

## 面向文本描述的 CPS 资源能力知识图谱构建\*

李正洁<sup>1,2</sup>, 沈立炜<sup>1,2</sup>, 李 弋<sup>1,2</sup>, 彭 鑫<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(复旦大学 计算机科学与技术学院, 上海 200438)

<sup>2</sup>(上海市数据科学重点实验室 (复旦大学), 上海 200438)

通信作者: 沈立炜, E-mail: [shenliwei@fudan.edu.cn](mailto:shenliwei@fudan.edu.cn)



**摘 要:** 信息物理融合系统 (cyber-physical system, CPS) 在社会生活中发挥越来越广泛的作用. CPS 资源的按需编排建立在 CPS 资源的软件定义基础上, 软件接口的定义则依赖对 CPS 资源能力的充分描述. 目前, CPS 领域内缺少一个能规范表示资源及其能力的知识库和构建该知识库的有效方法. 面向 CPS 资源的文本描述, 提出构建 CPS 资源能力知识图谱并设计一种自底向上的自动构建方法. 给定资源, 所提方法先从其代码和文档中提取资源能力的文本描述信息, 并基于预定义的表示模式生成规范化表示的能力短语. 然后, 基于动宾结构的关键成分对能力短语进行划分、聚合与抽象, 生成不同类型资源的能力层次化抽象描述. 最后, 构建资源能力知识图谱. 面向 Home Assistant 平台, 构建了包含 32 个资源类别、957 个资源能力的知识图谱. 图谱构建实验从不同维度对比分析了手工构建和所提方法自动构建的结果. 实验表明, 所提方法为 CPS 资源能力知识图谱的自动化构建提供可行途径, 有助于减少人工构建工作量, 补充 CPS 领域内资源服务与能力的描述, 并提高图谱的知识完备性.

**关键词:** 信息物理融合系统 (CPS); 能力; 知识图谱; 物联网 (IoT)

**中图法分类号:** TP311

中文引用格式: 李正洁, 沈立炜, 李弋, 彭鑫. 面向文本描述的CPS资源能力知识图谱构建. 软件学报, 2023, 34(5): 2268–2285. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6410.htm>

英文引用格式: Li ZJ, Shen LW, Li Y, Peng X. Text-oriented Construction for CPS Resource Capability Knowledge Graph. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2023, 34(5): 2268–2285 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6410.htm>

### Text-oriented Construction for CPS Resource Capability Knowledge Graph

LI Zheng-Jie<sup>1,2</sup>, SHEN Li-Wei<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>, PENG Xin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

<sup>2</sup>(Shanghai Key Laboratory of Data Science (Fudan University), Shanghai 200438, China)

**Abstract:** Cyber-physical system (CPS) plays an increasingly important role in social life. The on-demand choreography of CPS resources is based on the software defining of CPS resources. The definition of software interfaces depends on the full description for the capabilities of CPS resources. At present, in the CPS field, there is a lack of a knowledge base that can describe resources and their capabilities, and a lack of an effective way to construct the knowledge base. For the text description of CPS resources, this study proposes to construct the CPS resource capability knowledge graph and designs a bottom-up automatic construction method. Given CPS resources, this method first extracts textual descriptions of the resources' capabilities from code and texts, and generates a normalized expression of capability phrases based on a predefined representation pattern. Then, capability phrases are divided, aggregated and abstracted based on the key components of the verb-object structure to generate the hierarchical abstract description of capabilities for different categories of resources. Finally, the CPS knowledge graph is constructed. Based on the Home Assistant platform, this study constructs a knowledge graph containing 32 resource categories and 957 resource capabilities. In the construction experiment, the results of manual construction and automatic construction using the proposed method are compared and analyzed from different dimensions. Experimental results show

\* 基金项目: 上海市级科技重大专项 (2021SHZDZX0100)

收稿时间: 2021-02-25; 修改时间: 2021-05-17; 采用时间: 2021-05-29; jos 在线出版时间: 2021-08-03

CNKI 网络首发时间: 2022-11-15

that this study provides a feasible method for automatic construction of CPS Resource Capability Knowledge Graph. This method helps to reduce the workload of artificial construction, supplement the description of resource services and capabilities in the CPS field and improves the knowledge completeness.

**Key words:** cyber-physical system (CPS); capability; knowledge graph; Internet of Things (IoT)

依托 3C (computation, communication, control) 技术<sup>[1]</sup>的不断发展与逐步成熟,信息物理融合系统 (cyber physical system, CPS)<sup>[2,3]</sup>在人类社会生活中发挥越来越广泛的作用。CPS 是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统。在物理层面, CPS 通过软件接口实现对物理设备的控制和数据采集。在信息层面, CPS 融合计算资源、网络服务等,协调物理世界和信息世界的交互<sup>[4]</sup>。

CPS 涵盖一系列物理和信息资源 (本文中将其统称为 CPS 资源), 这些资源服务于特定的应用场景。例如, 访问在线天气服务查看实时天气信息。除此之外, 各类提供不同能力的 IoT<sup>[5,6]</sup>智能设备在 CPS 中也承担着关键角色, 实现面向物理世界的感知与反馈。例如, 使用温湿度传感器获知房间的温湿度状态; 利用摄像头完成照片的抓拍。更进一步, 按需融合各种 CPS 资源能够拓展应用场景。例如, 当在线服务提供的天气信息显示室外空气质量不佳时, 自动开启房间内的空气净化器, 并结合门窗传感器反馈的门窗开关状态, 判断是否需用智能音箱播放“室外空气质量不佳, 请关闭门窗”的语音提示。这类场景的实现意味着在运行时需要有序调用 CPS 资源的软件接口 (API)。随着“软件定义一切”<sup>[7,8]</sup>思想的兴起, 开发者可采用各种技术来挖掘资源的软件接口。例如, 在熟悉资源能力的前提下, 开发者通过实际使用资源或其相关应用程序, 采用内存计算反射等技术将资源的特定能力转换为软件接口<sup>[9]</sup>。为了尽量覆盖指定 CPS 资源的全部能力并挖掘出完整的接口集合, 首先需要对资源的能力进行充分的理解<sup>[10,11]</sup>, 并采用规范化的形式对能力进行描述从而支持运行时的资源检索与协作。然而, 当前 CPS 资源能力的描述并未形成一种共识, 智能设备的生产厂商很少提供设备能力的规范化说明, 往往需要使用者通过阅读设备使用手册或使用后才能发掘。例如, 通过阅读某一摄像头设备的使用说明, 获知该设备能提供回放上一视频的服务, 但不具备实时播放视频的能力。另一方面, 对资源能力的描述也并未形成统一标准, 使得在按需融合过程中无法实现高效的资源能力检索与匹配。

在资源及其能力的描述方面, 部分学者指出可在资源层面对领域内的概念和关系进行建模, 包括资源本身、资源属性、资源能够执行的动作以及资源与资源之间的关系<sup>[12,13]</sup>。已有的描述 CPS 资源概念和能力的工作可分为本体相关和知识图谱相关。本体相关的工作主要围绕特定场景需求, 对涉及资源的概念、服务等进行定义和规范, 通常由领域专家根据实际需要手工构建, 往往费时费力, 且难以适应行业快速发展带来的变化。知识图谱<sup>[14,15]</sup>可被视为一种描述物理世界中概念及其相互关系的数据表现形式, 目前对 CPS 资源及其能力的描述大多存在于通用的百科知识图谱中, 其涵盖资源类型广、对资源能力信息的描述形式多样。但是其中的信息组织形式扁平、能力划分不清晰、数据冗余量较大, 不适用于特定领域内的知识检索。因此, 目前 CPS 领域仍缺少一个能够有效表达资源及其能力的知识库。

将 CPS 资源及其提供的服务作为知识进行组织, 可从语义层面上屏蔽不同设备所依赖的底层平台和执行环境的差异, 提高设备的互操作性<sup>[16]</sup>, 进而更好地满足不同场景下的应用需求。在此背景下, 本文提出资源能力知识图谱, 将物联网设备和互联网信息服务作为不同类型的物理信息资源, 为这些资源提供的服务赋予语义描述, 并定义为资源的“能力”。在此基础上, 提出一种 CPS 资源能力知识图谱自动构建方法。该方法针对不同类型资源, 面向资源服务的文本描述, 从中抽取并生成规范化表示的能力。然后, 自底向上对能力进行划分、聚合与抽象, 生成不同类型资源的能力层次化抽象描述。最后, 构建资源能力知识图谱。文章的主要贡献分为以下两点。

(1) 提出端到端的 CPS 资源能力知识图谱自动构建过程。以文本描述为输入, 经能力抽取与表示、聚合与抽象, 输出 CPS 资源的能力知识图谱。端到端的自动构建过程可减少人工构建的工作量。

(2) 实现能力的规范化表示与层次化组织。区别于多样化的表示形式及扁平化的呈现方式, 对能力表示进行规范并将其组织成层次结构有利于从不同维度区分能力。表示特化的上下位关系可减少信息冗余, 在能力检索上支持精准匹配。

在 CPS 资源能力知识图谱自动化构建的基础上, 本文对图谱在实际需求中的应用进行分析。然后, 面向 Hass

(home assistant) 平台构建了包含 32 个资源类别、957 个资源能力的知识图谱. 最后, 开展了图谱构建实验, 从不同维度对比分析手工构建和自动构建的结果. 图谱的构建实验表明, 本方法为 CPS 资源能力知识图谱的自动化构建提供可行的途径, 有助于减少人工构建工作量, 补充 CPS 领域内资源服务与能力的描述, 提高图谱的知识完备性.

本文第 1 节介绍相关工作. 第 2 节给出研究资源能力知识图谱的自动构建方法的动机. 第 3 节对自动构建方法进行系统阐述并给出图谱的使用分析. 第 4 节介绍面向 Hass 构建图谱的结果. 第 5 节通过一个图谱构建实验评估验证自动构建方法的可行性. 第 6 节总结全文, 介绍未来值得研究的工作方向.

## 1 相关工作

近年来, IoT、CPS、CPSS<sup>[17,18]</sup>, 这些工作大致分为本体相关和知识图谱相关. 首先, 本体作为一种“对特定领域中某套概念及其相互之间关系的形式化表达”的技术<sup>[19]</sup>, 可用于定义知识图谱的元模型规范. 在机器人领域中, 文献 [20-23] 采用本体建模技术对机器人的相关概念进行了定义, 旨在描述机器人的组件、能力、动作等知识, 以满足不同应用场景的需求. 文献 [24,25] 构建了物联网领域的环境本体, 刻画环境、实体、服务及能力等概念间的交互关系, 为服务动态组合、物联网设备的自动调度提供支持. Smirnov 等人则建立了 CPSS 领域本体, 定义和规范了信息、物理、社会三元空间中涉及的主要概念, 其中也包括资源服务的信息<sup>[26,27]</sup>. 这些领域本体通常由领域专家根据实际需要手工构建, 往往耗费较大的工作量. 随着信息、物理资源种类的不断扩充, 资源及其能力等方面的知识也处于不断发展和动态变化的过程中, 因此以手动方式对这些知识进行构建难以适应行业快速发展带来的变化.

Google 在 2012 年提出的知识图谱在诸多领域得到广泛应用, 其构建逐渐形成一套方法论. 例如, 对非结构化的文本数据, 通常要经过文本预处理、实体识别和关系抽取等过程, 最终形成知识的三元组表示. 相福生<sup>[28]</sup>从语料库中抽取能力词汇, 描述了物联网领域内的各种能力及能力之间的关系, 为异构物联网平台的融合、物联网服务的细粒度描述等工作提供支持. 但该研究专注于训练能力知识抽取与关系抽取模型, 并非围绕资源对其能力进行抽取与表示. 通用的百科知识图谱覆盖的资源类型十分广泛, 并对资源能力信息进行了不同程度的描述. 例如, ConceptNet<sup>[29]</sup>是一个由词语和词语间关系构成的常识知识库, 定义了一系列的关系词汇来描述词语间的语义关系. 举例来说, “UsedFor”和“CapableOf”用于描述实体概念的能力信息. 然而, 通用知识图谱中能力信息的表示形式多样, 且通常以扁平化方式进行组织, 存在能力划分不清晰, 知识冗余的问题, 这将不利于对 CPS 资源的软件接口挖掘和运行时面向资源协作的知识检索和推理.

## 2 研究动机

通常, CPS 资源的能力信息以多种非结构化方式表述, 包括文本、图像、视频和语音等. 产品使用说明书、官方网站介绍、智能语音助手、聊天机器人及视频使用示例等多源信息使得能力获取更加复杂. Hass 是一个典型的开源智能家居解决方案<sup>[30]</sup>, 可以实现各种设备资源、信息服务的集成和统一编排控制. Hass 中包含各种类别的组件, 每个组件对应一种具体的设备或平台, 可被认为是一种 CPS 资源. 在 Hass 平台上, 用户可通过 YAML<sup>[31]</sup>配置接入资源的具体实例, 并调用 Hass 提供的接口访问该资源实例的服务. Hass 用多种方式描述资源的能力, 例如服务列表、文档和 YAML 配置等, 如图 1 所示, 服务列表结构化地描述了资源能力; 文档是设备或资源的介绍和使用说明; YAML 配置给出了具体的接入示例. 资源的能力隐含在以文档为主的文本信息中, 需要人工理解、提取和组织.

另一方面, 针对同类型资源但以不同方式表示的能力在语义上可能会出现相似或关联的情况, 这会导致信息冗余, 无法表现能力间的关系. 以 Hass 中 Camera 的描述文本为例: (1) “watch video”和“watch live video”, 前者更为抽象, 后者对前者加上限定词“live”来明确视频的类型; (2) “trigger gas alarm”和“trigger carbon\_monoxide alarm”, 由于“carbon\_monoxide”是一种“gas”, 因此后者是前者的特化. 由此可见, 同种类型资源的能力在表示上具有泛化和特化的层次特性, 因此能力可以用树型层次关系来组织, 从抽象到特化可减少检索能力的代价. 另外, 为了能根

据能力快速检索到提供该能力的资源, 还需在能力与资源之间建立关联. 知识图谱可以建立能力与能力、能力与资源之间的关系, 从概念角度对 CPS 资源及其能力信息进行描述, 并在实例层次接入具体的资源实体及其服务接口.

为了构建资源能力图谱, 需先抽取、表示资源的能力; 然后去除冗余能力、确定能力间关系; 最后建立能力的层次结构, 并用图谱方式进行组织. Hass 平台中的资源数量超过 900 个, 分为 48 种类型, 单类型下资源数量最多可达 253 个. 资源的描述信息包含自然语言描述、服务列表和配置示例 3 种. 若通过人工提取资源能力信息来构建不同类型的资源能力层次化关系并生成资源能力知识图谱, 则需耗费较大的工作量. 因此, 本文提出的 CPS 资源能力知识图谱构建方法将通过自动化的手段来达成以上目标.



图 1 Hass 平台资源能力描述方式

### 3 研究方法

CPS 资源能力知识图谱的概念模型如图 2 所示.

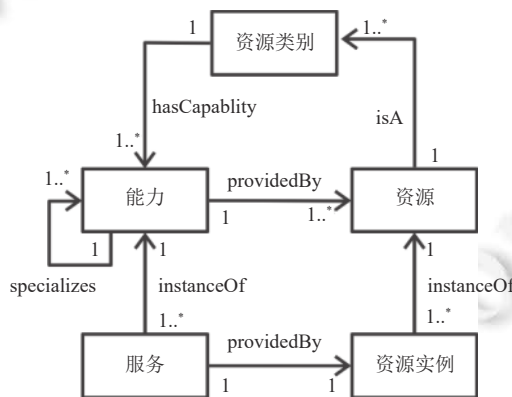


图 2 CPS 资源能力知识图谱概念模型

由图 2 可见模型划分为概念层和实例层. 资源类别、资源、能力及其关系构成图谱的概念层, 其中, 资源类别与能力通过 hasCapability 关系关联, 表示以资源类别为粒度进行能力描述. 能力之间具有 specializes 关系, 指能力间的特化关系, 表现出能力知识图谱的层次特性. specializes 关系所指向的目标能力抽象程度更高, 更具有概括性, 如“detect gas”; 该关系的起始能力含义更明确、具体, 如“detect carbon\_monoxide”. 能力可由资源类别下的某个资源提供, 因此在能力和资源间建立 providedBy 关系. 资源通过 isA 关系和资源类别关联, 表示资源所属的类别, 例如, “Xiaomi Air Purifier”属于“Fan”类别. 图谱的实例层定义服务和资源实例, 分别与能力和资源建立 instanceOf 关系, 表示能力和资源在现实世界中对应的真实存在的实例. 例如, 101 会议室摆放的“小米空气净化器”是资源 “Xiaomi Air Purifier”的一个资源实例. 在服务与资源实例间建立 providedBy 关系, 表示服务作为能力的实例形式

存在,并由某个具体的资源实例提供.本文的研究聚焦在构建资源能力知识图谱的概念层,不涉及服务、资源实例等具体的实例层知识.因此,后文中的资源能力知识图谱指代图谱中的概念层.

通常,资源类别及其包含的资源可通过既定的分类体系获得.以 Hass 平台为例,可直接将平台支持的各组件作为资源,将组件所属的类别作为资源类别,形成图谱中有关资源和资源类别的知识.隶属于同一类别下的资源称为同种类型的资源.特定类型资源所具有的能力,以及能力之间通过 *specializes* 关系体现的层次化特性通常隐藏在各类描述中,无法直接获取,因此需设计通用的能力提取和分析过程.为了以自动化的手段达成以上目标,本文提出 CPS 资源能力知识图谱的自动化构建方法,其流程如图 3 所示.首先,方法针对不同类型的信息物理资源,从相关的文档和 API 中提取描述资源能力的短语.然后,基于预定义的动宾短语模式生成规范化表示的动宾短语.接着,为不同类型资源生成其能力的层次化抽象描述.最后,整合所有类型资源,基于概念模型构建资源能力知识图谱.

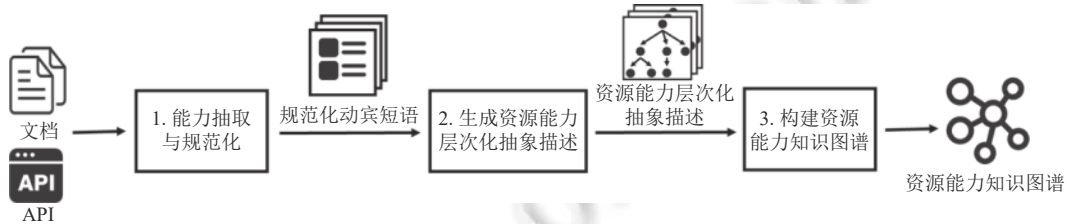


图 3 CPS 资源能力知识图谱构建方法流程

### 3.1 能力抽取与规范化

方法的第 1 步包括资源能力描述短语的提取与规范化表示.以下对这两个子步骤进行详细介绍.

#### 3.1.1 提取资源能力描述短语

针对不同形式的数据来源,可通过制定不同的规则自动化提取出其中描述能力的短语.表 1 列出 3 种数据来源下的能力提取规则,并以 Hass 为例,给出这 3 种规则在 Hass 中的实施细节.经过基于规则的提取过程,可得到 Hass 中每个资源的能力描述短语.

表 1 不同数据来源的能力短语提取规则

数据来源	提取规则	示例
服务列表	直接提取资源服务名	提取Hass中资源的services.yaml文件中的每个条目名作为描述能力的短语
配置代码	根据指定字段提取资源服务名	提取Hass中资源配置示例中的service字段值作为描述能力的短语
自然语言文本	匹配描述能力的典型词组,提取短语或从句	抽取包含“be able to”“be capable of”“allow to”等词组的句子,当句子主语为当前资源名时,提取位于词组后的短语或从句

#### 3.1.2 生成规范化动宾短语

##### (1) 定义能力短语的规范化表示形式

对第 3.1.1 节提取出的能力描述短语进行分析,总结出资源能力的表示一般可分为动宾短语和名词短语两种形式.以 Camera 资源为例,“capture image”“watch video”为动宾短语形式,“motion recording”“motion detection”为名词短语形式.对于动宾短语,宾语和动词分别表示在某一对象上所施加的某一动作,这种描述形式符合一般情况下能力表示的习惯.对于名词短语,末尾名词通常表示某一动作,可在保持语义的前提下,将其转化为动宾结构的形式,如将“motion recording”转化为“record motion”.另外,在上述两种短语形式中,通常将修饰语(或限定词)用于更精准地描述能力,如“watch live video”短语中的“live”“streams a video with MJPEG”中的“with MJPEG”.因此,修饰语也需作为能力表示的有效成分之一.

综上,定义能力短语的规范化表示形式,形如“动词(词组)修饰语 宾语 修饰语”的动宾短语模式,如定义 1 所示.

**定义 1.** 动宾短语模式.

$$VO = (\text{verb}, \text{qualifier1}, \text{object}, \text{qualifier2})$$

*verb*、*object*、*qualifier1* 和 *qualifier2* 称为动宾短语的成分。其中, *verb* 成分通常对应一个及物动词, 或由不及物动词加介词组成的动词词组; *object* 成分表示动词所作用的宾语, 通常是一个名词; *qualifier1* 和 *qualifier2* 成分则表示位于宾语前后的修饰语, 可由一个或多个包含名词、形容词或副词、介词在内的词语组成, 但不包括冠词、量词、代词等。

### (2) 生成规范化动宾短语

基于第 3.1.1 节提取出的能力描述短语, 对其应用依存句法分析技术<sup>[32,33]</sup>, 得到短语中词语间的依赖关系, 确定是否为一般的动宾短语或名词短语。若是动宾短语, 则根据下述情况 1 进行处理, 若是名词短语, 则根据下述情况 2 进行处理, 否则不予处理。

- 情况 1. 根据依存句法分析结果, 确定动宾短语中的谓语、宾语、定语和补足语等句法成分, 匹配为动宾短语模式中的 *verb*、*object* 和 *qualifier1*、*qualifier2* 成分, 进而生成规范化的动宾短语。

- 情况 2. 根据依存句法分析结果, 确定名词短语中的核心名词及该名词的修饰语, 匹配为 (修饰语, 核心名词) 的名词短语形式, 并按照下述转化规则转化为规范化的动宾短语。

转化规则有:

- 规则 1. 若核心名词为动名词, 且表示对修饰语施加的某一动作或过程, 则通过词形还原获取该名词对应的动词, 再将修饰语转化为该动词的宾语。例如, 先将“motion recording”中的动名词“recording”还原为“record”, 再得到“record motion”。

- 规则 2. 若核心名词为名词原形, 且表示对修饰语施加的某一动作或过程, 则结合英语的构词规律<sup>[34,35]</sup>获取该名词的同义动词, 再将修饰语转化为该动词的宾语。例如, 先将“motion detection”中的名词“detection”转化为“detect”, 再得到“detect motion”。

经过上述过程, 可得到资源能力的规范化表示的动宾短语。图 4 以 Hass 中 Camera 类型资源为例列举出一部分表示结果。



图 4 Camera 资源能力短语提取与规范化表示示例

## 3.2 生成资源能力层次化抽象描述

对每个类型下的资源, 将第 3.1 节得到的规范化动宾短语进行划分、聚合与抽象, 可生成该类型资源的能力层次化抽象描述, 作为构建资源能力知识图谱的基础。本节对生成资源能力层次化抽象描述的过程进行详细介绍。

### 3.2.1 能力层次化抽象描述生成流程

由第 3.1.2 节中动宾短语模式的定义可知, 规范化的能力短语必包含 *verb* 和 *object* 成分, 可能包含 *qualifier1* 和 *qualifier2* 成分。对每个类型的资源, 其能力的层次化抽象描述的生成步骤如图 5 所示。首先, 将能力短语集合按短语的 *object* 成分划分, 再按 *verb* 成分划分, 得到多个并列“最小短语集”, 最小短语集中短语的 *verb* 和 *object* 成分均相同。然后, 对每个最小短语集, 基于修饰语成分间的关系, 计算其中两两短语间的关系, 构造描述短语间关系

的有向加权图. 接着, 利用最小树形图生成算法生成短语关系树. 最后, 整合多个最小短语集对应的短语关系树, 生成当前类型资源的能力的层次化抽象描述.

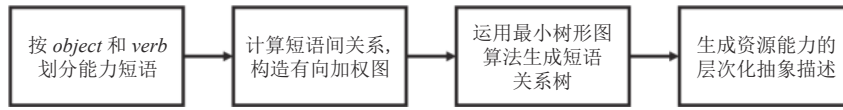


图 5 生成资源能力层次化抽象描述的步骤

该过程如算法 1 所示.

**算法 1.** 资源能力层次化抽象描述生成算法.

输入: 某一类型资源的规范化表示的能力短语集合  $V$ ;

输出: 当前类型资源的能力层次化抽象描述.

```

1. function AggregateVO( $V$ )
2.    $resVOMap$  #记录结果
3.    $obSetMap \leftarrow divide(V, 'object')$  #按照  $object$  划分短语集合
4.   for each  $\langle ob, obSet \rangle$  in  $obSetMap$ 
5.      $resObList$  #记录当前  $object$  对应结果
6.      $verbSetMap \leftarrow divide(obSet, 'verb')$  #按照  $verb$  划分短语集合
7.     for each  $\langle verb, verbSet \rangle$  in  $verbSetMap$ 
8.        $resMinSet \leftarrow AggregateMinSet(verbSet)$  #聚合短语, 得到短语关系树
9.        $resObList.append(resMinSet)$ 
10.    end for
11.     $rootCapability \leftarrow ob + 'related\ capability'$  #定义抽象能力
12.     $resVOMap.put(rootCapability, resObList)$ 
13.  end for
14. return  $resVOMap$ 

```

算法 1 中, 第 3 行和第 6 行中的 `divide` 操作分别指按给定的 `object` 或 `verb` 成分对短语集合进行划分的过程. 若两个短语在对应成分上的单词具有相同或同义关系, 则将两个短语划分在同一集合. 对单词同义关系的判定均基于 WordNet<sup>[36]</sup>提供的同义词集进行. 将输入的短语集合按 `object` 和 `verb` 成分双重划分后, 可得到多个并列的最小短语集. 例如, 对于图 4 所示的 Camera 资源的部分能力短语, 划分的结果如图 6 所示, 可得到的一个最小短语集合是 {"show latest captured still image", "display image"}. 将这两个能力短语划分在同一个最小短语集中的原因在于短语的 `object` 成分相同且短语的 `verb` 成分, 即 "show" 和 "display", 因此在划分过程中被判定为同义词.

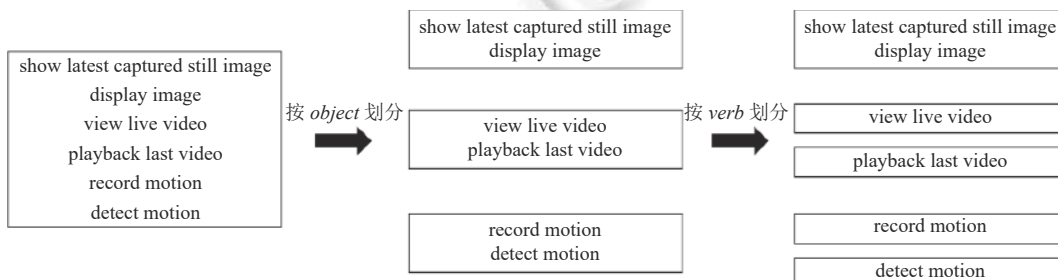


图 6 Camera 资源能力短语划分结果示例

算法1的第7-10行表示依次将最小短语集作为输入,生成多个并列的短语关系树的过程.第11行表示为每个object对应的多个短语关系树赋予一个<object related capability>格式的“公共树根”,定义为一个具有高度概括性的抽象能力.第8行的AggregateMinSet对应的最小短语集聚合过程如算法2所示.

---

#### 算法2. AggregateMinSet.

---

输入: 最小短语集合  $S$ ;

输出: 短语关系树.

---

```

1. function AggregateMinSet( $S$ )
2.    $resMinSet$  #记录聚合结果
3.   创建有向图  $G$ ,  $G.v$  为图的点集,  $G.e$  为图的边集
4.    $G.v \leftarrow S \# S$  对应为图的点集
5.   for  $i \leftarrow 0$  to  $S.length - 1$ 
6.     for  $j \leftarrow i+1$  to  $S.length - 1$ 
7.        $rel \leftarrow compare(S[i], S[j])$  #比较短语间关系
8.       if  $rel == 1$  #包含关系
9.          $w \leftarrow calculateSimilarity(S[i], S[j])$  #计算短语向量相似度值
10.         $G.e.append(edge(S[i], S[j], w))$  #加入  $G$  的边集
11.      end if
12.      if  $rel == 2$  #被包含关系
13.         $w \leftarrow calculateSimilarity(S[i], S[j])$  #计算短语向量相似度值
14.         $G.e.append(edge(S[j], S[i], w))$  #加入  $G$  的边集
15.      end if
16.    end for
17.  end for
18.  $resMinSet = eMPA(G)$  #利用最小树形图算法生成短语关系树
19. return  $resMinSet$ 

```

---

算法2中,第5-17行表示根据最小短语集中短语间的关系构建有向加权图  $G$  的边集.第7行的compare表示根据短语的修饰语成分判断短语间关系,具体细节将在第3.2.2节介绍.第8-15行表示当短语间具有包含或被包含关系时,将短语间的向量相似度值作为权重,构建有向边,第18行指基于构建的有向加权图运用最小树形图算法生成短语关系树,这部分细节将在第3.2.3节介绍.

#### 3.2.2 比较短语间关系

为构建资源能力的层次化描述,主要考虑判定短语间的上下位关系,即特化关系.下位表示特化关系所指向的目标能力;上位表示关系的起始能力.该关系可从结构上判定,如“watch live video”是“watch video”在结构上的特化;也可从语义角度判定,如“trigger carbon\_monoxide alarm”是“trigger gas alarm”在语义上的特化.由于最小短语集中短语的verb和object成分均相同或同义,因此,通过判断短语间的修饰语的上下位关系,即可判断短语间关系.对于修饰语A和B,其关系的判定过程如下:

- (1) 对A和B分别进行分词操作,得到单词集合setA和setB;
- (2) 若存在单词  $x \in setA$ , 单词  $y \in setB$ , 且基于WordNet判定  $x$  和  $y$  为同义词, 则从setA中移除  $x$ , 从setB中移除  $y$ ;
- (3) 若  $setA = \emptyset$  且  $setB = \emptyset$ , 则判定A和B为同义关系, 结束判定过程; 否则, 进入第(4)步;
- (4) 从结构角度判断setA和setB的关系: 若  $setA \subseteq setB$ , 则表示B是A的上位, 结束判定过程; 若  $setB \subseteq setA$ ,



则表示 A 是 B 的上位, 结束判定过程; 否则, 进入第 (5) 步;

(5) 从语义角度判断  $setA$  和  $setB$  的关系: 若 $|setA|=1$  且 $|setB|=1$ , 令  $x \in setA, y \in setB$ , 基于 WordNet 中单词的上下位关系判断  $x$  和  $y$  是否存在上下位关系, 若是, 表示为 A 和 B 的上下位关系; 否则, 判断 A 和 B 无上下位关系. 基于修饰语间关系的判定过程, 判断短语 P 和 Q 的关系的过程如下.

- (1) 若  $P.qualifier1$  是  $Q.qualifier1$  的上位, 则判定 P 是 Q 的上位, 结束判定过程; 否则, 进入第 (2) 步.
- (2) 若  $Q.qualifier1$  是  $P.qualifier1$  的上位, 则判定 Q 是 P 的上位, 结束判定过程; 否则, 进入第 (3) 步.
- (3) 若  $P.qualifier1$  和  $Q.qualifier1$  同义, 则进一步判断 P 和 Q 的关系.
  - ① 若  $P.qualifier2$  是  $Q.qualifier2$  的上位, 则判定 P 是 Q 的上位, 结束判定过程; 否则, 进入②.
  - ② 若  $Q.qualifier2$  是  $P.qualifier2$  的上位, 则判定 Q 是 P 的上位, 结束判定过程; 否则, 进入③.
  - ③ 若  $P.qualifier2$  和  $Q.qualifier2$  同义, 则判定 P 和 Q 同义; 否则, 判定 P 和 Q 仅为并列关系.

本文对具有同义关系的短语仅保留其中一个. 经过上述过程, 可得到短语间的包含或同义关系.

### 3.2.3 构造有向加权图, 生成短语关系树

基于短语间关系的判定, 可为每个最小短语集构造一个有向加权图  $G$ .  $G$  中的有向边以三元组  $(u, v, w)$  描述. 顶点  $u$  指向顶点  $v$ , 表示能力短语  $u$  是能力短语  $v$  的上位短语, 即泛化短语. 权重  $w$  则指短语  $u$  和  $v$  的词向量相似度, 取值范围是  $(0, 1)$ , 权重越接近 1 表示短语间的相似度越高, 该值使用 spaCy 工具包<sup>[37]</sup>计算得来.

为更清晰展现能力短语的从上至下的特化关系, 利用最小树形图<sup>[38]</sup>算法生成短语关系树. 最小树形图算法是以有向加权图为输入, 以最小权重和为目标的生成树算法. 最小权重和表示在算法有解的前提下, 保留图中权值较低的边. 本文的需求是保留图中相似度值较高的边, 因此, 首先需对  $G$  中每条边的权重进行更新, 令  $w=1-w$ . 另外, 若构造的有向图中存在独立的子图或孤立短语, 则会造成最小树形图算法无解. 为保证算法有解, 通常的做法是: 先为有向图生成一个虚拟顶点  $r$ ; 对图中的每个顶点  $x$ , 构造  $(r, x, \infty)$  的有向边, 得到新的有向图作为算法输入; 经求解, 一定会得到一棵以  $r$  为顶点的生成树; 最后去除顶点  $r$ , 可得到一棵或多棵树作为结果. 该过程如图 7 所示. 参考该过程, 本文采用以下两个步骤保证算法有解.

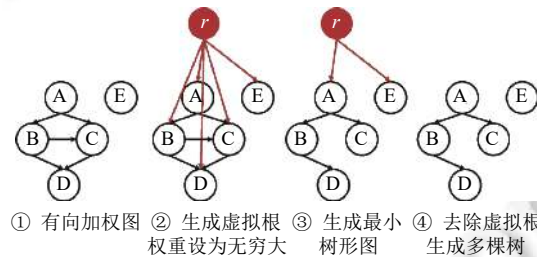


图 7 加入虚拟根的最小树形图算法示例

(1) 判断图  $G$  的点集  $G.v$  中是否存在顶点  $y$ ,  $y$  所对应的短语只包含  $verb$  和  $object$  成分, 不包含  $qualifier1$  和  $qualifier2$  成分. 若存在, 则  $y$  即为虚拟顶点  $r$ , 因此可直接将  $G$  作为算法输入; 否则, 进入第 (2) 步;

(2) 生成虚拟顶点  $r$ , 对应的短语表示为“ $verb0\ object0$ ”,  $verb0$  和  $object0$  为当前最小短语集中所有短语共同的  $verb$  和  $object$  成分. 对  $G$  中的每个顶点  $x$ , 构造有向边  $(r, x, 1)$  并加入  $G$ , 得到  $G'$ , 将  $G'$  作为算法输入.

对于第 (1) 步, 若存在短语  $y$ , 由于  $y$  不具有修饰语成分, 因此  $y$  对应的短语必为  $G.v$  中其余短语的上位, 即, 对于  $G$  中的每个顶点  $x$ , 均存在由  $y$  指向  $x$  的边. 因此, 图  $G$  具有强连通性, 算法一定有解, 且求解得到的生成树的根必为顶点  $y$ . 对于第 (2) 步, 由于不存在  $y$ , 因此, 需创建虚拟顶点  $r$  并构造有向边, 有向边的权值设为 1, 得到的新图  $G'$  可保证算法一定有解. 虚拟顶点  $r$  一定是求解得到的生成树的树根. 最后, 区别于图 7 中的第 ④步, 保留顶点  $r$ , 从语义角度理解,  $r$  所对应的短语是对  $G.v$  中所有短语的抽象, 具有最高的概括性, 应将其作为生成树的树根. 经过上述步骤, 可为每个最小短语集生成一棵树, 树中描述了最小短语集中能力短语的层次关系.

### 3.3 构建资源能力知识图谱

基于图 2 所示的资源能力知识图谱概念模型, 经以下步骤将能力的层次化抽象描述构建为资源能力知识图谱.

- (1) 创建“资源类别”“资源”“能力”等知识作为概念节点.
- (2) 在“资源类别”和“能力”结点之间建立“hasCapability”关系.
- (3) 在“资源”和“资源类别”结点之间建立“isA”关系.
- (4) 在“能力”和“资源”结点之间建立“providedBy”关系.
- (5) 在具有上下位关系的“能力”节点之间建立表示特化的“specializes”关系.

最后, 将所有类型资源的能力的层次化抽象描述转化为知识, 以“节点-关系-节点”的三元组形式表示, 并导入到知识图谱中, 形成资源能力知识图谱.

图 8 展示了 Camera 资源的能力层次化抽象描述, 中文括号中的名词表示提供能力的资源名, 未提供资源名的短语表示生成的抽象能力短语. 以“image related capability”为根的树为例, 构建出对应的资源能力知识图谱的片段如图 9 所示.

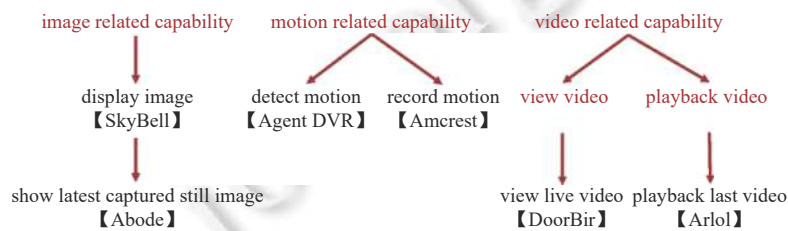


图 8 Camera 资源的能力层次化抽象描述示例

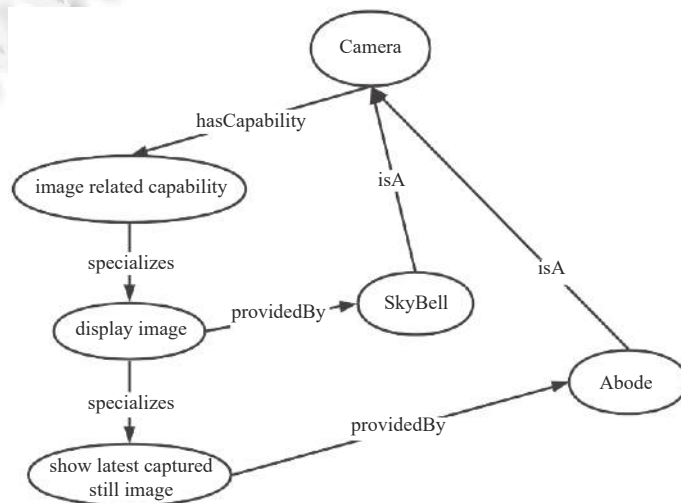


图 9 Camera 资源的能力知识图谱构建示例

### 3.4 图谱查询接口及其应用场景

我们对 CPS 资源能力知识图谱在 CPS 领域的应用进行定性分析. 首先, 本文方法构建的 CPS 资源能力知识图谱目前聚焦在概念层. 当应用到现实场景中时, 可根据真实情况添加环境中的资源实体作为对应资源概念的实例, 将资源实例提供的服务作为对应资源能力的实例. 另一方面, 我们在图谱上开发相应的接口用以实现面向图谱的知识检索等需求. 作为示例, 表 2 列出了一组通用的查询接口, 给出其说明及简化的 SPARQL<sup>[39]</sup>查询语句.

SPARQL 语句中使用“{参数}”结构表示查询输入的变量。

上述通用查询接口可以为 CPS 应用的构造和执行提供支持. 在应用构造阶段, 一般须提前获知完成整个场景运行所需的服务并以正确的次序编排这些服务; 在执行阶段, 应用可直接调用对应的服务驱动其执行. 拥有 CPS 资源能力知识图谱的情况下, 应用构造阶段可根据需求对能力进行编排, 应用执行时再通过调用“queryCapByDes”“querySpecCapByCap”和“querySerByCap”等接口, 为能力匹配当前可用的服务. 该过程将服务与应用的绑定推迟到执行阶段, 避免服务与应用的“硬绑定”, 在应用构造形式上增加了一层语义抽象, 提高了应用的可移植、可复用性. 另外一个场景是, 在应用执行因某一服务崩溃而中断时, 可根据服务对应的能力切换到其余可用的服务, 做到应用执行的快速恢复. 例如, 某一运行时场景依赖服务 A, A 是“capture image”能力的实例, 由 Blink 资源的实例提供, 当该资源实例不可用时, 可根据能力“capture image”查询提供该能力的资源为 Blink 及 Verisure. Verisure 存在一个可用的实例并提供一个服务 B 作为“capture image”能力的实例, 因此可通过将原先的服务 A 替换为服务 B 来快速恢复场景运行.

表 2 资源能力知识图谱通用查询接口

接口名	说明	输入参数	SPARQL 语句
queryCapByDes	根据能力名查询匹配的所有能力	能力名(cap)	SELECT ?subCap WHERE {?subCap rdf:type Capability. {cap} specializes* ?subCap }
querySpecCapByCap	查询某一能力的特化能力	能力名(cap)	SELECT ?subCap WHERE {?subCap rdf:type Capability. {cap} specializes ?subCap }
queryResByCap	查询提供某一能力的所有资源	能力名(cap)	SELECT ?res WHERE {?res rdf:type Resource. {cap} providedBy ?res }
queryCapByRes	查询某一资源具有的所有能力	资源名(res)	SELECT ?cap WHERE {?cap rdf:type Capability. ?cap providedBy {res} }
queryResInsByRes	查询某一资源的所有实例	资源名(res)	SELECT ?resIns WHERE {?resIns rdf:type ResourceInstance. ?resIns instanceOf {res} }
querySerByCap	查询某一能力的所有实例, 即服务	能力名(cap)	SELECT ?ser WHERE {?ser rdf:type Service. ?ser instanceOf {cap} }
queryResInsBySer	查询提供某一服务的所有资源实例	服务名(ser)	SELECT ?resIns WHERE {?resIns rdf:type ResourceInstance. {ser} providedBy ?resIns }
querySerByResIns	查询某一资源实例提供的所有服务	资源实例名(resIns)	SELECT ?ser WHERE {?ser rdf:type Service. ?ser providedBy {resIns} }

#### 4 图谱构建结果

面向 Hass 平台实施自动化构建过程, 构建出的 CPS 资源能力知识图谱包含具有实际含义的资源类别 32 个、能力节点 957 个, 可直接匹配到 218 个资源节点 (截至 2021 年 6 月, Hass 中共有 48 个组件类别、900 多个资源). 然而, 仍有部分文本描述无法转换为图谱知识. 其中, “DIY”“Intent”“Energy”等 13 个组件类别无法对应到具有实际含义的资源类别, 因此忽略对这些类别的资源能力的构建. 有一部分资源的描述内容不充分, 不足以提取其能力信息. 例如, “Sonarr”“Nello”“Clementine Music Player”等资源未给出服务列表和配置示例, 也缺少充分的能力文本描述. 另一部分自然语言文本无法应用能力短语提取规则. 例如, 由于文本“The worldclock sensor platform simply displays the current time in a different time zone”未包含“be able to”“used to”等明显用于表达能力的词组, 因此无法自动提取出其中的能力短语“displays the current time”.

图谱中的每条知识以“节点-关系-节点”的三元组形式表示, 构成图的形式. 由于篇幅原因, 表 3 采用表格形式列举出几种资源类别的主要能力以及提供能力的资源. 其中, 第 2 栏“主要能力”按照能力的特化关系进行排列, 最后一栏为对应的资源. 例如, “Light”一行中的“set brightness”是“brightness related capability”的特化能力, “set RGB brightness”是“set brightness”的特化能力, “set brightness”和“set RGB brightness”分别由资源“LIFX”和“Yeelight”提供.

表 3 面向 Hass 的部分构建结果

资源类别	主要能力	提供能力的资源
Light	brightness related capability └ set brightness └ set RGB brightness └ set HSV brightness	LIFX Yeelight Yeelight
	temperature related capability └ set temperature └ set color temperature	Yeelight
Vacuum	zone related capability └ clean zone	Xiaomi Mi Robot Vacuum
	step related capability └ move step └ move step in remote control mode	Xiaomi Mi Robot Vacuum
	base related capability └ return to base	Template Vacuum
Lock	lock related capability └ lock lock └ unlock lock └ set lock on └ set child lock on	Lock Lock Xiaomi Air Purifier
	speed related capability └ set speed	Dyson/Fan
Fan	direction related capability └ set direction	Fan
	humidity related capability └ set humidity └ set target humidity	Belkin WeMo/Climate Xiaomi Air Purifier
Camera	image related capability └ capture image └ get image of inside of refrigerator	Blink/Verisure/Abode Samsung Family Hub
	video related capability └ save video └ save latest video └ playback video └ playback last captured video	Ring Arlo
	email related capability └ send email	Mailgun
	amount related capability └ report amount └ report amount of all emails	IMAP
Downloading	limit related capability └ set limit └ set download speed limit	NZBGet
	queue related capability └ pause queue └ pause download queue	NZBGet
Notifications	notification related capability └ receive notification └ deliver notification └ deliver RESTful notification	Notifications SMTP/Matrix/Slack/ Syslog/LaMetric/ Notifications REST

以其中典型的资源类别为例介绍其能力的生成与构建过程. 资源的能力文本描述信息、数据来源及生成的规范化动宾短语在表 4 中列出. 对于资源类别“Vacuum”, 从 3 种数据来源中提取并生成动宾短语“clean zone”“move step in remote control mode”和“return to base”. 其中, “move step in remote control mode”中的“in remote control mode”

被匹配为动宾短语模式中的 *qualifier2* 成分,“return to base”中的“return to”被匹配为动宾短语模式中的 *verb* 成分。随后,3 个短语被划分在不同的最小短语集中,分别形成 3 个独立的短语关系树,树根节点“zone related capability”“step related capability”和“base related capability”对应为最上层的泛化能力。对于资源类别“Lock”,能力“lock lock”“unlock lock”和“set child lock on”具有相同的 *object* 成分,因此最终以“lock related capability”作为最上层泛化能力。“set child lock on”中“set on”作为动词词组被匹配为 *verb* 成分,“child”匹配为 *qualifier1* 成分,因此为其生成泛化能力“set lock on”,与“lock lock”“unlock lock”并列。对于资源类别“Fan”,提取并生成 4 个能力的动宾短语,“set speed”和“set direction”被构建成两个独立的短语关系树,树根节点根据短语的 *object* 成分生成。“set humidity”和“set target humidity”则在同一最小短语集中被识别为上下位关系,最上层的抽象短语命名为“humidity related capability”。对于资源类别“Mailbox”,其能力的构建过程与“Vacuum”类似。

表 4 Hass 中几种资源类别的部分能力

资源类别	能力文本描述	数据来源	能力动宾短语
Vacuum	“vacuum_clean_zone”	服务列表/配置示例	clean zone
	“vacuum_remote_control_move_step: Remote control the vacuum cleaner, only makes one move and then stops.”	服务列表, 自然语言文本	move step in remote control mode
	“Currently supported services are: start, pause, return_to_base, ...”	自然语言文本	return to base
Lock	“fan_set_child_lock_on”	服务列表	set child lock on
	“lock.lock”	服务列表/配置示例	lock lock
	“lock.unlock”	服务列表/配置示例	unlock lock
Fan	“set_speed”	服务列表/配置示例	set speed
	“set_direction”	服务列表/配置示例	set direction
	“set_humidity”	服务列表/配置示例	set humidity
	“fan_set_target_humidity”	服务列表	set target humidity
Mailbox	“The Mailgun notification service allows you to send emails via Mailgun’s REST API.”	自然语言文本	send email
	“The imap integration is observing your IMAP server and reporting the amount of unread emails.”	自然语言文本	report amount of all emails

## 5 图谱构建实验

本节通过图谱构建实验验证所提出的自动化构建方法的有效性,对比分析手工构建和自动构建的资源能力层次化抽象描述的结果,并对本文构建方法的不足进行讨论。

### 5.1 实验设置

#### (1) 目标

基于相同数据集,以资源能力的层次化抽象描述为构建目标,比较手工构建和本文自动构建方法的构建结果,并总结自动构建方法的不足。

#### (2) 方案

预先提取并生成不同类型资源的规范化能力短语,挑选手工构建的实验参与者。为避免参与者盲目进行构建,有关构建过程以及预期构建目标,总结以下几点先验知识预先告知参与者。

- 垂直方向上,能力以层级关系进行组织,即能力具有上下位的特化关系。
- 水平方向上,能力以合理的角度被有效划分。
- 可通过短语成分在语义上的相似、包含情况判断能力之间的同义、上下位、并列等关系,进而对其进行有效聚合,对多个同义短语只保留一个。
- 可对被聚合的多个原始能力进行合理抽象,生成具有概括性的抽象能力。

参与者充分理解后,独立完成构建过程,不限制用时.同时,将相同实验数据作为本文方法的输入,经自动构建,生成资源能力的层次化抽象描述.手工构建和自动构建的结果都以可视化方式展示.

### (3) 实验准备

在Hass平台中选取Mailbox, Calendar, Alarm, Camera这4种资源类别,这4种资源类别下资源的数量、文本描述信息的丰富程度递增.其中,Mailbox和Calendar代表信息资源,Alarm和Camera则代表物理设备资源.抽取并生成这4种资源类别对应的规范化能力短语,数量分别是7, 21, 29, 62.为避免不同人员对短语的理解产生歧义,在抽取时保留每个能力短语的上下文,作为规范化后短语附加的语义说明.同时,挑选软件工程专业的4名硕士研究生(记为A, B, C, D)作为实验参与者,并准备一台用于运行本文自动构建方法的计算机,配置为Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50 GHz 2.71 GHz, Windows 10 64 bit.

## 5.2 结果评估与总结

### (1) 结果评估

分别从层级关系、水平划分、有效聚合、概括抽象以及数据规模角度出发,对4位参与者的手工构建结果以及本文方法的自动构建结果进行对比分析.

首先,分析能力短语在垂直方向上的层级关系的构建情况.由于掌握先验知识,因此4位参与者都能以层级结构对能力短语进行组织.总体来看,手工构建和自动构建结果的层次结构都较为清晰.从层次数量来看,手工构建的层次数量因不同参与者的构建方式、抽象程度不同而有所不同,而自动构建方法也一定具有至少3层的层次结构,并且层次数量会随原始数据复杂度的增加而增加.在具体结构上,上层节点一般对应语义较为抽象的能力短语,下层节点则对应语义较为具体的能力短语.因此,从层级关系来看,手工构建和自动构建都达到了预期效果.

其次,分析能力短语在水平方向上的划分情况.从整体看,4位参与者都按各自的理解从不同角度对能力短语进行了划分.例如,对于资源类别Alarm,如图10所示,参与者A通过“trigger alarm”“fire alarm”“arm alarm”等短语将能力进行划分,参与者B则通过“trigger alarm”“change alarm mode”“show state”这3个方面划分.而自动构建方法则通过分析短语的句法结构并按其中的有效成分划分短语,分为“alarm related capability”“sensitivity related capability”“status related capability”等方面.对比来看,由于人的思维方式的多样性,手工构建结果在水平方向上的划分比较灵活,存在各种可能性,无法判断出绝对的好坏.但手工进行水平划分通常视具体情况具体分析,在资源种类多、数据量大的情况下,会存在一定难度.而自动构建方法在分析短语成分的基础上,制定了固定的短语划分规则,因此不存在上述问题.

接着,就能力短语被有效聚合及被概括抽象的情况进行讨论.总的来说,手工构建和自动构建均能将结构或语义上具有关联的短语进行聚合,但手工构建生成的抽象能力短语,概括性更好、格式更灵活.举例来说,(1)对于资源类别Mailbox,参与者ACD都将“view voicemail”“listen to voicemail”以及“delete voicemail”聚合在一起.参与者A为这些短语自定义名为“voicemail manipulation”的抽象短语,参与者C和D则直接定义名为“voicemail”的抽象短语.自动构建方法则根据这些短语拥有的共同宾语“voicemail”,将其聚合在一起,并定义名为“voicemail related capability”的抽象能力短语,达到了类似的效果.(2)对于资源类别Calendar的与event相关的短语“describe event start date”“describe event start time”和“describe event start date time”,全部参与者都将其直接在同一层次上聚合,并定义“describe event”的抽象短语.而自动构建方法则按照宾语“date”和“time”分别对其聚合,并依次向上生成抽象短语“describe time”“time related capability”以及“describe date”“date related capability”.从结果看,前者更加简洁直观,后者则稍显冗余,但对整体结果的呈现影响不大.(3)对于资源类别Camera,图11给出参与者A和自动构建方法的部分构建结果,其中,背景框着色的短语为自定义的抽象能力短语.参与者A将“capture image”“take new image”“generate animated radar image”等短语在同一层次上聚合,并定义抽象短语“image create”,再与抽象短语“video create”等做进一步抽象,生成最上层抽象短语“create function”.而自动构建方法基于“capture image”等上述短语和其他具有相同宾语的短语(如“show latest captured image”等短语),通过提取其动词和宾语成分,定义“show image”等抽象短语,再根据这些短语的公共宾语,定义名为“image related capability”的最上层抽象短语.在当前数据下,相比自动构建方法,手工构建直接从动词角度出发,对上述短语做出了更合理的抽象,整体概括性更高.

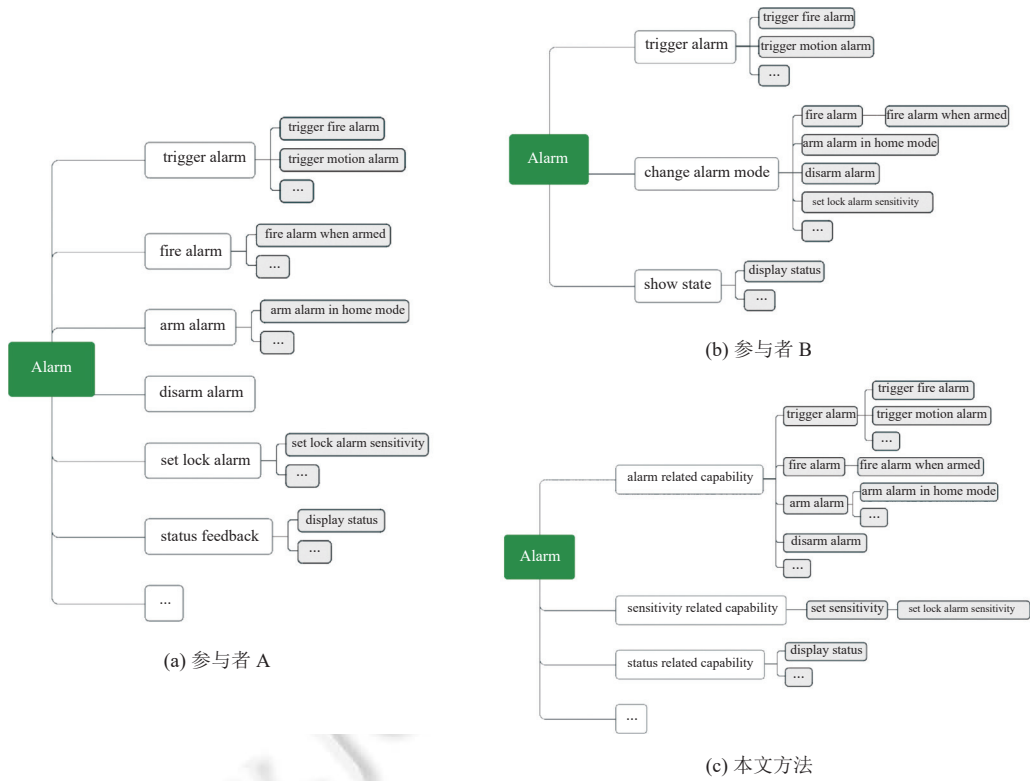


图 10 参与者 A、B 和本文方法对 Alarm 的部分构建结果

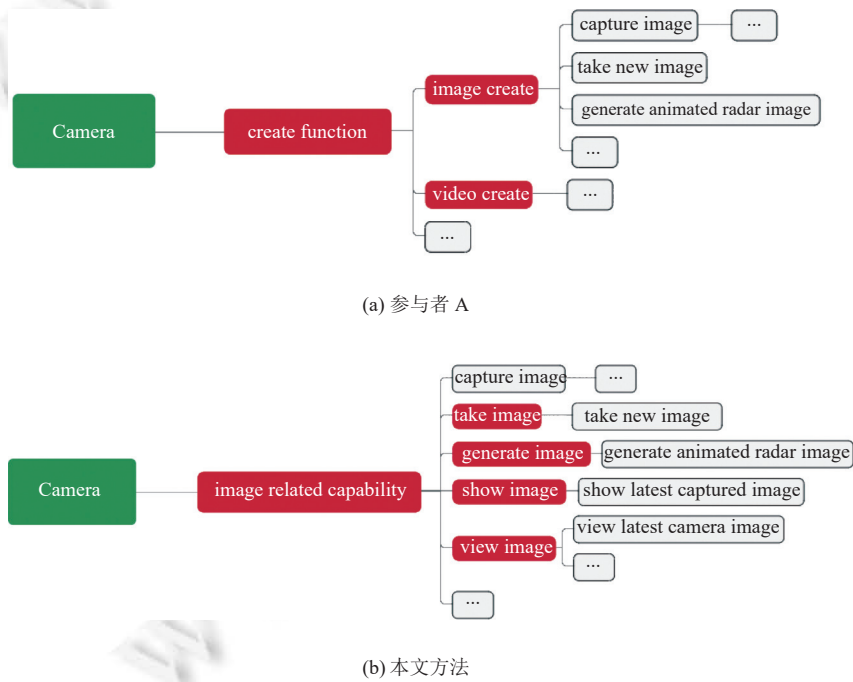


图 11 参与者 A 和本文方法对 Camera 的部分构建结果

最后,从数据规模的角度定性分析数据量和复杂程度对构建结果的影响.对于数据量较小、数据复杂程度较低的资源类别 Mailbox、Calendar 和 Alarm,手工构建所耗费代价较小,4位参与者都能给出较为清晰合理的构建结果.但对于资源类别 Camera,只有参与者 A 仍能对其中的能力短语进行比较合理的聚合和抽象,参与者 BCD 的构建结果则较为散乱,缺少有效的抽象,且存在遗漏了部分短语间关系的情况.对比来说,自动构建方法的结果不受数据规模的影响,始终以一定规则进行构建.随着数据规模增加,程序的运行时间虽有所延长,但对 Camera 资源能力短语的构建时间也不超过 1 分钟.

基于上述不同角度的对比分析,可以得出,由于不同参与者的理解方式、思考角度存在差异,使得手工构建通常具有较大的灵活性,对能力短语的聚合、概括抽象的表现通常较好.但手工构建过程一般无规律可言,且花费的代价随数据规模和复杂度的增加而逐渐加大.相比而言,本文提出的自动构建方法在能力短语的规范化表示的基础上能有效划分短语、确定短语间关系,并按照规则向上抽象,构建过程较为固定,具有较强的普适性,为 CPS 领域内大规模资源能力知识的规范化表示与组织提供了一种可行的途径.

## (2) 不足与改进

本文所提出的自动构建方法主要在以下两方面存在不足.

首先,未根据领域特性对词语的同义、上下位关系进行有效识别.举例来说,对于资源类别 Camera 的“show image”和“view image”能力,“show”和“view”两个单词的语义本无明显关联.但结合 Camera 资源进行实际分析,可发现上述两个能力分别是 Camera 资源和能力请求者的视角所展现,应被识别为同义短语.另外,对于资源类别 Alarm 的“trigger gas alarm”和“trigger carbon\_monoxide alarm”,对修饰语的语义进行分析可得,前者应是后者的上位短语,但方法并未识别.根本原因在于,自动构建方法对词语的同义、上下位关系的判定,均依赖于 WordNet 中词语的同义关系及分类体系进行,未将这些词语在描述 CPS 资源能力时具有的特性纳入考虑.

其次,对相关词语的抽象程度不足.在某些情况下,自动构建方法缺乏对相关词语做进一步概括和抽象,而只以固定的命名格式向上进行一至两层的抽象,导致抽象程度不高.

针对上述不足,改进的一种思路是建立 CPS 资源能力描述领域相关的词语知识库,对词语间关系及词语的分类体系进行总结.然而,构建一个完备的词语知识库需要大量领域数据的支撑,很难一步完成.一个可行的思路是利用 WordNet 中词语的同义和层级分类关系,结合人工对构建结果中相关词语的反馈标记,以增量的方式构建出上述词语知识库,并反馈用于构建过程,进而不断优化构建结果,以达到预期效果.

## 6 总 结

CPS 资源能力知识图谱可用于描述各种类型的 CPS 资源以及资源能力等知识.目前,有关 CPS 资源能力知识图谱的构建工作较为不足.本文提出一种面向文本描述的 CPS 资源能力知识图谱构建方法,以文本信息作为输入,抽取并生成规范化表示的能力短语,在此基础上对能力进行划分、聚合、抽象,最终构造资源能力知识图谱.该方法的提出有助于减少人工构建工作量并提高图谱的知识完备性.

在构建方法上,由于目前对相关词语的同义、上下位关系的判断均依赖于 WordNet,未根据领域特性做具体分析.因此,未来的一个工作方向是基于 WordNet 构建领域特定的词语知识库,对能力词汇间的关系及分类体系进行描述.另外,未来将对包含 Hass 平台的更大范围的 CPS 文本描述源进行知识挖掘,不断完善能力提取规则,并进一步丰富的能力间关系和资源间关系.

## References:

- [1] Xia F, Wang Z, Sun YX. Integrated computation, communication and control: Towards next revolution in information technology. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Intelligent Information Technology. Hyderabad: Springer, 2005. 117–125. [doi: 10.1007/978-3-540-30561-3\_13]
- [2] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. The Impact of Control Technology, 2011, 12(1): 161–166.
- [3] Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18–23. [doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001]



- [4] Jin Z, Chen XH, Li Z, Yu YJ. RE4CPS: Requirements engineering for cyber-physical systems. In: Proc. of the 27th IEEE Int'l Requirements Engineering Conf. (RE). Jeju: IEEE, 2019. 496–497. [doi: [10.1109/RE.2019.00072](https://doi.org/10.1109/RE.2019.00072)]
- [5] Liu YH. Introduction to Internet of Things. 3rd ed., Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [6] Qian ZH, Wang YJ. IoT technology and application. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023–1029 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.026)]
- [7] Mei H, Guo Y. Toward ubiquitous operating systems: A software-defined perspective. Computer, 2018, 51(1): 50–56. [doi: [10.1109/MC.2018.1151018](https://doi.org/10.1109/MC.2018.1151018)]
- [8] Mei H. Understanding “software-defined” from an OS perspective: Technical challenges and research issues. Science China Information Sciences, 2017, 60(12): 126101. [doi: [10.1007/s11432-017-9240-4](https://doi.org/10.1007/s11432-017-9240-4)]
- [9] Zhang S, Cai HQ, Ma Y, Fan TY, Zhang Y, Huang G. SmartPipe: Towards interoperability of industrial applications via computational reflection. Journal of Computer Science and Technology, 2020, 35(1): 161–178. [doi: [10.1007/s11390-020-9694-z](https://doi.org/10.1007/s11390-020-9694-z)]
- [10] Wang PW, Jin Z, Liu L, Cai GJ. Building toward capability specifications of Web services based on an environment ontology. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2008, 20(4): 547–561. [doi: [10.1109/TKDE.2007.190719](https://doi.org/10.1109/TKDE.2007.190719)]
- [11] Wang PW, Jin Z, Liu HY. Capability description and discovery of Internetware entity. Science China Information Sciences, 2010, 53(4): 685–703. [doi: [10.1007/s11432-010-0087-8](https://doi.org/10.1007/s11432-010-0087-8)]
- [12] Daoutis M, Coradeshi S, Loutfi A. Grounding commonsense knowledge in intelligent systems. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2009, 1(4): 311–321. [doi: [10.3233/AIS-2009-0040](https://doi.org/10.3233/AIS-2009-0040)]
- [13] Wollman D. Merging digital and physical worlds into cyber-physical systems framework. The Magazine of the Electroindustry, 2015, 20(11): 12–13.
- [14] Zou XH. A survey on application of knowledge graph. Journal of Physics: Conf. Series, 2020, 1487: 012016. [doi: [10.1088/1742-6596/1487/1/012016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1487/1/012016)]
- [15] Xu ZL, Sheng YP, He LR, Wang YF. Review on knowledge graph techniques. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 589–606 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.012)]
- [16] Kiljander J, D'elia A, Morandi F, Hyttinen P, Takalo-Mattila J, Ylisaukko-Oja A, Soininen JP, Cinotti TS. Semantic interoperability architecture for pervasive computing and Internet of Things. IEEE Access, 2014, 2: 856–873. [doi: [10.1109/ACCESS.2014.2347992](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2347992)]
- [17] Wang FY. The emergence of intelligent enterprises: From CPS to CPSS. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85–88. [doi: [10.1109/MIS.2010.104](https://doi.org/10.1109/MIS.2010.104)]
- [18] Guo W, Zhang Y, Li L. The integration of CPS, CPSS, and ITS: A focus on data. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(4): 327–335. [doi: [10.1109/TST.2015.7173449](https://doi.org/10.1109/TST.2015.7173449)]
- [19] Gruber TR. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199–220. [doi: [10.1006/knac.1993.1008](https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008)]
- [20] Schlenoff C, Messina E. A robot ontology for urban search and rescue. In: Proc. of the 2005 ACM Workshop on Research in Knowledge Representation for Autonomous Systems. Bremen: Association for Computing Machinery, 2005. 27–34. [doi: [10.1145/1096961.1096965](https://doi.org/10.1145/1096961.1096965)]
- [21] Lemaignan S, Ros R, Sisbot EA, Alami R, Beetz M. Grounding the interaction: Anchoring situated discourse in everyday human-robot interaction. Int'l Journal of Social Robotics, 2012, 4(2): 181–199. [doi: [10.1007/s12369-011-0123-x](https://doi.org/10.1007/s12369-011-0123-x)]
- [22] Kunze L, Roehm T, Beetz M. Towards semantic robot description languages. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011. 5589–5595. [doi: [10.1109/ICRA.2011.5980170](https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980170)]
- [23] Schlenoff C, Prestes E, Madhavan R, Goncalves P, Li H, Balakirsky S, Kramer T, Migueláñez E. An IEEE standard ontology for robotics and automation. In: Proc. of the IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve: IEEE, 2012. 1337–1342. [doi: [10.1109/IROS.2012.6385518](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385518)]
- [24] Jin Z, Zhu H. Unifying domain ontology with agent-oriented modeling of services. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on Service Oriented System Engineering. Irvine: IEEE, 2011. 31–42. [doi: [10.1109/SOSE.2011.6139090](https://doi.org/10.1109/SOSE.2011.6139090)]
- [25] Bian H, Chen XH, Jin Z, Zhang M. Approach to generating TAP rules in IoT systems based on environment modeling. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2021, 32(4): 934–952 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6224.htm> [doi: [10.13328/j.cnki.jos.006224](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006224)]
- [26] Smirnov A, Levashova T, Shilov N, Sandkuhl K. Ontology for cyber-physical-social systems self-organisation. In: Proc. of the 16th Conf. of Open Innovations Association FRUCT. Oulu: IEEE, 2014. 101–107. [doi: [10.1109/FRUCT.2014.7000933](https://doi.org/10.1109/FRUCT.2014.7000933)]
- [27] Smirnov A, Levashova T, Kashevnik A. Ontology-based resource interoperability in socio-cyber-physical systems. IT in Industry, 2018, 6(2): 19–24.

- [28] Xiang FS. Research and implementation of construction method for Internet of Things capability knowledge graph based on information extraction [MS. Thesis]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [29] Speer R, Chin J, Havasi C. ConceptNet 5.5: An open multilingual graph of general knowledge. In: Proc. of the 31st AAAI Conf. on Artificial Intelligence. San Francisco: AAAI, 2017. 4444–4451.
- [30] Home Assistant. 2021. <https://www.home-assistant.io/>
- [31] YAML. 2009. <https://zh.wikipedia.org/wiki/YAML>
- [32] Dependency Parsing. 2021. <https://web.stanford.edu/~jrafsky/slp3/15.pdf>
- [33] Qi P, Zhang YH, Zhang YH, Bolton J, Manning CD. Stanza: A Python natural language processing toolkit for many human languages. In: Proc. of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations. Association for Computational Linguistics, 2020. 101–108. [doi: 10.18653/v1/2020.acl-demos.14]
- [34] Plag I. Word-Formation in English. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [35] Lu CM. On the english word formation. Journal of Guangzhou University (Social Science Edition), 2002, 1(3): 29–32 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1671-394X.2002.03.006]
- [36] Miller GA. WordNet: A lexical database for english. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 39–41. [doi: 10.1145/219717.219748]
- [37] spaCy. <https://spacy.io/>
- [38] Edmonds' algorithm. 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Edmonds%27\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Edmonds%27_algorithm)
- [39] SPARQL query language for RDF. 2008. <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

#### 附中文参考文献:

- [5] 刘云浩. 物联网导论. 第3版, 北京: 科学出版社, 2017.
- [6] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究. 电子学报, 2012, 40(5): 1023–1029. [doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.026]
- [15] 徐增林, 盛泳潘, 贺丽荣, 王雅芳. 知识图谱技术综述. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 589–606. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.012]
- [25] 边寒, 陈小红, 金芝, 张民. 基于环境建模的物联网系统TAP规则生成方法. 软件学报, 2021, 32(4): 934–952. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6224.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.006224]
- [28] 相福生. 基于信息抽取的物联网能力知识图谱构建方法研究与实现 [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [35] 卢春媚. 浅谈英语构词法. 广州大学学报(社会科学版), 2002, 1(3): 29–32. [doi: 10.3969/j.issn.1671-394X.2002.03.006]



李正洁(1996—), 女, 硕士, 主要研究领域为人机物融合应用, 云计算.



李弋(1975—), 男, 博士, CCF 专业会员, 主要研究领域为机器人软件, 程序分析, 计算机系统架构.



沈立炜(1982—), 男, 博士, 副教授, CCF 专业会员, 主要研究领域为人机物融合应用, 移动应用开发与分析, 软件复用.



彭鑫(1979—), 男, 博士, 教授, CCF 杰出会员, 主要研究领域为智能化软件开发, 云原生与智能化运维, 泛在计算软件系统.