

DISS. ETH NO. 20482

Virtual reality rehabilitation in spinal cord injury patients

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

For the degree of

Doctor of Sciences

Presented by

MICHAEL VILLIGER

MSc ETH

Born 8 March 1981

Citizen of Erstfeld (UR) / Sins (AG)

Accepted on recommendation of

Prof. Dr. Urs Boutellier

Prof. Dr. Martin E. Schwab

PD Dr. Daniel Kiper

Dr. Kynan Eng

2012

Summary

Patients with an incomplete spinal cord injury (iSCI) are limited in their lower limb motor function and are also associated with a wide range of physical and psychosocial problems, including in particular neuropathic pain. The consequences of spinal cord injury are challenging to treat and the potential for recovery is still very limited. Although recent training-based neurorehabilitation approaches using virtual reality (VR) show some promise, the methods employed to date address only patient motivation issues and thus do not tap into the potential of VR. In particular, they do not directly promote activation of the underlying sensorimotor network to (re)activate cortical structures involved in control of the lower limbs.

This thesis makes a contribution to the understanding of the brain processing involved in lower limb movements mediated by VR, and its application to the treatment of iSCI patients. It is known that observing, imagining, and even understanding motor actions activate the neural networks involved in motor execution. Using VR training to activate this supraspinal network projecting to surviving parts of the spinal tract may thus promote rearrangement of the network and bring substantial locomotion benefits and pain reduction to iSCI patients. To test this principle, a new VR neurorehabilitation system was developed to provide task-specific VR training of isolated movements. The system displayed life-sized virtual lower limbs on a large screen, controlled by the user via size-adjustable shoes with integrated orientation sensors.

This thesis contains four studies, all based on the combination of observation and motor imagery, i.e. online motor imagination, a cognitive process in which a subject imagines himself/herself in the displayed movement situation. The *first study* using fMRI shows that it is possible to extensively activate the neural correlates of the lower limb motor execution network using online imagination, even in the absence of overt movement. The first ever VR training system for lower limbs combining action observation, imagination and execution was developed, with four training applications for different lower limb muscles and functions. In

the *second study*, a first investigation of the system in a pilot single-case study on iSCI patients showed that the training was well accepted by the patients and seemed to be enjoyable even if they were not familiar with VR. The motivation was high, which is promising for simple training of repetitive movements. The VR rehabilitation system required active patient effort at all times and the results demonstrated improvement of lower limb motor functions and reduction of pain intensity. The *third study*, a training study on iSCI patients with motor dysfunction and neuropathic pain, revealed positive effects on a short-term and longitudinal development. In the *fourth study*, the findings were extended for a VR lower limb training scenario called “footbag”, showing that motor online imagination and imitation for the VR “footbag” game and those of playing the game without or with reward revealed similarly activated brain regions. Furthermore, the results suggested that playing a game and being in control of the VR lower limbs is a rewarding activity per se.

The findings of this thesis extend previous results promoting the use of pure motor imagery, or of action imitation, as therapeutic approaches in lower limb neurorehabilitation. The use of VR techniques in neurorehabilitation may have profound implications on the facilitation of post-injury retraining of function and potentially promote reparative plasticity and functional recovery. It has been shown that the VR system improves motor function and reduces neuropathic pain in iSCI patients. A further advantage of the system is its low cost compared to other training technologies, e.g. robotics. Essentially, the patients were able to generalize the training of individual movements to achieve functional improvements on their own with no task-specific training. An open question for future investigation is the extent to which these results can be generalized to other neurological patient groups, e.g. stroke.

Zusammenfassung

Patienten mit einer inkompletten Rückenmarksverletzung (iSCI) sind in ihren motorischen Funktionen der unteren Extremitäten eingeschränkt, welche auch im Zusammenhang mit körperlichen und psychosozialen Problemen stehen, insbesondere neuropathischer Schmerz. Die Folgen einer Rückenmarksverletzung sind schwer zu behandeln und potentielle Heilung ist immer noch sehr schwierig. Obwohl jüngste Neurorehabilitationsansätze mit virtueller Realität (VR) vielversprechend sind, kommen die Methoden vorerst nur bei Motivationsproblemen der Patienten zum Einsatz. Besonders die direkte Aktivierung vom zugrunde liegenden sensomotorischen Netzwerk für (wieder)aktivierte kortikale Strukturen, welche in die Kontrolle der unteren Extremitäten involviert sind, wird nicht genutzt.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag für das bessere Verständnis der Hirnverarbeitung bei involvierten Bewegungen der unteren Extremitäten, vermittelt durch VR, und dessen Anwendung für die Behandlung von iSCI Patienten. Es ist bekannt, dass das neuronale Netzwerk der motorischen Ausführung mit Beobachten, Vorstellen und sogar dem Verstehen von motorischen Aktionen aktiviert werden kann. Mit einem VR Training, welches dieses Netzwerk und den damit verbundenen und noch vorhandenen Bereiche des Rückenmarks nutzt, dürfte eine Neugestaltung des Netzwerks gefördert werden und so die Lokomotion und Schmerzreduktion der iSCI Patienten wesentlich unterstützen. Um dieses Prinzip zu testen, wurde ein neues VR Neurorehabilitationssystem entwickelt, wobei ein VR Training von isolierten Bewegungen zur Verfügung gestellt wurde. Das System präsentiert lebensgrosse, virtuelle untere Extremitäten auf einem grossen Bildschirm, welche vom Benutzer über verstellbare Schuhe mit integrierten Orientierungssensoren kontrolliert werden können.

Diese Arbeit enthält vier Studien, welche alle auf der Kombination von Beobachten und motorischem Vorstellen beruht - ein kognitiver Prozess, in welchem sich die Person in die dargestellte Bewegungssituation hineinversetzt. Die *erste Studie* mit fMRT zeigt, dass es mit dieser Kombination möglich ist, das neuronale Netzwerk für die motorische Ausführung der

unteren Extremitäten weitgehend zu aktivieren. Das erste VR Trainingssystem, welches Aktionsbeobachtung, Vorstellung und Ausführung kombiniert, wurde mit vier Trainingsanwendungen für die unterschiedlichen Muskeln und Funktionen für die unteren Extremitäten entwickelt. Eine erste Untersuchung des Systems in einer Fallstudie mit iSCI Patienten zeigte in der *zweiten Studie*, dass das Training von den Patienten gut akzeptiert wurde, auch wenn sie VR nicht gewohnt waren. Die Motivation war gross, was vielversprechend für einfaches Training mit wiederholenden Bewegungen ist. Das VR System erfordert aktive Teilnahme und die Resultate zeigten Verbesserungen der motorischen Funktion und eine Reduktion der Schmerzintensität. Die *dritte Studie*, eine Trainingsstudie mit iSCI Patienten, zeigte positive kurz- und langzeit Effekte der motorischen Dysfunktion und des neuropathischen Schmerz. In der *vierten Studie* wurden die Ergebnisse auf ein VR Trainingsszenario für die unteren Extremitäten, genannt „footbag“, ausgeweitet. Die Kombination beobachten und vorstellen der Aktion des „footbag“-Spiels und imitieren, wie auch spielen ohne und mit Belohnung, zeigte eine ähnliche Aktivierung der Hirnregionen. Des Weiteren wiesen die Resultate darauf hin, dass ein Spiel spielen und die Kontrolle über die virtuellen unteren Extremitäten zu haben, eine belohnende Handlung per se ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erweitern Befunde, welche die Anwendung von reiner motorischer Vorstellung oder Imitierung einer Aktion als therapeutische Massnahmen in der Neurorehabilitation sehen. Der Gebrauch von VR Techniken in der Neurorehabilitation dürfte entscheidende Auswirkungen in der Förderung des Trainings nach einer Verletzung haben und möglicherweise reparative Plastizität und funktionelle Genesung voranbringen. Es wurde gezeigt, dass das VR System bei iSCI Patienten die motorische Funktion verbessert und neuropathischen Schmerz reduziert. Ein weiterer Vorteil vom System sind die tiefen Kosten verglichen zu anderen Trainingstechnologien, wie z.B. „robotics“. Im Wesentlichen war es den Patienten möglich, das Training mit den individuellen Bewegungen zu generalisieren und so funktionell, auch ohne spezifischem Lokomotionstraining, zu verbessern. Für zukünftige Untersuchungen stellt sich die Frage, in wie weit diese Resultate für andere neurologische Patientengruppen, z.B. bei Schlaganfall, verallgemeinert werden können.