veľmi jednoduchá, ako premietanie symbolických informácií na reálny obraz, alebo veľmi komplexná, ako virtuálne zariadenie s viacerými senzormi a počítačom generovanými obrazmi. Zložitosť konštrukcie súvisí s optickou technológiou, ktorá musí dosiahnuť široké zorné pole, nízke skreslenie, vysokú kvalitu obrazu a prijateľnú hmotnosť. Pri termálnom zobrazovaní je potrebné vyriešiť problém binokulárnosti, ktorý môže spôsobiť vizuálne zrkové problémy [6].

#### Kontrast jasu

Kontrast je definovaný ako rozdiel jasu medzi dvoma susednými oblasťami. Obrázok s nízkym kontrastom bude vyzeráť rozmazané. Existuje viacero spôsobov, ako vyjadriť kontrast.

Kontrast, kontrastný pomer a modulačný kontrast sú tri z najbežnejších formulácií kontrastu jasu. Niektoré definície používajú rôzne názvy pre luminancie, čo môže byť zavádzajúce. Niekedy sa luminancie identifikujú podľa ich relatívnych hodnôt, a preto sa označujú ako maximálna luminancia ( $L_{max}$ ) a minimálna luminancia ( $L_{min}$ ). Ak je však plocha pri jednej hodnote jasu oveľa menšia ako plocha pri druhej hodnote jasu, jas menšej plochy sa niekedy označuje ako cieľový jas ( $L_t$ ) a jas väčšej plochy sa označuje ako jas pozadia ( $L_b$ ). Medzi najbežnejšie matematické vyjadrenia kontrastu jasu patria [6]:

$$C = \frac{L_t - L_b}{L_b} \text{ pre } L_t > L_b \quad (3.1)$$

$$C = \frac{L_b - L_t}{L_b} \text{ pre } L_t < L_b \quad (3.2)$$

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{min}} = \frac{L_{max}}{L_{min}} - 1 \quad (3.3)$$

kde  $C$  predstavuje kontrast,

$$C_r = \frac{L_t}{L_b} \text{ pre } L_t > L_b \quad (3.4)$$

$$C_r = \frac{L_b}{L_t} \text{ pre } L_t < L_b \quad (3.5)$$

$$C_r = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (3.6)$$

kde  $C_r$  predstavuje kontrastný pomer,

$$C_m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (3.7)$$

$$C_m = \left| \frac{L_t - L_b}{L_t + L_b} \right| \quad (3.8)$$

kde  $C_m$  predstavuje modulačný kontrast.

V predchádzajúcich rovniciach sú použité konvencie, ktoré vylučujú záporné hodnoty kontrastu. Hodnoty kontrastu vypočítané podľa rovníc 3.1 a 3.3 sa môžu pohybovať od 0 do nekonečna pre svetlé ciele a od 0 do 1 pre tmavé ciele (rovnica 3.2). Hodnoty kontrastného pomeru (rovnice 3.4, 3.5 a 3.6) sa môžu pohybovať od 1 do nekonečna. Modulačný kontrast (rovnice 3.7 a 3.8), známy aj ako Michelsonov kontrast, je preferovanou metrikou pre cyklické ciele, ako sú sínusové a štvorcové vlny. Môže mať hodnotu od 0 do 1 a niekedy sa udáva ako zodpovedajúce percento od 0 do 100. Prevody medzi rôznymi matematickými vyjadreniami kontrastu sa môžu vykonávať prostredníctvom algebraickej manipulácie s rovnicami alebo pomocou nomografov [6].

### 3.3.3 Analýza súčasných trendov

Výskumná správa sa zaoberá trhom s vojenskými prilbami a prilbovými zobrazovacími systémami. Správa poskytuje dôležité informácie o veľkosti trhu a jeho segmentácií podľa typov výrobkov, aplikácií a regiónov. Okrem toho sa zaoberá aj dôležitými faktormi, ktoré ovplyvňujú rast trhu, ako aj súčasnými trendmi, príležitosťami a obavami. Správa tiež zahŕňa CAGR trhu, čo poskytuje informácie o jeho vývoji v čase. Je to užitočný nástroj pre

organizácie, pretože poskytuje dôkladný prehľad o dynamike trhu, SWOT analýzu a budúce stratégie pre podniky. Správa tiež zahŕňa analýzu nákladov, dodávateľského reťazca a technologických inovácií. Tieto faktory budú prispievať k optimalizácii výkonnosti výrobkov a rozšíreniu ich použitia v rôznych aplikáciách. Analýza správania spotrebiteľov a dynamika trhu poskytuje kľúčové informácie pre lepšie pochopenie trhu s vojenskými prilbami a prilbovými zobrazovacími systémami. Medzi najväčších výrobcov na trhu s vojenskými prilbami a zobrazovacími systémami na prilbách patria [27]:

- Collins Aerospace,
- Thales Group,
- Elbit Systems Ltd,
- BAE Systems PLC,
- Honeywell International Inc. ,
- L3Harris Technologies,
- 3M,
- Gentex Corporation,
- Safariland LLC,
- Ballistic Armor Co. ,
- ArmorSource LLC,
- MKU Limited,
- Nanchang Yingxiong.

### 3.3.4 Latencia systému v prilbových displejoch

Systémy HMD sú schopné spracovávať viac údajov z väčšieho počtu snímačov a poskytnúť bohatšie zobrazenie. Avšak ich používanie, implementácia a školenie prichádzajú s rastúcimi výzvami. Simulácie HMD majú tiež niekoľko výziev, ktoré treba riešiť, aby bolo možné efektívne využívať simulácie na výcvik používateľov a zdokonaľovanie vedomostí, zručností a schopností potrebných pre účinné používanie HMD. Jednou z týchto výziev je zmiernenie latencie systému. Výskumníci sa snažia vyvinúť techniky na zmiernenie tohto problému, avšak úspech závisí od presného vyhodnotenia latencie v každom konkrétnom systéme [11].

#### Vplyv oneskorenia systému

Latencia je oneskorenie medzi akciou používateľa a reakciou displeja. V simuláciách sa latencia meria v milisekundách a získava sa analýzou údajov o polohe hlavy. Celková latencia závisí od niekoľkých faktorov, ako je zaznamenávanie a spracovanie pohybu hlavy, generovanie vhodných obrazov pre používateľa a elektronické spracovanie obrazu medzi generátorom a displejom. Oneskorenie väčšie ako 80 ms môže spôsobiť problémy s vnímaním a simulátorovou chorobou. Obraz na displeji sa pohybuje spolu s hlavou, čo spôsobuje konflikt medzi stimuláciou sietnice a vestibulárnou stimuláciou, čo môže viesť k symptómom ako únava očí, bolesť hlavy a nevoľnosť. Oneskorenie môže tiež ovplyvniť transfer získaných schopností zo simulácie do reálneho sveta. Používatelia sa môžu adaptovať na latenciu a meniť svoje správanie v simulácii, čo môže mať negatívny vplyv na ich schopnosti v skutočnom prostredí [11].

#### Zníženie oneskorenia

Pokrok v oblasti rýchlejšieho prenosu a spracovania informácií nie je dostatočný na úplné zníženie oneskorenia spojeného s rýchlym pohybom hlavy používateľa. Preto výskumníci vyvíjajú inovatívne prístupy na zmiernenie tohto oneskorenia. Jedným z týchto prístupov je využitie hardvérovej dosky s obvody nazwanej Warper Board, ktorá dokáže spracovať



a korigovať obraz v reálnom čase s cieľom kompenzovať oneskorenie a chybu zarovnania. Taktiež sa skúma softvérový prístup na predpovedanie pohybu hlavy, kde algoritmy extrapolujú polohu hlavy používateľa pred aktuálnou polohou sledovača hlavy. Tento prístup sa nazýva "Kalmanov prediktívny filter" a používa sa už od 70. rokov. Nový prístup zahŕňa použitie neurónových sietí v kombinácii s Kalmanovými filtermi, čo môže zlepšiť schopnosť predikcie. Neurónové siete využívajú viaceré vstupy pre sledovanie hlavy a pomocou údajov o pohybe hlavy sa optimalizujú a poskytujú presnejšie predpovede [11].

## 3.4 Teleoperácia

Teleoperácia alebo telerobotika je technický výraz pre riadenie robotov na diaľku. Slovo "tele-" v teleoperácii znamená "vzdialene", umožňujúc ľudskému operátorovi riadiť robota zo vzdialených miest. Tento systém je nesmierne užitočný v rizikových situáciách. Napríklad v jadrovom priemysle, kde by bolo práca človeka v rádioaktívnom prostredí nebezpečná, umožňuje teleoperácia efektívne riadenie vzdialených robotov [23].

V roku 2019 sa používanie teleoperačných systémov výrazne rozšírilo, najmä v oblasti bezkontaktného doručovania a poskytovania zdravotnej starostlivosti. Navyše, teleoperácia nájde svoje uplatnenie aj v letectve, kde umožňuje ľuďom riadiť a monitorovať letúny z diaľky, čím prispieva k bezpečnosti a efektívnosti letectva [23].

### 3.4.1 História teleoperácie

V posledných 50 rokoch sa výskum zamerával na pochopenie a riešenie problémov v oblasti teleoperácie. Tá sa začala skúmať v polovici 40. rokov 20. storočia, keď bol zostrojený prvý teleoperátor typu master-slave. Odvtedy prešla oblasť teleoperácie niekoľkými etapami, od skúmania interakcie medzi človekom a robotmi až po teoretický výskum v riadení. Existujú dva vynikajúce prehľady, ktoré sa zameriavajú na dozorné riadenie, interakciu človek-stroj a softvérovú teleoperáciu. Teleoperácia cez internet, ktorá sa objavila v 90. rokoch, priniesla nové problémy. V polovici 90. rokov sa objavili nové výsledky v oblasti riadenia teleoperácie, ktoré zahŕňajú analýzu oneskorenia, nastavenie diskretného času a stratu informácií [20].

Teleoperované systémy majú svoje komplikácie, pretože komunikačné médium zvyšuje zložitosť systému a vnáša skreslenie, oneskorenia a straty, ktoré ovplyvňujú stabilitu a výkonnosť. To motivovalo výskum v oblasti riadenia teleoperácie. V priebehu času sa teleoperácia vyvíjala s novými konštrukciami a výskumom oneskorenia, dozorového riadenia a nových softvérových jazykov a vizuálnych vylepšení. Všetko toto prispelo k lepšiemu porozumeniu a riešeniu problémov v teleoperácii [20].

### 3.4.2 Prevádzka s jedným pilotom

Výskum znižovania počtu členov posádky dopravných letúnov sa zaoberal konceptom prevádzky s jedným pilotom. Rôzne koncepcie prevádzky SPO boli fragmentárne prototypované a skúmané, pričom sa ukázalo, že SPO je životaschopná v blízkej a strednodobej budúcnosti. Avšak, systémovo-teoretické analýzy naznačili, že SPO je menej odolná voči narušeniu bezpečnosti a ochrany ako tradičná dvojčlenná posádka [8].

Jeden z hlavných problémov spojených s prevádzkou SPO je výcvik pilotov. Existuje potreba nových postupov, pretože SPO si vyžaduje odlišný prístup k práci v porovnaní s tradičnou posádkou. Okrem toho je potrebné zaviesť nové postupy a predpisy, aby SPO boli kompatibilné s existujúcimi právnymi normami, ktoré vyžadujú minimálne dvojčlennú



posádku. Ďalším významným aspektom je potreba prepracovať a certifikovať minimálne predpisy týkajúce sa výcviku jednotlivých typov operátorov SPO. To by zahŕňalo nové metódy pre pilotov s diaľkovým ovládaním a zdokonalených dispečerov, ktorí by mali rozšírené povinnosti. Dĺžka letu by tiež mohla ovplyvniť výcvik, keďže by sa zohľadňovala únava pilotov. Pre úspešnú implementáciu SPO je nevyhnutné koordinovať a viesť výskum zameraný na technické aspekty a odporúčania týkajúce sa SPO. Výsledkom by mali byť nové postupy a metódy výcviku, ktoré budú zlučiteľné s prevádzkou SPO. Celkovo je potrebné venovať viac pozornosti výcviku, postupom a predpisom. Tieto zmeny sú nevyhnutné pre úspešné zavedenie a prevádzku SPO v komerčnej prevádzke dopravných letúnov. Pomocou STAMP je možné identifikovať potenciálne nebezpečenstvá a riziká spojené s postupom diaľkovo ovládaných operátorov v SPO. Táto štúdia je príkladom použitia STAMP na posúdenie rizík v hierarchickej štruktúre riadenia v systémových operáciách. Táto metóda sa môže použiť na štruktúrovanú analýzu rizík v počiatočnej fáze projektovania SPO. Je to hierarchický model, ktorý popisuje interakciu rôznych zložiek systému a ich vzťahy prostredníctvom spätných slučiek. Tento model sa skladá z troch zložiek:

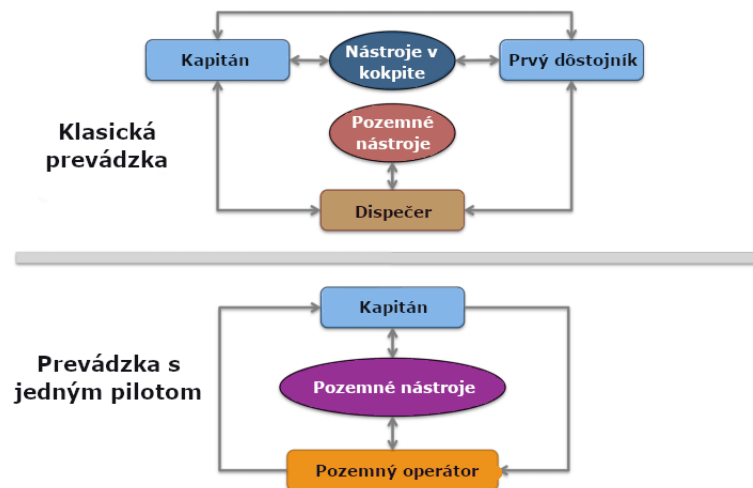
- bezpečnostné obmedzenia,
- hierarchické štruktúry kontroly bezpečnosti,
- procesné modely.

Bezpečnostné obmedzenia sú zásady a kontroly, ktoré zabezpečujú bezpečnú prevádzku systému. Hierarchické štruktúry kontrolujú bezpečnosť na rôznych úrovniach hierarchie, od regulačných orgánov až po prevádzku systému. Procesné modely sú nástrojom na predpoved porušenia bezpečnostných obmedzení. Výskum zameraný na vývoj systému s jednopilotnými lietadlami sa tiež zaoberal analýzou zmien v kontrolovaných slučkách pre vzdialených operátorov, ktoré by boli nevyhnutné pre komerčné jednopilotné operácie. Tieto slučky boli skúmané s cieľom identifikovať potrebné zmeny vo výcviku a podľa výsledkov boli navrhnuté úpravy príslušného procesu výcviku pre diaľkových operátorov [8].

Odborná príprava je kľúčová pre úspešné fungovanie SPO vo vzdušnom priestore. Výskum ukazuje, že rotácia medzi jednopilotnou a diaľkovou pozíciou môže znižovať záťaž výcviku a udržiavať aktuálne znalosti systému. Budúce jednopilotné lietadlá a pozemné stanice budú vyžadovať nové prevádzkové postupy. Dôležité je tiež zohľadniť degradáciu zručností v dôsledku používania automatizácie. Analyzovanie kompetencií a výcvik rôznych ConOps je nevyhnutný pre dosiahnutie úspešných systémových operácií. Nové náklady na výcvik personálu a infraštruktúru treba zohľadniť pri hodnotení nákladov a prínosov SPO. Je tiež dôležité mať na pamäti potrebu odbornej prípravy v kontexte pokročilej automatizácie a technológie prepojenia údajov. Celkovo je zavedenie režimu odbornej prípravy pre operátorov SPO dôležité pre úspešné fungovanie tejto koncepcie [8]. Na obrázku 3.4 je znázornené fungovanie prevá dzky s jedným pilotom oproti klasickej prevádzke.

### 3.4.3 Autonómny let

Technológia automatizácie letu existuje už od 30. rokov 20. storočia v podobe autopilota letúna, ktorý pilotom umožňuje udržiavať určenú rýchlosť, výšku a smer. Vývoj bezpečnej, škátovateľnej a plne autonómnej technológie letu pre letúny je veľkou výzvou, ktorú sa snažia ľudia vyriešiť. Dôležitú rolu taktiež zohráva umelá inteligencia (AI) a špecifické prípady využitia technológie autonómneho letu, ktoré môžu mať reálnu budúcnosť pri podpore rastu leteckého priemyslu. Využitie umelej inteligencie v autonómnom lete môže priniesť viaceré



Obr. 3.4: Klasická prevádzka vs. prevádzka s jedným pilotom. Prevzaté z [25].

výhody pre pilotov a celý letecký priemysel. Piloti majú veľa povinností a ich zamestnanie vyžaduje dlhé lety s obrovskou pracovnou záťažou. Asistenti s umelou inteligenciou by mohli byť užitoční pre komerčné letecké spoločnosti ako pomocníci pilotom. Mohli by pripomínať pilotom dôležité úlohy, pomáhať s kontrolným zoznamom pred letom alebo pomáhať pri komunikácii s letúnom. Ďalšou možnosťou je využitie umelou inteligenciou na navrhovanie optimálnej trasy a nadmorskej výšky zohľadňujúc poveternostné podmienky a palivovú úspornosť. Technológia autonómnych letov tiež môže byť riešením nedostatku pracovnej sily v leteckom priemysle, pretože pomôže zvládnuť rastúci dopyt. Ideálne riešenie by bolo hybridné spojenie pilotov a asistentov s umelou inteligenciou, ktorí by slúžili ako tréneri. Akcie v oblasti autonómneho letu sú už realizované americkou armádou a niektorými komerčnými startupmi. Je jasné, že existuje veľká trhová príležitosť pre technologické spoločnosti, ktoré by sa mali sústreďiť na pomoc pilotom, nie ich nahradenie [49]. Spoločnosť Reliable Robotics vyvíja "nepretržité zapájanie autopilota", ktorý riadi všetky letové úlohy. Ich cieľom je urobiť leteckú dopravu bezpečnejšou, efektívnejšou a dostupnejšou. Podobnú filozofiu uplatňuje aj spoločnosť Zipline, ktorá používa bezpilotné letúnové systémy (UAS) na doručovanie zdravotníckeho materiálu a iných produktov na veľké vzdialenosti [34].

Bezpečnostná prekážka spočíva v tom, že skutočná autonómia v leteckej doprave je komplexný problém, ktorý zahŕňa celý let vrátane rolovania, štartu, pristátia, navigácie, komunikácie a bezpečnosti. Hoci existujú technologicky pokročilé systémy s autonómnymi schopnosťami pre malé drony, ako je kontrola veterných turbín, doručovanie balíkov a vojenský prieskum, táto technológia ešte nie je dostatočne vyspelá pre komerčné letecké aplikácie. Preto regulačné orgány stanovujú obmedzenia a požiadavky na použitie bezpilotných letúnov, vrátane veľkosti, výšky, zábory letových zón a dohľadu človeka. Autopiloti v súčasnosti majú len obmedzené autonómne schopnosti a nejde o systémy umelej inteligencie. Skutočne autonómny let je teda v leteckej doprave ešte vzdialeným cieľom [49].

Vyvinúť bezpečný systém umelej inteligencie pre autonómne lietanie je ťažké kvôli financiám a vzdialenostiam. Aby sa autonómne vozidlá mohli vyvinúť, je potrebné zhromaždiť veľké množstvo reálnych kilometrov na cestách, ale napriek tomu autonómne vozidlá nie sú stále pripravené na samostatnú prevádzku. Autonómne lietanie je ešte komplikovanejšie, pretože chyby majú vážnejšie následky a let na míľu je nákladnejší ako cestovanie autom. Okrem toho, systémy umelej inteligencie sú pravdepodobnostné a môžu produkovať od-

lišné výstupy pri mierne odlišných vstupoch, čo komplikuje schválenie systému regulačnými orgánmi FAA. Preto sa niektoré spoločnosti sústreďujú na rozvoj autonómnych a teleoperatívnych technológií pre prieskumové drony a nákladné lety bez posádky, kde je možné tolerovať viac rizika. Autonómny dron je znázornený na obrázku 3.5. Drony generujú veľké množstvo údajov a vďaka faktorom ako lacné a spoľahlivé materiály, pokročilé riadiace jednotky a vysoká konektivita sa trh s dronmi úspešne rozbehol. AI prináša autonómiu do dronov prostredníctvom štyroch hlavných komponentov:

- odhad stavu,
- riadenie,
- mapovanie,
- plánovanie.

AI pomáha optimalizovať riadenie dronov v nestabilnom prostredí, učí sa zo skúseností a prispôbuje sa zmenám prostredia. Ďalším dôležitým faktorom je schopnosť mapovať a získavať prehľad o okolí, kde sa využívajú kamery a algoritmy počítačového videnia. Plánovanie dráhy a navigácia sú tiež významnými aspektmi autonómnych systémov dronov. AI vplyva aj na predchádzanie kolíziám, kde sa využívajú lacné kamery a AI algoritmy na efektívne riešenie [18]. Celkovo je vývoj systému umelej inteligencie pre bezpečné autonómne lietanie náročný proces s finančnými a technologickými výzvami [49].



Obr. 3.5: Autonómny dron na diaľkové monitorovanie elektrickej elektrárne. Prevzaté z [43].

### Problémy a obmedzenia dronov

Bezpilotné letúny majú mnoho problémov a obmedzení. Prvým problémom je nedostatok primeraných predpisov a regulácie zo strany vlád. Technológia pokročila rýchlejšie ako regulátori dokázali reagovať, čo viedlo k používaniu dronov bez dostatočných bezpečnostných smerníc. Ďalším obmedzením je bezpečnosť, pretože drony majú problém s rozpoznávaním, komunikáciou a vyhýbaním sa iným letúnom alebo predmetom. Existujú aj bezpečnostné zraniteľnosti dronov, ako napríklad hackerské útoky alebo rušenie GPS, ktoré môžu ohroziť prevádzku dronov. Ďalší problém sa týka ochrany súkromia, pretože drony môžu narušiť súkromie ľudí. Je potrebné vypracovať špeciálne predpisy na ochranu ľudí pred neoprávneným sledovaním dronmi. Celkovo je potrebné vyvinúť komplexný a účinný regulačný rámec na bezpečné a zodpovedné používanie dronov [18].

### 3.5 Platforma pre bezpečnú analytiku vo veľkých dátach

Posledné roky prinášajú nové výzvy v podobe informačnej integrácie, automatizácie a nových technológií, ktoré ovplyvňujú aj letecký priemysel a jeho snahu implementovať pokročilé senzorové technológie, IoT zariadenia a kyberneticko-fyzické systémy do letúnov a súvisiacich produktov a služieb. Podľa odhadov sa počas jedného letu generuje 500 až 1 000 gigabajtov údajov a do roku 2026 sa očakáva generovanie až 98 000 000 terabajtov údajov celosvetovej leteckej flotily. V dnešnej dobe veľkých dát sa generuje obrovské množstvo informácií z rôznych zdrojov. Preto je dôležité tieto údaje správne zhromažďovať a využívať na získanie cenných poznatkov a pridanej hodnoty. Toto zahŕňa odhaľovanie trendov a skrytých vzorcov, ktoré umožňujú predpovedanie a rozhodovanie. Na dosiahnutie tohto cieľa sa vyvinula nová generácia technológií nazývaných Big Data, ktoré sa zameriavajú na efektívne získavanie, odhaľovanie a analýzu veľkých objemov údajov. Pre efektívnu analýzu je dôležité kombinovať viacero zdrojov údajov, čo vedie k ich výmene a zdieľaniu medzi rôznymi zainteresovanými stranami [32].

#### 3.5.1 Technické riešenie ICARUS

S cieľom splniť potreby letectva s veľkými objemami dát bola vytvorená platforma ICARUS, ktorá poskytuje trh s leteckými údajmi a informáciami. Platforma umožňuje poskytovateľom a spotrebiteľom údajov v letectve efektívne a bezpečne spracovávať veľké objemy dát a vykonávať analýzu a vizualizáciu údajov. Súčasťou platformy je 22 komponentov navrhnutých na správu a obohacovanie údajov, pričom dôraz bol kladený na funkčnú dekompozíciu a tok údajov. Platforma je modulárna a flexibilná, umožňuje integráciu a efektívne fungovanie rôznych komponentov. Zabezpečuje bezpečné spracovanie údajov a ochranu súkromia pomocou šifrovania a bezpečných procesov. Architektúra platformy sa skladá z troch úrovní [32]:

- On-Premise prostredie: je zodpovedné za vykonávanie funkcií a vlastností platformy ICARUS týkajúcich sa prípravy údajov a nahrávania údajov na základe pokynov, ktoré poskytuje základná platforma v súlade s preferenciami poskytovateľa údajov.
- Základná platforma: je hlavnou úrovňou platformy ICARUS a zabezpečuje základné operácie. Integruje a kombinuje komponenty v cloudovej infraštruktúre a umožňuje prieskum, zdieľanie a sprostredkovanie údajov, ako aj operácie analýzy údajov. Ponúka aj používateľské rozhranie pre tieto operácie.
- Bezpečný a súkromný priestor: je pokročilé analytické prostredie platformy ICARUS, v ktorom sa spracováva analýza údajov v izolovanom a bezpečnom prostredí. Skladá sa z komponentov, ktoré tvoria dôveryhodný analytický pracovný priestor, kde sa vykonáva analýza údajov v súlade s analytickým pracovným postupom. Tento priestor ponúka bohatý súbor analytických nástrojov a funkcií a jeho správa sa vykonáva prostredníctvom základnej platformy.

## 3.6 Letúny eVTOL

Certifikácia elektrických vertikálnych lietadiel s možnosťou vertikálneho vzletu a pristátia je na dosah. Poprední výrobcovia eVTOL dúfajú, že v priebehu najbližších rokov dosiahnu potrebné certifikácie. V súčasnosti intenzívne pracujú na vývoji a testovaní týchto nových lietadiel, súčasne dokončujú návrhy a konfigurácie vozidiel. Zvyčajne sa zverejňujú nákresy a fotografie exteriérov eVTOL, no informácie o vnútornom vybavení, najmä o avionike v kokpíte, sú menej známe. Konštrukcia eVTOL kombinuje prvky konvenčných lietadiel a vrtuľníkov, pričom zahŕňa aj niektoré inovatívne aspekty. Prechod medzi režimami letu vpred a vertikálnym letom, spolu s použitím elektrického pohonu, znamená, že kokpity eVTOL budú odlišné od tých, ktoré sa používajú v súčasných lietadlách [38].

Zohľadniť treba aj zmeny v manažmente letovej prevádzky (ATM), najmä keď sa zvýši počet lietadiel eVTOL a systémov lietadiel bez posádky (UAS) prevádzkovaných vo vnútroštátnom vzdušnom priestore. UTM alebo manažment letovej prevádzky bez posádky je dôležitou oblasťou, ktorú je potrebné vyvíjať pre lietadlá bez posádky, ktoré budú diaľkovo ovládané alebo autonómne pilotované. Existuje viacero spoločností, ako Joby, Archer, Eve, Lilium, EHang, Volocopter, Vertical Aerospace, Supernal spoločnosti Hyundai, Airbus a ďalšie, ktoré vyvinuli koncepty na eVTOL lietadlá. Okrem samotných lietadiel sú aj spoločnosti, ktoré sa zameriavajú na vývoj infraštruktúry pre podporu týchto lietadiel. Tieto spoločnosti sú zamerané na vývoj a prevádzku vertiportov, ako sú VPorts, Skyports, Volatus, Ferroviaľ a Varon [39].

### 3.6.1 Prístrojové panely v kabíne eVTOL

V oblasti leteckej dopravy sme v súčasnosti svedkami rastúceho záujmu o eVTOL. Viacero spoločností sa venuje vývoju týchto strojov s cieľom vytvoriť to najlepšie riešenie. Tieto spoločnosti investujú do technologických inovácií s cieľom priniesť novú éru leteckej dopravy, ktorá bude nielen ekologicky udržateľná, ale aj pohodlná a efektívna pre cestujúcich.

Nemecká spoločnosť Lilium sa obrátila na spoločnosť Honeywell s požiadavkou na systémy riadenia letu, ktoré poskytnú zjednodušené používateľské rozhranie pre pilotov lietadiel Lilium eVTOL Jet. Jia Xu, technický riaditeľ a starší riaditeľ pre inžinierstvo a AAM v spoločnosti Honeywell Aerospace, uviedol, že systémy fly-by-wire sú nevyhnutné na efektívne riadenie lietadiel eVTOL v rôznych režimoch letu. Tým, že je priestor obmedzený, tak panel avioniky sa musí zmestiť do veľmi vymedzeného priestoru [48]. Toto je znázornené na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Kokpit eVTOL spoločnosti Lilium. Prevzaté z [48].



Ďalším popredným vývojárom eVTOL je spoločnosť Embraer, Eve. Začiatkom roka 2023 si spoločnosť Eve vybrala za strategického partnera spoločnosť Thales, ktorá prispeje odbornými znalosťami v oblasti vývoja avioniky, elektrických, riadiacich, komunikačných a navigačných systémov. Keďže lietadlo eVTOL bude riadiť jeden pilot, riešenia asistencie pilotovi a bezproblémové pripojenie umožňujúce komunikáciu sú ešte dôležitejšie ako inokedy [48]. Kokpit tohoto letúna je znázornený na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Kokpit eVTOL spoločnosti Embraer. Prevzaté z [48].

### 3.6.2 Air taxi

Tento rok sa očakáva premiéra leteckých taxíkov v rôznych častiach sveta, vrátane Francúzska, Talianska, Južnej Kórey a Strednej Ameriky. V Číne už sú tieto taxíky v prevádzke. Ide o nový spôsob dopravy, ktorý využíva bezpilotné lietadlá, známe pod skratkou eVTOL. Lietadlá eVTOL, označované ako letecké taxi, nepotrebujú tradičné letiská ani vzletové a pristávacie dráhy [40]. Tieto lietadlá majú veľkú kapacitu na prepravu cestujúcich a ich koncepcia je založená na tichosti a udržateľnosti. Sľubujú rýchlejšiu a bezpečnejšiu prepravu ako autá a vrtulníky, pričom sú oveľa tichšie a vypúšťajú menej emisií uhlíka. Predpokladá sa, že do roku 2026 bude komerčne certifikovaných pol tucta týchto lietadiel a v priebehu ďalších 10 rokov sa stanú súčasťou bežnej mestskej dopravy. Budú prevádzkované vo veľkých mestských centrách ako New York, Londýn a Paríž, a taktiež aj pomôžu v odľahčení dopravne preťažených miest ako Sao Paulo, Bombaj či Káhira [45].

#### Prvý medzimestský demonštračný let na svete

Dňa 27. februára 2024 bol uskutočnený prvý medzimestský demonštračný let elektrického air-taxi medzi juhočínskymi mestami Shenzhen a Zhuhai. Päťmiestne lietadlo Prosperity eVTOL spoločnosti AutoFlight, znázornené na obrázku 3.8, zavŕšilo míľnik tým, že autonómne preletelo 50 km dlhú trasu zo Shenzhen do Zhuhai. Let bol prevedený cez rieku Delta a trval len 20 minút, pričom cesta autom by trvala tri hodiny. Ukázkový let sa uskutočnil v jednej z najhustejšie obývaných oblastí na svete, kde žije približne 86 miliónov ľudí, a vo vzdušnom priestore, ktorý hraničí s viacerými medzinárodnými letiskami vrátane Hongkongu, Shenzhen a Macaa. Tento úspech predstavuje prvý verejný medzimestský let lietadla eVTOL na svete na trase cez more, ktorá sa tiahne cez záliv, kde sa rieka stretáva s morom, a spája dve juhočínske mestá. Týmto krokom sa posunula hranica mestskej leteckej mobility v Číne. Regionálna vláda vytvorila plán na rozvoj leteckej dopravy, ktorý zahŕňa otvorenie tisícov vertiportov a stoviek leteckých trás eVTOL v oblasti Veľkého zálivu v južnej Číne. Partner spoločnosti AutoFlight, Heli-Eastern, nedávno uzavrel dohodu

na kúpu 100 lietadiel Prosperity, ktoré budú použité na rôzne trasy v tejto oblasti. Dizajn tohto lietadla je signovaný renomovaným dizajnérom Frankom Stephensonom, ktorý vytvoril ikonické dizajny pre automobilové značky ako Ferrari či McLaren [40].



Obr. 3.8: Letún eVTOL spoločnosti AutoFlight. Prevzaté z [40].

## Kapitola 4

# Návrh vizualizácie letových údajov

Vytvorenie kvalitného návrhu HMD pre riadenie kvadrokoptéry zahŕňa dôraz na prvky, ktoré sú potrebné pre pilota počas letu. Počas tohto procesu bol kladený dôraz na zobrazenie informácií, ktoré sú kľúčové z pohľadu bezpečnosti a efektívnosti riadenie letúna. Týmto spôsobom bolo potrebné zabezpečiť, aby mal pilot okamžitý prístup k relevantným údajom, ktoré podporujú jeho rozhodovací proces.

Pri špecifických manévroch, ako je napríklad vertikálny odlet alebo pristátia, bolo potrebné sa zamerať na vytvorenie takého zobrazenia, ktoré je užitočné pre tieto fázy letu.

Bezpečnosť je ďalším kľúčovým aspektom návrhu, a preto bolo potrebné integrovať vizuálne ale aj zvukové bezpečnostné prvky. Pri vzniku nebezpečenstva alebo situácií vyžadujúcich pozornosť, je potreba, aby HMD automaticky generoval vizuálne upozornenia a v prípade potreby aj zvukové signály. To slúži na rýchlu reakciu pilota v kritických momentoch a zvyšuje tak celkovú bezpečnosť riadenia.

Výber vhodnej farby pre zobrazenie údajov na Helmet-Mounted Display (HMD) je tiež dôležitý faktor, ktorý ovplyvňuje čitateľnosť a pochopenie informácií pilotom. Správna farebná paleta zabezpečuje, že údaje sú jasné, dobre čitateľné a intuitívne interpretovateľné počas celého letu.

Celkovým cieľom návrhu HMD je poskytnúť užívateľovi informácie potrebné a užitočné v rôznych fázach letu, ktoré sú jasne čitateľné, ale aj bezpečnostné upozornenia, ktoré pomôžu pri rozhodovaní v rizikových situáciách.

### 4.1 Vlastný návrh

Hlavným zámerom pri návrhu vizualizácie letových dát pre prilbový displej je vytvoriť vizuálny systém, ktorý poskytuje užívateľovi jednoduché a komplexné informácie potrebné pre efektívne ovládanie letu. Tento návrh je špecificky prispôbený letúnom s elektrickým vertikálnym vzletom a pristávaním (eVTOL), kde tieto letúny prinášajú niekoľko výhod v kontexte letectva. Dôvodom zamerania na tento typ letúna bol ten, že sa dostávajú v súčasnosti do popredia čoraz viac a viac.

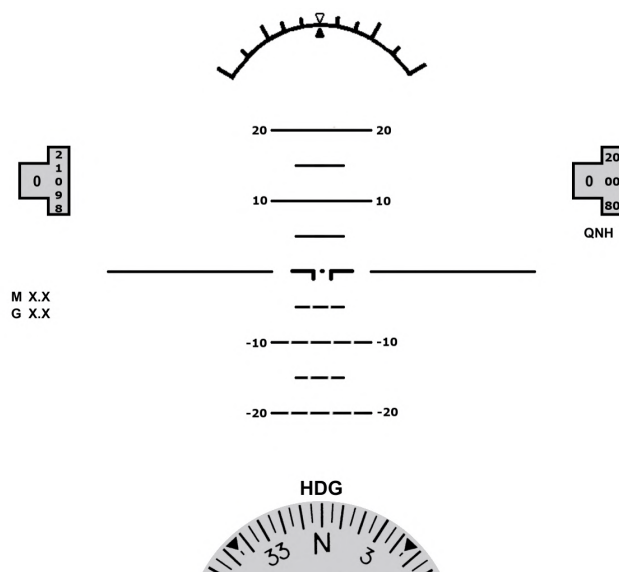
#### 4.1.1 Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej

Pri vytváraní návrhu bol kladený dôraz na zobrazovanie nevyhnutných informácií, ktoré sú potrebné pre riadenie letu. Hlavným cieľom bolo zobraziť jednotlivé prvky tak, aby boli jednoducho interpretovateľné a dostupné pre pilota. Návrh je zameraný pre vývoj do prostredia podporujúce virtuálnu realitu.



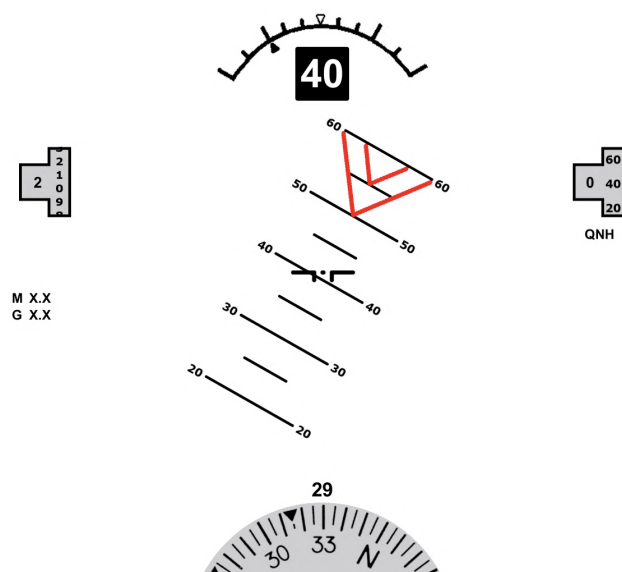
Tento návrh HMD je vytvorený s cieľom integrovať moderné technológie a výhody eV-TOL letúnov, poskytujúc pilotovi nástroj na efektívne a bezpečné riadenie letu v inovatívnom leteckom prostredí. Na obrázku 4.1 je znázornená navrhnutá vizualizácia letových dát pre prilbový displej. Pri tvorbe HMD boli použité viaceré prvky. Hlavné prvky, ktoré sú použité pri tvorbe návrhu sú:

- Ukazovateľ klonenia: tento ukazovateľ poskytuje pilotovi informácie o náklone letúna okolo jeho pozdĺžnej osi. Jednotlivé "výbežky" na ukazovateli značia náklon  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $60^\circ$ .
- Stupnica klopenia: táto stupnica umožňuje pilotovi monitorovať a udržiavať presný náklon letúna vzhľadom na horizont počas letu. Stupnica je značená po  $5^\circ$  až po klopenie od  $-60^\circ$  do  $60^\circ$ . Na stupnici sa taktiež nachádza čiara horizontu, ktorá oddeľuje záporné a kladné stupne náklonu.
- Ukazovateľ kurzu: tento ukazovateľ pomáha pilotovi udržiavať želaný smer letu a sledovať presný kurz počas navigácie.
- Stupnica rýchlosti: táto stupnica znázorňuje aktuálnu vzdušnú rýchlosť letúna.
- Stupnica výšky: táto stupnica znázorňuje aktuálnu výšku letúna nad hladinou mora. Pod touto stupnicou sa nachádza hodnota QNH, ktorá značí tlak.



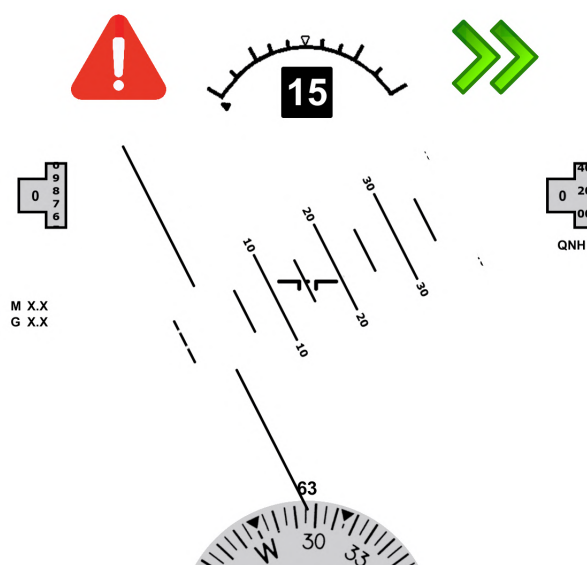
Obr. 4.1: Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej.

Na obrázku 4.2 je znázornené varovné značenie, ktoré nastane pri prekročení maximálneho dovoleného pozitívneho alebo negatívneho uhla klopenia. Toto značenie je červenej farby aby upútalo pozornosť užívateľa. Prekročenie uhla môže viesť k strate stability alebo kontroly letúna.



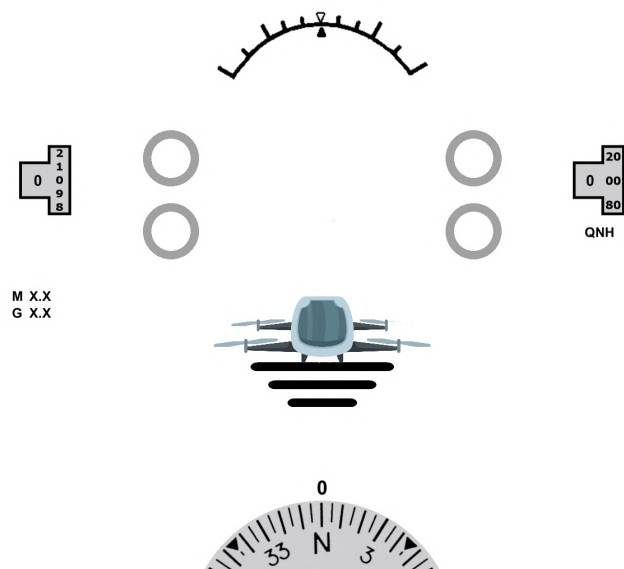
Obr. 4.2: Varovné značenie na stupnici klopenia.

Na obrázku 4.3 je znázornené varovné značenie, ktoré nastane pri prekročení uhla náklonu letúna  $60^\circ$ . Pri prekročení tohoto uhla, sa zobrazí na displeji výstražný trojuholník a šípky, ktoré určujú smer, akým by sa mal daný letún nakloniť, aby zmiernil nebezpečný náklon. Taktiež je počas nebezpečenstva pridaný zvukový efekt "Bank Angle", ktorý symbolizuje nebezpečný uhol náklonu.



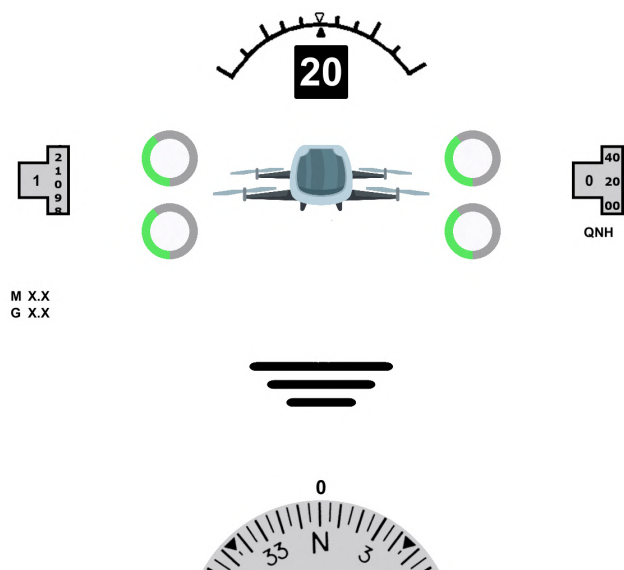
Obr. 4.3: Varovné značenie pri prekročení náklonu  $60^\circ$ .

Na obrázku 4.4 je znázornený návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej pre fázy letu odlet a pristátie. Na obrázku je znázornený stav letúna, ktorý sa nachádza na zemi s výkonom motorov na 0%. Rozdiel tejto vizualizácie oproti klasickému návrhu je ten, že v strede je znázornená kvadroptéra, ktorá sa vzdialuje/približuje k ikone zeme. Táto vizualizácia by mala pomôcť pri vertikálnych manévroch. Po boku sú znázornené výkony jednotlivých motorov danej kvadroptéry.



Obr. 4.4: Návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej pre fázu letu odlet/pristátie.

Na obrázku 4.5 je znázornený stav letúna, ktorý sa nachádza vo výške 20 stôp s výkonom motorov na približne 40%. Nad letúnom je taktiež zobrazená výška v štvorci pre väčšiu prehľadnosť. Pri prekročení výšky 500 metrov sa vizualizácia kvadrokoptéry už neposúva vyššie.

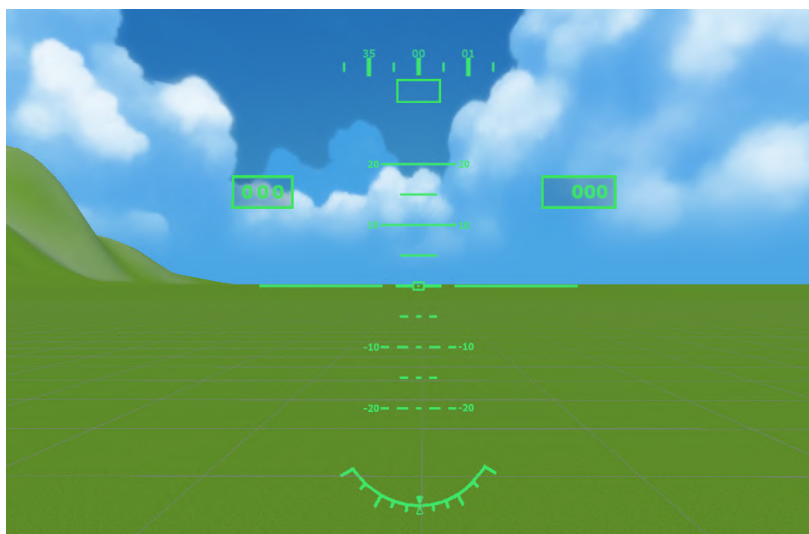


Obr. 4.5: Prilbový displej počas letu pre fázu letu odlet/pristátie.

Po dôkladnom otestovaní pôvodného návrhu HMD boli identifikované niektoré oblasti, ktoré vyžadovali zlepšenie. Na základe týchto zistení bol vypracovaný nový návrh, ktorý obsahuje niekoľko zmien a vylepšení. Medzi zmeny patrí upravenie tvarov niektorých častí HMD a taktiež aj reorganizácia polôh týchto častí. Hlavné zmeny v návrhu HMD sú nasledovné:

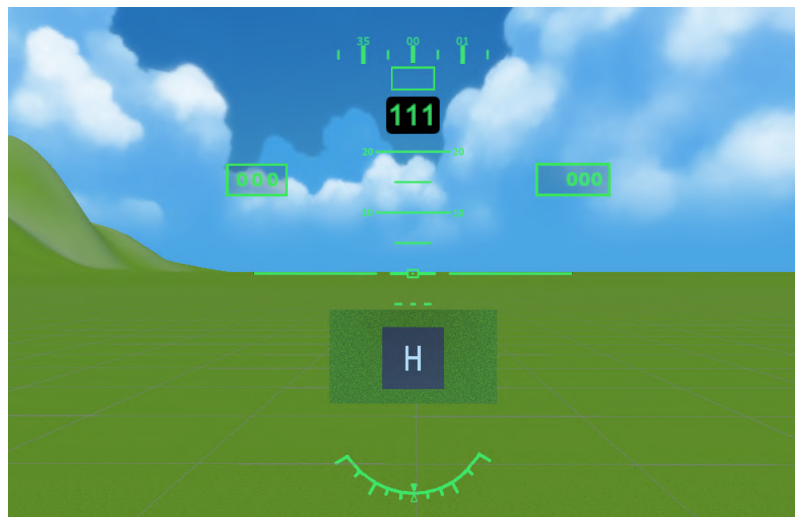
- Ukazovateľ klonenia, ktorý sa nachádzal na hornej časti displeja sa po úprave nachádza pod stupnicou klopenia.
- Ukazovateľ kurzu, ktorý sa nachádzal pod stupnicou klopenia sa zmenil na stupnicu kurzu, ktorá sa nachádza nad stupnicou klopenia.
- Tvary stupnice rýchlosti a stupnice výšky sa zmenili na obdĺžnikové a boli posunuté bližšie k stupnici klopenia.
- Pridanie objektu pre kameru, ktorá v učitý moment, zobrazuje terén nachádzajúci sa pod letúnom.
- Upravenie stredného indikátora v stupnici klopenia.

Na obrázku 4.6 je znázornený nový návrh, ktorý obsahuje popísané zmeny. Umiestnenie ukazovateľa klonenia pod stupnicu klopenia bolo vykonané na základe toho, že lepšie minimalizuje zasahovanie do videnia používateľa. Keďže oči sú prirodzene zamerané dopredu, ukazovateľ umiestnený v dolnej časti bude menej interferovať s pohľadom na okolité prostredie, čo môže prispieť k pohodlnejšiemu používaniu HMD. Tým, že bol ukazovateľ (stupnica) kurzu umiestnený hore, tak sa nachádza prirodzene v úrovni zraku, čím je ľahko viditeľný a ľahko sledovateľný bez toho, aby používateľ musel príliš odvrátiť svoju pozornosť od hlavného výhľadu. Tvary stupnice rýchlosti a výšky boli zmenené na základe toho, aby zaberali menej miesta v priestore. Tým, že je tvar týchto stupníc upravený na menší, tak sa mohol nastaviť väčší scale, čím sa stávajú tieto stupnice lepšie čitateľnými. Stredný indikátor bol upravený na trošku iný, aby bolo lepšie znázornené aký náklon letún vykonáva.



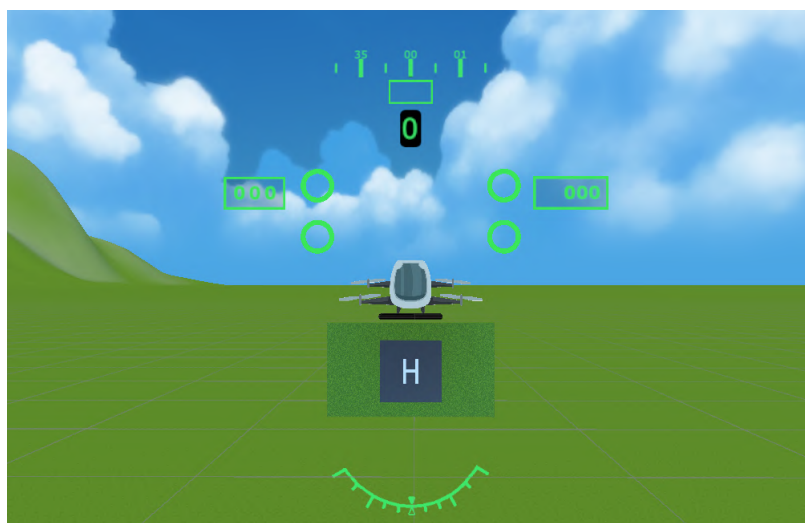
Obr. 4.6: Upravený návrh vizualizácie dát pre prilbový displej.

V prípade, že sa letún dostane pod 500 metrov, tak sa na displeji zobrazí ukazovateľ tejto výšky a taktiež kamera, ktorá sníma prostredie pod letúnom. Túto vizualizáciu môžete vidieť na obrázku 4.7



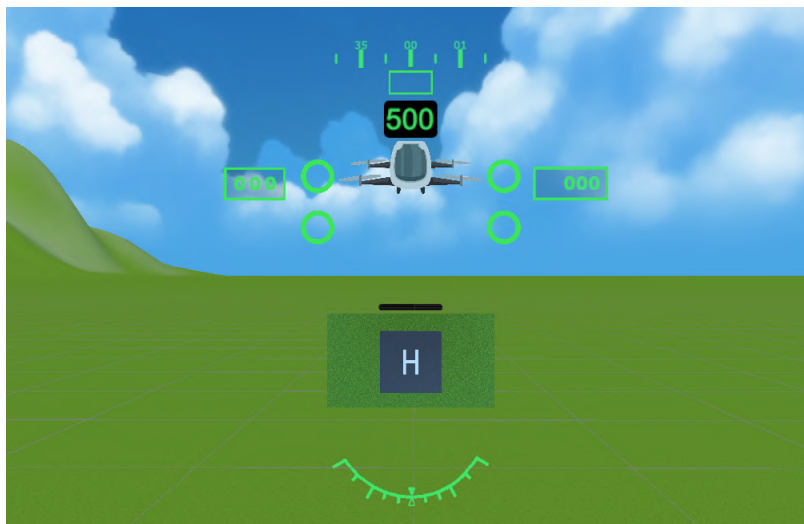
Obr. 4.7: Vizualizácia dát pre prilbový displej pod výškou 500 metrov.

Na obrázku 4.8 je znázornený upravený návrh vizualizácie dát pre prilbový displej pre fázy letu vertikálny odlet a pristátie. V tejto scéne displeja sú taktiež vykonané zmeny, ktoré su popísané vyššie. Znázornená kvadrokoptéra sa posúva nadol a nahor, čím simuluje vertikálny pohyb letúna. Po bokoch ostali ukazovatele výkonu jednotlivých 4 motorov. Horné dva znázorňujú predné propulzory (ľavý a pravý) a dolné dva naopak zadné propulzory.



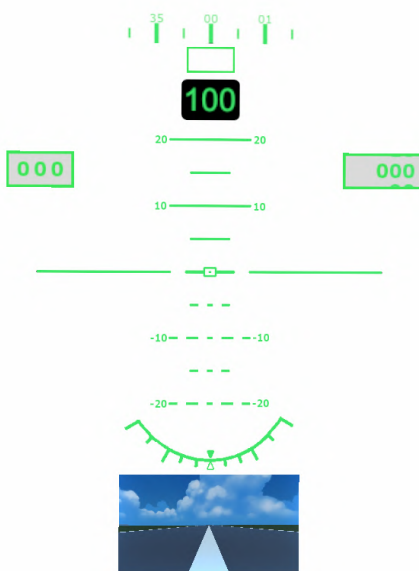
Obr. 4.8: Upravený návrh vizualizácie dát pre prilbový displej pre vertikálny odlet/pristátie.

Na obrázku 4.9 je znázornený stav pri dosiahnutí 500 metrov. V tejto fáze sa daná kvadrokoptéra vyššie už neposúva ale zostáva na pozícii, kde sa momentálne nachádza.



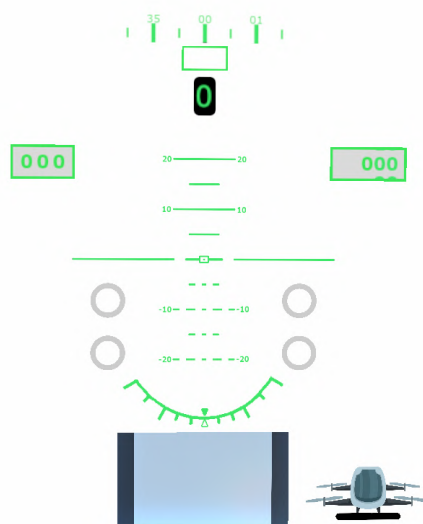
Obr. 4.9: Ukážka vizualizácie letových dát pre prilbový displej pri dosiahnutí výšky 500 metrov.

Na základe otestovania zmenenej vizualizácie letových dát bol vytvorený ďalší návrh, v ktorom boli upravené nájdené nedostatky. Zmeny sa týkali hlavne v zmene pozície jednotlivých častí HMD. Na obrázku 4.10 je znázornená upravená vizualizácia letových dát pre HMD. Medzi hlavné zmeny patrí zmena pozície ukazovateľa klonenia, kde bol daný ukazovateľ posunutý vyššie a to z dôvodu toho, že pri dosiahnutí určitej výšky, je zobranená kamera, ktorá ukazovala prostredie nachádzajúce sa pod letúnom. Táto pozícia bola ponechaná len v type displeja určeného pre vertikálny odlet a pristátie, ale v klasickom prípade zobrazuje kamera prostredie pred letúnom. Táto vizualizácia je zobrazovaná pod ukazovateľom klonenia, aby nezavadzala v hlavnom výhlade užívateľa.

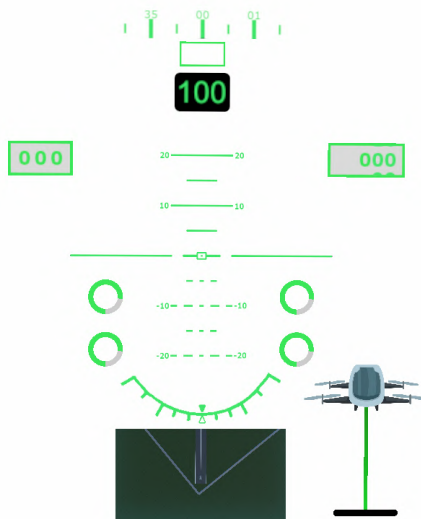


Obr. 4.10: Ukážka upravenej vizualizácie letových dát pre prilbový displej.

Vizualizácia letových dát pre HMD určená pre vertikálny odlet a pristátie, bola taktiež upravená. V pôvodnej vizualizácii chýbal kľúčový prvok a to stupnica klopenia. Táto stupnica bola pridaná do stredu vizualizácie, kde sa nachádzala kvadroptéra. Táto kvadroptéra bola umiestnená na pravú dolnú časť displeja. Ukazovatele výkonu jednotlivých motorov boli taktiež pridané na spodnú časť displeja. Táto zmena je znázornená na obrázku 4.11, kde sa letún nachádza vo výške 0 metrov a na obrázku 4.12, kde sa letún nachádza vo výške 100 metrov.



Obr. 4.11: Nový návrh pre vertikálny odlet/pristátie s výškou letúna 0 metrov.



Obr. 4.12: Nový návrh pre vertikálny odlet/pristátie s výškou letúna 100 metrov.

Zámer vytvorenia tohto upraveného návrhu vizualizácie letových dát pre HMD bolo vylepšiť vnímanie jednotlivých častí tak, aby boli jasne čitateľné a neprekážali vo výhlade

užívateľa. Navrhnutý dizajn zahŕňa všetky potrebné informácie pre lietanie, pričom sa sústreďí na minimalizáciu rušivých prvkov.



## Kapitola 5

# Implementácia vizualizácie letových údajov v prostredí leteckého simulátora

Následujúca kapitola sa zameriava na implementáciu HMD, ktorý predstavuje jeden z najzásadnejších komponentov vo svete rozšírenej reality. Implementácia tohto displeja vyžaduje zohľadnenie viacerých samostatných prvkov a ich správneho zladeného fungovania. Cieľom je vytvoriť efektívny výsledok, ktorý ponúkne užívateľom optimálnu funkčnosť a pomoc pri lietaní. V kapitole budú teda popísané kľúčové aspekty implementácie HMD ako získavanie dát, vytvorenie prostredia v Unity. Taktiež tu budú spomenuté aplikácie a nástroje, ktoré boli použité počas tvorby HMD.

### 5.1 Postup implementácie vizualizácie letových dát pre prilbový displej

Na začiatku vytvorenia HMD bolo potrebné urobiť návrh vizualizácie letových dát pre prilbový displej. Celkové návrhy, ktoré sa skladali z viacerých komponentov boli zobrazované a testované v aplikácii Unity. Jednotlivé prvky displeja boli vytvárané v grafickom editore Gimp. Následne bol finálny návrh implementovaný v aplikácii Unity podporujúcej virtuálnu realitu. Cieľom bolo dať jednotlivým komponentom správnu funkčnosť a logiku, čo bolo dosiahnuté pomocou programovacieho jazyka C#.

#### 5.1.1 Získavanie dát

Aby bolo možné dať jednotlivým prvkom funkčnosť, tak bolo treba získať dáta. Dáta sú získavané z herného simulátora X-plane 11 pomocou pluginu XplaneConnect, ktoré sú následne odosielané do Unity. Postup získavania a odosielania správ/dát je nasledovný:

1. Na začiatku je nekonečný cyklus ***while(1)***, ktorý dosiahne, že kód bude neustále opakováť čítanie a odosielanie údajov.
2. V cykle je následne nastavené spojenie s X-plane 11 pomocou funkcie ***openUDP(IP-address)***, ktorá vytvorí UDP socket na danej adrese.
3. Taktiež je vytvorené ďalšie spojenie pomocou funkcie ***openUDP(IP-address, port)***, ktorá slúži pre odosielanie údajov do Unity na danom porte.

4. Po daných spojeniach nasledujú rady kódov, ktoré volajú funkcie na získanie rôznych údajov z X-plane, ako sú napríklad rýchlosť, výška, sklon a náklon letúna, barometrický tlak atď. Všetky tieto údaje sa ukladajú do príslušných premenných. Pre získanie hodnôt o sklone a náklone letúna, je použitá funkcia ***int getPOSI(XPCSocket sock, float values[7], char ac)***, ktorá slúži na získanie rôznych informácií o pozícii letúna. Táto funkcia vracia zápornú hodnotu, ak nastala chyba, inak 0. Pre získanie zvyšných údajov je použitá funkcia ***int getDREFs(XPCSocket sock, const char\* drefs[], float\* values[], unsigned char count, int sizes[])***, ktorá umožňuje dynamicky získavať hodnoty rôznych DREFs z X-Plane, čím poskytuje užitočný mechanizmus na interakciu so simulátorom a získavanie dát pre ďalšiu analýzu a spracovanie.
5. Následne sa vytvára reťazec ***dataToSend***, ktorý obsahuje údaje, ktoré sú medzi sebou oddelené znakom '|'.
6. Po nastavení adresy pre odosielanie dát na adresu Unity na danom porte sa údaje odošlú pomocou funkcie ***sendto()***, ktorá pošle reťazec ***dataToSend*** na zadanú adresu.
7. Nakoniec sa pomocou funkcie ***closeUDP()*** zatvoria spojenia s X-Plane 11 a s Unity.

Celkový proces sa teda opakuje neustále v nekonečnom cykle, pričom sa neustále získavajú nové dáta z X-plane 11, ktoré sa spracovávajú a odosielať do Unity.

Na prijímanie dát bol vytvorený skript v Unity, ktorý prijíma údaje zaslané UDP prostredníctvom siete a spracováva ich. Bežný skript v Unity obsahujú dve základné funkcie a to ***Start()*** a ***Update()***. Funkcia ***Start()*** sa spustí práve raz počas inicializácie objektu alebo alebo scény. Používa sa na inicializáciu premenných, prípravu stavov alebo vykonanie iných úloh, ktoré sa vykonávajú iba raz pri spustení. Funkcia ***Update()*** sa vykonáva v každom snímku hry, čo ju robí ideálnym miestom na spracovanie interakcie, pohybu, animácie a ďalších dynamických zmien. V rámci tejto funkcie sa často kontroluje vstup od hráča, aktualizuje sa stav objektov alebo sa vykonávajú akcie na základe podmienok v hre. Tým, že je táto funkcia často volaná, tak treba dbať na efektivitu kódu, aby sa minimalizovalo zaťaženie výkonu aplikácie. Postup prijímania dát v Unity skripte je nasledovný:

1. V metóde ***Start()*** sa vytvára nová inštancia ***UdpClient()*** na zadanom porte a spúšťa sa nové vlákno pomocou ***Thread***, ktoré bude neustále prijímať dáta.
2. Metóda ***ReceiveData()*** je spustená v novom vlákne. V tejto metóde sa neustále čaká na prijatie dát prostredníctvom metódy ***udpClient.Receive(ref remoteEndPoint)***. Keď sú údaje prijaté, sú konvertované na reťazec pomocou príkazu ***Encoding.ASCII.GetString(receivedBytes)***.
3. Prijaté dáta sú následne odoslané na ďalšie spracovanie do hlavného vlákna pomocou výrazu ***ThreadPool.QueueUserWorkItem(new WaitCallback(ProcessData), receivedData)***, čo zabezpečuje, že hlavné vlákno bude spracovávať údaje bez toho, aby sa zastavilo prijímanie ďalších dát.
4. Metóda ***ProcessData(object data)*** je zodpovedná za spracovanie prijatých údajov. Zo získaného reťazca sú následne získané jednotlivé dáta pomocou funkcie ***Split()***, ktorá rozdelí reťazec na základe výskytu znaku '|', ktorý vytvorí pole samostatných hodnôt, ktoré sú použité na implementáciu logiky HMD.

5. Pri zničení objektu (*OnDestroy()*) sa vykoná uzavretie spojenia s UDP serverom, čo znamená, že sa zastaví prijímanie ďalších dát. Vlákno, ktoré prijíma dáta, je potom ukončené pomocou výrazu *receiveThread.Join()*, aby sa zabezpečilo, že sa spracovanie dát dokončí pred zatvorením spojenia.

Tento postup zabezpečuje, že dáta poslané prostredníctvom UDP siete na daný port sú prijaté a následne spracované vo vytvorených vláknach v Unity aplikácií. Celkovo použitie samostatného vlákna na spracovanie dát zvyšuje výkon aplikácie tým, že oddelí proces spracovania dát od hlavného vlákna a umožní paralelné vykonávanie úloh. To prispieva k plynulému fungovaniu aplikácie a rýchlejšej reakcii na zmeny.

### 5.1.2 Vytvorenie prostredia v Unity

Na začiatku bolo treba vytvoriť prostredie v Unity, ktoré podporuje virtuálnu realitu. Prvým krokom bolo vytvorenie scény, ktorá je optimalizovaná pre použitie s virtuálnou realitou, čo zahŕňa nastavenie správnej škály a rozloženia objektov, aby boli kompatibilné s headsetom a senzormi.

Jedným z kľúčových prvkov vytvoreného prostredia je dynamický skybox. Namiesto statickej oblohy bol implementovaný pohyblivý skybox, ktorý sa pomaly posúva, aby vytvoril ilúziu pohybu a zmeny atmosféry. Tento prístup poskytuje užívateľom väčší pocit prítomnosti a autenticity vo virtuálnom svete. Skybox môžete vidieť na obrázku 5.1 a 5.2.



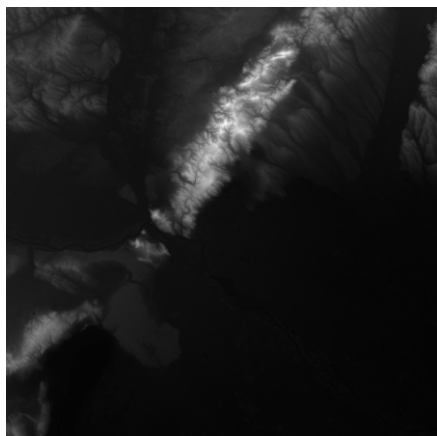
Obr. 5.1: Skybox vytvorený v Unity.



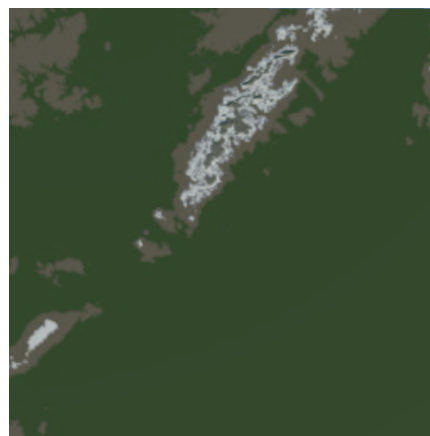
Obr. 5.2: Druhá ukážka skyboxu.

Ďalším krokom bolo vytvorenie terénu pomocou objektu Terrain v Unity. Terén bol vygenerovaný na základe čierno-bielej fotky zobrazujúcej okolie z reálneho prostredia nachádzajúceho sa na Slovensku. Na obrázku 5.3 sa nachádza fotografia, kde čierna farba v kontexte výškovej mapy reprezentuje nižšie výškové hodnoty. To znamená, že ak je časť obrazu čierna, zodpovedajúca časť terénu bude nižšia a naopak, biela farba vo výškovej mape znamená vyššie výškové hodnoty. Čím svetlejšia je oblasť, tým vyššia bude v teréne. Terén bol vytvorený s rôznymi druhmi terénu, čo zvyšuje variabilitu a zaujímavosť virtuálneho prostredia. Pre terén boli vytvorené viaceré materiály pre simuláciu trávy a kamenistých hôr. Tento terén je znázornený na obrázku 5.4. Do prostredia bola následne vložená pristávacia dráha, ktorá simuluje dráhu z reálneho sveta. Celkovo bola snaha vytvoriť prostredie v Unity, ktoré nie len podporuje virtuálnu realitu, ale aj ponúka užívateľovi zážitok, ktorý je čo najbližší skutočnému svetu.

Po vytvorení prostredia nasledovalo vytvorenie prostredia pre HMD. Celkovo boli vytvorené 4 plátna, do ktorých boli vložené jednotlivé komponenty HMD. Tieto plátna sú zobrazované na základe pohybu hlavy užívateľa a na základe zvoleného typu HMD. Dve



Obr. 5.3: Čierno-biela fotografia terénu.



Obr. 5.4: Vygenerovaný terén v Unity.

plátna sú nastavené na hlavnú kameru, čo je smer pohybu hlavy a ďalšie dve sú nastavené na fixnú polohu. V prípade, že sa užívateľ pozerá dopredu, tak je zobrazované fixné plátno, ktoré zobrazuje dáta. Pohyblivé plátno je zobrazované hneď, ako užívateľ zmení polohu hlavy o viac ako 15 stupňov. Uhly zmeny pohybu hlavy sú získané pomocou metódy *eulerAngles*, ktorá vracia aktuálne uhly rotácie objektu v Eulerových uhloch. Tieto uhly sú vyjadrené vo formáte *Vector3*, kde každá zložka predstavuje rotáciu objektu okolo jednej z osí *x*, *y* a *z*. V prípade tejto práce sa metóda *eulerAngles* používa na získanie Eulerových uhlov rotácie hlavného objektu kamery vo virtuálnom prostredí. Tieto uhly sú následne priradené do premenných, s ktorými sa pracuje.

### 5.1.3 Implementácia jednotlivých prvkov prilbového displeja

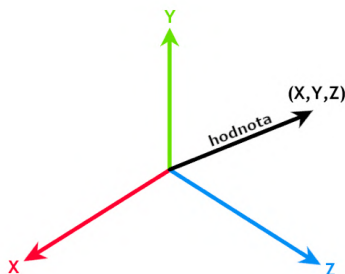
Do vytvoreného prostredia bolo treba následne vložiť jednotlivé prvky HMD ako objekty. Celkovo boli vložené objekty do 4 plátien, ktoré sa zobrazujú užívateľovi podľa potreby. Najčastejšie sa jedná o objekty typu *RawImage*, *Image*, *Text* a ďalšie.

V spomínanej základnej funkcii *Start()* sa po spustení skryjú niektoré časti HMD, ktoré sa zobrazia pri špeciálnych prípadoch a to pomocou príkazu *gameObject.SetActive(false)*. Medzi tieto prvky patria napríklad výstražné symboly, ktoré sa zobrazia v prípade, že letún presiahol uhol náklonu o viac ako 60°. Pri prekročení daného uhla sa taktiež spustí výstražné hlásenie "bank angle", čo znamená upozornenie pre pilotov, že letún dosiahol určitý sklon voči horizontálnej rovine. Ak pilot nevykoná žiadne opatrenia na korekciu sklonu lietadla, môže to viesť k nežiaducemu stavu, ako je nadmerné nakláňanie lietadla alebo dokonca vznik nebezpečnej situácie, ako je strata kontroly nad letúnom. Hlásenie "bank angle" je preto dôležitým varovaním pre pilota, aby bol informovaný o sklone letúna a podnikol potrebné kroky na zmenu situácie, ak je to potrebné.

Vo funkcii *Update()*, ktorá sa vykonáva neustále, sa najskôr získajú hodnoty rotácie virtuálnej reality, na základe ktorých sa zviditeľní dané plátno a zavolá sa funkcia pre toto plátno. Pre každé plátno je vytvorená vlastná funkcia, v ktorej je implementovaná logika jednotlivých prvkov HMD.

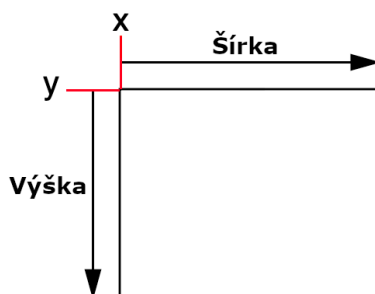
V prípade, že sa jedná o typ displeja, ktorý je určený na fázu lietania, tak sa na začiatku nastavuje indikátor klonenia a stupnice klopenia pomocou príkazu *transform.Rotate(new Vector3())*, ktorý slúži na otáčanie objektu pomocou jeho transformácie. Je to metóda, ktorá aplikuje rotáciu na základe špecifikovaného vektora. Parameter *new Vector3(x, y,*

z) určuje rotáciu okolo osi x, y a z. Napríklad, ak by ste chceli otočiť objekt o 23 stupňov okolo osi x, 77 stupňov okolo osi y a 0 stupňov okolo osi z, použil by sa kód: ***transform.Rotate(new Vector3(23, 77, 0))***. Schéma Vector3 je znázornená na obrázku 5.5.



Obr. 5.5: Schéma Vector3.

Ako ďalšie sú implementované výstražné symboly a hlásenia. V prípade prekročenia maximálneho bezpečného uhla náklonu sa spustia výstražné symboly a hlásenie, ktoré upozorní užívateľa na nebezpečenstvo. Pre pohyb stupnice klopenia nahor a nadol sa používa príkaz ***uvRect = new Rect(newX, newY, newWidth, newHeight)***, ktorý sa používa pre manipuláciu s textúrou zobrazovanou pomocou RawImage. ***uvRect*** je vlastnosťou typu Rect objektu Raw Image, ktorá určuje, aká časť textúry bude zobrazovaná. ***new Rect(newX, newY, newWidth, newHeight)*** vytvára nový obdĺžnik (Rect) s určenými súradnicami (newX, newY) a rozmermi (newWidth, newHeight). Týmto príkazom sa mení obdĺžnik, ktorým sa textúra zobrazuje na Raw Image. To umožňuje dynamicky meniť zobrazenú časť textúry alebo jej veľkosť, čo je užitočné pre pohyb alebo iné interaktívne operácie s textúrou. Príklad ilustráciu v GUI priestore je znázornený na obrázku 5.6. Pre zmenu stupnice kurzu sa používa podobná technika ako so stupnicou klopenia. Číslo, ktoré sa zobrazuje pod stupnicou sa nastavuje pomocou príkazu ***text = ((int)heading).ToString()***, ktorý aktualizuje textové pole s celočíselnou hodnotou uhla (v stupňoch), ktorá je uložená v premennej heading. Stupnica rýchlosti a výšky je spracovaná podobným štýlom ako ostatné stupnice. V prípade, že AGL výška letúna je menšia ako 500 metrov, tak sa daná výška zobrazí v strede HMD nad stupnicou klopenia s čiernym pozadím, s cieľom zlepšiť čitateľnosť tohto textového pola. Taktiež je zobrazená obrazovka kamery, ktorá je uložená pod letúnom a sníma prostredie nachádzajúce sa pod letúnom. Toto má pomôcť pri vertikálnom priblížení, kde bude vidieť na obrazovke, či sa letún približuje k zemi tak ako daný užívateľ plánuje.

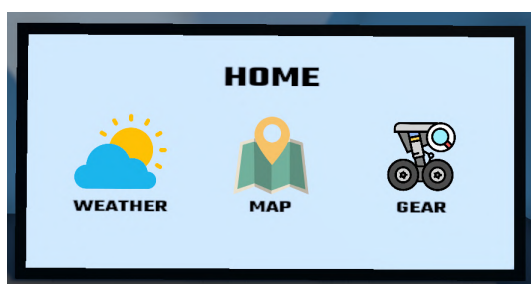


Obr. 5.6: Špecifikácia obdĺžnika pomocou x, y, šírky a výšky.

V druhom type HMD, ktorý je určený na fázu letu vertikálneho pristátia, je niekoľko zmien oproti prvému typu. Hlavná zmena spočíva v strede displeja, kde namiesto stupnice klopenia je umiestnená kvadroptéra, ktorá vykonáva pohyb nahor a nadol, čo simuluje výšku letúna nad zemou. Toto má pomôcť lepšie vnímať, aká vzdialenosť chýba letúnu pri dotknutí sa zo zemou. Pod touto kvadroptérou je taktiež umiestnená kamera, ktorá sníma okolie nachádzajúce sa pod letúnom. Táto kamera by mala pomôcť nasmerovať letún na správnu pozíciu pri pristátí. Na bokoch kvadroptéry sa nachádzajú 4 "krúžky", ktoré znázorňujú výkon štyroch motorov kvadroptéry. Maximálny výkon motora je 4500 RPM, kde pri dosiahnutí tohoto výkonu, sa krúžky vyplnia naplno. Pohyb kvadroptéry nahor a nadol je naimplementovaný tak, že najprv sa získava komponenta *RectTransform* priradená k UI prvku s názvom 'evtolVertical' pomocou príkazu ***RectTransform rectTransform = evtolVertical.GetComponent<RectTransform>***. Táto komponenta umožňuje nastavovať polohu, rozmery a rotáciu UI prvku. Následne sa vypočíta nová hodnota pre os y. Získaná hodnota je následne použitá na vytvorenie nového vektora, ktorý reprezentuje novú polohu UI prvku na displeji. Ostatné prvky sú implementované rovnako ako v prvom prípade HMD.

#### 5.1.4 Vytvorenie modelu letúna

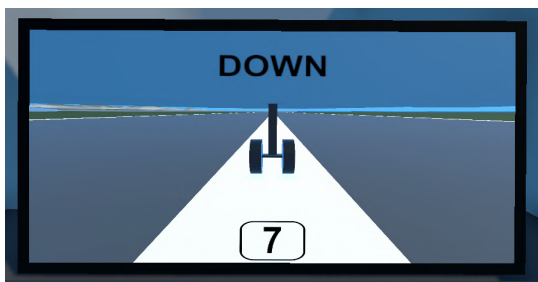
Po implementácii jednotlivých prvkov vizualizujúcich letové dáta, bol vytvorený jednoduchý model kokpitu letúna, v ktorom sa nachádza displej, ktorý slúži pre zobrazenie určitých dát. Tento displej je ovládaný na základe hlasu. Systém reaguje na hlasové príkazy užívateľa a dynamicky premieta rôzne grafické prvky a informácie na základe toho, aký príkaz bol vyslovený. Systém sa aktivuje po hláske "hey helmet", čím sa na displeji zobrazí hlavné menu, ktoré premieta možnosti, ktoré môžu byť na displeji následne zobrazené. Po vyslovení "weather conditions", sa zobrazia údaje o počasi, ako teplota, vietor, tlak, oblačnosť či viditeľnosť. Taktiež, pomocou príkazu "gear info", je zobrazená kamera, ktoré zobrazuje podvozok letúna, pre lepší pohyb po zemi. Pomocou príkazu "map", je zobrazená mapa okolia. Príkazom "stop helmet", sa deaktivuje tento hlasový systém. Príklady obrazoviek sú znázornené na obrázkoch 5.7, 5.8, 5.9 a 5.10. Implementácia začína inicializáciou rozpoznávača kľúčových slov *KeywordRecognizer* a definovaním zoznamu kľúčových slov, ktoré sa majú rozpoznávať. Potom sa pridáva udalosť *OnPhraseRecognized*, ktorá sa spustí, keď sa rozpozná nejaká fráza. Táto udalosť volá metódu, kde sa kontroluje hlasový príkaz, na základe ktorého sa vykoná určitá akcia.



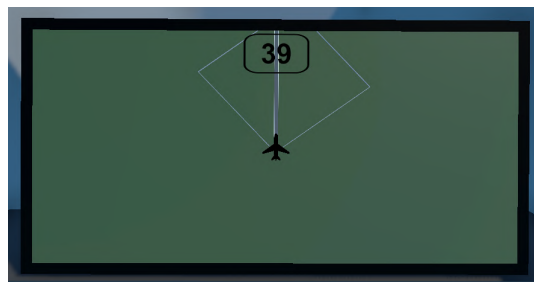
Obr. 5.7: Plocha hlavného menu.



Obr. 5.8: Plocha počasia.

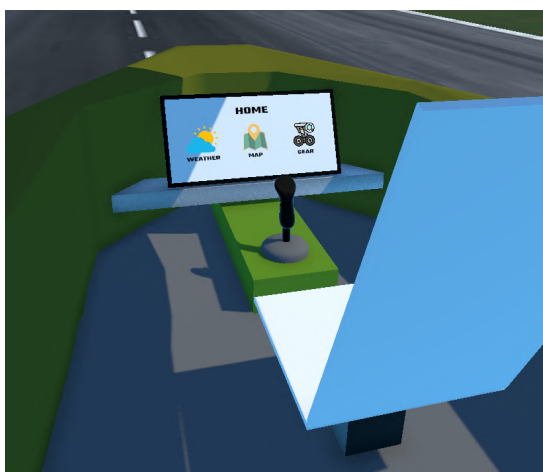


Obr. 5.9: Plocha kamery podvozku.



Obr. 5.10: Plocha mapy.

Taktiež, bol model kokpitu vytvorený na účel simulácie pohybu a rotácie letúna tak, aby poskytoval užívateľovi realistickejší pocit letu a taktiež, aby poskytoval lepšie vcítenie sa do virtuálneho prostredia. Jednoduchý model kokpitu je znázornený na obrázku 5.11. Implementovaný je najskôr pohyb dopredu, kde sa objekt posúva vpred podľa daného smeru s konštantnou rýchlosťou. Následne je implementovaný pohyb do strán, kde sa využíva náklon letúna na výpočet jeho pohybu. Sinusová funkcia ďalej určuje smer tohto pohybu. Vektor pohybu je potom aplikovaný na pozíciu letúna. Ďalej sa výška objektu aktualizuje plynulo pomocou lineárnej interpolácie, aby sa dosiahol cieľový výškový bod. Nakoniec, sa objekt otáča na základe hodnôt sklonu, natočenia a náklonu, aby zodpovedal žiadanej orientácii. Všetky tieto operácie sú riadené časom pomocou časového kroku *Time.deltaTime*, čím sa zabezpečuje plynulé správanie letúna v simulovanom prostredí.



Obr. 5.11: Model kokpitu letúna.

Pohyb letúna je vykonaný pomocou joysticku Thrustmaster T.16000M, znázorneného na obrázku 5.13. Tento joystick má magnetický senzor, čím sa zvyšuje presnosť a citlivosť ovládania. Výhodou je taktiež aj hladký pohyb v 4 nezávislých osiach, čím je schopný pohybu v štyroch rôznych smeroch bez závislosti na ostatných osiach. Nakláňaním joysticku nahor a nadol sa ovláda os sklonu, známa tiež ako os pitch. Tento pohyb je dôležitý pre zmenu výšky, stúpanie a klesanie. Pohybom joysticku doľava a doprava sa ovláda os náklonu, známa tiež ako os roll. Tento pohyb vykoná náklon letúna doľava alebo doprava, čím sa mení smer letúna. Pohybom otočenia joysticku okolo svojej osi sa ovláda os otáčania, známa tiež ako os yaw. Tento pohyb spôsobuje zmenu smeru letúna bez ovplyvnenia jeho sklonu alebo



náklonu. Tento pohyb je dobrý pre správne nasmerovanie letúna pri pristáti. Na obrázku 5.12 sú znázornené rotácie lietadla.



Obr. 5.12: Rotácie lietadla. Prevzaté z [17].

V strede joysticku sa nachádza taktiež ťahová páka, ktorá umožňuje reguláciu rýchlosti alebo intenzity pohybu letúna. V prípade, že je páka nasmerovaná úplne nahor, tak je nastavený maximálny ťah rotorov.



Obr. 5.13: Joystick Thrustmaster T.16000M.

## 5.2 Použité aplikácie a nástroje pri tvorbe vizualizácie letových dát pre prilbový displej

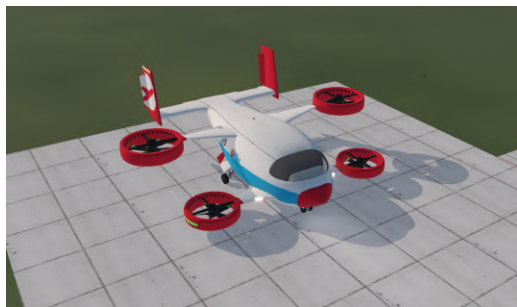
Pri tvorbe vizualizácie letových dát pre prilbový displej boli využité viaceré softvérové nástroje a prostriedky, ktoré umožnili efektívne vytvárať a implementovať túto technológiu. Medzi hlavné aplikácie a prostriedky, ktoré sa využili, patria Unity, X-Plane 11, nástroj GIMP a virtuálna realita HTC Vive. Tieto nástroje poskytli širokú škálu funkcií a možností, ktoré boli využité pri vytváraní a testovaní prilbového displeja.

### 5.2.1 Letecký simulátor X-plane 11

Tento letecký simulátor bol použitý na získavanie dát o letúne a okolitom prostredí. Je možné si do tohto simulátora stiahnuť bezplatný plugin XplaneConnect, ktorý umožňuje komunikáciu so simulátorom cez rozhranie siete. X-plane poskytuje široké spektrum údajov a informácií, ktoré boli potrebné pri vytváraní vizualizácie letových dát pre prilbový displej.



a autentického prostredia. Taktiež sa vyznačuje vysokou úrovňou realizmu a presnosti v simulácií letectva. Ponúka širokú ponuku rôznych typov letúnov, vrátane komerčných dopravných lietadiel, vojenských strojov, vrtulníkov a ďalších. Mnohé letúny sú vyvinuté s dôrazom na detaily. Na základe týchto výhod bol vybratý práve tento simulátor pre vývoj vizualizácie letových dát. V simulátore bola zakúpená kvadrokoptéra, pre ktorú bol daná vizualizácia letových dát vytváraná. Táto kvadrokoptéra je znázornená na obrázku 5.14.

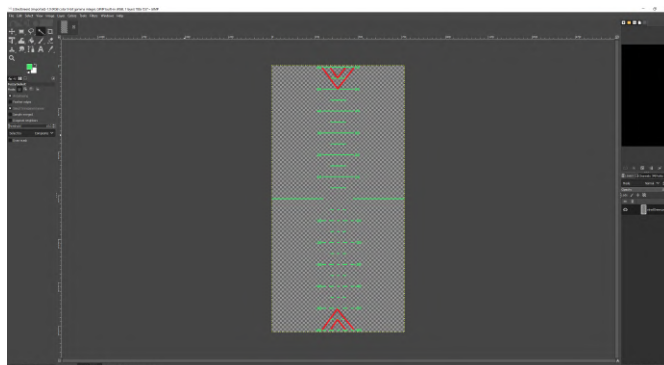


Obr. 5.14: Kvadrokoptéra AG-4.

### 5.2.2 Aplikácie pre tvorbu a vývoj vizualizácie letových dát

Aplikácia Unity bola použitá ako hlavné vývojové prostredie na vytvorenie a implementáciu vizualizácie letových dát pre prilbový displej. Dôvod výberu je ten, že Unity poskytuje robustné a intuitívne vývojové prostredie vhodné pre začiatočníkov aj skúsených vývojárov. Jeho vizuálny editor umožňuje rýchlu iteráciu a zobrazuje zmeny v reálnom čase. V obchode s aktívami Unity je k dispozícii široká škála 3D modelov, animácií, zvukových efektov, skriptov a ďalších prvkov, ktoré zrýchlia vývoj a zlepšia kvalitu hry. Unity má vstavané nástroje na optimalizáciu výkonu, ktoré zabezpečia plynulý beh hry na rôznych zariadeniach a platformách. S Unity je spojená aktívna komunita vývojárov, ktorá zdieľa svoje vedomosti a riešenia problémov [54].

Na úpravu a vytváranie jednotlivých komponentov prilbového displeja bol použitý grafický editor Gimp. Gimp je voľne dostupný editor na úlohy, ako je retušovanie fotografií, kompozícia obrázkov či tvorba obrázkov [14]. Ukážka tvorenia stupnice klopenia je znázornená na obrázku 5.15.



Obr. 5.15: Vytvorená stupnica klopenia v grafickom editore.

### 5.2.3 Hardvér na testovanie vizualizácie letových dát

Pre zobrazenie vizualizácie letových dát pre prilbový displej bola využitá virtualna realita HTC Vive. Jednou z hlavných výhod HTC Vive je jej presné sledovanie pohybu a orientácie. Toto je dosiahnuté pomocou sérií senzorov umiestnených na headsete a v miestnosti, ktoré sledujú pohyb užívateľa vo virtuálnom prostredí s mimoriadnou presnosťou. Tieto senzory zabezpečujú, že sa užívateľ môže vo virtuálnom svete voľne pohybovať svojou hlavou a rukami, čím sa dosahuje vysoká úroveň interaktivity. Medzi hlavné prvky HTC Vive patrí taktiež vysoká rozlíšenosť obrazu, intuitívne ovládanie a kompatibilita s mnohými hernými a vývojarskými platformami, či široké pole pohľadu, ktoré umožňuje užívateľovi vidieť veľké množstvo virtuálneho sveta bez toho, aby musel príliš často otáčať hlavou. Používa platformu SteamVR od spoločnosti Valve, ktorá umožňuje prechádzať a hrať VR hry. HTC Vive tiež ponúka vlastný softvér Vive Home VR [16]. Virtuálna realita aj s vybavením, na ktorej bola vizualizácia letových dát vyvíjaná je znázorená na obrázku 5.16.



Obr. 5.16: Virtuálna realita HTC Vive. Prevzaté z [28].

## Kapitola 6

# Testovanie a dosiahnuté výsledky

Táto kapitola sa zaoberá testovaním vizualizácie letových dát pre HMD a vyhodnotením dosiahnutých výsledkov. Testovanie spoľahlivosti a presnosti implementovanej vizualizácie dát pre HMD bolo kľúčovým krokom v procese vývoja. Cieľom testovania bolo overiť, či údaje zobrazené na HMD sú v súlade s informáciami dostupnými v hernom simulátore X-Plane 11, a zistiť, či vizualizácia letových dát pomáha pri lete tak, ako bolo predpokladané.

### 6.1 Ciele testovania

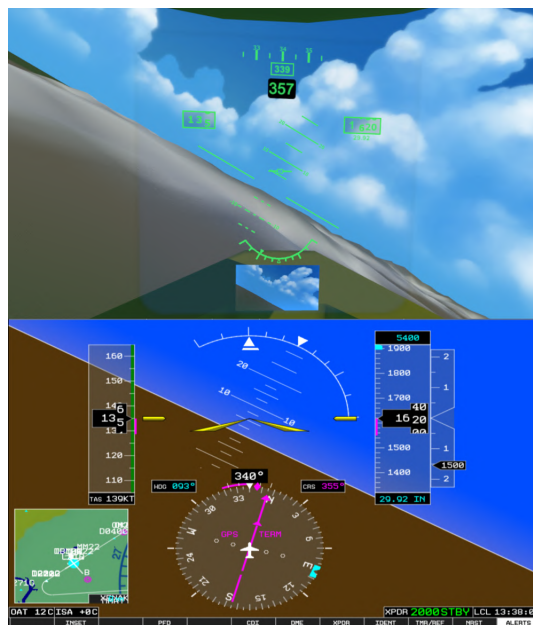
Cieľom testovania bolo overiť, či údaje zobrazené na Helmet-Mounted Displeji sú v súlade s informáciami dostupnými v hernom simulátore X-Plane 11, a zistiť, či vizualizácia skutočne pomáha užívateľom pri lete tak, ako bolo predpokladané. Konkrétne sa testovanie zameriavalo na nasledujúce kľúčové body:

1. Konzistencia údajov: Sledovalo sa, či údaje zobrazené na HMD zodpovedajú informáciám poskytnutým herným simulátorom X-Plane 11. Toto porovnanie malo poskytnúť jasné pochopenie presnosti a spoľahlivosti zobrazených údajov na HMD.
2. Efektivita vizualizácie: Testovanie malo tiež zhodnotiť, či použitie vizualizácie skutočne uľahčuje a zlepšuje letecké operácie. Sledovalo sa, aké výhody prináša vizualizácia v porovnaní s tradičnými spôsobmi zobrazenia.
3. Používateľská skúsenosť: Dôraz bol kladený na subjektívne hodnotenie užívateľov týkajúce sa čitateľnosti a všeobecného užívateľského dojmu pri používaní HMD počas letu.
4. Pomoc pri leteckých manévroch: Testovanie malo tiež skúmať, ako HMD ovplyvňuje schopnosť užívateľov vykonávať rôzne letecké manévry a splniť špecifické úlohy. Sledovalo sa, či HMD poskytuje relevantné a časovo vhodné informácie pre úspešné vykonanie leteckých operácií.

### 6.2 Postup testovania

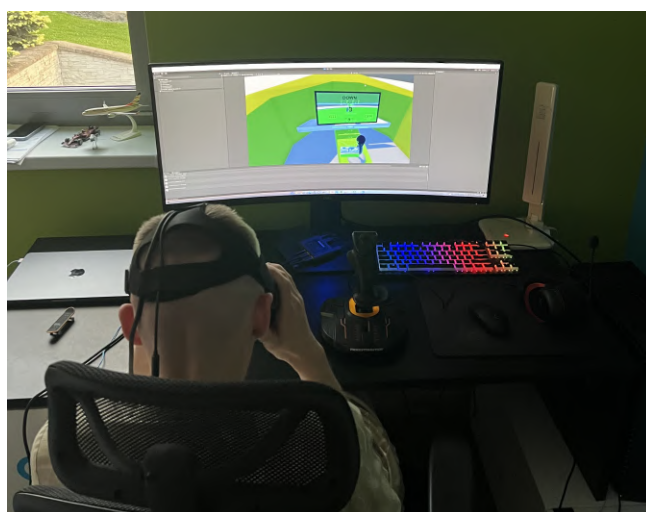
Po sérii testovacích scenárov, ktoré porovnávali údaje zobrazené na HMD s údajmi poskytnutými leteckým simulátorom X-Plane 11, nasledoval dôkladný proces vyhodnotenia. Tento proces zahŕňoval sledovanie všetkých parametrov, ktoré sa nachádzali na HMD, a ich porovnanie s údajmi zo simulátora. Na základe týchto testov bol upravený pôvodný

návrh HMD tak, aby lepšie vyhovoval očakávaniam. Pri finálnom návrhu vizualizácie boli výsledky testovania pozitívne, ukazujúce vysokú konzistenciu a zhodu medzi údajmi zobrazenými na HMD a údajmi v hernom simulátore. Ukážka z testovania je znázornená na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Porovnanie údajov v Unity s údajmi v Xplane.

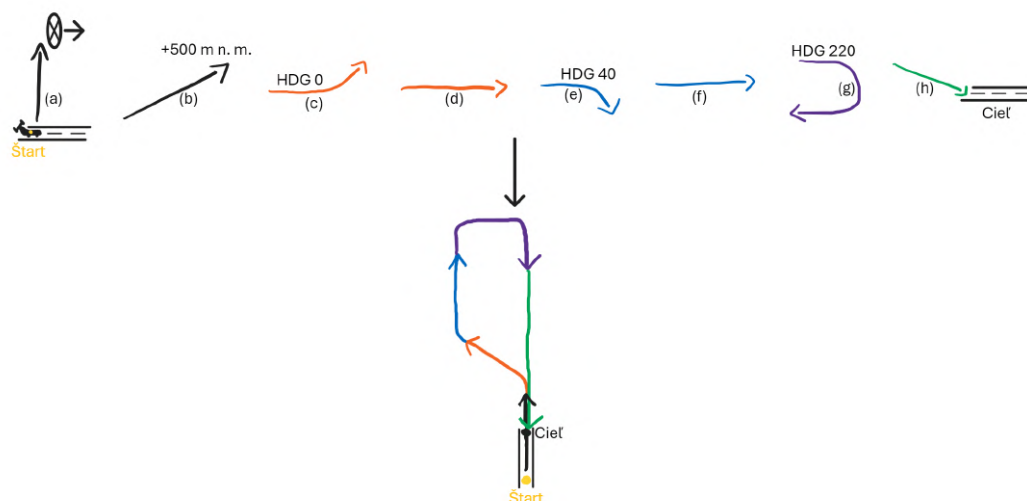
Ďalším dôležitým krokom bolo testovanie s používateľmi, ktoré malo za cieľ zistiť, či sú používatelia schopní pomocou vytvorenej vizualizácie letových dát úspešne vykonávať rôzne fázy letu a splniť tak zadané úlohy. Každý z používateľov dostal taktiež dotazník, v ktorom odpovedal na niekoľko otázok, čím poskytol spätnú väzbu. Na základe týchto dotazníkov bolo vykonané záverečné vyhodnotenie. Ukážka testovania užívateľa po pristáti na vertiport je znázornená na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Pristátie užívateľa na vertiport.

Pre testovanie boli vytvorené 2 experimenty, zahŕňajúce simulácie rôznych letových situácií a úloh. Pred vykonaním týchto experimentov boli všetci účastníci informovaní o tom, z akých prvkov sa vizualizácia letových dát skladá, a čo bude následne ich úlohou počas testovania. Pre každý experiment bol nakreslený aj plán experimentu, kde na hornej strane obrázka sa nachádzajú jednotlivé kroky, ktoré bude užívateľ vykonávať a na dolnej strane sa nachádza pohľad zhora ako bude vyzeráť trajektória letu. Tieto plány sú znázornené na obrázku 6.3 a 6.4. Zadania týchto experimentov sú nasledovné:

1. Experiment: Cieľom tohto experimentu je vykonať odlet a následne horizontálne pristátie. Na začiatku je Vášou úlohou odletieť a vystúpať do výšky nad 500 metrov. V tejto letovej výške vykonajte ľavotočivý manéver, tak aby ste boli nasmerovaní na kurz 0. Následne vykonajte pravotočivý manéver na kurz 40. Za Vami po pravej strane sa bude nachádzať pristávacia dráha, na ktorú budete pristávať. Vykonajte pravotočivý manéver o  $180^\circ$  pod uhlom klonenia približne  $60^\circ$  tak, aby ste mali výhľad na pristávaciu dráhu. V prípade, že ste vyosený tak sa nasmerujte na stred dráhy a začnite klesať a priblížte sa k pristávacej dráhe (kurz na dráhu je 220) a následne vykonajte horizontálne pristátie.

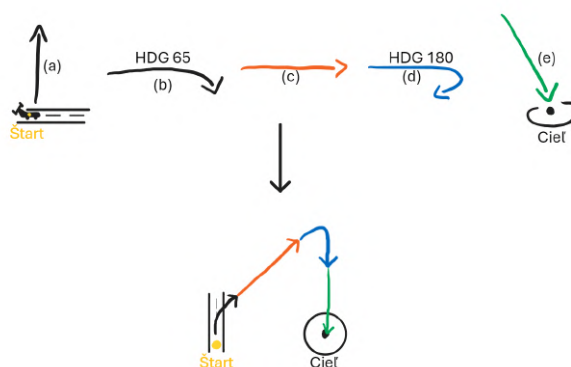


Obr. 6.3: Plán prvého experimentu.

V prvom experimente sa nachádza 8 krokov, ktoré bude užívateľ vykonávať. Tieto kroky sú nasledovné:

- (a) Vertikálny odlet letúna. Pri tomto manévri užívateľ nastaví rotory pre horizontálny let.
- (b) Vystúpanie do výšky viac ako 500 m n.m.
- (c) Ľavotočivý manéver na kurz 0.
- (d) Priamy let.
- (e) Pravotočivý manéver na kurz 40.
- (f) Priamy let.
- (g) Pravotočivý manéver o  $180^\circ$  na kurz 220.

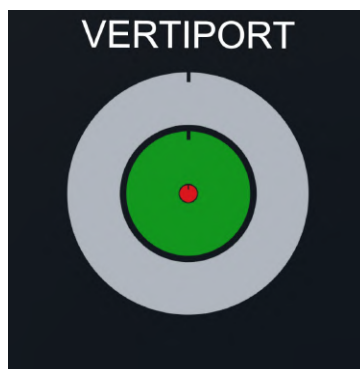
- (h) Klesanie a pristátie na dráhu.
2. Experiment: Cieľom tohto experimentu je vykonať vertikálny odlet a vertikálne pristátie. Na pravej strane od Vás sa nachádza vertiport, na ktorý budete vykonávať pristátie. Vašou úlohou je vertikálne odletieť a na základe Vášho usúdenia vykonať manévry pre priblíženie a následne pristátie na tomto vertiporte. Úlohou je pristáť do stredu na zelenú plochu vertiportu s nasmerovaním na kurz 180. Vertiport je znázorňený na obrázku 6.5.



Obr. 6.4: Plán druhého experimentu.

V druhom experimente sa nachádza 5 krokov, ktoré bude užívateľ vykonávať. Tieto kroky sú nasledovné:

- Vertikálny odlet letúna.
- Pravotočivý manéver na kurz 65.
- Priamy let.
- Pravotočivý manéver na kurz 180.
- Klesanie a pristátie na vertiport.



Obr. 6.5: Vertiport pre vertikálne pristátie.

Zámerom týchto experimentov bolo vyskúšanie si rôznych letových situácií a manévrov, či už zadaných alebo vykonaných podľa vlastného usúdenia.

## 6.3 Výsledky testovania

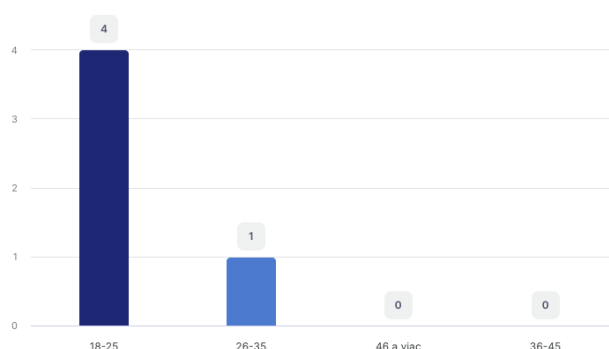
Výsledky z testovania sú zhotovené na základe odpovedí získaných zo sprevádzacieho dotazníka, ktorý obsahoval rôzne otázky zamerané na vizualizáciu letových dát. Tento dotazník pomohol lepšie porozumieť potrebám a očakávaniam používateľov a poskytol užitočnú väzbu na možné ďalšie vylepšenia a úpravy. Výsledky testovania sú zhotovené taktiež na základe hodnôt, ktoré boli automatické ukladané po každom vertikálnom pristáti užívateľa. Medzi tieto hodnoty patrí hodnota ukazujúca vzdialenosť letúna od stredu vertiportu a taktiež hodnota zobrazujúca vychýlenie letúna. Pri každom pristáti bol taktiež vyhodnotený čas, za aký sa užívateľovi podarilo vertikálne pristáť na vertiport. Časomiera sa spustila automaticky akonáhle užívateľ dosiahol vzdialenosť k vertiportu 200 metrov. Po pristáti sa automaticky zastavila a vypísala.

Celkovo sa do testovania zapojilo päť užívateľov. Jeden užívateľ nemal žiadne skúsenosti s lietaním na leteckom simulátore. Štyria užívatelia mali skúsenosti s lietaním na leteckom simulátore. Pri otázkach na čitateľnosť jednotlivých prvkov vyšiel najlepšie ukazovateľ výšky a ukazovateľ rýchlosti. Naopak najhoršie vyšiel ukazovateľ kurzu. Veľmi kladné hodnotenie mal prvok zobrazujúci okolie letúna. Tento prvok sa užívateľom páčil najviac a taktiež splnil účel a to, že bol nápomocný pri vertikálnom pristáti. Na otázku, čo sa užívateľom páčilo vo vizualizácii letových dát, bolo najčastejšie spomenuté zobrazovanie letových údajov aj pri rotácii hlavy. Na otázku, čo sa užívateľom nepáčilo vo vizualizácii letových dát, bola najviac spomenutá slabšia čitateľnosť ukazovateľa kurzu.

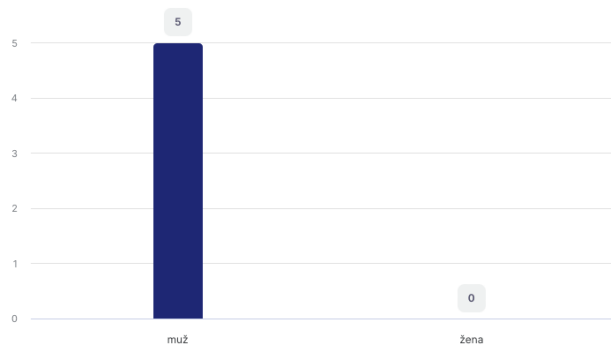
Čo sa týka výsledkov vertikálneho pristátia, všetci piati užívatelia si mysleli, že sa im podarilo pristáť do stredu vertiportu. Z výsledkov automatického vyhodnotenia pristátia, však užívateľ, čo nemal skúsenosti s lietaním bol vzdialený trošku ďalej, ako bolo považované za úspešné. Za úspešné pristátie, sa počítalo, ak bola kvadroptéra vzdialená od stredu menej ako 3.5 metra. Celkovo bola priemerná vzdialenosť letúna od stredu 2.12 metra. Priemerné vychýlenie letúna bolo  $7.44^\circ$ .

Z jednotlivých odpovedí užívateľov a zo získaných dát sa dospelo k záveru, že vizualizácia letových dát bola efektívna a nápomocná pri vykonávaní rôznych manévrov. Analýza výsledkov jednotlivých otázok je nasledovná:

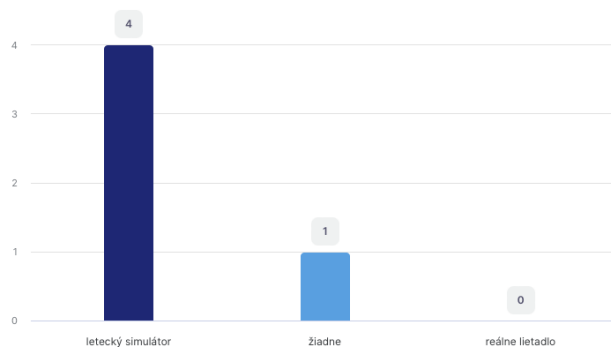
### 1. Aký je Váš vek?



## 2. Aké je Vaše pohlavie?



## 3. Aké máte skúsenosti s pilotovaním lietadla?

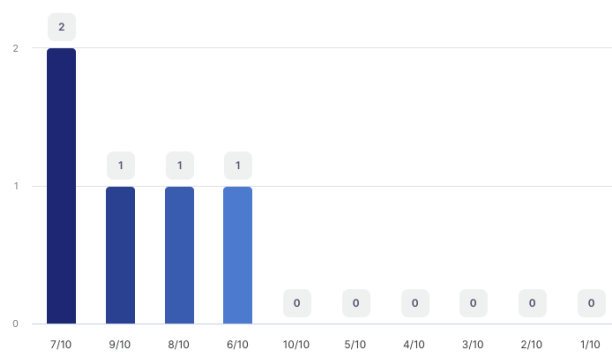


## 4. V prípade, že Vaša predošlá odpoveď bola iná ako "žiadne", aký typ lietadla ste ovládali?

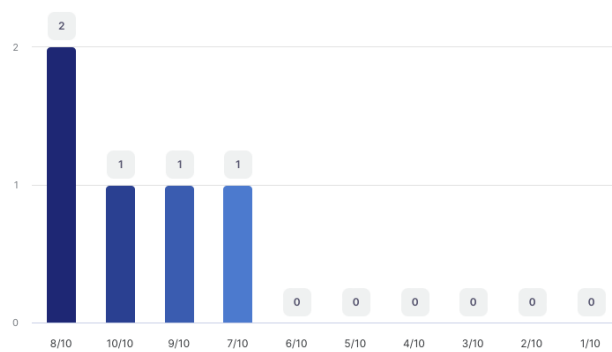
ODPOVEĎ	POČET	PODIEL
stíhačky a helikoptéry v hrách	1	20%
dopravné lietadlá Boeing, Airbus	1	20%
Boeing 737, Airbus A320, rôzne helikoptéry	1	20%
Boeing Apache, Spitfire, (GTA, War Thunder)	1	20%
	1	20%



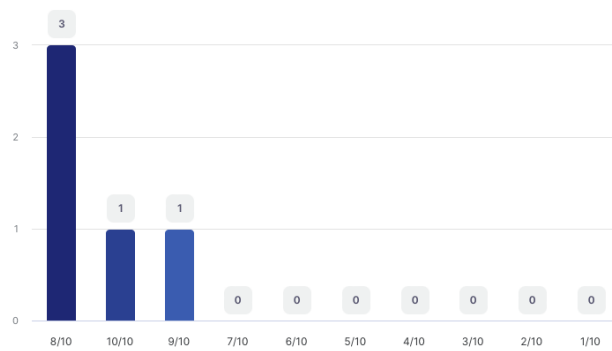
### 5. Aká je čitateľnosť ukazovateľa kurzu?



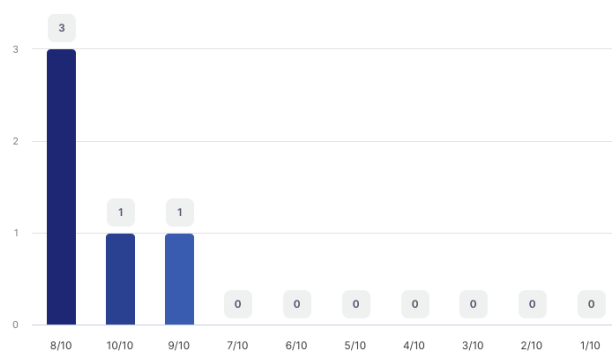
### 6. Aká je čitateľnosť stupnice klopenia?



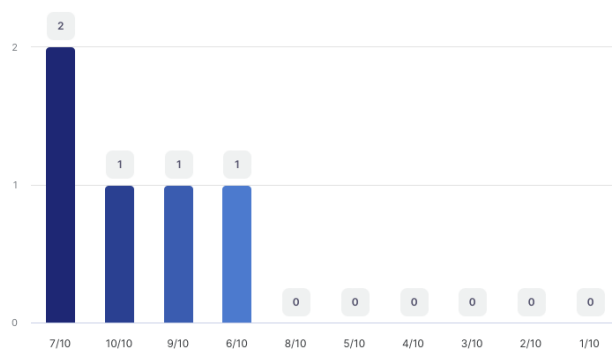
### 7. Aká je čitateľnosť ukazovateľa rýchlosti?



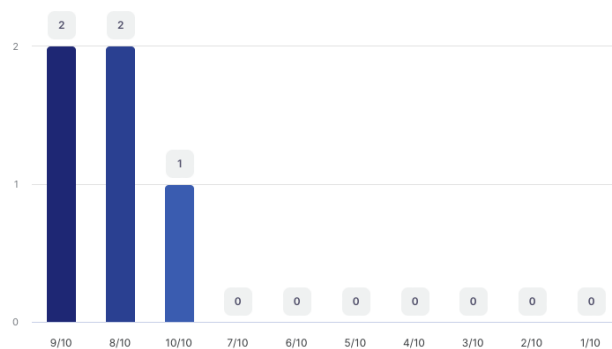
8. Aká je čitateľnosť ukazovateľa výšky?



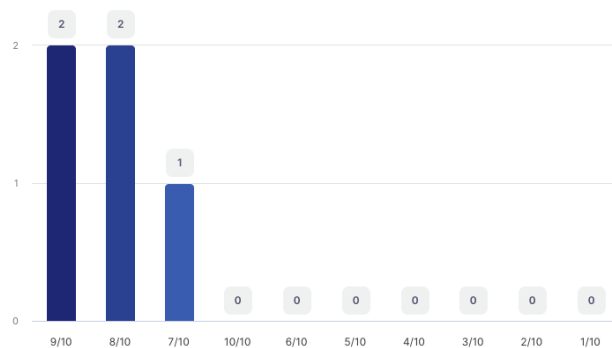
9. Aká je čitateľnosť ukazovateľa klonenia?



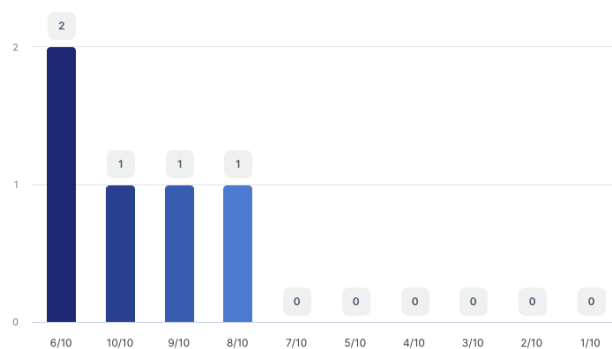
10. Ako sa Vám páči celkové rozmiestnenie prvkov vo vizualizácii letových dát?



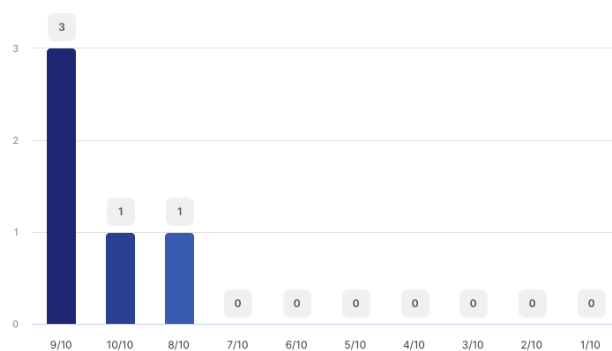
11. Ako sa Vám páči kontrast vizualizácie letových dát?



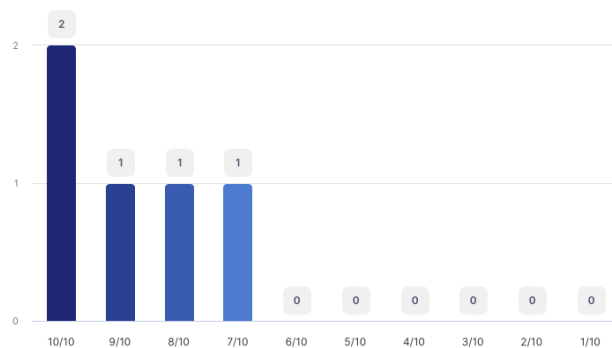
12. Páči sa Vám prvok kvadrokoptéry znázorňujúci pohyb nahor a nadol vo vizualizácii letových dát?



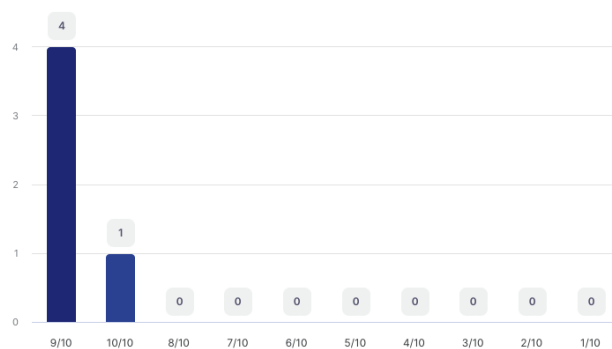
13. Páči sa Vám prvok zobrazujúci okolie letúna vo vizualizácii letových dát?



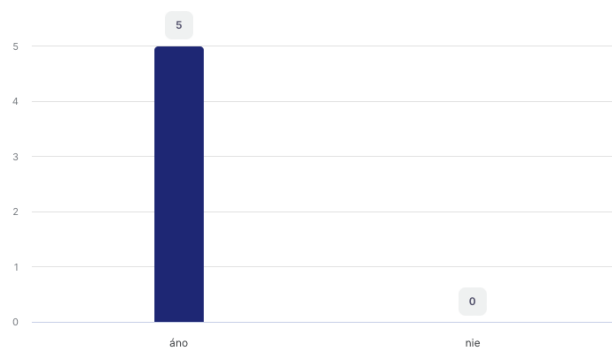
14. Pomohol Vám prvok zobrazujúci okolie ľahšie sa priblížiť a vertikálne pristáť?



15. Bolo pre Vás ovládanie letúna na základne vizualizácie letových dát jednoduché?



16. Myslíte si, že ste pri vertikálnom pristáti dokazali pristáť do stredu vertiportu?



## 17. Čo sa Vám páčilo vo vizualizácii letových dát?

ODPOVEĎ	POČET	PODIEL
zobrazenie výkonu motorov, zobrazenie dát aj pri rotácii hlavy, celkový dojem	1	20%
zobrazenie okolia pod letúnom	1	20%
varovné hlásenia	1	20%
ukazovanie dát aj pri otočení hlavy do strán	1	20%
aktuálne dáta ktoré sa v čase menili	1	20%

## 18. Čo sa Vám nepáčilo vo vizualizácii letových dát?

ODPOVEĎ	POČET	PODIEL
trošku horšia čitateľnosť kurzu	1	20%
prvok kvadrokoptéry som pri pristáti nevyužil, čiže mi príde zbytočný	1	20%
nič, všetko bolo super	1	20%
na bielom pozadí (napr. oblaky) slabšia viditeľnosť	1	20%
čísla na stupnice kurzu sú slabšie čitateľné	1	20%

## 19. Čo by ste zmenili vo vizualizácii letových dát?

ODPOVEĎ	POČET	PODIEL
upravil prvok kvadrokoptéry nech je užitočnejší	1	20%
nič mi nenapadá	1	20%
nič, implementovaný dizajn vyzeral pekne a prehľadne	1	20%
nič	1	20%
možno posunutie ukazovateľa výšky a rýchlosti bližšie k stredu	1	20%

# Kapitola 7

## Záver

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvorenie futuristického kokpitu moderného letúna. Cieľom bolo systematicky analyzovať a následne implementovať modernú vizualizáciu letových dát pre prilbový displej (HMD) v prostredí leteckého simulátora, s dôrazom na podporu technológií virtuálnej reality. Práca zahŕňala diskusiu o historickom vývoji návrhu vizualizácie letových veličín, s cieľom pochopiť evolúciu tejto oblasti.

V rámci práce, bola venovaná pozornosť taktiež súčasným trendom v oblasti vizualizácie letových dát, pričom bola analyzovaná široká škála inovácií a technologických prístupov využívaných v súčasnosti. Na základe týchto poznatkov bol vytvorený návrh vizualizácie letových dát pre eVTOL letúny. Tieto letúny sú známe tým, že sú schopné vertikálneho odletu a pristátia. Tento proces zahŕňal dôsledné nastavenie správneho umiestnenia a zobrazenia jednotlivých prvkov na displeji, s cieľom maximalizovať ich funkčnosť a zmysluplnosť pre užívateľa. Cieľom bolo taktiež pridať do displeja inovatívne prvky, ktoré pomôžu užívateľovi lepšie sa orientovať pri rôznych manévroch. Táto vizualizácia bola počas vývoja periodicky testovaná a po finálnej implementácii bola taktiež testovaná užívateľmi. Zo získaných odpovedí z dotazníka k testovaniu a získaných hodnôt týkajúcich sa užívateľských pristátí bolo vytvorené výsledné hodnotenie. Dospelo sa k záveru, že vizualizácia letových dát bola efektívna a nápomocná pri vykonávaní rôznych manévrov.

### 7.1 Budúci vývoj

Budúci vývoj pre vizualizáciu letových údajov pre letúny eVTOL by sa mohol zamerať na niekoľko kľúčových oblastí, aby poskytol užívateľom čo najkomplexnejší a najužitočnejší pohľad na ich letové operácie. Ako návrh pre vylepšenie vizualizácie je napríklad integrovanie 3D mapových nástrojov, ktoré umožnia užívateľovi vidieť ich letovú dráhu v reálnom prostredí. Tieto mapy by mohli zahŕňať napríklad výškové profily terénu. Ďalšou možnosťou pre budúci vývoj je pridanie autonómneho systému, ktorý by umožnil plne autonómne lietanie, kde by užívateľ mohol zadať cieľové miesta a letún by tam sám priletel.

# Literatúra

- [1] A, A. Ultimate Designer Guide Handbook for Aviation, Spacecraft, Marine and Defence Cockpit MFD by Aristotle A. 2020, [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/AristotleA1/ultimate-designer-guide-handbook-for-aviation-spacecraft-marine-and-defence-cockpit-mfd-by-aristotle-a>.
- [2] BOARD, N. T. S. *Introduction of Glass Cockpit Avionics into Light Aircraft* [online]. 2010 [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Documents/SS1001.pdf>.
- [3] BROWN, C., HICKS, J., RINAUDO, C. H. a BURCH, R. The use of augmented reality and virtual reality in ergonomic applications for education, aviation, and maintenance. *Ergonomics in Design*. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA. 2023, [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: [https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/10648046211003469?casa\\_token=Gt2ii1jMb24wAAAAA%3ACXiJ9eMFJ1eFR0GXq24lyFSr1KtS3GF7T51no9ejd2n8UUynwF-FC9niRxXmE\\_N-eCShku2l-4lRQQ](https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/10648046211003469?casa_token=Gt2ii1jMb24wAAAAA%3ACXiJ9eMFJ1eFR0GXq24lyFSr1KtS3GF7T51no9ejd2n8UUynwF-FC9niRxXmE_N-eCShku2l-4lRQQ).
- [4] CAMERON, A. Visor projected helmet mounted displays technology and applications. 1999, [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141933198001057>.
- [5] CHAMBERLAIN, R. M. *Multi-Function Displays: A Guide for Human Factors Evaluation* [online]. 2013 [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/am13-21.pdf>.
- [6] CLARENCE E. RASH, T. H. H. W. E. M. *VISUAL HELMET-MOUNTED DISPLAYS* [online]. 2007 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://usaarl.health.mil/assets/docs/hmds/Section-10-Chapter-4-Visual-Helmet-Mounted-Displays.pdf>.
- [7] CRAMER, J. *DEVELOPMENT OF ITU-R RECOMMENDATION ON RADIO ALTIMETERS* [online]. 2013 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj197Gyq9KCAxXH3QIHHQ1\\_CYEQFnoECDYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.icao.int%2Fsafety%2Facc%2FACPWGF%2FACF-WG-F-28%2FACF-WGF28-WP11\\_Radio%2520Altimeter%2520input.doc&usg=AOvVaw10ThBBAGk5XUuZ0B2wNLvQ&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj197Gyq9KCAxXH3QIHHQ1_CYEQFnoECDYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.icao.int%2Fsafety%2Facc%2FACPWGF%2FACF-WG-F-28%2FACF-WGF28-WP11_Radio%2520Altimeter%2520input.doc&usg=AOvVaw10ThBBAGk5XUuZ0B2wNLvQ&opi=89978449).
- [8] DANIELA SCHMID, N. A. S. *The Training of Operators in Single Pilot Operations: An Initial System Theoretic Consideration* [online]. 2019 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: [https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1045&context=isap\\_2019](https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1045&context=isap_2019).

- [9] DATA, I. O. *Exploring the Intersection of Data Science and Aviation* [online]. 2023 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.institutedata.com/blog/data-science-and-aviation/>.
- [10] DEEP, A. *Navigating the Skies with Ease: The Latest in Helmet-mounted Display Technology* [online]. 2023 [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/navigating-skies-ease-latest-helmet-mounted-display-technology-deep/>.
- [11] DENNIS A. VINCENZI, E. L. B. R. P. B. W. T. J. B. Measurement and reduction of system latency in see-through helmet mounted display (HMD) systems. 2010, [cit. 2024-02-21]. Dostupné z: [https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7688/76880F/Measurement-and-reduction-of-system-latency-in-see-through-helmet/10.1117/12.850239.full#\\_=\\_](https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7688/76880F/Measurement-and-reduction-of-system-latency-in-see-through-helmet/10.1117/12.850239.full#_=_).
- [12] EDITOR, P. *Heading Indicator: What it Is, How it Works, and What to Do if it Fails* [online]. 2023 [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://www.pilotmall.com/blogs/news/heading-indicator-what-it-is-how-it-works-and-what-to-do-if-it-fails>.
- [13] ENGINEERING, A. *What Is an Attitude Indicator and How Does It Work?* [online]. 2023 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://monroeaerospace.com/blog/what-is-an-attitude-indicator-and-how-does-it-work/>.
- [14] EXPERTPHOTOGRAPHY. *GIMP vs Photoshop (Is GIMP Really Just as Good in 2024?)* [online]. 2024 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://expertphotography.com/gimp-vs-photoshop/>.
- [15] GARMIN. *GHD 2100 Head-Up Display* [online]. [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/en-US/p/151152>.
- [16] GREENWALD, W. *HTC Vive Review* [online]. 2017 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/reviews/htc-vive>.
- [17] HALL, N. *Aircraft Rotations* [online]. 2022 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/>.
- [18] HERNÁNDEZ, P. *The role of AI in drones and autonomous flight* [online]. 2020 [cit. 2024-01-17]. Dostupné z: <https://datascience.aero/ai-drones-autonomous-flight/>.
- [19] HIRSCHMAN, D. *WHAT AM I? ANGLE OF ATTACK INDICATORS* [online]. 2019 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/february/flight-training-magazine/what-am-i-aoa#:~:text=AOA%20indicators%20measure%20the%20angle,re%20approaching%20an%20aerodynamic%20stall>.
- [20] HOKAYEM, P. F. a SPONG, M. W. Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*. 2006, zv. 42, č. 12, s. 2035–2057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.06.027>. ISSN 0005-1098. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109806002871>.
- [21] HORNE, T. A. *ON INSTRUMENTS: PRECISE FLYING AND TRACKING* [online]. 2020 [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2020/november/pilot/on-instruments-precise-flying>.



- [22] INSTITUTE, P. *Flight Instruments Explained – 6 Pack vs Glass Cockpit* [online]. 2023 [cit. 2023-11-14]. Dostupné z: <https://pilotinstitute.com/flight-instruments-explained/>.
- [23] INTERNET, T. *Teleoperation* [online]. 2021 [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: [https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/teleoperation?fbclid=IwAR3ieSIy31ZeCyQ9zQ086uR\\_2R7Myv13gxTg59MyDuzpbwfy0KL07ZkeYY8](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/teleoperation?fbclid=IwAR3ieSIy31ZeCyQ9zQ086uR_2R7Myv13gxTg59MyDuzpbwfy0KL07ZkeYY8).
- [24] JIŘÍ LANGER, J. P. Teoretická mechanika. 2015, [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://utf.mff.cuni.cz/vyuka/AFY016/TEXTY/tuhetele.pdf>.
- [25] JOHNSON, W. W. *Conventional vs. single-pilot operations* [online]. 2014 [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Conventional-vs-single-pilot-operations\\_fig1\\_300244822](https://www.researchgate.net/figure/Conventional-vs-single-pilot-operations_fig1_300244822).
- [26] KDÉR, F. *Učebnice sportovního letce* [online]. 1980 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: [https://www.aeroklubmedlanky.cz/fileadmin/user\\_upload/Download/Ucebnice/ucebnice\\_sportovniho\\_letce.pdf](https://www.aeroklubmedlanky.cz/fileadmin/user_upload/Download/Ucebnice/ucebnice_sportovniho_letce.pdf).
- [27] KOPP, C. *Helmet Mounted Sights and Displays* [online]. 2014 [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/military-helmet-helmet-mounted-display-systems-market-1f/>.
- [28] LOOPER, C. de. *How to set up a HTC Vive: follow these steps to get started with your HTC Vive* [online]. 2018 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/how-to/how-to-set-up-a-htc-vive>.
- [29] MARK, R. *How a Primary Flight Display Works* [online]. 2018 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://www.flyingmag.com/how-primary-flight-display-works/>.
- [30] MARTIN, S. *How DME Works* [online]. 2021 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/understanding-dme-on-instrument-approaches-and-vfr-use/>.
- [31] MIDCONTINENT. *The Six Pack Explained* [online]. 2019 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.mcico.com/resource-center/articles/six-pack-aircraft-instruments-explained>.
- [32] MILTIADOU, D., PITSIOS, S., SPYROPOULOS, D., ALEXANDROU, D., LAMPATHAKI, F. et al. A big data intelligence marketplace and secure analytics experimentation platform for the aviation industry. In: Springer. *International Conference on Big Data Technologies and Applications*. 2020, s. 48–62.
- [33] N., J. *Airspeed Indicator Explained* [online]. 2020 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://www.century-of-flight.net/airspeed-indicator-explained/>.
- [34] NBAA. *AI and Autonomous Flight* [online]. 2023 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://nbaa.org/news/business-aviation-insider/2023-07/ai-and-autonomous-flight/>.
- [35] NEWMAN, R., GREELEY, K., SCHWARTZ, R. a ELLIS, D. A Head-up display for general aviation. *SAE transactions*. JSTOR. 2000, s. 197–206.

- [36] PHELPS, M. *Group Focuses Attention on Angle of Attack Indicators* [online]. 2013 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.flyingmag.com/avionics-gear-instrumentaccessories-group-focuses-attention-angle-attack-indicators/>.
- [37] RANDLE, A. *History of Flight: Breakthroughs, Disasters and More* [online]. 2021 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.history.com/news/history-flight-aviation-timeline>.
- [38] REED, J. *Exploring Cockpit Configurations Inside Next Generation eVTOL Aircraft* [online]. 2022 [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/september-october-2022/satcom-antennas-are-electrifying/>.
- [39] REED, J. *Vertiports, Air Traffic Management, and Infrastructure Requirements for eVTOL Aircraft* [online]. 2022 [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/november-december-2022/innovations-in-remote-air-traffic-control-towers-for-diverse-landscapes/>.
- [40] REVIEW, I. A. *Electric Air-taxi maker, AutoFlight, successfully performs world's first inter-city demonstration flight* [online]. 2024 [cit. 2024-04-04]. Dostupné z: <https://www.internationalairportreview.com/news/214920/electric-air-taxi-maker-autoflight-successfully-performs-worlds-first-inter-city-demonstration-flight/#:~:text=AutoFlight%2C%20the%20eVTOL%20maker%2C%20presented,Zhuhai%20on%2027%20February%202024>.
- [41] ROESLER, A., CHURNG, S., BADER, S. a PARK, H. Designing Affordances for Direct Interaction. *International Journal of Designed Objects*. 2016, s. 1–16, [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-Primary-Flight-Display-PFD-is-the-key-tactical-flight-information-display-in-the\\_fig1\\_300014874](https://www.researchgate.net/figure/The-Primary-Flight-Display-PFD-is-the-key-tactical-flight-information-display-in-the_fig1_300014874).
- [42] SAFI, M. a CHUNG, J. Augmented reality uses and applications in aerospace and aviation. In: *Springer Handbook of Augmented Reality*. Springer, 2023, s. 473–494.
- [43] SINGH, I. *Autonomous drones to remotely monitor electric power station in Canada* [online]. 2023 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://dronedj.com/2023/01/25/percepto-autonomous-drone-canada-power/>.
- [44] SKYBRARY. *Electronic Flight Instrument System (EFIS)* [online]. [cit. 2024-03-28]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/electronic-flight-instrument-system-efis>.
- [45] SLOAT, D. *11 Electric Air Taxis That Could Revolutionize Your Daily Commute* [online]. 2024 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://robbreport.com/motors/aviation/gallery/best-electric-air-taxis-for-commute-1235508370/2-overair-screenshot-2024-02-12-at-8-30-26-pm/>.
- [46] SUBRAMANIAN, K. K. *What is the use of a radar altimeter?* [online]. 2019 [cit. 2023-11-20]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-use-of-a-radar-altimeter>.
- [47] TALLMAN, J. W. *HOW IT WORKS: TURN COORDINATOR* [online]. 2019 [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/january/flight-training-magazine/how-it-works-turn-coordinator>.

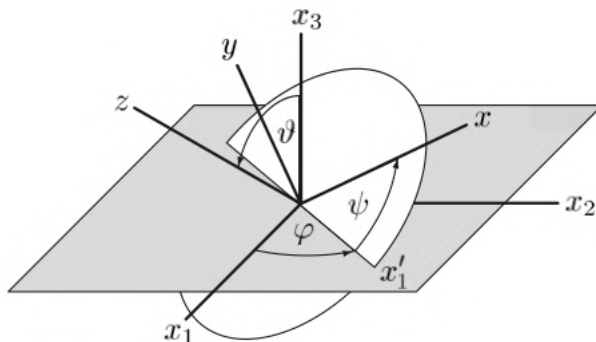
- [48] TATWOOD. *The Unique Layouts of eVTOL Cockpit Instrument Panels the role of Fly-by-Wire* [online]. 2023 [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.the-nref.org/content/unique-layouts-evtol-cockpit-instrument-panels-role-fly-wire>.
- [49] TAUB, S. *Is there a future for autonomous flight?* [online]. 2022 [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://medium.com/jetblue-ventures-insights/the-future-of-autonomous-flight-aefde61f2ec>.
- [50] THALES. *Learn more about cockpit: history, how it works and evolution* [online]. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://www.thalesgroup.com/en/global/activities/aerospace/flight-deck-avionics-equipment-functions/flight-deck/learn-more-about>.
- [51] TRANSPORTATION, U. S. D. of. *Flight Instruments* [online]. 2023 [cit. 2023-11-14]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak/10\\_phak\\_ch8.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/10_phak_ch8.pdf).
- [52] TWOMBLY, I. J. *HOW IT WORKS: COURSE DEVIATION INDICATOR* [online]. 2020 [cit. 2023-11-19]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2020/july/flight-training-magazine/how-it-works-course-deviation-indicator>.
- [53] WALKER, J. S. *HOW IT WORKS: THE ALTIMETER* [online]. 2019 [cit. 2023-11-16]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/july/flight-training-magazine/how-it-works-altimeter>.
- [54] WEB, X. *Top Advantages of Using Unity for Game Development* [online]. 2023 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://medium.com/@xceltecweb/top-advantages-of-using-unity-for-game-development-bd64b6a3004>.

# Prílohy

## Príloha A

# Eulerové uhly

Eulerove uhly sú znázornené na obrázku [A.1](#).



Obr. A.1: Eulerove uhly. Prevzaté z [\[24\]](#).

Ortogonalna matica  $A$ , ktorá jednoznačne určuje vzťah medzi dvoma ľubovoľne natočenými bázami, je definovaná len tromi nezávislými parametrami. Hoci matica rozmerov  $3 \times 3$  obsahuje celkovo 9 prvkov, ortogonálne relácie vyžadujú iba 6 podmienok. Rotáciu okolo počiatku je možné dosiahnuť pomocou troch jednoduchých postupných rotácií okolo vhodnej pevnej osi. Euler (1738) použil uhlové parametre týchto troch jednoduchých rotácií a to [\[24\]](#):

- uhol precesie ( $\varphi$ ),
- nutačný uhol ( $\vartheta$ ),
- uhol rotácie ( $\psi$ ).

Ich význam plynie z následujúcej konštrukcie matice  $A$  [\[24\]](#):

1. Vychádzame z bázy  $e_i$  pevnej v priestore a otáčame okolo osi  $x_3$  o uhol  $\varphi$ . Otáčanie je dané maticou:

$$D = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Následuje otočenie okolo osi  $x'_1$  o uhol  $\vartheta$  danej matice:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ 0 & -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{pmatrix}$$

3. Na záver sa urobí otočenie okolo osi  $x''_3$  o uhol  $\psi$  danej matice:

$$B = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Výsledná matica A transformácie od bázy pevnej v priestore do bázy, ktorá korotuje s telesom je potom daná maticovým súčinom  $A = BCD$  [24].

## Príloha B

# Sprevádzací dotazník k testovaniu

1. Aký je Váš vek?

- ☐ 18-25
- ☐ 26-35
- ☐ 36-45
- ☐ 46 a viac

2. Aké je Vaše pohlavie?

- ☐ muž
- ☐ žena

3. Aké máte skúsenosti s pilotovaním lietadla?

- ☐ žiadne
- ☐ letecký simulátor
- ☐ reálne lietadlo

4. V prípade, že Vaša predošlá odpoveď bola iná ako "žiadne", aký typ lietadla/lietadiel ste ovládali?

	Zlá					Výborná				
5. Aká je čitateľnosť ukazovateľa kurzu?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6. Aká je čitateľnosť stupnice klopenia?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7. Aká je čitateľnosť ukazovateľa rýchlosti?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8. Aká je čitateľnosť ukazovateľa výšky?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9. Aká je čitateľnosť ukazovateľa klonenia?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Nepáči					Páči				
10. Ako sa Vám páči celkové rozmiestnenie prvkov vo vizualizácii letových dát?	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

11. Ako sa Vám páči kontrast vizualizácie letových dát?
- |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
12. Páči sa Vám prvok kvadrokoptéry znázorňujúci pohyb nahor a nadol vo vizualizácii letových dát?
- |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
13. Páči sa Vám prvok zobrazujúci okolie letúna vo vizualizácii letových dát?
- |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
- Nie** **Áno**
14. Pomohol Vám prvok zobrazujúci okolie ľahšie sa priblížiť a vertikálne pristáť?
- |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
15. Bolo pre Vás ovládanie letúna na základne vizualizácie letových dát jednoduché?
- |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
16. Myslíte si, že ste pri vertikálnom pristáti dokazali pristáť do stredu vertiportu?
- ☐ áno
- ☐ nie
17. Čo sa Vám páčilo vo vizualizácii letových dát?
- 
18. Čo sa Vám nepáčilo vo vizualizácii letových dát?
- 
19. Čo by ste zmenili vo vizualizácii letových dát?
-



## Príloha C

# Obsah priloženého pamäťového média

**doc/** - zdrojové súbory tohto textu

**src/** - zdrojové súbory implementovaného prilbového displeja

**video/** - video prilbového displeja

**DP.pdf** - elektronická verzia tohto textu