

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ



Bc. Lukáš Zibner

**Vypracování pohybového modelu pilota v kokpitu s
použitím technologií MOCAP**

Diplomová práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Lukáš Zibner

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Vypracování pohybového modelu pilota v kokpitu s použitím technologií MOCAP**

Název tématu (anglicky): **Motion Model of a Pilot in the Cockpit Using MOCAP Technologies**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvořit dynamický pohybový model pilota v kokpitu letadla, perspektivně sloužící pro hodnocení pohybové aktivity pilota
- Vykonejte analýzu současného stavu v oblasti modelování pohybu s hlavní orientací na piloty v kokpitu
- Navrhněte metodiku experimentu s cílem zajistit vhodné prostředí pilotního prostoru
- Realizujte navržený experiment pomocí gyroakcelerometrických systémů MOCAP
- Vytvořte pohybový model pilota v kokpitu
- Zhodnoďte a diskutujte navržený model, stanovte závěry práce



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: HERDA, L. Skeleton-based motion capture for robust reconstruction of human motion. In: Proceedings Computer Animation 2000. 2000, s. 77-83.
MENACHE, Alberto. Understanding motion capture for computer animation and video games. San Diego, CA: Morgan Kaufmann, c2000. ISBN 978-0124906303.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.**
Ing. Lenka Hanáková

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **1. prosince 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Lukáš Zibner
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 3. září 2020

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Vypracování pohybového modelu pilota v kokpitu s použitím technologií MOCAP

Diplomová práce

Bc. Lukáš Zibner

2020

Abstrakt

Lidský činitel zaujímá v rámci celosvětového letectví nezastupitelnou úlohu. Proto se výzkumné aktivity v rámci letectví snaží o co nejlepší pochopení veškerých faktorů s ním spojených. Implementace pohybových modelů pilotů v letectví může přispět ke zvyšování bezpečnosti v letectví, když mimo jiné pomáhají zdokonalování současných i budoucích kokpitů z hlediska ergonomie, vedou k pochopení souvislostí ohledně únavových stavů posádek nebo přispívají k hodnocení dopadů pilotní profese na zdravotní stav posádek. Cílem předkládané diplomové práce je na základě výše uvedeného vypracovat dynamický pohybový model pilota v kokpitu s použitím technologií MOCAP. S ohledem na závěry zjištěné při vytváření teoretických základů práce bylo rozhodnuto o pořízení a využití gyro-akcelerometrického systému ProMove MINI společnosti Inertia Technology B.V. V rámci měření absolvovalo 8 subjektů 24hodinovou analýzu skládající se ze 64 kompletních letů a 128 přiblížení při využití školního letového simulátoru umístěného na Ústavu letecké dopravy, Fakulty dopravní, Českého vysokého učení technického v Praze. Lety probíhaly v maximální proveditelné míře podle obecně přijatých standardů přístrojového létání IFR a postupů spojených s konkrétním letounem Beechcraft Baron 58. Pohybový model byl vytvořen v prostředí Matlab 2020b ve formě grafického uživatelského prostředí. Mimo samotného pohybového modelu byly navrženy i metody hodnocení (kvantifikace) pohybové aktivity, které mohou sloužit pro komplexní biomechanickou analýzu pilota v kokpitu. Funkce programu samotného modelu byla empiricky validovaná.

Klíčová slova

letový simulátor, pohybové snímací systémy, pohybový model, technologie MOCAP

Abstract

The role of the human factor within worldwide aviation sector is irreplaceable. Because to that, research activities focus on precise evaluation of factors related to that. Implementation of motion model techniques can contribute to increase in safety when, besides other things, they help with improving the ergonomic of future cockpits. It can also provide us with insight into the effect of fatigue and contribute to better understanding of impacts pilot profession has on health. The goal of this thesis is to create a dynamic model of pilot in the cockpit while using MOCAP technology. Whereas the facts introduced in theory part, it was decided to use ProMove MINI motion capture system of the company Intertia Technology B.V. utilizing accelerometers and gyroscopes. Within the measurement, 8 subjects took part in 24 hours experiment consisting of 8 comprehensive flights and 16 instrument approaches while using a flight simulator located at the Department of Air Transport, Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University in Prague. The character of the flights was following the standards of IFR procedures and specific aircraft procedures so as to be as realistic as possible. The motion model was created in Matlab2020b in the form of a graphical user interface. Apart from the motion model itself, methods of quantification of motion activity were suggested. These methods could be used for a complex biomechanical analysis of the pilot in the cockpit. The function of the program was empirically validated.

Key words

Motion Capture Systems, MOCAP Technology, Motion Model, Flight Simulator

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mě podporovali při zpracování diplomové práce. Zvláště děkuji vedoucím práce, jmenovitě doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph. D. a Ing. Lence Hanákové za odborné vedení, cenné připomínky a obětavost i v rámci světově nepříznivé epidemiologické situace. Mé velké díky patří také spolužákům, kteří byli ochotní zúčastnit se měření, a věnovali tak mně i mým kolegům množství svého osobního času a energie. Dále děkuji JUDr. Janu Zibnerovi a Mgr. Matěji Vojtíškovu za jazykovou korekturu práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a blízkým za podporu, ochotu a pochopení v průběhu studia.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje v souladu s Metodickými pokyny o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 1. prosince 2020



podpis

Obsah

Úvod	9
1 Teoretické základy práce	11
1.1 Lidský činitel v letectví	12
1.2 Kokpit a jeho ergonomie	13
1.3 Antropometrie	14
1.4 Pohybová aktivita	15
1.5 Pohybové snímací systémy – technologie MOCAP	19
1.5.1 Optické snímací systémy	19
1.5.2 Magnetometrické snímací systémy	21
1.5.3 Mechanické snímací systémy	22
1.5.4 Akustické snímací systémy	23
1.5.5 Gyro-akcelerometrické snímací systémy	24
1.6 Využití pohybových snímacích systémů v dopravě	33
1.7 Teorie pohybového modelu	41
2 Metodika měření	46
2.1 ProMove MINI – Inertia	46
2.1.1 Kalibrace	53
2.2 Subjekty	54
2.2.1 Antropometrie	54
2.2.2 Umístění senzorů	55
2.3 Schéma měření a letů	56
3 Hodnocení dat	60
4 Diskuze výsledků	64
5 Závěr	67
Seznam použité literatury	70
Seznam obrázků	83
Seznam tabulek	85

Seznam použitých zkratek

2D	Two-dimensional Space
3D	Three-dimensional Space
ADF	Automatic Direction Finder
AHRS	Attitude and Heading Reference System
ARL-HRED	Army Research Laboratory Human Research and Engineering Director
BLE	Bluetooth Low Energy
BNC	Bayonet Neill–Concelman Connector
BR	Basic Rate
CAD	Computer-aided Design
CDI	Course Deviation Indicator
CPU	Central Processing Unit
CRM	Crew Resource Management
DEP	Design Eye Point
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
DOF	Degrees of Freedom
EDR	Enhanced Data Rate
EFB	Electronic Flight Bag
EMG	Electromyography
FDM	Flight Data Monitoring
FMS	Flight Management System
GA	General Aviation
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HCI	Human-computer Interaction
HDG	Heading

HRA	Human Reliability Analysis
ICAO	International Civil Aviation Organization
IDFT	Zpětná inverzní Fourierova transformace
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
INS	Inertial Navigation System
IRS	Inertial Reference System
Li-Ion	Lithium-ion
Li-Pol	Lithium Polymer
LOC	Localizer
MDI	Moving Dial Indicator
MEMS	Microelectromechanical Systems
MET	Metabolic Equivalent of Task
MOCAP	Motion Capture
PBN	Performance Based Navigation
PPL	Private Pilot Licence
RMS	Root-mean-square Deviation
RNAV	Area Navigation
RSSI	Received Signal Strength Indication
SDK	Software Development Kits
SID	Standard Instrument Departure
SMS	Safety Management System
SOP	Standard Operation Procedures
STAR	Standard Terminal Arrival
TWY	Taxiway
TX	Transmitter

USB	Universal Serial Bus
VFR	Visual Flight Rules
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range

Úvod

Pohyb a jeho charakteristiky jsou pro lidstvo odvěkým tématem. Omezíme-li se na pohyb živočichů, můžeme pohyb popsat jako výsledek interakce svalových tkání. Zachycení, pochopení a analýza pohybu je předmětem mnoha odvěkých oborů. Mimo jiné se sem řadí malířství, sochařství či medicína. Strukturu, složitost a průběh pohybu se pokusil mimo jiných zachytit a definovat již Aristoteles, například ve světoznámé publikaci *Metafyzika*. Skrze historický vývoj poznání a techniky se dnes nacházíme v pozici, kdy volně dostupnou technikou můžeme důkladně zkoumat a hodnotit pohyb z mnoha pohledů, třeba s použitím technologií MOCAP.

Pohybové snímací systémy MOCAP se těší širokému využití. Vhodně zvolené snímací systémy lze totiž použít prakticky kdekoliv, kde je zapojen lidský faktor, nebo tam, kde je zapotřebí zachytit sérii pohybů a interakcí subjektů. Mezi odvětví využívající tuto technologii patří typicky filmový průmysl či lékařství a biomedicína. Do naprosté většiny z těchto odvětví vnesly technologie MOCAP převratné možnosti. S ohledem na skutečnost, že má lidský faktor v letectví nezastupitelnou úlohu, se nabízí možnost využití pohybových snímacích systémů i v letecké dopravě, a to například pro monitorování, hodnocení a modelování pohybu leteckého personálu.

Data získaná snímáním pohybu pilotů mohou pomoci prohloubení pochopení mnoha souvislostí, které mohou přímo i nepřímo ovlivnit pohled na lidskou výkonnost. Mimo jiné by využití pohybového modelu mohlo objasnit některé z mnoha nesouladů a zdrojů provozních chyb na rozhraní LIVEWARE – HARDWARE a LIVEWARE – ENVIRONMENT (model Shell), a pomoci tak výkonnosti prostředního člena LIVEWARE [1, 2]. Dále by mohlo dojít k odhalení některých skrytých okolností běžného pracovního procesu v kokpitu, coby následků přirozených provozních odchylek od publikovaných pracovních postupů. Mohla by být nalezena slabá místa v procesu či posloupnostech událostí spolu s jejich příčinami a celkově by metoda mohla přinést nový způsob sledování prováděných úkonů. Pro letectví je totiž zásadní pracovat s ergonomií pilotního prostředí, rozumět příčinám provozních odchylek a chápat chování veškerých částí celku. Jen tak lze odhalit ničivý potenciál nebezpečí.

Mezi běžně využívané technologie MOCAP patří pohybové snímací systémy optické, magnetometrické, akcelerometrické, gyroskopické, mechanické a akustické. Jednotlivé příklady se liší svojí konstrukcí, využitelností v daném prostředí, schopností snímat charakteristické pohyby (posun a rotace), citlivostí, časovou odezvou nebo finanční náročností. Při návrhu experimentu, metodiky a samotném vyhodnocování je zapotřebí uvažovat všechny tyto vlastnosti tak, aby výsledný model co nejlépe splnil požadavky zadání práce. Předkládaná diplomová práce navazuje na autorovu bakalářskou práci zaměřenou

na výzkum vlivu únavy na přesnost pilotáže [3]. V rámci této bakalářské práce byla ověřena metodika využití prostředí letového simulátoru v souvislosti s výzkumem lidského faktoru v letectví. Dostupnost tohoto prověřeného letového simulátoru a technologií MOCAP spolu s rozmanitými možnostmi v rámci oblasti snímání pohybu představovaly prostor pro podrobnější výzkum v rámci zvoleného tématu. Diplomová práce si klade za cíl vytvoření dynamického pohybového modelu pilota perspektivně sloužícího pro hodnocení pohybové aktivity pilota s využitím gyro-akcelerometrických pohybových snímacích systémů (technologie MOCAP) a metodiky představené v následujícím textu.

Pro účely měření byly vybrány subjekty se srovnatelnými pilotními zkušenostmi. V rámci 24hodinové analýzy absolvoval každý subjekt 8 letů a 16 přiblížení odpovídajících postupům a požadavkům pro lety podle přístrojů IFR. Gyro-akcelerometrické senzory byly na subjektech vhodně rozmístěny s ohledem na referenční antropometrické tabulky tak, aby snímané pohyby subjektu byly přirozené a psychická a fyzická zátěž minimální. Výstupy z jednotlivých senzorů bylo možné v reálném čase zobrazovat na obslužném počítači a data byla průběžně ukládána do úložiště počítače a paměťových modulů senzorů. Samotné vyhodnocení dat a vytvoření pohybového modelu pilota je předmětem práce. Bude přitom využito metody následného zpracování dat („Off-line“) spolu s vhodnými statistickými prostředky.

V rámci svého pilotního výcviku a letecké kariéry jsem v kokpitech letadel a simulátorů strávil stovky hodin. Za tu dobu jsem si nemohl nevšimnout nápaditých souvislostí mezi ergonomií, celkovým zpracováním kokpitu, pohyby pilota, aktuálním tělesným stavem, psychickou a fyzickou výkonností či schopností a možnostmi pilota vykonávat let. Míra potřebné psychické a fyzické aktivity přímo nebo nepřímo vypovídá o vhodnosti a propracovanosti kokpitu a procedur a předurčuje možné výkony pilota, stejně jako mají vhodnost a kvalita pracovního prostředí přímé dopady na aktuální i dlouhodobý zdravotní stav posádek. Na základě dat o pohybové aktivitě pilota lze předpovídat mimo jiné riziko výskytu únavy, riziko zdravotních potíží spojených se sedavým typem práce, riziko výskytu chyb pilota nebo i riziko přehlédnutí důležitých údajů. Zvolené téma tak může pomoci zvyšování bezpečnosti. I proto mě problematika lidského faktoru v letectví zajímá a zvolené téma považuji za zásadní v prezentovaném kontextu. Využitím technologie MOCAP ve spojení s kokpitem letadla mohu napomoci k ještě dokonalejšímu a hlubšímu porozumění vzájemné interakce mezi člověkem a strojem. Zvolené téma může a závěry práce mohou posloužit jako základ navazujících prací a přispět tak výzkumným aktivitám v rámci lidského faktoru v dopravě a letectví. V neposlední řadě by mohla práce přinést nový pohled na design kokpitů letadel a schéma pracovních postupů v kokpitu.

1 Teoretické základy práce

Pohyb a celou jeho spletnost studují a popisují mnohé vědní disciplíny; mezi ně lze zařadit kineziologii, kinantropologii, antropomotoriku či kinematiku spolu s dynamikou. Závěry těchto disciplín vyzdvihují vliv anatomických, mechanických, psychologických, sociologických, fyziologických i environmentálních faktorů na výslednou podobu a charakteristiku pohybu. V práci zaměřené na pohyb a pohybovou aktivitu je příhodné tyto vědní disciplíny v krátkosti představit, jelikož právě ony jsou klíčem k dokonalému pochopení a úspěšnému kvantifikování a definování lidského pohybu [4].

Biomechanika studuje pohyb, jeho strukturu a funkci jednotlivých částí těla; její transdisciplinárnost spočívá v začlenění metod a poznatků z klasických oborů, jako jsou morfologie, fyziologie, matematika, fyzika, biofyzika, kybernetika, technická mechanika nebo nauka o materiálech, jakož i v šíři aplikací mimo jiné v klinických lékařských oborech, technických oborech, společenských oborech, přírodních vědách a ekologii [4]. Prakticky jsou tak poznatky biomechaniky uplatnitelné například při zlepšování fyzického výkonu a zdravotního stavu lidí či při navrhování technických prostředků spojených s lidským pohybem, kdy je využíváno dat o rozpětí pohybů, jejich síle, rychlostech pohybů, tělesné skladbě nebo odpovědi organismu na zrychlení, vibrace a rázy. Biomechanika tak dokazuje, že dokáže porozumět souvislostem na pomezí fyzikálních faktorů a neurologické organizace při řízení pohybu [5, 6]. České technické normy pak stanovují rámcové požadavky biomechanické povahy. V rámci biomechaniky se postupem času vykrystalizovala podkategorie kineziologie zabývající se pohybem svalového a kosterního ústrojí člověka. Tato podkategorie popisuje anatomické a funkční zákonitosti pohybového systému při vykonávání pohybu a daný pohyb popisuje podle toho, které svaly se na něm podílejí [7]. Hodnotí tak například limitující faktory v pracovním procesu člověka.

Existuje-li potřeba zaměřit se na změny poloh segmentů těla a těla jako celku v prostoru, využívá se metod a poznatků kinematiky. Ta se zabývá určováním polohy bodů a jejich změn v čase. Za pomoci veličin rychlosti, zrychlení a dráhy popisuje a vyjadřuje průběh pohybu bodu, jenž představuje a zhmotňuje zkoumaný segment. Tento optimální bod kinematika odborně označuje jako hmotný bod. Samotnými příčinami pohybu se na rozdíl od kinematiky zabývá vědní disciplína dynamika. Ta při stanovování příčin pohybu využívá pojmy jako gravitační síla, svalová síla, síla vznikající pohybem coby odpor hmoty proti tomuto pohybu či rezistující síla pevnosti a pružnosti tělesných tkání. Dynamika rozlišuje zdánlivé a setrvačné síly, tedy síly, které nejsou projevem vzájemného působení těles a řadí se mezi síly neinerciálních soustav [8]. Hlubší pochopení dynamiky umožňují matematické modely z oboru biomechaniky [5]. Mezi silné komplexní nástroje biomechanické analýzy přitom patří kinetika spolu s kinematikou.

Kinetika analyzuje síly způsobující pohyb a popisuje tak vznik pohybu a udržování konkrétního pohybového stavu. Pracuje s myšlenkou, že o silách nejlépe vypovídá jejich účinek a nikoliv mnohdy špatně čitelná přímá vizuální reference jejich působení.

Antropomotorika, jakožto poddisciplína motoriky a jedna ze základních vědních disciplín vědního oboru kinantropologie, zkoumá vnitřní pohnutky, které jedinec pro pohyb má. Zabývá se vývojem a stavem vnitřní i vnější stránky motoriky spolu se zákonitostmi jejího vzniku a vývoje. Vnitřní oblast se přitom zabývá pohybovými předpoklady (vědomosti, dispozice, zkušenosti, dovednosti, schopnosti) a vnější oblast pohybovými projevy (pohyb v rámci sportu, pohybové terapie, pracovního procesu nebo běžného života). Vnější pohybové projevy antropomotoriky přitom zkoumají a hodnotí testy a měření při diagnostice motorických projevů.

Jak vyplývá z předchozího textu, přístupů, metod a možností v rámci zkoumání pohybu je nepřehledné množství. Mezi empirické biomechanické výzkumné metody se mimo technologie MOCAP řadí například i stroboskopie, EMG, goniometry nebo metoda stanovení délek (délka kroku, délka skoku). Způsob provedení těchto metod je pak dělí na metody invazivní, neinvazivní, přímé a nepřímé.

1.1 Lidský činitel v letectví

Lidský činitel má v letectví nezastupitelnou úlohu. Pilotáž letadla představuje nepřetržitou dynamickou fyzicky a psychicky náročnou aktivitu a jakákoliv série chyb může mít fatální následky. Je tedy nasnadě, aby posádka letadla byla průběžně schopna vnímat okolní prostředí, rozhodovat a podávat stabilní výkony. Historicky se porozumění úloze lidského faktoru posouvá na vyšší a vyšší úroveň. V samotných počátcích letectví byly kokpity čistě účelové. V rámci šetření nehod a incidentů se inklinovalo k hledání závad a viníků, typicky pilotů. V průběhu první a druhé světové války se objevuje masová výroba letadel v sériích. Nebylo neobvyklé, že posádku těchto letadel tvořilo více členů; začaly se zavádět standardizované postupy a zpětná reference od posádek pracujících v kokpitu nabírala na své váze. Od 70. let minulého století se postupně přešlo k tendenci hlubšího porozumění lidského vlivu v letectví. Mezi populární pojmy tohoto období patřil jednak lidský činitel, ale též lidská výkonnost, limity lidského faktoru nebo systém řízení lidských zdrojů na palubě CRM. I tato etapa však dosáhla pomyslného vykonatelného maxima a pozvolně přešla až v dnešní éru organizačních faktorů zaměřující se na vlivy okolního prostředí. Analýza incidentů a nehod se přestala omezovat na strohé určení viníka či hledání závad. Dnes dominuje potřeba porozumění fungování všech částí celku a snaha dokonale ovládat všechny proměnné, které mohou způsobit realizaci následků nebezpečí, coby integrální složky letectví. Mezi základní otázky dávno nepatří prosté: „Co se stalo? Kdy se to stalo? Kdo to zavinil?“, nýbrž: „Jak se to stalo? Proč se to stalo? Proč tomu nebylo předem zabráněno?“ [9]

S bezpečnostními riziky a identifikovaným nebezpečím se nepřetržitě pracuje. Základní přístupy k rozpoznávání nebezpečí lze popsat jako prediktivní, proaktivní a reaktivní. Prediktivní proces je založen na přímém pozorování palubního personálu v rámci běžného provozu. Dokáže sumarizovat data z podobných druhů činností, pracovat s biologicko-matematickými modely či brát v úvahu data z proaktivních a reaktivních procesů. Mezi základní prostředky pro sběr dat v rámci prediktivního procesu patří proces monitorování letových dat FDM a hlášení zaměstnanců. Proaktivní přístup zahrnuje průběžný a nepřerušovaný sběr dat o událostech s minimálními následky a vážností. Je založen na dobrovolných i povinných hlášeních posádek, bezpečnostních auditech v rámci fungování společnosti, průzkumech a rozborech. Výsledná data jsou velice důležitá pro prevenci výskytu závažnějších událostí, protože dále rozšiřují znalosti fungování reálného provozu a pomáhají při identifikaci nebezpečí a řízení rizik. Základní myšlenkou proaktivního přístupu je hledání nebezpečí a nedostatků systému ještě před tím, než dojde k selhání, a zavádění zmírňujících strategií. Cílem reaktivního procesu je sběr dat po výskytu bezpečnostních selhání. Ač se jedná o prakticky nejprimitivnější proces, je nedílnou součástí celého složitého systému řízení bezpečnosti. Je totiž nesmírně důležité nastalé události detailně rozebrat a ke zjištěným skutečnostem zaujmout takový přístup, který do budoucna eliminuje nepřijatelné události. Žádná informace totiž není postradatelná a nahraditelná [9].

1.2 Kokpit a jeho ergonomie

Optimalizací potřeb člověka v jeho pracovním prostředí se zabývá vědní obor ergonomie. V práci zaměřené na pohybový model a pohybové aktivity pilota je příhodné nastínit vztah pilota a jeho pracovního prostředí. Kokpit představuje poměrně malý prostor, standardně vybavený letovými, navigačními, komunikačními a jinými přístroji, se kterými musí pilot průběžně interagovat. Interakci do značné míry předurčují standardní provozní postupy (SOP), které bývají nedílnou součástí náplně práce pilota. Tyto postupy zpravidla představují chronologické myšlenkové pochody, jejichž předmětem je metodická manipulace s různými prvky, jejich kontrola a v případě vícepilotního letadla standardní hlášení v podobě „calloutů“. Postupy, jejich provádění a vhodnost představují spolu s vybavením kokpitu zásadní faktory návrhu systému kritických pro bezpečnost.

Největší pozornost je při standardním letu bez využití autopilota věnována základním prvkům řízení, jakými jsou nožní řízení, plynové přípusti a sloupek řízení či knipl. Od typu letadla se pak odvíjí, zda samotné řízení představuje více či méně náročnou silovou a psychickou aktivitu. Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA) spolu s FAA stanovují požadavky na uspořádání prvků v kokpitu na základě „task-driven“ konceptu, tedy na základě toho, jak moc je daný prvek využíván, potřebný a kritický [10]. Kromě samotného řízení musí pilot aktivně vnímat okolí letadla, vyhodnocovat polohu letadla v prostoru a monitorovat veličiny jako

rychlost, výška, magnetický směr letu nebo údaje o výkonu pohonných a dalších jednotek. Stejně tak je zapotřebí obsluhovat zbylé systémy, pracovat s „checklisty“, komunikovat s řídicími letového provozu, vyplňovat dokumentaci nebo vykonávat náležitosti konceptu spolupráce v posádce. Všechny tyto činnosti vytváří jednotný a konečný obraz pilota využívajícího všechny prvky svého pracovního prostředí tak, aby si zajistil dostatečné situační uvědomění. Pro definici situačního uvědomění nabízí široká odborná veřejnost mnoho definic. Jednu z nich lze přeložit následovně:

„Situační uvědomění je vnímání všech prvků okolí v prostoru a čase, pochopení jejich významu a schopnost představit si jejich status nebo následky v blízké budoucnosti.“ [11]

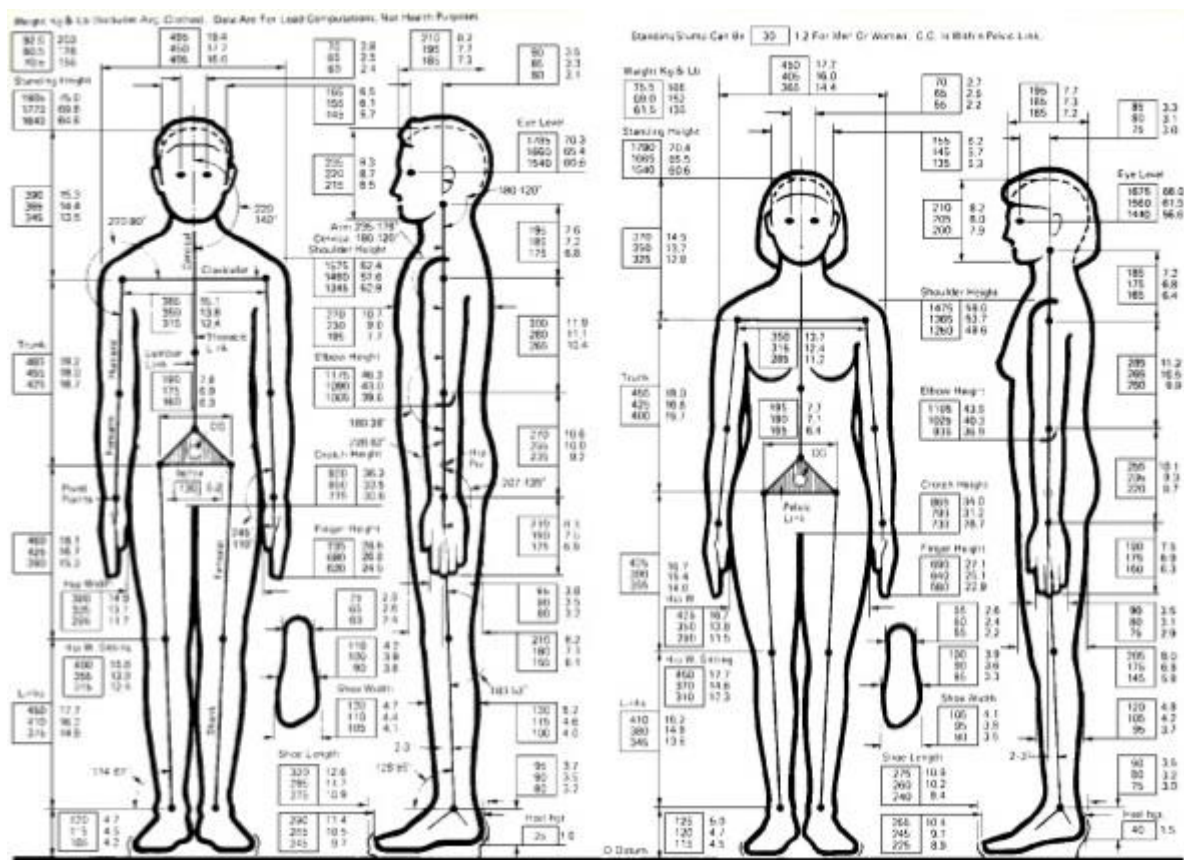
Pro rozšíření povědomí o ergonomii kokpitů by mohla sloužit právě data pohybových modelů pilotů. S jejich pomocí by mohlo dojít k odhalení nedostatků kokpitu, úpravám rozložení ovládacích prvků, ke zdokonalení provozních postupů, modifikování výhledu z kokpitu, úpravě posedu, změně indikace a vizualizace letových a provozních dat a konečně tedy ke zvýšení výsledné funkčnosti a komfortu pracovního prostředí, jeho designu a komponent. Dále by mohla být data využita v kombinaci s jinými biomechanickými metodami k stanovení průběhu individuálních energetických stavů pilotů, výzkumu únavových stavů, kategorizaci negativních dopadů sedavé profese na zdravotní stav nebo by data mohla vypovídat o motorických a koordinačních schopnostech a průběžích úrovních situačního uvědomění.

1.3 Antropometrie

Předpokladem úspěšného modelování pohybu a provedení měření je chápání a stanovení potřebných antropometrických parametrů subjektů. Antropometrie, jakožto jedna z výzkumných metod antropologie, se ze své definice zabývá pozorováním a měřením částí lidského těla. Měřením získává hodnoty znaků jako jsou délkové míry, úhly a obvody [12]. Příkladem obecných antropometrických tabulek je Obrázek 1.

Metody antropometrie jsou standardizovány tak, aby byly celosvětově srovnatelné. Z těchto standardizací vycházejí mimo jiné antropometrické body, které představují stejnojmenné body na kostře promítnuté na povrch těla [12]. Takové body lze nalézt na místech, kde je kostní podklad pokryt pouze kůží bez svalů a tuku. Jednoznačnost těchto bodů spolu s použitím vhodného antropometrického instrumentáře zajišťují maximální chybu měř na těle $\pm 0,5$ cm. Pro technické účely slouží ČSN EN ISO 7250-1 – *Základní rozměry lidského těla pro technologické projektování – Část 1: Definice a orientační body tělesných rozměrů*. Tato norma přesně stanovuje měřicí metody, měřené charakteristiky, měřidla a popisuje postupy provedení měření [13]. Antropometrie úzce souvisí s myšlenkou, že fyzické faktory jedince, jako jsou síla, výška, zrak či sluch, předurčují jeho možnosti fungování v pracovním prostředí, ať už je to myšleno obecně, nebo přímo na pomezí člověka a stroje (LIVEWARE –

–HARDWARE). K antropometrickým parametrům bude při návrhu rozmístění senzorů nahlíženo tak, aby byla naměřená data přesná, zpracovatelná, porovnatelná a co možná nejvíce objektivní.



Obrázek 1: Antropometrické tabulky [13]

1.4 Pohybová aktivita

Pohybová aktivita, coby základní koncept kinantropologie, je definována jako jakýkoliv tělesný pohyb zabezpečovaný kosterním svalstvem za účelem zvýšení energetického výdeje nad úroveň klidového metabolismu [14]. Charakterizuje ji doba trvání, frekvence, její intenzita a typ svalové kontrakce. Mimo volnočasové a sportovní aktivity jsou její esenciální součástí běžné činnosti jako jsou výkon povolání, svižná chůze nebo hra. Projevují se tak veškeré vzájemné vazby jako jsou vazby biologické, psychické, psychomotorické a faktor sociální stránky jedince [15]. Pohybová aktivita udržuje lidský organismus v dobrém fyzickém, duševním a zdravotním stavu a představuje podmínku pro udržení kondice a udržitelného životního stylu. Její nenahraditelný pozitivní účinek na imunitu, prevenci a léčbu nemocí funguje jako přirozená obrana před výskytem civilizačních chorob jako jsou cukrovka II. typu, kardiovaskulární choroby, hypertenze nebo obezita.

Pohybové aktivitě je přisuzováno 15 až 40 % celkového energetického výdeje jedince [16]. Jako číselný ukazatel energetického výdeje pro pohybovou aktivitu lze uvést jednotku

kcal/min, při čemž číselná hodnota s touto jednotkou vyjadřuje intenzitu pohybové aktivity (například té sportovní). Dále existuje forma vyjádření energie vzhledem k referenční hodnotě 1 MET. Hodnota 1 MET představuje výdej energie při nečinném sedu a pro dospělého člověka činí zhruba $3,5 \text{ ml} \cdot \text{O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Posledně lze mezi ukazatele pohybové aktivity zařadit vyjádření v procentech bazálního metabolismu % *BM*, tedy energie dostačující k pokrytí základních životních funkcí [17, 18]. V případě nenaplnění subjektivních limitů pohybových aktivit se hovoří o takzvané hypokinezi, která má stejně jako nadbytečná úroveň pohybové aktivity škodlivé účinky na organismus [15].

Z hlediska konvenčních přístupů ke sledování pohybové aktivity lze zmínit využití snímačů srdeční frekvence, akcelerometrů, pedometrů či různých dotazníků [16]. Přitom byly ověřeny následující metody monitoringu: [19, 20]

- přímá/nepřímá/odvozená
- s průběžným záznamem/se zpětným záznamem
- objektivní/subjektivní
- laboratorní/v kontrolovaných podmínkách/terénní
- fyzikální/fyziologická
- krátkodobá/dlouhodobá
- deskriptivní/komparační/korelační/kausální
- individuální/skupinová
- retrospektivní/prospektivní
- průřezová/následná/semi-longitudinální/longitudinální

Základní koncepty specifického monitoringu jsou přitom: [20, 21]

- pohyb těla, pohyb končetin
- energetický výdej
- energetický příjem
- svalová aktivace – elektromyografie
- lokace a distance
- srdeční frekvence
- fyzikální, fyziologické a chemické indikátory zatížení (teplota, tepelný tok na pokožce, průběh napětí na pokožce, průběh respirace)
- postoj a poloha končetin
- individuální a subjektivní informace o kontextu aktivity

Monitoring jednotlivých komponent pohybové aktivity lze uskutečnit jako: [14, 20]

- celková pohybová aktivita
- délka trvání, frekvence, intenzita pohybové aktivity
- délka spánku, délka bdělosti
- čas věnovaný sedavým typům činnosti a činnostem s nízkou, střední a vysokou intenzitou zátěže
- předpověď celkového energetického výdeje, aktivního energetického výdeje a energetického výdeje v rámci spánku
- klasifikace lokomočních aktivit (běh, jogging, chůze)
- chůze (vzdálenost, délka kroků, jejich počet a rychlost)
- pozice těla (ve stoje, v sedu, ležmo)

Výkon profese pilota představuje po pracovní stránce kontinuální aktivitu, jejíž průběh a intenzita se odvíjí od faktorů jako jsou typ létání, typ letadla, počet členů v posádce nebo provozní podmínky jako jsou počasí, charakter okolního terénu, směřování letu či výskyt závady. S uvažováním vysokého stupně používané automatizace v letectví lze tvrdit, že nadpoloviční většina letů představuje po stránce silové nenáročnou aktivitu s pouze mírně vyššími intenzitami pohybové aktivity v jistých částech letu a situacích. Spíše než na velké fyzické a funkční nároky na kosterní a svalovou soustavu pilotů, je kladen důraz na jemnou motoriku. Dále klade létání vysoké nároky na procesy vnímání, myšlení, procesy rozhodování a orientace ve složitých situacích.

Sigmund *et al.* řadí sedavá zaměstnání mezi pohybové inaktivity, tedy aktivity, jimž náleží energetický výdej menší než 2 kcal/min [16]. Dle Boucharda *et al.* se u takové aktivity podílí na energetickém výdeji ze 65 % klidový metabolismus (aktivita základních životních funkcí), z 25 % energetické nároky při pohybové aktivitě člověka a z 10 % tepelný účinek po potravě (trávení, transport, vstřebávání živin, rozdělování a ukládání energie v organismu). Naopak u pohybově aktivních jedinců může až 50 % celkového energetického výdeje připadat na vykonání pohybové aktivity [14]. Z toho vyplývá, že piloti musí dbát na dostatek pohybové aktivity mimo výkon svého povolání tak, aby byli průběžně schopni naplňovat zdravotní požadavky pro výkon jejich profese. Jisté anomálie kloubů, kostí, svalů a šlach, neuspokojivá funkční rezerva svalové a kosterní soustavy nebo významné následky nemocí by mohly pilota připravit dočasně či trvale o zdravotní způsobilost [22]. Mimo to má fyzicky aktivní a schopný člověk prokazatelně lepší predispozice k zvládnutí stresových situací. Závěry a doporučení mnohých odborníků liší, ale obecně lze konstatovat, že 30 až 60 minut chůze denně a párkrát do týdne středně až vysoce intenzivní pohybová aktivita jsou klíčem ke zdraví [23, 24].

Z hlediska projevů pohybové aktivity a pohybové inaktivity spojené s vykonáváním profese pilota je největší pozornost směřována na oblast páteře. Špatná technika sezení, jako například sezení s kulatými zády nebo v předklonu, neúměrně zatěžuje svalové a vazivové soustavy a oslabené svaly tak neposkytují dostatečnou oporu páteři a kloubům. Nepříznivé dopady dlouhodobého sezení se zpravidla projevují ve formě bolesti v dolní oblasti zad, bolestí hlavy nebo problémy s plotýnkami, u nichž se zvyšuje riziko jejich vyhrěznutí. Z dalších dopadů sedavé profese na organismus nelze opomenout zkrácení a přetěžování trapézových svalů, zdvihačů lopatek a prsního svalstva; dolní končetiny trpí zkrácením zadních stehenních svalů, oslabením hýžděových svalů a břicho oslabením břišních svalů. Z hlediska celkového zatížení organismu a kardiovaskulárního systému spolu s uvážením potřeby jemné motoriky a stability je však pracovní pozice v sedu pro výkon povolání pilota výhodná [25, 26].

Při výzkumech zaměřených na komplexní pohyby pilota je nutné zaměřit pozornost správným směrem. To umožňuje znalost scénáře jednotlivých fází letů, které jsou do velké míry standardizovány. V rámci fáze přípravy kokpitu letadla převládá fyzická aktivita horní poloviny těla, která se zpravidla minimálně věnuje primárním řídicím prvkům a většina pozornosti je směřována na obsluhu systémů, kontrolu parametrů nebo na komunikaci s řízením letového provozu. V průběhu pojiždění se pilotova pozornost přesouvá k manipulaci s ovládním přípustí plynů, samotnému směrovému řízení letadla, výhledu z kokpitu a navigaci například s využitím pojezdových map na EFB. Zaměření snímání v rámci pojiždění předurčuje typ letadla nebo letového simulátoru. Menší letadla se na zemi řídí zpravidla silovým působením na nožní pedály. U větších letadel převládá koncept řízení pomocí hydraulických pístů, jejichž vstup je ovládán na základě výchyly ručního ovládním v kokpitu. Konečně může pilot k pojiždění použít jak nožní řízení, tak i ruční řízení, a to v závislosti na charakteru zatáčky a fázi pojiždění či vzletu. Schéma pohybů při vzletu letadel je u letounů vždy takřka stejné. Jedna ruka je soustředěna na sloupku řízení či kniplu, druhá ruka na ovládním přípustí motorů, nohy působí na nožní řízení a hlava pilota kmitá ve vertikální a horizontální rovině tak, aby dokázal sledovat veškeré kritické parametry a vizuální vjemy uvnitř a vně kokpitu. Lze se domnívat, že míru pohybové aktivity spojené s výhledem z kokpitu a monitorováním letových parametrů předurčuje kvalita vizualizace letových dat, zpracování kokpitu, správné nastavení sedadla a řízení vzhledem k referenčnímu očnímu bodu designu kokpitu letadla DEP či samotné fyziologické parametry pilotů. Po vzletu pilot v závislosti na počtu členů v kokpitu manipuluje s pákou ovládním podvozku, ovládním klapek, radiotelefonní stanicí, ovládním osvětlení, nastavením výškoměru nebo s ovládním ukazatele referenčního kurzu a systému FMS (nebo jeho alternativou). To vše je při manuálním pilotování až sekundární zájem, protože pilot musí primárně řídit letoun. Jak se letoun vzdaluje od země a přechází do letu v horizontu, úkonů nutných k provádění letu zpravidla ubývá. V závislosti na použití

autopilota a typu letounu pilot pouze minimálně nebo vůbec nepůsobí na primární prvky řízení a věnuje se běžné obsluze řídicích, systémových a komunikačních prvků letadla. Analogicky přibývají úkony a pohyby při přiblížení na přistání, zvláště pak ve fází střední a konečného přiblížení. Zde musí pilot například manuálně pilotovat letadlo, upravovat přípusti motorů tak, aby efektivně přivedl letoun až k přiblížovací rychlosti, pracovat s nastavením výškoměru, komunikovat s řídicím, vysunovat konfiguraci klapek a podvozku a zároveň zůstat s letounem na předepsané trajektorii jak polohově, tak i časově a rychlostně. Opět platí, že ve fázi konečného přiblížení je jedna ruka pilota soustředěna na sloupku řízení či kniplu, druhá ruka na přípustích plynu a hlava a oči kmitají v horizontální a vertikální rovině tak, aby měl pilot dostatečný přehled o parametrech letu. Při přistání je většina pozornosti věnována venkovnímu prostředí a primární pohybovou aktivitu zpravidla vykonává ruka na sloupku řízení, ve výraznějších povětrnostních podmínkách nohy na nožním řízení a u specifických typů letounu může pilot využít plynové přípusti například k úpravě tahu motorů pro zajištění hladkého přistání. Pojízďení po přistání probíhá analogicky k pojízďení před letem. To stejné platí o procedurách po letu. Pro účely této práce lze závěrem kapitoly konstatovat, že nejvýraznější část pohybové aktivity v kokpitu vytváří horní polovina těla, tedy trup, horní končetiny a hlava.

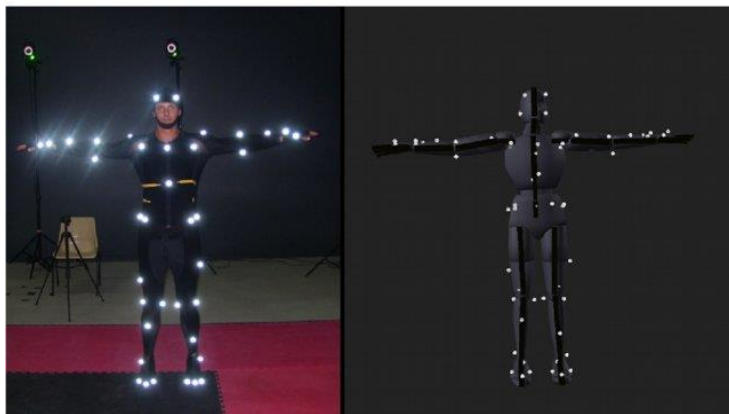
1.5 Pohybové snímací systémy – technologie MOCAP

Technologie MOCAP v posledních letech nacházejí široké využití, které je nezpochybnitelně jedním z důvodů prudkého vývoje v této oblasti. První prakticky použitelné a volně dostupné snímací systémy se hojně objevovaly již ve 20. století. Jednalo se převážně o optické snímací systémy sloužící pro práci s 2D a později 3D pohybovými modely. Spolu s nimi paralelně postupoval i vývoj jiných technologií, mezi něž lze zařadit technologie magnetometrické, akcelerometrické, gyroskopické, akustické a mechanické. Vývoj každé z těchto technologií je do značné míry ovlivněn její použitelností v uživatelském sektoru a finanční náročností komponent. Pro účely práce je zapotřebí vymezit teoretický koncept jednotlivých systémů, na základě něhož bude vybrán finální produkt pro měření.

1.5.1 Optické snímací systémy.

Optické snímací systémy jsou považovány za průkopníky v rámci technologií MOCAP. Jako takové bývají hojně využívány ve filmovém průmyslu, v odděleních zaměřených na vývoj počítačových her nebo v lékařství (ortopedie) [27, 28, 29]. Základem optických snímacích systémů jsou kamerová zařízení, která zaznamenávají pohyb objektů pokrytých vizuálními body zájmu. Celý obrazový záznam je vytvářen v prostředí s dostatečným kontrastem mezi vizuálními body zájmu a okolím [30]. Toho je docíleno například užitím jednobarevného pozadí v kombinaci s vysoce reflektivními body zájmu nebo použitím světelných diod coby bodů zájmu [29]. Umístění samotných bodů na snímaném objektu závisí na požadovaném výsledku

a budoucím použití nasnímaného materiálu. Pokud se jedná o případ snímání pohybů člověka, umísťují se tyto body typicky na úroveň kloubů, do středů a zakončení končetin, na trup těla nebo do úrovně hlavy. Posledně je zapotřebí zajistit požadovaný počet kamerových zařízení a zajistit jim vhodné snímací podmínky z hlediska úhlu jejich optických os a snímaného objektu [31] (viz Obrázek 2).



Obrázek 2: Rozmístění vizuálních bodů zájmu [32]

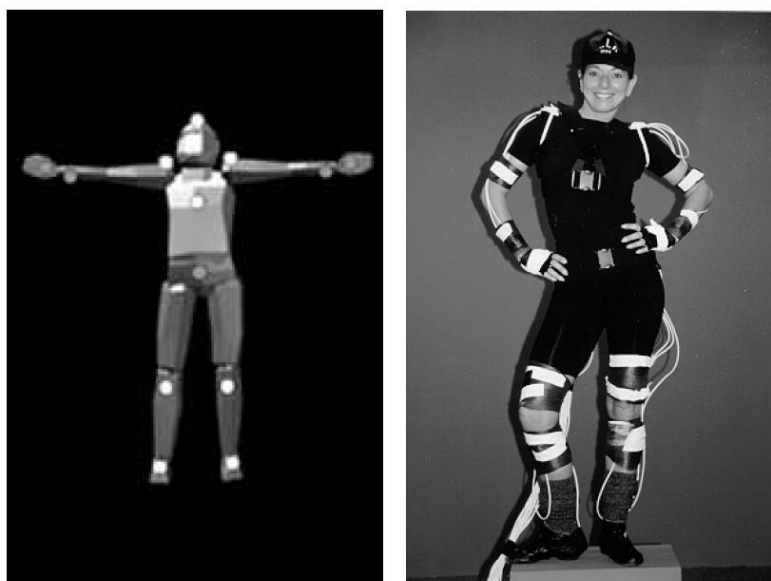
Výsledek měření je ovlivněn mimo jiné počtem vizuálních bodů zájmu, složitostí snímaných pohybů, počtem kamerových zařízení nebo jejich snímkovací frekvencí. Tyto skutečnosti pak předurčují možnosti a propracovanost výsledných 2D a 3D modelů. Mezi další limity technologie se řadí závislost výsledku snímání na okolním prostředí, jelikož složité a prostorově omezené prostředí nebývá pro užití optických systémů vhodné. Při zajištění vhodných podmínek měření lze však zařadit optické systémy mezi nejpřesnější MOCAP technologie.

K vyhodnocení a zpracování dat je zapotřebí specifických softwarových prostředků založených na příslušných algoritmech. Typicky bývá využíváno například triangulačních metod [29]. Nezřídka je však zapotřebí značná interakce obslužného personálu. Při snímání dochází k překrývání a vzájemnému stínění mezi body zájmu. V takovém případě může v softwarovém prostředí, využitím k práci s daty, dojít k záměně označení jednotlivých bodů zájmu, načež obsluha musí manuálně rozšířovat jejich správné rozdělení a rozmístění; tuto problematiku lze do jisté míry řešit využitím metody predikce [27]. Prudký vývoj v rámci počítačových technologií dnes navíc také umožňuje práci s nasnímanými objekty, jež nejsou pokryty fyzickými body zájmu, vlivem čehož se dá pracovat s obyčejným videozáznamem pohybujícího se subjektu [29]. Nespornou výhodou této technologie je dokonalé zachycení veškerých interakcí pohyblivých objektů a okolí. Výhody a přínosy této technologie však nezřídka převyšují její dosavadní limitace z hlediska kontextu předkládané práce.

Pro účely měření této práce se optické systémy jeví jako nevhodné. Z prostorového hlediska představuje kokpit letadla a letového simulátoru nerovnoměrně osvětlené a stísněné prostředí hustě pokryté prvky ovládání a s minimálními možnostmi umístění snímacích kamer. Pohyby pilota v kokpitu jsou složité a ne zcela zaznamatelné metodou optických snímacích systémů, pro jejichž přesnost je zásadní pokud možno nepřerušovaný vizuální kontakt s bodem zájmu („clear line of sight“) [28]. Tento nedostatek by se částečně dal eliminovat zaměřením snímání na jednotlivé části těla při opakovaném měření. Takový postup se dá uplatnit například při kinematické analýze a monitorování obličejových rysů, pohybů a mimiky v rámci hodnocení stresových a únavových stavů a psychického stavu člověka. Cílem měření je však získat ucelený soubor pohybových dat z mnoha letů tak, aby navržená metoda vytváření pohybového modelu pilota mohla být jednoduše použita v kokpitech reálných letadel. Z hlediska vytvoření dynamického pohybového modelu pilota dále limituje optickou technologii i její samotná konstrukce. Dokáže sice výborně zachytit emoční rozpoložení člověka, ale je nevhodná z hlediska zachycení rotace končetin nebo aktivního sledování jejich orientace [27, 33].

1.5.2 Magnetometrické snímací systémy

Magnetometrické snímací systémy představují druhou významnou skupinu v rámci technologií MOCAP. S jejich využitím lze dosáhnout uspokojivých výsledků v prostředích, ve kterých nelze použít systémy optické. Jejich funkčnost totiž není podmíněna přímou viditelností nebo prostorovou složitostí okolí. Vedle toho je magnetometrický systém schopen zachycovat orientaci snímaného objektu, což ve své práci ověřil a využíval například autorský kolektiv Bodenheimer *et al.* [34]. Pro svá měření využil komerční produkt MotionStar spolu se softwarovým prostředkem Softimage (viz Obrázek 3). V této kombinaci byli autoři schopni dosáhnout vzorkovací frekvence 144 Hz, a dokonale tak zachytit veškerou složitost a dynamičnost pohybů. Zvolené softwarové prostředí přitom umožnilo počáteční i průběžnou kalibraci senzorů; chybná data tak spolu s nepřesnostmi měření byly odhaleny na základě statistické analýzy a inverzní kinematiky [34]. Autorský kolektiv Molet *et al.* pak ve své práci došel k závěru, že magnetometrické systémy jsou vhodné k zachycení pohybů člověka a jednoduché modelaci pohybu končetin. Nejsou však schopny zachytit veškerou složitost pohybu člověka jako je pohyb šlach nebo jemná motorika, s čímž si například optické systémy zvládnou poradit [33].



Obrázek 3: Magnetometrický systém MotionStar [34]

U měření podmíněných velikou přesností tyto systémy nevyužívají zemské magnetické pole ale uměle vytvořené magnetické pole za pomoci magnetických cívek. To zajišťuje dostatečnou ochranu před potenciální a postupně rostoucí nepřesností měření. Ta bývá způsobena ujížděním ("driftem") nulové polohy magnetometrických senzorů. Z hlediska měření v kokpitu letového simulátoru je toto spolu s velkou citlivostí systému na přítomnost rušivých magnetických polí a elektromagnetického šumu velkou překážkou. Kokpit letového simulátoru a obecně letadel je totiž především kovového charakteru, vybavený množstvím elektrických zařízení a setrvačnicků. Vliv těchto prvků by byl v praxi i při následné práci s daty neměřitelný a nestanovitelný s požadovanou přesností. Proto je technologie magnetometrických systémů považována z hlediska měření v kokpitu za nevhodnou [29, 33].

1.5.3 Mechanické snímací systémy

Mezi mechanické snímací systémy se řadí produkty Gypsy™ společnosti MetaMotion nebo ShapeWrap™ společnosti Measurand (viz Obrázek 4). Tyto produkty představují sofistikovaná zařízení využívaná v lékařství a filmovém průmyslu. Technologie mechanických snímacích systémů lze do značné míry uzpůsobit na míru, přičemž se jedná o poměrně specificky zaměřené a finančně náročné odvětví. Systém se obecně skládá z exoskeletonu, jehož konstrukci tvoří kovové, kompozitové a plastové profily pevně propojené v kloubních spojeních. Pohyb exoskeletonu je zaznamenáván například senzory fungujícími na základě měření elektrického odporu. Charakteristiky tohoto systému předurčují jeho využívání v otevřených prostorech; ve filmovém průmyslu bývá tato technologie využívána k zachycení dynamických scén aktérů. Naměřená data pak často tvoří jen obecný rámec výsledného modelovaného pohybu, který vzniká s velkým přispěním počítačové technologie v rámci postprodukce. Výsledkem může být například dynamika animované postavy odlišující

se kompozicí od kompozice lidské, avšak fyziologicky následující přirozené pohyby [29]. Další formou využití je odvětví elektrogoniometrů využívaných v lékařství. Pomocí nich je měřen rozsah pohybu a změny úhlu kolem jedné, dvou nebo tří os v rámci pozorovaného kloubního spojení (viz Obrázek 4). Vzhledem k specifickému určení těchto systémů a prostorové náročnosti nejsou tyto systémy vhodné pro měření v kokpitu, zvláště kvůli rozměrům, prostorovým požadavkům a veliké fyzické zátěži, kterou vytváří pro měřený subjekt.



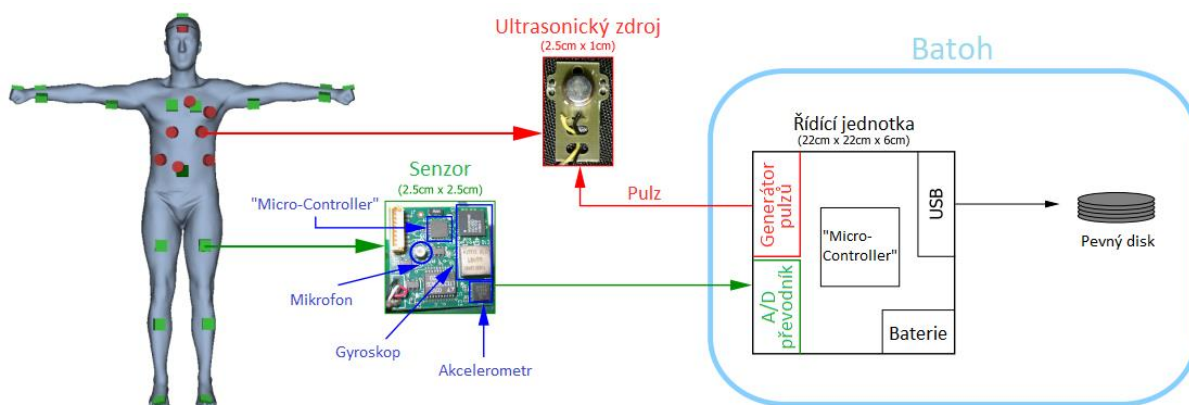
Obrázek 4: Mechanický snímací systém Gypsy™ MetaMotion (vlevo) spolu s elektrogoniometrem společnosti Biometrics Ltd (vpravo) [31, 35]

1.5.4 Akustické snímací systémy

Základní myšlenkou akustických snímacích systémů je měření zpoždění vyslaného akustického signálu od vysílače k přijímači. V prvních produktech 90. let minulého století byly akustické systémy využívány coby primární snímací systémy. Za zmínku stojí práce autorského kolektivu Ward *et al.*, který pracoval s metodikou spočívající v umístění vysílače ultrasonických pulzů na snímaném objektu a rozmístění přijímačů na předdefinovaných místech v prostoru. V posledních letech však převažuje způsob využití akustických snímačů v rámci hybridních systémů jako sekundárního prvku, který zlepšuje a stanovuje přesnost měření [29, 36].

Za hybridní využití lze považovat akusticko-inerční systém Constellation™ vyvinutý autorským kolektivem Foxlin *et al.* Vznikl za účelem korekce přirozené a postupné tendence inerčních systémů k ujíždění nulové polohy akcelerometrů („inertial drift“). Růstu této chyby lze zamezit právě užitím dat z akustických snímacích systémů. Využije se při tom přesného měření uplynulé doby mezi vysláním ultrasonického pulzu vysílačem a zachycením pulzu přijímačem. To s sebou samozřejmě nese potřebu rozlišení původního a odraženého signálu. Kromě toho, že je odražený signál zpožděný a slabší, se proto podle daného schématu periodicky mění vysílací frekvence a časový rozstup mezi jednotlivými ultrasonickými pulzy. V roce 2007

se autorský kolektiv Vlasic *et al.* zabýval myšlenkou opačného využití [29]. Byla vypracována studie ukazující na možnost kombinace akustických a inerčních systémů při snímání volného pohybu, přičemž primárním zdrojem dat o pohybu byly ultrasonické snímací systémy. Data z inerční části sloužila ke zvýšení přesnosti, navýšení snímkovací frekvence a zmírnění negativních dopadů výpadků akustických signálů v případě zakrytí přijímače a vysílače. Schéma jejich systému lze vidět na Obrázku 5.



Obrázek 5: Využití akustického snímacího systému [29]

Využitím kombinace akcelerometrů a akustických snímacích systémů se dá při znalosti proměnných parametrů okolního prostředí, jakými jsou teplota nebo hustota vzduchu, dosáhnout přesných výsledků měření.

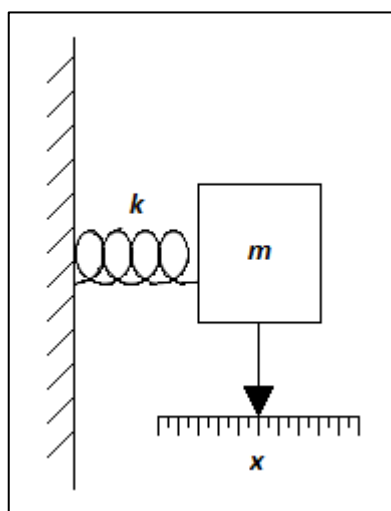
1.5.5 Gyro-akcelerometrické snímací systémy

Gyro-akcelerometrické snímací systémy patří mezi nejběžněji využívané technologie MOCAP, a to zvláště díky jejich kompaktnosti a cenové dostupnosti. Na rozdíl od optických, magnetometrických nebo mechanických systémů jsou totiž výrazně méně závislé na charakteru okolního prostředí a představují minimální zátěž pro měřený subjekt [37]. Navíc jsou gyro-akcelerometrické systémy poměrně odolné proti velkému množství zdrojů rušení a mnohdy jsou schopné nezávislého měření na jakémkoliv externím členu. Nevýhodou gyro-akcelerometrických systémů ve srovnání například s optickými systémy je neschopnost zachycení celé komplexnosti prostředí a jeho interakcí. Gyro-akcelerometrické systémy se soustředí pouze na pohyb těch objektů, které jsou předmětem měření, a jsou vybaveny příslušným snímačem.

Z hlediska ovládání a kalibrace pokrývají gyro-akcelerometrické systémy spektrum od produktů dodávaných s hotovým ovládacím a zobrazovacím prostředím v podobě mobilní aplikace či počítačového programu až po produkty, jejichž výstupy jsou zpracovávány v libovolných programovacích prostředích. Množství dostupných komerčních produktů pak umožňuje přizpůsobit výběr a konfiguraci technologie uskutečňovanému projektu.

Gyroskopické a akcelerometrické systémy dnes často tvoří jeden kompaktní celek a jejich vlastnosti a schopnosti se vzájemně doplňují. Výstupem gyroskopického čidla jsou data o úhlové rychlosti, zatímco výstupem akcelerometrického čidla jsou data o zrychlení. Mezi měřeními a výstupem musí být využita příslušná metoda konverze tak, aby fyzický projev posuvného a otáčivého pohybu mohl být vyjádřen v elektrické a číselné podobě. Kombinace výstupů z akcelerometru a gyroskopu, a případně z kompasu, jsou dostačující pro úplný popis a modelování pohybu subjektů. Proto jsou gyro-akcelerometrické systémy pro účely této práce považovány za jednu nedělitelnou skupinu a v následujících odstavcích budou v krátkosti přestaveny jejich principy fungování, konstrukce a způsoby využití.

Základem konstrukce akcelerometru je akční člen. Ten na ose citlivosti akcelerometru reaguje na příslušné zrychlení. Další člen konstrukce pak měří hodnotu zrychlení s předem známou minimální přesností a v daném pracovním rozsahu. Jednoduchou konstrukci akcelerometru by mohlo představovat těleso o hmotnosti m , pohybující se na ose citlivosti x , zavěšené na pružině s tuhostí k (viz Obrázek 6).



Obrázek 6: Znárodnění konstrukce jednoduchého akcelerometru

Pro zrychlení a platí: [38]

$$a = \frac{k}{m} * \Delta x \quad (1)$$

kde k značí tuhost pružiny, m hmotnost tělesa, Δx změnu polohy tělesa na ose citlivosti x a a představuje zrychlení.

Taková konstrukce je ovšem nedokonalá. V případě moderních akcelerometrů je zapotřebí měřit nejen zrychlení odpovídající pohybu akcelerometru, ale i složku gravitačního zrychlení [39]. Takový akcelerometr v klidovém stavu nebo při rovnoměrném přímočarém

pohybu indikuje hodnotu gravitačního zrychlení, jež závisí na inklinaci osy citlivosti akcelerometru vzhledem ke gravitačnímu poli Země [39]. Základní výpočet změny polohy, tedy dráhy, přitom využívá princip Newtonova druhého pohybového zákona, aneb: [38]

$$\vec{F} = m * \vec{a} \quad (2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

kde F značí sílu působící na těleso o hmotnosti m pohybujícího se se zrychlením a .

Dvojitou časovou integrací zrychlení lze získat změnu polohy, tedy dráhu. Jelikož jeden akcelerometr je schopen měřit zrychlení jen v jednom směru, typicky se používá kombinace nejméně tří akcelerometrů s navzájem kolmými osami citlivosti [40]. V takové konfiguraci je celé ústrojí schopno vyhodnocovat změnu polohy a orientace. Svoji orientaci v klidovém stavu jsou akcelerometry schopny určovat pomocí měření gravitačního zrychlení [41]. Je-li známa počáteční poloha a případně i orientace, pak lze popsat celý průběh pohybu objektu z hlediska statického, dynamického, intenzity i frekvence pohybu [42].

Pokud se jedná o kompaktní produkty schopné měření akcelerace s vysokou přesností, dominuje technologie mikro-elektro-mechanických systémů MEMS. Produktem této technologie jsou snímací struktury založené na elektrických a elektro-mechanických systémech křemíkové báze. MEMS pokrývají mimo jiné oblast měření teploty, tlaku, zrychlení, rychlosti, magnetického pole či radiace. MEMS akcelerometry, založené na proměnné kapacitě kondenzátoru, jsou schopny vysoce přesného měření na malém rozsahu při velice nízké energetické náročnosti. Cenově dostupnější a robustnější MEMS akcelerometry, založené na piezorezistivním principu činnosti, jsou vhodné pro měření akcelerace s velkým rozpětím, nicméně malou přesností [43]. MEMS akcelerometry, založené na piezoelektrickém jevu, jsou vhodné pro měření nerovnoměrného zrychlení s velkým dynamickým rozsahem [44].

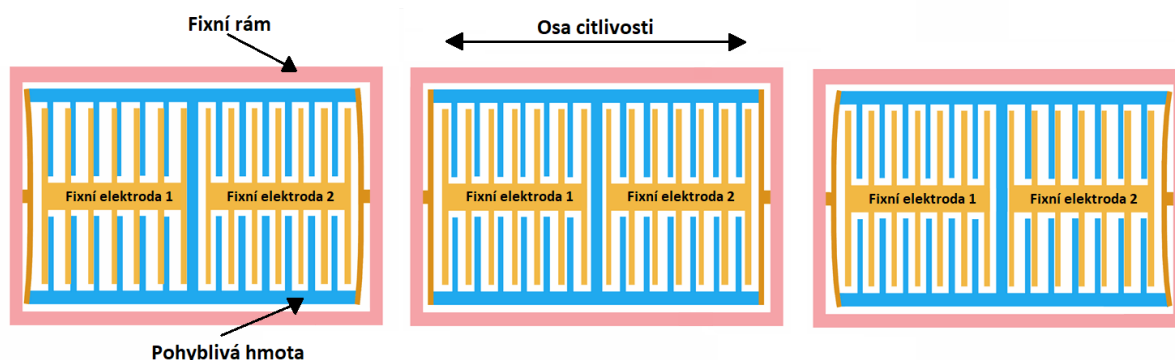
První zmiňovaná skupina akcelerometrů funguje na principu stanovení změny množství náboje mezi deskami kondenzátoru. Platí, že: [38]

$$C = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \frac{S}{d} \quad (4)$$

kde ε_0 značí permitivitu vakua, ε_r relativní permitivitu, S plochu desek kondenzátoru, d představuje vzájemnou vzdálenost desek.

Hmota, na niž zrychlení působí, je zavěšena na rámu. V klidovém stavu je zpravidla prostor mezi první elektrodou a hmotou ve srovnání s prostorem mezi druhou elektrodou a hmotou

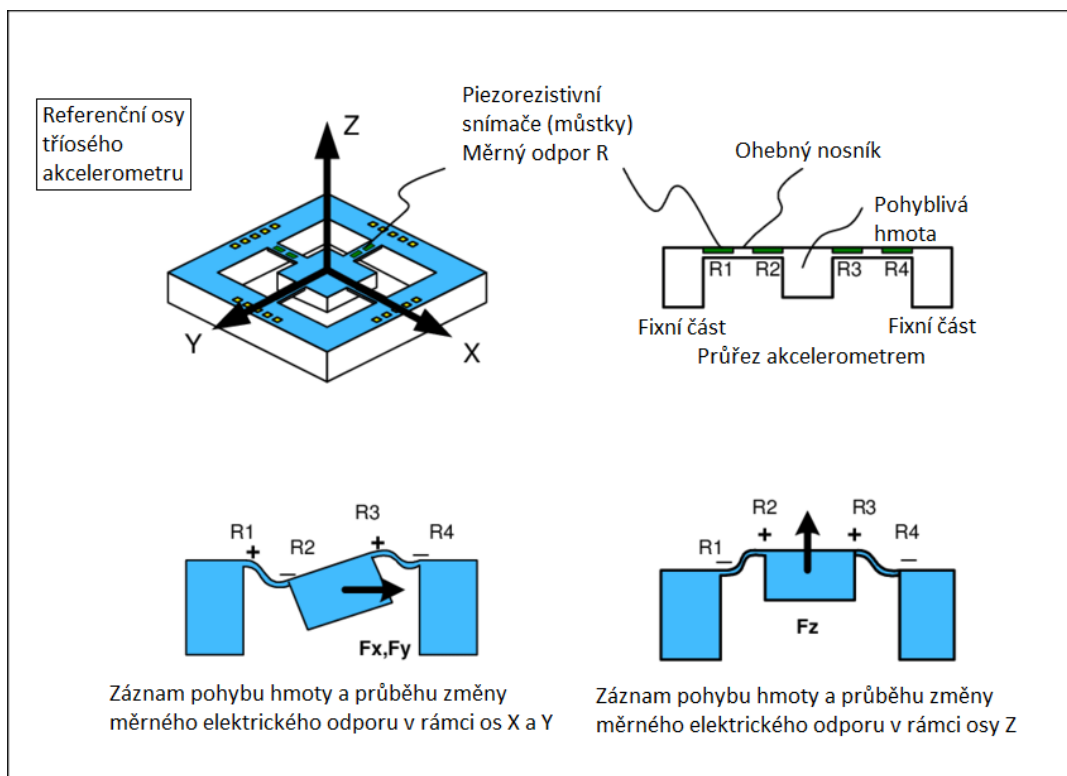
stejný (viz Obrázek 7). Při působení zrychlení se vzdálenosti mezi elektrodami a hmotou mění úměrně s velikostí zrychlení působícím na hmotu. Vnitřek ústrojí akcelerometru je vyplněn plynem tak, aby bylo zajištěno tlumení a co možná nejmenší ovlivnění měření změnou teploty okolního prostředí. Celá konstrukce, její pružnost, citlivost a odolnost jsou přizpůsobeny zamýšlenému maximálnímu měřenému zrychlení a požadované přesnosti [43]. Zde se opět uplatňuje Newtonův druhý pohybový zákon, kdy je síla F vzniklá působením zrychlení a na hmotu m převáděna přes závěsy (pružiny) na posuv pohyblivé hmoty. Změna kapacity pak může být převedena na změnu napětí a výstupem je standardní lineární napěťový výstup. Konečně lze realizovat i kompenzaci vlivu teploty.



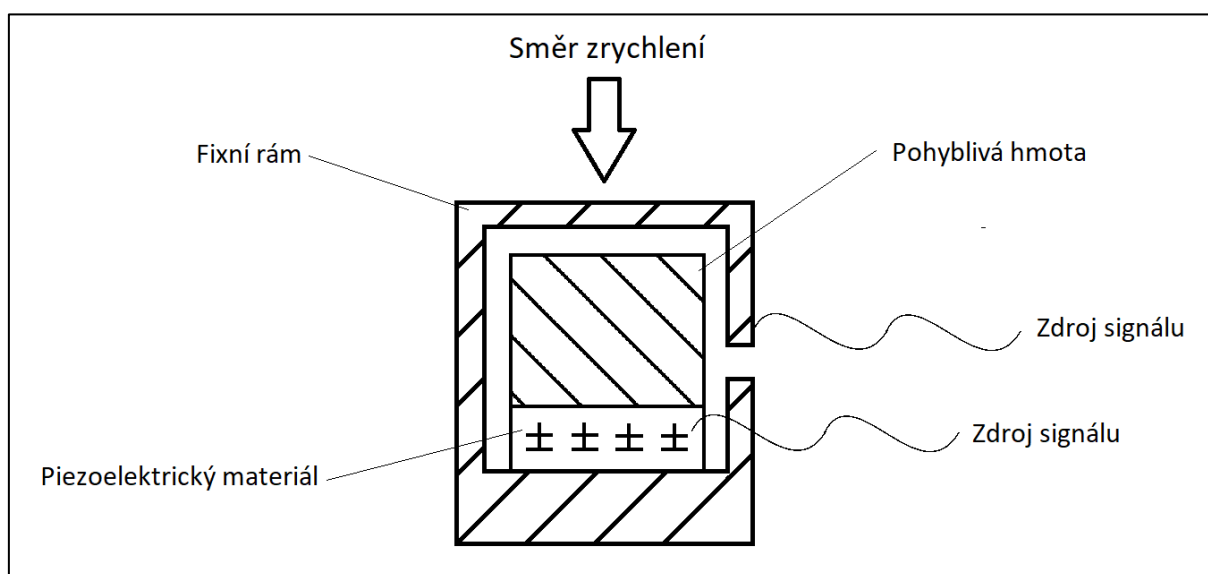
Obrázek 7: Znázornění působení zrychlení na jednoduchý kapacitní akcelerometr [45]

Snímací prvek piezorezistivního akcelerometru tvoří ohybová struktura z polovodičového, výjimečně i odporového, materiálu (viz Obrázek 8). Příkladem může být mikro–křemíková mechanická struktura, jež podléhá daleko výrazněji piezorezistivnímu efektu než běžné odporové materiály. Působení akcelerace způsobuje fyzické změny na ohybech (prohyby, ohyby), jež mají za následek měřitelnou změnu elektrického odporu. Změna odporu je úměrná velikosti působícího zrychlení. Stavba a robustnost ohybové struktury odpovídá zamýšlenému rozsahu a požadované přesnosti výstupních údajů o zrychlení.

Piezoelektrické akcelerometry využívají piezoelektrického jevu. Ten popisuje schopnost piezoelektrického krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci, jež je úměrné namáhání vzniklému působící akcelerací. Mezi běžně využívané piezoelektrické materiály patří monokrystalický křemen (SiO_2), pevný roztok PZT [PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT)], Polyvinylidenfluorid (PVDF) či oxid zinečnatý (ZnO). Schéma jednoduchého piezoelektrického akcelerometru lze vidět na Obrázku 9.



Obrázek 8: Schéma jednoduchého piezorezistivního akcelerometru [46]



Obrázek 9: Schéma jednoduchého piezoelektrického akcelerometru

Z příkladů širokého využití akcelerometrických snímacích systémů lze uvést lékařství, kde jsou tyto systémy využívány k monitorování a hodnocení pohybu u starších nebo obézních lidí. Dále lze zmínit využití v herním průmyslu, přičemž právě herní průmysl se zapříčinil o prudký vývoj této technologie [47]. Z leteckého odvětví lze uvést zástavbu akcelerometrů v inerciálních navigačních systémech letadla INS a IRS.

MEMS senzory jsou ve většině konfigurací schopné přesného měření výsledného zrychlení a následného určení změny polohy a orientace. K tomu je však zapotřebí rozlišit gravitační složku zrychlení od inerciální a vyfiltrovat například vlivy vibrací a následky sil vzniklých rotacemi [48]. I přes dokonalost technického zpracování a použitých metod výpočtů je výsledek vždy zatížen chybou, mimo jiné vzniklou jako následek změny orientace os citlivosti. Proto je zpravidla zapotřebí sekundární korekční systém, jakým jsou například gyroskopy.

Základem konstrukce konvenčních gyroskopických přístrojů je těleso rotující kolem pevného bodu v prostoru, tedy setrvačnick [49]. Teoreticky platí, že pokud na setrvačnick nepůsobí žádné vnější síly, zachovává setrvačnick polohu své osy otáčení vůči prostoru konstantní. Taková soustava je označována za inerciální. V neideálním případě však platí, že existuje okamžitá osa otáčení, která se v čase mění. Této vlastnosti se odborně přezdívá „drift“ a představuje největší limitaci setrvačnicků.

K popisu rotujícího tělesa slouží veličina moment setrvačnosti. Ta je typicky stanovená vzhledem k zvolené souřadnicové soustavě, například x,y,z . Pro moment setrvačnosti pak platí: [50]

$$J = m * r^2 \quad (5)$$

kde m je hmotnost hmotného bodu a r je poloměr jeho otáčení.

Pro moment setrvačnosti množiny hmotných bodů platí: [50]

$$J = \sum_i m_i r_i^2 \quad (6)$$

kde i značí jednotlivé hmotné body.

Ve větších zařízeních se pro měření úhlových rychlostí využívají derivační a integrační setrvačnick. Mezi ně lze zařadit plovákové setrvačnick nebo setrvačnick optické (laserové rezonanční a s vláknovou optikou). Optické setrvačnick využívají Sagnacova jevu, a tedy měření průběhu změny frekvence světelného paprsku. Konvenční setrvačnick však postupně vytlačuje moderní technologie. Nejenom v menších zařízeních opět začíná dominovat technologie MEMS.

MEMS gyroskopy, jinak známé jako snímače úhlové rychlosti, jsou založeny na měření Coriolisovy síly. Základními prvky konstrukce bývá vibrační těleso, využívající piezoelektrické, elektromagnetické nebo elektrostatické energie, a snímač následků působení Coriolisovy síly.

Jednu z možných konfigurací snímače úhlové rychlosti, která je pro svoji schopnost snímání tří os najednou převratná, tvoří v základu jedno vibrující těleso. To přenáší vibrační pohyb do desek $M1$ až $M4$ (viz Obrázek 10). V průběhu měření se desky $M1$ až $M4$ pohybují v horizontální rovině dopředu a dozadu s danou frekvencí. Červené a žluté šipky na Obrázku 10 naznačují následek působení Coriolisovy síly při rotaci celého ústrojí. Vibrující desky se při působení rotačního pohybu na celek snaží zachovat původní směr kmitání v prostoru. To má za následek vychýlení příslušných desek vzhledem k okolnímu rámu. Pro zrychlení působící na desky jako následek Coriolisova efektu platí: [50]

$$a = 2 * (\Omega * v) \quad (7)$$

kde v je rychlost vibrující hmoty, Ω představuje úhlovou rychlost rotace.

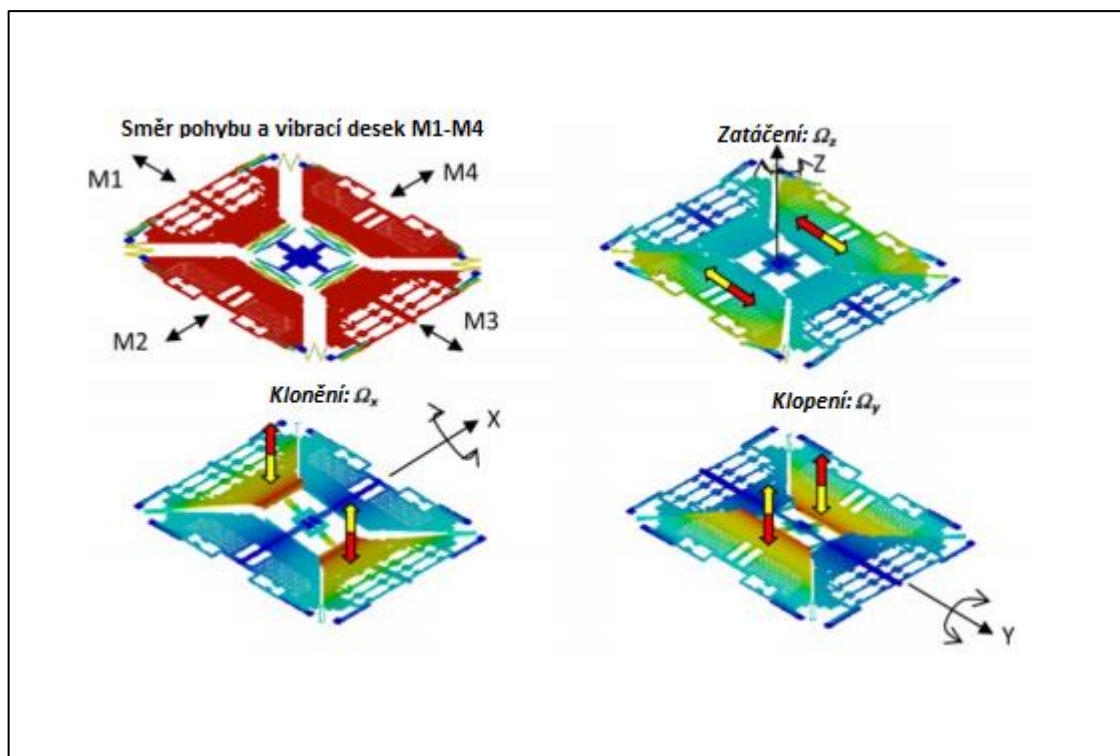
Pro Coriolisovu sílu F_c platí: [50]

$$F_c = 2 * m * (\Omega * v) \quad (8)$$

kde m je hmotnost vibrujícího tělesa.

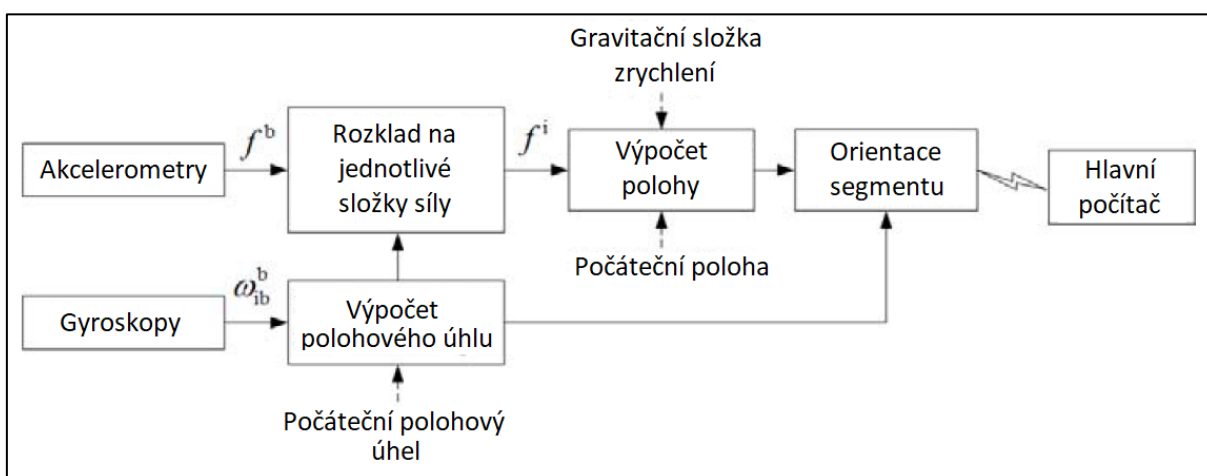
Pohyb desek může být sledován například monitorováním změny kapacity mezi fixními a pohyblivými elektrodami, na základě piezorezistivního jevu či piezoelektrického jevu. Změna měřené veličiny je pak úměrná změně úhlové rychlosti. Jak je vidno z Obrázku 10, protilehlé desky M vykonávají při rotačním pohybu ústrojí vždy protichůdný pohyb. Tato konfigurace tak zajišťuje, že ústrojí nereaguje na lineární zrychlení. To totiž na základě konstrukce ústrojí nevyvolá změnu kapacity na snímačích, protože protilehlé desky se budou pohybovat souběžně. Tato konfigurace je tedy v rámci naměřených veličin odolná proti zrychlením v rámci nárazů a vibrací.

Hodnoty úhlových rychlostí lze integrací převést do podoby úhlových složek. Jedná se o kontinuální operaci, která se snaží s jistou obnovovací frekvencí reagovat na jakékoliv změny úhlové rychlosti. Zpravidla následuje odfiltrování signálu („First order high pass filter“) a rozšíření například za pomoci Taylorovy řady. Výsledkem je informace o průběhu měřeného pohybu ve formě kvaternionů [52]. Gyroskopické přístroje se těší širokému využití v oblasti biomedicíny a ortopedie [39, 53]. V letectví lze gyroskopy využít jako letové a navigační přístroje či jejich součásti (AHRS).



Obrázek 10: Schéma konstrukce tříosého MEMS gyroskopu [51]

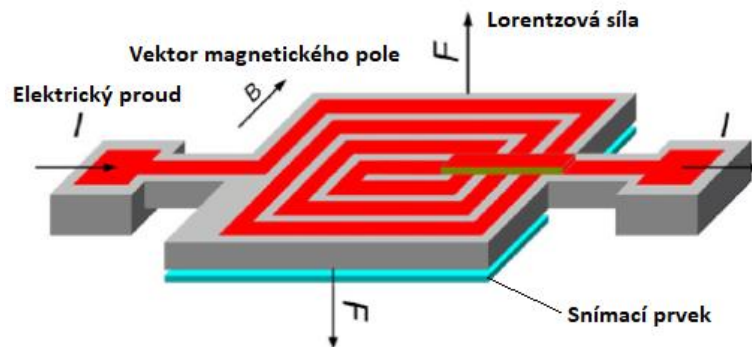
Gyroskopy, na rozdíl od akcelerometrů, nebyvají negativně ovlivněny složkou gravitačního zrychlení. Využití samotných gyroskopických přístrojů je však zatíženo postupně narůstající chybou „driftu“ orientace po integraci. Proto je zapotřebí korigovat gyroskopické systémy a jejich výstupy za pomoci matematických úvah a přidružených systémů. Spojením gyroskopických a akcelerometrických snímacích systémů lze dosáhnout přesných výsledků měření, jelikož dojde k vzájemné kompenzaci chyb měření a nedostatků. Data o zrychlení a úhlové rychlosti lze kombinovat například s užitím Kalmanova filtru. Schématické řešení gyro-akcelerometrického systému lze vidět na Obrázku 11.



Obrázek 11: Krabicové schéma gyro-akcelerometrického snímacího systému [30]

Gyro-akcelerometrický celek je schopen zaznamenat jak posuv, tak i rotaci s využitím běžného gravitačního a magnetického pole Země [37]. Fúzí akcelerometrů a gyroskopů se zabýval jako jeden z prvních například autorský kolektiv Sakaguchi *et al.* [54]. Motivací pro jejich práci byly limitace tehdejších optických a magnetických snímacích systémů, mezi něž patřily optická okluze a náročné prostorové požadavky magnetických systémů. Výsledkem jejich práce byla technologie fúze senzorů, která prohloubila základy a možnosti jejich využití, při čemž vzájemně kompenzovala jejich nedostatky.

Gyro-akcelerometrický celek může být navíc doplněn například akustickým snímacím systémem, který je schopen kompenzovat přirozený „drift“ přidáním informace o vzdálenosti čidel, nebo kompasem, poskytujícím doplňující informace o pohybu kolem os [47, 29, 55]. Kompas neboli magnetometr je snímač intenzity magnetického pole, který představuje základní součást například gyro-akcelerometrického systému ProMove MINI od společnosti Inertia Technology B.V. [55]. Magnetometry MEMS mohou pracovat s využitím mnoha fyzikálních jevů. Jeden z nejpoužívanějších přístupů je založen na využití existence Lorentzovy síly, tedy síly, která působí na náboj v elektromagnetickém poli. Autorský kolektiv Kynnäräinen *et al.* sestrojil v roce 2007 3D mikromechanický kompas využívající Lorentzovy síly v reakci na fakt, že dostupnou a rozšířenou technologii magnetometrů využívající Hallův jev limitovala její malá citlivost spolu s velkým „off-setem“ a „driftem“ a jinak velice citlivou (přesnou) technologii využívající magneto-rezistivní jev limitoval její velký „off-set“ a závislost výsledku měření na průběhu teploty okolí [56]. Výsledný produkt kolektivu Kynnäräinen *et al.* se skládal z cívky umístěné ve vakuu, která rezonovala s danou frekvencí a zároveň vedla elektrický proud (viz Obrázek 12). Amplituda a frekvence zaznamenávaných rezonancí se v závislosti na orientaci cívky vzhledem k magnetickému poli měnily jako důsledek přítomnosti Lorentzovy síly, přičemž změny průběhu byly zaznamenávány elektrodami s použitím kapacitní metody [56]. Takto navržený magnetometr nebyl zatížen hysterezní chybou a nepředstavoval tak limitace pro další MEMS senzory například v kompaktním uspořádání gyro-akcelerometrického celku. Mezi další ukazatele změn rezonanční frekvence by mohla být zařazena metoda optického výstupu nebo metoda snímání výstupního napětí [57]. Limitací kompasů je citlivost na přítomnost rušivých polí vytvářených například feromagnetickými materiály a elektrickými zařízeními [52].



Obrázek 12: Jednoduchá konstrukce MEMS magnetometru [56]

Z dnešního využití kombinací gyro-akcelerometrických snímacích systémů lze uvést užití v medicíně, a to zvláště v odvětvích ortopedie a fyzické terapie. Tato technologie umožňuje lékařům hodnotit pacientovu kondici pomocí srovnání pohybových dat před a po rehabilitaci nebo zákroku, či sledování únavy svalů při dlouhodobé zátěži [20]. Obecně to lze považovat za značný posun v rámci interakce mezi člověkem a počítačovou technikou HCI [58].

1.6 Využití pohybových snímacích systémů v dopravě

V rámci mnohaletého vývoje a pokroku byly pohybové snímací systémy využity i v mnoha oblastech dopravy a letectví [59, 60, 61, 62]. Pohybové modely bývají nejčastěji využívány v rámci ergonomie, ale pronikají též do vývoje vojenských technologií, systémů řízení bezpečnosti SMS a oborů biomechaniky. Výstupem jsou základní soubory dat, které jsou nezbytné pro vytváření počítačových modelů a simulací například v rámci počítačem podporovaného projektování CAD [63, 64]. Právě tyto počítačové modely do jisté míry dokážou nahradit reálná měření a pozorování při vytváření návrhů, designu a postupů. Posuzování lidského faktoru s využitím reálných dat z provozu však nebude nikdy zcela nahraditelné.

Existuje množství teoretických konceptů designu kokpitu a představ o podobě ideálního pracovního prostředí. Autorský kolektiv Bonney *et al.* považoval za zásadní rozložit prvky na základě počítačem vyhodnocené relativní důležitosti prvku pro vykonání letu [65], autorský kolektiv Palmiter *et al.* představil kvantitativní analýzu ergonomické kvality rozložení ovládacích prvků [66], autorský kolektiv Palmer *et al.* dokázal v rámci návrhu designu matematicky stanovit limit kapacity pilota, jehož považoval za střed dění v kokpitu [67], a autorský kolektiv Wang *et al.* navrhl systematickou multi-kritériovou metodu uplatnitelnou při návrhu rozložení ovládacích prvků v kokpitu [68]. Závěry těchto a dalších prací, které se dnes přímo či nepřímo aplikují v rámci návrhu designu kokpitů, se do značné míry odráží pouze od teoretických základů a subjektivních referencí posádek. Existují však situace, pro jejichž pochopení a popis idealizované případy a subjektivní hodnocení ze strany posádek nestačí.

Jediným zdrojem přesných a objektivních dat jsou pak měření a pozorování z reálného provozu. Sběr letových dat, jakými jsou rychlost, výška, směr letu a poloha přepínačů, je dnes ostatně součástí běžného komerčního provozu letadel. Sběr pohybových dat posádek v reálném provozu je organizačně složitý, finančně nákladný a pro provozovatele letadel, který je pouhým koncovým uživatelem, nemá žádný přímý statistický a bezpečnostní význam. Otázky bezpečnostních rizik návrhu kokpitu, logiky a proveditelnosti postupů či různých ergonomických parametrů kokpitu jsou zpravidla považovány za odpovědnost výrobců těchto strojů.

Každý pilot se chová jinak, má jiné zkušenosti a na základě mnoha faktorů zaujímá k úkonům a postupům jistý postoj více či méně respektující a reflektující předepsané postupy a myšlenky designu kokpitu. Stejně tak platí, že si piloti, jakožto přirozenou lidskou vlastnost, vytvářejí na daném typu letadla/simulátoru své osobní návyky, ve kterých se přímo či nepřímo odráží vhodnost a propracovanost designu a rozpoložení prvků kokpitu [30]. V rámci toho se projevuje faktor různorodých letových podmínek, typu provozu, úrovně znalostí, efektivity spolupráce v kokpitu nebo faktor lišící se náročnosti jednotlivých fází letu. Konečně nelze opomenout faktor rozmanitosti požadavků zákazníků výrobce letecké techniky či odborné veřejnosti. Je tedy vhodné zabývat se reálnými případy chování v kokpitu tak, aby byl udržen krok s nepřetržitým vývojem na poli vědy a techniky, který se odráží i v podobě výbavy kokpitů.

Autorský kolektiv Xia Zhang *et al.* ověřil obsáhlou metodu hodnocení výkonu pilotů z kvantitativního i kvalitativního hlediska v rámci hodnocení kvality zpracování řízení a kokpitu [10]. K tomu autoři využili subjektivní pocity pilotů, průběhy akcelerací jejich pohybů, metodu výpočtu indexů a shlukovou metodu. Stroze představili historické přístupy k této problematice. V počátcích využívání pohybových dat si autoři vystačili s kvantitativním hodnocením indexů jako jsou stabilita a manévrovatelnost. Ty jsou však zatíženy rozličnými přístupy a výkonnostmi pilotů. Proto byla tato metoda rozšířena o subjektivní hodnocení pilotů; daleko větší pozornost se tak přikládá pilotovi než na letadlu samému. Zde je navíc podle autorů zapotřebí uvážit složitost celého subjektivního hodnocení ze strany člověka. Kromě faktu, že hodnocení je výrazně zatíženo psychologickým a fyziologickým stavem člověka, je pro člověka velice těžké hodnotit pozitivní a kladné faktory v kokpitu. Člověk totiž umí přirozeně hodnotit stupeň nepohodlí přímo i kvantitativně, ale už ne stupeň pohodlí. Pro výkonnost člověka je vhodná střední pracovní zátěž; příliš mnoho nebo příliš málo pracovního zatížení snižuje jeho výkonnost. Závěr práce autorského kolektivu Xia Zhang *et al.* ukázal, že se subjektivní pocity a recenze pilotů shodovaly s metodou využitou k objektivnímu hodnocení pohybových dat pilotů. Význam jejich práce vyzdvihují například i studie Ministerstva obrany Spojených států amerických orientované na lidský faktor a práce autorského kolektivu Wagner *et al.* [69, 70]. Ty vyzdvihují důležitost ověřování teoretických konceptů a zásad designu v reálném provozu

a ostatně i Xia Zhang *et al.* zdůrazňují, že sebelepší model nedokáže v dostatečné míře uvažovat s faktorem situačního uvědomění posádky.

Výstupy z gyro-akcelerometrických pohybových snímacích systémů tvoří základ prací zaměřených na implementaci dotykových obrazovek v kokpitech, zlepšování designu kokpitu nebo hodnocení kvality zpracování kokpitu a postupů. Yanjun Zhang *et al.* ověřili možnost užití letového simulátoru, coby prostředku pro simulaci různorodých letových fází a situací [30]. V kombinaci s použitím gyro-akcelerometrických systémů byla zaznamenávána pohybová schémata pilotů, která byla vztažena k danému ovládacímu prvku, fázi letu, typu letadla, letovým podmínkám a provozním postupům. V rámci letu piloti demonstrovali normální, abnormální a nouzové postupy. Autoři uvedli vyčerpávající množství situací, které se mohou v rámci jednotlivých fází vyskytnout, přiřadili jim provozní status a určili, jaké prvky ovládání je příhodné v rámci řešení situace využít a monitorovat (viz Obrázek 13). Na základě uvedeného přístupu ke sběru dat a s dodržением předepsaných schémat byl celý autorský kolektiv schopen nasbírat za pomoci technologie gyro-akcelerometrických systémů množství dat, které poté posloužilo jako podklad pro design kokpitů letadel.

Typ letounu	Fáze letu	Letové podmínky	Provozní postupy	Prvky ovládání
A320	Pojíždění	Rovná TWY	Normální	Nožní řízení
		TWY s ostrou zatáčkou	Abnormální	Ruční řízení "tiller"
		Výpadek jednoho motoru	Nouzové	Plynové přípusti
				Směrovka
		Brždění		

Obrázek 13: Popis průběhu pojíždění z hlediska letových podmínek, postupů a použitých prvků kokpitu [30]

Z dalšího využití pohybových snímacích systémů v dopravě lze uvést práci autorského kolektivu Barbé *et al.*, jež se zaměřil na potřeby fyzické ergonomie ve spojení s implementací dotykových obrazovek v kokpitech letadel (viz Obrázek 14) [71]. Dotyková technologie se dnes aktivně využívá na palubách letadel, ať už v podobě externího zařízení nebo přímo jako integrální část kokpitu. Mezi představitele letadel využívajících dotykové technologie patří dálkové letouny výrobce Airbus, vojenské letouny Rafale nebo zástupci odvětví soukromých letounů Falcon. Nutno dodat, že dotykové obrazovky byly často zasazeny do existujících a obecně známých zásad konstrukcí kokpitu. Nabízí se tedy otázka, zda není na místě uvést na trh nové a dosud nevídané koncepty kokpitu. Koncepty dnešních kokpitů zpravidla vycházejí z letitých zkušeností konstruktérů a možnosti implementace dotykových technologií v nich ještě nemohou být zcela naplněny. Při implementaci těchto technologií musí být dbáno na dostupnost mezi ostatními prvky kokpitu a zároveň jim příslušnou pracovní polohu uživatele, tj. pilota. Špatné umístění obrazovek může vést až ke svalové únavě,

muskuloskeletálním poruchám a neshodám na rozhraní LIVEWARE – HARDWARE. Při tom je důležité zaměřit se jak na subjektivní hodnocení ze strany pilotů, tak i na uchopitelný důkaz v podobě pohybových dat. Autoři se zaměřují na rozsahy a přesnost gest, délku a složitost úkolu či charakter pracovního prostředí (rozvržení potřebných prvků v kokpitu, povaha provozu, dopady vibrací). Antropometrické a biomechanické faktory spojené s člověkem uvažují do budoucna s postupnou proměnou průměrných lidských proporcí v čase. I s uvážením tohoto faktoru musí být výsledný produkt ve velkém množství případů schopen uspokojit světovou poptávku, která zahrnuje široké spektrum uživatelů. Barbé *et al.* přitom zmiňují markantní rozdíly mezi 95. percentilem lidské populace (Severní Amerika, muž) a 5. percentilem populace (Asie, Japonsko, žena) [71]. Bez uvážení specifik vojenského odvětví, které si může dovolit zúžení průměrného spektra uživatelů, lze tvrdit, že komerční výrobci tak musí vyhovět mnoha faktorům spojených s lidským pohybem, a to nejen anatomickému ale třeba i sociologickému faktoru. Indikátorem vhodnosti rozpoložení prvků v kokpitu jsou například průběhy náklonů a kroucení těla, průběhy sklonů hrudi a pozice horních končetin vzhledem k ramennímu kloubu. Samozřejmostí a podmínkou je dnes i dostupnost a vhodnost podpěrek dolních končetin, horních končetin nebo hlavy. Sedadlo musí svými parametry zajišťovat polohu ve vzpřímeném sedu a řídit se mnohými doporučeními a normami [72].

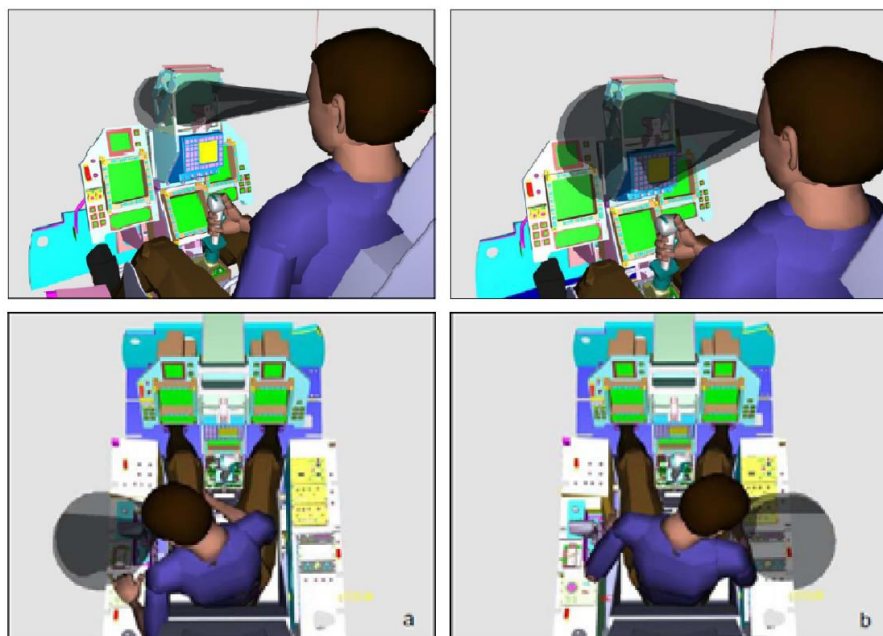


Obrázek 14: Modelová obálka dosažitelnosti prvků v kokpitu spolu s vizuálními možnostmi pilota [71]

Výsledek práce autorského kolektivu Barbé *et al.* tvoří sbírku kritérií, které je nutné uvážit při návrhu kokpitů s využitím dotykových obrazovek. Mimo jiné definuje vhodnost orientace displejů a jejich dostupnost tak, aby byly uspokojeny požadavky posádky vícepilotních letadel.

Z prací zaměřených čistě na modelování pohybu lze představit práci autorského kolektivu Sun *et al.* [73]. Autoři ověřili potenciál modelování lidského pohybu při návrhu designu kokpitů vícepilotních letadel. Nalezli a hodnotili tak kritická místa v kokpitu a procedurách, při nichž

by mohlo docházet k nežádoucím interakcím mezi členy kokpitu, ať už přímo fyzickým nebo vizuálním jako například zakrytí výhledu jednoho člena posádky částmi těla druhého člena posádky. Proces modelování na základě archivovaných pohybových dat není v letectví ničím neobvyklým. Laboratoře americké armády ARL-HRED disponují dokonalou knihovnou dat o vojenském vybavení a personálu, která slouží při návrzích spojených s lidským faktorem. Data mimo jiné posloužila při návrzích vrtulníků Boeing CH-47 Chinook, Sikorsky UH-60 Black Hawk a Boeing/Sikorsky RAH-66 Comanche. ARL-HRED zde využila knihovnu dat při implementaci nových technologií, vývoji nových verzí vrtulníků a hodnocení efektivity komponent v provozu v návaznosti na rozdílnost pohlaví vojáků a jejich antropometrických parametrů jako jsou výška a délky končetin [74]. Autorský kolektiv Karmakar *et al.* byl pak ve své práci schopen znázornění, vyjádření a hodnocení vztahu pilotova zorného pole a vizuálních možností vzhledem k povaze kokpitu (viz Obrázek 15) [75]. To je ostatně základ ergonomie jakéhokoliv pracovního prostředí. Správné pochopení vizuálních kapacit pilota vzhledem k charakteru kokpitu je totiž z psychologického hlediska zásadní pro správné a bezchybné provedení rozhodovacího procesu, zvláště pak v časové tísní. Pro dosažení precizních závěrů do své práce promítli fyziologické možnosti člověka, tj. průměrné antropometrické parametry populace (prokazováno na modelu Indie), fyzickou dosažitelnost prvků, zorné pole, žlutou skvrnu oka (*macula lutea*), slepou skvrnu oka, rozsah periferního vidění či charakteristické pohyby krku. Dále brali v úvahu odrazivost materiálů v kokpitu či možnosti zakrytí výhledu v rámci procedur.



Obrázek 15: Modelování vizuálních možností pilota [75]

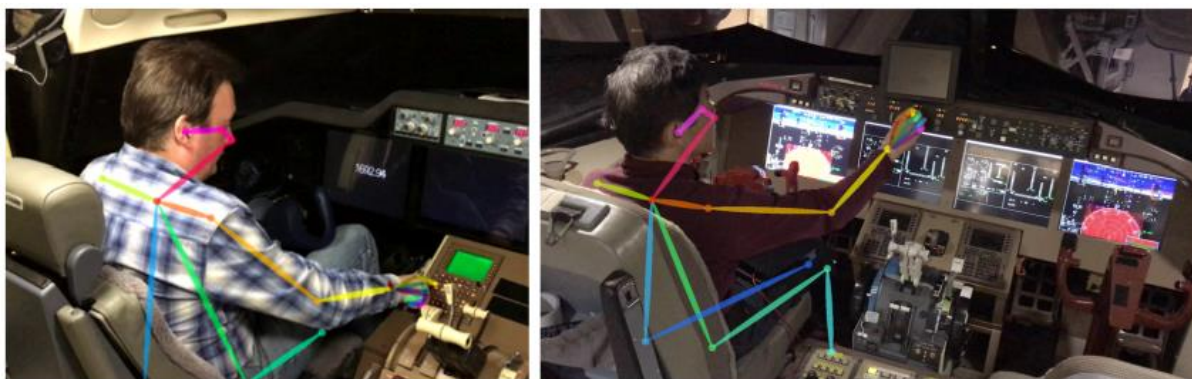
Autoři sami odkazují na práci autorského kolektivu Oudenhuijzen *et al.*, jenž považuje odhadnutí průměrné pozice a posedu pilota v kokpitu za zdroj jedné z největších chyb v rámci teoretického modelování pohybu v kokpitu [62]. V případě práce zaměřené na vizuální možnosti pilotů lze tuto chybu do značné míry eliminovat usazením pilotů tak, aby jejich oči byly na úrovni předem definovaného bodu v prostoru kokpitu DEP. Na základě této metodiky byli autoři schopni navrhnout a hodnotit teoreticky správné rozložení prvků kokpitu s hlavním důrazem na jednotlivé i vzájemné umístění obrazovek. Tyto práce dokazují přínos modelování pohybu a kokpitů, na základě čehož lze ušetřit značné množství finančních prostředků jinak vynakládaných na stavbu maket a kokpitů [76, 77, 78, 79]. Zároveň však vytváří prostor pro pochybnosti ohledně průkaznosti těchto teoretických modelů, protože jak již bylo řečeno, lidský faktor a s ním spojené pohnutky jsou nevyzpytatelné.

Porovnáním výstupu prostého statického modelování v rámci softwaru JACK a výstupu z pohybového snímacího systému Measurand MOCAP se zabýval autorský kolektiv Hong-jun Xue *et al* [80]. Autoři zdůrazňují praktický rozdíl mezi statickými modely v rámci digitálních projekcí a dynamickými modely, aby výstupy pohybových snímacích systémů. Zaměřují se přitom na hodnocení pohodlnosti kokpitů, jež je považována za ukazatel kvality designu. Z hlediska komfortu kokpitu je výsledek obou metod srovnatelný s tím rozdílem, že metoda zachycení pomocí pohybových snímacích systémů umožňuje zřetelně zachytit průběžné změny v komfortu v návaznosti na pohyby pilota v kokpitu a interferenci s prvky ovládání. Dynamické modely jsou propracovanější, nabízí hodnocení a řešení efektivity provozu a viditelně zdůrazňují důležitost ergonomie kokpitu. Statickou metodu modelování považují autoři jako výbornou pro počáteční hodnocení dosažitelnosti prvků a vizuálních aspektů, například v rámci prvních krůčků v návrhu konkrétního kokpitu, ale zdůrazňují, že tato metoda nedokáže racionálně predikovat komplexnost průběhů pohybů reálných pilotů v kokpitu a objektivně stanovit vhodnost rozložení prvků v kokpitu. Autoři doporučují využití obou metod, protože obě znamenají přínos použitelný pro design kokpitu a zvýšení efektivity ovládání a bezpečnosti.

Optické pohybové snímací systémy nachází v dopravě také široké využití. Autorský kolektiv Zhuang *et al.* je využil se záměrem docílení včasného odhalení provozních chyb [81]. Autoři se zabývali vlivem povahy rozložení prvků v kokpitu na vzniku těchto chyb a vytvořili k tomu příslušný teoretický model pilotních chyb. Pro stanovení jeho parametrů a funkcí autoři využili heuristickou analýzu, analýzu lidské spolehlivosti HRA a fitzův zákon. Na základě porovnání s reálnými daty naměřenými optickými systémy („user testing“) došli k závěru, že se predikce teoretického modelu chyb ve velké míře shodovaly s výskytem chyb v provozu. Takový model a jemu příslušnou analýzu chyb lze využít k predikci kritických míst v designu kokpitu. Optické snímací systémy se zaměřením na ergonomii využil dále například autorský kolektiv Tsuda

et al. nebo Wang *et al.* [82, 83]. Tsuda *et al.* předložili digitální model kokpitu a pohybový model člověka o 66 segmentech, 65 kloubních spojeních a 131 stupních volnosti, za pomoci kterého hodnotili dosažitelnost ovládacích prvků kokpitu, vizuální možnosti pilota a komfort pracovního prostředí. Autoři přitom zdůraznili potřebu zajištění ergonomicky vhodného prostředí z hlediska základního smyslu zraku, kterým člověk získává až 80 % všech informací.

Poměrně neexaktní a subjektivní kategorii využití pohybových snímacích systémů tvoří hodnocení komfortu pracovního prostředí spolu s hodnocením negativních dopadů sedavé profese na pohybový aparát uživatele. Přesto například autorský kolektiv L.B. Zhang *et al.* představil metodu spočívající v hodnocení a klasifikaci pohybů hlavních kloubních spojení, jako jsou zápěstí, loket, rameno, krk, páteř, kyčel, koleno nebo kotník [84]. Autorský kolektiv Lijing Wang *et al.* pak dokázal shrnout vhodnost polohovací sedačky letounu General Dynamics F-16 Fighting Falcon vzhledem k rozptylu v průměrných antropometrických parametrech populace a charakteru daných pohybů [83]. Neopomenul přitom omezení pohybu spojená s různým nastavením úhlu sedačky nebo nastavením upínacích pásů, což vytváří případy, se kterými v rámci návrhu kokpitu nemuselo být uvažováno. Posledně lze zmínit závěry práce autorského kolektivu Tsuda *et al.* [85]. Autoři přišli s návrhem využívání záznamníku obrazu v kokpitech letadel. Na základě obrazových záznamů letů na simulátorech byli schopni vytvořit algoritmus logistické regrese, který se učil správný průběh pilotních postupů a úkonů. V praxi pak byl schopen rozeznat momenty, kdy pilotovo jednání neodpovídalo publikovaným postupům (viz Obrázek 16).



Obrázek 16: Znárodnění pohybového modelu s využitím optických snímacích systémů [85]

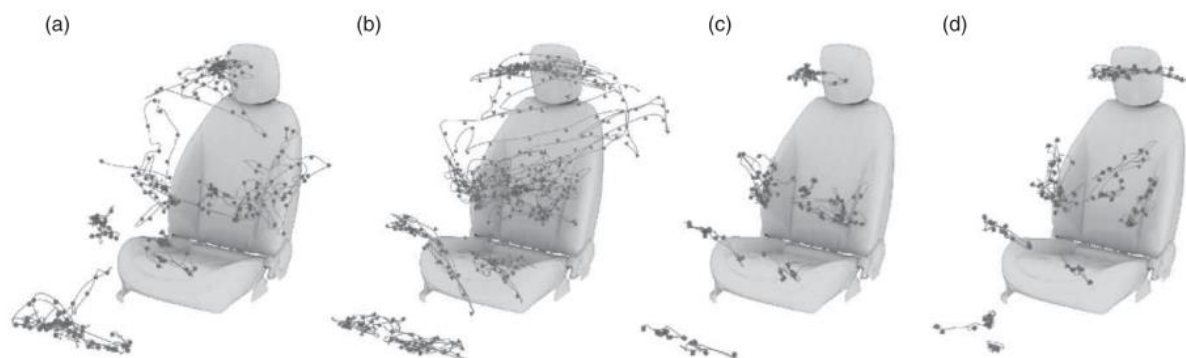
V průběhu měření optickými snímacími systémy byly použity makety a simulátory výrazně přizpůsobené požadavkům těchto systémů. V případech, kdy nebyly modifikovány a odstraňovány stěny a celky simulátorů, byly některé statické prvky pokryty světelnými vizuálními body zájmu, a kamerová a snímací zařízení byla umístěna tak, jak by to v běžném reálném provozu letadel nebylo možné. Zároveň musel být průběh takových měření bedlivě monitorován a průběžně korigován.

V oblastech pozemní dopravy využil pohybové snímací systémy například autorský kolektiv Gallahan *et al.* [86] a Caruso *et al.* [87]. První ze zmiňovaných kolektivů využil komerčně dostupný produkt Microsoft Kinect spolu s vlastní softwarovou aplikací k vytvoření systému pro varování řidičů dopravních prostředků při nedostatečném věnování pozornosti řízení. K návrhu softwaru byl využit „Microsoft software development kit“, který už v základu nabízí „open source“ kód pro rozpoznání gest a mimiky. Výsledný systém byl schopen odhalit případy mluvení do telefonu, hledání předmětů v autě, věnování se osobní hygieně nebo přílišné věnování vizuální pozornosti nerelevantním objektům. Právě to jsou totiž na základě studie autorského kolektivu Neale *et al.* z Virginia Tech Transportation Institute VTTI nejčastější důvody pro nevěnování pozornosti při řízení [88]. Toho všeho byl systém schopen na základě určování relativních vzdáleností mezi prostorovými polohami různých kosterních kloubů a také na základě pozorování průběhů klonivých, klopivých a otáčivých pohybů hlavy (viz Obrázek 17).



Obrázek 17: Kinect a jeho trasování kosterních kloubů a obličeje [86]

Autorský kolektiv Caruso *et al.* dokázal využít optické pohybové snímací systémy v rámci ověřování nových přístupů v návrhu designu a ergonomie interiérů automobilů (viz Obrázek 18). Autoři se považují za jedny z průkopníků této metody, která dokáže zohlednit jinak velice špatně stanovitelné psychologické a fyzické faktory na straně uživatelů. Byli schopni, na rozdíl od softwarů pracujících s virtuálními modely, promítnout do tématiky designu dynamiku veškerých poloh a situací. K tomu navíc zaujali revoluční přístup nerespektující jakousi inertně danou potřebu symetrie interiéru. Rozšířili tak běžné pojetí virtuálních modelů o reálné antropometrické parametry zkoumaného subjektu a vytvořili „obálku“ pohybů pasažéra v automobilu, která může být využita jako negativní model při návrhů prvků interiéru, posedu, uspořádání místa pro nohy, loketní opěrky nebo flexibilní bederní opěrky. Jako další posun práce navrhli vytvoření polygonální sítě fyzické dosažitelnosti objektů i s uvážením objemu jejich využití [87].



Obrázek 18: Grafické zobrazení výsledků při a) interakci s pasažéry na zadních sedačkách, b) umisťování osobních věcí, c) stanovování komfortní pozice posedu, d) využívání telefonu [87]

1.7 Teorie pohybového modelu

Člověk je z hlediska modelování pohybu poměrně dobře zachytitelný objekt. V rámci prací, při nichž není důležité zachytit veškerou složitost pohybu, jako jsou práce šlach, pružnost tkání nebo práce svalové struktury, se pohybový 2D nebo 3D model člověka často omezuje na formu souboru příček propojených kloubními spojeními („stick model“ neboli příčkový model) [52]. Pro mnohé aplikace je tento zdánlivě jednoduchý model více než dostatečný, jelikož i ten vytváří pevný a velice slušně použitelný základ pro široké spektrum výzkumů a statistiky. Využije-li autor takového modelu i antropometrické parametry měřených subjektů, může takový model velice dobře posloužit například v rámci ergonomického hodnocení [38]. Výsledný počet příček a kloubních spojení, reprezentujících pohyb člověka, stejně jako jejich vlastnosti závisí na použitých snímacích systémech, kvalitě získaných dat, možnostech programovacích prostředí a záměrech práce. Zpravidla se propracovanost modelů vědecky zaměřených prací ani zdaleka neblíží dokonalému modelování pohybu všech zhruba 210 kostí, 100 kloubním spojeními a 600 svalům člověka.

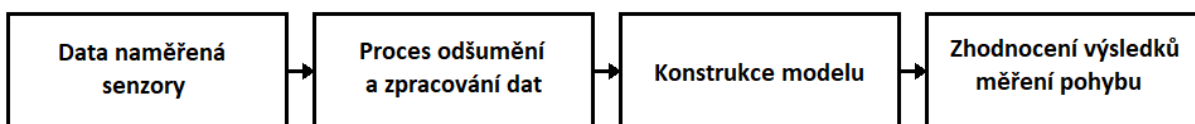
Nelze konstatovat, že by se pohybové modely řídily nějakým striktním rozdělením. Metod, forem a matematických úvah využitých při tvorbě pohybových modelů existuje už jen kvůli enormnímu využití v herním, filmovém a lékařském průmyslu nespočet a jejich výčet není předmětem této práce. Proto se tato kapitola omezí na představení pouze několika málo faktů, jenž mohou sloužit jako inspirace pro vytvoření dynamického pohybového modelu pilota, a podrobnější rozbor o tvorbě konkrétního modelu bude uveden v kapitole „Hodnocení dat“.

Obecně se lze setkat zhruba se čtyřmi typy 3D modelů. Modely vytvářené na základě gyro-akcelerometrických snímacích systémů bývají reprezentovány jednoduchými příčkovými modely, ale i propracovanějšími modely, kde jsou třetí rozměr a prostorová forma vytvořeny užitím třírozměrných geometrických těles (kužele, komolé kužele, elipsovité kužele, válce, koule), nebo složitějšími konturami vyplývajícími z obecně známých fyziologických

a antropometrických parametrů člověka. Je však nutné zmínit, že tvorba takových modelů je výpočetně hodně náročná a výsledné modely mohou být často nestabilní [52]. V kombinaci s optickými snímacími systémy nebo i čistě v rámci počítačového modelování vznikají mnohvrstevnaté modely sestávající se z kostry, svalů a kůže. Optické snímací systémy totiž dokážou do nejmenšího detailu zachytit veškeré detaily svrchní vrstvy snímaného subjektu [52, 89].

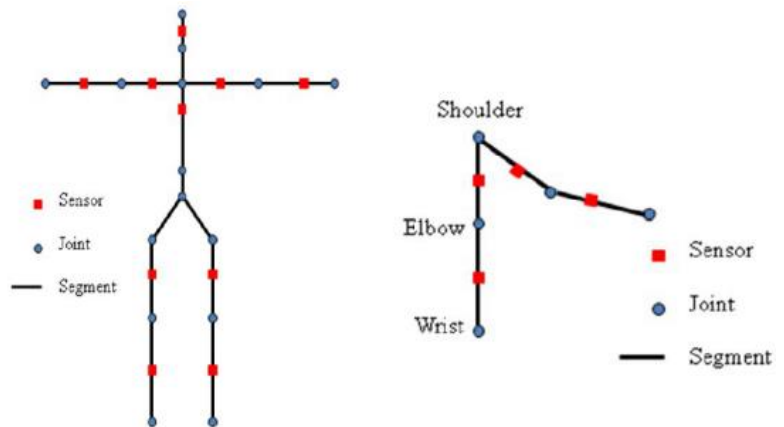
Autorský kolektiv Long *et al.* ve své práci vyzdvihuje důležitý fakt ohledně modelování lidského pohybu, totiž že člověk je z hlediska modelování pevný objekt a jeho výhodou je, že pohyb jednotlivých segmentů těla v prostoru je vzájemně závislý a částečně předvídatelný [89]. Například autorský kolektiv Wang *et al.* dokázal do svého modelu implementovat limitace pohybu na základě fyziologických a antropometrických vlastností člověka. Jako příklad lze uvést rozsahy pohybů kloubních spojení a jím příslušný počet stupňů volnosti [90]. Autorský kolektiv Rehg *et al.* ve své práci již v roce 1995 dokázal pracovat s modelací pohybu při zakrytí výhledu na oblast zájmu nebo při krátkodobém výpadku dat a zároveň dokázal implementovat algoritmus vylučující modelování nereálných případů, jako jsou prokřížení a prostoupení končetin a zkoumaných segmentů [91]. Dokonalost záznamu z optických systémů dobře umožňuje predikci pohybů například při zakrytí bodu zájmu nebo výpadku toku dat. Pokročilé softwarové prostředky pracující s takto dokonalými daty dokážou vyhodnocovat dynamiku daného segmentu a odhadnout pravděpodobnou trajektorii v časových úsecích, kde data chybí nebo nebyla zachycena [92].

Pokud se jedná o práce s využitím gyro-akcelerometrických systémů, autorský kolektiv Xiang *et al.* sestrojil s využitím akcelerometrů příčkový pohybový model o 14 segmentech a 15 kloubních spojení s tím, že podle nich a jejich výzkumu je pro hodnocení pohybu člověka plně dostačující model o 15 až 19 segmentech. V rámci práce využili typický postup (viz Obrázek 19) [58].



Obrázek 19. Ukázkový postup vytváření pohybového modelu [58]

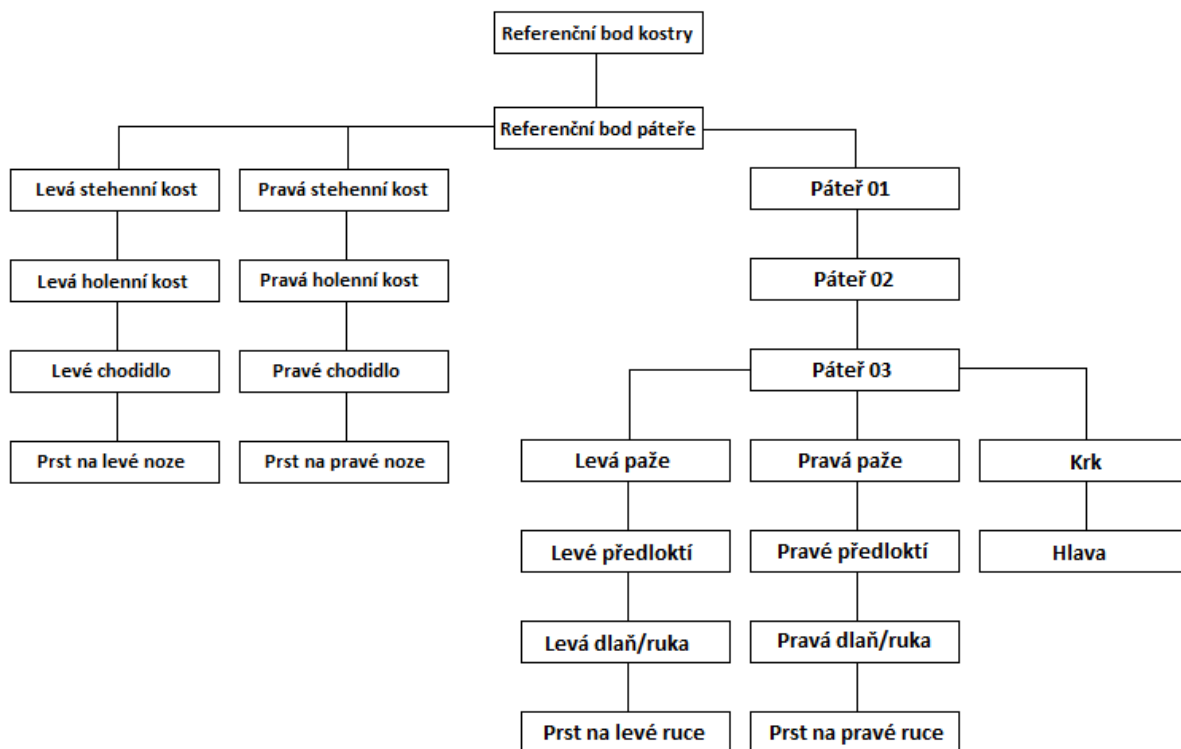
K rozmístění senzorů využili schéma na Obrázku 20, přičemž horní polovinu těla snímalo 6 akcelerometrických senzorů – jeden na hlavě, jeden na trupu, po dvou na předloktích a po dvou na pažích.



Obrázek 20: Příklad rozmístění akcelerometrických snímačů a jednoduchého modelu [58]

Akcelerometrické senzory poskytovaly informace o rotacích měřených segmentů. Data z nich byla po příslušné konverzi využita jako vstup do modelových kloubních spojení, která na základě toho promítla pohyb do pohyblivých příček modelu. Ramenní kloub tvořil základní kloub pohybového modelu horní končetiny, z něhož vystupoval kinematický řetězec dvou příček, paže a předloktí, spojených kloubem představujícím loket (viz Obrázek 20). Takový kinematický řetězec pohybu horní končetiny autoři přirovnali ke konceptu rodičovské závislosti („parent and son“). Do modelu implementovali pohybové omezení v rámci kloubů, a to anteflexi, extenzi posterior, abdukci a addukci. Jejich metodika i výsledky práce s využitím akcelerometrů se ukázaly jako vypovídající. Jako reference pro ověření správnosti měření a výsledného pohybového modelu sloužil sekundární snímací systém „Microsoft Kinect“, jenž svými nezávislými výstupy potvrdil využitelnost akcelerometrů při modelování lidského pohybu.

Prakticky stejný přístup hierarchie pohybového modelu člověka využil ve své práci autorský kolektiv Li *et al.* [93]. Ten představil vícevrstvý model člověka, jenž vzniknul postupnou metodou vytváření příčkového modelu, dynamického modelu s příslušnými limitacemi pohybů v kloubních spojení a poté doplněním o věrohodný zevnějšek s možností deformace pokožky na základě polygonální metody seskupení („polygon grouping method“). Model disponoval jedním těžištěm, 21 segmenty a 17 kloubními spojeními. Jako těžiště modelu a referenční bod posloužila křížová kost, jež také představovala počátek hierarchie pohybů, kde je pohyb každého snímače (segmentu), kromě toho nejvýše postaveného, podřízen právě jednomu nadřazenému snímači (segmentu) a pomyslný konec představuje konec končetin a křížová kost (viz Obrázek 21) [93].



Obrázek 21. Ukázkový příklad hierarchie pohybového modelu [93]

Pro demonstraci modelování funkčních spojení využili ruku. Každému velkému kloubu ruky přiřadili vlastní systém souřadnic, kde osa x byla sesouhlasena se směrem k dalšímu závislému kloubu řetězce (vztah „parent and child“). Celkově měl jejich model ruky 7 stupňů volnosti – rameno 3 DOF, loket 2 DOF a zápěstí 2 DOF. Změny v rámci 7 DOF byly vyjádřeny rotačními parametry, tedy vektory $(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7)$. Dynamická charakteristika byla přitom pospána jako:

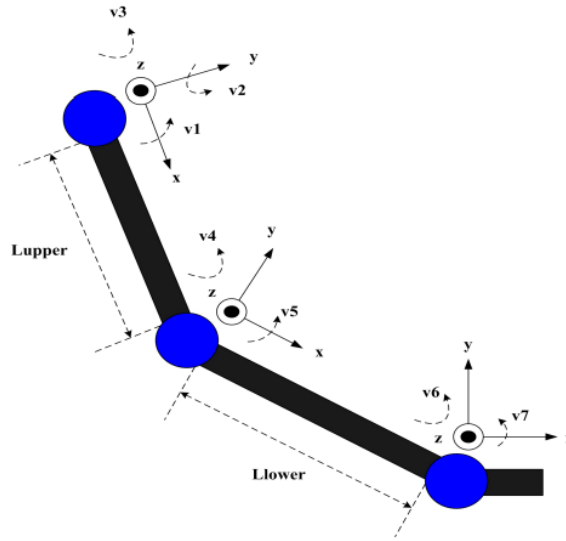
$$M_{ram.kl.} = rot(x_{ram.kl}, v_1)rot(y_{ram.kl}, v_2)rot(z_{ram.kl}, v_3)tran(d_x, d_y, d_z) \quad (9)$$

$$M_{lok.kl} = rot(z_{lok.kl}, v_4)rot(x_{lok.kl}, v_5)tran(d_x, d_y, d_z) \quad (10)$$

$$M_{zápěstí} = rot(z_{zápěstí}, v_6)rot(x_{zápěstí}, v_7)tran(d_x, d_y, d_z) \quad (11)$$

kde M představují transformační matice ramenního kloubu, loketního kloubu a zápěstí. $Rot(\dots)$ značí operaci rotace, kde relativní úhly rotace mohou být udány ve formě kvaternionů, coby výstupů ze snímačů. $Tran(\dots)$ značí operaci posuvu, x, y, z značí soustavu souřadnic daného kloubu, d_x, d_y, d_z značí pohyb ramenního kloubu ve světovém souřadnicovém systému. Na

základě tohoto dynamického modelu lze odhadnout pozici loketního kloubu a zápěstí (viz Obrázek 22).



Obrázek 22: Dynamický model ruky [93]

Pokud by byla délka paže $L_{paže}$ a délka předloktí $L_{předloktí}$, pak by počáteční pozice ramenního kloubu v daném dynamickém modelu byla vyjádřena jako $P_{ram.kl}(0) = (0, 0, 0, 0)$, počáteční pozice loketního kloubu $P_{lok.kl}(0) = (L_{předloktí}, 0, 0, 0)$. Pozice kloubních spojení v čase T , kdy pro ramenní kloub platí $T_{ram.kl}(0) = (0, 0, 0, 0)$, by byly vyjádřeny následovně:

$$P_{ram.kl}(t) = T_{ram.kl}(t) \cdot P_{ram.kl}(0) \quad (12)$$

$$P_{lok.kl}(t) = q_{ram.kl}(t) \times P_{lok.kl}(0) \times q_{ram.kl}^*(t) \cdot T_{ram.kl}(t) \quad (13)$$

$$P_{zápěstí}(t) = q_{ram.kl}(t) q_{lok.kl}(t) \times P_{zápěstí}(0) \times q_{lok.kl}^*(t) q_{ram.kl}^*(t) \cdot T_{ram.kl}(t) \quad (14)$$

kde q značí kvaternion (orientaci segmentu), který je výstupem zpracování dat, a \times násobení kvaternionů. Při rekonstrukci pohybu celého modelu člověka měl každý segment svůj vstup pohybových dat ve formě kvaternionu. Informace byly transformovány do úhlů rotace i polohových informací. Byly přitom užity matematické funkce jako velikost vektoru $Norm$. Při vytváření modelu pohybu využili celkem 3 souřadnicové systémy, a to světový souřadnicový systém, souřadnicový systém vztažený k člověku a souřadnicový systém vztažený ke kloubu.

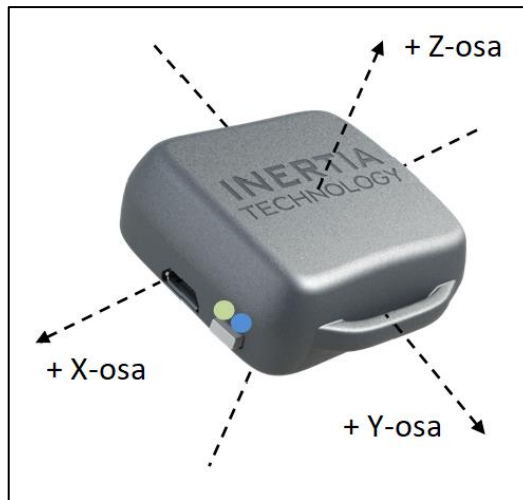
2 Metodika měření

Předchozí kapitola teoretické základy práce představila jednotlivé pojmy spojené s výzkumem pohybu. V podkapitolách byla představena problematika spojená s lidským činitelem, ergonomií a pohybovou aktivitou; celá kapitola posloužila jako rozbor a zdůvodnění zvoleného tématu práce. Na základě předložené rešerše bylo rozhodnuto o využití školního letového simulátoru, přičemž pohyb subjektů bude zaznamenáván gyro-akcelerometrickými pohybovými snímacími systémy, které se pro jejich dostupnost a široké spektrum využití jeví jako ideální. Zároveň vyhovují způsobu využití v kokpitech a jejich výstupy odpovídají požadavkům práce. Zvolená MOCAP technologie dobře umožní sběr dat do úložiště za účelem následného zpracování („off-line MOCAP“) a eliminuje tak problematiku zpoždění přenosu dat mezi snímačem a obslužným počítačem. Pohyby budou sledovány s využitím přímé metody s průběžným záznamem v kontrolovaných podmínkách prostředí simulátoru. Na základě charakteru pilotní profese bude sledován pohyb horní poloviny těla. Samotné měření bude součástí většího bloku měření, při němž se i jiní autoři budou věnovat výkonům subjektů, avšak s jinými záměry a s využitím odlišné techniky. Do průběhu letů nebudou žádná z těchto měření výrazněji zasahovat tak, aby byla zachována důvěryhodnost simulovaného prostředí a let v co možná největší míře odpovídal průběhu reálného letu. Výstupem práce bude spektrální analýza pohybů perspektivně sloužící k hodnocení pohybové aktivity.

2.1 ProMove MINI – Inertia

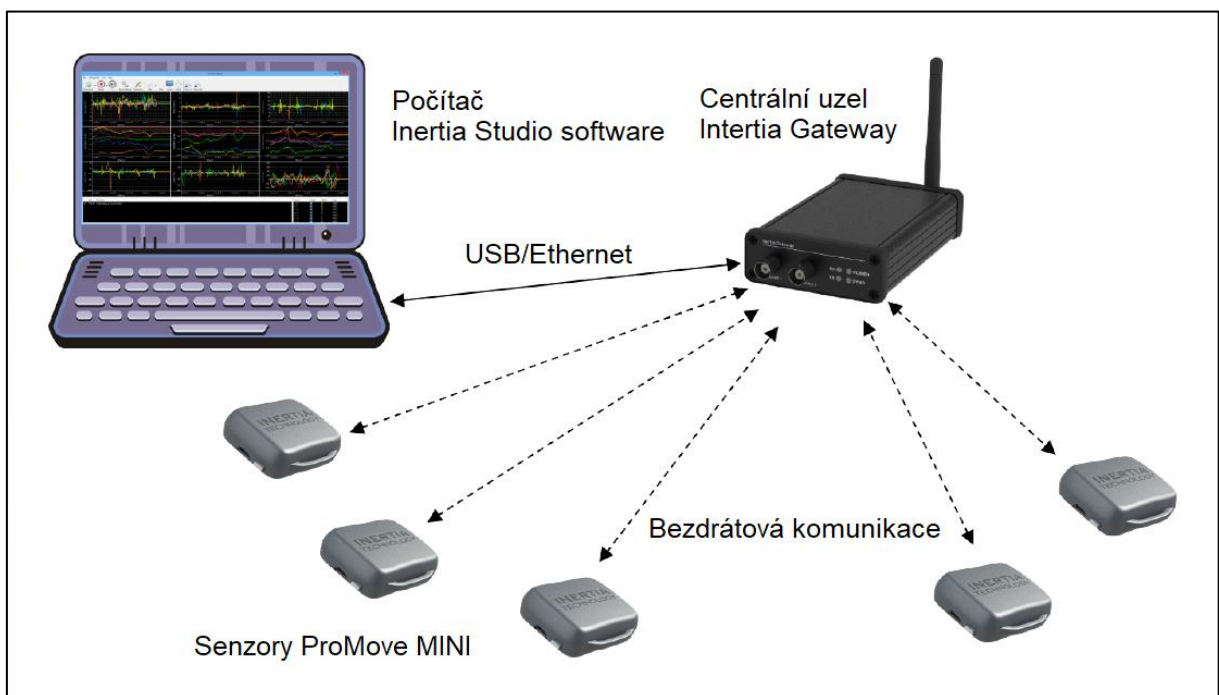
Na základě technických specifikací zařízení a s uvážením předkládané rešerše a zkušeností autora a vedoucích práce byl vybírán gyro-akcelerometrický pohybový snímací systém s důrazem na co možná nejmenší psychickou a fyzickou zátěž vyvíjenou na zkoumaný subjekt. Požadavkům měření dobře vyhovuje gyro-akcelerometrický snímací systém ProMove MINI od společnosti Inertia Technology B.V. Ten využívá nejnovější technologie MEMS a je speciálně určen pro zachycení pohybu objektů a lidí nebo jejich uskupení.

Jedním ze základních prvků sítě je senzor ProMove MINI (viz Obrázek 23). Celý senzor je designován s ohledem na ergonomii a pohodlí měřeného subjektu. Oblý tvar zajišťuje komfortní umístění senzoru na člověku, ale zároveň nijak negativně neovlivňuje stabilitu v případě umístění senzoru na rovné ploše. Senzor monitoruje každou ze svých os se snímkovací frekvencí až 1 kHz a se stejnou frekvencí odesílá data do centrálního uzlu. Výsledná síť senzorů ProMove MINI může mít desítky senzorů, přičemž každý z nich je schopen snímat a vysílat data s vysokou vzorkovací frekvencí a zajišťovat plně synchronizované vzorkování s přesností větší než 100 ns.



Obrázek 23: Senzor ProMove MINI, referenční osy [55]

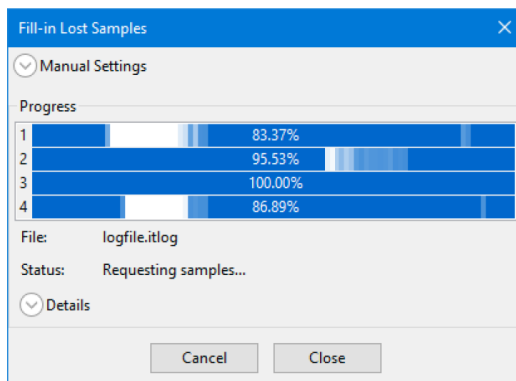
Síť systému Inertia se standardně sestává ze senzorů ProMove MINI, centrálního uzlu („Inertia Gateway“) a obslužného počítače (viz Obrázek 24).



Obrázek 24: Schéma sítě Inertia [55]

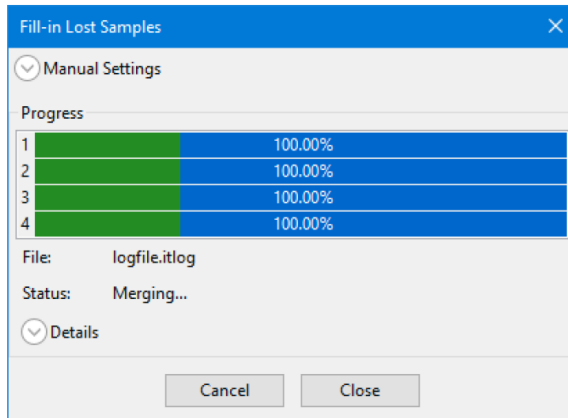
Vzorkovací frekvenci systému předurčuje počet senzorů v síti. Čím větší je počet senzorů, tím nižší musí být vzorkovací frekvence. Pro měření předkládané práce byla vybrána nejvyšší možná vzorkovací frekvence 200 Hz. Dojde-li k přerušení toku dat mezi senzorem a centrálním uzlem, lze využít vestavěný 2GB paměťový modul každého z senzorů. Ten je schopen pojmout až 510 souborů s daty nastavení a naměřenými daty z celé sítě senzorů. Zkušenosti ukazují, že k výpadku toku dat dochází standardně. Proto je vhodné průběžně využívat automatickou funkci v rámci softwarového prostředí „Inertia Studio“, a to takzvanou „Fill-in lost samples“

funkci. V rámci ní proběhne automatická kontrola souborů dat v počítači, vyhledání chybějících dat a následný bezdrátový přenos chybějících dat ze senzorů do obslužného počítače (viz Obrázek 25). Bílá barva na ukazateli indikuje 100% ztrátu. Modrá barva indikuje 0% ztrátu. Procentuální hodnota vyjadřuje celkové množství dostupných dat.



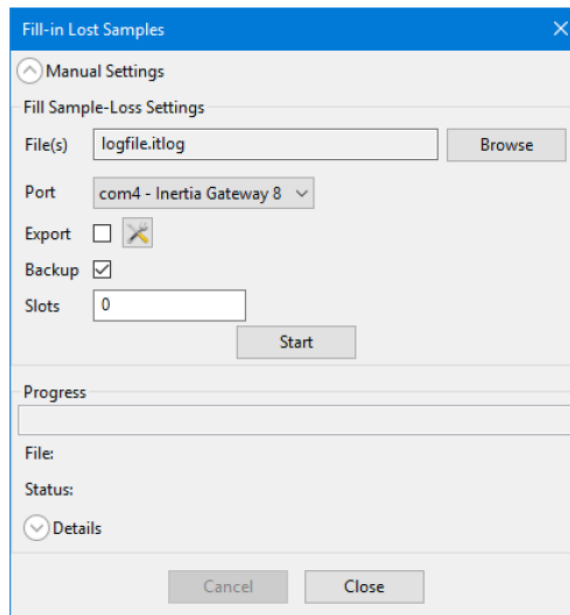
Obrázek 25: Funkce "Fill-in lost samples" – analýza a identifikace chybějících dat [55]

Na obrázku 26 lze vidět proces automatického doplňování dat. Zelená barva značí průběh procesu doplňování. V případě chybějících dat je postižená sekce vyznačena červenou barvou. Bílá barva na ukazateli indikuje 100% ztrátu. Modrá barva indikuje 0% ztrátu. Procentuální hodnota vyjadřuje celkové množství dostupných dat.



Obrázek 26: Funkce "Fill-in lost samples" – doplňování chybějících dat [55]

Pokud nedojde k absolutnímu doplnění chybějících dat, dají se data ze senzorů stáhnout pomocí přenosu přes USB a manuálně importovat do datových souborů v obslužném počítači (viz Obrázek 27).



Obrázek 27: Podkategorie funkce „Fill-in lost samples“ manuální nastavení doplňování dat [55]

Funkce, vyjadřující míru ztráty dat v procentech, slouží jako reference pro správnost vzájemného rozmístění senzorů a centrálního uzlu Inertia Gateway. Cílem je, aby byl vyjádřený procentuální výpadek dat co nejmenší. Proto je výkonnost celého měřícího celku v průběhu měření monitorována na obslužném počítači. Výsledný celek dat (10 DOF) obsahuje data o zrychlení, úhlové rychlosti, intenzitě magnetického pole, zrychlení s velkým přetížením (až do 400 g), atmosférickém tlaku nebo o poloze GPS. Technické specifikace senzorů shrnuje Tabulka 1.

Tabulka 1: Technické specifikace senzorů ProMove MINI [55]

Akcelerometr	
Rozsah	Volitelný: $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ g
Rozlišení (citlivost)	62 μg @ ± 2 g rozsahu
Vzorkovací frekvence	1000 Hz
Nelinearita	$\pm 0,5$ %
Cross-axis (chyba v rámci osy kolmé na osu měření)	± 2 %
Noise-power spectral density Spektrální hustota šum/výkon	300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Gyroskop	
Rozsah	Volitelný: $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ °/s
Rozlišení (citlivost)	0,007°/s @ ± 250 °/s rozsahu
Vzorkovací frekvence	1000 Hz
Nelinearita	$\pm 0,1$ %
Cross-axis	± 2 %
Rate noise spectral density Spektrální hustota šumu	0,01 (°/s)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Kompas	
Rozsah	± 4912 μT
Rozlišení (citlivost)	0,15 μT
Vzorkovací frekvence	100 Hz
Barometr	
Rozsah	260 až 1260 hPa
Rozlišení (citlivost)	0,02 Pa
Vzorkovací frekvence	25 Hz
Šum	0,01 hPa RMS
Akcelerometr pro velká zrychlení	
Rozsah	Volitelný: $\pm 100, \pm 200, \pm 400$ g
Rozlišení (citlivost)	49 mg @ ± 100 g rozsahu
Vzorkovací frekvence	1000 Hz
Inertia Wireless Network Protocol	
Frekvenční pásmo	2,4 Ghz
Rychlost přenosu dat	4 Mb/s
Výkon TX	10 dBm
Dosah	>30 m (přímá viditelnost)
Sběr a úložiště dat	
Maximální počet snímačů v rámci jedné sítě	39 snímačů při 200 Hz 19 snímačů při 500 Hz 9 snímačů při 1 kHz
Inertia Gateway	Centrální uzel pro sběr dat
Synchronizace	< 100 ns
Interface	Standard USB 2.0
Úložiště	2GB paměťový modul
Software	
Inertia Studio	Vizualizace dat v reálném čase, sběr dat a konfigurace Windows 10, 8, 7, Vista, Ubuntu Linux
Baterie	
Výdrž baterie	7 hodin při plném využití bez GPS, 3 hodiny při využití GPS
Ostatní parametry	
Bluetooth	4.0 dual-mode BR/EDR/BLE
GPS	1 Hz / 5 Hz update rate
Rozměry	51 x 45,5 x 15,86 mm
Váha	22 g (s baterií)

Data jsou ze senzorů bezdrátově přenášena s přenosovou frekvencí 2,4 GHz do centrálního uzlu. Z něj putují přes USB nebo ethernetové připojení do obslužného počítače. Technické parametry centrálního uzlu shrnuje Tabulka 2.

Tabulka 2: Technické parametry centrálního uzlu Inertia Gateway [55]

	Poznámky	Základní verze Inertia Gateway	Pokročilá verze Inertia Gateway
Bezdrátová komunikace			
Frekvenční pásmo		2,4 Ghz	2,4 Ghz
Rychlost přenosu dat		Max. 4 Mb/s	Max. 4 Mb/s
Výkon vysílače TX		Max. 10 dBm	Max. 10 dBm
Dosah	Při maximální výkonu TX	30 m	30 m
Konektivita			
Mini-USB		USB standard	USB standard
Ethernet		-	100 Mb/s
Zdroj DC	Externí zdroj	-	7 - 12 V, max. 2A
Síť			
Rozsah	Odvozený od vzorkovací frekv.	Max. 39 senzorů	Max. 39 senzorů
Synchronizace času mezi senzory		< 100 ns	< 100 ns
Externí synchronizace			
Rozhraní		-	2 x BNC konektor
Impedance	Volitelná na vstupu i výstupu	-	50 Ohm, Vysoká
Rozsah napětí na vstupu	50 Ohm impedance na vstupu	-	-5 V - 5 V
	Vysoká impedance na vstupu	-	-10 V - 10 V
Rozsah napětí na výstupu	50 Ohm impedance na výstupu	-	0 V - 3,3 V, 0 V - 5 V, -5 V - 5 V
	Vysoká impedance na výstupu	-	0 V - 3,3 V, 0 V - 5 V, -10 V - 10 V
Módy synchronizace		-	Clock, Trigger
Rozsah frekvence synchronizace	Clock mode Na vstupu i výstupu	-	1 Hz - 1500 Hz
Software			
Vizualizační software	Windows Vista, 7, 8, 8.1, 10 32 a 64bit, Ubuntu Linux	Inertia Studio	Inertia Studio
Parametry			
Rozměry	Bez antény a konektorů	12,7 x 8 x 3 cm	12,7 x 8 x 3 cm
Váha	Bez antény	202 g	226 g
Provozní teplota		0 - 35 °C	0 - 35 °C

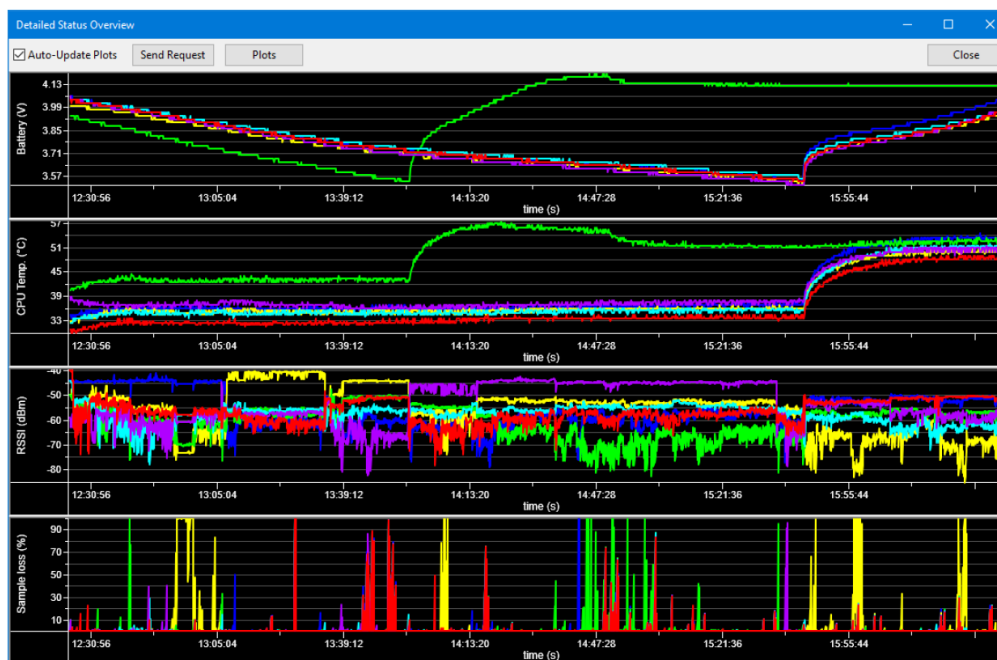
Obslužný počítač je využíván k nastavení a monitorování celého procesu měření. Standardní výbavou systému Inertia je softwarový prostředek „Inertia Studio“, který lze zprovoznit na běžně využívaných operačních systémech (viz Obrázek 28). Výrobce zároveň podporuje iniciativu uživatelů a celý systém je dostupný k užití a modifikacím v rámci programovacího jazyka C++ a JAVA SDK. Právě JAVA SDK rozšiřuje systém o využití na platformě Android.

Softwarový prostředek „Inertia Studio“ umožňuje uživateli bezprostřední prezentaci měřených dat (viz Obrázek 28). To je umožněno vysokorychlostním bezdrátovým přenosem dat ze senzorů v reálném čase. V horní polovině lze nalézt grafické zobrazení průběhů zrychlení, indukce magnetického pole (Gauss) a úhlové rychlosti (°/s). V pravém dolním rohu lze nalézt stav připojení jednotlivých sond, stav baterie či procentuální vyjádření ztráty přenosu dat.



Obrázek 28: Úvodní obrazovka – Inertia Studio [55]

Uživatel programu si sám volí, která data a parametry měření budou v rámci „Inertia Studio“ ukládána a prezentována. Rozlišení v rámci zobrazovacích os X a Y lze měnit, stejně jako kotvit, a v reálném čase lze s uživatelským rozhraním a zobrazovanými parametry aktivně pracovat. Okénko „Detailed Status Overview“ slouží k monitorování parametrů jako jsou úroveň nabití baterie, teplota CPU, stav RSSI nebo výpadek toku dat ze senzorů (viz Obrázek 29).



Obrázek 29: Inertia Studio – Detailed Status Overview [55]

V případě dat o stavu baterie, teplotě senzoru a grafů externích vstupů dochází k aktualizaci prezentovaných dat každých 10 sekund. U dat o síle signálu RSSI a výpadcích toku dat dochází k aktualizaci každou sekundu. Mezery v toku dat vyplní data stažená z paměťových modulů senzorů. Pro precizní měření je zapotřebí v „Inertia Studio“ nastavit maximální rozsah akcelerometrů a gyroskopů. Cílem je, aby se maximální hodnota zrychlení a úhlové rychlosti v rámci měření co nejvíce blížila nastavenému maximu na senzorech. Tak je zajištěna největší citlivost a přesnost. Na výběr je z předem definovaných skupin rozsahů. Sensory se řídí časem obslužného počítače (± 1 s) a čas mezi jednotlivými senzory není synchronizován.

Výsledkem měření je orientační algoritmus, který zvládá vyhodnocovat aktuální polohu senzoru v prostoru. K tomu je zapotřebí výstupů z akcelerometrů, gyroskopů a případně kompasu. Reprezentací orientačního algoritmu, a tedy polohové informace, jsou kvaterniony a Eulerovy úhly. Klonění a klopení je vyhodnocováno na základě měření zemského gravitačního pole akcelerometry. Zatačení v rámci roviny tečné na zemský povrch („yaw angle“) je vyhodnocováno na základě kompasu a magnetického pole Země. Standardní pořadí Eulerových úhlů je pak ZYX.

2.1.1 Kalibrace

Správná a včasná kalibrace předurčuje kvalitu výsledné práce. Kalibrace musí být ideálně prováděná před a mezi všemi měřeními. Podnětem ke kalibraci může být například monitorování výkonů senzorů v rámci „Inertia Studio“. Veškeré použité senzory musí být zkalibrovány rotací po všech osách v dostatečné vzdálenosti od kovových předmětů. Při kalibraci akcelerometrů mohou být zkalibrovány všechny sondy najednou. Při kalibraci kompasu musí být kalibrace prováděna postupně. Na všech osách musí být zřetelně dosaženo měřitelného maxima a minima (u akcelerometru příkladně -9.8 až $+9.8$ m/s^2).

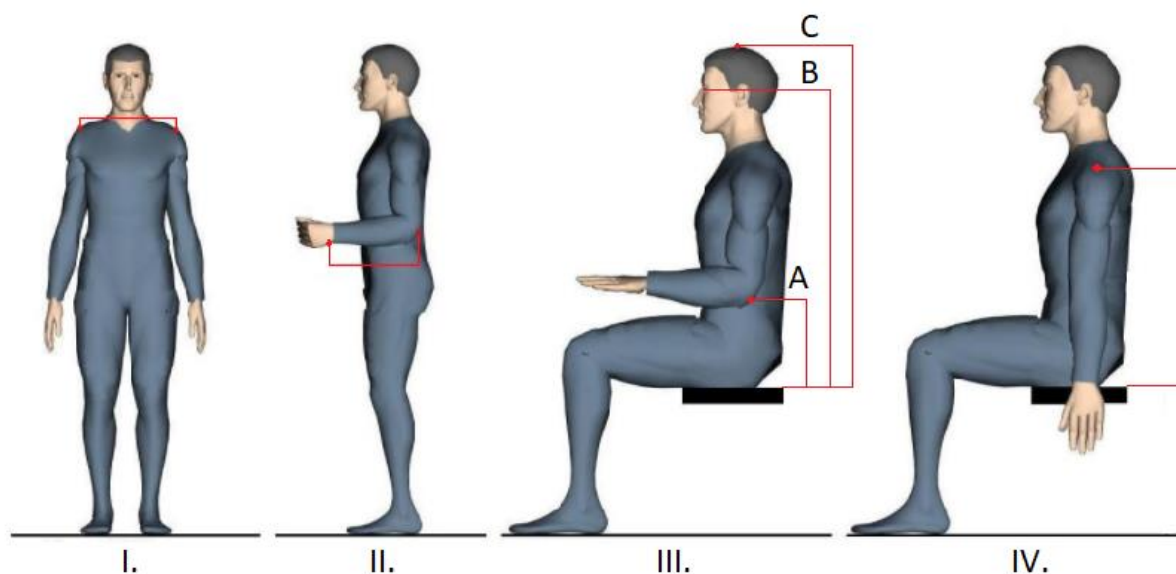
Funkčnost kompasu závisí na prostředí, v němž jsou senzory ProMove MINI využívány. Výrobce doporučuje vypnutí kompasu v prostředích s velkou koncentrací kovových předmětů a elektromagnetických polí. Obecně výrobce nedoporučuje využívat kompas uvnitř budov v momentě, kdy není zajištěna vzdálenost 1 metr od kovových předmětů a 1 metr od země. Funkci kompasu jde s použitím „Inertia Studio“ jednoduše vypnout a poté provést kalibraci směrového určení polohy resetováním daných os citlivosti dle instrukcí výrobce [55].

2.2 Subjekty

Měření se zúčastnilo 8 studentů oboru Profesionální pilot Fakulty dopravní Českého vysokého učení technického v Praze. Všichni piloti měli srovnatelné pilotní zkušenosti (100 až 150 hodin náletu) a znalosti, byli držiteli průkazu soukromého pilota PPL a úspěšně podstoupili prohlídku pro získání osvědčení zdravotní způsobilosti 1. třídy. Každý ze subjektů byl schopen samostatného IFR letu s využitím konvenčních navigačních postupů i PBN. Jejich praktickou zkušenost v rámci provádění IFR letů představovalo 30 až 40 hodin náletu IFR. Věkový průměr subjektů byl 23 let \pm 2 roky. Piloti byli předem seznámeni s prostředím konkrétního letového simulátoru a jemu náležitými postupy tak, aby byl jejich pilotní výkon co možná nejautentičtější.

2.2.1 Antropometrie

Pro každý subjekt byly zaznamenány tyto parametry: šířka ramen (I.), vzdálenost ramene a lokte, vzdálenost lokte a zápěstí (II.), výška loktů v sedu (III.A.), výška ramen v sedu (IV.), výška očí v sedu (III.B.) a výška v sedu (III.C.) (viz Obrázek 30). Pro měření výšek v sedu musel měřený subjekt sedět rovně tak, že stehna byla v horizontální poloze a vzájemně souběžná. Výška v sedu byla vyjádřena jako vertikální vzdálenost mezi sedací podložkou a nejvyšším bodem hlavy (vertex). Výška očí v sedu byla vyjádřena jako vertikální vzdálenost mezi sedací podložkou a vnějším okrajem oka (ectocanthus). Výška ramen v sedu byla vyjádřena jako vertikální vzdálenost mezi sedací podložkou a kostním výběžkem na lopatce (acromion), přičemž měřený subjekt seděl s uvolněnými pažemi ve visu. Výška loktů v sedu byla vyjádřena jako vertikální vzdálenost sedací podložky a nejnižšího kosterního bodu lokte, přičemž paže byly v rovině vertikální a předloktí v rovině horizontální. Paže a předloktí svíraly pravý úhel.



Obrázek 30: Antropometrické parametry využité při měření [94]

2.2.2 Umístění senzorů

Správné umístění senzorů vzhledem k charakteru a cílům měření je pro objektivní výsledky zásadní. Zaznamenávaný pohyb může být posuvný, rotační, složený či lokálního a jiného charakteru. Umístění senzoru vzhledem k ose otáčení měřené části subjektu ovlivňuje amplitudu výstupních dat. Svalstvo a tkáň, na které senzor přiléhá, svojí pohybovou aktivitou zasahují do měření. V případě limitovaného počtu senzorů je vhodné předem znát charakter zkoumaného pohybu tak, aby senzory byly schopny co možná nejefektivněji zachytit daný pohyb.

Pohyby lokálního charakteru nejsou v rámci kontextu zpracovávaného modelu tak důležité, jako zachycení co možná největší celistvosti pohybů pilota v kokpitu. Senzor 315 byl umístěn na pravém bicepsu, senzor 316 na levém bicepsu, senzor 317 na bříše, senzor 318 na pravém předloktí a senzor 319 byl umístěn na levém předloktí (viz Obrázek 31). Sensory umístěné na horních končetinách poslouží k monitorování pohybu končetin, senzor na trupu zase vnese rozměr celkového pohybu těla z blízkosti těžiště. Sensory 315 a 316 byly umístěny na základě určené vzdálenosti mezi ramenem a loktem. Přesná poloha byla definována vzdáleností středu senzoru a bodu acromion. Pro umístění senzorů 318 a 319 byla jako referenční vybrána vzdálenost lokte a zápěstí; ta byla vyjádřena jako vzdálenost středu senzoru od lokte. Pro vyjádření polohy břišního senzoru byla zásadní výška v sedu a jeho poloha byla vyjádřena jako vzdálenost bodu vertex a středu uchycení senzoru. S ohledem na to, že bylo se senzory nutné průběžně pracovat, byly jim přiřazené pozice na těle vyznačeny vizuálně za pomoci psacího fixu. Zároveň byly všechny senzory barevně a směrově označeny tak, aby nedošlo k jejich záměně a nechtěné změně orientace.



Obrázek 31: Umístění senzorů ProMove MINI na subjektu

2.3 Schéma měření a letů

Měření pohybových dat probíhalo na letovém simulátoru *Beechcraft Baron* (viz Obrázek 32).



Obrázek 32: Průběh měření – letový simulátor a senzory ProMove MINI

Letový simulátor byl vybaven standardními ovládacími prvky, letovými přístroji, navigačními a komunikačními přístroji a přístroji pro kontrolu draku a motorů. Jejich rozložení plně odpovídalo předloze letounu *Beechcraft Baron*, a bylo tedy vhodné pro účely práce. Všechny parametry měření, jako samotný průběh letu, manipulace s prvky kokpitu a skenování přístrojů a okolí, byly nastaveny tak, aby vše v největší možné míře přibližovalo realitu letů IFR. K podélnému a příčnému řízení letadla sloužil sloupek řízení, na který měřený subjekty typicky působil levou rukou. Směrové ovládání simulátoru na zemi zajišťovaly pedály nožního řízení.

V průběhu letu na ně pilot nemusel působit zpravidla vůbec, nebo pouze minimálně. Na středovém panelu simulátoru se nacházely tři dvojice pák zajišťující ovládání přípusti motorů, nastavování bohatosti směsi a nastavování úhlu náběhu vrtulí, s nimiž musel pilot průběžně manipulovat. Dále se zde nacházelo ovládání zasouvání a vysouvání podvozku, ovládání podélného a příčného vyvážení a ovládání dalších standardních systémů letounu Beechcraft (viz Obrázek 33).

Z konvenčních přístrojů s indikací pomocí mechanického ukazatele měl pilot k dispozici následující zařízení – mechanický rychloměr, umělý horizont, barometrický mechanický výškoměr s mechanickým ovládáním nastavení referenčního tlaku, ukazatel CDI s mechanickým ovládáním nastavení referenčního kurzu, zatačkoměr s příčným relativním sklonoměrem, směrový setrvačnick s mechanickým ovládáním nastavení referenčního kurzu HDG, mechanický variometr, VOR/LOC/GPS indikátor s mechanickým ovládáním nastavení referenčního kurzu a indikátor ADF (MDI) (viz Obrázek 33).



Obrázek 33: Kokpit letového simulátoru (na obrázku simulátor před zabudováním družicové navigace Garmin GTN750)

V levé části kokpitu bylo umístěno zařízení iPad s letištní a traťovou dokumentací JEPPESEN. V pravé části kokpitu se nacházely ukazatele chodu a stavu pohonných jednotek, ovládání stopek, indikátor polohy klapek, indikátor polohy podvozku a modul pro simulaci družicové navigace Garmin GTN750 (viz Obrázek 34).



Obrázek 34: Modul pro simulaci družicové navigace Garmin GTN750

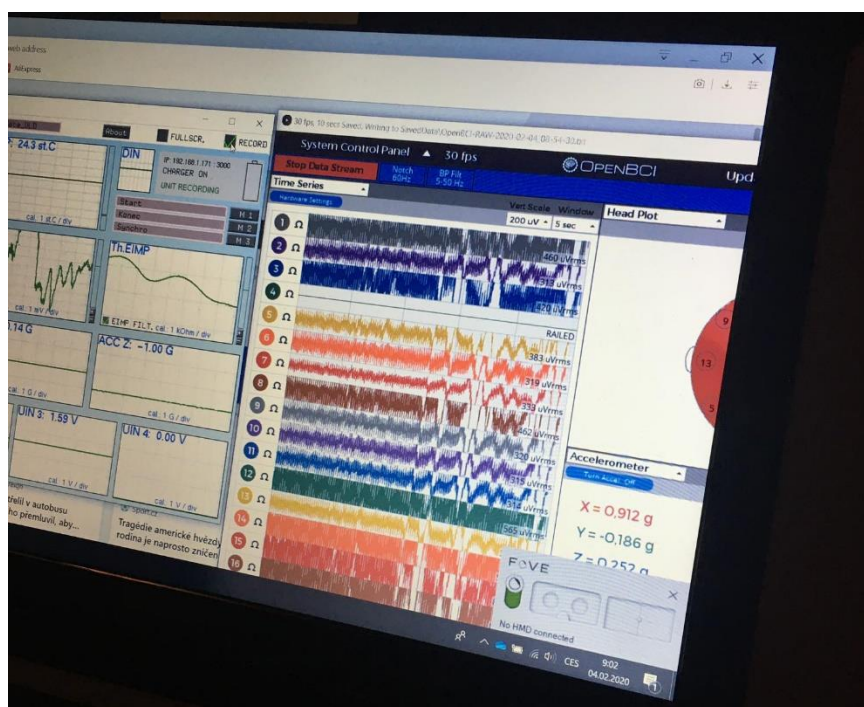
Měření gyro-akcelerometrickými systémy na letovém simulátoru bylo součástí větší série měření zaměřených na lidskou výkonnost. Výsledný návrh a průběh letů byl navržen tak, aby uspokojil požadavky všech měření a zároveň nikoho nelimitoval. Byla přitom využita letiště s označením ICAO - EDAC, EDDP, EDBC, EDDC, LKKV, EDQM, EDME, LOWS, LOWL, LKMT, LKTB, LOWW, EDDE, LKPR, LKPD, EDDM, EDDN. Každý subjekt absolvoval 8 měření sestávajících se vždy z dvou odletů po SID, dvou příletů po STAR a dvou přístrojových přiblížení ILS. Každý z letů probíhal v jednočlenné posádce a meteorologické podmínky v destinacích byly vždy na úrovni IMC, spadajících do minim přesného přiblížení první kategorie ICAO. Zároveň byla cíleně vybrána letiště s dlouhými úseky konečného přiblížení. Tím bylo dosaženo toho, že soubor pohybů pilotů byl vzájemně mezi lety porovnatelný. Průběh přiblížení měl co možná nejvíce uniformní charakter z hlediska postupů v kokpitu a pilot měl dostatek prostoru pro předvedení precizního přiblížení. Pro kontrolu konfigurace a nastavení parametrů letu využíval pilot checklist.

Obecný scénář letů probíhal zhruba následovně. Po vzletu v bezvětří pokračoval pilot po standardní odletové trati SID. Případný kratičký traťový let tvořily spojnice radionavigačních zařízení a RNAV traťových bodů. V žádné fázi letu nebyl využit autopilot. Krátce či přímo po dosažení konečného bodu SID následoval přílet k letišti po standardní příletové trati STAR a přesné přístrojové přiblížení ILS. V rámci jednoho měření byla tato série vykonána ještě jednou se zakončením měření na třetím letišti, přičemž každý let trval zhruba 30 minut. Průběh všech letů co nejvěrněji simuloval reálný provoz; Pilot komunikoval se všemi běžnými řídicími stanovišti, následoval rychlostní a výšková omezení tratí a plnil směrové a výškové pokyny

řídících. Při tom samozřejmě následoval platné provozní postupy letounu a obecně platné zásady precizního létání. Jako příklad jedné z tratí lze uvést trať následující:

Trať začíná na německém letišti Drážďany – EDDC. Standardní odletová trať SID z dráhy 22 s označením MAREM 5W vede pilota levou zatáčkou na konečný bod odletové trati MAREM. Následuje 9 NM dlouhý traťový let po spojnici MAREM – GOPSI a let po standardní příletové trati letiště Karlovy Vary – LKKV GOPSI 2P. Tato trať pilota zavede až na bod počátečního přiblížení IAF ARMOV. Z něj pilot pokračuje na standardní přesné přiblížení ILS na dráhu 29. Po přistání je pilot přesunut na práh dráhy 29 a pokračuje v měření s odletem z dráhy 29 po standardní odletové trati OKG 1F. Po krátkém traťovém letu na spojnici traťového bodu OKG (VOR/DME Cheb) a traťového bodu ABERU následuje standardní příletová trať ABERU 3A německého letiště Hof – EDQM a přesné přístrojové přiblížení ILS na dráhu 26.

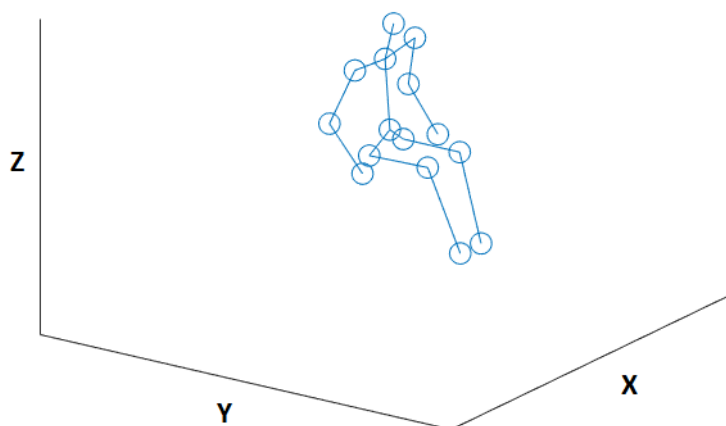
Samotný „instruktor“ a řídící letu měl neustálý přehled o dění v kokpitu, parametrech letu a výkonech jednotlivých senzorů ProMove MINI. Mohl tak aktivně řídit měření, sledovat průběh letu a zaznamenávat dodatečná data potřebná k vyhodnocení pohybu a modelování. Zároveň mohl zasáhnout v případě, že došlo k nějakým provozním výpadkům v rámci segmentu měření senzory ProMove MINI. Cílem bylo co možná nejméně zasahovat do přirozeného průběhu letu, ale zároveň dbát na dodržení obálky letu a měření.



Obrázek 35: Sledování výkonů segmentů systému Inertia v reálném čase

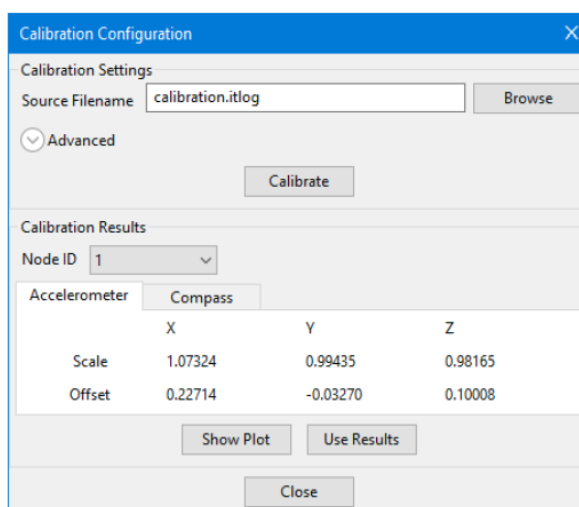
3 Hodnocení dat

Pro modelování pohybu byl určen referenční souřadnicový systém X, Y, Z, jehož orientace korespondovala se světovým souřadnicovým systémem (viz Obrázek 36).



Obrázek 36. Systém souřadnic využitý při tvorbě pohybového modelu

Pro sesouhlasení senzorů ProMove MINI s tímto systémem souřadnic byla využita metodika z kapitoly 2.1.1. Kalibrace. Jak lze vidět na Obrázku 37, konkrétní soubor „logfile“, zde konkrétně „calibration.itlog“, představuje jeden proces kalibrace snímačů. Po vykonání příslušných kalibračních pohybů jsou pro jednotlivé senzory „Node ID“ stanoveny hodnoty „Scale“ a „Offset“. Funkce „Show Plot“ umožňuje ověření správnosti kalibrace na základě prezentace normalizovaného signálu. Správné referenční hodnoty „Scale“ a „Offset“ jsou uváděny výrobcem v dodané příručce. Obecně by se měla hodnota „Scale“ pohybovat kolem 1 a hodnota „Offset“ kolem 0 [55].



Obrázek 37: Kalibrace ProMove MINI [55]

Při vytváření modelu bylo využito dat o změnách prostorových úhlů. Prostorové úhly definují následující matematické operace.

Pokud $a = [x_a, y_a, z_a]$, $b = [x_b, y_b, z_b]$ jsou prostorové vektory v souřadnicovém systému X, Y, Z , pak platí, že jejich skalární součin je:

$$a \cdot b = |a| * |b| * \cos(\alpha) \quad (15)$$

$$\text{kde } |a| = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \text{ a } |b| = \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}$$

Pokud z výše uvedeného vyplývá, že:

$$\alpha = \arccos[(a \cdot b) / (|a| * |b|)] \quad (16)$$

pak po dosazení pro prostorový úhel α platí:

$$\alpha = \arccos[(x_a * x_b + y_a * y_b + z_a * z_b) / (\sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} * \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2})] \quad (17)$$

K hodnocení polohy segmentů těla lze perspektivně využít spektrální analýzu, která je součástí prezentovaného programu, pro odhad spektra akcelerací a úhlů jednotlivých bodů modelu. Získaná data (signál) jsou pro tuto analýzu dobře použitelná, jelikož představují průběh úhlových výchylek v diskrétním čase s vzorkovací frekvencí odpovídající 200 Hz. Aby bylo možné zakomponovat frekvenční analýzu do hodnocení pohybu předkládaného modelu, je zapotřebí vykreslit výkonové spektrum. To udává rozložení výkonu signálu podél frekvenční osy a amplituda znázorňuje intenzitu výchylek na dané frekvenci. Z tohoto spektra pak lze vyčíst, která složka pohybu je nejvýkonnější.

Signály se dělí na deterministické a náhodné. Deterministické signály následují předepsanou funkci, zatímco náhodné signály na první pohled nerespektují žádný předpis či předvídatelný vývoj. Frekvenční charakteristika takového signálu může definovat fázovou nebo amplitudovou charakteristiku.

Protože je zapotřebí převést naměřený signál z časové do frekvenční oblasti, bude využito Fourierovy transformace. Ta převede časově závislý signál do vyjádření funkcemi \sin a \cos . Protože využitá technologie MOCAP poskytuje data úhlových odchylek v diskrétním čase, bude využita konkrétně diskrétní Fourierova transformace (DFT).

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je numerická metoda umožňující určení spektra ze vzorku signálů, či signál ze vzorků spektra. Její odvození je možné skrze diskretizaci

Fourierovy transformace v časové nebo frekvenční oblasti. Pro přímou diskretní Fourierovu transformaci (DFT) platí:

$$X\left[\frac{n}{NT}\right] = T \sum_{n=0}^{N-1} x[nT] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (18)$$

pro zpětnou diskretní Fourierovu transformaci (IDFT) platí:

$$x[nT] = \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} X\left[\frac{k}{NT}\right] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (19)$$

Pro zobecnění výše uvedených rovnic lze vynechat konstantu T , nahradit nT spolu s n/NT koeficienty n a k a zavést substituci $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$. Pak pro diskretní Fourierovu transformaci (DFT) platí:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} \quad (20)$$

kde $X[k]$ je posloupnost amplitudové charakteristiky, $x[n]$ posloupnost hodnot signálu, W_N^{nk} transformující činitel a n, k přirození čísla.

Soustava rovnic, vycházejících z rovnice pro diskretní Fourierovu transformaci DFT, by například pro $N = 4$ vypadala následovně:

$$\begin{aligned} X[0] &= x[0]W_4^0 + x[1]W_4^0 + x[2]W_4^0 + x[3]W_4^0 \\ X[1] &= x[0]W_4^0 + x[1]W_4^1 + x[2]W_4^2 + x[3]W_4^3 \\ X[2] &= x[0]W_4^0 + x[1]W_4^2 + x[2]W_4^4 + x[3]W_4^6 \\ X[3] &= x[0]W_4^0 + x[1]W_4^3 + x[2]W_4^6 + x[3]W_4^9 \end{aligned} \quad (21)$$

Z toho vyplývá, že $X[k]$ popisuje míru podobnosti posloupnosti $x[n]$ s $\sin(n\Phi_k)$ a $\cos(n\Phi_k)$. $\sin(n\Phi_k)$ a $\cos(n\Phi_k)$ jsou složky komplexní exponenciály a normovanou frekvencí $\Phi_k = \frac{2\pi k}{N}$. To znamená, že pro $k = 0$ se $x[n]$ porovnává s konstantní posloupností 1,1,1,... o N prvcích. Pokud roste k , frekvence se zvyšuje o $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{N}$ až do $k = N - 1$, kde dosahuje frekvence maximální hodnoty: [95, 96, 97]

$$f_{max} = \frac{2\pi(N-1)}{N} \quad (22)$$

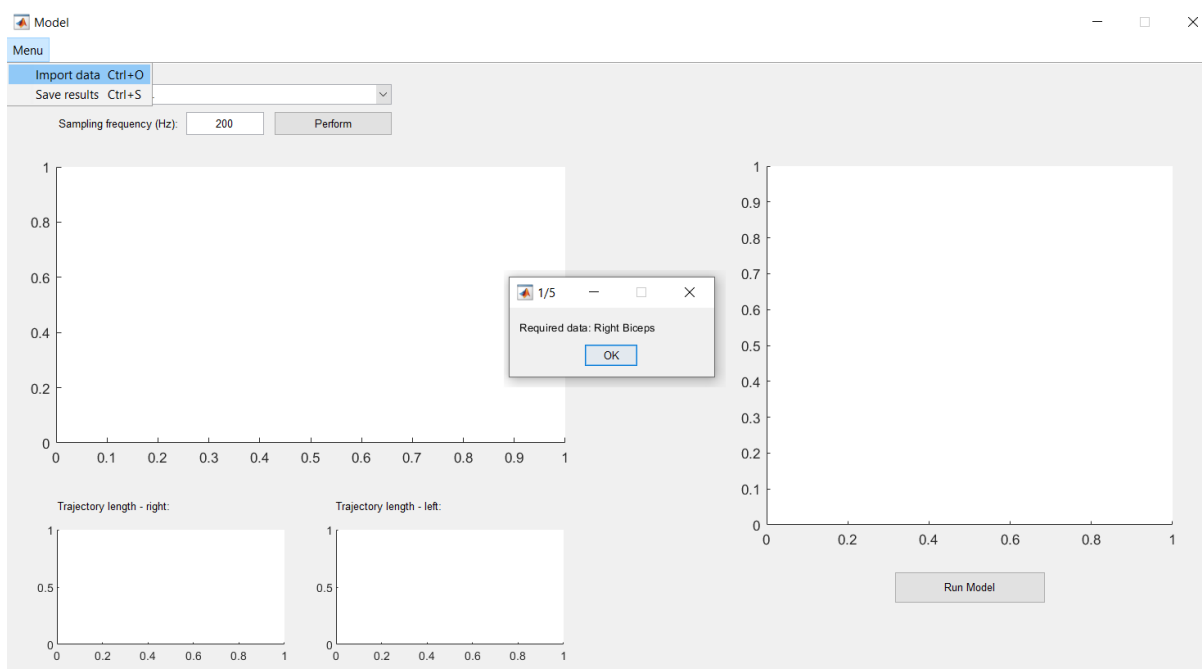
Hodnocení 3D pohybu je dále možné na základě metody délek trajektorie. Metoda délky trajektorie v tomto konkrétním případě vyjádří například, jak moc pilot kmitá rukou, respektive jakou míru segmentální aktivity vynakládal. Platí, že čím méně se specifický segment těla pohybuje, tím kratší je délka trajektorie. To by měla nepřímo potvrdit i spektrální analýza. V případě této práce probíhal výpočet délek trajektorie s využitím posuvu souřadnic. Dále je potřebné poznamenat, že v tomto případě byla délka trajektorie bezrozměrná, a to z důvodu nevytvoření modelu a souřadnicové soustavy v reálném měřítku. Specifický přístup pro tento typ analýzy spolu s matematickým pozadím je možné najít v [98, 99].

4 Diskuze výsledků

Před samotnou diskuzí výsledků je na místě zmínit, že vznik práce, průběh měření i samotná výsledná podoba práce byly zásadně ovlivněny světovou pandemií COVID-19. Práce si mimo jiné kladla za cíl vytvoření obsáhlé knihovny pohybových dat pilotů, jenž by mohla posloužit i pro další práce zaměřené na srovnávací statistiku, konkrétní ergonomické aplikace, výzkum pohybových aktivit a další. Průběh pandemie znemožnil další měření a zastavil průběh měření spojených s prací na počtu 8 subjektů.

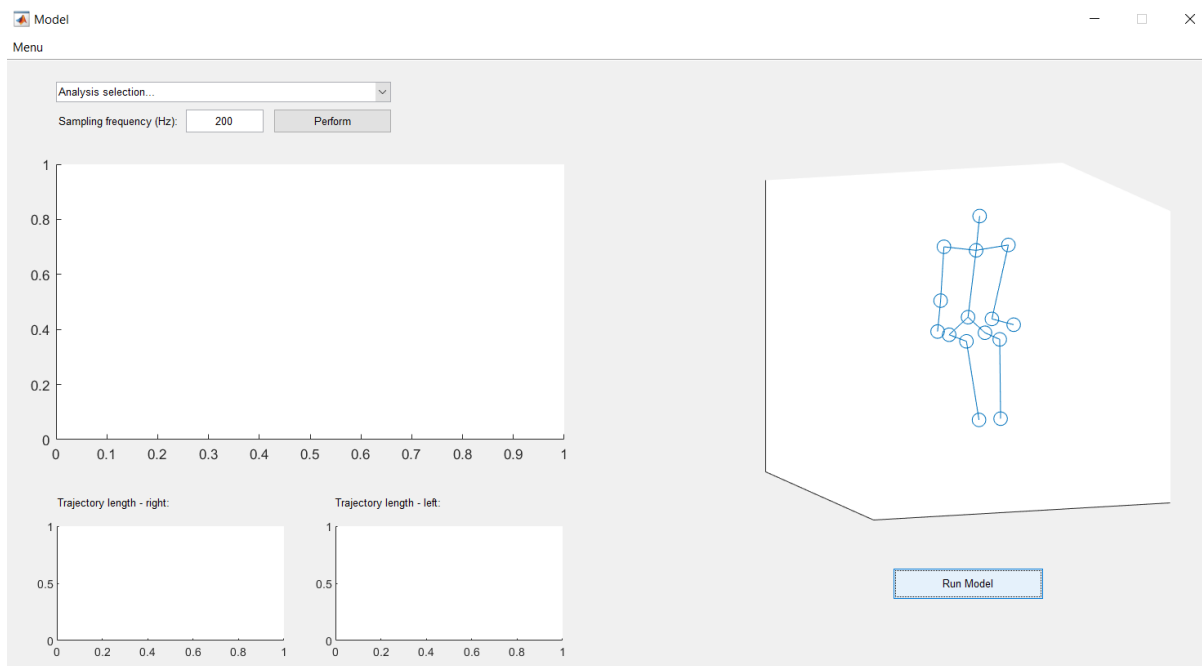
I přes veškeré snahy a přesvědčení o vhodnosti zvoleného gyro-akcelerometrického systému se při následné analýze prokázalo, že většina z 15 GB dat obsahujících 96 hodin měření není dost dobře použitelná pro vytváření pohybového modelu. Data byla neúměrně zatížena výpadky spolu s nesrovnalostmi v orientacích a polohách snímačů. Proto byla následně v rámci možností doměřena alespoň základní pohybová data v přísných laboratorních podmínkách letového simulátoru tak, aby veškerá uvedená metodika byla na co aplikovat a bylo možné ji experimentálně ověřit. Další měření bohužel úplně znemožnily restriktce spojené s návštěvou škol, seskupování cizích lidí a hlavně, pro autora nejvíce limitující, restriktce spojené s cestováním na území ČR. Po komunikaci s výrobcem využitého gyro-akcelerometrického celku byl celý systém poslán na odborný servis a nebylo s ním možné dále pracovat.

Výsledek práce lze prezentovat v rámci „Graphical User Interface“ GUI (viz Obrázek 38).



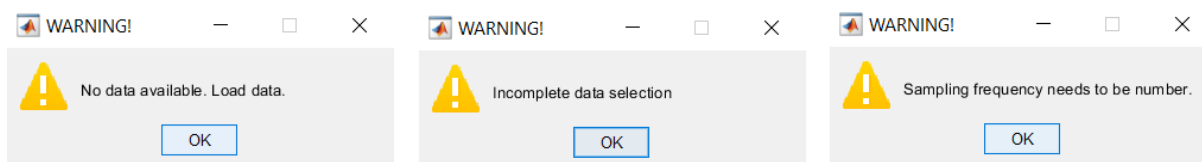
Obrázek 38: Počáteční stav – volba dat

V rámci GUI může uživatel zvolit vzorkovací frekvenci odpovídající frekvenci („Sampling Frequency“), se kterou byla data měřená. V případě této práce to bylo 200 Hz. Načtení konkrétních dat uživatel provede v „menu – Import Data“. Datový soubor, příslušející konkrétnímu snímači 315 – 319, je zvolen na základě žádosti od programu – „Right Biceps, Left Biceps, Right Forearm, Left Forearm, Chest“ (viz Obrázek 38). Po načtení dat se v pravé části prezentovaného GUI automaticky spustí model (viz Obrázek 39).



Obrázek 39: Spouštění modelu

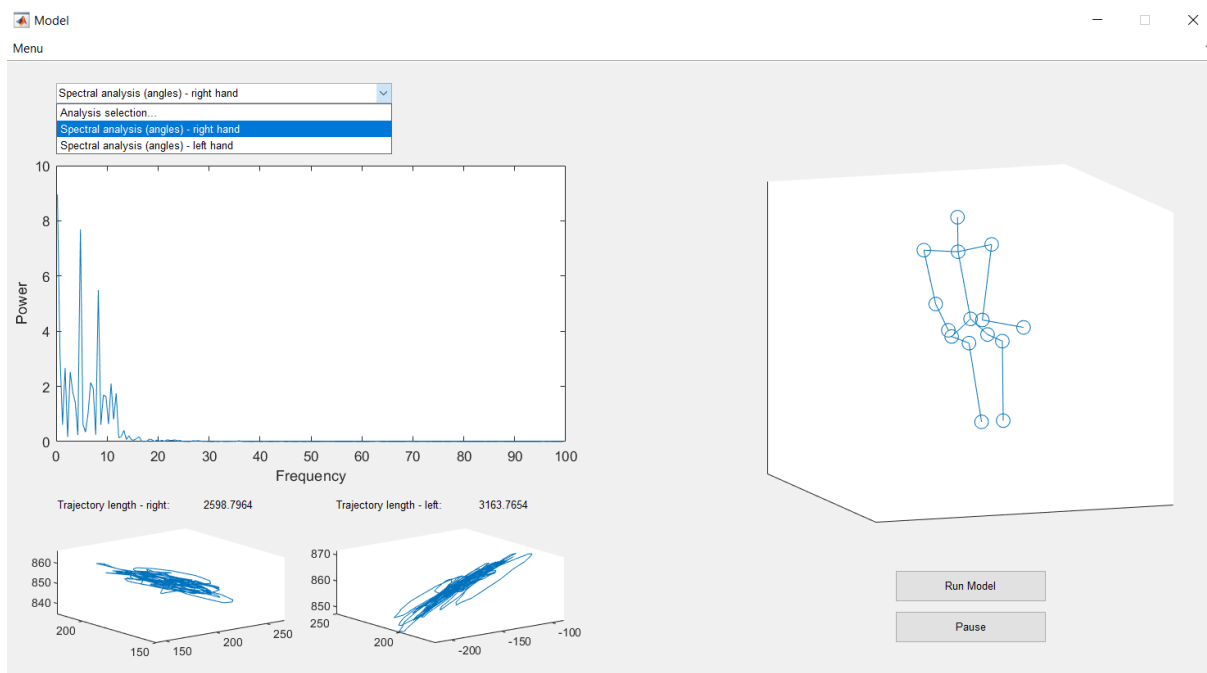
Délka trvání vytváření modelu se odvíjí od množství vstupních dat. V průběhu spuštění modelu a v návaznosti na to se začínají počítat úhly v rámci spektrální analýzy, což lze po dokončení modelu vidět v levé části prezentovaného GUI. Uživatel může proces po prvotním úplném vymodelování spouštět a zastavovat znova s využitím tlačítek „Run Model“ a „Pause“. V případě, že uživatel nevloží žádná data nebo vloží data chybná, upozorní jej po spuštění „Run model“ varovná funkce (viz Obrázek 40).



Obrázek 40: Varovná funkce - chyba v datovém souboru

Prezentované GUI umožňuje uložit data, vykreslené grafy a obrázky.

V levé části GUI je prezentovaná spektrální analýza a průběh délek trajektorií. V tomto konkrétním případě lze zvolit ze dvou případů, pro něž se bude spektrální analýza a zobrazení délek trajektorie vykreslovat, a to „spectral analysis (angles) – right hand“ a „spectral analysis (angles) – left hand“. V tomto konkrétním příkladu lze z délek trajektorií vyčíst větší aktivitu levé ruky – „Trajectory length – left“ (viz Obrázek 41).



Obrázek 41: Výsledek modelování

V rámci prezentovaného modelu byl využit 50% percentil mužské populace. Měření konkrétních antropometrických parametrů subjektů posloužilo ke správnému umístění senzorů. Výsledný všeobecný model tak dokáže prezentovat průměrnou mužskou populaci na základě předpokladu, že nejvíce vzorků bude korespondovat s tímto průměrem. V případě potřeby přesné rekonstrukce konkrétního člověka lze jeho konkrétní antropometrické parametry promítnout do modelu po příslušné úpravě skriptu [100].

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvoření dynamického pohybového modelu perspektivně sloužícího k hodnocení pohybové aktivity. Na základě toho byla provedena analýza současného stavu, v níž byly představeny dostupné technologie MOCAP, úloha lidského činitele v leectví, využitelnost pohybových modelů a stejně tak byly v krátkosti představeny existující přístupy k analýze, měření a rozpoznávání pohybů. Navržený experiment proběhl jako součást většího bloku měření na školním letovém simulátoru, přičemž maximální důraz byl kladen na reálný průběh letů. Rozmístění gyro-akcelerometrických senzorů a průběh měření se opíraly o závěry analýzy současného stavu. Celkem bylo naměřeno 64 kompletních letů odpovídajících postupům a podmínkám jednopilotních letů IFR, z nichž bohužel ani jeden nemohl být kvůli více faktorům na straně techniky nakonec vybrán pro experimentální ověření metodiky. Metodika byla úspěšně ověřena s použitím vzorku dat naměřeným s maximálním důrazem na kontinuitu výstupního signálu. Zpracování dat a vytvoření pohybového modelu vycházelo z předložené analýzy, studia velkého množství publikací (viz Seznam použité literatury) a kapacity použité výpočetní techniky a softwarového prostředí MATLAB.

Na základě uvedeného byl s pomocí naměřených dat vytvořen příčkový model pilota spolu se spektrální analýzou mezisegmentálních úhlů s perspektivním využitím taktéž pro akcelerace. K dispozici bylo kvůli vysokým pořizovacím nákladům pouze 5 kusů gyro-akcelerometrických senzorů, jež z podstaty věci nedostačovaly k zachycení pohybů celého člověka. Výsledný model se tak soustřeďuje na horní polovinu těla. Použitý letový simulátor nepatřil mezi certifikovaná zařízení a nebyl schopen napodobit aspekty letu, tak jako to zvládnou plně pohyblivé simulátory. Jejich užití by zajisté prohloubilo pocity a vjemy pilota dokonalou fyzikou, vibracemi a průběhy klonění, klopení a stoupání. Zároveň by však musela být naměřená data korigována o vlivy specifických pohybů těchto simulátorů, jelikož například zpomalení a zrychlení letadla je simulováno klopivým pohybem simulátoru. Tento problém by však bylo možné vyřešit umístěním referenčního gyro-akcelerometru do kabiny.

Diplomová práce a její výstup vytváří prostor pro další výzkum, v němž by se případní autoři mohli zaměřit na konkrétní využití pohybových modelů při implementaci nových a inovativních systémů a postupů. Stejně tak je možno zmínit možnost využití těchto technologií v kokpitech reálných letadel. Vzhledem ke kompaktnosti využitého systému ProMove MINI nepředstavuje jeho využívání prostorový a pohybový problém. Pokud by se jednalo o využití v rámci všeobecného leectví GA za podmínek VFR, lze se domnívat, že prakticky neexistují limitace takového měření, kterými by se bylo třeba zabývat. Jak stanovuje letecký předpis L6 – Provoz letadel, vycházející z celosvětově všeobecně uznávaných standardů, letadla při letech VFR musí být vybavena prostředky pro měření a zobrazování magnetického kurzu, indikované

nadmořské výšky, indikované rychlosti letu a prostředky pro měření a zobrazování času [101]. Měření a indikaci ani jedné z těchto veličin spolu s dalšími faktory spojenými s průběhem letu VFR systém ProMove MINI neomezí. Na provoz IFR, obchodní letecké dopravy a velkých proudových letounů se typicky vztahují přísnější kritéria. Proto by využívání gyro-akcelerometrických systémů v tomto provozu musel pravděpodobně předcházet schvalovací proces zahrnující určení a hodnocení negativních vlivů na provoz jako například interferences ostatními systémy. Pro bližší referenci a provedení strukturou požadavků by mohl posloužit například dokument *RTCA DO-307A Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance* [102]. Ten vymezuje mimo jiné podmínky pro využívání dnes už tak běžných součástí kokpitu jako je EFB. Součástí technologického vybavení EFB, jakým je typicky například zařízení iPad, bývají mimo jiné baterie (Li-Ion či Li-pol), akcelerometry, gyroskopy, kompas či barometr. V případě použití letového módu, v němž je většina takovýchto zařízení za letu provozována, nedojde na zařízení iPad (verze 9.7z roku 2018) k deaktivaci ani jedné ze zmiňovaných komponent a lze se tedy domnívat, že gyro-akcelerometrický snímací systém by nijak neinterferovals avionikou a dalšími zařízeními v kokpitu. Dále je povoleno a přímo vyžadováno v kokpitu EFB průběžně dobíjet. Charakteristiky přenosové sítě systému Inertia jsou frekvenční pásmo 2,4 Ghz, při vysílacím výkonu 10 dBm a rychlosti přenosu 4 Mb/s. Vzhledem k dnes už poměrně běžně vyskytujícímu se Wi-fi připojení na palubách letadel, jehož výkon je dimenzován na obsluhu stovek zařízení najednou a má podobné charakteristiky jako přenos v rámci Inertia, se lze domnívat, že vysílací charakteristiky Inertia by neměly představovat limitaci pro využití v kokpitech. Navíc výrobce uvádí, že senzory Inertia jsou schopny po příslušném nastavení samostatného měření bez nutnosti přenosu dat do centrálního uzlu a obslužného počítače.

Kromě výše uvedeného se lze domnívat, že navrženou metodiku je možné dobře zkombinovat s jinými biomechanickými metodami a určit tak například energetický výdej spojený s pilotováním. Dále může tato metodika dobře posloužit pro komplexní analýzu pohybové aktivity v kokpitu a obecně biomechanické modelování člověka, což je (jak ukazuje například široké spektrum publikací autorského kolektivu Socha et al.) hojně diskutované téma posledních let [103,104]. Domnívám se navíc, že by se metodika dala využít při zkoumání percepce a reakce na podněty, hodnocení stresu nebo „mikrotřesu“ („microtremor“). Při použití v reálném letadle se nabízí zaměření na přenos a kompenzaci vibrací člověkem; pravděpodobně by šly zpozorovat kompenzační pohyby vůči vibracím, vliv vibrací na řízení a další.

Předkládaná práce dle zadání zevrubně zmapovala jak metodické zázemí, tak i možné přístupy k problematice, na základě čehož předložila komplexně vytvořený experimentální model pilota v kokpitu se všemi výsledky z toho plynoucími. Práce tak ve svém závěru představuje exploratorní základ pro další výzkum v oblasti, přičemž jednotlivé výsledky mohou sloužit jak dalšímu teoretickému rozvoji, tak mohou nalézt i praktické uplatnění, o čemž je autor na tomto místě přesvědčen.

Seznam použité literatury

[1] CHAFFIN, DB. Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design. *Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, Pa.* [online]. 2001 [cit. 2020-11-07].

[2] CHAFFIN, DB. Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics* [online]. 2007, 48(5), 478-491 [cit. 2020-11-07]. ISSN 0014-0139.
Dostupné z: doi:10.1080/00140130400029191

[3] ZIBNER, Lukáš. *Vliv únavy pilota na přesnost pilotáže*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní. Vedoucí práce Doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

[4] GODFREY, A., R. CONWAY, D. MEAGHER a G. ÓLAIGHIN. Direct measurement of human movement by accelerometry. *Medical Engineering & Physics* [online]. 2008, 30(10), 1364-1386 [cit. 2020-11-14]. ISSN 13504533.
Dostupné z: doi:10.1016/j.medengphy.2008.09.005

[5] STERGIOU, Nicholas. *Innovative Analyses of Human Movement: Analytical Tools for Human Movement Research*. Champaign, IL : Human Kinetics, 2004. ISBN 9780736044677.

[6] Biomechanika: Historie, Definice, Základní charakteristiky a veličiny. *Fakulta tělesné výchovy a sportu - Univerzita Karlova* [online]. 2018 [cit. 2020-11-17].
Dostupné z: <https://ftvs.cuni.cz/FTVS-1.html>

[7] BALATKA, Jan. FAKULTA SPORTOVNÍCH STUDIÍ. *Kineziologie pro posluchače tělesné výchovy I*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2002.

[8] BERNACIKOVÁ, Martina a Miriam KALICHOVÁ. Teorie sportovní kineziologie: Kinematická charakteristika pohybů člověka. *Základy sportovní kineziologie* [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/do/1451/e-learning/kineziologie/elportal/pages/kinematika_dynamika.html

[9] VITTEK, Peter, SCHERKS, Jan. *Učební text k předmětu Bezpečnost a kvalita: Podle ICAO doc. 9859*. Praha, 2009 [cit. 2020-11-21].

- [10] SUN, Youchao a Xia ZHANG. Method of Pilot's Motion Retrieval and Recognition Based on Dynamic Programming. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, *China: International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control* [online]. 2017 [cit. 2020-11-08].
- [11] ENDSLEY, M.R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In: *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference* [online]. IEEE, 1988, s. 789-795 [cit. 2018-08-24]. DOI: 10.1109/NAECON.1988.195097. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/195097/>
- [12] DREYFUSS. *Measure of Man and Woman*. John Wiley, 2001, 112 s. ISBN 0471099554.
- [13] JAYVES, Christian. Anthropometric: Basic of Architectural Design. *Slideshare* [online]. 2014 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/iitCHANJAYVES/1-anthropometry>
- [14] BOUCHARD, Claude, Steven N. BLAIR a William L. HASKELL. *Human Kinetics (ADVANTAGE) (Consignment)*; 2nd edition, 2012, 456 s. ISBN 0736095411.
- [15] RUBÍN, Lukáš, Aleš SUCHOMEL a Jaroslav KUPR. Aktuální možnosti hodnocení tělesné zdatnosti u jedinců školního věku. *Česká kinantropologie* [online]. 2014, , 11-22 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282291553_Aktualni_moznosti_hodnoceni_telesne_zdatnosti_u_jedincu_skolního_veku
- [16] SIGMUND, Erik a Dagmar SIGMUNDOVÁ. *Pohybová aktivita pro podporu zdraví dětí a mládeže. 1. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011. ISBN 978-80-244-2811-6.
- [17] FRÖMEL, Karel, Zbyněk SVOZIL a Jiří NOVOSAD. *Pohybová aktivita a sportovní zájmy mládeže: [monografie pro studijní účely]*. Olomouc: Univerzita Palackého, 1999. ISBN 80-706-7945-x.
- [18] HAVLÍČKOVÁ, L., a kol.. *Fyziologie tělesné zátěže I: obecná část. 2., přeprac. vyd.* Praha: Karolinum, 1999, 203 s. ISBN 978-80-7184-875-2.

[19] NEULS, Filip a Karel FRÖMEL. *Pohybová aktivita a sportovní preference adolescentek*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2016. ISBN 978-80-244-5090-2.

[20] DOLEŽÍLEK, Jakub. *Monitoring pohybové aktivity vybrané populační skupiny*. Brno, 2017. Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA, Fakulta sportovních studií, Katedra kineziologie. Vedoucí práce Mgr. Tomáš Vespalec, Ph.D.

[21] INTILLE, S. S., LESTER, J., SALLIS, J.F. a G. DUNCAN. New horizons in sensor development. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(1 Suppl 1) [online]. 2012, 24-31 [cit. 2020-12-01].

[22] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 216/2008 ze dne 20. února 2008 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Evropské agentury pro bezpečnost letectví, kterým se ruší směrnice Rady 91/670 EHS, nařízení (ES) č. 1592/2002 a směrnice 2004/36/ES [online]. [cit. 2020-11-21]. Dostupné z:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0216&from=CS>

[23] HASKELL, William L., I-MIN LEE a R.P. RUSSELL. Physical Activity and Public Health. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2007, 39(8), 1423-1434 [cit. 2020-12-01]. ISSN 0195-9131.
Dostupné z: doi:10.1249/mss.0b013e3180616b27

[24] Move for Health. World Health Organization [online]. 2002 [cit. 2020-11-21].
Dostupné z: <http://www.who.int/moveforhealth/en/>

[25] GILBERTOVÁ, Sylva a Oldřich MATOUŠEK. *Ergonomie: optimalizace lidské činnosti*. Praha: Grada, 2002. ISBN 80-247-0226-6.

[26] BEJČEK, Miroslav. *Fyzický dopad na práci pilota z pohledu nedostatku pohybu během výkonu služby*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy. Vedoucí práce Ing. Stanislav Absolon.

[27] HERDA, L., P. FUA, R. PLANKERS, R. BOULIC a D. THALMANN. Skeleton-based motion capture for robust reconstruction of human motion. In: *Proceedings Computer Animation 2000* [online]. IEEE Comput. Soc, 2000, s. 77-83 [cit. 2020-11-07]. ISBN 0-7695-0683-6.
Dostupné z: doi:10.1109/CA.2000.889046

[28] MENACHE, Alberto. *Understanding motion capture for computer animation and video games*. San Diego, CA: Morgan Kaufmann, c2000. ISBN 978-0124906303.

[29] VLASIC, Daniel, Rolf ADELSBERGER, Giovanni VANNUCCI, John BARNWELL, Markus GROSS, Wojciech MATUSIK a Jovan POPOVIĆ. Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2007, 26(3) [cit. 2020-11-08]. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/1276377.1276421

[30] ZHANG, Yanjun a Youchao SUN. Reuse of Pilot Motions for Improving Layout Design of Aircraft Cockpit. *Journal of Computers* [online]. 2013, 8(9), 2269-2276 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1796-203X. Dostupné z: doi:10.4304/jcp.8.9.2269-2276

[31] VÝZKUMNÉ METODY V BIOMECHANICE. Aplikovaná sportovní edukace bezpečnostních složek [online]. *Fakulta sportovních studií Masarykovy univerzity*, 2012 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z:

<https://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/biomechanika/vyzkumne-metody-v-biomechanice#>

[32] HORDYJ, Jacek. Inverse Kinematics of anthropomorphic structures for vision systems applications [online]. *AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY - FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND ROBOTICS*, 2015 [cit. 2020-11-09].

Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.1.3459.4002

[33] MOLET, Tom, Ronan BOULIC a Daniel THALMANN. Human Motion Capture Driven by Orientation Measurements. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* [online]. 1999, 8(2), 187-203 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1054-7460. Dostupné z: doi:10.1162/105474699566161

[34] BODENHEIMER, Bobby, Chuck ROSE, Seth ROSENTHAL a John PELLA. The Process of Motion Capture: Dealing with the Data. THALMANN, Daniel a Michiel VAN DE PANNE, ed. *Computer Animation and Simulation '97* [online]. Vienna: Springer Vienna, 1997, 1997, s. 3-18 [cit. 2020-11-08]. Eurographics. ISBN 978-3-211-83048-2.

Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7091-6874-5_1

[35] *Motion Capture Suits: Gypsy 7 Torso Motion Capture System* [online]. [cit. 2020-11-25].

Dostupné z: <https://metamotion.com/gypsy/Gypsy-6-torso.html>

[36] WARD, A., A. JONES a A. HOPPER. A new location technique for the active office. *IEEE Personal Communications* [online]. 4(5), 42-47 [cit. 2020-11-22]. ISSN 10709916.

Dostupné z: doi:10.1109/98.626982

[37] MILLER, N., O.C. JENKINS, M. KALLMANN a M.J. MATARIC. Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation. In: *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2004* [online]. IEEE, 2004, s. 547-565 [cit. 2020-11-08]. ISBN 0-7803-8863-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICHR.2004.1442670

[38] BUFFA, Cesare. Lorentz Force Magnetometers. BUFFA, Cesare. *MEMS Lorentz Force Magnetometers* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018, 2018-07-06, s. 13-29 [cit. 2020-11-26]. ISBN 978-3-319-59411-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-59412-5_3

[39] FAVRE, J., B.M. JOLLES, O. SIEGRIST a K. AMINIAN. Quaternion-based fusion of gyroscopes and accelerometers to improve 3D angle measurement. *Electronics Letters* [online]. 2006, 42(11) [cit. 2020-11-08]. ISSN 00135194. Dostupné z: doi:10.1049/el:20060124

[40] JIHONG LEE a INSOO HA. Sensor fusion and calibration for motion captures using accelerometers. In: *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)* [online]. IEEE, 1999, s. 1954-1959 [cit. 2020-11-08]. ISBN 0-7803-5180-0. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.1999.770394

[41] SHIRATORI, Takaaki a Jessica K. HODGINS. Accelerometer-based user interfaces for the control of a physically simulated character. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2008, 27(5), 1-9 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/1409060.1409076

[42] GODFREY, A., R. CONWAY, D. MEAGHER a G. ÓLAIGHIN. Direct measurement of human movement by accelerometry. *Medical Engineering & Physics* [online]. 2008, 30(10), 1364-1386 [cit. 2020-11-14]. ISSN 13504533.

Dostupné z: doi:10.1016/j.medengphy.2008.09.005

[43] INTRODUCTION TO MEMS ACCELEROMETERS. PCB PIEZOTRONICS, AN MTS COMPANY [online]. 3425 Walden Avenue Depew, NY 14043-2495 USA, 2020 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/mems-accelerometers>

- [44] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl – Piezoelektrické. *Automatizace.hw.cz*. [online]. 2007 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [45] Inertial Sensor Technology - Working principles and development of MEMS inertial sensors. *SILICON SENSING* [online]. Plymouth, United Kingdom, 2017 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.siliconsensing.com/technology/mems-accelerometers/>
- [46] AGNIHOTRI, Nikhil. What are inertial sensors?: Piezoresistive Accelerometers. *Engineers Garage - An EE World Online Resource* [online]. 2020 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/tech-articles/what-are-inertial-sensors/>
- [47] SLYPER, Ronit a Jessica K. HODGINS. Action Capture with Accelerometers. *Proceedings of the 2008 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation* [online]. Dublin, Ireland, 2008 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: doi:10.2312/SCA/SCA08/193-199
- [48] MATHIE, Merryn J, Adelle C F COSTER, Nigel H LOVELL a Branko G CELLER. Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement. *Physiological Measurement* [online]. 2004, 25(2), R1-R20 [cit. 2020-11-26]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: doi:10.1088/0967-3334/25/2/R01
- [49] *OXFORD aviation academy. ATPL Ground Training Series. Aircraft General Knowledge – Flight Instruments – Auto Flight – Waring and Recording – Engine Instruments. Fourth Edition.* United Kingdom: Oxford Aviation Academy, 2008.
- [50] MATOUŠ, Štěpán. Palubní přístroje II. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní. Vedoucí práce RNDr. Martin Vecko, CSc.
- [51] FOLTYN, Jan. *Víceúčelový senzor pro analýzu pohybů člověka.* Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Černý, Ph. D.
- [52] CHEN, Peng-zhan, Jie LI, Man LUO a Nian-hua ZHU. Real-Time Human Motion Capture Driven by a Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Games Technology* [online]. 2015, 2015, 1-14 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1687-7047. Dostupné z: doi:10.1155/2015/695874

- [53] MANTYJARVI, J., J. HIMBERG a T. SEPPANEN. Recognizing human motion with multiple acceleration sensors. In: *2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat.No.01CH37236)* [online]. IEEE, 2001, s. 747-752 [cit. 2020-11-08]. ISBN 0-7803-7087-2.
Dostupné z: doi:10.1109/ICSMC.2001.973004
- [54] SAKAGUCHI, T., T. KANAMORI, H. KATAYOSE, K. SATO a S. INOKUCHI. Human motion capture by integrating gyroscopes and accelerometers. In: *1996 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (Cat. No.96TH8242)* [online]. IEEE, 1996, s. 470-475 [cit. 2020-11-08]. ISBN 0-7803-3700-X.
Dostupné z: doi:10.1109/MFI.1996.572219
- [55] ProMove-mini Wireless Inertial Sensing Platform: User Manual v3.8.5 [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: inertia-technology.com
- [56] KYYNÄRÄINEN, J., J. SAARILAHTI, H. KATTELUS, et al. 3D Micromechanical Compass. *Sensor Letters* [online]. 2007, 5(1), 126-129 [cit. 2020-11-26]. ISSN 1546198X.
Dostupné z: doi:10.1166/sl.2007.040
- [57] KAHR, Matthias, Michael STIFTER, Harald STEINER, Wilfried HORTSCHITZ, Gabor KOVÁCS, Andreas KAINZ, Johannes SCHALKO a Franz KEPLINGER. Dual Resonator MEMS Magnetic Field Gradiometer. *Sensors* [online]. 2019, 19(3) [cit. 2020-11-26]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19030493
- [58] XIANG, Chengkai, Hui Huang HSU, Wu Yui HWANG a Jianhua MA. Comparing Real-Time Human Motion Capture System Using Inertial Sensors with Microsoft Kinect. In: *2014 7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 53-58 [cit. 2020-11-08]. ISBN 978-1-4799-4266-4.
Dostupné z: doi:10.1109/U-MEDIA.2014.25
- [59] VAN DER MEULEN, Peter A. a Perry DICLEMENTE. *Ergonomic Evaluation of an Aircraft Cockpit with RAMSIS 3D Human Modeling Software* [online]. In: . 2001-06-26, s. - [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: doi:10.4271/2001-01-2115
- [60] LULIĆ, T. Jurčević, O MUFTIĆ a A SUŠIĆ. Ergonomical analysis of pilot seat km-1. Proceedings of 2nd International Ergonomics Conference, Ergonomics 2004 [online]. Stubičke Toplice, Zagreb, Croatia, 2004 [cit. 2020-12-01].

Dostupné z: <https://bib.irb.hr/datoteka/179073.179073.pdf>

[61] GREEN, Rush a Jeffrey HUDSON. A Method for Positioning Digital Human Models in Airplane Passenger Seats. DUFFY, Vincent, ed. *Advances in Applied Digital Human Modeling* [online]. CRC Press, 2010, 2010-06-09, s. 1-8 [cit. 2020-11-08]. Advances in Human Factors and Ergonomics Series. ISBN 978-1-4398-3511-1.

Dostupné z: doi:10.1201/EBK1439835111-2

[62] OUDENHUIJZEN, Aernout, Gregory ZEHNER, Jeffrey HUDSON a Hyeg CHOI. On the Creation of 3D Libraries for F-16 Pilots in their Crew Station: Method Development, Library Creation and Validation. DUFFY, Vincent, ed. *Advances in Applied Digital Human Modeling* [online]. CRC Press, 2010, 2010-06-09, s. 9-18 [cit. 2020-11-08]. Advances in Human Factors and Ergonomics Series. ISBN 978-1-4398-3511-1.

Dostupné z: doi:10.1201/EBK1439835111-3

[63] DAS, BIMAN a ARIJIT K. SENGUPTA. Technical note. Computer-aided human modelling programs for workstation design. *Ergonomics* [online]. 1995, 38(9), 1958-1972 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0014-0139. Dostupné z: doi:10.1080/00140139508925243

[64] NAUMANN, Anja a Matthias ROETTING. Digital Human Modeling for Design and Evaluation of Human-Machine Systems. MMI-Interaktiv, Nr. 12 [online]. Technische Universität Berlin, 2007 [cit. 2020-11-08]. ISSN 1439-7854.

[65] BONNEY, M. C. a R. W. WILLIAMS. CAPABLE. A Computer Program to Layout Controls and Panels. *Ergonomics* [online]. 2007, 20(3), 297-316 [cit. 2020-11-25]. ISSN 0014-0139. Dostupné z: doi:10.1080/00140137708931629

[66] PALMITER, Susan L. a Jay ELKERTON. Evaluation Metrics and a Tool for Control Panel Design. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* [online]. 1987, 31(10), 1123-1127 [cit. 2020-11-21]. ISSN 0163-5182.

Dostupné z: doi:10.1177/154193128703101011

[67] PALMER, Michael T., William H. ROGERS, Hayes N. PRESS a Kara LATORELLA. A Crew-Centered Flight Deck Design Philosophy for High-Speed Civil Transport (HSCT) Aircraft. *NASA Langley Research Center* [online]. 1998 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/2740603_A_Crew-Centered_Flight_Deck_Design_Philosophy_for_High-Speed_Civil_Transport_HSCT_Aircraft

[68] WANG, M. J., C. M. LIU a Y. S. PAN. Computer-aided panel layout using a multi-criteria heuristic algorithm. *International Journal of Production Research* [online]. 1991, 29(6), 1215-1233 [cit. 2020-11-21]. ISSN 0020-7543. Dostupné z: doi:10.1080/00207549108930129

[69] WAGNER, Dan, Joseph A. BIRT a Michael SYNDER. *HUMAN FACTORS DESIGN GUIDE: For Acquisition of Commercial-Off-The-Shelf Subsystems, Non-Developmental Items, and Developmental Systems* [online]. USA: National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161, 1996, (DOT/FAA/CT-96/1) [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance_hf/library/documents/media/human_factor_s_maintenance/hfdg.pdf

[70] UNITED STATES GOVERNMENT GOVERNMENT DEPARTMENT OF DEFENSE. MIL-STD-1472G *Department of Defense Design Criteria Standard Human Engineering* [online]. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012, 382 s. [cit. 2020-12-01]. ISBN 1478264071.

[71] BARBÉ, Jérôme, Nicolas CHATRENET, Régis MOLLARD, Marion WOLFF a Patxi BÉRARD. Physical ergonomics approach for touch screen interaction in an aircraft cockpit. In: *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine - Ergo'IHM '12* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2012, 2012, s. 9-16 [cit. 2020-11-21]. ISBN 9781450318464. Dostupné z: doi:10.1145/2652574.2653402

[72] GOOSSENS, R.H.M, C.J SNIJDERS a T FRANSEN. Biomechanical analysis of the dimensions of pilot seats in civil aircraft. *Applied Ergonomics* [online]. 2000, 31(1), 9-14 [cit. 2020-12-01]. ISSN 00036870. Dostupné z: doi:10.1016/S0003-6870(99)00028-9

[73] SUN, Xiaohui, Feng GAO, Xiugan YUAN a Jingquan ZHAO. Application of Human Modeling in Multi-crew Cockpit Design. DUFFY, Vincent G., ed. *Digital Human Modeling* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, 2011, s. 204-209 [cit. 2020-11-08]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-21798-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-21799-9_23

[74] U. S. ARMY COMBAT CAPABILITIES DEVELOPMENT COMMAND ARMY RESEARCH LABORATORY: *The Army's Corporate Research Laboratory* [online]. USA, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.arl.army.mil/who-we-are/directorates/hred/>

- [75] KARMAKAR, Sougata, Madhu Sudan PAL, Deepti MAJUMDAR a Dhurjati MAJUMDAR. Application of digital human modeling and simulation for vision analysis of pilots in a jet aircraft: a case study. *Work* [online]. 2012, 41, 3412-3418 [cit. 2020-11-21]. ISSN 18759270.
Dostupné z: doi:10.3233/WOR-2012-0617-3412
- [76] MORRISSEY, Mark. Human-Centric Design. *Mechanical Engineering* [online]. 1998, 120(07), 60-62 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0025-6501. Dostupné z: doi:10.1115/1.1998-JUL-2
- [77] WOLDSTAD, Jeffrey C. Digital Human Models for Ergonomics [online]. In: *W. Karwowski (eds), International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, Vol-II, Taylor & Francis, New York, 2001, s. 1783-1786.* [cit. 2020-11-08].
- [78] ZHANG, Xudong a Don CHAFFIN. A three-dimensional dynamic posture prediction model for in-vehicle seated reaching movements: development and validation. *Ergonomics* [online]. 2010, 43(9), 1314-1330 [cit. 2020-11-08]. ISSN 0014-0139.
Dostupné z: doi:10.1080/001401300421761
- [79] SANJOG, J, Sougata KARMAKAR, Thaneswer PATEL a Anirban CHOWDHURY. Towards virtual ergonomics: aviation and aerospace. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* [online]. 2015, 87(3), 266-273 [cit. 2020-11-30]. ISSN 0002-2667.
Dostupné z: doi:10.1108/AEAT-05-2013-0094
- [80] YAN-QING TIE, JUN-FENG PANG, YI-CHUN LUAN a HONG-JUN XUE. Computational cognitive modeling of civil aviation pilots. In: *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2012, 2012, s. 668-671 [cit. 2020-11-08]. ISBN 978-1-84919-537-9. Dostupné z: doi:10.1049/cp.2012.1066
- [81] ZHUANG, Qianzheng, Xiaoyan ZHANG, Hua ZHAO, Hongjun XUE a Tao LI. Modeling Pilots' Operation Error Based on Fitts' Law. YAMAMOTO, Sakae a Hirohiko MORI, ed. *Human Interface and the Management of Information. Visual Information and Knowledge Management* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019, 2019-06-28, s. 402-411 [cit. 2020-11-08]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-030-22659-6.
Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-22660-2_29

- [82] RUSHBY, John. Analyzing Cockpit Interfaces Using Formal Methods. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* [online]. 2001, 43, 1-14 [cit. 2020-11-09]. ISSN 15710661. Dostupné z: doi:10.1016/S1571-0661(04)80891-0
- [83] WANG, Li Jing, Xiao Hua GAO a Wei XIANG. An Experiment Based Reach Model for Fighter Cockpit Design. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2013, 300-301, 853-859 [cit. 2020-11-09]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.300-301.853
- [84] ZHANG, L.B., YUAN, X.G. a L.J. WANG. Evaluation of Joint Motion Based on Perceived Discomfort. *Space Medicine and Medical Engineering*, Beijing, China, 2006, vol. 19, s. 412–416 [cit. 2020-11-09].
- [85] TSUDA, Hiroka, Olaf STROOSMA a Max MULDER. Reconstruction of Pilot Behaviour from Cockpit Image Recorder. In: *AIAA Scitech 2020 Forum* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020, 2020-01-06, s. - [cit. 2020-11-09]. ISBN 978-1-62410-595-1. Dostupné z: doi:10.2514/6.2020-1873
- [86] GALLAHAN, S. L., G. F. GOLZAR, A. P. JAIN, A. E. SAMAY, T. J. TREROTOLA, J. G. WEISSKOPF a N. LAU. Detecting and mitigating driver distraction with motion capture technology: Distracted driving warning system. In: *2013 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 76-81 [cit. 2020-11-09]. ISBN 978-1-4673-5663-3. Dostupné z: doi:10.1109/SIEDS.2013.6549497
- [87] CARUSO, Giandomenico, Serena CAMERE a Monica BORDEGONI. System based on Abstract Prototyping and Motion Capture to Support Car Interior Design. In: *Proceedings of CAD'15* [online]. CAD Solutions, 2015, 2015-6-22, s. 323-327 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: doi:10.14733/cadconfP.2015.323-327
- [88] NEALE, Vicki L a Thomas A DINGUS. An Overview of the 100-Car Naturalistic Study and Findings. *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)* [online]. Washington DC, United States, 2005 [cit. 2020-11-09].
- [89] LONG, Jie, Cory REIMSCHUSSEL, Ontario BRITTON, Anthony HALL a Michael JONES. Motion Capture for a Natural Tree in the Wind. BOULIC, Ronan, Yiorgos CHRYSANTHOU a Taku KOMURA, ed. *Motion in Games* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,

2010, 2010, s. 158-169 [cit. 2020-11-09]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-16957-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-16958-8_1

[90] WANG, Z.Q. Study on Synthesis of Virtual Human. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, Beijing, China, 2000, 17(2), s. 89–98

[91] REHG, James M. a Takeo KANADE. Model-Based Tracking of Self-Occluding Articulated Objects. *Proceedings of 5th International Conference on Computer Vision* [online]. Cambridge: MA, 1995, , 612-617 [cit. 2020-11-26].

[92] YAMANE, Katsu a Wataru TAKANO. Human Motion Reconstruction. SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed. *Springer Handbook of Robotics* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016, s. 1819-1834 [cit. 2020-11-27]. ISBN 978-3-319-32550-7.

[93] LI, Gang, Zheng WU, Xiaoli MENG a Jiankang WU. Modeling of Human Body for Animation by Micro-sensor Motion Capture. In: *2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling* [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 98-101 [cit. 2020-11-29]. ISBN 978-0-7695-3888-4. Dostupné z: doi:10.1109/KAM.2009.174

[94] Antropometrie: Ergonomie. *Nábytkářský informační systém* [online]. 2013 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/antropometrie/page/34/>

[95] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.

[96] HEJDA, Jan. *Systém pro určení polohy hlavy a ramen pomocí akcelerometrů a kamer*. Kladno, 2012. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta Biomedicínského Inženýrstva. Vedoucí práce ing. Patrik Kutílek, Ph.D.

[97] SOCHA, Vladimír. *Hodnocení polohy hlavy a ramen pacientů v 3D prostoru*. Kladno, 2013. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, Katedra přírodních oborů. Vedoucí práce Ing. Patrik Kutílek, PhD.

[98] HEJDA, Jan, Ondrej ČAKRT, Vladimír SOCHA, Jakub SCHLENKER a Patrik KUTILEK. 3-D trajectory of body sway angles: A technique for quantifying postural stability. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* [online]. 2015, 35(3), 185-191 [cit. 2020-12-01]. ISSN 02085216. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbe.2015.02.001

- [99] KUTILEK, Patrik, Vladimír SOCHA, Ondřej ČAKRT, Jakub SCHLENKER a Lucia BIZOVSKÁ. Trajectory length of pitch vs. roll: Technique for assessment of postural stability. *Acta Gymnica* [online]. 2015, 45(2), 85-92 [cit. 2020-12-01]. ISSN 23364912. Dostupné z: doi:10.5507/ag.2015.008
- [100] BEARDMORE, Roy. Anthropometric Notes: Anthropometric Data [online]. 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: Roymech.org
- [101] Letecký předpis: Provoz letadel L6. *Letecká Informační Služba* [online]. [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [102] BARBAGALLO, John. Advisory Circular: Use of Portable Electronic Devices Aboard Aircraft [online]. AC No: 91.21-1D. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2017 [cit. 2020-11-09].
- [103] SOCHA, Vladimír, Patrik KUTILEK, Alexandr STEFEK, Lubos SOCHA, Jakub SCHLENKER, Karel HANA a Stanislav SZABO. Evaluation of relationship between the activity of upper limb and the piloting precision. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 405-410 [cit. 2020-12-01]. ISBN 978-80-214-4816-2. Dostupné z: doi:10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018292
- [104] SOCHA, Vladimír, Patrik KUTILEK, Ondřej ČAKRT a Rudolf ČERNÝ. COMPARATIVE MEASUREMENTS OF HEAD ANGULAR MOVEMENTS USING A CAMERA SYSTEM AND A GYROSCOPE SYSTEM. *Acta Polytechnica* [online]. 2014, 54(4), 295-300 [cit. 2020-12-01]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2014.54.0295

Seznam obrázků

Obrázek 1: Antropometrické tabulky [13]	15
Obrázek 2: Rozmístění vizuálních bodů zájmu [32]	20
Obrázek 3: Magnetometrický systém MotionStar [34]	22
Obrázek 4: Mechanický snímací systém Gypsy™ MetaMotion (vlevo) spolu s elektrogoniometrem společnosti Biometrics Ltd (vpravo) [31,35].....	23
Obrázek 5: Využití akustického snímacího systému [29].....	24
Obrázek 6: Znárodnění konstrukce jednoduchého akcelerometru.....	25
Obrázek 7: Znárodnění působení zrychlení na jednoduchý kapacitní akcelerometr [45]	27
Obrázek 8: Schéma jednoduchého piezorezistivního akcelerometru [46].....	28
Obrázek 9: Schéma jednoduchého piezoelektrického akcelerometru	28
Obrázek 10: Schéma konstrukce třřosého MEMS gyroskopu [51].....	31
Obrázek 11: Krabicové schéma gyro-akcelerometrického snímacího systému [30]	31
Obrázek 12: Jednoduchá konstrukce MEMS magnetometru [56].....	33
Obrázek 13: Popis průběhu pojíždění z hlediska letových podmínek, postupů a použitých prvků kokpitu [30].....	35
Obrázek 14: Modelová obálka dosažitelnosti prvků v kokpitu spolu s vizuálními možnostmi pilota [71].....	36
Obrázek 15: Modelování vizuálních možností pilota [75].....	37
Obrázek 16: Znárodnění pohybového modelu s využitím optických snímacích systémů [85]39	
Obrázek 17: Kinect a jeho trasování kosterních kloubů a obličeje [86].....	40
Obrázek 18: Grafické zobrazení výsledků při a) interakci s pasažéry na zadních sedačkách, b) umístování osobních věcí, c) stanovování komfortní pozice posedu, d) využívání telefonu [87]	41
Obrázek 19: Ukázkový postup vytváření pohybového modelu [58]	42
Obrázek 20: Příklad rozmístění akcelerometrických snímačů a jednoduchého modelu [58].	43
Obrázek 21. Ukázkový příklad hierarchie pohybového modelu [93]	44
Obrázek 22: Dynamický model ruky [93].....	45
Obrázek 23: Senzor ProMove MINI, referenční osy [55]	47
Obrázek 24: Schéma sítě Inertia [55].....	47
Obrázek 25: Funkce "Fill-in lost samples" – analýza a identifikace chybějících dat [55]	48
Obrázek 26: Funkce "Fill-in lost samples" – doplňování chybějících dat [55]	48
Obrázek 27: Podkategorie funkce „Fill-in lost samples“ manuální nastavení doplňování dat [55]	49
Obrázek 28: Úvodní obrazovka – Inertia Studio [55]	52
Obrázek 29: Inertia Studio – Detailer Status Overview [55].....	52

Obrázek 30: Antropometrické parametry využité při měření [94].....	54
Obrázek 31: Umístění senzorů ProMove MINI na subjektu	56
Obrázek 32: Průběh měření – letový simulátor a senzory ProMove MINI.....	56
Obrázek 33: Kokpit letového simulátoru (na obrázku simulátor před zabudováním družicové navigace Garmin GTN750)	57
Obrázek 34: Modul pro simulaci družicové navigace Garmin GTN750.....	58
Obrázek 35: Sledování výkonů segmentů systému Inertia v reálném čase	59
Obrázek 36. Systém souřadnic využitý při tvorbě pohybového modelu	60
Obrázek 37: Kalibrace ProMove MINI [55]	60
Obrázek 38: Počáteční stav – volba dat.....	64
Obrázek 39: Spouštění modelu.....	65
Obrázek 40: Varovná funkce - chyba v datovém souboru	65
Obrázek 41: Výsledek modelování.....	66

Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické specifikace senzorů ProMove MINI [68]	50
Tabulka 2: Technické parametry centrálního uzlu Inertia Gateway [68]	51