数据整理脚本语义的可视化

罗中粟[1,2)], 熊凯[2,3)], 傅四维[3)], 鲍虎军[2,3)], 巫英才[2,3)*]

[1)] (浙江工业大学 计算机科学与技术学院 杭州 310023)
[2)] (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)
[3)] (之江实验室 杭州 311121)
(ycwu@zju.edu.cn)

摘 要: 理解数据整理脚本的语义是数据工作者的常见需求. 然而, 数据整理操作的类型及其代码的实现方式复杂多样, 使得数据工作者在理解脚本语义时费时费力. 大多数现有的可视化工作能够较好地展示单步数据转换操作的语义, 但是对于包含多步操作的代码块, 这种长链路的可视化会增加用户的阅读负担. 本文通过收集数据工作者在理解数据整理脚本语义上的具体需求, 设计并实现了一个基于概览和细节模式的交互式可视分析系统 ChangeVis, 以帮助数据工作者理解表格在数据整理过程中的变化. ChangeVis 包含四个视图, 分别可视化代码块中的表结构变化、行列信息变化、单元格数据变化以及执行的数据转换操作的语义. 本文通过案例分析和用户实验, 验证了 ChangeVis 在帮助数据工作者理解数据整理脚本语义的可用性和有效性.

关键词: 数据整理; 程序可视化; 可视化设计; 表格数据可视化

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.202*.

Visualizing the Semantic of Data Wrangling Script

Luo Zhongsu[1,2)], Xiong Kai[2,3)], Fu Siwei[3)], Bao Hujun[2,3)], and Wu Yingcai[2,3)*]

[1)] (*College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023*)
[2)] (*State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058*)
[3)] (*Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311121*)

Abstract: Understanding the semantics of data wrangling scripts is a common requirement for data workers. However, due to the complexity and diversity of the types of data transformations and their parameters, understanding the semantics of wrangling scripts is time-consuming and laborious. Some existing visualization systems can depict the semantics of one-step data transformation well. These systems, however, do not fully support code snippets that contain multi-step operations, bringing burden to users in understanding a series of wrangling operations. we worked with four data workers and developed an interactive visualization system, called ChangeVis, to help data workers understand the changes of tables in the process of data wrangling. Based on the Focus+Context technique, ChangeVis scales well and illustrates the changes of table structure, the semantics of data transformations, the changes of column information, and the changes of cell data on a selected code snippet. We designed two use cases and a semi-structured lab study to demonstrate the usability and effectiveness of ChangeVis.

Key words: data wrangling; program visualization; visualization design; tabular data visualization

---

罗中粟(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可视分析、数据整理; **熊凯**(1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为可视分析、数据整理; **傅四维**(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为人机交互、可视分析、多模态交互; **鲍虎军**(1966—), 男, 博士, 教授, CCF 常务理事, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、计算机视觉; **巫英才**(1983—), 男, 博士, 教授, 论文通讯作者, 主要研究方向为可视分析、信息可视化、人机交互;

数据整理(Data Wrangling)是为了满足数据分析等任务要求对数据进行转换、整合及错误纠正的数据预处理过程[1]. 在工作中, 数据工作者常使用脚本语言(如 R、Python 等)完成数据整理工作, 数据整理脚本通常由多个代码块组成, 每个代码块是一段独立的数据处理逻辑, 通常包含多步数据转换操作. 数据工作者在众多场景中都需要阅读并理解这些代码块中数据整理的语义[2], 如对代码进行调试、检查、复用等.

然而, 理解代码的语义要求数据工作者熟悉相应的脚本语言及其使用的函数包, 且理解代码的过程是费时费力、容易出错[3]. 此外, 对于数据整理的代码而言, 实现数据转换操作的编程方式繁多, 同一个数据转换操作,可以有不同的实现方式, 例如 Python 语言中, 使用 drop_na 和 replace 都可以完成对缺失值的替换. 并且, 同一个函数在使用不同参数时, 可能会执行不同的数据转换操作, 例如 R 语言中的 select 函数, 既可以用作对列重新排序操作, 也可以用作删除列操作. 这些都使得数据工作者理解数据整理代码的语义更加困难.

近年来, 许多工作致力于协助数据工作者理解数据整理脚本. 一些工作, 如 WrangleDoc[2], 利用文字概述的方式来描述数据表在数据整理前后发生的变化, 以帮助数据工作者理解代码块对数据表的影响. 然而, 文本描述的方式并不直观. 因此, 近年来有不少工作如 Somnus[6]利用可视化展示数据整理脚本中的数据转换操作的语义. 这些工作擅长展示单步数据转换操作的可视化, 然而, 它们通常可扩展性较差不适用于展示一整段代码块的语义.

为了解决以上问题, 本文开发了一个基于概览和细节模式的交互式可视化系统 ChangeVis,以帮助数据工作者理解数据整理代码块的转化语义. 该系统利用四个不同层次的视图, 即概览视图、语义视图、统计视图和数据视图, 来可视化代码块的语义. 概览视图用来展示数据整理脚本中整个数据转换过程的表结构变化概况, 并支持数据工作者选择不同的代码块; 语义视图阐明所选代码块中数据转换操作的具体语义; 统计视图可视化所选代码块中初始表与最终表的列统计信息, 同时呈现该数据整理过程中的行列变化信息; 数据视图为数据工作者提供某一步数据转换操作所涉及的具体表格数据. 同时, 该系统支持合并具有相同数据转换语义的重复操作, 以简化可视化元素, 提高数据工作者的理解效率.

最后, 本文实现了两个案例, 分别展示 ChangeVis 系统在帮助数据工作者理解脚本语义和检查数据整理脚本方面的应用, 并通过用户实验验证系统的可用性和有效性.

1. 相关工作

1.1. 数据整理

近年来, 为了提升数据工作者完成数据整理工作的效率, 研究者设计开发了用于辅助完成数据整理任务的各类系统[1]. Wrangler[1]系统基于用户的交互行为推荐合适的数据转换操作.Wrex[9]和 Foofah[10]使用了样例编程(Program By Example)的方法协助用户完成数据整理任务. 除此之外, 还有研究者设计了能够对网络结构进行数据整理的工具, 如 Origraph[11]等. 另外, 有一部分研究使数据工作者能直接从不同的网站获取数据进行数据整理任务, 提升了数据整理中数据获取阶段的效率, 如 Dataxformer[12], WebRelate[13]等. 这些工作使数据工作者完成数据整理任务更加方便, 但对于解释数据转换操作的语义却十分有限.

为了帮助数据工作者理解数据整理脚本, 一些工具通过文本概述的方法描述脚本的数据转换语义. WrangleDoc[2]通过归纳数据表经过代码块操作后的变化来帮助用户理解数据整理脚本, 发现脚本中存在的细小问题. Unravel[7]通过拖放和切换交互来帮助数据工作者探索和理解链式结构代码块, 并提供一段自然语言文本来解释每步数据转换操作的语义.这些工作通过文本概述的方法描述代码块, 缺少直观的可视化表达.

还有一些工具基于规则解析数据脚本代码, 并可视化不同数据转换操作的语义. 例如, Somnus[6]通过基于图形图符的节点链接图可视化数据整理脚本的数据转换过程. Datamations[14]和 Data Tweening[15]则是利用动画的形式解释每一步的数据转换的语义. 然而, 这些工作均是针对单步数据转换操作的可视化, 对于代码块即多步操作的语义可视化仅是单步可视化的拼接.这种拼接使得数据工作者需要逐一阅读, 阻碍了理解速度. 因此, 本文设计了一种多步数据转换语义的可视化以提高数据工作者理解代码块的效率.

1.2. 表格数据可视化

表格数据是一种被广泛应用于各个领域的数据结构[16], 随着表格数据分析在各领域起到重要作用,很多可视化的研究服务于表格数据[16].

Furmanova 等[17]将表格数据可视化分为三种类型, 第一种是基于概览技术的可视化[18], 基于表格数据中的数值进行可视化; 第二种为基于投影技术的可视化[21], 常用于可视化高维数据; 第三种是基于表格式技术的可视化[22], 会基于数据和类型进行相应的可视化, 并保留原有的表格数据结构. 由于每种技术各有其优缺点, 因此也有混合使用这几类技术的可视化工作[17]来消除单一技术的不足.

以上的工作着重于对表格数据内容的可视化, 缺乏表格数据变化的展示. TACO[16]通过使用时间轴概览、差异直方图和热力图可视化表格数据随时间发生的演变, 但是这种演变并不适用于可视化数据整理任务中的数据转换操作的语义. 因此, 本文设计了一种混合技术的表格数据可视化, 以表格数据中的列为可视化基本单位, 展现经过数据转换操作后表格数据发生的变化, 以此来揭示数据整理脚本中代码块的语义.

2. 设计需求

本文的设计目标是帮助数据工作者理解脚本中代码块的语义. 为了了解数据工作者的需求, 本文邀请了四位数据工作者, 两位是在国家实验室工作的数据分析师, 两位为计算机专业的学生, 他们都拥有三年以上的数据整理经验. 本文通过访谈获取他们在理解数据整理脚本语义时所采用的方法及面临的问题, 最后收集并整理出他们在完成该任务上的需求.

R1.展示数据整理脚本中代码块的语义. 数据工作者需要理解代码块对数据表操作的语义, 即对表中哪些行/列做了何种数据转换操作. 通过展示操作的语义可以帮助数据工作者更好地完成代码检查、复用等工作.

R2.提供能够展示数据转换操作语义的数据示例. 数据工作者常常会输出经过一段代码块的前后表, 通过对比表中数据来推断其中包含的数据转换操作. 但数据表常包含许多与操作无关的数据. 通过展示只与数据转换操作相关的数据示例, 能够提升数据工作者的推断效率.

R3.展示数据整理过程中数据表结构的变化. 数据表的结构(即表的行列)变化可以揭示数据转换操作的类型, 如新增列、删除行等, 从而为数据工作者提供当前脚本内数据转换操作的概览, 以帮助他们选择感兴趣的代码块.

R4.提供数据表在代码块执行前后各列数据的统计信息. 数据工作者需要对比代码块的输入表与输出表中列数据发生的变化, 以辅助数据工作者对操作语义的理解. 列数据的变化通常可由统计信息来描述, 其中数据分布、极值、离群值等是数据工作者常关注的重点.

R5.展示数据转换操作后数据表中发生变化的数据及其占总数据的比例. 相同的代码对于不同的数据表可能会影响不同的数据. 数据工作者需要了解代码实际改变了数据表中哪些数据及多少数据, 以帮助他们掌握数据的变化.

3. ChangeVis 系统

为了满足以上需求, 本文开发了如图 1 所示的交互式系统 ChangeVis. ChangeVis 包含了 4 个视图: 概览视图(A 部分)展示数据表在数据整理代码块中的表结构变化; 语义视图(B 部分)可视化所选代码块内的数据转换操作, 帮助用户理解代码块的语义; 统计视图(C 部分)呈现代码块中初始表和最终表中各列的统计信息, 同时展示该段代码块中数据表的行列变化; 数据视图(D 部分)用于展示经过数据转换操作前后的详细单元格数据.

ChangeVis 使用基于规则的方法解析数据整理脚本中的代码, 通过提取代码中的函数名和参数自动识别每一步数据转换操作, 并根据代码的运行时行为动态获取该数据转换操作的输入输出表. 基于 Guo 等[8]定义的不同数据转换操作以及 Kasica 等[27]总结的数据转换操作的类型空间, ChangeVis 组合并筛选了其中的 23 种常见的数据转换操作进行解析和可视化.

数据转换操作对表中的行列及单元格数据可造成 4 种类型的变化, 即数据的新增、删除、修改和不变. 考虑一致性, 系统在不同视图中统一使用绿色、红色、蓝色和灰色来分别编码这 4 种变化.

除此之外, 为了提升用户理解数据整理脚本语义的效率, ChangeVis 使用一套合并规则(3.5 节)

对代码块中重复的数据转换操作在可视化时进行合并来精简可视化的内容，减少用户的阅读负担

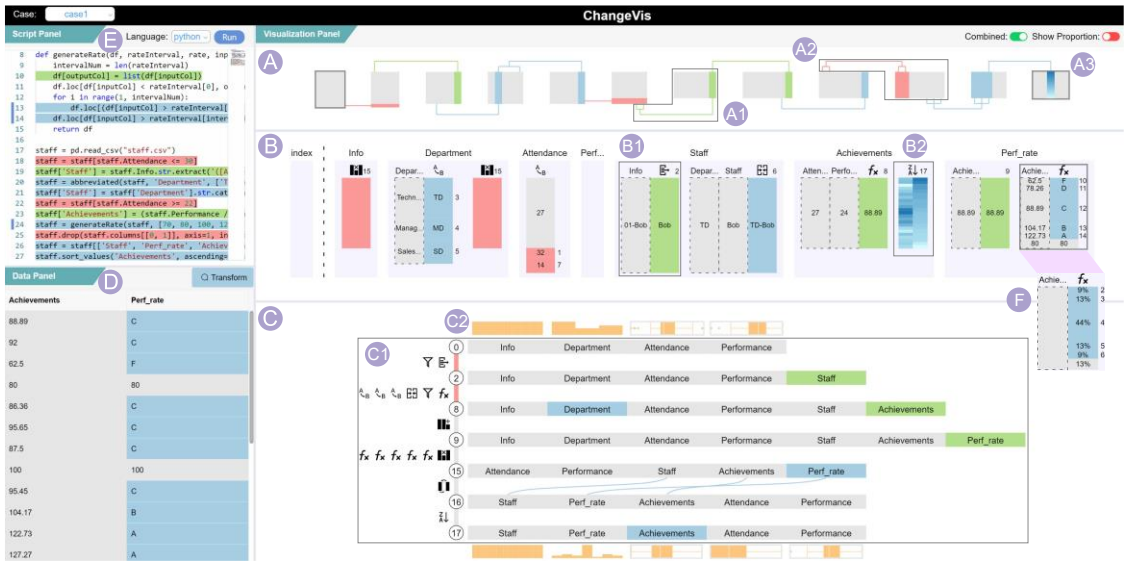


图 1 ChangeVis 系统界面

3.1. 概览视图

概览视图利用一条表结构的变化链路为数据工作者提供当前脚本内数据转换操作的概览(R3)，如图 1 中的 A 部分所示. 链路中的节点展示某步数据转换操作后数据表的结构变化，节点使用表示数据变化类型的颜色对相应数据进行填充；连接节点的边表示完成该数据转换操作涉及的行/列数据. 如图 1 中的 A1 部分所示，边的起始点连接该步操作输入表中的两列，终止点连接输出表中的最后一列，同时该列及边的颜色为绿色，表示该操作根据输入表中的两列新增了最后一列. 同理，图 1 中的 A2 部分则表示删除了最前面的两列.

由于排序操作会改变整张数据表中行数据的位置，而对整个节点都进行颜色填充是无意义的，因此 ChangeVis 针对排序操作只对排序列使用颜色的深浅渐变表示数据的排序情况. 如图 1 中的 A3 部分，填充的颜色从上至下由深变浅，代表该步为降序操作.

此外，用户可以点击节点进行交互，选择感兴趣代码块的起始和终止节点，脚本面板(图 1 中的 E 部分)中会将对应操作的代码根据表数据变化的类型分别用不同的颜色进行高亮，同时下方的语义视图和统计视图将只展示选中代码块内的信息.

3.2. 语义视图

该视图以数据表中的列为可视化的基本单位，通过展现数据表中各列经过数据转换操作后的变化，来帮助数据工作者理解数据整理脚本中代码块的语义(R1). 语义视图用来展示所选代码块中数据表的每一列所执行的数据转换操作的具体语义(R1). ChangeVis 利用一个操作子图可视化一步数据转换操作，如图 1 中的 B 部分所示，Staff 列中共包含两个操作子图，表示 Staff 列共经历了两步数据转换操作.

下文将以图 1 中 B1 部分为例，详细阐述每个操作子图需展示的 6 部分信息及其可视化方式：(1)该步数据转换操作执行的主体列，即实际发生数据变化的列，用一个竖直矩形框表示，放置在操作子图中的最右侧(如图 1 中 B1 部分的 Staff 列)；(2)完成数据转换操作的依赖列，即影响主体列发生变化所依赖的数据列，用带虚线的灰色竖直矩形框表示，以区分主体列，放置在操作子图的左侧. 同时，虚线框的上方标注依赖列的列名(如图 1 中 B1 部分的 Info 列)；(3)该数据转换操作在所选代码块中的步骤序号，将该步骤序号标注在主体列的右上方(如图 1 中 B1 部分的数字 2)；(4)该数据转换操作的类型，用一个能表达该操作的语义的图标表示，放置在主体列的正上方(如图 1 中 B1 部分的”抽取” 图标). ChangeVis 为每一种数据转换操作类型匹配了一个语义图标(23 种数据转换操作的类型、定义描述、及其语义图标详见补充材料)；(5)数据转换操作对主体列中实际新增、修改、删除及不变的数据占比，在主体列中用不同的区域块展示，每个区域块根据其发生数据变化的类型用对应的颜色进行填充(如图 1 中 B1 部分的绿色块). 此外，

由于缺失值是数据工作者的一个重要观察信息，因此对于单元格数据为缺失值的区域块用白色背景单独编码;(6)展示主体列中不同区域块实际变化的一个数据示例(如图 1 中 B1 部分的“Bob”)，同时在依赖列中相应的位置展示该数据示例对应的依赖列数据(如图 1 中 B1 部分的“01-Bob”). 因此，结合图 1 中 B1 部分的该 6 部分信息，可以推出该数据转换操作的语义为“抽取 Info 列的子字符串为新列 Staff，且该操作填充了新列 Staff 中的所有单元格数据”.

对于不涉及任何主体列的数据转换操作，即操作对象为数据表中的行，如删除表中的重复行等，ChangeVis 引入索引列(Index)作为此类操作的主体列，并放置于语义视图的最左侧，用一条虚线将右侧数据表中的实际列隔开. 若该类行操作有指定具体的行号，将会在索引列的右侧使用带有具体行号标注的三角形符号展示该步操作所涉及的行号如图 3 中的 F 部分.若对行进行了新增或删除操作，此步操作后的所有操作子图中竖直矩形框的高度也将发生相应的改变.

由于排序操作不会对表内的值造成改变，而是修改数据的位置信息. 为了展示排序操作的语义，ChangeVis 在语义视图中利用颜色的深浅变化来展示排序操作后数据位置发生的变化. ChangeVis 将主体列拆成左右两部分，分别表示排序操作前后的单元格数据，并用颜色的深浅编码数值的大小. 如图 1 中 B2 部分所示，主体列(即 Achievements 列)的左半部分的颜色分布是混乱的，表示 Achievements 列在操作前是无序状态，而主体列的右半部分的颜色分布为由深到浅，表示 Achievements 列在操作后为降序状态. 这种可视化设计不仅能展示排序操作的语义，还能揭示数据分布情况.

为了更直接地展示数据转换操作后数据表发生变化的数据占比，ChangeVis 支持用户点击图 1 中可视化面板右上角的“Show Proportion”按钮，以查看操作子图中各个数据区域块的具体比例，如图 1 的 F 部分所示.

3.3. 统计视图

统计视图包含操作时间轴线图(图 1 中的 C1 部分)和列数据统计图(图 1 中的 C2 部分)两个部分，分布用来展示代码块内的行列变化信息(R3)和初始表与最终表的列统计信息(R4).

操作时间轴线图的起始点和终止点分别表示该段代码块的输入表和输出表. 起始点与终止点间的节点用来展示当前代码块内引起表中的列发生变化(即列的新增、列的删除、列名的修改或列位置的重新排布)的数据转换操作. 节点内的数字表示该数据转换操作的步骤序号. 节点的右侧展示该步数据转换操作后数据表的列，用列的背景颜色编码上一个节点到该节点中列数据的改变. 为了展示相邻节点的列排布位置的变化，使用连接线将位置发生变化的列连接起来. 节点之间轴线的填充颜色，编码这两个节点所代表的操作后数据表中行数目的变化，而节点之间的左侧操作图标表示这两张数据表中发生的数据转换操作类型.

列数据统计图位于操作时间轴的首尾两端，分别用来展示该段代码块的初始表与最终表中各列的统计信息. 针对不同数据类型的列，ChangeVis 使用不同类型的统计图进行展示: (1)利用箱线图可视化数值类型的数据. 箱线图可以展示一组数值的分布区间、极值、离群值等; (2)利用条带图可视化时间类型的数据.条带图可展示时间的连续分布情况; (3)利用柱状图展示字符串类型的数据. 柱状图可以展示各个类别数据重复出现的个数，以此观察是否包含重复值. 鼠标悬浮在统计图上可详细查看该列的统计信息，如缺失值的个数、具体的离群值等.

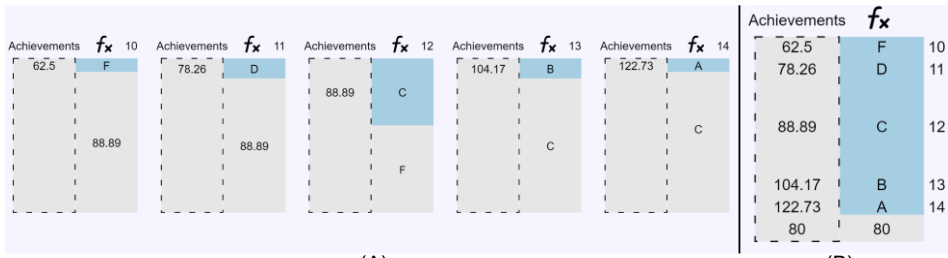
3.4. 数据视图

当用户点击语义视图中的操作子图，数据视图，如图 1 的 D 部分所示. 将展示该步数据转换操作所涉及的所有单元格数据(R2)，以更详细地揭示数据的变化. 数据视图中呈现的列为操作子图中所有的依赖列及主体列. 若存在某依赖列为主体列的情况(即该操作对主体列做的转换，依赖于该列本身)，数据视图将这两列的列名分别添加”_old” 和”_new” 加以区分. 此外，若该操作的主体列为索引列，则数据视图将显示数据表中所有的列. 数据视图中单元格的背景颜色编码数据变化的类型. 此外，视图的右上方会根据数据变化的类型提供对应颜色的筛选按钮，用户可点击该按钮以筛选出符合此变化类型的单元格数据.

3.5. 合并规则

ChangeVis 系统通过以上四个视图的设计，帮助用户理解数据整理脚本的语义，并提升用户在理解过程中的效率. 但通过研究真实的数据整理

任务后发现，数据整理脚本中经常会出现重复操作.例如，数据整理任务中会需要将某列数据按不同的区间进行替换，从而造成连续的多步替换操作，而他们的操作语义是相同的. 为了使视图更加精简，提升用户的阅读效率，本文提出了一种将重复操作合并的规则，该规则包含以下 4 个条件: (1)操作的主体列为同一列; (2)操作的依赖列相同; (3)操作类型相同;(4)操作间没有出现改变依赖列或主体列数据的操作. 点击 ChangeVis 右上方的”Combined”按钮即可将满足条件的操作进行合并. 合并后的具体表现为: (1)概览视图中重复操作对应的节点将会合成一个节点;(2)语义视图中重复操作对应的操作子图将生成一个新的合并操作子图，操作子图中原本位于右上方的步骤序号将移至相应区域块的右侧(如图 2 所示). 通过合并操作能进一步减少用户的阅读时间，且不影响用户对语义的理解.



(A) (B)

图 2 原始操作子图(A)、合并操作子图(B)

4. 系统评估

为了验证 ChangeVis 系统对数据工作者理解数据整理脚本语义的帮助，本文通过两个数据整理任务案例和一个用户实验来探究 ChangeVis 的有效性和可用性.

4.1. 案例 1——复用数据整理脚本

本案例为数据工作者在复用他人代码时需要理解脚本中代码块语义的场景. 某公司每月需要对各部门员工的出勤情况和工作绩效进行评估，数据工作者需要对考勤系统中的数据进行数据整理以完成之后的数据可视分析工作.

目前有一份其他数据工作者使用 Python 语言对类似数据进行数据整理的脚本，脚本中包含了两个自定义函数. 然而，该数据工作者所熟悉的脚本语言为 R，理解使用不同脚本语言编写的代码存在困难. 数据工作者通过 ChangeVis 系统对该段数据整理脚本进行可视化，以理解脚本中代码块的语义，如图 1 所示.

数据工作者在概览视图中通过点击两个节点选择了一段代码块(A 部分)进行探索，通过概览视图数据工作者发现在这段代码块内包含了新增列、转换列、删除列以及对数据表进行排序的操作(R2). 数据工作者通过观察下方的统计视图(图 2 中 C 部分)发现在第 14 步时删除了 Info 和 Department 列，并在第 15 步进行了列重排操作，将 Staff 和 Perf_rate 列移至表的最左侧(R3). 数据工作者阅读语义视图(图 1 中 B 部分)，发现在这段代码块中存在合并操作，但通过阅读脚本并未发现重复的函数，因此数据工作者点击了语义视图中 Perf_rate 列的操作子图，ChangeVis 的脚本面板中(E 部分)标注出相应的数据转换操作代码，发现合并的操作为代码中的自定义函数代码块; 数据工作者通过点击 ChangeVis 右上角(F 部分)的显示操作比例滑块查看每步数据转换操作实际影响数据的比例(R4). 数据工作者通过脚本面板(E 部分)中的代码以及 Perf_rate 列的操作子图中的示例数据(R5)，推断出此步操作为根据设定的分类区间及 Achievements 列内的数据在 Perf_rate 中生成相应的标签(R1, R4). 数据工作者点击了第 10 步操作对应的颜色块，在数据视图内(D 部分)看到了详细的数据，通过点击视图右上角的蓝色按钮(D1 部分)，筛选出经过代码块后改变的数据检查是否符合预期的结果(R6).

数据工作者在阅读合并后的语义视图时发现，在 Perf_rate 列中，有部分的数据并没有发生改变，不符合操作的预期，因此数据工作者通过点击合并后的操作子图在脚本面板和数据面板中进行检查. 发现是由于在自定义函数 generateRate 中在数据筛选条件的两端都设置为闭区间，因此导致了等于筛选条件的数据并未能被成功转换. 通过这一操作体现了 ChangeVis 可以帮助数据工作者检

查脚本中隐藏的问题.

4.2. 案例 2——检查数据整理脚本

本案例为数据工作者在编写数据整理脚本时需要理解脚本语义并检查是否完成预期中的数据整理工作. 数据工作者现在有一份二手车的成交数据, 他需要对不同车企、型号、生产年份的二手车保值率进行分析.

在完成一段数据整理脚本后, 数据工作者使用 ChangeVis 系统对脚本进行检查, 如图 3 所示. 数据工作者通过点击“Combined”按钮将视图精简. 在快速浏览了语义视图及各操作的数据示例后, 判断当前脚本的数据转换操作符合预期(R1, R5). 但当他阅读统计视图时发现了问题, Launch_Year 列中年份数据出现了离群值(R3)如图 3 中 D 部分, 而汽车的生产年份不应该存在较大的差距. 同时数据工作者发现在初始表中 Launch_Date 列的数据类型就是字符型,(图 3 中 C 部分) 并未被正确识别为日期型. 数据工作者检查了语义视图中的数据示例, 发现提取操作并没有问题(R4, R5), 他通过点击第 4 步(图 3 中 B 部分)的操作子图, 使用数据视图查看详细数据(R6). 数据工作者发现在数据表中日期的格式是不同的(图 3 中 F 部分), 有的使用了年/月/日的格式, 而有少量数据却使用了月/日/年的格式, 由于此操作的提取规则只会提取第一个’/’符号前的数据, 从而导致有的数据被提取的是月份而不是年份.

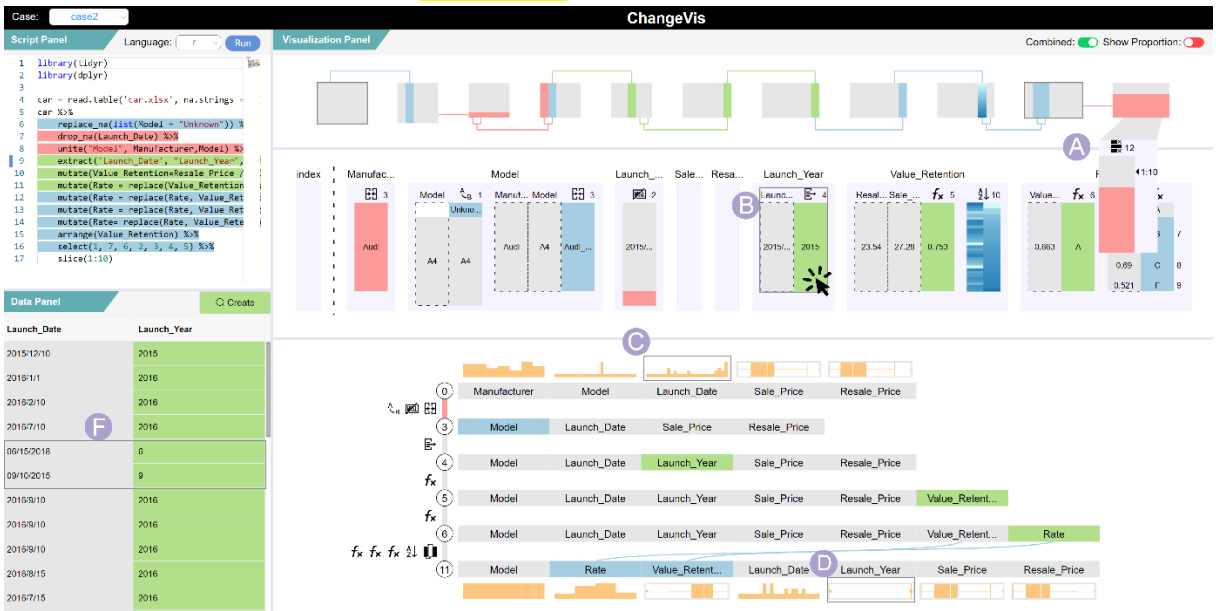


图 3 案例 2——检查数据整理脚本

4.3. 用户实验

(1)实验数据. 本文为实验准备了三份数据整理案例, 其中一份作为训练案例, 用于介绍系统及让参与者熟悉任务; 另外两份作为实验案例, 其脚本和数据表格分别来自 4.1 和 4.2 节的两个案例.

表 1 用户探索任务

任务编号	任务描述
T1	描述指定代码块中数据转换操作的语义
T2	描述指定代码块中数据表行列的变化
T3	检查指定代码块中输入表和输出表的列是否存在离群值或重复值
T4	找出指定代码块中只修改了列的部分数据的操作, 并描述修改数据占总数据的比例

(2)参与者. 共有 12 名数据工作者(8 男, 4 女)参与了本次实验, 其中 5 名为拥有两至三年工作经验的数据分析师, 7 名为日常工作中需要完成数据整理任务的计算机专业学生; 实验的参与者均拥有数据整理的基础知识.

(3)任务设计及实验流程. 在实验开始前, 本文首先向参与者描述了实验目的, 并收集参与者的个人基本信息. 然后使用训练案例向参与者详细介绍 ChangeVis 系统, 并让参与者使用 ChangeVis 完成一组探索任务, 如表 1 所示. 在熟悉系统及任务后, 参与者需要对两个实验案例分别完成一组探索任务. 接着, 参与者需要填写一份调查问卷, 如表 2 所示. 参与者根据问卷中的描述

使用 7 级李克特量表对 ChangeVis 系统进行评分; 1 分代表对描述非常不认同, 7 分代表对描述非常认同. 最后, 参与者提出对 ChangeVis 系统的使用反馈及改进建议. 整个实验过程大约为 40 分钟, 实验结束后, 每位参与者获得了 20 元的报酬.

表 2 用户调查问卷

序号	问卷内容
Q1	系统设计美观
Q2	系统能展示单步数据转换操作的语义
Q3	系统能帮助你高效的理解一段代码块中数据整理的语义
Q4	从系统中你能获取数据表变化的信息
Q5	系统能帮助你获得当前数据转换操作导致数据的改变及其比例
Q6	系统能帮助你完成日常工作中理解数据整理脚本的需求

(4)结果分析. 图 4 展示了参与者根据调查问卷对 ChangeVis 系统的评分结果. 参与者认为可以快速准确的获得表变化信息和实际操作数据的比例(Q4, Q5), 这些信息对理解数据整理语义及检查数据转换操作起到积极作用. 在展示单步的数据转换操作时, ChangeVis 获得了相对较低的评分(Q2), 是由于 ChangeVis 注重展示的是一段代码块内的操作, 而对于单步操作的展示较为简单, 这一问题也导致了 Q6 的评分相对较低. 从用户实验结果中可以得出, ChangeVis 能够高效地帮助数据工作者理解数据整理脚本中代码块的语义.

(5)实验反馈. 参与者对 ChangeVis 系统提出了以下反馈及建议: (a)系统的学习成本较高. 由于 ChangeVis 中的视图较多且语义视图和统计视图包含的信息量较大, 需要花费较多时间进行学习; 在未来工作中应该增加系统中对视图的教学引导, 以帮助用户缩短学习成本. (b)希望加强视图间的联系. 用户在理解数据转换操作时需要同时阅读多个视图中的内容,但这些内容在不同视图中难以对应. (c)展示操作的语义图标不够直观. 参与者认为部分图标难以清楚地表达数据转换操作的语义, 如抽取操作的图标, 不能直观体现出抽取子字符串操作的语义. 未来可以通过悬浮弹窗, 使用文字描述操作的语义解决这一问题. (d)提供语义视图中数据转换操作执行顺序的引导. 由于数据转换操作由分布在各个列中的操作子图来展示, 使得操作的展示顺序并不符合其执行顺序. 而通过操作子图中右上方的步数来确定执行顺序的方式并不直观. 为了解决该问题, 在未来工作中可加强语义视图内各操作子图与概览视图中对应节点之间的关系, 促进用户对操作执行顺序的理解.

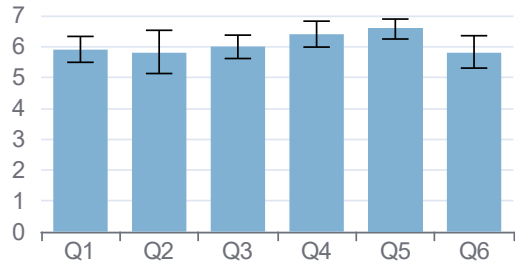


图 4 用户实验结果

4.4. 局限性与未来工作

本文工作的局限性有以下 3 点:

(1) 不支持包含多张输入表或输出表操作的可视化. 由于目前该系统是通过单张数据表中各列内的操作子图来展示数据转换操作的语义, 因此对于包含多表的操作, 如左连接等合并表的操作, 无法用本文的可视化方法来展示该操作的语义. 在未来的工作中将设计一种能够展示操作多张输入输出表的语义可视化方法.

(2) 不支持规则外的函数及数据转换操作的解析. 本文系统中目前只支持 23 种常用数据转换操作及其部分函数代码的解析, 对于规则外的函数或操作将会识别失败. 未来可以通过优化解析脚本内代码的方式, 并结合机器学习方法以适配更丰富的函数和数据转换操作.

(3) 缺乏与现有工作的对比. 本文通过用户实验对 ChangeVis 进行评估, 但未能与现有的展示数据整理脚本语义的工作进行对比. 未来考虑增加与 Somnus 等系统进行对比实验, 进一步验证 ChangeVis 在帮助用户理解代码块语义上的有效性.

5. 结语

本文通过收集数据工作者在理解数据整理脚本语义上的具体需求, 设计并实现了一个基于概览和细节模式的交互式可视分析系统. 本文通过四个视图展示数据整理脚本中执行的操作和对数据表造成的影响, 此外本文设计了一种合并规则帮助用户进一步提升阅读效率. 最后通过案例分析和用户实验验证系统的有效性和可用性. 未来考虑继续优化设计, 丰富代码解析器支持的操作及函数, 以支持对更多操作的展示.

参考文献(References):

[1] Kandel S, Paepcke A, Hellerstein J, et al. Wrangler: Interactive visual specification of data transformation scripts[C]//Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems. 2011: 3363-3372.

[2] Yang C, Zhou S, Guo J L C, et al. Subtle bugs everywhere: Generating documentation for data wrangling code[C]//2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). IEEE, 2021: 304-316.

[3] Lewis C, Olson G M. Can principles of cognition lower the barriers to programming[C]//Empirical studies of programmers: second workshop. Ablex Publishing Corporation, Norwood, New Jersey, 1987, 2(15): 248-263.

[4] Qian Y, Lehman J. Students' misconceptions and other difficulties in introductory programming: A literature review[J]. ACM Transactions on Computing Education (TOCE), 2017, 18(1): 1-24.

[5] Sorva J, Karavirta V, Malmi L. A review of generic program visualization systems for introductory programming education[J]. ACM Transactions on Computing Education (TOCE), 2013, 13(4): 1-64.

[6] Xiong K, Fu S, Ding G, et al. Visualizing the Scripts of Data Wrangling with SOMNUS[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2022 (01): 1-1.

[7] Shrestha N, Barik T, Parnin C. Unravel: A Fluent Code Explorer for Data Wrangling[C]//The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 2021: 198-207.

[8] Guo P J, Kandel S, Hellerstein J M, et al. Proactive wrangling: Mixed-initiative end-user programming of data transformation scripts[C]//Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. 2011: 65-74.

[9] Drosos I, Barik T, Guo P J, et al. Wrex: A unified programming-by-example interaction for synthesizing readable code for data scientists[C]//Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems. 2020: 1-12.

[10] Jin Z, Anderson M R, Cafarella M, et al. Foofah: Transforming data by example[C]//Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data. 2017: 683-698.

[11] Bigelow A, Nobre C, Meyer M, et al. Origraph: Interactive network wrangling[C]//2019 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST). IEEE, 2019: 81-92.

[12] Abedjan Z, Morcos J, Ilyas I F, et al. Dataxformer: A robust transformation discovery system[C]//2016 IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE). IEEE, 2016: 1134-1145.

[13] Inala J P, Singh R. WebRelate: integrating web data with spreadsheets using examples[J]. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 2017, 2(POPL): 1-28.

[14] Pu X, Kross S, Hofman J M, et al. Datamations: Animated explanations of data analysis pipelines[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2021: 1-14.

[15] Lau S, Srinivasa Ragavan S S, Milne K, et al. Tweakit: Supporting end-user programmers who transmogrify code[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2021: 1-12.

[16] Niederer C, Stitz H, Hourieh R, et al. TACO: visualizing changes in tables over time[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2017, 24(1): 677-686.

[17] Furmanova K, Gratzl S, Stitz H, et al. Taggle: Combining overview and details in tabular data visualizations[J]. Information Visualization, 2020, 19(2): 114-136.

[18] Claessen J H T, Van Wijk J J. Flexible linked axes for multivariate data visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2310-2316.

[19] Fua Y H, Ward M O, Rundensteiner E A. Hierarchical parallel coordinates for exploration of large datasets[M]. IEEE, 1999.

[20] Yalçın M A, Elmqvist N, Bederson B B. Keshif: Rapid and expressive tabular data exploration for novices[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2017, 24(8): 2339-2352.

[21] Liu S, Maljovec D, Wang B, et al. Visualizing high-dimensional data: Advances in the past decade[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2016, 23(3): 1249-1268.

[22] Gratzl S, Lex A, Gehlenborg N, et al. Lineup: Visual analysis of multi-attribute rankings[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2013, 19(12): 2277-2286.

[23] Pajer S, Streit M, Torsney-Weir T, et al. Weightlifter: Visual weight space exploration for multi-criteria decision making[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2016, 23(1): 611-620.

[24] Lex A, Schulz H J, Streit M, et al. VisBricks: multiform visualization of large, inhomogeneous data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12): 2291-2300.

[25] Lex A, Streit M, Schulz H J, et al. StratomeX: visual analysis of large - scale heterogeneous genomics data for cancer subtype characterization[C]//Computer graphics forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2012, 31(3pt3): 1175-1184.

[26] Stahnke J, Dörk M, Müller B, et al. Probing projections: Interaction techniques for interpreting arrangements and errors of dimensionality reductions[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2015, 22(1): 629-638.

[27] Kasica S, Berret C, Munzner T. Table scraps: an actionable framework for multi-table data wrangling from an artifact study of computational journalism[J]. IEEE Transactions on visualization and computer graphics, 2020, 27(2): 957-966.