ŚLĄSKI UNIWERSYTET MEDYCZNY W KATOWICACH

Zabrze 15.11.2024 r.

dr hab. n med. **Zbigniew Nawrat**

Zakład Biofizyki Katedry Biofizyki

Wydział Nauk Medycznych w Zabrzu

Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

41-808 Zabrze ul. H.Jordana 19

RECENZJA
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Andrzeja Michnika

pt. „Modularny system sterowania robota rehabilitacyjnego narządów ruchu ze sprzężeniem siłowym"

wykonanej pod opieką promotora prof. dr hab. inż. Roberta Michnika i opiekuna pomocniczego dr hab.inż. Janusza Wróbla

Uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej nr 87/2024 z dn. 17.10.2024 r. zostałem powołany na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr. inż. Andrzeja Michnika.

Dziedzina robotyki medycznej w zakresie rehabilitacji wzbudza duże zainteresowanie zarówno ze strony wykonujących usługi medyczne jak i pacjentów. To jest również atrakcyjne pole do badań naukowych łącząc wiedzę dotyczącą układu ruchu człowieka i potrzeb, które powstają przy jego dysfunkcji oraz wiedzę inżynierską, jak realizować w bezpośrednim kontakcie z pacjentem odpowiednie zadania mechaniczne bezpiecznie i skutecznie.

W związku z dużym zainteresowaniem grupy potencjalnych beneficjentów dla urządzeń, które spełnią ich oczekiwania i możliwości finansowania istnieje też szansa wdrożenia. Zapotrzebowanie rynkowe na narzędzia niewymagające fachowej obsługi, realizujące czynności powtarzalne, czasochłonne i oszczędzające kosztowne zasoby sektora zdrowia, rośnie z roku na rok.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna
wpłynęło dnia 15.11.2024
nr 244 zał.

W Polsce można znaleźć znakomite przykłady prac naukowych oraz firm wdrażających roboty rehabilitacyjne. Z pewnością w awangardzie znajdują się Politechnika Śląska i zabrzański ITAM; obecnie pod pełną nazwą Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Techniki i Aparatury Medycznej.

Praca wykonana w ramach doktoratu wdrożeniowego dotyczy opracowania systemu sterowania wraz metodologią projektowania i walidacją przyjętych rozwiązań. Na pewno jedną z podstawowych jej zalet jest to, że została przygotowana przez twórcę robota odpowiedzialnego od początku za jego realizację. Wieloletnie zaangażowanie zespołu ITAM w tworzenie robotów medycznych znane jest z osiągnięć – kilku modeli i prototypów w różnych fazach prac badawczych i wdrożeniowych. Powstające roboty rehabilitacyjne w różnych wersjach mogą być oferowane jako urządzenia zastępujące wyczerpującą pracę rehabilitanta i pozwalają, by jeden specjalista nadzorował wielu pacjentów. Jednak, by zrealizować bezpiecznie te zadania robot musi posiadać odpowiedni system sensoryczny oraz system nadzoru, w którym interakcja robota z pacjentem jest kontrolowana w trakcie wykonywanych zadań. W pracy przedstawiono system sterowania oryginalnego, własnej konstrukcji, robota umożliwiającego wykonanie złożonych ruchów kończyn osoby rehabilitowanej, biernych, czynnych i z oporem o odpowiednim zakresie i dynamice.

Praca powstała w trakcie realizacji planów wdrożenia robota, więc zwrócono szczególną uwagę na analizę wymagań funkcjonalnych i wymagań bezpieczeństwa (zgodnie z obowiązującymi normami). Wszystko to oznacza, że przekazana do recenzji praca spełnia wszystkie podstawowe założenia doktoratów wdrożeniowych, zarówno przez postać autora, zaangażowanego inżyniera w projektowanie i badania oryginalnego robota przygotowywanego do wdrożenia, jak i osadzenie doktoratu w najodpowiedniejszym wydziale dla tego tematu Politechniki Śląskiej oraz wybór promotorów tego dzieła.

Treść

Pracę rozpoczyna krótki Wstęp a następnie obszerny Przegląd robotów w zakresie działania opracowywanego urządzenia. Słusznie wydzielono rozdział wprowadzający w systemy sterowania stosowane w robotyce. Zgodnie ze sztuką dysertacji po tym wprowadzeniu autor podaje Cel i zakres pracy (str.25).

Celem wskazanym przez doktoranta było opracowanie systemu sterowania wykorzystującego sprzężenie siłowe robota rehabilitacyjnego, który jest przeznaczony do terapii kończyn górnych.

Sformułowano trzy tezy. Pierwsza odnosi się do wykorzystania danych z sensorów umieszczonych w węzłach (osiach) robota do sterowania trajektorią ruchu robota na podstawie automatycznej detekcji intencji ruchu w stawach kończyny górnej. Druga związana jest z przekonaniem autora, że wprowadzenie w algorytmie sterowania minimalnej siły wymaganej do aktywacji napędów zwiększy bezpieczeństwo pacjenta. Trzecia dotyczy

nienegatywnego (neutralnego? pozytywnego? czy braku wpływu?) wpływu na sterowanie robota stosowania aplikacji działającej w systemie operacyjnym nie czasu rzeczywistego.

Na stronie 128 znajdziemy Podsumowanie i wnioski, które odnoszą się do tak sprecyzowanych celów i tez.

Autor zaprojektował i wykonał system sterowania robota, opracował i zaimplementował odpowiednie algorytmy, opracował protokoły komunikacji i metodykę regulacji wszystkich parametrów.

Odpowiednio zaprojektowany robot został poddany badaniom, by ocenić wpływ opracowanego sposobu sterowania na realizację określonych zadań. Wszystkie elementy systemu zostały poddane walidacji.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań walidacyjnych potwierdziły poprawność działania wszystkich testowanych elementów, spełnienie wymagań funkcjonalnych i normatywnych.

Należy wyrazić tu gratulacje dla autora, choć liczba błędów (literowych i formy) napisania tych kluczowych rozdziałów niestety nieco łamie pełne zadowolenie Recenzenta z merytorycznej konsekwencji dzieła.

Analiza

Przejdźmy jednak do uzasadnienia, czyli analizy metod, środków i uzyskanych rezultatów.

Autor pracy wykorzystał swoje doświadczenie z pracy nad robotem ARM-100 zwieńczonym również patentem na układ sterowania. System rozbudowano w oparciu o czujniki siły, które pozwalają sterowanie z śledzeniem ruchu kończyny z zadawanym progiem wartości siły i współpracę z „wejściówką elektromiograficzną". (Kolejny błąd edycyjny na str.27).

Opracowany prototyp robota ARM-200 posiada konstrukcję egzoszkieletu z siedmioma stopniami swobody. Można go stosować do rehabilitacji lewej i prawej ręki. Ramię robota pełni rolę wykonawczo-pomiarową. Komputer PC łączy się z systemem Master. Każdy moduł Slave kontroluje jeden z silników BLDC i współpracuje z modułem Expandera dodający określone funkcjonalności. Kolejnym modułem może być sEMG. Autor bardzo szczegółowo opisuje każdy z elementów układu sterowania. Dla osiągania wskazanego celu badawczego najważniejszym jest wyposażenie robota w czujniki siły umieszczone w każdym z uchwytów kończyny. W rozdziale 4.13 opisane jest działanie modułu Master, a w kolejnym – moduły Slave. Jednym z ważnych osiągnięć jest możliwość stosowania trybu śledzenia ruchu, który umożliwia intuicyjne programowanie trajektorii ruchu i realizację treningów aktywnych z kontrolą siły wywieranej na czujniki. Kolejnym podstawowym trybem jest odtwarzanie ruchu. W rozdziale 4.15 autor przedstawia bardzo szczegółowo i fachowo protokół komunikacji, a w następnym rejestrację danych przez system sterowania. (Strona 99 jest pusta.). Rozdział 5 poświęcony jest walidacji systemu sterowania podzielonego na oprogramowany komputer i robota (połączone przewodem LAN). Każdy moduł Slave wyposażony jest w tor pomiaru siły i steruje praca napędu w węźle na podstawie zadanego

trybu pracy przez Master oraz wartości pomiarowych z sensorów. Walidację toru pomiarowego współpracującego z czujnikami siły wykonano za pomocą odważników (specjalnie zrobionych ze śrutu i drukowanych elementów) w zakresie sił 0,43 – 35,32 N. Autor zadowolił się wykonaniem pomiarów jednokrotnych i porównaniem ze wskazaniami czujnika (różnica wartości zwana tu błędem bezwzględnym wynosiła maksymalnie 0,6 N). Podobnie – bez wprowadzania aparatu statystycznego - referencyjny pomiar prędkości kątowej wykonano za pomocą tachometru. Walidacja pomiaru kąta bezwzględnego, układu pomiaru prądu i napięcie zasilania napędu kończy ocenę systemu sterowania opartego na pomiarach wymienionych wielkości. W rozdz. 5 poddano ocenie wpływ na sterowanie zastosowania systemu operacyjnego nie czasu rzeczywistego, ponieważ zakładano współpracę systemu sterowania z oprogramowaniem do gier rehabilitacyjnych (konsekwencje problemu braku precyzji i powtarzalności taktowania). Autor przeprowadza serię pomiarów i formułuje kilka zaleceń ograniczających negatywny wpływ „wewnętrznego życia" systemu operacyjnego Windows. Następnie autor sprawdził odporność opracowanego rozwiązania na uszkodzenie jednego z węzłów systemu (rozdz.5.4). Brak odpowiedzi z jednego z modułów Slave nie przerywa cyklu wymiany danych z innymi modułami. W rozdziale 5.5 , 5.6 i 5.7 autor testuje robota w pełnej konfiguracji np. reakcję węzłów robota pracującego w trybie śledzenia ruchu kończyny. Na podanych wykresach możemy obserwować zmiany kątów, prędkości obrotowej i mierzonej siły w poszczególnych węzłach. Wysoką czułość (niewielka siła uruchamia ruch robota) ograniczono przez wprowadzenie progu (wartości siły) stopnia nieczułości. Przedstawione tu badania stanowią przykład oceny systemu przez konstruktora i podejmowanie określonych działań zmierzających do uzyskania poszukiwanych cech funkcjonalnych zdefiniowanych bardzo ogólnie. W rozdziale 5.8 autor podejmuje temat interakcji czujników i wpływu ich pomiarów na sposób sterowania. Na podstawie badań poszczególnych węzłów oceniono wartość progową 6,4 N, powyżej której napęd robota może przejść do realizacji ruchu (w trybie śledzenia). Po tych ustaleniach dotyczących charakterystyki opracowanego urządzenia i wprowadzenia poznanych parametrów umożliwiających wykonanie rehabilitacji autor wykonał tylko dwie serie ruchów zginania i prostowania w stawie łokciowym (aktywny węzeł nr.4) z różnymi prędkościami zginania. Na wykresie 5.33 widzimy pomiary kątowe i siłowe w każdym węźle podczas tego badania.

Przedstawione badania i wyniki opisują świetnie pracę konstruktora robota, twórcę systemu sterowania skomplikowanego układu mechanicznego, z wieloma stopniami swobody oraz sensorami w trakcie próby stosowania na człowieku. Autor zręcznie dopasowuje parametry i wprowadza elementy umożliwiające wykonanie założonych zadań związanych z rehabilitacją kończyny górnej. Pomimo obszerności wykonanych badań i jego zakresu mamy jednak wrażenia, że prototyp jeszcze czekają kolejne badania dla określenia pełnej charakterystyki działania robota i bezpiecznego jego stosowania na pacjentach. Z punktu widzenia pracy naukowej niedosyt budzi konsekwentne unikanie stosowania typowej procedury badań z podjęciem oceny statystycznej wyników.

Forma

Praca liczy 148 stron. Ma klasyczną formę. Wstęp i wprowadzenie w tematykę z właściwym wyborem treści zajmuje 24 strony. Po rozdziale precyzującym Cel i zakres pracy autor w rozdziel 4 podaje bardzo szczegółowy Opis systemu sterowania. Ten ponad siedemdziesięciostronicowy rozdział napisany jest w sposób, który wzbudza podziw dla autora – nie mamy wątpliwości, że autor ma ogromną wiedzę teoretyczną i praktyczną rozwijaną, doskonaloną przez lata. Następnie w rozdziale Walidacja (strony 99-125) znajdujemy pełny opis w jaki sposób przeprowadzono testy i jakie wyniki osiągnięto. W rozdziale 6 podano podsumowanie a w 7 (str.129) opisano jakie są planowane kierunki dalszych badań. Na kolejnych stronach zgodnie z przyjętymi regułami dla prac doktorskich znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim, spis literatury – właściwe dobranej i cytowanej (64 pozycje). Książkę kończy Spis rysunków i tabel. Autor nie ustrzegł się licznych błędów edytorskich (literówek, kopii bez zmiany formy, stron niezadrukowanych).

Na pewno warto kontynuować badania i tworzenie robotów rehabilitacyjnych uniezależniających pacjenta od obecności na miejscu specjalistów w obecnej sytuacji kadrowej. I praca przedstawiona do recenzji dowodzi kompetencji autora i jednostki badawczej, w której realizowano projekt, w tym zakresie.

Podsumowanie i wnioski

Podsumowując recenzję, muszę stwierdzić, że praca wymyka się klasycznej ocenie. Niewątpliwie praca została zrealizowana przez niezwykłego inżyniera posiadającego ogromne doświadczenie zarówno w zakresie elektroniki jak i oprogramowania robotów. Wyczuwamy zapał i autentyczną wiedzę oraz umiejętności twórcy innowacyjnego, bardzo skomplikowanego urządzenia skierowanego do odbiorców usług medycznych, rehabilitacji. Autor ze swobodą bada robota dopasowując określone elementy systemu sterowania, nadzoru robota, w oparciu o pomiary wielu sensorów umieszczonych w różnych miejscach; osiach (napędach) oraz uchwytach osoby rehabilitowanej.

Doktorat wdrożeniowy oceniany jest głównie przez pryzmat przydatności uzyskanych wyników dla firmy nastawionej na wdrożenie innowacyjnego urządzenia. Nie mam wątpliwości, że ten cel został osiągnięty. Celem wskazanym przez doktoranta było opracowanie systemu sterowania wykorzystującego sprzężenie siłowe robota rehabilitacyjnego, który jest przeznaczony do terapii kończyn górnych. Autor uczestniczył w budowie robota ARM – 200, wyposażył go w sensory i opracował system sterowania, który umożliwia prowadzenie rehabilitacji z ciągłym pomiarem siły, z sEMG w różnych trybach (również w przestrzenie wirtualnej gry).