

Technologie exoskeletu pro pohyb

Pavel Furik

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology
Institute of Automation and Computer Science
Technická 2896/2, Brno 616 69, Czech Republic
208560@vutbr.cz

Abstrakt: *Práce se zabývá charakterizací, rozdělením a vlastnostmi moderních exoskeletů, které jsou stále považovány za potenciální nástroj pro podporu a zvýšení výkonnosti lidských činností. Jsou zde uvedena některá odvětví, kde se tato technologie potenciálně dá využít a možné dopady nasazení v její současné formě.*

Klíčová slova: *Weareable robotic devices, WRD, Exoskeletons, Exosuits, Robotic Suits, Usage of WRDs, positives and negatives of WRDs.*

1 Charakterizace a rozdělení

Exoskelet neboli vnější kostra, dostala svůj název podle stejnojmenného označení kostry vyskytující se například u členovců. Tu nalezneme na povrchu těla, kde chrání vnitřní orgány před vnějšími vlivy. Zároveň tvoří podporu těla jako kostra vnitřní, což se blíže shoduje s dnešním pojetím této technologie. Exoskelet si lze nasadit a dosáhnout tak podpory nebo vylepšení některých fyzických vlastností člověka. Může se jednat o rychlost chůze a běhu, zvětšení hmotnosti břemene, jenž je osoba schopna unést a zároveň prodloužit čas, po který jsou namáhavé činnosti vykonávány. Většinu fyzické zátěže a její efekt na lidské tělo by měl do jisté míry exoskelet kompenzovat [1].

Exoskelety patří do oblasti robotiky označovanou jako Wearable Robotic Devices (WRD) [1,2] nebo obecněji Wearable Robotics (WR) [3], každopádně většina označení této oblasti začíná přídavným jménem popisující robota nebo zařízení, které si lze navléct či obléci. Problém v názvosloví je i následující. Kromě názvu exoskelet se objevuje i název exo oblek případně exo svaly, které popisují podobné, ale přesto rozdílné technologie. Hlavním rozdělením je podle [4] přítomnost pevné konstrukce, která odděluje exoskelety od exo obleků nebo exo svalů. Dále v textu bude používána zkratka WRD jako obecné označení exoskeletů, exo obleků atd. Další možné rozdělení WRD je na ty podporující celé tělo nebo jako označení pro některé z mnoha selektivních implementací této technologie. Ty se mohou soustředit pouze na určitou část lidského těla, jako jsou dolní nebo horní končetiny, podpora páteře a další [2].

Důležitou vlastností WRD je částečné nebo úplné nahrazení řízení jejich pohybů. Místo složitých systémů pro analýzu vnějšího prostředí a následné vykonání pohybu je za řídicí člen v tomto případě dosazen člověk. Skrze rozhraní mezi člověkem a strojem (HMI) dochází v podstatě k mimice pohybu osoby. Tato vlastnost umožňuje specifické WRD nasadit kdekoliv, kde je zapotřebí lidské přítomnosti. Řízení WRD je tak soustředěno na systémy vyhodnocující množství síly, kterou chce člověk při pohybu použít nebo jakou rychlostí chce člověk daný pohyb provést [1]. HMI také kompenzuje vznikající síli při vykonávaných činnostech. Tyto síly jsou následně převáděny na část těla více odolné pro dlouho trvající zátěž, případně je HMI odvádí přímo k zemi [1,5].

WRD mohou být pasivní a aktivní. Pasivní WRD využívají jako zdroj energie gravitaci a akumulaci této energie v pružinách nebo jiných pružných prvcích. Zdrojem pro vykonání pohybu aktivních WRD ve většině případů zastává hydraulický akční člen. Ty se využívají často díky poměru velikosti a množství generované energie. Vyskytují se i pneumatické zdroje a varianty s umělým svalstvem, kde stah může mít zdroj pneumatický, elektrický nebo jiný princip. Samozřejmě existují i kombinace aktivních a pasivních zdrojů v jediném WRD. Pasivní část slouží jako vedlejší zdroj energie, který akumuluje energii například při pohybu z kopce. Akumulovaná energie následně slouží k dalšímu pohybu [1,2]. Podrobnější rozdělení dle zdroje energie a terminologie lze najít v [4].

2 Využití WRD

Ve studii [2] je uvedeno, že dnešní výrobci a laboratoře zabývající se WRD technologií, soustředí svoje snahy převážně na podpurné a rehabilitační aplikace, zatímco zlepšování lidských vlastností má dnes menší zastoupení. Většina vyvíjených WRD je bez nutnosti kompletní nebo částečné asistence při používání. Výjimkou je rehabilitace, kde je zastoupení WRD s asistencí větší jak polovina [2].

Co se týče selektivních implementací WRD pro jednotlivé části lidského těla, tak dolní končetiny jsou aktuálně uváděny jako nejčastější místo aplikace WRD, a to pro rehabilitační účely [2]. Druhé největší zastoupení tvoří horní končetiny, které jako originální záměr WRD byly vyvíjeny pro podpurnou aplikaci v průmyslu, ale celkový úspěch rehabilitační WRD technologie pro dolní končetiny je posunul až na druhé místo [2].

2.1 Zdravotnictví

Jedná se o oblast s nejvíce komerčně dostupnými WRD. Zároveň dle [2] zabírá dva největší směry vývoje, tedy podporu člověka a jeho rehabilitaci. Více jak 80 % všech potenciálních WRD se navrhuje s možností aplikace ve zdravotnictví [2] a z této hodnoty je více jak polovina určena k rehabilitaci po mrtvici [6, 7]. Menší část těchto zařízení jsou zamýšleny k rehabilitaci po zranění páteře, ale WRD k navrácení motoriky bývají velice podobné [2] a použití možné pro více jak jeden typ rehabilitace.

K rehabilitaci dolních končetin lze využít WRD založené na různých principech. Zde je hlavní rozdíl v kontaktu s osobou, tedy WRD které jsou v kontaktu s celou končetinou a WRD v omezeném kontaktu na jednom místě končetiny. Omezený kontakt je většinou jistá forma nosné konstrukce a pacient se pohybuje s asistencí běžícího pásu či kol [6].

Motivace k tréninku tvoří jeden z problémů při rehabilitaci motoriky. Běžící pás může být, co se týče efektivity lepší v porovnání s aktivními WRD pro volný pohyb po místnosti nebo konstrukci s koly, ale pro pacienta taková forma tréninku nemusí být příliš sympatická. Řešením může být využití právě těchto WRD [7] k volnému pohybu nebo VR trénink.

WRD určené k rehabilitaci mají oproti těm určeným k vylepšením lidských vlastností navíc možnost aktivně odporovat pohybu v rámci tréninku pro navrácení některých ztracených fyzických vlastností člověka. Za tímto účelem jsou tyto WRD vybaveny více senzory pro přesné měření sil a momentů spolu s měřením biologických signálů (EMG). Přesné řízení akčních členů je zásadní k zvýšení efektivity rehabilitace [6].

Lidské tělo má velké potíže s neustálým stáním nebo udržováním nepřírozené pozice těla. V rámci prevence vzniku problémů z takových aktivit je možné využít pasivních WRD k podpoře svalů a zdravého držení těla. Operace jsou právě jednou z takových aktivit a tělo v dlouho trvajícím předklonu nad pacientem může trpět. WRD pro torso, krk a horní končetiny může negativní efekty v takové poloze zmírnit [8].

2.2 Vojenství

Vojenská technika se neustále posouvá kupředu, ať už se jedná o nové vybavení pro snímání prostředí, jako integrace Augmented Reality (AR) brýlí, využití lehčích a odolnějších materiálů nebo zbraní hromadného ničení. Jeden problém ale zůstává stále stejný, voják musí v některých situacích všechno svoje osobní a další vybavení přenést z jednoho místa na druhé bez pomoci transportu. Takový fyzický výkon není nemožný, ale podepisuje se na bojeschopnosti a zdraví v delším časovém měřítku.

Váha vybavení pro delší chůzi by neměla překročit 15 až 26 kilogramů [1]. Váha celkového vybavení, ale často začíná na 40 kilogramech se stále rostoucím trendem [9]. Rozdíl mezi hodnotou stanovenou doktrínou a skutečně požadovanou po vojácích, je z důvodu variací mezi normami. Ty se řídí podle tělesné hmotnosti osoby, okolní teploty, vzdálenosti pochodu, ale hlavně dle státu ke kterému vojsko patří. [1].

Jedno z řešení by bylo snížit množství vybavení, které by osoba měla nést, což je nereálné. Tím dalším možným řešením je využití WRD pro vylepšení fyzických vlastností člověka. Rovnoměrné rozprostření váhy po celém těle pomocí pasivních WRD, má opět svoje limity. Aktivní WRD, například

Human Universal Load Carrier (HULC) [1] je tedy dosavadně jediným řešením pomocí WRD určené pro dolní končetiny. Umožňuje nosit břemena do 91 kilogramů při normální chůzi nebo krátkodobém běhu po dobu až 8 hodin, každopádně tato technologie je stále v dlouhodobém vývoji.

2.3 Další využití

Zástupcem využití v průmyslu jsou WRD pro horní končetiny určené k práci s rukama nad hlavou. Taková práce, například při výrobě automobilu, může mít na člověka negativní efekt, který by WRD měla kompenzovat svým HMI [5]. Jako potenciální WRD zde uvádím ExIF projekt s VR rozhraním určený právě k těmto průmyslovým aplikacím [3].

Nejenom v průmyslu, ale ve většině zaměstnání a i mimo něj se potýkáme právě s nezdravým držetím těla při každodenní činnosti, jak již bylo zmíněno ve 2.1. Hlavním trendem je využití pasivních WRD zejména exo obleků ke korekci a snížení negativních vlivů [4,10]. Další využití WRD jako celkově obsáhlejší oblasti lze vidět ve sportu. Cybathlon je mezinárodní soutěž pro tělesně postižené, kde závod s použitím exoskeletu je pouze jedna z disciplín v tomto sportu [11].

3 Situace současné technologie

Co se týče aktivních WRD jejich výkon není hlavním řešením k jejich rozšířenému nasazení. Každopádně i v jedné iteraci [1] projektu se dosahuje velkých pokroků u zvýšení výkonnosti těchto WRD. Nosnost je u mnoha projektů zvýšena až o polovinu původní hodnoty, ale asi největší zlepšení je u napájení a výdrže baterií. Opět jako příklad uvádím HULC, kde původní hodnota 3 hodin byla zvýšena na 8 hodin chůze a krátkodobého běhu ¹.

3.1 WRD bez asistence

V dnešní době vidíme stále málo neasistovaných WRD, a z nich ještě méně určených pro domácí použití. Celkově vidíme malý počet testování s běžným uživatelem i pro ostatní použití této technologie. Problém je v malém počtu nasazení WRD do reálných podmínek, ale také to, že se do tak pozdní části vývoje mnoho prototypů nedostane [2].

Když vezmeme úroveň technologické připravenosti jako měřítko (TRL), jednalo by se o TRL 7 (System prototype demonstration in operational environment). Většina nových WRD projektů je ve stádiu testování v laboratoři (TRL 4). Vzhledem ke komplikovanosti WRD a zaměření na neasistované použití jsou nároky na bezpečnost vysoké a mnoho prototypů nelze reálně použít. Komplikovanost a splnění nároků na bezpečnost je tedy hlavním úzkým místem ve vývoji těchto technologií.

Další problém je s vlastnostmi, které uživatel WRD považuje za důležité, jelikož přísné nároky na bezpečnost dělají testování na mnoho skutečných uživatelích složité. Požadované vlastnosti se ale mění s odvětvím a na individuálním uživateli, což vyžaduje velké množství testování. Proto jsou některé prototypy hodnoceny negativně a další investice do vývoje projektu řídnu nebo jsou ukončeny [2].

Při vývoji WRD se doposud dával velký důraz na funkčnost a splnění výkonových parametrů, zatímco faktory jako lehkost používání pro uživatele nebo pohodlí při nasazení byly vynechávány v nižších fázích TRL. Zanedbání těchto vlastností potom zapříčinilo jakýkoliv další posun kupředu. Příkladem může být HULC, který byl odkoupen a vyvíjen od roku 2000 s několika iteracemi. I přes všechny vývoj bylo WRD hodnoceno jako nebezpečné, protože docházelo k omezení normálního pohybu a HULC dnes nikde v terénu není nasazen.

Jakékoliv zlepšení výkonových vlastností aktivních WRD se nejvíce jeví jako řešení prosazení WRD pro běžné použití v domácnostech. Pasivní varianty WRD sice neposkytují vysoký výkon, zato díky své kompaktnosti tolik neomezují pohyb uživatele a v případě exo obleků nepřekáží více jako normální oblečení.

¹Hlavní zdroj těchto výkonových informací je [1] a SOFIC 2012, kde byl projekt HULC prezentován.

Hlavním trendem pro dnešní WRD technologie, například protézy [12], je user centered design (UCD) [2, 3]. Tento přístup napomáhá nutné vlastnosti WRD, adaptibilitě pro uživatele. Zde je uživatel zapojen do vývoje a testování již na začátku procesu návrhu a celkově je více uspokojen s výsledným WRD. Zdroj [2] uvádí, že právě tento přístup se snaží výrobci použít pro řešení posunutí vývoje prototypů, zvláště těch pro domácí využití, které by takto mohli vidět větší zastoupení pro komerční WRD.

3.2 WRD s asistencí

WRD pro rehabilitační účely se ukázaly jako dostatečně efektivním způsobem terapie a dnes jsou využívány i v praxi u některých rehabilitačních středisek. Tyto WRD se stále potýkají s některými nedostatky, které se objevují i u WRD bez asistence. Opět existuje omezení volnosti pohybu uživatele. Řešením by mohlo být využití více flexibilních materiálů na způsob exo svalů či více hybridních variant mezi pasivními a aktivními prvky, které se sice neprojevily příliš efektivně u systémů za účelem vylepšení fyzických vlastností [1], ale pro rehabilitační účely není třeba vysokých výkonů [6]. Jak již bylo zmíněno HMI a řízení pohybu potřebuje více informací o aktuálním směru pohybu člověka, silách a množství zapojení lidských svalů. Zde se objevuje problém s odezvou na tahy svalů. Působení akčních členů WRD v některých situacích pracuje se zpožděním a nepřesnostmi těchto informací, což snižuje celkovou efektivitu rehabilitace. Technologie senzorů pro snímání tahů nebo přímo mozkové aktivity a celkově HMI musí být vylepšeno pro dosažení lepších výsledků rehabilitace [7].

3.3 Bezpečnost

Vzhledem k malému počtu dlouhodobě používaných WRD je těžké posoudit, zda současná podoba WRD není nečekaně nebezpečná. U aktivních WRD vzniká problém v omezování pohybu uživatele a znemožnění tak potencionálního pohybu v nebezpečné situaci. Zvýšení výkonu lidských svalů pomocí WRD má obrovský potenciál, ale aktivní WRD dokážou zastat veškerou činnost tohoto svalstva což může vést k ochabování a dalším problémům při dlouhodobém používání.

Další problém pro pasivní, ale i aktivní WRD, je způsob uchycení HMI na lidském těle. Například WRD pro kompenzaci práce s rukama nad hlavou využívají k uchycení HMI pneumatické pružné prvky. HMI tak působí tlakem na část končetiny, která je již odkrvená. Při takové práci snížení prokrvení končetiny může způsobit další problémy uživateli, zatímco WRD kompenzuje jiné [5]. Většina zdrojů, které pojednávají o potencionální aplikaci se v jistém smyslu zmiňuje o takových nečekaných bezpečnostních rizicích, ale dále se nevyjadřují o nějakém konkrétním řešení [5, 10]. Celkově se ale shodují, že je tento problém třeba vyřešit, aby WRD byla přijata do všech potencionálních odvětví a do domácností.

4 Závěr

Celkově jsem šel do tohoto tématu se zdravou dávkou pesimismu. Potenciál této technologie je obrovský, ale neočekávaný boom v rozšíření do veškerého průmyslu se tohoto roku asi nedočkáme. Pokud ano nejspíš se bude jednat o nějaký typ pasivního WRD ve funkci oblečení, které by se dalo využít i pro sedavé práce, ale v tomto ohledu jsem možná ovlivněn aktivitou kterou vykonávám při psaní této práce.

Zdroje

- [1] Z. Yan, W. Gu, J. Zhang, and L. Gui, *Force control theory and method of human load carrying exoskeleton suit (1st ed.)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [2] J. T. Meyer, R. Gassert, and O. Lamercy, “An analysis of usability evaluation practices and contexts of use in wearable robotics,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, Dec. 2021.
- [3] M. C. Carrozza, S. Micera, and J. L. Pons, eds., *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. Springer International Publishing, 2019.
- [4] M. Xiloyannis, R. Alicea, A.-M. Georgarakis, F. L. Haufe, P. Wolf, L. Masia, and R. Riener, “Soft robotic suits: State of the art, core technologies, and open challenges,” *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1–20, 2021.
- [5] C. Linnenberg and R. Weidner, “Industrial exoskeletons for overhead work: Circumferential pressures on the upper arm caused by the physical human-machine-interface,” *Applied Ergonomics*, vol. 101, p. 103706, May 2022.
- [6] D. R. Louie, W. B. Mortenson, M. Durocher, R. Teasell, J. Yao, and J. J. Eng, “Exoskeleton for post-stroke recovery of ambulation (ExStRA): study protocol for a mixed-methods study investigating the efficacy and acceptance of an exoskeleton-based physical therapy program during stroke inpatient rehabilitation,” *BMC Neurology*, vol. 20, Jan. 2020.
- [7] X. Zhang, Z. Yue, and J. Wang, “Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke,” *Behavioural Neurology*, vol. 2017, pp. 1–13, 06 2017.
- [8] E. Tetteh, M. S. Hallbeck, and G. A. Mirka, “Effects of passive exoskeleton support on emg measures of the neck, shoulder and trunk muscles while holding simulated surgical postures and performing a simulated surgical procedure,” *Applied Ergonomics*, vol. 100, p. 103646, 2022.
- [9] A. J. Oudenhuijzen, C. L. Koerhuis, and L. L. Bossi, “Characterizing the loads of nato soldiers,” *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 20, p. S148, 2017. ICSPP Abstracts.
- [10] A. Omoniyi, C. Trask, S. Milosavljevic, and O. Thamsuwan, “Farmers’ perceptions of exoskeleton use on farms: Finding the right tool for the work(er),” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 80, p. 103036, 2020.
- [11] CYBATHLON, “Cybathlon.” <https://cybathlon.ethz.ch/en>, 2022. [cit. 2022-2-21].
- [12] O. Christ, M. Jokisch, J. Preller, P. Beckerle, J. Wojtusch, S. Rinderknecht, O. von Stryk, and J. Vogt, “User-centered prosthetic development: Comprehension of amputees’ needs,” *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, vol. 57, no. SI-1-Track-R, pp. 1098–1101, 2012.