为了克服这些问题，我们推出了Mymou系统（希腊语为“Monkey”，发音为my-moo），这是一种低成本，开源，全自动无线触摸屏培训系统，由现成的组件构成。自动化设备可以整天连续运行，包括在周末，无需实验者的监督或干预。它利用实时面部识别算法，可以启动特定主题的任务并提供准确的数据记录。这是用于NHP自动训练的新颖特征，并且允许任务训练而无需分离NHP或RFID植入。复杂的任务可以仅使用Java编程语言的基本知识编写，并且所有必需的代码都是公开可用的。该系统允许在到达设施后立即对NHP进行培训，允许NHP在他们想要的时间和时间内工作，并且可以分析任务性能并实时调整任务参数以加快训练。

Mymou系统旨在使用低成本，轻便且易于访问的组件对其家庭中的NHP进行行为测试。 Mymou系统分为两个独立的组件，即行为测试单元（BTU）和奖励交付接口（RDI）。 BTU通过蓝牙无线地与RDI通信，因此这两个系统在物理上彼此独立（图1A）。 Mymou系统的总成本为385英镑，主要成本是电子平板电脑和平板电脑支架（表1，价格准确到2018年7月2日）。

Mymou系统A的组件，该系统是完全无线的，并使用蓝牙与奖励传送系统进行通信。 B，用于将平板电脑固定到笼子外部的支架的3D示意图。 包括1）平板电脑，2）金属锁定销，3）用于可选充电电缆的孔，4）平板电脑支架，5）倾斜漏斗，6）前面板，7）孔以将支架锁定到保持架，8）奖励管 ，9）挂钩将支架安装到保持架上。 C，B中描述的支架的照片。数字对应于B中的相同项目.D，连接到4通道蠕动泵的微控制器（1）的照片（2）

BTU由两部分组成：Android平板电脑，用于传递行为任务并与RDI通信;以及支架，用于将平板电脑固定在家庭笼子的侧面（图1B-1C）。对于BTU，使用运行Android操作系统Marshmallow 6.0.1的Samsung Galaxy Tab A（2016,16 GB，10.1英寸）。只要本机具有蓝牙功能和前置摄像头，任何运行任何Android版本6.0.0及更高版本的设备都可以使用。但是，没有其他操作系统版本已经过测试，并且可能会出现一些兼容性问题，尽管可能很小，但在成功部署系统之前需要进行更正。建议使用Android OS的平板电脑，因为所有行为和实验例程都是用这种语言编写的。

由乙缩醛塑料制成的支架由内部工程师制造，以将片剂固定在笼子的前部。该设计改编自Calapai等人。 （2017），使用方形平截头体来封闭单元，同时通过笼子的杆使受试者能够大量进入平板电脑（图1B）。支架可以保持安装在笼子上，并且平板电脑可以根据需要轻松地滑入和滑出。充电端口也存在于支架上，允许平板电脑在使用时充电，尽管平板电脑上的电池寿命（> 12小时）意味着系统可以全天无线使用。我们的Github页面（https://github.com/jamesbutler01/Mymou）上提供了可扩展的3-D模型，可用于根据需要复制不同的部分。

奖励交付界面

RDI是BTU和奖励传递系统（RDS）之间的中介。 使用了Arduino Uno微控制器板（Adafruit Industries，New York，USA），这种电路板既便宜又容易接近那些没有电子工程背景的人。 另一个蓝牙模块连接到微控制器，允许它从BTU接收命令并根据需要控制连接的RDS。 微控制器可以同时控制多达11个RDS /通道，尽管这里只使用了4个。 它使用传统的数字信号进行通信，任何可以通过5V数字信号控制的RDS都可以与RDI配合使用。 这里，使用四通道蠕动泵（Reglo ICC，Ismatec，Wertheim，Germany）独立地提供不同的流体奖励。 该系统还用于食物颗粒输送系统（Med Associates Inc.，Fairfax，USA）。

软件

Mymou系统的软件用三种语言编写，但只有一种语言的基本知识足以操作Mymou系统。 Java用于设计要在BTU上运行的行为任务，C ++用于控制RDI，Python用于训练面部识别系统。 我们所有脚本的最新版本可以在我们的Github页面（https://github.com/jamesbutler01/Mymou）上找到，它们会定期更新。 该项目是完全开源的，鼓励其他用户的贡献。 Mymou系统的任何问题也可以在此页面上引起我们的注意。

Java（BTU）

BTU由使用Java编程语言在Android Studio中构建的应用程序控制。 它由两个控制蓝牙和面部识别功能的后端模块和一个用于行为任务本身的前端模块组成。 后端模块不需要来自实验者的任何输入。 前端模块需要编程来设计所需的任何行为任务。 行为任务所需的许多功能已经在我们的Github页面上提供，例如用于记录任务数据，提供奖励和动画任务对象的脚本。 复杂的任务设计只需要相对少量的代码。

设备操作可完全自定义，指定主体能够使用系统的当天时间。这也可以在当天进行修改，例如限制周末访问。在非活动时段期间，设备进入休眠状态，显示具有低亮度的黑屏，其不记录来自对象的任何触摸。在活动期间，屏幕返回到全亮度并显示任务，提醒对象他们现在可以使用该设备。在测试日结束时，计时器可以触发奖励泵以通过果汁线冲洗水以清洁系统。

BTU将所有数据保存到设备的内部存储器中，但如果需要，可以轻松更改软件以便将数据保存到外部SD卡。数据每天存储在新文件夹中，以训练日期命名（例如，20180226）。在此文件夹中，名为“i”的文件夹（用于图像）存储相机在白天拍摄的所有照片，可用于手动主体验证。这些图像也被转换为数字阵列并存储在名为“f”（用于浮点阵列）的文件夹中，其由面部识别系统使用。最后，还会在文件夹中创建包含当天所有行为事件的文本文件（也以培训日期命名）。在该文本文件中，每个任务事件有一行（例如，NHP按压，奖励递送），具有包含所有相关信息所需的列数（例如，事件时间戳，对应于该事件的照片的时间戳，审判结果等）。生成的每个图像或浮点数组都以照片拍摄时间的名称保存（格式为HHmmss\_iii，其中H =小时，m =分钟，s =秒，i =毫秒），允许一个匹配日志文件中的事件以及图像文件夹中的相应图像。在午夜，设备会自动开始将事件保存到新日期，从而允许程序在多天内存储数据而不会出现问题。然后，可以将数据复制到计算机上，以便在需要时进行离线分析。没有提供自动备份系统，因此建议定期从设备传输数据。但是，尽管应考虑数据安全性，但可以使用许多第三方应用程序自动备份数据。

BTU可以被配置为根据需要经常向实验者发送信息，允许远程监控任务。这包括有关当前任务的信息，例如已完成的试验次数或给出的奖励金额，有关任务执行情况的信息（例如，反应时间或条件的准确性），或有关单位本身的信息，例如电池剩余。这些电子邮件也可以设置为触发而不是定期发送 - 例如，如果电池电量不足或设备丢失了与RDI的蓝牙连接，则警告实验者。

自动化训练的一个警告是，实验者不会观察可能发生的任何错误。 BTU还支持广泛的错误监控。在默认状态下，设备会记录任何错误，供实验者稍后查看（或者可以实时通过电子邮件发送）。同时，如果发生错误，设备会自动重启任务，以便继续培训而无需实验者干预。

C ++（RDI）

在Arduino IDE中执行的简洁，自定义编写的C ++脚本用于控制RDI。 该脚本不需要实验者的改动，可以直接加载到微控制器上。 它用于接收通过蓝牙从BTU发送的事件代码，并适当地激活或停用不同的RDS信道。 通常，一个唯一的事件代码激活特定的频道，第二个唯一的事件代码停用该频道。 表2详细列出了它们控制的所有事件代码和微控制器的数字通道。

**Table 2**

List of event codes the RDI responds to and the effects they have

| **Event Code** | **Channel** | **Value** |
| --- | --- | --- |
| 0 | All | Low (0 V) |
| 1 | 2 | High (5 V) |
| 2 | 2 | Low (0 V) |
| 3 | 3 | High (5 V) |
| 4 | 3 | Low (0 V) |
| 5 | 4 | High (5 V) |
| 6 | 4 | Low (0 V) |
| 7 | 5 | High (5 V) |
| 8 | 5 | Low (0 V) |

值得注意的是，RDI旨在充当BTU和RDS之间的被动中介。 因此它没有故障保险箱，并且依靠BTU来充分调节RDS活动。

Python（面部识别训练）

用于面部识别的人工神经网络（ANN）的监督训练最初是在PC上使用Python训练的。这样做是因为此培训对处理器的计算需求很高，这更适合于更快的台式机CPU而不是Android平板电脑中较慢的CPU。该脚本需要来自实验者的微小输入，只需将其指向要用于监督学习的主题标记数据集的位置。

ANN的监督培训如下进行。首先，需要先前收集的每个受试者的标记照片的数据集。预处理脚本对标记的照片文件进行排序，将它们附加到单个2-D矩阵中（每个图像一行）。然后将该矩阵输入主脚本，该脚本随机地对文件进行混洗并将它们分成训练集和测试集。人工神经网络包括一个输入层，一个神经元用于输入图像的每个像素，一个完全连接的隐藏层，其大小可以指定（在我们的情况下，20最佳工作），以及一个完全连接的输出层，每个主体一个神经元（在我们的情况二到四）。梯度下降用于训练每层的权重，使得每个输出神经元仅响应单个主体的图像。实验者可以修改各种超参数以优化ANN的性能，尽管根据我们的经验，系统在很少或不调整超参数的情况下运行良好。这些包括训练迭代次数，隐藏层的大小和学习率。训练完成后，将生成三个文件，其中包含训练数据的均值和方差（对系统的未来输入进行标准化所需），隐藏层的优化权重以及输出层的优化权重。然后需要将这些文件简单地传输到BTU，在那里它们用于在线面部识别。

安全

由于平板电脑存储了关于实验动物的潜在敏感信息，因此需要非常小心以确保此信息的安全性。 Android操作系统经过完全加密和密码保护，确保任何获得对设备的物理访问权限的未授权用户将无法访问数据本身。 但是，在任务运行期间，任何获得设备访问权限的人都可以访问存储在设备上的照片和其他数据。 除了电子邮件报告功能（可以禁用）之外，设备可以在没有互联网连接的情况下运行，从而可以免除任何远程未经授权的访问。 无论如何，我们建议您咨询您的信息技术专家，以确保数据安全。

动物

Mymou系统用于训练两只雄性恒河猴（Macaca mulatta），在项目开始时为3和4岁，为期超过10个月的182个疗程。所有培训课程都是在两个受试者的家笼中进行的，并且在任何时候都没有将受试者分开进行个别训练。系统在一个会话中保持长达12小时，受试者可以按照自己的节奏自由发挥。两个受试者都没有植入设备。

对于前41个实验课程（10周），当受试者进入Mymou系统时（每天最少14小时进水），受试者可以随意获取水。对于超过6周的另外36个疗程，受试者在通过Mymou系统获得流体时，可以在水中获得159±11分钟（最少90分钟）的水。在没有训练发生的日子里，受试者可以随意获取水。对于22周以上的剩余123次治疗，受试者从Mymou系统的奖励中获得大部分液体，并且如果他们未能获得每日最低液体需求，则在一天结束时仅给予补水。所有实验程序均由内政部和地方道德程序委员会批准，并按照英国动物（科学程序）法进行。

为了评估两个受试者的个人果汁偏好，提供以下四种液体，每种液体用水稀释：橙色南瓜（Robinsons Orange，Britvic Soft Drinks Ltd，都柏林，爱尔兰），苹果汁，菠萝汁和黑加仑南瓜（Ribena） blackcurrant，Lucozade Ribena Suntory Ltd，Uxbridge，UK）。水也经常作为奖励类型之一提供。

结果

使用Mymou系统

该系统在10个月的时间内共使用了182次。即使在不使用时，系统通常也处于休眠状态的家笼中。每当需要收集行为数据或需要改变任务时，两个片剂串联使用并相互交换。这使得平板电脑可以在几秒钟内完成交换，而无需等待设备充电或数据传输。在10个月结束时，所使用的平板电脑或外部平板电脑支架都没有可观察到的损坏，这表明Mymou系统非常坚固并且可以长时间使用。

平板电脑很容易持续整整一个实验日，在10小时内损失约50％的电池。在不使用时处于休眠状态（例如放置过夜），在相同的10小时内仅使用其最大电池容量的大约10％。因此，当无线使用时，系统可以在实验者需要对设备充电之前舒适地持续一天半的训练，与过夜时间相交。我们主要使用插入了平板电脑的Mymou系统进行充电。在这种状态下，并且结合自动化任务计时，设备能够无限期地运行而无需实验者的任何关注。

在我们的设施中，笼子被冲洗并且每周至少清洁一次。在此期间，电子平板电脑可以在几秒钟内由未经训练的工作人员滑出其支架，并在洗涤完成后更换。发生这种情况后无需重新启动设备，无论多少次从设备中取出并更换，平板电脑都能继续运行。

行为

在最初暴露于Mymou系统期间，实验者握住平板电脑并给予受试者食物奖励以换取按压屏幕。 在连续5个10分钟的会话之后，受试者知道与平板电脑进行交互以获得奖励，并且从这一点开始，受试者通过图1中所示的平板电脑支架与他们的家庭笼中的平板电脑进行交互。

平板电脑支架的设计允许受试者长时间舒适地与设备相互作用（图2A）。 前置摄像头能够在他们与设备接合时捕获对象的清晰图像（图2B），并且受试者能够在仍然参与屏幕上的任务时接收果汁奖励（图2C）。

图2。

使用中的Mymou系统A，使用该设备的非人类灵长类动物之一。 B，由主体O触发的设备拍摄的自拍启动试验。 用于提供果汁奖励的不锈钢喷嘴可以在中心底部看到。 C，主题V在参加屏幕上的任务时接收奖励的示例。 D，每个NHP在整个单个会话期间完成试验的分布（n = 7）。 误差线表示均值的标准差。 E，所有会议期间两个NHP之间完成的试验次数。 请注意，他们所做的任务在此期间变化很大

受试者将全天参与该系统;然而，两个NHP的程序有明显的差异（图2D）。主题V在整个会话期间始终与设备进行交互。然而，受试者O随着会话的进展而增加了他的参与度，可能是因为他在一天中积累了他的渴望。因此，不同的NHP更喜欢在一天中的不同时间工作或喜欢流体，并且Mymou系统适应这种情况。

两个受试者每天都与Mymou系统接触，每次会话完成1,239±52次试验（图2E，n = 182;由于单个受试者数据不适用于早期会话，因此数据在各受试者之间折叠面部识别包仍在开发中）。参加会议的人数大幅波动（图2E）;然而，在整个课程中，36个不同的任务版本被赋予了主题，因为它们发展到具有更高认知需求的更复杂的任务设计。这些不同试验的长度存在很大差异，其中一些试验每次试验只需要一种选择，而另一些则要求受试者在完成的试验中连续五次正确选择。因此，下面我们描述来自18个会话的一个特定时间段的数据，超过21天，其中任务没有变化，作为使用Mymou系统训练NHP的详细示例。

学习Mymou系统

在这些任务中，我们对联想学习和NHP学习复杂的刺激联想网络的能力感兴趣。 为了测试这一点，我们使用了一个由4个4平方网格排列的16种不同刺激的网络（图3A）。 刺激是从Brady，Konkle，Alvarez和Oliva（2008）提供的图像数据库中随机抽取的。 在该网络中，每个刺激具有两到四个相关联的邻居，导致整个网络中总共68个关联。 目标是使受试者了解所有刺激是如何连接的，以便他们可以在相关刺激之间导航以达到目标刺激。 要求主体导航到目标，多个关联会大大增加任务的认知需求，因为主体必须规划通过网络的路径才能到达目标位置。

使用Mymou系统的任务设计如图3B所示。受试者之前已经在屏幕顶部学习了进度条的概念，这表明为了达到目标并获得奖励需要多少剩余的正确选择。受试者将通过触摸屏幕上的中性刺激（黑色方块）来启动试验。然后，受试者将被呈现“目标”位置刺激，以及邻近他们在网格中的当前位置的两到四个刺激（未示出但可以推断）。受试者被要求选择这些刺激之一。然后选择的选项移动到屏幕的中心，而其他刺激消失。如果选择了目标刺激方向的刺激，则进度条与实现目标的剩余步骤成比例地填充。如果选择远离目标刺激的刺激，那么进度条会耗尽并且屏幕变为红色以指示不正确的选择并终止试验。受试者必须连续选择刺激，直到达到目标刺激并获得奖励。所需的选择数量取决于起始状态和目标刺激之间的距离。

在整个训练期间，受试者不断参与任务（图4A）。在培训过程中，受试者V稳定地增加了每次完成的试验次数，这可能是由于他的表现增加所致的努力 - 回报率降低。两个受试者在训练过程中学习了刺激网络，增加了他们能够正确导航两个过渡刺激的次数的百分比（受试者O从正确的43％增加到正确的78％，受试者V从49％增加到91％;图4B）。稍后在训练中，向受试者呈现更难的问题（例如，起始位置和目标位置之间的三个过渡的距离）。受试者也很快学会解决这些问题，在仅仅六次训练期间表现出正确执行的试验的稳定增加（受试者O从正确的35％增加到72％，并且受试者V从正确的70％增加到84％;图。 4C）。因此，Mymou系统有效地教授NHP非常抽象和复杂的认知任务。同时，两个NHP也使用安装在椅子上的操纵杆在实验室中接受不同任务的培训。因此，在家庭笼子中使用Mymou系统似乎并没有削弱NHP进入测试椅并学习基于实验室的奖励任务的意愿。

面部识别

面部识别开始于首先在一组特定主题图像上训练ANN。在13天内总共拍摄了6,512张面部图像，而受试者使用了Mymou系统（图5A和5B）。从人工观察中可以清楚地看出，两个NHP的面部位置始终位于图像的中心，每个图像的边缘不包含面部识别的有用信息。为了减少人工神经网络的处理时间，全尺寸图像（176×144像素）的边缘被移除，仅留下80×82像素的中心。在提供的源代码中可以很容易地调整裁剪量，但是为了避免重新训练ANN，这应该保持慷慨，以确保整个面部是可见的，因为ANN必须在相同尺寸的图像上进行训练。如果需要离线手动验证，则将裁剪后的图像保存到设备中。然后将图像转换为灰度并平展成长度为6,560的1-D阵列并保存到设备以与ANN一起使用。将图像分成两个大小相等的组，一组测试组和一组训练组，后者用于训练ANN。

图5。

在线面部识别A，主题O的裁剪自拍，用于识别对象。 B，用于识别受试者的受试者V的裁剪自拍。 C，用于面部识别的神经网络的示意图。 每个圆圈代表一个神经元，每个箭头代表一个调节上游神经元输入的重量。 网络能够以98.89％的准确度正确识别受试者。 D，由对象O（顶行）和V（底行）的ANN正确识别的图像的示例。 E，在线面部识别过程的时间线，从过程的10次迭代中获取的数据

网络的结构是6,560个神经元的输入层，接着是20个神经元的隐藏层，最后是两个神经元的输出层（图5C）。网络完全连接，隐藏层产生131,200个权重（6,560×20），输出层产生40个权重（20×2）。梯度下降用于在完整训练数据集的60次迭代中调整这些权重。然后使用测试数据集来检查ANN的准确性，其区分两个受试者，准确度为98.89％。

尽管头部位置和头部方向的变化或图像中的面部特征模糊，但ANN能够正确地识别每个对象。在图5D中提供了正确识别的照片的一些示例。 ANN的手动验证确认了其准确性。

然后将训练过的重量加载到Mymou系统上并用于实时面部识别。然后每次捕获图像时使用ANN以返回图像中对象的预测身份。在受试者进行初始触摸事件时，Mymou系统需要204±8 ms来捕获图像，8±0 ms将图像转换为平坦的1-D阵列，73±1 ms以运行阵列通过ANN并返回预测的主体身份（总共285±8ms，n = 10;图5E）。

为了评估人工神经网络对更大人口的有效性，另外两只6-7岁的雄性恒河猴接受了使用Mymou系统的培训。我们首先将它们引入Mymou系统，通过手动奖励它们获得食物奖励，每天按压平板电脑屏幕10分钟，持续5天。然后将它们与Mymou系统一起留在笼子中2小时。在此期间，两个NHP很快了解到喷嘴在接触片剂时分配汁液，并且它们与片剂343接合并且各自接合824次。然后，我们将图像汇集在四个NHP上，并生成每个受试者300个图像的训练批次，其中240个用于训练ANN。当对每个受试者的剩余60个图像进行测试时，ANN成功地预测了受试者身份，准确度为98.99％。此外，当训练数据集从每个受试者的240个图像减少到仅40个图像时，ANN仍然可以预测主体身份，准确度为93.75％。因此，ANN能够在一组四个NHP中进行高度精确的面部识别，并且仅需要少量图像用于训练以达到高精度。

人工神经网络生成的预测被附加到存储时的行为数据中，从而产生特定于主题的数据，之后可以轻松分析。由于其等待时间短，人工神经网络还可以在线使用以特定主题的方式指导培训（图5E）。因此，ANN足以启动特定于主题的行为任务，提供准确的行为数据记录而无需嵌入式微芯片，并且允许在群组环境中进行行为训练而无需分离主题。

奖励偏好

Mymou系统的另一个特点是能够同时控制多个RDS。我们使用此功能允许受试者逐个试验选择奖励，这使我们能够探索奖励偏好如何在行为测试会话内和行为测试会话之间发生变化。我们使用四通道蠕动泵在一次训练中提供四种不同的液体。在成功试用结束时，另外一个屏幕显示了四个独特的图像，每个图像与提供的特定果汁奖励相关联。这允许受试者探索可用的不同类型的奖励，并且如果他们变得满足于一个选项则在奖励之间切换。

我们测试了总共五种不同的流体奖励（水，橙，苹果，菠萝和黑醋栗），并在个别会话中提供了四种奖励的不同组合。偏好在实验过程中和两个受试者之间变化（图6A）。例如，受试者O最初优选黑加仑至苹果几次，但在后来的会议中，该受试者开始偏爱苹果汁。虽然在大多数课程中，科目会坚持一个首选方案，但有时候科目不那么具有决定性，并且在两个或三个不同的选项之间切换（图6A）。在受试者偏好两个或更多奖励的会话中（例如，图6A的第11天），奖励之间切换的性质是可变的;受试者O经常在两个选项之间交替（图6B，左），而受试者V将以较低频率切换，在切换到不同奖励之前对相同选项进行较长时间的采样（图6B，右）。两个受试者在所有提供的果汁之间的奖赏偏好中也表现出明确的等级，其中黑加仑和苹果汁是两种最优选的奖励（图6C）。

RDS准确分配果汁的能力通过称量灌注液体的量在不同的泵激活持续时间来评估。 将泵激活1,000,1,500,2,000或2,500毫秒分别灌注0.18±0.04,0.29±0.06,0.45±0.03和0.59±0.05克果汁（每种情况下n = 10，数据表示为平均值±标准 偏差）。 因此，尽管奖励递送的准确性将取决于所使用的奖励装置，但RDS能够以高精度分配少量液体。

Mymou系统允许受试者在逐个试验的基础上在优选奖励之间进行选择。 这可以用来建立个人奖励偏好的综合图片，这可以与实验者的主要任务同时进行。 允许受试者在逐个试验的基础上选择优选奖励减少了奖励特定的饱腹感，这可以激励表现并促进行为训练。

讨论

我们开发了一种低成本，开源，完全自动化的笼内测试装置，可以轻松地与现成的组件一起使用。 该装置用于训练NHP以在其家庭室内而不是在实验室中执行要求严格的认知任务。 该系统允许培训在一整天内进行，具有准确的数据记录，并允许受试者以自己的节奏和休闲方式工作以获得奖励。 我们认为Mymou系统是一个改进（根据3Rs原则：Macarthur Clark，2018; Prescott＆Lidster，2017; Russell＆Burch，1959），相对于实验室或其他笼内训练方法，我们强调其优势 下面。

优于实验室培训的优势

通过实验室培训，NHP必须经过培训才能进入测试椅（可能需要使用杆和领），适应离开家庭环境，并学习如何使用椅子安装设备（杠杆，按钮等） 。）与任务交互。在NHP准备好执行主要实验任务之前，此过程可能需要数月。通过Mymou系统，NHP可以在抵达工厂后立即开始学习任务。实验者可以充分利用NHP的天生好奇心来提示他们（通过平板电脑提供的声音或刺激）触摸屏幕并探索不同的奖励。在我们的案例中，经过5天的培训，NHP在没有实验者干预的情况下使用该系统。

Mymou系统是完全自动化的，只要奖励保持充足，就可以保持运行状态。这对于NHP来说是有利的，NHP然后能够以他们自己的速度工作（包括在一天中休息吃饭，喝酒或玩耍），而不是让实验者在他们工作时控制，因此当食物/有流动的奖励。这种灵活的工作程序旨在最大限度地减少培训过程中的饱腹感，厌倦感或疲劳感。在某些情况下，例如对于电生理学实验，可能需要训练NHP在浓缩时期而不是在一天中以悠闲的方式工作。该设备可以配置为每天仅打开特定时间窗口，以使NHP适应这种工作计划。

优于其他自动化培训系统的优势

有几种出色的自动化系统可用于培养NHP，无论是在家笼中还是在相邻环境中（Calapai等，2017; Fagot＆Bonte，2010; Gazes等，2013; Tulip等，2017）。虽然每个系统都有自己的优势，但Mymou系统与目前的自动化培训系统相比有四个主要优势。

首先，当前系统的局限性在于，准确的主体识别和数据记录需要侵入式RFID植入物（Fagot＆Bonte，2010; Gazes等，2013; Tulip等，2017）或者人工密集的人工分类镜头（ Calapai等，2017）。正如我们所示，NHP每天使用Mymou系统进行数千次试验，这是在复杂任务上训练NHP时的一个优势，但这也使得通过手动图像分类进行主题识别和数据记录变得不切实际。 Mymou系统使用实时面部识别，以前没有在自动化系统中用于训练NHP。尽管每个NHP头部的位置和角度有很大差异，但该系统的准确度几乎达到了完美（99％），因此适合在NHP在训练期间具有完全移动性的家庭环境中使用。这消除了对照片的任何手动分类的需要，以便识别哪些NHP正在使用该系统。如果NHP是单人住院或接收RFID植入物作为常规事项或与其他手术相结合，Mymou系统的全面实施（即，用于实施特定主题任务和准确数据记录的面部识别）可能是不必要的，更简单的设备也可以表现得更好。

人工神经网络是（人类）面部识别的领先技术（Parkhi，Vedaldi，＆Zisserman，2015; Schroff，Kalenichenko，＆Philbin，2015; Taigman，Yang，Ranzato，＆Wolf，2014），它们可以区分人口个体比最大的猴子群体多了许多个数量级。我们使用人工神经网络进行面部识别，用于双层NHP，这是全球科学实验中NHP最常见的住房策略之一（DiVincenti＆Wyatt，2011; Hannibal，Bliss-Moreau，Vandeleest，McCowan，＆Capitanio，2017; National 2017年研究中动物替代，改进和减少中心;国家研究委员会，2011年;动物健康和福利科学委员会，2002年; Truelove，Martin，Perlman，Wood，＆Bloomsmith，2017年）。然而，ANN的参数可以适应更复杂的水平以用于更大的社会群体，例如通过添加卷积层，以在必要时提高ANN的性能。或者，已经开发了其他面部识别包用于大型NHP组（Witham，2018），其可以与Mymou系统一起用于代替ANN。

其次，面部识别算法在屏幕触摸的300毫秒内准确地识别出NHP。这种实时主题识别允许系统生成特定于主题的参数，非常适合配对和组合的NHP。例如，Mymou系统可以加载不同的任务，提供不同的奖励（食物或流体），激活不同的操作（操纵杆，按钮或其他Mymou系统），所有这些都在启动试验的300毫秒内完成，这样NHP就会大不相同训练阶段，或非常不同的任务或任务参数，都可以使用相同的系统。配合可编程定时器和长电池寿命，Mymou系统可在一整天（包括周末）进行全自动培训，无需实验人员在家庭环境中启动任务，调整设置或与NHP分离/互动。

第三，Mymou系统还能够在主体执行任务时分析行为表现。如果满足设定的性能标准，这允许系统即时切换任务或条件或使系统不可访问。 Mymou系统还可以通过电子邮件向实验者发送每个NHP的常规性能更新。这对于跟踪可能正在努力完成当前任务设计的任何个人是有用的，并且还允许实验者跟踪每个主题已经接收多少奖励。

最后，Mymou系统价格实惠，可以轻松安装在传统的家庭环境中。 一些领先的自动化培训系统已被用于其主要家庭笼子外部或附属的专业测试亭或笼子（Calapai等，2017; Fagot＆Bonte，2010; Gazes等，2013; Mandell） ＆Sackett，2008; Truppa等，2010; Tulip等，2017），Mymou系统允许在其家庭环境中训练NHP，并且在配对环境中工作得非常好。 此外，一些更复杂的自动化系统需要昂贵的专业组件，这些组件难以采购和组装（Calapai等，2017; Fagot＆Bonte，2010）。 相比之下，Mymou系统的成本低于400英镑，由商用组件制成，我们提供所有源代码和组装和使用说明。

Mymou系统的局限性

Mymou系统具有一些功能限制，因为它目前已配置。首先，除了基于文本的电子邮件警报之外，没有远程监控设备，并且用户无法远程激活或停用设备（尽管可以在软件中安排激活/停用）。其次，没有提供自动数据备份系统，因此如果设备发生故障，未能定期手动备份设备会导致数据丢失（尽管在使用超过10个月内我们从未发生这种情况）。上述两个限制都可以使用第三方应用程序（例如Dropbox，TeamViewer）解决，但考虑到数据的敏感性，在给第三方应用程序访问设备之前应该仔细考虑。应该可以通过封闭网络wifi备份数据，尽管我们还没有探索过这个选项。

另一个限制是BTU-RDS关系目前是单向的，因此它无法从RDS接收信息，例如果汁库的状态。这当前需要用户监控，以确保在系统处于活动状态时果汁储存器永远不会耗尽，尽管应该可以安装秤或红外线束，当果汁掉落时，它可以向BTU发出信号（并触发电子邮件警报）低于一定数量。

许多基于实验室的任务使用精确的眼睛跟踪设备来检测眼睛运动作为行为反应，但Mymou系统的源代码中目前没有此功能。由于系统已经不断地获取面部识别模块的NHP的视频馈送，因此获得一些在线眼睛位置信息可能是可行的。然而，车载摄像头的低采样率（30 fps）可能不足以实现精确的实时眼球跟踪。

如果平板电脑设备出现故障，则无法保证同一平板电脑仍可供购买。 这可能需要调整支架以适应新的平板电脑尺寸，并且可能还需要更改Android操作系统。 在前一种情况下，由于平板电脑支架的模块化设计，安装不同尺寸的平板电脑只需要更换一块可拆卸塑料，价格约为50英镑。 后一种情况可能需要一些时间来调整系统的代码，尽管这可能也是不必要的，因为我们和其他用户组继续开发Mymou系统（用于其他平板电脑）并相应地更新我们的Github页面上的脚本。

更多应用

由于Mymou系统可以分配液体，因此它也可以用于精确监测每日液体的摄入量。在标准NHP外壳环境中，每日水通过连接到自来水或大瓶的水喷嘴分配。这种设计有几个缺点。首先，水瓶可能会从其支架上脱落，和/或水口可能会漏水，这意味着NHP可能无法满足其日常需求。其次，除非在流体可用时将NHP分开，否则几乎不可能量化每只动物消耗的液体量。对于流体控制方案的动物，准确记录液体摄入量是一个重要的福利考虑因素，以确保NHP接受其日常液体需求并且NHP在既定生长曲线内生长（Prescott等，2010）。 Mymou系统也通过饮水机解决了这些问题。通过训练NHP来简单地按压并保持平板电脑用于水，系统（通过实时面部识别）可以准确地跟踪已经向每个NHP输送了多少水，因此可以消除分离NHP用于流体施用的需要。这也减轻了工作人员分离NHP和管理水的需要，这在周末或假日期间可能会出现问题。如果系统失去电力，则存在NHP可能无法获得水的风险。因此，通过Mymou系统进行流体调度仍需要人工监测;系统可以设置成在成功输水后发送电子邮件，并且没有这个电子邮件更新将表明需要人的关注。

Mymou系统允许在迁移到基于实验室的经典设置之前进行培训。然而，将Mymou系统与无线记录技术结合使用可以允许在传统的实验室环境之外进行完整的实验。正在开发许多无线系统用于自由移动的NHP（Capogrosso等，2016; Fernandez-Leon等，2015; Schwarz等，2014; Yin等，2014），可以接收来自Mymou的信号该系统允许在更自然和自由移动的条件下使行为事件与神经元活动同步。例如，Arduino板可以产生定时定时信号，该定时信号由平板电脑和无线记录系统检测，以便同步两个设备，尽管需要仔细检查其准确的定时精度。这是我们当前研究的重点，我们欢迎任何有关此类项目的合作。

总之，Mymou系统是第一个低成本，无线，开源，全自动笼内训练系统，无需植入微芯片或劳动密集型事后分析即可提供准确的数据记录。它允许NHP在一整天和周末学习复杂的行为任务，所有这些都无需将NHP与其同行组分开或进行实验干预。该系统对实验室和其他家庭笼式系统进行了重大改进，并为更自然，自由移动的环境中的无线电生理学研究提供了平台。

作者说明

我们感谢Sean Cavanagh，Lianne McCombe，Shirley Mark和Tim Behrens对该项目的帮助。这项工作得到了S.W.K的Wellcome Trust新研究员奖的支持。 （096689 / Z / 11 / Z）。作者声明没有竞争性的经济利益。