

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760134

研究課題名(和文)多目的逐次近似最適化を用いた可変ブランクホルダー力の最適軌道設計

研究課題名(英文)Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory Using Multi-objective Sequential Approximate Optimization

研究代表者

北山 哲士 (Kitayama, Satoshi)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：90339698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：先進的な加工法として、成形加工中における材料を抑えるブランクホルダー力を適切に調整する可変ブランクホルダー力による加工法がある。この加工法で最も重要なことは、加工過程で材料に発生するしわ・割れを抑制するような可変ブランクホルダー力の最適軌道を設計することである。本研究では、角筒深絞り加工を対象に、しわと割れを目的関数とした多目的最適設計問題を構築し、多目的逐次近似最適化法を用いて可変ブランクホルダー力の最適軌道を求めた。

研究成果の概要(英文)：In sheet metal forming, it is important to adjust the blank holder force (BHF). Low BHF causes wrinkling, whereas high BHF result in tearing. Variable BHF (VBHF) approach that the BHF varies through the punch stroke is one of the attractive forming techniques. Unfortunately, the VBHF is unknown in advance, and the determination of the VBHF using numerical simulation is valid. Numerical simulation in sheet forming is so expensive that a sequential approximate optimization (SAO) is beneficial. In this research, in order to determine the VBHF trajectory, an optimization problem is constructed. We determine the optimal VBHF trajectory to avoid the tearing and wrinkling for square cup deep drawing. Thus, a multi-objective optimization (MOO) is constructed for this purpose. A sequential approximate multi-objective optimization method is developed and applied to the MOO problem. Through numerical simulation, the proposed approach is so effective.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：最適設計 多目的最適化 塑性加工 シミュレーション 機械学習

1. 研究開始当初の背景

塑性加工の分野では、材料を加工する前の様々な条件を決定するための検討手段の一つとして、コンピュータシミュレーション(Computer Aided Engineering: CAE)技術が活用されている。塑性加工では、ブランクホルダー力(Blank Holder Force: BHF)を適切に調整して材料を金型間に流し込むが、深絞り加工では BHF が大きすぎると材料に割れが生じ、BHF が小さすぎるとしわが発生する。しわと割れの間にはトレードオフの関係があることが知られているものの、その関係を定量的に把握して成形を行うことは、成形加工を行う際に有用な知見をもたらすと考えられる。特に近年では、成形加工中に BHF を変化させる可変ブランクホルダー力(Variable BHF: VBHF)による成形加工法は先進的加工法として知られており、しわや割れといった成形不良に対し、品質を改善する有効な手段であり、品質改善を目的とした VBHF の最適軌道を求めることは重要な研究課題の一つである。

塑性加工シミュレーションは一般に、多大なる解析時間を要するため、VBHF の最適軌道を求めるためには、サンプル点(シミュレーションを行う設計点)とその応答値から関数空間を予測する応答曲面法が有効であるが、近年ではサンプル点を逐次追加して応答曲面の精度を向上させて精度の高い最適解を得る逐次近似最適化が有効であり、逐次近似最適化を多目的最適設計へ拡張した多目的逐次近似最適化は、これからの研究課題であるとされている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、以下の項目に焦点を絞り、研究を行う。

(1) 多目的逐次近似最適化システムの構築：効率的にパレートフロントを把握するためのサンプル点配置方法を提案する。これにより、少ない計算回数で精度の高いパレートフロントを同定することが期待できる。精度の高いパレートフロントを同定できれば、トレードオフ分析が容易となる。

(2) しわと割れを同時に防ぐような VBHF の最適軌道設計：深絞り加工における主たる成形不良として、しわと割れが挙げられる。しわと割れを防ぐような VBHF の最適軌道をシミュレーションにより求める。

3. 研究の方法

3.1 有限要素解析モデル

角筒深絞りを対象とし、実成形品(成形成功、しわ発生、割れ発生)を図1に、その有限要素解析モデルを図2に示す。なお、対称性を考慮し、解析には1/4モデルを採用した。各構成要素の要素タイプおよび要素数を表1に示す。板材の寸法は 92.5mm × 92.5 mm × 1.2 mm とし、板材とパンチ/

ブランクホルダー/カウンターパンチの摩擦係数はすべて 0.1 とした。また、接触に関しては、ペナルティ法を用い、ペナルティ係数は 0.1 とした。板材はシェル要素(Belytschko-Tsay)を用い、板厚方向の積分点数は 7 点とした。

図2において、パンチは固定され、BHF はブランクホルダー全体に z 軸正の方向に作用する。カウンターパンチとダイに z 軸負の方向へ強制変位を与え、下死点まで到達した後、カウンターパンチ・ダイ・ブランクホルダーに対し、z 軸正の方向へ強制変位を与えて、加工シミュレーションは終了する。



図1 実成形品

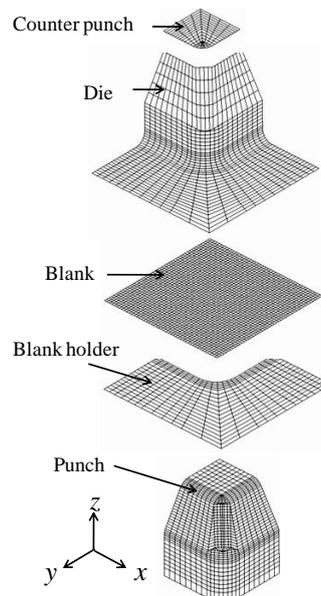


図2 角筒深絞り加工有限要素解析モデル

表1 要素タイプと要素数

	Element type	Number of finite elements
Counter punch	Rigid	120
Dies	Rigid	924
Blank	Shell (Belytschko-Tsay)	2116
Blank holder	Rigid	432
Punch	Rigid	962

3.2 RBF ネットワークを用いた多目的逐次近似最適化

(a) RBF ネットワーク

RBF ネットワークでは基底関数としてガウス関数が用いられ、その重ね合わせにより応答曲面 $\hat{y}(x)$ を作成する。応答曲面は

$$\hat{y}(x) = \sum_{j=1}^m w_j h_j(x) \quad (1)$$

で表わされ、 m は中間層素子数、 w_j は重みを表す。また $h_j(\mathbf{x})$ は基底関数を表し、次式で与えられる。

$$h_j(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)}{r_j^2}\right) \quad (2)$$

上式において \mathbf{x}_j と r_j はそれぞれ j 番目の基底関数の中心と半径である。学習データ \mathbf{x}_j と対になる教師データを y_j ($j=1,2,\dots,m$) とすると、RBF ネットワークにおける学習は次式を最小化する問題となる。

$$E = \sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}(\mathbf{x}_j))^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

RBF ネットワークの学習とは、式(3)を最小化する重みベクトル \mathbf{w} を見つけることであり、次式により求まる。

$$\mathbf{w} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

ここで上式の \mathbf{H} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{y} はそれぞれ

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_1) & h_2(\mathbf{x}_1) & \cdots & h_m(\mathbf{x}_1) \\ h_1(\mathbf{x}_2) & h_2(\mathbf{x}_2) & \cdots & h_m(\mathbf{x}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1(\mathbf{x}_m) & h_2(\mathbf{x}_m) & \cdots & h_m(\mathbf{x}_m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T \quad (7)$$

また、式(2)中の r_j を簡易的に決定するために、以下の半径式を用いる。

$$r_j = \frac{d_{j,\max}}{\sqrt{n} \sqrt{m-1}} \quad (8)$$

ここで、 n は設計変数の数、 m はサンプル点数、 $d_{j,\max}$ は j 番目のサンプル点からの最大距離を表している。

(b) 密度関数

密度関数とは、RBF ネットワークを用いてサンプル点の疎な領域に極小値を生成させる関数である。密度関数を最小化し、その最適解を新たな追加サンプル点とすることで、大域的な近似が期待でき、局所的最適解の捕捉にとらわれず、大域的最適解の発見につながることを期待できる。密度関数の作成法と新たなサンプル点の追加の流れは次のようになる。

(D-STEP1) 式(7)のすべての成分を+1 とした $m \times 1$ ベクトル

$$\mathbf{y}^D = (1, 1, \dots, 1)^T \quad (9)$$

を準備する。

(D-STEP2) 密度関数の重み \mathbf{w}^D を以下の式から求める。なお、基底関数の半径の算出には式(8)を用いる

$$\mathbf{w}^D = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{y}^D \quad (10)$$

(D-STEP3) 密度関数 $D(\mathbf{x})$ を最小化し、その最適解を新たな追加サンプル点とする。

$$D(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m w_j^D h_j(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (11)$$

1 変数における密度関数の一例を図 3 に示す。図 3 において ● はサンプル点を表している。密度関数を最小化する点が、追加サンプル点となる。

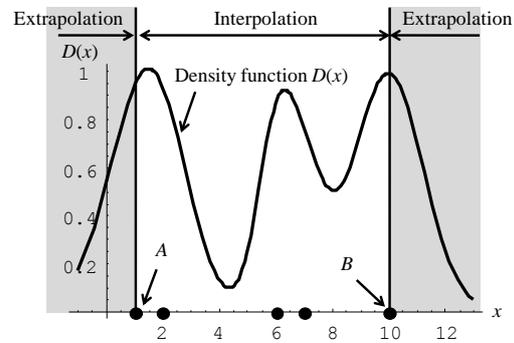


図 3 密度関数の一例

(c) パレート適合度関数

i 番目の探索点に対し、パレート適合度 G_i は次式で与えられる。

$$G_i = 1 - \max_{j \neq i} [\min(f_{s1}^i - f_{s1}^j, \dots, f_{sk}^i - f_{sk}^j)] \quad (12)$$

ここで f_{sk}^i は i 番目の探索点の $[0,1]$ にスケールリングされた k 番目の目的関数値を表し、

$$f_{sk}^i = \frac{f_{k,i} - f_{k,\min}}{f_{k,\max} - f_{k,\min}} \quad (13)$$

である。式(13)中の記号は次の通りである。

$f_{k,i}$: i 番目の探索点の k 番目の目的関数値。

$f_{k,\max}$: k 番目の目的関数の最大値。

$f_{k,\min}$: k 番目の目的関数の最小値。

パレート適合度は次の性質を持つ。

(PF1) 非劣解となる探索点は、パレート適合度の値がとなる。

(PF2) 非劣解でない探索点は、パレート適合度の値がとなる。また、パレート適合度の値が 1 に近いサンプル点は、非劣解が生成するパレートフロントに近いことを意味する。

パレート適合度は、もともと多点同時探索型手法を用いてパレート最適解集合を見つけるために導入された方法である。「探索点」を「サンプル点」として置き換えて考

えると、パレート最適解となるようなサンプル点はパレート適合度が 1 以上となり、そうでないサンプル点はパレート最適解でないということになる。パレート適合度の性質を考慮すれば、多目的逐次近似最適化における追加サンプル点の指針が得られる。サンプル点数が m 個のとき、パレート適合度関数の作成方法は次のようになる。

(P-STEP1) すべてのサンプル点に対し、式 (12) によりパレート適合度を計算する。

(P-STEP2) i 番目のサンプル点に対し、次のようにしてパレート適合度を以下の式により修正する (修正パレート適合度)。

$$MG_i = \begin{cases} (1-G_i)+2 \times G_{\max} & G_i < 1 \\ G_i & G_i \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$G_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} G_i \quad (15)$$

(P-STEP3) 修正パレート適合度を RBF ネットワークの出力とする。

$$y^p = (MG_1, MG_2, \dots, MG_m)^T \quad (16)$$

(P-STEP4) パレート適合度関数の重み w^p を

$$w^p = (H^T H + A)^{-1} H^T y^p \quad (17)$$

により求める。

(P-STEP5) パレート適合度関数 $PF(x)$ を最小化し、追加サンプル点を得る。

$$PF(x) = \sum_{j=1}^m w_j^p h_j(x) \rightarrow \min \quad (18)$$

サンプル点が表 2 のよう与えられているとき、パレート適合度と修正パレート適合度の値を併せて表 2 に示す。また、このときのパレート適合関数の様相を図 4 に示す。

表 2 サンプル点と修正パレート適合度

No.	x	$f_1(x)$	$f_2(x)$	G_i	MG_i
1	-2	4	16	0.555	3.257
2	0	0	4	1.028	1.028
3	0.5	0.25	2.25	1.109	1.109
4	2	4	0	1.141	1.141
5	3	9	1	0.938	2.874

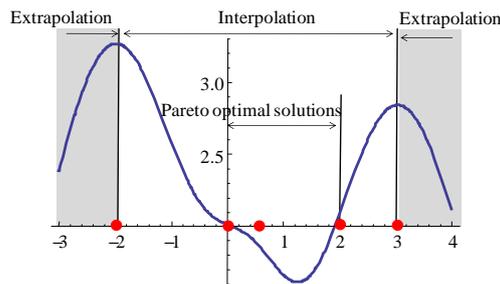


図 4 パレート適合度関数の様子

図 4 からわかるように、内挿領域において、パレート適合関数はパレート最適解集合内に最小値を生成している。よって、パレート適合関数の最適解を追加サンプル点とすれば、パレート最適解集合を効率的に同定できることがわかる。

(d) サンプル点追加アルゴリズム

多目的逐次近似最適化のための基本的なサンプル点追加アルゴリズムを図 5 に示す。図 5 において、設計変数の数に応じて、密度関数によるサンプル点の追加数を変更させている点に注意が必要である、 int は四捨五入の関数を表す。サンプル点追加の流れは次のようになる。

はじめに m 個のサンプル点から目的関数および制約条件を応答曲面近似し、近似パレート最適解を求める。得られた近似パレート最適解を追加サンプル点とし、サンプル点数を更新する。

次に密度関数を構築し、その最適解を追加サンプル点とし、設計変数空間におけるサンプル点の疎密をできる限り無くす。

最後に、パレート適合度および修正パレート適合度を計算し、パレート適合関数を構築する。パレート適合関数の最適解を追加サンプル点として、サンプル点追加アルゴリズムは終了する。

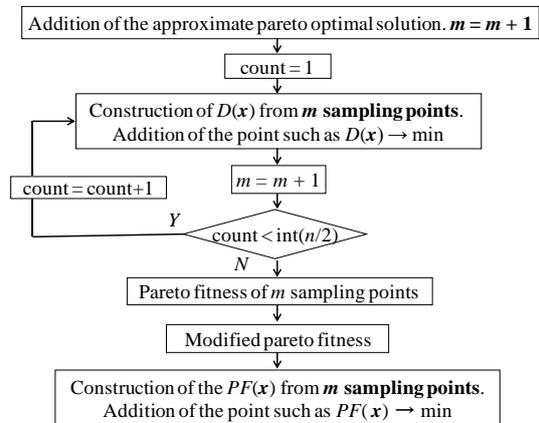


図 5 多目的逐次近似最適化アルゴリズム

3. 3 最適設計問題

(a) 目的関数

角筒深絞りにおいて、しわや割れを目的関数として考える。これらを定量化するため、本研究では図 6 に示す成形限界線図 (Forming Limit Diagram: FLD) を用いた。同図において、①はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1=1$ となる等二軸引張線、②はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1=-r/(1+r)$ となる単軸引張線、③はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1=-1$ となる純粋せん断線、④はひずみ比が $\varepsilon_2/\varepsilon_1=-(1+r)/r$ となる単軸圧縮線を表す。なお、 r はランクフォード値 (r 値) である。

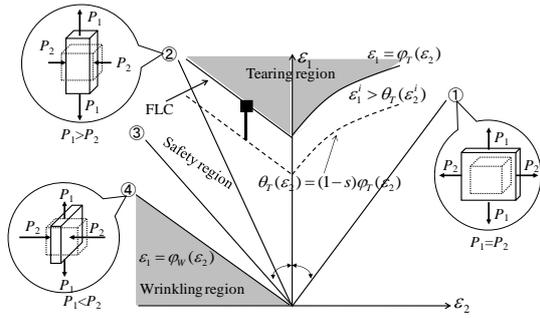


図6 成形限界線図

ブランクのすべての有限要素は FLD 上にプロットされ、しわの危険性が予測される有限要素は、しわ領域(Wrinkling)にプロットされ、一方、割れの危険性が予測される有限要素は、割れ領域(Tearing)にプロットされる。また、しわや割れがないと予測される有限要素は、安全領域(Safety region)の中にプロットされる。主ひずみ ε_1 は、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varphi_T(\varepsilon_2) \\ \varepsilon_1 &= \varphi_W(\varepsilon_2) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

と表記される。ここで φ_T は、割れを制御する成形限界曲線(Forming Limit Curve: FLC)を表し、 φ_T と φ_W は用いる材料に依存する。ここで、安全係数 s を考慮した次の関数を考える。

$$\left. \begin{aligned} \theta_T(\varepsilon_2) &= (1-s)\varphi_T(\varepsilon_2) \\ \theta_W(\varepsilon_2) &= (1+s)\varphi_W(\varepsilon_2) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

そして、次のようにして、しわ $f_1(\mathbf{x})$ と割れ $f_2(\mathbf{x})$ を評価する。

$$f_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{nelm} [\varepsilon_1^i - \theta_W(\varepsilon_2^i)] \exp[\varepsilon_1^i - \theta_W(\varepsilon_2^i)] & \varepsilon_1^i < \theta_W(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{nelm} [\varepsilon_1^i - \theta_T(\varepsilon_2^i)] \exp[\varepsilon_1^i - \theta_T(\varepsilon_2^i)] & \varepsilon_1^i > \theta_T(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

(b) 設計変数

図7に示すように全ストローク (L_{max}) を n 分割し、各ストロークにおける BHF の大きさを設計変数 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ とすることで VBHF の軌道を表すことにした。シミュレーションでは、全ストローク長を $L_{max} = 62\text{mm}$ し、6 分割した場合の VBHF の最適軌道を求める。各ストローク長 $L_i \text{mm} (i=1, 2, \dots, 6)$ は、それぞれ下記のように設定した。

$$\begin{aligned} 0.00 &\leq L_1 \leq 10.09 & 10.09 &\leq L_2 \leq 21.07 \\ 21.07 &\leq L_3 \leq 31.93 & 31.93 &\leq L_4 \leq 41.61 \\ 41.61 &\leq L_5 \leq 51.50 & 51.50 &\leq L_6 \leq 62.00 \end{aligned}$$

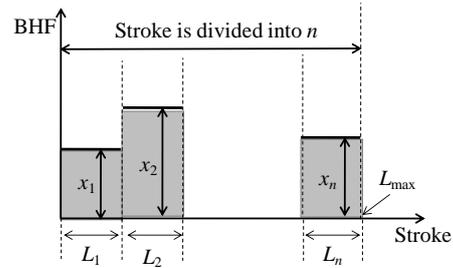


図7 VBHF のための設計変数

4. 研究成果

初期サンプル点数を 15 とし、多目的逐次近似最適化システムで求めた最適軌道を、成形状態と併せて図8に示す。最適軌道を得るために、50回のシミュレーションを要した。このときの FLD を図9に示す。図9から、しわや割れが発生せずに成形できていることがわかる。本研究ではしわと割れの二目的であるため、パレート最適解を求めるために、重みつき lp ノルム法を用いて、重み (図10中の α_i) を適宜変更してパレートフロントを同定した。その結果を図10に示す。図10より、しわと割れの間には明確なトレードオフの関係があることがわかる。

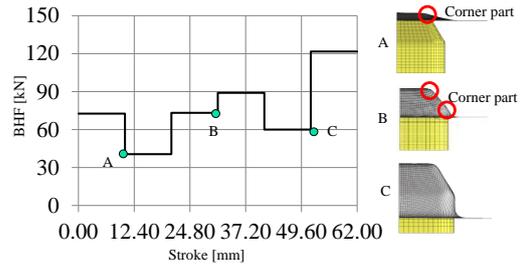


図8 VBHF の最適軌道の一例

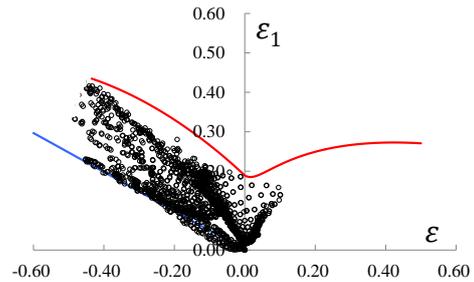


図9 VBHF の最適軌道における FLD

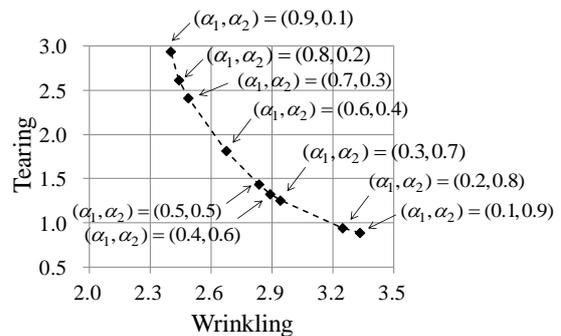


図10 しわと割れのトレードオフ関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① **Kitayama, S.**, Srirat, J., Arakawa, M., Yamazaki, K., Sequential Approximate Multi-objective Optimization using Radial Basis Function network, Structural and Multidisciplinary Optimization, 48-3, (2013), pp.501-515 DOI 10.1007/s00158-013-0911-z (査読有)
- ② **Kitayama, S.**, Huang, S., Yamazaki, K., Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory for Springback Reduction via Sequential Approximate Optimization with Radial Basis Function network, Structural and Multidisciplinary Optimization, 47-2, (2013), pp.289-300 DOI 10.1007/s00158-012-0824-2 (査読有)
- ③ **Kitayama, S.**, Arakawa, M., Yamazaki, K., Sequential Approximate Optimization for Discrete Design Variable Problems using Radial Basis Function Network, Applied Mathematics and Computation, 219-8, (2012), pp.4143-4156 <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2012.10.030> (査読有)
- ④ **Kitayama, S.**, Kita, K., Yamazaki, K., Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory by Sequential Approximate Optimization with RBF network, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61(9-12), (2012), pp.1067-1083 DOI 10.1007/s00170-011-3755-y (査読有)
- ⑤ **Kitayama, S.**, Yamazaki, K., Compromise Point incorporating Trade-off Ratio in Multi-objective Optimization, Applied Soft Computing, 12-8, (2012), pp.1959-1964 doi:10.1016/j.asoc.2012.03.024 (査読有)
- ⑥ **北山哲士**, 黄穗生, 山崎光悦, スプリングバック抑制を目的とした可変ブランクホルダー力の最適軌道設計, 日本機械学会論文集 C 編, 78-790, (2012), pp.2252-2265 (査読有) https://www.jstage.jst.go.jp/browse/kikaic/78/790/_contents/-char/ja/ (査読有)
- ⑦ **Kitayama, S.**, Arakawa, M., Yamazaki, K., Sequential Approximate Optimization using Radial Basis Function network for engineering optimization, Optimization and Engineering, 12-4, (2011), pp.535-557 DOI 10.1007/s11081-010-9118-y (査読有)
- ⑧ **Kitayama, S.**, Yamazaki, K., Simple estimate of the width in Gaussian kernel with adaptive scaling technique, Applied Soft Computing, 11-8, (2011),

pp.4726-4737

doi:10.1016/j.asoc.2011.07.011 (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 北山哲士, Srirat, J., 山崎光悦, 多目的逐次近似最適化を用いた可変ブランクホルダー力の最適軌道設計, 日本機械学会第26回計算力学部門講演会, 2013, 11.4, 佐賀
- ② 北山哲士, Srirat, J., 山崎光悦, 逐次近似最適化を用いた可変ブランクホルダー力の軌道と工具モーションの同時最適化, 日本機械学会第23回設計工学システム部門講演会, 2013, 10.23, 沖縄
- ③ **Kitayama, S.**, Kita, K., Yamazaki, K., Optimization of Variable Blank Holder Force Trajectory via Sequential Approximate Optimization with Radial Basis Function network, 10th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Paper No. 5102, CD-ROM, 2013, 5.20, Florida, USA
- ④ **北山哲士**, 荒川雅生, 山崎光悦, Radial Basis Function network を用いた多目的逐次近似最適化, 第10回最適化シンポジウム, 2012, 12.7, 神戸
- ⑤ **北山哲士**, 黄穗生, 山崎光悦, スプリングバック抑制を目的とした可変ブランクホルダー力の最適軌道設計, 日本機械学会第22回設計工学システム部門講演会, 2012, 9.26, 広島
- ⑥ **Kitayama, S.**, Arakawa, M., Yamazaki, K., Sequential Approximate Optimization Using Radial Basis Function network, 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, CD-ROM, Paper ID: J008, 2012, 6.19, Huangshan, China.
- ⑦ **北山哲士**, 荒川雅生, 山崎光悦, RBF ネットワークによる多目的逐次近似最適化, 日本機械学会第21回設計工学システム部門講演会, 2011, 10.22, 山形
- ⑧ **Kitayama, S.**, Arakawa, M., Yamazaki, K., Discrete Differential Evolution for the Mixed Discrete Non-Linear Problems, 9th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, CD-ROM, Paper ID: 074_1, 2011, 6.12, Shizuoka, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北山哲士 (Satoshi Kitayama)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号: 90339698