目录

[1 绪论 3](#_Toc134541224)

[1.1 项目背景与意义 3](#_Toc134541225)

[1.2 研究与产业现状 3](#_Toc134541226)

[1.2.1 研究现状 3](#_Toc134541227)

[1.2.2 产业现状 4](#_Toc134541228)

[1.2.3 现状分析与项目目标 4](#_Toc134541229)

[1.3 文章结构 4](#_Toc134541230)

[2 模型搭建中的关键问题与解决方案 5](#_Toc134541231)

[2.1 关键问题分析 5](#_Toc134541232)

[2.1.1 深度学习模型搭建 5](#_Toc134541233)

[2.1.2 数据集选择 5](#_Toc134541234)

[2.1.3 实际场景展示 5](#_Toc134541235)

[2.2 方案设计 5](#_Toc134541236)

[2.3 技术选型 5](#_Toc134541237)

[3 手部运动估计模型设计 6](#_Toc134541238)

[3.1 环境说明与搭建 6](#_Toc134541239)

[3.1.1 环境选择 6](#_Toc134541240)

[3.1.2 环境配置 6](#_Toc134541241)

[3.2 Artiboost模型 6](#_Toc134541242)

[3.2.1 模型训练与测试 6](#_Toc134541243)

[3.2.2 输入部分 6](#_Toc134541244)

[3.2.3 输出部分 6](#_Toc134541245)

[3.3 TriHorn模型 6](#_Toc134541246)

[3.3.1 模型训练与测试 6](#_Toc134541247)

[3.3.2 输入部分 6](#_Toc134541248)

[3.3.3 输出部分 6](#_Toc134541249)

[3.3.4 模型优化 6](#_Toc134541250)

[4 应用软件设计 7](#_Toc134541251)

[4.1 模块设计 7](#_Toc134541252)

[4.1.1 数据集生成 7](#_Toc134541253)

[4.1.2 Socket通信与优化 7](#_Toc134541254)

[4.1.3 摄像画面截取 7](#_Toc134541255)

[5 结果展示与分析 7](#_Toc134541256)

[5.1 模型训练结果 7](#_Toc134541257)

[5.2 模型对比实验结果 7](#_Toc134541258)

[5.3 数据集对比实验结果 7](#_Toc134541259)

[6 总结 7](#_Toc134541260)

[6.1 总结 7](#_Toc134541261)

[6.2 趋势展望 7](#_Toc134541262)

# **1 绪论**

## 项目背景与意义

手势作为一种新型的交互手段可以实际应用于一些具有交互性质的场景，例如：文化遗址、博物馆等等。传统的展馆多数是以图片和文字作为交互的载体，能够传达给的信息十分有限。可能由于时代或环境因素，人们无法体会到图片和文字信息背后所包含的内容，而手势作为一种新型的交互工具，可以很大程度地弥补图片和文字的不足。随着技术的发展以及人们对于信息获取需求的不断多样化，基于AR、VR的交互式体验逐渐开始流行起来。

而交互最大的难点就在于姿态估计，所以如何提升手部信息的精准性能够大幅提高交互式体验在实际场景的可行性。在现有的体感交互设备中，大多都是专业且昂贵的动作捕捉设备，可以通过识别人体动作、手势等信息，实现对计算机的控制，从而实现更加自然、只管的人机交互方式，通常需要在手部绑定特定的传感器来识别手势。而神经网络依靠训练数据来不断学习和随时间推移提高自身精度。因而可以做到无需专业设备，通过训练得出的网络来估计手势姿态，大大降低了交互成本，同时还具有较高的泛用性。

虚拟手部生成数据集的方法能够快速、高效地获取到大量的手部数据，避免了复杂的专业设备的使用。这些虚拟空间手部数据同样具有有效的手部信息，能够快速地在虚拟空间中生成想要的数据集，避免了现实数据采集的限制和约束。

## 1.2 研究与产业现状

### **1.2.1 研究现状**

随着深度学习、神经网络和图像处理的不断发展，近年来，计算机视觉领域出现许多优秀的算法架构，使得计算机视觉技术正在广泛被使用，从自动驾驶汽车到医疗保健再到安全系统，计算机能够做一些更为精准的数据预测与数据增强。

**卷积神经网络。**卷积神经网络避免了对图像的复杂前期预处理，可以直接输入原始图像。Alex Krizhevsky、Hinton等人在2012年提出的AlexNet[1], 首次提出了Relu激活函数以及最大化池。相比于Sigmoid激活函数，训练效率成倍提升，从而获得了当时ImageNet[2]竞赛冠军。Kaiming He等人于2015年提出的Resnet[3], 解决了深度神经网络的“退化”问题，即使用浅层直接堆叠成深层网络，不仅难以利用深层网络强大的特征提取能力，而且准确率会下降。由于Resnet[3]的泛用性较高，因此许多数据增强模型会优先选择Resnet作为预训练模型，减少大量的训练资源和时间。

**对比学习**。对比学习是无监督学习中的重要分支。采用监督学习方法训练神经网络，需要采集大规模的数据集，但是数据集收集的成本非常高，例如用于深度卷积神经网络训练的ImageNet数据集中包含约130万张标签图像，人工标记这些图像需要花费大量的时间。 用于训练 卷积神经网络进行视频动作识别的Kinetics数据集中包含50万个视频，且每个视频持续时间约10s，这需要花费更长的时间对数据集进行注释。无监督学习孕育而生，解决了训练的数据集问题。在2019年MoCo[4]的提出使得原先不被看好的无监督对比学习一下子成为了最热门的研究方向之一。MoCo模型无需提前标注数据集的正确语义信息，计算机只需要区别数据之间的是否类似，从而开拓了对比学习模型。在之后的2020年，随着SimCLR[5]、SWaV[6]更多的框架被提出，人们发现无监督对比学习是可行且高效的，相比于原先的有监督学习需要大规模的数据集以及非常耗时的数据集标注来说，无监督学习就很好的避免了这些缺点，通过学习数据中的语义信息、特征信息来不断学习，从而应用在下游的任务中。

### 1.2.2 产业现状

由于计算机视觉现阶段主要还停留在科研阶段，实际实质化产出内容较少，因此存在一个巨大的市场缺口。实际场景中许多地方都需要使用计算机视觉相关的技术，例如：工业领域、医疗诊断、图像识别等等。在人脸识别领域，通过计算机进行支付验证、人脸跟踪的技术已经相对成熟。在自然语言处理领域，由于gpt-3[7]的出现，基于深度学习的大模型基本已经能够与人正常交流，并开始逐步进入了市场应用，被人们广泛使用。现今随着类似于gpt-3[7]的大模型越来越流行，未来会有更多领域使用大模型的方法进行训练和测试，其中也包括计算机视觉。但是由于手势的复杂性导致目前暂时没有一个非常优秀的网络模型来解决姿态估计的问题，因此整个手势识别领域现阶段还只是处于研究阶段。

### 1.2.3 现状分析与项目目标

近年来，在学术领域提出的许多前瞻性的新方法，造就了计算机视觉的飞速发展，但是由于多数模型的研究都只停留在理论层面的结论，没有考虑在实际场景中的应用，从而导致缺少与工程领域的对接，需要做大量的修改才能满足工程上的需求。因此我们的方法是在前人的基础上进行重构，使用其模型的核心思想：整个神经网络模型，然后将整个模型进行封装，从而能够应用到实际场景中。

本项目的目标是构造一个面向实际场景的应用。首先需要建立数据集生成模型，该模型使用骨骼动画化驱动虚拟手渲染生成数据集并且针对神经网络模型的输入要求批量采集数据。基于如上数据集，交由手部-物体姿态估计算法模型进行训练，然后封装成一个手部姿态估计工具。最后应用于下游的实际应用中，根据输入的手势数据在应用的虚拟场景中实时显示和交互。

## 1.3 文章结构

本文总共分为六个章节

第一章：绪论。

第二章：关键问题分析与解决

第三章：神经网络模型设计

第四章：模块设计

第五章：实验对比与分析

第六章：总结与展望

# 2 手势运动估计的关键问题与解决方案

## 2.1 关键问题分析

手势运动估计的数据集生成与应用一共分为三个模块，分别为数据集生成、手势估计模型以及实际场景应用。而其中，手势估计模型是三者的核心。对应数据集的生成需要首先分析模型的输入参数，根据输入参数批量生成数据集，然后放入模型中进行训练。实际场景应用则是在模型训练完成后，使用最新的模型参数信息进行估计，最后得到的结果放入场景中进行展示和交互的过程。因此，手势估计模型设计至关重要，只有完成整个模型的训练、测试以及重构才能继续完成其他两个模块的工作。

### 2.1.1 深度学习模型原理

由于在此之前并未学习过深度学习的模型原理，所参考的论文也没有对基础知识的详细描述，因此对模型和论文中的大量方法和术语并不清楚。在前期工作中需要了解大量的深度学习的基础知识，从最简单的有监督学习开始，再到需要使用到神经网络来解决的复杂问题。之后再进一步了解各种神经网络模型，以及网络每一层所使用的方法。

### 2.1.2 数据集选择

神经网络模型通常都会使用一些开源的数据集进行训练和测试，从而有助于将自身的网络模型与他人的模型相比较，以此来说明自身模型的误差率和稳定性。但是通常这些开源的数据集并非是直接将图片的信息完整地输入至网络模型中，相反，往往在输入前已经对图片进行了一些预处理操作，例如：在输入前对图像预分割，在训练过程中模型只会关注边界框内的像素信息，减少图像其他区域的信息干扰。但是在没有其他工具的帮助下，使用摄影设备截取的画面不仅仅包含手势信息，还包含其他物体和环境元素。当截取到的图片信息直接交由网络模型训练时，模型将无法准确得到其中的手势信息，导致最后训练的结果与实际值相差甚远。

### 2.1.3 实际场景展示

神经网络模型在训练时都是使用2D的数据集进行训练，而实际场景中展示手势关节信息需要3D数据，因此需要将2D的关节数据转换为3D的关节数据。

## 2.2 方案设计

首先是模型框架原理问题。在项目前期工作中，需要清楚了解基础的深度学习基本框架、基本原理，了解整个模型的流程以及每一个步骤的详细内容。在掌握了一些基础知识后，结合论文，搭建环境，进行整个模型的可行性分析和测试结果的准确性分析。若模型的可行性出现问题，缺少相关的文件或者参数，那么应该尝试寻找相应文件或是更换模型。这一问题普遍存在，虽然所选的项目模型是开源、可供下载的，但可能存在只提供最后的测试模型，而如何训练模型的部分并没有开源。当完成可行性和准确性分析后，就需要结合论文，详细分析模型的代码。对于一些封装性较好的模型，则更加需要仔细分析，寻找模型输入数据的传输方式，以及神经网络最后输出结果的方式。当输入输出都完成后，就可以开始下一步生成数据集和对接下游应用的工作。

其次是数据集生成问题。在虚拟场景中生成数据集很好地解决图片预处理的问题。通过在虚拟场景中渲染手势来批量生成数据集，与实际场景的数据集生成相比，虚拟场景可以根据模型的特定需求，更加方便地调整渲染背景，避免了其他元素的干扰。同时在虚拟场景中无需实际的摄影设备和场地，也避免了标签数据的标注成本，大大减少了数据集制作的难度。

## 2.3 技术选型

本项目涉及深度学习相关方法，结合论文所推荐配置，因此选择Ubuntu操作系统。虽然越来越多的深度学习工具库开始支持Windows系统，但是Linux系统具有更好的稳定性，可以更好的保证运行过程中的稳定性和安全性。其次，Linux系统可以实现更高效的GPU加速，尤其是在多GPU环境下，Linux系统可以更好地利用GPU资源进行并行计算和训练。此外，许多深度学习相关的工具和库都是基于Linux系统开发的，并且Linux环境下的命令行操作也是非常强大和灵活的，这些特性为深度学习的研究和开发提供了更强大的支持。另外，大多的深度学习工具库都支持使用cuda加速运算，利用Nvidia GPU的并行计算引擎，使GPU可以进行超复杂的运算。

主流的深度学习框架有TensorFlow和PyTorch。TensorFlow采用数据流图进行计算，计算图中节点代表数学运算，而图的边表示节点间的数据[8]，具有较强的可扩展性，同时支持多语言编程，具有出色的社区服务支持。但是其缺点也非常明显，整个框架非常庞大，底层的运行机制极其复杂，从而造成学习难度较大；再者框架的接口变动较为频繁，使用者需要经常关注和修改框架接口的调整。与之相比，PyTorch框架更加适合开发者[8]：第一，PyTorch 使用了动态图框架。动态图框架中计算图在运行过程中构建，因此动态图框架更易调试，具有更高的灵活性。第二，设计简洁。PyTorch在设计上有张量、变量、模块 三个抽象层次，与拥有众多抽象概念的TensorFlow相比，PyTorch的设计更为简洁易于理解。并且PyTorch在代码量上也更为简洁，易于理解。第三，PyTorch具有速度优势。许多测试中，PyTorch速度快于TensorFlow等框架，同样的算法在PyTorch框架上实现速度可能快于其他框架。第四，极强的易用性。PyTorch框架在目前所有深度学习框架中易于学习，由于采用了命令式编程，其代码与Python等编程语言相似，学习门槛低，且继承了Torch框架灵活易用的接口设计，符合人类的思维方式。

（图）

链接：[(34 封私信 / 66 条消息) PyTorch到底好用在哪里? - 知乎 (zhihu.com)](https://www.zhihu.com/question/65578911/answer/2529374967)

# 3 手部运动估计模型设计

## 3.1 环境说明与搭建

整体环境框架为Ubuntu 20.04 + Cuda 11.1 + PyTorch 1.8.1。因为Ubuntu操作系统默认的GPU驱动程序存在一些问题，所以需要首先卸载原先的驱动程序，然后自行安装适合网络模型的GPU驱动程序。需要注意的是，GPU 驱动程序、Cuda加速平台与PyTorch之间存在版本对应关系，所以在前期环境配置时必须严格遵循论文模型的安装配置。

环境框架安装完成后，需要先检查GPU驱动程序安装是否正确。通过在命令行中输入(添加驱动程序页面)

（图）

其次，检查Cuda 和 Pytorch是否安装成功。在命令行中打开python编写一个简单的调用PyTorch工具库进行运算的程序，查看是否能够成功输出结果。

（图）

接下来安装网络模型所需要的第三方依赖库。在模型主目录的requriememts.txt中包含了所有需要使用到的依赖，使用pip等python包管理工具进行统一安装。

（图）

## 3.2 Artiboost模型

ArtiBoost是一种轻量级的在线数据增强学习模型，从数据的角度提高关节手-物体的姿态估计[9]。

从单独一个RGB图像中提取信息来估计关节三维手-物姿态是一个到目前为止都难以解决和具有挑战性的问题。由于模型在训练时需要尽可能地满足数据集的多样性，而手势-物体姿态的信息又比较繁多，这就需要包含不同手姿态、物体姿态和相机视点的大规模数据集。大多数真实世界的数据集缺乏这种多样性，最大原因在于物体的形状并非统一，使用手抓取不同的物体的姿态也是不同的，从而导致真实世界的书记无法包含太多的姿态特征，造成最后训练的模型泛用性较低，欠拟合。相比之下，合成数据集可以很容易地确保巨大的多样性，然后只从它们中学习是低效的，并且训练所需的时间成本非常大。但是先前探索合成数据集的工作已经多次证明了它在增强训练神经网络的真实数据方面的有效性[10][12]。因为合成数据可以很容易地涵盖不同的姿态和视角。这些工作的数据合成阶段与训练阶段分离，称为离线数据增强。然而，并不是每个手-物体结构都有助于训练手部-物体姿态估计模型。例如，类似的结构可能已经被观察过多次，那些容易识别的样本可能经常出现。因此，对于手部-物体姿态估计模型任务来说，在训练过程中不与模型重复交互的离线数据增强被认为是低效的。ArtiBoost将合成数据集与真实世界的数据集结合在一起，使用在线数据增强的方法，通过在训练过程中探索和合成两个步骤，有效地提高关节手-物姿态估计。在训练过程中，ArtiBoost交替执行数据探索和合成，基于合成手-物体配置和视点空间(CCV-space)覆盖各种手-物体姿态和摄像机视点，并通过挖掘策略自适应丰富当前难识别样本[9]。即使是一个简单的神经网络中也可以在HO3D数据集上超越之前基于Transformer[11]模型的效果。

问题定义。给定一个输入图像I∈RH×W×3，提取图像中的信息特征，观察单个手与某个对象交互。手势-物体姿态估计模型旨在学习预测3D手部关节位置的特定神经网络:Ph={pj}J j=1，对象质心位置:po和对象旋转:ro∈so(3) 三个关键信息，其中pj, po∈R3, J =21，H×W为分辨率。

模型框架。为了训练神经网络，首先需要准备一个真实世界的源数据集:Dreal作为初始数据。在训练过程中，ArtiBoost提出了合成手-物体结构和相机视角空间(称为CCV-Space)[9]来模拟手部与物体的交互动作，其中包含了模拟手势姿态的手部空间（C-Space）、模拟手势-物体交互的合成手部空间（CC-Space）以及使用相机记录手势-物体姿态的视角空间（V-Space），并从中采样手-物体-视角姿势三个维度。然后在合成阶段，将采样手和物体在采样视角方向上的多边形网格渲染为具有逼真纹理的RGB图像，形成一个采样权重池M。将采样权重池M与源数据集Dreal以一个权重值Mixture分批混合，得到的混合数据集放入手势-物体姿态估计学习框架中进行训练，以完成前向和后向传播。当训练完成时，ArtiBoost 根据数据挖掘模块更新采样权重池M，将训练损失作为反馈，进入探索步骤，挖掘当前难识别的样本，为下一轮训练做准备。

（框架图）

### 3.2.1 模型训练与测试

HO3D数据集。Artiboost模型一共有两个可用的开源数据集，分别为HO3D数据集和DexYCB数据集。两个数据集都可以用来进行模型训练和测试，但是在使用DexYCB数据集分析整个模型代码时，发现其数据集的输入方式较为复杂。如果之后参照DexYCB数据集重构代码可能会比较繁琐，不利于之后数据集的替换，因此选择HO3D数据集作为整个模型框架的输入数据。HO3D数据集中的图像包含了手以及与物体交互的动作，因此在下载HO3D数据集本身的同时，还需要下载模型预处理好的物体相关信息。在HO3D数据集中，包含了分别用来训练和估计的数据以及用来控制输入数据集的txt文件。

（图）

模型训练。模型开放了其训练整个Artiboost数据增强部分的代码，但是并没有给出训练的相应初始参数配置信息，导致Artiboost模型部分的训练无法进行，只能够使用一个基于Resnet[3]已经预训练的基础神经网络进行测试，即模型的可行性存在问题。而如果忽略Artiboost提出的CCV-Space方法，只是使用神经网络模型进行测试，可能最后会出现估计的误差值会非常大，无法用于最后在实际场景实时展示手势。为了解决最后的场景应用问题，在分析完Artiboost模型框架后，重新更换了神经网络模型，寻找可以使用自身数据集进行训练和测试的模型设计。

（图）

模型测试。虽然模型的训练部分无法完成，但是整个项目提供了完整的测试流程。通过使用特定的开源数据集，可以使用其已经预训练好的神经网络模型验证数据估计的准确性。在Epoch 0中，通过直接将测试数据集导入网络模型，最后估计得到每张图像中手势节点信息，并且将得到的信息连同物体的节点信息一共渲染到图像中展示。

（图）

由此得到，模型测试部分可以正常运行，绘制的结果也基本正确，但由于此时的网络并没有训练，所以部分关节节点的误差值较大。

### 3.2.2 输入部分

HO3D数据集的输入参数包含了相机内参、手势边界框、根节点坐标变换值、关节3d坐标、物体坐标信息、物体旋转坐标值、图片像素信息等信息。其中有许多参数是之后数据集生成时所不需要的。例如：有关物体的所有参数信息都是非必要的。因为这些物体参数表示了图像中手部与之交互的特定物体，而在最后的手部姿态实时展示中，并没有特定的物体，那么输入物体的参数信息也就没有意义。剩下的参数信息主要为相机参数、手势边界框、根节点坐标变换值、关节3D坐标初始值以及图像像素信息。

相机参数：对于真实世界的数据集，每个摄像设备都有固定的相机内参；而使用合成数据集，引擎所使用的摄像机一般也都有对应的参数可供调用。

手势边界框：图像原先的分辨率为640 ×480像素。一般整个图像除了手和物体以外，还会包含其他的干扰因素，通过事先缩小需要学习的像素范围，可以大大减少其他物体的干扰。但也正是这个原因，对于前期数据集处理的要求较高，无法做到任意一个相同大小的图像无需处理就可以通过模型训练，造成数据集生成和替换难度的提升。

（图）

根节点坐标变换：手势可以在空间内自由变换旋转，给定根节点的变换信息可以使整个模型的训练和估计得到一个基准值，其他节点根据根节点的位置来估计相应的坐标。

关节3D坐标初始值：一共具有21个关节节点数据，在输入传入时所有关节都是默认为根节点坐标值，当使用模型估计后，才能得到真正估计得出的关节数据。

图像像素信息：包含了图像中每一个像素的RGB三元组信息。

### 3.2.3 输出部分

原先模型的输出只有一个已经封装好的测试效果图展示，而其中模型估计得到的节点信息并没有暴露对应的接口和函数供他人调用。寻找输出的部分花费了大量的时间和精力，原因在于首先需要对整个Artiboost模型代码有较为清楚的认识，知道每一个模块、每一个部分的的作用。其次需要对Python语言有较为详细的了解，特别是与其他主流语言有所不同的却又频繁使用的功能。经过大量的学习和研究，以及指导老师的帮助，最终寻找到了保存21个关节节点的数据，并将最终估计得出的数据通过Json的格式保存到了项目所在目录的文件中。在最终用来实时展示的Unity游戏引擎中编写调用文件读入的方法，将其中的Json格式的关节数据对应到虚拟场景中制作的手势中，查看估计得出的3D坐标的效果。

（图）

（介绍图片中的信息）

## 3.3 TriHorn-Net模型

之前在Artiboost模型训练部分提到，缺少相应的训练参数配置，导致无法进行模型训练。为了解决这一棘手的问题，重新寻找了一个能够正常训练和测试且相对较为轻量的神经网络模型：TriHorn-Net模型。

TriHorn-Net模型使一种能够提高深度图像手部姿态估计精度的新型神经网络模型[13]。

与Artiboost[9]模型相同的是，两者都是为了提高手势姿态精度的模型，都使用了数据增强来更精确地估计手势。数据增强目的是通过随机生成新数据来增加扩充训练数据的数量和多样性以及使数据样本接近实际数据。近年来，在数据增强方法方面取得了重大进展，主要用于视觉[14][15]、自然语言处理[16]和语音[17]。

但是不同的地方在于，Artiboost模型的侧重点在于手部-物体交互的姿态估计，通过实际场景的数据集与合成数据集结合的方式作为输入数据集，不断扩充原有的数据样本，达到数据增强的目标，输入信息也为通常的RGB三元组，而TriHorn-Net模型则是重点关注单独手部的姿态估计，并没有涉及到物体以及其他场景元素，输入信息是手势的深度图，除了手以外图像中没有其他任何干扰因素。通过将深度图拆分成包含关键信息和不包含关键信息但是可能存在潜在信息的注意力图，以此来构建特征池。TriHorn-Net模型第一个创新是将三维手姿估计分解转化为深度图像空间中二维关节位置的估计，并在两个互补的注意力图的帮助下估计其相应的深度。这种分解可以防止深度估计在预测和特征提取上受到干扰，而深度估计同样也是一项较为困难的任务。第二个创新是PixDropout，这是第一个基于外观的数据增强手部深度图像的方法[13]。PixDropout的原理为在深度图上先随机采样，然后屏蔽输入图像中一个矩形区域，用来模拟图像识别任务的遮挡。

问题定义。三维手部姿态估计的任务定义如下:给定一个输入深度图像DI∈RH×W，任务是在相机坐标系中估计一组预定义的手部关节P∈R J×3的三维位置。H, W表示输入深度图像的高度和宽度。J表示待估计的关节总数[13]。

模型框架。TriHorn-Net模型架构包括两个阶段部分。在第一阶段，输入深度图像通过编码器网络f运行。编码器提取并组合手部的低级和高级特征，并输出高分辨率特征体，该特征体传递给三个独立的分支。UV分支计算每个关节的注意力图，这些图集中关注在相应关节发生的像素上。这种过程是通过将注意力图传递到一个特殊的softmax层，再由2D带监督的应用程序计算得到的。第二个分支，称为注意力增强分支，同样也是计算每个关节的注意力图，但没有任何约束，允许它自由学习检测对于不同场景下关节深度值最重要的手部像素。该注意图通过融合操作增强了由UV分支计算的注意图。融合操作由每个关节可学习参数控制的线性插值执行。因此，融合注意图不仅关注关节像素，还关注非关节的手部像素，这些像素包含了估计关节深度值的潜在有用信息。然后使用融合后的注意力图作为指导，从深度分支计算的深度特征图中构建特征池。最后，利用权重共享线性层从每个关节计算的特征向量中估计关节深度值。

（图）

### 3.3.1 模型训练与测试

### 3.3.2 输入部分

### 3.3.3 输出部分

### 3.3.4 模型优化

# 4 应用软件设计

## 4.1 模块设计

### 4.1.1 数据集生成

### 4.1.2 Socket通信与优化

### 4.1.3 摄像画面截取

# 5 结果展示与分析

## 5.1 模型训练结果

## 5.2 模型对比实验结果

## 5.3 数据集对比实验结果

# 6 总结

## 6.1 总结

## 6.2 趋势展望

参考文献

1. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
2. Deng J, Dong W, Socher R, et al. Imagenet: A large-scale hierarchical image database[C]//2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Ieee, 2009: 248-255.
3. He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016: 770-778.
4. He K, Fan H, Wu Y, et al. Momentum contrast for unsupervised visual representation learning[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 9729-9738.
5. Chen T, Kornblith S, Norouzi M, et al. A simple framework for contrastive learning of visual representations[C]//International conference on machine learning. PMLR, 2020: 1597-1607.
6. Caron M, Misra I, Mairal J, et al. Unsupervised learning of visual features by contrasting cluster assignments[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020, 33: 9912-9924.
7. Brown T, Mann B, Ryder N, et al. Language models are few-shot learners[J]. Advances in neural information processing systems, 2020, 33: 1877-1901.
8. 唐晓彬,沈童.深度学习框架发展综述[J].调研世界,2023,No.355(04):83-88.DOI:10.13778/j.cnki.11-3705/c.2023.04.009.
9. Artiboost
10. Hasson Y, Varol G, Tzionas D, et al. Learning joint reconstruction of hands and manipulated objects[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2019: 11807-11816.
11. Transformer
12. Zimmermann C, Ceylan D, Yang J, et al. Freihand: A dataset for markerless capture of hand pose and shape from single rgb images[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019: 813-822.
13. TriHorn-Net
14. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
15. Cubuk E D, Zoph B, Mane D, et al. Autoaugment: Learning augmentation policies from data[J]. arXiv preprint arXiv:1805.09501, 2018.
16. Yu A W, Dohan D, Luong M T, et al. Qanet: Combining local convolution with global self-attention for reading comprehension[J]. arXiv preprint arXiv:1804.09541, 2018.
17. Hannun A, Case C, Casper J, et al. Deep speech: Scaling up end-to-end speech recognition[J]. arXiv preprint arXiv:1412.5567, 2014.