

製品の機能・性能の探求を促す内発的動機付けの数理モデリング

Mathematical Modeling of Intrinsic Motivation Promoting Exploration for Function of Products

○張 晋赫（東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 設計工学研究室）*1
柳澤 秀吉（東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 設計工学研究室）*2

- *1 Jinhyuk Chang, Design Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo Ku, Tokyo To, 113-8656, Japan, chang30682@mail.design.t.u-tokyo.ac.jp
*2 Hideyoshi Yanagisawa, Design Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo Ku, Tokyo To, 113-8656, Japan, hide@mail.design.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: Modeling, Motivation, Exploration, AI, Reversal theory

1. 緒 言

我々は新しい製品を手にしたときに、どのような過程を経てその製品を長期的に使用するに至るのであるのか。Krippendorffは、製品が知覚され繰り返し使用されるまでには、知覚、探究、信頼の3つの段階が存在するとしている⁽¹⁾。最初に製品を知覚する。知覚した後に、今度はその製品に何ができるのか、どのような製品なのか探究する。その探究の末に信頼に至った製品をユーザは使用する、と提唱した。

AIエージェントを搭載したクラウド接続型の製品においては、時間とともに機能、サービスが拡張される。このような製品においては、時間と共にアップデートされる機能や性能に対して、使用者に継続的な探索を促すことが求められる。そこで、本研究では、継続的な探索を促進させる動機付けに着目した。

探索の動機付けは、未知の目的を探求するための動機付けである。古典的な動機付けの分類として、Ryan&Deciは、特定の目的のために行動する動機付けをExtrinsic motivation、ある目的のためではなく潜在的な満足を得るために行動する動機付けをIntrinsic motivationとした⁽²⁾。この、目的の有無による動機付けの分類について、Apterは2つの心理状態、すなわち、目的志向のTelic modeと行動志向のParatelic modeを想定し、状況によって2つの心理状態が切り替わる（反転する）反転理論（Reversal theory）を提唱した⁽³⁾。Paratelic modeでは、目的を探索するよう行動する。本研究では、ユーザをParatelic modeへ導くことで、探索を促進できるのではないかと考えた。反転理論は定性的なモデルであり、製品設計に応用可能な数理モデルは見当たらない。また、製品使用におけるParatelic modeへの反転の条件も明らかになっていない。

そこで、本研究では、ユーザに探索的な行動の動機付けをもたらす製品設計の実現を目的とする。本研究の目的を実現するための第一歩として、反転理論のParatelic modeを、そのメカニズムから数理的に説明するモデルを提案する。モデル予測から得られる知見をAIエージェン

ト搭載型製品における対話インタフェースに適用し、有効性を検証する。

2. 最適覚醒水準と反転理論を統合した動機付けの

数理モデル

2.1. 最適覚醒水準と反転理論の対応

Berlyneの覚醒ポテンシャル説では、横軸を新奇性や複雑さなどから得る覚醒の度合い（覚醒度、Arousal）、縦軸を快感情の度合い（感情価、Valence）としたときに、逆U字のヴント曲線（Wundt 曲線）を成すとしている⁽⁴⁾。図1に示すように、覚醒度が低いところでは快でも不快でもない無感情、覚醒度が高すぎる部分は不快感を抱き、その間に感情価を最大にする最適覚醒水準（Optimal arousal level）が存在することが分かる。

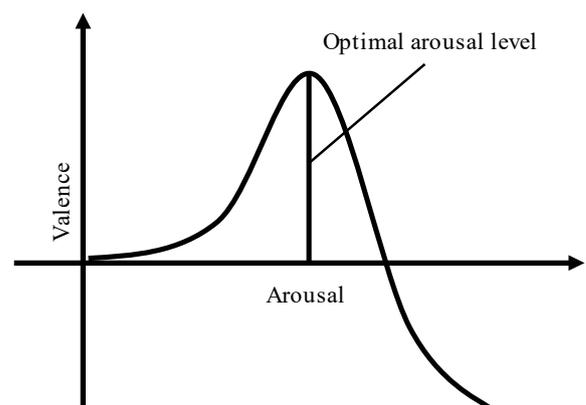


Fig.1 The optimal arousal level in arousal potential theory

Apterの反転理論において、Telic mode（目的志向）では覚醒度が低いと安心、覚醒度が高くなると興奮を感じる。Paratelic mode（行動志向）では覚醒度が低いと飽き、覚醒度が高くなると興奮を覚えるとしている⁽³⁾。図2のように、Telic modeでは覚醒度と感情価は反比例し、Paratelic modeでは比例する。そして状況に応じて二つの曲

線を行き来し、二つの心理状態が反転する。

本研究では, Berlyne の逆 U 字曲線の短調に増加する部分が Apter の Paratelic mode, 単調に減少する部分が Apter の Telic mode に対応すると考えた. しかし, 一本の逆 U 字曲線の覚醒度が低い部分が Paratelic mode, 高い部分が Telic mode であるとする考えは Apter の理論とは異なる. Apter は同じ覚醒度でも, 覚醒度が低いところでは安心と飽き, 覚醒度が高いところでは不安と興奮という, 違う心理状態が存在するとしている. そこで, Berlyne の最適覚醒水準が状況によって図 2 の横軸方向にシフトすると考える. すると図 3 の緑枠で囲まれている部分で, 同じ覚醒度でも Telic または Paratelic 両方の状態になりうることを示され, 両理論を統一的に説明できることがわかる. 本研究ではこの統一モデルを, 数理的な解析に基づいて検証する.

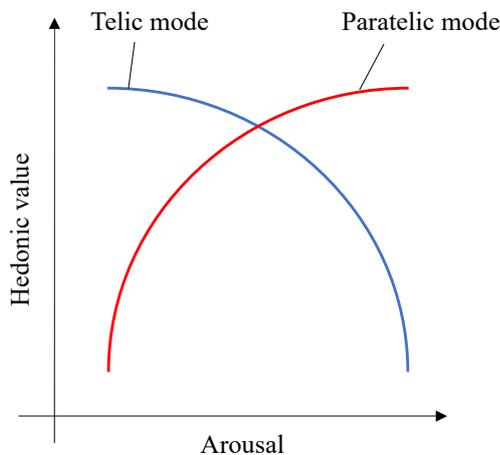


Fig.2 Telic mode and Paratelic mode in reversal theory

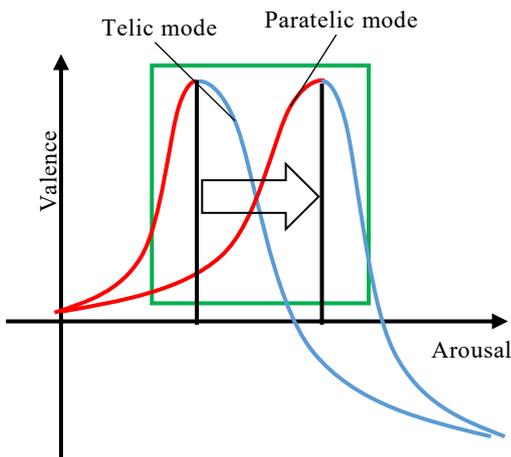


Fig.3 The proposed unified model of the optimal arousal level and reversal level

2.2. 覚醒度に対応する情報利得モデル

Yanagisawa は, ベイズの定理にもとづく知覚モデルを提唱し, 実験検証した⁽⁵⁾. さらに, Yanagisawa らは, 感情の覚醒度(驚き)が, 事象の経験後に獲得する情報量を意味する情報利得(KL情報量; Kullback-Leibler divergence)⁽⁶⁾を用いて表せることを示した⁽⁷⁾. ベイズモデルの事前分布(Prior)と事後分布(Posterior)に正規分布を仮定すると, それ

らの間の情報利得 G は式(1)に示す関数で表せる.

$$G = KL(\text{Posterior}||\text{Prior}) = \frac{1}{2} \left(\frac{s_p}{(s_p+s_l)^2} \delta^2 + \log \frac{s_p+s_l}{s_l} - \frac{s_p}{s_p+s_l} \right) \quad (1)$$

ここで, δ は事前分布と尤度関数の期待値の差であり, 事前の予測と実際の刺激とのずれを表し, これを予測誤差(Prediction-error)と呼ぶ. s_p は期待の不確かさ, 予測の立ちにくさを表し, 不確実性(Uncertainty)と呼ぶ. s_l はデータのばらつき, つまり感覚刺激に混入する外乱(Noise)である. (1)式より, 情報利得は δ, s_p, s_l の三つの関数で表されることがわかる. 本研究では, 式(1)を覚醒度の数理モデルとして用いる.

3. 情報利得の数理モデル解析から得られる仮説

3.1. 情報利得と予測誤差の関係の解析

Yanagisawa らは, 情報利得と予測誤差の関係が不確実性大・小二つの状態によってどのように変化するかを明らかにした⁽⁷⁾. 不確実性が大きい場合(s_p1)と不確実性が小さい場合(s_p2)の二つの状況を考える. 外乱(s_l)は実験系によってばらつきが抑えられるとし, 一つの値に固定する. 二つの不確実性の積が外乱より小さい場合($s_p1 \times s_p2 < s_l^2$)は必ず不確実性が大きい方が同じ予測誤差に対して大きな情報利得を得る. また, 逆に二つの不確実性の積が外乱より大きい場合($s_p1 \times s_p2 > s_l^2$)は, 予測誤差が大きくなると, 途中で逆転が生じ, 不確実性が小さい方が同じ予測誤差の値で大きな情報利得を得る条件が生じる.

3.2. 解析結果から得られる仮説

外乱より不確実性が大きい場合を考える($s_p1 \times s_p2 > s_l^2$). この場合, 3.1.の解析から, 図 4, 5 に示した様に, 不確実性による情報利得の大小関係は予測誤差の増大に伴って逆転する. 覚醒度を情報利得で表すと, 最適覚醒水準は最適な情報利得に対応する. 今, 図 3 に示した最適覚醒水準が低い状態(図 3 左の Wundt 曲線)と, 最適覚醒水準が高い状態(図 3 右の Wundt 曲線)の二つの状態を考える. この二つの状態において, 最適覚醒度(Valence がピークとなる情報利得)を, それぞれ G_l, G_h とする. 図 4 に, 最適な情報利得が低い場合の Telic と Paratelic mode の範囲を示す. G_l と情報利得の交点から, Telic と Paratelic の境界となる予測誤差は, 不確実性が小さい方が大きいことが分かる($\delta_{l1} < \delta_{l2}$). 一方, 図 5 に示した様に, 最適覚醒水準が高い, G_h の場合, 不確実性が大きい方が Telic と Paratelic の境界となる予測誤差が大きいことが分かる($\delta_{h1} > \delta_{h2}$). より大きな予測誤差に対して Paratelic mode を保つことは, Paratelic mode になりやすいことを意味する.

以上から, 最適覚醒水準の大小によって以下の二つの仮説が成り立つ.

- 最適覚醒水準が低い場合(G_l), 不確実性が小さい方が Paratelic mode になりやすい.
- 最適覚醒水準が高い場合(G_h), 不確実性が大きい方が Paratelic mode になりやすい.

Li & Yanagisawa の先行研究⁽⁸⁾において, 二つの AI スピーカを用いた実験により, 不確実性が小さい AI スピーカの方がユーザの intrinsic motivation が促進されることが検

証された。1. で述べたように、intrinsic motivation とは、ある目的のためには無く、潜在的な満足を得るための動機付けであるため、これは *Paratelic mode* に対応すると考える。したがって、この結果は仮説(a)を支持する。そこで、先行研究⁽⁸⁾の実験系より高い最適覚醒水準を実現できれば、仮説(a)から(b)の状態となり、仮説(b)が検証できると考えた。

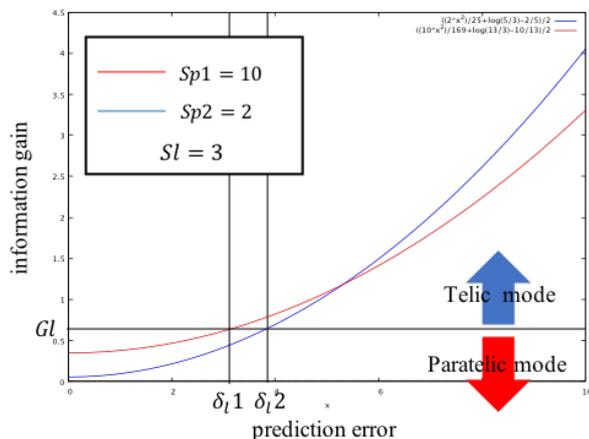


Fig.4 Relationships between prediction error and information gain in different uncertainties. Range of *telic* or *paratelic* mode when the optimal information gain is low.

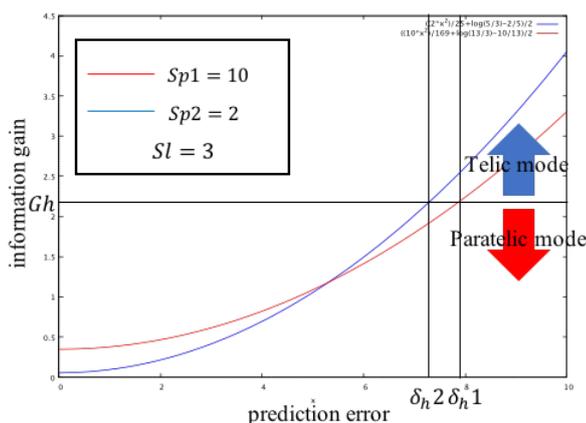


Fig.5 Relationships between prediction error and information gain in different uncertainties. Range of *telic* or *paratelic* mode when the optimal information gain is high.

4. 提案モデルの検証実験

4.1. 実験パラメータの操作

モデルの検証として、先行研究⁽⁸⁾と同様に、二つの AI スピーカを用いた実験を行った。用意した質問を実験参加者にしてもらい学習によりパラメータを操作する。仮説(b)は「不確実性小・大ともに最適覚醒水準が高い場合は、不確実性大の方が *Paratelic mode* になりやすい」である。つまり片方は不確実性小、他方は不確実性大、最適覚醒水準は両者とも高くなるよう操作する。この実験で検証するのは不確実性による差異のみである。

一方は不確実性が小さい、予測が立ちやすい AI スピーカとして、簡単な質問には必ず正解するが、難しい質問には必ず間違えるものを用意した。他方は、予測が立ちにく

い AI スピーカとして、簡単な質問には時折間違えるが、難しい質問には正解することもあるものを用意した。つまり AI スピーカの回答能力の限界の分かり易さで不確実性を操作する。

高い最適覚醒水準を実現する方法を述べる。図 6 によると、最適覚醒水準が低い位置 (G_l) にあるときよりも高い位置 (G_h) にあるときの方が、同じ情報利得 (覚醒度) を得たときの *Paratelic mode* の範囲が広い。よってユーザが *Paratelic* な心理状態で製品と関わっているときに最適覚醒水準は上昇するのではないかと考えた。先行研究⁽⁸⁾では学習のための質問として、サイコロを投げる、LED ランプの色を変える等、AI スピーカに対して特定のタスクを求めるといった目的を持った質問のみを採用した。つまり、先行研究⁽⁸⁾の実験参加者は AI スピーカと *Telic* な心理状態でインタラクションを行っていたと考えられる。そこで最適覚醒水準の操作のための学習として、不確実性小・大両方に、AI スピーカとゲームをしたり、AI スピーカの内面を問う質問をしたりと、実験参加者が *Paratelic* な関わり方ができるような質問を用意した。

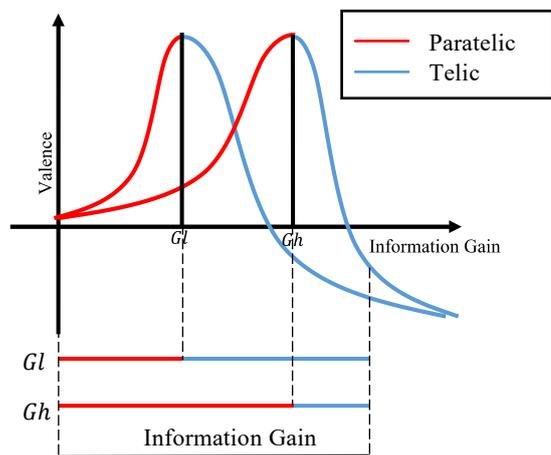


Fig.6 The difference in the range of *paratelic* mode between low and high optimal information gain.

4.2. 評価方法

実験の評価方法として、主観評価・客観評価二つの評価方法を用いた。

主観評価として、不確実性小・大どちらの AI スピーカにどの程度 *Paratelic* または *Telic* な動機付けを持ったか評価する 11 段階の質問紙を用いた。

客観評価として、実験参加者に二つの AI スピーカと 7 分間自由に喋ってもらった。不確実性小・大どちらの AI スピーカに何回 *Paratelic* または *Telic* な動機付けによる質問をしたか、音声データの解析によって評価した。

4.3. 実験結果

図 7 に主観評価による、不確実性小・大どちらの AI スピーカにどの程度 *Paratelic* または *Telic* な動機付けを持ったかの評価値の 20 名分の平均値を示す。不確実性大の方に最大 5 のうち 0.975 だけ *Paratelic* な動機付けを持ち、不確実性小の方に最小が -5 のうち -0.525 だけ *Telic* な動機付けを持ったことが得られた。不確実性大の方に、より *Paratelic* な動機付けを持つことは有意差が認められた (p 値

<0.05). これは仮説を支持する結果である. 不確実性小の方に, より Telic な動機付けを持つことは有意差が認められなかった (p 値 > 0.1).

次に図 8 に客観評価による, 不確実性小・大それぞれの AI スピーカに向けられた Paratelic または Telic な動機付けによる質問の総数の平均値を示した. 不確実性小に向けられた Paratelic な動機付けの質問数の平均値と, 不確実性大に向けられた Paratelic な動機付けの質問数の平均値に有意差は認められなかった (p 値 > 0.1). 不確実性小に向けられた Telic な動機付けの質問数の平均値と, 不確実性大に向けられた Telic な動機付けの質問数の平均値に有意差は認められなかった (p 値 > 0.1).

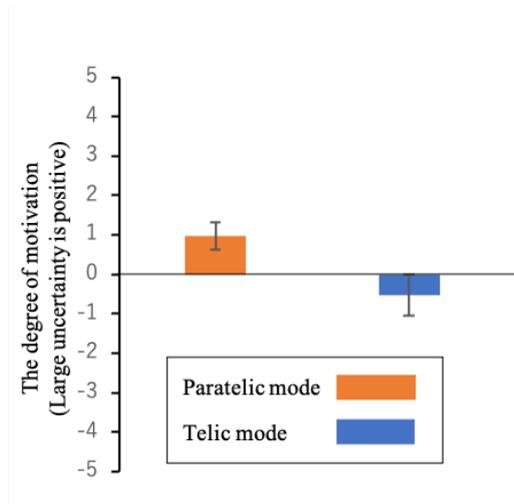


Fig.7 The difference in the range of *paratelic* mode between low and high optimal information gain.

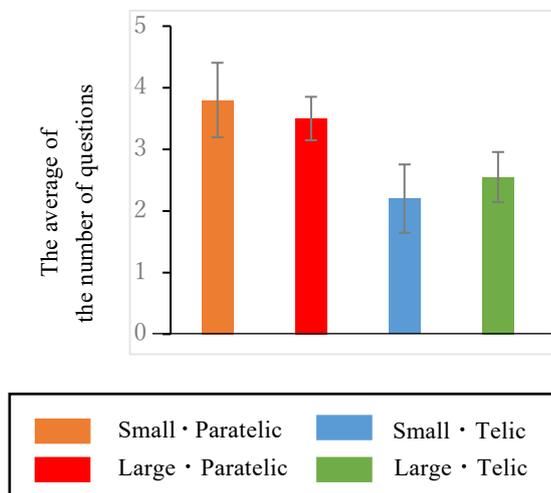


Fig.8 The difference in the average number of questions due to uncertainty in each motivation.

5. 考察

5.1. 実験系に対する考察

主観評価において, 不確実性が大きい方に, より Paratelic な動機付けを持つことには統計的な有意差が認められた.

一方, 不確実性が小さい方に, より Telic な動機付けを持つことには統計的な有意差が認められなかった. これは最適な覚醒水準の操作のために, 不確実性小・大両方の AI スピーカに Paratelic な心理状態で取り組んでもらうよう操作した事により, そもそも Telic な動機付けを持ちにくい実験系であったことが原因として挙げられる.

客観評価において, それぞれの動機付けにおける, 不確実性の違いによる質問数の平均値の差に統計的な有意差は認められなかった. 客観評価では同じ動機付けによる質問を両方の AI スピーカに対して行い, その回答の差異を比較することができる. よって, 実験結果としての差が生じにくくなっていたと考えられる.

5.2. 総合考察

提案する図 3 のモデルの数理的解析によって, 3.2. に示す二つの仮説が得られる.

仮説(a)の, 最適覚醒水準が低いと想定される場合は, 不確実性が小さい方が Paratelic mode になりやすい状況を考える. この状況に対応する結果は先行研究⁽⁸⁾により検証された. Apter は Paratelic mode が促進される条件としてプロテクティブ・フレームを唱えた⁽⁹⁾. これは, 人は安全が保証されている状況であれば, より危険・興奮を求める心理状態, つまり Paratelic mode になるとする理論である. (a) の状況では, 製品に対する予測の立ちやすさが製品の安全・信用のプロテクティブ・フレームとなり, Paratelic mode になりやすくと考えられる.

次に仮説(b)の, 最適覚醒水準が高い状態と想定される場合は, 不確実性が大きい方が Paratelic mode になりやすい状況を考える. 本実験の主観評価において, 不確実性の大きい AI スピーカに, より Paratelic な動機付けを持つ事に有意差が認められた. この事は, モデルの予測を支持する. 図 6 によると最適覚醒水準が高い状態は, 同じ情報利得を得たときの Paratelic mode の範囲が広く, ユーザは既に製品と Paratelic な心理状態で関わっていると考えられる. (b) の状況では, 製品との関わり自体を信用し, プロテクティブ・フレームを有している. よって, 製品の挙動の予測が立ちにくい方が, より好奇心を抱き, 自ら製品を探索する動機付けが促進されると考えられる.

6. 結 言

本研究では, ユーザに探索的な動機付けをもたらす製品設計の実現を目的とした. そこで, Apter の反転理論における Paratelic mode (目的を探索する心理状態) を, Berlyne の最適覚醒水準を用いて統一的に説明するモデルを提案した. Yanagisawa らの情報利得モデルを覚醒度の指標として用いることで, 提案するモデルを数学的に定式化した. 定式化した数理モデルの解析から, 以下の二つの仮説を導出した.

- (a) 最適覚醒水準が低い場合, 不確実性が小さい方が Paratelic mode になりやすい.
- (b) 最適覚醒水準が高い場合, 不確実性が大きい方が Paratelic mode になりやすい.

先行研究⁽⁸⁾では, AI スピーカを用いた実験により, 不確実性が小さいものに対して, より内発的動機付け (intrinsic motivation), つまり Paratelic mode になりやすいという知見が得られている. これを本研究の仮説に当てはめると, (a) に対応する. そこで本研究では, (a) の状態から最適覚醒水

準を上昇させることで、(b)の不確実性が大きい方が Paratelic mode になりやすい条件が生まれると考えた。実験では、二つの AI スピーカを用いた。不確実性は、回答能力の予測の立ちやすさで操作した。最適覚醒水準は実験参加者が Paratelic な心理状態で AI スピーカとインタラクションを行うことで上昇すると考えた。主観評価では、11 段階の質問紙によって二つの AI スピーカにどの程度 Paratelic または Telic な動機付けを持ったか評価してもらった。客観評価では、二つの AI スピーカにどちらに何回 Paratelic または Telic な動機付けによる質問をしたのか、音声データの解析により評価した。主観評価において、不確実性が大きい AI スピーカに、より Paratelic な動機付けを持つことに有意差が認められた。先行研究⁽⁸⁾の知見と、本研究の主観評価によって、モデルの予測による仮説が検証された。

文 献

- (1) Krippendorff, K.: The semantic turn, A new foundation for design, crc Press, 2005.
- (2) Ryan, R. M., & Deci, E. L.: Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions, Contemporary Educational Psychology, Vol. 25, No. 1, 54-67, 2000.
- (3) Apter, M. J.: Reversal Theory and Personality: A Review, Journal of Research in Personality, Vol. 18, 1984.
- (4) Berlyne, D. E.: Intrinsic and extrinsic motivations: Novelty, complexity, and hedonic value, Perception & Psychophysics, Vol. 8, 1970.
- (5) Yanagisawa, H.: A computational model of perceptual expectation effect based on neural coding principles, Journal of Sensory Studies, Vol. 31, No. 5, 430-439, 2016.
- (6) Kullback, S., & Leibler, R. A.: Information and Sufficiency, The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 22, No. 1, 79-86, 1951.
- (7) Yanagisawa, H., Kawamata, O., & Ueda, K.: Modeling emotions associated with novelty at variable uncertainty levels, A Bayesian approach, Frontiers in Computational Neuroscience, Vol. 13, No. 2, 2019.
- (8) Li, C., & Yanagisawa, H.: Intrinsic Motivation in Virtual Assistant Interaction, Proc. International Symposium on Affective Science and Engineering ISASE2019 (2019), 1-5.
- (9) M. J.アプター, 山岸俊男監訳, 渋谷由紀訳: デンジャラス・エッジ 「危険」の心理学, 株式会社講談社, 1995.