

# 多次元ベクトル表現に基づく設計概念の新規性評価手法

## A method for evaluating design concepts' novelty based on multidimensional vector representation

○古屋かほる (東京都立大学大学院) \*1      増村陸 (東京都立大学大学院) \*2  
筒井優介 (岡山県立大学) \*3      下村芳樹 (東京都立大学) \*4

\*1 Kahoru Furuya, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka Hino-shi Tokyo, 191-0065, furuya-kahoru@ed.tmu.ac.jp

\*2 Riku Masumura, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka Hino-shi Tokyo, 191-0065, masumura-riku@ed.tmu.ac.jp

\*3 Yusuke Tsutsui, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki Soja-shi Okayama, 719-1197, tsutsui@cse.oka-pu.ac.jp

\*4 Yoshiki Shimomura, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka Hino-shi Tokyo, 191-0065, yoshiki-shimomura@tmu.ac.jp

キーワード: 創造性, 新規性評価, 概念設計, 多次元ベクトル表現

### 1. 緒 言

近年, 我が国を含む社会の持続的な発展には, 従来とは抜本的に異なる創造的な設計による問題解決が必要とされており, これを受けて設計者が考慮すべき問題が高度化している<sup>(1)</sup>. 例えば, 創造的な設計を行うためには, 設計の上流段階に位置づけられる概念設計において, 設計者が創造性の高い設計解を導き得る概念を選択する必要がある. そして, 設計者の能力に過度に依存することなくその選択を可能とするためには, 概念の創造性を評価する手法の確立が必須である.

設計における創造性は一般的に新規性と有用性の2つの尺度で評価されるが<sup>(2)</sup>, 概念設計段階では設計解の抽象度が高く, 物理的な顕在性が乏しいため, 有用性の評価が特に困難である<sup>(3)</sup>. そこで本稿では, 創造性の高い設計解選択支援の第一段階として概念の新規性評価を研究対象とする.

概念設計段階において, 設計者は新規性の高い概念を仮説的に生成, それらの比較・検討を通じて洗練化することが求められる<sup>(4)</sup>. 一方で, 設計者が仮説的に生成した概念の定量的な評価基準は明らかでなく, このことが創造性の高い設計解を導き得る新規性の高い概念を合理的に選択することを困難としている. 上記の課題を受け, 本稿では, 設計者が仮説的に生成した概念の新規性を評価する手法の構築を目的とする.

### 2. 先行研究と本研究の位置づけ

#### 2.1. 既存の新規性評価手法

概念の新規性を測るアプローチは定量的な評価と定性的な評価に大別される. 定量的な評価の代表的な例として Sarkar は, 製品の novelty 評価は従来製品との違いを特定するために不可欠であるという考えのもと, 新製品と既存製品を比較し, 異なる機能と構造の数に応じて点数を割り当てることで新規性を評価する手法を提案した<sup>(5)</sup>. 一方, 定性的な評価の代表的な例として, Ruiz-Pastor らは, 設計者が想起した機能を満たす既存製品の有無, 機能を満たすた

めに使用される技術や材料を整理することで, 想起した機能が既存製品に見出される可能性を5段階でランク付けした. そして, そのランクに応じ, 概念設計段階において想起された機能の新規性を評価する手法を提案している<sup>(6)</sup>.

#### 2.2. 本研究のアプローチ

Sarkar らの手法を用いることにより, 概念の新規性の評価結果を数値として得られる一方で, 点数を割り当てる際に評価者の主観が影響するため, 必ずしも再現性が担保されない. さらに本手法は, 製品の詳細設計の完了後に適用することを想定しており, より抽象度が高い概念設計段階での適用は困難である. Ruiz-Pastor らの手法は, 設計解の有する機能を評価対象としており, 概念設計段階において想起された機能の新規性を評価可能な手法であるが, その評価基準は定性的であり, 概念を定量的に評価するための基準は未整備である.

以上の課題に対し本研究は, 概念設計段階において設計者が仮説的に生成した概念を評価者の主観に依らず定量評価する手法の構築を試みる. 手法の構築にあたり, 3章では, 本稿の研究対象である概念設計段階において設計者が想起する概念を, 設計者の知的活動を論じた一般設計学の用語を用いて説明する (3.1 節). 続いて, 本研究における新規性評価法の基盤となる考え方を示している概念間距離の算出法<sup>(8)</sup>について説明する (3.2 節). 4章では, 本研究で評価対象とする概念を定義し, 概念距離の算出法を応用することで, 概念の新規性を定量的に評価する手法を提案する.

### 3. 理論的基盤

#### 3.1. 一般設計学<sup>(7)</sup>

設計者の知的活動を数理的に説明した理論である一般設計学において, 設計者は「実体概念 $s$ 」と「抽象概念 $T$ 」を操作する主体と捉えられる. ここで, 実体概念 $s$ とは, 人間が実体 $s'$ を体験することで成立する概念, 抽象概念 $T$ とは, 意味ないし価値に導かれて実体概念を分類する際の各類に関する概念である. さらに抽象概念は, 実体の性質に関する客観的な特性を示す属性概念と, 機能的価値に対応する

機能概念に大別される。

### 3.2. 概念距離の算出法<sup>(8)</sup>

橋らは、より距離の遠い抽象概念を組み合わせることで、新規性の高い実体概念が得られるという考え<sup>(9)</sup>に基づき、特許情報の要旨から抽出した抽象概念を表す数百次元のベクトルを生成し、2つのベクトル間にコサイン類似度を定義することで抽象概念間の距離を算出する方法を提案した。その際、橋らは、近年のデータサイエンス技術を用いて、抽象概念間の距離を機械的に算出可能とした。設計者はこの方法から得られる算出結果に基づき距離の遠い2つの抽象概念を組み合わせることで、新規性の高い実体概念の生成を可能としている。

## 4. 提案内容

本研究では、概念設計において産生される実体概念を特徴づける抽象概念間の距離を自然言語処理により機械的に算出することで、当該実体概念の新規性を評価者の主観に依らずに評価可能であると仮定し、本仮定の下、手法を構築する。

本稿では、設計結果は要求された機能を発揮する実体とされる<sup>(7)</sup>ことから、設計解のもつ機能的側面を表す機能概念に着目し、設計解を特徴づける性質に関する発話から機能概念を表す文を抜粋する。そして、機能概念を表す文を多次元ベクトルに変換し、それらを二次元平面に圧縮表示する。さらに、機能概念同士を直線で結んだ際に成る図形の面積が大きいほど、それらの機能概念でその性質が規定される実体概念の新規性が高くなるという仮定を置き、手法を構築する。以下に各ステップの詳細を述べる。

### STEP1：発話データから概念を抜粋

まず、設計者が仮定的に産生する機能概念の抜粋方法を定義する。機能概念は一般的に動詞、目的語、修飾語の組み合わせで表現される<sup>(10)</sup>ため、設計解を特徴づける性質に関する発話から各品詞に該当する語を抜粋し、設計解の有する機能を文で表現する。その際、主語を設計対象、または設計対象が有する機構とし、「(Sが) OをVする」の形で機能の記法を定義する。設計対象が主語の機能概念は、設計解が有する機構を修飾語として、「設計解が有する機構」でOをVする」の形で、設計解が有する機構が主語の機能概念は、「設計解が有する機構」がOをVする」の形で記述する。

### STEP2：文ベクトルの算出

抜粋した機能概念を表す文を構成する単語間の関係から文をベクトルに変換可能な手法に適用することで定量化する。自然言語処理では、文の特徴量を数百次元のベクトルで表現し数値化することで、文同士の意味的な類似度の比較を可能にしている。機能概念を表す文のベクトル（文ベクトル）の算出には Transformer Encoder に基づくモデルである BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) を使用する<sup>(11)</sup>。BERT とは Google 社が発表した自然言語処理モデルであり、単語や文を表す多次元ベクトル表現を獲得する際に広く用いられているモデルのひとつである。文ベクトル  $w$  は、文を構成する各単語の単語ベクトルを求めた後に、式(1)に示すように、単語ベクトルの線形和  $v_{sum}$  を機能概念を表す文を構成する単語数  $n$  で割り平均化することにより算出される。

$$w = \frac{v_{sum}}{n} \quad (1)$$

さらに、単語や文のベクトルを獲得する代表的なモデルに Word2Vec<sup>(12)</sup>がある。Word2Vec は、大量のテキストを学習データとして用い、ニューラルネットワークのモデルによる学習を行うことで、数百次元のベクトル空間を生成し、単語の意味を数値表現可能とする手法である。その際、1つの単語に対して1つの単語ベクトルを生成するため、単語と単語ベクトルは1対1対応となる。そのため、文脈により意味が異なる多義語が機能概念に含まれる場合でも、同一の単語ベクトルが算出され、その意味の差異を表現することは困難である。一方、BERT は事前学習の際に、学習する単語の前後の単語を併せて使用することで、文中のすべての単語との関係性から単語ベクトルを算出可能なモデルである。ゆえに、1つの単語に対し、複数のベクトル表現を生成し、入力された文に応じて、単語の意味を反映した最適な単語ベクトルを出力可能である。以上を踏まえ本稿では文ベクトルの算出には BERT を用いる。なお本稿では、日本語版 Wikipedia をもとに学習された既存の BERT モデルを用いて文ベクトルを算出する<sup>(13)</sup>。Wikipedia は様々な分野の専門用語から常識に関連する用語までの膨大なテキスト情報を蓄積しているため、学習データとして用いることで客観的な評価結果を算出可能である<sup>(14)</sup>。

### STEP3：二次元平面への圧縮と面積比較

本ステップではまず、多次元で表現された文ベクトルを二次元平面に圧縮することで、機能概念間の類似性を二次元平面上に可視化する。次元圧縮法は一般的に、線形アプローチと非線形アプローチの2つに大別され<sup>(15)</sup>、それぞれで用いられる代表的な手法が PCA (Principal Component Analysis) と t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) である<sup>(16)</sup>。線形アプローチは、高次元空間を低次元空間に線形にマッピングする手法で、データの分散に着目することで大域的な構造を保持して次元圧縮する。一方、非線形アプローチでは、高次元空間を低次元空間に非線形にマッピングする手法で、点同士の近さに基づいた条件付き確率分布を用いることで高次元空間における各データの類似性の情報を保持して次元圧縮を行う。

本稿では、機能概念間の距離と新規性の関係に着目し、手法を構築する。その際、機能概念間の距離は機能概念を表す文同士の意味類似性に基づき定められることから、各機能概念の類似性に係る情報を保持しつつ次元を圧縮することが重要である。したがって、本稿では、データごとの類似性を保持して次元を圧縮可能な非線形アプローチの代表的な手法である t-SNE を用いて、機能概念を表す多次元の文ベクトルを二次元平面に圧縮し、可視化する。

続いて、二次元平面上にマッピングされた文ベクトルを結ぶことにより成る図形の面積を算出する。算出後、図形の面積が大きいほど当該設計解の新規性も高いという考えのもと、多角形の面積を比較することで各設計解の新規性を評価する。

## 5. 事例適用

### 5.1. 事例適用の概要

提案手法の有効性を検証するため、工学系大学院の機械系研究室に所属する学生2名及び教員1名を対象として実

施した設計実験の結果に、本手法を適用した。本設計実験では、「自動で舗装道路の地下を地盤調査するロボットの設計」を設計課題に設定し、レーダを配置するスペースを設けること、探査時はレーダと地面の距離を 3cm 以内にするこ、15cm の段差の乗り越えを可能とすること、の 3 つを制約条件として設けた。3 人の設計者には、30 分間で 1 つの設計解を導出する実験を 3 回実施した。設計実験を通じて、著者らは設計者の発話のプロトコルデータと、各設計解の新規性の主観評価に係るデータを取得した。その後、取得したプロトコルデータに提案手法を適用し、設計解の新規性評価を行った。また、実験後にそれぞれの設計者に対して、各設計解の新規性の度合いを 5 段階 (1[低]~5[高]) で主観評価するアンケートを実施した。最後に、新規性評価結果と設計者の主観評価を比較し、手法の有効性を検証した。

5.2. 事例適用結果

STEP1：発話データから概念を抜粋

設計解 I, II, III を導出する際の発話を記録したプロトコルデータから設計解を特徴づける機能概念を抜粋した。本事例では、機能概念の抜粋の際に、設計者が作成したビューモデル<sup>(17)</sup>を参照した。ビューモデルとは、設計対象の機能構造および機能単体なる実体の関係を平面上に配置し、可視化するモデルである。本研究では、設計解における機

能概念間の関係を整理する目的で、発話データを参照しながら著者らがビューモデルを構成した。そしてビューモデルに基づき、設計解を特徴づける性質に関する発話から、制約条件を満たす機能概念を表す文を抜粋した。その結果、各設計解に対し、機能概念を表す文が 4 つずつ抜粋された。最後に、各設計解に関して抜粋した機能概念の記法を 4 章の定義に従い統一した (表 1)。

STEP2：文ベクトルの算出

抜粋した機能概念に対して 4 章に述べた BERT モデルを適用し、各機能概念を表す文の多次元ベクトルを算出した。

STEP3：二次元平面への圧縮と面積比較

数百次元で表現される機能概念を表す文ベクトルを t-SNE により、二次元に圧縮した。その結果、各機能概念を表す点が二次元平面上にプロットされた。さらに、今回の事例適用では、凸包を生成するアルゴリズムである Convex hull<sup>(18)</sup>を用いることで、対象となる点群をすべて含む最小の多角形を作成した。その後、高度な科学技術計算が可能な Python ライブラリの SciPy を使用し、多角形の面積を算出した<sup>(19)</sup>。最後に、設計解に対する新規性の主観評価の平均を求め、各設計解に関して求めた機能概念が成す図形の面積と比較した。各図形の面積と各設計者が設計解の新規性を 5 段階で評価した結果の平均を表 2 に示す。

Table.1 Functional concepts of each design solution

Design solutions	Functional concepts
I	$T_{1a}$ : Robot moves as if paddling on the ground with an arm.
	$T_{1b}$ : Robot kicks the ground with its arm.
	$T_{1c}$ : Robot maintains height on casters.
	$T_{1d}$ : Robot moves on the ground on casters.
II	$T_{2a}$ : Wheels do not skid.
	$T_{2b}$ : Oncoming two-wheelers skid on the ground.
	$T_{2c}$ : Robot climbs steps with omni-crawlers.
	$T_{2d}$ : Suspension absorbs shock.
III	$T_{3a}$ : Wheels and omni-wheels move up and down.
	$T_{3b}$ : Robot climbs steps on wheels that move up and down.
	$T_{3c}$ : Robot moves on the ground with omni-wheel.
	$T_{3d}$ : Driving wheels turn on the ground

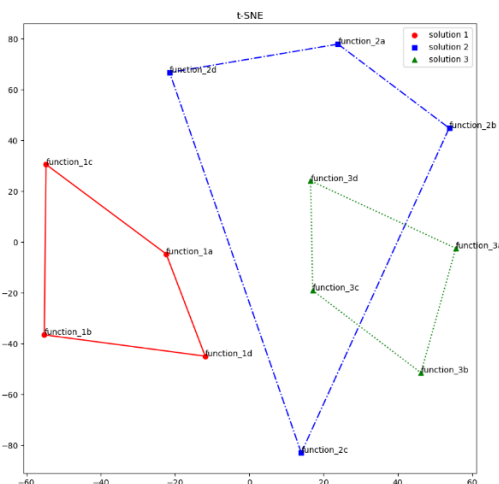
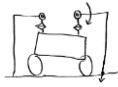
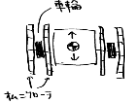
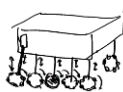


Fig.1 Figure formed by the functional concepts of each design solution

Table.2 Novelty comparison of each design solution

Design solution	I	II	III
Sketch			
Graphic area	200.64	379.11	189.90
Average of subjective evaluation	3.33	4.33	2.33

## 6. 考察

### 6.1. 提案手法の有効性

5.2節で示した事例適用結果では,提案手法により算出した機能概念が成す図形の面積と設計者の新規性の主観評価の大小関係が一致し,提案手法が新規性評価手法として一定の有効性を有することが推測された.既存の新規性評価手法は,定性的あるいは評価者の主観が評価結果に影響するため,概念設計段階において設計者が生成した概念を設計者の主観に依らず定量的に評価する手法は未構築であった.本研究では,設計者が設計過程において仮想的に生成した概念を多次元ベクトルで表現した後,二次元平面上に圧縮表示し,機能概念がなす図形の面積を求めることを通して,概念の新規性を定量的に評価可能とする方法を提案した.その際の多次元ベクトル表現および二次元平面状への圧縮処理を自然言語処理等のデータサイエンス技術を用いて機械的に算出することで,主観性を低減させたより客観的な評価結果を示した.

さらに本手法では,3.2節で述べた概念距離の算出法を応用することで複数の機能概念により特徴づけられる実体概念の新規性を評価する手法を提案した.従来研究における抽象概念間距離の算出法は,抽象概念を表す2つのベクトル間のコサイン類似度に基づく概念距離の算出により2つの抽象概念により特徴づけられる実体概念の新規性を評価可能である.一方で,複数の抽象概念により特徴づけられる実体概念の新規性を評価する手法については十分に検討されていなかった.本手法では,機能概念を表す文ベクトルを二次元平面上に圧縮表示し,複数の機能概念が成す図形の面積を算出することを提案している.このような面積の値を用いることで,複数の抽象概念により,その性質が規定される実体概念間の新規性を評価する可能性を示した.以上本手法は,複数の抽象概念の導出が行われる現実の設計において,設計解の新規性を評価する一つの手段として期待される.

### 6.2. 提案手法の課題と展望

本稿における事例適用では,STEP1の機能概念の抜粋を発話データから手動で行った.今後,他の設計への手法適用を行う際に,発話量が多い場合は概念の抜粋を効率的に行う支援が必要である.例えば,機能概念は動詞,目的語,修飾語の組み合わせで表現されることが知られているため,発話データから各品詞に該当する単語を自然言語処理により抜粋する等の方法が考えられる.さらに,本事例適用では,抜粋された機能概念の数が各設計解に対し4つずつと同数であったため,設計解ごとに機能概念の数が異なる際の新規性評価に関しては有効性が未検証である.今後は,頂点の数が面積に与える影響等を考慮し,手法を改善する

ことで,機能概念の数が異なる設計解同士の新規性を評価可能な手法の構築を目指す.

本稿では,設計解を特徴づける概念が成す図形の面積比較により生成された実体概念の新規性を評価したが,設計過程において仮想的に生成された機能概念の評価手法に関しては未構築である.加えて,本稿における事例適用では,ビューモデルに基づき各設計解を特徴づける機能概念を抜粋したため,設計過程で設計者が棄却した機能概念に関しては評価の対象外であった.今後は,かような設計過程で棄却される機能概念についても新規性評価の対象に含めるよう手法を改善することで,設計者による新規性の高い機能概念の棄却を防ぎ,設計者に合理的な概念の選択を促す手法の構築を目指す.

また,本稿では,STEP2の文ベクトルの算出において,日本語版 Wikipedia をもとに学習された既存のBERTモデルを用いた.Wikipediaは,学習モデルを構築する際に必要な膨大なテキスト情報を取得可能な情報源である一方,誰もが編集可能なオープン百科事典であるため,その内容は信頼性が高いとは言い難い.それが要因となり,BERTモデルにより算出される文ベクトルも事実とは異なる値となるいわゆるハルシネーションが引き起こされる可能性がある.かような問題を避けるためには,用いる学習データの質を向上させる必要がある.例えば,学習データとして特許文書データベースを用いたモデルを使用することで,より専門的な情報に基づいた文ベクトルの算出が期待できる.現時点では,学習データによる影響を完全に抑制することは困難だが,評価結果への影響を緩和させるための方法に関しては今後の検討が必要である.

さらに,本手法の評価対象とした新規性は,設計者の中での新しさの程度を表す認知的新規性であり,社会における新しさの程度を表す工学的新規性の評価手法は未構築である.新しい製品が多く生み出される現代において,取得可能な製品情報の有限性から,工学的新規性の評価は困難である.一方で,概念設計段階において工学的新規性の評価が可能となることで,社会や企業にとって新たな変革をもたらし得る新規性の高い設計解の導出を支援できる可能性があるため,今後は工学的新規性を評価可能な手法の検討も必要である.さらに,設計過程で生成される概念の有用性を評価可能な手法を構築し,概念の新規性と有用性を総合的に評価可能な創造性評価手法の検討を行う.

## 7. 結論

本稿は,実体概念である設計解を特徴づける機能概念を多次元ベクトルに変換し,二次元平面上に圧縮表示することで,設計過程において仮想的に生成される実体概念の新規性を可視化し,定量的に評価する手法を構築した.加え

て、設計実験に提案手法を適用した結果、設計者の主観的な評価結果と提案手法により導出した概念が成す図形の面積の大小関係が一致し、提案手法が妥当性を有することを確認した。今後は、複数の設計に本手法を広く適用しつつ手法を改善し、創造的な設計解を導き得る新規性の高い概念を特定する設計支援手法の完成を目指す。

## 文 献

- (1) 下村芳樹: 設計の哲学, その虚々実々, 日本機械学会 2023年度年次大会講演論文集, 先端技術フォーラム F121-3, web公開, 2023.
- (2) Ranjan, B. S. C., Siddharth, L., Chakrabarti, A.: A systematic approach to assessing novelty, requirement satisfaction, and creativity, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol.32, No.4, 390-414, 2018.
- (3) Acharya, S., Bhatt, A. N., Chakrabarti, A., Nagai, Y.: Fostering Creativity in Design - An Empirical Study on Improvement of Requirement- satisfaction with Introduction of InDeaTe Tool, *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, Vol.1, No.1, 3631-3640, 2019.
- (4) 野間口大, 河原貴大, 正田浩暉, 藤田喜久雄: 設計概念生成のための新規性ポテンシャルの考え方と単語類似度計測によるその評価法の提案, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890, 6-20, 2019.
- (5) Sarkar, P., Chakrabarti, A.: Assessing design creativity, *Design Studies*, Vol.32, No.4, 348-383, 2011.
- (6) Ruiz-Pastor, L., Chulvi, V., Mulet, E., Royo, M.: A metric for evaluating novelty and circularity as a whole in conceptual design proposals, *J Clean Prod*, Vol.337, 130495, 2022.
- (7) 吉川弘之: 一般設計学序説, 精密機械, Vol.45, No.536, 906-912, 1979.
- (8) 橘智也, 正田浩暉, Syamimi, A. B. A. R., 野間口大, 岡本和也, 藤田喜久雄: 新規性ポテンシャルと単語分散表現モデルに基づく特許情報からの設計概念生成, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.905, 21-222, 2022.
- (9) Taura, T., Nagai, Y.: A systematized theory of creative concept generation in design: first-order and high-order concept generation, *Res Eng Des*, Vol.24, No.2, 185-199, 2013.
- (10) Shimomura, Y., Yoshioka, M., Takeda, H., Umeda, Y., Tomiyama, T.: Representation of design object based on the functional evolution process model, *JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN*, Vol.120, No.2, 221-229, 1998.
- (11) Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., Toutanova, K.: BERT: Pre-Training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, *arXiv preprint arXiv*, 1810, 04805, 2018.
- (12) Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., Dean, J.: Efficient estimation of word representations in vector space, *arXiv preprint arXiv*, 1301, 3781.
- (13) 東北大学: BERT Model for Japan NLP: <https://github.com/cl-tohoku/bert-japanese/tree/v1.0>. (参照日 2023年7月3日)
- (14) 野間口大, 正田浩暉, 橘智也, 藤田喜久雄: 外延的概念空間の操作による設計概念生成支援フレームワーク, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.914, 22-191, 2022.
- (15) Anowar, F., Sadaoui, S., Selim, B.: Conceptual and empirical comparison of dimensionality reduction algorithms (PCA, KPCA, LDA, MDS, SVD, LLE, ISOMAP, LE, ICA, t-SNE), *Comput Sci Rev*, Vol.40, 100378, 2021.
- (16) Silva, R., Melo-Pinto, P.: t-SNE: A study on reducing the dimensionality of hyperspectral data for the regression problem of estimating oenological parameters, *Artificial Intelligence in Agriculture*, Vol.7, 58-68, 2023.
- (17) 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, Vol.71, No.702, 669-676, 2005.
- (18) Barber, C. B., Dobkin, D. P., Huhdanpaa, H.: The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol.22, No.4, 469-483, 1996.
- (19) scipy.spatial. ConvexHull - SciPy v1.11.2 Manual: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.ConvexHull.html>. (参照日 2023年7月3日).