

## こころの時間・こころの空間\*

—脳が作り出す時間と空間—

北澤 茂\*\*

Key Words : mental time, mental space, time perception, visual stability

(神経治療 32 : 87-91, 2015)

## はじめに

我々が意識する「こころの時間」は過去から未来に滞りなく流れていくように感じられる。しかし、よく調べてみると、物理世界の時間の順序通りには、流れていないことがある。村上春樹の小説「1Q84」の表現を借りると「ときとして前後が入れ替わったり、ひどいときにはまったく消滅してしまったりもする。ないはずのものが付け加えられたりもする。」我々が意識する「こころの時間」は、物理的な出来事から得られた信号を元にして脳が作り出すものである。そのために時間の逆転などの錯覚が生じるのだ。逆に、時間の錯覚に注目してその理由を考えると、「こころの時間」を作り出す脳のメカニズムの一端を明らかにすることができるのではないか。

我々が眼前に広がっていると感じる「空間」も、やはり脳が外界からの信号や記憶を元に作り出している。「こころの空間」と呼ぶことにする。我々は1秒に3回も急速な眼球運動（サッケード）を繰り返しているから、網膜像は恐ろべき勢いで飛び跳ねている。それにもかかわらず我々が意識する「こころの空間」は頑として動かない。そのため、私たちは自分の目が動いていることに気づくことすらない。目を動かしても「こころの空間」が動かないのはなぜか。これは少なくとも1000年以上にわたって、アルハーゼン、デカルト、ヘルムホルツ、といった偉大な思想家によって繰り返されてきた問いである。しかし、未だに解決されているとは言いがたい。

本講演では時間の流れの錯覚と、「眼を動かしても空間が動かない」という我々の実感を手がかりにして、時間や空間

の意識を脳がどのようにして生み出しているのかを検討してみたい。

## I. 腕交差による時間順序の逆転とその神経メカニズム

時間の流れを定義する最も単純な実験系として、われわれは2つの信号の順序を判断する課題を用いて研究を行ってきた。心理学の古典的なモデルでは、脳のなかに判断のセンターがあって、2つの信号の到着を待ち受けている、と仮定する<sup>1)</sup>。信号Aの到着時刻 $T_A$ と、信号Bの到着時刻 $T_B$ を計時して、その時間差に応じて、判断を出力すると考える (Fig. 1)。実は、信号が光であれ音であれ、触覚であれ、30ms程度の時間差があれば正解率が75%程度になることが知られている。この計時センターは脳のどこにあるのだろうか。

我々は、左右の手に加えた触覚刺激の順序を判断する、という課題を使ってこの問題に取り組んだ。腕を平行に並べた場合には、古典モデルでよく説明できるシグモイド (S字状) の応答曲線が得られた。しかし、腕を交差すると、応答曲線がN字型になる被験者が出現した (Fig. 2)。0.2s程度の時間差では判断が逆転する一方、時間差を1.5sまで延長すると、正しい判断が回復した。程度の差こそあれ、腕交差の効果は誰にでも生じる<sup>2)</sup>。

この結果は何を意味するのか。一次体性感覚野のように皮膚からの信号が皮膚座標系で表現されている間は、信号は腕交差の影響を受けない。従って、判断のセンターが皮膚座標系の信号を受け取るとすれば、腕交差は影響を与えないはずである。実際には、腕交差で明瞭な判断の変化が生じたので、判断のセンターは皮膚座標系の信号を受け取るのではな

\* Mental Time and Mental Space—How the Brain Constructs Time and Space—.

\*\* 大阪大学大学院・生命機能研究科 Shigeru KITAZAWA : Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

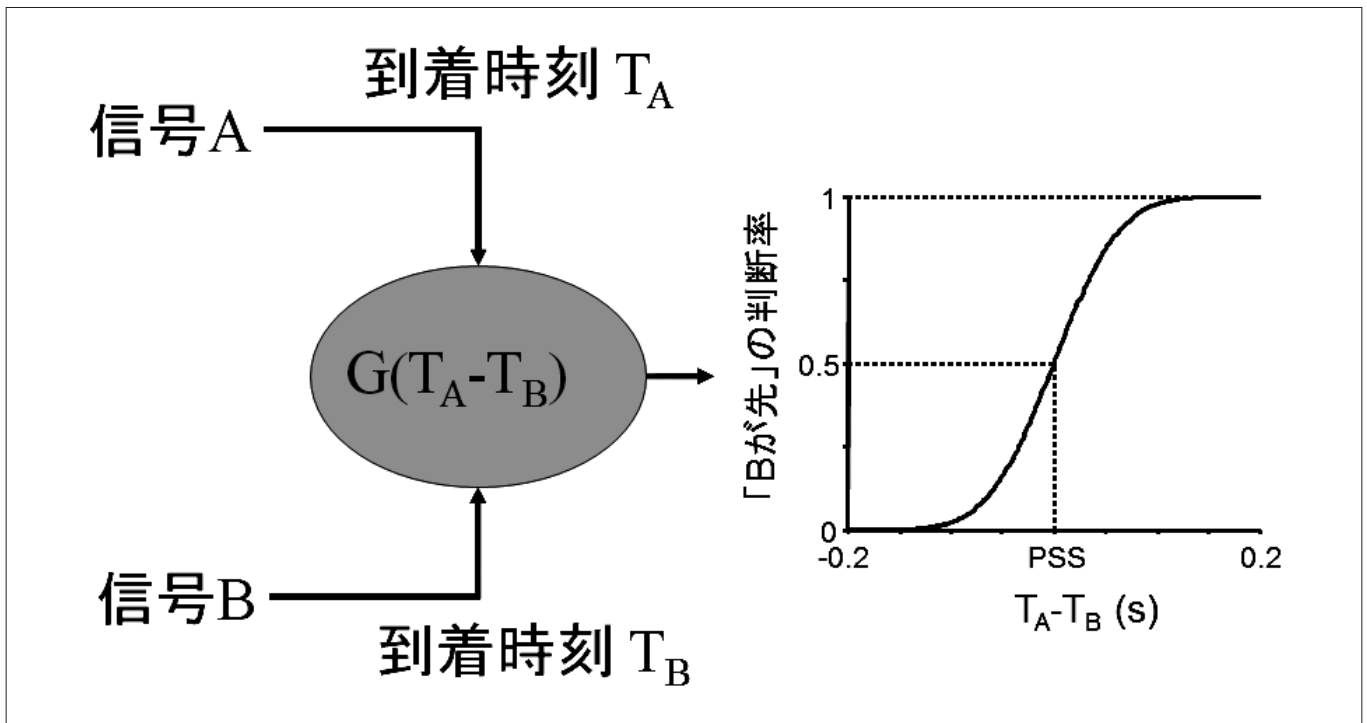


Fig. 1 A classic model for temporal order judgment 時間順序判断の古典モデル

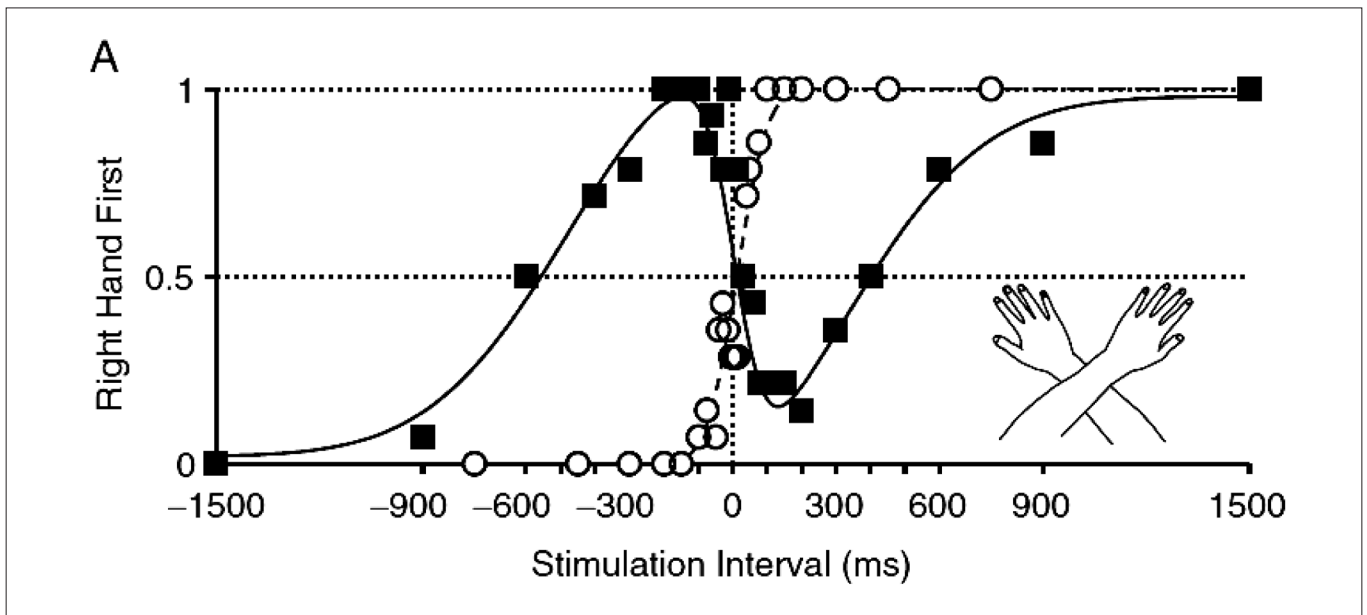


Fig. 2 Reversal of subjective temporal order due to arm crossing<sup>2)</sup> 腕交差による主観的時間順序の逆転

い。左右の手の皮膚からの信号は、空間で位置づけられてから順序づけられるのだ。実は、手と足の刺激の時間順序判断は手と足を交差すると逆転する<sup>3)</sup>。手に持った棒の先端に加えた刺激の時間順序判断は、棒を交差するだけで逆転する<sup>4)</sup>。これらの結果も、「左右の手の皮膚からの信号は、空間で位

置づけられてから順序づけられる」という結論を支持している。

では、脳のどこにセンターがあるのか。機能的磁気共鳴画像法を用いて検討したところ、空間座標との関係が報告されている下頭頂葉、運動前野や中前頭回だけでなく、上側頭溝

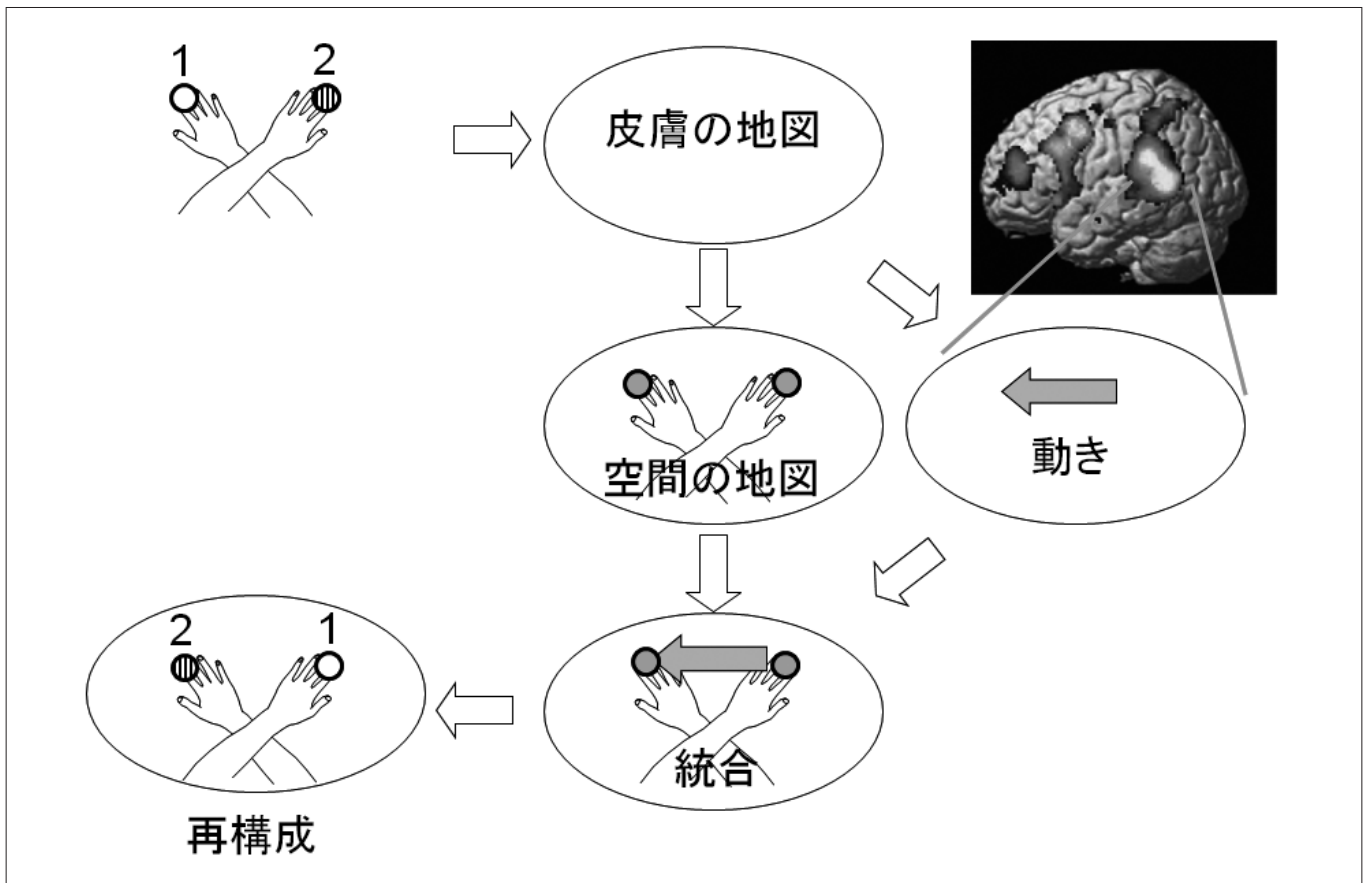


Fig. 3 A motion projection hypothesis 動き投影仮説

から中側頭回に、時間順序判断に伴う活動が両側に生じることが明らかになった。側頭葉の活動領域の後部は、視覚的な動きの刺激で活動するヒトのMT/MST相当領域の前部と重なっていた。つまり、「動き」の情報が両手に加えた順序判断には利用されていることが明らかになった<sup>5)</sup>。

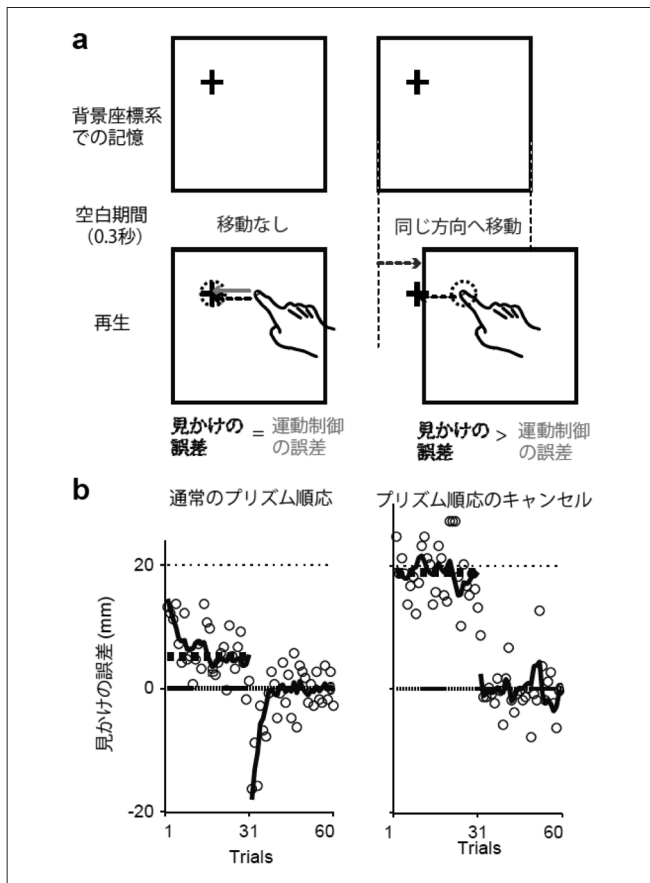
これまでの結果を合わせて、我々は時間順序は位置と動きの情報から再構成されると考えている<sup>5-7)</sup> (Fig. 3)。手が左、右の順番で刺激された場合、脳のある領域には手が刺激された空間的な場所の情報(2ヵ所)が表現される。しかし、その順序の情報はすぐに失われる。一方、別の領域には左から右への動きの情報が表現される。この動きの情報はベクトル的で、始点と終点は何であるかは頓着しない。何がどの順序で起きたかを知るには、片方の情報だけでは不十分で、両者を統合する必要がある。我々は、位置の情報と動きの情報を脳が統合して必要に応じて時間の流れをもう1回作り出していると考えている。

信号の順序を判断する「センター」が脳のどこか1ヵ所に存在するわけではなさそうである。我々は入力してきた物理的な情報を、まず位置と動きに分け、時間を判断する必要があると、おもむろにその二つを統合して、再構成している

らしい。この再構成の過程に、間違いが忍び込む余地があるのだろう。

## II. 目を動かしても世界が動かない理由

我々は1秒に3回も高速な眼球運動、サッケード、を行って外界の情報を取り入れている。しかし、我々は網膜像の流れに気づかず、外界は常に安定している。400年前にデカルトは、目を指で押すと外界が揺らぐことに気づき、眼を動かすための信号が世界の安定に寄与していると考えた。この考えは60年前に von Holst と Mittelstaedt によって定式化された<sup>8)</sup>。サッケードの運動指令の遠心性コピーを使ってサッケードによる網膜像の「流れ」が抑制される、という図式である。しかし、このモデルは問題の一部を説明するに過ぎないし、サッケード中の視覚野の活動の抑制は限定的であることが知られている。つまり、単純な抑制だけでは説明できない。この問題を措くとしても、別の問題が残る。網膜からの情報が途絶えている空白期間に、一体我々は何を見ているのだろうか。さらに、空白期間の情報補填のメカニズムがわかったとしても、サッケード前後のずれた網膜像からどうやって1つの外界の知覚が作られるのかという大問題が残る。



**Fig. 4** Evidence for the existence of a background coordinate<sup>11)</sup>  
背景座標系の存在を支持する実験結果

このずれた2枚の網膜像は脳の中に「外界」を表象する外部座標系があれば、それぞれの場所に2枚の像を嵌めることで統合できる。実際、受容野が目の位置に依らず頭に対する位置に固定されているニューロンがサルの頭頂-後頭間溝の周囲(PO野, 別名V6野)で報告されている<sup>9)</sup>。しかし、そのようなニューロンの報告は少数で必ずしも定説として認められていない<sup>10)</sup>。我々は、脳に表象されるのは、計算が複雑な厳密な外部座標系ではなく、網膜像の特徴を手掛かりとした「背景」座標系ではないか、と考える。

V6野は目標に手を伸ばす到達運動に重要な役割を果たしていることも知られている。そこで、我々は、背景の四角い枠だけを動かすことで、到達運動の学習(プリズム順応)のスピードをコントロールできるかどうかを調べる実験を行った<sup>11)</sup>。1) 背景として枠を置き、ランダムな場所に提示した目標に手を伸ばす到達運動を行わせる(Fig. 4)。2) 運動中(0.3秒程度)は液晶シャッターで視覚を遮断する一方、画面に触れた瞬間には視覚フィードバックを0.3秒与えて、誤差の信号をフィードバックする。3) このとき、視野をずらすプリズムを入れて、大きな見かけの誤差が生じる状況を作り

出す(点線矢印)。4) 背景は視覚を遮断した運動中に動かない移動なし条件、同じ方向に動かす同方向移動条件、反対方向に動かす反対方向移動条件の3条件を設定した。目標の位置が背景座標系で記憶されるとすれば、同方向移動条件では狙った目標に指が到達したと解釈され、運動制御の誤差は生じず、プリズム順応が生じなくなるはずである。反対方向条件では促進されるはずである。

移動なし条件では、通常のプリズム順応が生じた。つまり、プリズムを入れると視野の移動方向に誤差が生じ、試行とともに減少した(Fig. 4b左)。そしてプリズムを外すと(31試行目)逆向きに大きな誤差が生じた(残効)。2) 一方、同方向移動条件ではプリズム順応が生じなかった(Fig. 4b右)。反対方向条件では逆に促進された。これらの結果は、運動誤差の計算に背景座標系が使われていることを明瞭に示す<sup>11)</sup>。サッケードの前後の網膜像から、相互に重なる「背景」を取り出して、「背景」に対して目標を位置づける自動的なメカニズムがあると思われる。

さらにfMRIの順応法を用いた研究を行ったところ、背景座標系が右の楔前部に存在することを示唆する結果を得た。背景座標系の神経メカニズムを研究することで、「こころの空間」が安定している理由が解き明かされるだろう。

### III. こころの空間とこころの時間の相互作用

実は、「こころの空間」と「こころの時間」は独立した存在ではない。腕を空間で交差するだけで時間順序判断が逆転することはその一例である。ほかにも、サッケードを行う直前(0.1秒以内)に提示した視覚刺激の順序判断が逆転する、という興味深い錯覚も報告されている<sup>12)</sup>。この現象は、「目を動かしても世界が動かない」理由で挙げた1つ目の問いと直結した問題であると考えられることもできる<sup>6)</sup>。「こころの時間」と「こころの空間」の神経基盤の解明は両者の関係を考えることでさらに進展していくことだろう。

本論文はCOI報告書の提出があり、開示すべき項目はありません。

### 文 献

- 1) Sternberg S, Knoll R : Attention and Performance (ed Kornblum S), Academic Press, 1973, p629-685
- 2) Yamamoto S, Kitazawa S : Reversal of subjective temporal order due to arm crossing. Nat Neurosci 4 : 759-765, 2001
- 3) Schicke T, Roder B : Spatial remapping of touch : confusion of perceived stimulus order across hand and foot. Proc Natl Acad Sci USA 103 : 11808-11813, 2006
- 4) Yamamoto S, Kitazawa S : Sensation at the tips of invisible tools. Nat Neurosci 4 : 979-980, 2001
- 5) Takahashi T, Kansaku K, Wada M et al : Neural correlates of tactile temporal-order judgment in humans : an fMRI study. Cereb Cortex 23 : 1952-1964, 2013
- 6) Kitazawa S et al : Attention and Performance XXII (eds Hag-

- gard P, Kawato M, Rossetti Y), Oxford University Press, 2008, p73-97
- 7) Fujisaki W, Kitazawa S, Nishida S : The New Handbook of Multisensory Processes (ed Stein B), MIT Press, 2012, Ch. 16, p301-318
- 8) von Holst E, Mittelstaedt H : Das reafferenz princip : Wedselwirkungen zwishchen Zentrainervensystem und Peripherie). Die Naturwissenschaften 37 : 464-476, 1950
- 9) Galletti C, Battaglini PP, Fattori P : Parietal neurons encoding spatial locations in craniotopic coordinates. Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation cerebrale 96 : 221-229, 1993
- 10) Wurtz RH : Neuronal mechanisms of visual stability. Vision Res 48 : 2070-2089, 2008
- 11) Uchimura M, Kitazawa S : Cancelling prism adaptation by a shift of background : a novel utility of allocentric coordinates for extracting motor errors. J Neurosci 33 : 7595-7602, 2013
- 12) Morrone MC, Ross J, Burr D : Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. Nat Neurosci 8 : 950-954, 2005

## Mental Time and Mental Space—How the Brain Constructs Time and Space—

Shigeru KITAZAWA

Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka University

Space and time that we perceive in our mind are, of course, based on the counterparts in the physical world, but it remains still unknown exactly how the mental space and mental time are constructed in our brain. Take the mental space for example. We swing our eyes three times a second on average, with a peak angular velocity as fast as 100-500 degrees/s. But the world in our mind are so stable that we do not even notice our own eye movements. Why do blurred images on the retina not appear in our conscious mind? What are we looking at, while the blurred retinal images are blocked from our mind? How are two distinct retinal images, one before and the other after the rapid eye movement, mapped to the same part in the mental space? As for the mental time, it does not flow equably as hypothesized in physics. For example, subjective temporal order of successive stimuli are inverted just by crossing our arms, or

just before the onset of each rapid eye movement. A key word for solving these problems is “postdiction”, a notion that the mental space and the mental time are constructed by our brain from sensory signals sampled over the past ~ 100 ms by combining information across multiple areas in the brain. We are searching for the neural basis of “postdiction” by applying techniques in psychophysics and neuroimaging to human participants, and neurophysiological techniques to monkeys. Why the world remains stable while we move our eyes has been repeatedly questioned by great thinkers like Alhazen, Descartes, and Helmholtz, for more than 1000 years at least. We hope that our research would ultimately yield final answers to the long-lasting historical question, in addition to other important questions regarding the mental space, time, and their interactions.