

身体としての認識を促すリアリティの高い義手の開発

Enhancement of the embodiment of prosthesis as a part of body

河島 則天（国立障害者リハビリテーションセンター研究所）

Noritaka KAWASHIMA (Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities)

Abstract: Tool embodiment is well recognized concept and commonly utilized as an explanation for the achievement of learning for tool use in sports activity and some specific skill in our life. The adaptive process due to use of a prosthesis and an orthosis can be regarded as with the specific cases of tool embodiment, and the extent of embodiment might have relevance to an affinity and comfortableness with the use of prosthesis. We are trying to develop different two types of hand prostheses based on distinct two different elements of the process of embodiment, those are, (1) prosthesis as a part of body and (2) as a tool. We hypothesize that the function part of prosthesis is an element of embodiment as a tool, and high function might facilitate to possess a sense of agency with prosthesis. On the other hand, realistic appearance of cosmetic hand might lead embodiment of the artificial hand as a part of body, and lead to possess a sense of ownership with prosthesis. We here briefly introduce latter type of cosmetic prosthesis with the concept and rational behinds.

Key Words: Tool embodiment, prosthesis, awareness, sense of ownership

1. 研究の背景

失った体肢の機能を代行、外観を補完し、意のままに操作可能な義手を手に入れることは、体肢切断者にとっての切なる願望である。現状では上肢切断者の場合、装飾義手、能動（作業用）義手、電動義手のうちから本人のニーズに応じた選択・適合が行われるが、義手に求める機能とその充足度には大きな隔たりがあること（Narang&Jape 1982, Saradjian et al. 2008）、消極的選択として機能性を持たない装飾義手の選択に留まっているケースが多いことなどが指摘されている（Kyberd & Hill 2011）。このような背景から、近年5本指を独立に操作し得るような高機能の義手、残存部位の神経活動を制御に活用した義手など、盛んに研究開発が行われているが、日常生活での使用頻度の大きい上肢・手指の機能を補完し得る義手を開発することは容易ではない。

現在我々は、これまでの義手に関する知見や臨床報告、体肢切断後に生じる幻肢／幻肢痛の発現機序についての認知科学的知見を基盤として、身体に調和する新しい義手の開発を行ってきた。具体的には、①身体としての義手（身体所有感：sense of ownership）、②道具としての義手（行為主体感：sense of agency）、という2つの観点から義手に求められる要素を捉え直し、各々に特化した義手の開発を行うことで、切断者の日常生活での制約の最小化と、幻肢痛や身体喪失感などの負の適応現象を軽減／緩和することを目指している。『道具としての義手』に関しては、本シンポジウムにて別演題として発表する3指電動義手 finch に譲ることとして、本発表では、『身体としての義手』の観点から開発を試みているリアル装飾義手について紹介する。最初に義手開発の理論基盤として、義手と身体の関係性についての現象学的解釈、体肢切断後に生じる中枢神経系の変化に関する知見、道具の身体化に関する認知神経科学的知見を整理し、義手の開発コンセプトを紹介する。その上で、切断端に存在する損失肢の body representation を利用した義手への感覚情報転移、self-touch がもたらす多重身体表象を利用した感覚励起などについて実例を挙げる。

2. 切断者にとっての「義手」という存在

Murray (2004) は義手についての現象学的考察をまとめた論文の中で、義手を日常的に使用している切断者の義手

への認識は、①身体の一部としての義手、②道具としての義手、の2つのタイプに特徴づけられること、さらに、長年の日常生活場面での使用により義手が担うべき役割や機能が明確な場合には、義手の存在が身体の一部として認識され得ることを指摘している。このような義手の「身体化」という現象は、失った手に対する認識、あるいは手が担っていた機能を義手が補完した結果、本来人工物である義手が身体図式の中に取り込まれ、「手」の存在として捉えられること意味している。

3. 体肢切断後の手に関する認識、知覚の変化

体肢切断後にもなお失った身体部位の存在をありありと感じる「幻肢」、また、その部位に生起する痛み「幻肢痛」は、体肢切断後の大脳皮質再組織化の結果として起こる生理学的基盤を持った現象であることが、近年の研究成果によって明らかにされつつある（Flor et al. 2006, Markin et al. 2013）。大脳皮質再組織化は脳の可塑性を示す有力な根拠であり、このような神経科学的知見は、幻肢痛などの諸問題を解決する具体的な方策を考案する上での糸口となる。Flor たちは、幻肢痛の程度と大脳皮質再組織化の範囲が関連すること（Flor et al. 2004）、筋電義手を使用した上肢切断患者では大脳皮質再組織化の範囲が小さく、幻肢痛を訴えるケースが有意に少ないことを報告している（Lotze et al. 1999）。これらの研究成果は、体肢切断後にも損失肢への運動指令が適切に保たれ、失われた感覚情報を何らかの形で補完するようなリハビリテーションが行われれば、幻肢痛等の負の適応を最小化できる可能性を示唆している。

我々はこれまで、幻肢の状態を可視化する適切な視覚フィードバック（健側にて幻肢の状態を再現した鏡像）を与えることによって幻肢のアウェアネス（気づき）が変化すること（Kawashima et al. 2013, 2016）、さらにこの視覚フィードバックを介入手段として用いることで治療に難渋していた幻肢痛症例に改善が認められることを報告した（Kawashima and Mita 2009）。従来、幻肢痛に対して薬理的手法、神経ブロック、心理的手法など、様々な方策が講じられているが、上記のような大脳皮質再組織化のプロセスや幻肢のアウェアネス惹起についての知見を基盤としたて義手を開発することで、これまで解決策に限界のあった新たなアプローチが可能になると考えられる。

4. 手の自然な外観、動作を実現する high reality 義手

義手に高いリアリティを備えることの意味合い（理論的根拠）を先ずは明示しておく必要があるだろう。なぜなら、「不気味の谷」という言葉が広く認識されているように、精緻にヒトを模することでリアリティは高まる一方で、一定のレベルを超えると不気味さや違和感を感じてしまう可能性があるためである。不気味の谷の文脈には、『これはヒトではない』という前提が含まれるが、義手の場合、損失肢を補完する『身体として』認識するという文脈が重要となる。外観のリアリティや自然な装着感を与えることは、違和感を最小化し、身体としての所有感を促すことに繋がるのではないかと、というのが我々の着想である。また、人工物である義手が身体図式に取り込まれるプロセスにおいても義手の自然な振る舞いや、義手を介して得られる種々の感覚フィードバックが有益に作用するものと考えた。そこで、開発する義手が充たすべき仕様として、①色味、皺、爪の硬質感などの細部にわたる高いリアリティを備えること、②シリコン素材を用いた柔らかいソケットを製作することで自然な装着感が得られること、③MP 関節にトーションばねを配置することで外力に応じた自然な（他動的な）指関節伸展動作が実現できること、の3点を挙げ、以下に示す義手を試作した。



図1 手の自然な外観、動作を実現する high reality 義手

5. 身体化を促すための認知神経科学的プロセス

上記仕様に基づいて製作した義手を装着し、身体化のプロセスを促し、成立させていく上でいくつかのアプローチを紹介する。これらの試みは、身体への認識や知覚に関する先行知見、体肢切断後に生じる幻肢／幻肢痛の発現機序についての認知科学的知見を理論基盤としている。

5-1. 損失肢の身体表象を利用した義手への知覚転移

後天的に事故などで体肢を切断した患者の多くは、切断端近傍に触覚刺激を与えることで、referred sensation（関連感覚）と呼ばれる損失肢に関する知覚体験を生ずる。この現象の神経メカニズムを基盤として、切断端に存在する損失肢の身体表象を幻肢の感覚を義手からの知覚に転移させることが可能になる。具体的には、rubber hand illusionの手法に準じて断端部と義手の同時触知覚入力を行うと、当人はありありと、指からの知覚生起を感じる。

5-2. 指尖タッピングによる知覚聴覚-運動系の引き込み

Rubber hand illusion は視覚-触覚の同期性を利用した感覚情報の転移であるが、義手を介した知覚のモダリティとして指尖タッピング時に爪から生み出される聴覚フィードバックによる運動の引き込み現象を利用した、義手の身体化を促すアプローチを考案した。また、指尖タッピング時には爪が机を打つ振動が切断端に物理的的刺激として伝達されることから、運動-感覚ループの構築にもつながるもの

と考えられる。つまり、開発義手に硬質アクリル製の爪を実装しているのは、機能性に加えて、聴覚フィードバックの生起という企図がある。

5-3. 多重身体表象を利用した感覚励起

両手を合わせた時には、両手から共通の固有感覚、温度覚、触覚が生じるため、異なる2つの身体部位（右手と左手の手のひら）からの感覚入力に強い関連性が生じる。このような関連性は感覚入力への感度を促し、触れている身体部位間の連関を強化する結果、多重身体表象（coherent body representation）を生じることが知られている（Tsakiris et al. 2007）。この現象は、幻肢痛を軽減させるアプローチを考える上で極めて重要である。既述の方法によって義手の身体化が促された後には、義手を健側手で触れることにより、通常健常者において生じる self-touch の効果が義手にも生じるとすれば、実在のない、しかし痛みを生じる部位に触れ、和らげることが可能になるかもしれない。



図2 ソフトソケットと指関節のバネ機構によって実現される義手の自然なふるまい

6. 実際の装着経験

現在、3名にモニタ協力を依頼し、日常生活での長期的な義手による効果を検証している。いずれの対象者も義手を身体としてみなす感覚が装着直後よりも高まっているとの感想を得ている。幻肢に痺れのある1名においては、義手装着時の指関節ストレッチによって痺れが減少すると話し、難治疼痛をもつ1名は『痛みがある時には義手のその部分を無意識に触るようになった』という感想が聞かれた。未だ経過報告に留まるものの、義手の身体化を促す工夫を施し、長期的に日常生活で装着・使用することによる好影響が示唆されている。このように義手の身体化（身体との調和）が実現されれば、体肢切断後に生じる幻肢痛や身体喪失感などの負の変化を最小限に留められる可能性がある。今後、さらに多数の切断者への義手適合と長期使用の経過観察・評価を進め、義手の身体化レベルの定量的評価と幻肢痛の軽減効果などについて検証していく予定である。

参考文献

1. Narang IC & Jape VS. Prosthet Orthot Int. 6:10-6, 1982
2. Saradjian A, et al. Disabil Rehabil 30:871-83, 2008
3. Kyberd PJ, Hill W. Prosthet Orthot Int. 35:234-41, 2011.
4. Murray CD. Disabil Rehabil. 26:963-73, 2004
5. Flor H et al. Nat Rev Neurosci, 7: 873-81, 2006
6. Makin TR, et al. Brain 138: 2140-6, 2015
7. Lotze M et al. Nat Neurosci 2: 501-2, 1999
8. Kawashima N, et al. PLoS One 8(7) e69324, 2013
9. Kawashima N & Mita T. PLoS One 11(5) e0156349. 2016
10. Kawashima N & Mita T. Neurocase 15:478-84, 2009
11. Tsakiris M. et al. Conscious Cogn. 16(3):645-60, 2007