

感性のダイナミクス: Temporal Dominance of Sensations データの主動作分析

岡本 正吾*, 江原 侑希*, 岡田 拓武*

* 名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻

Affective dynamics: Principal motion analysis of the data acquired by temporal dominance of sensations method

Shogo OKAMOTO*, Yuki EHARA*, Takumu OKADA*

* Department of Mechanical Systems Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

Abstract: The temporal dominance of sensations (TDS) method can be used to record temporal changes in multiple sensory and affective responses. Extant analyses performed on TDS data do not fully utilize their time-series properties. The proposed study validates the prospect of principal motion analysis (PMA) of TDS data. PMA can be used to resolve multivariate motion data into base principal motions. In this study, panelists were called upon to evaluate tastes of ten types of pickled plums using the TDS method. Additionally, the panelists were asked to rate the plums using the semantic differential method as well. Results obtained using both methods were observed to demonstrate good agreement with each other in terms of the structures of reduced variable spaces. As realized in this study, implementation of the combined TDS-PMA approach can potentially facilitate statistical discrimination of all food products, whereas conventional methods, such as principal component analysis of data provided via use of the semantic differential method, can, at best, discriminate only up to 67% of product pairs. PMA can, therefore, be considered as a suitable technique to reveal the characteristics of TDS data.

Keywords: *Non-negative matrix factorization, Plum, Principal component analysis, Sensory evaluation*

1. はじめに

使用性の高い官能評価手法として Semantic differential (SD)法や Qualitative descriptive analysis 法などがある。これらの手法では評価者が刺激を体験してから設問に回答するまでに十分な時間を掛ける。これに対して、Trace 法や Temporal dominance of sensations (TDS)法[1]は、評価者が刺激を体験し始めてからしばらくの知覚および感性的応答の時系列変化を記録することを目的としている。特に後者は、刺激に対する多様な知覚および感性的応答の時系列変化を効率的に取得するための方法として注目を浴びている[1]。TDS法は、もっぱら飲料を含む食品(味覚, 嗅覚, 触覚)に用いられてきたが、音声を含む視覚刺激(視覚, 聴覚)[2, 3]に対しても用いられ始めるなど、食品以外の分野でも標準的な官能評価手法に発展しつつある。

TDS法は歴史の浅い手法であり、実験プロトコルの改良や取得されたデータの性質の調査が精力的に行われている最中である。したがって、これまでに標準的な解析方法は確立されていない。典型的には、TDS法によって得られた時系列応答の形状を議論したり、それらから算出されるいくつかの特徴量に線形判別分析の手法を適用したりすることが多い。後者は、時系列情報を活用した手法ではない。

われわれは、ヒトの動作のような多自由度冗長系の運動解析に用いられる主動作分析(Principal motion analysis, PMA)[4]を用いて、TDSデータを解析することを提案する。主動作分析は、TDSデータのような多次元時系列データを少数の基底に分解する。線形手法であるため、基底の意味を解釈することが可能であり、知覚や感性の時系列応答を理解する

目的に適している。加えて主動作分析は、よく知られたパラメトリックな検定手法との相性が良く、統計に支持された結論が得られる。本研究は、主動作分析をTDSデータに初めて適用するものであり、その具体的な方法と効果を示す。

TDSデータの多次元時系列特性を積極的に解析した例としては、動的因果関係モデリング[5, 6]がある。これは知覚および感性応答間の因果関係分析が目的であり、本研究とは目的が異なる。他に、Markov過程モデルを用いたものがある[7, 8]が、その使用性は未知である。

2. Temporal dominance of sensations (TDS)法

詳細は[9, 10]などに譲り、ここでは、本論文を理解するうえで必要な範囲に留めて、TDS法を概説する。TDS法は多種類の知覚および感性特性の時間変化を記録する方法である。直感的には、静的に多種類の特性を記録するSD法と、高々1-2種類の特性の時系列変化を記録するTrace法を組み合わせたものであるが、TDS法の実験方法は、これらとは大きく異なる。

TDS課題では、Fig. 1(a)のようなコンピュータ上のグラフィカル・インタフェースを用いる。味覚, 嗅覚, 食感, 感性に関する特性が記載された複数の選択肢が表示され、それらが選択された時刻が記録される。食品の場合、評価者が食品を口に入れると同時にstartボタンを押し、記録が開始される。評価者は、ある瞬間にもっとも注意が惹かれた体験に対応するボタンを随時選択する。Fig. 1(b)のように、ある選択が成されたら、次に別の選択が成されるまではその選択が継続して適用される。したがって、ある瞬間には多くとも1種類の選択だけが成されている。この作業は、食品が口内からなく

なり, stop ボタンが押されるまで継続する.

以上の作業の結果, それぞれの選択肢について二値関数が得られる (Fig. 1(b)). これを選択肢ごとに, 評価者間で重畳して評価者数で除することにより, Fig. 1(c)のように, 選択率 (支配率) が得られる. 選択率はスムージングされ, 連続値に変換される. 本研究では, 選択の頻度は最大でもたかだか1秒に1回であったことから, 遮断周波数が1 Hz のローパスフィルターによって, スムージングを実施した. 連続値に変換された選択率を TDS カーブと呼ぶ.

3. 主動作分析 (Principal motion analysis)

主動作分析は, 冗長な多自由度系であるヒトの動作解析手法として Park ら [11] が発表したものである. 主成分分析を時系列情報に拡張した手法であり, 主成分に相当する主動作を多次元時系列データの基底として算出する. 多次元時系列データで表される単一試行からのサンプルは, 基底の線形和で合成される. 基底の数は, サンプルに含まれる変数の数よりもずっと小さいのが普通であり, 情報を縮約する効果に優れる.

k 番目の試行 (サンプル) について, $\mathbf{x}_{ijt}^{(k)}$ は食品 i に対する正規化された時刻 t での, 選択肢 j の選択率を表す. $\mathbf{x}_{ij}^{(k)}$ は時間方向に s 個に離散化された選択率の列ベクトルであり,

$$\mathbf{x}_{ij}^{(k)} = \left(x_{ij1}^{(k)}, x_{ij2}^{(k)}, \dots, x_{ijs}^{(k)} \right)^T \quad (1)$$

と定義される. p 種類の選択肢について, これを結合したものが

$$\mathbf{y}_i^{(k)} = \left(\mathbf{x}_{i1}^{(k)T}, \mathbf{x}_{i2}^{(k)T}, \dots, \mathbf{x}_{ip}^{(k)T} \right)^T \quad (2)$$

である. これを用いて, 食品 i に対する k 番目のサンプルから得られる各種選択肢の選択率の時間変化は, 一つのベクトルで表される. 食品 i について, 全 n 試行を結合したものが行列

$$\mathbf{Z}_i = \left(\mathbf{y}_i^{(1)}, \dots, \mathbf{y}_i^{(k)}, \dots, \mathbf{y}_i^{(n)} \right) \quad (3)$$

である. 全 q 種類の食品については, さらにこれを結合して

$$\mathbf{W} = \left(\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_q \right) \quad (4)$$

となる.

通常, \mathbf{W} は特異値分解によって縮約的に直交基底に分解され, それぞれの基底が主動作となる. しかし, そのような基底は負の値を含む. 選択率は正の範囲で定義されるものであるから, 負の値を含む主動作では解釈性に問題がある. そこで, 行列の非負値展開によって \mathbf{W} を基底に分解する. \mathbf{W} は

$$\mathbf{W} \sim \mathbf{V}\mathbf{H} \quad (5)$$

のように, 正の値のみを含む行列 $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{sp \times r}$ と $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{r \times nq}$ に展開される. ここで r は主動作 (基底) の数である. \mathbf{V} の列ベクトルが主動作であり, \mathbf{H} は各試行に含まれる主動作の大きさを意味する主動作得点の行列である. \mathbf{H} の列ベクトル $\mathbf{h}_i^{(k)}$ を用いて, 単一の試行から得られるサンプルは

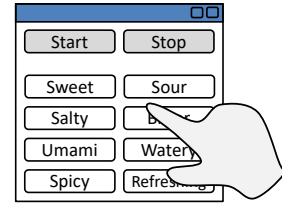
$$\mathbf{y}_i^{(k)} \sim \mathbf{V}\mathbf{h}_i^{(k)} \quad (6)$$

と近似される.

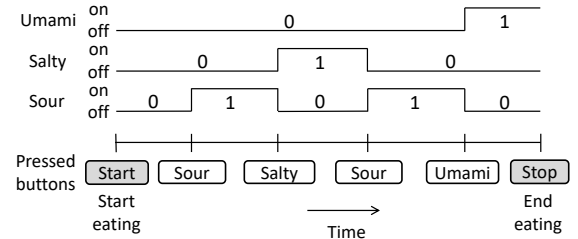
3.2 リサンプリング

TDS 法は, Fig. 1(d) のような滑らかな TDS カーブを得るた

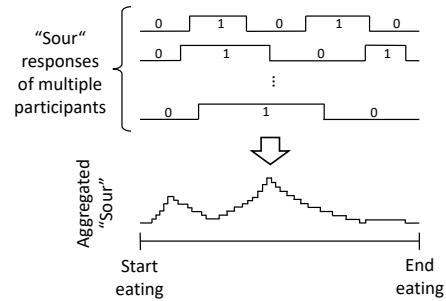
(a) Graphical user interface



(b) Single operation of TDS task



(c) Aggregation of multiple operations for each descriptor



(d) TDS curves (smoothing and calculation of dominance rate)

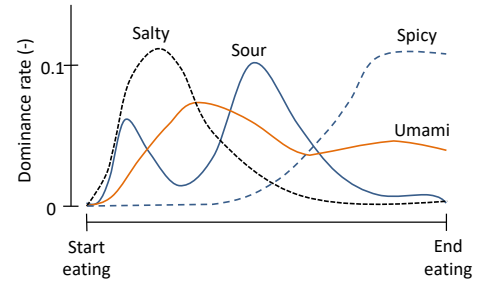


図 1 Temporal dominance of sensations 法の手順

めに, 十分な評価者の人数を要する. 本研究では, 20 名の評価者の実験結果を重畳して各食品に対して 1 つの滑らかな TDS カーブのサンプルを得る. しかしながら, 主動作分析は通常はこれよりも多くのサンプルを必要とする. そこで, リサンプリングによって見かけのサンプル数を増加させる. 20 名の評価者プールから復元抽出によって選択された 20 サンプルを用いて, 滑らかなカーブを生成する. この作業を 20 回繰り返して, 結果として 20 名の評価者から 20 セットの TDS カーブを得る.

4. 実験

4.1 評価者

20 名の日本人学生 (21-26 歳, 女性 4 名, $n = 20$) が書面

での同意書を提供の上、実験に参加した。

4.2 食品

市販されている10種類の梅干しを実験に用いた。そのうち、3種類がはちみつで、4種類がしそで、さらに4種類が鰹で味付けされたものであった。評価者には同じサイズにちぎられた果肉がスプーンに載せて提供された。

4.3 評価用選択肢

あらかじめ実験者によって選定された食品の評価に関する163語を用いて、6名の投票によって梅干しの表現に適した知覚に関する語および感性と総合評価に関する語をそれぞれ10語を超えない範囲で選択した。

知覚に関する語は9個とし、「酸っぱい」、「甘い」、「旨い」、「塩味のある」（以上の4種が味覚）、「水っぽい」、「なめらかな」、「さわやかな」（以上の3種が食感）「ジューシーな」、「フルーティーな」であった。「旨い」はたんぱく質によるものであり、「ジューシーな」は果汁の濃さを意味し、「フルーティーな」は香りに関するものと説明した。

感性および総合評価に関する8語は、「好き」、「嫌い」、「美味しい」、「高級な」、「豊かな」、「深い」、「するどい」、「目が覚めるような」であった。「豊かな」は体験される味覚の種類多さを意味し、「深い」は複数の旨味の強度と説明した。

一度のTDS課題では、知覚語もしくは感性および評価語のいずれかのみがFig. 1(a)のインタフェースに表示され、混在されなかった。

4.4 官能評価（TDS法と食後のSD法）

全ての評価者がTDS法とSD法の課題の両方にランダムな順で参加した。評価者は実験前に、評価のための選択肢の定義について説明を受けた。

4.4.1 TDS法の課題

本実験の前に、評価者は5-10分の練習セッションに参加した。評価者は閉眼で、鼻をつまんだ状態で、食品サンプルを口に入れ、その後、開眼し、鼻をつまんだ指を離して、選択肢を押す課題を開始した。これらは、課題の開始前に視覚および嗅覚を遮断するためである。一回の課題はおよそ10秒であり、各課題の前には評価者は口内を水で洗浄した。

それぞれの評価者は20試行（10種類の梅干し×2種類の選択肢群）を実施した。梅干しおよび選択肢群の提示順はランダムとした。選択肢のグラフィカル・インタフェース上での配置は、評価者ごとにランダムとした。

4.4.2 食後のSD法の課題

評価者は7段階のスケールを用いたSD法による課題でそれぞれの梅干しを評価した。知覚と感性に関する17語の全てについて、スケールを用いて採点した。スケールの両端には、「強く同意」か「強く反対」が記載され、中央には「どちらでもない」が記載された。4.5.2節の解析では、「同意」に正の値が、「反対」に負の値が割り当てられた。TDS法の課題と同様に、梅干しはランダムな順で提示された。本実験の課題は、

一種類の梅干しについておよそ2分間を要した。

実験前に評価者は、リファレンスを用いずに採点を実施できるように、5-10分の練習を行った。この練習セッションでは、評価者は全ての梅干しを食べることができた。

4.5 データ解析

4.5.1 TDSデータの解析

各試行で得られた選択肢の二値関数は、stopボタンが押された時刻で正規化された。リサンプリングによってTDSカーブが生成されたのち、それぞれのサンプルは時間方向に100点に分割され、主動作分析が適用された。知覚に関する選択肢と、感性に関する選択肢は別々に解析された。

主動作分析と先の研究で頻繁に用いられた手法を比較するため、TDSカーブから支配時間（dominance duration）を計算した。支配時間は、ある選択肢が選択されていた時間の合計である。一種類の梅干しにつき、9種の知覚に関する語および8種の感性に関する語の支配時間が計算された。9ないし8種類の支配時間を変量とする合計で200サンプル（20名×10種類の梅干し）のデータに主成分分析が適用された。

4.5.2 SD法のデータ解析

SD法で得られた各語のスコアは、それぞれの評価者内でz-scoreに標準化された。それぞれのサンプルは9（知覚語）ないし8（感性語）種類のスコアで定義され、全200サンプルに主成分分析が適用された。

上記とは別に、リサンプリングを伴う主動作分析の結果と比較する目的で、SD法のスコアにもリサンプリングを施してから主成分分析を適用した。

4.5.3 Multivariate ANOVAによる製品分別

主動作分析および主成分分析の結果から、実験で用いた10種類の梅干しを分類することを試みた。10種類の内の任意の2種類の梅干しをMultivariate ANOVAによって比較した。この比較を、全ての梅干しのペアについて実施した（全45ペア）。有意水準が0.05以下であった場合に、2種類の梅干しが統計的に分類されたと判断した。本研究では、それぞれの梅干しを、主動作分析もしくは主成分分析によって抽出された2種類の変量で特徴づけた。2種類とした理由は、紙面に描画する都合上、2次元がよく好まれることと、主動作分析では2つの主動作によって10種類の梅干しが完全に分類できたからである。

5 結果

5.1 TDSカーブの例

Fig. 2にしそ風味（U5）およびはちみつ風味（U7）の梅干しから得られたTDSカーブの例を示す。これらは20名全員の結果から計算されたものである。U5の製品では、塩味と酸味が摂取直後に顕著に上昇した。その後、酸味はやや低下した（Fig. 2(a)）。感性に関する選択肢では、「目が覚めるような」および「鋭い」が顕著であった（Fig. 2(b)）。U7の製品は、食べ終わるまで継続する甘みと、序盤のフルーティさおよび

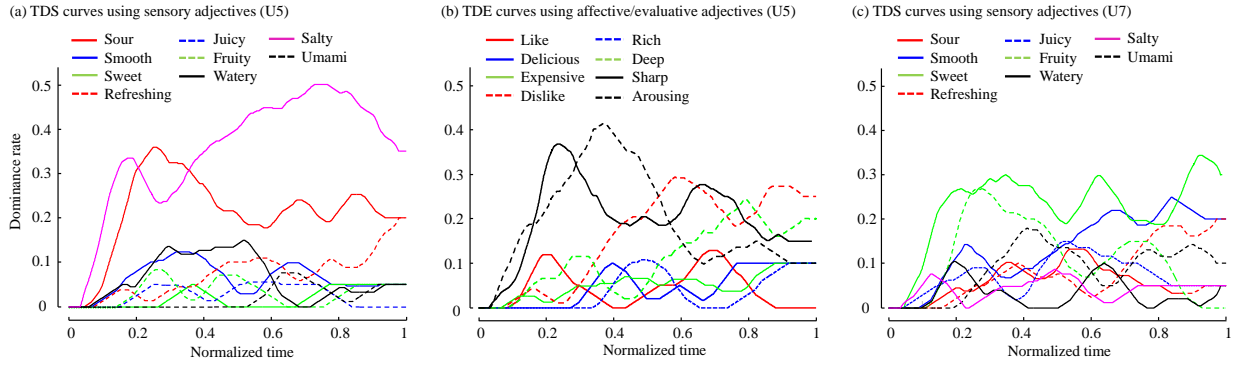


図2 TDS カーブの例。しそ風味の梅干しの知覚(a)および感性的(b)応答。はちみつ風味の梅干しの知覚的応答(c)。

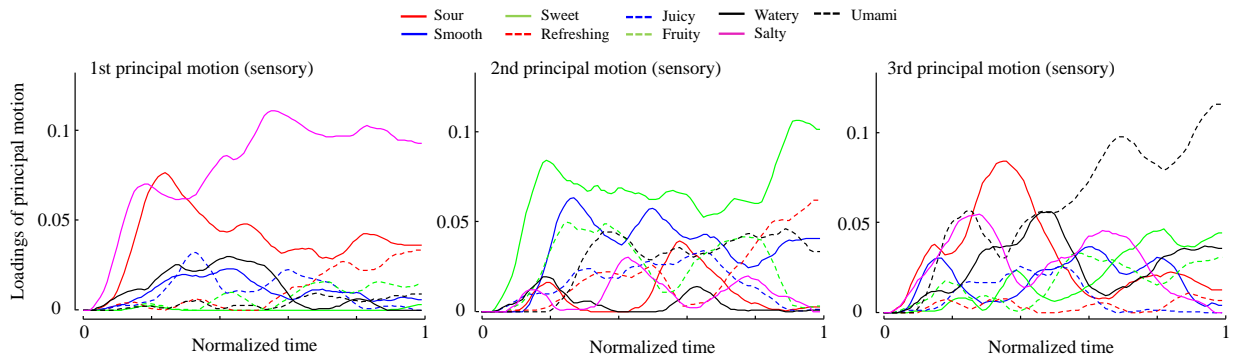


図3 知覚的な選択肢に対する TDS カーブの主動作

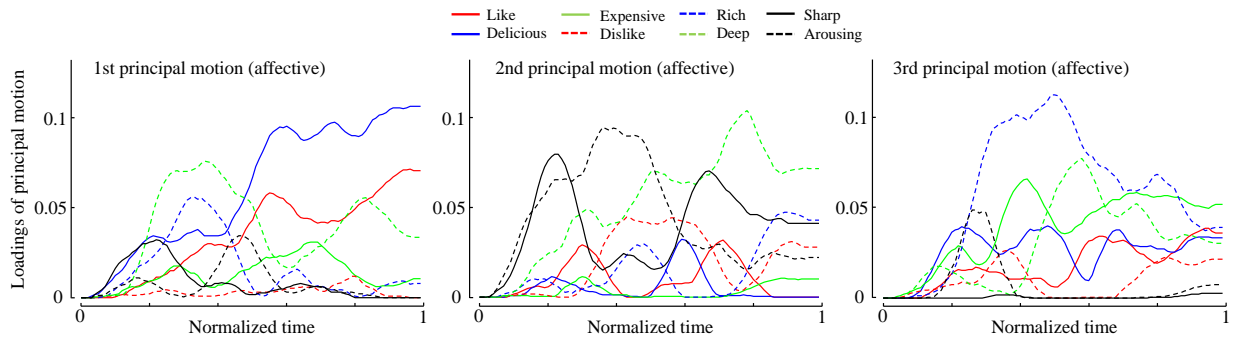


図4 感性的な選択肢に対する TDS カーブの主動作

後半の滑らかさが顕著であった。

タスクの初期では、全ての選択肢の支配率を足し合わせても100%とならないが、これは start ボタンが押下された直後には、どの選択肢も選ばれていないからである。

5.2 主動作と得点

Fig. 3 および 4 に、知覚と感性に関する TDS カーブの主動作をそれぞれ示す。後の解析では、第一と第二主動作のみが用いられたが、ここでは第三主動作まで示す。主成分分析と異なり、行列の非負値展開には寄与率という概念はない。

知覚に関する主動作を Fig. 3 に示す。第一主動作は明らかに酸味と塩味に特徴づけられた。酸味は前半に顕著で、塩味は全区間で一貫して顕著であった。第二主動作は甘みとジューシーさおよび後半のさわやかさに特徴づけられた。第三主動作では、前半の酸味と後半に向けて強くなる旨味が顕著で

あった。

感性に関する主動作を Fig. 4 に示す。第一主動作は「好き」や「美味しい」の肯定的な応答から構成された。加えて、前半では「深い」と「豊かな」に対する応答が中程度に大きかった。第二主動作は、「鋭い」と「目が覚めるような」に対する応答が顕著であり、「深い」に対する応答が徐々に増加した。第三主動作は「豊かな」、「深い」、「高級な」に特徴づけられた。これらは肯定的な応答であるが、第三主動作では「好き」は顕著ではなかった。

Fig. 5 に 10 種類の梅干しの主動作平面上での分布を示す。それぞれの梅干しについて、リサンプリングで生成された 20 サンプルの平均値と標準偏差が描画されている。知覚に関する主動作空間では、しそ風味の梅干しが第一主動作で大きな得点を示し、はちみつ風味の梅干しが第二主動作で大きな得点を示した。かつお風味の梅干しは第三主動作で大きな得点

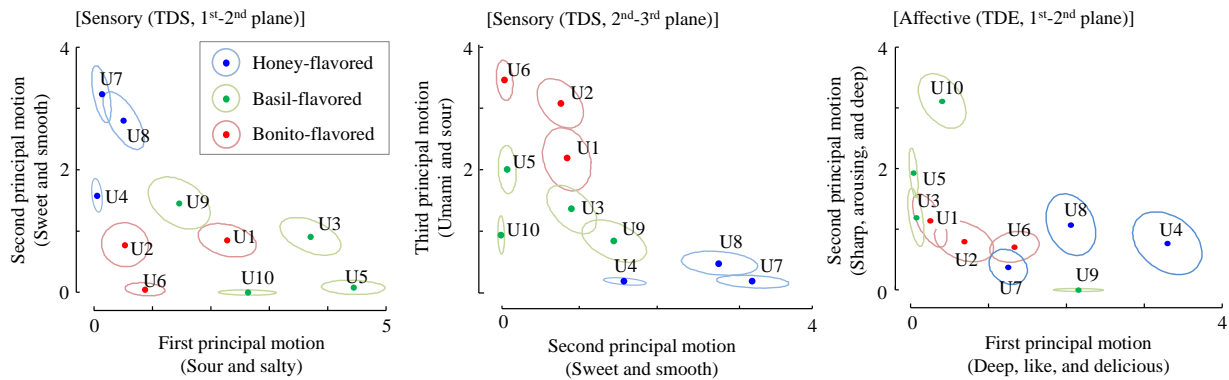


図5 10種類の梅干しの主動作空間上での分布。平均と標準偏差。

表1 Number of product pairs discriminated by MANOVA. Forty-five pairs made of 10 products were tested. For the methods using resampling, the values are means of 10 repetitions.

	After-tasting SD task		TDS task	
	Normal PCA	Resampled PCA	PCA of dominance durations	Principal motion analysis
Sensory	30	32.2	28	45.0
Affective	24	26.7	22	44.4

を示した。感性に関する主動作平面では、2種のはちみつ風味の梅干し (U4 と U8) および 1 種のしそ風味の梅干し (U9) が第一主動作について大きな得点を示した。この主動作は、「好き」、「美味しい」、「豊かな」などに代表される。U1 と U2 は第二主動作の得点が大きかった。

5.3 梅干しの統計的分類

Table 1 に各分析手法で統計的に分類された梅干しのペアの数を示す。製品は、第一-第二主動作もしくは主成分平面上で分類された。リサンプリングでは、サンプルがランダムに復元抽出されるため、10 回のリサンプリングの平均値を示している。

主動作分析がもっとも高い分類性能を発揮した。特に、知覚に関する選択枝を用いた場合は、全ての梅干しが分類可能であった。感性に関する選択枝を用いた場合でも、高い分類性能が確認された。SD 法による分類性能と、TDS カーブの支配時間を用いた場合の分類性能に大きな差は見られなかった。これらの手法により分類された製品ペアの数は、22-30 であり、主動作分析の性能には及ばなかった。

SD 法の結果にリサンプリングを用いた場合、分類可能なペア数が 2-3 増加した。リサンプリングによってサンプル数が増加したわけではないので、これらの検定では全ての条件で自由度は等しいことに留意する。

6 結論

TDS 法と主動作分析の組み合わせでは、ほとんど全ての梅干しを分類することが可能であった。一方で、SD 法と主成分

分析の組み合わせでは 45 ペア中のたかだか 30 ペアが分類された。このことは TDS 法の性質を考えると理にかなっている。TDS 法は、多種の質問項目に対する時間応答を記録することが可能であり、食後の SD 法などに比べて情報量が多い。主動作分析は、このような多次元時系列データの特徴を活かした分析手法であるから、全ての梅干しの分類が可能となったのであろう。以上のことから、主動作分析は、TDS 法に適した標準的な解析方法として相応しいであろう。今後は、適用例を重ねて、その使用性を検討することが必要である。

謝辞

本研究の一部は科研費 (感性ダイナミクスの創成, 17K20002) の補助を得て実施された。

参考文献

- [1] N. Pineau, P. Schlich, S. Cordelle, C. Mathonnière, S. Issanchou, A. Imbert, M. Rogeaux, P. Etievant, and E. Köster, Temporal dominance of sensations: Construction of the tds curves and comparison with time-intensity, *Food Quality and Preference*, vol. 20, no. 6, pp. 450-455, 2009.
- [2] T. C. Merlo et al., Measuring dynamics of emotions evoked by the packaging colour of hamburgers I using temporal dominance of emotions (TDE), *Food Research International*, in press, 2018.
- [3] C. Peltier, M. Visalli, A. Thomas, Using temporal dominance of emotions at home. Impact of coffee advertisements on consumers' behavior and methodological perspectives, *Food Quality and Preference*, vol. 71, pp. 311-319, 2019.
- [4] B. Lim, S. Ra, and F. C. Park, Movement primitives, principal component analysis, and the efficient generation of natural motions, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 4630-4635.
- [5] T. Okada, S. Okamoto, Y. Yamada, and T. Ishikawa, Vector autoregression model of temporal perceptual and affective

responses towards food, Proceedings of IEEE Global Conference on Life Sciences and Technologies, 2019, pp. 43–45.

- [6] 岡田 拓武, 岡本 正吾, 石川 智治, 山田 陽滋, Temporal Dominance of Sensations 法を用いた味覚と感性の時系列データ解析, 第 20 回日本感性工学会大会, B3-03, 東京, 2018, Sep.
- [7] B. C. Franczak, R. P. Browne, P. D. McNicholas, J. C. Castura, and C. J. Findlay, A Markov model for temporal dominance of sensations (TDS) data, Proceedings of 11th Pangborn Sensory Science Symposium, Gothenburg, Sweden, 2015.
- [8] G. Lecuelle, M. Visalli, H. Cardot, and P. Schlich, Modeling temporal dominance of sensations with semi-Markov chains, Food Quality and Preference, vol. 67, pp. 59 – 66, 2018.
- [9] R. Di Monaco, Temporal dominance of sensations: A review, Trends in Food Science & Technology, vol. 38, no. 2, pp. 104 – 112, 2014.
- [10] P. Schlich, Temporal dominance of sensations (TDS): A new deal for temporal sensory analysis, Current Opinion in Food Science, vol. 15, pp. 38–42, 2017.