迈向用于眼科学视网膜数据可视分析的统一用户界面

Martin R¨ohlig[1, a]，Lars Nonnemann[2, a]，Hans-J¨orgSchulz[3, b]，Oliver Stachs[4, c]和 Heidrun Schumann[5, a]

[a]视觉与分析计算研究所，罗斯托克大学，德国[b]计算机科学系，奥胡斯大学，丹麦[c]眼科系，罗斯托克大学医学中心，德国

arXiv:2301.01840v1 [cs.HC] 4 Jan 2023

摘要

视网膜数据的可视分析有助于深入理解各种眼病。为了评估横断面研究，眼科医生依赖于其工作环境中已建立的工作流和工具集。也就是说，他们了解工作流的每个步骤需要哪些工具和数据。然而，手动操作各种工具（包括启用工具、处理数据或调整视图布局）可能既繁琐又耗时。因此，我们提出一种新的可视化支持的工具链方法，将工作流、工具和数据结合起来。首先，我们为工作流的每个步骤提供所需工具。其次，我们处理这些工具之间的数据交换。第三，我们使用合适的布局来安排工具视图在屏幕上的位置。第四，我们将工作流、工具和数据之间的联系可视化，以支持数据分析。我们通过眼科研究中的一个用例展示了这一方法，并报告了专家的初步反馈。

1 引言

多年来，人们开发了许多不同的可视分析（VA）工具，用于支持广泛应用领域中的医疗数据分析。其总体目标是通过提供决策和知识发现的手段，帮助领域专家开展数据分析。眼科学领域也是如此，可视分析工具有助于人们加深对各种眼病的认识。通过与眼科医生合作，我们利用专门针对视网膜数据的可视分析工具，提高了早期视网膜缺陷的检测能力 [37, 40]。为此，我们专门根据眼科医生的需求开发这些工具，并将其整合到他们评估横断面研究的工作流中。

然而，单一的可视分析工具往往不足以全面处理复杂的分析工作流。一方面，这是因为分析的不同步骤可能需要不同的可视分析工具。另一方面，通常还需要数据管理和预处理工具，以及用于统计分析和汇总最终结果的工具。总的来说，可视分析工具主要用于实际可视化数据分析所需的步骤。其余步骤通常借助其他软件解决方案完成，范围从临床信息系统到检查设备

-

专用软件到通用电子表格和统计软件。其原因在于，试图将

-

所有功能整合到单一工具中，会显著增加软件开发和维护所需的工作量。在某些情况下，由于时间和资源限制，或者所使用的专有算法或数据格式，这甚至可能根本无法实现。因此，领域专家必须与各种工具（无论是否基于可视分析）交互，并在这些工具之间交换数据，以完成分析工作流中的所有必要步骤。

由此产生的一个问题是，对于该领域中的某个分析工作流，如何协调所需工具及其在屏幕上的相应可视化输出，可能并不显而易见。对于每个工作流步骤，领域专家都必须先确定要使用哪些工具，以及要显示哪些信息，然后再决定如何在屏幕上呈现这些内容，以完成当前步骤。这给工作流带来了额外负担，使其执行起来更加繁琐且耗时。与此同时，通常没有工具支持用户在进行实际数据分析的同时完成这些辅助任务。相反，在实践中，专家必须手动切换预处理、可视化数据分析和结果解读等不同阶段，并手动操作工具及其输出。每次执行工作流时，往往都必须反复进行这些操作。

我们提出一种新颖的可视化支持工具链式方法，将工作流、工具和数据整合在一起。通过眼科学中视网膜数据分析的一个用例，我们展示了该方法不仅

[1]martin.roehlig@uni-rostock.de[2]
lars.nonnemann@vcric.igd-r.fraunhofer.de[3]
hjschulz@cs.au.dk[4]oliver.stachs@uni-rostock.de[5]
heidrun.schumann@uni-rostock.de

能够提供每个工作流步骤所需的工具和数据，还能帮助在屏幕上组织这些工具的用户界面（UIs）。这减少了工作流执行期间管理各种工具和数据所需的额外开销。在与眼科医生合作时，专家因此能够专注于横断面研究评估中的实际数据分析步骤。我们的贡献如下：

工作流与工具的整合：我们结合用例考察工作流、工具与数据之间现有的关联，并建立有意义的联系，以便在恰当的时机访问合适的工具、数据和视图。

工具链的可视化支持：W e
我们提出了一种编辑器，支持交互式创建工具链，并为工作流的每个步骤调整工具和数据。我们整合了统一用户界面，用于展示工作流、工具和数据，并帮助在屏幕上组织多个工具视图。

实践应用：我们与领域专家合作，在眼科学领域的一个用例中评估了我们的方法。我们讨论了该方法与当前数据分析实践的差异，并报告了专家的初步反馈。

本文其余部分的结构如下：第2节第2节介绍背景和当前的分析工作流，随后在第3节概述相关工作。我们在第4节详细阐述整合工作流、工具与数据的方法。在第5节介绍应用示例和用户反馈。最后，在第6节讨论结论和未来工作的主题。

2 背景

在眼科学中，人们会分析各种检查方法获取的数据，以了解不同眼病对人类视网膜状况的影响。一种广泛使用的检查方法是光学相干断层扫描（OCT） [1, 2]。现代 OCT 扫描仪能够以高空间分辨率对多层视网膜的亚结构进行无创成像 [3]。通过分析 OCT图像，眼科医生能够检测常见的眼部疾病，例如年龄相关性黄斑变性 [18], 糖尿病视网膜病变 [25],或青光眼 [20], ，以及其他具有眼部体征的病理状况，例如多发性硬化 [17]。因此，OCT 检查如今已成为诊所中的标准流程，也是眼科研究不可或缺的一部分 [26]。

我们尤其关注眼科研究中横断面研究背景下的OCT数据分析。在此类研究中，需要将多个OCT数据集与其他临床记录中的信息结合分析，以比较患者与健康对照组的视网膜状况。这是一个复杂的过程。为了处理研究数据，眼科医生依赖于其工作环境中已建立的工作流和工具集。这些工作流可分为三个常见阶段：

数据准备：收集并处理所有研究参与者所需的数据，包括依据研究标准进行筛选和审查。之后，组建患者组和对照组。

数据分析：利用准备好的数据，计算患者与对照组之间的差异。选择感兴趣的数据子集，并进行测量和统计量化。

结果摘要：研究发现中与研究设计最相关的部分汇总如下。最终结果通过图像、绘图和表格组合呈现。

在这三个阶段中，眼科医生会针对不同类型的数据使用不同的工具。第一阶段使用的工具通常包括临床信息系统、OCT设备专用软件，以及用于管理和处理原始电子健康记录和OCT数据集的通用电子表格软件。第二阶段主要使用统计软件分析准备好的数据，近年来也开始使用面向探索的可视分析工具 [34,38]。在此阶段，数据通常会补充计算所得的测量值，并缩减为相关子集。最后，在第三阶段，使用制图工具对选定结果进行汇总和呈现。

在当前的分析实践中，从通用工具到专用于可视化的工具，各类工具的组合都必须手动操作。然而，切换工具可能颇为困难，因为眼科医生必须记住工作流的各个环节分别使用哪些工具，在恰当的时机找到这些工具，并手动启动它们。由于所用数据格式各异，且各种工具之间的兼容性有限，数据交换也可能非常耗费人力。因此，要追踪数据何时在不同工具之间传输并不容易。此外，还必须合理安排工具的输出在屏幕上的位置，因为某些工作流步骤需要同时操作多个工具，而非仅操作一个。例如，在数据探索阶段，往往需要在选择数据子集、对其进行可视分析以及统计量化之间反复切换。总的来说，工作流步骤、工具和数据之间整合有限，通常会增加执行分析工作流所需的时间和精力，并给眼科医生带来额外负担。

因此，我们的目标是帮助眼科医生在恰当的时机呈现恰当的工具，展示工具之间的数据流，并明确每一步使用了哪些数据、生成了哪项输出。建立这种程度的支持，有助于减少工作流执行过程中管理各种工具和数据所需的额外工作。

3 相关工作

基于工作流的工具链的开发涉及可持续数据交换方面的挑战 [39]以及工具互操作性 [27]。尽管这两个研究领域本身都很复杂，但使用多个可视分析工具还会给工作流协调带来一个额外问题，即如何统一彼此独立工具的用户界面。

管理多个视图的方法有很多，从内置可视分析工具的综合应用工具包，到松散耦合、同时运行的应用程序，不一而足 [10, 9]。现有解决方案大多依赖以下方法：

集成视图： Tableau [4]、Dashiki [11], 或 Fusion [5]等应用程序允许用户在给定界面中快速组合多个视图。这通常通过 Web界面来创建混搭应用 [15] 或 Web图表 [13]。如果有足够的屏幕空间，同一环境中甚至可以纳入数十个独立视图 [32]。然而，采用集成式方法也有局限性，因为随着纳入的视图数量增加，视觉负荷也会随之增大。

耦合视图： 有些方法不采用嵌套式或选项卡式用户界面，而是通过松散耦合的独立视图来实现视图编排。这样一来，便可将这些视图交互式地组合到同一个界面中。例如，WinCuts [6] 和 Fa.cades [8], 会将任意视图区域复制到一个组合界面中，以聚焦于与任务相关的区域。其他方法则依靠独立视图之间隐式或显式的可视化链接，促进视图间的关联 [16, 23]。

视图的集成与视图的耦合，都取决于视图的数量和可用的屏幕空间。在这方面，基于工作流的工具执行顺序变得十分重要。通过提供工具链，可以明确哪些工具需要在何时处于活动状态，以及哪些数据需要从一个工具传递到下一个工具。这有助于减轻当前分析步骤的视觉负荷。虽然这能帮助用户进行数据分析，但也意味着必须考虑如何随时间管理工具视图。就此而言，工具视图的显示方式可分为两种基本类型：

顺序显示： 在简单的工作流场景中，一次仅通过一个工具视图显示信息便已足够。例如 Stack'n'flip [19], ，其中视图按顺序显示，并可通过中央界面进行交互式切换。

并行显示： 对于更复杂工作流中的某些分析任务，需要同时执行多个工具，并将各个视图并行显示。一个例子是 ManyVis [21], ，其中多个视图在一个集成的可视化环境中共同呈现。

协调多个工具时，工具链本身有时也会以可视化方式编码，例如用有向图展示其连接关系 [12, 27]。考虑到工具随时间完成的步骤和生成的数据，在数据溯源可视化领域也能找到类似的可视化方法，尤其是工作流溯源和数据溯源方面 [29]。例如，AVOCADO [28]用于可视化工作流产生的生物医学数据；VisTrails [7], 、Galaxy [14], 或 Taverna [22] 等系统则用于自动跟踪和可视化工作流与数据溯源。这些系统对工作流步骤及相关数据的呈现，有助于用户理解数据分析并使其可复现。然而，迄今为止，针对工作流步骤执行、工具的顺序或并行使用及其数据交换，以及屏幕上视觉输出布局的综合支持，几乎尚未得到探讨。

在此背景下，我们最近提出了一种用于可视分析（VA）的分层工具链方法 [41]。我们的核心思想是将给定工作流中的可视分析工具建模为一张图，其中工具作为节点，不同层级的通信则表示为有向边。无论工具是按顺序使用、反复来回使用，还是同时并行使用，这种方法都能灵活描述不同的耦合方式。基于这一模型，我们得以刻画可视分析工具之间的数据交换 [39] ，并推出了 ReVize [36], ：一个用于为基于 Web 的应用程序添加工具链支持的库，并以 Vega-Lite [30]作为通用交换格式。我们还展示了一个框架，可通过在独立的可视分析工具之间建立自定义数据连接，交互式地创建工具链 [42, 44]。然而，我们尚未探讨如何呈现和交互统一用户界面，也未解决在实际工作流执行过程中如何将工具的输出合理整合在一起。

总而言之，用户界面元素的统一有多种方法。对于眼科学中的视网膜数据分析，目前尚不清楚如何将这些方法付诸实践，尤其是在评估横断面研究等复杂分析场景中。因此，我们旨在弥补其中的不足，并为我们的应用示例制定一致的协调方法。为此，我们以分层工具链的构想为基础 [41]，并探究：(1) 在工作流的哪些环节展示哪些工具；(2) 在工具之间交换哪些数据部分；(3) 如何在屏幕上呈现工具和数据；以及 (4) 如何建立工作流、工具与数据之间的联系，以支持视网膜数据分析。

4 基于工作流的工具链，用于可视分析

我们的目标是支持眼科学中视网膜数据可视分析的工具链。为找到合适的解决方案，我们首先考察应用用例中的需求，并在此基础上提出新的概念和可视化设计。

4.1 需求

我们通过访谈眼科医生并观察其工作，全面了解当前的分析实践。随后，我们共同参与了两项研究的统计分析 [31, 33]，之后又开展了另外两项研究 [37, 40] 的分析，这些研究综合采用了统计工具和可视分析工具。由此，我们深入了解了他们的工作流以及可视分析、统计学和通用分析软件的使用情况。最后，我们整理出了一系列与视网膜数据分析中可视分析工具协调相关的设计需求。

工具访问 (R_1)： 在工作流中，工具的时间顺序及其相互作用通常仅被隐式定义。一方面，这意味着眼科医生必须记住当前工作步骤需要激活哪些工具。另一方面，他们还需要确定应同时使用这些工具显示哪些内容。这些内容包括当前所需的面板和视图，也包括有关可用数据的信息，以及有关已使用工具或后续工具的信息。因此，必须支持在恰当的时间访问恰当的工具。

工具与数据的连接（R_2）： 通常，在工作流执行期间，完整数据不会在分析工具之间反复传递。相反，数据会逐步减少，有时甚至会选择性扩展，以提取有价值的信息。因此，眼科医生不仅必须在工作流开始时向工具提供原始数据，还必须在后续工作流步骤中管理各工具之间不同数据片段的交换。这包括负责工具之间所有必要的数据转换，以及在分析过程中部分数据发生变化时进行更新。因此，支持在正确的时间访问正确的数据，并在数据与工具之间建立联系，是一项必要条件。

工具视图的排列(R_3)： 激活不同工具时，其视图的布局应与其在工作流相应部分中的预期用途相符。如果这些工具依次使用，其视图可以简单地互换。然而，如果这些工具并行使用，就必须在屏幕上以合理的方式组织其视图，以便有效地配合使用。此外，还需要导航功能，不仅能让用户在工作流步骤及其对应的视图布局之间切换，还能帮助用户同时保持方向感。因此，需要提供支持，以便在适当的时机获取合适的视图布局，从而管理工具的可视化输出。

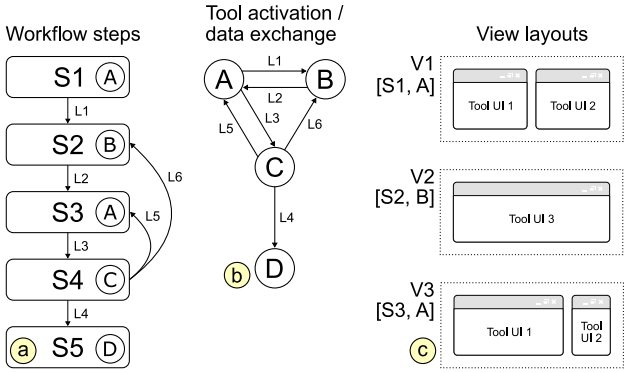

图1：协调组件概览。其中展示了工作流步骤$S1$至$S5$（a）、关联的工具集A至D（b）、工作流步骤与工具之间的链接$L1$至$L6$，以及分配给每个工作流步骤和工具集的视图布局$V1$至$V3$（c）。

，还能帮助用户同时保持方向感。因此，需要提供支持，以便在适当的时机获取合适的视图布局，从而管理工具的可视化输出。

从可视分析的角度来看，三个需求（R_1）至（R_3）与三个基本问题相关，回答这些问题是为了支持我们用例中的工具链。第一个问题是展示什么？。就需求（R_1）而言，它涉及选择在特定时刻需要向用户呈现的所有相关信息。第二个问题是交换哪些数据部分？，对应需求（R_2）。其目标是识别有趣的数据子集，并考虑何时以及如何在工具之间交换这些数据。第三个问题是如何展示？。这与需求（R_3）相关，主要涉及当前工具中视图和面板的布局与调整。此外，还包括呈现有关工作流本身的信息，以及工作流步骤、数据和工具之间的关联。通过在可视分析设计中回答这三个问题，我们能够实现工作流、工具、数据和视图布局之间有意义的协调。

4.2 工具、数据与视图布局的组合

为了满足我们的设计需求并回答相应的三个问题，我们首先需要确定若干项信息。为此，我们以先前关于可视分析中轻量级工具链分层方法的研究为基础 [41]。具体而言，我们实现并调整了所提出的协调模型，以建立以下四个组成部分之间的联系：(i) 领域工作流，(ii) 所用工具，(iii) 所分析的数据，以及 (iv) 工具视图的布局。图1 展示了这些组成部分之间的相互作用。

我们首先考察应用领域中现有的工作流及其使用的工具。这使我们能够

为每个工作流步骤确定一组工具（图 1a）。通常，完成每个步骤可能需要一个或多个工具。根据工作流步骤的顺序，可以推导出这些工具必须按何种顺序激活。步骤之间的往返过程也决定了哪些工具之间必须建立哪些数据连接。掌握这些信息后，我们逐步为成对的工具定义链接，从而构建协调图 [41]（图 1b）。这些链接既体现了工具的使用流程，即所有可能的激活序列，也体现了数据流，即工具之间所有可能的数据交换。基于此，我们进一步定义不同的工具视图排列，并为每种工作流步骤与工具集的组合指定合适的布局（图 1c）。请注意，同一组工具可用于多个工作流步骤，但工具内容可针对每个特定步骤以不同布局显示。我们根据用户偏好确定这些布局。例如，我们支持从一组默认布局中进行选择，或为每个步骤保存自定义视图排列。

最终的协调图提供了在我们的用例中实现工具链所需的全部《Information》。也就是说，它使我们能够随时查询需要激活或停用哪些工具、需要将哪些数据片段从当前工具传递到下一个工具，以及屏幕上应如何显示哪些内容。这样，我们尤其能够回答以下问题：显示什么？(R_1)以及交换哪些数据片段？(R_2)。将不同的视图布局纳入图中，也为回答第三个问题如何显示？(R_3)奠定了基础。然而，只有在运行时执行工作流、且用户通过交互决定按何种顺序处理各个步骤后，才能确定协调图中的实际路径。因此，除了在屏幕上排列各个工具之外，还必须能够访问协调图、工作流的进度以及执行过程中获得的结果。为此，我们提出了一种新的设计，以可视化且交互式的方式呈现这些信息，再次专门针对第三个问题：如何显示？(R_3)。

4.3 支持用户界面组合统一的可视化

工作流描述了用户要执行的分析步骤。每个步骤会使用一个或多个工具。协调图展示了工具之间的成对耦合关系以及相关的数据交换。指定的布局决定了工具视图在屏幕上的显示方式。由此形成的工具链负责控制工具的使用，包括在不同工具之间来回切换。

为了有效使用协调图，必须向用户提供其中包含的信息。因此，我们设计了一个统一用户界面，用于可视化工作流及其协调图。我们的设计帮助用户创建或调整协调图，从中检索信息以执行工作流，并理解所获得的结果。该界面由多个视图组成，可在当前工作步骤与后台相应的工具链之间切换。

工作流和协调图的可视化：从用户的角度来看，在执行特定工作流之前，了解当前工作的概况非常重要。这不仅包括必须执行的各个工作流步骤，还包括待分析的数据，以及工具协同支持的程度。因此，我们通过统一用户界面提供工作流概览和协调图。工具链编辑器可以详细查看工具之间的各个连接，并根据需要进行调整。图 2 展示了由三个视图组成的设计。

该工作流视图以流程图的形式展示工作流步骤（图 2a）。步骤显示为矩形，并根据其所属的工作流阶段着色（准备、分析、摘要）。矩形之间的箭头表示步骤之间可能的往返关系。通过高亮显示已执行的步骤和链接，可展示工作流当前的进度。

该协调图视图以网络可视化的形式展示工作流中使用的工具集（图 2b）。工具集以圆形表示，连线则表示它们之间的数据交换和激活能力。将鼠标悬停在圆形上可显示更多信息，例如各工具集包含哪些工具，以及这些工具在哪些步骤中使用。

第三个视图由一个工具链编辑器（图 2c）组成。基于我们先前的工作 [42, 44], ，该编辑器的主要用途是建立工作流与协调图之间的联系。它由三个面板组成，分别显示所有可用工具（顶部）、所有数据源（底部）以及工具之间的链接（中间）。在我们的界面中，编辑器有两项功能。第一项是针对给定的工作流和工具集创建协调图（如果尚不存在）。通过这三个面板，可以使用拖放逐步添加工具之间的链接。第二项功能是指定计划执行工作流时用作输入的数据源，并调整工具之间的数据转换。这三个视图共同概览了所涉及的工作、工具和数据，并支持按需设置工具协调。

支持工作流执行：通过协调图建立工作流与工具协调之间的连接后，就必须为各个工作流步骤的执行提供支持。在此过程中，重要的是告知用户当前需要完成什么，同时提供导航支持，说明之前已完成的工作以及接下来要做的事情。此外，还需要

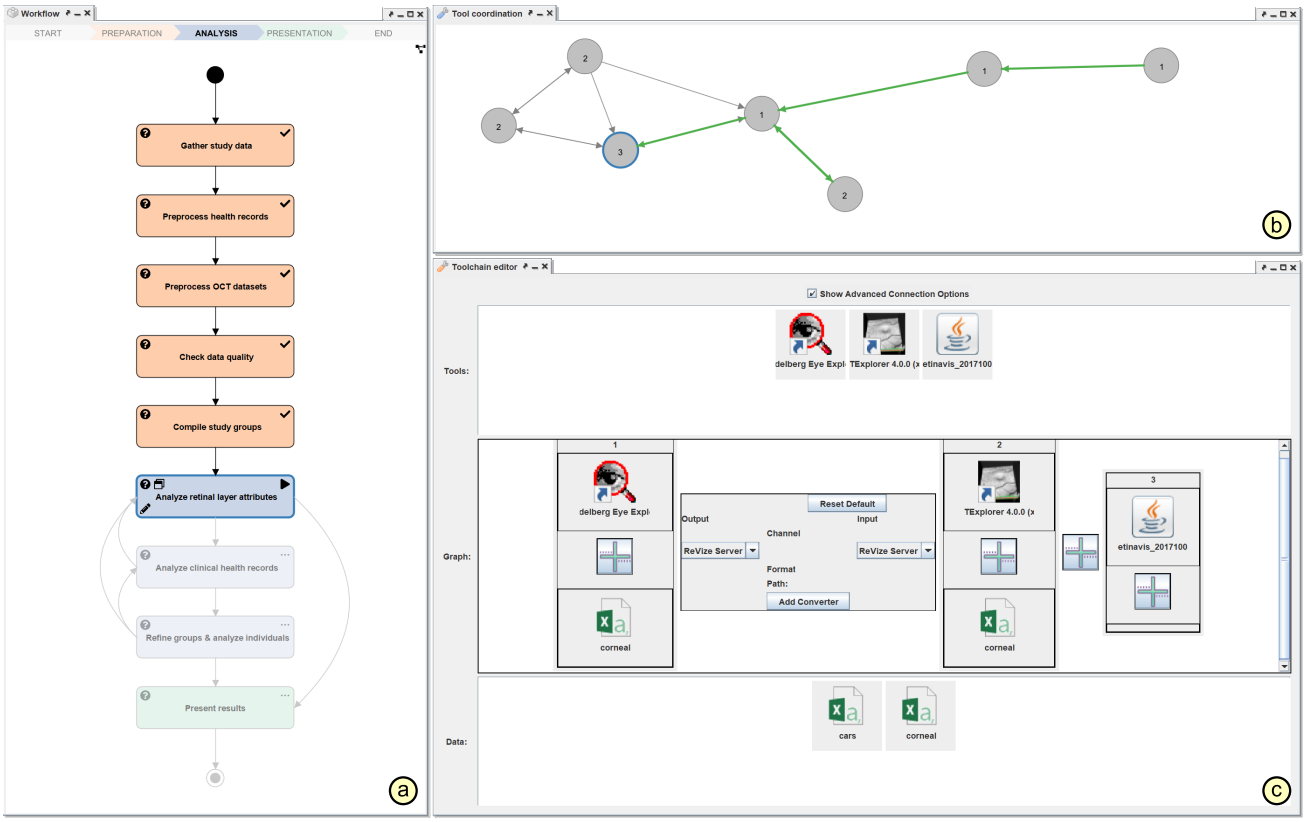

图 2：工作流、协调图和工具链编辑器的可视化。工作流步骤以彩色矩形显示（a）。协调图以网络可视化的形式呈现，其中圆圈表示工具，连线表示工具之间的连接（b）。工具链编辑器（c）由三个面板组成，分别显示可用工具（顶部）、数据源（底部）以及工具之间的数据连接（中部）。

能够记录工作内容和进展。如图3所示，我们的界面通过详细显示当前步骤以及有关协调的其他信息来提供支持。

为了在工作流执行期间聚焦当前步骤，工作流视图会从概览切换为详细视图（图 3a）。当前步骤会放大显示，并展示需要完成的事项说明，以及完成这些事项所需的工具在屏幕上的布局。上一步显示在当前步骤上方，接下来可能执行的步骤则显示在下方。点击这些步骤即可在工作流中前进或后退。选定工作流步骤后，相应的工具便会自动启用，其内容也会根据指定的布局在屏幕上排布。最后使用的工具与当前工具之间的数据交换也会按照协调图中的定义自动处理。这样便省去了手动查找合适工具、启用工具、传递工作数据，以及自定义内容在屏幕上的显示位置等操作。用户可随时切回概览可视化（图 2），查看工作流和协调图中迄今为止实际经过的路径。这样会在概览中突出显示当前步骤和工具的连接，从而可以随时调整协调图。

我们的界面还有助于记录已完成的工作。一方面，用户可以设置当前工作流步骤的状态（例如，待处理、已完成、已暂停、已取消），以表明工作进展。此外，还可以在步骤中添加备注，说明工作是如何完成的，以及是否需要偏离原定的工作描述（图 3b）。另一方面，可以通过对屏幕上当前可见的工具内容进行屏幕截图来捕获中间结果（图 3c）。用户可以选择屏幕上的任意区域添加多张截图，并通过参考图像查看哪些区域已被捕获。如果工作过程中出现相关变化，可以更新或移除所选屏幕区域的内容。如果某个工作流步骤被多次访问（例如，在工作流中前后导航），每次激活都会创建一组新的备注和截图。由此便可生成所有已完成工作的详细历史记录。特别是在工作流中采取不同路径时，这有助于回顾为获得各个结果而执行了哪些步骤。

汇总结果：在工作流执行期间及完成后，通常都需要总结已完成的工作。在不同工作流步骤和多个工具之间来回切换，可能会使得工作完成后难以回顾工作内容并从多个中间结果中提取最有意义的见解，而——

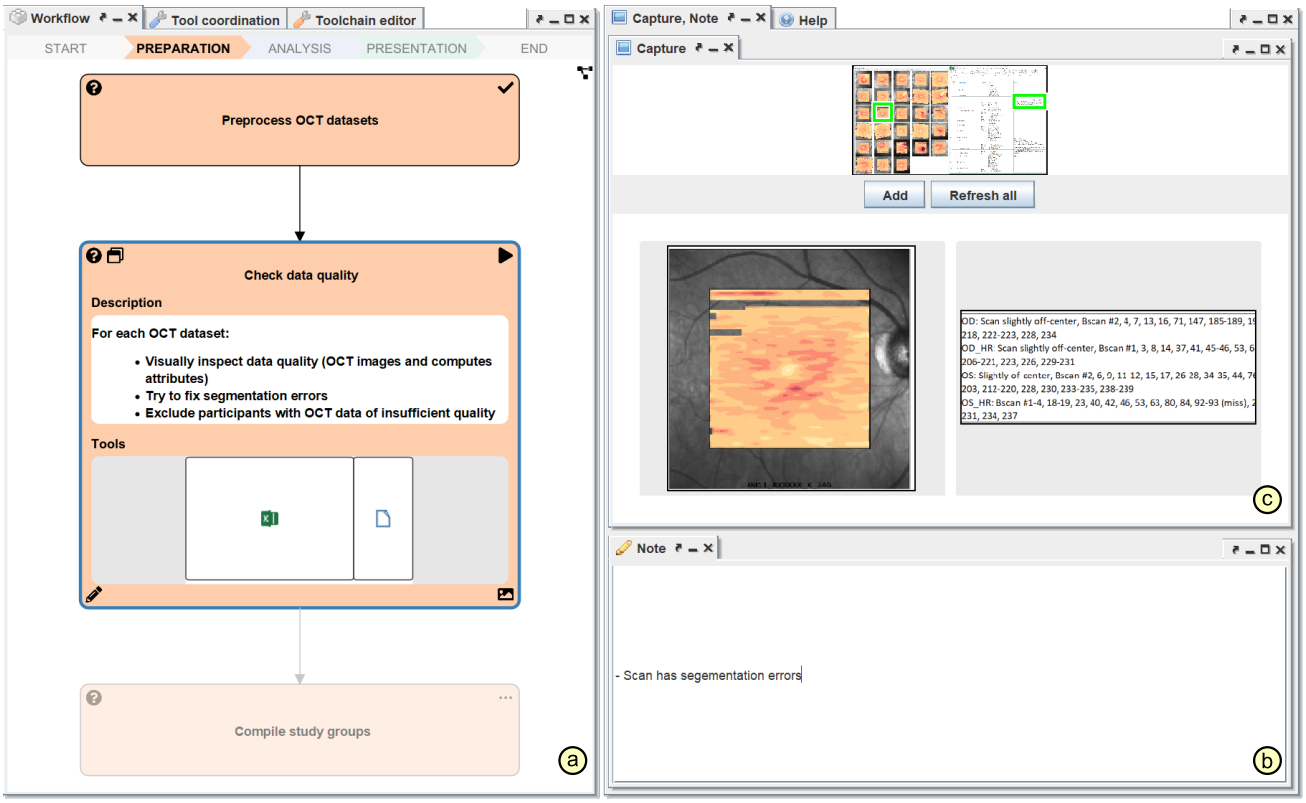

图3：可视化各个工作流步骤及其他信息。左侧放大显示当前步骤及其附加信息，并在其上方和下方显示前一个和下一个可能的步骤（a）。右侧展示当前步骤的完整说明和用户备注（b）。此外，中间分析结果以屏幕截图列表的形式显示（c）。

且，工作完成后也可能难以回顾工作内容并从多个中间结果中提取最有意义的见解。事实上，最终结果不一定来自单个工作流步骤和一组工具。更常见的情况是，需要协调并比较来自多个步骤和工具的中间结果，以全面了解已完成的工作和获得的见解。因此，我们的界面提供了一个额外的汇总视图，用于汇总跨工作流步骤和工具的结果。图4展示了这一视图。

摘要视图由三个区域组成。下方区域按照工作流步骤的启用顺序显示所有已执行步骤的历史记录（图4a）。每个步骤均以彩色矩形表示，并配有小图标，用于指示是否已截取中间结果。中间区域按各自所属的步骤分组列出中间结果（图4b）。上方区域可通过拖放交互式地将中间结果合成为一张图像（图4c）。完成的图像随后可以导出以供进一步使用。这样便可汇总并比较数据分析的主要发现。如果只分别考虑工作步骤及其相关工具，没有我们的统一用户界面，这几乎不可能直接实现。

总体而言，统一用户界面的不同视图在工作流、工具、数据与显示内容之间建立了视觉联系。因此，我们的设计方法有助于用户创建符合特定工作流的协调图，并为执行工作流和理解结果提供有价值的信息。为了评估该方法的实用性，我们以眼科学中的一个用例进行了测试。

5 视网膜数据分析的应用

我们与眼科医生合作，应用并测试了我们的解决方案。如第 2 节简要所述，眼科医生尤其关注横断面研究中视网膜OCT数据的分析。在这类研究中，会将一组患者的数据与对照组的数据进行比较，以确定所研究的疾病对视网膜状况及其他测量所得临床参数的影响。所有研究参与者的数据采集完成后，研究评估便会按照既定工作流开展，通常分为三个阶段：（1）数据准备，（2）数据分析，以及（3）结果摘要。然而，目前眼科医生必须手动操作完成这些阶段所需的工具。因此，我们共同根据他们的步骤和工具创建了一张协调图，并将我们的解决方案所支持的工作流执行情况与他们在以往研究中手动协调工具的经验进行了比较



图4：工作流历史和结果构成的可视化。底部显示所有已执行工作流步骤的历史记录（a）。中间列出了所有捕获的中间结果（b）。顶部则以概览形式总结选定的中间结果，展示数据分析的主要发现（c）。

。 [31, 40]。

5.1 工作流、工具和数据的关联

在我们的用例中，我们重新评估了一项先前研究 [40] 的数据，重点关注早期检测糖尿病患者视网膜内层的厚度变化。该研究分析了33名糖尿病患者和40名健康对照组的数据。

数据：在研究评估中，我们区分了两类输入数据。第一类是视网膜OCT数据集，包括每位参与者视网膜的三维图像和分割后的层边界。第二类是临床健康记录。每位参与者的记录包含多种参数，例如年龄、身体质量指数、血糖水平以及所接受的药物治疗类型。

使用的工具：我们使用了总共 8 种不同的工具来处理和分析数据。一方面，这些工具包括专门用于采集和处理视网膜OCT数据的商业软件工具。为了管理来自电子健康记录的表格数据，我们还使用了通用电子表格软件和统计软件。另一方面，我们应用了自主开发的可视分析工具，用于探索视网膜OCT数据以及来自临床健康记录的多变量数据 [24, 34, 38] 。对于统计分析，我们还使用了自定义脚本和 R软件环境 [43]。

工作流：为了评估研究数据，我们在此前关于视网膜数据的基于工作流的可视分析研究基础上开展工作 [38]。我们与眼科医生合作，改进了方法，将全面开展眼科研究所需的多种工具和数据源纳入其中。在扩展后的工作流中，眼科医生需要完成 9 个步骤（图 2a）。在前 5 个步骤中，他们专注于数据准备，包括收集所有受试者的研究数据、计算视网膜厚度、检查数据质量，以及组建要进行比较的两组。在接下来的 3 个步骤中，眼科医生继续进行数据分析，主要分析两组间厚度值的差异。他们还交替分析 OCT

数据和临床参数，以识别离群值并据此优化分组。为此，他们结合使用可视探索和统计假设检验。因此，尤其在这一阶段，他们需要在各个工作流步骤之间反复切换，以将数据范围缩小至相关子集。在最后一个步骤中，眼科医生根据对已识别子集的分析总结关键发现，包括提取相关数据值的图像并创建其他图表，例如突出显示有趣的统计结果。

工具链：我们使用工具链编辑器（图 2c）创建了用例所需的工具协调。首先，我们将所有工具和数据集导入编辑器。随后，我们与眼科医生共同着重通过自动化激活来确保工具能在需要时使用。为此，我们在概览可视化中显示工作流步骤，并使用编辑器在工具之间创建相应的链接。编辑器中连接关系的可视化表示帮助我们了解各个工具在何时被使用。然后，我们利用编辑器的拖放功能设置工作流的数据输入，并自定义工具之间的数据传输。建立链接后，我们通过逐步执行工作流进行了测试，以确保建模的协调图符合眼科医生的预期。测试运行也有助于为每个工作流步骤中自动激活的工具分配合适的视图布局。基于默认布局，眼科医生能够进一步调整内容的显示位置，以及每个视图在屏幕上占用的空间。布局以及工作流和协调图的说明均已保存，以便后续执行。

5.2 工作流执行与测试

我们根据与眼科医生共同定义的用例，应用了工作流和工具链。在构思我们的方法以及测试解决方案的过程中，我们通过与两位眼科专家的讨论，获得了初步的非正式反馈。

工作流与工具链的执行：完成上述初始配置后，我们执行了先前保存的工作流和工具链描述。从工作流概览（图2a）开始，将用户界面切换至详细视图（图3a），逐一浏览各个步骤。在每个步骤中，已分配的工具都会被激活，其视图也会自动排列在屏幕上。我们根据显示的待执行操作说明，使用提供的数据操作这些工具。如有必要，我们可以在工作流视图和工具链编辑器之间切换，查看当前步骤中工具链的底层数据交换和转换（图2c）。

在整个工作流执行过程中，我们使用开发的用户界面控件收集用户评论和中间结果的屏幕截图（图3b、c）。随后，我们将这些结果汇总为主要发现的最终概览，而可视化的工作流历史则有助于回顾各部分是在什么阶段、哪个步骤中得出的（图4）。

通过我们这种可视化支持的工具链方法，我们提取并重现了先前分析同一研究数据时得到的相同医学发现 [38, 40]。不过，这一次，我们能够通过统一用户界面支持工作流的全部三个阶段，从数据准备到数据分析，再到结果摘要。与以往研究中的人工协调相比，这减少了启用各种工具、管理工具间的数据交换，以及组织其视图以便顺序或并行显示所需的工作量。

讨论与用户反馈：根据工作流执行的结果，专家的反馈总体上是积极的。他们特别指出，通过统一用户界面以可视化方式呈现工作流，并访问相关工具和数据，具有诸多益处。他们也认为，支持采用不同布局，在屏幕上排列每个工作步骤对应的工具视图十分有用。他们还赞同直接在用户界面中，根据中间评论和屏幕截图汇总结果的想法，但指出，未来版本的已配置工具链可能需要纳入更多工具，以便生成用于汇报研究结果的最终图表。尽管如此，他们仍认可我们为实现视网膜数据分析统一用户界面所提出的解决方案。

另一方面，鉴于工具异质性，在工作流和工具链配置过程中，用例的所有步骤都无法实现完全自动化。进一步微调我们的通用解决方案，有助于适配评估此类眼科研究数据时涉及的一些特定步骤。然而，总体而言，我们一致认为，只协调必要的内容，而非理论上可行的所有内容，以平衡配置工作流和工具链所需的工作量，以及在统一用户界面中开发额外控件所需的工作量。与此相关的是，我们讨论了为强行耦合那些看似不兼容的工具而必须预先投入的工作，并考量了执行过程中实际获得的支持程度，以及这些方案超越特定用例的普适性。最终，我们的讨论提出了未来改进的若干方向（第 6 节）。

最后，我们注意到，有必要对我们的方法进行更深入的测试和正式评估，以在此处所述初步结果的基础上，全面评估我们解决方案的优势与局限。因此，我们目前正与眼科医生继续开展研究，进一步开发用于视网膜数据分析的统一用户界面。具体而言，我们还将考虑结合其他数据类型的多工具分析工作流，以及

研究方法，包括与囊性纤维化相关的视网膜变化以及乳腺癌患者的纵向治疗效果 [45]。

6 总结与未来工作

我们提出了一种用于眼科学中视网膜数据可视分析的新型工具链方法。我们的方法由两部分组成。第一部分是协调图，用于捕捉工作流步骤、所使用的工具、待分析的数据以及要在屏幕上显示的工具内容之间的相互作用。第二部分是统一用户界面，可针对给定工作流创建和自定义此类图，访问执行工作流所需的全部信息，并理解所获得的结果。通过将这两部分结合起来，我们不仅能够回答三个基本问题显示什么？、交换哪些数据部分？和如何显示？，还满足了合作眼科医生的需求。初步用户反馈表明，我们的解决方案有助于评估横断面研究，并且与当前对各个分析工具进行手动同步相比，减少了协调开销。

关于未来工作，我们认为可以从多个方向进一步支持工作流与工具链的集成。例如，目前我们通过为每个工作流步骤设置各个工具窗口的固定布局，将工具内容显示在屏幕上。这使用户无需在每次激活工具时手动排列窗口。接下来，可以探索如何动态重新排列这些布局，以自动或交互方式适应用户在数据分析过程中关注重点的变化。在多屏可视分析中探索的自动布局计算等方法 [35],可能会对此有所帮助。此外，目前各个工具窗口的全部内容都会原样显示。未来，如果可行，提取工具视图中仅必要的部分，并将其直接集成到我们的统一用户界面中显示，或许是值得尝试的。类似于 WinCuts [6]和 Fa,cades [8], ，这可以减少屏幕上的杂乱，例如移除冗余的界面组件；与此同时，我们对工作流和协调图的可视化有助于理解其图形构成。

关于协调图，我们迄今只考虑了工具激活以及工具间的数据交换。然而，在测试过程中，我们也发现有必要在参数层面同步工具。这些参数尤其包括可视化专用参数，例如应用的筛选器或高亮显示，以及所选的色标。在不同工具间一致地调整这些参数，可使可视化输出相匹配，从而让屏幕上的复合表示更易于理解。未来要解决这些问题，还需要开展更多用户研究，以评估我们方法的适用性以及扩展所带来的潜在益处。

致谢

本研究得到了德国研究联合会的支持（UniVA 项目，资助编号 380014305）。

参考文献

[1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Sc hu- man, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto. “光学相干断层扫描”。载于：《科学》254.5035 (1991)。 DOI: 10.1126/science.1957169.[2] M. R. Hee, J. A. Izatt, E. A. S wanson, D. Huang, J. S. Schuman, C. P. Lin, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto. “人类视网膜的光学相干断层扫描”。载于：JAMA Ophthalmol 113.3 (1995)。 DOI: 10 . 1001 / archopht . 1995 . 01100030081025.[3] W. Drexler, U. Morgner, R. K. Ghanta, F. X. K¨artner, J. S. Schuman, and J. G. Fujimoto. “超高分辨率眼科光学相干断层扫描”。载于：Nat Med 7.4 (2001)。 DOI: 10.1038/86589.[4] C. Stolte, D. Tang, and P. Hanrahan. “Polaris：用于查询、分析和可视化多维关系数据库的系统”。载于：IEEE TVCG 8.1 (2002)，页 52–65。 DOI: 10 . 1109/2945.981851.[5] C. North, N. Conklin, K. Indukuri, V. Saini, and Q. Yu. “Fusion：多样化数据、可视化和挖掘算法的交互式协调”。载于：CHI’03 扩展摘要。ACM，2003，页 626–627。 DOI: 10.1145/765891. 765897.[6] D. S. Tan, B. Meyers, and M. Czerwinski. “WinCuts：操控任意窗口区域，以更有效地利用屏幕空间”。载于：CHI’04 扩展摘要。ACM，2004，页 1525–1528。 DOI: 10.1145/985921.986106.[7] L. Bavoil, S. P. Callahan, P. J. Crossno, J. Freire, C. E. Scheidegger, C. T. Silva, and H. T. Vo. “VisTrails：实现交互式多视图可视化”。载于：IEEE可视化大会。2005，页 135–142。 DOI: 10.1109/VISUAL.2005.1532788.[8] W. Stuerzlinger, O. Chapuis, D. Phillips, and N. Roussel. “用户界面立面：迈向完全可适配的用户界面”。载于：用户界面软件与技术研讨会论文集（UIST）。ACM，2006，页 309–318。 DOI: 10.1145/1166253.1166301.[9] J. C. Roberts. “前沿综述：探索性可视化中的协调视图与多视图”。载于：协调与多视图探索性可视化国际会议论文集（CMV）。IEEE，2007，页 61–71。 DOI: 10.1109/CMV.2007.

20.

[10] M. D¨ork, S. Carpendale, C. Collins, and C. Williamson. “VisGets：用于网络信息探索与发现的协调式可视化”。载于：IEEE TVCG 14.6 (2008)，页 1205–1212。 DOI: 10.1109/TVCG.2008.175.[11] M. McKeon. “利用基于维基的可视化仪表板，发挥网络信息生态系统的作用”。载于：IEEE TVCG 15.6 (2009)，页 1081–1088。 DOI: 10.1109/TVCG.2009.148.[12] M. Tobiasz, P. Isenberg, and S. Carpendale. “Lark：通过信息可视化协调同地协作”。载于：IEEE TVCG 15.6 (2009)，页 1065–1072。 DOI: 10 . 1109/TVCG.2009.162.[13] D. Fisher, S. Drucker, R. Fernandez, and S. Ru- ble. “无处不在的可视化：用于关联可视化的多平台基础设施”。载于：IEEE TVCG 16.6 (2010)，页 1157–1163。 DOI: 10.1109/TVCG.2010.222.[14] J. Goecks, A. Nekrutenko, J. Taylor, and The Galaxy Team. “ Galaxy：支持生命科学领域开展可访问、可复现且透明的计算研究的综合方法”。载于：Genome Biol. 11 (2010)，R86。DOI: 10.1186/gb-2010-11-8-r86. [15] S. Pietschmann, T. Nestler, and F. Daniel. “表示层的应用程序组合：替代方案与待解决问题”。载于：国际信息集成与基于 Web 的应用程序及服务会议论文集（iiWAS）。ACM，2010，页 461–468。 DOI: 10.1145/1967486.1967558.[16] M. Waldner, W. Puff, A. Lex, M. Streit, and D. Schmalstieg. “跨应用程序的可视化链接”。载于：Graphics Interface 论文集。2010，页 129–136。[17] J. D¨orr, K. D. Wernecke, M. Bock, G. Gaede, J. T. Wuerfel, C. F. Pfueller, J. Bellmann-Strobl, A. Freing, A. U. Brandt, and P. Friedemann. “视网膜和黄斑损伤与多发性硬化症脑萎缩的关联”。载于：PLOS ONE 6.4 (2011)。 DOI: 10.1371/journal.pone. 0018132.[18] P. A. Keane, P. J. Patel, S. Liakopoulos, F. M. Heussen, S. R. Sadda, and A. Tufail. “利用光学相干断层扫描评估年龄相关性黄斑变性”。载于：Surv Ophthalmol 57.5 (2012)。 DOI: 10.1016/j.survophthal. 2012.01.006.[19] M. Streit, H.-J. Schulz, A. Lex, D. Schmalstieg, and H. Schumann. “异构数据可视分析的模型驱动设计”。载于：IEEE TVCG 18.6 (2012)，页 998–1010。 DOI: 10.1109/ TVCG.2011.108.

[20] D. S. Grewal 和 A. P. Tanna。《利用频域光学相干断层扫描诊断青光眼并检测青光眼进展》。载于：Curr Opin Ophthalmol 24.2（2013）。DOI: 10.1097/ICU.0b013e32835d9e27。[21] A. Rungta、B. Summa、D. Demir、P.-T. Bremer 和 V. Pascucci。《ManyVis：集成可视化环境中的多种应用》。载于：IEEE TVCG 19.12（2013），页 2878–2885。 DOI: 10.1109/TVCG.2013.174。[22] K. Wolstencroft、R. Haines、D. Fellows、A. Williams、D. Withers、S. Owen、S. Soiland-Reyes、I. Dunlop、A. Nenadic、P. Fisher、J. Bhagat、K. Belhajjame、F. Bacall、A. Hardisty、A. Nieva de la Hidalga、M. P. Balcazar Vargas、S. Sufi 和 C. Goble。《 Taverna 工作流套件：在桌面、网络或云端设计并执行网络服务工作流》。载于：《核酸研究》41.W1（2013年5月），W557–W561。 DOI: 10.1093/nar/gkt328。[23] A. Fourney、B. Lafreniere、P. Chilana 和 M. Terry。《 InterTwine：创建跨应用的信息气味，以支持软件的协同使用》。载于：用户界面软件与技术研讨会论文集（UIST）。H. Benko、M. Dontcheva 和 D. Wigdor 编。ACM，2014，页 429–438。 DOI: 10 . 1145 / 2642918 . 2647420。[24] M. Luboschik 、M. R¨ohlig、G. Kundt、O. Stachs、S. Peschel、A. Zhivov、R. F. Guthoff、K. Winter 和 H. Schumann。《通过可视分析支持糖尿病神经病变的早期检测》。载于：EuroVis 可视分析研讨会论文集（EuroVA）。欧洲图形学协会，2014。 DOI: 10.2312/eurova.20141145。[25] G. Virgili、F. Menchini、G. Casazza、R. Hogg、R. R. Das、X. Wang 和 M. Michelessi。《光学相干断层扫描（ OCT）检测糖尿病视网膜病变患者的黄斑水肿》。载于：Cochrane Database Syst Rev 1（2015）。 DOI: 10.1002/14651858.CD008081. pub3。[26] J. Fujimoto 和 E. Swanson。《光学相干断层扫描的发展、商业化及其影响》。载于：《眼科研究与视觉科学》57.9（2016）。 DOI: 10.1167/iovs.16-19963。[27] D. G¨urd¨ur、F. Asplund、J. El-khoury 和 F. Loiret。《迈向工具互操作性的可视分析：立场文件》。载于：信息可视化理论与应用国际会议论文集（ IVAPP）。SciTePress，2016，页 139–145。 DOI: 10.5220/0005751401390145。[28] H. Stitz、S. Luger、M. Streit 和 N. Gehlenborg。《 AVOCADO：可视化工作流衍生数据的数据溯源，以实现可重复的生物医学研究》。载于：《计算机图形论坛》35.3（2016），
第 481–490 页。 DOI: 10.1111/cgf.12924。

[29] M. Herschel、R. Diestelk¨amper 和 H. Ben Lahmar。《关于数据溯源的调查：有何用途？何种形式？来自何处？》。载于：The VLDB Journal 26.6（2017），页 881–906。 DOI: 10.1007/s00778- 017-0486-1。[30] A. Satyanarayan、D. Moritz、K. Wongsuphasawat 和 J. Heer。《Vega-Lite：交互式图形语法》。载于：IEEE TVCG 23.1（2017），页 341–350。 DOI: 10.1109/TVCG.2016. 2599030。[31] A. G¨otze、S. von Keyserlingk、S. Peschel、U. Jacoby、C. Schreiver、B. K¨ohler、S. Allgeier、K. Winter、M. R¨ohlig、A. J¨unemann、R. Guthoff、O. Stachs 和 D.-C. Fischer。《1型糖尿病儿童及匹配对照组的角膜上皮下神经丛与视网膜层厚度》。载于：Sci Rep 8.1（2018）。 DOI: 10.1038/s41598- 017-18284-z。[32] R. Langner、U. Kister 和 R. Dachselt。《面向多用户的大型显示屏多视图协调：关于用户行为、移动和距离的实证发现》。载于：IEEE TVCG 25.1（2018），页 608–618。 DOI: 10.1109/ TVCG.2018.2865235。[33] R. K. Prakasam、A. G¨otze、S. von Keyserlingk、A. J¨unemann、M. R¨ohlig、O. Stachs 和 D.-C. Fischer。《采用频域光学相干断层扫描测定轻至中度慢性肾病儿童患者视网膜厚度：一项横断面研究》。载于：Current Eye Research 44.2（2018），页 206–211。 DOI: 10.1080/02713683. 2018.1522649。[34] M. R¨ohlig、C. Schmidt、R. K. Prakasam、H. Schumann 和 O. Stachs。《利用光学相干断层扫描对视网膜变化进行可视分析》。载于：Vis Comput 34.9（2018），页 1209–1224。 DOI: 10.1007/s00371-018-1486-x。[35] C. Eichner、H. Schumann 和 C. Tominski。《多显示屏视觉分析：模型、用户界面与布局计算》。载于：CoRR abs/1912.08558（2019）。 URL: http : / / arxiv . org/abs/1912.08558。[36] M. Hogr¨afer 和 H.-J. Schulz。《ReVize：用于 Vega-Lite 可视化工具链的库》。载于：Smart Tools and Apps for Graphics（STAG）论文集。欧洲图形学协会，2019，页 129–139。 DOI: 10 . 2312 / stag . 20191375。[37] R. K. Prakasam、M. R¨ohlig、D.-C. Fischer、A. G¨otze、A. J¨unemann、H. Schumann 和 O. Stachs。《偏差图有助于理解1型糖尿病儿童视网膜内层厚度的变化》。载于：Curr Eye Res 44.7（2019），页 746–752。 DOI: 10 . 1080/ 02713683.2019.1591463。[38] M. R¨ohlig、R. K. Prakasam、J. St¨uwe、C. Schmidt、O. Stachs 和 H. Schumann。《利用光学相干断层扫描对视网膜层厚度进行增强型网格视觉分析》。载于：《Information》10.9（2019），第 266 页。 DOI: 10.3390/info10090266。[39] L. Nonnemann、H. Schumann、B. Urban、M. Aehnelt 和 H.-J. Schulz。《视觉分析工具之间数据交换的特征描述》。载于：国际信息可视化会议（IV）论文集。2020 年，第 368–377 页。 DOI: 10.1109/IV51561.2020.00066。[40] R. K. Prakasam、A. Matuszewska-Iwanicka、D.-C. Fischer、H. Schumann、D. Tsch¨ope、B. Stratmann、H.-J. Hettlich、R. F. Guthoff、O. Stachs 和 M. R¨ohlig。《2 型糖尿病患者视网膜内层厚度与伴发糖尿病神经病变的关系：一项使用偏差图进行OCT数据分析的横断面研究结果》。载于：Biomedicines 8.7（2020）。 DOI: 10 . 3390 / biomedicines8070190。[41] H.-J. Schulz、M. R¨ohlig、L. Nonnemann、M. Hogr¨afer、M. Aehnelt、B. Urban 和 H. Schumann。《可视分析中轻量级工具链的分层方法》。载于：《计算机视觉、成像与计算机图形学理论与应用》。Springer International Publishing，2020 年，第 313–337 页。 DOI: 10.1007/978-3-030-41590-7_13。[42] L. Nonnemann、M. Hogr¨afer、H. Schumann、B. Urban 和 H.-J. Schulz。《独立视觉分析工具的可定制协调》。载于：EuroVis可视分析研讨会（EuroVA）论文集。The Eurographics Association，2021 年。 DOI: 10.2312/eurova.20211094。[43] R核心团队。《R：统计计算语言与环境》。统计计算基金会。奥地利维也纳，2021 年。 URL: https://www.R-project.org/。[44] L. Nonnemann、M. Hogr¨afer、M. R¨ohlig、H. Schumann、B. Urban 和 H. Schulz。《用于协调独立视觉分析工具的数据驱动平台》。载于：《Comput Graph》106（2022），第 152–160 页。 DOI: 10.1016/j.cag.2022. 05.023。[45] N. Stache、S. Bohn、K. A. Sterenczak、C. George、H.-V. Do、M. R¨ohlig、A. Stachs 和 O. Stachs。《乳腺癌治疗期间与紫杉烷诱导的多发性神经病相关的视网膜层厚度变化》。载于：《Die Ophthalmologie》第 119 卷。DOG大会论文集，增刊 3。Springer Medicine，2022 年。 DOI: 10. 1007/s00347-022-01723-2。