拡張現実による自己運動錯覚の誘導

—脳卒中による感覚・運動機能障害に対する 新しい治療方法として—

Own-body Kinesthetic Illusion in the Augmented Reality : A Novel Approach for
Sensory-motor Dysfunction Due to Stroke

金子文成* *Fuminari Kaneko*

札幌医科大学

Key Words : 視覚刺激, 運動知覚, 脳卒中, 拡張現実, 運動錯覚

視覚入力で誘導される 四肢運動の知覚とは

1 自己運動錯覚—静止していても自己 の運動を知覚する

通常, 運動の感覚は運動の実行によって知覚される。しかし, いくつかの方法によって, 実際には運動が生じていないにもかかわらず, 運動が生じている感覚の知覚, すなわち自己運動錯覚 (self-movement kinesthetic illusion) を生じさせることが可能である。自己運動錯覚は, ある特定の感覚モダリティを単独, もしくは複合的に刺激することで誘導される。これまでに, 皮膚感覚入力¹⁾, 深部感覚入力²⁾, そして視覚入力³⁻⁷⁾ が報告されている。さらに, 覚醒下手術中 (図 1)⁸⁾, あるいは体性感覚を遮断した状況下で脳を刺激した場合⁹⁾ にも, 自己運動錯覚は確認されている。

図 1 覚醒下手術中の電気刺激による運動知覚の誘導 (文献 8 より)

BA39 と BA40 への刺激では, 運動は誘発されないにもかかわらず, 自己の身体が運動したと感じた, あるいは運動したくなつたと答えた。BA6 に対する刺激では, □または四肢に運動が誘発されたが, 運動の知覚はなかった。

2 視覚入力による自己運動錯覚

視覚刺激による運動錯覚としては, vection (視覚誘導性自己運動感覚) がよく知られている。vection とは, 身体の前面上におかれた中心を回転するような視覚的フローを提示することで, 視覚入力された物体の動きとは逆方向に体全体が動く

* 札幌医科大学保健医療学部理学療法学第一講座
(〒060-8556 北海道札幌市中央区南 1 条西 17 丁目)
E-mail : f-kaneko@sapmed.ac.jp

感覚が生じるというものであり^{10, 11)}、姿勢制御や全身移動の速度知覚などに関する研究に用いられてきた。それに対して Tardy-Gervet ら^{3, 4)}は、四肢がおかれた背景を回転させることで、背景の回転と逆方向へ四肢運動が生じる錯覚を誘導できることを報告し、segmentary vection と呼んだ。一方、Ramachandran は、上肢切断患者に対し切断された前腕に鏡を重ね、そこに映された残存側の手の運動を切断肢側の運動のように見せること（ミラーセラピー）で自己運動錯覚を引き起こすことができることを報告した^{12, 13)}。

われわれが用いた方法は、現実の自己身体上にパソコンの液晶モニタ（以下、モニタ）を配置し、その中で別途録画しておいた四肢の動画を再生する方法である（図2）。この方法による視覚誘導性自己運動錯覚（kinesthetic illusion induced by visual stimulus, 以下 KiNVIS）に関する最初の報告は、示指の内転・外転運動に関するものであった（図2-a）^{5, 14)}。この手法の優れている点は大きく2点ある。1点目は、segmentary vection のように手が一定方向に動いているという運動錯覚ではなく、映像の内容に応じて、いくつもの種類の3次元運動に関する錯覚が得られる点である。2点目は、ミラーセラピーのように対側の身体運動を伴うことがないため、被験者が出力する運動指令に伴う脳活動の影響を排除できる点である。

3 拡張現実を応用した治療法

われわれが報告してきた KiNVIS は、人工的な身体像〔仮想現実（virtual reality, 以下 VR）〕を現実的な身体像に置き換えるというものである。これにより、人工的な身体像を自己の身体であると認識する自己身体所有感が生まれる。さらに、その身体が運動する映像を見ることで、あたかも現実の自己身体が運動しているかのような知覚が誘導される。このように、現実環境に人工環境が

図2 上肢における KiNVIS の誘導（文献5より）

- a：最初の KiNVIS の報告である、示指外転の他動運動の映像を用いて視覚刺激している。
b：手指の屈曲伸展運動で KiNVIS を誘導している様子。

付加された空間を、拡張現実（augmented reality, 以下 AR）という。AR は、VR の下位区分であり、モニタを使用した KiNVIS は、AR の技術に区分されるものである。また、今後ヘッドマウントディスプレイを用いたシステムが実用化されることを想定すると、その場合には複合現実（mixed reality：MR）技術を応用した治療というほうが適切であろう¹⁵⁾。

液晶モニタを用いた KiNVIS の実施方法

安静にしている被験者の四肢末端近くにモニタを設置し、あらかじめ録画しておいた動画を再生する。この時、提示された動画に対して自己身体所有感（後述）を保有することが KiNVIS を高めることになるので、動画位置が現実の四肢の位置と“患者の主観”として矛盾しないことが重要なポイントの1つである。モニタの角度や位置を調整することで現実の四肢と映像の四肢が連続して見えるようにするか、モニタと四肢の接続部分を遮へいして、見ている動画が本来の四肢の場所に

位置するよう調整する。また、現実身体における体性感覚入力がないこともポイントであるため、安静を保たせたときの環境設定として余分な感覚を入力しない注意が必要である。

KiNVIS の科学的背景

1 認知心理学的基盤

自己身体所有感とは、「この身体は、まさに自分のものである」という感覚であり、四肢末梢から感覚入力されている状況と、視覚情報とが一致することで生じる¹⁶⁾。図3は、SchwabeとBlanke¹⁷⁾が示した、自己身体所有感を知覚する際の認知心理学的プロセスをあらわした簡略モデルである。運動フォワードモデルは運動指令のエフェレントコピーを示す。感覚フォワードモデルは実態が明らかでないが、運動指令と非常に類似した信号が、運動の結果として生じる感覚を予測するためのものとされている。KiNVISの基盤には、人工身体に対する自己身体所有感があるものと考えられるが、それは、多種感覚モダリティの信号が統合された結果、マッチしていることで生じる(図3-①)。さらに、運動時に予測される感覚である感覚フォワードモデルと求心性感覚入力が一貫していれば自己主体感が生じる(図3-②)。まず、自己身体所有感について考えると、KiNVISにおいては安静にしている状況下での体性感覚入力と、人工身体の動画が刺激となる視覚入力はマッチしない。このため、2つのモダリティは矛盾していることとなり自己身体所有感が生まれにくいはずである。また、自己主体感に関しても、動画再生中には、感覚フォワードモデルと視覚入力されている人工身体像の情報とが矛盾している。したがって、KiNVISの基盤として想定される自己主体感も生じないこととなる。しかし、われわれの実験結果では自己身体所有感を生じることがほとんどである。そして、自

図3 身体所有感と自己主体感における感覚-運動および多種感覚の入力状況と役割を示した簡略モデル (文献17より)

自己身体所有感は、求心性感覚信号による感覚間のマッチングと関連するものである。自己主体感は、意図的な運動により生じる感覚の予測(感覚フォワードシステム)と実際に生じる求心性感覚入力との誤差が消えることによって生じるものである。

己主体感に近い印象を知覚することもある。これは、おそらくKiNVISの場合には、安静を持続することで順応が起こり、求心性感覚入力で起こる自己身体像に関する感覚が弱くなるということ、そして視覚刺激として入力される運動映像で、末梢性感覚入力による感覚フォワードモデルがマスキングされることで誘導されるものと考えられる。

事前に、ラバーハンド錯覚の誘導にならってタッチ映像をモニタ内で見せて自己身体所有感を高めると、KiNVISが強くなることを経験する。一方で両者が互いに独立したものであることも経験するため、必ずしも映像で提示する身体像(人工身体)に所有感を有する必要はないようであり、認知心理学的基盤は検討課題であるといえる。

また、われわれの過去の実験では、現実の自己身体と人工身体を提示する位置をずらした場合、KiNVISと同時に観察される経頭蓋磁気刺激による運動誘発電位(motor evoked potential, 以下MEP)の増大が出現しなかった¹⁸⁾。しかし、被

験者に針穴を空けたゴーグルを着用させ、モニタと自己身体との接合部位を遮へいし、手指運動のみを見せた場合、自己運動錯覚とともに MEP が増大した (図 4)。このことから、身体図式に関わる感覚フォーワードモデルと視覚入力における人工身体が一致することは、KiNVIS に重要であることが理解できる。

2 神経科学的研究

(1) 皮質脊髓路興奮性

経頭蓋磁気刺激で一次運動野を刺激して記録される MEP は、自己運動錯覚誘導中に著明に増大し、皮質脊髓路興奮性が高くなっていた^{5,6)}。その影響は、動画を観察しているだけのときと比較して明らかに大きい。この効果は、手指運動についてのみならず足部の運動に対しても得られ、足関節背屈の動画を用いた KiNVIS により前脛骨筋からの MEP が増大することを報告した (図 5)⁶⁾。手指運動においては示指外転運動の錯覚誘導時に得られる促通性効果は、示指外転筋に選択的であることから、標的とする身体部位に特異的、および運動方向特異的に影響を与えるものと考えられる (図 6)⁵⁾。しかし、小指外転動画を用いた場合に小指外転筋から促通性効果が検出されないことから、錯覚の誘導、あるいは錯覚時の皮質脊髓路興奮性変化というものが、あらゆる身体部位や運動で検出されるものではないことが示唆される。

(2) 脳神経回路網活動

われわれは、KiNVIS 最中の脳神経回路網活動について探索するため、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いて運動感覚を知覚しない単なる運動観察条件との比較を行った。その結果、両側補足運動野、対側の背側および腹側運動前野、上・下頭頂小葉、後頭側頭野 (extrastriate body area, 以下 EBA)、両側の島前方、尾状核と被殻において、著明な活動があることが示された⁷⁾ (図 7)。

図 4 視覚入力と自己身体座標の矛盾と皮質脊髓路興奮性 (文献 18 より)

図 5 足部運動に関する KiNVIS の誘導 (文献 6 より)

図 6 人工身体の運動部位および運動方向に依存した MEP の変化 (文献 5 より)

運動関連領域の活動が影響することで、標的部位への刺激で記録される MEP に促通性の影響が検

図7 KiNVISに伴う脳活動 (文献7より)

出されるものと推察した。EBAは、視覚的情報に関して自己と他者の身体を区別することに関わる領域であり、体性感覚入力による運動錯覚の場合と比較してKiNVISにおける特徴であるといえる。両側の被殻と島皮質は、自己身体所有感の場合にも活動が示されている部位である。しかし、島皮質の活動部位は、KiNVISで特徴的であり、自己身体所有感の場合と比較して明確に前方であった。このことから、自己身体所有感とKiNVISが異なる心理的状況であることが、脳活動の側面から裏づけられたと理解できる。

さらに、ミラーセラピーにおける脳活動の特徴と比較する。Matthysら¹⁹⁾は、右のタッピング運動を鏡で見ているミラーセラピー条件と、右のタッピングを直接見ている非ミラーセラピー条件での脳神経回路網活動を探索した。いずれも、左一次運動野、体性感覚野、運動前野、中側頭回、上頭頂小葉などに活動が認められたが、非ミラーセラピー条件よりもミラーセラピー条件で強かった部位は、右上側頭回と右上後頭回のみであった。両条件下で運動関連領域や体性感覚野には明確な違いがないことから、ミラーセラピー時の脳

図8 KiNVISの即時的影響の1例

活動は視覚刺激による運動知覚誘導の影響というよりは、対側で運動を実施していることが大きく貢献しているものと考えられる。

症例提示

われわれは、現時点ではまだ5例ではあるが、脳卒中患者を対象としたKiNVISの即時的効果に関する研究を報告してきた²⁰⁾。その中から本稿では、表面筋電図により筋活動や筋力・拮抗筋間での相反的筋活動について、即時的に変化が観察された例を紹介する。

(1) 症例1

左被殻出血により、発症から11年を経過した50代男性である。10年前の入院時に廃用手といわれて以来、上肢の運動障害に対する治療は受けていなかった。現在は在宅で自立した生活を送っているものの、利き手である右手は廃用手であり、日常で使用されることはない状況であった。

表在感覚および深部感覚はともに完全に脱失していた。筋緊張はModified Ashworth Scaleで1であった。運動機能は、Brunnstrom Stage (以下、BRS) が上肢Ⅱ、手指Ⅱ、下肢Ⅲであった。この症例について、KiNVIS実施前後に記録した表面筋電図生データを図8に示す。図8-aは、肘関節屈曲運動中に上腕二頭筋から記録されたも

のであり、**図 8-b** は、手指の屈曲伸展運動をするように随意努力している最中のデータである。KiNVIS 実施前には、ほとんど関節運動が生じなかったが、実施後には肘関節が明確に屈曲していることがわかる。また、手指屈筋と伸筋との相反的な運動を実施している最中の表面筋電図について、KiNVIS 前後で目視的に比較すると実施前は実施後と比較して振幅値が小さい。1 回目の実施後には実施前と比べて振幅値が増大している。この検査終了後数分間休憩し、さらに 2 回目の KiNVIS を実施したところ、屈筋からは筋収縮と筋弛緩が拮抗的に観察されるようになった。

(2) 症例 2

70 代女性、視床出血にて発症後、検査時には 17 週が経過していた入院患者である。利き手は右で、麻痺側も右であった。BRS は上肢、手指、下肢ともに IV、上肢の Fugl-Meyer Assessment (FMA) は 18/66 点と重度であった。表在覚は軽度鈍麻、深部覚は中等度鈍麻であった。minimal state examination (MMSE) は 23 点であり、軽度の認知機能低下が疑われた。症例 2 は麻痺側を日常で使用することはなかった。

上肢運動機能を評価するための課題として、この症例には、2~5 指による手指の最大屈曲力 (**図 9-a**) を測定し、その最中の表面筋電図 (**図 9-b**) を記録した。刺激前後の表面筋電図を目視的に比較すると、刺激後には屈筋群の振幅値が増大しており、刺激前に共同収縮していた伸筋群の振幅値が小さくなっていた。手指屈曲力の発揮においては、テノデューシス機能の貢献が必要なことから、伸筋群の筋活動が出現することは合理的であると推察する。しかし、刺激後には屈曲力が増大していることから考えると、伸筋群の筋活動が屈曲筋力を発揮するために有利な状況に調整された結果であろうと推察する。

図 9 共同収縮に対する即時的な影響の 1 例

ここで供覧した症例は、2 名分のみであり、一般化できる結果ではない。しかし、この 2 例に限れば KiNVIS は運動機能に対して即時的にポジティブに影響していたものと考えることができ、今後、さらに質の高い臨床研究を行っていく価値があることが示されたものと考えられる。

おわりに

KiNVIS が患者に与える心的影響は、これまで臨床で使用されてきた視覚入力手段とは明確に異なる。平易に述べると、患者は模倣的に運動実行の方法を思い出すようなつもりになれると同時に、運動したくなるような意図を感じる。つまり、“その気にさせる”方法である。単に運動を視覚的にフィードバックするのではなく、“実行しているつもり”の感覚を誘導することが効果につながるのではないかという思いから開発してきたものである。この技術の発展にはまだまだ可能性があり、今後も開発を継続する必要がある。さらに、臨床試験によって適用と効果を明確にすることで、新たな治療方法を提供することに結びつくことを願う。

謝辞：本稿で紹介した多くの研究に関わったすべての皆様に、この場を借りて深謝申し上げます。

文 献

- 1) Collins DF, Prochazka A : Movement illusions evoked by ensemble cutaneous input from the dorsum of the human hand. *J Physiol* 1996 ; **496** (Pt 3) : 857-871
- 2) Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB : Proprioceptive illusions induced by muscle vibration : contribution by muscle spindles to perception? *Science* 1972 ; **175** : 1382-1384
- 3) Tardy-Gervet MF, Gilhodes JC, Roll JP : Demonstration of an illusory limb movement and associated motor activities induced by a moving visual stimulus in man : a descriptive study. *Neurosci Lett* 1982 ; **28** : 187-192
- 4) Tardy-Gervet MF, Gilhodes JC, Roll JP : Perceptual and motor effects elicited by a moving visual stimulus below the forearm : an example of segmentary vection. *Behav Brain Res* 1984 ; **11** : 171-184
- 5) Kaneko F, Yasojima T, Kizuka T : Kinesthetic illusory feeling induced by a finger movement movie effects on corticomotor excitability. *Neuroscience* 2007 ; **149** : 976-984
- 6) Aoyama T, Kaneko F, Hayami T, Shibata E : The effects of kinesthetic illusory sensation induced by a visual stimulus on the corticomotor excitability of the leg muscles. *Neurosci Lett* 2012 ; **514** : 106-109
- 7) Kaneko F, Blanchard C, Lebar N, Nazarian B, Kavounoudias A, Romaiguere P : Brain regions associated to a kinesthetic illusion evoked by watching a video of one's own moving hand. *PLoS One* 2015 ; **10** : e0131970
- 8) Desmurget M, Reilly KT, Richard N, Szathmari A, Mottolese C, Sirigu A : Movement intention after parietal cortex stimulation in humans. *Science* 2009 ; **324** : 811-813
- 9) Christensen MS, Lundbye-Jensen J, Grey MJ, Vejlbj AD, Belhage B, Nielsen JB : Illusory sensation of movement induced by repetitive transcranial magnetic stimulation. *PLoS One* 2010 ; **5** : e13301
- 10) Brandt T, Dichgans J, Koenig E : Perception of self-rotation (circular vection) induced by optokinetic stimuli. *Pflugers Arch* 1972 ; **332** (Suppl) : R98
- 11) Palmisano S, Gillam B : Stimulus eccentricity and spatial frequency interact to determine circular vection. *Perception* 1998 ; **27** : 1067-1077
- 12) Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D : Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proc Biol Sci* 1996 ; **263** : 377-386
- 13) Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Cobb S : Touching the phantom limb. *Nature* 1995 ; **377** : 489-490
- 14) Kaneko F, Yasojima T, Kizuka T (eds) : Misunderstanding someone else's action as own can modulate corticospinal tract (CoST) excitability. IX th International Conference on Cognitive Neuroscience, Havana, 2005
- 15) Wichrowski M, Satalecka E, Wieczorkowska A : Augmented Reality Workshops for Art Students. In Shumaker R, Lackey S (eds) : Virtual, Augmented and Mixed Reality : Applications of Virtual and Augmented Reality. Switzerland, Springer International Publishing, 2014 ; pp156-166
- 16) Botvinick M, Cohen J : Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature* 1998 ; **391** : 756
- 17) Schwabe L, Blanke O : Cognitive neuroscience of ownership and agency. *Conscious Cogn* 2007 ; **16** : 661-666
- 18) Kaneko F, Aoyama T, Hayami T (eds) : Masking of vision prevents loss of facilitatory effect of self motion illusion on corticospinal excitability during quasi-illusion induced by visual input. 7th Progress in Motor Control, 2009, Marseille
- 19) Matthys K, Smits M, Van der Geest JN, Van der Lugt A, Seurinck R, Stam HJ, Selles RW : Mirror-induced visual illusion of hand movements : a functional magnetic resonance imaging study. *Arch Phys Med Rehabil* 2009 ; **90** : 675-681
- 20) Kaneko F, Inada T, Matsuda N, Shibata E, Koyama S : Positive acute effect of visual stimulation-induced kinesthetic illusion on motor function in patients with stroke. *J Neuroeng Rehabil*, [Under review]