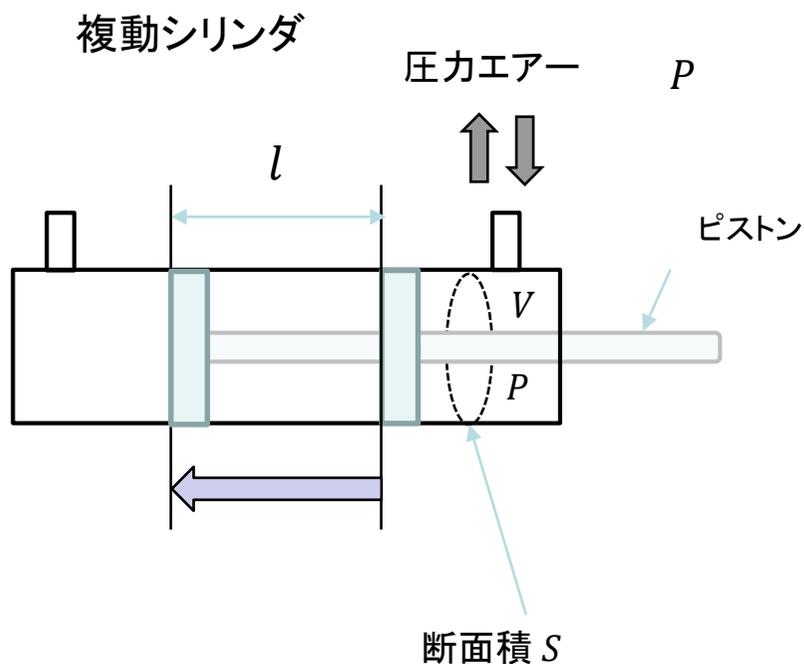


位置センサ不要なアクチュエータ制御の実現

立命館大学 総合科学技術研究機構
教授 清水 正男

2024年10月3日

チャンバに出し入れする空気の体積を制御し、ピストンの位置を制御



$$V [m^3] = l [m] \times S [m^2]$$

使う圧力媒体(空気)は伸縮するので、

$$PV = nRT \quad (\text{気体の状態方程式)から}$$

$$l = \frac{1}{S} \times k \times \int \frac{G}{P} dt$$

G=単位時間当たり質量流量

k = 係数

質量流量/絶対圧力値の積分によりシリンダの変位を推定可能

- ✓ 機構部(アクチュエータ)は2ポート(複動)とする
- ✓ 各部位を形成する部品は、できる限り汎用品を用いる(安価・再現性を重視)
- ✓ MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を使った、圧力センサ、フロー(質量流量)センサーを使用
- ✓ 食品や生き物(人間も含めて)を取り扱う分野への適用を優先(駆動圧力は低圧域)
- ✓ 実現場での制御性を考慮してIoT化も同時に検証する

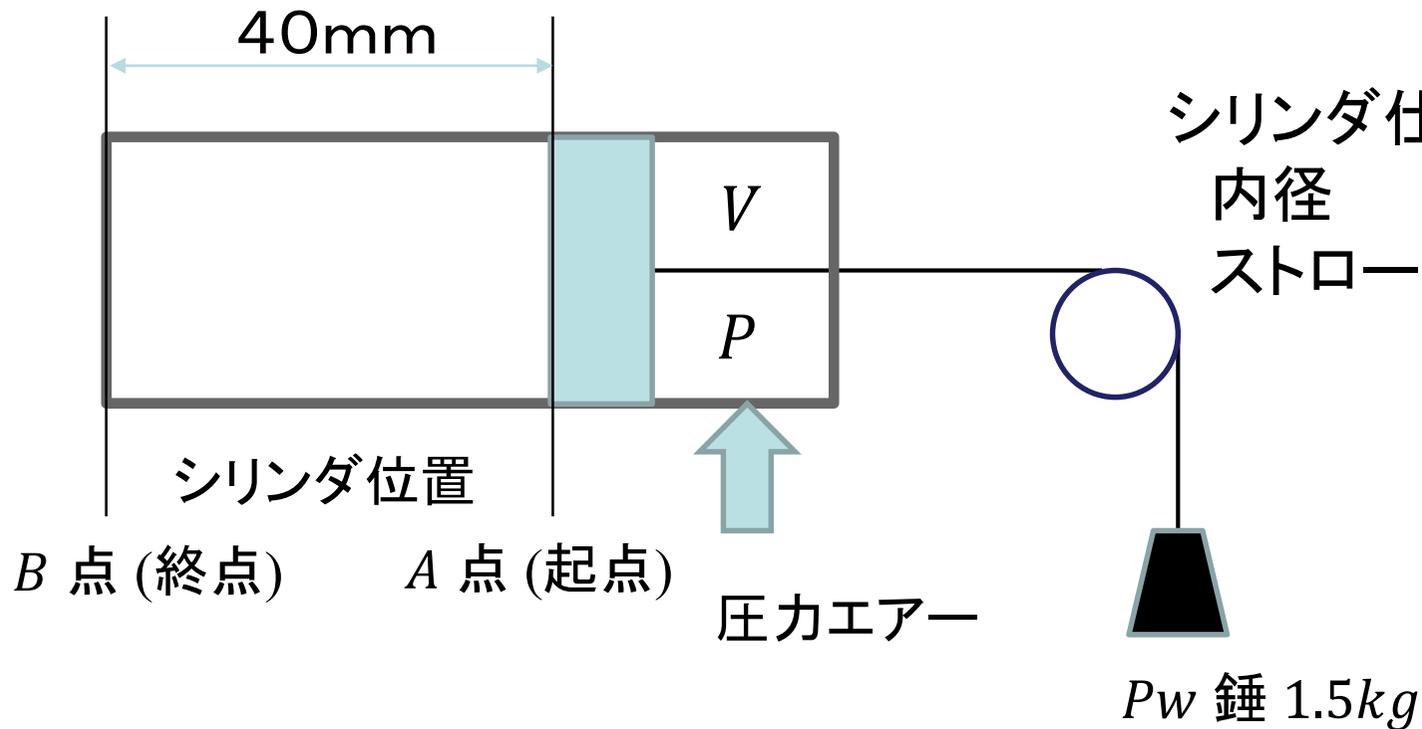
V : シリンダ体積

P : シリンダ内圧

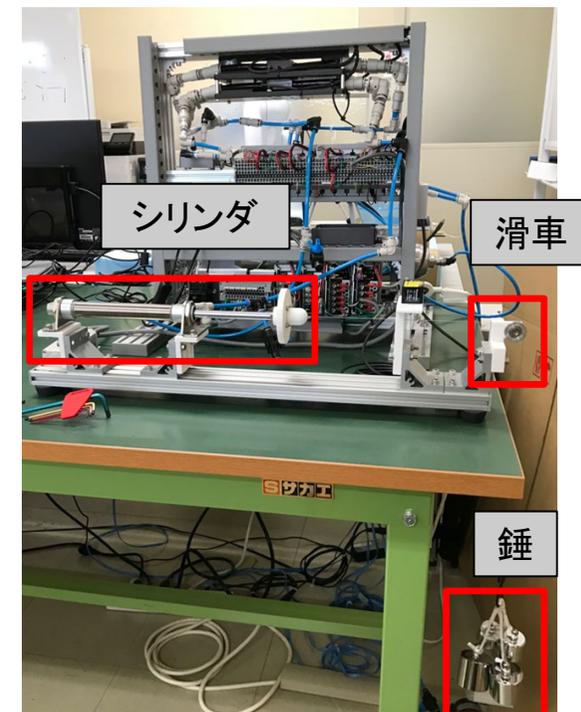
P_0 : 元圧 = 80 kPa (ゲージ圧)

P_a : 外部圧(大気圧) = 101.325 kPa(絶対圧)

P_w : 錘りによる圧力

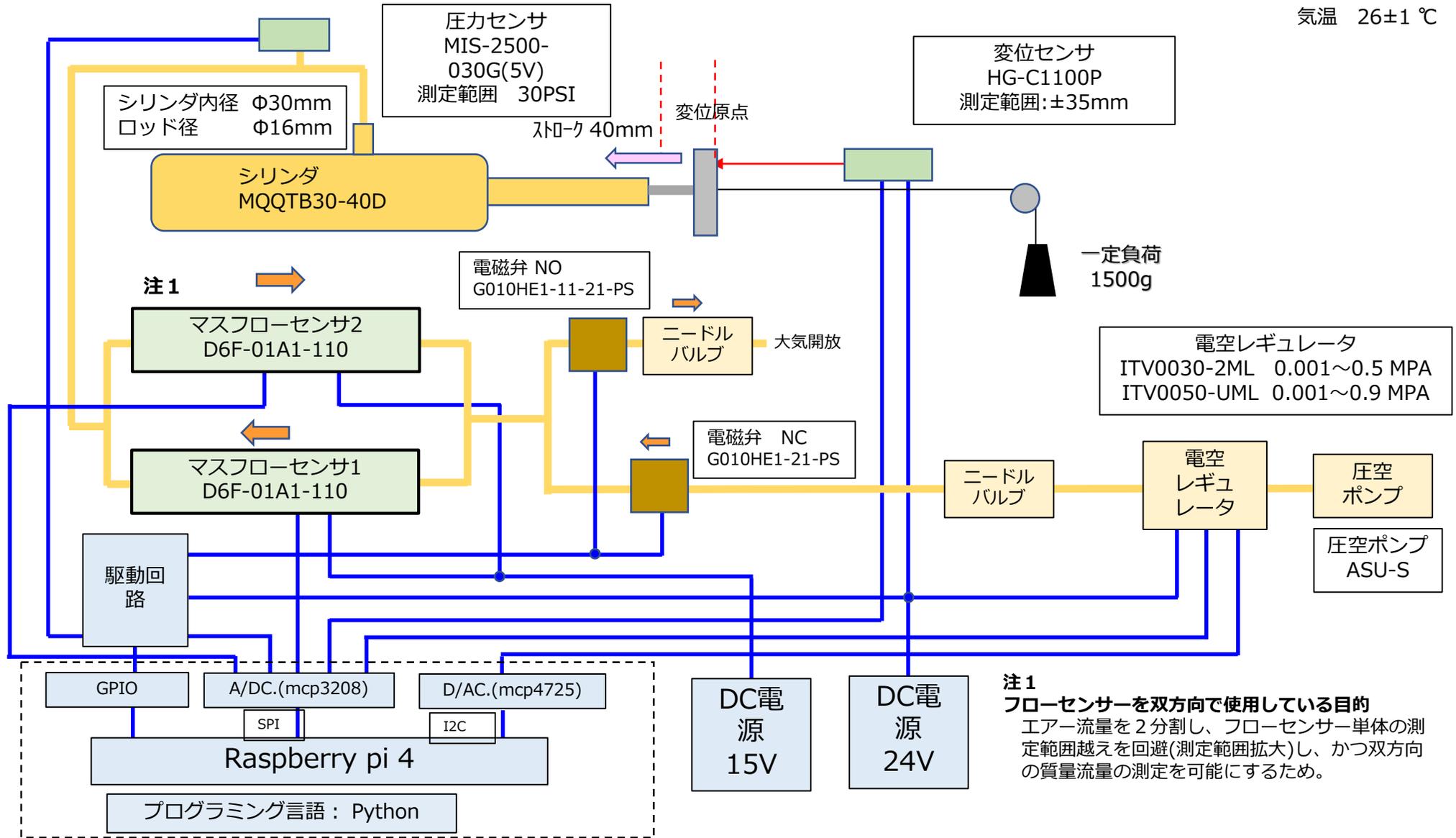


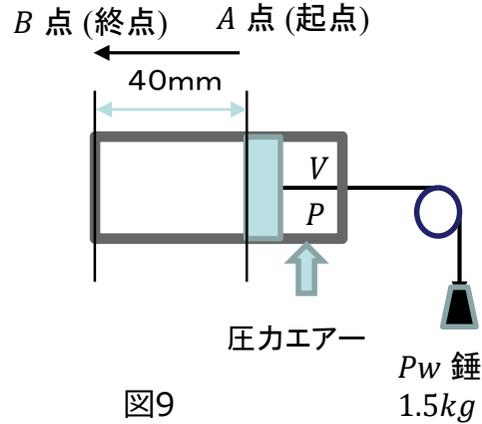
A点、B点はシリンダ駆動範囲の両端



予備実験装置図

気温 26±1 °C

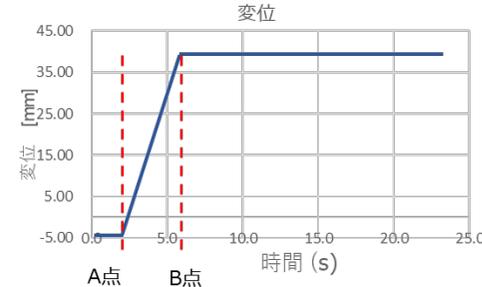




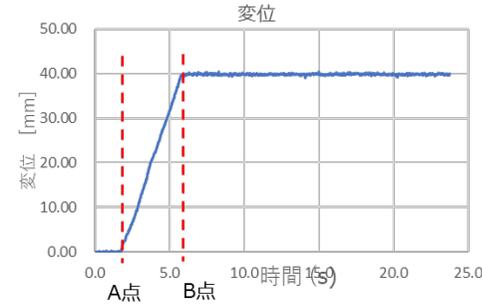
V : シリンダ体積
 P : シリンダ内圧
 P_0 : 元圧 = 80 kPa (ゲージ圧)
 P_a : 外部圧 (大気圧) = 101.325 kPa (絶対圧)
 P_w : 錘りによる圧力

A → B 移動 変位特性

モデル

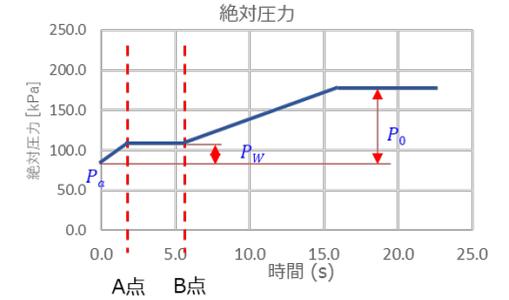


実測値

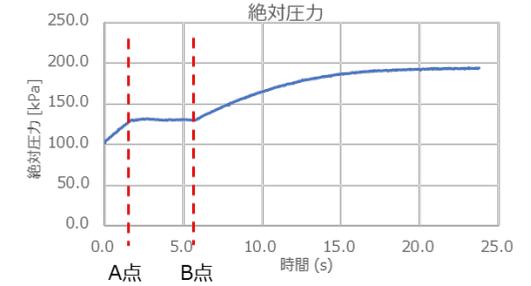


A → B 移動 絶対圧力特性

モデル

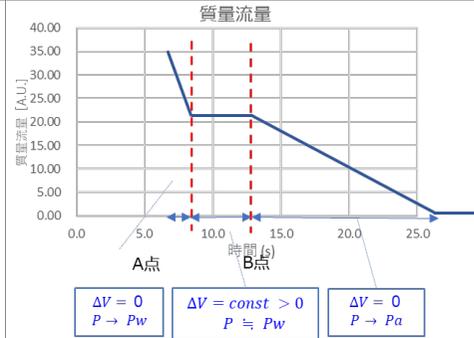


実測値



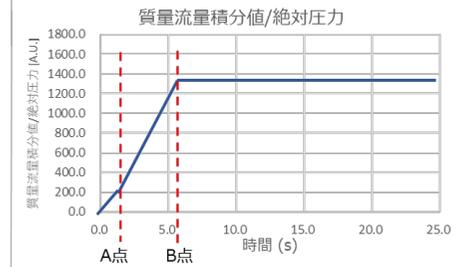
A → B 移動 質量流量値特性

モデル

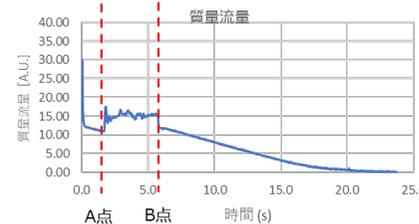


A → B 移動 質量流量積分値 / 絶対圧力値

モデル



実測値



実測値

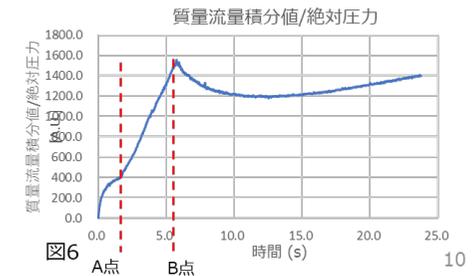
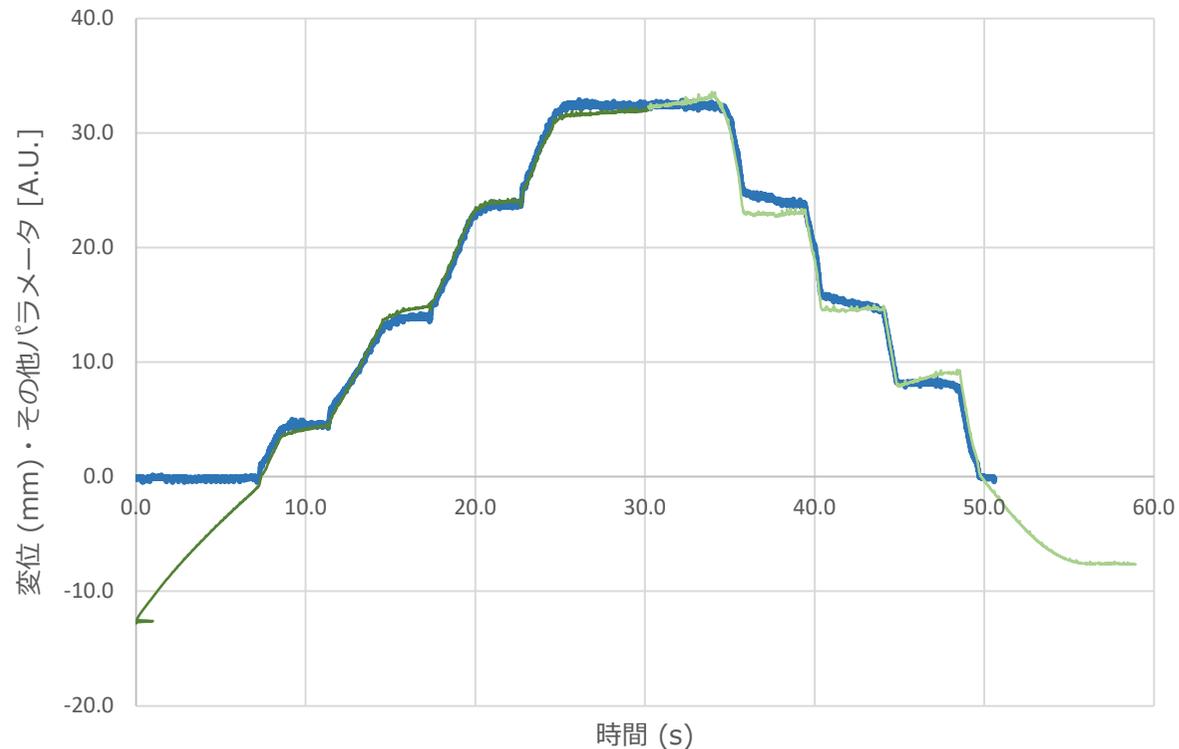


図6

階段状動作実験結果

変位と質量流量積分値/絶対圧力 の移動特性



往路:

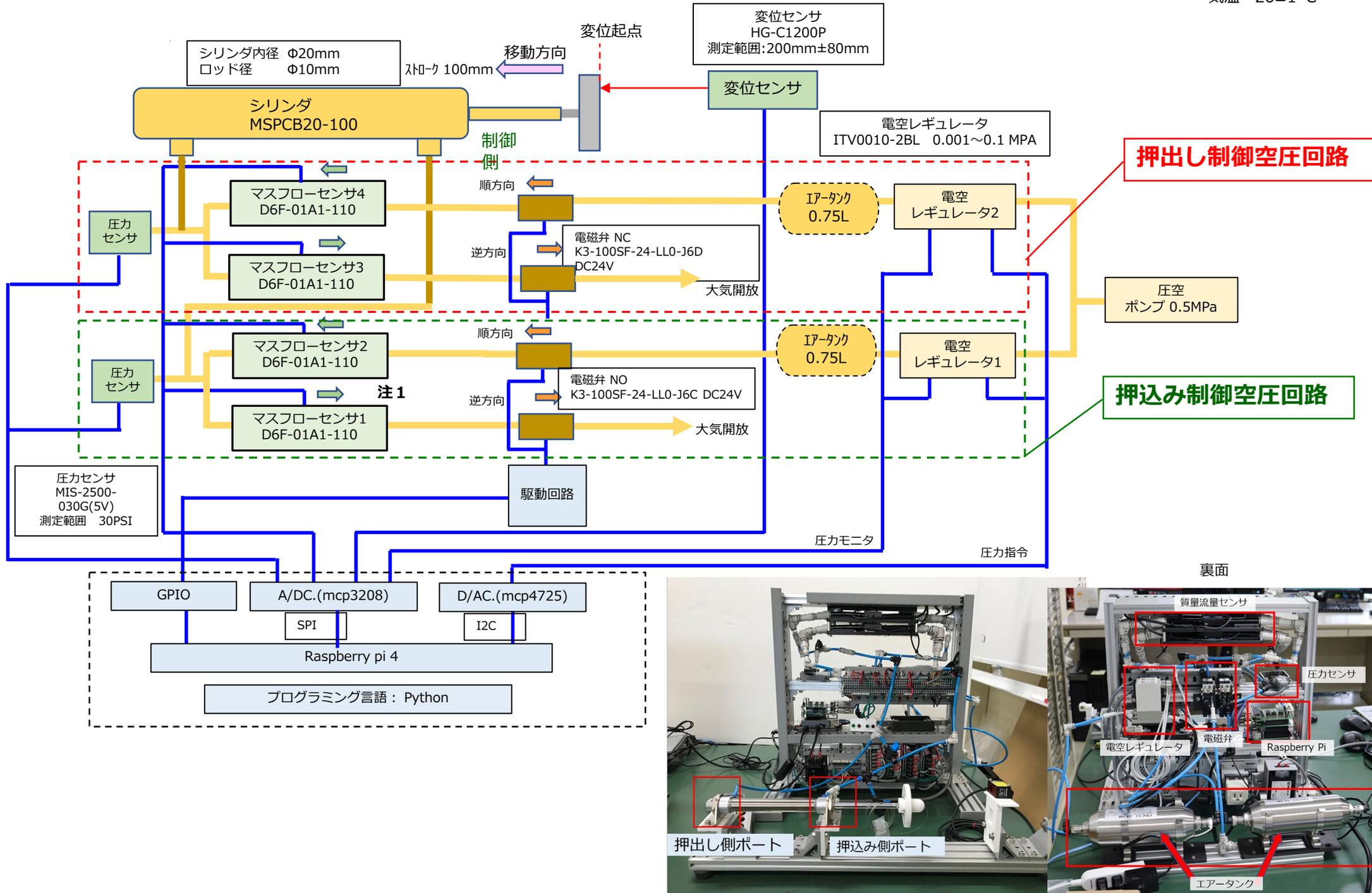
0mm(起点) → 5mm位置 → 停止 → 15mm位置 → 停止 → 25mm位置 → 停止 → 35mm位置 → 停止(拮抗状態)

復路:

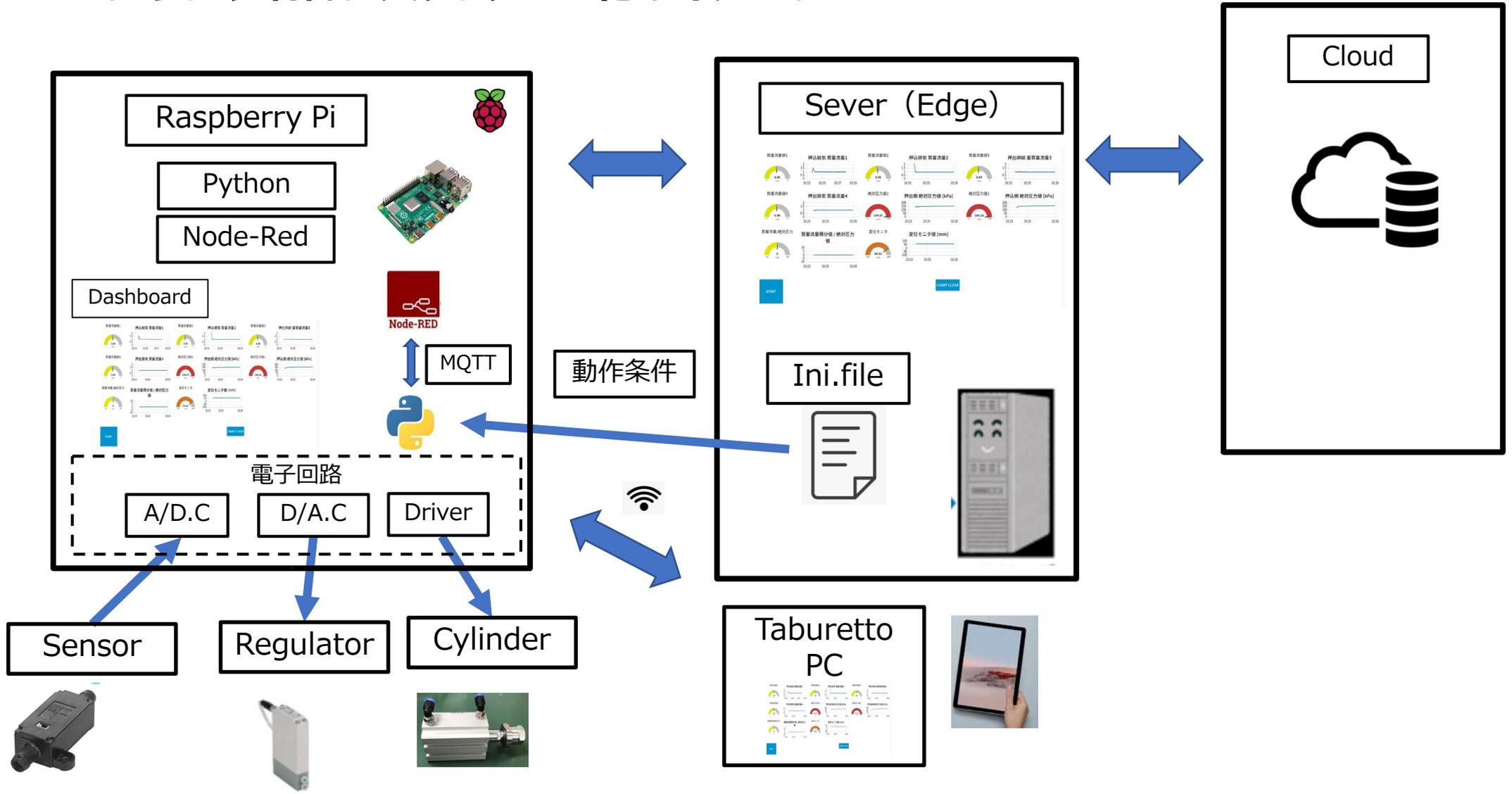
停止(拮抗状態) → 25mm位置 → 停止 → 15mm位置 → 停止 → 5mm位置 → 0mm(起点)

2ポート(復動)シリンダ実験装置図

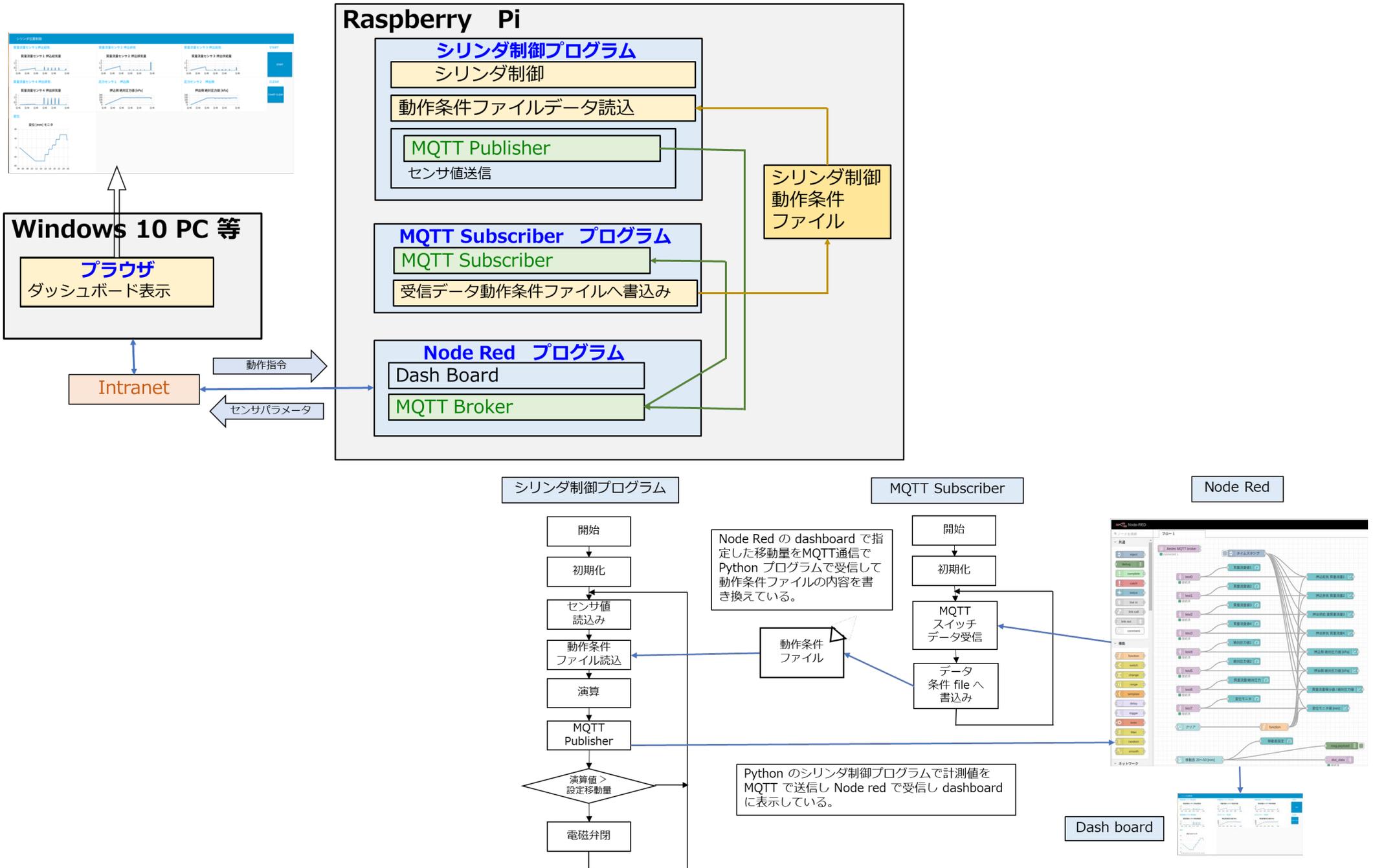
気温 26±1℃



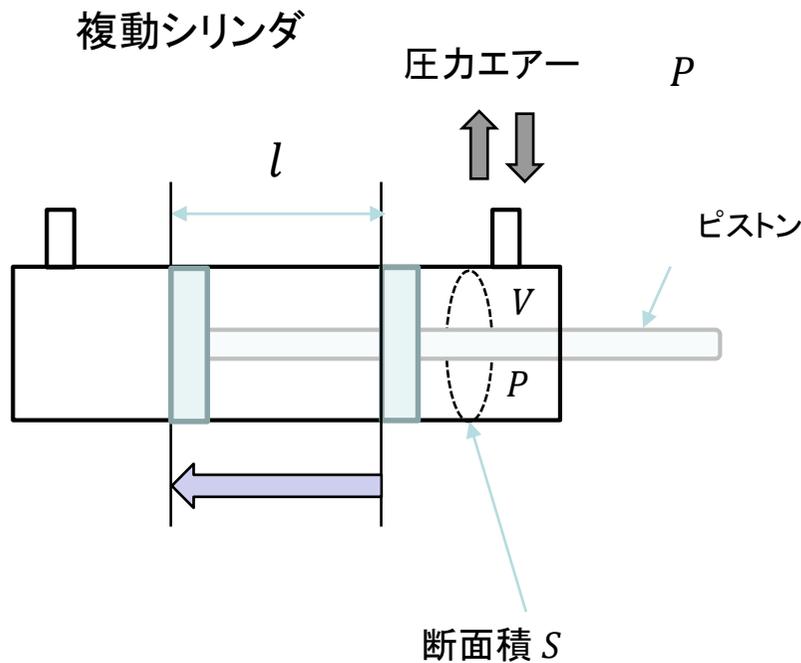
7.1 シリンダ制御システム IoT 化のイメージ



シリンダ制御システム IoT 化のイメージ2



チャンバに出し入れする空気の体積を制御し、ピストンの位置を制御



$$V [m^3] = l [m] \times S [m^2]$$

使う圧力媒体(空気)は伸縮するので、

$$PV = nRT \quad (\text{気体の状態方程式)から}$$

$$l = \frac{1}{S} \times k \times \int \frac{G}{P} dt$$

G=単位時間当たり質量流量

k = 係数

質量流量/絶対圧力値の積分によりシリンダの変位を推定可能

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{\kappa P} \frac{dP}{dt} y + \frac{RT}{sgP} G$$

上式でシリンダ変位 y_n をオイラー(euler)法で求めるには、微小時間 Δt [s] サイクルで次の演算を実行する。

$$y_n - y_{n-1} = -\frac{1}{\kappa \cdot P_n} \cdot (P_n - P_{n-1}) \cdot y_{n-1} + \frac{R \cdot T}{s \cdot g \cdot P_n} \cdot G_n$$

$$\frac{dy}{dt} = y_n - y_{n-1} \quad \text{変位 [m]}$$

$$\frac{dP}{dt} = P_n - P_{n-1} \quad \text{絶対圧力 [Pa]}$$

$\kappa = 1.4$ 比熱比

絶対温度 [K]

$T = 273.15 + 25$ (室温)

ガス定数 [J/(kg·K)]

$R = 8.315$

$s = 0.000707$ (押出側)、 0.000506 (押込側) シリンダ断面積 [m²]

重力加速度 [m/s²]

$g = 9.81$

$G = k_f \cdot V_f$

単位時間当たりの質量流量 [kg/s]

V_f

質量流量センサ出力電圧 [v]

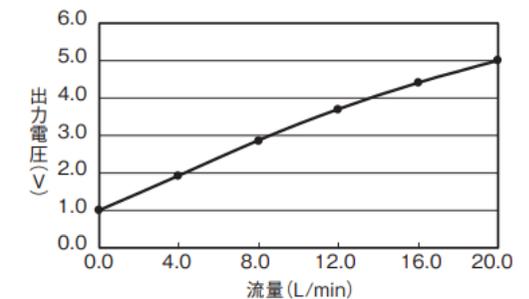
$k_f = 0.006$

質量流量値への変換係数 [kg/(sv)](センサ仕様より)

青字 : 変数

質量流量センサ特性

形D6F-20A6-000特性

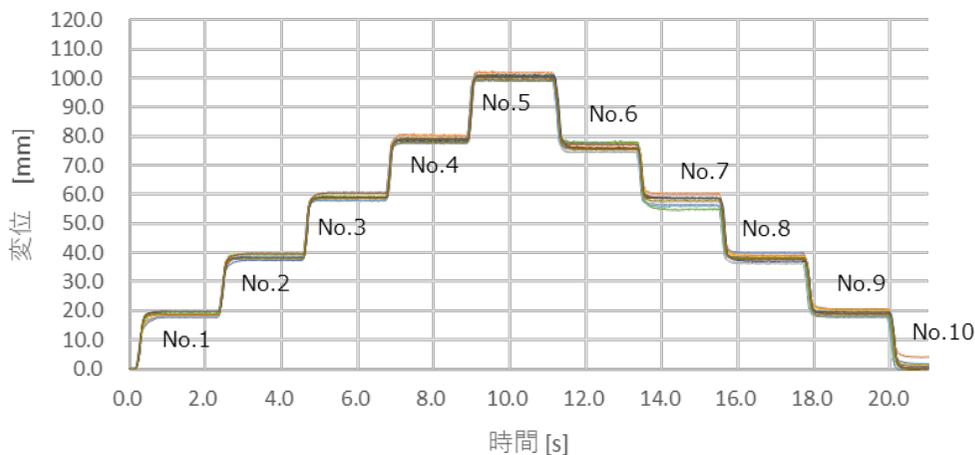


シリンダーを押込み方向に5段階、押出し方向に5段階を各連続10回動作させた時の停止位置のバラツキを次の2種類の方法で制御した時の変位を計測した。

制御1. 質量流量積分値/絶対圧力値

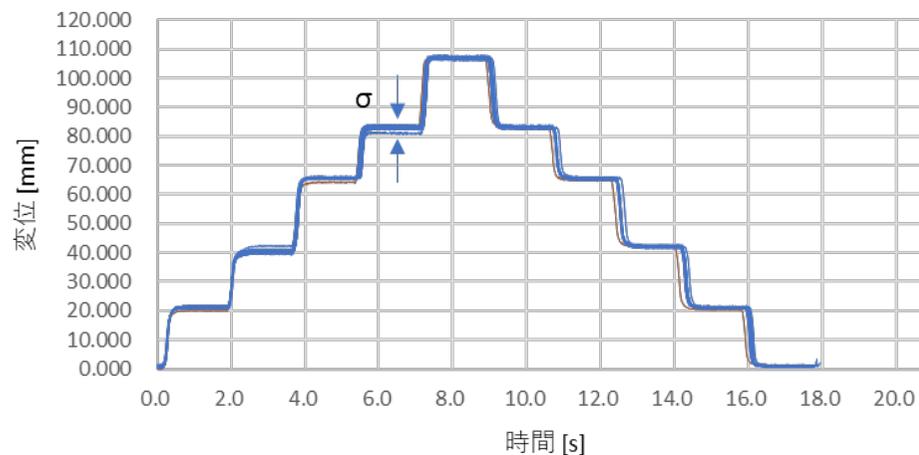
制御2. 運動方程式をオイラー法で演算した値

質量流量積分値/絶対圧力値による停止位置制御 n=10



No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
変位[mm]	19.01	19.51	20.62	19.81	21.57	23.96	18.64	19.84	18.85	18.85	20.07
σ	0.77	0.69	0.86	0.12	0.75	1.10	1.65	0.98	0.98	1.48	0.94
3CV	12.2%	10.6%	12.5%	11.7%	10.4%	16.5%	26.5%	14.9%	16.4%	23.9%	15.6%

状態方程式のオイラー法による停止位置位置制御 n=10



No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
変位[mm]	20.32	19.30	25.07	17.33	23.98	23.95	17.58	23.36	20.99	20.99	21.29
σ	0.57	0.57	0.47	0.04	0.43	0.45	0.54	0.57	0.57	0.64	0.49
3CV	8.6%	8.9%	5.6%	4.2%	2.0%	5.6%	9.2%	7.4%	6.1%	3.0%	6.1%

制御1. 約20mmの移動量に対して σ の平均は **0.94**

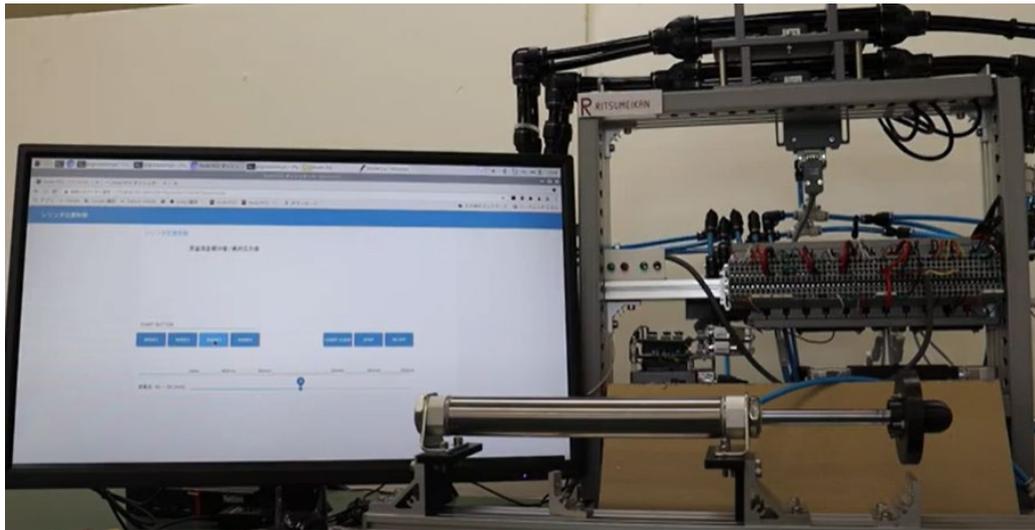
制御2. 約20mmの移動量に対して σ の平均は **0.49**

で制御2の方が σ の値が ほぼ1/2 で 繰り返し精度がよい。

ただし、②の方法でシリンダの特定位置において変位量パラメータと変位量の関係がずれる問題発生した。

No.3, No.4 及び No.7, No.8 の位置。

2ポートシリンダによる位置指定による動作実験

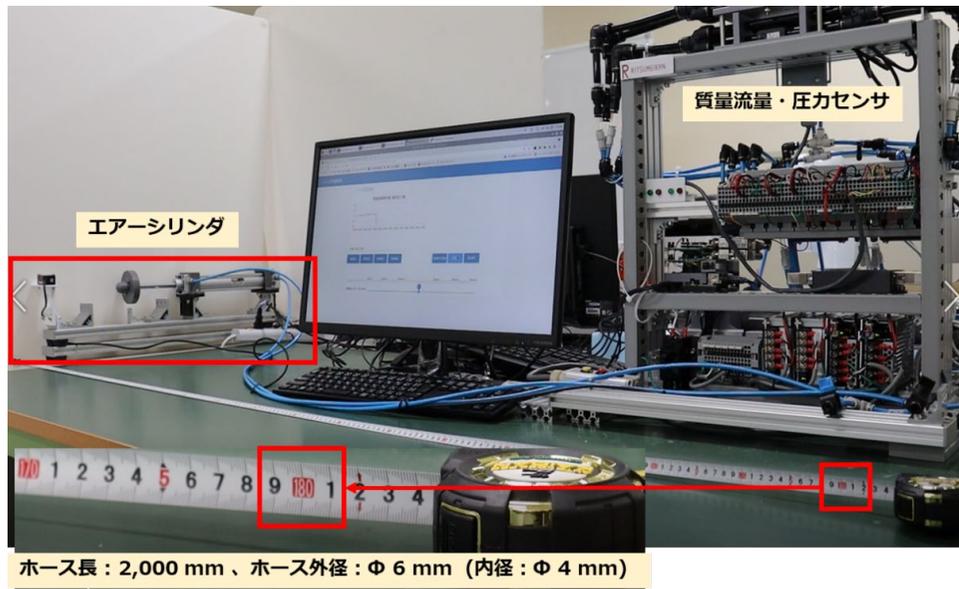


動画：任意位置指定停止

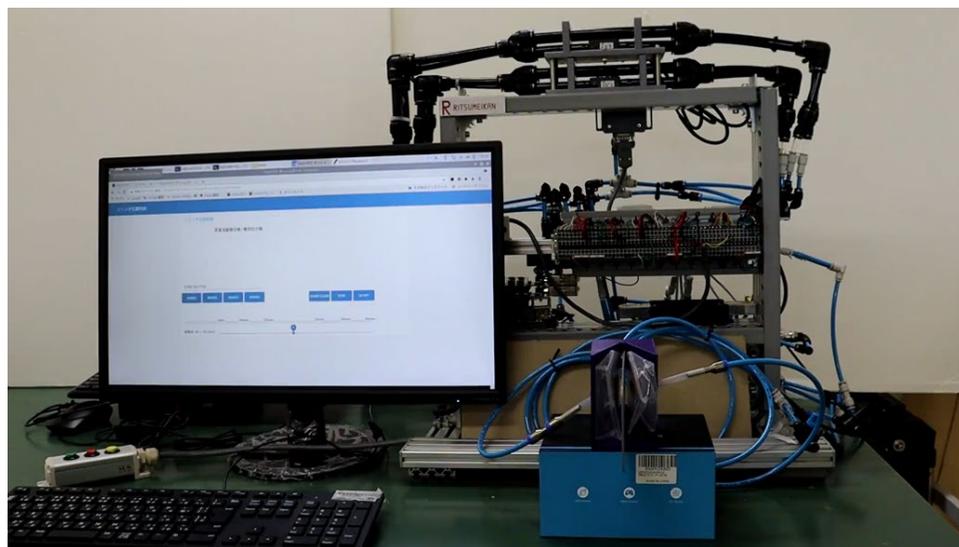
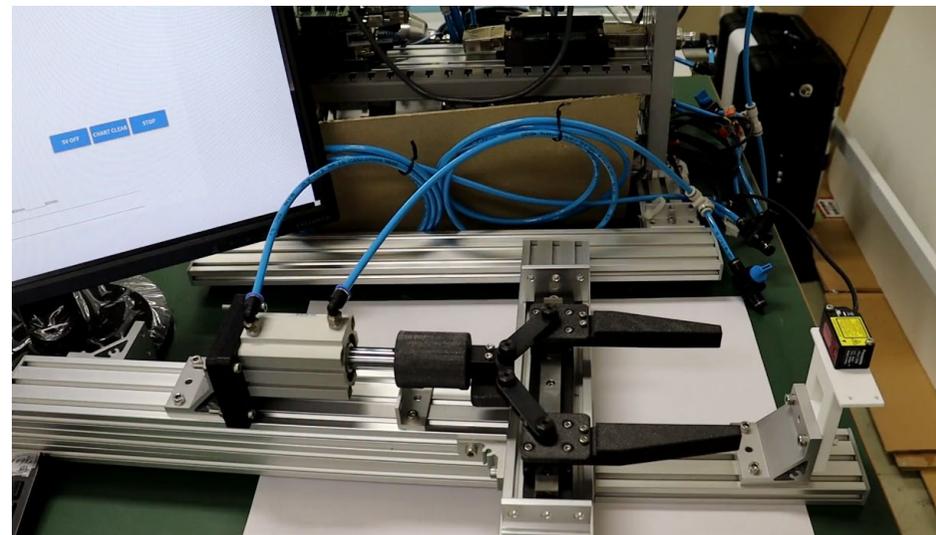
<https://www.youtube.com/watch?v=y9eqzlXHJ6o>



質量流量/絶対圧力の積分値を使った制御方法



遠隔操作（2 m配管）の実験と簡易ハンドの動画
<https://youtu.be/AN3g-qrDFLk>



エアバッグアクチュエーターの実験動画
<https://youtu.be/ntGpaqxyVRk>



従来技術とその問題点

既に実用化されているものには、駆動位置に位置センサ・圧力センサ等を取り付けフィードバックする方法が多く採用されたが、フィードバック信号の遅延等に起因する振動現象等の問題があり、広く利用されるまでには至っていない。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 一般的な空気圧システムでは、伸長時、縮退時の2つの状態（デジタル動作）の位置制御であった。この技術では、その間の任意の位置制御（アナログ動作）が可能。
- 空気などの伸縮する圧力媒体を使う場合、従来技術では、位置制御のためにセンサをアクチュエーター近傍に配置する必要があった。この技術では、アクチュエーター周りにセンサ類の取り付け不要。フィードフォワード動作。
- MEMS技術で小型で高精度な圧力センサ・質量流量センサが安価で手に入るようになり実用化が目指せるようになった技術分野。

想定される用途

- 食品などの不定形で脆弱な物品を取り扱う分野
- 医療介護現場での優しい動作
- アクチュエータ近傍に、センサ等の電子回路を置くことのできない環境（電磁ノイズが多い環境）での位置制御

実用化に向けた課題

- 剛性（ロボットハンドにするならば把持力）の検討、衝突（接触）も含めて負荷がかかった時の挙動などの検討。
- 配管の脱落、エアバッグの破損等、異常時の挙動と安全性の確認。
- 圧力媒体の流量計測を使ったシステムなので、漏気は位置精度の誤差になる。漏気対策が必須。
- カルマンフィルターの導入など、さらなる信号処理の最適化。

企業への期待

- 食品などの不定形で脆弱な物品を取り扱う分野、医療介護現場での優しい動作での社会実装（キラーアプリの提案と実証）
- 信頼性の高い2ポート（復動）エアータグアクチュエータの開発
- 圧力・質量流量複合センサの提供（システムの簡略化及び低価格化のため）

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は柔らかな接触（把持）が可能のため、不定形で脆弱な対象物を扱う分野の駆動系を必要とする企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで社会実装が可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 流体駆動装置
- 出願番号 : 特開2023-129926
- 出願人 : 学校法人立命館
- 発明者 : 清水正男、川村貞夫

お問い合わせ先

立命館大学

研究部 BKCリサーチオフィス

T E L 077-561-2802

e-mail liaisonb@st.ritsumei.ac.jp