

■ 研究交流 ■

ボストン大学認識とニューラルシステム研究所における
Laminar cortical モデルによる仮想環境でのサイバシックに関する研究

張 善 俊

Research on Cybersickness in Virtual Environment by Laminar Cortical Model
in Department of Cognitive and Neural System, Boston University

Shanjun Zhang^{1,2}

¹ Department of Information Sciences, Faculty of Science, Kanagawa University

² To whom correspondence should be addressed. E-mail: zhang@info.kanagawa-u.ac.jp

はじめに

2005年4月1日～2006年3月31日一年間、神奈川県川大学在外研究員として、ボストン大学認識とニューラルシステム研究所 (Department of Cognitive and Neural systems) で Laminar cortical モデルによる仮想環境でのサイバシックに関する研究を行う機会を得たので、以下に、CNS の紹介をかねて、研究の概要を報告する。

大学都市ボストン

アメリカの独立生誕の地、ボストンは、マサチューセッツ州の州都であり、6州からなるニューイングランド地方最大の都市である。ボストンは、Harvard や MIT をはじめ、70以上の大学が集まる、全米随一の大学都市である。町の中には現代的な建物と百年も前のアパートは当たり前のように、うまく調和してその存在感を示している。筆者が住む Beacon Street では、石畳の路地にレンガ造りの家並みは、まるでヨーロッパを思い立たせる情緒が漂っている。この街は、歴史的に奥深いだけでなく、学問や芸術の分野でも活気があふれている。ここで様々な肌色と顔をした若者に会える、一年間でたくさんの中国人研究者と日本から来たお医者さんとお友達になった。

ボストンの地下鉄もアメリカで最も古い。1897年9月1日に開業したボストンの地下鉄は、市民の足として親しまれている。ボストンの地下鉄は、T (ティー) とよばれており4つの路線がある。この4つの路線が、ボストン近郊をほとんど網羅している。筆者は毎日グリーンラインに乗ってボストン大学の研究室と借りたアパートと行き来している。地下鉄は郊外に出ると路面電車となる。アウトバウンド方向では、自由に乗り入れてき、インバウンド(ダ

ウンタウン方向)では1.5ドルの安さで乗れる。車がなくてもさほど不自由を感じない。

ボストンは日本の札幌と同じ緯度に位置しているが、札幌の気候よりちょっと暖かい。四月の初めに、MIT のメインストリートの両側に桜の花が満開し、公園には色とりどりの花を咲かせていた。



図1. ボストン大学のキャンパスの一角。

認識とニューラルシステム研究所 (CNS)

CNSは、野球で有名なレッドソックス球場のすぐ近くにある3階建ての小さな建物を占めている。CNSは、ボストン大学のなかでもかなり異色な存在であり、もともとはfunding chairmanのグロスバーグ教授の研究グループから発展してきた。今は9名の教授陣と25名の提携研究者、そして50名ほどの大学院生、ポスドックなどで、人間あるいは動物のニューラルシステムの計算原理、機構、およびアーキテクチャについて研究をしている。ここでは、主に二つの問題に解答を求めている。つまり、(1)脳はどうやって人間(動物)の行動をコントロールしているか。(2)どうやって技術を使って生物的な知能をシミュレートするか。具体的には、ニューラルモ

デルの理論的研究、視覚研究、聴覚研究、計算視聴覚の研究と記憶に関する研究です。一個のニューロンの計算モデルから、大脳皮質の各領野、大脳皮質のマルチ階層までの研究を繰り返している。



図 2. Stephen Grossberg 教授と筆者.

CNS での研究は、筆者がボストン到着の三日目から始まった。二階の客員研究員の一室に筆者の机が置いている。二ヶ月後にギリシアの某大学の助教授も加わった。オフィスの設備は日本のそれとはさほど変わらない。実験用の眼球追跡の設備はミンゴラー教授の実験室のものを使わせてもらった。今まで 3 世代の眼球追跡装置を使ってきたが、この装置は使い勝手も精度も一番よかった。CNS では、実験もやるが、どちらかというと理論的な研究の方が多い。しかもその理論はほとんど 30 年前からグロースバーグ教授が提案してきた *shunting network* 理論をベースに発展している。筆者はもともとコンピュータグラフィックスと画像処理をやっているが、ニューラルネットワークそして大脳の内部機構などにはあまり詳しくなかった、ここでは大学院生向けのコースも一部参加させてもらった。ここでは、一回の授業は大体 2 時間である、毎回の授業は事前に配られている 5, 6 本の論文が読まれていることを前提にして進められている。授業の中に課題が課されていて期末テストと中間テストもあり、学生さんが単位を取得するのが容易ではない。年末には学生さんの成績に合わせて *funding* と称する奨学金の配分を決めていく。*Funding* をもらうと月々 2000 ドルぐらいのお金がもらえるだけでなく、年間 4 万ドルの授業料も免除される。学生さんは *Funding* をもらうために一生懸命、教授達は *Funding* を集めるために一生懸命である。2004 年にグロースバーグ教授を代表にボストン大学、ブランディ大学、MIT とペンシルベニア大学で構成する研究グループで 2010 万ドルの NSF のグラントを 5 年間計画で獲得

し、CNS に潤いをもたらしていたそうである。

CNS では、研究指導は一對一のミーティングの形で、アポイントメントを予約して行われている。65 歳にもなるグロースバーグ教授は精力的に共同研究者あるいは大学院生達とのゼミをこなしている。一人一時間のペースで次から次へと人々と議論しているグロースバーグ教授を見て筆者が大変感心をした。グロースバーグ教授はもともと数学出身で、ドクターを取得後すぐに MIT の助教、準教授になった。彼は変微分方程式を使って、脳モデル、ビジョン、記憶、感情、認識など幅広い分野に応用した。1980 年代初頭に彼の論文に、学会が特集を組んで、当時の著名な学者達に賛否両論の議論を引き起こし、学会の一大風景となった。また彼はビジョンの研究で有名な MIT の David Marr との喩亮のライバル関係も有名な話である。筆者は、グロースバーグ教授とのミーティングを通していろんなことを学んだ。特に、一流の研究者の問題の捉え方である。彼は様々な研究資源を集中させ、自分の理論のルールに導かせて、幅広い分野に応用させて、問題を掘り下げながら 460 もの論文を生産している¹⁷⁾。

CNS でもうひとつ印象に残ったことは、学術交流の頻度とそのレベルである。ボストンでは、*neural talks* と呼ばれる公開ゼミが、MIT、ハーバード大学医学部、ボストン大学、ブラン大学の研究者を中心毎週行われている。ネイチャーに発表される論文の内容は、多くそこで取り上げられている。

サイバーシックスの研究

サイバーシックスはバーチャルリアリティ(VR)システムなどの仮想環境で引き起こされる車酔いに似た症状である。VR システムに没入する最中、あるいは使用後に以下のような症状はかなりの割合の人で出てくる。(1)視覚症状(眼精疲労、目が張る、目がかすむ、頭痛)、(2)方向感症状(眩暈、平衡失調)、(3)悪心(目まい、吐き気、嘔吐)。そのほかの症状として: 一般的な不快、集中機能の低下、唾液の分泌の増加、頭が重い、余分な発汗、胃が張るなども報告されている。Lawson *et al.* (2002)⁸⁾。

McGuinness(1981)⁹⁾の報告では、66 人の 250 から 4000 時間の飛行経験を持つ人に戦闘機シミュレータシステム(ACMS)を一回 1 時間のコースを毎日 4 回ずつ一週間使用させますと、27%の人が少なくともひとつの症状が出る。また、1500 時間以上の飛行経験を持つ人は 47%で、1500 時間以下の飛行経験を持つ人は 18%に症状が出る。Crowley(1987)¹⁰⁾は、コブラ戦闘機のパイロット 115 名に FWS シミュレータを使用させて、そのうち

40%の参加者に吐き気や眩暈などの症状が報告された。1000時間以上の飛行経験を持つ人がもっとサイバシックを感じやすい結果である。なお、普通の人なら、没入型のVRシステムを利用するとおよそ60%の人がサイバシックの症状が出ると報告されている (stern, 1990)。

サイバシックの原因解明はVRシステムがより一層そのパワーを社会に発揮するために不可欠である。従来の研究では、サイバシックは3つの感覚システム間のコンフリクト、つまり、視覚、前庭および自己感応の情報の不一致によるものと主に思われていた。その他、中毒の理論(Treisman,1977)¹²⁾および生態学的な理論(Stoffregen,1991)¹³⁾もある。以下はそれらの理論を紹介する。

センサー衝突の理論 (sensory conflict)

センサー衝突の理論は感覚器官の情報不一致によって症状を引き起こされる説としては最も流行する解説である。この理論では、三次元空間にある人体のオリエンテーションを保持するために、中枢神経系に最小4つの知覚情報エントリのポイントを必要とする: (1) 耳石が提供線形加速、速度および傾斜に関する情報; (2) 三半規管によって提供される角加速の情報; (3) 視覚システムが提供する視覚シーンによる体の方位に関する情報; (4) 接触と運動感覚圧力のシステムが提供する肢および体の位置に関する情報。環境の変化から既にきちんと整っている体の感覚システム間のミスアラインメントか不一致があったらサイバシックの症状は現われることができる (Harm, 2002)¹⁴⁾。

適切な視野を維持するためには、目は見られる対象に対して安定しなければならない。そのために、環境に置かれる頭部の位置情報と眼球運動と一致させる必要がある。この一致はVOR (vestibulo-ocular reflex) によって実現される。頭部が特定の方向で動き始めるとき前庭システムは動きを感じ、視覚システムの眼球運動モーターに情報を直接送ることで網膜像を維持する。頭部が没入VR環境のなかで動いているとき、前庭システムによって感知される変位とコンピュータによって送信される相応の視覚情報の間にわずかな時間的ずれが起こる。それによって方向に狂いが出て、眩暈、平衡失調などの症状が発生するといわれている。また、VRの映像では、環境が回っているときに、視覚センサーは回旋を認識するが、三半規管からは人間が回っていることを示さないで、感覚の不一致が結局人間に眩暈をもたらしている。

一般に、体の動きは視覚、前庭および自己感応の

メカニズムによって感知される。視覚の要素がない時、頭部の方位と動きは前庭システムによって検出される。リアルな環境では、これらのシステムから来る情報は完全に一致する。しかしバーチャルリアリティで、人は動かなかったことを前庭および自己感応システムが示す間、人が動いたことを視覚センサーからの情報によって示される。逆に、移動する車の中で本を読んでいるとき、視覚情報では、体は動いていないが、前庭および自己感応システムが人の動きを示す。このように、方向性症状と吐き気は、多種センサーシステムから脳によって届く情報間の衝突によって引き起こされるようである。

また、VRで実現する三次元の世界は両眼視差によって作り出されているが、実際にヘッドマウントディスプレイ (HMD) の中で、VR没入者の両眼運動はVRの映像を作るときに仮定した両眼視差とは完全に一致することが困難である。タイミング的に両者の同期が難しい、両眼の運動量の大きさにも一致させることがほぼ不可能である。この不一致がある程度蓄積したら、サイバシックの症状が出る。しかし、その具体的な相関はどうなっているかは不明である。それについて筆者はいろんな実験をやったが、その結果をまとめて別途論文にする予定である。

センサー衝突の理論は一般に十分な説得力があるようであるが、でも、どうして同じ対立衝突する情報に対してサイバシックが出る人と出ない人がいるかきちんと説明できない。また、ある状態では、センサー情報の対立は、全員にサイバシックの症状を引き起こさないことがある。また、症状が出る人でも、ある種の情報衝突に症状が出るが、別な情報衝突には症状が出ないことがある。さらに、この理論は情報衝突と症状発生との定量的関係を示すことが困難であるし、根本的なメカニズムを詳細に説明することが困難である。

中毒理論

中毒理論は、Treismanが1977年にscience誌に発表している理論である¹²⁾。つまり、動きに起因する病気を誘発するメカニズムが胃からの毒素を撤回するために作用する身体への応答の結果である。Treismanは動きが単なるある特定のメカニズムを活動化させるための人工的な刺激であると提案している。もっと簡単に言えば、動きは吸収された毒素に起因する生理学的な妨害に答えるために作られ、開発されるメカニズムで機能である。神経系の活動は神経毒の効果によって肢および目の動きを制御するためにすべての感覚システムからの情報の記入項

目の調整を可能にして妨げられる。従って、不自然な動きによるこの活動の妨害は解釈されメカニズムを活動化させる毒素の吸収の徴候でありとして催吐性の応答を作り出す。Money (1996)によると、動きに起因する前庭システムによって始められる中毒を表す病気が2つの主要な現象で構成される: 空いている胃の応答(副交感神経制御)および圧力の応答(交感神経制御)。前庭システムは自律神経系の規則に関係していると考えられる。

中毒の理論に対する批評は前庭のメカニズムに影響を与えるのに毒素に必要な周期に関連している。胃腸域の毒素を除去する方法として可能にするには持続期間が余りにも長い。それは嘔吐が中毒に対して防衛の最後の手段のひとつである^{15,16)}。

生態学的な理論

生態学的な理論は交通機関に起因する“車酔い”が状態の不安定(Postural instability, PI)が長い期間までに続くことによって引き起こされると思われる。これは、センサー衝突の理論を否定する考えである。このアプローチはVR参加者と環境との適応を問題にしている。参加者の不慣れが安定姿勢を保つのに影響を及ぼす。参加者が適応するまで、状態の不安定が身体的な不快を引き起こす。PI理論は、姿勢の安定性の個人差があると説明できる。さらに、没入型VR環境化では参加に姿勢の不安定を引き起こすことができる。不安定の持続期間そして強度はサイバーシクの強度を予測する。

このアプローチへある限界がある。第一に、この理論は迷走神経(中耳)に問題がある個人は、どうしてサイバーシクを感じないかの説明を完全にできないか。第二に、このアプローチは意味されたメカニズムと操作に関してわかりやすい説明を提供しない。最終的に、このアプローチは状態の不安定により変位のために病気をなぜに関して引き起こすか理由の明確な説明を提供しない。

以上の三つの理論の存在は、それぞれの限界と同時に、サイバーシクの現象の複雑さも示されている。これらの理論の相違は相互に排他的であることを意味しない。これらを統一に説明するには、トリガーとなる神経伝達物質の解明と大脳皮質中の各層での情報の流れを明らかにする必要がある。Takedaら(2001)は薬物でサイバーシクを治療するために、ヒスタミン、アセチルコリンノルアドレナリンなどの神経伝達物質が車酔いのような現象に強く関与していることを特定したが、shunting ネットワークモデルで階層的な展開を試みたい。

謝辞

CNS 滞在中、公私にわたりお世話いただいたボストン大学の Stephen Grossberg 教授、Ennio Mingolla 教授をはじめ CNS のスタッフおよび大学院生の人々に感謝します。本留学の機会を与えてくれた神奈川大学に感謝の意を表します。

文献

- 1) Berzhanskaya J, Grossberg S and Mingolla E (2006) Laminar cortical dynamics of visual form and motion interactions during coherent object perception. *Spatial Vision*, in press.
- 2) Cao Y and Grossberg S (2005) A laminar cortical model of stereopsis and 3D surface perception: Closure and da Vinci stereopsis. *Technical Report CAS/CNS TR-2004-007, Boston University. Spatial Vision* **18**: 515-578.
- 3) Grossberg S and Howe PDL (2003) A laminar cortical model of stereopsis and three-dimensional surface perception. *Vision Research* **43**: 801-829.
- 4) Raizada R and Grossberg S (2003) Towards a theory of the laminar architecture of cerebral cortex: Computational clues from the visual system. *Cerebral Cortex* **13**: 100-113.
- 5) Grossberg S (2001) Linking the laminar circuits of visual cortex to visual perception: Development, grouping, and attention. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **25**: 513-526.
- 6) Grossberg S (2001) Linking the laminar circuits of visual cortex to visual perception: Development, grouping, and attention. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* **25**: 513-526.
- 7) Grossberg S (1999) How does the cerebral cortex work? Learning, attention and grouping by the laminar circuits of visual cortex. *Spatial Vision* **12**: 163-186.
- 8) Lawson BD Graeber DA and Mead AM (2002) Signs and symptoms of human syndromes associated with synthetic experience. In: *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*. Stanney KM, eds., Mahwah: IEA. pp.589-618.
- 9) McGuinness J, Bouwman JH and Forbes JM (1981) Simulator sickness occurrences in the 2E6 Air Combat Maneuvering Simulator (ACMS). *Tech. Rep. NAVTRAEQUIPCEN 80-C-0135-4500-1. Orlando, FL: Naval Training Equipment Center*.
- 10) Crowley JS (1987) Simulator sickness: a problem for Army aviation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* **58**: 355-357.
- 11) Stern RM, Hu S, Anderson RB, Leibowitz HW and Koch KL (1990) The effects of fixation and restricted visual field on vection-induced motion sickness. *Aviation, Space and Environment Medicine* **61**: 712-715.
- 12) Treisman M (1977) Motion sickness: An evolutionary hypothesis. *Science* **197**: 493-495.
- 13) Stoffregen TA and Riccio GE (1991) An ecological critique of the sensory conflict theory on motion sickness. *Ecological Psychology* **3**: 151-194.
- 14) Harm DL (2002) Motion sickness neurophysiology,

- physiological correlates, and treatment. In: *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*. Stanney KM, ed., Mahwah: IEA. pp. 637-661.
- 15) Stanney KM and Kennedy RS (1998) Aftereffects from virtual environment exposure: how long do they last? *Proc. 42nd Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. pp.1476-80.
- 16) Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS and Lilienthal MG (1993) Simulator Sickness Questionnaire (SSQ): a new method for quantifying simulator sickness. *Int. J. Aviat. Psychol.* **1993**: 203-220.
- 17) Takeda N, Morita M, Horji A, Nishiike S, Kitahara T and Uno A (2001) Neural mechanisms of motion sickness. *J. Med. Inve.* **48**: 44-59.