

# 仮現運動におけるフレーム数の効果について

## The Effect of Number of Frames on Apparent Motion

加 藤 知佳子

### 1. 問 題

#### 1.1 仮現運動

人間は、静止画像を適当な時間間隔で継時的に提示されたものから、特定の物体の運動を知覚することができる。これは仮現運動と呼ばれる現象であり、映画やテレビの映像から撮影された世界を知覚できるのは、その代表的な例である。

仮現運動でも、時刻上隣接する<sup>1)</sup>刺激間の stimulus onset asynchrony (SOA) が500msec以上のオーダーになると、実運動と区別できない（あるいは本質的には同じ）運動とはとても言えなくなる。もう少し範囲を限定すれば、200-300msec 近辺から質的な変化が生じ始めることが確認されている（e.g., Petersik, 1980; Suga & Kato, 1995）。逆に言えば、静止画像の継時的提示から運動が知覚されるといっても、すべて同質の運動視が成立しているとは限らない。

SOA が大きくなると、運動の本質—速度と軌道—が失われて、いわば「ワープする」UFO にたとえられるような運動が知覚されるようになる。物体は、ある場所から別の場所へ突如として出現するように知覚され、均質な空間（絶対空間）を特定の速度で移動しているようには見えない。つまり、運動が直接知覚されるというより、その結果として物体が移動したことを知るという体験になる。

人間は運動視が可能であることによって、衝突物を避けたり、運動する物体を追視したり、捕獲したりすることができる。その恩恵によって、運動視の機構は進化したに違いないとも考えられる。このように視覚系が物体の運動を復元する意義を考えれば、単に「何か動いた」と知覚されるだけでは不十分だと考えても、それほど偏狭ではあるまい。そこで本研究では、仮現運動の中でも、「速度や軌道が特定できる」運動の知覚を対象とすることにする。

#### 1.2 運動視において欠かせない3次元性

さて、仮現運動が生じる最低限の刺激は、フレーム内の情報を上下左右いずれかに少しずらして提示する、2枚のフレームの継時的提示である。このような2フレームから知覚されるのは、2時刻間の平均の速さを持った前額平行面上での直接運動でしかない。しかし、前述のような運動視の機能的側面を重視すれば、知覚される運動は、最終的には3次元空間内で特定される必要がある。もしすべての運動が3次元空間内で特定されるとすると、2枚のフレームから知覚される運動の速度ベクトルは未定（あるいは暫定的）のはずであり、その知覚は後続のフレームによっていかようにも変わりうることになる。つまり、2フレームを提示された段階では、視覚系は運動の検出が可能なだけである。もし第

1) 従来の実験においては、以下で説明される通り、物理的に提示される刺激の時間と復元される運動における時間とのずれが意識されたことはなかった。しかし、視覚系は SOA が一定の範囲内であれば、ある意味で勝手に、元通り復元してしまう。従って、ここで言う「時刻上隣接する」とは、物理的に提示される刺激においてではなく、「結果的に復元された運動において」隣接する刺激間において、という意味である。

3のフレームとの間でも同じ移動量と方向が観測されれば、2フレーム提示段階で暫定的に知覚された通り、前額平行面上の等速直線運動である可能性が増す。それでも、後続のフレームを含めて求められる移動量と方向が変化していけば、他の運動が知覚されることとなる。

以上のように、人間の視覚系はその記憶特性が許す限り、運動の軌道を計算できるような形で、3次元空間内で物体の運動を復元することが要請されていると考えられる。すなわち仮現運動においては、(1)複数のフレーム間で、同一物体に属する特徴点の対応関係を特定し、対応問題 (correspondence problem) を解き (Ullman, 1979)、(2)物理的に新たな入力があればそれを捕獲する形で予測的に、入力がなければその時間における物体の運動を補間できるような形でやはり予測的に機能しうる、運動に関する情報を復元することが要請されていると言えよう。

### 1.3 従来の実験パラダイムにおける問題点

仮現運動の研究は、実験やモデルで使用されるフレーム数に基づいて言えば、専ら運動視の初期過程をターゲットにしている2フレーム・パラダイムと、仮現運動に関わる過程にフル稼働を課すマルチ・フレーム・パラダイム (Suga & Kato, 1995) とに大別される。

2フレーム・パラダイムでは、前節でも考察したように本来「運動の検出」しか扱えないため、そもそも運動視の初期過程の特性しか明らかにできないわけだが、刺激の構成要素を統制しない限り、運動視以外のモジュールの関与を排除できない点に注意を要する。その点、Julesz (1971) によって発見されたランダム・ドット・キネマトグラム (random-dot kinematogram: RDK) は、フレーム数が最小単位である上に、非常にプリミティブな要素で構成されているため、2重にターゲットが絞られており、脳内でその存在が確認されている輝度分布に関する空間周波数フィルタ特性を調べる目的でも、非常に

よく使用される。

一方、マルチ・フレーム・パラダイムにおいて視覚系に課される課題は、Wallach & O'Connell (1953) 以来知られる「運動からの構造復元 (structure from motion: SFM)」と呼ばれるもので、Ullman (1979) が使用した、ランダム・ドットで構成された回転するシリンダーの2次元射影による仮現運動が有名である。

運動視に関わる計算モデルは、空間周波数フィルタをその部品として持つ「時空間フィルタリング・モデル」と、剛体性の制約 (Ullman, 1979) に基づいて運動からの構造復元を行う「特徴点マッチング・モデル」の2種類に大別できる (佐藤, 1991)。これら2種類の計算モデルとの関連で、RDKとSFMはそれぞれ質的に異なるメカニズムによって生起すると解釈されることが多いが、実験パラダイムとしてとらえる限り、マルチ・フレームによる運動視は2フレームによる運動視を包含するのであって、両者に関わるメカニズムは独立ではない。

両者の本質的な違いは、言うまでもなく、フレーム数そのものではなく、それによって構成される運動の内容である。従って、2フレーム・パラダイムで使用される刺激を単に延長して引き伸ばすことによってフレーム数を増やしても、マルチ・フレーム・パラダイム同様に運動視の全過程を扱うことは、不可能である。というのは、2フレームによる運動を延長しても、単に前額平行面上の等速直線運動が長くなるだけで、奥行き方向も含めた3次元空間での運動という質的条件を満たすことはないからである。では、2フレーム・パラダイムで使用される刺激を使えば、フレーム数を延長して増やしても初期過程だけを扱えると考えられるのも早計である。前節で考察した通り、フレーム数が増えれば、いくらか「易しい」問題と言えどもSFMを可能にする高次のメカニズムが働いてしまうからである。このような事態は、視覚系の機能を非侵襲的に研究する心理学的実験にはつきもの

の限界ではあるが、2フレーム・パラダイムによる実験結果についても、果たしてその目論見通り運動視の初期過程の特性だけをうまく取り出しているかどうか、疑問が残ると言わざるを得ない。

さて、マルチ・フレーム・パラダイムで使用される刺激は、仮現運動の過程を高次のメカニズムまでフル稼働することを課すので、刺激の構成要素を統制すれば、2フレーム・パラダイムで明らかになった運動視の初期特性を、仮現運動の過程全体の中で位置づけることが可能であると思われる。

そこで次に、マルチ・フレーム・パラダイムにおいて、2フレーム・パラダイムの成果を位置づけてみることにする。

#### 1.4 須賀の「超高速時分割ジグソー・パズル」課題

須賀 (1989) が考案した新しい実験課題「超高速時分割ジグソー・パズル」は、基本的には SFM を生起させる一連の刺激であり、マルチ・フレーム・パラダイムに則っているが、従来型の刺激に対して、次のような操作が加えられている点が新しい。まず第1に、同時刻に提示されるべき1フレームを空間的に分割し (ピースに分解)、継時的に提示することによって、提示時間と運動上の時間の一致が破壊されている。第2に、ピースの提示順を任意にシャッフルして、時刻の順序を破壊することも可能である。1フレームを何分割するか、分割したピースの順序をどのように入れ替えるかは、任意である。Fig. 1 に例示したのは、1フレームを2分割する場合である。入れ替え法としては、Suga & Kato (1995) および本研究で使用した2重交替法 (Fig. 1(b)), 混合交替法 (Fig. 1(c)) を例示した。

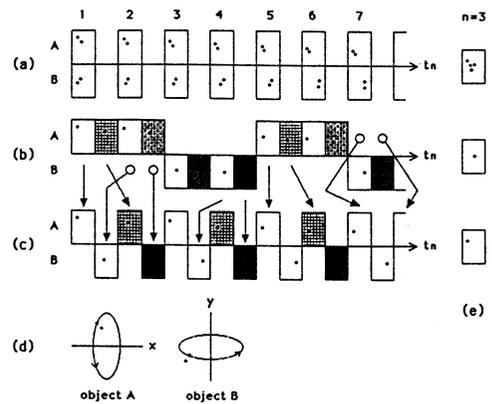


Fig. 1 Schematic representation of rapid “jigsaw puzzle solving”. (a) An example of the original sequence. In this case, two objects, A and B, consist of two dots respectively, and they are rotating in a 3D space as shown in (d). In (b) and (c), each original frame is split into two pieces and they are presented one after another. (b) The double-alternation sequence. The frames are omitted double-alternately. (c) The crossed-alternation sequence. The frames are omitted alternately and the pieces of object A are presented alternately with the ones of object B. (e) Sample images. They are displayed at time  $t_3$  in their respective cases.

視覚系は、このような「意地悪な」課題であっても、正しい順序に並び変えて運動を復元することが可能である。Fig. 1 の例で言えば、(b), (c) のような提示であっても、(a) のちょうど半分の SOA で提示すれば、(a) と全く同じ運動が知覚される。ただし、SOA は以下のような時間的制約内にあることが前提となる。

当課題を使用した Suga & Kato (1995) によれば、その時間的制約 (SOA) とは、(1) 対応する (つまり同物体・異時刻の) 2 ピースの時分割に必要な計算時間 (約 30msec), (2) 2 ピースを統合して 1 フレームを復元する時間的上限 (約 100msec), (3) 後続のピースの解釈を助けたり、入力欠損時間帯を補間するための運動情報の記憶時間 (約 200-250msec) の 3 種類である。なお、(2) の制限を持つメモリは、入力データそのもの

を一定の時間貯めておくバッファという意味で、Input Buffer (IB) と名づけられ、(3) に関しては、運動に関する仮説を記憶する装置という意味で、Perceptual Hypothesis Maintainer (PHM) と名づけられている (Suga & Kato, 1994)。

さて、(1) と (2) は、RDK が成立する時間的上限閾 (Braddick, 1974; Baker & Braddick, 1985) と下限閾 (Baker & Braddick, 1985; 佐藤, 1989) とほぼ一致しており、(3) は2フレーム提示を延長した場合に、移動限界 (Dmax) が拡大する時間的上限とほぼ一致している (Nakayama & Silverman, 1984; Snowden & Braddick, 1989a; 1989b)<sup>2)</sup>。これらを考え合わせると、RDK において明らかにされた視覚系の特性は、運動視の過程をフル稼働させれば、提示時間上 (現実) に隣接して提示された2フレーム (Suga & Kato (1995) ではピースに対応) の時分割に関してではなく、復元された運動において時間上隣接する2フレームの時分割に現れるのではないかと思われるのである。そもそも、2フレーム・パラダイムでは、両者を区別することはできない。

Suga & Kato (1995) においては、異なる物体を描いたピースが提示時間上隣接していても復元可能であるし、対応する2ピース間の移動距離 / SOA (刺激が提示される速度) が異なる条件でも (例えば, Fig. 1(b), (c)), 復元された運動の速度は同じになる。2フレーム・パラダイムが前提としているように、物理的な入力に従って時間微分を行って、次々とそれを単純に積分していくことを仮定する

だけでは、このような現象は説明できないのである。

「超高速時分割ジグソー・パズル」の知覚に見られるような、人間の視覚系の柔軟性を実現するためには、2フレームから検出できる運動の積み重ねとは質的に異なる、別種の機械的処理を想定する必要があると言えよう。

### 1.5 マルチ・フレーム・パラダイムにおけるフレーム数の問題

さて、フレーム数の問題は、本来一連のフレームによって構成される運動の、速度や軌道との関連によって議論されるべきものであろう。最初から前額平行面上の等速直線運動だとわかっているならば、2フレームで十分であるが、視覚系は速度も軌道も未知な状態から計算し始めるため、何フレームあれば速度や軌道が予測できるのかも、当然未知である。

時間的に離散的なデータを使用する場合には、入力されない部分をどのように補間するかが問題となる。従って、欠損部分が多ければ多いほど (サンプリング間隔が大きいほど)、解があいまいになるはずである。

Suga & Kato (1995) は、時間的な要因のみをコントロールすることによって、非連続な部分の量をコントロールした。つまり、SOA だけをコントロールした。扱われた物体の運動は、3次元空間内の等速回転運動であったから (Fig. 1 参照)、補間しなければならない空間的な移動量は、どの条件でも一定であった。

一方、同じ軌道を描く運動に対して、それを構成するフレーム数を何段階か用意し、さ

2) 一部の仮現運動は非常に短い空間的上限 (Dmax) によって規定される (short-range motion) と考えていた Snowden らは、フレーム数を増やすことによって同じ運動が登録され (temporal recruitment), signal-to-noise ratio が低下したり、移動限界である Dmax が増加すると考えた。彼らは、2フレーム提示の RDK を延長した実験によって、約5移動 (つまり6フレーム) までは Dmax が増加すると結論づけた。しかしそのデータを見ると、値が上限に達するまでの SOA × フレーム数は約 200-300 msec になり、PHM のような記憶装置を仮定した方がより統一的に説明できると思われる。彼らは SOA が 20 msec の条件だけ、8移動しても上限に達しなかったことを説明するために、同じドットが続いて移動しないように刺激を加工した (hetero recruitment のみにした)。結果的に約4移動 (5フレーム) で上限に達したのだが、(1) 本来10移動以上測定すれば上限に達したのではないか、(2) 3移動以上共通する運動成分をなくした場合、PHM に登録されるべき運動が3フレーム以降ないのだから、早く上限に達するのも当然ではないか、とも考えられる。広い部分で同時に現れる運動成分が登録される (home recruitment) という仮説は、確かに R 細胞の特性に対応しているように思われるが、そこからフレーム数 (× Dmax) が運動視成立の限界として設定されていると考えるのは、少々無理があると思われる。

らに提示時間を変化させることも可能である。例えば、3次元空間内で円運動する物体に対して、一周  $2\pi$  ラジアンを64フレームに分割する場合と、32フレームに分割する場合を考える。後者の1フレームの提示時間を2倍にすれば、物体の速度は前者と同じになる。ただし、後者において一定時間内に視覚系に提示されるコマ数は、前者の半分である。

離散的に採集されたデータは、必ずしも円運動と知覚される必要はない。64角形運動、32角形運動と知覚されてもよいはずである。しかし、実際に知覚される軌道は、直線ではなく円弧に相当する曲線である。ただし、コマ数をもっと減らせば—例えば2コマにしてしまえば—2点間の往復直線運動としか見えないだろう。Suga & Kato (1995) は、物理的に刺激が提示されていない時間帯を補間する能力を、一種の記憶装置を仮定することで実現しようとした。では、空間的な補間についてはどのように考えたらよいのだろうか。

前額平行面上 ( $x-y$  平面上) の回転に関しては、マカクサル MST 野における R 細胞 (回転運動に反応する細胞) が、 $2\pi$  ラジアンを8分割した円運動 (1フレームあたり  $\pi/4$  ラジアン) によって、速度勾配や要素の大きさに関わらず、実運動と同等かそれに近い大きさの反応を示すことが知られている (Tanaka et al, 1986; 1989)。R 細胞の中には、少数ではあるが、奥行き方向への回転に選択的に反応する細胞もみつかっている。R 細胞自体は、その運動方向の配置が広い視野にまたがって同時に存在している必要がある。刺激を構成する要素の密度あるいは視野に対する大きさによっては、別のタイプの細胞あるいは処理を考える必要がある。

さて、マルチ・フレーム・パラダイムによる実験結果には、少なくとも運動視の初期過程に存在すると仮定される、空間周波数フィルタの特性が反映されると思われる。ただし、2フレーム・パラダイムの場合とは違っ

て、異なる周波数にチューニングされた複数のフィルタ群全体の振る舞いが反映されることになる。なぜなら、奥行き方向の運動の射影における空間的移動量は、どのようなサンプリング・レイトをとろうとも、一定ではないからである。また、Suga & Kato (1995) による先行研究の結果から、物理的に提示された刺激間の SOA や、運動を構成するフレーム数に左右される時空間周波数特性は、運動の視認性には関与するものの、知覚された運動の速度や方向を説明することはできないだろうと予測される。

そこで、本研究では、空間的な補間を課された場合の視覚系の振る舞いについて、実験的検討を行うことにする。

## 2. 実験

### 2.1 方法

刺激は、1.4 で述べた須賀の「超高速時分割ジグソー・パズル」課題を使用する。本研究で使用した加工手続きは、2つの物体 (それぞれ30ドットで描かれた螺旋4本からなる) の回転運動 (1つは  $x$  軸周り回転、1つは  $y$  軸周り回転) を、二重交替して提示する方法 (実験1) と、単交替を混合して提示する方法 (実験2) の2種類である。どちらも、Suga & Kato (1995) で使用した刺激と同じである (Fig. 1 参照)。

ただし、本実験では、一回転あたりのフレーム数を、96, 80, 64, 48, 32, 16 の6種類で行った。フレーム数に応じて SOA を倍増 (減) すれば、復元される物体の回転速度は同じとなる。また、フレーム数と SOA が同じ条件であれば、実験1と実験2の刺激上の物体は同じ速度で回転して見えるはずであるが、加工手続きの違いによって、実験1では時分割すべき (対応する) ピースの空間的間隔が実験2の半分である<sup>3)</sup>。つまり、時分割すべきピース間の回転角 (ラジアン) は、

3) 厳密に言えば、二重交替法 (Fig. 1(b)) では、対応するピース間の距離が一定ではないが、ここでは、引き続いて提示される短距離のピース間を基準として考えている。

実験1では、 $\pi/48$ ,  $\pi/40$ ,  $\pi/32$ ,  $\pi/24$ ,  $\pi/16$ ,  $\pi/8$ であるのに対して、実験2では、 $\pi/24$ ,  $\pi/20$ ,  $\pi/16$ ,  $\pi/12$ ,  $\pi/8$ ,  $\pi/4$ となる。なお、時間的間隔についても、実験1は実験2の半分である。従って、SOAが同じ条件であれば、復元される物体の回転速度は等しくなる。

SOAは、2から54msecまで2msec間隔(27種類)で行った。各条件ごとに4試行(上昇系列が2試行, 下降系列が2試行)で行った。総試行数は、648(=6×27×4)試行である。

刺激作成および制御はEPSON 386GSによって行い、刺激提示はKIKUSUI COSI611 X-Y DISPLAY (P31)を使用した。

実験には、正常な視力(矯正)をもつ1名(筆者)が参加した。被験者はディスプレイから約60cmの距離から観察した。頭部は固定せず、観察時間も特に限定しなかった。

被験者の課題は、2つの回転する物体が知覚された場合、それぞれを構成する螺旋の本数を答えることである。

## 2.2 結果

結果は、運動の知覚が質的に変化する閾を、ピース間のSOA(msec)で求めた。質的な変化とは以下の通りである。

- (1) 多重から2重に (multiple/double)
- (2) 2重から正答に (double/correct)
- (3) 正答からあいまいな運動の知覚に (correct/ambiguous)
- (4) あいまいな運動の知覚から運動の知覚不成立に (ambiguous/meaningless)

「多重」とは、物体を構成する螺旋の本数が不明であることを意味し、「2重」は8本で、「正答」は「4本」で構成されていると知覚されたことを意味する。また、「あいまいな運動」とは、「2つの物体が回転している」という運動の知覚そのものが、不安定になったことを意味する。(1)は8本に見える下限閾、(2)は正答の下限閾に相当し、(3)、(4)はその間に運動視の上限閾が存在することになる。

各閾であるSOAとフレーム数との関係をグラフに表したのが、Fig. 2, 3である。

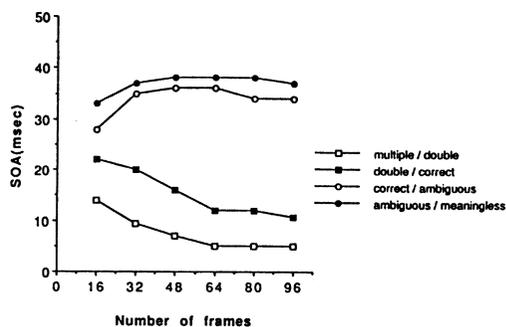


Fig. 2 The results of Experiment 1. The four thresholds are plotted against the number of frames per one revolution.

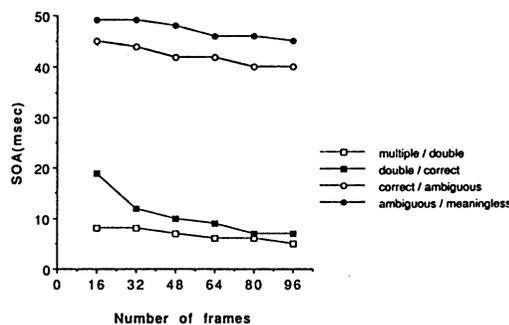


Fig. 3 The results of Experiment 2. The four thresholds are plotted similarly to Fig. 2.

まず正答の上限閾に相当する(3)および(4)は、実験1の16フレーム条件を除けば、実験1, 2ともに、フレーム数による差はほとんどなかった。Suga & Kato (1995)では、本刺激における上限閾は時間的な記憶限界によって解釈されたが(ただし、実験1はIBの上限に、実験2はPHMの上限に依存)、本研究でもフレーム数によらずほぼ一定であったことから、この解釈は支持されたと言えよう。なお、実験1の16フレーム条件では、運動が速すぎて、上記の(3)の質的な差そのものが非常にあいまいにしか知覚されなかった。一方、物体の回転速度は等しではあるが、いが時分割すべきピース間の回転角

が大きい実験2においては、16フレーム条件でもこのような特徴は見られなかった。

次に、(1) および正答の下限閾である (2) においては、フレーム数が少ない条件で SOA が大となった (ただし、実験2では (2) のみ)。この結果は、仮現運動の知覚における Korte の第3法則 (刺激強度が一定の場合、フレーム間の空間的距離が大であれば、SOA も大) と一致する。しかし、その関係は単純な比例関係にはない点に注意を要する。

フレーム数の効果は、特に、時分割すべき (つまり対応する) ピース間の回転角が小さい実験1において顕著であった。これは、物体の回転速度だけではなく、対応する2ピースが提示される速さが影響していることを示している。

さらに、実験1と2の間で、対応するピース間の空間的距離、時間的距離がともに同一の条件間を比較すると (つまり、フレーム数に関して、実験1と2を2:1の条件で比較すると)、知覚される運動の速度は異なるにも関わらず、下限閾はほぼ同じであることがわかった (Fig. 4)。2種類の下限閾を比較してみると、multiple/double: double/correct は、ほぼ1:2になっている。これは、2重から正答に移行するに当たっては、時分割すべきピース間の時間的・空間的距離が、ちょうど半分になることと呼応する。以上の結果から、運動の視認性については、刺激の時空間周波数特性でうまく説明できることがわかった。しかし、刺激の時空間周波数特性は同じでも、知覚される運動の速度は異なる場合があることから、それですべては説明できないことも確認された。

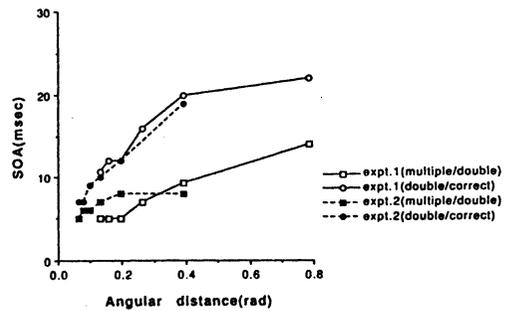


Fig. 4 Relationships between threshold SOA and angular distance of corresponding pieces as determined from data in Fig. 2 and Fig. 3.

### 2.3 考察

まず全体的に、フレーム数が減少すると下限閾が上昇したことについて、これは、同じ時間間隔であれば、空間的距離が大きいほど継時的に提示される刺激間の時分割 (本実験では統合も含む) が難しくなることを意味する。なお、Petersik (1980) による一般的な SFM の実験においては、フレーム数の効果に有意差はなかったが、それは、SOA に関して閾より大きい値 (20-700msec) を使用したためと考えられる。つまり、1回転あたりのフレーム数は、知覚の質的变化に関する閾そのものに影響を与えるだけで、それ以外の SOA における知覚内容に大きな影響は与えないのである。

閾付近の知覚に対する影響については、次のようなことが考えられる。一般に、高空間周波数チャンネルは低時間周波数特性を持ち、低空間周波数チャンネルは高時間周波数特性を持つと考えられている (Kulikowski & Tolhurst, 1973; Tolhurst, 1975)。フィルタリング・モデルに基づいて言えば、前述の結果は、空間的距離の増大によってピースが一般的に速く提示され、高空間周波数チャンネルの反応が全体的に低下する結果、時分割/統合が難しくなると予想できよう。しかし、それだけでは、なぜ間に異なる物体に関するピースが入っていたり、物体の回転速度とは

異なる速さで刺激を提示しても、その位相のずれを統合できるのかは、説明できない。

物体の構造と運動をワンショットで復元する須賀(1992)の計算モデルでは、同一物体に属する異なる点間の距離と、異なる時刻に属する同一点間の距離とは、計算上全く区別されない。しかし、対応問題を解くために悉皆律を適用する際、近傍点から候補を捜すアルゴリズムを適用すると、フレーム間の空間的距離が大きいほど解に到達するまでの試行回数も増大する。試行回数の増大が何らかの形で仮現運動成立を妨げる要因になり得るとすれば、本実験によって、脳内でも近傍点との対応を優先するメカニズムが実現されているという可能性が示唆されたと言えよう。

次に、回転速度が一定になるように条件間を比較すると、フレーム数が少ない場合ほど、下限閾が小さいことについて、空間周波数チャンネルの特性に則して言えば、フレーム数が少なければピース間の空間的距離が大きくなるため、高空間周波数チャンネルによる誤反応が減少し、高時間周波数特性を持つ低空間周波数チャンネルの反応が有効利用されたためだと考えられるかもしれない。しかしこの解釈も、対応しないピース間の空間周波数チャンネルの反応をどのように処理すべきかという根本的問題が残される。

Ullman(1984)、Grzywacz & Hildreth(1987)による計算モデルでは、1回転あたりのフレーム数が減少するほど、解への収束時間が長くなったり、解が不安定になる。彼らの計算モデルにおいては、時刻と時間の区別はないと考えるならば、本研究におけるこの結果と一致すると考えられるかもしれない。これらの計算モデルでは、直接z軸(奥行き方向)の値を復元するのではなく、剛体性の制約に基づいて物体を構成する要素間の距離の変化が最小になるようにzを計算する方法をとっており、(incremental rigidity scheme)、フレーム間の空間的距離が大きければ

大きいほど、それに抗して不変である物体の構造を表す値数が早く収束する。しかし、これらの計算モデルは対応問題が解かれていることを前提にしているため、一般に人間の運動視の(特に初期)過程には対応しないと考えられている(Ullman, 1981)。

須賀(1992)とUllman(1984)らの計算モデルは、どちらもマッチング・モデルに属するが、後者は、「運動からの構造復元(SFM)」と言うより「構造からの運動復元」と言うべき逆の戦略を取っており、フレーム数の効果に関しても両者は全く逆の結果を導いている。しかし、モデルの適用レベルを変えることによっては、前述のように、両方同時に適用することも可能なように見えるのは、大変奇妙である。しかし、このパラドクシカルな説明は、森(1992)による「多重表現の統合は、排他原理に従う」という仮説を思い起こさせる。この仮説は、運動視においては、「全体運動を最小にする処理系」と「内部運動を最小にする処理系」とが各時刻では排他的に働くという仮説となる。須賀のモデルは両者をワン・ショットで計算してしまうが、Ullmanらのモデルはまさに後者に相当する。人間の脳内では、同じ問題を反対側から解決する戦略が、両方排他的に実現されることによって、柔軟な計算を機械的に行っているのかもしれない。

最後に、ピース間の空間的距離および時間的距離がどちらも同一の条件間で比較すると、物体の運動の速度は異なっているにも関わらず、ほぼ同じ視認性を持つということについて、ここで言うピース間も、復元された運動において隣接するピース間をさす。本実験で確認されたことは、時間的・空間的サンプリング・レイトに左右される時空間周波数特性は、運動の視認性を左右する要因ではあるが、知覚された運動そのもの(本実験では特に、速度)を説明することはできないということである<sup>4)</sup>。Watson et al(1986)によ

4) Suga & Kato(1994)は、行きつ戻りつしつつ進む方式(「3歩進んで2歩下がる」提示)でもフレーム操作を行った実験を実施しているが、この場合も1様の時間的制約内であれば、「行きつ戻りつ」していることは知覚されず、一定方向の運動が知覚される。

る仮現運動の視認性に関する研究も、同様の限界が指摘されている。本実験では特に、刺激の時空間周波数特性が仮現運動の全体の過程に与える影響について、具体例を提供したと言えよう。

### 3. まとめ

本研究では、「超高速時分割ジグソー・パズル」課題を使って、奥行き方向の回転に関する仮現運動を構成するフレーム数の効果、つまり空間的サンプリング・レイトの問題を実験的に検討した。

結果は、SFMに関する先行研究とほぼ一致するものであった。運動視の初期過程の部品として仮定される空間周波数チャンネルの特性が、本実験の結果でも反映されていると考えられるが、その特性だけでは視覚系の高次の出力（例えば、物体の運動速度）を説明できないことが確認された。

現在提案されているフィルタリング・モデルは、基本的に、フィルタ間の相互作用・統合過程を今後の課題として残している。その中で、緒方・佐藤 (1989a; 1989b) は、空間周波数チャンネル間の相互作用を考慮した運動視のモデルを提案したり、フィルタリング・モデルとマッチング・モデルの両過程を含んだモデルを提案している。

このように、両モデルは2つの独立した(並列の)モジュールのように扱われることが多いのだが、果たしてそう言いきれぬのだろうか。フィルタリング・モデルの出力を統合していくと、結果的にマッチング・モデルが適用できるというように、本来記述レベルが異なるモデルだとは言えないのだろうか。これは、ボトム・アップ式の情報処理とトップ・ダウン式の情報処理との統合に相当する問題だと思われるが、脳内でこれらがどのように実現されているかを解明するには、まだまだ両者の懸隔は広いと思われる。

トップ・ダウン式の情報処理を考えると、空間的サンプリング・レイトの問題は、運動

の軌道（あるいは空間的周期）と無関係ではない。今後は、軌道の形や空間的周期との関係を検討する必要があるだろう。また、計算モデルにおける計算量の問題はどのように定義されるのか、その場合、軌道の形や空間的周期、物体の構造に対する要素の数（ドット数）などと、空間的サンプリング・レイトとの関係はどのように考えられるのかなどが問題となろう。生理学的知見などとの対応も合わせて、より総合的な検討が期待される。

## 引用文献

- Baker, C. L., & Braddick, O. J. 1985 Temporal properties of the short-range process in apparent motion. *Perception*, **14**, 181-192.
- Braddick, O. J. 1974 A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, **14**, 519-527.
- Grzywacz, N. M., & Hildreth, C. 1987 Incremental rigidity scheme for recovering structure from motion: position based versus velocity-based formulations. *Journal of Optical Society of America*, **A4**(3), 503-518.
- Julesz, B. 1971 *Foundation of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kulikowski, J. J., & Tolhurst, D. J. 1973 Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision. *Journal of Physiology*, **232**, 149-162.
- 森晃徳 1992 視覚の運動的基礎. 認知科学ハンドブック. Pp. 570-578. 共立出版株式会社.
- Nakayama, K., & Silverman, G. H. 1984 Temporal and spatial characteristics of the upper displacement limit for motion in random dots. *Vision Research*, **24**, 293-299.
- 緒方昌美・佐藤隆夫 1989a 空間周波数チャンネル間の相互作用を考慮した運動視知覚モデル. 電子情報通信学会論文誌 D-II, J-73-D-II, 207-214.
- 緒方昌美・佐藤隆夫 1989b 2段階処理による運動物体の形状知覚モデル. 電子情報通信学会技術研究報告, PRU 89-44.
- Petersick, J. T. 1980 The effects of spatial and temporal factors on the perception of stroboscopic rotation simulations. *Perception*, **9**, 271-283.
- 佐藤隆夫 1989 ランダムドット仮現運動におけるドット密度の効果. 日本心理学会第53回大会発表論文集, 602.
- 佐藤隆夫 1991 仮現運動と運動知覚のメカニズム. 心理学評論, **34**, 259-278.
- Snowden, R. J., & Braddick, O. J. 1989a The combination of motion signals over time. *Vision Research*, **29**, 1621-1630.
- Snowden, R. J., & Braddick, O. J. 1989b Extension of displacement limits in multiple-exposure sequences of apparent motion. *Vision Research*, **29**, 1777-1787.
- 須賀哲夫 1989 理論心理学アドベンチャー. Pp. 161-168. 新曜社.
- 須賀哲夫 1992 3次元構造の知覚的復元について. 日本女子大学紀要人間社会学部, **2**, 133-141.
- Suga, T., & Kato, C. 1995 Spatio-temporal properties in multi-framed apparent motion using frame-splitting procedure. 日本基礎心理学研究, **13**, 69-79.
- Suga, T., & Kato, C. 1994 Rapid "Jigsaw puzzle solving": A computational theory of temporal limits in apparent motion. *JWU Laboratory Report*.
- Tanaka, K., Fukuda, Y., & Saito, H. 1989 Underlying mechanisms of the response specificity of expansion/contraction and rotation cells in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, **62**, 642-656.
- Tanaka, K., Hikosaka, K., Saito, H., Yukie, M., Fukuda, Y., & Iwai, E. 1986 Analysis of local and widefield movements in the superior temporal visual area of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, **6**, 134-144.
- Tolhurst, D. J. 1975 Sustained and transient channels in human vision. *Vision Research*, **15**, 1151-1155.
- Ullman, S. 1979 The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London B*, **203**, 405-426.
- Ullman, S. 1981 Analysis of visual motion in biological and computer systems. *Computer*, **14**, 57-69.

- Ullman, S. 1984: Maximizing rigidity: the incremental recovery of 3-D structure from rigid and nonrigid motion. *Perception*, **13**, 255-274.
- Wallach, H., & O'Connell, D. N. 1953: The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, **45**, 205-217.
- Watson, A. B., Ahumada, A. J., & Farrell, J. E. 1986: Window of visibility: a psychophysical theory of fidelity in time-sampled visual motion displays. *Journal of Optical Society of America*, **A3**(3), 300-307.