

## Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Karoliny Trzyniec

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Karoliny Trzyniec zatytułowana: „*Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do oceny stopnia wyszkolenia operatora wybranych urządzeń stosowanych w rolnictwie precyzyjnym*”. Promotorem rozprawy jest Prof. dr hab. inż. Adam Kowalewski, a przewód zmierza do nadania stopnia naukowego w dyscyplinie naukowej **Informatyka**. Podstawą formalną do sporządzenia tej recenzji było pismo dziekana wydziału EAIiB AGH, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. n. AGH, symbol WEAIiB-b/510-26-3/13, datowane 21.10.2016 r., oparte na uchwale Rady Wydziału z dnia 20.10.2016 r.

Cel i zakres pracy zostały zdefiniowane bardzo precyzyjnie na początku rozprawy (str. 8 i 9) co bardzo pochwalam, bo od razu wiadomo, o co w tej pracy chodzi. Doktorantka napisała:

*Celem badań było zbudowanie neuronowego modelu rozpoznającego moment nabycia przez operatora umiejętności obsługi nowoczesnej nawigacji na pasach równoległych, stosowanej w rolnictwie precyzyjnym.*

Uważam, że ten cel i związana z nim teza, która brzmi:

*Moment osiągnięcia pożądanego stopnia wyszkolenia operatora może być automatycznie rozpoznawany przez odpowiednio dobraną sztuczną sieć neuronową, uczoną na podstawie danych zbieranych podczas obserwacji procesu szkolenia innych operatorów, przy wykorzystaniu kryterium określonego przez ekspertów.*

są wybrane kompetentnie i z dużą znajomością rzeczy. Na tę moją opinię składa się kilka elementów. Po pierwsze problem **szkolenia operatorów** w nowoczesnym rolnictwie, podniesiony i rozważany w rozprawie, jest bez wątpienia problemem bardzo ważnym i aktualnym z punktu widzenia praktyki. Zapatrzeni w osiągnięcia współczesnej teleinformatyki, robotyki, biotechnologii i innych awangardowych działów techniki – nie dostrzegamy i nie doceniamy „rewolucji” jaka za sprawą mechanizacji zaszła także w rolnictwie. A tymczasem wystarczy zajrzeć do rozdziałów 4.3 do 4.6 opiniowanej rozprawy, by uświadomić sobie, jak radykalnie zmieniły się narzędzia, którymi posługują się obecnie osoby pracujące w rolnictwie, w stosunku do tych, jakie były stosowane jeszcze kilkanaście lat temu. Uważam, że wystarczy spojrzeć na rysunek 4.6.1. na stronie 58

rozprawy i porównać go z widokiem kabiny kierowcy ciągnika rolniczego sprzed kilku lat, by uświadomić sobie, jak wielkie zamiany zaszły w tym obszarze i jak wielkim problemem jest obecnie potrzeba **ustawicznego szkolenia** i doskonalenia zawodowego operatorów tego typu maszyn. Dodatkowym uwarunkowaniem, które stawia w tym zakresie wysokie wymagania zarówno szkolącym się jak i szkolonym, jest zmierzanie w gospodarce rolnej w kierunku rolnictwa precyzyjnego, co jest obecnie coraz częściej podejmowanym tematem, mającym swoje przełożenie także do sfery umiejętności operatorów sprzętu rolniczego. Praca Pani Trzyniec w tej ważnej i aktualnej problematyce stanowi znaczący krok, pozwalający ograniczyć czasochłonność, pracochłonność i koszt niezbędnych szkoleń operatorów dzięki stworzeniu modelu, który pozwala stwierdzić (dla każdego operatora oddzielnie!) kiedy jest on już wystarczająco wyszkolony, by można było zaprzestać dalszych treningów, nawet jeśli zostały one pierwotnie zaplanowane.

Wyżej wypowiedziałem mój sąd w sprawie praktycznego znaczenia recenzowanej rozprawy, która może wyznaczać nowy sposób myślenia o problemie szkolenia operatorów w rolnictwie i może proponować kryteria obiektywizacji ocen skuteczności tych szkoleń. Natomiast teraz chcę skupić uwagę na wartości naukowej opiniowanej rozprawy. Moim zdaniem wartość ta opiera się w dużej mierze na fakcie, że praca Pani mgr Trzyniec tym się między innymi wyróżnia, iż przy wspomaganiu decyzji dotyczących szkolenia operatorów odwołuje się do modelu opartego na sieciach neuronowych. Sieci te są narzędziem informatycznym z powodzeniem stosowanym obecnie do różnych celów i generalnie tym się cechują, że wymagane kompetencje nabywają one w wyniku procesu uczenia. To bardzo ważna okoliczność, bo twórca modelu opartego na sieciach neuronowych nie wprowadza przy ich tworzeniu żadnych arbitralnych założeń co do formy i parametrów tworzonego modelu, tylko pozwala, by sieć neuronowa automatycznie (w wyniku uczenia) stworzyła model o adekwatnym do rozwiązywanego problemu kształcie (na przykład liniowy lub nieliniowy) oraz o ustalonych empirycznie parametrach. W przypadku rozważanego w pracy modelu procesu szkolenia operatora sprzętu rolniczego zbudowany przez Panią Trzyniec model neuronowy nabywał wiedzę śledząc proces szkolenia pewnej grupy operatorów (tworzących zbiór uczący) dla których wymaganą decyzję (czy szkolenie można zakończyć, czy należy je nadal kontynuować) podejmował ekspert (człowiek). Wiążąc przebieg szkolenia z ową końcową decyzją sieć neuronowa może nabyć wiedzy o tym, jakie czynniki determinowały taką czy inną decyzję eksperta podczas szkolenia operatorów należących do zbioru uczącego, a następnie tę wiedzę sieć może przenieść na innych operatorów, szkolonych potem, dla których sieć musi zaproponować decyzję typu „kontynuować czy zakończyć”, a decyzja ta podlega niezależnej ocenie eksperta.

Jako specjalista od ponad 20 lat budujący i stosujący sieci neuronowe do różnych celów z przyjemnością stwierdzam, że sieci te są w oceniane pracy bardzo dobrze dostosowane do przeznaczonego im zadania i trafnie użyte.

Dokonom teraz krótkiego przeglądu treści opiniowanej rozprawy z uwypukleniem mojej opinii na temat zalet i wad poszczególnych rozdziałów pracy.

Pracę rozpoczyna typowy **Wstęp**, po którym Doktorantka definiuje **Cel i zakres pracy**. Wyrażałem już wyżej moją zdecydowaną aprobatę dla faktu, że ten cel wskazano tak wcześnie – dzięki temu czytając pracę wiemy cały czas, na co warto zwracać uwagę, co jest ważne i do czego Doktorantka zmierza.

Następny (trzeci) rozdział poświęcony jest omówieniu sieci neuronowych, jako narzędzia, którym Doktorantka zamierza się posłużyć. Rozdział ten napisany jest bardzo profesjonalnie, wskazuje na dużą wiedzę i erudycję Pani Trzyniec, ale nie zawiera elementów oryginalnych w sensie naukowym, więc z punktu widzenia oceny **doktoratu** ma to znaczenie wyłącznie **uzupełniające**, ale miło mi stwierdzić, że w dziedzinie której poświęciłem co najmniej ćwierć stulecia mojej pracy, Doktorantka poczyniła sobie tak swobodnie i tak profesjonalnie. Bardzo ciekawe jest też studium wykorzystania sieci neuronowych w rolnictwie (podrozdział 3.6), z którego dowiedziałem się wielu nowych dla mnie rzeczy.

Z kolei rozdział 4, zatytułowany **Ciągnik rolniczy w systemie rolnictwa precyzyjnego**, opisuje obiekt badań. Wprawdzie badaniem w pracy obiektem nie jest ciągnik jako taki, tylko działanie operatora tego ciągnika, ale dobrze, że czytelnicy rozprawy którzy z nowoczesnym rolnictwem mają małą styczność, dowiedzą się dzięki temu, jak złożone maszyny są w nim obecnie wykorzystywane i jak bardzo złożona stała się obecnie praca operatora takich maszyn, którego dziś zupełnie nie można porównywać z „traktorzystą” z ubiegłego wieku. Wyłoniło to problem szkolenia operatorów takich maszyn, będący głównym wątkiem opiniowanej pracy. Trzeba zdać sobie sprawę, że przy rolnictwie precyzyjnym kierowana przez operatora maszyna musi pokonywać dystanse nawet kilkuset metrów (w terenie, po nierównościach!) przy czym zakres tolerancji odchylenia od zadanego toru jazdy wynosi maksymalnie 100 mm, żeby nie najechać roślin uprawnych w rzędzie. To naprawdę nie jest to samo, co szkolenie kierowców na prawo jazdy!

Poczynając od rozdziału 5 Pani Trzyniec przedstawia przeprowadzone przez siebie badania zmierzające do ustalenia przydatności sieci neuronowych jako modelu rozpoznającego moment nabycia przez operatora umiejętności obsługi nowoczesnej nawigacji na pasach równoległych, stosowanej w rolnictwie precyzyjnym w celu usprawnienia i skrócenia szkolenia tych operatorów.

Najpierw, w rozdziale 5, przedstawiona została metodyka przeprowadzonych badań. Opisano grupę osób (ochotników), którzy uczestniczyli w badaniach jako szkoleni operatorzy, następnie przedstawiono schemat eksperymentu i sposób pozyskiwania wymaganych danych (o umiejętnościach szkolonego operatora). Według mojej oceny Doktorantka zaplanowała i przeprowadziła potrzebne eksperymenty w sposób naprawdę **wzorowy**, pomysłowo rozwiązując różne nasuwające się problemy. Za szczególnie cenny pomysł uważam konwersję **obrazu** trajektorii z systemu GPS do formy danych możliwych do komputerowej analizy za pomocą prostego ale pomysłowego programu, a także cenę bardzo zastosowanie reprezentacji rozważanych trajektorii (zadanej i realizowanej) w postaci kilku (3 lub 4) współczynników wielomianu opisującego błędy popełnione podczas tego przejazdu zamiast 234 par współrzędnych opisujących zadaną i rzeczywistą trajektorię pojazdu. Dzięki takiemu rozwiązaniu można było rozważany problem skutecznie rozwiązać przy pomocy sieci neuronowej o rozsądnych rozmiarach.

Łącząc opisy trajektorii z ocenami ekspertów (trenerów) uzyskano zbiór uczący potrzebny do treningu sieci neuronowej.

Autorka podjęła próbę znalezienia topologii sieci najlepiej odpowiadającej założonym zadaniom. Wybrano sieci MLP oraz RBF i poddano je badaniom.

Wyniki tych badań przedstawiono w rozdziale 6. rozprawy. Analiza przedstawionych tam danych pozwala stwierdzić, że Pani Trzyniec wykonała naprawdę wielką pracę, badając **setki** sieci neuronowych i optymalizując ich parametry (w szczególności liczebność neuronów warstwy ukrytej). Udało się wyłonić sieci o najbardziej stosownej topologii i udało się przeprowadzić jej skuteczne uczenie (przy narzędzi z Neural Network Pattern Recognition Tool z pakietu Neural Network Toolbox w środowisku Matlab. Uzyskane wyniki oceniam jako wysoce zadowalające.

Pracę kończy krótkie, ale porządnie udokumentowane podsumowanie (numerowane jako siódmy rozdział rozprawy), zawierające wnioski. Są one dobrze przedstawione, chociaż trochę „miękkie”, o czym będzie dalej mowa. Natomiast wartościową częścią podsumowania są mądrze zarysowane kierunki dalszych prac.

Podsumowując powyższe omówienie zawartości i najważniejszych osiągnięć rozprawy z przyjemnością stwierdzam, że jej teza została w pełni wykazana, a realizując postawione cele badawcze Doktorantka wykazała się umiejętnością prawidłowego formułowania oraz skutecznego rozwiązywania złożonych problemów naukowych i inżynierskich.

Uważam – co wyrażę jeszcze we wniosku końcowym tej opinii – że oceniana rozprawa doktorska powinna być przyjęta i zaakceptowana.

Do każdej pracy naukowej można także sformułować pewne uwagi polemiczne, więc ja je tutaj także przedstawię. Oczywiście robię to nie po to, by krytykować Autorkę czy kwestionować Jej niewątpliwie wartościowe dokonania – ale po to, by wskazać kierunki dalszego doskonalenia Jej warsztatu naukowego.

Tym, czego mi w opiniowanej pracy trochę brakuje, to pogłębionej analizy statystycznej uzyskanych wyników.

Jest oczywiste, że każde zastąpienie człowieka podejmującego decyzję (tu – trenera szkolącego operatorów) przez zautomatyzowany algorytm jest obarczone określonym ryzykiem błędu. W szczególności dotyczy to rozważanych przez Panią Trzyniec uczących się modeli neuronowych, które mogą zawieść, bo przy ich stosowaniu na podstawie pewnej skończonej liczby doświadczeń (elementów zbioru uczącego) próbuje się sformułować ogólną metodę podejmowania decyzji.

Pani Trzyniec zdawała sobie sprawę z zawodności (w określonym procencie przypadków) zaproponowanej metody opartej na sieciach neuronowych. Z tego powodu w rozdziale 6.3 przytoczyła „surowe” statystyki, pozwalające na pewną ocenę skuteczności działania sieci oraz umożliwiające ocenę rozkładów błędów typu „*false positive*” albo „*false negative*”. Zrobiła to dla błędów uczenia, błędów walidacji i błędów testowania, osobno dla sieci wykorzystującej współczynniki wielomianu o stopniu  $N=2$  i osobno dla sieci wykorzystującej współczynniki wielomianu o stopniu  $N=3$ . Na tej podstawie wyciągnęła wnioski zestawione w rozdziale 7 – i do tych wniosków chciałbym zgłosić krytyczną uwagę.

Pani Trzyniec napisała na przykład:

1. *Sztuczna sieć neuronowa może automatycznie rozpoznawać moment wystarczającego wyszkolenia operatora prowadzącego pojazd według wskazań nawigacji na pasach równoległych*

Moje zastrzeżenie budzi użycie słabego sformułowania „może” (wytłuszczonego przeze mnie w wyżej przytoczonym cytacie). Moim zdaniem możliwe tu było zastosowanie silniejszego wnioskowania i wyciągnięcie bardziej precyzyjnych i mocniejszych naukowo wniosków. Dotyczy to w większym albo mniejszym stopniu wszystkich wniosków zawartych w końcowej części opiniowanej rozprawy.

Doktorantka zetknęła się z faktem, że zaproponowana przez nią metoda (oparta na sieciach neuronowych) czasem dawała lepsze wyniki, a czasem gorsze. To powodowało pewien dyskomfort na etapie wnioskowania. Niemniej warto podkreślić, że podobne sytuacje nagminnie występują w pewnych obszarach nauk empirycznych, co jednak nie przeszkadza w ich naukowym rozwoju. Przykładem może tu być **medycyna**. W medycynie wszelkie wnioski wyprowadza się z ograniczonej liczby obserwacji i zmierza się do sformułowania na tej podstawie ogólnej reguły postępowania. Przyjrzyjmy się, jak to funkcjonuje w medycynie, żeby zasugerować Autorce co mogłaby zrobić w trakcie swoich dalszych prac dotyczących mechanizacji rolnictwa precyzyjnego.

Powiedzmy że lekarz zaobserwuje, że zastosowanie pewnego leku polepsza wynik leczenia pewnej choroby (tak jak Pani Trzyniec zaobserwowała, że pewne cechy szkolonego operatora upoważniają trenera do orzeczenia, iż tego człowieka nie potrzeba już dalej szkolić, bo opanował on już wymaganą umiejętność w stopniu zadowalającym). **Oczywiście nie zawsze lek pomaga w skutecznym leczeniu i nie zawsze sieć neuronowa pomaga w trafnym ustaleniu, że operator już umie to co umieć powinien.** Sformułowanie kategorycznego sądu w formie deterministycznej jest w tej sytuacji oczywiście niemożliwe. Jednak lekarz nie formułuje w piśmie fachowym stwierdzenia, że dany lek **może** pomagać przy danej chorobie – bo byłby wyśmiany. Zamiast tego odwołuje się do wnioskowania statystycznego.

Najczęściej formułuje hipotezę zerową (że ten lek jest bezwartościowy) i za pomocą odpowiednich testów statystycznych usiłuje ją **obalić**. W efekcie wyznacza dokładny **poziom ufności**, przy jakim tę hipotezę można odrzucić – i może opublikować w pełni uzasadniony wniosek naukowy, że ten lek jest skuteczny **z takim i takim poziomem ufności**. Wniosek jest konkretny, ale odbiorca tego wniosku jest **ostrzeżony**, że istnieje ściśle określone prawdopodobieństwo, że ten wniosek może być jednak **nieprawdziwy**. Od decyzji odbiorcy zależy, czy przyjmie ten wniosek, czy uzna poziom ufności za zbyt mały. Ale podejmując decyzję stąpa po twardym gruncie: taki wniosek, takie prawdopodobieństwo, taka decyzja. Tu nie ma miejsca na żadne „może”!

Wracając od tych medycznych analogii (zawsze miłych memu sercu) do tezy rozprawy Pani Trzyniec i do Jej wniosków jeszcze raz powtórzę, że tezę akceptuję, ale uważam, że wnioski są sformułowane zbyt „międko”.

Generalnie jest to jednak jedna z lepszych prac, jakie zdarzyło mi się oceniać, przeto przechodząc do wniosku końcowego stwierdzam, że opiniowana rozprawa **mgr inż. Karoliny Trzyniec** zatytułowana: *„Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do oceny stopnia wyszkolenia operatora wybranych urządzeń stosowanych w rolnictwie precyzyjnym”* **spełnia wymagania odnośnej**

**Ustawy** (ponieważ Doktorantka wybrała stary tryb procedowania Jej stopnia naukowego stosowana jest tu *Ustawa o stopniach naukowych i o tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595*). Praca ta może być przyjęta jako rozprawa doktorska, a moja opinia na temat jej wartości naukowej jest **pozytywna**. Dlatego wnioskuję do Wysokiej Komisji, powołanej decyzją Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH, o przyjęcie tej rozprawy i o dopuszczenie Autorki, mgr inż. Karoliny Trzyniec do jej publicznej obrony.