

残留振動を生じない 準最短時間位置決め制御

公立諏訪東京理科大学 工学部 機械電気工学科
教授 星野 祐

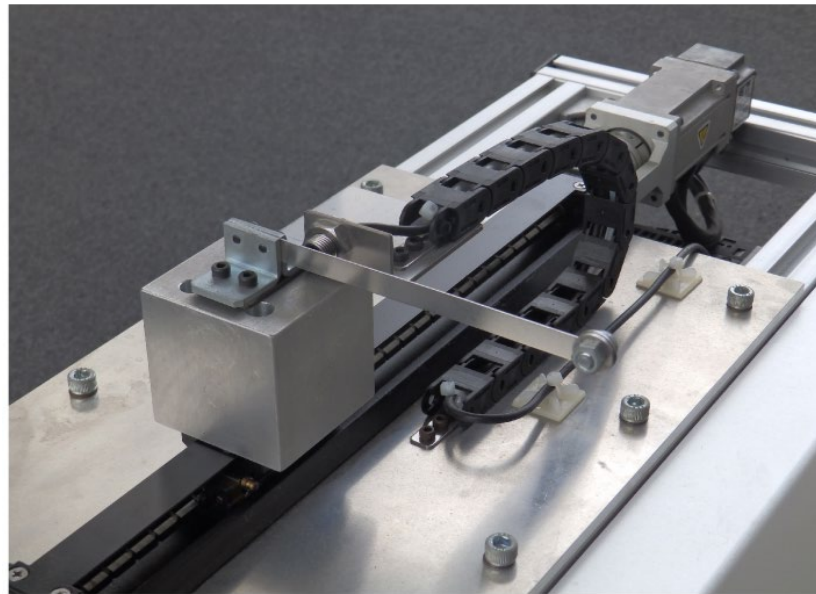
2026年2月19日

本技術が解決しようとする課題 (1/2)

柔軟な位置決め機構の高速位置決め ⇒ 残留振動の抑制



直動位置決め機構



柔軟梁先端のおもり

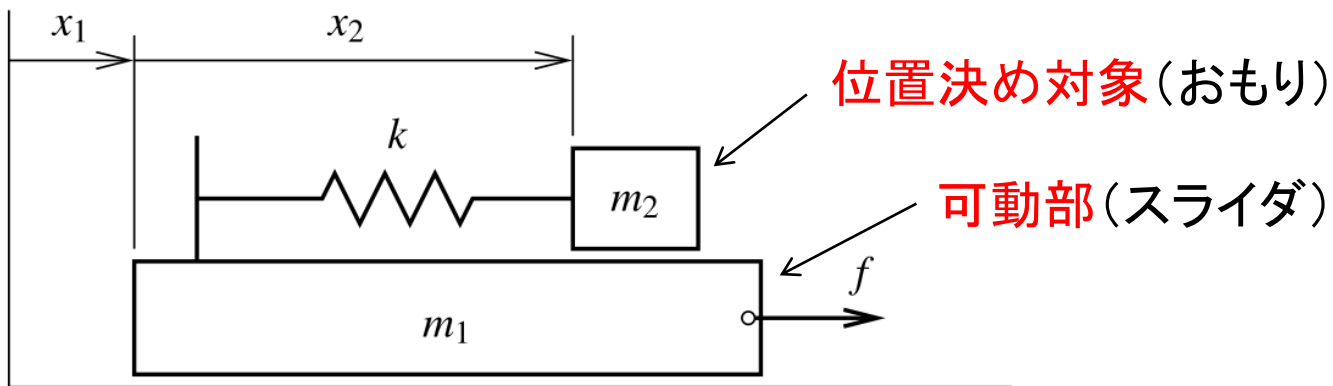
x_1 スライドの変位

x_2 おもりの変位

スライドの制約

v_T 速度の最大値

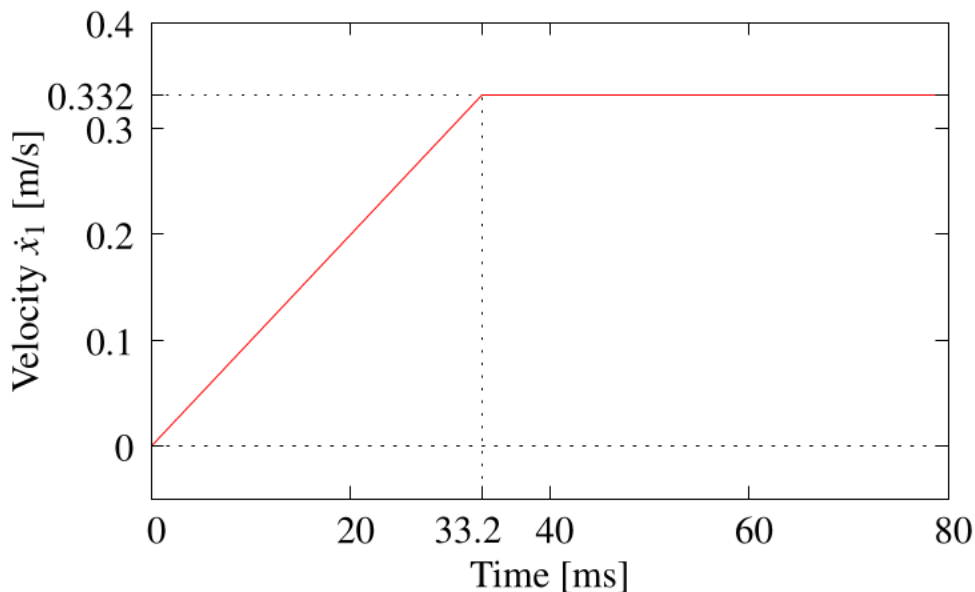
a_{max} 加速度の最大値



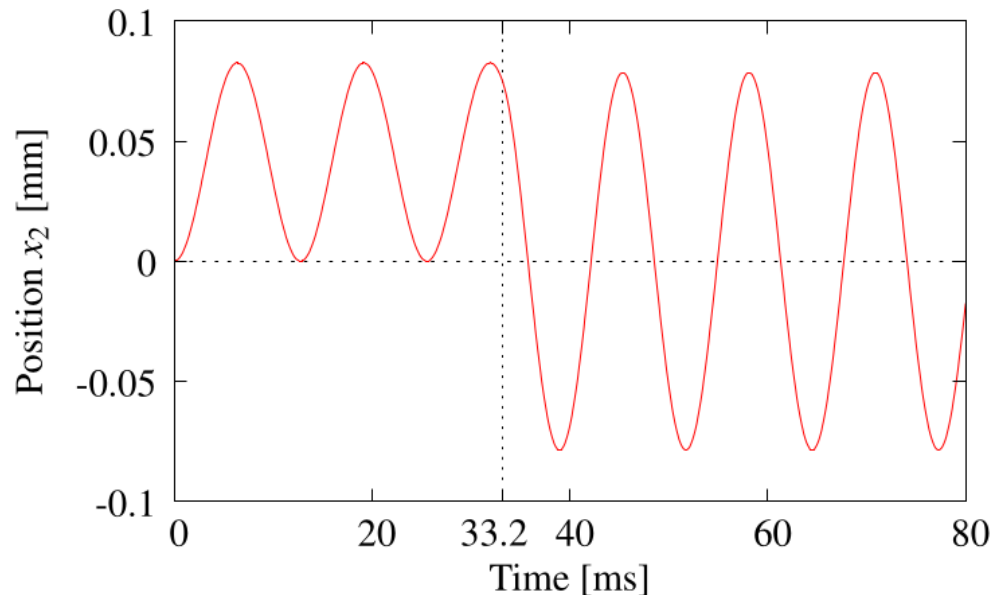
振動系としてモデル化

本技術が解決しようとする課題 (2/2)

単なる台形速度軌道では残留振動を生じる



スライダの速度(加速)



おもりの変位

おもり振動の原因はスライダの加速度

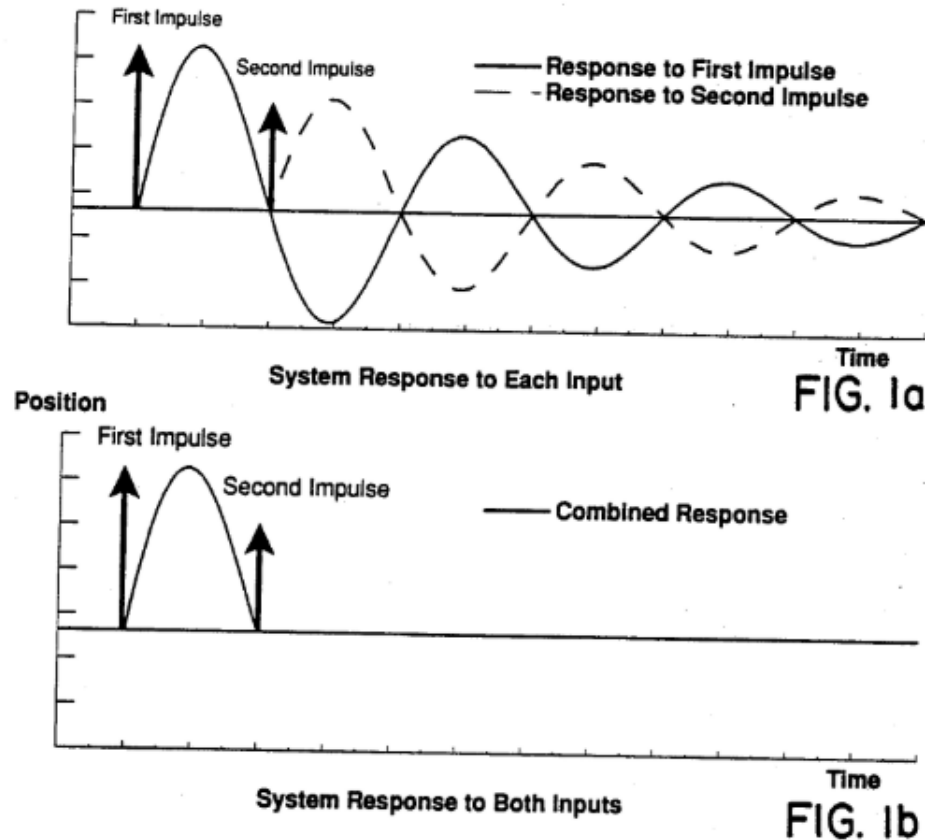
$$\ddot{x}_2 + \omega_n^2 x_2 = -\ddot{x}_1, \quad \omega_n := \sqrt{\frac{k}{m_2}}$$

基本的なアイデア: スライダを「うまく」加速して残留振動を抑制する

従来技術(1)とその問題点

入力整形法 (Input Shaping; US4916635A)

U.S. Patent Apr. 10, 1990 Sheet 1 of 7 4,916,635

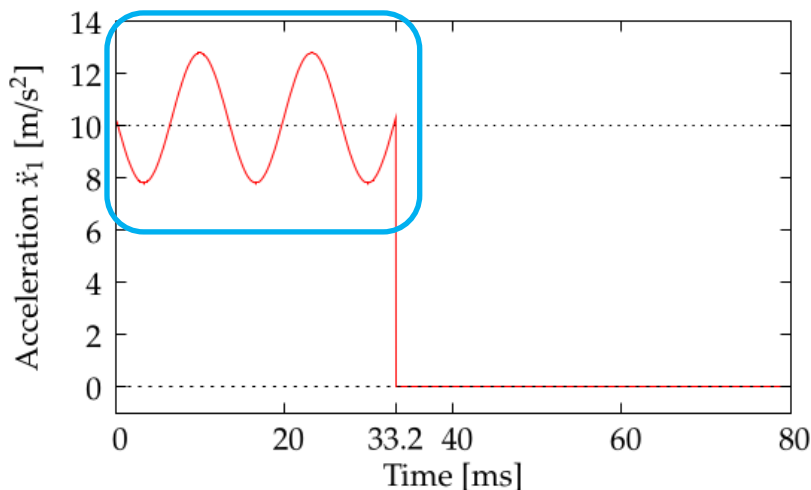


加速を2度に分けて重ねる (Input Shaper との畳み込み)

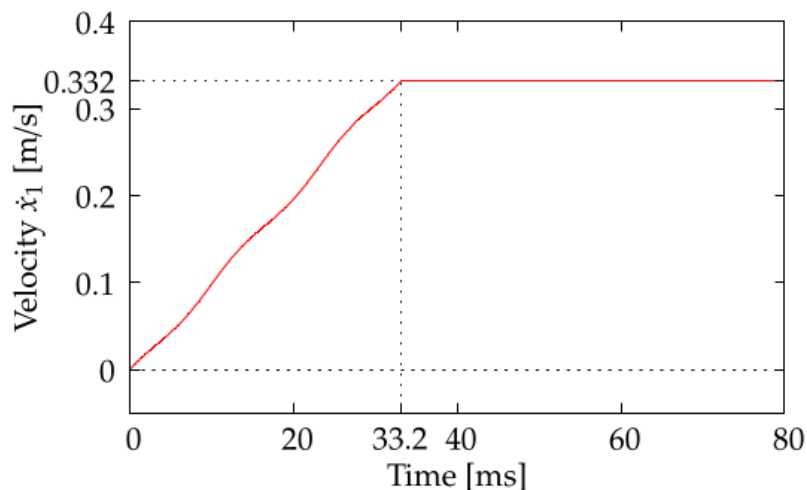
- どんな加速度信号にも対応
- × 加速度の切り替え回数が多い

従来技術(2)とその問題点

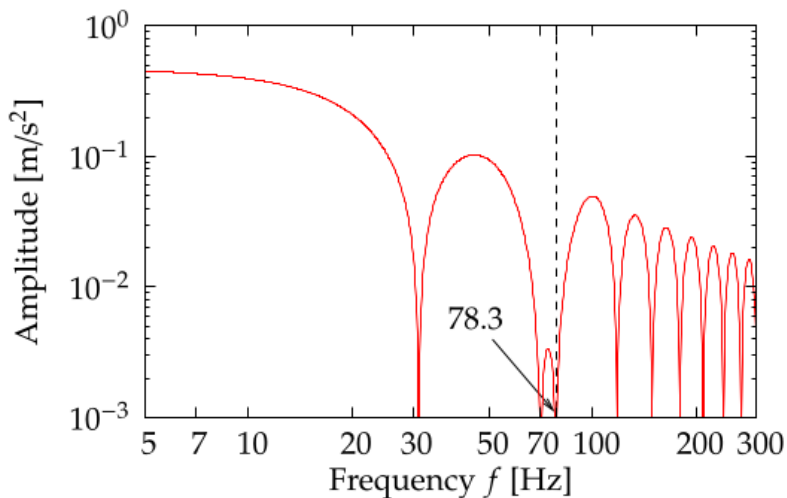
周波数整形法 (Spectrum Shaping; 特許第5710367号)



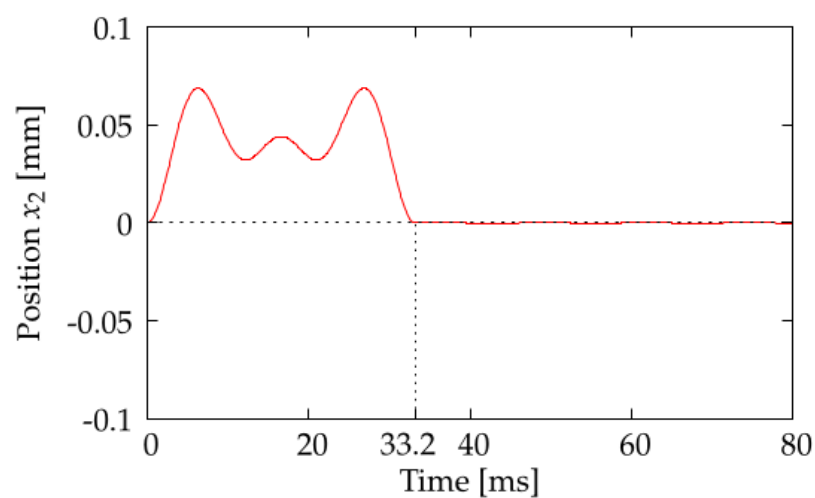
スライダの加速度



スライダの速度(加速)



加速度の振幅スペクトル



おもりの変位

× 加速度波形が複雑、最大加速度を超過(最大値を指定できない)

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術は**加法的**に加速度軌道を構築

Input Shaper との畳み込み
基底となる三角関数の重ね合わせ



最短時間問題が扱いにくい

- 本技術は**減法的**に加速度軌道を構築

最短時間軌道を部分的に整形

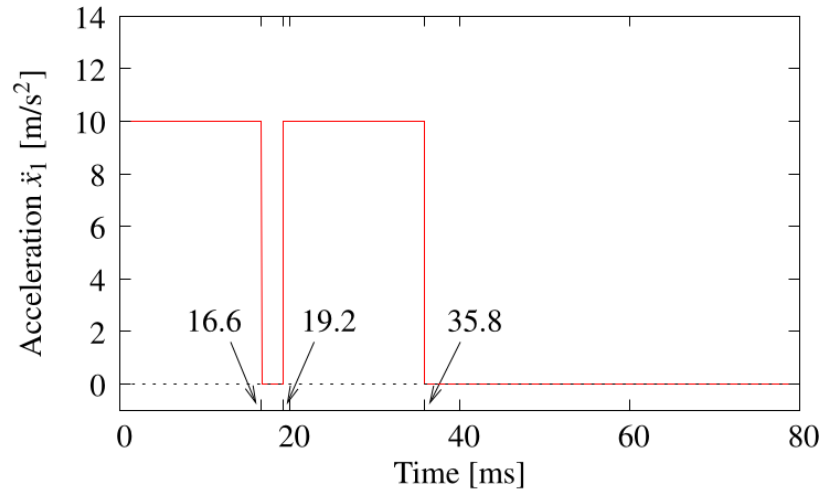


(準)最短時間性を有する

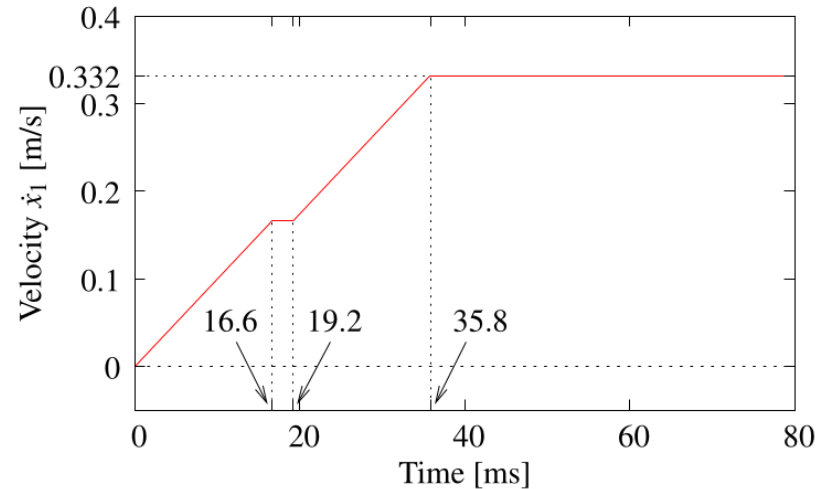
- 従来技術に比べて**タクトタイム**が短縮される
- 周波数領域の手法で**減衰振動系の制振軌道**を設計できる

実施例1：非減衰系の制振加速 (1/2)

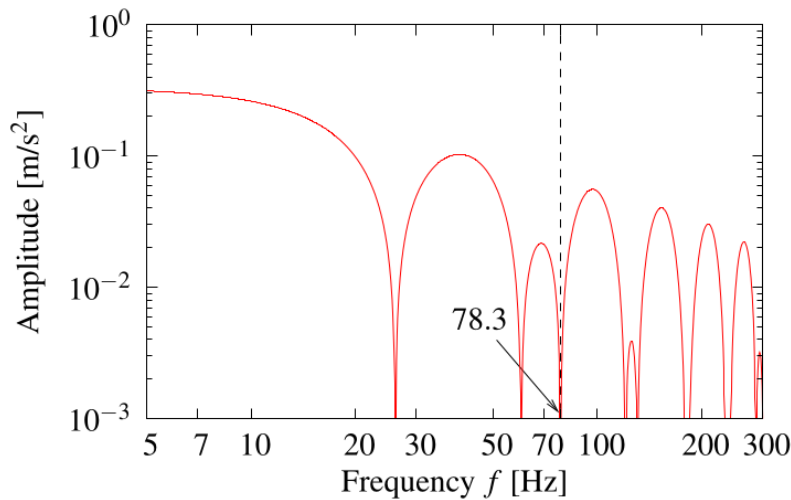
常に加速度の最大値を使う； **ただし途中で一旦加速をやめる**



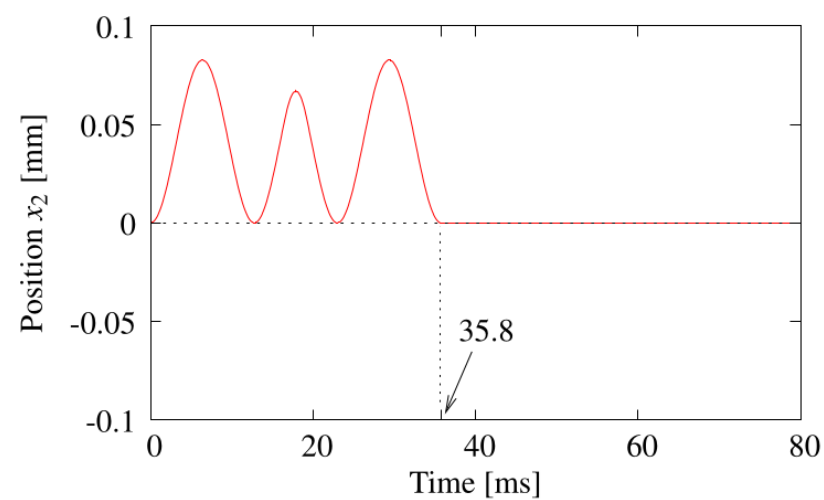
スライダの加速度



スライダの速度(加速)



加速度の振幅スペクトル



おもりの変位

最短加速時間となるような、加速をやめる時刻とその持続時間

実施例1: 非減衰系の制振加速 (2/2)

定理 4.2 (最短時間に準じる周波数整形軌道; 終端速度指定). パラメータを

$$\begin{cases} T = \frac{v_T}{a_{max}}, \\ T_1 = \frac{T}{2}, \\ \Delta T = \frac{1}{\check{f}_1} \left(m + \frac{1}{2} \right) - \frac{T}{2} \end{cases}$$

とした加速度軌道 (12) は, 境界条件 (4) と振幅スペクトル条件 (13) を満たす.

$$m = \left\lceil \frac{\check{f}_1 T - 1}{2} \right\rceil.$$

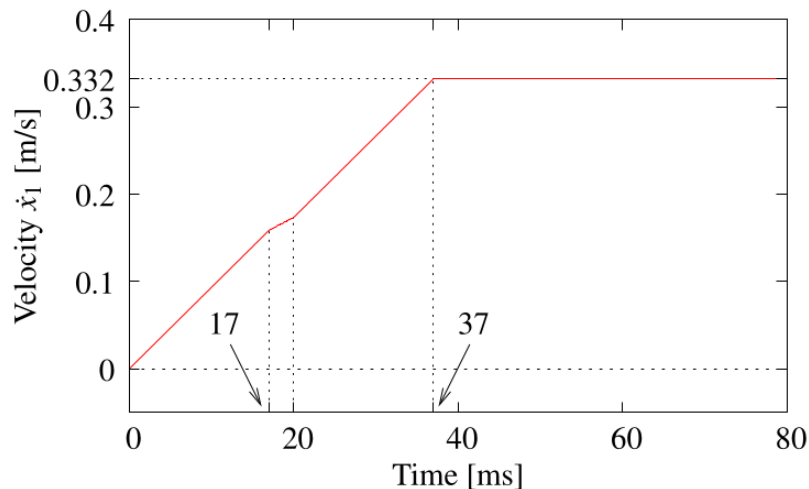
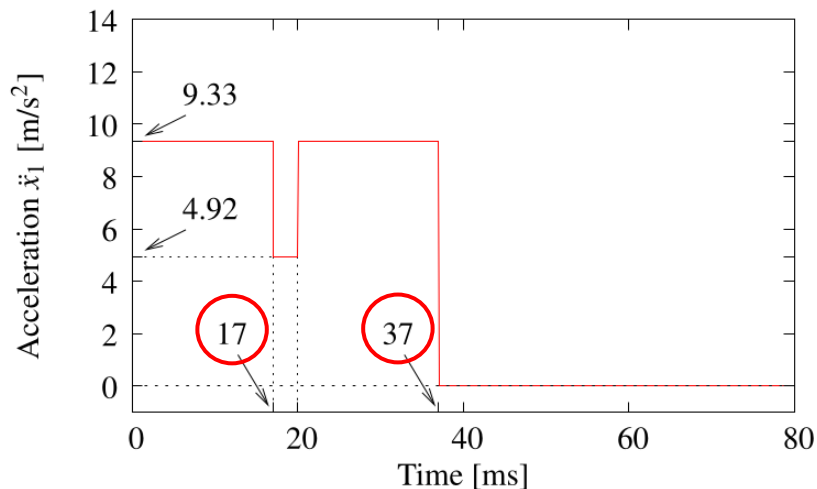
星野、松木、上田: 非減衰系の準最短時間制振位置決め制御、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021.

- 非減衰系の場合は解析解(容易に計算できる解)がある
- 制振位置決めの場合も解が得られている

Hoshino and Fujiwara, Time-Suboptimal Trajectories for Vibration-Free Positioning of Undamped Flexible System, IEEE IECON2022.

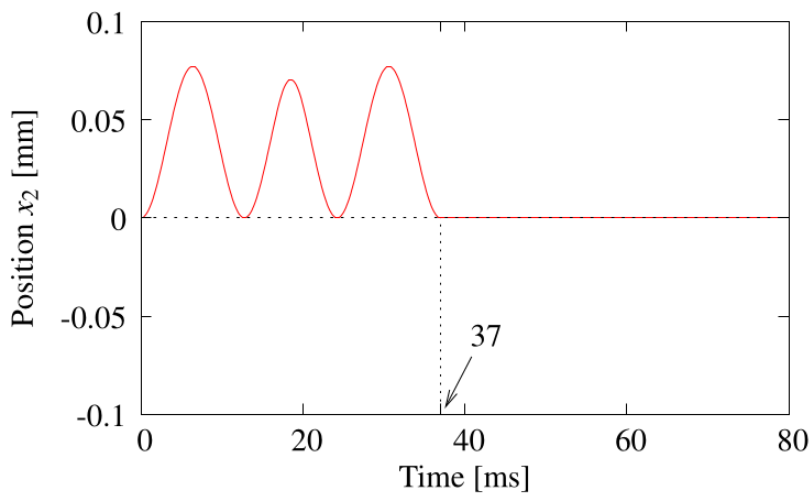
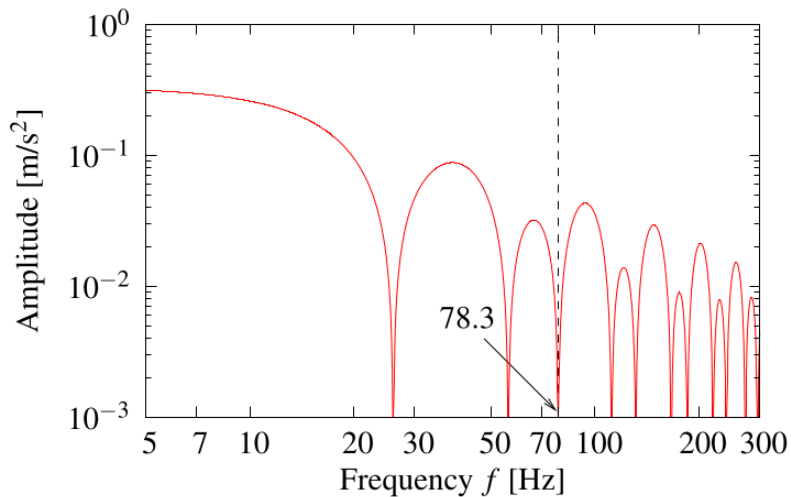
実施例2: 離散時間制御での実装 (1/2)

加速度の切り替え時刻が、離散時間制御の制御周期の整数倍



スライダの加速度

スライダの速度(加速)



加速度の振幅スペクトル

おもりの変位

実施例2: 離散時間制御での実装 (2/2)

定理 4.3 (離散時間の準最短時間周波数整形軌道; 終端速度指定). パラメータを

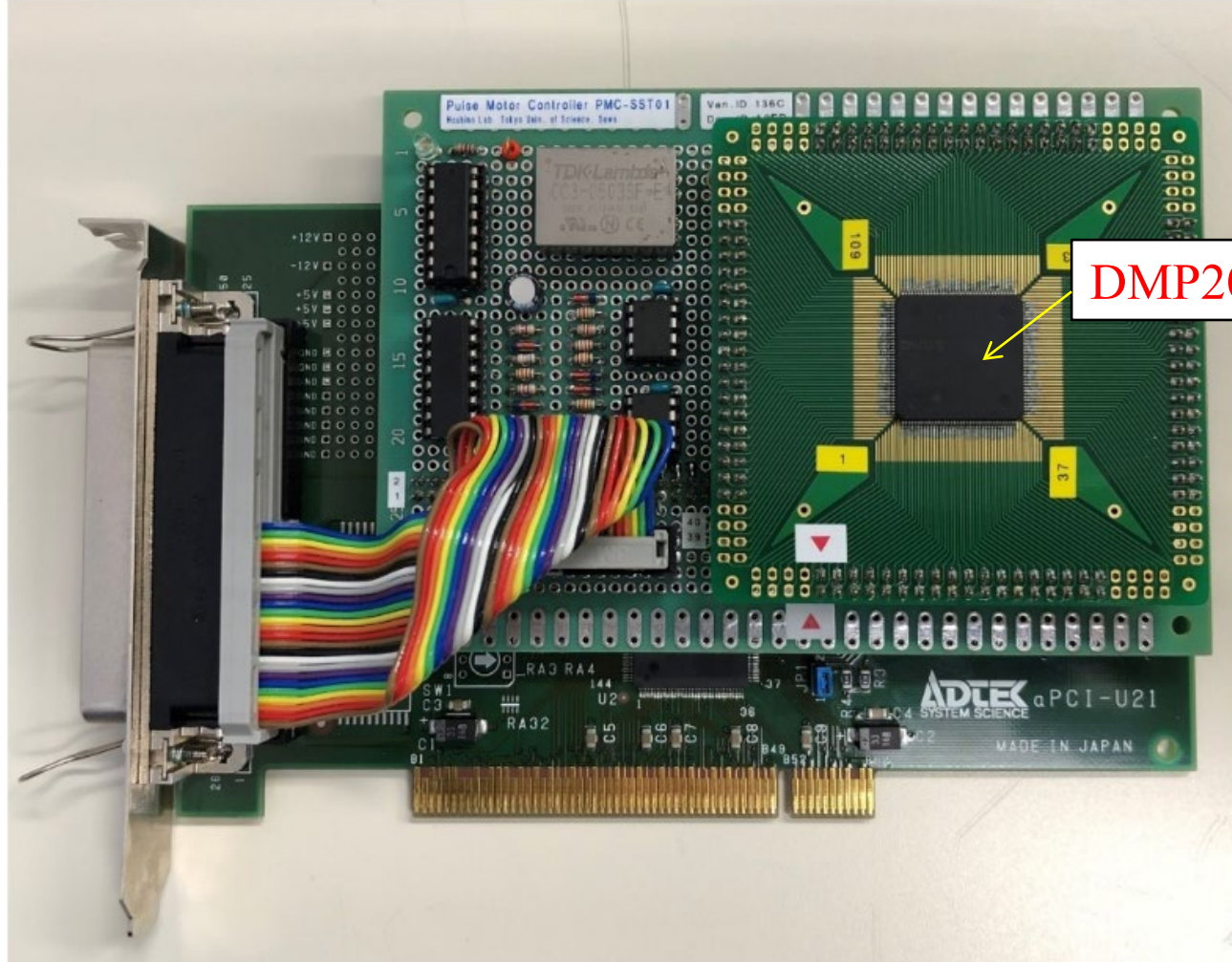
$$\left\{ \begin{array}{l} T = 2 \left[\frac{v_T}{2a_{max}\Delta t} \right] \Delta t, \\ \Delta T = \left[\frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{1}{\check{f}_1} \left(m + \frac{1}{2} \right) - \frac{T}{2} \right\} \right] \Delta t, \\ a_1 = \frac{v_T - a_2\Delta T}{T}, \\ a_2 = \frac{v_T \left\{ \sin \frac{\check{\omega}_1(T + \Delta T)}{2} - \sin \frac{\check{\omega}_1\Delta T}{2} \right\}}{\Delta T \sin \frac{\check{\omega}_1(T + \Delta T)}{2} - (T + \Delta T) \sin \frac{\check{\omega}_1\Delta T}{2}} \end{array} \right.$$

としたときの加速度軌道 (18) は, 境界条件 (19) と振幅スペクトル条件 (20) を満たす.

星野、松木、上田: 非減衰系の準最短時間制振位置決め制御、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021.

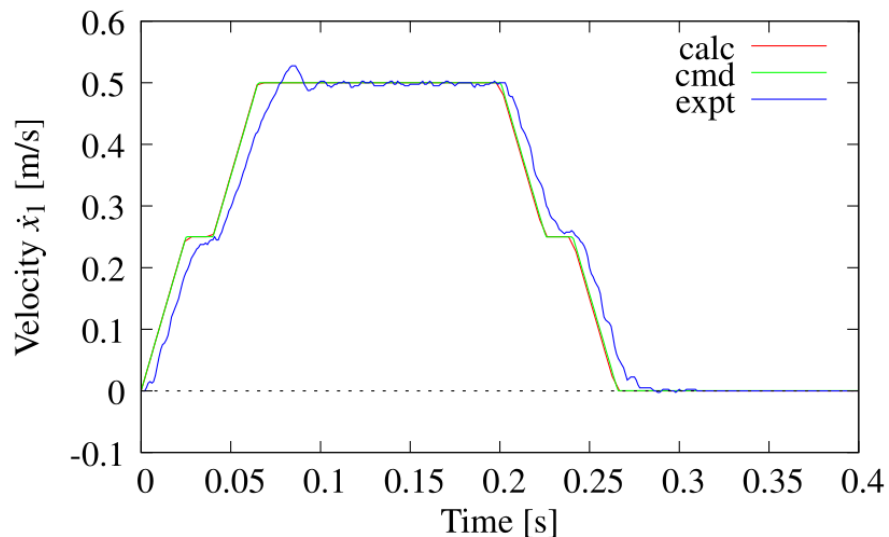
- 時間を制御周期の整数倍にして、加速度の値を調整
- 制振加速の他、**制振位置決め**の場合も解が得られている

実施例3:パルス列指令での実装 (1/2)

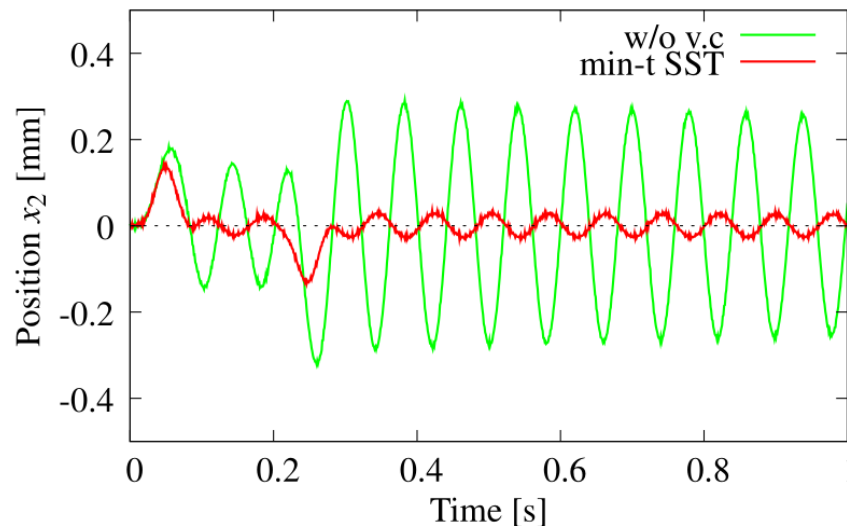


- 通常、組込みコントローラ上でプログラムを実行して軌道生成
- 任意形状を指定しパルス列指令を生成 (DMP2042, MYCOM)

実施例3:パルス列指令での実装 (2/2)

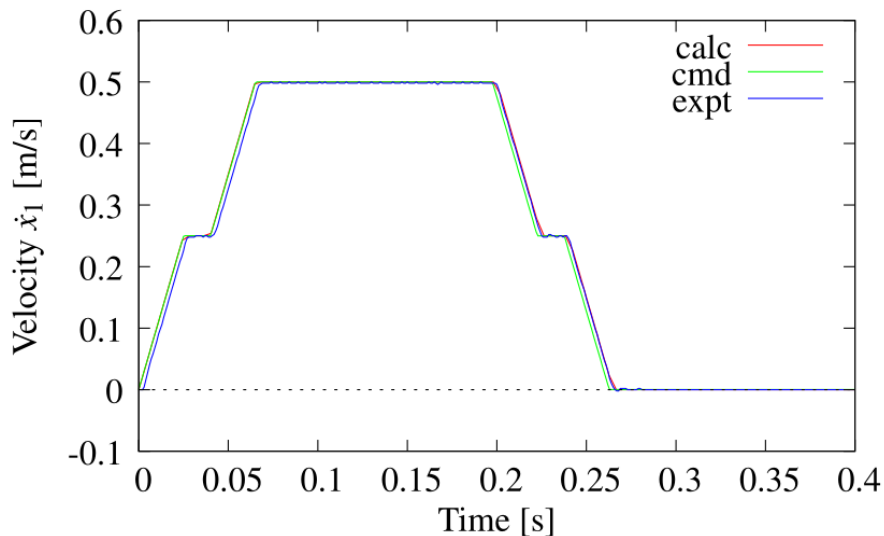


スライダの速度

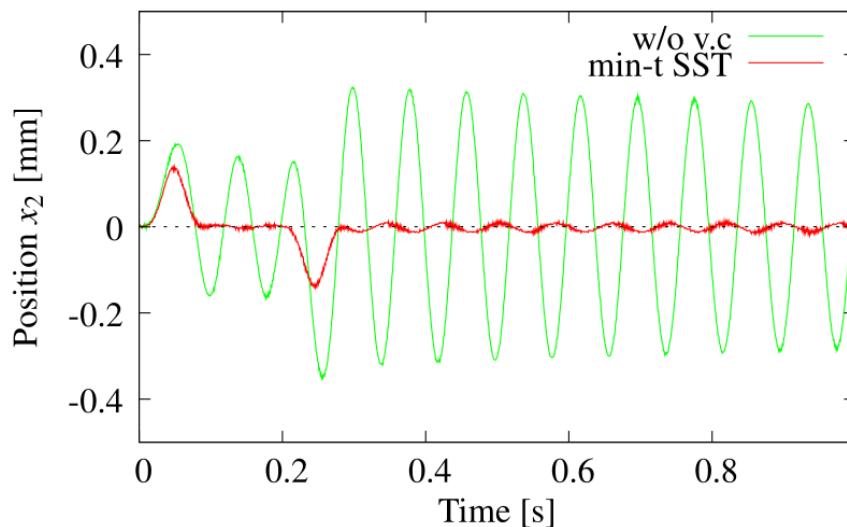


おもりの変位

ステッピングモータを使った実装(位置のパルス列指令)



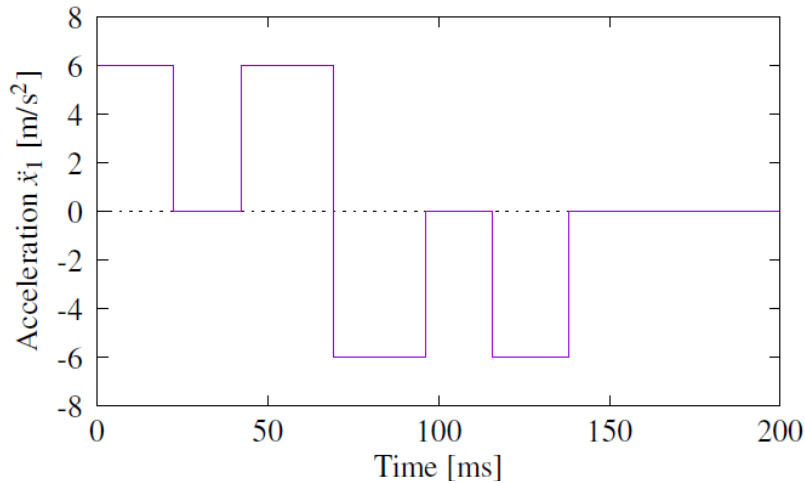
スライダの速度



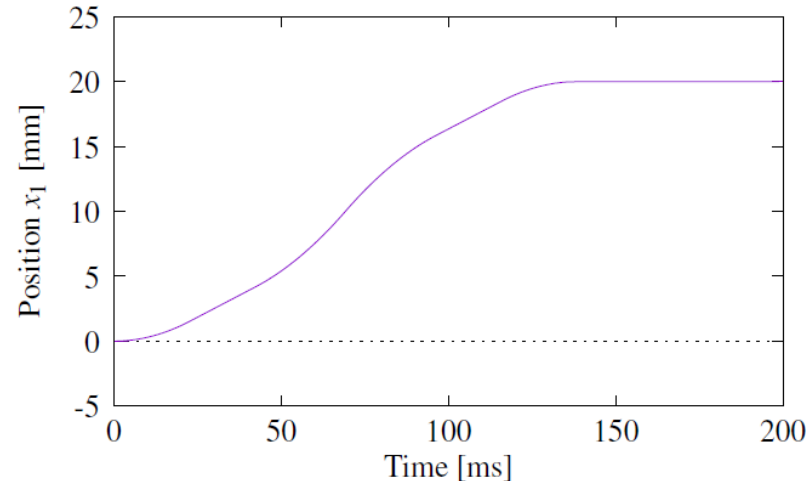
おもりの変位

ACサーボモータを使った実装(位置のパルス列指令)

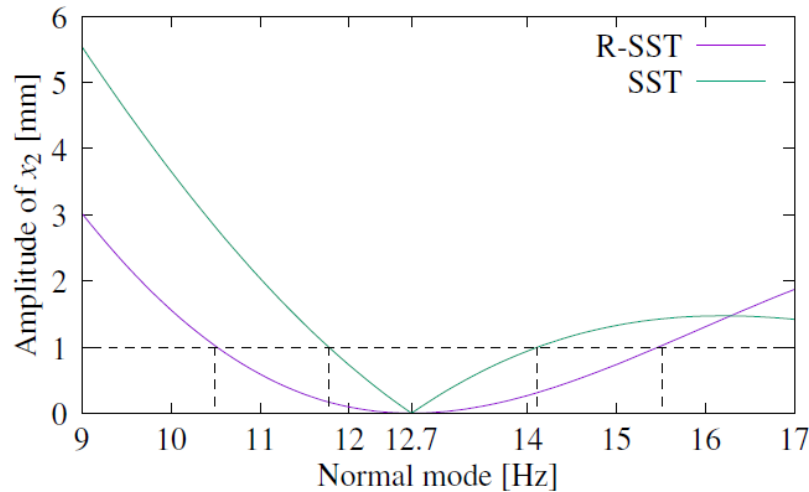
実施例4: 固有振動数変動への対応



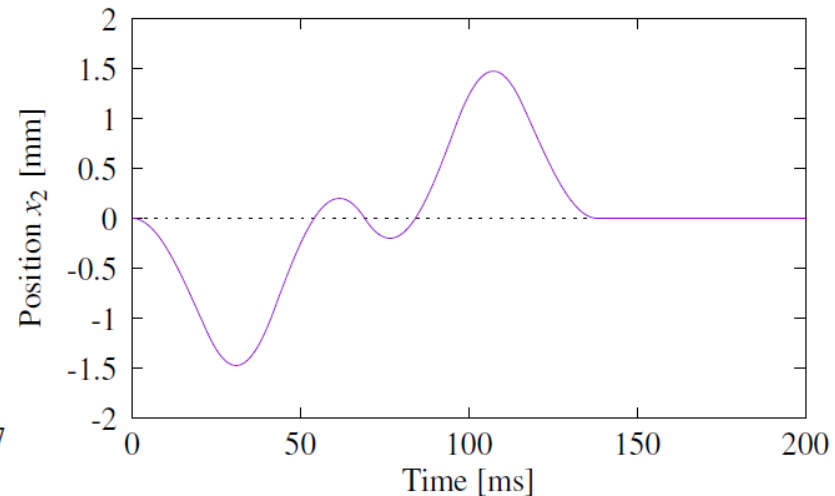
スライダの加速度



スライダの位置



加速度の振幅スペクトル



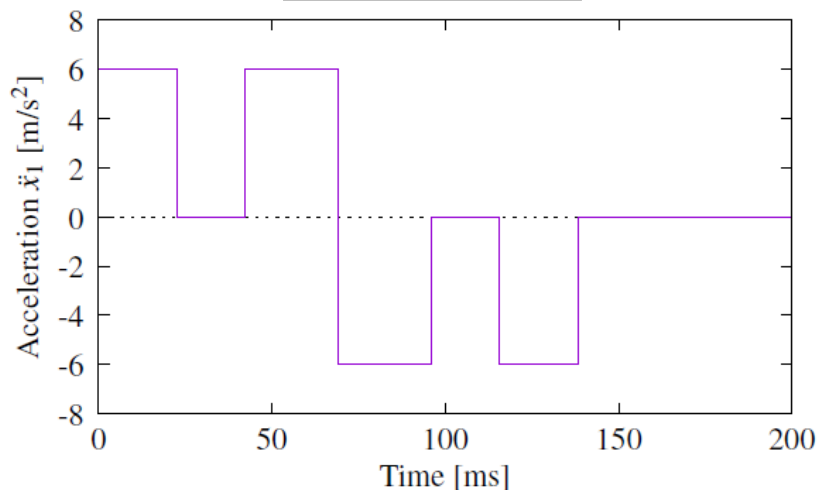
おもりの変位

- 加速度の**振幅スペクトル**が**広い範囲で抑制**されている

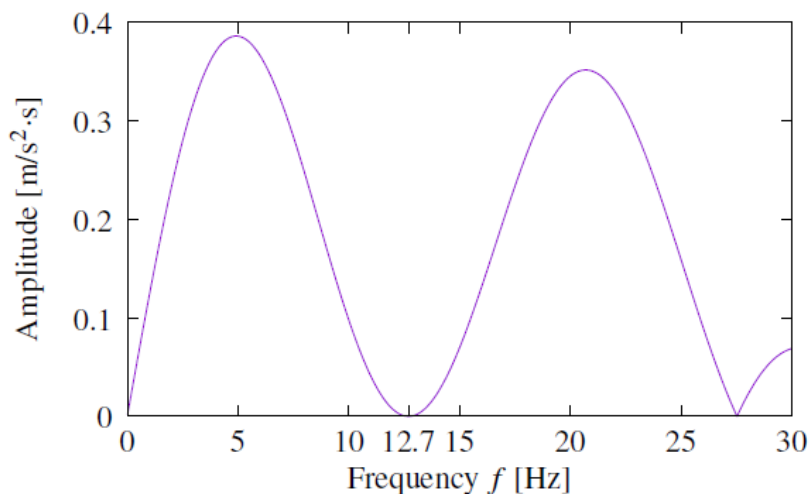
星野、青山、藤原: 非減衰1自由度振動系のロバスト準最短時間制振位置決め制御、日本機械学会「運動と振動の制御シンポジウム」(MoViC2023).

実施例4 (補足): 提案技術の特長

提案技術

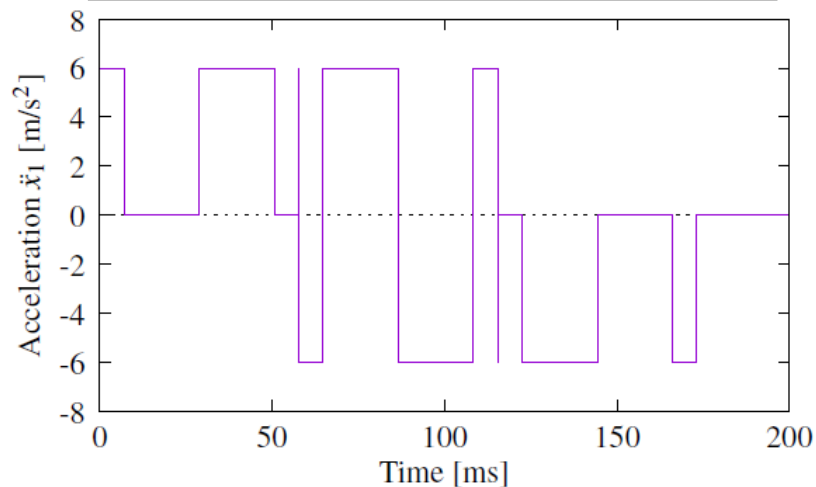


スライダの加速度

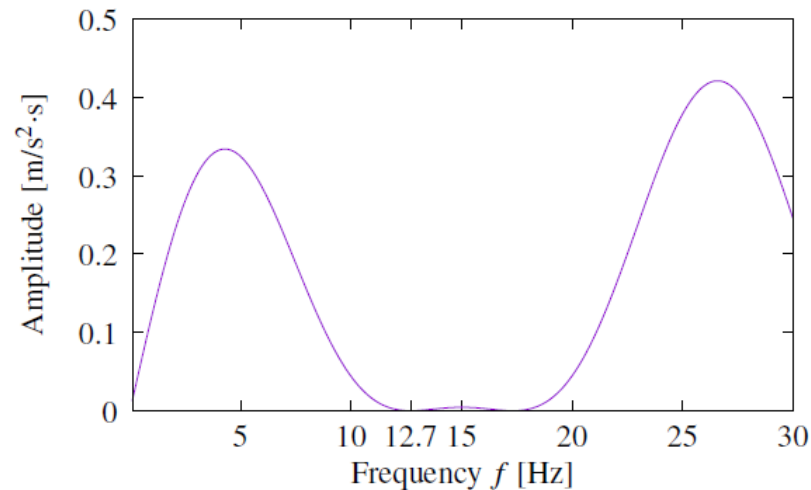


加速度の振幅スペクトル

Input Shaper (UM-ZVD)



スライダの加速度



加速度の振幅スペクトル

- 短時間で、加速度の切り替え回数が少ない
- △ ロバスト性

実施例5: 減衰振動系への対応

- 非減衰系が残留振動を生じない、加速度軌道の条件

$$\int_0^T \ddot{x}_1(t) e^{-i\omega_n t} dt = 0$$



- 減衰系が残留振動を生じない、加速度軌道の新たな条件

定理 4.1 (増幅フーリエ変換を用いた加速度軌道の振幅スペクトル条件).

$$\int_0^T \ddot{x}_1(t) e^{(\zeta - j\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t} dt = 0$$

を満たす加速度軌道 $\ddot{x}_1(t)$ は減衰振動系の位置決め後の残留振動を抑制する

茂木、星野: 減衰振動系の制振位置決め問題に対する増幅フーリエ変換を用いた解析的解法、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2024.

- 「新規性に富み、優秀な発表」日本機械学会若手優秀講演フェロ一賞受賞

- 前半と後半の加速時間が異なる

$$\ddot{x}_1(t) = \begin{cases} a_{max} & (0 \leq t < T_1 + \delta_1), \\ 0 & (T_1 + \delta_1 \leq t < T_1 + \delta_1 + \Delta T + \delta_2), \\ a_{max} & (T_1 + \delta_1 + \Delta T + \delta_2 \leq t < T_a + \Delta T + \delta_2 =: T), \\ 0 & (T_a + \Delta T + \delta_2 \leq t) \end{cases} \quad (17)$$

- 加速時間の修正量を与える定理

定理 4.2 (増幅フーリエ変換を用いた制振加速度軌道の近似解). 加速度軌道(17)の時刻のパラメータ δ_1, δ_2 を ζ についての n 次の多項式

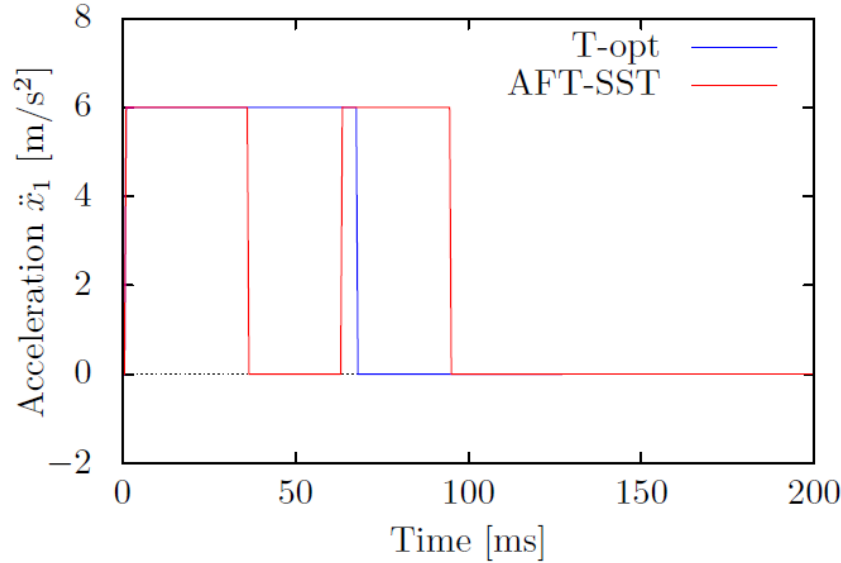
$$\delta_1 = \alpha_1 \zeta + \alpha_2 \zeta^2 + \dots + \alpha_n \zeta^n \quad (18a)$$

$$\delta_2 = \beta_1 \zeta + \beta_2 \zeta^2 + \dots + \beta_n \zeta^n \quad (18b)$$

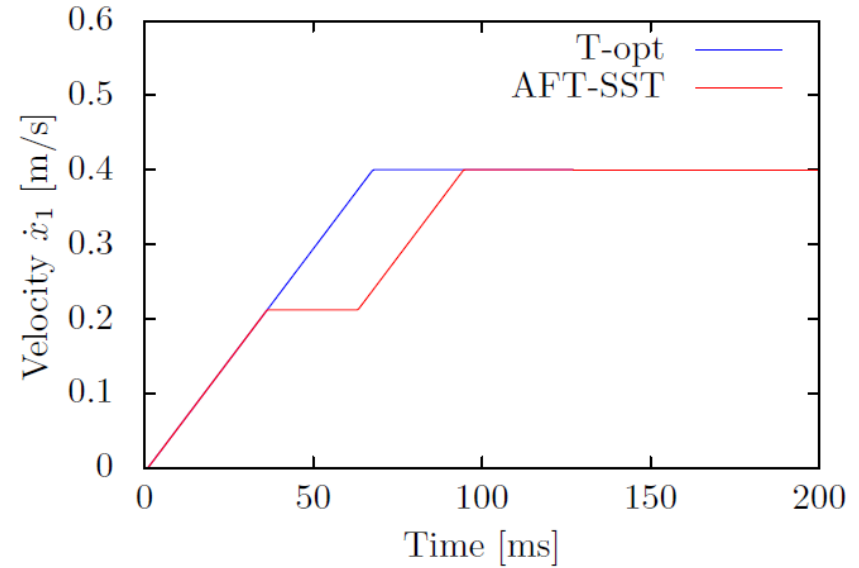
で表す. このとき減衰比 ζ とパラメータ δ_1, δ_2 の値が1に比べて十分に小さいとすると $k (= 1, 2, 3, \dots, n)$ 次の係数 α_k, β_k は定理3.1のパラメータ $T_a, T_1, \Delta T, m$ と系の固有振動数 f_n を用いて以下のように表せる.

- (18a), (18b) の係数 α と β は漸化式の形で与えられ、 δ_1, δ_2 の近似値が解析的に計算できる

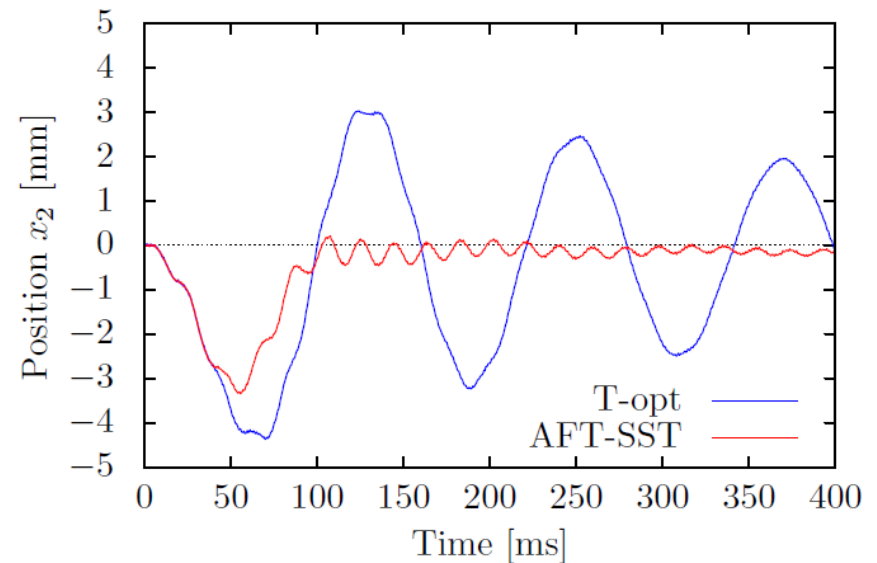
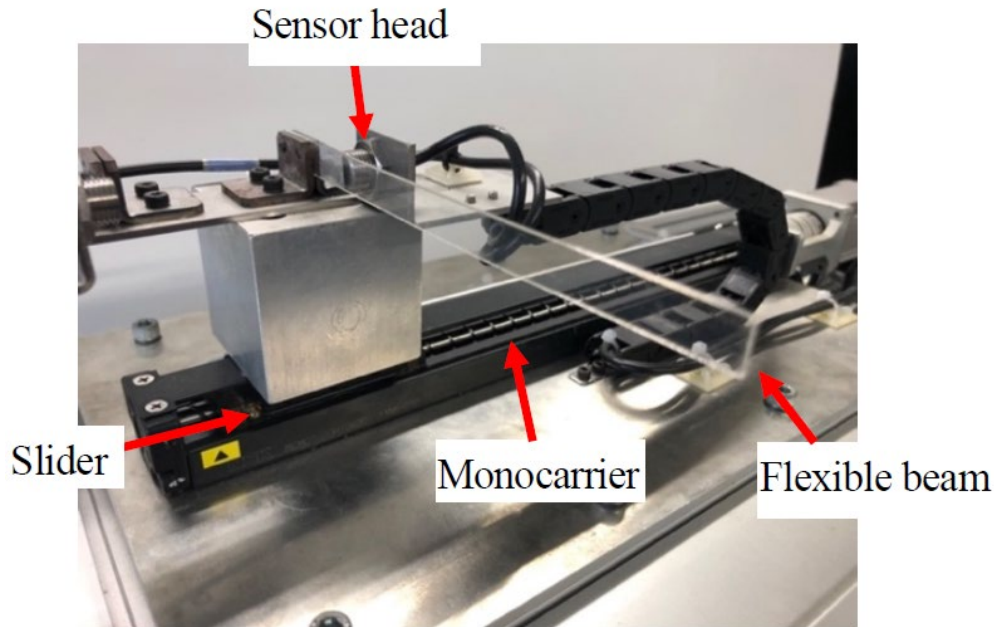
実施例6: 減衰振動系の制振加速 (2/2)



スライダの加速度

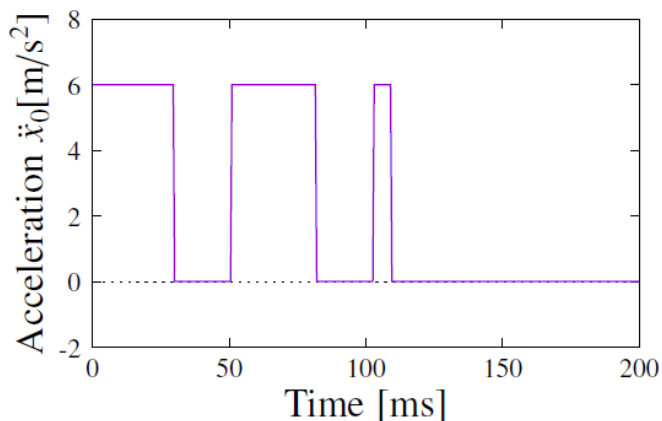
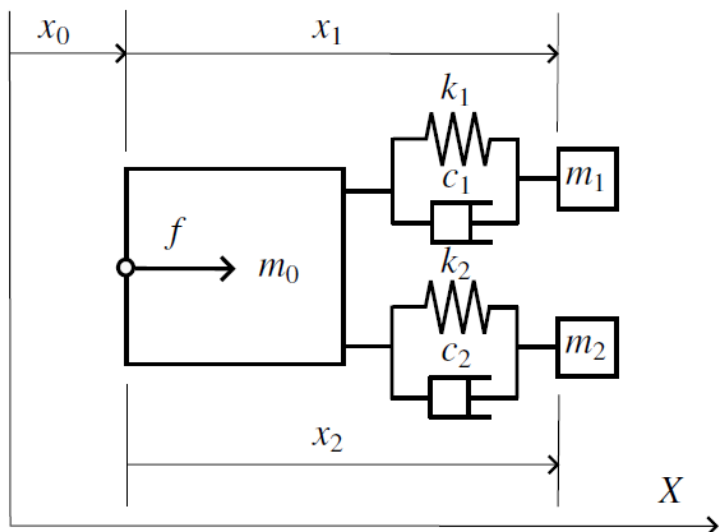


スライダの速度(加速)

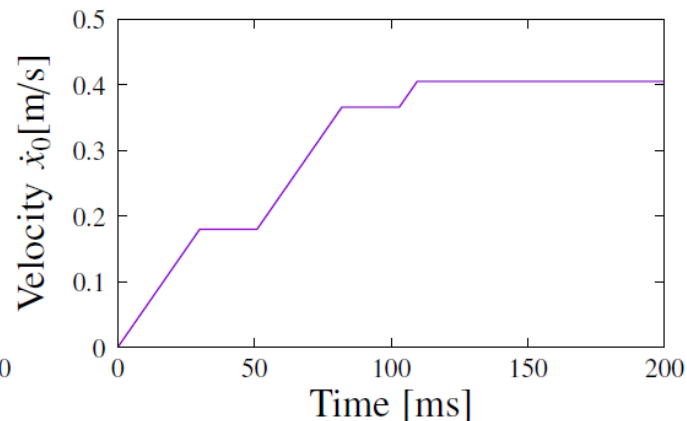


柔軟梁(スチロール樹脂板)の変位

実施例7: 2モード減衰振動系



スライドの加速度

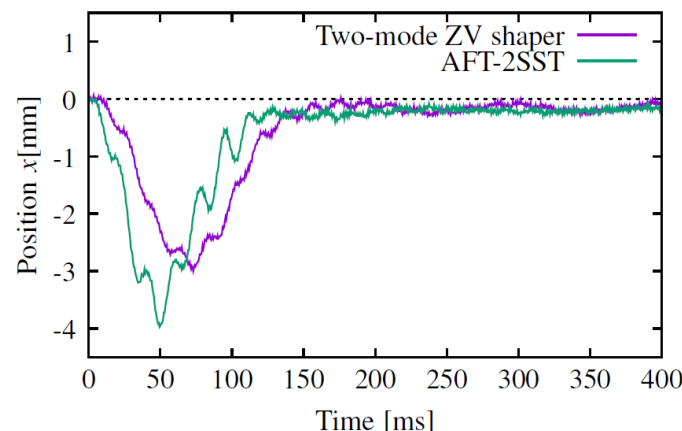
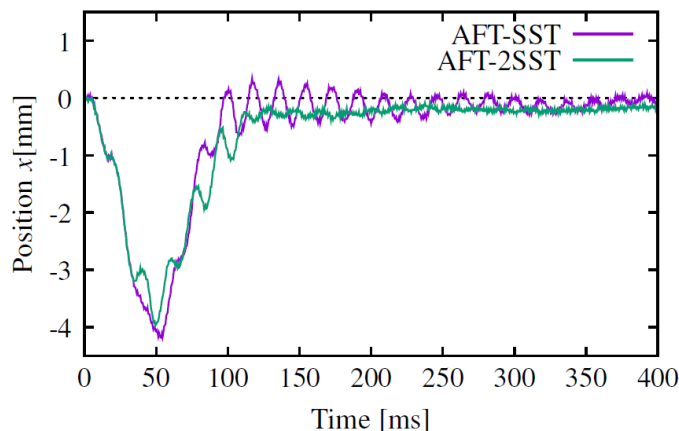


スライドの速度(加速)

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 + 2\zeta_1 \omega_1 \dot{x}_1 = -\ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 + 2\zeta_2 \omega_2 \dot{x}_2 = -\ddot{x}_0 \end{cases}$$

増幅フーリエ変換規範(2つ)

$$\begin{cases} \int_0^T \ddot{x}_0(t) e^{(\zeta_1 - j\sqrt{1-\zeta_1^2})\omega_1 t} dt = 0 \\ \int_0^T \ddot{x}_0(t) e^{(\zeta_2 - j\sqrt{1-\zeta_2^2})\omega_2 t} dt = 0 \end{cases}$$



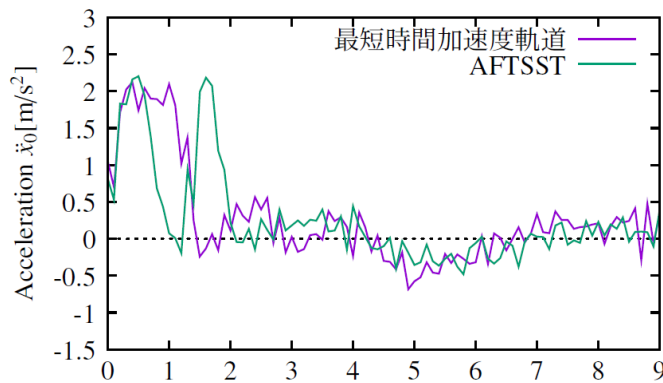
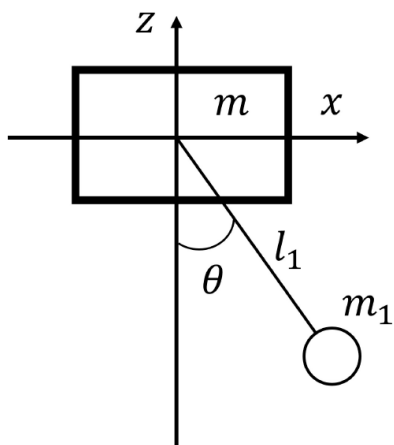
柔軟梁(スチロール樹脂板)の変位

- 2つの振動モードが抑制されている
- ZV shaper よりも整定時間が短い

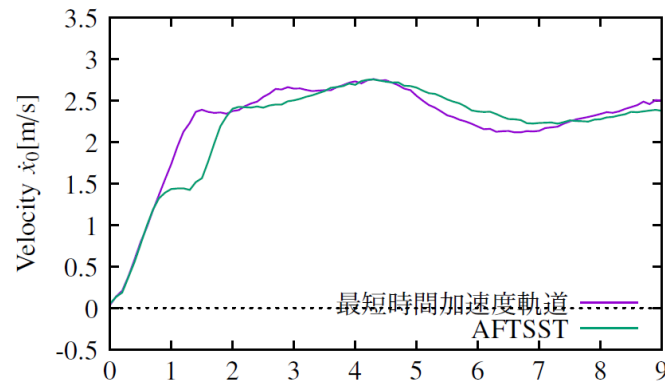
実施例8: 吊り下げ搬送物資の制振



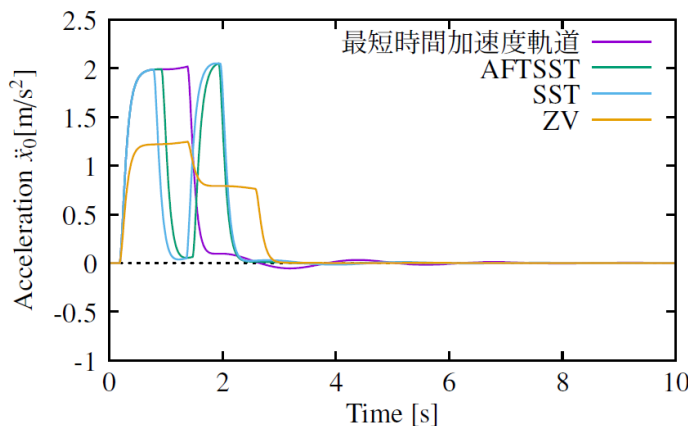
実験用クワッドコプター



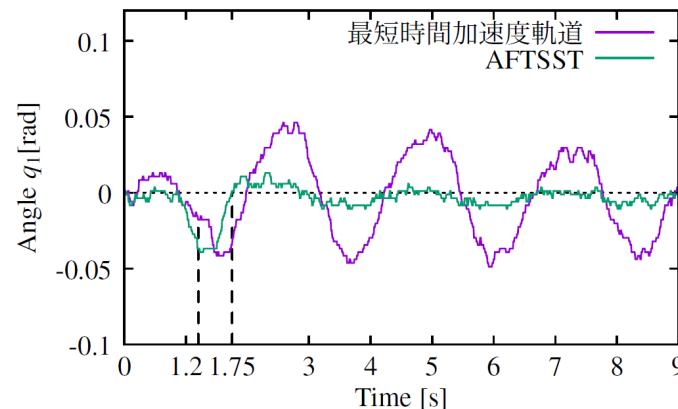
機体の水平加速度(実験)



機体の水平速度(実験)



水平加速度(シミュレーション)



吊り荷の変位(実験)

- 2回の加速により吊り荷の振動が抑制される

松野:クワッドコプターの動力学モデルに基づく吊り下げ搬送物資の振動制御、2025年度修士論文、工学・マネジメント研究科 工学・マネジメント専攻、公立諏訪東京理科大学大学院、2026.

想定される用途

- 本技術は、加速度の切り替えが少なく、静粛な、減衰系を含む振動系の制振動位置決めに適用可能
- 高速位置決めが要求される用途、半導体製造装置をはじめとする生産設備
- 吊り下げ搬送物資の振動制御、ドローンによる搬送、屋内クレーン搬送など

実用化に向けた課題

- 大学研究室レベルの実験では効果を確認した
- 他の制振対象での評価、加速度軌道生成部の実装方法の改善などが必要と思われる
- 設計には対象の固有振動数と減衰係数の情報が必要であり、その取得方法を検討する必要がある

企業への期待

- 柔軟性を持つシステムの高速位置決め制御を必要とする企業と共同研究を実施し、実用性の検証や、新しい制振アルゴリズムの開発などを希望

本技術に関する知的財産権

- ・ 発明の名称 : 可動部制御装置、可動部制御方法及びプログラム
- ・ 出願番号 : 特願2019-138404
- ・ 登録番号 : 特許第7142359号
- ・ 出願人 : 公立大学法人公立諏訪東京理科大学
- ・ 発明者 : 星野 祐

お問い合わせ先

公立諏訪東京理科大学
産学連携センター

TEL 0266-73-1345

E-mail sangaku@admin.sus.ac.jp

Web <https://www.sus.ac.jp>