

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření



Diplomová práce

**Realizace pilotážně/navigačního displeje EFIS s rozšířenými
funkcemi pro podporu rozhodování pilota**

Bc. Petr Mazurek

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Letecké a kosmické systémy

11. května 2015



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Petr Mazůrek
Studijní program: Obor:	Kybernetika a robotika Letecké a kosmické systémy
Název tématu česky:	Realizace pilotážně/navigačního displeje EFIS s rozšířenými funkcemi pro podporu rozhodování pilota
Název tématu anglicky:	Design of an EFIS Display Extended by Functions Supporting Decision Making Process

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte SW zobrazovače letových a navigačních informací společně s plastickou mapou terénu. Práce předpokládá analýzu dostupnosti datových zdrojů pro 3D vizualizaci terénu (výškový model), významných staveb (věže, elektrická vedení, silniční síť, ...) a významných přírodních objektů (vodní toky, zalesněné oblasti, ...). SW vybavení bude v základním módu umožňovat zobrazení 3D terénu, letových a navigačních údajů a významných překážek. SW bude zobrazovat data jak z leteckého simulátoru, tak z externí INS jednotky a také z externího modulu pro plánování trajektorií. Mezi další zobrazované informace patří oblasti omezených prostorů, letištní koncové zóny a navigační tunel. Systém bude možné měnit nastavením parametrů zobrazovaných informací, zvýrazněním nebezpečných objektů a takových artefaktů, které budou usnadňovat srovnávací navigaci. Výsledný systém bude otestován s pomocí leteckého simulátoru, ověřen s pomocí externích specialistů a bude proveden letový test.

Seznam odborné literatury:

- [1] Cary R. Spitzer, Digital Avionics Handbook, 2006, CRC Press, ISBN-10: 0849384419
- [2] Blasch E., Bosse E., Lambert D., High-Level Information Fusion, 2012, CRC Press, ISBN-10: 1608071510
- [3] Ebermann H., Scheiderer J., Human Factors on the Flight Deck, 2013, Springer, ISBN 978-3-642-31732-3

Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce:	12. listopadu 2014
Platnost zadání do ¹ :	31. srpna 2016

Doc./Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 11. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Poděkování

Považuji za nezbytné poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Pavlu Pačesovi, Ph.D. za podporu, kterou mi poskytoval již od počátku práce na projektu a následně též diplomové práci, jejímž výstupem je EFIS 3D. Veškerá rozhraní využívaná v rámci EFISu 3D jsou jeho dílem, což umožnilo projekt dotáhnout do zde prezentované podoby. Tvorba textur a databáze leteckých překážek by zase nebyla možná bez Jakuba Filly, který zároveň celý projekt zprovoznil na GITu a značně tak ulehčil sdílení výsledků projektu. Dokončení přispěla i má rodina, především aktivní účastí na natáčení letového testu, ale taktéž svou trpělivostí. Mimo těchto lidí je zde však rozsáhlá komunita programátorů, kteří pracovali na knihovnách pro OpenGL, úpravě SRTM dat či na OpenStreetMap serveru. Všem těmto lidem taktéž děkuji, protože bez nich by EFIS 3D nikdy nemohl vzniknout v takovéto podobě.

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užívání 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 11. 5. 2015

.....

Abstract

This diploma thesis - focused on realization of an EFIS display - confronts the reader with current trends in the field of EFIS systems for ultralight aircraft. It deals with current development of enhanced vision system (EVS, SVS or SVS) as well. The analytical part incorporates a description of the used data and of their usage in the designed system.

The practical part of the thesis is dedicated to work with modern OpenGL 3.3+ and it offers an analysis of the displayed data. The thesis is concluded with description of tests in both laboratory and in-flight conditions. EFIS 3D is designed as a transferable program which can be run on all devices equipped with Windows OS and with OpenGL 3.3+ support.

The entire focus of the presented system is to support the visual navigation during all phases of the flight.

Abstrakt

Tato diplomová práce zaměřená na realizaci pilotážně-navigačního přístroje EFIS konfrontuje čtenáře se současnými trendy na poli systémů EFIS pro ultralehké letectví. Zaobírá se také aktuálními výdobytky v oblasti rozšiřujících zobrazovacích systémů (EVS, SVS či SVS). Součástí analytické části je také popis využívaných dat a specifikace jejich využití v navrhovaném systému.

Praktická část práce se věnuje práci s moderním OpenGL 3.3+ a nabízí rozbor zobrazovaných dat. Práce je završena popisy testů tohoto systému jak v laboratorních podmínkách, tak i za letu. EFIS 3D je koncipován jako přenositelný program, který lze spouštět na zařízeních s operačním systémem Windows a podporou OpenGL 3.3+.

Celkovým záměrem prezentovaného systému je podpořit srovnávací navigaci během všech fází letu.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam zkratk	x
Úvod	1
1 Požadavky na systém EFIS	2
1.1 Elektronické systémy na palubě letadel	2
1.2 Koncept systému EFIS	3
1.2.1 Zobrazení	3
1.2.2 Ovládací prvky	5
1.2.3 Procesory dat	7
1.3 Rozšířená realita pro systém EFIS	8
1.3.1 Enhanced Vision System	8
1.3.2 Synthetic Vision System	9
1.3.3 Combined Vision System	10
1.4 EFIS v ultralehkém letectví	10
1.4.1 Dynon Avionics	10
1.4.2 TL elektronik Czech	10
1.4.3 Garmin	12
1.4.4 ForeFlight	12
1.5 EFIS pro simulátor CAST	12
2 Mapové podklady	14
2.1 SRTM	15
2.2 OSM a mapnik	16
2.2.1 Typ povrchu	17
2.2.2 Elektrická vedení	17
3 Vizualizace pomocí OpenGL 3.3+	19
3.1 Architektura programu	19
3.2 Inicializace OpenGL	19
3.3 Matrix stack	22
3.3.1 Projection matrix	22

3.3.2	View matrix	23
3.3.3	Model matrix	23
3.3.4	Výsledná transformace	24
3.3.5	Posloupnost transformací v programu EFIS 3D	24
3.4	Shadery	24
3.4.1	Vertex shader	25
3.4.2	Geometry shader	25
3.4.3	Fragment shader	28
3.5	Vykreslování terénu	29
3.5.1	Tvorba 3D modelu	29
3.5.2	Výpočet normál	29
3.6	Vykreslování textur	30
3.7	Algoritmus načítání terénu	32
3.8	Generování a zobrazení textu	33
3.9	Vykreslování přístrojů	34
3.9.1	Třída pro vykreslování přístrojů	34
3.9.2	Rychloměr	34
3.9.3	Výškoměr	35
3.9.4	Umělý horizont	35
3.9.5	Relativní příčný sklonoměr	36
3.9.6	Variometr	36
3.9.7	Kompas	36
3.9.8	Ukazatel podélného náklonu	36
3.9.9	Zatáčkoměr	37
3.9.10	Ukazatel polohy klapky	37
3.10	Návrh a vykreslení menu	39
4	Zdroje a vykreslení AIP dat	40
4.1	Zdroje AIP dat	40
4.2	Žádané informace	41
4.2.1	Třídy letových prostorů	41
4.2.2	Letové zóny a oblasti	41
4.3	Vyzvednutí dat o letových prostorech	42
4.4	Vykreslení letových prostorů	43
4.5	Klasifikace a značení překážek	44
4.6	Vykreslení překážek	44
5	Připojení externích jednotek	46
5.1	Připojení iDrive	46
5.2	Připojení AHRS a GPS jednotky	48
5.3	Spolupráce s aplikací Navigator	49
6	Testování aplikace EFIS 3D	50
6.1	Předběžná FMEA analýza	50
6.1.1	Tabulky využité pro hodnocení	50
6.1.2	Vyplývající poznatky	50

6.2	Vybrané testovací scénáře	53
6.2.1	Rutinní let LKTC - LKVO	53
6.2.2	Výpadek motoru v blízkosti LKRK	53
6.2.3	Volný let	53
6.3	Provedení letů	54
6.3.1	Testování piloti	54
6.3.2	Let 1	54
6.3.3	Let 2	55
6.3.4	Let 3	55
6.4	Výsledky a jejich zhodnocení	55
7	Experimentální nasazení systému EFIS 3D	57
7.1	Pozemní test	57
7.2	Plán testu za letu	57
7.3	Kritéria testu	58
7.4	Provedení	58
7.5	Vyhodnocení testu	60
	Závěr	63
	Seznam příloh	69

Seznam obrázků

1.1	Schéma propojení systémů EFIS a FMS	4
1.2	Podoba obrazovky PFD u typu B-777	5
1.3	Podoba obrazovky MFD (mapové zobrazení) u typu B-777	6
1.4	Podoba obrazovky EICAS u typu B-777	7
1.5	EVS pro HUD od firmy Rockwell Collins	9
2.1	Zdroje informací a rozhraní systému EFIS	14
2.2	Dělení SRTM dlaždic na dílčí indexované dlaždice	16
2.3	Ukázka terénní dlaždice mapového zobrazení EFIS 3D	18
3.1	Popis komolého jehlanu kamery (frustum)	27
3.2	Popis roviny normálovým vektorem	28
3.3	Ilustrace vektorů důležitých pro stínování	30
3.4	Trojrozměrný terén opatřený texturou	32
3.5	Podoba rychloměru v zobrazení EFIS 3D	35
3.6	Podoba výškoměru v zobrazení EFIS 3D	36
3.7	Podoba variometru v zobrazení EFIS 3D	37
3.8	Podoba kompasu a reaktivního příčného sklonoměru v zobrazení EFIS 3D	37
3.9	Podoba ukazatelů polohových úhlů v zobrazení EFIS 3D	38
3.10	Podoba menu v zobrazení EFIS 3D	38
4.1	RA (žlutě), PA (červeně) a hranice CTR (modře) nad Prahou	43
4.2	Označení překážky (zde vysílač na Žižkově)	45
4.3	Překážky z AIP nacházející se v Praze	45
5.1	Podoba ovladače iDrive	46
5.2	Naváděcí obdélníky pro modul Navigator	49
7.1	Letoun OK-DSF využitý pro testování (Cessna 172)	59
7.2	Rozpojená měřicí soustava před zkušebním letem	60
7.3	Krabice omezující odlesky displeje tabletu	61
7.4	Srovnání reality a výstupu programu EFIS 3D	65
7.5	Prolnutí reality a výstupu programu EFIS 3D (letišťe Dvůr Králové)	65

Seznam tabulek

1.1	Přehled výbavy EFISů od firmy Dynon Avionics	11
2.1	Legenda zobrazení EFIS 3D	17
3.1	Seznam zdrojových souborů projektu EFIS 3D (mimo shaderů)	20
3.2	Popis parametrů v konfiguračním souboru	21
4.1	Třída popisující letový prostor (Asp) - vybrané položky	42
4.2	Třída popisující leteckou překážku (Ano) - vybrané položky	43
4.3	Formát dat o překážkách	44
4.4	Rozlišení typu značení	44
6.1	FMEA - Pravděpodobnost (P)	51
6.2	FMEA - Závažnost (S)	51
6.3	FMEA - Detekce (D)	51
6.4	FMEA analýza pro EFIS 3D - část I	52
6.5	FMEA analýza pro EFIS 3D - část II	52
6.6	Výsledky dotazníku (otázky zjišťovací)	56
6.7	Výsledky otázky č. 6 (Myslíte si, že je zobrazení následujících útvarů v 3D vyhovující?)	56

Seznam zkratek

ADAHRS	Air Data Attitude and Heading Reference System inerciální jednotka doplněná o výstupy z ADC (Air Data Computer) a magnetometru
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast automatický závislý systém pro sledování letadla
AHRS	Attitude and Heading Reference System inerciální jednotka spolupracující s magnetometrem pro stanovení polohových úhlů letadla
AIP	Aeronautical Information Publication letecká informační příručka
ATZ	Aerodrome Traffic Zone kruhové zóny v okolí letiště se stropem 600 ft nad zemí
CAN	Controller Area Network sériová sběrnice často využívaná u senzorových sítí
CAST	Center for Advanced Simulation and Technology laboratoř pro HMI testování vybavená mimo jiné letovým simulátorem
CTR	Control Zone řízený okrsek
CVS	Combined Vision System letový systém zobrazující reálný obraz z kamer do terénu generovaného z databáze
DA	Danger Area nebezpečná oblast
EFIS	Electronic Flight Instrument System elektronický systém pro integrované zobrazení letových přístrojů
EGM96	Earth Gravitational Model 1996 model gravitačního pole sloužící pro výpočet výšky nad geoidem
EICAS	Engine-Indicating and Crew-Alerting System systém monitorující stav motorů a bezpečnostních systémů letadla
EVS	Enhanced Vision System letový systém zvyšující povědomí o okolí letounu za nepříznivých podmínek
FAA	Federal Aviation Administration státní úřad pro civilní letectví v USA
FIR	Flight Information Region letová informační oblast

FMC	Flight Management Computer počítač pro plánování, provedení a monitorování letu
FMS	Flight Management System systém pro plánování, provedení a monitorování letu (jeho podmnožinou je FMC)
FO	First Officer první důstojník (kopilot)
GLSL	OpenGL Shading Language programovací jazyk pro shadery v OpenGL
GLM	OpenGL Matrix Library knihovna pro práci s maticemi v OpenGL
HMI	Human-Machine Interface obor zabývající se rozhraním člověk - stroj
IFR	Instrument Flight Rules přístrojový let za podmínek IMC
MFD	Multi-Function Display vícefunkční zobrazovací displej EFIS
PA	Prohibited Area zakázaná oblast
PFD	Primary Flight Display primární zobrazovací displej EFIS
RA	Restricted Area omezená oblast
SOIL	Simple OpenGL Image Library knihovna pro práci s obrázky v OpenGL
SDL	Simple DirectMedia Layer multiplatformní multimediální knihovna poskytující nízkoúrovňový přístup k 3D a 2D zobrazení
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission data o elevaci terénu získaná během mise STS-99 (Endeavour)
SVS	Synthetic Vision System systém zobrazující terén modelovaný podle databáze
TMA	Terminal Maneuvering Area koncová řízená oblast
TRA	Temporary Reserved Area dočasně vymezený prostor
TSA	Temporary Segregated Area dočasně vyhrazený prostor
UL	Ultralight ultralehký
VAO	Vertex Buffer Array objekt držící reference na příslušné VBO objekty
VBO	Vertex Buffer Object objekt odkazující na buffer v grafické paměti
VFR	Visual Flight Rules let za podmínek VMC

Úvod

Od přelomu konce 20. století se v letectví výrazně navyšuje úroveň integrace elektronických systémů. Tento trend zavádění stále sofistikovanějších letových systémů okrajově proniká i do oblasti ultralehkých strojů. Letové informační systémy pro UL letadla mají svůj trh a spoustu odběratelů po celém světě. Dílem k tomuto jevu přispívají nižší požadavky na vybavenost ultralehkých strojů, dílem nižší výrobní náklady a snazší certifikace.

V elektronické výbavě moderních strojů hrají nezanedbatelnou úroveň systémy EFIS, zprostředkovávající spojení mezi FMS a pilotem. Jejich výraznou pozici umocňuje také to, že se jedná o vizuálně nejpřitažlivější prvek kokpitu. Naším cílem však je, aby přítomnost systému EFIS na palubě reálně napomáhala ve zvyšování bezpečnosti ultralehkého letectví.

Na zvyšování bezpečnosti tohoto specifického odvětví letectví bylo zaměřeno již několik projektů v rámci školy. Ten navenek nejlákavější představuje simulátor CAST. Myšlenkou simulátoru již od samého počátku je výzkum reakcí pilotů na jisté předem dané podmínky, a tím pádem hodnocení navrhovaných technologických řešení. Prostředníkem v komunikaci simulátor - pilot je vlastní systém EFIS vyvinutý Ing. Tomášem Levorou.

Poněvadž současný systém funguje jen ve 2D s vybranými 3D zobrazovacími možnostmi (například ve spolupráci se softwarem Navigator), počítaly nové plány na rozvoj EFISu s plnohodnotnou integrací 3D zobrazení. Koncept vycházející z ústřední ideje SVS (Synthetic Vision System) systémů se stal předobrazem této diplomové práce.

Primárním úkolem takto vybaveného systému EFIS je poskytnout co nejpřesnější referenci pro srovnávací navigaci. Částečně přispěje k zlepšení povědomí pilota o terénu a nabídne další zdroj pro rozhodování pilota v kritických okamžicích letu. Přítomnost trojrozměrného terénu doplněného o podrobnou mapu povrchových útvarů by dle předpokladů měla výrazně přispět k bezpečnějšímu provozu UL letadel.

Cestou k dosažení této ideje je především prozkoumání dostupných zdrojů dat a zhodnocení jejich použitelnosti. Trojrozměrný terén v rámci systému EFIS bude zahrnovat přírodní útvary (lesy, vodní toky, pole, aj.), útvary vzniklé lidskou činností (elektrická vedení, zástavba, silnice, železnice) a objekty definované leteckým právem a leteckými předpisy (letové prostory, letecké překážky).

Tato diplomová práce je zaměřena na grafickou implementaci 3D terénu a útvarů podporujících srovnávací navigaci, která umožní systém provozovat bez finančních či právních závazků k třetím osobám. Ačkoliv nastíní i řešení mnoha dalších problémů se systémem spjatých, hlavním zaměřením práce bude návrh systému a jeho zobrazovacích metod.

Nedílnou součástí diplomové práce má dle zadání být i vyhodnocení testů systému na simulátoru a během zkušebního letu. Tato část bude hlavní zpětnou vazbou na rozhodnutí v oblasti designu i funkčnosti přístroje, jež přispěje k dalšímu směřování tohoto projektu.

Kapitola 1

Požadavky na systém EFIS

Nedílnou součástí návrhu elektronického letového informačního systému je průzkum dosavadních řešení využívaných v praxi. Taktéž je třeba poodkrýt motivaci k využití těchto moderních přístupů a četnost jejich využívání v oblasti ultralehkého letectví. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze má za sebou již několik pokusů o návrh vlastního systému EFIS. Jedním z nich je systém fungující na simulátoru CAST. Mnou prezentované řešení má ambici stát se další generací tohoto zobrazovacího softwaru, je tedy logické, že v mnohých ohledech z dosavadního systému čerpá. Mám na mysli především vzhled systému a jeho komunikaci s ostatními nástroji, z hlediska technického jsou mnohé přístupy odlišné.

Zatímco podrobný popis mého systému EFIS 3D představuji v dalších kapitolách, v této kapitole se budu věnovat teoretickým konceptům v pozadí elektronických informačních systémů v letectví.

1.1 Elektronické systémy na palubě letadel

Přístrojové vybavení letadel v průběhu let prodělalo zásadní vývoj, v jehož důsledku jsme schopni poměrně jednoznačně rozlišit jeho jednotlivé „generace“ podle příslušné technické úrovně.

Zrod přístrojů je pochopitelně spjat se samým počátkem letectví. Ovšem v těchto dobách pilot vnímal většinu podnětů přímo na svém vlastním těle. Ačkoliv nové technologie a robustnější konstrukce vzdalovaly pilota těmto bezprostředním vjemům, v kabinách se začaly objevovat přístroje, které umožnily stav letadla alespoň základním způsobem monitorovat. Hovoříme o tzv. „nulté“ generaci přístrojů.

Po konci první světové války a s nástupem rychlých strojů schopných létat i za méně příznivých podmínek se objevila snaha pilotovi poskytovat i informace o poloze letadla. Zrodily se tak první zatáčkoměry a relativní příčné sklonoměry. Po vypuknutí druhé světové války byla většina letounů vybavena též umělým horizontem, variometrem a radiovybavením [18]. Mechanické přístroje a radiovybavení předznamenaly úsvit tzv. „první“ generace leteckých přístrojů. S vývojem tranzistoru elektrotechnické disciplíny postupují vpřed mnohem rychleji a výsledné produkty jsou skladnější, což se pozitivně projevuje na mnohem sofistikovanější vybavenosti letadel. Přístroje nyní umožňují plnohodnotné lety podle přístrojů (IFR) a rozvoj navigačních radiových systémů si žádá další nové technologie. Uvažujeme-li

období od počátku šedesátých do konce sedmdesátých let, hovoříme často o „druhé“ generaci avioniky.

Typickým znakem tohoto období bylo využívání především analogových přístrojů, jejichž senzory byly nezávislé a jejichž propojení bylo poměrně složité. Vyžadovalo velké množství kabeláže a každé přidání nového přístroje postavilo techniky před problém, jak propojení předělat tak, aby nedocházelo k ohrožení funkčnosti ostatních systémů [16, str. 18]. Navíc každá takováto jednotka znamenala nezanedbatelný nárůst hmotnosti letadla.

S příchodem digitalizace, a především mikroprocesorů (první byl vyvinut přímo pro letoun F-14 [6]), se otevřela cesta k větší integraci dříve jednotlivých přístrojů. Samozřejmě, že architektura těchto systémů nebyla pilotovi přímo přístupná, a tak sám poznal rozdíl ve výkonnosti a efektivitě systémů, nicméně změna architektury nebyla nijak rozpoznatelná. S příchodem „třetí“ generace přístrojů, která již zahrnovala Air Data Computer a byla z převážné většiny digitální, se však otevřely nové možnosti designu zobrazovací části přístrojů.

Výhody analogového zobrazení byly již dříve doplňovány digitálními údaji, nikdy se však neobjevila tak výrazná možnost celý přístroj zpracovat graficky a umožnit jeho dynamické přepínání pro různé konfigurace, či jeho vypnutí - což značně optimalizovalo rozměry palubních desek a zpřehlednilo využívání přístrojů. Nastávající éra systému EFIS - tedy elektronického letového informačního systému - započala právě v této době. Pilotáž je vedena prostřednictvím výstupů z FMS (Flight Management System), což je systém komunikující se všemi klíčovými systémy pro provedení letu. Role systému EFIS v této koncepci je naznačena na obrázku 1.1 převzatém z [17, str. 59].

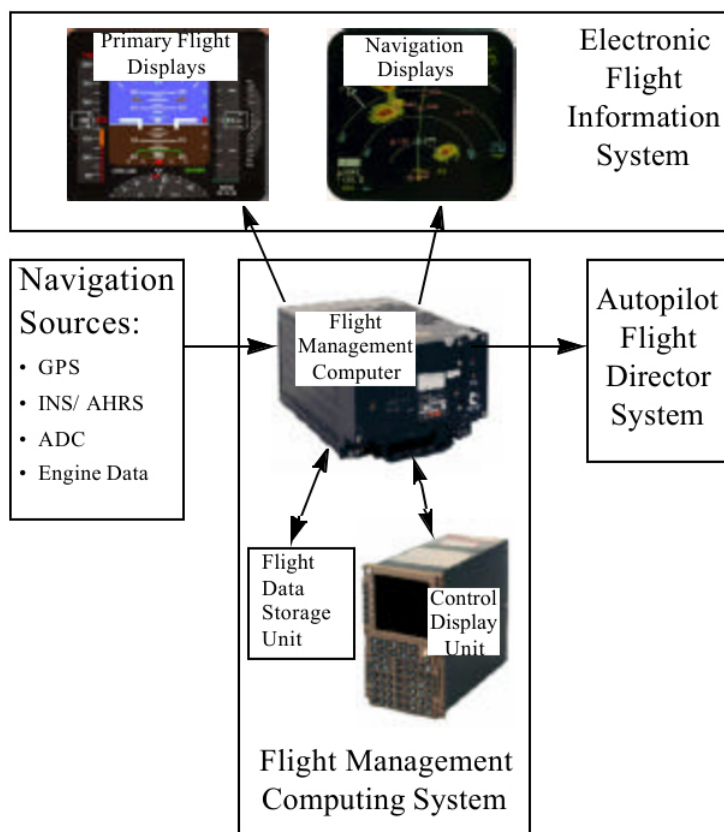
1.2 Koncept systému EFIS

Tato sekce se zabývá představením konceptu systému EFIS. Elektronický letový a informační systém lze na základě klíčových procesů dekomponovat na následující subsystémy:

1. zobrazení
2. ovládací prvky
3. procesory dat

1.2.1 Zobrazení

Zobrazovací jednotka většinou sestává ze tří základních typů displejů. PFD (Primary Flight Display) představuje základní pilotážní, potažmo pilotážně-navigační displej, který využívá pilot pro úspěšné provedení letu [17, str. 57]. PFD je doplněn MFD (Multi-Function Display), který umožňuje přepínání zobrazovaných informací a pokrývá všechny zbylé pilotážní a navigační informace. Třetím stavebním kamenem zobrazení je EICAS (Engine Indicating and Crew Alerting System). Jeho cílem je monitorovat stav motorů a poskytovat všechny doplňkové bezpečnostní informace. Nejčastěji varování před požárem, funkčnost hydrauliky,

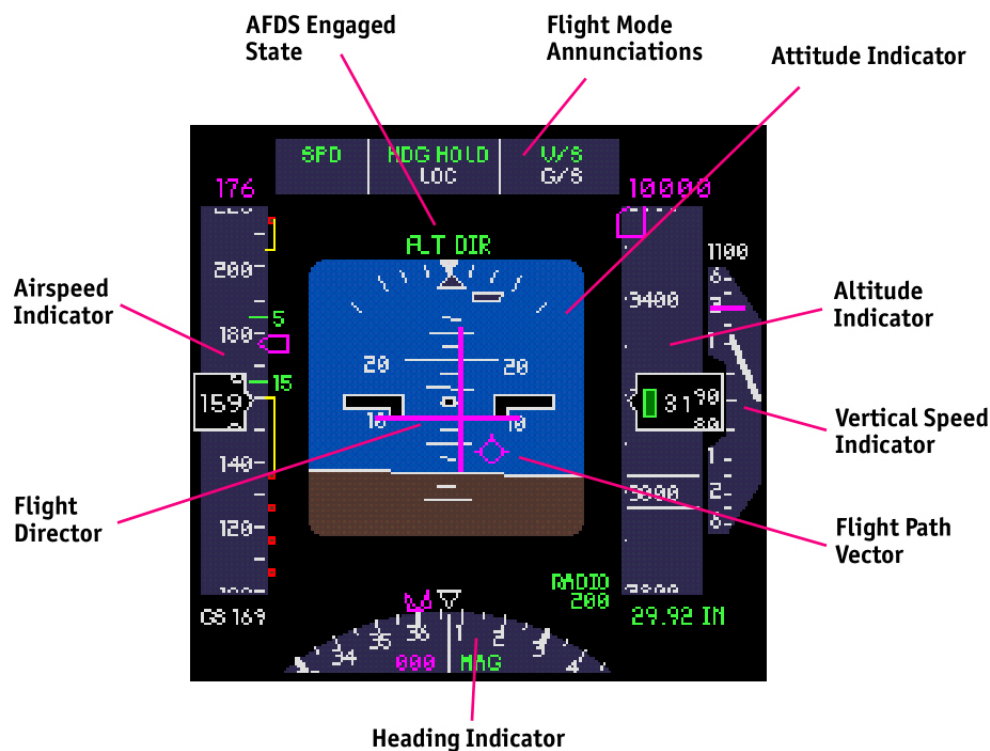
Obrázek 1.1: Schéma propojení systémů EFIS a FMS¹

či nebezpečný pokles, případně nárůst napětí. Počet, ale i rozmístění displejů se mohou velmi lišit a jejich design koreluje s daným typem letounu. Značné rozdíly panují především mezi různými třídami letounů. Letoun může být ve výsledku vybaven nejčastěji 1 - 6 EFIS displeji.

Zobrazení těchto informací v současnosti umožňují ve valné většině LCD displeje, který vyřadily kdysi taktéž užívané displeje CRT. Požadavky na displeje jsou nicméně velmi vysoké, neboť se jako ostatní přístroje řídí normou RTCA DO-160.

PFD Obsah PFD se liší mezi jednotlivými výrobci především svým grafickým ztvárněním, podle typu letadla se však mohou lišit i zobrazované přístroje. Příklad PFD využívaného NASA u Boeingu 737 můžeme nahlédnout v [11]. Je zřejmé, že mnohé zobrazené přístroje nejsou u ultralehkého letounu podstatné (machmetr), nebo jsou pro dané letové režimy zbytečné (vybavení pro přístrojové létání). Pro prezentaci funkcí integrovaných do PFD jsem vybral letoun Boeing B-777. Zobrazení PFD na obrázku 1.2 můžeme nalézt v [5, str. 3].

¹Převzato z: [17, str. 59]

Obrázek 1.2: Podoba obrazovky PFD u typu B-777²

MFD Funkčně nejpozoruhodnějším displejem v rámci systému EFIS je MFD. Zaměření MFD je především na navigační a radionavigační funkce. To přibližuje i článek [10, str.32]. V něm je uveden seznam některých MFD od významných světových firem.

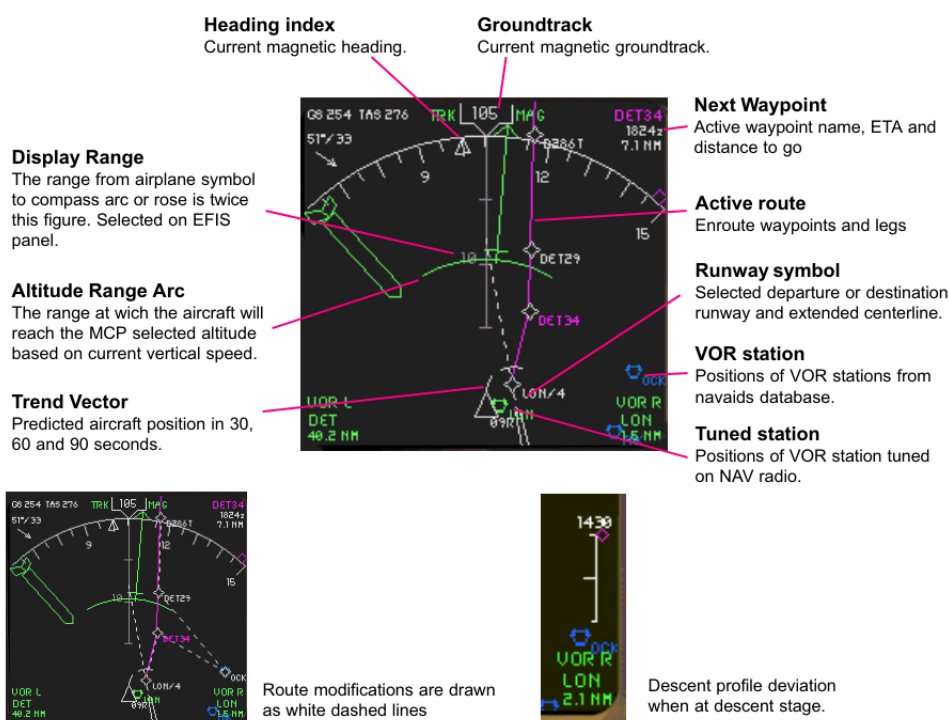
MFD je schopen kombinovat navigační obrazovku (ND) s jinými aktuálně využitelnými daty. Z článku [10, str.33] například vyplývá, že součástí mnohých těchto displejů jsou zobrazovače aktuálního letového provozu podle informací z vysílačů ADS-B nebo informace subsystému TCAS. Začleněn může být i povětrnostní radar. Typický MFD displej přibližuje obrázek 1.3 převzatý z [5, str. 8].

EICAS/ECAM Obrazovka s údaji týkajícími se motorů, paliva, protipožárních systémů, mechanizace a výstražných zpráv se nazývá EICAS. Většina displejů tohoto druhu umožňuje přepínání mezi obrazovkami podle současného režimu letu a podle dat z FMS. Obrazovka má za cíl zprostředkovávat data pro správné řízení spotřeby a zvýšení bezpečnosti letu. Příložený obrázek 1.4 nastiňuje možnosti zobrazení EICAS u letounu B-777 podle [5, str. 12].

1.2.2 Ovládací prvky

Tento subsystém umožňuje uživateli přímo ovládat volitelné prvky zobrazení a přepínat funkčnost jednotlivých displejů. Umožňuje-li systém zadávat data zároveň do více druhů

³Převzato z: [5, str. 3]



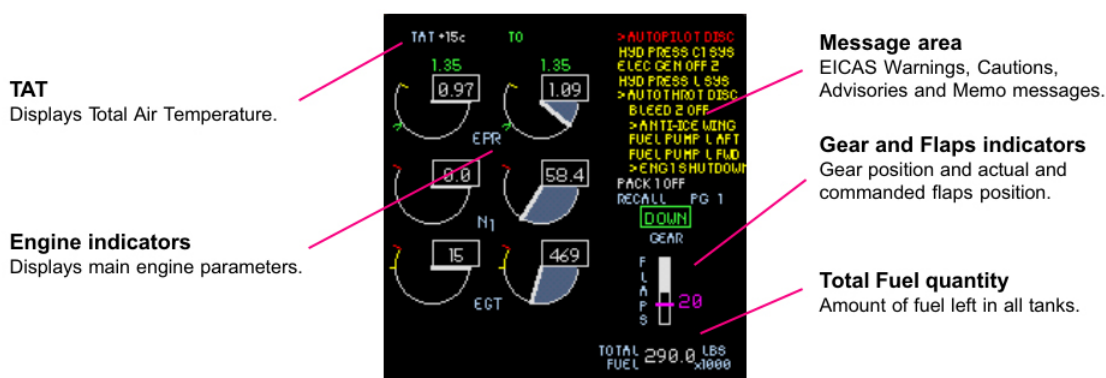
Obrázek 1.3: Podoba obrazovky MFD (mapové zobrazení) u typu B-777³

systemů prostřednictvím jedné volby, zprostředkuje systém EFIS distribuci vstupních dat všem poplatným systémům.

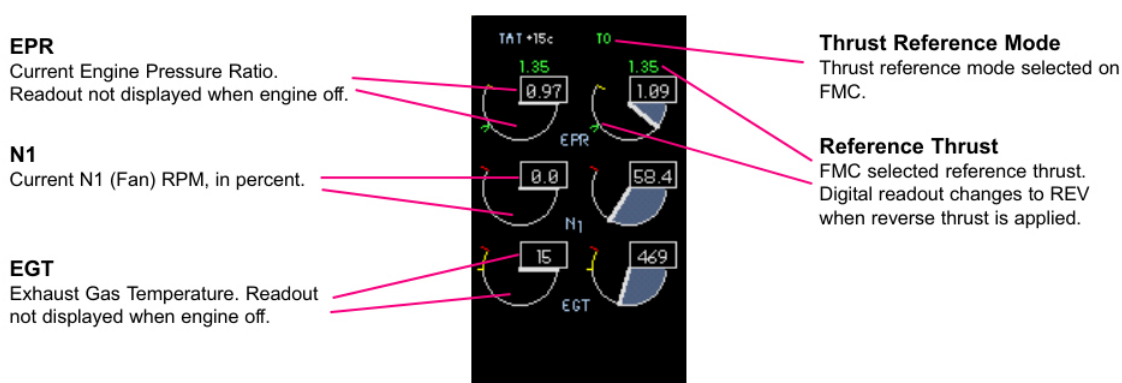
Právě v tomto subsystému se nejvýrazněji projevuje otázka ergonomie a HMI (Human Machine Interface), případně koncept „Intelligent Interface“ [20, 24-13]. Zde se projevují slabost a zároveň síla tradičního designu přístrojů. Na jednu stranu je klasická podoba přístrojů dobře čitelná a podobná obdobným návrhům u jiných letadel, na stranu druhou zbytečně limituje možnosti zobrazení displeje a možného rozhraní člověk - stroj. V současné době se proto často objevují dotykové obrazovky či moderní joysticky, kterými se dá zobrazení upravovat a libovolně přepínat. Výběr ideálního rozhraní a správného displeje může ulehčit vytvoření znalostní báze [20, 24-14]. Z konkrétní analýzy se pak mohou ukázat některé možnosti displeje jako nadbytečné, nebo naopak zcela nedostatečné. Přínosem je jednoznačně více systémový přístup k návrhu přístroje, než jaký byl doposud využíván k návrhu mechanických přístrojů.

Ačkoliv tedy interaktivita není u těchto systémů klíčovou, může se prokázat jako významná pro cílového zákazníka. Na trhu existují i směry využívající HMI pro návrhy lepších standardních palubních desek [8]. Rozšíření portfolia o EFIS displeje se tedy přímo nabízí.

³Převzato z: [5, str. 8]



Primary Engine Indicators



Obrázek 1.4: Podoba obrazovky EICAS u typu B-777⁴

1.2.3 Procesory dat

U systému EFIS mluvíme nejčastěji o Display Processing Computer, někdy také o Display Electronics Unit⁵. Ačkoliv je ústředním cílem všech těchto procesorů shromážďovat vstupní data a produkovat adekvátní data výstupní, jejich významnou úlohou je též monitoring. Tento monitoring odhalí vadné senzory, poruchu v přenosu dat, chyby přístroje a slouží jako komparátor.

V dřívějších dobách byl komparátorem systém, který monitoroval výstupy do kapitánova zobrazovače, a zároveň data, která obdržel první důstojník (FO). Pokud došlo k výrazné odchylce v těchto datech, spustilo se zvukové i obrazové varování. Současné systémy používají princip zcela stejný, ovšem separátní zobrazení může i nemusí být využito. Při digitální kontrole vstupních dat z příslušných senzorů (například senzorů náklonu) vyústí případná neshoda ve varování [1, str. 1]. Komparační obvody v současných systémech EFIS monitorují desítky takových parametrů. V případě neshody údajů lze tento obvod resetovat, což vyřadí zvukovou výstrahu, ale pokud neshoda trvá, obrazovka systému stále chybu hlásí.

⁴Převzato z: [5, str. 12]

⁵<<http://www.b737.org.uk/flightinsts.htm>> [Naposledy zhlédnuto: 9. 5. 2015]

Kontrola samotných zobrazovaných dat může být buď zcela vypuštěna (je-li zobrazovací jednotka natolik jednoduchá, že nemůže vyprodukovat chybu, jež by nebyla ihned zřetelná), či může být využito kontrolních mechanismů již dříve. Displej může mít svůj vlastní nezávislý procesor, který pošle výsledky do výpočetní jednotky Display Electronics Unit. Ta předpoví například náklon, který by danou odchylku v datech mohl způsobit, a pak výsledek porovná s daty z inerciálního systému či z AHRS. Takto odhalené chyby omezí možnost propuštění chybných vstupů do zobrazovací jednotky.

1.3 Rozšířená realita pro systém EFIS

Zlepšující se komponenty a rozvoj výpočetních systémů s postupem času umožnily implementaci dalších funkcí, které dříve pro EFIS nebyly dostupné. Velkým tématem se stalo zobrazení situace v bezprostředním okolí letadla přímo v systému EFIS. Poměrně zásadním bodem byl požadavek na minimální úpravu současných standardů, ale zároveň snížení minimálních rozhodovacích výšek pro stávající kategorie přístrojového přiblížení [9, str. 63].

Systém, který umožňuje vizuálně reprezentovat situaci v okolí letadla (např. v mlze), dovoluje nejen kvalitnější rozhodování, ale též pojistku proti selhání jiného primárního systému. Tento všeobecný směr vývoje zobrazovacích systémů lze rozdělit do několika základních podsystémů.

1.3.1 Enhanced Vision System

EVS Představuje technické řešení, které využívá kameru či radar [12, str. 27] ke snímání reálné situace. Získaný obraz umísťuje do kontextu systému EFIS či HUD. Zařízení může mít různé režimy snímání. V praxi se využívá nejvíce infračervených kamer, kamer s nočním viděním a mikrovlnných radarů. Využití těchto systémů u „business jetů“ rozšířil Gulfstream svým modelem G550 v roce 2003. V současnosti EVS patří do výbavy letounů od firem Gulfstream, Bombardier, Dassault či Boeing.

V případě EVS u strojů Gulfstream patřil mezi první⁶ zdroje informace záznam z infračervené kamery promítaný do HUDu. Toto řešení skutečně dosáhlo změny legislativy [19, str. 48]. Stroje vybavené certifikovaným systémem EVS mohou přistávat na runwaye kategorie CAT I za využití minim kategorie CAT II. Výstupy z mikrovlnných radarů jsou dosud doménou vojenskou, konkrétně se jedná o program Sandblaster [13]. Účelem tohoto systému je zvýšit přehlednost při přistávání helikoptér v oblasti zahalené do hustého dýmu, zvířeného prachu či písku.

Jednotlivé kombinace senzorů a zobrazovacích technik se nicméně vzájemně nevyklučují a jejich výstupy lze i slučovat na základě povětrnostních podmínek - jedinou podmínkou je správná kalibrace systému. Podoba systému EVS pro průhledový displej HUD je vidět na obrázku 1.5 převzatém z videa firmy Rockwell Collins.

⁶<http://www.gulfstream.com/product-support/product-enhancements/enhanced-vision-system>
[Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

Obrázek 1.5: EVS pro HUD od firmy Rockwell Collins⁷

1.3.2 Synthetic Vision System

Na rozdíl od EVS, jehož vstupem jsou data vzorkovaná v reálném čase, se systémy SVS vyznačují využitím databází s informacemi zeměpisného, geopolitického, hydrologického či leteckého charakteru. Výsledkem je tedy 3D model okolního terénu a význačných objektů, který odstraňuje závislost stroje na externích senzorech, nicméně klade velké nároky na přesnost informací o poloze. Podkladem pro 3D model v minulosti bývala data z DTED (Digital Terrain Elevation Data) [12, str. 28], v současnosti SRTM data, o kterých je pojednááno v další kapitole.

Koncept SVS byl odvozen již na přelomu 70. a 80. let v NASA, přičemž motivací byl posun k inteligentnější avionice pro letouny nové generace. Výzkum tohoto systému zaujal světové univerzity a ze snah v rámci těchto projektů se jako vedlejší produkt zrodil žánr leteckých simulátorů. Po dosažení prvních relevantních výsledků se SVS stalo vynikajícím prostředkem pro řízení dronů ze země. Zavedení SVS zobrazení do civilního letectví opět zprostředkovala firma Gulfstream.

V roce 2009 byl představen první displej, který byl zároveň certifikován FAA, a to v podobě SVS-PFD, tedy primárního letového displeje systému EFIS, do něhož bylo SVS začleněno. Umělý horizont byl tedy nahrazen skutečným modelem terénu. Právě tato koncepce se s postupem let stala oblíbenou u výrobců displejů pro nižší třídy letounů a pro ultralehká letadla. Zároveň představuje hlavní zdroj inspirace pro tuto diplomovou práci, jejíž zadání obsahuje funkcionality systému SVS.

Obrázek C1⁸ uvedený v příloze C prezentuje verzi systému SmartViewTM od firmy Honeywell, která využívá čistě syntetický terén. Pokročilejší CVS verze je prezentována dále.

⁷ <<https://www.youtube.com/watch?v=R6kKdwu6ss0>> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

⁸ <<http://myjetreview.com/html/honeywell-smartview.html>> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

1.3.3 Combined Vision System

Aby byl výčet systémů rozšířeného vidění úplný, je třeba zmínit také CVS systémy. Ústřední ideou takového řešení je kombinace přístupu SVS a EVS. V praxi to znamená, že v průběhu letu se využívá téměř výhradně zobrazení SVS, ale při přiblížení na přistání se aktivuje systém EVS, který je do SVS začleněn. Toto řešení lze reprezentovat jako 3D model terénu, který je v místě předpokládané pozice VPD nahrazen živě zachycenými daty. Takovéto zobrazení je opět součástí PFD. Ukázka zobrazení je uvedena v příloze C na obrázku C2 z webové stránky SAE International⁹. Minimální požadavky na výše uvedená technická řešení jsou uvedena v dokumentech RTCA DO-315B a Eurocae ED-179B [9, str. 62].

1.4 EFIS v ultralehkém letectví

V poslední době se s rozvojem spotřebitelské elektroniky objevují elektronické informační systémy i na palubě ultralehkých letadel. V jejich případě se jedná o zobrazovací jednotku, která vyžaduje připojení vstupů, a menší roli mají samotné procesory. Zato je trendem věnovat se pohodlnému ovládní takového displeje a v některých případech výrobci nabízí i serva umožňující zapojení autopilota.

Již jsem zmínil, že největšími lákadly těchto EFISů jsou formy zobrazení letových informací. Trendem jsou možnosti přepínání jednotek u přístrojů, SVS (Synthetic Vision System), podpora poježdění na letišti a zobrazení okolního provozu na základě příjmu Mode S, příp. ADS-B vysílání.

1.4.1 Dynon Avionics

Výrobce Dynon Avionics¹⁰ má na trhu několik jednotek použitelných pro tuto oblast letectví. Jmenovitě EFIS D-6, EFIS-D-60 SuperBright, EFIS D-10A, EFIS D-100 SuperBright. Tyto systémy se liší svými pokročilými funkcemi, ale základní vlastnosti zobrazení zůstávají stejné. V prodeji je taktéž systém kombinující zobrazení EFIS se systémem EMS (FlightDEK-180), ten jsem z následující tabulky 1.1 vynechal. Tabulka určuje, zda je EFIS vybavený danou funkcí (A/N), či zda je volitelná (V).

1.4.2 TL elektronik Czech

Další z významných systémů EFIS - tentokrát z české provenience - je zastoupen dvěma modely firmy TL elektronik¹¹. Jmenovitě se jedná o modely EFIS INTEGRA TL-6560 a EFIS INTEGRA TL-6524. První jmenovaný je vybavený devítipalcovým displejem, druhý jmenovaný o dva palce menším.

Systémy EFIS tohoto výrobce obsahují drtivou většinu výše uvedených funkcionalit. Ozvláštňením je možnost zapojení externí ovládací jednotky. Tato úloha byla v minulosti řešena ve spolupráci s ČVUT v Praze. Využití podobné jednotky bylo tedy implementováno

⁹<http://www.sae.org/dlymagazineimages/web/516/10695_13335.jpg> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

¹⁰<<http://www.dynonavionics.com>> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

¹¹<<http://www.tl-elektronic.com>> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

Tabulka 1.1: Přehled výbavy EFISů od firmy Dynon Avionics

	EFIS D-6	EFIS D-60	EFIS D-10A	EFIS D-100
Vzdušná rychlost	A	A	A	A
Polohové úhly	A	A	A	A
Výška	A	A	A	A
Kulička	A	A	A	A
Gyrokompas	A	A	A	A
Vertikální rychlost	A	A	A	A
Kódovaná výška	A	A	A	A
Úhel náběhu	V	V	V	V
Záložní baterie	V	V	V	V
Kompas	A	A	V	A
Super Bright obrazovka	N	A	N	V
GPS ground speed	A	A	A	A
Senzor přetížení	N	N	A	A
HSI	N	N	A	A
Sestupová rovina	N	N	A	A
Autopilot	N	N	A	A
Sesíťování s jiným EFIS	N	N	A	A
Bugy	N	N	A	A
Checklisty	N	N	A	A
Data logging	N	N	A	A
Hodiny	N	N	A	A
Časovač	N	N	A	A
TAS	N	N	A	A
GPS kurz větru	N	N	A	A
Výšková varování	N	N	A	A
Více zobrazených oken	N	N	A	A

i do zadání této práce. Podobně jako někteří zahraniční výrobci i TL elektronik umožňují dokupovat různé moduly a programové vybavení zvlášť. Součástí této nabídky je monitorování pohonné jednotky, čímž se tato koncepce blíží i systémům EMS.

Rozlišení přístroje EFIS INTEGRA TL-6524 činí 800x480, přičemž jeho jas dosahuje hodnoty 800 cd/m². Externí jednotky jsou propojitelné pomocí RS-232, CANaerospace či volitelně pomocí ARINC429. Hmotnost přístroje činí 1190 g.

1.4.3 Garmin

Světověznámá firma Garmin se jednodušším EFIS systémům věnuje také. Její produkt G3X¹² patří při základní ceně 4 375 USD mezi nejdražší podobné systémy. Cena produktů firmy Dynon Avionics je pro srovnání zhruba poloviční. Je to způsobeno tím, že G3X v sobě již při základní konfiguraci obsahuje EMS, jednotku ADAHRS, magnetometr a sondu teploty vnějšího vzduchu. Toto vybavení je sekundováno softwarovou výbavou zahrnující nejen dříve zmíněné funkcionality, ale taktéž některé terénní atributy (přítomnost řek, jezer), které se pak zobrazují na displeji s vysokým rozlišením.

I přístroj firmy Garmin umožňuje aktivovat autopilota a připojit jednotky se senzory motorových parametrů. Jako doplněk autopilota lze dokoupit i externí ovládací panel. Přístroj zvládá také zobrazovat okolní provoz pomocí příjmu signálů ADS-B a je vybaven mnoha různými zobrazeními specifickými pro danou fázi letu. Software pomáhající při pojíždění, monitorování letových prostorů, leteckých překážek, aj. Tato funkčnost taktéž inspirovala zadání této práce.

1.4.4 ForeFlight

V oblasti aplikací pro iPad je výběr pomůcek pro létání již poměrně široký. Pro porovnání s předchozími systémy jsem vybral systém ForeFlight¹³, který je svým pojetím poměrně blízký projektu EFIS 3D. Hlavním důvodem je zakomponování 3D terénu obohaceného o některé terénní atributy (např.: přítomnost řek či jezer). Zároveň získává informace o poloze pomocí GPS modulu daného zařízení, což je podobné principu, kterým budeme EFIS 3D testovat.

1.5 EFIS pro simulátor CAST

Součástí projektu, který se zabývá zvyšováním bezpečnosti v ultralehkém létání, je také simulátor využívající principu Stewartovy plošiny pro simulování přetížení působících na pilota letounu. Simulátor umožňuje zkoumat ovladatelnost a přehlednost přístrojového vybavení za podmínek věrných skutečnému letu.

Doposud byl simulátor ovládán za pomoci EFISu s omezenými prvky 3D rozhraní (kupříkladu pro navedení na nouzové přistání), ovšem nebylo nikdy dokončeno plynulé zobrazení 3D terénu přímo v této aplikaci. U přístroje EFIS je samozřejmě klíčovým prvkem spolehlivost, která je u stávajícího systému velmi vysoká. Osvědčil se na vícero prezentacích fakulty, kde byl v provozu nepřetržitě i několik hodin.

Právě tento systém je výchozím bodem pro můj návrh systému, který obsáhne i 3D zobrazení terénu s rozumnou rychlostí vykreslování. 3D zobrazení umožní zobrazovat četné přidávané informace, o kterých se podrobněji rozepisuji v další kapitole.

Školní systém EFIS představuje software běžící na běžném PC s operačním systémem Windows. Jeho rozhraní bylo doposud limitováno na příjem dat ze simulátoru Flight Gear

¹²<http://www.garmin.com/us/products/intheair/sport-aviation/g3x> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

¹³<http://www.foreflight.com/products/foreflight-mobile/synthetic-vision> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

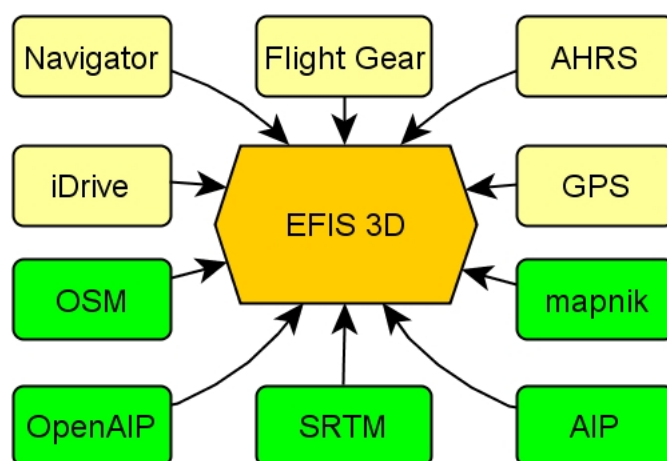
a přístroj nepodporoval plnohodnotné 3D zobrazení terénu či letových prostorů. Přístroj obsahuje rychloměr, výškoměr, kompas, variometr, indikátor úhlu náběhu, zatáčkoměr, relativní příčný sklonoměr, umělý horizont, ukazatel podélného náklonu a menu ovladatelné externím ovladačem. Navíc je možné nastavovat „bugy“ označující pilotem žádané hodnoty letových parametrů. Ty pak umožňují snáze se těmito parametry přiblížit a udržovat je během letu v daných mezích.

Kapitola 2

Mapové podklady

Pro správnou funkčnost jakéhokoliv informačního systému je klíčové napojení na databázi, z níž svá data čerpá. V rámci projektu padlo rozhodnutí využívat offline data pravidelně aktualizovaná ze školního serveru. Data popisovaná v této kapitole obsahují informace o terénu a o terénních atributech, na jejichž základě lze obsažené informace interpretovat ve vysokém rozlišení.

Schéma uvedené níže (obr. 2.1) reprezentuje veškeré zdroje informací, jejichž zobrazení v programu EFIS 3D vyžadujeme, oproti rozhraním, jež je důležité podporovat. Ze schématu je patrné, že od výsledného programu je požadována poměrně velká flexibilita - pro laboratorní i venkovní využití. Diplomová práce rozebírá postupně všechny prvky tohoto schématu a jako první v pořadí se budeme podrobněji zabývat „OSM“, „SRTM“ a „mapnikem“¹.



Obrázek 2.1: Zdroje informací a rozhraní systému EFIS

¹Pozn.: Všechny zmiňované datové podklady byly připravovány ve spolupráci se studentem Jakubem Fillou, který pro ně zřídil univerzitní server. Níže uvedené zdroje dat tedy referencují zdroje, ze kterých jsou data přenášena na tento univerzitní server.

2.1 SRTM

Nejnižší vrstvou finálního zobrazení je trojrozměrný terén zobrazený podle dat SRTM. Data SRTM jsou výsledkem mise STS-99, která pořídila digitální záznam průběhu nadmořských výšek terénu vztahených k EGM96 (Earth Gravitational Model 1996). SRTM data jsou dostupná z mnoha veřejných serverů přes protokol ftp. Pro potřeby našeho projektu jsme se rozhodli pro naplnění databáze ze serveru CGIAR-CST².

Jak je všeobecně známo, data SRTM pokrývají povrch Země od 56° j.š. až po 60° s.š. Prvotní data obsahovala velké množství vad. Vědecká komunita nicméně přišla s algoritmy, podle kterých lze tato neurčená místa dopočítat. Od roku 2012 je tedy možné tato opravená data využívat pro celý svět. Tato verze programu EFIS 3D využívá verzi SRTM, která má rozlišení na úrovni tří úhlových sekund (data s přesností jedné úhlové sekundy byla k dispozici jen pro Spojené státy). Od září 2014 má celý svět s výjimkou Blízkého východu a Severní Afriky rozlišení jedné úhlové sekundy, podle vybraného zdroje dat lze z tohoto důvodu v EFIS 3D přepínat rozlišení SRTM dlaždic.

SRTM dlaždice se nacházejí v adresáři programu ve složce „data\SRTM“. Zde nahrané soubory jsou později načítány programem EFIS 3D po částech. Není tedy využito celé dlaždice, ale pouze menších segmentů načtených speciálním algoritmem. Přechody mezi těmito výslednými dlaždicemi je pak nutné dopočítat vždy s ohledem na dlaždice sousední. Paměťová náročnost takové operace naštěstí není tak vysoká, aby výrazně omezovala funkčnost programu. Díky tomu mohou SRTM dlaždice být využívány bez pre-processingu a není je potřeba žádným způsobem rozšiřovat.

Již jsem zmínil, že původní SRTM dlaždice (kde je u všech verzí základní dělení po jednom stupni šířky, respektive délky) dále dělíme na dlaždice menší. Princip tohoto dělení je takový, že v rámci programu stanovíme počet segmentů, na který se má interval jednoho stupně dále rozdělit. Následně jednotlivé díly indexujeme. Princip této indexace jednoduše přibližuje následující obrázek 2.2. Na obrázku vidíme původní dlaždici SRTM N49E014. Rovnoběžka i poledník, které ji vymezují, jsou na obrázku znázorněny. Vnitřní struktura pak využívá indexaci, která si jako základ převezme původní indexy SRTM dlaždice.

Rozdíl N a S (severní a jižní šířky) i E a W (východní a západní délky) odlišujeme v nové indexaci pouze znaménkem. Vrátime-li se k obrázku 2.2 a zaměříme-li se na dlaždici v levém dolním rohu, vidíme indexy 4900 a 1400. To znamená, že výsledný identifikátor této dlaždice bude string „4900_1400“. Pokud by se jednalo o případ s hodnotami 49° j.š. a 14° z.d., měl by řetězec tvar „-4900_-1400“. Jsme-li schopni dlaždice takto dělit, můžeme tím optimalizovat počet dat, která je nutno umístit do grafické paměti během samotného vykreslování, a zároveň nám to může výrazně pomoci v práci s texturami.

Odvozování příslušných indexů zajišťuje funkce „LoadMapTile()“ deklarovaná v souboru „tile.h“. Pro veškeré prezentace spojené s diplomou prací je jedna dlaždice SRTM rozdělena na 100 indexovaných dlaždic podle vzoru obrázku 2.2. Dělení 10x10 je zároveň nejvyšším přípustným dělením, které program podporuje.

²<http://srtm.csi.cgiar.org> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

	14° v.d.			15° v.d.		
50° s.š.	4904	4904	4904	4904	4904	4904
	1400	1401	1402	1403	1404	1404
	4903	4903	4903	4903	4903	4903
	1400	1401	1402	1403	1404	1404
	4902	4902	4902	4902	4902	4902
	1400	1401	1402	1403	1404	1404
	4901	4901	4901	4901	4901	4901
	1400	1401	1402	1403	1404	1404
	4900	4900	4900	4900	4900	4900
49° s.š.	1400	1401	1402	1403	1404	1404

Obrázek 2.2: Dělení SRTM dlaždic na dílčí indexované dlaždice

2.2 OSM a mapnik

Program EFIS 3D původně pracoval s konceptem plně vektorového zobrazení, což se ale posléze ukázalo jako značně nevýhodné. Výpočetní výkon potřebný k plnému zobrazení tak složitých útvarů, jako jsou hranice lesů či vodních ploch, byl enormní a výsledky neuspokojivé (viz příloha C, obr. C3).

Již v prvopočátcích projektu se čerpalo z projektu „OpenStreetMap“ (OSM³), jenž obsahuje data pro celý svět vkládaná uživateli. Licence OSM varuje před využitím dat pro letecké účely, nicméně v našem případě data mají sloužit pouze jako podpora, nikoliv základní navigační prvek, tudíž jsme přistoupili k rozhodnutí data využít. Ze stránek projektu lze data stahovat v mnoha podobách a formátech.

S pomocí Jakuba Filly se podařilo využít zdrojové soubory „OpenStreetMap“ k vytvoření textury pomocí aplikace „mapnik“⁴. Textury mají sice nevýhodu fixního rozlišení a nemožnosti přímo zvýrazňovat jednotlivé objekty, nicméně umožňují k datům přistupovat dynamicky (je jednoduché data rozdělit do dlaždic podobných těm na obr. 2.2). Již představená indexace SRTM dat je tedy využita i pro pojmenování výsledných textur.

Díky aplikaci „mapnik“ je obsah mapových podkladů volitelný a může i nadále podléhat úpravám. To vše za účelem toho, aby zobrazení v systému EFIS 3D usnadňovalo srovnávací navigaci, poskytovalo doplňkové informace a zvyšovalo přehled pilota o svém okolí. Konkrétní využití zobrazovaných terénních atributů je rozebráno níže.

³<www.openstreetmap.org> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

⁴<<http://mapnik.org>> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]




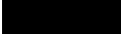
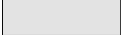


2.2.1 Typ povrchu

Pro srovnávací navigaci je velmi důležité moci korelovat charakteristické tvary velkých ploch s plochami zanesenými v mapě. Mezi takové plochy se jednoznačně řadí lesy, pole, vodní plochy, ale i zástavba či rozsáhlé umělé objekty. V texturách, ze kterých čerpá program EFIS 3D, rozhodně nalezneme všechny tyto kategorie a čelíme spíše tomu, jaké barvy zvolit pro charakterizaci jednotlivých typů povrchu. Charakterizace povrchu v 3D zobrazení si neklade za cíl věrně reprezentovat krajinu, nýbrž zvýraznit určité objekty či plochy (podobně jako tomu je u map), a proto se přistupuje k zobrazení výraznými barvami.

V další řadě pracujeme s liniovými objekty, které slouží v navigaci jako dočasná reference pro vytyčení trati. Předpokládejme situaci, kdy pilot ztratí pojem o své přesné pozici. V takovém případě je program EFIS 3D cennou pomůckou při nalezení objektu (např.: silnice vedoucí kolem letiště) pomocí srovnávací navigace. Navíc je poměrně jednoduché tento objekt dále sledovat a dostat se do cílového místa bez explicitního využití GPS informace.

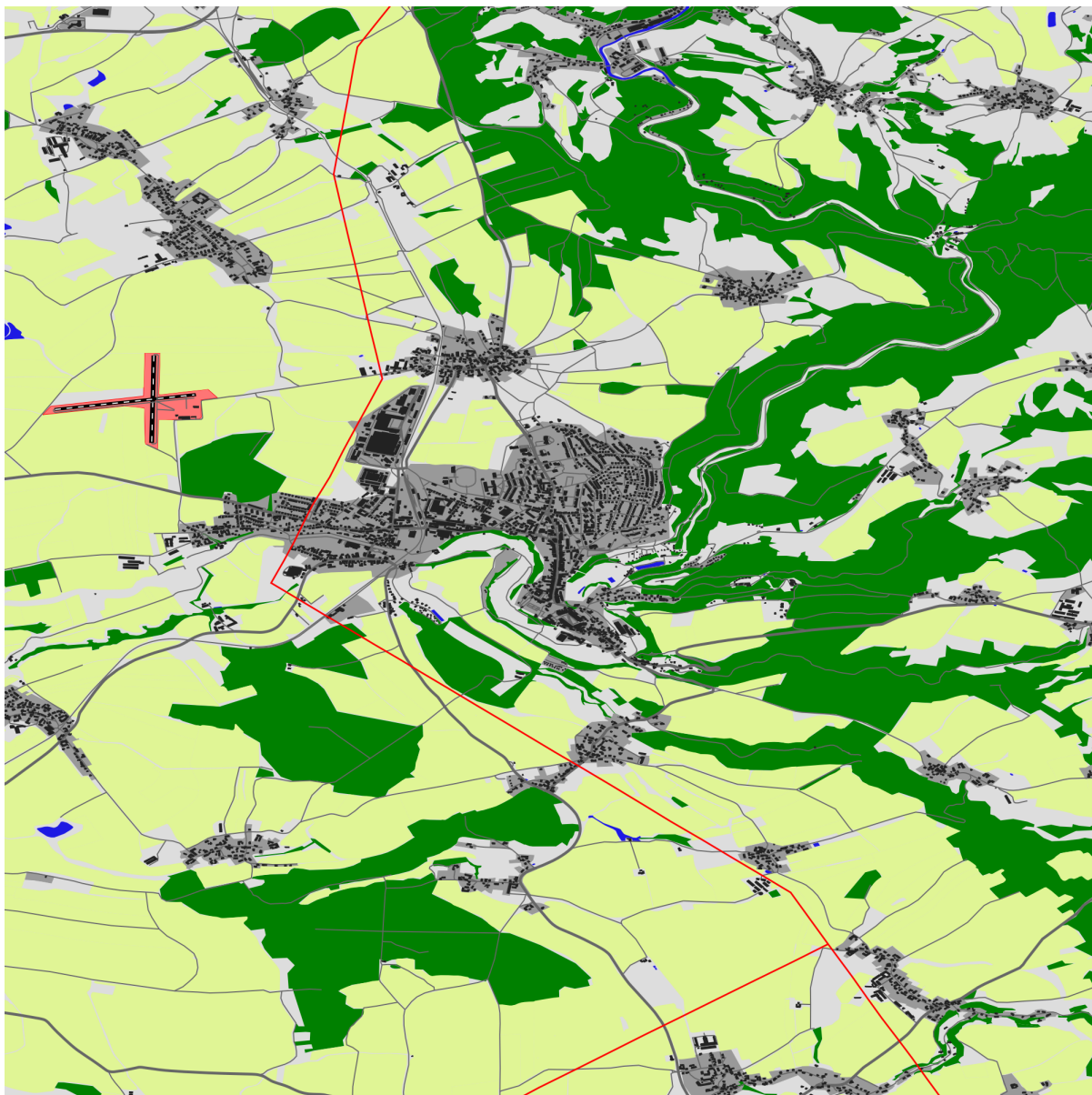
V následujícím vzorkovníku 2.1 je možné porovnat jednotlivé barvy a kategorie povrchových útvarů, které jsou jimi vyznačené. Ukázka hotového mapového zobrazení následuje na obrázku 2.3.

Tabulka 2.1: Legenda zobrazení EFIS 3D

Barva	Liniové útvary	Plošné utvary
	elektrická vedení	letiště
	-	lesy
	vodní toky	vodní nádrže
	vzletová a přistávací dráha	budovy
	silnice, železnice, pojezdové dráhy	zástavba
	-	pole
	-	neudržovaná půda

2.2.2 Elektrická vedení

Jak je ukázáno výše, informace o elektrických vedeních, elektrárnách a transformátorech jsou taktéž součástí dat z OSM. Především v oblasti ultralehkého létání se jedná o velmi důležité informace, neboť právě elektrická vedení jsou častou příčinou leteckých nehod malých strojů. V 3D zobrazení jsou vedení zvýrazněna pouze v rámci textury. Na základě rozboru tohoto řešení v kap. 6 vyplývá, že viditelnost potenciálně nebezpečného vedení je nedostatečná. Proto je na místě z OSM čerpat data pro vykreslení vedení v plně 3D podobě (tedy jako objekty mimo texturu). Toto řešení zůstává v současné době pouze konceptem, neboť vektorový přístup k datům z OSM vyžaduje jiné přístupy k datům z databáze než současné řešení.



Obrázek 2.3: Ukázka terénní dlaždice mapového zobrazení EFIS 3D

Kapitola 3

Vizualizace pomocí OpenGL 3.3+

Následující kapitola je věnována zobrazování terénu a terénních charakteristik, což patří mezi základní požadavky kladené na tuto diplomovou práci. Samotné zobrazení bylo také nejdéle zkoumáno a implementováno. Jako vhodný nástroj pro práci s 3D i 2D daty bylo vybráno rozhraní OpenGL. Důvodem byly předchozí kladné zkušenosti s tímto rozhraním, uživatelská přívětivost a veřejně přístupná dokumentace. OpenGL patří mezi přední nástroje pro programování grafiky, tudíž lze mezi důvody zařadit i optimalizované knihovny, které práci s tímto nástrojem dále zjednodušují.

Projekt s OpenGL počítal již od samého počátku, tudíž i struktura programu je využití tohoto nástroje zcela podřízena. Pro vytvoření kontextu OpenGL byly využity knihovny „freeglut“ a „glew“. Pro podporu výpočtů ve zvláštním vláknu bylo později do projektu začleněno i SDL.

3.1 Architektura programu

Poněvadž je zobrazení terénu klíčovou funkcí systému EFIS 3D, je kolem ní tento nástroj vystavěn. Tomu odpovídá také architektura celého programu. Tělo programu je obsahem souboru „efis.cpp“ a obsahuje především inicializaci OpenGL kontextu a základní smyčku programu, jejíž handly jsou obsluhovány funkcemi knihovny „freeglut“.

Základní konfigurační parametry a další nastavení sdílená celým programem jsou součástí instance třídy „Cconfig“, která má označení „g“. Tudíž například proměnná „scalefac“ klíčová pro zobrazení je v programu dostupná jako „g.scalefac“.

Všechny funkce využívané pro vykreslování terénu jsou uvedeny v souborech „display.h“ a „display.cpp“. Volány jsou v rámci kontextu, jenž popisuje „efis.cpp“. Vykreslování textu a dalších objektů obstarávají k tomu speciálně vytvořené třídy, k nimž se budu vyjadřovat podrobněji vždy v daném kontextu.

3.2 Inicializace OpenGL

Klíčovým prvkem pro cílové zobrazení je správná inicializace všech knihoven, procedur a funkcí, ke kterým budeme později přistupovat. Stejně klíčové je i vytvoření správného kontextu a vlastní návrh grafické pipeline (klíčový prvek u OpenGL verze 3 a vyšší).

Tabulka 3.1: Seznam zdrojových souborů projektu EFIS 3D (mimo shaderů)

Název	Přípona	Stručný popis
Asp	.h/.cpp	letový prostor (třída)
AipParser	.h/.cpp	parser letových prostorů
Ano	.h/.cpp	letecká překážka (třída)
AnoParser	.h/.cpp	parser leteckých překážek
Cconfig	.h/.cpp	konfigurační třída
Cfonts	.h/.cpp	třída pro práci s texty
CFrustum	.h/.cpp	třída pro komolý jehlan výhledu kamery
Cinstruments	.h/.cpp	třída pro správu virtuálních přístrojů
Cmenu	.h/.cpp	třída pro tvorbu a ovládání menu
connections	.h/.cpp	deklarace funkcí pro propojení s externími nástroji
CPlane	.h/.cpp	třída pro popis roviny
display	.h/.cpp	deklarace vykreslovacích funkcí
downloadSRTM	.h	stahování SRTM dat
efis	.cpp	tělo programu
GLSL_Shader	.h/.cpp	třída ulehčující práci se shadery
INS_GPS	.h/.cpp	třída pro připojení k AHRS jednotce
OGLFT	.h/.cpp	třída pro vykreslení textu (MIT licence)
SRTM	.h	funkce pro načítání dat o terénu
structs	.h	deklarace struktur používaných v programu
tile	.h	funkce pro tvorbu terénních dlaždic

Parametry, se kterými je program spouštěn, lze nastavovat v konfiguračním TXT souboru, jenž má formát

```
PARAMETR_1=HODNOTA_1
PARAMETR_2=HODNOTA_2
...
```

Nastavitelné proměnné uvádím v tab. 3.2. Soubor je pojmenován „config.txt“ a je umístěn v adresáři „data/“. Proměnné typu „boolean“ jsou pro účely konfiguračního souboru aktivovatelné využitím čísel 0 či 1 (logická nula, logická jednička). Mezi parametrem či zadanou hodnotou a rovnítkem by neměla být umístěna mezera ani žádný jiný znak.

Tabulka 3.2: Popis parametrů v konfiguračním souboru

Název parametru	Typ	Proměnná	Popis
IDRIVE_PORT	int	g.iDrive	kom. port pro iDrive
FGC_PORT	int	g.FGC	kom. port pro FGConnector
COM_GPS	uint	g.COM_GPS	COM port pro GPS
COM_INS	uint	g.COM_INS	COM port pro INS
PITCH_OFFSET	float	g.pitch_off	odchylka úhlu klopení (INS)
ROLL_OFFSET	float	g.roll_off	odchylka úhlu klonění (INS)
WIDTH	float	g.width	šířka okna
HEIGHT	float	g.height	výška okna
WINDOW_X	int	g.INIT_X	posun okna v ose X
WINDOW_Y	int	g.INIT_Y	posun okna v ose Y
FULLSCREEN	bool	g.fullscreen	celá obrazovka
3D	bool	g.e3D	aktivace 3D
SRTM_VERSION	int	g.SRTM_version	počet dat na 1 úhl. stupeň
ELEMENTS	int	g.elements	počet dlaždic na 1 úhl. stupeň
VIEW_DISTANCE	float	g.zFar	vzdálenost vzdálené ořezové roviny
VIEW_DISTANCE_NEAR	float	g.zNear	vzdálenost blízké ořezové roviny
ZOOM_SPEED	float	g.scaleFac	rychlost přiblížení obrazu
MAP_DRAG_SPEED	float	g.DragSpeed	rychlost posunu obrazu
ELEVATION_FACTOR	float	g.elevation	měřítko výšky terénu
MAP_VIEW_SCALE	float	g.scale	výška pohledu na mapu
TERRAIN_SHIFT	float	g.terrain_shift	vertikální posun terénu (odchylka od AMSL)
DEFAULT_UNIT_ID	uint	g.unit_id	identifikátor sady jednotek
A/C_MAX_AIRSPEED	float	g.max_airspeed	maximální rychlost letounu v uzlech
A/C_OVERSPEED	float	g.overspeed	nebezpečná rychlost letounu v uzlech
A/C_STALL_SPEED	float	g.stall_speed	pádová rychlost letounu v uzlech
AIP_AREAS_VISIBLE	bool	g.bool_areas	viditelnost prostorů
AIP_DA_PA_RA	-	-	data o omezených oblastech
AIP_CTR	-	-	data o okrcích letišť
AIP_TMA	-	-	data o koncových oblastech

3.3 Matrix stack

Neboť se v průběhu práce na projektu ukázalo jako nezbytné implementovat do mého kódu využití shaderů, musela být upravena i struktura matic, které popisují translace, rotace a další vlastnosti zobrazení.

Při vykreslování v OpenGL prochází každý vrchol transformací, která později umožní přiřadit danou polohu i barvu určitému pixelu v grafickém okně [15, str. 10]. Tato sada matic může být reprezentována vnitřními proměnnými OpenGL, ale může být také nahrazena. To má své výhody v podobě přehlednějšího a volnějšího zápisu kódu. Knihovna využívaná za tímto účelem nese jméno GLM.

GLM (OpenGL Mathematics)¹ představuje knihovnu pro programovací jazyk C++, která je odvozena od postupů dříve využívaných jen v jazyce GLSL (OpenGL Shading Language). Programátoři v C++ prostřednictvím tohoto softwaru získávají přístup k třídám a funkcím, jež jsou nezbytné pro snadnou komunikaci s vyššími grafickými programovacími jazyky. Tato knihovna tedy umožní přistupovat již během kódování ke všem maticím a vektorům tak, jak je následně budeme interpretovat v programování shaderů. Získáváme tím především větší konzistenci kódu a lepší čitelnost. Výhodou je ale i možnost implementovat složitější funkce přehlednějšími příkazy.

V konfigurační třídě 'Cconfig' projektu EFIS 3D jsou již připraveny matice rozměru 4x4:

- **P** ... projection matrix
- **M** ... model matrix
- **V** ... view matrix
- **MV** ... kombinovaná matice modelview matrix

3.3.1 Projection matrix

Projekční matice je definována takto ([15, str. 832])

```
g.P=glm::perspective('FOV','poměr stran','bližší ořez. rovina','vzdál. ořez. rovina');
```

Tato matice - jak vyplývá z jejího tvaru - vytváří projekci vrcholů z koordinát kamery (camera space/view space) do koordinát projekčních (screen space/clip space). Je tedy zodpovědná za finální podobu scény v okně.

¹<http://www.g-truc.net/project-0016.html> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

3.3.2 View matrix

Pohledová matice je definována:

```
g.V=glm::lookAt ('pozice kamery','střed pohledu','osa Y kamery');
```

Tato matice slouží k převodu souřadnic vrcholů z koordinát globálních (world space) do souřadnic kamery (camera space/view space). Vytváří dojem umístění kamery v 3D prostoru, ačkoliv se jedná pouze o posuny objektů.

3.3.3 Model matrix

Matice modelu pak zahrnuje všechny translační, rotační a měřítkové operace se vstupními daty. Translační matici můžeme vyjádřit následovně [15, str. 832]:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Programově využijeme v GLM příkaz

```
T=glm::translate(T,glm::vec3(x,y,z));
```

Matice pro změnu měřítka je vyjádřitelná jako [15, str. 832]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 & 1 \\ 0 & y & 0 & 1 \\ 0 & 0 & z & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

V programu je totéž zapsané jako

```
S=glm::scale(S,glm::vec3(x,y,z));
```

Rotace pak můžeme reprezentovat [15, str. 832] maticemi pro rotace podél jednotlivých os v daném pořadí. Vždy je doplněn i patřičný GLM příkaz pro využití této rotace.

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

```
Rx=glm::rotate(Rx,glm::vec3(1,0,0))
```

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

```
Ry=glm::rotate(Ry,glm::vec3(0,1,0))
```

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

```
Rz=glm::rotate(Rz,glm::vec3(0,0,1))
```

Kombinací rotace, posunu a změny měřítka pohybujeme modelem v souřadnicích globálních (world space). Výchozí pozice modelu je chápána jako souřadnice v souřadnicích objektu (object space).

3.3.4 Výsledná transformace

Cílem je odeslat shaderu ukazatel na matici MVP, která kombinuje efekt všech matic uvedených výše. Získáme ji jako

$$\mathbf{MVP} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{M} \quad (3.6)$$

Díky využití GLM knihovny můžeme tedy jednoduše zapsat

```
MVP=P*V*M;
```

3.3.5 Posloupnost transformací v programu EFIS 3D

Program EFIS 3D všechny body posouvá o vektor pozice letounu

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} -x_{pos} \\ -y_{pos} \\ -z_{pos} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Kolem počátku souřadnic následně provádí všechny rotace - tedy opravu podle kurzu, klopení a klonění. Po provedení všech transformací přesouvá souřadnice zpět na jejich místo ve „world space“, tedy o vektor $-\vec{v}$. Na zobrazení je aplikována také škálovací matice, která poměry stran všech objektů upraví tak, aby se blížily reálné podobě (nikoliv tedy striktní geodetické projekci z LLH souřadnic). Poměr os y a x je nastaven na 1.6.

Transformace přístrojů a menu jsou odděleny a řešeny samostatně. Není zapotřebí žádných úprav měřítka ani rotací (nevyžaduje-li je koncept přístroje).

3.4 Shadery

Vzhledem k tématu práce jsem se rozhodl pojednat podrobněji o shaderech, které využívám, a jejichž užití odlišuje moji práci od předchozích přístupů k programu EFIS. Shaderem rozumíme program, který běží na GPU a je součástí programovatelné grafické pipeline. Význam shaderů spočívá v přesunutí části výpočetního výkonu z CPU na GPU. Aby takový přesun byl efektivní, je nutné dodržet jistá pravidla jeho užívání. Například zvolit co nejméně vstupů do shaderu a volat jej ekonomicky - jen v případě jeho bezprostředního užití.

Shadery klasifikujeme na tři druhy (druhý uvedený přibyl v rozšířeních OpenGL 3.3+):

- vertex shader
- geometry shader
- fragment shader

3.4.1 Vertex shader

Shader reprezentuje kód ve speciálním jazyce pro psaní shaderů (shading language), v mém případě GLSL (OpenGL Shading Language) [14]. Příkladem tohoto jazyka je následující ukázka vertex shaderu:

```
#version 330

layout(location = 0) in vec3 vVertex;

uniform mat4 MVP;
uniform vec3 RGB;

void main()
{
    gl_Position = MVP*vec4(vVertex,1);
}
```

Tento úsek kódu se kompiluje vždy při spuštění programu a zařizuje přepočítání ze soustavy „object space“ do soustavy „world space“ [14, str. 45], „camera space“, a následně do „screen space“ (zde provedeno v jednom kroku pomocí matice MVP). Vidíme tedy, že notnou část přepočítání vyhodnotí shader, přičemž jeho jedinými vstupy jsou poloha daného vrcholu, jeho barva (kterou nezpracovává, jen posílá dále) a matice MVP.

3.4.2 Geometry shader

Vertex shader tedy pracuje na úrovni jednotlivých vrcholů a je první v pořadí grafické pipeline. Následuje volitelný geometry shader. Ten již pracuje na úrovni jednotlivých primitiv (rozumějně základních geometrických tvarů definovaných v OpenGL). Příkladem tohoto shaderu může být např. následující kód:

```
#version 330 core

layout (triangles) in;
layout (triangle_strip, max_vertices=3) out;

in vec3 vertex[];
in vec3 normal[];
in vec2 vUV[];
out vec3 vNormal;
out vec2 UV;
```

```

uniform mat4 MVP;
uniform vec4[] FrustumPlanes;

bool PointInFrustum(in vec3 p)
{
// *OBSAH VYNECHÁN*
}

void main()
{
for(int i=0;i<gl_in.length(); i++)
{
// JE VE FRUSTUM?
if(PointInFrustum(vertex[i])) {
gl_Position=gl_in[i].gl_Position;
vNormal=normal[i];
UV=vUV[i];
EmitVertex();
}

}
EndPrimitive();
}

```

Uvedený geometry shader je poměrně rozsáhlý, ale umožňuje ořezávat vše, co nespadá do komolého jehlanu kamery, tedy vše, co není viditelné. Přínos z hlediska rychlosti zobrazování není velký, ale přesto znatelný. Vstupem jsou tři vrcholy za sebou (tvořící primitivum `GL_TRIANGLE`) a pole čtyřrozměrných vrcholů popisující 6 rovin tvořících zmíněný komolý jehlan (frustum). Funkce, jejíž obsah byl za účelem přehlednosti vynechán, vypočítává, zda primitivum je alespoň částečně viditelné. Výpočet probíhající ve funkci „`PointInFrustum()`“ probíhá na základě odvození následujícího níže.

Naším základním předpokladem je popis roviny pomocí normálového vektoru (obr. 3.2). Pro určení vektorů všech rovin však nejdříve požadujeme jednotlivé body, které v nich leží, k čemuž využijeme parametry na obrázku 3.1.

Využíváme k tomu jednoduchých vztahů, u kterých potřebujeme znát vzdálenosti bližší a vzdálené ořezové roviny,

$$Z_{near} = nearDist$$

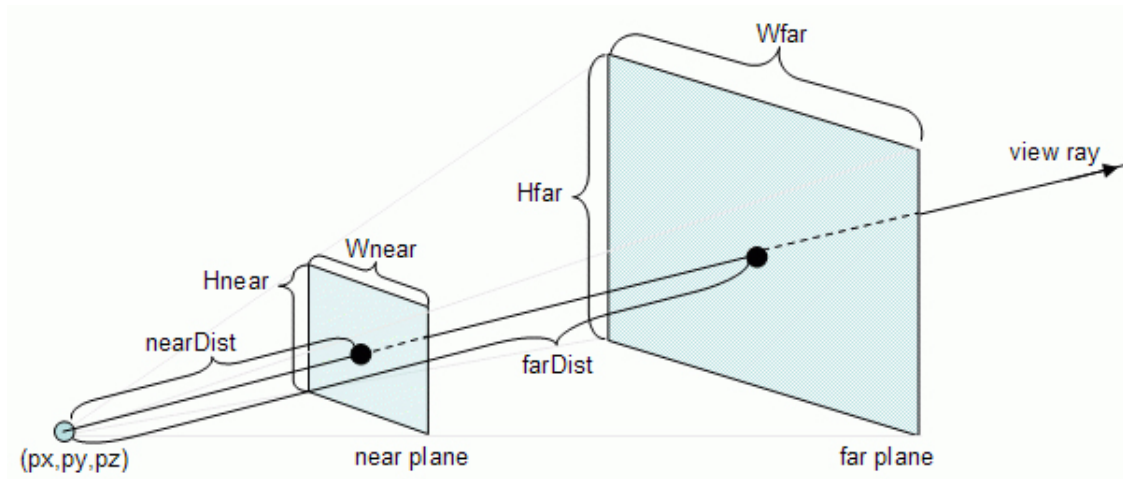
$$Z_{far} = farDist$$

FOV parametr vyjádřený úhlem Φ a poměr šířky obrazu ku výšce a . Poté můžeme vyjádřit parametry obrázku 3.1.

$$H_{near} = 2 \tan \frac{\Phi}{2} Z_{near}$$

$$W_{near} = H_{near} * a$$

$$H_{far} = 2 \tan \frac{\Phi}{2} Z_{far}$$

Obrázek 3.1: Popis komolého jehlanu kamery (frustum)²

$$W_{far} = H_{far} * a$$

Jelikož známe projekci, kterou užíváme, můžeme nyní všechny body vyjádřit pomocí získaných parametrů ve „world space“ pomocí vektorů. Předpokládejme nyní, že dolní podstava komolého jehlanu bude tvořena množinou bodů $\{A, B, C, D\}$ a horní podstavu tvoří množina $\{A', B', C', D'\}$. Každý z bodů můžeme nyní vyjádřit pomocí vektoru (např.: \vec{A}). Chceme-li odvodit jednotlivé roviny, pro každou z nich si zvolíme trojici bodů. Dále pak vypočteme dva vektory mezi nimi se společným počátkem v jednom z bodů

$$\vec{v}_1 = \vec{A}' - \vec{A} \quad \vec{v}_2 = \vec{B} - \vec{A}$$

a provedeme jejich vektorový součin

$$\vec{n}_1 = \vec{v}_1 \times \vec{v}_2$$

Výsledný vektor se normalizuje

$$\vec{n}_1 = \frac{\vec{n}_1}{\|\vec{n}_1\|}$$

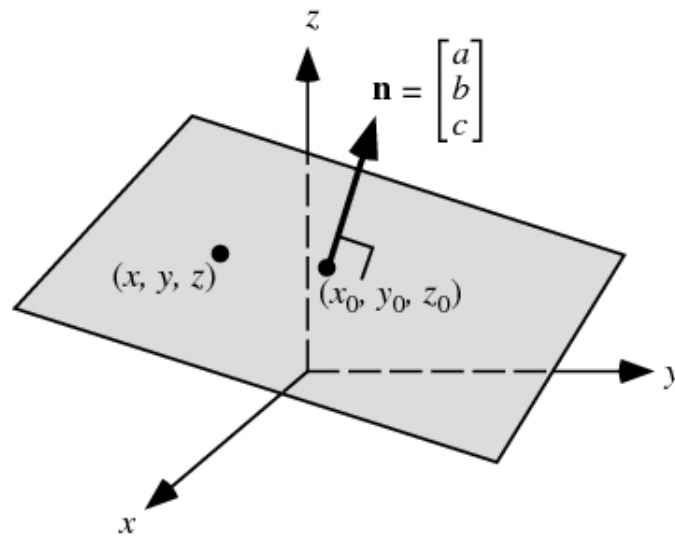
a dopočteme k němu parametr d_1 , charakterizující posun vektoru

$$d_1 = -\vec{n}_1 \cdot \vec{A}'$$

Po získání všech šesti vektorů jsou tyto odeslány do shaderu (jako čtyřsložkové, neb obsahují i parametry d_i), kde proběhnou zmiňovanou funkcí 'PointInFrustum()', jež vykoná následující pro každý z vektorů

$$\forall i \in N : 0 < i \leq 6 : \quad \vec{n}_i \cdot \vec{p} + d_i < 0 \Rightarrow p \notin F; \quad F \dots \text{set of points in frustum}$$

²Zdroj: <http://mathworld.wolfram.com/images/eps-gif/Plane_1001.gif> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

Obrázek 3.2: Popis roviny normálovým vektorem³

Do vykreslení prostřednictvím fragment shaderu jsou tedy odeslány pouze vrcholy, pro něž platí $p \in F$, tedy leží v komolém jehlanu kamery.

3.4.3 Fragment shader

Dostáváme se k poslednímu druhu shaderů - fragment shaderu. Příklad fragment shaderu je o dost jednodušší než v předchozích případech. Jedná se o závěr grafické pipeline - řeší se v něm textury a zbarvení objektů.

```
#version 330 core

out vec4 vFragColor;
in vec3 RGB;
vec3 diffuse_color=RGB;
void main()
{
vFragColor = vec4(diffuse_color,1);
}
```

Z předané hodnoty RGB přisoudíme každému vrcholu příslušnou barvu, včetně alfa kanálu, jak je popsán v standardu RGBA. Je to právě tento typ shaderu, kde se také pomocí sampleru odebírají barevné hodnoty z textur a přiřazují se jednotlivým vrcholům.

³Zdroj: <http://cgvr.cs.uni-bremen.de/teaching/cg_literatur/lighthouse3d_view_frustum_culling/images/vf2.gif> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

3.5 Vykreslování terénu

3.5.1 Tvorba 3D modelu

Již jsem se zmínil o tom, jakým způsobem se data o terénu vyzvedávají z SRTM dlaždic. Nyní rozvinu, jak se s těmito daty zachází dále. Struktura „STerrain“ definovaná v „structs.h“ je nositelkou všech relevantních informací o dané terénní dlaždici. Nejdůležitější informací obsahuje dvourozměrné pole „STerrain.Terrain“, ve kterém jsou nahrány eliptické výšky terénu v rozlišení daném SRTM. Tato data jsou vkládána do VAO (Vertex Array Object).

VAO si můžeme představit jako kontejner nesoucí všechny informace o v něm uložených bufferech (respektive VBO - Vertex Buffer Objects). Při ukládání informací o jednotlivých vrcholech do grafické paměti je účelné ukládat zvláště tři informace:

1. souřadnice vrcholu
2. UV souřadnice textury [15, str. 298] pro daný vrchol
3. normálový vektor v daném bodě

Každé informaci je vyčleněn jeden VBO, k čemuž dále přibývá jeden pro uložení indexů vykreslování vrcholů. Čtveřici VBO je tedy pak vhodné uzavřít do kontejneru v podobě VAO. Jediným voláním VAO zavoláme automaticky všechny uložené VBO.

Je důležité ukládání dat do bufferů výpočetně oddělit od samotného vykreslování, neboť se jedná o časově nejnáročnější proces, při kterém se data přehrávají z paměti výpočetní do paměti grafické. Navíc je dobré předpřipravit data před nahráváním do VBO objektů, a to zejména při výpočtu normál. O tuto část se ideálně postará separátní vlákno, které je do kódu začleněno pomocí knihovny SDL.

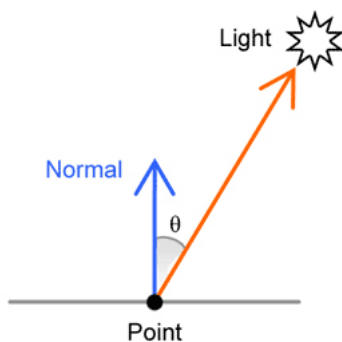
3.5.2 Výpočet normál

Již texturovaný terén by nebyl využitelný bez zakomponování stínování. Pro program EFIS 3D jsem zvolil metodu Phong (Phong Shading Model). Základem této metody je výpočet normál povrchu, které následně slouží k počítání úhlu dopadu světelného zdroje na daný vertex. Tato metoda nezahrnuje stínění samotným objektem, ale umožňuje efektivně stínovat jen s pomocí jednoduchého skalárního součinu

$$I_i = \vec{n}_i \cdot \vec{l}_d$$

\vec{n}_i ... normalizovaný normálový vektor vrcholu i

\vec{l}_d ... normalizovaný vektor zdroje světla i



Obrázek 3.3: Ilustrace vektorů důležitých pro stínování

I_i ... výsledná „intenzita světla“ (závisí na $\cos \theta$) v bodě i

Princip této metody zachycuje také obrázek 3.3. Ačkoliv výpočet je značně triviální, získání normálových vektorů pro jednotlivé vrcholy představuje poměrně obtížný úkol. Je potřeba vycházet z bodů, které s vyšetřovaným vrcholem bezprostředně souvisí, a z nich normálový vektor počítat. Uvažujeme-li stínování jen v jednom oktantu (tj. omezíme vržený stín na rozsah $0 - 90^\circ$ horizontálně i vertikálně), můžeme problém zjednodušit na pouhé tři vrcholy $\{A, B, C\}$. Předpokládejme, že B je vyšetřovaným vrcholem. Pak

$$\vec{n}_i = (\vec{A} - \vec{B}) \times (\vec{C} - \vec{B})$$

Klíčový je tedy vektorový součin, jenž zajistí, že normálový vektor bude kolmý na vektory spojují sousední body $\{A, B, C\}$. Nevýhodou je absence dat o vrcholech D a E . V takovém případě lze vypočítat normálové vektory pro 4 oktanty (stínování uvažujeme na povrchu a ne již pod povrchem, proto pouze čtyři) a následně je zprůměrovat.

Algoritmus využitý v programu EFIS 3D počítá normály pouze v 1 oktantu, což však nabízí nižší výpočetní náročnost. Výsledná „intenzita světla“ je využita ve fragment shaderu. Proměnná „texel.rgb“ je tříprvkovým vektorem, který obsahuje informace o barvě vrcholu získané z texture sampleru a vypočtená intenzita je uložena v proměnné „intensity“ typu „float“. Výpočet, který probíhá v shaderu je uveden níže.

```
vFragColor = vec4(texel.rgb*intensity,1);
```

RGB hodnoty odpovídající barvě vrcholu jsou tedy adekvátně zkresleny tak, aby výsledný efekt napodobil stínování.

3.6 Vykreslování textur

Zpočátku bylo věnováno značné úsilí vektorovému vykreslování dat, ovšem v průběhu projektu se ukázalo, že zpracování vektorových informací je značně neefektivní. Potenciální přínos v podobě okamžité dostupnosti dat o daných terénních útvarech byl vyvážen značnou

paměťovou náročností a - i přes velké množství dat - nekvalitními výstupy. Proto se v průběhu pozornost obrátila na reprezentaci těchto dat texturou. Tato implementace textur mne konfrontovala s četnými přístupy, jak s texturami zacházet, čemuž jsem vyhradil tuto část zabývající se vykreslováním textur.

Pro využití textur v programu EFIS 3D bylo čerpáno z knihovny SOIL, která disponuje funkcemi, které umí načítat mnoho vstupních obrazových formátů - komprimovaných i nekomprimovaných. Příslušné textury očekáváme ve složce „Data/Textures/“. Taktéž předpokládáme formát JPEG či PNG (program umí vybrat ten, který je k dispozici) a název souboru odpovídající kódu příslušné dlaždice (obrázek 2.2). Neexistuje-li pro danou terénní část adekvátní textura, je využita šedá textura „default.png“. Soubor načteme pomocí příkazu

```
SOIL_load_image('název', 'šířka textury', 'výška textury', NULL, SOIL_LOAD_RGB);
```

Následně data uložíme do ukazatele na proměnnou typu „unsigned char“, která je součástí struktury popisující danou terénní dlaždici (STerrain.vhTexture). Pro správnou aplikaci textury je nutné deklarovat UV souřadnice, které spadají do rozmezí <0,1> v obou osách a přiřazují každému vertexu terénu jeden pixel textury odpovídající normovaným souřadnicím UV.

Texturu uložíme do grafické paměti příkazy

```
glGenTextures(1, &'ID textury');
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, 'ID textury');
glTexSubImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, 0, 0, 'šířka', 'výška', GL_RGB, GL_UNSIGNED_BYTE, 'textura');
```

Pro optimálnější využití textur definujeme mipmapping, který vytvoří několik verzí textury pro různá rozlišení textury a zlepší čitelnost výsledného zobrazení.

```
glTexStorage2D(GL_TEXTURE_2D, 'počet mipmap', GL_RGBA8, 'šířka', 'výška');
glGenerateMipmap(GL_TEXTURE_2D);
```

Pro využití potenciálu mipmap je také nutné deklarovat, jak se budou textury filtrovat při přibližování či oddalování, což přibližuje následná ukázka.

```
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR);
```

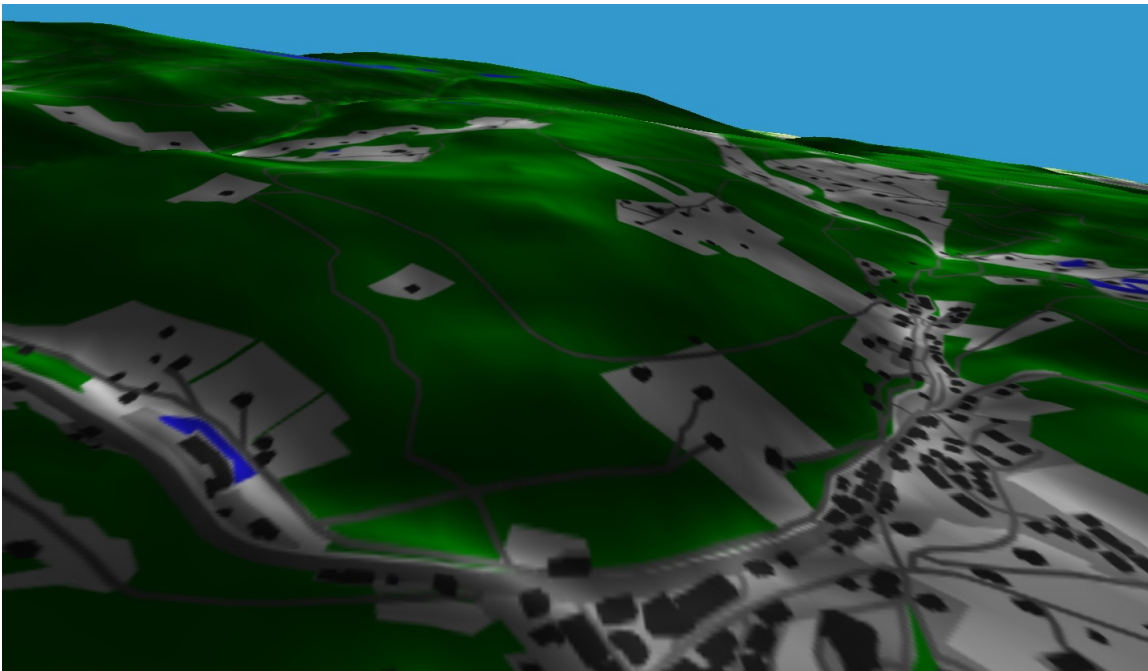
Veškeré přesahy či nedostatky UV souřadnic vyřeší direktiva „GL_CLAMP_TO_EDGE“, v jejímž důsledku textura nikdy nepřesáhne rozměr texturovaného povrchu.

```
glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP_TO_EDGE );
glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_CLAMP_TO_EDGE );
```

Užití textury vrcholí využitím adekvátního fragment shaderu, který využívá „uniform“ proměnné typu „sampler2D“.

```
(...)  
uniform sampler2D myTextureSampler;  
  
void main()  
{  
(...)  
vec4 texel=texture( myTextureSampler,UV);  
vFragColor = vec4(texel.rgb*intensity,1);  
}
```

V tomto příkladu se odebere vzorek barvy RGBA z definované souřadnice textury a následně se její RGB složka vynásobí intenzitou dopadajícího světla. Výsledkem je efekt stínování terénu, který objektu dodá hloubku a usnadní orientaci v jeho blízkosti. O výpočtu intenzity pojednává předcházející podkapitola věnující se práci s normálami.



Obrázek 3.4: Trojrozměrný terén opatřený texturou

3.7 Algoritmus načítání terénu

Trojrozměrná reprezentace dlaždic terénu opatřená náležitou texturou je základem vykreslovacího algoritmu, který jsem v programu EFIS 3D využil. Za základ považujeme 9 vykreslených dlaždic, tak aby byly za ustáleného režimu vždy vykresleny tři délkové (longitude) a tři šířkové (latitude) vrstvy terénu. Letoun se pak nachází v prostřední dlaždici s indexem 4.

Základním požadavkem je udržovat letoun vždy v této dlaždici, překročí-li tedy její hranici, spustí se separátní vlákno, které vygeneruje indexy dlaždic, které je potřeba dočíst, připraví všechna data pro nahrání do příslušných bufferů a následně jejich tvorba proběhne v hlavním vlákně. GLUT neumožňuje zacházet s buffery mimo kontext okna, do kterého vykresluje. Naplňování bufferů může výrazně zpomalit vykreslování, což je taktéž vnímáno jako hlavní slabina tohoto programu. Pokročilejší práce s vlákny umožňuje vícero kontextům předávat si vzájemně ukazatele na příslušné buffery. Toto řešení by bylo velmi přínosné právě v tomto případě.

Ihned po spuštění načítacího vlákna zmizí dlaždice, které jsou požadovány v současném kontextu za nadbytečné, program tedy v této přechodné době zobrazuje jen 6 dlaždic. Jakmile se naplní nové buffery, je zobrazení opět kompletní a letoun se opět nachází v dlaždici číslo 4.

Algoritmus je použitelný pro oblasti, ve kterých jsou dostupná SRTM data. Polární oblasti (jež do SRTM dat nespádají) jsou velmi zatížené geometrickými chybami vzniklými užíváním geodetických souřadnic bez konverze do jiného zobrazení. Využití SRTM dat bez nutných konverzí umožňuje škálování využívající jako vstup poměr délky 1 úhlového stupně na rovníku a na poledníku.

3.8 Generování a zobrazení textu

Pro kompletaci přístrojů, menu a popisu překážek bylo nezbytné pracovat s knihovnou, která by umožňovala pracovat jednoduše s textem. Předem bylo známo, že vhodným kandidátem bude knihovna FreeType využívající TrueType fonty. Neboť čas na vypracování práce byl limitován, rozhodl jsem o využití volně přístupné knihovny „OGLFT“ (OpenGL FreeType), jejímž autorem je firma Lignum Computing, Inc.⁴ Výhodou knihovny je to, že se jedná o free software. Nevýhodou je ovšem její stáří (rok 2002), čerpá tedy z funkcí, na kterých již nestaví moderní OpenGL. Vzhledem k tomu, že všechny moderní grafické karty tyto funkce podporují a že vykreslování textu není přímo spřaženo s vykreslováním jiných objektů, tento fakt není nijak zásadní.

Pro práci s textem využívám instance třídy „Cfonts“, v rámci níž řeším vykreslování veškerého textu mimo menu. Text je vždy vztažen ke středu aktuálního okna. Aby text kopíroval to, jak se mění zobrazovaný HUD, je potřeba všechny koordináty pro osu X zadávat ve formátu

```
text->draw(POZICE_X/ratio,POZICE_Y,"TEXT");
```

kde „ratio“ představuje poměr šířky okna k jeho výšce. Proměnná „text“ je objektem typu „Monochrome“ označující jednobarevný font. V rámci třídy „Cfonts“ je tento font inicializován a volání všech vykreslovacích příkazů je nepřímé.

Text je rovněž využíván u označování leteckých překážek a v menu. Tomuto specifickému využití se vždy věnuji v kapitole zaměřené na danou problematiku.

⁴<http://oglft.sourceforge.net/> [Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

3.9 Vykreslování přístrojů

Systém EFIS zprostředkovává informace pilotovi, k čemuž využívá rozmanité zobrazovací prostředky. Pro účely návrhu tohoto konkrétního EFISu bylo prioritní poskytnout co nejlepší reprezentaci terénu pro srovnávací navigaci. Pilot pro provedení letu však vyžaduje především informace spjaté s letadlem. Minimální VFR výbavu doplněnou o přístroje, které mu zvýší přehled o průběhu letu. Na leteckém simulátoru, který je součástí CAST, bylo již otestováno, jaké přístroje piloti nejvíce docení. Tato práce tedy čerpá z těchto poznatků. Systém navíc podporuje různé kombinace jednotek, rozsah rychloměru se přizpůsobí nastavením pro dané letadlo a lze nastavovat referenční hodnoty pomocí mušek (bugů). Všechny přístroje zobrazují informace, které předkládá simulátor, a plně funkční jsou jen při připojení k FGConnectoru. Pro testování v exteriéru jsou funkční jen rychloměr, kompas, výškoměr, umělý horizont, ukazatel podélného náklonu a zatáčkoměr.

3.9.1 Třída pro vykreslování přístrojů

Třída, která umožňuje správu a vykreslení přístrojů, se jmenuje „Cinstruments“. Pevné grafické součásti přístrojů se vytvoří během inicializace programu a umístí se do bufferu grafické karty. To umožňuje vykreslovat rychle a efektivně bez výrazné ztráty rychlosti vykreslování.

Funkce předpřipravující VBO nesou název končící touto zkratkou. V případě rychloměru:

```
int speedometerVBO(GLSL_Shader shader[6]);
```

Funkce vykreslovací pak nesou název ve tvaru „draw_[objekt]“:

```
int draw_speedometer(float posX,float posY,GLSL_Shader shader[6]);
```

Objekty dynamické - jako například ručičky jednotlivých přístrojů jsou rotovány v rámci své vykreslovací funkce pomocí rotačních matic z knihovny GLM. Jako příklad mohou znovu uvést ručičku rychloměru:

```
M_speed=glm::rotate(M_speed,-airspeed*360/200,glm::vec3(0,0,1));
```

Ve výše uvedeném příkladu otáčíme ručičkou rychloměru tak, aby byla škálována na rozsah 200 jednotek pro obvod kruhu. Podrobněji je tento příklad rozebrán dále.

3.9.2 Rychloměr

Při návrhu rychloměru byl brán v potaz především faktor čitelnosti. Cílem práce bylo vytvořit rychloměr analogový s dodatečnou digitální informací, jenž by zároveň obsahoval nastavitelný rozsah podle typu ovládaného stroje. V zájmu přehlednosti bylo nakonec upuštěno od digitální informace.

Pro displej rychloměru byl vybrán rozsah hodnot 0-200 jednotek (km/h, mph, kt). Pohyb ručičky rychloměru (resp. úhel otočení α []) se pak řídí jednoduchým vztahem, kde přijatou

informaci o rychlosti v (opravenou podle druhu užitých jednotek) škálujeme pro daný ciferník rychloměru podle vztahu

$$\alpha = \frac{360}{200}v \quad (3.8)$$

Rozsah displeje se po překročení 200 uzlů změní na rozsah od 200 do 400 jednotek a obdobně pokračuje až do hodnoty 1000. Další parametry zobrazení v podobě barevných pruhů indikujících pádové, optimální a kritické rychlosti se přepočítávají obdobným způsobem, ale s parametry v_{stall} , v_{opt} , v_{crit} .



Obrázek 3.5: Podoba rychloměru v zobrazení EFIS 3D

3.9.3 Výškoměr

Výškoměr pro systém EFIS 3D byl rovněž zvolen jako analogový. Jedná se dvouručičkový výškoměr, jehož rozsah je pevně dán v rozmezí 1-10, a jenž opět umožňuje přepnutí zobrazovaných jednotek (ft či m). Referenční hodnota tlaku je nastavitelná a zobrazuje podle zvolených jednotek v mmHg či v hPa. Úhel otočení určíme pomocí:

$$\alpha = h * \frac{360}{1000} \quad (3.9)$$

3.9.4 Umělý horizont

Při výpadku zdroje 3D informace (chybějící soubory, chyby vykreslení, aj.) je přístroj vždy schopen fungovat s umělým horizontem anglosaské koncepce. Klonění znázorňuje horizont přímo, klonění je převáděno na posuvný pohyb, který je odvozen od výšky objektu, který v projekci užíváme pro znázornění země.



Obrázek 3.6: Podoba výškoměru v zobrazení EFIS 3D

3.9.5 Relativní příčný sklonoměr

Relativní příčný sklonoměr (součástí obr. 3.8) je pomůckou pro provedení koordinované zatáčky. Jako takový je brán v potaz i v programu EFIS 3D a nepodporuje tedy zobrazení extrémních vybočení výslednice sil, neboť jeho rozsah činí -14° až 14° . Pro účely zobrazení je výsledná hodnota ještě dělena dvaceti, což odpovídá posunu v příslušných projekčních souřadnicích.

3.9.6 Variometr

Variometr (obr. 3.7) je jedním z větších přístrojů tohoto zobrazení, neboť jeho výstup je klíčový pro dodržení letu v určené výšce. Stupnice, jíž disponuje, počítá s využitím tří možných typů jednotek: ft/min, ft/s a m/s. Jeho rozsah je ocejchován pro hodnoty od -25 do $+25$ m/s či eventuálně ft/s. Pro jednotky ft/min jsou hodnoty násobeny stokrát, tedy od -2500 ft/min do 2500 ft/min.

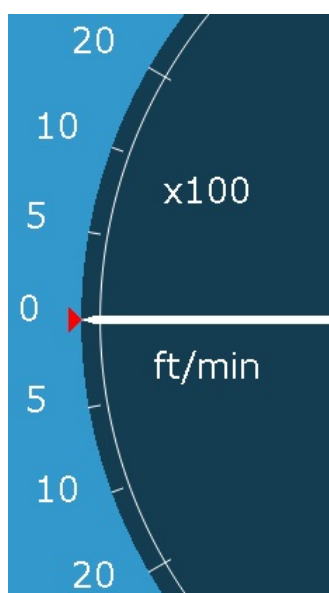
3.9.7 Kompas

Kompas využitý v systému EFIS 3D rotuje podle přijaté hodnoty „g.heading“ a obsahuje nejen ocejchovanou stupnici, ale také konkrétní digitální údaj, který je zobrazován pod relativním příčným sklonoměrem. Zobrazení kompasu je velmi přímočaré a lze jej zprovoznit aplikováním jediné transformace:

```
M=glm::rotate(M,heading,glm::vec3(0,0,1));
```

3.9.8 Ukazatel podélného náklonu

Podélný náklon (klopení) znázorňují i břevna odstupňovaná po 5° . Kladné hodnoty klopení jsou charakteristické bílou barvou, záporné hodnoty barvou hnědou. Posun ukazatele v závislosti na úhlu klopení má jiné konstanty než umělý horizont (což je dáno rozdílnou



Obrázek 3.7: Podoba variometru v zobrazení EFIS 3D



Obrázek 3.8: Podoba kompasu a reaktivního příčného sklonoměru v zobrazení EFIS 3D

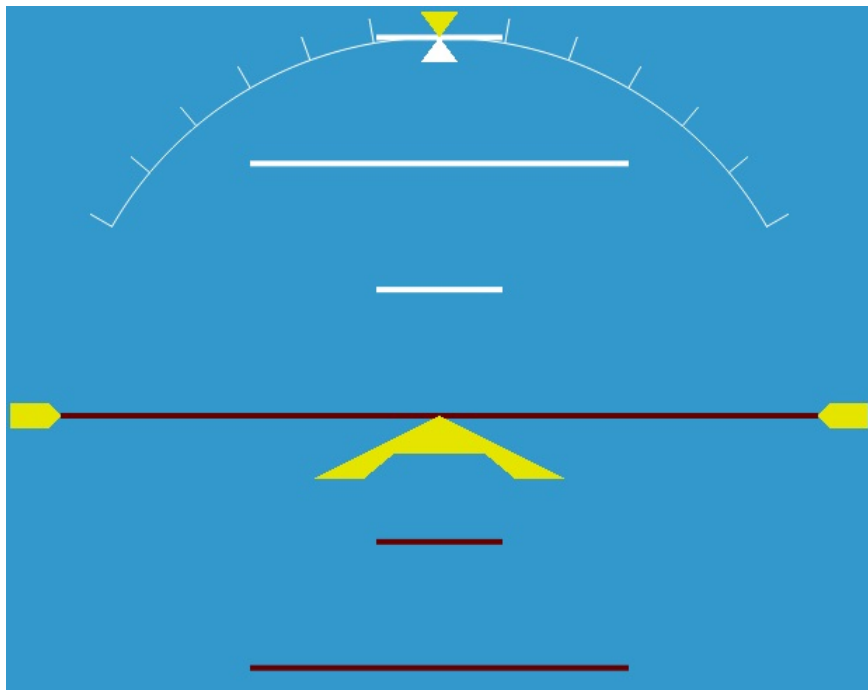
velikostí přístrojů). Tento efekt je záměrný a umožňuje letounu snadněji držet v rovině díky rozdílné dynamice obou přístrojů. Je-li aktivován 3D terén, zobrazen je pouze ukazatel podélného náklonu.

3.9.9 Zatáčkoměr

Tento ukazatel klonění je řešen obdobně jako umělý horizont, přenos klonění na úhel otočení je tedy přímý. Zatáčkoměr je včetně dalších přístrojů zaznamenávajících změny polohových úhlů zobrazen na obrázku 3.9.

3.9.10 Ukazatel polohy klapky

Vzhledem k rozdílným typům letounů a jejich odlišným koncepcím jsem se rozhodl reprezentovat polohu klapky procentuálním údajem o jejich vysunutí. 100 % tedy může označovat jeden vysunutý stupeň jednoplošných klapky, stejně jako třetí stupeň klapky tříplošných. Tento ukazatel se objevuje pouze, jsou-li klapky vysunuty.



Obrázek 3.9: Podoba ukazatelů polohových úhlů v zobrazení EFIS 3D



Obrázek 3.10: Podoba menu v zobrazení EFIS 3D

3.10 Návrh a vykreslení menu

Některé z funkcí programu EFIS 3D lze přenastavovat za běhu programu. K tomu slouží menu, které jsem navrhl pro spojení s ovládacím prvkem iDrive. O připojení prvku iDrive je podrobněji pojednáno dále, následující pasáž je věnována technickému řešení menu.

Menu se skládá z položek, jejichž aktuální volby se zobrazují v okně vyskakujícím pod aktuálně zvolenou položkou (obr. 3.10). Cílem menu bylo navrhnout jej maximálně flexibilní pro budoucí úpravy a zásahy do designu. Volby v menu sestávají především z položek, jejichž nastavení během letu není kritické, nevylučuje se však jejich přenastavení. Mezi navržené hlavní volby spadají:

Units Výběr jednotek, které chce uživatel používat pro jednotlivé přístroje. Možnosti nastavení profilu jsou definovány v kódu, lze tedy vytvořit neomezeně mnoho kombinací.

Instruments Umožňuje skrýt některé ukazatele, případně skrýt vše kromě 3D terénu. Tato volba má stejně jako předchozí mnoho možných variant.

Set bugs Tato volba umožní vybrat přístroj, jehož mušku (bug) hodlá uživatel nastavit. Stisknutím iDrive joypadu aktivuje uživatel ovládání posunu bugu. Opětovným stiskem se uživatel vrátí do menu.

Kapitola 4

Zdroje a vykreslení AIP dat

Implementace informací poskytovaných leteckou informační službou a jejich prolnutí se zobrazováním terénu představovalo výzvu především z hlediska přehlednosti. Adekvátní souhra zobrazení těchto dvou rozličných informací má za cíl zvýšit povědomí pilota o tom, v jakém prostoru se pohybuje, ovšem vždy zde existuje i riziko zobrazení matoucích informací. Abychom se tomuto problému vyhnuli, stále jsou zobrazovány jen informace o nebezpečných prostorech, zakázaných prostorech a překážkách. Všechny dodatečné informace se zobrazují pouze na výzvu pilota prostřednictvím menu.

Následující text se zabývá otázkou získání a zobrazení leteckých informací v konceptu zobrazovacího systému EFIS. Tato část práce je velmi úzce provázána s vizualizací popsanou v předchozí kapitole, z toho důvodu budu na předchozí kapitolu v mnoha případech odkazovat.

4.1 Zdroje AIP dat

Jednotlivé letecké informační služby členských států ICAO disponují formáty pro vzájemnou komunikaci, ovšem veřejný přístup do světových AIP dat je poněkud problematický. Tento problém se podařilo eliminovat pomocí stránky projektu OpenAIP¹. Jedná se o server svou ideou blízký OSM, ovšem zaměřený na letecké informace. Opět jsme postaveni před problém využitelnosti takových informací. Pochopitelně ne všechny informace z otevřených zdrojů považujeme za důvěryhodné. Nicméně ve chvíli nouze je jakákoliv dodatečná informace pilotovi užitečná. Předpokladem je, že na základě takové informace neučiní pilot své závěrečné rozhodnutí, nýbrž že tuto informaci bude brát jako podpůrný zdroj ve svém rozhodování.

S přihlédnutím k omezenému času, který byl při vývoji programu EFIS 3D k dispozici, je tento předpoklad značně na místě. Cílem totiž není finální produkt, ale koncept, který potvrdí či vyvrátí funkčnost jednotlivých přístupů k zobrazení informací. Více o tomto tématu nabízejí letové testy, které byly provedeny v předposlední kapitole.

OpenAIP nabízí čtyři druhy informací:

¹<http://www.openaip.net/>[Naposledy zhlédnuto: 5. 5. 2015]

Airports obsahují databázi všech letišť na Zemi.

Nav aids zahrnují všechny radionavigační prostředky na světě. Výčet zahrnuje všesměrové majáky NDB, navigační VOR spřažené s DME či navigační majáky TACAN. Pro všechny navigační prostředky jsou k dispozici data o poloze a dedikované frekvence.

Airspaces popisují letové informační oblasti a všechny další letové oblasti a okrsky pod ně spadající. Zvláštní důraz je kladen na nebezpečné, zakázané a omezené prostory. OpenAIP poskytuje i základní informace o dočasně rezervovaných či dočasně vymezených prostorech.

Hotspots shrnují informace o přirozených či lidskou činností indukovaných vzestupných prouděch. Zahrnuty jsou informace o jejich původu, pravděpodobnosti výskytu i nadmořské výšce. Tuto část EFIS 3D žádným způsobem nevyužívá.

4.2 Žádané informace

Mezi ústřední požadavky při tvorbě systému EFIS 3D patřila možnost vybrat pouze jisté druhy objektů, které hodláme zobrazovat. V tomto případě hovoříme o letových prostorech, letových zónách a oblastech. Z hlediska navigace jsou všechny objekty podstatné, přičteme-li však požadavek přehlednosti, ukazuje se jako vhodnější v 3D zobrazení vynechat velké poloprůhledné plochy, které představují letové prostory. Uživateli je tedy umožněno aktivovat zobrazení těch objektů, které považuje za kritické, dle vlastního uvážení.

4.2.1 Třídy letových prostorů

Letové prostory dělíme podle vícero klasifikátorů na třídy A-G. Mezi tyto klasifikátory se řadí mimo jiné pravidla dodržování rozestupů mezi VFR a IFR lety, či možnost tyto lety v daném prostoru provozovat. V České republice se nevyskytují žádné prostory A,B a F, nicméně EFIS s nimi samozřejmě počítá, neboť má být využitelný i jako globální systém. Informace o prostorech je skutečně načtena a může s ní být dále pracováno, v současné podobě systému však třídy letových prostorů považujeme za volitelné z již dříve zmíněného důvodu přehlednosti.

4.2.2 Letové zóny a oblasti

Mezi významné zobrazované oblasti mohou na základě [4] patřit:

TMA Koncová řízená oblast. Klíčová křižovatka letových cest, v jejímž prostoru se provádí navedení na přistání (fáze approach). V České republice spadá do kategorie D.

CTR Řízený okrsek letiště. V České republice náleží do kategorie C.

PA Prohibited Area. Průlet touto oblastí je omezen především z bezpečnostních důvodů.

DA Danger Area. Existuje vážné ohrožení letového provozu v oblasti zapříčiněné lidskou činností či přírodními jevy.

RA Restricted Area. Vstup do této oblasti musí být povolen autoritami, neboť existuje vážné ohrožení provozu, které nemusí být pilotům zřejmé.

Do zobrazovaných oblastí jsem nezařadil oblasti spadající pod Airspace Use Plan jako jsou TSA či TRA, jejichž proměnnost je narozdíl od výše uvedených prostorů denní.

Tabulka 4.1: Třída popisující letový prostor (Asp) - vybrané položky

Název proměnné	Datový typ	Popis
category	string	definice typu prostoru
name	string	název prostoru
top_limit	AltLimit	údaje o horní hranici prostoru
bottom_limit	AltLimit	údaje o dolní hranici prostoru
geometry	vector<Coor>	polygon vytyčující podstavu prostoru

4.3 Vyzvednutí dat o letových prostorech

Ve stádiu, kdy máme k dispozici AIP data (zprostředkovatelem je opět školní server), zbývá klíčový bod - jejich interpretace. Data jsou uložena v XML souboru, jehož struktura je naznačena níže.

```
<ASP CATEGORY="CTR">
  <VERSION>1b9b07a82690c23c19ca7f441ecdf7de1c4ac65</VERSION>
  <ID>26045</ID>
  <COUNTRY>CZ</COUNTRY>
  <NAME>CTR Brno Turany (119.6 TWR)</NAME>
  <ATLIMTOP REFERENCE="MSL">
    <ALT UNIT="F">5000</ALT>
  </ATLIMTOP>
  <ATLIMBOT REFERENCE="GND">
    <ALT UNIT="F">0</ALT>
  </ATLIMBOT>
  <GEOMETRY>
    <POLYGON> *ZKRÁCENO* </POLYGON>
  </GEOMETRY>
</ASP>
```

Můžeme rozeznat, že se jedná o řízený okrsek letiště, který je omezen výškově i horizontálně (je definován polygon podstavu tohoto prostoru). Data o prostorech jsou ukládána do struktury (tabulka 4.1). Pro názornost jsou vynechány proměnné užívané v OpenGL.

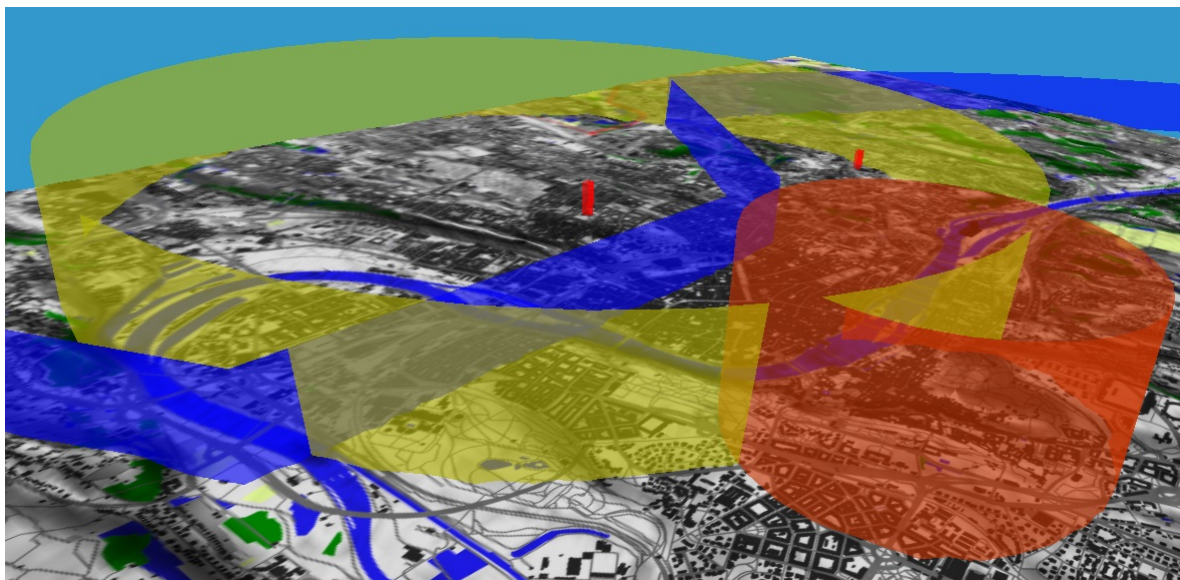
Tabulka 4.2: Třída popisující leteckou překážku (Ano) - vybrané položky

Název proměnné	Datový typ	Popis
id	int	identifikátor (podle AIP ENR 5.4)
type	string	označení typu překážky
name	string	název překážky
elev	float	údaj o nadmořské výšce základny překážky [m]
hgt	float	údaj o výšce překážky [m]
position	Coor	GPS pozice překážky

4.4 Vykreslení letových prostorů

Pro vykreslení prostorů bylo využito informací uložených ve struktuře a na základě půdorysu byla sestrojena svislá stěna hranolu či válce, která daný prostor vytyčuje. Tato stěna byla nadále koncipovaná jako poloprůhledná. V kontextu zobrazení systému EFIS zaručuje tato volba velmi dobrou viditelnost prostoru, nicméně paradoxně snižuje využitelnost srovnávací navigace. Proto bylo rozhodnuto, že zobrazení omezených a nebezpečných prostorů bude přepínatelné a jeho stálou implementaci uijeme v mapovém zobrazení, na kterém pracuje Jakub Filla.

Vykreslení stěny prostorů funguje principiálně stejně jako vykreslování terénu, opět využíváme trojúhelníků, tentokrát však pomocí indexů vytyčíme uzavřený obrazec a nikoliv rovinnou dlaždici.



Obrázek 4.1: RA (žlutě), PA (červeně) a hranice CTR (modře) nad Prahou

4.5 Klasifikace a značení překážek

V předpisu L 15 [7, Hlava 2] je uvedeno, jakým způsobem jsou elektronicky distribuována data o překážkách. Povinnost elektronicky distribuovat překážky platí jen pro tzv. „Prostor 1“, což je území celého státu. Za překážku pak považujeme objekt vyšší než 100 m, v odůvodněných případech i objekty nižší, které byly uznány jako význačné pro letový provoz (viz [3, ENR 5.4]). Od listopadu 2015 začne platit povinnost uveřejňování i překážek z tzv. „Prostoru 2“ mezinárodních letišť. Ten zahrnuje předpolí letišť, odletové a příletové výseče, včetně přechodových překážkových ploch, tudíž vše, co popisuje ve vztahu k letišti předpis L 14.

Databáze překážek musí obsahovat jejich identifikátor, jméno, druh, vertikální rozměr, nadmořskou výšku, GPS souřadnice podle normy ISO 19100 a druh značení překážky [7]. To přehledně znázorňuje následující tabulka 4.3. Označení typu/barvy překážky je uvedeno v tabulce 4.4.

Tabulka 4.3: Formát dat o překážkách

ID	Označení	Typ přek.	Souřadnice	E/H [M]	Typ/Barva
1	KRÁSNÁ U AŠE	vět. elektrárna	501530,68N 0120648,85E	773 / 150	NIGHT
50	PRUNĚŘOV	komín	502504,24N 0131533,05E	657 / 301	DAY

Tabulka 4.4: Rozlišení typu značení

Typ/Barva	Význam
DAY	denní značení
NIGHT	noční značení
DAY & NIGHT	denní a noční značení
WO	bez značení
UNKNOWN	není známo

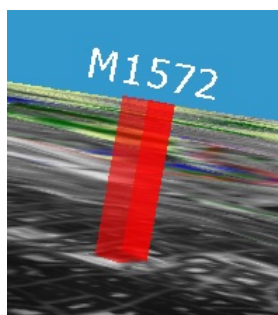
4.6 Vykreslení překážek

Za účelem následného zobrazení překážek byla zdrojová data extrahována z PDF souboru, který je součástí internetové verze AIP na stránkách Letecké informační služby České republiky. Důvodem byly nejednotné zdroje těchto informací u různých letových informačních služeb. Nyní jsou tato data uložena v podobě XML souboru. V případě potřeby je možno vkládat do tohoto souboru nová data. Proces však není automatizovaný pro zahraniční letecké informační služby.

Program načte zmíněné XML a překážkám vytvoří unikátní označení, které je shodné s označením ve VFR mapách dle standardů ICAO. To představuje kódové písmeno (rám-

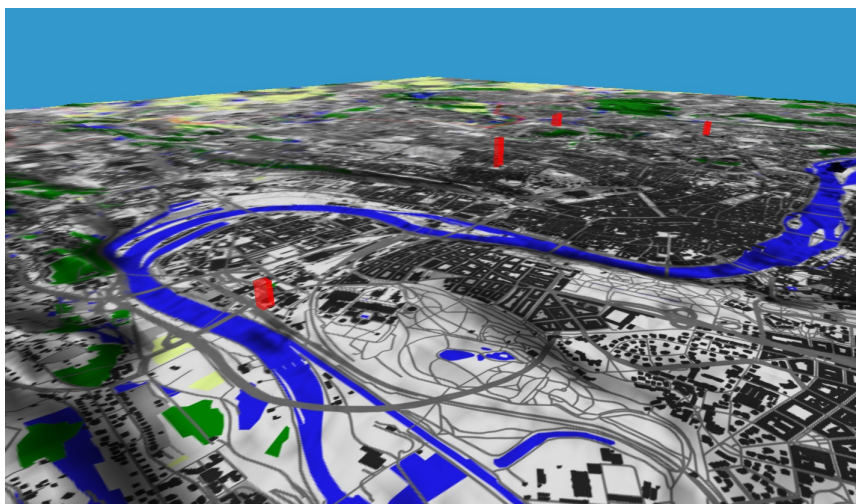
cově charakterizující typ překážky) a nadmořská výška vrcholu překážky ve stopách zao-krouhlená na jednotky. Příkladem může být vysílač na pražském Žižkově. Ten je označen písmenem M (mast²) a číslem 1572 charakterizujícím nadmořskou výšku vrcholu stožáru (477,9 m.n.m³). Příslušné označení tedy má tvar: M1572.

Taková překážka pak je v programu označena štítkem (obr. 4.2) s tímto označením, nachází-li se letoun na kolizním kurzu ± 5 . Uchovávané informace jsou uvedeny v tab. 4.2.



Obrázek 4.2: Označení překážky (zde vysílač na Žižkově)

Z těchto dat je pak vykreslen hranol, který počítá i s případným bezpečnostním prostorem okolo překážky. Vykreslovací funkce je principiálně shodná s vykreslováním letových prostorů.



Obrázek 4.3: Překážky z AIP nacházející se v Praze

²stožár (ang.)

³1572 ft AMSL

Kapitola 5

Připojení externích jednotek

Neboť součástí diplomové práce je též otestování programu za letu, je zapotřebí umožnit přístup k datům z inerciálních senzorů, GPS a externího ovládání. Implementaci podpory těchto zařízení postihuje následující kapitola. Zaměřuje se především na programové začlenění výstupů z těchto jednotek. Samotné principy zařízení jsou uvedeny jen tam, kde je to dle mého uvážení nezbytné.

5.1 Připojení iDrive

Ovládací jednotka iDrive (obr. 5.1) představuje součást palubního systému současných automobilů BMW. Ideou v pozadí tohoto přístroje je umožnit komfortní ovládání všech podružných - ale přesto významných - systémů v automobilu (klimatizace, média, zábava, aj.). Ovládací rozhraní iDrive bylo již využíváno k ovládání 2D EFISu, proto bylo přirozené propojit jej i s programem EFIS 3D.



Obrázek 5.1: Podoba ovladače iDrive¹

¹<<http://media-in-motion.co.uk/wp-content/uploads/2010/10/CIC-I-Drive-Controller1.jpg>>
[Naposledy zhlédnuto: 10. 5. 2015]

Jednotka komunikuje s programem prostřednictvím UDP protokolu, tudíž bylo zapotřebí do kódu přidat funkce, které odposlouchávají komunikaci na předem přiděleném portu a dekódují ji. Rozhodl jsem se pro přístup, ve kterém jsou zprávy pouze uloženy do pole a až v kódu pro ovládání menu a přístrojů se význam stisknutých tlačítek dekóduje.

Vyhrazený port se dá nastavit v konfiguračním souboru pomocí vložení řádku:

```
IDRIVE_PORT=XXXX
```

Implicitně uložená hodnota portu je 9001 - tedy shodná s nastavením školního simulátoru CAST. Přijatá zpráva sestává z osmi čísel typu „unsigned char“ a má formát:

```
15 4 0 0 X X X X
```

Podle číslic na pozici 5 a 6 lze rozlišit stisknutá tlačítka, čísla 7 a 8 dále uvádějí hodnoty rotace v případě otáčení joysticku. V programu EFIS 3D využíváme tlačítka následovně:

1. MENU - aktivace a deaktivace menu
2. NAV - přepnutí na navigační pohled
3. MEDIA - aktivace a deaktivace zobrazení letových prostorů
4. RADIO - vypnutí 3D funkcí (klasický 2D EFIS)
5. LEFT/RIGHT - posun mezi hlavními položkami menu
6. ROT+/ROT- - posun mezi volbami v položce menu
7. CLICK - zapnutí speciální volby (např. nastavení bugů)

Komunikaci s iDrive včetně dekódování zajišťují funkce v souboru „connections.cpp“. Pro dekódování přijaté zprávy slouží „iDriveDecoder()“. Výstupem této funkce je jediné číslo představující ID daného ovládacího prvku. Podle ID vybírá adekvátní odezvu třída „Cmenu“, konkrétně funkce „update()“ a „Execute()“. V případě využití rotačního prvku ovladače se zaznamenává jeho poslední nastavení a nastavení aktuální. Na základě rozdílu mezi nimi se patřičně nastavuje odezva menu.

5.2 Připojení AHRS a GPS jednotky

Připojit k programu externí jednotky umožňuje knihovna „srcTrCAN_IO.dll“. Zmiňovaná knihovna byla v největší míře využívána pro bezdrátové spojení. V našem případě využíváme spojení prostřednictvím sériové linky přes USB, které se osvědčilo oproti bezdrátovému připojení. Důvodem byl značně nepravidelný příjem dat.

Pokud chce uživatel využívat výstupy inerciální sondy a GPS přijímače, může funkci aktivovat stisknutím klávesy „I“. V případě tabletu se dotkne levé části displeje. Program naváže spojení s jednotkou a inicializuje knihovnu. Odečítání dat odeslaných jednotkou nahradí v programu implicitní zdroj těchto informací, kterým je FGConnector. Práci s jednotkou umožňuje třída „INS_GPS“.

Vzhledem k potížím s GPS jednotkou rozebraným v další kapitole, je zapnutí GPS a INS senzorů oddělené. Navíc knihovna „srcTrCAN_IO.dll“ musela být pro využití GPS modifikována na novou knihovnu „srcParseGPS.dll“. Využívány jsou tedy obě knihovny, přičemž pro každou zvlášť testujeme, zda je zařízení skutečně dostupné. Pokud ne, je deaktivováno. Za účelem úspěšné komunikace je zapotřebí definovat porty, na kterých komunikace bude probíhat. K tomu opět poslouží konfigurační soubor. Tentokrát parametry udávající čísla COM portů:

```
COM_GPS=8
COM_INS=2
```

Struktura přijímačící data z FGConnectoru vypadá následovně:

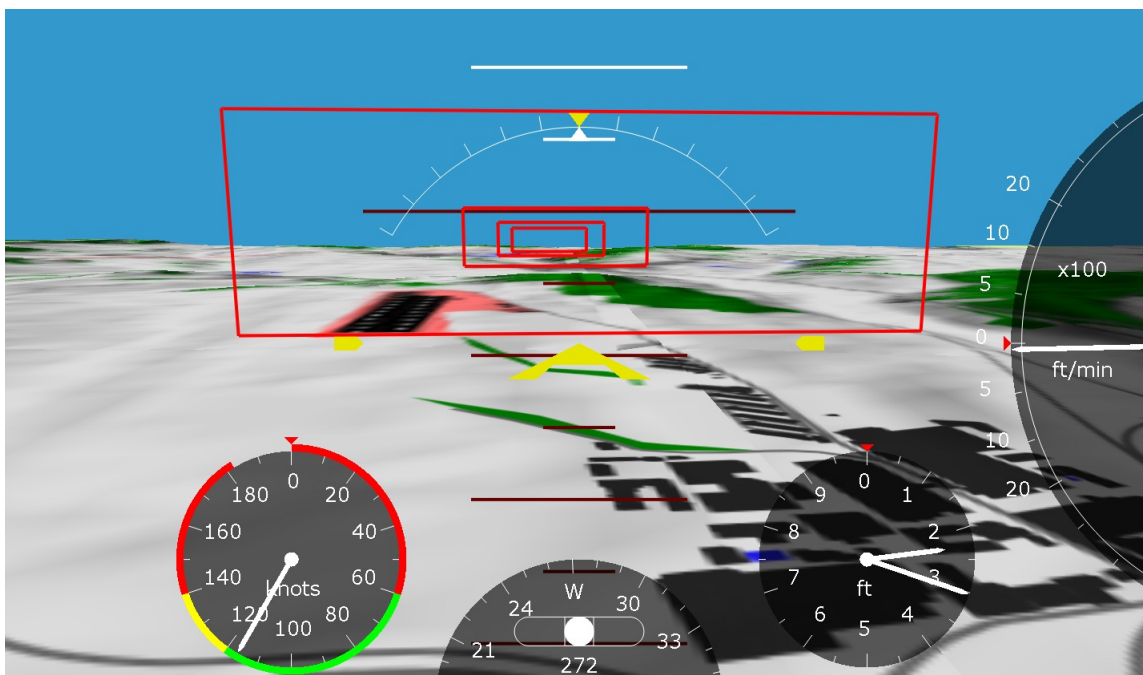
```
struct struct_params {
    float command_lateral;
    float command_longitudinal;
    float latitude; //GPS
    float longitude; //GPS
    float altitude;
    float altitude_msl; //GPS
    float vario;
    float heading; //GPS
    float roll; //AHRS
    float pitch; //AHRS
    float sideslip;
    float airspeed; //GPS
    float engine_status;
    float altimeter_ref;
    float flaps;
};
```

V případě připojení extreních jednotek je tato struktura naplňována jen částečně, a to navíc jen ze dvou zdrojů (ty jsou ve struktuře uvedeny pomocí komentářů). V příštích podobných experimentech by jednotka AHRS disponovala vlastní GPS, což by umožnilo data získávat pouze z jediného zařízení.

5.3 Spolupráce s aplikací Navigator

Součástí dosavadního programu EFIS byl také modul Navigator, umožňující na základě vložené XML databáze letišť navádět letoun na nouzové přistání. Systém zobrazuje břevna, kterými letoun musí proletět, aby byl bezpečně naveden na přistání. Tuto funkčnost v programu EFIS 3D zajišťuje funkce, jež je součástí třídy „Cinstruments“ nazvaná „draw_tunnel()“. Dekódované zprávy z Navigatoru (posílané taktéž UDP, obdobně jako FGConnector) obsahují údaje o prvním a konečném bodě vytyčované trajektorie (jedná-li se o přímý úsek), či navíc ještě údaje o středu oblouku, který tyto dva body prokládá (jedná-li se o složitější manévr). Výpočet probíhá na základě znalosti poláry letadla a ploch v okolí, na kterých lze podle databáze přistát.

Rozhodl jsem se pro stejné zobrazení jako v rámci starého programu EFIS. Jedinou obměnou je záměna břeven za obdélníky. Program Navigator nemá příliš podrobnou dokumentaci, proto je podpora tohoto zobrazení i nadále omezena na okolí letiště LK RK (Rakovník). Výstup ze zkušebního letu je uveden níže na obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Naváděcí obdélníky pro modul Navigator

Kapitola 6

Testování aplikace EFIS 3D

System EFIS byl testován jak výkonově, tak funkčně. Výkonové testování probíhalo na simulátoru za běžného provozu za účelem omezení paměťových nároků programu. Za účelem ověření rizik aplikace byla dále vytvořena analýza FMEA.

Funkční testování aplikace EFIS 3D v laboratorních podmínkách spočívá ve zpětné vazbě od externích odborníků (pilotů), kteří budou na leteckém simulátoru CAST konfrontováni se situacemi vycházejícími z incidentů, jejichž účastníci létali na ultralehkých strojích. Předmětem testu bude rychlost reakce pilota, jeho schopnost orientace a dále slovní ohodnocení dojmů ze součinnosti simulátoru a programu EFIS 3D.

6.1 Předběžná FMEA analýza

Prezentovaná FMEA analýza se zabývá vztahem mezi náhlou poruchou systému EFIS 3D v ultralehkém letectví a efekty, které tato porucha může mít na prováděný let. Jsou prezentovány i tabulky významů jednotlivých hodnot. FMEA analýza je prezentována ve dvou tabulkách. První se zabývá klasifikací poruch, druhá jejich řešením a postupy (důvodem je omezený prostor diplomové práce). Hodnocení předpokládá stoprocentní funkčnost modulů mimo program EFIS 3D.

6.1.1 Tabulky využité pro hodnocení

Následující FMEA analýza je volně inspirována dokumentem ARP4761 vydaným SAE, na základě kterého FAA rozhoduje o letuschopnosti daného typu letadla. Pravděpodobnost, detekce a závažnost poruch jsou hodnoceny podle tabulek 6.1, 6.3 a 6.2. Prezentované zhodnocení rizik je založeno na předběžné tabulce uvedené v MIL-STD-882 [2, str. 12]. Konkrétní výpočty rizik jsou předmětem podrobných analýz, které jsou v tomto stádiu vývoje programu předčasné, a tudíž nejsou uvedeny.

6.1.2 Vyplývající poznatky

Z prezentované FMEA analýzy vyplývá, že nejkritičtější poruchy jsou ty, které ovlivňují chod programu či neumožňují chod aplikace Navigator. Veškeré další zobrazovací funkce

(3D terén a překážky) jsou jištěny jednoduchým umělým horizontem a základními přístroji. Tyto poruchy neřadíme mezi rizikové.

Nedostatku paměti RAM či VRAM lze zabránit důsledným debugem. V současné době nedostatek obou druhů paměti nenastává ani po několikahodinovém provozu a podle monitorovacích nástrojů množství paměti rezervované programem nenarůstá. Jedinou poruchou závažnějšího rázu tedy zůstává přerušení komunikace se systémem Navigator během nouzového přistání. Závažnost této poruchy je mírně nadsazena, protože Navigator je pouze pomůckou pro provedení přistání. Nicméně v případě špatné funkce tohoto systému může být pilot zmaten a provést přistání ve větším stresu.

Tabulka 6.1: FMEA - Pravděpodobnost (P)

Hodnocení	Význam
A	vzácné
B	málo pravděpodobné
C	řídce
D	velmi pravděpodobné
E	časté

Tabulka 6.2: FMEA - Závažnost (S)

Hodnocení	Význam
I	žádný vliv na bezpečnost
II	drobná závada, lehce opravitelná
III	mírné poškození, méně četná zranění
IV	středně závažné, četná zranění
V	kritické, možné úmrtí
VI	katastrofické, mnohočetná úmrtí

Tabulka 6.3: FMEA - Detekce (D)

Hodnocení	Význam
1	jistá
2	téměř jistá
3	vysoce pravděpodobná
4	střední
5	málo pravděpodobná
6	nemožná

Tabulka 6.4: FMEA analýza pro EFIS 3D - část I

ID	Druh poruchy	P	S	D	I	Riziko
1	Výpadek 3D terénu	C	II	1	A	nízké
2	Výpadek UDP spojení	A	III	1	A	nízké
3	Nedostatek RAM	C	III	4	N	střední
4	Nedostatek VRAM	C	III	2	A	střední
5	Nefunkční Navigator	B	V	4	A	vysoké
6	Chybějící textury	B	II	1	N	nízké
7	Zkreslená výšková informace	C	II	4	N	nízké

Tabulka 6.5: FMEA analýza pro EFIS 3D - část II

ID	Detekce poruchy	Řešení poruchy	Opatření
1	Výjimka OpenGL error 1281: terrain_draw	automatické opětovné načtení terénu	důsledné podmínky pro alokaci a dealokaci terénu
2	Ukončení aktualizace letových parametrů	opětovné spuštění systému	využití vysokého čísla portu a ověřených knihoven
3	Zamrznutí či pád programu	restart programu	ověření správně alokace a dealokace dynamických objektů
4	Výjimka OpenGL error 1285	restart programu	důkladný debug pomocí GPU monitoringu
5	Výpadek naváděcích prvků (obdélníků)	vypnutí a zapnutí zobrazení nav. prvků	automatické vypnutí/zapnutí funkce
6	Šedá či černá textura místo barevné	textura není přítomná nebo je chybná GPS informace, tudíž nelze vyřešit za letu	fault-tolerant design
7	Letadlo se při vzletu či přistání propadá do země	nastavení parametru TERRAIN_SHIFT v konfiguračním souboru	využití spolehlivých SRTM dat vztahených k EGM96

6.2 Vybrané testovací scénáře

Byly vybrány tři letové situace, v jejichž řešení by se měl EFIS 3D osvědčit. Záměrem testů je hodnotit grafickou stránku EFIS 3D a její využitelnost pro bezpečnější vedení letu, tudíž jsou testy zaměřeny méně na letecké umění a více na interakci pilota s programem. Přiložená forma dotazníku a formulář pro hodnocení pilotů (viz příloha B) se vztahují ke všem třem letům.

6.2.1 Rutinní let LKTC - LKVO

Tento let se inspirová incidentem ze dne 29. 11. 2009, kdy došlo k narušení CTR letiště LKPR¹. Podle dostupných materiálů měl pilot v úmyslu přistát na LKVO, ovšem došlo k záměně za LKPR. Oblet Prahy byl proveden východním směrem a nic nenasvědčuje tomu, že by pilot neměl dostatek zkušeností místním provozem. Přesto zjistil svoji chybu až 5 km před RWY 24. Toto zásadní selhání ohrozilo běžný provoz a k nehodě nedošlo jen díky aktivovanému odpovídající sekundárního radaru.

V rámci testů seznámíme pilota s plánovanou trasou na LKVO, umožníme mu náhled do mapy a přípravu dle jeho uvážení. Komunikace s řízením letového provozu bude pro účely testu vypuštěna. Nepředpokládáme opakování tak vážného incidentu, test je tedy zaměřen spíše na celkový dojem z letu a na přínos programu EFIS 3D pro rozpoznání letiště LKVO. Po dokončení letu bude sepsána krátká zpráva rozebírající chování a reakce pilota.

6.2.2 Výpadek motoru v blízkosti LKRK

Výběr letiště LKRK není náhodný. Okolí letiště LKRK již bylo v minulosti pokryto navigačním programem Navigator, který je schopen s EFIS 3D komunikovat. Tento modul je aktivován po vypnutí motoru simulujícím jeho náhlý výpadek. Účelem testu však není využití tohoto navigačního modulu, nýbrž využití srovnávací navigace pro nalezení vhodného místa k přistání. Úkolem hodnotitele je zhodnotit technické provedení nouzového přistání a roli programu EFIS 3D v pilotově rozhodovacím procesu. Přistávací manévr bude nejprve stručně zaznamenán hodnotitelem, což bude následně konfrontováno s výpovědí pilota.

6.2.3 Volný let

Závěrečný testovací let je volným letem na základě pilotova výběru. Pilot si vybere jakékoli letiště z FIR Praha, se kterým je obeznámen, a v následujících minutách provede rutinní okružní let po místních zajímavostech. Výstupem tohoto testu bude zpráva vycházející z pilotovy výpovědi o průběhu letu. Komentář bude zaměřen na pilotovo zhodnocení věrnosti zobrazeného terénu. Poněvadž simulátor disponuje texturami s nízkým rozlišením a náhodným generováním objektů, dá se předpokládat, že EFIS 3D poskytne pilotům mnohem lepší povědomí o tom, kde přesně se nacházejí. Jedná se o nejvíce subjektivní zkoušku ze tří prezentovaných.

¹<<http://letistecr.cz/aktuality/rozbor-mimoradnych-udalosti-v-provozu-slz-za-rok-2009.aspx>> [Naposledy zhlédnuto 2. 5. 2015]

6.3 Provedení letů

Níže následuje rozbor výše představených scénářů. Každý scénář podstoupili tři piloti různých zkušeností. Všichni zúčastnění mají shodou okolností licenci pro lety s kluzáky, což není cílová skupina systému EFIS 3D, nicméně potýkají se s podobnými problémy jako piloti ultralehkých strojů.

6.3.1 Testování piloti

Pilotům bylo slíbeno, že účast na testech bude zcela anonymní, nicméně uvedení některých charakteristik je nezbytné pro možnost korelace jednotlivých odpovědí s dosavadními zkušenostmi pilota.

PB Student ČVUT, který se ve volném čase věnuje simulátorům a létání na kluzácích. Věk: 22 let. Je vlastníkem licence na kluzáky, na kterých má nalétáno 230 hodin. Se systémem EFIS se již setkal v praxi i na simulátoru.

JK Vyučující na ČVUT, a zároveň pilot kluzáků, meteorolog a člen komise pro závody kluzáků. Věk: 72 let. Má nalétáno 1880 hodin na nejrůznějších strojích (od Blaníku až po DG 1000). Dosud se nesetkal se systémem EFIS v běžném provozu, ani v žádné simulaci.

PR Studentka ČVUT se zájmem o letectví. Je vlastníkem licence pilota kluzáků. Věk: 25 let. Zkušenosti má především s typem L-13 Blaník. Systém EFIS zná pouze ze simulátorů. Nalétáno má 310 hodin.

6.3.2 Let 1

Pilot PB a pilotka PR odstartovali z letiště Točná s menšími potížemi, které však zapříčinila poměrně vysoká citlivost simulátoru. Po dosažení Vltavy letoun stočili na sever a následně využili východní trasy okolo omezeného prostoru LK R9. Pilot JK odmítl tuto trasu použít a pokračoval v letu na západ, aby se vyhnul LK R9. Dával bedlivý pozor, aby nenarušil provoz na letišti Ruzyně, a pro okamžité rozpoznání své polohy využil pozic letišť vykreslených v navigačním (mapovém) pohledu EFIS 3D.

Pilot PB několikrát nadnesl, že zobrazení letových prostorů nepovažuje za dostatečné, protože nemá vytyčené žádné vstupní body do těchto prostorů. Narážel na nedokonalost zobrazení, která byla do provedení dvou zbývajících letů odstraněna. Přistání ve Vodochodech všichni zúčastnění piloti zvládli bez úhony a průběh letu by se dal označit za velmi poklidný.

PR uvedla, že je zobrazení působivé, ale ne moc využitelné v praxi. Navrhla označit jednotlivé prostory 3D textem po jejich obvodu.

6.3.3 Let 2

Scénář zahrnující výpadek motoru všechny piloty zaskočil, ačkoliv byl předem avizován. Nejvíce problematickým bodem bylo nedostačující zobrazení v programu Flight Gear, které narušovalo vcítění se do dané situace. S výjimkou pilota JK nevěnovali piloti žádný ohled na displej s 3D terénem a řídili se informacemi ze simulátoru. Všichni zúčastnění se vyvarovali drátům a stožárům vysokého napětí i lesnímu porostu. Zato jejich dosednutí málokdy skončilo na rovině, což by v reálu způsobilo významné poškození letounu. Situace by zřejmě ani v jednom z případů neskončila vážnou újmou na zdraví, je ovšem znát, že všichni zúčastnění by potřebovali mnohem delší čas na sžití se s programem EFIS 3D.

Z výpovědi všech pilotů vyplynulo, že náhlý výpadek motoru je přinutil zaměřit se na dění okolo letadla (tedy na simulátor) namísto přístroje EFIS 3D. S výjimkou JK jej dokonce ani nepoužili jako referenci pro posouzení místa k přistání. Přínosnější test by přinesly testy s fotomapou terénu - ta by byla porovnatelná se zobrazením EFIS 3D.

6.3.4 Let 3

Tato část se ukázala být nejpřínosnější z celého testu. Piloti dobře seznámení s okolím svých letišť byli často zaskočeni, jak věrně a přehledně je okolí znázorněno. Uživatel PB okamžitě po vzletu z LKPR zamířil k zakázanému prostoru nad městem Řež. Jakmile si ověřil, že je prostor na správném místě, provedl let nad Prahou, který průběžně komentoval. Z poznámek PB vyplývá, že si nejvíce cení zobrazení letových prostorů, ale na simulátoru nepovažuje 3D terén za přínos.

Oproti tomu JK vzletl z letiště LKPM (Příbram), kde sídlil jeho bývalý aeroklub, a až na absenci několika hangárů byl unesen věrností zobrazené informace. Docenil nejen zobrazení letových prostorů, ale taktéž 3D terén. Provedl vyhlídkový let nad vodní nádrží Orlik a průběžně let komentoval. Všechny jeho poznámky o význačných bodech se prolínaly s tím, co na displeji bylo skutečně vidět. JK za nedostatek považuje, že v simulátoru chybí význačné orientační body, které však nejsou uvedeny v AIP. S tímto faktem je obtížné do budoucna naložit, protože databáze takovýchto objektů neexistuje, nicméně i tak považujeme tento postřeh za přínosný.

PR si vybrala pro svůj let letiště na základě nedávných zkušeností. Zvolila letiště Sázená (LKSZ). Po vzletu ocenila přesnost zobrazení, ale upozornila na to, že rozsáhlé jednobarevné plochy příliš nepomáhají s orientací. Velmi uvítala zobrazení leteckých překážek i letových prostorů, ovšem bez popisu považovala za obtížné jednotlivé prostory rozlišit.

6.4 Výsledky a jejich zhodnocení

Výstupy z dotazníků (přiloženy v příloze B), které měli jednotliví účastníci za úkol vyplnit, zpracovávám postupně dle zadaných otázek. Otázky zjišťovací jsou rozvedeny v tabulkách 6.6 a 6.7. Otázky doplňovací jsou rozvedeny níže.

Jaké rozmístění přístrojů preferujete vy?

- PB: Jsem zvyklý na „T“ rozložení.
- JK: Jako u větroně, tedy kompas nahoře.
- PR: Jsem zvyklá na klasické „T“ rozložení.

Jaké geometrické zobrazení překážek byste upřednostnil/a?

- PB: Upřesnil bych výšku překážky v 3D zobrazení.
- JK: Zahrnul bych i překážky mimo AIP, které jsou ale regionálně známé.
- PR: Líbil by se mi jehlan.

Tabulka 6.6: Výsledky dotazníku (otázky zjišťovací)

Otázka	PB	JK	PR
Vyhovovalo vám rozmístění přístrojů?	ANO	ANO	ANO
Považujete přítomné přístroje za dostatečné k provedení letu za podmínek VFR?	ANO	ANO	ANO
Měl jste problémy s čitelností hodnot?	NE	NE	ANO
Pomohlo vám zobrazení 3D terénu v orientaci během letu?	NE	ANO	ANO
Ocenil byste prezentované zobrazení nebezpečných a omezených prostorů?	ANO	ANO	ANO
Využil jste navigačního (mapového) zobrazení systému EFIS 3D?	ANO	ANO	NE

Tabulka 6.7: Výsledky otázky č. 6 (Myslíte si, že je zobrazení následujících útvarů v 3D vyhovující?)

Pilot	Lesy	Řeky	Nádrže	Silnice	Zástavba	Pole	El. vedení	Překážky
1	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	NE	ANO
2	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO
3	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO

Kapitola 7

Experimentální nasazení systému EFIS 3D

Nedílnou součástí práce je také letový test programu za podmínek velmi podobných jeho navrhovanému využití. Ověření využitelnosti programu EFIS 3D pro srovnávací navigaci umožnil Windows tablet Acer Iconia. Jeho výpočetní výkon umožňuje přiměřeně rychlý chod programu. Zaměření testu tedy vyžadovalo stanovení kritérií funkčnosti programu. Jejich výčet, včetně jejich záznamu pomocí videokamery, byl pořízen autorem Petrem Mazůrkem.

7.1 Pozemní test

Propojení tabletu Iconia a AHRS jednotky doplněné o GPS bylo zkoumáno již během pozemního testu 10. 4. 2015. Tablet byl umístěn v automobilu a cílem bylo ohodnotit kvalitu příjmu signálu. Z testu vyplynulo, že dostupný GPS modul není schopen data správně přijímat při rychlosti přesahující 50 km/h. To značně zpozdilo přípravu na finální letový test.

Pozitivní zprávou byla dobrá funkčnost 3D zobrazení i při pohybu po zemi a adekvátní rychlost grafiky. Vedoucí práce nabídl výměnu GPS modulu za jiný, který však byl limitován obnovovací frekvencí. Z důvodu časové tísně jsme se shodli na tomto řešení. To umožnilo 24. 4. 2015 uskutečnit druhý test v automobilu. Během tohoto testu již nebylo zaznamenáno žádné pochybení. Systém se osvědčil jako způsobilý pro nadcházející letový test.

7.2 Plán testu za letu

Testovací let byl naplánován na sobotu 25. 4. 2015. Byla pronajata Cessna 172 s označením OK-DSF pro cca hodinový let. Na palubě je přítomen tablet Acer Iconia se spuštěným programem EFIS 3D, přičemž k tabletu je připojena AHRS jednotka a GPS. Jedna kamera zabírá obrazovku programu EFIS 3D, druhá se věnuje okolnímu terénu. Cílem je identifikovat mezi zobrazovanými daty takovou shodu, která by dokazovala užitečnost programu pro provádění srovnávací navigace.

7.3 Kritéria testu

V této části je mým úmyslem přesně definovat kritéria, na základě kterých bude let hodnocen. Hodnocení bude podloženo obrazovým materiálem v podobě fotografií i videozáznamu. Bude přihlédnuto také k názoru pilota, jemuž bude přístroj k dispozici k nahlédnutí.

Plynulost zobrazení Toto kritérium je důležité z pohledu rychlosti aktualizace zobrazovaných veličin. Taktéž není žádané snížení vykreslovací frekvence při přeletu mezi terénními dlaždicemi. Rychlost zobrazení bude ovlivňovat i kvalita GPS přijímače, tudíž obnovovací frekvence zaznamenávaných letových parametrů.

Přesnost zobrazené informace V kokpitu letounu budeme mít okamžitě možnost porovnat, zda zobrazované informace číselně sedí. Je třeba brát na zřetel, že informace z GPS nebudou přímo převeditelné na údaje vztažené k danému referenčnímu tlaku, tudíž může docházet k odchýlkám. Přístroje použitelné s GPS a AHRS jednotkou zahrnují kurz, rychlost, výšku, polohu a polohové úhly letounu.

Výpadky přístroje Je možné, že buď vlivem chyby v programu, či vlivem nesprávně parsovaného údaje dojde k vypnutí či zamrznutí programu. V tomto případě závadu zapíšeme do závěrečné zprávy a přístroj restartujeme. Okolnosti, za kterých pád nastal, mohou pak poukázat na konkrétní chybu, kterou bude možno ošetřit.

Náchylnost k vibracím Vzhledem k citlivosti AHRS jednotky očekáváme, že výsledné zobrazení bude ovlivněno vibracemi, čímž dojde ke klepání obrazu. Nastane-li tento problém, let dokončíme, nicméně bude navrženo implementovat do programu vyhlazovací algoritmus.

Úroveň grafického zpracování Zde se jedná o estetické hledisko, které můžeme ohodnotit po dohodě s pilotem. Bude se jednat o první nasazení programu v terénu, což může implikovat změnu některých designových rozhodnutí z počátku vývoje programu. Toto kritérium je zaměřené na 3D terén, letecké překážky a terénní útvary.

Čitelnost displeje V této kategorii hodnotíme čitelnost číslic, jednotek a ukazatelů za různých podmínek. Nedostatky opět budou okomentovány a bude navrženo jejich řešení.

7.4 Provedení

Letový test se uskutečnil podle plánu 25. 4. 2015. Letoun OK-DSF 7.1 byl převzat v 11:30 UTC a připraven k poježdění byl ve 12:00 UTC. Během předletové přípravy byla připravena měřicí soustava:

Acer Iconia Dotykový tablet s nainstalovaným programem EFIS 3D.

USB hub Dokovací stanice až pro šest USB zařízení, tablet byl totiž vybaven pouze jedním USB portem.

AHRS jednotka Školní AHRS jednotka s odpojeným vadným GPS modulem. Výstupem byly úhly klopení a klonění letounu.

Navilock NL-602 U GPS modul sloužící jako náhrada za momentálně nefunkční modul. Měřicí soustavu zachycuje obrázek 7.2.

Protiodlesková krabice Improvizované řešení pro efektivnější záznam displeje tabletu. I na nepřímém slunci vrhá displej nepříjemné odlesky, je špatně čitelný a odráží obraz kameramana. Z tohoto důvodu je tablet po celý let uložen na dno krabice, jež je zabalená v textilii. Textilie se uzavře nad kamerou a vytvoří tak ideální podmínky pro záznam obrazovky tabletu. Zároveň může být kdykoliv umožněn přístup k tabletu samotnému. Krabice je zaznamenána na obrázku 7.3. Řízený let VFR byl zahájen v 12:07 UTC vzletem z RWY 34.



Obrázek 7.1: Letoun OK-DSF využitý pro testování (Cessna 172)

Let pokračoval v kurzu 0° směrem nad Dvůr Králové nad Labem. Posléze se letoun kvůli mírným turbulencím stočil více na západ a pokračoval přes ATZ Vrchlabí až k Železnému Brodu, kde se obrátil a přes ATZ Lomnice nad Popelkou, Choteč a Hořice se vrátil zpět k LKHK. Pilot požádal o sestup po větru pravou na RWY 34. Vítr na přistání byl 27006KT,



Obrázek 7.2: Rozpojená měřicí soustava před zkušebním letem

tedy 6 uzlů ze směru 270°. To způsobilo mírný boční posun při dosednutí. Pilot i posádka byli s letem spokojeni a všechny potřebné záznamy byly pořízeny bez komplikací.

Fotografie a ukázka letu jsou přiloženy na CD a dostupné též na katedře měření FEL ČVUT. Vybrané obrazové materiály jsou využity v těle práce jen v míře nezbytně nutné. Přibližná trajektorie letu je vyobrazena v příloze na obrázku C4.

7.5 Vyhodnocení testu

Plynulost zobrazení Rychlost vykreslování byla během celého letu zcela dostatečná a nebyly zaznamenány žádné potíže, které by vedly k nečitelnosti displeje vlivem vykreslovacích vad. Změny polohových úhlů probíhaly s frekvencí překračující 25 Hz, tudíž nebylo postřehnutelné žádné zpoždění. Drobná závada AHRS jednotky způsobila, že před startem samotného testu bylo potřeba jednotku několikrát odpojit a opětovně zapojit, než došlo k uspokojivému spojení. Od této chvíle nedošlo s AHRS k žádným komplikacím. Nedopatřením byla během vzletu pozicována pootočená o 180°, tato chyba však byla napravena neprodleně po startu. Záznam programu EFIS 3D tedy při vzletu udal nesmyslné údaje o sklonu letounu, nicméně přesto umožnil zabrat vzletovou a přistávací dráhu bez vizuálních nedostatků, tudíž toto nepovažujeme za závadu systému EFIS 3D.

Přesnost zobrazené informace Již během pojíždění jsme byli schopni ověřit, že pozice letounu v rámci mapového zobrazení systému EFIS 3D je odečítána velmi přesně. Pojíždění



Obrázek 7.3: Krabice omezující odlesky displeje tabletu

letounu bylo možno sledovat přímo na pojezdových drahách vykreslených na dané textuře. Výškový údaj ve stopách nad mořem nebyl bohužel přímo porovnatelný s výškoměrem nastaveným na místní QNH, nicméně při pohybu po zemi odpovídal zápisu v mapě. Rychlost měřená pomocí GPS (tedy ground speed) se logicky lišila od indikované vzdušné rychlosti, nicméně pozorované změny opět byly v normě. Kompas udával identický kurz jako palubní kompas magnetický, nicméně jeho obnovovací frekvence okolo 1 Hz neposkytovala informaci, která by byla dostatečná k vedení letu. Vario ani relativní příčný sklonoměr nebyly zapojeny. Změny polohových úhlů nebyly kalibrovány a podléhaly vibracím stroje, což způsobilo jisté nepřesnosti. Vylepšení AHRS jednotky a zvýšení obnovovací frekvence GPS jsou tedy prioritami pro jakákoliv další měření.

Výpadky přístroje Jednou během letu došlo k chybnému vykreslení textury, kdy nebyla vybrána ani pojistná textura záložní. Důvodem byla absence dané textury a také textury „default.png“. Vykreslování terénu ještě nějakou dobu pokračovalo, posléze ale zřejmě došlo ke ztrátě GPS signálu nebo příjmu mylné informace. EFIS 3D se přepnul do svého zobrazení umělého horizontu. Po znovunačtení terénu zaostával za letadlem, a proto jsem usoudil, že je nevyhnutelný restart programu. Po restartu probíhal záznam bez komplikací. Při dosednutí na zem bohužel došlo k chybnému odečtení výšky pomocí GPS a letoun se tedy v programu propadl pod terén. Zajímavostí je, že při následném poježdění bylo již zobrazení opět v pořádku. Z tohoto jevu je taktéž zapotřebí vyvodit důsledky pro další vývoj systému.

Náchylnost k vibracím Navzdory původním obavám jsme nezaznamenali drastický vliv vibrací na přesnost a čitelnost displeje. Nehledě na tento fakt by implementace klouzavého průměru jistě pomohla v plynulosti zobrazení, tudíž je s tímto řešením počítáno při budoucím vývoji EFIS 3D.

Úroveň grafického zpracování Ukázalo se, že během letu nemohl být displej prezentován z prostorových důvodů, tudíž veškeré výstupy týkající se podoby přístroje jsou omezeny na experimenty na simulátoru.

Čitelnost displeje Odmyslíme-li si pro tuto chvíli nevhodný displej tabletu, jediný problém s viditelností představovala indikace u varia, která je na různých pozadích obtížně čitelná. Taktéž terén a břevna podélného náklonu se někdy ne zcela vhodně prolínají. Ovšem uvážíme-li, že cílem displeje je především napomáhat srovnávací navigaci, je stále prostor pro zlepšení systému v jiných oblastech.

Závěr

Provedením jednotlivých experimentů jsme se dostali do stádia, kdy je na místě zhodnotit proces tvorby programu a jeho využitelnost. Z toho vyplyne i vlastní hodnocení výsledků diplomové práce.

Shrnutí tvorby programu EFIS 3D

Již od první konfrontace se zadáním práce bylo zřejmé, že těžiště tvorby bude spočívat v přípravě adekvátních dat a jejich vizualizaci. Především nabytí dostatečných znalostí o programování grafiky bylo klíčovým požadavkem ke zdárnému dokončení práce. Seznámení se s moderními trendy v OpenGL a využití VAO objektů nebylo přínosné jen ze stránky teoretické, ale hlavně umožnilo realizaci 3D zobrazení s přípustnou obnovovací frekvencí. Teprve na počátku ledna 2015 se podařilo zobrazit jednu trojrozměrnou terénní dlaždicí včetně patřičné textury. Tento dílčí úspěch však umožnil pokračovat na práci s mnohem viditelnějšími výsledky.

Program samotný vznikl z prototypu, který původně OpenGL téměř nezahrnoval, neboť se věnoval především zpracování dat. Z tohoto důvodu jsem se nechal inspirovat dosavadním programem EFIS, do něž jsem implementoval prvky objektového programování. To umožnilo mnohem šetrněji zacházet se sdílením proměnných. Vytvoření jedné globální třídy výrazně napomohlo možnostem tvorby konfiguračního souboru i průběžným změnám parametrů zobrazení. Cílem bylo vytvořit program co nejvíce přehledný pro případné následné úpravy. Proto program bude pro potřeby katedry doplněn dokumentací vytvořenou pomocí nástroje Doxygen a doprovodným textem.

Program EFIS 3D splňuje požadavky na obsah zobrazení, protože zahrnuje všechny terénní útvary a výsledky lidské činnosti, které byly vyjmenovány v zadání. Zvýrazňování jednotlivých objektů (například všech lesů) by bylo možné pomocí alfa textur sloužících jako masky, ovšem jejich tvorba a přidaná náročnost z našeho pohledu nijak výrazně nevyvažují výhody. Síla zobrazení EFIS 3D tkví právě v zobrazení, které zahrnuje všechny terénní atributy, a umožňuje tak v reálném čase porovnávat pohled z kabiny s podobou syntetického terénu.

Největší komplikace do programu jistě zavedla knihovna „OGLFT“ pro práci s texty. Vyhledání knihovny, která by splňovala všechny mé požadavky, nakonec vyústilo ve využití čistě 2D textu i pro popis leteckých překážek. Je zřejmé, že pro jakékoliv další účely je výhodnější napsat knihovnu vlastní. Takto je zobrazení popisků jednotlivých přístrojů odděleno od přístrojů samotných, což se trochu vzdaluje objektovému pojetí, kterému bych byl za jiných okolností více nakloněný.

Na základě zkušeností ze simulátoru a letových testů lze konstatovat, že EFIS 3D má přiměřené požadavky na PC, a že jeho chod není poznamenán nečekanými pády programu či nedostatkem výkonu.

Přínos pro srovnávací navigaci

Zaměřme se nyní více na využitelnost programu v praxi. V pojetí této diplomové práce se příliš nepřihlíží k rozdílům mezi simulátorem a reálným využitím systému, ovšem rozdíl je zde vskutku markantní.

Během letového testu pociťuje člověk mnohem větší respekt k okolním povětrnostním podmínkám a i ze strany pilota bylo znát velikou ostražitost, aby nedošlo k překročení hranice žádného vyhrazeného prostoru. Zde jakákoliv přidaná grafická informace výrazně přidává na klidu v kabině a zabraňuje nedorozuměním. Několikrát během letu došlo k situaci, kdy jsem pilota upozornil na to, kde hledat různé navigační body, neboť EFIS 3D obsahoval informace v přehlednější podobě než GPS, kterou pilot využíval.

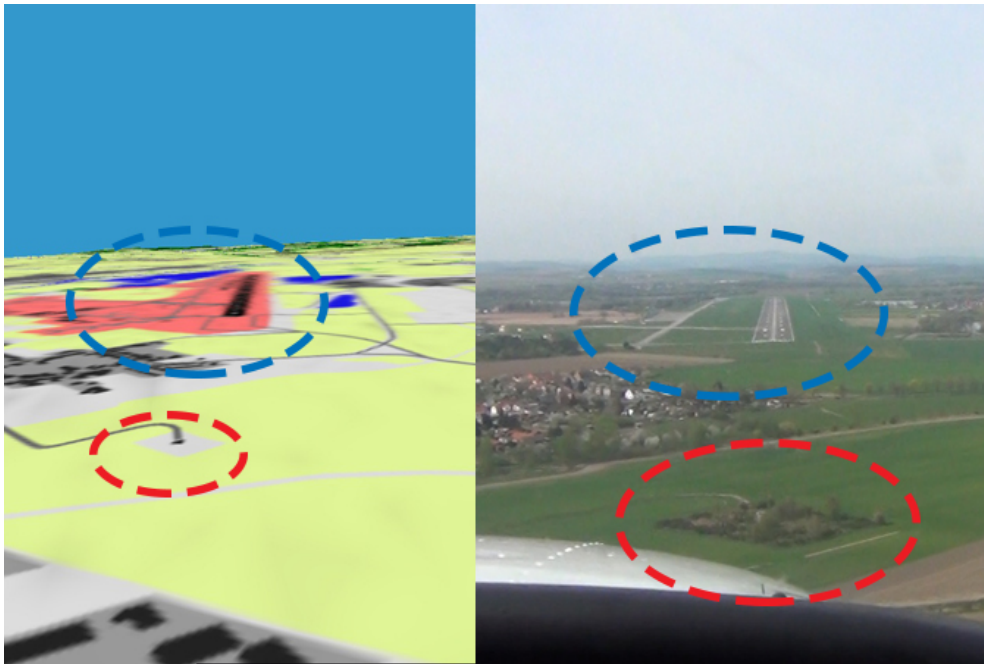
Při letu na simulátoru člověk pociťuje relativní klid, neboť i při ztrátě orientace nedojde k žádné finální konfrontaci či vyšetřování případného incidentu. Navíc virtuální povaha světa moc nenahrává zmatení smyslů, které může nastat v letadle. I při započítání pohybů CAST simulátoru člověk jen těžko ztratí pojem o tom, kde se právě nachází. Navíc ve virtuálním světě chybí mnoho navigačních bodů, které v realitě velmi dobře poslouží. Proto jeden z pilotů na simulátoru v dotazníku uvedl, že neviděl příliš možnost využít systém pro srovnávací navigaci. Tomuto komentáři bych oponoval obrázkem 7.4, ve kterém porovnávám záznam z letu se zrekonstruovaným záznamem v programu EFIS 3D. Jak je na obrázku patrné, charakter krajiny i zástavby je v programu poměrně věrně zachycen.

Z pohledu studenta se zájmem o letectví (a autora programu v jedné osobě) jsem v jiné pozici než piloti, kteří EFIS 3D zkoušeli. I přesto musím konstatovat, že výsledky 3D zobrazení značně předčily má očekávání. Samozřejmě jsem byl obeznámen s dosud existujícími řešeními SVS systémů, netušil jsem však, nakolik přidání terénních atributů napomůže celkové podobě výsledku. To krásně prezentuje obrázek 7.5, který zobrazuje prolnutí výstupu z programu EFIS 3D s realitou.

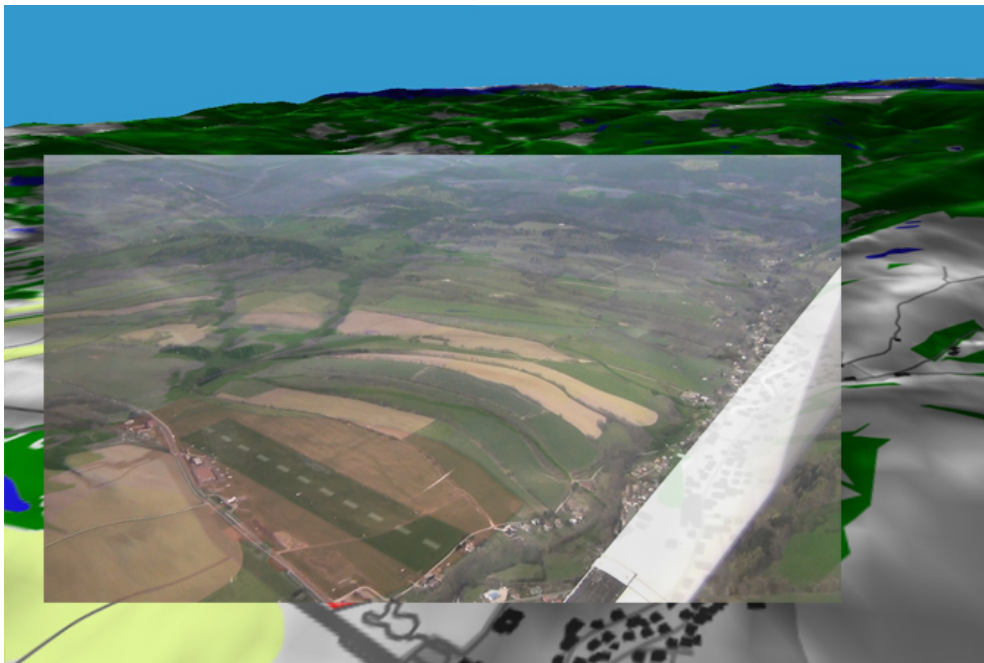
Objektivně je, domnívám se, zcela na místě připomenout, že návrh HMI rozhraní a detailů zobrazení patří mezi zcela samostatné disciplíny. V současné podobě EFIS 3D odpovídá technickým požadavkům, ale pro přiblížení programu běžnému uživateli by bylo zapotřebí ještě mnoha kroků. Velmi se proto i s vedoucím zajímáme o výsledky první veřejné prezentace systému, která se uskuteční na veletrhu IDET 19. - 21. 5. 2015.

Celkové hodnocení

Na základě výše uvedeného lze EFIS klasifikovat jako SVS systém s podporou simulátoru Flight Gear i externích senzorů. Systém splňuje podmínky zobrazení trojrozměrného terénu, včetně zobrazení výrazných přírodních i člověkem vytvořených útvarů. Jednotlivé útvary jsou viditelně odděleny a reprezentovány bitmapou, která následně slouží jako textura pro existující 3D terén. Toto zobrazení je rozšířeno ještě o trojrozměrné útvary.



Obrázek 7.4: Srovnání reality a výstupu programu EFIS 3D



Obrázek 7.5: Prolnutí reality a výstupu programu EFIS 3D (letiště Dvůr Králové)¹

Během experimentů se osvědčil zejména režim zobrazení letových prostorů. Ten poprvé umožnil vyzkoušet fúzi leteckých dat s terénem v rámci programu EFIS vyvinutého na ČVUT. Externí modul pro zadávání trajektorií (v práci zmiňovaný jako program Navigator) umí s programem EFIS 3D komunikovat, ovšem jeho funkčnost je omezena na základní navigační pokyny. Podporovány jsou jen úseky bezprostředně v blízkosti letadla, v paměti nezůstává zapsána celá předepsaná trajektorie, jak tomu bylo v dosavadním řešení programu EFIS.

Propojení s externími senzory umožňuje systém testovat i v terénu. Kvalita zobrazení výrazně závisí na kvalitě použitého GPS přijímače. Žádoucí je obnovovací frekvence na úrovni přibližně 100 Hz, s níž se dá dostatečně rychle i přesně dopočítávat jak rychlost letu, tak kurz letu.

Pro veškerý další rozvoj programu EFIS 3D bude klíčové skloubit dosud prezentované vlastnosti systému s novým 2D mapovým zobrazením, které plně nahradí provizorní 3D mapu. Pozitivním důsledkem takovéto úpravy bude možnost implementovat do zobrazení více pomocných letových informací, které nebudou blokovat výhled v klasickém 3D pohledu. Optimální míra rozšířeného vidění pro školní systém EFIS jistě bude předmětem všech dalších snah o zlepšení tohoto systému.

Na základě výše řečeného lze považovat vývoj programu EFIS 3D za úspěšný. Systém se osvědčil jak během laboratorních testů, tak i při zkušebním letu. Program též splnil klíčové požadavky na tento systém v souladu se zadáním a podařilo se prokázat vliv zobrazení terénu na rozhodovací procesy pilotů. Výsledky této práce budou dále sloužit pro prezentaci fakulty na veřejných akcích (jako součást simulátoru CAST) a pro další testování pilotů.

¹Zdrojové obrázky umístěny v příloze C: obr. C7 a obr. C8.

Literatura

- [1] EFIS-85C(14)/86C(14) Electronic Flight Instrument System [online]. Rockwell Collins, USA, 2000. [cit. 07.05.2015]. Dostupné z: <www.amcpilot.com/files/Collins_85C_EFIS_Manual.pdf>.
- [2] MIL-STD-882E [online]. Department of Defense, USA, 2012. [cit. 01.05.2015]. Dostupné z: <<http://www.system-safety.org/Documents/MIL-STD-882E.pdf>>.
- [3] Letecká informační příručka [online]. LIS ŘLP ČR, s.p., 2015. [cit. 01.05.2015]. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm>.
- [4] Air Traffic Services. Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation [online]. ICAO, Červenec 2001. [cit. 10.05.2015]. Dostupné z: <mid.gov.kz/images/stories/contents/an11_en.pdf>.
- [5] Phoenix Boeing 777-200 Advanced Panel Manual [online]. Phoenix Simulation Software. Engineering for Industry, 2001. [cit. 01.05.2015]. Dostupné z: <<https://cours.etsmtl.ca/gpa745/notesdecours/Cours%203/Cabine%20de%20pilotage%20pour%20le%20film%20du%20Boeing-777.pdf>>.
- [6] The F-14 “Tomcat” First Microprocessor [online]. 2015. [cit. 01.05.2015]. Dostupné z: <<http://www.firstmicroprocessor.com/>>.
- [7] Letecký předpis L15 o letecké informační službě [online]. Ministerstvo dopravy ČR, 2015. [cit. 01.05.2015]. Dostupné z: <<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-15/index.htm>>.
- [8] Here’s a Switch [online]. Commercial Benefits - Spinoffs. NASA STI Transportation. [cit. 08.05.2015]. Dostupné z: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020063410.pdf>>.
- [9] ELLIOTT, K. A Clearer Picture of Combined Vision Systems. Avionics News. Květen 2011, s. 62–65.
- [10] HIGDON, D. A Buyer’s Guide: Multi-Function Displays. Pilot’s Guide to Avionics 2008-2009. 2008-2009, s. 30–35.
- [11] KNOX, C. E. Description of the Primary Flight Display and Flight Guidance System Logic in the NASA B-737 Transport Systems Research Vehicle. NASA Technical Memorandum 102710. Srpen 1990.

- [12] MOLLER, H. – SACHS, G. Synthetic Vision for Enhancing Poor Visibility Flight Operations. IEEE AES Systems Magazine. Institute of Flight Mechanics and Flight Control at TUM, München. Březen 1994, s. 27–33.
- [13] MOORMAN, R. W. Through Sand and Fog. Avionics Today. Leden 2012, s. 26–32.
- [14] ROST, R. J. OpenGL® Shading Language. Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA : Addison Wesley Professional, 25. leden 2006. 2. vydání. ISBN: 978-0-321-33489-3.
- [15] SHREINER, D. et al. OpenGL® Programming Guide : the Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3. Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA : Pearson Education, Inc, 2013. 8. vydání. ISBN: 978-0-321-77303-6.
- [16] SPITZER, C. R. Avionics Development and Implementation. Digital Avionics Handbook. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2007. 2. vydání. ISBN: 978-0-8493-8441-7.
- [17] STRUNK, E. – KNIGHT, J. C. Digital Avionics: A Computing Perspective. Dependability Research Group Dept. of Computer Science University of Virginia. Charlottesville, VA 2006, USA. Dostupné z: <<http://fhs1.eng.buffalo.edu/publications/AvCompBook.pdf>>.
- [18] SWASSING, M. M. A Brief History of Military Avionics [online]. 2015. [cit. 07.05.2015]. Dostupné z: <<http://sfte2013.com/files/75235127.pdf>>.
- [19] WAGENEN, J. V. Enhanced Vision Systems - Peak Into New Markets, Capabilities. Avionics Today. Duben-květen 2015, s. 45–50.
- [20] WISE, J. A. – HOPKIN, V. D. – GARLAND, D. J. Handbook of Aviation Human Factors. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2010. 2. vydání. ISBN: 978-0-8058-5906-5.

Seznam příloh

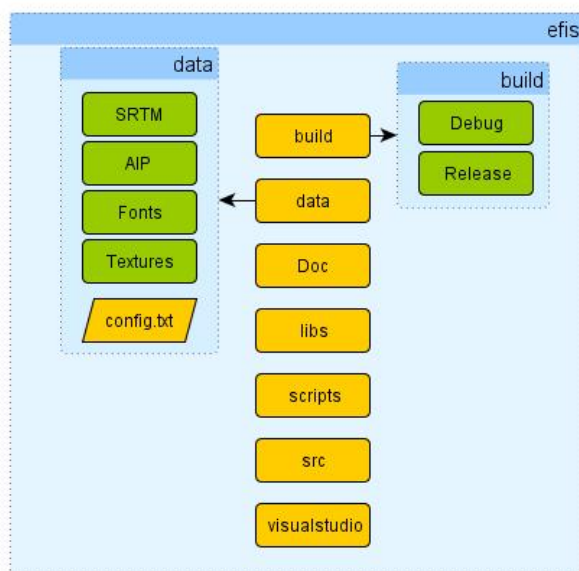
Příloha A: Obsah přiloženého DVD	I
Příloha B: Dokumenty použité při testování	II
Příloha C: Doplnková obrazová příloha	VII

Příloha A: Obsah přiloženého DVD

Přiložené DVD obsahuje 3 složky:

1. TEXT - samotný text práce včetně zadání a příloh;
2. EFIS3D - celý program včetně všech náležitostí nezbytných k jeho spuštění; Vyžaduje program Microsoft Visual Studio 2010.
3. PICS - knihovna obrázků spjatých s programem EFIS 3D (screenshoty, obrázky z experimentů,...);

Instalace programu EFIS 3D je jednoduchá. Kompletní adresářová struktura se překo-píruje kamkoliv, kde má uživatel práva přístupu pro čtení i zápis. Spustitelný EXE soubor se nachází ve složce „build/Release“ a nese název „efis3d.exe“. Součástí adresářové struktury (obr. A1) je i kompletní zdrojový kód.



Obr. A1: Výběr z adresářové struktury programu

Příloha B: Dokumenty použité při testování

- Obr. B1: Formulář pro testování pilotů
- Obr. B2: Dotazník pro testování pilotů (str. 1a)
- Obr. B3: Dotazník pro testování pilotů (str. 1b)
- Obr. B4: Dotazník pro testování pilotů (str. 2)

FORMULÁŘ – Testovací lety

Část I – obecné poznatky

1. Věnuje subjekt dostatečnou pozornost displeji?
2. Zkouší subjekt displej přenastavovat (jednotky, atd.)?
3. Využívá subjekt mapového zobrazení?

Část II – jednotlivé lety

1. Vybraná trajektorie:

Nebezpečné situace:

Překvapivé postřehy:

2. Vybraná trajektorie:

Nebezpečné situace:

Překvapivé postřehy:

3. Vybraná trajektorie:

Nebezpečné situace:

Překvapivé postřehy:

Obr. B1: Formulář pro testování pilotů

DOTAZNÍK – Testovací lety s programem EFIS 3D

Dobrý den,

jménem Fakulty elektrotechnické ČVUT děkuji za Vaši účast na testování systému EFIS 3D. Cílem projektu je ulehčit pilotům ultralehkých letadel srovnávací navigaci během letu za podmínek VFR. Výsledky testů budou publikovány v rámci diplomové práce.

Petr Mazůrek, 2. ročník mag. studia

Věk:

Kvalifikace:

Zkušenosti s letounem:

Nalétané hodiny:

Setkal jste se již se systémem EFIS?

Vhodné odpovědi zakroužkujte:

1. Vyhovovalo Vám rozmístění přístrojů? ANO - NE

2. Jaké rozmístění přístrojů preferujete vy?

.....

.....

3. Považujete přítomné přístroje za dostatečné ANO - NE
k provedení letu za podmínek VFR?

Obr. B2: Dotazník pro testování pilotů (str. 1a)

4. Měl jste problémy s čitelností displeje? ANO - NE
(Pokud ano, u jakých hodnot?)

.....

.....

5. Pomohlo Vám zobrazení 3D terénu ANO - NE
v orientaci v průběhu letu?

6. Myslíte si, že je zobrazení následujících útvarů v 3D vyhovující?

• lesy ANO – NE

• řeky ANO – NE

Obr. B3: Dotazník pro testování pilotů (str. 1b)

- vodní nádrže ANO – NE
- silnice ANO – NE
- zástavba ANO – NE
- pole ANO - NE
- elektrická vedení ANO - NE
- překážky ANO - NE

7. Jaké geometrické zobrazení překážek byste upřednostnil?

.....

.....

8. Ocenil byste prezentované zobrazení nebezpečných a omezených prostorů? ANO - NE
9. Využil jste mapového zobrazení systému EFIS 3D? ANO - NE

Obr. B4: Dotazník pro testování pilotů (str. 2)

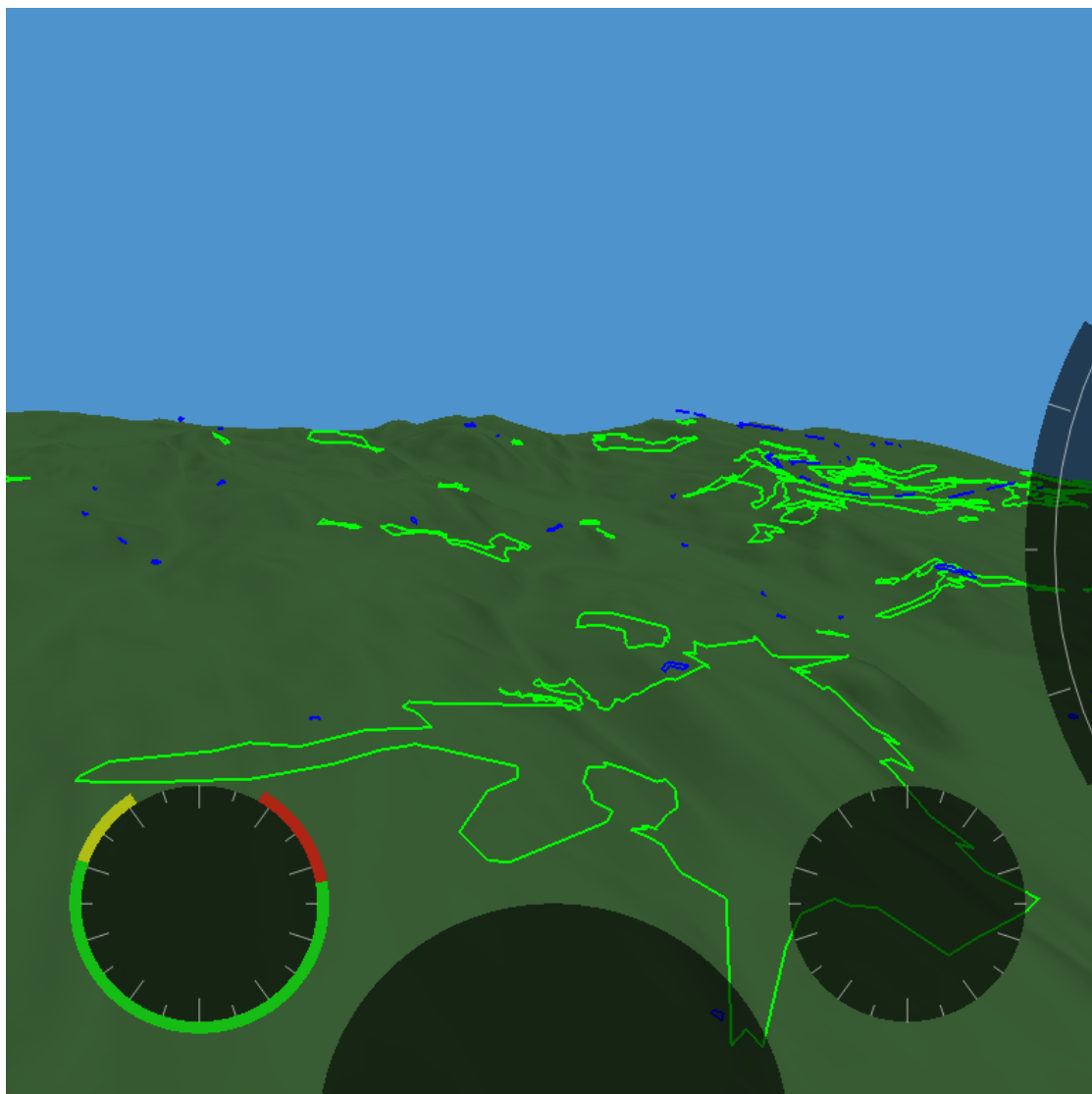
Příloha C: Doplnková obrazová příloha



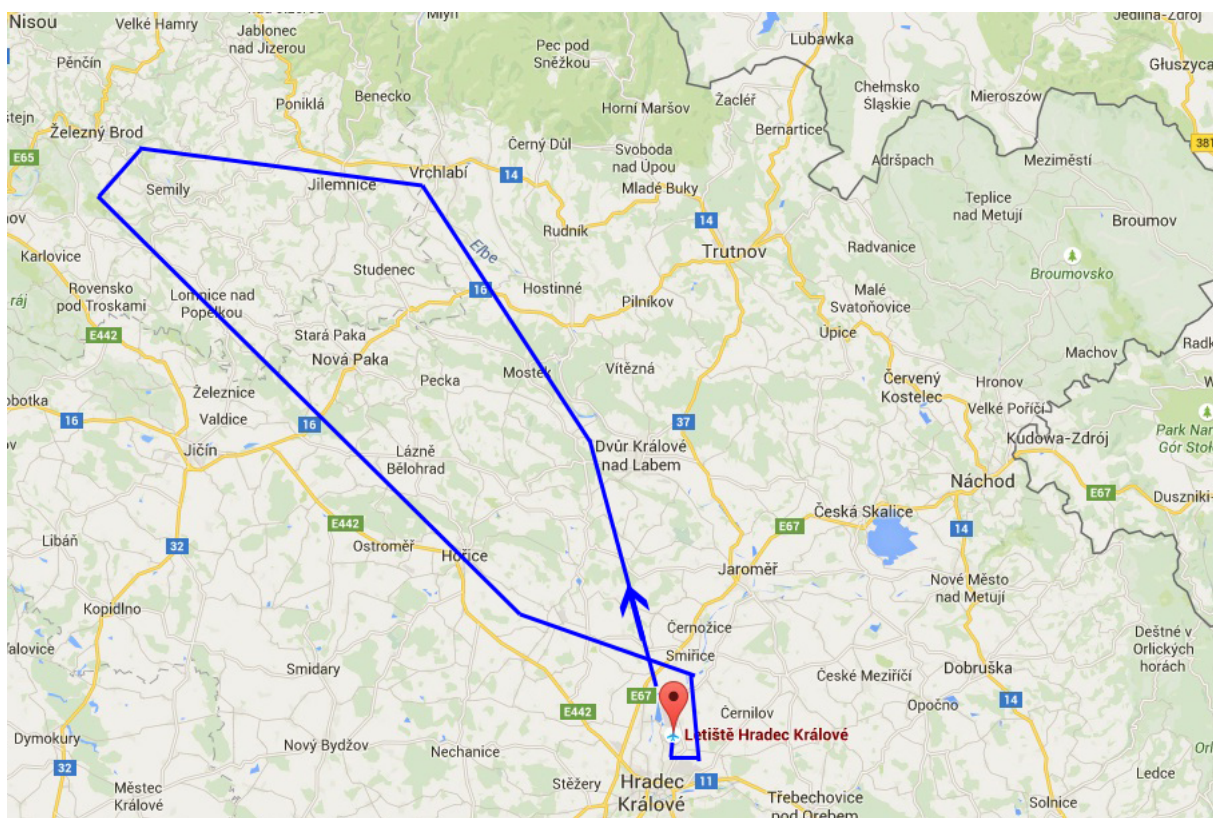
Obr. C1: Zobrazení terénu ve SmartView™ od firmy Honeywell



Obr. C2: CVS systém SmartView™ od firmy Honeywell



Obr. C3: První pokusy o zobrazení vektorových dat



Obr. C4: Přibližná trajektorie zkušebního letu



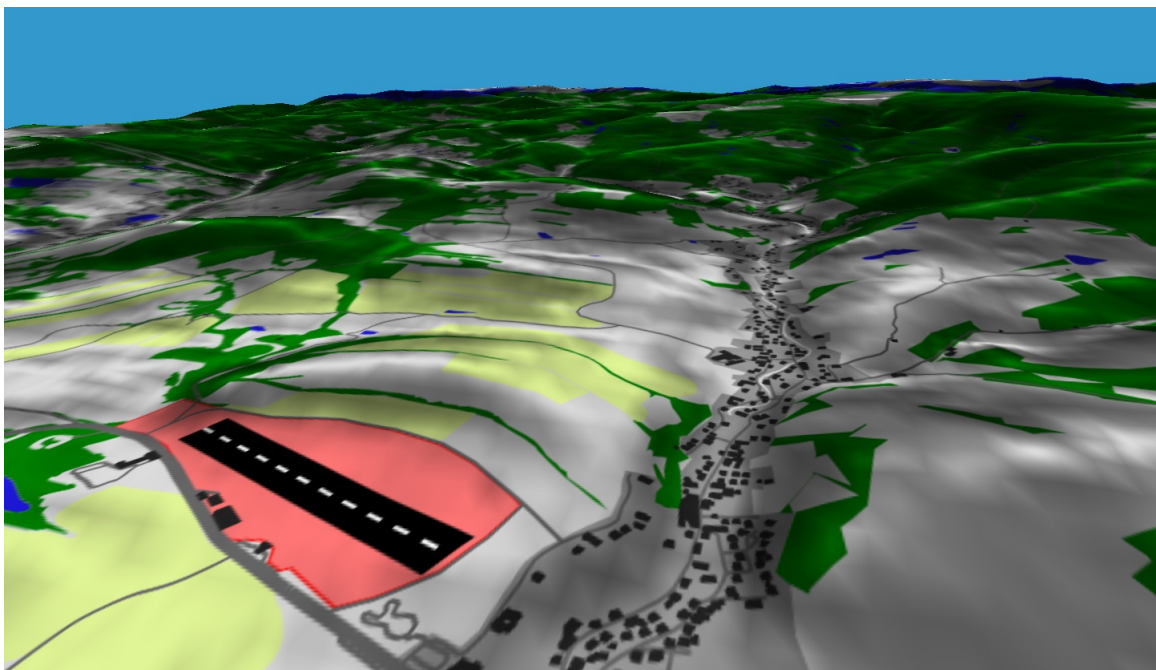
Obr. C5: EFIS 3D (vlevo) a dosavadní EFIS na simulátoru CAST



Obr. C6: EFIS 3D během zkušebního letu bez protiodleskové krabice



Obr. C7: Pohled z letounu během zkušebního letu



Obr. C8: Zobrazení letiště Dvůr Králové v EFIS 3D