

食感デザインのための物性・感性を目的とした物質配合の設計支援

小平 乙寧* 千田 知佳* 宮下 芳明*

概要. 本稿では、目的の食感となる物質の配合を物性、感性から得るための手法を提案する。物性から食感をデザインする手法では、物質的特性を操作可能なパラメータとして扱い、物質的特性を示すグラフ、物質配合および食感に関する言語表現のいずれかを操作し、目的の食感を得る。感性から食感をデザインする手法では、感性語を直接操作可能な数値的パラメータとして扱う。ユーザが操作した感性語パラメータの値に対し、LLMと機械学習モデルが物質の配合を推定する。これにより、消費者から専門家までを包含する汎用的な食感デザイン支援システムを目指す。

1 はじめに

味覚分野では、機械学習を用いて言語表現から味わいのレシピを提案する研究 [1][10] や、味・香りの再現 [2][8][10] に加え、口当たり・食感の再現手法も提案されている。著者らは、オリーブオイル [9] やカスタードクリーム [11] の食感を、脂質を用いずに再現する手法を提案し、Pereira らは層積造形の充填パターンや密度設計により目標テクスチャを付与可能であることを示した [5]。機械学習を用いて物質の配合から粘度などの物性予測をする研究 [3] が行われている。しかし、多様な目的・制約・ユーザに応じた食感再現手法は未だ確立されていない。そこで我々は、目的の食感となる物質の配合を物性、感性から得ることで、課題解決を図った。

例えば、嚥下障害を有する人々が安全かつ安心して摂食できる物性への社会的需要は高い。そのため、誤嚥リスクの低減と満足感の両立を図る食感デザインの確立が重要な課題である。一方で、一般消費者は誰もが理解しやすい感性語で食感を理解している。このようなユーザが、容易に食感をデザインできる対話的な手法の確立も課題の一つであると考える。

本稿は、望む食感を得るための物質の配合設計支援手法を、物性目的と感性目的から提案する。物性目的では、食感に関する言語表現から、物理特性を示すグラフを推定し、推定されたグラフに適合する物質の配合を逆算する双方向の推定手法を提案する。推定グラフのドラッグ編集と、配合量のスライダー編集から、再度グラフと配合が計算され、対応する言語表現も更新される。これにより、言語表現・物性グラフ・配合の往復を可能にする食感デザインシステムを提案する。感性目的では、「濃厚感」「ボディ感」などの感性語に基づくパラメータに対し、LLMと機械学習モデルが配合をリアルタイムに推定する

システムを提案する。感性語パラメータの評価値を二次元マップ上に配置し、食感の印象変化を可視化することで、専門知識を要せず対話的な食感デザインを実現する。将来的には、両システムを相互接続することで、一般消費者から専門家までを包含する汎用的な食感デザインシステムへの拡張を図る。

2 物性目的の支援手法

食感は、粘弾性および口腔内潤滑に強く依存しており [6][7]、官能印象には、貯蔵弾性率とひずみの依存性が直結する。そこで、食感に関する言語表現から、物理特性として貯蔵弾性率とひずみの関係を推定し、推定されたグラフに適合する物質の配合量を推定する手法を提案した。

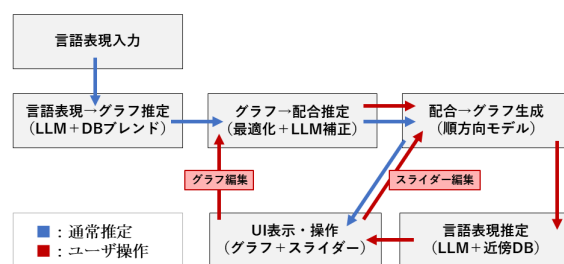


図 1: 提案システムの双方向の推定フロー

図1は、言語表現から貯蔵弾性率とひずみの物性グラフを推定し、可視化する処理と、推定グラフから、その食感を再現する配合を逆推定する、双方向の推定フローを示す。赤色の矢印は、ユーザのグラフのドラッグ編集や、配合スライダーの操作による推定ループを示す。

提案手法は、一部既存食品における物理特性のデータと、物質の配合により得られた物理特性のデータおよび、配合に関するデータベースを保持している。ここでは、配合から物理的特性を推定することを順方向モデル、物理的特性から配合を推定することを逆方向モデルと呼ぶ。

言語表現からのグラフ推定 入力された言語表現とデータベースをもとに、LLM が初期グラフを推定する。初期グラフとデータベースの各グラフのコサイン類似度をもとに、重み付け平均から近傍グラフを生成する。そして、LLM グラフと近傍グラフをブレンドし、言語表現の柔軟性と実測データに基づく現実性を併せ持つグラフを生成する。LLM グラフと近傍グラフの差が大きいほど、LLM 側のブレンド比率を下げ、非現実的な形状を避ける。

グラフからの配合推定 (逆方向モデル) データベース内にある、複数物質の配合により得られた物性グラフと、推定されたグラフに最も近いものを初期グラフに設定する。推定グラフと初期グラフの誤差を形重視の log MSE で評価し、各成分を指定した範囲内で調整、探索する。log MSE が最小になるときの各成分量を、最も適した配合として出力する。

配合からのグラフ推定 (順方向モデル) 各成分が指定した範囲内に存在するか確認した後、形が常に一定のグラフを初期解に設定する。データベースをもとに学習した各成分の特性をひずみの固定グリッド上で9点に反映し、グラフを生成する。

言語表現の生成 最初の言語表現に加え、グラフと配合から得たヒントを LLM に渡して日本語文を生成する。低ひずみ (崩れていない時の硬さ): ボディ感 (軽い/中程度/しっかり), ゼラチンの配合量: 弾性 (弱い/やや/明確), 高ひずみ/低ひずみの差: ほどけ方 (ほどける/ゆっくり崩れる), PHGG とイヌリンの和: 口当たり (なめらか/ややざらつき)。

ユーザインターフェース ユーザはグラフのドラッグ編集や配合のスライダー編集が可能であり、操作に応じた推定、描画を繰り返す。さらに、食感に関する言語表現も更新し、形状変化を言語で即座にフィードバックすることで、グラフ、配合、テキストを往復しながら、調整することができる。

3 感性目的の支援手法

感性語パラメータの操作から望む食感を実現する配合を推定する手法について述べる。図2は全体の操作・推定フローを示し、配合から感性語パラメータ評価値の推定を順方向モデル、その反対方向の推定を逆方向モデルにより行う。

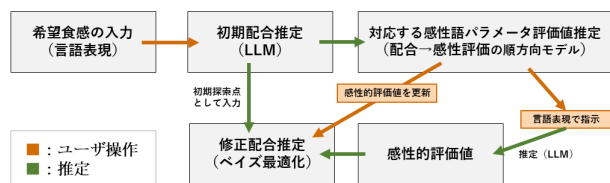


図2: 提案手法の操作・推定フロー

言語表現から初期配合の推定 ユーザは「コッテリしたバターのような食感」「あっさりしたヨーグル

トの食感」など、望む食感を言語表現で入力する。ここで、感性語パラメータ平面と LLM には共通のランドマークを前提として与え、LLM は入力と与えられた制約（学習データに基づく各成分の配合最小・最大値）をプロンプトとして受け取り、汎用的な初期配合を生成する。

配合から感性語パラメータ評価値の推定 (順方向モデル) 初期配合に対し、順方向モデルを用いて評価値を予測する。順方向モデルには少数データでも安定な Ridge 回帰を用いた。学習には、複数の配合とそれに対応する評価値（2 指標: 0-10 の 11 段階）からなるデータセットを用いる。食感の 2 指標の感性語パラメータで表し、両指標を 0-10 の 11 段階で制御する。

感性語パラメータ評価値から配合の推定 (逆方向モデル) 目標とする評価値を更新すると、ベイズ最適化により配合を逆算する。初期配合を初期探索点とし、学習データに基づく各成分の配合範囲内で、更新後の評価値と順方向モデルの予測値の誤差を最小にする配合を探索する。

ユーザインターフェース 感性語パラメータを各軸とした二次元マップを表示する。ユーザはランドマークを参照しつつ、任意の食品を自身の感覚でマップに登録できる。これにより、食感表現の相対的な位置を把握しやすくなると期待される。ユーザは二次元マップ上の位置を更新するか、自然言語による指示で目標とする感性語パラメータ評価値を更新し、それに応じて配合が再計算される。以上により、ユーザ主観に基づく食感操作の実現が期待される。

実装 感性語パラメータとして「濃厚感」「ボディ感」の 2 軸を用いた。LLM には GPT-5[4] モデルを使用し、ランドマークとして (濃厚感, ボディ感) 平面上に、(0,0) 水, (10,10) 巣蜜, (5,5) ポタージュ, (1,1) コンソメスープを与えた。順方向モデルの学習には、ハイドロコロイド 5 種 (イヌリン, 低強度寒天, ゼラチン, カラギーナン, サンファイバー) の配合と、著者による感性語パラメータ評価値 (濃厚感・ボディ感: 0-10 の 11 段階) からなるデータセット (N=24) を用いた。

4 制約・展望

現状、物性目的と感性目的による配合の探索という、二系統の手法を提案しているが、物性、感性、言語表現、配合の 4 要素を相互接続することで、多様な目的や入力から食感をデザインできるシステムの構築を目指す。本稿の支援手法は、初期段階にすぎず、多様な予測や探索に関して完全とは言えない。また、学習に用いるデータセット数も十分ではない。今後は、システムにおける配合予測精度や汎用性の向上を図るべく、推定フローの改善や、LLM 等を活用したデータベースの拡充を行う。

図 3: 想定される多様な食感デザイン