

EGOLEM, DIGITÁLNÍ SIMULÁTOR PACIENTA

Tomáš Kulhánek, Jiří Kofránek

Abstrakt

Vyvinuli jsme simulátor virtuálního pacienta, který se skládá z figuríny pacienta, která dýchá, makety přístroje ECMO, která se chová jako reálný přístroj a webového simulátoru, který jednak ukazuje co se děje uvnitř pacienta, posílá a přijímá údaje z makety přístroje ECMO a posílá a přijímá údaje z figuríny virtuálního pacienta. Matematický model za simulátorem řídí dýchání figuríny. Máme implementovaný model přenosu krevních plynů a webový simulátor ukazuje vliv selhávání plic a srdce na koncentrace rozpuštěných krevních plynů v těle a vliv léčby přístroje ECMO.

Klíčová slova

ECMO, model, robotizovaná figurína pacienta, simulátor, lékařský trenážér, výuka

Úvod

V první polovině osmdesátých let na katedře anesteziologie Floridské university (University of Florida) nastoupil do rezidenčního výcviku dr. Joachim Stefan Gravenstein. Práce anesteziologa je zdánlivě velmi poklidná. Spočívá v uvedení pacienta do narkózy a pak jen ve sledování jeho stavu v průběhu operace, kde hlavní tíže spočívá na práci chirurgů. Ten poklid je ale jen zdánlivý. Někdy totiž přicházejí z ničeho nic závažné situace, kdy na rychlém a správném rozhodnutí anesteziologa závisí osud nemocného. Ještě napjatější situace, kdy jen rychlé a správné rozhodnutí může zachránit život pacienta, nastávají na jednotkách intenzivní péče.

Dr. Gravenstein přemýšlel o tom, jak co nejlépe naučit lékařský personál tyto krizové situace zvládat a využít při tom obdobné postupy, které se využívají na pilotních trenážerech při výcviku pilotů. Konec sedmdesátých a počátek osmdesátých let byl totiž údobím velkého rozmachu pilotních trenážerů. V sedmdesátých letech, v důsledku naftové krize, začala řada leteckých společností intenzivněji využívat letecké trenážery při výcviku pilotů. Krom toho, pokrok ve výpočetní technice umožnil vytvořit skutečně realistické pilotní trenážery, na nichž bylo možno piloty cvičit jako v reálném provozu, a navíc s nimi procvičovat reakce na závažné situace a poruchy, které bylo nebezpečné procvičovat v reálném provozu. Na trenážeru bylo možné pro piloty nasimulovat řadu nebezpečných situací a sledovat, jak se s nimi vypořádají. V následném debriefingu bylo možné vrátit čas zpět a podrobně rozebrat rozhodování pilota při řešení akutní situace, kterou bylo možné opět opakovat a zkusit znovu řešit.

Letecká havárie na pilotním trenážeru je jen virtuální a letadlo je možné zpětně oživit jediným příkazem. Na lékařském trenážeru je poškození nemocného nebo i jeho smrt také jen virtuální. Dr. Gravenstein začal proto vážně uvažovat, jak sestavit lékařský trenážér, na němž by bylo možné procvičovat různé závažné situace, monitorovat rozhodování lékaře a následně zhodnotit jeho správnost a případně to zkusit řešit znovu, jinak a lépe, obdobně jako na pilotním trenážeru.

Výhodou bylo, že Dr. Gravenstein byl původním vzděláním počítačový odborník, a tak se při řešení tohoto problému začal na univerzitě porozhlížet po odbornících z různých (informatických a technických) oborů, kteří by mu s konstrukcí lékařského trenážeru pomohli.

V roce 1986 Gravensteinův tým vytvořil simulátor pacienta, který bylo možné připojovat k základním lékařským přístrojům [1]. Simulátor podle zadaného scénáře a příslušného matema-

tického modelu na pozadí, simuloval různé závažné stavy a adekvátně reagoval na terapii.

V roce 1994 se podařilo dostat trenážér do průmyslové výroby. Simulátor začala pod názvem MET1 velmi úspěšně prodávat nově založená firma Medical Education Technologies Inc. (Sarasota, Florida).



Obrázek 1 – Dr. Gravenstein a jeho lékařský trenážér (foto: Sarah Kiewel[1])

Na přelomu tisíciletí tuto úspěšnou firmu koupil nadnárodní koncern CAE, vyrábějící špičkové simulátory pro nejrůznější oblasti.

Trenážér Patient Simulator CAE Healthcare, jehož kolébkou bylo oddělení anesteziologie Floridské univerzity dodnes patří mezi nejsostifikovanější lékařské trenážery (<https://caehealthcare.com>). Tento simulátor by ale nevznikl, kdyby Gravenstein nedal dohromady tým složený z odborníků i z dalších (nemedicinských) oborů vyučovaných na Floridské univerzitě.

Výhodou univerzit je to, že soustřeďují různé obory, což dává potenciální možnosti snadného vzniku univerzitních multioborových týmů. Historie vzniku lékařského trenážeru na Floridské univerzitě je názorným příkladem využití těchto možností pro vytvoření zcela nového výrobku s vysokou přidanou mezioborových znalostí.

Multioborový řešitelský tým 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a čtyř malých vývojových firem se sešel při řešení rozvojových projektů Ministerstva průmyslu a obchodu (č. FV20628 a FV30195). Jedním z výsledků těchto projektů je originální technologie tvorby webových simulátorů [2–6] a jejich propojení na hardwarovou figurínu virtuálního pacienta.

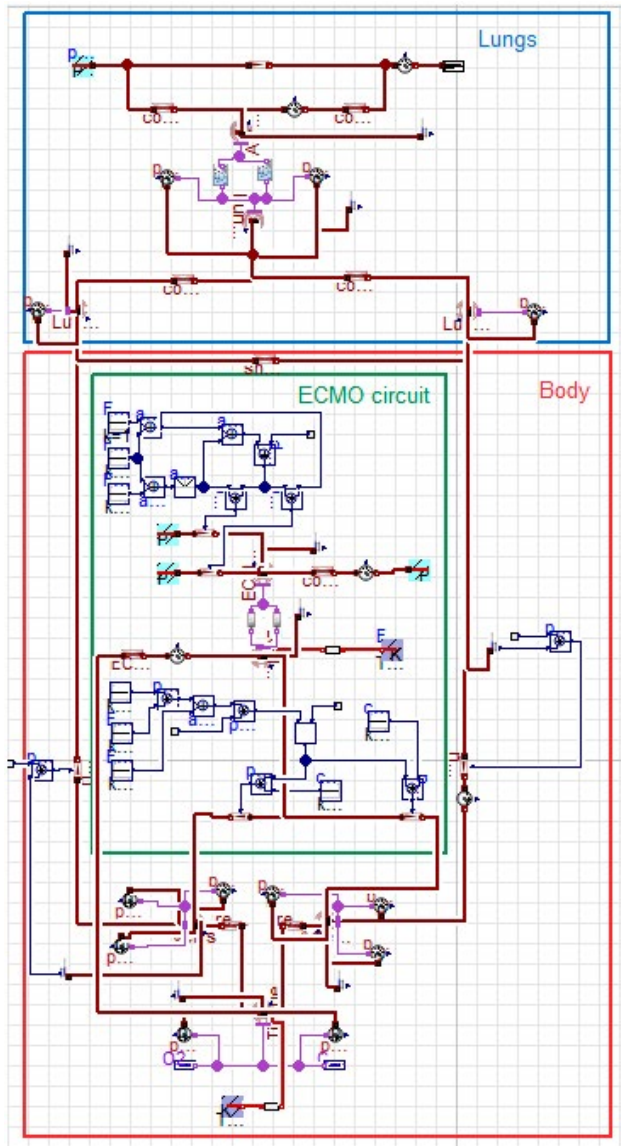
V našem projektu eGolem nyní testujeme využití simulátorů při výuce, která nemusí nutně probíhat jen v simulačních centrech. Cílem je nabídnout využití simulátorů v teoretické výuce na seminářích, přednáškách a doplnit statické prezentace a obrázky pacientů z učebnic a článků o interaktivní simulační modely. Figurína pacienta je obohacena o simulátor, který běží v prohlížeči a ukazuje stav pacienta.

Metody

Matematický model vychází z modelu publikovaného v diplomové práci J. Ferkla [7] na obr. 2.

Firmou INOMECH s.r.o. bylo vyrobeno hardwarové zařízení: byl vytištěn skeleton žeber z pružného materiálu a ve spojení s kontrolními motorky simuluje dýchací pohyby a výdech v hlavové části upravené figuríny původně určené pro nácvik kardiopulmonární resuscitace (obr. 3).

Pro tvorbu softwarového simulátoru, kompilaci matematického modelu do interaktivní animace, propojení animačních elementů s proměnnými modelu a interakcí s uživatelem jsme použili webové komponenty [Bodylight.js](#) [6]. Simulátor tak propojuje model, a zároveň komunikuje přes REST API s HW



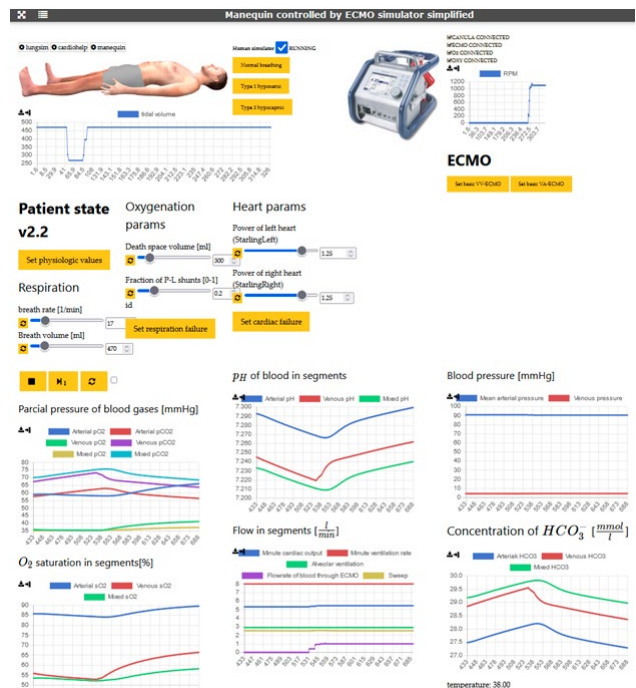
Obrázek 2 – Model dýchání, přenosu krevních plynů a zapojení přístroje ECMO v jazyce Modelica v nástroji Dymola a knihovnou PhysiLibrary v 3.0



Obrázek 3 – HW torzo figuríny, žebler a mechanismu pro dýchání virtuálního pacienta



Obrázek 4 – Virtuální pacient a maketa přístroje ECMO



Obrázek 5 – Simulátor ukazující vnitřní stav pacienta, pH krve, saturace kyslíku a koncentrace oxidu uhličitého a koncentrace iontů bikarbonátu (hydrogenuhlíčitanu)

simulátorem a kontroluje dýchání a získává nastavení tlačítek, přepínačů a senzorů z makety přístroje.

Výsledky

Prototyp robotizované figuríny virtuálního pacienta a makety reálného přístroje pro extrakorporální membránovou oxygenaci ECMO (obr. 4.) je propojena se softwarovým simulátorem, který běží ve webovém prohlížeči.

Stav modelu je vizualizován v několika grafech a připravené ovládací prvky v softwarovém simulátoru mohou pacienta uvést do stavů, které se předvádějí a diskutují při semináři nebo výuce (obr. 5.).

Oproti konkurenčním robotizovaným figurínám ukazujeme, co se děje uvnitř pacienta z fyziologického pohledu a tudíž je možné figurínu použít nejen ve specializované simulační výuce pro nácvik dovedností v různých klinických situacích, ale i v teoretičtějších předmětech pro ozřejnění teoretických pojmů a propojení znalostí s klinickou praxí. Doprovodné výukové materiály vytvořené jako webové aplikace umožňují pomocí simulačních her vysvětlit patofyziologickou podstatu pozorovaných klinických dat virtuálního pacienta.

Využíváme přitom propojení figuríny na webové simulátory, vytvořené pomocí naší vyvinuté technologie Bodylight. Pomo-

cí této technologie vygenerujeme simulátor jako webovou aplikaci sestávající z HTML5 a zdrojových kódů v jazyce javascript a WebAssembly. Tuto aplikaci pak mohou přehrávat všechny moderní webové prohlížeče. Grafika i simulační výpočty probíhají uvnitř internetového prohlížeče (proto hovoříme o in-browser simulačních výpočtech). Výsledná aplikace je spustitelná v internetovém prohlížeči na jakýchkoli zařízeních a operačních systémech a nevyžaduje trvalé připojení k Internetu. Technologie Bodylight.js a know-how nám popsaným způsobem umožňuje vytvářet nový typ elektronických učebnic, spustitelných na jakémkoliv zařízení s internetovým prohlížečem, propojujících hypertext, multimedia, simulační modely a interaktivní grafiku řízenou modelem na pozadí [2,5,6].

Diskuse

Úlohou výuky na lékařských fakultách je naučit budoucí lékaře nejen teoretické znalosti ale i řadu praktických dovedností a zejména schopnost tyto znalosti uplatňovat při diagnostickém a terapeutickém rozhodování. Absolvováním šestiletého studia na lékařské fakultě výuka lékařů nekončí – schopnost pracovat samostatně získává lékař teprve po absolvování popromočního vzdělávání zakončeného atestační zkouškou. Ve Spojených státech se žertem říká, že rezidentura (jak je nazýváno tříleté popromoční vzdělávání amerických lékařů) je posledním požadkem otroctví.

Náročnost výuky medicíny u řady studentů působí jako stresový faktor. Podle studie týmu autorů zveřejněného na portálu "Po Medině" je stres hlavní faktor nepohody při studiu medicíny. Hlavní příčinou jsou uvedeny obavy ze zkoušek, časová náročnost a na některých fakultách i náročným individuálním přístupem konkrétních učitelů [8].

Jedním z důsledků je, že zhruba 10% studentů medicíny opouští studium ve vyšších ročnících i když prokazatelně by studium zvládli, neboť prošli sítí přijímacích zkoušek a prvního ročníku. Dokonce kolem 1% absolventů medicíny nakonec pokračuje svoji profesní kariéru v nemedicínském oboru. Obdobné počty je možné vyvodit i z hrubých dat publikovaných ve výročních zprávách fakult [9]. Další studie z portálu "Mladí lékaři" uvádí, že po ukončení studia 79% absolventů se necítí připraveni dostatečně na klinickou praxi [10] a jedním z důvodů uvádějí nedostatek praktických předmětů na klinice nebo v simulační výuce.

„Co slyším, to zapomenu. Co vidím, si pamatuji. Co si vyzkouším, tomu rozumím.“ – napsal již před více než dva a půl tisíce lety Konfucius. Tato stará zkušenost ze staré Číny je potvrzována moderními metodami aktivní výuky, kde se široce uplatňují simulační hry a simulátory, které podporují rychlejší pochopení vzájemných souvislostí a hlubší porozumění vykládané látce.

Do kurikula lékařské výuky se proto čím dál tím více včleňuje simulační výuka a většina univerzit a lékařských fakult investuje prostředky do tzv. simulačních center, případně simulačních oddělení, které v bezpečném prostředí dovolí studentům a lékařům získat nezbytné znalosti, dovednosti a kompetence, vyzkoušet si a zažít všechny lékařské postupy na vlastní kůži, aniž by ohrozili reálného pacienta.

Výstupem lékařských simulátorů nemusí být jen obrazovka počítače nebo tabletu. Může jím být i figurína pacienta, která slouží jako výstupní a vstupní zařízení trenažéru.

Figurína pacienta, využívaná jako vstupně-výstupní zařízení lékařského trenažéru má při nácviu lékařských dovedností nesporné výhody. Z didaktického hlediska je velký rozdíl, zda podáváme lék či infúzi kliknutím na příslušnou ikonku na počítači, nebo když příslušnou infúzi či lék musíme podat virtuálnímu pacientovi realizovanému jako figurína (například se procvičí i to, že v reálné praxi příslušné léky musíme mít připraveny tak, aby byly po ruce). Je rozdíl, zda kardiopulmonální resuscitaci

provádíme na obrazovce počítače, nebo když srdeční masáž a defibrilátor použijeme v reálné simulační hře s figurínou pacienta. Zejména podstatný rozdíl mezi čistě softwarovou simulací a simulační hrou s virtuálním pacientem realizovaným i fyzicky je v připojování pacienta k lékařským přístrojům. Zatímco pacienta zobrazeného na počítačovém monitoru připojujeme k přístroji umělé plicní ventilace pouze pomocí klávesnice, klikání a pohybu kurzorem myši, v simulační hře s figurínou pacienta musíme fyzicky realizovat připojení k reálnému respirátoru a na jeho ovladači musíme pečlivě nastavit příslušné parametry, což je klinické realitě mnohem blíže. Krom toho, lékařská péče je týmová práce, kdy, zvláště v medicíně akutních stavů, o výsledcích rozhoduje spolupráce a sebranost celého týmu. A spolupráce lékařských profesionálů při péči o akutně nemocného se v čistě softwarových simulacích procvičuje obtížně. Zde pak mají patientské simulátory realizované figurínou pacienta nezastupitelnou roli. Lékařské trenažéry využívají figurínu pacienta jako své výstupní zařízení. Figurína dýchá, má hmatný pulz, umožňuje poslechové vyšetření apod. Na druhé straně je figurína i vstupním zařízením – např. při realizaci kardiopulmonální resuscitace, při podávání farmak nebo při propojení figuríny s nějakým lékařským přístrojem.

Studenti na základě výsledků simulovaných vyšetření, a v sofistikovanějších simulátorech i na základě dat z reálných lékařských monitorů, připojených k figuríně pacienta, rozhodují o terapeutickém postupu, provádějí léčbu (od připojování pacienta na ventilátor umělé plicní ventilace či anesteziologický přístroj, přes kardiopulmonální resuscitaci, až po podávání simulovaných infuzí, a simulaci podávání příslušných léků). Velký význam mají tyto trenažéry zejména pro nácviu správného lékařského rozhodování v medicíně akutních stavů.

Vlastní trenažér je, obdobně jako u leteckých pilotních simulátorů, řízen ze stanoviště operátora, odkud učitel může ovládat simulovaného pacienta a volit mezi nejrůznějšími scénáři simulovaných onemocnění. Ukazuje se, že z pedagogického hlediska je velice efektivní, když veškeré akce studentů jsou monitorovány a simulátor poskytuje podklady pro pozdější rozbor (debriefing) diagnostického a terapeutického postupu studentů u simulovaného onemocnění.

Scénářem řízené (tzv. scenario-driven) trenažéry řídí simulační hru podle scénáře, realizovaného jako větvený algoritmus (přesněji řečeno jako stavový automat), který podle zadávaných vstupů (požadavků na vyšetření, podání příslušných léků apod.) realizuje výstupy (dává výsledky vyšetření na obrazovku, či ovládá parametry figuríny zjistitelné vizuálně nebo fyzikálním vyšetřením apod.). Tyto trenažéry jsou velmi náročné na tvorbu scénáře, protože umožňují naprogramovat v podstatě libovolnou kombinaci výstupů na dané vstupy.

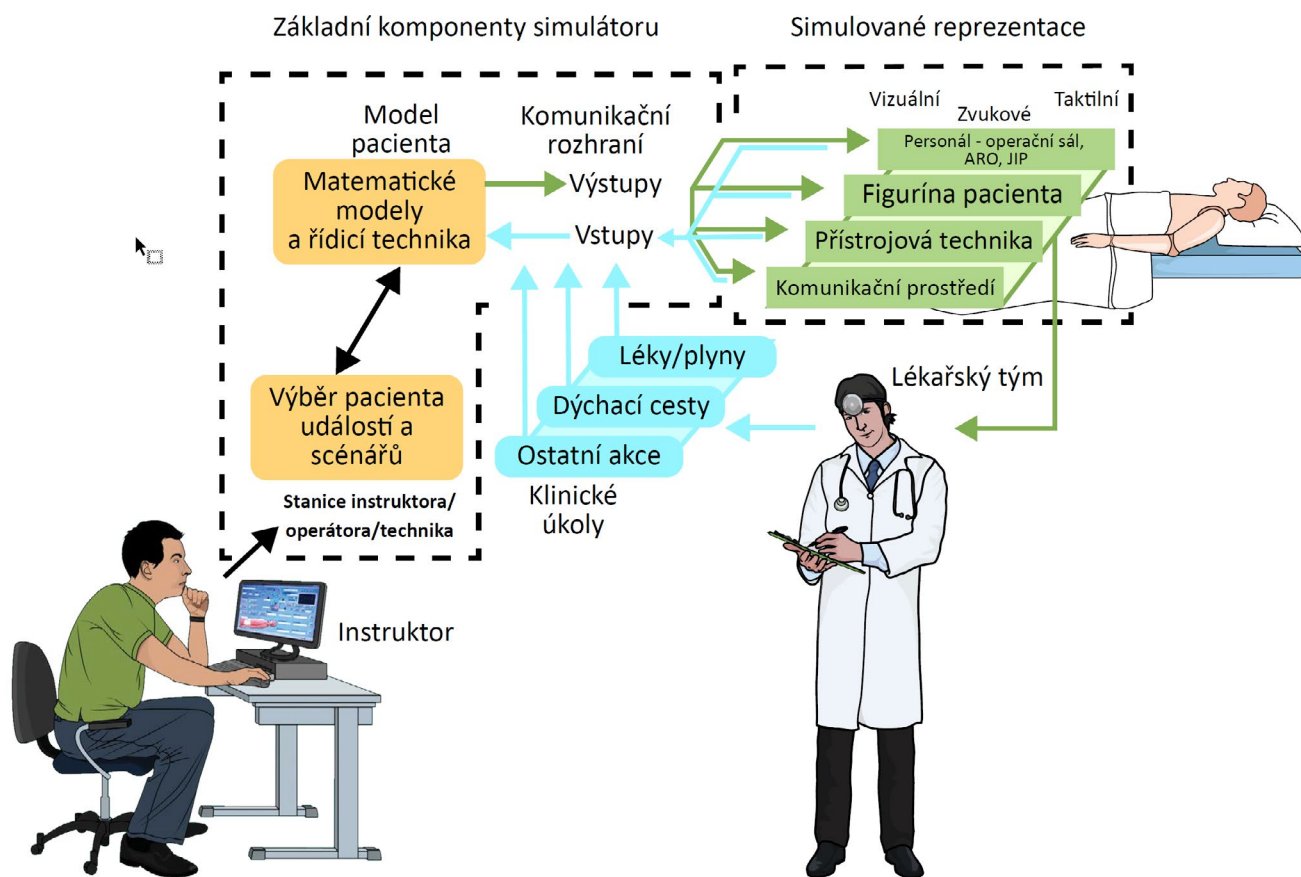
Mnohem složitější, a ve výuce efektivnější, jsou ale modelem řízené (model-driven) trenažéry využívající matematické (a u figurín pacientů i kombinované mechanicko-matematické) modely.

Obdobně, jako jádrem leteckých simulátorů matematický model letadla, tak i v pozadí sofistikovaných lékařských simulátorů je matematický model pacienta (obr. 6).

Výuka se simulátorem klade citelně vyšší nároky na vyučujícího, než klasická výuka. Při správném využití simulátoru je však pedagogický efekt velmi výrazný [11,12].

Závěr

Tuto úvahu nyní rozvíjíme jako startup, který jsme pojmenovali eGolem jehož ambicí je vylepšit simulační výuku a dostat simulační prvky výuky i do jiných oblastí a předmětů a nabídnout chytré výukové materiály pro fyziologii a patologickou fyziologii, které by zlepšily i domácí výuku a přispěly k eliminaci obav ze zkoušek a z nedostatku času.



Obrázek 6 – Základní struktura modelem řízeného lékařského trenážeru s figurínou pacienta

Pro tyto aktivity jsme v roce 2022 využili inkubátor Caelestinus, kterou pořádala letos poprvé agentura Insane Business Ideas s.r.o. s hlavním sponzorem Intersystems, dodavatelem digitálního řešení pro podniky i ve zdravotnictví, nemocnicí IKEM a fakultou biomedicínského inženýrství ČVUT [12]. Dále se v českém prostředí pořádají i další národní i mezinárodní aktivity a události pro podporu začínajících podniků. Během inkubace jsme se seznámili s jinými startupy v různých stádiích vývoje jejich podnikatelského záměru a procházeli definicí business plánu, strategie, ujasnění si právních a dalších náležitostí. Důležitou součástí práce je najít odvahu a jít za potenciálními zákazníky a uživateli a konzultovat a validovat použití produktu a služby, neboť ne všechna rozhodnutí a návrhy lze provádět čistě od stolu.

Poděkování

Výsledky této práce byly ještě z velké části podpořeny veřejnými granty MPO FV30195 a MPO FV20628. Dále inkubátorem Caelestinus [13], programy “New Generation of Founders” [14], “Google Startup Academy” [15] a aplikace propojující online a offline nástroje s chytrým tzv. deníkem nápadu Startupbox [16]. Doufáme, že budoucí vývoj a jeho správnost a vhodnost ocení zákazníci tak, že si produkt a službu eGolem zakoupí a budou mít jako první zákazníci možnost výrazného vlivu na konečnou funkcionalitu [17].

Literatura

- [1.] Remembering Dr. Joachim Gravenstein. 2009 [cited 12 Oct 2020] Available: <https://news.drgator.ufl.edu/2009/01/30/remembering-dr-joachim-stefan-gravenstein/>
- [2.] Šilar J, Polák D, Mládek A, Ježek F, Kurtz TW, DiCarlo SE, et al. Development of In-Browser Simulators for Medical Education: Introduction of a Novel Software Toolchain. *J Med Internet Res.* 2019;21: e14160.
- [3.] Polák D, Ježek F, Šilar J, Kofránek J. Technologie tvorby webových simulátorů. *Medsoft.* 2019;31: 122–139.
- [4.] Kofránek J, Ježek F, Šilar J, Mládek A, Mateják M, Kulhánek T. Nová generace elektronických učebnic se simulačním jádrem. *Medsoft.* 2020;32: 63–72.
- [5.] Kofránek J, Kulhánek T. Standardizace – cesta k open source technologiím pro webové simulátory. *Medsoft.* 2021;33: 25–34.
- [6.] Kulhánek T, Mládek A, Brož M, Kofránek J. Bodylight.js web components - webové komponenty pro webové simulátory. *Medsoft.* 2021;33: 48–52.
- [7.] Ferkl J. Simulační model extrakorporální oxygenace (ECMO). Diplomová práce, FEL ČVUT. 2021. Available: <http://hdl.handle.net/10467/96661>
- [8.] Palička M, Mechurová B, Rybář M, Sobelová T, Paličková N, Pokorná K. Čeští medici v nepohodě 2021. In: Po medině [Internet]. 2022 [cited 12 Oct 2022]. Available: <https://www.pomedine.cz/vysledky-pruzkumu/>
- [9.] Výroční zpráva 1.LFUK 2021. 2021. Available: <https://www.lf1.cuni.cz/aktualni-vyrocní-zprava>
- [10.] Šlegerová L, Michenka P, Kočí M. MEDICI 2020 Kompetence a preference. Powerprint; 2020.
- [11.] Kofránek J, Kulhánek T. Lékařské simulátory. *Medsoft.* 2014;26: 123–147.
- [12.] Kofránek J, Hozman J. Pacientské simulátory. *Creative Connections;* 2013.

- [13.] Caelestinus - a FHIR healthtech incubator. 2022 [cited 11 Dec 2022]. Available: <https://www.caelestinus.tech/>
- [14.] New Generation of Founders, metoda Design Thinking. 2022 [cited 12 Oct 2022]. Available: <https://events.withgoogle.com/new-generation-of-founders/>
- [15.] Google for Startups Academy. 2022 [cited 12 Oct 2022]. Available: <https://gfsa.impacthub.cz/>
- [16.] StartupBox. 2022 [cited 12 Oct 2022]. Available: <https://startupbox.app/>
- [17.] egolem.online. 2022 [cited 12 Oct 2022]. Available: <https://egolem.online/>

Kontakt**Mgr. Tomáš Kulhánek, Ph.D.**

Oddělení biokybernetiky

U nemocnice 5

128 53 Praha 2

tmkulhanek@gmail.com**doc. MUDr. Jiří Kofránek, CSc.**

Oddělení biokybernetiky

Ústav patologické fyziologie 1. LF UK

kofranek@gmail.com

+420 777 68 68 68