

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03318

研究課題名（和文）新奇性に対する感情の数理モデル開発（情報量が覚醒度と快感情に与える影響の解明）

研究課題名（英文）Development of mathematical model of emotion associated with novelty (Effects of information contents on both arousal and valence)

研究代表者

柳澤 秀吉 (YANAGISAWA, Hideyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：20396782

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：新奇性に対する感情次元（覚醒度と感情価）をベイズ知覚モデルと情報利得を用いて定式化した。覚醒度（または驚き）をベイズ事後分布と事前分布とのカルバックライブラー情報量による情報利得としてモデル化した。提案モデルの解析から、覚醒度に対する予測誤差と不確実性の交互作用を明らかにし、主観報告および事象関連電位P300を用いた実験により検証した。また、感情価を報酬系と嫌悪系の和として、情報利得の関数として定式化した。さらに、情報利得を時間発展させたモデルにより、新奇性に対する「慣れ」を定式化し、予測可能性が慣れの速度に与える影響をモデル予測と実験の両側面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感情次元を数理的にモデル化し実験的に検証した研究は世界的に類を見ない。したがって、本研究の成果は感情の数理という新たな研究領域の科学的基盤を提出したと言える。本研究で対象とした新奇性に対する感情は、新しさに対する社会的受容や普及のために重要である。本研究で提案したモデルは、新奇性の受容性の条件を不確実性と予測誤差を用いて一般的に明らかにした。さらに、提案モデルの応用から、新奇性に対する慣れや飽きの条件も不確実性と予測誤差を用いて明らかにした。提案モデルの応用可能性は非常に幅広く、たとえば、新しい製品やサービスの受容性と普及の条件を理解し、予測・シミュレーションする際の基礎理論となり得る。

研究成果の概要（英文）：We proposed a general model of emotion dimensions (i.e., arousal and valence) associated with novelty using Bayesian perception model and the information gain. We modelled the arousal as a information gain represented as Kullback-Leibler divergence of Bayesian posterior from the prior. From the analysis of the proposed model, we derived the interaction effect between the prediction errors and the uncertainties on arousal and verified the model prediction by an experiment using subjective reports of surprise and ERP P300. In addition, we formulated the emotional valence as a function of information gain as the summation of the reward system and the aversive system. Furthermore, we modelled the habituation to novelty by applying the proposed information gain model and elucidated the effect of predictability on the habituation speed.

研究分野：設計学

キーワード：感情 新奇性 不確かさ 情報理論 ベイズ P300 数理モデル 慣れ

1. 研究開始当初の背景

新奇性 (Novelty) は、創造性に不可欠な因子である。しかし、新しいものが社会に受け入れられるか否かは、それを享受する側の感情に依拠するところが大きい。インダストリアル・デザイナーの先駆者レイモンド・ローウィーは、新奇なものの誘惑と未知のものに対する怖れとの臨界点を MAYA (Most advanced, yet acceptable) と呼び、これを満たすことが広く受け入れられる新しいデザインに重要であると主張している。新奇性に対する受容性は、それを享受する人々の感情に依拠する。新奇性に対する感情を解明し、その法則性を数理的にモデル化することにより、社会に受け入れられる「新しさ」をデザインするための基盤知識になると考えた。

新奇性は、新たな情報をもたらす。情報理論では、事象生起後 (事後) に得られる情報量の期待値を、事前の確率分布のエントロピーで定義している。エントロピーは不確実性を意味する。事後に得る情報量は、エントロピーの減少量として計算可能であり、これを情報利得と呼ぶ。新奇性の高い事象は、大きな情報利得をもたらす。そして、大きな情報利得は、驚き (surprise) などの強い感情を引き起こす。一般に、感情は覚醒度 (感情の強さ) と快-不快 (感情価) を含む次元を用いて空間的に配置されることが知られている。驚きは、覚醒度の高い感情状態として位置づけられる。このことから、情報利得が感情の覚醒度に対応すると考えた。では、情報利得は快-不快とどの様な関係をもつであろうか。情報利得がゼロの場合、感情の覚醒度はゼロであり無感情となる。一方、過大な情報利得はそれを処理する脳の許容量を超えて不快となる。したがって、情報処理の許容量を超えない範囲で適度な情報利得をもたらす事象が、新しさと受容性を両立した快の感情をもたらすと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、新奇性に対する感情次元 (覚醒度および感情価) と感情の時系列変化を推定するための計算モデルを研究開発する。すなわち、情報理論を用いて、事前の不確実性と事後の情報利得が、覚醒度と感情価に与える影響を明らかにする。そして、その関係性を計算可能な数理モデルとして記述し計算機に実装する。これにより、新奇性に対する感情を計算機でシミュレーション可能にする。さらに、ヒトを対象とした検証実験として、期待と実際の差 (予測誤差) や不確実性を操作した際の脳計測および行動計測を行い、モデルの妥当性を検証する。

本研究は、新奇性に対する感情のメカニズムをホワイトボックス化し、その普遍的な法則を数理モデルとして記述することにより広く利用可能な知識とすることを目指す。従来の研究で多く見られる定性的なモデルや実験データにもとづく統計モデルとは異なり、対象に依存しない一般性と定量性を併せ持つ数理モデル構築の立場をとる。

3. 研究の方法

新奇性に対する感情のモデル化のアプローチとして、対象に依存しない物理量である情報量を用いる。情報量を用いて表現可能な不確実性と情報利得は、それぞれ、個人の持つ知識量、および脳の情報処理量に対応する。このことは、提案モデルが、新奇事象に対する感性の個人差、および状況により変動する認知負荷の影響を統一的に説明しうる。

3.1 新奇事象に対する感情の覚醒度計算モデルの開発

新奇な事象から獲得する情報利得を感情の覚醒度の指標としてモデル化する。情報利得は、事後分布と事前分布により求まる。ベイズの定理により、事後分布は事前分布×尤度関数に比例する。筆者らは、これまでに、事後分布を不確実性、予測誤差、外乱の関数として表せることを明らかにした[1]。ここで、予測誤差とは予想と実際のズレであり、事前分布の期待値と尤度関数

の最尤推定値との差としてあらわす。外乱は、感覚刺激に混入するノイズであり、尤度関数の尖度作用する。このベイズ知覚モデルを応用することで、情報利得を、予測誤差、不確実性、および外乱をパラメータとした関数として定式化する。これを計算機に実装し、予測誤差、不確実性、外乱を操作した際の情報利得の値を解析する。

3.2 不確実性と予測誤差が感情次元に与える影響（計算シミュレーションおよび実験）

3.1 の数理モデルを計算機に実装し、不確実性と予測誤差が情報利得および驚き（感情の覚醒度）に与える影響を調べる。数理モデルの解析から導出した、不確実性と予測誤差の情報利得の交互作用を検証する。すなわち、予測誤差が小さい場合、不確実性が大きい方が情報利得は大きい、予測誤差が大きい場合は、逆に、不確実性が小さい方が、情報利得が大きいことを検証する。検証材料として、打楽器の見た目と打音を評価対象として用いる。打楽器を見て（事前）打音を聞く（事後）の状態遷移を考える。見た目から打音を予想させ、実際の打音に対する驚きを評価する。打楽器の見た目の典型性を用いて不確実性を操作する。また、異なる打音を映像に合成することにより予測誤差を操作する。

評価方法は、主観と脳波を用いる。主観では、見た目に対する音についての驚きの度合い、および映像から予想した音と実際聴こえた音のずれの程度を評定尺度法で取得する。脳波は、事象関連電位 P300 を用いる。P300 は、事象発生から約 300ms 後に生じる一過的な電位変動であり、その振幅は外部刺激に対する注意や処理の度合いを反映し、驚きと対応するとされている。

3.3 新奇刺激に対する慣れの数理モデルと実験検証

新奇刺激による感情の覚醒度は、刺激の複数回提示によって減衰する、すなわち、新しい事象はいずれ慣れる。慣れによる覚醒度の減衰の仕方は、新奇性に対する受容性の経時変化を議論する上で重要である。そこで、ベイズ更新の考え方を適用し、事前分布から事後分布への更新を繰り返した場合、分布がどの様に真の分布に近づくかを、異なる条件でシミュレーションする。この結果を実験仮説として、3.2 のパラダイムを用いた P300 振幅の時系列的な減衰を分析し慣れのモデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

4.1 新奇性に対する感情次元の数理モデルの定式化[2]

本研究で定式化した新奇性に対する感情次元の数理モデルの全体像を図 1 に示す。感情次元を構成する覚醒度 (arousal) に対応する驚きは、事後に獲得する情報利得で表される。これは、事前分布 P からベイズ事後分布 Q へのカルバックライブラー情報量 (KL 情報量) に対応する。すなわち、事前の期待を表す事前分布と事後の認識を表す事後分布の間の擬距離として、覚醒度を定式化した。事前分布と事後分布が正規分布に従うと仮定すると、情報利得 G は、不確実性 s_p 、予測誤差 δ 、外乱 s_l を変数とする関数として表せることが分かった。

$$G = \alpha \delta^2 + \beta, \quad \text{ただし, } \alpha = \frac{s_p}{2(s_p + s_l)^2}, \quad \beta = \frac{1}{2} \left(\log \frac{s_p + s_l}{s_l} - \frac{s_p}{s_p + s_l} \right) \quad (1)$$

すなわち、予測誤差の二次関数であり、係数 α と β は、不確実性と外乱の関数である。

さらに、感情次元である感情価 (valence) は、覚醒ポテンシャル理論にもとづき、感情価を二つのシグモイド型関数の和として情報利得の凸関数として定式化した。図 2 に感情価関数モデルの概要を示す。

$$Valence = \frac{h_r}{1 + \exp(-c_r G + G_r)} + \frac{-h_a}{1 + \exp(-c_a G + G_a)} \quad (2)$$

ここで、二つのシグモイド関数は、それぞれ報酬系と嫌悪系の反応関数に対応する。本モデ

ルにおいては、情報利得が、感情の次元である覚醒度と感情価を説明する重要な媒介変数である。

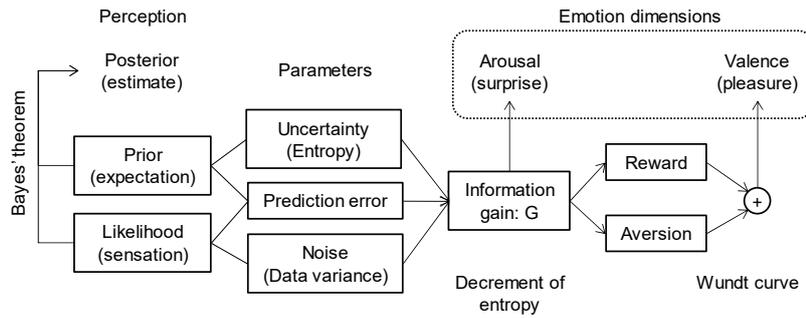


図1 新奇性に対する感情次元の数理モデルの全体像

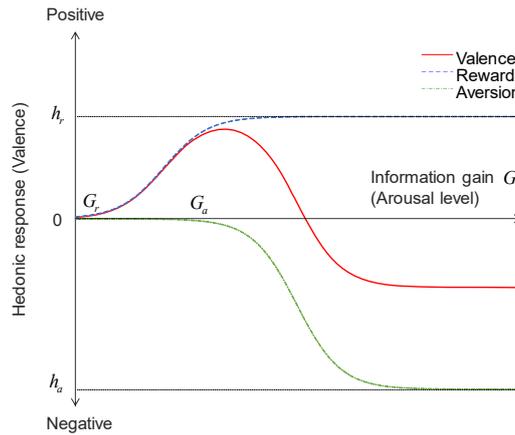


図2 覚醒度の関数としての感情価モデル

4.2 予測誤差と不確実性が覚醒度（驚き）に与える影響[2]

定式化した数理モデルを用いた解析の結果、図3に示す予測誤差と不確実性の交互作用が明らかとなった。すなわち、予測誤差と情報利得の関係は不確実性によって異なり、予測誤差が小さい場合には不確実性が大きいほど情報利得は大きい、予測誤差が大きい場合は逆に不確実性が小さいほど情報利得が大きい条件が存在することが分かった。不確実性は、期待や予測がどれだけ確実性をもつかの信念の度合いである。これは、評価対象の典型性や、評価対象に対する知識や経験に依存する。たとえば、対象が典型的であるか、対象に対して知識や経験を有していれば、不確実性は小さい。逆に、非典型的な対象や、対象に対する知識、経験が乏しい場合は不確実性が大きい。すなわち、評価対象に対して評価者が事前にもつ情報量を意味する。このことから、感情次元（覚醒度と感情価）は、評価対象の物理的な感覚刺激だけでなく、評価対象に対する事前の情報量と、それにもとづく予測（期待）との不一致の度合いの両方が交互作用を伴って影響する。

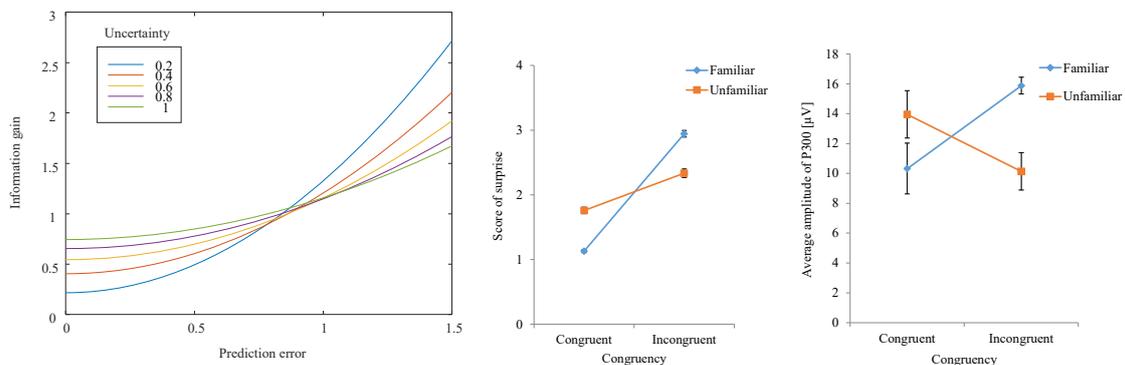


図3 覚醒度（驚き）に対する予測誤差と不確実性の交互作用（左図：シミュレーション、中央：主観評価、右図：象関連電位 P300 の振幅）

モデルで予測した予測誤差と不確実性の交互作用を、打楽器を刺激として用いた被験者実験により検証した。本実験では、方法で述べたように、打楽器の見た目と音の一致性で予測誤差を、打楽器の親近性（よく知っている楽器か否か）で打音の予測に対する不確実性を操作した。その結果、驚きについての主観評価および事象関連電位 P300 のいずれにおいても、親近性と音の一致性において有意な交互作用が確認された（図3）。この結果から、定式化した感情の覚醒度モデルの予測が支持された。

4.3 「慣れ」の数理モデル[3, 4]

4.1 の覚醒度モデルを応用して、新奇刺激の繰り返し提示に対する慣れの数理モデルを定式化した。すなわち、新奇刺激に対する情報利得の減衰を慣れと捉えた。モデル予測から、初期の不確実性と予測誤差によって、慣れの速度が異なることが分かった。初期の予測誤差が小さいまたはゼロの場合、初期の不確実性の増大に伴って慣れの速度が増加する。逆に、初期の予測誤差が大きい場合、初期の不確実性の増大に伴って慣れの速度が減少することが明らかとなった。モデル予測を、4.2 で用いた打楽器の刺激を用いて被験者実験により検証した。実験では、主観評価と P300 振幅を反応として取得した。これらの結果は、初期の予測誤差と不確実性の交互作用によるモデル予測を指示した。このことから、ベイズ更新にもとづく情報利得の減衰を慣れのモデルとして用いることの妥当性が示された。

4.5 研究成果の意義と展望

本研究では、新奇性に対する感情次元（覚醒度と感情価）を、ベイズモデルと情報利得を用いて数理的に定式化し、その妥当性を被験者実験により実証した。感情次元を数理的にモデル化し実験的に検証した研究は世界的に類を見ない。また、新しさに対する感情を一般的にモデル化した研究は見当たらない。したがって、本研究の成果は感情の数理という新たな研究領域の科学的基盤を提出したと言える。本研究で対象とした新奇性に対する感情は、新しさに対する社会的受容や普及のために重要である。本研究で提案したモデルは、新奇性の受容性の条件を不確実性と予測誤差を用いて一般的に明らかにした。さらに、提案モデルの応用から、新奇性に対する慣れや飽きの条件も不確実性と予測誤差を用いて明らかにした。提案モデルの応用可能性は非常に幅広く、たとえば、新しい製品やサービスの受容性と普及の条件を理解し、予測・シミュレーションする際の基礎理論となり得る。以上から、本研究の成果は、感情の科学およびイノベーションのための産業応用の両面において基盤的な科学知識を提供したと言える。今後は、構築した基礎モデルを応用して、様々な方面で活用する研究を展開していきたい。同時に、感情モデル自体の精緻化、一般化にも取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] H. Yanagisawa, "A computational model of perceptual expectation effect based on neural coding principles," *Journal of Sensory Studies*, vol. 31, no. 5, pp. 430-439, 2016.
- [2] H. Yanagisawa, O. Kawamata, and K. Ueda, "Modeling Emotions Associated With Novelty at Variable Uncertainty Levels: A Bayesian Approach," *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 13, no. 2, 2019-January-24, 2019.
- [3] T. Sekoguchi, Sakai, Yuki, Yanagisawa, Hideyoshi, "Mathematical model of emotional habituation to novelty: Modeling with Bayesian update and information theory," *IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, SMC2019*, 2019.
- [4] K. Ueda, T. Sekoguchi, and H. Yanagisawa, "How predictability affects habituation to novelty," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 6, pp. e0237278, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takahiro Sekoguchi, Yuki Sakai, Hideyoshi Yanagisawa	4. 巻 449
2. 論文標題 Mathematical Model of Emotional Habituation to Novelty: Modeling with Bayesian Update and Information Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SMC.2019.8914626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 柳澤秀吉	4. 巻 17-4
2. 論文標題 感性のプリンキピアを探究する（クロスモーダルから感情まで）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本感性工学会誌	6. 最初と最後の頁 163-198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柳澤秀吉	4. 巻 122-1208
2. 論文標題 感性のプリンキピアを目指して（知覚の相対論とその数理）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 12-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jsmemag.122.1208_12	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 上田一貴	4. 巻 17-4
2. 論文標題 感性の認知神経科学的モデリング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本感性工学会誌	6. 最初と最後の頁 169-173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hideyoshi Yanagisawa, Oto Kawamata, Kazutaka Ueda	4. 巻 13-2
2. 論文標題 Modeling Emotions Associated With Novelty at Variable Uncertainty Levels: A Bayesian Approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2019.00002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hideyoshi Yanagisawai, Chihiro Miyazaki	4. 巻 13
2. 論文標題 A methodology for extracting expectation effect in user-product interactions for multisensory experience design	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueda Kazutaka, Sekoguchi Takahiro, Yanagisawa Hideyoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 How predictability affects habituation to novelty	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0237278-0237278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0237278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masafumi Miyamoto, Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 Modeling acceptable novelty using information theory
3. 学会等名 International Society of Affective Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 Towards Principia of perceptions and emotions: A Bayesian approach
3. 学会等名 The International Conference on Emotion and Sensibility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤秀吉
2. 発表標題 感性のプリンキピアを目指して (知覚の相対論とその数理)
3. 学会等名 日本機械学会年次大会先端技術フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本 雅史 , 柳澤 秀吉
2. 発表標題 ベイジアン情報量を用いた感情次元の数理モデリング (音楽刺激を用いた実験検証)
3. 学会等名 第21回日本感性工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡崎真琴, 世古口 昂大, 柳澤秀吉
2. 発表標題 新しさと複雑さに対する感情の数理モデリングの試み (自由エネルギーの関数としての感情価)
3. 学会等名 第21回日本感性工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤秀吉
2. 発表標題 感性のプリンキピアをめざして(クロスモーダル知覚から感情まで)
3. 学会等名 第21回日本感性工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本 雅史 , 柳澤 秀吉
2. 発表標題 情報利得を用いた感情の数理モデリング (音楽刺激を用いた実験検証)
3. 学会等名 Designシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 世古口 昂大, 柳澤 秀吉
2. 発表標題 新奇性に対する慣れの数理モデルの提案
3. 学会等名 日本機械学会第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田一貴, 酒井裕希, 柳澤 秀吉
2. 発表標題 事象関連電位を用いた操作レスポンスに対する違和感とその時間遷移の定量的評価手法
3. 学会等名 日本機械学会第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazutaka Ueda, Yuki Sakai, Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 Quantitative evaluation of sense of discrepancy to operation response using event-related potential
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2019 & Manufacturing Systems Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡崎真琴, 世古口昂大, 柳澤秀吉
2. 発表標題 新奇性と複雑さに対する感情次元の数理モデリング (形状に対する感情反応を用いた検証)
3. 学会等名 第15回日本感性工学会大会春期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田一貴
2. 発表標題 感性の認知神経科学的モデリング
3. 学会等名 第21回日本感性工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 How does expectation affect sensory experience? -A theory of relativity in perception
3. 学会等名 International Society of Affective Science and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Sekoguchi, Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 A Mathematical Model of Emotional Desensitization to Novelty -Modeling with Bayesian Update and Information Theory
3. 学会等名 International Society of Affective Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyoshi Yanagisawa
2. 発表標題 Towards mathematical modeling of emotions elicited by novelty: An information theoretic approach
3. 学会等名 International Conference on Human Systems Engineering and Design (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳澤秀吉, 川又音, 上田一貴
2. 発表標題 新奇性がもたらす感情次元の数理モデリング (不確実性と予測誤差が驚きに与える影響)
3. 学会等名 日本機械学会 第28 回設計工学・システム部門講演会講演論文集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Hideyoshi Yanagisawa	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Nature Switzerland AG	5. 総ページ数 238
3. 書名 A Mathematical Model of Emotions for Novelty in Fukuda, S. ed., Emotional Engineering, Vol.8	

1. 著者名 Kazutaka Ueda	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Nature Switzerland AG	5. 総ページ数 238
3. 書名 A Neural Model of Aesthetic Preference for Product. In Fukuda S. Ed., Emotional Engineering Vol.8.	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	上田 一貴 (KAZUTAKA Ueda) (10403594)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------