arXiv:2302.02233v1 [cs.HC] 4 Feb 2023

使用热成像测量手卫生质量

CHAOFAN WANG,荷兰代尔夫特理工大学WEIWEI JIANG,中国安徽师范大学KANGNING YANG,澳大利亚墨尔本大学ZHANNA SARSENBAYEVA,澳大利亚悉尼大学 BENJAMIN TAG,澳大利亚莫纳什大学TILMAN DINGLER,澳大利亚墨尔本大学JORGE GONCALVES,澳大利亚墨尔本大学 VASSILIS KOSTAKOS,澳大利亚墨尔本大学

研究目的： 长期以来，手卫生一直被认为是预防感染传播最有效的方法。然而，鉴于以往研究报告的手卫生依从性和质量较低，持续监测医护人员的手卫生依从性和质量至关重要。本研究探讨将热成像相机与RGB相机结合使用，以检测含酒精制剂的手部覆盖情况，从而监测手消毒质量的可行性。

材料与方法： 本研究招募了32名参与者。参与者需完成四种类型的手消毒操作，以形成不同的含酒精制剂手部覆盖情况。每项任务完成后，使用热成像相机和RGB相机拍摄参与者的手，同时采用紫外线（UV）测试获取含酒精制剂手部覆盖情况的真实值。随后，使用U-Net从热图像中分割出含含酒精配方的区域，并通过比较热图像与UV图像（来自UV测试）之间的覆盖差异，依据准确率和Dice 系数评估系统性能。

结果： 在手部消毒后 10 秒进行观测时，该系统展现出良好的表现，准确率为 93.5%，Dice 系数为 87.1%。此外，我们还考察了系统性能在 60秒观测期内的变化；在第 60 秒进行观测时，准确率和 Dice 系数仍分别保持在约 92.4% 和 85.7%。

结论： 鉴于这些令人鼓舞的结果，热成像显示出应用潜力，有望实现准确、持续且系统化的手卫生质量监测。

其他关键词和短语：热成像相机、紫外线、手卫生、世界卫生组织

1 引言

手部消毒是规范手卫生的重要组成部分，也是预防医疗相关感染（HAIs）及减少其传播的最有效方法 [2, 21, 35]。医疗相关感染是医疗保健环境中最严峻的患者安全挑战之一 [26]。它们会显著增加患者的住院时间、成本、发病率和死亡率 [7, 12]。此外，医疗相关感染往往给医疗保健系统带来沉重的经济负担。在美国，估计每年的成本为 280 亿至 450 亿美元 [10]。然而，只要遵循更规范的手卫生实践，至少三分之一的医疗相关感染是可以预防的 [27]。

2009年，世界卫生组织（WHO）发布了《WHO医疗保健手卫生指南》，对医疗保健领域的手卫生证据进行了全面审查，并提出了改善医疗保健环境中手卫生实践的具体建议 [35]。在该指南中，WHO总结了医护人员（HCWs）应执行手卫生的五个关键时刻 [35]。该指南还建议采用两种标准手卫生

程序：对于明显受到污染的手，应“使用肥皂和水洗手”；对于所有临床适应证下的手部常规去污，应“使用酒精类制剂进行手消毒”[35]。

然而，研究发现，医疗保健环境中的手卫生质量普遍不尽如人意[3, 13,28]。Szilágyi等报告称，接受手卫生培训后，只有72%的医护人员能够充分清洁所有手部表面[28]。由于含酒精制剂手消毒已广泛应用于常规临床实践[35],，精确测量手消毒质量并向医护人员反馈其表现，对于促进医疗环境中的良好手卫生至关重要。

然而，在医疗保健环境中测量手消毒质量颇具挑战[31]。受训审核员直接观察被视为监测手卫生依从性和质量的金标准，但这种严格方法受限于人力投入和费用、样本量不足以及霍桑效应[4]。最近，研究人员通过环境传感器和可穿戴传感器追踪医护人员对世界卫生组织六步洗手法的依从性，以测量手卫生质量[9, 11, 13, 14, 16, 17, 32]；然而，这些技术只是用于检测医护人员手卫生质量的间接指标。此外，研究人员还尝试量化手消毒和洗手流程中的手部覆盖情况[30, 33]。紫外线（UV）测试已广泛用于医护人员手卫生培训，以显示其手消毒后清洁不足的区域。然而，由于紫外线测试需要使用荧光染料（通常会留下残留物，影响后续测量）和紫外灯，因此难以将其轻松纳入医护人员的日常工作中。

含酒精制剂通常含有 60%–80% 的乙醇，在室温下会挥发并使手部表面降温。鉴于热成像技术近期取得的进展，热成像相机如今能够检测细微的温度变化，这促使我们采用热成像来测量含酒精制剂的表面覆盖度。

在本文中，我们逐像素比较热图像（由热成像相机采集）与紫外图像（从紫外测试中采集的 RGB 图像，作为真实值）所检测到的含酒精制剂手部覆盖情况。我们使用图像配准将热图像转换到紫外图像的坐标系中，以准确率和 Dice 系数（预测的清洁区域与实际清洁区域之间的相似度）计算估计的覆盖差异。通过比较，我们得以探究使用热成像相机测量手卫生质量的可行性，具体包括

（1）验证使用热成像检测含酒精制剂覆盖情况的准确率。所提出的基于热像仪的系统表现良好：在进行手部揉搓后 10 秒观察时，准确率达到 93.5%，Dice 系数达到 87.1%；（2）测量 60 秒观察期间系统性能的变化，因为热特征会随时间减弱（尽管观察可在数百毫秒内完成）。我们发现，系统性能会随着观察时间延长而下降，这表明应尽早进行观察。尽管如此，即使观察时间达到 60 秒，准确率和 Dice 系数仍分别保持在约 92.4% 和 85.7%。

2 方法

2.1 参与者与实验流程

我们通过本机构的邮件列表和滚雪球招募了32名参与者，女性和男性人数相同。所有参与者都是本机构的学生或员工，年龄介于18至27岁之间（M = 22.8，SD = 2.1岁）。大多数参与者（32人中有27人，占84.4%）在过去三年内没有接受过正式的手卫生

培训，也不熟悉正式的手卫生流程。整个实验流程持续约130分钟，包括情况说明和总结。本研究已获匿名机构人类伦理咨询小组批准。

实验前，参与者填写了一份问卷，内容涉及对含酒精制剂和紫外光的过敏反应。参与者抵达我们的实验室后，我们向他们介绍了研究目的，并征得他们的书面同意，确认其同意参与我们的实验。随后，我们对参与者进行了如何执行世界卫生组织六步洗手法的培训。为此，我们首先讲解了各个步骤。接着，他们观看了世界卫生组织提供的教学视频 [36] 三遍，并跟随教学视频练习手部揉搓消毒程序。

培训结束后，参与者开始完成实验任务。每项任务开始前，参与者先冲洗双手以去除残留荧光染料，然后用纸巾擦干双手。接着，他们用暖手器搓手一分钟，使双手恢复至体温 [19]。在参与者的手上涂抹含酒精制剂之前，我们拍摄了热成像和 RGB 图像，作为基线图像。随后，参与者执行实验任务，并将双手放在钉板上 60 秒，同时由热成像相机进行观察。最后，我们在参与者的手上方打开紫外灯，并使用 RGB相机拍摄照片。

我们针对参与者双手的两侧，按照附录B节中提到的四种任务类型设计了30项不同的任务，并为每项任务撰写了任务说明，还提供了可视化的表面覆盖率示例。然而，由于参与者在60秒观测期内必须将手放在钉板上，这会使实验总时长延长至180分钟，并可能导致参与者疲劳。因此，对于分开的 WHO 手部揉搓步骤任务，我们通过仅观测每位参与者手部的一侧（手掌侧或手背侧）来缩短实验时长。最终，每位参与者完成了30项可能任务中的21项。具体而言，一半的参与者完成了任务5–13（单独手部揉搓步骤，手背侧）和任务20–28（单独手部揉搓步骤，手掌侧）。

2.2 数据预处理

2.2.1 图像配准。我们的分析要求将热图像和 RGB 图像转换至同一坐标系。第一步是对热成像相机进行标定，以校正其镜头畸变。相机标定通常会使用棋盘或圆形标定板图案。然而，在我们的情况下，仅仅打印棋盘格图案并不够，因为它不具备热学特性。因此，我们使用 3D打印机制作了 12×6 白色棋盘，其中有36个正方形凹坑，并使用激光切割机制作了36个黑色立方体。将黑色立方体放在棋盘上后，RGB相机便可检测到 12×6 棋盘格图案（如图1所示）。同时，这些立方体可用微波炉加热，然后放在棋盘上，从而形成热成像相机可见的棋盘（如图1所示）。拍摄一组棋盘的热图像后，我们进一步使用 OpenCV 库 [6]处理这些图像。我们首先从每张图像中提取并记录棋盘内角点的位置，然后计算热成像相机的内参，以校正热图像中的畸变。

校正热成像相机的镜头畸变后，我们接着对相机之间的图像进行配准。由于 RGB 图像的分辨率远高于热图像的分辨率，为了尽可能保留 RGB 图像的细节，我们选择将热图像转换到 RGB 图像的坐标系中。首先，我们在实验装置中将相机安装在木框内（见附录 A 节）。然后，我们

加热黑色立方体，将其安装在棋盘上，并同时拍摄 RGB 图像和热图像。我们从两张图像中提取内角点，并求出它们之间的单应性。最后，我们将热图像透视变换到 RGB 图像的坐标系中。为避免相机移动造成误差，我们在每位参与者到场前都重复进行相机间的图像配准。

2.2.2 根据紫外图像获取真实值。相机标定并配准后，我们使用紫外图像标注了含酒精制剂覆盖的手部区域的真实值。为从紫外图像中识别手部区域，我们将白光下拍摄的 RGB 图像转换为 YUV 色彩空间，其中 Y 表示亮度分量，U 和 V 表示色度分量。随后，我们使用 V 通道（红色差色度分量）和大津法进行自动图像阈值分割 [20]。在二值图像中找到最大轮廓后，我们便可将手部从背景中分割出来。由于本研究主要关注手卫生，我们进一步将检测到的手部中手腕以上的区域分割为感兴趣区域（ROI），并通过手动标注手腕点作为真实值。

然后，我们从紫外图像中提取含酒精区域。由于实验中使用的荧光染料在紫外灯下会发出绿色荧光，我们将这些图像转换为色调、饱和度、明度（HSV）色彩空间，并使用 H 通道，通过设置 25 到 97 之间的阈值，专门检测绿色范围内的区域。为尽量减少先前试验残留荧光染料（视为噪声）的影响，我们使用 V 通道去除绿色且亮度较低（低于 60）的区域。

2.3 RGB 图像和热图像的分割

在此，我们采用了一种深度学习神经网络——U-Net。它是应用最广泛的生物医学图像分割算法之一，用于分割（1）RGB 图像中的手部区域，以及（2）热图像中的覆盖区域。

对于这两项分割任务，我们使用了相同的网络结构（如图 2 所示）。任务 1（从 RGB 图像中分割手部区域）的模型输入如图 3 所示。同时，任务 2（从热图像中分割含酒精免洗手消毒剂覆盖的区域）的输入将与基线图像、观测图像及其差异结合。在医疗保健环境中采用热成像时，背景可能会有噪声；因此，我们进一步利用任务 1 生成的分割后手部区域，从任务 2 的输入中去除背景信息。更多细节如图 3 所示。为扩大数据集，我们通过水平翻转图像进行数据增强。

我们通过结合交叉熵损失和 Dice 损失 [29]，使用 Combo loss 训练了两个模型。我们使用单块 Nvidia GeForce RTX 3080 Super（12GB RAM），在 PyTorch 中实现并训练了这两个模型。两个模型均训练了 30 个训练轮数，批量大小为 8。我们将输入图像调整为 $3 \times 483 \times 322$ 像素（原始图像的 16%）。采用 RMSprop 优化，初始学习率为 10^{-5}，权重衰减为 10^{-8}，动量为 0.9。我们基于以下规则调整学习率：如果验证集上的 Dice 系数连续两个训练轮数没有提高，学习率就会衰减至原来的 0.1 倍。

2.4 统计分析

通过测量两个分割任务的准确率和 Dice 系数来评估所提出系统的性能，并采用 5 折交叉验证检验其泛化能力。对于任务 1，我们将 U-Net 分割出的手部区域与人工分割的手部区域进行了比较。对于任务 2，由于先前的研究表明，荧光

染料能够突出显示手部表面上消毒充分的区域，且准确率可接受（灵敏度为 95%，特异度为 98%），因此我们比较了通过紫外图像和热图像检测出的结果之间的覆盖率差异。更多细节见第 2.2 节。2 [15]。

对于每张图像（包括左手和右手），我们计算了所有类别的准确率（任务 1：手部区域和背景；任务 2：覆盖或未覆盖含酒精制剂的手部区域）。同时，我们计算了感兴趣区域的 Dice 系数（任务 1：手部区域；任务 2：覆盖含酒精制剂的手部区域）。然而，由于在若干任务中，手部区域要么完全被含酒精制剂覆盖，要么完全未被覆盖（例如，仅步骤 1 的任务；更多详情见附录 B.2 节），覆盖率为 0% 会导致计算 Dice 系数时出现除零错误。因此，我们计算了 $Dice\ coefficient = \frac{2 \times True\ Positive}{2 \times TP + False\ Positive\ FP} (TP) + False\ Negative(FN) + \epsilon$，其中 $\epsilon = 0.001$ 用于避免除零错误。

由于数据存在异方差性，我们采用了 Welch方差分析（ANOVA）和 Welch-Satterthwaite自由度 [34]。统计分析使用 Python（3.6.8版本）和 statsmodels（version0.9.0）进行。

3 结果

3.1 分割性能

我们剔除了3名参与者（参与者1、13和22）的数据，因为他们未严格遵循研究方案（例如，未洗掉残留紫外染料，或在观察期内未保持双手静止）。考虑系统的准确率时，测量时间至关重要。酒精从参与者的手上挥发时，会导致温度暂时下降。这意味着，如果在涂抹酒精很久之后才进行热成像观察，可能就无法观察到任何效果。鉴于这些限制，我们报告10秒观察时间下的准确率和 Dice 系数：由于准确率最高，热成像观察在参与者将手放到钉板上10秒后进行。在后续章节中，我们将报告将这一时间窗口延长至最多60秒所产生的影响。

对于任务1的模型，5折交叉验证期间的平均准确率和 Dice 系数分别为99.6%（$SD = 0.0003$）和97.2%（$SD = 0.003$）。更多详情见图4a。同时，为验证使用热成像检测含酒精制剂覆盖率的准确率，我们汇总了热成像在不同参与者、手部尺寸和任务中的表现（覆盖率范围为0%至100%，以确保结果的可靠性和效度。

在所有参与者和所有实验中，该系统识别被含酒精制剂覆盖的手部区域的平均准确率为 93.5% (SD =0。046)，平均 Dice 系数为 87.1% ($SD = 0.195$)。我们还按参与者和不同任务对准确率进行了分组，并在图 4b 中展示了结果。其中，参与者 25 的平均准确率最高，为 96.0%；参与者 32 的平均准确率最低，为 84.9%。同时，参与者 7 的平均 Dice 系数最高（96.0%），参与者 32 的平均 Dice 系数最低（64.0%）。

此外，我们还测量了手部大小对准确率的影响。由于每位参与者每项任务使用的酒精量固定为 3 ml（ [5] 建议的用量），手较大的参与者每单位面积所用的酒精就会更少。因此，我们按手长将参与者分组：$160 \le XS < 171mm$、$171 \le S < 182mm$、$182 \le M < 192mm$ 和 $192 \le L < 204mm$，并将每位参与者的平均准确率作为一个数据点（如图4c所示）。单因素方差分析显示，不同手部大小组之间的系统准确率（$F_{3,\ 25} = 1.302$, $P = 0.295$）以及 Dice 系数（$F_{3,\ 25} = 0.662$, $P = 0.583$）均无显著差异。

我们还汇总了所有参与者的结果，计算每项任务的平均准确率（如图4d所示）。其中，任务30的平均准确率最高，为 96.3%；任务8的平均准确率最低，为 88.7%。此外，任务30的平均 Dice 系数最高，为 97.7%；任务5的平均 Dice 系数最低，为 17.6%。

如上述结果所示，尽管某些参与者和任务的准确率仍高于90%，其 Dice 系数却出现了数次显著下降。这一现象可能与含酒精配方覆盖区域的面积较小有关。因此，我们采用 Spearman相关性检验来考察 Dice 系数与含酒精配方覆盖区域面积之间的相关性。对于每位参与者，在所有任务中含酒精配方覆盖区域的平均百分比介于34.0%至73.6%之间，且与 Dice 系数存在较强的正相关性（0.840，$P < 0.001$）。对于每项任务，在所有参与者中含酒精配方覆盖区域的平均百分比介于6.1%至94.2%之间，同样与 Dice 系数存在较强的正相关性（0.967，$P < 0.001$）。这些发现表明，由于热成像相机的分辨率有限，且基线图像与观测图像之间的对齐并不完美，热成像可能无法识别面积较小且靠近边缘的区域。

3.2 变化观察时长的影响

在实验中，参与者完成全部 21 项任务后，需将双手放在观测钉板上 60 秒。在这 60秒观测期内，我们测量了双手逐渐回温对系统性能的影响。本节针对 30 名参与者中的每一位计算准确率和 Dice 系数，再按照观察时间对结果进行分组。由于分析所需的计算量较大，我们每隔 5 秒分析一次热成像结果，从延迟 0 秒（参与者将双手放在观测钉板上后立即拍摄图像）开始，直至延迟 60 秒，如图5所示。

最高平均准确率为 93.6%，出现在 10 秒时；在整个 60秒观测期内，所有平均准确率均高于 92%。同时，从 0 秒到 60 秒，所有平均 Dice 系数均高于 85%；最高平均 Dice 系数为 87.4%，出现在 35 秒时。更多详情见图5。

在整个60秒观测期内，准确率和 Dice 系数随时间推移略有下降。因此，我们通过 Spearman相关性检验评估观察时间与系统性能之间的相关性。观察时间与准确率、Dice 系数之间的相关值分别为 -0.275（$P = 0.026$）和 -0.034（$P = 0.785$）。尽管由于观察时间与系统性能之间存在较弱的负相关，建议尽早采集热图像，但在60秒观测期内，热成像仍能有效运行。

4 讨论

4.1 热成像性能

在我们的研究中，热成像在实验室环境下观察手卫生质量方面呈现出令人鼓舞的结果。通过比较热图像与紫外图像中检测到的区域，基于热像仪的系统在10秒观察时间时取得了最佳综合性能，准确率为93.5%，Dice 系数为87.1%。这意味着，该系统能够识别手部覆盖情况，其表现接近采用荧光染料和紫外光的金标准 [15, 23]。

然而，荧光染料的一大缺点是会留下残留物，因此并不实用，而且通常只用于教学场景。与紫外测试相比，热成像通过

测量含酒精制剂引起的细微温度变化来识别手部覆盖情况，无需添加额外成分。尽管如此，由于热成像相机分辨率较低，且基准照片与观测图像之间的对齐并不完美，热成像可能无法检测到面积较小且靠近边缘的含酒精制剂覆盖区域。为弥补这一不足，需要开发更先进的图像分割和配准算法，以便从背景中分割出手部及含酒精制剂覆盖区域，并对齐基准图像与观测图像中的手部。

此外，随着观察时间延长，含酒精制剂逐渐消散，系统性能也随之逐渐下降。尽管观察时间为 60 秒时，准确率和 Dice 系数最低，但两者仍分别达到 92.4% 和 85.7%。这意味着热成像能够较为准确地识别手部表面被含酒精制剂覆盖和未覆盖的大部分区域。

我们的研究展示了热成像如何有望助力医护人员开展手卫生工作。在 COVID-19 大流行期间及后疫情时期，这一点尤为重要，因为手卫生已被认为是预防病毒传播和医疗相关感染最有效的方法之一。然而，鉴于既往研究报告的手卫生依从性和质量较低 [3, 8, 13, 22, 28], ，有必要持续监测医护人员的手卫生依从性和质量。在医疗保健环境中采用基于热像仪的系统，医护人员和医院管理者便能持续监测手卫生质量，而无需打断日常工作。

4.2 在医疗保健环境中采用热成像

鉴于实际操作中难以在两次观测之间保持用户手部位置不变，我们建议采用三种替代方案，在医疗保健环境中使用热成像来配准基线图像与观测图像（如图6所示）。

第一种方案是提供图形用户界面（GUI），显示叠加了手部轮廓的线框 RGB 图像。该界面会指导医护人员在拍摄基线图像以及揉搓双手后拍摄观测图像时，将双手放在相同位置（详情见图 6 [24]）。不过，这种方案可能会出现手部未对齐的问题，从而导致分类错误并降低系统性能。

第二种方案是将手部分成若干区域，然后比较基线图像与观测图像中相同区域的温度差异（详情见图 6 [25]）。虽然医护人员知道某个区域接触了含酒精制剂，但由于该方案无法提供精确的覆盖率信息，他们无法确定该区域内哪些部位未接触制剂。

第三种方法是不计算各片段的温度差异，而是将手部片段映射到标准手部图示上（详情见图 6 [30]）。系统首先根据 MediaPipe 生成的关键点和指蹼点 [18], 将识别出的手部区域和手部图示分别划分为 18 个片段。然后，将手部区域中的片段与手部图示中的对应片段进行匹配和映射。这样，系统便能在不丢失覆盖率信息的情况下计算温度差异。因此，医护人员可以识别遗漏区域，而视觉干预也有助于他们改善手卫生。这种方法能够提供手部片段内部的丰富信息，并且比前述另外两种方法更能适应手部未对齐的情况。

5 结论

在本文中，我们展示了使用热成像检测含酒精制剂手部覆盖情况的可行性，从而监测手卫生质量。在对32名参与者进行的评估中，该系统取得了令人鼓舞的结果

在准确率和 Dice 系数方面表现良好，同时与使用紫外线浓缩液的金标准相当。我们的研究表明，采用热成像监测手卫生质量具有潜在的灵活性，这可能是朝着持续自动化手卫生监测系统迈出的一步，使其能够在不中断医护人员日常工作的情况下进行实时监测。

利益冲突

无。

致谢

本研究部分由 NHMRC 项目资助（项目编号 1170937 和 2004316）、欧盟地平线 2020 研究与创新计划（资助协议编号 957296），以及墨尔本大学工程与信息技术学院的博士论文写作奖资助。

参考文献

[1] ACGIH. 2016.《生物暴露指数文献汇编》，第7版。载于《*TLVs* 和 *BEIs*：化学物质和物理因素的阈限值及生物暴露指数》。[2] B. Allegranzi 和 D. Pittet. 2009. 手卫生在预防医疗相关感染中的作用。《医院感染杂志》73, 4 (12 2009), 305–315. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2009.04.019[3] Ariadna V. Arias、Humberto G. Garcell、Yagdeline R. Ochoa、Katiana F. Arias 和 Fernando R. Miranda. 2016. 使用世界卫生组织六步法评估手卫生技术。《感染与公共卫生杂志》9, 3 (5 2016), 366–369. https://doi.org/10.1016/j.jiph.2015.11.006[4] John M. Boyce. 2008. 手部卫生依从性监测：来自美国的当前观点。《医院感染杂志》70 (10 2008), 2–7. https://doi.org/10.1016/S0195-6701(08)60003-1[5] John M. Boyce 和 Didier Pittet. 2002. 医疗保健环境中的手卫生指南：医疗保健感染控制实践咨询委员会以及 HICPAC/SHEA/APIC/IDSA 手部卫生工作组的建议。https://doi.org/10.1067/mic.2002.130391[6] G Bradski. 2000. OpenCV 库。《*Dr. Dobb's* 软件工具杂志》(2000). https://doi.org/10.1111/0023-8333.50.s1.10[7] G. De Angelis、A. Murthy、J. Beyersmann 和 S. Harbarth. 2010. 估算医疗相关感染对住院时间和成本的影响。《临床微生物学与感染》16, 12 (12 2010), 1729–1735. https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2010.03332.x[8] Vicki Erasmus、Thea J. Daha、Hans Brug、Jan Hendrik Richardus、Myra D. Behrendt、Margreet C. Vos 和 Ed F. van Beeck. 2010. 医院护理中手卫生指南依从性研究的系统综述。《感染控制与医院流行病学》31, 3 (3 2010), 283–294. https://doi.org/10.1086/650451[9] P. Goroncy-Bermes、T. Koburger 和 B. Meyer. 2010. 卫生性手消毒中手消毒剂用量对减少手部微生物计数的影响。《医院感染杂志》74, 3 (3 2010), 212–218. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2009.09.018[10] Nicholas Graves、Kate Halton、David Paterson 和 Michael Whitby. 2009. 澳大利亚医院感染控制的经济学依据。医疗保健感染14, 3 (9 2009), 81–88. https://doi.org/10.1071/HI09010[11] Jesse Hoey、Pascal Poupart、Axel von Bertoldi、Tammy Craig、Craig Boutilier 和 Alex Mihailidis. 2010. 使用视频和部分可观测马尔可夫决策过程，为痴呆症患者提供自动洗手辅助。《计算机视觉与图像理解》114, 5 (5 2010), 503–519. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2009.06.008[12] R. Monina Klevens、Jonathan R. Edwards、Chesley L. Richards、Teresa C. Horan、Robert P. Gaynes、Daniel A. Pollock 和 Denise M. Cardo. 2007. 估算美国医院的医疗保健相关感染和死亡人数（2002年）。《公共卫生报告》122, 2 (3 2007), 160–166. https: // doi.org/10.1177/003335490712200205[13] Anne Korhonen、Helena Ojanpera、Teija Puhto、Raija Jarvinen、Pirjo Kejonen 和 Arja Holopainen. 2015. 手卫生指南的依从性——测量忠实度的意义。《临床护理杂志》24, 21-22 (11 2015), 3197–3205. https://doi.org/10.1111/jocn.12969[14] Ekaterina Kutafina、David Laukamp、Ralf Bettermann、Ulrik Schroeder 和 Stephan M. Jonas. 2016. 用于手动任务电子学习的可穿戴传感器：在手卫生培训中使用前臂肌电图。《传感器（瑞士）》(2016). https://doi.org/10.3390/s16081221[15] A. Lehotsky、L. Szilagyi、S. Bansaghi、P. Szeremy、G. Weber 和 T. Haidegger. 2017. 迈向客观的手卫生技术评估：基于紫外线染料的手部揉搓质量评估程序的验证。《医院感染杂志》97, 1 (9 2017), 26–29. https: // doi.org/10.1016/j.jhin.2017.05.022[16] Hong Li、Shishir Chawla、Richard Li、Sumeet Jain、Gregory D. Abowd、Thad Starner、Cheng Zhang 和 Thomas Plotz. 2018. WristWash：利用腕戴设备实现自动洗手评估。载于《国际可穿戴计算机研讨会论文集，*ISWC*》。https: //doi.org/10.1145/3267242.3267247

[17] David Fernandez Llorca、Ignacio Parra、Miguel Angel Sotelo 和 Gerard Lacey. 2011. 用于自动洗手质量评估的视觉系统。*MachineVision and Applications* 22, 2 (3 2011), 219–234. https://doi.org/10.1007/s00138-009-0234-7[18] Camillo Lugaresi、Jiuqiang Tang、Hadon Nash、Chris McClanahan、Esha Uboweja、Michael Hays、Fan Zhang、Chuo Ling Chang、Ming Guang Yong、Juhyun Lee、Wan Teh Chang、Wei Hua、Manfred Georg 和 Matthias Grundmann. 2019. MediaPipe：用于构建感知流水线的框架。[19] H. Margreet Oerlemans、Maud J.L. Graff、Judith B.G. Dijkstra-Hekkink、Theo De Boo、R. Jan A. Goris 和 Rob A.B. Oostendorp. 1999. 使用红外耳温计测量手部皮肤温度的可靠性和正常值：一项试点研究。*Journal of Hand Therapy*(1999). https://doi.org/10.1016/S0894-1130(99)80065-9[20] Nobuyuki Otsu. 1979. 基于灰度直方图的阈值选择方法。*IEEE Trans Syst Man Cybern* (1979). https: //doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076[21] Didier Pittet. 2001. 改善手卫生实践依从性：一种多学科方法。*Emerging Infectious Diseases* 7, 2 (4 2001), 234–240. http://www.cdc.gov/ncidod/eid/vol7no2/pittet.htm[22] Didier Pittet、Anne Simon、Stephane Hugonnet、Carmen Lucia Pessoa-Silva、Valerie Sauvan 和 Thomas V. Perneger. 2004. 医生的手卫生：表现、信念与认知。*Annals of Internal Medicine* 141, 1 (7 2004), 1. https://doi.org/10.7326/0003-4819-141-1-200407060- 00008[23] Jacqui S. Reilly、Lesley Price、Sue Lang、Chris Robertson、Francine Cheater、Kirsty Skinner 和 Angela Chow. 2016. 在英国急性医院护理中对比六步法与三步法手卫生技术的务实随机对照试验。*Infection Control and HospitalEpidemiology*(2016). https://doi.org/10.1017/ice.2016.51[24] Manfred Smieschek、Gregor Kobsik、Andre Stollenwerk、Stefan Kowalewski、Thorsten Orlikowsky 和 Mark Schoberer. 2019. 利用 RGB立体视觉在热成像中辅助检测手部。载于*IEEE*医学与生物学工程学会年度国际会议论文集（*EMBS*）。https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856990[25] Manfred Smieschek、André Stollenwerk、Patrick Jüptner、Stefan Kowalewski、Thorsten Orlikowsky 和 Mark Schoberer. 2016. 使用含酒精洗手液进行手部消毒的热成像评估。载于*CEUR Workshop Proceedings*。[26] M. E. Stefl. 2001. 《To Err is Human: Building a Safer Health System》：1999年版。https://doi.org/10.1097/01974520-200107000-00001[27] Patricia W. Stone、Sumya Hasan、Dave Quiros 和 Elaine L. Larson. 2007. 指南实施对手卫生成本的影响。*NursingEconomics* (2007).[28] Laszlo Szilagyi、Tamas Haidegger、Akos Lehotsky、Melinda Nagy、Erik-Artur Csonka、Xiuying Sun、Kooi Li Ooi 和 Dale Fisher. 2013. 对手卫生质量和“WHO六步法”有效性的大规模评估。*BMC InfectiousDiseases* 13, 1 (12 2013), 249. https: //doi.org/10.1186/1471-2334-13-249[29] Saeid Asgari Taghanaki、Yefeng Zheng、S Kevin Zhou、Bogdan Georgescu、Puneet Sharma、Daguang Xu、Dorin Comaniciu 和 Ghassan Hamarneh. 2019. Combo loss：处理多器官分割中的输入与输出不平衡。*Computerized Medical Imaging and Graphics* 75 (2019), 24–33.[30] Chaofan Wang、Weiwei Jiang、Kangning Yang、Zhanna Sarsenbayeva、Benjamin Tag、Tilman Dingler、Jorge Goncalves 和 Vassilis Kostakos. 2022. 手卫生技术的计算评估系统。*Journal of Medical Systems* 46, 6 (2022), 36. https://doi.org/10.1007/s10916- 022-01817-z[31] Chaofan Wang、Weiwei Jiang、Kangning Yang、Difeng Yu、Joshua Newn、Zhanna Sarsenbayeva、Jorge Goncalves 和 Vassilis Kostakos. 2021. 手卫生电子监测系统：技术系统综述。https://doi.org/10.2196/27880[32] Chaofan Wang、Zhanna Sarsenbayeva、Xiuge Chen、Tilman Dingler、Jorge Goncalves 和 Vassilis Kostakos. 2020. 使用传感器臂带准确测量洗手质量：测量工具验证研究。*Journal ofMedical Internet Research* (2020). https://doi.org/10.2196/17001[33] Chaofan Wang、Kangning Yang、Weiwei Jiang、Jing Wei、Zhanna Sarsenbayeva、Jorge Goncalves 和 Vassilis Kostakos. 2022. 使用图像到图像转换评估手卫生质量。载于《医学图像计算与计算机辅助干预——*MICCAI 2022*：第*25*届国际会议，新加坡，*2022*年*9*月*18*日至*22*日，论文集，第七部分》。Springer, 64–73.[34] Peter D. Welch. 1967. 使用快速傅里叶变换估算功率谱：一种基于对修正周期图进行短时段时间平均的方法。*IEEE*音频与电声学汇刊 (1967). https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901[35] 世界卫生组织（WHO）. 2009. 《*WHO*医疗保健手卫生指南》。[36] 世界卫生组织（WHO）. 2015. *WHO*：如何使用含酒精制剂进行手部揉搓？ https://www.youtube.com/watch?v=ZnSjFr6J9HI

图

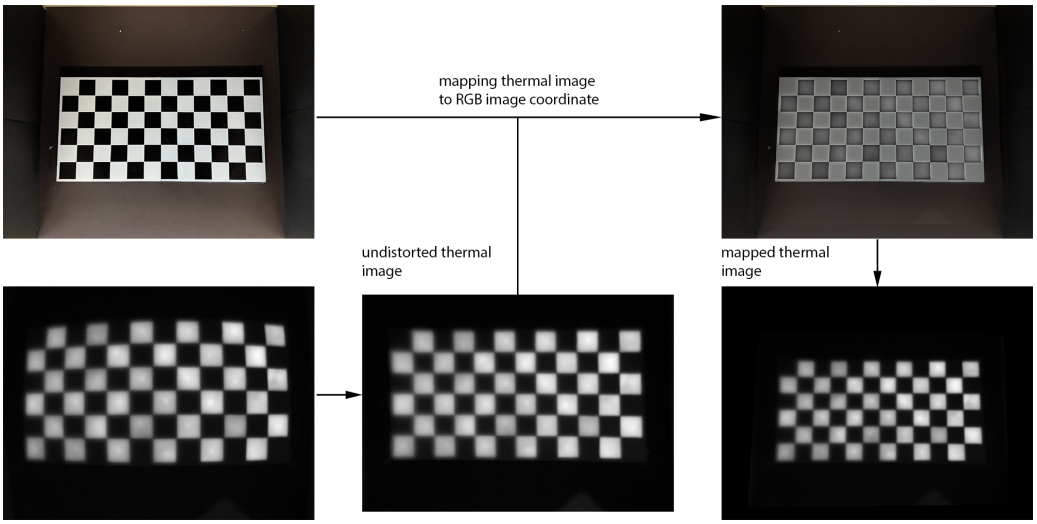


图1. 将热成像相机配准到 RGB 相机坐标系的流程

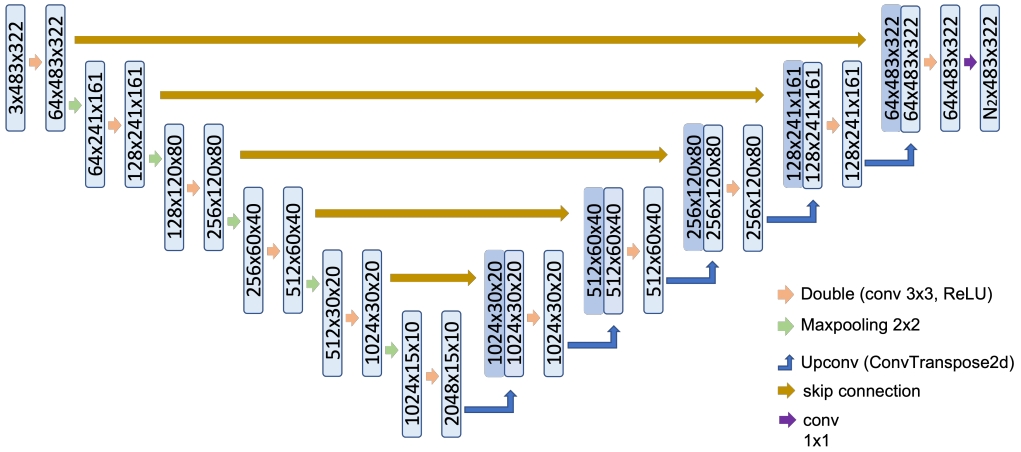


图2. 所提出模型的模型结构。

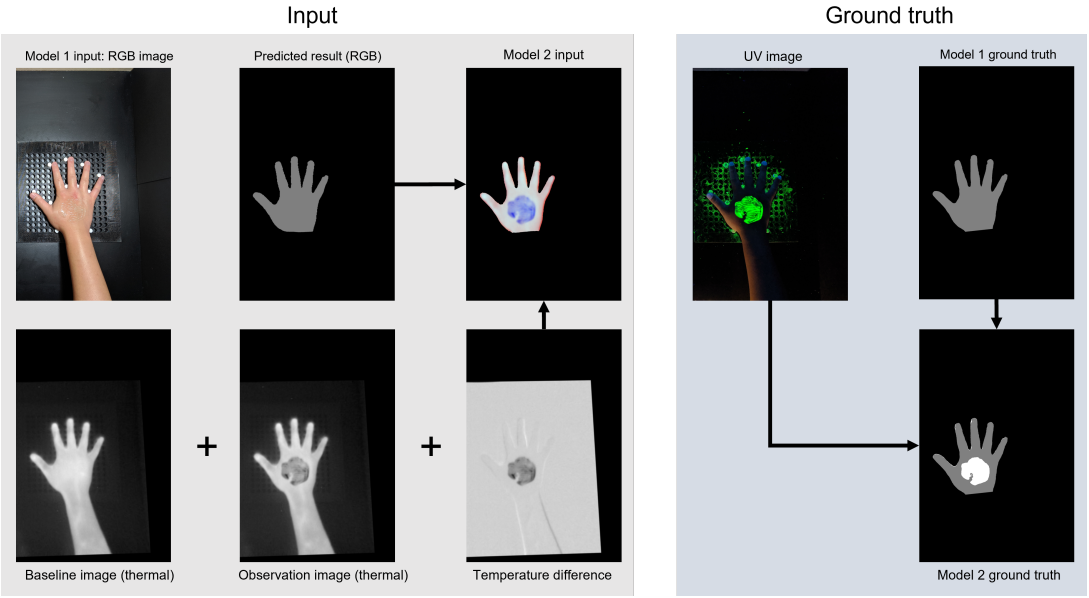
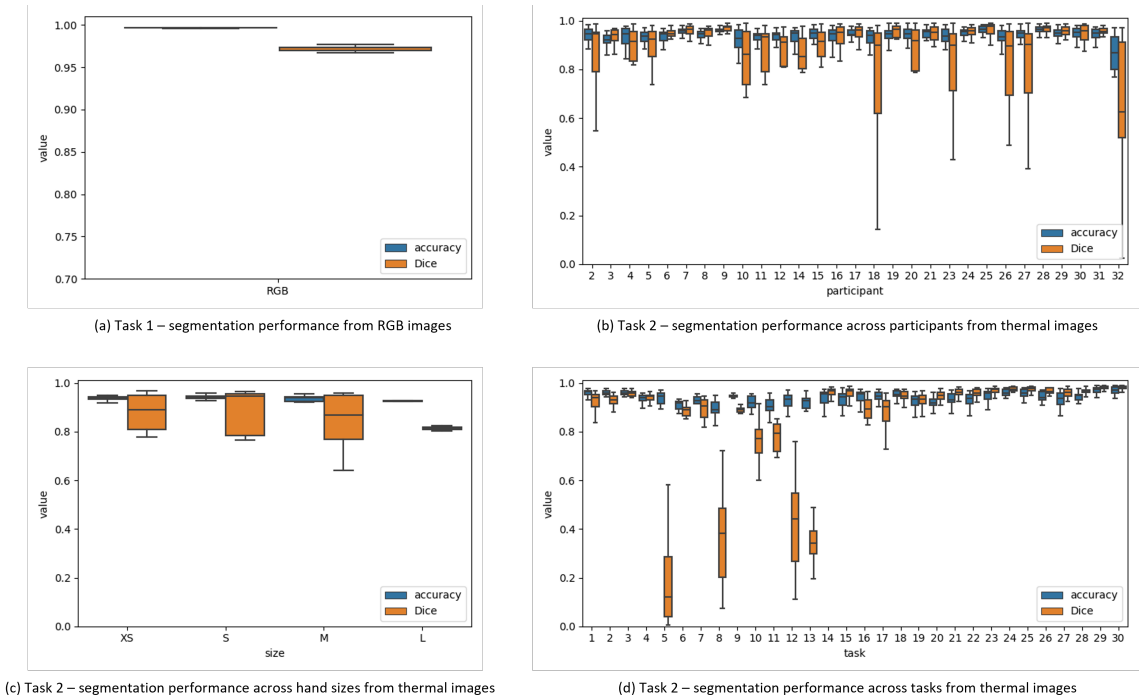


图 3。所提出模型所需的输入。



(a) Task 1 – segmentation performance from RGB images

(b) Task 2 – segmentation performance across participants from thermal images

(c) Task 2 – segmentation performance across hand sizes from thermal images

(d) Task 2 – segmentation performance across tasks from thermal images

图 4。参与者、手部尺寸和任务的分类准确率及 Dice 系数。

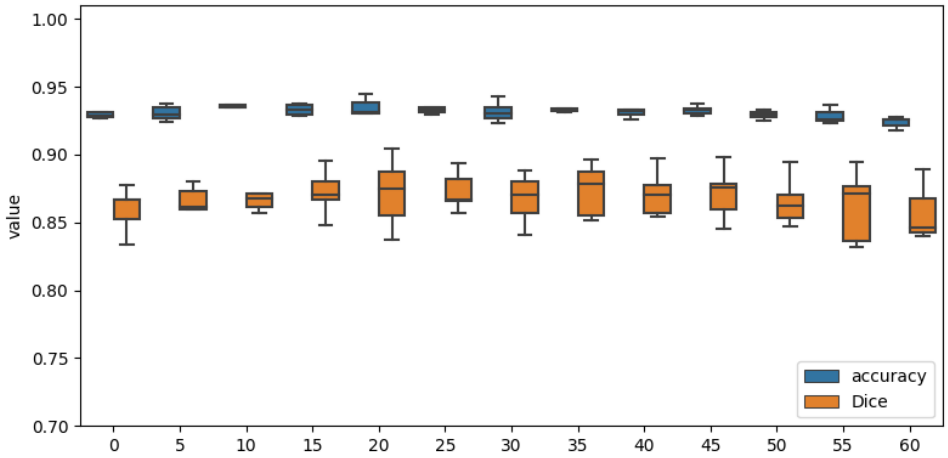


图 5. 观察 60 秒期间准确率和 Dice 系数的系统性能。

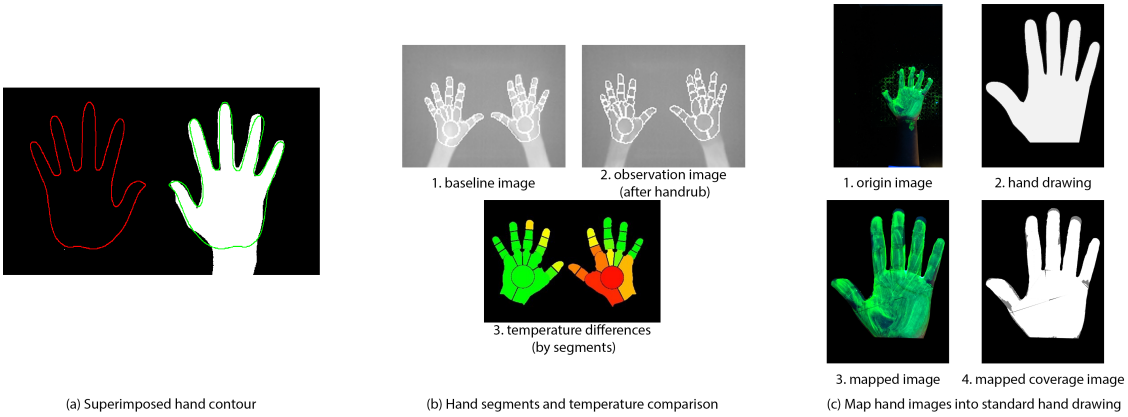
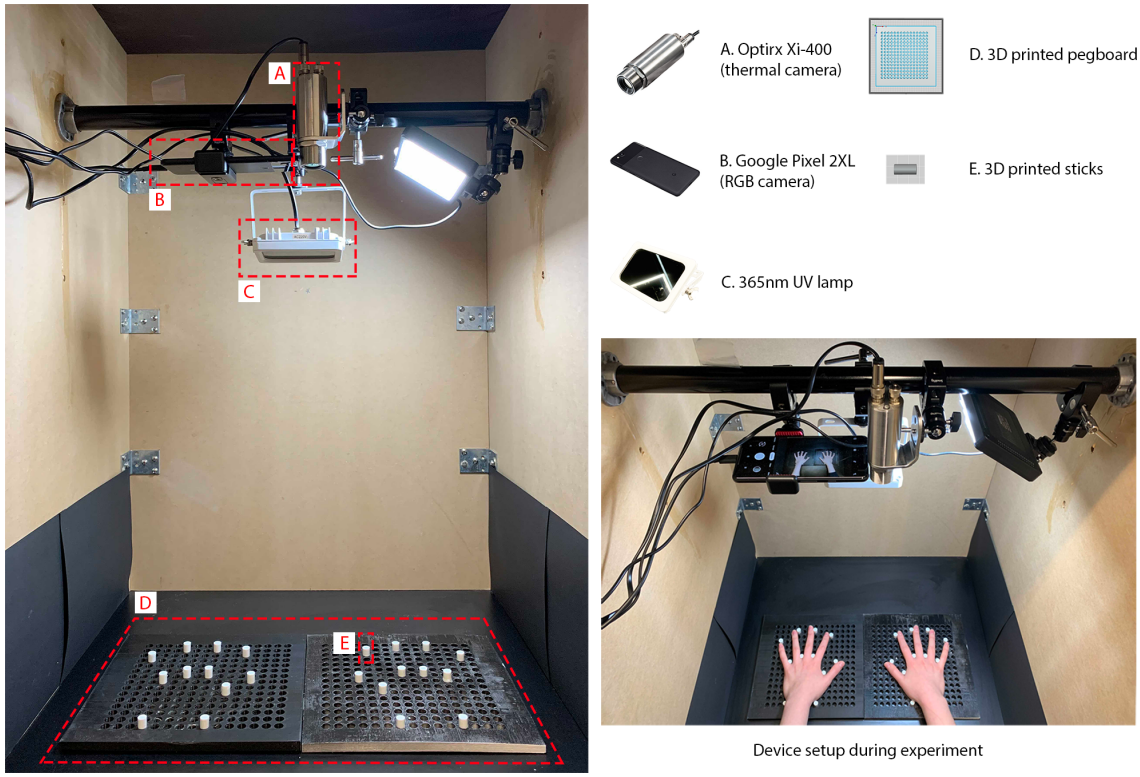


图 6. 在医疗保健环境中部署热成像的替代方法。方法 (a) 基于 [24], 方法 (b) 基于 [25],, 方法 (c) 基于 [30]。

硬件设置

我们使用智能手机（Pixel 2XL，Google LLC）上的 RGB相机采集 RGB 图像，分辨率为4032 × 3024 像素。使用热成像相机（Optris Xi 400，Optris GmbH）采集热图像，分辨率为 382 × 288 像素，视场为 18∘ × 14∘ ($f = 20\,mm$)，热灵敏度（噪声等效温差）为 80 mK。我们将 RGB相机和热成像相机居中安装在木框上，并将两者并排放置（详情见附录图 1）。



附录图 1. 实验装置。

我们的目标是测量使用热成像相机估算含酒精制剂在参与者的手上涂抹面积的准确率。我们将紫外图像（在紫外灯下拍摄的 RGB 图像）视为真实值。为了验证使用热成像的准确率，我们计算紫外图像与热图像之间的覆盖差异。这意味着两台相机必须拍摄同一样本（即参与者的手）。为此，我们将有色抗菌洗手凝胶（Microshield Angel Blue，Schülke & Mayr GmbH）与荧光手消毒剂配方（Glitterbug Gel，OnSolutionPty Ltd）按 3:2 的比例混合。这意味着含酒精制剂既保留了其热学特性，同时又具有荧光特性，因此在紫外光下可见。此外，为确保参与者的安全，我们使用有效辐照度为 $30\,mW/cm^2$ 的 365 nm UV-A灯来检测荧光手消毒剂配方的覆盖率。两者之间的距离

UV-A灯与钉板之间的距离为 55 cm。我们还控制每位参与者的总观察时长，使其低于每日紫外线照射阈值 3.0 mJ/cm^2 [1]。

此外，我们预计参与者手上的酒精挥发后，手部会开始变暖，这可能会降低热成像的实用性。因此，我们连续记录了 60 秒内热成像性能的变化。不过，在这 60 秒的观察期间，参与者可能会移动双手，导致计算两张热图像之间的覆盖差异时出现错位。为了尽量减少观察期间参与者手部的移动，我们使用 3D打印机制作了一对钉板和木棍，帮助参与者将双手固定在同一位置（见附录图1）。需要指出的是，在实际部署中不需要钉板和木棍，因为它们是为便于进行 60 秒的观察、测量系统性能变化而设计的；而实际评估只需几百毫秒即可完成。

B 任务设计

我们设计了四类任务，使用荧光手消毒剂配方，以不同的覆盖面积和位置涂抹参与者的手，从而系统地评估热成像性能。这些任务包含简洁的图案，便于图像处理软件识别和处理。此外，我们将世界卫生组织推荐的手部揉搓消毒程序作为其中两项任务 [35]。世界卫生组织的手部揉搓消毒程序包含六个步骤，每个步骤也汇总于附录表1中，其中某些步骤需要在每只手上重复进行。

附录表1：世界卫生组织六步手部揉搓消毒程序。

步骤编号	各步骤说明
1	双手掌心相对揉搓
2（Ra）	右手掌放在左手背上，手指交错揉搓
2（左手背）	左手掌覆于右手背上，手指交错
3	掌心相对，手指交错
4	手指交扣，以指背揉搓对侧手掌
5（右）	右手掌握住左拇指进行旋转揉搓
5（左）	在左手掌中握住右拇指进行旋转揉搓
6（右）	将右手手指交扣，在左手掌中前后旋转揉搓
6（左）	将左手手指交扣，在右手掌中前后旋转揉搓

a R：右。

b L：左。

因此，参与者需要在实验中完成以下类型的任务（任务描述见附录 B.1 节，示例图见附录 B.2 节）：(1) 形状——我们使用四种不同形状的印章（包括圆形、六边形、正方形和星形），将含酒精制剂印在参与者的手上。(2) 均匀分布——我们使用刷子将一层含酒精制剂涂抹在参与者的手上，覆盖率分别为 0%、50% 和 100%。(3) WHO 单独手部揉搓步骤——要求参与者单独执行步骤 1，或先执行步骤 1，再分别执行附录表 1 中描述的各个 WHO 手部揉搓步骤，使用 3 ml 含酒精制剂 [35]。执行其他单独步骤前必须先执行步骤 1，因为没有步骤 1，其他步骤无法将含酒精制剂涂开。(4) WHO 完整手部揉搓程序——要求参与者使用 3 ml 含酒精制剂执行完整的 WHO 手部揉搓程序 [35]。

B.1 实验任务描述

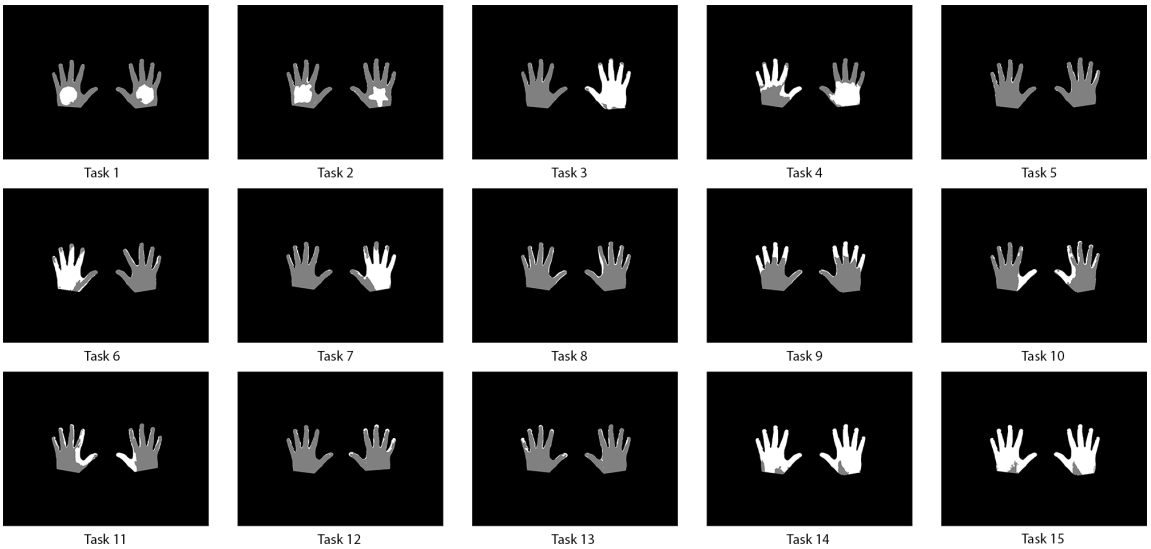
附录表 2. 实验任务描述。

Task	手侧	任务类型	描述
1	手背	印章	圆形（La） + 六边形（Rb）
2	手背	印章	矩形（L） +星形（R）
3	手背	刷子	0%（左） + 100%（右）
4	手背	刷子	50%（左，上半部分） + 50%（右，下半部分）
5	手背	单独手部揉搓步骤	1
6	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 2 (R)
7	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 2 (L)
8	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 3
9	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 4
10	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 5 (R)
11	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 5 (L)
12	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 6 (R)
13	手背	单独手部揉搓步骤	1 + 6 (L)
14	手背	完整手消毒流程	-
15	手背	完整手消毒流程	-
16	手掌侧	印章	六边形（左） + 圆形（右）
17	手掌侧	印章	星形（左） + 矩形（右）
18	手掌侧	刷子	100%（左） + 0%（右）
19	手掌侧	刷子	50%（左，下半部分） + 50%（右，上半部分）
20	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1
21	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 2 (R)
22	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 2 (L)
23	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 3
24	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 4
25	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 5 (R)
26	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 5 (L)
27	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 6 (R)
28	手掌侧	单独手部揉搓步骤	1 + 6 (L)
29	手掌侧	完整手消毒流程	-
30	手掌侧	完整手消毒流程	-

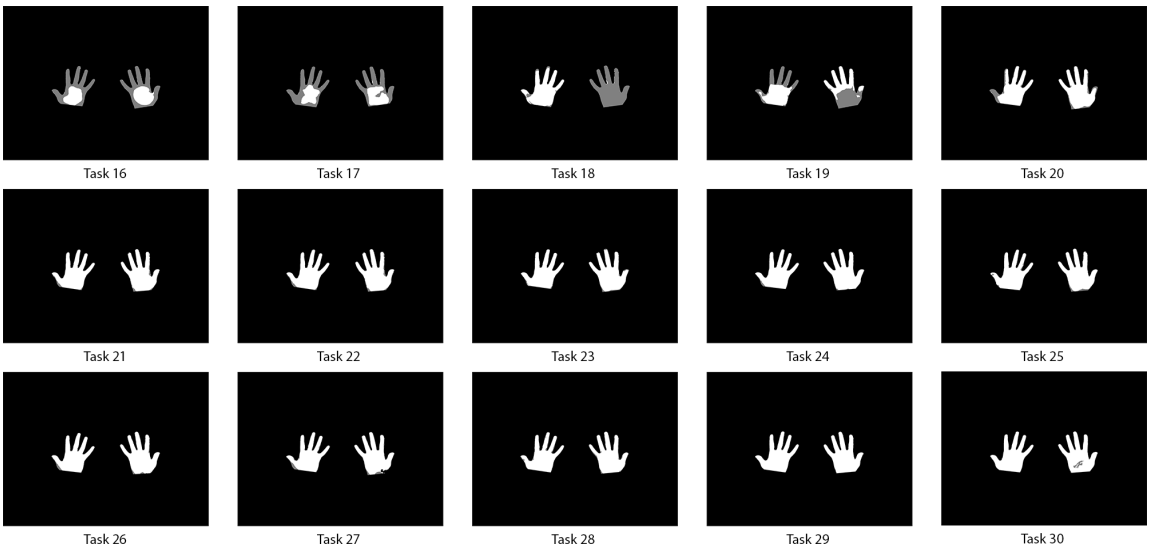
a L：左。

b R：右。

B.2 含酒精免洗手消毒剂覆盖的表面区域



附录图 2。任务 1–15 中含酒精免洗手消毒剂覆盖的表面区域（手背侧）。



附录图 3。任务 16–30 中含酒精免洗手消毒剂覆盖的表面区域（手掌侧）。