



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy

Návrh zobrazení letových informací prostřednictvím rozšířené reality
Design of Displaying Flight Information Through Augmented Reality

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojkch

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

Ing. Lenka Hanáková

Erik Ingeduld

Praha 2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Erik Ingeduld

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

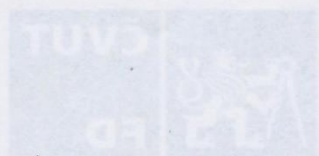
Název tématu (česky): **Návrh zobrazení letových informací
prostřednictvím rozšířené reality**

Název tématu (anglicky): Design of Displaying Flight Information Through
Augmented Reality

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout funkční a ergonomicky vhodné rozmístění základních a aditivních letových informací, promítnutých do zorného pole pilota pomocí rozšířené reality.
- Vypracujte analýzu současného stavu v oblasti využití rozšířené reality u pilotů. Rešeršní část zaměřte na zobrazení základních a aditivních letových dat do zorného pole pilota, ergonomické koncepty a využití v letectví.
- S využitím brýlí pro rozšířenou realitu implementujte zobrazení vybraných letových informací.
- Vykonejte experiment, který bude zaměřen na vykonávání standardních letových úloh, přičemž od subjektů sesbírejte informace o optimálním zobrazení údajů v rozšířené realitě.
- Zobrazená data a zpětnou vazbu využijte pro úpravu systému v kontextu zobrazování informací do zorného pole.
- Výsledky diskutujte a formulujte závěry práce.



TECHNICKÉ V PRAZE



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Safi, Maryam, Joon Chung, and Pratik Pradhan. "Review of augmented reality in aerospace industry." 2019.
Li, Wen-Chin, et al. "Evaluating Pilot's Perceived Workload on Interacting with Augmented Reality Device in Flight Operations." 2020.

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

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

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

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Erik Ingeduld
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucím mé bakalářské práce panu doc. Ing. Bc. Vladimírovi Sochovi, Ph.D. a slečně Ing. Lence Hanákové za odborné vedení, cenné rady, konzultace a metodické vedení práce. Zároveň bych také poděkoval své rodině za podporu během celého studia. Nakonec bych touto formou poděkoval všem, kteří se ve svém volném čase zúčastnili experimentu, který byl nezbytnou součástí této práce.

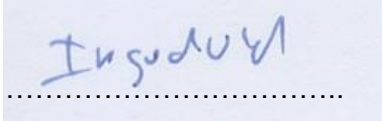
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8. 8. 2021



Erik Ingeduld

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší aktuálního stavu dostupných technologií pro zobrazování rozšířené reality a ergonomickými koncepty zobrazování letových informací. Součástí práce je návrh ergonomicky vhodného rozmístění letových veličin do zorného pole pilota prostřednictvím brýlí s rozšířenou realitou. Byl proveden experiment na letovém simulátoru X-Plane, na jehož základě byla získána zpětná vazba od pilotů ve výcviku ohledně navrhovaného rozmístění.

Klíčová slova

Rozšířená realita, ergonomie, letové přístroje, brýle s rozšířenou realitou, kokpit, pilot, HMD.

Abstract

The main goal of this bachelor's thesis was to conduct a review of technologies that are presently available for Augmented Reality (AR) and ergonomic design concepts of displaying flight information. One of the main goals of the thesis was to design usable ergonomic placement of flight instruments in pilot's field of view using AR glasses. An experiment was conducted using a X-Plane Flight Simulator and based on this experiment a feedback from student pilots regarding the instrument placement has been received.

Key words

Augmented reality, ergonomics, flight instruments, Augmented Reality Glasses, cockpit, pilot, HMD.

Obsah

Úvod	8
1 Teorie a analýza současného stavu	9
1.1 Historie rozšířené reality	9
1.2 Koncept rozšířené reality	9
1.3 Grafická vázanost rozšířené reality na okolní prostředí	10
1.4 Způsoby rozšiřování reality	11
1.5 Dělení displejů podle pozice vůči uživateli	12
1.6 Monoculární, bi-oculární a binoculární projekce	14
2 Zobrazení základních a aditivních letových dat do zorného pole pilota	15
2.1 Letové přístroje a jejich rozmístění	15
2.2 Zobrazení letových informací pomocí rozšířené reality	18
2.3 Zobrazení virtuálních prvků	19
2.4 Barevné zobrazení letových informací na HUD a HMD	21
3 Metodika	23
3.1 Subjekty	23
3.2 Vybavení	23
3.3 Návrh rozmístění letových informací do brýlí s rozšířenou realitou	25
3.4 Experimentální setup	27
3.5 Kolekce a zpracování dat	29
4 Presentace výsledků	34
5 Diskuse	42
6 Závěr	43
Použité zdroje	44
Příloha A: Tištěná podoba dotazníku	46
Příloha B: Kompletní znění konfiguračního souboru pro rozmístění přístrojů	50

Seznam obrázků

Obrázek 1 Koncept z Milgram, Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Display [2]	10
Obrázek 2: Schéma zobrazení AR pomocí VST displeje. Adaptováno z (Azuma 1997)	11
Obrázek 3: Schéma zobrazení AR pomocí VST displeje. Adaptováno z (Azuma, 1997).	12
Obrázek 4: Grafické znázornění kategorií AR displejů podle vzdálenosti od oka. Zdroj: Schmalstieg, 2016	13
Obrázek 5: Vufine VUF-110 Wearable Display.....	14
Obrázek 6: Google Glass Enterprise Edition 2	14
Obrázek 7: Epson Moverio BT-300	14
Obrázek 8: Oculus Quest 2.....	14
Obrázek 9: Schématické rozmístění šesti základních přístrojů v moderním uspořádání "six pack" a červeně vyznačeny přístroje tzv. "basic T".....	16
Obrázek 10: Žlutý rámeček vyznačuje základní přístroje "basic six" v letounu Cessna 172 (Zdroj: Microsoft Flight Simulator)	17
Obrázek 11: Moderní integrovaný přístrojový panel Garmin G1000 (Zdroj: Garmin G1000 Pilot's Guide for Cessna Nav III).	17
Obrázek 12: Modré obrysy tří překážek v pravé části na HMD. (Zdroj: Aeroglass).....	19
Obrázek 13: Zvýrazněný obrys dráhy s prodlouženou osou na HUD v Airbusu A319. Obrys se na obrázku jeví vůči dráze posunutý kvůli poloze kamery. (Zdroj: Youtube).....	19
Obrázek 14: T-NASA HUD symbologie rozšířené reality v mlžném prostředí letištních pojezdových ploch při nízké dohlednosti.	20
Obrázek 15: Barevné rozdělení funkčních skupin prvků u zobrazení AR na HMD pro piloty vrtulníků [12]	21
Obrázek 16: Flight Yoke System. (Zdroj: Logitech)	24
Obrázek 17: Rudder pedals with toe brake. (Zdroj: Logitech).....	24
Obrázek 18: Moverio BT-300 - brýle a ovládač	24
Obrázek 19: Část konfiguračního souboru popisující jednu zobrazovanou veličinu	26
Obrázek 20: Navržené rozmístění leteckých veličin	27
Obrázek 21: Experimentální setup	27
Obrázek 22: Schéma letištního okruhu	28
Obrázek 23: Otázka č. 1 - Identifikace respondenta.....	29
Obrázek 24: Otázka č. 2 - Předchozí zkušenost respondenta s rozšířenou realitou v kokpitu	30
Obrázek 25: Ergonomie zobrazení letových veličin	30
Obrázek 26: Množství zobrazovaných informací	30

Obrázek 27: Situační povědomí a pracovní zátěž	31
Obrázek 28: Konkrétní letecké přístroje na HMD	31
Obrázek 29: Dali by piloti využívající HUD přednosti zobrazení letových dat na HMD?.....	31
Obrázek 30: Otázka na úroveň dosažené pilotní licence.....	32
Obrázek 31: Je technologie přínosná, měl by o ní respondent zájem?.....	32
Obrázek 32: Předchozí zkušenosti respondentů s HUD, HMD systémy v kokpitu	35
Obrázek 33: Přehlednost zobrazovaných veličin	36
Obrázek 34: Názor respondentů na ergonomii zobrazení letových veličin.....	36
Obrázek 35: Názor respondentů na množství zobrazovaných informací	37
Obrázek 36: Sloupcový graf k otázkám o zvýšení situačnímu povědomí a snížení pracovní zátěže	37
Obrázek 37: Požadavky respondentů na další letové přístroje	38
Obrázek 38: Preference HMD a HUD systému	39
Obrázek 39: Názor respondentů na přínosnost HMD technologie.....	40
Obrázek 40: Využili by testovaní piloti předložené zařízení, kdyby bylo dostupné v jejich letadle?	40
Obrázek 41: Zájem respondentů o podobné zařízení.....	41

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Anglický význam	Český překlad
ADF	Automatic Direction Finder	Radiokompas
AI	Attitude Indicator	Umělý horizont
AR	Augmented Reality	
ATPL	Airline Transport Pilot License	Průkaz dopravního pilota
CPL	Commercial Pilot License	Průkaz obchodního pilota
DG	Directional Gyro	Směrový setrvačnick
FD	Flight Director	Povelový ukazatel
FPV	First Person View	
HDD	Head-down Display	
HHD	Hand-held Display	
HI	Heading Indicator	Ukazatel kurzu
HMD	Head/helmet Mounted Display	
HSI	Horizontal Situation Indicator	
HUD	Head-up display	
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla pro let podle přístrojů
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Meteorologické podmínky pro let podle přístrojů
MFD	Multi-function Display	
OST	Optical See-through	
PFD	Primary Flight Display	
PPL	Private Pilot License	Průkaz soukromého pilota
RNAV	Area Navigation	Prostorová navigace
TC	Turn Coordinator	Zatáčkoměr
VFR	Visual Flight Rules	Pravidla pro let za viditelnosti
VMC	Visual Meteorological Conditions	Meteorologické podmínky pro let za viditelnosti
VOR	VHF Omnidirectional Range	
VPD		Vzletová a přistávací plocha
VST	Video See-through	

Úvod

Rozmístění leteckých přístrojů plní důležitou roli v bezpečnosti letecké dopravy. Ergonomicky vhodné rozmístění leteckých přístrojů snižuje posádce pracovní zátěž a snižuje pravděpodobnost mylné interpretace zobrazené informace. Existují zavedené standardy rozložení přístrojů adaptované výrobcí letadel, díky kterým je umožněn pilotům snadnější přechod z jednoho letadla na jiné [19].

Sebelepší umístění přístrojů na palubní desce má zásadní limitaci. V určitých fázích letu je požadována zvýšená pozornost posádky na vnější prostředí. Přístroje se však nacházejí na palubní desce a pilot musí stále přecházet pohledem mezi přístroji a výhledem z kabiny. Tento problém částečně řeší HUD (Head-mounted Display) umístěný před čelním sklem. Je tak možné sledovat zobrazené informace při pohledu vpřed. V tomto ohledu by stávající HUD technologii mohla překonat technologie implementující rozšířenou realitu do brýlí (ve některých případech do helmy – HMD (Head/helmet-mounted Display)).

První část práce se zabývá teoretickými znalostmi o rozšířené realitě a analýzou současného stavu zařízení a systému na její zobrazování. Je zde definován pojem rozšířená realita a je přiblížen způsob, kterým vzniká. Dále je zde uvedeno rozdělení zařízení podle principu fungování. V druhé kapitole je čtenář seznámen se základními leteckými přístroji a veličinami a rovněž s ergonomickými koncepty využívanými v letectví pro jejich umístění v zorném poli pilota. Rešeršní část této práce se zabývá civilními systémy s rozšířenou realitou. Existuje výzkum HMD (Helmet-mounted Display) pro vojenské účely, nicméně o vojenských systémech existuje jen omezené množství informací, které je zveřejňováno spíše pro propagační účely. Dokumenty popisující jejich vývoj a funkci nejsou volně dostupné.

Cílem práce je navržení rozmístění přístrojů pro HMD zařízení prostřednictvím brýlí Epson Moverio Smart Glasses. Touto problematikou a se zabývá hlavní část práce. Důležitou součástí je provedené testování pilotů a vyhodnocení zpětné vazby, které bylo vyhodnoceno pomocí dotazníkového šetření. Výsledkem práce je navržení rozmístění leteckých informací, které bylo v rámci možností dostupného softwaru možné nakonfigurovat a zároveň splňovalo ergonomické koncepty a požadavky pilotů.

1 Teorie a analýza současného stavu

Tato kapitola definuje samotnou rozšířenou realitu a popisuje tzv. kontinuum smíšené reality. Následující část nastíní její vznik a následující vývoj.

1.1 Historie rozšířené reality

V roce 1968 vědec Ivan Sutherland na Harvardské univerzitě vyvinul první technologii zobrazování rozšířené reality pomocí HMD. Ivan Sutherland je za svou práci považován za otce počítačové grafiky [1]. Velký vývoj zobrazování rozšířené reality (AR) se však odehrál až v 90. letech 20. století díky pokrokům v počítačových technologiích a digitálních technologiích, které umožnily zařízení zmenšit a zajistit tak jejich použitelnou velikost. Vznikla tak celá řada různých systémů, způsobů zobrazení a jejich první klasifikace.

Technologický pokrok v novém tisíciletí umožnil další zmenšení velikosti zařízení schopných zobrazovat rozšířenou realitu. Dnes existuje velké množství různých hardwarových integrací AR systémů do brýlí, aniž by byla výrazně zvětšena jejich velikost a hmotnost. Konstrukce stávajících chytrých mobilních zařízení umožňuje softwarovou integraci AR a její využití v nejrůznějších aplikacích.

V kokpitu letadel se rozšířená realita začala prvně využívat ve vojenských letounech prostřednictvím HUD (Head-Up Display) a její kořeny vedou až do druhé světové války. První primitivní systémy spočívaly v gyroskopickém zaměřovači, který udržoval zaměření na cíl. Dalším vývojem byla projekce umělého horizontu, rychlosti, výšky a podobných parametrů. Se známým zobrazením letových přístrojů na HUD systému přišel francouzský testovací pilot Gilbert Kopfstein. Jeho systém se stal standardem a měl vojenským pilotům zjednodušit přechod mezi různými letouny. V civilním letectví se s podobnými systémy začalo experimentovat až v 70. letech. V roce 1994 byl HUD poprvé certifikován pro využití při ILS IIIA přiblížení a první letecká společnost ho začala využívat v roce 1995. V dnešní době jsou do nových dopravních letadel HUD montovány buď na přání zákazníka nebo jako součástí standardní výbavy, jako tomu je u letounu Airbus 350 nebo Boeing 787 [8].

1.2 Koncept rozšířené reality

Schéma virtuálního kontinua (viz Obrázek 1) spojuje na jedné ose skutečné a virtuální prostředí, mezi kterými nám vzniká prostředí smíšené reality. Ryze reálné prostředí se nachází na levé straně schématu. Postupem doprava přibývají na obraze syntetické prvky. Zcela napravo se nachází obraz složený zcela z virtuálních prvků čili tzv. virtuální realita. Prostředí Smíšené reality dále Milgram a Kashino [2] rozdělují na rozšířenou realitu a

rozšířenou virtualitu podle povahy převahujícího prostředí. Rozšířená realita je prostředí převážně reálné s virtuálními prvky, zatímco v rozšířené virtualitě je obraz složen převážně z virtuálního prostředí [2].



Obrázek 1 Koncept z Milgram, Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Display [2]

1.3 Grafická vázanost rozšířené reality na okolní prostředí

Mezi způsoby implementace virtuálních prvků do obrazu rozlišujeme dvě rozdílné koncepce podle míry vázanosti virtuálních prvků na prvky v reálném prostředí.

Jedním konceptem jsou informace nevázané na okolní prostředí. Jedná se o jednodušší koncept zobrazení AR. Zobrazení prvků (poloha) se nemění v závislosti na úhlu/směru pohledu na okolní prostředí. Informace jsou zobrazovány jako vrstva mezi námi a realitou. Tento koncept je využíván například u zobrazování letových veličin na HUD u dopravních i vojenských letounů.

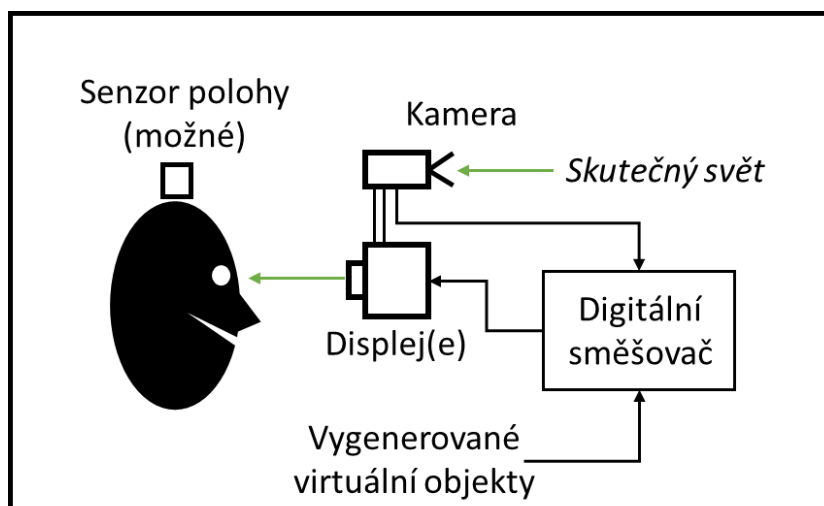
Opakem jsou informace nebo objekty, které jsou na okolním prostředí vázané. Virtuální prvky jsou uměle přidány do skutečného prostředí, jako by byly jeho součástí. Ke správné syntéze je potřeba využít předem definované body/značky umístěné v reálném prostředí nebo musíme využít umělou inteligenci naučenou rozpoznávat okolní prostředí. Pro správnou funkci jsou do systému zapojeny akcelerometry, v některých případech je využívána informace o poloze z GPS [3]. V civilním letectví je takový způsob přidávání informací na HUD uplatňuje spíše sporadicky a jen některých fázích letu. V současné době prochází tato koncepce značným rozvojem. Vznikají různé EVS (Enhanced Vision System), které využívají virtuální objekty ke zvýraznění rysů okolního prostředí, kterými mohou být vybrané překážky, reliéf terénu nebo přistávací plocha.

1.4 Způsoby rozšiřování reality

Prvním systémem pro přidávání virtuálních objektů do obrazu skutečného světa je systém Video see-through (VST). U systému VST sleduje uživatel obrazovku, na které jsou prvky rozšířené reality zobrazené společně s výstupem z kamer. Syntéza skutečného prostředí (výstup z kamery) a virtuálních prvků (PC simulace) probíhá za pomoci počítače a uživateli je promítán výsledný obraz.

Virtuální prvky na VST displeji mohou být zobrazeny jako zcela neprůhledné, díky tomu je sloučení virtuálního a skutečného prostředí přesvědčivější. Nevýhodou zařízení využívající neprůhledný displej je, že při selhání systému zůstane zařízení pro uživatele neprůhledné.

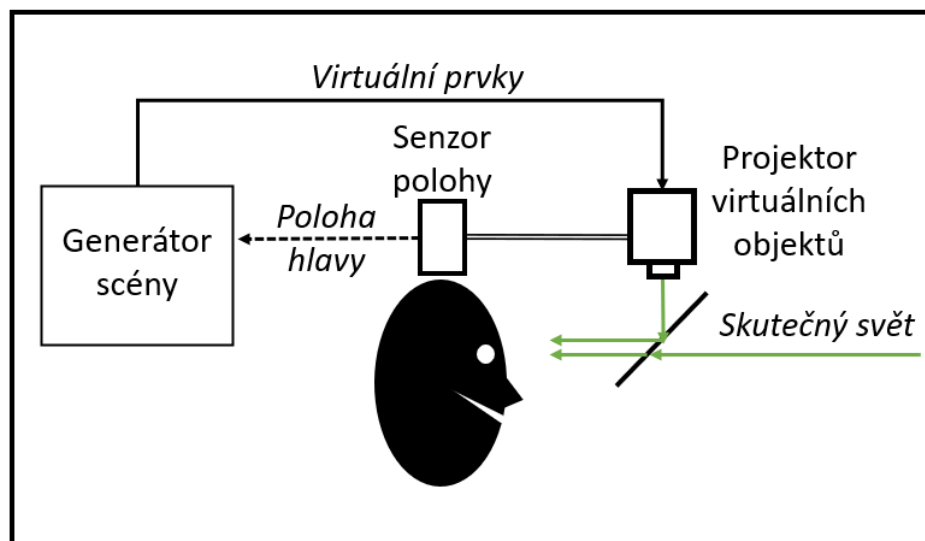
Princip funkce systému VST je znázorněn na schématu na následujícím obrázku (viz. Obrázek 2). Uživatel sleduje neprůhledný displej, do kterého je veden obraz rozšířené reality z digitálního směšovače. V něm dochází k syntéze obrazu skutečného světa z kamery a virtuálních prvků z generátoru scény. Snímače polohy nejsou nutné, nicméně jejich implementace umožňují větší přesnost modelování virtuálních trojrozměrných objektů. Kamera může být připojena k systému dálkově, díky čemuž je možné implementovat dálkové řízení bezpilotních zařízení. Tento princip využívají například výzkumné sondy, dálkově ovládaní roboti pro odkrývání výbušnin nebo dnes populární drony. Mezi leteckými modeláři jsou rozšířené FPV (First Person View) systémy pro ovládání dronu na dálku. Pilot vidí výstup z kamery ve VST zařízení společně s letovými informacemi [2].



Obrázek 2: Schéma zobrazování AR pomocí VST displeje. Adaptováno z (Azuma 1997)

Druhým způsobem rozšířením reality je princip Optical see-through (OST). Virtuální prvky jsou promítány na polopropustné zrcadlo pod úhlem umístěné v naší přímé viditelnosti. Polopropustné zrcadlo zařídí odraz promítaného obrazu do oka uživatele. Zároveň však díky své průhlednosti nebrání ve výhledu. Ke kombinaci virtuálních prvků a skutečného světa dochází opticky [2].

Schéma takového systému je následujícím obrázku 3. Uživatel sleduje reálný svět přímo skrz sklo brýlí, průhledného displeje. Virtuální objekty se promítají na optický směšovač tvořený polopropustným zrcadlem, které je odráží do oka. Objekty se pak jeví jako součást skutečného světa. Využití kamery a senzorů polohy umožňuje vázat virtuální objekty na určité místo ve skutečném světě.



Obrázek 3: Schéma zobrazení AR pomocí VST displeje. Adaptováno z (Azuma, 1997).

Projektor syntetických objektů se nachází vždy mimo přímou viditelnost, aby nebránil ve výhledu uživatele. Může být umístěn nad optickým směšovačem, pod ním nebo na jeho straně, jak tomu je u většiny moderních chytrých brýlí.

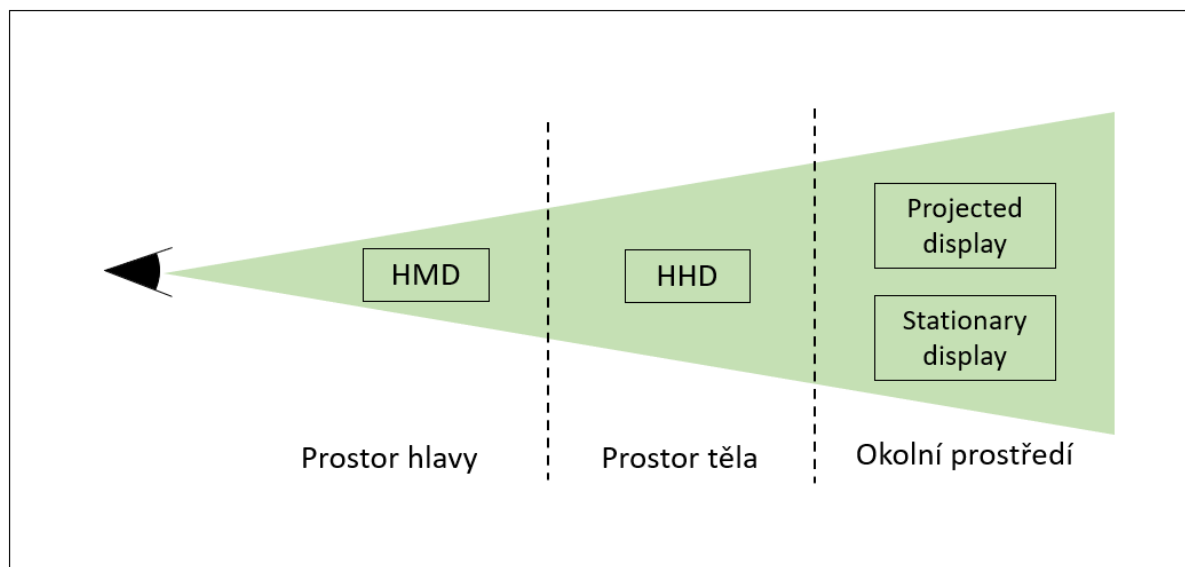
Pro správnou funkci OST displeje je nutné, aby bylo oko uživatele a displej s polopropustným zrcadlem stále v dané pozici. Jinak by byl virtuální obraz posunutý nebo zcela neviditelný. Proto se OST zařízení využívají jen v případech, kde zůstane poloha uživatele a zařízení fixní. Jedná se například o displeje v brýlích připevněné na hlavu nebo HUD, kde je vzájemné poloha zaručena správným nastavením sedadla.

OST displej neumožňuje zobrazovat neprůhledné virtuální prvky, protože musí být z principu funkce průhledný. Velká výhoda OST systému je, že při selhání zařízení neznemožňuje uživateli stále sledovat skutečné prostředí. Tento displej lze tudíž využívat i v oblastech s vysokým nárokem na bezpečnost, jakou je například letectví.

1.5 Dělení displejů podle pozice vůči uživateli

Zařízení zobrazující rozšířenou realitu lze rozdělit do kategorií podle vzdálenosti displeje od oka uživatele. Displeje tak dělíme na Head-mounted v prostoru naší hlavy, Head-up v blízkosti

našeho těla a displeje v okolním prostředí. Obrázek 4 schematicky popisuje rozdělení displejů podle vzdálenosti.



Obrázek 4: Grafické znázornění kategorií AR displejů podle vzdálenosti od oka. Zdroj: Schmalstieg, 2016

Head-mounted displeje jsou umístěny přímo před okem uživatele a pevně spojené s hlavou podobně jako brýle. HMD nechává na rozdíl od HD uživateli volné ruce. Na rozdíl od HUD nevyžaduje jeho implementace zásah do konstrukce letadla nebo jiného dopravního prostředku. U HMD nejsme vázáni ani na směr pohledu jako tomu je u HUD, informace jsou dostupné neustále při jakémkoli natočení hlavy. HMD jsou dostupné v provedení *video* i *optical see-through*, ale většina technologií využívá OST pro jednodušší konstrukci a neomezuje uživatele při selhání. Head-mounted displeje jsou díky svým výhodám optimální pro civilní i vojenské využití.

Handheld display (HHD) je zařízení, které drží uživatel v ruce. Jsou dostupné pouze v projekci VST. OST by nebylo možné integrovat kvůli malé velikosti zařízení a nemožnosti zaručení stálé vzájemné polohy zařízení a uživatele. HHD lze snadno integrovat do chytrých mobilních telefonů, tabletů apod. Pro širokou veřejnost existuje mnoho aplikací využívajících koncept AR. Výhodou HHD je široká dostupnost zařízení (existuje velké množství aplikací). Nevýhodou zařízení je, že uživateli zabírá jednu nebo obě ruce, čímž snižuje jeho výkonnost a schopnost např. řídit dopravní prostředek (klíčové pro využití v kokpitu) [4] [5].

Prvním typem World Displeje je stacionární displej. Jak vyplývá z názvu, displej je stacionární, zaujímá v prostoru stejnou polohu. Zobrazení může být jako v případě HMD dvojího typu – VST nebo OST. Stacionární OST displeje jsou známé pod názvem Head-up displej (HUD).

HUD se v současné době používají v letectví převážně ve vojenských letounech, nicméně některé výrobci letadel a letecké společnosti je osazují i do civilních letadel. HUD se ojediněle

objevují i v moderních automobilech, kde je na čelní sklo promítána například rychlost nebo různá varování.

1.6 Monokulární, bi-oculární a binokulární projekce

Monokulární zobrazení generuje obraz pro pouze jedno oko. Dostupné v provedení OST i VST. Příklad monokulárního VST zařízení vidíme na obrázku (viz Obrázek 5), monokulární OST zařízení na je zobrazeno obrázku (viz Obrázek 6). Bi-okulární zařízení vytváří obraz pro obě oči, nicméně oba obrazy jsou stejné a výsledný obraz je monoskopický. Binokulární zobrazení je nejvíce komplexní. Pro každé oko je generován odlišný obraz, díky kterému lze výslednou projekci vnímat jako perspektivní. Stereoskopie lze lépe docílit u OST, jelikož pozadí (skutečný svět) je vnímán přirozeně. VST musí k docílení stejného plastického efektu využívat dvě kamery, které musí být umístěny co nejbližší očím uživatele. Na obrázku (viz Obrázek 7) vidíme binokulární stereoskopické OST brýle Moverio. Na obrázku (viz Obrázek 8) je uveden příklad stereoskopického zobrazení VST. Tyto brýle se dají využívat pro zobrazení jak rozšířené reality, tak virtuální reality, které dnes využívá velké množství počítačových her [2], [6].



Obrázek 5: Vufine VUF-110 Wearable Display



Obrázek 6: Google Glass Enterprise Edition 2



Obrázek 7: Epson Moverio BT-300



Obrázek 8: Oculus Quest 2

2 Zobrazení základních a aditivních letových dat do zorného pole pilota

Následující kapitola se zabývá formou zobrazování letových dat do zorného pole pilota. Letecké přístroje zobrazují důležité informace o stavu a pohybu letadla. Mezi zobrazované parametry patří fyzikální veličiny popisující pohyb a polohu letadla a indikace stavu palubních systémů, jakými jsou například nastavení radia, navigace, mechanizace křídla nebo poloha podvozku.

Zrakem člověk vnímá přibližně 70 % až 80 % informací z okolí [17]. Je důležité, aby zobrazení letových údajů bylo jednoznačné, přehledné a ergonomicky přijatelné. Dnes existují standardizovaná rozmístění přístrojů zobrazující základní informace tak, aby nedocházelo k záměně indikací, například při přechodu z jednoho typu letadla do jiného [7], [8].

2.1 Letové přístroje a jejich rozmístění

V prvních letounech bylo přístrojů poměrně málo a jejich rozmístění nebyla věnována příliš vysoká pozornost. Přístroje bývaly umísťovány blízko u předmětu dané indikace, palivoměr u palivové nádrže, otáčkoměr u samotného motoru atp. Spolu s rozvojem letounů vznikaly přístroje, které mohly být umísťovány přímo na palubní desku. První zásadní milník v rozvoji leteckých přístrojů je vznik gyroskopických přístrojů a přístrojů pro radionavigaci společně s pozemními navigačními stanicemi. Během 30. letech 20. století dospěla technika k druhému významnému milníku. Přístrojové vybavení letadel dosáhlo takové úrovně a spolehlivosti, že bylo možné vedení letadla bez vizuální reference na vnější svět. Tento způsob létání dnes nazýváme let IFR (Instrument Flight Rules). Mezi základní přístroje umožňující let IFR patří z řady gyroskopických přístrojů umělý horizont (AI) a směrový setrvačnick (DG, HI), z radionavigačních přístrojů některá forma radiokompasu (například indikátor HSI nebo dříve využívaný ADF) a z tlakových přístrojů rychloměr, výškoměr a variometr. Těchto šest základních přístrojů nazýváme „basic six“ a v každém letadle jsou tyto nejčastěji používané přístroje umístěny blízko sebe.

Rychloměr (ASI) ukazuje vzdušnou rychlost, tj. rychlost letounu vůči okolnímu vzduchu. Na rychlosti je přímo závislá tvorba vztlaku na křídlech, díky kterému letoun letí, a proto je důležité znát její přesnou velikost. Rychlost bývá v letectví udávána v uzlech. 1 uzel (kt) je definovaný jako jedna námořní míle za hodinu a je roven přibližně 1,852 km/h.

Umělý horizont (AI) ukazuje pilotovi míru klopení a klonění letadla. Při letu v přístrojových meteorologických podmínkách (IMC), kdy je skutečný horizont zakrytý oblačností, je umělý horizont využíván jako základní reference pro klonění a klopení.

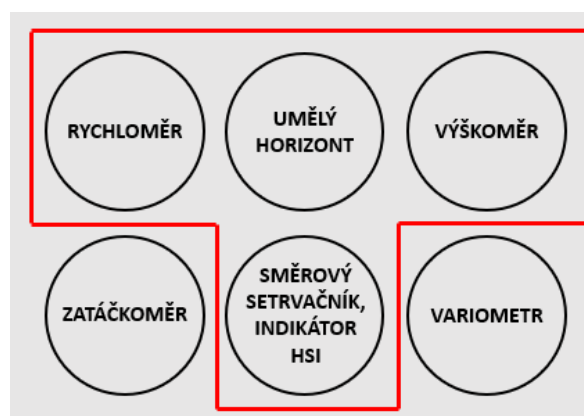
Výškoměr (ALT) udává výšku letadla nad referenční plochou, za kterou bývá při většině letů používána hladina moře. Výškoměr umožňuje let v optimální letové hladině vzhledem k terénu, spotřeba paliva a slouží jako jeden ze základních způsobů separace letadel ve vzdušném prostoru. Jednotkou výšky používanou ve většině letadel je 1 stopa (ft), která odpovídá 0,305 metru.

Zatáčkoměr (TC) pilotům ukazuje míru zatáčení, tj. úhlovou rychlost kolem svislé osy letounu, a bývá spojený s tzv. „kuličkou“, indikátorem vektoru působení tíhy. Díky zatáčkoměru lze provádět ustálenou tzv. „rate one“ zatáčku s úhlovou rychlostí 360° za 120 vteřin, které je využíváno při letu podle přístrojů.

Směrový setrvačnick (DG, HI) (ukazatel kurzu) udává úhel podálné osy letadla vzhledem k magnetickému severu. Směrový setrvačnick bývá spojen s magnetometrem nebo je manuálně nastavován pilotem na základě porovnání kurzu s kompasem.

Variometr (VSI) měří vertikální rychlost letadla na základě velikosti změny výšky za určitou časovou dobu. Díky němu je možné klesat/stoupat známou vertikální rychlostí.

Schematické rozmístění základních šesti přístrojů je na obrázku níže (Obrázek 9) a jeho implementace do kokpitu letadla na následujícím obrázku (viz Obrázek 10). S větším množstvím zobrazovaných informací nastala snaha tyto informace pilotovi prezentovat tak, aby byly nejčastěji používané přístroje u sebe a aby nedošlo k záměně při čtení indikací. S ohledem na ergonomii a lidský faktor vyvinulo Letectvo Spojených států amerických v 50. letech rozmístění přístrojů ve formátu „T“ známého pod názvem „basic T“ (viz Obrázek 9). Mezi „basic T“ patří umělý horizont, rychloměr, výškoměr a indikátor HSI.



Obrázek 9: Schématické rozmístění šesti základních přístrojů v moderním uspořádání "six pack" a červeně vyznačeny přístroje tzv. "basic T".

S technickým rozvojem letectví byly vyráběny přístroje zobrazující nejrůznější letové parametry. U komplexnějších letadel již narážíme na limit prostoru pro umístění jednotlivých přístrojů. Nedostatek místa vyřešil vývoj digitálních technologií v 90. letech, které vedly ke vzniku moderních digitálních přístrojů, schopné zobrazovat více indikací na své obrazovce. Obrazovku zobrazující základní letové informace nazýváme Primary Flight Display (PDF).



Obrázek 10: Žlutý rámeček vyznačuje základní přístroje "basic six" v letounu Cessna 172 (Zdroj: Microsoft Flight Simulator)

V kokpitu moderního letadla je většina přístrojů integrována do několika velkých obrazovek umístěných na přístrojové desce. Toto přístrojové vybavení nazýváme jako tzv. Glass Cockpit a kromě PDF se v nich ještě setkáváme s MFD (Multi Function Display). MFD zobrazuje další informace ohledně stavu letadlových systémů a údajů o stavu pohonných jednotek.



Obrázek 11: Moderní integrovaný přístrojový panel Garmin G1000 (Zdroj: Garmin G1000 Pilot's Guide for Cessna Nav III).

Jednodušší PFD integruje základních šest přístrojů. Pokročilé zařízení (například Garmin G1000 na viz Obrázek 11) dokáže zobrazovat v rámci jednoho displeje prakticky všechny důležité informace od základních šesti přístrojů až po nastavení frekvencí rádia a v případě poruchy navigačního displeje i navigační mapu. Zobrazení základních letových veličin si zachovává podobnou filozofii jako u analogového uspořádání „basic T“ – uprostřed umělý horizont, nalevo rychloměr, vpravo výškoměr a variometr, dole indikace kurzu společně s indikací HSI. Podle FAA Regulace 14 CFR § 61.129 - *Aeronautical experience* by měl PFD obsahovat přinejmenším rychloměr, zatáčkoměr, umělý horizont, indikátor kurzu, výškoměr a variometr.

2.2 Zobrazení letových informací pomocí rozšířené reality

Displeje primárních letových informací moderních dopravních letadel umí velmi dobře prezentovat informace pilotům tak, aby podporovaly celkovou efektivitu řízení a poskytovaly dobrý přehled o situaci. Nicméně je nezbytné v určitých fázích letu přecházet pohledem z displeje na palubní desce na vnější vizuální referenci. To způsobuje nežádoucí rozdělení pozornosti, často během kritických fází letu [9].

HUD a HMD displeje řeší problém rozdělení pozornosti, který nastává v kritických fázích letu, jakými jsou vzlet, přiblížení a přistání. Oba systémy mohou výrazně snížit, či odstranit tzv. *head-down time* – čas, během kterého sledujeme přístroje, a čas který strávíme přechodem pohledu z palubní desky na pohled ven.

Zatímco HUD umožňuje zobrazování letových přístrojů při pohledu čelním sklem, HMD zaručuje poskytování informací při pohledu jakýmkoli směrem. To může hrát zásadní roli při vzletu, konečné fázi přístrojového přiblížení, přiblížení okruhem nebo při letu za VFR, kdy je nutné sledovat okolní prostředí i mimo směr letu.

Moderní HUD systémy zobrazují informace srovnatelné s PDF, tj. základní letová data. Technologie HUD a HMD umožňuje sledovat letové informace i při pohledu ven z kokpitu, což je prospěšné v konečné fázi přiblížení a přistání, kdy pilot vyhledává externí vizuální reference.

Poloha virtuálních přístrojů na HMD může být libovolná, nejčastěji se jedná o jeden ze dvou následujících způsobů. Poloha vázaná na hlavu a poloha vázaná na letadlo. V prvním případě virtuální přístroje zaujímají stále stejnou polohu v zorném poli pilota. Přístroje jsou promítány pomocí HMD, proto se zdánlivá pozice přístrojů pohybuje společně se směrem natočení hlavy pilota. Druhá varianta, varianta vázaná na letadlo, je poloha virtuálních přístrojů je vázána na

dané místo v kokpitu letounu, podobně jako by byl na daném místě umístěn konvenční přístroj. Virtuální přístroje lze však na rozdíl od konvenčních umístit v rámci kokpitu kamkoliv, třeba na čelní sklo, jako je tomu u HUD. HMD umožňuje zvolit jakoukoli polohu bez nutnosti montáže HUD zařízení nebo zásahu do konstrukce kokpitu.

Studie, srovnávající tyto dva způsoby rozložení přístrojů, která spočívala v testování obou variant na pilotech vrtulníků, prokázala, že na HMD pilotům více vyhovuje poloha vázaná na hlavu. Informace z přístrojů se pilotům lépe čtou, když je mají neustále v zorném poli. Piloti se mohou lépe zaměřit na vizuální referenci mimo kokpit. Přechzení přístrojů tak vyžaduje jen malou změnu pohledu bez nutnosti měnit polohu hlavy [10].

2.3 Zobrazení virtuálních prvků

Taxonomie rozdělení virtuálních prvků (symbolů) podle typu zobrazované informace a vázanosti na okolní prostředí. *Scene-linked symbology* je implementována do HUD/HMD ve třech různých formách [11].

- a) Scene enhancements (zvýraznění prostředí)
- b) Scene augmentations (rozšíření prostředí)
- c) Virtual instruments (virtuální přístroje)

Do této skupiny *scene enhancements* patří symboly, které zvýrazňují skutečné objekty v okolním prostředí. Jejich účel je zlepšit jejich viditelnost a nápadnost. Může se jednat o obrysy dráhy, obrysy překážek jako jsou televizní vysílače a jiných výrazných krajinných bodů.



Obrázek 12: Modré obrysy tří překážek v pravé části na HMD. (Zdroj: Aeroglass)



Obrázek 13: Zvýrazněný obrys dráhy s prodlouženou osou na HUD v Airbusu A319. Obrys se na obrázku jeví vůči dráze posunutý kvůli poloze kamery. (Zdroj: Youtube)

Projekt AEROGLASS® využívá prvky *scene enhancements* pro objekty důležité pro VFR let a srovnávací navigaci. Reprezentace takového HMD zobrazení, kde je patrná zvýraznění překážek je vidět na obrázku 12. Systém AEROGLASS také dokáže díky pozici letadla a referenčnímu systému uvnitř kabiny zobrazovat polohy bodů i mimo naši dohlednost

(například letiště nebo význačné body) a generovat viditelné hranice vzdušných prostorů, nebo koridor nastavené letové trati [18].

Na obrázku výše (Obrázek 13) je HUD systém výrobce letounů Airbus. Displej dokáže, kromě zobrazení virtuálních přístrojů, zobrazit i zvýrazněný obrys dráhy s prodlouženou osu pro její snazší identifikaci a pro zjednodušení vedení letadla v konečné fázi přiblížení a při přistání.

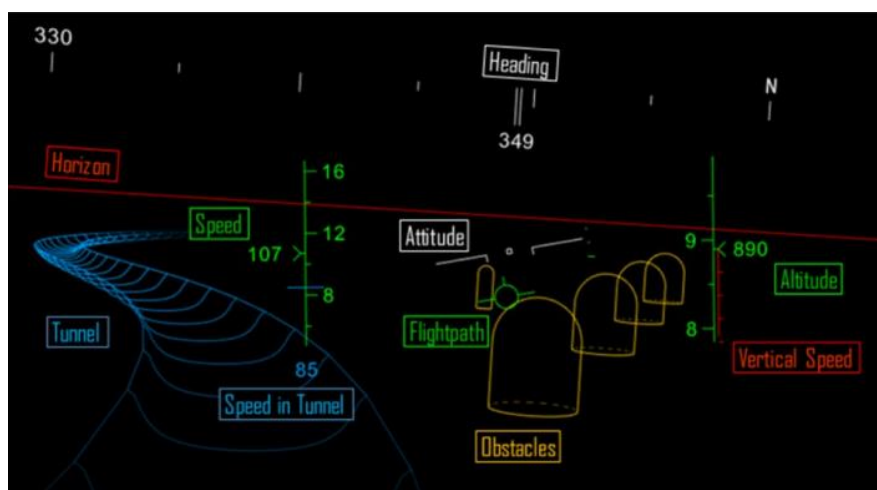
Skupina objektů *scene augmentations* do scény přidává virtuální objekty, které nejsou v reálném světě zastoupeny objekty skutečnými. Může se například jednat o virtuální kužely na straně pojezděcí plochy. Využívají je pokročilejší HMD i HUD technologie. Jednou takovou technologií je prototyp systému T-NASA (Taxiway Navigation and Situation Awareness). Systém T-NASA má sloužit ke zlepšení výkonnosti, účinnosti a zlepšení situačního povědomí při poježdění letadel po letištní ploše. Obrázek 14 ukazuje implementaci virtuálních kuželů na hranu pojezdějí plochy [11].



Obrázek 14: T-NASA HUD symbologie rozšířené reality v mlžném prostředí letištních pojezdových ploch při nízké dohlednosti.

Do kategorie virtuálních přístrojů patří reprezentace letových přístrojů do projekce na HUD, MHD. Na HMD můžeme tyto informace umístit kamkoliv do zorného pole pilota. Zde může být například hodnota pozemní rychlosti nebo poloha vůči sestupové rovině. Je důležité správně zvolit polohu jednotlivých údajů, aby byly přehledné a pilot se v nich dobře orientoval. Také by neměly být jednotlivé přístroje snadno zaměnitelné s jinými přístroji, indikacemi nebo prvky jiné skupiny, než jsou virtuální přístroje. Není dobré zahlcovat pilota příliš mnoha zobrazovanými informacemi, to může mít negativní následky [11]. Jednotlivé kategorie virtuálních prvků jsou od sebe odlišeny barevně (viz Obrázek 15). Například indikace rychlosti a výšky je zelená, indikace kurzu je zobrazena bíle a umělý horizont tvoří červená přímka. [12]

Existují studie zabývající se zobrazováním i jiných užitečných informací, než jsou letové veličiny. Jedna z takových studií se zabývá implementací asistence při plnění nouzových postupů v kokpitu Airbusu A320 [15]. Systém zobrazí pilotovi pomocí rozšířené reality daný check-list a krok po kroku polohu jednotlivých ovládacích prvků, jejichž polohu je nutné změnit. Experiment potvrdil, že čas na zvládnutí postupu byl díky využití rozšířené reality zkrácen. Také se ukázalo, že je možné snížit pracovní zátěž ovládním elektronických AR check-listů pomocí hlasových povelů [13].



Obrázek 15: Barevné rozdělení funkčních skupin prvků u zobrazení AR na HMD pro piloty vrtulníků [12]

Pomocí rozšířené reality je také možné kromě PFD a ND promítnout do zorného pole digitalizované informace, které má pilot obvykle uloženy na nákolníku. Digital knee-board DKB, jak se tento prvek nazývá, je schopný zobrazit mapy, schémata, nebo jiné textové informace [14].

2.4 Barevné zobrazení letových informací na HUD a HMD

Dříve bylo zobrazení na displejích HUD, HMD pouze monochromatické z důvodu technických omezení. Lidské oko je v tmavém prostředí nejvíce citlivé na barvy o vlnové délce kolem 500 nm [17]. Jedná se o světle zelené barvy, které jsou optimální pro zobrazování informací na průhledné displeje. Díky rozlišovacím schopnostem lidského oka tyto barvy nejlépe kontrastují s různobarevným pozadím. Jiné barvy mohou být výhodné v určitých situacích, jako například červená barva, která příliš nedegraduje adaptaci na noční prostředí. Červená barva by ale mohla snadno splýnout s osvětlením překážek, nebo například s dráhovými návěstidly. Modrá barva by splývala s oblohou, žlutá barva by mohla splývat se zapadajícím nebo vycházejícím sluncem.

Díky pokrokům v technologiích je nyní možné zobrazovat informace různých barev. Je možné adaptovat známé standardizované barevné schéma pro zobrazování letových informací nebo

barevné kódování podle filozofie „dark cockpit“, kde indikace, které nevyžadují pozornost posádky nejsou zobrazeny. Standardní barevné schéma, legislativně zakotvené pro velká letadla v CS-25, spočívá v následujícím rozložení barev indikací:

- a) bílá – aktuální stav;
- b) modrá – dočasný stav;
- c) zelená – normální provozní stav;
- d) žlutá nebo jantarová – upozornění;
- e) červená – varování, nebezpečný stav [19].

Nedávná studie se zabývala testováním návrhu barevného zobrazení letových údajů u pilotů a ne-pilotů. Jednalo se o návrh barevného zobrazení letových údajů, kde se podle velikosti odchylky od ideálního stavu změnila barva indikace nejdříve ze zelené na žlutou, při větší odchylce na červenou. Výsledky ukázaly, že barevné zvýraznění odchylky zlepšily výkon pilotů při zatáčení a manévrech zahrnující změnu výšky. Barevné indikace nicméně neměla vliv na chyby v přímém a vodorovném letu [16].

3 Metodika

Na základě zadání této práce byl proveden experiment, který spočíval v testování zúčastněných subjektů za účelem získání zpětné vazby prostřednictvím elektronické ankety. Tento experiment vedl k finálnímu řešení rozmístění indikací letových informací do AR brýlí, které je cílem této práce.

3.1 Subjekty

Na experimentu se podílelo 24 z celkových 30 studentů, kterých bylo o účast na testování požádáno. Zúčastnili se piloti studenti z různých fází letového výcviku dopravního pilota letounů ATPL(A). Čtyři studenti měli pouze nálet podle pravidel letu za viditelnosti VFR, 14 subjektů právě létalo fází výcviku letů podle přístrojů a zbylých šest subjektů již mělo výcvik dokončený. 10 subjektů vlastnilo v době experimentu průkaz soukromého pilota PPL. 6 subjektů již mělo letecký výcvik ukončený a bylo držiteli licence obchodního pilota (CPL). Celkový průměrný nálet testovaných subjektů činil 176 hodin. Věk účastníků se pohyboval od 20 do 25 let, průměrný věk činil 22,3 roky. Genderové zastoupení bylo poněkud nevyvážené, ale zhruba odpovídalo zastoupení pohlaví v daném oboru, experimentu se zúčastnilo 22 mužů a 2 ženy.

3.2 Vybavení

Experiment se uskutečnil v budově Dopravní fakulty ČVUT v prostorách Ústavu letecké dopravy (ÚLD). Na ÚLD je k dispozici výkonný počítač s leteckým simulátorem X-Plane 11 a potřebné vybavení k realistickému ovládní letounu. Simulátor X-Plane 11 je populárním softwarem pro domácí i komerční využití. Nabízí vysokou úroveň realistické simulace pilotáže a díky vysoké modifikovatelnosti je ideální platformou pro výzkum nových konceptů, mezi který patří předmět zkoumání této práce.

Pro experiment byl vybrán letoun Cessna 172S. Jedná se o populární vrtulový jednomotorový hornoplošník s pístovým motorem o výkonu 180 koňských sil. Rozpětí letounu činí 11 metrů, nejvyšší vzletová hmotnost je 1160 kg, cestovní rychlost asi 220 km/h. Letoun byl pro experiment zvolen pro svoji jednoduchost a široké zastoupení v leteckých školách.

Žádný letecký simulátor by nebyl úplný bez externích řídicích a ovládacích prvků. Pro účely mého experimentu, který spočíval s letem na stroji Cessna 172, byl k počítači připojen knipl (řídicí páka obdobná té v letounu C172) pro realistické řízení klonění a klopení (viz Obrázek 16). Na řídicí páce se na levé straně nachází ovládní vyvážení a malý joystick, kterým v simulátoru vychyluje pohled doleva, doprava, nahoru a dolů. Pod joystickem pro ovládní

pohledu se nachází třípolohový spínač elektrického ovládání vyvážení. Ke kniplu byl připojen blok, na kterém se nachází páky pro nastavování výkonu, páka ovládání vrtule a páka nastavení směsi. Směrové řízení a brždění bylo ovládáno soupravou pedálů (viz Obrázek 17).



Obrázek 16: Flight Yoke System. (Zdroj: Logitech)



Obrázek 17: Rudder pedals with toe brake. (Zdroj: Logitech)

Poslední nezbytnou částí vybavení jsou samotné brýle, schopné zobrazovat rozšířenou realitu. Pro účely této bakalářské práce mi byly prostřednictvím ÚLD poskytnuty brýle Epson Moverio BT-300 Smart Glasses (viz Obrázek 18). Skládají se ze dvou částí: vlastních brýlí (náhlavní soupravy) a z ovladače (řídící jednotky), který je k brýlím připojen propojovacím kabelem.



Obrázek 18: Moverio BT-300 - brýle a ovladač

Brýle zobrazují rozšířenou realitu podle konceptu OST, který je podrobněji vysvětlený v první kapitole této práce. Ve sklech brýlí, které jsou asi jeden centimetr tlusté se nachází průhledná obrazovka o úhlopříčce 0,43 palce. Obrazovka má rozlišení 1 280 x 720 pixelů (poměr stran 16:9), je schopna zobrazovat 24bitové barvy (2^{24} barev) a obnovovací frekvence činí 30 Hz. Obraz je na displej promítán z Si-OLED (Silicon – Organic Light-Emitting Diode) promítacího systému nacházejícího se uvnitř nožiček brýlí. Výsledek vnímá uživatel jako obraz před sebou zabírající asi 23° zorného pole. Pro snazší představu lze velikost vzniklého obrazu připodobnit ke dvoumetrovému promítacímu plánu ve vzdálenosti 5 metrů. Náhlavní souprava má

hmotnost 69 g a velikost, která nebrání v komfortním nošení zařízení delší dobu. AR brýle nebrání uživateli v nošení vlastních dioptrických brýlí ani velkých leteckých sluchátek pro piloty.

Ovladač brýlí, přesněji řídicí jednotka, je něco jako „mozek“ celého zařízení. Nachází se v něm elektronické zařízení s uživatelsky orientovaným operačním systémem Android, který je všeobecně známý z celé řady chytrých mobilních telefonů. Ovladač disponuje řadou tlačítek pro ovládání uživatelského prostředí a dotykovou plochou nahrazující dotykovou obrazovku mobilního telefonu. Dotyková plocha funguje na podobném principu jako touchpad u přenosných počítačů. Řídicí jednotka podporuje bezdrátové připojení s Wi-Fi, Bluetooth a klasické kabelové připojení microUSB, které zároveň slouží k nabíjení. Zařízení využívá lithiovou baterii o kapacitě 2950 mAh s deklarovanou výdrží 6 hodin při nepřetržitém používání.

3.3 Návrh rozmístění letových informací do brýlí s rozšířenou realitou

Software vznikl ve spolupráci s kolegou inženýrem Tomášem Malichem. Sestával se ze tří částí – Samotného simulátoru X-Plane s využitím pluginu *X-Plane Connect* (dostupném z: <https://github.com/nasa/XPlaneConnect>), middleware, který poskytuje data pro aplikaci v brýlích Epson Moverio a Android aplikace v brýlích, která slouží k samotnému zobrazování hodnot definovaných z referenčních veličin ze simulátoru.

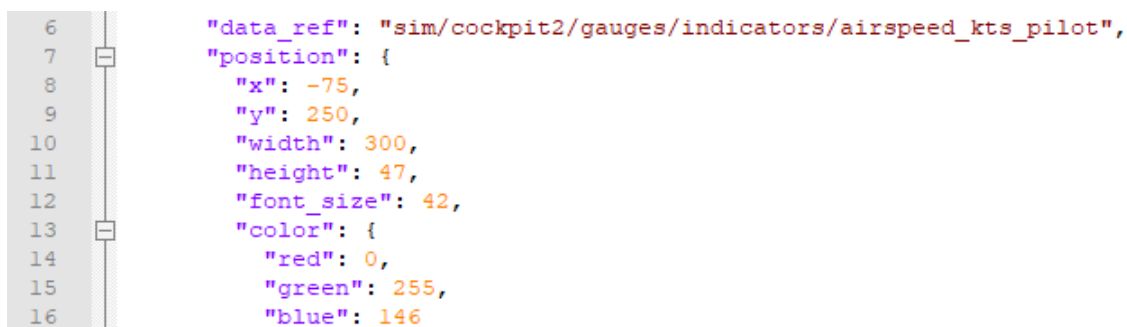
Middleware je instalován na počítač a funguje na principu Java EE aplikace s využitím Spring boot frameworku. Poskytuje konfigurační soubor pro aplikaci v AR brýlích přes REST Api. Konfigurační soubor je přenášán v objektu JSON. Přes TCP socket jsou do aplikace v brýlích přenášeny aktuální hodnoty požadovaných veličin *datarefs* ze simulátoru X-Plane (*datarefs* jsou definována v konfiguračním souboru). Porty a název konfiguračního souboru je možné editovat v *application.properties*.

Android aplikace je vyvinuta v Unity enginu a je v ní využit framework (Moverio BT-300 Unity Plugin), který poskytuje sám výrobce brýlí, firma Epson. Po připojení aplikace k middleware je stažen konfigurační soubor. Při spuštění scény se aplikace připojí k serveru přes TCP socket a začne zobrazovat příchozí data v pravidelném intervalu.

Na základě provedené rešerše v první kapitole byl vypracován návrh zobrazení virtuálních přístrojů do zorného pole pilota prostřednictvím rozšířené reality. Vzhledem k limitacím softwaru bylo nezbytné omezit indikace na číselné a textové údaje.

Rozmístění letových veličin, jejich velikost, barva a název bylo do brýlí vloženo pomocí konfiguračního souboru v počítačové části programu. Část konfiguračního souboru pro

vložení jedné veličiny do zobrazení na displeji brýlí je znázorněno na následujícím obrázku (viz Obrázek 19). V příloze 2 této práce se nachází kompletní kód, který udává rozmístění přístrojů všech přístrojů v rámci vlastního návrhu. Tento soubor umožňoval vkládat neomezené množství veličin ze simulátoru X-Plane podle referenčního názvu. Následující popis se týká nastavení zobrazení jednotlivých parametrů jedné veličiny.

The image shows a code editor window with a vertical line on the left side. The code is a JSON object defining the configuration for an airspeed indicator. The lines are numbered from 6 to 16. The code is as follows:

```
6 "data_ref": "sim/cockpit2/gauges/indicators/airspeed_kts_pilot",
7 "position": {
8   "x": -75,
9   "y": 250,
10  "width": 300,
11  "height": 47,
12  "font_size": 42,
13  "color": {
14    "red": 0,
15    "green": 255,
16    "blue": 146
```

Obrázek 19: Část konfiguračního souboru popisující jednu zobrazovanou veličinu

První řádek (řádek 6) obsahuje název veličiny, kterou má software zobrazovat. Jedná se o referenční název, který je pro každou užívanou veličinu v X-Planu dostupný na internetových stránkách simulátoru. Dále je definována pozice pomocí souřadnic x a y (řádek 7 až 9), které udávají polohu na displeji v brýlích s rozšířenou realitou. Řádek 10 a 11 udává šířky a výšky pomyslného rámečku, ve kterém in veličina zobrazena¹.

Na řádce 12 je položka nastavení velikosti fontu. Pro rychlost a výšku byla zvolena velikost fontu 42 px, magnetický kurz má velikost fontu 40 px, rychlost nad povrchem země a vertikální rychlost má velikost 30 px. Velikost fontu okolní teploty byla nastavena na 24 px.

Barva indikací byla zvolena tak, aby odpovídala vlnové délce 500 nm, pro kterou jsou lidské oči nejvíce citlivé. Konfigurační soubor umožňuje nastavení každé barevné složky formátu RGB (Red-Green-Blue), kde každá složka uvádí podíl základních tří barev (řádek 13 až 16). Světlo o vlnové délce 500 nm má ve formátu RGB složku červené barvy (R) rovnou 0, složku zelené barvy (G) rovnou 256 a složku modré barvy (B) rovnou hodnotě 146.

Výsledné zobrazení letových informací na displeji AR brýlí je znázorněné na obrázku 20. Černá barva v pozadí leteckých veličin značí průhlednou část obrazu. Indikace rychlosti na obrázku je záporná, to je způsobeno když letoun stojí způsobem jakým simulátor pracuje s veličinami.

¹ Výšku rámečku je nutno nastavit větší, než velikosti fontu na řádce 12. Šířka by měla být větší než délka hodnoty letové veličiny, jinak nebude vidět celá.

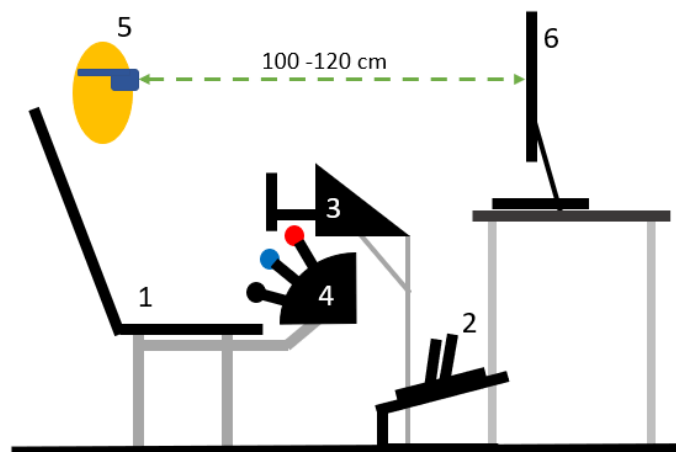
Software se nachází ve fázi vývoje a má ve své aktuální podobě některé funkční limitace. Nelze pomocí něj zobrazovat žádné grafické indikace, jakými je například indikace klonění a klopení prostřednictvím umělého horizontu, indikace horizontální a vertikální polohy letounu od nastavené letěné trasy.



Obrázek 20: Navržené rozmístění leteckých veličin

3.4 Experimentální setup

Schéma rozmístění sedadla, ovládacích prvků a monitoru je znázorněno na obrázku 21. Testovaný subjekt seděl na polohovatelném sedadle (1), nohy měl položené na pedálech ovládání zatáčení a brždění (2). Podobně jako v reálném letounu levou rukou ovládal knipl (3). Pravá ruka zůstala volná na ovládání výkonu pákou palivové příjisti (4). Subjekt měl na hlavě nasazené zkoumané průhledné brýle s rozšířenou realitou (5), skrz které sledoval



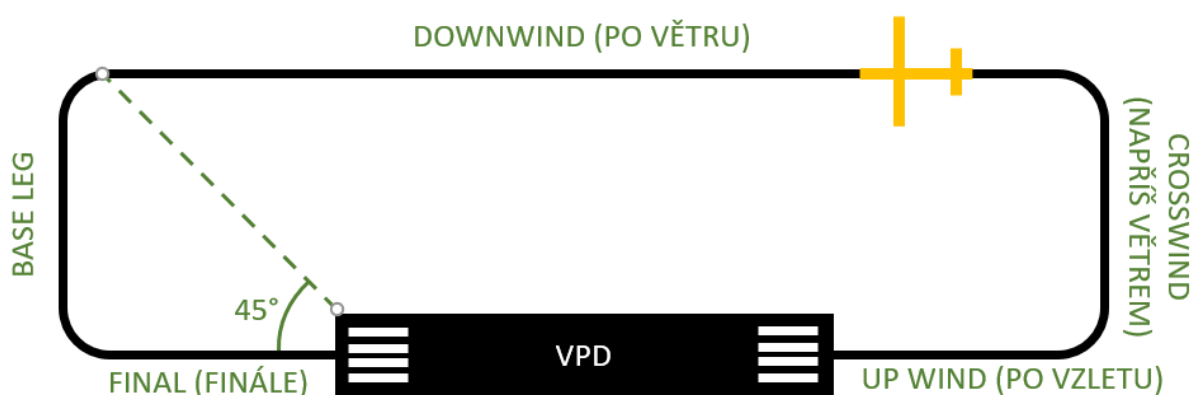
Obrázek 21: Experimentální setup

obrazovku (6), na které viděl pohled z kokpitu. Vzdálenost mezi hlavou a monitorem činila podle nastavení sedadla 100 až 120 cm.

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, experiment probíhal v prostředí leteckého simulátoru X-Plane 11 se známým letounu Cessna 172 SP s analogovým přístrojovým vybavením. Většina subjektů byla s letounem seznámena již z leteckých škol, kde se tento letoun hojně využívá k výcviku letů na jednomotorovém letounu. Ti, kteří žádné zkušenosti s letounem Cessna 172 neměli, byli krátce seznámeni s řízením a důležitými parametry, jakými je rychlost rotace², rychlost stoupání a cestovními otáčkami motoru.

Letová úloha byla navržena tak, aby měl každý subjekt možnost si zařízení vyzkoušet v každém režimu letu. Jednalo se o denní let VFR při jasném počasí v bezvětří, s dohledností větší než 10 km. Letové podmínky byly záměrně nastaveny příznivě, tak aby negativně neovlivňovaly průběh experimentu. Jednotlivci se tak mohli plně soustředit na samotný let s experimentálním vybavením a tím poskytnout zpětnou vazbu s lepší vypovídající hodnotou. Úloha spočívala v letu po levém okruhu dráhy 27 na Brněnském mezinárodním letišti Brno-Tuřany LKTB. Pro let po letištním okruhu nebylo třeba subjekty připravovat, neboť každý pilot byl s ním seznámen již z letecké školy.

Letištním okruhem je nazýván myšlený obrazec v blízkosti letiště (viz Obrázek 22), určený pro letouny v jeho prostoru s úmyslem přiletu nebo odletu. Slouží jako postup pro bezpečné přiblížení, přistání a odlet. Má tvar obdélníku se čtyřmi zatáčkami o 90° a může být levý nebo pravý, podle informací publikované na letištní vytyčovací ploše nebo v Letecké informační příručce (AIP). Za standardní je považován levý okruh, je tomu tak proto, že ve většině letadel sedí pilot na levém místě a má tak lepší výhled na letištní plochu. Úsek okruhu od vzletu do 1. kruhové zatáčky se nazývá „po vzletu (upwind)“; část okruhu mezi 1. a 2. zatáčkou nazýváme „napříč větrem (crosswind)“; část okruhu mezi 2. a 3. zatáčkou nazýváme „po větru



Obrázek 22: Schéma letištního okruhu

² Rychlost rotace, také označována jako v_R , je rychlost, ve které při rozjezdu na dráze pilot přitlačí řídicí páku k sobě. Následkem toho dojde ke zvednutí přídě letounu a následnému odlepení od země.

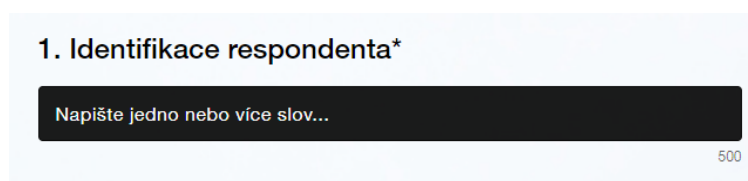
(downwind)“, mezi 3. a 4. zatáčkou se nachází poloha „finále (final)“. Pojmenování poloh letištního okruhu vyplývá ze skutečnosti, že přistání je prováděno z pravidla proti větru.

3.5 Kolekce a zpracování dat

Kolekce dat probíhala prostřednictvím elektronické ankety, která byla testovaným subjektům zpřístupněna po vykonání zkušebního letu s AR brýlemi. Dotazník byl vytvořen na platformě Survio.com a byl pomocí odkazu v QR kódu, který byl každému respondentovi poskytnutý v tištěné podobě. V dotazníku se vyskytovaly tři typy otázek. Otázky s posuvníkem s výběrem ze sudého počtu (6) hodnot, tak by si nemohl respondent vybrat neutrální odpověď. Jedna otázka nabízela výběr ze tří možností, dvě otázky ze dvou možností. Na závěr se v dotazníku vyskytovala místa na odpovědi slovní, číselné a prostor pro komentáře. Celý dotazník je v tištěné podobě dostupný v příloze 2.

Dotazník byl rozdělen na dvě po sobě jdoucí části. První část ankety byla zaměřena na zpětnou vazbu ohledně zobrazení letových veličin. V této části se nacházely otázky týkající se předchozí zkušenosti s HUD/HMD systémy, rozmístění přístrojů a celkové ergonomie zobrazovaných veličin na testovaných brýlích. V druhé části dotazníku byly zařazeny otázky shromažďující informace o demografii testovaných subjektů. Mezi sbírané charakteristiky patřil věk a pohlaví respondentů, počet nalétaných hodin a vlastnictví pilotní licence.

Tím, že anketa probíhala v elektronické podobě, byl každý respondent požádán o vyplnění svého jména (viz Obrázek 23). Tato otázka zjednodušuje práci s jednotlivými vyplněnými dotazníky a umožňuje chybně vyplněný dotazník zaslat konkrétnímu subjektu znovu.



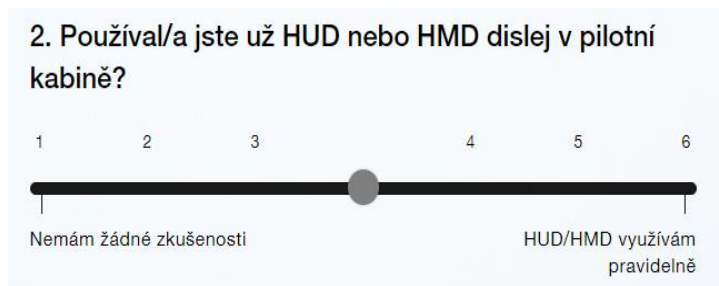
1. Identifikace respondenta*

Napište jedno nebo více slov...

500

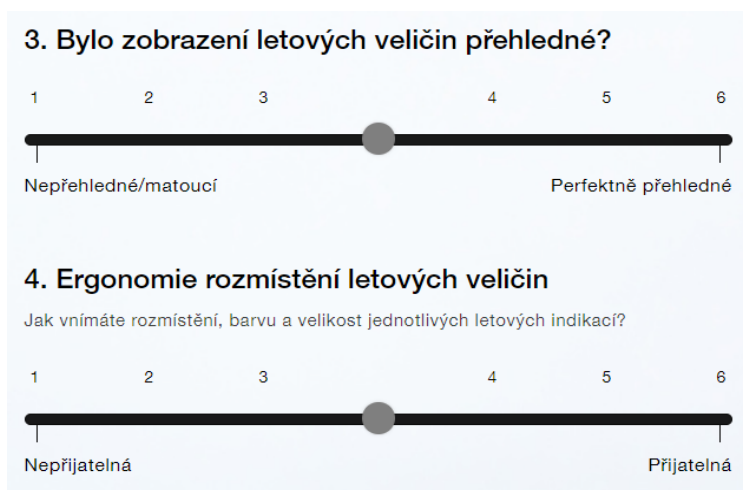
Obrázek 23: Otázka č. 1 - Identifikace respondenta

Druhá otázka se týkala předchozí zkušenosti se systémy zobrazujícími letová data pomocí rozšířené reality, jakými jsou systémy HUD nebo HMD (viz Obrázek 24).



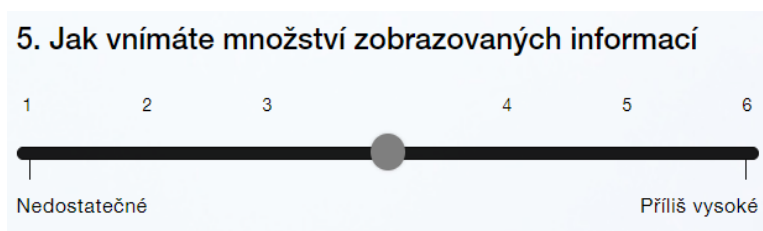
Obrázek 24: Otázka č. 2 - Předchozí zkušenost respondenta s rozšířenou realitou v kokpitu

Dalších pět otázek bylo zaměřeno na vlastní zobrazení letových informací a považují je za nejdůležitější. Respondent má vybrat jednu ze šesti poloh posuvníku, která jeho zkušenost nejlépe vystihuje. Otázky č. 3 a 4 (viz Obrázek 25) se dotazují na celkový dojem z prezentovaných informací – zda bylo zobrazení přehledné, jak daný respondent hodnotí rozmístění, barvu a velikost leteckých veličin.



Obrázek 25: Ergonomie zobrazení letových veličin

V otázce č. 5 (viz Obrázek 26) je subjekt dotazován, jak na něj působí množství informací. Větší množství informací může pilota, kvůli relativně malé zobrazovací ploše, snadno zahltit informacemi.



Obrázek 26: Množství zobrazovaných informací

Následující dvě otázky (viz Obrázek 27) zkoumají, jestli navrhovaný systém prezentace údajů snížil pilotovi pracovní zátěž a zdali má pozitivní vliv na jeho situační povědomí. Jedná se o jednu z nejzásadnějších parametrů indikující kvalitu zobrazovaných informací.

6. Zvýšil HMD Vaše situační povědomí?

1 2 3 4 5 6

Ne Ano

7. Snížil HMD Vaši pracovní zátěž

1 2 3 4 5 6

Ne Ano

Obrázek 27: Situační povědomí a pracovní zátěž

8. Jaká indikace podle Vás na zobrazení chyběla?*

Napište jedno nebo více slov...

500

9. Jaká indikace podle Vás na displeji přebývala?*

Napište jedno nebo více slov...

500

Obrázek 28: Konkrétní letecké přístroje na HMD

Další pár otázek (viz Obrázek 28) se dotazoval respondentů, jaké konkrétní indikace na letovém přístroji jim na zobrazení chyběla, nebo naopak jakou indikaci považovali za nadbytečnou nebo postradatelnou.

Otázka č. 10 (viz Obrázek 29) byla zaměřena na piloty, kteří mají předchozí zkušenost s HUD. Jejím cílem bylo zjistit, jestli by piloti využívající HUD dali přednosti systému HMD, tedy displeji připevněnému na hlavě.

10. Dali byste přednost HMD před tradičními HUD?*

HMD = Head-up Display, HMD = Head-mounted Display

Ano

Nemám zkušenost s HUD

Ne

Obrázek 29: Dali by piloti využívající HUD přednosti zobrazení letových dat na HMD?

Další tři otázky se týkaly osobního názoru respondentů na technologii rozšířené reality na HMD (viz Obrázek 31). Otázky měly za cíl zjistit, zdali respondent považuje předvedenou technologii zobrazování leteckých veličin v kokpitu za přínosnou, zdali by takové zařízení využíval, pokud by bylo na palubě letadla dostupné nebo jestli by o takové zařízení žádal svého zaměstnavatele, nebo pokud by měl zájem si takové zařízení zakoupit.

11. Je podle Vás AR technologie přínosná?
AR = Augmented Reality, rozšířená realita

1 2 3 4 5 6
Ne Ano

12. Kdyby bylo takové zařízení dostupné ve Vašem letadle, využíval/a byste ho?

1 2 3 4 5 6
Ne Ano

13. Kdybyste měl/a tu možnost, koupili byste si takové zařízení? Žádal/a byste takové zařízení u svého provozovatele?*

Ano

Ne

Obrázek 31: Je technologie přínosná, měl by o ní respondent zájem?

17. Jste držitelem pilotní licence?*

Vyberte jednu nebo více odpovědí

Ne

PPL

CPL

ATPL

type rating

Obrázek 30: Otázka na úroveň dosažené pilotní licence

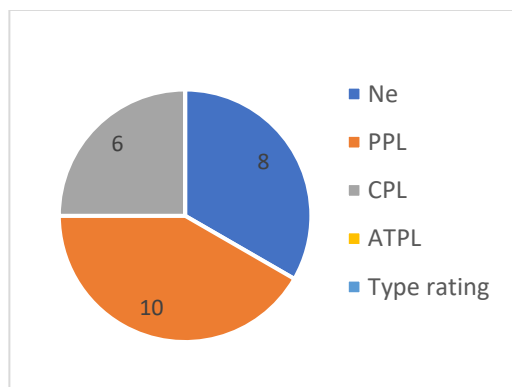
Poslední položkou první části ankety byl prostor vložení komentáře, kde měl každý respondent místo na vyjádření názoru nebo zkušenosti ve volné řeči.

Druhá část dotazníku je zaměřená na demografické údaje o subjektech. Jsou zde řazeny otázky na věk a pohlaví respondentů a na jejich zkušenosti s létáním reprezentované otázkou na jejich celkový nálet v hodinách. Dvě poslední otázky dotazníku mají upřesnit, kolik hodin mají účastníci ankety nalétaných podle pravidel VFR a IFR. Dále jsou v této části ankety respondenti dotazováni, zdali jsou držiteli platné pilotní licence a o jaký typ způsobilosti se jedná (viz Obrázek 30).

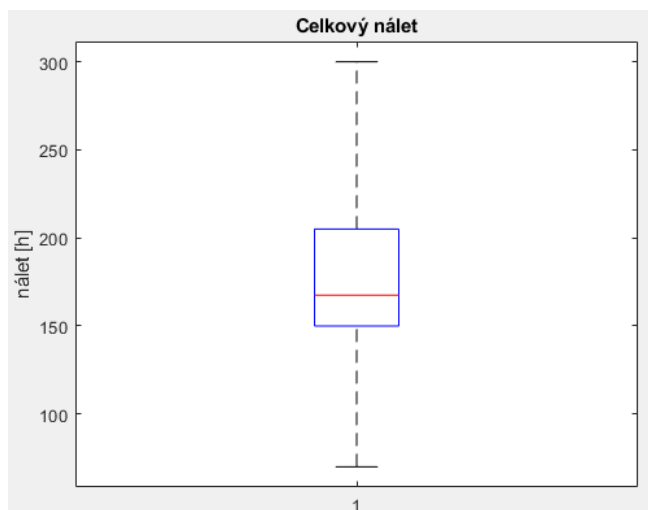
4 Prezentace výsledků

V předchozí kapitole byl popsán postup průběhu experimentu a rozebrány jednotlivé otázky dotazníku, který každý subjekt po letu na simulátoru vyplnil. Tato kapitola představuje výsledky dotazníku a jejich vyhodnocení a interpretaci.

V první části této kapitoly je uvedeno vyhodnocení demografie zúčastněných subjektů. Bez výjimky se jednalo o studenty leteckých škol ve věku od 20 do 25 let, průměrný věk činil 22,3 roku. Celkem 18 studentů procházelo pilotním výcvikem, většina z nich byla studenty Dopravní fakulty ČVUT v oboru profesionální pilot, další studovali obdobný program na jiné škole. Zbýlých 6 studentů již letecký výcvik ukončilo a pokračovalo v navazujícím vysokoškolském studiu. Přibližně polovina studentů ve výcviku vlastnila průkaz soukromého pilota (PPL), piloti s dokončeným výcvikem pak disponovali licenci pilota obchodního (CPL) (viz Graf 1).



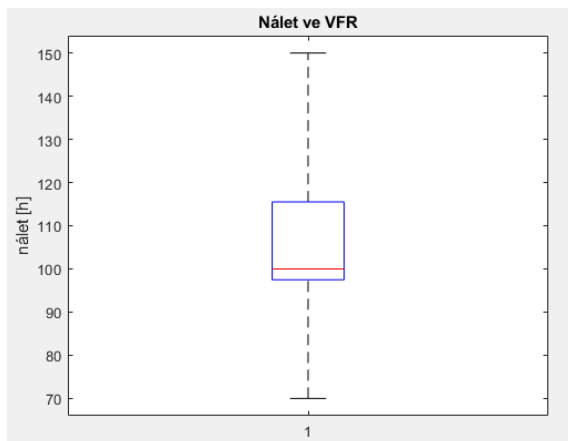
Graf 1: Vlastnictví pilotního průkazu



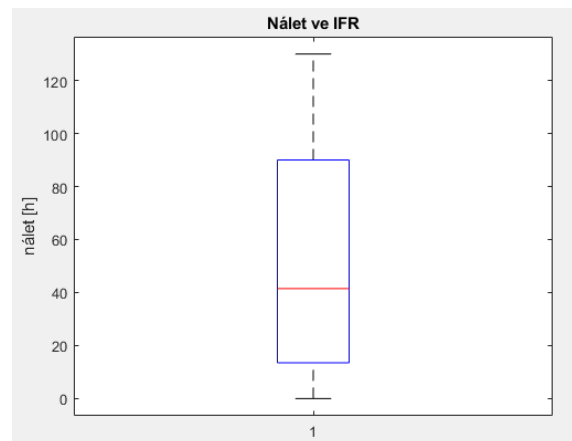
Graf 2: Krabicový diagram celkového náletu testovaných subjektů

Vyhodnocení celkového náletu jednotlivých subjektů a náletu subjektů podle pravidel VFR a IFR provedl pomocí krabicového diagramu vykresleného programem Matlab 2018. Celkový nálet jednotlivých subjektů se pohyboval v rozmezí od 70 do 300 nalétaných hodin a průměrná hodnota činila 176 hodin (viz Graf 1 Graf 2). Průměrný nálet subjektů podle pravidel VFR je 108 hodin, minimální nálet byl 70 a maximální 150 hodin (viz Graf 3). Podle pravidel IFR činí průměrný nálet 50 hodin a nalétané hodiny podle pravidel IFR nacházely v rozmezí od 0 hodin do 130 hodin (viz Graf 4). Jak je patrné zkušenosti jednotlivých subjektů s létáním podle vidu jsou daleko více srovnatelné. Většina pilotů měla dokončenou fázi leteckého výcviku, ve které létali lety VFR, a tudíž měla velká část pilotů ve VFR právě okolo 100 nalétaných hodin. Zkušenosti s IFR se mezi testovanými subjekty výrazně lišily. Pět subjektů zatím s létáním

IFR nepřišlo do styku, 13 studentů právě výcvik IFR prodělává a 6 subjektů má tuto fázi leteckého výcviku hotovou.



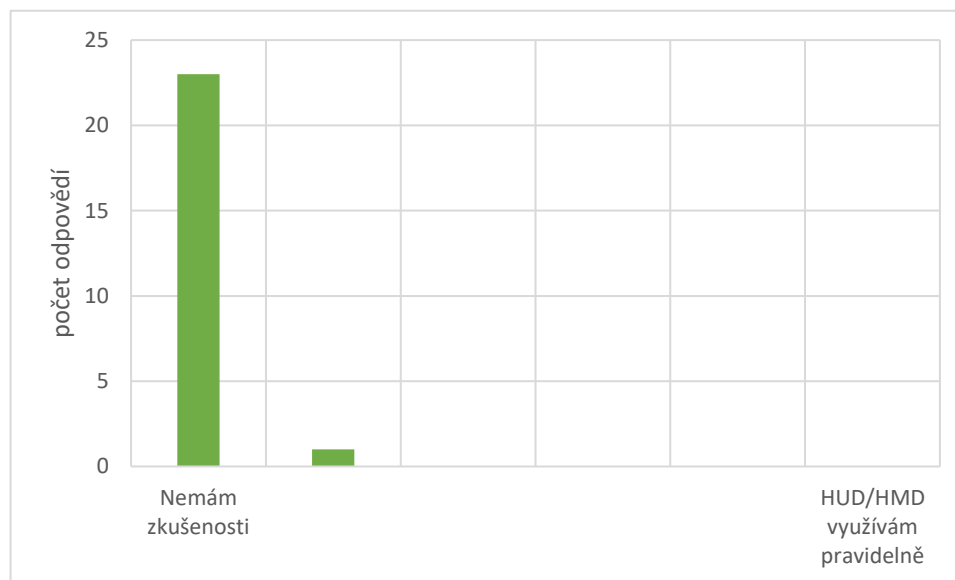
Graf 3: Krabicový diagram náletu testovaných subjektů podle pravidel VFR



Graf 4: Krabicový diagram náletu testovaných subjektů podle pravidel IFR

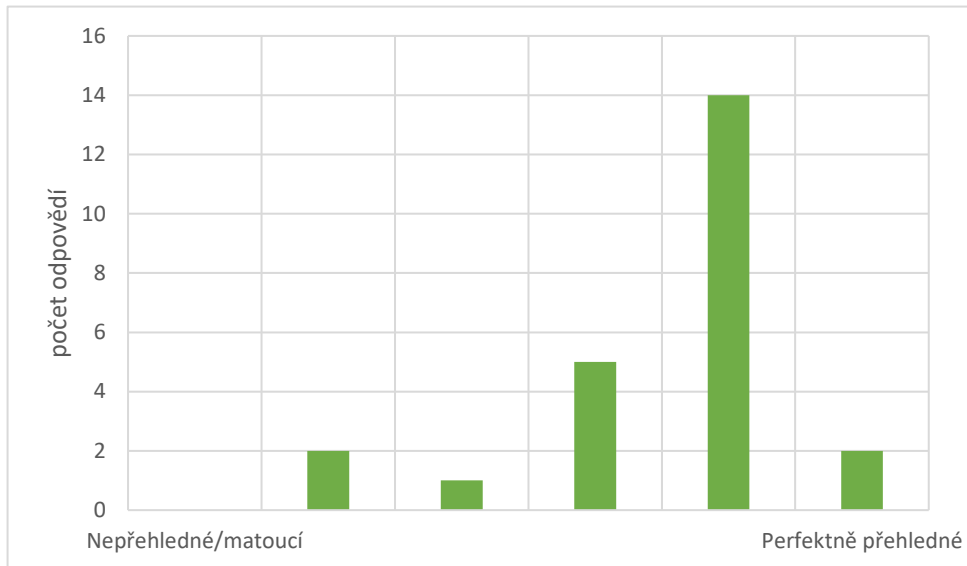
Dále se budeme věnovat vyhodnocení části dotazníku, ve které měli respondenti odpovídat na otázky spojené se samotným rozmístěním letových veličin.

Obrázek 32 je sloupcovým grafem odpovědí na následující otázku: *Používal/a jste už HUD nebo HMD displej v pilotní kabině?* Z obrázku je zřejmé, že ani jeden z testovacích subjektů zkušenosti ze systémy zobrazující rozšířenou realitu v pilotní kabině nemá.



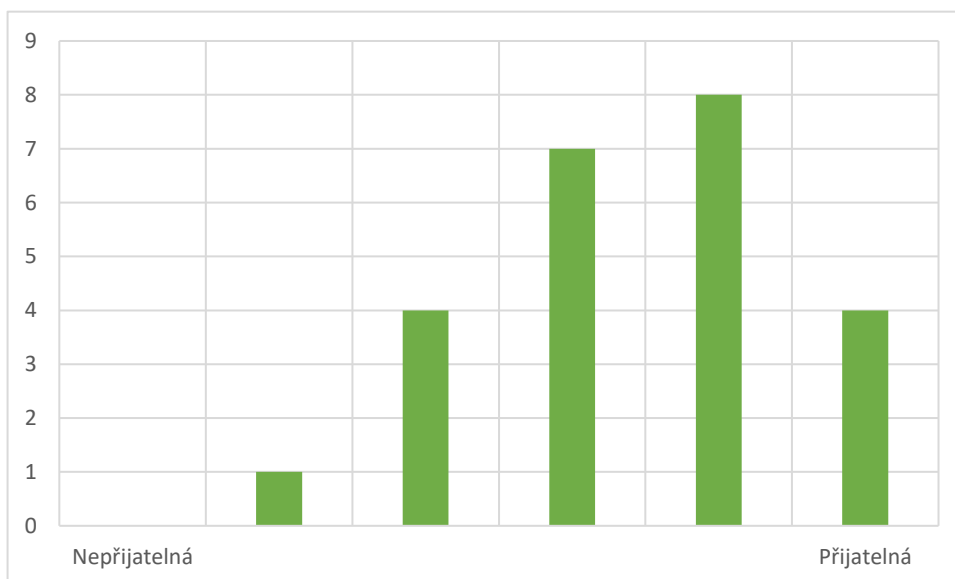
Obrázek 32: Předchozí zkušenosti respondentů s HUD, HMD systémy v kokpitu

Obrázek 33 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Bylo zobrazení letových veličin přehledné?* Většina subjektů (87,5 %) hodnotila zobrazení jako přehledné. Třem subjektům (12,5 %) se představené zobrazení zdálo jako méně přehledné. Tento fakt nejspíše vyplývá za skutečnosti, že jako uživatel HMD musíte při pohledu na přístroje a pohledu ven neustále přeastřovat zrak.



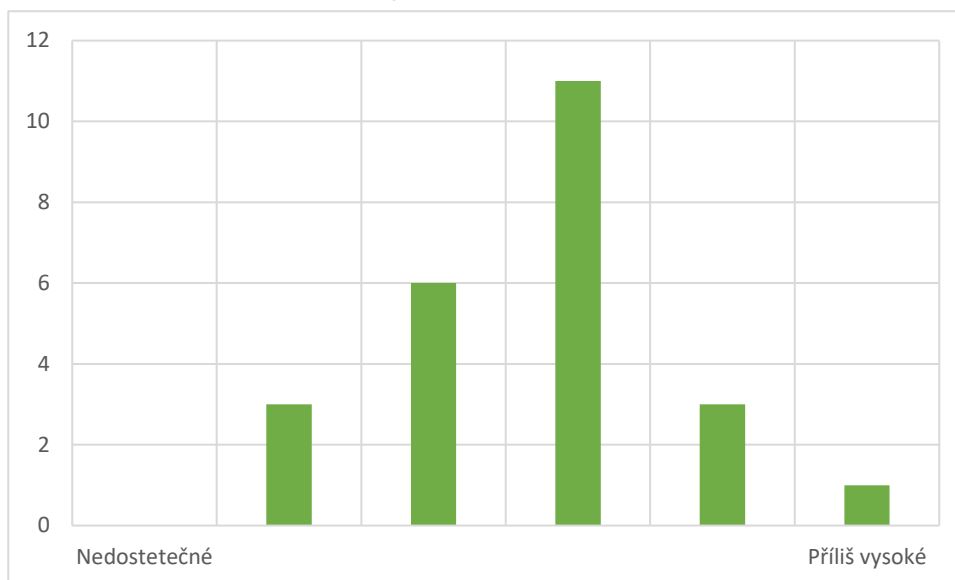
Obrázek 33: Přehlednost zobrazovaných veličin

Obrázek 34 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Ergonomie rozmístění letových veličin. Jak vnímáte rozmístění, barvu a velikost jednotlivých letových indikací?* Z grafu vyplývá, že většina respondentů hodnotí ergonomii zobrazení letových veličin pozitivně. Rozdělení odpovědí odpovídá Gaussovu normálnímu statistickému rozdělení, kde nejvyšší četnost sesbíraných odpovědí se nachází na straně hodnotící ergonomii jako přijatelnou.



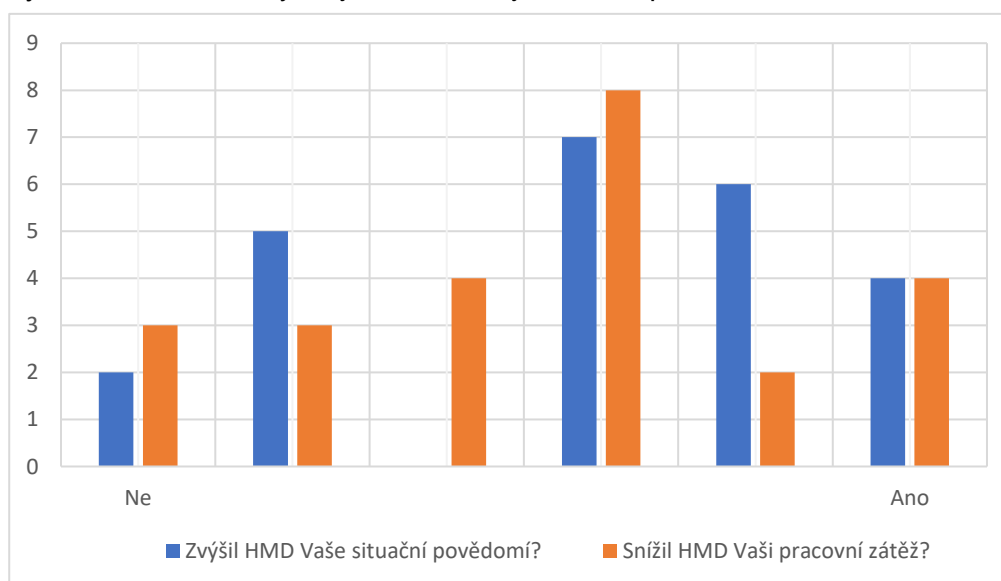
Obrázek 34: Názor respondentů na ergonomii zobrazení letových veličin

Obrázek 35 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Jak vnímáte množství zobrazovaných informací?* Z grafu je patrné normální rozložení odpovědí kolem střední hodnoty, byť lehce posunuté na stranu vyššího množství informací. Tento posun si lze vysvětlit indikací teploty okolního vzduchu, kterou většina respondentů považovala vzhledem k dané letové úloze, letu letištním okruhem za VFR podmínek, za postradatelnou.



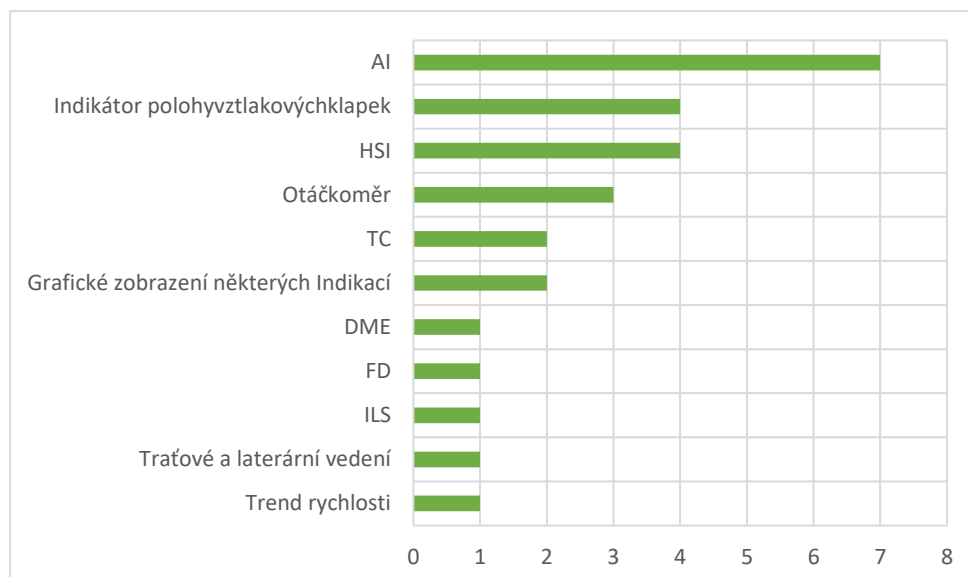
Obrázek 35: *Názor respondentů na množství zobrazovaných informací*

Obrázek 36 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Zvýšil HMD Vaše situační povědomí?* (modře) a *Snížil HMD Vaši pracovní zátěž?* (oranžově). Rozložení odpovědí obou otázek při připomíná Gaussovo normální rozložení, lehce posunutého na stranu odpovědi „ano“. Tuto skutečnost lze interpretovat jako pozitivní přínos HMD zařízení. Je ovšem také možné, že posun rozložení odpovědí na pozitivní stranu měla za následek skutečnost, že většina subjektů byla zároveň studenty stejného oboru, jako autor práce.



Obrázek 36: *Sloupcový graf k otázkám o zvýšení situačnímu povědomí a snížení pracovní zátěže*

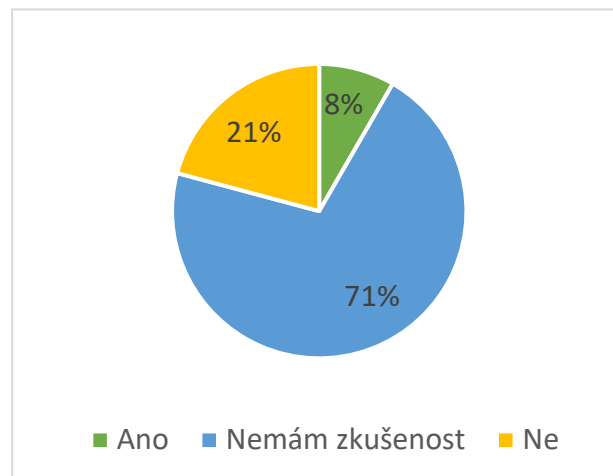
U následujících dvou otázek měl každý respondent vypsát přístroj přístroje, které mu na zobrazení chyběly, a které naopak považoval za zbytečné. Tuto otázku považují za velice důležitou, jelikož z odpovědí přímo vyplývá, o jaké přístroje by měli testovaní piloti zájem. Na Obrázek 37 je graf s přístroji, které respondenti vyplnili do dotazníku jako chybějící.



Obrázek 37: Požadavky respondentů na další letové přístroje

Mezi nejčastěji požadovaný přístroj patřil jednoznačně umělý horizont (AI). Jednalo se o jedinou indikaci ze základních šesti, která na navrhovaném zobrazení chyběla. Mezi další žádané indikace patřil indikátor polohy vztlakových klapek a indikátor HSI (Horizontal Situation Indicator). Indikátor HSI patří k velmi rozšířenému způsobu indikace letěného kurzu, nastaveného kurzu a polohy vzhledem k nastavenému radiálu od VOR stanice nebo nastavené RNAV (Area Navigation) trasy. Další žádanou indikací se stal otáčkoměr, který se objevil v odpovědi třech testovaných subjektů. Otáčkoměr patří k primárním způsobům nastavení cestovního výkonu u jednodušších pístových letounů, mezi které patří letoun C172 využitý v experimentu. Dvakrát byl v odpovědích respondentů zmíněn zatáčkoměr (TC) a absence grafického znázornění přístrojů. Mezi odpovědi respondentů také patřila indikace měřiče vzdálenosti DME, povelového ukazatele (FD), indikace trendu vývoje rychlosti (u digitálního typu rychloměru znázorněna sloupečkem nebo šipkou a velikosti a směru předpovědi vývoje rychlosti za určitou dobu), traťové a laterální vedení nebo indikace pro přiblížení ILS.

Jako nadbytečné přístroje respondenti v malém počtu označovali pozemní rychlost a teplotu okolního vzduchu. Docházím k závěru, že subjekty zmínili tyto indikace, poněvadž jich nebylo potřeba pro letěnou úlohu, než že by je na svém zařízení nechtěli vidět.

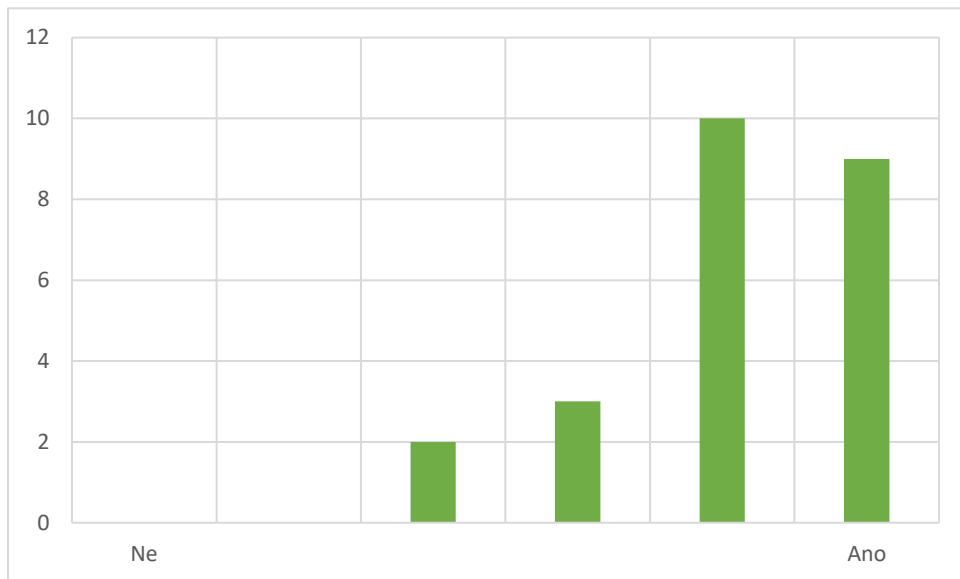


Obrázek 38: Preference HMD a HUD systému

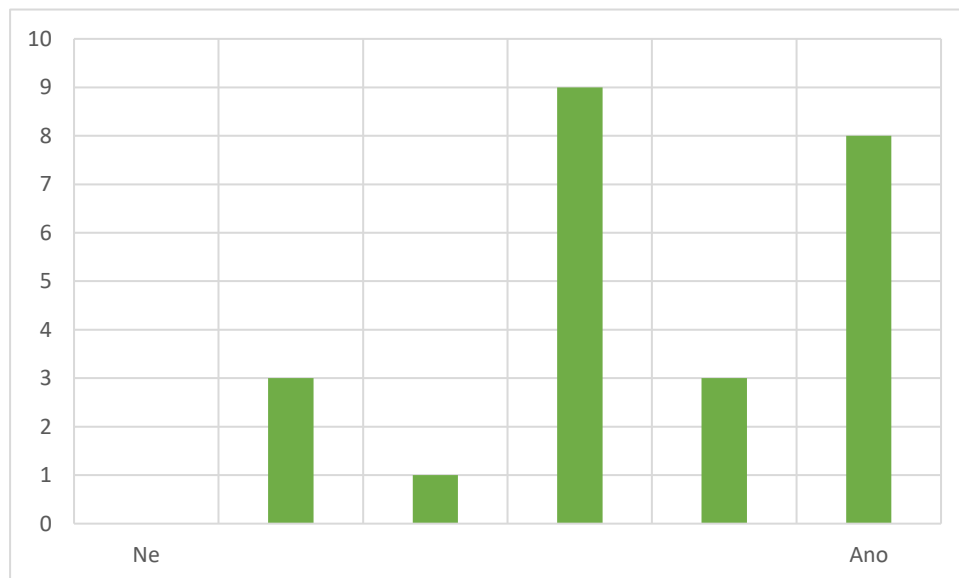
Obrázek 38 je koláčovým digramem odpovědí na otázku: *Dali byste přednost HMD před tradičními HUD?* 71 % Subjektů odpovědělo, že pro takové rozhodnutí nemají dostatek zkušeností. 8 % respondentů by před HUD přednost HMD dalo, 21 % respondentů nikoliv. Vzhledem k tomu, že se experimentu nezúčastnili žádní dopravní piloti, kteří by létali na letounu s HUD systémem, není zřejmé, jakým způsobem odpovědi interpretovat. Možným způsobem interpretace je vyhodnocení odpovědi, jaký typ zařízení (HUD/HMD) by si respondenti vybrali, kdyby měli možnost volby. Více subjektů si tak vybralo konvenční HUD zařízení. To může být způsobené i tím, že přeložený HMD systém obsahoval poměrně malé množství letových veličin a indikací než známé HUD systémy využívané na palubě moderních dopravních letounů.

Obrázek 39 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Je podle Vás AR technologie přínosná?* Z výsledků je zřejmé, že ačkoli by většina respondentů podle výsledků z minulé otázky HMD před HUD přednost nedala, považuje technologii za přínosnou.

Obrázek 40 je sloupcovým grafem odpovědí na otázku: *Kdyby bylo takové zařízení dostupné ve Vašem letadle, využíval/a byste ho?* Naprostá většina respondentů (20) by předložené zařízení při řízení letadla využila. Čtyři účastníci experimentu by takové zařízení nevyužili.



Obrázek 39: *Názor respondentů na přínosnost HMD technologie*

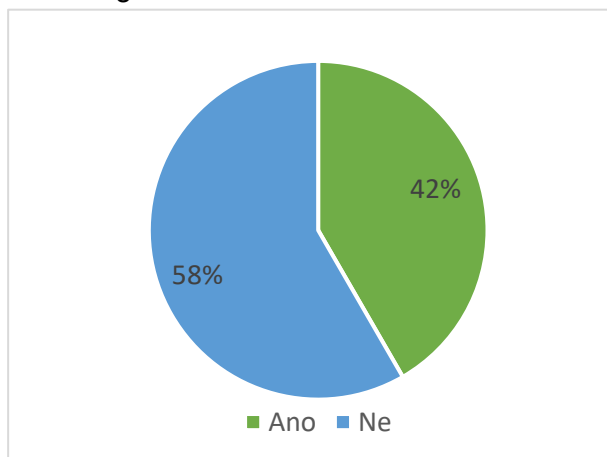


Obrázek 40: *Využili by testovací piloti předložené zařízení, kdyby bylo dostupné v jejich letadle?*

Následující koláčový diagram na obrázku 41 je rozložení odpovědí na otázku: *Kdybyste měl/a tu možnost, koupili byste si takové zařízení? Žádal/a byste takové zařízení u svého provozovatele?* Většina respondentů, tedy 14 dotazovaných (přibližně 60 %), by o koupi podobného zařízení neuvažovala, ani by podobné zařízení nežádala u zaměstnavatele. Zbylých 10 respondentů (asi 40 %) by o podobné zařízení zájem mělo. Je pravděpodobné, že

testované zařízení nepředstavovalo markantní zvýhodnění nebo ulehčení pilotáže natolik, aby zařízení piloti aktivně vyhledávali.

Poslední otázkou této části dotazníku byl prostor, kde se mohl každý účastník experimentu vyjádřit ve volném textu. Mohli zde doplnit další postřehy a připomínky, jaké nebylo možné předat v ostatních otázkách dotazníku. Mezi odpověďmi v této části ankety byly komentáře k použitému zařízení, technologii a rovněž k samotnému rozmístění veličin.



Obrázek 41: Zájem respondentů o podobné zařízení.

Několik subjektů si stěžovalo na „nezvyk“ na pohled skrze průhledné brýle a také na fakt, že museli akomodovat oko při přechodu z pohledu na virtuální přístroje na pohled ven z kabiny (na obrazovku počítače). Tři respondenti by umístili indikace na levé a pravé straně, více doprostřed. Měli pocit, že vzdálenost mezi indikacemi rychlosti a výšky prodlužovala jejich čtení přístrojů a zvyšovala tak pracovní zatížení. Naopak jeden respondent hodnotil nedostatečnou vzdálenost mezi ukazatelem rychlosti vzdušné a pozemní, a ukazatelem výšky a vertikální rychlosti.

Respondenti hodnotí pozitivně fakt, že brýle usnadňovaly sledování důležitých letových parametrů při vyhledávání význačných bodů, protože měli indikace přístrojů kontinuálně před sebou v pohledu jakýmkoli směrem. Jeden subjekt by ocenil možnosti uživatelského editování polohy a velikosti přístrojů, aby si každý pilot mohl nastavit přístroje podle vlastní preferencí.

5 Diskuse

Všichni piloti, kteří se zúčastnili experimentu se s brýlemi s rozšířenou realitou potkali poprvé. Muselo jim být vysvětleno, jak přístroj funguje a jakým způsobem ho mají využívat. Většina subjektů popisovala, že sledování přístrojů na takové zařízení je velmi nezvyklé a kdyby měli takové zařízení využívat během letu, museli by si na něj nejdříve přivyknout. I přes tyto připomínky hodnotila většina subjektů novou technologii pozitivně. Na základě zpětné vazby bych doporučil upravit vertikální vzdálenost mezi indikacemi rychlostí vzdušné a pozemní a mezi indikacemi výšky a vertikální rychlosti.

Vzhledem k limitacím softwaru bylo nezbytné omezit indikace na číselné a textové údaje, tzn. bez použití grafických prvků. U mnoha leteckých přístrojů se grafickému znázornění vyhnout nelze. U některých přístrojů by pouze číselné zobrazení snižovalo čitelnost a tím zvyšovalo pracovní zátěž pilota. U dalších přístrojů, mezi které patří například umělý horizont nebo indikátor HSI, by bylo číselné zobrazení absolutně neinterpretovatelné.

Osobně si myslím, že je systém s displejem na hlavě velmi přínosnou technologií, které má svůj potenciál na palubě soukromých i dopravních letadel. Mezi jeho přednosti patří i pořizovací cena, která je nižší než u tradičnějších HUD zařízení a jejich menší velikost a přenosnost. Bylo by tak v budoucnu možné takové zařízení mezi letadly libovolně přenášet a používat je třeba jen u letů, u kterých by byly jejich přednosti markantní.

6 Závěr

V rámci této práce byla zpracována analýza současného stavu zařízení zobrazující rozšířenou realitu a ergonomických konceptů využívaných pro zobrazování letových veličin. Práce je zaměřena na využití HMD zařízení v aplikacích civilního letectví. Na základě teoretické části práce bylo navrženo rozmístění letových veličin do zorného pole pilota pomocí HMD s rozšířenou realitou.

V průběhu zpracování zadané práce byla zjištěna limitující omezení, která zásadně ovlivnila kvalitu dosažených cílů. Prvním omezením byl software určený ke streamování dat do brýlí, který v aktuální podobě neumožňuje zobrazení grafických útvarů. Dalším podstatným omezením je počet testovaných subjektů a jejich status. Z původně zamýšlených 30 účastníků se jich experimentu zúčastnilo 24. Všichni účastníci měli poměrně malý nálet a neměli žádnou předchozí zkušenost s HUD displeji. Z části je na vině i pandemická situace, kvůli které se na pracovišti (ÚLD) v Praze nacházel omezený počet potenciálních subjektů. Někteří studenti se experimentu nemohli zúčastnit kvůli nakažení onemocněním COVID-19.

I přes nedostatky uvedené v předchozím odstavci bylo dosaženo požadovaného cíle a bylo navrženo funkční zobrazení leteckých informací. Mezi zobrazované hodnoty patřilo 6 indikací – vzdušná rychlost, rychlost nad zemí, kurz, výška, vertikální rychlost a teplota okolního vzduchu. Byl připraven experiment, který spočíval v testování brýlí s rozšířenou realitou oslovenými subjekty a byla sestavena anketa s dvaceti otázkami na navržené zobrazení přístrojů na HMD a způsob jejího vyhodnocení. Experimentu se zúčastnilo 24 subjektů – pilotů, kteří brýle vyzkoušeli během letu na leteckém simulátoru X-Plane na letištním okruhu v Brně. Následně byli účastníci požádáni o vyplnění sestaveného dotazníku s otázkami. Ze sesbíraných odpovědí byla získána zpětná vazba ohledně navrhovaného rozmístění.

Výsledky zpětné vazby mohou být použity při dalším vývoji zařízení zobrazující letové informace. Bylo by vhodné implementovat do softwaru podporu grafických údajů a naprogramovat složitější letecké přístroje a grafickou reprezentaci těch stávajících. Také by bylo možné experimentovat s barvou zobrazovaných údajů, která by mohla odpovídat jejich hodnotám, nebo nastavení.

Použité zdroje

- [1] JAVORNIK, Ana. The Mainstreaming of Augmented Reality: A Brief History. In: Harvard Business Review [online]. October 04, 2016 [cit. 2021-01-20] Dostupné z: <<https://hbr.org/2016/10/the-mainstreaming-of-augmented-reality-a-brief-history>>
- [2] AZUMA R. T. A *Survey of Augmented Reality* [online]. 1997. [cit. 2020-10-23], Dostupné z: <https://direct.mit.edu/pvar/article/6/4/355/18336/A-Survey-of-Augmented-Reality>
- [3] SCHMALSTIEG, D. HÖLLERER T. *Augmented Reality: Principles and Practice*. 1. vydání. Crawfordsville: Addison-Wesley, 2016. ISBN-13: 978-0-321-88357-5
- [4] TABÁŠEK, Michal. *Augmented Reality in Cockpit*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/22631/>
- [5] HONDLÍKOVÁ Markéta. *Rozšířená realita a její praktické využití*. České Budějovice, 2011. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomické fakulta.
- [6] MILGRAM, Paul. KISHINO, Fumio. *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. 1994. IEICE Transactions on Information and Systems. Vol. E77-D, No.12. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays>
- [7] DRAEGER, J. *Visual ergonomics and flying safety. The importance of recognizing the instruments*. Ophthalmologie, 2009, 106(4), 370-373.
- [8] SPITSYN, Yegor. *Use of Modern Imaging Methods in Transport Aircraft Cockpits*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta Dopravní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80005/F6-BP-2018-Spitsyn-Yegor-BP_Spitsyn.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [9] NICHOLL, Ryan J. *Airline Head-Up Display Systems: Human Factors Considerations* [online]. 2014. [cit. 8-11-20]. Dostupné z: <<http://ssrn.com/abstract=2384101>>
- [10] ERNST J. M., EBRECHT L. a SCHMERWITZ S. *Virtual cockpit instruments displayed on head-worn displays – Capabilities for future cockpit design* [online]. 2019. [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume->

58/issue-5/051807/Virtual-Cockpit--an-immersive-head-worn-display-as-humanmachine/10.1117/1.OE.58.5.051807.short>

- [11] FOYLE D. ANDRE A. HOOLEY B. L. 26. *Situation Awareness in an Augmented Reality Cockpit: Design, Viewpoints and Cognitive Glue*. [online] 2005. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228367987_Situation_awareness_in_an_augmented_reality_cockpit_Design_viewpoints_and_cognitive_glue
- [12] WALKO, Christian. SCHUCHRDT, Bianca. *Increasing helicopter fight safety in maritime operations with a head-mounted display* [online]. 2020. [cit. 18-10-2020]. Dostupné z: <<https://doi.org/10.1007/s13272-020-00474-7>>
- [13] WEN-CHIN Li., et al. *Evaluating Pilot's Perceived Workload on Interacting with Augmented Reality Device in Flight Operation*. [online] 2020. [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-49183-3_26
- [14] DOEHLER, H. U., ERNST J. M., a Th. LEUKEN. *Virtual aircraft-fixed cockpit instruments* [online]. 2015. German Aerospace Center, Institute of Flight Guidance. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9471/1/Virtual-aircraft-fixed-cockpit-instruments/10.1117/12.2177796.short>>
- [15] TRAN T. H., et al. *Single Pilot Operations with AR-Glasses using Microsoft HoloLens* [online]. IEEE, 2018. [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8569261>>
- [16] BLUNDELL, J., et al. *With flying colours: Pilot performance with colour-coded head-up flight symbology* [online]. Centre for Mobility and Transport, Coventry University, Coventry, UK, 2020. [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141938219300368?via%3Dihub>>
- [17] HÁČIK, Ľubomír. *Lidská Výkonnost a omezení: Dočasná učebnice*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006
- [18] AEROGLOSS. Glass.aero [online]. © 2014-2019 Aero Glass [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: <<http://glass.aero/>>
- [19] CAE Oxford Aviation Academy. *ATPL Ground Training Series: Instrumentation*. 2014.
- [20] ZITKO, Karel. VACÍK Milan. *Učebnice létání*. 6. vydání. Praha: Vintage Aviation s. r. o., 2016. ISBN 978-80-260-9395-4

Příloha A: Tištěná podoba dotazníku

Návrh zobrazení letových přístrojů prostřednictvím rozšířené reality

1. Identifikace respondenta

Používal/a jste už HUD nebo HMD displej v pilotní kabině?

1 2 3 4 5 6

Nemám žádné zkušenosti HUD/HMD využívám pravidelně

Bylo zobrazení letových veličin přehledné?

1 2 3 4 5 6

Nepřehledné/matoucí Perfektně přehledné

Ergonomie rozmístění letových veličin

Nápověda k otázce: *Jak vnímáte rozmístění, barvu a velikost jednotlivých letových indikací?*

1 2 3 4 5 6

Nepřijatelná Přijatelná

Jak vnímáte množství zobrazovaných informací

1 2 3 4 5 6

Nedostatečné Příliš vysoké

Zvýšil HMD Vaše situační povědomí?

1 2 3 4 5 6

Ne Ano

Snížil HMD Vaši pracovní zátěž

	1	2	3	4	5	6	
Ne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ano

8. Jaká indikace podle Vás na zobrazení chyběla?

9. Jaká indikace podle Vás na displeji přebývala?

10. Dali byste přednost HMD před tradičními HUD?

Nápověda k otázce: *HMD = Head-up Display, HMD = Head-mounted Display*

- Ano
 Nemám zkušenost s HUD
 Ne

Je podle Vás AR technologie přínosná?

Nápověda k otázce: *AR = Augmented Reality, rozšířená realita*

	1	2	3	4	5	6	
Ne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ano

Kdyby bylo takové zařízení dostupné ve Vašem letadle, využíval/a byste ho?

	1	2	3	4	5	6	
Ne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Ano

13. Kdybyste měl/a tu možnost, koupili byste si takové zařízení? Žádal/a byste takové zařízení u svého provozovatele?

Ano

Ne

14. Komentář

Nápověda k otázce: *Zde máte možnost se vyjádřit ve volné řeči.*

15. Pohlaví

Nápověda k otázce: *Vyberte jednu odpověď*

Muž

Žena

16. Věk

17. Jste držitelem pilotní licence?

Nápověda k otázce: *Vyberte jednu nebo více odpovědí*

Ne

PPL

CPL

ATPL

type rating

18. Kolik hodin činí Váš celkový nálet?

19. Nálet podle pravidel VFR

20. Nálet podle pravidel IFR:

Nápověda k otázce: Včetně hodin na simulátoru FNPT II.

Příloha B: Kompletní znění konfiguračního souboru pro rozmístění přístrojů

```
{
  "data_source": "xplane",
  "positioning_mode": "precision",
  "labels": [
    {
      "data_ref":
"sim/cockpit2/gauges/indicators/airspeed_kts_pilot",
      "position": {
        "x": -75,
        "y": 250,
        "width": 300,
        "height": 47,
        "font_size": 42,
        "color": {
          "red": 0,
          "green": 255,
          "blue": 146
        }
      },
      "data_name": "IAS",
      "data_type": "float",
      "round": 0
    },
    {
      "data_ref":
"sim/cockpit2/gauges/indicators/altitude_ft_pilot",
      "position": {
        "x": 900,
        "y": 250,
        "width": 300,
        "height": 47,
        "font_size": 42,
        "color": {
          "red": 0,
```

```

        "green": 255,
        "blue": 146
    }
},
"data_name": "ALT",
"data_type": "float",
"round": 0
},
{
"data_ref": "sim/cockpit2/temperature/outside_air_temp_degC",
"position": {
    "x": -50,
    "y": 0,
    "width": 225,
    "height": 30,
    "font_size": 24,
    "color": {
        "red": 0,
        "green": 255,
        "blue": 146
    }
},
"data_name": "OAT",
"data_type": "float",
"round": 1
},
{
"data_ref": "sim/cockpit2/gauges/indicators/vvi_fpm_pilot",
"position": {
    "x": 920,
    "y": 300,
    "width": 270,
    "height": 35,
    "font_size": 30,
    "color": {
        "red": 0,
        "green": 255,

```

```

        "blue": 146
    }
},
"data_name": "VS",
"data_type": "float",
"round": 0
},
{
"data_ref": "sim/flightmodel/position/mag_psi",
"position": {
    "x": 430,
    "y": 0,
    "width": 350,
    "height": 45,
    "font_size": 40,
    "color": {
        "red": 0,
        "green": 255,
        "blue": 146
    }
},
},
"data_name": "HDG",
"data_type": "float",
"round": 0
},
{
"data_ref": "sim/flightmodel/position/groundspeed",
"position": {
    "x": -45,
    "y": 300,
    "width": 250,
    "height": 35,
    "font_size": 30,
    "color": {
        "red": 0,
        "green": 255,
        "blue": 146
    }
}
}

```



```
    }  
  },  
  "data_name": "GS",  
  "data_type": "float",  
  "round": 0  
}  
]  
}
```