



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

GRAFICKÉ ROZHRANÍ PRŮHLEDOVÉHO DISPLEJE

GRAPHICAL INTERFACE FOR HEAD-UP DISPLAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ POMIKÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETER CHUDÝ, Ph.D., MBA

BRNO 2017

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2016/2017

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Pomikálek Jiří**

Obor: Informační technologie

Téma: **Grafické rozhraní průhledového displeje**
Graphical Interface for Head-up Display

Kategorie: Počítačová grafika

Pokyny:

1. Diskutujte historický vývoj návrhu vizualizace letových veličin v pilotní kabině.
2. Nastudujte současné trendy vizualizace letových dat.
3. Navrhněte vizualizaci letových dat pro průhledový displej.
4. Návrh implementujte v prostředí leteckého simulátoru, který obsahuje technologie podporující virtuální realitu.
5. Diskutujte možné směry a budoucí vývoj v rámci zkoumané disciplíny.
6. Vytvořte stručný plakát nebo video prezentující Vaši bakalářskou práci.

Literatura:

- dle doporučení vedoucího

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

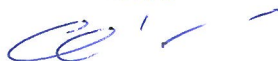
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Chudý Peter, doc. Ing., Ph.D. MBA, UPGM FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2016

Datum odevzdání: 17. května 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
612 06 Brno, L. Šteřehova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vizualizace letových dat. Cílem projektu byl návrh a implementace vizuálního rozhraní průhledového displeje. Důraz je kladen na použití správné symboliky, udržení přehlednosti předávání letových informací a současně také na integraci návrhu do leteckého simulátoru prostřednictvím technologií pro virtuální realitu.

Abstract

This bachelor thesis addresses the visualization of flight data. The aim of the thesis is to design and implement the visual interface of a head-up display. Emphasis is placed on using the right symbology, maintaining the clarity of the flight information and simultaneously integrating application into a flight simulator with motion platform, using virtual reality technologies.

Klíčová slova

průhledový displej, avionické systémy, letectví, vizualizace letových dat, monochromatické zobrazení, letecký simulátor, syntetický terén, virtuální realita, Unity 3D.

Keywords

head-up display, avionics systems, aviation, flight data visualization, monochromatic display, flight simulator, syntetic terrain, virtual reality, Unity 3D.

Citace

POMIKÁLEK, Jiří. *Grafické rozhraní průhledového displeje*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Chudý Peter.

Grafické rozhraní průhledového displeje

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Petera Chudého, Ph.D., MBA a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jiří Pomikálek
17. května 2017

Poděkování

Především bych chtěl upřímně poděkovat mému ochotnému vedoucímu panu doc. Ing. Peterovi Chudému, Ph.D., MBA za vysoce odborné vedení této práce, cenné rady, obrovskou dávku motivace a naprosto skvělý přístup. Mé veliké díky patří i kolegovi Ing. Janu Vlkovi, který mi pomáhal v prostředí leteckého simulátoru a vše mi dopodrobna vysvětlil. Dále bych chtěl poděkovat členům výzkumné skupiny AeroWorks, kteří mi umožnili přístup k potřebným technologiím.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod | 6 |
| 2 Matematicko-fyzikální popis prostorového pohybu letounu | 7 |
| 2.1 Souřadné systémy | 7 |
| 2.1.1 Souřadný systém Země | 7 |
| 2.1.2 Světový geodetický systém 1984 | 8 |
| 2.1.3 Lokální tečná rovina | 9 |
| 2.1.4 Letadlový souřadný systém | 9 |
| 2.1.5 Aerodynamický souřadný systém | 10 |
| 2.2 Transformace mezi souřadnými systémy | 10 |
| 2.2.1 Transformace z lokálního tečného do letadlového souřadného systému | 10 |
| 2.2.2 Transformace z aerodynamického do letadlového souřadného systému | 11 |
| 2.3 Pohybové rovnice | 12 |
| 2.3.1 Předpoklady | 12 |
| 2.3.2 Diferenciální rovnice polohy | 12 |
| 2.3.3 Diferenciální rovnice pozice | 13 |
| 2.3.4 Diferenciální rovnice síly | 14 |
| 2.3.5 Momentové diferenciální rovnice | 14 |
| 3 Historie leteckých vizualizačních systémů | 15 |
| 3.1 Mechanická éra | 15 |
| 3.2 Elektro-mechanická éra | 16 |
| 3.2.1 Základních šest | 16 |
| 3.2.2 Základní T | 16 |
| 3.2.3 Umělý horizont (ADI) | 17 |
| 3.2.4 Indikátor horizontální situace | 18 |
| 3.3 Elektro-optická éra | 19 |
| 3.3.1 Primární letový displej | 20 |
| 3.3.2 Průhledový displej | 20 |
| 4 Současný stav leteckých vizualizačních systémů | 22 |
| 4.1 Současný stav řešení průhledových displejů | 22 |
| 4.1.1 Datová architektura | 22 |
| 4.1.2 Rozbor režimů průhledových displejů | 23 |
| 4.1.3 Monochromatické zobrazení | 25 |
| 4.1.4 Vylepšený systém letového vidění | 25 |
| 4.2 Inovace | 26 |
| 4.2.1 Interaktivní displej pro kokpit ODICIS | 26 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.2 | Avionics 2020 | 27 |
| 5 | Návrh rozhraní průhledového displeje | 28 |
| 5.1 | Popis obecného formátu | 28 |
| 5.2 | Vlastní návrh | 29 |
| 6 | Implementace | 31 |
| 6.1 | Vývojové prostředí | 31 |
| 6.1.1 | Unity 3D | 32 |
| 6.1.2 | Virtuální realita HTC Vive | 32 |
| 6.1.3 | Použité programy | 32 |
| 6.2 | Trojrozměrné zobrazení terénu | 32 |
| 6.2.1 | SRTM data | 33 |
| 6.2.2 | Reprezentace terénu | 34 |
| 6.3 | Komunikační systém AW-COM | 34 |
| 6.3.1 | Modul AW-COM-SRV | 35 |
| 6.3.2 | Modul HUD | 35 |
| 6.3.3 | Modul AW-COM-XPLANE | 35 |
| 6.3.4 | Popis komunikačního protokolu | 35 |
| 6.4 | Zpracování letových veličin | 36 |
| 6.5 | Integrace do leteckého simulátoru | 36 |
| 7 | Testování a vyhodnocení | 38 |
| 7.1 | Praktické testování | 38 |
| 7.2 | Uživatelské testování | 38 |
| 7.3 | Vyhodnocení | 40 |
| 8 | Závěr | 41 |
| 8.1 | Možnosti budoucího vývoje | 41 |
| | Literatura | 42 |
| | Přílohy | 45 |
| | Seznam příloh | 46 |
| | A Snímek aplikace HUD | 47 |
| | B Obsah přiloženého CD | 48 |
| | C Dotazník | 49 |
| | D Rozhodovací stromy | 52 |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Diagram faktorů ovlivňující průběh letu. | 7 |
| 2.2 | Souřadný systém ECEF. | 8 |
| 2.3 | Souřadný systém WGS 84. | 8 |
| 2.4 | Souřadný systém NED. | 9 |
| 2.5 | Letadlový souřadný systém. | 9 |
| 2.6 | Aerodynamický souřadný systém. | 10 |
| 2.7 | Eulerovy úhly [26]. | 11 |
| 2.8 | Šest stupňů volnosti [21]. | 12 |
| | | |
| 3.1 | Palubní deska letounu Spirit of St. Louis [2]. | 16 |
| 3.2 | Přístrojová konfigurace podle formátu „basic 6“. | 17 |
| 3.3 | Přístrojová konfigurace podle základního T pro civilní letouny. | 17 |
| 3.4 | Umělý horizont[4]. | 18 |
| 3.5 | Indikátor horizontální situace[24]. | 19 |
| 3.6 | HUD - Head Up Display [13]. | 20 |
| | | |
| 4.1 | Schéma datové architektury civilních průhledových displejů [22]. | 23 |
| 4.2 | Navigační režim [5]. | 24 |
| 4.3 | Přistávací režim [5]. | 24 |
| 4.4 | Citlivost lidského oka na různé vlnové délky [17]. | 25 |
| 4.5 | EFVS - Enhanced Flight Vision System [27]. | 26 |
| 4.6 | One Display for a Cockpit Interactive Solution [23]. | 27 |
| 4.7 | Prototypové řešení Avionics 2020 [12]. | 27 |
| | | |
| 5.1 | Schéma rozložení funkčních oblastí pro symboliku průhledového displeje [22]. | 28 |
| 5.2 | První pracovní návrh rozhraní. | 29 |
| 5.3 | Druhý pracovní návrh rozhraní. | 29 |
| 5.4 | Finální návrh rozhraní. | 29 |
| | | |
| 6.1 | Kompletní scéna a vzhled průhledového displeje. | 31 |
| 6.2 | Schéma raketoplánu Endeavour při misi SRTM [10]. | 33 |
| 6.3 | Znázornění jednotlivých vrcholů a jejich indexů [9]. | 34 |
| 6.4 | Viditelnost stěn při různé orientaci trojúhelníků [9]. | 34 |
| 6.5 | Schéma propojení jednotlivých komunikačních modulů. | 34 |
| 6.6 | Pohyblivý letecký simulátor na Fakultě informačních technologií, foto Jan Vlk. | 37 |
| | | |
| 7.1 | Propojení se simulátorem a vyobrazení podobnosti krajiny. | 39 |
| 7.2 | Uživatelské testování, foto AeroWorks. | 39 |

Seznam použitých zkratk

| | |
|--------|---|
| ADI | Umělý horizont |
| AOA | Úhel náběhu |
| BFF | Letadlový souřadný systém |
| CAS | Kalibrovaná vzdušná rychlost |
| CG | Těžiště |
| CRT | Katodová trubice |
| EASA | Evropská agentura pro bezpečnost letectví |
| ECEF | Souřadný systém Země |
| EFVS | Vylepšený systém letového vidění |
| EVS | Vylepšený systém vidění |
| FAA | Federální úřad pro letectví |
| FLIR | Systém s dopřednou infračervenou kamerou |
| FPM | Ukazatel směru letu |
| GS | Rychlost vůči Zemi |
| HD | Vysoké rozlišení |
| HSI | Indikátor horizontální situace |
| HUD | Průhledový displej |
| ICAO | Mezinárodní organizace pro civilní letectví |
| IIS | Systém integrovaných přístrojů |
| ILS | Systém pro přístrojové přistání |
| LED | Dioda emitující světlo |
| MMW | Vlna s milimetrovou vlnovou délkou |
| NAV | Navigace |
| NED | Souřadný systém lokální tečná rovina |
| NVD | Zařízení pro noční vidění |
| ODICIS | Jeden displej pro interaktivní řešení kokpitu |
| PFD | Primární letový displej |
| RAF | Královské letectvo |
| SRTM | Radarová topografická mise |

| | |
|--------|---------------------------------|
| TAS | Skutečná vzdušná rychlost |
| TRE | Ústav pro výzkum telekomunikací |
| USA | Spojené státy americké |
| VR | Virtuální realita |
| WGS 84 | Světový geodetický systém 1984 |

Seznam veličin a jednotek

| Zkratka | Jednotky | Název |
|-----------------|----------------|---|
| a | $[m]$ | velká poloosa |
| e | $[1]$ | excentricita |
| f | $[1]$ | zploštění |
| F | $[N]$ | síla |
| f_x, f_y, f_z | $[N]$ | specifické síly |
| g | $[m.s^{-2}]$ | gravitační zrychlení |
| GS | $[m.s^{-1}]$ | rychlost pohybu letounu vůči Zemi |
| h | $[m]$ | nadmořská výška |
| I_X, I_Y, I_Z | $[kg.m^{-2}]$ | momenty setrvačnosti |
| L, M, N | $[kg.m^{-2}]$ | ostatní působící momenty |
| m | $[kg]$ | hmotnost |
| M_μ | $[1]$ | poloměr zakřivení poledníku |
| N_μ | $[1]$ | nejvyšší poloměr vertikálního zakřivení |
| p, q, r | $[rad.s^{-1}]$ | úhlové rychlosti |
| u, v, w | $[m.s^{-1}]$ | složky rychlosti |
| V | $[m.s^{-1}]$ | rychlost letounu ve směru pohybu |
| α | $[^\circ]$ | úhel náběhu |
| β | $[^\circ]$ | úhel vybočení |
| θ | $[^\circ]$ | úhel klopení |
| λ | $[^\circ]$ | zeměpisná délka |
| μ | $[^\circ]$ | zeměpisná šířka |
| ϕ | $[^\circ]$ | úhel náklonu |
| ψ | $[^\circ]$ | úhel vybočení |

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vizualizace letových dat. Jejím cílem je návrh a implementace vizuálního rozhraní průhledového displeje. Důraz je kladen na použití správné symboliky, udržení přehlednosti předávání letových informací a současně také na integraci návrhu do leteckého simulátoru prostřednictvím technologií pro virtuální realitu.

Ve druhé kapitole je uveden matematicko-fyzikální popis prostorového pohybu letounu, na němž jsou založena jádra leteckých simulátorů. Třetí kapitola představuje obecnou historii vývoje leteckých systémů. V navazující čtvrté kapitole jsou popsány současné trendy vizualizace letových veličin a to především se zaměřením na průhledové displeje. Zároveň se zde práce zabývá inovacemi z této oblasti a souhrně uvažuje jejich možné futuristické varianty. Následná pátá kapitola pojednává o symbolice průhledových displejů a představuje konkrétní návrhy aplikace. Navazující šestá kapitola, obsahuje popis implementace aplikace a sedmá kapitola se věnuje průběhu testování v prostředí virtuální reality leteckého simulátoru. Závěrečná osmá kapitola shrnuje výsledky této práce a zvažuje možnosti dalšího rozvoje.

2. Matematicko-fyzikální popis prostorového pohybu letounu

Prostorový pohyb a popis chování letounu představují značně komplexní problematiku. Účelem provedení letu není pouze vznést stroj do vzduchu, ale také ho ve vzduchu udržet, řídit správným směrem při různorodém působení povětrnostních vlivů, světelných podmínek a s důrazem na zajištění bezpečnosti letu, včetně úspěšného přistání. Všechny prvky systému, tzn. od pevnostních elementů v přistávacím podvozku až po důkladně vyvičeného pilota, musí plnit přísné mezinárodní certifikační standardy vydané například FAA, EASA, ICAO [7][6][16].

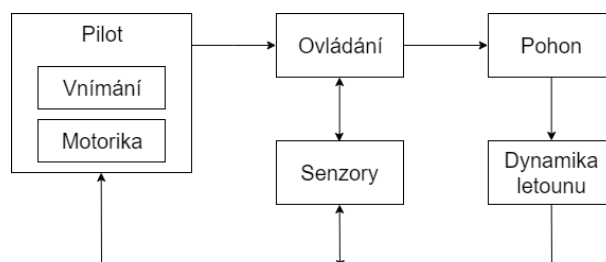
Pro cílené testování komponent, nebo komplexní výcvik pilotů je využíváno leteckých simulátorů. Ty kromě běžného letového provozu umožňují simulaci mimořádných událostí za letu. Všechny důležité faktory ovlivňující průběh letu lze shrnout do několika skupin. Zobecněný souhrn klíčových součástí průběhu letu je vyobrazen na obrázku 2.1.

2.1 Souřadné systémy

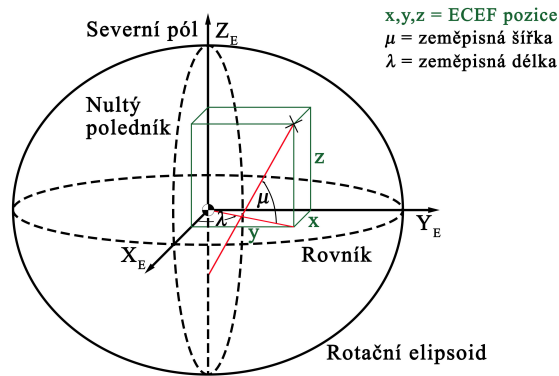
Předtím, než přejdeme k samotnému matematickému modelu pohybu letounu, musíme zavést základní souřadné systémy, ve kterých budou pohybové rovnice odvozeny. Prostorovou polohu a orientaci letounu popíšeme parametry vztahenými ke zvoleným osám, přičemž tři parametry jsou souřadnicemi pozice těžiště letounu a zbývající tři reprezentují úhly prostorové rotace. Zavedeme tedy pravoúhlý, pravotočivý, inerciální souřadný systém $X_E Y_E Z_E$ pevně spojený se Zemí. Kvůli pomalé rotaci Země vzhledem k rychlosti pohybu letadla, můžeme vliv rotace Země zanedbat [3].

2.1.1 Souřadný systém Země

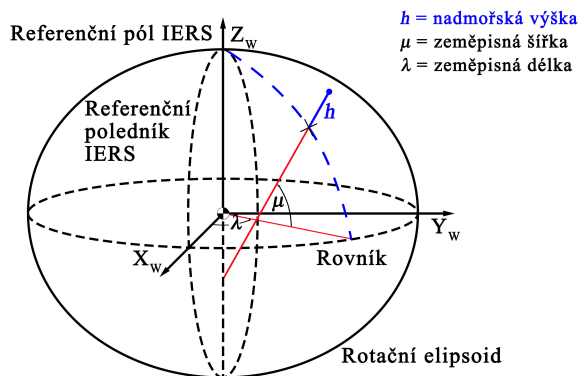
ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) je kartézský souřadný systém vyjadřující polohu těles vůči Zemi. Středem této souřadné soustavy je hmotnostní těžiště Země. Používá se v ge-



Obrázek 2.1: Diagram faktorů ovlivňující průběh letu.



Obrázek 2.2: Souřadný systém ECEF.

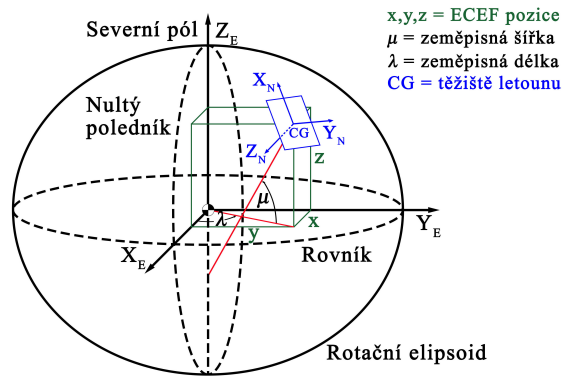


Obrázek 2.3: Souřadný systém WGS 84.

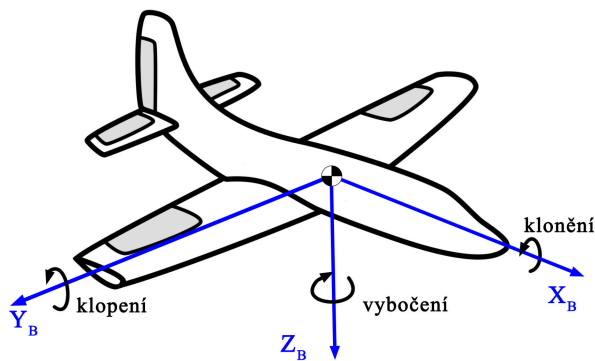
odetických a navigačních aplikacích, protože se zemský povrch vůči středu této soustavy prakticky nepohybuje. Umožňuje popsat polohu v prostoru bez nutnosti definice konkrétního rotačního elipsoidu. Souřadná soustava ECEF není inerciální, protože rotuje spolu se Zemí. Počátek je v zemském těžišti. Osa X_E prochází nultým poledníkem (Greenwichský), osa Z_E směřuje na sever, ale není přesně shodná s aktuálním směrem osy rotace Země, protože se sever vůči povrchu Země pomalu mění. Osa Y_E je kolmá na rovinu, kterou tvoří osy X_E a Z_E a její orientace splňuje podmínku pravouhlého souřadného systému, tak jak je znázorněno na obrázku 2.2 [33].

2.1.2 Světový geodetický systém 1984

WGS 84 (World Geodetic System 1984) je globálně rozšířený geodetický standard vydaný v roce 1984, který definuje souřadný systém jako referenční elipsoid pro geodézii a navigaci [3]. Souřadnice vycházejí ze zeměpisných souřadnic, poloha je určena pomocí zeměpisné délky, šířky a výšky. Souřadný systém WGS 84 je pravotočivá kartézská soustava souřadnic se středem v těžišti Země. Kladná osa Z_W směřuje k severnímu pólu, kladná osa X_W k průsečíku nultého poledníku a rovníku a kladná osa Y_W je na obě předchozí osy kolmá a orientovaná ve směru dle pravidla pravé ruky [3]. Dohromady tak tvoří pravotočivou soustavu souřadnic, která je zobrazena na obrázku 2.3.



Obrázek 2.4: Souřadný systém NED.



Obrázek 2.5: Letadlový souřadný systém.

2.1.3 Lokální tečná rovina

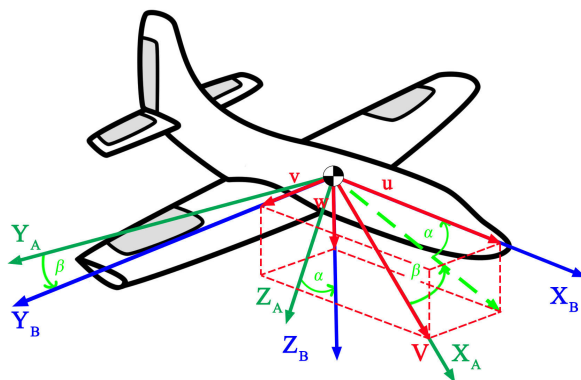
Tento souřadný systém je geodetický souřadný systém (NED) běžně používaný v letectví. Obsahuje tři hodnoty, z nichž první udává pozici po severní ose, druhá pozici po východní ose a poslední určuje vertikální polohu. Počátek tohoto souřadného systému je běžně zvolen tak, aby představoval těžiště letadla. Osa X_N směřuje vždy na sever, osa Y_N na východ a osa Z_N dolů. Grafická reprezentace systému NED je zobrazena na obrázku 2.4 [3].

V tomto systému se také počítá tzv. Ground Speed, tedy rychlost pohybu letounu vůči Zemi:

$$GS = \sqrt{V_N^2 + V_E^2} \quad (2.1)$$

2.1.4 Letadlový souřadný systém

Letadlový souřadný systém (BFF) je souřadný systém s počátkem umístěným v těžišti letounu. Pozice tří navzájem kolmých os je dána pravidlem pravé ruky, s osou X_B vždy směřující dopředu letounu, osou Y_B orientovanou do pravého křídla a osou Z_B kolmou na rovinu $X_B Y_B$ a směřující dolů. 2.5 [11].



Obrázek 2.6: Aerodynamický souřadný systém.

2.1.5 Aerodynamický souřadný systém

V aerodynamickém souřadném systému je počátek systému umístěn v těžišti letounu (obrázek 2.5). Tento souřadný systém se však zabývá orientací vůči vektoru rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu. První důležitou veličinou, která definuje vztah mezi BFF a aerodynamickým souřadným systémem je úhel náběhu α , který svírá projekce vektoru rychlosti nabíhajícího proudu vzduchu do roviny $X_B Z_B$ s osou X_B . Úhel náběhu má velký vliv na hodnotu součinitele vztlaču a tudíž i na výslednou vztlačkovou sílu. Podobná situace je s úhlem vybočení. Schématické znázornění vztahu mezi aerodynamickým a letadlovým souřadným systémem je uvedeno na obrázku 2.6 [30].

Vztahy pro výpočet složek rychlostí v letadlovém souřadném systému jsou uvedeny v rovnici 2.2.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \alpha \cos \beta \\ V \sin \beta \\ V \sin \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Zpětná transformace do aerodynamického souřadného systému je uvedena v rovnici 2.3.

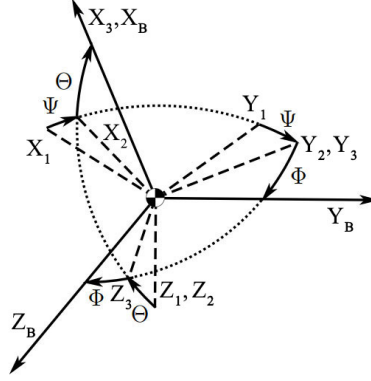
$$\begin{bmatrix} V \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ \arctan(w/u) \\ \arcsin(v/V) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.2 Transformace mezi souřadnými systémy

Ve spektru definovaných souřadných systémů, můžeme mezi dvojicí systémů provádět vzájemné transformace. Tyto transformace jsou aplikovatelné na silové, momentové, nebo rychlostní vektory.

2.2.1 Transformace z lokálního tečného do letadlového souřadného systému

Pro popis orientace letounu vůči Zemi zavádíme definici Eulerových úhlů. Pro zjednodušení popisu posuneme systém $X_N Y_N Z_N$ do pozice, aby jeho počátek splýval s těžištěm letounu



Obrázek 2.7: Eulerovy úhly [26].

CG, zároveň zachováme orientaci os a transformovaný systém přejmenujeme na $X_1Y_1Z_1$ (obrázek 2.7).

Rotaci souřadného systému $X_B Y_B Z_B$ vůči $X_1 Y_1 Z_1$ popíšeme namísto devíti směrových kosinů pomocí tří sousledných rotací. Tyto rotace nejsou komutativní, tudíž musíme dbát na pořadí provedených rotací. Při záměně jejich pořadí by došlo k sestavení jiné výsledné prostorové polohy letadla [30].

Pro lepší přehlednost jsou popsány jednotlivé aplikace rotací. Při první rotaci se souřadný systém $X_1 Y_1 Z_1$ v kladném směru otáčení otočí kolem osy Z_1 o úhel ψ , který nazveme úhel vybočení. Tím vznikne souřadný systém $X_2 Y_2 Z_2$.

Pomocí druhé rotace pootočíme souřadný systém $X_2 Y_2 Z_2$ kolem osy Y_2 o úhel θ v kladném směru otáčení. Úhel θ nazýváme úhlem klopení. Tímto krokem vzniká souřadný systém $X_3 Y_3 Z_3$.

Provedením třetí rotace pootočíme souřadný systém $X_3 Y_3 Z_3$ kolem osy X_3 o úhel ϕ v kladném směru otáčení. Vznikne nám souřadný systém $X_B Y_B Z_B$, který je pevně spojen s letounem. Třetí úhel ϕ nazveme úhlem klonění.

Rotační (transformační) úhly ψ , θ a ϕ se označují jako Eulerovy úhly. Všechny souřadné systémy, úhly jsou vyznačeny na obrázku 2.7 [30].

Rotační matice tří úhlů je výsledek násobení třech rotačních matic jednotlivých úhlů:

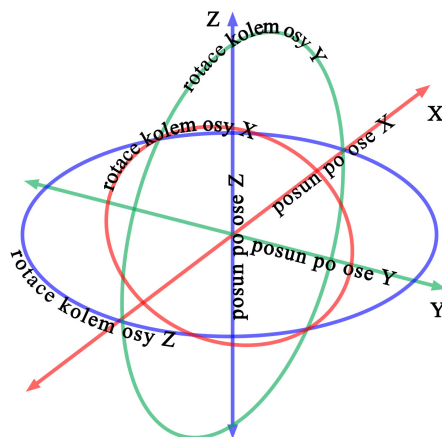
$$M_N^B(\phi, \theta, \psi) = M_2^B(\phi) M_1^2(\theta) M_N^1(\psi) \quad (2.4)$$

$$M_N^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2.2 Transformace z aerodynamického do letadlového souřadného systému

Podobně jako u předchozí transformace, transformační matice z Aerodynamického souřadného systému do BFF vypadá následovně [30]:

$$M_{BA} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos -\beta & \sin -\beta & 0 \\ -\sin -\beta & \cos -\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



Obrázek 2.8: Šest stupňů volnosti [21].

2.3 Pohybové rovnice

Všechny pohybové rovnice jsou nelineární, se „šesti stupni volnosti“ (obrázek 2.8) orientované v letadlovém souřadném systému dle obrázku 2.5 (BFF).

2.3.1 Předpoklady

Předpokládejme letoun jako tuhé těleso. Tím je myšleno ideální těleso, jehož tvar a objem zůstanou účinkem libovolně velkých sil nezměněny. Dále předpokládáme, že síly působící na těleso mají pouze pohybové účinky a zanedbáváme tedy veškeré účinky deformačních sil. Tento model tuhého tělesa je používán k teoretickému zkoumání čistě pohybových účinků sil na těleso v případech, kdy jeho tvar a rozměry nelze zanedbat, případně je nutno vzít v úvahu jeho rotaci. Dále uvažujeme podmínky bezvětří bez mechanické nebo termické turbulence. Důležitým předpokladem je omezení vlastností vzduchu na nestlačitelné chování. Pro zjednodušení budeme považovat hmotnost letounu za konstantní [26].

Jelikož je pozice těžiště úzce spojená s letovými vlastnostmi letounu, zavádíme pojem centráž, který určuje pozice, ve kterých se těžiště může nacházet, aby výrazně neovlivňovalo stabilitu letu a manévrovací schopnosti letounu. Pokud je těžiště příliš blízko zadní centráži letounu, může být letoun hůř ovladatelný. Snížená letová stabilita může být způsobena i tím nejmenším pohybem ovládacího prvku letounu. Na druhou stranu, k nízké citlivosti podélného řízení může dojít, pokud je těžiště příliš blízko přední centráže letounu.

Řídící plochy letounu vytváří přídavné aerodynamické síly, které tím že se jejich průsečík nachází v určité vzdálenosti od těžiště, vytváří momenty k hlavním osám, což způsobuje rotaci letounu (manévrování). Toto je princip manévrování letounu. Vývážený klopivý moment je způsoben pohybem vztlačových klapek umístěných symetricky na obou křídlech letadla. Vybočení letounu je řízeno směrovým kormidlem a klonění je docíleno pomocí ovládnání křidélek. Pomocí systému vyvážení je pilot schopen měnit množství působící síly na řízení a tím dosáhnout snazšího manévrování letounu [3].

2.3.2 Diferenciální rovnice polohy

Tento vztah určuje polohové úhly letounu v čase (ϕ, θ, ψ) : Vztahy v rovnicích 2.7, 2.8 a 2.9 definují diferenciální zápis pro výpočet časové změny Eulerových úhlů [31].

$$\dot{\phi} = p + (q \sin \phi + r \cos \phi) \tan \theta \quad (2.7)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (2.8)$$

$$\dot{\psi} = \frac{q \sin \phi + r \cos \phi}{\cos \theta} \quad (2.9)$$

2.3.3 Diferenciální rovnice pozice

K určení přesných souřadnic letounu (zeměpisná šířka, zeměpisná délka a výška) v globálním polohovém systému jsou LLA souřadnice počítány pomocí následujících rovnic:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\mu} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_E}{(N_\mu + h) \cos \mu} \\ \frac{V_N}{M_\mu + h} \\ -V_D \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

kde M_μ a N_μ jsou definované jako:

$$M_\mu = N_\mu \cdot \frac{1 - e^2}{1 - e^2 \sin^2 \mu} \quad (2.11)$$

$$N_\mu = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \mu}} \quad (2.12)$$

s následujícími konstantami, které vychází z popisu modelu Země:

$$a = 6378137.0[m] \quad (2.13)$$

$$f = 0.0034[1] \quad (2.14)$$

$$e = 0.0818[1] \quad (2.15)$$

Transformace rychlostí z letadlového souřadného systému do rychlostí v souřadném systému NED je popsána v následujícím formátu:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{bmatrix} = M_{ob} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

kde transformační rovnice M_{ob} má níže uvedený tvar:

$$M_{ob} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.3.4 Diferenciální rovnice síly

Pohybové rovnice pro letadlo vychází z druhého Newtonova zákona pro každou částici hmoty letounu a jeho následnou integraci pro celý letoun, kde písmeno F značí vektor síly, a zrychlení a m hmotnost [31]:

$$d\vec{F} = \vec{a}.dm \quad (2.18)$$

Pokud pracujeme se zrychlením každé částice, musíme do výpočtů zahrnout přírůstky jeho rychlosti z lineárních rychlostí (u, v, w) ve směru každé souřadnicové osy a také přírůstky kvůli úhlové rychlosti kolem jednotlivých os (p, q, r) , jako je vyobrazeno na obrázku 2.5. Posledními složkami jsou specifické síly (f_x, f_y, f_z) . Jednotkami výsledných rychlostí jsou $[m.s^{-1}]$ [31].

$$\dot{u} = rv - qw - g \sin \theta + f_x \quad (2.19)$$

$$\dot{v} = pw - ru + g \cos \theta \sin \phi + f_y \quad (2.20)$$

$$\dot{w} = qu - pv + g \cos \theta \cos \phi + f_z \quad (2.21)$$

2.3.5 Momentové diferenciální rovnice

Momentové diferenciální rovnice jsou pro rotace kolem základních os BFF naformulovány pomocí rovnic 2.22, 2.23 a 2.24. Časová změna úhlových rychlostí je v nich vyjádřena jako kombinace součtů momentů od aerodynamických a propulzních sil ($\sum L, \sum M, \sum N$), kvadratických momentů setrvačnosti kolem základních os v BFF (I_{XX}, I_{YY}, I_{ZZ}), deviačního momentu I_{XY} a samotných úhlových rychlostí [31].

Fyzikálním rozměrem pro úhlové rychlosti je $[rad.s^{-1}]$.

$$\dot{p} = \frac{\sum LI_Z + \sum NI_{XZ} + pqI_{XZ}(I_X - I_Y + I_Z) - qr(I_X^2 - I_Y I_Z + I_{XZ}^2)}{I_X I_Z - I_{XZ}^2} \quad (2.22)$$

$$\dot{q} = \frac{\sum M - pr(I_X - I_Z) + I_{XZ}(r^2 - p^2)}{I_Y} \quad (2.23)$$

$$\dot{r} = \frac{\sum LI_{XZ} + \sum NI_X + pq(I_{XZ}^2 - I_X I_Y + I_X^2) - qrI_{XZ}(I_X - I_Y + I_Z)}{I_X I_Z - I_{XZ}^2} \quad (2.24)$$

3. Historie leteckých vizualizačních systémů

Letecké řídicí a vizualizační systémy se za posledních 100 let výrazně změnily. Nástupem kompaktních, výkonných digitálních zařízení se výrazným způsobem rozvinulo zpracování dat v reálném čase. Tento rozvoj umožnil zásadní transformaci z jednoúčelových přístrojů na multifunkční displeje.

Samotná historie letových displejů může být členěna do tří technologických období [19]:

- mechanická éra,
- elektro-mechanická éra,
- elektro-optická éra.

3.1 Mechanická éra

Mechanická éra dominuje úplnému začátku vývoje leteckých systémů. Za první stroj těžší než vzduch se považuje letoun postavený bratry Wrightovými, jehož první let úspěšně proběhl v roce 1903. Již na tomto letounu bylo několik přístrojů pro vizualizaci letových dat a to přístroj pro měření vzdušné rychlosti, ukazatel směru proudění vzduchu a otáčkoměr motoru [19].

Klíčovým ukazatelem byl indikátor úhlu proudění vzduchu udávající stoupání nebo klesání letounu, především při ztrátě vzlaku na křídle, kdy letoun začne výrazně klesat. Pro bezpečný průběh letu je tedy tento parametr nezbytný a díky tomu se zachoval až do dnešních dob [19].

I přes prvotní úspěch bratří Wrightů a dalších téměř deset let plných úspěšných letů, nedošlo k významnému vývoji v oblasti leteckých přístrojů. Samotné přístroje měly k dokonalosti poměrně daleko a zásadní tak zůstávaly smysly pilota [19].

K významnějšímu rozmachu došlo až během 1. světové války, kdy byl kladen větší důraz na vývoj letecké techniky. To vedlo k mnoha technickým a technologickým změnám, které zvyšovaly spolehlivost a bezpečnost letecké techniky. Tyto události stály na počátku rozvoje letecké dopravy. Správnost směru tohoto vývoje lze podložit prvním přeletem Atlatického oceánu. Samotný přelet proběhl v květnu roku 1927 a byl realizován pilotem Charlesem Lindberghem a jeho letounem s názvem Spirit of St. Louis. V pilotní kabině tohoto letounu se nacházelo již výraznější množství letových přístrojů a ukazatelů, kterými byly periskop, rychloměr, výškoměr, směrový setrvačnický, zatáčkoměr, otáčkoměr motoru, indikátory tlaku oleje a paliva, indikátor teploty oleje a palubní hodiny. Vyobrazení palubní desky letounu Spirit of St. Louis je na obrázku 3.1 [19].

O dva roky později poručík James Doolittle prokázal spolehlivost přístrojů odvážným a úspěšným letem „naslepo“, tedy pouze pomocí leteckých přístrojů a bez orientace výhledem



Obrázek 3.1: Palubní deska letounu Spirit of St. Louis [2].

z pilotní kabiny z místa A do místa B. Klíčem jeho úspěchu byla spolupráce s Paulem Kollsmanem, vývojářem citlivého výškoměru, a s Elmerem Sperrym, který byl výrazným průkopníkem gyroskopických systémů. Pro tento let byl Doolittlův letoun Consolidated NY-2 speciálně vybaven na svou dobu větším množstvím pokročilých přístrojů, které zahrnovaly Sperryho gyroskopický umělý horizont, směrový setrvačnick, kompas, zatáčkoměr, ukazatel vzdušné rychlosti, variometr a speciální Kollmanův výškoměr [19].

3.2 Elektro-mechanická éra

Díky rozvoji elektrických přístrojů, mohly být do letounů instalovány systémy založené již na elektro-mechanických principech fungování. Roku 1934 byl letoun s názvem Lockheed Electra představen jako jeden z prvních letounů se všemi přístroji ovládanými elektricky [19].

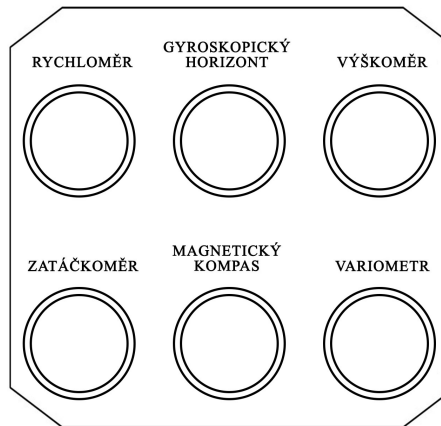
Během 40. let 20. století a následně v období druhé světové války došlo k první standardizaci zobrazování letových dat. Díky vývoji známého letounu Avro Lancaster, který sloužil během druhé světové války k dálkovému bombardování, byl návrh přístrojové desky optimalizován pro přesnou navigaci. K běžným letovým přístrojům byly přidány především radiolokační a naváděcí přístroje. Uspořádání základních letových přístrojů bylo později známo jako tzv. základní šestka. Postupnými úpravami tohoto modelu nakonec vznikl další standard zvaný základní T [19].

3.2.1 Základních šest

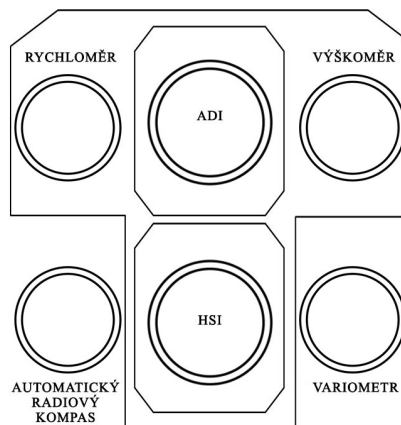
Podstatou rozložení základní šestky bylo upřednostnění nejdůležitějších letových přístrojů a jejich umístění přímo do vizuálního pole pilota. Šlo především o rychloměr, gyroskopický horizont, výškoměr, zatáčkoměr, magnetický kompas a variometr. Přístrojová konfigurace podle pravidla „basic six“ je zobrazena na obrázku 3.2 [19].

3.2.2 Základní T

Koncem 50. let 20. století vojenské letectví USA vyčlenilo tým inženýrů, pilotů a dalších specialistů, určený k vytvoření kompletního přístrojového panelu. Tento projekt byl nazván Integrated Instrument System (IIS). Důvodem vzniku tohoto projektu, byly zvyšující se



Obrázek 3.2: Přístrojová konfigurace podle formátu „basic 6“.



Obrázek 3.3: Přístrojová konfigurace podle základního T pro civilní letouny.

nároky na rychlejší a přesnější čitelnost palubních přístrojů. Řešením bylo zobrazení všech letových dat (úhel náběhu, Machovo číslo, rychlost, výška a vertikální rychlost) na vertikální pohyblivé pásky, umožňující rychlejší odečítání příslušných hodnot oproti původním „kulatým“ přístrojům. Mezi dvěma skupinami pásek byl umístěn umělý horizont a pod ním se nacházel navigační gyrokompas HSI. Výsledný tvar rozložení přístrojů tedy připomínal písmeno T [19].

Pro civilní leteckou dopravu byl tento návrhový model pozměněn. Namísto posuvných pásek byly použity kulaté přístroje. Model základního T se v této podobě používá dodnes prakticky ve všech elektro-mechanicky řízených civilních dopravních letounech. Obrázek 3.3 zobrazuje přístrojovou konfiguraci podle civilního konceptu „basic T“ [19].

3.2.3 Umělý horizont (ADI)

ADI kombinuje funkce předchozích třech přístrojů z původního uspořádání základní šesty v jeden:

- umělý horizont,
- letový direktor,



Obrázek 3.4: Umělý horizont [4].

- zatačkoměr s příčným relativním sklonoměrem.

Dle obrázku 3.4 můžeme vidět, že přístroj je složen z několika částí:

- Umělý horizont - světle modrá páska značí oblohu a černá symbolizuje zemi, zároveň zobrazuje i úhel klonění a klopení vůči statickému symbolu letounu uprostřed přístroje. Stupnice klonění je umístěna na horním okraji přístroje. Klopení je znázorněno stupnicí procházející středem celého přístroje.
- Letový direktor - obsahuje dvě žluté, na sebe kolmé, linky, které zobrazují stranové a vertikální navádění pro udržení plánované letové dráhy.
- Příčný relativní sklonoměr - je připojen k čelní straně přístroje a slouží ke koordinaci zatačky, tedy k tomu, aby byla zatačka prováděna bez skluzu či výkluzu.
- Signalizátory poruchy - varují, nebo upozorňují na situace, při nichž je třeba zásah posádky. Detekují nesrovnalosti mezi dvojicemi přístrojů v pravé a levé části palubní desky. Jednotlivé přístroje z každého páru získávají data z jiného zdroje a tím zajišťují jejich nezávislost. V případě rozdílu odečtení hodnot musí posádka rozhodnout, který z přístrojů zobrazuje validní data [19].

3.2.4 Indikátor horizontální situace

Indikátor horizontální situace (HSI) kombinuje funkce tří přístrojů z předchozí generace základní šestky [19]:

- gyroskopický a magnetický kompas,
- radiokompas,
- dálkoměr.

Přístroj HSI (obrázek 3.5) funguje dle nastaveného režimu, buď jako směrový gyroskopický ukazatel nebo jako magnetický kompas. Lze tedy z něho odečíst hned několik hodnot:

- Směr letu - je indikován rotací kompasu oproti statickému ukazateli ve středu horní části přístroje.



Obrázek 3.5: Indikátor horizontální situace[24].

- Letový kurz - je znázorněn pevným ukazatelem indikujícím kurz na rotujícím ciferníku kompasu. Jeho aktuální hodnota je zároveň zobrazena v pravém horním rohu přístroje.
- Zvolený směr letu - je znázorněn nastavitelným směrovým ukazatelem na rotujícím ciferníku kompasu. Ovladačem pro nastavení směru letu lze nastavit kurz relativně vzhledem k růžici kompasu.
- Odchylka azimutu - od zvoleného relativního směru, nebo od ILS lokalizačního paprsku je reprezentována bočním posunem vůči ukazateli odchylky kurzu.
- Odchylka ve vertikálním směru - zobrazuje vychýlení od ideální sestupné dráhy a je získána z ILS sestupové dráhy a vykreslena na svislé stupnici.
- Relativní orientace - informace je zobrazena relativním orientačním ukazatelem vůči kompasu. Ten je nezávisle ovládán z rádio-navigačního vybavení [19].

3.3 Elektro-optická éra

V 70. letech 20. století výrazně vzrostl letový provoz a byly zlepšeny rádiové a navigační systémy. Technologie elektro-mechanických zařízení při komplexnějších letových trasách nedokázala jednoznačně a intuitivně posádce zprostředkovat letová data. Technologie CRT, dříve používána pouze armádou, však nabízela řešení. Sice zprvu limitující světlost a kontrast CRT vedl pouze k monochromatickým multifunkčním displejům, avšak v příznivějším prostředí civilní letecké dopravy nakonec výustil v použití již barevných variant elektronických letových systémů v podobě multifunkčních displejů [19].

Vývoj CRT technologie pro účely letových přístrojů v civilním sektoru začal v polovině 70. let 20. století v USA a tvořil součást projektu vývoje nadzvukové dopravy. Po zastavení projektu amerického nadzvukového dopravního letounu byl vývoj na bázi CRT přesunut do NASA. Výsledky projektu byly následně zahrnuty do vývoje letounu Boeing 737 jako součást programu TCV (Terminal Configured Vehicle). První uplatnění našla technologie letových displejů v letounech Boeing 757 a 767 [19].



Obrázek 3.6: HUD - Head Up Display [13].

3.3.1 Primární letový displej

Hlavním vizualizačním letovým přístrojem se tedy stal primární letový displej. Ten zahrnuje vizualizaci všech důležitých letových veličin pomocí umělého horizontu, indikátoru vzdušné rychlosti letu, výškoměru, indikátoru vertikální rychlosti, indikátoru příčného relativního sklonoměru a další. Začal se používat především v kombinaci s daty z gyrokompasu a radiokompasu. Tato konfigurace se prakticky používá dodnes v celé řadě letounů [19].

3.3.2 Průhledový displej

Na začátku 40. let 20. století díky Telecommunications Research Establishment (TRE) ve vedení výzkumu radarů Spojeného království bylo zjištěno, že noční piloti královského letectva (RAF) mají při navádění letounů k jejich cílům problémy s reagováním na verbální instrukce od radistů. Během následných experimentů s přidáním radarového displeje pro pilota bylo zjištěno, že při tomto řešení měli piloti opět problém a to při nahlížení ze světlých displejů na temnou oblohu, kde hledali svůj cíl. V říjnu 1942 se podařilo úspěšně zkombinovat obraz z radaru a gyroskopického zaměřovače a promítnout ho přímo na rovnou plochu čelního skla. Zobrazovací sada přístrojů také obsahovala umělý horizont, který zjednodušoval létání pomocí takto vytvořeného průhledového displeje [15].

V roce 1955 úřad pro námořní výzkum a vývoj amerického námořnictva (ONR) přišla s konceptuálními návrhy průhledových displejů, za účelem zjednodušení pilotáže moderního proudového letounu. Sice v té době nebyl tento výzkum zakomponován do vývoje nového letounu, přesto tento hrubý návrh, který vyvinuli obsahoval všechny náležitosti dnešních moderních průhledových displejů [20].

První letoun, který vstoupil do aktivní služby u RAF s již vestavěným průhledovým displejem byl v 70. letech 20. století Hawker Siddeley Harrier se svislým vzletem. Nad konvenčními elektromechanickými přístroji byl umístěn zmíněný průhledový displej. Na dnešní standardy to byl malý displej, jeho náhled byl tvořen čtyřmi výstupními objektivy a poskytoval skromné zorné pole 14 stupňů. Z technického hlediska obsahoval průhledový displej CRT a kolimační optiku. Symbolika byla vytvářena vzdáleně zařízením obsahujícím vlnový generátor a CRT řídicí elektroniku. Na displeji byla používána pouze kurzíva a zajišťovala tak čitelnost symboliky i během denního světla [19]. Displej obsahoval hned několik

přepínatelných režimů pro maximalizování využití. Jednotlivé režimy průhledového displeje zahrnovaly módy pro podporu:

- navigace,
- vzletu a přistání,
- vzdušného boje,
- útoku na pozemní cíle.

Během poslední doby se toto původně výhradně vojenské zařízení dostává také do civilní letecké dopravy, kde se využívá při obtížnějších manévech jako je např. vzlet nebo přistání za snížené viditelnosti. Technicky se jedná o průhledový displej, na kterém jsou vybraná letová data, a který se sklápí do zorného pole pilota, jak je vyobrazeno v levém horním rohu na obrázku 3.6 [19].

4. Současný stav leteckých vizualizačních systémů

V této kapitole je popsán princip fungování dnešních průhledových displejů, rozbor jejich symboliky a případy běžného využití této technologie. Dále je zde nastíněn směr vývoje vizualizačních systémů v blízké budoucnosti.

4.1 Současný stav řešení průhledových displejů

Navzdory tomu, že průhledový displej začal svůj vývoj jako zbraňový zaměřovací systém, netrvalo dlouho a začal být naplňován potenciál této technologie, tedy množství důležitých informací zobrazovaných touto technologií. Především se jedná o zobrazení základních letových veličin. V posledních letech kromě poskytování letecké navigace a letových veličin bylo možné do systému HUD zakomponovat video senzor ze systému FLIR (Forward-Looking InfraRed), jehož promítnutí do průhledového displeje docílí zobrazení okolní scény během nočního provozu, jako za denního světla. Další provozní funkcí je promítání kolimačního obrazu se zaostřením na nekonečno s překrýváním výhledu pilota, který pak nemusí přeastřovat zrak pro čtení dat z přístrojů, protože jsou všechna klíčová data o letu a misi dostupná na průhledovém displeji propojeném s reálným světem [19].

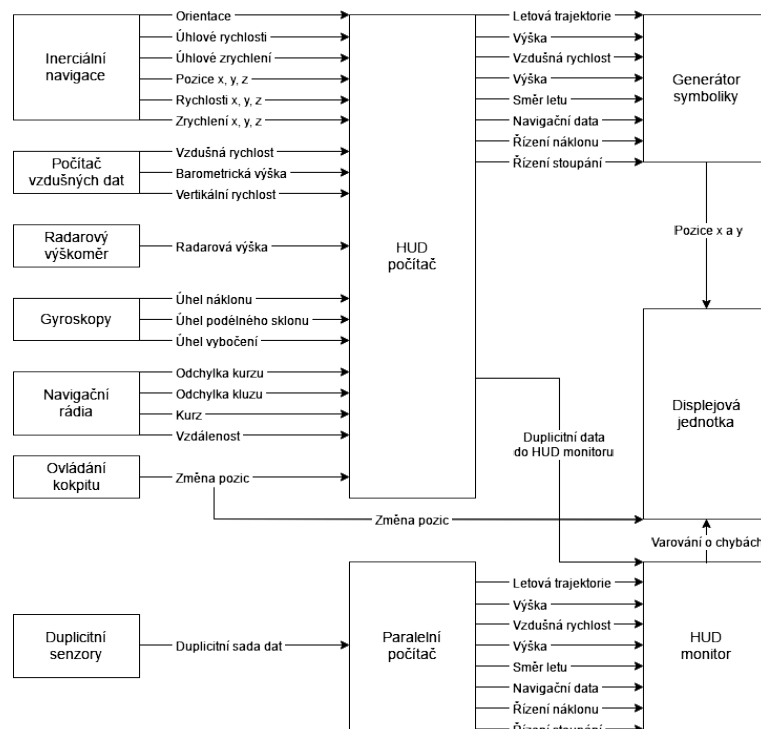
Samotný princip průhledového displeje není technicky složitý. Uvnitř přístrojové desky je umístěn silný světelný zdroj, který přes průsvitný displej a optickou soustavu zrcadel přenáší obraz na speciální průhledovou desku. Průhledová deska zajišťuje správné překrytí obrazu, čímž zlepšuje jeho ostrost.

Kromě leteckého sektoru se dnes vyvíjí průhledové displeje pro mnoho dalších oborů. Kompaktní HUD jsou zařazeny i do výbavy automobilů, kde dovolují řidiči zaměřit vizuální pozornost na silnici a tím zvýšit úroveň aktivní bezpečnosti.

4.1.1 Datová architektura

Většina průhledových displejů vyžaduje značné zpracování dat, protože sbírají data z mnoha senzorů a transformují informace do grafického výstupu. Systémová architektura definuje jak budou data zpracována a jak průhledový displej provede chybové kontroly a ověření systému.

Samotné zpracování dat probíhá zejména ve dvou součástech. V počítači průhledového displeje a v generátoru symboliky. Počítač průhledového displeje sbírá data z dostupných senzorů a provádí výpočty o stavu letounu. Některá data ze senzorů (např. barometrická výška) jsou jednoduše propuštěna dál a některá jsou vysoce zpracovaná, jako je odchylka dat z přistávacího systému, absolutní výška nebo radarová výška, při použití pro generování syntetické přistávací dráhy do zorného pole.



Obrázek 4.1: Schéma datové architektury civilních průhledových displejů [22].

Různé položky dat, které mají být vyobrazeny (úhel směru letu, výška, navigační data apod.), jsou poslána do generátoru symbolů. Generátor symbolů převádí tato přepočítaná data na symboliku (série čar, oblouků a znaků), které jsou dále poslány do displejové jednotky jako pozice x, y.

Civilní průhledové displeje obsahují důsledné vnitřní kontroly zahrnující duplicitní paralelně vedené senzory a spoje pro zpracovaná data vedoucí ke generátoru symbolů. Výpočty jakýchkoliv rozdílů mezi daty zabraňují zobrazování chybných dat. Obrázek 4.1 zobrazuje typickou systémovou architekturu zpracování dat pro civilní průhledový displej [22].

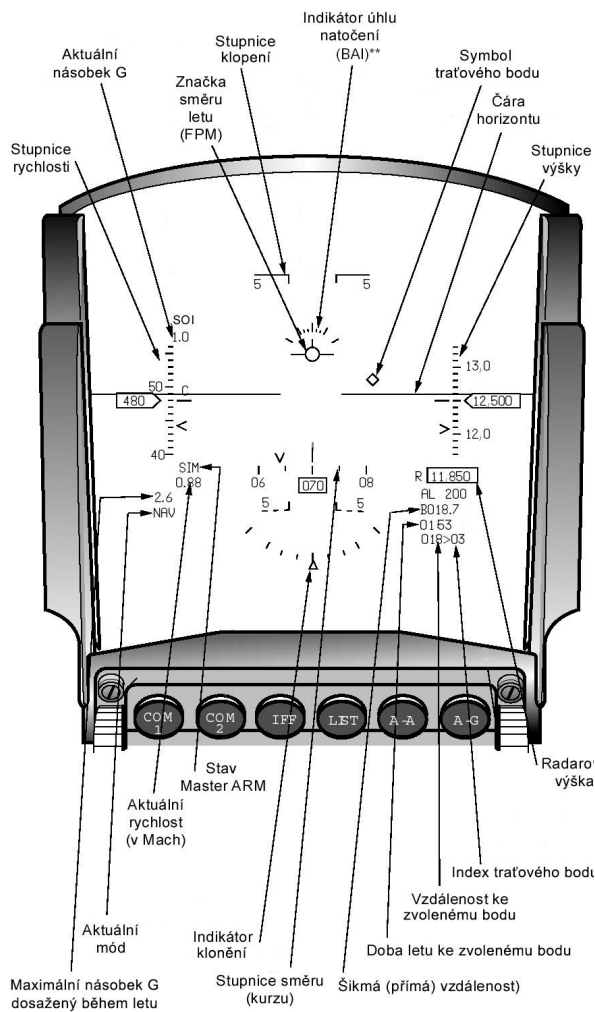
4.1.2 Rozbor režimů průhledových displejů

Pro ilustraci symboliky budou v této části popsány vybrané funkční režimy průhledového displeje z víceúčelového stíhacího letounu F-16 Fighting Falcon [5].

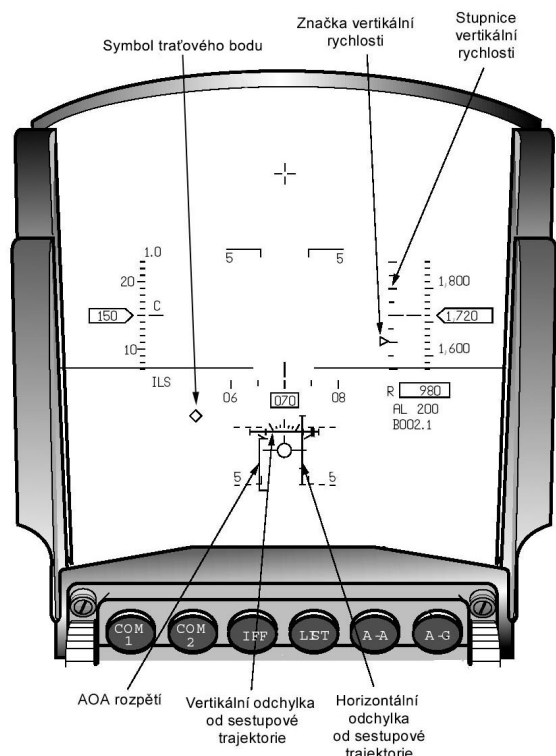
Základním režimem je v F-16 [5] režim navigační (NAV), který je vyobrazený na obrázku 4.2. Uvedený režim poskytuje dostatečné množství zobrazených informací pro bezpečný let. Mezi jeho klíčové prvky patří umělý horizont, indikátor vzdušné rychlosti, indikátor výšky, příčný relativní sklonoměr a ukazatel kurzu [5].

Stupnici rychlosti symbolizuje proužek, který se posouvá dle měnící se rychlosti. Symbol „C“ vpravo od pásky zobrazuje, zda zobrazujeme rychlost kalibrovanou (CAS), skutečnou (TAS) nebo pozemní (GS). Samotnou stupnici je možné vypnout a uživatel může zvolit pouze zobrazení digitálních údajů. Zarážka vpravo od stupnice znázorňuje ideální rychlost potřebnou k dosažení zvoleného bodu na trase v předepsaném čase [5].

Ukazatel směru letu (FPM) je umístěn uprostřed displeje. Aktuální sklon letové trajektorie závisí na úhlu náběhu a nemusí tedy nutně odpovídat směru podélného sklonu letounu. Hned vedle jsou vyobrazeny symboly směru ke zvolenému bodu na trase a uka-



Obrázek 4.2: Navigační režim [5].

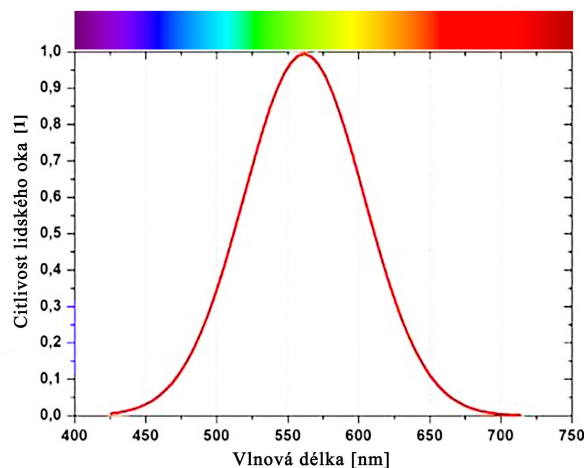


Obrázek 4.3: Přistávací režim [5].

zatel zvoleného bodu na trase. Pokud je symbol směru ke zvolenému bodu vycentrován a jeho ukazatel směřuje vpřed, značí tím nejkratší cestu k danému bodu. Aktuální kurz ve stupních je zobrazen v dolní části displeje na posuvné stupnici. Zarážka nad stupnicí ukazuje odchýlení od plánované trasy posunem vlevo, nebo vpravo. Pokud je směr správný, zarážka je uprostřed [5].

Stupnici klonění symbolizuje tzv. „žebřík“, a společně s umělým horizontem pomáhá určit podélnou orientaci letounu v prostoru. Pro rychlejší a uživatelsky intuitivní čtení hodnot jsou na „žebříku“ krátké svislé čáry mířící vždy směrem k horizontu. Úhel klonění může být vyobrazen v horní nebo dolní části displeje a zobrazuje úhel mezi horizontem a rovinou XY letadlového souřadného systému [5].

Stupnice výšky je pro zobrazování unifikovaného pohledu displeje tvořena posuvným proužkem, jehož princip značení je stejný, jako u stupnice rychlosti. Opět lze pro větší přehlednost proužek vypnout a zobrazovat pouze digitální údaj [5].



Obrázek 4.4: Citlivost lidského oka na různé vlnové délky [17].

Dalším a neméně důležitým režimem je přistávací režim (ILS), který je zobrazen na obrázku 4.3. Při zhoršených podmínkách viditelnosti se nadále nelze spoléhat na vizuální orientaci a zároveň je třeba rychle nasměrovat letoun na osu přistávací trajektorie. Díky správně nastavené symbolice je pilotovi tento manévr výrazně usnadněn. Při vysunutí podvozku se vedle značky směru letu (FPM) zobrazí rozmezí úhlu náběhu (AOA). Tento symbol se posouvá vůči značce směru letu tak, aby zobrazoval aktuální úhel náběhu. Dále jsou zde zobrazeny dvěma na sebe kolmými ukazateli vertikální a horizontální odchylka od ideální sestupové trajektorie. Přičemž vycentrováním obou odchylek se letoun dostane do ideální sestupové trajektorie [5].

4.1.3 Monochromatické zobrazení

Důvod používání monochromatické zelené barvy v průhledových displejích je stejný jako u nočního vidění (NVD). Lidské oko je nejcitlivější na světlo s vlnovou délkou kolem 555nm, což dle obrázku 4.4 odpovídá zelené barvě. Navíc je z dlouhodobého hlediska daleko příjemnější pozorovat zelené displeje, než kterékoliv jiné. Zelená barva je také nejméně závislá na světlených podmínkách. Displeje lze snadno číst ve dne i v noci. Lidské oko díky vyšší citlivosti na zelenou také dokáže rozpoznat více odstínů zelené, než kterékoliv jiné barvy. Výsledný obraz je v odstínech zelené i kvůli použití fosforu na stínítku [29].

4.1.4 Vylepšený systém letového vidění

Vylepšený systém letového vidění (EFVS) je systém pro snímání okolního světa z letadla a poskytování obrazu, ve kterém mohou být objekty lépe rozeznatelné. Jinými slovy zařízení poskytuje obraz, který je lepší než lidské vidění. EFVS obsahuje různé senzory jako je např. barevná kamera, infračervená kamera, radar a typicky displej pro pilota ve variantě head-up nebo head-down. EFVS může být kombinován se systémem syntetického vidění a vytvářet tak kombinovaný systém vidění [7].

EVS (Enhanced Vision System) bývá založen na infračervené kameře směřující dopředu, která poskytuje teplotní obraz světa a zobrazuje teplo vyzářené ze světelné řady před a na letištní dráze. Od roku 2007 sice letiště mění světla na energeticky účinnější LED osvětlení, které má nižší teplotní profil, ale nové EVS jsou multispektrální a umožňují zachycení jak



Obrázek 4.5: EFVS - Enhanced Flight Vision System [27].

světla z LED osvětlení, tak i tepelnou stopu předchozí generace letištních světelných řad. Budoucí návrhy EVS se zaměřují na vidění za všech světelných podmínek a za každého počasí. Toho může být dosaženo inteligentním slučováním obrazů a dat z kamer pracujících ve viditelném, infračerveném a MMW spektru.

Hlavním účelem EVS je asistence při vzletu, přistání, nebo poježdění po letišti během snížené viditelnosti, kdy by byly tyto manévry nebezpečné. EVS má schválení FAA pro přistání pouze v případě, že se jedná o systém zkombinovaný s HUD. V tomto případě se systém nazývá EFVS.

Když se pilot přibližuje k zemi a chystá se přistát, musí mít vizuální referenci odkazující na letiště. Těmito vizuálními referencemi je například vodorovné značení na přistávací dráze (zebra), osvětlení, nebo přibližovací světelná řada. Pokud pilot ztratí vizuální referenci v přistávací výšce, musí ukončit přistávací manévr, znovu se zařadit do letištního okruhu a pokusit se o další přistání, nebo přistát jinde. Nad rozhodovací výškou používá pilot spíše letové displeje. Při přistávání se pilot musí dívat ven a identifikovat vizuální referenci. V této fázi se pilot střídavě dívá na displeje a ven z okna. Toto střídání může být eliminováno právě použitím průhledového displeje, tedy zobrazením informací pilotovi zatímco se dívá ven [33].

4.2 Inovace

Vývoj avioniky neustále pokračuje ve všech oblastech. Od bezpečnostních prvků přes systémy řízení až po zvyšování komfortu cestujícím. V této sekci budou popsány některé inovace z oblasti vizualizace letových dat, které pravděpodobně nejvíce ovlivní budoucnost vizualizačních systémů.

4.2.1 Interaktivní displej pro kokpit ODICIS

„One Display for a Cockpit Interactive Solution“ (ODICIS), neboli řešení jednoho interaktivního displeje pro kokpit. Jedná se o inovaci představenou v roce 2012 společností Thales Avionics, která patří mezi přední světové poskytovatele pozemních a integrovaných systémů pro civilní letectví. Jejich koncept kokpitu odhaluje mnoho inovací a udává směr pravděpodobného vývoje vzhledu kokpitů v následujících letech [23].



Obrázek 4.6: One Display for a Cockpit Interactive Solution [23].



Obrázek 4.7: Prototypové řešení Avionics 2020 [12].

ODICIS technologie klade důraz na zobrazení velkého množství požadovaných informací při udržení maximální přehlednosti celého zobrazení, čímž má usnadnit práci pilotům. Očekává se, že se v budoucnu stane novým standardem kokpitů pro civilní letectví [23].

Ambicí interaktivního displeje je snížení uživatelem vnímané složitosti leteckých systémů a zjednodušení ovládání. Současně tím bude docíleno rozšíření portfolia uživatelů o piloty s menším množstvím technických znalostí. Vizí ODICIS je poskytnutí jasného a intuitivního přehledu potřebných informací k bezpečnému letu.

4.2.2 Avionics 2020

Po představení návrhu ODICIS vznikl další úspěšný koncept. V roce 2013 byl na mezinárodním veletrhu Paris Air Show odhalen projekt s názvem Avionics 2020. Tento koncept kokpitu je sice podobný jeho předchůdci, vykazuje ovšem vyšší zaměření na individuální přizpůsobení se pilotovi a systematické předvídání průběhu letu. K dispozici je také časová osa, na které se zobrazují změny v letovém plánu. Dále nabízí podrobné informace o detekci problémů a možných řešení. Celkové ovládání je inspirováno manipulací s dotykovými displeji chytrých telefonů a to z důvodu rychlejšího a méně problémového navyknutí si uživatele na novou technologii [12].

5. Návrh rozhraní průhledového displeje

Při grafickém návrhu je vizuální stránka rozhraní nejdůležitější částí. Špatně navržené rozhraní může situaci spíše zneprůhlednit a zkomplikovat, obzvlášť pokud se jedná o průhledový displej, který může při špatném návrhu stínit výhled z letadla. Tudíž je zde kladen velký důraz na užití správné symboliky, intuitivní rozložení elementů displeje a udržení pilotovi pozornosti na klíčových prvcích rozhraní.

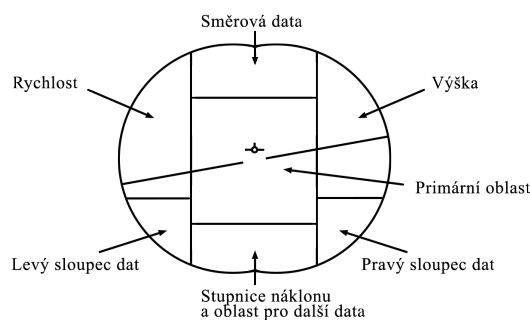
5.1 Popis obecného formátu

Standardizace symboliky průhledových displejů napříč různými typy letounů je důležitá pro maximalizování přenosů pozitivních návyků a minimalizování negativních. Zároveň klade důraz na efektivitu použití displeje pro konkrétní režimy displeje a typ letounu. Ve výsledku je důležitější dbát na podobnost režimů v daném displeji, než na standardizaci napříč typy letounů a to z toho důvodu, aby pilot nebyl vystavován různým formátům symboliky ve stejném letounu při denní rutině, protože s jiným typem letounu se setkává pouze nepravidelně a méně často [22].

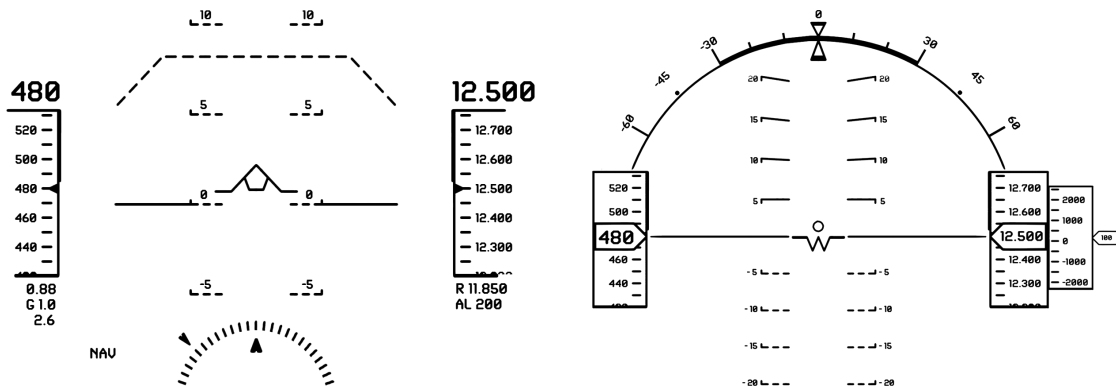
Na druhou stranu není žádoucí dodržovat standardizace v každém případě, jelikož historické standardy symboliky často odrazovaly limitace generátorů symboliky, v čase kdy byly vyvinuty, a neměli by tím omezovat vývoj formátů pokročilých displejů. Hlavním cílem je stále vylepšení výkonu pilota [22].

Definicí symboliky průhledového displeje je často myšlena definice konkrétních symbolů, ale ve skutečnosti se jedná o tři oblasti, které musí být dodrženy a to tvar, velikost a význam konkrétních symbolů, dále umístění v zorném poli a nakonec pohyb symbolů vzhledem k ostatní symbolice [22].

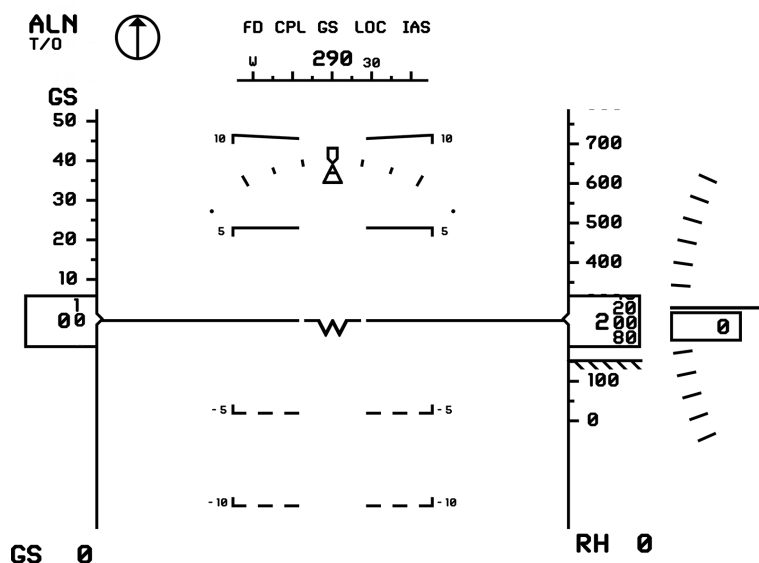
Na obrázku 5.1 jsou vyobrazeny obecně doporučené oblasti pro zobrazovaná data v průhledovém displeji a to ve stejném formátu jako podle standardu základního T (viz. obrázek 3.3), který popisuje umístění prvků na palubní desce [22].



Obrázek 5.1: Schéma rozložení funkčních oblastí pro symboliku průhledového displeje [22].



Obrázek 5.2: První pracovní návrh rozhraní. Obrázek 5.3: Druhý pracovní návrh rozhraní.



Obrázek 5.4: Finální návrh rozhraní.

5.2 Vlastní návrh

V počáteční fázi byl vytvořen první prototyp návrhu (obrázek 5.2), kterým měl být ověřen správný směr vývoje. V tomto případě byl při vytváření návrhu brán ohled především na design, nikoliv na funkční prvky. Z důvodu nevhodné funkčnosti a neintuitivní symboliky bylo od tohoto návrhu upuštěno.

Po důkladnějším nastudování symboliky a po bližším seznámení se s problematikou, byl první návrh přepracován a prakticky všechny prvky prošly úpravou. Vznikl druhý návrh (obrázek 5.3), který byl použit pro další vývoj. Během testování však neobstál kvůli špatné čitelnosti údajů z displeje a nevhodnému designu pro umístění chybějících prvků.

Z důvodu zamítnutí prvních návrhů byl vytvořen návrh třetí, ve kterém byla již aplikovaná správná symbolika. Návrh byl inspirován moderními průhledovými displeji. (obrázek 5.4) Mezi jeho hlavní části patří:

- Umělý horizont - se nachází ve střední části displeje, kde vyjadřuje polohu letounu vůči zemi.

- Úhel klopení - je součástí umělého horizontu a je zobrazován pomocí stupnice klopení (tzv. žebřík), který zobrazuje úhel vychýlení kolem osy Y_B dle obrázku 2.5. Na stupnici jsou vyznačeny úhly po 5° a při zvětšování úhlu stoupání se ukazatele vychylují směrem k horizontu, aby intuitivně vedly pilota zpět do horizontální letové polohy.
- Úhel klonění - v horní části se nachází zaoblená stupnice klonění, která vyjadřuje úhel náklonu kolem osy X_B dle obrázku 2.5. Důležitou součástí je statický ukazatel, který je vyobrazen jako protilehlý trojúhelník a ukazuje na aktuální velikost klonění. Na stupnici jsou vyobrazeny úhly 10° , 20° , 30° a 45° pro provádění správných manévřů.
- Kurs - je v horní části vyobrazen pomocí pohyblivé pásky udávající azimut letu. Jedná se o velikost úhlu rotace kolem osy Z_B dle obrázku 2.5. Aktuální kurs se vždy zobrazuje uprostřed pásky.
- Vzdušná rychlost - je zobrazena v levé části displeje. Zobrazení je tvořeno posuvnými páskami a ukazatelem aktuální rychlosti. Pro snadnější čtení hodnoty slouží druhá posuvná páska doplňující aktuální hodnotu. Pod hlavní stupnicí je umístěn ukazatel rychlosti letadla vůči Zemi (GS).
- Tlaková výška - je zobrazena v pravé části displeje. Výškoměr funguje obdobně jako ukazatel rychlosti. Na stupnici je dále vyznačen symbol Zemského povrchu a značí, v jaké nadmořské výšce se nachází. V dolní části je doplněna i hodnota získaná z radaru, pro určení v jaké radarové výšce nad zemí se letadlo nachází.
- Vertikální rychlost - je prezentována úplně vpravo pomocí grafické interpretace vario-
metru. Jeho úlohou je vyjádřit velikost vertikální rychlosti. K tomu slouží pohyblivý ukazatel na stupnici. Aktuální hodnota vertikální rychlosti je vyobrazována uprostřed variometru.

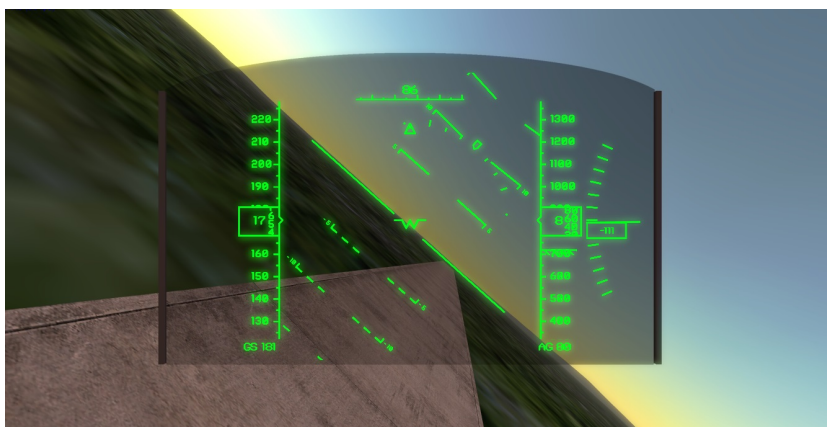
6. Implementace

V této kapitole je shrnut průběh implementace všech součástí aplikace. Dále je zde popsáno vývojové prostředí a průběh integrace aplikace do pohyblivého leteckého simulátoru.

Finální implementace zahrnovala vytvoření 3D scény se správným umístěním všech prvků průhledového displeje, naprogramování jejich logiky chování a konfiguraci ořezových masek pro jednotlivé vrstvy. V další řadě bylo třeba naprogramovat klientskou část komunikace pro připojení k serveru AW-COM-SRV [25], který je propojen s leteckým simulátorem. Po otestování základní funkčnosti přišla na řadu práce s výškovými daty. Bylo navrženo a naprogramováno generování syntetického terénu podle výškových dat a výsledný terén byl zakomponován do hlavní scény. Pro zvýšení realističnosti vjemu byl do scény přidán sklěněný plát, na němž se vykresluje symbolika displeje. Dále byl na vykreslenou symboliku aplikován efekt pro vydávání záře a do celé scény byl vložen denní a noční režim pro simulování různých světelných podmínek. V další fázi byla aplikace přizpůsobena a zkalibrována pro zařízení pro virtuální realitu HTC Vive. Posledním krokem byla integrace do pohyblivého leteckého simulátoru (obrázek 6.6), který se nachází na Fakultě informačních technologií. Finální podoba průhledového displeje a všech prvků ve scéně je vyobrazena na obrázku 6.1.

6.1 Vývojové prostředí

Vzhledem k práci s 3D scénou, rozlehlym terénem, síťovou komunikací a podporou virtuální reality, bylo rozhodnuto pro použití vývojového prostředí Unity.



Obrázek 6.1: Kompletní scéna a vzhled průhledového displeje.

6.1.1 Unity 3D

Unity 3D je multiplatformní herní jádro pro PC, konzole, mobily a web. Je vyvinutý společností Unity Technologies a jeho první verze podporovala pouze OS X a byla představena na celosvětové konferenci společnosti Apple v roce 2005. Od té doby bylo jádro rozšířeno na více než patnáct dalších platform [32].

Unity poskytuje možnosti vývoje pro 2D i 3D aplikace obecného zaměření. Obsahuje výkonné grafické jádro a plnohodnotný grafický editor. Kromě grafického prostředí pro tvorbu, podporuje také vytváření skriptů a to především v jazyce C# a Javascript. Unity je možné provozovat pro nekomerční účely využívajíc bezplatnou licenci [32].

Unity bylo v práci použito pro jeho multiplatformní vlastnosti, podporu virtuální reality a efektivní tvorbu 3D aplikace. Mezi další důvody patří příjemné uživatelské rozhraní a možnost rychlého prototypování při vývoji aplikace.

6.1.2 Virtuální realita HTC Vive

Virtuální realita (VR) je technologie, která umožňuje uživatelskou interakci se simulovaným prostředím. Technologie virtuální reality vytváří prostorovou iluzi scény. Prostřednictvím vizuálních, sluchových, hmatových vjemů se VR využívá pro výcvik v různých odvětvích, jako je vojenství, letectví, lékařství, nebo pro zprostředkování fiktivního světa počítačových her [28].

K vytvoření virtuální reality se používají speciální brýle, ve kterých jsou zabudované gyroskopy a pohybové senzory pro sledování polohy hlavy. Dále jsou uvnitř dva malé HD displeje pro stereoskopické zobrazení. Poslední součástí jsou externí pohybové senzory detekující pohyb brýlí v prostoru [28].

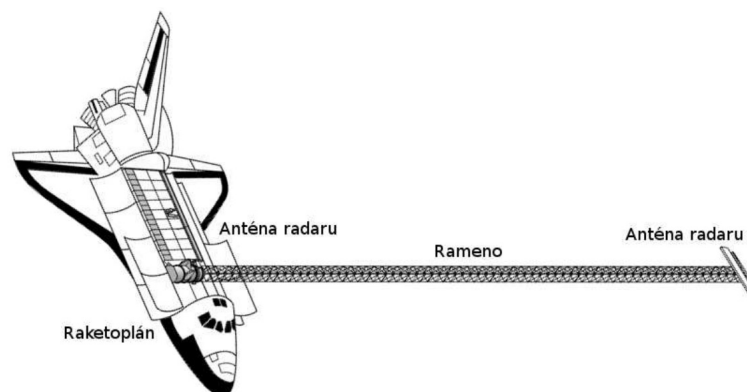
Virtuální realita HTC Vive je složena z headsetu s displeji a zabudovaným gyroskopickým zařízením, dvěma externími senzory pohybu a dvěma sofistikovanými ovladači. V porovnání s jinými VR řešeními se HTC Vive odlišuje možností rozšíření virtuální reality o okolní prostor o velikosti až 5x5 metrů, ve kterém se může uživatel pohybovat. Tento prostor je snímán dvěma senzory pohybu, které mapují prostředí v místnosti, čímž zabráňují nechtěným kolizím [14].

6.1.3 Použité programy

Pro samotný vývoj aplikace byl použit Unity Editor, ve kterém byla vytvořena hlavní scéna obsahující 3D terén a všechny součásti průhledového displeje. Vestavěný textový editor v Unity s názvem MonoDevelop posloužil pro naprogramování logiky chování všech zmíněných prvků a komunikace se serverem. Dalším použitým programem byl Adobe Photoshop CC, ve kterém byl průhledový displej navrhován a později v něm byly vytvořeny všechny jeho součásti. Práci s SRTM daty usnadnil software s názvem VTBuilder, ve kterém byla výšková data zobrazena a následně exportována do formátu s GPS údaji. Zdrojem letových dat byl letecký simulátor X-Plane vyvinutý společností Laminar Research.

6.2 Trojrozměrné zobrazení terénu

Kromě samotného průhledového displeje bylo důležité vytvořit i prvky okolní scény. Pro tento účel byl vytvořen trojrozměrný terén, který do jisté míry dle vstupních dat odpovídá terénu skutečného světa. Terén byl vytvořen podle volně dostupných SRTM dat.



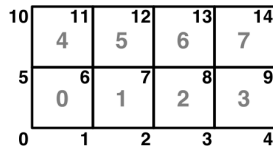
Obrázek 6.2: Schéma raketoplánu Endeavour při misi SRTM [10].

6.2.1 SRTM data

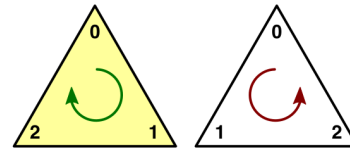
SRTM mise (Shuttle Radar Topography Mission) raketoplánu Endeavour proběhla v roce 2000. Cílem mise bylo nasnímat výškový profil téměř celého zemského povrchu. Toho bylo docíleno pomocí umístěním dvou radarů do raketoplánu. Jeden radar byl umístěn v nákladovém prostoru a druhý byl na oběžné dráze vysunut na rameni do vzdálenosti 60m od raketoplánu. Zemský povrch byl snímán těmito radary v pruzích o šířce 225km a díky vzdálenosti mezi radary bylo možno pomocí interferometrie zrekonstruovat z naměřených hodnot trojrozměrný povrch terénu. Během 11 denní mise provedl Endeavour 176 obletů Země a nasnímal plochu mezi 60° severní a 56° jižní zeměpisné šířky, což tvoří přibližně 80% zemského povrchu. Rozlišení, v jakém byl povrch snímán, odpovídá jednomu výškovému bodu pro každou úhlovou vteřinu, což je přibližně vzdálenost 30 metrů. Takto detailní data byla zveřejněna pouze pro oblast Spojených států amerických a data oblasti zbytku světa jsou k dispozici v rozlišení jednoho bodu za 3 úhlové vteřiny, což odpovídá vzdálenosti 90 metrů. Přesnost dat je určena maximální chybou měření, která je přibližně 20 metrů horizontálně a 16 metrů vertikálně [18].

Komplikací, která se v této databázi [8] vyskytuje, jsou místa bez naměřené výškové hodnoty. Použitá technologie měření nedokázala korektně nasnímat velmi členitý horský terén, nebo zasněžené oblasti. V některých případech se jedná o rozsáhlé plochy. Tento problém se snaží eliminovat pokročilé algoritmy, které interpolací doplňují chybějící hodnoty podle okolních naměřených hodnot. Proces oprav a úprav pokračuje dodnes a průběžně tak vychází další verze SRTM databáze [8].

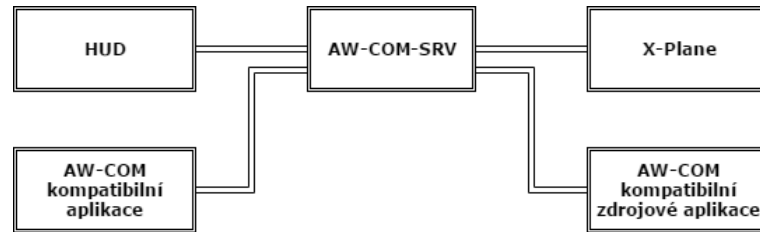
K dispozici jsou data ve verzích SRTM 1, 2 a 3, podle míry interpolace chybějících hodnot. Data jsou strukturována dle kontinentů do jednotlivých adresářů s komprimovanými soubory ve formátu HGT. Každý takový soubor odpovídá čtvercové oblasti o rozloze 1° zeměpisné délky a 1° zeměpisné šířky s rozlišením jednoho bodu každé tři úhlové vteřiny. HGT soubor nemá žádnou hlavičku a je tvořen souvislým blokem binárních hodnot typu *signed short int* bez oddělených řádků. Soubor obsahuje 1201×1201 těchto hodnot, přičemž řádky udávají posun v zeměpisné šířce a sloupce odpovídají posunu v zeměpisné délce. Formát uložení hodnot je big-endian a případná chybně naměřená data mají hodnotu -32768 [8].



Obrázek 6.3: Znázornění jednotlivých vrcholů a jejich indexů [9].



Obrázek 6.4: Viditelnost stěn při různé orientaci trojúhelníků [9].



Obrázek 6.5: Schéma propojení jednotlivých komunikačních modulů.

6.2.2 Repräsentace terénu

Terén je procedurálně generován dle výškových SRTM dat. Celá oblast je rozložena na stejně velké pruhy, které jsou postupně generovány a pozicovány vedle sebe.

V první řadě je nutné pro každý pruh z dostupných SRTM dat vytvořit mříž vrcholů, které hustotou a vzdáleností odovídají posunům v zeměpisné šířce a délce. Pro každý z těchto bodů je třeba nastavit příslušnou výšku.

Z vytvořených vrcholů již lze poskládat trojúhelníkovou síť pro zobrazení terénu. Při definování trojúhelníků je důležité dbát na pořadí přidělovaných vrcholů, protože takto definované trojúhelníky jsou viditelné pouze z jedné strany. Ze které strany je trojúhelník viditelný je dáno pořadím indexů jeho vrcholů. Pokud jsou vrcholy trojúhelníku definovány ve směru hodinových ručiček, trojúhelník je orientován směrem dopředu a je tedy viditelný. Stěny na opačné straně jsou vyřazeny, abychom zbytečně neztráceli čas s vykreslováním vnitřku objektů, které stejně nemají být vidět.

Dále je nutné spočítat normály, abychom mohli určit pod jakým úhlem dopadá světelný paprsek na povrch trojúhelníku. V poslední řadě vytvoříme UV mapu pro naši polygonální síť, abychom na ni mohli aplikovat texturu.

6.3 Komunikační systém AW-COM

Propojení mezi zdrojem dat a aplikací zajišťuje komunikační software AW-COM, který je založen na architektuře klient-server. Server získává data přímo ze zdroje a na vyžádání je odesílá klientovi, přičemž komunikace probíhá přes ethernet a je postavena na protokolu TCP-IP [25].

Komunikaci zajišťuje serverový modul AW-COM-SRV, který je propojen s aplikacemi získávající data (se simulátorem). Na druhé straně v aplikaci průhledového displeje klientskou obsluhu zajišťují skripty SocketScript a TCPConnection, které jsou zabudované v aplikaci a jsou plně automatické. Obě dvě strany se při ztrátě zdroje snaží opakovaně navázat spojení [25].

6.3.1 Modul AW-COM-SRV

AW-COM-SRV je serverovým prvkem, který zapouzdřuje různé zdroje dat. V našem případě užití jde především o komunikaci mezi simulátorem X-Plane a výstupní aplikací této práce.

Různé nastavení a jednotlivé parametry jsou rozepsány zde [25]:

- -p port - určuje na kterém portu server odpovídá, jedná se o povinný parametr,
- -fsx - přepne na režim pro získávání dat z MS Flight Simulator X,
- -xplane - režim pro získávání dat ze simulátoru X-Plane,
- -gpx soubor - režim pro načítání vstupních dat ze souboru,
- -uni - univerzální režim, který volí mezi variantou -xplane a -gpx dle dostupnosti zdroje,
- -sensors - režim pro získávání dat z přístrojů s gyroskopem, akcelerometry, GPS a podobně.

6.3.2 Modul HUD

Slouží jako koncový bod toku dat. Dostává vyžádaná data, která vizualizuje, nebo s nimi dále pracuje. Tento modul je plně závislý na příjmu dat.

6.3.3 Modul AW-COM-XPLANE

Doplňek AW-COM-XPLANE umožňuje přímou komunikaci s leteckým simulátorem X-Plane. Dokáže zobrazovat vybraná data na obrazovce simulátoru a zprostředkovává přeposílání dat do ostatních modulů [25].

6.3.4 Popis komunikačního protokolu

Tento komunikační protokol dokáže předávat velké množství letových dat získaných ze simulátoru v předepsaném formátu.

Požadavek pro získání dat ze serveru probíhá prostřednictvím příkazu GET, nastavení a kalibraci různých parametrů uvnitř aplikací zajišťuje příkaz SET. Formát příkazů je následující [25]:

- GETDATA - toto je základní příkaz pro získání celé sady dat. Používá se především při komunikaci se simulátorem X-Plane, který také posílá celou sadu dat,
- GET:GYRO:END - příkaz pro získávání dat ze zařízení používající gyroskopy, akcelerometry, nebo GPS,
- GET:PRESS:END - slouží pro získávání dat přímo z hardwarových senzorů, například údajů o rychlosti a výšce z tlakových senzorů,
- SETQNH:hodnota:END - příkaz sloužící pro nastavení správné hodnoty QNH v simulátoru.

Data jsou následně poslána ve zprávě v posloupnosti DATA:veličina:hodnota:END. Přesný formát jednotlivých součástí vypadá takto [25]:

- DATA - tato část tvoří hlavičku zprávy, která musí být vždy přítomna,
- :veličina:hodnota - veličina udává o jakou letovou veličinu se jedná, hodnota je vždy s přesností na 6 desetinných míst a určuje velikost veličiny,
- :END - ukončovací sekvence znaků.

6.4 Zpracování letových veličin

Po přijetí zprávy obsahující letové veličiny, dojde k jejímu zpracování a distribuci do zbytku aplikace. Jedna zpráva obsahuje celou sadu veličin a jejich hodnot oddělenými oddělovači. Příklad doručené zprávy je následující [25]:

DATA : LON : 16.696613 : LAT : 49.151146 : PIT : 0.660788 : BAN : -41.741505 : HEA : 86.799469 : ALT : 243.560136 : GAL : 218.207927 : IAS : 89.943786 : TAS : 91.074524 : PWR : 1835203.125000 : RPM : 0.000000 : ACC : 0.314974 : HCM : 0.000000 : VCM : 0.000000 : VS : -0.566650 : FFL : 405.802077 : GS:93.211220 : TMP : 0.000000 : AOS : 0.000000 : GPS : 0.000000 : LFU : 0.000000 : RFU : 0.000000 : OPR : 475735.780884 : OTM : 177.549454 : TIM : 28068.947266 : END

Některé veličiny jsou v jiných jednotkách, než požaduje výsledná aplikace. V této zprávě je například vertikální rychlost v metrech za sekundu, ale stupnice vertikální rychlosti v aplikaci je ve stopách za minutu. Obdobně byly převedeny další veličiny z metrů na stopy a z metrů za sekundu na uzly.

6.5 Integrace do leteckého simulátoru

Pohyblivý letecký simulátor umístěný na Fakultě informačních technologií je složen z několika propojených součástí, které tvoří univerzální šestinohá mechanická plošina, originální kokpit sportovního letounu s leteckými řídicími prvky, projekční jednotka složená ze tří velkoplošných obrazovek a skříní s výpočetními jednotkami a další elektronikou.

Nejdůležitější součástí simulátoru se však nachází „uvnitř“. Simulátor obsahuje matematicko-fyzikální algoritmy pro výpočty sil, které mají působit na pilota a transformační algoritmy, které tyto síly interpretují prostřednictvím pohyblivé plošiny. Dalšími důležitými součástmi je výpočet sil pro generování silové zpětné vazby do řídicí páky, nebo multifunkční letové displeje s dotykovou obrazovkou, které slouží jako primární, nebo jako multifunkční letové displeje.

Kromě dalších výzkumných účelů je tento simulátor určen k výcviku pilotů a simulování různých situací za letu. To je jeden z důvodů, proč bylo vhodné výsledky této práce zintegrovat uvedeného tohoto simulátoru.

Pro zaintegrovaní HUD aplikace do simulátoru byly dostupné dvě zařízení vytvářející virtuální realitu - Oculus Rift a jeho konkurent HTC Vive. Jejich zobrazovací vlastnosti jsou srovnatelné a vhodné. Jediný výraznější rozdíl je v detekci polohy brýlí. Oculus Rift je orientován především gyroskopickým zařízením uvnitř brýlí a korekce je prováděna jedním externím pohybovým senzorem. U HTC Vive je poloha primárně určována dvěma sofistikovanějšími senzory polohy a korekce je prováděna gyroskopem uvnitř brýlí. V rámci této aplikace byla VR umístěna na pohyblivém leteckém simulátoru. Bylo zapotřebí odečíst pohyby plošiny simulátoru a zohlednit pouze pohyby hlavy s brýlemi. Toho bylo docíleno tím, že pohybové senzory byly umístěny přímo na pohyblivou plošinu simulátoru na okraje ob-



Obrázek 6.6: Pohyblivý letecký simulátor na Fakultě informačních technologií, foto Jan Vlk.

razovek, tak aby byl pilot s brýlemi neustále v zorném poli obou těchto senzorů. Po ověření funkčnosti bylo použito zařízení HTC Vive.

7. Testování a vyhodnocení

Tato práce během vývoje prošla spektrem různých testů a ověřování. Pro lepší přehled můžeme samotné testování rozdělit do dvou hlavních částí.

První část označíme jako praktické testování, které průběžně probíhalo od samotného počátku vývoje až po jeho konec a mělo za cíl odstraňovat chyby v implementaci a ověřovat nastavený směr vývoje.

Ve druhé části bylo zahájeno rozsáhlejší uživatelské testování, při němž byla aplikace představena různým uživatelským skupinám, od nezkušených studentů až po profesionální piloty. Cílem tohoto testování bylo ověřit prostřednictvím evaluačních metod správnost návrhu, míru čitelnosti a použitelnost rozhraní.

7.1 Praktické testování

Praktické testy probíhaly již během implementace prvního návrhu. Předmětem první fáze testování byla kontrola správného pohybu elementů HUD a zobrazování jejich hraničních hodnot. Ověření probíhalo pomocí vizuálního srovnávání s již existujícími řešeními.

V další fázi praktických testů šlo o kontrolu komunikace mezi simulátorem X-Plane a aplikací. Současně byl kladen důraz na zachování stejných jednotek používaných v simulátoru X-Plane. Důležité bylo ověřením správnosti vygenerované krajiny podle SRTM dat a zjistit podobnost terénu mezi aplikací a simulátorem. Všechny tyto aspekty byly ověřovány vizualizací obou aplikací vedle sebe a porovnáním přístrojových dat se symbolikou v průhledovém displeji, jak se vyobrazeno na obrázku 7.1. Kontrola stejné členitosti terénu probíhala porovnáním výškových hodnot na konkrétních souřadnicích a vizuálním ověřením dle obrázku 7.1.

7.2 Uživatelské testování

Uživatelské testování probíhalo v poslední fázi vývoje v laboratorních podmínkách s virtuální realitou a v prostředí pohyblivého leteckého simulátoru na FIT. Opět lze tuto část pro větší přehlednost rozdělit na tři části. V první proběhlo krátké seznámení s aplikací, volné užití aplikace a následně byly zadány úkoly, které musel uživatel provést. Všechny jeho reakce a chování bylo sledováno.

Ve druhé části byla použita metoda pro evaluaci displejů, která vychází z metody Cooper-Harper pro hodnocení pilota [22]. Jako hodnotící stupnici používá rozhodovací strom. Průchod stromu tvoří série dichotomických alternativ a slouží k určení přesných odpovědí na zadané otázky. Hlavní výhodou použití této metody je, že průchod logickým stromem produkuje konzistentní výsledky. První rozhodovací strom byl zaměřen na vyhodnocení čtení dat z konkrétního parametru a druhý na řízení daného parametru. Tyto dva



Obrázek 7.1: Propojení se simulátorem a vyobrazení podobnosti krajiny.



Obrázek 7.2: Uživatelské testování, foto AeroWorks.

stromy, vyobrazené v seznamu příloh na obrázcích D.1 a D.2 byly opakovaně aplikovány na všechny otázky ohledně vizualizačních součástí aplikace dle dotazníku v příloze [22].

V poslední části uživatelského testování byla otevřena diskuze a každý zúčastněný měl možnost prezentovat své nově získané poznatky o aplikaci a zdůvodnit své odpovědi.

7.3 Vyhodnocení

Na začátku uživatelského testování byly stanoveny hypotézy, které byly předmětem evaluace:

- Hypotéza č.1 - Implementace HUD displeje s využitím technologie HTC Vive umožňuje dobrou čitelnost zobrazovaných letových dat.
- Hypotéza č.2 - Implementace HUD displeje umožňuje intuitivní ovládání pohybového leteckého simulátoru.

Cílem uživatelského testování bylo potvrdit, nebo vyvrátit stanovené hypotézy a odhalit slabá místa rozhraní.

Uživatelského testování se zúčastnilo celkem 6 lidí a všechny důležité prvky grafického rozhraní byly těmito uživateli prověřeny. Zprůměrované výsledné hodnoty z rozhodovacích stromů jsou pro jednotlivé prvky následující:

- stupnice klopení - čitelnost 1.7 a říditelnost 1.7, což odpovídá nízké obtížnosti čtení a minimální zátěži pilota,
- stupnice klonění - čitelnost 2.7 a říditelnost 2.5 značí mírné potíže při čtení a přiměřenou mentální zátěž pilota,
- variometr - čitelnost 1.17 a říditelnost 1.17 odpovídají velmi lehké obtížnosti čtení a ovládání parametru nevyžaduje žádné zvýšené úsilí pilota,
- rychloměr - čitelnost 1.3 a říditelnost 1.5 vykazují velmi lehkou čitelnost a minimální zátěž pilota,
- výškoměr - čitelnost 1.5 a říditelnost 1.3 odpovídá nízké obtížnosti čtení a ovládání parametru nevyžaduje žádné zvýšené úsilí pilota.

Na základě získaných výsledků můžeme provést rozbor zadaných hypotéz. První hypotéza, která tvrdí, že implementace HUD displeje s využitím technologie HTC Vive umožňuje dobrou čitelnost zobrazovaných letových dat, byla potvrzena, protože všechny vizualizační prvky byly průchodem evaluačního stromu ohodnoceny nízkým hodnocením značící dobrou čitelnost a nízkou koncentraci pilota.

Druhá hypotéza, která tvrdí, že implementace HUD displeje umožňuje intuitivní ovládání pohybového leteckého simulátoru, byla také potvrzena, protože všechny součásti rozhraní byly ohodnoceny nižším hodnocením než 4 a tudíž splňují adekvátní kritéria přijatelnosti a vykazují nízkou náročnost ovládání.

Dále bylo prostřednictvím dotazníku a provedením diskuzí zjištěno, že nejméně čitelným a nejhůře ovladatelným prvkem je stupnice klonění. Další přínosnou informací bylo zjištění, že s navyknutím na rozhraní displeje neměli problém ani nezkušení uživatelé. Dle potvrzených hypotéz a dalších výsledků z testování můžeme říci, že výsledný návrh je snadno čitelný a nevyžaduje téměř žádné úsilí pilota při snaze mít pod kontrolou konkrétní parametry.

8. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat aplikaci průhledového displeje a prostřednictvím technologií pro virtuální realitu aplikaci integrovat do pohyblivého leteckého simulátoru. Neméně důležitou částí bylo seznámení s historickým vývojem avioniky a získání znalostí o současně používaných leteckých systémech pro vizualizaci dat. Na základě těchto znalostí vznikl návrh rozhraní a aplikace pro vizualizaci průhledového displeje prostřednictvím virtuální reality. Výsledný design zachovává tradiční rozložení grafických prvků a obsahuje správnou symboliku, je tedy snadné symboliku číst a navyknout si na rozhraní. Funkčnost cílové aplikace byla ověřena testováním v prostředí virtuální reality HTC Vive na pohyblivém leteckém simulátoru v prostorách Fakulty informačních technologií Vysokého učení technického v Brně.

8.1 Možnosti budoucího vývoje

Tuto práci je možné v budoucnu dále rozvíjet. Mezi možná rozšíření patří implementace přepínatelných režimů pro přistání, nebo pohyb po letištní dráze. Zajímavou možností je rozšíření o zobrazování syntetického terénu prostřednictvím symboliky a to zejména při nízkých průletech, nebo při vzletu a přistání. Pro realističtější vjem je zde prostor pro vymodelování virtuálního kokpitu a synchronizaci se skutečnými ovládacími prvky. V rámci zobrazování reálné krajiny se nabízí generování letišť a vylepšení grafické stránky krajiny.

Literatura

- [1] *The international system of units (SI)*. BIPM, 2006, ISBN 92-822-2213-6.
- [2] Air, S. N.; Museum, S.: *Ryan NYP Spirit Of St. Louis*. [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://airandspace.si.edu/collection-objects/ryan-nyp-spirit-st-louis-charles-lindbergh>
- [3] Cai G., L. T., Chen B.M.: *Coordinate Systems and Transformations*. Springer, 2011, ISBN 978-0-85729-634-4.
- [4] Collector, C.: *Cockpit Instruments from the Concorde Development Fleet*. 2009, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://developmentfleetinstruments-en463.blogspot.cz/>
- [5] Darland, S.: *F-16 A/B Mid-Life Update Production Tape M1 - The Pilot's Guide*. Lockheed Martin Corporation, 1998, ISBN F333657-90-C-2233.
- [6] EASA: *European Aviation Safety Agency*. 2002, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.easa.europa.eu/>
- [7] FAA: *Federal Aviation Administration*. 1958, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.faa.gov/>
- [8] de Ferranti, J.: *Completing The Worldwide Elevation Map*. 2014, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://www.viewfinderpanoramas.org/>
- [9] Flick, J.: *Procedural Grid*. [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://catlikecoding.com/unity/tutorials/procedural-grid/>
- [10] Floreo: *Model terénu (SRTM)*. [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL [http://floreo.cz/Informacni-clanky/Model-terenu-\(SRTM\).aspx](http://floreo.cz/Informacni-clanky/Model-terenu-(SRTM).aspx)
- [11] Gregory L. Beeker, J. M. P., Richard L. Bennet: *Performance flight testing*. USAF TEST PILOT SCHOOL, 1993, ISBN 19970116-073.
- [12] Group, T.: *THALES UNVEILS AVIONICS 2020, THE COCKPIT OF THE FUTURE*. 2013, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/press-release/thales-unveils-avionics-2020-cockpit-future>
- [13] Havenga, B.: *Boeing 737-832 Cockpit and HUD*. 2008, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.flickr.com/photos/psychoemia/2585529774>

- [14] HTC, V. C.: *Virtual Reality HTC Vive*. 2016, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.vive.com/us/>
- [15] Hurst, R.: *RAF Fixed and Free-mounted Reflector Gunsights*. 2009, [Online; navštíveno 23.01.2017].
URL <http://forum.axishistory.com/viewtopic.php?p=160621&sid=51c60b7d43f1923c2bb9a94c598a6ff1>
- [16] ICAO: *International Civil Aviation Organization*. 1944, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://www.icao.int/Pages/default.aspx>
- [17] Ing. Robert Krejčí, C., Doc. Ing. Eduard Hulicius: *Polovodičové lasery a LED-ky*. 2007, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [18] Jet Propulsion Laboratory, C. I. o. T.: *U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data*. 2014, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [19] Jukes, M.: *Aircraft display systems*. AIAA, 2004, ISBN 1-56347-657-6.
- [20] Magazine, P. M.: *Windshield TV Screen To Aid Blind Flying*. 1955, [Online; navštíveno 23.01.2017].
URL <http://forum.axishistory.com/viewtopic.php?p=160621&sid=51c60b7d43f1923c2bb9a94c598a6ff1>
- [21] Moore, P.: *Describing All Conceivable Motions*. 2000, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL http://moorecanoeing.com/school/skills_philosophy.htm
- [22] Newman, R. L.: *Head-Up Displays, Designing the way ahead*. Avebury Aviation, 1995, ISBN 0 291 39811 1.
- [23] OnBoard: *New functions unveiled on ODICIS future cockpit prototype*. 2012, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://onboard.thalesgroup.com/2012/07/10/new-functions-unveiled-on-odicis-future-cockpit-prototype/>
- [24] cpt picard: *Forum thread: 4.4 and HSI*. 2015, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://forums.garmin.com/showthread.php?318305-4-4-and-HSI&s=8b244e3eefc106d1e9c637d3f7902b4>
- [25] Rydlo, K.: *Vizualizace vzdušného prostoru ve 3D*. Diplomová práce, Fakulta informatiky Masarykovy univerzity, 2012.
- [26] Sabartova, Z.: *Dynamika letu a řízení*. Bakalářská práce, Fakulta strojního inženýrství - Ústav matematiky, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [27] Schwab, D.: *Worth the Wait — FAA's New EFVS Rule FAR 91.176*. 2017, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://blogs.rockwellcollins.com/2017/01/17/worth-the-wait-faas-new-efvs-rule-far-91-176/>

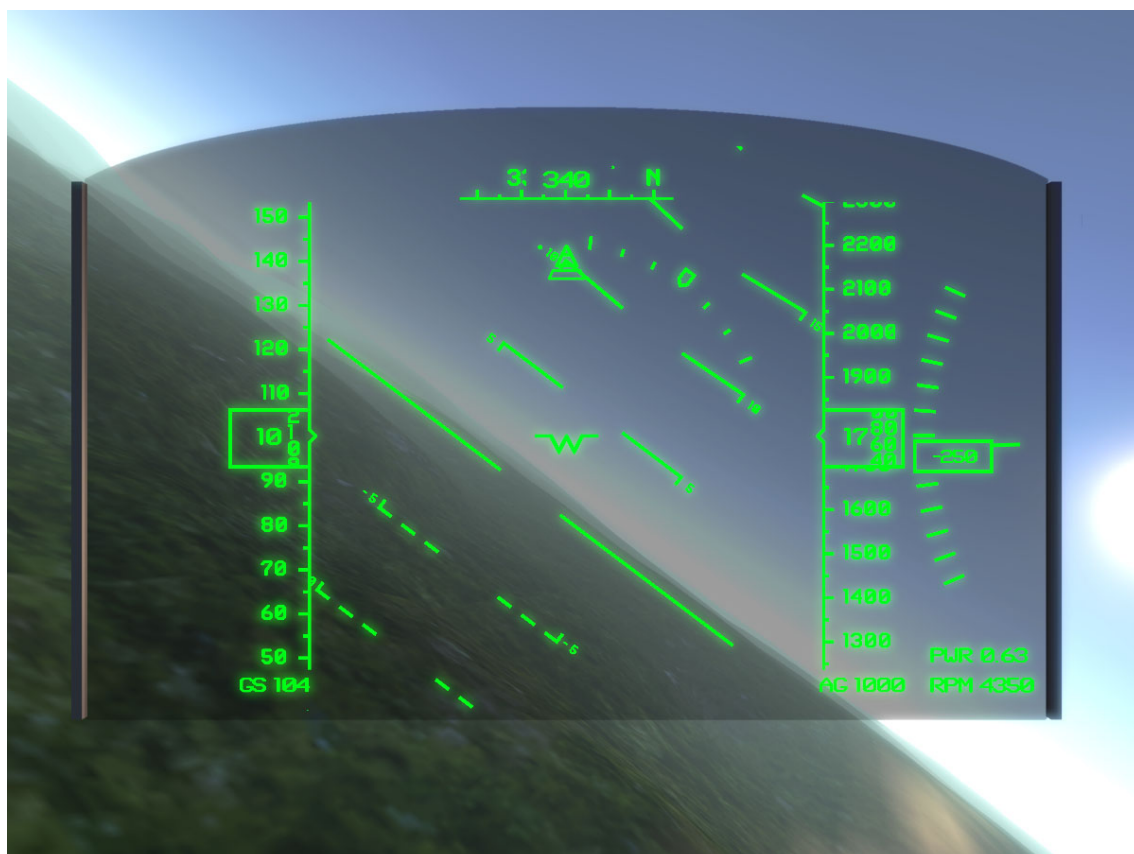
- [28] Society, V. R.: *What is Virtual Reality?* 2017, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/what-is-virtual-reality.html>
- [29] Soniak, M.: *Why Does Everything Look Green Through Night Vision Goggles?* 2012, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <http://mentalfloss.com/article/31061/why-does-everything-look-green-through-night-vision-goggles>
- [30] Stengel, R.: *Aircraft Equations of Motion: Flight Path Computation*. 2016, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://www.princeton.edu/~stengel/MAE331Lecture9.pdf>
- [31] Stengel, R. F.: *Flight Dynamics*. Princeton University Press, 2004, ISBN 978-0-691-11407-1.
- [32] Technologies, U.: *Unity Editor*. 2005, [Online; navštíveno 9.05.2017].
URL <https://unity3d.com/>
- [33] Tsui, J. B.-Y.: *Earth-Centered, Earth-Fixed Coordinate System*. John Wiley and Sons, Inc., 2004, ISBN 9780471706472.

Přílohy

Seznam příloh

| | |
|-------------------------------|-----------|
| A Snímek aplikace HUD | 47 |
| B Obsah přiloženého CD | 48 |
| C Dotazník | 49 |
| D Rozhodovací stromy | 52 |

A. Snímek aplikace HUD



Obrázek A.1: Snímek aplikace HUD.

B. Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje:

- adresář se zdrojovými kódy aplikace HUD,
- adresář s binárními soubory této aplikace,
- adresář se zdrojovými kódy dokumentace,
- dokumentaci ve formátu PDF,
- plakát.

C. Dotazník

DOPROVODNÝ DOTAZNÍK

k testování rozhraní průhledového displeje

Před Vámi je dotazník, který spadá do testovací části mé bakalářské práce zabývající se vizualizací letových dat. Cílem práce byl návrh a implementace vizuálního rozhraní průhledového displeje a integrace návrhu do leteckého simulátoru prostřednictvím technologií pro virtuální realitu. Dotazník je jedním z nástrojů, které mi pomohou ve zpracování výsledků projektu. Děkuji Vám za jeho vyplnění.

Prohlašuji, že tento dotazník je anonymní a bude využit pouze ke zpracování výsledků mé bakalářské práce.

Jiří Pomikálek

O vás:

Věk: 20-30let 30-40let 40-50let více

Zkušenosti s pilotováním letadla v leteckém simulátoru nebo ve skutečném letadle:

malé <70hodin 70-250hodin 250-1000hodin >1000hodin velké

HUD:

Celkový design:

velmi se mi líbí 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nelíbí se mi

Rozložení prvků rozhraní:

vynikající 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nevyhovující

Navyknutí na nové rozhraní:

snadné 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožné

Na následující otázky odpovídejte dle přiloženého rozhodovacího stromu pro čtení dat

Čitelnost stupnice klopení:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nečitelná

Čitelnost stupnice klonění:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nečitelná

Čitelnost rychloměru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nečitelná

Čitelnost variometru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nečitelná

Čitelnost výškoměru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nečitelná

Na následující otázky odpovídejte dle přiloženého rozhodovacího stromu pro říditelnost prvků

Říditelnost stupnice klopení:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožná

Řiditelnost stupnice klonění:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožná

Řiditelnost rychloměru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožná

Řiditelnost variometru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožná

Řiditelnost výškoměru:

výborná 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 nemožná

Doplňující otázky:

Jaké byly Vaše první dojmy?

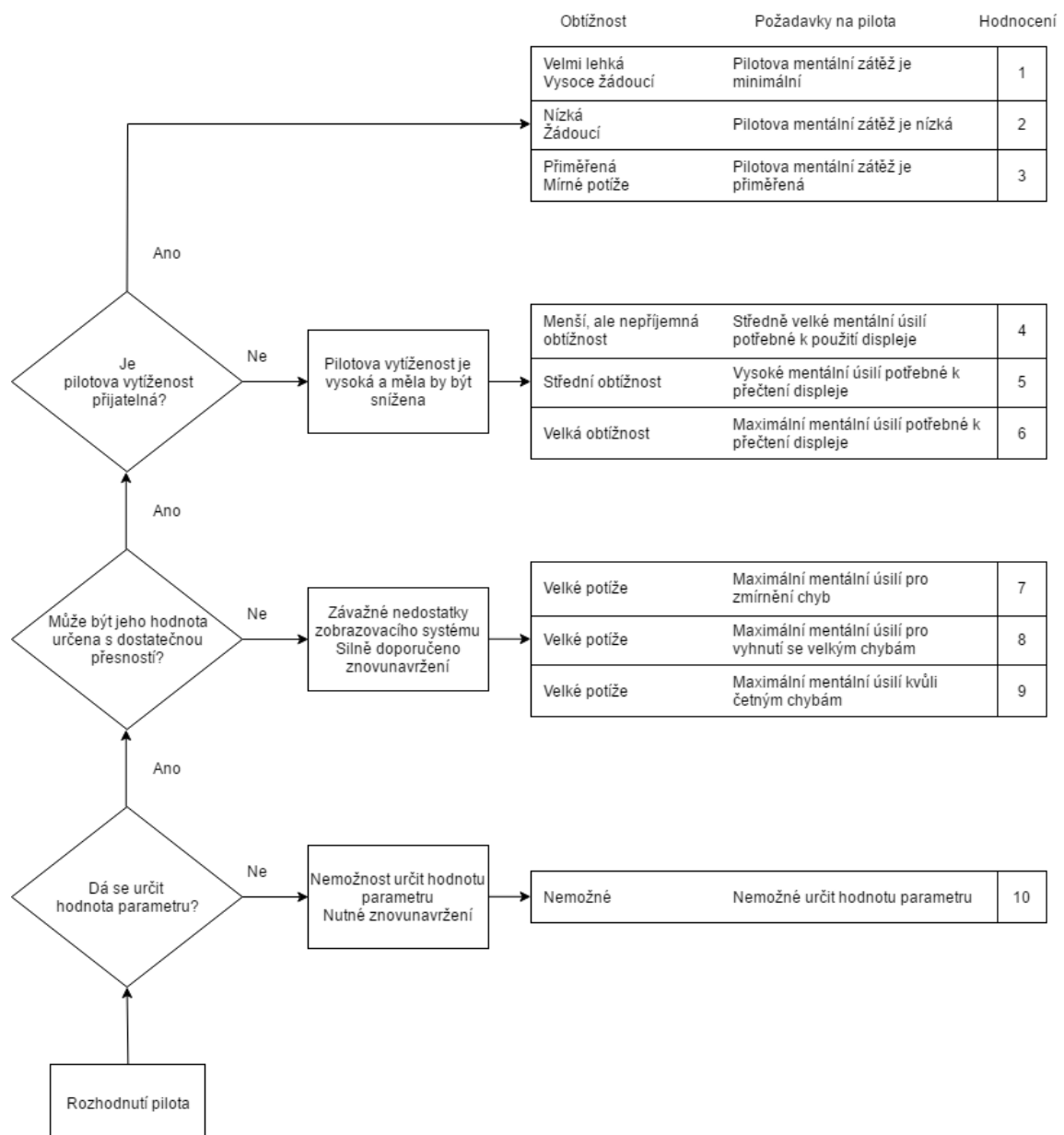
Co se Vám líbilo nejvíce?

Co se Vám nelíbilo?

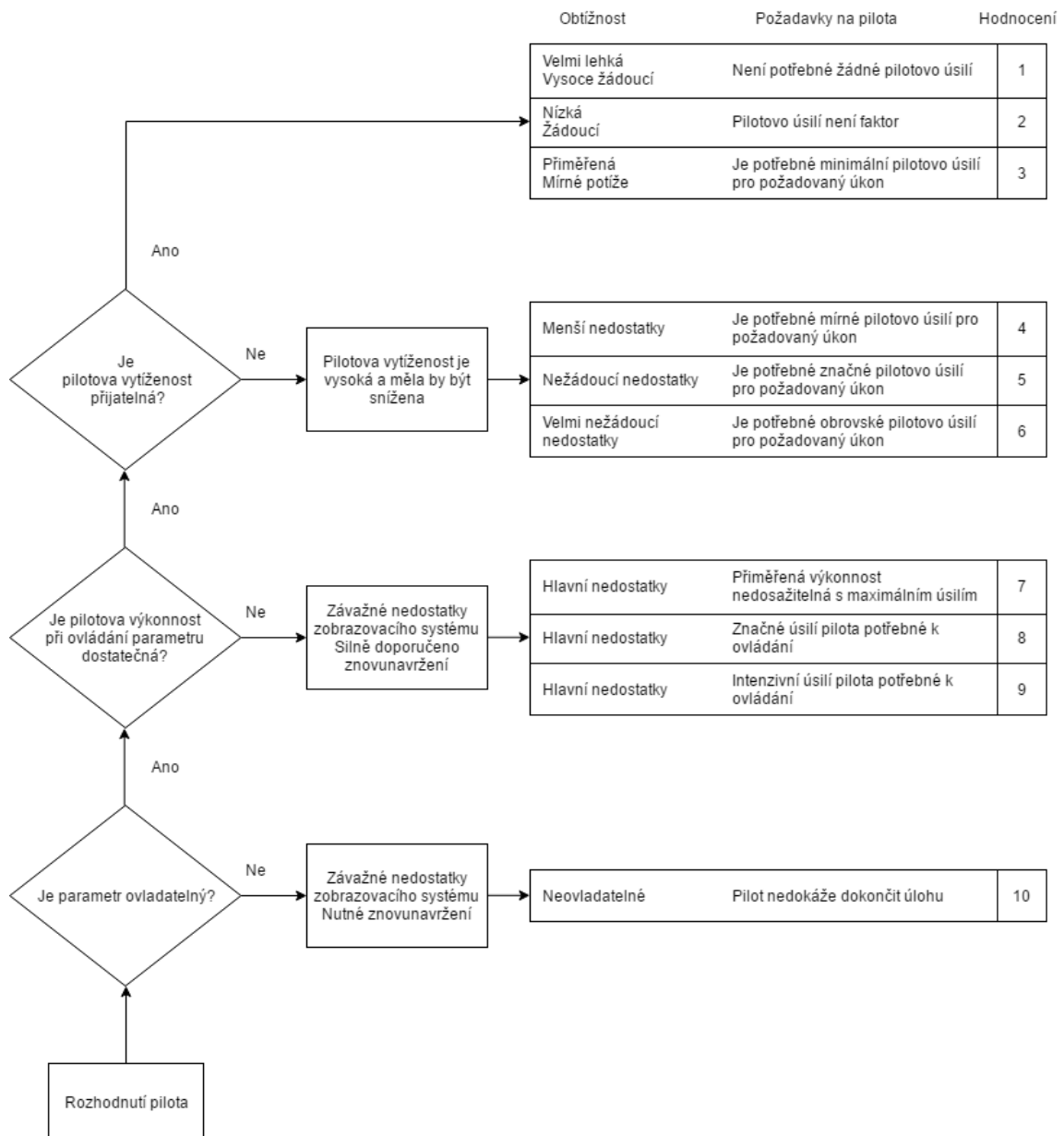
Co by jste změnili nebo doplnili:

Pocítli jste pocit dezorientace, nebo se Vám udělalo špatně?

D. Rozhodovací stromy



Obrázek D.1: Rozhodovací strom - čtení dat [22].



Obrázek D.2: Rozhodovací strom - říditelnosti prvků [22].