



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

SOUČASNÝ VÝVOJ SYSTÉMŮ S HAPTICKOU ZPĚTNOU VAZBOU

RECENT PROGRESS IN PILOT-AIRCRAFT HAPTIC FEEDBACK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Suchnová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Studentka: **Klára Suchnová**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Zikmund, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Současný vývoj systémů s haptickou zpětnou vazbou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Systémy haptické zpětné vazby mohou zprostředkovávat pilotovi cenné letové informace. Nejznámější jsou systémy „shaker“ a „Force feedback“ u systému řízení letounu Fly-by-wire. Haptické systémy lze využít nejen při samotném řízení letounu ale i pro jiné úkoly jako je například navigace.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše systémů haptické zpětné vazby, zejména novinky z posledních let.
- Definice nevýhod a překážek těchto systémů.
- Shrnutí možností pro budoucí využití haptických systémů v rozhraní pilot–letoun.

Seznam doporučené literatury:

BAELEN, Dirk van; et al. Flying by Feeling: Communicating Flight Envelope Protection through Haptic Feedback. International Journal of Human–Computer Interaction. 2021. 655-665.

DELDYCKE, Pieter-Jan, et al. Design and Evaluation of a Haptic Aid for Training of the Manual Flare Manoeuvre. In: 2018 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. 2018. p. 0113.

FU, Wei; et al. Developing active manipulators in aircraft flight control. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2019, 42.8: 1755-1767.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá současným vývojem systémů s haptickou zpětnou vazbou. Haptická zpětná vazba má pomoci pilotovi snadněji vykonávat jeho úkoly. Především se má zaměřit na odlehčení vytíženosti jeho zraku a sluchu za účelem zvýšení bezpečnosti letu. Lze ji využít nejen při samotném řízení letounu, ale i pro jiné úkoly, jako je například navigace. Haptické systémy přináší spoustu výhod při samotném řízení letounu, ale mají v určitých případech i své nevýhody.

KLÍČOVÁ SLOVA

Haptická zpětná vazba, hmatová zpětná vazba, silová zpětná vazba, vibrace, řídicí páka

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the recent progress in pilot-aircraft haptic feedback. Haptic feedback is intended to help the pilot perform his tasks more easily. Above all, it should focus on relieving the strain on his vision and hearing to increase flight safety. It can be used not only for the actual control of the aircraft but also for other tasks such as navigation. Haptic systems bring a lot of advantages in the actual control of the aircraft, but they also have their disadvantages in certain cases.

KEYWORDS

Haptic feedback, tactile feedback, force feedback, vibration, control stick

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHNOVÁ, Klára. *Současný vývoj systémů s haptickou zpětnou vazbou* [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149154>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Pavel Zikmund.

ČESTÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Zikmunda, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Klára Suchnová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Zikmundovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a za poskytnuté materiály potřebné k vypracování mé práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

Klára Suchnová

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	Soustava řízení	12
2.1	Primární řízení	12
2.2	Sekundární řízení	13
3	Vývoj systémů řízení letadel	14
3.1	Mechanický systém	14
3.2	Hydro-mechanický systém	15
3.3	Elektro-hydraulický systém	15
3.4	Fly-by-wire	16
3.4.1	Stick shaker	17
3.4.2	Force feedback	17
4	Systémy haptické zpětné vazby	18
4.1	Systém haptické zpětné vazby na ochranu letové obálky	18
4.1.1	Ochrana letové obálky	18
4.1.2	První koncept	20
4.1.3	Druhý koncept	21
4.1.4	Třetí koncept	23
4.1.5	Vyhodnocení	23
4.2	Haptická pomůcka pro nácvik podrovnání	24
4.2.1	Návrh haptické zpětné vazby	25
4.2.1.1	Režim High Roundout	25
4.2.1.2	Režim Late Roundout	25
4.2.1.3	Režim Ballooning	25
4.2.2	Průběh výzkumu	26
4.2.2.1	Fáze seznamování	27
4.2.2.2	Fáze tréninku	28
4.2.2.3	Fáze hodnocení	28
4.2.3	Vyhodnocení	32
4.3	Adaptivní haptická pomůcka	33
4.3.1	Návrh adaptivní haptické pomůcky	33
4.3.2	Experiment	33

4.3.3	Vyhodnocení	35
4.4	Haptický volant	36
4.4.1	Navržené funkce	36
4.4.2	Prototyp haptického volantu	37
4.4.2.1	Haptické ikony	38
4.4.3	Vyhodnocení	38
5	Zhodnocení možností haptických systémů	39
6	ZÁVĚR	41
	POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	42

1 ÚVOD

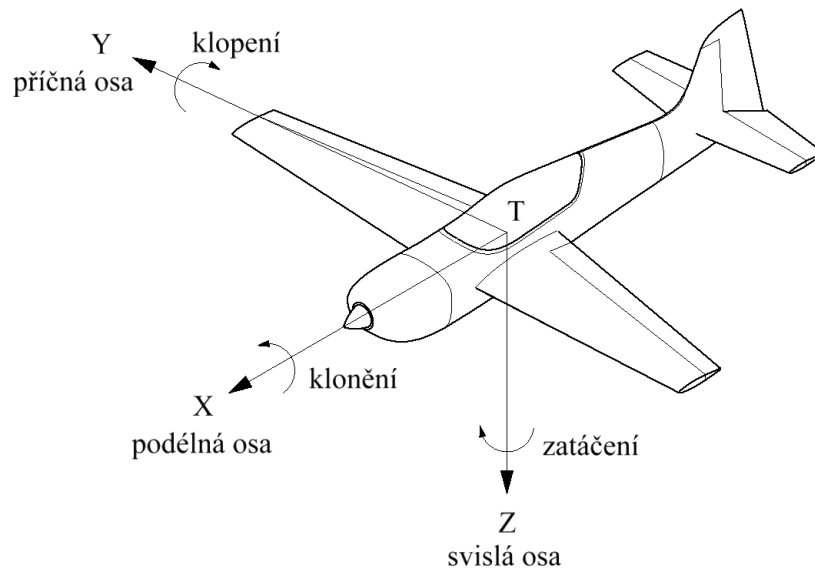
Za pomoci haptické odezvy neboli pomocí hmatového vjemu mohou být člověku předávané různé informace. Tyto informace je člověk schopen přijímat prostřednictvím kůže, kde jsou smyslové buňky (receptory), a daná osoba tak může při kombinaci těchto kontaktů rozlišovat tvar, povrch nebo strukturu a teplotu daného objektu.

Pilot pro příjem informací využívá zrak, sluch i hmat. Zrak je nejdůležitější a nejefektivnější pro příjem informací, proto bývá při řízení letadla přetížen. Pomocí zraku pilot kontroluje přístroje a okolí a pomocí sluchu pak vnímá zvukové signály, jako jsou výstrahy nebo komunikace. Tyto informace jsou dokreslovány pomocí haptické odezvy, kterou pilot vnímá nejen prostřednictvím řídicí páky letounu, ale důležitou zpětnou vazbou je i přenos sil přes sedadlo pilota. Například cítí boční sílu při vybočení a případné vibrace konstrukce. Na základě těchto vjemů je pilot schopen ovládat let. Přidaná haptická zpětná vazba do systému má pilotovi pomoci vykonávat jeho úkoly snadněji. Především se má zaměřit na odlehčení vytíženosti jeho zraku a sluchu za účelem zvýšení bezpečnosti letu.

Na začátku bakalářské práce se krátce věnuji soustavě řízení a vývoji systémů řízení letadel, který je zakončen současným systémem řízení letounu fly-by-wire, u něhož jsou nejznámější haptické systémy „shaker“ a „force feedback“. Dále jsou představeny nedávné výzkumy, které navrhuji další možnosti využití haptické zpětné vazby a uvádí, do jaké míry jsou za její pomoci ovlivněny řídicí schopnosti pilota. Lze ji využít nejen při samotném řízení letounu ale i pro jiné úkoly, jako je například navigace. Haptické systémy přináší spoustu výhod při samotném řízení letounu, ale mají i určité nevýhody.

2 Soustava řízení

Soustava řízení umožňuje ovládání aerodynamických kormidel. Pohybem těchto prvků pilot udržuje letadlo v rovnovážné poloze a v ostatních dovolených polohách těžiště. Řízení letounu probíhá ve třech osách – klonění, klopení, zatáčení. [1]



Obrázek 1: Letadlový souřadnicový systém

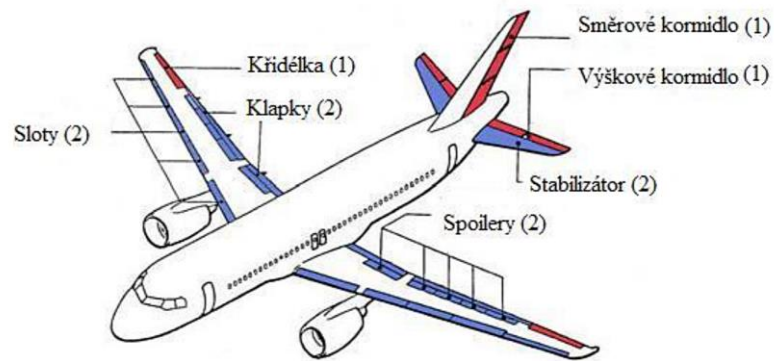
Rozdělení základních řídicích prvků zajišťující pohyb pro daný řídicí systém letadel se rozděluje na primární řízení a sekundární řízení.

2.1 Primární řízení

Mezi primární řízení letadel se řadí zmíněné klonění, klopení a zatáčení. K vykonání určitého pohybu je potřeba i příslušný řídicí prvek. Klonění se ovládá pomocí křidélek, když pilot vychýlí řídicí páku doprava či doleva. Klopení zajišťuje výškové kormidlo umístěné na vodorovné ocasní ploše a je ovládáno přitáhnutím řídicí páky k sobě nebo od sebe. Zatáčení je prováděno pomocí směrového kormidla, které je částí svislé ocasní plochy a je ovládáno pomocí pedálů. Na obrázku 2 jsou primární prvky řízení označeny číslem 1 v závorce. [2]

2.2 Sekundární řízení

Lze říci, že mezi sekundární řízení letadel se řadí všechna ostatní ovládání. Přiřadit sem můžeme vztlakovou mechanizaci, která ovládá vztlakové klapky sloužící ke zvýšení vztlaku a k snížení přistávací rychlosti. Dále vyvažovací plošky, které umožňují snadnější ovládání, ovládání podvozku a u větších letadel pomáhají ke klonění spoilerů. Na obrázku 2 jsou sekundární prvky řízení označeny číslem 2 v závorce. [2]



Obrázek 2: Primární a sekundární prvky řízení [1]

3 Vývoj systémů řízení letadel

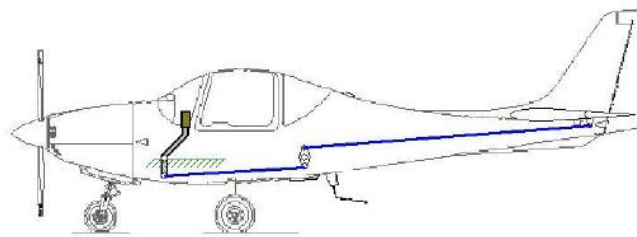
Řízení letadel probíhá za využití všech ovládacích mechanismů, které způsobí změnu pohybu letadla nebo změnu polohy letadla. Mezi ovládací prvek lze zařadit řídicí páku. Její pohyb dopředu a dozadu se používá k řízení podélného sklonu pomocí výškového kormidla a pohyb páky do stran zajišťuje příčný sklon pomocí křidélek, což umožňuje letadlu manévrovat. [2] Některá letadla jsou místo řídicí páky vybavena volantem, u kterého je funkce stejná. Otáčením volantu se řídí křídélka a přitahováním a odtahováním výškové kormidlo.

Od počátku, kdy se řízení prvních letadel provádělo pomocí mechanického systému za využití táhel, lan a kladek, byl se zdokonalující technikou vynalezen systém řízení fly-by-wire, kde není přímé mechanické propojení řídicích ploch s řídicí pákou.

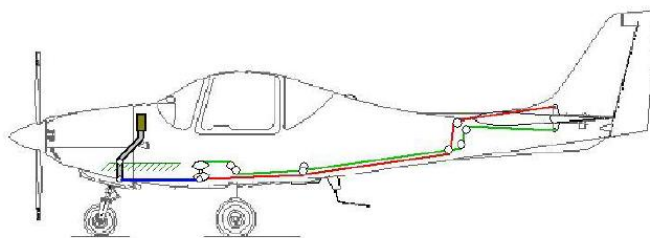
3.1 Mechanický systém

První z používaných systémů řízení letadel byl mechanický systém řízení letu, jenž se řadí k nejzákladnějšímu způsobu řízení letadla. Tento systém je využíván především u malých letadel, kde aerodynamické síly nedosahují nadměrných rozměrů, a tudíž jsou řídicí zařízení přímo propojena s pilotem, který dokáže letadlo ovládat svojí silou. Systém využívá k přenosu sil mezi řídicími prvky v kokpitu a ovládacími plochami sadu mechanických částí, jako jsou táhla, napínací lana a kladky. [2; 3] V současné době se stále využívá tento systém u malých letadel, protože je jednoduchý a spolehlivý.

Tento systém má i svá omezení. S rostoucí velikostí a hmotností letadla se zvyšuje složitost systému. Zvyšují se síly v řízení a od určité velikosti není pilot schopen řídit letadlo pouze pomocí své síly a je zapotřebí pomoci pilotovi například zavedením hydraulických posilovačů.



Obrázek 3: Mechanický systém řízení táhel [2]

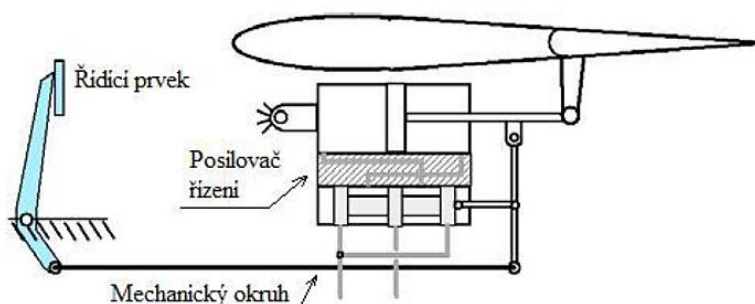


Obrázek 4: Mechanický systém řízení lany [2]

3.2 Hydro-mechanický systém

Hydro-mechanický systém se používá u letadel, kde už není dostatečný pouze mechanický systém. Při větší hmotnosti a rychlosti letounu rostou síly v řízení, tudíž přímé řízení pilotem není dostačující a systém je doplněn hydraulickými posilovači pro lehčí ovládání řídicích ploch. To vedlo k použití hydraulické síly. [2; 3]

Celý systém se skládá z mechanického obvodu spojujícího řídicí prvky kokpitu s hydraulickým obvodem. Mechanický obvod je tvořen táhly. Hydraulický obvod napájí akční členy, které pak pohybují s řídicími plochami. Pilot ovládá jen servomechanismus, který zvětšuje řídicí sílu na hodnotu potřebnou pro řízení letadla. [2]

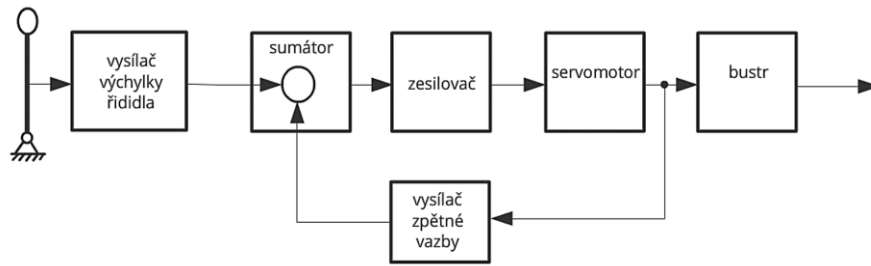


Obrázek 5: Hydraulický systém řízení [2]

3.3 Elektro-hydraulický systém

Letadlo se dá ovládat manuálně nebo při zapnutí autopilota zcela elektronicky. Při manuálním řízení pilot ovládá letadlo stejným způsobem jako hydro-mechanický systém. Při zapnutí autopilota jsou řídicí plochy letadla ovládány hydraulikou. Součástí systému jsou elektrohydraulické servoventily, které mění elektrické signály z palubního počítače a autopilota na mechanické účinky. Hydraulické posilovače tak neovládá pilot

přes mechanické obvody, ale palubní počítač přes elektrické signály. [2] Z tohoto systému vychází pokročilý systém fly-by-wire. [1]



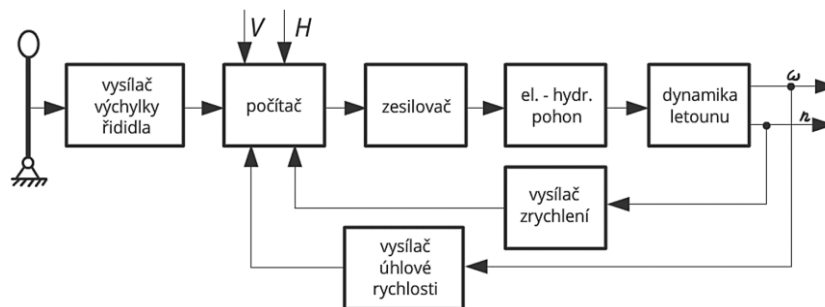
Obrázek 6: Elektro-hydraulický systém řízení [1]

3.4 Fly-by-wire

Fly-by-wire je počítačem řízený systém, který snímá řídicí vstupy pilota prostřednictvím různých parametrů, jako je rychlost letu, výška a úhel náběhu, a řídí pohyb řídicích ploch, aby letadlo zůstalo ve stanovené letové obálce. [4]

U řídicího systému fly-by-wire jsou pohybem řídicí páky generovány elektronické signály. Tyto signály jsou přenášeny pomocí kabelů vedoucích k servomotorům, které pak určují, jak se mají pohybovat řídicí plochy na křídle a ocasních plochách. Vložení chytré elektroniky mezi pilota a řídicí plochy vede k zaručení toho, že nedojde k překročení mezí letové obálky, která se vztahuje k bezpečným provozním charakteristikám letadla. Jde tedy o systém, u něhož jsou informace kompletně přenášeny elektrickou cestou, a nahrazuje tak systém ovládaný pilotem pomocí mechanických vazeb mezi řídicími prvky letadla a hydraulickým obvodem. [2; 4]

Tento systém má velké množství výhod. Hlavní výhody systému fly-by-wire jsou například snížená hmotnost systému, zvýšená spolehlivost letu a schopnost udržet letoun uvnitř letové obálky. V dnešní době využívá systém řízení fly-by-wire většina velkých dopravních letadel. [4]



Obrázek 7: Fly-by-wire [1]

3.4.1 Stick shaker

Se systémem stick shaker se nejčastěji potkáme u letadel se systémem řízení fly-by-wire, kde je mechanický systém řízení nahrazen řízením přes elektronické signály. Pilot tak na řídicí páce nemůže cítit vibrace vznikající kvůli turbulencím, a je proto nutné tyto vibrace vyvolat uměle pomocí elektromotoru, který rozkmitá setrvačnick. Jedná se o mechanické zařízení, které varuje pilota přes řídicí páku o blížícím se pádu. Při vysokém úhlu náběhu, kdy už hrozí pád letadla, se hlasitě a silně rozvibruje řídicí páka. [5]

Stick shaker je často spojen se systémem stick pusher. Tento systém sám potlačí páku, když pilot nezareaguje na stick shaker, aby zamezil pádu letadla za kritickým úhlem náběhu.

3.4.2 Force feedback

Force feedback také potkáme u letadel se systémem řízení fly-by-wire. Má simulovat síly působící na řídicí páku jako ve skutečném letadle. Tento systém lze využít k lepšímu dodržování bezpečné letové obálky, díky čemuž se snižuje riziko jejího překročení a zamezení se tak dostat letadlu do nebezpečného stavu mimo meze letové obálky. [6] Tuto technologii můžeme znát i mimo letectví například u ovladačů nebo volantů pro počítačové hry.

4 Systémy haptické zpětné vazby

Systémy haptické zpětné vazby mají také významné využití v leteckém průmyslu. V letadlech haptická zpětná vazba přispívá ke zvýšení bezpečnosti letu, zlepšení efektivity a komfortu pilotů a posádky.

Jednou z hlavních oblastí, kde se systémy haptické zpětné vazby uplatňují, je navigace. Piloti mohou pomocí těchto systémů přijímat hmatové signály, které jim pomáhají udržovat správnou trajektorii letu. Díky těmto signálům by měla haptická zpětná vazba umožnit snížit nutnost sledování letových přístrojů a pilotovi tak umožnit více sledovat okolí.

Se systémy s haptickou zpětnou vazbou se mimo letectví můžeme setkat například ve virtuální realitě, v herním průmyslu, medicíně nebo také v automobilovém průmyslu.

V této kapitole budou představeny nedávné výzkumy haptické zpětné vazby, které se zaměřují na různé oblasti aplikace.

4.1 Systém haptické zpětné vazby na ochranu letové obálky

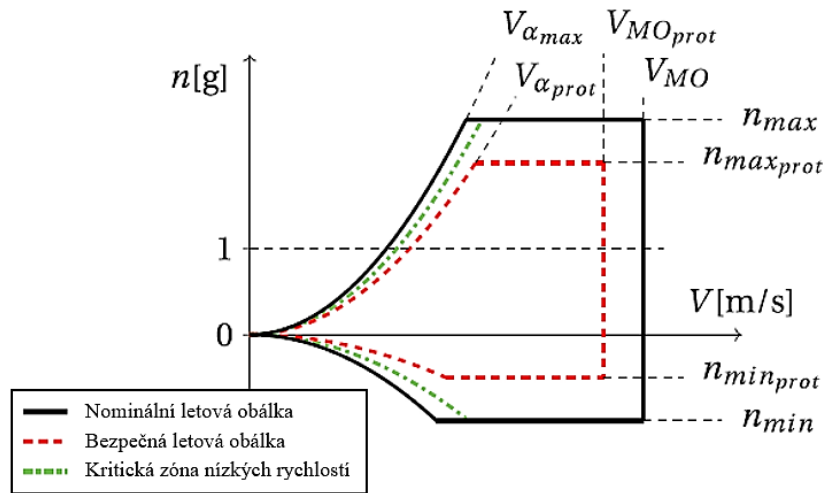
Tato podkapitola popisuje výzkum provedený (VAN BAELEN et al. 2021) včetně popisu experimentu a dosažených závěrů.

Moderní letadla mohou být vybavena systémem ochrany letové obálky. Jedná se o automatizaci, která přizpůsobuje řídicí vstupy tak, aby letadlo zůstalo v povolených mezích rychlostí a jejich násobků. Překročení může vést k nebezpečným situacím. Výzkum byl založen na třech návrzích haptické zpětné vazby pro ochranu letové obálky. První koncept využíval jak silovou zpětnou vazbu, tak i vibrační výstrahy. Druhý koncept využíval asymetrické vibrace pro směrové výstražné signály a třetí koncept silovou zpětnou vazbu k fyzickému vedení pilota mimo hranice letové obálky.

4.1.1 Ochrana letové obálky

Pro vyhodnocení návrhů haptické zpětné vazby byl použit model letadla, který má podobnou dynamiku a řídicí mechanismy jako Airbus A320. Je vybaven systémem fly-by-wire, což umožňuje použití systému ochrany letové obálky, který může kontrolovat vstupní údaje pilota a v případě potřeby je omezit, aby nedošlo k překročení mezí. Je použito přísné omezení obálky, které zabraňuje pilotovi překročit horní hranice úhlu náběhu, součinitele zatížení a maximální rychlost. Tato ochrana je zobrazena na obrázku 8, kde nominální letová obálka je krajní mez, kterou není možné překročit.

Bezpečná letová obálka je místo, kde začínají působit ochrany. Obálka je tvořena pomocí maximálního (n_{max}) a minimálního (n_{min}) součinitele zatížení, jejich ochranných mezí ($n_{max_{prot}}$, $n_{min_{prot}}$), maximální provozní rychlostí (V_{MO} a ochrany $V_{MO_{prot}}$) a minimální rychlostí ($V_{\alpha_{max}}$ a ochrany $V_{\alpha_{prot}}$).



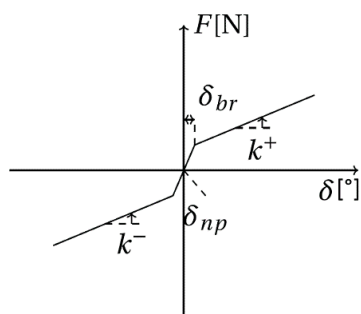
Obrázek 8: Letová obálka [7], převzato a upraveno

Při poruše počítače řízení letu nebo když dojde k poruše senzoru, řídicí zákon je přepnut do degradovaného režimu. Tato studie se zaměřovala na alternativní zákon Airbusu bez omezených ochran, kde platí stejné ochrany jako předtím, pouze je ztracena ochrana úhlu náběhu. Tento přístup k ochraně letové obálky vede ke sdílenému řízení s různými vstupy. To je v případě, kdy pilot a automatika sdílejí řízení letadla a jejich záměry se při zadávání do počítačů řízení letu prolínají. Toto prolínání se koná skrytě a zásahy automatizace do řízení se pilotovi nevracejí. Proto může být zkreslený stav pilota mezi řídicími vstupy a stavem letadla, což může vést k problémům s uvědomováním si situace a režimu. To by mohlo vést k nehodám, kdy piloti nebyli informováni o tom, jaký řídicí zákon je aktivní a jaké ochrany stále platí. Proto se další výzkum v této oblasti může zaměřovat na hledání jasné metody, jak předat tyto informace pilotovi prostřednictvím haptické zpětné vazby.

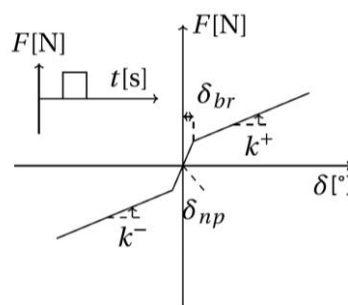
4.1.2 První koncept

Cílem haptické zpětné vazby je názorně předat informace o mezích ochrany letové obálky pomocí pěti pokynů.

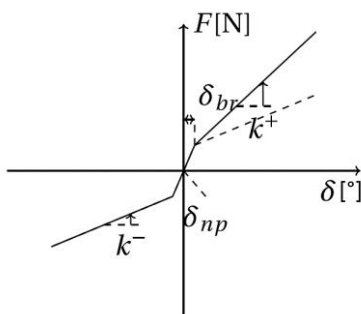
1. Když letadlo opustí bezpečnou letovou obálku, na řídicí páku se přidá diskrétní jednotková pulzní funkce, která zvyšuje intenzitu tlaku. Znázornění na obrázku 9b.
2. Pro rychlosti letadla blízké dolní mezní rychlosti (V_{prot}) se aktivuje stick shaker, který signalizuje rostoucí riziko zastavení letadla.
3. Při přechodu z bezpečné letové obálky ke skutečným mezím (černá čára na obrázku 8) se zvyšuje koeficient tuhosti pro signalizaci relativní vzdálenosti od těchto hranic. Zvýšený koeficient tuhosti znamená, že pilot musí vyvinout větší sílu k pohybu řídicí páky v určitém směru, jak je znázorněno pro kladné výchylky na obrázku 9c.
4. Pokud má letadlo kriticky nízkou rychlost a vrácení řídicí páky do neutrální polohy nestačí k návratu do bezpečné letové obálky, je požadovaná výchylka řídicí páky oznámena pilotovi změnou neutrálního bodu řídicí páky. Znázorněno na obrázku 9d.
5. Během překročení rychlosti je automatický náklon letadla oznámen pilotovi změnou neutrálního bodu řídicí páky, podobně jako na obrázku 9d, ale nyní s použitím záporné polohy neutrálního bodu.



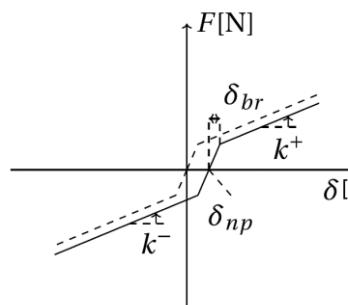
a) Nominální případ



b) Přidaná pozitivní pulzní funkce



c) Zvýšený koeficient tuhosti pro kladné výchylky



d) Kladný posun polohy od neutrálního bodu

Obrázek 9: Závislost síly potřebné na řídicí páku na vychýlení [7], převzato a upraveno

Pro vyhodnocení tohoto návrhu byl proveden experiment s 11 piloty Airbusu na výzkumném simulátoru SIMONA. Piloti byli požádáni, aby létali manuálně dvěma různými způsoby: vizuálním způsobem se zvýšenou pracovní zátěží a pomocí přístrojů bez vnější viditelnosti. V průběhu vizuálního letu se piloti setkali se silným větrem, který vyžadoval, aby letadlo bylo ovládáno blízko svých limitů při obnovení stabilního letu. Během letu prováděného za pomoci přístrojů se na křídlech letadla tvořila námraza, která zhoršovala aerodynamické vlastnosti a přibližovala letadlo k jeho současným limitům. Let se silným větrem byl proveden jak v normálním, tak v alternativním řídicím zákoně, kdy let s námrazou byl proveden pouze v alternativním řídicím zákoně. Všichni piloti letěli tři lety se systémem haptické zpětné vazby a bez něj v náhodném pořadí.



Obrázek 10: Výzkumný simulátor SIMONA [7]

Pilotům byl poskytnut dotazník s otázkami, který zjišťoval jejich zkušenosti s haptickou zpětnou vazbou a simulačním prostředím. Výsledky neprokázaly žádné významné změny výkonnosti, bezpečnosti ani pracovní zátěže za žádných z podmínek. Ani haptická zpětná vazba nebránila pilotům v plnění úkolů. Piloti pocítili zvýšené povědomí o situaci a vidí potenciál implementace haptické zpětné vazby do letadel se systémem fly-by-wire.

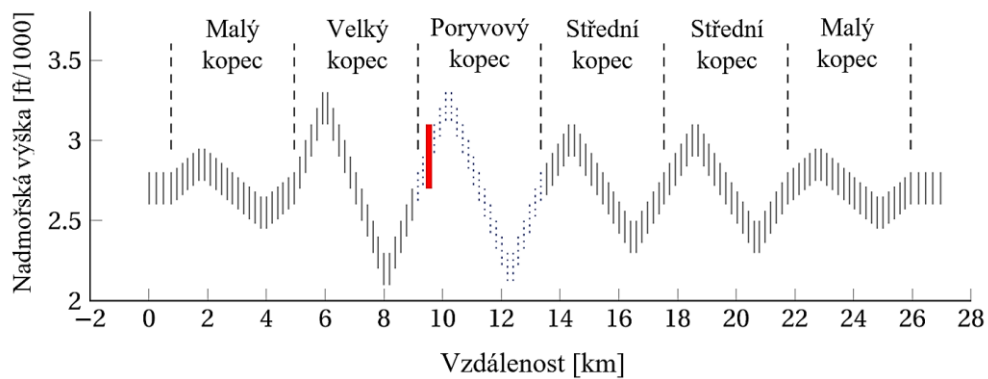
4.1.3 Druhý koncept

Z vyhodnocení předchozího návrhu se ukázalo, že vibrační výstrahy byly zúčastněnými piloty přijaty velmi dobře. Druhý návrh haptické zpětné vazby proto využíval jen vibračně hmatové signály. Nejprve byl proveden experiment zaměřený na vnímání směru a aktivace těchto vibrací. Výsledky ukázaly, že vibrace ve tvaru zubu pily měly nižší spodní hranici vnímatelnosti ve srovnání s trojúhelníkovým tvarem. Proto byla vibrace ve tvaru zubu pily doporučena k implementaci jako výstražný signál pro piloty. Tato

vibrace byla zahrnuta do systému haptické zpětné vazby, aby informovala piloty o blížení se ochraně letové obálky a také o směru korekce.

1. Když stav letadla opustí bezpečnou letovou obálku. To je v případě překročení červené čáry na obrázku 8. Poté se aktivují vibrace ve tvaru zubu pily.
2. Dokud stav letadla zůstává mimo bezpečnou letovou obálku, je poskytována jedna vibrace ve tvaru zubu pily každou sekundu, přičemž intenzita vibrace lineárně roste s velikostí odchylky od bezpečné letové obálky až do maximální hodnoty dvojnásobku výchozí velikosti.
3. Když se rychlost sníží pod hodnotu $(V_{\alpha_{max}} + V_{\alpha_{prot}})/2$. To znamená vlevo od zelené čáry na obrázku 8. Aktivuje se systém stick shaker.

Tento systém byl hodnocen 24 piloty na nepohyblivém simulátoru. V tomto simulátoru piloti letěli náročný svislý profil znázorněný na obrázku 11.



Obrázek 11: Boční pohled na dráhu letu [7], převzato a upraveno

Plné černé svislé čáry označují „průletové brány“ zobrazené na vnějším vizuálu, tlustá červená čára označuje spouštěcí bod silného větru (není zobrazen na vnějším vizuálu), přerušované modré čáry označují úsek silného větru.



a) Pohled na začátku letu



b) Perspektivní pohled na dráhu letu

Obrázek 12: Příklad vizualizace vnější vizuální dráhy letu [7]

V jednom z kritických bodů letu se spustil silný vítr a piloti se museli manuálně z této situace dostat letem blízko hranic letové obálky. Každý pilot absolvoval dva bloky po čtyřech letech. V jednom bloku byla zapnuta haptická zpětná vazba, ve druhém byla vypnuta. Piloti byli rozděleni do dvou skupin s různým pořadím spouštění haptické zpětné vazby, aby byl experiment vyvážený.

Výsledky ukázaly, že zapnutí haptické zpětné vazby zlepšilo rychlost učení po prvním spuštění, a že po odstranění zpětné vazby se neprojeví žádné další účinky. Zdálo se, že obě skupiny začínají na podobné úrovni bezpečnosti, ale skupina, která měla haptickou zpětnou vazbu v prvním bloku a ve druhém ji neměla, zlepšila svou úroveň bezpečnosti rychleji ve srovnání s druhou skupinou, jež haptickou zpětnou vazbu v prvním bloku neměla.

3.1.4 Třetí koncept

Piloti procházejí náročným výcvikem, avšak ten není nikdy přesnou kopií výcviku nouzové situace, která se může stát ve skutečnosti. Třetí koncept návrhu haptické zpětné vazby používal dva signály. První signál představoval změnu tuhosti pro nežádoucí výchylku (znázorněno na obrázku 9c) a druhý signál představoval aktivní pohyb řídicí páky na požadovanou polohu k návratu do bezpečné letové obálky (obrázek 9d). Piloti opět sledovali trajektorii zobrazenou na vnějším displeji, během které se objevil silný vítr. V prvním bloku čtyř letů jedna skupina obdržela pomoc haptické zpětné vazby, zatímco druhé skupině nebyla poskytnuta žádná pomoc.

Výsledky neprokázaly žádnou významnou změnu v pracovní zátěži a přehledu o situaci. Ukázaly ale značný rozdíl mezi skupinou, která nedostala pomoc, a skupinou, která pomoc silové zpětné vazby měla. Jelikož silová zpětná vazba podporovala pilota již od samého začátku, druhá skupina měla výrazně bezpečnější hodnoty. Tato zpětná vazba zlepšuje jak přehled o situaci, tak zároveň vytváří závislost na systému. Může být užitečně implementována do řídicího systému letadla za předpokladu, že bude podpora stále poskytována. Každá aplikace využívající silovou zpětnou vazbu by měla vždy zvážit důsledky pro situaci, kdy by ji již nemohla poskytovat.

3.1.5 Vyhodnocení

Byly popsány tři návrhy systému haptické zpětné vazby, které slouží ke sdělování mezi letové obálky, tedy k aktivaci její ochrany. První návrh kombinoval oba typy zpětné vazby, jak vibračně hmatovou, tak silovou. Druhý návrh používal pouze vibračně hmatové signály ve formě asymetrických vibrací a poslední návrh používal čistě silovou zpětnou vazbu. Ukázalo se, že každý návrh poskytuje informace pro konkrétní případ použití. Vibračně hmatové signály mohou být použity během výcviku k informování

pilota o systému ochrany letové obálky, mohou zlepšit tempo učení a zdá se, že neprojevují závislost, když je podpora odebrána. Silová zpětná vazba může být poskytována po celou dobu provozu k informování pilota o systému ochrany letové obálky. Mohla by podporovat pilota v udržení se v mezích letové obálky, ale vede ke zhoršenému výkonu, když je odebrána. To naznačuje, že se na ni dokáže vybudovat závislost.

4.2 Haptická pomůcka pro nácvik podrovnání

Tato podkapitola popisuje výzkum provedený (DELDYCKE et al. 2018) včetně popisu experimentu a dosažených závěrů.

Bezpečné létání v dnešních vysoce automatizovaných a složitých letadlech stále předpokládá, že se piloti v případě neočekávaných událostí musí spolehnout na své letecké dovednosti. Tyto dovednosti tvoří základ každého začátečnického výcvikového programu pro piloty. Jedním z manévru, který se trénuje v počátečních fázích letového výcviku, je poslední fáze letu před dosednutím, tedy podrovnání. Podrovnání letadla je vzhledem ke své dynamické povaze, krátkému trvání a blízkosti země ze své podstaty náročné, a proto je jedním z častých bodů stagnace během počátečního výcviku. Tento přechod je piloty běžně vnímán jako nejobtížnější manévr vyskytující se během běžného letu. Kromě toho jsou četné letecké nehody důsledkem nesprávně provedeného podrovnání.

Nácvik podrovnání se obvykle provádí za reálného letu pomocí rozsáhlých cvičení touch-and-go, při nichž žáci provádějí několik přistání v krátkém čase. Pokud je v této fázi patrný nedostatečný pokrok, může to zvýšit náklady na již tak nákladný výcvik. S touto částí výcviku jsou spojeny také některé psychologické aspekty. Žáci mohou být odrazeni nebo se dokonce bát, což vede k přerušení nebo k prodloužení doby výcviku. Častou chybou žáků, kteří mají problémy s přistáním, je, že se místo zaměření na reakce letadla příliš soustředí na pohyby řídicí páky.

Výcviková zařízení pro simulaci letu se běžně používají při výcviku pilotů, protože snižují náklady a riziko poškození letadla. Zařízení pro simulaci letu mají také schopnost pojmout systémy, které nejsou k dispozici během skutečného letu, a slouží tak jen jako výcvikové pomůcky. Dalším způsobem, jak tuto dovednost posílit, může být využití haptického vnímání. Haptická podpora může mít mnoho podob. Obecně se rozlišuje pasivní a aktivní podpora. Pasivní haptické systémy nevytvářejí pohyb ovládacího zařízení, ale omezují jej. Příkladem aktivní haptické podpory je haptické sdílené ovládání.

Podrovnání je část letu, v níž letadlo přechází z klesajícího přiblížení do polohy, která umožňuje letadlu přibrzdit těsně nad přistávací dráhou. Podrovnání je velmi rychlý

a krátký manévr. Aby bylo možné správně přistát, mělo by být letadlo ve správné poloze. Pokud se nepředpokládá boční vítr, je rozhodující podélné řízení letadla. Navržená haptická zpětná vazba se zaměřuje na řízení v podélném sklonu.

Jedním z kritických bodů, které musí nezkušení piloti zvládnout, je správné načasování. Tím je myšleno, aby nezahájili podrovnání příliš brzy ve velké výšce nebo příliš pozdě, či žádné, s velmi rychlým klesáním. Tyto chyby mohou vést k přistání s nadměrnou rychlostí, která by způsobila poškození letadla nebo zranění cestujících a posádky. Dobře zvolená trajektorie podrovnání v kombinaci se stabilním přiblížením zvyšuje šance na dosažení požadovaného výkonu při přistání.

4.2.1 Návrh haptické zpětné vazby

Návrh haptické tréninkové pomůcky se zaměřil na poskytování haptické zpětné vazby mimo cíl, která je aktivní pouze v případech, že dojde k jedné z podstatných chyb. Výsledkem je několik haptických režimů, které po aktivaci poskytují hmatovou zpětnou vazbu. To umožňuje pilotům volnost při aktivním řízení. Pilot se učí z chyb, které při aktivním řízení udělá. Aktivní provádění motorické dovednosti zlepšuje učení na rozdíl od učení pasivního.

4.2.1.1 Režim High Roundout

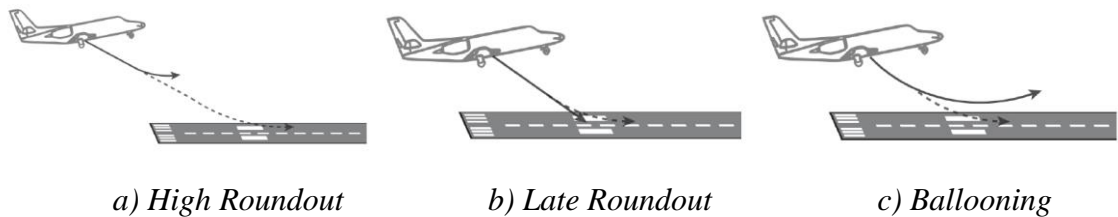
Pokud žák zahájí podrovnání příliš brzy, představuje velká výška, ve které se letadlo nachází, riziko. Proto byl vytvořen režim označující bod, od něhož je podrovnání povoleno. Nad předem určenou výškou byl definován „měkký limit“ pro vychýlení řídicí páky směrem nahoru a při překročení tohoto bodu se projeví zvýšení tuhosti.

4.2.1.2 Režim Late Roundout

Příliš pozdní nebo žádné zahájení podrovnání může mít za následek vysoké hodnoty rychlosti při přistávání. Pro signalizaci blížícího se pozdního podrovnání byl navržen haptický režim Late Roundout. Tento režim je aktivován, když je čas do kontaktu se zemí nižší než určená hodnota a nedochází k dostatečnému přitažení řídicí páky. Signalizace byla zvolena jako opakující se impuls ve směru zvedání.

4.2.1.3 Režim Ballooning

Když pilot zahájí podrovnání s příliš prudkým náklonem, může dojít k tomu, že letadlo přestane klesat a dojde ke stoupání. Proto je tento režim navržen tak, aby vydal opakovaně varovné impulsy ve směru podélného sklonu, tedy v opačném směru než impulsy u režimu Late Roundout.

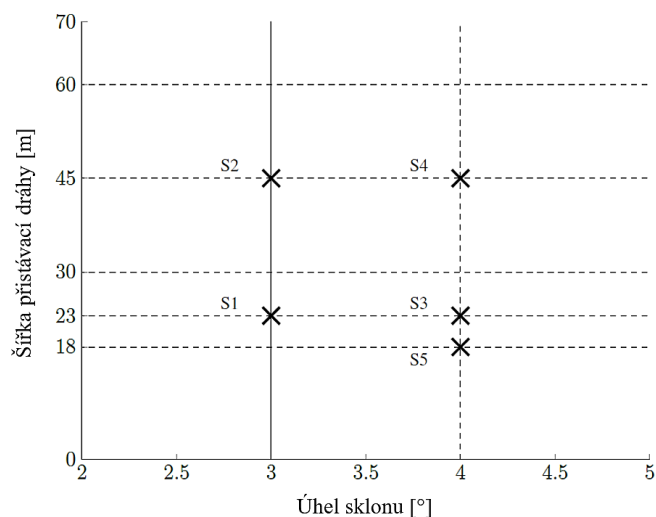


Obrázek 13: Běžné chyby během podrovnání [8]

4.2.2 Průběh výzkumu

Výzkum byl proveden s využitím plně pohybového výzkumného simulátoru SIMONA a byl použit nelineární model letadla Cessna Citation I. Žáci mohli ovládat plyn, klonění a klopení. Ovládání směru letu v ose zatáčení jim umožněno nebylo. K zadávání řídicích vstupů byla použita řídicí páka se dvěma stupni volnosti umístěná na pravé straně kokpitu. Experiment se skládal z několika letů, z nichž každý obsahoval přistání. Každý let začínal fází konečného přiblížení, po níž následovalo provedení podrovnání. Pro zvýšení realističnosti a podnícení aktivního řízení byla použita turbulence bez přítomnosti větru.

Scénáře přistání se lišily z hlediska úhlu přiblížení a šířky dráhy. Byly také použity různé startovní vzdálenosti, aby se předešlo používání nežádoucích nápověd jako například počítání doby letu. Na obrázku 14 jsou zobrazeny testované scénáře přistání se zvýrazněnými standardními šířkami přistávací dráhy dle ICAO a plnou čarou označující standardní úhel přiblížení 3° . Pro posouzení dovedností byla definována extrémní podmínka s použitím úhlu sklonu 4° v kombinaci s úzkou šířkou dráhy 18 metrů.



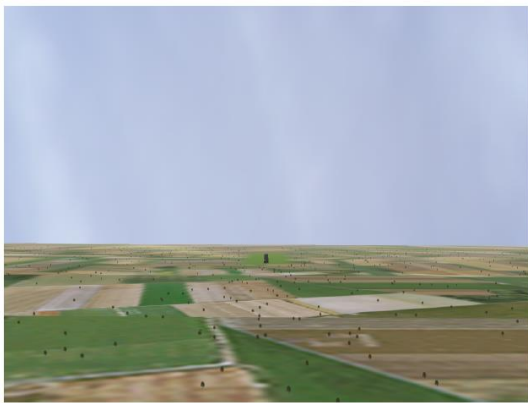
Obrázek 14: Přehled testovaných scénářů přistání [8], převzato a upraveno

Pro testování vlivu haptické zpětné vazby byl proveden kvazi-výcvikový experiment s 16 účastníky. Účastníci byli poučeni a byly jim sděleny pokyny, které mají provést v momentě, kdy si mysleli, že má být zahájeno podrovnání. Měli snížit výkon na volnoběh, přemístit pohled ze zaměřovacího bodu směrem ke vzdálenějšímu konci dráhy a jemným přitažením řídicí páky směrem nahoru zvýšit náklon, čímž sníží jeho rychlost.

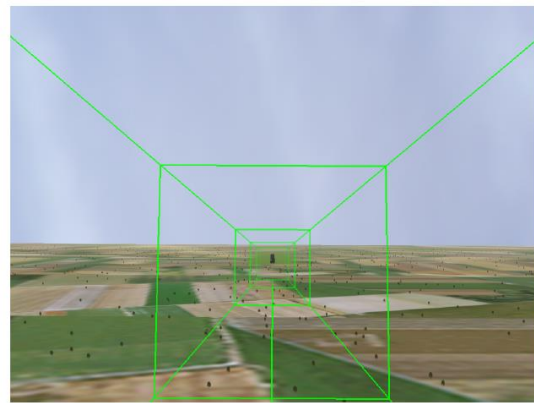
Experiment byl rozdělen do tří hlavních částí, a to do fáze seznamovací, fáze tréninku a fáze hodnocení. První den se konalo seznámení a uskutečnila se první tréninková fáze, druhá část tréninku a hodnocení probíhaly druhý den. Blok obsahoval čtyři lety, s výjimkou posledního bloku, který obsahoval všech 10 letů za extrémních podmínek. Skupina s haptickou zpětnou vazbou ji měla k dispozici po celou dobu tréninkové fáze. Pokud by podrovnání bylo dobře provedené, neměla by být cítit žádná haptická zpětná vazba.

4.2.2.1 Fáze seznamování

Experiment začal dvěma lety, aby se účastník seznámil se simulátorem, ovládním a dynamikou letadla. Lety začínaly ve výšce 1000 stop nad zemí v upravené přistávací konfiguraci pro volný let. Zatímco v hlavním experimentu se používal pouze běžný pohled z okna (obrázek 15a), první tři přiblížení zahrnovala tunel na obloze, který účastníky vedl po požadované dráze sestupu (obrázek 15b). Tunel byl pro poslední tři lety seznamovací fáze odstraněn.



a) Běžný pohled z okna



b) Tunel na obloze

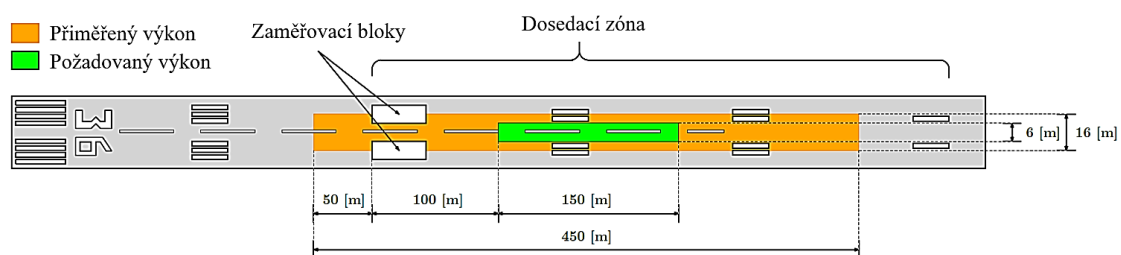
Obrázek 15: Ilustrace pohledů na okolí použité v experimentu [8]

4.2.2.2 Fáze tréninku

Cvičné lety začínaly s letadlem na těsném závěrečném přiblížení (mezi 70 metry a 110 metry) nad zemí v ustáleném stavu. Scénáře se lišily podle obrázku 14. Pro zabránění rozpoznání byly pro stejný scénář použity různé startovní pozice podél sestupu. První den se letělo pět bloků ve čtyřech scénářích. Druhý den byla v rámci tréninku provedena další sada pěti bloků, což celkem dávalo 40 letů. Během této fáze dostávala skupina s haptickou podporou hmatovou zpětnou vazbu a byla požádána, aby po každém letu uvedla, jakou zpětnou vazbu vnímala. Všem účastníkům byla po každém přistání poskytnuta informace o poloze a rychlosti při přistání, a zda byli v požadované zóně, či nikoliv.

4.2.2.3 Fáze hodnocení

V této fázi byla haptická zpětná vazba pro skupinu s haptickou podporou vypnuta. Na začátku této fáze byli účastníci na tuto změnu upozorněni. Nejprve byly dva bloky (8 letů) stejného scénáře jako ve fázi tréninku. Následovalo 10 letů v extrémních podmínkách čili byl použit nestandardní úhel přiblížení 4° v kombinaci s úzkou dráhou 18 metrů. Na obrázku 16 je znázorněno ideální umístění na dráze a příslušné vzdálenosti.



Obrázek 16: Kritéria pozic míst dosednutí [8], převzato a upraveno

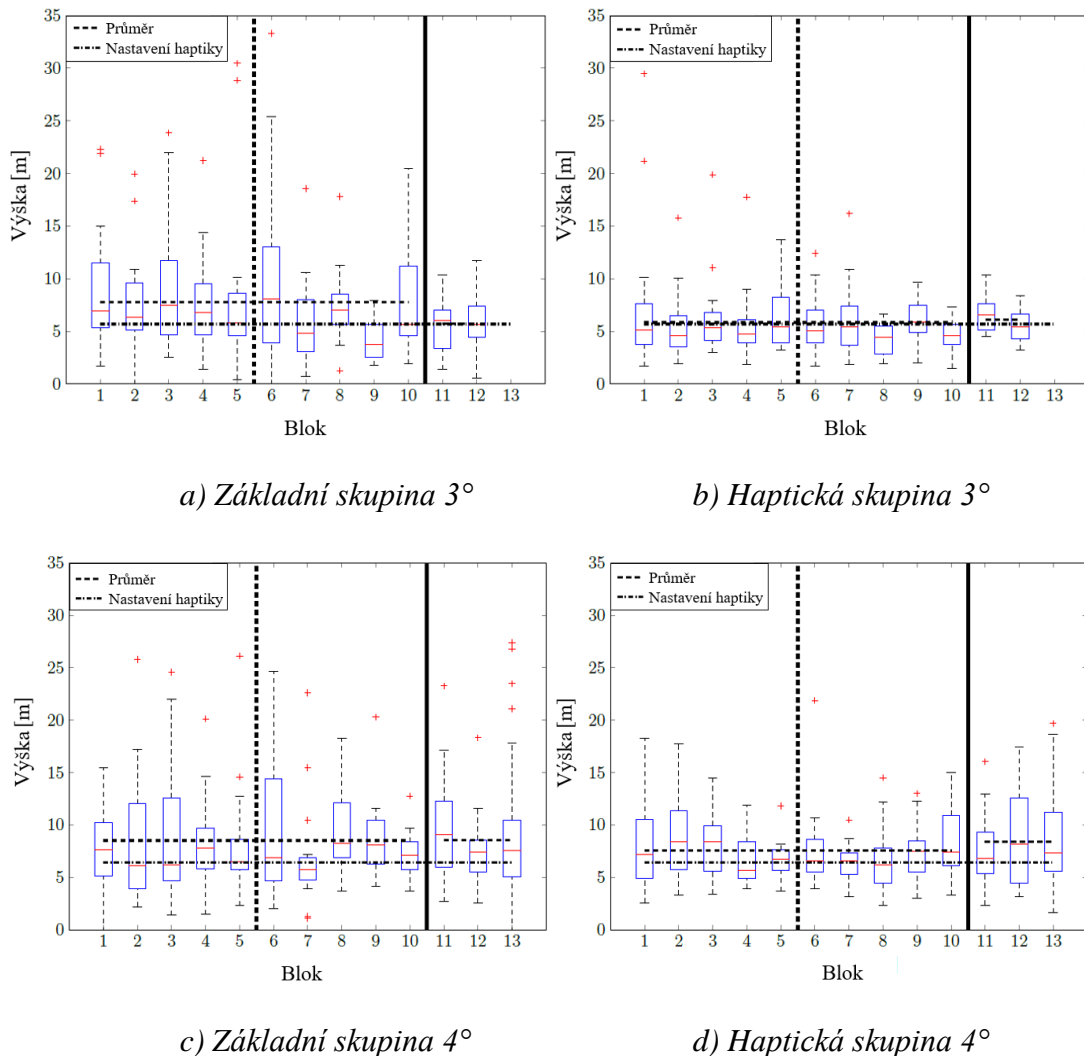
Výsledky v seznamovací fázi byly použity ke kvantitativnímu odhadu počáteční úrovně dovedností všech účastníků. Pro zajištění srovnání výkonnosti mezi skupinami, je nutná srovnatelná úroveň dovedností účastníků v obou skupinách.

Výška iniciace podrovnání

Pro výšku iniciace podrovnání se rozlišovalo mezi přiblížením na sklonu 3° a 4° . Tréninková fáze základní skupiny pro úhel 3° vykazovala významný rozptyl hodnot, přičemž většina odlehlých hodnot se vyskytovala v prvním dni. Mezi začátkem a koncem této fáze nebyl pozorován významný rozdíl. Ve vyhodnocovací fázi se rozptyl hodnot zmenšoval a odlehlé hodnoty se vyskytovaly pro úhel sklonu 4° . Průměrné výšky iniciace

podrovnání byly 7,8 metrů ve fázi tréninku a 5,7 metrů ve vyhodnocovací fázi. Byl tedy pozorován pokles, což vykazuje pozdní nebo žádné provedení podrovnání.

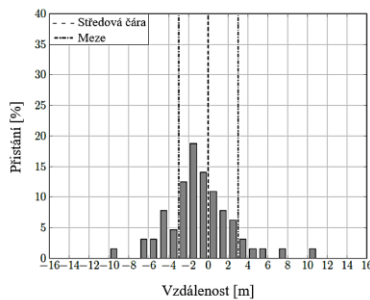
Skupina s haptickou zpětnou vazbou vykazovala pro úhel 3° od začátku do konce tréninku vyšší konzistenci a menší rozptyl, jak je možno vidět na obrázku 17, kde čerchovaná čára ukazuje rozdělení mezi prvním a druhým dnem a plná čára označuje konec fáze tréninku. Průměrné hodnoty jsou 5,8 metrů ve fázi tréninku a 6,1 metrů ve vyhodnocovací fázi. Obě hodnoty jsou velmi blízko výšce, ve které mizí režim High Roundout (5,7 metrů). U přiblížení s úhlem sklonu 4° se rozpětí hodnot první den snižovalo, ale ke konci tréninku opět mírně rostlo. Na začátku se nevyskytovaly žádné odlehlé hodnoty, ale ve druhém dni byly stále. Naměřené hodnoty byly 7,6 metrů v tréninkové fázi a 8,4 metrů při hodnocení, což je poněkud větší nárůst od požadované výšky 6,4 metrů.



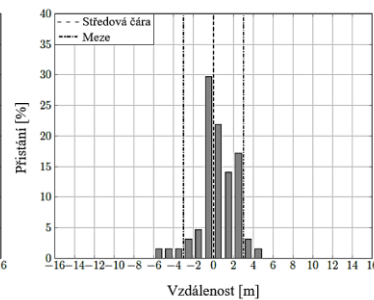
Obrázek 17: Výška iniciace podrovnání na blok pro různé úhly sklonu [8], převzato a upraveno

Umístění dozednutí v kolmém směru

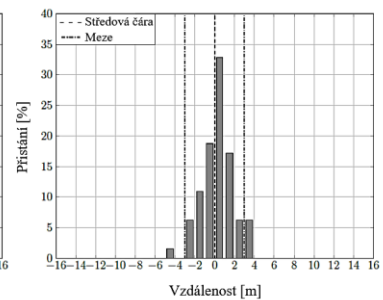
Na obrázku 18 je rozložení míst přistání ve směru kolmém na dráhu. Pro každou vzdálenost je uveden procentuální podíl přistání. Rozlišovalo se mezi jednotlivými fázemi, aby bylo možné získat přehled o vývoji v průběhu experimentu. Na obrázku 18 nejsou uvedeny rozdíly v šířce nebo úhlu dráhy. Během obou fází vyhodnocování základní skupiny byl rozsah hodnot v porovnání s tréninkem menší. V první části hodnocení byla většina přistání v rozmezí 0 a 1 metru vpravo od osy dráhy. Skupina s haptickou zpětnou vazbou také vykazovala pokles rozsahu hodnot v průběhu experimentu. V první tréninkové fázi byla maximální naměřená boční vzdálenost 12 metrů vlevo od osy a největší výskyt přistání byl v rozmezí 1 metr a 2 metry vlevo od osy. Druhá tréninková fáze měla výskyty přistání jak mezi 0 až 1 metrem, tak i 1 až 2 metry vlevo od osy, kde největší posun byl 8 metrů doleva, zatímco většina přistání se vyskytovala v rozmezí 0 až 1 metr vlevo od středu dráhy. Poslední fáze vyhodnocení zaznamenala maximální posun vlevo 5 metrů a většina přistání byla provedena mezi 0 a 1 metrem vlevo od osy dráhy. Mezi skupinami byl zjištěn významný rozdíl, což lze vysvětlit tím, že skupina s haptickou zpětnou vazbou obecně vykazovala větší asymetrii vlevo. To by mohlo být způsobeno polohou pilotů v kokpitu, kdy bylo použito pravé sedadlo. Takže když je letadlo na dráze, měla by být osa vlevo od pilota.



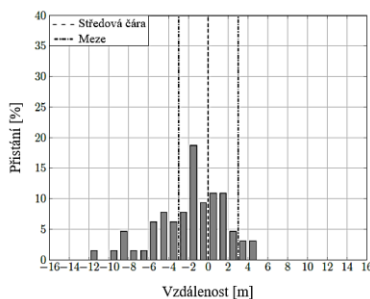
a) Základní skupina – první tréninková fáze



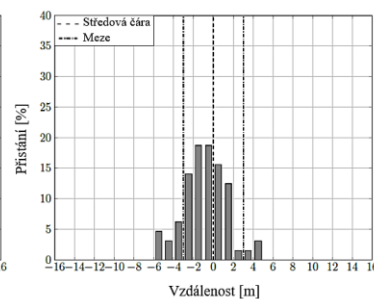
b) Základní skupina – druhá tréninková fáze



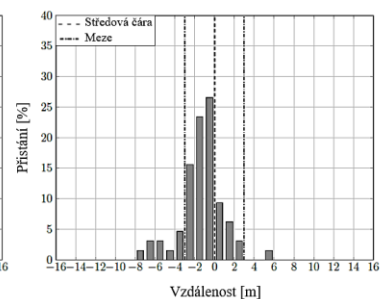
c) Základní skupina – první fáze hodnocení



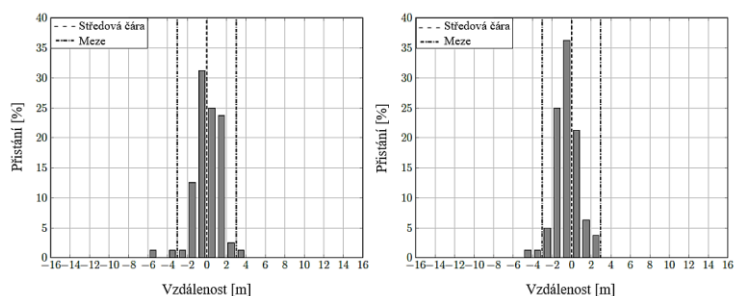
d) Haptická skupina – první tréninková fáze



e) Haptická skupina – druhá tréninková fáze



f) Haptická skupina – první fáze hodnocení

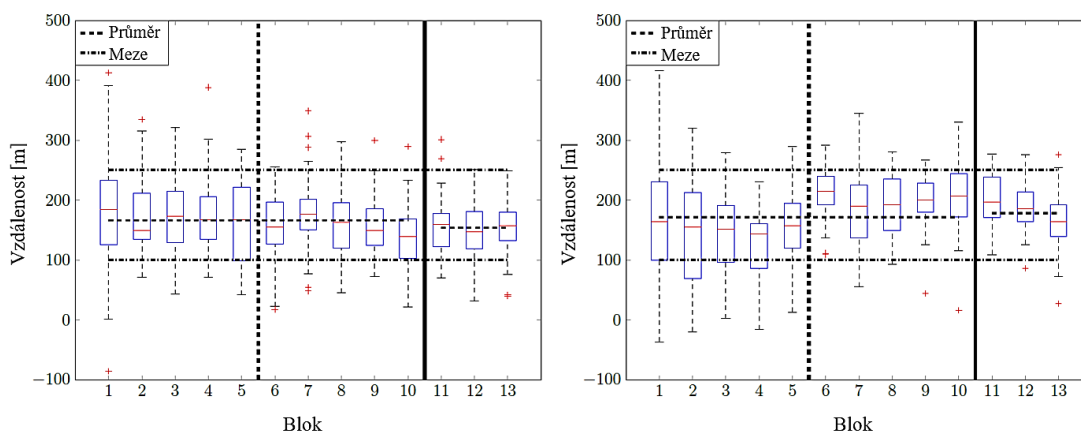


g) Základní skupina – druhá fáze hodnocení h) Haptická skupina – druhá fáze hodnocení

Obrázek 18: Výsledky umístění dosednutí v kolmém směru [8], převzato a upraveno

Umístění dosednutí v podélném směru

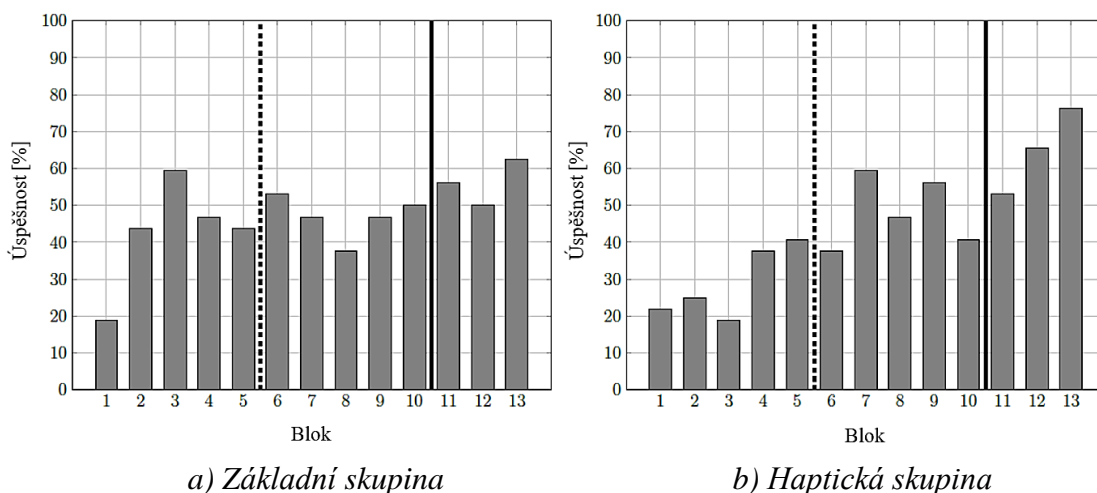
Na obrázku 19 je znázorněna vzdálenost přistání na přistávací dráze měřená od bodu zaměření pro obě skupiny v každém bloku, kde silná přerušovaná čára zvýrazňuje oddělení prvního a druhého dne, plná čára označuje konec tréninkové fáze a tenčí přerušovaná čára udává průměr. Meze označující požadované místo jsou 100 metrů a 250 metrů. Během celého experimentu se u obou skupin snižoval rozsah výsledků. Skupina s haptickou zpětnou vazbou měla méně odlehlých hodnot než základní skupina. Průměrné hodnoty se v průběhu experimentu u základní skupiny snižovaly, zatímco u skupiny s haptickou zpětnou vazbou se zvyšovaly.



Obrázek 19: Výsledky umístění dosednutí v podélném směru [8], převzato a upraveno

Úspěšná přistání

Na obrázku 20 je znázorněno procento úspěšných přistání, kde přerušovaná čára zvýrazňuje oddělení prvního a druhého dne a plná čára označuje konec tréninkové fáze. U základní skupiny byla výkonnost v průběhu celé tréninkové fáze do jisté míry konstantní s výjimkou bloku 1, který vykazoval nižší úspěšnost. V první vyhodnocovací fázi zůstává počet úspěšných přistání přibližně konstantní v porovnání s poslední fází tréninku. Skupina a haptickou zpětnou vazbu vykazuje zřetelný efekt učení při porovnání první fáze tréninku s jeho koncem. Nárůst výkonu pokračuje v první, a dokonce i ve druhé fázi hodnocení.



Obrázek 20: Úspěšná přistání [8], převzato a upraveno

4.2.3 Vyhodnocení

Byla vyvinuta haptická tréninková pomůcka jako podpora pro nácvik podrovnání s cílem poskytnout zpětnou vazbu a zabránit tak třem typickým chybám při jeho provádění. Byl proveden experiment se dvěma skupinami (s a bez haptické podpory) se 16 účastníky. Na základě výcviku bylo zjištěno, že navržená haptická zpětná vazba vedla jen k malému počátečnímu přínosu. Vzhledem ke krátkému trvání podrovnání a obtížnosti úkolu neposkytovala haptická zpětná vazba účastníkům výcviku vždy vhodnou podporu a v některých případech vyvolávala další chyby. Bylo to zapříčiněno příliš silnými reakcemi na postupné aktivace haptické zpětné vazby. Účastníci měli tendenci používat haptické signály k ověření svého postupu pro dosažení požadovaného výkonu. Údaje ze skupiny s haptickou zpětnou vazbou ukazují menší rozptyl výšky iniciace podrovnání ve srovnání se skupinou, která tuto podporu neměla. Po vypnutí haptické zpětné vazby na ni nebyla zjištěna žádná závislost. Omezení úkolu prostřednictvím haptické zpětné vazby má potenciál jako tréninková pomůcka pro manévry s kritickým načasováním, jako je například podrovnání před dosednutím.

4.3 Adaptivní haptická pomůcka

Tato podkapitola popisuje výzkum provedený (ARENELLA et al. 2019) včetně popisu experimentu a dosažených závěrů.

Haptické pomůcky jsou obvykle navrženy takovým způsobem, aby poskytovaly sílu na řídicím zařízení, vyvolávaly reakce pilotů a stále ho udržovaly v pozornosti. Poskytnutí nesprávného množství haptické pomoci může vést k nežádoucím účinkům, jako je přílišná závislost na systému.

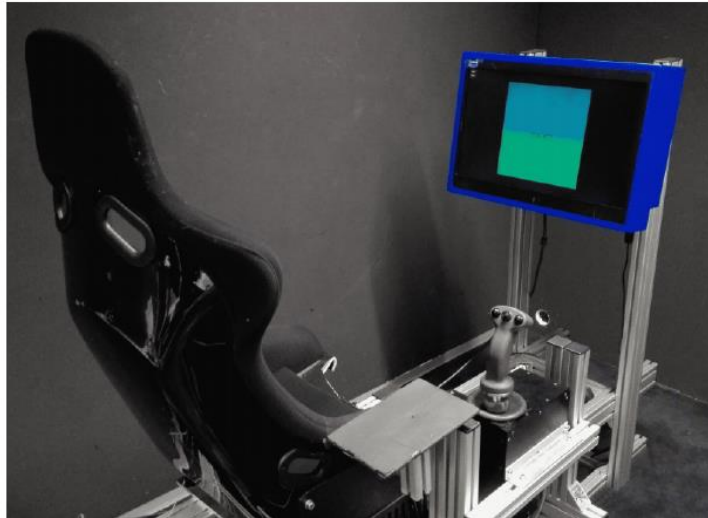
Není jednoduché navrhnout systém haptické pomoci, který by každému pilotovi pomáhal tím nejlepším způsobem a zároveň minimalizoval chyby mezi člověkem a haptickým systémem. Možným řešením je přizpůsobit haptickou pomůcku aktuálním dovednostem pilota. Takové systémy by mohly každému pilotovi pomoci dosáhnout požadovaného výkonu a pomoci mu pouze v případě potřeby.

4.3.1 Návrh adaptivní haptické pomůcky

Návrhem adaptivní haptické pomůcky, která přizpůsobuje množství poskytované pomoci na základě skutečného výkonu pilota je dosaženo parametrizací haptického systému a úpravou příslušných parametrů on-line. Přizpůsobením parametrů se dosáhne optimálního kompromisu mezi výkonem pilota a množstvím pomoci. Tyto parametry se upravovaly pomocí techniky známé jako Model Reference Adaptive Control, což představuje strategii řízení, která minimalizuje chybu mezi výstupem referenčního modelu a výstupem skutečného zařízení.

4.3.2 Experiment

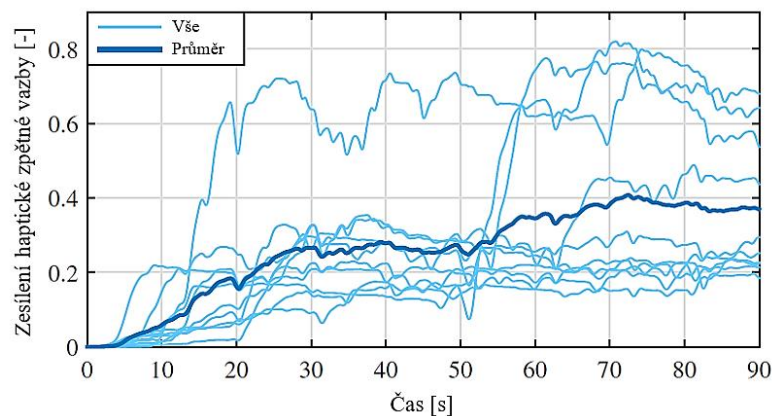
K ověření navržené adaptivní haptické pomůcky byla provedena simulační studie s lidskou interakcí v reálném čase za účelem vyhodnocení navrhovaného systému adaptivní haptické pomůcky. Experiment byl založen na sledovací úloze s jedním stupněm volnosti v ose náklonu. Cílem bylo vyhodnotit změny haptických hodnot s ohledem na výkony účastníků. V experimentu byla jako řídicí zařízení použita haptická řídicí páka na pravé straně a k zobrazení kompenzačního displeje pilotovi byl použit displej s vysokým rozlišením.



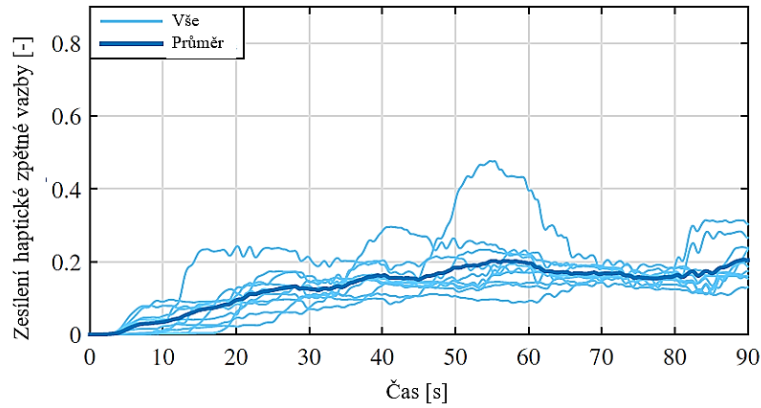
Obrázek 21: Řídicí páka s ovládacími prvky [9]

K provedení experimentu byli vybráni tři účastníci: jeden s nízkou zkušeností s kontrolní úlohou, jeden se střední zkušeností a jeden s vysokou zkušeností. Každý účastník provedl 20 pokusů kompenzační úlohy s jedním stupněm volnosti v ose náklonu. Pokusy byly rozděleny do dvou fází: 10 pokusů s adaptivní haptickou pomůckou a 10 pokusů s manuálním ovládáním (adaptivní haptická pomůcka nastavena na 0). Každý pokus trval 90 sekund.

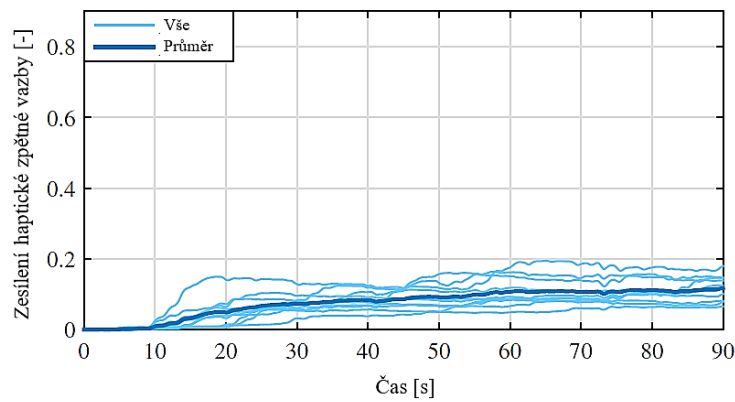
Zprůměrované hodnoty dosahovaly různých úrovní podle pilotních dovedností. Subjekt 1 během většiny pokusů dosahoval hodnot blízkých průměru, avšak ve třech pokusech hodnoty náhle vzrostly a po tomto vzrůstu již neklesly níž. Toto odpovídalo chybným řídicím akcím účastníka. U subjektu 2 byly hodnoty nižší, než jaké měl první subjekt. Byl zde však jeden velký vzrůst hodnot. V tomto případě se hodnoty po několika sekundách vrátily zpět na průměrné. U subjektu 3 je dosaženo malých hodnot a k provedení úkolu nepotřeboval velké množství pomoci od haptického systému. Na druhou stranu větší množství síly mohlo pilota vyrušit a vyvolat chyby.



a) Subjekt 1



b) Subjekt 2



c) Subjekt 3

Obrázek 22: Závislost zesílení haptické zpětné vazby na čase [9], převzato a upraveno

Na konci experimentu byli účastníci dotazováni na vnímání haptické pomůcky. První subjekt uvedl, že haptická síla byla prospěšná, s výjimkou pokusů, kdy po provedení velkých chyb byla haptická síla příliš velká a bránila k znovu získání kontroly nad úkolem. Na druhou stranu subjekty 2 a 3 uváděly, že cítily malou sílu, a že jim síla pomáhala při plnění úkolu.

4.3.3 Vyhodnocení

Byly představeny simulace s lidskou interakcí v reálném čase pro vyhodnocení navrhované koncepce adaptivní haptické pomůcky, která má poskytovat proměnlivou míru pomoci na základě aktuálních dovedností pilotů. Podle očekávání poskytovala adaptivní haptická pomůcka větší množství pomoci méně kvalifikovaným pilotům

a menší množství pomoci více kvalifikovaných pilotům. Dva ze tří účastníků dosáhli lepšího výkonu při použití adaptivní haptické pomůcky.

4.4 Haptický volant

Haptické systémy se nevyužívají pouze v letectví, ale nacházejí své uplatnění také v automobilovém průmyslu. Tyto systémy často najdeme zabudované ve volantu automobilu. Jeden z možných návrhů haptického volantu bude popsán níže. Tato podkapitola popisuje výzkum provedený (SARABIA et al. 2022) včetně popisu experimentu a dosažených závěrů.

Automatizované systémy řízení jsou stále složitější, protože každé vylepšení na stupnici Automated Driving Levels přináší novou sadu funkcí a zároveň snižuje povinnosti řidiče. Ve středních úrovních Automated Driving Levels 2 a 3 je však složitá interakce mezi řidičem a automatizací. Přestože automatizace, tak řidič si mohou ve vybraných situacích převzít řízení volantu a pedálů, je tato změna řízení složitý proces. Může přinášet bezpečnostní problémy, které je obtížné řešit, například zajistit, aby řidič měl dostatečný přehled o situaci, aby mohl náležitě obnovit řízení, když dojde k neočekávané události. V tomto smyslu je udržování řidiče v pozornosti a zároveň zvýšení úrovně podpory automatizace při manuálním řízení nebo nižších úrovních Automated Driving Levels slibným řešením. Toho by mohlo být dosaženo prostřednictvím realizace volantu vozidla jako haptického rozhraní člověk-stroj, které může řidiči pomoci dvěma způsoby. Za prvé, díky využití sdílených strategií řízení, aby automatizace aktivně pomáhala řidiči při jízdách manévrech. Za druhé, použitím volantu jako hmatového komunikačního kanálu pomocí haptických ikon, které slouží k přenosu informací z automatizace na řidiče.

4.4.1 Navržené funkce

První funkce využívající sdílené řídicí strategie na pomoc řidiči je založena na dvou hlavních principech. První princip je založen na minimálním zásahu automatiky do bočního řízení vozidla. Pokud se předpokládá jakákoliv odchylka od trajektorie, systém vyvine minimální požadovanou sílu. Řidič se tímto způsobem dokáže vyhnout nebezpečným a stresujícím situacím ztráty kontroly. Pomáhá také řidiči mít určitou volnost v ovládní vozidla za předpokladu, že je vozidlo v bezpečné poloze. Druhý princip představuje zásadu bezpečnosti před pohodlím. Na základě tohoto principu byla kolem vozidla vyvinuta bezpečnostní obálka a v závislosti na přicházejícím nebezpečí systém upravuje trajektorii vozidla.

Druhou funkcí volantu je poskytovat rychlejší a spolehlivější komunikaci mezi automatizací a řidičem. Je to proto, aby řidič mohl lépe porozumět činnosti automatizace. Toho je dosaženo pomocí haptické zpětné vazby aplikované na volant.



Obrázek 23: Studie řídicího simulátoru s haptickým volantem [10]

4.4.2 Prototyp haptického volantu

Pro průzkumné studie se používal standardní závodní volant. Strategii řízení lze vysvětlit ve dvou částech, a to generování trajektorie řízení a sledování trajektorie řízení. Z jedné strany vozidlo primárně sleduje střed jízdního pruhu, ale na základě geometrie vozovky a viditelných překážek je generována bezpečná dynamická trajektorie. Na druhé straně regulátor používá strategii prediktivního řízení pro sledování trasy. Tato řídicí technika může dynamicky upravovat chování regulátoru během jízdy vážením různých proměnných, jako je boční odchylka, směr jízdy, zrychlení a další.

Tento systém lze považovat za kombinaci různých řídicích strategií, i když je prováděn přímo prostřednictvím stejného algoritmu. V závislosti na chování řidiče funguje dvěma různými způsoby.

Na jedné straně, pokud je řidič pozorný, systém funguje jako systém, který udržuje řidiče v daném jízdním pruhu, a zabraňuje tak přejíždění čar působením opačného točivého pohybu. Pokud je v jízdním pruhu nalezena překážka, systém zváží její polohu a přepočítá boční omezení, aby se jí vyhnul. Například protijedoucí motorka vjede do jízdního pruhu vozidel v protisměru, aby předjela jiné vozidlo, a způsobí tak potenciální kolizi. Když k této události dojde, systém poskytne minimální požadovaný točivý moment, aby pomohl řidiči se kolizi vyhnout.

Na druhou stranu, pokud je řidič rozptýlován, systém také provede centrování jízdního pruhu, čím zabrání tomu, aby vozidlo vyjelo ze své jízdní dráhy. Když motorka vjede do jízdního pruhu vozidla, systém přejde k systému s vyšším točivým momentem než v případě, kdy je řidič pozorný. Toto zvýšení točivého momentu má zabránit nebezpečné přehnané reakci nepozorného řidiče.

4.4.2.1 Haptické ikony

Aby bylo možné využít stávající způsob haptické interakce prostřednictvím volantu, byly navrženy tři typy haptických ikon, které sdělují informace řidiči.

- Informativní ikony jsou upozornění, která upoutají pozornost řidiče a informují ho o událostech, které nejsou časově kritické. Mají jednotný vzor jako vibrační tón telefonu. Pokud je řidič rozptýlen intenzita vibrací se zvýší.
- Přechodové ikony se spustí při každé aktivaci a deaktivaci systému Automated Driving Levels 2. Slouží jako potvrzení změny režimu. Mají proměnlivou intenzitu vibrací a lze je například pociťovat jako nastartování nebo zastavení motoru.
- Ikony na požadavek převzetí upozorní řidiče, pokud vozidlo již nemůže udržet režim Automated Driving Levels 2 a vyšle signál o požadavku na převzetí. Tento signál má tvar vibrací po dobu pěti sekund, který se s každou sekundou zintenzivňuje. Pokud řidič obnoví řízení dříve, ikona se deaktivuje.

4.4.3 Vyhodnocení

Pro vývoj prototypu haptického volantu byly provedeny dvě studie, jejichž cílem bylo vyhodnotit výkonnost systému a přijetí této technologie řidičem. Pokud jde o podporu bočních manévřů (první studie), je optimalizován komfort a bezpečnost, když se úroveň síly mění v závislosti na stavu řidiče. Úroveň bezpečnosti a komfortu lze studovat společně s analýzou nehod, kdy se měří počet kolizí. Pokud jde o haptické ikony (druhá studie), byla použita subjektivní studie založená na dotaznících. Tato metodika umožnila získat sadu haptických ikon, které byly účinné při poskytování odpovídajícího sdělení, a navíc získaly vysokou známku na stupnici spokojenosti.

5 Zhodnocení možností haptických systémů

Haptická zpětná vazba je sama o sobě jako taková přínosná. Její pomoc pozitivně ovlivňuje výkon pilota a tím zvyšuje bezpečnost letu. Může mít podobu vibrací nebo silového působení. Tímto způsobem může pilot získat důležité informace o stavu letadla nebo ho může upozornit na nebezpečí.

VAN BAELEN et al. [7] ve své studii ukázali, že vibračně hmatová zpětná vazba bude velkým přínosem pro piloty při plnění jejich úkolů. Ověřila se hlavně při výcviku, kde urychlovala tempo učení, a zdá se, že nevytváří závislost a výkon pilota se po jejím odstranění výrazně nezmění.

Pomáhá také zvyšovat povědomí o situaci a lépe reagovat na podněty v prostředí, ve kterém se pohybuje. V letectví například může pilotům pomoci udržet letadlo na správné trajektorii a sledovat tak požadovaný letový profil. Pokud dojde k odchýlení letounu z ideální trasy, haptická zpětná vazba by pilotovi poskytla informace prostřednictvím vibrací na řídicí páce, které by ho navedly správným směrem zpět na ideální trasu letu na základě letového plánu.

Na rozdíl od předchozí studie, DELDYCKE et al. [8] dosáhli jiných výsledků. Hlavní rozdíl nejspíše způsobilo krátké trvání nebo vyšší obtížnost úkolu, u kterého by mohla vibračně hmatová zpětná vazba způsobit větší chybovost pilota. Příčinou by mohlo být nevhodné poskytnutí podpory haptické zpětné vazby v podobě nesprávně načasovaných a příliš silných vibrací. Z toho vyplývá, že následná pilotova reakce na náhlé vibrace by mohla být přehnaná, a mohla by způsobit, že se letadlo dostane do nebezpečné situace. Zpětná vazba by měla být jemná, ale zároveň rozpoznatelná, aby podporovala pilota v jeho úkolu, aniž by ho zbytečně vyrušovala.

Co se týče silové zpětné vazby, kterou využíval VAN BAELEN et al. [7] ve své studii, vidím jako užitečnou při ovládání letu, ale její použití bych předem pečlivě zvažila. Na tomto druhu zpětné vazby často vzniká závislost a její odstranění by mohlo negativně ovlivnit výkony pilotů. Proto je důležité, aby bylo zajištěno, že piloti budou dostávat stejný typ zpětné vazby při řízení letadel, protože pokud by pilot přešel z letadla se silovou zpětnou vazbou na letadlo bez ní, mohl by se potýkat s potížemi při jiných podmínkách řízení, což by mohlo ohrozit bezpečnost letu, zejména v kritických situacích.

Nejlepší možností, jak ve své studii uvádí ARENELLA et al. [9], by bylo navrhnout systém haptické zpětné vazby podle individuálních potřeb pilota, který by každému pilotovi pomáhal tím nejlepším způsobem. Takové systémy by mohly každému pilotovi pomoci dosáhnout požadovaného výkonu a zároveň minimalizoval chyby mezi pilotem a haptickým systémem.

V oblasti automobilového průmyslu je zavedení haptické zpětné vazby do volantu vnímáno jako velké plus. Navržený systém podle SARABIA et al. [10] pomáhá řidiči zůstat ve svém jízdním pruhu a v případě jeho nepozornosti je schopen zasáhnout. Příkladem může být situace, kdy protijedoucí motorka vjede do protisměru při předjíždění vozidla, a tím způsobí riziko kolize. Haptická zpětná vazba v těchto situacích předchází dopravním nehodám tak, že upozorňuje řidiče na překážku na trase, čímž zvyšuje šance na odvrácení možné srážky. Systém, který pomáhá držet vozidlo v jízdním pruhu, je běžný v dnešních moderních vozidlech, ale s výhledem do budoucnosti by rozšíření těchto funkcí mohlo vést k plné automatizaci.

Celkově lze říct, že haptická zpětná vazba by mohla mít pozitivní přínos na výkon pilota a řidiče, což by přispívalo k vyšší bezpečnosti v leteckém a silničním provozu. Je ale samozřejmě důležité správně navrhnout a implementovat systém haptické zpětné vazby, aby se minimalizovaly negativní dopady a zvýšila se spolehlivost systémů, které by ji využívaly.

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala současným vývojem systémů s haptickou zpětnou vazbou a představila nedávné studie v různých oblastech aplikace.

Haptická zpětná vazba je důležitý prvek jak v leteckém, tak i v automobilovém průmyslu. Studie ukázaly, že haptická zpětná vazba přináší významný přínos pro lepší bezpečnost letového provozu.

Díky vibračně hmatové zpětné vazbě mohou piloti získat důležité informace o stavu letadla a provozních podmínkách přímo prostřednictvím řídicí páky. Tímto přenosem pilot dostane rychlou odezvu na důležité situace, čímž se snižuje riziko lidské chyby. Velká intenzita nebo špatné načasování však může vést k přehnané reakci pilota, což může mít negativní dopad na bezpečnost letu.

Je důležité zmínit, že haptická zpětná vazba může vyvolat závislost a po jejím odstranění může dojít k okamžitému zhoršení výkonu pilota. V případě silové haptické zpětné vazby to znamená, že se piloti mohou příliš spoléhat na její navádění a nedostatečně využívat další důležité informace z přístrojů.

Vzhledem k tomu, že haptická zpětná vazba přináší velké výhody, ale zároveň má i svá negativa, je důležité provádět další studie za účelem vyvážení těchto vlastností.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KOŠTIAL, R. *Palubní soustavy II.* Brno, 2023 Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/578829/mod_resource/content/1/CZ_Aircraft_Systems_2.pdf. Výukový materiál z předmětu FLE. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [2] SOKOL, F. *Vývoj palubních soustav dopravních letadel.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Helena Trefilová.
- [3] GARG, Atul; LINDA, Rezawana Islam; CHOWDHURY, Tonoy. Evolution of aircraft flight control system and fly-by-light flight control system. *International Journal of Emerging technology and advanced Engineering*, 2013, 3.12: 61-63.
- [4] NICOLIN, Ilie; NICOLIN, Bogdan Adrian. The fly-by-wire system. *Incas Bulletin*, 2019, 11.4: 217-222.
- [5] KORIBSKÝ, Denis. Systém pro měření úhlu náběhu [online]. Brno, 2019 Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117431>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Pavel Zikmund.
- [6] GIBSON, J.C a R.A. HESS, 1997. AGARDograph 332 Stick and Feel System Design. Neuilly-sur-Seine: Advisory Group for Aerospace Research & Development.
- [7] VAN BAELEN, Dirk, et al. Flying by feeling: Communicating flight envelope protection through haptic feedback. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2021, 37.7: 655-665.
- [8] DELDYCKE, Pieter-Jan, et al. Design and Evaluation of a Haptic Aid for Training of the Manual Flare Manoeuvre. In: *2018 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. 2018. p. 0113.
- [9] ARENELLA, Antonio, et al. An Adaptive Haptic Aid Based on Pilot Performance. In: *AIAA Scitech 2019 Forum*. 2019. p. 1232.
- [10] SARABIA, Joseba, et al. Haptic Steering Wheel for Enhanced Driving: an Assessment in Terms of Safety and User Experience. In: *Adjunct Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 2022. p. 219-221.