

# IJCAI23 论文发表小记

余皓然

2023 年 9 月

今年 4 月，我们课题组的博士生崔绿叶和我写的论文“Inferring Private Valuations from Behavioral Data in Bilateral Sequential Bargaining”（“双边顺序议价中基于行为数据的私有底价推断”）被 IJCAI 2023 接收。特用这篇小文简记论文诞生的过程。

我在读博时与黄老师、张老师做过一个有关议价问题的研究<sup>[1]</sup>，本质上是研究一对多按序议价中议价的次序对议价者收益的影响。举一个简化的例子，有一个设施提供商 A 和一个场地拥有者 B 围绕在场地中合作部署设施进行协商。设施部署后，A 和 B 能分别获得 100 和 50 的收益，此外，A 部署的花费是 20。如果 A 和 B 对这些信息完全掌握而且具有同等议价能力，根据纳什议价的理论，议价的结果应当是 A 支付 15 给 B，从而实现对总净收益 130 的平分。我们论文研究的是在纳什议价的理论框架下，当设施提供商 A 面对多个特性不同的场地拥有者且 A 的效用函数有边际效用递减的性质时，A 与场地拥有者们的议价次序是否会影响 A 的总收益。通俗地说，就是 A 能否通过把一些特定的议价对手往后排、作为备选，从而帮助 A 在和前面的对手议价时有更好的“底牌”、赚取更高的总收益。这是我完整做的第一个与博弈论有关的理论工作，有比较有趣的数学结果，但依赖议价者掌握完全信息等假设。在许多实际的议价应用中，议价者的信息是有限的，尤其难以知道议价对手的底价。

几年后，我读到 Matthew Backus 等学者的论文<sup>[2]</sup>，他们非常慷慨地整理并开放了电商平台 eBay 上的真实买卖双方围绕二手商品交易的大量双边顺序议价数据。相比图像、视频、文本等数据，有关拍卖、议价等商务场景中博弈行为的数据很少开放。这个数据集规模大、包含信息全面丰富，我很自然地想基于它做一些更偏应用的工作，最终我确定的一个问题是私有底价推断。在 eBay、闲鱼等平台上，卖家可能在一段时间内与不同买家议价、卖出多件同样的商品（比如消费券）。当给定这些卖家与买家在议价中多轮的出价记录与成交与否的结果，我们是否可以推断出卖家对商品的内心底价（即愿意接受的买家最低报价）。本质上，这属于博弈环境中的私有信息推断问题，类似的问题包括拍卖场景中竞拍者的内心价位推断、狼人杀和阿瓦隆中玩家角色推断等。如何根据博弈环境中个体的行为推断其私有信息是应用广泛且很有趣的问题。过往的一些研究大多通过假设个体具有完全理性、采用均衡行为策略来做私有信息推断。在 eBay 等平台上，数以百万的买家和卖家的理性程度与行为无法都满足这些假设。因此，基于这些真实议价数据做私有底价推断就有了独特的价值和趣味。

我们最初的思路是用部分可观察的马尔科夫决策过程 (Partially Observable Markov Decision Process, POMDP) 建模每个卖家的决策过程，根据观察到的卖家行为数据推断这个模型的未知信息，再进一步得到私有底价的信息。在经济学文献中，有工作用类

似的思路分析玩家在比如重复囚徒困境博弈中的行为。绿叶在读完一些相关文献后提出了一版模型和相应的推断算法,但我们发现 POMDP 中“状态”这个概念和私有底价的关系并不明确,最后还是放弃了这个思路。

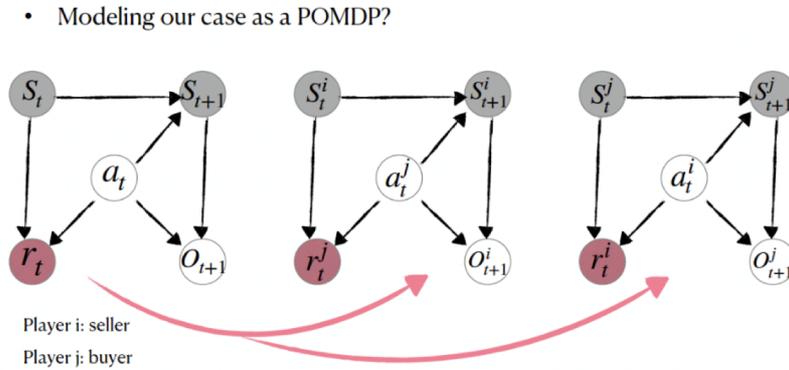


图 1: 基于 POMDP 的议价过程建模 (来自绿叶的幻灯)

我们的第二个思路来源于我偶然间读到微软亚洲研究院关于对偶学习的工作<sup>[3]</sup>。在机器翻译的应用中,像中翻英和英翻中可以视作是互为对偶的两个任务,利用这层对偶关系同时训练这两个任务的深度学习模型可能获得比单独训练其中一个任务的模型更好的效果。在博弈环境下的个体行为分析中,个体行为预测和个体私有信息推断这两个任务可能也互为对偶,为它们建立模型并同时训练可能获得不错的结果。绿叶沿着这个思路阅读相关工作、完整提出了一版算法,讨论后我们觉得我们的问题与语言互翻有本质不同的地方,利用对偶学习的思路来解决会造成建模上的冗余。虽然还是没采用这个思路,多次讨论让我们对问题理解得更清楚,促成了最后思路的形成,我们也把基于对偶学习思想的算法列做论文中的一个对比算法。

The dual-learning mechanism for Vs inference:

- **Primal work:**  $\theta_f \leftarrow \arg \min_{\{\theta_f\}} \sum_{s=1}^m \sum_{a=1}^{n_s} \sum_{r=1}^{r_{sa}} \mathcal{L}(F_{\theta_f}(\mathbf{x}_{sa}^{(r)}, y_{sa}^{(r)}), v_{sa}^{(r)})$
- **Dual work:**  $\theta_g \leftarrow \arg \min_{\{\theta_g\}} \sum_{s=1}^m \sum_{a=1}^{n_s} \sum_{r=1}^{r_{sa}} \mathcal{L}(G_{\theta_g}(\mathbf{x}_{sa}^{(r)}, v_{sa}^{(r)}), y_{sa}^{(r)})$

图 2: 基于对偶学习的解决思路 (来自绿叶的幻灯)

我们可以把卖家的行为决策简单建模成一个函数  $f_{\theta}$ :  $f_{\theta}(v, \mathbf{x}) = y$ 。其中,  $v$  是私有底价、 $\mathbf{x}$  是议价历史等公开信息、 $y$  是卖家相应的行为决策。在数据集中,只有  $\mathbf{x}$  和  $y$  的信息是已知的,在函数  $f_{\theta}$  的形式完全未知的情况下,其实是无法推断私有底价  $v$  的。传统的经济学论文本质上就是在通过做完全理性和采用均衡策略等假设手动推导函数  $f_{\theta}$  的形式,从而实现了对  $v$  的推断。在不依赖完全理性等假设时,我们是否完全无从确定  $f_{\theta}$  的形式呢? 换而言之,当我们用神经网络建模函数  $f_{\theta}$ ,能否在缺少完整特征或标签的情况下训练这个神经网络。在想这个问题时,我读到了 Stefano Ermon 课题组的论文[4],得

到的启发是一个未知的映射关系可能本身受到物理（或者经济）规律的限制，把这种领域知识考虑进来就有可能在缺少完整标签的情况下实现对映射关系的学习。在行为决策中，一个基本的规律就是个体理性（individual rationality），比如私有底价是 80 的卖家不可能提出或接受低于 80 的报价。当数据集包含足够多对  $(x, y)$ （例如同一个卖家有多条议价记录或多个卖家有相似的行为函数），我们有可能利用个体理性的限制训练神经网络、得到比较准确的函数  $f_{\theta}$ ，进而推断出私有底价  $v$ 。

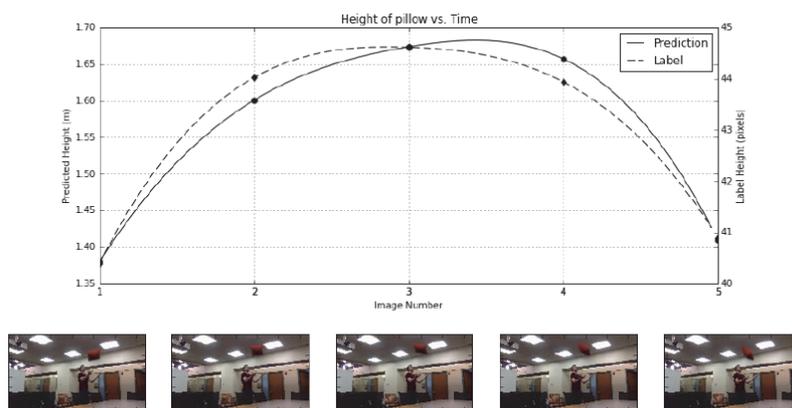


图 3：论文[4]在缺少标签时利用物理规律依然能预测枕头的运动轨迹

围绕上述的思路，绿叶设计了用于训练神经网络的损失函数，完成了全部代码和实验的工作。研究的具体过程还包含很多繁杂的细节，比如设计合理的算法生成用于丰富实验结果的人工数据集、设计聚类算法用于把卖家按行为的相似程度聚类、提升代码效率缩短实验时长等。绿叶的代码和实现能力很强，使得想法落实到实验、我们得到反馈的节奏很快。

论文被 IJCAI 接收时，我们非常高兴。做研究是反馈周期很长的一件事，招收学生、和学生合作完成工作、逐词逐句打磨论文，一直到学生参会完成论文的宣讲，整个周期更为漫长。很开心我们的思考与努力能够浓缩进这篇 IJCAI23 论文，呈现在大家面前。

- [1] Haoran Yu, Man Hon Cheung, and Jianwei Huang, "Cooperative Wi-Fi Deployment: A One-to-Many Bargaining Framework," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 6, pp. 1559—1572, June 2017.
- [2] Matthew Backus, Thomas Blake, Brad Larsen, and Steven Tadelis, "Sequential Bargaining in the Field: Evidence from Millions of Online Bargaining Interactions," *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 135, no. 3, pp. 1319—1361, August 2020.
- [3] Di He, Yingce Xia, Tao Qin, Liwei Wang, Nenghai Yu, Tie-Yan Liu, Wei-Ying Ma, "Dual Learning for Machine Translation," *Advances in neural information processing systems* 29 (2016).
- [4] Russell Stewart, Stefano Ermon, "Label-Free Supervision of Neural Networks with Physics and Domain Knowledge," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2017.