

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

鷗 沼 秀 行*・長谷川 桐**・ケルマン, フィリップJ.***

The Role of Visual Buffer in Visual Interpolation

Hideyuki UNUMA, Hisa HASEGAWA, Philip J. KELLMAN

Abstract

Perception of objects in ordinary scenes requires spatiotemporal interpolation processes to integrate inputs fragmented in space and time. This paper gives a brief review of recent research on spatiotemporal interpolation processes and the role of the visual buffer in interpolation. The authors also review psychophysical methods for investigating the temporal characteristics of the buffer. Moreover, temporal limits on visual persistence in the dynamic visual icon (Palmer, Kellman, & Shipley, 2006) are discussed. We suggest a unified account of interpolation processes for static, dynamic, occluded, and illusory objects.

Key Words: visual interpolation, illusory contours, visual buffer, temporal integration

近年、3次元空間内の対象（物体：object）の知覚における視覚的補間（visual interpolation）の役割が理論的に明確になる（Marr, 1982; Palmer, 1999; Kellman, Guttman, & Wickens, 2001; 鷗沼, Kellman, 長谷川, 2005）とともに、その具体的なモデルが提案されてきた（Kellman & Shipley, 1991; Shipley & Kellman, 1992ab）。このなかで視覚的補間の問題は、従来の2次元の平面上でのエッジの補間のみならず、3次元空間（Kellman, Garrigan, & Shipley, 2005; Kellman, Garrigan, Shipley, & Keane, 2007 ab）、さらには時間次元を含めた領域（Palmer, Kellman, & Shipley, 2006; Unuma, Hasegawa, & Kellman, 2006, 2007）へと展開してき

*教授 知覚・認知心理学

**青山学院大学大学院博士後期課程

***カリフォルニア大学ロサンゼルス校

鶴 沼 秀 行・長谷川 桐・フィリップJ.ケルマン

た。本研究は、時間的次元をふくめた時間・空間的な視覚的補間における視覚的記憶の具体的な役割に関してこれまでの研究を整理するとともに、近年行われてきた実験的研究の方法について検討し、視覚的補間の総合的モデルについて考察する。

1. 視覚的補間研究における最近の理論的展開

1.1 視覚情報の統合と視覚的補間

外界の対象の知覚は、空間的ないし時間的広がりを持った視覚的入力をもとに対象全体についての知覚的表現が形成されることによって成立すると考えることができる。この場合、視覚システムに対する入力は、外界の事物の運動や変化と、観察者自身の移動にともなって時々刻々変化する。Gibson (1966, 1979) が指摘したように、このように変化する情報から不変の対象 (object) についての安定した知覚が成立することは知覚システムの本質的な特性であるといえる。この問題に対して、断片的な視覚入力から知覚システムが対象全体の知覚的表現 (perceptual representation) を形成すると考えると、情報処理系としての知覚システムがいかにして空間的あるいは時間的に入力情報を統合して知覚的表現を形成するのかが問題となる。知覚系が時空間的に断片的な入力情報を一体としてまとめることで知覚像 (percept) が成立することは、すでにゲシュタルト心理学によって知覚的体制化の Gestalt 法則として提起されていたが、その法則は長い間、現象観察にもとづく定性的な法則として位置づけられてきた (Palmer, 1999)。近年に至って、この知覚的体制化の法則を定量的に明らかにする試みが登場し (Kellman & Shipley, 1991; Kellman, Garrigan, & Shipley, 2005)、知覚的体制化の Gestalt 要因についての量的操作と測定が可能であることが示されている。

一方、視覚情報処理システムに関する理論的展開は、このような知覚的体制化の過程が視覚情報処理全体のなかでどのように位置づけられるのかを明らかにした (Marr, 1982; Palmer, 1999)。すなわち、視覚システムに入力される情報のなかでも空間的な輝度変化 (縁; エッジ edge) は、初期視覚 (early vision) 過程において補間 (interpolation) されて輪郭 (contour) を形成する。これに対して、色、テクスチャなどの表面特徴 (surface property) はエッジの処理とは並列に処理され、補間された輪郭と総合されて面 (surface) を準備する。さらに並列処理される運動や両眼視差による奥行き情報がこれらと総合されて、輪郭と面の処理と矛盾しない「形 (shape)」の知覚表現を形成する。このような3次元空間内の物体 (object) の知覚へといたる一連の情報処理過程のなかで、入力の補間による輪郭と表面特性の処理から形の成立は、Marr (1982) おいて考えられていた過程よりも、より生態学的な情報、すなわち、

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

物体運動や観察者自身の運動をふくめた、よりダイナミックな運動による変化を取り込む過程としてとらえられるにいたっている (Palmer, Kellman, & Shipley, 2006)。

1.2 2次元平面および3次元空間における補間のモデル

対象や観察者が移動する事態では、視覚系に外界における事物間の遮蔽関係 (occlusion) のために、一般に外界において連続する縁 (エッジ) は断片的に視覚系へと入力される。空間的に断片的な入力は、視覚情報処理の初期過程において補間され輪郭線の表現が用意される。たとえば Figure 1 では、机や球体の縁の一部は遮蔽関係によって直接視覚系に入力されることはないが、複数のエッジをもとに遮蔽された部分が補間されることによって、輪郭表現が成立し机や球体を物体として知覚することを可能にする。近年、空間的なエッジの補間の法則性を実験的に明らかにしたいくつかの研究 (Kellman & Shipley, 1991; Kellman, Garrigan, & Shipley, 2005) の登場によって、従来「よい連続の要因」として記述されてきた現象について、より具体的な知覚現象とこれを規定する刺激条件の関係が明らかとなり、さらにそのメカニズムについても具体的な神経学的モデル (Heitger, F., Rosenthaler, L., von der Heydt, R., Peterhans, E., & Kübler, O. 1992; Heitger, F., von der Heydt, R., Peterhans, E., Rosenthaler, L., & Kübler, O.,

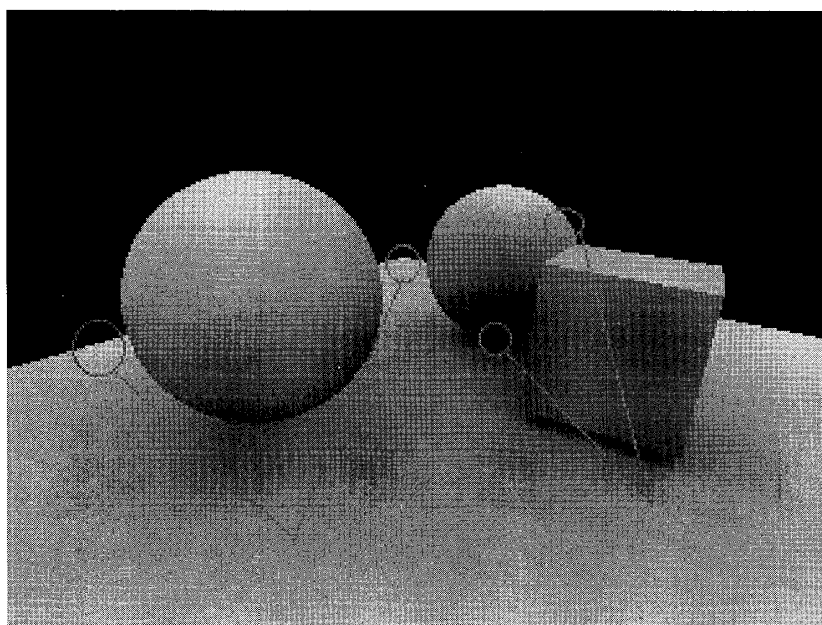


Figure 1 An example of visual interpolations. Fragmented edges are integrated into unitary perceived objects.

1998) が提案され検証がすすめられている。

2次元平面における視覚的補間の具体的なモデルとして、Kellman ら (1991) は空間的に隔たった2つのエッジの単純な幾何学的な関係が補間成立を規定するという「関係づけ可能性 (relatability)」仮説を提案した (鶴沼, Kellman, 長谷川, 2005)。さらに、補間が悉無的に成立するのではなく、エッジ間の方向関係が直線 (0°) から直交 (90°) まで変化するにしたがって補間の強度も線型に減少することが示された (Kellman & Shipley, 1992)。また、視覚的補間が成立する際の物理的なエッジの長さとおエッジ間のギャップ (gap: 間隙) の大きさについての規則性も指摘されており、両者の相対的な比率が補間を規定するという「支持比率 (support ratio)」仮説は、視覚的補間が視野内のエッジの絶対量よりもそれらの関係という高次の生態学的な刺激変数によって説明できる可能性を示唆している (Shipley & Kellman, 1992b)。このような2次元平面における補間の法則性は、さらに3次元空間における補間にも成立することが指摘されている (Kellman, Garrigan, Shipley, Yin, & Machado, 2005)。

2次元および3次元空間の視覚的補間過程はエッジの抽出と境界の補間による境界補間過程 (boundary interpolation process) と、色や肌理 (texture) などの表面特徴の検出と拡散による表面補間過程 (surface interpolation process) という2つの並列する処理からなると考えられる (Palmer, 1999; Shipley & Kellman, 2001)。境界補間過程は一連の神経生理学的知見 (Hubel & Wiesel, 1959, 1968; Livingstone & Hubel, 1987; Hubel, 1995) を基礎としており、工学的な神経回路モデル (Heitger, F., et. al, 1998) による検証によっても支持されている。一方、表面補間過程は境界補間過程とは独立に進行することが精神物理学的データをもとに指摘されている (Kellman & Loukidies, 1987; Kellman & Shipley, 1991; Shipley & Gordon, 1987; Shipley & Kellman, 1992a)。これら2つの補間過程の処理がさらに奥行き手がかりの処理や、高次の記憶系からのトップダウン処理と統合されることによって、「図 (figure)」への境界線の割当 (boundary assignment) と局所的表面特徴の拡散 (spreading) が可能となり、形 (shape) の統一的な知覚表現 (perceptual representation) が成立すると考えられている (Kellman, Guttman, & Wickens, 2001)。

ここで最終的に知覚される輪郭線と形が補間過程において一義的には決まらない段階があることに注意する必要がある。すなわち、補間過程においてどの領域が図に割りあてられるかは多義的であって、最終的には奥行き情報や記憶系からのトップダウンも関わりながら図の決定がおこなわれ、輪郭線もその領域に属するものとして知覚される。表面特性もその輪郭線で規定された内部に拡散することになる。つまり、最終的に異なる図形が知覚される事態においても、それらの補間過程はある段階まで同一であると考えることができる。

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

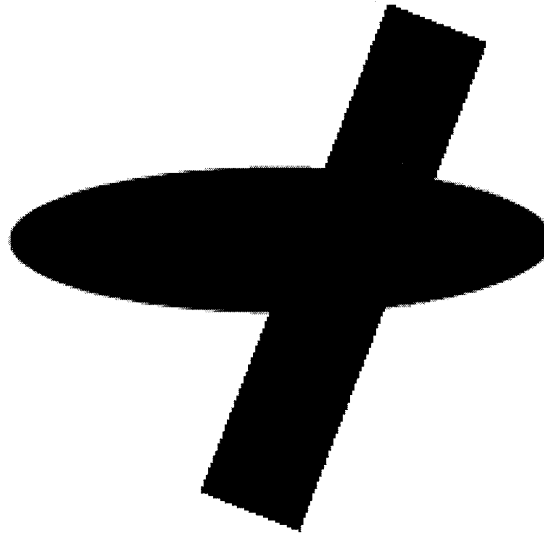


Figure 2 An example of a spontaneously-splitting object. This figure is typically seen as an ellipse and a rectangle. When an ellipse is perceived as interpolated behind the rectangle, the illusory sides of the rectangle are perceived around the center of the figure. But when the rectangle is perceived behind the ellipse, illusory arc can be completed. (After Kellman & Shipley, (1991).)

Figure 2 は自発的分割対象 (spontaneously-splitting object) あるいは自己分割対象 (self-splitting object) とよばれるものである (Kellman & Shipley, 1991; Kellman, Guttman, & Wickens, 2001)。ここでは、楕円形の上に長方形が覆いかぶさるように知覚される事態と、逆に楕円が長方形を覆う 2つの事態が成立し、しばしば反転する。長方形が楕円を覆う (遮蔽する) 場合、長方形の辺は実在感をもって知覚される。これに対して楕円の円周は、長方形の背後で連続していると知覚されるが、輪郭線自体が感覚的属性をもって「見える」わけではない。この場合、長方形のように感覚的属性をもって輪郭線が実在するように知覚される事態を「感性的補完 (modal completion)」とよび、これに対して長方形の背後の楕円のように感覚的属性をもたずにその形が (楕円であると) 知覚される事態を、「非感性的補完 (amodal completion)」とよぶ (Kanizsa, 1979)。刺激事態が同一にも関わらず、これらの事態が反転して感性的に補完されていた長方形が非感性的に補完されうることは、この 2種の補完が同一の補間過程を共有していることを示唆している。Shipley ら (Shipley, T.F., & Kellman, P.J., 1992a) は感性的補完と非感性的補完の背後に同一の補間過程があると仮定し、これを「同一過程仮説 (identity hypothesis)」とよんだ。

1.3 時間的統合による補間と一時的視覚記憶 (visual buffer) の役割

2次元および3次元空間において視覚的補間が「関係づけ可能性」の制約下で成立すること

が示されてきたが、対象と観察者が移動する生態学的な環境下 (Gibson, 1966, 1979) では視覚系に入力されるエッジは空間的に隔たると同時に時間的にも変動すると考えることができる。すなわち、上述の視覚的補間過程は空間的統合の機能をもつばかりでなく、時間的にも視覚入力を統合することで輪郭線の補間し形の知覚的表現を形成していると考えられよう。そこでは入力された視覚情報を一時的に保持し他の入力と統合するために、情報保持機能すなわち視覚的記憶を仮定する必要がある。

一時的な視覚的記憶については、すでに Sperling (1960) によって刺激の物理的消失後も視覚系が一時的に情報を保持することが示されている。周知のように、この段階の情報の内的表現は Neisser (1967) によって visual icon とよばれた。その後、Coltheart (1980) は保持される情報の形式として、神経活動の持続 (neural persistence)、視覚的持続 (visible persistence)、アイコニック・メモリー (iconic memory) をあげた。一方、保持される情報の内容および属性については、Sperling (1960) に類似した方法で色 (Banks & Barber, 1977; Clark, 1969)、大きさと方向 (Von Wright, 1968)、形 (Turvey & Kravetz, 1970)、運動方向 (Demkiw & Michaels, 1976; Shioiri & Cavanagh, 1992) が検討されてきた。

本稿における対象および観察者の移動にともなう遮蔽と補間という問題との関連では、特に形、方向および運動方向についての情報がどのように視覚系によって保持・表現されるのかがきわめて重要である。しかしながら、保持された情報が新たな視覚的入力との間で補間されて輪郭線と形の知覚的表現が形成される過程に関しては、その法則性あるいは具体的なメカニズムについていまだ十分に解明されてはいない。以下では、このような時空間的な情報統合による形あるいは対象の知覚という仮説について、過去の実験的観察による根拠をあげておきたい。

Hochberg (1968) は、小さな覗き窓 (aperture) を通してその背後で運動する立体図形を観察する事態で、観察者が一度には対象の限られた部分のみ観察可能であるにもかかわらず対象全体の知覚像を形成することが可能であることを示した。Hochberg は、視覚系が限定された可視領域を時空間的に統合し対象全体の正確な知覚的表現を形成すると仮定し、図式的な地図 (schematic map) に各部分の形の情報を保持するとともに、対象の運動にしたがってそれらを更新、統合するという仮説を提案した。同様の方法を多義図形に適用した Unuma (1992) は、その構成要素の系列的提示順序によって一義的に図形が知覚される可能性を報告した。この結果は要素部分の情報が視覚系によって保持されるとともに、それらが系列的順序にしたがって統合されることを示唆している。

また、いわゆるアノースコピック知覚 (anorthoscopic perception) とよばれる現象では、

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

狭いスリットをとおしてその背後で移動する対象の全体を知覚されることが可能であることが知られている (e.g., Anstis & Atkinson, 1967; Parks, 1965)。この事態でも一度に視覚系に入力される情報は対象全体のごく一部であるにもかかわらず、視覚系がそれらを統合することで対象全体の知覚像を形成する (Parks, 1965; Rock, Halper, DiVita, & Wheeler, 1987; Sohmiya & Sohmiya, 1994) と考えることができる。アノソスコピック知覚についての実験的観察から、いくつかの現象的事実が報告されている。まず知覚される対象は、細いスリットよりもかなり大きく広がって知覚される。これは形の情報がスリットを視覚刺激が通過する時間を超えて視覚系内で持続し、それ以上の時間的幅にわたって加重されていることを示唆している。また、この持続する部分情報はスリットの背後での対象の移動にもなってその空間内での位置を更新しており、そのためには対象の移動速度がなんらかの形で表現されていると考えられる。さらにこれらの空間的にも時間的にも異なる部分情報から単一の対象として知覚が成立することから、対象としてのまとまり (unit) を形成する過程が、ある時点での可視入力をすでに視覚系内に保持されている部分と統合することで同一の対象として表現をすることを可能にしていると考えられる (Kellman, Guttman, & Wickens, 2001; Palmer, Kellman, & Shipley, 2006)。

これらの観察はいずれも視覚系が断片的な視覚入力を一時的に保持することを示唆するとともに、適切な条件下ではそれらをひとつの対象として表現することを示している。ここで、保持された断片的な視覚情報から対象全体の知覚的表現が形成されると仮定する場合、その内的表現についてつぎの点が明らかにされる必要があるだろう。まず第一に、その知覚表現がどのような情報を表現しているのかが問題となる。そこではエッジを含む形の情報と、移動対象の運動情報が区別される必要があると考えられる。またそれらが統合される条件が、2次元あるいは3次元の補間における関係づけ可能性の制約とどのような関係にあるのかが検討されることになる。第二に、このような情報の保持と対象の知覚的表現が、それぞれどのような情報処理段階に位置づけられるのかが明らかにされなければならない。本稿の以下では、これらの問題についての具体的な精神物理学実験とその結果をとりあげ、それらをもとに視覚的補間における記憶系の役割とその情報処理過程について考察することにする。

2. 時空間的補間研究の精神物理学実験パラダイム

2.1 視覚的補間の成立と知覚される輪郭の機能的実在性

ここではまず、視覚的記憶を媒介とした時空間的補間機能を検討するための具体的な実験

パラダムをとりあげることにする。アノースコピック知覚や Hochberg (1968) らの観察は、現象の観察として貴重なものであるが、視覚的補間の成立条件と成立する補間の量的な側面の法則性について検討するには必ずしも適しているとはいえない。また、知覚される対象の形や輪郭についての観察と報告は定性的であり、さらにその心的過程のモデルについても検討の余地を残している。そこで以下では、補間成立の心的過程のモデルを明らかにすることに焦点をあて、その方法として精神物理学の実験方法を中心にとりあげることにする。これは、精神物理学的手法によって視覚刺激の時空間条件と視覚的補間の間の法則性をまず明らかにしようと意図するものであり、またさらにその基礎となる精神物理学のモデルが補間過程を明らかにするための根拠ともなりうると考えられるからである。

一方、視覚的補間を実験的に検討しようとする場合、補間の成立をどのような現象によって観察するかが問題となる。さきにあげた Hochberg (1968) やアノースコピック知覚の現象は、必ずしも定量的な測定に適した材料とはいえない。また観察された形が知覚現象としてどれほどの感覚属性をとまうのかが必ずしも明らかではないことは、その結果の解釈を多義的にしているともいえる。これに対して Unuma ら (Unuma, 1996, 2000; Unuma & Tozawa, 1994) は主観的（錯視的）輪郭線図形 (subjective contour figure; Figure 3 参照) を用いて、その構成要素である誘導図形（いわゆる“パックマン”）を系列的に提示する事態で、同時提示事態と同様の主観的輪郭線図形が知覚される時間条件を検討した。ここでは同時提示事態と同様の主観的輪郭線図形が観察されれば、個々の誘導図形が時空間的に統合され輪郭線が補間されたものとみなされた。一般に主観的輪郭線図形において観察される輪郭線は、物理的エッジが存在しないにもかかわらず、実輪郭と同様にその輪郭線によって図と地の分凝 (segregation) をもたらし、図と地の間に明るさと奥行きの変化を生じさせる (Kanizsa, 1979)。したがってもし誘導図形の系列的提示事態において同様の現象的な変化が観察されれば、視覚的補間の成立が保証されると考えられる。実際に一連の実験で、誘導図形の系列的提示事態においても同時提示と同様の現象が観察されることが示されている (Unuma, 1996; Unuma & Tozawa, 1994)。すなわち、系列的提示事態で観察された輪郭線が同時提示事態と同じ視覚的補間による輪郭線と同様の機能（機能的実在性）をもつことが示唆された。このような時空間的統合による輪郭線補間の過程を、さらに精神物理学的手法で検討したものに、小点定位法と補間による形の弁別課題を用いた研究をあげることができる。

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

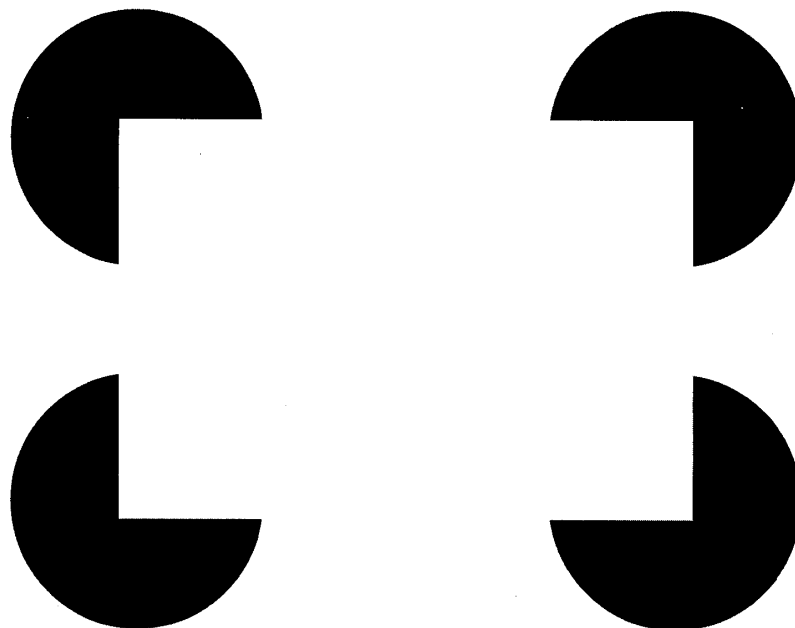


Figure 3 A Kanizsa-type subjective contour figure used in Unuma & Hasegawa (2002, 2004). Each inducing figure was presented one by one, and total subjective figure was perceived under limited temporal conditions.

2.2 小点定位法による知覚された輪郭線位置の検証

上にのべた Unuma らの方法は輪郭線の明瞭さ、明るさと奥行きの変化をそれぞれ評定尺度を用いて報告させたものであった。これに対して、より行動的な指標を用いた精神物理学的方法のひとつに小点定位法 (dot localization paradigm) がある。これは知覚される輪郭線の付近に小点を提示し、観察者にその小点が知覚された輪郭線に対してどこに位置するかについての判断を求めるものである。輪郭線の成立と同時に図形が知覚される事態では、その小点が図形の内側 (上) か外側かの判断をもとめることになる。図形全体の知覚が成立しない事態でも、輪郭線が小点付近で知覚されれば、その上下左右という相対的な位置関係を判断することが可能である。この方法で知覚される輪郭線の位置を推定することが可能になるが、この方法において観察される小点位置判断の精度と誤差が補間される輪郭線の特徴を反映すると考えられる。

Unuma と Hasegawa (2002, 2004) は、先の主観的輪郭線図形の誘導図形を系列的に提示する方法に小点定位法を組み合わせた。小点の位置は二重上下法 (double staircase method) の手続きにしたがって操作された。すなわち、図形の内側から外側に向かって小点を変化させる系列と、外側から内側へと変化させる系列の 2 系列が設定された。系列ごとに知覚された輪郭線の位置の推定値が求められ、それぞれ内側弁別閾 (inside threshold) と外側弁別閾 (outside

threshold) と定義された。ここで両系列の推定値の差が不正確度 (imprecision) と定義された。不正確度が大きいほど、より不正確に輪郭線が定位されていたことを示すと考えられた。もうひとつの指標は両推定値の平均値で、知覚された輪郭線の位置 (location) の指標とされた。すなわちこの値が負であれば誘導図形のエッジの単純な延長よりも内側に、正であればその外側に輪郭線が知覚され位置が変位していたことを示すことになる。

誘導図形を系列的に一周 (1 サイクル) 提示する時間を 40 ミリ秒から 1920 ミリ秒までの範囲で変化させたところ、240 ミリ秒までの範囲ではそれ以上の時間範囲よりも不正確度が低い、すなわち輪郭線の定位が安定して知覚されていた。その不正確度の大きさは平均視角で 0.28° であり、これは誘導図形の同時提示条件と同程度であった。これに対して知覚された輪郭線の位置は、240 ミリ秒以下では物理的エッジの延長線から規則的に図形の内側に平均視角で 0.37° 変位しており、その程度はより長い時間条件における平均の変位 0.18° の倍の大きさであった。

この結果は、約 4 分の 1 秒までの範囲では誘導図形は統合されて同時提示条件と同じように主観的輪郭線が感覚属性をともなって知覚され、視覚的補間が成立していたことを示唆していた。特徴的なことは、この条件下で知覚された輪郭線の位置が一貫して図形の内側に変位していたことであった。これに比べて、より長い時間範囲では、反応から推定された輪郭線の位置はむしろエッジの物理的延長線上に近いが、その定位は安定していないと考えられた。4 分の 1 秒以上の時間範囲では、それ以下の時間条件における視覚的補間とは異なるメカニズムが関与していたものと考えられる。それは、感覚属性をともなった補間ではなく、より高次の認知的推論にもとづく小点の定位がおこなわれたものと考えられる。

小点定位法による視覚的補間の検討は、知覚される輪郭線の不正確度を精神物理学的指標から定義することで、輪郭線生成の時間的変化を従来よりも正確に測定できる可能性を示した。また、知覚される輪郭線の位置を明らかにすることで、視覚的補間により知覚される形が物理的なエッジの位置とは単純に対応しない「錯視的」なものであることを明らかにした。

2.3 補間によって知覚される形の弁別

小点定位法は、知覚される輪郭線の位置と正確度を異なる精神物理学的指標によって測定することを可能にした点で意義がある。ただし、小点の定位は必ずしも図形全体の知覚像の成立を十分に保証するものではない。そこで視覚的補間によって図形全体の知覚が成立することを測定するために、知覚された形の弁別成績を指標とする課題が検討された。すなわち、視覚的補間が成立して形全体が知覚されることによって、弁別の成績が向上することを利用するものである。これは、一般に単語優位効果 (word superiority effect), 顔優位効果 (face superiority

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

effect) と同じように、形の知覚においても視覚的補間によって主観的輪郭線図形が知覚されると、個別の要素的誘導図形のみが知覚される場合よりも、その図形全体に対する知覚的処理が促進され反応時間や検出率、弁別成績が向上するという事実を根拠としている。この形弁別法 (shape discrimination paradigm) を視覚的補間の問題に適用した例には、視覚的補間の空間的範囲を検討した Shipley と Kellman (1992b)、感性的補完と非感性的補完を比較検討した Kellman と Shipley (1991)、そして補間過程を直接問題とした Petry と Gannon (1987)、Reynolds (1981)、Gellatly (1980)、Kojo, Liinasuo と Rovamo (1993)、Ringach と Shapley (1996) をあげることができる。

Unuma ら (2006, 2007) は主観的輪郭線の誘導図形を系列的に提示するこれまでの方法に形弁別法を適用し、提示の時間条件を主変数として視覚的補間による形の弁別閾を恒常法によって測定した。観察者ごとに、誘導図形を提示する周期 (HZ) の関数としての弁別の正反応率から精神測定関数をもとめた。正反応率 80 パーセントの弁別閾は観察者によって異なっていたが、遮蔽物によるマスク刺激がある場合には 3.33 から 4.00 HZ、マスク刺激がない場合は 0.80 HZ から 1.50 HZ と推定された。この結果は、遮蔽物の背後で視覚的補間が成立するためには 4 分の 1 から 3 分の 1 秒の範囲で保存された視覚的情報が統合される必要があり、それ以上の時間範囲では視覚的補間が不十分であることを示していた。またマスク刺激にあたる遮蔽物がない事態では、より長い時間範囲で記憶された視覚的情報が統合されることが示唆された。

Unuma ら (2006, 2007) の結果は、同様の主観的輪郭線図形と局所的なマスク刺激を用いて視覚的補間の成立過程を検討した Ringach と Shapley (1996) において示唆されていた時間特性に近い時間範囲での時間的統合の可能性を示していた。また、Ringach らにおいて示唆された 2 段階の情報処理過程の区別と矛盾するものではなかった。Ringach らの説明によれば、まず第 1 段階として 2 次元的な遮蔽関係や短い境界情報のような局所的な特徴の抽出がおこなわれ、これには 100 ミリ秒程度の時間が必要である。さらにそれに続く第 2 段階でこの局所的情報が統合されるが、これには誘導図形がマスクされた後に 140 から 200 ミリ秒の処理が必要とされた。Unuma らの実験は誘導図形が系列的に視覚系に入力される点で Ringach らの実験パラダイムとは異なるが、刺激入力を時空間的な系列として統制した条件において同様の時間特性が示唆されたことは、系列的視覚入力に対する時空間的統合を可能にする処理過程が同時的入力に対する処理過程と共通の処理段階をもつことを示唆している。

3. 時空間的補間と視覚的情報保存

3.1 視覚的補間の時空間特性と処理段階

視覚的補間の時間特性については、すでに Shipley と Kellman (1994) が時空間境界形成 (spatiotemporal boundary formation: SBF) 過程を提案し、これを駆動する刺激条件として色、方位、位置などの局所的な特徴を検討し、これらが SBF を駆動するための時間的制約として 165 ミリ秒までの時間的幅をもつ「窓」(165-ms window) を仮定している。アノースコピック知覚や誘導図形の系列的提示条件下で知覚される主観的輪郭線図形の同時的知覚を説明するためには、このような一時的な視覚記憶が仮定される必要があるだろう。ただし、Shipley ら (1994) の仮定する時間範囲と Unuma ら (2006,2007) および Ringach ら (1996) から示唆される時間範囲は必ずしも同一とはいえない。視覚的補間成立は、刺激の大きさ、輝度、図形間の比率などいくつかの要因に影響されるため、その時間条件もそれらの要因の差異により変動する可能性があるが、刺激の特性と補間処理の時間特性との関係については検討の余地が残されている。一方で 165-ms window と Unuma らの時間範囲の相違は視覚的補間における境界補間過程と表面補間過程の相互作用が影響をあたえた可能性も否定できない (Unuma et al. 2007)。すなわち、視覚的補間の成立による形の弁別課題では明るさと奥行きを含めた形の属性をより明瞭に知覚することが必要であり、その処理時間が長くなることが考えられる。形全体の表現と明るさなどの表面特性を統合した知覚表現の生成が要請される事態においてその補間の処理過程が検討されるべきであろう。いずれにしても、輪郭線補間過程のみではなく、表面補間過程、奥行き処理との統合を経た物体の知覚的表現の生成までの処理過程全体が一層明らかにされる必要がある。

物体の知覚的表現が生成される段階では、主観的輪郭線の明瞭度はその観察距離に関わらず対象間の比率によって規定されることが指摘されている (Kellman & Shipley, 1991)。これは物体や観察者がさまざまに変化する生態学的環境下においても、安定した補間と物体の知覚表現が成立することを示唆している。このような高次の安定した知覚表現が、環境の適応的な知覚を可能にしていると思われる。特に時間的変化、運動を考慮したとき、どのようにして安定した物体の知覚像が成立するのかが重要な問題となる。その意味で、視覚的補間の理論は物体の補間 (object interpolation) の理論 (Kellman, Garrigan, & Shipley, 2005) でもあるべきだろう。

3.2 一時的視覚記憶が表現する情報と物体の補間

時空間的な視覚情報の統合による物体知覚 (object perception) の成立を検討した Palmer,

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

Kellman と Shipley (2006) は、2次元および3次元の「関係づけ可能性」理論を拡張し「時空間的關係づけ可能性 (spatiotemporal relatability: STR)」理論を提案した。このなかで STR が動的視覚アイコン (dynamic visual icon) とよばれる心的表現を生成すると仮定した。これは入力された形の情報をごく短時間保持するとともに、運動する物体が遮蔽物の背後に消失しても運動速度からその位置を更新する機能を持ち、それらを可視領域と統合することで物体全体の心的表現を生成すると仮定された点で、従来の視覚アイコンとは異なる。この理論が説明しようとする現象は、静的な事態もふくむ動的な環境における補間であり、さらに同理論は遮蔽関係による非感性的な補完と錯視的・感性的補完を同一の過程によって説明しようとするものである。その意味で生態学的な環境下における適応的物体知覚の総合的理論を指向しているといえよう。

STR において今後検討されるべき問題は、その時間特性と表現される情報、特に位置更新の信頼性の問題である (Palmer, Kellman, & Shipley, 2006)。位置更新が物体の運動速度をもとにおこなわれる場合、その内的に表現された速度は実際の速度よりも遅いことが報告されており (De Valois & Takeuchi, 2001), STR によって生成される内的表現の内容が今後さらに検討される必要がある。また本稿のとりあげた一時的視覚記憶の時間特性の検討は、STR による物体補間の時間的制約の問題に答えるものであろう。

謝辞

本研究は、第一著者に対する平成 19 年度川村学園女子大学教育研究奨励の補助を受けた。

引用文献

- Anstis, S. M., & Atkinson, J. (1967). Distortions in moving figures viewed through a stationary slit. *Quarterly Journal of American Psychology*, 80, pp.572-585.
- Banks, W. P., & Barber, G. (1977). Color information in iconic memory. *Psychological Review*, 84, pp.536-546.
- Clark, S. E. (1969). Retrieval of color information from preperceptual memory. *Journal of Experimental Psychology*, 82, pp.263-266.
- Coltheart, M. (1980). Iconic memory and visible persistence. *Perception & Psychophysics*, 27, pp.183-228.
- Demkiw, P., & Michaels, C. F. (1976). Motion information in iconic memory. *Acta Psychologica*, 40, pp.257-264.
- De Valois, K. K., & Takeuchi, T. (2001). Judging the velocity of an invisible moving object [Abstract]. *Journal of Vision*, 1, 378a.
- Gellatly, A. R. H. (1980). Perception of an illusory triangle with masked inducing figure. *Perception*, 9, pp.599-602.
- Gibson, J. J. (1966). The problem of temporal order in stimulation and perception. *Journal of Psychology*, 62,

pp.141-149.

- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin. (古崎敬 他訳 (1985). ギブソン 生態学的視覚論 - ヒトの視覚世界を探る - サイエンス社)
- Heitger, F., Rosenthaler, L., von der Heydt, R., Peterhans, E., & Kübler, O. (1992). Simulation of neural contour mechanisms: From simple to end-stopped cells. *Vision Research*, 32, pp.963-981.
- Heitger, F., von der Heydt, R., Peterhans, E., Rosenthaler, L., & Kübler, O. (1998). Simulation of neural contour mechanisms: Representing anomalous contours. *Image and Vision Computing*, 16, pp.407-421.
- Hubel, D.H. (1995). *Eye, Brain and Vision*. Scientific American Library, No. 22., WH Freeman, NY.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology*, 148, pp.574-591.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology*, 195, pp.215-243.
- Hochberg, J. (1968). In the mind's eye. In R. N. Haber (Ed.), *Contemporary theory and research in visual perception* (pp.309-331). New York:Holt, Rinehart & Winston.
- Kanizsa, G. (1979). *Organization in vision : Essays on gestalt perception*. New York Praeger. (野口 薫監訳 (1985). 視覚の文法 : ゲシュタルト知覚論 サイエンス社)
- Kellman, P.J., Garrigan, P., & Shipley, T. F. (2005). Object interpolation in three dimensions. *Psychological Review*, 112, (3), pp.586-609.
- Kellman, P.J., Garrigan, P.B., Shipley, T.F. & Keane, B.P. (2007)a. Interpolation processes in object perception: A reply to Anderson. *Psychological Review*, 114 (2), pp.488-508.
- Kellman, P.J., Garrigan, P.B., Shipley, T.F. & Keane, B.P. (2007)b. Postscript: Identity and constraints in models of object formation. *Psychological Review*, 114 (2), pp.502-508.
- Kellman, P. J., Garrigan, P., Shipley, T. F., Yin, C., & Machado, L. (2005). 3-D interpolation in object perception: Evidence from an objective performance paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, pp.558-583.
- Kellman, P. J., Guttman, S., & Wickens, T.D. (2001). Geometric and neural models of object perception. In T.F. Shipley & P.J. Kellman (Eds.), *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision*. Oxford, UK: Elsevier Science Publishers.
- Kellman, P. J., & Loukides, M. G. (1987). An object perception approach to static and kinetic subjective contours. In S. Petry & G. E. Meyer (Eds.), *The perception of illusory contours* (pp.151-164) New York: Springer-Verlag.
- Kellman, P. J., & Shipley, T. F. (1991). A theory of visual interpolation in object perception. *Cognitive Psychology*, 23, pp.141-221.
- Kellman, P. J., & Shipley, T. F. (1992). Visual interpolation in object perception. *Current Directions in Psychological Science*, 1(6), pp.193-199.
- Kojo, I., Liinasuo, M., & Rovamo, J. (1993). Spatial and temporal properties of illusory figures. *Vision Research*, 33, pp.897-901.
- Livingstone, M.S., & Hubel, D.H. (1987). Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, 7(11), pp.3416-3468.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. (乾敏郎 安藤広志 訳 (1987). ビジョン - 視覚の計算理論と脳内表現 - 産業図書)

視覚的補間における一時的視覚記憶の役割

- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. East Norwalk, CT: Appleton-Century-Crofts.
- Palmer, E. M., Kellman, P. J., & Shipley, T. F. (2006). A theory of dynamic occluded and illusory object perception. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, pp.513-541.
- Palmer, S. (1999). *Vision science: Photons to phenomenology*. MIT Press.
- Parks, T. E. (1965). Post-retinal visual storage. *American Journal of psychology*, 78, pp.145-147.
- Petry, S. & Gannon, R. (1986). Time, motion and objectness in illusory contours. In Petry, S. & Meyer, G.E. (Eds.), *The perception of illusory contours* (pp.193-200). Berlin: Springer.
- Reynolds R, I. (1981). Perception of an illusory contour as a function of processing time. *Perception*, 10 (1), pp.107-115.
- Ringach, D. L. & Shapley, R. (1996). Spatial and temporal properties of illusory contours and amodal boundary completion. *Vision Research*, 36, pp.3037-3050.
- Rock, I., Halper, F., DiVita, J., & Wheeler, D. (1987). Eye movement as a cue to figure motion in anorthoscopic perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, pp.344-352.
- Shapley, R., & Gordon, J. (1987). The existence of interpolated illusory contours depends on contrast and spatial separation. In S. Petry & G. E. Meyer (Eds.), *The perception of illusory contours* (pp.109-115) New York: Springer-Verlag.
- Shioiri, S., & Cavanagh, P. (1992). Visual persistence of figures defined by relative motion. *Vision Research*, 32, pp.943-951.
- Shipley, T.F., & Kellman, P.J. (1992)a. Perception of partly occluded objects and illusory figures: Evidence for an identity hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, pp.106-120.
- Shipley, T.F., & Kellman, P.J. (1992)b. Strength of visual interpolation depends on the ratio of physically-specified to total edge length. *Perception & Psychophysics*, 52, pp.97-106.
- Shipley, T.F. & Kellman, P.J. (1994). Spatiotemporal boundary formation: boundary, form, and motion perception from transformation of surface elements. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123 (1), pp.3-20.
- Shipley, T.F., & Kellman, P.J. (2001). *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision*. Oxford, UK: Elsevier Science Publishers.
- Sohmiya, T., & Sohmiya, K. (1994). What is a crucial determinant in anorthoscopic perception? *Perceptual & Motor Skills*, 78, pp.987-998.
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentation. *Psychological Monographs*, 74 (11, Whole No. 498).
- Turvey, M., & Kravetz, S. (1970). Retrieval from iconic memory with shape as the selection criterion. *Perception & Psychophysics*, 8, pp.171-172.
- Unuma, H. (1992). Spatio-temporal integration in visual perception, *Japanese Psychological Research*, 34 (4), pp.158-163.
- Unuma, H. (1996). Successive presentation of inducing figures and the perception of an illusory contour figure, *XXVI International Congress of psychology*. Montreal, Canada.
- Unuma, H. (2000). Spatio-temporal Integration and Visual Interpolation in Illusory Contour Perception, *XXVII International Congress of psychology*. Stockholm, Sweden.

鵜沼秀行・長谷川 桐・フィリップJ.ケルマン

- Unuma, H. & Hasegawa, H. (2002). Spatio-temporal interpolation and perception of illusory contour. 25th European Conference on Visual Perception. *Perception*, 31, supplement, 73.
- Unuma, H. & Hasegawa, H. (2004). Temporal Limits in Visual Completion. 27th European Conference on Visual Perception. *Perception*, 33, supplement, 86.
- Unuma, H., Hasegawa, H., & Kellman, P. J. (2006). Spatiotemporal contour interpolation and shape discrimination [Abstract]. *Journal of Vision*, 6 (6), 333a, <http://journalofvision.org/6/6/333/>, doi:10.1167/6.6.333.
- Unuma, H., Hasegawa, H., & Kellman, P. J. (2007). Spatiotemporal interpolation behind moving occluder [Abstract]. *Journal of Vision*, 7 (9): 610, 610a, <http://journalofvision.org/7/9/610/>, doi:10.1167/7.9.610.
- 鵜沼秀行 Kellman, P.J. 長谷川桐 (2005). 視覚的補間の幾何学的・神経生理学的モデル 川村学園女子大学研究紀要 第16巻 第1号 pp.45-62.
- Unuma, H. & Tozawa, J (1994). Perception of illusory contour and spatio-temporal integration in the visual system, *Japanese Psychological Research*, 36 (3), pp.188-194.
- Von Wright, J. (1968). Selection in visual immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20, pp.62-68.