来源：Artificial Intelligence

主题：人工智能

论文题目：自动推理中模拟的范围和限制

摘要：

在科学计算和逼真的图形动画中，模拟（即逐步地计算物理系统的完整轨迹）是最常见且重要的计算模式之一。在本文中，我们针对涉及高级物理推理的AI任务，阐述了仿真使用的范围和限制。我们认为，在许多情况下，模拟最多只能发挥有限的作用。当任务是预测时，当可获得完整的信息时，当可获得合理高质量的理论时以及当所涉及的比例范围在时间和空间上都不是极端时，模拟是最有效的。如果不满足这些条件，则模拟效果不佳或完全不合适。我们讨论了物理推理问题的十二个特征，这些特征对基于仿真的推理提出了挑战。我们简要地调查了不依赖模拟的其他物理推理技术。

**1.简介**

计算机仿真——广义上讲，是对随时间演变系统的轨迹进行详细跟踪的计算，已经无处不在。程序员已经创建了非常详细的模拟，模拟了血浆中2亿个可变形红细胞的相互作用[51]；直升机叶片周围的气流[46]；碰撞星系的相互作用[3]；以及在水箱下爆炸装置造成的伤害[59]。可以实时模拟各种材料（包括刚性固体，布料和液体）相互作用的软件，例如NVidia PhysX，可供游戏设计师作为现成的免费软件使用[31]。 在人工智能（AI）程序中，仿真已用于物理推理[28,48]，机器人技术[45]，运动跟踪[61]和计划[67]。

同样，在认知心理学中，模拟已被提倡用于基础物理推理，对其他思想的推理，语言理解以及许多其他认知功能的主要机制[43]。例如，Kaup等人[32]提出“创建模拟对于理解语言是必要的”，而Battaglia等人[2，p.18327]提出了一种物理推理模型。

基于“直观物理引擎”的一种认知机制，可以模拟视频游戏和图形中的丰富物理，类似于计算机引擎，使用近似的概率模拟来进行可靠而快速的推断。

类似地，Sanborn等人[54]提出“人们关于诸如碰撞物体之类的物理事件的判断”是基于对牛顿物理模型的最优统计推断，该模型结合了感官噪声和关于被观察物体物理特性的内在不确定性。”

对于许多推理任务而言，仿真无疑是一种功能、直观而吸引人的工具。但是，认识到它的局限性也很重要。在这里，我们分析了模拟的范围和局限性，将其作为通用AI的自动物理推理技术。（在另一篇论文中，我们分析了认知模型中的相应限制[42]。）对任务进行了分类，其中模拟效果很好，并且可以作为推理机制。分为模拟根本不起作用的任务，因此不可能作为推理机制；和可以进行模拟的任务，但是其他技术可能会更有效。

**2.物理系统的计算机模拟**

在典型的模拟中，输入应该是对初始方案的详细描述。然后，该程序使用域的动态定律在不久后推断出场景状态的同样详细的描述。程序继续将每个状态外推到下一个状态，直到满足某些停止条件为止。以该程序返回状态的整个轨迹，作为对将要发生的事情的预测。表1以伪代码显示了此过程的描述。

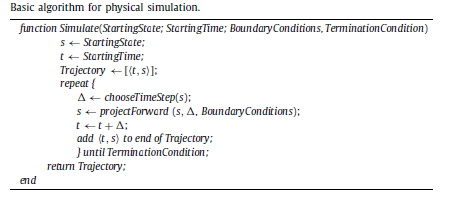


表1

例如，考虑一个球掉落到地面上。在该模拟中，给定时间t的初始状态是根据球的高度x（t）及其速度v（t）来确定的，两者均向上测量。 为了从时间t的一个状态推断到时间t +△的下一个状态，我们计算出高度下降了当前向下速度△的乘积，而下降速度则是重力加速度△乘以g。

x (t+△ ) =x(t)+△\*v(t)

v (t+△ ) =v(t)-△\*g

当x（t）≤0时，模拟停止，因为此时球已击中地面。

一些模拟，例如对飞机空气动力学的评估，旨在达到高精度。它们在物理现象和所考虑的场景方面都非常专业；并且它们涉及巨大的计算负担。而关于其他方法，例如用于实时动画的仿真（尤其是在视频游戏中），通常是在个人笔记本电脑上实时而不是在超级计算机上离线，是针对合理的图像而不是物理精度。

处理物理对象的AI程序经常有充分的理由使用模拟。尽管存在许多技术难题（下面将进行许多描述），但是仿真在概念和方法上都很简单，而且实现起来也相对简单。此外，仿真可以直接用于产生可见的动画，这对于最终用户以及程序开发和调试都非常有用；更多的是功率、质量和范围不断增加的物理引擎都可以公开使用。在某些情况下，它们代表了理想的解决方案。

**3.仿真：自动化系统中的挑战**

但是，对于非专家而言，容易高估物理模拟的最新水平，并假设有一个即插即用的物理引擎可以在几乎任何物理情况下工作。尽管物理引擎现在视频游戏中很普遍，但是在现实世界中，它们的保真度通常非常有限。即插即用引擎仅捕获狭窄定义的环境；更复杂的应用程序需要专家的辛勤工作。灾难片中几秒钟的逼真的CGI可能需要花费几天的工作。准确而复杂的科学计算可能需要几个人月。

Nils Thuerey（个人交流）写道，这些模拟存在内在的困难：我们离精确模拟周围自然的复杂性还差很远。另外，众所周知，常用的数值方法难以微调和控制。

即插即用物理引擎也会受到错误和异常的影响，并且可能需要仔细调整才能正常工作。在对七个物理引擎的系统评估中，Boeing和Bräunl[4]发现，对于涉及固体物体的某些简单问题，所有七个引擎均给出了明显且明显错误的答案。

在本节中，我们回顾了在构建仿真时出现的十二个挑战，其中一些广为人知，而其他则较少。它们共同帮助阐明了模拟何时可以和不能用作自动物理推理的合适工具的范围和限制。

**3.1. 寻找合适的建模方法的挑战**

在某些情况下，实现模拟器的第一个障碍是开发领域模型，这是众所周知的。但是，即使对于熟悉的对象，材料和物理过程，选择合适的模型通常也很困难。迅速改变温度的物理系统理论（“非平衡热力学”）目前存在很大差距。液体和气体的理论也有很大的差距，包括湍流[7]和柔性固体与液体的相互作用，例如在游泳中发生[56]。在作为日常活动中遇到的最简单材料的刚性固体理论中，对碰撞的分析尚未完全解决[30,58]。

即使在平凡的情况下，找到合适的模型也可能具有挑战性。例如，考虑使用工具切割材料。一个普通的家庭可能有十几种切割工具：几种厨刀；更专业的厨房设备，例如刨丝器和削皮器；几种剪刀；钻，锯，割草机等。（还有很多专家，例如木匠或外科医生。）大多数人都知道应该如何使用它们，如果您对材料使用了错误的工具，将会怎样？例如，如果您试图用剪刀剪柴。于是，很难在物理学或工程学文献中为这些模型找到好的模型。

**3.2. 时间离散化的挑战**

大多数仿真算法都采用离散的时间模型：时间线通常由一系列离散的时刻组成；假设系统在分离瞬间的间隔内遵循均匀的轨迹。在某些情况下，将连续的物理时间转换为离散模型是没有问题的，但是在广泛的问题中，这种转换会带来困难。

例如，考虑在模拟刚性对象时选择适当的时间增量的问题。如果选择的值太小，则必须计算许多时间步长，从而增加了计算负担。如果太大，则两个对象可能在一个时间点与下一个时间点之间碰撞，互穿并彼此穿过。例如，假设您在空中拿着一个光盘（X），然后从上方1米处直接将另一个（Y）放到光盘上。到Yreaches X时，它以大约4.5m / sec的速度行进。如果时间增量大于毫秒的三分之一，则将错过碰撞（图1）。正如波音和布劳恩[4]所展示的那样，当前的物理引擎无法避免这种错误。

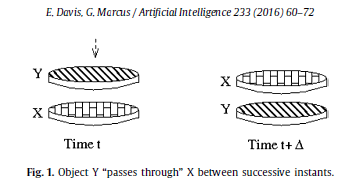


图1

或者，可以准确计算下一次碰撞或状态更改的时间。但是这种计算可能极具挑战性。

时间离散也可能导致更细微的问题。例如，如果刚性摆的模拟使用简单的Euler方法从一个时间点更新到另一个时间点，则该模拟将错误地预测该摆来回摆动几次，并在一个更大的角度上每次摆动，直到最终它在一个方向上以完整的垂直圆旋转。为避免这种情况，需要更复杂的更新过程。在物理性质比钟摆更丰富的领域中，例如流体动力学，这些问题可能以更为复杂的形式出现[6,23]。例如，许多用于流体模拟的基本方法都具有不受欢迎的特征，即系统中的流体量会随着时间而稳定减少。

**3.3. 不连续动力的挑战**

在某些问题上，对起始状况的微小变化会导致总体轨迹的相应较小变化。例如，如果将大炮的角度改变很小，则球的路径只会稍微改变。在其他问题中，两个几乎完全相同的起始情况可能导致明显不同的行为。在这种情况下，测量和仿真都需要极高的精度，以确保获得准确的答案。考虑一下滚动模具的问题，这是一个物理过程的原型，其结果很难预测，并且初始条件中的细微差异会导致完全不同的结果。尽管对模具滚动进行近似的计算机模拟并以动画形式进行渲染是相对容易的，但是即使精确地指定了起始条件，也很难准确地预测实际骰子滚动的结果[29]。

一个相关的问题是，仿真器可以进行数学上正确的预测，但由于不稳定而无法进行物理预测。例如，由波音和Bräunl[4]测试的所有七个仿真器均错误地预测，如果将三个球体准确地落在另一个球体上，则它们会堆叠。

**3.4. 选择理想化的挑战**

几乎所有模拟都代表理想化；在某些情况下，摩擦被忽略，在另一些情况下，三个维度被抽象为两个。在大多数情况下，许多不同的理想化都是可能的。理想化的选择应该使得，一方面，计算不会不必要地困难，另一方面，保留了局势的重要特征。例如，考虑弦上的摆的模拟。如果您使用的是现成的物理引擎，那么您将使用引擎支持的理想化之一。例如，典型的引擎可能会将鲍勃模型建模为扩展的刚性形状，并将弦模型建模为抽象约束，该约束要求两端相对的物体之间的距离不超过固定长度。在这种情况下，模拟摆需要您指定摆的结构，摆锤的质量和形状，弦的长度以及摆锤的初始位置和速度。相比之下，新生物理学的学生可能会将鲍勃近似为一个点质量，该点质量被限制在固定半径的圆上移动；由此产生的仿真肯定会更容易执行，并且可能会更加准确。但是，要以这种方式进行模拟，学生必须事先了解该行为的基本形式，即鲍勃摆动时琴弦保持完全伸展。

其他情况更复杂。摆锤可能会在水平圆圈内摆动；在弦轴上旋转；像溜溜球一样绕其质心旋转，或在空中飞舞（图2）。线本身可能绷紧，松散，缠结，打结或扭曲；它可能会挡住鲍勃；它甚至可能解散或折断。尽管这些行为对于那些花费大量时间在弦上演奏对象的人来说都是熟悉的，但几乎没有现有的物理引擎支持弦的紧绷和松散状态，甚至可能会折断。

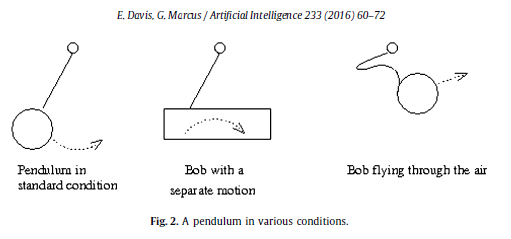


图2

关于弦和鲍勃的这些不同可能行为的有效推理需要使用各种不同的理想化方法。空间可以是二维的，也可以是三维的。摆线可以理想化为点对象，刚性对象或弹性对象。可以将长度为L的字符串理想化为抽象的约束摆锤运动的约束。有质量或无质量的长度为L的一维曲线;或具有均匀或具有某种内部结构（例如，从螺纹或链节中扭出）的三维柔性物体。对系统的影响可能仅限于重力，或者可能包括摩擦和空气阻力。在查看任何经过精心设计的模拟时，很容易忘记选择正确的理想化需要进行多少精心的工作。到目前为止，还没有算法来保证有效解决任意问题。尽可能使用最现实的模型不是万能药。高度逼真的模型都需要更费力的计算和更详细的信息。

而且，不同的高质量物理引擎可以针对单个问题给出根本困难的预测，尤其是当问题涉及带有反馈的设备时。[5]图3显示了由三种不同的物理引擎为潜艇机器人尝试沿着墙壁而计算的路径。即使正如波音和Bräunl所强调的那样，这三者完全不同，所有三个结果均来自“有效且可接受的流体模拟方法”。

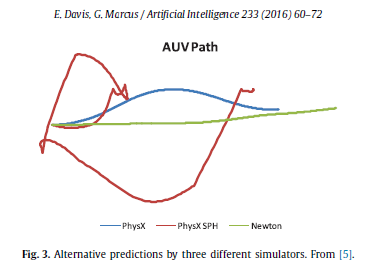


图3

3.5. 快速得出“简单”推论的挑战

模拟的输出始终是精确的，但并非总是准确的。推理程序通常不需要模拟所提供的精确度。例如，考虑一个孩子，他已经建造了一个积木塔，现在正计划用另一个积木击中它以将其翻倒。孩子通常不需要知道每个单独块的最终布置细节，也不需要知道可能的最终布置的概率分布。知道塔将以令人满意的掉落而倒下就足够了。同样，如果您在崎岖不平的道路上骑自行车，同时携带一个半满的封闭水杯，那么重要的是水会留在杯内，而不是溅在杯内的水的轨迹。在这种情况下，完全详细的模拟似乎是效率低下且不合适的工具。

有许多种规则可以快速推断结果或将结果从已知情况快速转移到新情况。时间和空间下的不变性：如果某个机制在周一在家中以某种特定的方式起作用，那么它将在周二以相同的方式起作用。无关紧要的不变性：如果将广口瓶装在架子上，并且用几美分装满，便仍然可以放在架子上。比例变化时的不变性（对于某些物理理论，例如运动学）：一对大型齿轮的工作原理与较小比例模型的工作原理相同。近似值：如果一个水罐装一加仑水，则另一个尺寸和形状相似的水罐装一个加仑水。在相关尺寸上订购：如果玩具可以装在盒子里，那么它将按照正确的“更大”的定义装在更大的盒子里[14]。分解：如果系统由两个未耦合的子系统组成，则可以分别推理每个子系统。

也可能有经验法则：对常见情况的有用概括。例如，如果您在办公室洒了一杯咖啡，则不必通过模拟来推断咖啡不会在其他办公室出现。相反，可以使用经验法则，即从中等“高度”落到水平表面上的少量液体最终会与掉落点“少量”，“中等高度”的位置相距不远，和“不太远”有一些非常近似的定量测量。

此外，在模拟扩展严重的情况下，这些替代形式的推理可能会做得很好。请考虑以下情形：将多个对象放在一个盒子中，合上盖子，然后剧烈摇动。现在，我们想推断出对象仍在盒子中。随着对象数量的增加，对象运动的模拟将迅速变得更加复杂，对象的形状变得更加复杂，盒子的晃动也变得更加复杂和剧烈。相反，有一条简单的规则：“一个密闭容器中的对象保留在容器中”足以进行推断。

**3.6. 整合物理外信息的挑战**

在某些情况下，可以使用物理外信息更可靠，更有效地进行物理系统的推理。假设您看到一个棒球投手扔了一个球。如果您模拟球的运动，则可以使用最佳信息，收集有关球离开手时球的角度、速度等信息，并考虑该信息的不精确性，从而可以预测击球手接近球的可能性很小。 您将获得更好的结果——依靠已知的投手准确性，再加上有关比赛状态和投手愿意接受的非常具体的信息，预测球将最终落在打击区附近，无论是在球内还是在球外。

**3.7. 信息不完整的挑战**

通常只有在精确了解初始条件的几何和物理特征的情况下，才能进行物理模拟。在许多常见的现实情况中，必须根据部分（有时是极其有限的）信息进行推理。感知可能不完美或不完整。例如，对象可能被部分遮挡。（不透明的对象总是将自身挡在观看者的远端。）物理情况的知识可能来自自然语言的文本或草图。有关情况方面的知识可能来自推论。例如，如果您看到有人尝试提起手提箱失败，则可以推断出手提箱异常沉重；然后您可以将该推断用于未来的预测。或者可能尚未确定确切的细节。例如，假设您要去家具店购买餐桌。您可以推断，即使您尚未选择特定的桌子，也将无法步行或骑自行车回家。

当然，没有任何表述是真正完整或完全精确的。在任何表示中，一些方面被省略，一些方面被简化，并且一些方面是近似的。但是，模拟算法要求相对于给定的描述级别完全指定场景的初始条件。也就是说，表示框架指定了实体与实体属性之间的一些关键关系。相对于该框架的情况的完整表示将枚举与该情况相关的所有实体，并指定框架中所有实体之间的所有关系。该描述必须足够详细和精确，以相同的意义同样充分地说明下一时间步的情况。

**3.8. 不相关信​​息的挑战**

在物理推理中，就像在大多数形式的推理中一样，重要的是要专注于情境的相关方面，而忽略无关紧要的方面。

在建模和仿真中，通常会手动排除不记名情况。进行仿真的人员根据相关特征来提出问题，而忽略不相关的特征。但是，这种权宜之计不适用于一般的AI程序或认知理论。必须有一个定义明确的过程来排除物理推理中不相关的信息，而且很难看到这种排除过程本身如何可以依靠模拟。

例如，假设您正在郊游集市中间野餐。您从热水瓶倒柠檬水，而周围的集市却热闹非凡。摩天轮在转动，狂欢节的叫声在叫，热狗摊贩在烤热狗，等等。在大多数情况下，在推理倒柠檬水的过程中，您可以放心地忽略所有其他活动。

作为第二个示例，让我们回到第3.7节中讨论的自动生成螺母和螺栓样本的问题。假设您对螺栓的形状有一些不相关的信息：它是规则的七边形，制造商的会标刻在一侧。如果将其作为给定信息λ的一部分包括在内，那么生成满足λ的随机样本的问题就变得困难得多。

**3.9. 刻度范围的挑战**

请考虑以下情形。到了晚上，您抬头看着北斗七星，可以看到北极星。但是，如果您闭上眼睛，则看不到北极星。

我们怎么知道呢？尽管原则上可以使用物理引擎进行计算，但实际上，这种方法非常笨拙。使用模拟来理解这种情况的自然方法是模拟从北极星向随机方向发射的光子，然后继续进行模拟，直到获得符合观察者瞳孔的可观光子集合为止。（为了获得正确的颜色，至少需要三个光子。）问题出在所涉及的刻度上。您会看到北极星处于其观察到的亮度和颜色，因为每100毫秒，来自北极星的约500,000个光子到达您的瞳孔。北极星距离地球433光年，因此它们是在公元1580年发出的。北极星发出的特定光子会遇到一个特定的1cm2瞳孔的概率约为3×10-42。即使使用高速计算机，也无法通过在如此巨大的规模上跟踪单个光子来进行计算。

仍然主要依赖于仿真的不太直接的解决方案会增加自身的复杂性。假设我们可以避免概率模拟的问题，而是直接生成一个光子的模拟，该光子从Polaris开始并沿直线传播到眼睛。这涉及到在多个时间点对具有约束的模拟进行插值的问题，这将在下一节中讨论。即使这样，时间离散的问题仍然存在。如果我们将时间离散化为相等的时间步长，那么要检测光子与1mm厚的眼睑的相互作用将需要10-11秒的时间步长，因此跨越400年需要大约1020个时间步长。在所有这些时间步长中，除了一个时间步长之外，光子在空的空间或大气中前进1毫米。显然这是不可行的。相反，模拟必须仅表示发生有趣事件的时间点。一个人可以在模拟中保留小部分角色，但随后的大部分工作将决定要包含在模拟中的内容。执行模拟最多只能提供一个很小的难题。

当然，计算夜空的外观没有困难。简单的天文学程序就可以做到这一点。困难在于将其与可能干扰光通过的物体的推理结合在一起。例如，一个天文学的学生应该很容易确定或推断，如果他闭上眼睛，他将不会看到北极星；小行星带中一英里宽的小行星可以遮挡一颗恒星，但仅需不到一秒的时间；绕北极星运行的一英里宽的物体不会遮挡北极星，依此类推。

在科学中，整合各种规模的推理是很常见的。恒星的进化与核反应有关。这涉及大约1057的质量比。这大约是1034的倍数。日常生活中还涉及很大的比例，尽管这不是天文数字。已经开发出可以处理各种规模的专用仿真技术。例如，Vogels-berger等人[60]描述了宇宙学演化的模拟，其线性范围从100兆秒到48秒之间跨越了6个数量级。但是应该可以执行上述简单的推论，而无需调用这种非常复杂，计算量很大的技术。

**3.10. 预测以外的任务挑战**

模拟最容易用于生成预测的任务，例如在给定的瞬间摆的位置。但是，还有许多其他重要的物理推理任务，基于模拟的技术通常不太适合这些任务。一些例子：

**两个状态在两个不同时间之间的插值：**看北极星是一个简单的例子。光子于公元1580年离开北极星。现在到了眼前一个希望在两者之间进行插值。

**计划：**给出起始情况和目标，找到在起始情况下执行时将实现目标的计划。例如，在开始的情况下，假设一个装满水的水罐和一个空的玻璃杯，并且目标是玻璃中有水，则计划将水从水罐倒入玻璃杯中。大多数模拟设备不足以开发此类计划，并且从大量可能的计划中进行蒙特卡洛采样似乎是不切实际的解决方案。

**从其物理行为推断物体的形状：**例如，观察到一桶水从底部缓慢滴下的人可以轻易推断出有一个小孔。基于仿真的推理器只能通过使用从大量可能的桶中进行任意更改采样的监控系统来得出这样的推论。

**从物体的物理行为推断物体的物理特性：**例如，如果物体被轻风吹走，则人类推理者可以轻易地推断出它是轻物体。几乎没有仿真系统可以得出这种推论。

**设计：**构造一个对象以实现指定的功能。例如，假设您要为宠物蟾蜍设计一个放在玻璃窗台上的玻璃容器。可以立即推断出许多限制；它无法完全关闭，否则蟾蜍会窒息而死；它不能在顶部打开，否则蟾蜍会跳出来；必须有可能将食物和水带到蟾蜍并清洁玻璃容器；它需要有一个平坦的底部；它需要放到架子上；等等。在选择或模拟玻璃容器的设计和尺寸之前，必须先得出这些约束。

**比较分析：**对问题的修改如何影响解决方案？例如，您可以推断出，如果将某个物体加重，则举升起来将变得更加困难。这种推论可以在不知道物体实际重量的情况下进行[16]。

**3.11. 框架问题的挑战**

乍一看，模拟理论似乎不受所谓的框架问题的影响，有效地推理随时间变化的情况的各个方面；实际上，框架问题是在仿真中以与基于知识的理论几乎相同的方式和程度出现的，这在简单情况下是可以避免的[55,52]，在许多复杂情况下则令人生畏。

模拟陷入框架问题的情况的示例如下。考虑一下这样的情况：地面上有两个稳定的砖块塔，它们之间有相当大的空间，塔A和塔B。您现在将砖块放在塔A上。对于人类的围观者来说，显而易见的是，塔A发生了什么，B塔将不受影响。为了确定这一点，就像我们在第2节和第3节中讨论的那样，一个物理引擎将需要计算B塔中各块之间的所有力，并计算每个块上的净力和净转矩为零。而且，为了准确地预测A塔如何倒塌，发动机将需要使用非常精细的时间离散化，其中包括许多时间步长。并且需要在每个时间步上对B塔重复进行相同的计算。框架问题的关键标志是不必要的重复计算，即B塔中的任何事物都不会改变；在特定类型的摆锤中，可能会意识到这种情况的重复，并可以检索先前的结果，而不用重做计算；但是随着情况变得越来越复杂，这就会变得越来越困难。

**3.12. 使用常识检查模拟的挑战**

正如我们所看到的，模拟中的技术问题所产生的结果不仅在细节上是错误的，而且在物理上也是荒谬的。如果在模拟固体对象时使用了错误的时间增量，则模拟可以预测一个对象穿过另一个对象。如果钟摆的模拟使用错误的更新规则，它将预测钟摆摆动得越来越高（第3.2节）。

如果循环中有人，他们可以检查模拟器的输出，至少可以看到这是不对的，尤其是在模拟器输出动画的情况下。如果循环中没有人，那么非常希望物理推理系统能够自行检测到这类问题。如果模拟是唯一的推理机制，则无法完成。

有许多使用定性推理的推理系统排除了具有非理性结果的Modelica或Matlab仿真[33]。

**3.13. 摘要**

当任务是预测，可用的完整信息，可用的质量较高的理论以及涉及的尺度范围（时间和空间）不是极端的时候，模拟对于自动物理推理是有效的。如果不满足这些条件，则模拟在一定程度上将成为问题。我们已经确定了不满足这些条件的许多类别的问题，并通过示例证明了这些类别包括许多自然而简单的示例。

此外，即使这些条件确实成立，也可能存在基于其他种类的物理知识或基于非物理知识的更简单方法。

当可以假定合理的概率分布时，并且容易生成满足已知约束的实例随机样本时，概率模拟会非常有效。在许多情况下，不满足这些条件。如果给定的信息太弱，例如形状或材料未知的物体，则可能没有自然的概率分布。如果已知复杂的约束条件，例如在螺钉和螺栓装配在一起的情况下，则可能很难生成满足约束条件的随机样本。

表2列举了我们讨论过的挑战的类别，并回顾了示例。

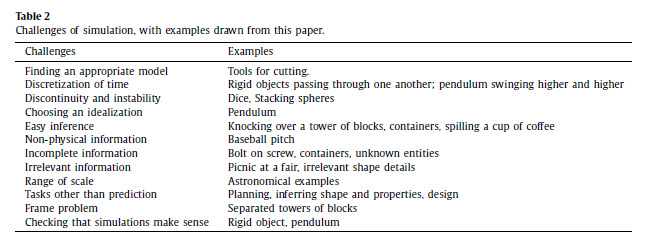


表2

其中一些问题已在建模和仿真文献中得到了很好的讨论。寻找动态模型，离散时间和不连续性的问题被广泛讨论。这些是建模和仿真理论中的核心问题，并且有大量针对这些问题的技术文献。讨论了选择理想化和检查模拟是否有意义的问题，但通常是非正式的，例如[53,66]。信息不完整，信息不相关，规模范围，非预测性任务和框架问题仅在有限的程度上得到了研究，建模和仿真理论中的技术文献很少。容易推断的问题或从非物理信息推论几乎没有被讨论。为了使仿真能够以人为形式或自动形式作为物理推理问题的一般解决方案，将需要解决所有问题。目前，还没有实际实现的自动化系统。

**4.模拟的替代方法**

有哪些替代方案？一种可能性是基于知识的推理引擎，其中物理知识领域和问题规范在很大程度上以声明方式表达。AI文献已经开发了基于知识的物理推理的几个不同方面 [12]：

•基于物理领域理论的符号推理。该理论可能由有效的定性规则组成，例如“一个密闭容器内的物体仍留在里面”。[24,25,10,13]也可以是“直觉”或“天真”的理论，例如运动的冲动理论。

•定性推理：为推理有关物理量的相对大小和变化方向而开发的算法集合[19,36,65]。例如，这些算法支持定性推论，即如果两个处于不同温度的物体发生热接触，则热量将从较热的物体流向较冷的物体，直到它们达到相同的温度。

•类推推理[21]。例如，液压系统中的压力和流量与电子系统中的电压和电流之间的类比使推理者可以根据水流来概念化电路，这是更为熟悉的。

•元层次的推理；明确地推理理论的结构和使用[39,19,36,18,62,63,47]。例如，可以使用一条规则，该规则指出，刚硬的固体理论足以描述在玩耍的背景下建造木块的情况，而在建筑的情况下则不能。

这些不同的方法在很大程度上是互补的，而不是相互对立的。他们处理推理的不同方面；完整的理论可能会涉及将这些技术与其他尚未解决的其他问题的进一步技术集成在一起。

迄今为止，定性推理已得到最广泛的研究，并取得了一些显著成就，例如在文本理解[35]和类比映射和几何推理[41]中。用于汽车电气系统故障模式和影响分析的Flame系统[50]已被多家公司使用多年。 Fromherz等人[20]讨论了一种为高端打印系统自动生成基于模型的控制策略的系统。其他推理形式的其他暗示类似物包括非模拟计划方法，例如部分订单计划[8,64]。分层计划[17]以及用于验证计算机软件的符号推理[9]，例如控制飞机等复杂物理系统的软件[57]；后者固有地将物理推理与复杂的逻辑推理结合在一起。

训练有素的物理推理（例如接飞球或自旋预测台球的轨迹）可能还涉及从存储的示例数据库中进行插值，这些示例是根据个人经验结合使用紧密的感知行为反馈回路而获得的，强化学习或类似策略。

**5.结论：模拟的局限性**

凭借无限的计算能力、时间和存储空间，也许可以像从Pierre Simon Laplace [37]曾经想象的那样，从下至上模拟任何事物，

某个智者在某个时刻会知道使自然运动的所有力以及组成自然的所有项目的所有位置，如果该智者也足够将这些数据提交给分析，它将包含在一个公式中宇宙中最大的物体和最微小的原子的运动；对于这样的智力，没有什么是不确定的，就像过去一样存在着未来。

但是在现实世界中，计算能力是有限的，必须在有限的时间内做出决定，并且内存资源是有限的。头脑或自动化的问题解决者都不能希望通过起源于量子水平的模拟来建模日常对象的交互，更不用说像人类这样的复杂主体的交互了。

取而代之的是，在现实时间内使用合理的资源运行的真实模拟必须在更高的抽象级别上使用近似和理想化。在许多情况下，设置模拟选择适合问题的近似值和理想化并解释模拟的输出确定模拟结果可能有多准确，模拟的哪些部分有效以及哪些部分有效零件是理想化的产物比执行模拟要困难得多。单纯地想象一下，例如，自动推理机可以通过在遇到的每个实体上运行牛顿物理模拟器来推断其所需的所有物理知识。借助我们在本文中回顾过的许多示例，我们希望清楚地认识到，完全模拟的认知视图是完全不现实的，并且出于同样的原因，无论多么精确，模拟都同样不可能解决自动化常识性问题物理推理。

在此关头，很难或不可能量化可以使用模拟来执行通用人工智能或特定应用（例如家用机器人或叙述性理解）所需的物理推理的比例。但是，我们认为，我们在本文中介绍的示例范围表明，使用模拟存在很大的局限性。特别是，尽管我们已经建议，当任务是预测时，当物理信息可用时，当可获得完整的信息时，当可获得合理高质量的理论时，并且当涉及的空间或时间范围的范围适中时，模拟对于物理推理是有效的。在其他情况下，模拟在一定程度上是有问题的。特别是，物理推理通常涉及预测以外的任务，信息通常是不完整的。

此外，即使在这些条件成立的情况下，在许多情况下，似乎替代性的非模拟推理模式也可能更容易，更快或更稳定。最后，设置和解释模拟需要的物理推理模式本身并不是模拟。出于所有这些原因，我们建议非模拟形式的推理在自动物理推理器中不仅仅是可选的，而是至关重要的。

**致谢**

感谢Peter Battaglia，Benjamin Bergen，ThomasBräunl，Alan Bundy，Garnet Chan，Jonathan Goodman，Philip Johnson-Laird，Ken Forbus，Casey McGinley，Andrew Sundstrom和Ed Vul进行有益的讨论；并向Nils Thuerey提供有关电影CGI模拟的信息。

**参考文献**

[1]A. Ang, W. Tang, Probability Concepts in Engineering, Planning, and Design, 2nd ed., Wiley, New York, 2007.

[2]P. Battaglia, J. Hamrick, J. Tenenbaum, Simulation as an engine of physical scene understanding, Proc. Natl. Acad. Sci. 110(45) (2013) 18327–18332.

[3]W. Benger, Colliding galaxies, rotating neutron stars, and merging black holes – visualizing high dimensional datasets on arbitrary meshes, New J. Phys. 10 (2008), http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/10/12/125004.

[4]A. Boeing, T. Bräunl, Evaluation of real-time simulation systems, Graphite (2007), http://dx.doi.org/10.1145/1321261.1321312.

[5]A. Boeing, T. Bräunl, Leveraging multiple simulators for crossing the reality gap, in: 12th International Conference on Control, Automation, Robotics, and Vision, Guangzhou, China, 2012, http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06485313.

[6]R. Bridson, Fluid Simulation for Computer Graphics, A.K. Peters, Wellesley, Mass., 2008.

[7]A. Celani, The frontiers of computing in turbulence: challenges and perspectives, J. Turbul. 8 (2007).

[8]D. Chapman, Planning for conjunctive goals, Artif. Intell. 32(3) (1987) 333–379, http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(87)90092-0.

[9]P. Cousot, Formal verification by abstract interpretation, in: A. Goodloe, S. Person (Eds.), 4th NASA Formal Methods Symposium, in: Lecture Notes in Computer Science, vol.7211, Springer, Norfolk, Virginia, 2012, pp.3–7, http://www.di.ens.fr/~cousot/publications.www/Cousot-NFM2012.pdf.

[10]E. Davis, A logical framework for commonsense predictions of solid object behavior, Artif. Intell. Eng. 3(3) (1988) 125–140, http://dx.doi.org/10.1016/0954-1810(88)90029-5.

[11]E. Davis, The naive physics perplex, AI Mag. 19(4) (Winter 1998) 51–79.

[12]E. Davis, Physical reasoning, in: F. van Harmelen, V. Lifschitz, B. Porter (Eds.), Handbook of Knowledge Representation, Elsevier, 2008, pp.597–620.

[13]E. Davis, How does a box work?, Artif. Intell. 175(1) (2011) 299–345, http://dx.doi.org/10.1016/j.artint.2010.04.006.

[14]E. Davis, Qualitative spatial reasoning in interpreting text and narrative, in: Spatial Cognition and Computation, 2013, http://www.cs.nyu.edu/faculty/davise/papers/cosit.pdf.

[15]E. Davis, G. Marcus, A. Chen, Reasoning from radically incomplete information: the case of containers, in: Proc. of the 2nd Annual Conference on Advances in Cognitive Systems, 2013, pp.273–288.

[16]J. de Kleer, J. Brown, A qualitative physics based on confluences, in: D. Bobrow (Ed.), Qualitative Reasoning About Physical Systems, MIT Press, Cam-bridge, 1985, pp.7–84.

[17]K. Erol, J. Hendler, D. Nau, UMCP: a sound and complete procedure for hierarchical task-network planning, in: Proceedings, International Conference on AI Planning Systems, 1994, pp.249–254.

[18]B. Falkenhainer, K. Forbus, Setting up large-scale qualitative models, in: Proceedingsof the National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-88, 1988, http://www.aaai.org/Papers/AAAI/1988/AAAI88-054.pdf.

[19]K. Forbus, Qualitative process theory, in: D. Bobrow (Ed.), Qualitative Reasoning About Physical Systems, MIT Press, Cambridge, Mass., 1985, pp.85–168.

[20]M. Fromherz, D. Bobrow, J. de Kleer, Model-based computing for design and control of reconfigurable systems, AI Mag. 24(4) (2003) 120.

[21]D. Gentner, K. Forbus, Computational models of analogy, Wiley Interdiscip. Rev., Cogn. Sci. 2(3) (2011) 266–276, http://dx.doi.org/10.1002/wcs.105.

[22]N. Goodman, V. Masinghka, D. Roy, K. Bonawitz, J. Tenenbaum, Church: a language for generative models, in: Proc. Uncertainty in Artificial Intelligence, UAI, 2008.

[23]E. Hairer, C. Lubich, B. Wanner, Geometric Numerical Integration Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations, Springer, New York, 2006.

[24]P. Hayes, The naive physics manifesto, in: D. Michie (Ed.), Expert Systems in the Microelectronic Age, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1979, http://aitopics.org/publication/naive-physics-manifesto.

[25]P. Hayes, Naive physics 1: ontology for liquids, in: J. Hobbs, R. Moore (Eds.), Formal Theories of the Commonsense World, Ablex, Norwood, NJ, 1985, pp.71–107, http://www.issco.unige.ch/working-papers/Hayes-1978-35.pdf.

[26]K. Hoffman, M. Schreiber (Eds.), Computational Statistical Physics: From Billiards to Monte Carlo, Springer, New York, 2002.

[27]P.I. Hurtado, C.P. Espigares, J.J. del Pozo, P.L. Garrido, Thermodynamics of currents in nonequilibrium diffusive systems: theory and simulation, J. Stat. Phys. 154(1–2) (2014) 214–264.

[28]B. Johnston, M. Williams, A generic framework for approximate simulation in commonsense reasoning systems, in: International Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning, 2007, http://epress.lib.uts.edu.au/research/bitstream/handle/10453/2532/2007001119.pdf.

[29]M. Kapitaniak, J. Strzalko, J. Grabski, T. Kapitaniak, The three-dimensional dynamics of the die throw, Chaos 22(4) (2012), http://dx.doi.org/10.1063/1.4746038.

[30]D. Kaufman, E. Vouga, R. Tamstorf, E. Grinspun, Reflections on simultaneous impact, Comput. Graph. (2012), http://dx.doi.org/10.1145/2185520.2185602.

[31]H. Kaufmann, B. Meyer, Simulating educational physical experiments in augmented reality, in: SIGGRAPH Asia ’08, 2008.

[32]B. Kaup, J. Lüdtke, C. Maienborn, “The drawer is still closed”: simulating past and future actions when processing sentences that describe a state, Brain Lang. 112(3) (2010) 159–166, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2009.08.009>.

[33]M. Klenk, D. Bobrow, J. de Kleer, B. Jansenn, Making modelica applicable for formal methods, in: Proceedings of the 10th International Modelica Conference, Lund, Sweden, 2014.

[34]N. Koenig, H. Howard, Design and use paradigms for GAZEBO, an open-source multi-robot simulator, in: Intelligent Robots and Systems, IROS, 2004.

[35]S. Kuehne, Understanding Natural Language Description of Physical Phenomena, Northwestern University, Evanston, IL, 2004.

[36]B. Kuipers, Qualitative simulation, Artif. Intell. 29(3) (1986) 289–338, http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(86)90073-1.

[37]P. Laplace, A Philosophical Essay on Probabilities, 1814.

[38]T. Laue, K. Spiess, T. Rofer, SimRobot—a general physical robot simulator and its application in robocup, in: RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX, Springer, Berlin, 2006, pp.173–183.

[39]J. Lehmann, M. Chan, A. Bundy, A higher-order approach to ontology evolution in physics, J. Data Semant. (2012) 1–25, http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13740-012-0016-7#.

[40]P. Loan, B. Cagatay, J. Rosen, Surgical simulation: an emerging technology for training in emergency medicine, Presence 6(2) (1997) 147–159.

[41]A. Lovett, E. Tomei, K. Forbus, J. Usher, Solving geometric analogy problems through two-stage analogical mapping, Cogn. Sci. 33(7) (2009) 1192–1231.

[42]G. Marcus, E. Davis, The scope and limits of simulation in cognitive models (unpublished), http://arxiv.org/abs/1506.04956.

[43]K. Markman, W. Klein, J. Suhr, Handbook of Imagination and Mental Simulation, Psychology Press, New York, 2009.

[44]J. McCarthy, P. Hayes, Some philosophical problems from the perspective of artificial intelligence, in: B. Meltzer, D. Michie (Eds.), Mach. Intell., vol.4, Edinburgh U. Press, Edinburgh, 1969, pp.463–502.

[45]K. Mombauri, K. Berns, Modeling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking, Springer, 2013.

[46]S. Murman, W. Chan, M. Aftosmis, R. Meakin, An interface for specifying rigid-body motions for CFD applications, in: 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2003, http://people.nas.nasa.gov/~wchan/publications/aiaa2003-1237.pdf.

[47]P. Nayak, Causal approximations, Artif. Intell. 70(1–2) (1994) 277–334, http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(94)90108-2.

[48]D. Nyga, M. Beetz, Everything robots always wanted to know about housework (but were afraid to ask), in: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, http://ias.cs.tum.edu/\_media/spezial/bib/nyga12actioncore.pdf.

[49]T. Pang, An Introduction to Computational Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.

[50]C. Price, D. Pugh, M. Wilson, N. Snooke, The FLAME system: automating electrical failure mode and effects analysis (FEMA), in: Proc. of the IEEE Reliability and Maintainability Symposium, 1995, pp.90–95.

[51]A. Rahimian, I. Lashuk, S. Veerapaneni, A. Chandramowlishwaran, D. Malhotra, L. Moon, G. Biros, Petascale direct numerical simulation of blood flow on 200K cores and heterogeneous architectures, Supercomputing (2010) 1–11, http://dx.doi.org/10.1109/SC.2010.42.

[52]R. Reiter, Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems, MIT Press, Cambridge, Mass., 2001.

[53]S. Robinson, Simulation: The Practice of Model Development and Use, Wiley, Hoboken, N.J., 2004.

[54]A.N. Sanborn, V.K. Masinghka, T.L. Griffiths, Reconciling intuitive physics and Newtonian mechanics for colliding objects, Psychol. Rev. 120 (2013) 411–437.

[55]M. Shanahan, Solving the Frame Problem: A Mathematical Investigation of the Common Sense Law of Inertia, MIT Press, Cambridge, Mass., 1989.

[56]M. Shelley, J. Zhang, Flapping and bending bodies interacting with fluid flows, Annu. Rev. Fluid Mech. 43 (2011) 449–465.

[57]J. Souris, D. Delmas, Experimental assessment of Astree on safety-critical avionics software, in: F. Saglietti, N. Oster (Eds.), Computer Safety, Reliability, and Security, 26th Intl. Conf. 4680, in: Lecture Notes in Computer Science, Springer, Nuremberg, Germany, 2007, pp.479–490.

[58]D. Stewart, Rigid-body dynamics with friction and impact, SIAM Rev. 42(1) (2000) 3–39, http://www.jstor.org/stable/2653374.

[59]A. Tabiei, G. Nilakantan, Reduction of acceleration induced injuries from mine blasts under infantry vehicles, Dept. of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Cincinatti, Cincinatti, http://www.ase.uc.edu/~atabiei/pdfs/J.pdf.

[60]M. Vogelsberger, S. Genel, V. Springel, P. Torrey, D. Sijacki, D. Xu, L. Hernquist, Properties of galaxies reproduced by a hydrodynamic simulation, Nature 509 (2014) 177–182, http://dx.doi.org/10.1038/nature13316.

[61]M. Vondrak, L. Sigal, O. Jenkins, Physical simulation for probabilistic motion tracking, Comput. Vis. Pattern Recognit. (2008), http://robotics.cs.brown.edu/projects/dynamical\_tracking/.

[62]D. Weld, Approximation reformulations, in: Processings of the National Conference on Artificial Intelligence, AAAI-90, 1990, http://aaaipress.org/Papers/AAAI/1990/AAAI90-062.pdf.

[63]D. Weld, Reasoning about model accuracy, Artif. Intell. 56(2) (1992) 255–300.

[64]D. Weld, An introduction to least-commitment planning, AI Mag. 15(4) (1994) 27–61, http://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/view/1109.

[65]D. Weld, J. de Kleer, Qualitative Reasoning About Physical Systems, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., 1989.

[66]T. Willemain, Model formulation: what experts think about and when, Oper. Res. 43(6) (1995) 916–932.

[67]S. Zicker, M. Veloso, Tactics-based behavioural planning for goal-driven rigid body control, in: Computer Graphics Forum, 2009, http://www.cs.cmu.edu/~mmv/papers/09cgf-stefan.pdf.