

多目的最適化の視点に基づく PSS 設計解の導出支援手法

東京都立大学 ○辻彩英子, 三竹祐矢, 稲垣泰, ◎下村芳樹

要旨

製品サービスシステム (PSS) の設計において、複数のステークホルダの要求間のトレードオフを考慮する設計解の探索法として、多目的最適化の手法が注目されている。一方で、既存研究は個別事例への適用に留まり、広範な PSS の設計へ適用可能な一般性を有していないことが、研究成果の実用と普及を損ねている。本稿では、PSS の概念設計段階における、要求間のトレードオフを考慮した汎用的な設計解の最適化手順を提案する。

1 序論

近年、我が国を含む先進国の製造業は、市場競争の激化や社会的要求の多様化、環境への懸念に伴い、その持続性の向上のための改革が求められている。この背景のもと、環境負荷を低減しつつ、国際市場における競争力を高める手段として、製品サービスシステム (Product Service Systems : PSS) が注目を集めている。PSS は、製品とサービスの高度な統合により新たな価値を創造するビジネスモデル¹⁾であり、製品サプライヤやサービス企業など複数のステークホルダの連携により構成される²⁾。一方で、各ステークホルダの重視する要求は異なるため、その要求間に生じ得るトレードオフの難しさが PSS 設計解の導出を困難にしている。しかし、PSS の導入成功のためには、設計方針を定める概念設計段階から、トレードオフを考慮し、各々の要求を可能な限り最大化させる設計解を構成することが必達である。

PSS 設計研究分野では、上記の支援方法として、複数の目的関数間のトレードオフを分析し、制約条件下での最適な近傍解 (パレート解) 集合を導出する多目的設計最適化³⁾が注目されている。しかし既存研究は、対象とする各個別事例への適用⁴⁾に留まり、広範な PSS 設計への適用は未だ達成されていない。具体的には、対象とする PSS 設計問題における目的関数の表現に必要な設計変数や、制約条件の決定、及びそれらを用いた定式化の手順が形式化されておらず、PSS 設計者が設計解の最適化を行うために参照可能な一般的指針が存在しない。そして、これが当該研究成果の実用と普及を損ねており、産業界における PSS 設計解の導出を未だ困難としている。この課題解決のためには、PSS の様々な形態や要求に依らず、適用可能な汎用性の伴う PSS 設計解の最適化手法を構築することが必要である。

本研究は、概念設計段階における要求間のトレードオフを考慮した PSS 設計解の導出支援を目的とし、汎用的な PSS 設計解の多目的最適化手法を構築し、仮説的な PSS 設計事例への適用を通して提案手法の妥当性を検証する。

2 PSS 設計解の汎用的多目的最適化手法

本稿は、要求間のトレードオフを考慮した PSS 設計解の導出に向けて、具体的な定式化手順を整備した汎用性を有する多目的最適化手法を提案する。以下では、各 STEP について詳述する。

STEP1 : 対象範囲とするステークホルダの決定

まず、設計最適化の対象範囲を決定する。そのために、設計者が対象の PSS の実現に必要なステークホルダとその関係性を記述するフローモデル⁵⁾を用いて整理し、最適化の対象範囲とするステークホルダを決定する。

STEP2 : 最適化の目的パラメータの設定

STEP1 で定めたステークホルダの要求群の中で、トレードオフが生じると推定される要求を選定する。そしてこれらの、要求に係る定量的かつ客観的に測定可能なパラメータを最適化の対象とする目的パラメータ (Objective parameter: OP) として設定する。

STEP3 : 設計変数と定数パラメータの設定

STEP2 で設定した各 OP に対して、広義製品 (製品およびサービス) の基本構造を記述するビューモデル⁶⁾を用いて機能展開を行い、OP を充足するための実体が有する属性 (対象物が持つ計測可能な物理的・化学的性質) を特定する。そして、これらを操作の対象とする設計変数候補とする。

その後、OP 間において共通に対応する属性の分析を通して、実際に生じている要求間のトレードオフの詳細を特定する。この際、共通の属性が特定されなかった場合は、当該要求間にはトレードオフは生じないとし、STEP2 に戻り、要求の再選定を行う。

最後に、抽出した設計変数候補に対して、設計者による操作の可否と要否の観点で変数を分類する。その中で、操作が可能かつ必要と判断された設計変数候補を「設計変数」、操作が不可能だが必要、あるいは操作が可能だが不必要と判断された設計変数候補を「定数パラメータ」として分類する。

STEP4 : PSS 設計問題の定式化

STEP3 の結果を基に、対象とする PSS 設計問題を定式化する。具体的には、OP を設計変数と定数パラメータを用いて表現し、目的関数を設定する。この際、設計変数と定数パラメータのみでは目的関数の表現が困難である場合は、間接的な変数として補助変数を適宜追加する。そして、上記に基づき設計変数の制約条件と目的関数値の許容範囲を設定する。

STEP5 : 多目的最適化の実装によるパレート解の取得

最後に、STEP4 の定式化結果を基に、最適化アルゴリズムを用いて多目的最適化を実装し、パレート解を取得する。その結果、パレート解集合により形成されるパレート面が確認された場合は、STEP4 で設定した目的関数値の許容範囲を参照し、設計者が当該要求に即した解を選定する。一方で、出力された解の発散等によりパレート面が形成できない場合は、制約条件が厳しく、探索される解の範囲が極端に狭いことや、定式化内容が不適切である場合が考えられる。そのため、それらの原因に応じて、各ステップに立ち戻り、目的関数や各変数、制約条件の修正を行う。

3 事例適用

3.1 事例概要

本稿では、提案手法の妥当性の検証を目的とし、リチウムイオン電池 (LiB) 搭載の電気自動車 (EV) リースの仮想的 PSS 設計を対象に適用した。その結果を以下に示す。

3.2 事例記述

STEP1 : 対象範囲とするステークホルダの決定

図 1 に本 PSS 実現に必要なステークホルダを整理したフローモデルを示す。LiB を購入し、製造した EV をリースサービスを通じて顧客に提供する EV 会社を中心に、LiB を製造し、EV 会社に販売する LiB 製造企業、EV 会社とリース契約を結び EV を利用する顧客及び部品製造企業、充電サービス会社が特定された。その上で、最適化の対象範囲は、要求間にトレードオフがあると考えられる、EV 会社、LiB 製造企業、顧客と決定した。



図 1 記述したフローモデル

STEP2 : 最適化の目的パラメータの設定

STEP1 で定めた各ステークホルダの要求群から、トレードオフが生じ得る要求として、EV 会社の「利益を上げたい」、「CO₂ 排出量を抑えたい」、LiB 製造企業の「利益を上げたい」、顧客の「気軽に EV を利用したい」を選定した。そして、最適化の対象とする OP として、それぞれ「EV 会社の利益 (f_1)」、「LiB 製造企業の利益 (f_2)」、「EV 走行時の CO₂ 排出量 (f_3)」、「顧客が払うリース料金総額 (f_4)」の 4 つを設定した。

STEP3 : 設計変数と定数パラメータの設定

次に、設定した各 OP の充足に必要な設計変数候補を抽出した。一例として、OP「EV 会社の利益」に対して作成したビューモデルを図 2 に示す。同様に、他の OP に対するビューモデルも作成した結果、実際にトレードオフが存在することを確認した。例え

ば、「EV 会社の利益 (f_1)」、「LiB 製造企業の利益 (f_2)」、「EV 走行時の CO₂ 排出量 (f_3)」の 3 つの OP 間で共通に対応する属性の 1 つに、「EV 台数」を特定した。これは、EV 会社や LiB 製造企業の利益向上には EV 台数の増加が好ましい一方で、CO₂ 排出量の抑制には、EV 台数の減少が好ましいというトレードオフを意味する。

その後、抽出した設計変数候補を、操作の可否及び要否の観点で設計変数と定数パラメータに分類した結果を表 1 に示す。

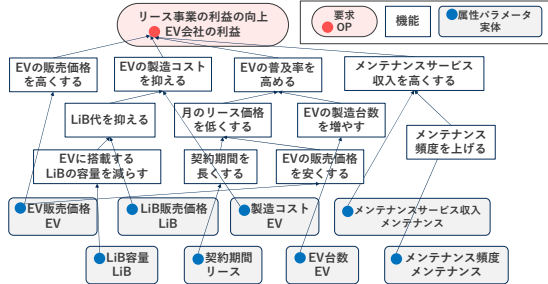


図 2 OP「EV 会社の利益」のビューモデル

STEP4 : PSS 設計問題の定式化

式(1)~(4)に各 OP を設計変数、定数パラメータで表現し、目的関数として定式化した結果を示す。ここでは、EV のリースや製造、LiB に関する文献や市場情報の調査で収集した情報⁹⁾を基に、定数パラメータの値、設計変数の制約条件及び目的関数値の許容範囲を設定した (表 1)。

$$f_1(x) = -1 \times \{x_1 + C_{Emai} \times m - (C_{Eman} + x_3 \times Cap)\} \times x_2 \quad (1)$$

$$f_2(x) = -1 \times (x_3 - C_{Lman}) \times Cap \times x_2 \quad (2)$$

$$f_3(x) = k_{CO2} \times x_2 \times Cap \times (x_4/d) \quad (3)$$

$$f_4(x) = (x_1 - C_{rv})/m + C_{Emai} + (x_4/d) \times C_{ch} \times Cap \quad (4)$$

例えば、「EV 会社の利益 (f_1)」は収入 (EV 一台あたりの販売価格 x_1 + 契約期間 m 内のメンテナンスサービス収入 C_{Emai}) から、支出 (EV 一台の製造コスト C_{Eman} + EV の LiB 容量 Cap 分の LiB の販売価格 x_3) を差し引いた分に、都心部の 1 店舗を想定したリース用 EV の保有台数 x_2 を掛けることで構成した。尚、「CO₂ 排出量 (f_3)」と充電に必要な電力消費量を関連付けるために、補助変数として、CO₂ 排出係数 k_{CO2} を追加し、定式化を行った。

表 1 定式化情報

分類	表記	説明	許容範囲/制約条件/数値	目的パラメータとの対応			
目的パラメータ	f_1	EV 会社の利益 [万円]	$f_1 \geq 4000$	f_1	f_2	f_3	f_4
	f_2	LiB 製造企業の利益 [万円]	$f_2 \geq 2500$				
	f_3	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /月]	$f_3 \leq 3000$				
	f_4	リース料金総額 [万円/月]	$f_4 \leq 7$				
設計変数	x_1	EV 販売価格 [万円/台]	$330 \leq x_1 \leq 470$	○	○	○	○
	x_2	EV 台数 [台]	$10 \leq x_2 \leq 30$	○	○	○	○
	x_3	LiB の販売価格 [万円/kWh]	$5 \leq x_3 \leq 10$	○	○		
	x_4	走行可能距離 [km/月]	$1200 \leq x_4 \leq 1800$			○	○
定数パラメータ	C_{Eman}	EV の製造コスト [万円/台]	100	○			
	C_{rv}	残存価格 [万円/台]	37				○
	m	リース契約期間 [月]	84	○			○
	C_{Emai}	メンテナンスサービス収入 [万円/月・台]	1	○			○
	C_{Lman}	LiB の製造コスト [万円/kWh]	3		○		
	C_{ch}	充電料金 [万円/kWh]	0.0025				○
	Cap	EV の LiB 容量 [kWh/台]	40	○	○	○	○
	d	航続距離 [km]	322			○	○
補助変数	k_{CO2}	CO ₂ 排出係数 [kg-CO ₂ /kWh]	0.441				○

STEP5 : 多目的最適化の実装によるパレート解の取得

最後に、解の効率的な大域的探索が可能であり、局所解に陥りにくい多目的遺伝的アルゴリズム¹⁰⁾を用いて、多目的最適化を実装した。図 3 にその出力結果を示す。ここでは、y 軸を CO₂ 排出量 f_3 、z 軸を月のリース料金総額 f_4 と固定し、x 軸を EV 会社の利益 f_1 、または、LiB 製造企業の利益 f_2 とした 2 つのプロット結果を示している。結果として、双方において異なる角度から、パレート面が出力され、パレート解の取得を確認した。表 2 に、STEP4 で設定した許容範囲内の目的関数値を取る複数のパレート解 (各設計変数値) の一部を示す。例えば、解 1 は、EV 会社及び LiB 製造企業の利益において、解 2 より優れた値を取っている。つまり、4 つの要求のうち、利益を優先度の高い要求とする場合は、

解 1 が最適解になると判断される。このように、提案手法を用いて、要求間のトレードオフを考慮したパレート解集合が獲得可能であることを確認した。

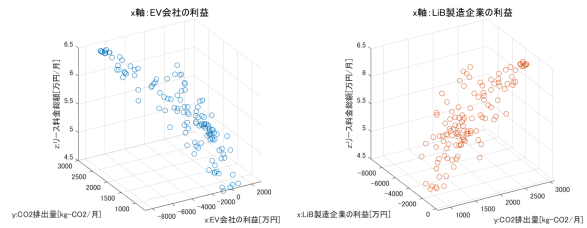


図 3 パレート解の出力結果

表 2 許容範囲内のパレート解の一部

解番号	優れている解							
	利益 (EV) [万円] f_1	利益 (LiB) [万円] f_2	年間 CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /年] f_3	リース料金総額 [万円/月] f_4	EV 販売価格 [万円/台] x_1	EV 台数 [台] x_2	LiB の販売価格 [万円/kWh] x_3	走行可能距離 [km/月] x_4
1	5977.1	2921.2	2902.0	6.21	434.5	29	5.45	1567.7
2	4967.4	2626.0	2499.4	6.00	418.6	26	5.44	1497.8

4 考察と展望

本稿では、提案手法を基に、仮想的な事例適用を行い、実際にトレードオフを考慮した PSS 設計解の導出が可能であることを確認した。本手法では、PSS 設計解の多目的最適化にあたり、これまで整備されていなかった操作すべき設計変数の特定・分類に係る具体的な手順を提案した点において、情報が限られ、自由度が高い概念設計段階においても PSS 設計問題の定式化を容易にすることが期待できる。

また、得られたパレート解集合における設計変数値の妥当性も確認した。例えば、表 2 に示した解 2 の「EV 販売価格」や「走行可能距離」の値は、社会における実勢の「EV 販売価格 (400 万円)」及び「走行可能距離 (1500km)」との差が小さいことから、得られた設計解は一定の妥当性を有すると考えられる。

一方で、提案手法は、設計者自身による設計変数等の決定を伴うため、設計者の有する情報量やスキル、主観に依存した結果が出力される。そのため、より妥当な設計解の導出には、複数の設計者間での協議を通じた適用により、設計者間における知識やスキルの不足を相補完しつつ実施することが望ましい。また本稿では、取得したパレート解の妥当性を、既存の PSS に関連する情報と比較することにより検証しているが、過去に実装されていない新たな PSS の設計に関するパレート解の妥当性や実現可能性を同方法で検証することは出来ない。今後は、この課題に対する解決方法を検討するとともに、実際の PSS 設計事例への適用を通して、提案手法の信頼性と実用性の向上を図る。

参考文献

- [1] Tukker A., "Eight types of product-service system: Eight ways to sustainability? Experiences from suspronet", Bus Strateg Environ, (2004), Vol.13, No.4, pp.246-260.
- [2] 北山哲士, "工学系のための最適設計法", 共立出版株式会社, (2021).
- [3] Sun H., Liu Y., Sakao T., Wang Z., "Configuring user-oriented aero-engine overhaul service with multi-objective optimization for environmental sustainability", J Clean Prod, (2017), Vol.162, pp.94-106.
- [4] 下村芳樹, 原辰徳, 渡辺健太郎, 坂尾知彦, 新井民夫, 富山哲男, "サービス工学の提案", 日本機械学会論文集 C編, (2005), Vol.71, No.702, pp.669-676.
- [5] 佐藤登, 菅原秀一, 風間智英, 藤田誠人, "大容量Liイオン電池の製造・コスト解析と安全性: 製造・コスト・安全性・国際規格・市場展望", シーエムシー出版, (2020).
- [6] Forrest S., Mitchell M., "Adaptive computation: The multidisciplinary legacy of John H. Holland", Commun ACM, (2016), Vol.59, No.8, pp.58-63.