

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16071

研究課題名（和文）脳内多感覚統合機構の解明を目指した理論・実験の融合的研究

研究課題名（英文）A fusional study of mathematical modelling and experiments that aims to elucidate the mechanisms of multisensory integration

研究代表者

佐藤 好幸 (Sato, Yoshiyuki)

東北大学・ヨッタインフォマティクス研究センター・特任助教

研究者番号：00548753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多感覚統合機構に関して代表者の数理的バックグラウンドを生かしたモデル化と実験の融合的研究を行った。その成果として、多感覚統合機構に関する時間的性質と推定対象に関する成果を得た。具体的には、聴覚による視覚情報処理促進、感覚運動統合、複数の音イベント時間情報統合、視聴覚刺激の因果性推定などを対象とし、実験的、理論的両面からの研究を行った。多感覚情報統合の時間的な性質や推定対象に関して当初計画よりも多面的な視点から研究を遂行し、成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては他感覚情報統合に関する数理モデルと実験の融合的研究を行った。特に数理的研究は一般性をもつため、様々な種類の情報統合に適用可能な研究パラダイムとなる。これらの研究成果は、多感覚統合機構の解明につながるのももちろんのことながら、同時に脳内での情報表現・保持の仕組みに関する重要な研究ともなる。実験的観点からは多岐にわたる内容であるが、モデルの観点からはいずれも密接な関係にある。これらの実験及び数理モデルに関する成果をより発展させることで、多感覚統合の解明に向けた新たな視点による将来的な展開を期待することができる。

研究成果の概要（英文）：I have carried out fusional studies on multisensory integration with mathematical modelling and experimental methods. Especially, I have obtained results on the temporal aspects and the object to be estimated in multisensory integration. Concretely, I have obtained results from various viewpoints such as auditory facilitation of visual information processing, sensory-motor integration, temporal information integration of multiple auditory events, and causal inference in audio-visual integration.

研究分野：計算論的認知科学

キーワード：多感覚統合 ベイズ推定 視聴覚統合 感覚運動統合

1. 研究開始当初の背景

人間は様々な感覚からの情報を統合することで効率的な知覚を実現している。例えば異なる場所に光と音が提示されると、それぞれの信頼度を元にして統計的に最適な統合が行われた位置に知覚が生じることが知られている。このような統計的最適性はベイズ推定で定式化される。ベイズ推定とは、事前に持つ知識(事前分布)と観測から得られる情報(尤度関数)を最適に統合して推定を行う枠組みである。多感覚情報統合に関する多くの現象がベイズモデルで理解できることが、申請者の研究を含む過去の研究により解明されてきている。

多感覚統合の仕組みを解明することは基礎・応用科学の両面から見て重要なことであるが、その仕組みは世界的に精力的に研究が行われてはいるものの未だよくわかっていないことが多い。本研究の目的は、視聴覚統合などの多感覚情報統合を対象とし、ベイズ推定という計算原理をベースにして心理物理学実験と数理モデルによる融合的研究によりその仕組みを解明することである。

2. 研究の目的

人間は視覚や聴覚などの異なる感覚から得た観測情報を統合することで効率的な外界知覚を可能としている。本研究の目的は、この多感覚情報統合の機構を心理物理学実験及び数理モデルの融合的研究により解明することである。そのために、1. 感覚統合は脳内でいつ起こるのか、2. 知覚系が推定しようとしている対象は何なのか、3. 感覚統合では何がどのように学習されるのか、の3つの問題意識を設定する。これらは実験的観点からは幅広いテーマであるが、数理的観点からはベイズモデルの事前確率・尤度関数が何によって規定されるかという共通の視点で捉えることができる。申請者の得意とするベイズモデルを基礎とした数理モデル構築とその検証によりこれらの問題に取り組むことで、多感覚統合機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

研究目的で掲げた3つの観点から多感覚統合の性質の解明するため、ベイズモデルをベースとした実験提案と、その実験検証を行う。まずは視聴覚統合研究のための実験系を構築し、それを利用して、具体的なモデル予測および予備的結果を得ている統合タイミングに関する実験的研究を行う。次に推定対象に関する実験に関してもモデルからの実験提案が具体化しているのでその検証を行う。その後は計算論モデルを構築・発展させながら感覚統合が「いつ」起こるのかと、「何が」統合されるかを解明すべく、これらのテーマを更に発展させるとともに、適応現象に関してもモデル構築及び実験を行っていく。これら実験とモデルの融合的研究により、ベイズモデルという統一的な観点から多感覚統合に関して幅広い知見を得て、それらの統合的理解につなげることを目指す。

4. 研究成果

2016年度の研究成果

2016年度においては、まず、視聴覚統合の時間的性質に関する実験を行った。具体的には、視聴覚統合現象の一つとして、視覚刺激に対する反応速度が聴覚刺激の存在によって向上するという現象がある。これに関し、従来の研究ではこの向上効果が視聴覚刺激の相対位置に依存するという報告としないという報告が混在していた。代表者らが提案した同一源推定モデルをベースにした視聴覚統合のメカニズムを考えると、この効果は位置に依存することが予想される。実験的に異なる結果が得られていることの原因として、刺激提示位置の不一致により視聴覚刺激の対応関係がきちんととれていないこと、また刺激提示が狭い範囲に限定されていることがあるのではないかと考え、より広い範囲できちんと空間的に位置を合わせて対応関係がとれるように刺激提示を行った。その結果、視覚刺激に対する反応時間の向上効果は、聴覚刺激の相対的位置に依存することが明らかとなった。これは視聴覚統合の性質を決定する上で重要な要素を明らかにしたという意味で重要な成果である。さらに、これはモデルの予測とも一致する結果であり、モデルをベースとした視聴覚統合機構の解明に貢献する成果である。

2016年度において当初は刺激に時間差をつけることで視聴覚統合のタイミングを解明する計画であった。しかし予備的な実験結果を元に再度検討を行った結果、直接刺激に時間差をつけて提示するよりも、刺激に対する反応速度を計測することで、視聴覚統合のメカニズムを探ることのほうがより簡単であると判断し、上記実験を行った。反応速度に関しては、Drift Diffusion Model等の脳内メカニズムと直結するモデルが提唱されているため、視聴覚統合における反応速度の特性を明らかにすることで、そのメカニズムの解明につながる。当初実験案とは少々異なるものとなったが、結果的に一見相反する過去の報告を説明しうる、視聴覚の情報統合に関する重要な示唆を得た。

2017 年度の研究成果

2017 年度においては、「いつ」と「何が」を同時に研究しうる実験系を検討した結果、実験系の候補として感覚運動統合に関する研究を行った。具体的には、時間的に精密な運動として例えば両手を同時に動かすといった運動があるが、このような運動がどのようにして生成されるのか、その際に感覚フィードバックがどの程度重要になるのかを解明するべく実験を行った。実験の結果、両手を同時に動かすタスクにおいてはおよそ 10ms の高い精度で同時性を達成できることを示した。そして、この運動時間精度と感覚フィードバックとの関連性を調べるため、聴覚および触覚の左右弁別時間域を計測して、運動の精度との相関を見た。その結果は相関がみられず、一見すると感覚を用いた修正を行っていないという結果が得られた。

さらに、両手の同時運動タスクではなく手と足の同時運動タスクを行った。足の運動は手の運動に比べて、運動・感覚情報の神経伝達に時間差が加わる。手足運動タスクにより、同時運動の際には、時間差のある運動指令や感覚情報のうちどれを同時にするように運動がなされているのかを分離することができる。実験の結果、運動の結果としての感覚フィードバックが脳に到達するタイミングの時間差をベースにして同時性を判断していることを示唆する結果が得られた。

これらの結果は、時間的な精密さが必要なタスクにおいて、何の情報がいづ統合されるのかの一例を示すと共に、そのような研究するための研究手法として重要な意義を持っている。さらにこのタスクは学習としての側面も持っている。理論研究に関してはまだ十分に進展していないものの、実験研究面で大きな成果があり、国際会議においても発表を行うなどの進展を得ることができた。

2018 年度の研究成果

複数のイベント情報の統合においては、それらの時間的な関係が重要となる。特に、脳内で情報を保持しておかなければならないようなタスクにおいては、時間とともに情報が劣化することが予測されるということが本研究計画の一つの着眼点となっている。時間を計測するためにはその起点となる時間タイミングが必要となるが、脳内情報統合プロセスにおいて、何が起点となって時間が計測されているのかということは十分明らかになってはいない。

そこで 2018 年度においては、特に理論的観点から、時間の起点が情報統合にもたらす影響についての研究を行った。通常、2 つの音イベント間の時間差の知覚は、時間差が短いほど精度が良く、長くなるほど精度が悪くなっていくという性質も持つ (Weber 則)。本研究においては、特に 3 つ以上の音イベントが存在する場合に、時間を計測する起点のとり方によって、そのうちの 2 イベント間の時間差の知覚が通常とは逆に短いほど精度が悪くなることもありうることを理論的に示した。いまだ仮説の段階ではあるものの、通常予測される時間知覚の性質とは逆の性質を予測する結果となっている。本研究は音の知覚についての研究であったが、このモデルは多感覚統合にも容易に拡張可能なモデルとなっている。

2018 年度においてはこれまでにを行った研究に関する対外発表も複数件行った。また、代表者が本研究期間中に複数の所属変更を行い、研究を行う環境が大きく変化したため、補助機関の延長を申請し研究を引き続き行うこととした。

2019 年度の研究成果

視覚刺激と聴覚刺激を統合することが有益であるのは、それらが同じ原因に関する情報を共有しているからである。視聴覚統合の際に視聴覚刺激が同一源から来ているかどうかを推定する causal inference モデルが、代表者の業績も含め、近年注目を集めてきている。しかし結合する対象が複数ある場合にどのような結合が行われるのかは十分明らかになっていない。そこで 2019 年度においては、本研究計画のテーマである視聴覚統合の時間的性質と推定における情報統合対象に関する性質を解明するため、複数の情報統合対象があるときの情報統合に関する性質の理論的研究を行った。

聴覚刺激が視覚刺激と同時であると感じる「同時性の窓」が、視覚刺激をもう一つ追加することで、その追加刺激の聴覚刺激に対する時間的タイミングとは逆の方向にずれる現象が報告されている。本研究では、この状況下での視聴覚統合のベイズモデルの提案を行った。聴覚刺激と視覚刺激の刺激源に関する因果的関係について 3 つの異なる可能性を考え、それぞれに対応するベイズ統合モデルを導出し、モデルの挙動を解析・比較を行った。その結果、どのモデルも既存の実験結果を精度よく説明できるが、それぞれのモデルが同時性の窓のずれに対して与える解釈が大きく異なることを示した。さらに、これらのモデルを区別するための実験提案を行った。この結果は、理論をベースにして現象に異なる解釈を与え、それを区別するための実験手法を提案するという好例であり、本研究計画にも合致する研究となっている。現在、本結果に関する論文を投稿中である。

以上のように、本研究全体を通して、代表者の数理的バックグラウンドを生かしたモデル化と実験の融合的な研究により、人間の多感覚統合機構に関する時間的性質と推定対象に関して成果を得た。学習に関する成果は当初の計画に比べてそれほど得られなかったものの、特に多感覚統合の時間的な性質に関しては当初計画よりも多面的な視点から研究を遂行し、成果を得ることができた。特に数理的な研究は一般性をもつため、様々な種類の情報統合に適用可能な研究パラダ

イムとなる。これらの研究成果は、多感覚統合機構の解明につながるのももちろんのことながら、同時に脳内での情報表現・保持の仕組みに関する重要な研究ともなる。実験的観点からは多岐にわたる内容であるが、モデルの観点からはいずれも、事前分布や尤度関数は何によって規定されるのかに関する示唆を与える研究内容となっていて、お互いに密接な関係にある。これらの実験及び数理モデルに関する成果をより発展させることで、多感覚統合の解明に向けた新たな視点による将来的な展開を期待することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 澤井賢一, 佐藤好幸	4. 巻 36
2. 論文標題 時間順序による時間知覚の非対称性を説明するベイズモデル	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告 2018-MUS-119	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyuki Sato, Kaori Sakai, Eriko Aiba, and Yutaka Sakaguchi	4. 巻 33
2. 論文標題 Characteristics of simultaneous tapping by different hands/feet	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics	6. 最初と最後の頁 312-317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐藤好幸	4. 巻 12
2. 論文標題 多感覚統合の時空間特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告 2017-MUS-115	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 渡部貴行, 佐藤好幸, 佐藤俊治	4. 巻 116
2. 論文標題 周辺視野における視覚情報処理に聴覚刺激が及ぼす影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水梨勇河, 佐藤好幸, 饗庭絵里子, 阪口豊	4. 巻 116
2. 論文標題 マカーク効果の刺激依存性に関する検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 99-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 酒井香里, 佐藤好幸, 饗庭絵里子, 阪口豊	4. 巻 116
2. 論文標題 自発的な同時運動の特性と制御メカニズム ~ 同時運動の時間精度と同時性知覚の関係 ~	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 67-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤好幸	4. 巻 46
2. 論文標題 視聴覚統合のベイズモデルが示す動的な統合時間窓	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本音響学会聴覚研究会資料	6. 最初と最後の頁 521-524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 澤井賢一, 佐藤好幸
2. 発表標題 時間間隔知覚のベイズモデルから予測されるWeber則逆転現象
3. 学会等名 日本時間学会 第10回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澤井賢一, 佐藤好幸
2. 発表標題 時間順序による時間知覚の非対称性を説明するベイズモデル
3. 学会等名 情報処理学会 第119回音楽情報科学研究発表会 (音学シンポジウム2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤好幸, 渡部貴行, 佐藤俊治
2. 発表標題 聴覚刺激による視覚刺激検出促進効果の水平視野全体における性質
3. 学会等名 第10回多感覚研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤好幸
2. 発表標題 多感覚統合の時空間特性
3. 学会等名 第115回 音楽情報科学研究会 (音学シンポジウム) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki Sato, Kaori Sakai, Eriko Aiba, and Yutaka Sakaguchi
2. 発表標題 Characteristics of simultaneous tapping by different hands/feet
3. 学会等名 Fechner Day 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiyuki Sato, Takayuki Watanabe, and Shunji Satoh
2. 発表標題 Auditory facilitation of visual speeded detection in the entire visual field
3. 学会等名 40th European Conference on Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡部貴行, 佐藤好幸, 佐藤俊治
2. 発表標題 周辺視野における視覚情報処理に聴覚刺激が及ぼす影響
3. 学会等名 ヒューマン情報処理研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水梨勇河, 佐藤好幸, 饗庭絵里子, 阪口豊
2. 発表標題 マガーク効果の刺激依存性に関する検討
3. 学会等名 ヒューマン情報処理研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒井香里, 佐藤好幸, 饗庭絵里子, 阪口豊
2. 発表標題 自発的な同時運動の特性と制御メカニズム ~ 同時運動の時間精度と同時性知覚の関係 ~
3. 学会等名 ヒューマン情報処理研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤好幸
2. 発表標題 視聴覚統合のベイズモデルが示す動的な統合時間窓
3. 学会等名 日本音響学会聴覚研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----