

脆弱食品の高速ハンドリングにおける ロボットハンドの最適剛性

王 忠奎
立命館大学
2025.11.07

第1章 研究背景

第2章 ソフトハンドの剛性の影響

2-1節 有限要素シミュレーションによる検討

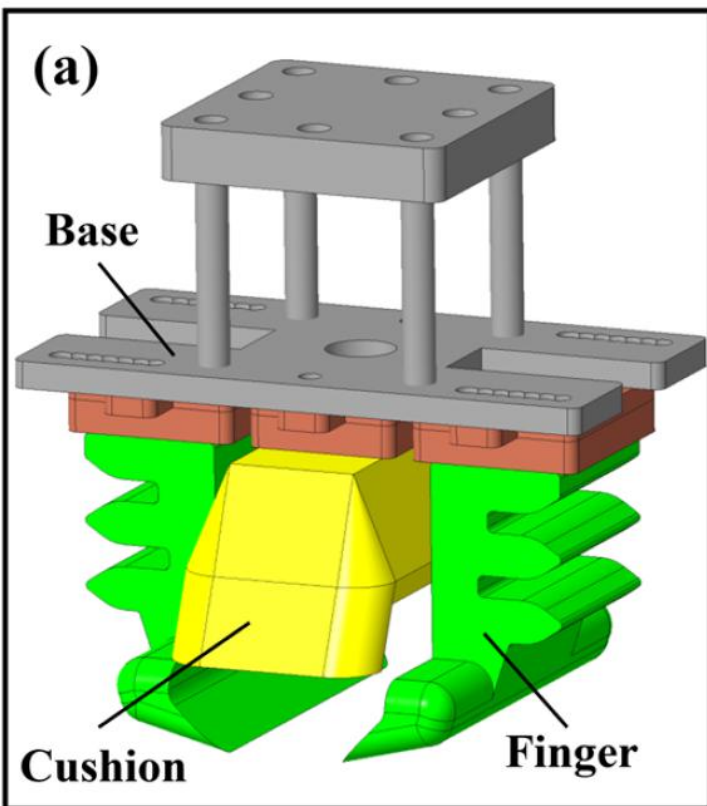
2-2節 生牡蠣を用いた実験検証

第3章 剛性異方性を利用したロボットハンド

3-1節 ハンドの構造と把持戦略

3-2節 豆腐と海苔を用いた高速把持実験

第4章 まとめ



ショベルハンド

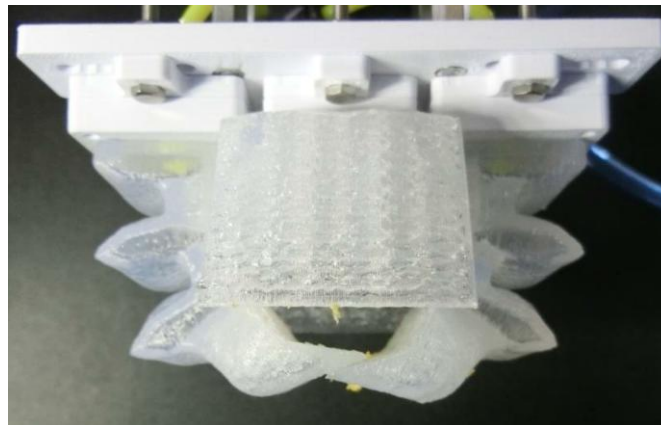
タクト実現：80個／分
耐久性：300回超え
食品適合性あり



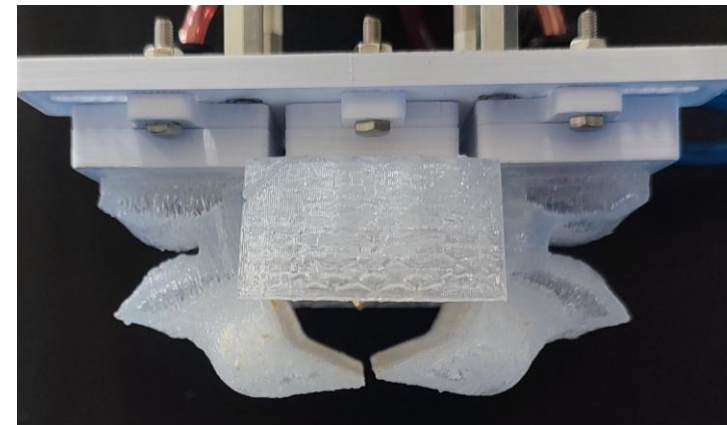
現場稼働様子 (https://www.youtube.com/watch?v=qZ_KpXwfHlc)

ソフトハンドの 剛性の影響

異なるグリッパの実験結果



Gripper 1 (剛性が低い)



Gripper 2 (剛性が高い)

Gripper 1, 16 g, 90 oysters/min, 0°



Gripper 1, 16 g, 100 oysters/min, 0°



Gripper 1, 40 g, 100 oysters/min, 0°



Gripper 2, 16 g, 90 oysters/min, 0°



Gripper 2, 16 g, 90 oysters/min, 45°



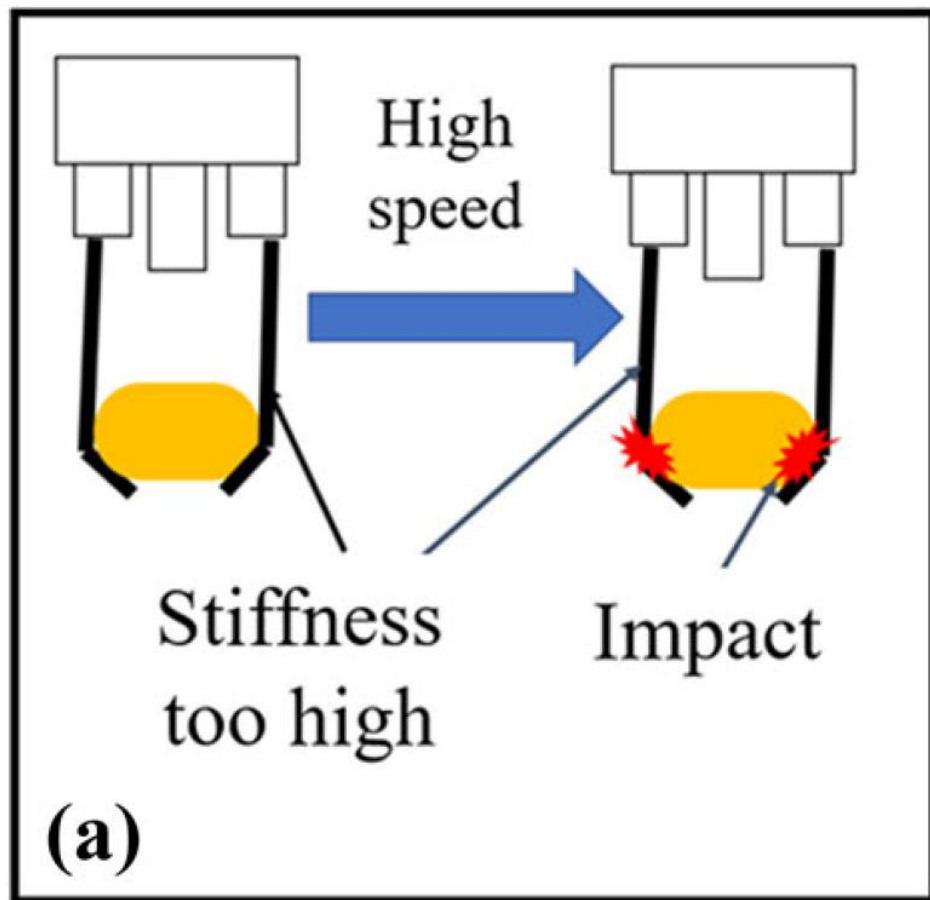
Gripper 2, 40 g, 90 oysters/min, 0°



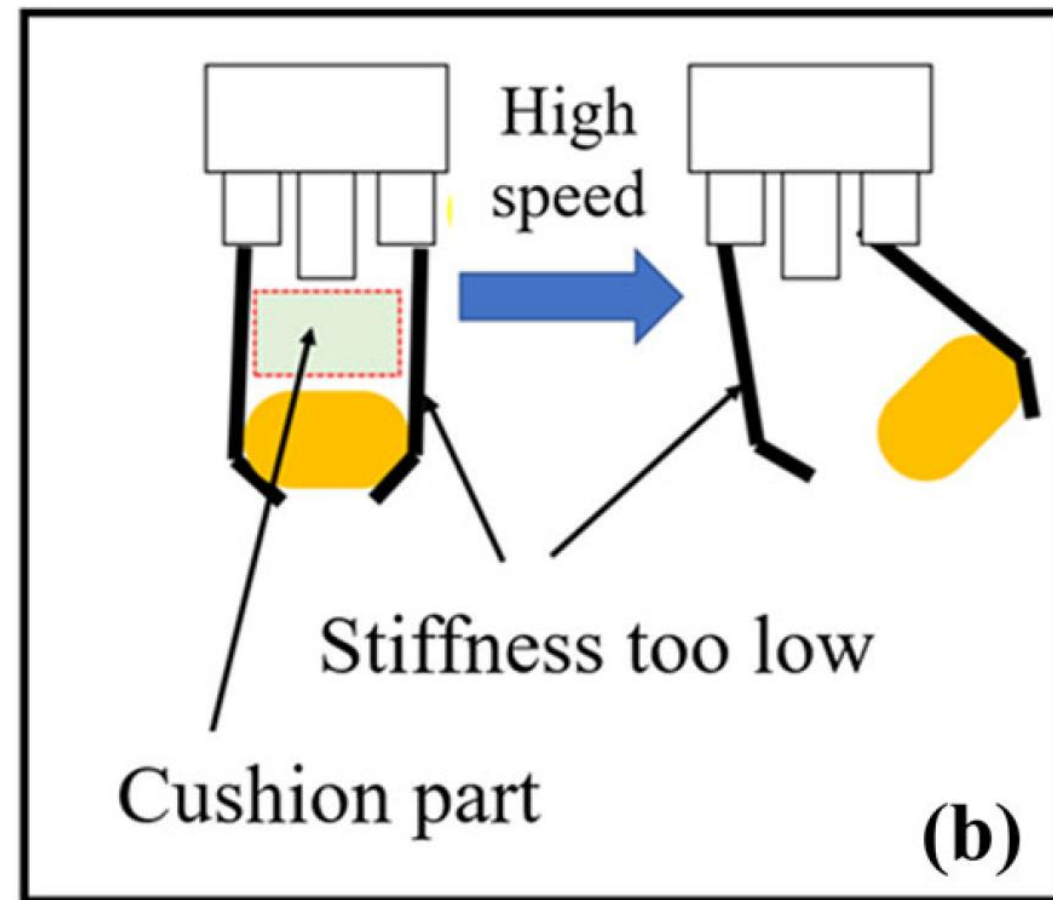
Gripper 1
剛性が低い

Gripper 2
剛性が高い

ソフトハンドの剛性の影響



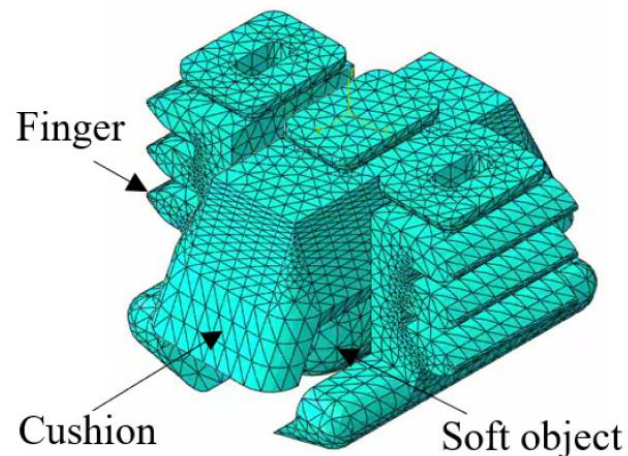
最適な
ハンド剛性
が存在する
???



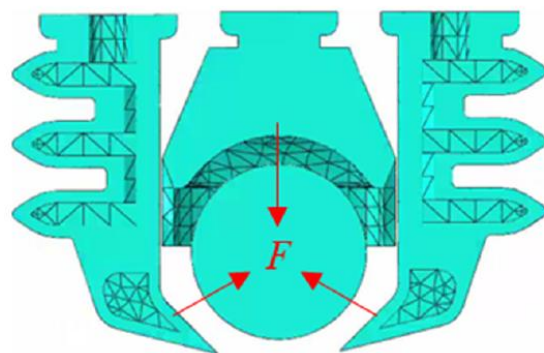
剛性が**高い**場合、慣性力で
対象物が崩れる

剛性が**低い**場合、揺れが発
生し、把持が失敗する

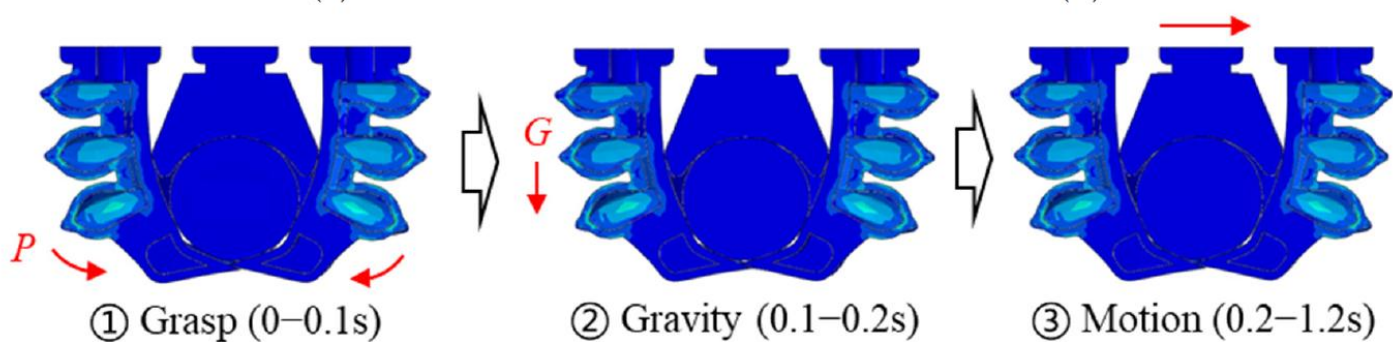
有限要素シミュレーション による検討



(a)

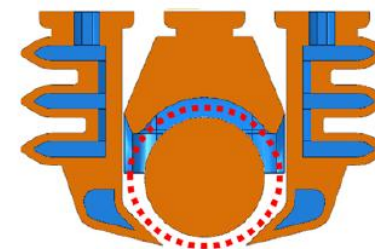


(b)

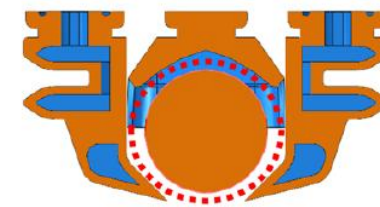


有限要素モデルとシミュレーションステップ

(a) Gripper Models

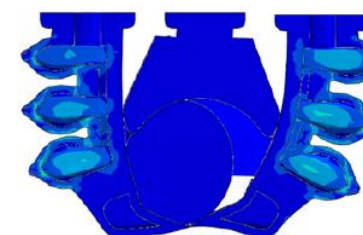
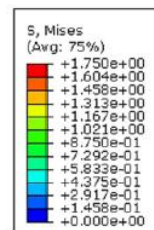


Gripper 1
(Finger design VII)

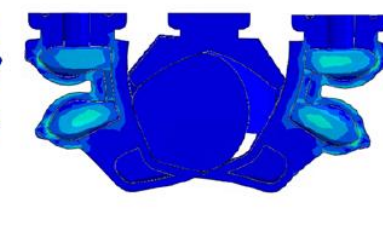


Gripper 2
(Finger design IX)

(b) Grasping Simulation Results

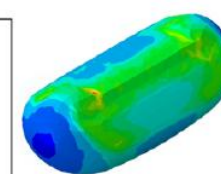
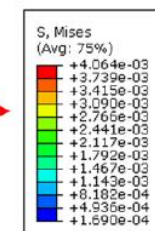
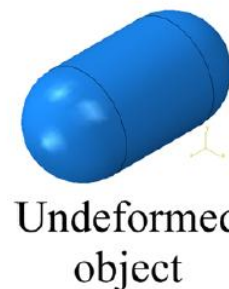


Gripper 1

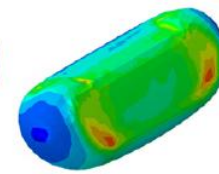


Gripper 2

(c) Object Deformation



Object in
Gripper 1

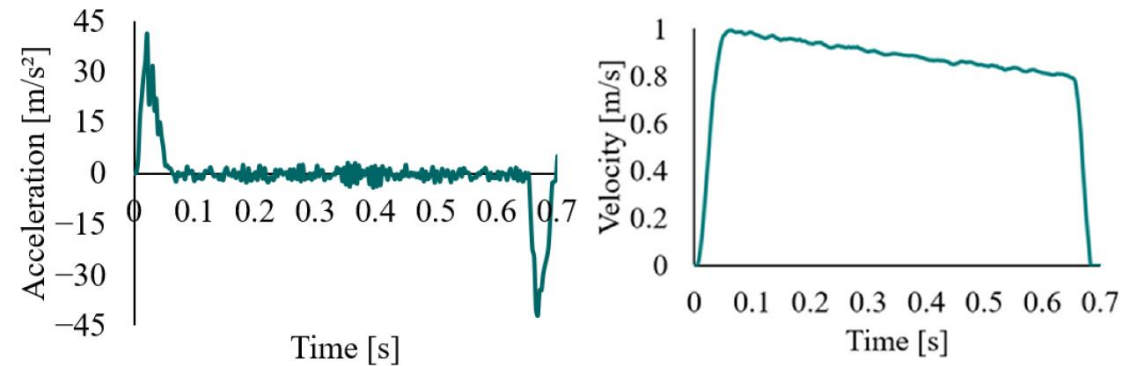


Object in
Gripper 2

シミュレーション結果（物体の応力）

有限要素シミュレーションによる検討

実験で計測した加速度をシミュレーションに入力し、高速ハンドリングのシミュレーションを行った。



10 kPa



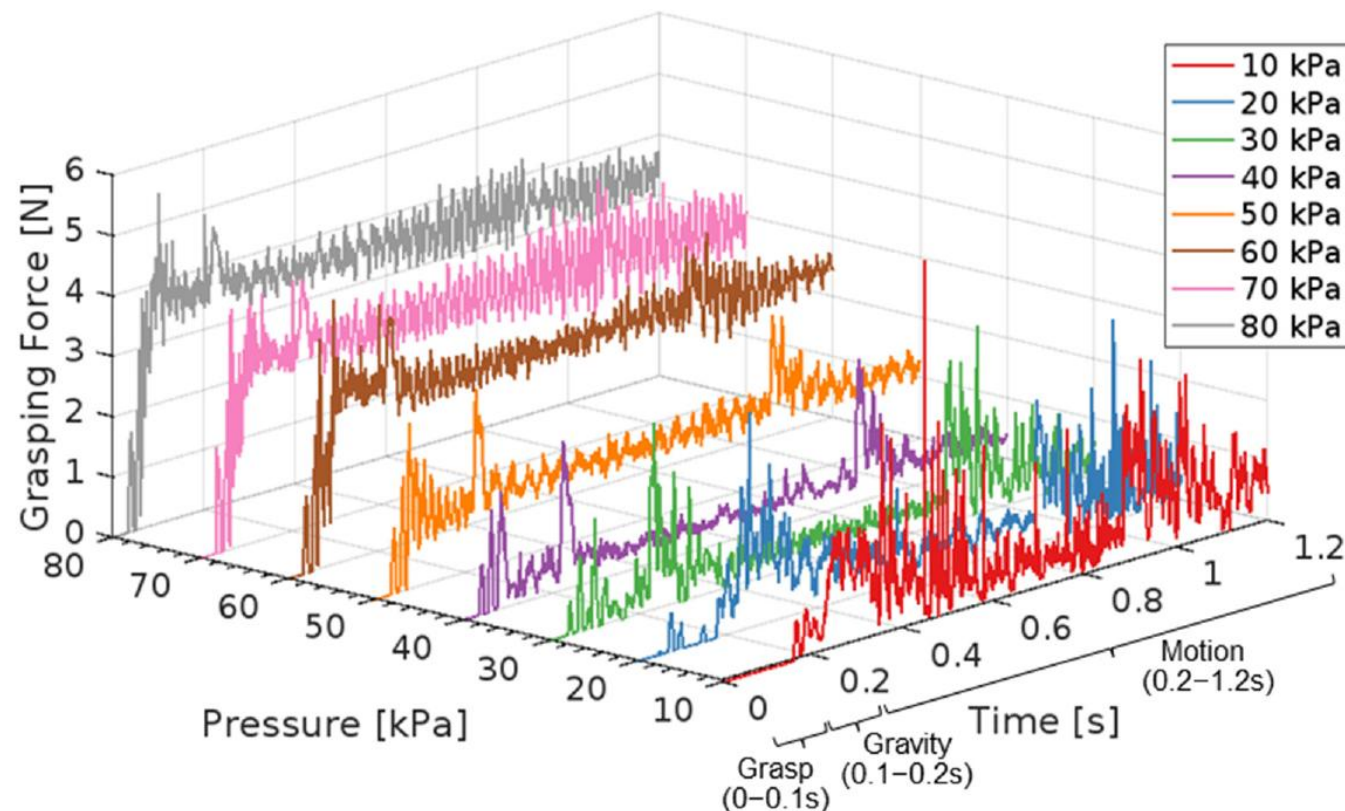
40 kPa



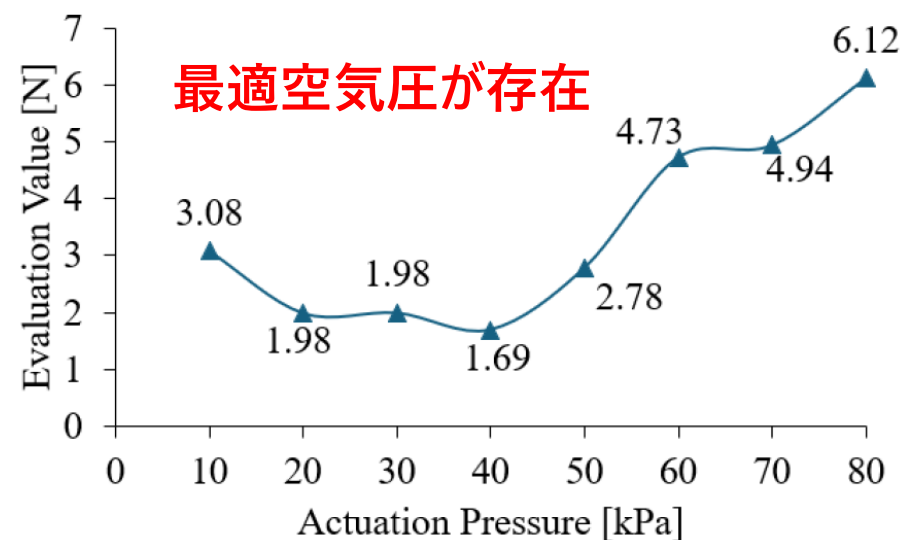
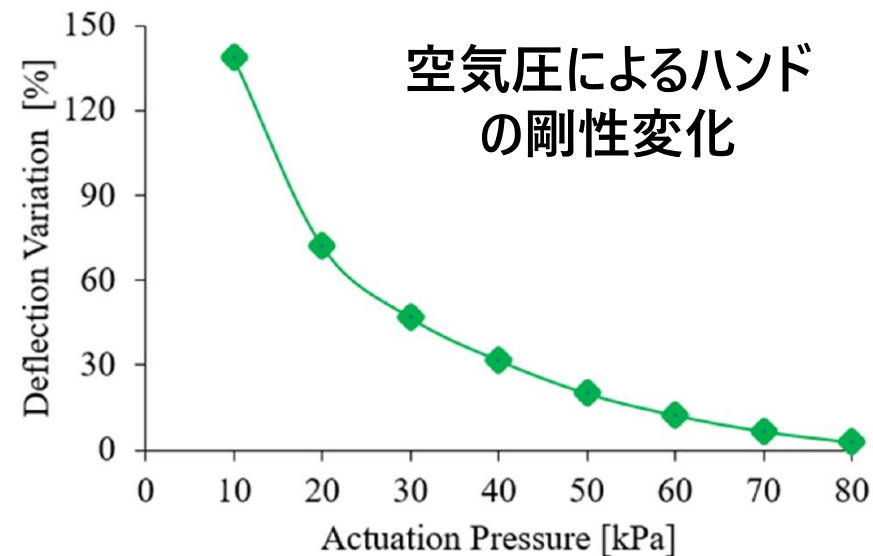
80 kPa



有限要素シミュレーションによる検討

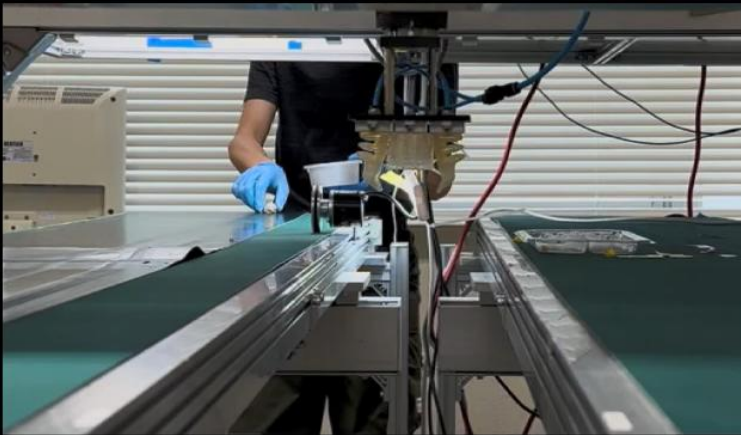


異なる空気圧による物体が受ける把持力の
シミュレーション結果



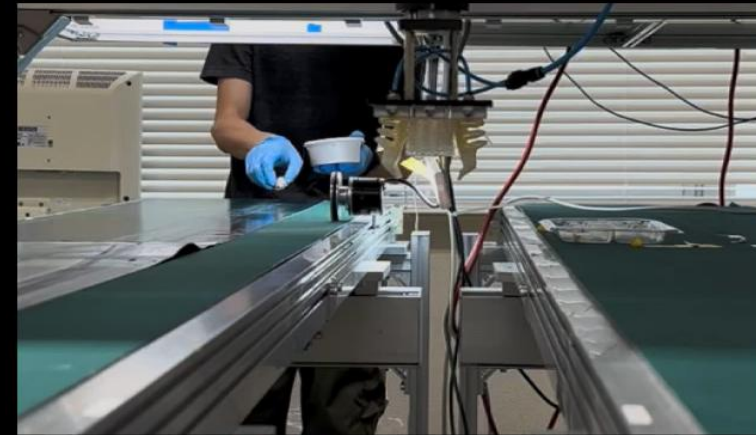
➤ Actuation Pressure

Actuation pressure **10** kPa
Oyster orientation 0°



Handling success rate **3/5**

Actuation pressure **20** kPa
Oyster orientation 0°



Handling success rate **4/5**

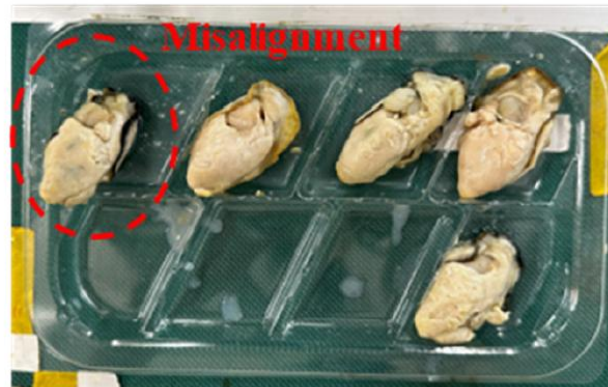
生牡蠣を用いた実験結果

10kPa, orientation 0°



(a)

20kPa, orientation 0°



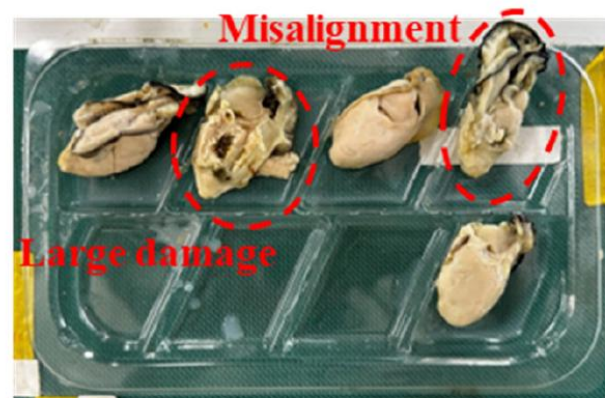
(b)

40kPa, orientation 0°



(c)

80kPa, orientation 0°



(d)

20kPa, orientation 45°



(a)

20kPa, orientation 90°



(b)

40kPa, orientation 45°



(c)

40kPa, orientation 90°



(d)

80kPa, orientation 45°



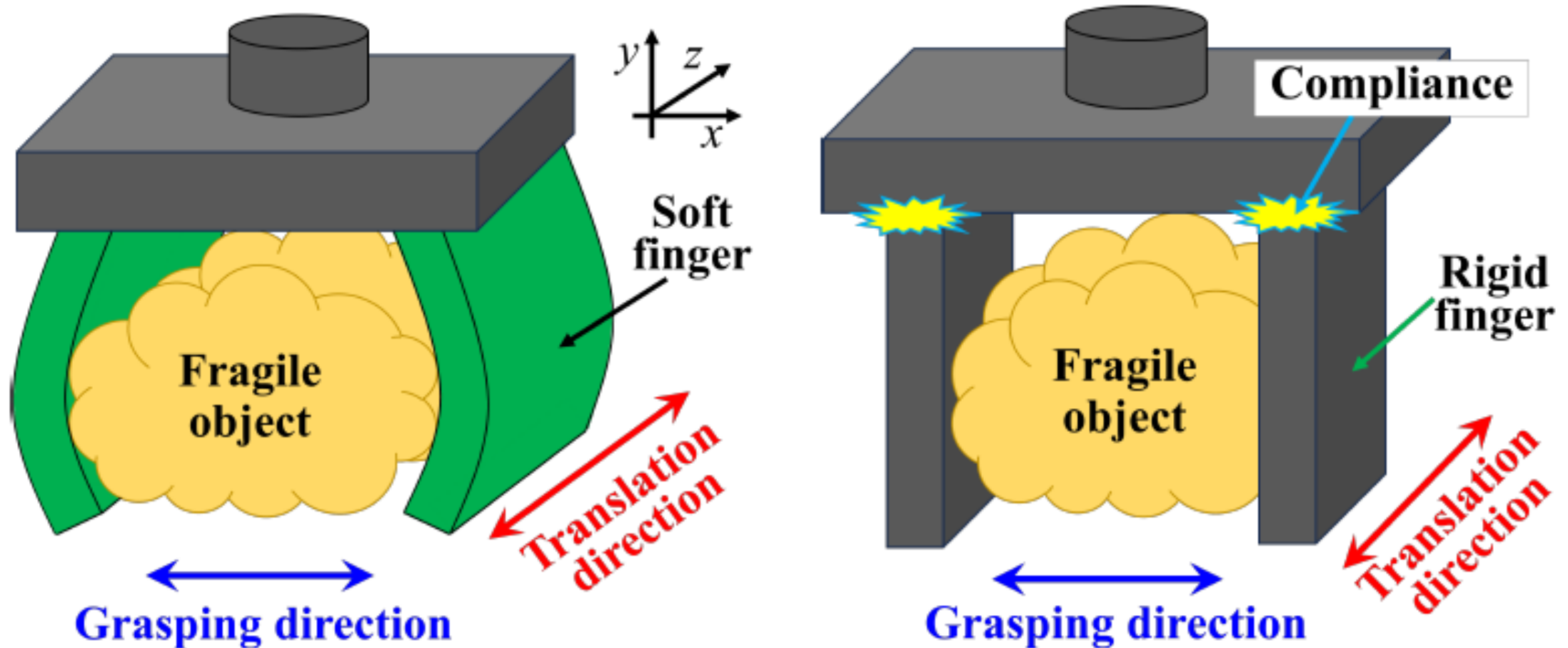
(e)

80kPa, orientation 90°



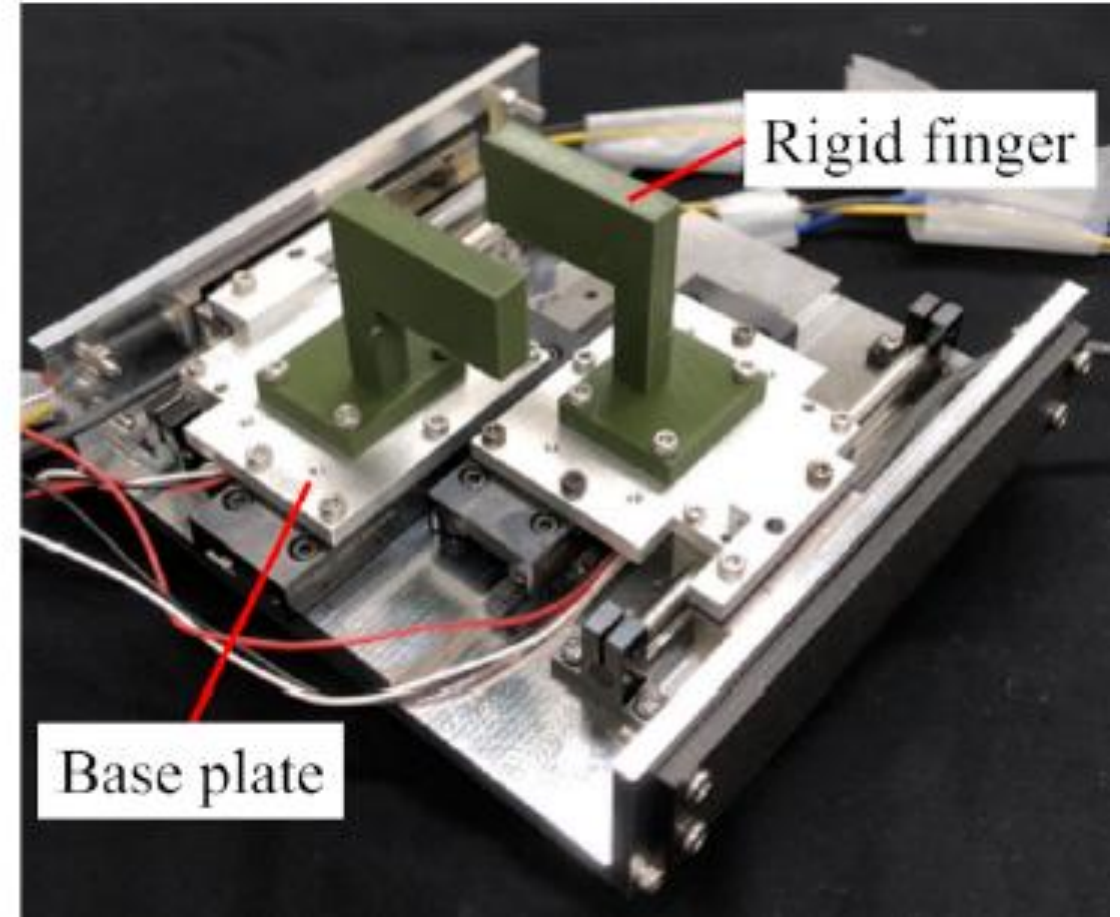
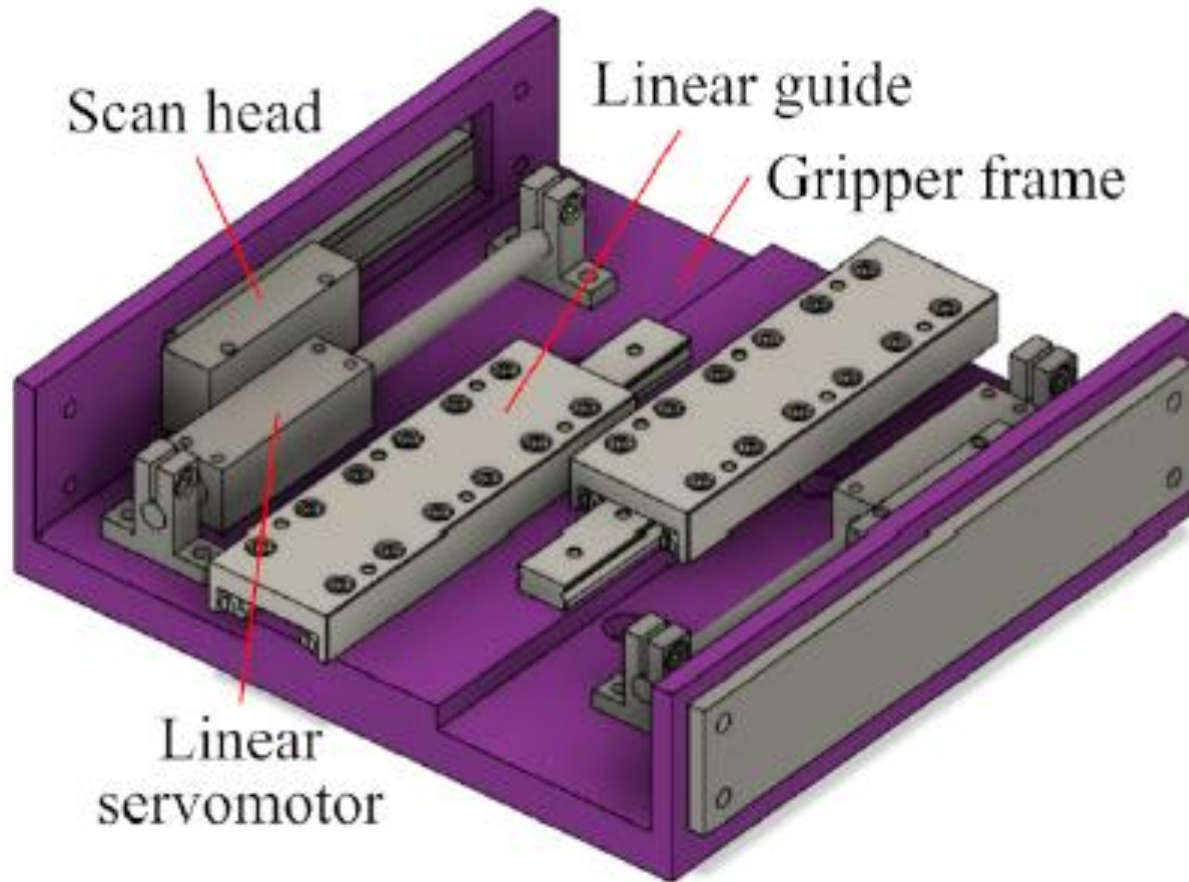
(f)

剛性異方性を利用したロボットハンド



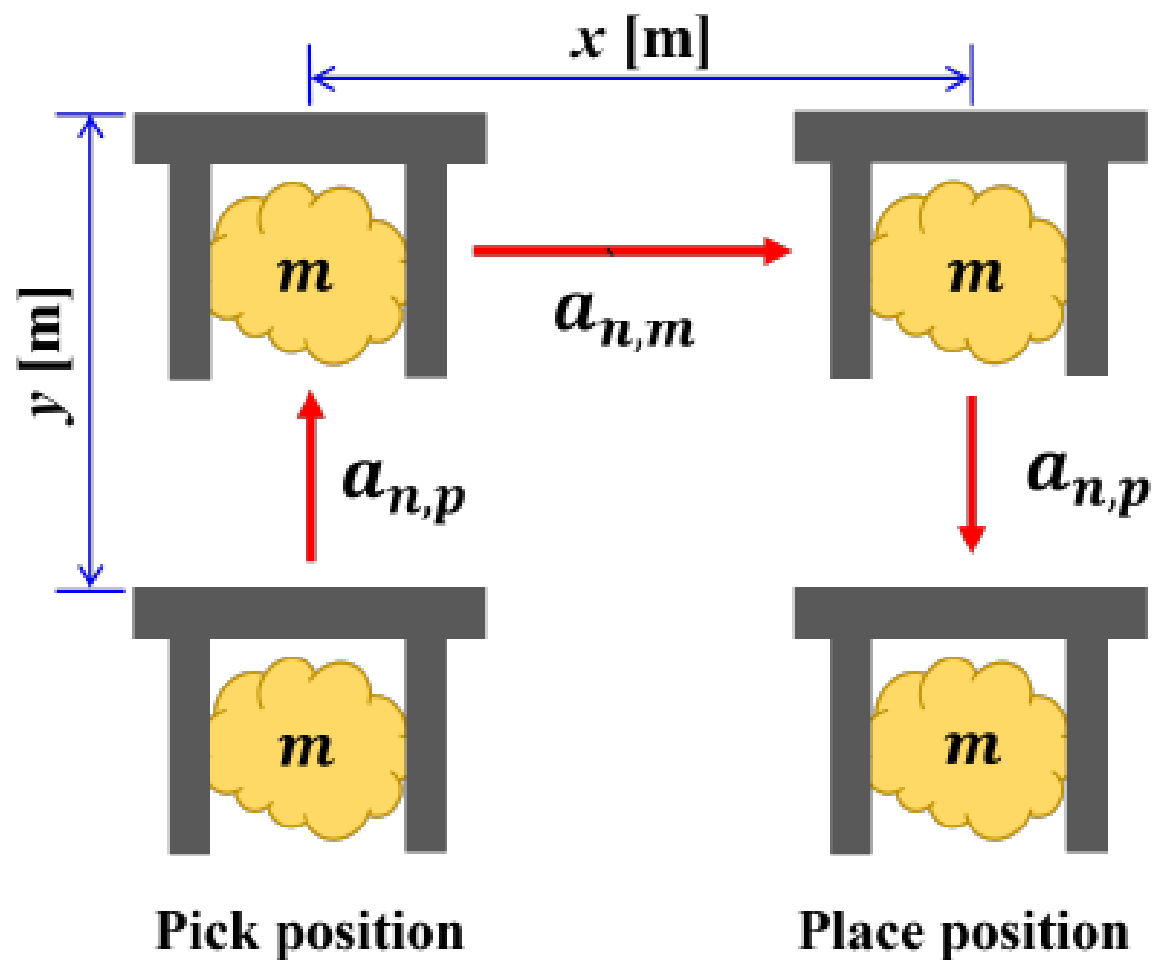
ハンドの特徴： **把持方向**（Grasping direction）の**剛性が非常に低い**が、**運搬方向**（Translation direction）の**剛性が極端に高い**。

剛性異方性を利用したロボットハンド

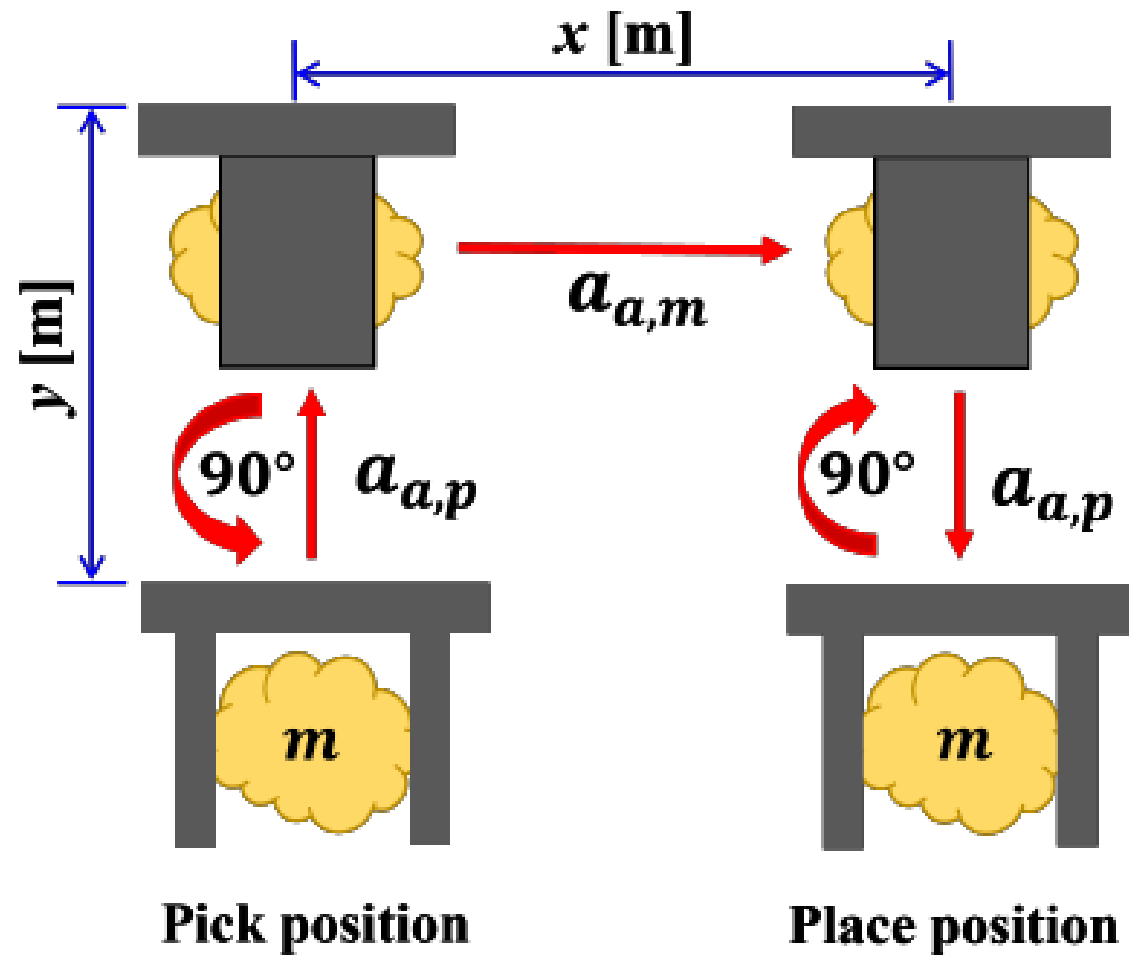


ハンドの構造設計：リニアモーターと低摩擦リニアガイドを用いることで、微小把持力を実現できる。最小把持力は**0.076N**である。

ハンドリング戦略



異方性を利用しない場合



異方性を利用する場合

ハンドリング時間の比較

異方性利用しない場合所要時間

$$t_n = 4\sqrt{\frac{y}{a_{n,p}}} + 2\sqrt{\frac{x}{a_{n,m}}}$$

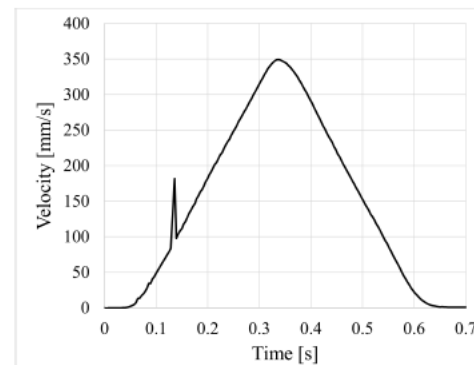
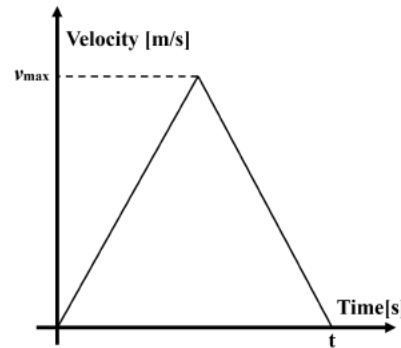
$$= 4\sqrt{\frac{my}{2\mu F - mg}} + 2\sqrt{\frac{xS(2M + m)}{f_1 + f_2}}.$$

異方性利用した場合の所要時間

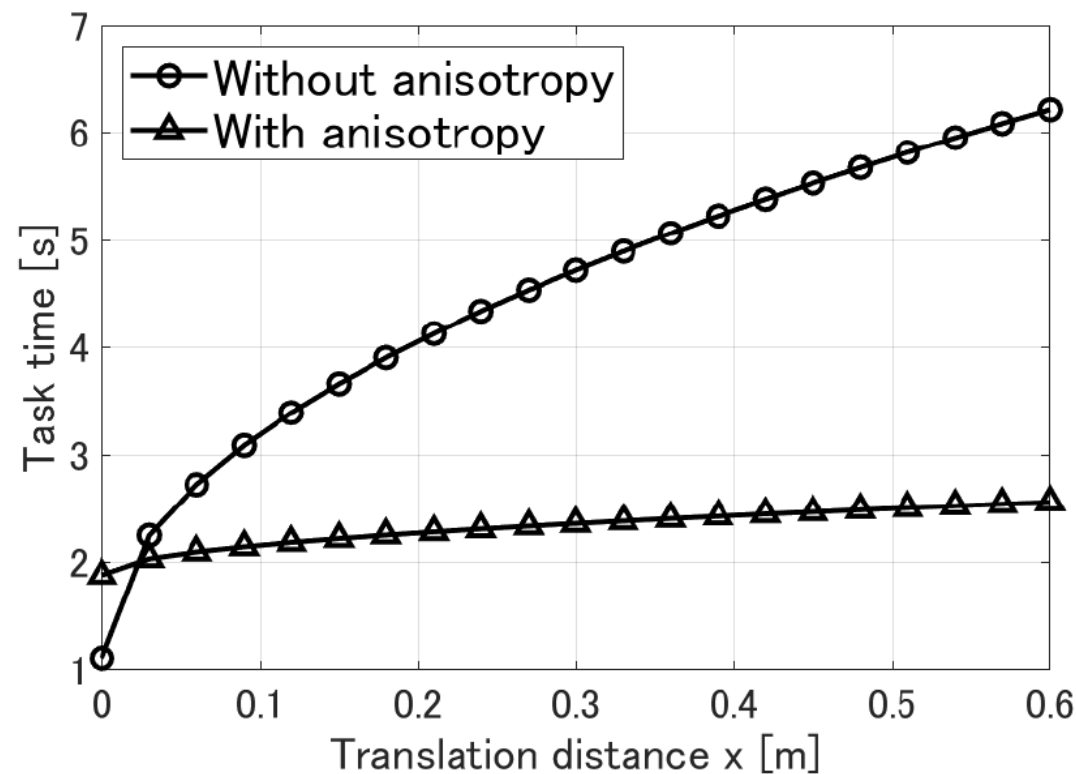
$$t_a = 4\sqrt{\frac{y}{a_{a,p}}} + 2\sqrt{\frac{x}{a_{a,m}}}$$

$$= 2\sqrt{\frac{4my + \mu M \theta^2 (B + b)}{2\mu F - mg}} + 2\sqrt{\frac{mx}{\sqrt{4\mu^2 F^2 - m^2 g^2}}}.$$

結論：運搬距離**18mm以上**であれば、
異方性利用した方が有利



速度パターン（左：計算、右：実験）



計算した運搬距離と所要時間の関係

豆腐の運搬実験（異方性利用しない場合）



運搬途中で落下

持ち上げ加速度：0.949 m/s²
運搬加速度：5.60 m/s²

豆腐の運搬実験（異方性利用した場合）



運搬成功

持ち上げ加速度：0.949 m/s²
運搬加速度：5.60 m/s²

回転角速度：2.35 rad/s

海苔の運搬実験（異方性利用しない場合）



運搬途中で落下

持ち上げ加速度：0.949 m/s²
運搬加速度：5.60 m/s²

海苔の運搬実験（異方性利用した場合）



運搬成功

持ち上げ加速度：0.949 m/s²
運搬加速度：5.60 m/s²

回転角速度：2.35 rad/s

まとめ

- 脆弱物を高速でハンドリングする際に、最適なハンド剛性が存在する；
- 対象物の特性とも関係があり、ハンドの最適な剛性を設計／選定するために、シミュレーションが有効である；
- ロボットハンドの剛性異方性を利用することで、より高速なハンドリングの実現が可能となる；