

Sisteme de Proces Inteligente: Modelare și Control Avansat în Procese Biomedicale și de Mediu

-- Rezumat --

Această teză de abilitare prezintă o sinteză amplă a contribuțiilor științifice, academice și profesionale în domeniul ingineriei sistemelor de control, cu o orientare interdisciplinară puternică. Accentul central este pus pe modelarea și controlul avansat al sistemelor dinamice complexe din domeniile biomedical, farmaceutic și al protecției mediului—domenii cu impact societal major și cerințe tot mai stricte privind performanța, siguranța și sustenabilitatea. Activitatea de cercetare integrează dezvoltări teoretice riguroase în control predictiv și adaptiv, estimarea stării, sisteme hibride și analize de sensibilitate, cu aplicații reale care necesită soluții robuste, fiabile și eficiente energetic.

O direcție majoră de cercetare a vizat controlul personalizat în buclă închisă pentru anestezia intravenoasă. În colaborare cu parteneri academici și clinici, au fost dezvoltate strategii avansate de control capabile să gestioneze farmacocinetica și farmacodinamica neliniară a agenților anestezici. Aceste contribuții includ control predictiv multiparametric, control predictiv cu estimare integrată și structuri hibride de control bazate pe linearizarea pe segmente a modelelor farmacologice. Controlorii propuși au fost evaluați prin studii de simulare și comparații pe modele de referință, demonstrând un potențial semnificativ pentru administrarea individualizată și sigură a medicamentelor în condiții clinice în timp real. Aceste rezultate contribuie la obiectivul mai larg de dezvoltare a unor sisteme inteligente și autonome de administrare a medicamentelor.

În domeniul producției farmaceutice, cercetarea s-a concentrat pe controlul model bazat al proceselor continue, în special în contextul inițiativelor de tip quality-by-design și al transformării digitale. Un proces de evaporare a fost dezvoltat și implementat experimental în colaborare cu Eli Lilly și Texas A&M University, susținând proiectarea de algoritmi de control predictiv adaptați sistemelor neliniare cu constrângeri. În paralel, colaborarea cu Purdue University a permis dezvoltarea și testarea de strategii avansate de control pe o presă rotativă de comprimate la scară pilot, oferind informații experimentale valoroase despre variabilitatea procesului, incertitudinea măsurărilor și limitările actuatorilor. Activitatea a inclus, de asemenea, analize globale de sensibilitate, implementarea embedded a controlorilor multiparametrici și dezvoltarea de arhitecturi de control supervisor. Aceste inițiative au fost consolidate prin proiecte de cercetare naționale și internaționale axate pe digitalizarea proceselor farmaceutice, integrarea avansată a proceselor și controlul inteligent al calității.

Contribuții suplimentare au vizat modelarea și controlul bioprocесelor în ingineria tisulară. În parteneriat cu University of Surrey și East China University of Science and Technology, au fost dezvoltate modele de dinamica computațională a fluidelor (CFD) pentru biorreactoare de perfuzie, utilizate în analiza distribuției de debit, a livrării oxigenului și a tensiunilor de forfecare în structuri tridimensionale de tip scaffold. Pe baza acestor modele, au fost proiectate strategii de control

pentru reglarea variabilelor critice de proces, cum ar fi concentrația de oxigen și căderea de presiune, esențiale pentru o creștere tisulară uniformă. Integrarea teoriei controlului cu modelarea proceselor biologice avansează dezvoltarea unor platforme scalabile și controlabile în ingineria tisulară și demonstrează versatilitatea principiilor ingineriei controlului în aplicații biomedicale emergente.

În domeniul mediului, cercetarea s-a concentrat pe controlul eficient energetic al etapelor biologice din stațiile de epurare a apelor uzate (WWTPs), cu un accent deosebit pe sistemele de aerare. Având în vedere că aerarea reprezintă principala sursă de consum energetic în aceste stații, au fost dezvoltate strategii de control predictiv și adaptiv pentru reglarea concentrației de oxigen dizolvat în condiții de influent variabil. Aceste contribuții au fost susținute prin proiecte naționale de cercetare și au inclus dezvoltarea de modele dinamice, analize de sensibilitate și strategii de control ierarhizat, testate în simulări și în medii pilot. Metodele propuse au demonstrat o îmbunătățire a eficienței energetice și a robusteții operaționale în raport cu funcționarea convențională.

Aceste realizări științifice sunt susținute de un parcurs academic solid, care include activități de predare și mentorat în cadrul mai multor instituții internaționale. Cu experiență în peste șase țări de pe trei continente, cursurile au fost susținute în sisteme academice și contexte culturale diverse, de la universități de prestigiu din Regatul Unit și Statele Unite, până la instituții academice importante din Asia și Europa de Est. Această expunere a facilitat dezvoltarea unei înțelegeri profunde a dinamicii educaționale interculturale, a unei flexibilități pedagogice și a unei filosofii de predare centrate pe student. Activitatea de îndrumare a proiectelor studențești, implicarea activă în dezvoltarea curriculară și participarea la inițiative academice comune contribuie la consolidarea unui profil academic complet.

Privind spre viitor, direcția de cercetare vizează dezvoltarea de cadre avansate de modelare și control adaptate sistemelor de proces interconectate, caracterizate prin volume mari de date. Accentul va fi pus pe optimizarea energetică, autonomie și reziliență atât în sistemele industriale, cât și în cele biomedicale, precum și pe integrarea tehnologiilor digitale pentru sprijinirea procesului decizional și a sustenabilității. Prin colaborare interdisciplinară și inovație aplicată, se urmărește contribuția la următoarea generație de sisteme de proces inteligente și sustenabile, aflate la intersecția dintre inginerie, sănătate și științele mediului.