# 第一章 绪论

## 1.1 选题的背景和意义

### 1.1.1 选题的背景

近年来，随着人脸识别技术的迅速发展，越来越多的基于人脸识别的应用进入了日常生活领域。从人脸识别考勤系统、人脸识别门禁系统等较为传统的人脸识别应用，到新近流行起来的“刷脸”支付的手机app、“刷脸”取款的ATM，人脸特征凭借着其方便、友好的交互方式，迅速取代了其他的冗余、繁琐的验证方式。但目前，绝大多数的人脸识别系统都把研发重心放置于身份识别的准确性以及算法效率上；却忽视了人脸识别的安全性问题，即——输入的人脸可以是非真实的脸（包括高分辨率的彩色打印照片、3D打印的人脸模型、人脸面具等），使用者以此可以仿冒他人身份通过人脸识别系统，对后续的应用安全性构成了极大地安全隐患。

任何一种验证系统，都会面临仿冒攻击的威胁。应对的方式无外乎以下两种：（1）通过保护验证信息，使仿冒者不易获取；（2）通过验证系统本身来鉴别验证信息是否有效。前者的主要应用场景就是密钥验证系统（包括对称密钥以及非对称密钥），使用此方式来保护验证系统对密钥持有者的要求较高，且密钥本身不易被他人获取。由于人脸的特殊性，它作为日常生活中人类的最重要的身份标示，被广泛地传播，极容易被他人获取；所以对于人脸验证系统而言，通过验证系统本身来鉴别验证信息的可靠性是唯一的解决方案。

因此，用于增强人脸识别系统的安全性的人脸活体验证技术受到了越来越多人的关注。人脸活体验证技术旨在通过人脸信息来验证目标的合法性，更加具体的说，即在传统的人脸识别系统之前，增加一道防火墙，所有试图进行人脸验证的输入都将首先进行人脸活体验证，通过验证的输入才能继续进行人脸识别，否则就认为是非法输入，从而拒绝访问。

### 1.1.2 选题的意义

信息安全的重要性和敏感性以及无需赘述。在人脸识别领域，使用者不仅仅需要方便快捷地进行身份验证，更希望验证系统能够保证其身份的安全性，即不被仿冒者盗用。人脸活体验证系统是一个添加在人脸识别系统之前的认证模块，采用带有人脸活体验证模块的人脸识别系统有助于在保证信息真实有效并且可以使用的情况下大大提高人脸认证的效率。传统的人脸识别中，其可欺骗性会导致系统运行的结果不可靠等非预期性结果。所以在高敏感性的应用环境中，对于机器识别的结果，还需要人工进行筛查纠错，这就直接降低了人脸识别系统的实用性。因为动用人力来进行筛查纠错不仅成本高，而且效率极其低下，也容易发成错误。

本次课题就是针对这一应用环境，通过图像信息来对输入信息的合法性进行验证，旨在通过尽可能少的交互量以及时间，最大限度地提高伪造人脸的识别率（即最大限度地提高伪造人脸成功的成本）。

综上所述，人脸活体验证系统具有非常广阔的应用场景，人脸活体验证技术能够为人脸识别系统提供可靠的输入数据，使人脸识别系统的应用范围得到进一步的拓展。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 人脸活体验证算法研究现状

随着人脸识别技术的成熟，在2000年左右，活体验证技术逐渐被各大领域重视。人脸活体验证技术的目标是通过一幅（组）人脸照片来判断照片中的人脸是否为真实的人脸，而非模型或者照片。

Herbert Bay等人于2006年提出了一种基于SFM（Structure from Motion）的活体检测模型。该模型通过定位眼睛、嘴巴等显著位置来预测特征点的三维深度，从而实现判断活体的方法。Klaus Kollreider等人于2009年提出了利用光流（Optical Flow）来分析人脸各部位的移动量，最终进行活体检测的方法。孙霖于2010年提出了利用人脸识别进行多模活体验证的概念。其思想大多是将多个检测源的数据进行混合，然后计算加权检测结果，来进行评判。

李翼于2011年采用高斯差分（Difference of Gaussian, DoG）特征结合稀疏低秩双线性逻辑斯特回归的方法，在NUAA数据库上获得了很高的准确率。杨健伟于2014年提出了基于运动一致性的活体检测的方法，通过计算微纹理，计算脸部与背景的运动一致性。为人脸活体检测提供了新的方向。曹瑜于2014年提出了局部二值特征（Local Binary Pattern, LBP）结合卡方统计量来判断活体人脸的方法，使用该方法能够有效提高检测的准确率。刘华成于2014年提出了使用奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）与HSV直方图的方法用来检测活体，具有较高的鲁棒性。

由于活体检测的巨大市场，工业界也推出了很多了里程碑式的产品。例如2012年，由北京旷视科技推出的Face++，在LFW评测集上连续创造世界纪录，并且在人脸活体检测上，也有较为出色的表现。不过目前Face++仅以API调用的形式为开发者提供服务，并没有公开其实现算法。

### 1.2.2 人脸特征点定位算法研究现状

人脸特征点定位技术的目标是通过一幅人脸图片，得到其中人脸的语义特征点位置的技术。其结果的准确性通过如下误差函数来衡量：

|| S – SGround True||2

其中S是指通过预测得到的人脸特征点位置，SGround True表示实际的人脸特征点位置，但由于在预测阶段，SGround True是未知的，因此不能直接通过最小化误差函数来得到S。现阶段有两类方法，分别从两个不同的角度去得到S，因此绝大多数主流的人脸特征点定位算法都可以被分为如下两类：基于最优化算法的人脸特征点定位算法以及基于回归算法的人脸特征点定位算法。

基于最优化算法的人脸特征点定位需要再设计一个能量函数，该能量函数要求与上述误差函数相关性大，通过最优化该能量函数来减少误差。此类方法的结果误差直接取决于能量函数是否能够反映误差函数的变化以及能量函数能否被最优化。例如由Timothy F. Cootes等人于2001年提出的AAM（Active Appearance Models）算法就是典型的基于最优化算法的人脸特征点定位算法。AAM算法通过训练得到一个表观模型（Appearance Model）；然后在预测阶段，使用该模型最小化纹理误差（Texture Residual）来达到减少误差的目的。但是，由于表观模型的形变能力不强，所以对于训练集之外的人脸，不能做到很好的拟合；并且AAM算法受初始化数据的影响较大，鲁棒性不强。

基于回归的算法并不需要另外设计一个能量函数，此类算法是通过训练得到回归器，在预测阶段直接通过输入映射出输出结果，此类算法的普遍优点是能够有效利用大容量的训练集，从而提高回归质量。David Cristinacce等人与2007年提出的Boosted Regression框架结合ASM（Active Shape Models）算法以及Michel Valstar等人与2010年提出的Boosted Regression框架结合Graph Models的方法中，均采取为每个特征点训练一个回归器的策略。这种策略有两个很明显的劣势：不容易区分一些特征区分度不高的特征点（比如脸颊上的两个特征点）、没有考虑特征点之间的位置关系。Piotr Doll´ar等人于2010年使用所有特征点进行整体回归，并提出了级联回归器的算法框架，该方法通过贝叶斯概率模型逐步对结果进行修正。Xudong Cao改进了级联回归器的框架，并且引入了新的语义特征，在人脸特征点定位上取得了非常好的效果。

## 1.3 本人主要工作

* 研究人脸活体验证系统的定位，了解相关的基本功能需求；并且通过阅读大量文献，掌握国内外有关人脸活体验证的发展现状。
* 根据系统的应用场景，明确系统角色，确定最后的项目功能性需求以及非功能性需求。
* 通过项目的需求分析，确定项目的整体架构以及相关系统功能模块的划分。
* 根据需求分析，尝试进行核心算法的实现并且通过不同算法的组合来达到项目需求，并最终确定核心算法流程。
* 细化项目的各个模块设计，抽象出各个模块之间的通信接口，按照软件工程的项目规范把所有模块实现。
* 搭建系统的测试环境，并根据系统的功能性需求以及非功能性需求进行完善的测试。

## 1.4 论文组织结构

本论文的内容结构安排如下：

第一章为绪论。该章论述了人脸活体检测系统的项目背景和项目意义，并且介绍了现阶段工业界和学术界有关人脸活体检测以及人脸特征点定位的最新成果。

第二章为相关技术介绍。主要介绍了本项目涉及的一系列算法原理以及实现框架，其中包括半朴素贝叶斯模型、随机蕨回归算法、显式形状回归算法、Node.js以及MongoDB。

# 第二章 相关技术介绍

## 2.1 半朴素贝叶斯模型原理

半朴素贝叶斯模型（Semi-Naive Bayes Model）对朴素贝叶斯模型（Naive Bayes Model）的改进。该算法由Geoffrey I. Webb等人于2005年提出。该算法填补了朴素贝叶斯模型的两大缺陷：需要大量训练样本以及独立性假设与大部分特征不相符。假设输入的N维特征向量的形式为：f = (f1, f2, … , fN)，模型的输出类别为C∈{c1, c2, …, cK}。贝叶斯模型是一个通过计算后验概率并求出最大值所属的类别，并作为输出。贝叶斯模型的形式化表示为：

H(f) = argmaxk P(C=ck|f1,f2,…,fN)

使用贝叶斯公式可以将后验概率的形式变化为先验概率的形式：

H(f) = argmaxk P(f1,f2,…,fN | Ck) \* P(Ck)

在朴素贝叶斯模型中，假设所有的特征都是互相独立的，因此上述联合概率分布等于各个特征的先验概率的乘积，即为：

但是这个假设过于严格，在实际的应用中，该假设往往是不成立的，这就直接导致了朴素贝叶斯模型得出的结果与真实情况有较大的偏差。

半朴素贝叶斯模型取消了这个全局独立性假设，而是对特征进行分组，假设各个组内特征不独立，各个组间特征独立。假设N个特征被划分为L个组，每个组内含有S个特征，则上述的联合概率分布可以表示为：

通过计算每个组内的联合概率分布，并通过独立事件的组合来求得该先验概率，再通过最大化先验概率来得到整个模型的最终输出。

半朴素贝叶斯模型通过组内容量的大小来协调算法复杂度与准确度之间的关系。S的量级与算法准确度成正比，而L的量级与算法复杂度成正比。

## 2.2 随机蕨回归算法原理

随机蕨回归器是由Dollár等人在2010年首次提出。该算法将半朴素贝叶斯模型进行了应用到了回归器的设计上。随机蕨回归器采用了级联式回归的设计方式，由多个回归器共同来约束输出结果。更具体地说，随机蕨级联回归框架的每一级回归器都是对上一级回归器所做出的结果的一个修正。该算法不同于之前流行的大部分算法，采用参数化的约束来控制输出结果；在随机蕨回归算法中，最终的输出是所有的训练集的一种线性组合，由此保证了在不依赖参数化约束模型的情况下，依然能够控制输出结果。

以图像的特征点定位的应用为例，随机蕨回归器在特征选择上，采用的是像素差异特征。选取的是随机生成的N对像素对的强度差，组成原始的特征向量。其形式如下：

X = {x1, x2, … , xn}

通过随机采样，将特征的数量缩减至S个，并且在每次迭代时生成S个划分阈值，将S个经过随机采样的特征映射成S个二进制位。映射规则如下：

在训练时，通过将S个二进制位的映射，可以把S维特征映射为0-2S-1之间的一个整数d，将该训练集存于序号为d的桶中，完成第一个回归器的训练。随后用第一个回归器预测出所有训练集图片的特征点，并将该误差作为第二级回归器的回归目标，以此类推，完成所有回归器的训练。

在预测时，对于每个回归器，对输入图片进行取“像素差异特征”后，再进行随机采样，并将映射的到的序号为d的桶中的所有回归目标中，选取一个残差最小的回归目标，作为本次回归器的输出。形式化表示如下：

其中，函数d(Si,S)表示第一个回归目标与序号为d的桶中所有回归目标的残差。

在预测时，对于整个级联回归器，将输入图片依次通过所有的回归器，将每个回归器输出的结果进行累加，即为整个级联回归器最终的输出。形式化表示如下：

RFinal = R0 + R1 + ... + RS

随机蕨回归器的训练，预测速度都非常快，并且由于采用了级联的方式约束结果，随着级联回归器数量的增加，回归器输出的误差粒度逐渐细化，可以得到比较准确的输出结果。由于级联框架中的每一级回归器的回归目标为上一级回归器与真实形状之间的残差，因此采用随机蕨这种较弱的回归器亦能取得较好的回归效果，并且能够极大地提高回归速度。

同样得益于级联回归的设计，经过Dollár等人证明，随机蕨回归器可以在每一个阶段以指数级的速度逐步收敛，因此该算法具有非常强的的鲁棒性，可以在不同的输入的情况下得到稳定的输出结果。

## 2.3 显式形状回归算法原理

显式形状回归（Explicit Shape Regression）算法由Xudong Cao等人于2014年提出。该算法也是以随机蕨回归算法为基础，并且在全局特征选取，整体架构设计，以及初始化数据等方面进行了大量改进，使其能够非常高效准确地进行人脸特征点定位。

在全局特征选取上，Xudong Cao提出了形状索引特征（Shape Indexed Feature）。形状索引特征相较于原始的随机蕨回归算法的随机像素差异特征，能够保持非常良好的语义一致性。更具体地说，随机像素差异特征是在全局坐标系上随机地取点对，并计算像素的强度差作为特征，各个像素对的坐标是以全局坐标系下的绝对坐标来表示的，不能根据输入图像的实际情况进行改变。形状索引特征同样是从像素差异特征改进而来：首先在全局坐标系下随机选取点对，而每个点对并非以绝对坐标的形式保存，而是保存为距离最近的特征点的相对坐标；在实际计算特征之时，再通过上述方式逆向映射会实际的坐标点。因此形状索引特征的各个坐标能根据不同的输入形状进行调整，从而保证特征的语义一致性，增强算法的准确率以及鲁棒性。

在整体架构的设计上，该算法创造性地使用了2层回归器的设计，其结构如下：

其中，高层次的回归器Rt被称为外层回归器，而低层次的回归器rk被称为内层回归器。与上一节提到的级联回归的思想类似，显式形状回归的每一层也采用级联式的设计：每一个回归器的输入是上一个回归器的输出，每一个回归器的回归目标是上一个回归器的的结果与真实形状的残差。但由于单个内层回归器的回归能力很有限，并不能很好地纠正上一层的误差，并且容易造成过拟合的现象。因此，Xudong Cao采用了两层回归器的结构：外层回归器形状索引特征的初始化，内层回归器使用该形状索引特征进行回归，即同一个外层回归器下属的内层回归器均使用相同的形状索引特征，这样能够提升训练与预测的速度，并且使得结果更加准确。

此外，显式形状回归还提出了初始数据扩增来优化回归结果。由于级联式的回归器的特点所致，对于每一个输入，都需要有一个初始化形状作为第一个回归器R0的输入。之前的方法无外乎采用所有训练集的均值形状或者选取某一个全局残差最小的形状作为初始形状输入。这会导致训练得到的回归模型的泛化能力不足，并且由于随机蕨算法的随机性，还会导致输出结果的不稳定（对于同样的输入，回归得到差距较大的输出形状）。Xudong Cao采用了初始化数据扩增的方法：在训练时，随机地采用多个形状作为初始形状进行回归，可以大幅度增强回归模型的泛化能力，有效避免过拟合；在预测时，将通过多个初始形状进行回归得到的结果的均值进行输出，能够提高输出结果的稳定性。

## 2.4 主流人脸数据库介绍

* BioID：BioID数据库由Oliver Jesorsky等人于2001年提出，该数据库包含了1521张人脸图片，每张人脸照片采用20个特征点进行标注，该数据库的人脸均由相同距离的正脸在实验室环境下采集而成。
* LFPW：LFPW（Labeled Face Parts in the Wild）由XX于2011年提出，中包含了1100张训练图片以及300张测试图片，每张人脸图片使用68个特征点来标注。LFPW人脸库中包含大量的复杂表情、姿势、光照等条件下采集的相片，对于人脸识别算法具有一定的挑战性。
* LFW87：LFW87数据库由XX于20008年创建，其中大量图片提取自LFW（Labeled Face in the Wild）数据库，该数据库中包含4002张训练图片以及1716张测试图片，每张人脸图片使用87个特征点来标注。
* Helen：Helen数据库由XX于2012年创建，该数据库采用2330张高分辨率的人脸图片，每张人脸图片使用194个特征点进行标注。由于该数据库的高分辨率、多特征点的特点，使得该数据库训练出来的模型能够更好地利用图像的细节信息，使结果更加准确。

## 2.5 Node.js介绍

Node.js是一款流行的高性能开源的网络服务与应用平台，使用JavaScript作为脚本语言。Node.js的构建基础是Google公司的V8引擎（Chrome JavaScript Runtime V8），而Google的V8引擎亦是目前全球效率最高的JavaScript解释器之一，这使得Node.js拥有非常好的并发性能以及非常快的执行速度。

Node.js能够提供一个使用事件驱动来实现异步开发的优秀解决方案。由于Node.js中绝大多数的API都是采用基于事件触发的异步调用模式设计的，非常适合进行高并发、高IO、低运算的网络开发。

Node.js旨在提供一种可伸缩、可扩展的高性能运行环境，以解决WEB服务器的性能瓶颈问题。由于传统的WEB服务器需要为每一个访问链接创建一个处理线程，会导致服务器只能响应十分有限的请求。而Node.js由于采用了单进程、单线程的事件驱动的设计方式，把每个新的请求加入事件循环（event loop）的轮询队列而非创建新线程，这个方式极大地减少了系统开销，提高了系统的处理并发连接的能力。

Node.js还是用模块化的设计来划分不同的功能包，这一特点也在很大程度上提高了开发效率。例如HTTP模块内封装了大量HTTP以及TCP/IP协议栈的操作函数，采用Node.js可以有效降低服务器的资源消耗，提高脚本的性能。

虽然Node.js与2013年才正式发布，但是已经得到了业界的一致认可，其中国际著名的社交网站LinkedIn、国际著名的开源项目托管网站GitHub和国内的阿里巴巴都把Node.js作为项目的重要组成部分。

## 2.6 MongoDB介绍

MongoDB是一款分布式的非关系型（NoSQL）数据库系统，该数据库系统于2009年发布，采用C++语言实现。MongoDB作为一款非关系型数据库，更加适合分布式应用的场景，与传统的关系型数据库相比，有如下优点：

* 高性能：相比于关系型数据库的查询缓存（针对每一条查询语句设置缓存信息，每当查询的目标发生改写，会导致缓存失败），MongoDB的缓存粒度更加细，每当数据改写后能够及时更新缓存，提高查询性能。此外，由于MongoDB并不支持关系型数据库的事务操作，可以进一步减少操作时间，提升性能。
* 易扩展性：MongoDB采用的是面向文档存储的数据模型，这是其非常容易在多个服务器之间进行数据分割；此外，由于MongoDB的各个集合之间取消了外键的约束，因此也方便数据进行扩展。
* 高灵活性：MongoDB采用键值对的形式进行数据存储，并不要求每个表项拥有相同的字段，可以灵活地存取数据而避免频繁地增加减少字段。

# 第三章 系统需求分析

## 3.1 系统的设计目的

## 3.2 系统功能性需求

### 3.2.1 离线训练数据

### 3.2.2 采集摄像头数据

### 3.2.3 目标眨眼检测

### 3.2.4 目标张嘴检测

### 3.2.5 目标摇头检测

## 3.3 系统非功能性需求

### 3.3.1 实时性

### 3.3.2 健壮性

### 3.3.3 可维护性

# 第四章 系统概要设计

## 4.1 系统整体架构

## 4.2 系统功能模块设计

# 第五章 系统详细设计

## 5.1 客户端详细设计

### 5.1.1 控制器模块设计

### 5.1.2 通信模块设计

### 5.1.3 图像采集模块设计

### 5.1.4 人脸特征点定位模块设计

### 5.1.5 眨眼检测模块设计

### 5.1.6 张嘴检测模块设计

### 5.1.7 摇头检测模块设计

## 5.2 服务器端详细设计

### 5.2.1 模型模块设计

### 5.2.2 控制器模块设计

### 5.2.3 视图模块设计

# 第六章 系统部署与测试

## 6.1 系统功能测试

## 6.2 系统性能测试

# 第七章 总结

## 7.1 论文总结

## 7.2 个人收获

## 7.3 改善空间

# 参考文献

1. Geoffrey I. Webb, Janice R. Boughton, Zhihai Wang. Not So Naive Bayes: Aggregating One-Dependence Estimators. Machine Learning(ML), 58, 5–24, 2005 提出半朴素贝叶斯定理
2. Piotr Doll´ar, Peter Welinder, Pietro Perona. Cascaded Pose Regression. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2010 提出随机蕨回归器
3. Mustafa Özuysal, Michael Calonder, Vincent Lepetit, Pascal Fua. Fast keypoint recognition using random ferns. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence(PAMI), 2010 首次提出random fern, 提出随机蕨分类器
4. 蒋秀鹏. 基于NodeJS的数字标牌系统的设计与实现[硕士学位论文]. 天津: 南开大学, 2014 参考了一些Node.js的概念
5. 王越. 基于nodejs的微博系统的设计与实现[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2014 参考了一下nodejs以及mongodb的概念
6. Xudong Cao, Yichen Wei, Fang Wen, Jian Sun. Face Alignment by Explicit Shape Regression. International Journal of Computer Vision(IJCV) 107:177–190, 2014 提出了ESR算法
7. Oliver Jesorsky, Klaus J. Kirchberg, Robert W. Frischholz. Robust Face Detection Using the Hausdorff Distance. Third International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication, 2001 提出了BioID数据库
8. Peter N. Belhumeur, David W. Jacobs, David J. Kriegman, Neeraj Kumar. Localizing Parts of Faces Using a Consensus of Exemplars. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2011 提出了LFPW数据库
9. Lin Liang, Rong Xiao, Fang Wen, Jian Sun. Face Alignment Via Component-Based Discriminative Search. European Conference on Computer Vision(ECCV), 2008 提出LFW87数据库
10. Vuong Le, Jonathan Brandt, Zhe Lin, Lubomir Bourdev. Interactive facial feature localization. European Conference on Computer Vision(ECCV), 2012 提出Helen数据库
11. 仝义明, 黄蔚, 李戴维. 基于MongoDB的信息集成系统的设计与实现. 信息技术: 1009-2552(2015)02-0125-05, 2015 参考了MongoDB的简介
12. Iain Matthews, Simon Baker. Active Appearance Models Revisited. International Journal of Computer Vision(IJCV), 60(2), 135–164, 2004 AAM参考文献1
13. Patrick Sauer, Tim Cootes, Chris Taylor. Accurate Regression Procedures for Active Appearance Models. British Machine Vision Conference(BMVC), 2011 AAM参考文献2
14. Jason Saragih, Roland Goecke. A Nonlinear Discriminative Approach to AAM Fitting. International Conference on Computer Vision(ICCV), 2007 AAM参考文献3
15. Timothy F. Cootes, Gareth J. Edwards, Christopher J. Taylor. Active Appearance Models. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,23(6), 681–685, 2001 AAM参考文献4
16. David Cristinacce, Tim Cootes. Boosted Regression Active Shape Models. British Machine Vision Conference(BMVC), 2007 基于回归的传统算法1
17. Michel Valstar, Brais Martinez, Xavier Binefa. Facial Point Detection using Boosted Regression and Graph Models. IEEE Conference on Computeer Vision and Pattern Recognition, 2010 基于回归的传统算法2
18. Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision(ECCV), 2006 提出了一种基于SFM（Structure from Motion）的活体检测模型
19. Klaus Kollreider, Hartwig Fronthaler, Josef Bigun. Non-intrusive liveness detection by face images. European Conference on Computer Vision(ECCV), 2009 利用光流来分析人脸各部位的移动量，最终进行活体检测
20. 孙霖. 人脸识别中的活体检测技术研究[博士学位论文]. 杭州：浙江大学, 2010 提出了利用人脸识别进行多模活体验证的概念
21. 杨健伟. 面向人脸识别的人脸活体检测方法研究[硕士学位论文]. 北京：北京邮电大学, 2014
22. 曹瑜. 活体人脸检测技术研究[硕士学位论文]. 北京：北京工业大学, 2014
23. 刘华成, 人脸活体检测关键技术研究[硕士学位论文].  宁波：宁波大学, 2014

# 致谢