VERSION FRANÇAISE

Du contrôle optimal à la commande par retour d'état : extraction de motifs par IA pour la régulation de populations microbiennes

Stage de M2 (5–6 mois) – Équipe-projet GreenOwl, Centre Inria d'Université Côte d'Azur
Encadrant : Walid Djema (walid.djema@inria.fr)

Contexte. Les modèles mécanistes non linéaires de dynamique de populations, décrits par des équations différentielles ordinaires (EDO), permettent de formuler des problèmes de contrôle optimal au service d'objectifs biotechnologiques : maintenir la coexistence d'espèces dans un consortium microbien (bioremédiation, ingénierie du microbiote), maximiser une bioproduction ou atteindre une composition cible en temps minimal, en agissant sur des leviers tels que la dilution, l'apport de nutriments ou la lumière (optogénétique). La même démarche s'applique aux populations cellulaires sous traitement. L'analyse des solutions optimales, notamment à travers le Principe du Maximum de Pontryagin (PMP), permet de mettre en évidence différentes structures : arcs *bang-bang*, arcs singuliers, surfaces de commutation, comportement *turnpike*. Ces solutions sont cependant obtenues en boucle ouverte, et leur caractérisation par le PMP fait intervenir des états adjoints sans interprétation physique directe. Leur traduction en lois de retour d'état explicites et robustes reste donc un défi.

Objectifs. Le stage vise à développer une méthodologie qui utilise l'IA comme générateur de connaissance à partir des solutions optimales, et non comme substitut au contrôle optimal. Le travail comprendra :

1. la résolution numérique de problèmes de contrôle optimal par méthodes directes (collocation, CasADi/Bocop) sur un ensemble de conditions initiales et de paramètres, afin de constituer une base de trajectoires optimales ;
2. l'extraction de règles de commutation et de motifs récurrents par des outils d'apprentissage interprétables (arbres de décision obliques peu profonds, régression logistique parcimonieuse, clustering, régression symbolique parcimonieuse des surfaces de commutation) ;
3. la confrontation de ces règles à l'analyse géométrique issue du PMP ;
4. la synthèse de lois de commande par retour d'état et l'évaluation de leur robustesse en boucle fermée sous incertitudes paramétriques ; selon l'avancement, leur couplage à des observateurs d'état.

Profil. Étudiant·e de M2 en mathématiques appliquées, automatique ou science des données. Une bonne maîtrise des EDO et de l'optimisation, ainsi qu'une pratique de Python ou Julia, sont attendues. Un intérêt pour la biologie est un plus.

ENGLISH VERSION

From optimal control to feedback: AI-assisted pattern extraction for the regulation of microbial populations

M2 internship (5–6 months) – GreenOwl project-team, Inria Centre at Université Côte d'Azur
Supervisor: Walid Djema (walid.djema@inria.fr)

Context. Nonlinear mechanistic population dynamics models, described by ordinary differential equations (ODEs), lead to optimal control problems driven by biotechnological goals: sustaining species coexistence in a microbial consortium (bioremediation, microbiome engineering), maximizing bioproduction or reaching a target composition in minimum time, by acting on levers such as dilution, nutrient supply or light (optogenetics). The same approach applies to cell populations under therapy. The analysis of optimal solutions, in particular through Pontryagin's Maximum Principle (PMP), can reveal various structures: bang-bang arcs, singular arcs, switching surfaces and turnpike behavior. These solutions are, however, obtained in open loop, and their PMP-based characterization involves adjoint states with no direct physical meaning. Turning them into explicit and robust state-feedback laws therefore remains a challenge.

Objectives. The internship aims to develop a methodology in which AI acts as a knowledge generator built on optimal solutions, rather than a replacement for optimal control. The work will include:

1. numerically solving optimal control problems with direct methods (collocation, CasADi/Bocop) across a range of initial conditions and parameters, in order to build a database of optimal trajectories;
2. extracting switching rules and recurrent patterns with interpretable learning tools (shallow oblique decision trees, sparse logistic regression, clustering, sparse symbolic regression of switching surfaces);
3. cross-checking these rules against PMP-based geometric analysis;
4. synthesizing state-feedback laws and assessing their closed-loop robustness under parametric uncertainty; depending on progress, coupling them with state observers.

Profile. M2 student in applied mathematics, control engineering or data science. Solid knowledge of ODEs and optimization, together with experience in Python or Julia, is expected. An interest in biology is a plus.