鸟群，兽群，鱼群，一个分布式行为模型

Craig W. Reynolds

Symbolics Graphics Division

1401 Westwood Boulevard

Los Angeles, California 90024

(Electronic mail: [cwr@Symbolics.COM](mailto:cwr@Symbolics.COM))

**摘要**

**鸟群、兽群或鱼群的聚集运动是自然界中美丽且熟悉的一部分。但是这种复杂的运动很少在计算机动画中看到。本文探讨了一种基于模拟的方法，作为对为每只鸟编写路径的替代方案。模拟的鸟群是粒子系统的一种拓展，其中模拟的鸟类是粒子。模拟鸟群的聚集运动是通过分布式行为模型创建的，类似于自然群体中正在发挥作用的模型；鸟类选择自己的路径。每个模拟鸟都被实现为一个独立的行动者，根据其对动态环境的局部感知、规定其运动的模拟物理法则以及由“动画师”编程的一组行为来导航。模拟鸟群的聚集运动是个体模拟鸟的相对简单行为密集交互的结果。**

分类和主题描述：1.2.10 [人工智能]：视觉与场景理解；1.3.5 [计算机图形]：计算几何与对象建模；1.3.7 [计算机图形]：三维图形与逼真度--动画；1.6.3 [模拟与建模]：应用。

一般术语：算法，设计。

**关键词：群体、兽群、鱼群、鸟类、鱼类、聚集运动、粒子系统、行动者、飞行、行为动画、约束、路径规划。**

**介绍**

**鸟群的运动是大自然中的一种美妙。鸟群及其相关的同步群体行为，如鱼群或陆地动物的兽群，都是观察美丽且发人深思的。鸟群展示了许多对比。它由离散的鸟类组成，但整体运动似乎流畅；它在概念上简单，但在视觉上却如此复杂。它看起来似乎随机排列，却又极其精确地同步。也许最令人费解的是强烈的意图和集中控制的印象。然而，所有证据表明，鸟群运动必须仅仅是个体动物行动的集合结果，每个动物都仅仅根据自己对世界的局部感知而行动。**

**计算机动画中一个感兴趣的领域是描述和控制各种类型的运动。计算机动画师既希望发明全新的抽象运动类型，又希望复制（或对其进行变化）现实世界中的运动。乍一看，制作一部描绘鸟群的动画电脑图形似乎存在着重大困难。使用传统的计算机动画技术编写大量个体对象的路径将是繁琐的。鸟类所遵循的复杂路径，很难确保这种规范没有错误。即使可以描述合理数量的适当路径，也不太可能保持鸟群运动的约束（例如，在每帧中防止所有鸟之间的碰撞）。最后，用这种方式编写的鸟群将很难编辑（例如，更改动画的某些部分中所有鸟的路径）。虽然编写鸟群运动并非不可能，但需要一种更好的方法来实现高效、健壮且可信的鸟群和相关群体运动的动画。**

**本文描述了一种这样的方法。该方法假设鸟群仅是个体鸟类行为之间相互作用的结果。为了模拟一个鸟群，我们模拟了个体鸟类的行为（或至少是允许其参与鸟群的部分行为）。为了支持这种行为“控制结构”，我们还必须模拟鸟类的感知机制的部分以及空气动力学飞行的物理方面。如果这个模拟的鸟类模型具有正确的群体成员行为，那么要创建一个模拟的鸟群，只需要创建一些模拟鸟类模型的实例并允许它们相互作用。**

**本文的其余部分将更详细地描述对这种模拟鸟群进行的一些实验。这些模拟的成功和有效性很难客观地衡量。它们似乎与某些已经被动物学和行为科学报道的自然鸟群和鱼群的特定标准[25]以及一些统计属性[23]相符合。也许更重要的是，许多观看这些动画鸟群的人立即将它们认定为自然鸟群的表现，并发现它们同样令人愉悦。**

**已有的鸟群**

**计算机图形学界以前曾见过模拟的鸟群。SIGGRAPH '85的电子影院展示了一部名为“Eurythmy”的作品的运动研究，由俄亥俄州立大学计算机图形研究组的Susan Amkraut、Michael Girard和George Karl共同制作[4]。在这部电影中，一群鸟从一座尖塔飞起，穿过一系列柱子，向下飞入一个庭院中的慵懒螺旋。在此期间，鸟儿慢慢地拍动翅膀，避免与同伴相撞。**

**该动画是使用一种与本文描述的技术完全不同的技术制作的，显然并非专门用于群体建模。但其基本概念在其本身具有用处和有趣。以下概述基于未发表的通信[3]。该软件非正式地称为“力场动画系统”。力场由一个3x3矩阵运算符定义，将从空间中的一个点（物体所在的位置）转换为一个加速度向量；鸟类沿着力场的“相位图”追踪路径。每只鸟周围和静态物体周围都有“排斥力”。与每个对象相关联的力场具有一个边界框，因此可以根据边界框测试来修剪对象相互作用。增量线性时间算法找到边界框交点。 “动画师”定义了空间场(s)并设置了对象的初始位置、方向和速度。其余的模拟是自动的。**

**麻省理工学院媒体实验室的卡尔·西姆斯（Karl Sims）构建了一些具有行为控制的移动对象群体的动画（太空飞船、寸虫和四足动物），但它们并不是组织成鸟群[35]。另一位作者一直建议[28, 29, 30]基于分布式行为模型实现鸟群模拟。**

**粒子系统**

**这里描述的模拟鸟群与粒子系统[27]密切相关，粒子系统用于表示具有不规则和复杂形状的动态“模糊对象”。粒子系统已用于模拟火焰、烟雾、云彩，以及近期的海浪喷溅和泡沫[27]。粒子系统是由大量个体粒子组成的集合，每个粒子都有自己的行为。粒子被创建、老化和消亡。在它们的生命周期内，它们具有可以改变粒子自身状态的某些行为，包括颜色、不透明度、位置和速度。**

**在这个突出的鸟群模型之下是粒子系统的一种轻微概括。在所谓的“子对象系统”中，Reeves的点状粒子被一个完整的几何对象取代，该对象包括一个完整的本地坐标系统和对几何形状模型的引用。使用形状而不是点在视觉上具有重要意义，但更基本的区别是个体子对象具有更复杂的几何状态：它们现在具有方向性。**

**粗体鸟群与粒子系统之间的另一个差异并不那么明确。Boids的行为通常比文献中描述的粒子的行为更复杂。当前的粗体行为模型可能比典型的粒子行为复杂度高一两个数量级。然而，这只是程度上的差异，而不是性质上的差异。而且，任何一种模拟行为都远不及真实鸟类的复杂程度。**

**此外，如所述，粒子系统中的粒子并不相互作用，尽管这并不被定义所排除。但是鸟类，粗体必须强烈相互作用才能正确地成群。粗体行为不仅依赖于内部状态，还依赖于外部状态。**

**actor与分布式系统**

控制boid的飞行和群集的行为模型相当复杂，因此与其采用临时方法，不如追求最合适的形式化计算模型更为值得。这些行为将以某种方式表示为规则或程序，并且每个boid的内部状态必须以某种数据结构保存。将这些行为和状态封装为对象是方便的，这是面向对象编程系统的一种概念[10, 11, 21]。这些对象的每个实例都需要一个计算过程来将行为程序应用于内部数据。将过程、程序和状态结合起来的计算抽象称为actor [12, 26, 2]。actor本质上是一个虚拟计算机，通过传递消息与其他虚拟计算机通信。actor模型已被几位作者提议作为动画控制的自然结构[28, 13, 29, 18]。它似乎特别适用于涉及相互作用角色和行为模拟的情况。在并行和分布式计算系统的文献中，鸟群和鱼群被提供为稳健的自组织分布式系统的示例[15]。

**窗体顶端**

**行为动画**

传统的手绘动画是使用一种完全静止的媒介制作的。传统的计算机动画使用了一种活跃的媒介（运行图形软件的计算机），但大多数动画系统并没有充分利用计算机自动化运动设计的能力。使用不同的工具，当代计算机动画师几乎以与手绘动画师相同的低抽象水平工作。他们通过直接描述角色的运动来讲述自己的故事。两种媒体都存在快捷方式；计算机动画师和手绘动画师通常使用辅助工具来在指定的关键帧之间进行插值。但是在自动化运动描述方面几乎没有取得什么进展；动画师必须将情感和角色刻画的微妙之处转化为角色执行的运动。动画师不能简单地告诉角色“表现开心”，而必须繁琐地指定表达快乐的运动。

典型的计算机动画模型仅模拟角色的形状和物理特性，而行为或基于角色的动画则试图模拟角色的行为。这样模拟的角色的目标是处理许多动作的细节，因此他们的运动。这些行为包括从简单的路径规划到角色之间复杂的“情感”交互的整个范围。行为动画角色的构建吸引了许多研究者，但这仍然是一个年轻的领域，需要更多的工作。

由于控制的独立性质，通过角色模拟创建动画的人可能并不严格是动画师。传统上，动画师直接负责动画制作中的所有动作[40]。将通过模拟角色指导动画的人称为元动画师可能更合适，因为动画师更像是行为的设计者，而不是动作的设计者。这些行为，当被模拟角色表演时，间接导致最终的动作。因此，动画师的工作有点像戏剧导演：角色的表演是导演对演员的指导的间接结果。这里报告的工作中有一点迷人的方面是不知道模拟将如何根据指定的行为和初始条件进行；有许多意想不到的愉快惊喜。另一方面，随着截止日期的临近和意想不到的麻烦出现，这种魅力开始变得薄弱。最近，我花了很多时间试图让不合作的鸟群按预期移动（“这些可恶的boids似乎有自己的想法！”）。

**几何飞行**

粗体模型的一个基本部分是几何飞行的能力。模拟鱼群或兽群成员的运动可以被视为一种“飞行”，忽略了翅膀、鳍和腿部运动的相当复杂性（在兽群的情况下，通过限制在第三维度的运动自由）。在本文中，几何飞行一词指的是沿路径的某种类型的运动：一个动态的、增量的、刚性的几何变换，沿着并切于一个3D曲线移动。虽然运动是刚性的，但对象的基础几何模型可以在这个“飞行坐标系”内自由表达或改变形状。与更典型的沿预定义样条曲线运动的动画运动不同，飞行路径的形状不是预先指定的。

几何飞行基于沿着对象的“前进方向”（其局部正Z轴）进行的增量平移。这些平移与转向相互交错——绕局部X和Y轴（俯仰和偏航）的旋转，重新调整局部Z轴的全局方向。在真实的飞行中，转向和移动是连续并且同时发生的。增量几何飞行是对此的离散近似；小的线性运动模拟连续曲线路径。在动画中，运动必须每帧至少增量一次。以更高的速率运行模拟可以减少飞行模型的离散采样误差，并精细化运动模糊图案的形状。

飞行建模广泛利用对象自身的坐标系。局部空间代表“boid的视角”；它意味着相对于boid自身的位置和方向进行测量事物。在笛卡尔坐标系中，左/右轴是X轴，上/下是Y轴，前/后是Z轴。在局部和全局参考框架之间的几何数据转换由几何运算符localize和globalize处理。使用局部比例尺是方便的，这样坐标系的长度单位就是一个体长。生物学家通常用体长来指定鸟群和鱼群的统计数据。

几何飞行模型遵循动量守恒原理。飞行中的物体倾向于保持飞行状态。模型中有一个简单的黏性速度阻尼模型，因此即使boid不断加速在一个方向上，它也不会超过某个最大速度。最小速度也可以指定，但默认为零。最大加速度，表示为最大速度的一部分，用于截断对加速度的过度要求，因此可实现速度和航向的平稳变化。这是一个具有有限可用能量的生物的简单模型。

目前的粗体模型不支持许多物理力。重力被建模，但仅用于定义倾斜行为。它被定义为过程化，以允许构建任意形状的场。如果每个粗体每一帧都受到重力的加速作用，它将倾向于下降，除非重力被升力或浮力所抵消。浮力与重力相对立，但空气动力学升力与boid的局部“向上”方向对齐，并与速度相关。这种建模水平导致了一些效果，如通常水平飞行、向下飞行时速度增加（或向上飞行时速度减慢）以及“失速”动作。速度限制参数可以更真实地建模为摩擦阻力，即与速度相关的向后指向的力。在当前模型中，转向是通过将可用推力指向适当的方向来实现的。更真实的做法是分别对切向推力和横向转向力进行建模，因为它们通常具有不同的大小。

**倾斜**

几何飞行涉及平移、俯仰和偏航，但不约束滚动，即绕局部Z轴的旋转。这种自由度用于倾斜——将物体滚动，使局部Y轴与作用于其上的（总）加速度的局部XY分量对齐。通常，倾斜是基于加速度的横向分量，但切向分量可以用于某些应用。横向分量来自转向和重力。在直线飞行中，没有径向力，因此重力项占主导地位，倾斜将物体的-Y轴与“重力向下”方向对齐。在转弯时，径向分量变大，“加速向下”方向向外摆动，就像挂在飞行物体上的钟摆一样。转向加速度的大小与物体的速度直接相关，与其路径的曲率（因此与其转弯半径的倒数）成反比。在无限速度的极限情况下，类似于在没有重力的情况下的倾斜行为。在这些情况下，局部+ Y（向上）方向直接指向由当前转弯定义的曲率中心。

图示

描述已自动生成

图表 1

通过正确的倾斜（飞行员称之为协调转弯），物体的局部空间保持与“感知”或“加速度”坐标系对齐。这有几个优点：它简化了鸟（或飞行员）的方向任务，使得翼型的升力保持指向最有效的方向（“加速度向上”），使得乘客的咖啡保持在杯子里，最重要的是对于动画来说，它使得飞行的boid符合观众对飞行物体应该如何移动和定向的期望。另一方面，现实并不总是动画的目标。通过简单地反转倾斜角度，我们得到一个卡通般的运动，看起来就像物体被转弯的离心力向外抛出一样。

**粗体与乌龟**

几何飞行中基于前向平移和局部旋转的增量混合是编程语言Logo中“乌龟图形”的基础。Logo最初被用作教育工具，让孩子们通过实验学习几何、算术和编程。Logo乌龟最初是一个小型机械机器人，它在教室地板上铺设的大纸张上爬行，通过在移动时拖动毡头笔沿纸张绘制图形。抽象的乌龟几何是一个基于乌龟的参考系的系统，一个对象将位置和航向结合在一起。在程序控制下，Logo乌龟可以从其当前位置向前或向后移动，从其当前航向向左或向右转向，或者将笔放在纸上。乌龟几何已经从平面扩展到任意流形和三维空间。这些“3D乌龟”及其路径与boid对象及其飞行路径完全等效。

**鸟群，兽群与鱼群**

为了参与鸟群，鸟必须具有使其能够与其群体成员协调运动的行为。这些行为并不特别独特；所有生物在某种程度上都有这些行为。自然鸟群似乎由两种平衡的相反行为组成：一种是希望保持与群体的密切联系，另一种是希望在群体内避免碰撞。很明显，个体鸟想要避免与其群体成员碰撞是为了什么。但为什么鸟似乎要寻找空中等同于恶劣交通堵塞的东西呢？加入鸟群的基本冲动似乎是几个因素的进化压力的结果：保护免受捕食者的袭击，从统计上提高（共享的）基因库免受捕食者攻击的生存机会，从更大的有效搜索模式中获益以寻找食物，并获得社交和交配活动的优势。

没有证据表明自然鸟群的复杂性在任何方面都受到限制。当新鸟加入时，鸟群不会变得“满员”或“超载”。当青鱼迁徙到产卵地时，它们组成的鱼群可以延伸长达17英里，包含数百万条鱼。自然鸟群似乎在各种规模的群体中以完全相同的方式运作。一个个体鸟似乎不太可能对其所有群体成员都非常注意。但在遍布广阔距离的庞大鸟群中，一个个体鸟必须对其余的鸟群有一种局部化和过滤的感知。一只鸟可能意识到三个类别：自己、它的两三个最近的邻居和其余的鸟群。

将真实鸟群对复杂性的不敏感性与下文描述的模拟鸟群情况进行对比。所描述的鸟群算法的复杂性基本上是O(N^2)。也就是说，运行该算法所需的工作量随着鸟群数量的平方增长。我们确实看到了以这种方式实现的模拟鸟群规模的上限。一些解决这一性能问题的技术在算法考虑部分进行了讨论。

**模拟鸟群**

要构建一个模拟鸟群，我们首先需要一个支持几何飞行的boid模型。我们添加与避免碰撞和加入鸟群冲动相对应的行为。简要陈述为规则，并按照优先级降低的顺序，导致模拟鸟群的行为是：

1. 避免碰撞：避免与附近的群体成员发生碰撞。

2. 速度匹配：尝试与附近的群体成员保持相似的速度。

3. 群心驻留：尝试保持靠近附近的群体成员。

速度是一个矢量量，指的是航向和速度的组合。如何协调和组合每种行为的结果是重要的，并且稍后会更详细地讨论。同样，这些规则中“附近”的含义对于群集过程至关重要。这也会在稍后更详细地讨论，但通常一个boid对另一个的感知是基于它们之间偏移向量的距离和方向。

静态碰撞避免和动态速度匹配是互补的。它们共同确保模拟鸟群的成员能够在群体内部拥挤的天空中自由飞行，而不会相互碰撞。碰撞避免是远离即将发生碰撞的冲动。静态碰撞避免基于群体成员的相对位置，并忽略它们的速度。相反，速度匹配仅基于速度，忽略位置。它是碰撞避免的一种预测版本：如果boid能够与其邻居很好地匹配速度，那么它不太可能很快与它们中的任何一个发生碰撞。通过速度匹配，boid之间的间隔与正在进行的几何飞行保持近似不变。静态碰撞避免有助于建立最小所需的间隔距离；速度匹配有助于保持这种间隔。

**群心驻留让一个boid希望靠近鸟群的中心。因为每个boid对世界有局部化的感知，所以“鸟群的中心”实际上指的是附近鸟群成员的中心。群心驻留导致boid飞向一个方向，使其更接近附近boid的质心。如果一个boid深入到鸟群内部，那么其邻近区域的人口密度大致是均匀的；在所有方向上，boid的密度大致相同。在这种情况下，邻近boid的质心大致位于邻近区域的中心，因此群心驻留的冲动较小。但是如果一个boid处于鸟群的边界上，它的邻近boid都在一侧。邻近boid的质心从邻近区域的中心偏移，朝着鸟群的身体。在这里，群心驻留的冲动更强，飞行路径会稍微偏向局部鸟群中心。**

**真实的鸟群有时会分开绕过障碍物。为了更加真实，模拟鸟群模型必须具备这种能力。群心驻留正确地允许模拟鸟群分叉。只要一个单独的boid能够保持与其附近的邻居接近，它就不在乎其他鸟群是否转向。对于鸟群组织提出的更简化的模型（例如中心力模型或跟随指定领导者模型）不允许分叉。**

**这里提出的鸟群模型实际上更适用于鱼群或兽群而不是鸟群。在浑浊的水域中的鱼类（以及地面动物由于无法看到他们的同伴之外的环境）对其环境具有有限的、短程的感知能力。鸟类，尤其是在鸟群外部的鸟类，具有出色的长程“视觉感知”。据推测，这使得相距甚远的鸟群能够聚集在一起。如果群心驻留冲动完全局限于局部区域，当两个鸟群相距一定距离时，它们将互不理睬。长程视觉似乎在鸟群中“机动波”的传播中起到了重要作用，这种传播速度极快。已经证明，这个波前的传播速度达到了个体鸟类测量的惊吓反应时间的三倍。韦恩·波茨提出的解释是，鸟类感知到了即将到来的“机动波”的运动，并计算自己的转弯时间以匹配它。波茨将此称为“合唱队排练”假设。**

**独立行为的仲裁**

与集群行为相关的三种行为冲动（以及下文将要讨论的其他行为冲动），每种行为冲动都产生了关于引导鸟类朝哪个方向转向的独立建议。这些建议以加速请求的形式表达。每种行为都会说：“如果我负责，我会朝那个方向加速。”加速请求以三维向量的形式表示，按照系统约定，被截断为单位大小或更小。每种行为都有几个控制其功能的参数；其中一个是“强度”，它是一个介于零和一之间的分数值，可以进一步减弱加速请求。由鸟类大脑的导航模块收集所有相关的加速请求，然后确定一个单一的行为所需加速度。它必须组合、优先级排序，并在潜在的冲突冲动之间进行仲裁。飞行模块将导航模块所需的加速度传递给驾驶模块，后者试图朝着那个方向飞行。

将加速度请求组合的最简单方法是对它们进行平均。由于包含了“强度”因素，实际上这是加权平均。一个行为相对于另一个行为的相对强度可以通过这种方式定义，但这是一个难以调整的不稳定的相互关系。早期版本的boid模型表明，通过简单加权平均来导航加速请求的方式效果“相当不错”。按照这种方式选择航向的boid将在典型条件下飞行一个合理的航线。但在关键情况下，例如潜在的与障碍物碰撞，冲突必须及时解决。在高速飞行中，犹豫或优柔寡断是对面前的砖墙的错误回应。窗体顶端

犹豫的主要原因是每种行为可能都在大声建议应该往哪个方向转向以避免灾难，但如果这些加速度请求碰巧位于大致相反的方向，它们在简单的加权平均方案下将大部分相互抵消。鸟类可能会做出一个非常小的转向，从而继续朝着同一方向飞行，可能会撞上障碍物。即使这些冲动没有完全抵消，平均也会导致其他问题。考虑飞越摩天大楼之间的城市街道网格；虽然“向北飞”或“向东飞”可能是一个好主意，但将它们合并成“向东北飞”是一个不好的主意。

来自人工智能领域的技术，如专家系统，可以用于仲裁相互冲突的意见。然而，在当前的实现中采用了一种较少复杂的方法。基于对所有组件行为的严格优先级排序的优先加速度分配，因此考虑了它们的加速度请求。（此排序可以根据动态条件进行更改。）加速度请求按优先级顺序考虑并添加到累加器中。每个请求的大小被测量并添加到另一个累加器中。这个过程持续进行，直到累积大小总和大于每个boid的最大加速度值，这是一个参数。最后一个加速度请求被修剪回来以弥补累积大小的过多。关键在于，一定量的加速度受导航模块的控制；这个加速度被分配出来以满足各种行为的加速度请求，按优先级顺序进行。在紧急情况下，加速度将被分配以优先满足最迫切的需求；如果所有可用的加速度都被使用完，“用尽”后，较不紧迫的行为可能会暂时无法满足。例如，群聚中心的冲动可能会暂时被正确地忽略，以便执行一个避免静态障碍物的机动动作。

**模拟感知**

这个模型并不直接模拟真实动物在集群行为（视觉和听觉）或群聚行为（视觉和鱼类独特的“侧线”结构，提供一定程度的压力成像能力[23, 24]）中使用的感觉。相反，感知模型试图为行为模型提供与真实动物可用的大致相同的信息，这些信息是作为感知和认知过程的最终结果可获得的。

这主要涉及过滤掉实现boid行为的软件中可用的多余信息。模拟的boids可以直接访问描述环境中所有物体的精确位置、方向和速度的几何数据库。真实的鸟类对世界的信息非常有限，因为它通过不完美的感官感知，并且因为其附近的同伴隐藏了更远处的物体。这在聚群动物中更为明显，因为它们都被限制在同一个平面内。在鱼群中，由于它们之间的水有时会浑浊，邻近鱼类的视觉感知受到光线的散射和吸收的限制。这些因素结合在一起，将每只动物可用的信息强烈地局限在一定范围内。

不仅给每个模拟的boid提供关于世界的完美和完整信息是不现实的，而且这样做是错误的，会导致行为模型明显失败。在实施局部化的群聚中心行为之前，群聚使用了一个中心力模型。这导致了一些不寻常的效果，例如使得一个广泛散布的群体的所有成员同时向群体的质心聚集。本文报告的实验的一个有趣结果是，我们直观地认识到作为“群聚”（或者聚群或者群集）的集体运动取决于对世界的有限、局部化的视图。

**组成群集模型的行为是以“附近的群体成员”为基础来表述的。在当前的实现中，邻域被定义为以boid的本地原点为中心的一个球形敏感区域。敏感度的大小被定义为距离的反指数。因此，邻域由两个参数定义：一个半径和一个指数。有理由相信，这个敏感度领域在前进方向上应该真实地被夸大，可能与boid的速度成比例。处于运动状态需要增加对前方情况的意识，这个需求随着速度的增加而增加。一个前向加权的敏感度区域可能也会改善当前boids实现中位于群体前沿的行为，这些boids往往会被身后的群体分散注意力。由于它们的头部和眼睛的排列方式，真实的鸟类有一个宽阔的视野（约300度），但两只眼睛的重叠区域很小（10到15度）。因此，鸟类只有在一个非常小的、前向导向的锥形区域内才具有立体深度感知。目前正在研究前向加权感知模型的boids。**

**在群集模型的早期版本中，吸引力和排斥力的度量是根据距离进行线性加权的。这种类似弹簧的模型产生了一个弹跳的群集行为，对于卡通式的描述可能还可以，但并不是非常现实。后来，模型被改为使用距离的倒数平方。这种更类似于重力的模型产生了看起来更自然、更好阻尼的群集模型。这与布莱恩·帕特里奇对鱼群空间关系进行的仔细控制的定量研究（引用23）相吻合；他发现，“鱼受到其附近邻居的影响要比受到远处成员的影响更大。每条鱼对[影响力]的贡献与距离的平方或立方成反比。”在之前的工作中，他和同事们（引用23, 24）证明，鱼群行为基于它们的视觉系统和它们的“侧线”器官所感知的压力波信息。物体轮廓的透视图（其“视角”）的面积与其距离的平方成反比，而在水等3D介质中传播的压力波与距离的立方成反比。**

**Boid感知模型相当特别，避免了对视觉进行实际模拟。人工视觉是一个极其复杂的问题[38]，远远超出了这项工作的范围。但是，如果boids可以“看到”它们的环境，它们将比当前模型更擅长路径规划。可以构建简单的类似迷宫的形状，这些形状可能会使当前的boid模型感到困惑，但是对于有视觉的boid来说，这些形状会很容易解决。**

**即兴集群**

**上述描述的群集模型赋予了boids参与接近群集行为的热情。在彼此附近释放的boids开始聚集在一起，嬉戏和争夺位置。boids保持彼此接近（群集中心化），但始终与邻近的成员保持谨慎的分离（避免碰撞），群集很快就会“极化”——其成员朝大致相同的方向、以大致相同的速度前进（速度匹配）；当它们改变方向时，它们会同步进行。独自的boids和较小的群体会加入以形成更大的群体，在外部障碍物的存在下（下文将讨论），更大的群体可以分裂成较小的群体。**

**每次模拟运行时，boid模型的初始位置（在指定的椭球体内）、朝向、速度以及各种其他参数都被初始化为在指定分布内随机化的值。使用可重新启动的随机数生成器以确保可重复性。这种随机化并不是必需的；boids同样可以从一个规则的模式开始，群集模型的所有其他方面都是完全确定性和可重复的。**

**当运行模拟时，群集的第一个动作是对初始条件的反应。如果boids最初过于密集地聚集在一起，就会出现初始的“闪烁扩张”，其中相互避免碰撞的愿望驱使boids从初始过压力的地点径向远离。如果它们释放在一个半径小于“邻域”半径的球壳中，boids会朝着球的中心收缩；否则它们开始聚集成小的群体，这些群体可能会开始合并。如果boids被限制在一个特定的区域内，那么如果它们被长时间地放任自流地漫游，较小的群体最终会聚合成一个单一的群体。**

**指令集群**

**到目前为止讨论的行为使个体鸟类有能力飞行并参与愉快的无目标群集行为。但是，要将群集模拟与其他动画动作结合起来，我们需要更直接地控制群集。我们希望在特定时间指导特定的动作（例如，“群集在序列的2.3秒时从左边进入，于3.5秒时转向直接向上飞行，并在4.0秒时离开画面”）。**

**当前的boid模型实现了几种设施来指导群集行为的运动和时间。首先，模拟是在一个通用的动画脚本系统[36]的控制下运行的。那个脚本系统的细节在这里并不重要，除了它除了典型的交互式动作控制设施外，还提供了按帧调度调用用户提供的软件（如群集模型）的能力。这个脚本设施是用来描述各种群集行为的时间安排的基本工具。它还允许对参数的时变值进行灵活的控制，这些值可以传递给模拟软件。最后，脚本用于设置和动画化场景的所有非行为方面，例如背景、照明、摄像机运动和其他可见对象。**

**指导群集路径的主要工具是内置于boid模型中的迁徙冲动。在当前模型中，这种冲动是通过全局目标来指定的，可以是全局方向（例如“为了过冬去Z方向”）或者是全局位置——即所有鸟都飞向的目标点。模型计算出一个有界加速度，逐步将boid转向其迁徙目标。**

**借助脚本系统，我们可以动画化一个动态参数，其值是一个全局位置向量或全局方向向量。这个参数可以传递给群集，群集可以将其传递给所有的boids，每个boid都设置自己的“迁徙目标寄存器”。因此，所有鸟的全局迁徙行为可以直接从脚本中进行控制。（当然，并不需要同时改变所有的boids，例如，延迟可能是它们当前空间位置的函数。真实的群集不会同时改变方向[25]，而是转向始于单个鸟，并迅速在整个群集中传播，就像冲击波一样。）**

****

**我们可以通过沿着期望路径动画化目标点来引导群集，目标点稍微超前于群集。即使迁徙目标点突然改变，每个boid的路径仍然相对平滑，因为飞行模型模拟了动量的守恒。这意味着boid自己的飞行动态实现了一种在“控制点”之间的平滑插值。**

**避免环境障碍物**

**模拟群集最有趣的动作来自与环境中其他对象的互动。一个群集的孤立行为往往会达到稳定状态，并变得相当单调。群集可以被看作是对其行为所隐含的约束的一种放松解。例如，群集中心化和避免碰撞的冲突冲动并不会导致持续不断的来回运动，而是boids最终在这两种冲动之间达到平衡（阻尼程度决定了这种平衡达成的速度）。环境障碍物以及boid试图绕过它们的尝试增加了群集行为的表面复杂性。（事实上，真实群集行为的复杂性可能主要是由自然环境的复杂性所导致的。）**

**从建模我们希望放置群集的场景的角度来看，环境障碍物也是很重要的。如果群集被脚本化以在桥下飞行并绕过树木，我们必须能够表示这些障碍物的几何形状和尺寸。这里采用的方法是独立地对“用于渲染的形状”和“用于避免碰撞的形状”进行建模。目前用于环境障碍物的形状类型远不像用于计算机图形模型渲染的模型那么复杂。目前的工作实现了两种类型的环境避免碰撞形状。一种是基于力场概念的，适用于不太苛刻的情况，但存在一些缺点。另一种模型称为“转向避免”，更加健壮，并且似乎更接近自然机制。**

**力场模型假设从障碍物向空间外发出排斥力场；boids在接近障碍物时会越来越受到排斥。这种方案易于建模；场的几何形状通常相当简单，因此可以直接从场方程中计算出避免加速度。这些模型可以产生良好的结果，例如在“Eurythmy”[4]中，但它们也有一些明显的缺点。如果一个boid以正好与力场方向相反的角度接近一个被力场环绕的障碍物，那么这个boid将不会转向。在这种情况下，力场只会通过将boid向后加速而减缓boid的速度，根本不提供侧向推力。对于即将发生碰撞的最糟糕的反应是未能转向。力场还会对“周围视觉”造成问题。当boid飞向墙壁时，它应该注意并避开墙壁，但如果boid沿着墙壁飞行，则应忽略墙壁。最后，力场在近处倾向于过强，在远处倾向于过弱；避开障碍物应该涉及长距离规划，而不是在最后一刻慌张地进行校正。**

**Steer-to-avoid 是对自然鸟类受视觉引导的更好模拟。boid只考虑直接在其前方的障碍物。（它找到其局部Z轴与障碍物的交点，如果有的话。）在局部透视空间中工作，它找到最接近最终碰撞点的障碍物轮廓边缘。计算出一个径向向量，它将把boid指向轮廓边缘后方一个身体长度的点（见图2）。目前，Steer-to-avoid 已经为几种障碍物形状实现了：球体、圆柱体、平面和盒子。正在开发用于任意凸多面体障碍物的碰撞避免。**

**笼子里有只黑白照片

低可信度描述已自动生成**

图表 2

障碍物不一定固定在空间中；它们可以在动画过程中由脚本动画化。或者更有趣的是，障碍物可以是行为性角色。麻雀可能会在一群障碍物周围聚集，而这些障碍物实际上是一群大象。同样，行为性障碍物可能不仅仅是阻碍物；它们可能是恐惧的对象，例如捕食者。已经注意到[25]，自然的群集本能似乎会因为捕食者而变得更加敏锐。

**群集模型还有许多其他应用**

极化非碰撞聚集运动模型有许多应用，计算机动画中对鸟群的视觉模拟就是其中之一。某些修改可以产生鱼群模型。进一步的修改，比如限制在二维表面上并且能够跟随地形，会导致牧群模型。想象一下一群PODA风格的腿形生物，使用Karl Sims的技术在崎岖复杂的地形上移动。其他应用可能不那么明显。交通模式，如高速公路上的车流，是一种类似群集的运动。有一些特殊的行为，比如被限制在车道内行驶，但保持boids不碰撞的基本原理在高速公路上同样适用。我们可以想象为电影创造出一群“临时演员”（无论是人类还是其他生物）。然而，最有趣的是在计算机图形中通过混合和匹配产生的离奇组合：一群蹦床棒、一群类似飞马的翅膀马，或者一群太空飞船在三维星际公路上堵车。

群集模型可以用于科学研究中，尤其是对于群集、牧群和鱼群等自然现象的调查和研究。科学家们在这方面几乎完全依赖观测模式进行研究；对自然群集和鱼群进行实验是困难的，并且可能会干扰正在研究的行为。然而，通过使用更加精心制作的某种鸟类的实际行为的模型，可以进行控制和可重复的实验，模拟出“仿真自然群集”。通过实施分布式行为模型，简单比较模拟群集的总体运动与自然群集的运动，可以对群集组织理论进行明确的测试。这种方法可以帮助科学家们更深入地理解群集行为和组织原理，而无需对自然环境进行干扰或观察。

**算法思考**

一个简单的基本群集算法的实现会随着群集人口的平方级增长而增加复杂性（“O(N^2)”）。基本上，这是因为每个boid都必须考虑到其他每个boid，即使只是决定忽略它。这并不意味着算法快或慢，只是随着问题的规模（群集的总人口）增加，复杂性增长得更快。将boid的数量加倍会使所花费的时间增加四倍。

然而，正如之前所述，真实的鸟类可能并不像对整个群体总数那么敏感。这让人们希望模拟的仿鸟可以被教导独立导航，而不受总体群体数量的影响。显然，问题的一部分在于我们试图在单台计算机上运行整个群体的仿真。自然的解决方案是使用分布式处理，就像真实的群体一样。如果我们为每个仿鸟使用一个单独的处理器，那么即使是群集算法的朴素实现也将是O(N)，即与人口数量成线性关系。但即便如此，这还不够好。这仍然意味着随着更多的仿鸟加入群体，问题的复杂性将增加。

我们所期望的是一个常数时间算法，即对总体人口数量不敏感的算法。换句话说，如果有一种有效的方法能够保持N非常小，那么一个N^2的算法也是可以接受的。目前有两种方法正在研究中以实现这个目标。一种是对群体进行动态空间划分；仿鸟根据它们在空间中的位置被分成一个“格子”网格。一个试图在群体中导航的仿鸟可以通过检查其当前位置附近的“格子”快速访问到物理上附近的群体成员。另一种方法是进行增量式碰撞检测（“接近性测试”）。一般的碰撞检测是另一个N^2算法，但是如果我们基于一个部分解决方案进行增量式碰撞检测，这个部分解决方案描述了刚刚之前的情况，那么算法只需要考虑变化，因此可以运行得更快，假设增量变化是小的。Girard的PODA系统中使用的增量式碰撞检测算法在典型情况下显然能够实现常数时间性能。

**计算环境**

Boids软件是用Symbolics Common Lisp编写的。代码和动画是在Symbolics 3600 Lisp Machine上生成的，这是一台高性能个人计算机。群体软件是在Flavors中实现的，这是Symbolics Common Lisp的面向对象编程扩展。系统的几何方面是基于S-Geometry层，这是一个交互式几何建模器。Boids基于3D:OBJECT flavor，它提供了它们的几何能力。群体模拟是从使用S-Dynamics动画系统创建和动画化的脚本中调用的，该系统还提供了用于查看运动测试的实时播放功能。这个图形工具包的可用性使作者能够立即专注于这个项目的独特问题。这个基础的一个例子是，在SIGGRAPH'86会议前十天完成了群体模型的初始版本，包括实现、测试、调试以及制作了七个短的运动测试。

该Boid软件并未针对速度进行优化。但是，如果没有对系统的实际性能进行大致估计，这份报告就会显得不完整。使用一个群体包含80个仿鸟，采用朴素的O(N^2)算法（因此有6400个个体仿鸟之间的比较），在一台没有任何特殊硬件加速器的单个Lisp机器上，每帧仿真运行约为95秒。一个长为十秒（300帧）的运动测试花费了约八个小时的真实时间来完成。

未来工作

本文主要忽略了提供仿真鸟视觉表示的几何模型的内部动画。最初使用这些模型制作的运动测试都显示了一群小抽象的刚性形状，可能类似于纸飞机。它们没有挥动翅膀，也没有转动头部，当然也没有角色动画。这些主题对于仿真群体的可信动画都非常重要和相关。但是，作为极化的、非碰撞的集合运动的群集的基本抽象性质在很大程度上独立于这些内部形状变化和关节活动的问题。这一概念得到了支持，因为大多数观看这些仿真的人在没有任何内部动画的情况下也将这些抽象对象的运动识别为“群集运动”。

然而，要将运动的这两个方面融合起来，并不仅仅是将角色的内部动画循环的行动与几何飞行定义的运动连接起来。飞行动态模型的当前状态与翅膀运动循环的振幅和频率之间存在重要的同步问题。当前开发的主题包括内部动画、同步以及仿真群体模型与其他更传统的交互式动画脚本系统之间的接口。我们希望能够让一位技能娴熟的计算机动画师设计一个鸟类角色，并使用标准的交互式建模和脚本技术来定义其“翅膀拍动循环”，然后能够将这个循环运动“插入”到群体模拟模型中，使得群体中的仿鸟按照脚本循环飞行。

在本文中讨论的行为都是简单的、孤立的、低复杂度的行为。仿鸟具有几何和运动状态，但它们没有显著的心理状态。真实的动物具有比简单的避免痛苦碰撞更复杂的、更抽象的行为；它们有比简单地飞往空间中某一点更复杂的动机。更有趣的行为模型会考虑到饥饿、寻找食物、对捕食者的恐惧、定期需要睡眠等因素。其他研究者已经创建了这种类型的行为模型，但尚未为本文描述的仿鸟模型实现。

**总结**

本文提出了一种极化的、非碰撞的集合运动模型，例如群、群和群。该模型基于独立模拟每只鸟的行为。在独立工作的情况下，鸟类既试图聚在一起又避免彼此和环境中其他物体的碰撞。使用这个模型构建的仿真群体的动画似乎与观察者直观的“群体运动”概念相一致。然而，要客观地衡量这些仿真的有效性是困难的。通过比较仿真群体的行为方面与自然群体的行为方面，我们能够改进和完善模型。但是，一旦模型达到了一定的逼真水平，动画师就可以随意改变仿真群体的参数，以实现许多关于群体行为的变化。