

空間的・意味的整合性を伴う自動車室内視聴覚情報 提示デザインのための研究

中, 貴一

<https://hdl.handle.net/2324/6787623>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

空間的・意味的整合性を伴う
自動車室内視聴覚情報提示デザインのための研究

*Research on Design Application of Audiovisual in-Vehicle
Information Presentation with Spatial and Semantic Consistency*

中 貴一

Kiichi Naka

2023年3月

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.1.1 日本における自動車に関する社会状況	1
1.1.2 安心・安全な運転体験のための情報提示	1
1.1.3 視聴覚情報提示をいかにしてデザインするか	2
1.1.4 視聴覚情報の空間的・意味的整合性を保つためのデザイン上の課題	3
1.2 本論文の構成	4
第2章 視聴覚情報の配置はどの程度揃えるべきか？	6
2.1 はじめに	6
2.2 実験	8
2.2.1 実験システム	8
2.2.2 実験参加者	9
2.2.3 手続き	9
音源定位の精度確認	9
視覚探索課題とトラッキング課題	10
2.3 結果	11
2.3.1 音源定位の精度確認	11
2.3.2 指数正規分布による反応時間の分析	12
2.4 考察	17
2.5 第2章のまとめ	20
第3章 ドライビングシミュレータを用いた検証	21
3.1 背景	21
3.2 実験2：聴覚情報を視覚情報方向から提示することの効果	22
3.2.1 実験システム	22
ドライビングシミュレータ部	23
視覚刺激提示部	24
聴覚刺激提示部	25
3.2.2 実験参加者	26
3.2.3 手続き	26
音源定位の精度確認	26
自動車運転中の視覚探索	26
3.2.4 結果	27

	音源定位の精度	27
	視覚探索課題における誤答率	27
	メンタルワークロード	28
	視線	29
	運転課題	30
3.2.5	考察	32
3.2.6	実験2のまとめ	33
3.3	実験3：聴覚刺激の音源定位が困難な場合	34
3.3.1	実験システム	34
3.3.2	実験参加者	34
3.3.3	手続き	35
	音源定位の精度確認	35
	自動車運転中の視覚探索	35
3.3.4	結果	35
	音源定位の精度	35
	視覚探索課題における誤答率	35
	メンタルワークロード	35
	視線	36
	運転課題	37
3.3.5	考察	38
3.3.6	実験3のまとめ	39
3.4	実験4：視聴覚刺激の配置がずれている場合の効果	40
3.4.1	実験システム	40
	ドライビングシミュレータ部	40
	視聴覚刺激提示部	40
3.4.2	実験参加者	42
3.4.3	手続き	43
	音源定位の精度確認	43
	自動車運転中の視覚探索	43
3.4.4	結果	43
	音源定位の精度	44
	視覚探索課題における反応速度	44
	視覚探索課題における誤答率	44
	メンタルワークロードおよび視覚探索課題の主観的難易度	45
	運転課題	46
3.4.5	考察	47
3.4.6	実験4のまとめ	48
3.5	第3章のまとめ	48

第4章 視聴覚情報の緊急感は揃えるべきか？	50
4.1 はじめに	50
4.2 実験5：緊急感の視聴覚クロスモーダル対応	51
4.2.1 緊急感に基づく刺激の選定	51
4.2.2 手続き	55
4.2.3 実験参加者	56
4.2.4 結果	56
反応時間の分析	56
誤答の分析	57
4.2.5 考察	58
4.2.6 実験5のまとめ	59
4.3 実験6：知覚負荷の影響	59
4.3.1 結果	59
反応時間の分析	59
誤答の分析	60
4.3.2 考察	61
4.4 第4章のまとめ	62
第5章 総括	63
5.1 研究のまとめ	63
5.2 今後の課題と展望	66
参考文献	67
関連論文・学会発表	80
謝辞	81
付録	i

第1章 序論

1.1 はじめに

1.1.1 日本における自動車に関する社会状況

自動車は人々の移動を支える重要な産業製品である。日本における自動車の保有台数は、普通自動車や大型車、二輪車などを含めると、2020年時点で8000万台を超え(国土交通省, 2022), 2022年における運転免許保有者数も8000万人を超える(警察庁, 2022b)。近年は内閣府が示す第5期科学技術基本計画で示されている通り、自動運転車の導入が意欲的に進められている(内閣府, 2022a)。自動運転車の登場により、人と自動車の関わり方が変化していくと考えられるが、人が自動車を運転する機会は今後しばらく残り続けるだろう。

自動車は人々の生活を支えているが、同時に交通事故を引き起こす危険性を持つ。日本における交通事故発生件数は近年減少傾向にあるものの、2021年は30万件を超える交通事故が発生し、2000人を超える死者が出ている(警察庁, 2022a)。交通事故を減らしていくためにも、人々に安心・安全な運転体験を提供することは長年継続した課題である。

1.1.2 安心・安全な運転体験のための情報提示

人々に安心・安全な運転体験を提供するために、自動車室内ではドライバーに様々な情報が提示される。安全に関するものとして、車両周辺の他の車両や歩行人などの障害物を検知し、正面インストルメントパネルやルームミラー、左右ドアミラーなどに警報を表示するものがある(自動車技術会, 2016)。安全に関するもの以外でも、カーナビゲーションシステムによる道案内や、スマートフォンと連携してメールなどの通知もドライバーに送られる。ドライバーはこれらの、様々な方向から提示される様々な情報を、素早く正確に理解できなければならない。

Ho & Spence (2008)はドライバの情報処理プロセスを、Fig.1.1のとおり(1)情報の知覚、(2)行動決定/注意のプロセス、(3)運動反応の3段階に分割して捉えている。運転中に提示された情報を、ドライバは素早く正確に、知覚し、理解し、行動に移すことが重要である。この情報処理プロセスの中でも、情報を知覚して理解する認知のプロセスに障害が生まれるような情報提示は、事故リスクを高めてしまう。

情報処理の遅れが事故リスクを高める事例として、Horrey & Wickens (2006)は、自動車運転中の通話は事故リスクを高めることを指摘している。興味深いことは通話形式が、携帯電話を握っている場合とハンズフリー通話の場合で、事故リスクに違いがないことである(Mohebbi et al., 2009)。このことは、運転中の通話が事故リスクを高めるのは、身体的制約よりも認知的制約によるところが大きいことを意味する。たとえドライバーの安全のため、もしくは運転体験を高めるために、周囲の危険や道案内などの情報を伝えようとしても、その

情報が理解しにくいものであれば、かえって事故リスクを高めてしまう危険性がある。ドライバーに何らかの情報を伝える場合は、素早く正確に理解できるようなデザインを心がけることが必須である。

自動車室内での情報提示では、視覚情報のみや聴覚情報のみといったユニモーダルな情報提示よりも、視覚・聴覚など複数のモダリティを組み合わせた情報提示が好まれる傾向にある (Jakus et al., 2015)。視覚情報は詳細な情報を表示できる利点を持つが、自動車運転中はドライバーの視線が正面方向に奪われるため、視覚情報が提示されたタイミングを捉えにくい。一方聴覚情報は、ドライバーの視線によらず提示されたタイミングを理解できる。視覚情報と聴覚情報を組み合わせることにより、情報が提示されたタイミングを聴覚情報で知覚し、その内容を視覚情報で理解できる。各モダリティの利点を活かした情報提示デザインが重要となる。

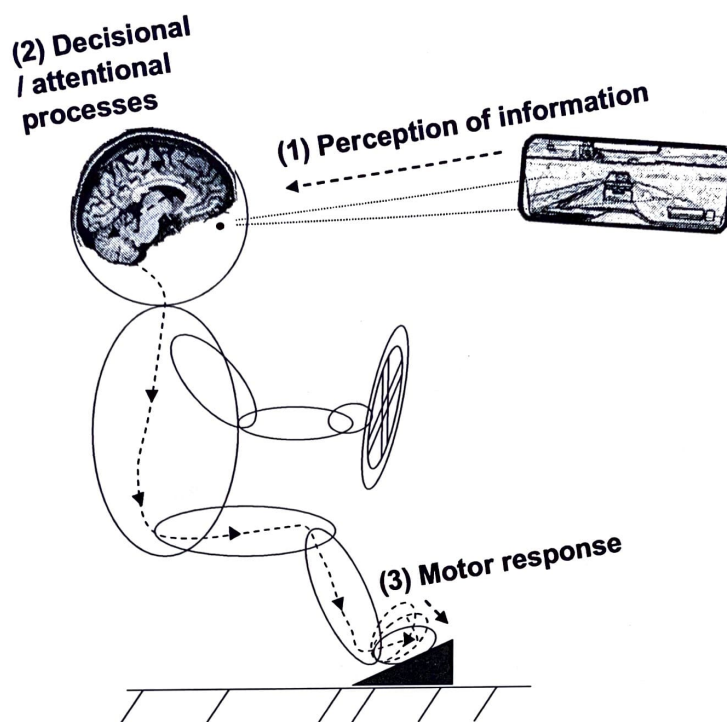


Fig. 1.1: Schematic diagram of information processing of driver(Ho & Spence, 2008).

1.1.3 視聴覚情報提示をいかにしてデザインするか

自動車運転中の情報理解は主に視覚によって行われる (Sivak, 1996)。その点を考慮すると、視聴覚情報提示デザインを考える場合は、“聴覚情報によりいかにして視覚情報の理解を助けるか”という観点で議論することが有効であると考えられる。

Catchpole et al. (2004) は情報提示デザインにおいては、情報が何を意味しているか、情報がどの場所を示しているか、情報がどのタイミングでのイベントを示しているかの3つの要素が重要であるとしている。

例えば Patterson (1990) は聴覚情報により異なる情報を提示する場合、それぞれが明確な時間・周波数パターンを持つ必要があるとしている。情報の違いをはっきりと識別できるようにすることで、それぞれの情報が何を意味しているかを学習することが容易になる。

情報がどの場所を示しているかも適切に表現する必要がある。例えば自動車室内でも、ドアが閉まっていない場所やシートベルトが占められていない座席をドライバーに伝える場合はどの場所が該当しているかが伝わった方がよく、車両に接近する危険があるならばどの方向から危険が迫っているかが伝わった方がよい (e.g. Liu & Zhuang, 2012; Wang et al., 2022)。

提示された情報が、どのタイミングのイベントを示しているかも適切に伝わらなければならない。カーナビゲーションシステムなどは「2つ目の交差点を右折」を求めるなど、情報が提示されてから実際に行動を起こすまでに時間的な余裕がある一方で、衝突回避や車線変更時の後続接近車両を伝える場合は、情報が提示されてから即座の情報判断、行動が求められる。情報に対してどのタイミングで対応すべきかは、情報が持つ緊急感 (perceived urgency) をコントロールしてデザインすれば良いとされる (e.g. Stanton & Edworthy, 1999)。危険が迫り即座の行動を促す必要がある場合は緊急感の高い情報を提示することで、ドライバーが何が起きているのかを理解して即座に行動することを助けることができるだろう。

また Proctor & Vu (2015) は、提示される情報と情報により伝えられる内容について、空間的・意味的な整合性が保たれるべきとする。ドライバーに右側へ注意を向けてほしいときは、情報提示により自然に右方向へと注意が向けられ、不要な不安を煽る必要のない場面では、情報提示があったとしても安心感を与えるようなものでなければならないというものである。

視聴覚情報提示のデザインにおいても、Catchpole et al. (2004) や Proctor & Vu (2015) の主張が参考になるだろう。まず何よりも、異なるディスプレイを通して提示される視聴覚情報が、1つの情報を意味すると理解されなければならない。視聴覚情報が空間的に全く離れた場所から提示されれば、視聴覚情報の適切な対応づけが得られず、視聴覚情報が単一な情報を示しているとユーザーが判断しない可能性がある。また、提示される視聴覚情報が近い意味性をユーザーに知覚されることも重要である。視聴覚情報が全く異なる緊急感を持つ場合、それぞれが異なる事象を意味しているとも解釈されかねない。ユーザーが情報の意味を適切に理解できるよう、従来より単一モダリティでの緊急感知覚に関する研究が行われてきたが、視聴覚情報提示を考える場合はやはり近い緊急感を持つことが望ましいだろう。

空間的・意味的側面のいずれにおいても、複数モダリティを跨いで「合っている」という感覚はユーザーの評価を高めると考えられている (e.g. 岩宮, 2014; Spence, 2021)。視聴覚情報提示においても、その空間的配置や意味的側面としての緊急感が整合していることが、わかりやすい情報提示として機能的側面の価値を高めることは期待できる。それに加え、空間的・意味的整合性の高い視聴覚情報提示を目指すことは、ユーザーの製品に対する純粋な評価を高めることにもつながると期待できる。そのためにも、視聴覚情報提示の空間的・意味的整合性を保つため、相互作用やその効果について既往研究をまとめることで残存する課題を示し、それを解決することは意義深い。

1.1.4 視聴覚情報の空間的・意味的整合性を保つためのデザイン上の課題

以上より本研究では視聴覚情報提示について、視聴覚情報の空間的配置と、意味的側面として緊急感の相互作用に注目する。視聴覚情報提示デザインにおいて、空間的配置と緊

急感を統一してデザインするとして、次の課題が残る。それぞれの課題については概略のみに言及し、詳細は第2章以降で述べる。

空間的配置の整合性の必要性を支持する知見として、空間のある地点に手がかりとなる刺激を提示することにより、付近の視覚探索を助ける空間手がかり効果がある。空間手がかり効果は視聴覚など異なるモダリティの間でも強固に表れるため (Spence & Driver, 2004), 聴覚情報を視覚情報方向から提示することは、視覚情報を素早く視認することを助けると考えられる。その効果を自動車室内に実現するためには、“どの程度視聴覚情報を近づければよいか”を示したデザイン指針があることが望ましい。しかしながら、作業負荷環境下において視聴覚間の空間手がかり効果を得るには、視聴覚刺激がどの程度近付いていけば良いかについては検討の余地がある。

緊急感については、視覚・聴覚・触覚において、単一モダリティにおける緊急感知覚の研究がこれまでに多く行われてきた (e.g. Stanton & Edworthy, 1999; Baldwin & Lewis, 2014)。しかしながら、複数モダリティを考慮した、クロスモーダルな相互作用についての検討は非常に少ない。緊急感知覚を軸として考えた場合に、そもそも視聴覚感でクロスモーダルな相互作用が現れるかどうかについて議論が必要だろう。

また自動車運転中の情報確認は、常に運転作業へと注意資源が奪われる知覚負荷環境下にて行われる。クロスモーダルな知覚・認知にはトップダウン的な注意による調節が入るため (e.g. Santangelo et al., 2006), 注意資源が減少することは、空間手がかり効果などクロスモーダルな効果へ影響を及ぼす。前述の空間的配置、緊急感のクロスモーダルな相互作用についても、なんらかの作業を与えて注意資源が減少したような状態で検討する必要がある。

1.2 本論文の構成

第1章では日本における自動車の利用状況を延べ、自動車室内での視聴覚情報提示について、空間的配置と緊急感の整合性を保ったデザインを目指す上での課題についてその概略を述べた。第2章から第4章にかけては、空間的配置と緊急感の整合性に関するテーマをそれぞれ設ける。いずれの章でも、まずは各章で取り扱う問題に関する既往研究を詳述する。既往研究を整理することで自動車室内の視聴覚情報提示デザインのために残された課題を提示し、それを解決するための実験を行ったうえで、自動車室内視聴覚情報提示デザインに関する議論を行う。

第2章では視聴覚情報の空間的整合性に関して、知覚負荷環境下における素早い視覚情報の探索を行うために求められる、視聴覚情報間の相対角度差を検討する。まず、視覚探索における聴覚刺激などのクロスモーダルな刺激を用いることの空間手がかり効果に関する研究について概観を述べる。その後、トラッキング課題と視覚探索課題による二重課題実験を行い、視覚刺激と聴覚刺激の出現位置ごとの組み合わせにおける反応の違いを、反応時間を評価指標として調べる。知覚負荷環境下において素早い視覚探索を行うために、聴覚刺激をどの程度近づけなければならないかを、反応時間をもとに議論する。

第3章では視聴覚情報の空間的整合性に関して、自動車運転中の視覚情報確認において聴覚情報の配置を揃えることの効果、ドライビングシミュレータを用いて調べる。まず、自動車運転中の情報提示について、空間的情報を提示することの効果について調べた研究

の概観を述べる。その後、ドライビングシミュレータによる運転課題と視覚探索による二重課題を実施し、視覚情報方向から聴覚情報を提示することの効果調べる。また第2章での結果と比較し、自動車運転中の視覚情報確認において聴覚情報をどの程度近づけなければならないかを、運転パフォーマンス、視線移動、メンタルワークロードなど反応時間以外の評価指標も含めて議論する。

第4章では視聴覚情報が持つ意味的整合性に関して、情報提示デザインで重要な要素となる緊急感に着目して調べる。まず視聴覚刺激の整合性に関する研究を代表する事例として、視聴覚間クロスモーダル対応に関する研究の概観を述べる。その後、異なる緊急感を持つ視聴覚刺激を組み合わせたプライミング課題により、緊急感による視聴覚間クロスモーダル対応が現れるかを調べる。プライミング課題では聴覚刺激をプライム刺激、視覚刺激をターゲット刺激とした実験を行い、緊急感の整合性が視覚刺激の知覚を促進するかという観点からも議論する。またトラッキング課題とプライミング課題を同時に行い、知覚負荷環境下における緊急感の整合性の影響も調べる。

最後に第5章では、第2章から第4章までの研究を総括し、空間的・意味的整合性を保った自動車室内の視聴覚情報提示デザインに関する議論を行い、それぞれの整合性がどのようにして製品価値向上に貢献するかを述べる。また、残された課題について言及する。

本研究では6つの実験を実施した。第2章では実験1として、作業負荷環境下での視覚探索促進に求められる視聴覚刺激間の相対角度差の検討を行う。第3章では実験2として、自動車運転中の視覚情報確認における聴覚情報による方向情報提示の効果、視覚探索課題における反応時間、運転パフォーマンス、視線移動、メンタルワークロードから調べる。同じく第3章における実験3として、聴覚情報の音源定位が困難な場合の方向情報提示の効果調べる。同じく第3章における実験4として、視聴覚情報の配置が左右に20°ずれている場合の方向情報提示の効果調べる。第4章では実験5として、緊急感による視聴覚間のクロスモーダルな相互作用を調べるために、基礎的な実験室実験であるプライミング課題を通して、緊急感によるクロスモーダル対応を調べる。同じく第4章における実験6として、緊急感のクロスモーダル対応による反応促進が、自動車運転中のように継続的な作業により注意資源が減少した状態でも現れるかを検討するために、実験5のプライミング課題と同時にトラッキング課題を行った場合の効果調べる。

第2章 視聴覚情報の配置はどの程度揃えるべきか？

2.1 はじめに

ある視覚刺激を探索する時、視覚刺激が出現する場所付近から、近いタイミングで手がかりを提示することで、視覚探索を促進できる。これを空間手がかり効果 (spatial cuing effect) という。手がかりが聴覚・触覚など、視覚以外のモダリティへの刺激である場合は特にクロスモーダル空間手がかり効果 (crossmodal spatial cuing effect) といい、多くの研究がされてきた (Spence et al., 1998, 2000; Driver & Spence, 1998; Spence & Driver, 2004; Santangelo et al., 2006)。

クロスモーダル空間手がかり効果が得られる理由として、多感覚統合による反応促進 (multisensory integration) と注意 (attention) の効果が考えられている (Spence & Driver, 2004)。多感覚統合による反応促進は、視覚への入力と空間的・時間的に一致した場所・タイミングで聴覚など異なるモダリティへ刺激を入力すると、ユニモーダルな刺激と比較してその反応が増強されるものである (Stein et al., 1989; Stein & Stanford, 2008)。一方注意による効果は、手がかりが提示された方向に空間的注意 (spatial attention) が働くことで、近くに出現するターゲットへの反応が促進されるというものである (Posner et al., 1980; Posner, 1980)。

注意による効果の中でも、非言語の聴覚刺激により視覚刺激方向への注意を獲得し、視覚探索を促進することを、特に外発的視聴覚クロスモーダル空間手掛かり効果 (audio-visual exogenous crossmodal spatial cuing effect) という (Lee & Spence, 2017)。その中でも、実験参加者の正面領域を左右に分割し、視聴覚刺激が左右で異なる領域にある場合よりも、同側にある場合で視覚探索が促進されることを、半球間手がかり効果 (between-hemifield cuing effect) という (Spence & Driver, 1997)。手がかりによって引き寄せられる空間的注意は勾配モデル (gradient model of spatial attention) に基づき、引き寄せられた点を最大として、距離が離れるほど注意が減少するとされる (e.g. Mondor & Zatorre, 1995; Shulman et al., 1985; Downing, 1988; Teder-Sälejärvi & Hillyard, 1998; Kennett & Driver, 2014; Mock et al., 2015)。そのため、視聴覚刺激が空間的に一致した場合に最も探索が促進されると考えられ、左右同一半球内で視聴覚刺激が異なる位置にある場合よりも同じ位置にある場合で視覚探索が促進されることを、半球内手がかり効果 (within-hemifield cuing effect) という (Driver & Spence, 1998; Schmitt et al., 2001; Spence & Driver, 2004)。

しかしながら Lee & Spence (2017) は、視聴覚の半球内手がかり効果を明確に示す実験結果が、半球間手がかり効果と比較して不足していることを指摘する。Lee & Spence (2017) が行った実験では、ある方向から聴覚刺激が提示された場合の視覚探索速度を、視覚刺激位置ごとで比較された。その結果、聴覚刺激と左右で同じ領域にある視覚刺激への反応が促進される半球間手掛かり効果は強く支持されたが、半球内での手がかり効果は支持されず、

聴覚刺激の位置によらず常に内側の視覚刺激への反応が、外側の視覚刺激よりも速い結果となった。

この結果は、視覚探索において、中心視野付近の視覚探索が周辺視野に比較して速くなる、偏心度効果 (eccentricity effect) が表れている。ヒトの視覚は、中心窩付近に多くの神経細胞が集まるため、中心窩が寄与する中心視野付近の空間解像度が最も高く、周辺視野に外れるほど空間解像度は低下する。そのため視覚刺激が外側に配置されるほど、探索が遅くなる (Carrasco et al., 1995; Carrasco & Frieder, 1997; Wolfe et al., 1998)。視聴覚クロスモーダル空間手がかり効果に関する既往研究の多くは、視覚刺激の位置ごとに反応を比較しているため (Schmitt et al., 2001; Spence & Driver, 2004; Lee & Spence, 2017), これらの結果には偏心度効果との交絡が表れていると考えられる。偏心度効果との交絡を回避するためにも、ある1ヶ所の視覚刺激への反応について、聴覚刺激の位置を変化させることにより、どのように視覚探索への影響が表れるかを調べる必要がある。この点は Lee & Spence (2017) も指摘している。

ある1点の視覚刺激の探索を聴覚刺激の位置がどのように影響を与えるか、すなわち、ある点の視覚探索を促進するためにどの程度聴覚刺激を近づければ良いかという疑問について、Gray et al. (2009) がマルチモーダルユーザーインターフェースデザインへの応用を視野に入れた検討を行っている。しかしながら検証した領域は、正面を中心として左右に18°のみと、やや狭い領域での検証に留まっている。自動車室内では、右側が運転席となる場合、正面から左方向に約40°~50°離れたドアミラー位置に視認を求める場合もある。自動車室内に視聴覚ディスプレイを設置する場合、コスト面での制約もあり、必ずしもスピーカを視覚ディスプレイ位置に設置できるとは限らない。マルチモーダルユーザーインターフェースデザインの指針を示すためには、視覚探索促進を引き起こす聴覚ディスプレイ位置について、より広い領域での検証が必要である。

また、視聴覚間のクロスモーダル空間手がかり効果を調べた研究の多くは、マルチモーダルユーザーインターフェースデザインへの応用を考えた Gray et al. (2009) を含め、聴覚刺激が100 ms 秒以上先行して提示された後に視覚刺激が提示される実験デザインとなっている (Lee & Spence, 2015, 2017)。これは視聴覚刺激間に時間間隔を設けることで、視聴覚の多感覚統合が引き起こされる時間窓をはずれ、注意による効果へ注目できるためである (Stoep et al., 2015a)。しかしながら、自動車室内での視聴覚情報提示を考えた場合、視聴覚情報は同時に提示されると考えるのが妥当である。視聴覚刺激が同時に提示された場合も、その原因が多感覚統合、注意、もしくは両方であれ、空間手がかり効果は起こりうる (Spence & Driver, 2004; Stoep et al., 2015b)。マルチモーダルユーザーインターフェースデザインへの応用を考えるならば、視聴覚刺激が同時に提示された場合に視覚探索が促進される視聴覚ディスプレイ間距離を検討するべきである。

加えて、自動車などでの応用を検討する際は、知覚負荷の影響を考慮することが望ましい (Suied et al., 2008)。空間手がかり効果は、必ずしも自動的に発生するものではないとされ、視覚探索に対するトップダウン的な注意の総量により調節される (Santangelo & Spence, 2006, 2008, see also Schreij et al., 2008)。知覚・認知的負担がある環境下では視覚探索に分配される注意資源の量が減少するため (Wickens, 2008), クロスモーダル空間手がかり効果が弱まる (Santangelo & Spence, 2007; Santangelo et al., 2007, 2008a,b; Ho et al., 2009)。ドライバーは常

に運転作業へと注意資源が奪われた状態であり、その環境下において情報確認を行う必要がある。従って、本実験では実験参加者へ継続的な注意を要する課題を与えた状態で検討を行う。

本章では、知覚・認知的負担を継続的に与えた状態において、視聴覚刺激が同時に提示された場合の視覚探索を促進するために求められる視聴覚ディスプレイ間の水平方向の相対角度差を調べる。実験参加者にはトラッキング課題を継続的に行った状態で、視覚探索課題を同時に行うよう求めた。視覚探索課題における反応時間を、視聴覚ディスプレイ間の相対角度差ごとに比較する。

2.2 実験

2.2.1 実験システム

実験システムのブロックダイアグラムを Fig. 2.1 に、スピーカ、LED、8 インチディスプレイの配置を Fig. 2.2 に示す。実験システムは、「視覚探索課題システム」と「トラッキング課題システム」の2つから構成される。実験システムのプログラムは、MATLAB 2021a の Psychtoolbox-3 で作成した (Brainard, 1997; Pelli, 1997; Kleiner et al., 2007)。

視覚探索課題システムに用いた PC は、Alienware m17 R4 (CPU: Intel core i9) であった。実験参加者正面を 0° とし、水平方向へ $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 60^\circ$ の位置に7つのスピーカ (Genelec 8010A) を設置した。実験参加者頭部位置とスピーカの距離は 1.1 m であった。スピーカはオーディオインターフェース (MOTU 828ES) を介して制御した。LED は各スピーカの正面に設置され、実験参加者頭部位置との距離は 1.0 m であった。実験参加者正面の LED のみ赤色で、それ以外は上下1対の白色 LED であった。白色 LED の上下間の距離は 1 cm であった。LED の輝度を輝度計 (KonicaMinolta LS-110) で測定したところ、赤色 LED は 145 cd/m^2 , 白色 LED は 245 cd/m^2 であった。実験室内の実験参加者目線高さにおける水平面照度は約 500 lx と十分な明るさを確保しており、LED によるグレアや過度な残像は生じないことを確認した。LED は Arduino Mega 2560 を介して制御した。スピーカと LED の設置高さは、実験参加者の目線高さに統一した。実験参加者の反応は、上下に2つのキーのみが並んで配置された片手キーボード (Koolertron AE-AMAG09-RDB) で取得した。聴覚刺激は、500 ms の長さで、複数の周波数成分を含み、実験参加者に不快感を与えない音色を持つものを選択した。聴覚刺激の時間波形および周波数スペクトルを Fig. 2.3 に示す。

トラッキング課題システムに用いた PC は、Zenbook 13 (CPU: Intel core i7) であった。8 インチディスプレイ (Century LCD-8000U, Resolution: $800 \times 600 \text{ pixels}$) は、実験参加者正面の LED 真下に設置し、実験参加者頭部から俯角およそ 8° の位置にあった。実験参加者の入力には、Arduino Uno R3 を介してジョイスティックにより取得した。

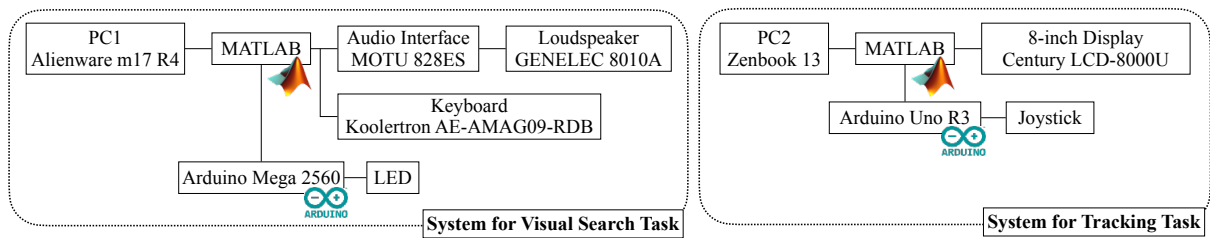


Fig. 2.1: Block diagram of the experimental set-up used in the experiment 1.

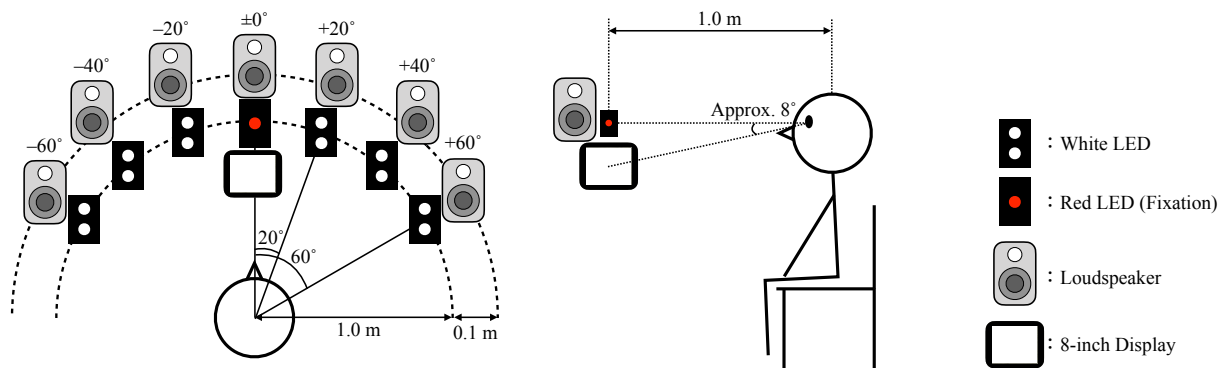


Fig. 2.2: Arrangement of LEDs, loudspeakers, and 8-inch display used in the experiment 1.

2.2.2 実験参加者

実験参加者は22名（男性15名，女性7名，22歳から26歳）であった。全ての実験参加者にオージオメータ（RION AA-77A）を用いた聴力検査を実施し，500，1000，2000，4000 Hzの平均聴力レベルが10 dB以下であることを確認した。実験参加前に実験参加者からインフォームドコンセントを得た。実験内容はヘルシンキ宣言に基づいており，九州大学大学院芸術工学研究院実験倫理委員会の承認を得た。

2.2.3 手続き

音源定位の精度確認

本実験は，視覚探索促進に求められる視聴覚刺激間の距離を調べることを目的とする。そのため，実験参加者は音源定位がある程度正確に行えることが望ましい。実験参加者の音源定位の精度を調べるために，5秒間隔でいずれかのスピーカから聴覚刺激を，ランダムな順番で10回ずつ，合計70回提示した。実験参加者には，どのスピーカから聴覚刺激が提示されたかを回答するよう求めた。水平方向に並んだ7つのスピーカについて，左端から順番に1～7の番号を付し，実験参加者は番号を回答用紙に記入することで聴覚刺激が提示されたスピーカを回答した。なお実験参加者の基本姿勢は正面を向いた状態とし，頭部運動は自由とした。

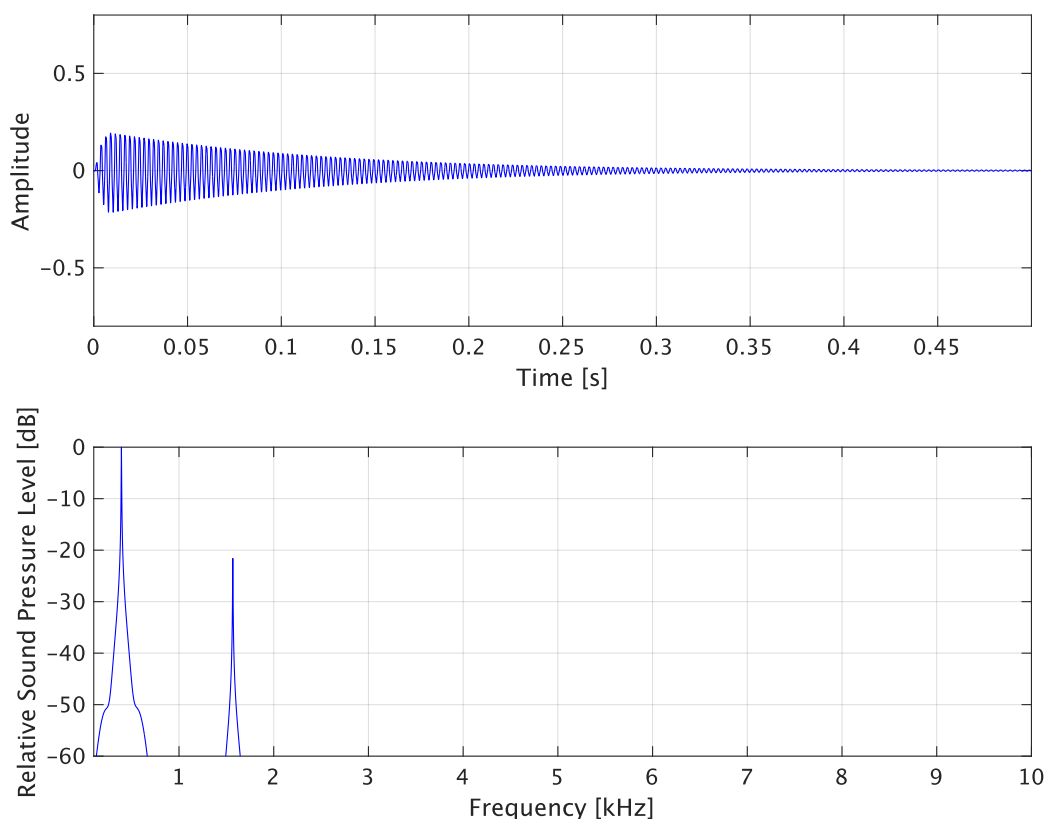


Fig. 2.3: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus used in the experiment 1.

視覚探索課題とトラッキング課題

視覚探索課題の1試行の流れを Fig. 2.4 に示す。まず、赤色 LED が 500 ms の点灯した。その後、いずれか1つの白色 LED が点灯し、それと同時に聴覚刺激がいずれか1つのスピーカから提示された。実験参加者には、上下のどちらが点灯したかを、上下に配置されたキーをできる限り素早く正確に、右手の親指で押下して回答するよう求めた。この実験では、左右方向の探索に対して、上下方向の回答を求める直交計画 (orthogonal spatial cuing paradigm) をとることにより、プライミング効果との交絡を防ぎ、聴覚刺激による空間手がかり効果を独立させる狙いがある (Spence & Driver, 1994, 1996, 1997; Ho et al., 2006b)。試行間の間隔は 2~4 秒でランダムとした。LED 点灯と、聴覚刺激が実験参加者頭部位置に到達するタイミングは、オシロスコープ (Siglent SDS1104X-E) を用いて同時となるよう調節した。

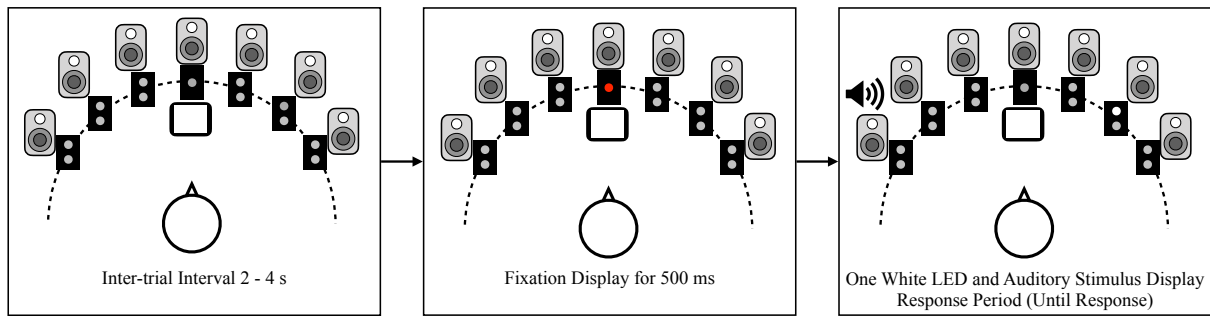


Fig. 2.4: Schematic diagram of a single trial of visual search task used in the experiment 1.

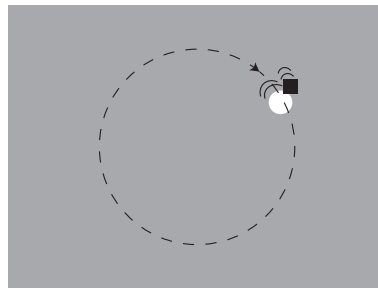


Fig. 2.5: Screenshot of tracking task used in the experiment 1. The dashed line shows the orbit of the white circle.

視覚探索課題を行っている間、実験参加者は常にトラッキング課題にも取り掛かった。トラッキング課題の画面を Fig. 2.5 に示す。トラッキング課題では、グレーの背景上に白い円が表示された。白い円は画面中央を中心として、半径 8 cm の正円軌道上を、1 周 5 秒のペースで、一定速度で周回した。実験参加者は左手でジョイスティックを用いて黒の四角形を操作し、白い円を常に追従するよう求めた。画面上各色の RGB 値は、白色 (0, 0, 0)、黒色 (255, 255, 255)、灰色 (170, 170, 170) で設定した。

実験条件は、視覚刺激提示位置 6 箇所 ($\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 60^\circ$)、聴覚刺激提示位置 7 箇所 (0° , $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 60^\circ$) を組み合わせた 42 通りであった。それぞれの組み合わせが 10 回ずつ、合計 420 試行をランダムな順番で実施した。実験中、100 試行ごとに任意の休憩を設けた。実験は九州大学 1 号館 1 階の防音室で実施した。防音室の暗騒音レベルは A 特性で 22.0 dB、実験参加者目線高さでの水平面照度は約 500 lx だった。

2.3 結果

2.3.1 音源定位の精度確認

2 名の実験参加者において、音源定位の正答率が 8 割を下回った。この 2 名は視覚探索課題においても、聴覚刺激の方向を正確に捉えられなかった可能性を考慮し、反応時間の分析対象から除外した。残る 20 名の音源定位課題の結果を Fig. 2.6 に示す。20 名の音源定位課題の平均正答率は約 92.4% (SD = 5.4) で、最小値が 81.4%、最大値が 100% であった。

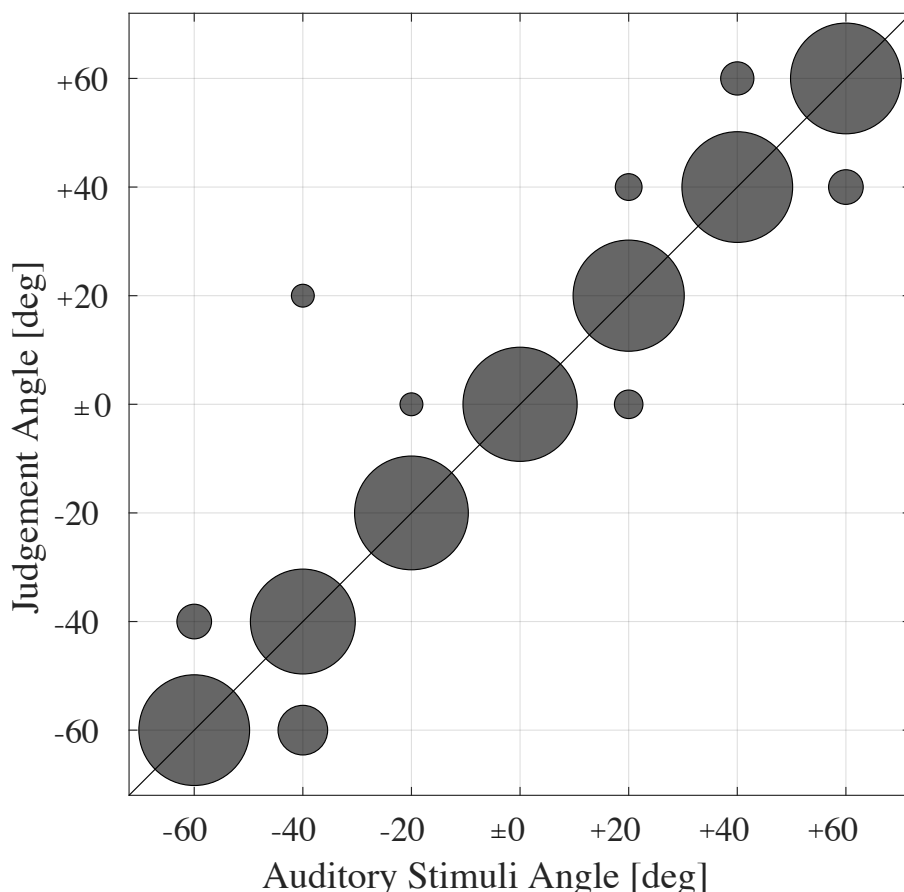


Fig. 2.6: Accuracy of sound source localization for 20 participants in the experiment 1. These participants data were submitted to analysis of response times.

2.3.2 指数正規分布による反応時間の分析

本実験は、視覚刺激6水準、聴覚刺激7水準を組み合わせた実験デザインである。一般に多重比較において、水準数の増加は検出力の低下につながる。また、反応時間の分布は正規分布ではないことが多い。正規分布でないデータに、正規分布を想定して分散分析を行うと、検出力が低下してしまう (Whelan, 2008)。

反応時間分布を対数変換することで正規分布に近似して分析をする方法もあるが、本実験では上述の問題点を回避するために、指数正規分布による分析を行う。反応時間の分布は、指数正規分布に従うことが多いとされる (Balota & Yap, 2011)。指数正規分布は、正規分布と指数分布をたたみ込んだ分布であり、3つのパラメータ μ , σ , τ を用いて次式、

$$f(\mathbf{x}|\mu, \sigma, \tau) = \frac{1}{\tau} \exp\left(\frac{\mu - x}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right) \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau}\right) \quad (2.1)$$

で確率密度関数が定義される。 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ は長さ n のデータで、 $\Phi(z)$ は相補誤差関数であり、

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^z \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (2.2)$$

で定義される。なお、 $\sigma > 0$, $\tau > 0$ である (Haj et al., 2021)。指数正規分布の平均値は $\mu + \tau$ で得られる。また τ は分布の裾形状に影響をもち、Fig. 2.7 に示すように、値が大きくなると分布の裾が伸びた形状となる。そのため指数正規分布を用いた分析では、分布形状変化の考察が可能となる (Balota & Yap, 2011)。

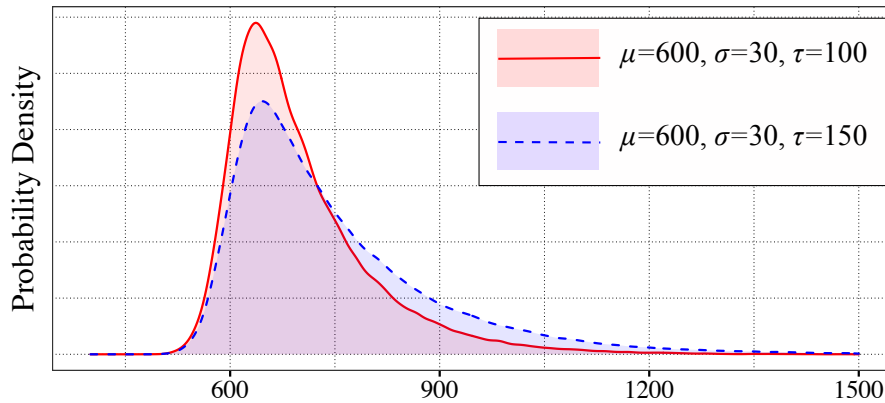


Fig. 2.7: Probability density of ex-Gaussian distribution. The parameter τ stretches the tail of the distribution.

視聴覚刺激の組み合わせごとに得られた反応時間の分布に、式(2.1), (2.2)で定義される指数正規分布を当てはめるために、パラメータ μ, σ, τ をそれぞれ推定する。Fig. 2.8 に、パラメータ推定に用いた確率モデルを示す。各パラメータについて、十分な幅を持つ一様分布を事前分布とし、反応時間データが指数正規分布から得られたと仮定して、MCMC法 (Markov chain Monte Carlo methods) により各パラメータの事後分布をベイズ推定した (Kruschke & Liddell, 2018)。なお τ は、 $\lambda = 1/\tau$ とし、 λ の値を推定することで間接的に求めた (Haj et al., 2021)。

MCMC法によるベイズ推定には R (ver. 4.0.3) と rstan パッケージ (ver. 2.21.2) を用いた。パラメータ推定開始直後は、得られた反応時間データへの自己相関関数が高いため、推定開始から 1000 サンプルはバーンイン (burn-in) として推定値から除外した。バーンイン後の 10000 サンプルをパラメータ推定値とした。パラメータ推定は初期値を変更して 4 回繰り返し、合計 40000 サンプルを推定値として得た。MCMC法による各パラメータ推定の収束判定は、Gelman-Rubin の方法 (Gelman & Rubin, 1992) により行った。全てのパラメータにおいて $\hat{R} < 1.1$ となり、十分に長いサンプルを取れていることを確認した。実際に推定されたパラメータから、指数正規分布の事後分布を作成し、反応時間分布と重ね合わせた例を Fig. 2.9 に示す。

視聴覚刺激の配置が同じ角度にある場合と比較して、聴覚刺激の配置が変化した場合の平均反応時間がどのように変化するかを調べるために、視聴覚刺激配置の角度が同じ場合 (SA [Same Angle] condition) の平均反応時間 ($\mu_{SA} + \tau_{SA}$) と、角度が異なる場合 (DA [Different Angle] condition) の平均反応時間 ($\mu_{DA} + \tau_{DA}$) について、差分 ($(\mu_{DA} + \tau_{DA}) - (\mu_{SA} + \tau_{SA})$) をそれぞれ求め、その値の正負が差分分布の中央値と同じになる確率を $p.d.$ (probability of direction, $1 \geq p.d. \geq 0.5$) として求めた (Makowski et al., 2019a,b)。 $p.d.$ は頻度論的 p 値と対応を取ると、 $p.d. = 0.950$ は $p = 0.10$, $p.d. = 0.975$ は $p = 0.05$, $p.d. = 0.995$ は $p = 0.01$ とそれ

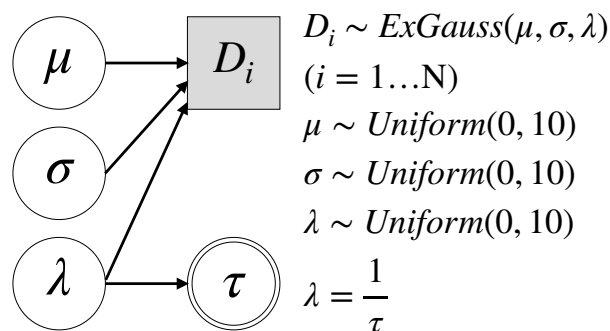


Fig. 2.8: Graphical structure of Bayesian model used in the analysis of the results of experiment 1.

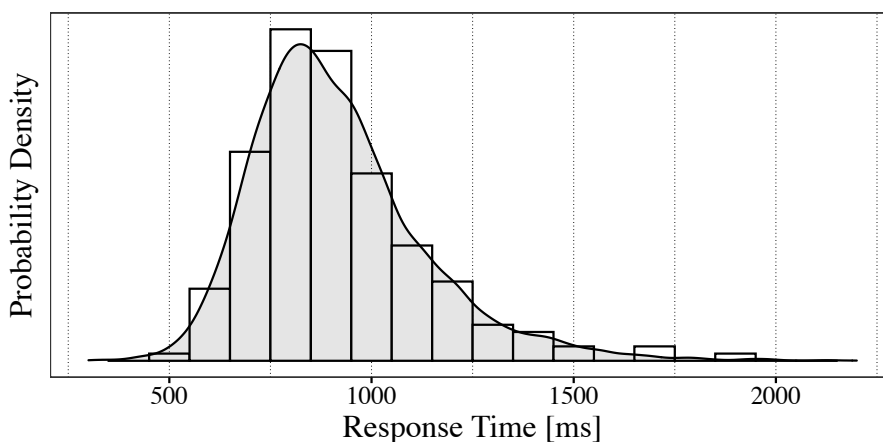


Fig. 2.9: Example of the histogram of response time obtained from the experiment 1 and estimated probability density.

それぞれ対応がある。一方近年の論文では、 $p.d. \geq 0.950$ の差を“significant”と報告する例もある (Wolpe et al., 2022)。したがって本実験では、 $p.d.$ が0.950を超えた組み合わせに注目して議論する。

Fig. 2.10に、各視聴覚刺激の配置の組み合わせにおける、平均反応時間の95%確信区間 (95% credible interval)を示す。ベイズ推定で求められる平均値の95%確信区間は、95%信頼区間 (95% confidence interval)と異なり、平均値が95%の確率で取りうる確率密度の範囲を直接的に事後分布として推定している。視聴覚刺激の配置角度が等しい場合、“SA”と記されている。各視覚刺激の設置角度にて、SA条件と6つのDA条件の平均反応時間事後分布から $p.d.$ を算出し、 $p.d. \geq 0.950$ となった組み合わせに注釈をつけている。視覚刺激の配置が -20° の時、平均反応時間の $p.d.$ が0.950を超えるSA条件とDA条件の組み合わせはなかった。視覚刺激の配置が $+20^\circ$ の時、聴覚刺激の配置が -60° のDA条件において、SA条件と比較して0.950を超える $p.d.$ で反応が遅くなった (-60° : $p.d. = 0.960$, Median = 28.6, 95%CI[-6.3, 88.3])。視覚刺激の配置が -40° の時、平均反応時間の $p.d.$ が0.950を超えるSA条件とDA条件の組み合わせはなかった。視覚刺激の配置が $+40^\circ$ の時、聴覚刺激の配置が -20° , -40° , -60° のDA条件において、SA条件と比較して0.950を超える $p.d.$ で反応が遅くなった (-20° : $p.d. = 0.994$, Median = 55.8, 95%CI[12.2, 101.7], -40° : $p.d. = 0.950$, Median = 34.5, 95%CI[-7.2, 77.9], -60° : $p.d. = 0.992$, Median = 55.8, 95%CI[10.7, 104.1])。視覚刺激の配置が -60° の時、聴覚刺激

の配置が 0° , $+20^\circ$, $+40^\circ$ の DA 条件において, SA 条件と比較して 0.950 を超える *p.d.* で反応が遅くなった (0° : *p.d.* = 0.983, Median = 54.0, 95%CI[4.3, 106.4], $+20^\circ$: *p.d.* = 0.985, Median = 34.5, 95%CI[5.9, 111.2], $+40^\circ$: *p.d.* = 0.967, Median = 47.6, 95%CI[-3.5, 100.3])。視覚刺激の配置が $+60^\circ$ の時, 聴覚刺激の配置が -20° , -40° , -60° の DA 条件において, SA 条件と比較して 0.950 を超える *p.d.* で反応が遅くなった (-20° : *p.d.* = 0.999, Median = 78.4, 95%CI[26.3, 134.7], -40° : *p.d.* = 0.950, Median = 56.3, 95%CI[8.6, 106.8], -60° : *p.d.* = 0.951, Median = 36.7, 95%CI[-6.3, 88.3])。

また, 指数正規分布における平均値を構成するパラメータである μ と τ のうち, どちらのパラメータが平均反応時間の増加に影響を及ぼしているかを調べるため, それぞれのパラメータの事後分布期待値である EAP (Expected a Posteriori) を計算した。各パラメータの EAP を Fig. 2.11 に示す。SA 条件と比較して *p.d.* が 0.950 以上の確率で平均反応時間が遅くなる DA 条件には注釈を付けている。平均反応時間が増加した DA 条件では, SA 条件と比較して, いずれも τ の値が大きくなっていることが示された。

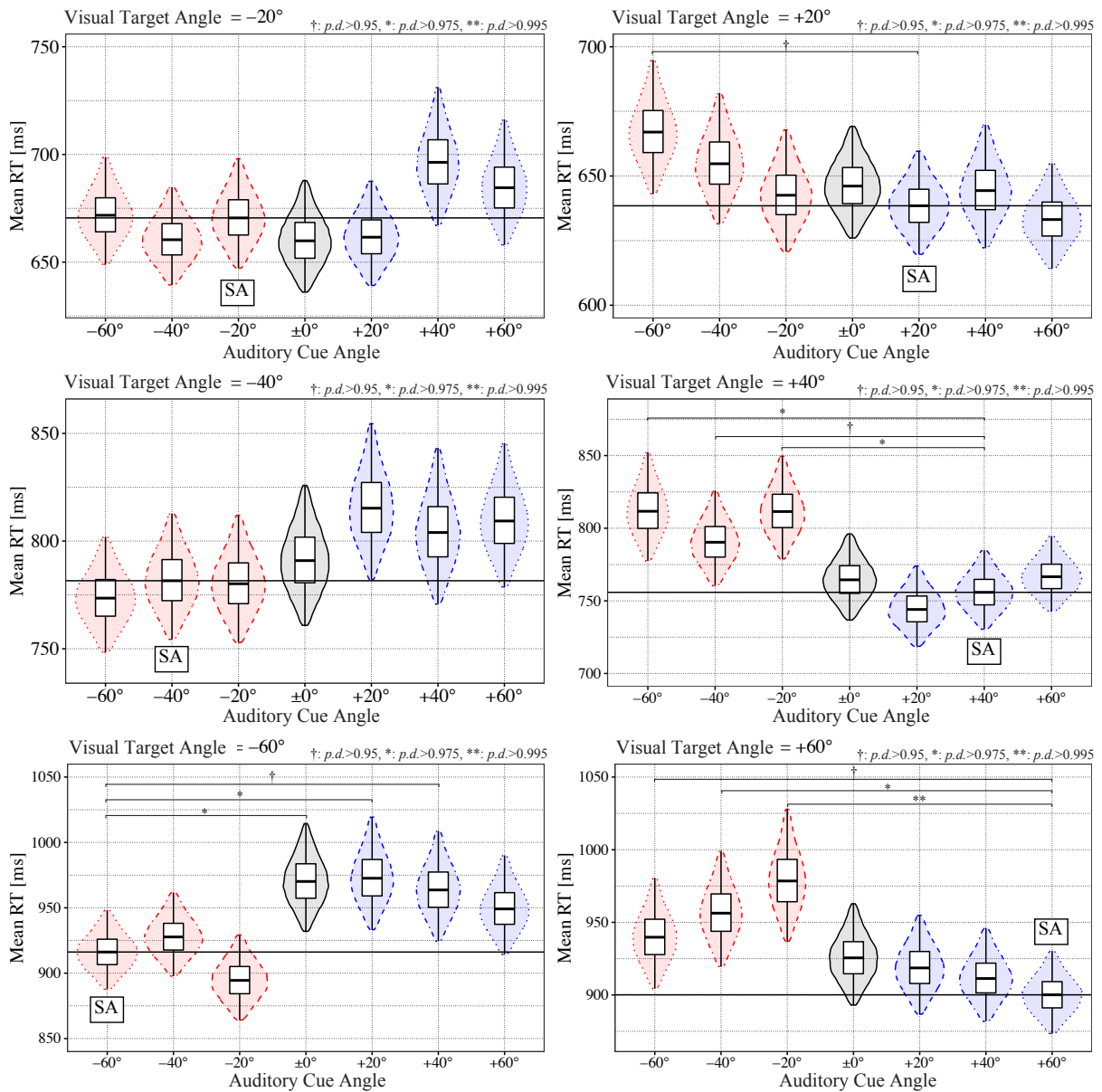


Fig. 2.10: Violin-plot and box-plot of estimated probability density of mean response time ($\mu + \tau$) of the experiment 1. Violin plot shows posterior distribution of mean response time. Upper and lower edge of plot shows 95% credible interval. Horizontal solid line in each figure shows median response time value of the condition when audio-visual arrangement were aligned (SA [Same Angle] condition).

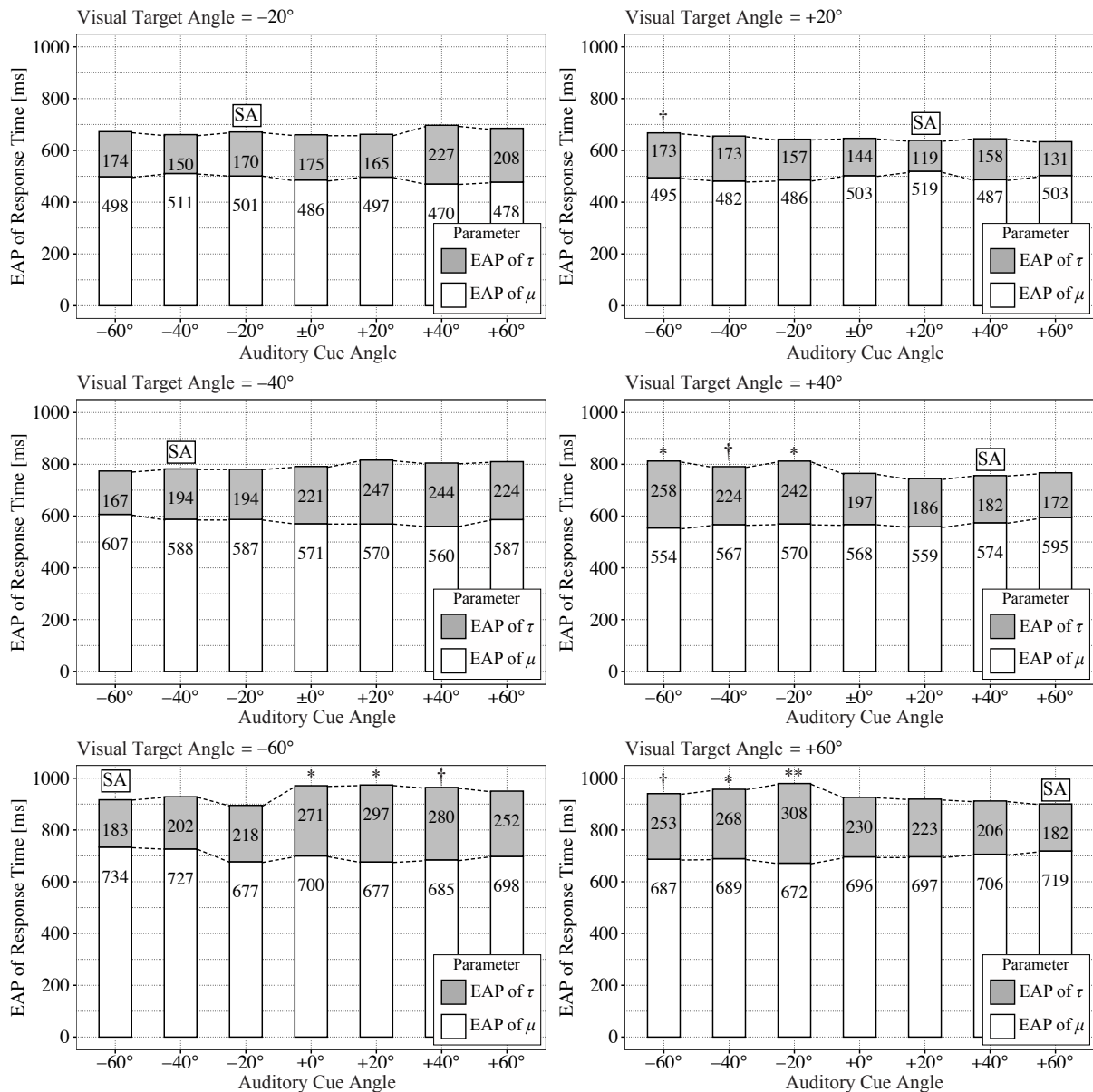


Fig. 2.11: The EAP (Expected a Posteriori) of μ and τ which describe the mean response time for each audio-visual combination of the experiment 1. The annotations show the DA condition which had the more than 0.95 of *p.d.* compared to SA condition.

2.4 考察

Gray et al. (2009) が実施した、聴覚手がかりによる空間手がかり効果を調べる実験では、実験参加者正面から左右水平方向に $\pm 18^\circ$ の領域にある視覚刺激に対して、視覚探索に要した時間は 300 ms から 450 ms であった。本実験で得られた結果は、視覚刺激が正面から左右水平方向に $\pm 20^\circ$ 離れた位置の視覚刺激について、いずれの組み合わせにおいても 600 ms 以上の反応時間を要した。これは本実験が作業負荷環境下における視覚探索課題を実施したためである。このことから、実験参加者はある程度トラッキング課題に集中しており、視覚探索に配分できる注意資源が減少していたことが分かる。

視聴覚刺激が左右で同じ領域に存在する場合、いずれの視覚刺激位置においても聴覚刺激の位置による反応の違いは見られなかった。このことは、視聴覚間クロスモーダル空間手掛かり効果について、半球内手掛かり効果は現れないという Lee & Spence (2017) の主張と一致している。本実験での視覚刺激の配置は、左右水平方向に 20°, 40°, 60° であった。このことから本結果は、視聴覚刺激が 40° 離れていても、平均反応時間の大きな遅延は表れないとも解釈できる。この解釈は、視覚刺激位置が+20° の時の聴覚刺激位置-20°, 視覚刺激位置が-20° の時の聴覚刺激位置+20° の組み合わせのように、視聴覚刺激が左右で異なる領域にある場合にも当てはまる。加えて視覚刺激が-60° 位置にある場合は、聴覚刺激が実験参加者正面である 0°, すなわち視覚刺激から 60° 離れた位置から提示された場合には、平均反応時間が遅くなっており ($p.d. > 0.950$)、大きな平均反応時間の遅延が起こらない視聴覚刺激配置の角度差は 40° 程度という解釈を支持する。しかしながらこの結果の解釈は、空間的注意は刺激が提示された場所を最大として離れるほどに減少することを多くの研究が報告していることを考慮すると (Mondor & Zatorre, 1995; Shulman et al., 1985; Downing, 1988; Teder-Sälejärvi & Hillyard, 1998; Kennett & Driver, 2014; Mock et al., 2015; Schmitt et al., 2001; Lee & Spence, 2017), 視聴覚情報を離れた位置に置く積極的に支持できるものではないことを述べておく。

40° という角度は、Itoh et al. (2009) が報告した、有効視野の領域に近い (see also Wolfe et al., 2017)。反応時間の分析に用いたデータは、聴覚刺激の音源定位が正確に行っていた実験参加者のものであった。視覚探索において、聴覚刺激方向に実験参加者の視線が誘導されたとすれば、その方向を中心として、視線移動や頭部運動を行う更なる視覚探索を必要とせずに視覚情報処理が可能な領域に視覚刺激が存在したため、視覚探索の大きな遅延が発生しなかったとも考えられる。ただし、有効視野は頭部運動と眼球運動を伴わずに測定するため (Ball & Owsley, 1993), 本実験結果と有効視野の関連は参考程度に留める。

視聴覚刺激が左右で異なる領域にある場合、視覚刺激位置が+20° の場合は聴覚刺激位置-60°, 視覚刺激位置が+40° の場合は聴覚刺激位置-20°, -40°, -60°, 視覚刺激位置が-60° の場合は聴覚刺激位置 0°, +20°, +40°, 視覚刺激位置が+60° の場合は聴覚刺激位置-20°, -40°, -60° の組み合わせにて、 $p.d.$ が 0.950 を超えた。

視聴覚刺激が左右で異なる領域にある場合は、SA 条件と比較して反応が遅くなる組み合わせが多くなった。既往研究で多く示されてきた、クロスモーダルな空間手掛かり効果における半球間手掛かり効果が、本実験でも確認できた (Spence & Driver, 1997; Lee & Spence, 2017)。また、視覚刺激が外側に配置されるにつれ、0.950 以上の $p.d.$ を示す組み合わせが増えた。これは視覚刺激が外側に配置されるにつれ視覚の信頼性が下がったため (Carrasco et al., 1995; Carrasco & Frieder, 1997; Wolfe et al., 1998), 視覚探索においてより聴覚刺激を手がかりとするようになったためと考えられる。

知覚負荷環境下においては注意資源が減少しており、トップダウン的な注意の影響を受けるクロスモーダル空間手がかり効果は弱まるとされる (Santangelo & Spence, 2007; Santangelo et al., 2007, 2008a,b; Ho et al., 2009)。しかしながら、本実験では視聴覚刺激の組み合わせにより反応時間の違いが現れる組み合わせが複数見られた。Schreij et al. (2008) は、ディストラクタとして突然提示される刺激は、実験参加者のトップダウン的な注意にかかわらず、注意を引きつけることができるとする。本実験で得られた、視聴覚刺激が異なる位置にある

ことによって反応が遅れた結果は、視覚刺激から離れた位置に聴覚刺激が提示された場合に、聴覚刺激がユニモーダルなディストラクタとして実験参加者に作用したことによると考えられる。

視覚刺激の配置が実験参加者から見て右側にある場合、左側にある場合と比較して、0.950以上の *p.d.* を示すSA条件とDA条件の組み合わせが多い結果となった。空間的注意は、左側と比較して右側に注意が傾きやすい (Chen & Spence, 2017)。その傾向はクロスモーダルな課題でも現れる (Chen & Spence, 2011)。加えて注意資源の総量にも影響され、知覚負荷環境下ではより右側に空間的注意が向きやすいとされる (Peers et al., 2006; Pérez et al., 2009; Eramudugolla et al., 2011; Takio et al., 2013)。本実験で、視覚刺激が右側にある場合に特に空間手がかり効果が現れたのも、トラッキング課題により注意資源が奪われた状態であったことで、空間的注意が右側に偏り、聴覚刺激が右側に提示された場合に、右側の視覚刺激への反応がより促進されたためと考えられる。

SA条件と比較して平均反応時間が遅くなったDA条件では、平均反応時間を構成する μ と τ のうち、 τ の値が大きくなっていた。Fig. 2.12に、視聴覚刺激が同じ位置にある場合の反応時間分布と、視聴覚刺激が左右半球で反対側に位置し、平均反応時間を構成する τ の値が大きくなった場合の分布を比較した一例を示す。 τ の増加は、反応時間分布の裾が長くなることを意味する。すなわち、視聴覚刺激が離れた位置にあることによる視覚探索の遅延は、全体的に反応が遅くなるのではなく、分布の裾あたりの反応（平均より極端に遅い反応）が得られる確率が高くなり、結果として平均反応時間が遅くなったと言える。この分布の裾あたりの反応というのは、聴覚刺激がディストラクタとして実験参加者に作用し、視覚刺激と離れた方向に空間的注意が働いたことによる遅延と考えられる (Schreij et al., 2008)。空間的注意が適切に働かなかったことが反応時間分布の裾形状に影響したという考察は、注意欠如による反応時間の分布変化の報告例とも一致している (Hervey et al., 2007)。なお分布の最頻値については、視聴覚刺激の位置が同じ場合と反対側にある場合で変化はあまりない。聴覚刺激によって視覚刺激と異なる方向に注意が奪われなかった場合は、反応時間に大きな差はないと考えられる。

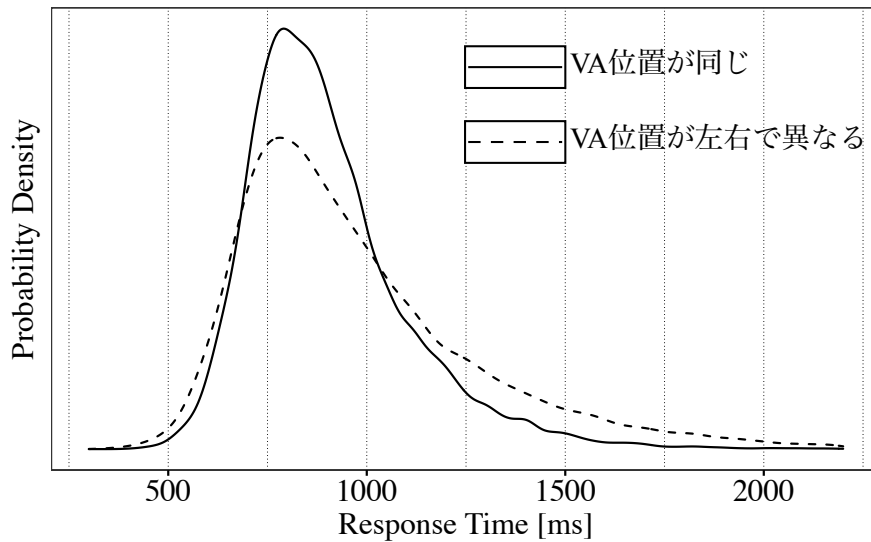


Fig. 2.12: An example of RT posterior distribution compared between a condition that the auditory and visual stimuli are located at same angle and a condition that the auditory and visual stimuli are located in opposite hemifield.

2.5 第2章のまとめ

第2章では、知覚負荷環境下の視覚探索において、同時に提示される聴覚刺激が視覚探索を促進する視聴覚刺激間距離を検討した。トラッキング課題と視覚探索を同時に実験参加者に求め、聴覚刺激の提示位置による視覚探索速度の違いを、それぞれの視覚刺激位置で調べた。視聴覚刺激間の角度差が 40° 以下である場合は、視覚探索の大きな抑制は見られなかった。視聴覚刺激間の角度差が 40° を超え、視聴覚刺激が左右で異なる半球にある場合は視覚探索の遅延が見られた。空間手がかり効果は視覚刺激が外側に位置するほど大きくなり、また左半球よりも右半球で空間手がかり効果が現れる傾向が見られた。また反応の抑制は反応時間分布の裾が伸びることで現れた。視覚刺激から遠い位置に提示された聴覚刺激がディストラクタとして実験参加者の注意を奪い、反応が平均と比較して極端に遅れたことが原因であると考えられる。ベイズ推定を用いて、反応時間分布の変化を見た研究は少なく、本研究が示した有効なデータと考える。

本実験では、視聴覚刺激間の角度差が 40° を超えなければ、視聴覚刺激の設置位置が揃っている場合と比較して、視覚探索の大きな抑制は現れないことを示した。しかしながら、空間的注意は刺激が登場した位置に最も強く引き寄せられ、そこから離れるほどに空間的注意は弱くなる。加えて、視聴覚ディスプレイを引き離すことは、視聴覚情報の素早い空間的対応づけが得られる可能性を低下させる。本結果がマルチモーダルユーザーインターフェースデザインにおいて、視聴覚ディスプレイを離れた位置に設置することを推奨するものではないことを改めて述べておく。

第3章 ドライビングシミュレータを用いた検証

3.1 背景

自動車室内で、ドライバは提示される情報を素早く正確に理解できることが望ましい。ドライバが素早く正確な情報確認を行えるようなインターフェースデザインに関する研究として、方向情報を兼ね備えた情報提示について検討がされてきた (Spence & Soto-Faraco, 2020)。曲がるべき方向から触覚刺激を提示することで、ナビゲーションシステムの直観的な理解に繋がること (Erp & Veen, 2004; Erp, 2005)、衝突回避行動が必要な時に、ぶつかりそうな対象物から聴覚・触覚刺激を提示することで、素早い衝突回避が可能となること (Ho & Spence, 2005; Ho et al., 2005, 2006a,b; Ho & Spence, 2009; Schwarz & Fastenmeier, 2017; Bella & Silvestri, 2017)、自動運転時のスムーズな権限移譲が可能となることなど (Cohen-Lazry et al., 2019; Chen et al., 2020)、自動車室内情報に方向情報を付加することの効果が多く示されている。

これらの効果は、視覚情報の方向を知らせる刺激が、運転中のドライバの視線を適切に視覚情報方向へ誘導できたために、行動が促進されたと考えられる。また、素早い行動ができるだけでなく、ドライバーのメンタルワークロードも小さいことが理想的な情報提示である。しかしながら、既往研究のほとんどは、視覚探索や緊急回避の反応時間に焦点を当てたものがほとんどであり、視線移動やメンタルワークロードを含めて議論した研究は多くない。

自動車運転中の視覚情報確認支援として、視覚情報にどの程度聴覚情報を近づければ良いかという議論も不足している。視覚探索を支援するために手がかりとなる刺激は、必ずしも同じ位置に配置する必要はなく、同じ方向 (same direction) (Spence & Ho, 2008b) もしくは同じ機能的領域 (same functional field) に含まれれば良いとされる (Spence & Ho, 2008b; Ho et al., 2006b)。しかしながらドライビングシミュレータを用いた実験において、実際に視覚刺激と手がかりとする聴覚刺激の配置がずれている場合の影響を、実験的に示したものは少ない。

また、用いる音の種類についても言及される必要がある。多くの実験で用いられた音は、純音、バンドノイズ、ブープ音である (Ho & Spence, 2008; Spence & Ho, 2008a)。これらの音は meaningless な音とされ、ドライビングシミュレータを用いた実環境を想定した実験においては実用的でないとの指摘もある (Spence, 2015)。意味情報を含む聴覚刺激として auditory icon の効果が検証されており、auditory icon の持つ情報の具体性が評価されてきた (Ho & Spence, 2005; Schwarz & Fastenmeier, 2017; Wang et al., 2022)。しかしながら Cabral & Remijn (2019) が指摘するように、auditory icon に関する研究で、用いた聴覚刺激の物理的特徴に言及されることは多くない。また、方向情報を提示することの効果に貢献する聴覚刺激の主な要因は、その刺激の音源定位のしやすさであると考えられる。純音のように周波数成分が少なく音源

定位が難しい聴覚刺激では、視覚探索の聴覚手がかりとしての効果が弱まるとの指摘もある (Paladini et al., 2018)。聴覚刺激を用いた自動車運転中の視覚探索支援について議論するときは、用いる聴覚刺激の物理的特徴や、聴覚刺激の音源定位のしやすさを合わせて議論する必要がある。

本章では、自動車運転中の視聴覚情報提示について、視覚情報方向から聴覚情報を提示することの効果調べる。ドライビングシミュレータを操作しながら視覚探索課題を行い、聴覚刺激を視覚刺激方向から提示した場合の視覚探索や運転課題の成績を調べる。実験2では視覚探索の課題成績の他、視線移動、運転行動、メンタルワークロードを調べる。実験3では、聴覚刺激の音源定位が困難な場合の効果調べる。実験4では、視覚刺激と聴覚刺激の位置がずれている場合の効果調べる。

3.2 実験2：聴覚情報を視覚情報方向から提示することの効果

実験2では聴覚情報を視覚情報方向から提示することの効果について、既往研究で多く示された反応時間や運転パフォーマンスの評価 (e.g. Ho & Spence, 2005) に加え、メンタルワークロードと視線移動を含めた効果を明らかにすることを目的とした。実験参加者にドライビングシミュレータを操作しながら、視覚探索課題を行うよう求めた。視覚探索課題における視線移動、視覚探索課題の精度、実験参加者のステアリング操作の安定性、およびメンタルワークロードについて、聴覚刺激の提示方法ごとに比較した。

3.2.1 実験システム

実験に用いた実験システムの概観を Fig. 3.1, ブロック図を Fig. 3.2 に示す。実験システムは、ドライビングシミュレータ部、視覚刺激提示部、聴覚刺激提示部の3つのユニットで構成された。



Fig. 3.1: Picture of the experimental set-up used in the experiment 2 and 3.

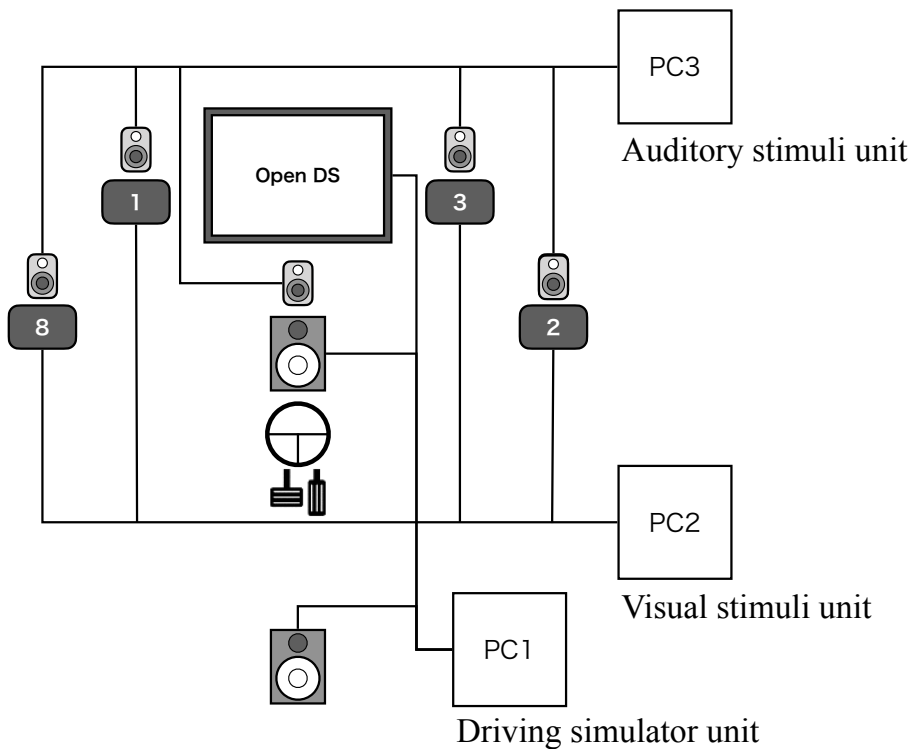


Fig. 3.2: Schematic diagram of experimental set-up used in the experiment 2 and 3.

ドライビングシミュレータ部

オープンソースのドライビングシミュレータである，“openDS”を用いた。使用したPCは，DELL U3E90FH（CPU: Intel core i7）であった。ドライビングシミュレータの画面は，42

型ディスプレイ（Panasonic TH-L42G3, 42 inches, resolution: 1,920 × 1,080 pixels, refresh rate: 60 Hz）に、1,280×720画素で表示した。実際の走行画面を、Fig. 3.3に示す。openDSに内蔵される複数のシナリオから、対向車線や障害物のない直線道路である「MotorwayTask」を選択した。

実験参加者はステアリングとフットペダル（Logitech, Driving Force GT）を用い、ステアリング制御と速度制御を行った。実験参加者にとって運転しやすい姿勢となるよう、実験参加者ごとにシート位置を前後に調節した。ドライビングシミュレータ画面の右下には速度計が表示された。ドライビングシミュレータ画面中心とステアリングの距離は約0.8 mであった。ドライビングシミュレータ画面下と、ドライバーシート後方床上に設置したスピーカ（YAMAHA, HS50M）から、模擬走行音が提示された。模擬走行音の提示レベルは、ドライバーシートとステアリングの距離が最小の実験参加者頭部位置における10秒間時間平均騒音レベル（ $L_{Aeq,10s}$ ）で、アイドリング状態は49.8 dB、60 km/h定常走行状態で56.2 dBであった。また、ドライビングシミュレータでは50 msごとに車体位置の座標と走行速度が記録された。



Fig. 3.3: Screenshot of the driving simulator used in the experiment 2 and 3.

視覚刺激提示部

視覚刺激は、ドライビングシミュレータ画面周辺に設置した4つの8インチディスプレイ（Century LCD-8000U, Resolution: 800 × 600 pixels）に提示した。各8インチディスプレイには、黒色の背景画面上に、09の1桁の白色の数字が1つずつ提示された。白色の数字は、1秒周期でランダムに異なる数字へと変化した。4つの8インチディスプレイのうち、いずれか1つの画面に、09の1桁の赤色の数字が1秒間、白色の数字に代わってランダムに提示された。赤色の数字が出現する頻度は、90秒間で20回であった。ディスプレイ上の数字の高さは18 mmで、視覚刺激の制御はProcessingで行った。

小型ディスプレイは、ドライバーシートとステアリングの距離が最小である場合の実験参加者頭部位置を基準に、正面方向を中心として、左右30°、仰角10°位置と、左右50°、俯角5°位置に2つずつ、合計4つのディスプレイを、頭部位置から距離1.2 mの場所に配置し

た。左右 30° 位置のディスプレイは床上高さ 1.3 m, 左右 50° 位置では床上高さ 0.7 m であった。実験参加者により、頭部位置とディスプレイの相対距離が変化した。ドライビングシミュレータ画面から最も離れた実験参加者における 8 インチディスプレイの設置角度は、内側のディスプレイで左右 25°, 外側のディスプレイで左右 45° であった。

聴覚刺激提示部

赤色の数字が提示された際に、各 8 インチディスプレイ位置、もしくはドライビングシミュレータ画面下に設置したスピーカ (Genelec, 8010A) より聴覚刺激を提示した。聴覚刺激は、発音タイミングが明確で、実験参加者に極端な不快感を与えないものを選択した。Fig. 3.4 に、実験 2 で用いた聴覚刺激の時間波形と周波数スペクトルを示す。聴覚刺激は鋭い立ち上がりから 0.5 秒ほどの減衰を持ち、基本周波数が 1000 Hz ほどで複数の正数倍音を含み、非調和成分が少ないものであった。聴覚刺激の騒音レベルの最大値 (L_{Amax}) はいずれも、ドライバーシートとステアリングの距離が最小である場合の実験参加者頭部位置で、66.2 dB であった。

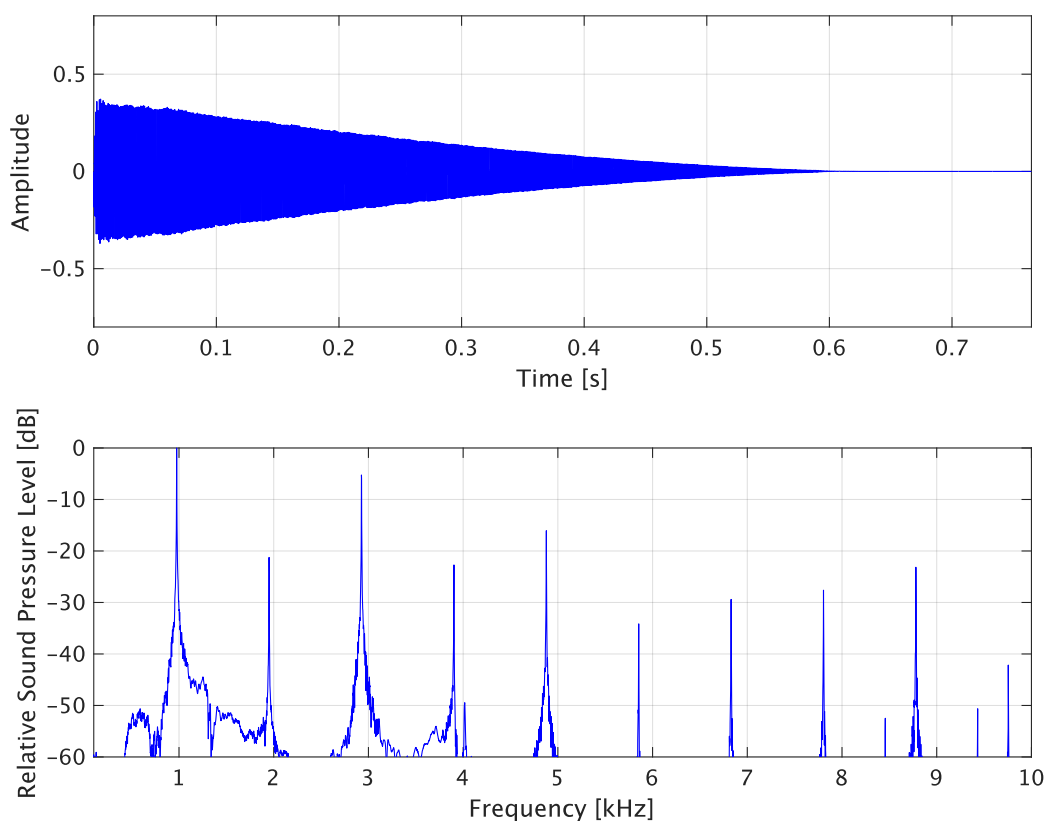


Fig. 3.4: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus used in the experiment 2.

3.2.2 実験参加者

実験参加者は20名（男性10名，女性10名，21歳から25歳）であった。全ての実験参加者は正常な聴力を保有していることを，自己申告により確認した。また，全員運転免許を持ち，保有年数は7ヶ月から6年であった。

3.2.3 手続き

音源定位の精度確認

実験参加者が視覚刺激背後から提示される聴覚刺激について，正確にその方向を認識できているかを調べた。視覚刺激後方の4つのスピーカから，ランダムな順序で聴覚刺激を10回ずつ，合計40回提示した。実験参加者には提示された方向を回答するよう求めた。

自動車運転中の視覚探索

実験参加者には，運転課題と視覚探索課題を同時に行うよう求めた。運転課題では，一般道の直線走行を想定し，走行速度を60 km/hに維持しながら，左車線を直進するよう求めた。走行中の車体と速度のぶれを評価指標とした。

視覚探索課題では，不定期に提示される赤色の数字を口頭で回答するよう求めた。赤色の数字は90秒の1試行で20回出現した。赤色の数字が出現した時の聴覚刺激提示方法により，3つの条件を求めた。条件1では，赤色の数字が出現しても聴覚刺激を提示しなかった。条件2では，赤色の数字が出現した時，ドライビングシミュレータ画面下のスピーカから聴覚刺激を同時に提示した。条件3では，赤色の数字が出現した方向から聴覚刺激を提示した。また条件0として，視覚探索課題を行わずに運転課題のみを行う条件も設けた。視覚探索の誤答率，および赤色の数字が出現してから視線が到達するまでの時間を評価指標とした。

実験の流れをFig. 3.5に示す。実験参加者にはまずドライビングシミュレータの操作に慣れてもらうため，走行練習を行った。走行練習は最短5分，最長15分間の練習時間を設けた。十分に操作に慣れたあと，本実験に移行した。実験は条件0から条件3までの4つの条件について，ランダムな順番で実施した。1つの条件について，まずは練習試行を2回実施し，その後に評価試行を2回実施した。1つの条件を4試行連続で実施したあと，行った条件についてメンタルワークロードの主観評価を実施した。主観評価の後，異なる条件に移行することを繰り返した。

メンタルワークロードの主観評価には，DALI（Driving Activity Load Index）（Pauzié, 2008）を用いた。DALIは主観的なメンタルワークロード評価手法であるNASA-TLX（NASA Task Load Index）（Hart & Staveland, 1988）に基づいて作られた，自動車運転時の主観的作業負担の評価に用いられる指標である。DALIに用いられる指標のうち，注意努力，視覚的負担，聴覚的負担，妨害感の4尺度を主観評価に求めた。左端に「低い」，右端に「高い」と書かれた線分上の任意の点に印をつけることで評価を求め，線分左端から評価位置までの距離を線分長で基準化し，0から100で表すことで主観評価値を求めた。

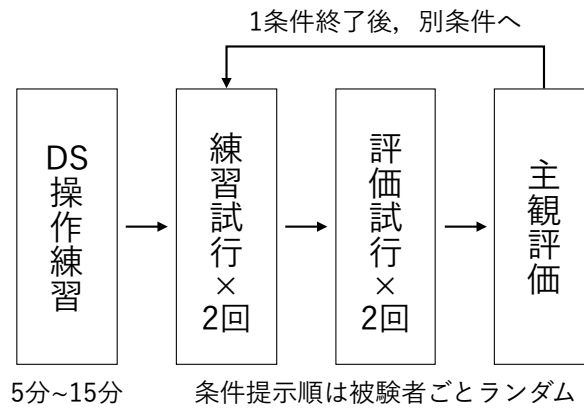


Fig. 3.5: Schematic flow of the experiment 2.

3.2.4 結果

音源定位の精度

音源定位の正答率は平均で 99.5% (SD = 1.0) であった。実験参加者全員が正確に音源定位ができていた。

視覚探索課題における誤答率

本実験の視覚探索における誤答とは、正しく赤色の数字を回答できなかったことを意味し、見逃しによる無回答も誤答に含む。実験参加者が回答を修正した場合、修正後の回答を取り扱った。視覚探索において、ターゲットが視野の中心から離れるほど、探索が遅くなる (Carrasco et al., 1995; Carrasco & Frieder, 1997; Wolfe et al., 1998)。そのため視覚探索課題の分析においては、配置された 4 つの視覚刺激を、内側・外側の 2 水準に分けた分析を行う。

Fig. 3.6 に各条件における誤答率の平均を、視覚刺激の配置ごと (内側・外側) に示す。実験条件と視覚刺激の配置を要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した結果、各要因の主効果および交互作用が認められた (条件: $F(1.8, 34.1) = 242.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.93$, 視覚刺激の配置: $F(1, 19) = 71.6, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.79$, 交互作用: $F(1.5, 29.1) = 14.9, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.44$)。単純主効果検定の結果、条件 1 と条件 2 では視覚刺激の配置による単純主効果 (条件 1: $F(1, 19) = 25.0, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.57$, 条件 2: $F(1, 19) = 44.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.70$)、それぞれの視覚刺激の配置 (内側・外側) における条件の単純主効果が (内側: $F(1.7, 32.3) = 118.6, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.84$, 外側: $F(1, 19) = 44.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.86$)、それぞれ有意に認められた。また、視覚刺激の配置ごとに多重比較を行ったところ、全ての条件間で有意差が認められた (条件 1-2 (内側): $t(19) = 8.4, p < 0.01, r = 0.89$, 条件 1-3 (内側): $t(19) = 13.5, p < 0.01, r = 0.95$, 条件 2-3 (内側): $t(19) = 4.0, p < 0.01, r = 0.68$, 条件 1-2 (外側): $t(19) = 6.0, p < 0.01, r = 0.81$, 条件 1-3 (外側): $t(19) = 15.4, p < 0.01, r = 0.96$, 条件 2-3 (外側): $t(19) = 10.4, p < 0.01, r = 0.92$)。分散分析において Mauchly の球面性仮定が棄却された要因については、Greenhouse-Geisser の ϵ を用いて自由度を調整した。また、多重比較における有意水準は Shaffer の方法で調整した。

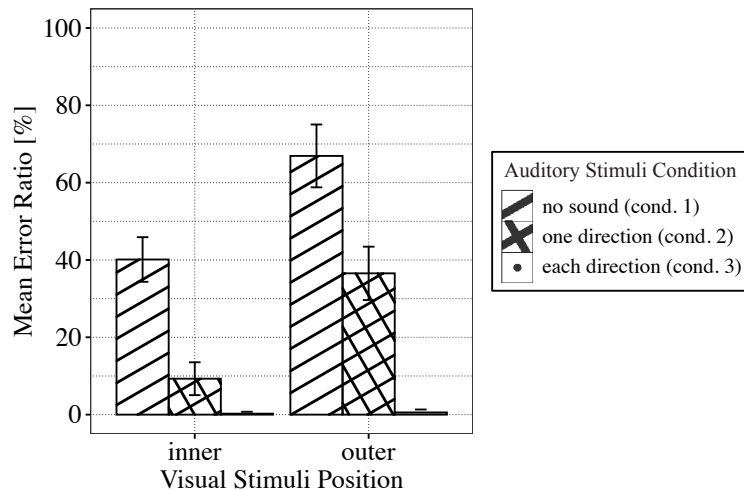


Fig. 3.6: Mean error ratio of visual search task at each condition of inner ($\pm 30^\circ$) and outer ($\pm 50^\circ$) location in the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

メンタルワークロード

Fig. 3.7に、各条件におけるメンタルワークロードの主観評価値の平均をそれぞれ示す。各評価指標について実験条件を要因とした一元配置反復測定分散分析を行ったところ、全ての評価指標で有意な主効果が認められた(注意努力: $F(1.8, 34.1) = 36.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.66$, 視覚的負担: $F(3, 57.3) = 57.3, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.75$, 聴覚的負担: $F(1.8, 33.8) = 20.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.52$, 妨害感: $F(3, 57) = 119.3, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.86$)。注意努力の評価値について多重比較を行ったところ、全ての条件間で有意差が認められた(条件0-1: $t(19) = 9.7, p < 0.01, r = 0.91$, 条件0-2: $t(19) = 7.1, p < 0.01, r = 0.85$, 条件0-3: $t(19) = 3.4, p < 0.01, r = 0.62$, 条件1-2: $t(19) = 2.7, p < 0.05, r = 0.53$, 条件1-3: $t(19) = 6.3, p < 0.01, r = 0.82$, 条件2-3: $t(19) = 3.4, p < 0.01, r = 0.62$)。視覚的負担の評価値について多重比較を行ったところ、全ての条件間で有意差が認められた(条件0-1: $t(19) = 13.2, p < 0.01, r = 0.95$, 条件0-2: $t(19) = 8.5, p < 0.01, r = 0.89$, 条件0-3: $t(19) = 6.1, p < 0.01, r = 0.81$, 条件1-2: $t(19) = 4.4, p < 0.01, r = 0.71$, 条件1-3: $t(19) = 7.7, p < 0.01, r = 0.87$, 条件2-3: $t(19) = 2.8, p < 0.05, r = 0.55$)。聴覚的負担の評価値について多重比較を行ったところ、条件0-1以外の組み合わせで有意差が認められた。(条件0-1: $t(19) = 1.8, p = 0.09, r = 0.38$, 条件0-2: $t(19) = 5.9, p < 0.01, r = 0.80$, 条件0-3: $t(19) = 4.8, p < 0.01, r = 0.74$, 条件1-2: $t(19) = 4.8, p < 0.01, r = 0.74$, 条件1-3: $t(19) = 4.0, p < 0.01, r = 0.68$, 条件2-3: $t(19) = 2.5, p < 0.05, r = 0.50$)。妨害感の評価値について多重比較を行ったところ、全ての条件間で有意差が認められた(条件0-1: $t(19) = 17.4, p < 0.01, r = 0.97$, 条件0-2: $t(19) = 11.8, p < 0.01, r = 0.94$, 条件0-3: $t(19) = 7.6, p < 0.01, r = 0.87$, 条件1-2: $t(19) = 3.8, p < 0.01, r = 0.66$, 条件1-3: $t(19) = 10.7, p < 0.01, r = 0.93$, 条件2-3: $t(19) = 6.5, p < 0.01, r = 0.83$)。分散分析においてMauchlyの球面性仮定が棄却された要因については、Greenhouse-Geisserの ϵ を用いて自由度を調整した。また、多重比較における有意水準はShafferの方法で調整した。

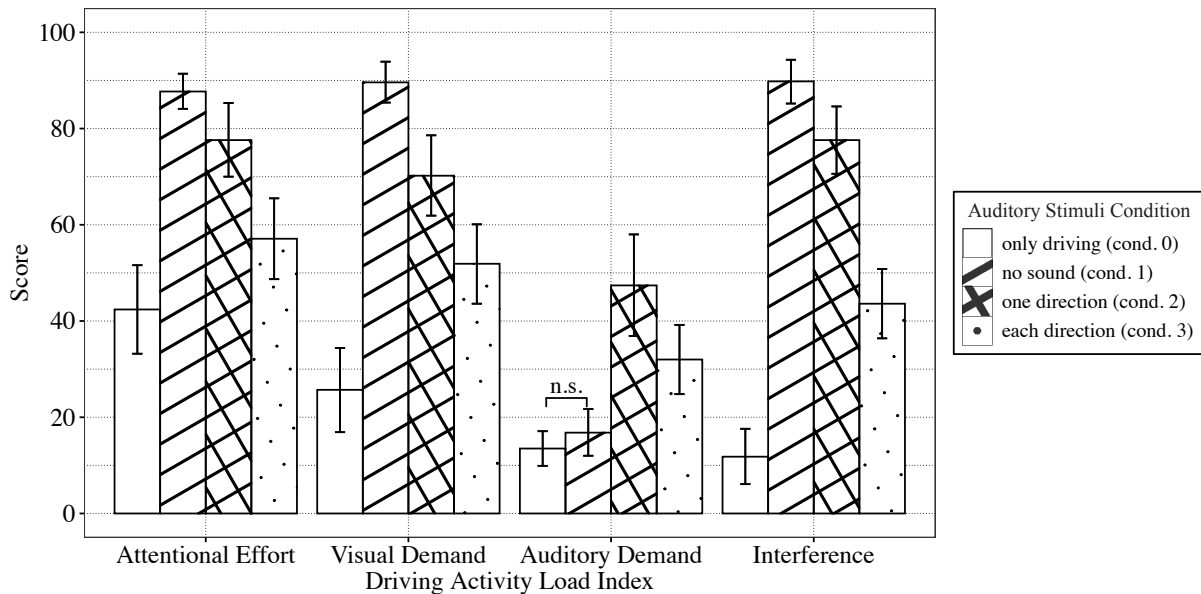


Fig. 3.7: Subjective mental workload at each condition of the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

視線

視線の分析は、実験参加者正面から撮影した動画を用いて行った。1試行につき90秒の動画を100msごとの画像に分割し、各画像について実験参加者の視線方向を、ドライビングシミュレータ画面、4つの8インチディスプレイ、判定不可の6種類に分類した。画像の分類は3名の判定員が行った。分類する際は条件を隠し、条件間で判定にバイアスがかかることを防いだ。3.3%の画像が判定不可とされた。

赤色の数字が出現後、その方向を見るまでに要した時間を視線到達時間 T_r [s]、評価試行1試行のうち、正面を見ていた時間の合計を正面注視時間 T_c として評価した。視線到達時間について、赤色の数字が出現している1秒間で視線が向けられなかったもの、表示された瞬間から表示方向を向いていたものは分析対象から除外した。なお、聴覚刺激が提示されてからの視線移動を評価することを目的としたため、条件2と条件3のみを分析対象とした。

条件2と条件3における、視覚刺激の配置(内側・外側)ごとの平均視線到達時間をFig. 3.8に示す。条件と視覚刺激の配置を要因とした二元配置反復測定分散分析を行ったところ、各要因の主効果および交互作用が認められた(条件: $F(1, 19) = 210.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.92$, 視覚刺激の配置: $F(1, 19) = 121.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.86$, 交互作用: $F(1, 19) = 67.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.78$)。単純主効果検定を行ったところ、各条件における視覚刺激の配置の単純主効果(条件1: $F(1, 19) = 115.3, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.86$, 条件2: $F(1, 19) = 21.8, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.90$)、および視覚刺激の各配置における条件の単純主効果(内側: $F(1, 19) = 120.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.86$, 外側: $F(1, 19) = 21.8, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.53$)がそれぞれ有意に認められた。分散分析においてMauchlyの球面性仮定が棄却された要因については、Greenhouse-Geisserの ϵ を用いて自由度を調整した。また、多重比較における有意水準はShafferの方法で調整した。

条件2と条件3における平均正面注視時間をFig. 3.9に示す。t検定を行ったところ、条件3の注視時間が有意に長いことが認められた($t(19) = -6.0, p < 0.01, r = 0.81$)。

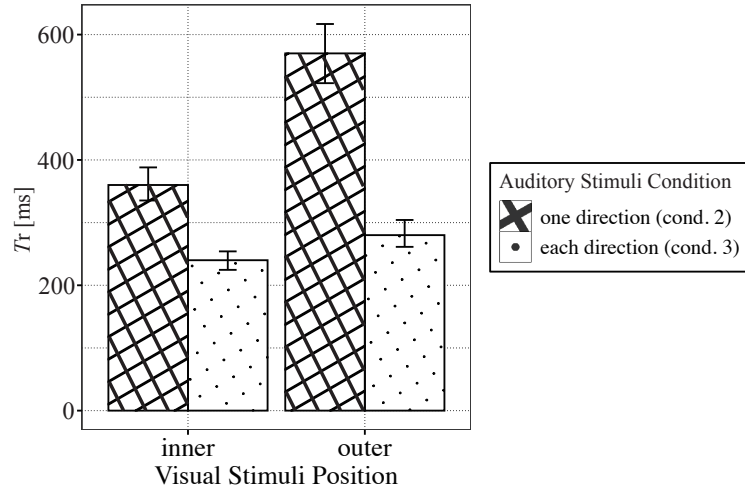


Fig. 3.8: Mean time from the presentation of auditory stimuli until the gaze reaches visual stimuli in the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

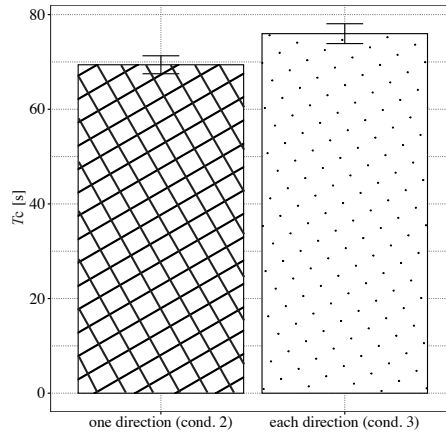


Fig. 3.9: Mean time that the participants were looking at the frontal view during one trial in the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

運転課題

運転課題の評価指標として、ドライビングシミュレータの走行ログから得られる 50 ms ごとの車体位置の座標と走行速度から、ステアリングのぶれと速度のぶれを調べた。ステアリングのぶれ U_{steer} [m] は、道路横断方向の座標 x の不偏標準偏差を次式、

$$U_{steer} = \frac{W_0}{W_{sim}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

で求めた値とした。ここで、 x_i はある時点 i における車体中心の x 座標、 x_m は 1 試行中の x 座標の平均値、 W_{sim} はドライビングシミュレータ内道路の車線幅である。 W_0 は日本の一般道の車線幅である 3.5 m として、ドライビングシミュレータ内の車線幅を日本の一般道における車線幅とした場合のステアリングのぶれを算出した。同様に、ある時点 i における走

行速度を v_i , 1 試行中の走行速度の平均値を v_m とし, 速度 v の不偏標準偏差を次式,

$$U_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(v_i - v_m)^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

で求め, 速度のぶれ U_v [km/h] とした。

Fig. 3.17, 3.18 にステアリング・速度のぶれの条件ごとの平均値をそれぞれ示す。ステアリングと速度のぶれについて, 条件を要因とした一元配置反復測定分散分析を行ったところ, いずれも有意な主効果が認められた (ステアリングのぶれ: $F(1.3, 25.2) = 120.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.34$, 速度のぶれ: $F(2.0, 38.1) = 7.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.28$)。それぞれ多重比較を行ったところ, ステアリングのぶれでは条件 0-条件 1, 条件 1-条件 3, 条件 2-条件 3 の 3 条件間 (条件 0-条件 1: $t(19) = 3.4, p < 0.05, r = 0.61$, 条件 1-条件 3: $t(19) = 3.5, p < 0.05, r = 0.63$, 条件 2-条件 3: $t(19) = 2.7, p < 0.05, r = 0.52$), 速度のぶれでは条件 0-条件 1, 条件 0-条件 2 の 2 条件間で有意差が認められた (条件 0-条件 1: $t(19) = 4.1, p < 0.01, r = 0.69$, 条件 0-条件 2: $t(19) = 3.1, p < 0.05, r = 0.57$)。分散分析において Mauchly の球面性仮定が棄却された要因については, Greenhouse-Geisser の ϵ を用いて自由度を調整した。また, 多重比較における有意水準は Shaffer の方法で調整した。

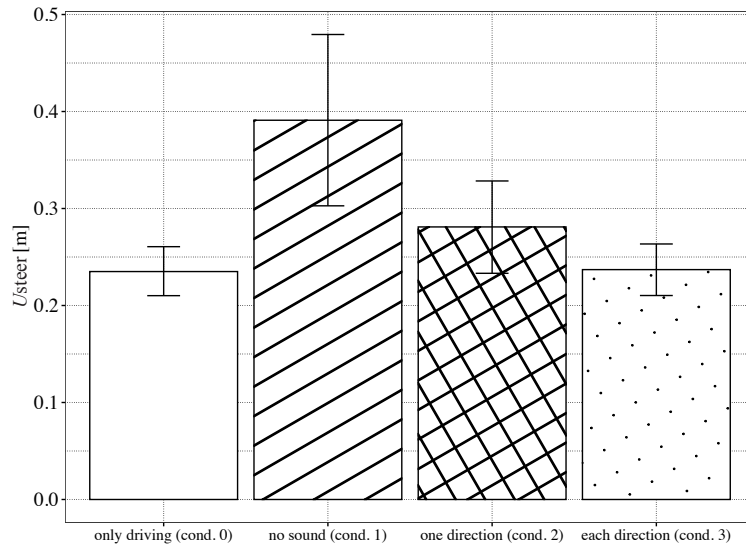


Fig. 3.10: Mean instability of steering control at each condition in the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

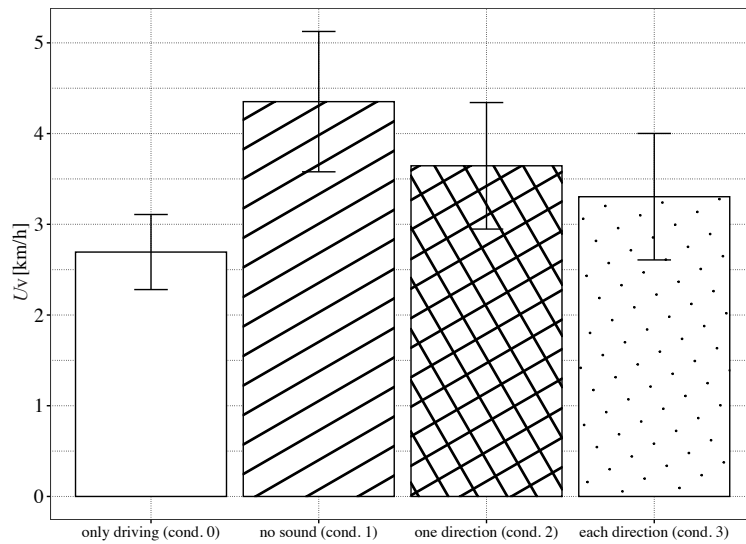


Fig. 3.11: Mean instability of speed control at each condition in the experiment 2. (Error bars show 95% confidence interval.)

3.2.5 考察

視覚探索において、聴覚刺激が提示された場合は提示されない場合と比較して、有意に誤答が少なくなった。しかしながら正面からのみ聴覚刺激が提示された場合は誤答が発生し、特に外側の視覚刺激は内側よりも有意に誤答が多くなった。偏心度効果により視覚探索に時間を要し (Carrasco et al., 1995; Carrasco & Frieder, 1997; Wolfe et al., 1998), 赤色の数字が消える1秒以内に視認ができない確率が高まったためと考えられる。聴覚刺激が視覚刺激の方向から提示された場合は、視覚刺激の配置によらず誤答がほぼなくなった。聴覚刺激が持つ方向情報により、運転中の視覚探索を適切に支援できるという結果は、多くの先

行研究と一致している (Ho & Spence, 2005; Schwarz & Fastenmeier, 2017; Lundqvist & Eriksson, 2019; Chen et al., 2020)。本実験における外側の視覚刺激は、先行研究 (e.g. Ho & Spence, 2005; Lundqvist & Eriksson, 2019) で検討されたものよりも外側に配置されている。聴覚刺激が持つ方向情報により運転中の視覚探索を支援することの効果は、本実験で用いたような広い範囲での条件でも現れるが示された。

注意努力、視覚的負担、妨害感については、運転課題のみを行っている場合が最も小さく、視覚探索課題があることにより上昇した。視覚探索課題により上昇した値は、聴覚刺激が同時に提示されることにより軽減し、聴覚情報が方向情報を持つ場合はさらに小さくなった。方向情報を持つ聴覚刺激が視覚探索の助けとなり、課題に対する主観的負担が軽減されたことが確認された。また聴覚的負担は聴覚刺激が提示されることにより上昇した。しかしながら、聴覚刺激が方向情報を持つ場合と正面からのみであった場合を比較した時、方向情報を持つ方が有意に聴覚的負担が減少した。自動車室内において、提示される情報の信頼性が高いほど、ドライバに好まれる傾向がある (Cummings et al., 2007; Schwarz & Fastenmeier, 2017)。このことから、聴覚刺激による主観的負担はスピーカのチャンネル数などよりも、実際に提示された聴覚刺激が課題遂行に有効であったかどうか、主観的負担の評価に影響を与えていると考えられる。

聴覚刺激が正面からのみ提示された場合は、視覚刺激方向から提示された場合と比較して、視線が視覚刺激を向くのに有意に長い時間を要した。この傾向は、外側の視覚刺激ほど顕著であった (Carrasco et al., 1995; Carrasco & Frieder, 1997; Wolfe et al., 1998)。聴覚刺激により方向情報を伝えることで、運転作業中であっても短い時間で実験参加者の視線を視覚刺激に誘導できることが確認できた。また、視覚探索に要する時間が短くなったことにより、正面に注視する時間も長くなった。

視覚探索において聴覚刺激が提示されない場合、運転課題のみを行った場合と比較して、ステアリングと速度のぶれが大きくなった。聴覚刺激を提示することにより、視覚探索が容易となり、ステアリングと速度のぶれは軽減した。聴覚刺激が方向情報を持つ場合は特に視覚探索が容易となり、ステアリングに関しては運転課題のみを行っている時と同等になるまでぶれが抑えられた。これは視覚探索に要する時間が短くなったことで、聴覚刺激が方向情報を持たない場合と比較して正面を注視する時間が長くなったことで、より運転の安定性が増したためと考えられる。

3.2.6 実験2のまとめ

ドライビングシミュレータの操作をしながら視覚探索課題を実施し、探索する視覚刺激方向から聴覚刺激を提示することの効果調べた。聴覚刺激を視覚刺激方向から提示することにより、視線が到達するまでの時間が短くなり、視覚探索がより早く正確になる。視覚探索に要する時間が減少するため、正面に注視できる時間が増え、ステアリング操作・速度制御などの運転行動が安定する。その結果、ドライバの主観的負担も軽減することが示された。

3.3 実験3：聴覚刺激の音源定位が困難な場合

聴覚刺激は視覚刺激と比較して提示箇所の特が困難である。そのため、聴覚刺激が獲得する注意の空間は、視覚刺激としてより広い空間を持つ (Spence & Driver, 2004)。このように、刺激によって獲得される注意の領域は、刺激の提示箇所の特のしやすさに依存する。

聴覚刺激について考えた場合も、刺激の種類によって音源定位のしやすさが異なる。そのため、視覚探索の探索に用いる聴覚刺激が音源定位が困難な場合、獲得できる実験参加者の空間的注意が散漫となり、効果が弱まることが考えられる。実験3では音源定位が困難な聴覚刺激を用い、自動車運転中の視覚探索における行動を調べ、実験1の結果と比較する。

3.3.1 実験システム

実験3で用いた聴覚刺激の時間波形と周波数スペクトルを3.12に示す。1000 Hzの周波数成分のみを含む音で、500 msほどの立ち上がりから500 msほどの減衰を持つ音であった。実験3に用いた実験システムは、実験2と同じである。

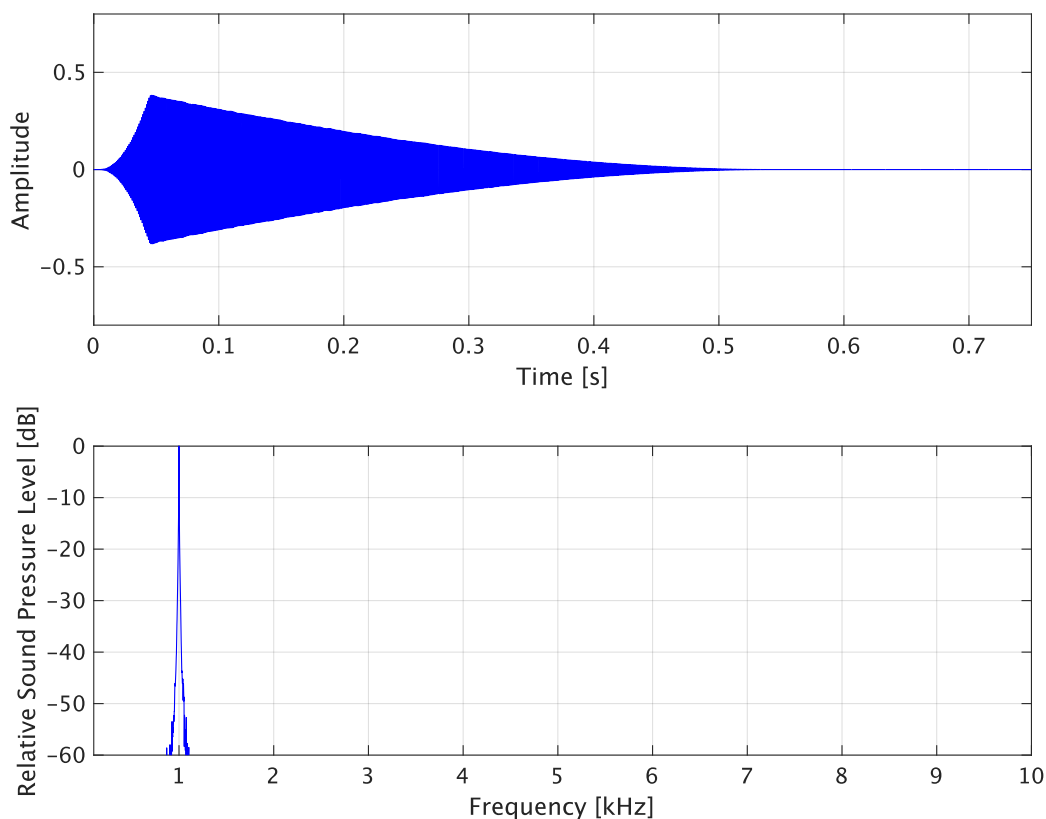


Fig. 3.12: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus used in the experiment 3.

3.3.2 実験参加者

実験参加者は20名（男性10名、女性10名、20歳から25歳）であった。実験参加者のうち6名は、実験2にも参加していた。全ての実験参加者は正常な聴力を保有していることを、

自己申告により確認した。また、全員運転免許を持ち、保有年数は2ヶ月から4年9ヶ月であった。

3.3.3 手続き

音源定位の精度確認

実験参加者が視覚刺激背後から提示される聴覚刺激を、正確にその方向を認識できているかを調べた。用いる聴覚刺激のみを実験1で用いたものに変更し、その他の手続きは実験2と同様であった。

自動車運転中の視覚探索

実験は運転課題と視覚探索課題を同時に行い、聴覚刺激が視覚刺激方向から提示される条件のみを実施した。実験2と同様に、ドライビングシミュレータの走行練習を行ったあと、練習試行2回、評価試行2回実施し、メンタルワークロードの評価を求めた。

3.3.4 結果

音源定位の精度

音源定位の正答率は平均で67.1% (SD = 18.8) であった。実験2で用いた聴覚刺激の音源定位正答率が99.5%であったため、比較すると音源定位しにくい聴覚刺激であったと言える。

視覚探索課題における誤答率

実験2に用いた聴覚刺激を聴覚刺激1、実験3に用いた聴覚刺激を聴覚刺激2と呼ぶこととする。Fig. 3.13に各条件における誤答率の平均を、視覚刺激の配置ごとに示す。聴覚刺激の種類と視覚刺激の配置を要因とした二元配置分散分析を実施した結果、各要因の主効果および交互作用が認められた（聴覚刺激の種類： $F(1, 38) = 24.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.39$, 視覚刺激の配置： $F(1, 38) = 4.7, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.11$, 交互作用： $F(1, 38) = 4.2, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.10$ ）。単純主効果検定を行った結果、外側の視覚刺激における聴覚刺激の単純主効果 ($F(1, 38) = 16.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.30$)、聴覚刺激2における視覚刺激の配置の単純主効果 ($F(1, 19) = 4.5, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.19$) がそれぞれ示された。

メンタルワークロード

Fig. 3.14に、各条件におけるメンタルワークロードの主観評価値の平均をそれぞれ示す。注意努力、視覚的負担、聴覚的負担、妨害感の4項目について、聴覚刺激ごとの評価値についてWelchのt検定を実施した。その結果、全ての評価指標において有意差が認められた（注意努力： $t(26.8) = -3.8, p < 0.01, r = 0.59$, 視覚的負担： $t(37.1) = -4.3, p < 0.01, r = 0.58$, 聴覚的負担： $t(35.2) = -4.7, p < 0.01, r = 0.62$, 妨害感： $t(36.4) = -7.2, p < 0.01, r = 0.77$ ）。

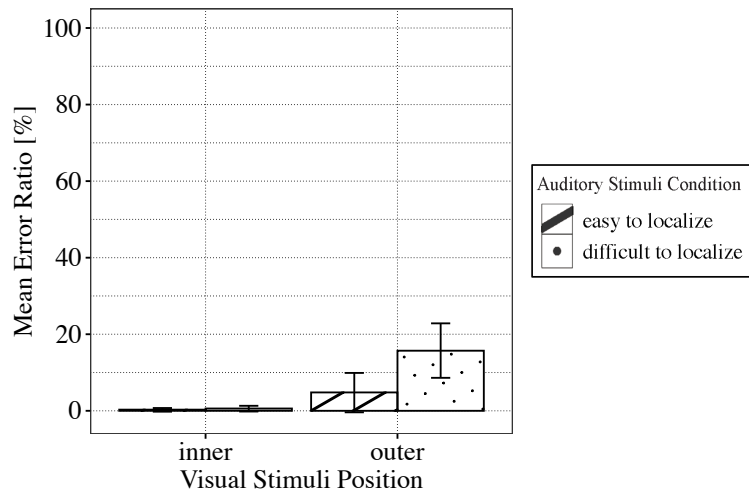


Fig. 3.13: Mean error ratio of visual search task for each auditory stimulus at inner ($\pm 30^\circ$) and outer ($\pm 50^\circ$) location in the experiments. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

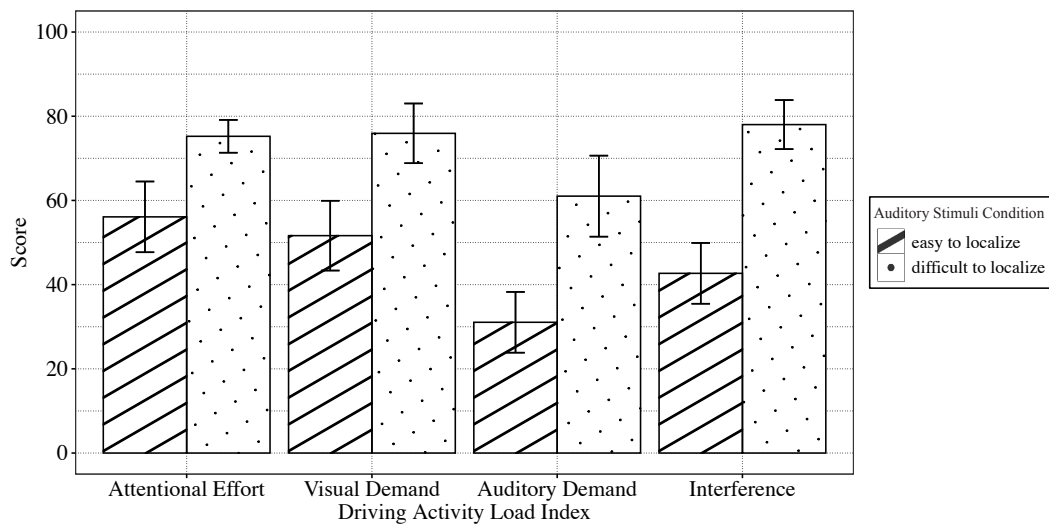


Fig. 3.14: Subjective mental workload at each auditory stimulus. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

視線

それぞれの聴覚刺激における、視覚刺激の配置ごとの平均視線到達時間を Fig. 3.15 に示す。聴覚刺激の種類と視覚刺激の配置を要因とした二元配置分散分析を実施した結果、各要因の主効果および交互作用が認められた（聴覚刺激の種類： $F(1, 38) = 107.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.74$, 視覚刺激の配置： $F(1, 38) = 10.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.22$, 交互作用： $F(1, 38) = 9.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.20$ ）。単純主効果検定を行った結果、内側の視覚刺激における聴覚刺激の単純主効果（ $F(1, 38) = 103.3, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.73$ ）、外側の視覚刺激における聴覚刺激の単純主効

果 ($F(1, 38) = 57.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.60$), 聴覚刺激 1 における視覚刺激の配置の単純主効果 ($F(1, 19) = 21.7, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.53$) がそれぞれ示された。

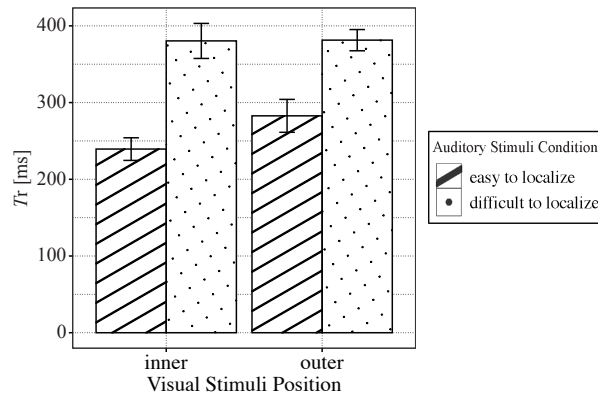


Fig. 3.15: Mean time from the presentation of auditory stimuli until the gaze reaches visual stimuli in the experiment 2 and 3. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

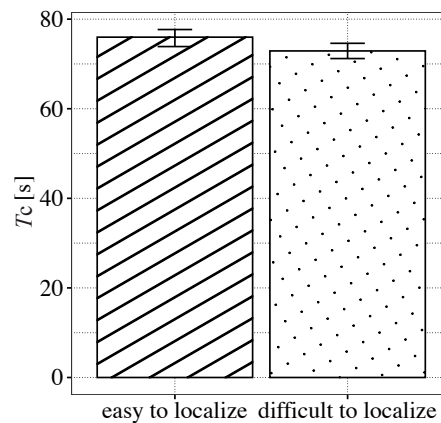


Fig. 3.16: Mean time that the participants were looking at the frontal view during one trial. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

運転課題

Fig. 3.17, 3.18 にステアリング・速度のぶれの条件ごとの平均値をそれぞれ示す。ステアリングと速度のぶれについて、Welch の t 検定を行ったところ、いずれも有意差は認められなかった (ステアリングのぶれ: $t(34.8) = -1.1, p = 0.30, r = 0.18$, 速度のぶれ: $t(37.8) = -0.4, p = 0.67, r = 0.07$)。

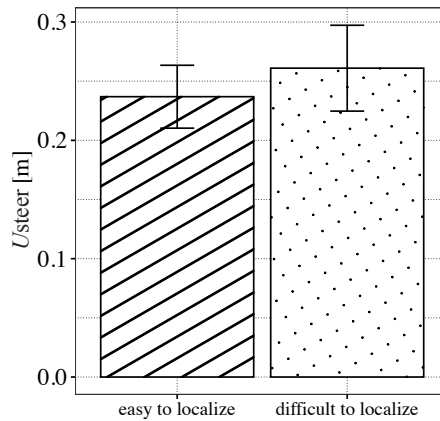


Fig. 3.17: Mean instability of steering control for each auditory stimulus. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

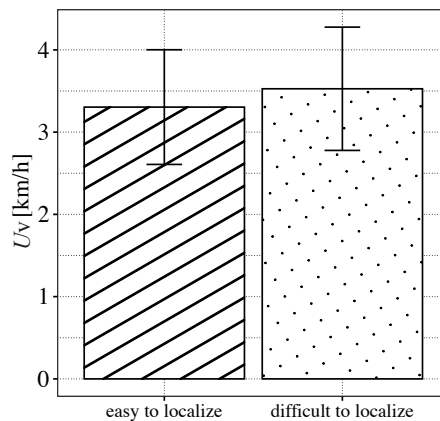


Fig. 3.18: Mean instability of speed control for each auditory stimulus. The auditory stimulus which was easy to localise was used in the experiment 2, and that was difficult to localize was used in the experiment 3. (Error bars show 95% confidence interval.)

3.3.5 考察

聴覚刺激の音源定位が困難な場合、視覚探索における誤答が有意に増加し、特に外側の視覚刺激においてその傾向が顕著であった。このことは、手がかりとして用いる聴覚刺激の音源定位のしやすさが、視覚探索のパフォーマンスに影響を及ぼすという Paladini et al. (2018) の報告とも一致する。自動車運転中の視覚探索において、用いる聴覚刺激の音源定位が困難な場合、音による方向情報提示の効果が弱まることが示された。

メンタルワークロードに関して、聴覚刺激の音源定位が困難な場合は、注意努力、視覚的負担で有意な上昇が見られた。視覚探索の誤答率が上昇したことから、聴覚刺激が適切に視覚探索を支援できなかったと考えられ、視覚探索を行うことにより多くの負担がかかったと考えられる。また、音の提示レベルやチャンネル数は聴覚刺激間で等しいものの、聴覚的負担および妨害感が上昇した。Cummings et al. (2007) や Schwarz & Fastenmeier (2017) が報告するように、聴覚情報の信頼性が低下したことにより、提示される刺激に対する主

観的評価が低下したと考えられる。

視覚刺激へ視線が到達する時間についても、その配置によらず有意に長くなった。音源定位が困難な聴覚刺激では、探索すべき視覚刺激の方向から提示したとしても、適切に視線誘導ができないことが示された。

視覚探索のパフォーマンス低下は見られたが、運転課題への悪影響は有意には認められなかった。実験2において、視覚刺激の配置によらず聴覚刺激を1方向から提示した条件での視覚探索の誤答率は、内側では約9%、外側では約38%であった。一方、音源定位が困難な聴覚刺激を視覚刺激方向から提示した条件での視覚探索の誤答率は、内側では約5%、外側では約16%であった。このことから、聴覚刺激を1方向から提示した条件と比較した場合は、視覚探索が容易になり、その分運転作業に集中できたと考えられる。

3.3.6 実験3のまとめ

実験3では、運転中の視覚探索に用いる聴覚手がかりを、音源定位が困難な聴覚刺激を用い、その効果を調べた。その結果、聴覚刺激の音源定位が困難な場合は、視覚刺激の方向から提示したとしても適切な視線誘導を行えず、視覚探索の精度が下がり、主観的なメンタルワークロードも増加した。一方、運転作業にまでは悪影響が現れず、視覚探索へ一定の効果があることが示された。

3.4 実験4：視聴覚刺激の配置がずれている場合の効果

実験2では自動車運転中の視聴覚情報提示について、聴覚情報を視覚情報方向から提示することの効果、視覚探索課題成績、メンタルワークロード、視線、運転課題成績から調べた。実験3では用いる聴覚情報の音源定位困難な場合を想定し、その場合は聴覚情報による方向情報提示の効果が弱まることを示した。これらの実験ではいずれも視聴覚刺激の配置を揃えており、聴覚刺激の提示位置が視覚刺激とずれた場合の効果について議論できていない。

第2章では、知覚負荷環境下における視覚探索に用いる聴覚手がかりについて、視聴覚刺激間の角度差が40°以内である場合は探索に大きな遅延が現れないことを示した。しかしながら第2章は、自動車運転中の視覚情報確認を、トラッキング課題により注意資源が減少した状態での視覚探索へと抽象化した検証である。視聴覚情報間の角度差が自動車運転中においても許容されるかどうかは、ドライビングシミュレータを用い、メンタルワークロードや運転課題成績への影響も合わせて議論する必要がある。実験4では、視聴覚刺激の位置が統一された場合とずれた場合の比較を行い、自動車運転中の視聴覚情報提示において視聴覚情報間の角度差が与える影響を調べる。また実験4では、視覚刺激の配置を左右ドアミラー位置とする。左右ドアミラー位置は、車線変更時の後方車確認など、実環境でも視認が求められる位置であり、その位置への反応を調べることは有効である。なお、実験4では具体的な状況はシミュレートせず、自動車走行をしながらドアミラー方向を視認する課題を設けた。

3.4.1 実験システム

Fig. 3.19に実験4で用いた実験システムの写真、Fig. 3.20に配置図を示す。実験4に用いたシステムは、ドライビングシミュレータ部と視聴覚刺激提示部からなる。

ドライビングシミュレータ部

使用したPCは、DELL U3E90FH (CPU: Intel core i7)であった。ドライビングシミュレータは、市販のゲームソフトである“City Car Driving”を用い、42型ディスプレイ (Panasonic TH-L42G3, 42 inches, resolution: 1,920 × 1,080 pixels, refresh rate: 60 Hz) に表示した。実験4に用いた走行画面をFig. 3.21に示す。ドライビングシミュレータの走行音は、ドライバーシート後方と42型ディスプレイ後方に設置したスピーカ (YAMAHA, HS50M) より提示した。走行音のA特性音圧レベルは、定常走行状態で約65 dBとなるよう提示した。実験参加者はドライバーシートに座り、ステアリングとフットペダル (Logitech, Driving Force GT) を用いてステアリング制御と速度制御を行った。実験参加者の目線高さは身長によって多少変化し、約1.0 m~1.1 mであった。走行中の画面はPCで録画された。

視聴覚刺激提示部

使用したPCは、Alienware m17 R4 (CPU: Intel core i9)であった。左右に1組ずつ設置された白色LEDは、右ハンドル車における左右ドアミラーの位置を模擬し、実験参加者正面を

0°とし、右ミラー位置のLEDは水平各30°、左ミラー位置のLEDは水平角50°の位置に設置した。実験参加者頭部中心と右側の白色LEDとの距離は約0.8 m、左側の白色LEDとの距離は約1.2 mであった。白色LEDの床面からの高さは約0.8 mであった。LEDの輝度を輝度計（KonicaMinolta LS-110）で測定したところ、245 cd/m²であった。聴覚刺激を提示するスピーカ（Genelec 8010）は、左右の白色LEDの背後に1つずつ、白色LEDから内側に20°ずれた位置に1つずつ、外側に20°ずれた位置に1つずつの合計6つを設置した。実験参加者頭部中心と右側のスピーカとの距離は約1.1 m、左側スピーカとの距離は約1.5 mであった。スピーカの設置高さは白色LEDと同じであった。用いた聴覚刺激は、第2章で用いたものと同じで（2.2.1節参照）、提示レベルは実験参加者頭部位置でA特性音圧レベルが約70 dBであった。LEDはPCからArduino Mega 2560を介して、聴覚刺激はPCからオーディオインターフェース（MOTU 828ES）を介して制御した。制御プログラムは、MATLAB 2021aのPsychtoolbox-3を用いて作成した（Brainard, 1997; Pelli, 1997; Kleiner et al., 2007）。



Fig. 3.19: Picture of experimental set-up used in the experiment 4.

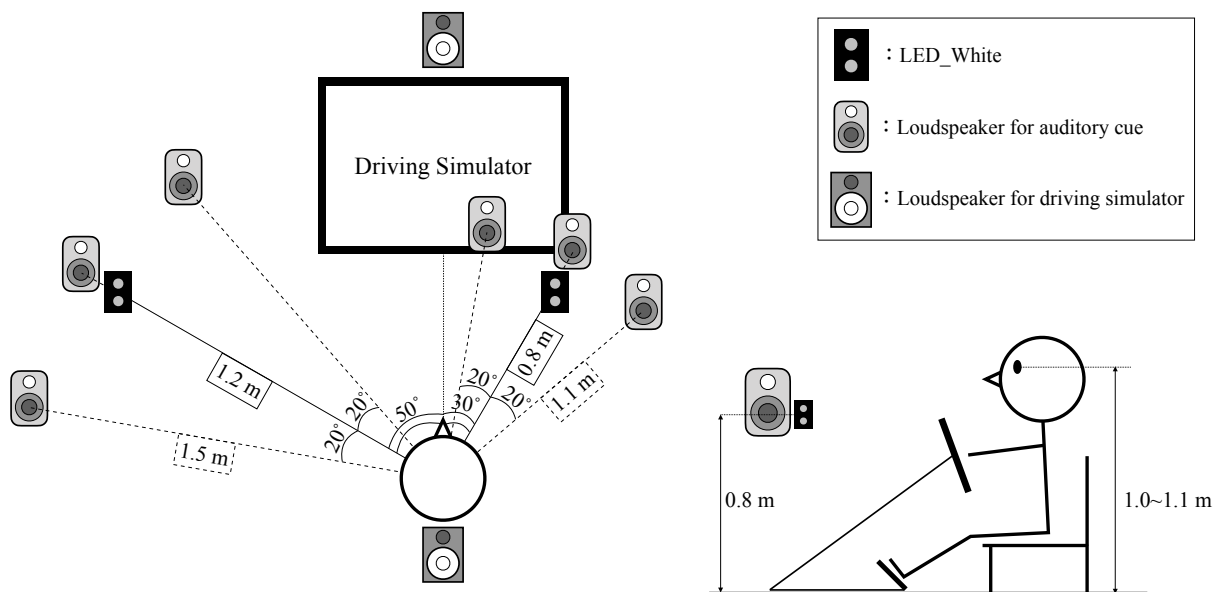


Fig. 3.20: Schematic diagram of experimental set-up used in the experiment 4.



Fig. 3.21: Screenshot of driving simulator used in the experiment 4.

3.4.2 実験参加者

実験参加者は20名（男性13名，女性7名，21歳から27歳）であった。全ての実験参加者にオーディオメータ（RION AA-77A）を用いた聴力検査を実施し，500，1000，2000，4000 Hzの平均聴力レベルが10 dB以下であることを確認した。また，全員運転免許を持ち，保有年数は10ヶ月から7年であった。

3.4.3 手続き

音源定位の精度確認

実験参加者が視覚刺激背後から提示される聴覚刺激を、正確にその方向を認識できているかを調べた。視覚刺激後方の6つのスピーカから、ランダムな順序で聴覚刺激を10回ずつ、合計60回提示した。実験参加者には提示された方向を回答するよう求めた。

自動車運転中の視覚探索

実験参加者には、運転課題と視覚探索課題を同時に行うよう求めた。運転課題では、一般道の直線走行を想定し、走行速度を50 km/hに維持しながら、1つの車線を直進するよう求めた。走行中の速度のぶれを評価指標とした。

視覚探索課題では、点灯したLEDの上下どちらが点灯しているかを、ステアリングに貼り付けた片手キーボード（Koolertron AE-AMAG09-RDB）でできる限り素早く正確回答するよう求めた。片手キーボードに取り付けられたキーは2つのみで、上下に並んで配置されていた。実験参加者は片手キーボードの上に右手の親指が位置するようにステアリングを握り、右手の親指で視覚探索の回答を行った。LED刺激が提示された時の聴覚刺激提示位置により、3つの条件を設けた。条件1では、LEDと同じ設置角度にあるスピーカから聴覚刺激が提示された。条件2では、LEDから内側に20°ずれた位置にあるスピーカから聴覚刺激が提示された。条件3では、LEDから外側に20°ずれた位置にあるスピーカから聴覚刺激が提示された。視覚刺激の左右反対位置から聴覚刺激が提示される条件はなかった。LEDが点灯してから、キー押下による回答が得られるまでの時間を反応時間として取得した。LED点灯と、聴覚刺激が実験参加者頭部位置に到達するタイミングは、オシロスコープ（Siglent SDS1104X-E）を用いて同時となるよう調節した。実験参加者の目線高さにおける水平面照度は約350 lxであった。

実験ではまず、ドライビングシミュレータの操作に慣れるために走行練習を実施した。十分にドライビングシミュレータの操作に慣れた後、実験に移行した。実験ではまず、1つの車線を50 km/hで走行し続けるよう求め、走行速度が安定してから視覚探索課題を開始した。視覚探索課題は、1試行につき左右15回ずつ、合計30回視覚刺激が提示された。1試行につき3回ずつ、合計9試行を実験参加者ごとにランダムな順序で実施した。1試行が終了するごとに、実験2、実験3と同様、メンタルワークロードの主観評価を行った。評価項目は、注意努力、視覚的負担、聴覚的負担、妨害感の4尺度に加え、視覚探索の主観的難易度を、左右の刺激位置に対してそれぞれ評価を求めた。

3.4.4 結果

1名のデータは欠損していたため、19名の実験参加者から得られたデータについて分析を行った。

音源定位の精度

19名の音源定位課題の平均正答率は約80.5% (SD = 6.4) で、最小値が71.7%, 最大値が96.7%であった。

視覚探索課題における反応速度

19名の実験参加者から、一部のデータ欠損を除き5100の反応時間を得た。誤答を除き、平均値±3SDを超える反応時間は外れ値として除外し、合計4894の反応時間を分析対象とした。

Fig. 3.22に、各条件での平均反応時間を視覚刺激位置ごとに示す。視覚探索における実験参加者ごとの平均反応時間について、実験条件と視覚刺激の配置を要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した結果、視覚刺激の配置の主効果のみ認められた（視覚刺激の配置： $F(1, 18) = 287.2, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.94$, 実験条件： $F(2, 36) = 0.60, p = 0.55, \eta_p^2 = 0.03$, 交互作用： $F(2, 36) = 1.6, p = 0.22, \eta_p^2 = 0.08$ ）。

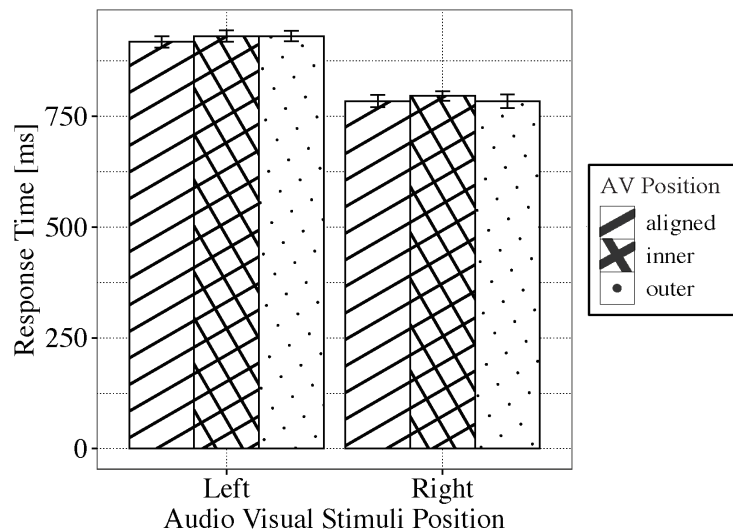


Fig. 3.22: Mean response time of visual search task at each condition of left and right location in the experiment 4. (Error bars show 95% confidence interval.)

視覚探索課題における誤答率

Fig. 3.23に、各条件での誤答率を視覚刺激位置ごとに示す。視覚探索における実験参加者ごとの平均誤答率について、実験条件と視覚刺激の配置を要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した結果、視覚刺激の配置の主効果のみ認められた（視覚刺激の配置： $F(1, 18) = 13.2, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.42$, 実験条件： $F(2, 36) = 1.0, p = 0.38, \eta_p^2 = 0.05$, 交互作用： $F(2, 36) = 0.5, p = 0.60, \eta_p^2 = 0.03$ ）。

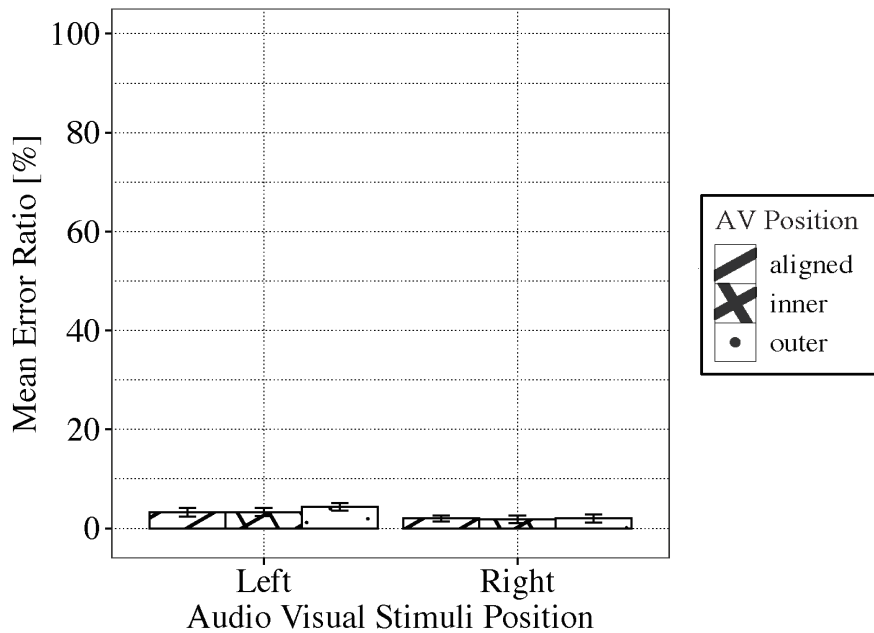


Fig. 3.23: Mean error ratio of visual search task at each condition of left and right location. (Error bars show 95% confidence interval.)

メンタルワークロードおよび視覚探索課題の主観的難易度

Fig.3.24 に、注意努力、視覚的負担、聴覚的負担、妨害感の平均評価値を条件ごとに示す。実験条件を要因として一元配置反復測定分散分析を実施したところ、妨害感のみ有意な主効果が認められた（注意努力： $F(2, 36) = 1.0, p = 0.37, \eta_p^2 = 0.05$, 視覚的負担： $F(2, 36) = 2.2, p = 0.12, \eta_p^2 = 0.11$, 聴覚的負担： $F(2, 36) = 1.0, p = 0.38, \eta_p^2 = 0.05$, 妨害感： $F(2, 36) = 3.3, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.15$ ）。妨害感について単純主効果を実施したところ、聴覚刺激が視覚刺激の内側にずれている場合（条件2）に、視聴覚刺激の設置角度が同じ場合（条件1）に比べて妨害感が高くなる傾向（ $p < 0.10$ ）が見られた（条件1-2： $t(18) = 2.6, p = 0.05$ ）。

Fig. 3.25 に、視覚探索課題の主観的難易度を、視覚刺激の配置ごとに示す。実験条件と視覚刺激位の配置を要因として二元配置反復測定分散分析を実施したところ、視覚刺激の配置のみ有意な主効果が認められた（視覚刺激の配置： $F(1, 18) = 45.4, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.72$, 実験条件： $F(2, 36) = 1.4, p = 0.26, \eta_p^2 = 0.07$, 交互作用： $F(2, 36) = 1.9, p = 0.16, \eta_p^2 = 0.10$ ）。

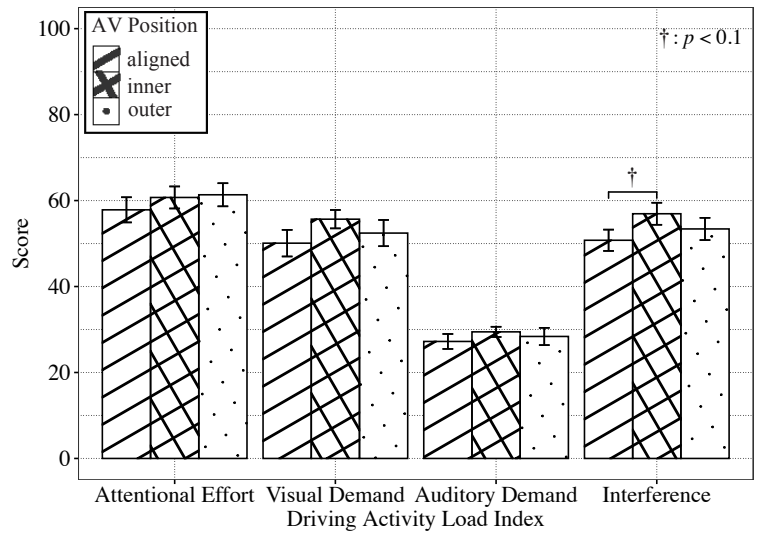


Fig. 3.24: Subjective mental workload at each condition in the experiment 4. (Error bars show 95% confidence interval.)

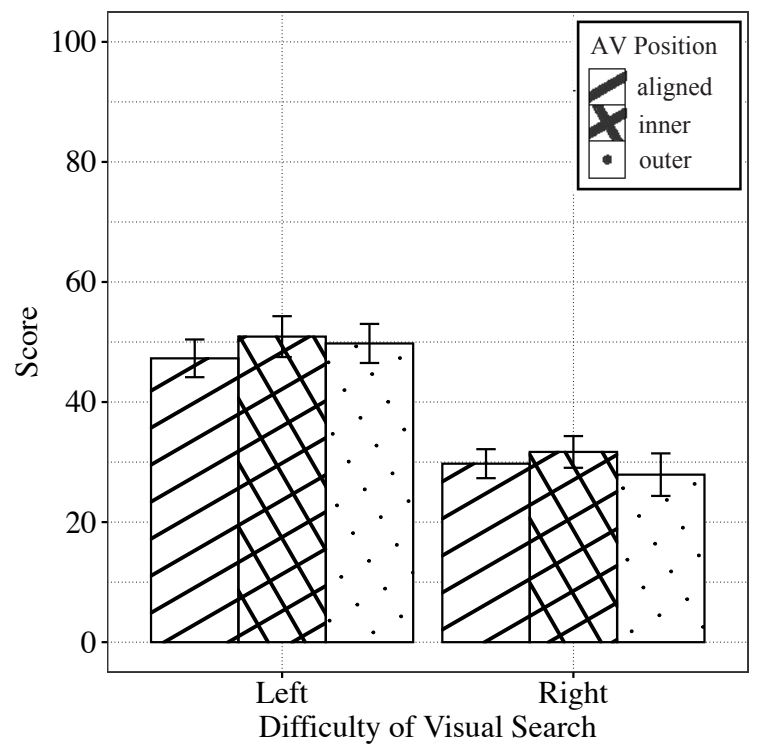


Fig. 3.25: Subjective difficulty of visual search task at each condition in the experiment 4. (Error bars show 95% confidence interval.)

運転課題

走行速度映像は、反応速度、誤答率、メンタルワークロードの分析に用いた19名の実験参加者のうち、2名は映像が記録されていなかったため、17名のデータで分析を行った。1試行ごとに録画したドライビングシミュレータの映像について、1フレームごとの画像を表

示されている速度を、OCR (Optical Character Recognition) により読み取って分析した。読み出した1フレームごとの走行速度を用いて、式3.2より速度のぶれを算出した。

条件ごとの速度のぶれを Fig. 3.26 に示す。実験条件を要因とした一元配置分散分析を実施した結果、有意な主効果は認められなかった ($F(2, 32) = 0.4, p = 0.67, \eta_p^2 = 0.02$)。

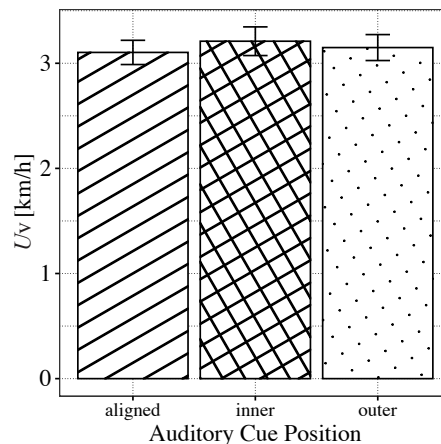


Fig. 3.26: Mean instability of speed control for each condition in the experiment 4. (Error bars show 95% confidence interval.)

3.4.5 考察

左ミラー位置にある視覚刺激の探索が、右ミラー位置と比較して有意に遅い結果となった。また視覚探索の誤答率に関しても、左ミラー位置が右ミラー位置よりも優位に高い結果となった。視覚探索の主観的難易度が、左ミラー位置にて右ミラー位置よりも有意に高いことが示す通り、左ミラー位置は右ミラー位置よりも正面から離れており、視覚探索難易度が高かったためであると考えられる。

左右で視聴覚刺激が同じ領域にある場合、聴覚刺激の位置が視覚刺激から左右方向に $\pm 20^\circ$ ずれていても、視聴覚刺激の位置が揃っている場合と比較して反応時間の違いが現れなかった。この結果は、Spence & Ho (2008b) が述べる視覚刺激とその手がかりとなる刺激は必ずしも同じ位置になくてよいという主張や、Ho et al. (2006b) が述べる視覚刺激と手がかりは同じ機能的領域に含まれていればよいという主張と一致する。また第2章で示したとおり、視聴覚刺激が $\pm 40^\circ$ の位置にある場合は大きな視覚探索の遅延が起こらない結果とも一致する。ドライビングシミュレータを用いた運転行動を行いながら視覚探索を行う場合に、聴覚刺激が左右同じ領域で空間的にずれた位置にあっても、空間手がかり効果に大きな違いは現れないことを実験的に示した。

反応時間には視聴覚刺激のずれによる違いが現れなかったが、妨害感においては聴覚刺激が視覚刺激の内側にずれている場合の評価値が、視聴覚刺激が揃っている場合と比較して高い傾向が現れた。そのほかの評価指標についても、分散分析において有意な主効果は得られていないが、いずれも視聴覚刺激の位置が揃っている場合が最も評価値が低くなった。実験参加者は平均で約80%の精度で音源定位ができており、提示された音源の位置は概ね理解できていたと考えられる。視覚探索が左右どちらに現れたかは、いずれの条件で

も理解できたため課題に対する主観的負担（注意努力・視覚的負担・聴覚的負担）の変化は小さいが、視覚刺激と聴覚刺激のずれを認識できたために、相対的に情報提示に対する主観的な妨害感が高まったと考えられる。また、内側の聴覚刺激の方が妨害感が高くなる傾向が現れた見られた。探索すべき視覚刺激よりも実験参加者の視野中心に近い位置に聴覚刺激があるため、視覚探索経路の途中で一時的に聴覚刺激方向へ空間的注意が補足された可能性がある。もしくは、正面右側10°位置にあるスピーカはほぼ正面であり、左右情報が伝えられなかった可能性もある。

3.4.6 実験4のまとめ

実験4では自動車運転中の左右ドアミラー配置の視覚情報確認を想定し、視聴覚刺激の位置にずれがある場合の効果を調べた。視覚探索にかかる時間や、課題に対する主観的負担、運転課題への影響は現れなかった。これは第2章で示した、視覚探索において手がかりとする聴覚刺激は、視覚刺激からの水平距離が±40°以内であれば、近い反応時間となることと一致する。

一方、提示される視聴覚情報をもたらす実験課題への妨害感は、聴覚刺激が視覚刺激の内側に20°ずれている場合に高まる傾向が見られた。実験参加者は概ね音源定位ができていたため、視覚刺激位置よりも視野中心に近い聴覚刺激位置に注意が奪われたことが、妨害感の上昇につながった可能性がある。聴覚刺激が視覚刺激の外側にある場合は、その傾向が弱まった。

妨害感以外の課題に対する主観的負担（注意努力・視覚的負担・聴覚的負担）についても、視聴覚刺激位置のずれによる変化は認められなかったものの、視聴覚刺激の位置が同じ場合の値が最も低くなった。視聴覚刺激の位置が揃っている場合が、ドライバーの視覚探索などの行動支援やその主観的負担の軽減に最も貢献できる可能性がある。視聴覚刺激のずれが発生すると、そのずれが小さい場合は運転や視覚探索への影響は小さいが、情報提示への妨害感が高まるかもしれない。なおその傾向は聴覚刺激が視覚刺激の内側にずれる方が現れやすく、外側にずれた場合の方が評価の低下を抑えられる可能性が示唆された。

視覚探索に用いた聴覚刺激の配置が視覚刺激とずれている場合、運転行動にも影響は現れなかった。視覚探索への影響が現れなかったことや、音源定位が難しい聴覚刺激を用いた場合でも、運転行動への悪影響が現れなかったことを踏まえると、妥当な結果と言える。

3.5 第3章のまとめ

第3章では自動車運転中の視覚情報確認において、視聴覚刺激の位置を揃えることの効果を、3つの実験を通して検証した。既往研究のほとんどは反応時間に関する議論に集中しているが、本研究ではメンタルワークロードも含めた包括的な議論を行った。

実験2では、自動車運転中の視覚探索において、視覚刺激の方向より聴覚刺激を提示することにより、素早い視線移動を促して正確な視覚情報確認が可能となった。視覚探索に要する時間が減少したことで、進行方向に視線が向く時間が上昇し、ステアリングや速度の制御が安定した。また、実験参加者の主観的な負担も軽減した。

実験3では、視覚探索の手がかりとなる聴覚刺激の音源定位が困難な場合の効果を調べた。音源定位が困難な聴覚刺激を用いた場合は、視覚探索にかかる時間が長くなり、視覚探索の精度が減少し、課題に対する主観的負担も増加した。運転行動についてもステアリング・速度のぶれが上昇したものの、その差は有意なものではなかった。

実験4では、視聴覚刺激が左右で同じ領域にあり、その位置がずれている場合の効果を調べた。視覚探索速度や課題に対する主観的負担、および運転課題成績には、視聴覚刺激のずれによる影響は現れず、第2章での結果から考えても妥当であった。一方、提示される視聴覚刺激への妨害感、聴覚刺激が視覚刺激の内側に位置した場合、わずかに高まる傾向があった。実験参加者は音源位置の定位が概ねできていたため、視覚探索において視覚刺激とわずかにずれた位置に注意が奪われたことが影響した結果と考えられる。

以上を踏まえると、自動車運転中の視覚情報確認において最もドライバーのパフォーマンスが保証されるのは、視聴覚情報の位置が揃っており、かつ聴覚情報の音源定位が容易な場合であると考えるのが妥当である。視聴覚情報の位置がずれが小さい場合は、運転や情報確認の精度、作業に対する主観的負担への悪影響は大きく現れないが、提示される情報に対するドライバーの評価が悪くなる可能性を含んでいる。その傾向は聴覚刺激が視覚刺激の内側にずれた場合の方が現れやすい。視聴覚情報を同じ場所に位置することが困難であれば、聴覚情報は視覚情報の外側にずらした方が、ドライバーからの評価の低下を抑えられる可能性がある。本章で実施した自動車運転中の視覚探索課題において、実験参加者のメンタルワークロードといった主観的評価や、音源定位の困難な音源を用いた場合の効果について、反応時間と運転パフォーマンスと交差して議論した既往研究は少なく、意義のある結果を示した。

第4章 視聴覚情報の緊急感は揃えるべきか？

4.1 はじめに

自動車室内での情報提示デザインを考える際、提示された情報からドライバが状況に応じた適切な緊急感 (perceived urgency) を知覚することが重要である (Stanton & Edworthy, 1999; Ho & Spence, 2005) そのため、多くの研究が色や音の周波数など物理的パラメータを操作して、緊急感のマッピングを得ることを試みてきた (Edworthy et al., 1991; Hellier & Edworthy, 1999; Arrabito et al., 2004; Baldwin et al., 2012; Baldwin & Lewis, 2014)。しかしながらマルチモーダルな情報提示の有効性がこれまでに多く示されているにもかかわらず、緊急感に関してモダリティ間の相互作用を検討した研究はほとんどない。

視聴覚の相互作用に関する研究では、クロスモーダル対応 (crossmodal correspondence) に関する研究が非常に多い。クロスモーダル対応は多くの人に共通して現れる異なるモダリティ刺激の対応づけである。視聴覚間ではピッチとサイズ (Gallace & Spence, 2006; Evans & Treisman, 2009)、ピッチと角度 (Marks, 1987; Parise & Spence, 2012; Walker, 2012)、色と音色 (Adeli et al., 2014)、視聴覚刺激の空間的位置 (Jamal et al., 2017)、音の周波数と視覚刺激の空間周波数 (Green et al., 2019; Postnova et al., 2020)、シャープネス、ラフネスといった音質評価指標と色 (Sun et al., 2018) など、多くの特性に関するクロスモーダル対応の報告がある。クロスモーダル対応が現れる要因としては、構造的 (structural)、統計的 (statistical)、意味的 (semantic) などの要因が考えられている (Spence, 2011, 2020b; Peters et al., 2015)。近年は、各モダリティ刺激により近い情動が喚起される場合、その情動を媒介してクロスモーダル対応が現れるという、情動媒介理論 (emotional mediation theory) が提案され (Palmer et al., 2013)、その理論を支持する研究も多い (Gerdes et al., 2014; Lindborg & Friberg, 2015; Isbilen & Krumhansl, 2016; Bhattacharya & Lindsen, 2016; Palmer et al., 2016; Spence, 2020a; Spence & Stefano, 2022)。Russell et al. (1989) によると情動は、快-不快 (pleasure-displeasure)、覚醒-沈静 (arousal-sleepiness) の2次元で表現される (see also Mauss & Robinson, 2009)。緊急感は覚醒に大きく関わるパラメータであり (Ho & Spence, 2005; Suied et al., 2008)、緊急感が異なる刺激間でもクロスモーダル対応が表れると予想できる。

そのため本章では、緊急感の異なる視聴覚刺激を用意した際、クロスモーダル対応が表れるかを実験5で検証する。まず、視覚刺激と聴覚刺激をそれぞれ用意し、主観評価実験により各刺激の緊急感を取得し、実験に用いる刺激を選定する。その後、聴覚刺激をプライム刺激、視覚刺激をターゲット刺激としたプライミング課題を実施する。プライミング課題は、プライム刺激提示直後のターゲット刺激を素早く回答する弁別課題で、クロスモーダル対応を調べる方法の1つである (e.g. Ho et al., 2014; Brunel et al., 2015; Feng et al., 2021)。緊急感による視聴覚間クロスモーダル対応が現れるならば、プライミング課題において近い緊急感を持つ組み合わせの刺激において、反応促進が現れるはずである。

またクロスモーダル対応による反応促進は、注意資源が減少した環境では弱まると考えられている (e.g. Santangelo & Spence, 2006)。緊急感が近いことによる反応促進が現れたとしても、同様の反応促進が自動車運転中に現れるとは言い難い。そのため実験6では知覚負荷を与えた環境下でのプライミング効果も検討するため、トラッキング課題を同時に実施する。

4.2 実験5：緊急感の視聴覚クロスモーダル対応

4.2.1 緊急感に基づく刺激の選定

まずプライミング課題に用いる視聴覚刺激を選定するために、視聴覚刺激を作成し、緊急感の主観評価実験を実施した。聴覚刺激は、聴覚アイコン (auditory icon) (cf. Gaver, 1986; Cabral & Remijn, 2019) や音楽に該当しないものを、シンセサイザソフトウェア (Alchemy) を用いて60種類作成した。聴覚刺激の長さは500 msで統一した。作成した聴覚刺激のWAVファイルは、Zenodoにて公開している (DOI: 10.5281/zenodo.5797918)。視覚刺激は単色からなる正方形とした。13種類のweb基本色, red, yellow, blue, green, orange, lime, navy, teal, aqua, purple, fuchsia, olive, maroonを用いた。

聴覚刺激はオーディオインターフェース (RME Babyface Pro FS) を介してヘッドホン (Sennheiser HD650) で提示した。聴覚刺激のラウドネスレベルは、 70 ± 1 phonで統一した。視覚刺激はディスプレイ (EIZO ColorEdge CS2420-Z, 24.1 inches, resolution: $1,920 \times 1,200$ pixels, refresh rate: 60 Hz) を用い、グレーの背景上に提示した。実験参加者とディスプレイの距離は約60 cmであった。視覚刺激のサイズは 100×100 pixelsで、視角は約 2.6° であった。視覚刺激の緊急感評価画面はFig. 4.1の通りである。Table4.1に、各視覚刺激と背景およびテキストのRGB値、および輝度計 (Konika Minolta LS-110) で測定した輝度を示す。ディスプレイに表示される色は、キャリブレーションセンサー (EIZO EX-4) を用いて校正した。

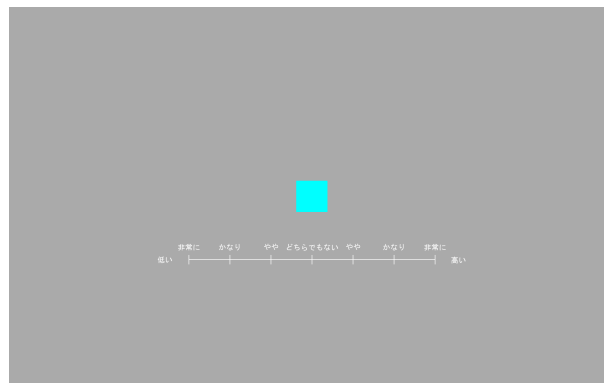


Fig. 4.1: Screenshot of the display for perceived urgency evaluation used in the experiment 5.

Table 4.1: The RGB colors in decimal value and luminance of each color used in the experiment 5.

Color	(R, G, B)	Luminance [cd/m ²]	Color	(R, G, B)	Luminance [cd/m ²]
Red	(255, 0, 0)	25.3	Purple	(128, 0, 128)	7.7
Yellow	(255, 255, 0)	99.9	Green	(0, 128, 0)	16.8
Blue	(0, 0, 255)	7.4	Fuchsia	(255, 0, 255)	32.3
Orange	(255, 165, 0)	53.5	Olive	(128, 128, 0)	22.3
Lime	(0, 255, 0)	75.3	Maroon	(128, 0, 0)	6.0
Navy	(0, 0, 128)	2.1	Gray (Background)	(170, 170, 170)	43.5
Teal	(0, 128, 128)	18.5	White (Text, Fixation)	(255, 255, 255)	107.2
Aqua	(0, 255, 255)	82.3			

実験システムは MATLAB 2021a の Psychtoolbox-3 を用いて作成した (Brainard, 1997; Pelli, 1997; Kleiner et al., 2007)。9名 (男性6名, 女性3名, 21歳から25歳) の実験参加者が, 各視聴覚刺激の緊急感を7段階 (-3:非常に低い, -2:かなり低い, -1:やや低い, 0:どちらでもない, +1:やや高い, +2:かなり高い, +3:非常に高い) で評価した。全ての実験参加者にオーディオメータ (RION AA-77A) を用いた聴力検査を実施し, 500, 1000, 2000, 4000 Hz の平均聴力レベルが 10 dB 以下であることを確認した。また, 石原色覚検査表IIを用いた色覚検査を実施し, 全員に色覚異常がないことを確認した。主観評価実験は防音室で実施した。暗騒音レベルはA特性で 22.0 dB, 防音室内は暗室とし, ディスプレイにグレーの背景を表示した際の机上面照度は 5.7 lx であった。

聴覚刺激の緊急感評定値を Fig. 4.2, 視覚刺激の緊急感評定値を Fig. 4.3 に示す。聴覚刺激のうち, 緊急感が最も高いもの (mean = 2.6, SE = 0.2), 中程度のもの (mean = 0.0, SE = 0.3), 最も低いもの (mean = -2.2, SE = 0.2) の3種類をプライム刺激として選定した。各聴覚刺激の時間波形および周波数スペクトルを Fig. 4.4, 4.5, 4.6 に示す。緊急感が最も高い聴覚刺激は, 周波数のピークを約 4300 Hz に持ち, 125 ms 周期で変動する音であった。緊急感が中程度の聴覚刺激は, 約 1600 Hz の周波数成分のみを持つ音であった。緊急感が最も低い聴覚刺激は, 約 400 Hz と約 1600 Hz の, 2つの周波数成分を持つ音であった。プライム刺激として選定した聴覚刺激はそれぞれ Zenodo (DOI: 10.5281/zenodo.5797918) にて, 「as_500ms_037」, 「as_500ms_016」, 「as_500ms_058」の名称で参照可能である。ターゲット刺激に用いる視覚刺激は, 緊急感が最も高い赤色 (mean = 2.9, SE = 0.1) と, 最も低い緑色 (mean = -2.3, SE = 0.3) を選定した。

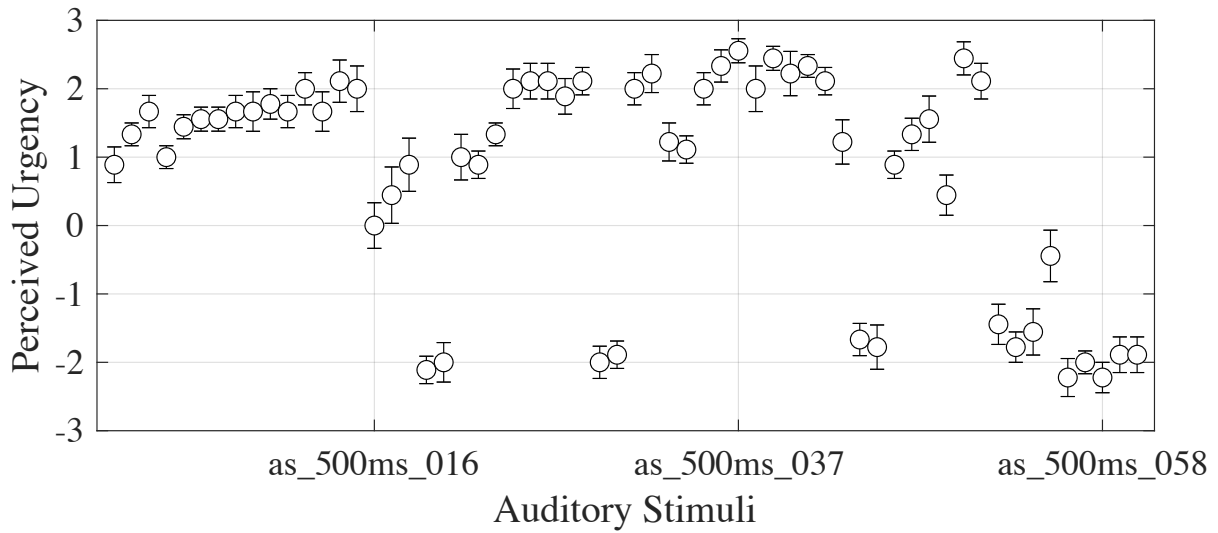


Fig. 4.2: Mean of perceived urgency of 60 auditory stimuli used in the stimuli selection of the experiment 5. (Error bars show standard error.) The as_500ms_016, as_500ms_037, and as_500ms_058 of auditory stimuli were selected for the priming task of the experiment 5.

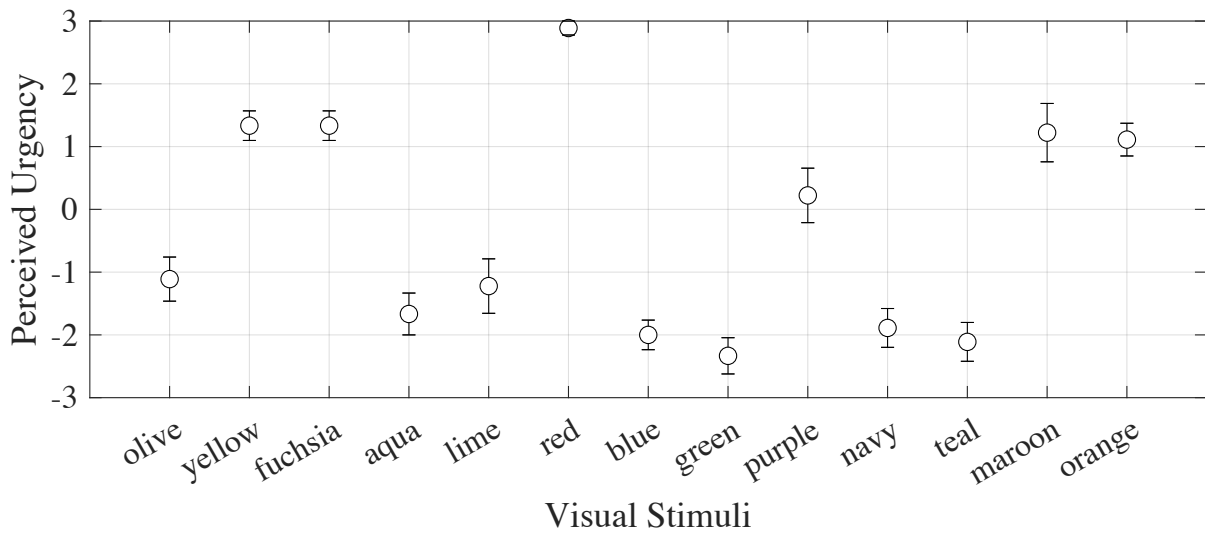


Fig. 4.3: Mean of perceived urgency of visual stimuli used in the stimuli selection of the experiment 5. (Error bars show standard error.) The as_500ms_016, as_500ms_037, and as_500ms_058 of auditory stimuli were selected for the priming task of the experiment 5.

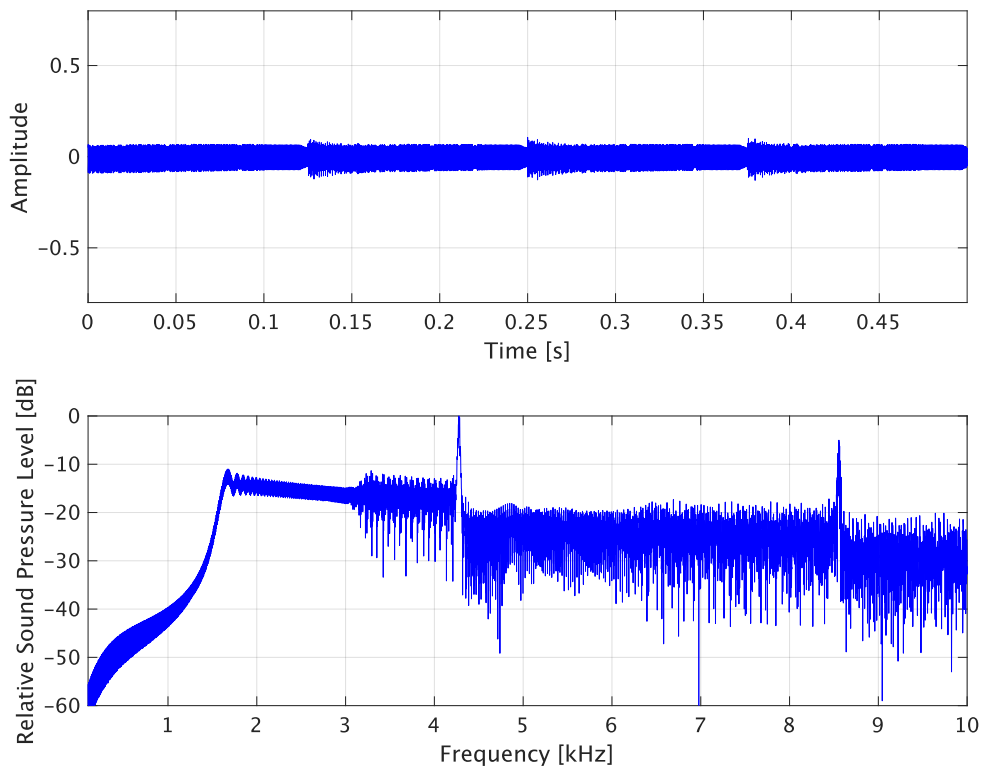


Fig. 4.4: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus with the highest perceived urgency used in the priming task of the experiment 5.

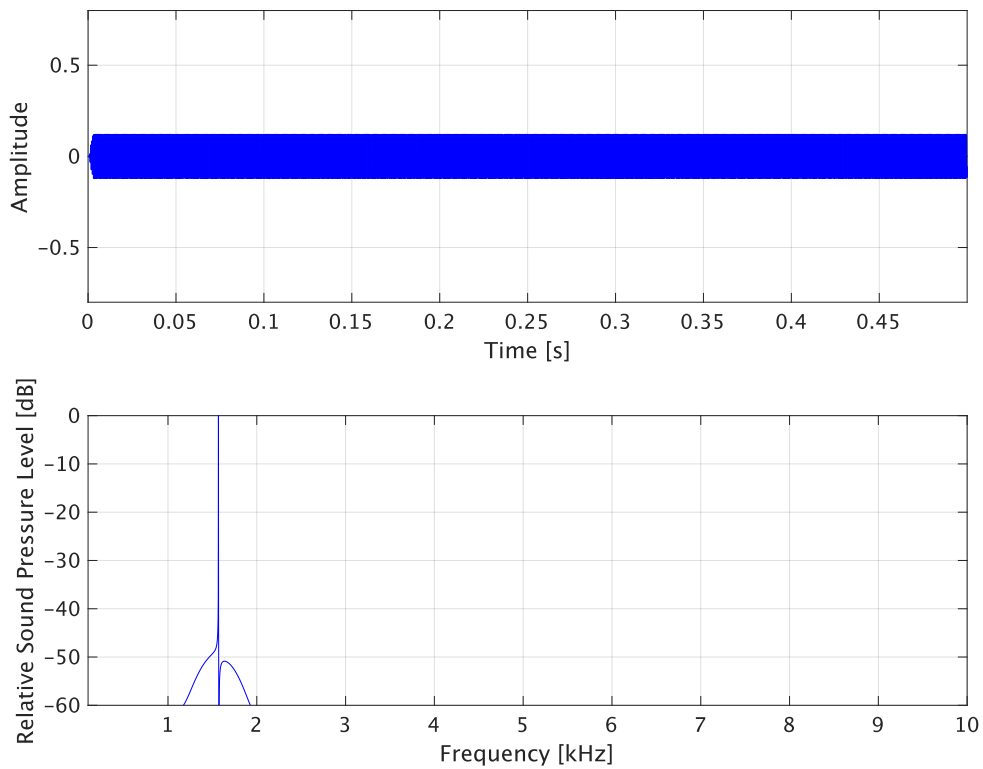


Fig. 4.5: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus with medium perceived urgency used in the priming task of the experiment 5.

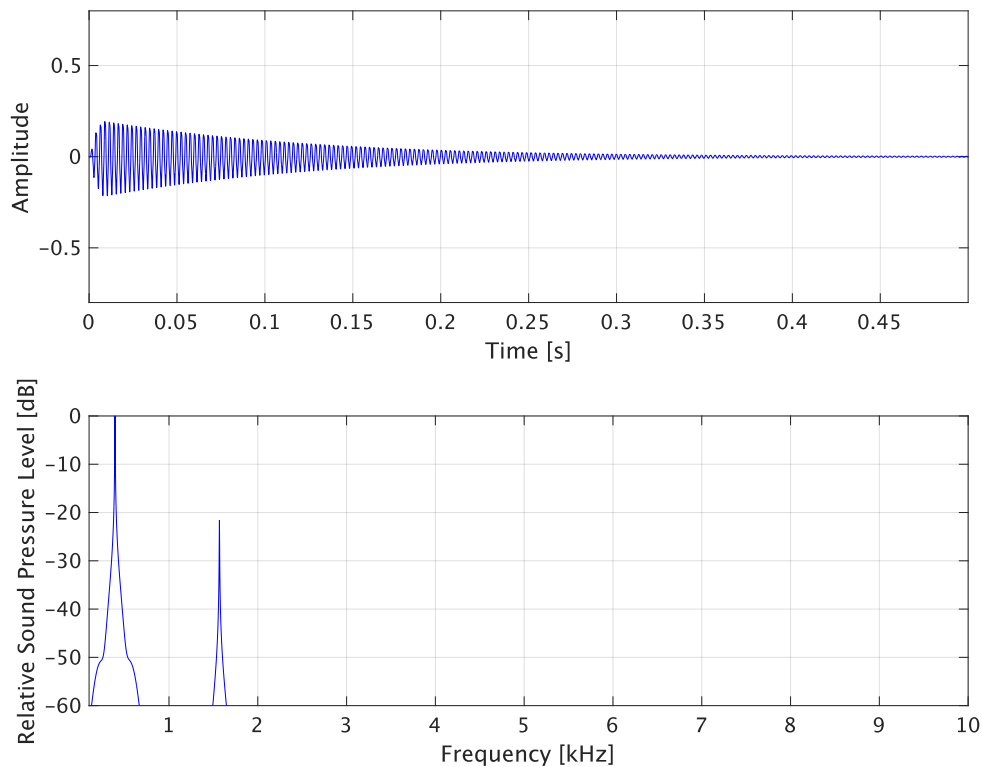


Fig. 4.6: Waveform and frequency spectrum of auditory stimulus with the lowest perceived urgency used in the priming task of the experiment 5.

4.2.2 手続き

実験は、緊急感が高・中・低の聴覚刺激3種類 (AH: *Auditory stimulus elicits high-perceived urgency*, AM: *Auditory stimulus elicits medium-perceived urgency*, AL: *Auditory stimulus elicits low-perceived urgency*) と、緊急感が高・低の視覚刺激2種類 (VH: *Visual stimulus elicits high-perceived urgency* [赤], VL: *Visual stimulus elicits low-perceived urgency* [緑]) を用いた、2要因 (3×2) の被験者内実験計画とした。

プライミング課題における1試行の流れを Fig. 4.7 に示す。まずはじめに、画面中央に注視点が表示されると同時に、いずれか1つの聴覚刺激が再生された。聴覚刺激のラウドネスレベルは 70 ± 1 phon とした。注視点が表示された 300 ms 後に、いずれかの視覚刺激が画面中央に表示された。実験参加者には、赤と緑のどちらが表示されたか、キーボード (Koolertron AE-AMAG09-RDB) の左右を用いて、できる限り素早く正確に、左手人差し指で回答するように求めた。半数の実験参加者は赤色が右、緑色が左、もう半数の実験参加者は反対の組み合わせのキーを割り当てることでカウンターバランスをとった。キーを押下すると視覚刺激が消え、1試行が完了した。試行間の間隔は、2秒から4秒でランダムとした。視聴覚刺激の組み合わせごとに60回ずつ提示し、合計360試行を1人の実験参加者に実施した。

実験システムを Fig. 4.8 に示す。実験プログラムは、MATLAB 2021a の Psychtoolbox-3 を用いて作成した (Brainard, 1997; Pelli, 1997; Kleiner et al., 2007)。オーディオインターフェース、ヘッドホン、ディスプレイ、実験室の条件は、全て緊急感の主観評価実験に用いたものと

同じであった。

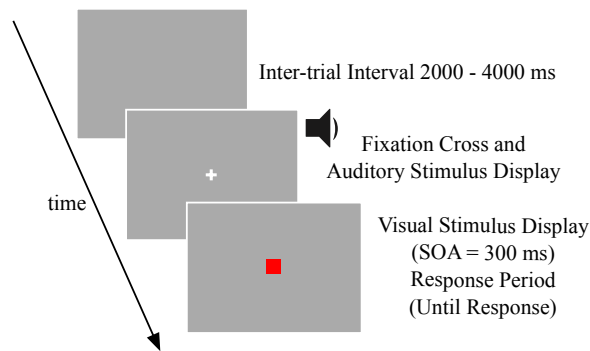


Fig. 4.7: Schematic diagram of a single trial of priming test of the experiment 5. (SOA: Stimulus onset asynchrony)

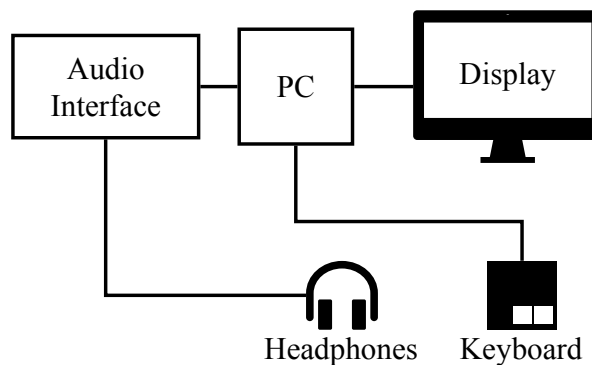


Fig. 4.8: Schematic diagram of the experimental set-up used in the experiment 5.

4.2.3 実験参加者

実験参加者は20名（男性13名，女性7名，22歳から25歳）であった。全ての実験参加者にオーディオメータ（RION AA-77A）を用いた聴力検査を実施し，500，1000，2000，4000 Hzの平均聴力レベルが10 dB以下であることを確認した。実験参加前に実験参加者からインフォームドコンセントを得た。実験内容はヘルシンキ宣言に基づいており，九州大学大学院芸術工学研究院実験倫理委員会の承認を得た。

4.2.4 結果

反応時間の分析

合計7200の反応時間を得た。1名の実験参加者について，15%以上の反応が1秒から3秒に分布しており，できる限り素早く回答するという実験意図が伝わっていなかったとして分析対象から除外した。誤答を除き，平均値 ± 3 SDを超える反応時間は外れ値として除外し，合計6723の反応時間を分析対象とした。

条件ごとの平均反応時間と95%信頼区間をFig. 4.9に示す。各実験参加者の条件ごとの平均反応時間について，視覚刺激(V)と聴覚刺激(A)を被験者内要因とした二元配置反復測定分散

分析を実施した。その結果、視覚刺激に主効果と (V: $F(1, 18) = 5.9, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.25$), 要因間の交互作用 ($A \times V: F(2, 36) = 8.1, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.31$) が有意に認められた。聴覚刺激に有意な主効果は認められなかった ($A: F(2, 36) = 0.1, p = 0.88, \eta_p^2 = 0.01$)。各聴覚刺激における視覚刺激について単純主効果検定を実施したところ、聴覚刺激 AH, AM について単純主効果が認められた ($AH: F(1, 18) = 6.4, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.26$, $AM: F(1, 18) = 16.6, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.48$)。一方, AL では単純主効果は認められなかった ($AL: F(1, 18) = 0.2, p = 0.65, \eta_p^2 = 0.01$)。各視覚刺激における聴覚刺激について単純主効果検定を実施したところ, VH, VL ともに有意な単純主効果が認められた ($VH: F(2, 36) = 3.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.16$, $VL: F(2, 36) = 4.8, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.21$)。各視覚刺激において多重比較を実施したところ, VH においてはいずれの条件間でも有意差は認められなかった ($AH-AM: t(18) = 0.3, p = 0.74, r = 0.08$, $AH-AL: t(18) = 1.8, p = 0.09, r = 0.40$, $AL-AM: t(18) = 2.4, p = 0.09, r = 0.49$)。一方, VL においては AL における反応時間が AH, AM よりも有意に短いことが認められた ($AH-AL: t(18) = 2.2, p < 0.05, r = 0.46$, $AM-AL: t(18) = 3.1, p < 0.05, r = 0.59$)。VL における AH と AM の間には有意な差は認められなかった ($AH-AM: t(18) = 0.3, p = 0.78, r = 0.07$)。多重比較における有意水準は, Shaffer の方法で調整した。

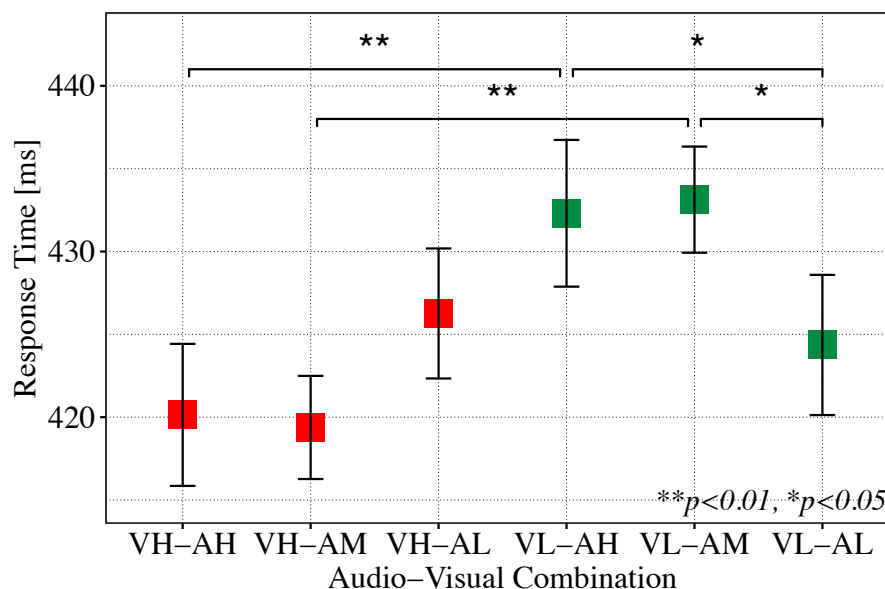


Fig. 4.9: Mean response time of each audio-visual combination in the priming task of the experiment 5. (Error bars show 95% confidence interval. The confidence intervals were calculated using Baguley's method [Baguley (2012)].)

誤答の分析

各実験参加者の条件ごとの平均誤答率について、視覚刺激 (V) と聴覚刺激 (A) を被験者内要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した。その結果、有意な主効果および交互作用は認められなかった。全体の平均誤答率は 0.8%, 最も誤答が多い条件で 1.2%, 最も誤答が少ない条件で 0.4%であった。

4.2.5 考察

視聴覚刺激間には有意な交互作用が認められた。聴覚刺激の緊急感が高い時、緊急感が高い視覚刺激に対する反応が、緊急感の低い視覚刺激に比べて有意に速くなることが認められた。このことから、緊急感が高い視聴覚刺激の間に、クロスモーダル対応が表れていると考えられる。この結果は、Adeli et al. (2014)が報告した、刺々しい音色 (harsh timbre) と赤色が結びつくこととも一致している。また Suied et al. (2008)は、短い周期で変動するような緊急感が高い音色は実験参加者の注意を引きつけ、反応を促進するとしている。しかしながら、聴覚刺激による反応時間への主効果は現れなかった。実験参加者の反応は視聴覚刺激の組み合わせに影響を受け、聴覚刺激の緊急感が高ければ反応が促進されるということとはなかった。

聴覚刺激の緊急感が中程度の場合についても、聴覚刺激の緊急感が高い場合と同様、緊急感が高い視覚刺激に対する反応が速くなった。緊急感が高い聴覚刺激と緊急感が中程度の聴覚刺激の間には、いずれの視覚刺激でも反応に差は見られなかった。緊急感が中程度の聴覚刺激は、周波数成分を1つしか持たない純音性の音であり、緊急感が高い聴覚刺激とは物理的特徴が異なる。それにもかかわらず、緊急感が高い聴覚刺激と同様な反応を示した。これには2つの現象が関係していると考えられる。1つは、異なるモダリティに入力された刺激を、各モダリティにおいて情動などの次元で位置付けを行い、その次元内における位置付けを相対的に比較することでクロスモーダル対応が発生するというものであり (Cohen, 1934; Mellers & Birnbaum, 1982; Spence & Stefano, 2022)、もう1つは、ネガティブな印象を与える刺激の方が、そうでないものと比較してより注意の偏りが生まれるネガティブバイアスである (Rozin & Royzman, 2001; Vaish et al., 2008)。緊急感が高い音は覚醒度 (Ho & Spence, 2005; Suied et al., 2008) を高め、アノイアンスが高まるなど、ネガティブな印象を抱きやすい (Wiese & Lee, 2004; Marshall et al., 2007)。また緊急感が高い視覚刺激として用いた赤色も覚醒度を高め、かつネガティブな印象と結びつきやすくとされる (Russell et al., 1989; Young et al., 2013; Buechner & Maier, 2016)。以上のことから、聴覚刺激から知覚された緊急感の主観評価においては中程度と評価されたが、中程度の緊急感を持つ聴覚刺激を知覚した時に、内発的な注意はネガティブな印象を与える方向、すなわち緊急感の高い方向へと向けられ、その結果として緊急感の高い視覚刺激に対するクロスモーダルな対応づけが行われたと考えられる。

緊急感が低い聴覚刺激では、視覚刺激間に反応の違いは見られなかった。しかしながら、緊急感の低い視覚刺激の中では、緊急感が高い・中程度の聴覚刺激が提示された場合よりも有意に速い反応を示している。このことから、緊急感が低い視聴覚刺激の間にもクロスモーダルな対応づけが表れていると考えられる。緊急感が高い場合と反応の表れ方に非対称性が見られるのは、赤色が持つ覚醒度やネガティブな印象が実験参加者の内発的な注意を起し、赤色に対する単純反応速度が緑色よりも速かったことが考えられる (Yiend, 2010; Buechner & Maier, 2016; Vishteh et al., 2019)。視覚刺激間には単純主効果も認められており、この考察を支持していると考えられる。

また Vishteh et al. (2019)は、単色刺激に対する単純反応速度を調べている。視覚刺激の提示タイミングがランダムでなく、一定の時間間隔 (10 s) で提示される実験デザインであっ

たため、本実験とは相対的な比較しか行えないが、Vishteh et al. (2019)によると、赤色と緑色に対する単純反応速度は、赤色に対しての反応（208 ms）が約10 msほど緑色に対する反応（218 ms）よりも有意に速いとされる。本実験では、緊急感が高い聴覚刺激が直前に提示された場合は、赤色に対する反応（420 ms）が緑色に対する反応（432 ms）よりも約12 ms、緊急感が中程度の聴覚刺激が直前に提示された場合は、赤色に対する反応（419 ms）が緑色に対する反応（433 ms）よりも約14 ms速い結果となった。一方、緊急感が低い聴覚刺激が直前に提示された場合には、緑色に対する反応（424 ms）が赤色に対する反応（426 ms）よりも約2 ms速い結果となった。Vishteh et al. (2019)の結果と比較した時、視覚刺激への反応の相対的变化は緊急感が低い聴覚刺激が直前に提示された場合の方が大きくなった。このことから緊急感が低い視聴覚刺激同士で対応づけが確かに行われていることが示されている。

4.2.6 実験5のまとめ

実験5では、緊急感が異なる視聴覚刺激を組み合わせてプライミング課題を実施した。直前に緊急感が高いもしくは中程度の聴覚刺激が提示された場合は緊急感の高い視覚刺激、緊急感が低い聴覚刺激が提示された場合は緊急感の低い視覚刺激への反応の相対的促進が見られた。このことから、緊急感が高い視聴覚刺激同士、緊急感が低い視聴覚刺激同士でクロスモーダル対応が現れることが示された。また、聴覚刺激の緊急感が中程度の場合は、緊急感が高い視覚刺激との対応づけが行われることも示した。

4.3 実験6：知覚負荷の影響

実験5では緊急感による視聴覚間のクロスモーダル対応が現れ、直前に提示される聴覚刺激が緊急感の近い視覚刺激への反応を促進した。このような反応促進が、自動車運転中のように、継続的な作業により注意資源が減少した環境における視聴覚情報確認でも現れるかには疑問が残る。実験6ではプライミング課題と同時にトラッキング課題を実施し、緊急感が整合することによる視覚情報判断の促進が、知覚負荷環境下においても現れるかを検討した。

Fig. 4.10にトラッキング課題の画面を示す。実験5と同じディスプレイ上に、時計回りに定速運動をする白い円が表示された。トラッキング課題とプライミング課題は同じ画面上に表示された。実験参加者には、左手人差し指でプライミング課題を行いながら、マウスカーソルをマウス（Logicool G Pro）で操作し、常に白い円と追従するよう求めた。実験条件、実験参加者は実験5と同様であった。

4.3.1 結果

反応時間の分析

実験5で分析対象から除外した実験参加者のデータは、実験6においても除外した。平均値±3 SDを超える反応時間は外れ値として除外し、合計6538の反応時間を分析対象とした。

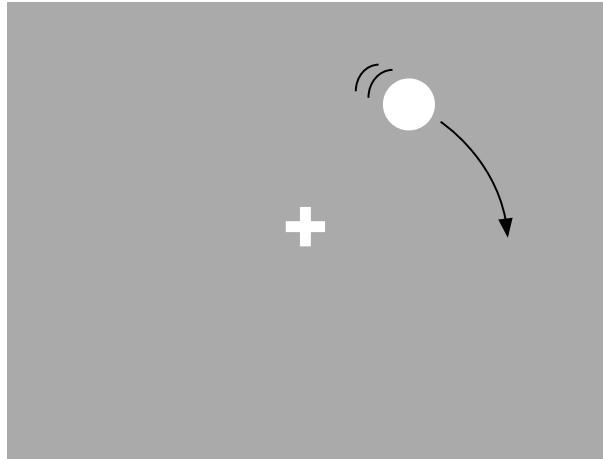


Fig. 4.10: Screenshot of the experiment 6. The tracking task display overlaid on the priming task.

条件ごとの平均反応時間と95%信頼区間をFig. 4.11に示す。各実験参加者の条件ごとの平均反応時間について、視覚刺激(V)と聴覚刺激(A)を被験者内要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した。その結果、視覚刺激の主効果のみ有意に認められた(V: $F(1, 18) = 9.5, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.35$)。有意な視覚刺激の主効果と交互作用は認められなかった(A: $F(2, 36) = 0.5, p = 0.62, \eta_p^2 = 0.03, A \times V: F(2, 36) = 2.8, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.14$)。

誤答の分析

各実験参加者の条件ごとの平均誤答率について、視覚刺激(V)と聴覚刺激(A)を被験者内要因とした二元配置反復測定分散分析を実施した。その結果、有意な主効果および交互作用は認められなかった。全体の平均誤答率は1.9%、最も誤答が多い条件で2.0%、最も誤答が少ない条件で1.6%であった。

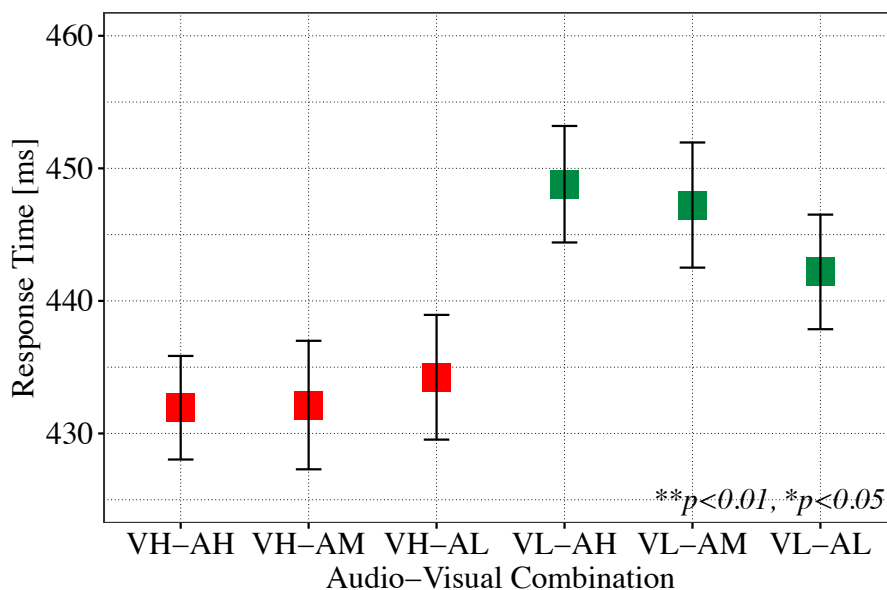


Fig. 4.11: Mean response time of each audio-visual combination under dual task condition of the experiment 6. (Error bars show 95% confidence interval. The confidence intervals were calculated using Baguley's method [Baguley (2012)].)

4.3.2 考察

トラッキング課題により知覚負荷を与えた状況下では、視聴覚刺激間の交互作用が弱まり ($p = 0.07$)、組み合わせる聴覚刺激の違いによる反応時間の相対的促進は見られなかった。視聴覚などのクロスモーダルな相互作用は、トップダウン的な注意によって調節されると考えられている (Klapetek et al., 2012; Orchard-Mills et al., 2013)。そのため知覚負荷により注意資源が減少した状態では、探索課題や弁別課題などの視覚に関する課題を行う際、空間的・意味的に一致した聴覚などのクロスモーダルな刺激による反応促進が弱まる (Santangelo & Spence, 2007; Santangelo et al., 2007; Santangelo & Spence, 2008; Lunn et al., 2019; Kvasova & Soto-Faraco, 2019)。本実験においても、クロスモーダル対応を持つ聴覚刺激が提示されたとしても、視覚刺激に対する注意を向けるために必要な注意資源が足りず、緊急感の異なる聴覚刺激による反応の違いが見られなくなったと考えられる。

緊急感が高い視覚刺激に対する反応は、知覚負荷環境下であっても有意に速い結果となった。この結果は、知覚負荷環境下におけるユニモーダル刺激の検出課題において、覚醒度が高い刺激がより効果的に実験参加者の注意を捉えることができるという Suied et al. (2008) の報告に一致している。緊急感が高い刺激として用いた赤色は、覚醒度の高い刺激であるため (Buechner & Maier, 2016)、同様の結果が表れたと考えられる。また、赤色が引き起こすネガティブな印象により、緊急感が低い視覚刺激よりも注意を捉えやすかった可能性もある (Yiend, 2010)。聴覚刺激による視覚刺激弁別へのクロスモーダルな影響は見られなかったが、視覚刺激のみにおいては反応の違いが表れた。

4.4 第4章のまとめ

既往研究での緊急感に関する研究は、ほぼ全てが単一モダリティでの議論である。本研究は緊急感に関して、視聴覚のクロスモーダルな相互作用を調べるための基礎的な取り組みとして、視聴覚情報のそれぞれが持つ緊急感によりクロスモーダルな対応が現れるかをプライミング課題により調べた。

その結果、緊急感が高い視覚刺激は、緊急感が高いもしくは中程度の聴覚刺激が、緊急感が低い視覚刺激は、緊急感が低い聴覚刺激が直前に提示された場合に、それぞれ反応が促進された。緊急感とは情動を構成する次元のうち、覚醒-沈静の次元に大きく関わるものであり、近い覚醒を引き起こす視聴覚刺激同士でクロスモーダル対応が現れた。緊急感が中程度の聴覚刺激はネガティブバイアスにより、緊急感が高い視覚刺激へと強く結びついたと考えられる。

緊急感によるクロスモーダル対応が確認され、視聴覚情報の緊急感が近い場合は、視覚情報の理解が相対的に促進される可能性が示唆された。しかしながら、知覚負荷を与えた条件では、視聴覚刺激の緊急感が近いことによる視覚刺激判断の促進は現れなかった。聴覚刺激が持つ緊急感による視覚刺激判断へのクロスモーダルな影響は、注意資源が減少している環境では弱まることが示された。

注意資源が減少した状態では、視聴覚情報の緊急感が近いことによる知覚促進は現れないということは、自動車運転中の情報確認においても同様の傾向が現れると考えられる。とはいえ、視聴覚情報デザインにおいて、視聴覚情報双方の緊急感が異なっても影響がないとは考えにくい。本研究においてもプライミング課題により、緊急感による視聴覚刺激間の潜在的な対応づけが観察できた。また、緊急感が異なる視聴覚刺激を同時に提示し、その緊急感を評価させた場合、緊急感が高い方向に調整されることや、その評価のばらつきが大きくなることが報告されている (Erp et al., 2015; Kaizuka & Nakano, 2020; Yamauchi et al., 2022)。緊急感が高い方に調整されることは、視聴覚情報提示において不要な緊急感を引き起こす可能性を示唆する。また、視聴覚情報が持つ緊急感が異なる場合、全体の緊急感評価のばらつきが大きくなるということは、情報が与える緊急性の解釈が人によって異なる可能性が高まることを意味する。視聴覚情報提示デザインにおいて緊急感を考える場合は、やはり視聴覚情報のそれぞれが与える緊急感を考慮する必要があるだろう。

第5章 総括

5.1 研究のまとめ

本論文では自動車運転中の視聴覚情報提示について、空間的・意味的な整合性が視聴覚間で保たれたデザインはユーザーにとっての価値を向上するという考えのもと、空間的・意味的整合性を保つことによる視聴覚間の相互作用やその効果について既往研究を詳述し、情報提示デザインのために残された課題を指摘し、それを解決することを目的とした。

第1章では日本における自動車に関する社会状況を述べた後、安心・安全な運転体験のためには、ドライバーが提示される情報を素早く正確に理解できる必要があることを指摘した。情報提示においては視聴覚など複数のモダリティを用いた情報提示が有効であることに触れ、視聴覚情報提示デザインのために残された課題の概略を述べた。

第2章では、自動車運転中のように継続的な作業により注意資源が減少した環境において、素早い視覚情報確認のためには、視聴覚情報をどの程度近づけなければならないかという問題を解決することを目的とした。まずは視覚探索においてクロスモーダルな空間手がかり効果について、多感覚統合、空間的注意の観点から既往研究の概観を述べた。また特に空間的注意に関して、視覚探索と聴覚手がかりの配置について議論をしている研究について調べ、残されている課題を整理した。その後、同時に提示される視聴覚刺激のうち、聴覚刺激を空間手がかりとした直交計画による視覚探索課題を実施し、視聴覚刺激が同じ位置にある場合の反応と比較して、聴覚刺激がどの程度近づいていれば同程度の反応速度が得られるかを調べた。視覚探索課題はトラッキング課題を同時に行い、注意資源が減少した状態で視覚探索を行う状況を作り出すことで、自動車運転中の視覚情報確認において望ましい視聴覚情報間の相対角度差を考察した。その結果、注意資源が減少した状態であっても、視聴覚刺激間の角度差が水平方向で 40° 以内である場合は、視聴覚刺激が同じ位置にある場合と比較して大きな反応の遅延が現れないことを示した。視聴覚刺激間の角度差が 40° 以上になると、反応時間の平均値が大きくなった、指数正規分布を用いた分析によると、視聴覚刺激の位置が離れることによる反応の遅延は、反応時間分布の裾あたりの反応が得られる可能性が上昇することが原因であることが示唆された。反応時間分布の裾あたりの反応は、視覚刺激が出現した場所と異なる方向へと注意が奪われ、反応が大きく遅れたことを意味していると考えられる。

第3章では、自動車運転中の視覚情報確認において、聴覚情報を視覚情報方向から提示することの効果調べた。まずは自動車運転中のマルチモーダルな情報提示について、方向情報を提示することによる効果を調べた研究の概観を述べた。視覚探索、メンタルワークロード、視線、運転行動の観点から調べるために、ドライビングシミュレータを用いた実験を行った。一定の速度を保ちながら直線道路を走行し、視覚探索課題をするよう求めた。その結果、探索する視覚刺激の方向から聴覚刺激が提示された場合は、方向情報を持

たない聴覚刺激と比較して、視覚刺激方向への素早い視線移動を引き起こし、正確な視覚探索が可能となった。視覚探索に要する時間が減少したことで、実験参加者は正面方向に注視する時間が長くなり、ステアリング・速度制御の安定性が増した。また、メンタルワークロードも減少した。聴覚手がかりの音源定位が難しい場合は、実験参加者は視覚探索に要する時間が長くなり、聴覚刺激を視覚刺激方向から提示することの効果も減少した。また、視聴覚情報の配置がずれている場合の効果も検証するために、聴覚刺激が視覚刺激の内側・外側に 20° ずれている場合の効果も、左右ドアミラー位置の視覚刺激を用いて検証した。その結果、視覚探索に要する時間に大きな変化は見られなかった。この結果は第2章で示した、視聴覚刺激間の角度差が水平方向で 40° 以内である場合は、視覚探索速度が大きく遅延することはないという結果と一致している。視覚探索にかかる時間に変化がないこともあり、運転課題の安定性や、課題に対する主観的な負担も大きな変化はなかった。しかしながら、唯一情報提示に対する妨害感のみ、聴覚刺激が視覚刺激の内側から提示された場合に上昇する傾向が見られた。刺激に対する空間的注意は、刺激が提示された場所で最も大きくなる。実験参加者は聴覚刺激の音源位置を概ね定位できていた。そのため、視覚刺激から内側にずれた位置に一瞬空間的注意が向く結果となり、その分妨害感が上昇した可能性がある。聴覚刺激が視覚刺激の外側にある場合は、空間的注意が外側へ移動する途中に視覚刺激へと視線を移すことができるため、内側へのずれと比較して妨害感の上昇は小さかったと考えられる。このことから自動車運転中の視聴覚情報提示において、ドライバーのパフォーマンスや主観的評価が最も保証されるのは、視聴覚情報の配置が統一されている場合であることが示唆された。自動車運転中の視聴覚情報提示に関して、視聴覚情報配置のずれとメンタルワークロードを包括的に議論した研究は過去に少なく、興味深い結果である。

第4章では、情報提示の意味的側面として緊急感を取り上げて議論を行った。まずは緊急感設計に関する研究と、意味的側面に関する視聴覚間相互作用の代表的な研究としてクロスモーダル対応についての既往研究について調べ、概観を述べた。その結果、単一モダリティによる緊急感知覚に関する研究は多いが、クロスモーダルな相互作用に言及した研究はほぼないことを示した。そのため、まずは緊急感による視聴覚情報間の相互作用を調べるために、緊急感によるクロスモーダル対応が現れるかを基礎的な実験室実験により調べることとした。異なる緊急感を持つ視覚・聴覚刺激をそれぞれ選定し、聴覚刺激をプライム刺激、視覚刺激をターゲット刺激としたプライミング課題を実施した。その結果、緊急感が中程度か高い聴覚刺激が提示された場合は、直後に提示される緊急感の高い視覚刺激への反応が、緊急感が低い聴覚刺激の場合には、緊急感の低い視覚刺激への反応が促進され、視聴覚刺激間に緊急感によるクロスモーダル対応が現れた。反応促進は、聴覚刺激により緊急感の対応を持つ視覚刺激への内発的注意が生まれたために発生したと考えられる。聴覚刺激の緊急感が中程度の場合も、緊急感が高い聴覚刺激と同じような反応を示したのは、ネガティブバイアスにより緊急感が高い方向へと印象が重み付けされ、緊急感が高い視覚刺激との対応づけが行われたと考えられる。次に、緊急感による視聴覚間のクロスモーダル対応が、自動車運転中のように、継続的な作業により注意資源が減少した環境での視聴覚情報確認を促進するのかを考察するために、同様のプライミング課題をトラッキング課題と同時に実施した。その結果、トラッキング課題によって注意資源が奪わ

れた状態では、緊急感のクロスモーダル対応による視覚刺激の知覚促進は消失することが示された。この結果は、クロスモーダルな反応促進はトップダウン的な注意により調節され、注意資源が枯渇した状態ではクロスモーダルな効果は減少するという既往研究での指摘と一致する。自動車運転中の視聴覚情報確認においては、緊急感が近いことによる情報知覚の促進は生まれにくいことが示唆された。しかしながら、本実験において緊急感による視聴覚刺激間の潜在的な対応づけが観察されたことの他にも、視覚・聴覚情報の緊急感が異なる場合は同時に提示した場合の緊急感評価のばらつきが大きくなることや、緊急感が高い刺激へと印象が引き寄せられるなど、緊急感による相互作用が報告されている。視聴覚間で緊急感があまりに異なると、視聴覚情報が何を意味しているのか、ドライバーによって判断が分かれる可能性がある。視聴覚情報の緊急感が近い場合は、視聴覚間の自然な対応づけを助け、ドライバーによる情報判断のぶれも抑えられるだろう。そのため視聴覚情報提示デザインにおいて緊急感を考える場合は、視覚・聴覚情報それぞれが与える緊急感を考慮する必要がある。

空間的整合性を保った視聴覚情報は、自動車運転中であっても聴覚情報により視覚情報方向への視線移動を助け、主観的な負担の少ない素早い情報判断を生む。情報確認が円滑に行われることによる、運転操作が安定する。用いる聴覚情報の音源定位が容易であると、より適切に視覚情報探索を支援できるため望ましい。視聴覚情報の配置が統一されている場合が最もこれらの効果を発揮できるが、視聴覚情報間に多少の角度差があっても、反応速度や主観的な負担に大きな違いは現れない。しかしながら、視聴覚情報の角度差が離れるほど、視聴覚情報の配置を揃えることによるドライバー支援の効果が弱まる可能性が高くなることに留意する必要がある。

意味的整合性に関しても、視聴覚情報の緊急感が近い場合は、視聴覚情報の自然な対応づけを助ける。視聴覚情報が自然に対応づけされることは、情報の正確な理解への貢献が期待できる。しかしながら空間的整合性とは異なり、自動車運転中のような注意資源が減少した環境では、緊急感が近いことによる知覚促進はあまり期待できない。

以上を踏まえると自動車室内視聴覚情報提示デザインについて、空間的整合性は主に反応速度や運転の安定性などの機能的側面での価値向上が期待できる。また空間的整合性により、主観的な評価も高まる。そして求められる空間的整合性の精度は、反応速度・運転の安定性・主観評価のいずれから見ても、多少の誤差が許容される。意味的整合性に関しては、視聴覚情報の適切な対応づけを生むという点で機能的側面への貢献が考えられる。聴覚情報については緊急感の高い印象に結びつきやすい。カーナビゲーションなどの緊急感を与える必要のない情報提示においては、聴覚刺激が与える印象がネガティブな方向に重み付けされてしまうことを留意しなければならない。なお、緊急感など視聴覚情報の印象が整合しても、自動車運転中などの注意資源が減少した環境では、反応促進などの効果は空間的整合性ほど現れないと考えられる。ただし既往研究に基づくと、印象が視聴覚間で合っている情報提示は意匠的側面での価値向上が期待できる (e.g. 岩宮眞一郎, 2014; Spence, 2021)。その場合は、緊急感以外の印象も拡張した議論が必要となるだろう。

5.2 今後の課題と展望

近年の重要な課題として、加齢を考慮した議論が必要だろう。日本における2020年時点での全人口に対する65歳以上人口の割合は、28.8%となっており、高齢者の割合は今後も増加すると考えられる(内閣府, 2022b)。高齢化は視覚や聴覚などの感覚・知覚能力の低下、認知機能の低下による注意力の低下、身体機能の低下などを引き起こし、知覚・認知・判断・行動といった自動車運転中のプロセスにも影響が生まれる(e.g. 佐藤ほか, 2007; Takio et al., 2013)。実際に、高齢者は一つの器官からの感覚入力が増加する分、自動車室内におけるマルチモーダルな情報提示の有効性が、若齢者と比較して増加するという指摘もある(Lundqvist & Eriksson, 2019)。自動車室内の情報提示についても、視覚情報探索における聴覚手がかりの重要性が増すことが可能性としてあり、その場合は求められる視聴覚刺激間の角度差も狭くなるかもしれない。加齢に伴う知覚・認知の変容を捉えた、生涯学的(学術変革領域「生涯学」事務局, 2020)な観点からデザインに関する議論が必要である。

運転環境での実験について、より高精度なシミュレーションが必要である。視覚情報の種類に関して、本研究において視覚探索に用いた刺激は白色LED、緊急感評価に用いた刺激は単色の四角形と、非常に単純化されたものであった。人は色以外に、形などからも異なる印象を受け、また視覚情報が持つ具体性によりドライバーの情報判断も影響される(Wang et al., 2022)。具体的なシチュエーションを想定したさらに高度なシミュレーション実験を行う場合などは、より現実利用に即した視覚表示を用いた検証が必要となるだろう。その場合、ドライビングシミュレータを表示する映像機器も、より実体験に近い環境を提示できるものを用いることが望ましい。本研究では42型ディスプレイのみをドライビングシミュレータに用いたが、実環境では360°方向に運転環境に関する情報が存在する。大型のスクリーンを用いることや、ヘッドマウントディスプレイを用いたVirtual Reality環境におけるシミュレーションを実施することも必要となるだろう。Virtual Reality環境における運転パフォーマンスを評価することの有効性は、Marucci et al. (2021)が述べている。

また、特に聴覚刺激について、意匠的側面により焦点を当てた研究も必要だろう。本研究では緊急感の相互作用の検討において、シンセサイザソフトウェアを用いて作成した聴覚刺激を利用した。最近ではシンセサイザソフトウェアにより、様々な音色を持つ聴覚刺激を作成できるようになっている。自動車における情報提示に関する研究では、バンドノイズ、純音、ビープ音などが多く用いられてきた(Ho & Spence, 2008)。これらに対し、聴覚アイコンは刺激が持つ具体性により、ビープ音などの意味性の乏しい音と比較してその有用性が主張されている(Schwarz & Fastenmeier, 2017; Wang et al., 2022)。しかしながら、シンセサイザソフトウェアはビープ音のようにチープな音色だけでなく、豊かで情緒的な音色を創出できる。実際に、自動車室内で用いる聴覚情報を、作曲家やゲームサウンドデザイナーが作成し、自動車室内情報提示の情緒的価値を高める試みもある(日産自動車株式会社, 2022; BMW AG, 2022)。情緒的側面の重要性を主張するものも多いが(Norman, 2004; Proctor & Vu, 2015)、自動車室内情報提示に関する研究において、聴覚刺激の情緒的側面に着目したものは非常に少ない。聴覚情報は注意を引く際にアノイアンスを高めてしまうことが問題点として指摘されており(e.g. Baldwin & Lewis, 2014; Spence, 2021)、近年では聴覚を用いず嗅覚を用いてアノイアンスを高めることなくドライバーの注意を引きつける嗅覚ディスプ

レイ情報提示も検討されている (Spence, 2021)。アノイアンスを高めることなく情報提示を行うことには課題が残っており、音の情緒的側面の検討も考えられる手段の1つだろう。

参考文献

- Adeli, M., Rouat, J., & Molotchnikoff, S. (2014). Audiovisual correspondence between musical timbre and visual shapes. *Frontiers in Human Neuroscience*, **8**, 352, DOI: 10.3389/fnhum.2014.00352.
- Arrabito, G. R., Mondor, T. A., & Kent, K. J. (2004). Judging the urgency of non-verbal auditory alarms: a case study. *Ergonomics*, **47**(8), 821–840, DOI: 10.1080/0014013042000193282.
- Baguley, T. (2012). Calculating and graphing within-subject confidence intervals for ANOVA. *Behavior Research Methods*, **44**(1), 158–175, DOI: 10.3758/s13428-011-0123-7.
- Baldwin, C. L., Eisert, J. L., Garcia, A., Lewis, B., Pratt, S. M., & Gonzalez, C. (2012). Multimodal urgency coding: auditory, visual, and tactile parameters and their impact on perceived urgency. *Work*, **41**, 3586–3591, DOI: 10.3233/wor-2012-0669-3586.
- Baldwin, C. L., & Lewis, B. A. (2014). Perceived urgency mapping across modalities within a driving context. *Applied Ergonomics*, **45**(5), 1270–1277, DOI: 10.1016/j.apergo.2013.05.002.
- Ball, K., & Owsley, C. (1993). The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function. *Journal of the American Optometric Association*, **64**(1), 71–9.
- Balota, D. A., & Yap, M. J. (2011). Moving Beyond the Mean in Studies of Mental Chronometry. *Current Directions in Psychological Science*, **20**(3), 160–166, DOI: 10.1177/0963721411408885.
- Bella, F., & Silvestri, M. (2017). Effects of directional auditory and visual warnings at intersections on reaction times and speed reduction times. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **51**, 88–102, DOI: 10.1016/j.trf.2017.09.006.
- Bhattacharya, J., & Lindsen, J. P. (2016). Music for a Brighter World: Brightness Judgment Bias by Musical Emotion. *PLoS ONE*, **11**(2), e0148959, DOI: 10.1371/journal.pone.0148959.
- BMW AG (2022). サウンドの未来へ。カーマニアがハリウッドにやって来た。
URL <https://www.bmw.com/ja/magazine/innovation/supercar-blondie-hans-zimmer-drive-bmw-i4.html> (Accessed: 2023-01-01)
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, **10**(4), 433–436, DOI: 10.1163/156856897x00357.
- Brunel, L., Carvalho, P. F., & Goldstone, R. L. (2015). It does belong together: cross-modal correspondences influence cross-modal integration during perceptual learning. *Frontiers in Psychology*, **6**, 358, DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00358.

- Buechner, V. L., & Maier, M. A. (2016). Not always a matter of context: direct effects of red on arousal but context-dependent moderations on valence. *PeerJ*, **4**, e2515, DOI: 10.7717/peerj.2515.
- Cabral, J. P., & Remijn, G. B. (2019). Auditory icons: Design and physical characteristics. *Applied Ergonomics*, **78**, 224–239, DOI: 10.1016/j.apergo.2019.02.008.
- 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, DOI: 10.3758/bf03208380.
- Carrasco, M., & Frieder, K. S. (1997). Cortical Magnification Neutralizes the Eccentricity Effect in Visual Search. *Vision Research*, **37**(1), 63–82, DOI: 10.1016/s0042-6989(96)00102-2.
- Catchpole, K. R., McKeown, J. D., & Withington, D. J. (2004). Localizable auditory warning pulses. *Ergonomics*, **47**(7), 748–771, DOI: 10.1080/00140130310001629739.
- Chen, J., Šabić, E., Mishler, S., Parker, C., & Yamaguchi, M. (2020). Effectiveness of Lateral Auditory Collision Warnings: Should Warnings Be Toward Danger or Toward Safety? *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, **64**(2), 418–435, DOI: 10.1177/0018720820941618.
- Chen, Y.-C., & Spence, C. (2011). The Crossmodal Facilitation of Visual Object Representations By Sound: Evidence From the Backward Masking Paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **37**(6), 1784–1802, DOI: 10.1037/a0025638.
- Chen, Y.-C., & Spence, C. (2017). Hemispheric asymmetry: Looking for a novel signature of the modulation of spatial attention in multisensory processing. *Psychonomic Bulletin & Review*, **24**(3), 690–707, DOI: 10.3758/s13423-016-1154-y.
- Cohen, N. E. (1934). Equivalence of Brightnesses across Modalities. *The American Journal of Psychology*, **46**(1), 117, DOI: 10.2307/1416240.
- Cohen-Lazry, G., Katzman, N., Borowsky, A., & Oron-Gilad, T. (2019). Directional tactile alerts for take-over requests in highly-automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **65**, 217–226, DOI: 10.1016/j.trf.2019.07.025.
- Cummings, M., Kilgore, R. M., Wang, E., Tijerina, L., & Kochhar, D. S. (2007). Effects of Single Versus Multiple Warnings on Driver Performance. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomic Society*, **49**(6), 1097–1106, DOI: 10.1518/001872007x249956.
- Downing, C. J. (1988). Expectancy and Visual – Spatial Attention: Effects on Perceptual Quality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**(2), 188–202, DOI: 10.1037/0096-1523.14.2.188.
- Driver, J., & Spence, C. (1998). Cross – modal links in spatial attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, **353**(1373), 1319–1331, DOI: 10.1098/rstb.1998.0286.

- Edworthy, J., Loxley, S., & Dennis, I. (1991). Improving Auditory Warning Design: Relationship between Warning Sound Parameters and Perceived Urgency. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, **33**(2), 205–231, DOI: 10.1177/001872089103300206.
- Eramudugolla, R., Kamke, M. R., Soto-Faraco, S., & Mattingley, J. B. (2011). Perceptual load influences auditory space perception in the ventriloquist aftereffect. *Cognition*, **118**(1), 62–74, DOI: 10.1016/j.cognition.2010.09.009.
- Erp, J. B. F. V., & Veen, H. A. H. C. V. (2004). Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **7**(4-5), 247–256, DOI: 10.1016/j.trf.2004.09.003.
- Erp, J. B. V. (2005). Presenting directions with a vibrotactile torso display. *Ergonomics*, **48**(3), 302–313, DOI: 10.1080/0014013042000327670.
- Erp, J. B. v., Toet, A., & Janssen, J. B. (2015). Uni-, bi- and tri-modal warning signals: Effects of temporal parameters and sensory modality on perceived urgency. *Safety Science*, **72**, 1–8, DOI: 10.1016/j.ssci.2014.07.022.
- Evans, K. K., & Treisman, A. (2009). Natural cross-modal mappings between visual and auditory features. *Journal of Vision*, **10**(1), 6–6, DOI: 10.1167/10.1.6.
- Feng, F., Li, P., & Stockman, T. (2021). Exploring crossmodal perceptual enhancement and integration in a sequence-reproducing task with cognitive priming. *Journal on Multimodal User Interfaces*, **15**(1), 45–59, DOI: 10.1007/s12193-020-00326-y.
- Gallace, A., & Spence, C. (2006). Multisensory synesthetic interactions in the speeded classification of visual size. *Perception & Psychophysics*, **68**(7), 1191–1203, DOI: 10.3758/bf03193720.
- Gaver, W. W. (1986). Auditory Icons: Using Sound in Computer Interfaces. *Human-Computer Interaction*, **2**(2), 167–177, DOI: 10.1207/s15327051hci0202_3.
- Gelman, A., & Rubin, D. B. (1992). Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences. *Statistical Science*, **7**(4), DOI: 10.1214/ss/1177011136.
- Gerdes, A. B. M., Wieser, M. J., & Alpers, G. W. (2014). Emotional pictures and sounds: a review of multimodal interactions of emotion cues in multiple domains. *Frontiers in Psychology*, **5**, 1351, DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01351.
- Gray, R., Mohebbi, R., & Tan, H. Z. (2009). The spatial resolution of crossmodal attention: Implications for the design of multimodal interfaces. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, **6**(1), 4, DOI: 10.1145/1462055.1462059.
- Green, J. J., Pierce, A. M., & Adams, S. L. M. (2019). Multisensory Integration Is Modulated by Auditory Sound Frequency and Visual Spatial Frequency. *Multisensory Research*, **32**(7), 589–611, DOI: 10.1163/22134808-20191402.

- Haj, A. E., Slaoui, Y., Solier, C., & Perret, C. (2021). Bayesian Estimation of The Ex-Gaussian Distribution. *Statistics, Optimization & Information Computing*, **9**(4), 809–819, DOI: 10.19139/soic-2310-5070-1251.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*, **52**, 139–183, DOI: 10.1016/s0166-4115(08)62386-9.
- Hellier, E., & Edworthy, J. (1999). On using psychophysical techniques to achieve urgency mapping in auditory warnings. *Applied ergonomics*, **30**(2), 167–71, DOI: 10.1016/s0003-6870(97)00013-6.
- Hervey, A. S., Epstein, J. N., Curry, J. F., Tonev, S., Arnold, L. E., Conners, C. K., Hinshaw, S. P., Swanson, J. M., & Hechtman, L. (2007). Reaction Time Distribution Analysis of Neuropsychological Performance in an ADHD Sample. *Child Neuropsychology*, **12**(2), 125–140, DOI: 10.1080/09297040500499081.
- Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2006a). Assessing the effectiveness of “intuitive” vibrotactile warning signals in preventing front-to-rear-end collisions in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, **38**(5), 988–996, DOI: 10.1016/j.aap.2006.04.002.
- Ho, C., Santangelo, V., & Spence, C. (2009). Multisensory warning signals: when spatial correspondence matters. *Experimental Brain Research*, **195**(2), 261–272, DOI: 10.1007/s00221-009-1778-5.
- Ho, C., & Spence, C. (2005). Assessing the Effectiveness of Various Auditory Cues in Capturing a Driver’s Visual Attention. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **11**(3), 157–174, DOI: 10.1037/1076-898x.11.3.157.
- Ho, C., & Spence, C. (2008). *The Multisensory Driver: Implications for Ergonomic Car Interface Design*. Ashgate.
- Ho, C., & Spence, C. (2009). Using Peripersonal Warning Signals to Orient a Driver’s Gaze. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, **51**(4), 539–556, DOI: 10.1177/0018720809341735.
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2005). Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **8**(6), 397–412, DOI: 10.1016/j.trf.2005.05.002.
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2006b). The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention. *Ergonomics*, **49**(7), 724–738, DOI: 10.1080/00140130600589887.
- Ho, H.-N., Doorn, G. H. V., Kawabe, T., Watanabe, J., & Spence, C. (2014). Colour-Temperature Correspondences: When Reactions to Thermal Stimuli Are Influenced by Colour. *PLoS ONE*, **9**(3), e91854, DOI: 10.1371/journal.pone.0091854.

- Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2006). Examining the Impact of Cell Phone Conversations on Driving Using Meta-Analytic Techniques. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, **48**(1), 196–205, DOI: 10.1518/001872006776412135.
- Isbilen, E. S., & Krumhansl, C. L. (2016). The Color of Music: Emotion-Mediated Associations to Bach's Well-Tempered Clavier. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, **26**(2), 149–161, DOI: 10.1037/pmu0000147.
- Itoh, N., Sagawa, K., & Fukunaga, Y. (2009). Useful visual field at a homogeneous background for old and young subjects. *Gerontechnology*, **8**(1), DOI: 10.4017/gt.2009.08.01.010.00.
- Jakus, G., Dicke, C., & Sodnik, J. (2015). A user study of auditory, head-up and multi-modal displays in vehicles. *Applied Ergonomics*, **46**, 184–192, DOI: 10.1016/j.apergo.2014.08.008.
- Jamal, Y., Lacey, S., Nygaard, L., & Sathian, K. (2017). Interactions Between Auditory Elevation, Auditory Pitch and Visual Elevation During Multisensory Perception. *Multisensory Research*, **30**(3-5), 287–306, DOI: 10.1163/22134808-00002553.
- Kaizuka, T., & Nakano, K. (2020). Effects of Urgency of Audiovisual Collision Warnings on Response Time and Accuracy of Steering. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, **18**(1), 90–97, DOI: 10.1007/s13177-018-0174-6.
- Kennett, S., & Driver, J. (2014). Within-hemifield posture changes affect tactile – visual exogenous spatial cueing without spatial precision, especially in the dark. *Attention, Perception & Psychophysics*, **76**(4), 1121–1135, DOI: 10.3758/s13414-013-0484-3.
- Klapetek, A., Ngo, M. K., & Spence, C. (2012). Does crossmodal correspondence modulate the facilitatory effect of auditory cues on visual search? *Attention, Perception, & Psychophysics*, **74**(6), 1154–1167, DOI: 10.3758/s13414-012-0317-9.
- Kleiner, M., Brainard, D., Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in psychtoolbox-3. *Perception*, **36**(14), 1–16.
- Kruschke, J. K., & Liddell, T. M. (2018). The Bayesian New Statistics: Hypothesis testing, estimation, meta-analysis, and power analysis from a Bayesian perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, **25**(1), 178–206, DOI: 10.3758/s13423-016-1221-4.
- Kvasova, D., & Soto-Faraco, S. (2019). Not so automatic: Task relevance and perceptual load modulate cross-modal semantic congruence effects on spatial orienting. *bioRxiv*, (p. 830679), DOI: 10.1101/830679.
- Lee, J., & Spence, C. (2015). Audiovisual crossmodal cuing effects in front and rear space. *Frontiers in Psychology*, **6**, 1086, DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01086.
- Lee, J., & Spence, C. (2017). On the spatial specificity of audiovisual crossmodal exogenous cuing effects. *Acta Psychologica*, **177**, 78–88, DOI: 10.1016/j.actpsy.2017.04.012.

- Lindborg, P., & Friberg, A. K. (2015). Colour Association with Music Is Mediated by Emotion: Evidence from an Experiment Using a CIE Lab Interface and Interviews. *PLoS ONE*, **10**(12), e0144013, DOI: 10.1371/journal.pone.0144013.
- Liu, Y.-C., & Jhuang, J.-W. (2012). Effects of in-vehicle warning information displays with or without spatial compatibility on driving behaviors and response performance. *Applied Ergonomics*, **43**(4), 679–686, DOI: 10.1016/j.apergo.2011.10.005.
- Lundqvist, L.-M., & Eriksson, L. (2019). Age, cognitive load, and multimodal effects on driver response to directional warning. *Applied Ergonomics*, **76**, 147–154, DOI: 10.1016/j.apergo.2019.01.002.
- Lunn, J., Sjoblom, A., Ward, J., Soto-Faraco, S., & Forster, S. (2019). Multisensory enhancement of attention depends on whether you are already paying attention. *Cognition*, **187**, 38–49, DOI: 10.1016/j.cognition.2019.02.008.
- Makowski, D., Ben-Shachar, M., & Lüdecke, D. (2019a). bayestestR: Describing Effects and their Uncertainty, Existence and Significance within the Bayesian Framework. *Journal of Open Source Software*, **4**(40), 1541, DOI: 10.21105/joss.01541.
- Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Chen, S. H. A., & Lüdecke, D. (2019b). Indices of Effect Existence and Significance in the Bayesian Framework. *Frontiers in Psychology*, **10**, 2767, DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02767.
- Marks, L. E. (1987). On Cross-Modal Similarity: Auditory-Visual Interactions in Speeded Discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **13**(3), 384–394, DOI: 10.1037/0096-1523.13.3.384.
- Marshall, D. C., Lee, J. D., & Austria, P. A. (2007). Alerts for In-Vehicle Information Systems: Annoyance, Urgency, and Appropriateness. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomic Society*, **49**(1), 145–157, DOI: 10.1518/001872007779598145.
- Marucci, M., Flumeri, G. D., Borghini, G., Sciaraffa, N., Scandola, M., Pavone, E. F., Babiloni, F., Betti, V., & Aricò, P. (2021). The impact of multisensory integration and perceptual load in virtual reality settings on performance, workload and presence. *Scientific Reports*, **11**(1), 4831, DOI: 10.1038/s41598-021-84196-8.
- Mauss, I. B., & Robinson, M. D. (2009). Measures of emotion: A review. *Cognition and Emotion*, **23**(2), 209–237, DOI: 10.1080/02699930802204677.
- Mellers, B. A., & Birnbaum, M. H. (1982). Loci of contextual effects in judgment. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **8**(4), 582–601, DOI: 10.1037/0096-1523.8.4.582.
- Mock, J. R., Seay, M. J., Charney, D. R., Holmes, J. L., & Golob, E. J. (2015). Rapid cortical dynamics associated with auditory spatial attention gradients. *Frontiers in Neuroscience*, **9**, 179, DOI: 10.3389/fnins.2015.00179.

- Mohebbi, R., Gray, R., & Tan, H. Z. (2009). Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, **51**(1), 102–110, DOI: 10.1177/0018720809333517.
- Mondor, T. A., & Zatorre, R. J. (1995). Shifting and Focusing Auditory Spatial Attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**(2), 387–409, DOI: 10.1037/0096-1523.21.2.387.
- Norman, D. (2004). *Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things*. Basic Books.
- Orchard-Mills, E., Alais, D., & Burg, E. V. d. (2013). Cross-modal associations between vision, touch, and audition influence visual search through top-down attention, not bottom-up capture. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **75**(8), 1892–1905, DOI: 10.3758/s13414-013-0535-9.
- Paladini, R. E., Diana, L., Zito, G. A., Nyffeler, T., Wyss, P., Mosimann, U. P., Müri, R. M., Nef, T., & Cazzoli, D. (2018). Attentional reorienting triggers spatial asymmetries in a search task with cross-modal spatial cueing. *PLoS ONE*, **13**(1), e0190677, DOI: 10.1371/journal.pone.0190677.
- Palmer, S. E., Langlois, T. A., & Schloss, K. B. (2016). Music-to-Color Associations of Single-Line Piano Melodies in Non-synesthetes. *Multisensory Research*, **29**(1-3), 157–193, DOI: 10.1163/22134808-00002486.
- Palmer, S. E., Schloss, K. B., Xu, Z., & Prado-León, L. R. (2013). Music – color associations are mediated by emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**(22), 8836–8841, DOI: 10.1073/pnas.1212562110.
- Parise, C. V., & Spence, C. (2012). Audiovisual crossmodal correspondences and sound symbolism: a study using the implicit association test. *Experimental Brain Research*, **220**(3-4), 319–333, DOI: 10.1007/s00221-012-3140-6.
- Patterson, R. D. (1990). Auditory warning sounds in the work environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, **327**(1241), 485–492, DOI: 10.1098/rstb.1990.0091.
- Pauzié, A. (2008). A method to assess the driver mental workload: The driving activity load index (DALI). *IET Intelligent Transport Systems*, **2**(4), 315, DOI: 10.1049/iet-its:20080023.
- Peers, P. V., Cusack, R., & Duncan, J. (2006). Modulation of spatial bias in the dual task paradigm: Evidence from patients with unilateral parietal lesions and controls. *Neuropsychologia*, **44**(8), 1325–1335, DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.033.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**(4), 437–442, DOI: 10.1163/156856897x00366.
- Pérez, A., Peers, P. V., Valdés-Sosa, M., Galán, L., García, L., & Martínez-Montes, E. (2009). Hemispheric modulations of alpha-band power reflect the rightward shift in attention induced by enhanced attentional load. *Neuropsychologia*, **47**(1), 41–49, DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2008.08.017.

- Peters, M. A. K., Balzer, J., & Shams, L. (2015). Smaller = Denser, and the Brain Knows It: Natural Statistics of Object Density Shape Weight Expectations. *PLoS ONE*, **10**(3), e0119794, DOI: 10.1371/journal.pone.0119794.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **32**(1), 3–25, DOI: 10.1080/00335558008248231.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, **109**(2), 160–174, DOI: 10.1037/0096-3445.109.2.160.
- Postnova, N., Nakajima, Y., Ueda, K., & Remijn, G. B. (2020). Perceived Congruency in Audiovisual Stimuli Consisting of Gabor Patches and AM and FM Tones. *Multisensory Research*, **34**, 455–475, DOI: 10.1163/22134808-bja10041.
- Proctor, R. W., & Vu, K.-P. L. (2015). Principles for Designing Interfaces Compatible With Human Information Processing. *International Journal of Human-Computer Interaction*, **32**(1), 2–22, DOI: 10.1080/10447318.2016.1105009.
- Rozin, P., & Royzman, E. B. (2001). Negativity Bias, Negativity Dominance, and Contagion. *Personality and Social Psychology Review*, **5**(4), 296–320, DOI: 10.1207/s15327957pspr0504_2.
- Russell, J. A., Weiss, A., & Mendelsohn, G. A. (1989). Affect Grid: A Single-Item Scale of Pleasure and Arousal. *Journal of Personality and Social Psychology*, **57**(3), 493–502, DOI: 10.1037/0022-3514.57.3.493.
- Santangelo, V., Belardinelli, M. O., & Spence, C. (2007). The Suppression of Reflexive Visual and Auditory Orienting When Attention Is Otherwise Engaged. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **33**(1), 137–148, DOI: 10.1037/0096-1523.33.1.137.
- Santangelo, V., Finio, P., Raffone, A., Belardinelli, M. O., & Spence, C. (2008a). Perceptual load affects exogenous spatial orienting while working memory load does not. *Experimental Brain Research*, **184**(3), 371–382, DOI: 10.1007/s00221-007-1108-8.
- Santangelo, V., Ho, C., & Spence, C. (2008b). Capturing spatial attention with multisensory cues. *Psychonomic Bulletin & Review*, **15**(2), 398–403, DOI: 10.3758/pbr.15.2.398.
- Santangelo, V., Lubbe, R. H. J. V. d., Belardinelli, M. O., & Postma, A. (2006). Spatial attention triggered by unimodal, crossmodal, and bimodal exogenous cues: a comparison of reflexive orienting mechanisms. *Experimental Brain Research*, **173**(1), 40–48, DOI: 10.1007/s00221-006-0361-6.
- Santangelo, V., & Spence, C. (2006). Assessing the Automaticity of the Exogenous Orienting of Tactile Attention. *Perception*, **36**(10), 1497–1505, DOI: 10.1068/p5848.
- Santangelo, V., & Spence, C. (2007). Multisensory Cues Capture Spatial Attention Regardless of Perceptual Load. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **33**(6), 1311–1321, DOI: 10.1037/0096-1523.33.6.1311.

- Santangelo, V., & Spence, C. (2008). Is the exogenous orienting of spatial attention truly automatic? Evidence from unimodal and multisensory studies. *Consciousness and Cognition*, **17**(3), 989–1015, DOI: 10.1016/j.concog.2008.02.006.
- Schmitt, M., Postma, A., & Haan, E. H. d. (2001). Cross-modal exogenous attention and distance effects in vision and hearing. *European Journal of Cognitive Psychology*, **13**(3), 343–368, DOI: 10.1080/09541440126272.
- Schreij, D., Owens, C., & Theeuwes, J. (2008). Abrupt onsets capture attention independent of top-down control settings. *Perception & Psychophysics*, **70**(2), 208–218, DOI: 10.3758/pp.70.2.208.
- Schwarz, F., & Fastenmeier, W. (2017). Augmented reality warnings in vehicles: Effects of modality and specificity on effectiveness. *Accident Analysis & Prevention*, **101**, 55–66, DOI: 10.1016/j.aap.2017.01.019.
- Shulman, G. L., Wilson, J., & Sheehy, J. B. (1985). Spatial determinants of the distribution of attention. *Perception & Psychophysics*, **37**(1), 59–65, DOI: 10.3758/bf03207139.
- Sivak, M. (1996). The Information That Drivers Use: Is it Indeed 90% Visual? *Perception*, **25**(9), 1081–1089, DOI: 10.1068/p251081.
- Spence, C. (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **73**(4), 971–995, DOI: 10.3758/s13414-010-0073-7.
- Spence, C. (2015). Crossmodal Attention: From the Laboratory to the Real World (and Back Again). In *The Handbook of Attention*. The MIT Press.
- Spence, C. (2020a). Assessing the Role of Emotional Mediation in Explaining Crossmodal Correspondences Involving Musical Stimuli. *Multisensory Research*, **33**(1), 1–29, DOI: 10.1163/22134808-20191469.
- Spence, C. (2020b). Simple and complex crossmodal correspondences involving audition. *Acoustical Science and Technology*, **41**(1), 6–12, DOI: 10.1250/ast.41.6.
- Spence, C. (2021). *Sense-hacking: How to use the power of your senses for happier, healthier living..* Penguin.
- Spence, C., & Driver, J. (1996). Audiovisual Links in Endogenous Covert Spatial Attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**(4), 1005–1030, DOI: 10.1037/0096-1523.22.4.1005.
- Spence, C., & Driver, J. (1997). Audiovisual links in exogenous covert spatial orienting. *Perception & Psychophysics*, **59**(1), 1–22, DOI: 10.3758/bf03206843.
- Spence, C., & Driver, J. (2004). *Crossmodal Space and Crossmodal Attention*. Oxford University Press, DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198524861.001.0001.

- Spence, C., & Ho, C. (2008a). Multisensory interface design for drivers: past, present and future. *Ergonomics*, **51**(1), 65–70, DOI: 10.1080/00140130701802759.
- Spence, C., & Ho, C. (2008b). Tactile and Multisensory Spatial Warning Signals for Drivers. *IEEE Transactions on Haptics*, **1**(2), 121–129, DOI: 10.1109/toh.2008.14.
- Spence, C., Nicholls, M. E. R., Gillespie, N., & Driver, J. (1998). Cross-modal links in exogenous covert spatial orienting between touch, audition, and vision. *Perception & Psychophysics*, **60**(4), 544–557, DOI: 10.3758/bf03206045.
- Spence, C., Pavani, F., & Driver, J. (2000). Crossmodal links between vision and touch in covert endogenous spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **26**(4), 1298–1319, DOI: 10.1037//0096-1523.26.4.1298.
- Spence, C., & Soto-Faraco, S. (2020). *Crossmodal Attention Applied: Lessons for and from Driving*. DOI: 10.1017/9781108919951.
- Spence, C., & Stefano, N. D. (2022). Coloured hearing, colour music, colour organs, and the search for perceptually meaningful correspondences between colour and sound. *i-Perception*, **13**(3), 20416695221092802, DOI: 10.1177/20416695221092802.
- Spence, C. J., & Driver, J. (1994). Covert Spatial Orienting in Audition: Exogenous and Endogenous Mechanisms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **20**(3), 555–574, DOI: 10.1037/0096-1523.20.3.555.
- Stanton, N., & Edworthy, J. (1999). *Human Factors in Auditory Warnings*. Ashgate.
- Stein, B. E., Meredith, M. A., Huneycutt, W. S., & McDade, L. (1989). Behavioral Indices of Multisensory Integration: Orientation to Visual Cues is Affected by Auditory Stimuli. *Journal of cognitive neuroscience*, **1**(1), 12–24, DOI: 10.1162/jocn.1989.1.1.12.
- Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, **9**(4), 255–266, DOI: 10.1038/nrn2331.
- Stoep, N. V. d., Spence, C., Nijboer, T., & Stigchel, S. V. d. (2015a). On the relative contributions of multisensory integration and crossmodal exogenous spatial attention to multisensory response enhancement. *Acta Psychologica*, **162**, 20–28, DOI: 10.1016/j.actpsy.2015.09.010.
- Stoep, N. V. d., Stigchel, S. V. d., & Nijboer, T. C. W. (2015b). Exogenous spatial attention decreases audiovisual integration. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **77**(2), 464–482, DOI: 10.3758/s13414-014-0785-1.
- Suied, C., Susini, P., & McAdams, S. (2008). Evaluating Warning Sound Urgency With Reaction Times. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **14**(3), 201–212, DOI: 10.1037/1076-898x.14.3.201.
- Sun, X., Li, X., Ji, L., Han, F., Wang, H., Liu, Y., Chen, Y., Lou, Z., & Li, Z. (2018). An extended research of crossmodal correspondence between color and sound in psychology and cognitive ergonomics. *PeerJ*, **6**, e4443, DOI: 10.7717/peerj.4443.

- Takio, F., Koivisto, M., Tuominen, T., Laukka, S. J., & Hämäläinen, H. (2013). Visual rightward spatial bias varies as a function of age. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, **18**(1), 44–67, DOI: 10.1080/1357650x.2011.628675.
- Teder-Sälejärvi, W. A., & Hillyard, S. A. (1998). The gradient of spatial auditory attention in free field: An event-related potential study. *Perception & Psychophysics*, **60**(7), 1228–1242, DOI: 10.3758/bf03206172.
- Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are created equal: The negativity bias in social-emotional development. *Psychological Bulletin*, **134**(3), 383–403, DOI: 10.1037/0033-2909.134.3.383.
- Vishteh, R. A., Mirzajani, A., Jafarzadehpour, E., & Darvishpour, S. (2019). Evaluation of Simple Visual Reaction Time of Different Colored Light Stimuli in Visually Normal Students. *Clinical Optometry*, **11**, 167–171, DOI: 10.2147/opto.s236328.
- Walker, P. (2012). Cross-sensory correspondences and cross talk between dimensions of connotative meaning: Visual angularity is hard, high-pitched, and bright. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **74**(8), 1792–1809, DOI: 10.3758/s13414-012-0341-9.
- Wang, Y., Wu, B., Ma, S., Wang, D., Gan, T., Liu, H., & Yang, Z. (2022). Effect of mapping characteristic on audiovisual warning: Evidence from a simulated driving study. *Applied Ergonomics*, **99**, 103638, DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103638.
- Whelan, R. (2008). Effective Analysis of Reaction Time Data. *The Psychological Record*, **58**(3), 475–482, DOI: 10.1007/bf03395630.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomic Society*, **50**(3), 449–455, DOI: 10.1518/001872008x288394.
- Wiese, E. E., & Lee, J. D. (2004). Auditory alerts for in-vehicle information systems: The effects of temporal conflict and sound parameters on driver attitudes and performance. *Ergonomics*, **47**(9), 965–986, DOI: 10.1080/00140130410001686294.
- Wolfe, B., Dobres, J., Rosenholtz, R., & Reimer, B. (2017). More than the Useful Field: Considering peripheral vision in driving. *Applied Ergonomics*, **65**, 316–325, DOI: 10.1016/j.apergo.2017.07.009.
- 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, DOI: 10.3758/bf03211924.
- Wolpe, N., Hezemans, F. H., Rae, C. L., Zhang, J., & Rowe, J. B. (2022). The pre-supplementary motor area achieves inhibitory control by modulating response thresholds. *Cortex*, **152**, 98–108, DOI: 10.1016/j.cortex.2022.03.018.

- Yamauchi, K., Naka, K., Masuda, M., Yuasa, M., & Nishihira, M. (2022). Effect of Semantic Congruency between Auditory and Visual Information Display on the Perceived Impression of Danger. *Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics*, (ABS_0543).
- Yiend, J. (2010). The effects of emotion on attention: A review of attentional processing of emotional information. *Cognition & Emotion*, **24**(1), 3–47, DOI: 10.1080/02699930903205698.
- Young, S. G., Elliot, A. J., Feltman, R., & Ambady, N. (2013). Red Enhances the Processing of Facial Expressions of Anger. *Emotion*, **13**(3), 380–384, DOI: 10.1037/a0032471.
- 佐藤稔久ほか (2007). 認知的・身体的機能の変化に適応した高齢ドライバーの対処行動の分析, 自動車技術会論文集. **38**(4), 209–214.
- 内閣府 (2022a). Society 5.0 とは.
URL https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/ (Accessed: 2023-01-01)
- 内閣府 (2022b). 令和4年高齢社会白書.
URL https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/zenbun/04pdf_index.html (Accessed: 2023-01-01)
- 国土交通省 (2022). 自動車の保有台数の推移.
URL https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000069.html (Accessed: 2023-01-01)
- 学術変革領域「生涯学」事務局 (2020). 生涯学の創出—超高齢社会における発達・加齢観の刷新.
URL <https://www.lifelong-sci.jinkan.kyoto-u.ac.jp/> (Accessed: 2023-01-01)
- 岩宮眞一郎 (2014). 視聴覚融合の科学. コロナ社.
- 日産自動車株式会社 (2022). 日産ストーリーズ：ドライバーに語りかける車の音.
URL <https://global.nissanstories.com/ja-JP/releases/your-car-speaks> (Accessed: 2023-01-01)
- 自動車技術会 (2016). 自動車技術ハンドブック人間工学編. 株式会社精興社.
- 警察庁 (2022a). 交通事故死者数について.
URL <https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/toukeihyo.html> (Accessed: 2023-01-01)
- 警察庁 (2022b). 運転免許統計.
URL <https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/menkyo.html> (Accessed: 2023-01-01)

関連論文・学会発表

関連論文

- 中貴一, 山内勝也, 田上宣昭, 川田歩, “サイン音を視覚情報位置から提示することによるドライバ行動支援の効果,” 日本音響学会誌, 77(8), 491–499, 2021,08.
- Kiichi NAKA, Katsuya YAMAUCHI, “Audio-visual Cross-modal Correspondences of Perceived Urgency: Examination through a Speeded Discrimination Task,” *Multisensory Research*. (under review)

学会発表

- Kiichi NAKA, Katsuya YAMAUCHI, Nobuaki TANOUE, Ayumu KAWATA, “Influence on information cognition by separation of visual and auditory information positions: A case of information presentation for a driver in a vehicle cockpit,” *the 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, pp. 4916–4921, Seoul, Korea, August, 2020. (online)
- 中貴一, 山内勝也, “サイン音と視覚情報の意味的調和が後続知覚される視覚情報の判断速度に与える影響に関する基礎検討,” 日本音響学会九州支部第14回学生のための研究発表会, pp. 59–62, 2020年11月. (オンライン)
- 中貴一, 山内勝也, “聴覚情報による視覚情報探索促進を引き起こす視聴覚ディスプレイ間角度差の予備的検討,” 多感覚研究会, 立命館大学, 2022年2月.
- 中貴一, 山内勝也, “サイン音と視覚情報の緊急感の違いが視聴覚情報処理プロセスに与える影響に関する検討,” 日本音響学会2022年春季研究発表会, 1-11-2, 2022年3月. (オンライン)
- 中貴一, 山内勝也, “作業負荷環境下において視覚情報探索促進を引き起こす視聴覚情報配置の検討,” 日本音響学会2022年秋季研究発表会, 1-10-1, 北海道科学大学, 2022年9月.
- 中貴一, 山内勝也, “作業負荷環境下における視聴覚間クロスモーダル空間手がかり効果の左右非対称性,” 建築音響, 騒音・振動研究会, AA2022-39, N-2022-47, 東京大学, 2022年11月.

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの皆様にご協力をいただきました。指導教員である九州大学大学院芸術工学研究院の山内勝也准教授には、本研究遂行のため終始ご指導やご助言をいただきました。九州大学大学院芸術工学研究院の高田正幸准教授、Gerard B Remijn 准教授には、それぞれご専門の立場から有益なご助言をいただき、本論文の質を向上させることができました。九州産業大学の菅野禎盛教授には、本研究遂行のためのご助言をいただきました。福岡大学の穴井謙教授には、積極的に研究活動を行うよう、日頃より激励のお言葉をいただきました。山内研究室の黒川哲氏には、実験システムにおける刺激提示の時間精度を確保するために、多くの協力をいただきました。山内研究室の鮎川栞氏には、本論文実験4の遂行にあたり多くのご協力をいただきました。また、山内研究室・高田研究室の学生の皆様にも、日頃より有益なご指摘をいただきました。最後に、日頃の生活を支えてくださった家族に感謝します。

本研究の一部は、公益財団法人スズキ財団より助成を受けた。

付録

Table 1: The estimated value of μ , σ , and τ (ms) in the experiment 1 of Chapter 2. The V and A mean Visual Stimuli Angle and Auditory Stimuli Angle in the table.

V	A	μ	σ	τ	V	A	μ	σ	τ
-20°	-60°	498.4	39.1	174.1	+20°	-60°	494.7	61.4	172.8
-20°	-40°	510.8	56.5	150.3	+20°	-40°	481.7	52.9	173.5
-20°	-20°	501.1	61.6	169.9	+20°	-20°	485.8	59.8	157.1
-20°	±0°	485.7	46.6	174.8	+20°	±0°	502.5	55.9	144.0
-20°	+20°	496.7	46.2	165.5	+20°	+20°	519.4	73.8	119.2
-20°	+40°	470.2	35.2	226.8	+20°	+40°	486.8	55.9	158.0
-20°	+60°	477.4	34.5	207.8	+20°	+60°	502.9	59.4	130.6
-40°	-60°	606.7	88.3	167.2	+40°	-60°	554.4	69.1	258.3
-40°	-40°	587.9	79.1	194.3	+40°	-40°	567.3	66.1	223.8
-40°	-20°	587.0	84.6	193.9	+40°	-20°	569.9	59.9	242.4
-40°	±0°	570.4	71.8	221.1	+40°	±0°	567.5	76.2	197.6
-40°	+20°	569.4	65.3	246.8	+40°	+20°	559.3	60.7	185.4
-40°	+40°	560.4	79.2	244.4	+40°	+40°	574.2	66.5	182.2
-40°	+60°	586.4	74.4	223.5	+40°	+60°	594.9	69.5	172.3
-60°	-60°	733.7	112.8	183.0	+60°	-60°	687.0	95.9	253.2
-60°	-40°	726.7	102.4	201.5	+60°	-40°	689.1	96.8	268.2
-60°	-20°	677.5	81.3	217.5	+60°	-20°	672.0	91.5	307.4
-60°	±0°	699.9	97.1	271.0	+60°	±0°	696.3	93.2	229.9
-60°	+20°	676.4	79.8	297.1	+60°	+20°	696.4	93.4	222.7
-60°	+40°	684.7	105.2	279.7	+60°	+40°	706.1	87.1	205.9
-60°	+60°	698.0	91.5	252.0	+60°	+60°	719.0	90.0	181.5

実験についての説明書

研究責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

実験責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

I. 研究課題

視覚情報判断を促進する聴覚情報提示方法の検討

II. 研究 (実験) 目的

視覚情報判断を促進する聴覚情報提示方法を検討する。

III. 実験手順

本実験は全部で2つのブロックからなります。うち1ブロックでは視覚刺激探索課題のみを実施し、残りの1ブロックでは視覚刺激探索課題と同時にトラッキング課題を実施します。

視覚刺激探索課題では、まず正面赤色LEDが点灯します。その後、聴覚刺激が提示されると同時にいずれか1つの白色LEDが点灯するので、上下どちらかが点灯しているかを、対応するキーを押下することで回答してください。回答は、できる限り素早く正確に行ってください。

トラッキング課題では、画面上を白い円が移動し続けるので、ジョイスティックを操作して常にマウスカーソルが円上に重なるようにしてください。

視覚刺激探索課題のみを実施するか、視覚刺激探索課題とトラッキング課題を同時に実施するかは、実験参加者ごとにランダムな順番となっています。実施順は、実験者より指示されます。

<実験全体の流れ>

[教示] → [練習試行] → [本試行 (第1ブロック)] → [本試行 (第2ブロック)] → [実験アンケート]

(※各本施行のブロックの実施時間は約15分で、実験全体で約2時間の見込みです。)

第4ブロックの終了後に、実験の感想等に関するアンケートに回答していただきます。その際、回答に困る設問があれば空欄のまま結構です。

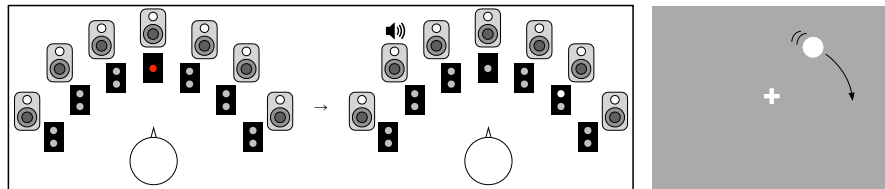


Figure 実験における1試行の流れ (左) , およびトラッキング課題のモニタ表示 (右)

Fig. 1: The instruction for participants of the experiment 1 (Chapter 2).

IV. 実験の危険性、不利益、苦痛、副作用等、及びそれらの対策について

スピーカから呈示される音量は、労働安全基準法（または労働安全衛生規則および騒音障害防止のためのガイドライン）で規定されている暴露が許容される音量を十分に下回るレベルであるため、危険性や副作用などはないと考えられます。

気分が悪くなった場合は実験者にいつでも申し出てください。申し出がありましたら速やかに実験を中止します。

この他、何らかの理由により実験を中止したい場合は直ちに実験を中断しますので、お申し出ください。

実験で得られたデータは実験者のみが扱い、またデータの公表時には個人が特定されないよう配慮いたします。

V. 緊急事態に対する対応について

もし実験中に不都合や身体の不調がありましたら実験者にお声掛けください。実験を中断いたします。

VI. 同意しない場合の不利益について

本実験に同意しない場合でも、いかなる不利益を受けることはありません。

また、同意した後でも途中でやめることができます。その際にも不利益を受けることはありません。

VII. プライバシーについて

個人情報及び実験により得られたデータは、研究以外の目的には一切使用いたしません。

また、情報管理には十分配慮しますので、実験関係者以外の者に渡ることはありません。

VIII. 謝礼について

この実験に参加することでの謝金はありません。

IX. その他

今回の実験について、苦情、その他ご意見がありましたら、九州大学大学院芸術工学研究院

「実験倫理委員会」までご連絡下さい。

連絡先：福岡市南区塩原 4-9-1 九州大学芸術工学部総務課研究支援係

電話番号 092-553-4429

実験参加者の皆様

これから実験参加者の皆様に、“運転タスク”と“数字確認タスク”という2つのタスクをこなしていただきます。各タスクの概要は次の通りです。

◆ 運転タスク

“時速60km/hを実験開始から終了まで維持すること”，“同一車線をふらつかず，まっすぐに走行すること”の2点を守り，ドライビングシミュレータを操作する。

◆ 数字確認タスク

周囲4箇所のディスプレイに表示されている0から9の数字の中で，赤色の数字が出現したら口頭でその数字を出来る限り素早く回答する。

実験の流れを説明します。

まずドライビングシミュレータの操作に慣れるために，最低でも5分間練習を行います。最大15分間設けますので，慣れるまで十分に練習をしてください。

ドライビングシミュレータの操作に慣れたら，実験に移ります。全部で4条件あり，各条件1試行が90秒を4試行ずつ，合計16試行からなります。3つの条件では，“運転タスク”と“数字確認タスク”を同時に行います。走行速度が時速60km/hで安定したら数字を出現させますので，2つのタスクどちらもしっかりと行なってください。数字が消えたら1試行終了です。1つの条件では“運転タスク”のみを行います。走行速度が時速60km/hで安定したら，周囲4つのディスプレイが白く光りますので，それから90秒間運転タスクを遵守してください。

また，各条件が終了した後，すなわち4試行ごとに主観評価シートに行なった条件についての評価をしていただきます。評価項目は，“注意努力”，“視覚的負荷”，“聴覚的負荷”，“妨害感”の4点です。深く考えず，自身が感じたままの評価を，線分上に印をつけて評価を行なってください。

この実験は個人の能力を試すものではありません。実験中，解析のために音声録音と動画撮影を行います。実験から得られたデータは，研究以外の目的に利用することは決してありませんので，ご協力をお願いします。実験結果は研究の目的にのみ使用し，成果を公表する際は個人のお名前などプライバシーに関わる内容は一切伏せられます。回答途中で何らかの理由により回答を中止したい場合は直ちに中断することができますので，その場合はお申し出ください。

それではよろしく申し上げます。

山内研究室

Fig. 2: The instruction for participants of the experiment 2 and 3 (Chapter 3).

実験についての説明書

研究責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

実験責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

I. 研究課題

自動車運転中の視覚情報探索を促進する視聴覚ディスプレイ間角度差の検討

II. 研究 (実験) 目的

自動車運転中の視覚情報探索を促進する視聴覚ディスプレイ間角度差を検討する。

III. 実験手順

本実験は、ドライビングシミュレータの操作練習を行った後、運転課題と視覚探索課題を同時に行っていただきます。

最初にドライビングシミュレータの操作に慣れるため、一定速度で走行する練習を行います。まずは、ブレーキペダルを踏み続けた状態で待機しておいてください。走行可能な状態になれば合図をしますので、ハンドル・アクセルペダル・ブレーキペダルを用いて走行してください。走行開始後は本線に合流し、右から2番目の車線を速度 50 km/h に保って、走行し続けてください。この際、乱暴な運転（速度超過など）をしないようにしてください。練習時間は最大で5分間設けます。十分に操作に慣れるまで練習してください。

ドライビングシミュレータの操作練習後、実験に移ります。本実験は、ドライビングシミュレータで一定速度を保ちながら走行する運転課題と、点灯したLEDの場所を回答する視覚探索課題からなります。運転課題では、右から2番目の車線を速度 50 km/h に保って走行し続けていただきます。視覚探索課題ではまず、左右に設置された4つのLEDのうち、1箇所が点灯します。LEDが点灯した後、上下1対で設置されたLEDのうち、上側が光っている場合は上のキーを、下側が光っている場合は下のキーを、できる限り素早く正確に、右手親指で押下してください。

1 試行の流れを説明します。まずドライビングシミュレータの初期画面に設定されますので、ブレーキペダルを踏んだまま待機してください。走行可能な状態になった後に合図を出しますので、本線の右から2番目の車線に入り、時速 50 km/h を保って走行し続けてください。運転が安定してしばらくたった後、LEDが点灯し始めますので、運転課題をこなしながら視覚刺激探索課題に取りかかってください。1 試行

Fig. 3: The instruction for participants of the experiment 4 (Chapter 3).

は約4分間で終了し、その中でLEDは数十回点灯します。1試行が終了したタイミングはこちらで合図をしますので、それまでは2つの課題に集中してください。1試行終了の合図が出た後は、速やかにその場でブレーキペダルを踏んで停止してください。

1試行終了後、実施した試行に対する主観評価を実施します。主観評価では、「注意努力」「視覚的負担」「聴覚的負担」「妨害感」「視覚探索課題の難しさ（右側）」「視覚探索課題の難しさ（左側）」をそれぞれ評価していただきます。評価方法は、各項目に左端が「低い」、右端が「高い」と記述された線分を用意しているので、自身が感じた各項目の程度を、線分上に×印を記すことで評価してください。「1試行実施→主観評価」を1セットとし、これを9回繰り返します。

<実験全体の流れ>

[教示] → [ドライビングシミュレータ操作練習] → [練習試行] → [本試行] → [実験アンケート]

(※各本施行のブロックの実施時間は約15分で、実験全体で約1時間30分の見込みです。)

本試行終了後に、実験の感想等に関するアンケートに回答していただきます。その際、回答に困る設問があれば空欄のままです。

IV. 実験の危険性、不利益、苦痛、副作用等、及びそれらの対策について

スピーカから呈示される音量は、労働安全基準法（または労働安全衛生規則および騒音障害防止のためのガイドライン）で規定されている暴露が許容される音量を十分に下回るレベルであるため、危険性や副作用などはないと考えられます。

気分が悪くなった場合は実験者にいつでも申し出てください。申し出がありましたら速やかに実験を中止します。

この他、何らかの理由により実験を中止したい場合は直ちに実験を中断しますので、お申し出ください。

実験で得られたデータは実験者のみが扱い、またデータの公表時には個人が特定されないよう配慮いたします。

V. 緊急事態に対する対応について

もし実験中に不都合や身体の不調がありましたら実験者にお声掛けください。実験を中断いたします。

VI. 同意しない場合の不利益について

本実験に同意しない場合でも、いかなる不利益を受けることはありません。

また、同意した後でも途中でやめることができます。その際にも不利益を受けることはありません。

VII. プライバシーについて

個人情報及び実験により得られたデータは、研究以外の目的には一切使用いたしません。
また、情報管理には十分配慮しますので、実験関係者以外の者に渡ることはありません。

VIII. 謝礼について

この実験に参加することでの謝金はありません。

IX. その他

今回の実験について、苦情、その他ご意見がありましたら、九州大学大学院芸術工学研究院
「実験倫理委員会」までご連絡下さい。

連絡先：福岡市南区塩原 4-9-1 九州大学芸術工学部総務課研究支援係

電話番号 092-553-4429

実験についての説明書

研究責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

実験責任者： 山内勝也（九州大学大学院芸術工学研究院・准教授）

I. 研究課題

サイン音と視覚刺激の相互作用に関する調査

II. 研究 (実験) 目的

サイン音と視覚刺激の相互作用について調査します。

III. 実験手順

本実験は全部で4つのブロックからなります。うち2ブロックでは視覚刺激の弁別反応課題のみを実施し、残りの2ブロックでは弁別反応課題と同時にトラッキング課題を実施します。

弁別反応課題では、まずヘッドホンからサイン音が提示されます。その後、視覚刺激が提示されるので、赤・緑のどちらが表示されたかを、対応するキーを押下することで回答してください。回答は、できる限り素早く正確に行ってください。トラッキング課題では、画面上を白い円が移動し続けるので、常にマウスカーソルを円上に重ねてください。

弁別反応課題のみを実施するか、弁別反応課題とトラッキング課題を同時に実施するかは、実験参加者ごとにランダムな順番となっています。実施順は、実験者より指示されます。

<実験全体の流れ>

[教示] → [練習試行] → [本試行 (第1ブロック)] → [本試行 (第2ブロック)]

→ [本試行 (第3ブロック)] → [本試行 (第4ブロック)] → [実験アンケート]

(※各本試行のブロックの実施時間は約15分で、実験全体で約1.5時間の見込みです。)

第4ブロックの終了後に、実験の感想等に関するアンケートに回答していただきます。

その際、回答に困る設問があれば空欄のままです。

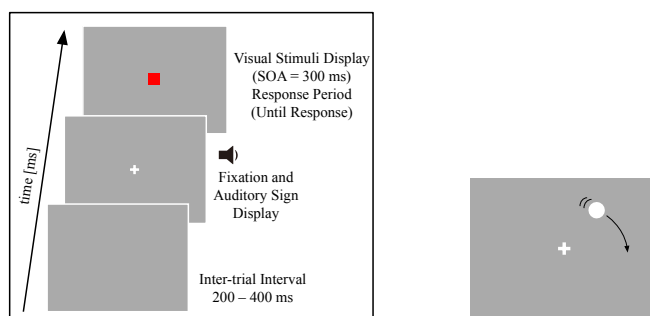


Figure 実験における1試行の流れ (左) , およびトラッキング課題のモニタ表示 (右)

Fig. 4: The instruction for participants of the experiment 5 and 6 (Chapter 4).

IV. 実験の危険性、不利益、苦痛、副作用等、及びそれらの対策について

ヘッドホンから呈示される音量は、労働安全基準法（または労働安全衛生規則および騒音障害防止のためのガイドライン）で規定されている暴露が許容される音量を十分に下回るレベルであるため、危険性や副作用などはないと考えられます。

気分が悪くなった場合は実験者にいつでも申し出てください。申し出がありましたら速やかに実験を中止します。

この他、何らかの理由により実験を中止したい場合は直ちに実験を中断しますので、お申し出ください。

実験で得られたデータは実験者のみが扱い、またデータの公表時には個人が特定されないよう配慮いたします。

V. 緊急事態に対する対応について

もし実験中に不都合や身体の不調がありましたら実験者にお声掛けください。実験を中断いたします。

VI. 同意しない場合の不利益について

本実験に同意しない場合でも、いかなる不利益を受けることはありません。

また、同意した後でも途中でやめることができます。その際にも不利益を受けることはありません。

VII. プライバシーについて

個人情報及び実験により得られたデータは、研究以外の目的には一切使用いたしません。

また、情報管理には十分配慮しますので、実験関係者以外の者に渡ることはありません。

VIII. 謝礼について

この実験に参加することでの謝金はありません。

IX. その他

今回の実験について、苦情、その他ご意見がありましたら、九州大学大学院芸術工学研究院「実験倫理委員会」までご連絡下さい。

連絡先：福岡市南区塩原 4-9-1 九州大学芸術工学部総務課研究支援係

電話番号 092-553-4429