Vol.2019-BIO-57 No.8
2019/3/9

報酬予期・獲得時に観測されるマウスの特徴的な洞毛運動に関する統計的解析

尾崎 隼平[1,a)]　水谷 晃大[2,3]　山下 貴之[3]　中野 高志[1]　池田 和司[1]　吉本 潤一郎[1,b)]

概要：脳の内的状態はしばしば表情として表れる．しかしながら，動物がどのような表情を持っているかはほとんど分かっていない．私たちは，今回，報酬に関連した内的状態をマウスの洞毛が表現している可能性を検討した．3 匹のマウスに聴覚性 Go/No-Go 課題を学習させ，学習後のマウスの課題遂行中の洞毛運動を撮影して解析を行った．その結果，報酬を予期させる音刺激「Go キュー」提示時に約 5-8 Hz の周期的な洞毛運動が表れることを発見した．このような洞毛運動は，報酬とは無関係の「No-Go キュー」提示時や「Go キュー」提示後に報酬獲得に至らなかった試行では見られなかった．また，報酬獲得後には洞毛はより前方に位置しながら前後運動することも明らかとなった．さらに，これらの洞毛運動データを利用して，マウスが報酬を予期し獲得に至った試行を洞毛運動から正確に区別できるアルゴリズムを機械学習により開発することができた．以上の結果は，報酬予期と報酬獲得に関連したマウスの表情の一部として，洞毛に特徴的な運動が表出することを示唆する．

キーワード：マウス，洞毛，Go/No-Go 課題，情動表出，機械学習

Statistical analysis on characteristic whisking movement observed in reward anticipation and acquisition

Jumpei Ozaki[1,a)]　Kohta Mizutani[2,3]　Takayuki Yamashita[3]　Takashi Nakano[1]　Kazushi Ikeda[1]
Junichiro Yoshimoto[1,b)]

Abstract: Internal states of the brain can be often reflected as facial expressions. However, how animals show their facial expression is largely unexplored. Here we investigate whether a whisker of mice might convey some information of their internal states related to reward processing. We trained three mice for an auditory Go/No-Go task and filmed a whisker during task performance after the mice learned the task. We found that approximately 5-8 Hz periodic whisking was commonly observed during reward-associated "Go" cue presentation. Such whisking rarely occurred in "No-Go" trials or in "Go" trials where the mice were not motivated to get a reward. Furthermore, after acquiring a reward, the mice whisked with a more protracted set-point. Using machine learning, we obtained a computer algorithm that could accurately indicate reward-anticipating and reward-acquiring trials only from whisker time plots. Our analyses suggest that mice exhibit stereotypic whisker movements as a part of orofacial movements related to reward anticipation and acquisition.

Keywords: mouse, whisker, Go/No-Go task, facial expression, machine learning

1. はじめに

ヒトは内的状態を身体的運動としてしばしば表出する．その中でも，顔面筋の運動は顔面表情とも呼ばれるように生理状態や情動と密接に関連している [1]．顔面筋の運動に

1 奈良先端科学技術大学院大学, Nara Institute of Science and Technology, Nara 630-0192, Japan
2 大阪大学, Osaka University
3 名古屋大学, Nagoya University
a) ozaki.junpei.of3@is.naist.jp
b) juniti-y@is.naist.jp

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

よる情動の表出は，ヒトに限らず，サルやイヌ，マウスなどの社会的相互作用を持つ他の生物にも存在する [2], [3]．例えば，マウスやラットに代表される齧歯類では，侵入者の出現や捕食者の匂いなどの嫌悪刺激に対して，目を細める，耳を伏せる，頬や鼻を膨らませるなどの運動が観察できることが報告されている [4]，また，お腹をさするなどの快刺激によって, 耳の色がピンクになること, 耳の角度が広がることが報告されている [5].

齧歯類には他にも代表的な顔面筋の運動として，洞毛運動がある．洞毛運動は物体の位置やテクスチャの知覚など [6], [7]，自身の空間認知や環境の探索に重要な役割を果たしていると一般的には考えられている．しかしながら，近年，洞毛刺激と水報酬との連合学習課題（条件づけ課題）において，学習後のマウスは報酬と関連づけられた洞毛への電気刺激（条件刺激）が与えられた直後に，洞毛を protractin（前方運動）させることが報告された [8]．これは，マウスは洞毛運動を用いて報酬予期に関連した情動を表出させている可能性を示唆するものである．しかしながら，直接的な洞毛刺激は反射的な洞毛運動を引き起こすことも知られており [9], [10]，洞毛運動が情動のような内的状態を表現しているかどうかについてまだ確固たる証拠が揃っていない.

そこで，本研究では，洞毛以外への感覚刺激によっても報酬と関連した洞毛運動が観測されるかどうか，また，観測されるならば報酬予期や報酬獲得に対応する洞毛運動はどのような特徴を持つのかを明らかにするために，音刺激と水報酬の連合学習が必要な聴覚性 Go/No-Go 課題を遂行中のマウスの洞毛運動を記録し，そのデータを解析した．さらに，洞毛運動のみの情報から，そのマウスが報酬を予期しているか否か，あるいは，報酬獲得に至ったか否かを正確に識別できるアルゴリズムを機械学習の手法を用いて開発することにより，洞毛運動が報酬に関連した情動の表出として社会的相互作用のためのコミュニケーションツールとなり得るかどうかを検証した．なお，本研究におけるマウスの実験は名古屋大学環境医学研究所倫理審査委員会の承認を得て実施した.

2. 手法

2.1 実験

本研究では，いずれも生後 6 週齢以上となる C57BL/6J 系統の雄マウス 3 匹を用いて実験を行い，解析の都合上，各マウスを KM1，KM2，KM3 と名付けた．下準備として，各マウスに対して，頭部固定のための金属頭部拘束ポストを取り付け，洞毛運動測定時の計測エラー低減のために右側 C2 以外の洞毛を全て切除した [11]．手術後には回復期間を設け，水制限をしてから事前訓練を行った．事前訓練は，実験装置の中で頭部拘束されたマウスが licking（舌先で繰り返し舐める行動）を行うと吐水口から水報酬が与えられるように設計され，この間にマウスを頭部拘束状態に順応させるとともに，licking と水報酬の連合を学習させた．この事前訓練を 1 日あたり 3 セッション（1 セッションあたり 20-30 分間）行った結果，いずれのマウスも 2-3 日で licking と水報酬の連合を学習することができた．

事前訓練後，以下で説明する聴覚性 Go/No-Go 課題を各マウスに遂行させる本実験を行った．各試行は，3 kHz または 13 kHz の純音刺激を 2 秒間マウスに提示することで開始する（キュー提示区間）．3 kHz の純音刺激（Go キュー）が提示された場合は，キュー提示区間終了後から 1 秒以内の間（報酬区間）に licking をすると通常は水報酬が与えられる．一方，13 kHz の純音刺激（No Go キュー）が提示された場合は，licking の有無に関わらず報酬区間であっても何もフィードバックはない．報酬区間後，3-9 秒間のランダムな時間間隔で試行間間隔が設けられ次の試行へと移る．ただし，試行開始予定の 2 秒前にマウスが licking をした場合には，改めて 3-9 秒間の試行間間隔へ戻るものとする．以上を各マウスに 1 日あたり 1 セッション 200-250 試行実施させたが，お腹を満たしたなどの理由により，水報酬に対して licking を示さなくなった場合には，その 3-6 分後にセッションを強制終了した．各セッション終了後には，マウスに 1.0-1.5 g の餌を与え，実験開始前の 80%以上の体重が維持されるようにした．

本実験は，各実験日の課題成功率をもとに 2 つのフェーズに分離した．前半の学習フェーズは，報酬の有無に応じて音刺激の違いを試行錯誤学習の結果として正しく弁別できるようになるかを確認するフェーズであり，Go キュー提示時に正しく licking できた割合（Hit 率）が 80%以上，かつ，No Go キュー提示時に誤って licking してしまった割合（False Alert 率; FA 率）が 20%以下になるまで継続した．音刺激の違いが正しく弁別できることが確認されると，後半の記録フェーズへと移行して，課題遂行中の洞毛運動をフレームレート 200 Hz のハイスピードカメラ（HAS-L1, ディテクト社）で撮影した．また，記録フェーズでは，期待される報酬獲得に失敗した際の反応を調べるために，Go キューが提示された場合でも，そのうち 10% の確率で licking の有無に関わらず水報酬が与えられない試行を追加した.

2.2 試行の分類

聴覚性 Go/No-Go 課題では，提示される音刺激の違い，それに対するマウスの licking の有無，報酬の有無に応じて全試行を以下の 6 つのカテゴリーに分類することができる.

Hit Go キュー提示後，報酬区間中に正しく licking し，報酬を獲得できた試行

Miss Go キュー提示後，報酬区間中に licking されず，報酬獲得に失敗した試行

False Alert (FA) No-Go キュー提示後，報酬区間中に

誤って licking してしまった試行（報酬は与えられない）

Correct Rejection (CR)　No-Go キュー提示後，報酬区間中に licking されなかった試行（報酬は与えられない）

Omission Lick (OL)　Go キュー提示後，報酬区間中に正しく licking したにも関わらず，報酬が与えられなかった試行

Omission Non-Lick (ON)　Go キュー提示後，報酬区間中に licking されず，報酬が与えられなかった試行

このうち，キュー提示区間に限定すると，Hit 試行と OL 試行のような Go キュー提示後の報酬区間に向けた licking 準備は，近い将来的に期待される報酬の予期と考えることができる．したがって，キュー提示区間に言及する場合，Hit 試行および OL 試行をまとめて報酬予期（Reward Anticipation; RA）試行と，その他の試行をまとめて非報酬予期（Non-RA）試行という上位カテゴリーも定義した．また，報酬区間に限定すると，報酬予期試行は，Hit は期待通りの報酬が獲得できた試行であるのに対して，OL は予想外の報酬省略が生じた試行として区別することができる．したがって，報酬区間にのみ言及する場合は，Hit 試行を報酬獲得試行，OL 試行を報酬省略試行と定義した．

2.3　データ解析

実験終了後，記録フェーズで撮影された洞毛運動のデータを解析した．各時点における洞毛の状態は，固定した頭から鼻筋への直線を軸と右側 C2 洞毛のなす角度 θ と定義し，実験時に撮影した動画から画像処理ソフト ImageJ/Fiji のプラグインである Whisker Tracking[*1] を用いて定量化した．この定義によれば，角度 θ の増加は protraction（前方への運動）に，減少は retraction（後方への運動）に対応する．

その後，正確な画像処理がなされなかったと目視により確認できた試行や，試行開始直前 2 秒前に licking をしたにも関わらず，試行間間隔に戻らずキュー提示区間に移行してしまった試行は，エラー試行として解析対象から除外した．

除外されなかった各試行に対しては，刺激提示 2 秒前から報酬区間終了 2 秒後までの洞毛運動を解析対象区間として切り出した．切り出された洞毛運動系列は，トレンドやノイズ除去のために，通過帯域 3-25 Hz のバンドパスフィルタを用いて平滑化を行った．その後，Hit 試行，CR 試行，および，OL 試行における典型的な洞毛運動パターン（図 1）を目視により確認したところ，キュー提示区間において，RA 試行（Hit 試行および OL 試行）時には，大きな protraction 後に小刻みかつ周期的な洞毛運動が観測されるのに対して，Non-RA 試行（例えば CR 試行）時には

*1　https://github.com/tarokiritani/WhiskerTracking

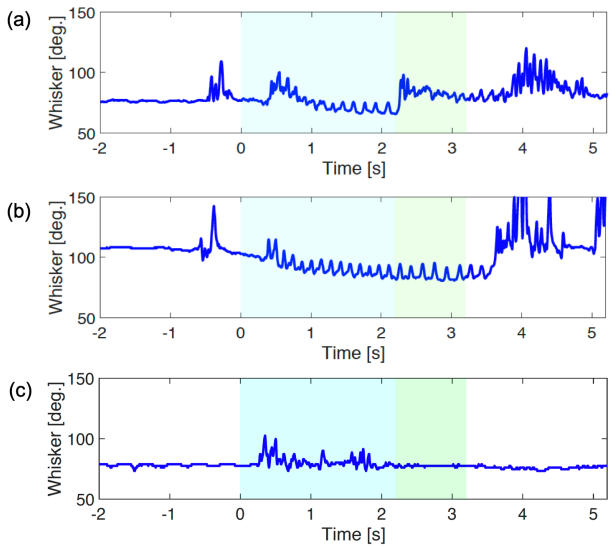

図 1　各試行カテゴリにおける洞毛運動の典型例．(a) Hit 試行時，(b) Omission Lick (OL) 試行時，(c) Correct Rejection 試行時の洞毛運動を表している．図中の背景色は，青：キュー提示区間，緑：報酬区間，白：試行間間隔を示している．

ほとんど洞毛運動が観測されない，あるいは，不規則な洞毛運動しか観測されなかった．このことから，刺激区間における洞毛運動については，窓サイズ 500 ms およびオーバラップ 250 ms の短時間フーリエ変換によって時間間隔 250 ms と 周波数間隔 1 Hz のスペクトログラムを算出することで，その時空間情報を抽出した．この際，スペクトログラムの時間刻みである 250 ms よりも長周期の成分（4 Hz 未満の成分）とバンドパスフィルタの通過帯域より高周波の成分（25 Hz を超える成分）はアーティファクトとみなし切り捨てた後，残った各成分のパワーは各時間ごとの和が 1 となるような正規化を行うことによって相対値へと変換した．さらに，抽出された情報量を最大限保持しながら低次元へと次元圧縮するために，主成分分析法を適用し，それによって得られた第 1 主成分得点を各試行のキュー提示区間における洞毛運動の特徴量とした．そして，このようにして得られた特徴量に関して，RA 試行と Non-RA 試行の 2 条件間で有意な差が認められるかを Wilcoxon の順位和検定（有意水準 5%）により検証した．

一方，報酬区間においては，報酬獲得試行（Hit 試行）時と報酬省略試行（OL 試行）時ともに，小刻みかつ周期的な洞毛運動が継続される一方で，前者の場合は，報酬獲得後に洞毛運動のセットポイント[*2] が protraction 側に移動することが観測された．このことから，キュー提示区間の場合と同様の方法で得られた第 1 主成分得点を各試行の報酬区間における洞毛運動の 1 つ目の特徴量とするとともに，報酬区間におけるセットポイントの変化を 2 つ目の特徴量

*2　マウスの洞毛運動において，retraction が終了する点（角度 θ の最小値）は retraction セットポイント，protraction が終了する点（角度 θ の最大値）は protraction セットポイントと呼ばれている．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

とした．ここで，セットポイントの変化は，キュー提示区間における洞毛の角度 θ の中央値を基準とした報酬区間における θ の中央値の変化量として定義した．そして，このようにして得られた 2 つの各特徴量に関して，報酬獲得試行，報酬省略試行，および，Non-RA 試行のペアワイズ条件間で有意な差が認められるかを Wilcoxon の順位和検定（Bonferroni 法による多重補正後の有意水準 5%）により検証した．

もし，洞毛運動が報酬に関連した情動の表出として社会的相互作用のためのコミュニケーションツールとして利用されているならば，観察者は洞毛運動からそのマウスの報酬獲得に向けた期待感や報酬獲得に対する喜び（あるいは予想外の報酬省略に対する失意）を高精度で読み取ることができるはずである．最後に，この可能性を検証するために，上記の特徴量から試行のカテゴリーを予測するための分類器を機械学習法により訓練し，その予測精度を検証した．ここで，分類器とはキュー提示区間の洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点）が入力された場合には，その試行が RA 試行であるか Non-RA 試行であるかの 2 クラス分類を行うロジスティクス回帰モデルのことを言い，報酬区間の洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点とセットポイントの変化量）が入力された場合には，その試行が報酬獲得試行であるか報酬省略試行であるかの 2 クラス分類を行う線形判別分析モデルのことを言うものとする．訓練後の各分類器の予測精度は，3 匹のマウスのうち 2 匹分のデータを訓練データとし，残りの 1 匹分のデータをテストデータとして用いる leave one-subject out 交差検証法により評価した．この際，分類精度の評価指標には，2 クラス分類問題で一般的に用いられる混同行列，精度，および，ROC 曲線下面積（以下では AUC と略する）を用いた [12]．

3. 結果

3.1 データ収集

学習フェーズ開始から 10 日後には，3 匹のマウスいずれも，80%以上の Hit 率，かつ，20%以下の FA 率を達成し，報酬の有無に応じた音刺激の違いを正しく弁別できることが確認された．

記録フェーズでは，KM1 からは 7 日間，計 1049 試行分の解析対象にできる洞毛運動を記録することができた．一方で，KM2 と KM3 に対しては，実験装置のトラブルのために，3 日間のみ記録フェーズを実施することができ，それぞれ，220 試行分と 350 試行分の解析対象となる洞毛運動を記録することができた．

3.2 キュー提示区間の洞毛運動解析

以上によって集積された洞毛運動のデータをマウスや実験日の区別することなく全て用いて，キュー提示区間における洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点）を RA 試行と Non-RA 試行で比較したところ，有意な差が認められた（図 2）．このときのスペクトログラムに対する各周波数成分の第 1 主成分負荷量を調べたところ，大きな負荷量が持つ成分が 5-8 Hz の周波数帯域に集中していた（図 3）．以上の 2 つの結果を合わせると，RA 試行時には Non-RA 試行時と比べて，キュー提示区間において 5-8 Hz の周期成分を多く含む洞毛運動がより高頻度で生じていたことが分かる．

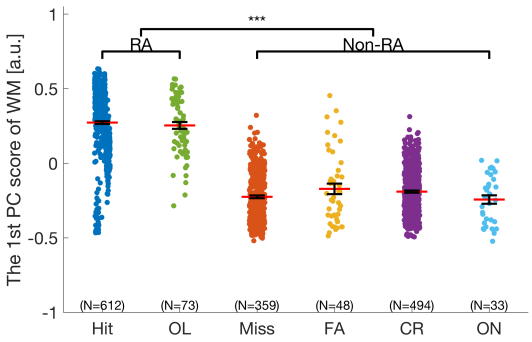

図 2　キュー提示区間における洞毛運動特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点）の試行カテゴリ間比較．各試行カテゴリ中の赤線とエラーバーは，それぞれ，平均値と標準誤差を示している（*** $p < 0.001$, Wilcoxon の順位和検定）．

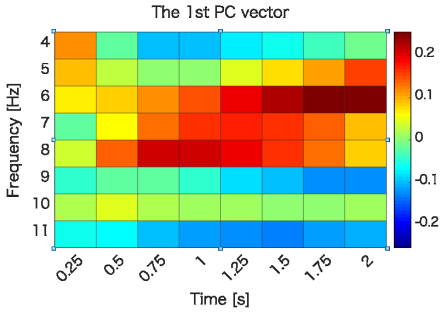

図 3　キュー提示区間における洞毛運動特徴量に対応する主成分負荷量．各成分に対する主成分負荷量（各周波数成分と主成分得点の相関係数）をヒートマップで示している．

キュー提示区間における洞毛運動の特徴量が RA 試行と Non-RA 試行を区別するための汎用的な指標となり得るかを検証するために，全データ集合を各マウスおよび各実験日ごとの部分集合に分割して，各部分データ集合ごとに上記と同じ比較を行った（図 4）．その結果，マウスや実験日の違いに関わらず，常に，同じ上位カテゴリの RA 試行に属する Hit 試行と OL 試行の間では，キュー提示区間における洞毛運動の特徴量に有意な差が認められない一方で，Hit 試行とそれと異なる上位カテゴリ（Non-RA 試行）に属するいずれの試行カテゴリー（FA 試行，CR 試行，ON 試行）の間では，サンプル数が極端に少ない実験日を除いて常にこの特徴量に有意差が認められた．よって，スペクトログラムの第 1 主成分得点として抽出したキュー提示区間における洞毛運動の特徴量は RA 試行と Non-RA 試行を

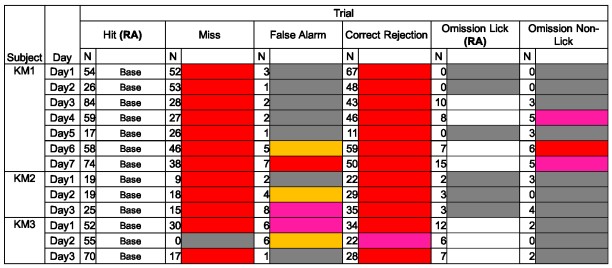

図 4　各実験日ごとのキュー提示区間洞毛運動特徴量の試行カテゴリ間比較．各エントリの色は RA 試行時と比較した各試行カテゴリの有意差の有無を示している（赤：$p < 0.001$，マジェンタ：$p < 0.01$，オレンジ：$p < 0.05$．白：有意差なし，Wilcoxon の順位和検定（Bonferroni 法による多重比較補正済））．灰色で示したエントリは該当するサンプル数が 3 以下のため，比較対象から除外されたものを示している．

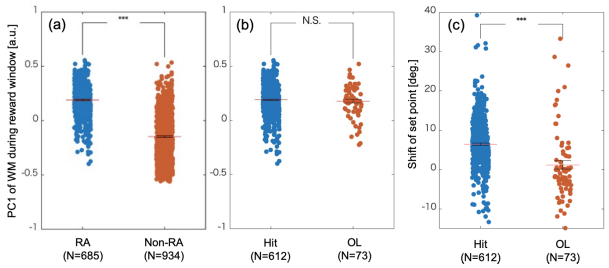

図 5　報酬区間における洞毛運動特徴量の試行カテゴリ間比較．(a-b) スペクトログラムの第 1 主成分得点に関する (a) RA 試行と Non-RA 試行間の比較，および，(b) Hit 試行と OL 試行間の比較．(c) 報酬区間における洞毛運動のセットポイントの変化量に関する Hit 試行と OL 試行間の比較（***: $p < 0.001$，N.S.: 有意差なし，Wilcoxon の順位和検定（Bonferroni 法による多重比較補正済））．

区別するための汎用的な指標であった．

3.3　報酬区間の洞毛運動解析

全解析データを用いて，報酬区間における洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点）を RA 試行と Non-RA 試行で比較したところ，キュー提示区間の時と同様に，有意な差が認められた（図 5(a)）．一方で，この特徴量は報酬獲得試行（Hit 試行）時と報酬省略試行（OL 試行）時の間で有意な差は認められなかった（図 5(b)）．このときのスペクトログラムに対する各周波数成分の第 1 主成分負荷量を調べたところ，大きな負荷量を持つ成分が 4 Hz から 6 Hz へとやや低い周波数帯域へと移動したものの，キュー提示区間と類似した傾向が見られた（紙面の都合上データは割愛）．もう一つの特徴量である報酬区間における洞毛運動のセットポイントの変化量については，報酬獲得試行時と報酬省略試行時の間で，有意な差が認められた（図 5(c)）．以上の結果を合わせると，Go キューの提示によって誘発された洞毛の周期的な運動は報酬区間でも周波数を低減しながらも引き継がれるが，報酬獲得に成功すると洞毛運動は protraction 側へとシフトすることが分かる．

表 1　キュー提示区間の洞毛運動からの試行カテゴリ予測結果

			Prediction		Accuracy
			RA	Non-RA	(AUC)
Test Data	KM1	RA	375	37	0.85
		non-RA	118	519	(0.93)
	KM2	RA	71	0	0.85
		non-RA	21	128	(0.99)
	KM3	RA	138	3	0.86
		non-RA	34	86	(0.94)

表 2　報酬区間の洞毛運動からの試行カテゴリ予測結果

			Prediction		Accuracy
			Hit	OL	(AUC)
Test Data	KM1	Hit	368	4	0.91
		OL	34	6	(0.71)
	KM2	Hit	61	2	0.93
		OL	3	5	(0.84)
	KM3	Hit	117	5	0.89
		OL	10	9	(0.93)

3.4　洞毛運動からの試行カテゴリ予測

洞毛運動から報酬獲得に向けた期待感を読み取ることが可能かを検証するために，キュー提示区間における洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点）からその試行が RA 試行か否か識別する 2 クラス分類器を構築し，その性能を leave one-subject out 交差検証法により評価したところ，精度は 0.85-0.86，AUC は 0.93-0.99 と高い予測性能を示した（表 1）．

また，洞毛運動から報酬獲得に対する喜び（あるいは予想外の報酬省略に対する失意）を読み取ることが可能かを検証するために，報酬区間における洞毛運動の特徴量（スペクトログラムの第 1 主成分得点およびセットポイントの変化量）からその試行が報酬獲得試行（Hit 試行）であるか報酬省略試行（OL 試行）であるかを識別する 2 クラス分類器を構築し，その性能を leave one-subject out 交差検証法により評価したところ，精度は 0.89-0.91，AUC は 0.71-0.93 と高い予測性能を示した（表 2）．

4.　まとめと考察

本研究では，洞毛以外の刺激によっても報酬と関連したマウスの洞毛運動が誘発できるかどうか，また，誘発できるならば報酬予期・獲得に対応する洞毛運動はどのような特徴を持つのかを明らかにするために，音刺激と水報酬の連合学習が必要な聴覚性 Go/No-Go 課題を遂行中のマウスの洞毛運動を記録し，そのデータを解析した．さらに，洞毛運動の情報から，マウスが報酬を予期しているか否か，あるいは，報酬獲得に至ったか否かを正確に識別できるアルゴリズムを機械学習の手法を用いて開発することにより，洞毛運動が報酬に関連した情動の表出として社会的

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

相互作用のためのコミュニケーションツールとなり得るかを検証した．その結果，連合学習が十分に進んだマウスに対して，報酬と関連付けられた音刺激が提示された試行とそうでない試行の間で大きく異なる洞毛運動の特徴量を発見した．この特徴量は，刺激提示区間における洞毛運動のスペクトログラムから主成分分析によって抽出されるものであり，マウスや実験日の違いに依らない普遍的なものであった．抽出された特徴量とスペクトログラムの各周波数成分との相関を主成分負荷量を用いて調べたところ，この特徴量は 5-8 Hz の周期的な運動成分を反映しているものであった．また，この特徴量は報酬と関連付けられた音刺激が提示された場合であっても，報酬獲得のための licking がその後に伴う場合と伴わない場合では大きく異なるものであり，後者の場合は，報酬と無関係な音刺激が提示された時とほとんど差がないものであった（図 2）．したがって，この特徴量は単純に音刺激の違いを反映しているものではなく，近い将来への報酬予期，あるいは，報酬獲得に向けた意欲の表出と解釈できる．

一方で，報酬獲得のための licking 後，期待通りに報酬が与えられると洞毛運動のセットポイントは protraction 側へ移動するのに対して，期待に反して報酬省略された場合には，そのセットポイントはほとんど変化しなかった．したがって，洞毛運動のセットポイントの変化は報酬獲得に対する情動反応の一種と解釈できる．

最後に，洞毛運動の情報から，そのマウスが報酬を予期しているか否か，あるいは，報酬獲得に至ったか否かを識別するための分類器を構築し，学習によってそのような識別が高い精度で実現できるアルゴリズムが存在することを示した．このことは，他者は，洞毛運動の情報から，報酬予期・獲得に関連する情動を読み取ることが可能であり，洞毛運動が社会的相互作用のためのコミュニケーションツールとなり得ることを示唆している．

整理すると，本研究の貢献は以下のようにまとめられる．1) 洞毛以外の刺激によっても報酬予期や獲得と関連したマウスの洞毛運動が誘発できる．2) 報酬予期に関連するマウスの洞毛運動は 5-8 Hz の周期的な運動成分により特徴づけられる．3) 報酬獲得に関連するマウスの洞毛運動は，protraction 側へのセットポイントの変化により特徴づけられる．4) 洞毛運動のみの観察から，報酬予期. 獲得といった情動を読み取ることが可能である．

しかしながら，実験課題の性質上，いくつか検証すべき問題も残っている．本実験課題では，報酬獲得のために licking という別の顔面筋の運動を必要とするため，筋シナジーによって副次的に報酬予期や報酬獲得と関連するマウスの洞毛運動が誘発された可能性は否定できない．実際に，5-8 Hz の周期的な洞毛運動が観測されるときには，連続した licking も観測されることも多かった．licking の他にも，報酬予期には顔面筋の運動を要する sniffing（におい嗅ぎ行動）が関わっているという報告もあり [13]，sniffing 時には 5 Hz を超える周期的な洞毛運動が誘発される [14] ことから，報酬予期時の洞毛運動は sniffing と連動した可能性も高い．これらの因果関係を明らかにしていくことは，報酬に対する情動反応の根源を解明する上では非常に重要な問題となる．今回の実験では，報酬と関連づけられた音刺激は 1 種類のみであり，発見した洞毛運動の特徴が刺激特異的なものであるのか，より一般的な情動反応と捉えて良いのかについては明らかになっていない．この点については，現在の実験パラダイムのまま刺激と報酬の連合条件を変えるなどにより，今後検証していく予定である．

参考文献

[1] Ekman, P.: Why Lies Fail and What Behaviors Betray a Lie, *Credibility Assessment* (Yuille, J. C., ed.), Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 71–81 (1989).

[2] Burrows, A. M. et al.: Muscles of facial expression in the chimpanzee (Pan troglodytes): descriptive, comparative and phylogenetic contexts, *Journal of Anatomy*, Vol. 208, No. 2, pp. 153–167 (2006).

[3] Kaminski, J. et al.: Human attention affects facial expressions in domestic dogs, *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 12914 (2017).

[4] Defensor, E. B. et al.: Facial expressions of mice in aggressive and fearful contexts, *Physiology & Behavior*, Vol. 107, No. 5, pp. 680–685 (2012).

[5] Finlayson, K. et al.: Facial Indicators of Positive Emotions in Rats, *PLOS ONE*, Vol. 11, No. 11, pp. 1–24 (2016).

[6] Deschênes, M. et al.: Sniffing and whisking in rodents, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 22, No. 2, pp. 243–250 (2012).

[7] McElvain, L. E. et al.: Circuits in the Rodent Brainstem that Control Whisking in Concert with Other Orofacial Motor Actions, *Neuroscience*, Vol. 368, pp. 152–170 (2018).

[8] Sachidhanandam, S. et al.: Membrane potential correlates of sensory perception in mouse barrel cortex, *Nature Neuroscience*, Vol. 16, p. 1671 (2013).

[9] Yamashita, T. et al.: Membrane Potential Dynamics of Neocortical Projection Neurons Driving Target-Specific Signals, *Neuron*, Vol. 80, No. 6, pp. 1477–1490 (2013).

[10] Ferezou, I., Haiss, F., Gentet, L. J., Aronoff, R., Weber, B. and Petersen, C. C. H.: Spatiotemporal Dynamics of Cortical Sensorimotor Integration in Behaving Mice, *Neuron*, Vol. 56, No. 5, pp. 907–923 (2007).

[11] Yamashita, T. and Petersen, C. C. H.: Target-specific membrane potential dynamics of neocortical projection neurons during goal-directed behavior, *eLife*, Vol. 5, e15798 (2016).

[12] Sokolova, M. and Lapalme, G.: A systematic analysis of performance measures for classification tasks, *Information Processing & Management*, Vol. 45, No. 4, pp. 427–437 (2009).

[13] Kepecs, A. et al.: The Sniff as a Unit of Olfactory Processing, *Chemical Senses*, Vol. 31, No. 2, pp. 167–179 (2005).

[14] Moore, J. D. et al.: Hierarchy of orofacial rhythms revealed through whisking and breathing, *Nature*, Vol. 497, pp. 205–210 (2013).

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan