

# 博士論文

論文題目 運動オブジェクト追跡に関する視覚運動処理

氏名 金谷 英俊

## 要約

本論文は、視野内を運動し続ける視覚対象（オブジェクト）を追跡するオブジェクト追跡に寄与する視覚処理過程について、実験心理学的に検討を行ったものである。このオブジェクト追跡に関しては、視覚的注意などの高次の視覚機能に焦点を当てた研究が多く（e.g., Cavanagh & Alvarez, 2005）、より低次の視覚処理段階において運動オブジェクトの時空間的変化を検出する運動処理過程、ならびに抽出された運動情報がオブジェクト追跡に寄与しているか否かについては、これまで十分な検討が行われてこなかった。そこで本研究では、オブジェクト追跡課題に対して ISI (inter-stimulus interval) の挿入、1 次・2 次運動刺激、属性内・属性間運動刺激の使用などの実験操作を適用することで、意識的な視覚処理であるオブジェクト追跡に低次の運動情報が寄与するか否かについて検討を行った。また、運動情報が寄与するのであれば、その運動情報が、視覚運動処理メカニズムのうちいずれのメカニズム由来のものか、ならびに注意など高次の視覚機能とどのような関係にあるかも併せ検討した。

第 2 章では、視野内の複数の運動オブジェクトを追跡する Multiple Object Tracking 課題（以下、MOT 課題）を用い、低次の運動情報がオブジェクト追跡に寄与しているか否か、および高次の注意処理との関係について検討を行った。低次の運動処理過程である 1 次運動検出メカニズムのはたらきに影響を及ぼすとされる ISI を MOT 課題の仮現運動刺激へ挿入した場合に、ISI がオブジェクト追跡に与える効果について調べた。その際に、課題成績を上下視野に分けて分析し、課題成績の上下視野非対称性に関する検討も併せ行った。実験 1 では、MOT 課題の輝度定義の仮現運動刺激を上下視野に呈示し、挿入する ISI を 0-133.3 msec の 5 段階に変化させ、ISI 挿入の効果を検討した。その結果、100 msec 程度の ISI により課題成績が低下した。加えて、ISI を挿入しない場合には課題成績が下視野優位となったが、ISI を挿入すると特に下視野で課題成績が大きく低下し、100 msec 以上の ISI の挿入により下視野優位性は消失した。実験 2 では、1 次の視覚属性である輝度に加え、注意の関与する運動処理により運動が検出されると考えられている、2 次の視覚属性であるコントラストまたは運動で定義した MOT 課題刺激に対し、挿入する ISI の値を 5 段階に変化させた。その結果、輝度定義条件に加えてコントラストならびに運動定義条件でも、ISI の増加とともに成績が低下した。上下視野別の分析では、輝度定義条件では実験 1 と同様の結果が得られたが、2 次運動条件では

コントラスト・運動間で一貫した結果は得られなかった。実験3では、高速呈示文字列のなかからターゲット文字を検出する文字検出課題（RSVP 課題）によって認知的負荷をかけた二重課題状況下で MOT 課題（輝度定義・コントラスト定義・運動定義）を行い、処理容量に限界があると考えられている注意とオブジェクト追跡との関係について検討を行った。その結果、どの属性条件においても二重課題による負荷を与えることにより課題成績が低下した。さらに条件別の分析より、輝度定義刺激とコントラスト定義刺激において、ISI を挿入しない場合に下視野では RSVP 課題による負荷を与えても MOT 課題成績が低下しにくく、逆に上視野でより大きく低下した。

以上の実験より、100 msec 程度の ISI 挿入によって MOT 課題の成績が低下することが示された。この MOT 課題に対する ISI の効果は、1 次運動検出の時間特性と概ね一致することから、低次の運動情報がオブジェクト追跡に寄与している可能性を示唆する結果であると解釈できる。2 次刺激でも ISI の効果が認められたことは、想定される運動処理が1 次運動刺激だけでなく2 次運動刺激も処理できる可能性を示唆するものであろう。しかしながら、注意にもとづく運動処理が関与するとされる2 次運動刺激でも ISI の効果が認められたこと（実験2, 3）、二重課題による負荷を与えると課題成績が低下したこと（実験3）、そして課題成績に1 次運動検出にはみられない上下視野差が存在することは（実験1-3）、オブジェクト追跡における注意処理の特性を示す結果であり、ISI が効果を及ぼしたのは注意処理であるとも解釈可能である。加えて、視野ごとの分析でも運動処理の寄与については明確にはならなかった。以上のことから、本章の実験結果は、オブジェクト追跡に低次の運動情報が寄与するか否かを明らかにするものとはならなかった。

第3章では実験課題を換え、Verstraten, Cavanagh and Labianca (2000) が用いたものと同様の注意追跡課題により、オブジェクト追跡が可能となる刺激の時間周波数の上限値（以下、時間周波数限界）を指標として、オブジェクト追跡に運動情報が寄与するか否かを検討した。実験4では、オブジェクトを定義する視覚属性のうち、1 次属性として輝度、2 次属性として運動、両眼視差、フリッカー、およびコントラストを用い、各属性におけるオブジェクト追跡の時間周波数限界を測定した。また、刺激の2つのフレームのオブジェクトが同一の属性で定義された属性内オブジェクト追跡条件に加えて、2つのフレームのうち一方のオブジェクトが輝度で、他方のオブジェクトが2次のいずれかの属性で定義されたオブジェクトのフレームを交互に呈示する属性間オブジェクト追跡条件を設定した。その結果、属性内条件では刺激の種別にかかわらず時間周波数限界は約4-5 Hz となり、また、属性間条件では属性内条件よりも時間周波数限界が低速

側にシフトし 2-3 Hz 程度となった。すなわち、両者の時間周波数限界の間には明確な相違が認められた。この結果は、属性内オブジェクト追跡と属性間オブジェクト追跡では、寄与しているメカニズムが少なくとも部分的に異なっていることを示している。この点を明らかにするため、実験5では、実験4と同じ属性の組み合わせを用いて、2つの孤立オブジェクト刺激間の往復直線運動を用いて古典的仮現運動知覚の時間周波数限界を測定し、オブジェクト追跡の時間周波数限界との比較を行った。仮現運動知覚率が50%となる時間周波数を仮現運動知覚の時間周波数限界と定義したところ、属性内、属性間にかかわらず約 4-6 Hz 程度と、実験4の属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界と近い値となり、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である 2-3 Hz とは一致しなかった。実験6では刺激中に運動成分が存在しない刺激を用い、注意の自発的な移動の時間限界を測定した。こうした事態における注意の移動時間限界は 2-3 Hz 程度、すなわち実験4における属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界とほぼ一致する値となった。さらに実験7では、属性間刺激におけるオブジェクト追跡と仮現運動知覚の時間周波数限界の結果の相違について検討するために、実験4で用いた多義性のある刺激配置パターンに対する仮現運動知覚の時間周波数限界を測定した。その結果、属性間刺激でありかつ多義性のある場合には、仮現運動知覚が生じにくいことが明らかとなった。

以上の結果をまとめると、属性内刺激ではオブジェクト追跡の時間限界と仮現運動知覚の時間限界が近いものとなり、属性間刺激ではオブジェクト追跡の時間限界と注意の時間限界がほぼ一致した。オブジェクト追跡には注意が関与しており、時間周波数が 3 Hz 程度まではこの注意が機能し得るため、注意のみでもオブジェクト追跡の遂行が可能となっていることを示すものと考えられる。特に属性間オブジェクト追跡では多義性のある刺激からの運動情報の抽出が困難であり、結果としてオブジェクト追跡に対する注意の関与が大きくなると考えられる。それに対し、時間周波数が 3 Hz 以上の場合のオブジェクト追跡については注意の要因で説明することは難しく、刺激の属性が 1 次、2 次いずれであっても、刺激から運動情報が抽出される属性内刺激であれば、オブジェクト追跡に比較的低次の運動情報が寄与している可能性を示唆するものと解釈できる。

本研究の結果は以下の3点である、(1) 属性内運動に対するオブジェクト追跡は、ISI 挿入に対する感受性が低い、(2) 二重課題により注意負荷を課した場合には課題成績が低下する、(3) 属性内運動を用いたオブジェクト追跡の時間限界は仮現運動の時間限界とほぼ一致し、属性間運動を用いた場合の時間限界は注意の自発的な移動の時間限界とほぼ一致する。以上の結果を総合的に考えると、これまで想定されてきた自発的・能動的な注意にもとづく高次の視覚処理に加え、それとは異なる処理過程、おそらくは比較

的初期の視覚運動処理メカニズム由来の運動情報がオブジェクト追跡に寄与していることを示すものと解釈することができる。また、オブジェクト追跡に寄与する運動処理過程に関して、本研究の実験より、1次刺激と2次刺激に対する処理が類似した傾向をもつことが示された。この結果については、本研究で用いたようなオブジェクト刺激に対しては、輝度定義刺激であっても1次運動検出メカニズムでは処理されず、それとは異なる、2次運動刺激を処理するメカニズムと同一のメカニズムで扱われていることを示唆するものと考えることができる。

# 目次

## 第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	オブジェクト追跡課題とは	3
1.3	オブジェクト追跡モデルおよびその関連研究	9
1.4	オブジェクト追跡における運動情報の利用可能性	17
1.5	オブジェクト追跡に寄与し得る視覚運動処理メカニズム	20
1.6	本研究の目的	29

## 第2章 MOT 課題における視覚運動処理の寄与と視覚的注意との関係

2.1	第2章の目的	31
2.2	実験1：MOT 課題の仮現運動刺激に対する ISI 挿入の効果	36
2.2.1	目的	36
2.2.2	方法	36
2.2.3	結果	41
2.2.4	考察	44
2.3	実験2：MOT 課題に対する2次運動刺激および ISI 挿入の効果	48
2.3.1	目的	48
2.3.2	方法	48
2.3.3	結果	53
2.3.4	考察	57

2.4	実験3：MOT 課題に対する二重課題による認知的負荷の影響	60
2.4.1	目的	60
2.4.2	方法	61
2.4.3	結果	65
2.4.4	考察	72
2.5	第2章のまとめと考察	73
2.5.1	注意処理および運動処理に対する ISI の効果	74
2.5.2	注意処理および運動処理と下視野優位性との関係	76
2.5.3	MOT 課題に対する1次運動検出メカニズムの寄与	79

### 第3章 注意追跡課題における視覚運動処理と視覚的注意との関係

3.1	第3章の目的	81
3.2	実験4：属性内・属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界の検討	85
3.2.1	目的	85
3.2.2	方法	85
3.2.3	結果	93
3.2.4	考察	95
3.3	実験5：属性内・属性間の古典的仮現運動知覚の時間周波数限界の検討	100
3.3.1	目的	100
3.3.2	方法	100
3.3.3	結果	102
3.3.4	考察	105
3.4	実験6：視覚的注意の自発的移動の時間限界の検討	107
3.4.1	目的	107
3.4.2	方法	108
3.4.3	結果と考察	110

3.5 実験7：多義的仮現運動の運動知覚の時間周波数限界の検討	113
3.5.1 目的	113
3.5.2 方法	113
3.5.3 結果と考察	114
3.6 第3章のまとめと考察	118
3.6.1 注意追跡課題に対する運動処理の寄与の検討	119
3.6.2 注意追跡課題に寄与する運動処理メカニズムの可能性	123

## 第4章 総合考察

4.1 オブジェクト追跡に対する視覚運動処理の寄与	126
4.2 オブジェクト追跡に関与する注意処理の特性	131
4.3 オブジェクト追跡に寄与する視覚運動処理の特性	135
4.4 オブジェクト追跡に寄与し得る視覚運動処理メカニズム	138
4.5 オブジェクト追跡モデルにおける視覚運動処理の役割	143

引用文献	147
------	-----

Appendix	159
----------	-----

謝辞	165
----	-----



# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

我々が「ものの動きを知覚する」ことは、外界を認識するうえで非常に重要な役割を果たしている。道路を走る自動車や歩道を歩く歩行者が移動すると、その対象が網膜に映った像も位置を変化させる。また、我々が頭部や身体を動かすことで、静止している人や建物であっても網膜上ではその位置を変化させる。このように、我々の視環境では「動き」は常に存在するものであり、我々が外界を認識するためには、視覚系は常にこの「動き」に対処していく必要がある。

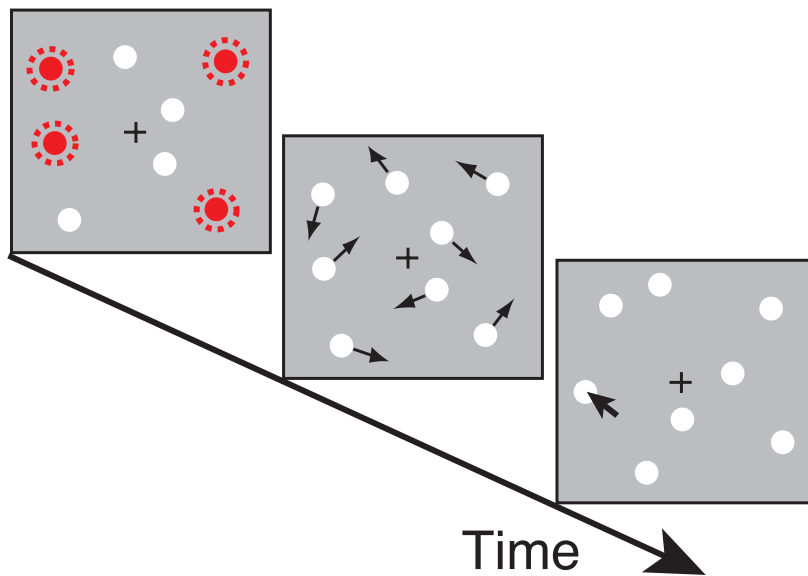
運動処理の基本的な役割は、視野内を動く対象の運動方向や運動速度を正しく捉えることであるが、運動処理の役割はそれだけにとどまらず、運動している対象を背景から分離して知覚させたり、空間的・時間的にバラバラになっている対象を1つの対象としてまとめあげたりということも行っている（佐藤, 1995）。特に後者に関して、脳の損傷によって運動の知覚が選択的に阻害された運動盲（motion blindness）の患者が、「遠くを走っていた車が、次に気づいた瞬間にはすぐ近くにまで迫っていた」と語ったように、運動が知覚できない場合の対象の知覚は間欠的な、静止イメージが連続呈示されたものにとどまってしまうことが知られている（Zihl, von Cramon, & Mai, 1983; Zihl, von Cramon, Mai, & Schmid, 1991）。このことから、運動情報が得られない場合

には、網膜に映し出される連続的な入力が入力がサンプリングされた、間欠的な知覚が得られるものと推測される。それに対し、健常な運動知覚をもつ観察者が対象の運動を間欠的に知覚するということはない。サンプリングされた対象の位置情報からトップダウン的に運動を推測するといった複雑な認知処理を行っている可能性もあるが、むしろ、ボトムアップの視覚運動処理メカニズムが視覚対象の運動を捉え、間欠的な位置情報の間に運動を内挿することにより、位置情報同士がつけぎられてひとつにまとまり、滑らかな運動知覚が実現していると考えられる。以上のことから、対象の位置を瞬間々々で把握するだけでなく、運動情報を獲得することが、視覚運動対象の認識において重要な役割を果たしていることがみてとれる。

日常生活のなかで我々が知覚している視覚対象は、運動して位置を変化させるとともに色や形などの知覚的特性を変化させ続けている。対象が動けば、太陽や照明の光の当たり方、観察者が対象を見る観察角度も変化することにより、観察者が知覚する対象の明るさや色、形なども同時に変化する。また、歩道を歩いている人が停車している車の陰に入ってしまう見えなくなり、その少し後にまた出現するなど、観察者や対象の状況に応じて対象の視覚入力が遮断されてしまうこともあり得る。しかし我々の視覚系は、そのような不安定な状況下にあっても、その視覚対象を同一のものとして知覚することが可能である。時間とともに変化する視覚情報を如何にしてまとめあげ、対象の同一性を保持しているかという問題は、時間的統合問題 (temporal binding problem, Treisman, 1996) もしくは時間的群化問題 (temporal grouping problem, e.g., Gepshtein & Kubovy, 2000) と呼ばれている。

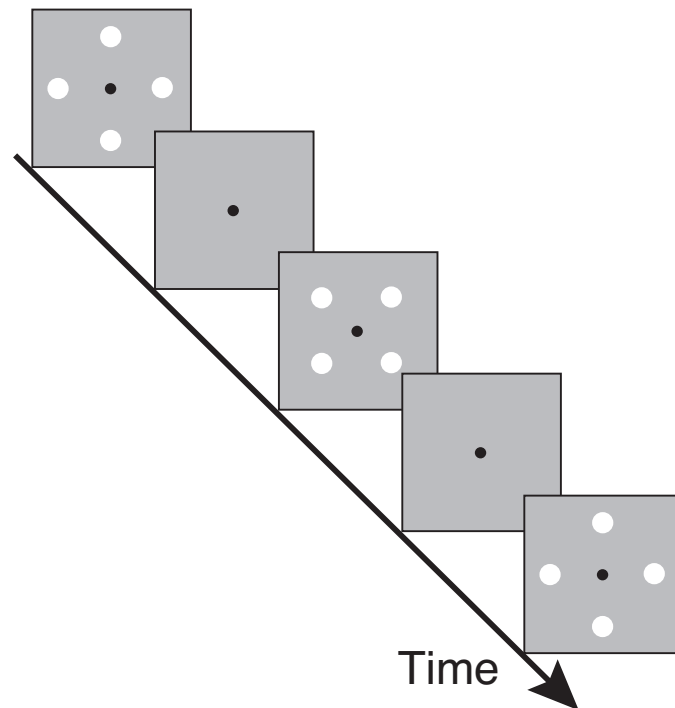
## 1.2 オブジェクト追跡課題とは

この時間的統合問題について調べるために、視覚心理学では、円や四角形などの形状をもった視覚対象（以後、本論文ではこれをオブジェクトと呼ぶ）が視野内を運動している場合に、オブジェクトを一定時間追跡する課題を用いた検討が行われてきた。その追跡課題の1つが、視野内を運動する複数のオブジェクトを一定時間追跡する、Multiple Object Tracking (MOT) 課題である (Pylyshyn & Storm, 1988)。図 1-1 に示したような代表的な MOT 課題では、刺激呈示領域内に複数のオブジェクトが出現し、そのうちのいくつかの色が変わるもしくは点滅することで、観察者が追跡すべきターゲットとして指定される（以後、オブジェクト追跡課題において、追跡するように指定されたオブジェクトをターゲットと呼び、ターゲット以外のオブジェクトをディストラクターと呼ぶ）。その後、元の状態に戻ったターゲットを含む全オブジェクトが、指定された領域内でそれぞれランダムな方向に動き始める。観察者の課題は一定時間（数秒～十数秒間）運動するターゲットを追跡し続け、オブジェクトの運動が停止した時点で自分の追跡していたターゲットがどれであったのかを報告するというものである。基本的に、運動するオブジェクトは視覚的に同一の属性（色や形など）をもっているため、ディストラクターがターゲットと取り違えられてしまう可能性が起り得る。これは仮現運動の運動対応問題における誤対応（false match）に相当すると考えられる。どのような実験条件で MOT 課題の成績が変化するかを調べることで、オブジェクト追跡の処理過程について検討を行うことが可能である。



**図 1-1 Multiple Object Tracking (MOT) 課題の刺激および試行の流れの模式図。** 図の例では、刺激呈示領域内に 8 個のオブジェクトが出現し、そのうち 4 個の色が赤く変化することで、その試行において観察者が追跡すべきターゲットとして指定される。その後、元の状態に戻ったターゲットを含む全オブジェクトが、呈示領域内でそれぞれランダムな方向に動き始める。観察者は注視点（図中では「+」）を注視したまま一定時間ターゲット 4 個を追跡し続け、オブジェクトの運動が停止した時点で、自分が追跡していたターゲットをマウスポインタにより報告する。

この MOT 課題に加え、近年注目されている運動オブジェクトの追跡課題として、Verstraten, Cavanagh, and Labianca (2000) によって考案された注意追跡課題 (attentive tracking task) がある。この課題は、Wertheimer が見出した仮現運動知覚の現象をもとにしたものである (Wertheimer, 1912, translated by Shipley, 1961)。Wertheimer は、2 本の線分が十字形に交わるフレームと×字形に交わるフレームを交互に呈示すると、受動的に観察している場合には時計回り、もしくは反時計回りに回転して揺れ動く仮現運動 (ロッキングモーション) が知覚され運動方向は多義的になるが、時計回りか反時計回りどちらか一方向に線分が移動するという「注意の構え」を与えると、線分がいずれかの方向に回転する仮現運動が知覚されやすくなることを見出した。Verstraten et al. (2000) はこの現象をもとに、刺激呈示領域の中央に配置された注視点を中心として、4 個の円形のオブジェクトを十字形もしくは×字形を成すように配置した刺激を考案した (図 1-2)。彼らの刺激も Wertheimer のものと同様に、観察時にはオブジェクトが十字形に配置されたフレームと、×字形に配置されたフレームが、inter-stimulus interval (ISI) を挟んで交互に呈示された。この場合、オブジェクトが、出現するごとに最も近距離にある隣のオブジェクトへ移動していくと考えると、オブジェクトが時間とともにいずれかの回転方向に運動していくことになる。しかしこのような刺激配置の場合、あるオブジェクトと、それと対応し得るオブジェクトは 2 つあるため、受動的に刺激を観察しただけでは、知覚される運動方向は曖昧なものになってしまう。Verstraten et al. (2000) は、こうした刺激に対して安定した運動知覚が成立するのは、視覚的注意 (visual attention, 以下、本論文では注意と呼ぶ) によって、いずれかの回転方向に



**図 1-2 注意追跡課題の仮現運動刺激パターンの模式図.** 4 個のオブジェクトが十字形に配置されたフレームと, ×字形に配置されたフレームが, inter-stimulus interval (ISI) のフレームをはさんで交互に呈示される. Verstraten, F. A. J., Cavanagh, P., & Labianca, A. T. (2000). Limits of attentive tracking reveal temporal properties of attention. *Vision Research*, 40(26), 3651-3664. Figure 2 (p. 3653) を参考にして著者が作成した.

じてオブジェクトが選択されることによると主張した。

MOT 課題と注意追跡課題に関して、2つの問題を明らかにする必要がある。1つは、ある方向に動き続けるオブジェクト刺激に対して、どのような視覚処理を行うことでオブジェクトを時空間的に統合し続けて「運動オブジェクト」として知覚していくか、という時間的統合の問題である。2つ目は、一定の時空間範囲内に同一形状をした複数のオブジェクトが存在する場合、どのようにして誤対応を無くしオブジェクトの個別化を行っていくか、という個別化の問題である。視覚系がどのようにしてこの2点の問題を解決し、追跡するオブジェクトの同一性を保持しているかについて、多くの研究が実験的検討を行っている。

Pylyshyn and Storm (1988) は、単一焦点である注意 (e.g., Posner, 1980; Posner, Snyder, & Davidson, 1980) が、ある空間位置に向けられ、その位置に存在するターゲットの位置から別のターゲットの位置へと逐次的に移動し続けることで、複数のオブジェクトの空間的な位置情報が更新され貯蔵されるというモデルの妥当性を検討した。注意の単一焦点の逐次的移動モデルにおける注意の移動速度限界を考慮して、注意の逐次的移動ではオブジェクト追跡が非常に困難となるような、ターゲットの個数や運動速度のパラメータを用いて MOT 課題を行わせた場合でも、実験参加者は高い正答率でオブジェクト追跡を遂行できていた。この結果から Pylyshyn and Storm (1988) は、単一焦点の注意がオブジェクト間を逐次的に移動することによってオブジェクト追跡が行われるモデルの妥当性を否定している。このことから現在では、複数のターゲットのオブジェクト追跡は、単一焦点の注意の逐次的移動とは異なるメカニズムによって実現されているという考えが一般的に受け入れられている。

次に、視覚処理のなかでも低次の段階、運動検出のレベルでオブジェクト追跡が行われている可能性についても検討された。視野内の局所運動は同時並列的に検出され (Dick, Ullman, & Sagi, 1987; Nakayama & Silverman, 1986), 非常に速い速度の運動も検出可能である (Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b). さらに、低次の運動メカニズムは意識にのぼらない運動をも処理しており (e.g., Maruya, Watanabe, & Watanabe, 2008; Nishida & Sato, 1992), この場合の運動処理の容量限界はない、もしくは非常に大きいと考えられている。しかしオブジェクト追跡のような意識にのぼる運動知覚では、追跡可能なオブジェクトの数に限界が存在し、MOT 課題において同時に追跡可能な運動オブジェクト数はせいぜい 4-5 個であると言われている (e.g., Pylyshyn & Storm, 1988). その後行われた個人差に関する研究によれば、オブジェクト追跡の容量は 2-6 個と個人差があり、平均して 4 個程度であることが報告されている (Oksama & Hyönä, 2004). また、注意追跡課題を用いたオブジェクト追跡の時間特性については、刺激の時間周波数が 4-8 Hz を超えるとオブジェクト追跡が困難になると報告されている (Verstraten et al., 2000). これは、正弦波運動縞刺激の運動検出の限界周波数 (30 Hz 以上, Burr & Ross, 1982; 10 Hz 以上, Lu & Sperling, 1995b) と比べてはるかに遅い。以上のように、オブジェクト追跡は低次の運動検出とは異なり、追跡容量に比較的小さな限界があり、また遅い時間特性をもつことも知られている。こうした特性から、Verstraten et al. (2000) は、低次の運動検出とは異なるメカニズムによってオブジェクト追跡が実現されていると主張した。



### 1.3 オブジェクト追跡モデルおよびその関連研究

以上の研究結果から、単一焦点の注意や低次の運動検出ではオブジェクト追跡が遂行されていないという考えが有力となり、その後のオブジェクト追跡の研究では、これら以外の要因にもとづいた追跡モデルが提案されることとなった。以下で紹介するモデルでは、初期的・同時並列的な視覚入力にもとづき、ディストラクターの中からターゲットが選択され、運動するオブジェクトに対応する入力が時間的に統合されて、同一性の保持が行われるという過程は共通している。各モデルで異なるのは、どのような視覚処理がターゲットの時間的統合および個別化を行うことでオブジェクトの同一性を保持しているかという点である。モデルによっては、ターゲットの時間的統合と個別化は明確に分けられていない。

#### FINST モデル

Pylyshyn and Storm (1988) は、注意は単一焦点であるという当時の注意研究のモデルを前提として (e.g., Posner, 1980; Treisman & Gelade, 1980), MOT 課題では 4-5 個の運動オブジェクトを同時並列的に追跡することが可能であるということから、単一焦点の注意を要求する高次の認知過程よりも前の段階の処理過程（前注意過程）が、オブジェクトの同一性の保持に重要な役割を果たしていると主張した。MOT 課題における運動オブジェクトは色や形状が同一であるため、それ以外の手がかりによってターゲットをディストラクターと区別していく必要がある。Pylyshyn は、個々のオブジェクトの時空間的連続性

のみを手がかりとして、試行の開始時から追跡し続けているのではないかと考えた。Pylyshyn の主張によれば (Pylyshyn, 1989, 2001), 前注意過程において視野内の視覚対象のなかから最大 4 個程度が選択され, その選択された対象それぞれにインデックス (index) が割り当てられる。このインデックスは一定の制限範囲内において, 対象の性質が変化したり (Sears & Pylyshyn, 2000), 対象が遮蔽により隠されたりしても (Scholl & Pylyshyn, 1999) ターゲットから外れない。このインデックス付加の段階ではその対象に関する運動以外の情報は処理に含まれないが, インデックスが付加された対象のみが後に続く高次の認知的処理段階へと進み, 対象の特徴を含む詳細な処理が行われるとされる。この前注意過程での処理に注目したモデルは, FINST (Finger of INSTantiation) モデルと名付けられている。このモデルでは, MOT 課題で示されている追跡可能なオブジェクト数の限界 (4-5 個) は, 並列的に付けることができるインデックスの個数限界によって決まるとされる。オブジェクトの時空間的連続性のみを手がかりとすることから, このモデルによる追跡ではオブジェクトの位置情報や軌跡情報が重要な役割を果たしていると考えられるが, インデックス付けが前注意段階でのどのような視覚処理メカニズムによって遂行されているかについては, 明確に説明されているわけではない。

### **オブジェクトファイルモデル**

Kahneman and Treisman (1984) は, 入力された視覚情報をもとに視覚対象を認識する過程のなかで, その対象についての諸情報を含んでいる一時的な内部表象が形成されると考えた。この対象に対する多次元的な表象はオブジェクトファイル (object file) と名付けられている。視覚処理経路を通して, ある

視覚対象に関する情報が入力された時点で、その視覚対象のオブジェクトファイルのスロットが開き、サイズ、形状、色、明るさ、運動方向などの視覚対象の特徴に関する情報がそこに入れられる。視覚対象がその時空間的位置を変化させると、その状態変化に応じてオブジェクトファイル内の情報が更新される。オブジェクトファイルモデルでは、この過程によって視覚対象の同一性が保持されると主張されている。Kahneman, Treisman, and Gibbs (1992) は運動するオブジェクトの上に表示された文字の異同判断課題を通じて、視覚対象の運動時にオブジェクトの特徴情報が保持されていることを実験的に示している。

### **多焦点注意モデル**

オブジェクト追跡について検討した先行研究では、高次の視覚処理過程のうち、ターゲットの選択・個別化を行う機能であるとされる注意の重要性に注目しているものが多い。そうした研究では、オブジェクト追跡における注意のふるまいについて、単一焦点の注意の逐次的移動とは異なるものであると考えられている。近年の注意研究において、注意は視野内の 1 ヶ所だけに向けられるというわけではなく、複数の空間位置やオブジェクトに対して並列的に向けることが可能であることが示されている (e.g., Awh & Pashler, 2000)。それをふまえて Cavanagh and Alvarez (2005) は、複数の注意の焦点が複数のオブジェクトに並列的に向けられ、各オブジェクトの移動に伴って移動することにより、ターゲットの同一性が保持されることが可能になるという、オブジェクト追跡における多焦点注意モデル (multifocal attention model) を提唱している。このモデルでは、MOT 課題で示されている追跡可能なオブジェクト数の限界 (4-5 個) は、オブジェクトに向けられる注意焦点の個数限界によって規定さ

れると説明される。また、Verstraten et al. (2000) は、注意追跡課題で示されたオブジェクト追跡が可能となる時間周波数の上限である 4-8 Hz は、仮現運動刺激のオブジェクトからオブジェクトへと移動する注意の移動の時間的な限界によって規定されていると解釈している。

### **モデルの相互の関係**

これらのモデルの提唱者たちは、自らのモデルと他のモデルとの関係についても論じている。Pylyshyn は、インデックス付けは、前注意処理段階において視覚対象を選択しておくことで、インデックス付けされた対象に対して選択的に高次の認知処理が行われるようにする役割を果たしていると述べている。Kahneman et al. (1992) は、FINST モデルによるインデックス付けはオブジェクトファイルにアクセスして処理を行う前段階での初期的な時空間的ラベルであり、オブジェクトファイルはそれよりも詳細な情報を含むものとして両者を区別している。Cavanagh and Alvarez (2005) は FINST モデルについて、Pylyshyn の主張をもとに、インデックスは注意をターゲットに迅速に向けるためのポインターとして機能していると解釈している。そして、高次の注意について単一焦点か複数焦点かを仮定する点で、FINST モデルと自らのモデルとが異なっていると主張している。以上のような相互解釈のもと、各モデルは、オブジェクト追跡において重視する過程がそれぞれ異なるという立場をとっている。

以上のように、さまざまなオブジェクト追跡モデルが提唱されているものの、オブジェクト追跡課題のような視覚入力動的に変化し続ける刺激状況で、視覚対象の同一性を保持し続けるメカニズムがどのようなものかについて、統一

した見解が得られているというわけではない。しかし、上記のように彼らのモデルの相互の関係を整理すると、モデル間の関係は排他的なものではなく、むしろ視覚処理過程について補完し合うような関係となっていると言える。

そのモデル間の相互補完関係に着目し、オブジェクト追跡に関する視覚処理段階を整理して著者がモデル化したものを図 1-3 に示す。このモデルは、視覚情報抽出段階、前注意処理段階、注意処理段階の 3 層に分かれている。第 1 層では、視野内のオブジェクトや背景などの視覚入力に対して視覚情報の抽出や分析が行われる。その視覚情報が 2 層目の前注意処理段階に送られ、いくつかのオブジェクトに対してインデックス付けによる選択処理が行われる (Pylyshyn, 1989, 2001)。第 3 層の注意処理段階では、下層から入力されるオブジェクトに対してトップダウンの注意処理 (e.g., Cavanagh & Alvarez, 2005; Scholl, 2009)、オブジェクトファイルによる視覚処理 (Kahneman & Treisman, 1984; Kahneman et al., 1992)、オブジェクト同士の群化 (Suganuma & Yokosawa, 2006; Yantis, 1992) などの処理が行われる。このように階層関係を考えることで、オブジェクト追跡に関して提案されているモデル間の関係が明確になってくる。

オブジェクト追跡の研究では特に、上で述べたような、追跡可能なオブジェクト数の限界や追跡の時間限界といった制限を生じさせていると考えられる高次の要因や、オブジェクト追跡と他の高次機能との処理の共通性について、検討が行われてきた (レビューとしては、Cavanagh & Alvarez (2005) および Scholl (2009) を参照のこと)。これらの研究は、図 1-3 の最上層に示したような、オブジェクト追跡に関する高次の処理を検討したものであると言えよう。

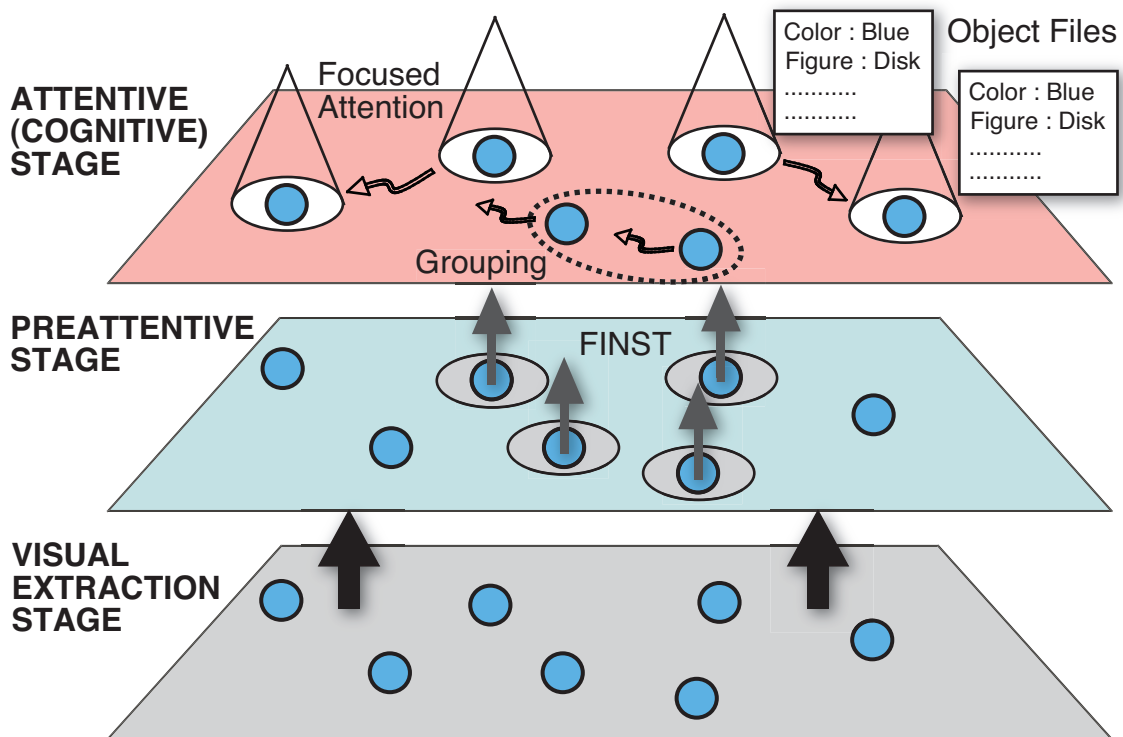


図 1-3 オブジェクト追跡における視覚処理の3層モデル。オブジェクト追跡における視覚処理は大きく3段階に分けられると考えられる。第1層の視覚情報抽出段階では、視野内の視覚入力からの視覚情報が抽出・分析される。第2層の前注意段階では第1層からの情報をもとに前注意的な選択処理が行われ、さらにその第2層の情報を受け、第3層では高次の認知処理が行われることにより、オブジェクト追跡においてオブジェクトの同一性が保持されている。

それに比べ、第1層や第2層で抽出されていると想定される諸情報、とりわけ運動情報がどのような役割を果たしているかについては、これまで明確には論じられてこなかった。オブジェクトの情報をオブジェクトファイルに一時的に保持し更新する、オブジェクトに対して注意を向けることでオブジェクトの同一性を保持し、空間的に近接するオブジェクト同士を個別化するという処理は、オブジェクトが「運動」していなくても、位置情報を利用することによってオブジェクトの同一性保持が実現され得るものである。もし仮に、対象の同一性を保持するのに運動情報が不要なのであったら、1.1節で述べた運動盲の患者のように、視覚対象の運動が知覚されず対象の情報が間欠的にしか得られなくても、注意やワーキングメモリーの機能によって動的な外界が完全に認識可能となることになる。しかしながら、運動盲の患者の外界の認識に深刻な不都合が生じているということからもわかるように、外界の対象の同一性の保持に運動情報が何らかの役割を果たしている可能性は高いものと考えられる。加えて、追跡個数に制限がある、比較的遅い時間特性をもつといったオブジェクト追跡の特性は、運動情報の寄与を否定する根拠としては薄弱なようにも思われる。さらに、オブジェクト追跡以外の課題、たとえば線運動錯視と呼ばれる錯視現象でも (Hikosaka, Miyauchi, & Shimojo, 1993a,b), 当初は注意と関連づけられて現象が説明されてきたものが、後に運動処理の要因についても考慮する必要があると主張されるようになった (e.g., Downing & Treisman, 1997; Kawahara, Yokosawa, Nishida, & Sato, 1996)。ゆえに、運動刺激を用いる課題であるオブジェクト追跡においても、注意に加えて運動の要因が役割を果たしていると考えても、それほどおかしくはないであろう。

本論文では、このオブジェクト追跡における視覚運動処理（以下、運動処理とする）が果たす役割に着目した。ここでいう運動処理とは、視覚対象である運動オブジェクトの入力から対象の運動を計算して運動情報を抽出する過程である。この運動処理はオブジェクトの時空間的变化を検出する過程であり、オブジェクトの移動に伴いその位置情報を取得し続けることで同一性を保持するという追跡の過程とは異なるものだと考えられる。上で述べたように、オブジェクト追跡のモデルによっては、オブジェクトが運動していなくても位置情報を取得、利用できるのであればオブジェクト追跡は実現されるとも考えられる。しかしオブジェクト追跡が運動刺激を用いた視覚課題である以上は、そこに運動処理がはたらいっているはずであり、運動処理メカニズムによって抽出されている運動情報が、オブジェクト追跡に何らかの形で寄与している可能性は高く、運動情報が寄与する追跡の過程が存在していても不思議ではない。以上をふまえ、本論文ではオブジェクト追跡に用いられると考えられるさまざまな情報のうち、運動処理からもたらされる低次の運動情報がオブジェクト追跡に寄与している可能性、そしてその運動情報をもたらす運動処理過程と高次の視覚過程との関係について、運動処理に影響を与えると考えられる刺激操作を用いて実験的に検討を行うこととする。それにより、図 1-3 で提案した階層モデルの第 1 層および第 2 層といった低層で抽出されると考えられる運動情報が、オブジェクト追跡において果たしている役割を明らかにすることを目指す。



## 1.4 オブジェクト追跡における運動情報の利用可能性

オブジェクト追跡に対する運動情報の寄与の可能性については、追跡時に、運動の速度や軌跡にもとづいてオブジェクトの位置の予測が行われているか、オブジェクトが遮蔽物に遮られた間にアモーダル知覚 (amodal perception) がはたらいてオブジェクトの運動感が維持される場合があるのかといった、高次の要因のみが検討されてきた。この問題の検討には、主として、追跡時にオブジェクトが一時的に消失する MOT 課題が用いられている。Scholl and Pylyshyn (1999) は、刺激呈示領域内に存在する仮想的な遮蔽物の裏側にオブジェクトがいったん隠された場合にも、課題成績は低下しないことを見出した。彼らはこの結果を、遮蔽からのアモーダル知覚によって説明している。Keane and Pylyshyn (2006) は、オブジェクトの消失時間を3段階設け、また、消失の様態を、消失した場所にオブジェクトを再出現させるか、消失中も同じ速度と軌道に沿ってオブジェクトが移動した場合に予測される場所に再出現させるかという違いを設け、MOT 課題の成績を測定した。その結果、オブジェクトの運動から予測される位置に再出現させた場合に、消失時間が短い場合には正答率が高く保たれたものの、消失時間が長くなると正答率は低下した。この結果は、オブジェクトの速度や軌跡からオブジェクトの位置を予測している、もしくは消失中にオブジェクトの運動を外挿して追跡を行っているわけではないことを示している。Horowitz, Birnkrant, Fencsik, Tran, and Wolfe (2006) も同様の結果にもとづき、オブジェクト消失時には位置予測や運動の外挿を行っているのではなく、オブジェクト追跡処理からオブジェクトの情報を保持する

処理に変更され、オブジェクトが再出現すると追跡の処理が再開されるという仮説を提案している。

一方、運動情報が位置予測に用いられる場合もあると主張する研究も存在する。Fencsik, Klieger, and Horowitz (2007) は、オブジェクト消失前にターゲットの運動方向と速度を与える条件と与えない条件で、オブジェクト消失をばさんだ MOT 課題の成績を比較した。その結果、追跡ターゲットが 2 個程度までは、オブジェクト消失前にターゲットの運動方向と速度の情報を与えた場合に、与えない場合と比べて課題成績が良くなった。この結果から Fencsik et al. (2007) は、追跡すべきオブジェクトの個数が少ない場合にのみ、運動方向や速度といった運動情報が消失オブジェクトの追跡に用いられると主張している。また、オブジェクトの軌跡情報に関しても、Suganuma and Yokosawa (2006) は、運動方向を変化させながら移動するターゲットを、ディストラクターによって追従させる MOT 課題を課した場合、追従するディストラクターに気づくか否かにかかわらず、課題成績が低下することを報告した。この結果について Suganuma and Yokosawa (2006) は、いわゆる「共通運命の法則 (law of common fate)」と呼ばれる、運動による知覚的群化現象により、ターゲットとディストラクターが知覚的にまとまりを作ってしまったために生じる、高次の運動過程による作用であると解釈している。以上の先行研究の結果より、オブジェクトの運動方向や速度などの運動情報をもとにした、位置の予測、運動の外挿、群化などのより高次の情報は、限定された個数や消失時間の範囲内でのみ利用可能となるものであると推測される。

ここまでで紹介した、オブジェクト消失状況における運動情報の寄与の可能

性について検討した研究は、運動情報をもとにした位置予測などの高次な処理の要因がはたらくべき刺激状況に関するものであった。その一方で、図 1-3 の視覚情報抽出段階や前注意処理段階のような、上記の処理よりも低次の視覚処理段階において、運動オブジェクトよりボトムアップに抽出される運動情報が、オブジェクト追跡に寄与しているかについて、直接的に示した先行研究はない。Verstraten et al. (2000) は上で述べたように、時間周波数を指標としてオブジェクト追跡に関わる視覚処理について実験的な検討を行い、低次の運動情報の寄与を否定している。1.1 節で述べた運動盲の患者の例では、運動処理がはたっていないため、意識にのぼってくるのは、車などのオブジェクトの運動がサンプリングされた間欠的な位置情報のみであった (Zihl et al., 1983)。このことから類推すれば、健常な視覚をもつ観察者が知覚している滑らかな運動の知覚は、間欠的に得られる対象の位置情報や形態情報に対して、ボトムアップの運動情報が補完した結果のものである可能性は十分に考えられる。この枠組みをオブジェクト追跡に当てはめてみると、ある時点において意識上にのぼってくるオブジェクトの位置情報に対し、オブジェクトの位置情報や形態情報にもとづき、注意やワーキングメモリーなどの高次な視覚過程によりトップダウンでオブジェクトの時空間的統合やターゲットの個別化を行うだけでなく、低次の運動情報が間欠的なオブジェクト間の時間的統合を行うことで、オブジェクト追跡という意識的処理を助け、視覚処理全体として安定したターゲットの同一性の保持を実現させている可能性もあり得るということになる。

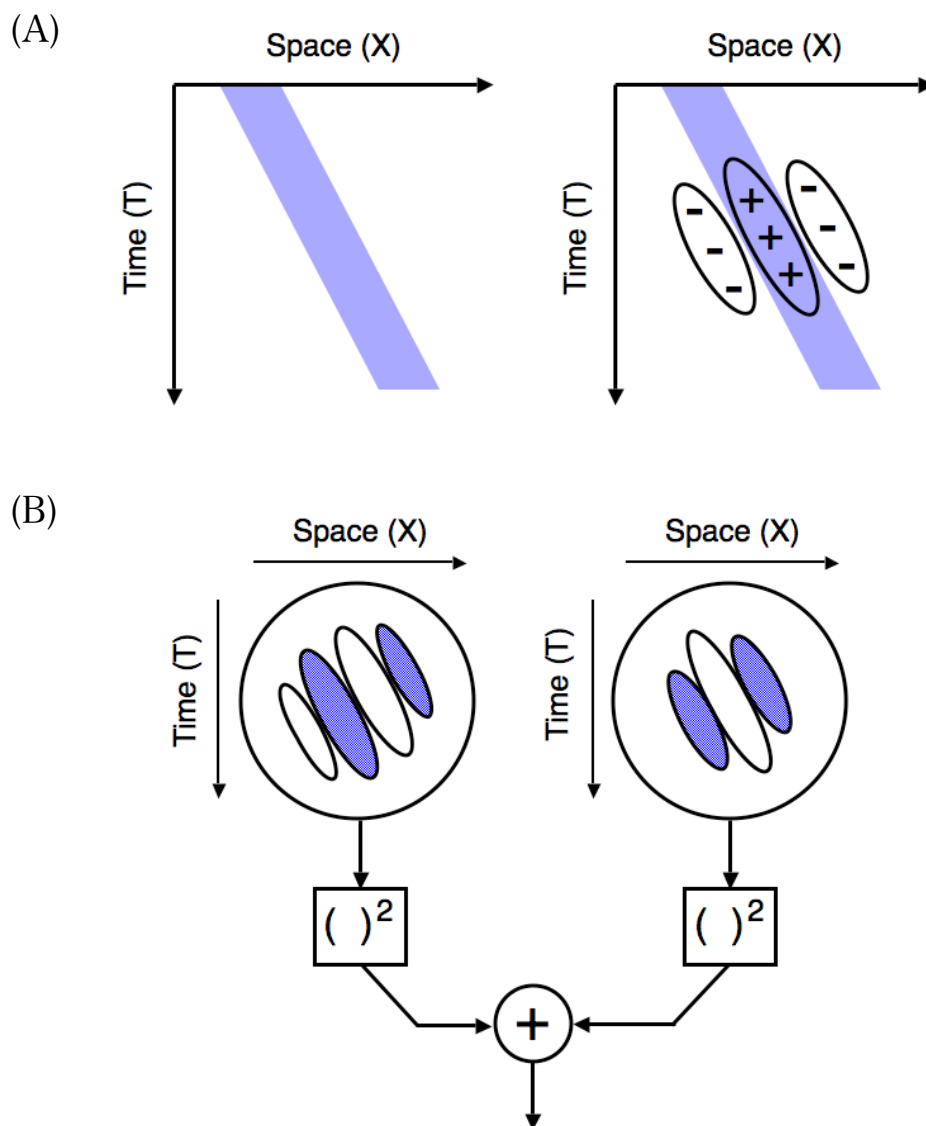
## 1.5 オブジェクト追跡に寄与し得る視覚運動処理メカニズム

では、オブジェクト追跡に寄与し得る運動情報を抽出している視覚運動処理には、どのようなものがあるだろうか。本節ではまず、運動視研究の流れを振り返りながら、視覚運動処理の区分について整理することとする。

仮現運動の対応問題に関しては古くから、刺激同士の時空間距離や類似性で対応関係が変化するか否かなど、運動知覚の現象ベースで実験的な検討が行われてきた。その流れに一石を投じたのは Braddick であった。Braddick (1974) は、ランダムドットパターンのドットの仮現運動が検出される空間距離限界が、視角にして 15-20 min 程度と短いことを見出した。それに対し、光点や図形などの孤立オブジェクトを用いた仮現運動が検出される空間距離限界は、それよりもはるかに長い (e.g., Burt & Sperling, 1981; Kolers, 1972)。こうしたことから、Braddick (1974, 1980) はこの 2 つのタイプの仮現運動を "short-range motion" および "long-range motion" に区分し、両運動に対応した運動処理メカニズムが存在すると主張した。

しかし、この Braddick の現象ベースのメカニズム論は、Cavanagh and Mather (1989) によって批判を受けることになる。Cavanagh らは、Braddick が主張するような単なる時空間距離に関する現象的な差異によるメカニズムの分類は無意味であり、刺激の原理的な差異にもとづく分類がなされるべきであると主張し、1 次運動 (first-order motion) / 2 次運動 (second-order motion) という新しい分類を提唱した。輝度という刺激内の 1 次の統計量にもとづく運動である 1 次運動は、それと対応する 1 次運動検出メカニズムで処理され、コ

ントラスト，運動，両眼視差，フリッカー（時間変調），テクスチャなどの属性の運動，すなわち刺激内の2次の統計量にもとづく運動である2次運動は2次運動検出メカニズムで処理されるという，刺激ベースの処理メカニズムの区分である．このCavanagh and Mather（1989）の提案は広く受け入れられ，以降，この刺激ベースの区分により運動処理メカニズムの検討が行われることとなった．1次運動を検出するメカニズムは，運動対象のもつ輝度情報の移動に対して運動を検出する仕組みである．たとえば，視野内を線分刺激が左から右へと移動する運動を検出する場合について考えてみよう．線分刺激がある瞬間にある場所を通り，次の瞬間には別な場所を通り，また次の瞬間には……と，時間ごとに位置を変えていく様子は，2次元のグラフの一方の軸で時間を，もう一方の軸で空間位置を表したグラフ上では，時空間上で傾きをもった線分として表現される（図1-4(A)）．輝度情報の移動から形成されるこの時空間的傾きに対して，1次運動検出のモデルの代表例である運動エネルギーモデル（motion energy model, Adelson & Bergen, 1985）では，時空間フィルタと呼ばれる複数のフィルタを組み合わせることで運動を検出することが可能であると説明している（図1-4(B)）．1次運動検出メカニズムは受動的，同時並列的に運動を検出しており（Dick et al., 1987; Nakayama & Silverman, 1986），非常に速い速度の運動も検出可能であるなど（Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b），高速かつ並列的な運動処理を実現している．また，運動パターンの知覚的な運動方向と同方向に生じる正の運動残効の例（Nishida & Sato, 1992）や視野闘争によって抑制されている運動刺激からも運動残効が生じる例（Maruya et al., 2008）からもわかるように，意識にのぼらない運動からもボトムアップに（受



**図 1-4 対象の運動に対する時空間プロットおよび1次運動検出器のモデル.**  
**(A).** 運動対象が時間ごとに位置を変えていく様子は、2次元のグラフの一方の軸で時間 (T) を、もう一方の軸で空間位置 (X) を表したグラフ上では、時空間上で傾きをもった線分として表現され (時空間プロット)、その運動は時空間上で傾きをもつ受容野で検出される。 **(B).** 時空間フィルタの組み合わせで運動を検出する1次運動検出器のモデル (運動エネルギーモデル)。ともに Adelson, E. H. & Bergen, J. R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(2), 284-299. Figure. 5 (p. 288) および Figure. 9 (p. 291) を参考にして筆者が作成した。

動的に) 運動を検出するものである。それに対して2次運動処理メカニズムは、運動刺激中の輝度成分の移動を伴わない2次運動に対して何らかの処理を行い、運動を知覚するメカニズムである。1次運動検出メカニズムは輝度成分の移動を伴わない刺激に対して運動を検出することができない (e.g., Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988)。そこで、2次運動を検出するメカニズムとして、さまざまなモデルが提唱されることとなる。Cavanagh and Mather (1989) のこの区分の提案以降、特に活発な議論が展開されたのは、1次運動と2次運動の処理がはたして同じものなのかという問題である。主に輝度定義運動刺激とコントラスト定義運動刺激が用いられ、さまざまな課題によって両刺激に対する運動処理メカニズムの特性が比較されてきた。そのなかで、コントラスト定義運動刺激の入力に対して単純な前処理を行うことで、輝度定義運動に対するものと類似した擬線形処理メカニズムで運動が検出されるというアルゴリズムも提案されており (Chubb & Sperling, 1988)、運動検出における輝度定義運動とコントラスト定義運動の特性が良く似ているという心理実験の結果も報告されている (Lu & Sperling, 1995b)。さらに、機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) を用いた脳機能イメージング研究の結果からも、輝度定義運動とコントラスト定義運動は大脳皮質の類似した領域で処理されているという報告がされている (Nishida, Sasaki, Murakami, Watanabe, & Tootell, 2003)。その一方で Cavanagh (1991, 1992) は、1次運動の処理と、より高次の運動処理に対し、受動的 (passive) / 能動的 (active) という区分を持ち込んだ。Cavanagh (1992) は、輝度変調縞刺激と等輝度色変調縞刺激が重なったリング形の放射状正弦波縞を運動刺激として

用いて観察を行った。輝度変調縞を時計回りもしくは反時計回りのどちらかに、色変調縞をその逆方向に運動させると、輝度縞のコントラストが強い場合には観察者は輝度変調縞の方向に運動を知覚した。一方、輝度縞のコントラストを色変調縞に対して相対的に弱めたうえで、観察者に色変調縞の特徴点を能動的に追跡させると、色運動縞の運動方向への運動知覚が得られるようになった。このことから Cavanagh (1992) は、受動的な輝度運動の検出過程に加えて、注意を用いて特徴点を追跡することによる能動的な運動知覚 (attention-based motion perception) があると主張した。また, Lu and Sperling (1995a, b, 2001) は、輝度とコントラスト以外の運動の検出について、刺激の顕著な特徴の時空間的情報をもとにした、刺激の属性に依存しない処理が行われる、feature salience system を提唱した。以上のように、輝度以外の 2 次属性で定義された 2 次運動の処理については諸説があり、明確な結論がでていない。

このような刺激ベースのメカニズムの分類の混乱に対し、Sato (1998) は運動処理メカニズムベースでの分類を提案している。図 1-5 は、Nishida and Sato (1995) および Sato (1998) で提案されている運動処理モデルをもとに、著者が作成したものである。運動刺激は、最初に 2 つの処理過程で並列的に処理される。1 つは擬線形過程 (quasi-linear pathway) である。輝度による 1 次運動は擬線形処理である 1 次運動検出メカニズムによって運動が検出される (e.g., Adelson & Bergen, 1985)。その他の属性による 2 次運動のうち、コントラスト定義運動については、整流処理などの単純な前処理を経て 1 次運動検出と同様の擬線形処理によって運動が検出されると考えられる (e.g., Chubb & Sperling, 1988)。その他の 2 次運動については、もうひとつの非線形過程



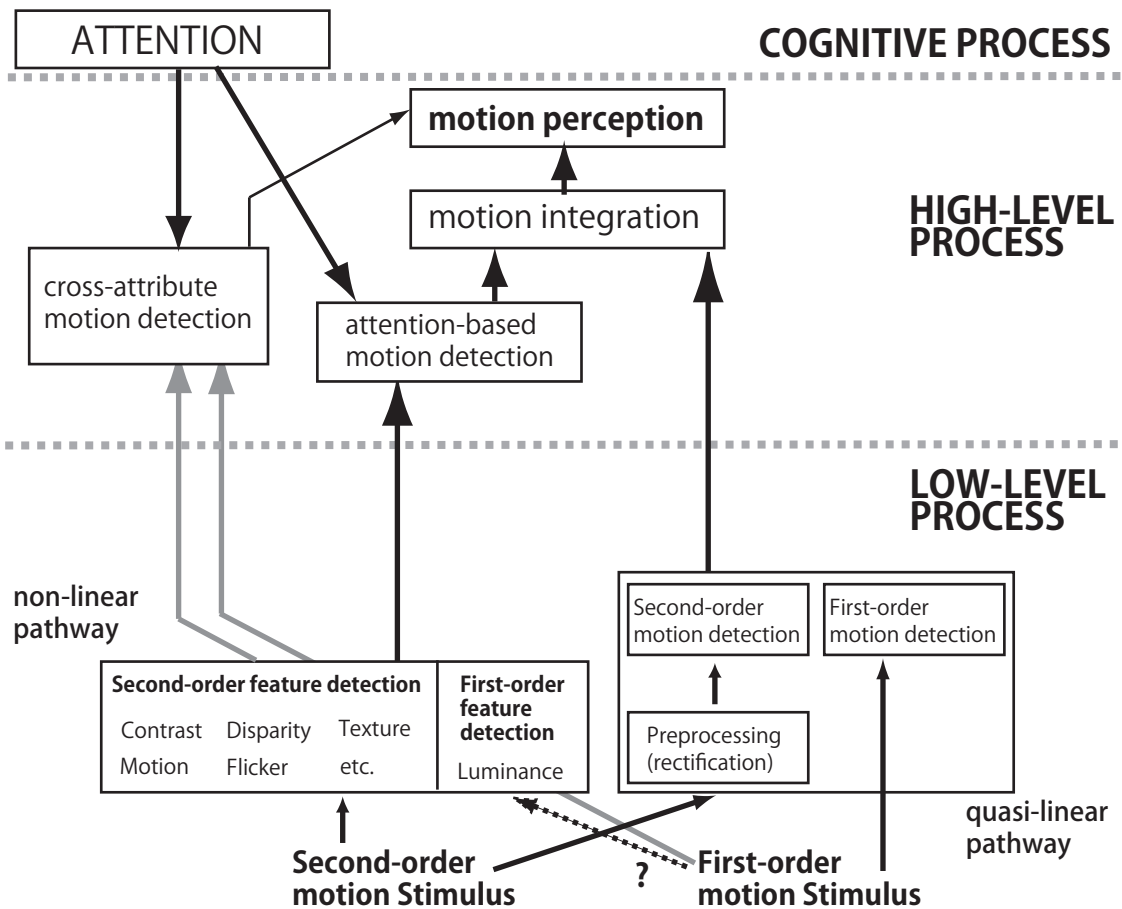


図 1-5 1次運動および2次運動の入力に対するメカニズムベースの視覚運動処理モデル。輝度で定義された1次運動，ならびに2次運動刺激のうちコントラスト定義運動は，擬線形過程（quasi-linear pathway）で処理されるのに対し，他の2次運動は非線形過程（non-linear pathway）において入力の中から特徴が抽出された後，より高次の処理過程に送られ運動が検出される。これら2つの過程による運動情報が統合され，最終的な運動知覚が得られている。Nishida and Sato (1995) および Sato (1998) の運動処理モデルをもとに著者が作成した。

(non-linear pathway) によって処理が行われる。この過程では先に2次運動刺激入力から特徴が抽出され、それをもとに高次の運動処理が行われるとされている。Cavanagh (1991, 1992) の提案しているトップダウンの注意にもとづく高次の運動処理や、Lu and Sperling (1995a,b, 2001) の提案する feature saliency system のような運動処理も、この特徴ベースの高次運動処理に含まれるであろう。これら2つの過程による運動情報が統合され、最終的な運動知覚が得られていると考えられる。

以上述べてきた、運動情報処理のタイプ分けを、オブジェクト追跡と関連づけて考えてみたい。これまでの、注意を中心とした高次機能による説明では、オブジェクト追跡を遂行する上で必須である、対象の位置情報の時間的な統合やオブジェクトの個別化といった下部機能は、図 1-3 に示したモデルの第3層に位置する高次の視覚処理段階で、能動的に注意を向ける、もしくはオブジェクトファイルにより一時的にオブジェクト情報を保持するという機能により実現されていると考えられてきた (e.g., Cavanagh & Alvarez, 2005; Kahneman et al., 1992)。一方、より低次の視覚処理段階、図 1-3 の階層モデルでは第1層や第2層にあたる視覚処理段階では、FINST モデルにおけるインデックス付けのような過程が想定されているものの、ターゲットの時間的統合や個別化の処理が、いかにして実現されているかについては、研究者間で一致した見解が得られているわけではない。これまで議論してきたように、この段階に比較的低次の視覚運動処理が、たとえ限定された役割であるとしても、寄与している可能性は高いと思われるが、そうした可能性は、今のところ十分に検討されてきてはいないように思われる。オブジェクト追跡研究では、オブジェクト追跡

が1次運動検出よりも遅い時間特性をもつという点が、高次の注意機能の関与を示す根拠のひとつとされてきた (Verstraten et al., 2000). しかしながら、注意のみならず運動処理のなかでも、奥行き定義運動や運動定義運動の検出のように比較的遅い時間特性をもつものがあることが知られている (e.g., Lu & Sperling, 1995b, 2001). それも含めて考慮すると、オブジェクト追跡の遅い時間特性は、それに寄与している運動処理の特性である可能性もあり得る。

もし、オブジェクト追跡過程の低次段階において低次の運動処理由来の運動情報が寄与しているとする、図 1-5 のモデルに示されている視覚運動処理メカニズムのうち、どのメカニズムがオブジェクト追跡に関係し得るであろうか。この問題について、唯一、運動処理の種別に言及しているのは Verstraten et al. (2000) の研究であると思われる。彼らは、オブジェクト追跡に関与する運動処理は Cavanagh (1992) が輝度および色定義運動縞を用いた運動知覚実験から主張する、能動的な注意による運動処理であると考えており、その注意の時間解像度限界によりオブジェクト追跡の時間的限界が規定されていると主張している。この能動的な注意による運動処理は、オブジェクトを選択し個別化する必要があり容量限界が存在するオブジェクト追跡を説明するのに適しており、その後の多焦点注意モデルの提案へとつながる (Cavanagh & Alvarez, 2005). しかしこの Verstraten et al. (2000) の実験は、1次属性の輝度運動刺激のみを用いたものであり、1次運動検出を阻害するなどの、運動処理の種別を特定するための実験操作も行われていない。輝度刺激は1次運動成分と共に2次運動成分も含むものであり、こうした輝度刺激のみを用いた実験では、寄与する運動処理メカニズムを明確に切り分けることは困難である。

オブジェクト追跡に関して、近年、背景とオブジェクトのテクスチャのドットの移動によってオブジェクトが定義される運動定義運動を用いてオブジェクト追跡を行った結果が報告されているが (Huff & Papenmeier, 2013; St.Clair, Huff, & Seiffert, 2010), これらの研究は運動定義運動の刺激特性について注目したものであり、オブジェクト追跡と 2 次運動処理との関連を明らかにするものではない。また、脳機能イメージングの手法を用いて、オブジェクト追跡の処理に関連する脳領域を明らかにした結果が報告されている。fMRI を用いて、受動的に MOT 刺激を観察した場合と、能動的に刺激を観察した場合とで信号増強を比較した結果、頭頂葉と前頭葉で異なるという結果が報告されている (Culham, Brandt, Cavanagh, Kanwisher, Dale, & Tootell, 1998)。さらに、同じく fMRI を用いて、追跡オブジェクトの個数の操作によって注意負荷をかけた場合の脳活動変化についても検討が行われている (Culham, Cavanagh, & Kanwisher, 2001; Jovicich, Peters, Koch, Braun, Chang, & Ernst, 2001)。これらの結果は、オブジェクト追跡に能動的に注意を向けるなど高次の処理が関与することを示している。しかしこれらの研究で用いられている手法は、受動的に刺激を観察した場合と能動的に観察した場合とを比較するものであり、こうした方法ではボトムアップに抽出される運動情報が寄与しているか否かは確かめられないことになる。

このように、オブジェクト追跡に、比較的低次の運動処理から生じた運動情報が寄与しているか否か、また寄与しているとすればどのようなタイプの運動処理由来のものであるのかといった問題は、未だ本格的な検討がなされていない問題であると言えるだろう。

## 1.6 本研究の目的

本研究の目的は、オブジェクト追跡課題に対して ISI の挿入、1 次・2 次運動刺激の適用、属性内・属性間運動刺激の使用など、運動知覚に関する実験心理学的研究で運動の種別を特定するために用いられる刺激操作を適用することで、意識的な視覚処理であるオブジェクト追跡に低次の運動情報が寄与しているのか否か、および運動処理と高次の注意処理との関係について検討を行うことである。上で述べたようにオブジェクトの時間的統合やターゲットの個別化といったオブジェクト追跡を支える下部機能を実現するためには、運動情報が部分的であるにせよ寄与している可能性が高い。このような作業仮説のもとに、オブジェクト追跡に運動情報が寄与しているのか否かを検討するとともに、もし寄与しているのであれば、その運動情報が、上記のメカニズムベースでの分類による運動処理メカニズムのうち、どのメカニズムによって検出されるものであるかを特定することが、本研究の具体的な到達目標となる。

第 2 章では、複数のオブジェクトを追跡する MOT 課題における運動刺激への ISI 挿入がオブジェクト追跡に与える効果、およびその結果から明らかとなるであろう視覚処理と注意が関与する高次の視覚処理との関係について検討を行う。実験 1 では上下視野呈示した MOT 課題の仮現運動刺激に対して ISI を挿入する。続いて実験 2 では MOT 課題のオブジェクトとして 2 次運動刺激を用い、運動刺激に対し ISI を挿入する。その結果をもとに、このような従来の運動視研究において 1 次運動検出メカニズムのはたらきを阻害するために用いられてきた実験操作が、MOT 課題成績に与える影響について検討する。さらに実験 3 では、

MOT 課題に加えて Rapid Serial Visual Presentation (RSVP) による文字検出課題を同時に課し、二重課題による認知的負荷が MOT 課題に与える影響を調べることで、MOT 課題に関与している処理が、注意が関与する高次の視覚処理であるか否かを検討する。

第3章では、Verstraten et al. (2000) が用いたものと同様の注意追跡課題により、課題遂行が可能となる時間周波数の上限値（以下、この値を時間周波数限界と呼ぶ）を指標として、オブジェクト追跡における、属性間運動を処理できる高次の視覚処理と低次の運動処理との関係について検討を行う。実験4では、単一の視覚属性でオブジェクトが定義された属性内オブジェクト追跡、および異なる視覚属性で定義されたオブジェクトを交互に呈示する属性間運動を用いたオブジェクト追跡の時間周波数限界を、Verstraten et al. (2000) で示された時間周波数限界 4-8 Hz と比較することにより、オブジェクト追跡に低次の運動情報が寄与しているのか否か、そして運動情報を生じさせる運動処理の特定を試みる。続く実験5と実験7では、属性内および属性間の古典的仮現運動知覚の時間周波数限界を、実験6では運動処理の関与しない刺激を用いて注意の自発的移動の時間限界を測定し、それぞれ実験4の属性内追跡および属性間追跡の時間周波数限界と比較することにより、オブジェクト追跡に寄与するメカニズムと、運動処理および能動的注意との関係について検討する。

第4章では総合考察として、第2章ならびに第3章の実験の結果から、オブジェクト追跡に低次の運動処理由来の運動情報が寄与している可能性について総合的な考察を行い、低次の運動処理段階および高次の視覚処理段階から構成される、オブジェクト追跡の統合モデルを提案する。

## 第2章 MOT 課題における視覚運動処理の寄与と視覚的注意との関係

### 2.1 第2章の目的

本章では、視野内の複数の運動オブジェクトを追跡する MOT 課題を用いて、オブジェクト追跡に低次の運動情報が寄与するのか否か、そして寄与しているとすれば、運動処理と注意が関与する高次の視覚処理との関係について明確にすべく、実験的な検討を行った。

そうした検討を実施するにあたり、最初に、MOT 課題に用いる刺激に注目した。大多数のオブジェクト追跡研究では、MOT 課題として、1次刺激に区分される輝度定義の、連続運動するオブジェクトを追跡する課題を用いている。そのため、MOT 課題を用いて運動情報の寄与を検討する際には、輝度定義の連続運動を検出するメカニズム由来の運動情報が寄与するか否かを検討する必要がある。また、第1章で述べたように、これまでの運動視研究により、運動処理には複数の過程が存在することが広く知られている(1.5節を参照)。そのなかで最も詳細に調べられてきたのは1次運動検出メカニズムである。これらの点をオブジェクト追跡と関連づけて考えると、オブジェクト追跡に対する運動情報の寄与を検討する際には、この1次運動検出メカニズムの寄与について最初に検討する必要があるであろう。しかし、これまでの研究での MOT 課題で用いられている連続運動では、運動が検出されるか否かを検討することが困難であ

った。そこで本章の実験では MOT 課題のオブジェクトの運動を、これまで多くの研究で使われてきた連続運動に換え、刺激のパラメータおよび運動信号の強度を操作可能な仮現運動にすることで、オブジェクト追跡に対する上記の 1 次運動検出メカニズムの寄与を検討する。

本章では MOT 課題の刺激に対し、ISI の挿入という操作を導入した。この ISI 挿入は 1 次運動検出メカニズムのはたらきを阻害する刺激操作のひとつとして、運動視研究の分野で広く知られている。Braddick (1974) は、ランダムドット・キネマトグラムの仮現運動フレーム間のドットの移動によって、パターンの周辺部分に対し中心部分が領域分割されて知覚される刺激において、フレーム間の ISI を増加させていくと領域分割が困難になることを報告した。また、Georgeson and Harris (1990) は、Missing Fundamental grating (以下、MF 縞と呼ぶ) の仮現運動のフレーム間への ISI 挿入による運動方向知覚の変化について検討し、ISI が挿入されない場合、MF 縞の波形が物理的に移動する方向とは逆の運動が知覚されるが、仮現運動のフレーム間に ISI を数十 msec 以上挿入すると、MF 縞の物理的な移動方向に運動が知覚されることを見出した。物理的な移動とは逆方向への運動は、MF 縞が含む最も強いフーリエ成分である第 3 高調波 (3f 波) にもとづく 1 次運動が検出され、知覚されるためと考えられている (Adelson, 1982)。また、ISI を挿入した場合の運動方向反転は、ISI の挿入によって 1 次運動検出メカニズムからの出力が低下し、より高次の運動処理メカニズムが相対的に強くはたらいたためだと考えられている (cf. Georgeson & Shackleton, 1989)。仮現運動刺激に一定以上の長さの ISI を挿入することにより 1 次運動検出メカニズムが阻害され、その結果として運動検出成績が低下



するという事は、上記の例に限らず、多くの研究が示すところである。1次運動検出メカニズムを阻害し得る ISI の長さは 100 msec 程度とされている (Braddick, 1974; Georgeson & Harris, 1990)。図 2-1 に、仮現運動刺激に対する一定以上の ISI の挿入が、対象の仮現運動の時空間的傾きを検出する時空間受容野のはたらきを阻害する仕組みを、時空間プロット上で表現したものを示す。もしオブジェクト追跡に1次運動検出メカニズムが寄与しているとしたら、この ISI による1次運動検出の阻害は MOT 課題の成績を低下させるはずである。本章ではこうした論理にもとづき、運動刺激への ISI 挿入が、MOT 課題成績に与える効果について検討を行った。

本章では、MOT 課題の成績全般に対する ISI 挿入の効果に加え、上下視野非対称性に対する効果にも注目した。He, Cavanagh, and Intriligator (1996) は、注視点よりも上方の視野（以下、上視野と呼ぶ）もしくは注視点よりも下方の視野（以下、下視野と呼ぶ）に呈示した 9 個の円形オブジェクトのうち 2 個をターゲットとして追跡させる MOT 課題において、課題の成績が上視野よりも下視野で良くなることを報告した。彼らはこの結果を、視覚対象を個別化する役割を果たしている注意の空間解像度に下視野優位性が存在すること (Intriligator & Cavanagh, 2001) と関連づけ、MOT 課題成績における下視野優位性は、ディストラクターに対してターゲットを個別化する注意処理の視野差を反映したものであると主張した (He et al., 1996, 1997; Intriligator & Cavanagh, 2001)。その後彼らは、この議論をさらに拡張し、オブジェクト追跡には注意にもとづく視覚処理が関与しているとするオブジェクト追跡モデルを提案している (Cavanagh & Alvarez, 2005)。一方、運動視研究においても、

複雑な運動処理において下視野優位性が存在することが報告されている。1次運動の検出には上下視野差がないと報告されている一方で (Sato & Mugishima, 2000; Smith & Hammond, 1986), たとえば, 視野の中心から周辺へ, 周辺から中心へとといった方向へのドットパターンの運動 (Edwards & Badcock, 1993), MF 縞の運動方向判断課題 (Sato & Mugishima, 2000), 2次運動である運動定義の運動縞刺激に対する運動方向判断課題 (Maruya & Sato, 2001) に, 下視野優位性がみられることが報告されている。MOT 課題に見出される下視野優位性は, オブジェクト追跡に対する運動処理の寄与を直接的に示すものではないが, もしその寄与が示されたならば, オブジェクト追跡に寄与するのが1次運動検出メカニズムなのか, それともそれより高次のメカニズムかを切り分ける指標として用いることが可能である。この下視野優位性と, 上で述べた1次運動検出メカニズムの寄与の可能性を合わせて考えると, 呈示視野と ISI の相互作用について調べるのが重要となってくる。本章の実験では, He et al. (1996) と同様に MOT 課題刺激を上視野もしくは下視野に呈示し, 課題成績の視野ごとの分析も行う。

本章ではこうした目的をふまえ, 実験1および実験2では, 刺激のフレーム間に挿入する ISI を 0-133.3 msec の5段階に変化させ, ISI がオブジェクト追跡に与える効果を検討する。実験3では, 注意が関与する視覚処理に負荷を与える二重課題状況下で MOT 課題の成績を調べることで, この ISI による効果と注意の関与する処理との関係について検討を行う。

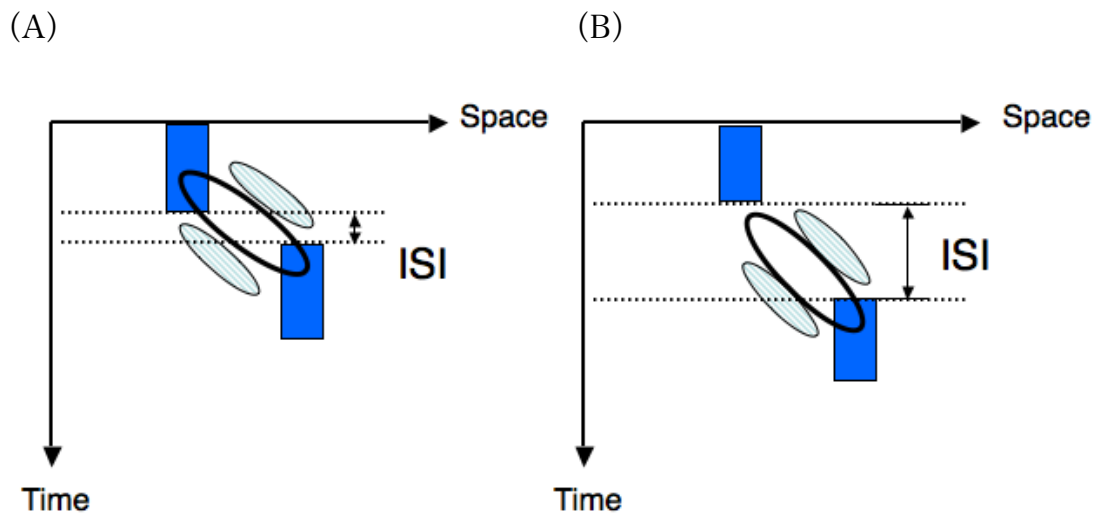


図2-1 ISIの長短が、時空間受容野による仮現運動検出に与える効果の模式図。  
**(A)**. フレーム間に挿入されたISIが短い場合. **(B)**. フレーム間に挿入されたISIが長い場合. ISIが短いと、時空間受容野は時空間プロット上で仮現運動を検出できるが、ISIが長くなると、処理に一定の時空間限界をもつ時空間受容野では仮現運動が検出できなくなる.

## 2.2 実験1：MOT課題の仮現運動刺激に対するISI挿入の効果

### 2.2.1 目的

本実験では、仮現運動刺激へのISI挿入が、MOT課題の成績に与える効果について検討を行った。He et al. (1996) で用いられたものと類似したMOT課題刺激を上視野もしくは下視野に呈示し、刺激のフレーム間に挿入するISIを0-133.3 msecの5段階に変化させながら、MOT課題の成績を測定した。

### 2.2.2 方法

#### 実験参加者

本実験には成人5名（女性1名，男性4名，年齢21-27歳）が参加した。全員が、裸眼もしくは矯正により正常な範囲の視力を有していた。参加者は全員、上下視野呈示のMOT課題の経験を積んでおり、上視野もしくは下視野に呈示されたMOT課題の刺激を観察しオブジェクト追跡を行うことに習熟していた。

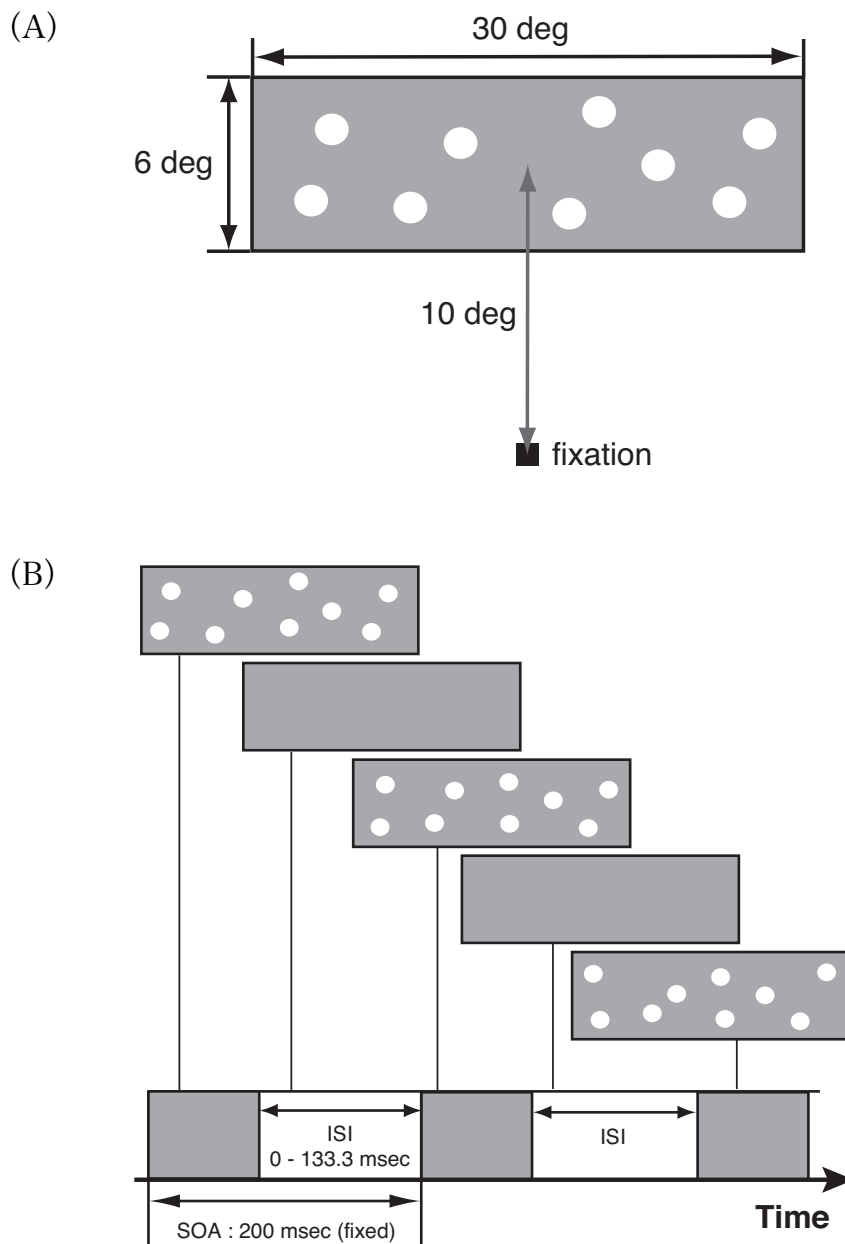
#### 装置

Macintosh PowerMac G4 (Macintosh OS 9.2.2, Apple Inc., Cupertino, CA) 上で刺激作成および実験の制御を行い、17インチCRTフラットディスプレイ (FlexScan T561, EIZO NANA O CORPORATION, Ishikawa, Japan) 上に刺激を呈示した。画面解像度は1024 × 768 pixels, リフレッシュレートは60 Hz

であった。顎台を用いて観察距離を 57 cm に固定しており、1 pixel が視角にして約 1.8 min に相当した。

## 刺激

本実験の刺激は、ソフトウェア MATLAB 5.2.1 および拡張ライブラリ Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997) を使用して作成した。図 2-2(A)に、本実験での MOT 課題刺激の配置図を示す。画面全体を覆うような暗い灰色 ( $7.5 \text{ cd/m}^2$ ) の背景上に 6 deg (縦)  $\times$  30 deg (横) の黒色の長方形の枠を呈示し、その内部を刺激呈示領域とした。ディスプレイの画面の中心付近に注視点として黒色の正方形を呈示し、注視点から垂直方向に離れた位置、すなわち画面の上部もしくは下部に刺激呈示領域を配置した。注視点から刺激呈示領域の中心までの距離を 10 deg とした。オブジェクト刺激は、直径 0.75 deg の白色 ( $36.5 \text{ cd/m}^2$ ) の円形オブジェクト 9 個であり、刺激呈示領域内を運動した。オブジェクトの運動時間は 7 秒間、運動速度は常に等速であり 3.0 deg/sec であった。フレーム間でのオブジェクトの空間移動距離は約 36 min であった。運動開始時のオブジェクトの運動方向はそれぞれランダムに設定した。オブジェクトは運動中には運動方向を変化させず直線運動を保ち、刺激呈示領域の枠に衝突した場合にのみ反射して運動方向を変化させた。運動中はオブジェクト同士の重なり合いを許した。仮現運動刺激の Stimulus Onset Asynchrony (SOA) は 200 msec に固定し、ISI の長さは 0, 33.3, 66.7, 100, 133.3 msec の 5 段階に操作し、ISI 期間中にはオブジェクトを含む刺激画像の代わりに、一様な灰色画面を刺激呈示領域内に呈示した (図 2-2(B))。オブジェ



**図 2-2 実験 1 における MOT 課題の刺激配置および刺激呈示の時間経過の模式図.** (A). MOT 課題の刺激配置の模式図. 注視点より上方（上視野）もしくは下方（下視野）のいずれかに刺激呈示領域を呈示した（図に示したのは上視野呈示の場合）. (B). 刺激呈示の時間経過の模式図. Stimulus Onset Asynchrony (SOA) は 200 msec に固定し, Inter-Stimulus Interval (ISI) を 0-133.3 msec の 5 段階に変化させた.

クト刺激は刺激のオンセットに合わせて、毎回約 36 min ずつ位置を変化させて呈示することで仮現運動を生じさせた。本実験の目的は ISI の効果を検討することであるから、仮現運動刺激の SOA は全ての ISI に対して固定した値を用いることとし、全ての ISI に対して十分に長い刺激呈示時間を与え得る値として 200 msec を採用した。

## 実験手続き

本実験は暗室内で個別に行った。実験参加者は顎台に頭部を乗せて固定し、CRT ディスプレイの画面に呈示された刺激を両眼観察した。参加者の眼球運動はモニターせず、刺激観察中は注視点から目を離さないように教示を行うことで、眼球運動を統制した。

図 2-3 に、本実験の MOT 課題の 1 試行の流れを示す。実験を通して、注視点および刺激呈示領域の枠は常に呈示した。参加者がマウスのボタンを押すことで試行が始まるようにした。最初に、刺激呈示領域内の灰色背景上に、白色の円形オブジェクトを 9 個呈示した (1 秒間)。オブジェクトの初期位置は試行ごとにランダムに、しかしオブジェクト同士が重なり合わないよう設定した。その後、オブジェクト 9 個のうち 2 個を 2 秒間赤色に変化させることで、その試行における追跡すべきターゲットとして指定した。2 秒経過すると赤色のオブジェクトの色は元の白色に戻った。戻ってから 0.5 秒後に 9 個のオブジェクトそれぞれがランダムな方向に仮現運動を開始し、7 秒後に停止した。参加者の課題は、ターゲットとして指定されたオブジェクト 2 個両方を、注視点を凝視したまま追跡し、オブジェクトの運動停止後に自分が追跡していたオブジェク

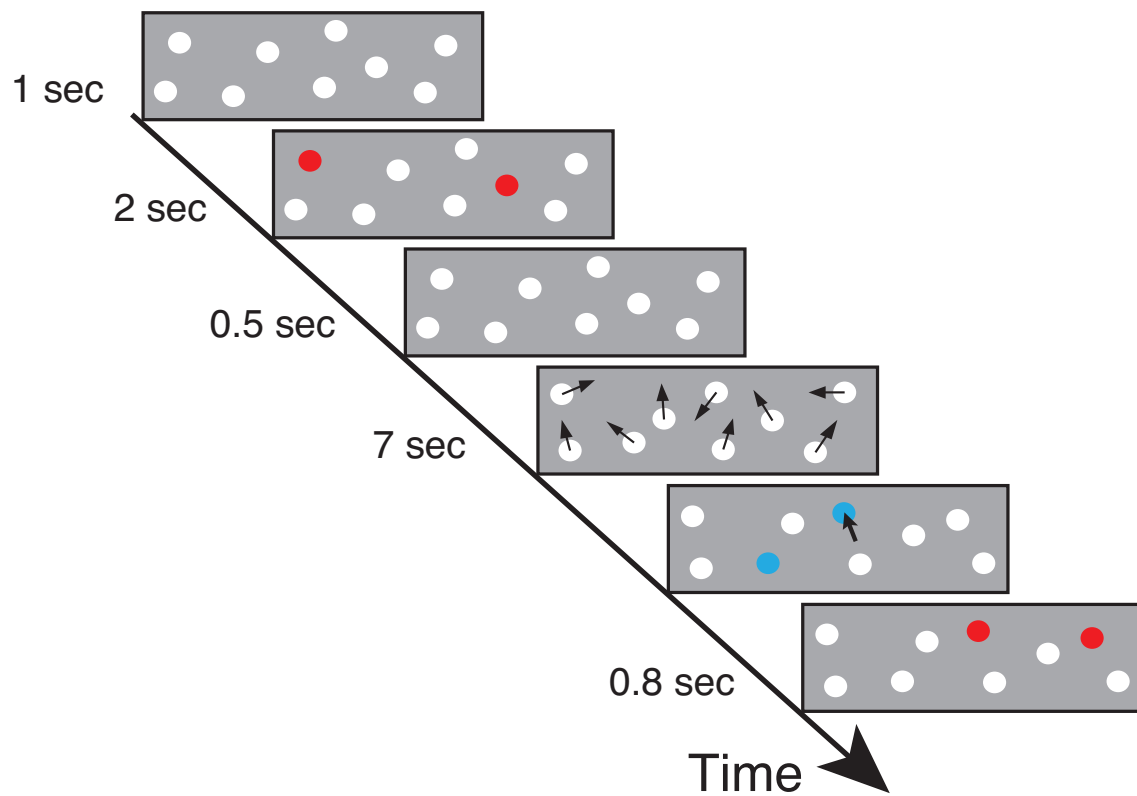


図 2-3 実験 1 の MOT 課題の 1 試行の流れ.



ト 2 個をマウスポインタで回答することであった。追跡できていなかった場合でも 2 個を選択するように参加者に要求した。参加者がターゲット 2 個を報告し終わると、正解のオブジェクトの色を赤色に変化させることで、その試行における正誤を参加者にフィードバックした。その 0.8 秒後にオブジェクトは全て消失し、次の試行へと移った。

各参加者に対し、ISI 挿入時間 5 水準 (0, 33.3, 66.7, 100, 133.3 msec)、呈示視野 2 水準 (上視野/下視野) の計 10 条件を、20 試行ずつ行った。実験は 10 セッションに分けて行い、セッション内では ISI および呈示視野条件は固定し、10 セッションをランダムな順序で実施した。

### 2.2.3 結果

本実験では、実験参加者がターゲットだとして回答したオブジェクト 2 個が両方とも正しかった場合のみを正答とし、条件ごとの正答率を算出した。この算出方法による課題のチャンスレベルは 2.78%である。

図 2-4 に、上下視野の結果を合わせ、ISI 条件ごとの MOT 課題の参加者 5 名の平均正答率を示す。ISI が挿入されない (0 msec) 場合には正答率が 50%程度となった。ISI を挿入した場合、ISI の増加とともに正答率が減少し、ISI 100 msec 条件では 30%程度となった。ISI の効果について 1 要因参加者内分散分析を行った結果、ISI の主効果が有意となった ( $F(4, 16) = 9.45, p < .001$ )。また、どの条件でも、課題のチャンスレベルの 2.78%よりも高い正答率を示した。

図 2-5 に、ISI 条件および呈示視野条件ごとの MOT 課題の参加者 5 名の平均

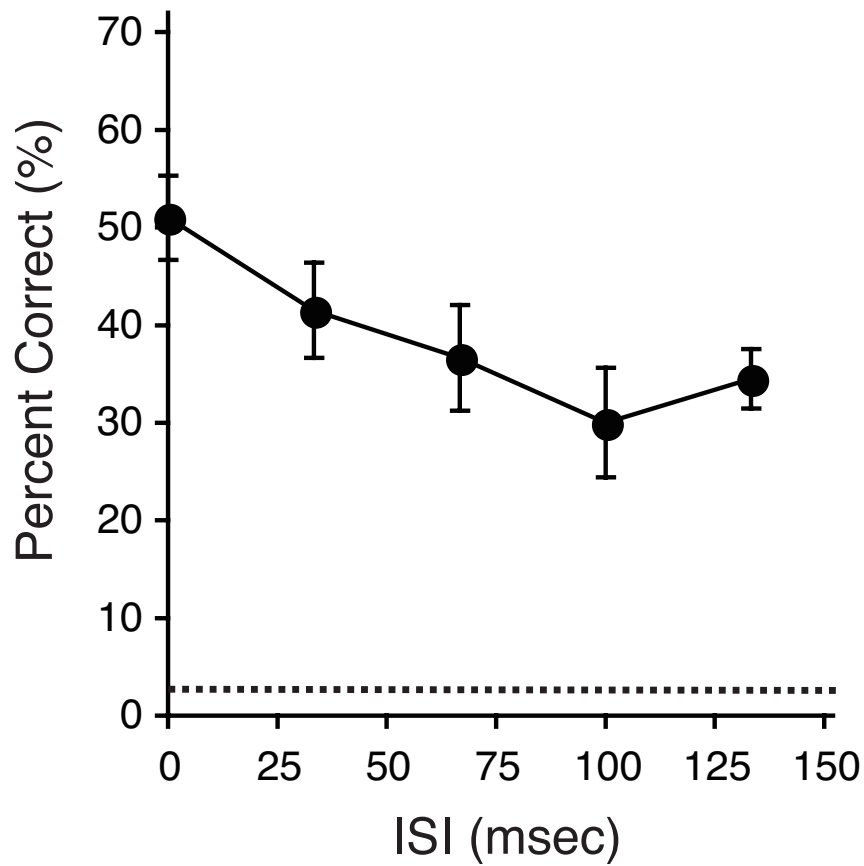


図 2-4 実験 1 の結果 (N=5). 上下視野条件の結果を合わせ, ISI 条件ごとの MOT 課題の参加者 5 名の平均正答率をプロットした. エラーバーは標準誤差を, 点線は課題のチャンスレベル 2.78%を示す.

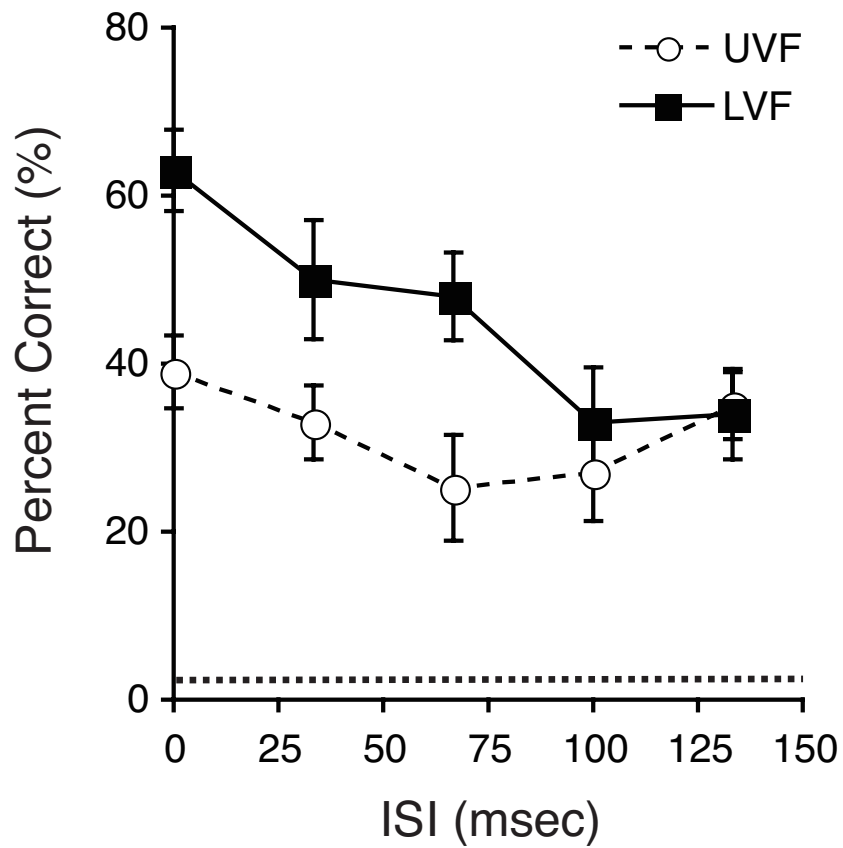


図 2-5 実験 1 の視野条件別の結果 (N=5)。ISI 条件および呈示視野条件ごとの、MOT 課題の参加者 5 名の平均正答率をプロットした。エラーバーは標準誤差を、点線は課題のチャンスレベル 2.78%を示す。UVF：上視野，LVF：下視野。

正答率を示す。各条件の平均正答率は 30-70%と、どの条件においてもチャンスレベルの 2.78%よりも高い正答率であった。ISI が挿入されない (0 msec) 場合には課題成績は下視野優位となった。ISI が挿入された場合、ISI が増加するとともに下視野では正答率が大きく低下した。一方、上視野では大きな変化は認められなかった。その結果として、ISI が増加するとともに課題成績の下視野優位性が減少し、ISI が 100 msec を超えると下視野優位性は消失した。

ISI×呈示視野の 2 要因参加者内分散分析を行った結果、ISI の主効果 ( $F(4, 16) = 9.54, p < .001$ )、呈示視野の主効果 ( $F(1, 4) = 13.28, p < .05$ ) はともに有意となり、ISI と呈示視野の交互作用も有意であった ( $F(4, 16) = 3.78, p < .05$ )。交互作用に関する単純主効果については、下視野における ISI 挿入の効果は有意であった ( $F(4, 16) = 9.71, p < .01$ )。一方、上視野における ISI 挿入の効果は有意傾向にとどまった ( $F(4, 16) = 2.92, p < .10$ )。また、各 ISI 条件における上下視野間の成績については、ISI が 0 msec 条件、66.7 msec 条件では下視野と上視野の成績の間に有意な差が認められたが ( $p < .05$ )、33.3 msec 条件では有意傾向にとどまり ( $p < .10$ )、100.0 msec 条件と 133.3 msec 条件では有意な差は認められなかった。

#### 2.2.4 考察

本実験では、MOT 課題の仮現運動刺激への ISI 挿入が、課題成績に与える効果を検討した。その結果、100 msec 程度の ISI を挿入することにより MOT 課題の成績が低下した。

100 msec 程度の ISI によって影響を受けるメカニズムとして、2つの可能性が考えられる。ひとつは、2.1 節で述べた 1 次運動検出メカニズムである。心理物理学の実験では、ドットパターンの運動方向判断 (Lappin & Bell, 1972, 1976) やランダムドット・キネマトグラムのドットの運動による領域分割 (Braddick, 1974) が ISI 挿入によって困難になること、MF 縞の運動方向 (Georgeson & Harris, 1990; Sato & Mugishima, 2000) が ISI の値によって変化することが報告されている。これらの結果については、ドットパターンや縞刺激といった運動刺激の処理には 1 次運動検出メカニズムが関与しており、ISI の挿入によって運動の検出が阻害されることによるとする考えが有力である (詳細は Braddick (1980) などを参照のこと)。こうした実験では、他の刺激パラメータによって時間限界に差が生じるものの、数十~100 msec 程度で ISI の効果が生じている。ゆえに 1 次運動検出メカニズムの運動検出の時間限界は、長くても 100 msec 程度と考えられている。本実験での ISI の効果の時間特性は、上記の 1 次運動検出の時間限界と概ね一致するものである。こうした実験結果を考慮すると、本実験で示された ISI の効果は、オブジェクト追跡に 1 次運動の検出が寄与している可能性を示すものと考えられることもできよう。

一方、意識的な視覚処理であるオブジェクト追跡において、100 msec 程度の ISI によって影響を受ける高次の視覚注意処理が存在し、MOT 課題の刺激の処理に関与している可能性もあり得る。この可能性に関しては、これまでに報告されている注意の効果の時間特性に注目して考察を行う。注意の瞬き現象についての実験から、第 1 ターゲットに向けられた注意は、200-500 msec 程度保たれて第 2 ターゲットの検出に影響を与えることが報告されている (e.g.,

Raymond, Shapiro, & Arnell, 1992). また、注意を持続的に向けている視覚対象に対する変化検出課題においても、ブランク時間を 200 msec はさんでも変化検出が可能であることが報告されている (Nakashima & Yokosawa, 2012). これらの研究における刺激事態は、MOT 課題のものとは大きく異なるため直接の比較は難しいが、こうした結果は、注意が向けられた視覚対象の情報を保持できる時間限界が 100 msec より長いことを示していると考えられる。しかしながら、注意の効果はこれより短い ISI によっても影響を受ける可能性は残されており、本実験の結果は 100 msec 程度の ISI が注意処理に影響を与えたものだと解釈可能である。たとえば、注意の補足 (attentional capture) の効果が ISI に影響を受けたという可能性がある。オブジェクトに捕捉されていた注意が、仮現運動刺激への ISI 挿入によってその効果を弱められ、注意によって遂行されていたオブジェクト追跡が困難になり、結果として課題成績が低下したとも解釈できよう。この可能性は、MOT 課題遂行に注意が役割を果たしているという主張 (e.g., Cavanagh & Alvarez, 2005; He et al., 1996, 1997) とも整合的である。

この ISI の効果は、視野ごとに分けてみると、特に下視野において顕著であった。ISI が挿入されない場合には課題成績が下視野で優位となり、ISI が増加すると特に下視野で成績が低下した。この結果は、1 次運動の検出には上下視野差がないと報告されている一方で (Sato & Mugishima, 2000; Smith & Hammond, 1986), 1 次運動検出よりも高次の運動処理には下視野優位性がみられる (Edwards & Badcock, 1993; Maruya & Sato, 2001; Sato & Mugishima, 2000) とする運動視研究の知見からすると、想定しにくい結果である。この下

視野優位性の問題については、以降の実験の結果と合わせ、2.5.2 節で考察を行う。

オブジェクト追跡に運動処理が寄与するのか否かという問題に関して、次の実験 2 で 2 次運動を用いて、引き続き検討を行う。第 1 章で述べたように、2 次運動は刺激中に輝度成分の移動を伴わないため、1 次運動検出メカニズムでは 2 次運動を検出できない (Cavanagh & Mather, 1989; Chubb & Sperling, 1988)。そのため、1 次運動検出メカニズムとは異なる、2 次運動の検出を行うメカニズムが存在すると一般に考えられている。運動視研究では特に、注意が 2 次運動の処理に関与するという主張が有力となっている (e.g., Cavanagh, 1992; Lu & Sperling, 2001)。実験 2 では、2 次属性で定義された MOT 課題の仮現運動刺激を呈示し、さらに刺激のフレーム間に実験 1 と同じ範囲の ISI を挿入した。MOT 課題の 2 次運動刺激の検出に対して注意処理が関与しているなら、1 次運動検出に対する ISI の効果は、2 次運動に対しては生じなくなると予想される。

## 2.3 実験2：MOT課題に対する2次運動刺激およびISI挿入の効果

### 2.3.1 目的

本実験では、2次運動刺激を用いたMOT課題において、ISI挿入がオブジェクト追跡に与える効果について検討した。1次属性である輝度定義の孤立オブジェクトによる仮現運動、および2次属性であるコントラスト定義、運動定義の孤立オブジェクトによる仮現運動（以後、前者を1次仮現運動、後者を2次仮現運動と呼ぶ）を上視野または下視野に呈示し、実験1と同様の各MOT課題を行いISIの効果を検討した。

### 2.3.2 方法

#### 実験参加者

本実験には成人8名（女性1名、男性7名、年齢22-28歳）が参加した。そのうち4名は実験1に参加した者であった。参加者は全員、裸眼もしくは矯正で正常な範囲の視力および色覚を有していた。2名は実験の目的および内容を知っていたが、残り6名は事前に実験の目的および内容を知らされていなかった。全員、本実験と類似するMOT課題の経験を有し、上視野もしくは下視野に呈示されたMOT課題の刺激を観察しオブジェクト追跡を行うことに習熟していた。輝度定義条件には8名全員、コントラスト定義条件には7名、運動定義条件には5名が参加した。



## 装置

実験 1 と同じ装置を用いた。

## 刺激

図 2-6 に、輝度定義条件、コントラスト定義条件、運動定義条件の刺激の模式図を示す。一様な灰色背景上に 6 deg (縦) × 31 deg (横) の長方形の黒色枠を呈示し、その内部を刺激呈示領域とした。ディスプレイの画面の中心付近に注視点として一辺が 0.45 deg の黒色の正方形を呈示し、注視点から垂直方向に離れた位置、すなわち画面の上部もしくは下部に刺激呈示領域を配置した。注視点から刺激呈示領域の中心までの距離を 10 deg (運動定義刺激のみ 8 deg) とした。オブジェクト刺激は、一辺が 0.9 deg (運動定義刺激のみ 1.1 deg) の正方形オブジェクト 9 個であり、刺激呈示領域内を仮現運動した。運動速度は常に等速であり、約 2.4 deg/sec であった。オブジェクトの運動時間は 6 秒間、運動開始時の運動方向はオブジェクトごとにランダムに設定した。オブジェクトは運動中には運動方向を変化させず直線運動を保ち、刺激呈示領域の枠に衝突した場合にのみ反射して運動方向を変化させた。運動中はオブジェクト同士の重なり合いを許した。

背景領域およびオブジェクト領域はドットのサイズが約  $1.8 \times 1.8$  min のランダムドットパターンとし、33.3 msec ごとに更新した。仮現運動刺激の SOA は 200 msec (輝度, コントラスト定義) もしくは 300 msec (運動定義) に固定し、ISI を 0, 33.3, 66.7, 100, 133.3 msec の 5 段階に変化させ、ドットパターンの更新のタイミングに合わせて、ISI の画像パターンとして背景領域と同じ

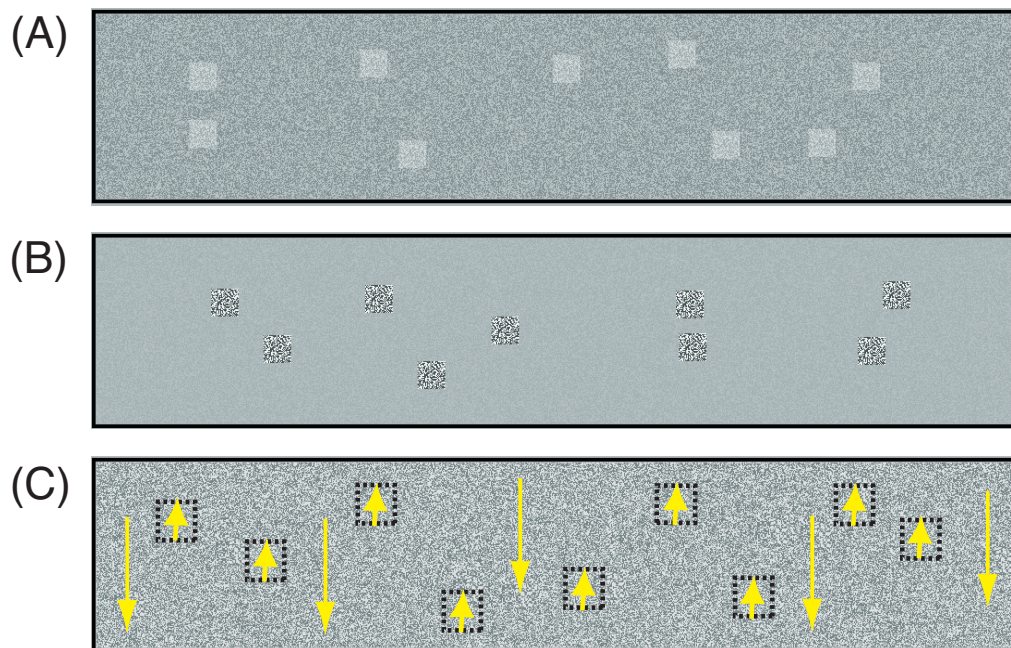


図 2-6 実験2の各属性条件における MOT 課題刺激の模式図。(A). 輝度定義刺激。(B). コントラスト定義刺激。(C). 運動定義刺激。本図における黒色の点線はオブジェクト領域の境界を、黄色の矢印はオブジェクト領域と背景領域のドットの局所運動方向の例を示し、実際の刺激では表示されなかった。

コントラストのドットパターンを挿入した。この ISI の画像パターンは 33.3 msec ごとに更新し、画像ごとのドットパターンが無相関となるようにした。オブジェクト刺激は刺激のオンセットに合わせて、毎回約 29 min (輝度, コントラスト定義) もしくは約 43 min (運動定義) ずつ位置を変化させて条件ごとに運動速度を揃えたうえで呈示することで、仮現運動を生じさせた。運動定義刺激に関しては、予備観察時に輝度定義刺激およびコントラスト定義刺激に比べ視認性が悪かったため、仮現運動刺激を観察しやすいように偏心度を小さくし、オブジェクトの大きさを大きくした。また、仮現運動刺激の SOA が 200 msec の場合、運動定義条件でのオブジェクトの視認が非常に困難であったため、運動定義刺激に対してのみ SOA を 300 msec と長く設定した。

輝度定義刺激では、背景領域およびオブジェクト領域の平均輝度が約 30  $\text{cd/m}^2$  で一定となる、約  $1.8 \times 1.8 \text{ min}$  の大きさのドットから構成されるランダムドットパターンを作成した。ドットパターンは明るいドットと暗いドットから構成され、明暗ドットの輝度コントラストが最大・最低輝度の 30% となるように設定した。明ドットおよび暗ドットのドット密度は 50% ずつとした。そして参加者および呈示視野ごとに輝度定義オブジェクトの運動検出閾を求める予備実験を実施し、求めた閾値の 2.5 倍となる輝度値を用いて、輝度定義刺激の背景領域の平均輝度を下げ、オブジェクト領域の平均輝度を上げることで、MOT 課題における輝度差を設定した。この方法による輝度設定により、オブジェクト領域および背景領域の明暗ドット間のコントラストがそれぞれ変化した。

コントラスト定義刺激では、背景領域およびオブジェクト領域全体の平均輝度が約 30  $\text{cd/m}^2$  で一定になるように、ドット密度が 50% となるドットパターン

を作成した。背景領域を構成するドットパターンのコントラストを 10%，オブジェクト領域を構成するドットパターンのコントラストを 90%に固定した。

運動定義刺激は、背景領域およびオブジェクト領域全体の平均輝度が約 30 cd/m<sup>2</sup>で一定になるように、ドット密度が 50%，ドットコントラスト 60%となるドットパターンを作成した。オブジェクト領域内では 1 フレームにつきドット 2 個分、速度としては約 1.8 deg/sec で上下いずれかの方向にドットが運動し、背景領域ではオブジェクト領域と同じ速度でドットパターンが 180 度反対方向に運動することで、オブジェクトが背景から分離して知覚されるようにした。オブジェクト領域と背景領域の運動方向は、試行中は固定し、試行ごとにランダムに決定されるように設定した。

## 実験手続き

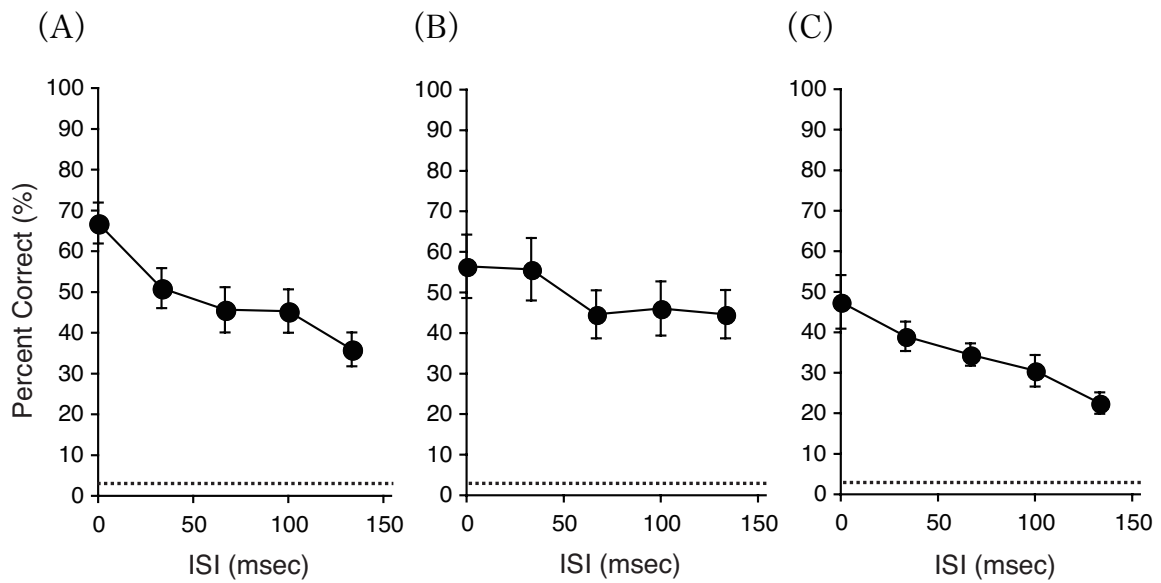
本実験の手続きは、以下の点を除いて実験 1 と同じであった。試行の最初にターゲットを指定するため、オブジェクト 9 個のうち 2 個のオブジェクトの左右の端の色を 2 秒間赤色に変化させた。オブジェクトの運動時間は 6 秒間であった。本実験は 3 つの刺激属性に対してそれぞれ、ISI 挿入時間 5 水準、呈示視野 2 水準の計 10 条件、各 20 試行の合計 200 試行を行った。試行は 10 セッションに分けて実施した。輝度定義条件およびコントラスト定義条件では、セッション内では呈示視野のみを固定し、ISI 5 水準を 4 試行ずつ、ランダムな順序で実施した。セッション間では、上視野と下視野のいずれを行うかはランダムに決定した。運動定義条件では、セッション内では ISI および呈示視野条件は固定し、10 セッションをランダムな順序で実施した。

### 2.3.3 結果

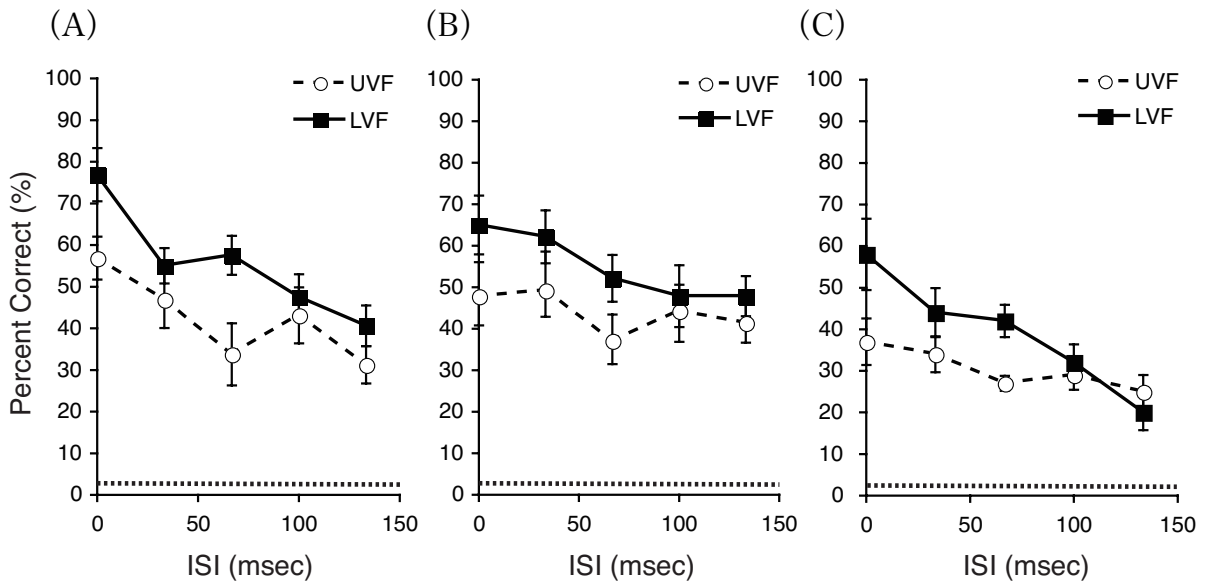
実験 1 と同じく，実験参加者が 2 個両方とも正しいオブジェクトを選択した場合のみを正答とし，条件ごとの正答率を算出した．この算出方法による課題のチャンスレベルは 2.78%である．

図 2-7 に，上下視野条件の結果を合わせ，図 2-7(A)に輝度定義条件における実験参加者 8 名の ISI 条件ごとの平均正答率，図 2-7(B)にコントラスト定義条件における実験参加者 7 名の ISI 条件ごとの平均正答率，図 2-7(C)に運動定義条件における実験参加者 5 名の ISI 条件ごとの平均正答率を示す．ISI の効果について刺激の属性ごとに 1 要因参加者内分散分析を行った結果，全ての属性で ISI の主効果が有意となった（輝度定義条件： $F(4, 28) = 21.81, p < .001$ ；コントラスト定義条件： $F(4, 24) = 4.56, p < .01$ ；運動定義条件： $F(4, 16) = 9.39, p < .001$ ）．どの属性条件でも ISI の主効果が認められ，ISI が増加するとともに課題成績が低下した．そして全ての属性条件で，どの ISI 条件においてもチャンスレベルの 2.78%を大きく上回る正答率を示した．

図 2-8 に，ISI 条件および呈示視野条件ごとに分け，図 2-8(A)に輝度定義条件における実験参加者 8 名の平均正答率，図 2-8(B)にコントラスト定義条件における実験参加者 7 名の平均正答率，図 2-8(C)に運動定義条件における実験参加者 5 名の平均正答率を示す．ISI×呈示視野の 2 要因参加者内分散分析を行った結果を，刺激条件ごとに示す．輝度定義条件において，ISI の主効果が有意 ( $F(4, 28) = 21.60, p < .01$ )，呈示視野の主効果が有意 ( $F(1, 7) = 12.68, p < .01$ )，ISI と呈示視野の交互作用が有意であった ( $F(4, 28) = 3.47, p < .05$ )．交互作



**図 2-7 実験 2 の結果.** 上下視野条件の結果を合わせ、ISI 条件ごとの MOT 課題の平均正答率をプロットした。(A). 輝度定義条件 ( $N=8$ ). (B). コントラスト定義条件 ( $N=7$ ). (C). 運動定義条件 ( $N=5$ ). エラーバーは標準誤差を、点線は課題のチャンスレベル 2.78%を示す.



**図 2-8 実験 2 の条件別の結果.** ISI 条件および呈示視野条件ごとの MOT 課題の平均正答率をプロットした。(A). 輝度定義条件 (N=8). (B). コントラスト定義条件 (N=7). (C). 運動定義条件 (N=5). エラーバーは標準誤差を, 点線は課題のチャンスレベル 2.78%を示す. UVF: 上視野, LVF: 下視野.

用有意の結果を受けた単純主効果の検定より、下視野における ISI 挿入の効果が有意となり ( $F(4, 28) = 14.97, p < .01$ ), 上視野における ISI 挿入の効果も有意であった ( $F(4, 28) = 10.03, p < .01$ ). また, 各 ISI 条件における上下視野間の成績については, ISI が 0 msec 条件, 66.7 msec 条件では下視野と上視野の成績の間に有意な差が認められたが ( $p < .05$ ), 33.3 msec 条件, 100.0 msec 条件, 133.3 msec 条件では有意な差は認められなかった.

コントラスト定義条件においては, ISI の主効果が有意 ( $F(4, 24) = 4.32, p < .01$ ), 呈示視野の主効果も有意であったが ( $F(1, 6) = 6.44, p < .05$ ), ISI と呈示視野の交互作用は有意ではなかった ( $F(4, 24) = 1.33, n.s.$ ).

運動定義条件については, ISI の主効果は有意であったが ( $F(4, 16) = 9.22, p < .01$ ), 呈示視野の主効果は有意ではなかった ( $F(1, 4) = 3.98, n.s.$ ). ISI と呈示視野の交互作用は有意となった ( $F(4, 16) = 4.78, p < .01$ ). 交互作用有意の結果を受けた単純主効果の検定より, 下視野における ISI 挿入の効果は有意であった ( $F(4, 16) = 9.82, p < .01$ ). 一方, 上視野における ISI 挿入の効果は有意傾向であった ( $F(4, 16) = 2.55, p < .10$ ). また, 各 ISI 条件における上下視野間の成績は, ISI が 0 msec 条件, 66.7 msec 条件では下視野と上視野の成績の間に有意な差が認められたが ( $p < .05$ ), 33.3 msec 条件, 100 msec 条件, 133.3 msec 条件では有意な差は認められなかった.

どの属性条件においても ISI の主効果が認められ, ISI が増加するとともに課題成績が低下した. 続いて, 視野の主効果が輝度定義条件およびコントラスト定義条件で認められ, 運動定義条件以外は課題成績が下視野優位となった. さらに輝度定義条件と運動定義条件で ISI×呈示視野の交互作用が認められ, ISI



が挿入されない (0 msec) 条件では上視野よりも下視野で課題成績が高く, ISI の増加とともに下視野優位性が減少し, 100 msec 以上の ISI で消失するという, 実験 1 と同様の傾向となった。

### 2.3.4 考察

本実験では, 実験 1 と同様の手続きによって, 2次運動を用いた MOT 課題に対する ISI の効果について検討した。その結果, 1次仮現運動を用いた輝度定義条件については, ISI 挿入によって MOT 課題の成績が低下するという, 実験 1 と同様の結果が得られた。MOT 課題成績に対する ISI の効果が改めて確認されたと言えよう。さらに, ISI が挿入されない場合には 2次仮現運動刺激でも 1次仮現運動刺激の場合と近い課題成績の傾向となり, 挿入される ISI が増加すると成績が有意に低下した。ISI の効果が 2次仮現運動の場合にも認められたということは, ISI が 2次運動を処理するメカニズムにも影響を与えたことを示す。加えて, この効果が 100 msec 程度の長さの ISI で生じたことは, 2次仮現運動刺激のオブジェクト追跡に寄与するメカニズムが, 1次仮現運動刺激に対するものと類似した時間特性をもつことを示している。本実験で見出された 2次仮現運動に対する ISI の効果は, これまで報告されていない, 仮現運動に関する新たな知見であるが, 実験 1 および本実験の 1次仮現運動に関する結果と矛盾するものではない。実験 1 では刺激として輝度定義の 1次仮現運動を用いたこともあり, ISI が効果を及ぼすのは 1次運動検出メカニズムだと想定した。しかし本実験の結果も合わせて考えると, 1次仮現運動刺激は 2次以上の成分も含む

ものであり、ISI が影響を及ぼしたのは 1 次運動検出よりも高次の視覚過程であるとも解釈できる。このように考えれば、1 次仮現運動と 2 次仮現運動とで類似した時間特性が示されることも十分にあり得るであろう。

2 次仮現運動刺激における下視野優位性については、コントラスト定義条件では課題成績に下視野優位性が確認された。また、運動定義条件については、主効果としては下視野優位な結果とはならなかったものの、交互作用の単純主効果の結果から ISI が挿入されない (0 msec) 条件では下視野優位性が確認された。ISI を増加させていくと、運動定義条件では輝度定義条件と同様に、下視野で特に正答率が大きく低下し、ISI が 100 msec 以上で上下視野差が消失した。しかしコントラスト定義条件では、ISI を増加させていくと上下視野両方で課題成績が低下し、100 msec 以上の ISI においても下視野優位性は消失しなかった。以上の結果は、ISI 挿入の効果については実験 1 と一貫しているが、下視野優位性については属性ごとに不一致な結果である。この視野ごとの結果については、2.5.2 節で改めて考察を行う。

以上の 2 次運動および ISI の効果について 2 つの可能性が考えられる。第 1 に、オブジェクト追跡に関与する注意処理に ISI が影響を与えたという可能性である。2 次仮現運動刺激の結果が 1 次仮現運動刺激と同様の傾向になったということは、注意処理が 1 次刺激、2 次刺激にかかわらずオブジェクト追跡に関与していることを示しているとも考えられる。本実験の結果のうち、1 次刺激と 2 次刺激の両方で 100 msec 程度の ISI が課題成績を低下させたという効果は、これまでの注意研究では明らかとはなっていないところである。この ISI の効果についても、実験 1 で述べたように、100 msec 程度の ISI に影響を受ける注意

処理が存在すると考えれば、本実験の結果の説明が可能である。第 2 の可能性は、刺激に対する運動処理がオブジェクト追跡に寄与しており、ISI がその運動処理に効果を及ぼしたという可能性である。1 次仮現運動に加えて 2 次仮現運動でも ISI の効果が確認されたが、2 次運動処理と ISI との関係については、これまでの運動視研究では明確になっていない。しかしながら、1 次運動だけでなく 2 次運動も処理し得る運動処理メカニズムが存在し、それが 100 msec 程度の ISI によって影響を受けると考えれば、今回の結果は運動処理が寄与していると考えられることによっても説明が可能であろう。以上のように、本実験の結果は注意処理のみによっても、運動処理の寄与を想定することによっても解釈が可能となる結果であり、オブジェクト追跡に寄与する視覚処理を明確にするものとはならなかった。

この問題について引き続き検討するため、次の実験 3 では、MOT 課題に加えて別の視覚課題を同時に課す二重課題を遂行することにより、MOT 課題の処理に認知的負荷を与えた場合に、MOT 課題成績がどのように変化するかを検討することとした。一般的に注意処理は処理資源に限界があると考えられており、Cavanagh and Alvarez (2005) の追跡モデルで主張されているように、MOT 課題におけるオブジェクト追跡が注意により遂行されているなら、二重課題によってその処理資源に負荷を与えることで、MOT 課題の成績が低下すると考えられる。

## 2.4 実験3：MOT課題に対する二重課題による認知的負荷の影響

### 2.4.1 目的

本実験では、オブジェクト追跡を遂行している処理メカニズムと、注意が関与する視覚処理との関係について検討した。本実験ではその検討を行うため、MOT課題遂行と同時に別の視覚課題を課す二重課題の手法を用いた。この二重課題状況下でMOT課題に対して認知的負荷をかけることが、MOT課題の成績に及ぼす影響について検討した。

二重課題パラダイムとは、実験参加者に2つ以上の実験課題を同時に課すことによって、その複数の実験課題ではたらいっているメカニズムが、一定の処理限界をもつ、共通する処理資源をもつメカニズムであるかどうかを検討するものである。もし共通する処理資源を使用するメカニズムによって遂行される2つの課題を実験参加者に課した場合、各課題を単独で行うよりも同時に行う場合のほうが、共通の処理資源に対して負荷がかかると考えられる。そのため、一方の課題に集中した場合にはもう一方の課題の成績が低下する、もしくは両方の課題の成績が共に低下すると考えられている。オブジェクト追跡の研究ではMOT課題の要因と他の高次の処理要因との共通性が注目され、MOT課題と視覚探索課題との視覚処理の共通性 (Alvarez, Horowitz, Arsenio, DiMase, & Wolfe, 2005)、MOT課題の処理とワーキングメモリーとの共通性 (Fougnie & Marois, 2006; Zhang, Xuan, Fu, & Pylyshyn, 2010) について、この二重課題法を用いた検討が行われている。

本実験では、高次の運動処理に影響を与える可能性のある視覚課題として、文字を同じ空間位置に高速呈示する Rapid Serial Visual Presentation (RSVP) による文字検出課題を用いた。Ho (1998) は、テクスチャ定義の運動刺激に対して運動方向判断を行う課題に加えて、さらに RSVP による文字認知課題を課したところ、運動を知覚する割合が減少することを報告した。このことは、RSVP を用いた二重課題が比較的高次の運動処理のはたらきを妨害し得ることを示している。

本実験では、実験 2 と同様の輝度定義、コントラスト定義、運動定義の各 MOT 課題を用い、ISI が 0 msec と 100 msec の条件において、主課題である MOT 課題および副課題である RSVP による文字検出課題の両方を行う二重課題あり条件と、MOT 課題だけを行う二重課題なし条件を設けて、成績を比較した。

## 2.4.2 方法

### 実験参加者

本実験には成人 8 名（女性 1 名、男性 7 名、年齢 22-28 歳）が参加した。参加者は全員、裸眼もしくは矯正で正常な範囲の視力と色覚を有していた。参加者のうち 2 名は実験の目的および内容を知っていたが、残り 6 名は事前に実験の目的および内容を知らされていなかった。8 名のうち、輝度定義条件には 7 名、コントラスト定義条件、運動定義条件には 6 名が参加した。3 条件全てに参加したのは 5 名であった。

## 装置

実験 1 および実験 2 と同じ装置を用いた。

## 刺激

図 2-9 に、本実験における MOT 課題と文字検出課題の刺激配置を示す。

**MOT 課題** 実験 2 と同じ、輝度定義、コントラスト定義、運動定義の MOT 課題を課した。ISI は 0 msec および 100 msec の 2 水準とした。オブジェクトの仮現運動の SOA は、輝度定義条件およびコントラスト定義条件では 200 msec、運動定義条件では 300 msec で固定した。

**文字検出課題** 使用した文字は黒色の大文字アルファベットで、"C", "F", "J", "N", "A", "B", "S", "Z", "X" の 9 種類であり、一様な灰色背景の上に RSVP の手法を用いて呈示した。文字呈示の SOA は、参加者 1 名のみ 66.7 msec、他の 7 名では 100 msec であった。ISI は 0 msec であった。文字の呈示順序はランダムになるように設定した。画面の MOT 課題の刺激呈示領域から 10 deg (輝度、コントラスト定義条件) もしくは 8 deg (運動定義条件) 離れた位置、すなわち実験 2 で注視点が呈示されていた位置に RSVP の文字列を呈示した。

## 実験手続き

本実験では、実験参加者に MOT 課題と文字検出課題を同時に課す二重課題あり条件と、実験参加者には MOT 課題のみを課す二重課題なし条件を設けた。二重課題なし条件では、二重課題あり条件と同じく RSVP 文字列は呈示されたが、参加者には文字検出課題を行わないように教示した。

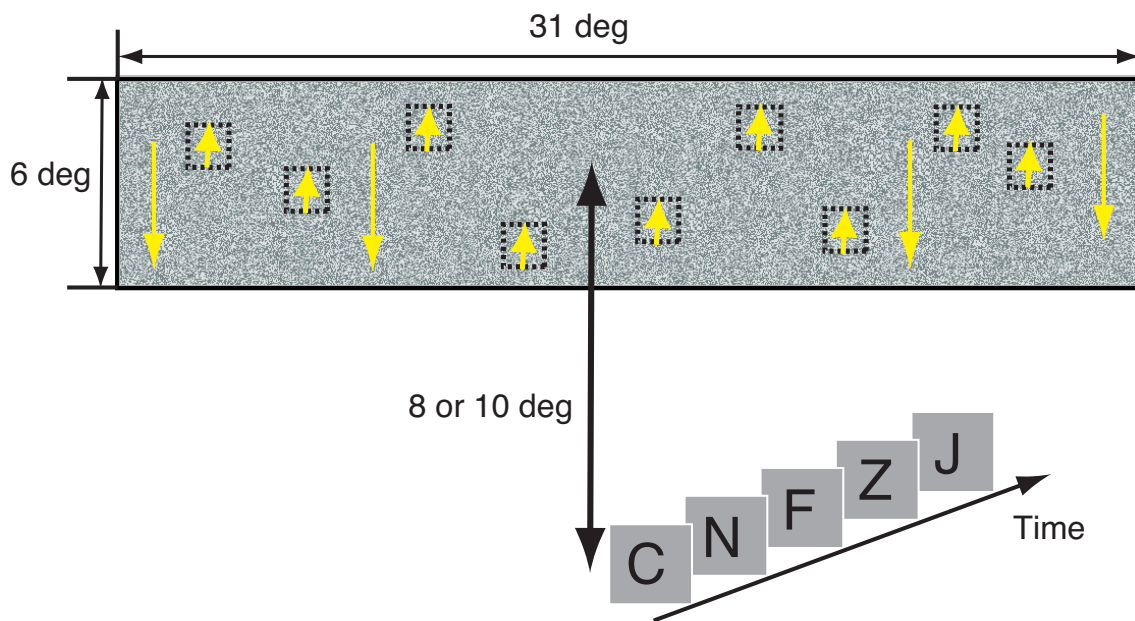


図 2-9 実験 3 における MOT 課題および文字検出課題の刺激の空間配置の模式図 (運動定義刺激, 上視野呈示の場合)。実験 2 において注視点を呈示した位置に, RSVP による文字検出課題の文字列を呈示した。

**MOT 課題** MOT 課題の手続きは実験 2 の各属性刺激の場合とそれぞれ同じであった。課題の正答率の定義も実験 1 および実験 2 と同じで、課題のチャンスレベルは 2.78%である。

**文字検出課題** 連続呈示されるアルファベット文字列のなかから、あらかじめ指定されたターゲットのアルファベット（本実験ではターゲットを "X" に固定した）を検出する課題であった。MOT 課題のオブジェクトが運動しはじめると同時に文字列の呈示を開始させ、オブジェクトの運動が停止すると同時に文字列の呈示も停止させた。実験参加者は MOT 課題でターゲット 2 個を回答した後、文字列中にターゲットの文字が存在したかどうかを 2 肢強制選択で回答した。試行の半数でターゲットの文字が呈示され、試行の残り半数ではターゲットの文字が呈示されなかったため、課題のチャンスレベルは 50%であった。

本実験は MOT 課題の 3 つの属性条件それぞれにつき、ISI 2 条件、呈示視野 2 条件、二重課題あり／なし条件の計 8 条件を行った。試行は 8 セッションに分けてブロック化して実施し、セッション内では 8 条件のうちどれかひとつの条件のみを行った。セッションは実験参加者ごとにランダムな順序で実施した。二重課題なし条件では 1 セッションは 20 試行であった。二重課題あり条件では 1 セッションは 24 試行実施され、文字検出課題の不正解が 4 試行以下（すなわち正答率が 83.3%以上）だった場合は、副課題に対して注意が正しく向けられていたと判断し、文字検出課題を正答した試行のうち最初の 20 試行を分析に用いた。文字検出課題が 5 試行以上不正解だった場合は、副課題に対する注意が正しく向けられていなかったと判断し、再度その刺激による実験を実施した。

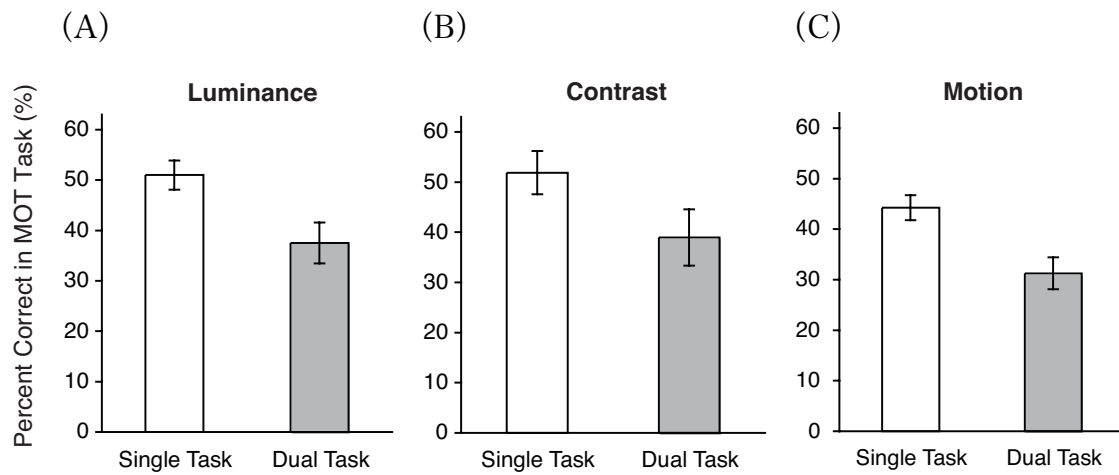


### 2.4.3 結果

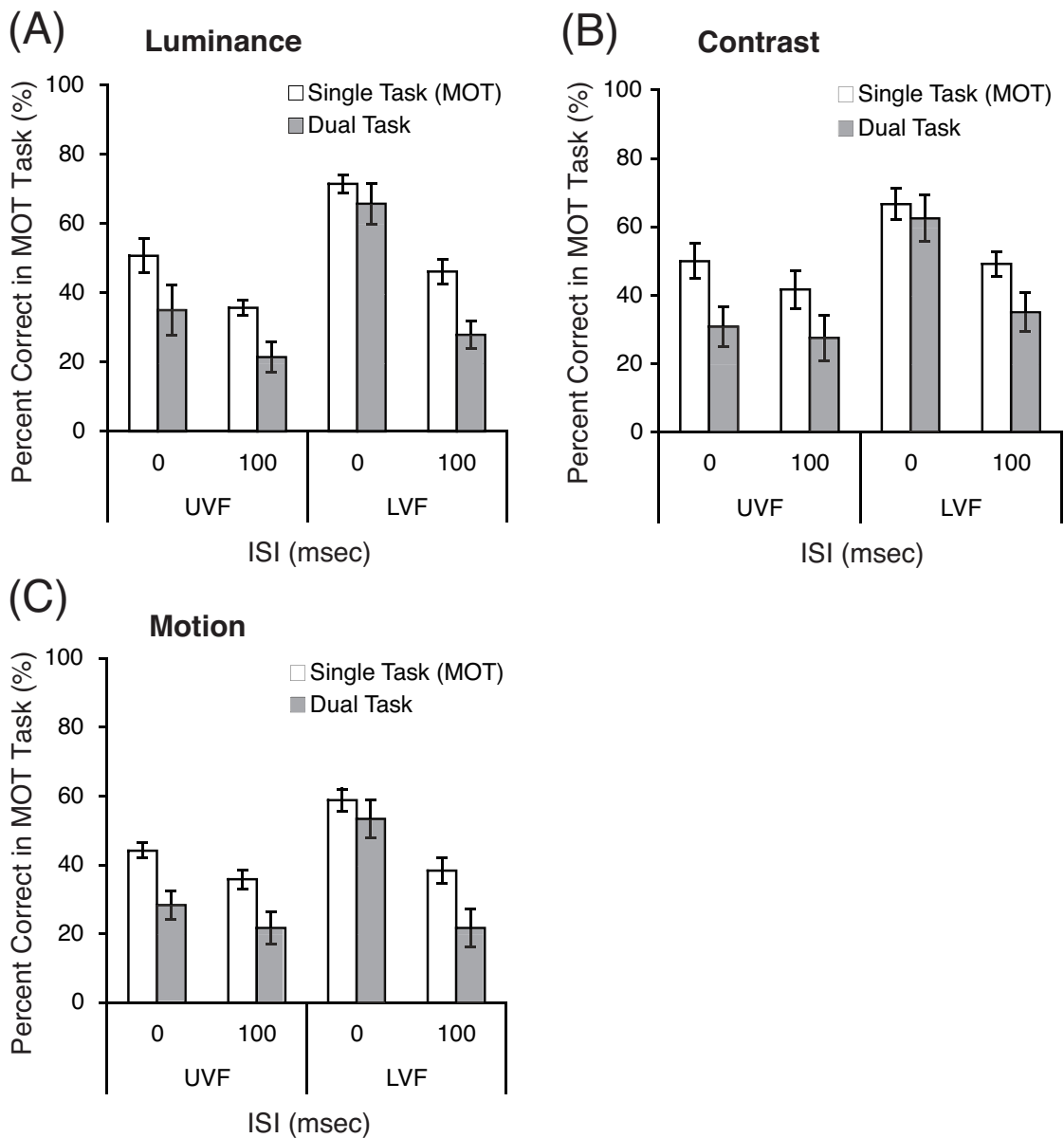
MOT 課題の結果に関して、実験 1, 2 と同じく、実験参加者が 2 個両方とも正しいオブジェクトを選択した場合のみを正答とし、条件ごとの正答率を算出した。この算出方法による課題のチャンスレベルは 2.78% である。

図 2-10 に、ISI 条件および呈示視野条件の結果を合わせ、二重課題の有無の条件ごとの MOT 課題の平均正答率を示した。図 2-10(A) に、MOT 輝度定義条件における参加者 7 名の平均正答率を、図 2-10(B) に、MOT コントラスト定義条件における参加者 6 名の平均正答率を、図 2-10(C) に、MOT 運動定義条件における参加者 6 名の平均正答率をそれぞれ示した。二重課題の効果に関して、刺激の属性ごとに 1 要因参加者内分散分析を行った結果、全ての属性で二重課題の主効果が有意となった（輝度定義条件： $F(1, 6) = 13.02, p < .05$ ；コントラスト定義条件： $F(1, 5) = 19.03, p < .01$ ；運動定義条件： $F(1, 5) = 14.77, p < .05$ ）。どの属性条件においても二重課題の主効果が認められ、二重課題による負荷を与えることにより課題成績が有意に低下した。しかし全ての属性条件において、二重課題の有無いずれの条件でもチャンスレベルの 2.78% を大きく上回る正答率を示した。

図 2-11 に、ISI, 上下視野, および二重課題の有無の条件ごとに分けた MOT 課題の平均正答率を示した。図 2-11(A) に、MOT 輝度定義条件における条件ごとの参加者 7 名の平均正答率を、図 2-11(B) に、MOT コントラスト定義条件における条件ごとの参加者 6 名の平均正答率を、図 2-11(C) に、MOT 運動定義条件における条件ごとの参加者 6 名の平均正答率をそれぞれ示した。これら属性



**図 2-10 実験3の MOT 課題の結果.** ISI 条件および呈示視野条件の結果を合わせ、二重課題の有無の条件ごとの MOT 課題の平均正答率を示した。 **(A)**. 輝度定義条件 ( $N=7$ ). **(B)**. コントラスト定義条件 ( $N=6$ ). **(C)**. 運動定義条件 ( $N=6$ ). エラーバーは標準誤差を示す。 Single Task : 二重課題無し (MOT 課題のみ), Dual Task : 二重課題あり (MOT 課題+文字検出課題).



**図 2-11 実験3の条件別の MOT 課題の結果。** ISI, 呈示視野, および二重課題の有無の条件ごとの MOT 課題の平均正答率を示した。 **(A)**, 輝度定義条件 ( $N=7$ ). **(B)**, コントラスト定義条件 ( $N=6$ ). **(C)**, 運動定義条件 ( $N=6$ ). エラーバーは標準誤差を示す。 UVF: 上視野, LVF: 下視野, Single Task: 二重課題無し (MOT 課題のみ), Dual Task: 二重課題あり (MOT 課題+文字検出課題).

表2-1 実験3の輝度定義条件における3要因参加者内分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
参加者	1597.07	6	266.18	
ISI	2703.83	1	2703.83	42.40 ***
誤差 [ISI]	382.66	6	63.78	
呈示視野	1602.65	1	1602.65	49.28 ***
誤差 [呈示視野]	195.14	6	32.52	
二重課題	1074.68	1	1074.68	12.18 *
誤差 [二重課題]	529.34	6	88.22	
ISI × 呈示視野	389.66	1	389.66	12.49 *
誤差 [ISI × 呈示視野]	187.21	6	31.20	
ISI × 二重課題	51.04	1	51.04	0.94
誤差 [ISI×二重課題]	326.52	6	54.42	
呈示視野 × 二重課題	30.14	1	30.14	0.71
誤差 [呈示視野 × 二重課題]	253.19	6	42.20	
ISI × 呈示視野 × 二重課題	63.64	1	63.64	6.28 *
誤差 [ISI × 呈示視野 × 二重課題]	60.85	6	10.14	
全体	9447.61	55		

\*  $p < .05$ , \*\*\*  $p < .001$

**【単純・単純主効果】** (該当部分のみ)

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
二重課題 [上視野, ISI 0 msec]	382.31	1	382.31	7.84 **
二重課題 [上視野, ISI 100 msec]	350.40	1	350.40	7.19 *
二重課題 [下視野, ISI 0 msec]	37.03	1	37.03	0.76
二重課題 [下視野, ISI 100 msec]	449.74	1	449.74	9.23 **
誤差		24	48.75	

\*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$

表2-2 実験3のコントラスト定義条件における3要因参加者内分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
参加者	2648.76	5	529.75	
ISI	870.83	1	870.83	33.83 **
誤差 [ISI]	128.71	5	25.74	
呈示視野	1163.97	1	1163.97	28.11 **
誤差 [呈示視野]	207.04	5	41.41	
二重課題	783.84	1	783.84	18.95 **
誤差 [二重課題]	206.88	5	41.38	
ISI × 呈示視野	310.03	1	310.03	13.56 *
誤差 [ISI × 呈示視野]	114.30	5	22.86	
ISI × 二重課題	7.50	1	7.50	0.49
誤差 [ISI×二重課題]	75.90	5	15.18	
呈示視野 × 二重課題	77.14	1	77.14	6.14 +
誤差 [呈示視野 × 二重課題]	62.82	5	12.56	
ISI × 呈示視野 × 二重課題	63.92	1	63.92	7.38 *
誤差 [ISI × 呈示視野 × 二重課題]	43.30	5	8.66	
全体	6764.94	47		

+  $p < .10$ , \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$

**【単純・単純主効果】** (該当部分のみ)

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
二重課題 [上視野, ISI 0 msec]	441.77	1	441.77	22.72 ***
二重課題 [上視野, ISI 100 msec]	248.43	1	248.43	12.78 **
二重課題 [下視野, ISI 0 msec]	17.98	1	17.98	0.93
二重課題 [下視野, ISI 100 msec]	224.21	1	224.21	11.53 **
誤差		20	19.45	

\*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$

表2-3 実験3の運動定義条件における3要因参加者内分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
参加者	675.11	5	135.02	
ISI	1368.86	1	1368.86	270.52 ***
誤差 [ISI]	25.30	5	5.06	
呈示視野	460.47	1	460.47	4.40 +
誤差 [呈示視野]	523.91	5	104.78	
二重課題	905.06	1	905.06	15.05 *
誤差 [二重課題]	300.66	5	60.13	
ISI × 呈示視野	389.14	1	389.14	12.09 *
誤差 [ISI × 呈示視野]	160.88	5	32.18	
ISI × 二重課題	56.79	1	56.79	3.44
誤差 [ISI×二重課題]	82.55	5	16.51	
呈示視野 × 二重課題	17.36	1	17.36	0.36
誤差 [呈示視野 × 二重課題]	244.29	5	48.86	
ISI × 呈示視野 × 二重課題	55.36	1	55.36	1.40
誤差 [ISI × 呈示視野 × 二重課題]	198.35	5	39.67	
全体	5464.11	47		

+  $p < .10$  \*  $p < .05$ , \*\*\*  $p < .001$

条件ごとに、ISI×呈示視野×二重課題の有無の3要因参加者内分散分析を行った。その結果を分散分析表として表 2-1 から表 2-3 に示す（本文における分散分析の結果の記述は、これらの表をもって省略する）。

全ての属性条件において、ISI および二重課題の主効果が有意であったことから、ISI の挿入および二重課題によって MOT 課題成績が低下したことが認められた。呈示視野の要因については、輝度定義条件およびコントラスト定義条件で主効果が有意であったものの、運動定義条件では有意傾向にとどまった。結果のうち、ISI (0 msec, 100 msec) × 呈示視野 (上視野, 下視野) の各条件で、二重課題なし条件に比べて二重課題あり条件の場合に MOT 課題成績が低下するか否かをみた。輝度定義条件では、ISI が挿入されない下視野の場合には (0 msec・下視野条件)、二重課題あり条件でも二重課題なし条件と比べて正答率が数%程度の低下にとどまったのに対し、ISI が挿入されない (0 msec) 上視野および ISI 100 msec が挿入された上下視野両条件 (ISI 100 msec・下視野条件, ISI 100 msec・上視野条件, ISI 0 msec・上視野条件) では、正答率が 10 数%-20% 程度、有意に低下した。2次運動であるコントラスト定義条件については、輝度定義条件と同様の傾向が確認された。一方、運動定義条件に関しては、二重課題により全体的な成績の低下がみられ、ISI が挿入されない下視野の場合に (0 msec・下視野条件)、二重課題あり条件で二重課題なし条件と比べて正答率が低下しにくい傾向は確認されなかった。以上の各視野の傾向から、二重課題を課した場合に MOT 課題成績の下視野優位性が減少することはなかった。

#### 2.4.4 考察

本実験では、二重課題状況下で MOT 課題に対して認知的負荷を与えることが、MOT 課題の課題成績に及ぼす影響について検討した。その結果、すべての属性条件において、二重課題によって負荷を与えることにより課題成績が低下した。この二重課題状況下での課題成績の低下は、MOT 課題のオブジェクト追跡に対して注意にもとづく高次の視覚処理が関与していることを示している。また、本実験の全ての属性条件で ISI 挿入により課題成績が低下し、実験 1 および実験 2 でみられた ISI の効果が改めて確認された。

条件別の分析の結果から、ISI×呈示視野の交互作用が全ての属性条件で有意となり、特に下視野条件において ISI 挿入による課題成績の顕著な低下がみられた。この結果は、実験 1 および実験 2 の輝度定義条件での、下視野の課題成績が ISI の影響を強く受けるという結果の傾向が改めて確認されたものである。さらに、ISI および呈示視野条件ごとの二重課題の効果の相違がみられた。MOT 刺激を下視野に呈示した場合、全ての属性で、MOT 課題の課題成績が他の条件に比べて高くなり、ISI 0 msec・下視野条件では、二重課題を課しても他の条件と比べて課題成績が比較的高く保たれている。一方、上視野の課題成績は二重課題状況下で低下している。この条件間での傾向差に関しては、1 次仮現運動である輝度定義条件では明確にみられたものの、運動定義条件では ISI×呈示視野×二重課題の有無の交互作用については統計的には確認されず、2 次仮現運動であるコントラスト定義条件と運動定義条件との間に、一貫した傾向は確認できなかった。以上の傾向差の結果については、2.5.2 節で考察を行う。



## 2.5 第2章のまとめと考察

本章では、仮現運動する MOT 課題を用いてオブジェクト追跡に運動情報が寄与するか、そしてオブジェクト追跡メカニズムと注意との関係について検討を行った。実験1では、輝度定義のオブジェクト刺激を用い、MOT 課題の仮現運動刺激への ISI 挿入が課題成績に与える効果について検討した。実験の結果、仮現運動刺激に 100 msec 程度の ISI を挿入することにより、課題成績が低下した。加えて、ISI が挿入されない場合は下視野で課題成績が優位となった。また、ISI が挿入された場合には、上視野では ISI が増加しても課題成績がほぼ変化しなかったのに対し、下視野では ISI が増加するとともに課題成績が低下し、ISI が 100 msec 以上で課題成績の下視野優位性が消失した。実験2では、2次属性であるコントラストもしくは運動で定義した仮現運動刺激を用い、そうした刺激に対して課題成績が変化するかを調べた。その結果、2次刺激に対しても ISI 挿入により課題成績が低下するという、実験1と同様の結果が得られた。また、2次刺激であっても、ISI が挿入されない場合には課題成績が下視野優位となる傾向が得られ、ISI が挿入されることで課題成績が低下した。しかし下視野優位性と2次運動の関係については、運動定義条件では ISI が 100 msec の場合で課題成績の下視野優位性が消失したが、コントラスト定義条件では下視野優位性が消失せず、一貫した傾向は得られなかった。続いて実験3では、オブジェクト追跡と注意との関係について検討した。文字検出課題によって認知的負荷をかけた二重課題状況下で、輝度、コントラスト、運動の各属性で定義された上下視野呈示の MOT 課題を参加者に遂行させた。その結果、全ての属性条件で、二重

課題による負荷を与えた場合に MOT 課題の成績が低下した。また、二重課題の効果については、輝度定義刺激およびコントラスト定義刺激については、MOT 課題成績は ISI を挿入しない場合には下視野で低下しにくく、逆に上視野でより大きく課題成績が低下した。

### 2.5.1 注意処理および運動処理に対する ISI の効果

本論文の作業仮説との関連で、以上の結果について、運動情報が寄与する可能性について考察を行う。実験の結果のうち特に注目したいのは ISI の効果である。100 msec 程度の ISI 挿入によって MOT 課題の成績が低下した。こうした ISI の効果が生じた理由として、2つの可能性が考えられる。ひとつはオブジェクト追跡に運動処理が寄与しており、その運動処理が 100 msec 程度の ISI により影響を受けるという可能性である。もうひとつはオブジェクト追跡に関与する注意処理が 100 msec 程度の ISI により影響を受けるという可能性である。

このうち前者の運動処理に起因する可能性について考えてみたい。実験 1 の考察で述べたように、本章の実験で得られたオブジェクト追跡に対する ISI の時間特性は、1次運動検出メカニズムの時間特性と概ね一致する (e.g., Braddick, 1974; Georgeson & Harris, 1990)。この結果は、1次運動検出メカニズムがオブジェクト追跡に寄与する可能性を示唆しているものだと考えられた。しかし実験 2 および実験 3 では、1次属性の輝度定義の MOT 課題だけでなく、2次属性のコントラスト定義および運動定義の MOT 課題においても ISI 挿入によって成績が低下した。この結果は、想定される運動処理が 1次だけでなく 2次運動

刺激も処理できる可能性を示唆するものである。ISI の効果については、2 次運動処理が 100 msec 程度の ISI に影響を受けることを示している研究報告は今のところ見当たらない。しかし、これまで述べてきたように、本章の実験で用いた孤立オブジェクトの仮現運動が、1 次運動だけでなく 2 次運動も処理し得る運動処理メカニズムによって媒介されており、それが 100 msec 程度の ISI によって影響を受けると考えれば、実験 1-3 の結果は運動処理でも説明が可能であろう。この、2 次運動処理と ISI との関係については、本論文の他の実験の結果とも関連づけて、第 4 章の総合考察で論じることとする。以上の点から、本論文の作業仮説に沿って考えると、本章の結果はオブジェクト追跡に運動処理が関与するとも解釈できる結果である。

次に後者の注意処理の可能性に関して考察を行う。1 次刺激と 2 次刺激で課題成績が同様の傾向になったということ（実験 2, 3）、二重課題による負荷を与えると課題成績が低下したこと（実験 3）、そして 1 次運動検出にはみられない上下視野差が存在することは（実験 1-3）、オブジェクト追跡に関与している注意処理の特性を示す結果である。100 msec 程度の ISI 挿入によって MOT 課題の成績が低下したという結果は、これまで報告されている注意の効果の時間特性からは想定しにくい結果である（e.g., Nakashima & Yokosawa, 2012; Raymond et al., 1992）。しかし、100 msec 程度の ISI の影響を受ける注意処理が存在し、注意の効果は 100 msec 程度の ISI により低下したために MOT 課題成績が低下したと考えれば、本実験の結果の説明が可能となるであろう。

以上のように、本章の実験結果は、オブジェクト追跡に運動情報が寄与するという作業仮説からすると、仮説を支持する結果であると解釈できるものの、

この結果は注意処理で説明できる結果でもあり、オブジェクト追跡に運動情報が寄与すると結論づけることは難しい。そこで、第3章では課題を換え、改めて運動情報の寄与の可能性、そして運動処理と注意との関係について実験的な検討を行うこととした。

## 2.5.2 注意処理および運動処理と下視野優位性との関係

実験 1-3 での結果を呈示視野ごとに分けて分析を行ったところ、ISI の効果について、ISI が挿入されない場合には課題成績が下視野で優位となり、ISI が増加すると特に下視野で成績が低下した。この結果は、運動視研究の知見からすると想定しにくい結果である。2.1 節でも述べたように、1 次運動の検出には上下視野差がないと報告されている一方で (Sato & Mugishima, 2000; Smith & Hammond, 1986)、1 次運動検出よりも高次の運動処理には下視野優位性がみられることが報告されている (Edwards & Badcock, 1993; Maruya & Sato, 2001; Sato & Mugishima, 2000)。これらの知見から考えると、ISI が挿入されない場合には 1 次運動検出メカニズムが阻害されないため、課題成績は上下対称となり、ISI が挿入された場合には 1 次運動検出メカニズムが阻害され、高次の運動処理からの寄与がより大きくなるため、特に ISI が 100 msec 以上では課題成績に下視野優位性が生じるはずである。しかし本章の実験 1 から得られた結果は、この仮説とは逆の傾向を示している。100 msec 程度の ISI によって影響を受けたのは 1 次運動検出メカニズムとは異なるメカニズムである可能性を示唆するものであろう。

さらに実験2において、1次仮現運動と2次仮現運動とが同様の課題成績の傾向を示したことは、1次運動検出ではなく、より高次の視覚処理が関与している説を支持する結果であると考えられる。これまでも述べてきたように、1次運動検出よりも複雑な運動処理 (Edwards & Badcock, 1993; Maruya & Sato, 2001; Sato & Mugishima, 2000) と注意処理の可能性 (He et al., 1996, 1997; Intriligator & Cavanagh, 2001) の可能性があり得る。しかし、このうちいずれかによるのかについては、明確にはならなかった。

そこで注意処理の可能性について、実験3での二重課題の実験結果に対しても視野ごとの分析を行った。もし MOT 課題成績の下視野優位性が注意処理に起因するのなら、二重課題による負荷を与えた場合に、下視野優位性が減少もしくは消失することが予想された。しかし結果は、二重課題による負荷を与えた場合に、MOT 課題成績は ISI を挿入しない場合には下視野で低下しにくく、逆に上視野でより大きく課題成績が低下し、上下視野差はより大きくなった。予想とは逆の結果となったが、この結果についても、下視野に比べて上視野で注意が向きにくい、もしくは注意の効果が少ないなどの、注意の効果の視野非対称性が存在すると仮定すれば、実験3の結果を説明することが可能であろう。

これまでの注意研究では、注意の焦点が上視野に向きにくい、もしくは注意の効果が上視野で少ないなどの、注意機能の視野非対称性について検討されてきた。注意の向きやすさについては、特に視覚探索課題を用いて検討が行われているが、注意を必要とするとされる結合探索課題で下視野優位を示す報告がある一方 (He et al., 1996), 上視野優位の報告 (Previc & Blume, 1993; Wolfe, O'Neill, & Bennett, 1998) や視野差がないという報告 (Carrasco, Evert, Chang,

& Katz, 1995), そして刺激配置の状況によって視野差が変化するという報告もあり (Ellison & Walsh, 2000), 一貫した傾向は確認されていない。また, 視覚探索以外の注意課題でも, 視野ごとの注意の効果が検討されている。Carrascoらの研究グループは, Posner (Posner, 1980) の先行手がかり法を用いて, 先行手がかりを呈示することにより駆動される注意の視野ごとの効果について実験的検討を行っている。ターゲットの方位弁別課題 (Carrasco, Talgar, & Cameron, 2001), および方位弁別課題に対する注意の時間特性 (Carrasco, Giordano, & McElree, 2004) の両方で, 注意が操作されない場合には課題の正答率や時間特性に下視野優位性が認められ, 注意が操作された場合の注意の効果は下視野優位にならないという結果が報告されている。以上の注意研究から, 上下視野に対する注意の効果については一貫した傾向が確認されていない。しかし, これらの研究で用いられた刺激は MOT 課題のものとは異なり, また注意の解像度の下視野優位性を示した Intriligator and Cavanagh (2001) も, 容量や時間特性に関しては検討しておらず, この注意の効果の上下視野非対称性およびオブジェクト追跡との関係については, 今後さらに検討する必要がある。

以上の考察より, 実験 1 から実験 3 の結果の視野ごとの分析は, 1 次運動検出メカニズムが追跡に寄与していないことを示唆してはいるものの, オブジェクト追跡に運動情報が寄与するか否かについて結論を下すものとはならなかった。また, 2 次仮現運動に関しては, 部分的に 1 次仮現運動と類似した結果の傾向がみられたものの, 刺激属性間では ISI の効果や二重課題の効果において一致がみられなかった。この 2 次仮現運動と追跡メカニズムの関係に関しては, 第 3 章において注意追跡課題を用いて改めて検討することとする。

### 2.5.3 MOT 課題に対する 1 次運動検出メカニズムの寄与

He et al. (1996) および本章の実験で得られた MOT 課題成績の上下視野非対称性は、オブジェクト追跡には 1 次運動検出メカニズムが寄与していない可能性を示している。これは、1 次運動の検出には上下視野差がないと報告している心理学実験の結果 (Sato & Mugishima, 2000; Smith & Hammond, 1986) とも一致する。さらに生理学的知見においても、第 1 次視覚野 V1 の下視野領域と上視野領域の処理に関わる領域の面積はほぼ等しいことが多くの研究で示されているのに対し (DeYoe, Carman, Bandettini, Glickman, Wieser, Cox, Miller, & Neitz, 1996; Horton & Hoyt, 1991; Sereno, Dale, Reppas, Kwong, Belliveau, Brady, Rosen, & Tootell, 1995; Tootell, Switles, Silverman, & Hamilton, 1988), 第 2 次視覚野 V2 以降の一部の領野では上視野相当領域と下視野相当領域で処理が分かれており (Wandell, 1999), 初期視覚野から頭頂領域への投射は、下視野領域のほうが上視野領域よりも多いことが報告されている (Maunsell & van Essen, 1987)。こうした生理学的知見も、V1 よりも高次の視覚野において下視野優位の表象が生じていることを示唆しており、本研究の結果とも整合的である。加えて、本研究の結果で注目したいのは、輝度定義のオブジェクト刺激であっても MOT の課題成績には下視野優位性が存在するという点である。上記の 1 次運動の検出には上下視野差がないと報告している先行研究との結果の相違は、輝度運動に対する運動検出とオブジェクト追跡に寄与する処理メカニズムが異なっていることを示唆している。本章の実験 1 および実験 2 の結果から、オブジェクト追跡においては輝度定義の刺激であって

も 1 次運動検出メカニズムで処理されるのではなく，それとは異なるオブジェクト追跡メカニズムで扱われている可能性が考えられる．この可能性については，第 4 章の総合考察で改めて議論を行うこととする．



## 第3章 注意追跡課題における視覚運動処理と視覚的注意との関係

### 3.1 第3章の目的

第2章の実験の結果は、オブジェクト刺激から検出される低次の運動情報が、少なくとも限られた条件下ではオブジェクト追跡に寄与し得る可能性を示唆する結果であったものの、注意処理によっても説明が可能となる結果であり、低次の運動情報がオブジェクト追跡に寄与するのか否かという点に関しては、明確な結論が得られなかった。そこで本章では、オブジェクト追跡の課題を換えて、オブジェクト追跡に対する運動情報の寄与の可能性について、引き続き検討を行うこととする。

本章では、Verstraten et al. (2000) が用いたものと同様の注意追跡課題を用いた。この課題は、第1章で既に説明したが、オブジェクト刺激が回転運動して知覚される仮現運動において1個のターゲットを追跡するというものである。この課題を用いて、Verstraten et al. (2000) と同様にオブジェクト追跡が可能となる時間周波数限界を指標とした検討を行った。Verstraten et al. (2000) は、この注意追跡課題における時間周波数限界は4-8 Hzであると報告している。この値は、正弦波縞刺激の運動方向判断の時間周波数の限界 (Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b) に比べ、はるかに低い値であることから、Verstraten et al. (2000) は、オブジェクト追跡には1次運動検出メカニズムではなく、高次の視覚処理が関与していると主張した。

その高次の視覚処理に関して、Verstraten et al. (2000) ならびに Benjamins, Hooge, van der Smagt, and Verstraten (2007) は、オブジェクト追跡は注意をオブジェクト間で能動的に移動させることによって実現されているものであり、オブジェクト追跡における 4-8 Hz の時間限界は、その注意の移動の時間限界であると主張した。一方、Horowitz, Holcombe, Wolfe, Arsenio, and DiMase (2004) は、Verstraten et al. (2000) の注意追跡課題と類似した刺激による実験課題を用いて、注意の自発的移動は非常に遅い(上限は SOA にして 300-500 msec) という結果を報告したうえで、オブジェクト追跡を 4-8 Hz で実現しているのは注意にもとづく処理ではなく、FINST モデル (Pylyshyn, 1989, 2001; Pylyshyn & Storm, 1988) にあるターゲットへのインデックス付けのような、前注意的な "object continuity process" であると主張している。

上記の 2 つの主張の相違点は、4-8 Hz の時間周波数限界でオブジェクト追跡を実現している処理が、注意が関与している高次な処理なのか、あるいはそれよりも低次の視覚処理なのかという点である。前者が、注意にもとづく高次の処理 (e.g., Cavanagh, 1992) が関与していることを主張しているのに対し、後者はどのような処理メカニズムであるかについては明確に述べているわけではない。しかし、MOT 課題では色や形といった特徴はターゲットとデストラクターとで共通であることから、オブジェクトの位置の履歴情報や運動情報などをもとにした処理である可能性が高いものと思われる。

オブジェクト追跡に関与するのは、注意が関与している高次な処理か、それより単純な処理かを切り分けるポイントとして、運動する刺激の属性が共通か否かという点がある。輝度・運動・テクスチャ・両眼視差・コントラストなど

異なる属性をもつ刺激の間の運動（属性間運動）は、1次運動や2次運動のような単純な運動刺激を処理している比較的低次の運動処理メカニズムでは検出できないと考えられている。属性間の運動の検出には、たとえば Lu and Sperling (1995a,b, 2001) によって提案されている3次運動（Third-order motion）の検出メカニズムのような、注意の機能を含む、より高次の運動処理メカニズムが必要となるという考えが一般的に受け入れられている。Lu and Sperling (1995a,b, 2001) の feature salience system では、注意を向けることによって刺激中の顕著な特徴を選択し、顕著性マップ上に配置することで、属性が異なる刺激同士の間であっても運動を計算することが可能となる。こうした注意にもとづく処理は、信号処理の枠組みを超えた、記号処理とも言える意味的処理プロセスであり、属性非依存であると考えられる。Verstraten et al. (2000) も、オブジェクト追跡に feature salience system のような注意にもとづく処理が関与している可能性について言及しているが、Verstraten et al. (2000) の注意追跡課題で用いられた刺激は1次属性の輝度定義刺激のみであるため、オブジェクト追跡に上記のような高次の処理メカニズムが関与しているかどうかは、彼らの結果からは明らかではない。

本章の目的は、オブジェクト追跡に比較的低次の運動処理が寄与しているか否かを、注意追跡課題を用いて検討することである。実験4では、単一の属性でオブジェクトが定義された属性内オブジェクト追跡、および異なる属性で定義されたオブジェクトのフレームを交互に呈示する属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界を比較する。はじめに、1次刺激に関して、Verstraten et al. (2000) と同様の時間周波数限界が得られることを確認したうえで、2次の属

性内，1次・2次刺激から成る属性間刺激の結果と比較検討する．この比較において，2つ重要なポイントがある．第1のポイントは，1次刺激に対する結果と，属性間刺激に対する結果の比較である．もし，1次刺激に対する時間周波数限界の値が属性間刺激に対するものよりも明らかに高いという結果が得られれば，上述したように，前章の結果と同様に，オブジェクト追跡に1次運動情報が寄与していることを示す結果と解釈することができるだろう．逆に，両者が類似した値であった場合には，オブジェクト追跡に1次運動情報は寄与しておらず，注意にもとづく高次の過程のみが関与している可能性が高くなる．第2のポイントは，1次刺激と属性間刺激の結果が異なるということが前提となるが，2次の属性内刺激の結果が，1次刺激の結果と類似したものになるか，それとも，属性間刺激の結果と類似したものになるかという点である．もし，2次の属性内刺激の結果が1次刺激の結果と類似したものであれば，その結果は，2次刺激由来の運動情報が1次刺激同様に，オブジェクト追跡に寄与し得ることを示すものとみなすことができるだろう．逆に，2次属性内刺激の結果が，属性間刺激の結果と類似したものとなった場合には，属性内であっても2次刺激のオブジェクト追跡には運動処理は寄与せず，この課題が高次の注意に関わる処理のみによって遂行されていることを示す結果と解釈することができるだろう．続く実験5において属性内および属性間のオブジェクトの古典的仮現運動の運動知覚の時間限界を，さらに実験6では運動処理の関与しない刺激を用いて注意の自発的移動の時間限界を測定し，実験4の結果と比較することにより，オブジェクト追跡に寄与する視覚処理について検討を行う．

## 3.2 実験4：属性内・属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界の検討

### 3.2.1 目的

本実験では、Verstraten et al. (2000) の実験 1 と同様の注意追跡課題をさまざまな属性によって定義された仮現運動刺激に対して実施し、各属性におけるオブジェクト追跡の時間周波数限界を測定した。1次属性として輝度、2次属性として運動、両眼視差、フリッカー（時間変調）、コントラストを用いた。また、2つのフレームのオブジェクトが同じ属性で定義された属性内オブジェクト追跡条件に加えて、2つのフレームのうち一方のオブジェクトが輝度で、他方のオブジェクトが2次のいずれかの属性で定義されたオブジェクトのフレームを交互に呈示する属性間オブジェクト追跡条件を設定した（図 3-1）。

### 3.2.2 方法

#### 実験参加者

本実験には大学生 6 名（女性 3 名、男性 3 名）が参加した。全員が、裸眼もしくは矯正により正常範囲の視力および立体視力を有していた。また、参加者は全員、本章で用いたオブジェクト追跡課題に対して練習済であり、実験の目的は知らされていなかった。

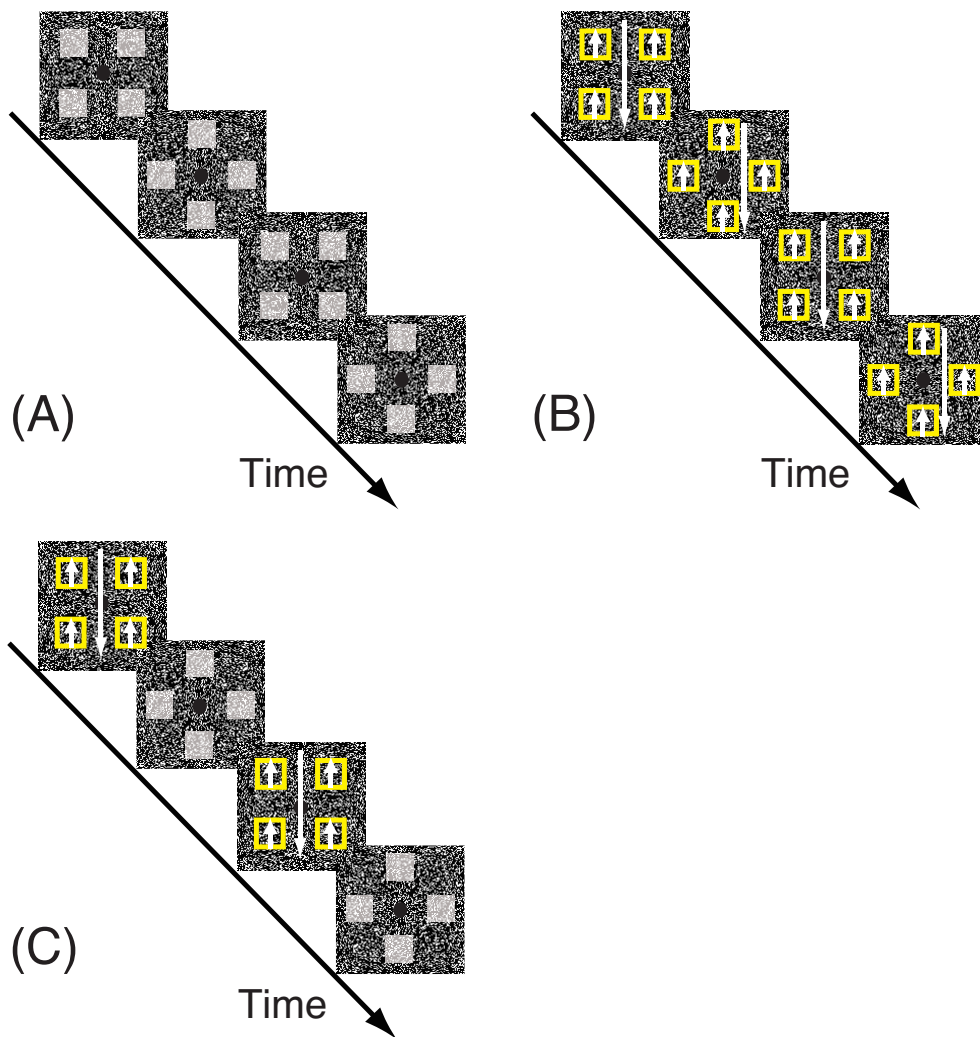


図 3-1 実験4における仮現運動刺激パターンの刺激配置（2次属性が運動の場合）. (A). 属性内輝度定義条件. (B). 属性内運動定義条件. (C). 属性間条件（輝度+運動）. 黄色の線はオブジェクト領域と背景領域の境界を, 白色の矢印はオブジェクト領域と背景領域のドットの局所運動方向の例を示し, 実際の刺激では表示されなかった.

## 装置

両眼視差定義条件でのみ，両眼立体視鏡（CTS-HS1 ハプロスコープ，中央精機株式会社製）を用いた以外は，実験 3 までと同じ装置を用いた．CRT ディスプレイのリフレッシュレートは 100 Hz とした．

## 刺激

MathWork 社製ソフトウェア MATLAB 5.2.1 と対応ライブラリ Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997) を用いて刺激を作成し，CRT ディスプレイ画面上に呈示した．実験 4 の刺激および実験の流れを図 3-2 に示す．オブジェクト追跡課題の刺激は，CRT 画面の中央部に配置した，11.0 deg (縦) × 10.5 deg (横) の領域内に呈示した．刺激呈示領域の中央部に 15 min の黒色の注視点を出し，注視点を中心として円形状になるように一辺が 1.0 deg の正立した正方形オブジェクトを配置した．注視点からオブジェクトの中心までの距離は 3.5 deg，オブジェクトとオブジェクトの中心間の距離は 2.68 deg とした．仮現運動のフレームは，1 枚はオブジェクト 4 個が等距離をとるように十字形に 4 個配置し，もう 1 枚はオブジェクト 4 個を方位を保ったまま 45 deg 回転させたものであった (図 3-1)．この 2 枚の仮現運動フレームを交互に呈示することで，実験参加者にオブジェクトの仮現運動 (円運動) が知覚されるようにした．2 枚の仮現運動フレームは ISI 無しで交互に呈示した．仮現運動のフレームの SOA は時間周波数の操作に応じて 5 段階に変化させた．

本実験では，1 次の属性として輝度，2 次の属性として運動，両眼視差，フリッカー (時間変調)，コントラストを用いた．属性内条件では，それぞれの 2

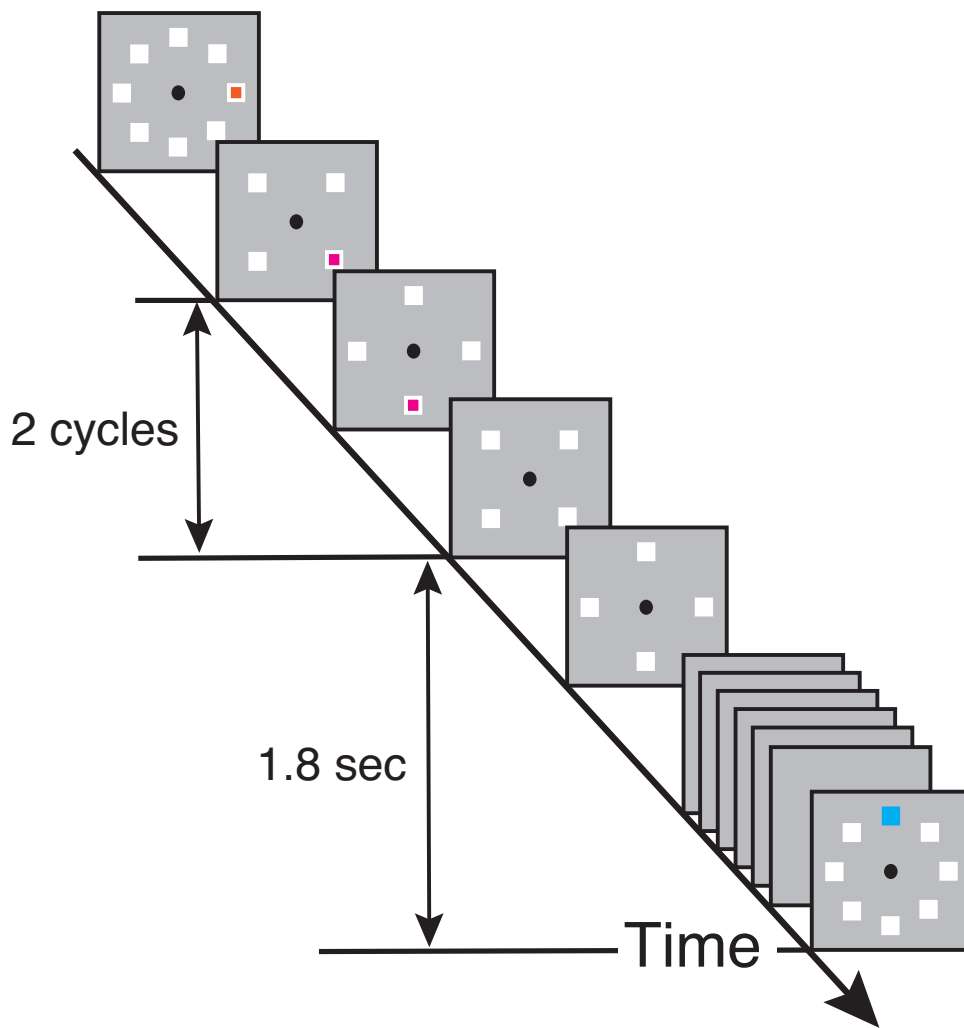


図 3-2 実験 4 における刺激配置と 1 試行の流れ.



次属性もしくは輝度のみで定義された刺激を用いた。属性間条件では、2次属性のいずれか1つと、輝度を組み合わせたものを用いた。2つの異なる2次属性を組み合わせたものは用いなかった。

背景領域とオブジェクト領域はそれぞれ、明るいドットと暗いドットから成るランダムドットパターンによって構成された。明ドットの密度は30%とした。各ドットは1.8 min × 1.8 min の pixel 1 個分から成り、運動、両眼視差、フリッカー定義の各刺激では、オブジェクトと背景の両領域共に、暗ドットの輝度は0 cd/m<sup>2</sup>、明ドットの輝度は38.6 cd/m<sup>2</sup>であり、ドットのコントラストは100%、オブジェクトと背景の両領域の平均輝度はともに12.1 cd/m<sup>2</sup>であった。

コントラスト定義刺激およびそれと組み合わせる輝度定義刺激では、明ドットと暗ドットの輝度を同じだけ増減させて平均輝度を一定に保つため、明ドットの密度は50%とした。コントラスト定義条件では、オブジェクト領域のコントラストは70%、背景領域のコントラストは30%、平均輝度はコントラストにかかわらず、両領域ともに23.2 cd/m<sup>2</sup>であった。

輝度定義刺激は、背景領域の平均輝度に対してオブジェクト領域の平均輝度が背景領域に対して高くなるように、明ドットと暗ドットの両方に同じだけ輝度値を加算した。この加算値は、予備実験（視認性マッチング課題）を実施し、各実験参加者に対して属性および時間周波数ごとに、2次属性刺激とそれと組み合わせる輝度定義刺激の視認性が等しくなる値を用いた。予備実験の詳細は後述する。運動定義刺激は、オブジェクト領域内ではドットパターンが上方向もしくは下方向に移動し、背景領域ではドットパターンがオブジェクト領域とは上下逆方向に同じ速度で運動することで、オブジェクトと背景とが分離して

知覚されるものとした。ドットパターンの運動方向は、試行内では固定し、試行間でランダム化した。ドットは 20 msec ごとに 4 ドット分だけ移動させた。ドットの局所運動速度は約 360 min/sec であった。両眼視差定義刺激は、CRT 画面の左右に呈示したダイナミック・ランダムドットステレオグラム、すなわち、視差分布を一定に保ちながら 20 msec ごとに新しいランダムドットパターン対に更新されるランダムドット・ステレオグラムを用い、実験参加者は両眼立体視鏡（ミラー・ステレオスコープ）を用いて観察した。本実験に用いた刺激は、オブジェクトが背景に対して浮き上がって知覚されるものであった。視差量は 10.8 min とした。フリッカー定義刺激は、オブジェクト領域のドットパターンを 20 msec ごとに更新し、背景領域のドットパターンを仮現運動フレームの切り替わりと同じタイミングで更新することで、オブジェクトと背景が分離して知覚されるものであった。コントラスト定義刺激は、上記のように背景領域とオブジェクト領域のドットのコントラストを変えることで、オブジェクトと背景とが分離して知覚されるものであった。

属性内仮現運動パターンは、上記の視覚属性のうちいずれか 1 つの属性刺激により構成されている仮現運動刺激の 2 枚のフレームを、ISI 無しで交互に呈示するものであった。フレームの交替時間は時間周波数にして 2.78 - 5.00 Hz の 5 段階に変化させた。属性間仮現運動パターンは、輝度定義刺激のフレームと、輝度以外の 2 次属性定義刺激のフレームを ISI 無しで交互に呈示するものであった。フレームの交替時間は時間周波数にして 1.67 - 3.57 Hz の 5 段階に変化させた。

## 実験手続き

**オブジェクト追跡課題** 実験参加者は暗室内で、注視点を注視したままオブジェクト追跡課題の仮現運動刺激を観察した。眼球運動はモニターしなかった。一試行の流れを図 3-2 に示した。試行の最初に、刺激呈示領域内にオブジェクト 8 個を円形状に配置して出現させた。そのうちいずれか 1 個のオブジェクトの中央に赤色のマーカーを表示させることで、追跡すべきターゲットとして指定した。そのすぐ後に、オブジェクト 4 個が配置されたフレームが切り替わることで仮現運動が生じる運動刺激へと移行させた。そのフレームの切り替わりとともに、赤色のマーカーを時計回りもしくは反時計回りのいずれかの方向に移動させた。マーカーは、最初に出現した場所から 2 周分回転した後で消失した。実験参加者に対し、マーカーが表示されたオブジェクトをターゲットとして追跡し、マーカーが消失した後も約 1.8 sec 間オブジェクトを追跡するように教示した。仮現運動のフレームの切り替わりが停止したらすぐに、オブジェクト 8 個を再度表示させ、そのうちいずれか 1 個の上に青色のマーカーを出現させた。実験参加者の課題は、青色のマーカーが出現したオブジェクトが自分の追跡したターゲットであるか否かを、2 肢強制選択で回答するものであった。実験参加者が回答すると刺激が全て消失し、次の試行へと移行した。オブジェクトの位置を判断する青色のマーカーは、試行の半数ではターゲットが停止した位置に、残り半数ではターゲットが停止した位置の前後いずれかの位置に表示した。したがって、本実験の課題のチャンスレベルは 50%であった。

本試行は、4 つの 2 次属性ごとに、属性内輝度条件、属性内 2 次属性条件、属性間条件を、3 つのセッションに分けて実施した。仮現運動の時間周波数は、

属性内輝度条件および属性内2次属性条件では2.78, 3.13, 3.57, 4.17, 5.00 Hz, 属性間条件では1.67, 2.27, 2.78, 3.13, 3.57 Hzの各5段階に変化させた。これら属性内条件および属性間条件の時間周波数範囲は、条件ごとの試行数を揃えたうえでオブジェクト追跡課題の課題成績が75%となる時間周波数を求めるため、予備観察により各条件における範囲を決定した。各セッション内では、時間周波数5条件をランダム順で24回ずつ繰り返し、計120試行を実施した。

**視認性マッチング課題** 本実験では、属性間条件で刺激の視認性が異なることによりオブジェクト追跡課題の成績が低下することを避けるため、オブジェクト追跡課題と同じ刺激を用いて、参加者ごと、属性条件および時間周波数条件ごとに、1次属性の輝度定義の刺激と2次属性の刺激の視認性を知覚上で揃えることを行った。実験参加者は2次属性のオブジェクトの仮現運動8フレーム（これは知覚上でオブジェクトが1回転するのに相当する）と、それと対応する輝度定義オブジェクトの仮現運動8フレームを連続して観察し、2次属性のオブジェクトと主観的視認性が等しくなるように、輝度定義のオブジェクト領域の平均輝度を調整した。オブジェクトの仮現運動の時間周波数は1.67, 2.27, 2.78, 3.13, 3.57, 4.17, 5.00 Hzの7水準とし、各時間周波数につき6試行ずつランダムな順で、合計42試行を実施した。これを、4つの2次属性条件に対して行った。実験参加者が報告した輝度の値に対して、参加者ごと、属性条件および時間周波数ごとに平均の輝度値を算出し、その参加者の輝度定義条件および属性間条件の輝度定義刺激におけるオブジェクト領域の平均輝度値として用いた。

1次属性刺激と2次属性刺激の視認性を揃える方法としては、今回用いた方

法の他にも、それぞれの運動刺激の検出閾を測定し、その閾値の数倍程度の値をパラメータとする方法や、運動パターンを空間的に重ね合わせて反対方向に運動させ、両方向への運動が打ち消し合って運動が知覚されなくなるパラメータを用いる方法 (e.g., Cavanagh & Anstis, 1991) なども考えられる。しかしながら、本実験では、2次属性刺激の視認性をなるべく高くするために、はじめに2次属性刺激の視認性をできるだけ高く設定し、それに輝度定義刺激のオブジェクト領域の平均輝度を合わせるようにした。

### 3.2.3 結果

属性条件および時間周波数条件における正答率を実験参加者ごとに算出し、さらに実験参加者6名の平均正答率を算出した。図3-3左列は、各属性条件における参加者6名の平均正答率を時間周波数の関数としてプロットしたものである。どの条件においても低時間周波数では正答率が高く、時間周波数が高くなるにつれて正答率が低下した。属性内条件では、輝度条件、2次条件にかかわらず、3 Hz程度の時間周波数条件では正答率が90%程度と高く、時間周波数がそれより高くなるにつれて正答率が下がり、時間周波数5 Hz条件では正答率が75%を下回った。一方、属性間条件では属性内条件よりも低い時間周波数で正答率が低下し、3 Hzを超えた条件では正答率がほぼチャンスレベルとなった。本実験では、オブジェクト追跡課題の正答率が75%となる時間周波数を追跡可能な時間周波数限界として定義したうえで、参加者ごとの正答率に対してロジスティック回帰直線をフィッティングし、時間周波数限界の値をそれぞれ算出

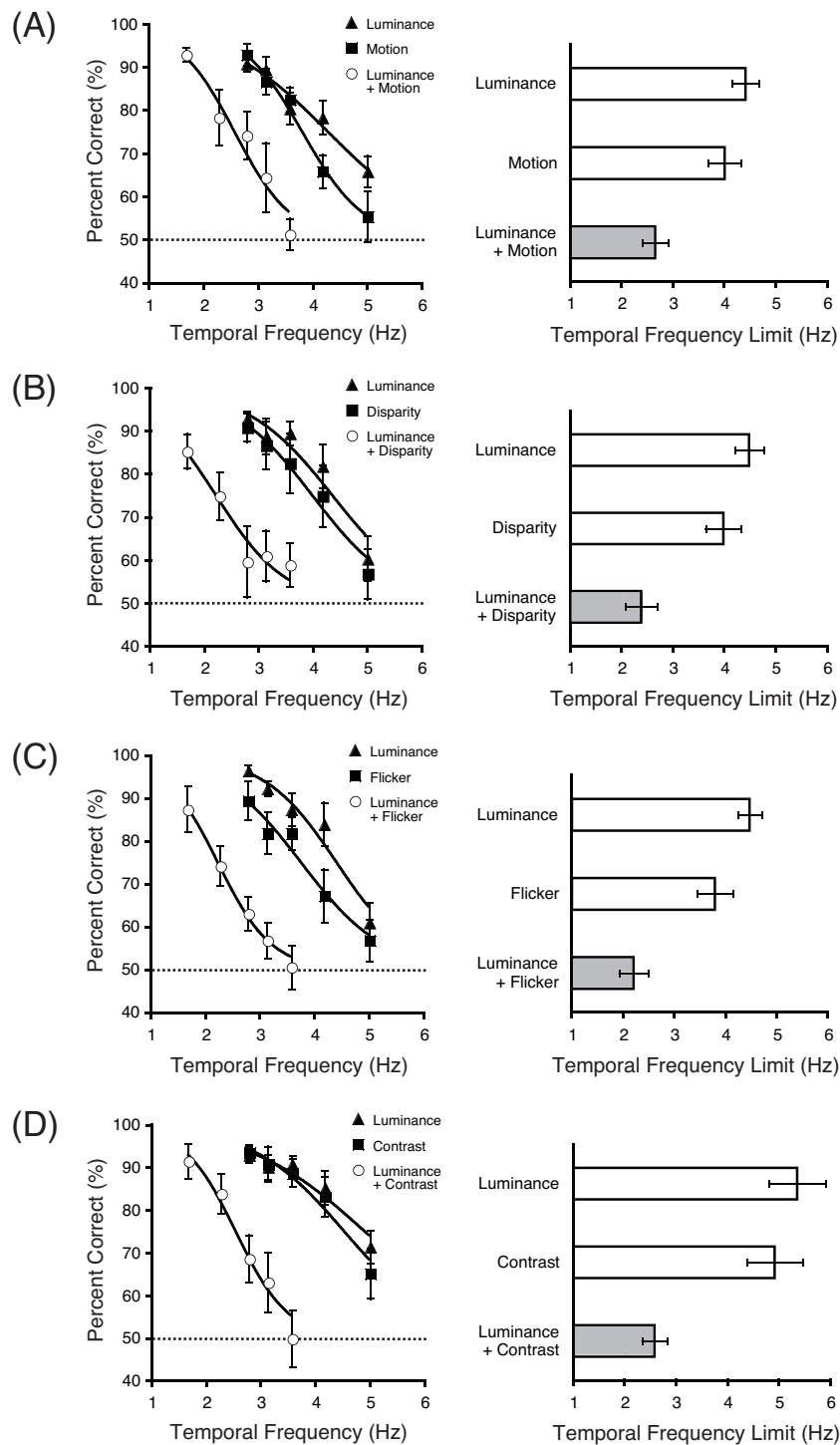


図 3-3 実験4の結果 (N=6). (A). 運動定義条件. (B). 両眼視差定義条件. (C). フリッカー定義条件. (D). コントラスト定義条件. 左列: 各属性条件における参加者 6 名のオブジェクト追跡課題の平均正答率を時間周波数の関数としてプロットしたもの. エラーバーは標準誤差を示す. グラフ中の点線は課題のチャンスレベル 50%を示す. 右列: 参加者 6 名の時間周波数限界の平均値を属性条件ごとに示したもの. エラーバーは標準誤差を示す.

した。図 3-3 右列は、参加者 6 名の時間周波数限界の平均値を属性条件ごとに示したものである。その結果、属性内条件では視覚属性の種類にかかわらず時間周波数限界が 4-5 Hz 程度となった一方、属性間条件では属性内条件よりも低く 2-3 Hz 程度となった。属性内輝度条件、属性内 2 次属性条件、属性間条件の間に対して 1 要因参加者内分散分析を行った結果、全ての属性条件において条件間に有意な差が認められ（運動定義条件： $F(2, 10) = 10.29, p < .01$ ；両眼視差定義条件： $F(2, 10) = 14.53, p < .01$ ；フリッカー定義条件： $F(2, 10) = 13.23, p < .01$ ；コントラスト定義条件： $F(2, 10) = 10.93, p < .01$ ），Tukey の LSD 法による多重比較の結果、全ての条件において、属性内輝度条件および属性内 2 次属性条件と属性間条件との間に有意な差が認められた ( $p < .05$ )。

### 3.2.4 考察

はじめに、本実験の結果を本章の冒頭で掲げた 2 つのポイント、1 次運動刺激・属性間運動によるオブジェクト追跡の時間特性の異同、2 次の属性内刺激・属性間刺激によるオブジェクト追跡の時間特性の異同との関係で考えてみることにする。本実験の結果は、属性内オブジェクト追跡と属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界の間に明確な差があることを示している。図 3-3 から明らかのように、各 2 次属性刺激と 1 次属性刺激から作られた属性間刺激に対する時間特性は、1 次属性のみならず、全ての 2 次属性を含む属性内条件の時間特性と比べて明らかに劣っている。第 1 のポイントである、1 次属性内と 1 次・2 次属性間のオブジェクト追跡の時間特性の関係に即して述べれば、両者の時間

特性は大きく異なっている。この結果は、少なくとも 1 次属性刺激と属性間刺激に対するオブジェクト追跡には異なる処理が寄与していることを示唆している。3.1 節で述べたように、属性間運動の抽出には高次の注意に関わる処理が必要であると考えられていることを考慮に入れると、1 次属性刺激に対するオブジェクト追跡には、少なくとも部分的には注意が関与する処理とは異なる視覚処理が寄与していることを示唆している。第 2 のポイント、2 次の属性内条件と属性間条件の比較については、前述のように、2 次の属性内条件の時間特性は属性間条件の時間特性とは異なり、1 次の属性内条件の時間特性と類似している。この 2 次属性刺激についての結果は、刺激の属性が 1 次、2 次どちらであっても、属性内刺激であれば、注意が関与する処理とは異なる視覚処理がオブジェクト追跡に寄与している可能性を示唆するものと考えられるだろう。

属性間条件で時間周波数限界の値が低下した結果について、オブジェクト刺激の属性間の処理時間の遅延の差で説明できるであろうか。視覚属性によって刺激の処理時間に違いがあることが報告されており（色と運動、e.g., Moutoussis & Zeki, 1997）、本実験のオブジェクト追跡においても、1 次刺激に対する 2 次刺激の処理時間の遅延が影響し、結果としてオブジェクト追跡の時間周波数限界をより低いものとしたとも考えられる。これについては追加観察にて、輝度定義刺激と運動定義刺激を組み合わせた属性間刺激を用い、その 2 次刺激の処理時間遅延を補償するために 2 次刺激のみを 0-80 msec だけ先行させて呈示した場合にも、時間周波数が 4.17 Hz での注意追跡課題の正答率がチャンスレベルを上回ることはなかった。ゆえに、本実験の時間周波数限界の低下が属性間の処理時間の差によるものである可能性は低いものと考えられる



が、この問題についてはさらに詳細に検討していく必要がある。

また、本実験の属性間条件の刺激は、1次属性である輝度と、2次属性の運動、両眼視差、フリッカー、コントラストのいずれかを組み合わせたものであった。そのため、時間周波数限界の値の低下が、1次属性と2次属性を組み合わせたことによるものなのか、それとも異なる視覚属性を組み合わせたことによるものなのかを明らかにすることは、本実験の結果からは難しい。この問題については、たとえば運動定義刺激と両眼視差定義刺激を組み合わせるというように、2次属性同士の属性間刺激を用いたオブジェクト追跡課題を行い、時間周波数限界を測定することにより、検討することが可能となるであろう。

属性内条件では、1次刺激および2次刺激いずれも時間周波数限界が4-5 Hzと、Verstraten et al. (2000) が報告した4-8 Hzの範囲内に収まっていたのに対し、属性間条件では時間周波数限界が2-3 Hzとなり4-8 Hzよりも有意に低い値となった。Verstraten et al. (2000) が報告した時間周波数限界は属性内オブジェクト追跡のみに当てはまる値であり、属性間オブジェクト追跡には当てはまらないものだと言えよう。

Verstraten et al. (2000) および Benjamins et al. (2007) は、オブジェクト追跡における4-8 Hzという時間周波数限界が、オブジェクト間で注意を移動させる時間限界を反映していると主張するが、その説では本実験の属性間条件での時間周波数限界の値の低下を説明することは困難である。また、顕著性マップにもとづく feature salience system によっても属性内と属性間の両条件の間の時間周波数限界の差異を説明することは難しい。なぜなら、注意による選択および顕著性マップ上での処理は属性非依存だと一般に考えられており、も

しそうであれば本実験で認められた属性内条件と属性間条件の時間周波数限界の差は生じなかったはずである。属性間オブジェクト追跡においては、オブジェクト間の運動を検出するためには、feature salience system のような複雑な刺激を処理する仕組みを必要とする。ゆえに、注意が関与する属性非依存処理は、4-8 Hz の時間周波数限界よりもむしろ、属性間条件に関して、本実験で得られた 2-3 Hz の時間周波数限界を説明するのに適している可能性が高いものと考えられる。

属性間オブジェクト追跡が上記のような属性非依存のメカニズムによって実現されているとしたら、属性内オブジェクト追跡にはそれとは異なるメカニズムが寄与しており、4-8 Hz の時間周波数限界はそのメカニズムの時間特性により規定されている可能性が考えられる。3.1 節で述べたように、4-8 Hz という時間周波数限界の値は、輝度情報にもとづく 1 次運動検出の時間周波数限界 (Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b) に比べてはるかに低い値であり、1 次運動検出メカニズムは属性内 2 次属性条件のオブジェクトの仮現運動を検出できないことから、1 次運動検出メカニズムがこの時間周波数限界を規定しているとは考え難い。それに対して、運動定義運動・奥行き定義運動などの 2 次運動検出の時間周波数限界は 1 次運動検出のそれよりも低く、3-4 Hz 程度であると報告されている (e.g., Lu & Sperling, 1995b)。本実験で示された属性内オブジェクト追跡の 4-5 Hz という時間周波数限界は、こうした時間周波数限界と近い値と言えよう。また、孤立オブジェクトの仮現運動の時間特性に関しては、Tyler (1973) が輝度オブジェクトの古典的仮現運動知覚の時間周波数限界は 7 Hz 程度であることを報告している。この仮現運動知覚の時間周波数限

界も、オブジェクト追跡における 4-8 Hz の時間周波数限界と近い値となっている。オブジェクト刺激の属性が 1 次であるか 2 次であるかにかかわらず、こうした運動処理メカニズムがオブジェクト追跡を実現し、追跡の時間周波数限界を 4-8 Hz に制限している可能性は十分にあり得るものであると言えよう。

2 次属性に関しては、運動縞刺激のような空間的に連続する刺激を用いて輝度定義運動とコントラスト定義運動の時間特性を比較した研究はいくつかあるものの (e.g., Derrington & Cox, 1998; Holliday & Anderson, 1994; Scott-Samuel & Georgeson, 1999; Smith & Ledgeway, 1998), 複数の異なる 2 次属性, たとえば運動定義や両眼視差定義の刺激を用い 2 次運動の時間特性を調べ比較した研究は非常に少ない (e.g., Hutchinson & Ledgeway, 2006; Lu & Sperling, 1995b). また, 2 次属性刺激の古典的仮現運動に関しては, 空間距離限界については Cavanagh, Arguin, and von Grünau (1989) によって検討されているものの, 時間周波数限界についてはこれまで調べられていない。

以上の点をふまえ, 本実験より示された, 属性内および属性間オブジェクト追跡の時間特性がどのような視覚処理によるのかについて, 実験 5 および実験 6 において検討を行う。実験 4 と可能な限りパラメータを揃えた刺激を用い, 実験 5 では孤立オブジェクトの古典的仮現運動の時間周波数限界を, 実験 6 では注意の移動の時間周波数限界を調べ, 実験 4 で明らかとなった属性内および属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界と比較することとした。

### 3.3 実験5：属性内・属性間の古典的仮現運動知覚の時間周波数限界の検討

#### 3.3.1 目的

実験5では、実験4と同じ属性の組み合わせを用いて、孤立オブジェクト間の古典的仮現運動知覚の時間周波数限界について検討する。可能な限り実験4と刺激条件を揃え、実験4で示されたオブジェクト追跡課題の時間周波数限界と、本実験での仮現運動知覚の時間周波数限界を比較することにより、属性内および属性間オブジェクト追跡とオブジェクトの仮現運動との関係を明らかにすることを旨とする。

#### 3.3.2 方法

以下の刺激および実験手続きの点を除き、基本的に実験4と同じであった。

##### 刺激

CRT画面の中央部に呈示した15 minの黒色の注視点の上方に、5 deg（縦）× 15 deg（横）の刺激呈示領域を配置した（図3-4）。注視点から刺激呈示領域の中心までの距離は、実験4のオブジェクト刺激の偏心度と同じ3.5 degとした。刺激呈示領域内には実験4と同じくランダムドットパターンを呈示し、2フレームの孤立オブジェクト間の仮現運動を呈示した。オブジェクトは一辺が1.0 degの正方形、仮現運動のオブジェクト間の距離は2.68 degであり、これ

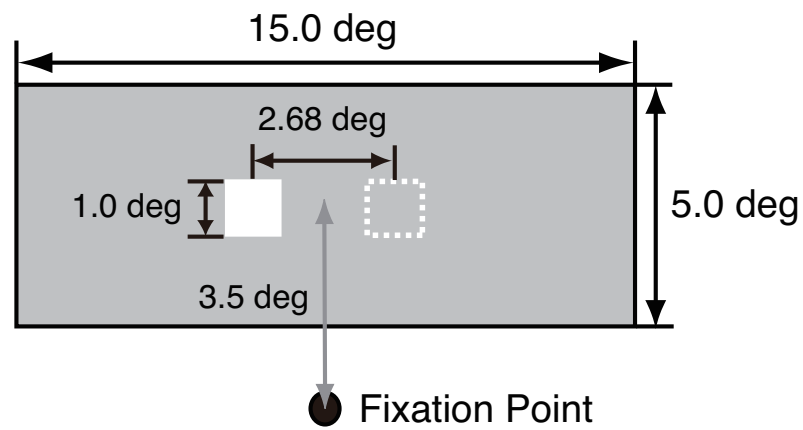


図 3-4 実験 5 の刺激配置の模式図.

らは実験4のオブジェクトの大きさおよびオブジェクト間の空間距離と同じ値を用いた。

実験4と同じく、オブジェクトを輝度、運動、両眼視差、フリッカー、コントラストのいずれかの属性で定義し、可能な限り実験4で用いたオブジェクト刺激と刺激条件を揃えるようにした。属性内仮現運動では、同じ属性で定義されたオブジェクトを含む仮現運動フレームを、ISIなしで交互に6回ずつ提示した。属性間仮現運動では、オブジェクトの一方が輝度で、もう一方が2次属性のいずれかひとつで定義された仮現運動の2つのフレームを、ISIなしで交互に6回ずつ提示した。仮現運動フレームの時間周波数は9段階（1.67, 2.27, 2.78, 3.13, 3.57, 4.17, 5.00, 6.25, 8.33 Hz）に変化させた。

### 実験手続き

実験参加者は暗室内で、注視点を注視したまま運動刺激を観察した。実験参加者の課題は、水平方向の仮現運動が知覚されたか否かをキーボードのキー押しにより回答することであった。本試行はセッションに分けて実施し、1セッションのなかでは属性条件（輝度条件、2次属性条件、属性間条件）は固定し、各セッション内では9段階の時間周波数（1.67, 2.27, 2.78, 3.13, 3.57, 4.17, 5.00, 6.25, 8.33 Hz）をランダム順で20回ずつ提示した。

### 3.3.3 結果

属性条件および時間周波数条件における仮現運動知覚率を実験参加者ごとに

算出し、さらに条件ごとに実験参加者 6 名の知覚率の平均値を算出した。図 3-5 は、各属性条件における参加者 6 名の平均知覚率を時間周波数の関数としてプロットしたものである。どの属性条件においても低時間周波数では仮現運動の知覚率が高く、時間周波数が高くなるにつれて知覚率が低下した。3 Hz までは 85%以上という高い知覚率を示し、3 Hz を超えると、時間周波数が高くなるにつれて知覚率が低下し、8 Hz を超えると仮現運動がほぼ知覚されなくなった。属性内輝度定義条件で最も知覚率が高くなりはしたが、属性内 2 次条件および属性間条件との差はわずかであり、全ての属性条件の組み合わせで似た傾向を示した。ただし、コントラスト定義刺激とそれに対応する輝度刺激との間の属性間条件でのみ、例外的に知覚率が低下した。本実験では各条件において仮現運動知覚率が 50%となる点を、仮現運動知覚の時間周波数限界とみなした。その値は、どの属性条件でも概ね 4-6 Hz 程度となった。属性内輝度条件、属性内 2 次属性条件、属性間条件の時間周波数限界の値の間に対して 1 要因参加者内分散分析を行った結果、運動定義 ( $F(2, 10) = 2.19, n.s.$ )、両眼視差定義 ( $F(2, 10) = 2.93, n.s.$ )、フリッカー定義 ( $F(2, 10) = 3.48, n.s.$ ) の各条件では刺激属性の主効果が有意ではなく、コントラスト定義条件でのみ有意となった ( $F(2, 10) = 6.25, p < .05$ )。コントラスト定義条件に対し、Tukey の LSD 法による多重比較を行った結果、属性内輝度条件と属性間条件との間に有意な差が認められた ( $p < .05$ )。

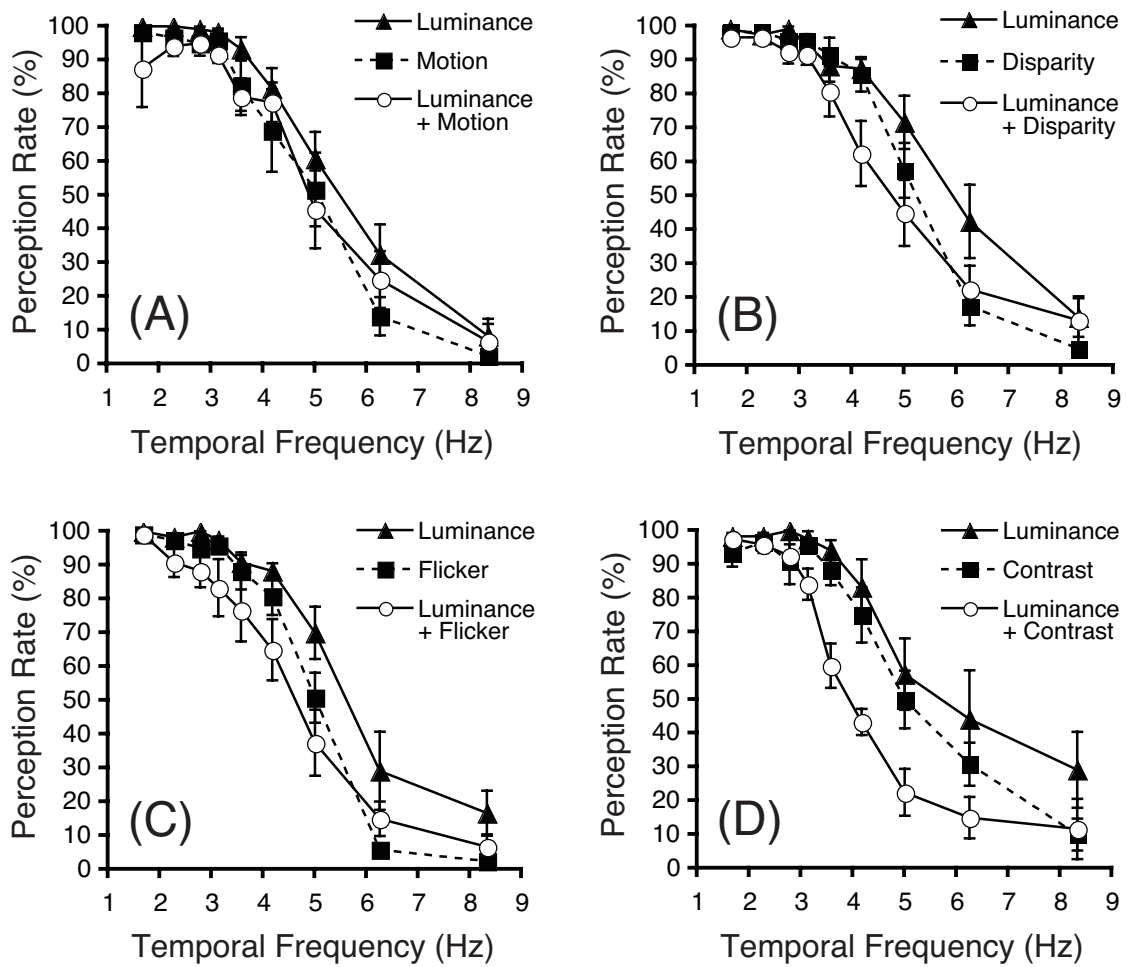


図 3-5 実験 5 の結果 (N=6). (A). 運動定義条件. (B). 両眼視差定義条件. (C). フリッカー定義条件. (D). コントラスト定義条件. 各属性条件における参加者 6 名の平均仮現運動知覚率を、時間周波数の関数としてプロットしたもの. エラーバーは標準誤差を示す.



### 3.3.4 考察

本実験から示された、孤立オブジェクトの古典的仮現運動の知覚傾向を、実験 4 の属性内および属性間オブジェクト追跡の課題成績の傾向と比較してみることとする。3 Hz までは高い知覚率を示し、3 Hz を超えると時間周波数が高くなるにつれて知覚率が低下するという知覚傾向は、実験 4 の属性内条件の正答率の傾向と類似しており、属性間条件の傾向とは相違がみられた。仮現運動知覚率が 50%となる時間周波数限界を属性間仮現運動知覚の時間周波数限界とみなしたところ、その値は 4-6 Hz 程度となり、実験 4 の属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界の値と近い値となった。一方で、属性間条件における仮現運動知覚率が 50%となる時間周波数は属性内条件と近い 4-5 Hz 程度となり、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である 2-3 Hz よりも明確に高い値を示している。この不一致については、実験 7 で改めて検討を行う。次の実験 6 では、注意の自発的移動の時間周波数限界を測定した。

上記の古典的仮現運動知覚の時間周波数限界は、実験者が任意に定めた、仮現運動知覚率が 50%となる時間周波数の値を用いている。しかしこの知覚率は実験参加者の判断基準により変化し得る主観的な指標であり、課題の正答率にもとづいて算出された実験 4 のオブジェクト追跡の時間周波数限界と直接比較を行うには妥当性に欠けるとも考えられる。上記のように値の比較を行う場合は、本実験で用いた仮現運動知覚率という主観的な指標よりも、他の客観的な指標を用いるほうが、より適切な比較ができるようになる可能性がある。たとえば、仮現運動の軌道上に呈示した刺激の検出率が低下する motion masking

と呼ばれる現象が報告されている (e.g., Hidaka, Nagai, Sekuler, Bennett, & Gyoba, 2011; Murai & Murakami, 2013; Yantis & Nakama, 1998). この検出率低下を仮現運動が知覚された指標として仮現運動知覚の時間周波数限界を求め、その値を比較に用いることで、より客観的な比較が行える可能性が考えられる。以上の点については、今後検討していく必要があるだろう。

## 3.4 実験6：視覚的注意の自発的移動の時間限界の検討

### 3.4.1 目的

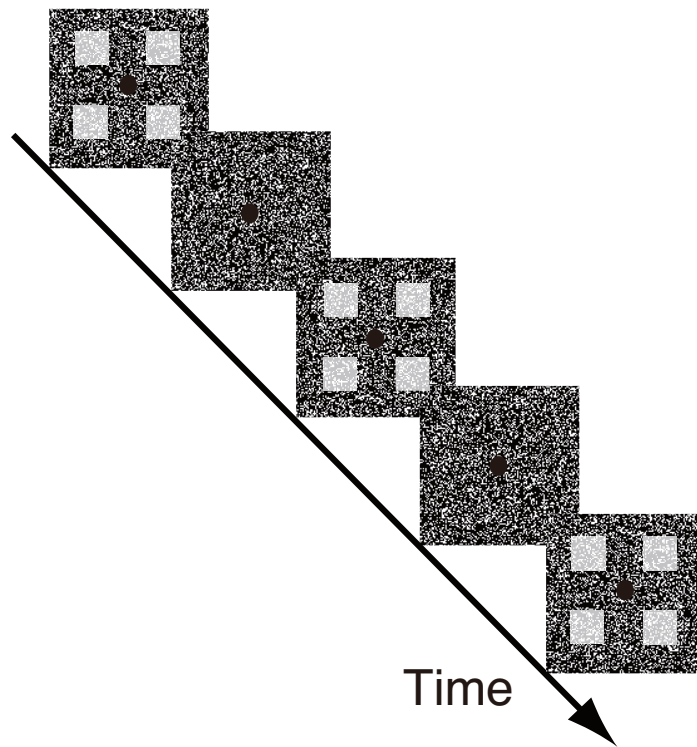
Verstraten et al. (2000) および Benjamins et al. (2007) は、注意をオブジェクト間で移動させることによりオブジェクト追跡を実現していると主張している。しかし Verstraten et al. (2000) および本章の実験4で用いられたオブジェクト追跡課題の刺激では、いずれかの回転方向に運動処理による運動信号が生じており、運動処理の時間周波数限界と注意の移動の時間限界が分離されていなかった。そこで実験6では、運動処理メカニズムのはたらきによる運動信号が発生しない刺激を用いて、自発的（能動的）に注意をオブジェクトからオブジェクトへと移動させる課題（以下、本実験の課題を注意移動課題と呼ぶ）を課すことにより、注意の自発的移動の時間周波数限界を測定した。

これまでの注意研究において、注意処理が複数の過程から構成されている可能性が示されている。その区分のひとつが外因性／内因性の区分である。注意を駆動する操作として、検出すべき周辺部の刺激の近辺に先行手がかりを呈示することにより注意を駆動する方法と、呈示された先行手がかりに応じて実験参加者が自発的（能動的）に刺激に向けることで注意を駆動する方法の2つがあり、駆動された注意はそれぞれ外因性注意、内因性注意と呼ばれる（e.g., Müller & Rabbitt, 1989; Theeuwes, 1991）。本実験の注意移動課題には、観察者が自発的（能動的）に注意を移動させる操作が必要であり、これは後者の内因性注意の時間限界を測定するものであると考えられる。

### 3.4.2 方法

以下の点を除き、実験方法は基本的に実験 4 と同じであった。本実験には、著者を含む成人 5 名（女性 1 名、男性 4 名）が参加した。5 名全員が、実験 4 および実験 5 には参加しておらず、裸眼もしくは矯正により正常範囲の視力を有していた。著者以外の 4 名は実験の目的を知らなかった。

刺激は、実験 4 での輝度定義刺激と同様のものを用いた（図 3-6）。実験 4 の輝度定義刺激のオブジェクト 4 個の配置パターンのうち、正立した正方形オブジェクト 4 個が十字形に配置されたパターン、もしくはオブジェクト 4 個が×字形に配置されたパターンのいずれか一方のみを、試行ごとにランダムに選択して用いた。実験 4 の注意追跡課題の仮現運動フレームのうち、一方のフレームには上記のオブジェクトが配置されたパターンを用い、もう一方のフレームはオブジェクトが表示されず背景領域のドットパターンのみが表示されたものを用いた。その呈示時間が等しい 2 つのフレームを ISI 無しで交互に呈示した。この刺激呈示の場合、4 個のオブジェクトが常に同じ位置に呈示されるため、ターゲットの位置を示す赤色のマーカーが消失した後は、刺激内にはボトムアップの運動成分は存在しないこととなる。オブジェクト領域および背景領域はドット密度 30% のランダムドットパターンによって構成されたものを用いた。背景領域のドットのパラメータは実験 4 の輝度条件と同じであった。本実験ではオブジェクト領域の平均輝度は  $20.9 \text{ cd/m}^2$  に固定した。



**図 3-6 実験6の注意移動課題の刺激配置の例.** 実験4の輝度定義刺激のオブジェクト4個の配置パターンのうち、正立した正方形オブジェクト4個が十字形に配置されたパターン、もしくはオブジェクト4個がx字形に配置されたパターンのいずれか一方のみを用いた（上図は後者の例）。実験4の注意追跡課題の仮現運動フレームのうち、一方のフレームには上記のオブジェクトが配置されたパターンを用い、もう一方のフレームはオブジェクトが表示されず背景領域のドットパターンのみが表示されたものを用いた。

試行の最初に、刺激呈示領域内にオブジェクト 4 個を上記のいずれかの配置で出現させた。そのうちひとつのオブジェクトの中央に赤色のマーカーを出現させることで、追跡すべきターゲットとして指定した。そのすぐ後に、オブジェクト 4 個が配置されたフレームと背景領域のみのフレームを切り替えて呈示していき、オブジェクトの出現に合わせて赤色のマーカーを時計回りもしくは反時計回りのいずれかの方向に移動させた。マーカーは最初に出現した場所から 2 周分回転した後で消失させた。マーカーの回転方向は試行ごとにランダムに設定した。それ以降は実験 4 での流れと同じであった。オブジェクトの位置を判断する青色のマーカーは、試行の半数では正解の位置に、残り半数では正解の位置の前後いずれかの位置に呈示したため、課題のチャンスレベルは 50 % であった。5 段階の時間周波数 (2.27, 2.78, 3.13, 3.57, 4.17 Hz) をランダム順で 24 回ずつ繰り返し、計 120 試行を実施した。

### 3.4.3 結果と考察

時間周波数条件ごとの注意移動課題の正答率を実験参加者ごとに算出し、さらに実験参加者 5 名の平均正答率を算出した。図 3-7 は、参加者 5 名の平均正答率を時間周波数の関数としてプロットしたものである。低時間周波数である 2.27 Hz 条件では正答率が 92.5% と高かったが、時間周波数がそれよりも高くなると正答率が急激に下がり、時間周波数 3 Hz 以上の条件では正答率がチャンスレベル程度となった。時間周波数の効果について 1 要因参加者内分散分析を行った結果、時間周波数の主効果が有意となった ( $F(4, 16) = 21.36, p < .001$ )。

実験の結果、注意移動課題において注意を自発的に移動させることが可能な時間周波数限界は 2-3 Hz 程度であることが示された。この値は、実験 4 における属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界である 4-5 Hz よりも低く、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である 2-3 Hz と近い値となった。加えてこの値は、Horowitz et al. (2004) の、注意の自発的な移動速度が遅いという主張と矛盾しない。Horowitz et al. (2004) は、彼らの "attentional saccade" 課題において、静止した placeholder 間で注意を移動させることが可能となる SOA の限界を測定した。複数のオブジェクトが注視点から等距離に円形状に配置されている静止刺激で、一定の時間間隔で音刺激が提示されるごとに、あるオブジェクトから隣のオブジェクトへと注意を移動させていく課題を実験参加者に課した。課題の正答率が 66.7%となる SOA を算出し、注意の自発的移動速度は遅い（手がかりの SOA で 300-500 msec）ことを報告した。本実験の結果から明らかとなった注意の自発的移動の時間限界もこの結果と近く、自発的注意の移動時間限界が Verstraten et al. (2000) で想定されたものよりも遅いことを支持する結果であると言えよう。

実験 4 から実験 6 の結果より、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界は 2-3 Hz となり注意の自発的移動の時間周波数限界と近い値となった。一方、属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界は約 4-5 Hz となり、注意の自発的移動の時間周波数限界よりも高い値をとり、属性内仮現運動知覚の時間周波数限界と類似した傾向を示した。しかし結果のうち、属性間仮現運動知覚の時間周波数限界が 2-3 Hz よりも高くなり、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である 2-3 Hz と一致しなかった。この点について、次の実験 7 で検討を行う。

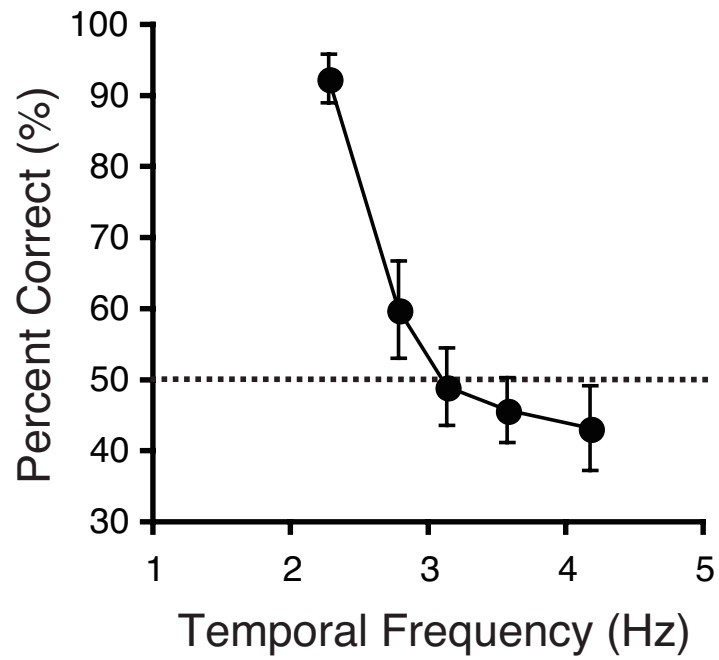


図 3-7 実験6の結果 (N=5). 注意移動課題の参加者 5 名の平均正答率を、時間周波数の関数としてプロットしたもの。エラーバーは標準誤差を示す。点線は課題のチャンスレベル 50%を示す。



## 3.5 実験7：多義的仮現運動の運動知覚の時間周波数限界の検討

### 3.5.1 目的

実験5において仮現運動知覚率が50%となる時間周波数の値を、属性間仮現運動知覚の時間周波数限界とみなしたところ、その値は概ね4-6 Hzとなり、実験4の属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である2-3 Hzとは明確な相違がみられた。この相違は、実験5で用いた仮現運動が水平方向への往復直線運動であったことによる可能性がある。このような単純な刺激配置から生じる仮現運動知覚には、注意の構えや位置予測など、運動とは異なる要因が交絡していた可能性もあり得る。ゆえに運動が多義的ではない実験5の結果は、実験4のような多義的仮現運動の知覚の時間特性を示していないとも考えることができよう。

そこで本実験では、実験4の注意追跡課題で用いた多義的な刺激配置パターンにおける、仮現運動知覚の時間周波数限界について検討を行う。実験4で用いた属性内輝度定義条件、属性内運動定義条件、輝度と運動を組み合わせた属性間条件の各条件で、オブジェクトを追跡せず刺激パターンを受動的に観察した場合に回転方向への仮現運動が知覚される時間周波数限界を測定した。

### 3.5.2 方法

本実験には著者を含む3名が参加した。3名全員が、実験4、5には参加して

いなかった。観察する刺激は、実験4で用いた運動定義刺激および輝度定義刺激、そしてその2つを組み合わせた属性間刺激を用いた。輝度定義刺激は実験4と同様に視認性マッチング課題によって参加者ごとに輝度オブジェクトの輝度値を変化させ、運動定義刺激と主観的視認性を揃えたものであった。実験4のオブジェクト追跡課題とは異なり、赤いマーカは表示せず、仮現運動刺激パターンを約1.8 sec間呈示し、オブジェクトを追跡せず受動的に観察するように参加者に教示した。参加者の課題は、仮現運動のフレームの切り替わりが停止した後、時計回りもしくは反時計回りの仮現運動が知覚されたか否かを、キーボードのキー押しにより回答することであった。本試行は3セッションに分けて実施し、1セッションのなかでは属性条件（輝度定義条件、運動定義条件、属性間条件）は固定し、各セッション内では9段階の時間周波数(1.67, 2.27, 2.78, 3.13, 3.57, 4.17, 5.00, 6.25, 8.33 Hz)をランダム順で20回ずつ呈示した。

### 3.5.3 結果と考察

図3-8は、実験参加者3名の属性条件ごとの平均知覚率を、時間周波数の関数としてプロットしたものである。実験5とは異なり、多義性のある刺激配置パターンでは、属性内条件と属性間条件の仮現運動知覚の間に明確な相違が生じた。属性内輝度定義条件および属性内運動定義条件では、3 Hzまでは90%以上という高い知覚率を示し、3 Hzを超えると、時間周波数が高くなるにつれて知覚率が低下し、6 Hzを超えると仮現運動がほぼ知覚されなくなった。本実験でも実験5と同じく、両属性条件において仮現運動知覚率が50%となる点を、

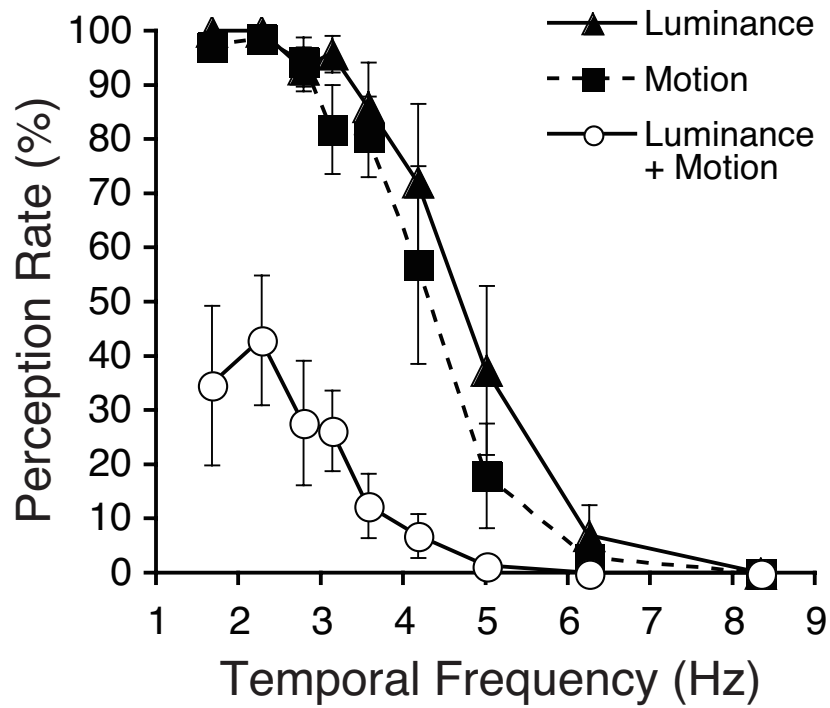


図 3-8 実験 7 の結果 (N=3). 各属性条件における実験参加者 3 名の平均仮現運動知覚率を時間周波数の関数としてプロットしたもの. エラーバーは標準誤差を示す.

仮現運動知覚の時間周波数限界とみなした場合、知覚率が 50%となるのは 4-5 Hz 程度となった。この値は、実験 4 のオブジェクト追跡課題の属性内追跡および実験 5 の水平方向の仮現運動知覚の属性内条件の時間周波数限界と近い値となっている。一方、属性間条件では、どの時間周波数条件でも平均知覚率が 50%を上回ることはなかった。以上の属性内・属性間仮現運動知覚の結果は、実験 5 とは異なり、実験 4 のオブジェクト追跡の時間特性と対応し得る結果である。

これらの結果は、刺激配置パターンにおける多義性の有無で、仮現運動知覚の時間特性が異なることを示すものである。実験 5 および本実験の結果から、属性内刺激では多義性の有無にかかわらず類似した時間特性が示されたのに対し、属性間刺激では多義性の有無により時間特性が明確に異なるものとなった。この相違は、実験 5 のような多義性のない刺激配置の属性間刺激に対しては運動信号を生じさせていた処理が、本実験のような多義性のある刺激配置にした場合には運動信号を生じさせにくくなっている可能性を示唆するものであろう。あるいは、多義性のある刺激配置にした場合に、属性間刺激において同属性の刺激同士の群化が生じたことにより運動信号が抑制され、結果として異なる属性の刺激間で「運動している」という知覚が成立しにくかった可能性もあり得る。運動信号が生じにくい、もしくは運動信号が生じてはいるが抑制されている、そのいずれにしろ、結果として知覚上では運動が生じていないように感じられたと考えられる。オブジェクト刺激の場合に属性間の仮現運動を検出する仕組みとして、刺激属性に関係なく対象のエッジを検出し、そのマッチングにより運動を捉えるメカニズムが想定される。しかし、その処理と多義性のある刺激配置との関係については、本実験からは明確にすることは難しく、今後の

課題となる。

さらに、以上の結果は、注意追跡課題は多義性のある運動を用いて検討する必要があることを示唆している。本実験の結果から、多義性のある属性間刺激では、2-3 Hz 以下の時間周波数においても知覚上は運動が生じにくいと感じられたことが示されている。しかし実験 4 の属性間オブジェクト追跡課題では、時間周波数が 2-3 Hz 程度までは十分な正答率で追跡が遂行されており、この場合には主として、注意の関与する視覚処理がオブジェクト追跡を支えていた可能性が浮かび上がる。属性間刺激のように知覚上では運動が感じられにくい場合には、注意による運動方向選択や追跡が必要となるなど、注意の役割がより重要となることを示していると言えよう。

ここまでの実験 4, 6, 7 の結果より、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界は 2-3 Hz となり、注意の自発的移動の時間周波数限界と近い値となった。それに対し、属性内オブジェクト追跡および属性内仮現運動知覚の時間特性を、注意の自発的移動の時間特性と比較すると、時間周波数が 2-3 Hz 程度では追跡課題の正答率と仮現運動知覚率は共に非常に高い値となっており、注意の時間特性とは明確な相違が認められた。

### 3.6 第3章のまとめと考察

本章では、注意追跡課題におけるオブジェクト追跡の時間周波数限界の値を指標として、オブジェクト追跡に対し比較的低次の運動情報が寄与している可能性を検討した。実験4では、複数の属性で定義されたオブジェクト刺激を用いて、属性内オブジェクト追跡と属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界を測定し比較した。その結果、属性内条件では1次刺激、2次刺激にかかわらず時間周波数限界が4-5 Hzとなる結果が得られ、Verstraten et al. (2000) が主張するオブジェクト追跡の時間周波数範囲内に収まっていたのに対し、属性間条件では属性内条件よりも時間周波数限界が低速側にシフトし2-3 Hz程度となり、両者の時間周波数限界の間には明確な相違が認められた。この結果は、属性内オブジェクト追跡と属性間オブジェクト追跡では、寄与しているメカニズムが少なくとも部分的に異なっていることを示している。この点を明らかにするため、実験5では、実験4と同じ属性の組み合わせを用いて、2つの孤立オブジェクト刺激間の水平方向の往復直線運動を用いて古典的仮現運動知覚の時間周波数限界を測定し、オブジェクト追跡の時間周波数限界との比較を行った。仮現運動知覚率が50%となる時間周波数の値を属性間仮現運動知覚の時間周波数限界とみなしたところ、その値は4-6 Hz程度と、実験4の属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界である4-5 Hzと近い値となり、属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である2-3 Hzとは一致しなかった。また、実験6では刺激中に運動成分が存在しない刺激を用い、注意の自発的な移動の時間限界を測定した。こうした事態における注意の移動時間限界は2-3 Hz程度、つまり実験4

における属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界である 2-3 Hz と近く、属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界である 4-5 Hz よりも低い値となった。さらに、属性間刺激におけるオブジェクト追跡と仮現運動知覚の時間周波数限界の結果の相違について検討するために、実験 7 で、実験 4 と同様の 4 つのオブジェクト刺激による多義性のある刺激配置パターンに対する仮現運動知覚の時間特性を検討した。その結果、属性内刺激では多義性の有無にかかわらず実験 5 と類似した時間特性が示されたのに対し、属性間刺激では多義性の有無により仮現運動知覚の時間特性が明確に異なるものとなった。属性間刺激でありかつ多義性のある場合には、仮現運動が生じにくいことが明らかとなった。このうち属性間刺激の結果は、特に属性間刺激においてはオブジェクト追跡に対する注意の役割が重要となることを示す結果であると考えられる。以上の実験 4, 6, 7 より、属性内刺激ではオブジェクト追跡の時間特性と仮現運動知覚の時間特性が近いものとなり、属性間刺激ではオブジェクト追跡の時間特性と注意の時間特性がほぼ一致する結果となった。

### 3.6.1 注意追跡課題に対する運動処理の寄与の検討

本章の実験で得られた、属性内オブジェクト追跡に対する時間周波数限界である 4-5 Hz は、実験 6 で得られた自発的注意の移動の時間周波数限界である 2-3 Hz よりも高いものとなっている。このことは、オブジェクト追跡の時間特性を自発的な注意の移動のみで説明するのは難しいことを示唆している。実験 5 および実験 7 で得られた属性内の仮現運動知覚の時間周波数限界の結果とも合

わせて考えると、刺激の属性が 1 次、2 次どちらであっても、属性内刺激であれば、オブジェクト追跡に運動処理メカニズム由来の運動情報が寄与している可能性を示唆するものと考えられる。

上で述べた運動情報の寄与の可能性に関して、本章で用いた注意追跡課題が運動以外の要因によって遂行されている可能性について考えてみることにする。その要因のひとつとして、第 1 章でも述べた運動刺激の位置予測を挙げることができる。MOT 課題におけるオブジェクト追跡でも、この位置予測の要因について複数の研究が検討を行っていることは既に述べたが (e.g., Fencsik et al., 2007; Horowitz et al., 2006; Keane & Pylyshyn, 2006), 本章の実験 4 および実験 6 の実験課題においてもこの位置予測の要因が関与していた可能性がある。すなわち、実験 4 で実験参加者はオブジェクトの追跡を行っておらず、試行の最初に出現した赤色のマーカーの仮現運動を追跡しており、マーカーが消失した後も、マーカーの運動情報と速度情報を手がかりにしてマーカーの現在位置を予測していたという可能性である。このような運動対象の位置予測についてはこれまでに、MOT 課題の他、representational momentum 現象を用いて実験的に検討されてきた (e.g., Freyd & Finke, 1984; Hubbard, 1995, 2005)。本章での実験の場合、実験 4 の属性間オブジェクト追跡の時間周波数限界の値が属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界よりも低い値となったのは、属性間運動によって低次の運動信号の抽出が困難になったためではなく、属性間仮現運動刺激中の異なる属性の刺激が、正確な位置予測を妨害するノイズとなってしまうためだとも解釈され得る。しかし、実験 6 の結果は、こうした解釈とは相容れないものである。実験 6 の注意移動課題は輝度定義オブジェクトの



みを用いたものであり、実験 4 の属性間オブジェクト追跡よりもノイズが少ない刺激であったと考えられる。その場合においても、注意移動課題の時間周波数限界は 2-3 Hz となり、実験 4 の属性間オブジェクト追跡の場合と非常に近い値となっている。このことから、今回得られたオブジェクト追跡の時間周波数限界が、刺激中の異なる属性の刺激による位置予測の妨害によるものであるとは考えにくいだろう。また、もし位置予測の要因によってオブジェクト追跡が遂行されているなら、実験 4 と実験 6 のそれぞれにおける輝度条件で運動信号が生じるか否かにかかわらず、結果は変わらないはずである。しかし両者の時間限界に違いが生じたということは、運動信号そのものがオブジェクト追跡に寄与していると解釈するほうが、より妥当だと考えられるであろう。

Horowitz et al. (2004) は、オブジェクト追跡は注意処理ではなく、オブジェクトへのインデックス付け (Pylyshyn, 1989, 2001; Pylyshyn & Storm, 1988) のような前注意的な処理過程によって媒介されていると主張している。この説は、属性内オブジェクト追跡は注意の要因のみで説明するのは困難であるとする本実験の結果と矛盾しない。それに対し、Verstraten et al. (2000) および Benjamins et al. (2007) は、4-8 Hz というオブジェクト追跡の時間特性を注意の過程の時間特性と関連づけようとした。しかし彼らの用いた刺激は輝度定義刺激であり、また、運動と注意の要因が交絡していたため、オブジェクト追跡の時間周波数限界が運動処理の要因に影響を受けたと考えることもできる。つまり、こうした実験事態では、必ずしもオブジェクト追跡の時間特性と注意とを結びつける必要はないものと考えられる。

Verstraten et al. (2000) が注意追跡課題と注意とを結びつけようとしたの

は、用いた仮現運動刺激の特性と強く関連があると考えられる。Verstraten et al. (2000) の実験 1 で用いられた仮現運動刺激は、オブジェクトの仮現運動の方向が、時計回りか反時計回りかが曖昧となる、多義性のある運動刺激であった。そのため Verstraten et al. (2000) は、自発的に注意を移動させていずれかの方向のオブジェクトを選択し続けることによって、その方向に安定して運動が知覚される、そしてこの自発的な注意の移動速度限界がオブジェクト追跡の時間周波数限界を 4-8 Hz に制限していると考えた。しかし、Verstraten et al. (2000) は、運動方向が曖昧とならず自発的な注意の移動による曖昧さ解決が必要ではない仮現運動によるオブジェクト追跡の実験も行っている。この場合においても、時間周波数限界は 5-8 Hz 程度となっている。注意の移動による選択の有無にかかわらず時間周波数限界が 5-8 Hz 程度に制限されるというこの結果は、自発的な注意による選択過程は 3 Hz 以上のオブジェクト追跡の時間周波数限界を規定する要因ではないことを示していると解釈できる。

自発的な注意が 3 Hz 以上のオブジェクト追跡過程に関わらないとしたら、運動方向が曖昧な仮現運動刺激において、運動方向の曖昧さを解決する要因は他に存在するのであろうか。ひとつの可能性として、オブジェクトの軌道情報（履歴情報）などオブジェクトの運動方向にバイアスをかける、運動慣性と呼ばれる要因が関与している可能性がある (e.g., Anstis & Ramachandran, 1987; Ramachandran & Anstis, 1983)。この運動慣性がオブジェクト追跡に寄与していると考えれば、注意による選択に依らずとも運動方向の曖昧さは解決される。すなわち、本章の実験 4 においては赤いマーカーが運動慣性を生起させるものに相当し、マーカーが消失した後もその回転方向にバイアスがかかり、そ

の回転方向のオブジェクトが選択されやすくなっていると考えられるわけである。以上のことから、1次および2次の属性内刺激のように運動方向の曖昧さ解決に運動情報を用いることが可能な場合には、注意による運動方向選択は必ずしも必要とはならないのではないかと考えられる。一方、属性間刺激のように刺激から運動信号が生じにくい場合には、注意による運動方向選択が必要となり、結果的に追跡の時間特性が遅くなると考えられる。以上の点も含め、注意追跡課題に対する注意の関与のあり方については、第4章の総合考察で改めて議論を行う。

本章の結果をまとめると、オブジェクト追跡に対しては、注意をオブジェクト間で移動させるといった自発的な注意過程が関与しており、刺激の時間周波数が3 Hz程度まではこの自発的な注意が機能し得るため（実験6）、刺激の属性にかかわらず、注意のみでもオブジェクト追跡の遂行が可能となっている。一方、刺激の時間周波数が3 Hzを超えると、この自発的な注意の処理のみではオブジェクト追跡の遂行が困難となる。このとき、運動刺激から運動情報が生じる、すなわち属性内刺激の場合には、運動処理がオブジェクト追跡を助け遂行することが可能となることを示唆する。

### 3.6.2 注意追跡課題に寄与する運動処理メカニズムの可能性

属性内オブジェクト追跡に運動情報が寄与しているとしたら、これまで提案されている運動処理メカニズムのうちの、どの運動処理メカニズムによるものであろうか。最初に、輝度定義の運動の時間周波数限界が、他の属性の刺激と同程度の時間周波数限界となっている点に注目したい。もし1次属性である輝

度運動刺激が1次運動検出メカニズムで処理されているとしたら、1次運動検出メカニズムは他の2次属性刺激の運動を検出できないはずであり、上記の輝度定義の運動と他の属性の運動とが同程度の時間限界となる結果は説明できない。また、1次運動検出の時間周波数限界は少なくとも10 Hz以上と高いことが知られており (Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b), 本章の実験7で得られたオブジェクトの仮現運動知覚の時間限界とは異なる。こうした事実は、本章の実験で用いられたような孤立オブジェクトの運動検出には、1次属性である輝度刺激であっても、1次運動検出メカニズム以外の視覚処理がより大きく寄与していることを示唆するものと考えられるであろう。

同様に、2次属性であるコントラスト定義刺激であっても他の2次属性の刺激と非常に近い時間周波数限界を示すことも、注目すべき点である。2次運動の運動知覚を媒介しているメカニズムにはいくつかの候補があることは、第1章で既に述べた。2次運動のうちコントラスト定義刺激に関しては、1次運動検出メカニズムと類似した擬線形処理によって運動が検出されていると言われている (e.g., Lu & Sperling, 1995b, 2001). Lu and Sperling (1995b) の実験においても、両眼視差定義や運動定義の縞刺激の運動検出の時間周波数限界が3-4 Hz程度なのに対し、擬線形処理によって運動が検出されていると考えられているコントラスト定義の縞刺激の運動検出の限界は12 Hz程度と報告されている。本実験のコントラスト定義運動の運動知覚およびオブジェクト追跡の時間周波数限界はこれよりも低い値をとることから、こうした擬線形の運動処理メカニズムがオブジェクト追跡に寄与しているとは考えにくい。

以上の考察をまとめると、オブジェクト追跡に運動情報が寄与しているとす

れば、その運動情報は、1次運動検出メカニズムおよび前処理を含むコントラスト変調刺激の擬線形処理メカニズムとは異なり、1次刺激と2次刺激の両方を共通に処理する、孤立オブジェクトの仮現運動知覚と非常に近い時間特性をもつ処理メカニズムによって抽出されている可能性が高いであろう。これについては、次章で改めて議論することとする。

## 第4章 総合考察

### 4.1 オブジェクト追跡に対する視覚運動処理の寄与

本研究の主要な目的は、これまで注意との関連から論じられることの多かったオブジェクト追跡課題に、比較的初期の運動情報が寄与するか否かを検討することにある。その上で本章では、運動情報を抽出する処理メカニズムと注意に関わるメカニズムとの相互関係を検討し、オブジェクト追跡に関するモデルを提案することも目的とする。

第2章では、複数のオブジェクトを追跡する MOT 課題において、とりわけ仮現運動刺激に挿入する ISI の効果に着目した検討を行った。実験1, 2では、MOT 課題成績に対する ISI の効果について検討した。その際に、課題成績を上視野に分けて分析し、上下視野非対称性に関する検討も併せ行った。その結果、MOT 課題の仮現運動刺激に 100 msec 程度の ISI を挿入することにより、課題成績が 20%程度低下した。加えて、ISI を挿入しない場合には課題成績が下視野優位となったが、ISI を挿入すると、輝度定義刺激では特に下視野で課題成績が大きく低下し、100 msec 以上の ISI の挿入により下視野優位性は消失、もしくは減少した。この ISI による課題成績の低下の効果が、運動処理の要因のみで説明が可能であるのかが問題となる。第2章で述べたように、Braddick(1974) は、ランダムドット・キネマトグラムに対する運動検出が 100 msec 程度の ISI の挿入により阻害されることを報告しており、それ以降、1次運動の検出は ISI

によって阻害されるということは広く受け入れられている。これは、おそらく、1 次運動の検出を担う時空間受容野の時間的な広がり（図 2-1）に規定されているものと思われる。今回用いたような、孤立オブジェクトを用いた、いわゆる古典的な仮現運動は、1 次と 2 次以上の高次の運動成分を持つ。少なくとも 1 次成分に関しては、ほぼ同じ時間的な制約を想定しても妥当であろうと考えられる。したがって、実験 1, 2 で ISI 挿入の効果が顕著に現れたことは、少なくとも輝度刺激に関しては、ISI が無い場合には 1 次運動の成分がオブジェクト追跡に寄与している可能性を示すものと解釈しても良いと思われる。また、上視野では輝度刺激に対しても、ISI 挿入の影響は弱く、成績はそれほど大きく変化しなかった。このことは、上視野におけるオブジェクト追跡に関しては、1 次運動のような低次の運動成分の寄与は相対的に小さく、より高次の処理の寄与が大きいことを示唆していると考えられる。

さらに、実験 2 において 2 次仮現運動刺激に対して ISI を挿入した場合にも、輝度刺激の場合と同様の ISI の効果が得られた。この結果は、2 次属性で定義された孤立オブジェクトの仮現運動がもつ 2 次の運動成分にも、1 次成分の場合と同様の、100 msec 程度の時間的制約が存在する可能性を示すものである。以上の解釈は、上で述べた 1 次運動成分に対する ISI の効果の説明と矛盾するようにも思われる。しかし本研究で用いた 100 msec 程度の ISI 挿入は、運動処理に効果を示すものとして想定した実験操作であり、運動処理の 1 次と 2 次を切り分けるものではない。第 2 章でも述べたように、この 2 次仮現運動に対する ISI の効果は新たな知見であるが、1 次仮現運動に関する結果と矛盾するものではなく、むしろ 1 次仮現運動であっても 2 次仮現運動と同様に処理を行う、1 次、

2次仮現運動の両方に関与する過程が存在する可能性を示唆する結果であろう。しかしながら、実験2における下視野優位性に対するISIの効果、および実験3の注意負荷に対する耐性については、2次運動間で一貫した傾向は認められなかった。そこで、2次刺激による古典的仮現運動について、時間的側面の観点から改めて検討を行った。実験5で、1次、2次の古典的仮現運動の時間特性を測定したところ、刺激属性（1次、2次）にかかわらず、ほぼ同じ値であり、かつ縞刺激などの連続的な運動刺激から得られている値よりもはるかに低い、約4-6 Hzという値が得られた。この結果も、上記のISIの効果に関する議論を支持するものと考えられることができるだろう。また、オブジェクト追跡に比較的初期の運動情報が寄与するか否かを検討するという本論の目的からは外れるが、ここまでの結果は、古典的仮現運動の処理には、1次刺激、2次刺激にかかわらず共通のメカニズムが存在することを示唆している。この点に関しては4.4節で詳しく論じる。

ここまでの議論の前提は、100 msecのISIで阻害されるのは、運動メカニズムであるというものである。次に逆に、ISIにより低下した課題成績について、注意やワーキングメモリーなどが関与する高次の過程が100 msec程度のISIで阻害される可能性を検討してみることとする。第1に、ISIの期間、記憶過程がオブジェクトの情報を保持しているが、保持の時間限界を超えると情報が保持できなくなるという可能性である。しかしながら、視覚の感覚記憶であるアイコニック・メモリーは長くても数百 msec程度 (e.g., Sperling, 1960)、追跡すべき視覚対象に対して形成されるオブジェクトファイルの保持時間限界は数百 msec から数秒程度であると推定されており (Kahneman et al., 1992; Noles,



Scholl, & Mitroff, 2005), 本研究の実験 1-3 で挿入された 100 msec 程度の ISI によって, 記憶によるオブジェクトの保持メカニズムが阻害されたとは考えにくい。また, ターゲットに対して向けられた注意によるオブジェクトの保持が, ISI の挿入によって困難になったという可能性についてはどうか。第 2 章の考察でも述べたように, 注意の瞬き現象 (Raymond et al., 1992), および変化検出課題 (Nakahima & Yokosawa, 2012) によって明らかとなった注意の時間特性は 100 msec よりも長い効果を示している。しかし, 注意の効果はこれより短い ISI によっても影響を受ける可能性は残されており, 実験 1-3 の結果は 100 msec 程度の ISI が注意処理に影響を与えたものだと解釈可能である。ゆえに, 第 2 章の実験の結果は運動情報の寄与を明確に示すものとはならなかった。

そこで引き続き, 第 3 章では, Verstraten et al. (2000) で用いられた, 知覚される運動方向が多義的となる運動刺激による注意追跡課題を用い, 運動情報の寄与の可能性を検討した。ここでは特に, 比較的低次の運動処理も関与し得る属性内オブジェクト追跡と, 注意にもとづく高次処理のみで処理することが可能と考えられる属性間オブジェクト追跡との時間周波数限界の差異に着目し, 検討を行った。その結果, 属性内追跡では時間周波数限界が 4-5 Hz であったが, 属性間追跡の時間周波数限界は 2-3 Hz となり, 両追跡で限界値が大きく異なることが示された。今回得られた属性内運動に対する結果は, Verstraten et al. (2000) の輝度定義の属性内運動の結果, 4-8 Hz と良い一致を示している。属性内, 属性間運動刺激に対する時間周波数限界が明確に分かれたことから, 今回の結果はオブジェクト追跡に複数の要因が寄与している可能性を示すものであると考えられる。そこで実験 5 では孤立オブジェクト間の仮現運動知覚の

時間周波数限界を、そして実験 6 では注意の自発的移動の時間周波数限界を測定し、実験 4 の結果と比較した。その結果、仮現運動知覚の時間周波数限界は、実験 1, 2 に関連して既に述べたことであるが、4-6 Hz 程度となり属性内追跡の時間周波数限界と概ね一致した値を示したが、属性間追跡の時間周波数限界とは一致しなかった。一方、注意の移動の時間周波数限界は 2-3 Hz 程度となり属性間追跡の時間周波数限界と一致し、属性内追跡の時間周波数限界の値よりも低いものとなった。

本研究の結果は要約すると、以下の 3 点にまとめることができる、(1) 属性内運動に対するオブジェクト追跡は、ISI 挿入に対する感受性が低い、(2) 二重課題により注意負荷を課した場合には課題成績が低下する、(3) 属性内運動を用いたオブジェクト追跡の時間的な限界は、仮現運動の時間限界とほぼ一致し、属性間運動を用いた時の時間限界は注意の自発的な移動の時間限界とほぼ一致する。以上の第 2 章および第 3 章の結果を合わせて考えると、これまで主張されてきた自発的・能動的な注意にもとづく高次処理 (e.g., Cavanagh & Alvarez, 2005; Verstraten et al., 2000) に加え、それとは異なる処理過程、おそらくは比較的初期の視覚運動処理メカニズム由来の運動情報がオブジェクト追跡に寄与していることを示すものと解釈することができるだろう。

本研究では、ISI に対する感受性、属性内・属性間の運動知覚特性の差異に着目し、刺激としては 1 次および 2 次属性、両者によって定義された刺激を併用した実験を実施した。その結果、実験 2 における ISI に対する感受性、実験 3 における下視野の注意負荷に対する耐性、実験 5 および実験 7 における属性内運動の時間特性、いずれに関しても 1 次、2 次運動の結果の間には大きな差異は

認められなかった。この点は、オブジェクト追跡に対する低次の運動情報の寄与可能性を検討するという今回の主要目的とは外れる点であるが、運動視研究としての観点からは興味深いものであるので、4.4節で詳しく論じる。

## 4.2 オブジェクト追跡に関与する注意処理の特性

本研究での実験操作によって生じた結果を運動処理の観点から解釈した場合であっても、オブジェクト追跡のあらゆる実験事態を運動処理のみで説明することは難しい。たとえば第1に、本研究の実験1から実験3における、ISI挿入後のMOT課題の成績が挙げられる。ISI挿入によって運動処理メカニズムのはたらきが阻害されたと考えられる状況下でも、MOT課題の正答率は30-40%程度と、課題のチャンスレベル2.78%を大きく上回る値を示している。さらに、二重課題を課して注意負荷をかけた場合(実験3)、ISIにより運動処理が阻害されたと考えられる100 msecのISI挿入条件で、MOT課題成績が有意に低下した。以上の結果を合わせて考えると、運動処理がはたらきにくい場合にも、注意が関与する高次の視覚処理過程がオブジェクト追跡を実現させている可能性が浮かび上がる。

次に注目するのは、オブジェクト刺激として属性間運動刺激を用いて、1次運動検出や2次運動処理といった運動処理がはたらくのを困難にした場合である。本研究の実験4において、輝度定義オブジェクトと2次属性定義オブジェクトの組み合わせで構成された属性間運動によるオブジェクト追跡の時間周波

数限界が、2-3 Hz 程度まで低下した。さらに、この値は実験 6 で得られた注意の自発的移動の時間周波数限界である 2-3 Hz とほぼ一致した。以上の結果は、属性間運動を用いて比較的低次の運動処理がはたらくのを困難にした場合であっても、時間周波数が十分に低ければ、注意が関係する高次の視覚過程がオブジェクト追跡を遂行し得ることを示している。

他の視覚課題における属性間処理においても、本研究の属性間オブジェクト追跡で示されたものと同様の時間特性がみられることが知られる。複数の視覚属性を用いて刺激の組み合わせを答える課題に関しては、いくつか研究報告がある。たとえば、Fujisaki and Nishida (2010) は、輝度・色・方位による視覚属性内、その組み合わせによる属性間、そして視覚・聴覚・触覚のモダリティ間で、2 種類の刺激の組み合わせを回答させるバインディング課題を用いて、それぞれの時間周波数限界を測定した。その結果、属性内条件ではいずれの視覚属性の組み合わせでも時間周波数限界が 4 Hz 以上となったのに対し、属性間条件およびモダリティ間条件では全ての組み合わせで時間周波数限界が 2-3 Hz 程度となった(モダリティ間の結果については、Fujisaki & Nishida (2005, 2009) の結果とも一致する)。他にも、異なる空間位置に呈示された明るさもしくは色と方位の組み合わせを答える属性間バインディング課題 (Holcombe & Cavanagh, 2001)、もしくは色と運動の属性を用いた属性間バインディング課題では (Arnold, 2005; Bertels & Zeki, 2006)、属性内課題よりも時間周波数限界の値が低下し 2-3 Hz 程度となることが報告されている。属性間の結果について Fujisaki and Nishida (2010) は、属性間条件およびモダリティ間条件では、単一のイベントに注意を向けることで詳細な分析を行うといった、高次の

要因によって時間周波数限界が制限されたためだと説明している。これらの結果は、本研究の実験 4 の属性間オブジェクト追跡における時間周波数限界と、値としても良い一致を示しているとともに、属性間のオブジェクト追跡には注意の自発的移動のような高次の要因が関与しているとする、本論文の考察を支持する研究結果とみなすことができるだろう。

では、本研究の属性間オブジェクト追跡や注意の移動の時間特性は、これまでの注意研究から得られた注意の時間特性と整合的だろうか。初期の注意の時間特性に関する研究では、視覚探索課題を用い、注意の単一焦点が視野内を移動する速度を調べたものが多い。そうしたなかで、先行手がかり法 (e.g., Posner, 1980; Posner et al., 1980) を用いて、手がかり刺激とターゲット刺激の SOA を段階的に操作した場合の反応時間をみることで、注意の移動速度を推定した研究では、注意は 8 msec/deg (Tsal, 1983), 19 msec/deg (Shulman, Remington, & McLean, 1979) で視野内を連続的かつ距離と比例する時間を費やして移動するとする結果が報告されている一方、刺激間の距離には影響されないという結果も報告されるなど (e.g., Remington & Pierce, 1984), 一貫した結果が得られているわけではなく、この手法から注意の移動速度がどの程度のものであるか、現時点でははっきりとした結論を下すことは難しい。その後、注意のなかでも速度が遅い成分が存在することが明らかとなった。たとえば、外因性注意に比べて内因性注意のほうが、注意の移動が遅いことが報告されている (e.g., Jonides, 1981; Müller & Rabbitt, 1989)。また、視覚探索課題においても、自発的に注意を移動させることを実験参加者に求める探索条件では、通常の視覚探索条件に比べて注意の移動が遅いことも報告されている (Wolfe,

Alvarez, & Horowitz, 2000). このように、特に注意を自発的に移動させる、内因性注意が必要な課題において、注意の移動が遅くなることが示されている。こうした結果は、自発的に移動させる注意が遅い時間特性をもつという、本論文の実験 6 の結果を支持するものであると言えよう。

運動するオブジェクトが一時的に消失する (Alvarez et al., 2005; Fencsik et al., 2007; Horowitz et al., 2006; Keane & Pylyshyn, 2006; Scholl & Pylyshyn, 1999), オブジェクトが遮蔽領域によって遮蔽される (Scholl & Pylyshyn, 1999) など、一時的に視覚入力が遮断される場合に関しても、複数の異なる過程が関与している可能性が指摘されている。たとえば、追跡課題のオブジェクトが一時的に消失した場合には、オブジェクトへ注意を向け続ける追跡メカニズムから、オブジェクト情報を一時的に保持しておく視覚的記憶メカニズムへと切り替えているとするモデルも提案されている (Alvarez et al., 2005; Horowitz et al., 2006)。さらに、第 1 章で述べたように、限定された刺激状況ではあるものの、オブジェクトの運動方向や速度、軌跡といった運動情報を用いることでオブジェクト追跡時に運動オブジェクトの位置予測を行っていることを示す研究結果も報告されている (Fencsik et al., 2007; Keane & Pylyshyn, 2006)。こうした結果は、本研究における実験 4 の属性間オブジェクト追跡の場合のような、比較的低次の運動処理がはたらかない状況下で、高次の要因がオブジェクトの運動知覚を安定化させる役割を果たしていると考えられる根拠になり得るであろう。この仮説は、オブジェクト追跡の先行研究で提案されている多焦点注意モデル (Cavanagh & Alvarez, 2005) やオブジェクトファイルモデル (Kahneman et al., 1992) とも整合的である。

### 4.3 オブジェクト追跡に寄与する視覚運動処理の特性

ここまで述べたように、注意など高次の視覚処理の役割は、オブジェクト追跡の遂行においては限定的なものだと考えられる。たとえば本論文第3章の実験4で、属性間刺激の使用という実験操作により、運動処理の要因の寄与を低くした場合に、追跡課題の時間周波数限界の値が2-3 Hzまで低下した。こうした結果は、オブジェクト追跡の状況下における注意の機能もしくは注意にもとづく処理過程は、単独ではそれほど強くはたらくことができないことを示唆しているものと考えられる。オブジェクト追跡に対し、注意の処理過程に加えて運動処理から生じる運動情報が寄与することによって、オブジェクト追跡の成績が上昇し、追跡可能となる時間周波数限界が4-5 Hz程度まで広がるなど、より広範な条件でオブジェクト追跡が遂行されるようになるのではないだろうか。

前節でもふれたように、Fujisaki and Nishida (2010) は、属性内の刺激同士で行ったバインディング課題での時間周波数限界の値は5-9 Hz程度となり、属性間バインディング条件よりも高い値になると報告している。Fujisaki and Nishida (2010) はこの結果について、高次の要因による属性間処理とは異なる、比較的末梢に近い処理が関係していると考察している。この結果も、本章の実験4の属性内オブジェクト追跡に関与する処理メカニズムが、注意など高次の視覚処理にもとづく属性間オブジェクト追跡の処理メカニズムとは異なるという、本論文の考察を支持するものだとみなすことができるであろう。ただし、Fujisaki and Nishida (2010) の属性内バインディング課題の時間特性と、本研究の属性内オブジェクト追跡の時間特性は数 Hz程度異なっている。この相

違については、行った課題が異なることにより、関与する視覚過程も異なっていた可能性が考えられる。本論文の実験 5 で得られた属性内仮現運動知覚の時間周波数限界は 4-6 Hz 程度であり、属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界と近い値となっている。このことから、本研究で用いられたオブジェクト追跡では、仮現運動処理に関与するメカニズムの時間特性が、属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界を 4-5 Hz 程度に限定している可能性が高い。

オブジェクト追跡の研究では、ターゲットに対して注意を向け続けることがオブジェクトの個別化に重要だと言われてきた (e.g., Benjamins et al., 2007; Cavanagh & Alvarez, 2005; Verstraten et al., 2000)。しかし、仮に運動処理の段階においてオブジェクトの選択や運動方向の曖昧さ解決が行われているなら、特に注意の関与を仮定しなくてもよいこととなる。第 3 章でも述べた、先行呈示される運動刺激の経路に沿った運動の知覚が得られやすくなるという、仮現運動知覚における運動慣性の現象は、運動処理段階において運動方向の選択や曖昧さ解決がなされている代表的な例であろう (Anstis & Ramachandran, 1987; Ramachandran & Anstis, 1983)。また、運動慣性の現象に関連して、運動オブジェクトの軌跡 (履歴) 情報が運動知覚に影響を与えるという実験結果が報告されている。これについては、Nakayama and Silverman (1984) によって "temporal recruitment" と名づけられ、運動視研究では運動検出可能な最大距離の増加や運動検出器間の相互作用という視点から検討が行われてきた。Snowden and Braddick (1989) は、運動刺激のフレーム数を増加させていくことで、ランダムドット・キネマトグラムにおける運動検出が可能となる空間距離限界 ( $D_{max}$ ) が増加することを報告した。そしてこの  $D_{max}$  増加が、運



動の軌跡と同じ運動方向の運動信号が増強され、それとは異なる方向の運動信号が抑制されるという運動検出器間の相互作用によって生じている可能性について言及している。では、このような運動処理における検出器間の相互作用が、オブジェクト追跡にどのように関連しているだろうか。たとえばオブジェクト刺激の運動の履歴情報を用いることで、その方向に沿って運動経路 (motion paths) が統合され、オブジェクトの運動方向の運動信号が増強されることにより、他のオブジェクトとの誤対応が生じてしまう確率や、オブジェクトの仮現運動の知覚方向が反転してしまう割合が減少し、オブジェクトの運動知覚が安定化している可能性が考えられる。この可能性は、FINST モデル (Pylyshyn, 1989, 2001; Pylyshyn & Storm, 1988) におけるインデックス付けの機能とも整合的である。

また、1次運動は並列的に処理されることが知られているが (Dick et al., 1987; Nakayama & Silverman, 1986)、2次運動についても、注意の関与無しに複数のオブジェクトが同時並列的に処理され得るのかという問題もある。運動定義運動を用いた MOT 課題で、8割程度の正答率で複数のオブジェクトを追跡できていることが報告されている (Huff & Papenmeier, 2013; St.Clair et al., 2010)。しかし、この結果が2次運動処理によるものか、それとも注意処理によるものかについては切り分けられていない。この問題については今後さらなる検討を要する。

以上の議論をまとめると、これまで想定されてきた能動的な注意にもとづく高次の処理に加え、比較的低次の視覚運動処理とそこから生じる運動情報も、オブジェクト追跡に重要な役割を果たしているものと考えられる。すなわち、

通常の実験事態では能動的な注意が主要な役割を果たしており、低次の運動情報は補助的ではあるかもしれないが重要な役割を果たしている。そうした運動情報の役割を、ISI や属性間運動を導入することにより明確に引き出すことができるという点が、本研究の総合的な結論となる。

#### 4.4 オブジェクト追跡に寄与し得る視覚運動処理メカニズム

これまで論じてきたように、オブジェクト追跡には注意などの高次の処理過程に加え運動処理が寄与している可能性が高いものと考えられる。しかし、運動視研究では、これまでにさまざまな運動処理のメカニズムが提案されている。そこで本節では、オブジェクト追跡に寄与している運動情報は、こうした運動処理メカニズムのうち、どのメカニズムから生じたものかについて考察を行う。本研究の結果に一貫して認められる興味深い点として、刺激が輝度定義であっても、課題成績にみられるオブジェクト追跡の特性が、一般的に認められている1次運動検出メカニズムの特性とは異なっている点がある。また、輝度定義運動刺激に関わるものと2次運動刺激に関わるものとは、非常に類似した特性をもっているという点も挙げることができる。He et al. (1996) および本研究の実験1の結果からは、輝度定義のオブジェクト刺激であっても、MOT課題の成績には下視野優位性が存在することが示されている。しかし、1次運動の検出には上下視野差がないという結果が報告されており (Sato & Mugishima, 2000; Smith & Hammond, 1986)、1次運動検出と輝度定義のオブジェクト追

跡の結果との間には相違がみられる。また、Verstraten et al. (2000) および本研究の実験 4 で得られている、輝度定義オブジェクトを用いた属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界は 4-8 Hz であり、一般的に知られている 1 次運動検出における時間周波数限界（少なくとも 10 Hz 以上, Burr & Ross, 1982; Lu & Sperling, 1995b）よりも低い値となっている。つまり、時間周波数限界においても、輝度定義のオブジェクト追跡と 1 次運動検出との間に乖離が存在する。さらに本研究の実験 1 から実験 3 で、MOT 課題の運動オブジェクトが 1 次仮現運動、2 次仮現運動にかかわらず、100 msec 程度の ISI 挿入によって MOT 課題の成績が低下し、実験 4 で、1 次仮現運動と 2 次仮現運動による属性内オブジェクト追跡の時間周波数限界がともに 4-5 Hz 程度となるなど、1 次仮現運動と 2 次仮現運動に共通する傾向が認められた。これらの結果は、輝度定義の運動刺激であっても、1 次運動検出メカニズムでは処理されず、それとは異なる 2 次運動刺激を処理するメカニズムと同一のメカニズムで扱われていることを示唆するものと考えることができよう。こうしたメカニズムの候補として、2 次運動処理メカニズムが挙げられる。1 次運動検出メカニズムは刺激の輝度情報をもとにした運動検出を行っており、輝度分布の移動を伴わない 2 次運動刺激は原理的に処理できないが、2 次運動処理メカニズムは 1 次運動刺激に対しても、たとえば輝度エッジの移動情報にもとづく運動の検出が可能である。ゆえにオブジェクト追跡においても、1 次の輝度刺激であっても 2 次運動処理メカニズムで運動が処理されたとしても不思議ではない。

もちろん、輝度定義刺激であっても複数のメカニズムで処理されるという説は、本論文で初めて主張されたわけではない。第 1 章で述べたように、Braddick

(1974, 1980) は、ランダムドットパターンのドットの仮現運動と光点やオブジェクトの仮現運動とでは、運動検出が可能な時空間限界が異なるなどの特性の違いが存在することから、両運動を "short-range motion" と "long-range motion" に区分し、それぞれの運動に対応した処理メカニズムが存在すると主張した。この主張は Cavanagh and Mather (1989) などで批判を受け、刺激属性にもとづく処理メカニズムの区分にとって代わられることになるのだが、Braddick (1974, 1980) の区分の失敗は運動の現象面での違いをメカニズムの違いと混同してしまったことにあり、メカニズムの違いによる区分にもとづいて2つの仮現運動の特性を捉え直してみれば、実はそうおかしなものでもない。現象面での運動特性の相違は、その運動刺激から運動を検出しているメカニズムの特性を反映するものであり、運動知覚や処理の特性が異なるということは、その運動を扱っている処理メカニズムが異なることに起因すると考えられる。たとえば、運動の検出範囲に一定の時空間限界をもつ運動検出メカニズムが存在し、その時空間限界を超えた場合など運動の検出が困難となる刺激入力が行われた場合には、輝度定義の刺激であってもそれとは別の運動検出メカニズムで運動が検出されると考えれば、仮現運動の刺激間の時空間的距離が変化するのに従い運動が検出されるメカニズムが変化し、結果として運動の特性にも違いが生じるということは十分にあり得るであろう。

オブジェクト追跡における刺激の処理に1次運動検出メカニズムが関与しないという点は、不思議に思われるかもしれない。その疑問についての示唆を与えてくれるのは、ランダムドット・キネマトグラムのドットのサイズもしくはドット密度を変化させ、仮現運動検出の  $D_{max}$  を測定した実験である。ランダ

ムドット・キネマトグラムのドットのサイズ (Cavanagh, Boeglin, & Favreau, 1985; Sato, 1998) あるいはドット密度 (Sato, 1998) を変化させて観察者に運動方向判断を課した場合、ドットサイズが大きくなる、もしくはドット密度が 0.1%以下と非常に粗になると Dmax が不連続に拡大し、刺激の SOA によって Dmax が変化するという結果が得られている。Sato (1998) は、この SOA による Dmax の変化は 1 次運動検出メカニズムによる処理ではみられない特性であり、従来は 1 次運動検出メカニズムによって検出されてきたと考えられるドットの仮現運動であっても、ドットサイズが大きくなる、もしくはドット密度が 0.1%以下と非常に粗になる場合には、通常の 1 次運動検出メカニズムとは異なるメカニズムによって運動検出が行われている可能性があるとして述べている。

この Sato (1998) の仮説をオブジェクト追跡に当てはめて考えてみよう。オブジェクト追跡における運動刺激は、サイズの大きな複数個のオブジェクトが限定された領域内を運動しているというものであり、上のランダムドットパターン実験における、ドットサイズが非常に大きくドット密度が低い、という状況に当てはまる。ゆえに、ランダムドットパターン実験の結果で 1 次運動検出メカニズムではみられない特性が表れたとの同様に、オブジェクト追跡においても、輝度定義オブジェクトに対する運動処理の様式が変化し、1 次運動検出メカニズム以外の運動処理がはたらくようになったと考えられる。

さらに、本論文で示された結果は、1 次、2 次刺激に対する共通の特性をもつ運動処理メカニズムが存在する可能性を示唆している。この運動処理メカニズムの候補としては、Braddick (1974, 1980) が主張する、孤立オブジェクト刺激に対する "long-range process" と類似した運動検出メカニズムが想定さ

れる。この "long-range process" メカニズムは、その運動の現象面での特性より、1次運動検出とは異なるメカニズムだと考えられている。たとえば、運動検出の時空間限界が1次運動検出と異なり非常に大きい (e.g., Burt & Sperling, 1981; Kolers, 1972), 刺激の属性に関係ない (e.g., Cavanagh et al., 1989) といった特性である。本論文の実験で用いた孤立オブジェクト刺激に対しては、この "long-range process" のような処理過程がはたらいっている可能性を指摘することができよう。この場合、1次刺激と2次刺激は同じように処理されることになる。また、Anstis (1980) も、Ramachandran, Rao, and Vidyasagar (1973) の輝度以外のパターンによる仮現運動知覚の報告をもとに、1次もしくは2次といった運動刺激の属性にかかわらず、入力されてきた視覚情報をもとに背景からオブジェクトの抽出を行い、そのオブジェクト同士の間で運動を検出するメカニズムのモデルを提唱している。さらに Ullman (1979) は、刺激入力のなかからある「特徴」を抽出し、抽出された特徴同士をマッチングして運動を検出する、特徴マッチング (feature matching) と呼ばれる運動検出を提案している。以上の3つのような、オブジェクトの抽出が運動検出に先行する過程を想定すれば、本研究の実験5および実験7で得られた、1次刺激であっても2次刺激であっても仮現運動知覚の時間周波数の上限値がほぼ同じ値になることの説明が可能となる。こうしたアルゴリズムでの運動検出の時空間限界については、これまで詳細には検討されてきていないが、本研究の結果 (実験1-3) は、ISIが運動処理に影響を与えたと解釈した場合に、少なくとも、こうした運動検出の時間的な限界が100 msec程度であることを示唆するものである。この点については、今後さらに詳細な検討を行う必要があるだろう。

さらに、運動検出と刺激の属性との関係について、刺激に多義性が存在するか否かで、特に属性間刺激の処理が異なることを示す結果を得た。多義性のない属性間運動刺激では低い時間周波数でも仮現運動が知覚され、時間特性が属性内刺激と類似した時間特性が得られたのに対し、多義性のある属性間運動刺激ではどの時間周波数でも十分な仮現運動が知覚されなかった。多義性のある属性間刺激の場合になぜ知覚上で運動が生じにくくなるのかについては、本論文の研究からは明らかにはならなかった。この刺激の多義性と属性内・属性間運動処理の問題については、運動視研究では未だ検討がなされていない問題であり、今後の検討課題となる。

#### 4.5 オブジェクト追跡モデルにおける視覚運動処理の役割

これまでの研究では、オブジェクト追跡の問題は注意など高次の過程とからめて論じられることが多かった。たとえば、Cavanagh and Alvarez (2005) が提唱する多焦点注意モデルは、複数の注意の焦点が複数のオブジェクトに並列的に向けられ、各オブジェクトの移動に伴って移動することにより、ターゲットの同一性が保持されるという、能動的な注意の役割を重視したものである。また、Kahneman and Treisman (1984), Kahneman et al. (1992) が提唱するオブジェクトファイルモデルは、視覚入力をもとに、サイズ・形状・色・明るさ・運動方向などの特徴を含む一時的な内部表象であるオブジェクトファイルが形成され、視覚対象がその時空間的位置を変化させた場合には、その状態

変化に応じてオブジェクトファイル内の情報が更新され、視覚対象の同一性が保持されるというものである。それに対し Pylyshyn らのモデル (FINST モデル) は、高次の認知過程よりも前段階の過程 (前注意過程) を重視しており、オブジェクト追跡課題でターゲットが指定された時点で、前注意過程においてターゲットにインデックスが付加され、追跡中もインデックスが並列的に保持されることによって、オブジェクトの同一性が保持されるというものである。

各モデルでは、オブジェクト追跡において重視する過程が異なっており、一見対立しているようにもみえるが、1-3 節で述べたように、各モデルは排他的なものではなく、むしろ視覚処理過程について各モデルが相互に補完し合うような関係となっているとも解釈できる。そのため本論文の第 1 章では、図 1-3 において、オブジェクト追跡に関する各モデル間の関係を整理し、階層モデル化したものを提示した。このモデルは、視覚情報抽出段階、前注意処理段階、注意処理段階の 3 層に分かれている。第 1 層では、視野内の視覚入力に対して視覚情報の抽出や分析が行われる。その視覚情報が 2 層目の前注意処理段階に送られ、いくつかのオブジェクトに対してインデックス付けによる選択処理が行われる (Pylyshyn, 1989, 2001)。第 3 層の認知処理段階では、下層から入力されるオブジェクトに対してトップダウンの注意などによる複雑な処理が行われているというものである。

これまでの研究では、高次の認知的過程と比べて、それよりも前の段階の処理が詳細に検討されてこなかった。本研究から得られた結果は、第 3 層よりも低層である第 2 層において、オブジェクト追跡に視覚運動情報が寄与していることを示したものであると言える。本研究の結果をふまえて図 1-3 のモデルを



修正したものを、図 4-1 に示す。この修正版のモデルでは、第 1 層より入力されたオブジェクトの情報をもとに第 2 層において運動の検出が行われ、さらに運動検出器間の相互作用が生じてその運動信号強度が強まることが想定される。ここで生じた運動情報がオブジェクト追跡に寄与することにより、高次の認知的過程以外に運動処理段階においても、オブジェクトの時間的統合およびターゲットの個別化が実現される。さらに、階層間で情報のやりとりが協調的に行われることによって、最終的に意識的な処理であるオブジェクト追跡がより安定的に実現し得るという点が、ここで提案するモデルが第 1 章で提示したものと異なる点であり、この点が本論文の結論ともなる点である。

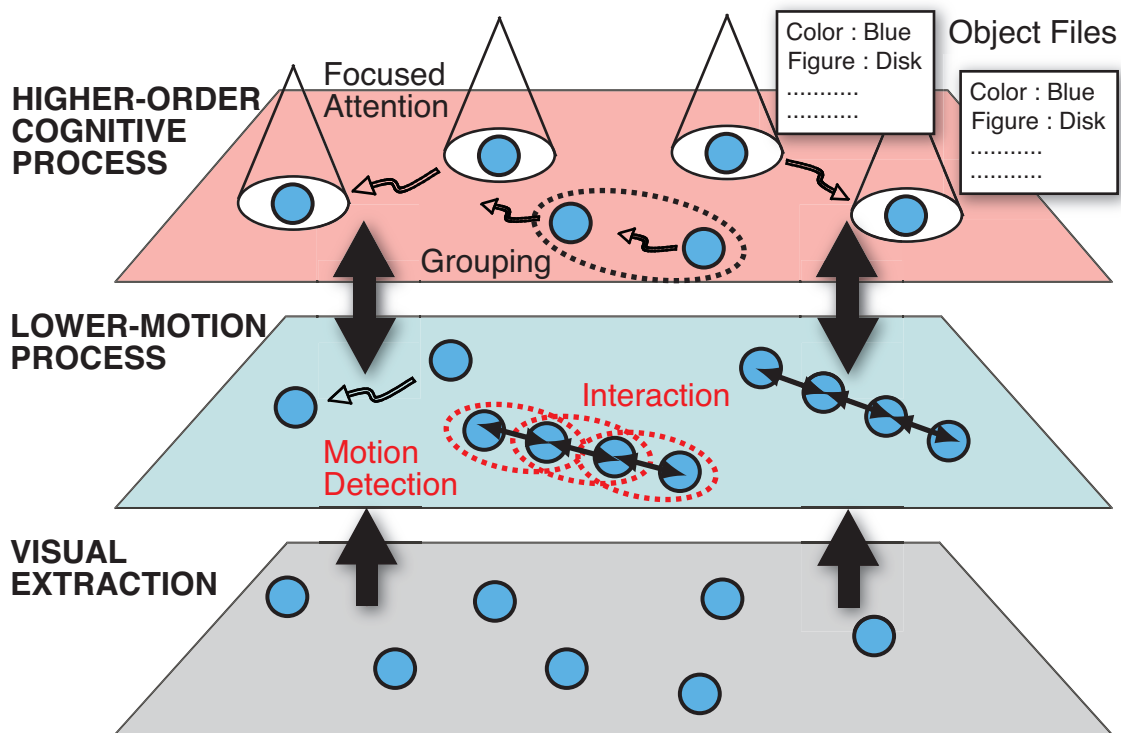


図 4-1 本研究の結果および考察にもとづく，オブジェクト追跡における視覚処理の3層モデルの修正。第1層の視覚情報抽出段階では，視覚入力からオブジェクトの情報が抽出・分析される。第2層の運動処理段階では，第1層から入力されたオブジェクト情報をもとに，比較的低次の運動処理によりオブジェクトの運動が検出される。また，ここから生じた運動情報がオブジェクト追跡に寄与する。第3層の高次認知処理段階では第2層で検出された運動情報をもとに，運動オブジェクトに対し高次の認知処理が行われる。このような第2層と第3層での処理および層間の相互作用により，オブジェクト追跡においてオブジェクトの同一性が保持されていると考えられる。

## 引用文献

- Adelson, E. H. (1982). Some new motion illusions, and some old ones, analyzed in terms of their Fourier components. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **22(3)**, s144. (Abstract)
- Adelson, E. H. & Bergen, J. R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **2(2)**, 284-299.
- Alvarez, G. A., Horowitz, T. S., Arsenio, H. C., DiMase, J. S., & Wolfe, J. M. (2005). Do multielement visual tracking and visual search draw continuously on the same visual attention resources? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **31(4)**, 643-667.
- Anstis, S. M. (1980). The perception of apparent movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, **290(1038)**, 153-168.
- Anstis, S. & Ramachandran, V. S. (1987). Visual inertia in apparent motion. *Vision Research*, **27(5)**, 755-764.
- Arnold, D. H. (2005). Perceptual pairing of colour and motion. *Vision Research*, **45(24)**, 3015-3026.
- Awh, E. & Pashler, H. (2000). Evidence for split attentional foci. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **26(2)**, 834-846.
- Bartels, A. & Zeki, S. (2006). The temporal order of binding visual attributes. *Vision Research*, **46(14)**, 2280-2286.
- Benjamins, J. S., Hooge, I. T. C., van der Smagt, M. J., & Verstraten, F. A. J. (2007). Disengaging attention sets the temporal limit of attentive tracking. *Vision Research*, **47(8)**, 1055-1059.
- Braddick, O. (1974). A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, **14(7)**, 519-527.
- Braddick, O. J. (1980). Low-level and high-level processes in apparent motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, **290(1038)**, 137-151.

- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10(4)**, 433-436.
- Burr, D. C. & Ross, J. (1982). Contrast sensitivity at high velocities. *Vision Research*, **22(4)**, 479-484.
- Burt, P. & Sperling, G. (1981). Time, distance, and feature trade-offs in visual apparent motion. *Psychological Review*, **88(2)**, 171-195.
- Carrasco, M., Evert, D. L., Chang, I., & Katz, S. M. (1995). The eccentricity effect: Target eccentricity affects performance on conjunction searches. *Perception & Psychophysics*, **57(8)**, 1241-1261.
- Carrasco, M., Giordano, A. M., & McElree, B. (2004). Temporal performance fields: Visual and attentional factors. *Vision Research*, **44(12)**, 1351-1365.
- Carrasco, M., Talgar, C. P., & Cameron, E. L. (2001). Characterizing visual performance fields: Effects of transient covert attention, spatial frequency, eccentricity, task and set size. *Spatial Vision*, **15(1)**, 61-75.
- Cavanagh, P. (1991). Short-range vs long-range motion: Not a valid distinction. *Spatial Vision*, **5(4)**, 303-309.
- Cavanagh, P. (1992). Attention-based motion perception. *Science*, **257(5076)**, 1563-1565.
- Cavanagh, P. & Alvarez, G. A. (2005). Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends in Cognitive Sciences*, **9(7)**, 349-354.
- Cavanagh, P. & Anstis, S. (1991). The contribution of color to motion in normal and color-deficient observers. *Vision Research*, **31(12)**, 2109-2148.
- Cavanagh, P., Arguin, M., & von Grünau, M. (1989). Interattribute apparent motion. *Vision Research*, **29(9)**, 1197-1204.
- Cavanagh, P., Boeglin, J., & Favreau, O. E. (1985). Perception of motion in equiluminous kinematograms. *Perception*, **14(2)**, 151-162.
- Cavanagh, P. & Mather, G. (1989). Motion: The long and short of it. *Spatial Vision*, **4(2/3)**, 103-129.

- Chubb, C. & Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: A general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, **5(11)**, 1986-2007.
- Culham, J. C., Brandt, S. A., Cavanagh, P., Kanwisher, N. G., Dale, A. M., & Tootell, R. B. H. (1998). Cortical fMRI activation produced by attentive tracking of moving targets. *Journal of Neurophysiology*, **80(5)**, 2657-2670.
- Culham, J. C., Cavanagh, P., & Kanwisher, N. G. (2001). Attention response functions: Characterizing brain areas using fMRI activation during parametric variations of attentional load. *Neuron*, **32(4)**, 737-745.
- Derrington, A. & Cox, M. (1998). Temporal resolution of dichoptic and second-order motion mechanisms. *Vision Research*, **38(22)**, 3531-3539.
- DeYoe, E. A., Carman, G. J., Bandettini, P., Glickman, S., Wieser, J., Cox, R., Miller, D., & Neitz, J. (1996). Mapping striate and extrastriate visual areas in human cerebral cortex. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93(6)**, 2382-2386.
- Dick, M., Ullman, S., & Sagi, D. (1987). Parallel and serial processes in motion detection. *Science*, **237(4813)**, 400-402.
- Downing, P. E. & Treisman, A. M. (1997). The line-motion illusion: Attention or impletion? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23(3)**, 768-779.
- Edwards, M. & Badcock, D. R. (1993). Asymmetries in the sensitivity to motion in depth: A centripetal bias. *Perception*, **22(9)**, 1013-1023.
- Ellison, A. & Walsh, V. (2000). Visual field asymmetries in attention and learning. *Spatial Vision*, **14(1)**, 3-9.
- Fencsik, D. E., Klieger, S. B., & Horowitz, T. S. (2007). The role of location and motion information in the tracking and recovery of moving objects. *Perception & Psychophysics*,

**69(4)**, 567-577.

- Fougnie, D. & Marois, R. (2006). Distinct capacity limits for attention and working memory. *Psychological Science*, **17(6)**, 526-534.
- Freyd, J. J. & Finke, R. A. (1984). Representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **10(1)**, 126-132.
- Fujisaki, W. & Nishida, S. (2005). Temporal frequency characteristics of synchrony-asynchrony discrimination of audio-visual signals. *Experimental Brain Research*, **166(3-4)**, 455-464.
- Fujisaki, W. & Nishida, S. (2009). Audio-tactile superiority over visuo-tactile and audio-visual combinations in the temporal resolution of synchrony perception. *Experimental Brain Research*, **198(2-3)**, 245-259.
- Fujisaki, W. & Nishida, S. (2010). A common perceptual temporal limit of binding synchronous inputs across different sensory attributes and modalities. *Proceedings of the Royal Society, B, Biological Sciences*, **277(1692)**, 2281-2290.
- Georgeson, M. A. & Harris, M. G. (1990). The temporal range of motion sensing and motion perception. *Vision Research*, **30(4)**, 615-619.
- Georgeson, M. A. & Shackleton, T. M. (1989). Monocular motion sensing, binocular motion perception. *Vision Research*, **29(11)**, 1511-1523.
- Gepshtein, S. & Kubovy, M. (2000). The emergence of visual objects in space-time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **97(14)**, 8186-8191.
- He, S., Cavanagh, P., & Intriligator, J. (1996). Attentional resolution and the locus of visual awareness. *Nature*, **383**, 334-337.
- He, S., Cavanagh, P., & Intriligator, J. (1997). Attentional resolution. *Trends in Cognitive Sciences*, **1(3)**, 115-121.
- Hidaka, S., Nagai, M., Sekuler, A. B., Bennett, P. J., & Gyoba, J. (2011). Inhibition of target detection in apparent motion trajectory. *Journal of Vision*, **11(10):2**, 1-12.
- Hikosaka, O., Miyauchi, S., & Shimojo, S. (1993a). Voluntary and stimulus-induced attention

- detected as motion sensation. *Perception*, **22(5)**, 517-526.
- Hikosaka, O., Miyauchi, S., & Shimojo, S. (1993b). Focal visual attention produces illusory temporal order and motion sensation. *Vision Research*, **33(9)**, 1219-1240.
- Ho, C. E. (1998). Letter recognition reveals pathways of second-order and third-order motion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95(1)**, 400-404.
- Holcombe, A. O. & Cavanagh, P. (2001). Early binding of feature pairs for visual perception. *Nature Neuroscience*, **4(2)**, 127-128.
- Holliday, I. E. & Anderson, S. J. (1994). Different processes underlie the detection of second-order motion at low and high temporal frequencies. *Proceedings of the Royal Society, B, Biological Sciences*, **257(1349)**, 165-173.
- Horowitz, T. S., Bimkrant, R. S., Fencsik, D. E., Tran, L., & Wolfe, J. M. (2006). How do we track invisible objects? *Psychonomic Bulletin & Review*, **13(3)**, 516-523.
- Horowitz, T. S., Holcombe, A. O., Wolfe, J. M., Arsenio, H. C., & DiMase, J. S. (2004). Attentional pursuit is faster than attentional saccade. *Journal of Vision*, **4(7)**, 585-603.
- Horton, J. C. & Hoyt, W. F. (1991). The representation of the visual field in human striate cortex: A revision of the classic Holmes map. *The Archives of Ophthalmology*, **109(9)**, 816-824.
- Hubbard, T. L. (1995). Environmental invariants in the representation of motion: Implied dynamics and representational momentum, gravity, friction, and centripetal force. *Psychonomic Bulletin & Review*, **2(3)**, 322-338.
- Hubbard, T. L. (2005). Representational momentum and related displacements in spatial memory: A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review*, **12(5)**, 822-851.
- Huff, M. & Papenmeier, F. (2013). It is time to integrate: The temporal dynamics of object motion and texture motion integration in multiple object tracking. *Vision Research*, **76(14)**, 25-30.
- Hutchinson, C. V. & Ledgeway, T. (2006). Sensitivity to spatial and temporal modulations of first-order and second-order motion. *Vision Research*, **46(3)**, 324-335.

- Intriligator, J. & Cavanagh, P. (2001). The spatial resolution of visual attention. *Cognitive Psychology*, **43(3)**, 171-216.
- Ito, H. (1999). Two processes in stereoscopic apparent motion. *Vision Research*, **39(16)**, 2739-2748.
- Jonides, J. (1981). Voluntary versus automatic control over the mind's eye's movement. In J. B. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX*, Erlbaum, NJ: Hillsdale. pp. 187-203.
- Jovicich, J., Peters, R. J., Koch, C., Braun, J., Chang, L., & Ernst, T. (2001). Brain areas specific for attentional load in a motion-tracking task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **13(8)**, 1048-1058.
- Kahneman, D. & Treisman, A. (1984). Changing views of attention and automaticity. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*. New York: Academic Press. pp. 29-61.
- Kahneman, D., Treisman, A., & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, **24(2)**, 175-219.
- Kawahara, J., Yokosawa, K., Nishida, S., & Sato, T. (1996). Illusory line motion in visual search: Attentional facilitation or apparent motion? *Pereption*, **25(8)**, 901-920.
- Keane, B. P. & Pylyshyn, Z. W. (2006). Is motion extrapolation employed in multiple object tracking? Tracking as a low-level, non-predictive function. *Cognitive Psychology*, **52(4)**, 346-368.
- Kolers, P. A. (1972). *Aspects of motion perception*. Oxford & New York: Pergamon Press.
- Lappin, J. S. & Bell, H. H. (1972). Perceptual differentiation of sequential visual patterns. *Perception & Psychophysics*, **12(2)**, 129-134.
- Lappin, J. S. & Bell, H. H. (1976). The detection of coherence in moving random-dot patterns. *Vision Research*, **16(2)**, 161-168.
- Lu, Z. L. & Sperling, G. (1995a). Attention-generated apparent motion. *Nature*, **377**, 237-239.



- Lu, Z. L. & Sperling, G. (1995b). The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Research*, **35(19)**, 2697-2722.
- Lu, Z. L. & Sperling, G. (1999). Second-order reversed phi. *Perception & Psychophysics*, **61(6)**, 1075-1088.
- Lu, Z. L. & Sperling, G. (2001). Three-systems theory of human visual motion perception: Review and update. *Journal of the Optical Society of America A*, **18(9)**, 2331-2370.
- Maruya, K., Mugishima, Y., & Sato, T. (2003). Reversed-phi perception with motion-defined motion stimuli. *Vision Research*, **43(24)**, 2517-2526.
- Maruya, K. & Sato, T. (2001). Asymmetry of motion perception in the lower and upper visual field with motion-defined motion stimulus. *First Asian Conference on Vision*, **1**, 54. (Abstract)
- Maruya, K., Watanabe, H., & Watanabe, M. (2008). Adaptation to invisible motion results in low-level but not high-level aftereffects. *Journal of Vision*, **8(11):7**, 1-11.
- Mather, G. (1988). Temporal properties of apparent motion in subjective figures. *Perception*, **17(6)**, 729-736.
- Mather, G. & Murdoch, L. (1999). Second-order processing of four-stroke apparent motion. *Vision Research*, **39(10)**, 1795-1802.
- Maunsell, J. H. R. & van Essen, D. C. (1987). Topographic organization of the middle temporal visual area in the macaque monkey: Representational biases and the relationship to callosal connections and myeloarchitectonic boundaries. *The Journal of Comparative Neurology*, **266(4)**, 535-555.
- Moutoussis, K. & Zeki, S. (1997). A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision. *Proceedings of the Royal Society, B, Biological Sciences*, **264(1380)**, 393-399.
- Müller, H. J. & Rabbitt, P. M. A. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention: Time course of activation and resistance to interruption. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15(2)**, 315-330.
- Murai, Y. & Murakami, I. (2013). Orientation dependency of motion masking relative to the

- direction of apparent motion. *Journal of Vision*, **13(9)**, 374. (Abstract)
- Nakashima, R. & Yokosawa, K. (2012). Sustained attention can create an (illusory) experience of seeing dynamic change. *Visual Cognition*, **20(3)**, 265-283.
- Nakayama, K. & Silverman, G. H. (1984). Temporal and spatial characteristics of the upper displacement limit for motion in random dots. *Vision Research*, **24(4)**, 293-299.
- Nakayama, K. & Silverman, G. H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, **320**, 264-265.
- Nishida, S., Sasaki, Y., Murakami, I., Watanabe, T., & Tootell, R. B. H. (2003). Neuroimaging of direction-selective mechanisms for second-order motion. *Journal of Neurophysiology*, **90(5)**, 3242-3254.
- Nishida, S. & Sato, T. (1992). Positive motion after-effect induced by bandpass-filtered random-dot kinematograms. *Vision Research*, **32(9)**, 1635-1646.
- Nishida, S. & Sato, T. (1995). Motion aftereffect with flickering test patterns reveals higher stages of motion processing. *Vision Research*, **35(4)**, 477-490.
- Noles, N. S., Scholl, B. J., & Mitroff, S. R. (2005). The persistence of object file representations. *Perception & Psychophysics*, **67(2)**, 324-334.
- Oksama, L. & Hyönä, J. (2004). Is multiple object tracking carried out automatically by an early vision mechanism independent of higher-order cognition? An individual difference approach. *Visual Cognition*, **11(5)**, 631-671.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10(4)**, 437-442.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **32(1)**, 3-25.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, **109(2)**, 160-174.
- Previc, F. H. & Blume, J. L. (1993). Visual search asymmetries in three-dimensional space. *Vision*

- Research*, **33(18)**, 2697-2704.
- Pylyshyn, Z. (1989). The role of location indexes in spatial perception: A sketch of the FINST spatial-index model. *Cognition*, **32(1)**, 65-97.
- Pylyshyn, Z. W. (2001). Visual indexes, preconceptual objects, and situated vision. *Cognition*, **80(1/2)**, 127-158.
- Pylyshyn, Z. W. & Storm, R. W. (1988). Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision*, **3(3)**, 179-197.
- Ramachandran, V. S. & Anstis, S. M. (1983). Extrapolation of motion path in human visual perception. *Vision Research*, **23(1)**, 83-85.
- Ramachandran, V. S., Rao, V. M., & Vidyasagar, T. R. (1973). Apparent movement with subjective contours. *Vision Research*, **13(7)**, 1399-1401.
- Raymond, J. E., Shapiro, K. L., & Arnell, K. M. (1992). Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18(3)**, 849-860.
- Remington, R. & Pierce, L. (1984). Moving attention: Evidence for time-invariant shifts of visual selective attention. *Perception & Psychophysics*, **35(4)**, 393-399.
- 佐藤隆夫 (1995). ものの動きを見る－運動の知覚－ 宮下保司・下條信輔 (編) 脳から心へ－高次機能の解明に挑む 岩波書店 pp. 32-38.
- Sato, T. (1998). Dmax: Relations to low- and high-level motion processes. In T. Watanabe (Ed.) *High-level motion processing*. Cambridge, MA: MIT Press. pp. 115-151.
- Sato, T., Kanaya, H., & Fujita, M. (2013). Spatio-temporal characteristics of classical apparent motion traversing vertical- and horizontal meridians. *Journal of Vision*, **13(9)**, 370. (Abstract)
- Sato, T. & Mugishima, Y. (2000). Detection of feature-tracking motion with missing fundamental gratings is superior in the lower visual field. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **41(4)**, s794. (Abstract)

- Scholl, B. J. (2009). What have we learned about attention from multiple-object tracking (and vice versa)? In D. Dedrick & L. Trick (Eds.), *Computation, cognition, and Pylyshyn*. Cambridge, MA: MIT Press. pp. 49-77.
- Scholl, B. J. & Pylyshyn, Z. W. (1999). Tracking multiple items through occlusion: Clues to visual objecthood. *Cognitive Psychology*, **38**(2), 259-290.
- Scott-Samuel, N. E. & Georgeson, M. A. (1999). Does early non-linearity account for second-order motion? *Vision Research*, **39**(17), 2853-2865.
- Sears, C. R. & Pylyshyn, Z. W. (2000). Multiple object tracking and attentional processing. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **54**(1), 1-14.
- Sereno, M. I., Dale, A. M., Reppas, J. B., Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Brady, T. J., Rosen, B. R., & Tootell, R. B. H. (1995). Borders of multiple visual areas in humans: Revealed by functional Magnetic Resonance Imaging. *Science*, **268**(5212), 889-893.
- Shipley, T. (Ed.) (1961). *Classics in psychology*. New York: Philosophical Library.
- Shulman, G. L., Remington, R. W., & McLean, J. P. (1979). Moving attention through visual space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **5**(3), 522-526.
- Smith, A. T. & Hammond, P. (1986). Hemifield differences in perceived velocity. *Perception*, **15**(2), 111-117.
- Smith, A. T. & Ledgeway, T. (1998). Sensitivity to second-order motion as a function of temporal frequency and eccentricity. *Vision Research*, **38**(3), 403-410.
- Snowden, R. J. & Braddick, O. J. (1989). Extension of displacement limits in multiple-exposure sequences of apparent motion. *Vision Research*, **29**(12), 1777-1787.
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, **74**(11), 1-29.
- St.Clair, R., Huff, M., & Seiffert, A. E. (2010). Conflicting motion information impairs multiple object tracking. *Journal of Vision*, **10**(4):18, 1-13.

- Suganuma, M. & Yokosawa, K. (2006). Grouping and trajectory storage in multiple object tracking: Impairments due to common item motions. *Perception*, **35**(4), 483-495.
- Theeuwes, J. (1991). Exogenous and endogenous control of attention: The effect of visual onsets and offsets. *Perception & Psychophysics*, **49**(1), 83-90.
- Tootell, R. B. H., Switkes, E., Silverman, M. S., & Hamilton, S. L. (1988). Functional anatomy of macaque striate cortex. II. Retinotopic organization. *The Journal of Neuroscience*, **8**(5), 1531-1568.
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, **6**(2), 171-178.
- Treisman, A. M. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, **12**(1), 97-136.
- Tsal, Y. (1983). Movements of attention across the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **9**(4), 523-530.
- Tyler, W. C. (1973). Temporal characteristics in apparent movement: Omega movement vs. PHI movement. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **25**(2), 182-192.
- Ullman, S. (1979). *The interpretation of visual motion*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Verstraten, F. A. J., Cavanagh, P., & Labianca, A. T. (2000). Limits of attentive tracking reveal temporal properties of attention. *Vision Research*, **40**(26), 3651-3664.
- Wandell, B. A. (1999). Computational neuroimaging of human visual cortex. *Annual Review of Neuroscience*, **22**, 145-173.
- Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, **61**, 161-265.
- Wertheimer, M. (1961). Experimental studies on the seeing of motion. In T. Shipley (Ed.) *Classics in psychology*. New York: Philosophical Library, pp. 1032-1089. (Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, **61**, 161-265.)
- Wolfe, J. M., Alvarez, G. A., & Horowitz, T. S. (2000). Attention is fast but volition is slow.

- Nature*, **406**, 691.
- Wolfe, J. M., O'Neill, P., & Bennett, S. C. (1998). Why are there eccentricity effects in visual search? Visual and attentional hypotheses. *Perception & Psychophysics*, **60(1)**, 140-156.
- Yantis, S. (1992). Multielement visual tracking: Attention and perceptual organization. *Cognitive Psychology*, **24(3)**, 295-340.
- Yantis, S. & Nakama, T. (1998). Visual interactions in the path of apparent motion. *Nature Neuroscience*, **1(6)**, 508-512.
- Zhang, H., Xuan, Y., Fu, X., & Pylyshyn, Z. W. (2010). Do objects in working memory compete with objects in perception? *Visual Cognition*, **18(4)**, 617-640.
- Zihl, J., von Cramon, D., & Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, **106(2)**, 313-340.
- Zihl, J., von Cramon, D., Mai, N., & Schmid, C. H. (1991). Disturbance of movement vision after bilateral posterior brain damage: Further evidence and follow up observations. *Brain*, **114(5)**, 2235-2252.

## Appendix

本研究から新たに明らかとなった、オブジェクト追跡に寄与する視覚運動処理メカニズムの特性をふまえ、第1章の図1-5で呈示した、メカニズムベースの視覚運動処理モデルの構造に対し修正を試みる。本論文で提案する視覚運動処理の修正モデルを図A-1に示す。第1章で述べた通り、輝度定義の1次運動は擬線形処理である1次運動検出メカニズムによって運動が検出され (e.g., Adelson & Bergen, 1985), 2次運動のうちコントラスト定義運動は、整流処理などの単純な前処理を経て1次運動検出と同様の擬線形処理によって運動が検出される (e.g., Chubb & Sperling, 1988) という擬線形過程には変更は無い。本編で述べてきたように、本研究の結果は、1次運動検出とは異なる2つの運動処理メカニズムが、オブジェクト追跡に何らかの寄与をしていることを示唆している。1つは注意が関与する、属性間運動のような複雑な運動刺激も処理可能な高次の処理である。こちらについては、注意が関与し属性間運動の処理も可能である feature salience system (Lu & Sperling, 1995a,b, 2001), 能動的な注意にもとづく運動検出 (Cavanagh, 1992) などとも整合的である。もう1つは、本研究の結果から新たに明らかとなった、輝度による1次運動が非線形過程で処理されるという経路である。この過程ではまず1次および2次運動刺激入力から対象の輪郭などの特徴が抽出され、それをもとにした運動処理が行われる。本研究の結果から、この運動処理は、属性間処理や能動的な注意にもとづく高次の運動処理よりも前段階における、比較的低次の運動処理過程であると考えられる。この過程は、通常の2次運動刺激を処理するメカニズムであり、

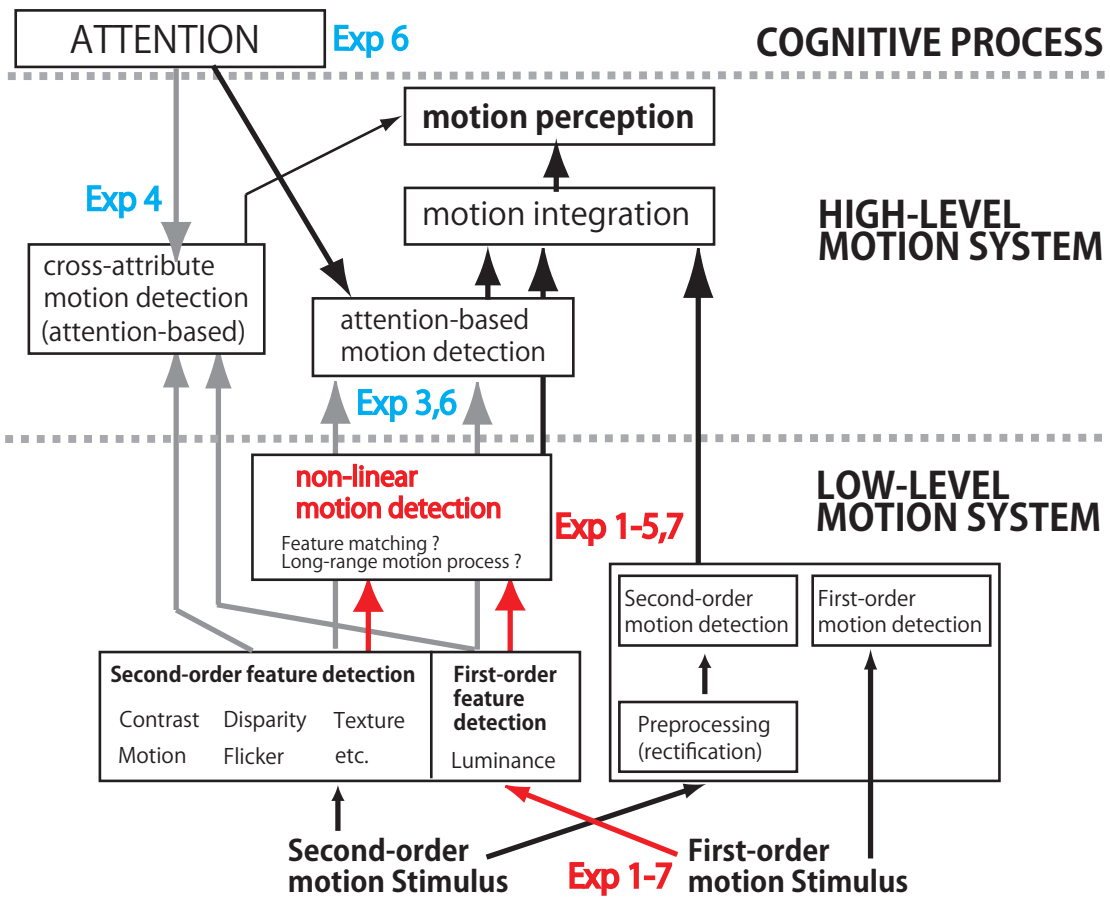


図 A-1 本論文で提案する視覚運動処理モデル。赤字および赤線の部分が、本論文の実験の結果から明らかになったと考えられる部分である。



後述する特徴マッチングとも呼ばれる運動検出に相当するものとみなすこともできよう (e.g., Ullman, 1979). しかし, この非線形過程が2次運動だけでなく1次運動も扱うメカニズムであることは, 認識はされているものの, あまり明示的に取りあげられてはいない.

では, オブジェクト追跡のような刺激入力事態において, 1次運動刺激および2次運動刺激の両方を処理しているのはどのようなメカニズムだと考えられるだろうか. 2次運動を検出するメカニズムとして, 属性固有の処理を行なっているメカニズムが存在するかについては明確にはなっていないが, 2次運動刺激に対して1次運動の処理過程でみられる "reversed phi" 現象が確認されたという報告があることから (Ito, 1999; Lu & Sperling, 1999; Maruya, Mugishima, & Sato, 2003; Mather & Murdoch, 1999), 低次の特性をもつ2次運動処理メカニズムが存在する可能性が示唆されてきた. そのような運動処理が可能となるメカニズムのモデルとして, Lu and Sperling (1999) は2次運動刺激に対する "texture grabber" モデルを提案している. これは2次運動刺激に対する reversed phi 現象を説明するためのもので, 2次運動刺激の入力に対して時間と空間のフィルタを通したうえで整流処理を行う "texture grabber" と呼ばれる前処理を行うことで, 輝度分布の移動を伴わない2次運動であっても擬線形の時空間フィルタ処理が行われるとする2次運動検出モデルである. このモデルの最後の時空間処理の時間限界が 100 msec 程度であると仮定すると, 本研究の実験結果が説明可能となるであろう. 一方, こうした前処理を含む擬線形処理とは別の2次運動検出メカニズムとして, 先に背景のなかからオブジェクトを切り出す処理を行う, もしくは対象のもつ何らかの特徴を抽出し,

その切り出されたオブジェクト同士や特徴同士をマッチングさせて対象の運動の検出を行うという運動検出の方法が考えられる。たとえば Anstis (1980) は、Ramachandran, Rao, and Vidyasagar (1973) の輝度以外の刺激パターンによる仮現運動知覚の報告をもとに、1次もしくは2次といった運動刺激の属性にかかわらず、入力されてきた視覚情報をもとに背景からオブジェクトの抽出を行い、そのオブジェクト同士の間で運動を検出するというモデル ("system 2" モデル) を提案している。また、前述のように Ullman (1979) は、刺激入力のなかからある特徴を抽出し、抽出された特徴同士をマッチングして運動を検出する、特徴マッチングと呼ばれる運動検出の手法を提案している。Ullman は、この特徴マッチングがどのようなアルゴリズムによって実現されているかという点を具体的に語っているわけではない。しかしながら、こういったオブジェクトや特徴の抽出が運動検出に先行する過程を想定すれば、本研究の実験 5 で得られた、輝度運動刺激であっても2次運動刺激であっても仮現運動知覚の時間周波数の上限値がほぼ同じ値になることの説明が可能となる。こうした手法による運動検出の時空間限界については、これまで詳細には検討されてきていないが、本研究の結果 (実験 1-3) は、少なくとも、時空間プロット上に存在する刺激間の運動検出の時間的な限界は 100 msec 程度であることを示唆するものである。この点については、今後さらに詳細な検討を行っていく必要があるだろう。

さらに、"long-range motion" と呼ばれる仮現運動刺激に対して運動を検出するメカニズムが関与している可能性も考えられる。この long-range motion の検出メカニズムがどのようなものかについては未だに明確にされていないが、

その運動の現象面での特性より, 1 次運動検出メカニズムとは異なるメカニズムだと考えられている. たとえば, 刺激の属性に関係ない (e.g., Cavanagh, Arguin, & von Grünau, 1989), 運動検出の時空間限界が 1 次運動検出と異なり非常に大きい (Burt & Sperling, 1981; Kolers, 1972) といった特性である. また, 第 1 フレームの刺激 1 個が第 2 フレームの刺激 2 個と対応し, 2 つに分離したように知覚される "split motion" と呼ばれる仮現運動が知覚されることから (Ullman, 1979), 注意の移動や位置予測など高次の要因によって生起するとは考えにくく, 受動的な運動処理メカニズムによって検出される運動だと推測される. 本研究で提案する比較的低次の運動処理メカニズムと long-range motion の処理メカニズムが異なる点は, 本研究の実験 1-3 において, 下視野呈示のオブジェクト追跡が 100 msec 程度の ISI によって課題成績が低下したのに対し, long-range motion はフレーム間に最大 500 msec 程度の ISI が挿入されても運動が知覚される点である (e.g., Mather, 1988). この相違に関して, Sato, Kanaya, and Fujita (2013) は, 大脳皮質における第 2 次視覚野, 第 3 次視覚野などの比較的初期の視覚野において, 上視野と下視野, 左視野と右視野が解剖学的に分離して存在している点に注目し (Wandell, 1999), long-range motion 刺激を上下視野間あるいは左右視野間で分けて呈示する実験を行った. そして, 先行研究で示されているような長い刺激間距離や長い ISI という刺激事態でも運動が検出できるメカニズムに加えて, 刺激を視野間呈示することによって仮現運動知覚率が低下する, 上記の低次の視覚野の特性を反映した, 比較的 low-level の運動処理メカニズムが long-range motion 知覚に関与していることを示す結果を報告している. Long-range motion には複数のメカニズムが関与し

ているという可能性を考慮すると、long-range motion のフレーム間の ISI が長い場合でも運動を知覚させるようなメカニズムは存在するが、その一方で、それとは異なる低次の視覚野の特性を反映した運動処理メカニズムのほうが、オブジェクト追跡にも関与しており、オブジェクトの運動処理を行っているという可能性も十分にあり得るであろう。ただし、多くの研究で用いられているオブジェクト追跡課題の運動刺激は、フレーム間の移動距離が非常に短い、連続運動に近い動きをしており、"long-range" の運動を処理するメカニズムがフレーム間の移動距離が非常に短い運動をも処理し得るかについては明確にはなっていない。

以上の考察をまとめると、本研究で示された、オブジェクト追跡に寄与すると考えられる比較的 low-level の視覚運動処理メカニズムには、複数の可能性が考えられる。この運動処理の詳細を明らかにしていくことが、本研究を発展させていくうえでの最大の課題となる。

## 謝 辞

東京大学大学院人文社会系研究科の佐藤隆夫教授には、講義に感銘を受けた勢いで卒業研究時に研究グループに配属させていただいて以降、10年以上にわたり、素晴らしい研究環境を与えていただき、本論文の作成まで大変な熱意で厳しくも暖かい御指導をいただきました。研究生活の最初に、佐藤教授に極めて高い水準で研究を指導していただきましたことは大変幸運でありました。研究の歩みが遅く、未熟な私を、決して見限ることなくここまで御指導くださいましたことで今の私があるものと、心より感謝を申し上げます。

東京大学大学院人文社会系研究科の立花政夫教授、横澤一彦教授、高野陽太郎教授には、学位審査の過程で御指導いただきました以外にも、学部および大学院の課程にて、実験心理学に関する基本的な知見を御教授いただき、多くの場面で本研究に対し御助言や叱咤激励をいただきました。東京大学大学院人文社会系研究科の村上郁也准教授、東京大学大学院総合文化研究科の四本裕子准教授には、本論文の未熟な草稿に目を通していただき、仔細にわたり多数の的確な御指摘と御助言をいただきました。本論文が今ある形になり得たのも先生方の御指導のおかげと、深く感謝申し上げます。

また、本論文の学位審査時には、愛知淑徳大学の三和義秀教授、天野成昭教授、高橋伸子教授、永井聖剛准教授、牧勝弘准教授には、様々な面で御理解と御配慮をいただきました。深く感謝申し上げます。

ここまでの研究の過程では、大変多くの方々にお世話になりました。東京大学大学院・研究員時代には、東京大学心理学研究室の研究員・大学院生の多く

の皆様には大変お世話になりました。東京大学心理学研究室佐藤グループの、現NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部の丸谷和史氏をはじめとする諸先輩方には、研究の初期から多くの御指導と、時には先輩の立場から叱咤激励をいただきました。九州大学の妹尾武治准教授、電気通信大学の中嶋豊助教、東京大学の細川研知氏、東京海洋大学の草野勉氏には、本論文の研究内容に対し多数の御助言をいただきました。研究生生活のなかで同期・友人として、共に競い合い励まし合いながら研究生生活を送れましたことは大変幸運でありました、深く感謝申し上げます。なかでも妹尾氏には、学部時代から、公私にわたり様々な面で支えていただきました。妹尾氏と知り合っていなければ今の研究者としての私はなかったものと、この場を借りまして、最大限の感謝を申し上げます。

心理学研究室の後輩諸氏にもお世話になりました。東京大学大学院人文社会系研究科の大学院生、藤田真新氏、佐藤弘美氏、中山遼平氏、渡辺真澄氏、柴田健史氏には、本論文の一部の実験に参加していただき、論文の校正にも御協力いただくなど、本論文の完成まで助けていただきました。また、心理学研究室の卒論生、橋田真由美氏、木村明広氏、深澤宏充氏、池之上晃慶氏、佐々木陽子氏、宇佐美和樹氏、星英樹氏、李徳洙氏には、一緒に研究を行ってくださるとともに、切羽詰まっていた時期に快く実験に参加してくださるなど、多くの面で助けていただきました。その他、お名前は挙げられませんが、数多くの皆様に実験参加者として御協力いただきました。皆様に深く感謝申し上げます。

最後に、心理学の研究の道に進路を決めた私をここまで見守り支えてくれた、父と母、弟をはじめとする家族に、感謝の意を捧げます。