解 説

時間的同期にもとづく感覚属性のバインディング

西 田 眞 也^{*1}, 藤 崎 和 香^{*2}^{*1} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所^{*2} 独立行政法人 産業技術総合研究所

Sensory Attribute Binding from Temporal Synchrony

Shin'ya Nishida^{*1} and Waka Fujisaki^{*2}Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT Communication Science Laboratories^{*1}
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)^{*2}

Summary

Temporal synchrony is a critical cue for binding attributes processed by separate sensory channels, but it remains controversial how the brain computes synchrony across different attributes. Here we describe our hypothesis, time marker theory, which states that cross-attribute synchrony is not based on simultaneous completion of attribute processing, but on the comparison of salient features (time markers) extracted from sensory signals evoked by the stimulus. This hypothesis was originally proposed to account for an anomaly of visual attribute binding, color-motion asynchrony, and is being developed to explain cross-attribute temporal synchrony in general, including cross-modality judgments.

1. は じ め に

人間は複数の感覚モダリティを通じて並列的に外界をとらえている。さらに一つの感覚モダリティ内でも、異なる感覚属性が別個に処理される。並列的に処理された感覚情報は再び統合される必要があり、ここにいわゆるバインディング問題が発生する。

一つの対象やイベントに由来する信号は通常同じ時空間位置を共有する。だから、感覚属性の結び付け過程においては時空間における一致が決定的な手がかりになる。これまでの属性バインディングの研究では空間的な一致について語られることが多かったが^{s1)}、ここでは時間的な一致、すなわち同期性・同時性に基づいて異種属性を結び付ける仕組みについて考える。時間一致に基づいた属性バインディングでは、一致しているということ、つまり同時であるということの判断が難しい問題になる。

同時知覚を考えるには三つの時間を区別して考える必要がある^{2,3)}。一つは外界の「事象時間」、もう一つは外界の事象に対する神経メカニズムの反応のタイム

コースである「脳時間」、そして観察者にどのようなタイミングで見えるのかという「主観時間」である。前者二つは客観的に観察可能な物理的時間であるが、最後の主観時間は観察者の体験内にものみ存在し、客観的な時間にマッピングできる保証はない。時間知覚とは、脳が脳時間を利用して事象時間に対応した主観時間を作り出す営みである。しかし、事象時間と脳時間の対応関係は単純ではない。脳における情報処理には時間がかかる。さらに、その処理時間は、処理属性およびそれによって左右される処理系路、強度といった刺激パラメータ、処理すべき内容の深さなどにより複雑に変化する^{4,5)}。また、異種感覚モダリティの統合では、信号の物理的な伝達速度の違いや、センサーの応答特性の違いも無視できない⁶⁾。このような様々な時間ずれ要因を乗り越えて、事象時間における同時性を主観時間における同時性として正しく知覚することが同時性知覚の計算論的課題となるが、その実現はそれほど容易なことではない。時間に基づく属性バインディングの理解においては、このような同時性の判断メカニズムの解明が不可欠である。

本解説では、異種属性間の同時性判断に関するこれ

^{*1} 〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

までの我々の研究を概説する。まず、視覚モダリティ内の属性バインディングに関する重要な洞察を与えてくれた色と運動の非同期錯視⁷⁾を紹介し、そこから生まれた時間マーカー理論^{8~15)}を説明する。後半では、時間マーカー理論の視点からクロスモダリティの同期性の検出メカニズムについて考える^{11~13, 15~17)}。

2. 異種視覚属性の時間的バインディングの錯誤

色と運動の非同期錯視とは、同期した色と運動方向の交代が同期しているように見えなくなり、結びつきが正しく判断できなくなるという錯視である⁷⁾ (図 1)。色と運動方向はそれぞれ二つの状態、たとえば赤と緑、上方向と下方向の間を 2 Hz 程度の周期で交代する。つまり、特定の色と運動方向の組み合わせが 250 ms 持続し、別の組み合わせが 250 ms 持続する。交代速度は決して早くなく、色も運動方向も問題なく知覚できるが、色と運動方向の組み合わせの判断は非常に難しい。実際には起こっていない組み合わせが見えたような錯覚も生じる。さらに興味深いことに、運動方向が変化してから 100 ms ほど後に色を変化させるように相対位相をずらすと、同期感が高まり、結び付けも容易になる。

図 1 色と運動の非同期錯視。(上) 色の交代と運動方向の交代が同期しているとき、知覚的には同期して見えず、色と運動方向の対応も難しくなる。(下) 運動方向の変化が 100 ミリ秒ほど先行すると、知覚的に同期して知覚され、色と運動方向の対応も容易になる。

実験では、色と運動の交代の相対的な位相を変化させ、優性に知覚される色と運動方向の組み合わせを答えさせる (図 2, バインディング課題)。すると、物理的に同期している位相差 0 の条件で正答と誤答がほぼ半々となり、色が 100 ミリ程度遅れるときに正しい組み合わせの反応が支配的になる⁷⁾。特定の組み合わせが見えたときに反応させるというイエス・ノー課題でも、同様のずれた位相にピークが見られる⁸⁾。色と運動が同じオブジェクトの中で変化していてもそれぞれが別のオブジェクトで変化していても同じ程度の非同期錯視が生じる¹⁸⁾。これらのことから、錯視の原因は属性統合に特異的なメカニズムではなく、それを支える時間判断過程にあると考えられる。

この錯視の一つの説明は、色と運動の処理時間のずれが見かけのずれを生むという処理時間説である (図 3 上)。この錯視を発見した Zeki らは、色を処理する第 4 次視覚野と運動を処理する第 5 次視覚野で色と運動に関する意識が独立に成立し、処理時間の違いがそのまま見かけの時間ずれとなると考えた^{7, 18, 19)}。しかし、この処理時間説には様々な問題がある。まず、色変化のタイミングを相対的に遅らせることで知覚的同期が得られることを処理時間説で説明しようと思うと、色の処理が運動の処理よりも早いことを仮定しないといけないが、これは運動処理の応答潜時は短く色処理の潜時は長いという一般的知見に反する⁴⁾。さらに、色と運動の非同期は時間条件に大きく左右される。ゆっくりした周期の交代では非同期は消失し、一方 4 Hz 以上の高い交代周期になると色と運動の時間関係の判断が不可能となって錯視も起こらない。さらに、色と運動の間で 100 ms 程度の処理時間差があるならば反応時間にも相応の違いがあると予想されるが、実際に測定するとほとんど違いはない⁸⁾。

このような矛盾を孕む処理時間説に代わるもう一つの説明が、時間関係を比較する際に用いる各イベントの時間マーカー (そのイベントのタイミングを代表する特徴) の選択の間違いが色と運動の非同期錯視を生むという仮説である^{8~10)} (図 3 下)。以下で詳説するように、この説では、各属性の刺激系列において目立った顕著特徴がマーカーになると考える。色の場合は色の変化する点がマーカーとなるのに、運動の場合は運動そのものがマーカーとなる。位置の二階時間微分である方向変化点が低次のメカニズムでは検出困難なために、代わりに一階微分成分である運動そのものが使われるという仮説である。対応させるべきマーカーを間違えたために、約 90 度の見かけ上の時間ずれが生じる。この説では、刺激交代がゆっくりになって運動方

図2 時間判断に用いられるタスク。バイディング課題では、特定の属性の組み合わせ（A と B，a と b）と、その反対の組み合わせ（A と b，a と B）のどちらかを判断する。図示したように物理的に同期した2位相条件だけを提示して時間限界を測定する場合や、色と運動の非同期錯視の実験のように連続的に位相を変化させてバイディングに適した相対位相を調べる場合がある。同期・非同期弁別課題では、ずれが0と特定値の2種類の刺激を提示し、両者の弁別を行う。弁別の精度は時間ずれで表現できるが、連続刺激で周期の半分の時間ずれを用いる場合、時間限界は周波数（1/周期）で表現できる。同時判断や時間順序判断では、様々な時間ずれの刺激が提示され、同時に知覚されたか、またはどちらが先だったように知覚されたかを答える。

向の変化点が正しく同定できる場合や、刺激交代が高速で顕著特徴が取り出せなくなる状況では、非同期は生じないことが予想される。また、色と運動についての処理が脳内ではほぼ同時に終了し、その結果、両者に対する反応時間にはほとんど差が無くても、マーカーがずれているために知覚的非同期は生じる。さらに、この説から予想されるように、色や運動といった属性にかかわらず一階微分と二階微分の組み合わせでは二階微分が見かけ上遅れることが実験で確認された⁸⁾。

この誤った時間マーカー対応説は本解説の主題である時間マーカー理論^{8-13, 15)}に基づいている。時間マーカー理論では、異種属性の内容の処理とは独立して、時間関係の判断を行うプロセスを考える（図4）。ま

ず、時間判断のメカニズムとして、二つのラインからの入力が増算器で比較されるという相関型の運動検出器²⁰⁾のようなものを想定する。一つの入力がディレイラインになっていると二入力間で一定の時間ずれがある時に強い信号が出力される。これが異なる網膜位置からの入力を受けると運動検出器になり^{20, 21)}、二つの入力が相対的な遅れなしに比較されると同時検出器となる。低次の運動検出器（例えば一次運動検出器）では感覚入力信号を直接比較するが^{22, 23)}、異種感覚属性間の比較で同様の仕組みを考えると、別々の脳領域で処理される感覚信号を直接結び付けねばならず、長い神経結線が必要となる。また、多種類の感覚属性の組み合わせに対する膨大な量の結線と比較器が必要とな

図3 色と運動の非同期錯視の二つの説明。(上) 処理時間説。運動の処理時間が長いため、脳内時間としては運動の交代が遅れる。(下) 時間マーカー理論に基づいた誤った時間マーカー対応説。運動方向変化のタイミングに付けられるべきマーカーが、処理の限界から運動そのもののタイミングに付けられるために、見かけ上運動が遅れる。

るし、フォーマットの異なる信号をどうやって比較するかという難問が生じる。これらの問題を効果的に回避する方略は、顕著特徴という属性を越えた不変特徴に一旦変換し、それを時間マーカーとして一般用途的な比較器の入力とすることである^{21, 24)}。この顕著特徴の抽出および比較過程は初期の感覚情報処理より上位にあり、かつ言語や思考といった高次過程が関与するレベルより低いということで、中位レベルの処理過程と位置づけられる。この仮説の実験的な証拠、すなわち時間解像度の低さ、マッチング特徴不変性、および注意によるマッチング特徴の選択については次節の異種感覚モダリティの同期判断のところで説明する。

時間マーカー理論は、主観的な時間関係（主観時間）は脳内イベント（脳時間）の反映ではなく外界のイベント（事象時間）の解釈の結果であるという思想に基づいている^{2, 3)}。時間関係を正しく判断するためには、それぞれのイベントの物理的な時間を正しく反映するマーカーを利用するのが理想である。そのため、できるだけ処理の浅い初期段階の信号系列の中から顕著特徴の抽出を行い、そこから適当な時間マーカーを選択して時間関係を符号化していると我々は予想している。通

常はこのような仕組みによって、処理時間の影響をあまり受けない時間判断が可能になる。実際、刺激強度や空間周波数といった反応時間に影響する要因も、主観的な時間判断に与える影響は小さいことが知られている⁵⁾。(ちなみに、時間マーカーの概念の源流は主観的時間関係と反応時間との食い違いを考察する議論に見いだすことができる²⁵⁾。)しかし、この正しい時間関係を推定するための仕組みが、色と運動の非同期錯視では大きな時間判断の誤りを生む。顕著特徴の検出は図を地から切り出すような処理で、トップダウンの制御もある程度可能だが、近傍信号の比較に基づくボトムアップの抽出処理が基本である。そのため、(知覚内容を把握した後に候補となる顕著特徴からトップダウンに、かつポストディクティブに^{2, 26)}マーカーを選択するようなケースを除き)、視覚系は抽出された顕著特徴を、それが意味する知覚内容を十分に把握せぬままマーカーに利用することになる。一方、知覚内容の処理は専門化された領域で行われ、その終了タイミングが反応時間を決定する(図4)。時間マーカー(when)と知覚内容(what)の結び付けはその後に行われる。その際、主観的には、知覚内容がマーカーの指し示す時間に逆行およびされる²⁷⁾。つまり、後から気づいた内容がマーカーの指し示す時点に起こったイベントのものであると正しく理解される。このような巧妙な仕組みは、日常場面では問題なく動いている。しかし、色と運動の非同期錯視においては、上方向から下方向の運動方向反転(二階微分成分)に対応すると考える時間マーカーが、実際は下向きの運動位相(一階微分成分)に対するものであったとしても、観察者はそのずれには容易には気づかないこととなる。交代周期が遅ければ事後に得られる情報からポストディクティブに知覚誤りを修正することも可能だが、高速交代刺激においてはそれも許されない。

色と運動の非同期錯視のメカニズムに関しては未だ様々な議論が続いている。例えば、刺激の時間構造を変化させなくても、運動透明視の状況を作ったり²⁸⁾、注意窓を移動させたりすることで^{29, 30)}非同期錯視が消失することが最近示された。これらの現象では、色と運動方向の変化の時間的同期以外のバインディングの手がかりが利用できることから、錯視の消失は誤った時間マーカー対応説から予測される。一方、時間変化がともに一階微分である色と方位の組み合わせに関しても非同期錯視が生じることは、時間マーカー理論の反例に挙げられる^{18, 19)}。しかし、この場合のずれは色と運動の組み合わせに比べはるかに小さく、かつバインディング課題では生じるが同期判断では生じない³¹⁾。

図4 時間マーカー理論の想定する複合属性イベントの処理. 属性 A と B の主観的な時間関係の判断は, 顕著特徴のタイミングを比較して行う. 一方, 各属性の内容は, それぞれの処理を専門とするモジュールで処理され, そのタイミングが反応時間を決定する. そして, 時間に関する判断と, 内容に関する判断が統合され, 統一的なイベントの知覚が成立する. 時間とともに内容処理が深まり, また新たな関連情報が入ってくることにより, 当該イベントの表象内容はどんどん豊かになっていく. しかし, イベントの時間は既にコードされており, その時間ポイントに対して正しく参照している限り, そのイベントの見かけの時間は後続の処理の影響を受けない.

課題中にどちらの属性に注意を向けるかといった方略の違いなど, 別の要因に起因するものではないかと我々は考えている. 時間ずれを起こす要因は複数あるのである. これに関して, 時間マーカー理論による説明は神経信号の物理時間のずれが主観的な時間に影響することを否定しない^{9,10)}. 物理的な事象の時間を正しく推定することが計算論的目標であるが, それにはおのずと限界がある. 時間マーカーは入力信号から抽出するので, その段階までに生じ, 後段の同時性判定機構で吸収できないずれは, 当然主観判断に影響することとなる³²⁾. 神経信号の時間ずれと時間判定機構の誤りは時間錯視を生む二つの要因である. これまでの時間錯視の説明のほとんどは, 時間ずれにその原因を求めてきた. それに対して, 我々は, 色と運動の非同期錯視の場合は主原因が時間判断の誤りであることを主張し, おそらく他の多くの時間錯視においても時間判断の誤

りが大きな要因になっているのではないかと考えている. イベント A がイベント B より先に起こったと主観的に判断されたことを根拠に A が B より先に知覚されたという結論を導くことがいまだ多くの研究で見られるが, これは論理的だけでなく現実的に誤った議論である. さらに, 時間錯視を時間判断の誤りと考えすることで, 時間錯視の研究から今まで分かっていた時間判断の仕組みや同時性に基づく属性バインディングの仕組みが見えてくるのである.

3. 感覚モダリティ間の同期性の判断

以上のように時間マーカー理論は異なる視覚属性の同期性に基づくバインディングの錯視を説明しようとする試みの中で導き出された. しかし, 同じ考え方は異種感覚属性間の時間判断一般に適用できるのではないかと我々は考えている. この点を示すために, 異種

感覚モダリティ間の同期性について次に見ていこう。

異種感覚モダリティ、とくに視聴覚の同期性判断は時間解像度が低い³³⁾。光と音の間にかんりの時間ずれがあっても、同時に起こったように感じる。ただ、同時に感じるといっても、ずれが検出できないのか、ずれが検出できても同時と判断するずれの許容範囲が広いのか区別できない。そこで我々は、一つのブロックで物理的に同時の刺激ペアと特定のずれをもつペアをランダムに提示し、フィードバック付きで両者を弁別させ、閾値となる時間ずれを測定した¹¹⁾（同期・非同期弁別課題、図2）。この弁別閾は、主観的な同時性判断や時間順序判断に比べ判断カテゴリーやバイアスの影響が小さい、知覚的なずれの検出限界と考えられる。この閾値は、単一パルスの視聴覚刺激の場合は約80 ms となった。また、連続パルスにして同位相と逆位相の弁別という課題にすると閾値は約4 Hz となった。この閾値を時間ずれで示すと約125 ms ということになり、単一パルスよりも多少悪い。さて、視覚系の時間解像度は30 Hz を越え、聴覚の時間解像度はそれよりも高い。4 Hz という視聴覚同期判断の時間解像度は、いずれかのモダリティの時間限界を反映したものではなく、視聴覚情報の比較を行うプロセスの遅さを示している。視聴覚同期判断の限界を超えた条件で光と音が提示されると、光の変化も音の変化も知覚できるのに、両者の関係が知覚できないという矛盾した状況になる。そのようなときには、周波数やパルス数が異なっているにもかかわらず同期しているような感覚が生じ、視覚のリズムが聴覚のリズムに引っ張られるという現象が起こる^{34, 35)}。これは、二つのモダリティの信号を一つのイベントに結び付け、そこに一つのリズムというモダリティを越えた属性を当てはめるときに、（おそらく信頼性が高いという理由³⁶⁾で）聴覚側のリズムを優先的に利用した結果と考えることができる。聴覚信号が視覚信号を直接モジュレートしたと考える必然性はない。

異種属性間の時間関係判断では時間的にまばらな顕著特徴をマッチングするという時間マーカー理論（図4）から考えると、視聴覚同期判断の遅さには二つの要因が考えられる。一つは比較器において同時性に関する時間ずれの許容範囲が広いことであり、もう一つは時間マーカーとして利用する顕著特徴の抽出と比較の時間解像度が低いことである。特徴抽出が簡単な単一パルスの時間限界は前者を反映すると考えればよいが、連続パルスの場合には第2の要因も関与している。このことは、連続パルスを一定間隔の規則的なものからランダムパルスに変えることで確認できる¹³⁾。もし、

高い時間精度を保ったままで視聴覚信号の相互相関を計算した後に、その相互相関のピークが広い同時性の時間窓に含まれるかどうかを判断しているならば、高密度ランダムパルスであっても同期・非同期弁別は可能なはずである。一方、一様性の高い高密度ランダムパルスに対しては時間的なクラウディング効果により顕著特徴を取り出しにくくなるので、相互相関を計算する前に顕著特徴を抽出しなければならないとすると、同期・非同期弁別が困難になることが予想される。実験結果は後者を支持し、視聴覚の時間ずれが十分大きいとき、または両者が完全に無相関なときでも、ランダムパルスの時間密度がある程度高くなると、それが視覚・聴覚それぞれの時間変調は問題なく知覚できる密度であっても、同期刺激との区別は不可能になる。

時間ずれの許容範囲と顕著特徴の抽出解像度は原理的には独立した要因だが、実際はそうではないかもしれない。視聴覚、視触覚、聴触覚の三つのクロスモーダルペアについて同期・非同期の時間弁別閾を比較すると、視触覚が視聴覚より少し良い程度であるのに対して、聴触覚は非常によい¹⁶⁾。連続パルスの同期・非同期弁別の場合、時間周波数にして10 Hz 程度となる。このとき、単一パルスを用いた場合の時間差による弁別閾も同様の变化比で聴触覚の弁別閾が小さくなる。このことから、比較する顕著特徴または時間マーカーの時間精度といった共通の要因が、時間ずれの許容範囲と顕著特徴の抽出解像度の両方を規定している可能性が示唆される。

異種感覚モダリティの同時性判断において感覚信号から抽出された顕著特徴を比較しているという仮説は、時間解像度の低さだけではなくマッチング特徴の属性不変性と注意選択性という二つの特性によっても示唆される。

視覚には輝度変化、色変化、位置変化など、聴覚には振幅変調、周波数変調、位置変調など、それぞれ様々な属性で定義されるイベントがある。そのどの属性の組み合わせを見ても、視聴覚の同時・非同時弁別閾はほぼ一定になる。視覚的拡大と音量の変化といった自然界に存在する組み合わせの時間限界も、そうでない組み合わせの限界と変わらない。このマッチング特徴の属性不変性は、各属性から抽出された共通の顕著特徴を比較しているという考えに合致する¹³⁾。

一つの視覚イベントに対して一つの聴覚イベントがあるときにはその結び付けはほぼ自動的に行われる。腹話術の状況のように、二つのモダリティの情報が空間的に異なる位置から提示されていても、時間的な同期があれば観察者はそれらを結び付けてしまう。しか

し、空間的に散らばる複数の視覚イベントに対して一つの聴覚イベントが提示され、唯一の視覚イベントが聴覚イベントと同期しているときに、その視覚イベントがポップアウトすることはない¹²⁾。一つ一つの視覚イベントに注意を向けて、聴覚との同期性を確認しなければ同期する視覚イベントは見つからない。一方、複数の視覚イベントが提示されていても、特定のイベントに注目して聴覚刺激との同期を判断するときには、ほかの視覚イベントを全く無視することができる。つまり、視聴覚の同期判断に先行して、空間位置に基づく視覚イベントのはほぼ完全な注意選択が行われる。

また、選択は完全ではないが属性値によるマッチング特徴の選択もある程度可能である。高密度の白い視覚ランダムパルスにまばらな赤いパルスを混ぜ、一方、高密度の低音聴覚パルスにまばらな高音パルスを混ぜる。全体として高密度で同期・非同期判断が不可能であるにも関わらず、まばらな特異パルスを対応させることによって判断できるようになる¹³⁾。これはボトムアップに選択可能な顕著特徴のマッチングの例だが、トップダウンの選択も可能である。たとえば、4色からなる視覚パルスの中、または四つのピッチからなる聴覚パルスの中の、特定の色またはピッチのパルスに注目して、他モダリティ刺激との同期性を判断することができる¹⁵⁾。このようなマッチング特徴の注意による選択可能性は、中位レベルの処理過程で選択した顕著特徴を比較しているという時間マーカー理論の考えに合致する。

先に聴触覚の同期・非同期弁別は視聴覚や視触覚の組み合わせより時間特性が良いと紹介したが、聴触覚の場合にもマッチング特徴の属性不変性や注意選択性は確認された¹⁶⁾。このことから、異種感覚属性の時間判断は原理としては共通のアルゴリズムで行われていることが示唆される。一方、モダリティ組み合わせ依存である時間解像度はボトムアップの顕著特性抽出過程などの特性を反映しているのではないかと我々は考えている。

我々は同期・非同期弁別課題を用いたが、過去の研究では同時性判断や時間順序判断を用いるのが一般的であった(図2参照)。同時性判断は同期・非同期弁別とよく似た特性を示すが、時間順序判断は多少違うようである。我々のデータは、時間順序判断の弁別閾は比較する属性に依存しないという見解³⁷⁾は支持しなかったが、聴触覚が視聴覚や視触覚の組み合わせに比べて時間解像度が高い傾向は、他の二つの課題に比べて弱かった¹⁴⁾。また、個人差のパタンの相関も、時間順序判断と他の二つの課題の間では低かった。

課題依存性ということに関してもう一点重要な発見が最近あった。これまで、色と運動の非同期現象では主としてバインディング課題を用い、異種感覚モダリティの研究では同期・非同期弁別課題を主に用いてきた(図2参照)。どちらも時間限界が低いが、実はその限界を決定している要因が異なることが分かった¹⁷⁾。上述のように同期・非同期弁別の時間限界は比較する属性に依存する。一方、異種属性バインディング課題の時間限界はさらに低く、さらに比較する属性に依存しない。つまり、どのような組み合わせであれ上限は2~3 Hzであった。バインディング課題では、同期のタイミングを時間マーカーの時間関係で決定した上に、属性内容の対応関係を判断するというさらに複雑な処理が必要となる。この処理は属性に依存しない中枢レベルの共通の処理を含み、その時間限界が2~3 Hzということではないかと考えている。

時間マーカーを用いた時間判断の利点は、処理時間の違いの影響を小さくして物理的に起こったイベントの時間関係を判断できることにある。しかし、例えば視聴覚の場合、信号が感覚器に到達するまでに光と音の物理的な伝達速度の違いから時間ずれが生じるし、感覚器の動作速度も違う。このような時間ずれは、適切な時間マーカーを利用するだけでは解消できない。しかし、同時性を判断する比較器で調整することができる。このような機能の存在を示す現象として、一定の視聴覚の時間ずれに順応した後に、主観的な同時性の基準が変化し、順応方向の時間ずれに対して同時性の窓が広がるという順応効果がある³⁸⁾。これは、運動残効と類似の現象が視聴覚の同時性判断で起こったことを意味し、同時性判断が運動検出器のようなメカニズムでなされているという我々の仮説を支持する。

4. おわりに

属性バインディングの議論の前提になっている並列処理の考え方に関しては、近年見直しが進んでいる。例えば、視覚系内で並列に処理されていると考えられてきた運動、形態、色の情報処理は、実際は密接に結びついて、巧みな知覚システムを形成していることが次第に分かってきた。たとえば、運動軌道痕跡から得られる方位情報は運動方向の知覚を精緻化し^{39, 40)}、運動信号は形の知覚を歪め^{41, 42)}、運動軌道に沿って形態や色情報を統合されて運動物体の明瞭な知覚を生み出す^{43~46)}。しかし、これらの交互作用は、ある属性の分析に別の属性情報が利用されているということであって、異なる属性が分散処理されるという枠組み自体を覆すものではない。また、感覚モダリティ間にも低次

の交互作用があるということが近年いろいろな形で報告されているが^{47, 48)}、上述したような属性バインディング過程を経ないでモダリティ間の交互作用が生じていると考える根拠は今のところ希薄である。

本解説では、並列に処理される異なる属性の同期性の知覚、および同期性に基づいたバインディングの過程に関して、我々の提唱する時間マーカー理論を中心に紹介してきた。この説の本質は、主観的時間が処理時間等によってゆがめられる可能性のある脳内の物理的時間を反映するものではなく、脳が適切な時間マーカーの利用と判断機構の適応的調整によって外界の物理的時間を正しく推定しようとした成果と考えるところにある。これは時間知覚を考える正しい枠組みであると信じるが、現時点では細かいところが詰められていないことも認識している。顕著特徴の抽出とはどのような処理なのか、属性の組み合わせによって異なる時間解像度の違いは何を反映しているのか、といった機能的側面に関する重要な疑問が残されているし、時間マーカーの比較を行う神経実体が何かについてはほとんど分からない状況である。これらは今後に残された重要な研究テーマである。

参 考 文 献

- 1) Treisman, A. (1998): Feature binding, attention and object perception, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, Vol.353, pp.1295–1306
- 2) Dennett, D.C. and Kinsbourne, M. (1992): Time and the observer: The where and when of consciousness in the brain, *Behav. Brain Sci.*, Vol.15, pp.183–247
- 3) Johnston, A. and Nishida, S. (2001): Time perception: brain time or event time?, *Curr. Biol.*, Vol.11, pp.R427–430
- 4) Schmolesky, M.T., Wang, Y., Hanes, D.P., Thompson, K.G., Leutgeb, S., Schall, J.D., and Leventhal, A.G. (1998): Signal timing across the macaque visual system, *J. Neurophysiol.*, Vol.79, pp.3272–3278
- 5) Jaskowski, P. (1996): Simple reaction time and perception of temporal order: dissociations and hypotheses, *Percept. Mot. Skills*, Vol.82, pp.707–730
- 6) King, A.J. and Palmer, A.R. (1985): Integration of visual and auditory information in bimodal neurones in the guinea-pig superior colliculus, *Exp. Brain Res.*, Vol.60, pp.492–500
- 7) Moutoussis, K. and Zeki, S. (1997): A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision, *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, Vol.264, pp.393–399
- 8) Nishida, S. and Johnston, A. (2002): Marker correspondence, not processing latency, determines temporal binding of visual attributes, *Curr. Biol.*, Vol.12, pp.359–368
- 9) Amano, K., Johnston, A., and Nishida, S. (2007): Two mechanisms underlying the effect of angle of motion direction change on colour-motion asynchrony, *Vision Res.*, Vol.47, pp.687–705
- 10) Nishida, S. and Johnson, A.: Time marker account of cross-channel temporal judgments. In R. Nijhawan and B. Khurana (Eds.), *Space and Time in Perception and Action*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, in press
- 11) Fujisaki, W. and Nishida, S. (2005): Temporal frequency characteristics of synchrony-asynchrony discrimination of audio-visual signals, *Exp. Brain Res.*, Vol.166, pp.455–464
- 12) Fujisaki, W., Koene, A., Arnold, D., Johnston, A., and Nishida, S. (2006): Visual search for a target changing in synchrony with an auditory signal, *Proc. Biol. Sci.*, Vol.273, pp.865–874
- 13) Fujisaki, W. and Nishida, S. (2007): Feature-based processing of audio-visual synchrony perception revealed by random pulse trains, *Vision Res.*, Vol.47, pp.1075–1093
- 14) Nishida, S. and Fujisaki, W. (2007): Dissociations of temporal-order and synchrony judgments: Revisited, in 8th Annual meeting of the International Multisensory Research Forum, Sydney, Australia
- 15) Fujisaki, W. and Nishida, S. (2008): Top-down feature-based selection of matching features for audio-visual synchrony discrimination, *Neurosci. Lett.*, Vol.433, pp.225–230
- 16) Fujisaki, W. and Nishida, S. (2007): Audio-tactile, visuo-tactile, and audio-visual temporal synchrony perception, in 8th Annual meeting of the International Multisensory Research Forum, Sydney, Australia
- 17) Fujisaki, W. and Nishida, S. (2008): Temporal limits of cross-modal and cross-attribute binding judgments, in 9th Annual meeting of the International Multisensory Research Forum, Hamburg, Germany
- 18) Moutoussis, K. and Zeki, S. (1997): Functional segregation and temporal hierarchy of the visual perceptive systems, *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, Vol.264, pp.1407–1414
- 19) Zeki, S. (2003): The disunity of consciousness, *Trends Cogn. Sci.*, Vol.7, pp.214–218
- 20) Reichardt, W. (1961): Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory in-

- formation by the central nervous system. In W.A. Rosenblith (Ed.), *Sensory Communication*, Cambridge, Mass.: MIT Press
- 21) Lu, Z.L. and Sperling, G. (2001): Three-systems theory of human visual motion perception: review and update, *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.*, Vol.18, pp.2331–2370
 - 22) van Santen, J.P.H. and Sperling, G. (1985): Elaborated Reichardt detectors, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.2, pp.300–321
 - 23) Adelson, E.H. and Bergen, J.R. (1985): Spatiotemporal energy models for the perception of motion, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.2, pp.284–299
 - 24) Itti, L. and Koch, C. (2000): A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention, *Vision Res.*, Vol.40, pp.1489–1506
 - 25) Sternberg, S. and Knoll, R.L. (1973): The perception of temporal order: Fundamental issues and a general model, *Attention and Performance*, Vol.4, pp.629–685
 - 26) Eagleman, D.M. and Sejnowski, T.J. (2000): Motion integration and postdiction in visual awareness, *Science*, Vol.287, pp.2036–2038
 - 27) Libet, B., Wright, E.W., Jr., Feinstein, B., and Pearl, D.K. (1979): Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience: a functional role for the somatosensory specific projection system in man, *Brain*, Vol.102, pp.193–224
 - 28) Clifford, C.W., Spehar, B., and Pearson, J. (2004): Motion transparency promotes synchronous perceptual binding, *Vision Res.*, Vol.44, pp.3073–3080
 - 29) Cavanagh, P., Holcombe, A.O., and Chou, W. (2008): Mobile computation: spatiotemporal integration of the properties of objects in motion, *J. Vis.*, Vol.8 (12.1), pp.1–23
 - 30) Holcombe, A.O. and Cavanagh, P. (2008): Independent, synchronous access to color and motion features, *Cognition*, Vol.107, pp.552–580
 - 31) Clifford, C.W., Arnold, D.H., and Pearson, J. (2003): A paradox of temporal perception revealed by a stimulus oscillating in colour and orientation, *Vision Res.*, Vol.43, pp.2245–2253
 - 32) Arnold, D.H. and Clifford, C.W. (2002): Determinants of asynchronous processing in vision, *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, Vol.269, pp.579–583
 - 33) Dixon, N.F. and Spitz, L. (1980): The detection of auditory visual desynchrony, *Perception*, Vol.9, pp.719–721
 - 34) Shipley, T. (1964): Auditory flutter-driving of visual flicker, *Science*, Vol.145, pp.1328–1330
 - 35) Shams, L., Kamitani, Y., and Shimojo, S. (2000): Illusions. What you see is what you hear, *Nature*, Vol.408, p.788
 - 36) Welch, R.B. and Warren, D.H. (1980): Immediate perceptual response to intersensory discrepancy, *Psychol. Bull.*, Vol.88, pp.638–667
 - 37) Hirsh, I.J. and Sherrick, J.C.E. (1961): Perceived order in different sense modalities, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.62, pp.423–432
 - 38) Fujisaki, W., Shimojo, S., Kashino, M., and Nishida, S. (2004): Recalibration of audiovisual simultaneity, *Nat. Neurosci.*, Vol.7, pp.773–778
 - 39) Geisler, W.S. (1999): Motion streaks provide a spatial code for motion direction, *Nature*, Vol.400, pp.65–69
 - 40) Ross, J., Badcock, D.R., and Hayes, A. (2000): Coherent global motion in the absence of coherent velocity signals, *Curr. Biol.*, Vol.10, pp.679–682
 - 41) De Valois, R.L. and De Valois, K.K. (1991): Vernier acuity with stationary moving Gabors, *Vision Research*, Vol.31, pp.1619–1626
 - 42) Nishida, S. and Johnston, A. (1999): Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern, *Nature*, Vol.397, pp.610–612
 - 43) Burr, D.C., Ross, J., and Morrone, M.C. (1986): Seeing objects in motion, *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, Vol.227, pp.249–265
 - 44) Nishida, S. (2004): Motion-based analysis of spatial patterns by the human visual system, *Curr. Biol.*, Vol.14, pp.830–839
 - 45) Nishida, S., Watanabe, J., Kuriki, I., and Tokimoto, T. (2007): Human visual system integrates color signals along a motion trajectory, *Curr. Biol.*, Vol.17, pp.366–372
 - 46) Watanabe, J. and Nishida, S. (2007): Veridical perception of moving colors by trajectory integration of input signals, *J. Vis.*, Vol.7 (11.3), pp.1–16
 - 47) Shimojo, S. and Shams, L. (2001): Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions, *Curr. Opin. Neurobiol.*, Vol.11, pp.505–509
 - 48) Spence, C. and Driver, J. (2004): *Cross-modal Space and Crossmodal Attention*. Oxford: Oxford University Press