
Cooperative distributed navigation for wheeled mobile robots using the Vector Field Orientation approach under time constraints

PhD dissertation

Rafał Mateusz SOBAŃSKI

Abstract

This doctoral dissertation is focused on the development of control algorithms within the *Vector Field Orientation* (VFO) methodology for nonholonomic mobile robots and distributed multi-vehicle systems composed of nonholonomic vehicles, which simultaneously take into account task execution time constraints and control input constraints.

This work uses the concept of *fixed-time stability*, which guarantees that the system's errors will converge to zero within a fixed time, which is upper-bounded by a certain constant value. Furthermore, the value of this upper bound is independent of a particular initial condition and holds for all initial conditions belonging to a certain set of admissible initial conditions. In this dissertation, due to the simultaneous consideration of time constraints and control input constraints, the use of a 'local' estimation of this upper bound is proposed.

The control algorithms developed are dedicated to unicycle-like mobile robots and were designed based on a two-stage control design approach, which means that a *nominal* control law is first designed, which does not guarantee satisfaction of the imposed constraints on the control inputs, and then a scaling procedure is performed to rescale the control signal values in order to satisfy the constraints.

This dissertation presents control laws for two control problems defined for a nonholonomic mobile robot, namely the set-point stabilization problem and the path-following problem with a nonparametrized reference path. Furthermore, two control algorithms for a nonholonomic multi-vehicle system are proposed, which address the problem of distributed formation control. The stability of the proposed algorithms has been formally proven, and the performance was verified by numerical simulations and experimental tests using physical mobile robots.

***Kooperatywna rozproszona nawigacja
dla kołowych robotów mobilnych z wykorzystaniem
metodyki orientowania pól wektorowych (VFO)
w obecności ograniczeń czasowych***

Rozprawa doktorska
Rafał Mateusz SOBAŃSKI

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska poświęcona jest opracowaniu algorytmów sterowania w ramach metodyki orientowania pól wektorowych (VFO, ang. *Vector Field Orientation*) dla nieholonomicznych robotów mobilnych oraz rozproszonych systemów wielopojazdowych złożonych z pojazdów nieholonomicznych, które jednocześnie uwzględniają ograniczenia czasu wykonania zadania oraz ograniczenia wejść sterujących.

W pracy wykorzystano koncept stabilności w czasie ustalonym (ang. *fixed-time stability*), który zakłada, że zbieżność błędów systemu do zera nastąpi w skończonym czasie, który jest odgórnie ograniczony przez pewną stałą wartość. Ponadto, wartość tegoż górnego ograniczenia jest niezależna od poszczególnego warunku początkowego i jest słuszna dla wszystkich warunków początkowych należących do pewnego zbioru dopuszczalnych warunków początkowych. W niniejszej rozprawie, ze względu na jednoczesne rozważanie ograniczeń czasu i ograniczeń wejść sterujących, zaproponowano wykorzystanie pewnego „lokalnego” szacowania tegoż górnego ograniczenia.

Opracowane algorytmy sterowania są dedykowane dla robota mobilnego typu monocykl i zostały zaprojektowane w oparciu o dwuetapową ideę projektowania sterowań, to znaczy najpierw projektowane jest *nominalne* prawo sterowania, które nie gwarantuje spełnienia nałożonych ograniczeń wejść sterujących, a następnie wykonywana jest procedura skalowania, która skaluje wartości sygnałów sterujących w celu spełnienia nałożonych ograniczeń.

W niniejszej rozprawie przedstawiono prawa sterowania dla dwóch problemów sterowania zdefiniowanych dla nieholonomicznego robota mobilnego, a mianowicie problemu podążania wzdłuż nieparametryzowanej ścieżki referencyjnej oraz problemu sterowania do punktu. Ponadto zaproponowano dwa algorytmy sterowania dla nieholonomicznego systemu wielopojazdowego, które rozwiązują problem rozproszonego tworzenia formacji. Stabilność proponowanych algorytmów została formalnie wykazana, a wydajność została zweryfikowana za pomocą symulacji numerycznych oraz testów eksperymentalnych z wykorzystaniem fizycznych robotów mobilnych.

*Navigation distribuée coopérative pour robots mobiles
en utilisant une approche d'orientation de champ
vectoriel (VFO) sous contraintes de temps*

Thèse de doctorat
Rafał Mateusz SOBĄŃSKI

Résumé

La présente thèse de doctorat est consacrée à l'élaboration d'algorithmes de commande dans le cadre de la méthodologie d'orientation des champs vectoriels (VFO, en anglais *Vector Field Orientation*) pour les robots mobiles non holonomes et les systèmes multi-véhicules distribués composés de véhicules non holonomes, qui tiennent compte à la fois des contraintes sur le temps d'exécution de la tâche et des contraintes sur les entrées de commande.

Ce travail s'appuie sur le concept de stabilité en temps fixe (en anglais *fixed-time stability*), qui suppose que la convergence des erreurs du système vers zéro se produira en un temps fini, limité a priori par une certaine valeur constante. De plus, la valeur de cette limite supérieure est indépendante de la condition initiale particulière et vaut pour toutes les conditions initiales appartenant à un certain ensemble de conditions initiales admissibles. Dans la présente thèse, compte tenu de la prise en compte simultanée des contraintes de temps et des contraintes sur les entrées de commande, il est proposé d'utiliser une estimation « locale » de cette limite supérieure.

Les algorithmes de commande développés sont destinés à un robot mobile de type unicycle et ont été conçus selon une approche de conception en deux étapes : on commence par concevoir une loi de commande nominale, qui ne garantit pas le respect des contraintes imposées aux entrées de commande, puis une procédure de mise à l'échelle est effectuée, qui redimensionne les valeurs des signaux de commande afin de respecter les contraintes imposées.

Cette thèse présente des lois de commande pour deux problèmes de commande définis pour un robot mobile non holonome, à savoir le problème du suivi d'une trajectoire de référence non paramétrée et le problème de la stabilisation en un point donné. De plus, deux algorithmes de commande pour un système multi-véhicules non holonomes sont proposés, qui résolvent le problème de la formation de formation distribuée. La stabilité des algorithmes proposés a été formellement démontrée, et leur performance a été vérifiée à l'aide de simulations numériques et de tests expérimentaux utilisant des robots mobiles physiques.