

基于图嵌入策略网络的机器定义基结构

朱劭骏 同济大学 博士研究生

主要合作者：Makoto Ohsaki、Kazuki Hayashi（京都大学）

国家土建结构预制装配化工程技术研究中心第三季研究生论坛

2021年9月11日

相关论文: Zhu S, Ohsaki M, Hayashi K, *et al.* Machine-specified ground structures for topology optimization of binary trusses using graph embedding policy network[J]. *Advances in Engineering Software*, 2021, 159: 103032. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2021.103032>

新型建筑工业化

定位：第三次工业化革命形成的信息化时代^[1]

问题：政策不够健全、设计技术不够完善和成熟、成本不具优势、宣传不够全面、队伍水平有待提升^[2]

对策：研究标准化设计和协同设计技术
研究主要类型结构体系的集成
研发高性能结构体系设计技术
研究全装配式围护体系设计技术^[2]

^[1] 沈祖炎, 李元齐. 建筑工业化建造的本质和内涵[J]. 建筑钢结构进展, 2015, 17(5):1-4.

^[2] 叶浩文. 新型建筑工业化的思考与对策[J]. 工程管理学报, 2016, 30(2):1-6.

研究背景

可否采用人工智能布置？

杆件数量：

$$n(n-1)/2$$

可能组合数：

$$C^{n(n-1)/2}$$

C: 截面种类数量

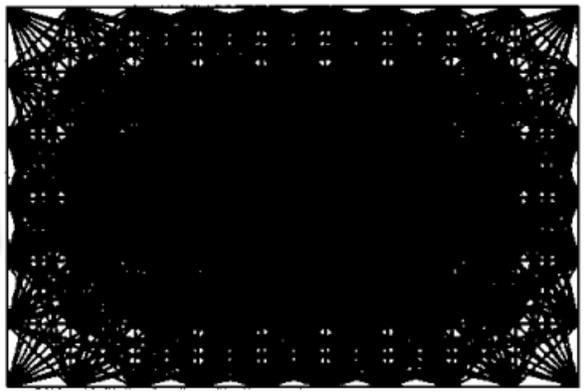


计算代价巨大

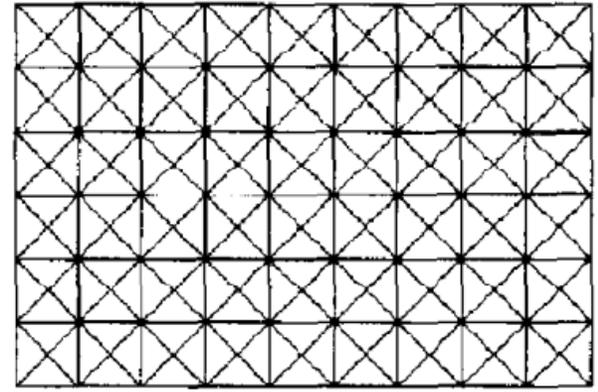


设计域

于设计域中生成 n 个结点
使其有限化



全连接基结构



人为布置基结构

平动约束数

杆件数量：

最小为 $2n - n_c$

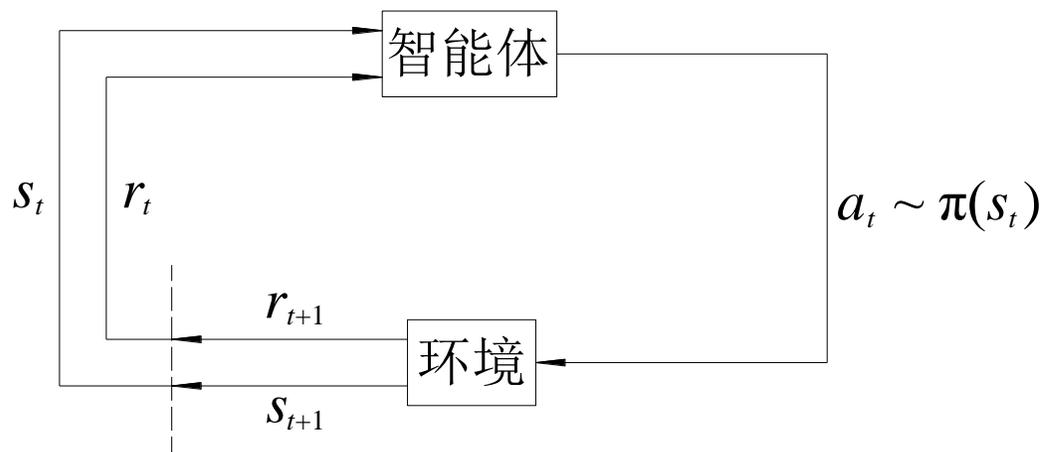
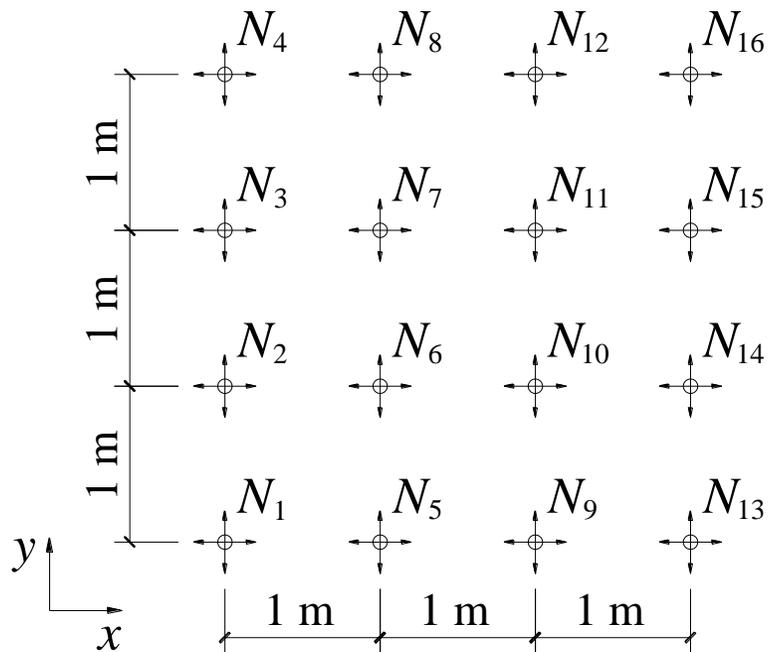
最大为 $n(n-1)/2$

结构几何不变



布置繁琐

强化学习问题



任务

结点集 + 最少的杆件 = 几何不变的结构

状态

结构既有拓扑信息+结点位置信息

动作

选择结点（连续选择的两个结点=杆件）

奖励

水平和竖直短杆: +20

短斜杆: +10

其他杆件: -5

若结构几何不变, 所有正奖励翻倍

采用图嵌入技术表达状态

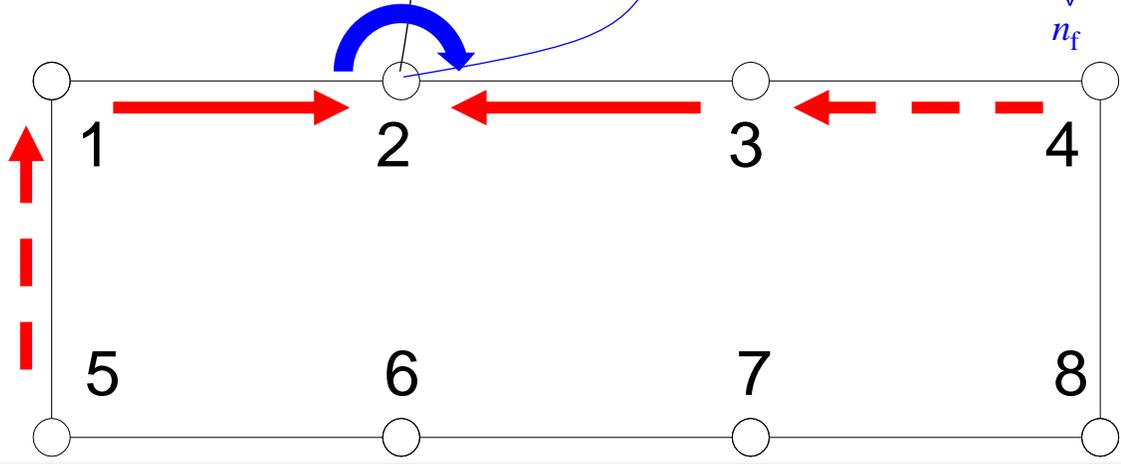
结构既有拓扑信息+结点位置信息

结点独立特征向量

$$\mathbf{v}_i = \{x_i \quad y_i \quad \text{Sel}_i\}$$

结点综合特征向量

$$\boldsymbol{\mu}_i = \{\mu_{i,1} \quad \mu_{i,2} \quad \mu_{i,3} \quad \dots \quad \mu_{i,n_f}\}$$



$\hat{\mathbf{C}}_{8 \times 8} = 4$
拓扑矩阵

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	0	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0	1	0
7	0	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	1	0	0	1	0

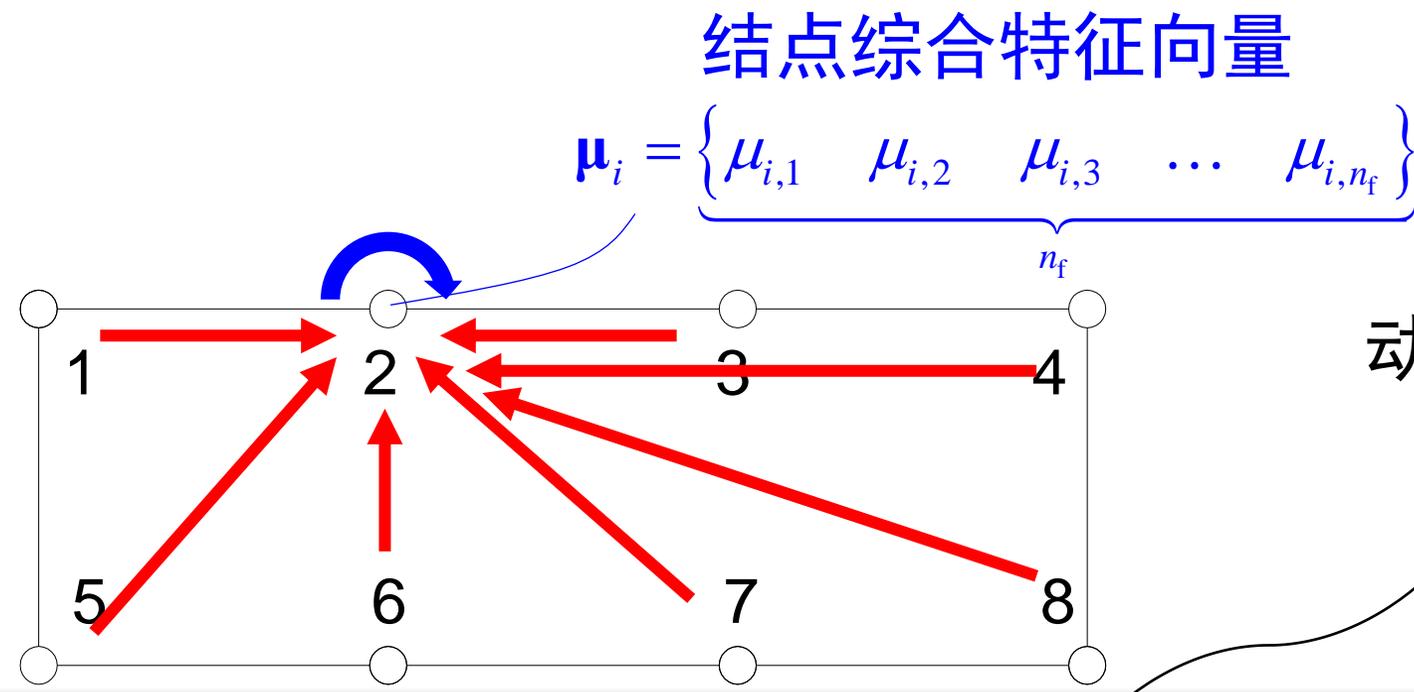
神经网络权重参数（待训练，尺寸与结点数 n 无关）

$$\boldsymbol{\mu}_i^{(T+1)} \leftarrow \text{ReLU} \left(\boldsymbol{\theta}_1 \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\theta}_3 \text{ReLU} \left[\boldsymbol{\theta}_2 \left(\hat{\mathbf{v}} \mathbf{C}_i^{(N)} \right) \right] + \boldsymbol{\theta}_4 \boldsymbol{\mu}_i^{(T)} + \boldsymbol{\theta}_6 \text{ReLU} \left[\boldsymbol{\theta}_5 \left(\hat{\boldsymbol{\mu}}^{(T)} \mathbf{C}_i^{(N)} \right) \right] \right)$$

第 i 号结点的自身信息

第 i 号结点附近结点的信息

建立策略网络



$$\pi = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 10\% \\ 15\% \\ 15\% \\ 10\% \\ 10\% \\ 15\% \\ 15\% \\ 10\% \end{Bmatrix}$$

神经网络权重参数（待训练，尺寸与结点数 n 无关）

非法动作过滤矩阵

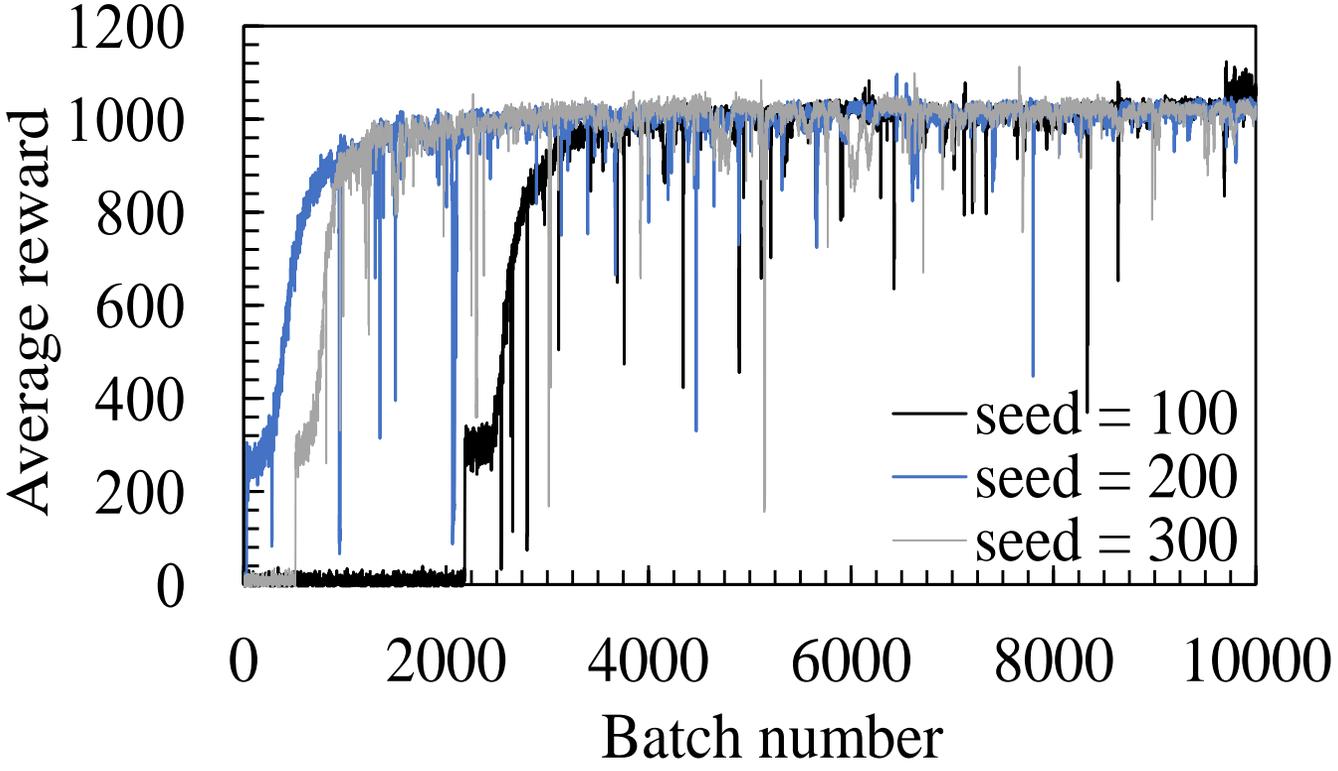
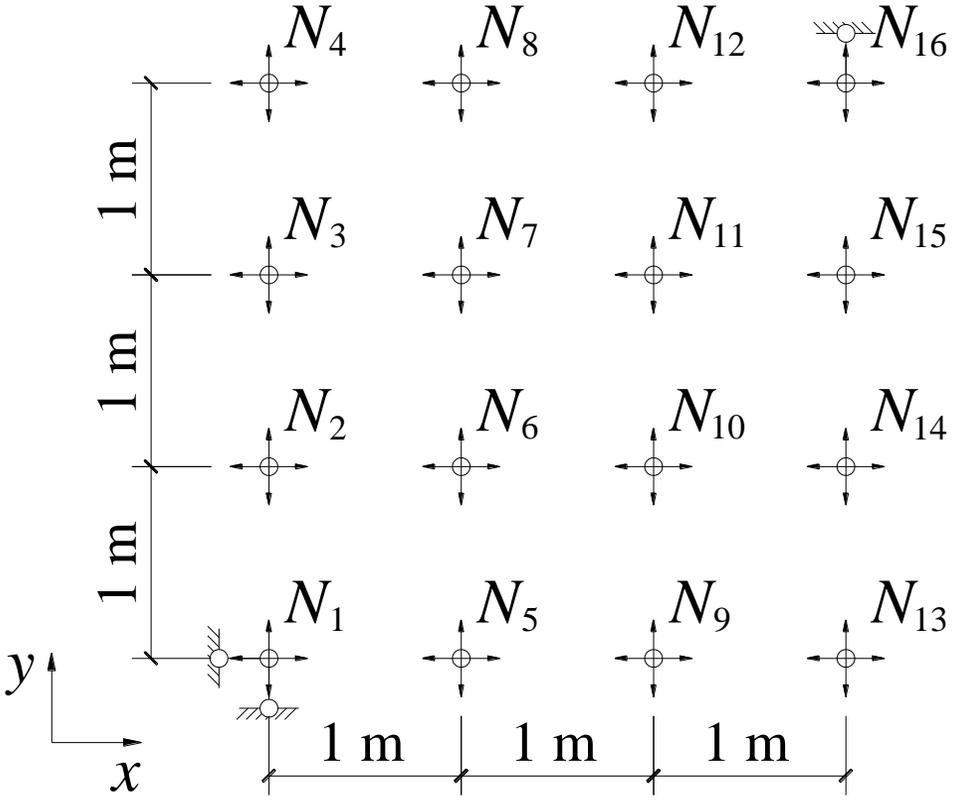
$$Q_i = \text{ReLU} \left[\theta_9^T \text{ReLU} \left(\theta_7 \mu_i^{(T)} ; \theta_8 \sum_{i=1}^n \mu_i^{(T)} \right) \right]$$

$$\pi = \text{Softmax} \left[\mathbf{S} \cdot \mathbf{Q}(\hat{\mu}) \right] = \frac{e^{\mathbf{S} \cdot \mathbf{Q}(\hat{\mu}, i)}}{\sum_{i' \in \mathcal{A}} e^{\mathbf{S} \cdot \mathbf{Q}(\hat{\mu}, i')}}$$

第 i 号结点的自身信息

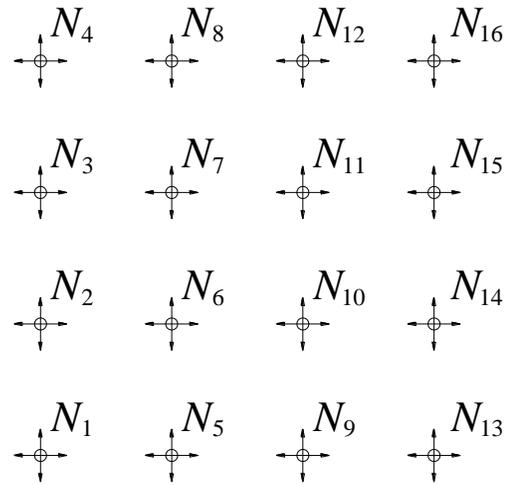
所有结点的信息

训练历史

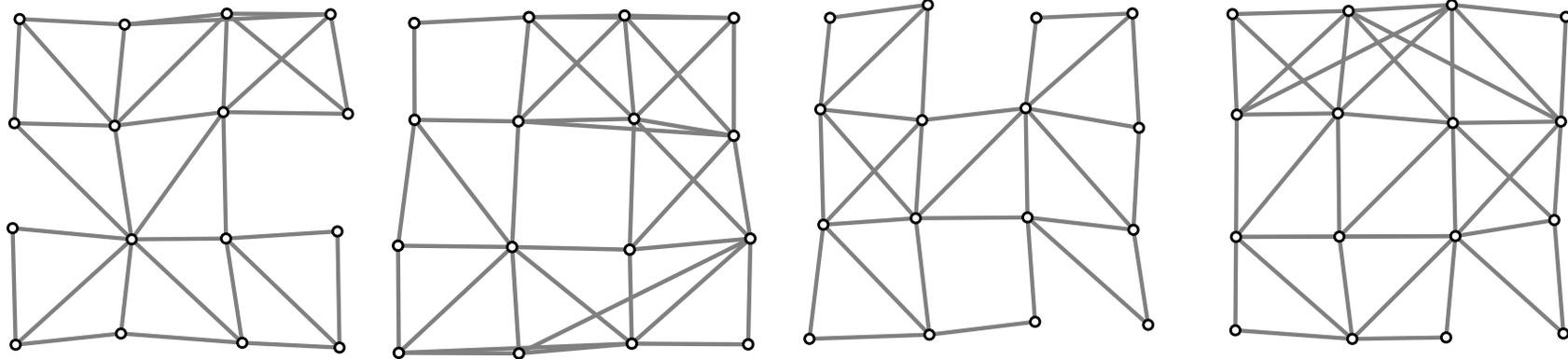


训练结果测试

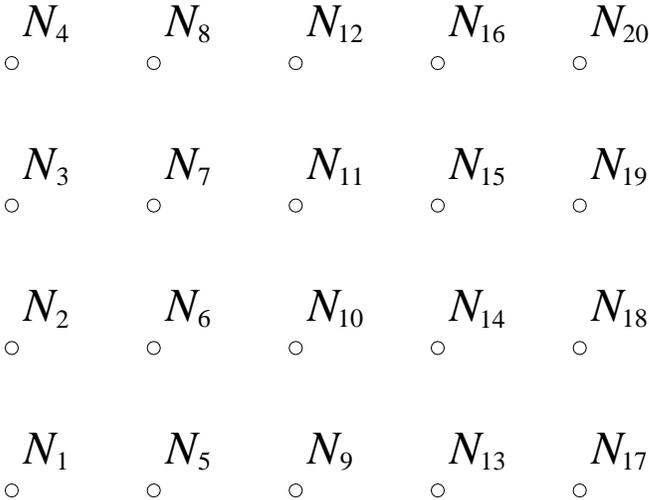
用于训练的结点集



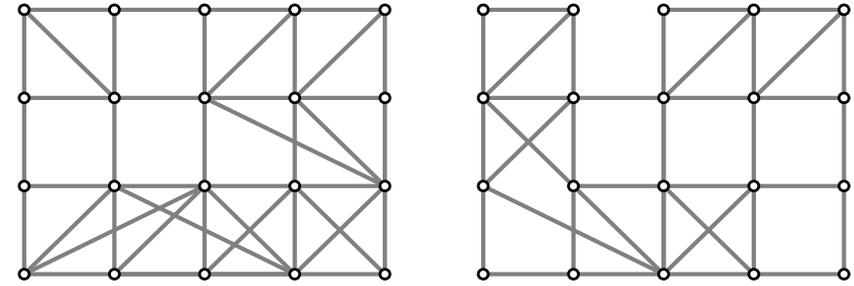
所生成的结构



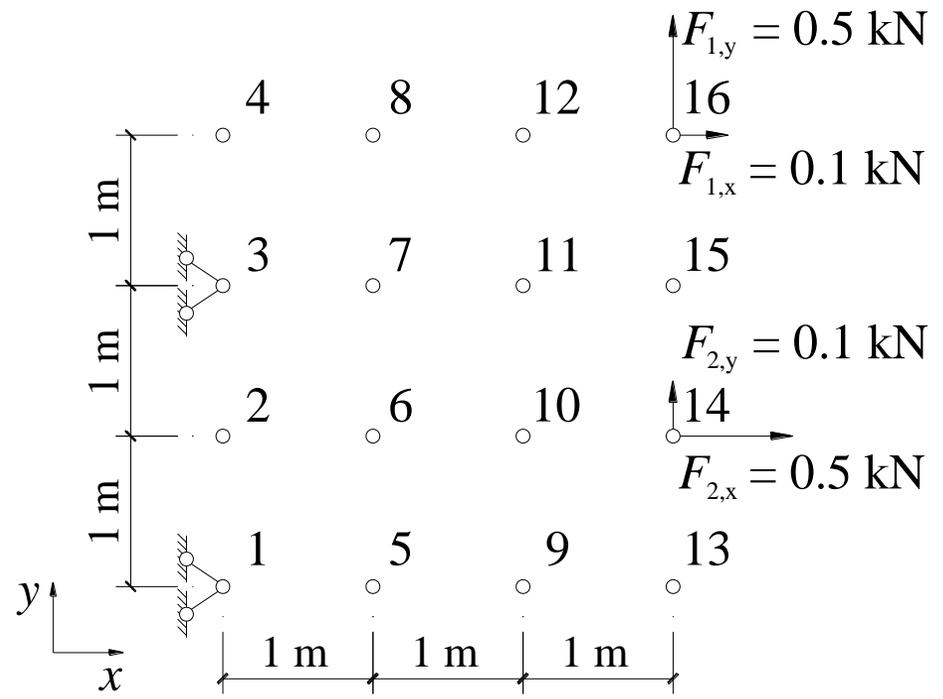
不同尺寸结点集



5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%



采用机器定义基结构进行拓扑优化



典型的包含奇异最优解的拓扑优化问题：

$$\begin{cases}
 \text{find} & \mathbf{A} \\
 \text{min.} & V(\mathbf{A}) \\
 \text{s.t.} & \text{应力约束} \\
 & \text{位移约束} \\
 & A_i \in \text{截面库}
 \end{cases}$$

$$\max_{i \in \Omega_m, j \in \{1, 2, \dots, n_L\}} \left(\frac{|\sigma_{i,j}(\mathbf{A})|}{\bar{\sigma}} \right) \leq 1$$

$$\max_{i \in \Omega_d, j \in \{1, 2, \dots, n_L\}} \left(\frac{|u_{i,j}(\mathbf{A})|}{\bar{u}} \right) \leq 1$$

避免最优解为机构

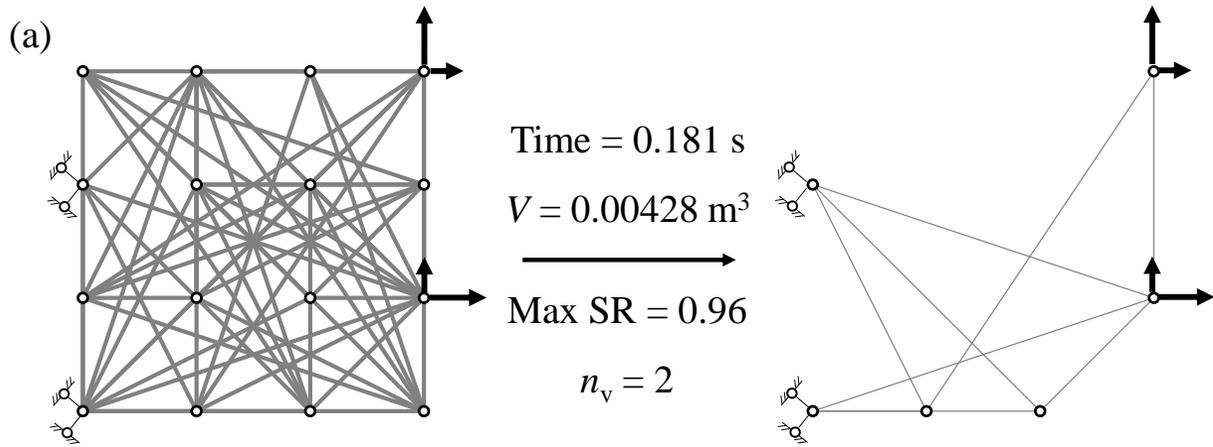
第 1 步：生成一几何不变结构并在此基础上随机添加杆件至指定数量

第 2 步：删除在所有工况下应力比最小的 m_r 根杆件，直到结构变为机构

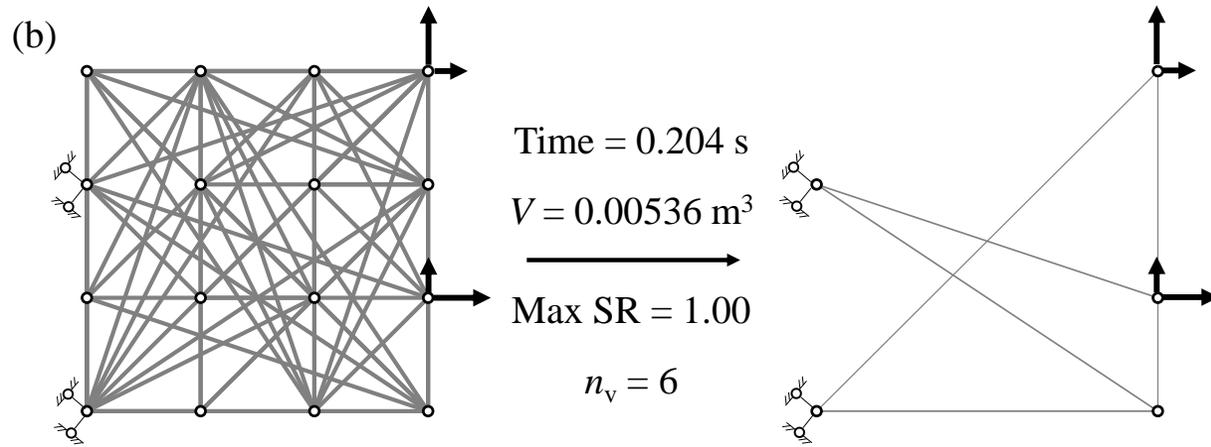
第 3 步：按满应力设计法从截面库中选取杆件截面

数值算例

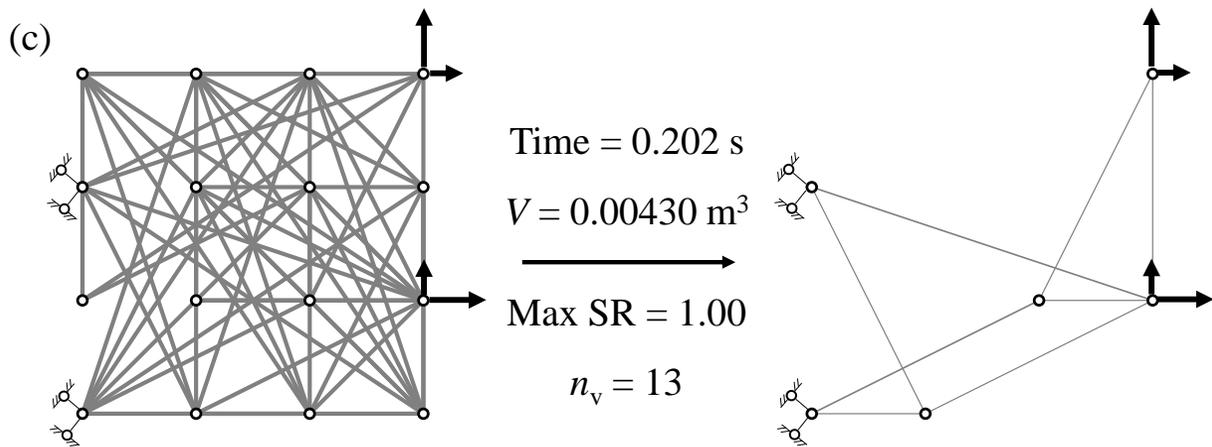
$$\begin{aligned} n &= 16 & m &= 65 \\ m_{\min} &= 2 \times 16 - 4 = 28 \\ m_{\max} &= 16 \times (16 - 1) / 2 = 90 \end{aligned}$$



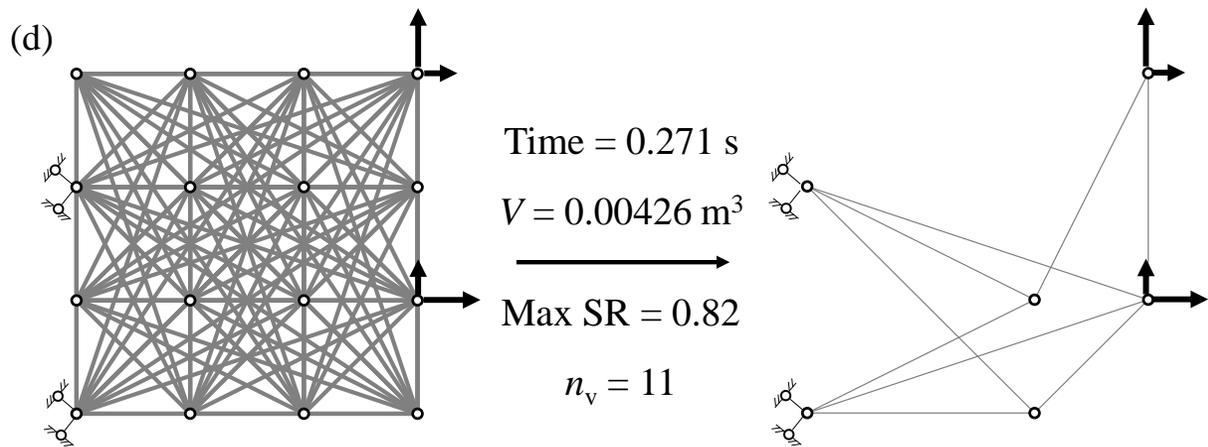
MGS1



MGS2



MGS3



全连接基结构

本研究主要贡献

- 提出了生成**机器定义基结构**的强化学习框架
- 经训练的智能体可以生成**不同的基结构**
- 采用图嵌入技术
 - **智能体可在不重新训练的基础上应用于其他结点集**
- 基于随机的机器定义基结构可得到**不同的最优解**
 - 对于含**奇异最优解**的问题更容易趋于**全局最优解**

邮箱: zhushaojuntj@gmail.com

网站: www.zhushaojun.com