

规划理论

人工智能

知识表示

数据结构

(17)

62-66

对规划理论研究现状的分析^{*}

Analysis about Current Research on Theory of Planning

刘贵全 陈小平 范焱 TP18

(中国科学技术大学计算机系 合肥 230027)

Abstract This paper analyzed the problems and shortages of the current work on planning and multi-agent collaborative planning, and proposed the basic idea about the research.

Keywords Agent, Planning

1 引言

现在不少人工智能(AI)研究者认为定义人工智能的一种方法就是将它看作是以构建具有智能行为的 agent 为目标的研究领域^[15~16]。从这种观点看,“agent”实际上就是人工智能的核心。自从80年代后期以来,关于 agent 理论及应用的研究取得了很大发展,目前 agent 是主流计算机科学,包括数据通讯、并行系统、机器人、用户接口设计等等的研究人员所讨论的一个主题^[3,4,7~9]。

构建 agent 的经典方法是将它们看作特殊类型的基于知识的系统,这就是通常的符号方法,而相应的 agent 则被称为慎思的 agent。一个慎思的 agent 包含对环境的确切描述的符号模型,并且其决策(例如应采取什么行动)都是基于模式识别或符号处理,通过逻辑推理给出的。这种方法(体系)的核心是规划,实际上,在基于符号方法的 AI 中一直认为某种类型的规划系统是任何人工 agent 最重要的组成部分^[1,12,13,15,16,9,5,6]。本文将对规划研究的现状和进展进行分析。

对于规划的研究现在有两种方法。第一种是以数据结构的观点研究规划的传统 AI 的研究方法,第二种将规划看作是 agent 高层认知状态的集合,其代表是文[14]和文[5~6]。

2 对基于数据结构观点的规划理论的分析

基于数据结构观点的规划理论和方法所依赖的很多假定和限制对于智能 agent 的构建是不适合的。这里,我们先介绍和分析这种方法所采用的知识表示方法,它的理论和技术,并对其中的问题进行分析。

2.1 知识表示方法

这里所讲的知识表示主要指行动的表示。传统的规划方法以数据结构的观点描述行动^[1~4],每个行动可能包含某些或所有以下部分^[10]:

- 一个标题,即描述的行动的名称,例如 α ;
- 一个先决条件列表为执行 α 所必须满足的条件;
- 一个效果列表为 α 执行之后的状态描述;
- 一组约束条件为对算子的合法例化的限制;
- 一个体或者是一组子行动,且它们的完成将导致 α 的完成;或者是一组子目标,而且实现它们后,也就完成了 α 。

以上表示方法存在比较大的问题,因此很难表示很多行动,例如 UNIX 命令 finger(可以把它看作是在 UNIX 系统下的一项行动)。finger 的输入参数可以是一个用户代码或用户的第一个或最后一个名字,它返回的是所有满足如下条件的用户的信息:这些用户的代码或第一个或最后一个名字正好和 finger 的参数相同。如果用上述方法表示 finger, finger 可以认为是给定用户代码而返回用户名,也可以认为是给定用户的第一个或最后一个名字而返回用户的代码等,这会给以往的规划算法带来很大困难。

2.2 对基于数据结构观点规划的分析

基于数据结构观点的规划方法以上述的表示方法描述行动,它接收一个输入目标,然后找到一个行动序列,使得该行动序列的执行能达到目标状态。然而,现实中的规划远非这么简单,以往绝大多数的规划理论及系统针对的是象积木世界这样的玩具领域,并作了各种各样不太现实的假定。例如封闭世界假说(CWA)(即 agent 都是完美的推理者),而且行动及规划的执

^{*} 本文得到了国家自然科学基金的资助。 刘贵全 讲师,博士,主要研究领域为 Agent 理论与应用、机器学习等, 陈小平 副教授,主要研究领域为 Agent 理论、机器学习、AI 基础, 范焱 博士生,主要研究领域为机器学习、KDD。

行都能达到预期效果(即 agent 是不会错的),等等。

传统的规划方法所作出的这些假定对于现实中的 agent 是不适合的,因为传统规划没有考虑 agent 在形成与实施规划时的信念与意图。例如,某人通过打电话到人工智能中心实际上就反映了他的信念(相信 $\times \times$ 在智能中心)及意图(希望通过打电话找到 $\times \times$);而不是说他事先就知道 $\times \times$ 在中心、并且知道打电话能找到 $\times \times$ 。关于信念和意图是 agent 规划的组成部分的其他方面问题的详细分析请参见文[14]。

最后,传统的规划方法针对的是静态世界,而现在讨论多 agent 系统的一个显著特征是其固有的动态性。通过对传统规划的分析, Pollack 对规划进行了重新定义^[14],这将在下面进行讨论。

3 对基于高层认知状态观点的单 agent 规划理论的分析

Pollack 将单 agent 的规划定义为该 agent 的一组高层认知状态,也就是一组意图和信念的集合。Pollack 所称的 agent(说话者或听者)的简单规划(simple plan)包括:关于计划采取的行动的可行性及这些行动之间的关系的信念,以及 agent 对这些行动的意图。形式描述如下:

SimplePlan($A, \alpha_n, [\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}], t_2, t_1$) $\Leftrightarrow$
 1. BEL($A, EXEC(\alpha_n, A, t_2), t_1$) for $i=1, \dots, n-1$ &
 2. BEL($A, GEN(\alpha_i, \alpha_{i+1}, A, t_2), t_1$) for $i=1, \dots, n-1$ &
 3. INT(A, α_i, t_2, t_1) for $i=1, \dots, n-1$ &
 4. INT($A, BY(\alpha_i, \alpha_{i+1}), t_2, t_1$) for $i=1, \dots, n-1$.

其中 SimplePlan($A, \alpha_n, [\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}], t_2, t_1$)表示在时间 t_1 , agent A 有一在时间 t_2 以执行 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}\}$ 来执行 α_n 的简单规划。其中,关系 EXEC(α, A, t)为真当且仅当 A 在时间 t 执行 α 是可行的;关系 BEL(A, P, t)为真当且仅当 agent A 在时间 t 相信 P ;INT(A, α, t_2, t_1)为真当且仅当在时间 t_1 , agent A 意欲在 t_2 做 α 。函数 BY 将两个行动类型映射为一个复合行动类型—BY(α, β), BY(α, β)表示行动通过执行 β 来执行 α 。(在文[14]中,行动被描述为三元组(act-type, agent, time),其中的行动类型 act-type 可以理解为对行动的抽象;agent 和 time 则分别表示行动的实施者和实施行动的时间。例如,击 DEL 键就是一种行动类型;而现在击 DEL 键则是一项行动)。

GEN(α, β, A, t_2)的含义是 agent A 在时间 t 实施行动 α 将导致他/她的另一行动 β 的实施(当然,需要满足合适的条件)。例如,现在击 DEL 键将导致行动:删除本文的部分内容。Pollack 还注意到^[14]:

There are plans and there are plans. There are the plans that an agent "knows"; essentially

recipes for performing particular actions or for achieving particular goal states. And there are the plans that an agent adopts and that subsequently guide his action.

为了区分这两种类型的“规划”,本文也将采纳 Pollack 的用辞并用术语 recipe 来表示第一种类型,一个 recipe 是一(复杂)行动(或任务)分解为子行动(或子任务)的一种抽象描述,实际上也就是完成该行动(或任务)的一种方法。执行一个行动的 recipe 表示了 agent 在采取某种方法做某件事的时候所拥有的知识。

Pollack 的定义有以下不足:(1)定义只是针对单个 agent 的。(2)定义要求 agent 知道他/她要采取的行动的完全知识;然而单个的 agent(多个 agent 更是如此)初始时往往只有关于要实施行动的部分知识。(3)Pollack 只考虑了行动的两种关系:产生(generation)和使能(enablement)(注:一个行动使能另外一个,若前一个行动的执行将为后一个行动建立起某些条件。^[14]);她的“简单规划”中只用了产生(规划被称为是“简单的”也正是由于这个局限)。(4)定义没有考虑行动与目标的关系。

Grosz 和 Kraus 对 Pollack 的理论进行了改进并推广到了多 agent 协作规划。

4 对基于高层认知状态观点的多 agent 协作规划理论的分析

Grosz 和 Kraus 的 SharedPlan 模型^[3,6]是目前最著名的多 agent 协作规划模型,下面将对 SharedPlan 模型进行详细的介绍与分析。

4.1 行动的 recipe

Grosz 和 Kraus 将行动进一步分为行动类型与参数两个部分^[5,6]。参数是在执行行动类型时涉及到的对象,包括一(或多)个 agent 及时间,例如,小陈在上午9点拨打智能中心的电话号码可以看作是将抽象的行动类型“拨打”应用到对象小陈、人工智能实验室的电话号码及时间上午9点上。文[5]假定有一组可用于一具体行动的函数以获得该行动的各种特性,如函数 type 可用于获得行动的类型。但如有可能也可使用更简单的记号来表示行动的特性。例如,用项 T_α 来表示行动 α 的时间特性,即 T_α 为 time(α)的缩写。因此行动 α 可表示为 $\bar{\alpha}(x_1, \dots, x_n)$ 的形式,其中 $\bar{\alpha}$ 表示 type(α),而 x_i 为行动 α 的参数。

在文[5,6]中,行动被分为简单行动和复杂行动。一行动为简单行动意味着,只要条件适合,agent 可立刻完成该行动。复杂的行动又可划分为该行动是由单个 agent 完成的,或必需由多个 agent 才能完成的。元

谓词 $\text{single_agent}(\alpha)$ 为真当且仅当 α 为一单 agent 行动, $\text{multi_agent}(\alpha)$ 为真当且仅当 α 为一多 agent 行动。

对于任一行动 α , 函数 Recipes 将 α 与完成它的一组 recipe 相联系, 即 $\text{Recipes}(\alpha)$ 表示行动 α 的一组 recipe, 行动 α 的一个 recipe 为一组行动描述, 记为 β ($1 \leq i \leq n$), 在适当的约束 ρ_i ($1 \leq j \leq k$) 之下执行这些行动也就完成了 α , 其中下标 i 与 j 是不同的。为了简洁起见, 在不致引起混淆的情况下可省去下标变化范围的描述。 α 为简单行动时 $\text{Recipes}(\alpha)$ 将为空, 这时用一个特殊的记号 R_{empty} 表示, 一个 recipe 可以用一棵树 (称为 recipe 树) 的形式表示出来。例如, 一组 agent GR 抬一张桌子的行动可用图1的形式描述出来, 而图右边是一些需要满足的约束条件。

一个 recipe 只包含一层的行动分解, 若 α 的一个 recipe 中的某个行动 β 不是简单行动, 那么 β 可进行进一步的分解, 而相应的 recipe 树的深度也将增加1。这一过程可一直进行到叶节点上的所有行动都是简单行动为止。这样的一棵树称为 α 的完全 recipe 树 (图2)。在图2中, 节点表示行动, 而一个 recipe 的约束条件集合则显示在相应 recipe (子) 树的右边。

每个 agent 被假定有一个 recipe 库, agent 将随着时间的推移, 可能会不断更新其中的行动类型与/或 recipe。当 agent 计划实施行动 α 时, agent 将用行动类型 $\bar{\alpha}$ 的 recipe 来构造 $\text{Recipes}(\alpha)$ 的元素。不过不同 agent 的库可能会不相同, 而协作规划的成功执行还有可能需要将不同 agent 的 recipe 进行合并。

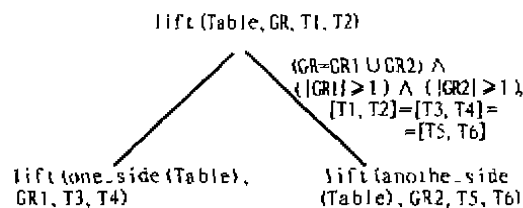


图1 行动“抬桌子”的一棵 recipe 树

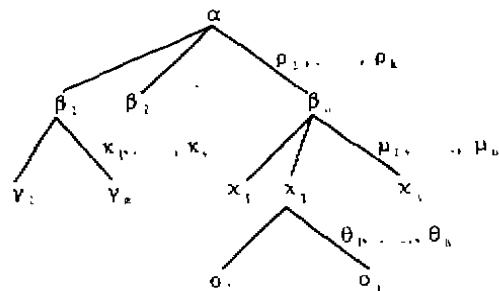


图2 α 的一棵完全 recipe 树

元语言符号 R_i 表示一特定的 recipe; 或更形象地用 $R_i = \{\beta, \rho_i\}$ 来说明 R_i 指的是用 $\{\beta, \rho_i\}$ 表示的一组子行动及相应的约束条件。然而在某些情况下, agent 完成行动 α 的 recipe 是不完全的 (甚至是空的), 因为 agent 可能对完成 (实施) 一行动的知识是不完全的。 R_i 被用来表示这样一个部分的 recipe, 即 $R_i \subseteq \{\beta, \rho_i\}$ 。

在一个 recipe 中可能会包含不同抽象层次的动作, 而行动的参数也可能没有完全确定。因此, 一个 recipe 可以包括未被实例化的变量 (变量的值不定), 例如, 实施行动的 agent 或行动的时间未定。但是, 如果 agent 要形成完全的规划, 这些参数必须是确定的, 并且要符合行动类型。(注: “符合行动类型”的精确定义涉及很多复杂的问题, 在文[11]中已有比较清楚的论述, 在此将不再加以讨论。)

Agent 在其个人规划或他/她参加的协作规划中所欲采取的行动往往是在一定的上下文 (context) 下得到实施的。Grosz 和 Kraus 用记号 C_i 来表示执行行动 α 时的上下文^[3]。本文中的这种上下文包括两种类型的信息。第一种涉及 agent 保持该意图的原因 (这被称为意向上下文 (intentional context)); 第二种涉及对实施该行动的约束条件。当行动 β 的执行是执行某个高层行动 α 的一部分, 即 β 是在为完成 α 的规划过程中被选中的 recipe 的一部分 (agent 意图以完成 β 作为完成 α 的一个步骤) 时, C_β (更准确地说是 $C_{\beta, \alpha}$) 中将包含这一事实; 当然 agent 也可能为了实现其某种独立的愿望而选择执行 β 。如果 β 的执行没有达到预期效果, 那些上下文参数将被用于限制 agent 对 β ——甚至 α 本身——的重新规划。

一 agent 实施行动 β 的能力依赖于执行 β 时的约束条件, 这些约束条件得自于以行动 β 为组成部分的 recipe, 以及该 recipe 被使用时的上下文。其中 recipe 约束就是上面的 $\{\rho_i\}$, 而上下文约束得自于上下文参数, 可形象地表示为 $\text{constr}(C_i)$, $\text{constr}(C_i)$ 与 $\{\rho_i\}$ 一起就是执行 β 时需要满足的约束条件。如果一 agent 在执行 β 时不满足这些约束条件, 那么对于 α 的规划而言, β 的执行将很可能起不到应有的效果; 而这又可能导致某个更大规划的失败。例如, 若大合唱中有人不按预先排练的顺序进行演唱, 那么合唱的效果很可能会很糟糕。

4.2 执行行动所需的知识前提

为了完成一项行动, agent 必须同时满足实施该行动的物理的与知识的前提^[11] (物理前提即传统规划所讲的前提)。例如, 若一 agent 要抬起一支铅笔, 他/她必须: (i) 知道通常应如何抬起一支铅笔; (ii) 能够识别出所讲的具体是哪支铅笔; (iii) 满足抬起一支铅笔的物理前提条件 (如, 他/她必须有一只空手)。如果由于

这些条件不(同时)成立而不能完成行动,那么 agent 可能会通过自己的(重新)规划改正这些错误,或通过对话让其他 agent 来协作解决问题。

Grosz 和 Kraus 在能力算子(CBA 系列)的定义中给出的是关于 agent 完成行动的能力,但是这些算子的定义没有充分考虑到知识前提(上面的(i)和(ii)两种情况);她们只是明确要求 agent 必须满足完成行动所需的物理前提。然而,如果(一组)agent 不具备适当的知识,他/她(们)往往并不能完成给定的行动。因此,在能力的定义里面必须加上知识前提,Morgenstern 指出^[1],agent(s)要完成一项行动必须满足以下几点:

1) Agent 需要知道他/她(们)将要执行的行动的 recipe;

2) 所有 agent 都应该有一组简单行动;

3) Agent 必须能识别出他/她(们)将要执行的行动的参数(以下不区分对象与参数);

4) Agent 对执行该行动的知识可能是不完全的;

5) Agent 有将复杂行动分解为简单行动的知识。

上面第(4)点要求知识前提关系是内涵的而非外延的,在其内部不能自由地将行动的一种表示替换为该行动的另一表示。例如,若 A 不知道 3602824 是人工智能中心的电话号码,那么行动 dial(phone-number (AI-Center),g1,t1,t2)与行动 dial(3603148),g1,t1,t2)是不同的。

4.3 对共享规划模型的分析

Grosz 和 Kraus 将 Pollack 的上述理论推广到了多 agent 协作规划中,她们称之为共享规划(Shared-Plan)模型,类似 Joint Intentions,它的形式化包含了共同信念的概念,并且要求系统成员的行为应与目标一致。但在通讯方面与前一工作是不同的。另外,它要求集体的行动要有一个可信的描述(recipe),这一点也与前一工作有所区别。

具有一个共享规划意味着具有一个共同的认知状态;从共享规划的定义中可以看出^[6],所有的 agent 都有如下的共同信念:

1) 每个 agent 都能在适当的时间完成适当的(子)行动;

2) 有一个完成给定(初始)行动的(共同的)recipe;

3) 每个 agent 都意欲(意图)在适当的时间完成自己的(子)行为;

4) 每个 agent 都意欲(意图)完成自己的(子)行动作为完成给定(初始)行动的一部分。

在她们的模型中,Grosz 和 Kraus 认为当一组 agent 有一实施某个集体行动的协作时,以下问题及其规范是这些 agent 的认知状态的主要组成部分:

1) 关于一个(不完全)recipe 的共同信念共享规划

模型允许行动的 recipe 是不完全的,因此可以处理部分的规划。但是 Grosz 和 Kraus 要求 agent(或 agent 的团体)有一个完全的规划(或协作规划)去找到一个关于给定行动的完全的 recipe;

2) 关于采取(联合)行动的个人意图;

3) 关于协作者采取(某些)子行动的个人意图;

4) 关于子行动的个人或协作规划。

为了刻画意图,Grosz 和 Kraus 引入了四个算子:

Int. To(intention to),**Int. Th**(intention that),**Pot. Int To**(potential intention to),以及 **Pot. Int. Th**(potential intention that)^[5]。**Int. To** 表示 agent 对行动的意图(意欲采取某项行动),**Int. Th** 表示 agent 对状态的意图(意欲达到某个状态);这两个描述的是一 agent 已采纳的意图。而潜在意图表示一 agent 准备采纳的意图,但还需在它们与已采纳的意图之间作一权衡,其思想是激励 agent 在行动的不同进程之间进行权衡。另外一个非常重要的一点是,**Int. To** 和 **Int. Th** 都要求一 agent 不能采纳 agent 知道为冲突的意图。

一 agent 意欲(intention to)采取某项行动时必须相信两点:1)他/她能在适当的时间采取该行动;2)他/她能成功执行他/她意欲采取的任何行动。最后一个条件非常强,若 agent 不能完全确信自己能完成一行动,他/她甚至不会去尝试该行动,显然,这与我们的直觉是不太符合的。

在此模型中,对通讯的需求来自 **Int. Th**,这与 Joint Intention 模型是完全不同的。具体地说,在关于 **Int. Th** 的公理中,如果一 agent 希望(intention that)某集体行动能够成功,那么他/她将采纳一潜在意图去采取任何他/她相信(直接或间接地)有助于完成该集体行动的^[5]。如果该 agent 相信传达其行动的失败、信念等信息对成功执行集体行动是有帮助的,那么他/她将传达这些信息;但这样的解释是比较牵强的,因为什么叫“对成功执行集体行动有帮助”在共享规划模型中并没有说明。

共享规划模型还对委托进行了研究,委托就是让一 agent 去执行另一 agent 的某些或全部行动。一 agent 为了方便(或自己的私利)或因缺乏知识,可能希望将某些他/她本来接受的行动委托给其他 agent,但是,委托行为不要求两个 agent 具有某种共同的认知状态^[6]。

综上所述,Grosz 和 Kraus 的模型有以下几点不足之处:

1) 对 **Int. To** 的定义过强。当 agent 不相信他/她能完成某一行动时,他/她很可能不去尝试该行动。这使得通常的规划方法或问题求解方法很难被满足此模型的 agent 所使用。

2) 由于委托行为不要求两个 agent 具有某种共同的认知状态, 因此委托并不是对某个共同目标的承诺; 委托只要求受委托者同意接受其他 agent 的某些任务, 而不必具有关于完成这些任务的认知状态。这样一来, 受委托者在完成委托任务的过程中失败时, 他/她可能并不去通知委托给他/她任务的 agent。

3) 在共享规划模型的能力定义中没有考虑执行知识前提, 但实际上这是需要的。

4) Grosz 和 Kraus 的共享规划模型中缺乏相互的承诺, 并且通讯问题也未能很好地解决。尽管她们认为这可以通过 *Int Th* 来达到, 即若某 agent 发现某个(子)目标无法实现或某(子)任务(或行动)无法完成时, 他/她会形成一个潜在意图通知相关的 agent; 但由于潜在意图需要与其他(潜在)意图进行权衡, 因此不能保证能(及时)被调度到。这就使得在(子)目标无法实现或(子)任务(或行动)无法完成的情况下, 某些 agent 还将继续为实现(或完成)该(子)目标(或行动)而努力, 这显然是不合理的。

5 我们的基本想法

我们的基本想法和 Pollack 与 Grosz & Kraus 相似, 即把 agent 的个人与协作规划描述为该 agent 的一组认知状态, 但将比她们的模型能更好地描述(个人及协作)规划。具体表现在: 1) 将更深入地讨论 agent 采取的行动与他/她的信念、意图及目标之间的关系; 2) 除了克服已有模型的缺点外, 还将研究多个 agent 为达到某一目标时的协作规划(可以称之为慎思式的协作规划), 对于这一问题, 现有模型都未讨论过^[2,5,6]。

参考文献

- 1 Chapman D. Planning for conjunctive goals. *Artif. Intell.*, 1987, 32: 333~378
- 2 Cohen P R, Levesque H J. Teamwork, Technote 503. SRI International, Menlo Park, CA, 1991
- 3 Cooley R, et al. Grouping Web Page References into Transactions for Mining World Wide Web Browing Patterns. University of Minnesota, 1997
- 4 Davies W, Edwards P. The Communication of Inductive Inferences. In: Weß G Ed. Distributed Artificial Intelligence Meets Machine Learning (Learning in Multi-Agent Environments), 1996. 223~241
- 5 Grosz B J, Kraus S. Collaborative plans for complex group action. *Artif. Intell.*, 1996, 86: 269~357
- 6 Grosz B J, Kraus S. The Evolution of SharedPlans, in A Rao and M. Wooldridge, Foundations and Theories of Rational Agency, 1998
- 7 Han E, et al. WebACE: A Web Agent for Document Categorization and Exploration: [Technique Report]. University of Minnesota, 1998
- 8 Bijn Hermans. Intelligent Software Agents on the Internet: an inventory of currently offered functionality in the information society & a prediction of (near-) future developments. Available at: <http://www.hermans.org/agents> 1996
- 9 Jennings N R. Controlling cooperative problem solving in industrial multi-agent systems using joint intentions. *Artif. Intell.*, 1995, 75: 195~240
- 10 Knoblock C A. Automatically generating abstractions for planning. *Artif. Intell.*, 1994, 68: 243~302
- 11 Morgenstern L. Knowledge preconditions for actions and plans. In: Proc. of IJCAI-87. Milan, Italy, 1987. 867~874
- 12 Pollack M E. Inferring domain plans in question-answering. [Ph. D. Thesis] Department of Computer Science and Information Science, Moore School, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, 1986
- 13 Pollack M E. A model of plan inference that distinguishes between the beliefs of actors and observers. In: Proc. 24th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, New York, 1986. 207~214
- 14 Pollack M E. Plans as complex mental attitudes. In: Cohen PR, et al. eds. Intentions in Communication. MIT Press, Cambridge, MA, 1990. 77~104
- 15 Wooldridge M, Jennings N R. Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey. In: Wooldridge M J, Jennings N R, eds. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Amsterdam, The Netherlands, 1994. 1~39
- 16 Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent Agents: Theory and Practice. Knowledge Engineering Review, 1995, 10: 115~152

欢迎订阅“计算机科学”