

动画物理原理

Alejandro L. Garcia

物理与解剖学院

圣何塞州立大学

SIGGRAPH 2012 课程笔记

中文翻译：路晞

课程介绍

角色动画师为什么要学习物理？

如果你要做一名外科手术医师，那么必然要学习解剖学；而对于写生绘画，了解一些骨骼、肌肉的常识会有帮助。如果你要成为一名工程师，微积分和物理学是必须学习的；对于一个角色动画师，掌握些力学和生物力学的基本原理还是有用的。在 Chuck Jones 的书《Chuck Amuck》中，他写到：“比较解剖学对于动画师或导演来说，是必不可少的。”这门课的目的是为你的动画工具箱增加一项物理学的技能。

在圣何塞州立大学，我负责《动画物理》这门课。课时为一个学期。前八周介绍力学和生物力学。在本次 SIGGRAPH 的课程中，将把16次课程浓缩到3小时。本课程围绕角色动画进行，但提及的很多概念也对角色特效，比如头发、布料有帮助。物理学对特效师、灯光师同样有帮助，但我们今天没有时间讨论。

所有动画师对《生命的幻象：迪斯尼动画》（Ollie Johnston 和 Frank Thomas 著）这本书中提到的“动画原理”肯定都再熟悉不过了。比如挤压和拉伸、预期，这些都是做动画时的指示性原则。因为他们描述的都是运动，所以很多动画原理的基础也就是物理学。比如，动画原理中的连动，就是来源于惯性原理。

我们将跟随 Johnston 和 Thomas 所列举的成功动画模型的一系列原理，来理解运动中的物理。本课程涉及到的动画物理原理有：

1. Timing, Spacing, and Scale
2. 惯性 (Law of Inertia)
3. 动量和力量 (Momentum and Force)
4. 重心 (Center of Gravity)
5. 超重和失重 (Weight Gain and Loss)
6. 作用力和反作用力 (Action-Reaction)

课程的前半部分，会逐一介绍每个原则，以及简单的应用。后半部分我们会用这些原则来理解诸如跳跃、走路这样的动作。

在正式开始前，还要说一句：这些动画物理原理的目的不是为了得到物理准确的动画。他们可以帮助你理解物理运动的内涵。动画师通常会观察参考视频，但不是照抄，而是吸取

他们想要的精髓。有了物理学的知识，你可以利用他们填充和创造动画环境，比如让长颈鹿走钢丝，或者让狮子荡秋千，这样的视频参考绝对不会出现在 YouTube 上。还要再引用一句 Chuck Jones 的话：“可信的现实是我们的起点。一切艺术创造都来源于此。”

动画物理原理

Timing, Spacing, and Scale

动画从业者的第一个练习通常都是小球弹跳，目的是通过学习用时间点(timing)和间隔(spacing)来模拟出每个弹跳顶点慢入慢出的逼真效果。Timing 和 spacing 体现了速度，以及加速对距离的影响。由于重力加速度是恒定的，因此小球的空间变化有规律可寻。我将这种规律称之为“奇数规则”，因为从第一个顶点开始，接下来的顶点之间的距离为1、3、5、7、9，... 图1所示的是一些运用奇数规则的案例。这一规则并非来自于直觉或经验，而是从数学公式得来的： $x = 1/2at^2$ 。



图1：符合“奇数规律”的慢入慢出范例

“奇数规则”除了能应用于直接（单线程）动画以外，对于姿势到姿势(pose-to-pose)类的动画也有推导式的帮助，我将其称之为“时间过半，路程过1/4”（了解美式足球会更容易理解）。内涵很简单：把姿势拆分，在顶点和最后位置点之间，从顶点开始的1/4的位置，就是时间到达1/2时物体所处的位置。图2列出了两个案例。奇数定律，或是时间过半，路程过1/4，都需要加速度恒定，也就是力是常量。

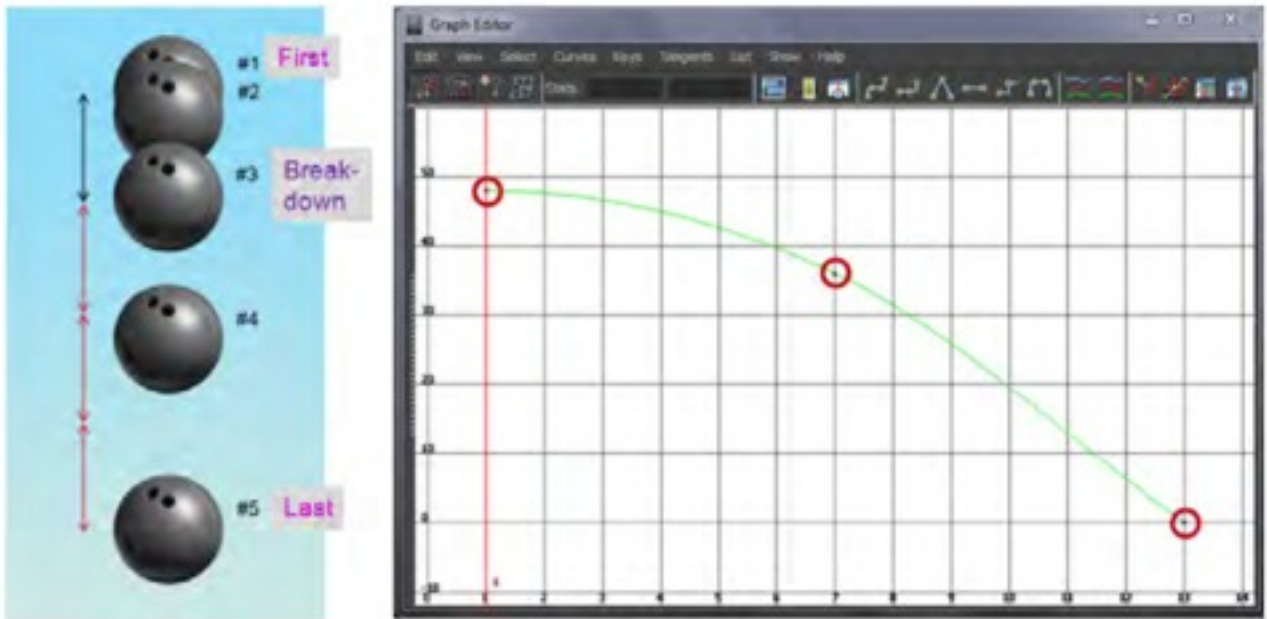


图2：左：时间过半，路程过1/4的例子。timing设置为每3帧一画。右：图形编辑器中的体现

对于重力加速度的情况，下降距离(以英寸为单位)等于 $1/3$ 乘以帧数的平方（仅指电影的每秒24帧的帧率，其他帧率不适合此公式）。比如，6帧的下落时间，下落距离（以英寸为单位） $= 1/3 \times (6)^2 = 12$ 英寸，相当于1英尺（约0.3米）。12帧的距离 $= 1/3 \times (12)^2 = 48$ 英寸，或者4英尺（约1.2米）。

虽然动画师很少会使用这些公式，但当用 timing 来体现尺寸时是很关键的。假如一个角色只用了12帧就能从房顶跳下并落在地上。这会让观众觉得这个角色的身高很矮，因为房子也不过1.2米高。而且这一规律也可以应用到除了下落以外的其他运动，包括走路、跑步、跳跃等等，因为对胳膊和腿的 timing 来说，所要表现的比例是相似的。在实拍时，我们可以将这种 timing 与 尺寸感之间的关系，应用于比例模型与高速摄影。比如，如果将帧率提高一倍，当按照正常速度播放时，该角色在视觉上会有放大4倍的感觉。所以 timing 需要与角色的尺寸始终一致。如果 timing 犯了20%的失误，就有可能让一个1米8的大个子看着跟1米2那么矮。

惯性定律

惯性定律，又叫牛顿第一运动定律，任何一个物体在未受到非平衡力的作用下，会维持匀速运动。我们先弄明白这里的“非平衡力”的概念。惯性定律最简单的形式：一个匀速运动的物体，如果没有受到外力干扰，会保持匀速运动下去，比如外太空的小行星会维持匀速运动。但除非是像《机器人Wall-E》这样的影片，否则很难遇到绝对无外力的动画项目。

放置在桌上的石头受到了一对力的作用：向下的重力和桌子表面向上的支撑力。这两种力互相平衡。一个在光滑的地面上滚动的保龄球也具备类似的平衡力（重力和地面的支撑力）。如果没有其他力的干预，那么保龄球会以匀速继续运动下去。石头的案例也是一样的，只不过它的速度是零。



图3：（左）用坐汽车的人演示惯性定律。当汽车突然刹车，乘客的反应。（右）坐着的乘客在汽车刹车瞬间；注意她的头发会有明显向前的变化。

虽然看起来都像是课本里说的话，但想想动画中用到的连动，其实就是因为惯性定律。拿图三中站在汽车上的这个人举例。当汽车突然停下，他会向前倒。在汽车刹车之前，他是在做向前的运动的，并且根据惯性定律，除非有外力干涉（比如他撞在地上），否则他会一直运动下去。

从惯性定律再做引申，一个静止的角色，如果不是受到了不平衡力的干扰，还会继续保持静止。如果汽车突然向前加速，那这个站立的角色会向后倒（图4），而坐着的角色头发会向后飘。如果你是站在车外观察，会感觉汽车的地面在从向后倒的人脚下抽离（图5）。这是因为你要将摄像机的运动考虑在内，特别是当摄像机也在加速运动的话。

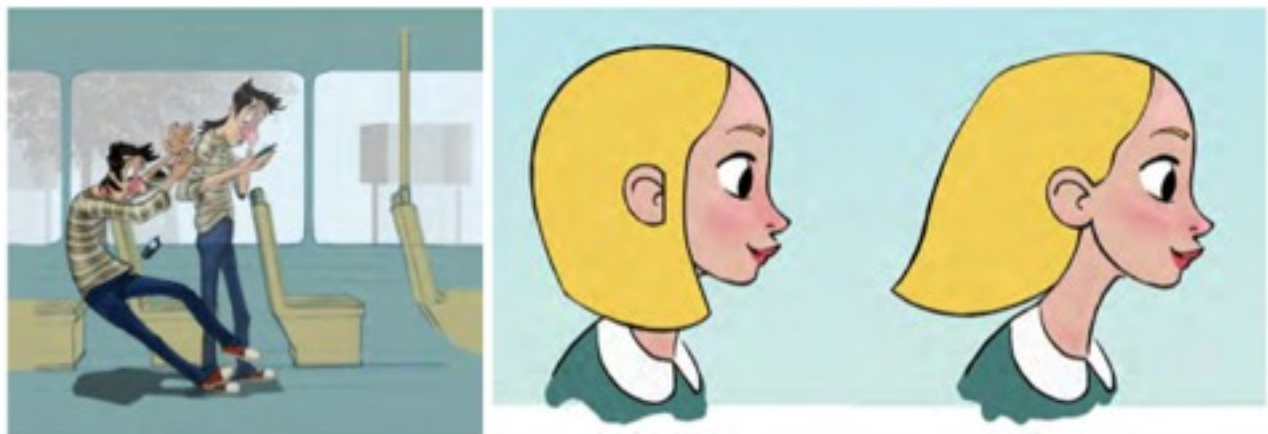


图4：（左）当汽车加速，站立的人会向后倒。（右）坐着的角色

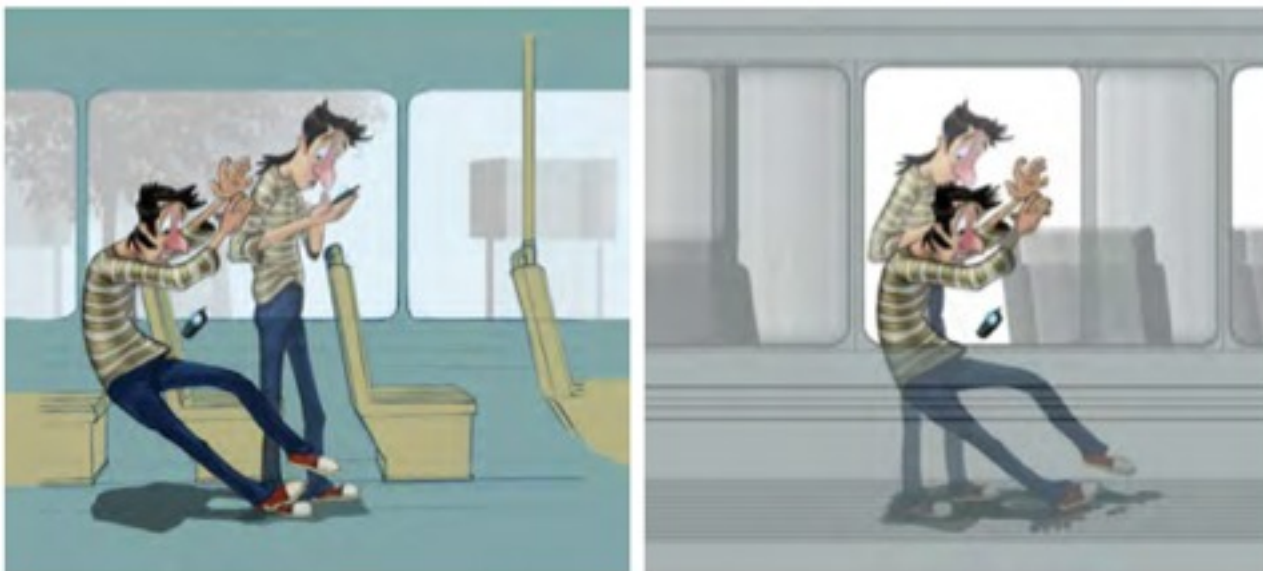


图5：（左）在车里观察，当汽车突然加速，人像后倒。（右）在车外的观察，汽车的地板像是从人的脚底抽出。

最后，惯性定律也能解释图6中的这种牵引力和“离心”力。当角色转动身体时，他们的头发和衣服会有被向后拖拽的感觉，也是因为惯性（静止的仍保持静止）。但如果头发或者衣服是在运动的，那么根据惯性，会有向外的运动（也可以称之为连动）。同理，如果汽车突然右转弯，这会让站立的角色继续保持原有方向的运动，也就是向汽车以左朝外的方向运动。

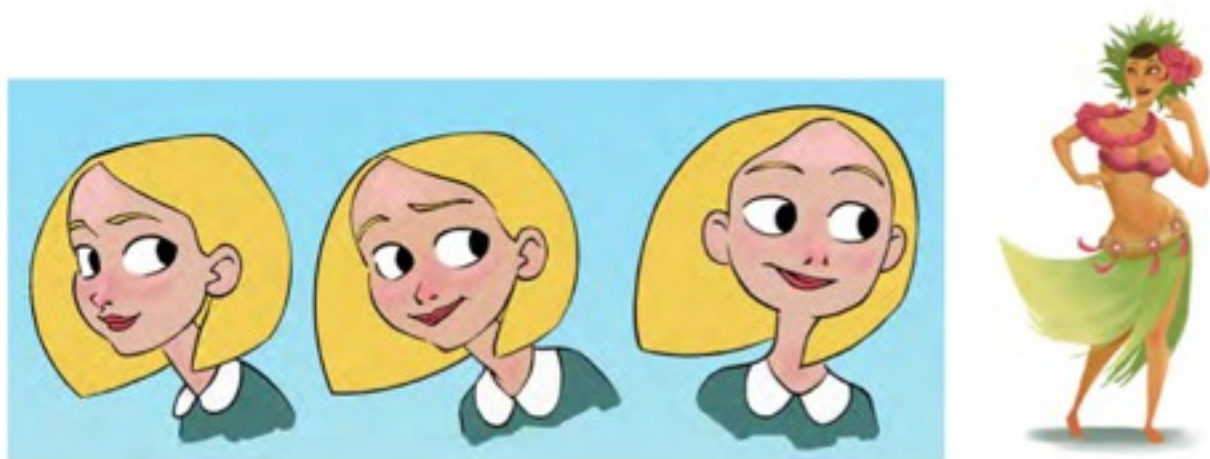


图6：（左）转头时，她的头发向后也向外飘。（右）草裙舞演员转动身体时，裙摆和花环会向后向外运动。

动量与力量

任何运动的角色，根据他的速度和重量的不同，也会有不同的动量。比如一个100磅重的角色，如果他的速度更快，可以与一个重300磅的角色有一样的动量。运动的方向也是动量的因素之一。

如果要改变角色的动量，你需要使用不平衡力。力越大，动量的改变越快。动量的改变可以体现在角色速度的加快、减慢，或者方向的改变（比如转弯）。在力学领域，这就是牛顿第二运动定律。

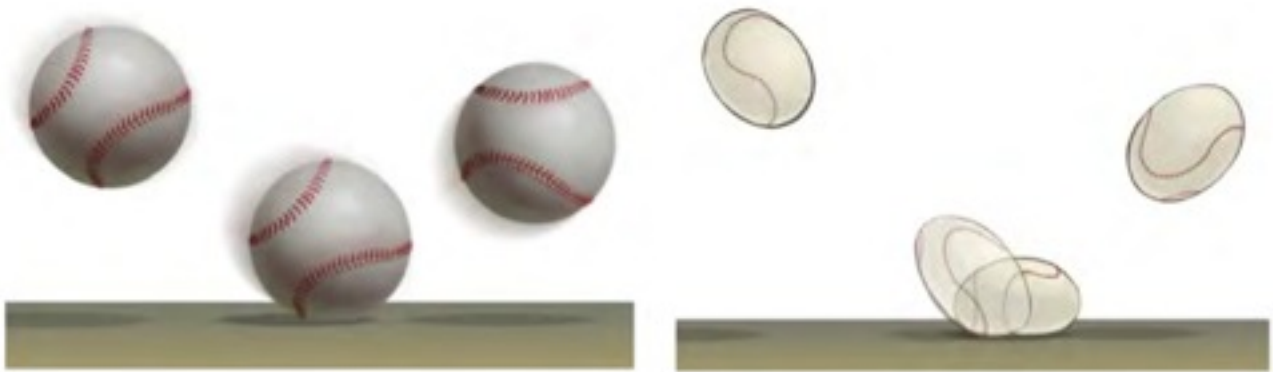


图7：（左）动量改变迅速，所以冲击力很大。（右）动量改变相对慢一些，所以力道降低。

图7是两组球撞击地面的效果。两组的动量改变可以是差不多的，但在左图，写实的这个案例中，改变迅速，因此冲击力是很大的。右图中运用了卡通风格的“挤压与拉伸”，因为转变的过程持续了几帧，因此力道也就柔和许多。简单概括，干脆的 timing 意味着较大的力，反之亦然。

图1中向前滑的角色之所以能停下是因为摩擦力（不平衡力）。如果摩擦力小，那么动量的改变就慢；如果角色开始的动量较大，那么滑动的时间也就会更长。如果力是恒定的（一般摩擦力都是恒定的），那么它产生的位置变化就应该符合“奇数规则”，以及“时间过半，路程过1/4”。

图8的案例中，不平衡力不是恒定力。如果力在增加，比如小球滚下坡或者翻倒，这种情况下，间隔的空间增长要比“奇数规则”更快。相反的，如果不平衡力是在减弱，那么间隔的距离变化会更接近。比如，在摆动球在最低点时，它的速度几乎恒定，因为在此时绳子的拉力与球的重力几乎平衡。

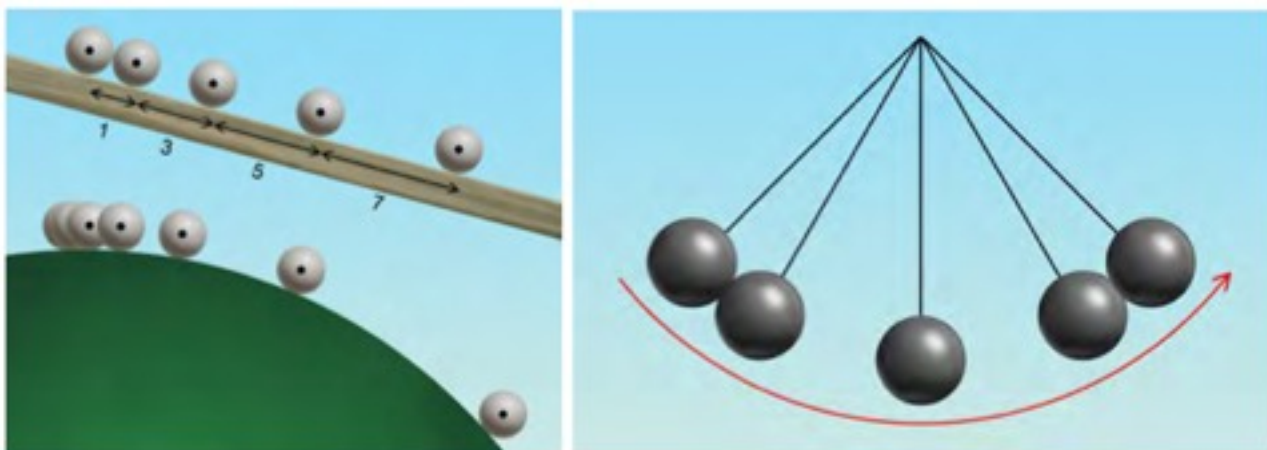


图8：非恒定的不平衡力案例。尽管重力是恒定的，但有弧度的斜坡产生的力是变化的（左）。悬摆球的拉力大小是随位置改变而改变的（右）。

最后，如果不平衡力减为零，那么速度也将变成匀速（见惯性定律）。一个案例是，当下落物体的重力与空气阻力相互平衡时，这个物体就达到了终极速度（对人类来说，这个速度超过了100英里/小时，但对于小动物，比如松鼠的终极速度就很小，因此它们从高处跌落下来也能生还）。概括来说，timing 体现了不平衡力和力的改变。只有当 timing 与力的实际情况相一致时，调出来的动画才有说服力。

重心

重心就是物理重量的平均位置。对大部分均匀物体来说，重心就是几何（视觉）中心，但对于非均匀物体（比如拿着一个金属头的木头把手的人），他的重心就会向偏重的一侧偏移。人的重心差不多位于躯体的中心，大约在肚脐的高度，但根据姿势不同，也会有所调整（图9）。



图9：（左）不同姿势下重心的改变。（右）灰色区域是人的支持面（Base of Support）。

强调重心有几个原因。首先，只有当重心位于角色脚面之上时，他才有可能处于平衡静止的状态，换句话说，重心必须位于支持面的范围内，也就是图9中的围绕脚的区域。

其次，当角色更换姿势时，重心也随之改变，这会导致重量从一条腿转换到另一条腿。重心几英寸的小调整，都有可能带来显著的重量移动，比如图10。当重量从一只脚换到另一只脚时，会反应在姿势上，最常见的是，承重的一侧会出现臀部提高以及肩部落下(也就是雕塑和绘画中的“对应”这个概念)。如果动画做的很好，即便镜头中只能看到角色的上半身，我们也能准确判断这个角色是站立还是坐着的。

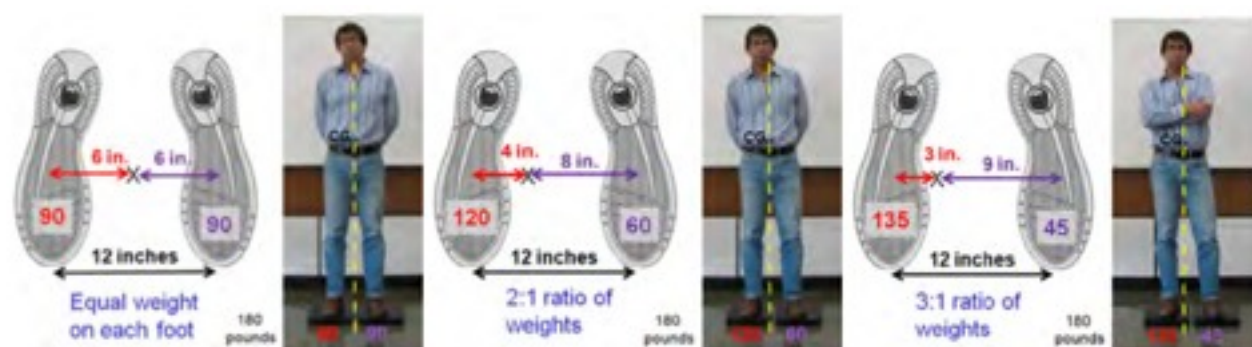


图10：（左）立正站姿下，重心位于两脚中点向上的延长线。（中图、右图）重心随重量偏移而向画面左侧调整。

最后，当我们设计运动轨迹时，重心也是很好的跟踪点。比如，被抛向空中的物体，其重心的运动轨迹是一条抛物线，但物体本身的旋转则不会影响到抛物线（见图11）。重心点的运动对走路来说也很重要，我们一会儿再讨论。



图11：在空中旋转的斧子，其重心的运动轨迹是抛物线

超重与失重

我们常认为重量是恒定的，但当物体变速运动时，重量会有所变化。比如图12中所示：

- 加速向上：超重
- 减速向上：失重

- 加速向下：失重
- 减速向下：超重

简单来说，如果与重力相反（加速向上，或者减速向下）就会得到超重，而与重力同向（减速向上或者加速向下）会得到失重。一个极端的案例是当物体做自由落体，那么它处于完全失重的状态。你可以通过托举重物来实验这一定律，比如拿一个哑铃，加速上举和下推。

角色运动时（走路、跑步、跳跃等），因为重力的改变，会带来很多交叠作用，比如头发、衣服、以及身上的肉。超重会让这些东西向下，而失重则会让他们向上。Richard Williams 将这种反应称之为“反作用”，并且在《动画师生存手册》中写道：“当角色’加速’向上，那么布料、头发、软质的东西都会向下。”一些动画调的不好，所以看起来很”飘“，就是因为缺乏这些体现重量的变化。



图12：角色重力随动作而改变：下蹲、上推、跳起、下落

作用力和反作用力

作用力与反作用力，也叫做牛顿第三定律，从这个定律能得出：当一个角色与某个物体（或另一个角色）有互动，那么双方都会受到影响。Paul Hewitt 描述为“触碰与被触碰是同时存在的。”更传统一些的解释会是：

任何一个作用力在产生的一瞬间，也会有一个反作用力出现，力度相等，方向相反。

再仔细来看看这个定义。首先，作用力与反作用力是一对力。举个例子，A打了B一拳（如图13）。那么这里的作用力就是A出拳打在B的脸上，而反作用力是B产生的相同的力作用于A的拳头上。其次，这一对力必须是同时产生的，因此，如果B回击的话，这个力就不叫做反作用力，而是一个新的动作。

再次，假如A向左打出的这一拳有100磅的力道，那么也会存在一个100磅的向右的力。因为力可以改变动量，作用力导致了B的头也会像左，而反作用力同样改变了A的动量，因此能让A停下来。如果想要把这一场景成功的调成动画，需要匹配作用力与反作用力。常见的错误是将注意力都放在B的动作，而忽视了与此同时发生在A身上的反作用力。

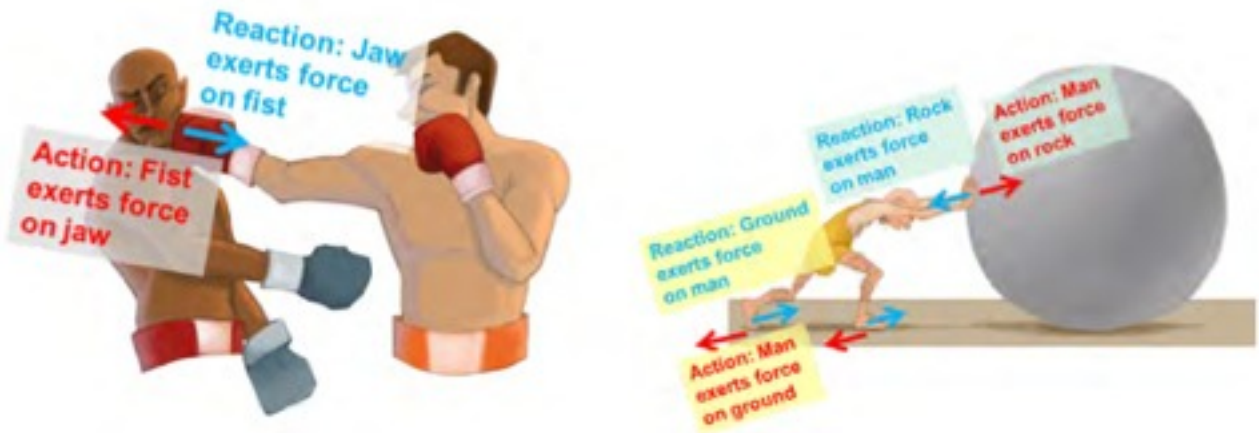


图13：作用力与反作用力的案例。（左）A打B （右）人推石头

对作用力和反作用力的分析很复杂，因为一般情况下都会存在多对力。拿人推石头（图13）这个简单的例子来讲。人对石头使出推力，石头也会产生反作用力。如果人的脚下踩着滑板，那他就会向后滑出去，而石头会向前运动。但他是光着脚的，所以还有另一对作用力与反作用力：他的脚有对地面的蹬力，而地面向前推他。为了能向前推动石块，腿上使的力气不能比胳膊的力小。这一场景动画的好坏，就取决于这些作用力与反作用力是否能匹配。

最后，无论在实拍还是动画电影中，经常能看到违反作用力与反作用力的场景。比如英雄人物总能打出非常强有力的出拳（或者使用大个儿的机枪），但后坐力却非常小，与此同

时，坏蛋就飞出视线了。这种违背常理的场面有可能是故意为之，从而得到戏剧化、卡通化的效果（让英雄更英勇，表现恶势力的惨败），但如果这一效果不是有意为之，那么很有可能无法得到令人信服的动画效果。

理论在实际工作中的应用

基本姿势

在课程的第二部分，我们用一系列案例来讨论动画物理的理论在实际中的应用，先从基本姿势开始。重心理论告诉我们，一个静止的角色，他的重心存在于支撑面向上延长的区域内（见图9）。为了更好的理解，我们可以画出“重心线”——一条纵向的穿过重心的垂直线。以及“压力中心”，也就是重心线与地面相交的点。如果压力中心落在支撑面以内，那么重力就会与来自地面的支撑力相互平衡。

我们来看几个案例：

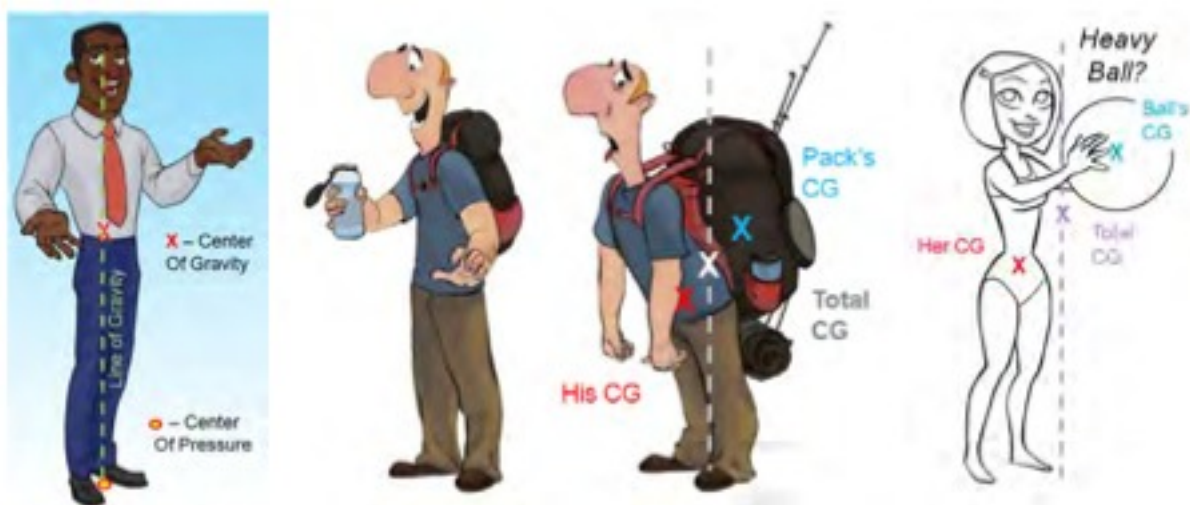


图14：（左）重心线和压力中心（中）轻、重两种背包（右）如果球很重的话，女孩会失去平衡

如果一个人背了很重的东西，就需要前倾，比如图14，只有这样才能保证两者合一后的重心位于支撑面以内。图14中的女孩手中的球不可能很重，这和她的力气大小无关，而是如果球很重的话，重心就会前移，超出了支撑面的范围。

注意看图15中，举轻的物体和重物时，人的姿势有什么不同。如果要举重物的话，就必须让物体与人贴得越近越好，只有这样，二者的重心才能位于支撑面以内。如果她快速抬起

重物（加速向上），那么就更难保持平衡，因为物体超重（参看《超重与失重》），而重力中心也就改变了。



图15：（左）拿起一个沙滩排球（右）拿起一桶很重的水

图16中，弯腰捡太阳眼镜的这位需要撅屁股，那是为了平衡她前倾的上半身。中间那个从椅子上起身的人，需要让身体前倾，才能平衡。而且他的双脚分开，也是为了拓宽支撑面。图16最右侧这个案例，像我们展示的是最大范围的倾斜。为了保证重心位于支撑面之上，我的另一条腿必须尽可能往后抬。总的来说，当支撑面变小，我们会本能的向两侧举起手臂，这样可以快速调整重心。

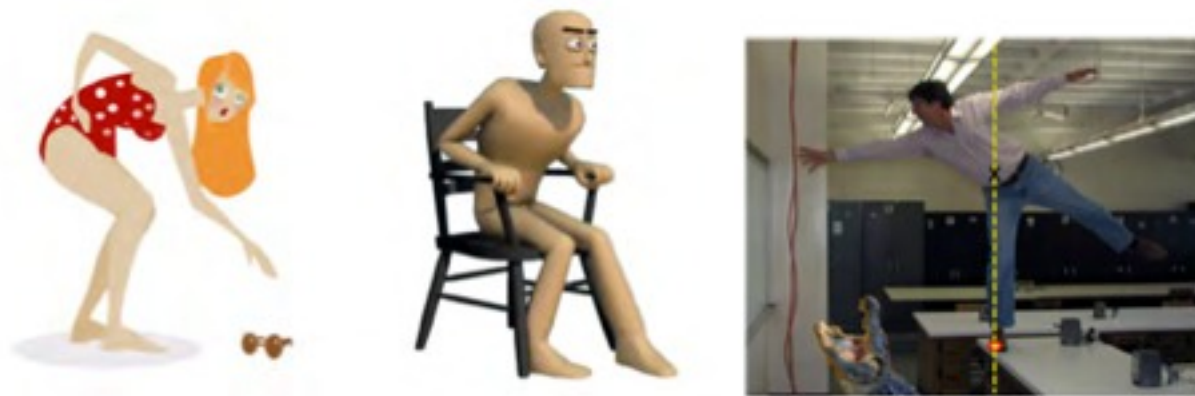


图16：（左）向前弯腰时，胯需要向后摆（中）从椅子上起来时，需要前倾，并且两只脚分开（右）伸出手

一些特殊情况里，重心线不是与地面垂直的直线。图17，当车厢加速，乘客前倾，因此重心线也前倾。中间的这位，因为汽车突然加速而失去了平衡。最后，当运动中的人转弯时，会因为向心力而转变动量（参见《动量与力》）。由此产生的加速会让重心线向曲线内测倾斜。这也就是图中这个跑步者会倾斜的原因。



图17：（左）在加速的车厢内保持平衡 （中）在加速的汽车上失去平衡 （右）跑步的人向跑道中心倾斜

弹跳

先从弹跳最简单的部分开始，也就是在空中的阶段。对于类似人类尺寸的角色，当速度小于30英里/小时时，空气阻力可以忽略不计，因此主要的力是重力。这种情况下，运动的轨迹是抛物线，如图18所示。横向的距离变化是一样的，而纵向的距离变化则符合奇数规律，以及时间过半，距离过1/4。在少数需要考虑空气阻力的情况中，运动轨迹是偏斜的，下降会比上升的倾斜度更高。

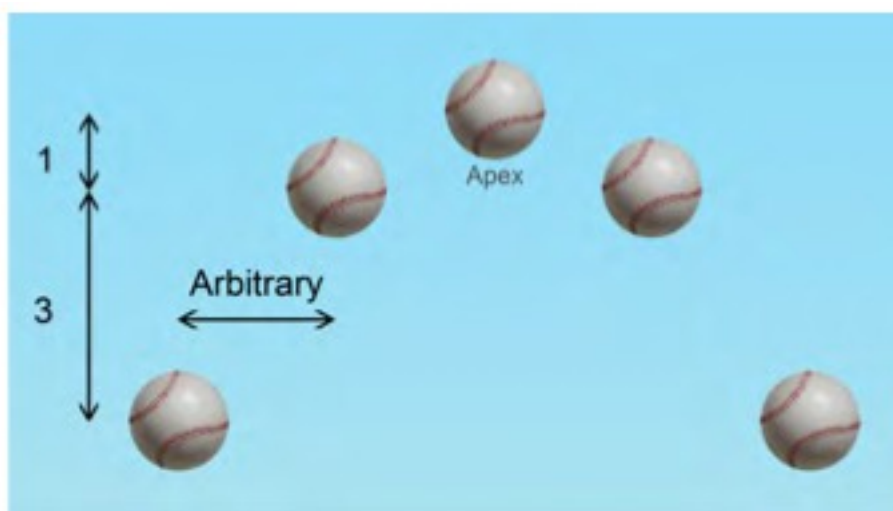


图18：抛物线的弹跳轨迹中，横向的间隔一致，纵向的间隔符合奇数规律和时间过半，距离过1/4

造成空中阶段操作简单的另一个原因是，重力加速度对任何物体来说都是一样的。比如，任何物体降落1英尺都需要6帧，所以凡是1英尺的高度就需要6帧爬升，6帧下落。在图19中，1英尺的“空中高度”等于6帧的“空中时间”。因为 timing 与 scale 相互关联，所以4英尺

的跳跃需要两倍的时间。要注意的是 timing 只与纵向跃起的高度有关，与横向跨越的距离无关。

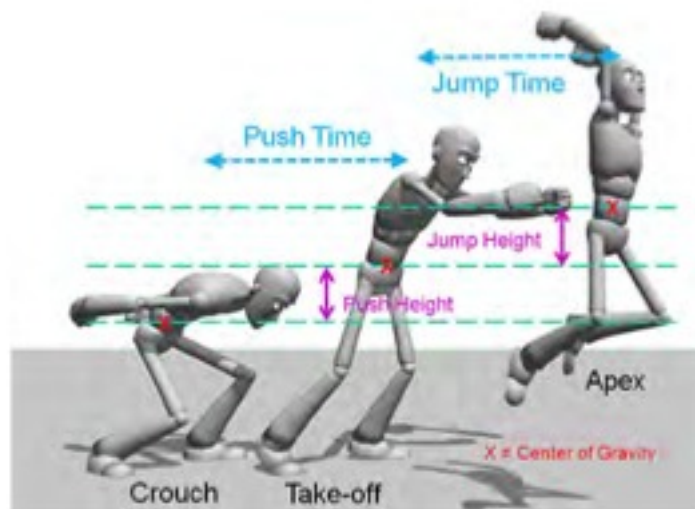


图19：从起跳到最高点;从顶点到下落是类似的。距离测量以重心为准。

再来说说起跳的动作，也就是下蹲、蹬腿并且身体离开地面的过程。我们将这个跳跃之前的高度称之为“准备高度”，从跳起到顶点间的高度称作“空中高度”（见图19）。这两者的比率为“跳起比率”

跳起比率=空中高度（跳起到顶点）/准备高度（下蹲到起跳）

比如，从下蹲到起跳的距离是1英尺，跳起到顶点的距离为4英尺，那么这个比率就是4.

计算起跳比率的重要性在于它决定了起跳准备的 timing。比率越大，起跳准备就要越快，这样看起来才更接近真实。具体来讲，如果起跳所用的力是恒定的，那么

准备时间（从下蹲到跳起）= 空中时间（从跳起到抵达顶点）/跳起比率

如果要跳4英尺，那么空中时间（从跳起到顶点）需要12帧，如果下蹲1英尺，则准备时间需要4帧（因为跳起比率为4）。比算术更重要的是这个公式所要表达的：如果想跳得高，那么准备的 timing 一定要够快。对于那些能跳得极高的超级英雄，如果要合乎物理规律，那么准备的时间可能要小于1帧。这就是有时这种情况会以慢动作体现的原因。

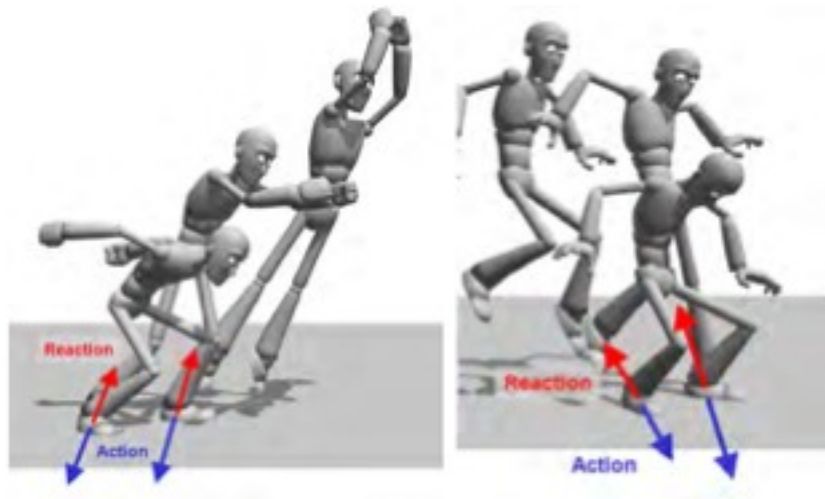


图20：跳起和下落的力

力越大，动量也就越大（反之亦然）。准备阶段使出的力等于跳起比率乘以人物重量。因为起跳的人对地面施加了向下的作用力，才会得到地面的反作用力，并且会向上加速运动（见图20，作用力与反作用力）。如果在跳跃的同时，增加双臂向上的摆动，这个力还能得到显著增加（跳得也就越高）。但如果摆臂发生在起跳之后，则会使身体下压，并且会降低在空中的高度。你应该自己试一下。犯一回错，你就会知道摆臂的动作如何与蹬腿匹配了。

最后，下落时落定的 timing，也与起跳准备的 timing 有关。假如起落定时下蹲的距离与起跳时下蹲的距离相似的话，那么两者的 timing 也相似。如果落定时下蹲了更多，那么 timing 就要慢一些。但如果直着落下，并且两腿也不打弯的话，那么 timing 的时间极短，作用力也非常强（参看《动量与力量》）。

行走

有关行走的生物力学课程，哪怕只是两足动物，都可以讲满3个小时。所以我们并没有时间去讨论有关行走的方方面面，只能关注涉及6个理论的一些案例。

行走是在接触姿势和过度帧之间的循环步骤（见图21）。尽管走路的方式各式各样，但总的来说，向过度帧演变时重心提高，此后下落。这所造成的结果是，向过度帧接近时，向前的速度减慢，通过之后，速度加快（见图21）。这个过程中的 timing 变化很细微，但如果手持一个装了水的盘子走路的话，观察这种速度的变化就非常明显了。

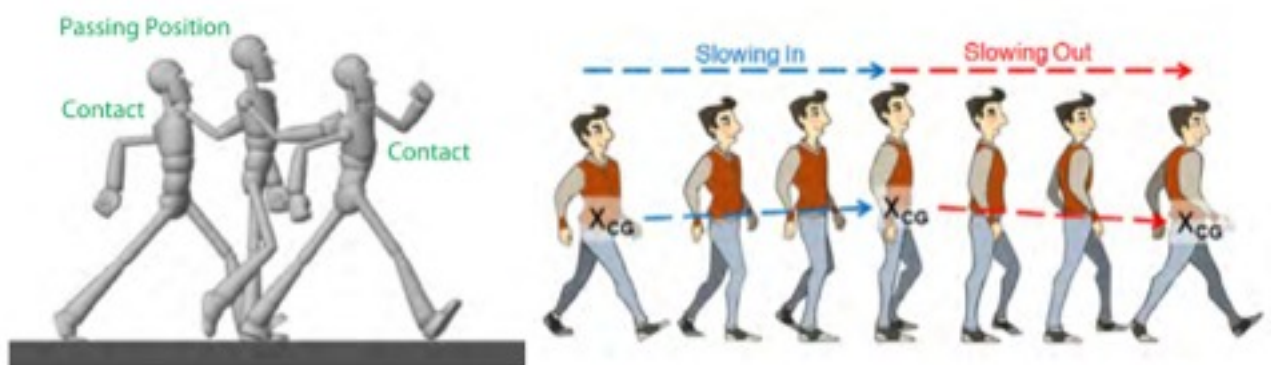


图21：（左）从接触姿势到过度帧。（右）过度帧前后的慢入慢出，以及重心的起落

和跳跃一样，走路的人对地面使出作用力，并借助地面的反作用力达到前进的结果。从接触姿势到过度帧，地面的反作用力是向后的，令运动速度减慢。通过想象脚踩香蕉皮的后果就可以理解这一向后的力的必要性。从过度帧到接触姿势，这个力变成向前方向的。有趣的是，在一个完整的循环中，向后的力与向前的力相等。因为在一个走路循环开始时和结尾时的速度是一样的，因此没有发生动量的改变，总的合力为零。

走路的同时提高重心会耗费力气。尝试用 Monty Python 的绘画《The Ministry of Silly Walks》（一部喜剧中出现的图画，非常夸张的动作）的方式运动5分钟，你就有所感觉了。这种运动其实是很好的有氧健身操。走路时，为了得到均匀的步伐和平稳节奏，身体需要做出一系列小动作来调整。首先，通过骨盆的旋转使腿向前迈进，与此同时，肩膀会朝相反的方向旋转。



图22：（左）在接触姿势中的髋骨旋转。（右）臀部与肩部的同步旋转。

为了避免在过度帧中重心提得过高，骨盆要向运动的那条腿的一次倾斜，这叫做“骨盆倾斜”（见图23）。承重腿的膝盖会略微弯曲也是同样的道理，而另一条腿的膝盖也需要弯曲，这是为了避免这只脚的位置过低拖在地上。

除了上下运动，还存在左右运动。最有效的行走需要将这些运动最小化，否则就需要使出更大的力去平衡。不过，总会发生上下、左右同时运动的情况。对于慢速的行走，可以看到重心的改变呈 ∞ 状。如果快走，同步作用下的调整和重心的摇摆会像企鹅一样，呈U型。



图23：（左）骨盆倾斜 （右）重心的左右运动

图24呈现的是行走过程中，左右脚的重量交替。两条曲线交叉的地方是在接触姿势中重量由位于后方的脚过度到前方的脚的那一瞬间。能看到在整个过程中，重量的变化很大，从220磅到140磅。重量下降和上升发生在过度帧中，减速时重量上升，加速时下降（参见《失重与超重》）。重量顶点发生时，前脚脚跟将落但尚未落地，以及后脚的将要离开地面。

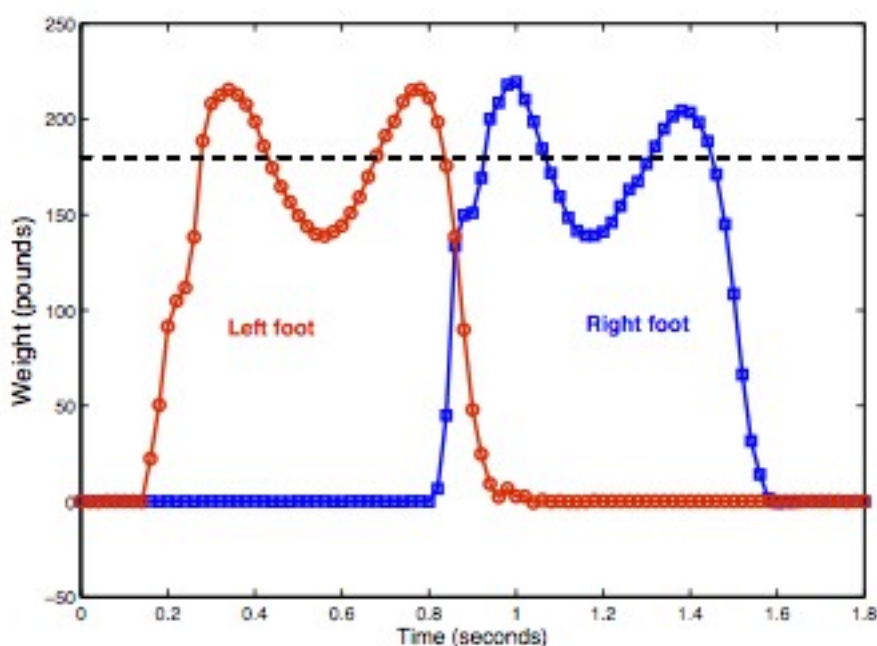


图24：实验室中计量的行走过程中重量的变化。虚线（180磅）是测试者静止状态下的体重。

图24中的数据是以普通行走为依据的（约1秒钟一个循环）。如果慢速行走，重量变化幅度变小。对于特别慢速的，有可能一只脚从脚跟过渡到脚趾的力是几乎不变的。对于快

走，变化则非常显著，在过度帧中最低值可以接近零，而最高值可以达到本身重量的两倍。这样的重量变化在头发、布料、肥肉等连动效果中会非常明显。

结语

动画物理课程的结束部分，还有两点要提：第一，虽然我将最重要的动画物理原理都列举出来了，但如果有更充裕的时间的话，我会再增加三条：

7.功和能

8.转动惯量

9.角动量和扭矩

在讲解行走的章节时，其实已经有所涉及。比如，重心的升高要用到功，而臀部和肩部的旋转需要用到扭矩。旋转惯量更是对理解更复杂的旋转有关，比如后空翻，或者在空中出现过身体旋转，最后四脚落地的猫（如图25）。希望这门课未来还有后续。



图25：（左）后空翻的旋转；（右）扭转身体的猫

其次，这些动画物理原理对任何工作都有益处，包括故事、layout、角色设计。在制作的早期阶段，导演需要和不同的艺术家一起制定视觉设计。除了要确定影片大体的视觉效果，还有很多情景设定需要做决定。比如，《功夫熊猫》中的动物会说话，但《寻龙记》的就不会。

同样的，也有需要物理设计的决定需要做。比如《功夫熊猫》中的螳螂。因为螳螂能够打得过比他大一百倍的坏蛋，所以这条作用力与反作用力的物理原则在他身上就要调整了。但这会导致其他有关物理学的问题：需要同样调整其他主要角色的作用力与反作用力吗？是否也对所有的反派和背景角色适用？有没有哪些镜头，需要让螳螂符合正常的作用力与反作用力？

你也可以把它想象成一份“物理脚本”，就像是色彩脚本，为每场确定物理会发生哪些变化。在喜剧中，物理原理常常会被夸张，但对于戏剧化的动作来说，强调真实反而会增添戏剧紧张度。很多物理方面的决定是导演做出的直觉决定，如果决定是成功的，那么影片看起来会很自然，观众也能够沉浸其中。所以，用你的智慧去驾驭这些原理，并祝愿原力与你同在。

One can also think of a “physics script”, similar to a color script, that indicates the variation in the physics in each scene. For comedic action the laws of physics are often bent but for dramatic action a heightened realism creates more tension. Many of these phys-dev decisions are made instinctively by the director and when the design is successful the film’s universe feels natural, immersing the audience in the story. So use the principles wisely and may the forces be with you.

Acknowledgements

The *Physics for Animation Artists* project has been supported by the National Science Foundation’s Transforming Undergraduate Education in Science, Technology, Engineering and Mathematics program. The author also thanks his colleagues at San Jose State University and Dreamworks Animation SKG.

Biosketch

Professor Alejandro Garcia has taught *Physics of Animation* at San Jose State since 2009. In 2011 he spent a one-year professional leave as physicist-in-residence at Dreamworks Animation SKG. During his time with Dreamworks he worked in the Division of Artistic Development, presenting over 30 classes and special lectures for various studio departments and consulted on *Madagascar 3: Europe’s Most Wanted*. This work was highlighted on Science Nation; see: <http://tinyurl.com/8ynw2tt>. Dr. Garcia is also the author of the textbook, *Numerical Methods for Physics*, and has published over 80 professional articles in the fields of computational physics, statistical mechanics, and fluid mechanics.

Image credits

Illustrations by Katie Corna: Figures 16(left), 22(right); Charlene Fleming: Figures 1, 2(left), 3(right), 4(right), 6(left), 8, 9(left), 14(right), 15, 17(left,right), 18; Stephanie Lew: Figures 21(right), 23; Dora Roychoudhury: Figures 6(right), 13, 25; Rebbaz Royee: Figures 3(left), 4(left), 5, 7, 14(left,center), 17(center); Corey Tom: Figures 9(right), 10, 12, 16(center), 19, 20, 21(left), 22(left). All photos are by the author.

©2012 ACM. This is the author’s version of the work. It is posted here by permission of ACM for your personal use. Not for redistribution. The definitive version will be published in the SIGGRAPH 2012 conference proceedings.