

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ  
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Tytuł rozprawy: **Lokalizacja robota mobilnego względem automatycznie wybieranych obiektów**

Autor rozprawy: **mgr inż. Ireneusz Hallmann**

### **1. Obszar problemowy rozprawy**

Przedmiotem rozprawy są metody automatycznej lokalizacji położenia i orientacji kamery przemieszczonej w płaszczyźnie poziomej, w otoczeniu, w którym umieszczono prosty, pasywny znak orientacyjny (landmark) o znanych charakterystykach (kształt, barwa, wymiary liniowe). Praca zawiera rozważania nad identyfikacją takiego znaku oraz nad wyznaczaniem pozycji (współrzędnych położenia i orientacji) kamery na podstawie obrazu zarejestrowanego przez nią. Istotną część rozprawy stanowią rozważania nad sposobami kalibracji kamery. Skalibrowana kamera umożliwia określanie wymiarów liniowych obiektów pojawiających się w jej polu widzenia. W szczególności rozważany jest problem korekcji zniekształceń obrazu wprowadzanych przez kamerę. Następnie wyprowadzono proste zależności trygonometryczne wiążące dane uzyskiwane z obrazu z parametrami wyznaczającymi chwilowe położenie i orientację kamery w płaszczyźnie jej ruchu. Zależności te odnoszą się do poszczególnych tzw. obszarów dobrej widoczności w otoczeniu znaku orientacyjnego. Obszary te pokrywają powierzchnię roboczą przed znakiem i gwarantują uzyskiwanie informacji z ograniczonym błędem metody. Warto podkreślić, że pojedyncza kamera jest tu zasadniczym elementem systemu nawigacyjnego mobilnego robota kołowego poruszającego się po płaszczyźnie (poziomej).

### **2. Ogólna ocena wyników**

Autor przeprowadził analizę teoretyczną i doświadczalną problemu detekcji znaku na obrazie, sformułował szczególne zadanie kalibracji kamery, przeprowadził rozważania nad wyborem użytecznych charakterystyk znaku orientacyjnego oraz wyprowadził zależności, wg których przeliczane są dane uzyskiwane bezpośrednio z zarejestrowanego obrazu na wielkości fizyczne charakteryzujące pozycję kamery. Analiza ta obejmuje wyznaczenie funkcji wrażliwości uzyskanych wyrażeń, co umożliwia ocenę wpływu błędów pomiarowych systematycznych i losowych na dokładność wyników. Obok wyprowadzeń wzorów stanowiących rozwiązanie podstawowego zadania rozprawy, autor przeprowadził szereg eksperymentów weryfikujących praktycznie elementy zaproponowanej metody samolokalizacji kamery (robota), co pozwala ocenić jej skuteczność i granice jej zastosowań.

Centralne miejsce w rozprawie zajmuje wyprowadzenie dwóch metod samolokalizacji, wykorzystujących elementarne zależności trygonometryczne pomiędzy położeniem wyekstrahowanych cech na obrazie, a parametrami charakteryzującymi współrzędne środka kamery i jej orientację w układzie odniesienia związanym ze sceną działań. Chodzi tu o:

- metodę opartą o pojedynczy pomiar odległości od znaku orientacyjnego,
- metodę opartą o pomiar dwóch odległości od znaku.

Zasadnicze znaczenie ma przyjęcie silnego założenia o znanych *a priori* charakterystykach znaku takich jak rodzaj kształtu (prostokątny), barwa pola wypełniającego, czy jego szerokość. Założenia te istotnie ograniczają praktyczną przydatność zaproponowanych metod. Z drugiej strony, zaletą zaproponowanego podejścia jest jego niezależność od znajomości trudno dostępnych tzw. wewnętrznych (*intrinsic*) parametrów kamery. Obie zaproponowane metody są wzajemnie komplementarne w tym sensie, że gwarantują prawie pełne pokrycie obszaru nawigacji w otoczeniu znaku grawitacyjnego, przy jednoczesnym zagwarantowaniu ograniczenia względnego błędu samolokalizacji do założonego przedziału wartości.

Istotnym elementem rozprawy jest staranna analiza właściwości statystycznych błędów zaproponowanych metod przeprowadzona na podstawie statystycznie znaczącej liczby powtórzeń pomiaru w wybranych punktach na płaszczyźnie nawigacji. Punkty te dobrano celowo, w taki sposób, aby możliwa była ocena wpływu wzajemnego położenia kamery i znaku na rozkład błędów mamy więc do czynienia z zaplanowanym eksperymentem. W wyniku analizy wrażliwości metody i badań statystyk błędów, płaszczyznę nawigacji podzielono na „obszary dobrej widoczności znaku”. Określenie „dobra widoczność” odnosi się do właściwości ciągłych zależności funkcyjnych wiążących współrzędne obrazowe i współrzędne rzeczywiste. Podział przestrzeni nawigacji jest w przypadku każdej z dwóch zaproponowanych metod istotnie różny, ale w sumie dobrze pokrywa obszar w otoczeniu znaku nawigacyjnego, którego rozległość jest istotna z punktu widzenia praktycznego zastosowania metody.

Teza rozprawy jest sformułowana dość ostrożnie i zakłada jedynie możliwość wykorzystania do lokalizacji obserwatora (kamery, robota mobilnego z kamerą pokładową) danych dostarczonych przez pojedynczą kamerę, odnoszących się do pojedynczego (szczególnego rodzaju) znaku nawigacyjnego. Dodatkowo dopuszcza się rotację kamery względem unoszącej ją platformy (bez sprecyzowania osi rotacji).

Uzyskana przez autora analityczna postać transformacji współrzędnych obrazowych we współrzędne sceny umożliwia w przypadku obu metod wyprowadzenie wyrażeń na współczynniki funkcji wrażliwości na wnoszące błędy metody, realistycznie określone, czynniki eksperymentu rejestracji obrazu. Wyznaczone pochodne cząstkowe 1-go rzędu dobrze charakteryzują wrażliwość z uwagi na ciągłość w/w transformat jednak są dość złożone.

Dużą zaletą rozprawy jest skonfrontowanie wyników obliczeń wrażliwości teoretycznej z wynikami badań statystycznych (pomiarów będących elementami zaproponowanych metod) w kontekście zadania samolokalizacji robota kołowego wyposażonego w system odometryczny. Test ten, tzw. UMB Benchmark, przeprowadzono wg standardowej metodologii, szeroko stosowanej do oceny jakości zewnętrznych systemów sensorycznych kołowych robotów mobilnych. Niestety, przedstawione wyniki eksperymentu nie potwierdziły w pełni oczekiwanych zalet zaproponowanej metody samolokalizacji. We wnioskach rozprawy brakuje wnikliwej analizy ewentualnych przyczyn uzyskanego rezultatu eksperymentu.

### 3. Uwagi szczegółowe.

W dalszej części recenzji odniosę się systematycznie do treści kolejnych rozdziałów rozprawy, jednocześnie zwracając uwagę na dostrzeżone usterki i błędy.

Rozdział pierwszy określa cel pracy, zawiera tezę rozprawy i ogólną charakterystykę zaproponowanej w dalszej części metody lokalizacji kamery. Wymienione cele, których osiągnięcie ma świadczyć o prawdziwości tezy, moim zdaniem nie wszystkie są konieczne lub zostały sformułowane nadmiernie ogólnie. W szczególności: przesłanki wyboru prostokątnego kształtu znaku orientacyjnego nie są ostre (wybór jest w istocie arbitralny), kwalifikacja obiektów i wybór ich cech ze względu na kryterium ich użyteczności w systemach automatycznej identyfikacji została

