

# Rozszerzone streszczenie rozprawy doktorskiej „Algorytmizacja ruchu robotów mobilnych z ograniczeniami stanu i wejść sterujących w kontekście metodyki VFO”

Tomasz Gawron

2019

W rozprawie zaprezentowano wyniki teoretyczne, symulacyjne oraz eksperymentalne dotyczące nowych metod algorytmizacji (tj. planowania i realizacji) ruchu wybranych kołowych robotów mobilnych. Metody te pozwalają na realizację zadań ruchu spotykanych w zastosowaniach takich jak systemy wspomagania kierowców, pojazdy autonomiczne, czy też realistyczni agenci w symulacjach komputerowych. Pomimo bardzo dynamicznego rozwoju robotyki mobilnej w ostatnich latach i wielu nowych wyników osiągniętych dzięki współbieżnym jednostkom obliczeniowym oraz uczeniu maszynowemu, algorytmizacja ruchu robotów mobilnych pozostaje trudnym i ważkim problemem. Od nowoczesnych metod algorytmizacji ruchu wymaga się odporności na nienominalne warunki ruchu powstałe w wyniku zakłóceń zewnętrznych i niedokładności urządzeń pomiarowych, wysokiej wydajności obliczeniowej oraz możliwości zastosowania w środowiskach ruchu o zróżnicowanej strukturze.

Aby sprostać tym wymaganiom, w metodach proponowanych w rozprawie wykorzystano techniki planowania ruchu oraz algorytmy sterowania w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. Jest to podejście odmienne od tego stosowanego zazwyczaj w literaturze, gdzie zakładana jest realizacja zaplanowanego manewru w pętli otwartej (tj. bez sterowania ze sprzężeniem zwrotnym od stanu robota), co sprawia że wynikowe rozwiązanie nie jest odporne na zakłócenia i niepewności pomiarowe obecne w warunkach rzeczywistych. Warto także zwrócić uwagę, że proponowane w tej rozprawie podejście zakłada wy-

korzystanie wiedzy o procesie realizacji ruchu już podczas planowania manewru, co jest również odmienne od klasycznych metod planowania. To, że techniki sterowania i planowania ruchu są ze sobą łączone już na etapie projektowania zaowocowało nowymi algorytmami planowania, których działanie jest motywowane sterowaniem.

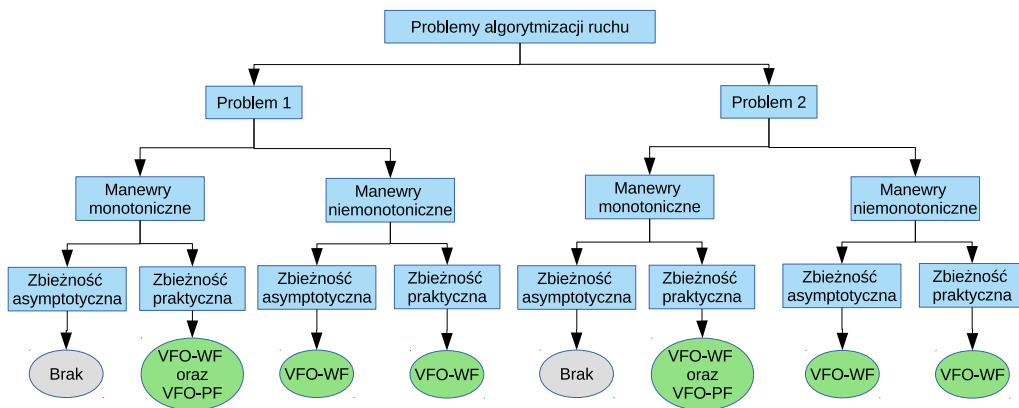
Naturalną konsekwencją wspomnianego podejścia jest fakt, że opracowane metody algorytmizacji są dedykowane dla systemów dynamicznych o pewnej wybranej formie z ograniczeniami stanu i wejść sterujących, które również zdefiniowano w szczególny sposób. Wiedza o realizacji ruchu na etapie planowania skutkuje jednak nie tylko utratą ogólności rozwiązania, lecz także podniesieniem jego skuteczności. Proponowane w rozprawie metody algorytmizacji opracowano dla generycznego modelu kinematycznego w postaci monocykla z dodatkowo narzuconym ograniczeniem krzywizny ruchu. Założono także jednocześnie występowanie ograniczonych amplitud sygnałów sterujących, ograniczenia monotoniczności ruchu (tożsamego z wymuszonym znakiem prędkości postępowej robota) oraz ograniczenia stanu wynikające z obecności przeszkód w ograniczonym środowisku ruchu robota. Następnie wykorzystano fakt, że wspomniany generyczny model zawiera w sobie kluczowe ograniczenia stanowiące o trudności problemu algorytmizacji ruchu i rozszerzono wprowadzone metody, aby zapewnić algorytmizację ruchu samochodu kinematycznego z ograniczonymi sygnałami sterującymi i ograniczonym kątem skręcenia koła skrętnego.

Informacje na temat procesu realizacji ruchu i odporności metod algorytmizacji na nienominalne warunki ruchu reprezentowane są poprzez dodatnio niezmiennicze podzbiory przestrzeni konfiguracyjnej nazywane tunelami zbieżności. Gwarantuje się, że zaplanowany manewr zostanie wykonany prawidłowo (tj. bez naruszenia zdefiniowanych w problemie ograniczeń) dla wszystkich konfiguracji początkowych zawartych w tunelu zbieżności. Zostały one wyznaczone dla układu zamkniętego z prawem sterowania VFO (z ang. *Vector Field Orientation*) stosowanym w proponowanych metodach algorytmizacji ruchu. Informacje o tunelach zbieżności pozwalają na takie planowanie manewrów, aby ich realizacja z wykorzystaniem sterownika VFO była odpowiednio odporna na nienominalne warunki ruchu.

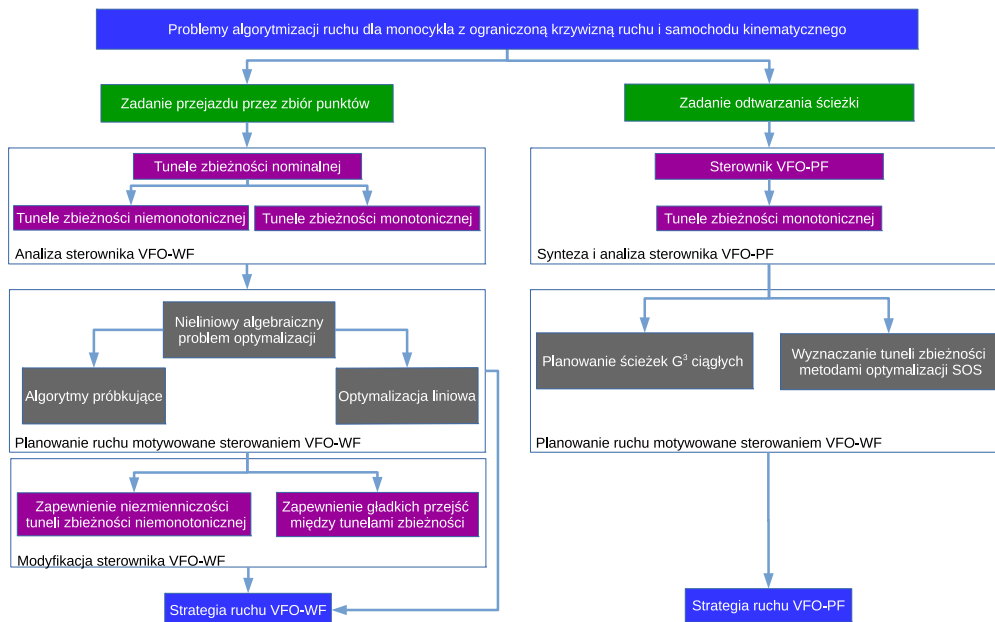
Podczas projektowania proponowanych algorytmów planowania i sterowania wykorzystano również szereg korzystnych własności układu zamkniętego z prawem sterowania VFO, które pozwalają na weryfikację spełnienia ograniczeń w ciągłej dziedzinie czasu i w ciągłej dziedzinie konfiguracji robota. Na potrzeby proponowanych metod algorytmizacji, dokonano także mody-

fikacji w klasycznych prawach sterowania VFO. Modyfikacje te zapewniają spełnienie wspomnianych ograniczeń stanu i sygnałów sterujących podczas procesu sterowania. Zmodyfikowane prawa sterowania VFO współpracujące z dedykowanymi (motywowanymi procesem sterowania) algorytmami planowania składają się na metody algorytmizacji ruchu, które odporne są na występowanie nienominalnych warunków ruchu dzięki wyznaczonym dodatnio niezmienniczym tunelom zbieżności.

Rozpatrzony w rozprawie problem algorytmizacji ruchu polega opracowaniu strategii sterowania ze sprzężeniem zwrotnym gwarantującej przeprowadzenie robota z każdej konfiguracji w tunelu zbieżności do zadanej konfiguracji końcowej. Rozwiązano go wykorzystując dwa pomocnicze zadania ruchu: przejazd przez zbiór punktów i odtwarzanie ścieżki. Zgodnie z rys. 1, dla każdego z tych zadań ruchu zaproponowano różne opisy tuneli zbieżności, różne metody planowania i różne algorytmy sterowania (utrzymane w ramach metodyki VFO). W związku z tym w rozprawie pokazano wiele metod algorytmizacji rozwiązujących różne warianty ogólnego problemu algorytmizacji, które zilustrowano na rys. 2. Wybór odpowiedniej metody algorytmizacji zależy od warunków zastosowania. Na przykład, metody algorytmizacji wykorzystujące zadanie odtwarzania ścieżki charakteryzują się bardziej gładkimi sygnałami sterującymi, lecz gwarantują jedynie praktyczną zbieżność do konfiguracji końcowej ze względu na skończony horyzont czasowy procesu sterowania. Czyni je to dobrze dostosowanymi do zadań takich jak śledzenie pasa ruchu, patrolowanie środowiska poprzez odtwarzanie ścieżki opisanej krzywą zamkniętą, czy zgrubne parkowanie pojazdem, w którym zainteresowani jesteśmy tylko zbieżnością do pewnego zbioru określającego miejsce parkingowe w środowisku. Jeśli planowana jest realizacja manewrów takich jak podłączenie robota mobilnego do gniazda ładującego, gdzie końcowa precyzja manewrów i asymptotyczna zbieżność do konfiguracji zadanej są kluczowe dla prawidłowego wykonania misji robota, to istotna staje się zbieżność asymptotyczna gwarantowana w przypadku przejazdu przez zbiór punktów. Ważny jest również kompromis między prostotą wyznaczenia tunelu zbieżności, a jego konserwatywnością i gwarancjami w nim utrzymanymi.



Rysunek 2: Proponowane rozwiązania poszczególnych wariantów problemów algorytmizacji. VFO-WF oznacza metody algorytmizacji wykorzystujące zadanie przejazdu przez zbiór punktów, a VFO-PF metody algorytmizacji wykorzystujące zadanie odtwarzania ścieżki nieparametryzowanej.

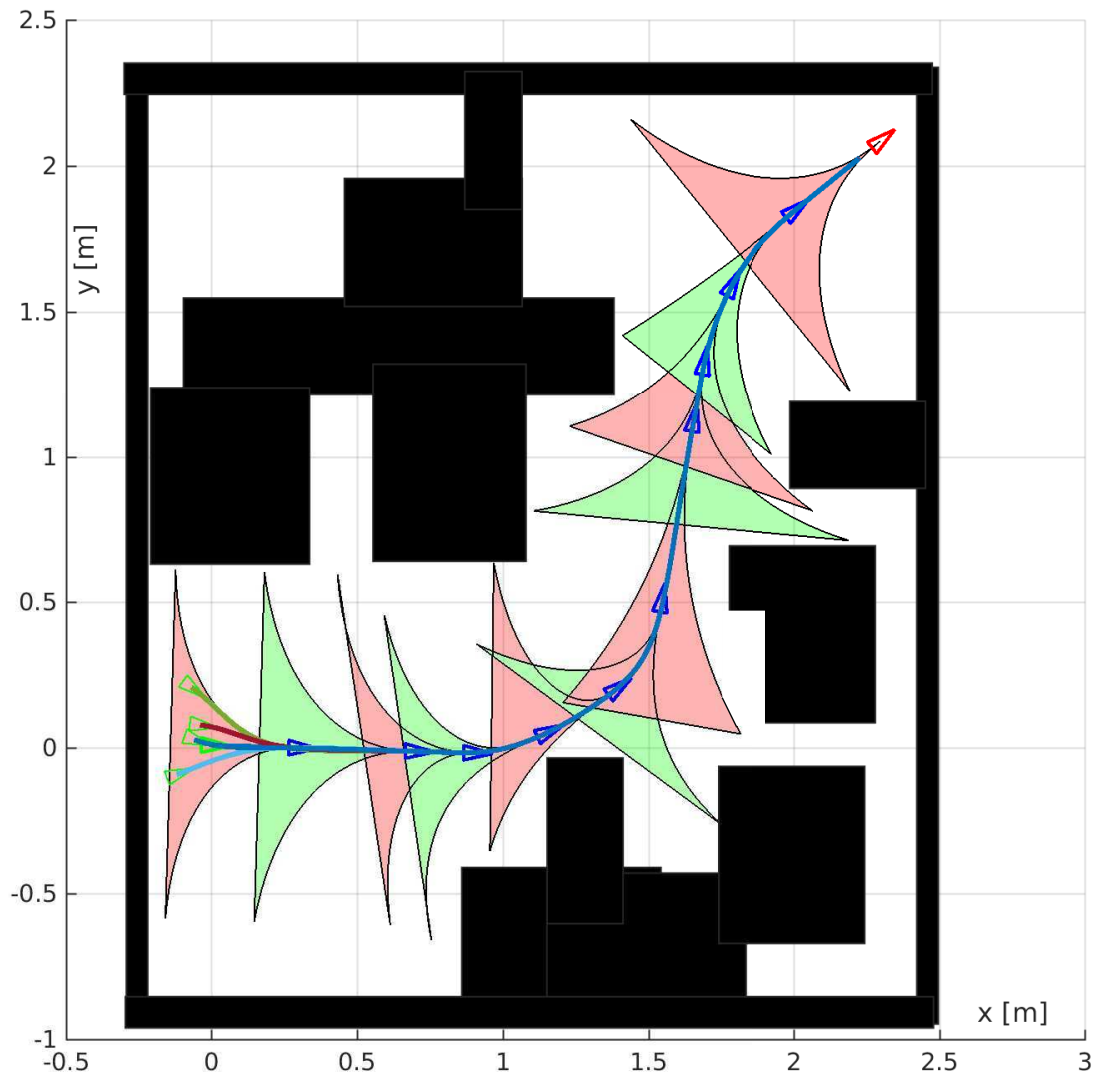


Rysunek 1: Schemat ideowy prezentujący opracowane metody algorytmizacji ruchu oraz wynikającą z nich strukturę rozprawy.

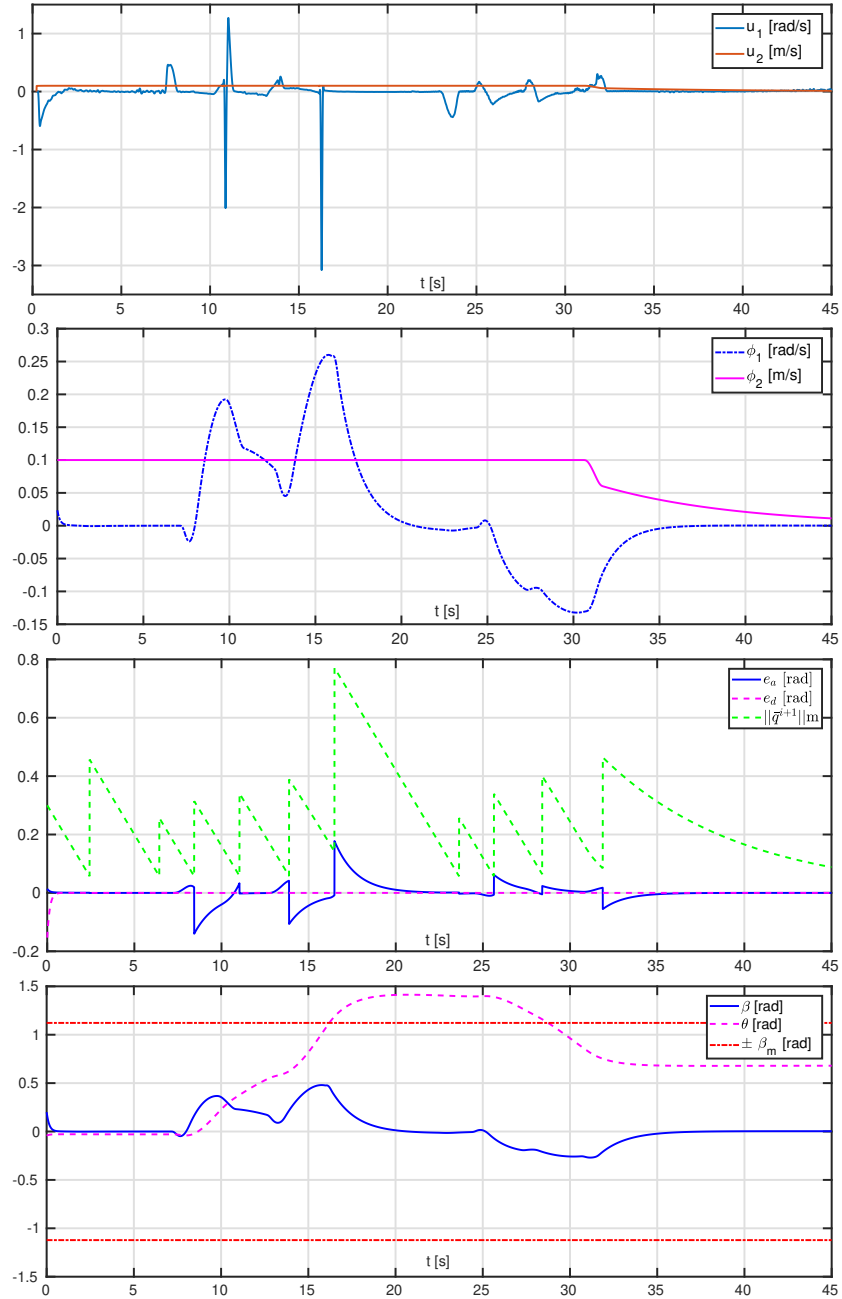
Tablica 1: Średnie czasy planowania dla 20 uruchomień proponowanego zrównoleglonego algorytmu planowania punktów przejazdowych w wybranych scenariuszach.

Scenariusz	$\text{card}(\mathcal{V})$	Czas planowania [ms]	Przeszukiwanie [ms]
SC1	10000 (100000)	18 (83)	16 (61)
SC3	10000 (100000)	26 (90)	23 (78)
SC4	10000 (100000)	35 (150)	31 (127)

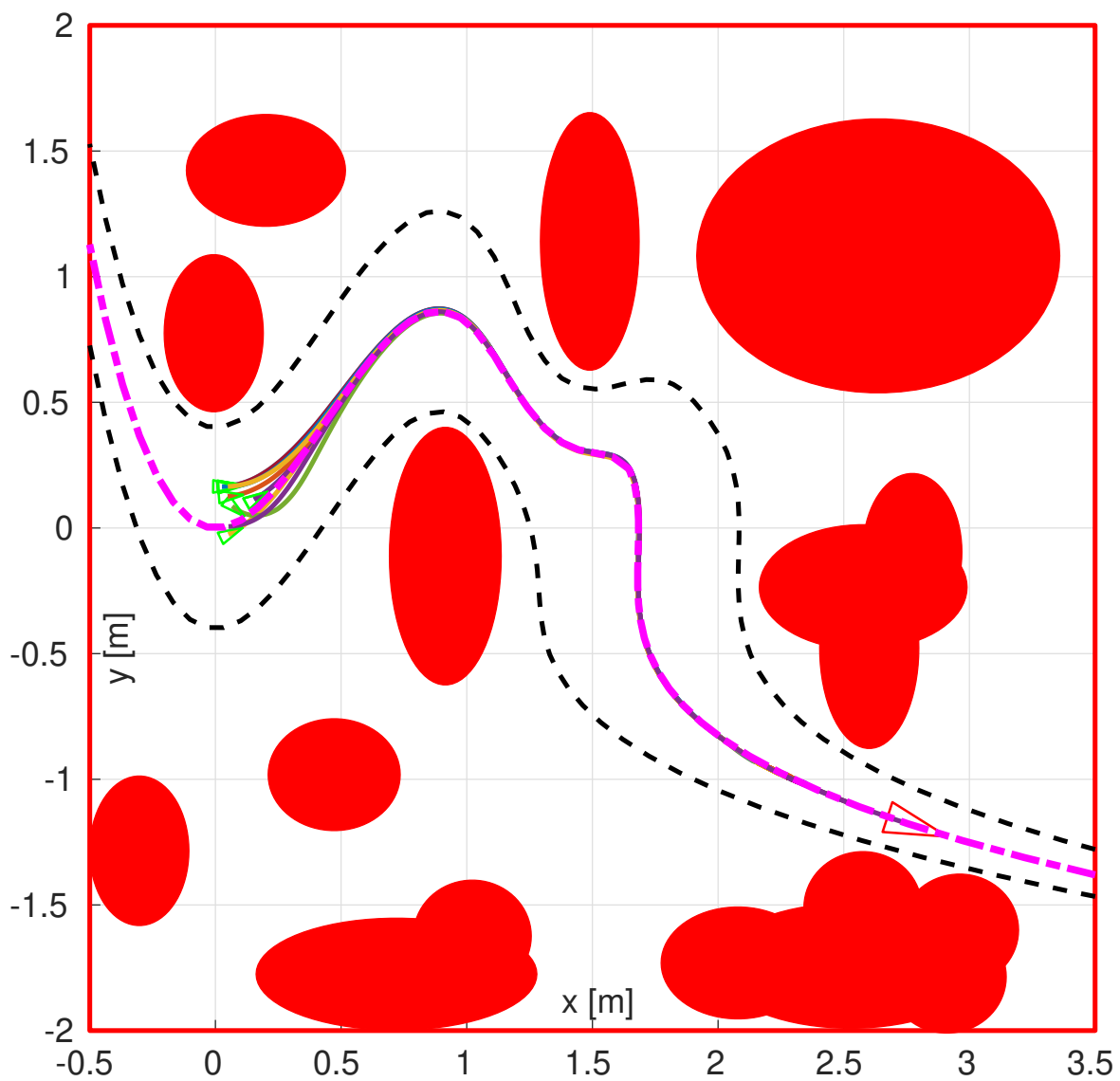
Efektywność proponowanych metod algorytmizacji została zilustrowana wynikami badań symulacyjnych oraz wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi na laboratoryjnym robocie mobilnym MTracker. Niski koszt obliczeniowy tych metod algorytmizacji ruchu został potwierdzony wynikami symulacji, podczas których porównano proponowane metody z podejściami znanymi z literatury. Wspomniany niski koszt obliczeniowy zaobserwować można analizując wyniki badań symulacyjnych zebrane w tab. 1. Średnie czasy planowania dla jednego z algorytmów proponowanych w rozprawie są na tyle niskie, że z powodzeniem można replanować manewry na bieżąco przy niskiej, właściwej dla manewrów parkowania, prędkości postępowej pojazdu. Na rys. 3 i rys. 4 pokazano wyniki jednego z eksperymentów dla algorytmizacji ruchu z wykorzystaniem przejazdu przez zbiór punktów. Na tunel zbieżności składa się tutaj sekwencja tub zbieżności (oznaczone naprzemiennie kolorem czerwonym i zielonym) przywiązanych do poszczególnych punktów przejazdowych. Ścieżki kreślone przez robota podczas eksperymentów pokazują, że realizacja ruchu była bezkolizyjna (przeszkody oznaczono na czarno) i robot osiągał konfigurację końcową (oznaczoną na czerwono). Przebiegi z rys. 4 ilustrują natomiast spełnienie ograniczeń sygnałów sterujących i kąta skrętu koła skrętnego samochodu kinematycznego. Z kolei na rys. 5 i rys. 6 przedstawiono wyniki eksperymentu dla algorytmizacji ruchu z odtwarzaniem ścieżki. Przeszkody oznaczono na czerwono, ścieżkę referencyjną oznaczono przerywaną różową linią, a czarne linie przerywane to granice tunelu zbieżności w przestrzeni pozycji. Warto tutaj zwrócić uwagę na to, że tunel zbieżności nie jest w tym przypadku podzielony na tuby i jest symetryczny, co czyni jego rozmiar (w sensie objętości w przestrzeni konfiguracyjnej) bardziej konserwatywnym. Znany jest za to dokładnie ruch robota w warunkach nominalnych, który tożsamy jest ze ścieżką referencyjną. Tak dokładna wiedza o ruchu w warunkach nominalnych nie jest dostępna w przypadku stosowania zadania przejazdu przez zbiór punktów.



Rysunek 3: Wyniki planowania i realizacji scenariusza SC7.

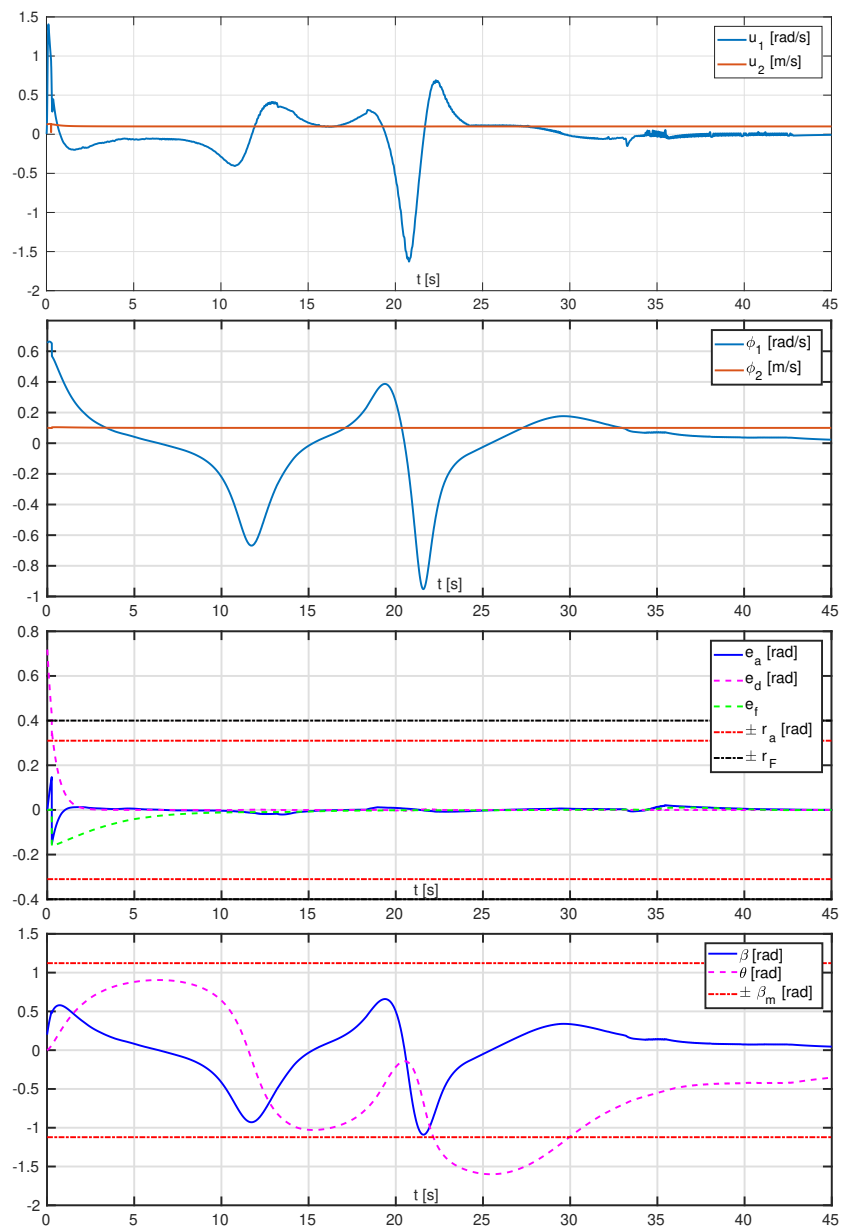


Rysunek 4: Przebiegi sygnałów sterujących, kąta skrętu  $\beta$  i uchybów dla scenariusza SC7.



Rysunek 5: Wyniki planowania i realizacji scenariusza SD3.





Rysunek 6: Przebiegi sygnałów sterujących, kąta skreću  $\beta$  i błędów dla scenariusza SD3.