

*mpi. RD ITT-08.05.2023
M. Skowron*

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 ustalaniem 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, zaburzenie 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 jakość i czytelność 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

