

dr hab. inż. ANDRZEJ GRABOWSKI, prof. CIOP-PIB (ORCID: 0000-0002-0924-2140)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: angra@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2021.11.6.Grabowski

Możliwości wykorzystania egzoskieletów do wspomagania pracowników w czynnościach wymagających siły, wirtualnych szkoleniach czy rehabilitacji



Fot. ekkasit919/Bigstockphoto

Postępująca automatyzacja i robotyzacja procesów produkcji przemysłowej idzie w parze z wykorzystaniem podobnych rozwiązań technologicznych, takich jak roboty noszone, do wspomagania pracowników w środowisku pracy. Najbardziej zaawansowany technologicznie przykład robota noszonego w formie egzoskieletu aktywnego dla całego ciała nie jest jedynym kierunkiem zastosowań różnych typów egzoskieletów. Można je również wykorzystać do wspomagania szkolenia pracowników, zdalnego sterowania robotami oraz wspomagania procesu fizjoterapii i rehabilitacji.

Słowa kluczowe: egzoskielety, wspomaganie pracowników, rzeczywistość wirtualna, zdalnie sterowane roboty, szkolenia, powrót do pracy po wypadku, fizjoterapia

Possibilities of the use of exoskeletons to support employees' strength-dependent activities, virtual training or rehabilitation

The automation and robotization of industrial production processes goes hand in hand with the use of similar technological solutions, such as wearable robots, to support workers. The most technologically advanced example of a wearable robot, i.e. a full-body active exoskeleton, is only one of many possible application of various types of exoskeletons. They can also be used to support workers training, remote control of robots and support the process of physiotherapy and rehabilitation.

Keywords: exoskeletons, supporting workers at work, virtual reality, remote-controlled robots, training, return to work after an accident, physiotherapy

Wstęp

Wbrew części obiegowych opinii rewolucja przemysłowa 4.0 nie jest ukierunkowana na wyeliminowanie człowieka z procesu produkcji i zastąpienie go robotami wspieranymi sztucz-

ną inteligencją. Wręcz przeciwnie, przyjmuje się, że człowiek jest niezbędnym, a nawet centralnym elementem, cyberfizycznych (ang. *cyber physical systems* – CPS) procesów produkcji fabryk przyszłości. Tym niemniej rozwój przemysłu

jest związany z ciągłym trendem zmniejszania obciążenia pracowników wykonujących pracę fizyczną oraz obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, ponieważ pracownicy są wspierani przez maszyny [1]. W wyniku trzeciej oraz czwartej

rewolucji przemysłowej (zwłaszcza automatyzacji) na wielu stanowiskach ludzka praca była przynajmniej częściowo wspierana przez zastosowanie robotów przemysłowych [1, 2]. Są one przydatne do wykonywania prostych zadań na wysoko wydajnych i wyspecjalizowanych liniach produkcyjnych [2].

Forma interakcji człowieka z automatami stale ewoluje [3]. Prowadzone są intensywne badania nad robotami autonomicznymi [4-6], w tym humanoidalnymi [7-10]. Jednak zastąpienie człowieka robotem nie zawsze jest możliwe lub opłacalne. Nawet nowoczesne systemy cyberfizyczne nadal wymagają interwencji człowieka, ponieważ zadania są lepiej wykonywane, gdy w pętli produkcyjnej przewidziano obecność człowieka [11]. Ludzkie zdolności poznawcze oraz umiejętność adaptacji i podejmowania decyzji na podstawie niewielkiej liczby danych sprawiają, że człowiek nadal jest cennym, a nawet niezbędnym ogniwem procesu produkcyjnego. Ważnymi czynnikami są również koszt i jakość wytwarzanego produktu. Dobrym przykładem są zmiany w branży związane z potrzebą elastycznych linii produkcyjnych z powodu wytwarzania krótkich partii produktów [12]. W takich sytuacjach linie montażowe wyposażone wyłącznie w roboty przemysłowe nie są ekonomicznie opłacalne. Potrzebne są zatem inne metody wspomagania prac fizycznych. Dobrym rozwiązaniem mogą być egzoszkielety (stanowiące rodzaj tzw. urządzeń noszonych; ang. *wearable mobile machines*), które, jak się okazuje, mają szeroką gamę potencjalnych zastosowań znacząco wykraczających poza wspomaganie wykonywania prac fizycznych.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań dotyczących użyteczności opracowanych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym nowych technologii, zwłaszcza zastosowania aktywnych egzoszkieleatów.

Cel badań i zastosowane metody badawcze

Zakres zastosowań urządzeń noszonych jest bardzo szeroki – ich przegląd przedstawiono m.in. w [13]. Zwłaszcza w przemyśle mogą być stosowane zarówno egzoszkieleaty pasywne, jak i aktywne [14-16].

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (dalej: CIOP-PIB), dotyczących zagadnień powiązanych z egzoszkieleatami aktywnymi. Badania te obejmowały porównanie różnych metod skuteczności sterowania egzoszkieleatami oraz ocenę użyteczności i akceptacji technologii przez docelowych użytkowników (tzn. osoby aktywne zawodowo). Badania przeprowadzono z użyciem standardowych narzędzi kwestionariuszowych, takich jak skala użyteczności SUS (*system usability scale*) [17] oraz model akceptacji technologii TAM (*technology acceptance model*) [18]. Oba kwestionariusze stosuje się w podobny sposób – uczestnik bada-



Fot. 1. Opracowany w CIOP-PIB aktywny egzoszkieleat kończyn górnych [23]

Photo 1. Active exoskeleton of the upper limbs developed at CIOP-PIB [23]

nia odpowiada na wiele pytań (z odpowiedziami w siedmiostopniowej skali: od *bardzo się nie zgadzam* do *bardzo się zgadzam*) bezpośrednio po zakończeniu sesji użytkowania egzoszkieleatu.

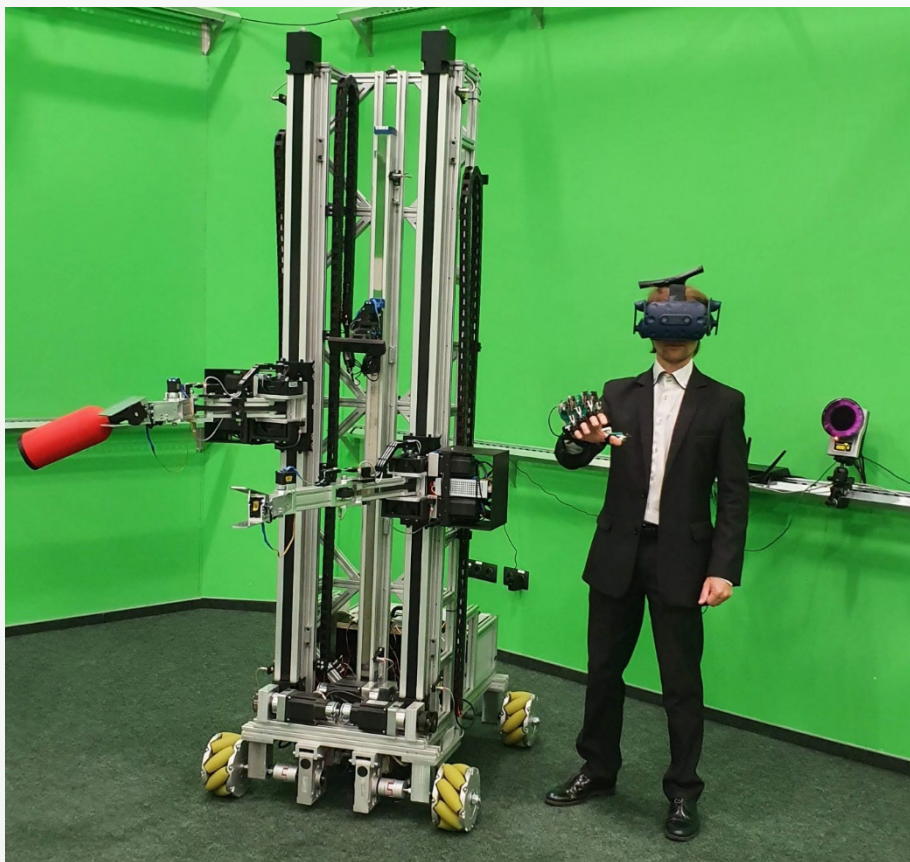
Wspomaganie wykonywania pracy – egzoszkieleaty pasywne vs egzoszkieleaty aktywne

Nasz naturalny szkielet jest szkieletem wewnętrznym (endoszkieletem), który przenosi na podłoże obciążenia związane z podnoszeniem i przenoszeniem przedmiotów. Wymagania stawiane w pracy odbiegają od warunków naturalnych, co sprawia, że obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego w trakcie wykonywania prac fizycznych może doprowadzić do powstania zaburzeń w jego funkcjonowaniu. Rozwiązaniem może być zastosowanie dodatkowego, zewnętrznego szkieletu (egzoszkieletu) odciażającego – w mniejszym lub większym stopniu – zarówno nasz wewnętrzny szkielet, jak i mięśnie. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie egzoszkieleatu pasywnego, np. do kończyn dolnych, ułatwiającego przenoszenie ciężkich plecaków (nawet 50 kg ładunku). Stełaż plecaka przymocowany jest do górnej części egzoszkieleatu znajdującej się na wysokości pasa, a jego ciężar przenoszony jest przez konstrukcję egzoszkieleatu na podłoże. Dodatkowo taki szkielet zewnętrzny może być wyposażony w pneumatyczne siłowniki w stawie kolanowym. W trakcie kucania ciśnienie znacząco wzrasta, a jego nacisk na tłok siłownika pomaga przy ponownym wyprostowaniu. Tego typu egzoszkieleaty są stosowane najczęściej przez żołnierzy, natomiast w przemyśle bardziej przydają się do odciażania górnej części ciała. Najczęściej rozważane są egzoszkieleaty odciażające kręgosłup (np. przenoszące obciążenie związane z przemieszczeniem przedmiotu bezpośrednio na biodra lub kończyny dolne) i kończyny górne, wspomagające pracę długotrwałe pracy wykonywane ponad głową [19] (konstrukcja egzoszkieleatu stabilizuje się w wybranym położeniu,

dzięki czemu pracownik nie musi podtrzymywać ciężaru swojej ręki oraz trzymanego narzędzia) – np. do zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym [20].

Oczywistą różnicą pomiędzy egzoszkieleatem pasywnym a aktywnym jest to, że ten drugi jest wyposażony w zestaw siłowników (najczęściej wykorzystuje się silniki elektryczne) pozwalających na zwiększenie możliwości pracownika w zakresie podnoszenia przedmiotów. Siłowniki mogą pełnić rolę wspomagającą (tzn. do podnoszenia ciężaru wykorzystywana jest zarówno siła ludzkich mięśni, jak i egzoszkieleat) oraz całkowicie odciażać człowieka (wtedy podnoszony przedmiot utrzymywany jest w górze tylko i wyłącznie przez egzoszkieleat). To drugie rozwiązanie jest stosowane zwykle w cięższych konstrukcjach, będących egzoszkieleatami całego ciała [21, 22] – zarówno kończyn górnych, jak i dolnych (obciążenie związane z trzymaniem przedmiotu przenoszone jest na podłoże przez konstrukcję egzoszkieleatu).

Mniej oczywiste jest to, że egzoszkieleat aktywny musi być wyposażony w system sterowania oraz zestaw zabezpieczeń chroniących pracownika przed niewłaściwym działaniem siłowników. Z tego powodu egzoszkieleat jest też często nazywany robotem noszonym (ang. *wearable robot*). System sterowania musi rozpoznać intencje operatora i na ich podstawie poprawnie kontrolować pracę siłowników, tak aby został osiągnięty efekt oczekiwany przez pracownika (np. wyprostowanie kończyny górnej lub uniesienie przedmiotu). Najprostszym rozwiązaniem, ale też zapewniającym wysoką precyzję ruchu egzoszkieleatu, jest zastosowanie standardowych elementów sterowniczych, takich jak przyciski i dżoystiki. Ewidentną wadą takiego rozwiązania jest konieczność nauki nowego interfejsu oraz zajęcie ręki (co może zmniejszać wydajność pracy i być uciążliwe dla operatora egzoszkieleatu). Obecnie prowadzone są prace badawcze nad bardziej adekwatnym rozwiązaniem w postaci wykorzystania sygnału EMG [23] o napięciu mięśni (w przypadku egzoszkieleatów



Fot. 2. Opracowany w CIOP-PIB zdalnie sterowany robot, wyposażony w dwa ramiona zakończone chwytakiem [24], oraz operator robota wykorzystujący egzoskielet ręki z siłowym sprzężeniem zwrotnym

Photo 2. A remotely controlled robot developed at CIOP-PIB. It has with two arms, each one with a gripper [24]. The robot operator uses a exoskeleton with force feedback

wspomagających) lub specjalnych obręczy wyposażonych w zestaw czujników zbliżeniowych dookoła nadgarstka (w przypadku egzoskieletów całego ciała) – ruch nadgarstka wewnątrz egzoskieletu, czyli zbliżenie do jednego z czujników, sprawia, że ramię egzoskieletu rusza się w tę samą stronę co kończyna górna operatora (system sterowania dąży do sytuacji, w której nadgarstek jest cały czas w środku obręczy).

Wyniki badań przeprowadzonych w celu porównania dwóch metod sterowania egzoskieletem dla kończyny górnej [23] potwierdziły przewagę sterowania za pomocą dżojstików nad sterowaniem wykorzystującym sygnał EMG (fot. 1). Użyteczność sterowania mierzona z wykorzystaniem skali SUS została oceniona na 77,5%, więc dosyć wysoko, natomiast ocena użyteczności sterowania bazującego na sygnałach EMG jest znacznie niższa i wynosi 39,5%. Mimo że komfort sterowania był podobny w przypadku obu metod, to jednak osiągnięcie precyzyjnego ruchu egzoskieletu za pośrednictwem sygnału EMG było trudne dla końcowych użytkowników, stąd stosunkowo niska postrzegana przez nich użyteczność takiego rozwiązania.

Egzoskielety wspomagające zdalne sterowanie maszynami

W pewnych sytuacjach korzystne jest zastąpienie fizycznej obecności pracownika zdalnie sterowanym robotem, często wyposażonym w jedno

lub więcej ramion. Dotyczy to wykonywania pracy w trudnych warunkach, związanych z zagrożeniem zdrowia i życia pracownika, ale również wykonywania zadań przez osoby z ograniczeniem siły mięśniowej. Do sterowania takimi robotami wykorzystuje się koncepcje teleobecności [24], polegające na wytworzeniu wrażenia, że pracownik znajduje się w tym samym miejscu co robot, a osiąga się to głównie za pomocą przekazywanego w czasie rzeczywistym obrazu z kamer zainstalowanych na robocie (obraz ten może być wyświetlany w goglach rzeczywistości wirtualnej w celu wzmocnienia poczucia obecności w innym miejscu) oraz przez sterowanie ramionami robota poprzez ruch kończyn górnych pracownika (robot odtwarza ruchy wykonywane przez pracownika, fot. 2.). Mogłoby się wydawać, że w takiej sytuacji egzoskielet jest zbędny, jednak nadal może on być z korzyścią wykorzystany do zwiększenia wrażenia obecności przestrzennej w miejscu instalacji robota i ułatwienia pracy operatora poprzez dodanie do systemu zdalnego sterowania siłowego sprzężenia zwrotnego pomiędzy robotem a operatorem. Stosunkowo najprostsze, ale też przynoszące największą korzyść w stosunku do inwestycji, jest zastosowanie egzoskieletu ręki, odpowiadającego za sterowanie chwytakiem ramienia robota. Pracownik ruchem palców zmienia stan chwytaka, ale bez egzoskieletu brakuje mu informacji o tym, czy chwytak ściska już przedmiot i z jaką

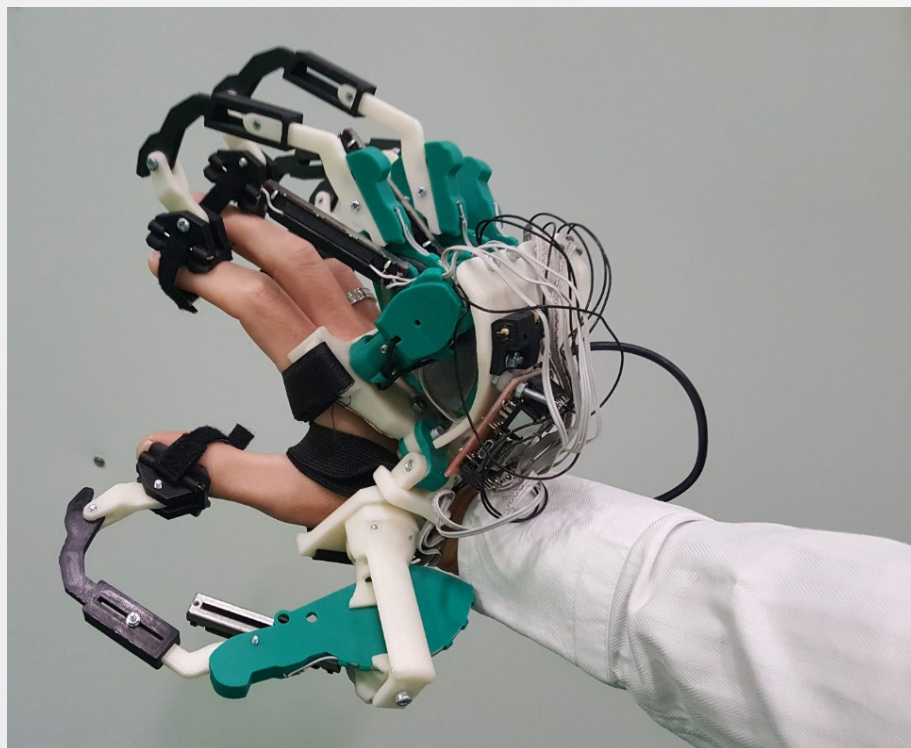
siłą. Informacje z czujników nacisku zainstalowanych na chwytaku wpływają na pracę siłowników egzoskieletu ręki, które mogą zatrzymać dalsze zginanie palców. W ten sposób operator robota czuje, że chwytak ściska przedmiot, co ułatwia mu manipulowanie przedmiotami za pośrednictwem zdalnie sterowanego robota. Bardziej zaawansowane egzoskielety pozwalają na nałożenie ograniczeń ruchu na całą kończynę górną operatora (w ten sposób pracownik czuje, że nie może przesunąć całego ramienia robota, gdyż doszło do jego kolizji z innym obiektem, takim jak ściana lub regał).

Przeprowadzone w CIOP-PIB badania pokazują, że zastosowanie koncepcji teleobecności do zdalnego sterowania robotem wyposażonym w dwa ramiona charakteryzuje się wysokim poziomem użyteczności i akceptacji technologii. Badania przeprowadzono z grupą osób młodszych (20-30 lat; 16 osób) oraz starszych (powyżej 50. roku życia; 18 osób). Zadaniem ochotników było przenoszenie przedmiotów za pośrednictwem robota. Ogólny poziom akceptacji technologii wynosił 69% wśród osób młodszych i 59% wśród osób starszych. Znacznie lepiej została oceniona postrzegana użyteczność – odpowiednio 74% w przypadku osób młodszych i 66% w przypadku starszych. Osoby młodsze najwyżej oceniły zamiar używania takiej technologii (79% wobec 62% głosów starszych osób).

Egzoskielety w szkoleniach wirtualnych

Zastosowanie rzeczywistości wirtualnej (VR – *virtual reality*) do szkoleń wprowadza nowe możliwości w zakresie przygotowania pracowników, zwłaszcza tych dopiero zaczynających pracę, do bezpiecznego i efektywnego wykonywania swoich zadań. Symulacja szkoleniowa realizowana w środowisku wirtualnym pozwala nie tylko na przećwiczenie całego procesu pracy, lecz także na doświadczenie sytuacji awaryjnych, których odtworzenie w typowych warunkach szkoleniowych wiązałoby się z narażeniem osób szkolonych na ryzyko. Duże znaczenie ma również to, że całe otoczenie jest symulowane za pomocą komputera, więc ewentualne błędy nie prowadzą do uszkodzenia sprzętu. Ponadto w trakcie symulacji odtwarzane jest rzeczywiste stanowisko pracy, dzięki czemu w trakcie szkolenia mamy pełne zaangażowanie pamięci mięśniowej (ruchy wykonywane w trakcie symulacji są tożsame z ruchami wykonywanymi na rzeczywistym stanowisku pracy) i – w odróżnieniu od szkoleń teoretycznych – możliwe jest przekazanie tzw. wiedzy ukrytej, czyli wynikającej bezpośrednio z doświadczenia. Ze względu na swoje zalety techniki VR w pierwszej kolejności znalazły zastosowanie w branżach związanych z dużymi zagrożeniami – dla przykładu warto wymienić prace strażowe wykonywane w podziemnych kopalniach [25] lub zwalczanie pożarów wewnętrznych przez strażaków [26].

W procesie szkolenia z wykorzystaniem VR istotne znaczenie ma realizm symulacji, który można zwiększać poprzez ulepszanie jakości



Fot. 3. Opracowany w CIOP-PIB egzoszkielek ręki z siłowym sprzężeniem zwrotnym, przeznaczony do szkoleń VR
 Photo 3. Hand exoskeleton with force feedback developed at CIOP-PIB. One of its main applications is supporting VR training

środowiska wirtualnego i zmiany w interfejsie człowiek-komputer. Te zmiany mogą się sprowadzać do drobnych poprawek, takich jak zmniejszenie masy gogli VR i zwiększenie pola widzenia, lub mieć charakter zmian jakościowych, polegających np. na zwiększeniu liczby zmysłów zaangażowanych w trakcie symulacji. W czasie typowej sesji szkoleniowej VR zaangażowane są głównie tylko dwa zmysły: wzrok i słuch. Uczestnik symulacji nie ma możliwości dotknięcia wirtualnych przedmiotów. Problem ten może rozwiązać, podobnie jak w przypadku zdalnie sterowanych robotów, poprzez dodanie siłowego sprzężenia zwrotnego za pomocą egzoszkieletu ręki [27], fot. 3. Jego zastosowanie usuwa problem przenikania palców ręki przez wirtualne obiekty – w momencie dotknięcia przez awatar ręki wirtualnego obiektu wysyłany jest sygnał do egzoszkieletu, aktywujący odpowiednie silniki, których zadaniem jest powstrzymanie dalszego ruchu palców. W ten sposób osoba szkolona czuje wirtualne przedmioty, co ułatwia ich przenoszenie, manipulowanie nimi lub też zwykłe używanie elementów sterowniczych. Przede wszystkim zastosowanie większej liczby zmysłów przekłada się na zwiększenie realizmu symulacji i lepsze zapamiętanie przekazywanych w trakcie szkolenia informacji. Przeprowadzone w CIOP-PIB badania z udziałem 30 osób i z wykorzystaniem symulacji szkoleniowych dotyczących użytkownika elementów sterowniczych maszyn stosowanych w przetwórstwie przemysłowym [27] pokazały, że zastosowanie egzoszkieletu ręki do zaangażowania zmysłu dotyku może podnieść subiektywnie postrzężoną ocenę precyzji manipulacji elementami sterowniczymi – o 42%.

Wspomaganie powrotu do zdrowia po wypadku – egzoszkielety w fizjoterapii i rehabilitacji

Nawet najlepsze metody szkoleniowe i systemy bezpieczeństwa nie zagwarantują, niestety, zero-wypadkowości. W przypadku niektórych osób, które uczestniczyły w wypadkach, niezbędną jest rehabilitacja i/lub fizjoterapia po odniesionych urazach. Bywa, że jest to długotrwały i żmudny proces, który nie daje szybkich efektów, dlatego trudno jest utrzymać wysoką motywację do kontynuowania ćwiczeń. Wsparciem procesu fizjoterapii mogą być gry rehabilitacyjne, w tym gry VR, oraz egzoszkielety pozwalające na rozszerzenie zakresu terapii (przykład takiego egzoszkieletu przedstawiono na fot. 4.; innym przykładem jest egzoszkielek kończyn dolnych, ułatwiający odzyskanie zdolności chodzenia po urazie lub udarze). Odpowiednio skonstruowane gry pomagają w utrzymaniu zainteresowania terapią oraz zapewniają wymuszenie i pomiar trójwymiarowych trajektorii ruchu kończyny górnej, natomiast egzoszkielek pozwala na zwiększenie zakresu stosowalności gier, gdyż zainstalowane silniki wspomagają na początku ruch palców (na wczesnych etapach terapii samodzielny ruch może być trudny lub niewykonalny), a w miarę postępów w terapii umożliwiają dodanie dodatkowego, regulowanego obciążenia przyspieszającego powrót do pełni sił. Skrócenie czasu rehabilitacji jest korzystne dla całego społeczeństwa – nie tylko dla pracownika, który szybciej może wrócić do normalnego życia, lecz także dla pracodawców, którzy prędzej mogą odzyskać wykwalifikowanego pracownika.

Badania dotyczące gier VR wspomagających proces rehabilitacji przeprowadzono z udziałem 60 pacjentów z dwóch różnych ośrodków rehabilitacji. Pacjenci korzystali z pięciu różnych gier przeznaczonych do wspomagania procesu fizjoterapii kończyn górnych. Ogólna ocena akceptacji technologii wyniosła 69% maksymalnej wartości dla modelu TAM. Pacjenci najlepiej ocenili zamiar używania (85%) oraz postrzeganą użyteczność (80%). Dodatkowo za pomocą kwestionariusza SUS system wspomagania rehabilitacji bazujący na grach VR został oceniony przez 20 fizjoterapeutów. Uzyskano stosunkowo wysoką wartość – 75%, co oznacza, że taki system jest użyteczny również z punktu widzenia osób, które profesjonalnie zajmują się fizjoterapią.

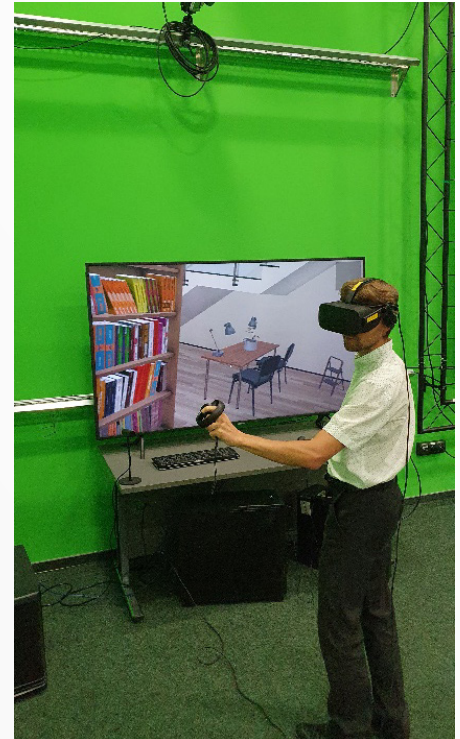
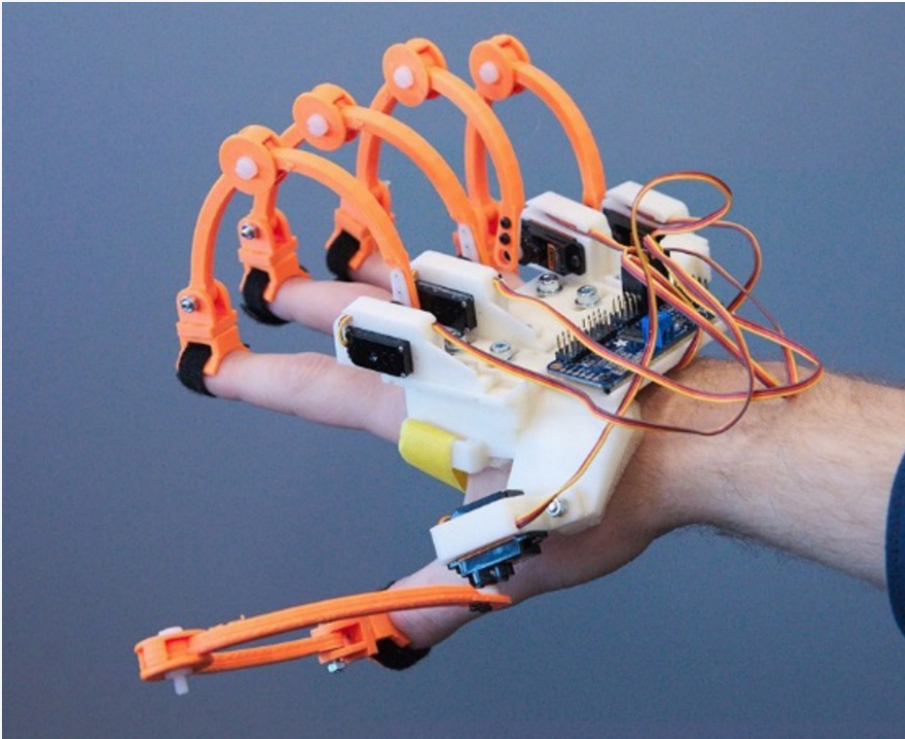
Podsumowanie

W artykule przedstawiono szeroki zakres wykorzystania egzoszkieleatów aktywnych w celu wspomagania pracowników zarówno przed rozpoczęciem pracy (szkolenia wirtualne), w trakcie wykonywania pracy (ułatwienie przenoszenia ciężarów w sposób pasywny i aktywny lub zdalne sterowanie maszynami z wykorzystaniem koncepcji teleobecności), jak i w celu przyspieszenia powrotu do pracy (wspomaganie procesu rehabilitacji i fizjoterapii po urazie). Omówione przykłady zastosowania nie są już w sferze rozważań teoretycznych – prototypowe rozwiązania powstają na całym świecie, a w artykule przedstawiono tylko wyniki badań przeprowadzonych w CIOP-PIB. Dalszy rozwój technologii oraz metod oceny i badania nowych form wykonywania pracy – zwłaszcza przy wykorzystaniu egzoszkieleatów – będzie prowadził do stałego zmniejszania obciążenia pracowników w środowisku pracy, a przede wszystkim do zmniejszenia obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.

Badania z udziałem końcowych użytkowników omawianych technologii wskazują, że narzędzia, takie jak różnego typu egzoszkieleaty stosowane w parze z innymi technologiami, np. rzeczywistością wirtualną i zdalnie sterowanymi robotami, uzyskują wysoką ocenę użyteczności i wysoki poziom akceptacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SPENCER, D.A. Fear and hope in an age of mass automation: debating the future of work. *New Technology. Work and Employment*. 2018, 33: 1-12, doi: 10.1111/ntwe.12105.
- [2] WALLÉN, J. The History of the industrial robot. 2008. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-56167>.
- [3] JANSSEN, C., et al. History and future of human-automation interaction. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2019, 131: 99-107, doi: 10.1016/j.ijhcs.2019.05.006.
- [4] SIEGWART, S., NOURBAKHSH, I., SCARAMUZZA, D. Introduction to autonomous mobile robots. The MIT Press, 2011.
- [5] LUCKCUCK, M., et al. Formal specification and verification of autonomous robotic systems: A survey.



Fot. 4. Opracowany w CIOP-PIB egzoskielet ręki z siłowym sprzężeniem zwrotnym, przeznaczony do wspomagania rehabilitacji, oraz przykład jednej z gier rehabilitacyjnych VR
 Photo 4. A hand exoskeleton with force feedback developed at CIOP-PIB, designed to support rehabilitation, and an example of one of the VR rehabilitation games

ACM Computing Surveys (CSUR). 2019, 52 (5), doi: 10.1145/3342355.

[6] WAHRMANN, D., HILDEBRANDT, A., SCHUETZ, C. An autonomous and flexible robotic framework for logistics applications. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2019, 93: 419-431, doi: 10.1007/s10846-017-0746-8.

[7] SPENKO, M., BUERGER, S., IAGNEMMA, K. The DARPA Robotics Challenge Finals: humanoid robots to the rescue. Springer, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-74666-1.

[8] ASFOUR, T., et al. ARMAR-6: A collaborative humanoid robot for industrial environments. 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Beijing(China). 2018, pp. 447-454.

[9] STASSE, O., et al. TALOS: A new humanoid research platform targeted for industrial applications. 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), Birmingham (UK). 2017, pp. 689-695.

[10] WANG, T., et al. Current researches and future development trend of intelligent robot: a review. *International Journal of Automation and Computing*. 2018, 15(5): 525-546, doi: 10.1007/s11633-018-1115-1.

[11] GIL, M., et al. Designing human-in-the-loop autonomous Cyber-Physical Systems. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2019, 130: 21-39, doi: 10.1016/j.ijhcs.2019.04.006.

[12] MICHALOS, G., et al. Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010, 2(2): 81-91, doi: 10.1016/j.cirpj.2009.12.001.

[13] BOGUE, R. Exoskeletons – a review of industrial applications. *Industrial Robot*. 2018, 45(5): 585-590, doi: 10.1108/IR-05-2018-0109.

[14] de LOOZE, M. et al. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016, 59(5): 671-681, doi: 10.1080/00140139.2015.1081988.

[15] GOPURA, R. et al. (2016), DSV Bandara, Kazuo Kiguchi, G.K.I. Mann, Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review, *Robotics and Autonomous Systems*. Part B. 2016, 75: 203-220, doi: 10.1016/j.robot.2015.10.001.

[16] McFARLAND, T., FISHER, S. Considerations for Industrial Use: A Systematic Review of the Impact of Active and Passive Upper Limb Exoskeletons on Physical Exposures. *IJSE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019, 7 (3-4): 322-347, doi: 10.1080/24725838.2019.1684399.

[17] BROOKE, J. SUS: a retrospective. *Journal of Usability Studies*. 2013, 8(2): 29-40.

[18] VENKATESH, V., DAVIS, F.D. A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management Science*. 2000, 46(2): 186-204, doi: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.

[19] HUYSAMEN, K. et al. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*. 2018, 70: 148-155, doi: 10.1016/j.apergo.2018.02.009.

[20] SPADA, S., et al. Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*. 2017, 11: 1255-1262, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.252.

[21] STRICKLAND, E. "Iron man" suits are coming to factory floors. *IEEE Spectrum*. 2019, 56(1): 27-29.

[22] CHU, G. et al. The experiments of wearable robot for carrying heavy-weight objects of shipbuilding works. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Taipei, 2014, pp. 978-983, doi: 10.1016/j.apergo.2017.11.004.

[23] JANKOWSKI, J., ŁACH, P. A comparison of methods of controlling the movement of an exoskeleton, supporting movements of the upper limb using signals of muscle activity and manual controls. *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*. 2020, 11(41): 19-32, doi: 10.5604/01.3001.0014.3705.

[24] GRABOWSKI, A., JANKOWSKI, J., WODZYŃSKI, M. Teleoperated mobile robot with two arms: the influence of a human-machine interface, VR training and operator age. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2021, 156, doi: 10.1016/j.ijhcs.2021.102707.

[25] GRABOWSKI, A., JANKOWSKI, J. Virtual Reality-based pilot training for underground coal miners. *Safety Science*. 2015, 72: 310-314.

[26] GRABOWSKI, A., JACH, K. The use of virtual reality in the training of professionals: with the example of firefighters. *Computer Animation and Virtual Worlds*. 2020, 32(2): 1-6, doi: 10.1002/cav.1981.

[27] KALWASIŃSKI, D. Interakcja człowieka ze środowiskiem wirtualnym za pomocą rzeczywistych i wirtualnych elementów sterowniczych. *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*. 2017, 8(2): 115-128, doi: 10.5604/01.3001.0010.1575.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.