

UNIVERZITA KARLOVA
Lékařská fakulta v Hradci Králové

OVLÁDÁNÍ POLOHOVACÍHO LŮŽKA POMOCÍ OČNÍCH POHYBŮ

Martin Kopeček

Autoreferát disertační práce
Doktorský studijní program: Lékařská biofyzika

Hradec Králové

2023

Disertační práce byla vypracována v rámci *prezenčního* studia doktorského studijního programu Lékařská biofyzika na Ústavu lékařské biofyziky Lékařské fakulty v Hradci Králové.

Autor: Ing. Martin Kopeček, MEng, Ústav lékařské biofyziky, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Univerzita Karlova

Školitel: prof. Ing. Jan Kremláček, Ph.D., Ústav lékařské biofyziky, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Univerzita Karlova

Školitel konzultant: doc. RNDr. Aleš Bezrouk, Ph.D., Ústav lékařské biofyziky, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Univerzita Karlova

Oponenti: doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D., Krajská nemocnice Liberec, a.s., Neurocentrum, Klinická biomechanika

MUDr. Martin Komzák, Ph.D., Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, Katedra pohybových aktivit a zdraví

Obhajoba se bude konat před Komisí pro obhajoby OR Lékařská biofyzika dne v od hod.
(bude doplněno po vyhlášení termínu, místa a času)

Tato práce vznikla za podpory Technologické agentury ČR (TA ČR), Programu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací GAMA, Podpora procesu komercializace výsledků výzkumu a vývoje na Univerzitě Karlově, TG01010108

S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení děkanátu Lékařské fakulty v Hradci Králové, Univerzity Karlovy, Šimkova 870, 500 03 Hradec Králové (tel. 495 816 134).

doc. Ing. Josef Hanuš, CSc.
Předseda komise pro obhajoby disertačních prací
v doktorském studijním programu Lékařská biofyzika
Garant studijního programu

OBSAH

OBSAH	1
SOUHRN	2
SUMMARY	3
1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	4
1.1 Definice primárních cílů	4
1.2 Stanovené hypotézy	4
2 STUDIE PROVEDITELNOSTI	5
2.1 Úvod ke studii proveditelnosti	5
2.2 Cíle studie proveditelnosti	5
2.3 Materiál a metodika	6
2.4 Výsledky	10
2.5 Diskuse	11
2.6 Závěr studie proveditelnosti	12
3 KONCEPTUALIZACE A REALIZACE OVLÁDÁNÍ	13
3.1 Úvod pro konceptualizaci	13
3.2 Cíle konceptualizace a realizace ovládání	13
3.3 Návrh řídicího systému polohovacího lůžka	13
3.4 Řídící jednotka	14
3.5 Návrh ovládacího SW – řídicí GUI	16
3.6 Závěr z konceptualizace a realizace ovládání	18
4 PILOTNÍ STUDIE S PACIENTY	19
4.1 Úvod k pilotní studii	19
4.2 Cíle pilotní studie	19
4.3 Materiál a metodika	19
4.4 Výsledky	21
4.5 Diskuse	25
4.6 Závěr pilotní studie	26
5 ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE	28
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
7 PŘEHLED PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI	33

SOUHRN

Vznik této práce vycházel z potřeby ovládní elektrického polohovacího lůžka pacienty s žádnou nebo výrazně sníženou motorikou horních končetin. Stěžejním bodem a cílem disertační studie bylo vyvinutí bezkontaktní alternativy k ručnímu ovladači a ověření, že technika sledování očních pohybů (*eye-tracking*) je použitelná a nabízí pacientům novou úroveň zvýšení soběstačnosti. Práce je rozdělena do třech navazujících částí s experimenty provedenými na detašovaných pracovištích a v laboratoři.

Po úvodní části věnující se etapám vývoje a současným progresivním trendům v sledování očních pohybů je popsána experimentální studie proveditelnosti ovládní lůžka s úlohou střídavé změny polohy hlavy a nohou s využitím ovládacích grafických elementů na displeji. Tato fáze byla realizována prostřednictvím virtuálního lůžka. Ve skupině 17 pacientů s diagnózami pentaplegie, tetraplegie, vysoké paraplegie, myopatie a spinální svalové atrofie byl celkový čas řešení úlohy 67,1 s (medián) s velkou interindividuální variabilitou s mezikvartilovým rozpětím od 56,7 s do 92,9 s. Efektivita řešení (100 % odpovídalo optimálnímu výkonu) byla 45,5 (34,9; 62,0) %. V rámci jednotlivých skupin dosahovali pacienti různých výsledků obou sledovaných parametrů. Při hodnocení vlastností systému dotazníkovým šetřením převažovaly pozitivní odpovědi 66/85, především kladně hodnocena byla bezkontaktní forma ovládní a snadnost použití.

V následující části věnované realizaci propojení systému pro sledování očí s polohovatelným lůžkem je popsán vývoj inovativního digitálně-analogového převodního modulu a unikátního grafického uživatelského rozhraní. Systém v průběhu konceptualizace prošel značným vývojem a byl plně řešitelný za pomoci několika komerčně dostupných elektrických a mechanických komponent a metody 3D tisku. Obslužná aplikace obsahovala úroveň vyčkávací (alternující svit diody), výběrovou (poloha hlavy, nohou a obojího zároveň) a potvrzovací (zadání příkazu) s předdefinovanými ovládacími časy.

Ve třetí části disertační práce je popsána experimentální studie ergonomie a použitelnosti vytvořeného prototypu. Ověření proběhlo obdobně jako ve studii proveditelnosti, ale s reálným polohováním nohou a hlavy. Experimentu se zúčastnilo 26 dobrovolníků v kontrolní skupině a 17 pacientů s roztroušenou sklerózou. Zdravotní stav pacientů se podle škály kvantifikující postižení nervového systému pohyboval od 7 do 9,5 bodu (10 odpovídá smrti). Kontrolní skupina zvládla úkol za 40,2 s (34,5; 45,5) s a pacienti zvládli úkol za 56,5 s (46,5; 64,9) s. Efektivita řešení úlohy byla 86,3 (81,6; 91,0) % pro kontrolní skupinu a 72,1 (63,0; 75,2) % pro skupinu pacientů. Při opakovaném plnění testů se u pacientů zlepšovala efektivita a čas řešení. Korelační analýza ukázala, že vyšší stupeň zdravotního omezení významně souvisel ($\rho = -0,587$) s pomalejším růstem efektivity. V kontrolní skupině nebyl efekt opakování významný. V dotazníkovém šetření šestnáct pacientů uvedlo, že získali důvěru v ovládní. Sedm pacientů preferovalo nabízenou formu ovládní lůžka před jinými jim známými technologiemi.

Klíčová slova: polohovací lůžko; motorika horních končetin; roztroušená skleróza; eye-tracking; asistivní technologie.

SUMMARY

The origin of this work was based on the need to control an electric positioning bed by patients with no or significantly reduced upper limb motor skills. The key point and objective of the dissertation study was to develop non-contact alternatives to manual controls and to verify that the eye-tracking technique is usable and offers patients a new level of increased self-sufficiency. The thesis is organized into three related parts with experiments conducted at the detached departments and in the laboratory.

After an introductory section covering the stages of development and current progressive trends in eye movement tracking, an experimental study of the applicability of bed control with the role of alternating head and leg position changes using on-screen graphical controls is described. This stage was conducted using a virtual bed. In a group of 17 patients with diagnoses of a pentaplegia, tetraplegia, high paraplegia, myopathy, and spinal muscular atrophy, the overall time to solve the task was 67.1 s (median) with a large interindividual variability with interquartile range from 56.7 s to 92.9 s. The solution efficiency (100 % matched to optimal performance) was 45.5 (34.9; 62.0) %. Within each group patients achieved different results for both studied parameters. When evaluating the features of the system by questionnaire survey, the positive responses of 66/85 were prevailing, especially the contactless mode of operation and the ease of use were positively evaluated.

In the following section dealing with the implementation of the connection of the eye-tracking system to the positioning bed, the development of an innovative digital-to-analogue conversion module and a unique graphical user interface are described. Throughout the conceptualization process, the system underwent considerable development and was fully realizable using several commercially available electrical and mechanical components and a 3D printing method. The servicing application included a holding level (alternating diode glow), a selectable level (position of the head, feet and both simultaneously) and a confirmatory level (command input) with predefined control times.

The third part of the dissertation describes an experimental study of the ergonomics and the usability of the prototype. The testing was carried out similarly to the feasibility study, but with real leg and head positioning. The experiment involved 26 volunteers in the control group and 17 multiple sclerosis patients. Patients' health status ranged from 7 to 9.5 points (10 corresponds to death) according to a scale quantifying nervous system impairment. The control group completed the task in 40.2 s (34.5; 45.5) s and the patients completed the task in 56.5 s (46.5; 64.9) s. The task solving efficiency was 86.3 (81.6; 91.0) % for the control group and 72.1 (63.0; 75.2) % for the patient group. Patients' efficiency and time to solve improved with repeated test administration. Correlation analysis showed that a higher degree of medical limitation was significantly related ($\rho = -0.587$) to slower efficiency gains. In the control group, the repetition effect was not significant. In the questionnaire survey, sixteen patients reported that they had gained confidence in operating. Seven patients preferred the offered form of bed control to other technologies familiar to them.

Keywords: adjustable bed; upper limb motor skills; multiple sclerosis; eye-tracking; assistive technology.

1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce bylo u vybraných diagnostických kategorií – roztroušená skleróza, pentaplegie, tetraplegie, vysoká paraplegie, myopatie a svalové atrofie ověřit, zda je pro ně systém bezkontaktního ovládní polohovacího lůžka pomocí očních pohybů vhodný, dostatečně přesný, spolehlivý a uživatelsky přívětivý a jeho vlastnosti by vedly k preferování tohoto řešení před ostatními dostupnými asistivními pomůckami.

1.1 Definice primárních cílů

- I. Navrhnout ovládací rozhraní pro experimentální testování bezkontaktního ovládní virtuálního polohovacího lůžka pomocí očních pohybů, ověřit technickou proveditelnost a připravit vhodné SW rozhraní, aby bylo možné provést širší analýzu na vybraných kategoriích probandů.
- II. Vybrat vhodné dobrovolníky ve spolupráci s organizací Česká asociace paraplegiků (CZEPA), z.s. Formou virtuálního experimentu ověřit na vybraných kategoriích testovaných osob – pentaplegie, tetraplegie, vysoké paraplegie, myopatie a spinální svalové atrofie použitelnost a efektivitu bezkontaktního systému.
- III. Na základě analýzy výsledků bezkontaktního ovládní virtuálního polohovacího lůžka navrhnout a realizovat inovativní ovládací rozhraní pro reálné polohovací lůžko. Připravit systém pro realizaci experimentů s dobrovolníky a ověřit jeho funkčnost a bezpečnost.
- IV. Verifikovat pro vybranou kategorii pacientů s roztroušenou sklerózou navržený systém a jeho funkčnost na základě získaných měření. Porovnat výsledky s dostupnými řešeními stávající úrovně poznání v oblasti bezkontaktních asistivních technologií a vyhodnotit funkcionalitu ovládacího systému.
- V. Zhodnotit přínos zařízení a nabídnout optimální inovaci pro modulární uspořádání systému pro průmyslové rozšíření tak, aby bylo možné celý systém bezkontaktního ovládní polohovacího lůžka transferovat z výzkumné oblasti do širšího sociálního spektra využití.

1.2 Stanovené hypotézy

- I. U bezkontaktní technologie založené na detekci očních pohybů dosahuje skupina pacientů s roztroušenou sklerózou (RS) a kontrolní skupina v rámci kvantitativního výzkumu reálného polohovacího lůžka stejných výsledků při řešení úlohy s opakovaným testováním.
- II. Realizovaný systém bezkontaktního ovládní polohovacího lůžka nabízí pro vybrané skupiny pacientů na základě definovaných kritérií vhodnou alternativu ke klasickému kontaktnímu tlačítkovému ovládní.

2.1 Úvod ke studii proveditelnosti

Z celosvětových odhadů z roku 2010 vyplývá, že více než jedna miliarda lidí trpí některou formou zdravotního omezení, to odpovídá asi 15 % populace. Z toho 2-4 % mají výrazné obtíže s fungováním v běžném životě [1]. V roce 2021 bylo v ČR 53 700 pacientů na nejvyšším stupni IV (úplná závislost na péči) [2]. Technologie *eye-tracking* je mocným technologickým prostředkem u lidí s pohybovým omezením především horních končetin [3–5].

Bezkontaktní asistivní technologie nejsou ve světě rehabilitace a neuro-inženýrství ničím novým. Mluví-li se o takovýchto technologiích, jsou tím míněny obecně nástroje, zařízení, software, systémy či služby využívající zpravidla moderní technologie (zejména oční a řečové senzory, nejrůznější elektromechanické aktuátory, informační a komunikační „*smart*“ technologie), jejíž cílem je především zachovat, posílit nebo zlepšit funkční schopnosti jedinců se specifickými potřebami, a tím jim usnadnit každodenní život a zlepšit kvalitu jejich života, samostatnost, zvýšit soběstačnost a podpořit duševní zdraví. Významnou technologií vedle *eye-trackingu* je automatické rozpoznávání řeči. U uživatele s motorickým omezením využívající aplikaci mluvených příkazů je možné pomocí hlasu a hlasového senzoru změnit polohu polohovací postele [6]. Kajol H a kol. využili modul pro rozpoznávání hlasu VR3 kompatibilní se systémem Arduino, který se používá k detekci klíčových slov pro trénovaný hlas. Uživatel dává hlasem příkazy k provedení některé z akcí, jako je náklon, poloha nahoru a dolů atd. Ovládání bezprostředního okolí lůžka jako zapnutí spotřebičů a různé další činnosti lze také provádět formou rozšířených funkcí. V práci [7] autoři také zkoumali možnosti hlasového ovládání, a to pro systém řízení elektrického invalidního vozíku. Systém dosáhl v rozpoznání řečových příkazů, po zaškolení probandů, úspěšnosti okolo 96 % při zachování vysoké bezpečnosti pohybu díky rozšíření o ultrazvuková a IR čidla. Pokročilé algoritmy dnes umí rozpoznat i hlasy jiných členů osob a odlišit je od příkazů uživatele. Povelky jsou zpracovány mikrofonem s řídicí jednotkou nebo prostřednictvím mobilního zařízení. Některé aplikace využívají pole mikrofonů, které umí lokalizovat zdroj hlasu a do jisté míry potlačit hluk přicházející z jiných směrů, což ovládání zpřesňuje. Převážná část uživatelů je schopna zadávat hlasové příkazy formou základních slov nebo v případě lehké vady řeči určitými zvuky. Použití této asistivní technologie je ovšem významně limitováno u pacientů s částečnou nebo úplnou ztrátou hlasu (např. pentaplegie).

2.2 Cíle studie proveditelnosti

V rámci Studie proveditelnosti bezkontaktního ovládání polohovacího lůžka pomocí očních pohybů bylo cílem autora ověřit, zda tato technologie vyhovuje potřebám pacientů s výrazně omezenou motorikou horních končetin po úrazech míchy nebo i s nepříznivým prognostickým vývojem klinického stavu.

1. Při návrhu uživatelského rozhraní pro ovládání lůžka nalézt optimální způsob zadávání příkazů pomocí vybrané sekvence okohybných manévru s využitím orientačních grafických elementů.
2. Pro vybrané skupiny pacientů vytvořit experiment prováděný na lůžku, který ukáže na prioritní oblasti studie, především na potřeby pacientů a jejich schopnost obsluhy nabízeného systému, ověření funkčnosti a spolehlivosti předkládaného zařízení.
3. Analyzovat studii na základě získaných dat z provedených testů a dotazníkových šetření, porovnat chybovost a rychlost provedených testů mezi jednotlivými pacienty.

2.3 Materiál a metodika

2.3.1 Systém virtuálního polohování a eye tracker

Pro experiment byl vyvinut systém pro ovládání virtuálního polohovacího lůžka pomocí očních pohybů (VBCET), který simuloval ovládání základních funkcí polohovacího lůžka. Pomocí vyvinuté SW aplikace mohl pacient ovládat virtuální změnu pozice hlavy a nohou. Systém byl HW kompletován ze zařízení *eye tracker* Tobii EyeX umístěného na dolním okraji displeje, přenosného notebooku. K detekci a sledování pohybů očí je možné použít několik technik. Jedním z nejběžnějších přístupů je metoda střed zornice a odraz světla od rohovky (PCCR) [8]. Obraz na rohovce, produkovaný zdrojem blízkého IR osvětlení, a poloha středu zornice jsou vstupními proměnnými pro odhad pohledu. Metoda předpokládá, že linie pohledu spojuje střed otáčení oční bulvy a střed zornice. Zařízení EyeX využívá dále metodu sledování „tmavé“ zornice k lokalizaci středu zornice uživatele. Naměřené charakteristiky EyeX (tj. přesnost $<0,6^\circ$, latence <50 ms a nominální vzorkovací frekvence ≈ 60 Hz) jsou dostačující pro testovanou aplikaci [9]. Pozorovací vzdálenost EyeX je možné volit v rozmezí 450-800 mm. EyeX umožňuje volné pohyby hlavy. V závislosti na vzdálenosti uživatele od obrazovky se mění maximální povolené horizontální a vertikální pohyby hlavy. Vzdálenost osoby provádějící ovládání virtuálního lůžka v experimentu byla stanovena na 0,75 m od ovládacího displeje se senzorem.

2.3.2 Grafické rozhraní pro ovládání

Pro vyhodnocení povelů uživatele a ovládání virtuálního lůžka bylo vyvinuto vlastní grafické rozhraní (GUI) s virtuálními tlačítky. Vzhledem k dostupnosti knihoven z vývojářského modulu Tobii EyeX SDK a funkcí potřebných pro přístup k datům z *eye trackeru* byl pro programování ovládací aplikace vybrán výrobcem podporovaný jazyk C#. V rámci programové vývojové verze Tobii.EyeX.SDK 1.3.443.0 a díky podpoře Tobii EyeX Engine API a .NET Framework nebylo pracováno s jednotlivými pixely, ale ohraničenými oblastmi. Výsledná aplikace se skládá ze tří režimů GUI: pohotovostní režim – vyčkává na zájem uživatele a umožňuje inicializaci celého systému; režim výběru – ovládací prostředí segmentů lůžka; režim potvrzení – vykonání příkazu (nahrazující stisknutí tlačítka na ovladači).

Pohotovostní režim – Inicializace

U základní interakce člověk – počítač je nutné nastavit vhodnou vstupní sekvenci pro akceptaci přístupu do ovládacího rozhraní aplikace a zobrazit následnou možnost výběru řídicí sekvence pro dané segmenty lůžka. V pohotovostním režimu se na bílém pozadí střídají dva barevně vystředěné obdélníky v intervalu cyklu 1 s. Viz obr. 1a a 1b. To má za úkol navozovat simulaci blikající diody obdobně jako u některých stand-by režimů elektronických zařízení, tedy přenést informaci o vyčkávání na interakci s uživatelem. Při pohledu na tento obdélníkový prvek se blikání ustálí a barva se změní na červenou, jak ilustruje obr. 1c. Upřeným pohledem do inicializačního obdélníku po dobu 2 s se aktivuje režim výběru. Při přerušení pohledu nebo vyjetím pohledem mimo zájmovou oblast dojde k opětovnému střídání vyčkávacích obrazců. Viz obr. 1a a 1b. Tento způsob komunikace umožňuje uživateli ověřit správnost jeho pohledu. Zároveň je aplikace schopna vyhodnotit záměr v ovládání lůžka, nebo zda se jedná pouze o nahodilou sakádu při běžné denní činnosti. Velikost cyklické virtuální diody je dána poměrovým zastoupením obrazce vůči displeji v poměru 1:5 v horizontální i vertikální pozici s centralizací interakčního prvku na střed v bílém pozadí. Pro návrh VBCET byly vybrány barvy, které k sobě byly dostatečně kontrastní a zásadně odlišovaly zobrazenou informaci.



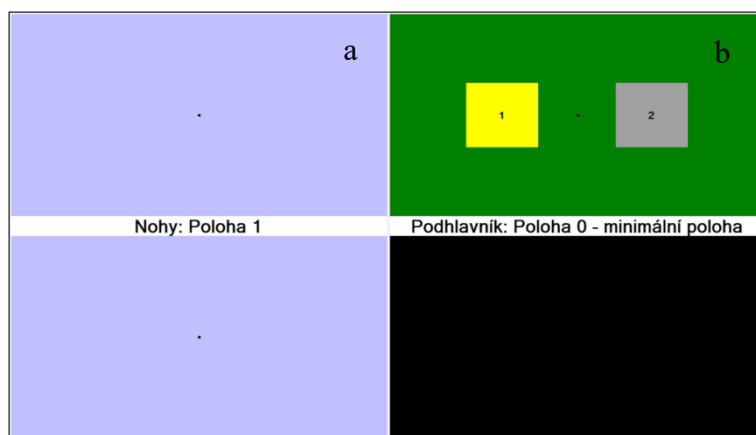
Obr. 1 Vyčkávací simulace diody pro interakci uživatele a systému. Zleva, alternace barevných prvků **a** černá/ **b** růžová, při ustálení pohledu pro vyvolání režimu výběru dochází ke změně na **c** červená.

Režim výběru

Aplikace ovládání virtuálního lůžka umožňuje vybrat segment hlavy (podhlavník), nebo segment nohou a zvolit polohu. V každém segmentu je možné volit ze tří předdefinovaných virtuálních poloh, daný úhel byl zaveden pouze pro představu uživatele: poloha 0 (0°); poloha 1 (15°); poloha 2 (30°).

Grafické prostředí pro ovládání je rozděleno na 4 základní výběrová a 2 informativní středová pole. V levé části displeje pacient vybírá pozici nohou, v pravé části pozici hlavy (podhlavník). Horní pole jsou pro směr polohování nahoru, dolní naopak. Střední bílý pruh s textem mezi jednotlivými obdélníky daného segmentu informuje pacienta o aktuálním stavu polohy.

Očním pohledem do jednoho ze 4 výběrových polí se daný obdélník stane aktivním a změní barvu na tmavě sytě zelenou (nohy modrou). Tímto je pacient informován, že aplikace zaznamenala jeho zájem o danou oblast. Na obr. 2a je nepoužívaný segment reprezentován slabě modrými poli a nohy jsou ve střední poloze 1. Na pravé straně obr. 2b je hlava (podhlavník) v základní poloze 0 a probíhá proces zvednutí do polohy 1. Textová pole jsou pro funkce pohledu během ovládání deaktivována a plní pouze funkci informativní. Pohledem na vodící středový černý bod výběru pacient může započít potvrzovací sekvenci. Při vyjetí pohledem z GUI na méně než 5 s je možné pokračovat v ovládání výběru. V případě prodloužení tohoto času dojde k návratu do pohotovostního režimu. Rozměry daných prvků jsou relativní vzhledem k velikosti displeje.



Obr. 2 Okno aplikace ve stavu, kdy pacient potvrzuje změnu segmentu Podhlavníku do Polohy 1. Segment **a** nabízí na výběr jak zvýšení, tak snížení polohy nohou o 1, nyní neaktivní. Pohled pacienta je interpretován aktivním zeleným polem **b**. Pro potvrzení polohy hlavy nabízí aplikace změnu pouze směrem nahoru, tedy tento segment je v nulové poloze. V případě pohledu i na druhý čtverec 2 po definovanou dobu, dojde ke změně z polohy 0 na polohu 1.

Režim potvrzení

Potvrzení příkazu je realizováno pomocí postupné fixace pohledu na sekvenci 2 čtvercových grafických elementů. Vzhledem k různému stupni zrakového postižení a různým diagnózám testovaných pacientů byla při ovládní lůžka použita strategie dvou ovládacích ploch a relativně dlouhých aktivačních časů. V návrhu nebyla použita další paralelní přidružená aktivace např. mrkáním nebo kliknutím myši či stisknutím klávesy. Při pohledu na naváděcí bod vybraného segmentu se zobrazí 2 šedé čtverce 1 a 2. Viz obr. 2b. Při sekvenčním udržení pohledu na jednotlivých čtvercích se po 0,5 s změni jejich barva na žlutou a dojde k potvrzení příkazu pro změnu polohy obdobně jako stisk klávesy Enter nebo levé tlačítko myši.

2.3.3 Protokol události

Pro vyhodnocení plánovaných experimentů a získání dat z průběhu polohování byla aplikace rozšířena o zápis jednotlivých kroků uživatele do souboru ve formátu .txt.

Popis pacientů

Pro ověření využitelnosti VBCET byla testována funkčnost a využitelnost ovládní lůžka skupinou dobrovolníků s významným pohybovým omezením horních končetin s diagnózami pentaplegie (C 1/3), tetraplegie (C 4/8), vysoké paraplegie (Th 1/6), myopatie a spinální svalové atrofie (SMA).

Byly vybrány čtyři ženy a třináct mužů, průměrný věk pacientů byl $33,8 \pm 9,9$ let (SD). Pacienti museli mít zachovaný zrak, schopnost pohybu očí a zachované kognitivní funkce. Vybrání byli pacienti, kteří chápali způsob provedení a vedení experimentu. Mezi výběrová kritéria pro zařazení byla zvolena špatná nebo žádná motorika rukou, tedy nemožnost dostatečně přesně ovládat klasický konvenční ovladač k polohovacímu lůžku. Pacienti se ve všech případech při testování pohybovali aktivně i pasivně na invalidním vozíku, k přesunu na lůžko potřebovali dopomoc asistenta, někteří byli připojeni na umělou plicní ventilaci. V rámci sebeobsluhy měli ve značné míře problémy s úkony denní potřeby a většinou neměli zkušenosti se snímáním očních pohledů nebo podobným typem asistivního ovládní. Výběr dobrovolníků proběhl na základě výše zvolených kritérií specialisty z CZEPA. Kvůli pohybu na elektrických vozících a v některých případech pobytu ve specializovaném zařízení dlouhodobé péče probíhal experiment za přítomnosti asistentů nebo proškolených zaměstnanců a jednoho experimentátora při běžném denním osvětlení.

Popis experimentu

Všichni dobrovolníci podstoupili kalibraci *eye trackeru* (mohla být několikrát opakována). Probandi, kteří úspěšně prošli kalibrací, byli seznámeni s aplikací pod vedením experimentátora (cca 10 minut). U některých pacientů se zkoušela aplikace i bez úspěšné kalibrace ve výchozím nastavení senzoru. Po volném procvičení aplikace a osvojení si základních ovládacích dovedností následoval test, který spočíval v provedení sekvence příkazů:

- a) pohledem iniciovat aplikaci
- b) zvednout podpěru nohou o 1 polohu nahoru
- c) zvednout podpěru hlavy o 1 polohu nahoru
- d) zvednout podpěru nohou o 1 polohu nahoru
- e) zvednout podpěru hlavy o 1 polohu nahoru
- f) přerušit oční kontakt s aplikací
- g) znovu aplikaci pohledem aktivovat

- h) snížit podpěru nohou o 1 polohu dolů
- i) snížit podpěru hlavy o 1 polohu dolů
- j) snížit podpěru nohou o 1 polohu dolů
- k) snížit podpěru hlavy o 1 polohu dolů
- l) ukončení testu experimentátorem

Doba trvání testu se pohybovala mezi 20 sekundami a několika minutami. Operátor prováděl dobrovolníky testem a oznamoval nadcházející kroky sekvence. Po dokončení posledního potvrzení (k) - snížit podpěru hlavy o 1 polohu dolů experimentátor ukončil test pravým tlačítkem myši – „Zavři Okno“. Tímto krokem se ukončilo nahrávání do protokolu událostí. Tři osoby odmítly podporu a test provedly bez vedení operátora. Bezprostředně po dokončení testu následovalo dotazníkové šetření. Celé sezení trvalo přibližně 20 minut (včetně nastavení experimentu a vyplnění dotazníku). Experiment probíhal na lůžku pacienta, přenosný notebook byl postavený na nastavitelném stolku. Viz obr. 3.



***Obr. 3** Probíhající experiment v domácím prostředí u pacienta s pentaplegií. Testování probíhalo ve většině případů za pomoci asistentů, kteří pomohli s přesunem pacienta do vhodné polohy pro provedení experimentu.*

Analýza

Pro vyhodnocení experimentu byl naprogramován zápis do souboru. Protokol událostí každého testu obsahoval časové záznamy jednotlivých virtuálních operací. Z protokolu bylo možno určit celkový počet kroků a potřebný čas k dokončení testu. Kritickým parametrem pro měření úspěšnosti VBCET byl potřebný čas k dokončení testu. Tato doba zahrnovala časový úsek, kdy došlo k několika očním sekvencím po posledním měřeném kroku. Aplikaci ukončil až experimentátor, a tím se teprve přerušil zápis do souboru. V upraveném protokolu událostí byl tento čas od celkového času redukován stejně jako počet výsledných kroků.

Optimální řešení testu vyžadovalo 48 kroků. Počet kroků, které potřebovali dobrovolníci navíc, snížil efektivitu řešení, která se vypočítala jako optimální počet kroků krát sto děleno počtem všech dokončených kroků probandem. Pokud byl počet kroků pro řešení testu roven 48, efektivita byla 100 %.

Míra celkové spokojenosti se systémem a průběhem testu byla získána formou zpětné vazby z dotazníkového šetření zaměřeného na jistotu v ovládnání, spokojenost s aktivací systému,

pochopení toho, jak byly segmenty lůžka symbolizovány, přehlednost ovládání a upřednostnění VBCET před jiným pomyslným ovládáním. Odpovědi byly na 5 úrovně škále od *silně podporují* (++) / *podporují* (+), přes *neutrální nevím*, až po *nepodporují* (-) / *silně nepodporují* (--).

Bylo analyzováno, zda efektivita závisela na věku pacienta. Efektivita představovala závislou proměnnou a věk představoval proměnnou nezávislou. Hladina významnosti byla v provedených testech 5 %. Pro statistické zpracování a vyhodnocení naměřených dat byl zvolen nástroj Jamovi [10] a Microsoft Office 365.

2.4 Výsledky

Celkově se experimentu zúčastnilo 17 pacientů. U třech probandů se nepovedlo *eye tracker* zkalibrovat, u jednoho z nich nebylo možné dokončit test, dva test úspěšně dokončili v defaultním nastavení kalibrace. Ve třech případech pacienti naopak zvládli kalibraci, ale nebyli schopni dokončit úlohu. Celkově test dokončilo 13 dobrovolníků. Minimální čas úlohy pro absolvování individuálního testu s optimální bezchybnou strategií (48 kroků) byl 41,0 s a byl získán empiricky na základě opakovaných testů experimentátorem (MK). Žádný dobrovolník nedokončil test bez redundantních interakcí a pouze několik z nich dosáhlo efektivit nad 70 %. Pacienti měli v celkovém čase 67,1 (56,7; 92,9) s značnou variabilitu: od minimálního času 47,9 s (65 kroků) do 150 s (146 kroků). Efektivita řešení úlohy byla 45,5 (34,9; 62,0) %. V rámci jednotlivých skupin dosahovali pacienti následujících výsledků:

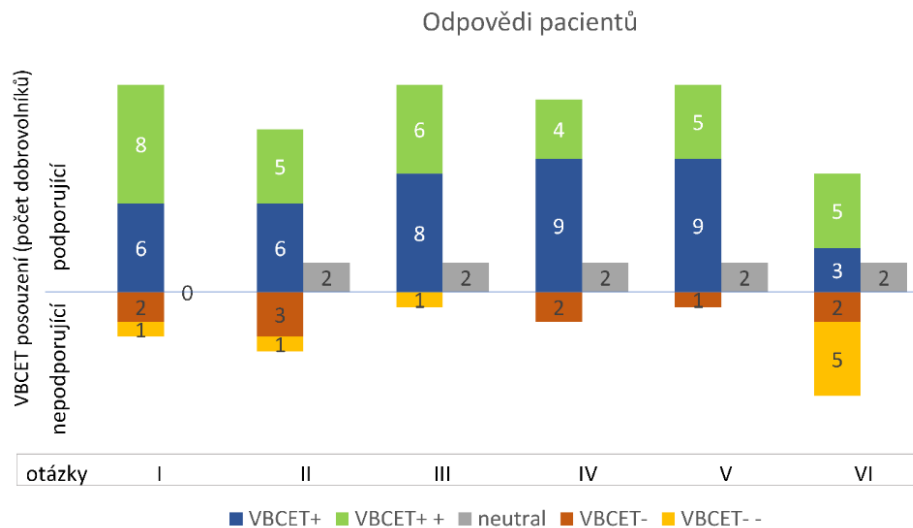
Tetraplegie – u 7 mužů byla efektivita 60,0 (42,0; 63,3) % a rychlost splnění úlohy 59,8 (56,7; 83,1). Jediná žena v této skupině dosáhla efektivit 70,6 % v čase 56,7 s. Výsledky pozorovaných parametrů u skupiny tetraplegiků jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Popisné charakteristiky sledovaných proměnných u skupiny s nejvyšším počtem dobrovolníků. Rozdělení sledovaných parametrů je popsáno mediánem, dolním a horním kvartilem a minimem a maximem.

	Pohlaví	Skupina	N	Percentily				
				Medián	25.	75.	Min	Max
Efektivita [%]	Ž	Tetraplegie	1	70,6				
	M		7	60,0	42,0	63,3	35,6	70,6
Celkový čas [s]	Ž		1	56,7				
	M		7	59,8	56,7	83,1	55,1	111,6
Věk [roky]	Ž		1	35,0				
	M		7	37,0	23,0	41,0	22,0	50,0

Paraplegie – u 3 žen byla efektivita 32,9 (16,4; 40,0) % a rychlost splnění úlohy 108,8 (88,0; 130) s, jedna žena test nedokončila. SMA – jeden muž dosáhl efektivit 73,8 % s rychlostí splnění úlohy 47,9 s, druhý kalibraci ani test nedokončil. Pentaplegie – u 2 mužů byla efektivita 22,4 (11,2; 33,6) % s rychlostí splnění úlohy 92,9 s u jednoho pacienta, druhý test nedokončil. Myopatie – u 2 mužů byla efektivita 22,4 (11,2; 33,6) % s rychlostí úlohy 81,3 s, druhý test nedokončil. Pacientům, kteří test nedokončili, byla započítána nulová efektivita.

Při hodnocení vlastností VBCET převažovaly pozitivní odpovědi 66/85 (jistota v ovládní, aktivace, výběr polohy, informace o nastavení lůžka a přehlednost ovládní), počet neutrálních odpovědí byl 8/85, počet spíše nepodporujících odpovědí na vybrané dotazy byl 11/85. Osm pacientů preferovalo testovaný VBCET před jinou asistivní technologií, sedm by si vybralo jinou technologii a dva si nebyli jisti. V otázce zabývající se preferovaným způsobem ovládní lůžka pacienti dále navrhli řešení pro ovládní polohovacího lůžka pomocí kombinace řeči a zraku nebo řeči, když jim to jejich zdravotní stav dovoloval. Celkově by pět dobrovolníků volilo ruční ovládní před VBCET. Viz obr. 4.



Obr. 4 Odpovědi na dotazník ve skupině pacientů ($n = 17$). V grafu je každá otázka reprezentována sloupci s barevně odlišenými odpověďmi. Počty kladných (záporných) hodnocení jsou uvedeny na kladné (záporné) svislé ose. Sloupce I–V ukazují hodnocení vlastností VBCET: jistota v ovládní (I), aktivace ovládní (II), volba polohy (III), informace o nastavení lůžka (IV) a přehlednost ovládní (V). V těchto kategoriích převažuje pozitivní hodnocení. Sedm ze 17 pacientů uvedlo, že dává přednost alternativnímu ovládní před prezentovaným (sloupec VI). Odpovědi byly na 5 úrovněové škále: silně podporují VBCET (+++, zelené sloupce), pravděpodobně podporují (+, modré sloupce), nejsou si jisti (šedé), pravděpodobně nepodporují (-, oranžové sloupce) a silně nepodporují (--, žluté sloupce).

2.5 Diskuse

Tato analýza ukazuje, že porozumění výběru funkcí a způsobu ovládní jednotlivých poloh bylo pro probandy srozumitelné, ale obtížné. V normální populaci je možné předpokládat, že s přibývajícím věkem by významně klesala efektivita ovládní. Jelikož je výběr pacientů značně heterogenní a probandi mají různé somatické a okulomotorické problémy, nepodařilo se tento předpoklad u skupiny pacientů potvrdit. Pro hlubší analýzu by bylo vhodné mít méně nedokončených testů a rozšířit soubor pacientů.

Důležitou součástí experimentu bylo subjektivní dotazníkové šetření dobrovolníků ohledně jejich zkušeností s VBCET a provedeným experimentem. Výsledkům dotazníku dominovalo pozitivní hodnocení VBCET. Výpovědi pacientů mohly být ovlivněny mírně horšími výsledky některých testů a nedokončenou kalibrací. Rozličné odpovědi byly na otázku, zda by

upřednostnili jiný typ ovládání před VBCET. Osm pacientů (pět určitě a tři pravděpodobně) by zvolilo VBCET jako preferovanou metodu řízení lůžka. Sedm pacientů by volilo jinou technologii: pět z nich, kteří nepreferují VBCET by zvolilo ruční ovládání z důvodu slabě zachované částečné motorické dovednosti pro mačkání tlačítek. Dva pacienti měli problém s kalibrací, proto uvedli pravděpodobné zvolení jiné technologie. Dva zbývající pacienti si nebyli jisti svými preferencemi. V otázce spokojenosti s aktivací ovládání 3 pacienti neuvedli podporu VBCET díky problematické kalibraci, jeden tento pacient měl moc veliký rozptyl pohledu s brýlemi, kdy docházelo k chybovosti fixací bodů nutných pro ovládání aplikace. Všichni pacienti byli obeznámeni s ovládáním a provedli volné procvičení ovládání, 2 pacienti i přes nedokončenou kalibraci. Jeden pacient nebyl schopen zvládnout kalibraci ani dokončit test (nicméně ve volném procvičení se mu podařilo některé sekvence aktivovat). Bylo to díky oboustranné ptóze, kdy okraj horního víčka přesahoval zornici, a tím omezoval pacientovo zorné pole. Na kontrolní otázky z dotazníkového šetření odpovídali i probandi, kteří nebyli schopni provést test, ale alespoň se o něj pokusili. To mohlo zvýšit počet negativních odpovědí, nicméně byl díky tomu získán širší pohled na problematiku pro budoucí inovaci systému polohování.

2.5.1 Limitující faktory studie proveditelnosti

Ačkoli studie proveditelnosti odpovídá na několik základních otázek týkajících se technické náročnosti řízení lůžka a uživatelské spokojenosti u vybraných pacientů, nenabízí pohled technického řešení ovládání reálného systému, ale jedná se pouze o simulaci. Pro řízení reálného polohovacího lůžka bude muset být systém důkladně konceptualizován. Opakované testování a používání VBCET s rozšířeným počtem dobrovolníků jednotlivých skupin by pravděpodobně umožnilo hlubší vyhodnocení ovládacích časů, efektivity a případnou implementaci dalších proměnných.

2.6 Závěr studie proveditelnosti

Na základě navrženého softwaru v kombinaci s *eye trackerem* bylo simulováno polohování lůžka pomocí zraku. Tento koncept se podařilo otestovat a ověřit jeho funkčnost u pohybově omezených pacientů s pentaplegií, tetraplegií, vysokou paraplegií, myopatií a SMA. Technologie byla u pacientů pozitivně hodnocena z hlediska bezkontaktnosti a snadnosti použití. Uživatelské rozhraní založené na relativně malých elementech ovšem nezajišťovalo dostatečnou robustnost pro detekci pohybu očí, což mělo za následek nižší efektivity. Důležitým výstupem této studie je, že ze 17 pacientů, kteří se pokusili ovládat virtuální lůžko, by tuto technologii využilo osm pacientů. Jednalo se o ty, kteří měli výrazný motorický problém v ovládání tlačítkového ručního ovladače. Výsledky pacientů dosahovaly značné variability v rychlosti a efektivitě a je nutné je vzít v úvahu v budoucích studiích této problematiky. Jedenáct ze třinácti pacientů, u kterých bylo možné registrovat pohyby očí a provést kalibraci, úspěšně dokončilo testovací sekvenci. Dva pacienti dokončili test i přes nedokončenou kalibraci v nativním režimu. Studie proveditelnosti ukázala, že koncept VBCET je možné využít u pacientů i s výrazným pohybovým omezením horních končetin.

3 KONCEPTUALIZACE A REALIZACE OVLÁDÁNÍ

3.1 Úvod pro konceptualizaci

Na základě analýzy výsledků Studie proveditelnosti a realizace VBCET bylo nutné přistoupit k hledání vhodného způsobu ovládání reálného elektrického polohovacího lůžka. Předpokladem pro úspěšnou realizaci takového systému je vhodně zvolená konceptualizace ovládání. V první řadě je potřeba se zaměřit na potřeby pacientů, reálné možnosti polohování vztažené k zachování bezpečnosti, výběr vhodných komponent a jejich umístění v systému a v neposlední řadě zvolení vhodného polohovacího lůžka. Inspirací dnes mohou být systémy a ovládání chytrých domácností, kde hrají bezkontaktní senzory velmi významnou roli. Chytré systémy jako Amazon Alexa, Google Home, Google Assistant, Apple Siri a Microsoft Cortana jsou silnými komerčními hráči na celosvětovém trhu s velkým výběrem použitelných HW modulů a SW aplikací. Na začátku byly systémy chytré domácnosti navrženy tak, aby zvýšily kvalitu života běžných lidí. Je působivé pozorovat uživatele inteligentních domů, jak sklízí výhody v oblasti zabezpečení, úspory energie a možnosti ovládat své osvětlení, ventilaci, dveřní zámky a kávovary ze svého pohodlí domova například v posteli nebo při sezení na pohovce [11]. Pomocí jednoduchých funkcí a způsobů ovládání například hlasem [12], gestem [13] nebo pohybem očí je možné navolit úroveň pohodlí a samoobslužnosti bez větších obtíží. Většina komerčních zařízení pro chytrou domácnost však není navržena s ohledem na osoby se zdravotním postižením a omezeným rozsahem pohybu, a na řadu tak přichází vývoj ovládacích prostředků v oblasti specifických potřeb pacientů s určitým zdravotním omezením [11, 14].

3.2 Cíle konceptualizace a realizace ovládání

Inovovat systém ovládání pro vybrané funkce polohování postele pomocí *eye trackeru* na základě předešlé Studie proveditelnosti. Naprogramovat jednoduché a intuitivní GUI se zpětnou vazbou o procesech na lůžku.

Realizovat funkční HW ovládání lůžka bez zásahu do polohovacího lůžka. Reflektovat poznatky získané od pacientů z předešlé studie a na základě těchto výsledků optimalizovat celkové pojetí konstrukce zařízení a ovládacího SW.

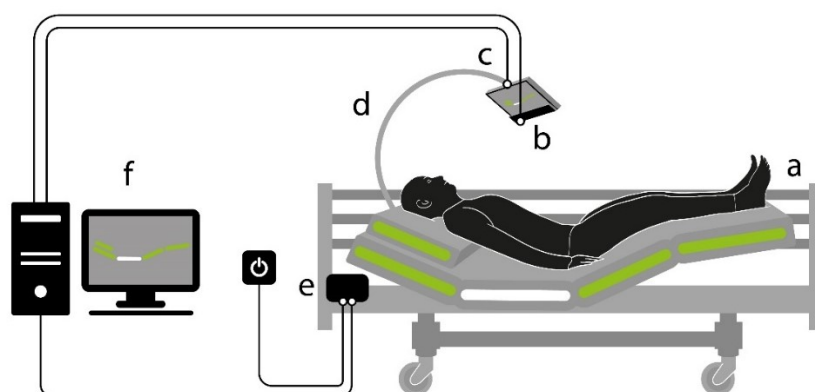
Jako základní parametry úspěšné realizace funkčního prototypu vhodného pro experiment s dobrovolníky byly stanoveny:

1. bezpečnost ovládání;
2. bezporuchovost zařízení;
3. přenositelnost a jednoduchá manipulace;
4. přehlednost a ergonomie ovládacího GUI.

3.3 Návrh řídicího systému polohovacího lůžka

Inteligentní polohovací lůžka opatřena nejrůznějšími senzory, vybavena polohovacími mechanismy a zařízeními pro ovládání domácnosti jsou dnes na vzestupu. Nabízejí velké využití pro pacienty při pobytu v nemocnici, kde je nutné zajistit pravidelné polohování, aby se zabránilo otláčeninám a dekubitům, což by mohlo vést až k fatálnímu zhoršení zdravotního stavu a přivození dalších sekundárních komplikací spojených s léčbou [15–17]. Velkou výhodou je schopnost lůžka dosáhnout laterálních náklonů, a tím minimalizovat problémy s akutními respiračními problémy [18]. V rámci navázání spolupráce se společností LINET,

s.r.o., partnerem, který je jedním z lídrů na poli výrobců komerčních elektricky polohovatelných medicínských lůžek, bylo jejich univerzální lůžko Latera Thema vybráno pro začlenění do systému polohovacího lůžka pomocí očních pohybů (BCET). Po dohodě s výrobcem lůžek bylo z hlediska bezpečnosti a testování běžných procedur vybráno ovládání polohy dolního segmentu (nohou), horního segmentu (hlava), ovládání těchto segmentů sdruženě (obojí) a nastavení lůžka do výchozí základní polohy funkcí kardio–pulmonární resuscitaci (CPR). Viz obr. 5.



Obr. 5 BCET se skládá z **a** polohovací postele s matrací, **b** eye trackeru, **c** ovládacího displeje, **d** flexibilního ramene, **e** řídicí jednotky včetně D/A převodníku a **f** stolního počítače s monitorem operátora. Systém je pod patentovou ochranou CZ 309229.

Lůžko bylo vybaveno držákem displeje a detektorem pohybu očí, jak je znázorněno na obr. 5, zobrazujícím celkovou konstrukci systému BCET. Vzdálenost očí a ovládacího displeje se senzorem byla 0,75 m. Pro výpočet úhlového rozlišení daných prvků byl použit vzorec pro přepočet počtu pixelů na jednu úhlovou minutu:

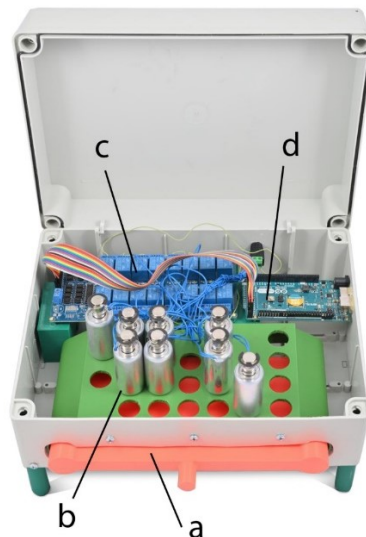
$$PPmin = 60 \cdot \arctg\left(\frac{1''}{d}\right) / PPI,$$

kde d je pozorovací vzdálenost uživatele od displeje, 100 PPI (pixelů/palec) tohoto displeje byl vypočítán z rozlišení obrazovky. Výsledné minimální rozlišení oka v testované vzdálenosti s daným displejem bylo 0,861 PPmin. Emetrop je tedy schopen rozlišit při minimálním úhlu rozlišení 1' na danou vzdálenost oblast menší než jeden pixel. Díky kladné zkušenosti s levným komerčním senzorem očních pohybů Tobii EyeX byl tento snímač začleněn i do návrhu BCET.

3.4 Řídicí jednotka

Úsilí bylo tedy zaměřeno na jakousi nastavbu *Supervisor* ovladače, která by mechanicky spínala daná tlačítka tak, jak to dělá standardně obsluha.

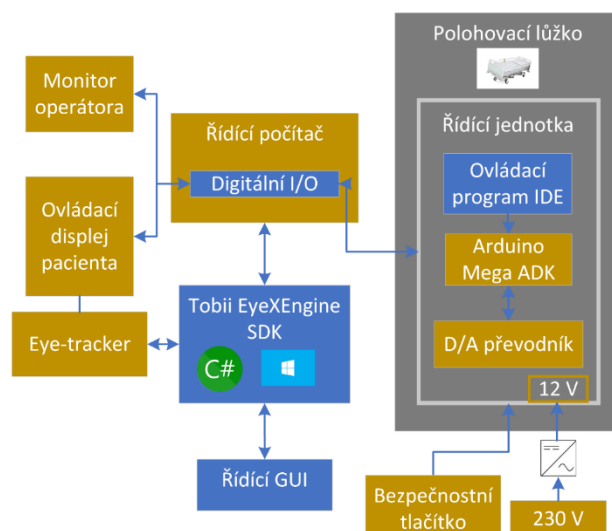
Pro návrh nadstavbové patice (viz obr. 6b.) byl vytvořen 3D model a depoziční tisk makety ovladače (obr. 6a), a díky tomu se mohla výsledná konstrukce patice lépe odladit. Pro zvýšení robustnosti byly všechny moduly upevněny do průmyslové krabice a fixovány. Solenoidy DC 12 V jsou s jádrem s vratnou pružinou, s maximálním výsuvem jádra 10 mm a tlačnou koncovou silou 21 N. Viz obr. 6b. Pro realizaci inovovaného systému stisku byla zvolena síla stisku 15-20 N. Tomu odpovídal výsuv jader na 8-10 mm.



Obr. 6 Řídicí jednotka s **a** modelem reálného ovladače pro personál, **b** experimentální patičí 2.0 s D/A převodníkem se solenoidy, **c** systému ovládacích relé, **d** vývojovou deskou na platformě Arduino.

3.4.1 Způsob řízení

Supervisor ovladač se zasune do patice, jak ilustruje obr. 6a, do připravené patice. Lze jej kdykoliv v průběhu experimentu ručně vyjmout. Patice je modulárně upevněna na posteli nebo vedle ní a aretována do požadované polohy, jak naznačuje obr. 5e. Uživatel provede příkaz pomocí očního pohybu, PC vyhodnotí tento úkon a posílá řídicí příkaz na jednotku Arduino Mega ADK (obr. 6d). Platforma Arduino ovládá soustavu 16 kanálového relé (obr. 6c) v podobě push pull elektromagnetů. Přesně vystředěné solenoidy se po řídicím impulzu mechanicky aktivují na onu definovanou dobu – stisknou tlačítka na ovladači. Ten vysílá signál na soustavu motorů přes vlastní řídicí jednotku lůžka a následně dochází ke změně polohy. Řídicí architektura BCET je znázorněna na obr. 7.



Obr. 7 Blokový diagram experimentálního nastavení BCET

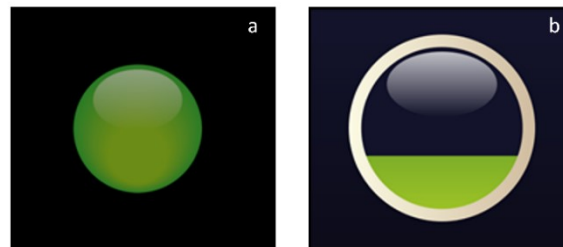
3.5 Návrh ovládacího SW – řídicí GUI

Na základě zkušeností z návrhu aplikace pro VBCET a zpětné vazby od probandů byl ovládací SW realizován ve třech funkčních režimech:

1. kontakt s uživatelem – zajištění inicializace aplikace a vyloučení nahodilých sakád;
2. výběr polohy – pomocí zrakové fixace do vyznačených částí displeje zvolení požadované akce a jejím grafickým znázorněním;
3. potvrzení volby – návrh zástupného ovládacího tlačítka pro zadání příkazu obdobně jako klávesou enter nebo kliknutím myši.

Pro vyhodnocení povelů uživatele a ovládní lůžka bylo vyvinuto vlastní GUI s virtuálními tlačítky. Využití *eye-trackingu* pro řízení vyžaduje, aby příkazy, které chce osoba provést, byly správně identifikovány v kontinuálním směru pohledu. Možnost, že pohled způsobí nezamýšlené aktivace, a tím vygeneruje náhodný problém, se nazývá Midasův dotek [19]. Obvykle jsou činěny pokusy zabránit těmto nedobrovolným aktivacím pomocí sekvence mrknutí, setrvání pohledu na jednom místě nebo výběrem typu fixace [20]. Vzhledem k různému stupni zrakového postižení pacientů byla při ovládní lůžka použita navržená strategie velkých ovládacích ploch a relativně dlouhých aktivacích časů, aby se zabránilo nežádoucím příkazům a následným nekontrolovaným stavům. Pro aktivní segmenty a potvrzovací element byla zvolena svěží zelená barva. Neaktivní části byly bílé. Pozadí bylo tmavě modré a obrysy pomocných čar šedé. Nejdůležitější vlastností experimentálního GUI je možnost uživatele zvolit si úhel zdvihu na základě svého uvážení. Byly implementovány SW bezpečnostní prvky pro nezamýšlené aktivace, viz další část textu.

Pohotovostní režim slouží k dlouhodobému aktivnímu hlídání okohybných interakcí s displejem, tedy detekuje zájem uživatele o práci s aplikací, změnu polohy. Ústředním grafickým prvkem je zelený stínovaný kruh, připomínající LED diodu, která se pravidelně objevuje na GUI a postupně se rozsvěčí a pohasíná s proměnnou nastavitelnou periodou všech fází. Viz obr. 8a.



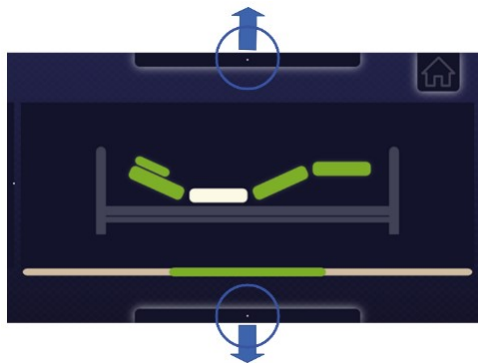
***Obr. 8** Grafické elementy použité při inicializaci systému: **a** element symbolizující pohotovostní blikající diodu slouží pro start aplikace, **b** potvrzovací element.*

Pro režim výběru je lůžko symbolizováno třemi vodorovnými segmenty (obr. 9). Po úspěšném opuštění pohotovostního režimu je vstupní aktivní polohou střední segment (obr. 9b). Při pohledu na levý okraj panelu s tečkou se změní segment na aktivní polohu opěrky hlavy (obr. 9a) a při pohledu na pravý okraj panelu se aktivuje opěrka nohou (obr. 9c). Posunutím zobrazení na opačnou stranu se uživatel vrací na dříve vybraný segment. Tedy je možno listovat mezi třemi segmenty zleva doprava jako při prohlížení filmového pásu o 3 políčkách. Pro výběr segmentu byla nastavena minimální doba fixace 0,2 s, aby se minimalizovali nežádoucí příkazy vyvolané nechtěným okohybným manévrem na displeji.



Obr. 9 Zobrazení tří variant obrazovek pro ovládání a výběr tří základních segmentů. Jednotlivé obrazovky symbolizují vybraný segment **a** zleva: poloha hlavy, **b** uprostřed: poloha hlavy a nohou, **c** vpravo: poloha nohou. Modré šipky představují možné přesuny mezi segmenty, pokud uživatel zrakově fixuje postranní elementy obrazovky.

Při pohledu na lištu s bílou tečkou v horním panelu grafického rozhraní se aktivuje režim zvedání lůžka. Při pohledu na dolní panel na liště GUI se aktivuje změna polohy daného segmentu směrem dolů. Viz obr. 10.



Obr. 10 Zvedání/spouštění vybraného aktivního segmentu lůžka (zelená) do požadovaného úhlu pomocí pohledu na vybranou lištu s vodícím bodem.

Pro režim potvrzení a nastavení požadovaného úhlu segmentu slouží výše již zmíněný potvrzovací element ilustrovaný obr. 8b. Po výběru segmentu následuje volba změny polohy nahoru nebo dolů, spustí se režim potvrzení a zobrazí se potvrzovací element. Pro zvýšení polohy je kruhový prvek plněn zdola nahoru. Pro snížení polohy je prvek plněn shora dolů. Měňící se grafika plnění potvrzovacího elementu vizualizuje a přibližně kopíruje reálný pohyb lůžka do požadované polohy, během confirmace se tedy lůžko průběžně mění. Přerušením očního kontaktu uživatele s potvrzovacím elementem pohledem mimo něj nebo zavřením očí se proces změny polohy zastaví. V případě, že dojde ke ztrátě očního kontaktu nahodile, proces aktivace nebo změny polohy se opět zastaví. Doba procesu změny polohy, tedy velikost změny požadovaného úhlu závisí výhradně na vůli uživatele. Z bezpečnostních důvodů je jedno polohování omezeno na 3 s, což zhruba odpovídá 30° změny segmentu lůžka.

V rámci grafické části návrhu BCET byla nejmenší sledovaná poloha pohledu 69 x 433 úhlových minut s bílým naváděcím bodem 8,59 úhlových minut pro výběr jednoho ze 3 polohovacích segmentů – pohled do stran. Největší kulatá plocha (232 úhlových minut) pokrývala střední část displeje a sloužila jako potvrzovací prvek. Minimální doba setrvání pohledu na prvek byla nastavena na 200 ms pro výběr segmentu, pro kratší fixace zařízení nereagovalo. Čas potvrzení inicializace byl nastaven na 2 s. Protože doba potvrzení byla dlouhá, existovala možnost odchýlit směr pohledu od prvku na 0,5 s bez přerušení procesu potvrzení. Barevné nastavení a kontrast představuje jedno z možných schémat GUI a pro slabozraké je možno ho modifikovat.

3.6 Závěr z konceptualizace a realizace ovládání

Podářilo se navrhnout a realizovat unikátní prototyp ovládání pro vybrané elektrické polohovatelné lůžko Laterna pomocí *eye trackeru*. U systému BCET byla ověřena jeho kompletní funkčnost a zajištěna uživatelská bezpečnost. Vyvinutá řídicí jednotka byla robustní a osazena několika vybranými spínacími prvky, které zajistily digitální funkci neinvazivního převodu očního příkazu na *Supervisor* ovladač polohovací postele. Z technologického hlediska je systém plně řešitelný a sestavitelný za pomoci 3D tisku a několika komerčně dostupných elektrických a mechanických komponent. Částka za jednotlivé HW prvky ovládání se pohybovala v nižší cenové hladině (cca 10 000 Kč) kvůli případné dostupnosti systému pro budoucí využití cílovými uživateli. Na základě zpětné vazby od pacientů z prvotní studie proveditelnosti došlo k modifikaci a odladění grafického prostředí. Navržená ovládací aplikace splňuje definované cíle a je lehce adaptovatelná pro různé typy *eye trackerů*.

4 PILOTNÍ STUDIE S PACIENTY

4.1 Úvod k pilotní studii

Roztroušenou sklerózou trpí asi 2,8 milionu lidí na celém světě. Incidence RS se podle mezinárodního projektu Atlas RS (pokrývá 115 zemí světa a přibližně 87 % světové populace) zvýšila o 30 % oproti roku 2013. V ČR se počet pacientů s RS odhaduje na 23 tisíc a ročně je diagnostikováno kolem 700 nových pacientů [21–23]. V některých případech s omezením svalové síly přichází i částečná nebo i úplná (napojení na plicní ventilaci) ztráta řeči. Imobilita horních končetin významně omezuje nezávislost pacienta při plnění každodenních úkolů – pro tyto lidi je to značná výzva, aby své každodenní činnosti vykonávali bez výrazné vnější pomoci [24]. V oblasti rehabilitace a fyzioterapie se může využívat pro optimalizaci polohy pacienta při cvičení polohovací lůžko, kdy takováto implementace sníží počet zdravotnického personálu, který s pacientem pomáhá. Rehabilitační pracovník tak díky vybraným povelům nastavuje lůžko do poloh, které napomáhají práci s klientem, případně může zahájit automatickou masáž [25]. Je možné uvažovat i o praktickém využití takových systémů při chirurgických zákrocích, kde chirurg může aktivně měnit polohu lůžka [26]. Robotická ramena a posuvné systémy implementovány přímo do lůžka mohou pacienta bezbolestně a bezpečně přepravit z lůžka na invalidní vozík bez potřeby větší asistence [27]. Alternativně mohou tyto systémy zajistit základní hygienické požadavky a zvýšit tím úroveň pacientovi soběstačnosti [28]. Se vzestupem moderních technologií, jako je sledování očí, mohou lidé s různými pohybovými obtížemi rozšířit své pracovní možnosti a zapojit se tak více do celospolečenského uplatnění třeba i z polohovacího lůžka.

4.2 Cíle pilotní studie

Cílem této pilotní studie bylo otestovat BCET vycházející ze Studie proveditelnosti a Konceptualizace a realizace ovládání. V rámci experimentu porovnat výkon BCET kontrolní skupiny a pacienty s RS s částečným až úplným motorickým omezením horních končetin a seznámit je s využitím *eye trackeru* jako inovativní pomůcky pro ovládání polohovací postele.

1. Ověřit BCET na dvou skupinách dobrovolníků formou testovací procedury a dotazníkového šetření.
2. Analyzovat celkový přínos BCET pro vybranou skupinu pacientů s RS, porovnat výsledky rychlosti ovládání a efektivity pacientů oproti kontrolní skupině.

4.3 Materiál a metodika

4.3.1 Systém polohování a *eye tracker*

Pro pilotní studii bylo využito experimentální ovládací rozhraní BCET s GUI. BCET je jednoduše demontovatelný (20 min.), vhodný pro převoz osobním automobilem (bez polohovacího lůžka) s rychlou kompletací (20 min.). Vzdálenost zařízení od pozorovatele při experimentu se pohybovala okolo 0,75 m, maximální zorný úhel byl $[-18^\circ, 18^\circ]$ na ose x a $[-10^\circ, 10^\circ]$ na ose y, což odpovídalo limitům udávaným výrobcem *eye trackeru*.

4.3.2 Nastavení studie

Pro ověření využitelnosti BCET systému byla testována funkčnost a využitelnost ovládání lůžka skupinou dobrovolníků bez pohybových omezení (Kontroly) a skupinou s významným pohybovým omezením s RS (Pacienti).

Kontrolní skupina

Bylo vybráno patnáct žen a jedenáct mužů, průměrný věk účastníků byl 42.7 ± 15.9 let (SD). Testování probíhalo v laboratoři Ústavu lékařské biofyziky Lékařské fakulty v Hradci Králové, za stejných světelných a teplotních podmínek. Mezi výběrová kritéria bylo zahrnuto fyzické a duševní zdraví.

Skupina pacientů

Bylo vybráno devět žen a osm mužů, průměrný věk pacientů byl $60,3 \pm 9,14$ let. Pacienti museli mít zachováno vidění, schopnost pohybu očí a zachovalé kognitivní funkce. Pro popis hendikepu bylo využito neurologické posouzení celkové motoriky u lidí s pohybovým omezením s RS pomocí škály kvantifikující postižení nervového systému (EDSS). Byli vybráni pacienti se skóre [29], v našem případě (7,0-9,5). Testování probíhalo na specializovaném pracovišti pro lidi s RS v Domově sv. Josefa v Žirči u Dvora Králové.

4.3.3 Popis experimentu

Návrh experimentu byl stejný jak pro kontrolní skupinu, tak pro skupinu pacientů. Všichni dobrovolníci podstoupili kalibraci *eye trackeru* (mohla být opakována třikrát). Probandi, kteří úspěšně prošli kalibrací, byli seznámeni s aplikací pod vedením experimentátora (cca 10 minut). Seznámení probíhalo formou výkladu s obrazovým manuálem, který je součástí této disertační práce v příloze 2. Po volném procvičení aplikace a osvojení si základních ovládacích dovedností následoval test, který spočíval v provedení sekvence příkazů: a) iniciovat oční kontakt s aplikací; b) zvednout opěrku nohou (po dobu 2-3 s); c) zvednout opěrku hlavy (po dobu 2-3 s); d) snížit opěrku nohou (po dobu 2-3 s); e) snížit opěrku hlavy (po dobu 2-3 s); a f) přerušit oční kontakt s aplikací. Každý test byl opakován třikrát s krátkými pauzami, aby se snížila variabilita řešení úkolů a umožnilo se učení nebo hodnocení míry únavy.

Doba trvání každého testu byla přibližně 60 sekund. Operátor prováděl dobrovolníky testem a oznámil jim nadcházející krok sekvence. Tři osoby odmítly podporu a test provedly bez vedení operátora. Bezprostředně po dokončení testů následovalo dotazníkové šetření. Celé sezení trvalo přibližně 30 minut (včetně nastavení experimentu a přestávek).

4.3.4 Analýza

K vyhodnocení řešení testu byl použit protokol událostí zaznamenávající celkový průběh testu v aplikaci. Kritickým parametrem pro měření úspěšnosti BCET byl potřebný čas k dokončení testu. Tato doba však zahrnovala čas polohování (nahoru/dolů), jehož trvání bylo individuálně určeno dobrovolníkem a bylo tedy náhodné. Čas všech polohování se tedy odečetl od celkového času, aby se minimalizoval vliv probanda. Tento upravený čas (čas úlohy*) byl použit pro následující analýzy.

Pro vyhodnocování rychlosti datového přenosu (ITR) v BCET byl použit podobný přístup, jaký se používá pro popis rozhraní mozek-počítač (BCI) [30, 31]. Pro každý testovací krok byl popsán počet stavů, ze kterých si dobrovolník mohl vybrat, a ten byl převeden do bitové podoby. Součet všech stavů pro daný test byl vydělen časem stráveným při rozhodovací sekvenci. Tento parametr popisuje rychlosti datového přenosu pro řešení testů. Obtížnost rozhodovacího procesu se v jednotlivých krocích lišila, protože GUI mělo různou složitost výběru, která podrobně popisuje pořadí a počet stavů, ze kterých si dobrovolník mohl vybrat. Během jednoho testu si dobrovolník mohl vybrat z 91 stavů, což odpovídá 51 bitům k přenosu.

Optimální řešení testu vyžadovalo 21 kroků. Počet kroků, které potřebovali dobrovolníci navíc, snížil efektivitu řešení, která se vypočítala jako optimální počet kroků krát sto děleno počtem všech dokončených kroků probandem. Pokud byl počet kroků pro řešení testu roven 21, efektivita byla 100 %.

Bylo analyzováno, zda během opakování úlohy došlo k efektu učení v celkové době provádění testu a efektivitě. Vypočítán byl sklon regresní přímky, který je dále označován jako trend mezi třemi hodnotami pro každého dobrovolníka. Doba provádění nebo efektivita představovala závislou proměnnou a pořadí testu představovalo proměnnou nezávislou. Trendy byly poté porovnány pomocí jednovýběrového t-testu oproti nulové směrnicí regresní přímky.

Subjektivní zkušenost se systémem a průběhem testu byla získána formou zpětné vazby z dotazníkového šetření zaměřeného na jistotu v ovládní, spokojenost s aktivací systému, pochopení toho, jak byly segmenty lůžka symbolizovány, přehlednost ovládní a upřednostnění BCET před jiným pomyslným ovládním. Odpovědi byly na 5 úrovněvé škále od *silně podporují* (++) / *podporují* (+), přes neutrální *nevím*, až po *nepodporují* (-) / *silně nepodporují* (--). Dobrovolníci také vyjádřili na 6 bodové stupnici intenzitu bolesti během testu. Obvyklá zraková pozornost byla hodnocena dotazem na schopnost sledovat celovečerní film.

4.4 Výsledky

Celkově se experimentu zúčastnilo 43 účastníků a provedlo 126 testů. U jednoho pacienta nebylo možné provést kalibraci *eye trackeru*, a tedy ani následné testování kvůli absenci detekce pohledu. Tři pacienti a devět osob v kontrolní skupině dokončilo test s brýlemi nebo kontaktními čočkami. Minimální čas úlohy* pro absolvování individuálního testu s optimální bezchybnou strategií (21 kroků) byl 23,9 s a nejdelší individuální čas byl 187,4 s (41 kroků). Žádný dobrovolník nedokončil všechny tři testy bez redundantních interakcí a pouze několik probandů ze skupiny kontroly dosáhlo efektivit 100 % v jednotlivých testech. Pro popis a porovnání výkonosti/úspěšnosti mezi skupinami byl vypočítán průměr ze tří opakovaných testů každého dobrovolníka. Kontrolní skupina zvládla úlohu za 40,2 (34,5; 45,5) s [medián (dolní kvartil a horní kvartil)] a výsledky byly relativně konzistentní. Ve skupině pacientů měl celkový čas 56,5 (46,5; 64,9) s značnou variabilitu: od minimálního času 38,2 s do 134,3 s. Ve skupině pacientů byla efektivita řešení úloh 72,1 (63,0; 75,2) % nižší než v kontrolní skupině, 86,3 (81,6; 91,0) %. Kontrolní skupina zvládla inicializaci systému BCET do prvního polohování za 11,5 (10,2; 14,1) s, pacienti zvládli tuto sekvenci za 13,9 (12,4; 16,5) s. Toto měření ukazuje, že navázání interakce se systémem, potvrzení bezpečnostních procedur a otevření výběru funkcí bylo pro obě skupiny bezproblémové.

Ve věkově odpovídajících podskupinách měla kontrolní skupina čas úlohy* o 17,7 s kratší ($p = 0,009$) a měla o 12,1 % vyšší efektivitu ($p = 0,001$) než pacienti a doba od kontaktu se systémem do prvního polohování byla kratší o 1,7 s ($p = 0,050$). ITR byl významně ($p = 0,009$) vyšší o 0,5 bitu za sekundu ve skupině zdravých dobrovolníků než u pacientů, což přímo odpovídá sledovanému rozdílnému času úlohy*. Podrobnosti jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Popisné charakteristiky sledovaných proměnných pro kontrolní skupinu a skupinu pacientů na základě výběru dle odpovídajícího věku.

	Skupina	N	Percentily					p
			Medián	25.	75.	Min	Max	
Čas úlohy* [s]	kontroly	12	40,5	37,5	44,5	25,7	66,7	0,009
	pacienti	10	58,2	45,9	65,1	38,2	134,3	
Efektivita [%]	kontroly	12	84,6	79,0	90,3	75,0	92,7	0,001
	pacienti	10	72,5	64,6	75,7	61,2	84,0	
EDSS [-]	kontroly	0						
	pacienti	11	9,0	9,0	9,0	7,5	9,0	
Čas do prvního polohování [s]	kontroly	12	12,4	10,4	14,0	9,7	20,6	0,05
	pacienti	10	14,1	12,5	18,5	12,0	23,3	
Věk [roky]	kontroly	12	50,0	48,8	56,0	41,0	59,0	0,1
	pacienti	11	58,0	50,5	63,0	42,0	64,0	
ITR [bity/s]	kontroly	12	1,5	1,3	1,6	0,8	2,5	0,009
	pacienti	10	1,0	0,9	1,3	0,4	1,6	

P hodnota neparametrického Mann–Whitneyho testu nezávislého pozorování porovnává obě skupiny a ukazuje deficit v čase úlohy*, čase do prvního polohování, efektivitě řešení úlohy, a ITR pro skupinu pacientů.

Proběhla analýza, zda se při opakovaném řešení úlohy projevil efekt učení. Pro vyhodnocení byl zvolen sklon regresní přímky. Učení bylo zřejmé ve skupině pacientů pro čas úlohy* ($p = 0,021$) a pro efektivitu ($p = 0,006$). Pacienti se zlepšili v průměru o 7,5 s (95% CI: -15,7, -0,3 s) a 5,4 % (95% CI: 1,7; 9,5 %) v každém testu. Dobrovolníci v kontrolní skupině tento významný trend nevykazovali. Ani u jedné skupiny nebyl efekt učení pro dobu od započetí testu do prvního polohování prokázán.

Tab. 3 Korelační matice vzájemných vazeb mezi sledovanými parametry.

	Čas úlohy*	Trend_Čas úlohy	Čas do prvního polohování	Trend_Čas do prvního polohování	Efektivita	Trend_Efektivita	Věk
Čas úlohy*	—	0,043	0,623 ***	0,169	-0,175	0,062	0,531 **
Trend_Čas úlohy	-0,118	—	0,267	0,084	-0,346	-0,353	-0,198
Čas do prvního polohování	0,535 *	-0,588 *	—	0,249	-0,154	-0,134	0,365
Trend_Čas do prvního polohování	-0,400	0,735 **	-0,588 *	—	-0,210	-0,118	0,283
Efektivita	-0,542 *	-0,075	-0,392	-0,053	—	-0,025	0,428 *
Trend_Efektivita	0,159	-0,382	0,371	-0,376	-0,326	—	0,211
Věk	-0,053	0,111	-0,059	0,096	-0,236	0,271	—
EDSS	0,282	0,220	0,154	0,088	-0,004	-0,587 *	-0,260

Korelace pro skupinu pacientů a kontrolní skupinu jsou uvedeny pod úhlopříčkou a nad úhlopříčkou, respektive. Korelace byly vypočteny pomocí Spearmanova neparametrického testu. Statistická významnost vztahu je označena hvězdičkami: * $p < .05$, ** $p < .01$ a *** $p < .001$.

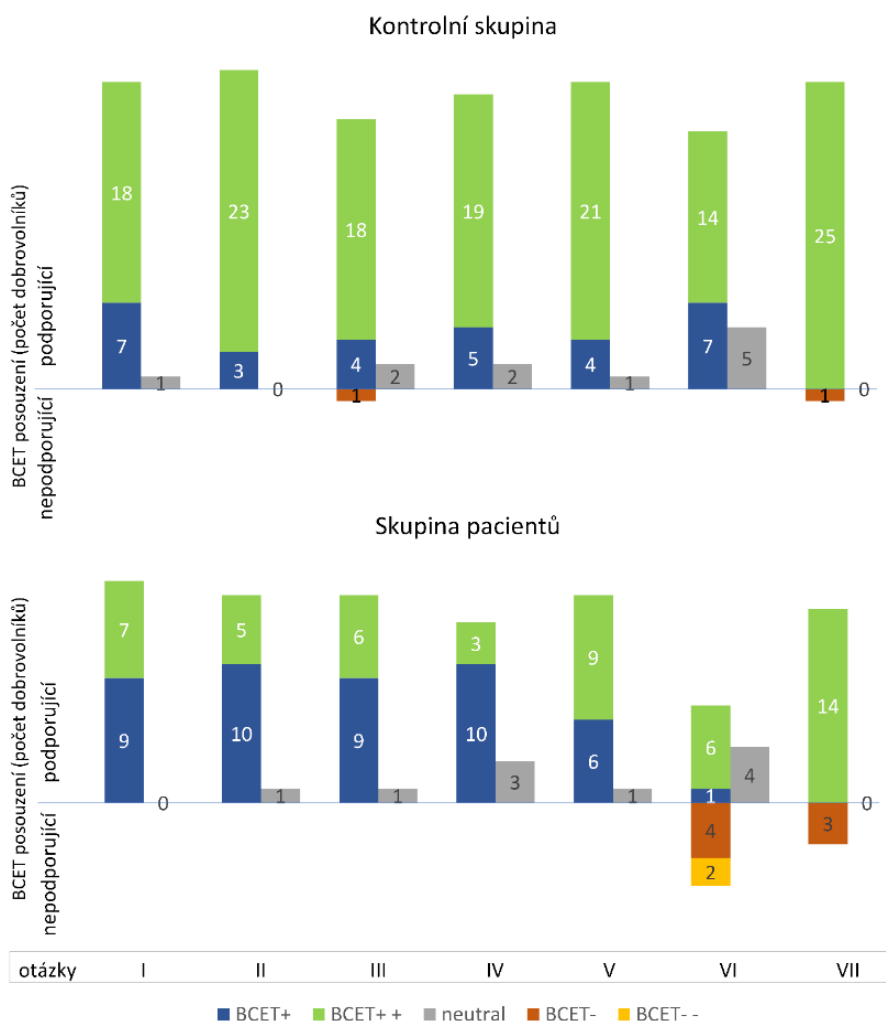
V korelační analýze pro skupinu pacientů bylo zjištěno, že vyšší stupeň EDSS významně souvisí ($\rho = -0,59$, $p = 0,017$) s pomalejším růstem efektivity během testování. Nebyla pozorována asociace žádného z analyzovaných parametrů s věkem. U korelací v rámci testu byla zjištěna významná pozitivní souvislost mezi časem úlohy* a efektivitou ($\rho = -0,54$, $p = 0,030$) a dobou do prvního polohování ($\rho = 0,54$, $p = 0,035$). Byl zjištěn významný vztah mezi zlepšením času úlohy* a časem do prvního polohování ($\rho = 0,74$, $p = 0,002$). Také bylo zjištěno, že čas do prvního polohování souvisel s učením vyjádřeným trendem času úlohy* ($\rho = -0,59$, $p = 0,019$) a trendem času do prvního polohování ($\rho = -0,59$, $p = 0,019$). Síla všech provedených korelací je uvedena v tab. 3 pod úhlopříčkou.

V kontrolní skupině byla zjištěna významná souvislost mezi zvyšujícím se věkem dobrovolníků a delším časem úlohy* ($\rho = 0,53$, $p = 0,005$) a sníženou efektivitou ($\rho = 0,43$, $p = 0,029$). Z ostatních testů byla významná pouze souvislost mezi časem úlohy* a časem do prvního polohování ($\rho = 0,62$, $p < 0,001$). Síla všech provedených korelací je uvedena v tab. 3 nad úhlopříčkou.

V našem experimentu byl vypočtený medián ITR 1,5 (1,3; 1,8) bitů/s pro kontrolní skupinu a 1,0 (0,9; 1,2) bitů/s pro pacienty. ITR byl ovlivněn zavedením časových prodlev mezi některými sekvencemi. Tyto časové prodlevy byly uplatněny, aby se omezily nežádoucí uživatelské příkazy generované neúmyslnými pohyby očí. Například zpoždění 2 s pro přerušování

pohotovostního režimu nebo 0,2 s pro výběr segmentů lůžka – režim výběru a 0,5 s pro režim potvrzení.

Všichni dobrovolníci v dotazníku vyplněném po BCET testování potvrdili, že mohou sledovat celovečerní film bez problémů (14 pacientů a 26 kontrol) nebo s přestávkami (3 pacienti). Při hodnocení vlastností BCET převažovaly zejména v kontrolní skupině pozitivní odpovědi (jistota v ovládní, aktivace, výběr polohy, informace o nastavení lůžka a přehlednost ovládní). Žádná ze skupin nehodnotila zařízení negativně a počet neutrálních odpovědí byl 11/181 v kontrolní skupině a 10/114 ve skupině pacientů. V otázce zabývající se preferovaným způsobem ovládní lůžka pacienti, na základě jejich zdravotního stavu, navrhli řešení pro ovládní polohovacího lůžka pomocí hlasu, balónku před ústy – tzv. ústní myš. Sedm pacientů preferovalo testovaný BCET před jinou kontrolní metodou, šest by si vybralo jinou technologii a čtyři si nebyli jisti. Tři pacienti a jedna kontrolní osoba zaznamenali během testu mírnou bolest. Četnost odpovědí na jednotlivé otázky je graficky shrnuta na obr. 11.



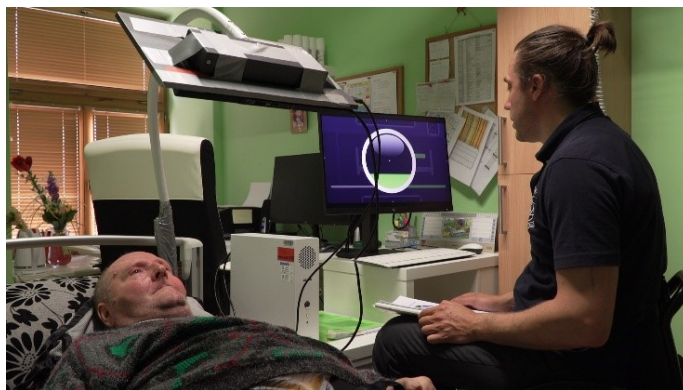
Obr. 11 Odpovědi na dotazník v kontrolní skupině ($n = 26$) a skupině pacientů ($n = 16$), ($n = 17$ v případě otázky VI a VII). V grafu je každá otázka reprezentována sloupci s barevně odlišenými odpověďmi. Počty kladných (záporných) hodnocení jsou uvedeny na kladné (záporné) svísle ose. Sloupce I–V ukazují hodnocení vlastností BCET: jistota v ovládní (I), aktivace ovládní (II), volba polohy (III), informace o nastavení lůžka (IV) a přehlednost ovládní (V). V těchto kategoriích v obou skupinách převažuje

pozitivní hodnocení. Šest ze sedmnácti pacientů uvedlo, že dává přednost alternativnímu ovládní před prezentovaným (sloupec VI). Bolest během testování (sloupec VII) byla indikována celkem 4 dobrovolníky (1 kontrolní a 3 pacienti) a hodnocena jako mírná. Odpovědi byly na 5úrovňové škále: silně podporují BCET (++ , zelené sloupce), pravděpodobně podporují (+, modré sloupce), nejsou si jistí (šedé), pravděpodobně nepodporují (-, oranžové sloupce) a silně nepodporují (--, žluté sloupce).

4.5 Diskuse

Pozorované přístupy k posílení plynulejší a hladší integrace schopností uživatele a asistivních technologií lze rozdělit do tří vzájemně se nevyklučujících oblastí [32]; 1) zlepšení mechaniky asistivních technologií; 2) vylepšení uživatelského a fyzického rozhraní; a 3) vylepšená sdílená kontrola mezi uživatelem a technologií. Tyto přístupy byly zakomponovány do návrhu a následné realizace BCET společně se snahou efektivně snížit zátěž dlouhodobé péče. Toto je součástí i obdobného řešení výzkumného týmu zaměřeného na ovládní polohovací postele a přivolání zdravotnického personálu [33]. Zde se zabývají implementací externích akčních členů formou pohonů do standardního mechanického polohovacího lůžka s displejem, vlastním GUI a *eye trackerem*. Jejich práce je ovšem omezena na návrh řídicí architektury a testování funkčnosti mechaniky bezkontaktního polohování, neřeší zpětnou vazbu z případných experimentů. Naproti tomu v této pilotní studii s pacienty byl zvolen přídavný externí modul (obr. 6) na *Supervisor* ovladači, který neohrozil integritu řízení lůžka. Identicky bylo implementováno řízení polohy lůžka jednotkou Arduino. Použitelnost a efektivitu vycházející z možných testování nebylo možné porovnat, protože v jejich studii nejsou k dispozici relevantní údaje.

Limitace využití *eye-trackingu* může vycházet z potřeby dodržet přímou viditelnost na systém sledování očí obsahujícího IR zdroj světla a kameru. Spolehlivost systémů je závislá na dostatečném pohledu zornice na *eye tracker* a je snížena odrazy, oslněním kamery, nesprávnou polohou obličeje, brýlemi s obroučkami nebo poruchami zraku, jako je strabismus [34]. Mezi účastníky experimentu jeden pacient s významnou ptózou nebyl schopen navázat komunikaci (oční kontakt) s BCET, protože mu příliš přivřená oční víčka bránila v pohledu, a nedošlo tak k dostatečné expozici zornic. Výrobce *eye trackeru* na tento problém upozorňuje také na svých internetových stránkách [35]. 60 Hz, kalibrace a umístění *eye trackeru* jsou pro daný úkol a použití optimální.



Obr. 12 Pracoviště Domova sv. Josefa s probíhajícím experimentem, pacient a experimentátor. Pacient samostatně a kontrolovaně pohybuje segmentem nohou směrem nahoru.

Při porovnání probandů na základě věku pilotní studie ukazuje lepší výsledky u všech sledovaných parametrů u kontrolní skupiny. Závislost efektivity na věku probandů byla zkoumána formou korelačních testů. Byla potvrzena významná korelace efektivity a věku u kontrolní skupiny ($p < 0.05$). U skupiny pacientů BCET ani VBCET nebyla tato závislost pozorována. Je nepravděpodobné, že by výsledky byly významně ovlivněny bolestí pacienta, protože pouze tři pacienti v dotazníkovém šetření uvedli, že během testování zažívali mírnou bolest. Pacienti ovšem mohli být ovlivněni analgetiky, což mohlo způsobit mírné odchylky v přesnosti a kognitivních funkcích [36–39].

V experimentu byl efekt učení významný a patrný u skupiny pacientů, u kterých opakování testu způsobilo zkrácení testovaných časů, a to se promítlo i do celkové efektivity řešení úkolů. Tato efektivita nebyla v kontrolní skupině pozorována. Dobrovolníci pravděpodobně dosáhli téměř optimálních výsledků v prvním testu a další zlepšení nebylo prokazatelné. Z literatury je zřejmé, že trénink očních pohybů pomocí *eye-trackingu* má další výhody. Zlepšení efektu učení tréninkem řešila studie [40], ta ukázala, že děti, které absolvovaly trénink sledování očí, vykazovaly lepší paměť a rychlejší učení. Studie [41] zabývající se zlepšením kognitivních schopností pacientů po cévní mozkové příhodě pomocí tréninku s *eye trackerem* ukázala, že trénink sledování očí významně zlepšil vizuální pozornost ($p < 0.05$). Dá se tedy předpokládat, že s dlouhodobějším používáním BCET by došlo k postupnému zkrácení času úlohy až například k podobným hodnotám, kterých dosahovala kontrolní skupina. Celkově by to mohlo poskytnout výhody na úrovni vizuálních a kognitivních funkcí a zvýšit efektivitu ovládnutí. To by ale vyžadovalo dlouhodobé sledování a trénování pacientů. Průběh experimentu je zobrazen na obr. 12.

Výsledkům dotazníku dominovalo pozitivní hodnocení BCET, zejména mezi dobrovolníky v kontrolní skupině, pro které nebylo obtížné jej použít. Výpovědi pacientů mohly být ovlivněny mírně horšími výsledky testů. Nejruznější odpovědi byly na otázku, zda by upřednostnili jiný typ ovládnutí před BCET. Sedm pacientů (šest určitě a jeden pravděpodobně) by zvolilo BCET jako preferovanou metodu řízení lůžka. Šest pacientů nedalo přednost systému BCET: tři z nich zvolili ruční ovládnutí, protože si zachovali dostatečné motorické dovednosti pro mačkání tlačítek, jeden pacient navrhl použití hlasového ovládnutí, protože byl obeznámen s technologií, další pacient by použil buď hlas, nebo ruční ovládnutí a poslední pacient nebyl schopen dokončit kalibraci a provést úkol, ale na tuto otázku v dotazníku odpověděl. Čtyři zbývající pacienti si nebyli jisti svými preferencemi.

4.5.1 Limitující faktory studie

Ačkoli studie poskytuje několik odpovědí týkajících se proveditelnosti a užitečnosti ovládnutí lůžka pomocí očních pohybů u pacientů s roztroušenou sklerózou, ponechává některé otázky nezodpovězené. Studie například neposkytuje informace o použitelnosti u jedinců s jinými neurologickými onemocněními, jako je demence, mírná kognitivní porucha nebo traumatické poranění mozku, případně u pacientů po poranění míchy. Kromě toho by delší období sledování a používání BCET s rozšířeným počtem dobrovolníků umožnilo úplné vyhodnocení efektu tréninku, zlepšení činností každodenního života a kvality života.

4.6 Závěr pilotní studie

Pomocí navrženého a odladěného SW v kombinaci s komponenty dostupnými na trhu a speciálně navrženým adaptérem bylo vyvinuto zařízení, které dokáže ovládat elektricky řízené polohovací lůžko Latera pomocí pohybu očí. Tento komplexní systém BCET se podařilo otestovat a ověřit jeho funkčnost u zdravých dobrovolníků i pohybově omezených pacientů s RS. Uživatelské rozhraní založené na velkých elementech s intuitivním grafickým význámem

a robustnost detekce pohybu očí byly pozitivně hodnoceny z hlediska spolehlivosti a snadnosti použití jak kontrolní skupinou, tak skupinou pacientů. Důležitým výsledkem této studie je, že ze 16 pacientů, kteří mohli úspěšně ovládat lůžko zrakem, by tuto technologii využilo sedm pacientů. Byli to ti, kteří nemohli ovládat tlačítka postele rukou nebo paží. Preference ve skupině pacientů kontrastovaly se skupinou zdravých dobrovolníků, kde by všichni zařízení využili v případě zdravotní komplikace výrazně omezující pohyb horních končetin. Zásadní rozdíl ve vyhodnocování použitelnosti zařízení je třeba vzít v úvahu v budoucích studiích věnujících se testování asistivních technologií. Výsledky zdravých kontrol nelze snadno extrapolovat na pacienty. Účastníci kontrolní skupiny provedli testovací sekvenci rychleji a efektivněji než pacienti. Pacienti však měli tendenci se zlepšovat opakováním v obou těchto parametrech. Nejvyšší rychlost přenosu informací byla 1,6 bit/s pro pacienty a 2,5 bit/s pro kontrolní skupinu. Hodnocení efektivity ovládnutí pacienty ukázalo, že vyšší úroveň EDSS negativně korelovala s efektivitou. Na základě dosažených výsledků se výzkumný tým domnívá, že BCET má potenciál zvýšit míru soběstačnosti a kvalitu života pacientů s roztroušenou sklerózou.

5 ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE

Sbírání dat k této disertační práci probíhalo během několika let v různých etapách vývoje ovládacího zařízení. Práce se věnuje postupné analýze základních otázek o vhodnosti zařízení pro vybrané pacienty formou studie proveditelnosti. Zařízení prošlo vysokou mírou inovace a testování od konceptu po reálné ovládání polohovacího lůžka. Podařilo se navržené řešení a vyvinuté zařízení otestovat formou experimentů na pacientech s RS a navrhnout průmyslovou inovaci systému. Získané výsledky pacientů s RS je možné extrapolovat na širší skupiny uživatelů s výrazně sníženou nebo žádnou motorikou horních končetin při zachování dostatečných kognitivních funkcí a míry pozornosti.

Hypotéza, že skupina pacientů s roztroušenou sklerózou dosahuje stejných výsledků při kvantitativním výzkumu BCET se nepotvrdila. Kontrolní skupina měla relativně konzistentní výsledky ve všech opakovaných testech i díky normálnímu rozdělení v populaci. Dosahovala kratších časů při vypracování úlohy, lepší efektivity a vyššího ITR. Skupina pacientů nedosahovala konzistentních výsledků, ale díky významnému trendu učení se postupně s opakovanými testy pacienti zlepšovali jak v rychlosti, tak v efektivitě zpracování úkolu. Analýza vztahu efektivity a věku u kontrol a pacientů potvrdila důležitost zapojení pacientů do experimentů. Mezi pacienty vznikají větší rozdíly díky rozsahu jednotlivých diagnóz, jsou zde častější okulomotorické problémy a omezená motorika končetin hraje velkou roli při správné pozici a nastavení pohledu do pozorované oblasti. Vývoj zařízení pouze na základě testování se zdravou populací nemusí reflektovat tyto závěry a zařízení nemusí být pro motoricky indisponované pacienty vhodně připravené. Tyto aspekty nelze pominout do návrhu bezkontaktního ovládacího systému polohovacích lůžek v budoucnu. Na základě výsledků experimentů z VBCET a BCET je možné doporučit bezkontaktní technologii PCCR pro pacienty s omezenou motorikou horních končetin a je velmi dobrou alternativou ke klasickému kontaktnímu tlačítkovému ovladači polohovacích lůžek.

Závěrem lze shrnout, že ovládání polohovacího lůžka pomocí *eye-trackingu* představuje další aplikační pilíř, který vnáší do odvětví asistivních technologií v medicíně novou (nadstavbovou) rovinu poznání, objektivizuje experimentální výstupy, nabízí zajímavé alternativy a jako prostředek zvýšení soběstačnosti významně posiluje roli bezkontaktních senzorů v oboru.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION. a WORLD BANK. *World report on disability*. B.m.: World Health Organization, 2011. ISBN 9789241564182.
- [2] ODBOR PROGRAMOVÉHO FINANCOVÁNÍ A STATISTIKY MPSV. *STATISTICKÁ ROČENKA Z OBLASTI PRÁCE A SOCIÁLNÍCH VĚCÍ 2021* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.mpsv.cz/statisticka-rocenka-z-oblasti-prace-a-socialnich-veci>
- [3] DZIEMIAN, Sabine, William W. ABBOTT a A. Aldo FAISAL. Gaze-based teleprosthetic enables intuitive continuous control of complex robot arm use: Writing & drawing. In: *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)* [online]. B.m.: IEEE, 2016, s. 1277–1282. ISBN 978-1-5090-3287-7. Dostupné z: doi:10.1109/BIOROB.2016.7523807
- [4] HWANG, Chi-Shin, Ho-Hsiu WENG, Li-Fen WANG, Chon-Haw TSAI a Hao-Teng CHANG. An Eye-Tracking Assistive Device Improves the Quality of Life for ALS Patients and Reduces the Caregivers' Burden. *Journal of Motor Behavior* [online]. 2014, **46**(4), 233–238. ISSN 0022-2895. Dostupné z: doi:10.1080/00222895.2014.891970
- [5] MEENA, Y. K., A. CHOWDHURY, H. CECOTTI, K. WONG-LIN, S. S. NISHAD, A. DUTTA a G. PRASAD. EMOHEX: An eye tracker based mobility and hand exoskeleton device for assisting disabled people. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* [online]. B.m.: IEEE, 2016, s. 002122–002127. ISBN 978-1-5090-1897-0. Dostupné z: doi:10.1109/SMC.2016.7844553
- [6] H*, Kajol, Shaik JUNAID, Shubham JAIN, Anuja CHAUDHARY a Prajwal KT. Design and Development of a Voice Actuated Hospital Bed for Patient Care. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* [online]. 2019, **8**(4), 1751–1757. ISSN 22773878. Dostupné z: doi:10.35940/ijrte.C5882.118419
- [7] MAZO, Manuel, Francisco J. RODRÍGUEZ, José L. LÁZARO, Jesús URENA, Juan C. GARCIA, Enrique SANTISO, Pedro REVENGA a J. Jesús GARCIA. Wheelchair for physically disabled people with voice, ultrasonic and infrared sensor control. *Autonomous Robots* [online]. 1995, **2**(3), 203–224. ISSN 0929-5593. Dostupné z: doi:10.1007/BF00710857
- [8] HANSEN, D.W. a QIANG JI. In the Eye of the Beholder: A Survey of Models for Eyes and Gaze. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2010, **32**(3), 478–500. ISSN 0162-8828. Dostupné z: doi:10.1109/TPAMI.2009.30
- [9] GIBALDI, Agostino, Mauricio VANEGAS, Peter J. BEX a Guido MAIELLO. Evaluation of the Tobii EyeX Eye tracking controller and Matlab toolkit for research. *Behavior Research Methods* [online]. 2017, **49**(3), 923–946. ISSN 1554-3528. Dostupné z: doi:10.3758/s13428-016-0762-9
- [10] THE JAMOVI PROJECT. *jamovi (Version 2.2) [Computer Software]*. 2021
- [11] MTSHALI, Progress a Freedom KHUBISA. A Smart Home Appliance Control System for Physically Disabled People. In: *2019 Conference on Information Communications*

- Technology and Society (ICTAS)* [online]. B.m.: IEEE, 2019, s. 1–5. ISBN 978-1-5386-7365-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICTAS.2019.8703637
- [12] GLADENCE, L. Mary, V. Maria ANU, R. RATHNA a E. BRUMANCIA. Recommender system for home automation using IoT and artificial intelligence. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* [online]. 2020, 1–9. ISSN 1868-5137. Dostupné z: doi:10.1007/s12652-020-01968-2
- [13] WANG, Rong-Jing, Shu-Chen LAI, Ji-Yun JHUANG, Ming-Chin HO a Yan-Chyuan SHIAU. Development of Smart Home Gesture-based Control System. *Sensors and Materials* [online]. 2021, **33**(10), 3459. ISSN 0914-4935. Dostupné z: doi:10.18494/SAM.2021.3522
- [14] PAING, May Phu, Aniwat JUHONG a Chuchart PINTAVIROOJ. Design and Development of an Assistive System Based on Eye Tracking. *Electronics* [online]. 2022, **11**(4), 535. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics11040535
- [15] BRUSH, Zachary, Alan BOWLING, Michael TADROS a Michael RUSSELL. Design and control of a smart bed for pressure ulcer prevention. In: *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* [online]. B.m.: IEEE, 2013, s. 1033–1038. ISBN 978-1-4673-5320-5. Dostupné z: doi:10.1109/AIM.2013.6584230
- [16] ROY, B., A. BASMAJIAN a H.H. ASADA. Repositioning of a Rigid Body With a Flexible Sheet and Its Application to an Automated Rehabilitation Bed. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* [online]. 2005, 2(3), 300–307. ISSN 1545-5955. Dostupné z: doi:10.1109/TASE.2005.849093
- [17] SHICKEL, Benjamin, Anis DAVOUDI, Tezcan OZRAZGAT-BASLANTI, Matthew RUPPERT, Azra BIHORAC a Parisa RASHIDI. Deep Multi-Modal Transfer Learning for Augmented Patient Acuity Assessment in the Intelligent ICU. *Frontiers in Digital Health* [online]. 2021, **3**. ISSN 2673-253X. Dostupné z: doi:10.3389/fdgth.2021.640685
- [18] MLČEK, Mikuláš, Michal OTÁHAL, João Batista BORGES, Glasiela Cristina ALCALA, Dominik HLADÍK, Eduard KURIŠČÁK, Leoš TEJKL, Marcelo AMATO a Otomar KITTNAR. Targeted lateral positioning decreases lung collapse and overdistension in COVID-19-associated ARDS. *BMC Pulmonary Medicine* [online]. 2021, **21**(1), 133. ISSN 1471-2466. Dostupné z: doi:10.1186/s12890-021-01501-x
- [19] JACOB, Robert J K. Eye Tracking in Advanced Interface Design. In: BARFIELD W a FURNESS TA, ed. *Virtual Environments and Advanced Interface Design*. New York: Oxford University Press, 1995, s. 258–288.
- [20] VELICHKOVSKY, Boris B., Mikhail A. RUMYANTSEV a Mikhail A. MOROZOV. New Solution to the Midas Touch Problem: Identification of Visual Commands Via Extraction of Focal Fixations. *Procedia Computer Science* [online]. 2014, **39**(C), 75–82. ISSN 18770509. Dostupné z: doi:10.1016/j.procs.2014.11.012
- [21] MS INTERNATIONAL FEDERATION. Number of people with MS. *Atlas of MS* [online]. Dostupné z: <https://www.atlasofms.org/map/united-kingdom/epidemiology/number-of-people-with-ms>
- [22] WALTON, Clare, Rachel KING, Lindsay RECHTMAN, Wendy KAYE, Emmanuelle LERAY, Ruth Ann MARRIE, Neil ROBERTSON, Nicholas LA ROCCA, Bernard

- UITDEHAAG, Ingrid VAN DER MEI, Mitchell WALLIN, Anne HELME, Ceri ANGOOD NAPIER, Nick RIJKE a Peer BANEKE. Rising prevalence of multiple sclerosis worldwide: Insights from the Atlas of MS, third edition. *Multiple Sclerosis Journal* [online]. 2020, **26**(14), 1816–1821. ISSN 1352-4585. Dostupné z: doi:10.1177/1352458520970841
- [23] DOBSON, R. a G. GIOVANNONI. Multiple sclerosis – a review. *European Journal of Neurology* [online]. 2019, **26**(1), 27–40. ISSN 1351-5101. Dostupné z: doi:10.1111/ene.13819
- [24] SUNNY, Md Samiul Haque, Md Ishrak Islam ZARIF, Ivan RULIK, Javier SANJUAN, Mohammad Habibur RAHMAN, Sheikh Iqbal AHAMED, Inga WANG, Katie SCHULTZ a Brahim BRAHMI. Eye-gaze control of a wheelchair mounted 6DOF assistive robot for activities of daily living. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* [online]. 2021, **18**(1), 173. ISSN 1743-0003. Dostupné z: doi:10.1186/s12984-021-00969-2
- [25] PAUL, Ayan, Juliana USMAN, Mohd Yazed AHMAD, Mohafez HAMIDREZA, Hadizadeh MARYAM, Zhi Chao ONG, Khairunnisa HASIKIN a Khin Wee LAI. Health efficacy of electrically operated automated massage on muscle properties, peripheral circulation, and physio-psychological variables: a narrative review. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* [online]. 2021, **2021**(1), 80. ISSN 1687-6180. Dostupné z: doi:10.1186/s13634-021-00788-6
- [26] KIM, Jeong Hun, Nicholas THEODORE, Rajiv IYER, Amir MANBACHI a Richard UM. Development of Voice-Controlled Smart Surgical Bed. In: *2020 Design of Medical Devices Conference* [online]. B.m.: American Society of Mechanical Engineers, 2020. ISBN 978-0-7918-8354-9. Dostupné z: doi:10.1115/DMD2020-9065
- [27] ABE, Kazunari a Hitoshi OKAMURA. Development of a Method for Transferring Paraplegic Patients with Advanced Cancer from Bed to Wheelchair. *Journal of Palliative Medicine* [online]. 2016, **19**(6), 656–660. ISSN 1096-6218. Dostupné z: doi:10.1089/jpm.2015.0345
- [28] KAPUSTA, Ariel S., Phillip M. GRICE, Henry M. CLEVER, Yash CHITALIA, Daehyung PARK a Charles C. KEMP. A system for bedside assistance that integrates a robotic bed and a mobile manipulator. *PLOS ONE* [online]. 2019, **14**(10), e0221854. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0221854
- [29] Expanded Disability Status Scale (EDSS). *Multiple Sclerosis Trust* [online]. 1. leden 2020 [vid. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://mstrust.org.uk/a-z/expanded-disability-status-scale-edss>
- [30] SINGH, Sinam Ajitkumar, Takhellambam Gautam MEITEI, Ningthoujam Dinita DEVI a Swanirbhar MAJUMDER. A deep neural network approach for P300 detection-based BCI using single-channel EEG scalogram images. *Physical and Engineering Sciences in Medicine* [online]. 2021, **44**(4), 1221–1230. ISSN 2662-4729. Dostupné z: doi:10.1007/s13246-021-01057-4
- [31] TEHOVNIK, E.J., L.C. WOODS a W.M. SLOCUM. Transfer of information by BMI. *Neuroscience* [online]. 2013, **255**, 134–146. ISSN 03064522. Dostupné z: doi:10.1016/j.neuroscience.2013.10.003

- [32] COWAN, Rachel E, Benjamin J FREGLY, Michael L BONINGER, Leighton CHAN, Mary M RODGERS a David J REINKENSMAYER. Recent trends in assistive technology for mobility. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* [online]. 2012, **9**(1), 20. ISSN 1743-0003. Dostupné z: doi:10.1186/1743-0003-9-20
- [33] LUI, Ping-Win, Feng Min LAI, Kuo-Chih SU, Jen Yung LIN, Hwa Wei CHI, Jean-Shyan WANG a Yuh Wen CHEN. Use Eye Tracker to Design an Intelligent Patient Bed. *Energy Procedia* [online]. 2017, **143**, 553–558. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.12.726
- [34] GONZALEZ-SANCHEZ, Javier, Mustafa BAYDOGAN, Maria Elena CHAVEZ-ECHEAGARAY, Robert K. ATKINSON a Winslow BURLESON. Affect Measurement: A Roadmap Through Approaches, Technologies, and Data Analysis. In: *Emotions and Affect in Human Factors and Human-Computer Interaction* [online]. B.m.: Elsevier, 2017, s. 255–288. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-801851-4.00011-2
- [35] Creating good conditions for eye tracking. *Tobii Connect* [online]. 2020. Dostupné z: https://connect.tobii.com/s/article/Creating-good-conditions-for-eye-tracking?language=en_US
- [36] MOREIRA, Sebastian A a Petr NOVAK. Effects of pain on cognitive function and mobility. *Open Access Journal of Clinical Trials* [online]. 2019, **Volume 11**, 1–10. ISSN 1179-1519. Dostupné z: doi:10.2147/OAJCT.S182502
- [37] LIER, Elisabeth J, Clementina M VAN RIJN, Marjan DE VRIES, Harry VAN GOOR a Joukje M OOSTERMAN. The interaction between pain and cognition: on the roles of task complexity and pain intensity. *Scandinavian journal of pain* [online]. 2022, **22**(2), 385–395. ISSN 1877-8879. Dostupné z: doi:10.1515/sjpain-2021-0119
- [38] TABRY, V., T. A. VOGEL, M. LUSSIER, P. BROUILLARD, J. BUHLE, P. RAINVILLE, L. BHERER a M. ROY. Inter-individual predictors of pain inhibition during performance of a competing cognitive task. *Scientific Reports* [online]. 2020, **10**(1), 21785. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-020-78653-z
- [39] CAMPBELL, Claudia M., Kenny WITMER, Mpepera SIMANGO, Alene CARTERET, Marco L. LOGGIA, James N. CAMPBELL, Jennifer A. HAYTHORNTHWAITE a Robert R. EDWARDS. Catastrophizing delays the analgesic effect of distraction. *Pain* [online]. 2010, **149**(2), 202–207. ISSN 0304-3959. Dostupné z: doi:10.1016/j.pain.2009.11.012
- [40] CHAN, Agnes S., Tsz-Lok LEE, Sophia L. SZE, Natalie S. YANG a Yvonne M. Y. HAN. Eye-tracking training improves the learning and memory of children with learning difficulty. *Scientific Reports* [online]. 2022, **12**(1), 13974. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-022-18286-6
- [41] MOON, Sung-Jun, Chan-Hee PARK, Sang In JUNG, Ja-Won YU, Eun-Chul SON, Hye Na LEE, Hyeonggi JEONG, Sueun JANG, Eunhee PARK a Tae-Du JUNG. Effects of an Eye-Tracking Linkage Attention Training System on Cognitive Function Compared to Conventional Computerized Cognitive Training System in Patients with Stroke. *Healthcare* [online]. 2022, **10**(3), 456. ISSN 2227-9032. Dostupné z: doi:10.3390/healthcare10030456

7 PŘEHLED PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI

Původní vědecké práce v impaktovaném časopise

KOPECEK, Martin a Jan KREMLACEK. Eye-tracking control of an adjustable electric bed: construction and validation by immobile patients with multiple sclerosis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* [online]. 2023, **20**(1), 75. ISSN 1743-0003. (IF 5.208; vážený AIS W2)

POHANKOVÁ, Denisa, Igor SIRÁK, Milan VOŠMIK, Linda KAŠAOVÁ, Jakub GREPL, Petr PALUSKA, Lukáš HOLUB, Jiří ŠPAČEK, Miroslav HODEK, **Martin KOPEČEK** a Jiří PETERA. High-Dose-Rate Brachytherapy as an Organ-Sparing Treatment for Early Penile Cancer. *Cancers* [online]. 2022, **14**(24), 6248. ISSN 2072-6694. (IF 6.575; vážený AIS W2)

BEZROUK, Ales, Tomas HOSSZU, Ludek HROMADKO, Zuzana OLMROVA ZMRHALOVA, **Martin KOPECEK**, Martin SMUTNY, Iva SELKE KRULICHOVA, Jan M. MACAK a Jan KREMLACEK. Mechanical properties of a biodegradable self-expandable polydioxanone monofilament stent: In vitro force relaxation and its clinical relevance. *PLOS ONE* [online]. 2020, **15**(7), e0235842. ISSN 1932-6203. (IF 3.752; vážený AIS W2)

Původní vědecké práce v recenzovaném neimpaktovaném časopise

KOPEČEK, Martin, Jiří ZÁHORA a Aleš BEZROUK. Contactless Measurement of Integrity of Silicone Coating on Self-Expandable Esophageal Nitinol Stents. *Acta Medica (Hradec Kralove, Czech Republic)* [online]. 2022, **65**(1), 18–24. ISSN 1211-4286.

SMUTNÝ, Martin, **Martin KOPEČEK** a Aleš BEZROUK. An Investigation of the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Transparent Endodontic Blocks. *Acta Medica (Hradec Kralove, Czech Republic)* [online]. 2022, **65**(2), 59–65. ISSN 1211-4286.

SIRÁK, Mudr Igor, Petra SÝKOROVÁ, Ing JAKUB GREPL, Ing Petr PALUSKA, Šárka KOLLÁROVÁ, Iva DOSTÁLOVÁ, **Ing Martin KOPEČEK**, Martina ŠŮNOVÁ, Monika SEDLÁČKOVÁ, Ing Linda KAŠAOVÁ, Mudr Miroslav HODEK a Mudr Milan VOŠMIK. 4D MR adaptivní brachyterapie karcinomu hrdla dělohy ve FN Hradec Králové. *Onkologická revue*. 2019, **01**.

Ostatní práce v recenzovaném neimpaktovaném časopise

KOPECEK, Martin, Petr VODA, David KORDEK a Pravoslav STRANSKY. E-LEARNING AND MASTERING OF ELECTROCARDIOGRAPHY AND BLOOD-PRESSURE MEASUREMENT. In: BASTINEC, J AND HRUBY, M, ed. MATHEMATICS, INFORMATION TECHNOLOGIES AND APPLIED SCIENCES 2018. 2018, s. 96–103. ISBN 978-80-7582-065-5.

KOPECEK, Martin, Petr VODA, Pravoslav STRANSKY a Josef HANUS. 3D PRINTING - LEARNING AND MASTERING. In: BASTINEC, J AND HRUBY, M, ed. MATHEMATICS, INFORMATION TECHNOLOGIES AND APPLIED SCIENCES 2017. 2017, s. 164–170. ISBN 978-80-7582-026-6.

MAŠÍN, Vladimír, **Martin KOPEČEK** a Josef HANUŠ. Moodle Portal in Virtualized Environment - a Performance Analysis. In: PROCEEDINGS OF THE 2017 FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS (FEDCSIS) [online]. 2017, s. 195–198.

VLADIMÍR MAŠÍN, MARTINA ŘEZÁČOVÁ, JIŘINA VÁVROVÁ, PETR PALUSKA, **MARTIN KOPEČEK**, PETR VODA, JOSEF HANUŠ a PRAVOSLAV STRÁNSKÝ. A COOPERATIVE APPROACH TO DISTANCE LEARNING IN RADIOBIOLOGY-Web of Science Core Collection. In: DISTANCE LEARNING, SIMULATION AND COMMUNICATION 2017 [online]. 2017, s. 106–112.

KORDEK, David, **Martin KOPECEK** a Petr VODA. Medical biophysics as a combination of the classic educational method and e-learning. In: PROCEEDINGS OF THE 2017 FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS (FEDCSIS) [online]. 2017, s. 177–180.

JIŘÍ ZÁHORA, **MARTIN KOPEČEK**, PETR VODA, IVA SELKE-KRULICHOVÁ, JOSEF HANUŠ a PRAVOSLAV STRÁNSKÝ. E-LEARNING SUPPORT FOR TEACHING OF BIOSTATISTICS-Web of Science Core Collection. In: Miroslav HRUBÝ, ed. DISTANCE LEARNING, SIMULATION AND COMMUNICATION 2017 [online]. 2017, s. 218–222.

KORDEK DAVID, **KOPECEK MARTIN**, CANOVA KRISTYNA, HABARTOVA KLARA a POSPISILOVA MONIKA. THE LMS MOODLE AND THE MOODLE MOBILE APPLICATION IN EDUCATIONAL PROCESS OF BIOPHYSICS-Web of Science Core Collection. In: BASTINEC, J AND HRUBY, M, ed. MATHEMATICS, INFORMATION TECHNOLOGIES AND APPLIED SCIENCES 2017 [online]. 2017, s. 171–176.

ALEŠ BEZROUK, TOMÁŠ NOSEK, MARTIN SMUTNÝ, **MARTIN KOPEČEK**, PETR VODA, JOSEF HANUŠ a PRAVOSLAV STRÁNSKÝ. (MSL) MULTIPLE STEP E-LEARNING PRACTICAL - COMPUTED TOMOGRAPHY-Web of Science Core Collection. In: Miroslav HRUBÝ, ed. DISTANCE LEARNING, SIMULATION AND COMMUNICATION 2017 [online]. 2017, s. 9–14.

Seznam odborných přednášek na odborných setkáních (ústní sdělení)

Název odborného setkání	Název příspěvku
Mefanet 2022	3D tisk na LFHK UK – návrh, výroba, testování
XLII. Dny lékařské biofyziky, 2019	Návrh, konstrukce a testování 3D ABS a PLA scaffoldů pro tkáňové inženýrství
MITAV 2018	E-learning and mastering of electrocardiography and blood-pressure measurement
FEDCSIS 2017	Medical biophysics as a combination of the classic educational method and e-learning
DLSC 2017	Education of the design, manufacture and testing of the 3D printed implants
MITAV 2017	3D tisk implantátů – návrh, výroba, testování
XXXIX. Dni lékařské biofyziky, 2016	3D tisk implantátů – návrh, výroba, testování
University of Hull (Velká Británie), 2016	Department of Medical Biophysics LFHK UK (R&D)
University of Gothenburg, 2015	Lessons of mechanical properties and durability of artificial bone replacement structures
XXXVIII. dny lékařské biofyziky, 2015	Studie proveditelnosti bezkontaktního ovládání polohovacího lůžka

Ocenění a významné spolupráce

První místo v soutěži o nejlepší přednášku studentů DSP na konferenci: Dny lékařské biofyziky 2015 a 2016

Vznik Laboratoře bezkontaktních technologií a Laboratoře 3D tisku na LFHK

Spolupráce s neziskovým sektorem - CZEPA a Centrum Paraple

Spolupráce se společností Linet - Dohoda o mlčenlivosti (Vývoj bezkontaktního ovládání polohovacího lůžka)

Spolupráce Domov Sv. Josefa, Žireč (zařízení pro pacienty s roztroušenou sklerózou)

Vedení úspěšné SVOČ 2019 (Thirumushi Sairaj, Revathi - Study and Design of 3D printed scaffolds for tissue engineering)

Cena Wernera von Siemense 2016 – Ocenění za překonání překážek

Patent „Systém pro ovládání polohovacího lůžka“ (CZ 309229) a užitný vzor (CZ 30188)

