

量子もつれ状態の生成 に要する深さの考察

チーム：つながろう！心の量子友達

メンバー

大久保拓海、河田直也、木村優太、Tseng YuChih

目次

1. IBMによる論文:Big cats
2. N qubitにおける量子もつれ状態
3. Depthを深くしたい
4. シミュレーションの設定
5. 結果
6. 考察
7. 今後の展望

IBMによる論文 : Big cats

Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond^[1]

IBMは2025年10月に120 qubitの量子もつれ状態を作ったことを報告

→多くのqubitにおける量子もつれ状態を作ることは量子コンピュータの性能の指標になる

[1]Javadi-Abhari, A., Martiel, S., Seif, A., Takita, M., & Wei, K. X. (2025). Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond. *arXiv preprint arXiv:2510.09520*.

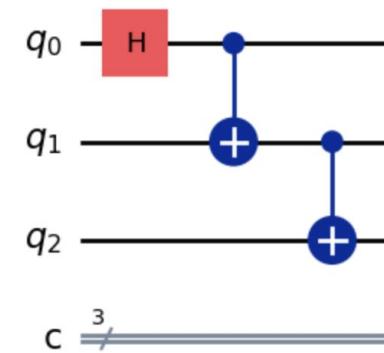
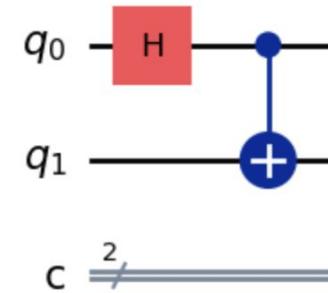
N qubit における量子もつれ状態

N = 2:ベル状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

N = 3:GHZ状態

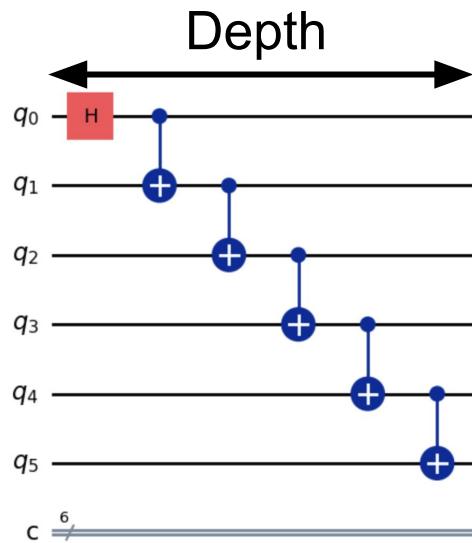
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle)$$



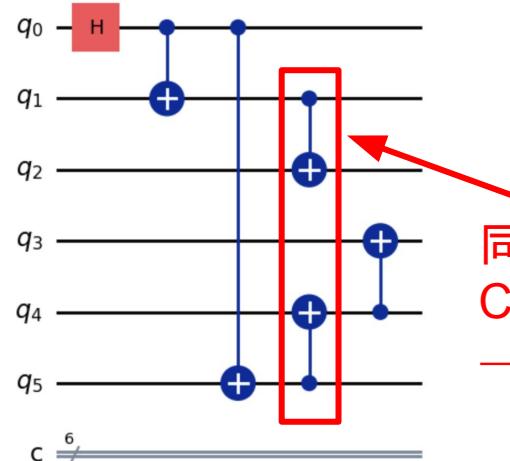
N qubit における量子もつれ状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\cdots 0\rangle + |11\cdots 1\rangle)$$

1つのqubitにHゲートをかける
→CNOTゲートを繰り返す
→量子もつれ状態 完成



Depth
が浅くなる

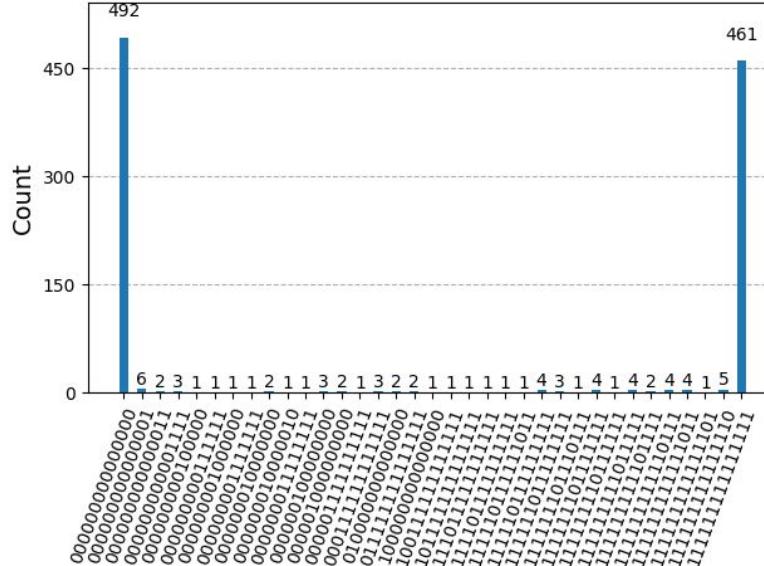
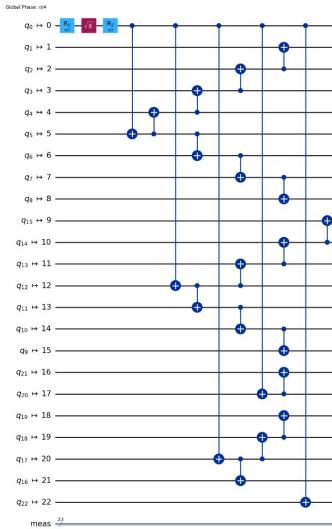


同時並行
CNOT可能
→効率的

Depthが浅くなると...

完成した量子もつれ状態の「質」が上がる^[1]

$\rightarrow |00\cdots 0\rangle \quad |11\cdots 1\rangle$ 態の割合が少ない状況



Depthを浅くするためには

qubit同士のつながりを増やす必要がある

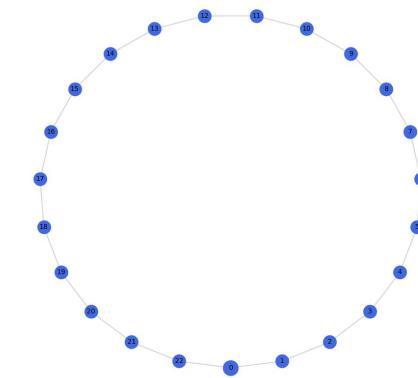


qubit同士のつながりである

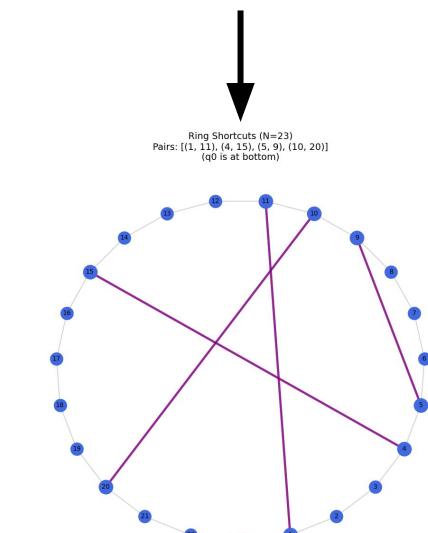
「ショートカット」はどう引くべきか？

(結ばれていないqubit同士にはCNOTをかけられない制約がある)

Ring Shortcuts (N=23)
Pairs: []
(q0 is at bottom)



Ring Shortcuts (N=23)
Pairs: [(1, 11), (4, 15), (5, 9), (10, 20)]
(q0 is at bottom)



シミュレーションの設定

1点から引く(Hub形式)

VS

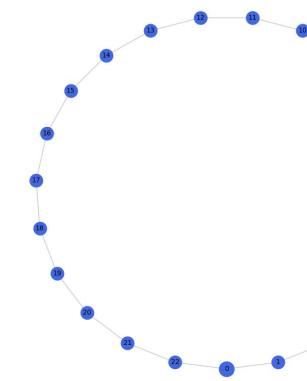
ランダムに2点を選び結ぶ(Random形式)

【条件】

500qubitを円形に並べる^[2]

→0,10,50,100本のショートカットを引く

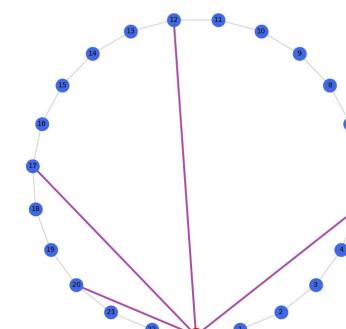
Ring Shortcuts (N=23)
Pairs: []
(q0 is at bottom)



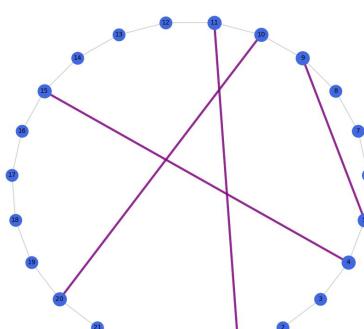
Hub

Random

Ring Shortcuts (N=23, center=0, targets=[5, 12, 17, 20])
Pairs: [(1, 11), (4, 15), (5, 9), (10, 20)]
(q0 is at bottom)

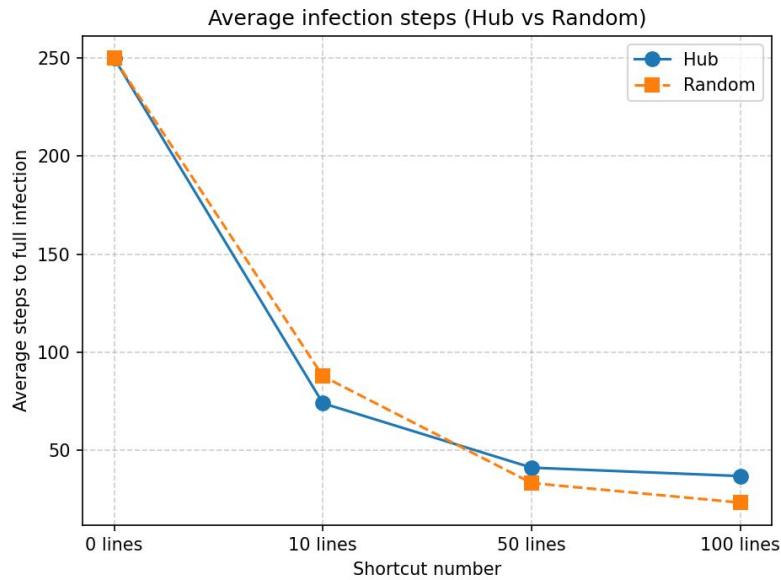


Ring Shortcuts (N=23)
Pairs: [(1, 11), (4, 15), (5, 9), (10, 20)]
(q0 is at bottom)

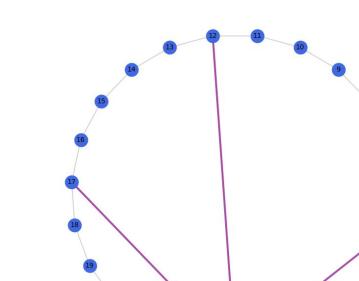


[2]Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *nature*, 393(6684), 440-442.

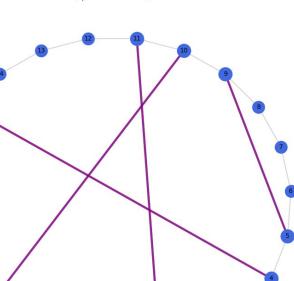
シミュレーション結果(平均値)



Ring Shortcuts (N=23, center=0, targets=[5, 12, 17, 20])

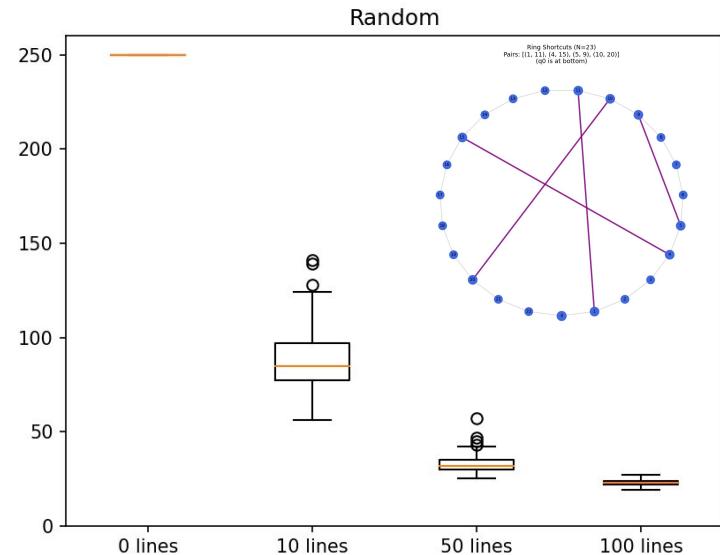
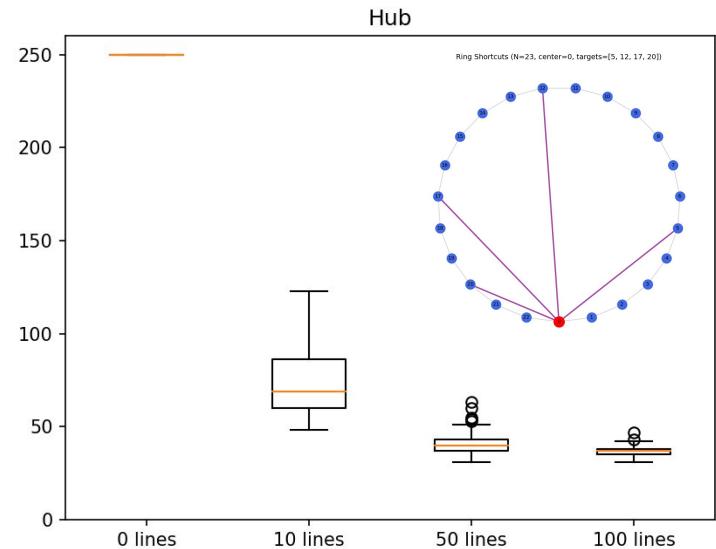


Ring Shortcuts (N=23)
Pairs: [(1, 11), (4, 15), (5, 9), (10, 20)]
(q0 is at bottom)



- ショートカットが10本(全体の約2%)でも平均深さが大幅に減少
 - 100本程度でほぼ最小値に収束
- Hub型ネットワークでは0本から10本への平均深さの減少が急速

シミュレーション結果(分散)



- Random型の分散はRandomと比べて小さい(10本で顕著)

考察

- Random
 - Few lines - ショートカットを持つqbitに辿り着くまでに時間がかかる場合がある
 - Many lines - すぐにショートカットに辿り着く
- Hub (HubにHゲートをかける)
 - Few lines - すぐにショートカットを使えるので効率的
 - Many lines - 働かないqbitの割合が大きくなる

今後の展望

多量子における量子もつれ状態を作ることはコンピュータの性能に直結

1. 複数Hub構造の検討

中央集中ではなく、複数の小Hubを設けることで、効率と安定性の両立が可能か？

2. 回路の深さとの関係

Hub構造がトランスパイル後の回路深さやFidelityにどのように影響するかを確認する？

3. 現実の量子デバイスへのマッピング

Heavy-hexなどの結合構造上で、どのようにスモール・ワールド的接続を実現できるか検討する？

参考文献

- [1]Javadi-Abhari, A., Martiel, S., Seif, A., Takita, M., & Wei, K. X. (2025). Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond. *arXiv preprint arXiv:2510.09520*.
- [2]Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of ‘small-world’networks. *nature*, 393(6684), 440-442.