

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 24320141152412

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

工 学 硕 士 学 位 论 文

基于三维重建技术的机器人外壳定制打印  
研究与应用

Research and Application of Robot Shell Customization  
and Printing Based on 3D Reconstruction Technology

许瀚翔

指导教师: 姚俊峰 教授

专业名称: 数字媒体技术

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩日期: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 月

指导教师: \_\_\_\_\_

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

2017年4月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

随着小型机器人的生产与推广，社交机器人已越来越多地被应用在家庭娱乐、商业活动以及教育领域等方面。社交机器人面向全年龄用户，能够与人进行互动和沟通，由于需要长时间与人交互，所以机器人外观的重要性显而易见。对于不同的用户而言，他们对机器人的样貌需求也不尽相同。如果能依据自身的想法对机器人外观进行定制，将会增大用户对机器人的可操作性，从而得到属于自己的个性化机器人。

本文针对社交机器人的外观，提出了一种结合三维重建技术的定制方法。三维重建技术可以提取不同照片中的相同特征点，根据匹配的特征点恢复出其在三维空间中的位置，得到拍摄对象的点云模型，再根据点云信息恢复物体表面，得到三维网格模型。对于该三维网格模型，本文提出的机器人外观定制方法可对其进行加工处理，以得到适配机器人的三维外壳模型。方法中主要包括以下几个步骤，即三维角色网格模型的躯体分块、角色模型与机器人内骨骼的大小匹配、删除不同部位模型之间发生碰撞的三角面、模型边缘线的平滑、模型加厚以及最终加工为可组装的外壳模型。经过完整流程的处理，输入的三维角色模型将能够转变为可 3D 打印的外壳模型，经由 3D 打印后即可安装至机器人内骨骼上。

本文采用了了开源的 HR-OS1 类人型机器人内骨骼框架，外观以现实世界中的动物玩偶为例，使用手机拍摄多视角图片，并根据拍摄得到的图像序列进行三维重建。通过三维重建过程，在计算机中得到了玩偶的虚拟三维模型，然后将其作为机器人外壳定制流程的输入，经过定制流程中各模块的处理与优化，最终得到了适合于 HR-OS1 机器人内骨骼的外壳模型。同时，该三维外壳模型符合 3D 打印的要求，验证了外观定制方法的可行性。

**关键词：**三维重建技术；机器人外观定制；3D 打印

## Abstract

With the production and promotion of small robots, social robots have been increasingly used in the fields of home entertainment, commercial activity and education. Social robot is produced for all age users, it can interact and communicate with people. As the social robot takes a long time to interact with the people, the importance of robot's appearance is obvious. For different users, their requirements of robot appearance are not always the same. If we can customize the appearance of the robot according to our own ideas, it will increase the operability of the robot, so as to get our own personalized robots.

This dissertation aims at the appearance of social robot and proposes a robot shell customization approach with the combination of 3D reconstruction technology. 3D reconstruction technology can extract the same features from different images, and recover the positions of points in 3D space based on matching features to obtain point cloud model. After reconstructing the surface of object by using the point cloud information, the 3D mesh model can be produced. For this mesh model, the proposed robot appearance customization approach in this dissertation can transform it to a 3D shell model that fit for robots. The main steps of the process include 3D character model segmentation, shape matching, collided faces removing, border edges smoothing, adding thickness to the mesh and splitting the mesh into assemble parts. The input 3D character mesh can be transformed to a 3D printable shell model via the complete process. Then the 3D printed shell can be fixed on the robot endoskeleton.

In the dissertation, we adopt an open source HR-OS1 humanoid robot endoskeleton framework. For the appearance, select an animal toy in real world and use cellphone to take multi-view images, and reconstruct the 3D virtual model based on the image sequence. Then we use it as the input of robot shell customization process. After processing and optimization of every customization module in our approach, the shell model that fit for HR-OS1 robot endoskeleton is finally obtained. At the same time, this 3D shell model meets the requirements of 3D printing. The experiment results validate the feasibility of the appearance customization approach.

**Keywords:** 3D Reconstruction Technology; Robot Shell Customization; 3D Printing

## 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 社交机器人的外壳设计.....	1
1.1.2 三维重建.....	2
<b>1.2 主要研究内容</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 论文结构安排</b> .....	<b>3</b>
<b>第二章 相关技术介绍</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 三维重建</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 基于物体三维几何结构的重建方法.....	6
2.1.2 基于物体二维图像的重建方法.....	6
<b>2.2 三维重建相关工具</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Autodesk 123D Catch.....	9
2.2.2 Autodesk Memento.....	9
2.2.3 Kinect.....	10
2.2.4 Agisoft PhotoScan .....	10
2.2.5 3DSOM .....	10
2.2.6 VisualSFM.....	10
<b>2.3 机器人定制化</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4 本章小结</b> .....	<b>12</b>
<b>第三章 基于多张图片的机器人外观模型重建方法研究</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 特征检测</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2 特征匹配</b> .....	<b>14</b>

3.3 摄像机标定 .....	14
3.4 稀疏重建 .....	15
3.5 稠密重建 .....	15
3.6 表面重建 .....	16
3.7 本章小结 .....	16
<b>第四章 三维重建技术应用于机器人外观定制研究.....</b>	<b>17</b>
4.1 躯体分块 .....	17
4.2 模型比例匹配 .....	17
4.2.1 确定输入角色网格模型 IBB .....	19
4.2.2 确定比例匹配的变换关系.....	24
4.3 模型优化 .....	26
4.3.1 碰撞面剔除.....	27
4.3.2 边缘平滑.....	27
4.3.3 模型加厚.....	28
4.3.4 加工为可组装部件.....	30
4.4 本章小结.....	31
<b>第五章 实验结果与分析 .....</b>	<b>32</b>
5.1 实验内容 .....	32
5.1.1 三维重建.....	33
5.1.2 躯体分块.....	37
5.1.3 模型比例匹配.....	38
5.1.4 碰撞面剔除.....	43
5.1.5 边缘平滑.....	44

5.1.6 模型加厚.....	46
5.1.7 加工为可组装部件.....	48
<b>5.2 实验结果与分析 .....</b>	<b>51</b>
<b>5.3 本章小结.....</b>	<b>52</b>
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1 总结 .....</b>	<b>53</b>
6.1.1 研究成果.....	53
6.1.2 不足之处.....	54
<b>6.2 展望 .....</b>	<b>54</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>56</b>
<b>附录.....</b>	<b>59</b>
<b>致谢.....</b>	<b>60</b>



## Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research Background.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Shell Design of Social Robot.....	1
1.1.2 3D Reconstruction .....	2
<b>1.2 Main Research Content.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Arrangement of Dissertation .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapter 2 Related Technical Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 3D Reconstruction.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Reconstruction Methods based on 3D Geometry Structure.....	6
2.1.2 Reconstruction Methods based on 2D Images.....	6
<b>2.2 3D Reconstruction Tools .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Autodesk 123D Catch.....	9
2.2.2 Autodesk Memento.....	9
2.2.3 Kinect.....	10
2.2.4 Agisoft PhotoScan .....	10
2.2.5 3DSOM.....	10
2.2.6 VisualSFM.....	10
<b>2.3 Robot Customization .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Summary.....</b>	<b>12</b>
<b>Chapter 3 3D Robot Appearance Reconstruction Based on Multiple Images.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Feature Detection .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Feature Matching.....</b>	<b>14</b>

3.3 Camera Calibration .....	14
3.4 Sparse Reconstruction .....	15
3.5 Dense Reconstruction .....	15
3.6 Surface Reconstruction .....	16
3.7 Summary.....	16
<b>Chapter 4 Application of 3D Reconstruction in Robot Shell</b>	
<b>Customization.....</b>	<b>17</b>
4.1 Segmentation .....	17
4.2 Shape Matching.....	17
4.3 Mesh Optimization.....	26
4.3.1 Delete Collided Faces .....	27
4.3.2 Smooth the Border Edges .....	27
4.3.3 Add Thickness .....	28
4.3.4 Split into Combinational Parts .....	30
4.4 Summary.....	31
<b>Chapter 5 Experiment and Analysis.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 Content of Experiment .....</b>	<b>32</b>
5.1.1 3D Reconstruction .....	33
5.1.2 Segmentation.....	37
5.1.3 Shape Matching .....	38
5.1.4 Delete Collided Faces .....	43
5.1.5 Smooth the Border Edges .....	44
5.1.6 Add Thickness .....	46
5.1.7 Split into Combinational Parts .....	48
<b>5.2 Experiment Result and Analysis.....</b>	<b>51</b>

<b>5.3 Summary</b> .....	<b>52</b>
<b>Chapter 6 Conclusion and Future Work</b> .....	<b>53</b>
<b>6.1 Conclusion</b> .....	<b>53</b>
6.1.1 Research Results .....	53
6.1.2 Insufficients.....	54
<b>6.2 Future Work</b> .....	<b>54</b>
<b>References</b> .....	<b>56</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>59</b>
<b>Acknowledgement</b> .....	<b>60</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 社交机器人的外壳设计

近几年来，随着科学技术的不断发展，原来仅存在于科幻电影中的机器人已在现实世界中被实现了出来。各种功能和形态各异的机器人成为了人们生活中的一部分，大到工业制造中的应用，小到用于娱乐的智能玩具。而其中，最吸引人的目光的是能够与人进行沟通与交互的一类机器人，即社交机器人。社交机器人多数被应用在商场、零售店或者家庭中，目的在于与人的交互，所以体型普遍小于常人。同时，一个有趣的外观也是至关重要的。目前在机器人外观的设计上，人们一直追求与人类更为接近的样貌，但在相似度接近 100%时，反而会因为一些细小的不真实而使人产生负面情感，这个现象被称为恐怖谷理论。Ernst Jentsch 在 1906 年首次提到了“恐怖谷”这一说法<sup>[1]</sup>，之后日本的机器人科学家森政弘在 1970 年发表的文章中正式提出了恐怖谷理论，以用来描述机器人看上去几乎与人相近时反而会给人带来厌恶感的现象<sup>[2]</sup>。由于社交机器人需要长时间与人接触，一个有个性的卡通外表，相比于可能带来“恐怖谷理论”效应的类人型外观，必定更能给人以舒适的感受。

目前市面上的各种社交机器人都有其独特的造型，如 Nao、Jibo、Pepper、Remeo、Buddy 等等。这些独具特色的外观都是由专业的艺术设计师所创作的，在兼顾实用性与美观的情况下，同时也都能得到广大使用者的接受。但是对于那些富有创造力的用户，他们更愿意依据自己的想法亲自动手定制一个属于自己的个性化外形，而不仅仅是局限于经设计师设计后再由工厂统一批量制造的单一模式。

用户想要设计一个三维模型，需要借助现有的一些三维建模软件，如 Autodesk Maya、3Ds Max 等等。然而，并不是所有人都能熟练掌握这些软件的操作与应用。普通家庭用户在设计机器人外形之前，必然需要花费大量的时间来学习

这些软件的操作。同时，机器人外壳的制作，在设计外观模型的基础上，还需考虑实际装配的可行性，如规格大小是否符合、外壳模型是否影响机器人动作行为、螺丝孔等连接结构的设置等等。这些程序只有专业的艺术设计师、工程师才能掌控，给普通用户的 DIY 定制带来了很大的困难。另外，在设计出计算机三维模型之后，还需要经由工业生产得到最终成品，整个过程务必要耗费不少的时间与金钱。而现在，3D 打印技术日趋成熟，如果将外壳设计的流程自动化，并使用 3D 打印机对生成的外壳模型进行打印，将会大大简化整个制作过程，降低生产成本，同时普通用户也可以根据自身的需求对外壳做自定义，而无需掌握专业的三维建模技术。

### 1.1.2 三维重建

随着计算机视觉、计算机图形学与虚拟现实技术的发展，对二维图像转化为三维模型技术的研究，逐步形成了一门交叉学科。其应用领域十分广泛，不仅仅是计算机领域的学术研究，医学方面、建筑方面等等也都涉及到了三维模型的重建技术。人们迫切需要将现实中的事物通过三维重建的方式，在计算机中以虚拟的形式表现出来，以进行现实中实现难度较大的一些操作，譬如对人体内器官的观察、大型场景的动态游览、以及古迹形态的恢复等等。同时，增强现实技术（Augmented Reality）也需要以三维重建为基础，通过三维重建得到的虚拟三维模型，可以被应用到增强现实或虚拟现实的场景中，实现虚实物体相结合的效果。

三维重建主要是基于图像中存储的场景信息进行模型重建。根据图像数量的不同，可以分为基于单张图像的三维重建与基于多张图像的三维重建。由于单张图像提供的信息太少，通常难以推断出所拍摄场景的三维结构，所以目前基于单张图像的三维重建对于目标物体有一定程度上的限制，如形态复杂度与对称性，或者需要在重建的过程中通过交互的方式人为地向计算机提供物体的结构信息，以提高模型重建的准确度。清华大学的陈韬在 2013 年发表的文章《3-sweep: Extracting editable objects from a single photo》中，提出了一种基于单张图片提取可编辑对象的方法，即能够通过交互的方式实现单张图像的三维重建<sup>[3]</sup>。

而基于多张图像的三维重建，相比于单张图像可以提供更为丰富的场景结构信息。通过摄影测量学对目标物体的多视角图像进行计算，我们可以得知物体上与场景中的点在空间中的分布，从而获取被测物的三维点云信息，进而通过点云到网格模型的转化，得到三维模型。目前基于多张图像的三维重建已有一些应用软件能够实现，如 Autodesk 公司的 Memento、123D Catch、微软公司的 Kinect Fusion 等等。

## 1.2 主要研究内容

基于机器人外壳设计的发展现状，本文以 HR-OS1 机器人框架为例，提出了一个为普通用户所设计的自动化机器人外壳定制流程，用户只需输入任意双足角色的三维模型，程序便会自动将其与机器人内骨骼进行匹配，并做碰撞检测、模型平滑、模型加厚、连结结构设置等一系列优化操作，最终得到适用于该机器人内骨骼、并且可进行 3D 打印的外壳模型。

在输入的获取方面，考虑到用户自行设计三维模型有一定的难度，而网络上共享的模型文件大多数情况下不符合用户需求。所以文中提出了使用目前热门的三维重建技术进行模型获取的方法，研究其在机器人外壳定制中的应用。以设计 HR-OS1 机器人外壳为例，用户可对现实世界中任意感兴趣的双足角色造型拍摄多角度图片，基于拍摄的图像序列进行三维重建，生成计算机三维模型，该模型即可被使用在外壳定制流程当中。结合三维重建技术，用户仅需对目标物体进行拍照，省去了专业性强且繁复的模型设计步骤，简化了外壳定制过程中的操作。这使得整个机器人外观定制流程更为自动化，使普通家庭用户独立设计定制属于自己的机器人外观成为了可能。

## 1.3 论文结构安排

根据课题研究期间所做的工作，本文内容结构组织如下：

第一章，绪论。主要描述了本文的研究背景，研究的主要内容及意义，同时介绍了文章的结构组织安排。

第二章，相关技术介绍。主要介绍三维重建以及机器人外壳定制所涉及到的相关技术及其研究现状。

第三章，基于多张图片的机器人外观模型重建方法研究。主要介绍重建过程中的具体流程与关键技术与方法，分析不同步骤中的数据转化。

第四章，三维重建技术应用于机器人外观定制研究。主要介绍基于三维重建技术得到的模型进行机器人外观定制的基本流程，分析每个步骤的方法实现。

第五章，实验结果与分析。主要介绍实验内容，对给定的物体拍摄多角度图片，基于拍摄的图像序列进行三维模型的重建工作，并将重建后的模型应用于机器人外壳的定制流程。结合3D打印的可行性对实验结果进行分析。

第六章，总结与展望。总结了所做工作的成果，并提出不足之处，指明以后的研究方向及改进计划。

## 第二章 相关技术介绍

### 2.1 三维重建

三维重建，是指通过计算机，对现实世界中的三维物体建立合适的数学表示模型，是通过虚拟模型在计算机中创建、复现现实世界的一项关键技术。目前在各个领域，都有着许多的研究人员关注于三维重建这项技术。2014年，Long Zhang等人在研究工作中，基于物体的拓扑结构实现了多张图片的自动三维建模，以解决结构特征明显的对象如建筑物，在生成三维点云时丢失结构信息的问题，获取更为准确的重建结果<sup>[4]</sup>。2015年，F. Alidoost等人提出了一种基于多视角的无人机航拍图像进行三维建筑重建的技术<sup>[5]</sup>；Schoning和Heidemann使用选定的数据集对现有的几款多视角三维重建软件进行了评估<sup>[6]</sup>；Schonberger等人提出了一个包含重建与检索的SfM系统，在实现大规模的重建工作的同时，相比于传统的方法也能更好地保留重建物体的细节部分<sup>[7]</sup>；Massot-Campos等人则关注于水下三维重建所使用的光学传感器和重建方法<sup>[8]</sup>。2016年，在三维脸部重建技术方面，Joseph Roth等人基于先前的工作，通过拟合一个三维形变模型来生成个性化的模板，以提高脸部重建在使用较少数量且分辨率不高的图像时也能保持良好的重建效果<sup>[9]</sup>。

在大量的三维重建技术当中，较为常用的几种方法，根据重建方式的不同，可以分为基于物体三维几何结构的重建方法，与基于物体二维图像的重建方法。基于物体几何结构的重建方法即直接通过三维建模软件对物体进行建模，以手动的方式重建出物体的虚拟模型；基于二维图像的重建方法是通过提取二维照片上的信息，寻找不同照片中所表示的相同的物理空间点，估算出这些匹配点在客观世界中的三维坐标，以此来确定三维场景中点的分布，以立体的方式重现照片中的图像信息，用三维模型给人以更直观的感受。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫