選好度を有する範囲概念に基づく多目的同時満足化設計
(構造と制御の同時設計への適用)石川 晴雄^{*1}, 佐々木 直子^{*1}Multi-objective simultaneous satisficing design based on set-based concept with preference
(Simultaneous design of structural and control system for a product)Haruo ISHIKAWA^{*1} and Naoko SASAKI^{*1}^{*1} The University of Electro-Communications
1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo 182-8585, Japan

Received: 5 April 2018; Revised: 20 August 2018; Accepted: 12 November 2018

Abstract

It is pointed out that multi-objective simultaneous design is very important. In the previous paper, we proposed a method for the design based on the concept of set-based approach with preference for design variable and performance. In the present study, the extension of the design method such as the applicability to non-monotonic phenomena and the introduction of the new concept of robustness as the relation between performances and design variables is realized. For considering the applicability of the proposed method, as an example, we deal with multi-objective simultaneous satisficing design of structural and control system for a product that is rotary pendulum with stepped rectangular shape and holes in the pendulum. For the design problem, four performances (three control performances and one structural performance) and six design variables (three control variables and three structural variables) are prepared. The simultaneous satisficing treatment of the shape design as structural system and the feedback control design as control system is carried out. As a result, the range solutions of six design variables that satisfy the objective range of four performances can be obtained and the influence of the preference on the result is shown. The effectiveness and usefulness of the proposed method could be shown.

Keywords : Simultaneous design, Point-based design, Set-based design, Structural design, Control design, PID control

1. 緒 言

現在、産業界では機能の多様化と高度化、市場環境の変化、低コスト化あるいは環境規制など、製品の開発環境は年々厳しい状況下にある。したがって多種多様な性能要件を実現する多数の影響因子に関する設計解を求め、製品としての開発を短期間、低コストで実現することがますます重要になってきている。背反性能も含む多様な性能を同時並行的に処理するために、様々なアプローチ、すなわちすり合わせ処理、CAEにおける連成機能、多目的最適化、セットベース設計の考え方、あるいは製品のライフサイクルのいわゆる over-the-wall 問題への対応（コンカレントエンジニアリング分野）など様々な考え方、手法、アプローチが提唱され、実績をあげてきた。しかしそれぞれに依然として、あるいはあらたな課題もある。例えば、すり合わせ処理ではすり合わせ会議の頻発、海外企業との関係性等、連成機能では対象の限定性等、最適化では実問題への適応性（例えば、パレート解集合からの選択性、重み付け線形和法におけるパレートフロントの非凸性等）（穴井, 2015）等、チームベースのセットベース設計では最終意思決定の合理的処理（Singer et al., 2009）等、over-the-wall 問題では情報共有の実現性（Boothroyd et al., 2002）等の課題がある。

一方、本研究では、適用分野として、ひとつの製品における制御系と構造系の両設計の同時設計という意味で

No.18-00181 [DOI:10.1299/transjsme.18-00181], J-STAGE Advance Publication date : 19 November, 2018

本論文は、設計工学システム部門 講演論文集(2017), No.17-32の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail of corresponding author: ishihawa@mce.uec.ac.jp

の多目的設計について取り上げる．制御システムによって制御される機械システムの開発においては，両システムの設計の整合性が重要である（Mehra, 1976, Kubrusly and Malebranche, 1985, Kabamba and Longman, 1983, Soong, 1990, 大日方, 1997）．従来はどちらかといえば先に与えられた構造に対する制御系の設計（2ステップ法）が多かった．典型例でいえば、確立している設計基準に基づいて設計されている高層建築の地震対策としてアクティブコントローラ設計を付加する場合などである．しかし宇宙空間の構造物は強度より振動減衰が支配的であり，重量軽減のためには両者の同時設計が要請される（大日方, 1997）．両者の同時設計に関する従来の研究としてはおもに，制御性能や構造パラメータの制約条件化のもとでの質量の最小化（梶原, 長松 1994），ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムを用いた広域的最適化（原, 1992, 波田野, 1993），構造システムと H_∞ 制御システムの最適化（Khot and Öz, 1993），感度解析に基づく手法（Fox and Kapoor, 1968）等，おもに数理的手法がある．こうした研究は制御系設計の視点から見ると，おもに数理的手法を用いる理論研究が多いようである．一方，本来のいわゆる設計の視点から見れば，設計自体がシンセシスといわれるように本来的に多目的性能の実現を目的としており，様々な観点での関連研究も数限りない．中でも今回の提案研究に関連して，多目的最適化設計に注目すれば，その解法も，荷重和法，制約法，ゴールドプログラミング法，満足化トレード法等いくつか提案され（荒川, 2011），実問題への適用性の観点からも研究（黒岩, 2005）もなされている．

本研究では，先に述べた設計手法等のなかで，特にセットベース設計手法に焦点を当て，その多目的設計手法としての位置付けを行うとともに，選好度付き範囲概念を基盤とするセットベース設計手法（PSD (Preference Set-Based Design) 手法）（Nahm and Ishikawa, 2005a, 南, 石川, 2005b, Nahm and Ishikawa, 2006）における満足化の意味とその汎用性および多目的性能同時実現性についてまとめた．具体的には，PSD 手法自体の骨格は新規ではないが，PSD 手法の実問題への適応性に関して，これまでは研究論文としては未発表であった次の2点について，新たに検討，導入した．

1) PSD 手法の設計課題への適応性の拡張として，従前の設計変数範囲の性能範囲への写像手法，設計変数と性能間の関係式表現の拡張および設計変数のロバスト性の指標を新たにしたこと，および2) 適用例として，構造系と制御系の1Dモデルに基づく同時設計分野の例（4性能6設計変数）に対する適用を試みたことである．従前のこの分野での研究としての設計例としては，これほどの多性能多設計変数の同時設計例の報告はない．なお制御系システムとしてはフィードバック制御系を，1DモデルとしてはMATLAB（MathWorks社）の制御系モデルを使用した．

2. セットベース設計手法の位置付け

セットベース設計手法は，製品の開発から廃棄に至る直列的ライフサイクルの部分的並列化を図ることを目的としたコンカレントエンジニアリング(CE)の分野で提唱された考え方である（Ward et al., 1995）．並列化の要素が入るため必然的に多目的設計の考え方が導入されている．CEにおけるその手法にはおもに2種類あり，以下の2.1節の設計手法の繰り返し処理に基づく探索的手法（iterative method）と2.2節の収束処理に基づく手法（convergent method）である．これらの特徴を概略説明するとともに，2.2節の新たな展開形として今回提案するセットベース設計手法の位置付けを2.3節で行う．

Fig.1 Set-based design method based on the elimination of alternatives in team-based design approach (Ward et al., 1995).

2・1 探索的手法

従来の多目的設計のひとつである繰り返し処理に基づく探索的手法の基本構造は、特定の設計案に対する設計変数のポイントベース探索（ポイント値をベースにし、各種性能の満足性を順次的、繰返しの確認していくスパイラル設計）(Evans, 1959)である。ポイントベース設計（PBD）手法には、初期値が適切でない場合に繰返し数の増大化を招く、初期設計での最適解は詳細設計での最適性を保証しない等の課題が指摘されている（Mistree et al., 1990）。また PBD 手法を基本にしたいわゆる over-the-wall 問題の克服等についてはその効率性の課題などの指摘もある（Bernstein, 1998）。

2・2 収束処理に基づく手法

収束処理に基づく従来の設計手法としてはおもに次の PBD に基づく 2 手法がある。

(1)設計の初期段階で扱う性能分野ごとに担当チームが用意した複数の設計解候補（代替案）を設計の意思決定のタイミング時に統括マネージャーが解候補を絞り込む方法（図 1 参照）である（team-based-approach）(Ward et al., 1995, Finch and Ward, 1996)。またその手法に対して QFD, AHP, エキスパートシステム, エージェントシステム, マルコフ過程をベースにしたフレームワーク等が関係因子の重みづけや意志決定の効率化等を目的とした支援システムとして検討されている（Gray and Singer, 2015）。この手法は米国の航空産業、造船産業に具体的な初期設計手法として導入され（金丸, 1996, Bernstein, 1998, Singer et al., 2009）ていて、おもに初期設計に対応したセットベースコンカレントエンジニアリング (SBCE) における設計手法として位置づけられることが多い (McKenney, 2013)。担当チームが用意する設計解候補（代替案）が複数であるということでセットベースといわれているが、各設計解候補の提示は PBD 手法を基本にしている。

(2)特定の製品設計に関する多目的性能、多設計変数に基づくメタモデルを作成し、設計変数に対して設定した比較的広い範囲（セット）内における多数のポイント値を用いた CAE 解析を行い（PBD 手法）、その結果の組合せにより各性能等に関するデータベースあるいは応答曲面式を求める。その上で、性能、コスト等の実現範囲が存在し得るように、顧客の視点も含めて多重のフィルタリングを実施し、設計変数の範囲解を求める手法（リスク管理も含めて統括的管理手法と呼ばれている）である（呉 et al., 2009, 森, 呉, 2009）。

2・3 本研究での提案手法

上記 2 手法と本研究の方法のいずれも一般的な意味で多目的性能の満足性を求めるという意味では同じであり、CE の範疇に入る手法であるといえる。しかし上記の 2 手法に対して、本研究での提案手法は以下のように PBD の考え方を取らず、首尾一貫して範囲（セット）の視点で多目的性能の満足性を実現する設計変数の範囲を求めることが上記 2 手法と異なる点である（Nahm and Ishikawa, 2005a, 南, 石川, 2005b, Nahm and Ishikawa, 2006）。

(a)多目的性能、多設計変数のそれぞれを範囲と範囲内選好度（詳細は後述）で表現し、各性能の目標範囲を同時に満足する設計変数範囲を求める手法であり、性能、設計変数に関する取扱いは、それらの表現および設計変数から性能への写像も含めてすべて範囲（セット）で扱っている点。

(b)満足性を基準にして多目的性能に対する設計変数範囲の共通範囲を求める点は上記 2.2 節の(2)と考え方としては同じであるが、さらに共通範囲内で好ましき（範囲の広さと選好度分布）とロバスト性を範囲基準で表現し、これらを合わせて単一指標化して処理することにより、好ましきとロバスト性のより高い部分集合を範囲（集合）演算で求める（3 章参照）手法である点。

3. 多目的性能の同時満足化設計手法（PSD 手法）の概略

PSD 手法の基本的考え方を示したのが図 2 である。複数性能に対する設計変数の共通集合が多性能の同時満足設計変数の解集合になるが、解集合の中でも各性能に対する満足性が異なると考え、共通集合の中で多性能に対して全体的に満足していく解範囲に絞り込むことを意味している。この考え方に基づく実際の処理に関するプロセスを示したのが図 3 である。以下にその内容の概略を順に示す。

1)設計意図の表現（範囲と選好度）

第 1 のステップは、図 3 に示すように要求性能および影響因子（設計変数）の範囲について以下の内容を入力する。

Fig.2 Concept of PSD Method.

Fig.3 Process of PSD Method.

Fig.4 Intervals of design variable and performance with preference.

Fig.5 Initial set of performance with preference and possibilistic performance.

ア) 実現したい要求性能の範囲,

イ) それぞれの性能範囲を実現できると思われる設計変数の範囲 (設定期待領域: 初期範囲という).

さらに, 図4に示すように, 要求性能および設計変数の設定した範囲に対して, 範囲内のどの部分をより重要視するか (期待するか) という設計者の意図 (選好度) を示す選好度関数を設定する. 選好度は $[0, 1]$ の値で示す. 選好度が0の場合の範囲を許容範囲, 1の場合の範囲を最も望ましい範囲であるとする.

2) 実現可能領域 (可能性分布)

第2のステップでは各設計変数の選好度付き範囲を各要求性能の範囲に選好度付きで写像する (範囲伝播という). 範囲伝播は, 前報では単調現象を対象とするIPT (範囲伝播理論) (Finch and Ward, 1996, Finch and Ward, 1997, Finch, 1997) を用いた,

3) 可能性分布と要求性能範囲との比較 (図3の Possible solution set? により分岐判断)

多設計変数の範囲から求めた選好度付き性能分布を可能性分布という (図5のピンク線). 可能性分布 (図5の青線) をステップ1で入力した選好度付きの性能分布と比較する. 図5の例のように可能性分布が性能分布に入らない部分がある場合は, その部分が生じないように当初の設計変数の範囲を絞り込む必要がある (設計変数範囲の区分範囲化).

4) 設計変数範囲の絞り込み (設計変数範囲の区分範囲化).

4)-1 設計範囲の好ましさとロバスト性の評価

各性能ごとに予め与えた選好度付き範囲に対して, 各設計変数の区分範囲の組合せから求まる当該性能の選好度付き範囲に関して設計の好ましさとロバスト性を評価し, それらが高い値を示す区分範囲を選定することで絞り込みを行う. 設計の好ましさとロバスト性 (要求性能範囲の変動の少なさ (確実性)) の内容は以下である.

(a) 設計の好ましさは, 可能性分布が性能の選好度付き初期範囲に対する選好度も含めた重なり具合 (積分値).

(b) ロバスト性は一般的には様々な定義があるが, 前報では Shannon のエントロピーの不確実性の測度 (Zimmermann, 2001) を用いて評価した. 本研究では後述の4章4.1節の(ア), (イ)に修正する.

4. PSD 手法の特徴とその改良

4・1 満足化

従来の数理的最適化手法が一般に最良（最小値，最大値）を求めるのとは異なり，セットベース設計手法は満足化を基本としている．満足化の考えは，1978 年ノーベル経済学賞を受賞した H. Simon による設計における人間活動の合理性は「最適化」ではなく「満足化」にあるとする指摘にもある（Simon, 2001）．特に上記 2.3 節および 3 章で示した PSD 手法では，与えた目標性能範囲に関して，検討している設計解範囲の好ましさとロバスト性について，選好度（範囲内の適性の分布）を含めて数値的に評価している．両者（範囲と選好度）を合わせて満足性という．本手法では，ロバスト性の定義として前報とは異なり，実際の設計の観点での分かりやすさから，Terwiesch ら（Terwiesch et al., 2006）の情報の安定性と精度に関する次の 2 つの定義を用いた．(ア)選好度 0 における設計変数の範囲の変動に対する要求性能の範囲の変化のしにくさ．(イ)選好度分布から実際に解を選定する際の変動の少なさ．数値的には選好度分布の高い領域への重みづけとその領域に至る選好度分布の急峻性である．

4・2 必要条件としての範囲解

PSD 手法により求まる範囲解は必要条件としての範囲解である．すなわち必要十分条件を満たす範囲解ではない．PSD 手法では，当初に設定する要求性能範囲を満足する設計変数範囲を求めるために，当初に設定する各設計変数範囲を区分的に分割し，区分範囲の組合せから性能に写像し，当初要求性能範囲との重なりから区分範囲の妥当性を評価する．初期設定の設計変数範囲と要求性能範囲の関係性に起因して，最終的に得られる範囲解が狭くなりすぎることを避けるために，新たにその重なりに関連したオーバーラップ率と定義し，その値が指定した値より低い区分範囲の組合せは除去するアルゴリズムを新たに導入した．

4・3 異種多性能への対応

PSD 手法では，製品性能の目標範囲に対して設計変数から求まる当該性能範囲の満足率といった意味合いの満足性を基本とし，設計変数の範囲が変化した場合の満足性の相対比較（相対的満足性）を行っている．PSD 手法において用いている実際の数的処理としての相対的満足性の内容は以下になる．

多性能の同時満足に関して設計変数の解となり得る範囲（共通集合範囲）は模式図である図 6（3 性能の例）の斜線領域になる．なお図 6 では各性能の実現領域を見やすくするため平面的に示している．斜線領域内であっても，その設計変数範囲解から求まる性能範囲の満足性は，望大や望小等の特性の違いにより多性能の性能ごとに異なる（斜線領域内で性能ごとに分布する）（山田, 2016）．あるいは同一目標であっても設計変数範囲（大きさやその置かれている位置）の差異ごとに異なることを意味する．このことおよび 3 章 3), 4) で述べたように多設計変数の各範囲を用いて写像した性能の可能性範囲が性能の目標範囲から外れた領域がある場合は設計変数範囲の絞り込みのために初期に設定した各設計変数範囲の区分的分割を行う．分割方法は設計変数によらずに n 等分とし，全性能の範囲を同時に満足するまで， $n=1$ から 1 ずつ統一的に増加させていくものとした．図 7 は 2 設計変数の 2 分割の場合で，仮に左半分の範囲の組合せを採用したとして，これに基づく性能の写像の様子を模式的に示している．図 7 の性能図（下図）では，青の実線の初期設定範囲内に写像結果であるピンクの実線の範囲が入っている． $n=1$ は分割不要を意味し，全設計変数の初期設定範囲の組合せですべての性能の目標範囲を満足することに対応する．図 7 に示すように設計変数ごとの区分範囲には一般的には異なる選好度分布を与えている．すべての区分範囲の組合せが性能の目標範囲に入る分割（ $n=2$ 以上）の場合，同じ分割数であっても設計変数の初期範囲は一般に異なるので，分割の区分範囲の大きさおよびそこにおける選好度の分布は設計変数ごとに異なる．そのうえで選考度付きの区分範囲の組合せに関して，性能の選考度付き目標範囲に対する好ましさとロバスト性を評価する．その際のそれらの評価内容としては 3 章 4)-1 の(a)の好ましさとおよび 4 章 4.1 節のロバスト性の内容((ア)と(イ))を用いる．これらの評価が設計変数の初期設定範囲の大きさに依存することを排除するために，その組合せ群の中での相対評価を行う．すなわち望大特性である(a)好ましさと(イ)のロバスト性の評価値の最大値に対して，および望小特性である(ア)は最小値に対して相対評価（無次元化）を行い，区分範囲の組合せの満足性（好ましさとロバスト性）の評価比較の無次元値を $[0, 1]$ の範囲内の値で表現し，その値の大きい組合せを選択する．実際には上記 3 種類の無次元量としての評価値の積を全体の評価値とする．つまり予め与えた性能の範囲に

対する設計変数の区分範囲の組合せの評価間の相対評価（その値を **PRI** とする）である満足性の高い区分範囲の組合せを求めることになる（式 (1)）。このような評価特性を区分範囲の組合せ間での好ましさとロバスト性に関する相対的満足性としている。

$$\begin{aligned} \text{PRI} = & (\text{a}) \text{の}[0,1] \text{の無次元評価値} \times (\text{イ}) \text{の}[0,1] \text{の無次元評価値} \times (\text{ア}) \text{の}[0,1] \text{の無次元評価値} \\ = & \{ (\text{a}) \text{の評価値} / \text{Max}((\text{a}) \text{の評価値}) \} \times \{ (\text{イ}) \text{の評価値} / \text{Max}((\text{イ}) \text{の評価値}) \} \\ & \times \{ \text{Min}((\text{ア}) \text{の評価値}) / (\text{ア}) \text{の評価値} \} \end{aligned} \quad (1)$$

以上のように **PSD** 手法では設計変数の初期設定範囲の区分範囲の組合せ間の性能の目標範囲に対する満足性の相対的評価（相対的満足性）を基準にして、いくつかの区分範囲の組合せがすべての性能範囲に入るまで区分に分割する数 n を徐々に増やすことで、可能な限り少ない n で、範囲が広くて選考度の高い設計変数の区分範囲を選択することになる。

Fig.6 Satisfying ranges of design variables x_i for 3 performances and their common range.

Fig.7 Possibility distribution of performance with preference obtained from equally dividing the ranges of 2 design variables. (schematic representation)

4・4 設計変数範囲から性能範囲への写像

設計変数範囲から性能範囲を求める写像（範囲伝播）には設計変数と性能の関係式を用いる。その関係式として近似式を用いる場合に対応するために、関係式が近似点を必ず通る指数関数を基底とする放射基底関数近似（すべての実験点や計算点を通る近似式）および線形補間近似を新たに導入した。また範囲伝播手法としては、従来、関係式が単調関数であることを前提に、IPT（範囲伝播理論）（Finch and Ward, 1996, Finch and Ward, 1997, Finch, 1997）を用いていたが、非単調な現象にも対応するために PSO（粒子群最適化）法も導入した。

5. 構造系と制御系の同時設計

5・1 設計対象例

前章の新たな導入機能も用いて、**PSD** 手法による異種性能範囲解を求めるための例題として、構造系と制御系の同時設計の有効性を示す例を用いた。この種の同時設計は、緒言でも触れたように従来は設計変数や性能数の比較的少ない課題について検討している。本研究では、**PSD** 手法の有効性を示すために、その課題の具体例（4 性能 6 設計変数）として図 8 に示す孔付き段差形状アーム振子の回転運動の **PID** 制御を用いた。教科書的例題に少し工夫を加えた例題であるが、手法の有効性を示すために用いた。構造系設計における設計変数はアームの領域 b の長さ L_b 、幅 W_b および孔の個数（離散量） N である。孔は領域 b の長手方向に引いた中心線上に等間隔に配置した。領域 a における長さ L_a (0.2 m)、幅 W_a (0.06 m) および孔の直径 d (1cm) は固定とした。

制御系設計における制御方式としてステップ入力に対するフィードバック制御を用いた。この場合の設計変数はフィードバック制御におけるゲインとした。本研究の場合は次節（図 9）で示す比例、積分、微分に関する 3

ゲインである。ゲインの調整法として、例えばジューゲラ・ニコルスの限界感度法等多数あるが、あくまで目安を与えるものであり、最終的には試行錯誤的に調整する変数である（須田, 1994）。

目標性能としては、制御運動性能として、図 10 に示すようにステップ入力（定常値： $\theta(t)=\pi/6$ (30°)）に対する立ち上がり時間 R_s （応答が定常値の 10% から 90% に達するまでの時間）、最大オーバーシュート率 $A_{\max}$ 、整定時間 T_s （定常値の $\pm 2\%$ に入る時間）を、構造性能としては質量 M を選定するものとした。以上より構造系と制御系を通して 4 性能を同時に満足する 6 設計変数の範囲解を求めることになる。

Fig.8 Rotational motion of stepped rectangular arm with holes.

Fig.9 PI-D feedback control.

Fig.10 Control motion performances.

5・2 制御系設計に用いたPID フィードバック制御

PID 制御にはフィードバック量に対する P（比例）、I（積分）、D（微分）を組み合わせたいくつかの制御方式があるが、本研究では図 9 に示す PI-D 制御（微分先行型 PID 制御）を用いた。これは目標値をステップ状とするので、定常状態での微分が零となることを特に考慮して、微分動作をフィードバック補償とするためである。PI-D 制御のコントローラは次式で示される。

$$u(s) = (K_p + K_i/s) e(s) - K_D s y(s) \quad (2)$$

ここで $u(s)$ は操作量、 s はラプラス演算子、 $y(s)$ は制御量、 $e(s)$ は制御量と目標値の偏差、 K_p は比例ゲイン、 K_i は積分ゲイン、 K_D は微分ゲインである。なお、図 9 おける $r(s)$ は目標値、 $C(s)$ は制御器、 $d(s)$ は外乱（本研究では考慮しない）を示す。

本研究の例題である孔付き段差形状アームの回転運動（図 6）の運動方程式は

$$J\ddot{y}(t) = -c\dot{y}(t) - Mlg\sin\dot{y}(t) + u(t) \quad (3)$$

である。ここで $y(t)$ は回転角 ($\theta(t)$)、 $u(t)$ は入力トルク、 M は質量、 l は質量中心から回転軸間の距離、 J は慣性モーメント、 c は粘性摩擦係数（今回は 0.695 とした）、 g は重力加速度である。本研究での例題の目標入力として回転角を $\pi/6$ のステップ関数としたため、上記式 (3) を $\theta = \pi/6$ 近傍で線形化した運動方程式を用いた。線形化した式 (3) で表される運動を図 9 の $P(s)$ に当てはめ、制御系全体のシミュレーションは MATLAB を用いて実行した。

5・3 PSD 手法の適用結果

前述した 4 性能 6 設計変数を有する構造系と制御系の同時設計に関して PSD 手法を適用した。まず設計変数の初期範囲設定の考え方を述べる。一般に、当該設計対象に知見、経験があれば比較的狭く、なければ広く設定する。また設計変数、性能の両者に範囲内の選好度分布を与えるが、これも同種の設計の知見等があれば狙ったところの選好度を高くし、なければ範囲内すべてに対して選好度を 1 の高い状態の分布にする。本手法では、多性能範囲を同時に満たす多設計変数の範囲を求めるが、満たし方は性能と設計変数の範囲の広さと選好度に依存する。今回の例題としては特に、提案手法の特徴を示すために選好度分布の違いを示す例題とした。具体的には設計変数の範囲と選好度の分布に関して次の 2 種類のケースを採用した。

ケース 1 設計変数の初期範囲全体にわたって選好度分布を 1 とする。

ケース 2 設計変数に関して, ケース 1 と同じ初期設定範囲のもとで, 選好度の分布は範囲内中央値を 1 とし, 範囲の端点で 0 になる三角形状とする.

6 設計変数の初期範囲と 4 性能の目標範囲はケースを問わず一定であり, それぞれ表 1, 表 2 に示す範囲とした. なお孔の個数 N は離散量とした. またケース 1 と 2 の違いである選好度分布について, 一例として図 11 に振子の領域 b の幅 W_b について示す. 図 11 中の左図がケース 1, 右図がケース 2 の場合である. いずれも□の角点を結ぶ点線で範囲と選好度分布を示す.

Table 1 Initial interval of design variables.

Design variables	Initial interval
Length of region b, L_b [m]	[0.12, 0.18]
Width of region b, W_b [m]	[0.12, 0.18]
Interval gain, K_i	[12, 18]
Proportional gain, K_p	[12, 18]
Derivative gain, K_d	[0.14, 0.46]
Number of holes, N	[1, 9]

Table 2 Requirement of performances.

Performances	Requirement
Rise time, R_s [s]	≤ 0.13
Maximum overshoot, A_{max} [%]	≤ 20.0
Settling time, T_s [s]	≤ 3.0
Mass, M [kg]	$1.0 \leq M \leq 3.0$

(Case 1)

(Case 2)

Fig.11 Difference of preference distribution of design variable W_b of pendulum.

なお, 図中の赤の実線については後述する. 表 1, 表 2 の初期範囲ならびにケースごとの選好度分布を用いて PSD 手法を適用する. まず 6 設計変数の選好度付き初期範囲を用いて 4 性能それぞれの範囲とそこにおける選好度分布 (可能性分布) を求める. 一例として, 性能の整定時間 T_s の結果を図 12 に示す. 図において青線の範囲と選好度分布は 6 設計変数の初期範囲と選好度分布から写像した結果 (可能性分布) である. □マーク付きの点線が性能の目標範囲 (図の場合は点線の左側) を示している. 青線の範囲は点線の範囲より大きい範囲部分があるので絞込みの対象になる. 設計変数の初期範囲を絞り込んだ結果を表 3 と表 4 に示す. 前述の設計変数 W_b に関する図 11 の赤の実線は W_b に関して絞り込まれた結果を示している. 表 3 の設計変数の絞り込まれた範囲 (区分範囲) を組み合わせて各性能の範囲を求めたのが表 4 になる. また表 4 より絞り込まれた設計変数の範囲に対する選好

Table 3 Narrowing result of design variables.

Design variables	Case 1	Case 2
Length of region b, L_b [m]	[0.120, 0.135]	[0.120, 0.135]
Width of region b, W_b [m]	[0.135, 0.150]	[0.150, 0.165]
Interval gain, K_i	[13.5, 15.0]	[15.0, 16.5]
Proportional gain, K_p	[12.0, 13.5]	[13.0, 15.0]
Derivative gain, K_d	[0.38, 0.46]	[0.30, 0.38]
Number of holes, N	[3, 5]	[1, 3]

Table 4 Narrowing result of performances.

Performances	Case 1	Case 2
Rise time, R_s [s]	[0.102, 0.128]	[0.098, 0.122]
Maximum overshoot, A_{max} [%]	[9.41, 16.08]	[14.70, 19.88]
Settling time, T_s [s]	[2.145, 2.962]	[2.165, 2.929]
Mass, M [kg]	[1.839, 2.468]	[2.152, 2.705]

Fig.12 Narrowing result of performance (settling time) T_s .

度分布の違い（ケース 1 とケース 2）は性能の絞込み結果に表れていることが分かる。したがって課題としている設計問題に関する知見，経験等を設計変数，性能に対する範囲と選好度分布として与えることで，それらを踏まえた多目的性能の同時満足化設計が可能となることが分かる。

6. まとめ

構造系と制御系の同時設計にも表れている多目的同時設計の重要性について述べるとともに，多目的同時設計に関する設計手法としての従来の提案内容をポイントベースとセットベースという大枠から整理し，そこにおける選好度付きセットベース設計（PSD）手法の位置付けを行った。また PSD 手法に関して，従来の提案内容の部分的拡張を含む全体のアルゴリズムを説明し，その対象性能の任意性の観点から PSD 手法における満足性の内容に基づく汎用性を示した。汎用性を示す適用例として構造系と制御系の同時設計を採用し，具体的例題として孔付き段差形状アームの回転運動制御問題において，4 性能 6 設計変数を選択した。また設計変数の初期範囲に対して 2 種類の選好度分布を与えて，4 性能の目標範囲を同時に満足する 6 設計変数の区分範囲を求め，提案手法の有効性を示した。以上より知見や経験等に基づいて初期設計変数と目標性能に範囲と選好度を与えることで，これらに基づく多目的性能の範囲解を提案手法により得られることになる。

文 献

穴井宏和，数理最適化の実践ガイド(2015)，講談社。

Antonsson, E.K. and Otto, K.N., Imprecision in engineering design, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design, Vol.117(1995), pp.25-32.

荒川雅生，多目的最適化の基礎と応用 (2011)，日本機械学会設計工学システム部門。

Bernstein, J. I., Design methods in the aerospace industry: looking for evidence of set-based practice, (Master's thesis), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1998).

Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W., Product Design for Manufacture and Assembly. 2nd ed., New York, Marcel Dekker (2002).

Evans, J.H., Basic Design Concepts, Naval Engineers journal, Vol.71, No.4(1959), pp.671-678.

Finch, W.W. and Ward, A.C., Quantified Relations: A Class of Predicate Logic Design Constraints Among Sets of Manufacturing, Operating, and Other Variations, Proc. of the American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, 96-DETC/DTM-1278(1996).

Finch, W.W. and Ward, A.C., A set-based system for eliminating infeasible design in engineering problems dominated by uncertainty, Proc. of the American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Technical Conference, DETC97/DTM-3886 (1997).

Finch, W.W., Predicate logic representations for design constraints on uncertainty supporting the set-based design paradigm, (Doctor Thesis), the University of Michigan, Michigan (1997).

- Fonseca, C.M. and Fleming, P.J., Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Proc. of the Fifth Inter. Conf. on Genetic Algorithms, San Mateo, CA (1993), pp.416-423.
- Fox, R. I. and Kapoor, M. P., Rates of change of eigenvalues and eigenvectors, The American Institute of Aeronautics and Astronautics journal, Vol.6, No.12 (1968), pp.2426-2429.
- Gray, A.W. and Singer, D., Applied Set-Based Communications and Negotiations System, Naval Engineers Journal, Vol.172, No.3 (2015), pp.61-72.
- 原文雄, ニューラルネットワークによる配管系の最適支持具配置の決定, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.58, No.550 (1992), pp.1728-1734.
- 波田野寿昭, GA による最適化, 計測と制御, Vol. 32, No. 1 (1993), pp. 52-57.
- Kabamba, P.T. and Longman, R.W., An Integrated Approach to Reduced-Order Control Theory, Optimal Control Applications and Methods, Vol.4 (1983), pp.405-415.
- 梶原逸朗, 長松昭郎, モード解析による構造系と制御系の最適設計, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 60, No. 570 (1994), pp.368-373.
- 金丸允昭, ボーイング 777 の国際共同開発, 日本機械学会誌, Vol. 99, No. 932 (1996), pp.562-565.
- Khot, N.S. and Öz, H., Structural-Control Optimization with H2 and H Constraints, 34th SDM (Structures, Structural Dynamics and Materials) Conference, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-93-1470-CP (1993), pp.1429-1437.
- Kubrusly, C.S. and Malebranche, H., Sensors and Controllers Location in Distributed Systems-A Survey, Automatica, Vol.21, No.2 (1985), pp.117-128.
- 呉宏堯, 森初男, 渡邊修, 鈴木秀夫, 松浦峻, 長谷川雄大, 統合的設計管理手法の開発と応用(その1)-セット・ベースド・デザインとモデル・ベースド・リスクマネジメント-, 日本機械学会第19回設計工学・システム部門講演会(2009), pp.101-106.
- 黒岩正, 東芝レビュー, Vol.60 No.1(2005), pp.48-51.
- McKenney, T.A., An Early-Stage Set-Based Design Reduction Support Framework Utilizing Design Space Mapping and a Graph Theoretic Markov Decision Process, (Doctor's thesis), the University of Michigan, Michigan (2013).
- Mehra, R.K., Optimization of Measurement Schedules and Sensor Designs for Linear Dynamic Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions, AC-21-1 (1976), pp. 55-64.
- Mistree, F., Smith, W.F., Bras, B.A., Allen, J.K. and Muster, D., Decision-based Design: A contemporary paradigm for ship design, Paper presented at the Society of Naval Architects and Marine Engineers Conference, San Francisco, CA (1990).
- 森 初男, 呉 宏堯, 統合的設計管理手法 (TDM) の構築と適用事例の紹介, 第28回 日本機械学会 設計研究会 (2009).
- Nahm, Y.-E. and Ishikawa, H., Representing and aggregating engineering quantities with preference structure for set-based concurrent engineering, Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.13, No.2 (2005a), pp.123-133.
- 南充義, 石川晴雄, 初期設計におけるセットベース多目的設計最適化(第1報), 自動車技術会論文集, Vol. 36, No. 6 (2005b), pp. 157-162.
- Nahm, Y.-E. and Ishikawa, H., Novel spaced-based design methodology for preliminary engineering design, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.28 (2006), pp.1056-1070.
- 大日方五郎, 構造系と制御系の同時最適設計問題, 計測と制御, Vol. 36, No. 4 (1997), pp. 254-261.
- Simon, H.A., The Science of the system (The 3rd Edition) (2001), Personal media, p.142.
- Singer, D., Doerry, N. and Buckley, M.F., What is Set-Based Design, Naval Engineers Journal, Vol.121, No.4 (2009), pp.31-43.
- Soong, T.T., Active Structural Control (1990), John Wiley & Sons.
- 須田信英, PID 制御(1994), 朝倉書店.
- Terwiesch, C., Loch, C. H. and Meyer, A. D., Exchanging preliminary information in concurrent engineering: Alternative coordination strategies, Organization Science, Vol.13, No.4 (2002), pp.402-419.

Ward, A., Liker, J. K., Cristiano, J. J. and Sobek II, D. K., The second Toyota paradox: How delaying decision can make better cars faster, Sloan Management review, Vol.36, No.3 (1995), pp.43-62.

山田秀, 実験計画法 - 方法論—(2016), 日科技連, p. 202.

Zimmermann, H.J., Fuzzy set theory and its applications (2001), Kluwer Academic Publishers.

References

Anai, H., Practice guide for mathematical optimization (2015), Kodansha (in Japanese).

Antonsson, E.K. and Otto, K.N., Imprecision in engineering design, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design, vol.117(1995), pp.25-32.

Arakawa, M., Foundation and application of multiobjective optimization (2011), the Japan Society of Mechanical Engineers, Design and Systems Division (in Japanese).

Bernstein, J. I., Design methods in the aerospace industry: looking for evidence of set-based practice, (Master's thesis), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1998).

Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W., Product Design for Manufacture and Assembly. 2nd ed., (2002), New York, Marcel Dekker.

Evans, J.H., Basic Design Concepts, Naval Engineers journal, Vol.71, No.4(1959), pp.671-678.

Finch, W.W. and Ward, A.C., Quantified Relations: A Class of Predicate Logic Design Constraints Among Sets of Manufacturing, Operating, and Other Variations, Proc. of the American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, 96-DETC/DTM-1278(1996).

Finch, W.W. and Ward, A.C., A set-based system for eliminating infeasible design in engineering problems dominated by uncertainty, Proc. of the American Society of Mechanical Engineers Design Engineering Technical Conference, DETC97/DTM-3886 (1997).

Finch, W.W., Predicate logic representations for design constraints on uncertainty supporting the set-based design paradigm, (Doctor Thesis), the University of Michigan, Michigan (1997).

Fonseca, C.M. and Fleming, P.J., Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Genetic Algorithms, San Mateo, CA (1993), pp.416-423.

Fox, R. I. and Kapoor, M. P., Rates of change of eigenvalues and eigenvectors, The American Institute of Aeronautics and Astronautics journal, Vol.6, No.12(1968), pp.2426-2429.

Gray, A.W. and Singer, D., Applied Set-Based Communications and Negotiations System, Naval Engineers Journal, Vol.172, No.3(2015), pp.61-72.

Hara, F., Optimization of Pipe Support Allocation by Neural Network, Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.58, No.550(1992), pp.1728-1734 (in Japanese).

Hatano, H., Optimization by GA, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.32, No.1(1993), pp. 52-57 (in Japanese).

Kabamba, P.T. and Longman, R.W., An Integrated Approach to Reduced-Order Control Theory, Optimal Control Applications & Methods, Vol.4(1983), pp.405-415.

Kajiwara, I. and Nagamatu, A., Optimum Design of Structure and Control Systems by Modal Analysis, Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.58, No.550 (1994), pp.368-373 (in Japanese).

Kanemaru, M., International joint development of Boeing 777, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.99, No.932 (1996), pp562-565 (in Japanese).

Khot, N.S. and Öz, H., Structural-Control Optimization with H2 and H Constraints, 34th SDM (Structures, Structural Dynamics and Materials) Conference, AIAA-93-1470-CP (1993), pp.1429-1437.

Kubrusly, C.S. and Malebranche, H., Sensors and Controllers Location in Distributed Systems-A Survey, Automatica, Vol.21, No.2 (1985), pp.117-128.

Kure, H., Mori, H., Watanabe, O., Suzuki, H., Matsuura, S. and Hasegawa, Y., Development and Application of Integrated

- Design Management Method, the 1st report, Set-Based Design and Model-Based Risk Management, the Japan Society of Mechanical Engineers, Design and Systems Division (2009), pp.101-106 (in Japanese).
- Kuroiwa, T., Trade-off Analysis Method, Toshiba Review, Vol.60, No.1 (2005), pp.48-51 (in Japanese).
- McKenney, T.A., An Early-Stage Set-Based Design Reduction Support Framework Utilizing Design Space Mapping and a Graph Theoretic Markov Decision Process, (Doctor's thesis), the University of Michigan, Michigan (2013).
- Mehra, R.K., Optimization of Measurement Schedules and Sensor Designs for Linear Dynamic Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions, AC-21-1 (1976), pp.55-64.
- Mistree, F., Smith, W.F., Bras, B.A., Allen, J.K. and Muster, D., Decision-based Design: A contemporary paradigm for ship design, Paper presented at the annual meeting, Society of Naval Architects and Marine Engineers, San Francisco, CA (1990).
- Mori, H. and Kure, H., Establishment of Integrated Design Management Method (TDM) and Introduction of Application Examples, The Japan Society of Mechanical Engineers, Engineering Design Committee (2009) (in Japanese).
- Nahm, Y. -E. and Ishikawa, H., Representing and aggregating engineering quantities with preference structure for set-based concurrent engineering, Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.13, No.2 (2005a), pp.123-133.
- Nahm, Y. -E. and Ishikawa, H., Set-Based Multiobjective Design Optimization at the Early Phase of Design (First Report), Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.36, No.6 (2005b), pp.157-162 (in Japanese).
- Nahm, Y. -E. and Ishikawa, H., Novel spaced-based design methodology for preliminary engineering design, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.28 (2006), pp.1056-1070.
- Obinata, G., Simultaneous optimum design problem of structural system and control system, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.36, No.4 (1997), pp.254-261 (in Japanese).
- Simon, H.A., The Science of the system (The 3rd Edition) (2001), Personal media, p.142.
- Singer, D., Doerry, N. and Buckley, M.E., What is Set-Based Design, Naval Engineers Journal, Vol.121, No.4 (2009), pp.31-43.
- Soong, T.T., Active Structural Control (1990), John Wiley & Sons.
- Suda, N., PID Control (1994), Asakura Publishing Co., Ltd, (in Japanese).
- Terwiesch, C., Loch, C. H. and Meyer, A. D., Exchanging preliminary information in concurrent engineering: Alternative coordination strategies, Organization Science, Vol.13, No.4 (2002), pp.402-419.
- Ward, A., Liker, J. K., Cristiano, J. J. and Sobek II, D. K., The second Toyota paradox: How delaying decision can make better cars faster, Sloan Management review, Vol.36, No.3 (1995), pp.43-62.
- Yamada, S., Design of experiments (Methodology), (2016), Union of Japanese Scientists and Engineers, p.202 (in Japanese).
- Zimmermann, H.J., Fuzzy set theory and its applications (2001), Kluwer Academic Publishers.