中國人民大學
RENMIN UNIVERSITY OF CHINA

复杂批次系统智能学习控制

1. Introduction

沈栋

分布式人工智能实验室
中国人民大学数学学院
中国人民大学应用数学研究中心
金融计算与数字工程教育部工程研究中心

OUTLINE

研究背景

制造强国
迭代学习控制
五个研究维度

学术贡献

学术贡献图
不完备数据驱动
过程性能增强

综述论文

专题综述
不完备数据
现状与未来

数据资料

学术论文
专著专利等

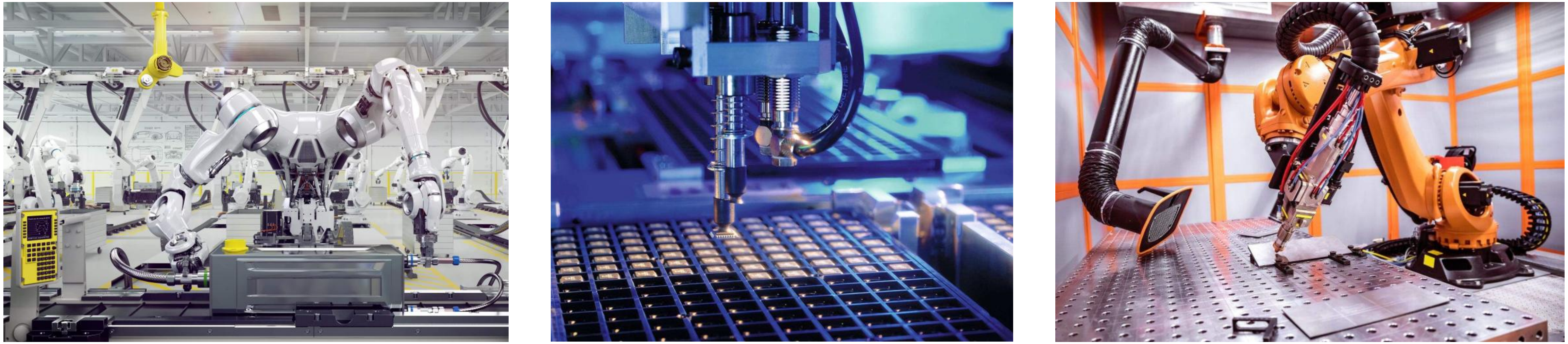
制造强国

高举中国特色社会主义伟大旗帜
为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗

——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告

（二）建设现代化产业体系。坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设**制造强国**、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国。实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，**推动制造业高端化、智能化、绿色化发展**。巩固优势产业领先地位，在关系安全发展的领域加快补齐短板，提升战略性资源供应保障能力。推动战略性新兴产业融合集群发展，构建新一代信息技术、人工智能、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等一批新的增长引擎。……

迭代学习控制

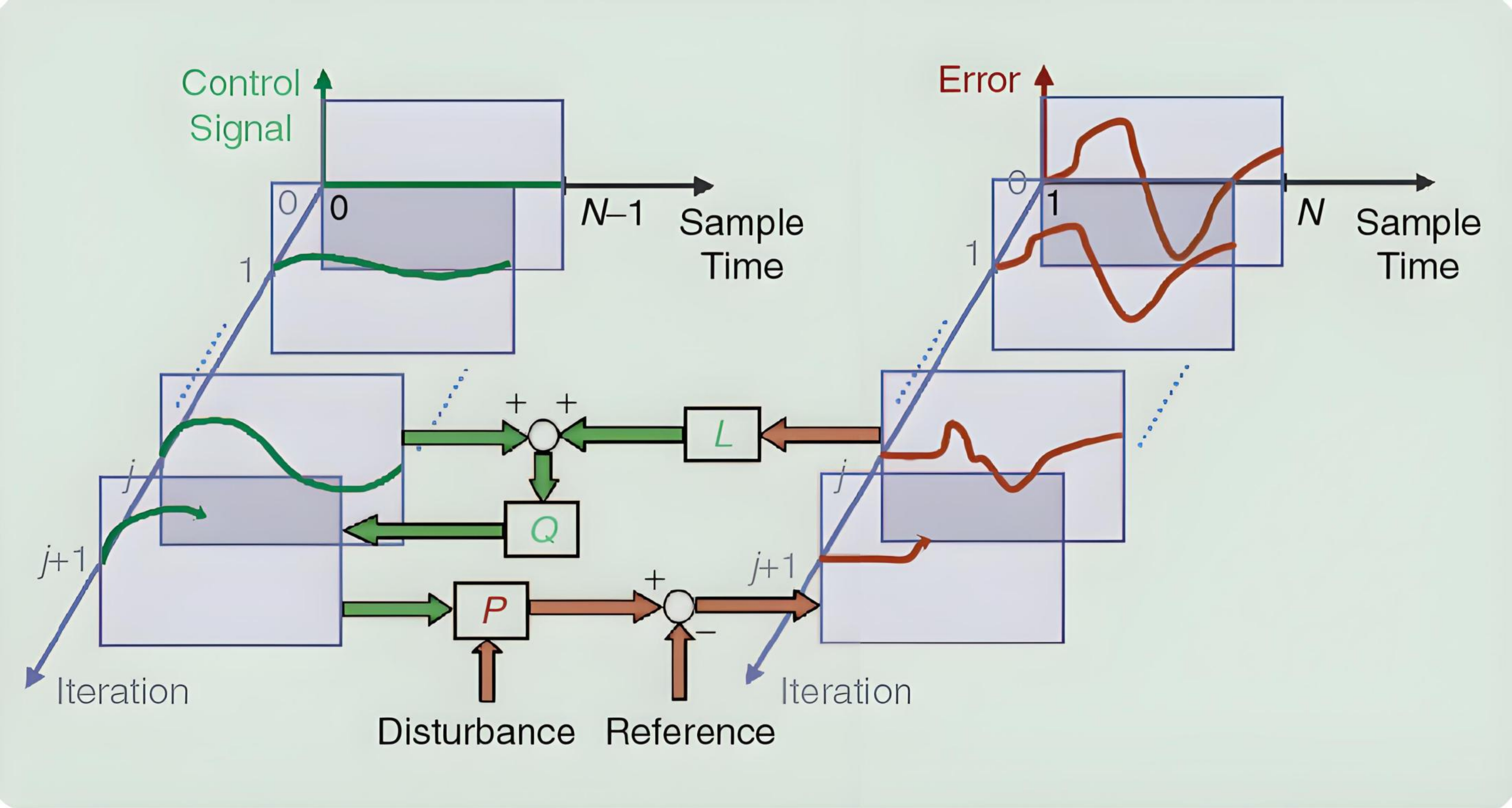


生产制造过程的一个基本特点是**批次化**

传统控制方法多是设计实时反馈型控制方案
在不同批次间控制性能难以提升

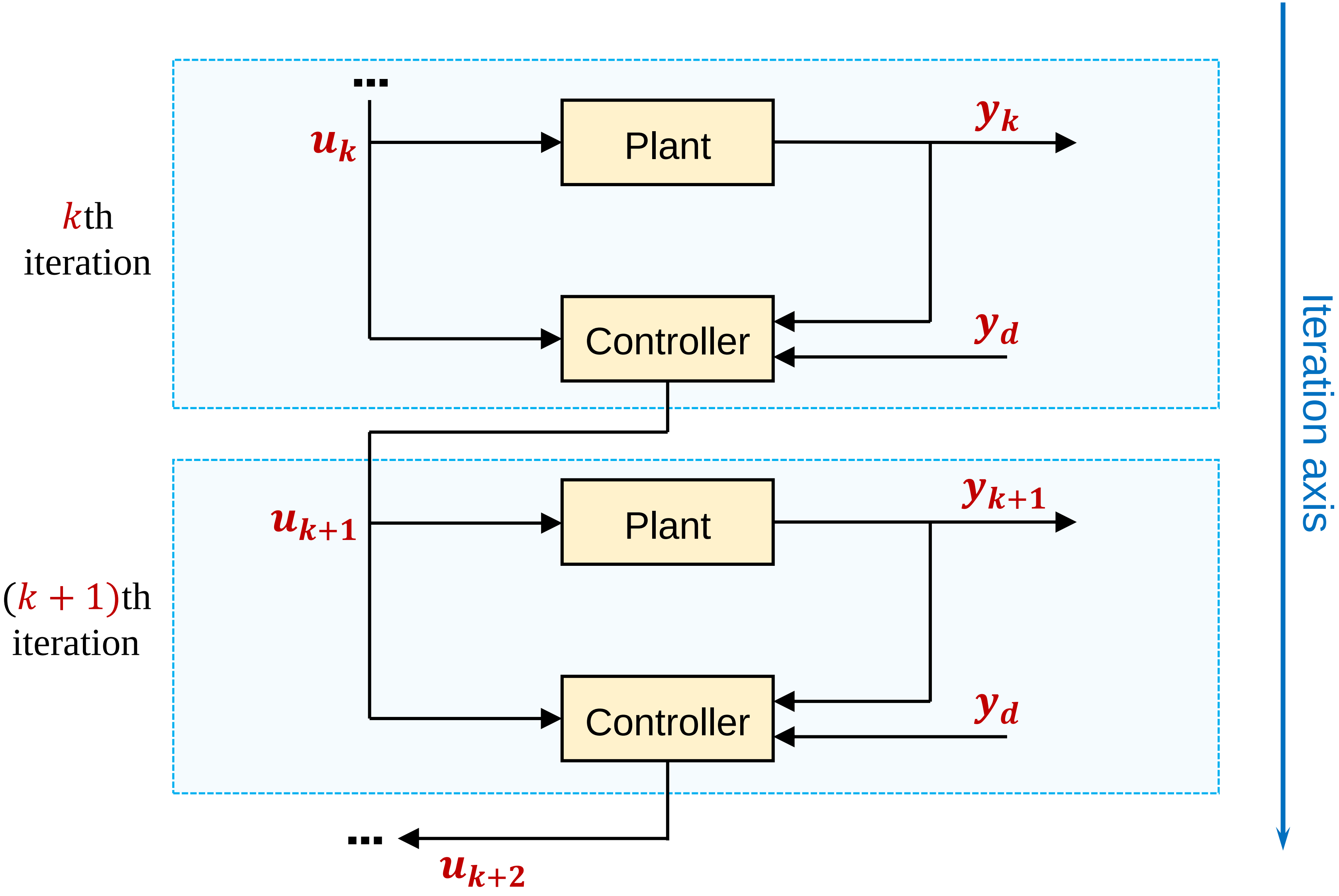
迭代学习控制

迭代学习控制

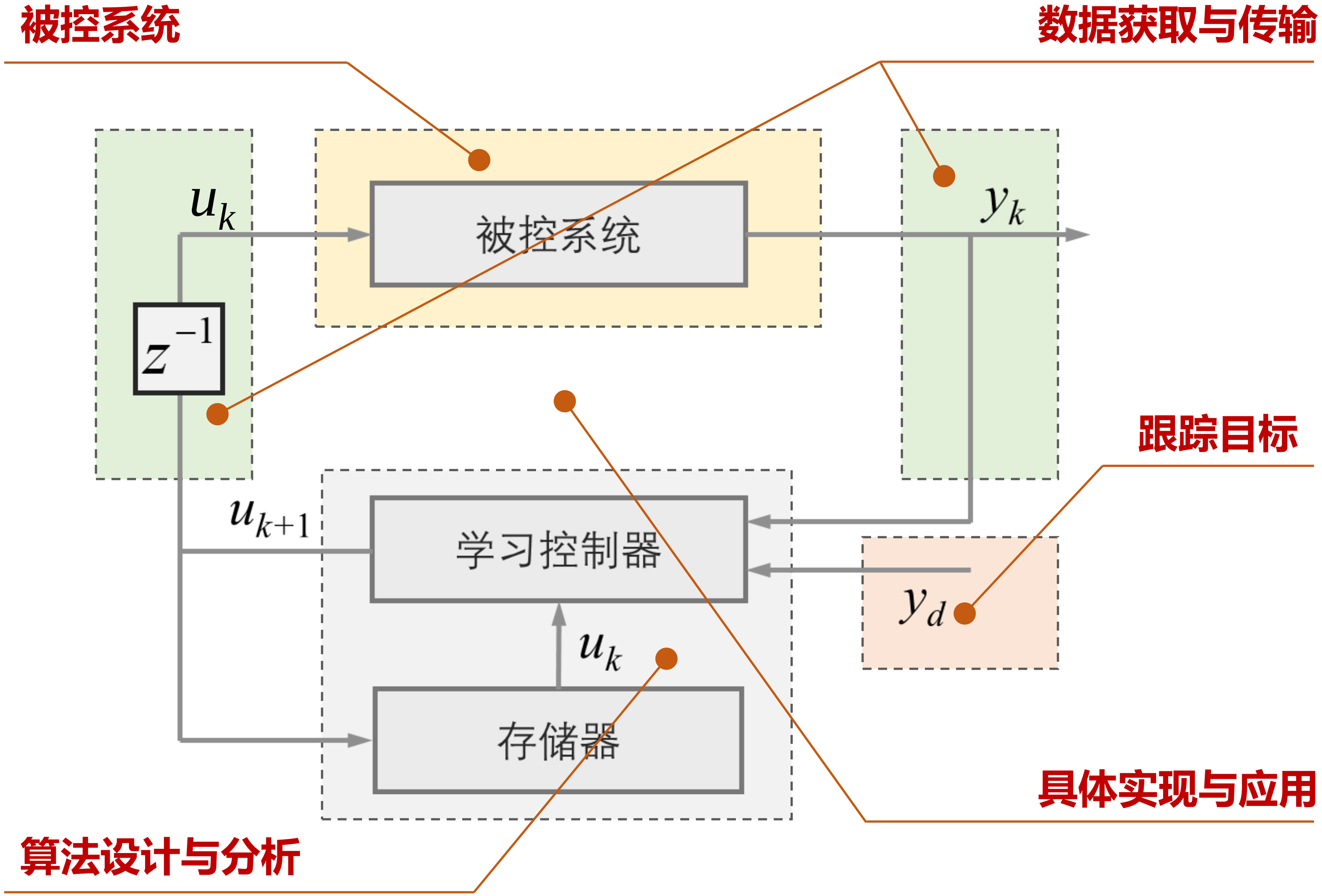


D. A. Bristow, M. Tharayil and A. G. Alleyne. A survey of iterative learning control: A Learning-based Method for High-performance Tracking Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006.

迭代学习控制


…
u_k
Plant
y_k
kth iteration
Controller
y_d
u_{k+1}
Plant
y_{k+1}
$(k+1)$th iteration
Controller
y_d
…
u_{k+2}
Iteration axis

迭代学习控制


被控系统
数据获取与传输
u_k
被控系统
y_k
z^{-1}
跟踪目标
u_{k+1}
学习控制器
y_d
u_k
存储器
具体实现与应用
算法设计与分析

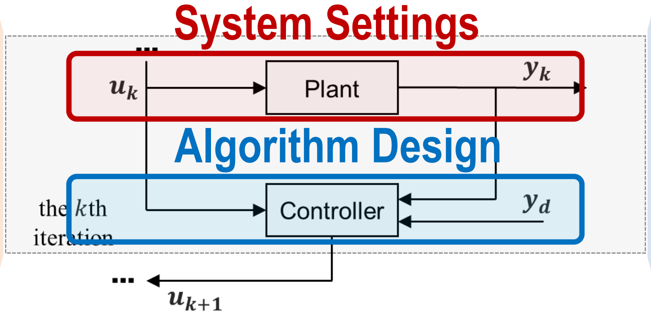
学术贡献

Information Oriented ◦
不完备数据驱动控制

RLP: Robust Learning Principle
鲁棒学习原理 ◇ **信息缺失**

RIM: Recovery Information Mechanism
重构信息机制 ◇ **信息漂移**

JLF: Joint Learning Framework
联合学习框架 ◇ **信息复用**



Performance Oriented ◦
过程性能增强控制

VGD: Variable Gain Design
变增益设计 ◇ **性能驱动**

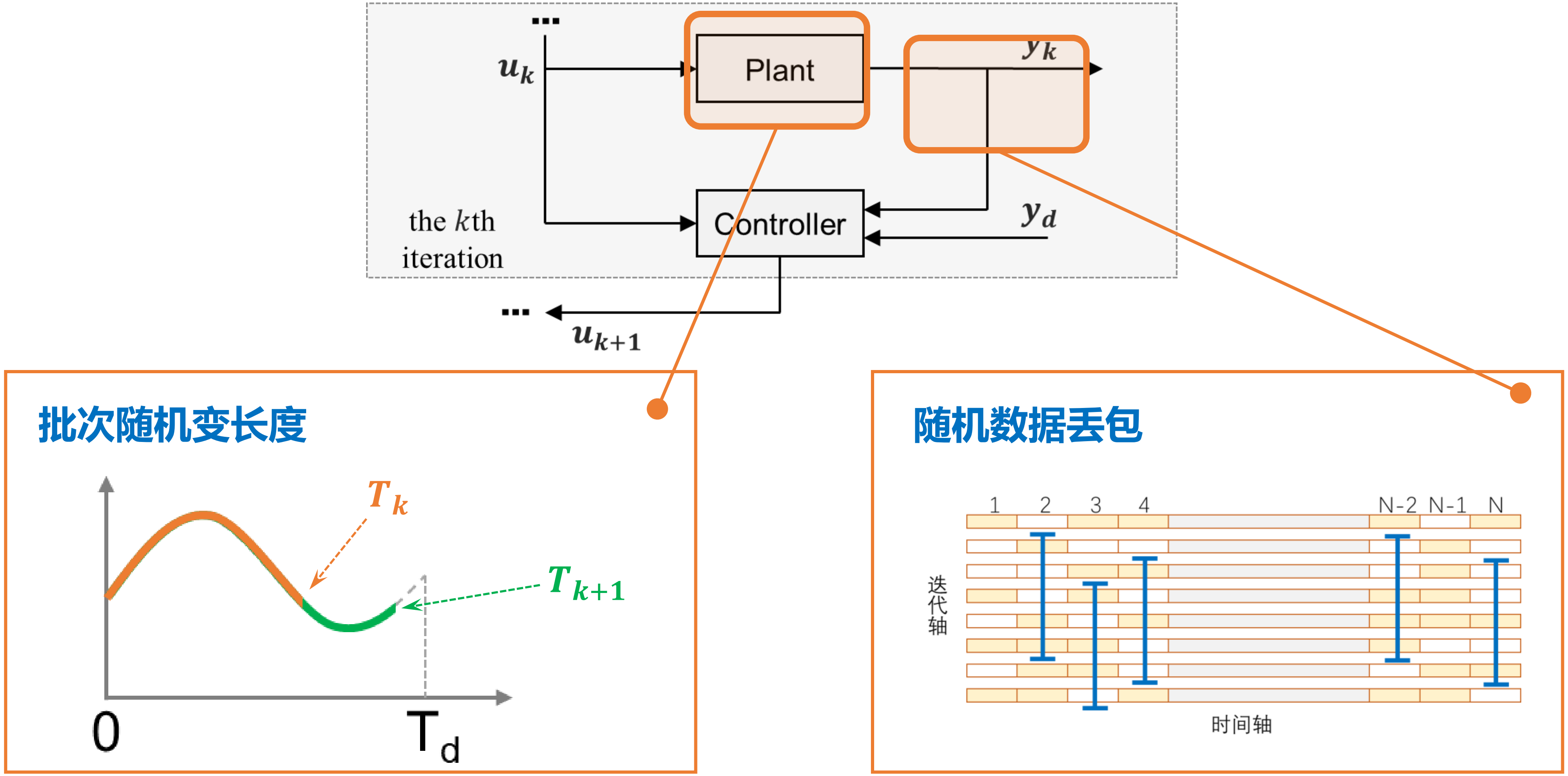
NUS: Nonlinear Update Scheme
非线性更新方案 ◇ **性能变革**

OLS: Optimized Learning Strategy
优化学习策略 ◇ **性能优化**

鲁棒学习原理

场景难题

数据随机不完备导致梯度漂移，致使传统算法设计无法实现精准收敛



批次随机变长度

随机数据丢包

鲁棒学习原理

学术贡献 未知随机数据不完备场景下，设计鲁棒算法实现渐进精确跟踪

□ 数据丢包 ➘ 在数据丢包/延迟等客观不完备数据条件下，如何实现高精度的控制性能？

- **建模**：建立**有限批次序列、马氏链**两种有**批次依赖性**丢包模型，去除**独立性**的强假设 **(JAS 2018)**
- **设计**：提出**存储器数据更新机制**与**算法迭代触发机制**，建立**连续型学习更新算法**，解决了有限存储/丢包/延迟等**复杂耦合情形**下的学习控制问题 **(TNNLS 2018, IS 2017)**
- **分析**：证明了两侧丢包情形下，**计算输入与实际输入**之间的**异步性具有马尔科夫性质 (TAC 2017)**；建立了**强概率意义**下的收敛性分析框架 **(TNNLS 2018, IS 2017)**

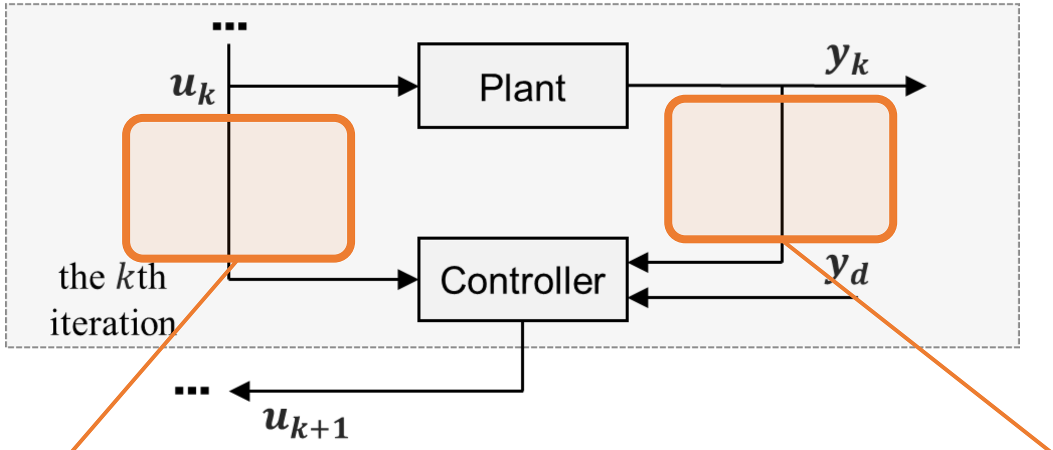
□ 批次变长度 ➘ 在批次长度不等的条件下，如何预测缺失过程并进行控制性能比较？

- **建模**：建立**基于马氏链的离散动态模型**与**基于概率分布函数的连续动态模型 (TAC 2022, ARC 2019)**
- **设计**：建立**基于随机平均算子的历史数据回溯机制**预测缺失过程 **(SCL 2017)**
- **分析**：建立离散系统**基于随机切换系统的递推计算分析方法 (AUT 2016)**，与连续系统**基于虚拟误差的新型复合能量函数 (TNNLS 2019, RNC 2019)**，实现了**信息量不等条件**下的性能比较

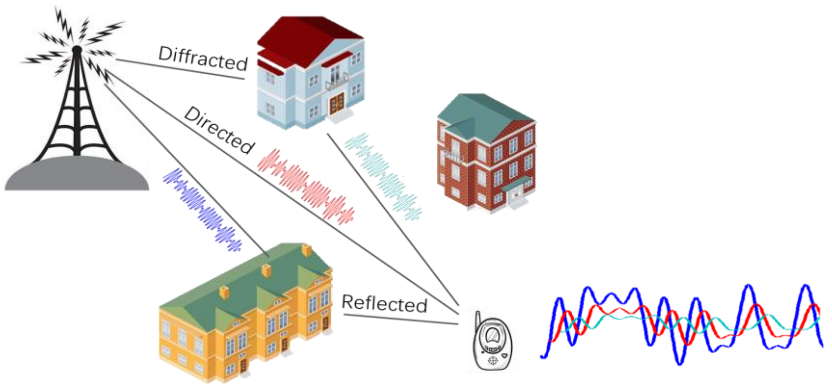
重构信息机制

场景难题

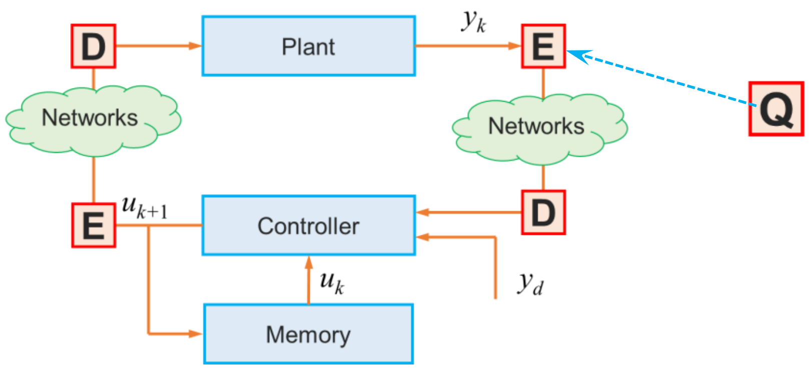
所获取的数据较真实信号存在不确定或随机偏移，蕴含信息与原始信息不等价



随机衰落信道



数据量化与传输



重构信息机制

学术贡献 基于不准确数据重构出原始真实信号或其等价信息

□ 量化传输 ↘ 如何在有效降低对数据量获取需求的同时，实现对原始信号的重构?

- **均匀量化**：建立了**编解码机制与有限层级均匀量化器**相结合的综合方法 (TASE 2020, TCYB 2022)，设计了编解码机制**缩放参数的自适应机制** (TCYB 2025)，实现了信号传递的**渐进精确重构**
- **球极坐标量化**：提出了融合编解码机制的**球极坐标量化**方法，通过**迭代动态调整支撑球半径**来规避**量化器饱和问题且不需要引入缩放参数** (TCYB 2025, RNC 2024)
- **概率量化**：提出了**概率量化机制** (TNNLS 2021)，结构比编解码机制更为简洁，实现**渐进零误差**跟踪性能

□ 衰落信道 ↘ 在信号幅值发生随机漂移的条件下，如何实现等价信息的有效提取用于学习?

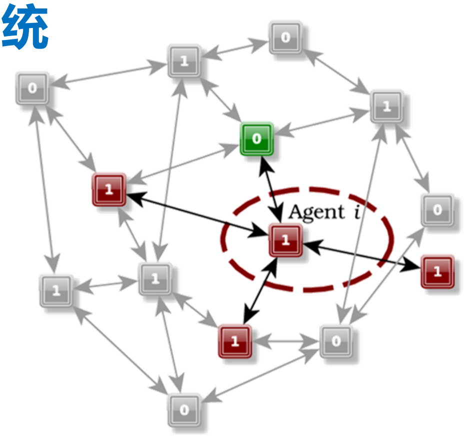
- **统计信息已知**：建立**输入信号的三种迭代平均机制**，保证了系统动态过程的平稳性，明确刻画了**学习速率与跟踪精度**之间的**折中平衡关系** (TAC 2021, TNNLS 2020, TNNLS 2021)
- **统计信息未知**：建立**基于随机迭代差分的综合梯度估计**方法(TNNLS 2021)与**基于测试信号的迭代估计机制**，用于有偏信息校正 (TNNLS 2022)
- **统计信息变化**：刻画实现渐进精确跟踪的**最小信息需求**，建立**仅基于单批次有限测试信号的均值逆的无偏估计**，实现了关键信息的提取与校正 (TAC 2023)

联合学习框架

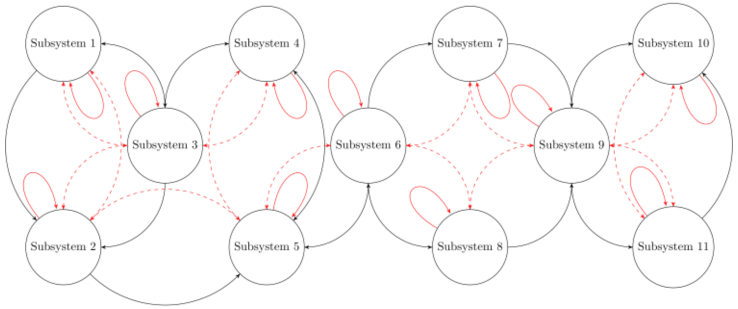
场景难题

由多个个体组成的复杂网络系统，如何统筹个体信息提升控制性能

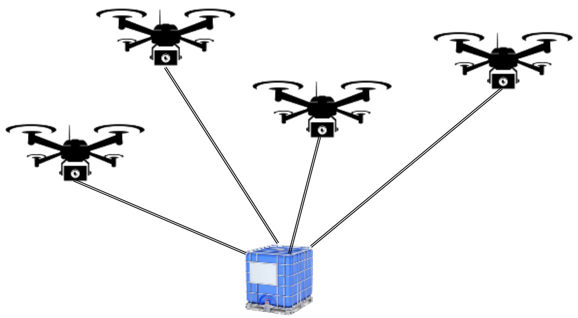
多智能体系统



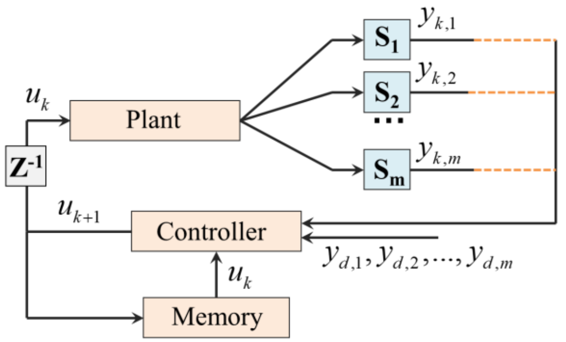
大规模内联系统



多个体合作任务



多传感器系统



联合学习框架

学术贡献

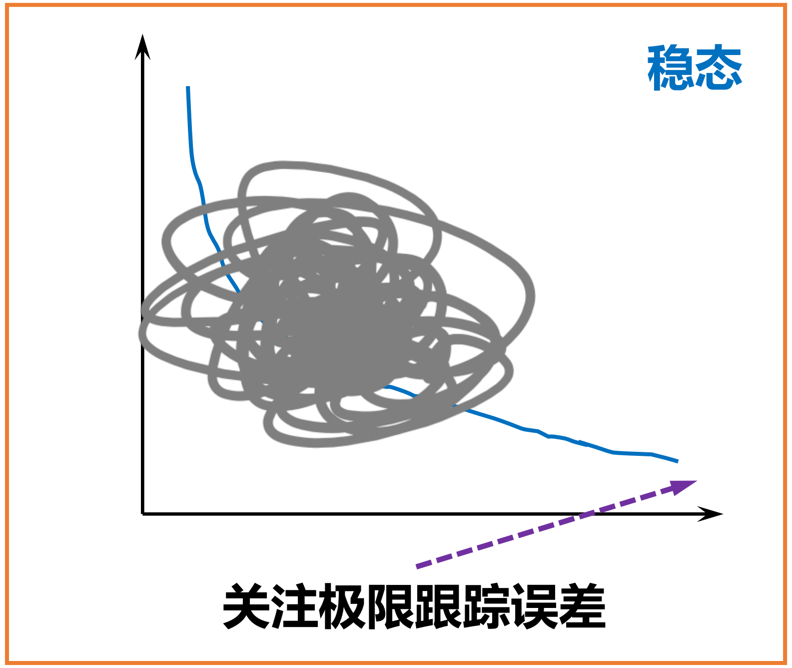
多种拓扑框架和信息交换模式下的联合学习理论

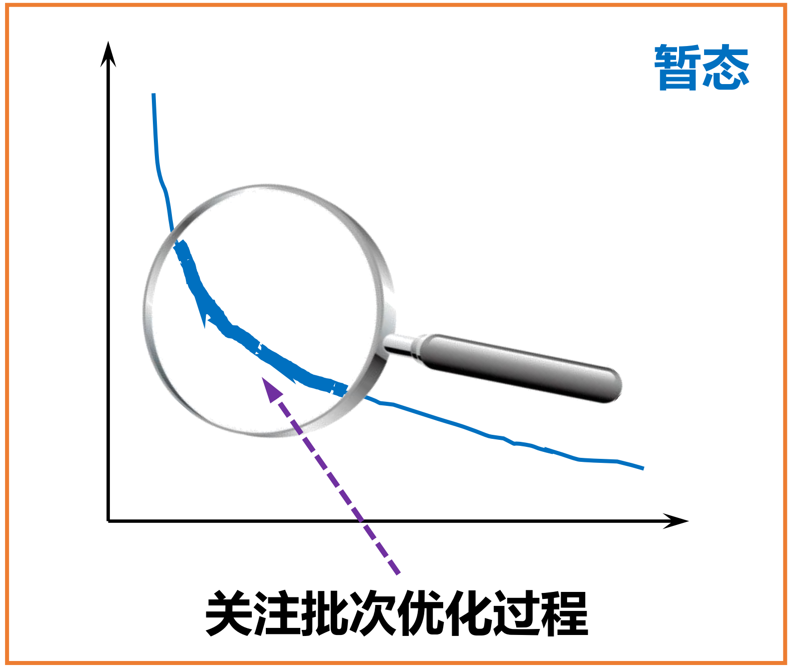
□ **联合学习** ↘ **如何针对不同类型复杂系统的结构特点，建立高效联合学习模式?**

- 针对异质受约束**非线性多智能体系统**，提出了**分布式自适应学习协同控制方法**，建立**有限批次学习协同跟踪上界的数学表达**，揭示了系统结构、算法参数与跟踪精度之间的关系**(Auto 2018, RNC 2019)**
- 针对**大规模非线性内联系统**，给出了**状态耦合矩阵**的定义和计算方式，建立**异步分散式学习控制算法**，给出了新的分析方法 **(IS 2023, Auto 2012)**
- 针对**多系统合作学习模型预测控制**问题，可根据实际场景及限制约束**自主产生学习目标**，提出了一类可高效计算的算法求解相关问题 **(ISA Trans 2022)**
- 针对多传感器系统，定义了**不相容多目标跟踪问题**并给出可行解数学刻画，建立了具有数据鲁棒性的**融合型迭代学习控制 (TCYB 2021)**，实现了**帕累托最优解集单调下降**迭代学习 **(TCYB 2024)**，建立了**基于用户偏好的迭代学习方案 (TAC 2026)**，解决了不相容多目标学习跟踪问题

变增益设计

场景难题 增益设定不依赖于系统运行过程中的实时表现，缺乏有效的整定方法





增益产生机制 ← 控制精度 ⚖ 收敛速度

算法 $u_{k+1}(t) = u_k(t) + \boxed{\gamma} L_t \epsilon_k(t+1)$

变增益设计

学术贡献 **面向系统综合性能提升的随机数据驱动适应型增益设计机制**

□ **增益设计** ➘ **如何基于实际运行状态自主计算增益，实现控制精度与收敛速度的有效平衡?**

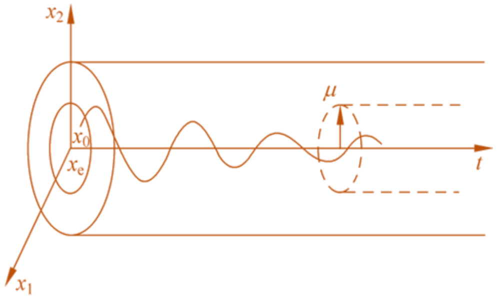
- 最优增益: 建立**基于估计跟踪性能的递推最优增益机制**，基于阶的估计给出**收敛速率精确估计 (TNNLS 2022)**, 给出了大规模内联系统**分散式最优增益**递推计算方法 **(IS 2023)**
- 自适应增益: 建立**仅基于跟踪误差的自适应增益机制**，可根据系统运行性能**自主切换学习模式 (TAC 2020)**，早期阶段增益保持不变，后期阶段切换为随机型衰减序列; 为**随机点对点跟踪问题与随机变批次长度问题**给出了变形版本 **(TAC 2022, TNNLS 2024)**
- 多阶段增益: 建立**基于累积性噪声影响和压缩性输入误差相比较的多阶段增益自调节机制**，引入纵向拉伸参数和横向拉伸参数，提出三种加速调节机制，平衡了跟踪性能与收敛速度两方面的需求 **(TCYB 2023, TNNLS 2024)**
- 矩阵增益: 基于误差自适应机制提出了**含暂态过程加速效果的自适应矩阵增益**设计方案 **(TCYB 2024)**, **基于跟踪误差大小动态分配权重**提出了**自适应误差加权机制**，均可模块化集成至现有多种更新方案，构成**数据驱动的非线性更新律**，**加速暂态收敛过程 (TAC 2026, TCYB 2025)**

非线性更新方案

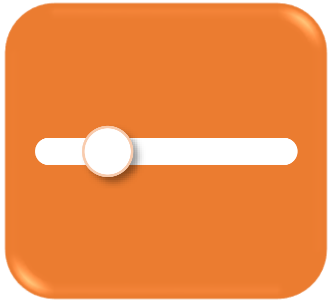
场景难题　绝大部分迭代学习更新律采用比例型更新结构，本质上限制了其学习能力

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \rho L e_k(t+1)$$

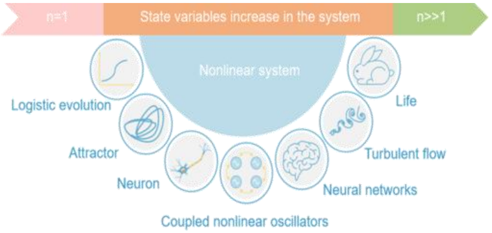
更新强度∝误差



关注渐进收敛性



可调节参数少



应用复杂系统受限

非线性更新方案

学术贡献 综合强化学习能力、提升收敛速度、改善控制性能三需求的更新方案

□ **非线性更新** ➘ **如何建立非线性学习结构特征的迭代更新算法，刻画其动态演化过程?**

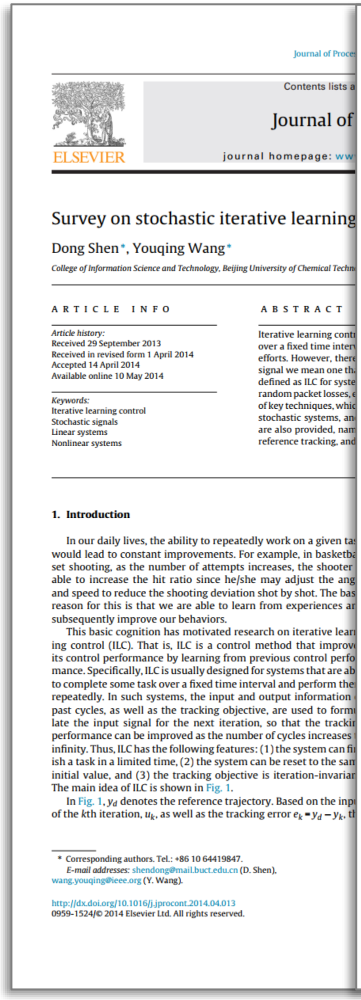
- 首次为整数阶系统提出了**纯分数次幂学习控制算法**，建立了基于**非线性映射**的收敛性分析框架，给出了**极限环**的计算方法 **(JAS 2023)**
- 提出了基于分数次幂更新律与比例型更新律的**多阶段切换型学习控制算法**，**切换点独立于系统信息**，建立了扰动非线性递归分析方法 **(TASE 2024)**
- 提出了同时包含**分数次幂更新项**与**比例更新项**的**复合学习控制算法**，基于扰动非线性映射原理建立收敛性分析，刻画了迭代**初始值与收敛极限**的对应关系，实现了**超线性收敛**速度 **(TAC 2025, TCYB2025)**
- 提出了结合**高阶与低阶分数次幂**的学习控制算法，给出了参数设计的**同向学习机制**与**反向学习机制**，建立了两种机制下的**正向演化不变集** **(submitted)**

学术贡献

聚焦动态 关注场景 探究机理

- **不完备数据驱动控制**
  Incomplete Data Driven Control
  - **鲁棒学习原理**
    RLP: Robust Learning Principle
  - **重构信息机制**
    RIM: Recovery Information Mechanism
  - **联合学习框架**
    JLF: Joint Learning Framework
- **过程性能增强控制**
  Process Performance Enhanced Control
  - **变增益设计**
    VGD: Variable Gain Design
  - **非线性更新方案**
    NUS: Nonlinear Update Scheme
  - **最优化学习策略**
    OLS: Optimized Learning Strategy

综述论文



Journal of Proce

Contents lists a

Journal of

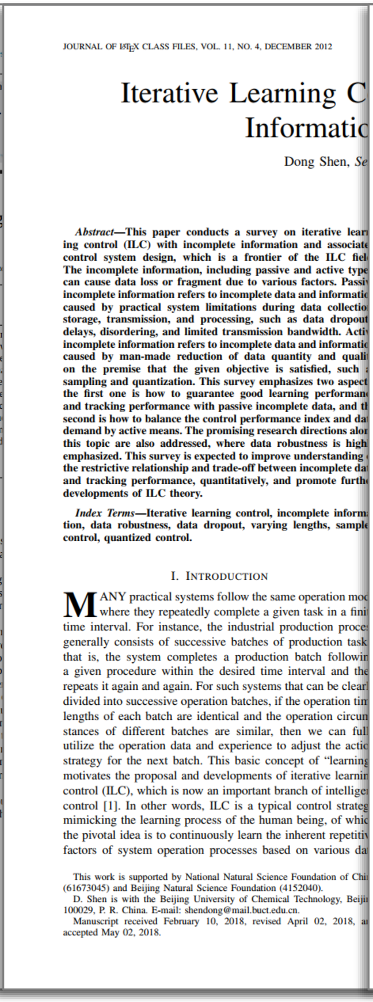
journal homepage: ww

ELSEVIER

Survey on stochastic iterative learning

Dong Shen*, Youqing Wang*

College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Techn

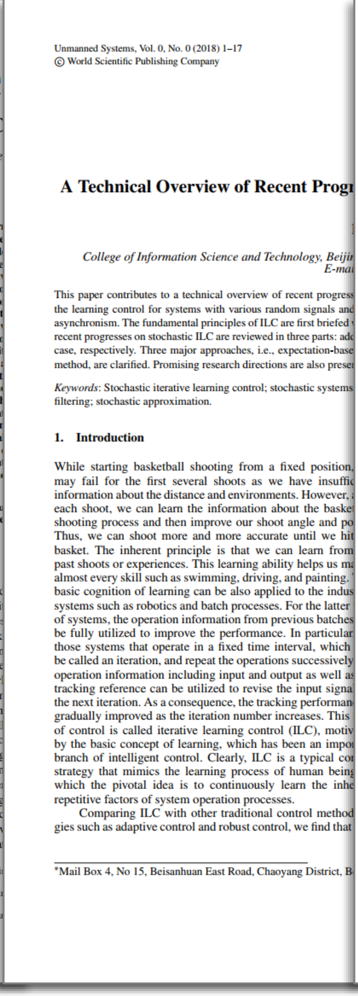


JOURNAL OF LaTeX CLASS FILES, VOL. 11, NO. 4, DECEMBER 2012

Iterative Learning C

Informatic

Dong Shen, Se

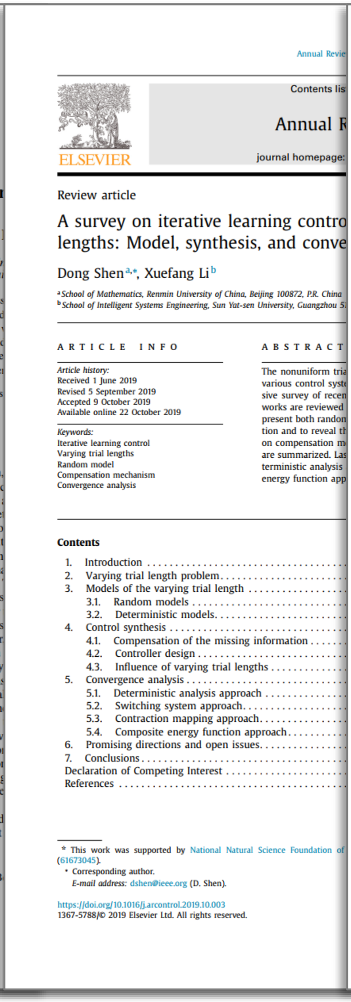


Unmanned Systems, Vol. 0, No. 0 (2018) 1–17

© World Scientific Publishing Company

A Technical Overview of Recent Progr

College of Information Science and Technology, Beijin



Annual Revie

Contents lis

Annual R

ELSEVIER

Review article

A survey on iterative learning contro

lengths: Model, synthesis, and conve

Dong Shen[a,*], Xuefang Li[b]

History Ma

Iterative Le

for High-Sp

Shuai Gao, Qijiang Song, Hao Jiang, and Dong Shen*

ARTICLE IN PRESS

ISA Transactions xxx (xxxx) xxx

Contents lists available at ScienceDirect

ISA Transactions

journal homepage: www.elsevier.com/locate/isatra

ELSEVIER

Research article

Advances in iterative learning control: A recent five-year literature review*

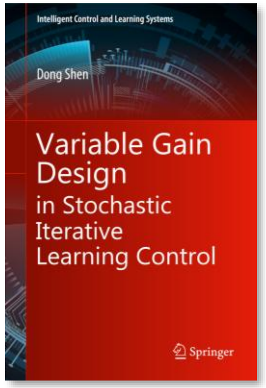
Dong Shen*, Xiang Cheng, Shuai Gao, Xun He, Zihan Li, Zeyi Zhang

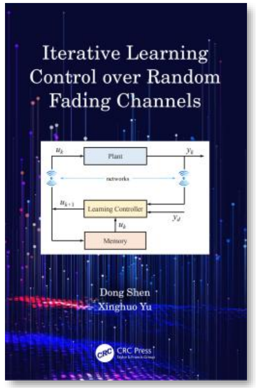
School of Mathematics, Renmin University of China, Beijing, 100872, PR China

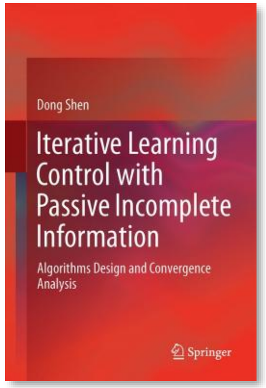
数据资料

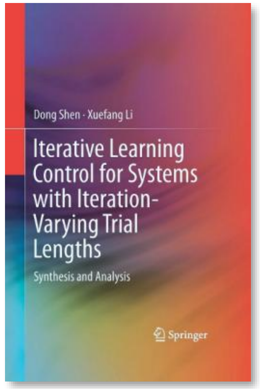
截至2026.4

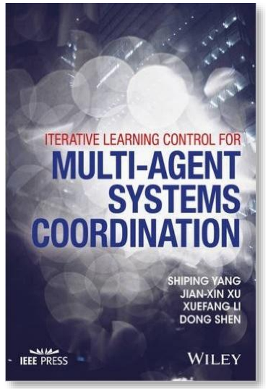
指标	数量
出版学术专著 (部)	**6**
发表(含已接收)学术论文 (篇)	**249**
期刊论文 (篇)	**171**
其中顶级期刊 IEEE Trans + JAS + Auto (篇)	**70**
Web of Science 被引 (次)	**3100^{+}**
Google Scholar 被引 (次)	**4700+**
其中单篇最高被引 (次)	**264**
H-index	**37**
i10-index	**102**
ESI高被引论文 (篇)	**9**
申请国家发明专利 (项)	**16**
已授权 (项)	**5**


Intelligent Control and Learning Systems
Dong Shen
Variable Gain Design in Stochastic Iterative Learning Control
Springer


Iterative Learning Control over Random Fading Channels
Dong Shen
Xinghuo Yu
CRC Press


Dong Shen
Iterative Learning Control with Passive Incomplete Information
Algorithms Design and Convergence Analysis
Springer


Dong Shen · Xuefang Li
Iterative Learning Control for Systems with Iteration-Varying Trial Lengths
Synthesis and Analysis
Springer


ITERATIVE LEARNING CONTROL FOR MULTI-AGENT SYSTEMS COORDINATION
SHIPING YANG
JIAN-XIN XU
XUEFANG LI
DONG SHEN
IEEE PRESS
WILEY


随机迭代学习控制
沈栋 著
科学出版社

Thanks

http://shendong.tech/

DAI Lab @ RUC

Acknowledgement
This work is supported by National Natural Science Foundation of China (62573422, 62173333, 61673045, 61304085) and Beijing Natural Science Foundation (Z210002, 4152040).