FRIT を用いた蒸気圧縮式冷凍機のデータ駆動型温度制御

鈴木 元哉^{a,b,*}

Data-driven Temperature Control Based on FRIT for Refrigeration Systems

Motoya Suzuki^{a, b,*}

(Received April 21, 2021; revised June 1, 2021; accepted June 7, 2021)

Abstract

The study of refrigeration systems is attracted topics. Refrigeration is the generation of cooling to maintain a particular product or space at a temperature lower than the ambient temperature. For realizing good control performances, a model-free control is desired. However, a standard PID control may not realize good control performance since refrigeration systems have strong nonlinearity. In this study, we proposed a temperature control based on Fictitious reference feedback tuning (FRIT). The validity of the proposed method is verified through numerical simulation of PID Benchmark 2018.

キーワード：データ駆動制御，冷凍機，制御系設計，FRIT

Keywords : Data-driven control, refrigeration system, Control system design, FRIT.

1. はじめに

蒸気圧縮式冷凍機は1世紀以上も前から研究されている。蒸気圧縮式冷凍機とは、特定の製品や空間を環境の温度より低い温度へ維持するための冷却システムである。食品保存、化学・プロセス産業、製造プロセス、金属冷蔵、医薬品製造、製氷など、さまざまな用途へ応用されている。現代技術の急速な進歩に伴い、蒸気圧縮式冷凍機は商業ビルや住宅の空間冷却の最も一般的な手段となっている。一方、エネルギー消費量の急激な増加等が問題となり、エネルギー効率のよい温度制御が望まれる。

冷凍機の制御については、PID制御⁽¹⁾、非干渉制御⁽²⁾、最適制御⁽³⁻⁵⁾、モデル予測制御 (MPC) ⁽⁶⁻⁷⁾、ロバスト制御⁽⁸⁻⁹⁾、等が報告されている。しかし、蒸気圧縮式冷凍機は、熱伝達プロセスに起因する強い非線形性を有する。プラントモデルを低次のシステムとして同定しても、モデル誤差の影響にて制御系の性能が劣化することが考えられ

る。また、時定数が非常に長いため、システム同定のための試験に膨大な工数が必要となってしまう。このような議論から、蒸気圧縮式冷凍機にはPID制御のようなモデルフリーな制御が望まれている。

蒸気圧縮式冷凍機のプロセス制御ベンチマーク問題として「Benchmark PID 2018」が報告されている⁽¹⁰⁾。このベンチマーク問題では、蒸気圧縮式冷凍機の詳細なプラントモデルがMATLAB/Simulinkのパッケージとして提供されている。IFAC主催の国際会議として開催された「The 2018 IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control」では、このベンチマーク問題を題材とした様々な制御方法が提案された⁽¹¹⁻¹⁷⁾。提案された方法の中でも、データ駆動型制御は制御器の設計に1回の実験しか必要としないという優れた点を有することが知られている。先行研究では、データ駆動制御の代表的な手法であるVirtual reference feedback tuning (VRFT)⁽¹⁸⁾を適用した事例が報告されている⁽¹⁷⁾。一回の開ループ実験データを取得するだけで閉ループ応答を改善できることが報告されている。一方、VRFTだと開ループ実験データ取得のため、冷凍機の制御を一時的に停止させなければならない。冷凍機の時定数が長いため、実験データ取得に長い時間を要してしまう。空調機向けの冷凍機だと、温度制御が長時間停止してしまうため、空調の快適性が損なわれる可能性がある。大規模プラント向けの冷凍機だと、冷凍機の稼働停止による膨大なコストが懸

*Corresponding author. E-mail: m-suzuki@iaec.ac.jp, s2042009@edu.cc.ucc.ac.jp

a (株)いすゞ中央研究所

〒252-0881 神奈川県藤沢市土棚 8

Isuzu advanced engineering center, Ltd.

8, Fujisawa-shi Tsuchidana, Kanagawa-ken 252-0881, Japan

b 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

Graduate School of Informatics and Engineering, The University of elector-communications.

1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

念される。実用的な面から考えると、開ループ実験を必要としない手法が望ましい。オンラインでPIDゲインを更新できれば、冷凍機の稼働停止による諸問題を起こすことなく、所望の制御応答を実現できる。

オンライン型データ駆動型制御法の一つとして、Fictitious Reference Feedback Tunings(FRIT)^(19,20)をベースとしたデータ駆動型制御が提案されている。若佐らは、標準的なFRITとRLSのアルゴリズムを応用したオンラインのデータ駆動制御(FRIT-RLS)を提案している⁽²¹⁾。制御対象に強い非線形性がある場合や、大きな外乱が発生した場合でも、所望の開ループ応答を得ることができる。FRIT-RLSの応用として、飛行体⁽²²⁾、車両⁽²³⁾、トランスミッション⁽²⁴⁾等のさまざまな非線形システムへの適用事例が報告されている。蒸気圧縮式冷凍機へFRIT-RLSをベースとした温度制御を適用すれば、良好な制御性能が得られる可能性がある。オンラインでPIDゲインを更新できるため、開ループ実験による冷凍機の稼働停止による諸問題を起こすこともないと考えられる。

本研究では、FRIT-RLSを用いた蒸気圧縮式冷凍機の温度制御系を設計した。提案手法をベンチマーク問題へ適用し、提案手法の有効性を検証した。本稿では提案手法および有効性検証の結果を報告する。

2. ベンチマーク問題

ここでは、Benchmark PID 2018⁽¹⁰⁾の概要を説明する。蒸気圧縮式冷凍機の概略図を図1に示す。蒸気圧縮式冷凍機は、1)蒸発器、2)凝縮器、3)可変速圧縮機、4)膨張弁、から構成される。冷凍機の冷却メカニズムは、蒸発器の二次側から熱を取り除き、その熱を凝縮器の二次側に移して熱を放出することである。冷凍機の冷媒は以下の手順にて冷凍機を循環する。

- 低温・高圧の冷媒が蒸発器へ取り込まれ、蒸発器二次側の熱を奪いながら蒸発する。
- 高圧・高温の冷媒が圧縮機に取り込まれ、凝縮器に入

Fig. 1. Refrigeration systems⁽¹⁰⁾.

る。

- 凝縮された冷媒が過冷却され、凝縮器の二次側へ熱を放出する。

- 低圧・低温の冷媒が膨張弁によって高圧・低温になり、蒸発器へ取り込まれる。

本ベンチマーク問題では、冷凍サイクルにおける外乱を表1のように定義している。本システムの目的は表1の外乱条件下において、蒸発器二次側の出口温度 $T_{e,sec,out}$ を設定温度へ保持することである。蒸発器の出口温度への主要な外乱として、冷凍サイクルにおける質量流束 $m_{c,sec}$ および二次質量流束 $m_{e,sec}$ が挙げられる。また、本システムでは、凝縮器二次側の入口温度 $T_{c,sec,in}$ 、と蒸発器二次側の入口温度 $T_{e,sec,in}$ も外乱として扱われる。冷凍機では、なるべく電力効率よく設定温度を維持することが望ましい、電力効率のよい運転を実現するため、蒸発器の出口温度だけでなく過熱度 T_{SH} も制御する必要がある。つまり、冷凍機における制御目的は以下のような多入出力系の制御問題として与えられる。

・問題

圧縮機回転数 N と膨張弁開度 A_v を制御入力とし、蒸発器二次側の出口温度 $T_{e,sec,out}$ と過熱度 T_{SH} を出力とするシステムを考える。表1の外乱が存在する条件下にて、 $T_{e,sec,out}$ と T_{SH} ができるだけエネルギー効率よく目標値へ追従するような制御測を考えよ。

Benchmark PID 2018では、温度制御系の初期制御器も提供されている。初期制御器は、離散時間制御器とPI制御で構成される。ここで、制御信号と出力信号を

$$u_1(k) \triangleq A_v \quad (1)$$

$$u_2(k) \triangleq N \quad (2)$$

$$y_1(k) \triangleq T_{e,sec,out} \quad (3)$$

$$y_2(k) \triangleq T_{SH} \quad (4)$$

$$r_1(k) \triangleq Ref_T_{e,sec,out} \quad (5)$$

$$r_2(k) \triangleq Ref_T_{SH} \quad (6)$$

と定義した。ベンチマーク問題における初期制御器は

$$u_i(k) = C^{r_i}(q)(r_i(k) - y_i(k)) \quad (7)$$

と与えられてる。ここで、 $i(i=1,2)$ はインデックスである。ベンチマーク問題における初期制御器 C^{r_i} は

$$C^{r_1}(q) = \frac{-1.0136q^2 - 0.0626q + 0.9988}{(q-1)(q-0.9853)} \quad (8)$$

$$C^{r_2}(q) = \frac{0.42q - 0.02}{(q-1)} \quad (9)$$

と与えられている。本稿では、初期制御器よりも良好な制御応答を実現可能な制御系の設計を目指す。次節にてこの課題を解決可能な温度制御系設計を設計する。

3. FRITを用いたデータ駆動型温度制御

本稿では、開ループ実験を必要としないオンライン型

のデータ駆動型温度制御系を設計する。本制御系は PI 制御器と FRIT-RLS による更新則から構成される。

3.1 PI 制御器

図 2 に温度制御系のブロック図を示す。ここでは、 $T_{e,sec,out}$ と T_{SH} を独立なフィードバックループにて制御する。各ループの制御則を

$$u_i(k) = C_i^{FB}(q)(r_i(k) - y_i(k)) \quad (10)$$

とした。ここで、制御器 C_i^{FB} を可調整パラメータ ρ_i でパラメタライズされた PI 制御器

$$C_i^{FB}(q, \rho_i) = \rho_i^T \varphi(q) = [k_i^P \quad k_i^I] \begin{bmatrix} 1 \\ q-1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

とした。本稿の制御系では、可調整パラメータ ρ_i を後述の FRIT-RLS にてリアルタイム更新する。

3.2 FRIT

標準的な FRIT⁽²⁰⁾の基本的な考え方を説明する。FRIT では、目標値 r_i から制御変数 y_i までの規範モデル $T_i(q)$ があらかじめ与えられているとする。まず、閉ループ実験にてデータ長 N の入出力データを得る。次に、閉ループ系の擬似参照信号を

$$\tilde{r}_i(k, \rho_i) = C_i^{FB}(q, \rho_i)^{-1} u_i(k) + y_i(k) \quad (12)$$

と計算する。ここで、FRIT の評価関数を

$$J_i(\rho_i) = \sum_{k=0}^N (y_i(k) - T_i(q) \tilde{r}_i(k, \rho_i)) \quad (13)$$

と定義する。この評価関数は、閉ループ伝達関数と規範モデルの相対誤差を最小化することに等しい。したがって、評価関数を最小化できれば所望の制御応答を実現できる。一方、実験データに外乱信号が含まれている場合、所望の制御性能を実現できないとされる⁽¹⁹⁾。また、制御対象が強い非線形性を有する場合、所望の制御応答を実現できない可能性が指摘されている⁽²⁵⁾。そこで、本稿の温度制御系では、通常の FRIT でなく FRIT-RLS を用いて可調整パラメータ ρ_i をオンラインで更新する。

3.3 FRIT-RLS

FRIT-RLS⁽²¹⁾では、FRIT の評価関数を線形最適化問題に置き換え、Recursive least square(RLS)法によって評価関数を最小化する。まず、FRIT の評価関数がゼロとなるケースなケースを考えると、

$$y_i(k) - T_i(q) \tilde{r}_i(k, \rho_i) = 0 \quad (14)$$

が成り立つ。式(14)を式(13)へ代入すると、

$$C_i^{FB}(q, \rho_i)(1 - T_i(q))y_i(k) - T_i(q)u_i(k) = 0 \quad (15)$$

が成り立つ。式(15)から擬似誤差信号

$$\tilde{e}_i(k, \rho_i) = C_i^{FB}(q, \rho_i)(1 - T_i(q))y_i(k) - T_i(q)u_i(k) \quad (16)$$

を定義する。ここで、変数 d_i と γ_i を

$$d_i(k) = T_i(q)u_i(k) \quad (17)$$

$$\gamma_i(k) = \varphi(q)(1 - T_i(q))y_i(k) \quad (18)$$

と定義する。式(17)と式(18)を(16)式に代入し、擬似誤差

Table 1. Disturbance.

Disturbance	Mathematical symbol	Units
Inlet temperature of the condenser secondary flux	$T_{c,sec,in}$	°C
Mass flow of the condenser secondary flux	$m_{c,sec}$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
Inlet pressure of the condenser secondary flux	$P_{c,sec}$	bar
Inlet temperature of the evaporator secondary flux	$T_{e,sec,in}$	°C
Mass flow of the evaporator secondary flux	$m_{e,sec}$	bar
Inlet pressure of the evaporator secondary flux	$P_{e,sec}$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
Compressor surroundings temperature	T_{surr}	°C

Fig. 2. Block diagram of temperature control

信号を

$$\tilde{e}_i(k, \rho_i) = \rho_i^T \gamma_i(k) - d_i \quad (19)$$

と再定義する。式(19)は可調整パラメータ ρ_i に対して線形である。したがって、最小二乗法によるリアルタイムの最小化を実現できる。本稿では、忘却係数付きの RLS にて擬似誤差信号を最小化する。忘却係数付きの RLS アルゴリズムは、

$$h_i(k) = \frac{Q_i(k-1)\gamma_i(k)}{\lambda + \gamma_i^T(k)Q_i(k-1)\gamma_i(k)} \quad (20)$$

$$Q_i(k) = \frac{Q_i(k-1) - h_i(k)(\gamma_i^T(k)Q_i(k-1))}{\lambda} \quad (21)$$

$$\hat{\rho}_i(k) = \hat{\rho}_i(k-1) + \hat{\rho}_i(k)(d_i(k) - \gamma_i^T(k)\hat{\rho}_i(k-1)) \quad (22)$$

となる。ここで、 Q_i が相関行列、 λ が忘却係数、 $\hat{\rho}_i$ が更新パラメータである。ただし、更新パラメータをそのまま閉ループ系へ実装してしまうと、パラメータの急激な変更によるシステムの不安定化が懸念される。そこで、フ

ードバック補償器の可調整パラメータを

$$\rho_i(k) = \beta \hat{\rho}_i(k-1) + (1-\beta)\rho_i(k-1) \quad (23)$$

と更新する。ここで β は 1 以下の正の数である。式(23)に基づいて可調整パラメータを更新することにより、可調整パラメータの急激な変化を抑制できる。

以上の手順にて、開ループ実験のために制御系を停止させることなく、所望の制御応答を実現できる。

4. 数値シミュレーション

本節で、数値シミュレーションにて提案手法の有効性を検証する。ここでは、Benchmark PID 2018 にて提供されている MATLAB/Simulink のシミュレーションモデルを用いて数値シミュレーションした。

4.1 冷凍機の動作条件

本節では、ベンチマーク問題における冷凍機の運転条件を示す。表 2 に Benchmark PID 2018 における冷凍機の動作点を示す。また、凝縮器と蒸発器の二次側の入り口温度を図 3 に示す。出口温度と加熱温度の目標値を図 4 に示す。本シミュレーションは、表 2 の定常状態から温度制御を開始する。ここで、圧縮機回転数と膨張弁開度のレンジが $A_v \in [10-100]\%$, $N \in [30-50]\text{Hz}$ として設定されている。出口温度の目標値 $Ref T_{e, sec, out}$ は -0.5°C のステップ信号として設定されている。また、時刻 540s にて $T_{e, sec, in}$ が -1°C 変化する。また、 $t = 960$ 秒の時刻にて $T_{e, sec, in}$ と $T_{c, sec, in}$ にそれぞれ 1°C と -3°C 変化する。

4.2 シミュレーション条件

本節では本シミュレーションにおける制御系の条件を示す。本シミュレーションでは、規範モデルを

$$T_1(q) = T_2(q) = \frac{0.6321}{q - 0.3679} \quad (24)$$

と設定した。また、初期の PI ゲインを $k_1^P = -20.4958$, $k_1^I = -7.0480$, $k_2^P = 12.8927$, $k_2^I = 0.3093$ として設定した。FRIT-RLS のパラメータを $\lambda = 0.998$, $\beta = 0.8$ とした。ここで、初期相関行列を

$$Q_1(0) = Q_2(0) = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (25)$$

とした。

本シミュレーションでは、ベンチマーク問題用の MATLAB/Simulink にて制御器を実装し、サンプル時間を 1 s の設定でシミュレーションした。

4.3 シミュレーション結果

図 5 に出口温度と過熱度の制御結果を示す。図 6 に膨張弁開度と圧縮機回転数を示す。青線が初期制御器の制御結果、赤線が固定ゲインの PI 制御における制御結果、黄線が FRIT-RLS の温度制御系を適用した結果、点線が目標値である。また、図 7 に可調整パラメータの時系列データを示す。固定ゲインの PI 制御では、FRIT-RLS の初期 PI ゲインが設定されている。FRIT-RLS の温度制御系

を適用した結果、過熱度と出口温度が目標値へ追従していることがわかる。過熱度と出口温度の応答が規範モデルの応答へ近づいたため、目標値への速応性が向上したことがわかる。また、外乱への抑圧性も向上していることが明らかである。可調整パラメータが逐次更新され、目標値への速応性と外乱抑圧性が改善されたと考えられる。一方、時刻 540 s にてオーバーシュートが発生していることがわかる。windup 現象により、この区間のみ制御精度が劣化したと考えられる。本結果から FRIT-RLS を用いた温度制御系を適用することにより、外乱抑圧性と目標値への速応性を改善できることを確認できた。

Table 2. Simulation condition.

Description	Variable	Value	Units
Expansion valve opening	A_v	48.79	%
Compression speed	N	36.45	H
Outlet temperature of the evaporator second flux	$T_{e, sec, out}$	-22.15	$^\circ\text{C}$
Degree of superheating	T_{SH}	14.65	$^\circ\text{C}$
Inlet temperature of the condenser secondary flux	$T_{c, sec, in}$	30	$^\circ\text{C}$
Mass flow of the condenser secondary flux	$m_{c, sec}$	150	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
Inlet pressure of the condenser secondary flux	$P_{c, sec, in}$	1	bar
Inlet temperature of the evaporator second flux	$T_{e, sec, in}$	-20	$^\circ\text{C}$
Mass flow of the condenser secondary flux	$m_{e, sec}$	150	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
Inlet pressure of the evaporator secondary flux	$P_{e, sec, in}$	1	bar
Compressor surroundings temperature	T_{surr}	25	$^\circ\text{C}$

Fig. 3. Disturbance signals.

Fig. 4. Reference signals

(a) Outlet temperature of the evaporator second flux.

(b) Degree of superheating.

Fig. 5. Output signals.

4.4 絶対誤差積分による性能評価

PID Benchmark 2018 の性能評価指標を適用し、提案手法の有効性を定量的に分析する。PID Benchmark 2018 では、以下の 8 つの指標に基づき二つの制御系の性能を比較する。

$$IAE_i = \int_0^t |e_i(t)| dt \quad (26)$$

$$ITAE_i = \int_{t_c}^{t_c+t_s} (t - t_c) |e_i(t)| dt \quad (27)$$

$$RIAE_i(C_2, C_1) = \frac{IAE_i(C_2)}{IAE_i(C_1)} \quad (28)$$

$$IAVU_i = \int_0^t \left| \frac{du_i(t)}{dt} \right| dt \quad (29)$$

(a) Valve opening [%].

(b) Compressor speed [Hz].

Fig. 6. Control signals.

(a) Tunable parameters ρ_1 .

(b) Tunable parameters ρ_2 .

Fig. 7. Tunable parameters with FRIT-RLS.

$$RIAVU_i(C_2, C_1) = \frac{IAE_i(C_2)}{IAE_i(C_1)} \quad (30)$$

$$RITAE_i(C_2, C_1, t_c, t_s) = \frac{ITAE_i(C_2, t_c, t_s)}{ITAE_i(C_1, t_c, t_s)} \quad (31)$$

$$RITVU_i(C_2, C_1) = \frac{IAVU_i(C_2)}{IAVU_i(C_1)} \quad (32)$$

Table 3. Evaluation results.

Index	Default VS fixed PI	Default VS FRIT-RLS
$RIAE_1(C_2, C_1)$	0.4820	0.2543
$RIAE_2(C_2, C_1)$	0.5885	0.4246
$RITAE_1(C_2, C_1, t_{c1}, t_{s1})$	2.6779	1.3550
$RITAE_2(C_2, C_1, t_{c2}, t_{s2})$	1.2333	0.4134
$RITAE_2(C_2, C_1, t_{c3}, t_{s3})$	1.0103	1.1125
$RITAE_2(C_2, C_1, t_{c4}, t_{s4})$	0.1095	0.1559
$RIAVU_1(C_2, C_1)$	1.2786	1.8918
$RIAVU_2(C_2, C_1)$	0.9837	1.4122
$J(C_2, C_1)$	1.1512	0.7433

$$J(C_2, C_1) = \frac{IAVU_i(C_2)}{IAVU_i(C_1)} \quad (33)$$

C_1 と C_2 は比較対象の制御系である。RIAE は二つの制御結果における積算絶対誤差 (IAE) の比である。RITAE は積分時間乗算絶対誤差 ITAE の比である。RIAV と RIAVU は、制御入力 of の効率評価である。式(33)の J は各評価指標の平均値として算出される制御結果の総合的な指標である。したがって、総合評価 J が 1 より小さいほど、 C_2 の方が C_1 よりも性能が向上していることがわかる。ここでは、固定ゲインの PI 制御と FRIT-RLS の温度制御系がベンチマーク問題の初期制御器からどの程度性能向上したかを評価する。表 3 に各制御器の比較結果を示す。表 3 は、初期制御器を C_1 、PI 制御と FRIT-RLS を C_2 とした場合の比較結果である。固定の PI 制御を適用した結果だと、総合評価が 1.1512 となった。不適当なゲインを設定したため、RITAE が大幅に悪化しまい、総合評価が悪化したと考えられる。FRIT-RLS を適用した結果だと、総合評価 J が 0.7433 となった。初期の PI ゲインが不適当でもオンライン更新より、所望の応答特性が実現され、総合評価が改善したと考えられる。

5. おわりに

本研究では、冷凍機のための温度制御として FRIT-RLS を用いた PI コントローラを提案した。提案手法をベンチマーク問題へ適用し、良好な制御性能を実現した。初期制御器や固定 PI 制御器と比較して、総合指数 J を改善できた。本手法は開ループ実験を必要としない。したがって、冷凍機停止に起因する諸問題を引き起こすことなく、所望の制御応答を実現できる。一方、FRIT-RLS の制御結果だと、入力飽和の影響でオーバーシュートが発生することが確認された。今後の課題として、入力飽和の影響を抑制可能な制御系の設計が考えられる。

文 献

- (1) M. Salazar and F. Méndez, :“PID control for a single-stage transcritical CO2 refrigeration cycle”, Appl. Therm. Eng., Vol. 67, No. 12, pp. 429–438, 2014.
- (2) Y. Shen, W.-J. Cai, and S. Li, :“Normalized decoupling control for highdimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems”, Control Eng. Pract., Vol. 18, No. 6, pp. 652–664, 2010.
- (3) L. C. Schurt, C. J. L. Hermes, and A. T. Neto, :“A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems”, Int. J. Refrig., Vol. 32, No. 7, pp. 1672–1682, 2009
- (4) D. Leducq, J. Guilpart, and G. Trystram, :“Nonlinear predictive control of a vapour compression cycle”, Int. J. Refrig., Vol. 29, No. 5, pp. 761–772, 2006.
- (5) N. Jain and A. Alleyne, “Exergy-based optimal control of a vapor compression system”, Energy Convers. Manage., Vol. 92, pp. 353–365, 2015.
- (6) T. G. Hovgaard, L. F. S. Larsen, K. Edlund, and J. B. Jørgensen, : “Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems”, Energy, Vol. 44, pp. 105–116, 2012.
- (7) A. Afram and F. Janabi-Sharifi, : “Theory and applications of HVAC control systems—A review of model predictive control (MPC),’ Building Environ”, Vol. 72, pp. 343–355, 2014.
- (8) T. Sung, Y. J. Kim, H. S. Kim, and J. Kim :“Empirical modeling and robust control of a novel meso-scale vapor compression refrigeration system (mVCRS)”, Int. J. Refrig., Vol. 77, pp.99–115, 2017.
- (9) G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. R. Rubio, : “Multivariable analysis and H_∞ control of a one-stage refrigeration cycle”, Appl. Therm. Eng., Vol. 91, No. 6, pp.1156–1167, 2015.
- (10) G. Bejarano, J. A. Alfaya, D. Rodríguez, F. Morilla, and M. G. Ortega, : “Benchmark for PID control of refrigeration systems based on vapour compression”, IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, No.4, pp. 497–502, 2018.
- (11) J. D.Rojas, F.Morilla, R.Vilanova, : “Multivariable PI control for a boiler plant benchmark using the virtual reference feedback tuning”. IFAC Proceedings Volumes, Vol.45, No.3, pp.376-381, 2012.
- (12) R.Cajo, S.Zhao, C. M.Ionescu, R.De Keyser, D.Plaza, S.Liu, : “IMC based PID Control Applied to the Benchmark PID18.”, IFAC-PapersOnLine, Vol.51, No. 4, pp.728-732, 2018.
- (13) G. J. A.Soto, J. M. G.López, J. A.Hernández-Riveros, : “Coupled eVolutionary tuning of PID Controllers for the Benchmark on Vapor Compression Refrigeration”, IFAC-PapersOnLine, Vol.51, No.4, pp.509-514, 2018.
- (14) C.Chen, J.Lu, : “Design of self-tuning SISO partial-form model-free adaptive controller for vapor-compression refrigeration system”, IEEE Access, Vol.7, pp.125771-125782, 2019.

- (15) Y.Zhao, Y.Li, S.Dehghan, Y.Chen, : “Learning feedforward control of a one-stage refrigeration system”, IEEE Access, Vol.7, pp.64120-64126, 2019.
- (16) D. D.Huff, G. R. G.da Silva, L.Campestri, : “Data-Driven control design by prediction error identification for a refrigeration system based on vapor compression”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, No.4, pp.704-709, 2018.
- (17) V.Bordignon, L.Campestri, : “Application of Multivariable Virtual Reference Feedback Tuning with Anti-Windup to the Benchmark PID 2018”. *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, No.4, pp.515-520, 2018.
- (18) M. C. Campi, A.Lecchini, S. M. Savaresi, : “Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers”. *Automatica*, Vol.38, No.8, pp.1337-1346, 2002.
- (19) 相馬将太郎, 金子修, 藤井隆雄: 「一回の実験データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ Fictitious Reference Iterative Tuning の提案」. システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.12, pp.528-536, 2004.
- (20) O.Kaneko, : “Data-driven controller tuning: FRIT approach”, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.46, No. 11, pp.326-336, 2013.
- (21) Y.Wakasa, K.Tanaka, Y.Nishimura: “Online controller tuning via FRIT and recursive least-squares”, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.45, No.3, pp.76-80. 2012
- (22) H.Endo, R.Aramaki, K.Sekiguchi, K.Nonaka, : “Application of model error compensator based on FRIT to quadcopter”, In 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), pp. 2088-2093, 2017.
- (23) 遠藤弘彬, 関口和真, 野中謙一郎: 「モデル誤差補償器のオンライン調整法」, 計測自動制御学会論文集, Vol.55, No.3, pp.156-163, 2019.
- (24) S.Yahagi, I.Kajiwara, T.Shimozawa, : “Slip control during inertia phase of clutch-to-clutch shift using model-free self-tuning proportional-integral-derivative control”, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 0954407020907257, 2020
- (25) 遠藤祐甫, 大月智史, 岡本鷹文, 古賀毅, 中島健一: 「非線形性を有する自動操船システムへの FRIT 適用」. システム制御情報学会論文誌, Vol.33, No.8, pp.242-249, 2020.

鈴木 元哉

2016 年 東京電機大学未来学部ロボット・メカトロニクス学科卒業。2018 年東京電機大学未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻修了。2018 年から 2019 年まで三菱電機株式会社勤務。2019 年東京電機大学にて博士(工学)取得。2019 年 株式会社いすゞ中央研究所 研究員。2020 年 電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻。博士(工学)。制御理論および応用の研究に従事。