

視覚における時間と空間の連続性： 腕交差が顕す時間順序判断の空間依存

北澤 茂

産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門

〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1

1. はじめに

脳の中では信号の伝達速度は一様ではない。しかも多くのループが存在するから、時間の情報は失われやすい。脳の中の時間マネジメントはなかなか難しい問題であると予想される。ここでは、事件 A と事件 B の時間順序を正しく判断する、という一見簡単な課題を脳がどのように解決するのか考えてみたい。

物理学的な観測では、理想化された観測者が時計を持っていて、事件 A の発生と同時に時計を読み、事件 B の発生と同時に時計を読み、その読みを比べて順序をつけることになろう。脳の中にも計時センターがあって事件に時間順序を与えているのだろうか。

2. 時間順序判断のモデル

古典的な時間順序判断に関するモデルでは、まさにこの計時センターを仮定する^{1,2)}。計時センターには事件 A に由来する信号 A と事件 B に由来する信号 B が収束しており、2つの信号の到着時刻の差に従って、A と B の時間順序判断を出力する (図 1)。この計時センターが、外界での事件 A と事件 B の生起順序を正しく判断するには、計時センターへの信号 A と信号 B の到着順序が事件の生起順序を正しく反映していなければならない。しかし、脳の中には多数のループがあるし、さまざまなスピードのさまざまな経路を通して信号が伝達されるので、計時センター到着までに信号の時間順序は逆転するかもしれない。同じ信号が2度、3度と到着を繰り返

すかもしれない。計時センターへの信号の到着の順序が、事件の起こった順序を反映するとは限らない。

一つの解決策は、できるだけ入力に近いところに計時センターを置くことである³⁾。信号 A と信号 B の時間順序が失われないうちに時間順序を判断して、その結果を "B after A" あるいは "A before B" で象徴されるような安定した表現に直して神経系を流通させよう、という考えである³⁾ (図 1)。果たして、十分に入力に近い位置に計時センターが用意されているのだろうか。

3. 腕の交差による主観的時間順序の逆転

われわれは、右手と左手を短い間隔で触った時の時間順序判断を課題として選んだ⁴⁾。事件 A として左手刺激、事件 B として右手刺激を選んだことに相当する。左手刺激が皮膚受容器に引き起こした信号は、脊髄後根神経節細胞の軸索を毎秒約 100メートルのスピードで上行し、延髄

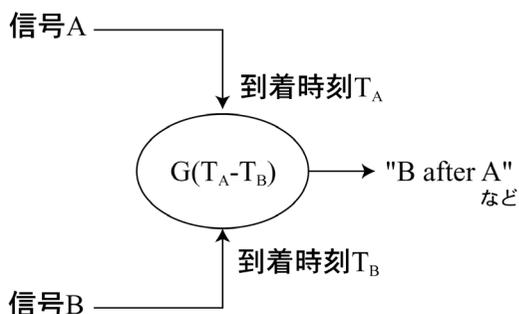


図 1 古典的な時間順序判断のモデル。時間差の単調関数 G の与える確率に従って「A が先」と判断する (Sternberg&Knoll,1973 など)。

と視床で神経細胞を乗り換えて、刺激からおよそ20ミリ秒後には大脳右半球の一次体性感覚野に到達する。右手刺激を原因とする信号も同様に左の一次体性感覚野に到着する。Dennetらの考えに従えば、この左と右の一次体性感覚野のごく近傍に計時センターがあることが望ましい。

この仮説が正しいかどうかを検証するために、われわれは手を交差した場合と交差しなかった場合の時間順序判断の能力を調べることとした⁴⁾。手を交差すると末梢神経のたわみ具合は確かに変わるが、伝導速度その他に大きな差が生じるとは考えにくい。一次体性感覚野までの信号の伝達には恐らく影響はないだろう。とすれば、一次体性感覚野のごく近傍に計時センターがある限り、手の空間配置を変化させても時間順序判断には殆ど何の変化も生じないはずである。

我々が得た結果は、予想外のものであった。手を交差しない場合は、右手と左手の刺激時間差が0.1秒以上あればどの被験者でも90%程度は正解することができた(図2の白丸)。刺激時間差に対する応答(右手が先と判断する確率)は単調増加のシグモイド関数でよく近似できた。ところが、手を交差すると、刺激時間差およそ0.3秒以内の場合に、誤答する確率が有意に上昇し、極端な被験者ではほぼ完全に逆転した。図に示した被験者の場合は、応答はN字状になった

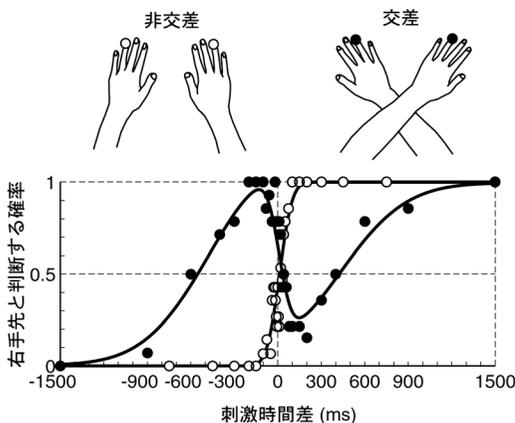


図2 腕の交差による主観的時間順序判断の逆転。正の時間差は右手先行を表す。

(図2)。もはや、刺激時間差に対する応答の単調性すら失われており、シグモイド関数では近似不能である。

ここで、刺激時間差が伸びるにつれて、正解率が回復することに注意されたい。また、右手単独、あるいは左手単独の刺激の場合には交差していてもどちらの手を刺激されたかの判断を誤ることはほとんど無かった。つまり、我々の発見したN字型に象徴される応答の変化は、左右の手の単純な(反応する際の)取り違えて生じたものではない。右手と左手に加えた刺激の時間順序判断そのものが、手の空間配置に決定的な影響を受けるのだ。

4. 時間の必要条件としての空間

この結果は何を意味するのか。まず、脳には一次体性感覚野を直接監視する図1のような計時センターはない。つまり、事件Aと事件Bを「皮膚上の事件」のまま順序付ける機構は存在しないということだ。計時センターが存在するとしても、手の空間配置の情報が加わるレベル以降に存在する。事件Aと事件Bは「皮膚上」の事件としてではなく、「空間内」の事件になってはじめて時間的な順序を与えられると言えるだろう。本課題では、回答に指の運動を用い、しかも閉眼で行った。従って、課題の要求の中には、手の刺激を空間内の事件として扱う必然性は全くない。むしろ皮膚上の事件のまま扱えるならば、その方が判断に有利であることは前述の通りである。わざわざ空間配置の情報を加味するのは、そうせざるを得ないからだろう。脳は空間内の事件に対してしか時間順序を与えることができない、と推定される。

5. 時間順序の再構成

空間がなければ時間はない。しかし、空間があるだけでよいということにはならない。事件を空間内に位置づけるには、相応の計算が必要である。手の皮膚刺激の場合には、手が空間内のどこにあるかを計算した上で、計算で得られた手の位置と皮膚刺激由来の信号を対応付ける必要

がある。事件を空間の中に位置づけるには時間がかかり、時間がかかればかかるほど時間の情報は失われて行く。

しかし、脳の時間順序判断の分解能は悪くない。我々のデータでは、非交差の場合には、刺激時間差25msにおいてすら正確率が1/2よりも有意に大きい。定義によるが、一般に時間順序判断の時間分解能は30ms程度であると言われている^{5,6)}。これだけの時間分解能を実現するには、空間で事件を記述する一方で、失われた時間情報を補う仕組みが必要ではないか。

生体は一般に「変化」の検出が得意である。もともと感覚受容器は「変化」によく応答するし、「変化」の情報には早い伝送路が割り当てられている。空間の中での大きな変化(動き)の情報は一次視覚野に信号が到達するよりも早くV5で検出されるという⁷⁾。もし、事件Aと事件Bの間の「変化」あるいは「動き」の情報を脳が速やかに固定することができれば、この「変化」の情報を使って失われた時間情報を補うことができそうである。

事件Aと事件Bの空間内での位置を記述するうちに時間の情報はあいまいになる。空間を表現する領域で得られるのは、事件Aと事件Bが生じた位置に関する情報(何がどこで起きたかということ)だけで、時間に関する情報は得られない。一方、事件Aと事件Bの間の「変化」あるいは「動き」だけが固定されている領域があるでしょう。ここには2つの事件の時間順序を反映した「変化」あるいは「動き」が表現されているが、事件そのものの(何が起きたか、どこで起きたか)の情報はない。しかし、これら2つの領域の情報、「何がどこで」という事件と位置の情報と「どういう向きで」という変化の情報をあわせると、事件Aがここで起きてから事件Bがあそこで起こった、と事件Aと事件Bの時間順序を再構成することができるだろう(図3)。われわれは、2つの事件の空間の位置の情報と、2つの事件の間の変化の情報から時間順序が再構成されると考え、時間順序判断の「動き投影仮説」と名づけた⁸⁾。

この仮説で時間順序の逆転を説明してみよう。非交差の場合は位置と動きの情報から正しく時間順序が再現される(図3上)。一方、交差した場合はどうなるだろうか。交差した場合も非交差の場合と同じ「動き」が固定されて、空間内の同じ位置に対応付けられるとすると、もはや手は交差しているので全く逆の時間順序が再構成されてしまう。動きと空間の対応付けの過程に時間逆転の理由が求められる。比較的短い刺激時間差(300ms程度)で逆転が生じやすいのは、短い時間差の場合ほど「動き」の情報に頼って時間順序を再構成すると考えれば説明できるだろう。

もちろん、仮説で説明ができることと、仮説が正しいことはまったく別のことである。実際、古典的な計時センター仮説でも時間順序の逆転を巧妙に説明することが可能である⁴⁾。仮説の当否の結論は今後の研究に待たなければならないが、時間順序判断が事件の空間表現と分かちがたく結びついていることだけは確かである。従って、時間順序判断のパラダイムは脳の中の空間表現を調べるツールとしても用いることができよう⁹⁾。また、本稿では体性感覚を入力とする例に限って説明したが、「空間」はもちろん視覚からも聴覚からもアクセス可能な領域に表現

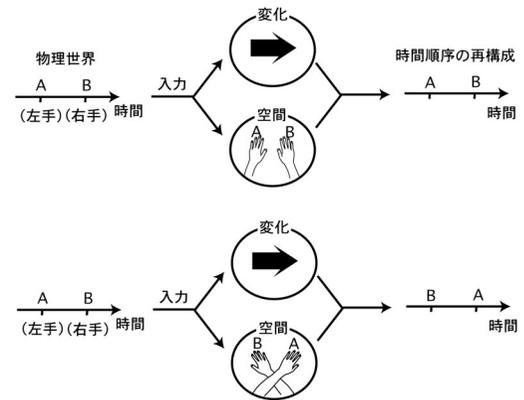


図3 時間順序の再構成.連続する2つの事件を原因とする信号は、空間内で位置づけられる一方、両者の時間関係は「変化」あるいは「動き」として固定される。事件の空間内での位置と変化の方向から、通常は正しく時間順序が再構成される(上)。しかし、手の交差時には誤った対応付けをして時間順序が逆転する可能性が生じる(下)。

されているはずである。だとすれば、時間と空間の結びつきをある感覚種に限定して考えるべきではなかろう。感覚種によらず時間と空間は連続していると考えるのが自然だろう。

文 献

- 1) S. Sternberg and R. L. Knoll: The perception of temporal order: fundamental issues and a general model. *S. Kornblum (ed): Attention and Performance*. Academic Press, New York, 629-685, 1973.
- 2) R. Efron: The effect of handedness on the perception of simultaneity and temporal order. *Brain*, **186**, 261-284, 1963.
- 3) D. C. Dennett and M. Kinsbourne: Time and the observer: the where and when of consciousness in the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, **15**, 183-247, 1992.
- 4) S. Yamamoto and S. Kitazawa: Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. *Nature Neuroscience*, **4**, 759-765, 2001.
- 5) I. J. Hirsh and C. E. Sherrick: Perceived order in different sense modalities. *Journal of Experimental Psychology*, **62**, 423-432, 1961.
- 6) E. Pöppel: A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Sciences*, **1**, 56-61, 1997.
- 7) D. H. Ffytche, C. N. Guy and S. Zeki: The parallel visual motion inputs into areas V1 and V5 of human cerebral cortex. *Brain*, **118**, 1375-1394, 1995.
- 8) 山本慎也, 北澤 茂: 二カ所の皮膚刺激の時間順序の判定: 動き投影仮説. 第14回 生体・生理工学シンポジウム論文集, BPES'99, 239-242, 1999.
- 9) S. Yamamoto and S. Kitazawa: Sensation at the tips of invisible tools. *Nature Neuroscience*, **4**, 979-980, 2001.