

入出力変換行列の実時間最適調整を用いた MIMOシステムの動特性変動低減

東京大学 古関・大西研究室
佐々木 怜音, 大西 亘



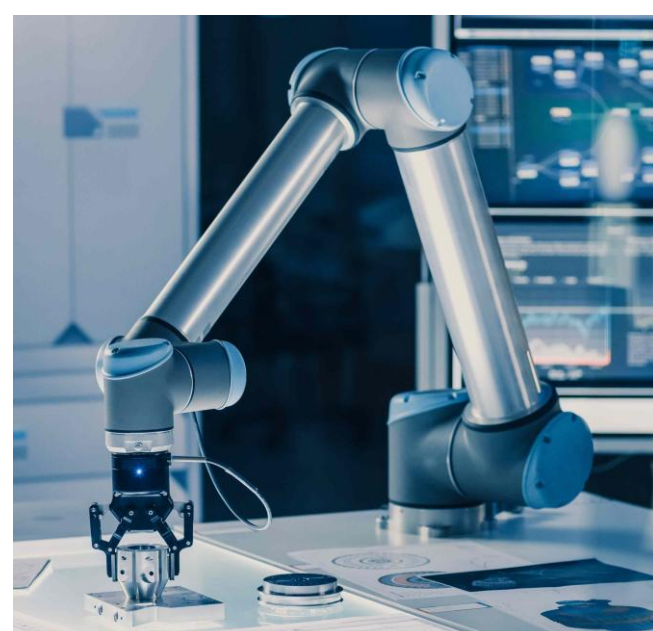
Panasonic
INDUSTRY



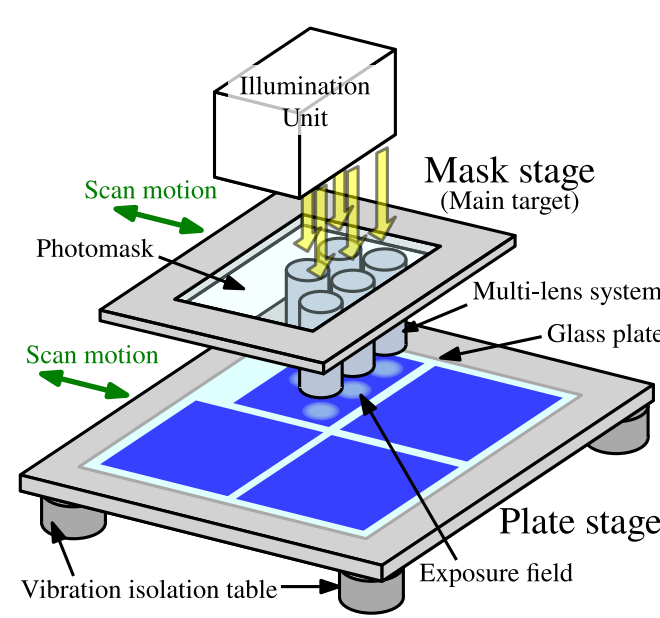
動特性変動を伴うMIMOシステム

産業界におけるタスク自動化への需要

⇒ **タスク難易度に伴う複雑なシステムの制御性能向上**



ロボットアーム
(Robotic arm)



FPD露光装置
(FPD lithography systems)



工作機械
(machine tools)

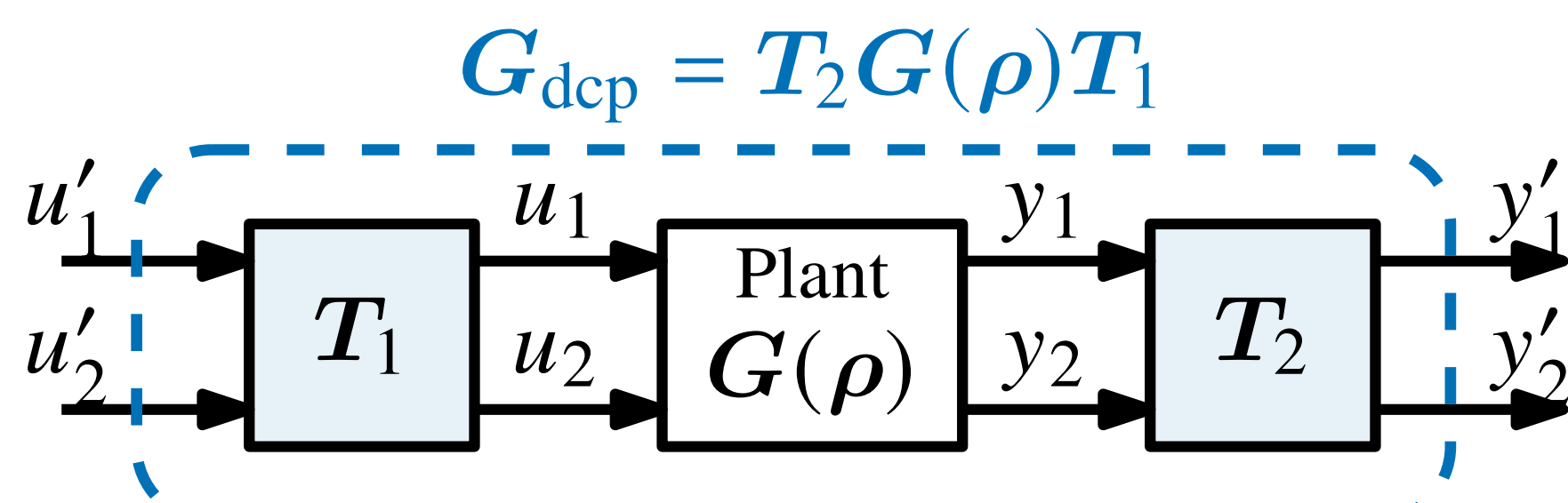
複雑なシステムとは

- ① **多入力多出力系であり軸間干渉が存在する**
→ 非同期性による振動励起, 追従精度低下
- ② **変数依存の動特性変動を伴う**
→ 動作中の制御性能の変動に直結, 整定の悪化

研究の主眼

システムの軸間干渉と動特性変動の影響を低減
学習制御を用いた超高精度制御を実現

制御対象を干渉のないLTIシステムに近づける！
座標変換行列を用いた非干渉化と最適化



ρ : スケジューリング変数 (状態変数含む)

非干渉化制御: 変換行列 T_1, T_2 により入出力を変換し
軸間の相互干渉を低減する制御法

静的非干渉化 Static decoupling

定数行列による入出力変換で
動作軸の座標を置き換える

動的非干渉化 Dynamic decoupling

伝達特性の逆系を用いた
広帯域での干渉低減

Intelligent decoupling control

変換行列をスケジューリング変数に合わせて
リアルタイムで調整した非干渉化制御

動作点ごとに最適化された変換行列をもとに
リアルタイムで適切な座標変換を行う

変換行列をある変数 γ の関数として定義 (重心位置や回転軸中心)

⇒ スケジューリング変数 ρ_k に対応する γ を最適化

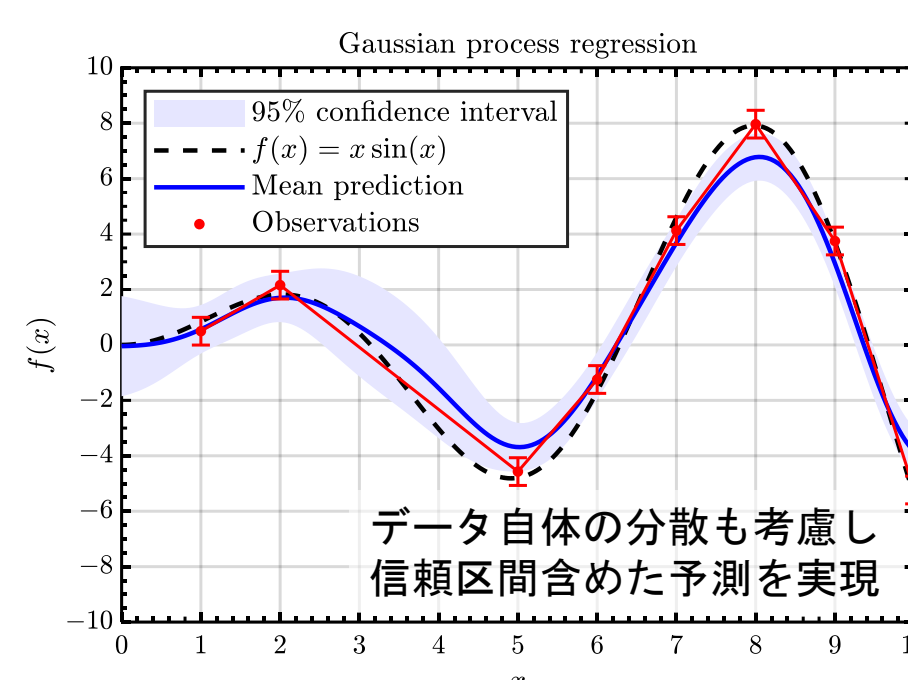
各動作点ごとの最適化問題

G_{ref} : 参照対象となるモデルの特性
 G_{dcp} : 変換行列含む実際の周波数特性

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \sum_{\omega} \|I - G_{\text{ref}}^{-1} G_{\text{dcp}}(\rho_k, \gamma, \omega)\|_{\infty} \\ & \text{subject to } \omega \in [\omega_1, \omega_2] \end{aligned}$$

学習制御と合わせて
制御性能向上を図る

ガウス過程回帰 (Gaussian Process Regression)

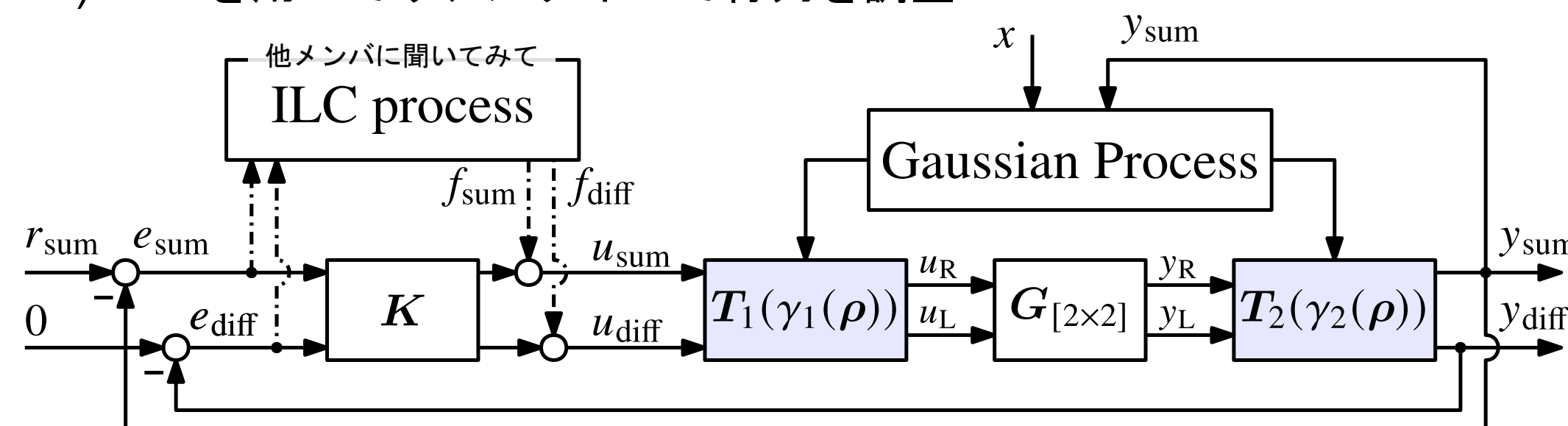


ガウス過程回帰 (GPR) とは...
関数に確率分布を仮定して入出力関係を予測する手法

- ・ 基底関数を必要としない (事前知識不要)
- ・ 少ないデータで高精度予測が可能
- ・ 補間手法であるため大きな予測ミスが少ない

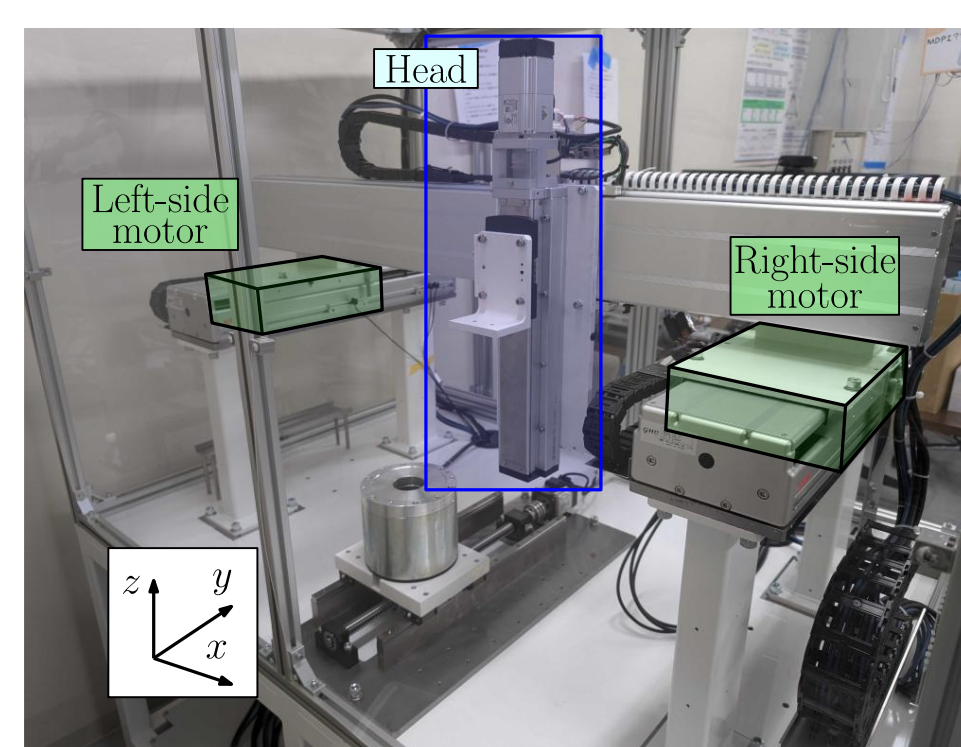
スケジューリング変数 ρ
↓
行列決定パラメータ γ

- 1) ある指定された各動作点における周波数特性を取得
- 2) それぞれの状態における変換行列決定パラメータ γ を最適化
- 3) GPRを用いてリアルタイムで行列を調整



システム変動を低減しモデル精度を相対的に向上

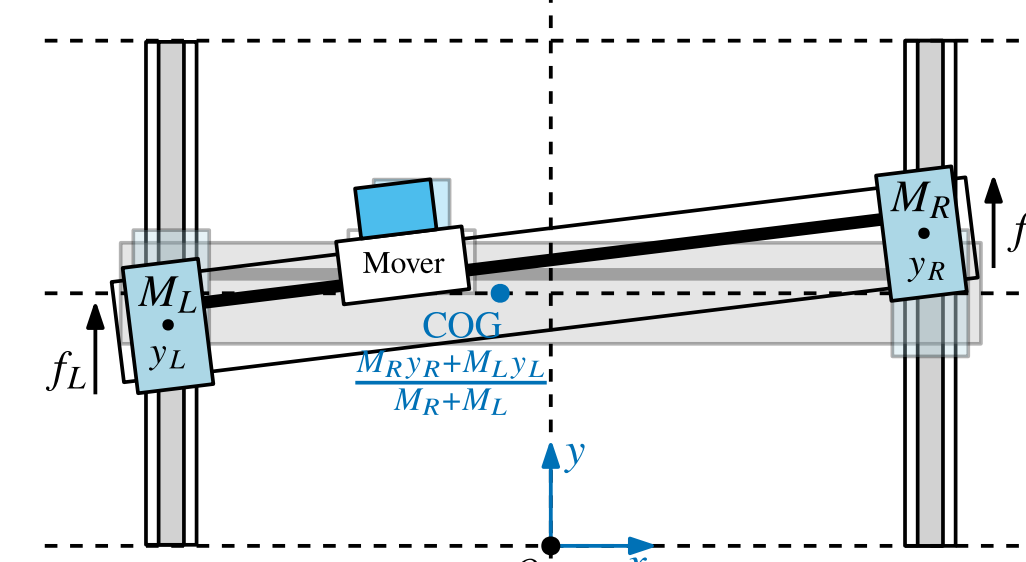
ガントリステージを用いた提案法検証



ガントリステージ実験機

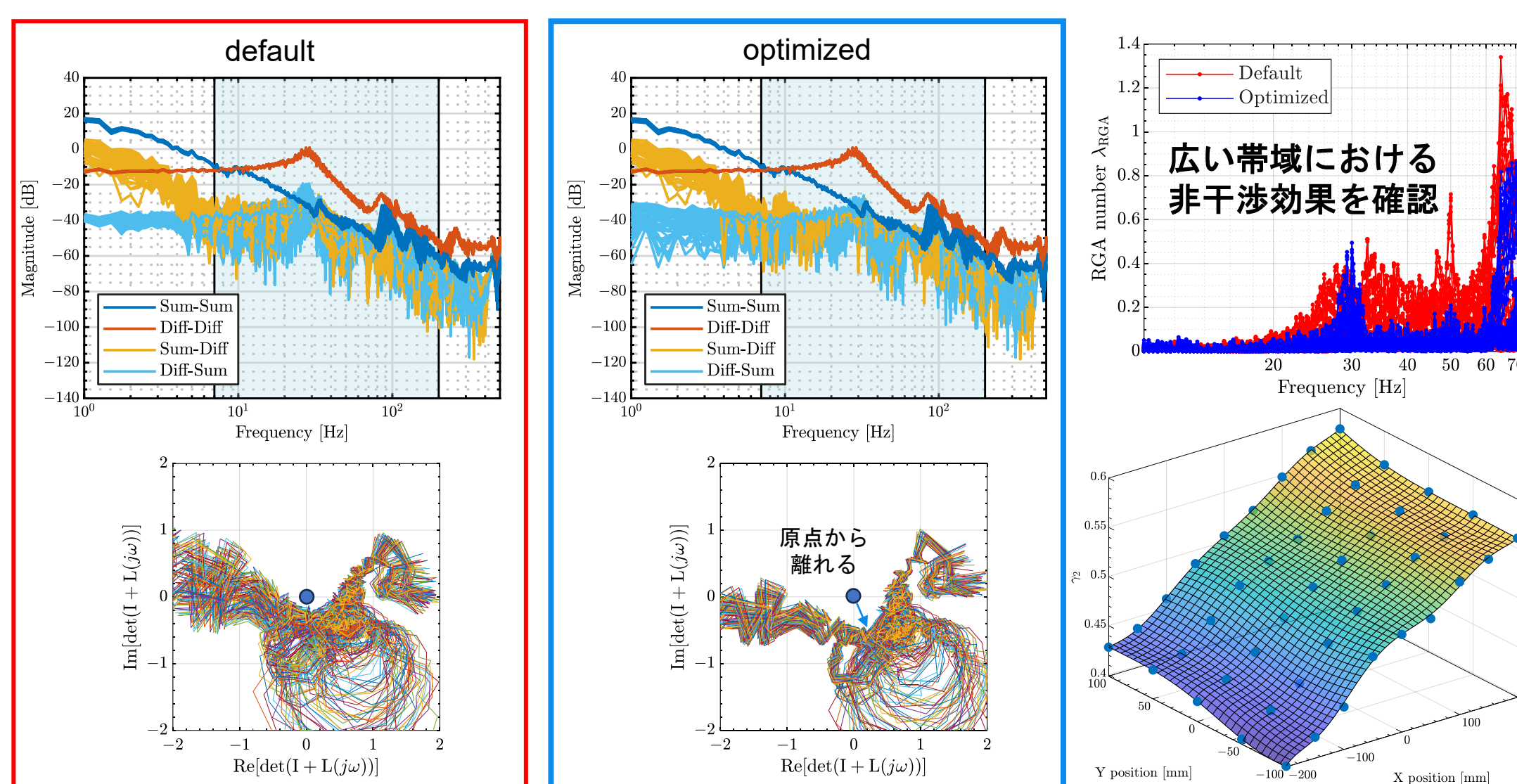
ヘッド位置による動特性変動を伴うMIMOシステム

2個のリニアモータの位置ではなく
機構全体の並進軸と回転軸に座標変換



$$\begin{aligned} \text{入力側} \quad \begin{bmatrix} f_R \\ f_L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 - \gamma \\ 1 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{sum}} \\ u_{\text{diff}} \end{bmatrix} \\ &= T_1(\gamma(\rho)) \\ \text{出力側} \quad \begin{bmatrix} y_{\text{sum}} \\ y_{\text{diff}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \gamma & 1 - \gamma \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_R \\ y_L \end{bmatrix} \\ &= T_2(\gamma(\rho)) \end{aligned}$$

仮想的な重心位置を実時間で予測した非干渉化制御



❖ 最適化問題により制御に適した重心位置の存在を示唆

❖ 変換行列を実時間で調整し安定性と非干渉化の改善を確認

最大1Gの加速度を持つ目標軌道に対する整定時間の短縮
異なるヘッド位置, 異なるストロークでの汎用性を確認

今後の展望: LPVフィルタとの統合による効果広帯域化

参考文献

- [1] 佐々木 怜音, 秋間尚輝, 伊藤銀平, 藤原弘, 大西志志, 大西亘, "Iterative Learning Control for MIMO LPV Systems Using Gaussian Process-Based Scheduling of Transformation Matrices", 産業応用部門大会 (2025).
- [2] Reon Sasaki, Naoki Akima, Gimpei Ito, Hiroshi Fujiwara, Hisashi Ooto, Wataru Ohnishi, "Real-Time Tuning of Transformation Matrices for Decoupling Control in Dual-Drive Stage Systems Using Gaussian Process", IEEE International Conference on Mechatronics, Wollongong, Australia, 2025, pp. 1-6

