

基于LLM的自然语言到信号时序逻辑的转换

Enhancing Transformation from Natural Language to Signal Temporal Logic Using LLMs with Diverse External Knowledge

房越, 金芝, 安杰, 陈宏申, 陈小红, 詹乃军

In Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Findings)

Joint work with Peking University, JD.com inc., and East China Normal University

联系人: 安杰, anjie@iscas.ac.cn, 天基综合信息系统全国重点实验室

背景及问题介绍

信号时序逻辑 (Signal Temporal Logic, STL) 是一种被广泛用于描述信息物理融合系统(例如自动驾驶系统, 机器人等)需求规约的形式逻辑。由于对于工程师来说正确使用STL公式并非易事, 人工的将自然语言描述的需求转换为STL形式规约是非常耗时且容易出错的, 因此如何自动的完成自然语言(NL)到信号时序逻辑(STL)的转换吸引了广泛关注。但是, 由于缺少相关高质量数据集, 利用人工智能如大语言模型(LLMs)技术完成这一过程面临很大挑战, 仍处于探索之中。

本文方法简介

在本论文中, 我们构建了一个名为STL-DivEn的高质量数据集, 它包含16,000个多样化的自然语言描述与相应STL公式的数据对(NL-STL)。为构建该数据集, 我们首先人工创建了一个小规模种子数据集; 随后通过聚类识别代表性样本, 并引导大语言模型 (LLMs) 生成更多NL-STL对; 最后通过严格的基于规则的过滤和人工验证确保多样性与准确性。此外, 我们提出了一种将自然语言转化为STL的新方法, 即知识引导的STL转换 (Knowledge-Guided STL Transformation, KGST) 框架, 其通过基于外部知识的"生成-优化"流程实现。

Natural Language:

Whenever the robot detects an obstacle within 1 meter in the first 60 seconds, it should move away from the obstacle and remain at least 1.5 meters away for at least 30 consecutive seconds within the next 50 seconds.

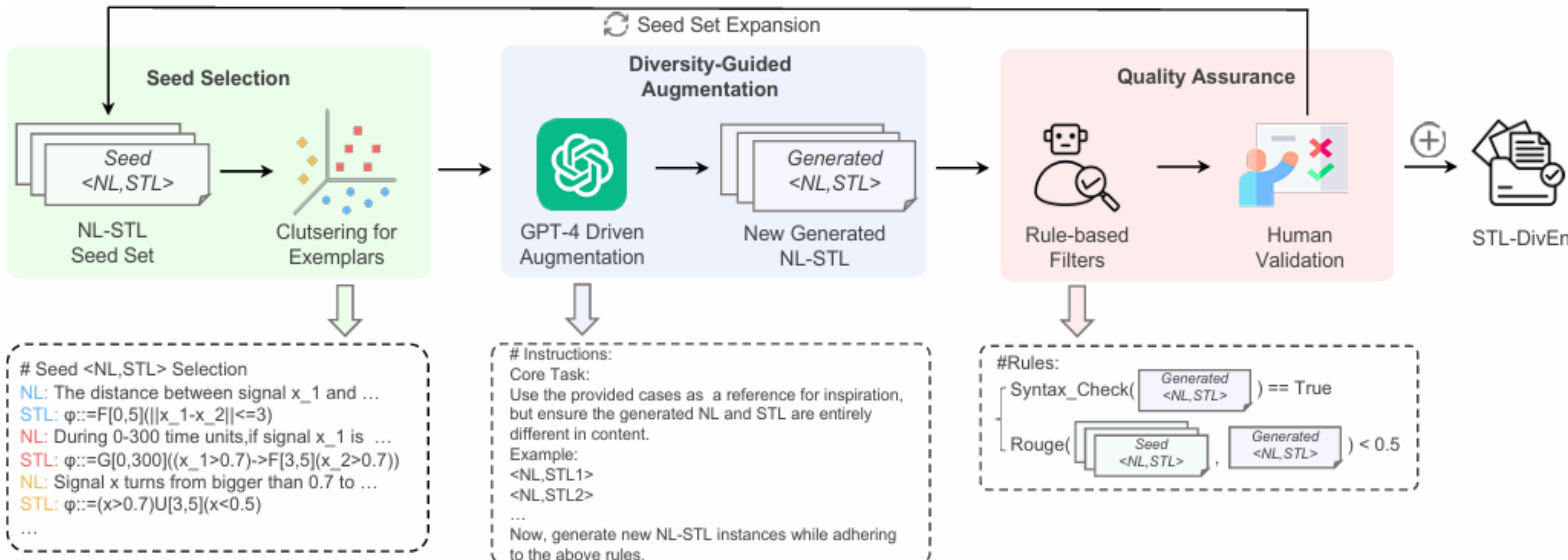
Signal Temporal Logic (STL):

$$G_{[0,60]} ((d_{\text{obs}} < 1) \rightarrow F_{[0,50]} G_{[0,30]} (d_{\text{obs}} \geq 1.5))$$

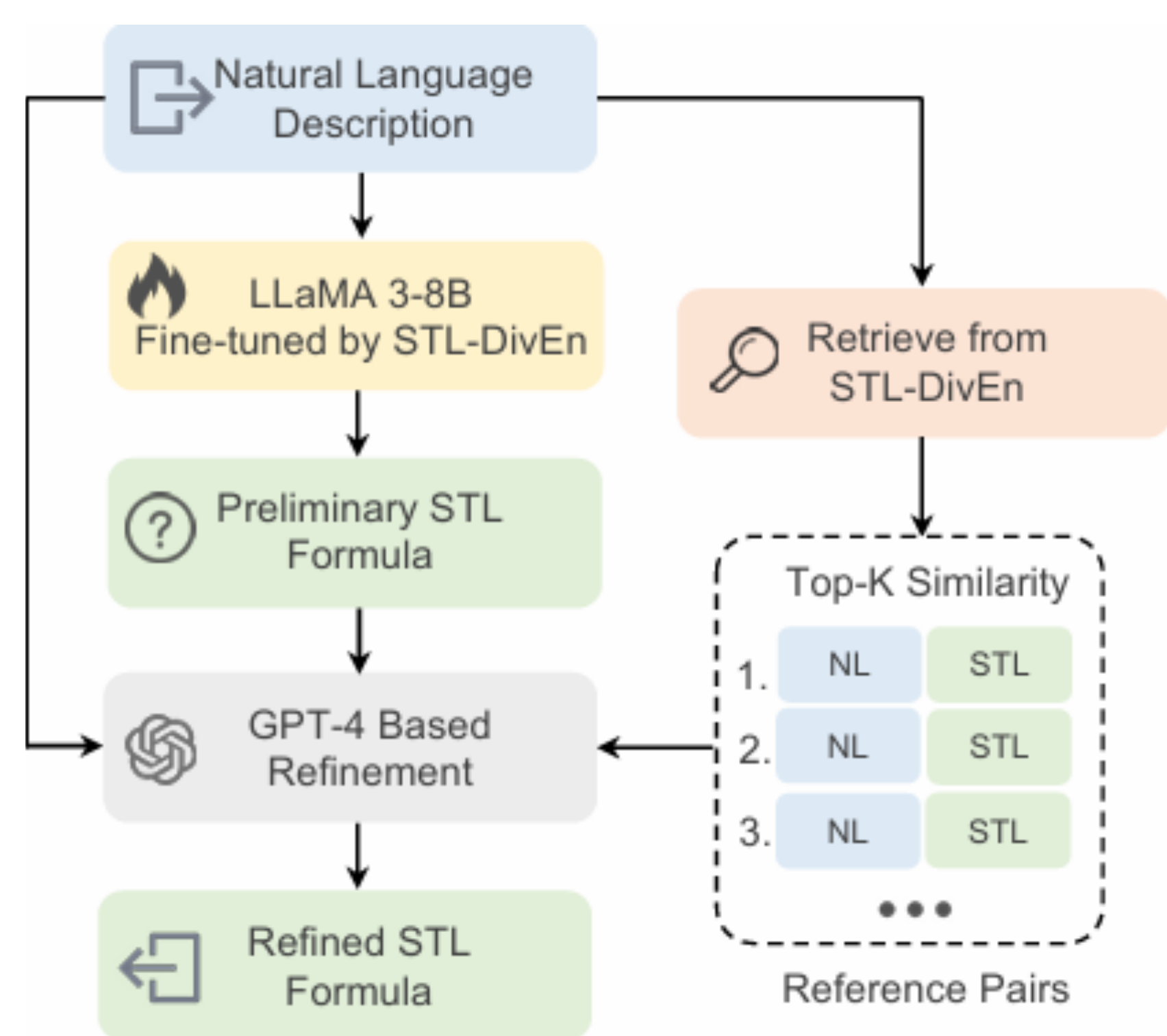
主要贡献:

- **STL-DivEn 数据集**。包含16,000个高质量NL-STL数据对。与目前已有的数据集DeepSTL相比, STL-DivEn的多样性更好, 数据质量更高。
- **知识引导的STL转换框架 (KGST)**。首个知识引导的NL到STL转换的通用框架。
- **KGST的实现与实验**。实验结果表明, 提出的KGST框架在STL-DivEn和DeepSTL数据集上均取得了目前最好的转换正确率。表明了KGST在不同数据集上的鲁棒性。

STL-DivEn 数据集构建



KGST 框架



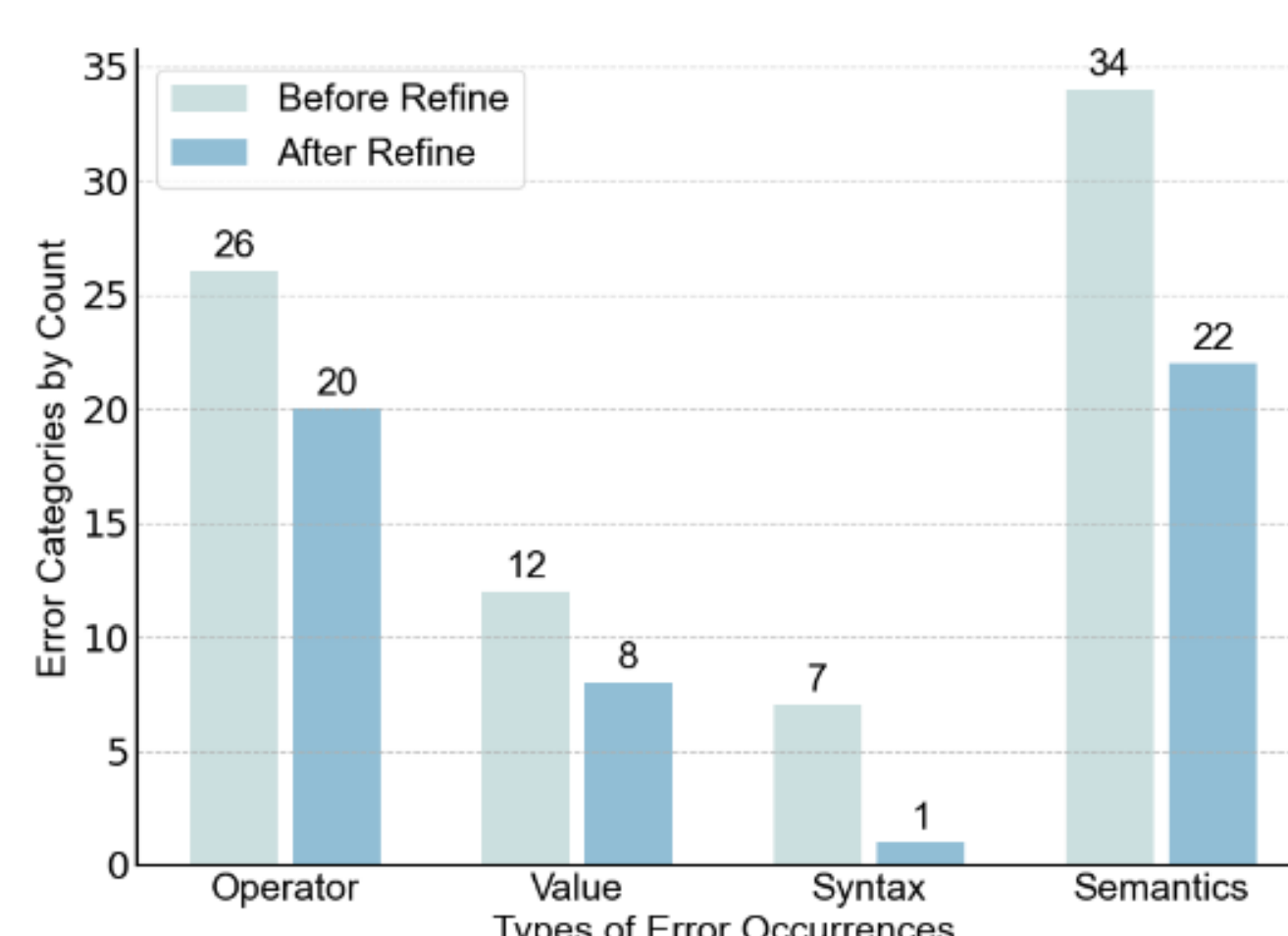
KGST的实验表现

Model	STL Formula Accuracy	Template Accuracy	BLEU
DeepSTL	0.1986	0.1883	0.0293
GPT-3.5	0.3018	0.3034	0.0424
GPT-4	0.4733	0.4741	0.0831
DeepSeek	0.4790	0.4825	0.0791
GPT-4+Self-Refine	0.4422	0.4466	0.0521
KGST	0.5587	0.5627	0.2142

(a) STL-DivEn			
Model	STL Formula Accuracy	Template Accuracy	BLEU
DeepSTL	0.2002	0.2916	0.3332
GPT-3.5	0.2145	0.3002	0.2249
GPT-4	0.2262	0.3048	0.2881
DeepSeek	0.2537	0.3254	0.3982
GPT-4+Self-Refine	0.2203	0.3019	0.2682
KGST	0.4538	0.4939	0.5686

KGST 在不同数据集上的表现

Model	STL Formula Accuracy	Template Accuracy	BLEU
KGST	0.5587	0.5627	0.2142
- w/o Fine-tuning	0.5360	0.5390	0.1978
- w/o Refinement	0.4956	0.5007	0.1784



微调和精化对KGST性能的影响