原著論文

能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習

清川 宏暁, 川島 祐貴, 山内 泰樹, 永井 岳大

山形大学大学院

Task-relevant Perceptual Learning for Judgments of Visual Material Features

Hiroaki KIYOKAWA, Yuki KAWASHIMA, Yasuki YAMAUCHI and Takehiro NAGAI

*Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University,
4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata, 992-8510, Japan*

Abstract : There have been growing interests in clarifying perceptual mechanisms for different material features such as glossiness and transparency in recent years. In this study, we examined whether perceptual learning effects can be observed for material perceptions, and whether active conduct of material judgment tasks is important for the learning effects. The observers were divided into two groups; the glossiness group and the transparency group. The former observers repeated a glossiness discrimination task, while the latter observers repeated a transparency discrimination task for 10 days. We measured changes in correct response ratios and reaction times for discriminations of learned and unlearned material features between before and after the learning. In the results, in both learning groups, the reaction times for the learned material features were significantly shortened after the learning. These results suggest that the human visual system can increase glossiness and transparency discrimination performances by actively repeating material discrimination tasks.

Keywords : *Material perception, Perceptual learning, Glossiness, Transparency*

1. は じ め に

ヒトは物体の表面を見ると、瞬時にその物体の持つ質感を知覚・認知することができる。その際、どのような画像特徴に基づいて質感が知覚・認知されているのか、また、脳や神経系がどのようなメカニズムによって質感に関する視覚情報を処理しているのかを明らかにすることは、知覚・認知研究の課題の一つとなっている。近年、質感知覚に寄与する画像成分や視覚メカニズムに関する心理物理学的研究が多数行われており、特に光沢感や透明感の知覚に寄与する画像特徴に関する知見は数多く得られてきた。

例えば、物体表面から知覚される光沢感は、物体表面における鏡面ハイライトの存在による輝度ヒストグラムの歪度やコントラストによって引き起こされること [1, 2] や、鏡面ハイライトの大きさや明瞭さ、両眼視差が寄与すること [3, 4] が報告されている。同様に、物体から知覚される半透明感 (translucency) は、光が物体内部で散乱することによる物体表面上の輝度コントラストの減少や輝度極性の反転が手掛かりとなり知覚されること [5]、透過率の高い物体から感じる透明感 (transparency) は、視覚系が局所的な背景の歪みから屈折率の推定をし、それを手掛かりとして知覚されることが示唆されている [6]。

ところで、真珠や宝石といった装飾品の質感鑑定を日常的に行なっている鑑定士は優れた質感判断能力を有していると考えられるが、彼らはどのような視覚情報を捉えて質感を判断しているのだろうか。例えば、心理物理実験の結果から、

真珠鑑定士と素人では、鑑定士の方が素人よりも精度良く、構造色や光沢の画像特徴を手掛かりにして価値の高い真珠と価値の低い真珠を見分けている可能性が報告がされている [7]。この結果は、鑑定士が真珠の鑑定を繰り返し経験することにより、真珠質感に関わる視覚情報を学習している可能性を示している。

このような知覚・認知における学習過程について、知覚心理学では「知覚学習」という枠組みにより、多くの研究が行われてきた。ヒトの視覚系には、大人であっても可塑性が保たれており、類似刺激を使った課題遂行を繰り返すことによってそれらの刺激の変化への感度が上昇すること知られている [8]。このような訓練によって知覚感度が上昇する現象は知覚学習と呼ばれる。例えば、刺激の方位 [9] や運動方向 [10]、コントラスト感度 [11] といったヒトの視覚の基本成分に対する知覚学習効果が多くの研究により明らかにされてきた。さらに近年では、形状 [12] やテクスチャ [13] の知覚のようなより高次の視覚判断においても知覚学習が発生することが報告されている。しかし、同じく高次の視覚判断であると考えられる光沢感や透明感などの質感知覚にも学習効果は現れるのかについては、これまで直接的には検討されていない。

また、知覚学習の発生メカニズムに関して、いくつかの疑問点が残されている。その一つが受動的知覚学習の有無である。受動的知覚学習とは、課題遂行を繰り返す能動的知覚学習とは異なり、視野内に呈示されるが注意が向けられてない知覚刺激に対して生じる受動的な知覚学習効果のことを指す。受動的知覚学習の有無については長らく議論されてきたが、近年では、課題に関連の無い知覚刺激でも、課題と関

連のある知覚刺激と同時に視野内に呈示されていれば学習効果が現れるという実験結果が多く得られている[14-16]。しかし、質感知覚における学習効果についてはこれまで検討されていないため、質感知覚についても学習効果が発生するとしても、それが能動的課題遂行を必要とするのかどうかについても未解明である。例えば、上述した鑑定士を例に取れば、仮に彼らの真珠質感判断において知覚学習が起きているとした場合、その学習が、真珠の価値を決定付ける表面特徴の判断を能動的に行い続けた結果として発生するのか、それとも、視野内に入りこんでくる真珠の視覚情報を受動的に観察し続けた結果として発生しているのかが分からないのである。

過去には、質感の知覚や認知にも学習効果が認められるのかは直接的には検討されていないものの、真珠鑑定士の知覚特性や視覚系の可塑性を考慮すれば、質感知覚に対しても知覚学習による感度上昇が生じる可能性は十分考えられる。そこで本研究では、透明感と光沢感に着目して、質感知覚に対して知覚学習が発生するのかを検討する。その際、質感知覚学習のための能動的課題遂行の重要性についても、併せて検討する。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

今回の実験では、被験者を2グループに分けた。第1グループは、光沢感を学習課題とする「光沢感学習グループ」、第2グループは、透明感を学習課題とする「透明感学習グループ」であった。学習刺激は異なる質感を呈する4つの物体画像からなり、それらの間には透明感と光沢感のどちらの違いも含まれていたが、被験者はそれらのうち課題となる質感の違いのみを選択的に判断した。これによって、質感の学習の際に、刺激に対する能動的な課題遂行が必要となるのか、それとも、視野内に刺激が呈示されていれば受動的に学習が進むのかを検討することを狙いとした。

図1に本研究で行う実験の全体の流れを示す。図1に示されている「予備実験」等の各フェーズの概要は下記の通りであった。なお、各フェーズの実験手続きの詳細は2.5節、2.6節、2.7節にて後述する。

(1) 予備実験フェーズ 被験者ごとに、透明感と光沢感の弁別感度を測定した。その結果は、本実験となるテストフェーズと学習フェーズにおける課題の難易度統制に利用された。

(2) 学習前・学習後テストフェーズ 透明感と光沢感について弁別感度を測定した。感度の指標として正答率と応答時間を用い、学習フェーズ前後の指標変化を計測した。

図1 実験全体の流れ

(3) 学習フェーズ 透明感学習グループと光沢感学習グループの被験者は同じ刺激群を観察したが、弁別課題の学習の対象となる質感はそれぞれ透明感と光沢感であり、異なっていた。なお、学習フェーズ中にも2日に1度学習確認テストとして、テストフェーズの課題を行うことで、学習過程における弁別感度の推移も計測した。

2.2 実験装置

PC (DELL社製 Vostro 3900, CPU: Intel Core i5-4460, グラフィックボード: GeForce GTX 745) に接続されたLCDディスプレイ (EIZO社製 ColorEdge CX271-CN, 画面解像度: 2560×1440, リフレッシュレート: 60Hz) 上に呈示された。ディスプレイは色彩輝度計 (EIZO社製 EX2) によりハードウェアキャリブレーションされており、実験用のカラープロファイルを設定した。その際のキャリブレーション目標値は、輝度120cd/m², 白色点6500K, ガンマ値2.20, 色域設定はsRGB IEC61966-2.1であった。Ubuntu 14.04 LTS上で動作するGNU OctaveとPsychtoolbox [17] でプログラムを作成・実行することで、刺激呈示と被験者応答取得を行った。被験者の頭部はあご台に固定され、ディスプレイから85cmの位置から両眼自然視で刺激を観察した。被験者はテンキーを用いて応答した。

2.3 実験刺激

実験刺激の3次元形状データはThe Stanford 3D Scanning Repository (<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>) からパニー、ドラゴン、ブッダの3種、そして、商用3次元形状データベースであるarchmodels vol.64 (Evermotion社) から人形1種の合計4種を用いた。各形状から作成したコンピュータグラフィックス画像の例を図2に示す。

コンピュータグラフィックス (CG) 画像は、市販のCG作成ソフトウェアであるNewTek社製LightWave11.0を用いて作成された。レンダリング時の環境照明として、ライトプローブイメージ [18] であるDebevecの“Eucalyptus”を使用した。

図2 実験で使った刺激形状

(a) ドラゴン, (b) パニー, (c) ブッダ, (d) 人形

能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習

透明感と光沢感はLightWave11.0中のパラメータにより操作した。光沢感を操作する場合は、「鏡面反射率」パラメータを変更した。鏡面反射率の操作による画像の変化を図3(a),(b)に示す。一方、透明感を操作する場合は、物体への入射光の表面下散乱をシミュレートするアルゴリズムである「Sub-Surface Scattering (SSS)」のDistance値を変更した。Distance値の操作による画像の変化を図3(a),(c)に示す。ただし、これらのパラメータが表す物理的光学特性についてはLightWave11.0の取扱説明書等に記載がなく、詳細については不明であった。しかし、過去の研究では、鏡面反射率を操作することで光沢感を操作することができることが確認されている[19]。また、SSS distance値を操作することで知覚的な透明感を操作することも確認されている[5, 20]。鏡面反射率とSSS Distance値の具体的な値については後述する。

光学特性に関するその他のパラメータについては、自己発光度0%, 反射光25%, 光沢25%, 屈折率1.5に固定されていた。これらはいずれもLightWave 11.0標準搭載のパラメータであり、知覚的な光沢感に関わる。

なお、鏡面反射率を変化させると画像の平均輝度が増減するため、光沢感判断が光沢感そのものには基づかず、単純な画像平均輝度、すなわち全体的な明るさ感のみに基づいて行われる可能性が懸念された。これを防ぐために、明るさに対するノイズ(明るさノイズ)として、拡散反射率を2~8%の

間で2%刻みにランダムに4段階に変化させた。これにより、光沢感操作とは独立に刺激平均輝度が画像ごとに異なるようにした。さらに、質感に基づいた判断を促すため、形状4種類、明るさノイズ4段階の合計16条件のそれぞれにおいて、平均輝度とRMSコントラストを画像間で均一化した。実験で使用した画像の全ピクセルの色度は $u'v'$ 色度図上でのD65点の色度($u'=0.198, v'=0.468$)に統一されていた。

2.4 被験者

被験者は、正常視力、または矯正視力正常の10名(20代男性9名、20代女性1名)であった。この10名という被験者数は過去の視覚刺激を用いた知覚学習研究[21, 22]を参考に決定された。これらの研究においては、被験者数は10名以下であったが学習効果が確認されている。10名のうち5名を光沢感学習グループ、残りの5名を透明感学習グループとした。実験内容は、「ヒトを対象とした研究についての倫理審査申請書」に基づいて、山形大学工学部倫理委員会により認可されていた。

2.5 予備実験

透明感や光沢感の弁別では、同じ刺激を使った場合でも、被験者によって難易度が異なるはずである。そこで、テストフェーズと学習フェーズにおける各被験者の透明感と光沢感の弁別難易度がほぼ同じになるSSS Distance値(透明感調整パラメータ)と鏡面反射率(光沢感調整パラメータ)を被験者ごとに測定することを目的として、予備実験を行った。

(1) 実験刺激 予備実験は光沢感と透明感それぞれについて行った。ここでは、まず光沢感予備実験について述べる。予備実験では、ドラゴン形状に異なる鏡面反射率を与えた2種類の刺激をそれぞれ2つずつ、計4つ同時に呈示した。それら2種類の画像の鏡面反射率は、全被験者共通の基準値から上下にlogスケールで等間隔に異なるように設定した。このときの鏡面反射率の基準値は2.95%であり、鏡面反射率の差の大きさとして5段階を用意した。以後、この鏡面反射率の差を有する画像対のことを「ペア」と呼ぶこととする。

実験刺激の模式図を図4に示す。黒背景の画面中央に白色固視点(79.9cd/m^2)を配置し、その右上、右下、左上、左下に

図3 鏡面反射率とSSS Distanceによる画像変化の例

- (a) 鏡面反射率1%, SSS Distance 0mm
- (b) 鏡面反射率10%, SSS Distance 0mm
- (c) 鏡面反射率1%, SSS Distance 50mm

図4 予備実験刺激例

この例では、鏡面反射率が左右で異なっている。

1つずつ刺激を配置した。各刺激が呈示される領域は固視点と隣接しており、その大きさは縦横ともに視角4.7度(300ピクセル)であった。物体刺激の大きさは、物体形状によらずおよそこの領域全体に収まるように調整した。この時、鏡面反射率が上下方向(この場合、左右に並ぶ刺激は同じ鏡面反射率を持つ)あるいは左右方向(この場合、上下に並ぶ刺激は同じ鏡面反射率を持つ)どちらかにおいて異なっていた。

透明感予備実験についても、光沢感予備実験と同様の刺激を用いた。ただし、ペア内で変化させるパラメータはSSS Distance値であり、基準値は43.0mmであった。

表1に光沢感予備実験の鏡面反射率の組み合わせを、表2に透明感予備実験のSSS Distance値の組み合わせを示す。

(2) 実験手続き 光沢感予備実験と透明感予備実験は別々のセッションで行われた。光沢感予備実験では、各試行において刺激が500ms呈示され、その後、画面には黒背景上の固視点のみが呈示された。このときに、被験者は二肢強制選択法で光沢感の強弱の変化の向き(上下または左右)をテンキーで応答した。透明感予備実験でも実験手続きは同様であり、透明感の強弱の変化の向き(上下または左右)をテンキーで応答した。

実験は恒常法により行い、各セッションにおいて5種類のペアに対する試行をランダムな順番で行った。1セッションでは、1ペアあたり20回、合計で100回の試行を行った。透明感・光沢感のそれぞれにおいて、全2セッションを2日に分けて行った。なお、セッション開始時に、刺激に対する順応を兼ねて1分間の練習時間が与えられた。練習時にも通常の試行と同様に刺激が呈示され被験者に応答をしてもらったが、その試行の結果は解析から除外された。被験者には練習時間の試行と通常の試行の区別は知らせなかった。全実験終了後、各ペアに対する正答率を算出した。なお、光沢感学習グループの2名と透明感学習グループの2名は、他の被験者よりも先に実験を行った。

表1 鏡面反射率の組み合わせ

ペア番号	低い鏡面反射率	高い鏡面反射率
1	2.56%	3.39%
2	2.22%	3.91%
3	1.93%	4.50%
4	1.68%	5.18%
5	1.46%	5.96%

表2 SSS Distanceの組み合わせ

ペア番号	低いSSS Distance	高いSSS Distance
1	36.9mm	50.2mm
2	31.7mm	58.5mm
3	27.2mm	68.2mm
4	23.3mm	79.5mm
5	20.0mm	92.7mm

(3) 実験結果 予備実験から得られた被験者の透明感弁別と光沢感弁別の正答率に対し、各ペアの持つlogスケールのパラメータ差分を説明変数として最尤法によってロジスティック関数を心理測定関数として回帰した。その心理測定関数に基づき、先行して実験に参加した4名の被験者に対しては正答率が70%になるパラメータ差分を、それ以外の6名の被験者に対しては正答率が70%と80%になるパラメータ差分を、閾値として算出した。なお、この違いを設けた理由については次段落で後述する。この閾値を、テストフェーズ、学習フェーズにおける刺激のパラメータ差分として用いる。ただし、閾値がペア1のパラメータ差分より小さい場合には全てペア1のパラメータ差分を用い、ペア5のパラメータ差分より大きい場合にはペア5のパラメータ差分を用いた。

先行参加した4名の被験者では正答率70%の差分を閾値とし、その値をテストフェーズでも学習フェーズでも刺激パラメータとして用いた。しかし、その結果を見ると、70%正答率に対応するパラメータ差分では学習前後で正答率や応答時間が変化していない被験者もいた。その原因の1つとして、課題難易度が高すぎて知覚学習が適切に行われていない可能性が考えられた。過去の知覚学習の研究においても、課題難易度が高い時には、感度上昇が起こりにくいことが報告されていた[23]。そこで、残りの6名の被験者では70%正答に対応する閾値はテストフェーズだけで用い、学習フェーズにおける課題難易度を下げるため80%正答に対応する閾値を学習フェーズで用いることとした。予備実験から決定された各被験者の本実験で用いられたSSS Distance値と鏡面反射率の値をそれぞれ表3、表4に示す。

2.6 テストフェーズ

学習前・学習後のテストフェーズのどちらにおいても、同じ刺激、同じ手続きで実験が行われた。

(1) 実験刺激 予備実験と同一であった。ただし、刺激中のペアの光学パラメータのみが異なり、被験者ごとに予備実験で正答率70%閾値として計測されたSSS Distance値と鏡面反射率の差分が使用された。実験は透明感セッションと光沢感セッションに分かれており、透明感セッションでは上下方向または左右方向に異なるSSS Distance値が設定され鏡面反射率が一定、同様に光沢感セッションでは上下または左右に異なる鏡面反射率が設定されSSS Distance値が一定であった。

(2) 実験手続き 被験者の知覚感度を安定させるために、各セッションの初めの1分間を順応期間とした。順応期間では、刺激中の4画像全てに同一の光学パラメータが設定された刺激を2sおきに500msずつ呈示した。順応期間終了後、試行が開始された。各試行では、刺激が500ms間呈示され、その後、黒背景上に固視点のみが呈示された。刺激呈示開始後、被験者は二肢強制選択法で透明感または光沢感の強弱の変化の向き(上下または左右)をテンキーで応答した。その応答における正答/誤答と応答時間を記録した。なお、応答

能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習

表3 本実験に用いられたSSS Distance値

学習課題	被験者	低いSSS Distance	高いSSS Distance
光沢感	A	31.2mm (70% 正答)	59.3mm (70% 正答)
	B	36.9mm (70% 正答)	50.2mm (70% 正答)
	C	20.0mm (70, 80% 正答)	92.7mm (70, 80% 正答)
	D	28.4mm (80% 正答) 33.4mm (70% 正答)	65.2mm (80% 正答) 55.4mm (70% 正答)
	E	20.0mm (80% 正答) 28.1mm (70% 正答)	92.7mm (80% 正答) 65.8mm (70% 正答)
透明感	F	34.1mm (70% 正答)	54.2mm (70% 正答)
	G	23.1mm (70% 正答)	80.2mm (70% 正答)
	H	20.0mm (80% 正答) 21.8mm (70% 正答)	92.7mm (80% 正答) 84.7mm (70% 正答)
	I	20.0mm (80% 正答) 20.9mm (70% 正答)	92.7mm (80% 正答) 88.6mm (70% 正答)
	J	20.0mm (80% 正答) 21.2mm (70% 正答)	92.7mm (80% 正答) 87.4mm (70% 正答)

表4 本実験に用いられた鏡面反射率

学習課題	被験者	低い鏡面反射率	高い鏡面反射率
光沢感	A	2.47% (70% 正答)	3.50% (70% 正答)
	B	2.41% (70% 正答)	3.60% (70% 正答)
	C	1.46% (80% 正答) 1.52% (70% 正答)	5.96% (80% 正答) 5.70% (70% 正答)
	D	1.97% (80% 正答) 2.12% (70% 正答)	4.40% (80% 正答) 4.10% (70% 正答)
	E	1.46% (80% 正答) 1.51% (70% 正答)	5.96% (80% 正答) 5.77% (70% 正答)
透明感	F	2.48% (70% 正答)	3.50% (70% 正答)
	G	1.60% (70% 正答)	5.44% (70% 正答)
	H	1.64% (80% 正答) 2.20% (70% 正答)	5.28% (80% 正答) 3.94% (70% 正答)
	I	2.56% (70, 80% 正答)	3.39% (70, 80% 正答)
	J	1.60% (80% 正答) 1.87% (70% 正答)	5.43% (80% 正答) 4.64% (70% 正答)

するまでの時間に制限はなかったが、出来るだけ早く応答するように教示した。1セッションあたりの試行数は光沢感セッションと透明感セッションのどちらも20回であった。正答率と応答時間は、どちらも感度の指標として用いた。

学習前後のテストフェーズの他に、学習確認テストとして、学習フェーズ中にも2日に1度学習後にテストフェーズと同じ課題を行った。実験手続きは学習前・学習後テストと同一であったが、1セッションあたりの試行数は光沢感セッションと透明感セッションのどちらにおいても10回とした。学習前後のテストフェーズより試行数を減らした理由は、学習確認テストによる知覚学習効果を小さく抑えたかったためである。

2.7 学習フェーズ

(1) 実験刺激 テスト時と同じ形状で質感弁別課題を繰り返す行くと、光沢感や透明感そのものではなく、特定のハイライトの位置や面積などの単純かつ形状に特異的な画像

特徴に基づく応答戦略を学習してしまう危険がある。そこで、学習フェーズでは、刺激の物体形状として、テストフェーズで用いるドラゴンは用いず、その他の1種類の形状（ブッダ、バンニー、人形）の中から、毎試行ランダムに選択された1種類が使用された。刺激中の画像呈示位置はテストフェーズと同じであった。刺激中のSSS Distance値と鏡面反射率の差分として、先行参加した4名の被験者では被験者毎に表3と表4に示す70%正答率閾値を、残りの6名の被験者では被験者ごとに80%正答率閾値になる値を用いた。

学習フェーズでは、上下方向または左右方向にSSS Distance値と鏡面反射率のどちらも異なるように設定されていたが、SSS Distance値と鏡面反射率の変化方向は必ず異なるよう設定された。例えば、図5に示すように、SSS Distanceが上下方向に異なっていた場合には、鏡面反射率は必ず左右方向に異なっていた。

(2) 実験手続き テストフェーズと同様に、各セッションの最初の1分間を順応期間とした。順応期間中には、刺激中の4画像全てに同一の光学パラメータ値が設定された刺激を2sおきに500msずつ呈示し、その間被験者には固視点を固視するように教示した。順応期間終了後に実験が開始された。各試行では、全ての被験者に対し、SSS Distance値と鏡面反射率のどちらも変化している刺激を500ms呈示した。ただし、被験者グループによって応答する質感課題が異なっており、透明感学習グループは光沢感変化を無視して透明感の変化方向を、光沢感学習グループは透明感変化を無視して光沢感の変化方向を、上下／左右の二肢強制選択法によりテンキーを用いて応答した。応答するまでの時間に制限は設けなかったが、なるべく早く応答するように教示した。また、応答するたびに正誤フィードバックがビーブ音により与えられた。被験者は毎日1セッション100試行の実験を行い、学習フェーズ全体では10セッション、合計1000試行を行った。10セッションはなるべく連続する日程となるように心がけたが、必ずしも連続しているわけではなかった。

図5 学習フェーズの刺激例

この例では、鏡面反射率は上下に変化し、SSS Distance値は左右に変化している。

3. 実験結果

3.1 学習フェーズ中の正答率と応答時間の変化

光沢感学習グループと透明感学習グループの学習フェーズにおける正答率の被験者間平均を、それぞれ図6(a)と(b)に示す。図6(a)と(b)から、どちらの学習グループも学習期間が進むにつれて正答率が高くなる傾向があることが分かる。

次に、学習フェーズにおける各被験者の応答時間を、光沢感学習グループについて図7(a)に、透明感学習グループについて図7(b)に示す。応答時間には大きな個人差があるものの、応答時間はおおよそ1～2.5秒程度であることがわかる。また、実施したセッション数が増すにつれ応答時間が短くなる傾向がある。

実施セッション数に伴う応答時間の推移をより明確にするため、被験者ごとに最初のセッションの応答時間により各セッションの応答時間を除算して正規化した上で、それらの正規化済応答時間を被験者間で平均した。その結果を、図8(a)と(b)に表す。なお、各被験者において、応答時間が平均値 $\pm 3 \times$ 標準偏差の範囲から外れた試行は外れ値とし

Dayは10回の学習のセッション順を表す。
エラーバーは平均値の ± 1 標準誤差を表す。

図6 (a) 光沢感学習グループの学習フェーズの正答率の推移。
(b) 透明感学習グループの学習フェーズの正答率の推移。

て正答率と応答時間のどちらの解析においても除外された。図8から、学習期間が進むにつれて応答時間が短くなる傾向があることが分かる。すなわち、正答率、応答時間のどちら指標においても、実験が進むにつれて学習フェーズにおいて知覚学習が生じたと考えられる。

3.2 テストフェーズでの正答率の変化

学習前後のテストフェーズの正答率と、学習確認テストにおける正答率の被験者間平均を、光沢感学習グループについて図9(a)に、透明感学習グループについて図9(b)に示す。なお、被験者ごとに応答時間が平均値 $\pm 3 \times$ 標準偏差の範囲から外れた試行は、解析から除外した。図9(a)の学習前と学習後と比較すると、光沢感学習グループは光沢感についての正答率がわずかに上昇したように見える。しかし、光沢感学習グループの正答率について質感（光沢感、透明感）とテスト時期（学習前、学習後）を要因とした2要因の分散分析を行ったところ、どちらの要因の主効果も交互作用も有意ではなかった（質感： $F(1,4)=0.73$; $p=0.44$; $\eta^2=0.04$, テスト時期： $F(1,4)=0.03$; $p=0.88$; $\eta^2<0.01$, 交互作用：

Dayは10回の学習のセッション順を表す。
グラフの色は被験者の違いを表す。
エラーバーは平均値の ± 1 標準誤差を表す。

図7 (a) 光沢感学習グループの各被験者の学習フェーズの
応答時間の推移。(b) 透明感学習グループの各被験者の
学習フェーズの応答時間の推移。

能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習

図8 (a) 光沢感学習グループの学習フェーズの応答時間の推移。
(b) 透明感学習グループの学習フェーズの応答時間の推移。

$F(1,4)=0.025$; $p=0.88$; $\eta^2<0.01$). 同様に、学習フェーズ中の学習確認テスト課題の正答率について質感(光沢感, 透明感)とテスト時期(Day2,4,6,8,10)の2要因の分散分析を行った。その結果、どちらの要因も主効果は有意ではなく、交互作用も有意ではなかった(質感: $F(1,4)=0.71$; $p=0.45$; $\eta^2=0.01$, テスト時期: $F(4,16)=0.14$; $p=0.97$; $\eta^2<0.01$, 交互作用: $F(4,16)=0.69$; $p=0.61$; $\eta^2=0.03$).

次に、図9(b)を見ると、透明感学習グループでは、学習後に透明感弁別の正答率が上昇する傾向にあることが分かる。透明感学習グループについても質感(光沢感, 透明感)とテスト時期(学習前, 学習後)を要因とした2要因の分散分析を行ったところ、テスト時期の主効果が有意傾向であった(テスト時期: $F(1,4)=5.71$; $p=0.08$; $\eta^2=0.14$). しかし、質感の主効果と、質感とテスト時期の交互作用は、どちらも有意ではなかった(質感: $F(1,4)=2.08$; $p=0.22$; $\eta^2=0.09$, 交互作用: $F(1,4)=0.36$; $p=0.58$; $\eta^2=0.01$). 同様に、学習フェーズの学習確認テストの正答率について質感(光沢感, 透明感)とテスト時期(Day2,4,6,8,10)の2要因の分散分析を行った。結果として、交互作用が有意傾向であった(交互作用: $F(4,16)=2.83$; $p=0.06$; $\eta^2=0.13$).

図9 (a) 光沢感学習グループの学習前後と学習確認テストの正答率。
(b) 透明感学習グループの学習前後と学習確認テストの正答率。

しかし、どちらの要因においても主効果は有意ではなかった(質感: $F(1,4)=0.47$; $p=0.53$; $\eta^2=0.02$, テスト時期: $F(4,16)=0.86$; $p=0.51$; $\eta^2=0.05$).

これらの結果から、どちらのグループにおいても、学習フェーズにおける知覚学習により、テストフェーズにおける課題質感への正答率の有意な上昇は見られなかった。また、その傾向は、学習課題であった質感と学習課題でなかった質感のどちらにおいても共通していた。

3.3 テストフェーズでの応答時間の変化

学習前後のテストフェーズにおける各被験者の応答時間を、被験者グループ・課題ごとに図10(a)~(d)に示す。これらのグラフから、応答時間には大きな個人差があるものの、学習前よりも学習後において応答時間が短くなっている被験者が多いことがわかる。

この学習前後の応答時間の違いに着目するため、光沢感と透明感のそれぞれについて、被験者ごとに学習前のテストフェーズの応答時間平均値により他の条件の応答時間を除算

エラーバーは平均値の ± 1 標準誤差を表す。

図10 (a) 光沢感学習グループの各被験者の学習前後での光沢感応答時間の推移。(b) 透明感学習グループの各被験者の学習前後での光沢感応答時間の推移。(c) 光沢感学習グループの各被験者の学習前後での透明感応答時間の推移。(d) 透明感学習グループの各被験者の学習前後での透明感応答時間の推移。

することにより正規化済み応答時間を算出した。学習前後のテストフェーズの応答時間の被験者間平均と、学習確認テストにおける応答時間の被験者間平均を、光沢感学習グループについて図11(a)に、透明感学習グループについて図11(b)に示す。なお、各被験者の応答時間のうち平均値 $\pm 3 \times$ 標準偏差の範囲から外れた応答時間は外れ値として解析から除外した。

図11(a)を見ると、光沢感学習グループは光沢感についてのみ応答時間が短くなる傾向があるように見える。光沢感学習グループの応答時間について、学習前後の光沢感への応答時間、学習前後の透明感への応答時間、学習後の光沢感と透明感への応答時間の平均値の間の差について t 検定を行った。その結果、学習前後の光沢感への応答時間($t(138) = 5.75; p < 0.001; d = 0.98$)と学習後の光沢感と透明感への応答時間の間($t(136) = -5.11; p < 0.001; d = 0.86$)には有意差が認められた。一方、学習前後の透明感への応答時間には有意差は認められなかった($t(130) = -0.55; p = 0.58; d = 0.08$)。次に、学習確認テストの応答時間について質感(光沢感, 透明感)とテスト時期(Day2, 4, 6, 8, 10)の2要因の分散分析を行った結果、質感の主効果が有意であった(質感:

学習課題となっていた質感を太線で示している。エラーバーは平均値の ± 1 標準誤差を表す。

図11 (a) 光沢感学習グループの学習前後と学習確認テストの正規化された応答時間。(b) 透明感学習グループの学習前後と学習確認テストの正規化された応答時間。

能動的課題遂行による視覚的質感判断への知覚学習

$F(1,4) = 19.6; p < 0.05; \eta^2 = 0.10$). しかし, テスト時期の要因の主効果と交互作用は有意ではなかった (テスト時期: $F(4,16) = 2.20; p = 0.12; \eta^2 = 0.02$, 交互作用: $F(4,16) = 1.49; p = 0.25; \eta^2 = 0.02$).

次に図 11 (b) を見ると, 透明感学習グループでは光沢感と透明感のどちらにおいても学習後に応答時間が短くなる傾向がある. 透明感学習グループについても, t 検定によって学習前後の光沢感への応答時間, 学習前後の透明感への応答時間, そして, 学習後の光沢感と透明感への応答時間の平均値の間に有意差があるか t 検定によって検討した. その結果, 学習前後の光沢感への応答時間 ($t(122) = 5.64; p < 0.001; d = 1.03$), 学習前後の透明感への応答時間 ($t(140) = 9.39; p < 0.001; d = 1.61$), 学習後の光沢感と透明感への応答時間の間 ($t(142) = 2.27; p < 0.05; d = 0.39$) の全てに有意差が認められた. 次に, 学習フェーズの学習確認テストの正答率について質感 (光沢感, 透明感) とテスト時期 (Day2, 4, 6, 8, 10) の 2 要因の分散分析を行った. 結果として, テスト時期の主効果は有意であった (テスト時期: $F(4,16) = 7.54; p < 0.01; \eta^2 = 0.09$) が, 質感の主効果と交互作用は有意ではなかった (質感: $F(1,4) = 0.01; p = 0.94; \eta^2 < 0.01$, 交互作用: $F(4,16) = 0.31; p = 0.87; \eta^2 < 0.01$). テスト時期の主効果が有意であったため, Holm 法による多重比較の検定を行った結果, Day2 と Day4, 6, 8, 10 のすべての間と Day4 と Day10 の間に有意差が認められた.

これらの結果をまとめると, 光沢感学習グループでは, 学習により課題質感であった光沢感への応答時間のみが短くなった. また, 透明感学習グループでは, 学習により透明感・光沢感の両課題の応答時間が短くなったが, その短縮量は学習課題であった透明感において光沢感よりも大きかった.

4. 考察

4.1 質感知覚への知覚学習効果

本実験では, 光沢感学習グループと透明感学習グループの被験者群に対し, 同じ呈示刺激に対し課題対象とする質感のみを光沢感と透明感という異なるものにして, 質感弁別課題を繰り返し行わせた. これにより, 光沢感と透明感に対する知覚学習効果は発生するのか, また, 学習のためには能動的課題遂行が必要なのかについて検討した.

今回の実験では, 質感弁別の感度の指標として正答率と応答時間を用いた. どちらの学習グループでも, 学習前後で課題質感への正答率は変化しなかったものの, 学習により応答時間が短縮した. 一般的に弁別対象課題に対し刺激呈示後から短時間で応答するほど精度は下がり, 時間をかけて応答するほど精度が上がるということが知られている [24]. 過去の研究では, 例えばコヒーレント運動刺激に対して, このトレードオフの関係性があることが報告されている [25]. この精度と応答時間のトレードオフを考慮すれば, 本実験の結果は, 光沢感学習グループにも透明感学習グループにも学習効果が現れたと解釈することができる.

質感弁別課題についても学習効果が発生するという結果は, 知覚学習が基本的な視覚要素を処理する視覚系の低次処理過程のみならず, より高次の処理過程において表現される視覚情報についても学習が起きる可能性を支持している. また, 光沢感学習グループでは, 学習課題ではない透明感弁別に対しては学習前後間で応答時間の変化がなく, 学習課題である光沢感弁別に対してのみ応答時間の変化がみられた. これは, 能動的な課題遂行が脳内の質感知覚メカニズムの光沢感を司る部分を選択的に働かせることで, 学習効果を生み出した可能性を示唆する. また, 学習フェーズとテストフェーズでは異なる物体形状の刺激を用いたにも関わらず, 学習によりテスト課題に対する応答時間の短縮が見られたことから, 質感弁別に関わる画像特徴の中でも今回の物体群に共通して含まれる特徴に対して学習が行われたと考えられる.

ところで, 今回の実験からは, 質感という高次の視覚的様相に対する感度が直接的に向上したのか, それとも質感知覚の手がかりとなる低次画像成分を学習した結果として間接的に質感弁別感度が上昇したのかは区別できない. 低次特徴に基づく高次視覚情報への知覚学習効果は, 過去の知覚学習を用いた形状知覚の研究 [12] で報告されている. その報告によれば, 形状に関する局所的特徴に対する知覚学習により, 全体的な形状の知覚も促進される. 質感知覚の知覚学習においても, この問題の検討は, 今後の重要な課題である. 例えば, 質感知覚学習の前後に学習刺激と同じ低次画像統計量を持つ単純なテクスチャ刺激の弁別などをコントロール実験として組み込むことで, 学習により低次画像統計量に対する感度向上が生じるかどうかを検討できると考えられる. もし質感知覚においても低次画像特徴に対する知覚学習が寄与するのであれば, 知覚学習を活用することにより形状知覚と同様に質感知覚に重要な視覚情報とその処理過程を検討できる可能性もある.

また, 本研究では知覚学習効果が応答時間の短縮という形でのみ観察されたが, 一般的には知覚学習効果は正答率の上昇もしくは閾値の低下として観察されるべきものである. 本研究では, 被験者にできるだけ早く応答するよう教示をしたため, 知覚学習効果が正答率ではなく応答時間に現れてしまった可能性が高い. もし被験者に明示的に時間をかけて応答するように教示すれば, 知覚学習効果が正答率の上昇という形で観察される可能性がある. このように教示を変えた実験は今後の課題の一つであろう.

4.2 受動的な刺激暴露による知覚学習

透明感学習グループにおいては, 非学習課題であった光沢感においても, 正答率が低下しないまま応答時間が有意に短くなった. これは, 過去の知覚学習で報告されていた, 課題に関連の無い刺激に対しても知覚学習が生じるという結果 [14-16] と矛盾しない. これまでの課題無関連刺激に関する学習の研究では, 運動や方位といった基本要素的な視覚刺激を課題無関連刺激として用いていたが, 本研究の結果

は、これらを発展させ、視覚的質感のようなより高次の視覚刺激の学習においても視覚刺激の継続的な暴露によって学習効果が発生することを示唆している可能性もある。しかし、今回の実験において透明感学習グループでも光沢感の感度が向上したように見える結果が得られた理由として、以下の2点のアーティファクトの影響も強く疑われる。

1点目は、透明感学習グループの被験者は非学習課題への学習効果が発生していたわけではなく、単に心理物理学的な実験手続きに慣れたことで応答が早くできるようになった可能性である。学習実験の後に、学習課題とは全く異なる視覚属性に対する正答率や応答時間を計測しコントロール条件とすることで、この慣れの要因の影響を定量化できると考えられる。

2点目は、透明感学習グループの被験者が実験中の戦略として光沢感の変化の向きに注目して応答していた可能性である。学習フェーズの実験では、鏡面反射率とSSS distance値の違いは必ず異なる方向（上下方向と左右方向）に設定されていたため、被験者がこの法則を知っていれば光沢感の違いを判断するだけで透明感が異なる方向も応答できてしまう。被験者がこの戦略をとっていたならば、透明感学習グループでも実際に注意を向けていたのは光沢感ということになり、学習効果が光沢感に現れることが考えられる。今後、非課題質感の差のみが含まれ、課題質感の差を含まない刺激を用いたダミー試行を混ぜるなどの対策を講じた実験で、このアーティファクトの可能性を検討する必要がある。

質感知覚に対する受動的知覚学習の有無については、これらのアーティファクトの影響を取り除くことで明確な結論を導くことができるようになるだろう。

5. お わ り に

本研究では、透明感と光沢感の両方に差がある学習刺激に対して、どちらか片方の質感の弁別課題を被験者に継続的に行わせた。その結果、弁別対象の質感については応答時間の短縮という形で学習効果が表れることを明らかにした。これは、脳内の質感知覚メカニズムに可塑性が保たれており、能動的課題遂行によって質感知覚に関連する脳内情報処理が強化されたためであると考えられる。また、この透明感と光沢感に対する学習効果の分離は、脳内で光沢感知覚と透明感知覚の機序が分離している可能性を示唆している。

一方で、透明感学習グループでは、非学習課題であった光沢感質感に対しても、学習による応答時間短縮が確認された。この結果は、質感知覚における受動的質感学習の存在可能性を示唆する。しかし、本研究の実験では、単純に実験手続きへの慣れによる効果や被験者の応答戦略が不適切であったなどアーティファクトが影響した可能性が残されているため、受動的課題遂行による学習効果の有無について結論付けるには、ダミー試行を含む実験などによるさらなる検討が必要である。

謝 辞

本研究はJSPS科研費15K00372, 16H01658の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., and Adelson, E.H.: Image statistics and the perception of surface qualities, *Nature*, 447, pp.206-209, 2007.
- [2] Wiebel, C. B., Toscani, M., and Gegenfurtner, K. R.: Statistical correlates of perceived gloss in natural images, *Vision Research*, 115 partB, pp.175-187, 2015.
- [3] Pellacini, F., Ferwerda, J. A., and Greenberg, D. P.: Toward a psychophysically-based light reflection model for image synthesis, *Proceedings SIGGRAPH '00*, pp.55-64, 2000.
- [4] Marlow, P. J., Kim, J., and Anderson, B. L.: The perception and misperception of specular surface reflectance, *Current Biology*, 22(20), pp.1-5, 2012.
- [5] Motoyoshi, I.: Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials, *Journal of Vision*, 10(9):6, pp.1-11, 2010.
- [6] Fleming, R. W., Jäkel, F., and Maloney, L. T.: Visual perception of thick transparent materials, 22(6), pp.812-820, 2011.
- [7] Tani, Y., Nagai, T., Koida, K., Kitazaki, M. and Nakauchi, S.: Experts and novices use the same factors –but differently– to evaluate pearl quality, *PLOS ONE* 9(1): e86400, 2014.
- [8] Gilbert, C. D., Li, W., and Piech, V.: Perceptual learning and adult cortical plasticity, *The Journal of Physiology*, 587(12), pp.2743-2751, 2009.
- [9] Jehee, J. F. M., Ling, S., Swisher, J. D., Bergen, R. S. V., and Tong, F.: Perceptual learning selectively refines orientation representations in early visual cortex, *The Journal of Neuroscience*, 32(47), pp.16747-16753, 2012.
- [10] Zhang, J. Y., and Yang, Y. X.: Perceptual learning of motion direction discrimination transfers to an opposite direction with TPE training, *Vision Research*, 99, pp.93-98, 2014.
- [11] Sowden, P. T., Rose, D., and Davies, I. R. L.: Perceptual learning of luminance contrast detection: specific for spatial frequency and retinal location but not orientation, *Vision Research*, 42(10), pp.1249-1258, 2002.
- [12] Golcu, D., and Gilbert, C. D.: Perceptual Learning of Object Shape, *The Journal of Neuroscience*, 29(43), pp.13621-13629, 2009.
- [13] Hussain, Z., Bennett, P. J., and Sekuler A. B.: Versatile perceptual learning of textures after variable exposures, *Vision Research*, 61(15), pp.89-94, 2012.

- [14] Watanabe, T., Nanez, J. E., and Sasaki, Y.: Perceptual learning without perception, *Nature*, 413, pp.844-848, 2001.
- [15] Nishina, S., Seitz, A. R., Kawato, M., and Watanabe, T.: Effect of spatial distance to the task stimulus on task-irrelevant perceptual learning of static Gabors, *Journal of Vision*, 7(13):2, pp.1-10, 2007.
- [16] Tsushima, Y., Seitz, A. R., and Watanabe, T.: Task-irrelevant learning occurs only when the irrelevant feature is weak, *Current Biology*, 18(12):24, pp.R516-R517, 2008.
- [17] Brainard, D. H.: The Psychophysics Toolbox, *Spatial Vision*, 10, pp.443-446, 1997.
- [18] Debevec, P.: Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography, *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1998*, pp.189-198, 1998.
- [19] Yang, J., Kanazawa, S., and Yamaguchi, M. K.: Can Infants Tell the Difference between Gold and Yellow?, *PLOS ONE* 8(6) : e67535, 2013.
- [20] Nagai, T., Ono, Y., Tani, Y., Koida, K., Kitazaki, M., and Nakauchi, S.: Image regions contributing to perceptual translucency: A psychophysical reverse correlation study, *i-Perception*, 4(6), pp.407-428, 2013.
- [21] Liang, J., Zhou, Y., Fahle, M., and Liu, Z.: Limited transfer of long-term motion perceptual learning with double training, *Journal of Vision*, 15(10):1, pp.1-9, 2015.
- [22] DeLoss, D. J., Bian, Z., Watanabe, T., and Andersen, G. J.: Behavioral training to improve collision detection, *Journal of Vision*, 15(10):2, pp.1-7, 2015.
- [23] Ahissar, M. and Hochstein, S.: Task difficulty and the specificity of perceptual learning, *Nature*, 387, pp.401-406, 1997.
- [24] Wickelgren, W. A.: Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics, *Acta Psychologica*, 41, pp.67-85, 1977.
- [25] Zhang, J. and Rowe, J. B.: Dissociable mechanisms of speed-accuracy tradeoff during visual perceptual learning are revealed by a hierarchical drift-diffusion model, *Frontiers in Neuroscience*, 8, p.69, 2014.

清川 宏暁 (非会員)

2016 年 山形大学工学部卒業。同年、山形大学大学院理工学研究科博士前期課程入学。現在に至る。主に心理物理学的手法を用いた質感知覚の研究に従事。

川島 祐貴 (非会員)

2007 年 東京理科大学理工学部卒業。2009 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。2012 年 同大学院博士課程終了。博士(工学)。2013 年より山形大学理工学研究科博士研究員。2017 年よりアメリカ国立標準技術研究所にて外国人客員研究員。

山内 泰樹 (非会員)

1991 年 東京大学大学院工学系研究科修士課程終了。同年、富士ゼロックス(株)入社。1999 年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程終了。ロチェスター大学助教、富士ゼロックス(株)研究員を経て、2009 年 山形大学大学院理工学研究科准教授。2013 年より同教授。博士(工学)。主に心理物理学的手法を用いた、色覚や画像評価、照明評価などの研究に従事。また、測光方法を中心にする有機 EL 照明の国際標準化活動にも従事。日本視覚学会、日本色彩学会、照明学会各会員。

永井 岳大 (正会員)

2007 年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。UCSD 博士研究員、豊橋技術科学大学大学院工学研究科助教、山形大学大学院理工学研究科准教授を経て、2018 年より東京工業大学工学院情報通信系准教授。博士(工学)。主に心理物理学的手法を用いた、様々な視知覚、特に色覚や質感知覚などの研究に従事。日本視覚学会、日本色彩学会、Vision Sciences Society 各会員。