



智能控制

主讲人：安剑奇 副教授

中国地质大学（武汉） 自动化学院

2020年3月

第五章 分层递阶智能控制





专家控制

- 引言
- 递阶智能控制的基本原理
- 递阶智能控制的组织与协调
- 分层递阶智能控制的应用举例



5.1 引言

➤ 分层递阶的出现

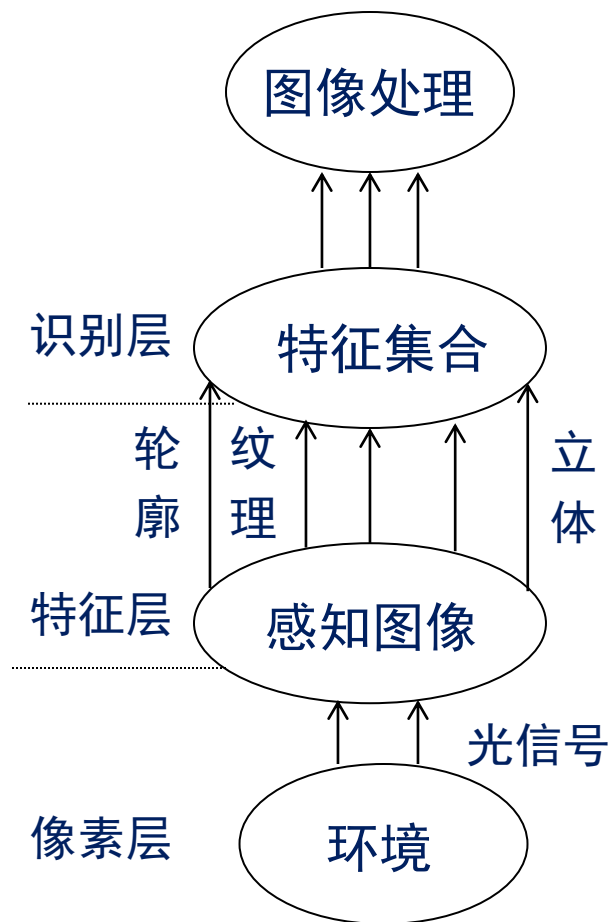
- 分层递阶是人们分析和组织复杂系统的一种常用方法
- 无论是信息分析、还是行为控制，都有其层次性
 - ✓ 高层负责宏观的信息和决策
 - ✓ 低层负责具体的数据和控制
- Saridis在1977年针对机器人控制，提出了一种智能控制的**三级递阶结构**
- 该思想在智能控制中有广泛应用，并进一步推广到了结合信息融合的集散递阶智能控制系统



5.1 引言

➤ 视觉处理的分层递阶

- 实现视觉信息处理有三个层次
 - ✓ 像素层：感光元件对光信号的获取
 - ✓ 特征层：从原始图像中提取的特征
 - ✓ 识别层：通过对特征分析，识别物体、理解环境
- 随着层次的升高，信息越来越宏观，对图像的处理也越深入

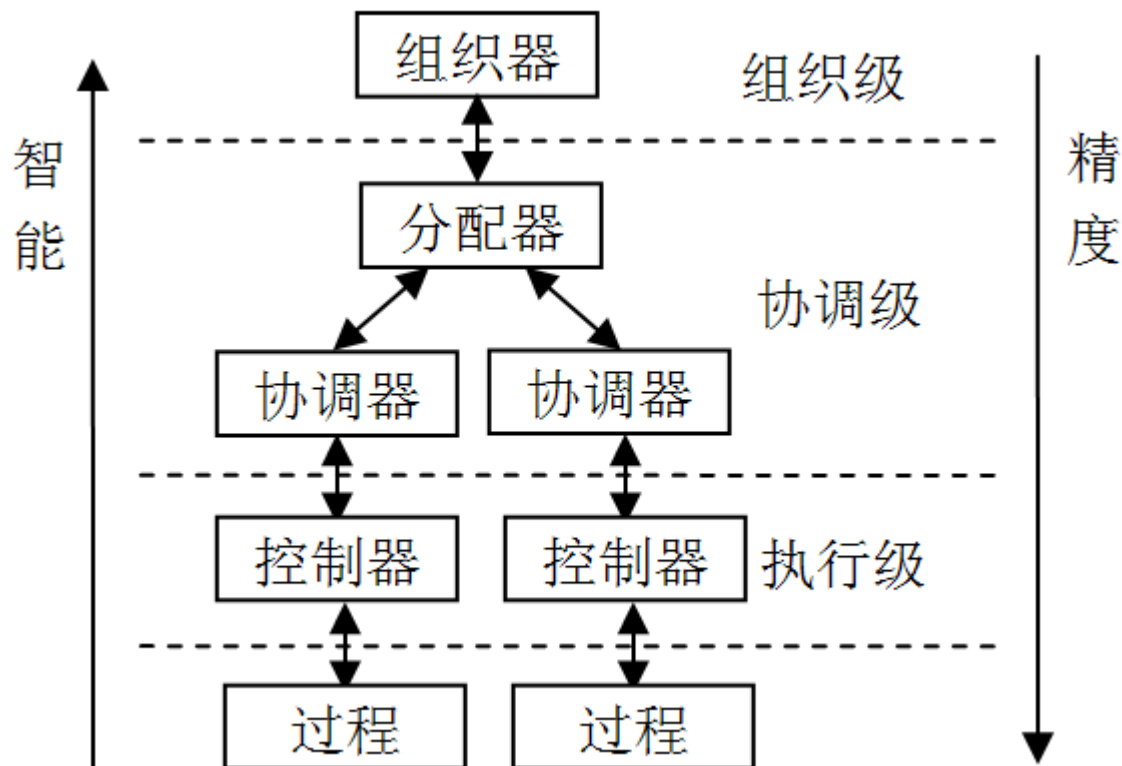




5.2 递阶智能控制的基本原理

➤ 递阶智能控制结构

- Saridis的分层递阶结构共有三层



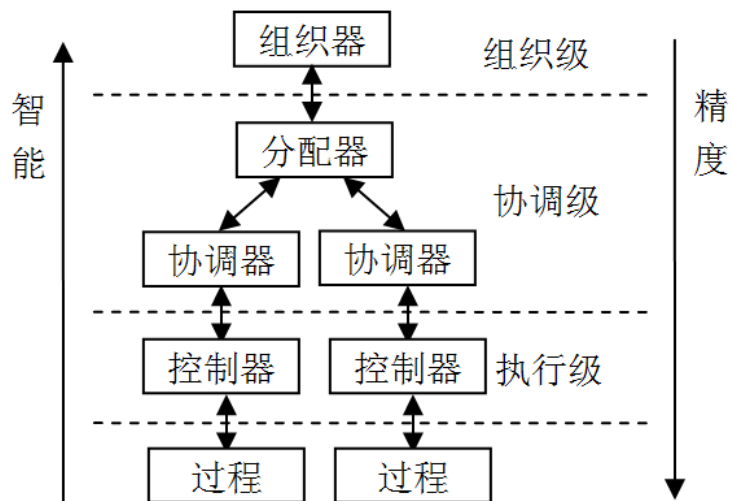


5.2 递阶智能控制的基本原理

➤ 递阶智能控制结构

■ 组织级

- ✓ 负责整个系统的推理、规划、决策、长期记忆、信息交流
- ✓ 智能最高的级别
- ✓ 主要进行基于知识的各种信息处理和决策





5.2 递阶智能控制的基本原理

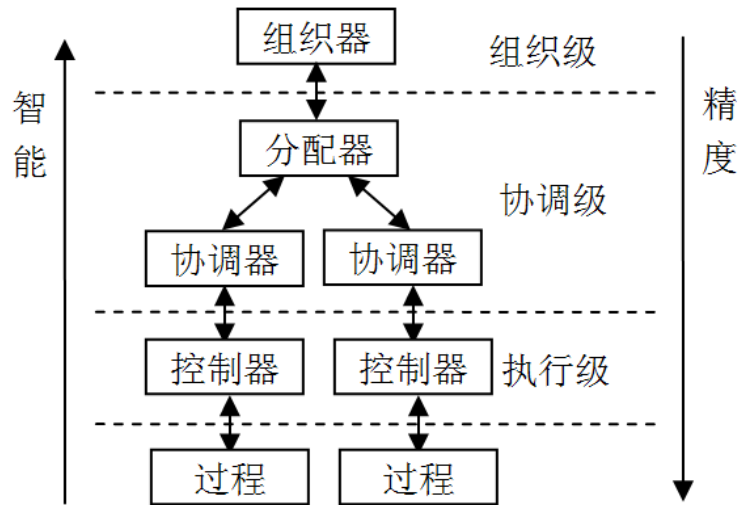
➤ 递阶智能控制结构

■ 协调级

- ✓ 是组织级和执行级的接口
- ✓ 负责将组织级的指令分配为执行级的各项子任务
- ✓ 同时反馈任务执行的信息

■ 执行级

- ✓ 一般由多个硬件控制器所组成
- ✓ 负责具体的过程控制





5.2 递阶智能控制的基本原理

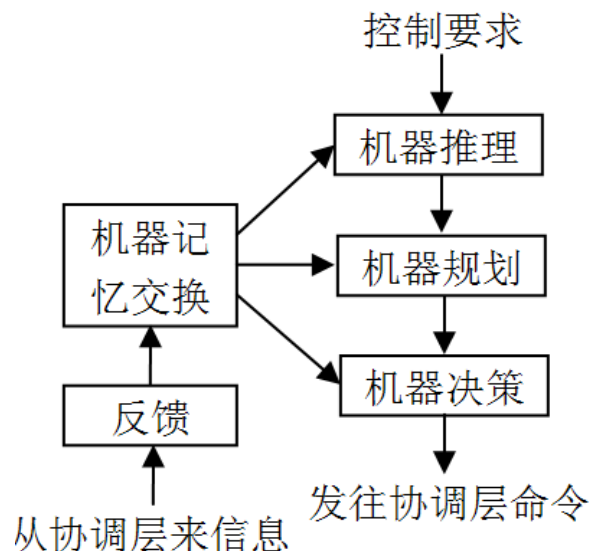
- 对于这种分层递阶的控制系统，越往下层，智能越低，但精度越高
- 这种精度随智能降低而增大的原理被称为 IPDI (Increasing Precision with Decreasing Intelligence)
- Saridis用Shannon的信息熵对这一原理作了说明



5.3 递阶智能控制的组织和协调

➤ 组织级功能

- **机器推理**：根据前提和规则，推出结论
- **机器规划**：根据控制目的，获得任务序列
- **机器决策**：选择最有利的任务序列
- **机器学习和反馈**：对控制评估，更新机器学习算法
- **机器记忆交换**：对存储器进行信息更新





5.3 递阶智能控制的组织和协调

➤ 递阶智能控制的协调级

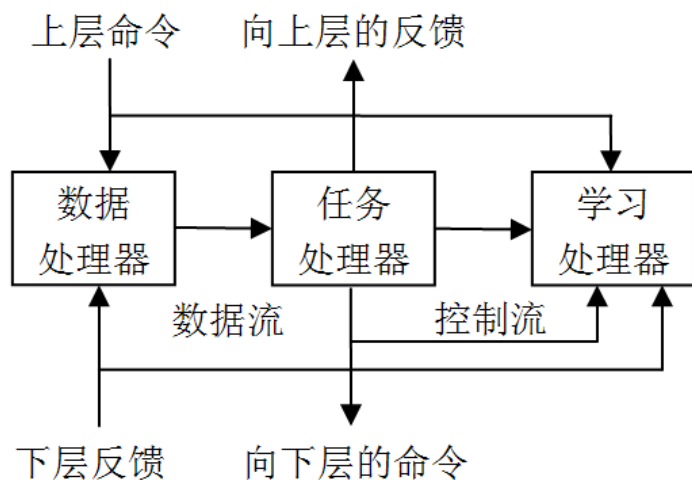
- 将任务序列分解为子任务，根据子任务之间的并行关系，由分配器给低一级的协调器
- 协调器将子任务分解为控制器可执行的控制序列，并保证该子任务最优
- 由于各子任务之间可能存在着耦合关系，分配器还必须根据总的目标，对各子任务的控制序列进行平衡和协调
 - ✓ 例如，在各子任务的控制策略中引入一个协调参数、关联约束，通过预测或修正的方法来进行调整



5.3 递阶智能控制的组织和协调

➤ 分配器和协调器具体功能

- **通讯功能**：与上、下层进行通讯，接收或发送信息
- **数据处理功能**：描述上下层反馈信息，并对自身的决策进行修改
- **任务处理功能**：识别、调度、转换和建立任务，产生下层控制程序，以及对上层的反馈信息
- **学习功能**：根据任务产生的经验，不断减小决策不确定性，改进任务分配能力





5.3 递阶智能控制的组织和协调

➤ 递阶智能控制的执行级

- 执行级完成对过程的控制，可以根据具体情况采用任何控制理论的经典方法

- 设被控系统为 $\dot{x} = f(x, u, w, t)$, $x(t_0) = x_0$

✓ 其中， x 是状态变量， u 是控制量， w 为随机干扰

- 系统的性能指标

$$V(x_0, t_0; u(x, t)) = \int_{t_0}^{t_f} L(x, t, u(x, t)) dt$$

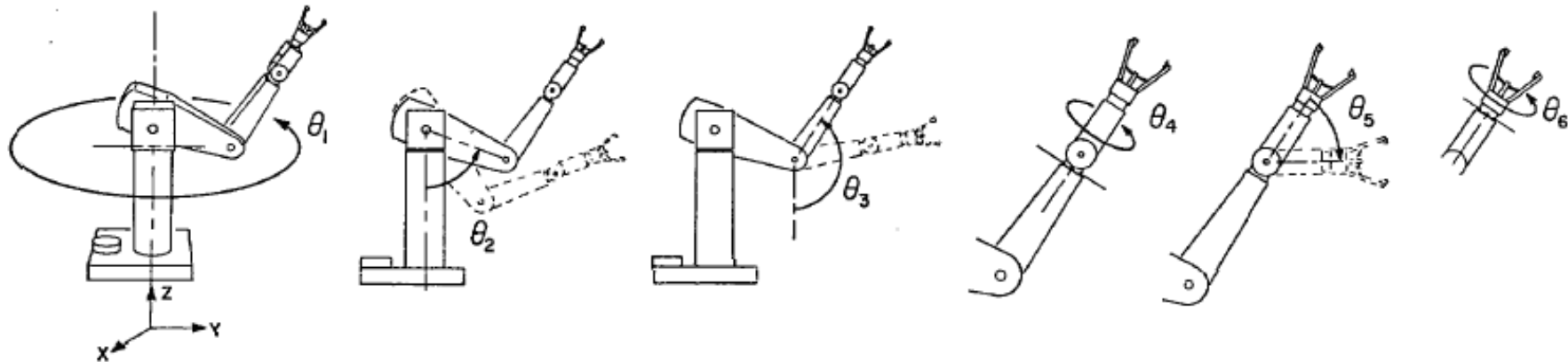
✓ 其中， $L(x, t, u(x, t)) > 0$



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 智能机械手

- 具有6个自由度
- 配有全局摄像头





5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 设计任务

- 假设需要完成两项任务，其对应的指令（Command）分别为 c_1 、 c_2 ：
 - ✓ c_1 ：拾取玻璃杯，注满水并放入指定的地点
 - ✓ c_2 ：拾取书本，并将其放入指定的地点
- 采用分层递阶控制的结构实现

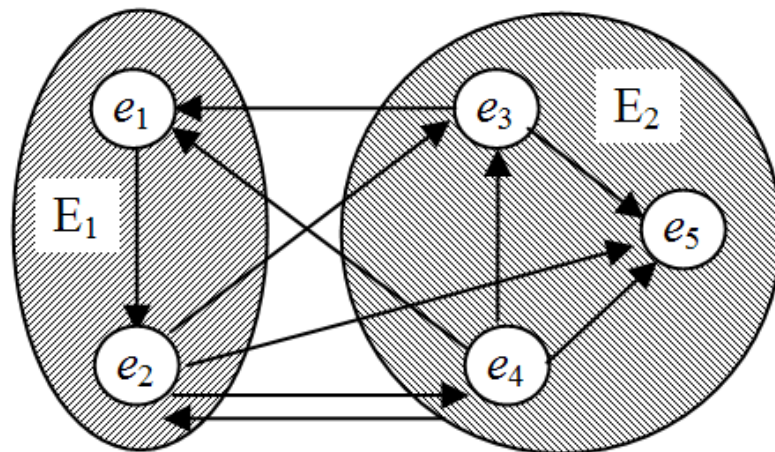


5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 组织层设计—机器推理

- 这些命令涉及了5个事件 (event) :

- ✓ e_1 : 摄像头获取目标
- ✓ e_2 : 机械手移动
- ✓ e_3 : 在水龙头处注满水
- ✓ e_4 : 抓取物品
- ✓ e_5 : 将物品放在指定的地点



- 事件状态转移关系如图



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 组织层设计—机器规划

- 为了找到各种可行的行为序列，将5种事件划分为可重复事件集合 E_1 和不可重复事件集合 E_2

$$E_1 = \{e_1, e_2\}$$

$$E_2 = \{e_3, e_4, e_5\}$$

- 完成指定的任务，必然要经过一系列的不可重复事件
- 完成 c_1 需要：

$$e_4 \rightarrow e_3 \rightarrow e_5$$



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 组织层设计—机器规划

- 完成任务需要一系列的**动作序列**
- 根据摄像头一次能观察到的目标数目，可以得到4种动作序列

$$Y_1^{c_1} = \{e_1, e_2, e_4, e_1, e_2, e_3, e_1, e_2, e_5\}$$

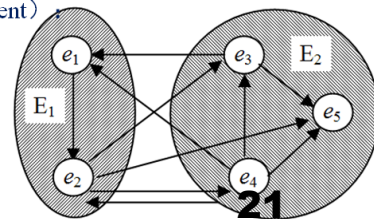
$$Y_2^{c_1} = \{e_1, e_2, e_4, e_1, e_2, e_3, e_2, e_5\}$$

$$Y_3^{c_1} = \{e_1, e_2, e_4, e_2, e_3, e_1, e_2, e_5\}$$

$$Y_4^{c_1} = \{e_1, e_2, e_4, e_2, e_3, e_2, e_5\}$$

这些命令涉及了5个事件 (event)

- ✓ e_1 : 摄像头获取目标
- ✓ e_2 : 机械手移动
- ✓ e_3 : 在水龙头处注满水
- ✓ e_4 : 抓取物品
- ✓ e_5 : 将物品放在指定的地点





5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 组织层设计—其他部分

- 机器决策：选取概率最大的动作序列作为当前的决策

✓ 例如当前任务是 c_1 时，动作输出序列为：

$$Y_o = \arg \max_r \{P(Y_r^{c_1} | c_1)\}$$

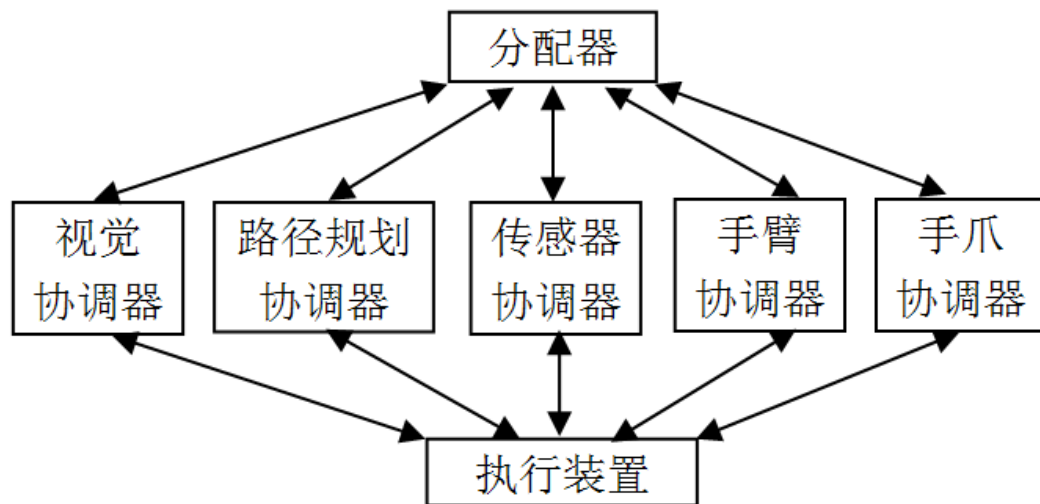
- 反馈：更新相关概率，为下一次决策做准备
- 机器记忆交换：存储更新概率，以及其他必要的反馈信息



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 协调层设计

- 涉及视觉协调 v 、路径规划协调 p 、传感器协调 s 、手臂协调 a 和抓取协调 g 五个部分





5.4 分层递阶智能控制的应用举例

► 协调层设计—任务描述

- 分配器输入：来自组织级的动作序列
- 协调器输入：各协调器的输入，即协调器的子任务序列
 - ✓ 设协调器 c 的子任务为 σ_c ，则各协调器的子任务指令集合 $\Sigma_c = \{\sigma_c\}$
 - ✓ $\Sigma_c = \{\text{contro}_c, \text{proc}_c, \text{analy}_c, \text{send}_{cp}, \text{send}_{pc}, \text{finish}\}$
 - contro_c 为协调器 c 对应设备的数据处理命令，例如获取图像或视觉数据；
 - proc_c 为 contro_c 的数据处理算法，用于去除噪声等；
 - analy_c 为 contro_c 数据的分析和融合算法，获得特征、识别、方位信息等；
 - send_{ab} 为协调器 a 、 b 之间的信息的发送或接收，通讯的方向为 $a \rightarrow b$ ；



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 协调层设计—任务描述

- ✓ $\Sigma_v = \{ \text{contro}_v, \text{proc}_v, \text{analy}_v, \text{send}_{vp}, \text{send}_{pv}, \text{finish} \}$
- ✓ $\Sigma_s = \{ \text{contro}_s, \text{proc}_s, \text{analy}_s, \text{send}_{sg}, \text{send}_{gs}, \text{finish} \}$
- ✓ $\Sigma_p = \{ \text{path}, \text{send}_{vp}, \text{send}_{pv}, \text{send}_{ap}, \text{send}_{pa}, \text{finish} \}$
- ✓ $\Sigma_a = \{ \text{move}, \text{send}_{ap}, \text{send}_{pa}, \text{finish} \}$
- ✓ $\Sigma_g = \{ \text{grasp}, \text{put}, \text{send}_{sg}, \text{send}_{gs}, \text{finish} \}$
 - path 为路径规划算法;
 - move 为具体运动轨线的计算;
 - grasp 为抓取动作;
 - put 为放置动作;
 - finish 为接收过程, 并反馈信息



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 协调层设计—任务翻译

- 任务的调度、转换
- 例如组织级的动作序列： $Y_O = \{e_1, e_2, e_4, e_2, e_3, e_2, e_5\}$
- 则可作如下翻译：
 - ✓ 初始情况下，需要观察环境，则指令 e_1 可翻译为：
 $\{\text{contro}_v, \text{proc}_v, \text{analy}_v, \text{finish}\}$
 - ✓ 发现目标后，将手爪移向目标，则指令 e_2 可翻译为：
 $\{(\text{contro}_v, \text{proc}_v, \text{analy}_v, \text{send}_{vp}, \text{path}, \text{move}, \text{send}_{pv})^+, \text{finish}\}$
(因为括号内部分可能要反复校对，所以用+表示)
 - ✓ 靠近目标并抓取物品的指令 e_4 可翻译为：
 $\{(\text{contro}_s, \text{proc}_s, \text{analy}_s, \text{send}_{sg}, \text{grasp}, \text{send}_{gs})^+, \text{finish}\}$



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 协调层设计—任务翻译

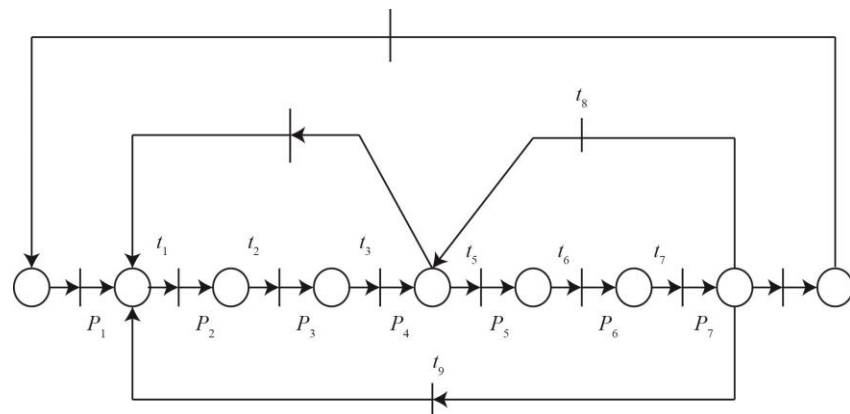
- 协调器的翻译就是将control等子任务翻译成硬件可以执行的指令序列
- 上述指令序列的执行，涉及不同协调器的同步、异步操作
- 对于比较复杂系统，可用Petri网翻译器PNT(petri net transducer)建模



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 协调层设计—Petri网实现

- 便于同步、异步操作；
- 基于Petri网的分配器如图
- 体现各子任务间的约束关系，保证各部分工作协调
- 协调器的设计分配器类似



分配器的Petri网结构图

- ✓ P 为位置，表各种状态
- ✓ t 为位置迁移，表指令序列引起的状态转移
- ✓ 下标 s 代表起点，下标 f 代表终点，
- ✓ 其余数字为中间过程



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 执行级设计

- 针对不同的对象，具体控制算法不同
- 考虑控制机械手臂到期望的位置 x^d
- 控制目标可设为下列函数最小：

$$J(u) = \int_0^T [(x(t) - x^d)^T Q (x(t) - x^d) + u^T(t)u(t)] dt$$

- ✓ 其中 $x = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ ， θ 为对应关节角度， u 为控制输入， Q 为加权矩阵



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 执行级设计

- 手臂运动方程为

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1}(x)N(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1}(x) \end{bmatrix} u(t)$$

- ✓ 其中 $J(x)$ 、 $N(x)$ 为与关节的惯性矩、摩擦系数和静摩擦力等因素有关的矩阵

- 次状态反馈控制为

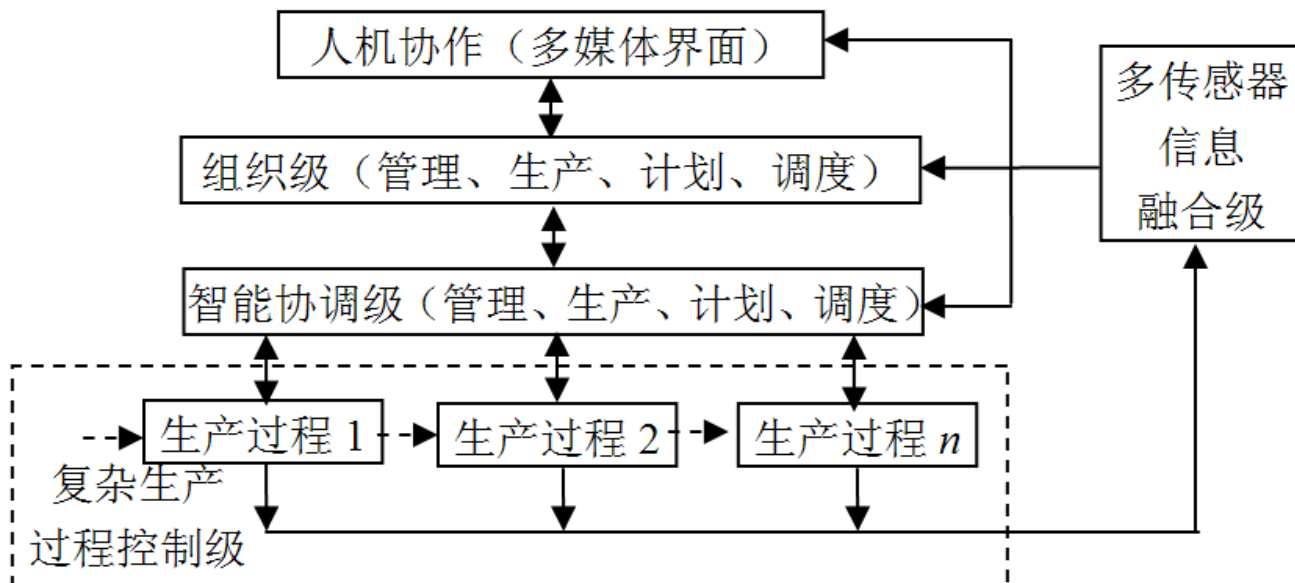
$$u(x, x^d) = -N(x) - J(x)[0 \quad I]^T S[x(t) - x^d]$$



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 集散递阶智能控制系统

- 分层递阶控制的思想不仅仅可以用来控制一个具体对象，也适合于控制一个大规模的**现代化工业企业**





5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 集散递阶智能控制系统

- 该结构在分层递阶结构的基础上，引入了多传感器信息融合技术，智能技术和人机协作技术，包括：
 - ✓ 组织级
 - ✓ 智能协调级
 - ✓ 多传感器信息融合级
 - ✓ 生产过程执行级



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 组织级

- 是整个系统的高层机构，主要完成：
 - ✓ 任务规划，决策，生产计划和优化调度
 - ✓ 对智能协调级的工作进行监督指导和评价
 - ✓ 收集环境信息，接受人的督导，向人提供必要工况过程信息
- 人类专家可以为智能组织提供教师信号，有效的修改智能协调级
- 使整个智能系统的品质逐渐改进，实现整个生产目标的实施



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 智能协调级

- 接受来自组织级的指令和每一次任务执行过程中的反馈信息
- 同时在线实时监控生产过程执行级
- 协调执行级的执行过程
- 优化执行级的控制指标和参数等



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 多传感器信息融合级

- 通过多种传感器采集生产过程中设备运行状态，生产指标参数以及被控对象的反馈信号等
- 经信号预处理，特征处理和信息融合
- 提供组织及协调及融合信息
- 对当前生产过程状态进行识别、决策、控制和故障诊断等



5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 多传感器信息融合级

■ 数据层

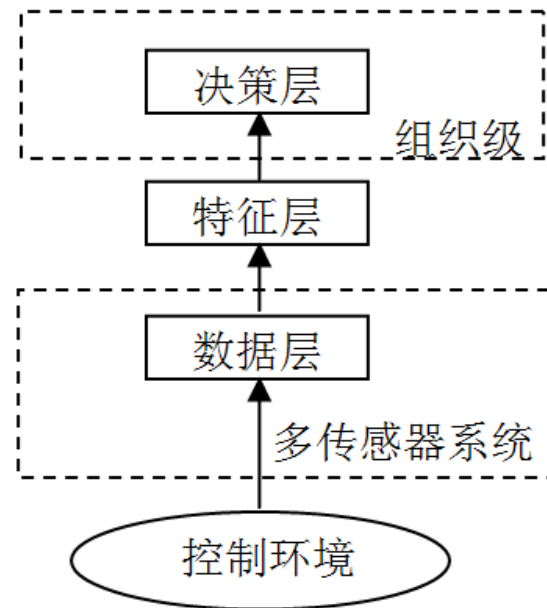
- 对传感器的原始数据进行去噪、滤波、估计等处理
- 主要用来提高数据的精度

■ 特征层

- 描述系统运行状态和环境标准
- 从数据层提供的数据信息中提取

■ 决策层

- 根据特征信息来确定当前的状态
- 并作出控制决策





5.4 分层递阶智能控制的应用举例

➤ 生产过程执行级

- 对生产过程各过程环节、单元回路、被控对象（如转速，位置，温度，压力和流量等）进行特定的控制和检测
- 要求具有过程中的数字模型的知识，过程的终结状态以及由协调器给出的性能指标或代价函数
- 一般应具备4个主要功能
 - ✓ 建模、综合分析决策、过程运行状态优化、直接控制



Thanks!