

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki



Autoreferat rozprawy doktorskiej

Wielopunktowa trójwymiarowa analiza ruchów
dłoni w schorzeniach neurodegeneracyjnych
związanych z zaburzeniem funkcji motorycznej

mgr inż. Tomasz Stanisław Orzechowski

Promotor:

prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz

Kraków 2012

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie nowej, nieinwazyjnej techniki badań pacjentów cierpiących na choroby neurodegeneracyjne bazującej na analizie złożonych ruchów dłoni. W związku z powyższym w rozprawie wykazano następującą tezę: Wielopunktowa trójwymiarowa analiza ruchów dłoni, przeprowadzana przy wykorzystaniu technik cyfrowej analizy sygnałów oraz metod komputerowej eksploracji danych pozwala na obiektywną i precyzyjną ocenę stopnia nieprawidłowości złożonego ruchu dłoni. W szczególności może to dotyczyć oceny nieprawidłowości występującej w schorzeniach neurodegeneracyjnych związanych z zaburzeniem funkcji motorycznej. Zaproponowana metoda uwzględnia nie tylko ruch drżenia całej kończyny górnej, ale również specyficzne dla rozważanych chorób neurodegeneracyjnych nieprawidłowe ruchy dłoni, a w szczególności zaburzenia niezależnych ruchów palców.

Tezę starano się wykazać w sposób konstruktywny, to znaczy przedstawiono całościowe rozumowanie, począwszy od przeprowadzenia krytycznej analizy dotychczas wykorzystywanych metod, opierających się w większości na analizie objawu drżenia, a skończywszy na stworzeniu nowego, autorskiego procesu kompleksowej analizy ruchu dłoni.

Stworzenie procesu kompleksowej analizy ruchu dłoni objęło zarówno dobór odpowiedniej platformy sprzętowej, napisanie oprogramowania badawczego pozwalającego na analizę wielowymiarowych danych, a także zdefiniowanie nowych współczynników całościowego opisu złożonego ruchu, mających wartość diagnostyczną. Skonstruowane współczynniki pozwalają ocenić w sposób obiektywny wartość takich cech złożonego ruchu dłoni jak: stabilność tempa, stabilność kończyny, płynność ruchu oraz precyzję ruchu.

Wstęp

Cyfrowa analiza sygnałów oraz zaawansowana eksploracja danych są coraz częściej wykorzystywane w różnych dziedzinach nauk, w szczególności także w medycynie. Praktycznie codziennie podawana jest do informacji publicznej jakaś kolejna wiadomość o udanym eksperymencie wykonanym z wykorzystaniem sprzętu komputerowego, którego wyniki byłyby niemożliwe do uzyskania w tradycyjny sposób. Większość uczelni proponuje nowe i atrakcyjne kierunki właśnie z pogranicza takich dziedzin wiedzy jak: informatyka, medycyna, fizyka, lingwistyka czy psychologia. Polskie uczelnie, jak również inne ośrodki badawcze, prowadzą w ostatnich latach coraz więcej badań interdyscyplinarnych z pogranicza informatyki i medycyny, często odnosząc sukcesy doceniane także na międzynarodowej arenie. Również pojawiające się w środkach masowego przekazu stwierdzenia o kształtowaniu się społeczeństwa informacyjnego, znajdują uzasadnienie w obserwowanych zmianach powszechnie dostępnej techniki. Składają się na to liczne przyczyny, a głównie następujące: Dostępne są coraz to nowocześniejsze, dysponujące większą mocą obliczeniową komputery, mogące przechowywać i przetwarzać większe ilości danych. Dostępne są także coraz doskonalsze i bardziej elastyczne narzędzia programistyczne. Znaczący wpływ na rozwój zastosowań informatyki ma również zmiana świadomości użytkowników i ich coraz większe zaufanie do sieci globalnych. W tych warunkach sposoby korzystania z zaawansowanych technologii informatycznych stają się coraz bardziej wyrafinowane, a rozpowszechnianie się nowych dziedzin takich jak: biocybernetyka, inżynieria biomedyczna czy informatyka medyczna znajduje coraz pełniejsze uzasadnienie.

Pomimo wielkich nakładów finansowych, a przede wszystkim pomimo ogromnego zaangażowania ludzi biorących udział w dotychczasowych badaniach, można bez wątpliwości stwierdzić, że przedstawione wyżej dziedziny pozostają nadal naukowo otwarte, ukazując wciąż nowe obszary problemowe, które nie znalazły dotąd satysfakcjonujących rozwiązań.

Informatyka medyczna rozwija się w wielu kierunkach, jednak bezspornie największe sukcesy odnosi w obszarze wspomagania technicznego procesów diagnostycznych. Budowane obecnie urządzenia metrologiczne służące medycynie pozwalają odbierać i interpretować przeróżne sygnały, pochodzące z ciała człowieka. Są to w większości sygnały reprezentujące aktywność różnych narządów i funkcjonowanie różnych naturalnych

systemów składających się na ciało człowieka (Tadeusiewicz, Informatyka medyczna 2011) (Tadeusiewicz, Place and Role of Intelligent Systems in Computer Science 2010).

Zawężając poruszone wyżej rozważania do obszaru mającego bezpośredni związek z zawartością niniejszej pracy, i skupiając się wyłącznie na obecności technologii informatycznych w medycynie można wyodrębnić kilka głównych zadań, jakie obecnie realizuje się przy ich użyciu. Są to:

- projektowanie, symulacja i wspomaganie przy budowie aparatury medycznej, protez jak również sztucznych narządów,
- pozyskiwanie, gromadzenie, przetwarzanie i szybki dostęp do dużych ilości danych medycznych,
- inteligentna analiza danych medycznych pozwalająca na wspomaganie lekarza w podejmowaniu decyzji, jak również na modelowanie, symulację oraz wizualizacja skomplikowanych struktur i procesów biologicznych,
- tworzenie systemów telemedycznych (osiągalnych dziś dzięki powszechności sieci globalnej), których zadaniem jest zarówno zdalny dostęp do baz danych, zasięganie opinii ekspertów jak również zdalne kontrolowanie i sterowanie procesami związanymi z opieką nad pacjentami znajdującymi się poza instytucjami służby zdrowia, najczęściej w swoich domach.

Technologia informatyczna może być między innymi wykorzystana do rejestracji i analizy ruchu. Takie rejestracje i analizy otwierają możliwość usprawnienia i obiektywizacji diagnozy medycznej tych chorób, które manifestują się właśnie w formie zaburzeń aktywności motorycznej człowieka. Dotyczy to w szczególności wsparcia lekarza w ocenie postępu choroby, weryfikacji efektu długotrwałego procesu rehabilitacji czy precyzyjnego dozowania leku wraz z monitorowaniem jego działania. Dedykowane narzędzia do akwizycji sygnału związanego z ruchem pacjenta wraz z procesem przetwarzania i analizy takich danych, są w szczególności przydatne dla lekarzy zajmujących się badaniem zaburzeń funkcji motorycznych obecnych w chorobach neurodegeneracyjnych. Jedną z cech charakteryzujących tego typu choroby to występująca korelacja pomiędzy stopniem zaburzenia funkcji motorycznych (spowolnienie ruchowe, trudności z wykonywaniem ruchów precyzyjnych, drżenie) a zaawansowaniem schorzenia neurodegeneracyjnego. W tej sytuacji

próba zunifikowania sposobu obiektywnej oceny zaburzeń motorycznych wraz ze sparametryzowaniem (ilościowym wyrażeniem) każdego objawu daje podstawy do automatycznego wspomagania procesu diagnozowania, monitorowania i leczenia oraz do prowadzenia uniwersalnej i zrozumiałej dla różnych jednostek dokumentacji pacjenta.

Warto wskazać, jak trudne jest wskazane wyżej zagadnienie. Dotychczasowe badania dotyczące oceny stopnia zaawansowania schorzeń neurodegeneracyjnych na podstawie zaburzeń funkcji motorycznych pozwoliły na opracowanie i wdrożenie kliniczne jedynie kilku metod. Metody te oparto w większości na bazie różnych sposobów pomiaru drżenia całej kończyny. Uzyskane parametry odnoszą się więc tylko do uśrednionych wartości częstotliwości drżenia całej kończyny, oceny zależności między aktywnością elektryczną mięśni uczestniczących w drzeniu czy też analizy zmienności nasilenia drżenia w czasie. Do rejestracji ruchu oscylacyjnego kończyny górnej wykorzystuje się obecnie głównie czujniki akcelerometryczne lub elektromiografię.

Wykorzystywane metody nie odzwierciedlają zatem w pełni istoty klasycznego badania zmierzającego do oceny zdolności manualnych, wykonywanego typowo przez lekarza specjalistę, bez wspomagania aparaturowego. Lekarz taki weryfikuje **zawsze całościowo indywidualny dla każdego pacjenta złożony ruch dłoni**. W związku z powyższym wnioskować można, że do precyzyjnej zautomatyzowanej i z informatyzowanej oceny stopnia zaawansowania dysfunkcji ruchowej niezbędna jest analiza komputerowa pełnej, złożonej serii ruchów, w szczególności jednoczesnego obserwowania ruchów palców oraz całej dłoni. Na tym tle wprowadzona została niżej sformułowana teza tej rozprawy.

Teza pracy

W pracy postawiono i wykazano następującą tezę:

Wielopunktowa trójwymiarowa analiza ruchów dłoni, przeprowadzana przy wykorzystaniu technik cyfrowej analizy sygnałów oraz metod komputerowej eksploracji danych pozwala na obiektywną i precyzyjną ocenę stopnia nieprawidłowości złożonego ruchu dłoni. W szczególności może to dotyczyć oceny nieprawidłowości występującej w schorzeniach neurodegeneracyjnych związanych z zaburzeniem funkcji motorycznej. Zaproponowana metoda uwzględnia nie tylko ruch drżenia całej kończyny górnej, ale również specyficzne dla

rozważanych chorób neurodegeneracyjnych nieprawidłowe ruchy dłoni, a w szczególności zaburzenia niezależnych ruchów palców.

W ramach przedstawionej w pracy analizy wyżej postawionego problemu zaproponowano wprowadzenie nowych wskaźników diagnostycznych umożliwiających ocenę poprawności wykonywania powtarzanych przez pacjenta serii złożonych czynności manualnych. Odróżnienia to metodę proponowaną w tej pracy od metod tradycyjnych, opisywanych w pracach innych autorów. Opracowana metoda oparta została nie tylko na podstawowych, uśrednionych parametrach opisu ruchu (takich jak poziom drżenia) ale przede wszystkim na jego kompleksowej analizie, także z wykorzystaniem nowoczesnych technik eksploracji danych. Przyjęta w pracy metodyka dała możliwość ekstrakcji istotnych, z punktu widzenia wsparcia diagnostyki neurologicznej, elementów różnicujących kolejne powtórzenia ćwiczenia manualnego, które dają podstawę do obiektywnej oceny stopnia dysfunkcji indywidualnego, złożonego ruchu dłoni pacjenta. Warto podkreślić, że opracowując proponowaną w pracy metodę starano się naśladować istotę opisanego wyżej, klasycznego badania zdolności manualnych, wykonywanego przez doświadczonego lekarza na podstawie jego wiedzy bez żadnych elementów technicznego wspomaganie.

Układ pracy

Pracę otwiera rozdział drugi, w którym przedstawiono metodologię podejścia biocybernetycznego używanego przez nas w obszarze modelowania żywych organizmów. W rozdziale tym opisano główne elementy układu nerwowego człowieka przedstawiając je w ujęciu cybernetycznym, a także scharakteryzowano wybrane choroby neurodegeneracyjne oraz inne schorzenia o podobnych objawach. W szczególności przeanalizowano podgrupę chorób z występującym zaburzeniem funkcji motorycznych wraz z wyszczególnieniem cech tych chorób, przydatnych w budowie systemu diagnostycznego.

Kolejny, trzeci rozdział zawiera szczegółową analizę wykorzystywanych obecnie technik pomiaru oraz analizy ruchu w schorzeniach neurologicznych. Przedstawiono w nim wzorcowe, klasyczne techniki pomiaru, a także możliwie szeroko opisano stosowane przez innych autorów techniki wykorzystujące narzędzia informatyczne, poddając je krytycznej

ocenie. Ponadto zarysowano także specyfikę cyfrowej akwizycji sygnału biomedycznego i wiążące się z tym niedogodności w odniesieniu do finalnych zniekształceń bądź częściowej utraty informacji w stosunku do postaci źródłowej.

Rozdział czwarty otwiera zasadniczą część pracy. Przedstawia on założenia przyjęte przy konstrukcji nowej metody analizy ruchu kończyny górnej. Opisano w nim koncepcję metody, bazującą na wnioskach z licznych wywiadów przeprowadzonych z lekarzami specjalistami, wykorzystującymi w swojej praktyce zawodowej zadania manualne do oceny schorzeń neurologicznych. W konsekwencji w rozdziale tym zawarto szczegółowy opis wybranego ćwiczenia manualnego (określonego układu ruchów dłoni), opartego na doświadczeniu z praktyki klinicznej, ale wykorzystywanego przy realizacji tej pracy. Przedstawiono również niezbędny zakres akwizycji ruchu dla zapewnienia pełnej rejestracji zjawisk i procesów potrzebnych do późniejszej, cyfrowej analizy danych.

Rozdział piąty, stanowiący zasadniczą część pracy, przedstawia rezultat zastosowania nowej, opracowanej przez autora, metody i aparatury do rejestracji i analizy ruchu kończyny górnej u osób z zaburzeniami ruchowymi, w szczególności związanymi ze zmianami neurologicznymi. Opisano przede wszystkim założenia teoretyczne, będące podstawą do konstrukcji zadania manualnego, oraz przedstawiono przyjęte w tej metodzie wstępne przetworzenie sygnału, które pozwala na uzyskanie jakości danych odpowiednich do podstawowej analizy oraz wizualizacji.

Rozdział szósty zawiera opis zastosowanej techniki cyfrowej analizy sygnału, która pozwoliła na wyznaczenie optymalnych parametrów reprezentujących istotne dla klinicznej diagnozy elementy ruchu. Oprócz tego przedstawia on także metody odkrywania wiedzy, głównie na przykładzie wybranej dla techniki „3DGAM” ścieżki eksploracji danych. W tej części pracy znalazło się także podsumowanie wyniku zastosowania nowej techniki w pilotażowych badaniach w ośrodku klinicznym.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie całości pracy. Opisano w nim najważniejsze zalety zaproponowanych w pracy metod, ale nie zaniedbano także obiektywnej prezentacji ich wad, wraz ze wskazaniem uwag mogących usprawnić ich działanie. Wymienione zostały także najważniejsze – w przekonaniu autora – osiągnięcia pracy, oraz wskazane zostały zamierzone kierunki dalszych badań.

Podsumowanie

Wnioski końcowe

W niniejszej pracy konsekwentnie zmierzano do wykazania tezy przedstawionej w rozdziale pierwszym. Tezę starano się wykazać w sposób konstruktywny, to znaczy przedstawiono całościowe rozumowanie, począwszy od przeprowadzenia krytycznej analizy dotychczas wykorzystywanych metod, opierających się w większości na analizie objawu drżenia, a skończywszy na stworzeniu nowego (autorskiego) procesu kompleksowej analizy ruchu dłoni. W szczególności skoncentrowano się na możliwości analizy niezależnych ruchów palców, bazując na procesie eksploracji dużych ilości danych pozyskanych przez wielopunktowe, trójwymiarowe czujniki ruchu rozmieszczone na każdym palcu dłoni.

Stworzenie procesu kompleksowej analizy ruchu dłoni objęło zarówno dobór odpowiedniej platformy sprzętowej, konstrukcję niskopoziomowego oprogramowania do rekonstrukcji ruchu (na podstawie danych z niezależnych sensorów różnego typu), napisanie oprogramowania badawczego pozwalającego na analizę wielowymiarowych danych, a także zdefiniowanie nowych współczynników całościowego opisu złożonego ruchu, mających wartość diagnostyczną.

Dzięki możliwości walidacji metody na zbiorze danych klinicznych, które pozyskano w czasie pilotażowego wdrożenia metody, zweryfikowano wysoką skuteczność metody. Przedstawione opracowania statystyczne otrzymanych wartości dla każdego ze współczynników pokazują, że zaproponowane w pracy algorytmy różnicują wyniki z grupy badawczej z wynikami z grupy kontrolnej w sposób wystarczający. Jedną z przyczyn uzyskania zadawalających wyników był staranny proces doboru grupy badawczej przez specjalistę. W konsekwencji badania prowadzono na grupie pacjentów w której znalazły się wyłącznie osoby z wyraźnymi, dużymi zaburzeniami czynności manualnych. Dzięki temu uzyskane wyniki analiz były wyraziste i czytelne. Niemniej ten pozytywny wynik testu dowodzi użyteczności zaproponowanej metody i stworzonego procesu kompleksowej analizy ruchu dłoni. To stwierdzenie nawiązuje do tezy rozprawy i pozwala twierdzić, że została ona wykazana, a także daje podstawy do dalszej rozbudowy proponowanych w pracy metod.

W ramach pracy skonstruowano i uzasadniono nowe współczynniki pozwalające, w sposób obiektywny ocenić wartość takich cech złożonego ruchu dłoni jak: stabilność tempa, stabilność kończyny, płynność ruchu oraz precyzję ruchu.

Na szczególną uwagę zasługuje ostatni współczynnik, którego wartość wyznaczana jest między innymi przy użyciu algorytmu redukcji wymiarowości oraz eksploracji danych NMF. Dzięki szczególnej własności tego algorytmu otrzymano możliwość kompleksowej analizy informacji pochodzących z wielu trójwymiarowych czujników rozmieszczonych na niezależnych palcach dłoni badanej osoby. Wartość zaproponowanego w pracy współczynnika odzwierciedla zatem szczegółowe osobliwości złożonego ruchu poszczególnych palców i tym samym daje możliwość obiektywnej oceny występujących zaburzeń. Tym samym opracowana metoda umożliwia ilościowe wsparcie dla subiektywnych jakościowych ocen lekarza, co znacząco pomaga w miarodajnej ocenie skuteczności leczenia pacjenta.

W związku z faktami zawartymi w treści rozprawy i dodatkowo przywołanymi w powyższym omówieniu można stwierdzić, że zacytowana na wstępie teza pracy znalazła swoje potwierdzenie.

Oryginalne elementy pracy

Jak się wydaje oryginalnym wkładem autora są:

- Opracowanie nowej, nieinwazyjnej techniki badań pacjentów cierpiących na choroby neurodegeneracyjne, wykorzystującej wielopunktowe, hybrydowe czujniki do analizy złożonych ruchów dłoni;
- Zdefiniowanie nowych współczynników całościowego opisu złożonego ruchu dłoni mających wartość diagnostyczną oraz walidacja ich przydatności;
- Opracowanie oprogramowania badawczego oraz dostosowanie wybranych algorytmów analizy danych do specyfiki analizy wielowymiarowych danych biomedycznych;
- Przygotowanie metody do tego, aby mogła być zastosowana do dowolnego innego zastosowania diagnostycznego, które opiera się na weryfikacji ruchu kończyny.

Sugerowane kierunki dalszych badań

Należy wyraźnie podkreślić, że metoda opracowana w pracy została zweryfikowana na starannie dobranej grupie badawczej, obejmującej osoby z wyraźnym i silnym zaburzeniem motorycznym. Przedmiotem badań powinna więc być ocena skuteczności działania metody w przypadku pacjentów, których symptomy są mniej oczywiste.

Jak wielokrotnie podkreślano, badania zostały przeprowadzone ze szczególną starannością, jednakże liczba przeprowadzonych badań była stosunkowo niewielka, co szczegółowo przedstawiono w pracy. Oczywistym kierunkiem dalszych prac może więc być przeprowadzenie kolejnej serii pilotażowych badań, która powinna obejmować liczniejsze grupy pacjentów, a także prac badawczych obejmujących choroby neurologiczne cechujących się innym rodzajem objawów.

Rozbudowa metody opracowanej w niniejszej pracy mogłaby dotyczyć dopracowania algorytmów weryfikacji stopnia zaawansowania danego objawu dla konkretnej choroby neurologicznej co niewątpliwie pozwoliłoby na otrzymanie bardziej precyzyjnych wyników.

Drugą ścieżką rozwoju opracowanego procesu kompleksowej analizy ruchu mogłoby być wdrożenie go w innej dziedzinie medycyny. Z przeprowadzonych wywiadów wśród lekarzy specjalistów wytypowano zbliżony do omawianego w pracy problem obserwacji zaburzeń ruchu stosowany w reumatologii. Także i w tej dziedzinie proces oceny nasilenia objawu chorobowego na podstawie obiektywnej ilościowej analizy zaburzeń ruchu mógłby znaleźć zastosowanie. Jak się wydaje na podstawie porównania tego problemu medycznego do problemu rozwiązywanego w tej pracy, zarówno zestaw wielopunktowych, trójwymiarowych czujników ruchu jak i opracowana metoda oceny poprawności wykonywanego w serii ćwiczenia manualnego mogłaby stanowić istotne wsparcie lekarza w ocenie zmian reumatologicznych. Podobne rozumowanie skłania do wniosku, że odpowiednia adaptacja opracowanych w tej pracy metod powinna dać narzędzie do badania i oceny postępu w procesie rehabilitacji po urazach sportowych.

Przedstawione powyżej przykładowe zagadnienia powinny wyznaczać kierunek dalszych badań, chociaż badania te zapewne same z siebie ujawnią dalsze problemy wymagające naukowego rozwiązania.

Summary

The main objective of this study was to develop a new, non-invasive technique for examinations of patients suffering from neurodegenerative diseases based on the analysis of complex hand movements. The study demonstrates the following hypothesis: Multi-dimensional analysis of hand movements carried with the use of digital signal analysis techniques and computer data mining methods allows an objective and accurate assessment of complex hand motion disorders. In particular, this may include the evaluation of disorders occurring in neurodegenerative diseases associated with impaired motor functions. The proposed method covers not only the tremor of the entire upper limb, but also a specific neurodegenerative disease of abnormal movements of the hand, especially disorders of independent movements of fingers.

This project presents a comprehensive reasoning, from a critical analysis of methods used so far (which are based mostly on analysis of tremor symptoms), ending with the creation of a new, original process – a comprehensive analysis of hand movement.

The process construction for a comprehensive hands motion analysis covers from the selection of an appropriate hardware platform, to the preparation of software for the multidimensional data analysis, as well as the definition of new coefficients for an overall description of the complex motion.

The result of this study was to construct a new coefficient that allows, in an objective way, the value assessment of features as the complex hands motion, in particular the stability of the rate, the overall stability of the limbs, and the smooth and precision of movement.