

硕 士 研 究 生 读 书 报 告



题目 在虚拟现实中利用牛顿第三定律的伪触觉反馈技术

作者姓名 宫镇涛

作者学号 NB15020

指导教师 李启雷

学科专业 移动互联网与游戏开发

所在学院 软件学院

提交日期 2015年 12 月

摘要

在虚拟现实技术中，真实的对象可以与虚拟对象交互。然而，在现实世界里真实的物体不会对虚拟物体提供任何反作用力。缺乏反作用力会阻碍用户感知物体的质量。虽然可以通过使用实际的力馈设备来提供反作用力，但是这样做不但复杂而且不实用。在这份论文中提供了一个单纯用视觉效果让不同质量的物体产生不同作用力反馈的方法。在论文的第一项研究中，用户不需要经过训练就能立即区分出不同重量的虚拟物体。在第二项研究中，使用这项技术来测量最低质量差。这项方案在不增加额外成本的情况下有效的提高了混合现实技术的体验。

**关键词**：虚拟现实， 物体交互，物理算法，伪触觉技术

Abstract

In mixed reality, real objects can be used to interact with virtual objects. However, unlike in the real world, real objects do not encounter any opposite reaction force when pushing against virtual objects. The lack of reaction force during manipulation prevents users from perceiving the mass of virtual objects. Although this could be addressed by equipping real objects with force-feedback devices, such a solution remains complex and impractical.

In this work, we present a technique to produce an illusion of mass without any active force-feedback mechanism. This is achieved by simulating the effects of this reaction force in a purely visual way. A first study demonstrates that our technique indeed allows users to differentiate light virtual objects from heavy virtual objects. In addi- tion, it shows that the illusion is immediately effective, with no prior training. In a second study, we measure the lowest mass difference (JND) that can be perceived with this technique. The effectiveness and ease of implementation of our solution provides an opportunity to enhance mixed reality interaction at no additional cost.

Keywords: Mass Perception, Physically-Based Simulation, Mixed Reality, Pseudo-Haptics

**1.引言**

混合现实涉及到真实世界和虚拟世界[13]，它使真实对象和虚拟对象看起来共存并彼此交互。这种相互作用可以是视觉的，诸如物体之间遮挡和阴影。另一种增加这种幻觉是通过现实的相互作用力[1,17]，虚拟对象成为受物理规律影响，并与其他物体作出碰撞的反应。特别是，它们可以通过由用户操纵真实物体被推动。

然而，这种相互作用仍然是单向的。尽管虚拟物体能与真实物体作出反应，碰撞，反之则不然。虚拟对象并不实际存在，所以他们不能阻止一个真正的对象穿过它们。因此，针对一个虚拟对象推真实物体时用户不感到任何的反作用力。

这种反馈的缺乏引出了很多问题。根据牛顿第三定律[16]，推压另一个物体应该感受到在相反方向的相等的反作用力。较重的物体比轻的物体更有动量，所以他们需要更大的力量来移动。因此通常来说强大的反作用力将表明，被推的对象会更加的重。如果用户感觉不到来自虚拟对象的任何力，那么这个虚拟对象会变得难以感知。

解决这一问题的一种方法是使用具有力反馈装置[6]的可操纵对象。但它需要复杂的设备，例如机器人触觉手臂，以便产生的反作用力。它也不能大量地扩展到现实世界中的潜在操纵的对象。因此，采用主动力反馈设备仍然是困难和不切实际的。在这篇论文中，我们提出了一个新的解决方案，用牛顿第三定律来预测丢失的反作用力。我们的技术EX- ploits单用视觉展示的方式就能引起虚幻的触觉感受。这就是所谓的“伪触觉反馈”[12]。如上所示，如果推动一个虚拟对象，真实物体很难被施加真反作用力。然而，伪触觉反馈可以用于直观地模拟的影响在真实物体上的力。我们的技术包括显示看上去被推回，即使真正的对象本身不影响对象的克隆。通过直观地再现失踪的反应力的作用，我们建议的技术从而使用户可以感知的质量没有任何积极的力反馈的虚拟对象。

**2.1基于物理的相互作用**

混合的现实的应用程序越来越多使用物理现实，增强用户体验，并支持与虚拟内容的自然交互。Kim [1] 提出了教育增强的现实游戏，在虚拟对象可以通过标记操作和物理层，原本正确的方式彼此交互。那里虽然没有真实的和虚拟的对象之间的物理交互。Wilson [21] 和 Piumsomboon [17] 提出用于深度传感器扫描实时、 允许虚拟对象身体应对现实世界客观对象的环境。然而，真实的物体仍然不受虚拟对象。从物理模拟的角度来看，他们被考虑作为不动产。Kim [9] 讨论了不动产的现实世界物体所造成的问题。它们表明，它会导致不现实物理作用，他们称之为"物理构件"。尤其是，其中一个项目是真实的物体碰撞与虚拟对象，并因此被推回到时不会遇到相反的反作用力。如上所述，这使得轻型和重型的虚拟对象无法区分。

**2.2主动力反馈**

允许实际对象受虚拟力的一种方法是，使他们具备制动器。例如，kang和woo [7] 提出了 ARMate，在现实世界玩具车会被虚拟角色推动的应用程序。要达到这个目的，购物车配备了电机和无线控制器。尽管技术上可行，但是现实世界不会真的准备装备了可动制动器的物体。另一种方法将力施加到物体上的办法是将物体和外部力学反馈装置绑定起来。jeon[6] 表明如何机器人触觉臂可用于调节所经历的效应对象的力。他们能够在举起对象时改变受试者对质量的感知。SPIDAR [8]是另一装置，用于同样的目的。与此装置中，受试者能够区分3个不同的虚拟对象的重量。该解决方案的主要缺点是，力反馈装置昂贵，体积大，而且难以简明的展示给用户。而且，这种解决方法只能应用到单个对象在同一时间，加入力反馈到多个现实世界的对象需要多个器件。由 Minamizawa提出了不同的方法。[14]。他们的触觉手套可以对皮肤产生震动。这使用户在任何真正的对象要用力推虚拟对象时感知至少部分的反应力。然而，这种解决方案需要特制的手套让用户佩戴。

**2.3伪触觉反馈**

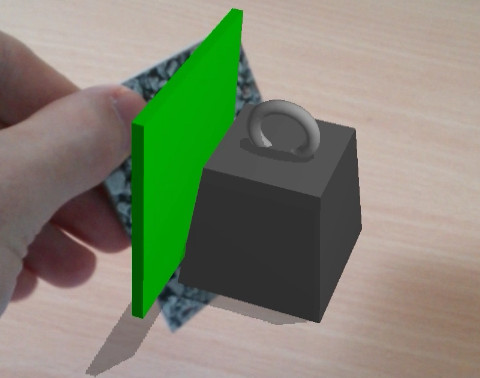
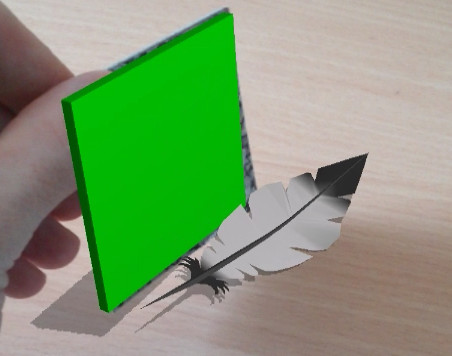
由于在技术上困以加入主动力反馈给真实物体，我们更需要的通过其他方式来模拟它。一个典型的混合现实系统是能够改变现实世界的视觉表示，以显示虚拟物体，而且已知视觉模式可以控制触觉方式进行空间互动任务[5]。因此，在没有真正接触力，视觉显视可用于模拟的力反馈。

一个视觉影像的例子是大小重量错觉[15]。当两个物体的质量相等，但不同的大小时，人们普遍认为较小的对象比较重。另一个例子是材料重量幻觉: Buckingham [2] 表明，视觉提示的材料 (聚苯乙烯，木材，铝......) 可以影响对象对重量的感知。这些幻想建议视觉模式的确可以用于模拟虚拟对象之间的质量差异。然而，改变对象的大小和质地并不是可行的混合现实的解决方案，因为虚拟对象主要由其外观所限制。

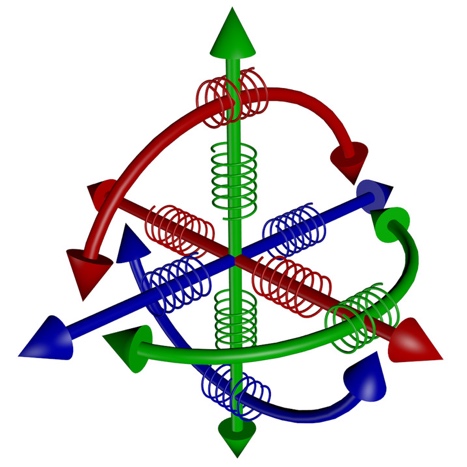
另一种方法是在视觉上改变操纵的对象的物理特性。它已经显示，一个操纵对象物的真实和视觉运动之间的差异可产生虚幻的力[11]。这种幻觉被称作伪触觉反馈。在Lécuyer [12]的实验中表明，减少被动输入装置的控制显示比率产生粘度的控制对象上的幻觉。在第二个实验中，他们发现，同样的方法可以模拟刚度。克里松 et al。[3] 了能够通过视觉改变工具的表观速度模拟材料抵抗的虚拟铣削中的应用。Dominjon[4] 表明，控制显示比(通过重量或惯性)可以用于影响的感知的质量否则为完全相同的对象。

**3将真实的物体与虚拟形象解耦**

我们的技术包括在创建一个真实对象的虚拟克隆，用相同的尺寸和形状，而且它与物理约束附着在真实对象。该克隆将作为真实物体物理代理。由于克隆是虚拟的，我们现在能够完全控制它。它可以制成物理模拟的一个组成部分，并与其它虚拟对象交互正常。具体来说，可以遇到另一个虚拟对象时，如预计值由牛顿第三定律推回。这种效应的强度将依赖于遇到的虚拟物体的质量。轻的物体将轻微影响到克隆，而重物将极大地影响到克隆。因此，克隆的位移使得能够感知虚拟物体的质量。

但是，虚拟克隆不应太远离其真实对应推动。否则，这两个对象将显示为分离的。它应该保持尽可能接近的真实对象，但仍受到虚拟的力。这是通过用六自由度弹簧约束联系起来完成的。在这样的一个约束，沿着每个自由度的运动是由一个弹簧的制约。弹簧约束趋向于带回虚拟克隆到真实物体的位置和方向，与一个力，随着距离而增加。因此，虚拟克隆保持附着在真实对象，但也能够从真实位置和取向时由虚拟对象推到偏离。



通过创建附加到真实对象的虚拟克隆，并使其受到与虚拟物体的接触过程中的反作用力，我们产生的反作用力的伪触觉错觉，没有任何活性力反馈。我们的技术不要求在视觉上取代真实对象，使它更容易实现比以前的身临其境的方法。因为真正的视图没有改变，两个版本的同一对象的可见（真钞和克隆）。弹簧约束确保它们保持足够接近被视为一个单独的实体。我们的技术松开真实对象，物化由其虚拟克隆的物理表示，和实际的对象本身之间的耦合。它们链接，但并非严格耦合。在本文的其余部分，我们将因此称这种技术去耦技

**4实现**

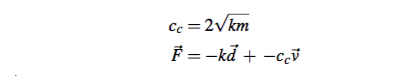
一个我们所提出的去耦技术的主要优点是，它仅基于视觉呈现，并且不需要额外的硬件。软件实现也是普通接的，因为它简单地包括在模拟6自由度弹簧约束假定物理引擎并可用于计算其余碰撞检测和刚体动力学。在我们的实施中，我们使用了Bullet1物理引擎用于此目的。

**4.1弹簧约束模型**

6自由度弹簧约束可以被建模为每个6个自由度，其中，虚拟克隆（“质量”）被附加到与一个弹簧真实物体一弹簧质量系统。这些弹簧或者是拉伸弹簧，对翻译轴，或扭转弹簧，在旋转轴。每个弹簧具有刚度参数。如后面将要看到的那样，刚性是在该技术中用于质量感知的有效性是至关重要的。

然而，普通的弹簧会导致不稳定时，虚拟力不再是应用于虚拟克隆。克隆将附近振荡真实物体的位置和方向，这将是令人费解给用户。为了解决这个问题，我们使用其中当返回到其基部配置一个衰减分量减慢虚拟克隆的粘弹性约束。所述阻尼ING系数应该足够小，以让克隆尽快返回到真实对象，但它也应该足够大，以防止振荡。同时满足约束的精确值称为临界阻尼系数。

弹簧约束模拟通过不断对虚拟克隆，应用力和力矩，尝试把它带回的实际位置和方向。每胡克定律的弹簧施加的力等于−*kd*⃗，其中 k 是弹簧的刚度，d⃗ 是位移。阻尼力等于的 −c⃗v，其中 c 是阻尼系数，⃗v 是相对于真实对象克隆的速度。力 ⃗F，应用于虚拟的克隆技术，可模拟线性弹簧的重心是因此计算如下：



d虚拟克隆和实际对象之间的距离

v相对于真实对象的虚拟克隆的速度

k线性弹簧刚度

m虚拟克隆的质量

Cc由m 和 k计算临界阻尼系数

**4.2参数**

从上述模型，它遵循去耦技术是由四个参数控制：线性弹簧刚度K，扭转弹簧刚度K，物体的质量m，而其惯性张量一，惯性张量可以从计算质量和物体的形状。这通常是通过物理引擎完成。

剩下的参数应该根据预期在虚拟环境中遇到虚拟群众的范围内设定。质量m必须特别是与其他虚拟群众一致。在m比其他物体更重，虚拟克隆才会有那么大的声势，这将勉强接触过程中受到反作用力，也不会进行任何脱钩。相反，如果m是轻得多，克隆就没有足够的动量来推动的虚拟对象。在仿真中假设的虚拟对象具有与它们的表观大小，则该质量参数可被合理地设置为真实物体的实际质量一致逼真群众。

两个刚度参数k和k的选择应最大限度地增强轻和重虚拟对象之间的视觉分离。他们应该被设定从而推动了最轻的物体在模拟时出现，几乎没有脱钩，推动最重的可能的对象时，会出现大量的脱钩。由于去耦技术专门基于该视觉上的错觉，刚度参数是决定因素质量感知的有效性。

隐式的参数值得一提的是摩擦。摩擦基本上是必需的物理模拟，以防止虚拟物体时，由另一个对象无限期推滑。但它也对脱钩的影响。作为一种力量，它改变虚拟对象的势头。因此，根据牛顿第三定律，在其上推，也改变时的反作用力产生的。再仔细一看是必要的，以确保这种情况不会扭曲大众的看法。Coulomb模型指出摩擦取决于物体的质量和恒定的乘法因子。因此反应力增加的量成比例的物体的质量。因此，摩擦不应改变的事实，一个虚拟对象被感知为比另一个更轻或更重。

在我们的实验中，效应对象用于与虚拟对象，它们的质量通常为10克至1000克交互。因此，我们选择的参数最大化脱钩的范围在此质量范围。质量参数被设置到效应物的实际质量为10g。摩擦系数被设定为0.8的所有对象之间。线性刚度参数k设定为50 N·m。

**5结论**

在这项工作中，我们提出了一种新技术，在视觉上模拟当一个真正的对象遇到虚拟对象应该发生的反作用力，根据牛顿第三定律。这使得它可进行固件感知虚拟对象为具有不同的质量。基于伪触觉，我们的技术不需要主动力反馈设备。此外，与先前的伪襻方法在混合现实，我们的技术不需要身临其境可视化设备。实验结果表明，用户就能够立即通过大规模的虚拟对象进行排序，没有以前的培训。我们还测量了最低差（JND），其可以感知相对于三个参考群众。今后的工作应着眼于减少JND，提高质量感知的准确性。其他合理的比喻可以考虑和结合。例如，虚拟克隆可以被动态地解耦时变得太高，间同重物作用时这将增加视觉线索变形。其他方式，如声音，可能被利用的类似的效果。在我们当前的实现，我们简单地叠加虚拟克隆到真正的对象。虽然这被证明是有效的，易于​​理解，去耦可以作出更现实的弹簧约束的一个明确的视觉表示（例如，虚拟橡皮筋）。在其当前状态，但是，我们的技术已经构成了简单有效的方法，以提高任何混合现实界面具有质量感知。

参考文献

[1] P. Buchanan, H. Seichter, M. Billinghurst, and R. Grasset. Augmented reality and rigid body simulation for edutainment: The interesting mechanism - an AR puzzle to teach newton physics. In *Proc. ACE ’08*, page 17–20. ACM, 2008.

[2] G. Buckingham, J. S. Cant, and M. A. Goodale. Living in a material world: how visual cues to material properties affect the way that we lift objects and perceive their weight. *Journal of Neurophysiology*, 102(6):3111–3118, 2009.

[3] F.Crison,A.Lécuyer,A.Savary,D.Mellet-d’Huart,J.-M.Burkhardt, and J.-L. Dautin. The use of haptic and pseudo-haptic feedback for the technical training of milling. In *EuroHaptics Conference poster, Munich, Germany*, 2004.

[4] L.Dominjon,A.Lecuyer,J.-M.Burkhardt,P.Richard,andS.Richir. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manip- ulated objects in virtual environments. In *Proc. IEEE VR ’05*, pages 19–25, Mar. 2005.

[5] Y. Hatwell, A. Streri, and E. Gentaz. *Touching for knowing: cognitive psychology of haptic manual perception*, volume 53. John Benjamins Publishing, 2003.

[6] S. Jeon, J.-C. Metzger, S. Choi, and M. Harders. Extensions to haptic augmented reality: Modulating friction and weight. In *Proc. WHC ’11*, pages 227–232. IEEE, June 2011.

[7] C.KangandW.Woo.ARMate:aninteractiveARcharacterresponding to real objects. In *Edutainment Technologies. Educational Games and Virtual Reality/Augmented Reality Applications*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Jan. 2011.

[8] S.Kim,M.Ishii,Y.Koike,andM.Sato.Developmentoftensionbased haptic interface and possibility of its application to virtual reality. In *Proc. VRST ’00*, page 199–205. ACM, 2000.

[9] S. Kim, Y. Kim, and S.-H. Lee. On visual artifacts of physics simu- lation in augmented reality environment. In *Proc. ISUVR ’11*, pages 25–28, July 2011.

[10] M. R. Leek. Adaptive procedures in psychophysical research. *Percep- tion & psychophysics*, 63(8):1279–1292, 2001.

[11] A. Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Tele- operators and Virtual Environments*, 18(1):39–53, Jan. 2009.

[12] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proc. IEEE VR ’00*, pages 83–90, 2000.

[13] P.MilgramandF.Kishino.Ataxonomyofmixedrealityvisualdisplays. *IEICE Trans. Information Systems*, pages 1321–1329, 1994.

[14] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. Gravity grabber: Wearable haptic display to present vir- tual mass sensation. In *SIGGRAPH ’07 Emerging Technologies*. ACM, 2007.

[15] D. J. Murray, R. R. Ellis, C. A. Bandomir, and H. E. Ross. Charpentier (1891) on the size—weight illusion. *Perception & Psychophysics*, 61(8):1681–1685, Dec. 1999.

[16] I.Newton.*Philosophiaenaturalisprincipiamathematica*.J.Societatis Regiae ac Typis J. Streater, 1687.

[17] T. Piumsomboon, A. Clark, and M. Billinghurst. Physically-based interaction for tabletop augmented reality using a depth-sensing camera for environment mapping. In *Proc. Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ-2011)*, pages 161–166, Auckland, 2011.

[18] A. Pusch, O. Martin, and S. Coquillart. HEMP-Hand-Displacement- Based pseudo-haptics: A study of a force field application. In *Proc. 3DUI ’08*, pages 59–66, Mar. 2008.

[19] H. E. Ross and D. J. Murray. *E.H. Weber on the tactile senses*. Erlbaum (UK) Taylor & Francis Hove, 1996.

[20] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space. In *IEEE Haptics Symposium*, pages 175–180, Feb. 2014.

[21] A. Wilson. Depth-sensing video cameras for 3D tangible tabletop interaction. In *Proc. TABLETOP ’07*, pages 201–204, Oct. 2007.