

分担研究課題
STS 人工網膜システムによる人工視覚の評価法、リハビリテーション法の確立

研究分担者 北澤 茂 大阪大学大学院生命機能研究科・脳神経工学講座/医学系研究科・脳生理学教授

研究要旨：

人工視覚を使った視機能回復のためのリハビリテーション法開発のために、1) 目標と手先の位置の情報のほかに、背景情報が到達運動の学習に利用されているかどうか、2) 背景に対して目標位置を表現する「背景座標系」が脳のどこにあるか、3) 健常被験者の視線移動の時系列の規則性を解析し、定量的なモデルとして表現できるかどうかを検討した。その結果、1) 我々の脳は背景の中で目標の位置を特定して、運動の修正信号の生成に利用していること、2) 「背景座標系」が頭頂葉 前頭葉 側頭葉を含む神経ネットワークに表現されていること、さらに3) 顔の動き、大きさ、新規性、口の動き、の4項目で定義される「顔の顕著性」が最も大きい顔を選んで視線を移動させていることが明らかになった。これらの成果は人工視覚を使った機能回復のリハビリテーションに応用可能である。

A. 研究目的

人工視覚の重要な用途の一つは、対象を視認して手を伸ばして取ることである。この一見簡単な到達運動課題も、実は手と対象の間の誤差の情報に基づいて毎回修正を受けている(Kitazawa ら, *Nature* 1998)。この修正過程がなければ、手は思った場所には到達しない。この修正過程には目標の情報と手先の位置の情報が必要であるから、人工視覚のシステムでも手先と目標の位置情報を提示することが必要である。しかし、人工視覚の入力部にあたる視野カメラには、対象だけではなく、背景の豊富な情報も写り込む。この情報の中から対象だけを抽出して提示するのがよいのか、それとも単純化した背景の情報（たとえば机の輪郭情報など）も提示するのがよいのか。

最近の研究によると、我々は認識対象の位置を背景を基準にした座標系でも表現しているらしい(Boi ら, *Current Biology* 2011)。しかし、背景の情報が到達運動の修正にも影響を与えるかどうかについてはなんら知見がない。そこで、H24年度は、まず、目標と手先の位置の誤差に基づく修正過程のモデルとして「プリズム順応」の実験系を採用し、四角等で表現した単純な背景の情報が「プリズム順応」を促進したり阻害したりするかどうかを調べた(実験1)。

もし背景の情報も有効に利用されているとすれば、脳の中には背景を基準として目標位置を表現する「背景座標系」が存在することを強く示唆する。H24年度の成果を受けたH25年度は、「背景座標系」の神経基盤を解明することを目的として、機能的磁気共鳴画像法(fMRI法)を用いた研究を

行った(実験2)。

視覚を失うことによって生じる困難は多岐にわたる。相手の顔の位置を知り、適切なタイミングで見ることができないこともその一つである。人工視覚は、顔を適切なタイミングで見るという行動を回復するためにも応用することができるはずである。一方、健常被験者が映画やテレビを見るとき視線の移動のタイミングと対象は、登場人物がいる場面では驚くほど類似していることが知られている(Nakano ら, 2010; Shepherd ら, 2010)。Koch らはコントラストや明度や色の变化などの物理的な特徴量で定義される目立つ場所(顕著性の高い場所)を見るというモデル(Itti と Koch, 2001)を提唱してきたが、このモデルでは上記の視線移動は全く説明できないことも報告されている(Shepherd ら, 2010)。一体、どのような規則に従って、われわれは複数の顔から一つを選んで眼を向けているのだろうか。H26年度は、映画やテレビを見る際の、定型的な視線の移動パターンを、定量的なモデルとして表現することを目的として研究を行った(実験3)。

B. 研究方法

実験1

対象：37名の健常自発参加者を対象として研究を行った。参加者には規定の謝金を支払った。
課題：1) 背景として枠を置き、ランダムな場所に提示した目標に到達運動を行わせた。2) 運動中(0.3秒程度)は液晶シャッターで視覚を遮断し、画面に触れた瞬間に視覚フィードバックを0.3秒与えて、誤差の信号をフィードバックした。3)

このとき、視野をずらすプリズムを入れて、大きな見かけの誤差が生じる状況を作り出した(図1上、点線矢印)。4) 背景は視覚を遮断した運動中に動かない「移動なし条件」、同じ方向に動かす「同方向移動条件」、反対方向に動かす「反対方向移動条件」の3条件を設定した。**目標の位置が背景座標系で記憶されるとすれば、同方向移動条件では狙った目標に指が到達したと解釈され、運動制御の誤差は生じず、プリズム順応が生じなくなるはずである。一方、反対方向条件では促進されるはずである。**

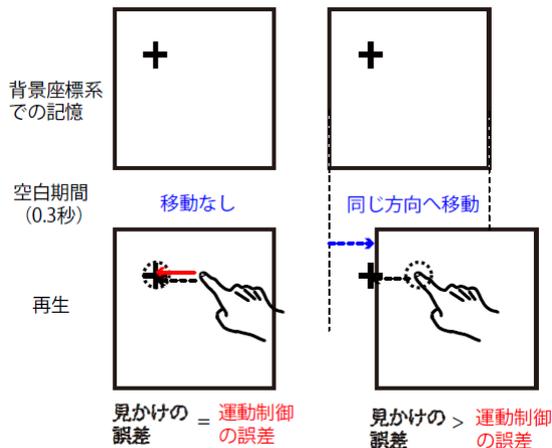


図1 実験1のデザイン。

(倫理面への配慮)

大阪大学大学院生命機能研究科に設置された外部委員を含む生命機能研究科倫理委員会において、研究内容の安全性・必要性に関して、審査・承認を受けて行った。各参加者には事前に研究の内容を説明し、書面で同意(インフォームドコンセント)を得てから実験を行った。

実験2

対象: 45名の健常自発参加者を対象として研究を行った。参加者には規定の謝金を支払った。
 課題: 1) 被験者はMRIスキャナーの中に仰臥して、ミラーに映る画像中の十字を固視する(図1a)。2) 2-8秒の後、枠が右または左に提示される。3) その2秒後にターゲットが左・中・右の3箇所のいずれかに提示される。4) 被験者はターゲットが赤丸かリングかを弁別して、リングであれば手元のボタンを押す。**目標の位置を背景座標系で表現する脳の領域では、背景の枠に関して同じ場所に目標が提示されると、順応によって徐々に反応が低下すると予想される。一方、目や頭に固定された座標系を表現する脳の領域では、画面上の同じ位置に目標が提示されると順応を起こすと予想される。** 得られたMRIデータ時系列をStatistical

Parametric Mappingソフトウェアを用いて解析して、各条件で順応する脳の領域を描出した。

(倫理面への配慮)

大阪大学大学院生命機能研究科に設置された外部委員を含む生命機能研究科倫理委員会において、研究内容の安全性・必要性に関して、審査・承認を受けて行った。各参加者には事前に研究の内容を説明し、書面で同意(インフォームドコンセント)を得てから実験を行った。

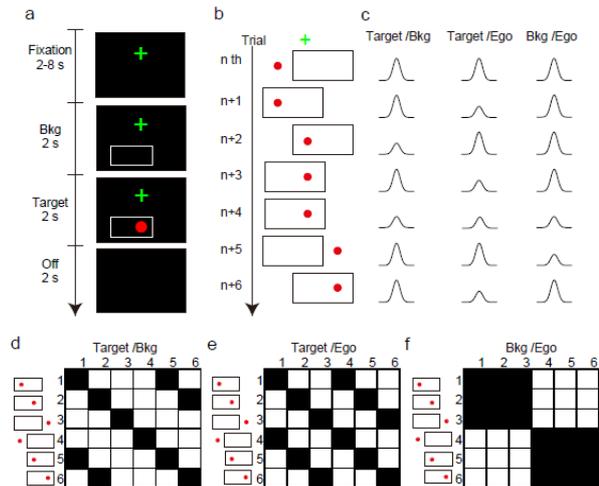


図2 実験2のデザイン。被験者はMRIスキャナーの中で画面の十字を固視する。枠が出た後に提示されるターゲットが、単なる丸かリングかを弁別する課題を行っている際の脳活動を計測した(a)。枠は左右2箇所、ターゲットは左・中・右の3箇所のいずれかに提示されるので、刺激パターンは6通りある(b)。枠に対して同じ位置にターゲットが提示されたときに、順応して脳活動が低下する領域を探した。

実験3

対象: 24名の健常自発参加者を対象として研究を行った。参加者には規定の謝金を支払った。
 刺激と課題: 被験者は顔を顎台に載せた状態で、前方の画面に提示されるビデオ画像を視聴した。およそ6秒の短いビデオクリップ12本を0.5秒のブランクをはさんで編集した約77秒(2237フレーム)のビデオ画像を刺激に用いた。被験者は異なる4条件(順方向再生・音あり、順方向再生・音なし、逆方向再生・音あり、逆方向再生・音なし)の4条件でビデオを視聴した。
 計測: 刺激を視聴する際の視線を50Hzで計測した(Tobii, X50, Tobii Technology AB)。
 解析: 各フレームにおいて、すべての顔の眼、口、鼻の位置を登録し、被験者ごとに視線位置と顔の

距離に基づいてどの顔を見ているかを判別した。その上で、それぞれの顔を見ている被験者の割合（顔の視聴率）を計算した。

多次元尺度法による視線パターンの比較：24被験者の4条件の視線パターン（96個）、Kochの顕著性モデルが予測する視線パターン（7個）、視聴率が最も高い顔を選んで作った視線パターン（ピーク顔パターン）を定量比較するために、お互いの距離を成分とする距離行列を作り、多次元尺度を適用して2次元平面上にプロットした。

顔顕著性モデル：それぞれの顔が持つ顕著性を1) 大きさ、2) 顔の動き、3) 口の動き、4) 新規性の4項の和として表現し、さらにすべての顔の顕著性の和で規格化した「顔顕著性」を定義した。どの顔を見るかの確率は顔顕著性を入力とするシグモイド関数で表現した（図1）。実際の顔の視聴率の時間変化を最もよく近似するように線形和のパラメータを調整した。

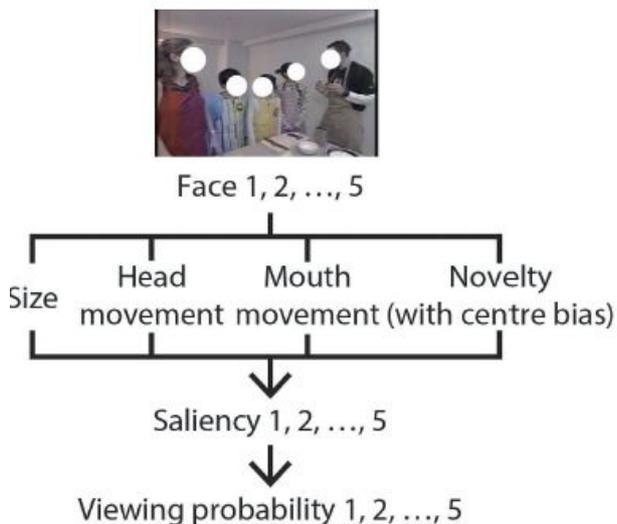


図3 顔顕著性モデル（倫理面への配慮）

大阪大学大学院生命機能研究科に設置された外部委員を含む生命機能研究科倫理委員会において、研究内容の安全性・必要性に関して、審査・承認を受けて行った。各参加者には事前に研究の内容を説明し、書面で同意（インフォームドコンセント）を得てから実験を行った。

C. 研究結果

実験1

移動なし条件では、通常プリズム順応が生じた。つまり、プリズムを入れると視野の移動方向に誤差が生じ、試行とともに減少した（図4中央）。そしてプリズムを外すと（61試行目）逆向きに大きな誤差が生じた（残効、矢印）。2）一方、**同方向移動条件ではプリズム順応が生じなかった**（図

2左）。反対方向条件では逆に促進された（図2右）。これらの結果は、**運動誤差の計算に背景座標系が使われていることを明瞭に示す**（Uchimuraら、*Journal of Neuroscience* 2013）。

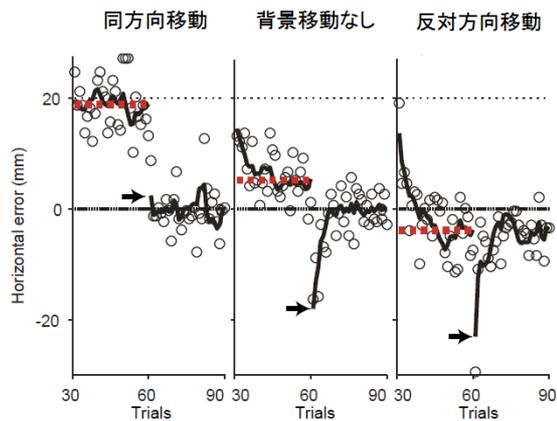


図4 背景移動の効果。背景を移動することでプリズム順応を加速（右、反対方向移動）あるいは原則（左、同方向移動）することができた。

実験2

背景に関して同じ位置にターゲットを提示した場合には、図5の暖色で示す領域に有意な順応が生じた。一方、目や頭に固定した自己中心座標系ではターゲットに関する有意な順応は生じなかった。背景が自己中心座標系に関して同じ場所に提示された場合は、寒色の領域に有意な順応が観察された。（Uchimuraら、投稿中）。

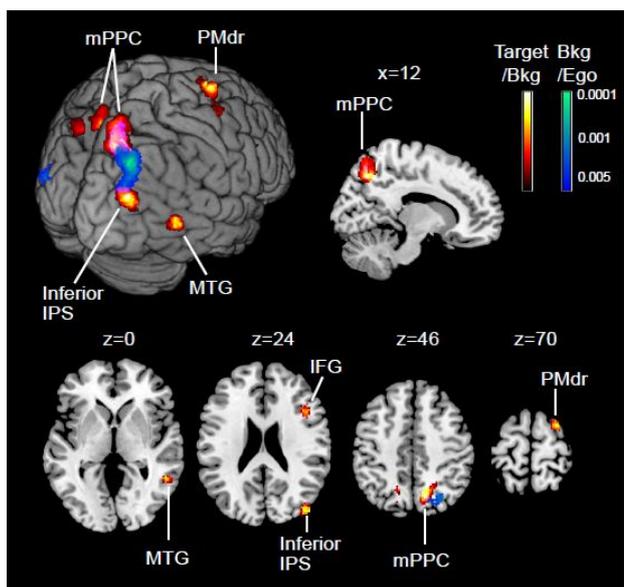


図5 背景座標系の神経基盤。mPPC: 後部頭頂葉内側領域, Inferior IPS: 下部頭頂間溝, PMdr: 背側運動前野吻側領域, MTG: 中側頭回。

実験 3

顔顕著性モデルをデータに適用した結果の一例を示す(図6)。このおよそ6秒のビデオクリップは、二人の少年が、交互に話す場面である。ビデオクリップが開始した直後は、正面向きで顔の面積が大きい右の少年の視聴率が高いが、左の少年が話をする時点に向って左の少年に視線が移動し、口を動かしている時(1.83 秒)に80%のピーク視聴率を示した。発話終了後は右の少年に視線が移動して、右の少年が発話する4.53秒後にやはり視聴率は80%を超え、その後徐々に左の少年に視線が移動した(図3の点線)。顔顕著性モデルで予測される視聴率は図3の実線である。実際のデータとよく一致し、83%の分散を説明した(d.c. = 0.83)。

全データの決定係数の中央値は0.87と高く(図6) 顔顕著性モデルが視線移動の過半を説明することが示された。

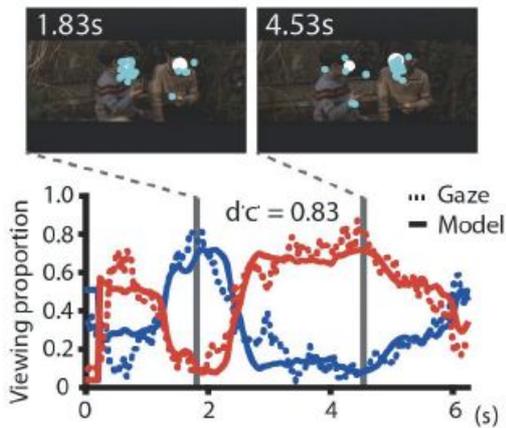


図6 視聴率変化とモデル予測の一例
視線の視聴率変化(点線)とモデル予測(実線)はよく一致した。d.c.は決定係数を表す。

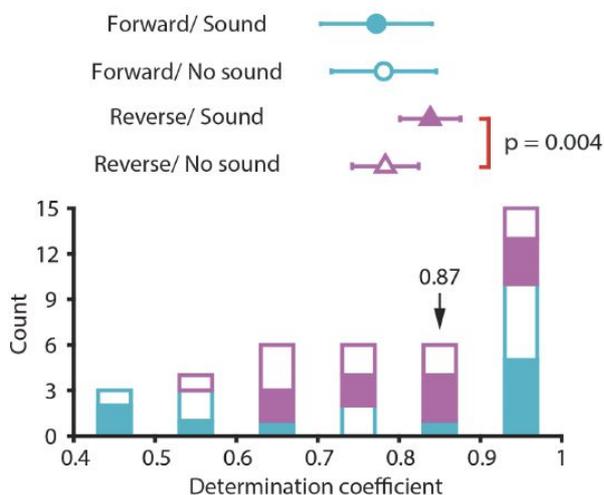


図7 顔顕著性モデルの決定係数の分布
中央値は0.87であった。

D. 考察

プリズム順応は背景を視野をずらす方向と同じ方向に移動するとキャンセルされ、反対方向に移動すると促進された。この結果は到達運動の修正過程に、目標と手先の位置情報だけでなく、背景の情報も利用されていることを明瞭に示している。つまり、我々は脳には背景座標系が存在することを示すことに成功した(実験1, Uchimura & Kitazawa, 2013)。

実験1の成果を受けて行った実験2においては、「背景座標系」が頭頂葉 前頭葉 側頭葉を含む神経ネットワークに表現されていることをfMRI adaptation 法を用いて明らかにした。特に、右の楔前部に強い信号が認められたことが注目された(Uchimura ら, 投稿中)。

さらにH27年度には、顔顕著性モデルを提案し、顔を含む場面を見る際のダイナミックな視線移動パターンの過半を再現することに成功した(Suda & Kitazawa, 2015)。

人工視覚の入力装置には、通常のCCDあるいはCMOSカメラが想定されている。軽量小型のCMOSカメラですら画素数は数十万を数え、視野の中の人や物、さらには背景の情報まで、多くの情報を含んでいる。

一方、現在開発中の人工視覚装置の刺激電極数は7x7の49個である。数十万の画素数の情報からいかに有効な情報を49個に圧縮して提示するのがよいのだろうか。実験1の結果は、カメラの情報から手の位置と目標の位置を抽出するだけでなく、机の輪郭等の単純な背景情報を抽出して提示することが、到達運動の誤差修正に寄与していることを示している。また、実験3の結果は、1) 顔の抽出、2) 大きさの計算、3) 顔全体の動きの計算、4) 口の抽出、5) 口の動きの有無の検出、6) 新規に登場してからの時間経過、の情報さえあれば、すぐに応用することが可能である。顔の抽出に関してはすでにデジタルカメラに搭載されているし、表情検出アルゴリズムを使えば口の動きの検出も容易だろう。顔の大きさや顔全体の動きの検出はさらに容易なはずである。つまり、既存の画像処理技術を応用するだけで、現在の視野のどの顔に眼を向けるのが自然か、が瞬時に計算できるはずである。

カメラの映像をそのまま電極に反映させるのではなく、事前の、それも生物学的に妥当な情報処理を行った上で提示することは一般論としても重要な観点であると思われる。背景情報と顔の情報をあらかじめ処理して、適切に提示することで、到達運動の機能回復や人の顔を見るという行動の回復に資することが可能であると考えられる。

E . 結論

我々の脳は、1) 到達運動の修正に、目標と手先の位置だけでなく背景の情報も有効に利用していること、2) 顔を検出して、大きさや動きなどの少数の情報を組み合わせて比較して、眼を向けるべき顔を選んでいることが明らかになった。これらの成果は人工視覚を使った到達運動のリハビリテーションと、適切なタイミングで人の顔を見る、という行動を回復するためのリハビリテーションに応用できるだろう。

F . 健康危険情報

該当する危険なし

G . 研究発表

1. 論文発表

- 1) Uchimura M & Kitazawa S. Cancelling prism adaptation by a shift of background: a novel utility of allocentric coordinates for extracting motor errors. *The Journal of Neuroscience* 33:7595-7602, 2013.
- 2) Suda Y & Kitazawa S. A model of face selection in viewing video stories. *Scientific Reports* 5: 7666, 2015.

2. 学会発表

- 1) Uchimura M & Kitazawa S. Cancelling prism adaptation by a shift of landmarks during reaching. Human Frontier Science Program Group Meeting, July 13, 2012, Lyon, France.
- 2) 内村元昭 北澤茂. 背景の移動によるプリズム順応の無効化. 包括脳ネットワーク夏のワークショップ ポスター発表 2012年7月26日, 仙台.
- 3) Uchimura M & Kitazawa S. Cancelling prism adaptation by a shift of landmarks during reaching. Nanosymposium in 37th Annual meeting of the Society for Neuroscience, 830.10. October 17, 2012, New Orleans, USA.
- 4) 北澤茂 .眼を動かしても世界が動かない理由 . The 70-th BioMecForum 21 招待講演, 大阪大学 シグマホール, 大阪, 2013年10月5日
- 5) 北澤茂 .目を動かしても世界が動かないのはなぜか . 第31回耳鼻咽喉科ニューロサイエンス研究会特別講演, ホテルグランヴィア大阪, 大阪, 2013年8月24日
- 6) 北澤茂 . ころの時間・ころの空間 . 国際高等研究所・研究プロジェクト「心の起源」「心の先端研究の新たな地平」, 国際高等研究所, 京都, 2013年7月7日
- 7) Inoue M, Uchimura M, & Kitazawa S. Increase of end-point errors in reaching induced by microstimulation to the primary motor and premotor cortices. 38th Annual meeting of the

Society for Neuroscience, 471.22. November 11, 2013, San Diego, USA.

8) Uchimura M, Nakano T, Morito Y, Ando H, & Kitazawa S. Automatic representation of a visual stimulus relative to a background in the right precuneus. *Vision, Memory, Thought: how cognition emerges from neural network*, International Symposium, December 6, 2014, Tokyo, Japan.

9) Uchimura M, Nakano T, Morito Y, Ando H, & Kitazawa S. Automatic representation of a visual stimulus relative to a background in the right precuneus. *Neural Mechanisms of Vision and Cognition*, CiNet 2nd International Symposium, March 2, 2015, Osaka, Japan.

H . 知的財産権の出願・登録状況

特記事項なし。

