

元启发式算法

MarkZZZ WeChat: MarkZZZ20XX

课程简介

元启发式算法 (Metaheuristics) 是求解大规模组合优化与连续优化问题的核心方法论。本课程以 Gendreau & Potvin *Handbook of Metaheuristics* 为主线, 系统讲授元启发式算法的理论基础、经典算法族与前沿进展。课程涵盖局部搜索、模拟退火、禁忌搜索、遗传算法、蚁群优化、粒子群优化、自适应大邻域搜索、超启发式、以及收敛性分析等主题。课程注重**严格的数学分析** (马尔可夫链收敛性、运行时分析、适应度层定理、漂移分析、黑箱复杂度) 与**工程实践** (参数调校、算法设计范式、基准测试方法论、统计检验) 的有机结合, 使学生具备独立设计、分析与实现元启发式算法的能力。内容深度对标 Gendreau-Potvin, Talbi, Doerr-Neumann, Auger-Doerr 等专著, 涵盖 PTAS/FPTAS 不可近似性、适应度景观理论、参数化复杂度 (FPT) 视角、以及深度学习辅助优化等前沿方向。

适合人群

- 计算机科学、运筹学、工业工程、人工智能等方向的研究生
- 从事组合优化、智能计算、算法设计研究的科研人员
- 希望深入理解启发式搜索理论基础与实践方法的算法工程师

前置知识

- 离散数学与图论: 图的连通性、树、哈密顿回路、匹配
- 概率论与数理统计: 条件概率、马尔可夫链基础、大数定律、鞅
- 算法设计与分析: 时间复杂度、NP 理论、基本数据结构、动态规划
- 线性代数: 矩阵运算、特征值、正定矩阵
- 凸优化基础 (连续优化部分需要)
- 至少掌握一门编程语言 (Python / C++ / Julia)

1 课程内容

讲次 主题

内容概要

1 组合优化与启发式导论

组合优化问题的形式化; 计算复杂度 (P/NP/NP-hard/NP-complete); 多项式归约与 Cook-Levin 定理; 不可近似性 (APX/PCP 定理); PTAS/FPTAS; 精确方法的局限性; 近似算法与近似比; 元启发式的分类 (单解/群体、构造/改进) 与总体框架; 适应度景观 (fitness landscape) 理论初步; 无免费午餐定理 (NFL) 及其正确解读; 运行时分析框架预告

2 局部搜索与邻域结构

邻域函数的形式化、搜索图与连通性、启发改进

讲次	主题	内容概要
4	禁忌搜索	短期记忆与禁忌表设计 (属性禁忌 vs 解禁忌); 渴望准则 (aspiration criteria); 频率信息与长期记忆; 强化与多样化策略; 路径重连 (path relinking) 与战略振荡; 反应式禁忌搜索 (Reactive TS); 记忆分层体系; 候选列表策略
5	遗传算法与进化计算	编码方案 (二进制、排列、实值、树/图); 选择算子 (轮盘赌、锦标赛、排序、截断) 与选择压力; 交叉算子 (OX, PMX, ERX, 均匀, SBX); 变异与约束处理 (罚函数、修复、解码器); Holland 模式定理与积木块假说; 模式定理的批评; 精英保留收敛性证明; Vose 精确模型; 差分进化 (DE); 进化策略 (ES) 与 CMA-ES
6	蚁群优化	蚂蚁觅食行为与信息素机制; 蚂蚁系统 (AS); 精英蚂蚁系统 (EAS) 与 MAX-MIN 蚂蚁系统 (MMAS); 蚁群系统 (ACS); 信息素-启发式权衡; ACO 的图论基础 (构造图); MMAS 收敛性证明 (Gutjahr 定理); 连续域 ACO; 参数设置与应用实例
7	粒子群优化	速度-位置更新方程; 惯性权重与加速系数; Clerc-Kennedy 收缩因子与收敛条件推导; 拓扑结构 (gbest, lbest, von Neumann, 随机); 随机性分析与轨迹方程; 离散化方法 (Kennedy-Eberhart 二进制 PSO、置换 PSO); 约束处理; PSO 变体与多目标扩展 (MOPSO)
8	自适应大邻域搜索	大邻域搜索 (LNS) 框架; 破坏算子与修复算子设计原则; 自适应权重更新机制 (ALNS); 接受准则 (SA、记录到记录、阈值); ALNS 在 VRP 中的应用 (Ropke-Pisinger); Matheuristics (元启发式与精确方法混合); Fix-and-Optimize 与 Relax-and-Fix
9	超启发式与算法选择	超启发式的分类 (选择型 vs 生成型、在线 vs 离线); 多臂赌博机与 UCB 策略; Thompson 抽样; 自适应算子选择 (AOS); 信用分配与算子概率更新; 算法配置 (irace, SMAC, GGA); 算法选择 (SATzilla, AutoFolio); 自动算法设计 (AutoML for optimization); 深度学习辅助优化 (学习搜索策略、注意力机制求解 TSP)

讲次	主题	内容概要
10	收敛性分析与应用	运行时分析框架（期望首达时间）；适应度层定理 (fitness level theorem)；加法漂移定理与乘法漂移定理；(1+1) EA 在 OneMax/LeadingOnes 上的严格运行时；黑箱复杂度理论（无偏黑箱、存储受限黑箱）；多目标优化基础（Pareto 最优、NSGA-II、MOEA/D）；VRP/JSP 综合应用案例；研究展望

2 参考资料

1. Gendreau, M. & Potvin, J.-Y. (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, 3rd Edition, Springer, 2019. (主教材)
2. Talbi, E.-G., *Metaheuristics: From Design to Implementation*, Wiley, 2009.
3. Doerr, B. & Neumann, F. (Eds.), *Theory of Randomized Search Heuristics*, World Scientific, 2020.
4. Eiben, A. E. & Smith, J. E., *Introduction to Evolutionary Computing*, 2nd Edition, Springer, 2015.
5. Luke, S., *Essentials of Metaheuristics*, 2nd Edition, Lulu, 2013. (免费电子版)
6. Glover, F. & Kochenberger, G. A. (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, 1st Edition, Kluwer Academic Publishers, 2003.
7. Auger, A. & Doerr, B. (Eds.), *Theory of Randomized Search Heuristics: Foundations and Recent Developments*, World Scientific, 2011.
8. Hoos, H. H. & Stützle, T., *Stochastic Local Search: Foundations and Applications*, Elsevier / Morgan Kaufmann, 2004.
9. Dorigo, M. & Stützle, T., *Ant Colony Optimization*, MIT Press, 2004.
10. Williamson, D. P. & Shmoys, D. B., *The Design of Approximation Algorithms*, Cambridge University Press, 2011.
11. Bianchi, L. et al., “A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization,” *Natural Computing*, 8(2):239–287, 2009.
12. Kerschke, P. et al., “Automated algorithm selection: Survey and perspectives,” *Evolutionary Computation*, 27(1):3–45, 2019.

授课信息

- 授课教师：MarkZZZ
- 微信号：MarkZZZ20XX