

基于抓取点生成网络 与视觉伺服的未知物体抓取算法研究

王泽飞

院（系）： 航天学院 专 业： 自动化
学 号： 1181140118 指导教师： 高会军

2022 年 6 月 x 日

哈爾濱工業大學

畢業設計（論文）

題 目 基於抓取點生成網絡與視
覺伺服的未知物體抓取算法研究

專 業 自動化

學 號 1181140118

學 生 王澤飛

指 導 教 師 高會軍

答 辯 日 期 2022 年 6 月 x 日

摘 要

摘要的字数（以汉字计），硕士学位论文一般为 500 ~ 1000 字，博士学位论文为 1000 ~ 2000 字，均以能将规定内容阐述清楚为原则，文字要精练，段落衔接要流畅。摘要页不需写出论文题目。英文摘要与中文摘要的内容应完全一致，在语法、用词上应准确无误，语言简练通顺。留学生的英文版博士学位论文中应有不少于 3000 字的“详细中文摘要”。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。（模板作者注：关键词分隔符不用考虑，模板会自动处理。英文关键词同理。）

关键词：TeX；L^ATeX；CJK；嗨！；thesis

Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summarization of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Key words are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 key words, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: T_EX, L^AT_EX, CJK, template, thesis

物理量名称及符号表

表 1 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示实例
频率	赫[兹]	Hz	s ⁻¹

目 录

摘 要	I
Abstract	II
物理量名称及符号表	III
 第 1 章 绪论	 1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 机器人视觉伺服系统概述	1
1.3 基于视觉伺服的物体抓取发展现状	1
1.4 主要研究内容及章节安排	2
第 2 章 基于图像的视觉伺服（IBVS）理论研究	3
2.1 引言	3
2.2 IBVS 系统模型建立	3
2.2.1 系统坐标系建立	3
2.2.2 视觉模型建立	4
2.3 IBVS 仿真系统实现	5
2.3.1 IBVS 算法原理	5
2.3.2 机器人仿真模型搭建	6
2.3.3 曲线绘制与相机轨迹记录	7
2.4 IBVS 实际系统实现	8
2.4.1 IBVS 实物系统平台搭建	8
2.4.2 IBVS 实际运行	9
2.5 本章小结	10
第 3 章 伺服目标生成算法研究	11
3.1 引言	11
3.2 基于模型的点云识别与姿态匹配	11
3.2.1 方法陈述	11
3.2.2 算法实现	11
3.2.3 方法小结	11
3.3 抓取点生成网络（GG-CNN）	11

3.3.1 方法陈述	11
3.3.2 算法实现	11
3.3.3 方法小结	11
3.4 本章小结.....	11
第 4 章 未知物体抓取算法实现	12
4.1 引言	12
4.2 机器人视觉伺服系统概述	12
第 5 章 IBVS 控制律优化	13
第 6 章 实验设计与验证	14
第 7 章 示例文档	15
7.1 关于数字.....	15
7.2 索引示例.....	16
7.3 术语排版举例	16
7.4 引用	16
7.5 定理和定义等	16
7.6 图片	17
7.6.1 博士毕业论文双语题注	17
7.6.2 本硕论文题注	18
7.6.3 并排图和子图	18
7.7 如何做出符合规范的漂亮的图	24
7.7.1 Tikz 作图举例	24
7.7.2 R 作图	24
7.8 表格	24
7.8.1 普通表格的绘制方法.....	25
7.8.2 长表格的绘制方法.....	26
7.8.3 列宽可调表格的绘制方法	27
7.9 公式	29
7.10 其他杂项	29
7.10.1 右翻页	29
7.10.2 算法	29
7.10.3 脚注	29
7.10.4 源码	29
7.10.5 思源宋体	29

7.10.6 专业绘图工具.....	31
7.10.7 术语词汇管理.....	31
7.10.8 TeX 源码编辑器	31
7.10.9 L ^A T _E X 排版重要原则	31
结 论	32
参考文献	33
哈尔滨工业大学本科毕业设计（论文）原创性声明	34
致 谢	35

第1章 绪论

研究生学位论文是研究生科学研究工作的全面总结，是描述其研究成果、代表其研究水平的重要学术文献资料，是申请和授予相应学位的基本依据。学位论文撰写是研究生培养过程的基本训练之一，必须按照确定的规范认真执行。研究生应严肃认真地撰写学位论文，指导教师应加强指导，严格把关。

学位论文撰写应实事求是，杜绝造假和抄袭等行为；应符合国家及各专业部门制定的有关标准，符合汉语语法规则。硕士和博士学位论文，除在字数、理论研究的深度及创造性成果等方面的要求不同外，撰写规范要求基本一致。人文与社会科学、管理学科可在本撰写规范的基础上补充制定专业的学术规范。

1.1 课题背景及研究的目的和意义

要不看看自己开题文章的开头？

1.2 机器人视觉伺服系统概述

分 IBVS、PBVS 和混合控制 hvs。IBVS 的基础原理从最原始的公式、解耦、图像矩到现在借助神经网络获直接端到端控制。绕不开当前特征与目标特征的提取的过程，但是方法越来越具有泛化性。

1.3 基于视觉伺服的物体抓取发展现状

抓取方法上：经典的方法当然是人为的制作特征点或者标志，辅助视觉伺服。但是泛化性是不行的，需要避免人为的制作特征，让程序自主提取特征并生成目标。直接把整张图当作特征是后来的发展方向之一，这样必须要求目标与当前相似，伺服范围太小。神经网络兴起后，方法变得百花齐放。如现在不断发展的抓取合成（grasp synthesis），分经验法和深度法；神经网络自主生成目标图像但还是那个问题，这样必须要求目标与当前相似，伺服范围太小；手到眼系统，神经网络估计机械臂末端和目标的相对位姿，伺服后期会出现遮挡现象，一般还是要配合眼在手系统一起使用，涉及到多数据融合问题，非常复杂。通过渲染引擎获得目标图像，神经网络自动提取特征并匹配特征。大部分的方法无法回避需要线下制作目标图像的问题，对于一个完全未知的目标，如何在

线上就能实时生成目标并执行抓取是对抓取未知目标任务的研究重点。伺服性能上：就算拥有一个合适的抓取方法，也需要有合适的控制律。低鲁棒性的伺服控制律，无法在应对各种位姿、形态的抓取对象中保证同样的抓取性能，这会大大降低最终的抓取成功率和伺服响应速度。为满足泛化性的需求，近几年有很多人投入到视觉伺服控制律的研究中，然后介绍各种控制方法。如何设计一个适合于当前抓取方法的控制律，是抓取未知目标任务的又一难点。

1.4 主要研究内容及章节安排

介绍本文都要干些啥，IBVS 相对于 PBVS 的优势，eye-to-hand 系统本文共分为六章，章节内容如下第一章：第二章：。。。

第2章 基于图像的视觉伺服（IBVS）理论研究

2.1 引言

绪论中介绍了 IBVS 相对于 PBVS 的优势：1. 伺服精度不依赖于相机外参，深度鲁棒性强；2. 直接得到指令，不需要轨迹规划，更易于实现实时闭环控制。因此认为 IBVS 更适合于未知位姿、形体的目标的抓取任务。IBVS 作为本算法研究的基石之一，尤其需要十分严谨合理的模型建立、公式原理分析、完善的仿真系统和实物环境搭建，这会为之后的工作减少不少麻烦。本章中除了完成上述基础性工作，还在实物上成功运行了简单的基于特征点交互矩阵的 IBVS。

2.2 IBVS 系统模型建立

2.2.1 系统坐标系建立

对于 IBVS 系统，最需要关注的点有三个：机械臂末端、相机和目标。为了后续仿真程序实现和问题分析需要，建立系统的坐标系用于表述它们的位置。如图2-1所示：

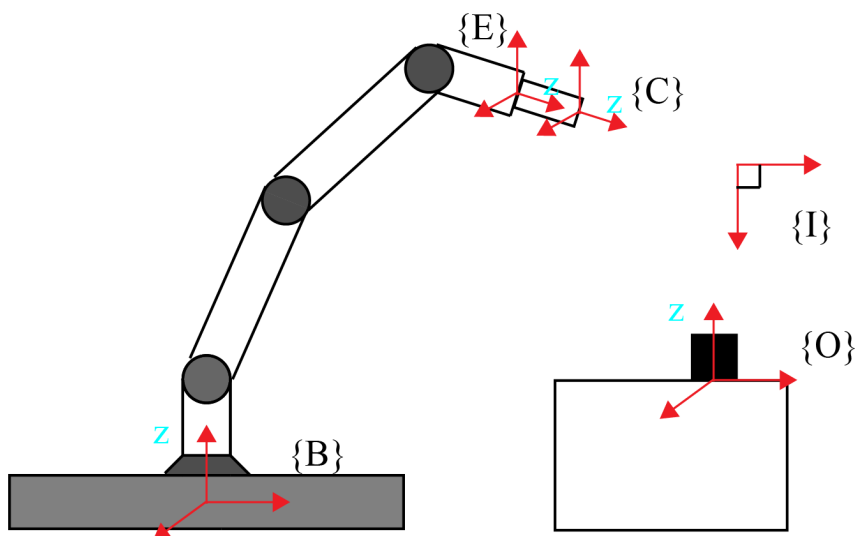


图 2-1 系统坐标系建立示意图

该示意图中， $\{O\}$ 、 $\{E\}$ 和 $\{C\}$ 分别表示物体坐标系、机器人末端坐标系，eye-to-hand 系统中的相机坐标系。为了便于阐述坐标变换公式，用 $\{B\}$ 、 $\{I\}$ 和 $\{CI\}$ 表示机器人基坐标系、图像坐标系和像素坐标系，本研究中所说的基坐标

系和世界坐标系是一个意思。将使用以下符号表示各个相对位姿变换： ${}^B T_O$ 表示目标 $\{O\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的坐标变换； ${}^B T_E$ 表示机器人末端 $\{E\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的变换。对机械臂末端使用的速度指令是在这个变化下进行的； ${}^C T_O$ 表示目标 $\{O\}$ 相对于相机坐标系 $\{C\}$ 的坐标变换； ${}^E T_C$ 表示相机 $\{C\}$ 相对于末端坐标系 $\{E\}$ 的坐标变换。一般情况下 IBVS 的伺服结果是相机正对目标，而真正抓取还是要依赖末端位置，所以这个变换是必要的； ${}^C T_I$ 表示图像 $\{I\}$ 相对于相机坐标系 $\{C\}$ 的坐标变换。特征初始是在图像中获取的，需要这个变换使特征位置描述变成 IBVS 需要的形式^[1]。

2.2.2 视觉模型建立

IBVS 不断地由特征偏差驱动着运行，而对特征的描述需要在 ${}^C T_O$ 下进行。在图像中获取的特征需要经过图2-2所示的坐标系变换才能真正为 IBVS 所用：



图 2-2 特征变换过程图

不例外地使用针孔模型描述从像素坐标系到机器人基坐标系中物体的映射, 这张图引自这篇文献^[1], 这张针孔模型示意图十分典型。

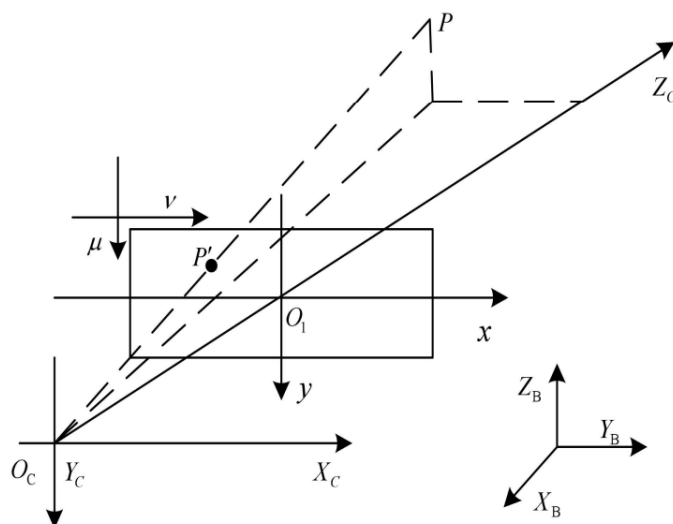


图 2-3 视觉坐标系建立示意图

图2-3中用 $X_c O_c Y_c$ 描述 $\{C\}$ ， $x O_I y$ 描述 $\{I\}$ ， P 表示 $\{C\}$ 中的目标点， P' 表示成像过程中投影到 $\{I\}$ 中的目标点。因为深度的存在，成像在二维像素坐标系中的图像所对应的目标可以是无穷多种情况，为了统一坐标变换形式，令目标深度 Z_c 为单位 1，在相机坐标系 $\{C\}$ 和像素坐标系 $\{CI\}$ 中加上了一个过渡

的图像坐标系 $\{I\}$ 。

相机内参由出厂地所给出，它包括相机的焦距 f ，相机放缩因子 f_x 和 f_y ，它们的单位为毫米；偏移量 c_x 和 c_y ，单位为像素，但是是浮点类型。由于 Realsense D435i 内置去畸变 API，就不考虑畸变因素了。使用 $[u, v]^T$ 表示像素坐标系下的目标点位置， $[X_C, Y_C, Z_C]^T$ 表示相机坐标系下的目标点位置， Z_C 为相机深度，可以得到它们之间的关系：

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

在已知相机内参的情况下，IBVS 中所需要的特征位置描述就转换为找到特征对应的 $\{CI\}$ 中的位置 $[u, v]^T$ 和深度相机测得对应点的深度 Z_C 。

2.3 IBVS 仿真系统实现

2.3.1 IBVS 算法原理

在本实验中所说的 IBVS 是基于特征点交互矩阵实现的^[2]。它的基本思想是将特征点偏差通过交互矩阵（也叫图像雅可比矩阵）映射为末端速度指令。为了表述简洁，符号所代表的意思如下： $s^* = [x^*, y^*]^T$ 表示 $\{C\}$ 中对应的期望特征点坐标。 $s = [x, y]^T$ 表示 $\{C\}$ 中对应的当前特征点坐标。 $v_c = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 表示 $\{B\}$ 中相机的速度，其中相机包含质心线速度，和绕三个轴的角速度。由于相机和机械臂末端是固连且位置上接近的，所以它们的速度认为是一致的。使用交互矩阵 L_c 建立当前特征随时间变化率与相机位姿随时间变化率的关系：

$$\dot{s} = L_c v_c \quad (2-2)$$

一般情况下，期望特征是不随时间改变的，或者变化甚微（在本研究中就是如此，所以进行近似），式2-2可以如方程组2-3中第一排表达式改写。另外，认为特征偏差随时间呈指数变化是合理的，因为它收敛快速且平滑^[2]，于是可以得到方程组2-3：

$$\begin{cases} (\dot{s} - \dot{s}^*) = \dot{e} = L_c v_c \\ L_e = L_c \\ \dot{e} = -\lambda e \end{cases} \quad (2-3)$$

其中 \dot{e} 为当前特征偏差随时间变化率， λ 为比例系数， e 为当前特征偏差。

通过对交互矩阵求广义逆，由方程组2-3可得到：

$$\begin{cases} v_c = -\lambda L_e^+ e \\ L_e^+ = (L_e^T L_e)^{-1} L_e^T \end{cases} \quad (2-4)$$

其中 λL_e^+ 为交互矩阵广义逆。通过方程组2-4可以借助当前特征偏差求取机器人末端速度了。交互矩阵由特征点在图像中的位置及深度信息得到，每个点对应的交互矩阵如式2-5所示，若有多个点，公式中的交互矩阵就是每个点对应的交互矩阵在行方向的叠加。

$$L_e = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z_C} & 0 & \frac{X_C}{Z_C} & X_C Y_C - (1 + X_C^2) & Y_C \\ 0 & \frac{-1}{Z_C} & \frac{Y_C}{Z_C} & 1 + Y_C^2 & -X_C Y_C & -X_C \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

2.3.2 机器人仿真模型搭建

基于为整个系统搭建的坐标系和不同系的坐标转换关系，借助 ROS 的 moveit 工具（由于 ROS2 的 moveit2 尚未开发成熟，使用 moveit 代替），为敬科公司提供的 JK 机器人搭建仿真模型。moveit 是一个开发的十分完善的工具包，不仅实现了机械结构的仿真，物理模型、碰撞体积和逆运动学都在包中相应地实现。本研究中，为了能更快地验证提出的算法，减少繁杂的处理，将把物体放到一个平整且颜色单一（在后续的研究中可以发现这些要求都不是必须的）的表面上。另外，相机一直保持俯视朝下，在 X、Y 轴方向的角度保持为 0° ，因此速度指令中 ω_x 和 ω_y 不论结果计算如何都给 0。仿真效果图如图2-4所示。

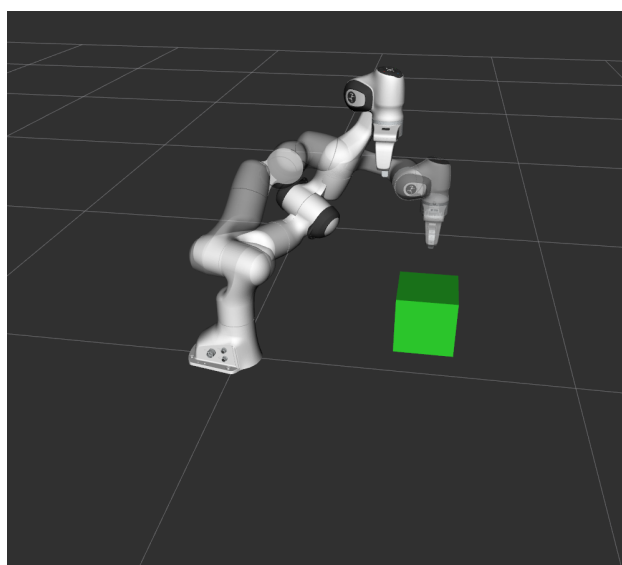


图 2-4 基于 moveit 机器人仿真模型实现

图2-5展现了整个系统最基础的控制方框图，在实验进行过程中会不断被改进，以应对实践中发生的各个问题。

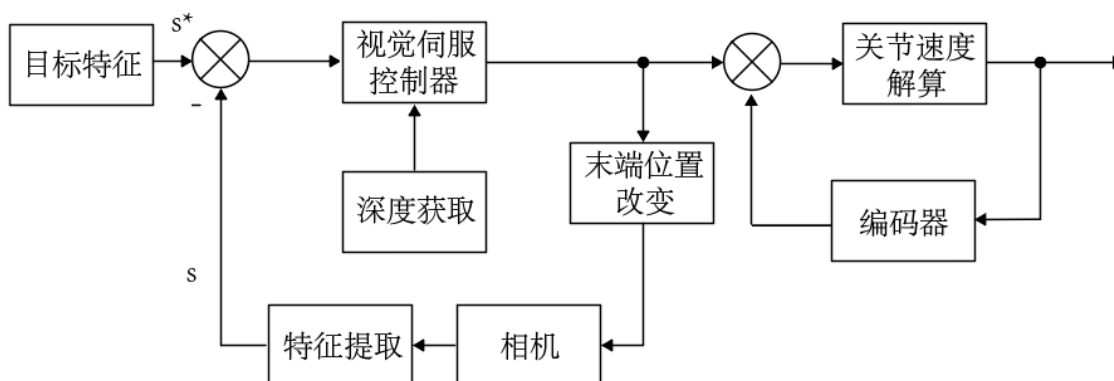


图 2-5 IBVS 基础控制流程方框图

深度获取的方式是会根据深度条件切换的，如图2-6所示。之所以加上这个切换，是因为 Realsense D435i 是基于结构光测量深度的，不可以测量过近距离的目标点。当相机在伺服末期十分靠近目标时，无法获得确切的目标点深度。所以在相机与目标点距离低于 20cm 时，会通过编码器读取末端下降的距离得到对应特征的深度，这在相机一直俯视向下时是可行的。



图 2-6 深度传感器切换示意图

开启仿真节点后，可以在另一个节点中与该节点建立连接并发送速度指令，仿真节点会因此响应，并进行移动。moveit 有自己的限位系统，在机器人进入奇异点或者超出移动范围时给予及时的警告，所以该机器人仿真模型多被用于对机器人是否进入奇异点的判断这样的定性分析，后文中真正的调参还是在实物上进行的。

2.3.3 曲线绘制与相机轨迹记录

曲线是分析问题非常重要的一环，所以仿真中应当有相应的曲线绘制。IBVS 本质是将特征偏差作为控制器输入而映射成速度指令的控制系统，所以研究中最关心的是点在于特征偏差和速度指令，它们将被分别绘制到两张图中。曲线图中时间单位为秒。关于特征偏差图：系统中定义特征偏差是相机坐标系

中被检测的特征点在 X、Y 方向的偏差，单位为米，该单位不被展现在曲线中，因为它的单位并不重要。关于末端速度指令图：为了与 JK 机器人需要的末端速度指令单位保持一致，所以线速度选取厘米每秒为单位，而角速度单位则为度每秒。

直观地展现相机的位移情况也是重要的，因为 IBVS 往往对机器人末端的运动轨迹十分不友好。如果当前的速度指令使机器人颤振，那么机器人已经进入了一个十分糟糕的姿态，通过分析相机的运动轨迹适当调节控制律参数也是非常好的解决方法。调用 VISP 库，对设定的参数进行视觉伺服仿真，实现的曲线绘制和相机轨迹绘制效果如图2-7所示。

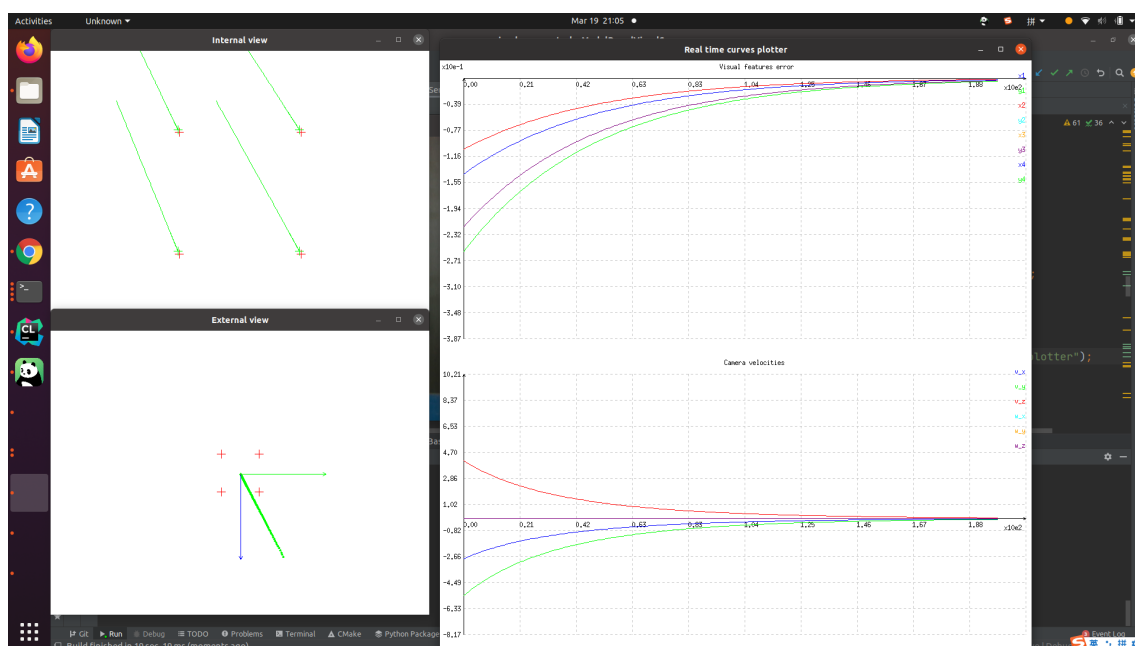


图 2-7 基于 VISP 视觉伺服仿真

提前在程序中设置好特征的位置，和与之对应的目标特征。将仿真得到的速度指令通过 ROS2 节点发布订阅机制传输给机器人仿真节点，机器人会相应地运动并使当前特征都到达目标特征处，从而到成到达目标位置处的目的。

2.4 IBVS 实际系统实现

2.4.1 IBVS 实物系统平台搭建

仿真终归只能用于定性分析。外界干扰、噪声多种多样，仿真中不可能把所有因素考虑进去。事实上，仿真跑出的结果往往十分顺滑，而实物中会反映很多处理不够细节的问题。我认为，IBVS 算法在实物上成功运行，研究才算真正的开始。实物运行环境包括 JK 机器人和装载它并固定它底座的台子；用于

承载目标物体的平台和目标; 平台上铺盖的一层漫反射效果好且为单一白色的纸; 机器人末端装配 Realsense D435i 深度相机 (夹具暂时未装配, 在正式夹取的时候会安装在末端)。之所以要铺一层纸, 除了保证平面平整且颜色单一以外, 还保证了深度相机不要因为丢失反射光导致获取无效数据。最终实物环境图如图2-8所示:

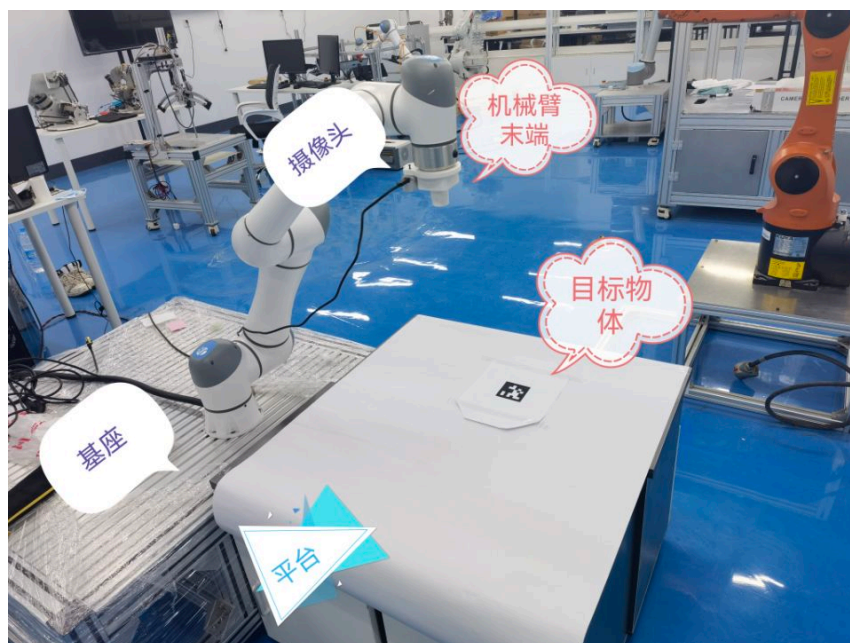


图 2-8 实物环境搭建展示图

2.4.2 IBVS 实际运行

为了能更快地验证 IBVS 算法, 在平台上贴了一张黑色方框码, 经过视觉二值化、边缘获取、多边形拟合等处理。实验进行前会将机械臂末端调到目标位置, 此时黑色方框会处于摄像头的中央, 记录此时的四个点为目标特征。将机器人末端初始位置调至远离黑色方框的位置, 距离目标位置的三维各个方向以及 Z 轴角度都有一定的偏差 ($\{B\}$ 中, $\Delta X = 0.3m, \Delta Y = 0.3m, \Delta Z = 0.5m$)。伺服过程中会不断捕获它的四个点作为特征, 并计算特征偏差, 最后映射成末端速度指令。伺服的成功证实了所实现的 IBVS 算法的正确性, 同时也正式踏入对未知物体视觉伺服抓取的研究领域中。2-9展示了伺服过程中机械臂末端速度指令和各特征点的偏差对应的曲线。

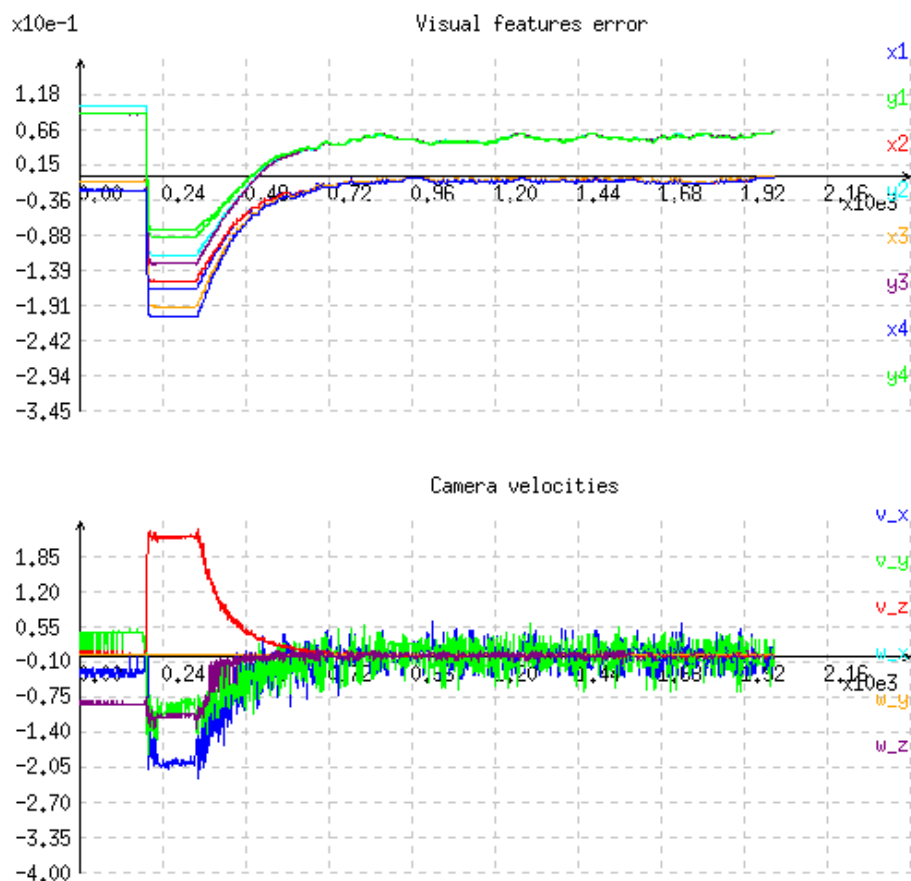


图 2-9 视觉伺服曲线绘制（初始）

2.5 本章小结

本章讲述了基于特征点交互矩阵的 IBVS 的原理。在算法实现前建立系统坐标系和视觉坐标系，这会使得之后的坐标描述便捷许多。搭建了 IBVS 的仿真运行环境，便于后续问题分析。搭建了实物运行环境，并成功运行了 IBVS 算法，这意味着研究真正的开始。

第3章 伺服目标自主生成算法研究

3.1 引言

第二章完成了 IBVS 的模型建立、仿真系统搭建以及在实物上成功运行 IBVS 算法，这些为后续的研究提供了控制基础。现在机器人知道自己怎么动了，那么它面对未知物体抓取任务时如何知道自己往哪动呢？接下来，在本章中将对本次课题又一基石——伺服目标生成的研究进行展开。主要研究了基于模型的点云识别和抓取点生成网络两种方法，将它们进行比较后，选择了后者作为应对未知物体抓取任务时生成机器人伺服目标的方案。

3.2 基于模型的点云识别与姿态匹配

3.2.1 方法陈述

3.2.2 算法实现

3.2.3 方法小结

3.3 抓取点生成网络（GG-CNN）

3.3.1 方法陈述

3.3.2 算法实现

3.3.3 方法小结

3.4 本章小结

第 4 章 未知物体抓取算法实现

4.1 引言

4.2 机器人视觉伺服系统概述

第 5 章 IBVS 控制律优化

第 6 章 实验设计与验证

第7章 示例文档

这是 hiThesis 的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《hiThesis 哈尔滨工业大学学位论文模板》^①，本示例文档也最好能看一看。此示例文档尽量使用到所有的排版格式，然而对于一些不在我工规范中规定的文档，理论上是由用户自由发挥，这里不给出样例。需要另行载入的宏包和自定义命令在文件 ‘hithesis.sty’ 中有示例，这里不列举。

7.1 关于数字

按《关于出版物上数字用法的试行规定哈哈》（1987年1月1日国家语言文字工作委员会等7个单位公布），除习惯用中文数字表示的以外，一般数字均用阿拉伯数字。（1）公历的世纪、年代、年、月、日和时刻一律用阿拉伯数字，如20世纪，80年代，4时3刻等。年号要用四位数，如1989年，不能用89年。（2）记数与计算（含正负整数、分数、小数、百分比、约数等）一律用阿拉伯数字，如3/4，4.5（3）一个数值的书写形式要照顾到上下文。不是出现在一组表示科学计量和具有统计意义数字中的一位数可以用汉字，如一个人，六条意见。星期几一律用汉字，如星期六。邻近两个数字并列连用，表示概数，应该用汉字数字，数字间不用顿号隔开，如三五天，七八十种，四十五六岁，一千七八百元等。（4）数字作为词素构成定型的词、词组、惯用语、缩略语等应当使用汉字。如二倍体，三叶虫，第三世界，“七五”规划，相差十万八千里等。（5）5位以上的数字，尾数零多的，可改写为以万、亿为单位的数。一般情况下不得以十、百、千、十万、百万、千万、十亿、百亿、千亿作为单位。如345 000 000公里可改写为3.45亿公里或34 500万公里，但不能写为3亿4 500万公里或3亿4千5百万公里。（6）数字的书写不必每格一个数码，一般每两数码占一格，数字间分节不用分位号“，”，凡4位或4位以上的数都从个位起每3位数空半个数码（1/4汉字）。“3 000 000”，不要写成“3,000,000”，小数点后的数从小数点起向右按每三位一组分节。一个用阿拉伯数字书写的多位数不能从数字中间转行。（7）数量的增加或减少要注意下列用词的概念：1）增加为（或增加到）过去的二倍，即过去为一，现在为二；2）增加（或增加了）二倍，即过去为一，现在为三；3）超额80应特别注意在表达数字减小时，不宜用倍数，而应采用分

^① 即 hithesis.pdf 文件

数。如减少为原来的 $1/2$, $1/3$ 等。

7.2 索引示例

为便于检索文中内容,可编制索引置于论文之后(根据需要决定是否设置)。索引以论文中的专业词语为检索线索,指出其相关内容的所在页码。索引用中、英两种文字书写,中文在前。中文按各词汉语拼音第一个字母排序,英文按该词第一个英文字母排序。

7.3 术语排版举例

术语的定义和使用可以结合索引,灵活使用。例如,树结构折筷过程(Tree-structured Stick-breaking process)是一种应用于狄利克雷过程抽样的算法。下次出现将是另一种格式:树结构折筷过程。还可以切换单复数例如:SCNAs(体细胞拷贝数变异(Somatic copy number alternation, SCNA)),下次出现为:SCNAs。此处体现了 \LaTeX 格式内容分离的优势。

7.4 引用

引文标注遵照 GB/T7714-2005,采用顺序编码制。正文中引用文献的标示应置于所引内容最后一个字的右上角,所引文献编号用阿拉伯数字置于方括号“[]”中,用小4号字体的上角标。要求:

(1) 引用单篇文献时,如“二次铣削^[3]”。

(2) 同一处引用多篇文献时,各篇文献的序号在方括号内全部列出,各序号间用“,”,如遇连续序号,可标注起序号。如,“...形成了多种数学模型^[3,4]...”注意此处添加`\inlinecite`中文空格^[3, 4],可以在`cfg`文件中修改空格类型。

(3) 多次引用同一文献时,在文献序号的“[]”后标注引文页码。如,“...间质细胞 CAMP 含量测定^{[4]100-197}...。...含量测定方法规定^{[4]92}...”。

(4) 当提及的参考文献为文中直接说明时,则用小4号字与正文排齐,如“由文献^[5]可知”

7.5 定理和定义等

定理 7.1^[3] 宇宙大爆炸是一种爆炸。

定义 7.1 (霍金) 宇宙大爆炸是一种爆炸。

假设 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

引理 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

推论 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

练习 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

问题 7.1 (Albert Einstein) 宇宙大爆炸是一种爆炸。

注释 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

公理 7.1 (爱因斯坦) 宇宙大爆炸是一种爆炸。

猜想 7.1 宇宙大爆炸是一种爆炸。

7.6 图片

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。机械工程图：采用第一角投影法，严格按照 GB4457 GB131-83《机械制图》标准规定。数据流程图、程序流程图、系统流程图等按 GB1526-89 标准规定。电气图：图形符号、文字符号等应符合附录 3 所列有关标准的规定。流程图：必须采用结构化程序并正确运用流程框图。对无规定符号的图形应采用该行业的常用画法。坐标图的坐标线均用细实线，粗细不得超过图中曲线；有数字标注的坐标图，必须注明坐标单位。照片图要求主题和主要显示部分的轮廓鲜明，便于制版。如用放大或缩小的复制品，必须清晰，反差适中。照片上应有表示目的物尺寸的标度。引用文献中的图时，除在正文文字中标注参考文献序号以外，还必须在中、英文表题的右上角标注参考文献序号。

7.6.1 博士毕业论文双语题注

每个图均应有图题（由图序和图名组成），图题不宜有标点符号，图名在图序之后空 1 个半角字符排写。图序按章编排，如第 1 章第一个插图的图号为“图 1-1”。图题置于图下，硕士论文只用中文，博士论文用中、英两种文字，居中书写，中文在上，要求中文用宋体 5 号字，英文用 Times New Roman 5 号字。有图注或其它说明时应置于图题之上。引用图应注明出处，在图题右上角加引用文献号。图中若有分图时，分图题置于分图之下或图题之下，可以只用中文书写，分图号用 a)、b) 等表示。图中各部分说明应采用中文（引用的外文图除外）或数字符号，各项文字说明置于图题之上（有分图时，置于分图题之上）。图中文字用宋体、Times New Roman 字体，字号尽量采用 5 号字（当字数较多时可用小 5 号字，以清晰表达为原则，但在一个插图内字号要统一）。同一图内使用文字应统一。图表中物理量、符号用斜体。



图 7-1 打高尔夫球的人（博士论文双语题注）
Fig. 7-1 The person playing golf (Doctoral thesis)

7.6.2 本硕论文题注



图 7-2 打高尔夫球的人，硕士论文要求只用汉语

7.6.3 并排图和子图

7.6.3.1 并排图

使用并排图时，需要注意对齐方式。默认情况是中部对齐。这里给出中部对齐、顶部对齐、图片底部对齐三种常见方式。其中，底部对齐方式有一个很巧妙的方式，将长度比较小的图放在左面即可。



图 7-3 打高尔夫球的人
Fig.7-3 The person playing golf



图 7-4 打高尔夫球的人。注意，这里默认居中
Fig. 7-4 The person playing golf. Please note that, it is vertically center aligned by default.



图 7-5 打高尔夫球的人
Fig.7-5 The person playing golf

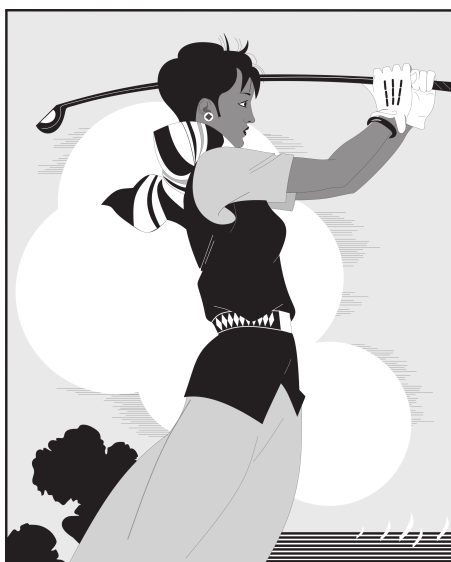


图 7-6 打高尔夫球的人。注意，此图是顶部对齐
Fig. 7-6 The person playing golf. Please note that, it is vertically top aligned.



图 7-7 打高尔夫球的人。注意，此图对齐方式是图片底部对齐
Fig. 7-7 The person playing golf. Please note that, it is vertically bottom aligned for figure.



图 7-8 打高尔夫球的人
Fig.7-8 The person playing golf

7.6.3.2 子图

注意：子图题注也可以只用中文。规范规定“分图题置于分图之下或图题之下”，但没有给出具体的格式要求。没有要求的另外一个说法就是“无论什么格式都不对”。所以只有在一个图中有标注“a), b)”，无法使用\subfigure的情况下，使用最后一个图例中的格式设置方法，否则不要使用。为了应对“无论什么格式都不对”，这个子图图题使用“minipage”和“description”环境，宽度，对齐方式可以按照个人喜好自由设置，是否使用双语子图图题也可以自由设置。



a) 打高尔夫球的人 1
a) The person playing golf



b) 打高尔夫球的人 2
b) The person playing golf



c) 打高尔夫球的人 3
c) The person playing golf

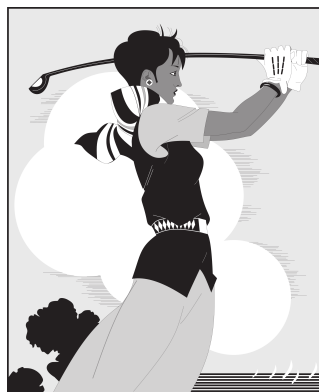


d) 打高尔夫球的人 4。注意，规范中没有明确规定要悬挂缩进、最后一行居中。
d) The person playing golf. Here, 'hang indent' and 'center last line' are not stipulated in the regulation.

图 7-9 打高尔夫球的人
Fig.7-9 The person playing gol



a) 打高尔夫球的人 1
a) The person playing golf



b) 打高尔夫球的人 2
b) The person playing golf

注意：这里是中文图注添加位置（我工要求，图注在图题之上）。

图 7-10 打高尔夫球的人。注意，此处我工有另外一处要求，子图图题可以位于主图题之下。但由于没有明确说明位于下方具体是什么格式，所以这里不给出举例。

Fig. 7-10 The person playing golf. Please note that, although it is appropriate to put subfigures' captions under this caption as stipulated in regulation, but its format is not clearly stated.

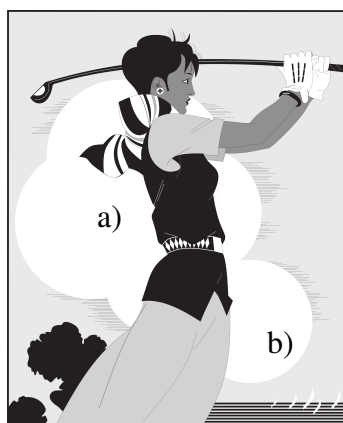


图 7-11 打高尔夫球球的人（博士论文双语题注）

Fig. 7-11 The person playing golf (Doctoral thesis)

a) 子图图题

b) 子图图题

b) Subfigure caption



图 7-12 打高尔夫球的人（非规范要求）
Fig. 7-12 The person playing golf (Not stated in the regulation)

如果不想让图片浮动到下一章节，那么在此处使用\clearpage 命令。

7.7 如何做出符合规范的漂亮的图

关于作图工具在后文7.10.6中给出一些作图工具的介绍，此处不多言。此处以 R 语言和 Tikz 为例说明如何做出符合规范的图。

7.7.1 Tikz 作图举例

使用 Tikz 作图核心思想是把格式、主题、样式与内容分离，定义在全局中。注意字体设置可以有两种选择，如何字少，用五号字，字多用小五。使用 Tikz 作图不会出现字体问题，字体自动与正文一致。

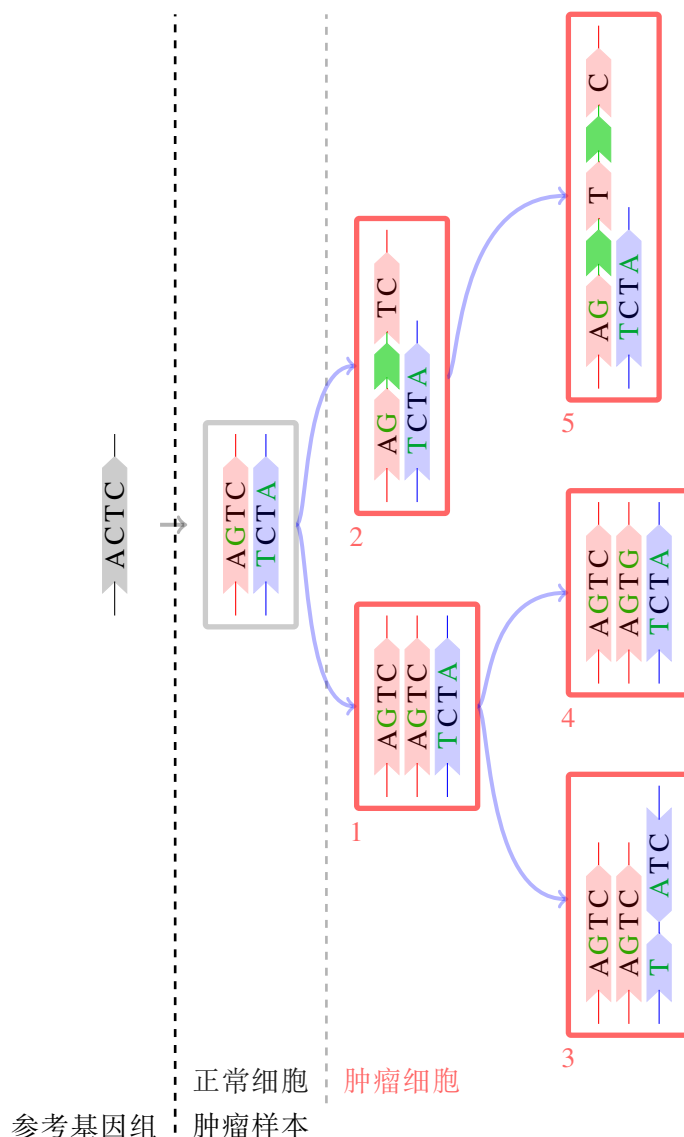
7.7.2 R 作图

R 是一种极具有代表性的典型的作图工具，应用广泛。与 Tikz 图 7-13 不同，R 作图分两种情况：（1）可以转换为 Tikz 码；（2）不可转换为 Tikz 码。第一种情况图形简单，图形中不含有很多数据点，使用 R 语言中的 Tikz 包即可。第二种情况是图形复杂，含有海量数据点，这时候不要转成 Tikz 矢量图，这会使得论文体积巨大。推荐使用 pdf 或 png 非矢量图形。使用非矢量图形时要注意选择好字号（五号或小五），和字体（宋体、新罗马）然后选择生成图形大小，注意此时在正文中使用\includegraphics 命令导入时，不要像导入矢量图那样控制图形大小，使用图形的原本的宽度和高度，这样就确保了非矢量图形中的文字与正文一致了。

为了控制 hiThesis 的大小，此处不给出具体举例，

7.8 表格

表应有自明性。表格不加左、右边线。表的编排建议采用国际通行的三线表。表中文字用宋体 5 号字。每个表格均应有表题（由表序和表名组成）。表序一般按章编排，如第 1 章第一个插表的序号为“表 1-1”等。表序与表名之间空一格，表名中不允许使用标点符号，表名后不加标点。表题置于表上，硕士学位论文只用中文，博士学位论文用中、英文两种文字居中排写，中文在上，要求中文用宋体 5 号字，英文用新罗马字体 5 号字。表头设计应简单明了，尽量不用斜线。表头中可采用化学符号或物理量符号。



图中，带有箭头的淡蓝色箭头表示肿瘤子种群的进化方向。一般地，从肿瘤组织中取用于进行二代测序的样本中含有一定程度的正常细胞污染，因此肿瘤的样本中含有正常细胞和肿瘤细胞。每一个子种群的基因组的模拟过程是把生殖细胞变异和体细胞变异加入到参考基因组中。

图 7-13 肿瘤组织中各个子种群的进化示意图

Fig.7-13 The diagram of tumor subpopulation evolution process

7.8.1 普通表格的绘制方法

表格应具有三线表格式，因此需要调用 `booktabs` 宏包，其标准格式如表 7-1 所示。全表如用同一单位，则将单位符号移至表头右上角，加圆括号。表中数据应准确无误，书写清楚。数字空缺的格内加横线“-”（占 2 个数字宽度）。表内文字或数字上、下或左、右相同时，采用通栏处理方式，不允许用“/”、“同上”之类的写法。表内文字说明，起行空一格、转行顶格、句末不加标点。如某个表需要转页接排，在随后的各页上应重复表的编号。编号后加“（续表）”，

表 7-1 符合研究生院绘图规范的表格

Table 7-1 Table in agreement of the standard from graduate school

$D(\text{in})$	$P_u(\text{lbs})$	$u_u(\text{in})$	β	$G_f(\text{psi.in})$
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089

表题可省略。续表应重复表头。

7.8.2 长表格的绘制方法

长表格是当表格在当前页排不下而需要转页接排的情况下所采用的一种表格环境。若长表格仍按照普通表格的绘制方法来获得，其所使用的table浮动环境无法实现表格的换页接排功能，表格下方过长部分会排在表格第 1 页的页脚以下。为了能够实现长表格的转页接排功能，需要调用 longtable 宏包，由于长表格是跨页的文本内容，因此只需要单独的 longtable 环境，所绘制的长表格的格式如表 7-4 所示。

注意，长表格双语标题的格式。

表 7-2 中国省级行政单位一览

Table 7-2 Overview of the provincial administrative unit of China

名称	简称	省会或首府
北京市	京	北京
天津市	津	天津
河北省	冀	石家庄市
山西省	晋	太原市
内蒙古自治区	蒙	呼和浩特市
辽宁省	辽	沈阳市
吉林省	吉	长春市
黑龙江省	黑	哈尔滨市
上海市	沪/申	上海
江苏省	苏	南京市
浙江省	浙	杭州市
安徽省	皖	合肥市
福建省	闽	福州市
江西省	赣	南昌市
山东省	鲁	济南市
河南省	豫	郑州市

表 7-2（续表）

名称	简称	省会或首府
湖北省	鄂	武汉市
湖南省	湘	长沙市
广东省	粤	广州市
广西壮族自治区	桂	南宁市
海南省	琼	海口市
重庆市	渝	重庆
四川省	川/蜀	成都市
贵州省	黔/贵	贵阳市
云南省	云/滇	昆明市
西藏自治区	藏	拉萨市
陕西省	陕/秦	西安市
甘肃省	甘/陇	兰州市
青海省	青	西宁市
宁夏回族自治区	宁	银川市
新疆维吾尔自治区	新	乌鲁木齐市
香港特别行政区	港	香港
澳门特别行政区	澳	澳门
台湾省	台	台北市

此长表格 7-4 第 2 页的标题“编号（续表）”和表头是通过代码自动添加上去的，无需人工添加，若表格在页面中的竖直位置发生了变化，长表格在第 2 页及之后各页的标题和表头位置能够始终处于各页的最顶部，也无需人工调整， \LaTeX 系统的这一优点是 word 等软件所无法比拟的。

7.8.3 列宽可调表格的绘制方法

论文中能用到列宽可调表格的情况共有两种，一种是当插入的表格某一单元格内容过长以至于放不下的情况，另一种是当对公式中首次出现的物理量符号进行注释的情况，这两种情况都需要调用 `tabularx` 宏包。下面将分别对这两种情况下可调表格的绘制方法进行阐述。

7.8.3.1 表格内某单元格内容过长的情况

首先给出这种情况下的一个例子如表 7-2 所示。`tabularx` 环境共有两个必选参数：第 1 个参数用来确定表格的总宽度，第 2 个参数用来确定每列格式，其中标为 X 的项表示该列的宽度可调，其宽度值由表格总宽度确定。标为 X 的列

表 7-3 最小的三个正整数的英文表示法

Table 7-3 The English construction of the smallest three positive integral numbers

Value	Name	Alternate names, and names for sets of the given size
1	One	ace, single, singleton, unary, unit, unity
2	Two	binary, brace, couple, couplet, distich, deuce, double, doubleton, duad, duality, duet, duo, dyad, pair, snake eyes, span, twain, twosome, yoke
3	Three	deuce-ace, leash, set, tercet, ternary, ternion, terzetto, threesome, tierce, trey, triad, trine, trinity, trio, triplet, troika, hat-trick

一般选为单元格内容过长而无法置于一行的列，这样使得该列内容能够根据表格总宽度自动分行。若列格式中存在不止一个 X 项，则这些标为 X 的列的列宽相同，因此，一般不将内容较短的列设为 X。标为 X 的列均为左对齐，因此其余列一般选为 l（左对齐），这样可使得表格美观，但也可以选为 c 或 r。

7.8.3.2 对物理量符号进行注释的情况

为使得对公式中物理量符号注释的转行与破折号“——”后第一个字对齐，此处最好采用表格环境。此表格无任何线条，左对齐，且在破折号处对齐，一共有“式中”二字、物理量符号和注释三列，表格的总宽度可选为文本宽度，因此应该采用 tabularx 环境。由 tabularx 环境生成的对公式中物理量符号进行注释的公式如式 (7-1) 所示。

$$\ddot{\rho} - \frac{\mu}{R_t^3} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \rho}{R_t^2} - \rho \right) = \mathbf{a} \quad (7-1)$$

式中 ρ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对位置矢量；

$\ddot{\rho}$ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对加速度；

\mathbf{a} ——推力所产生的加速度；

\mathbf{R}_t ——目标飞行器在惯性坐标系中的位置矢量；

ω_t ——目标飞行器的轨道角速度；

\mathbf{g} ——重力加速度， $= \frac{\mu}{R_t^3} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \rho}{R_t^2} - \rho \right) = \omega_t^2 \frac{R_t}{p} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \rho}{R_t^2} - \rho \right)$ ，这里 p 是目标飞行器的轨道半通径。

由此方法生成的注释内容应紧邻待注释公式并置于其下方，因此不能将代码放入 table 浮动环境中。但此方法不能实现自动转页接排，可能会在当前页剩余空间不够时，全部移动到下一页而导致当前页出现很大空白。因此在需要转页处理时，还请您手动将需要转页的代码放入一个新的 tabularx 环境中，将原来的一个 tabularx 环境拆分为两个 tabularx 环境。

7.8.3.3 排版横版表格的举例

7.9 公式

与正常 L^AT_EX 使用方法一致，此处略。关于公式中符号样式的定义在 ‘hithesis.sty’ 有示例。

7.10 其他杂项

7.10.1 右翻页

对于双面打印的论文，强制使每章的标题页出现右手边为右翻页。规范中没有明确规定是否是右翻页打印。模板给出了右翻页选项。为了应对用户的个人喜好，在希望设置成右翻页的位置之前添加 \cleardoublepage 命令即可。

7.10.2 算法

我工算法有以下几大特点。

- (1) 算法不在规范中要求。
- (2) 算法常常被使用（至少计算机学院）。
- (3) 格式乱，甚至出现了每个实验室的格式要求都不一样。

此处不给出示例，因为没法给，在 <https://github.com/dustincys/PlutoThesis> 的 readme 文件中有不同实验室算法要求说明。

7.10.3 脚注

不在再规范①中要求，模板默认使用清华大学的格式。

7.10.4 源码

也不在再规范中要求。如果有需要最好使用 minted 包，但在编译的时候要添加 “-shell-escape” 选项且安装 pygmentize 软件，这些不在模板中默认载入，如果需要自行载入。

7.10.5 思源宋体

如果要使用思源字体，需要思源字体的定义文件，此文件请到模板的开发版网址 `github: https://github.com/dustincys/hithesis` 或者 `oschia:`

① 规范是指《哈尔滨工业大学研究生学位论文撰写规范》和《哈尔滨工业大学本科生毕业论文撰写规范》

表 7-4 不在规范中规定的横版表格
Table 7-4 A table style which is not stated in the regulation

$D(\text{in})$	$P_u(\text{lbs})$	$u_u(\text{in})$	β	$G_f(\text{psi.in})$
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089

<https://git.oschina.net/dustincys/hithesis> 处下载。

7.10.6 专业绘图工具

推荐使用 `tikz` 包，使用 `tikz` 源码绘图的好处是，图片中的字体与正文中的字体一致。具体如何使用 `tikz` 绘图不属于模板范畴。`tikz` 适合用来画不需要大量实验数据支撑示意图。但 R 语言等专业绘图工具具有画出各种、专业、复杂的数据图。R 语言中有 `tikz` 包，能自动生成 `tikz` 码，这样 `tikz` 几乎无所不能。对于排版有极致追求的小伙伴，可以参考 <http://www.texample.net/tikz/resources/> 中所列工具，几乎所有作图软件所作的图形都可转成 `tikz`，然后可以自由地在 `tikz` 中修改图中内容，定义字体等等。实现前文窝工规范中要求的图中字体的一致性的终极目标。

7.10.7 术语词汇管理

推荐使用 `glossaries` 包管理术语、缩略语，可以自动生成首次全写，非首次缩写。

7.10.8 \LaTeX 源码编辑器

推荐：(1) 付费软件 Winedt；(2) 免费软件 kile；(3) vim 或 emaces 或 sublime 等神级编译器（需要配置）。

7.10.9 \LaTeX 排版重要原则

格式和内容分离是 \LaTeX 最大优势，所有多次出现的内容、样式等等都可以定义为简单命令、环境。这样的好处是方便修改、管理。例如，如果想要把所有的表示向量的符号由粗体 `\mathbf` 变换到花体 `\mathcal`，只需修改该格式的命令的定义部分，不需要像 MS word 那样处处修改。总而言之，使用自定义命令和环境才是正确的使用 \LaTeX 的方式。

结 论

学位论文的结论作为论文正文的最后一章单独排写，但不加章标题序号。

结论应是作者在学位论文研究过程中所取得的创新性成果的概要总结，不能与摘要混为一谈。博士学位论文结论应包括论文的主要结果、创新点、展望三部分，在结论中应概括论文的核心观点，明确、客观地指出本研究内容的创新性成果（含新见解、新观点、方法创新、技术创新、理论创新），并指出今后进一步在本研究方向进行研究工作的展望与设想。对所取得的创新性成果应注意从定性和定量两方面给出科学、准确的评价，分（1）、（2）、（3）…条列出，宜用“提出了”、“建立了”等词叙述。

参考文献

- [1] 孙冬雪. 基于模型预测方法的机器人视觉伺服控制研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018: 9-10.
- [2] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control. I. Basic approaches[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(4): 82-90.
- [3] 王重阳, 黄药师, 欧阳峰, 等. 武林高手从入门到精通[C] // 第 N 次华山论剑. 2006.
- [4] 贾宝玉, 林黛玉, 薛宝钗, 等. 论刘姥姥食量大如牛之现实意义[J]. 红楼梦杂谈, 1800, 224: 260-266.
- [5] Chu Y. Hi!Thesis!,Harbin Institue of Technology[J]. Github, 2017, 001(0001): 000-999.

哈尔滨工业大学本科毕业设计（论文）原创性声明

本人郑重声明：在哈尔滨工业大学攻读学士学位期间，所提交的毕业设计（论文）《基于抓取点生成网络与视觉伺服的未知物体抓取算法研究》，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明，其它未注明部分不包含他人已发表或撰写过的研究成果，不存在购买、由他人代写、剽窃和伪造数据等作假行为。

本人愿为此声明承担法律责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

致 谢

衷心感谢导师 XXX 教授对本人的精心指导。他的言传身教将使我终生受益。

.....

感谢哈工大 L^AT_EX 论文模板 hiThesis !