

仮現運動知覚における
形態および運動方向に関する時間的特性

栗木 礼子

日本女子大学大学院 人間社会研究科 心理学専攻

〒214-8565 神奈川県川崎市西生田1-1-1

(受付 2000 年 4 月 25 日 ; 改訂受付 2000 年 7 月 10 日 ; 再改訂受付・受理 2000 年 8 月 14 日)

Temporal Characteristics of Figure vs. Ground Segregation and
Direction of Apparent Motion Perception

Reiko KURIKI

Department of Psychology, The Graduate School of Integrated Arts and Social Sciences,

Japan Women's University

1-1-1 Nishiikuta, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8565

(Received 25 April 2000; Received in revised form 10 July 2000, 14 August 2000;

Accepted 14 August 2000)

The purpose of this study is to investigate the temporal characteristics of motion perception under the use of a modified dynamic random-dot kinematograms (DRDK). A frame of animated DRDK was further divided into 2 or 3 subframes, which is named as multi-partite stimulus. The original DRDK rendered motion of a rectangle, reciprocally moving into right-and-left or up-and-down. The subjects' task was to segregate the figure from the dynamic random-dot background, or to discriminate the direction of its motion. In the segregation task, the subjects were able to perceive a rectangle, when presented within the moderate duration of a fullframe. Compared with segregation task, apparent motion perception was not degraded in the direction discrimination task. The results of this study suggest that the duration of a fullframe, not the SOA between subframes, had an important role in the integration of multi-partite DRDK into a firm percept, especially in pattern segregation.

1. はじめに

通常の仮現運動研究では、2枚の画像フレームまたは数枚の画像フレームを連続呈示して、呈示刺激がどのように知覚されたかを調べている。Westheimerに始まる古典的仮現運動の研究では、主としてこれら各画像フレームに図形的刺激を用いて、仮現運動知覚生起の時間的条件と運動によって生じる図形刺激の現象的变化に注目してきた¹⁾。しかしランダムドットパターンの登場により新たな見解が述べられるようになった。ランダムドットパターンを用いた場合と、図形や光点などの古典的仮現運動刺激を用いた場合では、仮現運動の生起に対する時間的・空間的特性が異なることが示されている²⁾。特にランダムドットパターン刺激では、刺激間の時間間隔(SOA: Stimulus Onset Asynchrony)が短いほど仮現運動知覚は生じやすいといわれ、呈示時間は影響を及ぼさず、Korteの第四法則も当てはまらないといわれている³⁾。さらに近年になり、多分割刺激呈示法と命名された刺激呈示法を用いることで仮現運動知覚に対する新たな時間的特性について言及する試みがなされるようになった⁴⁾。

Yamazaki⁴⁾が新たに提唱した多分割刺激呈示法の特徴は以下の通りである。多くの研究が示したように人間は連続して呈示される静止画像に仮現運動を知覚することができる。これら静止画像フレーム(以下フルフレームと呼ぶ)の一枚一枚を何枚かの部分に分割して、部分フレーム(以下サブフレームと呼ぶ)を作成する。Yamazakiはこれら分割されたサブフレーム群を総称して「多分割刺激(Multi-Partite Stimulus: MPS)」と命名した。例えば、2枚のフルフレームのそれぞれを3枚のサブフレームに分割して呈示すると、観察者は連続して呈示される6枚のサブフレームを観察することになる。もし視覚システムが、これら6枚のサブフレームを拾い集めて2枚の静止原画像(フルフレーム)を再構成することが可能ならば、観察者は2枚のフル

フレーム間の明瞭な仮現運動を知覚することができるはずである。もし視覚システムがサブフレームからフルフレームへの再構成に失敗すれば、2枚のフルフレーム間の仮現運動は認められず、連続して呈示される6枚のサブフレームの仮現運動を知覚することになる。このように多分割刺激(MPS)を連続呈示する手法が多分割刺激呈示法である。

多くの仮現運動研究は、2フレームまたは数枚のフレームを連続呈示することで行われてきた。そのほとんどが各フレームに運動を構成する基本要素が全て含まれた状態(フルフレーム)で作成されている。この点に関しては、古典的仮現運動の研究¹⁾も、ランダムドットキネマトグラム(Random Dot Kinematograms: RDK)を使った研究²⁾も同様であった。それに対し多分割刺激を使用した研究⁴⁾は数例しか報告されていない。

先にSuga & Kato⁵⁾は、64枚のフルフレームで構成された4本の線分からなる仮現運動刺激を作成し、各フルフレームを2枚のサブフレームに分割してオシロスコープ上に連続呈示した。その結果、2枚のサブフレームが30~100 msの時間内に収まるように呈示されれば、視覚系は仮現運動を知覚することを示した。

Yamazaki⁴⁾はこの研究を発展させ、6点のドットで構成される64枚のフルフレームの刺激を用いて、1フルフレームを2、3、または6サブフレームの3種類に分けた。その結果、MPSの分割数に関わらず、またサブフレーム呈示時間(隣り合うフレームのSOA)に関わらず、フルフレームが約30~120 msの範囲内に収まるように連続呈示されるならばフルフレーム間の仮現運動知覚が生じることが示された。Yamazakiの結果は、サブフレーム呈示時間に関わりなくフルフレーム呈示時間によって知覚が制約されている結果を示した。ここで用いているフルフレーム呈示時間とは、各サブフレーム呈示時間と刺激要素を完全に表現するのに必要なサブフレーム数

(すなわち分割フレーム数)の積を示す。この結果は、MPSにおいて仮現運動知覚を生じさせる時間的要因の一つとして、フルフレーム呈示時間を考慮する必要性を示唆している。

これまでの古典的仮現運動視の研究では、SOAが最も重要な時間的要因であると強調されてきた⁷⁾。しかし前述のMPSを用いた研究結果から、MPSの仮現運動知覚はサブフレーム呈示時間ではなくフルフレーム呈示時間によって決定されることが示唆されている。従って、仮現運動知覚に必要とされる時間的制約条件に関して、従来のSOAに加えてフルフレーム呈示時間についても検討を進める必要がある。

一方、静止画を用いた知覚研究においては、分割呈示した静止画像の知覚的統合を論じた研究が数多く報告されている。例えば、分割呈示した画像情報が知覚的に統合されるための時間的制約に関する研究^{7,10)}、画像情報の知覚的統合と固視点や視野の関連性についての研究¹¹⁾、アイコニックメモリの研究¹²⁾などが挙げられる。これら諸研究では、分割呈示された静止画像の知覚的統合にはフレーム間のSOAが100ms以下という時間的制約があることを示唆している。これらの報告は前述のMPSを用いた運動知覚に関する研究によって報告されている時間的制約と類似している。このことは画像情報の知覚的統合という視点において、MPSを用いた運動知覚に関する研究と分割呈示した静止画像の知覚的統合に関する研究の関連性についても研究する必要性を示すものである。

MPS条件下で仮現運動を成立させるための時間的制約条件については、主としてフルフレーム呈示時間に依存していることが示されている⁹⁾が、十分に議論されているとはいえない。なぜならば、先行研究で使用された刺激は全て数え上げることが可能な線分や点で構成された古典的仮現運動刺激であった。しかも刺激は3次元構造の知覚を伴うものであ

り、これらの刺激を使用したMPS知覚には二次元画像処理、運動情報処理、奥行き処理などの多くの処理過程が関与していた可能性が考えられる。また古典的仮現運動刺激とRDK刺激では仮現運動知覚における時空間的特性が異なることが報告されている⁹⁾。特にRDK刺激では、時間的特性よりは空間的特性すなわち D_{max} が重要な要因であると考えられており、数多くの研究が報告されている¹³⁾。これらの報告は、先行研究で示唆されたフルフレーム呈示時間が重要であるという時間的制約が古典的仮現運動刺激特有のものであり、RDK刺激には当てはまらない可能性を示している。

そこで本研究ではダイナミックRDK(Dynamic RDK: DRDK)を刺激源として用いることでさらに検討を進めることにした。スタティックRDKは、背景のドットが静止した状態でターゲット部分だけが運動をするものである。ダイナミックランダムドットとは、画像のすべての点がフレーム毎にランダムな方向に運動するものを指すが、その一部に相関のある運動を与え、運動図形を定義したものが、DRDKである。スタティックRDKではなくDRDKを使用する利点は以下の通りである。DRDK図形の運動検出は、あるフレーム内の図形と同じドットパターンが次のフレームでどれだけ移動したかを検出することによって実現されると考えられる。しかし、もしDRDKを構成するフルフレームをさらに分割してサブフレームを作成するならば、連続して呈示されるサブフレーム間は無相関なドットで構成されることになる。つまり隣り合うサブフレーム同士は同じドットパターンを持っておらず、サブフレーム間には図形の対応に関する情報は明示的には存在しなくなる。さらにDRDKを使用することにより、サブフレーム間では背景のドットもターゲットパターンを構成するドットも共に無相関な運動を構成することになる。これにより、ランダムな運動を行う背景のドット群と、特定方

向に運動するターゲット刺激を分離することはスタティック RDK 刺激より困難になると推測される。仮現運動知覚に必要な情報を獲得するためには隣接するサブフレーム間の対応関係の検出だけでは不十分であり、複数フレームの画像および運動情報を統合させることにより初めてターゲット刺激の運動の抽出が可能になる。しかも、個々のサブフレーム自身には統合に必要な区切り情報（ n 枚フレームで一つの図形情報が完成するという情報）は含まれていないため、視覚系は何らかの方法で図を構成する情報を抽出する必要がある。多分割刺激呈示法を用いて実験を行うことで、視覚系がどのように図を構成する情報を抽出し安定した運動知覚を得るのか、またそこにはどのような時間的制約が存在するのかについて検討することが可能となると考えられる。

以上の理由から、多分割刺激呈示法と DRDK の組み合わせにより、視覚系が仮現運動刺激を再構成する際の特性についての検討が可能となることが期待される。

本研究は実験 1 および 2 から構成されており、分割 DRDK 刺激を用いた時の仮現運動知覚について調べた。実験 1 ではターゲットの形状弁別課題を行うことにより、ランダムに運動するドット群の背景からターゲット長方形を分離して知覚することが可能かを調べた。形状弁別の結果と Yamazaki の結果⁴⁾を比較することで仮現運動知覚に関する時間的制約が、刺激の時空間特性といかなる関係にあるか検討する。実験 2 では、分割 DRDK 刺激が運動方向の弁別 (direction discrimination) に与える影響を検討した。形状弁別の結果と比較することで図・地分離 (figure/ground segregation) と運動方向の弁別に関する時間特性の違いについて検討する。

2. 実験 1

2.1 方法

被験者は大学生、大学院生、及び著者の 4

名であった。全員が視力正常もしくは視力を矯正していた。著者以外の被験者は、実験の目的を知らされていなかった。

刺激はパーソナルコンピュータ (Apple Power Macintosh G3) によって作成・制御され、CRT ディスプレイ (Sony Multiscan 17GS) に呈示された。

2.2 刺激

刺激は、白地背景に黒色ドットの DRDK を使用した。一辺 0.05 deg の正方形のドットがランダムに配置された DRDK 背景に、ターゲットとして左右運動を行うランダムドットの長方形を用いた。刺激構成を図 1 に示す。ドット密度は 12%, 24%, および 36% の 3 種類であった。刺激の白い部分の輝度は約 110 cd/m², コントラストはほぼ 100% であった。背景もターゲットも常に同じドット密度となるようにランダムドットを生成した。ターゲットとなる長方形は、5 deg の行程を左右に往復運動した。ターゲットとなる長方形刺激の 1 フルフレーム当たりの変位量は、0.29 deg と 0.63 deg の 2 種類が用意された。それに対し、背景の DRDK は各点の 1 フルフレームあたりの変位量は 0.25 deg 以下で、変位の量も方向もランダムに決定された。

これまでの DRDK 運動の呈示実験では、1

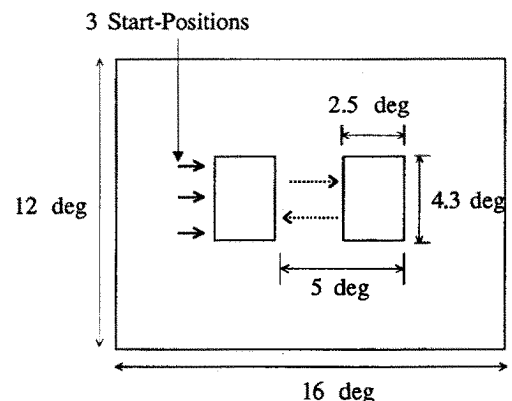


図 1 実験 1 で用いた呈示刺激の概念図を示す。DRDK によって呈示される縦長もしくは横長長方形が左右運動を行う。背景の各ドットの変位量と方向は、長方形とは関係なくランダムに決定される。

フレームに全ての情報（全ドット）を呈示していた。しかし、本実験では各フレームは呈示情報を2または3分割したサブフレーム構成を用いた。本実験では、分割なし条件、2分割条件、3分割条件の3種類の分割条件が用意された。例えば、3分割条件では分割された3枚のサブフレームを重ね合わせると元のDRDKの全要素が揃うようになっている。各サブフレームは等密度分布になるように分割した。従って、例えばドット密度が12%のフレームを3分割した場合、各サブフレーム

のドット密度は4%となった。サブフレーム作成の概略を図2に示す。

分割なし条件と2分割条件では3種類のサブフレーム呈示時間条件、3分割条件では機械的な制約から2種類のサブフレーム呈示時間条件（1サブフレームの呈示時間が15.7msの条件を除く）が用意された。全条件のサブフレーム呈示時間およびターゲット四角形が運動する速度を表1に示す。サブフレーム呈示時間は、フルフレーム呈示時間を分割フレーム数で割って算出された。ISI (inter stimulus interval) は0msであった。

刺激呈示画面の大きさは16deg × 12degであった。被験者が形状弁別を行うためのターゲット刺激は、縦長長方形(2.5deg × 4.3deg)、横長長方形(4.3deg × 2.5deg)、正方形(2.5deg × 2.5deg)の3種類の図形を用意した。正方形刺激はコントロール刺激として用意した。被験者がターゲットのスタート位置を予測をすることを避けるために、ターゲット刺激のスタート位置を試行ごとに垂直方向に3種類の位置でランダムに変化させた。水平方向の位置はターゲット刺激の重心がCRTの中心から左へ2.5deg離れた位置であり、垂直方向の位置はCRTの中心から上へ1.75deg、0.25deg、または-1.25degのいずれかであった。観察時間をなるべく一定にするために、往復運動はサブフレーム呈示時間ご

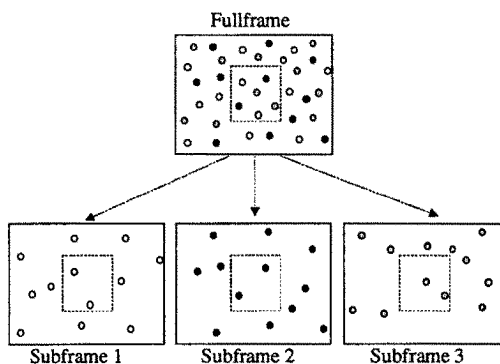


図2 DRDK 多分割刺激（3分割）の作成例を示す。通常の1フレーム（フルフレーム）を3枚のサブフレームに分割する。サブフレームへの分割では、元のフルフレームに含まれるドットを分割数でランダムに割り振るため、この場合はドット数・密度ともに1/3となる。詳しくは本文を参照。

表1 実験1, 2で用いられたsubframe呈示時間(ms)と速度(deg/s).

# of Subframes	Subframe Duration (ms)		
One (control)	47.2	70.8	141.6
Two	23.6	35.4	70.8
Three	— *1	23.6	47.2

Fullframe Duration (ms)	47.2	70.8	141.6
-------------------------	------	------	-------

Velocity			
Step Amplitude 0.29 deg (deg/s)	6.14	4.10	2.05
Step Amplitude 0.63 deg (deg/s)	13.35	8.90	4.45

*1 This condition was not set because of CRT frame-rate restriction

とに1往復から6往復まで設定された。各条件の往復運動数を表2に示す。

実験は薄暗闇の部屋で行われ、観察距離は114 cmであった。被験者の頭部は、顎台及び頭部固定機で固定された。

2.3 手続き

被験者の課題は四角形の形状弁別であった。実験手続きの流れを図3に示す。被験者は、運動しているターゲット刺激の形状が縦長・横長のいずれであるかを2肢強制選択法(2AFC)で応答した。

1セッションは、図の種類(3種類)×スタート位置(3種類)×ドット密度(3種類)×1フルフレーム当たりのターゲットの変位量(2種類)×分割条件と呈示時間の組み合わせ(8パターン)の合計432試行で

表2 観察時間の一覧。

Fullframe Duration	Target Displacement	Number of Oscillations	Total Observation Time
Short (47.2 ms)	0.29 deg	6	4.8 ms
	0.63 deg	3	5.0 ms
Middle (70.8 ms)	0.29 deg	4	4.8 ms
	0.63 deg	2	5.0 ms
Long (141.6 ms)	0.29 deg	2	4.8 ms
	0.63 deg	1	5.0 ms

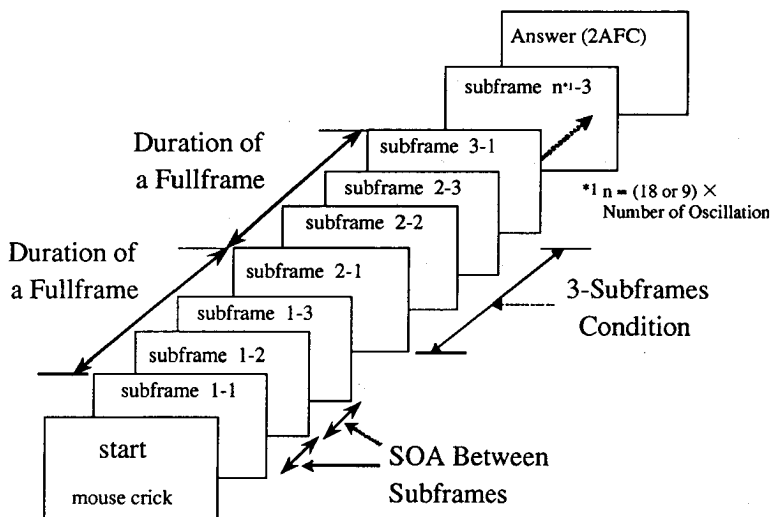


図3 3分割呈示条件の実験の流れを示す。被験者は一連の呈示刺激を観察後、長方形の形状が縦長・横長いずれかを回答する。サブフレーム 1-1 が呈示されてからサブフレーム 2-1 が呈示されるまでの時間、すなわちサブフレーム 1-1, 1-2, 1-3 の呈示時間の和がフルフレーム呈示時間である。

あった。全ての試行はランダムな順番で呈示された。各被験者は練習試行を経験した後、3セッションの本実験を行った。

2.4 結果

各被験者とも分割呈示した DRDK によるターゲットの形状弁別が可能であった。これは分割呈示した情報からでも、長方形の仮現運動知覚が行われたことを示唆している。

個人差の有無を調べるため、逆正弦変換後のデータに対し、試行条件 48 水準(分割条件とサブフレーム呈示時間の組み合わせ(8)×ドット密度(3)×フルフレーム当たりのターゲットの変位量(2))に対して繰り返し4(被験者数)の一元配置分散分析を行った。その結果、各実験条件について被験者間の反応に有意差は見られなかった($F(3, 188) = 0.24, P > 0.10$)。そこで全被験者の平均値をもとに、変位量条件・ドット密度条件ごとにデータを集計した結果を図4に示す。(a)はフルフレーム当たりの変位量が 0.29 deg の条件の結果、(b)はフルフレーム当たりの変位量が 0.63 deg の条件の結果である。各パネルは、左からドット密度 12%, 24%, および 36% の結果である。コントロールとして使用した正方形刺激に対する反応は結果には含まれていない。

図4 (a)に示すように、フルフレーム当たりの変位量が0.29 degの条件ではドット密度毎の正答率のパターンは類似した傾向を示した。2AFCを用いているため、全く弁別できない時が正答率50%であり、1/2の確率で知覚可能な時の正答率は75%に当たる。本実験条件である標本数72(スタート位置(3種類)×長方形の種類(2種類)×セッション(3回)×被験者数(4人))の二項分布における、チャンスレベル(50%)との有意差が両側5%水準で有意差が生じるのは、正答率が62%以上であり、正答率75%は両側1%水準以下で有意差を示す。すなわち、正答率75%のラインは、知覚的には正答率1/2にあたり、同時に統計的にもチャンスレベルと1%水準で有意差があるという意味を持っている。

例えば、ドット密度12%の結果を見ると、横軸のフルフレーム呈示時間が47.2 msと70.8 msの場合は、全てのシンボルがほぼ重なりあった状態でプロットされており、全て正答率75%以上を示している。一方、フルフレーム呈示時間が141.6 msの場合は、分割なし条件は84%と正答率75%以上であるのに対し、2分割あり条件は58%、3分割条件は60%と、分割呈示条件では正答率が75%未満と

なっている。

同様にして全てのドット密度ごとのデータを検討すると、全てのドット密度条件で分割フレーム数に関わりなく、フルフレーム呈示時間が141.6 ms条件の場合で、かつ分割呈示した条件においてのみターゲット弁別が正答率75%未満になったとすることができる。この結果は、6点の古典的仮現運動刺激を用いたYamazakiの実験⁴⁾で、MPS呈示条件ではフルフレーム呈示時間が120 ms以下の場合のみ6点の運動知覚が報告された結果と同様の時間的特性を示すものである。すなわち、フルフレーム呈示時間が約100 ms以下であれば、分割フレーム数に関わりなく、フルフレーム単位の運動知覚が75%以上の確率で報告されるが、呈示時間がそれ以上になると(本実験では141.6 msの場合)分割なし条件では長方形の形状弁別は正答率75%以上であるのに対し、分割した場合は弁別が正答率75%未満となり、チャンスレベルである50%に大幅に近づくことが示された。

フルフレーム当たりの変位量が0.63 degの条件における結果の特徴は、図4 (b)に示すように、分割条件間でのグラフの形状が非常に似通っていることである。図4 (a)と異なり、ほとんどのシンボルは75%未満の正答率を示

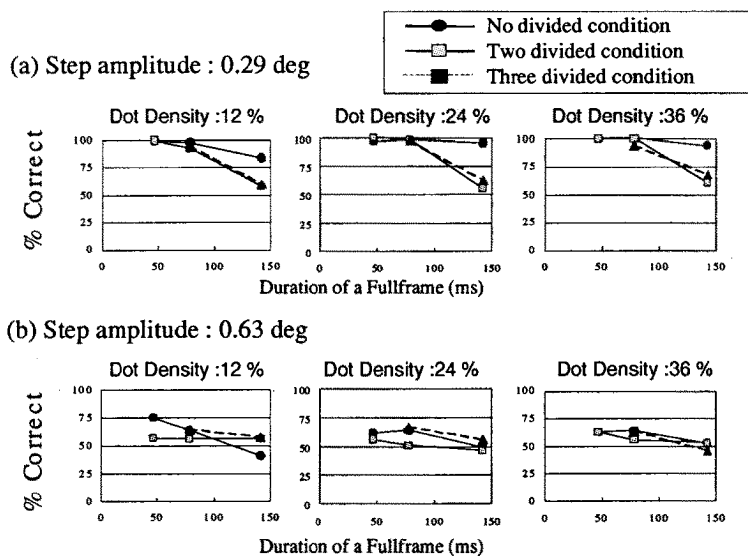


図4 形状弁別の結果を示す。グラフは全被験者の平均値である。横軸はフルフレーム呈示時間 (ms)、縦軸はターゲット刺激の形状弁別の正答率 (%) を示す。(a) は変位量 0.29 deg の条件の結果、(b) は変位量 0.63 deg 条件の結果を示している。パネルの違いはドット密度条件の違いを示している。

している。ドット密度 12% の時のフルフレーム呈示時間が 47.2 ms の条件における分割なし条件のみ正答率 75% を示しただけであった。

すなわち、フルフレーム当たりの変位置が 0.29 deg の条件では、ドット密度に関わりなく、フルフレーム呈示時間が 141.6 ms 条件の場合における分割なし条件と分割あり条件の正答率に差が見られたのに対し、フルフレーム当たりの変位置が 0.63 deg の条件では、分割なし条件と分割あり条件の正答率には有意な差は示されなかった。

2.5 考察

古典的仮現運動刺激では、Korte の第四法則に代表されるように、SOA が仮現運動知覚成立のために最も重要な時間的要因であると強調されてきた¹⁾。一方、DRDK による仮現運動では SOA ではなく刺激の移動距離が重要な要因であるといわれている^{2,3,5,13)}。つまり、刺激により仮現運動の知覚に影響を与える時間的要因が、必ずしも SOA 単一ではないことが示唆されてきた。しかし、フルフレーム当たりの変位置が 0.29 deg の条件における結果は、古典的仮現運動刺激も DRDK 刺激も、フルフレーム単位の運動知覚が成立する点に関して同様の時間的制約を示した。この結果は MPS 刺激における仮現運動の知覚に関する時間的要因は、刺激の種類に依存しないで共通して見られる特徴であることを示唆している。

一方、フルフレーム当たりの変位置が 0.63 deg の条件では、分割条件の違いによる知覚について検討する以前に、ドット密度に関わらず、形状の弁別が困難であったことを示唆していると考えられる。

3. 実験 2

DRDK 刺激は各フレームが空間的に無相関なドットで構成されているために図形的情報をもたず、共通する運動を抽出してはじめて構造復元が可能となるという特徴を持つ。DRDK に関する MPS 呈示条件によって示され

た仮現運動の知覚に関する時間的制約が、構造復元のメカニズムに限定されたものなのか、それとも運動情報処理にも関係するものなのか、実験 1 の結果からは言及できない。また 2 フレームの RDK を用いて形状弁別課題と運動方向弁別課題を行った実験では、同じ変位置の場合、運動方向弁別課題の方が形状弁別課題よりエラーが少ないという報告もある⁹⁾。そこで MPS 呈示によって運動情報処理の過程にどのような時空間的制約が生じるのかを調べるために、実験 2 では正方形刺激を使用して運動方向弁別に関する課題を行い、仮現運動の知覚が成立するための MPS 呈示条件が運動情報処理過程の時間的特性の影響をどのように受けるのかについて検証を行った。

3.1 方法

被験者は大学生、大学院生、および著者の 4 名であった。全員が視力正常もしくは視力を矯正していた。著者以外の被験者は、実験の目的を知らされていないかった。

装置は実験 1 と同じものを用いた。

3.2 刺激

刺激の概略を図 5 に示す。基本的構成は実験 1 と同じものを用いた。違いはターゲット刺激の形状を正方形 (2.5 × 2.5 deg) に固定したことである。ターゲット正方形の運動方向については左右または上下の 2 種類を用意した。

3.3 手続き

被験者の課題は運動方向の弁別であった。被験者は正方形刺激の運動が左右方向か上下方向か 2 肢強制選択法 (2AFC) で応答した。スタート位置の予測を避けるために、左右または上下に運動するターゲットのスタート位置を、それぞれ 3 種類の位置で試行ごとにランダムに変化させた。左右運動の場合は実験 1 と同じ 3 種類のスタート位置であった。上下運動の場合はそれぞれの位置がターゲット刺激の重心が CRT の中心から左へ 2.5 deg, 1.0 deg, -0.5 deg, 上へ 2.75 deg であった。従っ

て運動開始位置は左右運動の場合は上・中・下の3箇所(図5(a)), 上下運動の場合は左・中・右の3箇所であった(図5(b)).

1セッションは, 正方形の運動方向(2種類) × スタート位置(3種類) × ドット密度(3種類) × フルフレーム当たりのターゲットの変位量(2種類) × 分割条件と呈示時間の組み合わせ(8パターン)の合計288試行であった. 全ての試行はランダムな順番で呈示された. 各被験者は練習試行を経験した後, 3セッションの本実験を行った.

3.4 結果

各被験者とも分割呈示したDRDKによる運動方向の弁別が可能であった. 個人差の有無を調べるため, 逆正弦変換後のデータに対し, 試行条件48水準(分割条件とサブフレーム呈示時間の組み合わせ(8) × ドット密度(3) × フルフレーム当たりのターゲットの変位量(2))に対して繰り返し4(被験者数)の一元配置分散分析を行った. その結果, 各実験条件について被験者間の反応に有意差は見られなかった($F(3, 188) = 1.50, P > 0.10$). そこで, 全被験者の平均値をもとに, フルフレーム当たりの変位量条件・ドット密度条件ごとにデータを集計した結果を図6に示す. 結果の表示は実験1のグラフと同様で, (a)はフルフレーム当たりの変位量が0.29 degの条件の結果, (b)はフルフレーム当たりの変位量が0.63 degの条件の結果である. 各パネルは, 左からドット密度12%, 24%, および36%の結果である. 実験1と同様に

2AFCを用いているため, 全く弁別できない時間が正答率50%であり, 1/2の確率で知覚可能な時の正答率は75%に当たる.

運動方向の弁別課題の結果は, 実験1の形状弁別課題の結果と異なる傾向を見せた. 図6(a)に示すように, フルフレーム当たりの変位量が0.29 degの条件の結果は, 図4(a)と類似したパターンを示しているが, 分割条件間における違いがドット密度により異なった. ドット密度12%とドット密度24%の条件においては, 実験1と同様にフルフレーム呈示時間が141.6 msの条件においてのみ分割呈示条件間において差がみられた. すなわち, 分割なし条件では方向の弁別は正答率75%以上であるのに対し, 分割した場合は弁別が正答率75%未満となることが示された. しかし, ドット密度36%の条件では, どの分割条件も同じような変化の傾きを示した. 特にフルフレーム呈示時間が141.6 msの条件における2分割条件の方向の弁別は, 正答率75%以上を示しており, 実験1のような分割あり条件対分割なし条件のような明らかな違いは示されなかった.

図6(b)に示すフルフレーム当たりの変位量が0.63 degの条件における結果の特徴をまとめると以下の通りである. まず, 正答率の傾向を見ると, 全体的に75%付近を推移しているが, 分割あり条件に関してはいずれも正答率が75%未満であるのに対し, 分割なし条件では75%以上の正答率を示している. これらの結果から, 運動方向の弁別は, 分割なし条

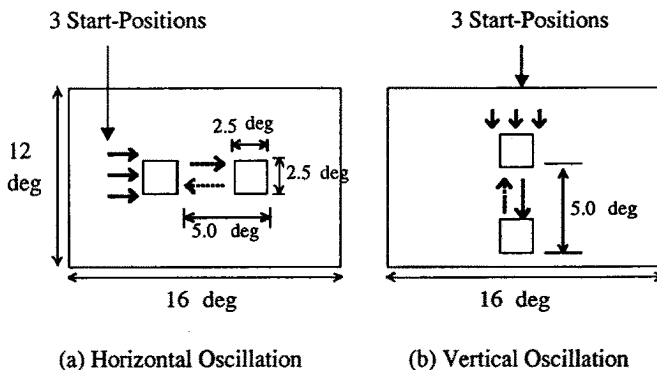


図5 実験2で用いられた呈示刺激の概念図を示す. DRDKの正方形刺激が左右(a)または上下運動(b)を行う. 背景の各ドットの変位量と方向は, 正方形とは関係なくランダムに決定される.

件と分割あり条件では被験者の反応に差が見られることが示された。分割なし条件では運動方向の弁別能は正答率 75% 以上の範囲を中心に变化するのに対して、分割あり条件では正答率 75% 未満を中心に变化している。従って、分割呈示することで運動方向の弁別は困難になる可能性が示唆された。

3.5 考察

形状の弁別と運動方向の弁別課題の結果は異なる傾向を示した。

変位量が 0.29 deg の条件における結果は、実験 1 では形状弁別能はドット密度に関係なく全て同様の傾向を見せた。すなわち、フルフレーム呈示時間が 141.6 ms では、分割あり条件でのみ正答率がチャンスレベルになった。それに対して、実験 2 のドット密度 36% では運動方向の弁別能は分割なし条件と分割あり条件間で明確な差が示されなかった。グラフは正答率 75% 以上の範囲で变化していることから、ドット密度 36% の条件では分割しても運動方向の弁別能が比較的高い正答率を示すことが示唆される。

同様に変位量が 0.63 deg の条件における結果においても、実験 1 の形状弁別の結果と異なる傾向が観察された。実験 1 では、形状弁別能は正答率 75% 未満の範囲であった。それに対し実験 2 では、図 6 (b) からわかるよう

に、分割なし条件は正答率 75% 以上の範囲で变化しており、運動方向の弁別が 1/2 以上の確率で可能であると示唆されるのに対して、分割呈示したものは運動方向の弁別が困難である可能性が示唆される。フルフレーム呈示時間が約 100 ms 以下の場合において、分割なし条件では運動方向の弁別が正答率 75% 以上の範囲となるにもかかわらず、分割条件では正答率 75% 未満の範囲となったことは、運動方向弁別のメカニズムと形状弁別のメカニズムが異なる可能性を示唆するものであると考えられる。すなわち、運動方向の弁別については、フルフレーム呈示時間で弁別能の違いが生じるのではなく、フルフレーム呈示時間に関わりなく、分割呈示方法の違いによって弁別能が決定される可能性が示唆される。

これらの結果は、形状の弁別と同じ呈示時間もしくはより長い呈示時間でも、運動方向の弁別の正答率は 75% 以上の範囲を示していると言いかえることが可能である。本実験で用いた DRDK は運動情報の手がかりを得て初めて図・地分離すなわち構造復元が可能になるという特徴を持っている。まず共通の運動成分が検出・処理されて、その情報をもとに図・地分離が行われると仮定するならば、形状の弁別のほうが運動方向の弁別よりフルフレーム呈示時間において正答率 75% 以上の範

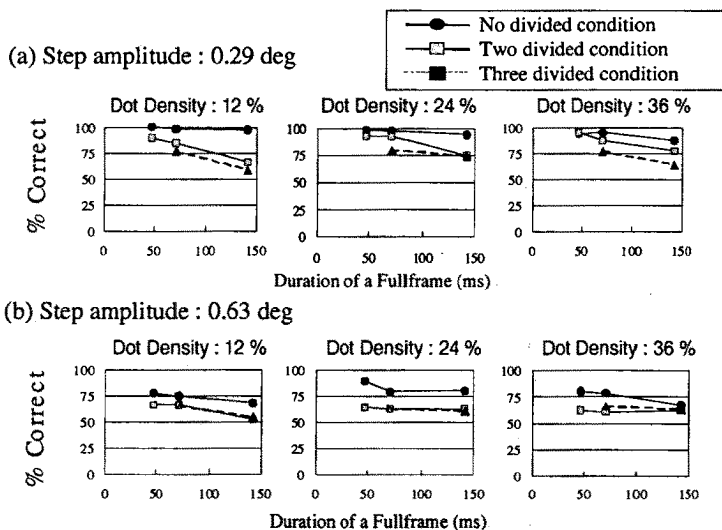


図 6 運動方向の弁別の結果を示す。グラフは全被験者の平均値である。横軸はフルフレーム呈示時間 (ms)、縦軸は、ターゲット刺激の運動方向弁別の正答率 (%) を示す。(a) は変位量 0.29 deg の条件の結果、(b) は変位量 0.63 deg 条件の結果を示している。パネルの違いはドット密度条件の違いを示している。

困となる呈示時間帯が短くなる可能性が考えられる。本研究における2つの実験の結果は、この可能性を支持するものであると考えられる。以上の議論から、DRDKによる仮現運動知覚は運動情報をもとに図・地分離が行われている可能性が示唆される。

4. 総合的考察

従来の運動刺激と比較して、MPSが持つ最大の特徴は1フレームの構成法の違いにある。過去の多くの研究は1フレーム内に運動を構成する要素を全て含んでいたのに対し、多分割刺激呈示手法は通常のフレームをさらに分割したサブフレームを用いている。このサブフレームには元のフルフレームの部分要素しか含まれていない。従って、滑らかな運動を知覚するためには、視覚システムは何らかの方法でサブフレームに分散した部分要素を再構成して、安定した運動物体と思われるものを抽出し、刺激の全体像を構築しなければならない。しかし、呈示される刺激自身には統合に必要な区切り情報、すなわちn枚フレームで一つの図形情報が完成するという情報は何も示されていないので、視覚システムは手がなりのない時々刻々と変化する情報の中から安定した運動物体の情報を抽出及び選択する必要がある。MPSを使用することにより、このような視覚システムの運動する物体の構造復元を行う過程について、新たな視点から言及することが可能となった。DRDK刺激は通常の呈示方法でも、各フレームに刺激の空間的対応を示す手がかりは明示的には存在しない。これをさらに分割呈示することによって、視覚メカニズムの構造復元過程における時間的制約について新たな示唆を与えることができたと考えられる。

ところで、多くの研究が2フレームに限定し、刺激要素をより単純化して呈示する方法を採択している理由は、刺激が持つ要因をできるだけ減らすことによって「ある特定の刺激の変化」によって生じる知覚の変化が「特

定のメカニズム」の影響を受けていることをより明確に抽出するためである。MPSを採用することによる問題点は、多フレームかつ多分割して呈示することにより、刺激が複雑化され、複数のメカニズムが同時に働く可能性が指摘されるということである。そのため、MPSの実験では特定のメカニズムについて言及し、それを分離することが困難になる可能性がある。本研究においても、構造復元過程のどの部分に関わるメカニズムなのかを具体的に示唆することまではできなかった。

4.1 構造復元過程における時間的制約について

実験1で示されたように、被験者は分割呈示条件の違いに関わらず、フルフレーム呈示時間が約100ms以下であれば、分割呈示されたDRDKからの形状の弁別能は75%以上の正答率を示した。すなわち、DRDK刺激における仮現運動の知覚に必要な時間的制約は、対応するサブフレーム間の呈示時間ではなくフルフレーム呈示時間にあることが示唆される。この結果は古典的仮現運動刺激を用いたYamazakiの結果⁹⁾と一致している。つまり古典的仮現運動刺激においてもランダムドットパターンにおいても仮現運動知覚の成立には同様の時間的制約が存在していると見ることができる。また、分割呈示された静止画像の知覚的統合に関する研究と比較すると、フレーム間のSOAが100ms以下で統合知覚が可能という報告^{8,9)}と、本研究の時間的制約の結果は類似している。

一方、運動方向弁別課題を行った実験2の結果では、MPSにおけるフルフレーム呈示時間が約100ms以下という制約は見られなかった。これらの結果は、フルフレーム呈示時間が約100ms以下という時間的制約は、MPSにおける仮現運動の知覚における運動からの構造復元を行う時に必要な、形態情報の処理機構に強く関係する制約であることを示唆するものである。

今回の研究では、構造復元を行う時に必要な形態情報の処理機構において、フルフレー

ム呈示時間が支配的要因である可能性が示された。しかし、図形を構成する各要素に着目すると、あるドットが次に現われるまでの時間、すなわち各ドット自身の SOA はフルフレーム呈示時間と同一であった。そのため、各画像構成要素の SOA とフルフレーム呈示時間のいずれが支配的な要因なのかは今回の研究結果から言及することはできない。しかし、Yamazaki⁴⁾ と今回の結果の主張は、単なる隣接するフレームが支配的要因ではないことを明確に示している。それ以上は今後の研究の課題であると考えられる。

4.2 構造復元メカニズムの時間的制約について

DRDK は個々のフレームから特定の線分や形態の情報を入手することはできない刺激であり、運動成分情報の違いだけで図と地が定義されている。すなわち DRDK から運動する物体を知覚することが可能であるということは、運動情報処理機構あるいは形態情報処理機構が、特定方向に運動する対象を背景から分離して一つの対象としてまとめ上げる機能を持っていると考えることができる。時分割した刺激を呈示しても、DRDK から運動する四角形が分離知覚できるという実験 1 の結果を、隣り合うフレーム単位の単純な要素マッチングモデルで説明することは困難である。むしろ運動刺激の抽出もしくは形態の統合をするシステムには、連続するサブフレームに関して視覚情報を時系列的に貯えるシステム

が存在する可能性が考えられる。

では、運動成分情報から構造復元を行うシステムは、どのように運動情報と形態情報を統合しているのだろうか。少なくとも 2 つのメカニズムの関与が想定される。一つは局所的運動変化をもとに運動している物体の形状や大きさを決定する画像統合メカニズムであり、もう一つはその物体がどのような方向や速度で運動しているかを決定するグローバル運動検出メカニズムである。想定されるメカニズムにおける情報の流れを図 7 に示す。画像統合メカニズムは、さらに 2 つの下位システムに分けられると考えられる。各サブフレーム間の局所的運動を検出する局所運動検出システムとイメージバッファの役割を果たす画像情報保持システムである。これらのシステムを仮定する必要がある理由を、以下のような例をあげて説明する。

例えば、分割なし条件でターゲットが水平方向に運動する場合、ターゲットの仮現運動を知覚するためには、各フレーム情報から、ランダムな運動をする背景に対し、水平方向運動をするドット群を検出する必要がある。そのためには、各フレームのドット位置の情報は画像情報保持システムに保存され (図 7 (1))、局所的運動検出システムが各フレーム間の運動成分を抽出し (図 7 (2))、さらに局所的運動方向の中に共通する運動方向成分を抽出することが必要であると考えられる。抽

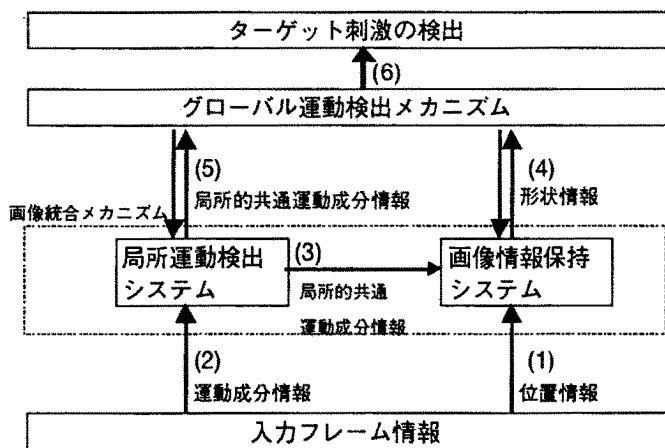


図 7 構造復元システムの概念図を示す。画像統合メカニズムとグローバル運動検出メカニズムより構成される。矢印は情報の流れる方向を示す。矢印の脇の数字については本文中の説明を参照。

出された共通の運動方向成分の情報はグローバル運動検出メカニズムと画像情報保持システムに伝えられると想定する（図7(5), (3)）。画像情報保持システムは、貯えられたドット位置の情報と共通の運動方向成分の情報に基づいて対応する位置のドット群を検出して、ターゲット刺激の形状情報をグローバル運動検出メカニズムに伝えるものと仮定する（図7(4)）。これらの情報を元にグローバル運動検出メカニズムでは、長方形が左右に運動するターゲット刺激であると決定することが可能であると考えられる（図7(6)）。

ところで、局所的な運動を検出するためには、局所的運動検出システムは運動と位置情報の両方の情報を保持している必要がある。この点を加味すると、上記の刺激条件ならば、局所的運動検出システムと画像情報保持システムが保持する情報は同じものであり、画像情報保持システムは必要なく、局所的運動検出システムとグローバル運動検出メカニズムだけでも説明可能かもしれない。では、なぜ画像情報保持システムが必要なのかという理由を、3分割条件の場合を例に挙げて説明する。

3分割条件の場合、分割なし条件で想定した場合と同様の処理が行われた場合、各サブフレーム間における局所的運動の方向はサブフレーム毎にランダムに変化してしまい、図7(5)に示した共通する運動方向の成分が正しく抽出されてグローバル運動検出メカニズムと画像情報保持システムに送られることは考えられない。一方、画像情報保持システムも、局所的運動検出システムから共通する運動方向の成分情報（図7(3)）が送られてこなければ、特定の形状を判断できるような情報をグローバル運動検出メカニズムに送ることはできない。これらの無意味な情報がそのままグローバル運動検出メカニズムに送られて、そのまま解釈されたとすると、無意味な形状の刺激がランダムな方向へ運動するような仮現運動を知覚するようになる。つまり、

この情報処理の流れでは本実験結果のような長方形の検出ができないことになる。

そこで実験結果から示唆される時間的制約に注目し、画像情報保持システムは、複数のサブフレーム情報を貯えることのできるイメージバッファのような機構で構成され、その持続時間には限界があると想定する。時間の経過と共に古いサブフレーム情報は消滅し、新しいサブフレーム情報が順次貯蔵されるものとする。これによってグローバル運動検出メカニズムは、局所的運動検出システムの情報（図7(5)）を元に、画像情報保持システムに貯えられたサブフレーム情報（図7(4)）から適切な構造復元に必要な何らかの予測的情報の抽出を行うことができるものと仮定する。さらに、予測的情報の抽出結果を、画像統合メカニズムにフィードバックする（図7(4), (5)）ことにより、より安定した構造復元を実現していると想定する。

以上の仮定を踏まえて、3分割条件の場合における情報処理の流れを追うと以下のようになると考えられる。局所的運動検出システムで検出される、各サブフレーム間に共通する運動方向の成分の情報は、サブフレーム毎に変化したものが画像情報保持システムとグローバル運動検出メカニズムに逐次送られる（図7(3), (5)）。一方画像情報保持システムは、イメージバッファにドット位置情報を特定の時間だけ貯えるものとする。貯えられるサブフレーム情報は最適セット、すなわち3サブフレーム分の場合もあれば、それ以下または以上の場合である可能性がある。画像情報保持システムでは、貯えられたドット位置の情報を元に、共通する運動方向成分の情報と一致する位置のドット群を検出してターゲット刺激の形状情報をグローバル運動検出メカニズムに逐次伝えると仮定する（図7(4)）。それに対し、局所運動検出システムは、バッファ機能を持たず逐次変化する運動情報を検出していると仮定する。一方でグローバル運動検出メカニズムは、共通する運

動方向の成分の情報が常に同じ運動方向かどうかを見極め、逐次変化する局所的運動方向成分の場合は、それが単なるノイズなのか、意味のある運動成分なのかを見極めなくてはならない。その見極めは、運動方向の変化に一定の繰り返しパターンが存在するかどうかを検出することで可能になると考えられる。さらにグローバル運動検出メカニズムは繰り返し出現する局所的運動方向の変化パターンからグローバルな運動方向も決定できると想定する。これらにより、グローバル運動検出メカニズムは3分割されたサブフレームの情報から長方形刺激の形状と運動方向を抽出することが可能になると考えられる。

言い換えるならば、このグローバル運動検出メカニズムは、各サブフレーム間の局所的運動変化の出現頻度をカウントすることによって、安定した運動構成要素は何であるのかを決定する役割をはたすものと推定される。ここでは幾つかのサブフレームのセットが1単位として選択され、1単位として選択された領域が大域的にどのような運動成分を保持しているのかを推定するような情報処理を行っているものとする。運動を構成する物体を決定するための最適情報を得るためには、1単位を構成する要素全体が制約時間内に繰り返し出現する必要がある。実験1の結果より、1単位情報の持続時間はフルフレーム呈示時間が約100ms以下であることが示された。フルフレーム呈示時間が短くなればバッファに溜め込まれるサブフレームの情報量は増加し、1単位情報も繰り返し出現することで、安定した運動構成物を決定する情報は増加するであろう。

一つの可能性として、Attneave¹⁴⁾に代表される情報理論と確率過程における系列依存性の概念を用いることで、この要素単位決定が達成可能であると考えられる。系列依存性とは、多かれ少なかれ事象がパターンを成していることを指す。例えば3分割呈示の刺激の場合、分割した各サ

ブフレーム内のターゲット刺激部分をA、B、Cと仮に名づけると、本実験での呈示順序はABCABCABC・・・という、ABCが繰り返し呈示されるパターンを成す系列になる。この場合、呈示刺激には系列依存性が存在していると呼ぶ。視覚システムは、この系列がどのような組み合わせで構成されているのか、つまりどのような系列依存性があるのかを見つけ出すことによって、パターンまたは運動する刺激を抽出している可能性が考えられる。従って、たとえ分割呈示されても、連続的に入手される情報が規則性をもっていれば、つまりフルフレーム単位で一定情報が繰り返し出現すれば、そこから系列依存性が抽出可能であると考えられる。ただし、グローバル運動検出メカニズムは、この繰り返しリズム、すなわち系列を抽出することによって運動パターンを抽出できるという仮定が必要となる。

もし画像統合メカニズムやグローバル運動検出メカニズムのような構造復元メカニズムが存在し、その復元能力に時間的制約があると仮定するならば、それは刺激の時間的特性を変化させた場合に復元される構造の知覚の変化として現われるはずである。MPSを用いた本研究では、この知覚変化はフルフレーム呈示時間が約100ms以下の場合においてのみ、背景のランダムドットパターンから運動する長方形を図として分離できたという形で現われた。これは、イメージバッファの役割を果たす画像情報保持システムの特性の現われであると推測可能である。それに対して、運動方向の弁別結果は、フルフレーム呈示時間ではなく、分割呈示条件に影響されていた。これは、バッファ機能を持たない局所運動検出システムの特性の現われであると推測可能である。運動方向の弁別能が分割しない条件のほうが高かったという結果は、逐次運動方向を検出するシステムでは、情報量の多いほうがより高い弁別能を示すという形で現われたと解釈することが可能である。

今回の結果では、その知覚上の変化をもたらす時間的主要因はフルフレームの呈示時間であった。今回の実験結果は、刺激の構成に依存する可能性も考えられるが、先行研究の結果等も総合して考察すると、運動する物体を決定するシステムは、フルフレーム呈示時間が約 100 ms 以下においてのみ、複数のサブフレームに分割された、運動する物体の構造復元を安定して行える可能性があると考えられる。

今回の結果を説明することのできるモデルは様々に存在することが予測でき、図7に呈示したようなモデルが必ずしも唯一のものではない。また、図7に示したモデルは概念的なものにすぎず、精緻化には更なる研究を要すると考えられる。

4.3 図・地分凝と運動方向知覚

2 フレームの DRDK 実験では、図・地分凝と運動方向弁別に関して弁別可能なフレームの変位量に差があることが報告されている⁹⁾。本研究の結果においても、形状の弁別（実験1）と運動方向の弁別（実験2）は異なる傾向を示した。

Yamazaki の結果⁹⁾や実験1の結果では、フルフレーム呈示時間が約 100 ms 以下の場合に MPS 刺激の仮現運動知覚が高い正答率で生じる事が示されている。一方、分割された静止画の知覚的統合に関する研究の結果においても、知覚的統合が可能な時間はフレーム間の SOA が約 100 ms 以下であると報告されている^{8,10)}。それに対し実験2の結果では、フルフレーム呈示時間が約 100 ms 以上でも運動方向の弁別がある程度可能であるという結果が示された。唯一、ドット密度が 12% と 24% の条件で、実験1や Yamazaki の結果⁹⁾と同様の傾向を示したのみである。実験1や Yamazaki の結果⁹⁾の研究などで、約 100 ms という制約が見られたのは運動方向の知覚の制約によるものではなく、図・地分凝に関わる制約が現われたためと考えられる。この解釈を取り入れれば、Yamazaki が提唱した MPS による仮

現運動知覚の時間的制約は、図・地分凝もしくは運動物体の抽出・決定に関わる時間的制約である可能性が推察される。

仮現運動知覚を生成する過程が運動知覚経路のどの段階に存在しているのかは本実験の結果からは示唆することはできない。しかし、形状に関する情報処理システムと運動方向に関する情報処理システムが独立に存在することを仮定した場合、運動情報処理システムは本実験で特定できるような時間的制約を示していないのに対し、形状情報処理システムについては、持続時間が最大約 100 ms という制約を持っていると仮定することが可能である。結果として、仮現運動知覚が可能な時間的制約が、フルフレーム呈示時間で約 100 ms 以下、という形で現われたことが説明できると考えられる。

5. 結論

本研究は、DRDK 刺激を分割呈示しても、それらを再構成した知覚が可能であることを示した。古典的仮現運動刺激や DRDK などの種類を問わず、仮現運動知覚の成立のための時間的制約として重要なのはフルフレーム呈示時間が約 100 ms 以下である事であり、この時間的制約は主に構造復元に関する形態情報処理システムに密接に関連している可能性を示唆していると考えられる。

謝辞

本研究は平成11年度佐藤愛子学術奨励金の援助を受けた。

本論文改稿にあたり、多くの有益な示唆を与えてくださった査読者の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) P. A. Kolers: Aspects of motion perception. Oxford, Pergamon press. 1972.
- 2) O. Braddick: A short-range process in apparent motion, *Vision Research*, 14, 519-527-527, 1974.

- 3) J. S. Lappin and H. H. Bell: The detection of coherence in moving random-dot patterns. *Vision Research*, 16, 161-168, 1976.
- 4) R. Yamazaki: Temporal restriction in apparent motion of two objects by presenting multipartitely divided subframe. *Japanese Psychological Research*, 40, 74-81, 1998.
- 5) Jr. C. Baker and O. Braddick: The basis of area and dot number effects in random dot motion perception. *Vision Research*, 22, 1253-1259, 1982.
- 6) T. Suga and C. Kato: Spatio-temporal properties in multi-framed apparent motion using frame-splitting procedure. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 13, 69-79, 1995.
- 7) V. Di Lollo: Temporal characteristics of iconic memory. *Nature*, 267, 241-243, 1977.
- 8) V. Di Lollo: Temporal integration in visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 75-97, 1980.
- 9) T. Kikuchi, T. Oyama, and S. Ichihara: Temporal integration and visual masking of dot patterns successively presented. *Japanese Psychological Research*, 25, 147-155, 1983.
- 10) T. Oyama and W. Yamada: Perceptual grouping between successively presented stimuli and its relation to visual simultaneity and masking. *Psychological Research*, 40, 101-112, 1978.
- 11) B. G. Breitmeyer, W. Kropfl and B. Julesz: The existence and role of retinotopic and spatiotopic forms of visual persistence. *Acta Psychologica*, 52, 175-196, 1982.
- 12) M. Coltheart: Iconic memory and visible persistence. *Perception and Psychophysics*, 27, 183-228, 1980.
- 13) T. Sato: Dmax: Relations to low- and high-level motion processes. T. Watanabe (ed): *High level motion processing*. MIT press, 1998.
- 14) F. Attneave: Applications of information theory to psychology. Holt, Rinehart and Winston, 1959.