arXiv:2602.01679v1 [cs.RO] 2 Feb 2026

迈向无菌处理应用中的器械托盘自主组装

Raghavasimhan S Ankaranarayanan[1], Paul Stuart[2],Nicholas Ahn[3],Arno Sungarian[4],和 Yash Chital ia[1]

摘要——**无菌处理与配送（SPD）部门负责在手术间隙对手术器械进行清洁、消毒、检查和组装。手动检查和准备器械托盘耗时长、容易出错，还常常存在污染和器械破损的风险。在本研究中，我们提出了一种全自动机器人系统，可对手术器械进行分拣并将其按结构化方式装入无菌托盘，重点实现 SPD 组装阶段的自动化。我们采集了包含 31 种手术器械和 6,975 张标注图像的定制数据集，用于训练混合感知流程：采用 YOLO12 进行检测，并使用级联式基于 ResNet 的模型进行细粒度分类。该系统整合了经过校准的视觉模块、一台配备定制双电磁夹爪的 6 自由度 St¨aubli TX2-60L 机械臂，以及一种基于规则的装箱算法，以减少运输过程中的器械碰撞。装箱框架采用 3D 打印隔板和支架，在物理上隔离器械，从而减少运输过程中的碰撞和摩擦。实验评估表明，该系统具有较高的感知准确率，与人工组装的托盘相比，器械之间的碰撞显著减少，且具有统计学意义。本研究是实现 SPD 工作流程自动化、提升手术准备安全性和一致性并缩短 SPD 处理时间的可扩展第一步。**

索引词—**计算机视觉、机器人学、算法、组装、医疗保健自动化、大数据与深度学习、实体人机交互、运动规划**

I. 引言

无菌处理与配送（SPD）技术人员负责清洁和检查手术器械、将器械组装到无菌托盘中，并在临床使用前对托盘进行灭菌 [1]（图 1a 展示了 SPD 技术人员通常进行的检查和组装工作）。这些工作对术前流程至关重要，但目前仍高度依赖人工，且耗时较长 [2]。在医院等高风险环境中，技术人员常常面临繁重的工作负荷和紧迫的时间压力，可能因此导致托盘组装不一致、器械放置不当，以及器械损坏或受到污染的风险增加 [3]。效率低下或杂乱无章的托盘布局（如图 1b 所示）可能延误手术，提高手术室（OR）工作人员的认知负荷，并因运输或灭菌过程中工具之间发生碰撞而缩短昂贵手术器械的使用寿命。

[1]路易斯维尔大学机械工程系，美国肯塔基州路易斯维尔。 [2]圣文森特医院无菌处理部，美国马萨诸塞州伍斯特。 [3]路易斯维尔大学骨科，美国肯塔基州路易斯维尔。 [4]马萨诸塞大学神经外科，美国马萨诸塞州伍斯特。r0sank01@louisville.edu

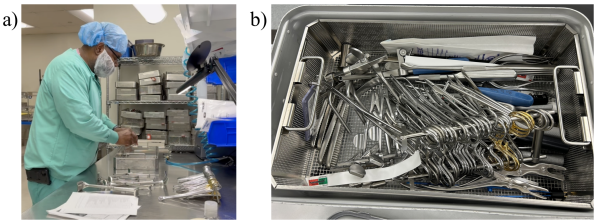


图1. a) 一名无菌处理与配送技术员正在检查并组装托盘。b) 手术室中刚打开的典型托盘

实现这一流程的自动化，可以大幅提高效率和一致性，同时减轻无菌处理与配送工作人员的负担。在本研究中，我们针对无菌处理与配送流程中的一个关键步骤——将器械组装并整理到无菌托盘中。我们提出了一种机器人系统，利用基于视觉的感知、运动规划和定制硬件，实现端到端的器械分拣与结构化装载。该系统集成了一台 6 自由度 St¨aubli TX2-60L 机械臂 [4]、一个双电磁夹爪，以及一套经过标定的俯视视觉系统，可实时检测、分类并将手术器械有序放置到无菌托盘中。在组装过程中，机器人会放入定制的 3D 打印隔板和支架，以物理隔离器械，确保空间布局一致，从而减少碰撞，并便于手术室护士在灭菌后取用。图 2 展示了我们提出的协作式工作场景：人工操作员检查器械，同时机器人自主地将其排列到托盘中。

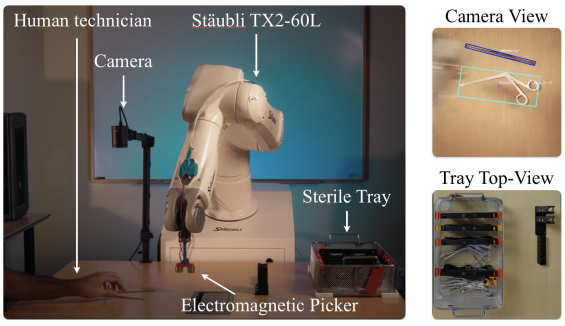


图2. 机器人系统与人协同工作，展示机器人所看到的画面以及组装过程中托盘的俯视图

鉴于手术器械细微的差异和复杂的几何形状，标准目标检测流程难以区分不同器械，尤其是在数据量较小时。为

解决这一问题，我们构建了一个定制数据集和混合感知框架，该框架结合了 YOLO12 [5] ，用于实时边界框检测；Segment Anything 模型（SAM） [6]，用于掩码提取和姿态估计；以及基于 ResNet 的定制架构 [7] ，用于分类。随后，利用标定相机的相机外参，将所得坐标转换到世界坐标系中。受 SPD 启发的装箱算法可确定器械摆放位置，在保持符合手术室规范的空间布局的同时，减少移动和碰撞。

所提出的系统面向医院灭菌单元和手术室支持工作流程，在这些场景中，通常由非手术人员在时间紧迫的情况下进行器械准备。通过将分拣和组装任务交由机器人系统执行，医院可以减轻人力负担、提高可靠性，并确保托盘配置更加安全且标准化，为未来实现自动化验证和库存管理铺平道路。我们的系统展示了一种人机协作工作流程：技术员负责检查，机器人则自主完成分拣和结构化装载。

A. 相关工作

尽管这一工作流程至关重要，现有的大多数手术机器人自动化研究都聚焦于术中辅助，而非术前准备。作为实现无菌处理自动化的早期探索，近期研究已开始探讨机器人系统在杂乱环境中进行器械识别、抓取和操作的能力。

Xu 等人 [8] 使用搭载传统基于边缘的视觉技术的机械臂来分离器械，但其处理流程需要受控照明。Wu 等人 [9] 开发了一种利用双目视觉进行抓取的双臂系统，但该系统缺乏托盘组装逻辑。Zhou 等人 [10] 提出了在手术室环境中通过感知和操作进行交互式手术器械识别的方法；Kim 等人 [11] 则推出了一款针对细长器械优化的柔顺型 3D 打印夹爪。然而，这些方案都不是端到端系统，也未涵盖托盘组装。Li 等人 [12] 采用结合阻抗控制的立体视觉进行器械定位，但其适用的工具类型有限。其他研究 [13]–[15] 改进了感知技术，以应对遮挡和复杂的器械几何形状。此外，也有研究贡献了诸如 HOSPI 数据集 [16], 之类的数据集，但这些数据集均未提供标定参数。

这些工作都未涉及自动化托盘组装，而这需要对器械进行分拣并稳妥装箱，以便灭菌和后续手术使用。此外，对于训练数据较少的大多数识别系统而言，外观相似的器械仍然难以区分，例如直镊与弯镊，或蚊式止血钳与克莱尔止血钳。

我们通过开发一套端到端机器人流程，检测手术器械并将其组装到结构化布局的无菌托盘中，以弥补这一差距。该系统可减少处理时间和器械碰撞，从而惠及 SPD 技术人员和手术室护士，同时提升整体工作流程效率。

总之，我们的贡献如下：

- 我们提出了一套完整流程，利用视觉引导的机器人机械臂和双电磁夹爪，实现手术器械的自动分拣组装。
- 我们构建了一个定制数据集，并设计了一种部件感知架构，以实现稳健的器械检测和姿态估计。
- 我们提出了一种可泛化的装箱优化框架，将手术器械放置形式化为“受约束的空间分配”问题，在简化手术室准备的同时，以减少碰撞为优化目标。

本文其余部分的结构安排如下：第二节详细介绍我们的方法，包括系统设计（第二节 A）、视觉（第二节 B）、机器人操作（第二节 C）以及装箱算法（第二节 D）；随后在第三节进行评估。最后，我们在第四节总结全文并讨论未来研究方向。

II. 方法

A. 提出的系统工作流程

所提出的系统旨在与人工技术人员协同工作，确保过程可解释，并符合现行无菌处理部门规程。在传统的无菌处理与配送（SPD）工作流程中，清洁流程完成后，技术员会先检查每件器械是否存在灰尘、人体组织残留、血液等杂物，并检查其功能是否正常。技术员会参照特定手术所需器械清单，并据此组装无菌托盘。这一过程十分细致，需要同时处理多项任务，因此容易出错。所提出的系统由一台用于观察操作台的标定相机和一条六自由度机械臂组成；检查后，技术员会将器械放置在操作台上。相机与机器人经过手眼标定（平均重投影误差为 < 0.3 像素）。系统可访问每项手术所需器械的数字清单，并使用第 II-D 节所述算法预先计算托盘组装方案。技术员检查后将器械放在操作台上时，机器人会以有条理的方式将器械放入无菌托盘。如果放置的器械顺序不正确，机器人会等待技术员放入下一件器械后，再放置当前器械；如果该器械不在所需清单中，机器人会将其移开，并继续等待下一件器械。机器人会负责按正确顺序放置器械。技术员只需检查器械，无须操心器械需求或如何将器械整齐地放入托盘。

B. 视觉

1）数据集： 如第 I-A 节所述，有许多数据集，例如 HOSPI 数据集 [16],，可公开获取并用于训练机器学习模型。然而，由于我们需要使用已知相机内参和位姿拍摄的图像（详见第 II-B2 节），且评估时无法获得同一组手术器械，因此我们收集了适用于本系统的数据。我们使用了 31 种不同的手术器械，

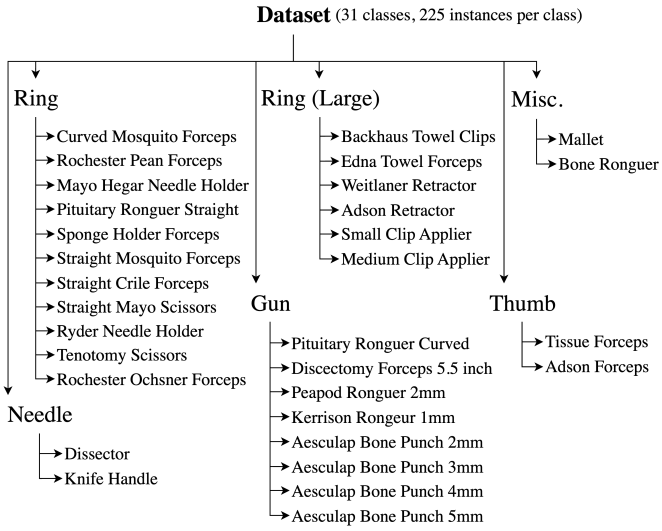


图 3. 按器械组列出的数据集中的器械

并收集了每种器械在不同光照条件、背景和 Z轴距离下拍摄的 250 张俯视图像。清理数据后，每个类别最终保留 225 个实例，共计 6975 张图像，其中 80% 用于训练，其余数据平均分配用于验证和测试。我们的目标之一是对器械细微的特征差异进行建模，而此前的研究均未探讨这一点。因此，我们选择了具有相似特征但尺寸不同的器械，例如 2 毫米骨冲与 3 毫米骨冲；也选择了尺寸相同但特征略有差异的器械，例如直型与弯型蚊式止血钳。图 3 列出了各器械所属的器械组。

我们使用 YOLO格式标注了器械边界框。正如第 II-B2 节所述，YOLO 12 nano (yolo12n) 模型 [5] 在检测任务的小规模数据上表现良好。我们利用这一点加快了标注速度。首先，我们使用 Roboflow [17] 手动标注了每个类别包含 50 个实例的子集，并训练了 yolo12n 模型。随后，我们使用训练好的模型自动完成后续标注流程，将速度提升至每分钟 ~50张图像。

2）目标检测：沿用相关工作中广泛采用的各类 YOLO 目标检测模型 [18]，我们最初收集了一个小型试点数据集，其中包含 10 种器械，每类有 ~100个实例，并使用输入图像尺寸为 480 像素的 yolo12n 模型进行训练。尽管该模型实现了可靠的定位，但其分类性能不稳定，尤其是在几何轮廓相似且反射表面特征相近的器械上。为解决这一局限，我们使用同一数据集训练了一个 ResNet-18 分类器。与 YOLO 相比，ResNet-18 模型展现出更强的可分性，减少了外观相似器械之间的混淆，这表明其在分类阶段具有更强的特征分离能力。然而，该模型在区分关系密切的器械之间的细微差异时仍面临困难，导致假阳性和假阴性增多。

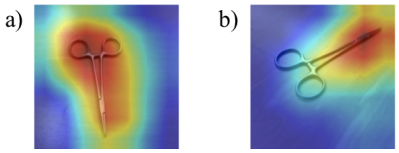


图 5. ResNet-18 第 4 层的热图。a) 失败 b) 成功

图 5 展示了在第 4 层查看 ResNet-18 模型时的 GradCAM [19]热力图可视化结果，其中包含一个失败案例 (a) 和一个成功案例 (b)。我们发现，当模型关注器械尖端时，正确预测类别的可能性更高。这些观察促成了图 4（分类）所示的级联部件感知ResNet-18架构，该架构针对局部判别性特征进行了显式建模，以改进细粒度分类。所提出的方法将手术器械分解为其功能部件——头部、尾部和全身区域，使用 ResNet-18 骨干网络分别提取特征，并将这些特征与元特征条件信息进行拼接。如第 II-B1 节所述，我们还拥有外观相似但尺寸不同的器械。YOLO 和 ResNet 模型都没有关于器械尺寸的信息。因此，我们使用标定相机采集了本研究所用的最终数据集，从俯视角度观察器械，并获得已知的器械尺寸。我们将这些信息作为元数据输入模型，为其提供更多关于器械尺寸的上下文信息。模型的方程如下所示。

$$\mathbf{r} = f_{\text{res}}^{(R)}(I_R), \mathbf{h} = f_{\text{res}}^{(H)}(I_H), \mathbf{t} = f_{\text{res}}^{(T)}(I_T) \quad (1)$$

$$\mathbf{m} = \sigma(W_{m2} \cdot \sigma(W_{m1}\mathbf{x}_m + b_{m1}) + b_{m2}) \quad (2)$$

$$\mathbf{z} = [\mathbf{r} \,\|\, \mathbf{h} \,\|\, \mathbf{t} \,\|\, \mathbf{m}] \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = W_2 \cdot \sigma(W_1\mathbf{z} + b_1) + b_2 \quad (4)$$

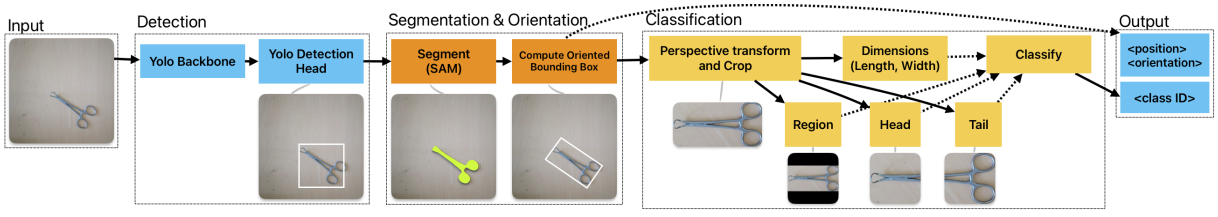


图 4. 训练与推理流程

其中，I_R、I_H 和 I_T 分别表示器械的裁剪图像区域、头部和尾部。$f(R)_{res}$、$f(H)_{res}$ 和 $f(T)_{res}$ 表示移除最终全连接（FC）层后的 ResNet-18 骨干网络。$f(H)_{res}$ 和 $f(T)_{res}$ 具有共享权重，以适应翻转和 180° 旋转。$\mathbf{x}_m$ 是形状为 $(B, 1, 2)$ 的元特征向量，其中包含经对数 $1p$ 归一化的器械长度和宽度，B 表示批量大小。[...‖...] 表示拼接。$\sigma(.)$ 表示激活函数，$\hat{}$y 表示类别逻辑值。我们对所有层使用 ReLU 激活函数，并使用 0.2 的丢弃率。该设计显式强化了部件感知注意力，并在全局特征含义不明确的情况下，实现了对视觉上相似器械的稳健小样本判别。Yolo12n 使用 ultralytics [20] 训练了 300 个周期，批量大小为 64，初始学习率为 10^{-2}；而 ResNet 模型使用 Adam 优化器训练了 50 个周期，批量大小为 64，以最小化交叉熵损失，初始学习率为 10^{-4}。

3) 姿态估计：由于机器人需要拾取手术器械并将其装入托盘，因此必须知道器械在桌面上的精确位置及其 Z 轴旋转角度（r_z）。为计算这些信息，我们使用 YOLO 检测头的输出提取每件器械的感兴趣区域（ROI），并将其输入 Segment Anything 模型（SAM） [6]，以获取器械的掩膜，如图 4 所示（分割和方向）。随后，我们利用掩膜的轮廓进行主成分分析（PCA） [21]，找出器械的长轴和短轴。世界坐标系 X 轴与长轴之间的夹角即为 r_z。

C. 操作

为拾取和放置器械，我们使用 St¨aubli TX2-60L 六自由度机械臂，该机械臂此前已应用于医疗场景，并在医院环境中使用。对于末端执行器，我们定制设计了双电磁夹爪（如图 6 a 和 b 所示），由 ESP32 微控制器控制。L298-N H 桥用于驱动电磁铁。我们还在控制器中实现了退磁，以尽量减小夹爪停用时残余磁场的影响。机器人采用线性点到点轨迹执行拾取与放置。

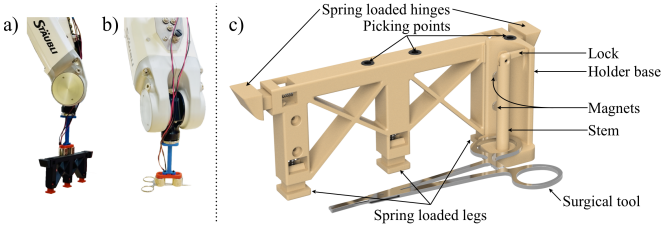


图 6. a）隔板和支架的 CAD 渲染图，展示了一件器械；配备双电磁拾取器的末端执行器，展示了 b）隔板和 c）一把笔直的蚊式止血钳

D. 托盘装载

在本节中，我们讨论无菌托盘装载，以减少碰撞并简化手术室准备。

1) 隔板和支架：我们的系统不仅旨在实现 SPD 工作流程的自动化，还旨在延长器械的使用寿命。手术器械常因机械冲击、摩擦或烫伤而受损 [22]。为减少器械之间的碰撞，我们设计了模块化隔板和支架，兼容多种器械和托盘。图 6.c 展示了隔板及其上安装的支架的 CAD 渲染图，其中放置了一件环形器械。

每个弹簧加载式隔板都锁定在托盘边缘上，并利用对准磁铁定位支架。隔板厚 20 mm，高度和宽度均可调整。支架由底座、可拆卸杆件以及一个充当单向闸门的扭簧锁组成，允许插入仪器，同时防止仪器掉出。实际操作中，手术室护士会从无菌托盘中取出器械，并按顺序摆放在折叠的布上，以确保器械侧面始终可见。如图 7（右）所示，按照手术室惯例，所提出的支架可以侧向倾斜放置在手术室手术台上。这种双用途设计简化了设置流程并缩短了操作时间。所有部件均采用 3D 打印制成，并设有螺钉顶端的抓取点，供夹爪抓取。部件生产成本低廉，且设计为一次性使用。

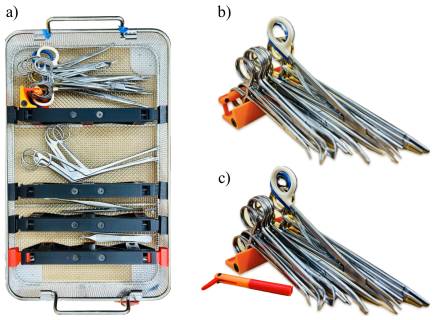


图 7. a) 装有 20 种不同手术器械的机器人组装托盘，b) 环形器械支架，c) 拆除杆件后的支架

2) 算法：为了高效设计装箱算法，我们采访了 SPD 技术人员，以了解其托盘组装工作流程。大多数情况下，每位技术人员都会按照个人习惯整理器械，缺乏标准化指南，但大多数人会首先按类型对器械进行分组。环类器械使用串线器固定，而针和拇指器械则放入灭菌袋中。其余器械经过排列，以减少移动和碰撞。我们将托盘组装形式化为一个“受约束的空间分配”问题，并提出一种确定性规则式装箱算法，在器械几何形状、器械组和托盘尺寸等约束条件下近似生成布局；这些信息取自相应制造商的数据表。算法 1 以分层方式将器械分配到各列中，并减少器械间碰撞。其时间和空间复杂度为 $O(n)$。隔板用于分隔器械组，第 II-D1 节讨论的支架取代了串线器。器械在每列中按长度排序，较长的器械放在底部。如果超出尺寸约束，算法会将兼容的器械组合并入预定义的合并集 -环、环（厚） O、n环、环（厚）针、拇指、环、环（厚）针、拇指、枪。机器人会在组装前预先计算器械、隔板和支架的放置位置。托盘、隔板和支架最初通过工作台上的锁定支架放置在已知位置，从而便于技术人员装载和卸载托盘。该算法可适用于不同的器械类型和托盘尺寸，但目前假设器械长度小于托盘宽度且采用托盘对齐朝向；未来工作将对此进行扩展。

器械在每列中按长度排序，较长的器械放在底部。如果超出尺寸约束，算法会将兼容的器械组合并入预定义的合并集 M - {环、环（厚）}、 {环、环（厚）} +{针、拇指}、 {环、环（厚）} + {针、拇指、枪}。机器人会在组装前预先计算器械、隔板和支架的放置位置。托盘、隔板和支架最初通过工作台上的锁定支架放置在已知位置，从而便于技术人员装载和卸载托盘。该算法可适用于不同的器械类型和托盘尺寸，但目前假设器械长度小于托盘宽度且采用托盘对齐朝向；未来工作将对此进行扩展。

算法 1托盘装箱算法

输入： 器械数量 Q、托盘 C、合并集 M、衬垫 p

输出： 仪器 P、支架 H和隔板 D 的放置位置

初始化 $P \leftarrow \emptyset$、 $H \leftarrow \emptyset$、 $D \leftarrow \emptyset$、 $y_{off} \leftarrow 0$
C_h、 C_w、 C_d 分别为托盘长度、宽度和深度
p_x、 p_y、 p_z 分别为各轴方向上的放置边距。
按合并组对器械分组 G使用 M
对于每个组 $g \in G$ **执行**
    按 g 对器械按长度降序排序
    计算最大器械长度 L_{max} 和每层最大值层 $N_{max} \leftarrow floor(C_w/(L_{max} + 2p_x))$
    if $N_{max} = 0$ **然后**
        引发托盘宽度溢出错误
    结束 if
    初始化 $x \leftarrow 0, z \leftarrow 0$， 暂存列表 $S \leftarrow \emptyset$
    从 Q创建包含所有仪器实例的队列
    当 $|queue|$ **时**
        每层仪器数 $n = \min(N_{max}, |queue|)$
        如果组的环形类型为**则**
            $n \leftarrow 1$
        结束如果
        计算层高 z_{new}
        如果 $z_{new} > C_d$ **则**
            提交列 $\Rightarrow$放置隔板和支架
            重置 $S, z \leftarrow 0$, 继续
        结束 if
        对于 $i = 1$ 到 n **执行**
            弹出仪器 t， 设置放置位置 $(x + (i + 0.5)(t_l + 2p_x)\ y_{off}, z + t_h)$
            将实例追加到 S
        结束 for
        $x \leftarrow 0, z \leftarrow z_{new}$
    结束 while
    提交剩余列
    计算列宽 w_c， 检查高度溢出
    在（$C_w/2$， $y_{off} + w_c$）处添加隔板；如果是环，则添加支架 type
    完成放置 P并更新 $y_{off} \leftarrow y_{off} + w_c$
结束循环
若超出托盘高度，则移除最后一个隔板
返回 (P， H， D)

III. 评估与讨论

A. 分类模型性能

如第 II-B2 节所述，在一个小型试点数据集上进行的初步实验揭示了基于 YOLO 的分类存在局限性，因此促使我们采用带有元特征的基于 ResNet 的分类器。这一前期经验为第 II-B1 节中的数据集收集提供了指导，并使本节所呈现的数据扩展分析成为可能。

我们注意到，对于这个更大的数据集，yolo12n 在分类方面的表现与基于 ResNet 的模型一样好。这是一项有趣且有价值的发现，如图 8 所示。图中展示了 6 种不同的架构（3 种统一式架构——使用同一模型进行检测和分类；以及 3 种分散式架构——使用 yolo12n 进行检测，并使用基于 ResNet 的变体进行分类），以及它们在不同训练数据规模下于测试集上的分类表现。整个实验过程中，验证集和测试集保持不变，而训练数据的规模则有所变化。在训练数据量较小时，基于 ResNet 的分散式架构表现明显优于统一式模型。随着训练数据量增加，统一式架构逐渐赶上，分类表现也变得相当。

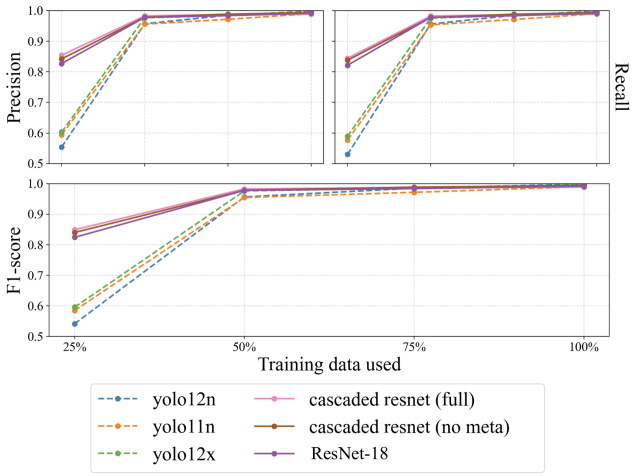


图 8. 模型在测试集上的表现与训练数据规模

另一个有趣的发现是，元特征并未显著提升模型表现，因为这些模型的 F1 分数相当。这可能是因为图像中已有足够的器械尺寸上下文信息（以纵横比的形式），这是由黑色条带的存在提供的（如图 4 的 区域 所示）；此外，我们在分割后裁剪了感兴趣区域，如图 4 所示，因此无需手动将尺寸作为元特征提供。

B. 托盘位移和倾斜的影响

为了实证评估无菌托盘运输所导致的仪器碰撞与干扰，将一件参考（“对照”）仪器涂覆荧光粉，该荧光粉在紫外线（UV）照射下会发光。该

对照器械在每次试验中随机选取。在组装每个托盘之后——人工操作员组装托盘A，托盘B使用分隔器和支架手动组装但不使用所提出的算法（即每组内的工具随机放置），以及机器人组装托盘C——我们在全部3个轴（X、Y和Z）上引入15秒的手动振动，频率介于 $1.5-1.8$ Hz，采用高帧率视频录制进行测量，每个轴双向位移为100 mm，以模拟托盘运输。振动后，检查托盘中的每件仪器是否发生粉末转移。将出现来自对照器械的转移粉末的器械数量记录为碰撞发生的指标。人工组装的托盘利用串条固定环形组，并利用灭菌袋分别固定拇指组和针具组。机器人组装托盘使用第II-D1节中讨论的分隔器和支架。

检查时，排除所有带有粉末斑点的器械，因为这些斑点可能是由空气颗粒沉积造成的。这些斑点可能源于支架的回弹运动，该运动会在安装过程中将细粉颗粒弹入空气中。只有出现可见污迹或连续粉末条痕，且表明与对照器械发生直接物理接触的器械，才被视为有效的碰撞事件。图9展示了这些痕迹的示例。

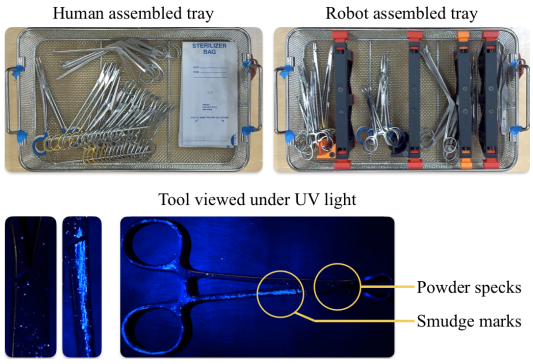


图9. 实验设置，展示了人工整理的托盘和机器人整理的托盘，以及粉末斑点和污迹的示例

表I列出了每个托盘中发生碰撞的器械平均数量。对于每个托盘（A、B和C），我们进行了5次不同的试验，采用了不同的对照器械和放置方式。

为评估托盘倾斜导致的器械碰撞，我们没有振动托盘，而是在 3 秒内将托盘沿 3 个轴分别倾斜至约 30 度。对于这项实验，我们也使用不同的对照器械和放置方式，对每个托盘进行了 5 次试验。

表I 托盘位移和倾斜导致的器械碰撞

	平均碰撞次数（标准差）- 越低越好	
Tray	**位移**	**Tilt**
基线 (A)	11.4 (5.004)	7.8 (3.763)
无算法 (B)	5.0 (2.0)	3.6 (1.02)
提出的方法 (C)	**4.0 (1.096)**	**1.8 (0.4)**

与基线相比，所提出的方法在位移（Co- hen's $d = 2.04$）和倾斜（$d = 2.24$）两种条件下均显著减少了碰撞，对应的效应量非常大。尽管结果具有统计学显著性（$p < 0.05$），但试验次数有限，因此仍需在大规模的真实无菌处理与配送环境中进一步验证。由于使用了支架和隔板，各器械组在各自的列内保持物理隔离，在位移或倾斜条件下均未观察到列间接触。因此，在大多数试验中，对照器械仅与列内紧邻其上方或下方的器械发生碰撞。此外，分层堆叠策略提高了机械稳定性，从而减少了器械移动和碰撞频率。通过（B）验证了这一效果：将器械随机放置在每列中，与分层排列相比，碰撞率更高。

这些实验首次证明，结构化的机器人装箱能够减轻碰撞导致的磨损，而这正是造成器械劣化的重要因素之一。不过，本研究未评估人为因素，例如使用便利性的主观感受或认知负荷。未来，我们计划与手术室护士和 SPD 技术人员开展用户研究，以量化使用便利性的主观感受、器械取用时间和工作负荷。

IV. 结论与未来工作

在本研究中，我们展示了一种具有临床相关性的机器人系统，可自动将术前手术器械分类并组装到无菌托盘中。该系统整合了计算机视觉、机器人学和定制部件，能够自动完成无菌处理过程中最耗时且最容易出错的环节之一。借助定制数据集和端到端感知与操作流程，机器人能够在托盘内对器械进行一致的定位、精确放置和结构化组装，同时与人工技术人员协作并为其工作流程提供支持。结果表明，与人工组装的托盘相比，该系统显著减少了器械碰撞和位移，验证了其鲁棒性以及在无菌处理部门实际部署的潜力。

未来，我们计划与手术室护士和 SPD 技术人员开展用户研究，评估他们对可用性、效率和认知负荷的感受。我们还期待扩展数据集，纳入更多器械类别并增加样本量，以提升算法在不同医院环境中的泛化能力。我们计划采用基于成本的规划，将装箱算法扩展至多方向和多层布局。我们还希望改进拾取器设计，使其能够处理非磁性器械（如钛或塑料），并能够操控器械的闭合与张开，这也是标准无菌处理工作流程的一部分。

致谢

我们衷心感谢 Rawan Ahmed 和 Harshith Jella 在数据集收集与标注方面给予的支持。

参考文献

[1] S. Holmes，《当前手术器械及其他医疗器械去污实践概述》，载于《医院与医疗保健去污》，J. Walker 编。伍德海德出版社，2020年，第443–482页。[2] L.-P. Hung、K.-Y. Chen、N.-C. Hsieh 和 C.-L. Chen，《利用物联网改进医疗保健领域手术器械的灭菌流程》，《互联网技术期刊》，第21卷，第6期，第1811–1819页，2020年。[3] P. Manikonda、P. kumar Reddy Yellela、D. S. Gondi、J. R. N. Reddy、V. K. R. Bandaru 和 J. S. Pokkalla，《保障手术效果：器械灭菌的现代方法与感染预防》，载于《数据分析与管理论文集》。施普林格·自然瑞士，2025年，第138–148页。[4] St¨aubli Robotics，《Tx2-60工业机器人》，https://www.staubli.com/us/en/robotics/products/industrial-robots/tx2-60.html，2025年，访问日期：2025-10-27。[5] Y. Tian、Q. Ye 和 D. Doermann，《YOLOv12：以注意力为中心的实时目标检测器》，arXiv 预印本 arXiv:2502.12524，2025年。[6] A. Kirillov、E. Mintun、N. Ravi、H. Mao、C. Rolland、L. Gustafson、T. Xiao、S. Whitehead、A. C. Berg、W.-Y. Lo 等，《Segment Anything》，载于《IEEE/CVF国际计算机视觉会议论文集》，2023年，第4015–4026页。[7] K. He、X. Zhang、S. Ren 和 J. Sun，《用于图像识别的深度残差学习》，载于《IEEE计算机视觉与模式识别会议论文集》，2016年，第770–778页。[8] Y. Xu、X. Tong、Y. Mao、W. B. Griffin、B. Kannan 和 L. A. DeRose，《用于杂乱环境中手术器械单件分拣的视觉引导机器人操作臂》，载于《2014年IEEE国际机器人与自动化会议（ICRA）》。IEEE，2014年，第3517–3523页。 [在线]。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6907366[9] Q. Wu、M. Li、X. Qi、Y. Hu、B. Li 和 J. Zhang，《用于手术器械分拣任务的双臂机器人协调控制》，《机器人与自主系统》，第112卷，第1–12页，2019年，出版商：爱思唯尔。 [在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0921889018304068[10] T. Zhou 和 J. P. Wachs，《大海捞针：通过感知与操作进行交互式手术器械识别》，《机器人与自主系统》，第97卷，第182–192页，2017年，出版商：爱思唯尔。 [在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889016305510[11] J. Kim、A. K. Mishra、L. Radi、M. Z. Bashir、O. Nocentini 和 F. Cavallo，《SurgGrip：用于基于视觉抓取细长手术器械的柔顺型3D打印夹爪》，《力学》，第57卷，第11期，第2733–2748页，2022年11月。 [在线]。可访问：https://link.springer.com/10.1007 11012 022 01594 6 。/s - - - M. Li、Y. Hu、Y. Sun、X. Yang、L. Wang 和 Y. Liu，《基于立体视觉和阻抗控制的手术器械分拣系统》，载于《2017年IEEE国际信息与自动化会议（ICIA）》。IEEE，2017年，第266–271页。 [在线]。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8078917[13] E. S. Deol、G. Henning、S. Basourakos、R. M. S. Vasdev、V. Sharma、N. L. Kavoussi、R. J. Karnes、B. C. Leibovich、S. A. Boorjian 和 A. Khanna，《用于手术器械自动检测与计数的人工智能模型：一项实验性概念验证研究》，《外科患者安全》，第18卷，第1期，第24页，2024年7月。 [在线]。可访问：https: // pssjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13037-024-00406-y [14] W. Y. Ng、Y. Huang、K. Xie、P. W. Y. Chiu 和 Z. Li，《多模态机器人手术器械转运与分拣平台：器械护士机器人》，载于《2024年IEEE国际机器人与仿生学会议（ROBIO）》。IEEE，2024年，第1783–1788页。 [在线]。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10907620[15] D. M. Lavado，《从杂乱托盘中分拣手术工具——目标检测与遮挡推理》，硕士论文，科英布拉大学（葡萄牙），2018年。 [在线]。可访问：https://search.proquest. com/openview/7 541 27 9055 1 5 66430192439 d fb d ef da f M. Rodrigues、M. Mayo 和 P. Patros，《新型分层手术器械数据集上的深度学习技术评估》，载于《AI 2021：人工智能进展》，G. Long、X. Yu 和 S. Wang 编。Cham：施普林格国际出版公司，2022年，第13151卷，第169–180页，丛书名称：《计算机科学讲义》。 [在线]。可访问：https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-97546-3 14[17] Roboflow，“Roboflow：面向开发者和企业的计算机视觉平台”，https://roboflow.com/，2025，访问日期：2025-10-30。[18] M. Hussain，“从 Yolo-v1 到 Yolo-v8：Yolo 的兴起及其对数字化制造和工业缺陷检测的补充作用”，*Machines*，第 11 卷，第 7 期，第 677 页，2023 年。[19] R. R. Selvaraju、A. Das、R. Vedantam、M. Cogswell、D. Parikh 和 D. Batra，“Grad-CAM：你为什么这么说？”，*arXiv* 预印本 *arXiv:1611.07450*，2016 年。[20] Y. Tian、Q. Ye 和 D. Doermann，“YOLOv12：以注意力为中心的实时目标检测器”，2025 年。 [在线]。可用地址：https://github.com/sunsmarterjie/yolov12[21] H. Abdi 和 L. J. Williams，“主成分分析”，*Wiley* 跨学科计算统计评论，第 2 卷，第 4 期，第 433–459 页，2010 年。[22] J. Tang、M. Zhuang、P. Lin、Z. Wang 和 J. Zhao，“手术器械信息管理系统在运动医学专科中的应用研究”，*Scientific Reports*，第 14 卷，第 1 期，第 6167 页，2024 年。