

mpi. ZD/TT-08.05.2023  
M. Skery

dr hab. Jarosław Bylina  
Instytut Informatyki  
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej  
Pl. M. Curie-Skłodowskiej 5  
20-031 Lublin  
email: jaroslaw.bylina@umcs.pl

Lublin, 22 kwietnia 2023

## Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Wykorzystanie symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Łukasz Sobczak**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Adam Domański, prof PŚ**

Dziedzina: **nauki techniczne**

Dyscyplina: **informatyka techniczna i telekomunikacja**

# 1 Temat i cel rozprawy

Autor postawił sobie za cel przygotowanie środowiska symulacyjnego służącego do ewaluacji algorytmów poruszania się pojazdów bezzałogowych (autonomicznych, robotycznych). Z tym celem głównym wiążą się niemniej ważne cele dodatkowe, mianowicie opracowanie odpowiednich do takiego środowiska metod symulacji i elementów oprogramowania.

Uzasadnienie wyboru tematu nie przedstawia żadnych wątpliwości. Motywowane jest ono bowiem współczesną potrzebą ciągłego rozwoju oraz opracowywania nowych pojazdów autonomicznych, które przejmują coraz więcej funkcji w dzisiejszym świecie.

## 2 Zawartość i charakter rozprawy

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów (oraz krótkiego dodatku). Pierwszy z nich jest krótkim wstępem, w którym zawarte jest wprowadzenie do pracy, a także jej teza, wraz z uzasadnieniem. Rozdział 2 poświęcony jest szerokiemu przeglądowi zagadnień autonomii jazdy, a w szczególności tym najważniejszym, to jest używanym czujnikom oraz algorytmom wykorzystywanym w jeździe autonomicznej. Rozdział 3 to przegląd istniejących narzędzi symulacji tego rodzaju pojazdów — a przy tej okazji także przegląd zagadnień związanych z taką symulacją. Rozdział 4 stanowi szczegółowy opis głównego dokonania pracy, to jest *Wirtualnego Systemu Testującego*. Kolejny rozdział to opis i analiza testów przedmiotowego systemu. Rozdział 6 opisuje docelowe wdrożenie systemu testującego i jego wykorzystanie do wdrożenia systemu sterowania. Ostatni rozdział jest podsumowaniem pracy.

Rozprawa jest więc samodzielnym dziełem, w którym Doktorant opisuje autorskie rozwiązanie konkretnego problemu powołując się także na swoje publikacje w międzynarodowych czasopismach naukowych.

Najważniejsze osiągnięcia Doktoranta przedstawione w rozprawie to:

- autorski projekt wraz z implementacją symulatora pojazdów autonomicznych — uwzględniający w szczególności syntezywanie bogatych danych sensorycznych oraz możliwość zdalnego sterowania pojazdem;
- przetestowanie owego symulatora wraz z analizą wyników testów;
- rzeczywiste zastosowanie powstałego systemu przy opracowywaniu i budowie rzeczywistego pojazdu.

## 3 Teza rozprawy

Teza, którą stawia Doktorant w rozdziale 1 brzmi:

*W celu opracowania systemu autonomicznej jazdy dla bezzałogowej platformy lądowej możliwe jest przygotowanie systemu symulacji pojazdu i jego czujni-*

*ków w sposób pozwalający dokonać weryfikacji i ewaluacji algorytmów autonomii bez dostępu do fizycznego pojazdu.*

Teza jest sformułowana jasno i poprawnie. Odzwierciedla ona dokładnie to, nad czym Autor w rozprawie rzeczywiście pracuje. Teza jest także oryginalna i wykracza poza obecny stan wiedzy.

Rozprawa wykazuje prawdziwość tezy — istotnie, przedstawiony przez Kandydata opis implementacji systemu, użytych metod, a ostatecznie także (czy też przede wszystkim) wdrożenia i przetestowania systemu w kontekście budowy rzeczywistego pojazdu.

Ważnym wnioskiem z całej pracy (którego hipoteza nie jest zawarta wprost w tezie), także wyraźnie potwierdzonym, jest możliwość ograniczenia kosztów projektowania takich pojazdów bez znaczącej rezygnacji z dokładności testów (mimo, że odbywają się one w środowisku wirtualnym).

## **4 Analiza źródeł i zastany stan wiedzy**

Bibliografia recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 124 pozycje — zacytowane w odpowiednim kontekście. Źródła te dobrze przedstawiają bieżący stan wiedzy na tematy poruszane w pracy. W większości są to źródła nowe (ostatnie pochodzą z 2022 roku), co całkowicie naturalne (i pożądane) w tego rodzaju tematyce, ale Autor nie stroni też od cytowania kilku starszych (bardziej klasycznych) publikacji (z lat 80. i 90. poprzedniego wieku), co pozwala osadzić pracę w całości dorobku naukowego dyscypliny oraz dyscyplin pokrewnych i pokazuje, że zainteresowanie autonomicznymi pojazdami nie jest nowe, ale i nie słabnie.

Wyczerpującym przedstawieniem stanu wiedzy i technologii zastanej jest rozdział 2, w którym większość z pozycji bibliografii całej pracy jest wymieniona i opisana pod kątem tematyki rozprawy. Autor rysuje w nim zarówno tło naukowo-historyczne (sekcja 2.1), jak i omawia z punktu widzenia naukowo-technicznego elementy składające się na pracę pojazdu autonomicznego (sensory w sekcji 2.2 oraz algorytmy w sekcji 2.3).

Także rozdział 3, który jest przeglądem narzędzi związanych z symulacją autonomicznych pojazdów, zawiera znaczące odnośniki do literatury przedmiotu.

Dodatkowo, rozdziały 4 oraz 5 — będące naukowym rdzeniem pracy — przywołują publikacje autorstwa Doktoranta, na których owe rozdziały się opierały.

## **5 Znaczenie wyników**

Kandydat w swej rozprawie zajmuje się budową i wdrożeniem autorskiego *Wirtualnego Systemu Testującego*.

Sam pomysł — testowania nowych rozwiązań w środowisku sztucznym/wirtualnym — nie jest oczywiście niczym nowym. Autor mówi o tym zresztą wyraźnie sam przede wszystkim w podrozdziale 3.1 stanowiącym przegląd istniejących rozwiązań. W rozprawie przedstawiony jest jednak całkiem nowy system symulacji. Dysponuje on takimi ogólnymi możliwościami, jak spodziewane po tego rodzaju symulatorze, mianowicie:

- tworzenie sztucznego (wirtualnego) środowiska do celów testowych — wraz z ustaleniem jego różnorodnych parametrów fizycznych;
- budowanie wirtualnego pojazdu/roboty (także z uwzględnieniem jego różnych cech fizycznych) i umieszczanie go w tymże środowisku;
- symulacje działania odpowiednich sensorów badanego pojazdu w wirtualnym środowisku;
- wizualizacja różnych aspektów symulacji;
- zbieranie i eksportowanie danych uzyskanych z symulacji.

Jednakże, powstały w ramach rozprawy *Wirtualny System Testujący* odznacza się pewnymi cechami, które stanowią o jego wyróżniającej się użyteczności:

- swobodne budowanie oraz importowanie elementów i parametrów świata testowego, za pomocą różnych metod i w różnych formatach danych — nieograniczone jedynie do wybranych rodzajów (typu: pomieszczenia, środowisko miejskie itd.);
- swobodne tworzenie testowanych pojazdów (ze względu na ich budowę, wielkość, napęd, dynamikę ruchu i inne parametry oraz właściwości);
- szeroki wybór modeli czujników wraz z ich realistycznym zachowaniem (uwzględniającym błędy, szumy, zakłócenia i zniekształcenia dostarczanych przez nie danych; na uwagę zasługuje autorska implementacja symulacji efektu *rolling shutter* w lidarze);
- realistyczna symulacja fizyki ruchu i środowiska (grawitacja, kolizje, tarcie, opory, drgania, siły działające na pojazd i jego elementy itp.);
- zgodność generowanych danych z istniejącymi rozwiązaniami w fizycznych pojazdach;
- realizm wizualizacji — w tym oświetlenia, dzięki czemu możliwa jest symulacja cyklu dobowego w wirtualnym świecie.

Nie są to elementy niespotykane w innych systemach, ale tutaj Autor postarał się je wszystkie zebrać i zaimplementować tak, by ze sobą płynnie i ściśle współdziałały — czego dowodzą rozdziały 5 i 6.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wspomniana już wyżej implementacja wirtualnych sensorów. Doktorant dostarcza w swoim systemie szerokiego zestawu gotowych rodzajów czujników, które można dodatkowo parametryzować — tak, by zamodelować niemalże dowolne urządzenie rzeczywiste. Te rodzaje to:

- sensory inercyjne (IMU);
- sensory odometryczne;
- skanery laserowe (typu lidar);

- kamery — tradycyjne, stereowizyjne, głębi — a także segmentujące (które nie realizują bezpośredniej symulacji fizycznych czujników, ale łączą rolę kamery tradycyjnej z segmentacją, dokonywaną w rzeczywistości przez moduł software’owy pojazdu);
- systemy nawigacji satelitarnej;
- ultradźwiękowe czujniki odległości.

W końcu, ważnym elementem autorskim pracy jest opisana w sekcji 4.5 własna implementacja interfejsu komunikacyjnego (*UDP Bridge*), która — jak wynika z przeprowadzonych przez Kandydata testów (sekcja 5.5) — jest bardzo wydajna w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami konkurencyjnymi.

## 6 Redakcja rozprawy i prezentacja wyników

Struktura pracy jest uporządkowana i przejrzysta. Podział na poszczególne rozdziały jest logiczny. Wyraźnie zaznaczone są dokonania autorskie Doktoranta (wraz z wymienionymi pod koniec rozdziałów 4 i 5 własnymi publikacjami naukowymi dotyczącymi tematów poruszanych w tychże rozdziałach).

Pracę dobrze się czyta — napisana jest starannie zarówno pod względem językowym, jak i typograficznym. Można, co prawda, znaleźć bardzo drobne błędy (o których niżej), ale nie jest to coś, co umniejszałoby znaczenie pracy. Szczególnie podkreślić należy dobór odpowiedniego narzędzia do składu ( $\LaTeX$ ). Bez większych zarzutów należy też odnieść się do wyglądu, opisu i czytelności ilustracji, wykresów oraz tabel, których duża liczba ułatwia czytanie i zrozumienie rozprawy. Także interpretacja wykresów zawarta w pracy jest poprawna.

## 7 Słabe strony i uwagi krytyczne

Praca ma bardzo niewiele elementów, do których można mieć wyraźne uwagi krytyczne.

- Pewien niedosyt pozostawia sekcja 3.1 (*Przegląd systemów symulacji*). Wskazane byłoby dokładniejsze przedstawienie istniejących systemów, a później w pracy odwołanie się do tych opisów przez wyraźne pokazanie/wypunktowanie różnic (a przede wszystkim zalet) systemu autorskiego w stosunku do istniejących rozwiązań konkurencyjnych.
- Do pełnego zrozumienia i docenienia pracy Doktoranta brakuje w tekście rozprawy wskazania repozytorium z pełnym kodem źródłowym, co jest już pewnym standardem w nauce (ze względu na konieczność powtarzalności doświadczeń). Z drugiej strony, być może zamknięcie kodu wynika z tego, że Kandydat nie ma pełnych praw publikowania swojego dzieła (ze względu na to, że jest to doktorat wdrożeniowy). Może jednak choć pewne fragmenty mogłyby ujrzeć światło dzienne?

- Bardzo drobnymi problemami są nieliczne błędy interpunkcyjne/typograficzne (jak brakujący przecinek, użycie łącznika w miejsce pauzy), czy zapis odmiany obcych słów (*Hall-a*, *LiDAR-u* w miejsce poprawnej *Halla*, *LiDARu/Lidaru*) oraz niekonsekwencja w zapisie ułamków dziesiętnych (znajdujemy zarówno zapis 1,5 jak i 0.25).
- Ogólną dobrą jakością i czytelnością wykresów i diagramów z rzadka zaburza dobór rozmiaru czcionek (zbyt małego), a także angielskie napisy na rysunkach 2.5, 5.3, 5.5.

Powyższe uwagi krytyczne nie wpływają na merytoryczną wartość pracy w żaden sposób, a są jedynie uchybieniami zrozumiałymi przy tego rodzaju i wielkości pracy, a także subiektywnym zdaniem recenzenta.

## 8 Podsumowanie i wniosek końcowy

Po analizie rozprawy Doktoranta, mogę stwierdzić, że jest ona przygotowana rzetelnie i wnosi znaczący wkład w dyscyplinę *informatyka techniczna i telekomunikacja*. Potwierdza ona też zdolność Kandydata do prowadzenia dalszej pracy naukowej samodzielnie.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa pt. „Wykorzystanie symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych” spełnia warunki określone w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. W związku z tym, wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Łukasza Sobczaka do publicznej obrony i dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Jarosław Bylina

