

磁気吸着ユニットと空圧アクチュエータを用いた 船体壁面歩行ロボット

- 松葉佐 哲仁 (学生会員, 九州大学大学院工学府)
- 浅沼 智幸 (九州大学大学院工学府)
- 木村 元 (正会員, 九州大学大学院工学研究院)

目次

- 研究の背景
- 先行研究
- IBマグネットについて
- カムを用いたIBマグネット
 - 誤差耐性について
 - カム形状の条件
- ロボットの試作と動作試験
- まとめ



研究の背景

海事産業→高所作業の多発

- 製造現場
 - 塗装 … 煩雑な足場の手配, 危険性
 - 点検 … 作業のしにくさ
- 運航現場
 - ホールドクリーニング
 - 港湾業者 → 多額の費用
 - 船員 → 航海中であり危険



壁面作業の省力化装置が求められる



製造・点検での壁面作業



運航上の高所作業

本研究の目的

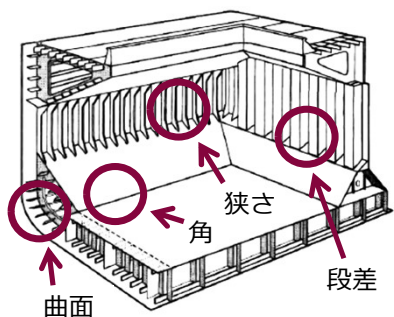
2020年, 松葉佐, 木村の研究

- 壁面作業用ロボットは市販
⇔高価で普及せず
- 壁面のロボットの特許は多い
⇒実用化されず
(吸着力, 作業面上の難)



Combijet / RJE-1000

<https://www.combijet.com/>



[BULK CARRIERS HANDLE WITH CARE / IACS](#)



安価な壁面作業装置を実現
(簡単な構造, 機能の削減)

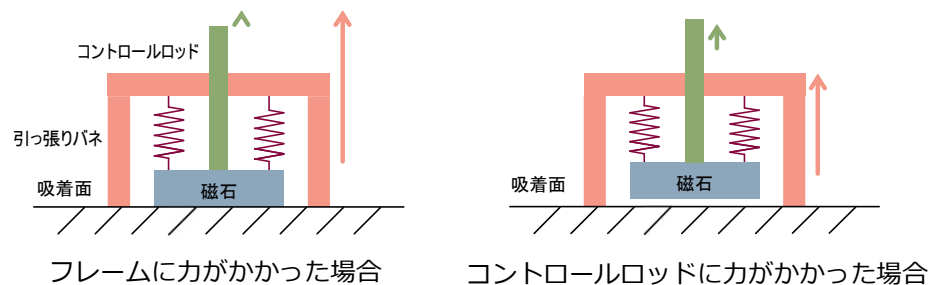
- 永久磁石の利用
→IBマグネット機構の利用
- 足を用いたロボット
- 空気圧を用いる
- 方向転換等の機能は最小限に

**IBマグネットを利用した
空圧で動作する支援装置**

IBマグネットについて先行研究

Internally-balanced Magnetic Unit

- 磁石の弱点を補う
 - 離脱時→莫大な力
 - 吸着時→衝撃
- 非線形な吸着力を線形な弾性力で補償
 - カムを用いて補償力を釣り合わせる
(近年の3Dプリント技術の発達で可能に)
 - 他にも補償方法あり (設計上問題あり)

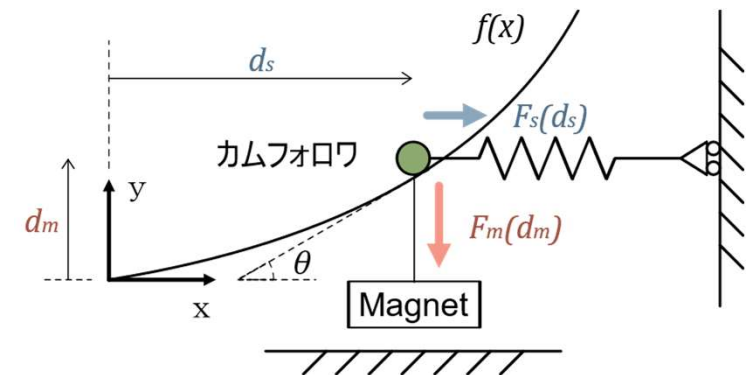


カム形状算出の式: $f'(x) = \frac{F_s(x)}{F_m(f(x))}$

カム形状補正の式:
$$\begin{cases} Q_x = P_x + r \sin \theta \\ Q_y = P_y - r \cos \theta \\ \theta = \arctan f'(x) \end{cases}$$

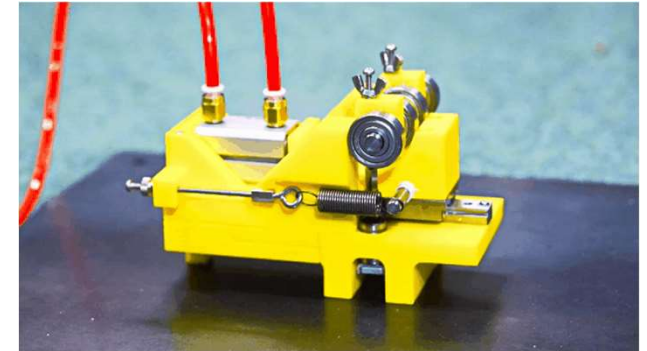
近似関数を用いた場合の解:

$$f(x) = \left\{ d_m^{1-c_2} - \frac{c_2 - 1}{2c_1} (kx^2 + 2d_s x) \right\}^{\frac{1}{1-c_2}} - d_m$$



本研究のアプローチ

- 以下に示される先行研究のIBマグネットの問題点を分析・解決
 - 誤差耐性について
 - 寸法精度や剛性の問題（砂や摩擦の影響）
 - 塗料の厚み、さびなどが吸着力と補償力のバランスを崩す
→従来方法のIBマグネットも持つ欠点
 - 簡単に入手できるバネの誤差は大きい
 - カム形状の条件
 - 補正前のカム形状に経験的な制約条件がある
- 試作検証および実際の装置での実証試験を実施



吸着ユニット(先行研究)

IBマグネットの補償力の誤差耐性について（解析法）

- IBMのモデルに誤差があった場合の操作に必要な力を加える

基礎方程式

$$f'(x) = \frac{F_s(x) + F_{ch}}{F_m(f(x)) + F_{cv}}$$

含める誤差

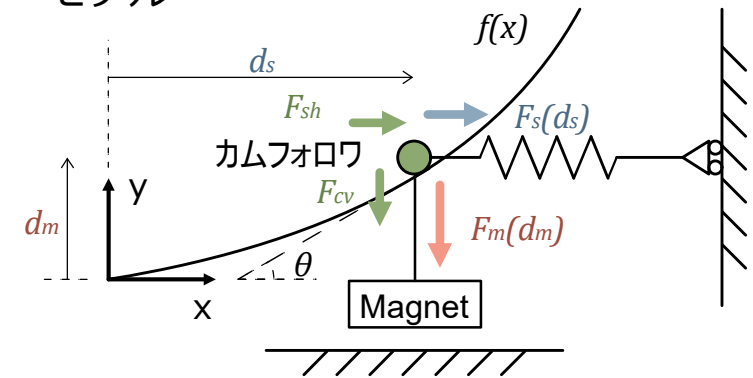
$$f(x) \rightarrow f(x) + e_v$$

$$f'(x) \rightarrow \tan(\arctan(f'(x)) + e_\theta)$$

$$x \rightarrow x + e_h$$

$$k \rightarrow k + e_k$$

モデル



- 操作に必要な力について解いた結果（誤差がなければ0になる）

$$F_{cv}(e_h, e_v, e_\theta, e_k; x) = \frac{F_s(x + e_h; k + e_k, d_s)}{\tan\left(\arctan\left(\frac{d}{dx}f(x; k, d_s, c_1, c_2, d_m)\right) + e_\theta\right)} - F_m(f(x + e_h) + e_x; c_1, c_2, d_m)$$

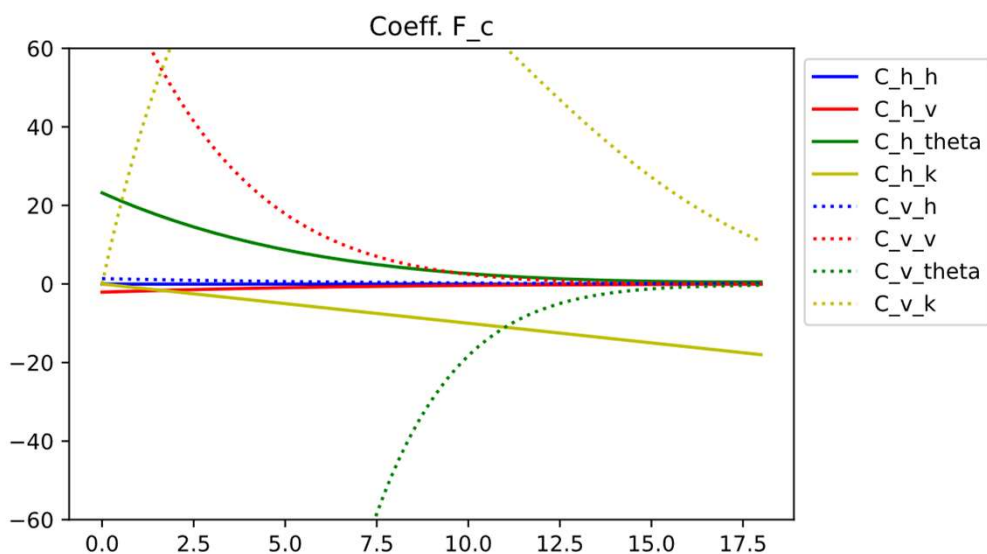
$$F_{ch}(e_h, e_v, e_\theta, e_k; x) = F_m(f(x + e_h) + e_x; c_1, c_2, d_m) \tan\left(\arctan\left(\frac{d}{dx}f(x; k, d_s, c_1, c_2, d_m)\right) + e_\theta\right) - F_s(x + e_h; k + e_k, d_s)$$

IBマグネットの補償力の誤差耐性について（数値計算）

- 基礎方程式のテーラー展開の結果

$$F_{cv} \cong C_{vv}e_v + C_{vh}e_h + C_{vk}e_k + C_{v\theta}e_\theta$$

$$F_{ch} \cong C_{hv}e_v + C_{hh}e_h + C_{hk}e_k + C_{h\theta}e_\theta$$



- C_v が小さい
 - 塗膜の厚みの影響が小さい
 - カムを用いる突出した長所
- C_h, C_θ が小さい
 - 製造精度の影響が小さい
 - 低剛性の影響が小さい
- C_k が小さい
 - 市販のバネを利用可能

カムを用いると
IBMの誤差耐性が上がる
($f'(x)$ による誤差圧縮効果)

利用可能バネについて

- 一般的なバネのバネ定数
 - バネ定数を調整するのが難しい（方法：バネの切断）
 - JIS規格ではバネ定数は正確に規定されていない
- バネ定数の誤差は大きいことが想定される
 - カムを操作する場合はそれほど問題にはならない
 - 既製品のバネで実用的なものが作成可能である。



<https://www.nc-net.or.jp/>

切断不能
(無研磨オープンエンドは可)

冷間成形圧縮ばねのバネ定数の許容誤差

有効巻数	1級	2級	3級
3以上10以下	±5%	±10%	±15%
10を超えるもの	±4%	±8%	±12%

実現可能なカムフォロワの軌跡の条件の導出

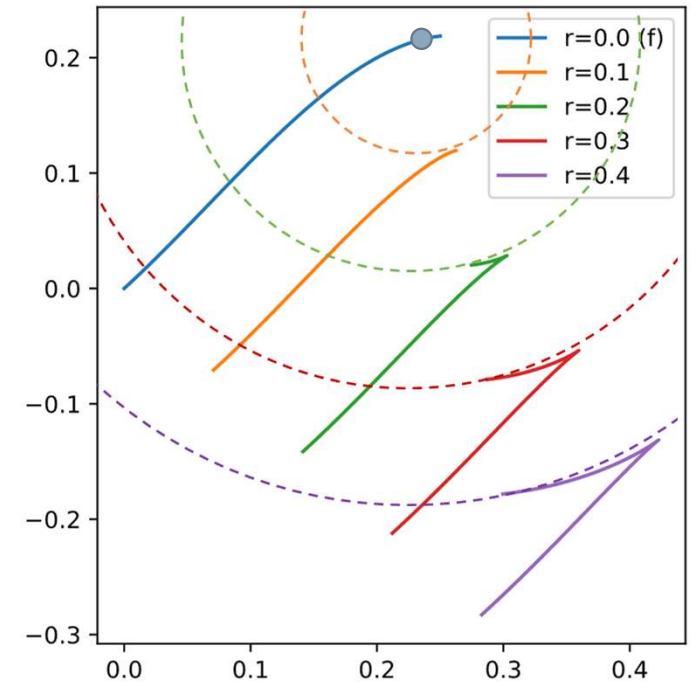
- カム形状の軌跡 $(X(x), Y(x))$ について考える

- $\frac{d}{dx}X(x) > 0$ が成り立てばよい

$$\frac{d}{dx}X(x) = \kappa r + 1 > 0 \quad r: \text{半径}, \kappa: \text{曲率半径}$$

- 最適なカム形状

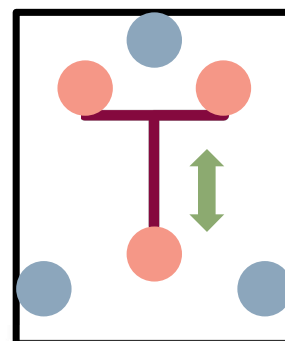
- 理論的に最適形状を出すことは不能
- 最適化手順
 1. 条件を満たした中で $f'(x)$ を最小化 (バネ定数)
 2. バネを選定 (人力に頼る部分がある)
 3. バネの使用域を最適化



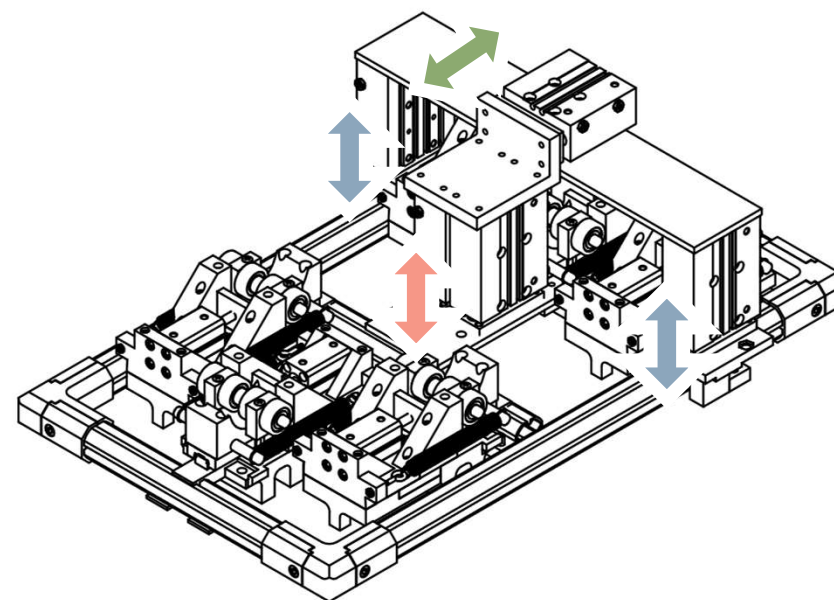
カム形状 : $f(x) = -10x^3 + 2x^2 + x$

ロボットの構造

- 機能を上下移動のみに限定
- 吸着脚は6個配置
 - 十分な摩擦力であると推定
- 移動中は常に3点で吸着
 - 湾曲している壁面でも安定
- ラズベリーパイを用いて制御
 - 電磁弁はON-OFF制御
 - ブラウザから操作



- : 吸着脚A ● : 吸着脚B
- ↕ : 移動用エアシリンダ
- : 固定A | : 固定B

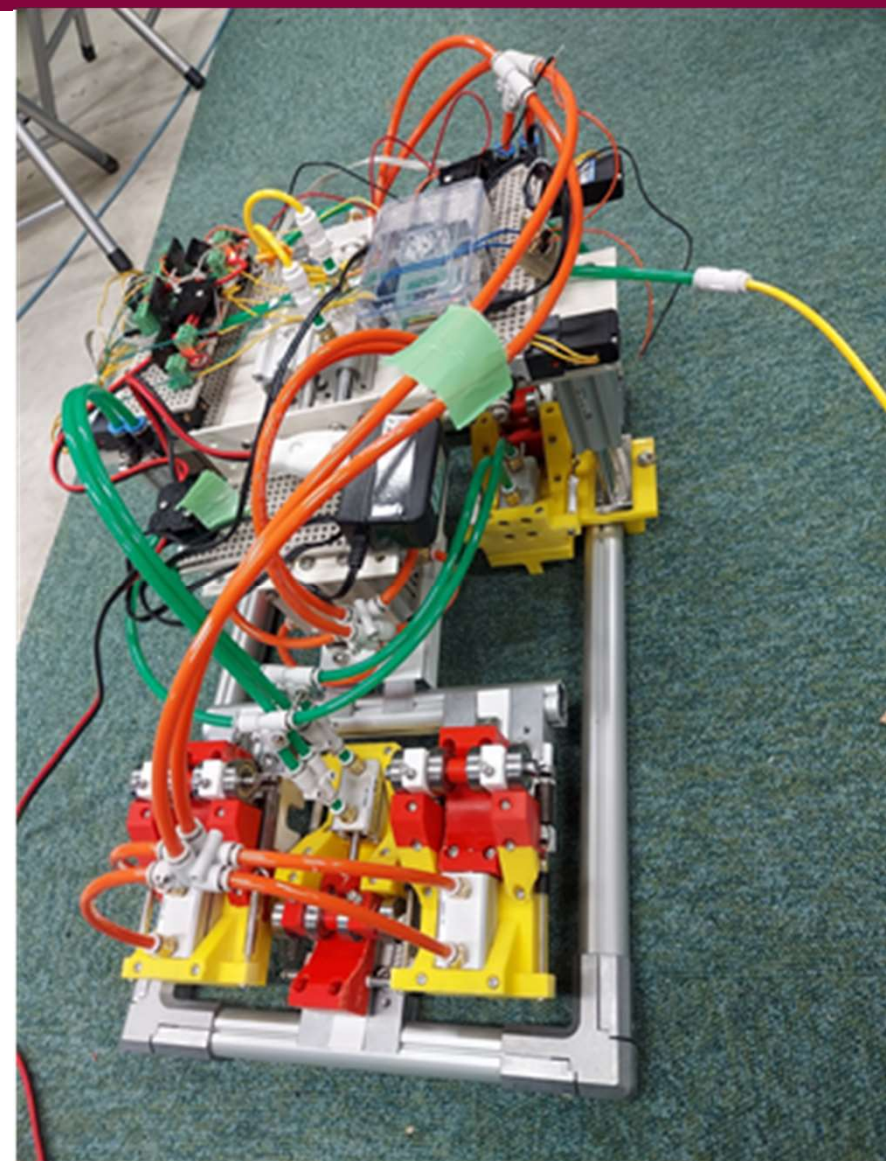


作製したロボット

- 寸法（吸着時）

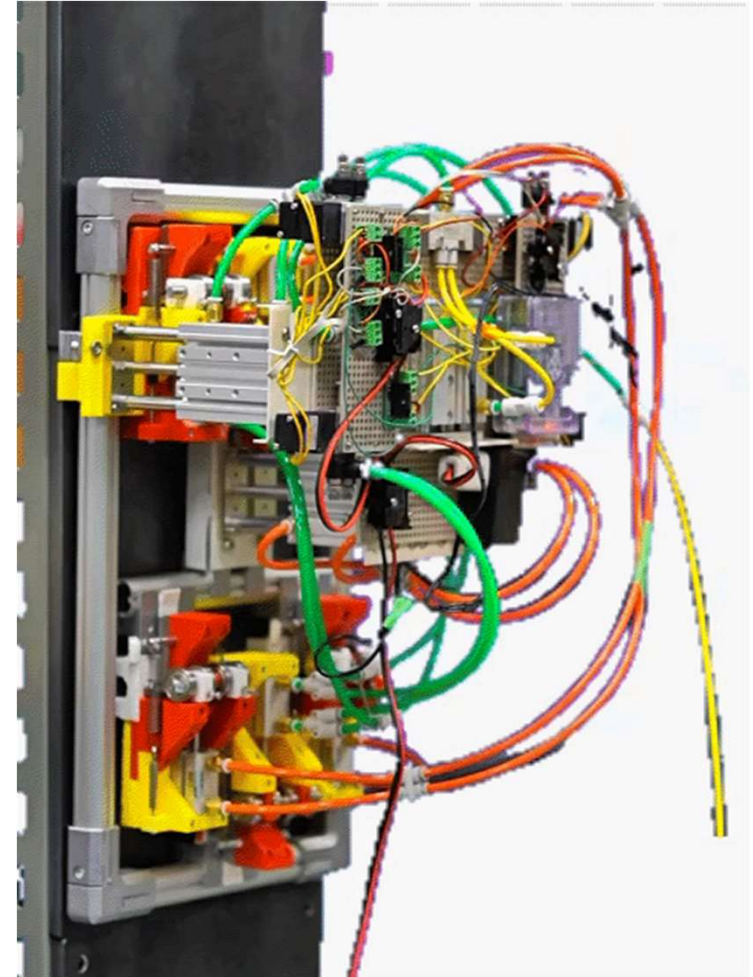
重力	9.9 [kg]
全長	503.0 [mm]
全幅	347.6 [mm]
全高	140.0 [mm] (チューブを除く)

- 3Dプリンターと市販部品で作成
→短い期間で製作、試行錯誤が可能
- 3Dプリンターの部品の歪みが問題
→やすり等で調節、設計と上下逆で実験



実験結果

- 自重 (9.9 kg) を支えて上ることが可能
 - ↔ ペーロードがほぼないため改善が必要
- 吸着面との摩擦力が小さい
 - さらなる吸着力の増大が必要
- 吸着動作には1.5s必要であった
 - 磁石はすぐには吸着力を発揮しない可能性
 - 振動を吸着力設計時に考慮する必要性
 - 現状 0.23 m/min << 有用となる速度
- 進むにつれて進行方向がずれる
 - エアによる精密制御の研究の応用

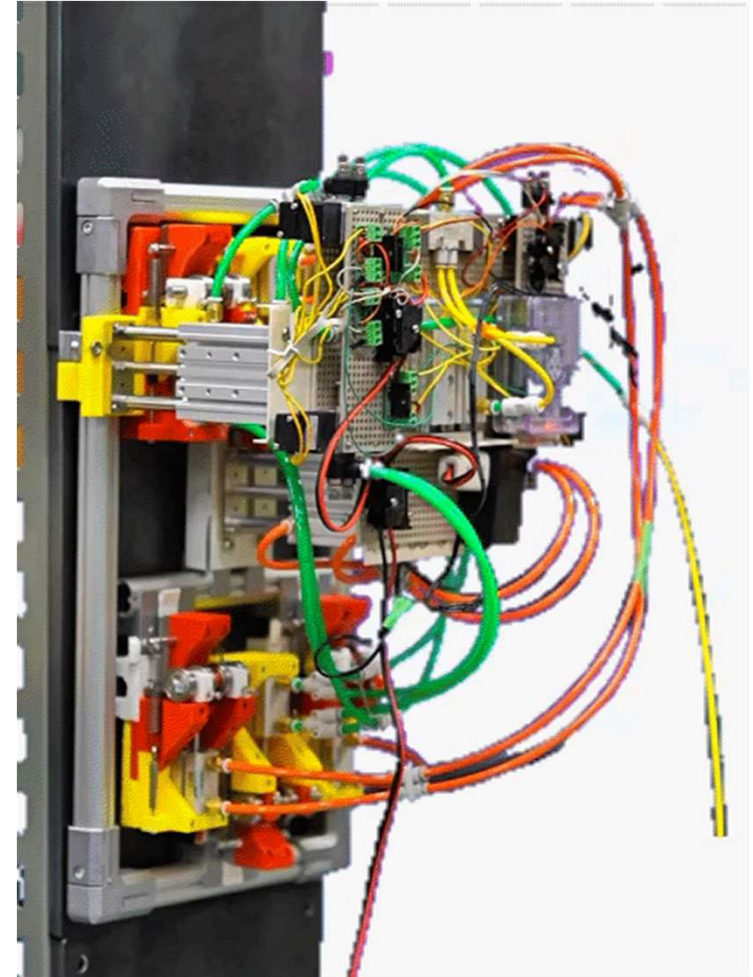


結論

- カムを用いたIMマグネットについて
 - 解析誤差耐性という優位点が明らかに
 - 設計条件を明らかに
 - バネ定数, カム形状の最適化が可能に
- 作製したロボットについて
 - カウンターウェイトなしで壁面を登坂
 - 空気圧, IMマグネット機構を用いることで小型化

今後の予定

- 左右方向へのある程度の精密性がある移動
- 更なる小型化によるペイロードの増加

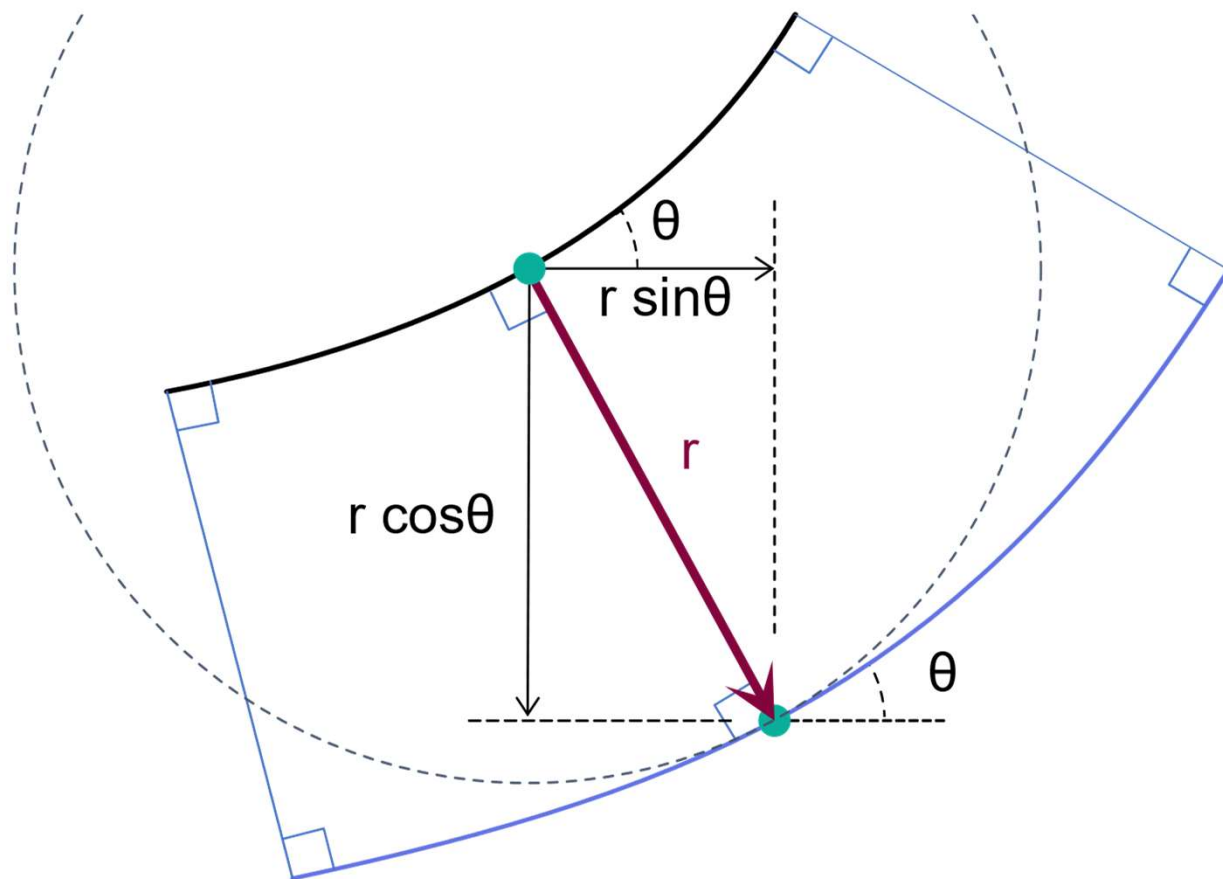


補足資料 1

- カムフォロワの軌跡が一致
- 接線の傾きが一致

$$\begin{cases} Q_x = P_x + r \sin \theta \\ Q_y = P_y - r \cos \theta \\ \theta = \arctan f'(x) \end{cases}$$

Q : 移動後の点
P : 移動前の点
r : 半径



補足資料 2

クーロンの法則

$$F = \frac{q^2}{4\pi\mu_0 r^2} = C_1 \frac{1}{r^2}$$

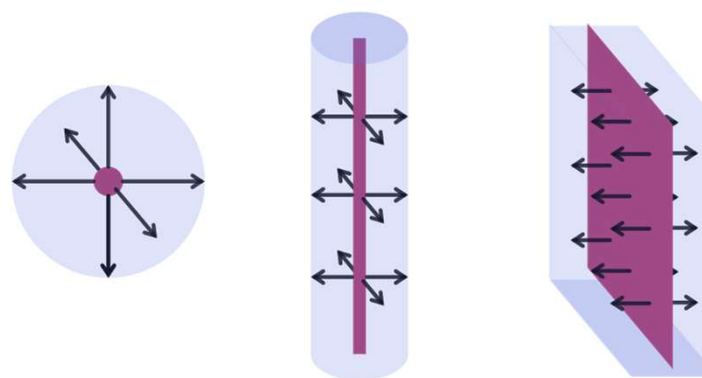
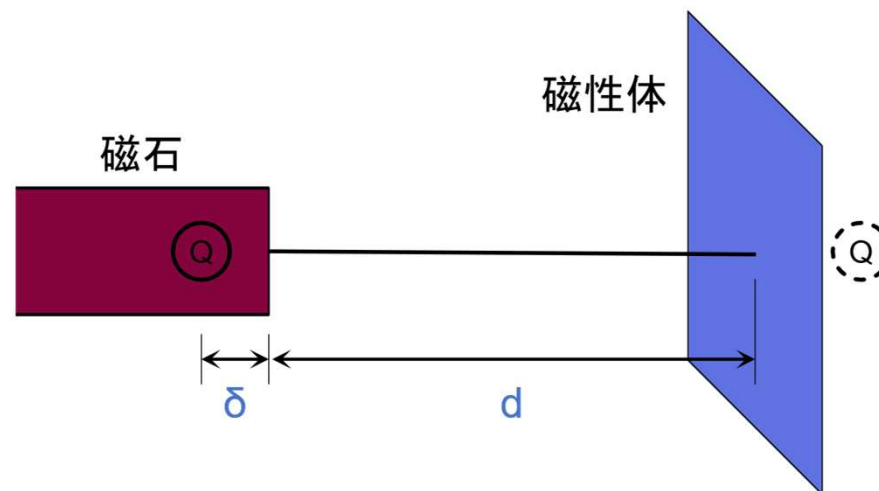
表面に磁荷があると力が ∞

→ δ 奥まった場所に磁荷

実際は点磁荷ではなく面磁荷

→次元数の調整

$$\rightarrow F = C_1 \frac{1}{(d + C_2)^{C_3}}$$



補足資料 3

- カムフォロワ半径を 0

$$\begin{cases} Q_x = P_x + r \sin \theta \\ Q_y = P_y - r \cos \theta \\ \theta = \arctan f'(x) \end{cases}$$

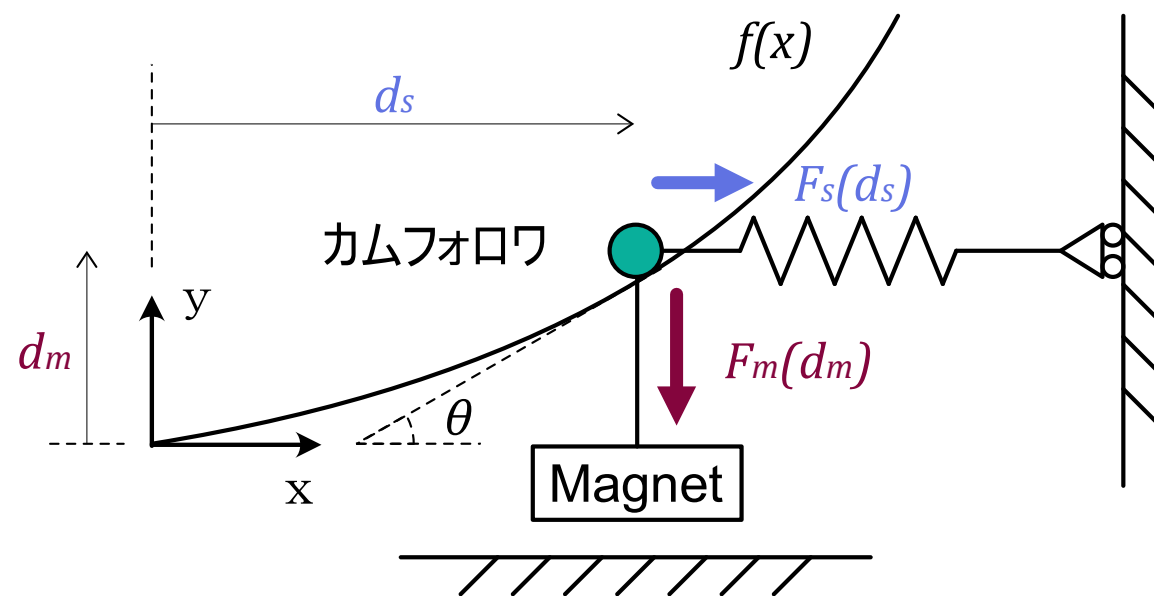
逆算

- 解いたつり合い

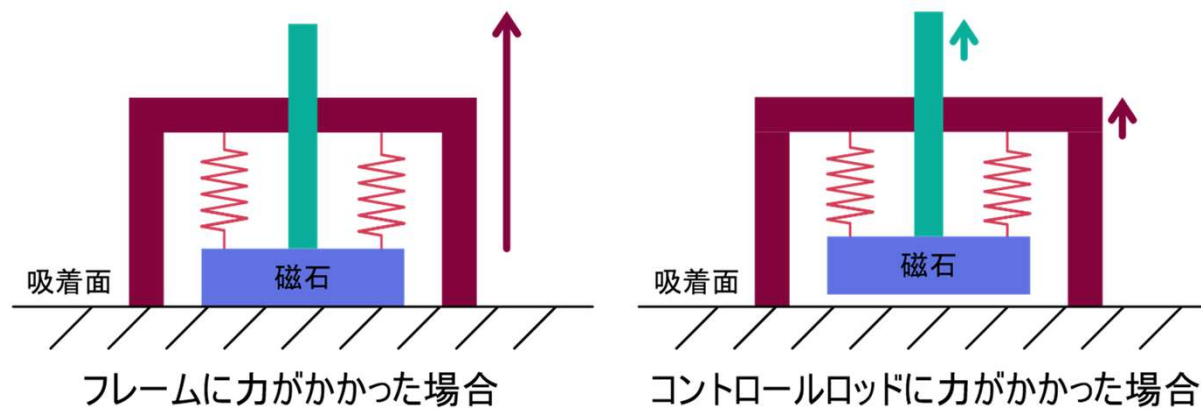
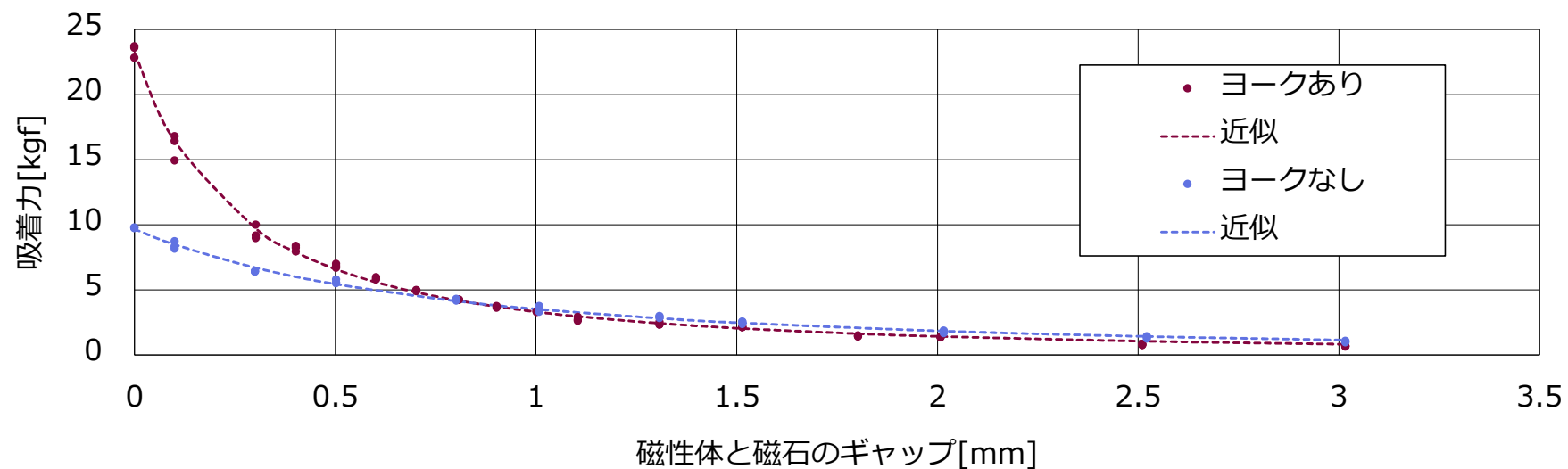
$$F_m(d_m) \sin \theta = F_s(d_s) \cos \theta$$

- 補償力 F_c は F_m に相当
- カム変位 d は d_s に相当

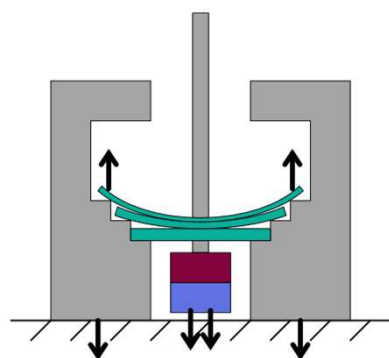
$$F_c = F_s(d) \frac{\cos \theta}{\sin \theta}$$



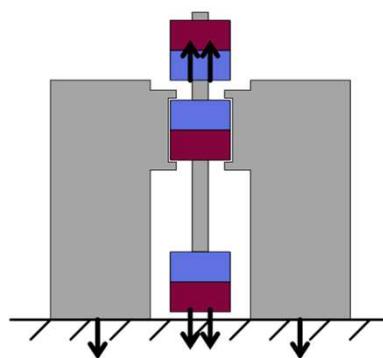
補足資料 4



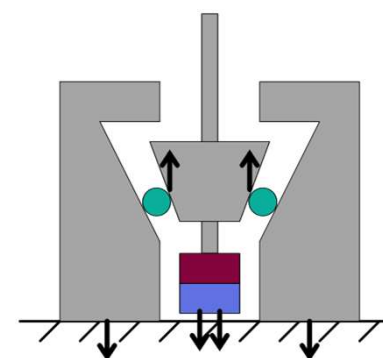
補足資料 5



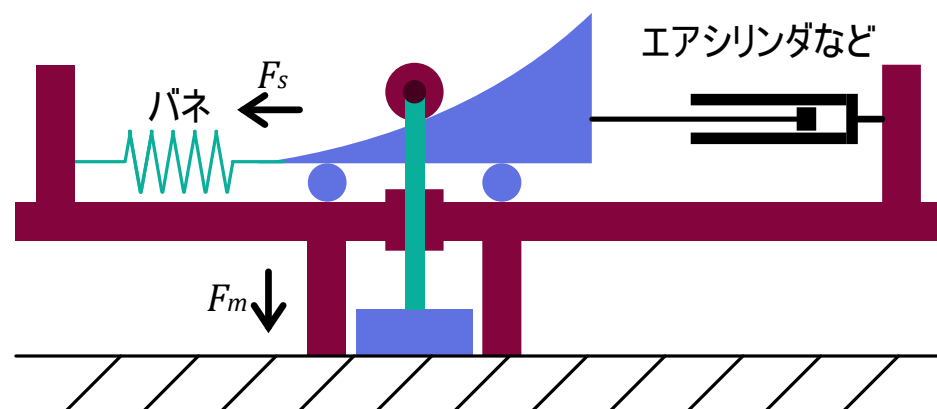
複数板バネ



磁気反発力



ゴムばね



カムを用を用いた方法