研究論文

E-FRITを用いた空気圧サーボ系の力制御PIDコントローラ設計*

村山 栄 治**, 黒 澤 和 磨***, 川 上 幸 男**

PID Controller Design of Force Control of Pneumatic Servo System Using E-FRIT

Eiji MURAYAMA, Kazuma KUROSAWA, Yukio KAWAKAMI

PID control schemes have been widely used in most industrial systems due to its simplicity and ease of implementation. In this paper, we propose a novel method for proportional-integral-derivative (PID) controller tuning directly using the closed-loop test data without parametric model of plant. The extended fictitious reference iterative tuning (E-FRIT) algorithm does not require any parameters of the plant model but only experimental data collected from the closed-loop system. By using an E-FRIT, which is one of the PID controller parameters tuning that enables us to obtain the ideal parameters with only one-shot experiment, this paper constructs a fictitious reference signal for the pneumatic servo system such that we can tune the PID controller parameters for desired control performance. A simple optimization problem is formulated to determine an appropriate reference model for the controlled process, and we use the particle swarm optimization (PSO) as the optimization method. The effectiveness of the proposed method is evaluated by an experimental result of a force control of the pneumatic servo system.

Key words : PID control, Extended fictitious reference iterative tuning, Particle swarm optimization, Pneumatic servo system

1. 緒 言

PID制御方式は、シンプルかつ実装のしやすさから多くの産業で幅広く使用されているフィードバック制御手法である¹⁾。 K_p , T_i , T_d のたった3つのパラメータであるが、理想的に調整することは難しい。現在では、実験に基づく経験則、制御対象モデルに基づくマッチング問題、オンライン調整など様々な手法が提案されている。特に制御対象のモデルに基づく調整法の場合には、人手と時間がかかってしまうことが知られている。我々の研究室ではフルードパワーを用いたデバイスを設計・製作し、それらの制御系設計を検討しているが²⁾、非線形摩擦を含む制御対象モデルの同定にはほぼ1日かかるため、このモデルを用いてPIDコントローラを調整する場合には、さらに時間を必要としてしまう。このような状況から簡易で高性能なPIDコントローラのゲイン調整手法の需要は高く、近年では新たな調整手法としてFRIT (Fictitious Reference Iterative Tuning) が注目されている³⁻⁶⁾。FRITは、閉ループシステムで計測

した一回の実験データにより理想的なパラメータを得ることができるPIDコントローラのパラメータ調整法で、当初は化学プラントなどプロセス制御系に用いられることが多かったが、近年では、2慣性システム⁷⁾、DCモータ⁸⁻¹⁰⁾、エレベータドア開閉¹¹⁾、クワッドローター (ドローン)¹²⁾、ロボット¹³⁾、油圧式ショベル¹⁴⁾、空気圧サーボ系¹⁵⁾など様々な分野で適用事例が提案されている。また、2自由度制御系などのフィードフォワードコントローラ的设计^{16,17)}、ニューラルネットワークの一種の小脳演算モデル (Cerebellar Model Articulation Controller : CMAC) を組み合わせた調整手法¹⁸⁾、外乱抑制¹⁹⁾、コントローラをPIDに固定せず内部モデル制御 (Internal Model Control : IMC) の設計問題に適用^{20,21)}などの制御問題や、不安定系²²⁾、むだ時間²³⁾、不感帯²⁴⁾といった制御対象の特性改善に用いられるなど応用範囲も広い。

本論文では、FRITの拡張系であるE-FRIT (Extended Fictitious Reference Iterative Tuning) を用いたPIDゲイン調整方法を空気圧サーボ系の力制御に適用した結果を報告する。E-FRITでは、ゲイン調整の際に最適化問題へ帰着するため、何らかの最適化アルゴリズムを実装する必要がある²⁵⁻²⁷⁾。最適解を探索する際の設計変数の上下限値の設定が問題となる。探索範囲を広くすると調整に多くの時間が必要となり、狭くすると大域的最適解が見つからない場合があるが、FRITやE-FRITを用いてPIDゲインを調整している多くの事例の中で、この点について触れられているも

*平成29年11月25日 原稿受付

**芝浦工業大学システム理工学部

(所在地：埼玉県さいたま市見沼区深作307)

(E-mail : nb12107@shibaura-it.ac.jp)

***芝浦工業大学大学院理工学研究科

(所在地：埼玉県さいたま市見沼区深作307)

のはほとんどない。そこで我々は、最適化アルゴリズムに粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization : PSO) を採用し、設計変数の上限値設定を閉ループシステムの計測データを周波数解析することで見積もる方法を提案し、このPIDゲイン調整手法の有効性を空気圧サーボ系の力制御の実験結果により評価する。

2. 主な記号

r	: 設定値 (目標値)	[N]
u	: 操作量	[V]
y	: 制御量	[N]
P	: 制御対象	
$C(\theta)$	: 構造が固定された制御器	
T	: 閉ループシステム	
θ	: 制御器のパラメータ	
K_p	: 比例ゲイン	[-]
T_i	: 積分時間	[s]
T_d	: 微分時間	[s]
K_i	: 積分ゲイン	[-]
K_d	: 微分ゲイン	[-]
N_f	: 微分フィルタの係数	[-]
θ_0	: 制御器のパラメータ (閉ループテスト用)	
$u_0(t)$	: 閉ループテストの操作量	[V]
$y_0(t)$	: 閉ループテストの制御量	[N]
$\tilde{r}(\theta, t)$	: 疑似目標値	[N]
$\hat{y}(\theta, t)$	: 規範モデル応答	[N]
$M(s)$	: 規範モデル	
τ	: 規範モデル係数	[s]
L	: 規範モデルむだ時間	[s]
θ_{opt}	: 最適な制御器のパラメータ	
$J(\theta)$	: 評価関数	[-]
N	: 計測したデータの要素数	
λ	: 重み係数	[-]
$\tilde{u}(\theta, t)$	: 疑似操作量	[V]
f_s	: スケーリング係数	[-]
n	: 規範モデルの次数	
T_{99}	: 目標値に対して99 [%] に到達するまでの応答時間	[s]
GM	: ゲイン余裕	[dB]
PM	: 位相余裕	[°]
ω_{pc}	: 位相交差周波数	[Hz]
ω_{gc}	: ゲイン交差周波数	[Hz]
K_c	: 安定限界ゲイン	[-]
T_c	: 持続振動の周期	[s]

3. 空気圧サーボ系の構成

本研究で使用した空気圧サーボ系の構成をFig. 1とTable 1に示す。また、実験装置をFig. 2に示す。アクチュエータ

には内径10 [mm]、ロッド径5 [mm]、ストローク22 [mm]の復動片ロッド小型空気圧シリンダ (コガネイ製特注) を採用し、リニアプッシュ (摩擦係数 $\mu=0.0006 \sim 0.0012$, ストローク30 [mm]) に支持されたシャフトをロッド先端で押し込む構造となっている。シャフトには圧縮バネ (バネ定数3.038 [N/mm]) が固定され、シャフトが押し込まれることでバネから反力を受け、ロッドとシャフトの間に設置されたロードセル (定格容量100 [N]) によりシリンダ推力が測定可能となる。空気圧シリンダには電空レギュレータ (SMC製ITV0051-3MS) が接続され、指令電圧によりヘッド、ロッドの圧力を直接制御することが可能となる。力指令とコントローラはHost PCにインストールされたMATLAB/Simulink[®]上で設計し、xPC-Target[™]を用いてリアルタイムOS用のアプリケーションを作成して、LAN経由でTarget PCに実装する。Target PCでは実装されたアプリケーションによりサンプリングタイム1 [ms] で力制御とデータの計測をおこなう。実験終了後、計測したデータはLAN経由でHost PCに転送される。フィードバックコントローラには、力指令とロードセルで計測した力の偏差が入力され操作量が決定される。この操作量は、空気圧シリンダのヘッド、ロッドに接続された電空レギュレータの指令電圧として使用される。

この実験装置は、我々の研究室で開発中のマニピュレー

Fig. 1 Schematics of pneumatic cylinder system

Fig. 2 Photograph of pneumatic cylinder system

Table 1 Hardware configuration

①	Compressor	②	Air filter
③	Mist separator	④	Booster regulator
⑤	Air tank	⑥, ⑦	Electro-pneumatic regulator
⑧	Air cylinder	⑨, ⑩	Pressure sensor
⑪	Load cell	⑫	Spring
⑬	Micro laser sensor	⑭	Strain amplifiers
⑮	A/D board	⑯	D/A board
⑰	LM stroke bush		

タや二足歩行ロボットといった多自由度空気圧シリンダシステムの制御系などを事前検討するための1軸の簡易治具となる。

4. E-FRITの概要とアルゴリズム

4.1 データ駆動型PID制御FRITの概要

FRITの基本概念は、IFT (Iterative Feedback Tuning)²⁸⁾やVRFT (Virtual Reference Feedback Tuning)²⁹⁾と同じく、閉ループテストの結果から制御器のパラメータを決定するモデルマッチング問題と考えることができる。この手法は、従来のモデルマッチング問題とは異なり、制御対象のモデルを必要とせず、閉ループテストの結果からPIDコントローラのパラメータを直接調整することが可能となる。

IFTは、構造の固定された制御器（例えば、PIDコントローラなど）を持つ閉ループシステムに対して、設定値応答などのテストを繰り返しおこない、プラントの入出力データから与えられた評価関数を最小にする制御器のパラメータを求める方法となる。オンライン学習法を採用した場合には、学習が完了するまでに多くのテストを必要とし、実用化に対する課題となっている。

一方、VRFTは、制御対象の入出力データを用いて、仮想の参照入力 (Virtual Reference) を構成し、閉ループ系の応答が規範モデルの応答と一致するように構造の固定された制御器のパラメータを求める方法となる。IFTに比べ必要なテスト回数が少ない利点があるが、開ループ系でのデータ取得が推奨されているため、制御対象が不安定な場合には適用が難しいことが知られている。

FRITは、IFTとVRFTの長所を合わせ持つ調整方法となる。FRITでは、テストで得られた出力と規範モデル応答の差が最小化されるようにPIDコントローラのパラメータが調整される。このとき、アルゴリズム内で使用される規範モデル応答は、式(6)のように記述される。制御対象のモデルをシステム同定などで構築することなく、一回の開ループテストの結果からオフラインでPIDコントローラのパラメータ調整が可能なFRITは、他の調整方法に比べてより実用的であると言える。

Fig. 3 Feedback control system

Fig.3に閉ループ系のブロック線図を示す。ここで、 P は制御対象、 $C(\theta)$ は構造が固定された制御器 (θ は制御器のパラメータ)、 r は設定値 (目標値)、 u と y はそれぞれ、操作量と制御量を表す。第3章に示す空気圧サーボ系では、 r は力指令 [N]、 u は電空レギュレータへの指令電圧 [V]、 y はロードセルで検出したシリンダ推力 [N] となる。

また、制御器にPIDコントローラを採用した場合、次式のように表される。

$$C = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{(1/N_f)s + 1} \right] \quad (1)$$

$$C = K_p + K_i \frac{1}{s} + \frac{K_d s}{\frac{1}{N_f} s + 1} \quad (2)$$

式(1)は標準形式、式(2)は並列形式などと呼ばれ、式(1)と(2)で制御器のパラメータ θ は式(3)、(4)のように表される。

$$\theta = [K_p \quad T_i \quad T_d] \quad (3)$$

$$\theta = [K_p \quad K_i \quad K_d] \quad (4)$$

このとき、FRITによるPIDコントローラのパラメータ調整手順は次のようになる。

(手順1)

閉ループ系が安定となるPIDコントローラのパラメータ θ_0 を用いて実験装置を駆動し、入出力データとなる $u_0(t)$ と $y_0(t)$ を計測する。このとき、設定値は多段ステップ入力などセットポイントが変化する時系列データがよく用いられ、 θ_0 は安定に入出力データが計測できれば、定常偏差やオーバーシュートが生じて問題ない。

(手順2)

PIDコントローラ $C(\theta)$ の逆モデル、入出力データ $u_0(t)$ と $y_0(t)$ を用いて次式の疑似目標値 $\tilde{r}(\theta, t)$ を算出する。

$$\tilde{r}(\theta, t) = C(\theta)^{-1} u_0(t) + y_0(t) \quad (5)$$

ただし、 θ は(手順1)で用いた θ_0 ではなく、(手順4)で更新されたパラメータを使用する。

(手順3)

規範モデル $M(s)$ と疑似目標値 $\tilde{r}(\theta, t)$ を用いて次式の規範モデル応答 $\hat{y}(\theta, t)$ を算出する。

$$\hat{y}(\theta, t) = M(s) \tilde{r}(\theta, t) \quad (6)$$

規範モデル応答 $\hat{y}(\theta, t)$ と出力 $y_0(t)$ の誤差が小さくなる θ が見つかれば、設定値 r と制御量 y の誤差も少なくなることが保証される。

(手順4)

最適なPIDコントローラのパラメータ θ_{opt} を次の最適化問題から算出する。

$$\theta_{\text{opt}} = \arg \min J(\theta) \quad (7)$$

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \{y_0(t) - \hat{y}(\theta, t)\}^2 \quad (8)$$

ただし、 N は計測したデータの要素数を表す。

以上の手順を踏まえ、最適な θ が見つかるまで（手順2）～（手順4）を繰り返す。

4.2 E-FRIT

FRITは非常に実用的なPIDコントローラのパラメータ調整方法であるが、式(8)のように制御応答誤差の最小化に基づく調整方法であるため、安定性が重視されるような制御対象の場合には、最小化すべき評価関数が不十分であることが指摘されている。この問題に対する解決手段としてFRITの拡張系であるE-FRIT (Extended Fictitious Reference Iterative Tuning)³⁰⁾が提案されている。E-FRITでは、従来のFRITの評価関数である式(8)に操作変数の変動に対するペナルティを導入した式(9)を採用することで、より安定な調整が可能となった。

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \{[y_0(t) - \hat{y}(\theta, t)]^2 + \lambda f_s \Delta \tilde{u}(\theta, t)^2\} \quad (9)$$

$$\Delta \tilde{u}(\theta, t) = \tilde{u}(\theta, t) - \tilde{u}(\theta, t-1) \quad (10)$$

$$\tilde{u}(\theta, t) = C(\theta) \{\tilde{r}(\theta, t) - \hat{y}(\theta, t)\} \quad (11)$$

$$f_s = \sqrt{\frac{\text{Var}(\hat{y}(\theta, t) - y_0(t))}{\text{Var}(\Delta \tilde{u}(\theta, t))}} \quad (12)$$

ただし、 λ は重み係数、 $\tilde{u}(\theta, t)$ は擬似操作量、 f_s はスケーリング係数、 $\text{Var}(a)$ は a の分散を表す。式(12)のスケーリング係数 f_s は、操作変数の変動、制御性能の両評価関数の大きさの絶対量を合わせるために導入した係数となる。また、擬似操作量 $\tilde{u}(\theta, t)$ を式(11)で与える場合、重み係数 λ は1が推奨とされている³⁾。式(9)のように操作変数の変動に対するペナルティを評価関数に加えることで、制御性能と同時に安定性（操作の緩慢さ）を考慮することができ、規範モデル $M(s)$ の設定に対するロバスト性向上が期待できる。

今回は、PIDコントローラに式(2)の並列形式、規範モデルには式(13)を採用した⁴⁾。

$$M(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n} e^{-Ls} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{T_{99}}{4.4n^{0.6}} \quad (14)$$

式(14)の n と T_{99} は、ユーザが設定するパラメータとなり、 n は制御系の構成により推奨値が決まっており（PID/PI-Dの場合には $n=2$ 、I-PDの場合には $n=3$ ）、 T_{99} は、目標値に対して99 [%] に到達するまでの応答時間と考えればよい。

また、PIDコントローラのパラメータに加え、規範モデルのパラメータ、むだ時間 L を考慮した式(15)を最適化問題の設計変数とし、最適解探索のアルゴリズムには、MATLAB® Global Optimization Toolbox™に含まれるPSOのソルバ「particleswarm」を採用した。

$$\theta = [K_p \ K_i \ K_d \ L] \quad (15)$$

PSOは、評価関数の勾配を用いない多点同時探索型最適化手法で、遺伝的アルゴリズムと同様にメタヒューリスティクスな最適化アルゴリズムとなる。このアルゴリズムは、虫や鳥の群れ行動をモデル化しており、探索空間内において複数の粒子を用いて探索をおこなう群知能の一種となる。粒子は位置情報だけではなく速度の情報も持ち、粒子の群れの中の個体の情報を群全体で共有しながら大域的最適解を探索していく。よって、このような多点探索型の手法では、設計変数の上下限值設定が大きく影響してしまう。上下限値の範囲は探索範囲となるため、広くすると調整に多くの時間が必要となり、狭くすると大域的最適解が見つからない場合がある。この課題については、対処方法を5.2章で提案する。

5. 閉ループテスト

5.1 設定値と入出力データ

E-FRIT用の入出力データを取得するため、閉ループテストをおこなった。空気圧機器は同じ動作を繰り返しおこなう生産ラインなどに多く使用されていることから、テストには計測が容易な同変位幅の往復変化を採用した。

Fig. 4のテストAは、PIコントローラにより計測をおこなっている。定常偏差は生じていないが、オーバーシュートが最大34 [%] 発生している。また、Fig. 5のテストBは、Pコントローラにより計測し、定常偏差が約31 [N]、オーバーシュートが最大54 [%] 発生している。どちらも安定に計測できているが、制御性能は大きく異なるデータとなる。

5.2 周波数解析による設計変数上限値の見積もり方法

計測した入出力データを周波数解析することで、閉ループ系 T のゲイン、位相特性を算出することができる。

$$T = \frac{PC(\theta)}{1 + PC(\theta)} \quad (16)$$

(a) The input data u_0

(b) The output data y_0

Fig. 4 Test A $\{u_0, y_0\}$ ($\theta_0 = [0.6 \ 0.6 \ 0 \ 0]$)

Fig. 5 Test B $\{u_0, y_0\}$ ($\theta_0 = [1.0 \ 0.0 \ 0.0]$)

また、Fig. 3に示される閉ループ系は、式(16)のように表され、一巡伝達関数 $PC(\theta)$ は次式で算出することができ、

$$PC(\theta) = \frac{T}{1-T} \quad (17)$$

式(17)に対して計測に使用した制御器の周波数特性を差し引くことで制御対象 P の特性を算出することができる。

Fig. 6にテストAの入出力データを用い、周波数解析から算出した制御対象のゲイン、位相特性を示す。また、Table 2にゲイン余裕GMと位相余裕PMを示す。

もっとも有名なPIDコントローラの調整方法であるジエグラ・ニコルスの限界感度法では、安定限界ゲイン K_c と持

Fig. 6 Frequency analysis of Test A

Table 2 Stability margin

GM	2.14 [dB]	@ $\omega_{pc} = 1300$ [Hz]
PM	41.70 [°]	@ $\omega_{gc} = 9.56$ [Hz]

続振動の周期 T_c を用いて調整をおこなうが、これらの値は、制御対象のゲイン余裕GM [dB]と位相交差周波数 ω_{pc} [Hz]を用いて式(18)、(19)のように表すことができる。

$$K_c = 10^{\frac{GM}{20}} \quad (18)$$

$$T_c = \frac{1}{\omega_{pc}} \quad (19)$$

限界感度法は最初のオーバーシュート量と次のオーバーシュート量の比を1/4程度にすることを目安とした調整方法となるため、経験的に大きなオーバーシュートが発生することが多い。それに対して、E-FRITでは式(13)のような規範モデルを採用しているため、最適なパラメータを見つけることができれば、オーバーシュートのない応答が期待できる。そこで我々は、前述の設計変数の範囲設定課題に対し、限界感度法により調整した結果を基準に上限値を見積もる方法を検討する。広大な探索範囲を設定するよりも効率よく最適解の探索が可能だと思われる。限界感度法によるPIDコントローラのパラメータをTable 3に示す。

Table 3 Ziegler-Nichols ultimate sensitivity method

K_c	1.28
T_c	7.69×10^{-2}
K_p	7.67×10^{-1}
T_i	3.85×10^{-2}
T_d	9.62×10^{-3}

6. E-FRITによるPIDコントローラ調整

テストA、Bの入出力データを用いてE-FRITにてPIDコントローラの調整をおこなった。PSOの設定条件については、粒子の個体数を10、最大イテレーション数を500とした。設計変数である式(15)の下限値はすべて0とし、上限値は、限界感度により求めたパラメータを並列形式に変換した値を5倍したものを使用した。また、パラメータ L は規範モデルのむだ時間となるため、計測した出力データからむだ時間を読み取り、その上限値を0.012 [s]と設定した。また、規範モデル応答に関連する T_{99} は0.95 [s]と設定した。

Table 4に最適化を実施したときの評価関数値を示す。上限値をすべて 10^5 に設定した場合、特にテストAの評価関数値が4.57と大きいことがわかる。また、テストA、Bどちらの入出力データを用いても500イテレーションの時点で

Table 4 Evaluation function value

UB	ZN method $\times 5$		10^5	
Iter.	Test A	Test B	Test A	Test B
500	0.33	0.85	4.57	0.91

Table 5 Tuning of PID parameters ($T_{99}=0.95$ [s])

Parameter	Test A	Test B
K_p	521×10^{-3}	5.79×10^{-3}
K_i	5.72×10^{-1}	5.91×10^{-1}
K_d	9.53×10^{-5}	2.38×10^{-4}
L	5.61×10^{-3}	1.57×10^{-3}

設計変数が下限値に張り付き最適解を見つけることができなかった。一方、限界感度法を基準に設計変数の上限値を設定した場合には、500イテレーション時点でテストBの評価関数値の方がテストAに比べ約0.5大きい結果となったが、Table 5に示す調整結果を見るとテストA、Bではほぼ同じパラメータとなった。これら結果から、周波数解析により算出した限界感度法のパラメータを基準に設計変数の上限値を設定する方法は有効と思われる。

Fig. 7 Experiment of E-FRIT (Test A)

Fig. 8 Experiment of E-FRIT (Test B)

また、E-FRITにて調整したPIDコントローラを用いて実験した結果をFig. 7とFig. 8に示す。設定値の他に比較のため、出力データ y_0 と限界感度法にて調整したPIDコントローラの応答結果もプロットしている。限界感度法で調整したPIDコントローラでは、オーバーシュートが発生しているのに対し、E-FRITで調整した結果はオーバーシュートなく設定値に追従していることがわかる。また、テストA、Bどちらの入力データを用いても T_{99} で設定した0.95 [s]で応答することが確認できた。

7. 結 言

本論文では、閉ループテストの入出力データ（操作量と制御量）から直接的にPIDコントローラを調整することのできるE-FRIT (Extended Fictitious Reference Iterative Tuning) を空気圧サーボ系の力制御に適用し、その有効性を実験に

より検証した。

E-FRITでは、テストデータが1組あればよく、PIDコントローラのパラメータ調整はオフライン最適化により実施される。ユーザは希望する応答時間のみを与えればよく、非常に簡便で実用性が高い調整方法といえる。

本研究では、閉ループテストA、Bの入出力データを用いた調整結果より、テストデータは安定に運転できていればオーバーシュートや定常偏差が発生していても問題なく、ユーザが指定した応答時間となるようにPIDコントローラが調整できることを確認した。また、最適解探索時の設計変数の上下限値設定については、提案したテストデータを周波数解析し限界感度法により算出したゲインを基準に上限値を見積もることで、少ないイテレーション回数で効率よく最適解の探索が可能となった。

今回の空気圧サーボ系は1軸の実験装置となるが、実際の制御対象となるマニピュレータや二足歩行ロボットは多自由度の空気圧サーボ系となるため、アクチュエータ間の干渉なども含め制御器を調整する方法を検討する必要がある。また、力のフィードバックにロードセルの測定値を直接使用したが、指先や足裏などロボットのエンドエフェクタにセンサを取り付けることができない場合は、オブザーバなどで推定した状態量で制御をおこなうため、閉ループ系がよりロバストになるように制御器を調整する必要があると考える。今後はこれらの課題を念頭に置き、研究を進めていきたい。

謝 辞

本研究をおこなうにあたり、実験装置の製作等でご支援いただいた株式会社コガネイ 堀川昭芳氏、塩田浩司氏、小川真史氏に心より感謝致します。また、FRITや最適化について助言をいただいた山浦和隆氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 荒木光彦, 須田信英: リレー解説PID制御《第1回》PID制御の歴史, 計測と制御, Vol. 36, No. 9, p. 643-647 (1997)
- 2) 村山栄治, 川上幸男: 空気圧ロボットとモデルベースデザイン, 油空圧技術2016年3月号, p. 23-29 (2016)
- 3) <http://e-fritchase-dream.com/index.html>
- 4) 加納学: プロセス産業における操業データ活用の実例, 電気学会論文誌C, Vol. 131, No. 4, p. 710-717 (2011)
- 5) 金子修: FRITの基礎と今後の展開—目標応答への追従問題を中心として—, 電気学会論文誌C, Vol. 132, No. 6, p. 816-819 (2012)
- 6) 増田士朗: 操業データに基づくPIDゲイン調整に関する取組み—ゆるやかな産学連携の実施例—, 電気学会論文誌C, Vol. 136, No. 5, p. 595-598 (2016)
- 7) Hidehiro, I. et al: Application of fictitious reference iterative

- tuning to vibration suppression controller for 2-inertia resonance system, Proceedings of IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 1825-1830 (2016)
- 8) Hien, T.N., Osamu, K. : Fictitious Reference Iterative Tuning for Cascade PI Controllers of DC Motor Speed Control Systems, 電気学会論文誌C, Vol. 136, No. 5, p. 710-714 (2016)
 - 9) Nobutoshi, S. et al. : Controller Design by Frequency-Domain Fictitious Reference Iterative Tuning Using Sliding DFT, Proceedings of 2015 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS), p. 213-218 (2015)
 - 10) Shiro Masuda : A direct PID gains tuning method for DC motor control using an input-output data generated by disturbance response, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), p. 724-729 (2011)
 - 11) 金子修, 宮地誠, 孫田康雄, 藤井隆雄, 大坪亮, 小林清 : 1 自由度系に対するFictitious Reference Iterative Tuningに基づく同定手法の提案とエレベータドア開閉速度動特性の同定への応用, システム制御情報学会論文誌, Vol. 20, No. 11, p. 439-447 (2007)
 - 12) Arthit, J. et al. : Quadrotor tuning for attitude control based on PID controller using fictitious reference iterative tuning (FRIT), Proceedings of 2015 6th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES) (2015)
 - 13) Takuya, K., Toru, Y. : Design of a Data-Oriented Kansei Feedback Control System, Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. 4, No. 1, p. 14-17 (2017)
 - 14) Yasuhito, O. et al. : Data-Driven Torque Controller for a Hydraulic Excavator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 28, No. 5, p. 752-758 (2016)
 - 15) 黒澤和磨, 村山栄治, 川上幸男 : 空気圧サーボシステムに対するE-FRITによるPIDゲイン調整方法の検討, 2016年度産業応用部門大会講演論文集, p. 87-90 (2016)
 - 16) Osamu, K. et al. : Fictitious Reference Tuning of the Feed-Forward Controller in a Two-Degree-of-Freedom Control System, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 4, No. 1, p. 55-62 (2011)
 - 17) 小河守正, 加納学 : 一般化 2 自由度PID制御システムの 2 段階E-FRIT調整法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 11, p. 631-638 (2016)
 - 18) 脇谷伸, 大西義浩, 山本透 : 非線形システムに対するFRITを用いたCMAC-PID制御器の一設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 12, p. 847-853 (2012)
 - 19) 増田士朗 : 外乱抑制FRIT法によるPIDゲイン調整, 電気学会論文誌C, Vol. 132, No. 6, p. 820-823 (2016)
 - 20) Hien, T.N. et al. : Fictitious Reference Iterative Tuning of Internal Model Controllers for Non-Minimum Phase Systems : A Laguerre Expansion Approach, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 1, p. 38-44 (2013)
 - 21) Hien, T.N. et al. : Fictitious Reference Iterative Tuning to Modified IMC for Unstable Plants, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 5, p. 345-352 (2013)
 - 22) 田坂謙一, 加納学, 小河守正, 増田士朗, 山本透 : 閉ループデータに基づく直接的PID調整とその不安定プロセスへの適用, システム制御情報学会論文誌, Vol. 22, No. 4, p. 137-144 (2009)
 - 23) 奥谷明大, 金子修, 山本茂 : 「SCT'14論文」特集号 I FRITを用いた多入力むだ時間系に対するスミス補償器のチューニング—出力にむだ時間を持つ場合, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 2, p. 58-65 (2015)
 - 24) Yuji, W. et al. : FRIT for Systems with Dead-Zone and Its Application to Ultrasonic Motors, 電気学会論文誌C, Vol. 131, No. 6, p. 1209-1216 (2011)
 - 25) 若佐裕治 : 解説 : 特集 データ駆動制御—新機軸と新地平 データ駆動型制御における非線形補償と最適化手法, 計測と制御, Vol. 52, No. 10, p. 872-877 (2013)
 - 26) 林香予子, 山本透 : 閉ループデータを用いたPID制御系の進化的設計法, 電気学会論文誌C, Vol. 131, No. 4, p. 794-799 (2011)
 - 27) Takehito Azuma : A METHOD TO DESIGN PID CONTROLLERS USING FRIT-PSO, INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS, Vol. 8, No. 4, p. 1876-1895 (2015)
 - 28) 中村政志 : Iterative feedback tuningのプロセス制御への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 10, p. 924-932 (2003)
 - 29) 中村政志 : VRFTを応用した多変数のプロセス制御系の調整, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 4, p. 330-337 (2005)
 - 30) Manabu, K. et al. : Extended Fictitious Reference Iterative Tuning and Its Application to Chemical Processes, Proceedings of the 2011 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, p. 379-384 (2011)