

Erzeugung von Berührungsimulationen durch räumlich verteilte Vibrationen

Robert Kirchner¹, Robert Rosenkranz² und M. Ercan Altinsoy²

¹ 6G-life, Professur für Akustik und Haptik, TU Dresden, E-Mail: robert.kirchner1@tu-dresden.de

² CeTI, Professur für Akustik und Haptik, TU Dresden

Mit fortschreitender Digitalisierung finden soziale Interaktionen zwischen Menschen zunehmend in virtuellen Umgebungen, wie virtueller Realität oder virtuellen Klassenräumen statt. Berührungen, die sonst ein wichtiger Teil von sozialer Interaktion sind, können mit dem aktuellen Stand der Technik jedoch nicht authentisch reproduziert werden. Dadurch fehlt eine taktile Interaktion zwischen den Nutzern in der Ferne. Eine Möglichkeit, um die Wiedergabe von haptischen Gesten zu ermöglichen, ist die Abkehr von der Authentizität und die Fokussierung auf die Plausibilität einer Empfindung. Auf diese Weise ist es möglich vibratorische haptische Illusionen zu nutzen, welche technisch einfacher erzeugbar sind. Wir haben daher ein kompaktes haptisches Armband gebaut, welches mit Hilfe eines Arrays aus Vibrationsmotoren in der Lage ist die Empfindung einer kontinuierlichen Bewegung auf dem Unterarm zu erzeugen. Diese bildet die Grundlage für wesentliche Gesten, wie das Streichen über den Unterarm. In dieser Studie beschreiben wir die Funktionsweise des Armbandes und stellen eine erste Wahrnehmungsstudie vor.

Einleitung

Um Berührungen, wie das Streichen mit der Hand über den Arm, möglichst passend wiederzugeben ist es nötig ihre einzelnen Aspekte darzustellen. Hierfür ist zuvorderst eine Kraft zu erzeugen, welche die entsprechenden taktilen Rezeptoren in der Haut anspricht. Hinzu kommt weiterhin eine zeitliche und örtliche Veränderung dieser Kraft, um Bewegungen darstellen zu können. Neben diesen beiden Grundvoraussetzungen können weiterhin die Richtung der möglichen Bewegung, die Kontaktfläche, die Temperatur und weitere Aspekte in eine Darstellung mit einfließen, um bestimmte Berührungen näher zu definieren. Am Beispiel des Streichens über den Arm kann mit Hilfe der Veränderung der Kontaktfläche zum Beispiel zwischen dem Streichen mit der Handfläche oder mit einem Finger unterschieden werden. Möchte man all diese Aspekte möglichst authentisch, d.h. physikalisch akkurat darstellen, so benötigt man hierfür aufwendige und sperrige Mechanismen. Diese laufen den Anforderungen von VR hinsichtlich Tragbarkeit der Geräte und Mobilität des Nutzers zuwider.

Bei der Betrachtung dieser Anforderungen werden die Vorteile von vibrotaktile Darstellung der Berührungsmuster sichtbar. Vibrationsmotoren besitzen einen kleinen Formfaktor und lassen sich einfach ansteuern. Zusätzlich kann hierbei auf Mechanismen zur Bewegung des Stimulus verzichtet werden, da durch die Nutzung von haptischen Illusionen eine Bewegung des Stimulus mit ortsfesten Aktoren möglich ist. Dadurch kann das gesamte

Darstellungssystem in Kleidung integriert werden, was die geforderte Tragbarkeit sowie den nötigen Komfort ermöglicht. Bei der Nutzung eines solchen vibrotaktile Systems in VR hat der Nutzer keine Möglichkeit die Wiedergabe mit einer echten Berührung zu vergleichen. Er ist daher auf einen Vergleich mit seiner aus dem VR-Kontext resultierenden Erwartung angewiesen. Eine Vibration, welche dem erwarteten Bewegungsmuster folgt ist dabei zwar keine authentische Darstellung, sie könnte jedoch als hinreichend plausibel für den jeweiligen Kontext bewertet werden. Auf Basis dieser Überlegungen haben wir am Lehrstuhl für Akustik und Haptik der TU Dresden ein haptisches Armband Array gebaut, mit welchem das Konzept der vibrotaktile Wiedergabe von Berührungsmustern untersucht werden kann. Folgend wird der Aufbau und das Funktionsprinzip des Armbandes näher beschrieben, sowie eine erste Wahrnehmungsstudie ausgewertet.

Haptisches Armband Array

Aufbau

Das Gesamtsystem besteht aus einer Armbandmanschette mit 8 Vibrationsmotoren, sowie aus einem Steuerprogramm und den Treibern. Die Armbandmanschette besteht aus elastischem Gewebe, um eine Schwingungsübertragung durch den Stoff zu verhindern. Die Vibrationsmotoren sind in einer 2x4 Matrix angeordnet (siehe Abbildung 1 a)). In Umfangsrichtung des Armes besitzen die Kontaktpunkte mit der Haut einen Abstand von 3.8 cm und in Längsrichtung des Armes einen Abstand von 4.8 cm. Die Abstände sind so gewählt, dass sie unterhalb des sog. „Two-Point-Thresholds“ (TPT) liegen und oberhalb der Grenze für den minimal wahrnehmbaren Unterschied an Ortsänderung einer Vibration auf der Haut [1]. Es werden Lofelt L5 Voice-Coil Motoren verwendet.

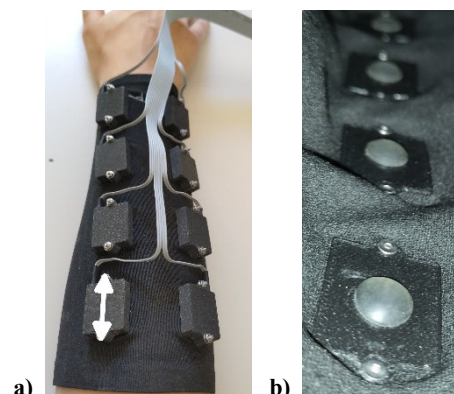


Abbildung 1: a) Foto des Armbandes mit 8 Vibrationsmotoren in Gehäusen; Pfeil zeigt Hauptrichtung der Vibration an. b) Innenseite des Armbandes mit Silikonknoten für die Anbindung der Vibration an die Haut.

Die Berechnung der Treibersignale der Stimuli erfolgt durch ein Matlab-Programm auf Basis von Eingabeparametern, wie Geschwindigkeit, Intensität, Pfad, Frequenz. Das hierbei berechnete mehrkanalige Audiosignal (für jeden Motor ein Kanal) wird durch eine 8-kanalige Soundkarte (Fireface UCX, RME) ausgegeben und durch einen mehrkanaligen Verstärker (STA-850D, img) verstärkt. Die Wiedergabestrecke ist kalibriert, wodurch die Amplitude der Beschleunigung auf der Haut im Programm vorgegeben werden kann. Wie in Abbildung 1 a) zu sehen, sind die Vibrationsmotoren in 3D-gedruckten Gehäusen auf dem Armband verschraubt. Die Hauptschwingungsrichtung ist entlang der Längsachse des Armes. Für eine bessere Anbindung an die Haut wurde eine Silikonkuppe auf die Unterseite jedes Gehäuses geklebt, welche beim Tragen leicht in die Haut eindringt (Abbildung 1 b)). Abbildung 2 zeigt das Funktionsprinzip des Gesamtsystems.

Haptische Illusionen für Berührungsmuster

Zur Realisierung einer empfundenen Bewegung einer Vibration mit ortsfesten Vibrationsmotoren kann einerseits die „Apparent Movement Illusion“ (AMI) und andererseits die „Phantom Illusion“ (PI) verwendet werden. [2] Während das Potenzial von PI hinsichtlich Bewegungsmustern bisher noch nicht untersucht wurde, wurde die AMI bereits in Versuchen eingesetzt, um ein Streichen über den Arm nachzubilden. Auf Grund von Beschränkungen der AMI können die für diese Versuche entwickelten Aufbauten jedoch lediglich ein Bewegungsmuster wiedergeben. In [3, 4] ist dies eine Streichbewegung über den Arm, welche entlang einer Reihe aus Vibrationsmotoren wiedergegeben wurde. Die Möglichkeit die PI auch auf einer Fläche, d.h. zweidimensional, mit einer kontinuierlichen zeitlichen und örtlichen Auflösung zu nutzen, ermöglicht eine Vielzahl verschiedener Berührungsmuster. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die PI näher untersucht.

Funktionsprinzip

Die PI tritt grundsätzlich bei zwei oder mehr Vibrationen am Körper auf. [2] Sie beschreibt dabei eine zusätzliche Vibrationsempfindung zwischen den Vibrationsmotoren. Durch eine Veränderung der Amplituden der Vibrationsmotoren kann die Position dieses virtuellen Vibrationpunktes gesteuert werden. Schwingen beispielsweise zwei Motoren mit derselben Intensität, so befindet sich die Virtuelle Vibration in der Mitte von beiden. Verändert man nun das Verhältnis der beiden Amplituden, so verschiebt sich die Position in Richtung des stärker

schwingenden Vibrationsmotors, ähnlich dem Prinzip der Stereowiedergabe. [5] Bei der Verwendung von drei Motoren erfolgt die Bewegung dieses Punktes auf einer Fläche anstatt auf einer Linie zwischen den Motoren. Die benötigten Amplitudenverhältnisse für eine Empfindung der virtuellen Vibration an einer bestimmten Stelle können in diesem Fall über baryzentrische Koordinaten berechnet werden. [6]

Indem die der Abstand der Motoren kleiner als der TPT gesetzt wird, werden benachbarte Motoren nicht mehr als einzelne Vibrationspunkte wahrgenommen, sondern verschmelzen in der Wahrnehmung zu einem Punkt an der Stelle des virtuellen Vibrationpunktes. [1] Verändert man nun die Amplituden der Motoren in geeigneter Weise, so kann man eine kontinuierliche Bewegung der Vibration über die aufgespinnene Fläche der acht Motoren erzeugen. Auf diese Weise können sich kontinuierlich bewegende Berührungsmuster nachgebildet werden. Das Matlab-Programm berechnet hierfür aus den vorgegebenen Bewegungsparametern die zugehörigen Amplituden der Motoren für das gesamte Bewegungsmuster und moduliert diese dann auf das Trägersignal um die gewünschte Wahrnehmung zu erzeugen. Bei dieser Berechnung ist zu beachten, dass die empfundene Intensität der Vibration bei einer einfachen Verwendung der baryzentrischen Koordinaten für die Berechnung der Amplituden nicht konstant ist. [7] Die wahrgenommene Intensität nimmt dabei zur Mitte zwischen den Motoren hin ab. Um dem entgegen zu wirken können andere Interpolationsansätze gewählt werden, wie der logarithmische und der „Power“ Ansatz. Beide bewirken eine Anhebung der addierten Amplituden der Motoren zur Mitte hin und damit eine Angleichung der empfundenen Intensität. Die Berechnung der benötigten Amplitude A_i eines Motors erfolgt im 2D Fall nach folgenden Ansatzfunktionen:

$$\text{Linear} \quad A_i = a_i \times A_v \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (1)$$

$$\text{Power} \quad A_i = \sqrt{a_i} \times A_v \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (2)$$

$$\text{Log} \quad A_i = \frac{\log(a_i + 1)}{\log(2)} A_v \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (3)$$

Dabei ist A_v die gewünschte Amplitude des virtuellen Vibrationpunktes und a_i die normierte baryzentrische Koordinate des jeweiligen Motors. [6] Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Ansatzfunktionen der Interpolationen auf die Amplitudenverläufe.

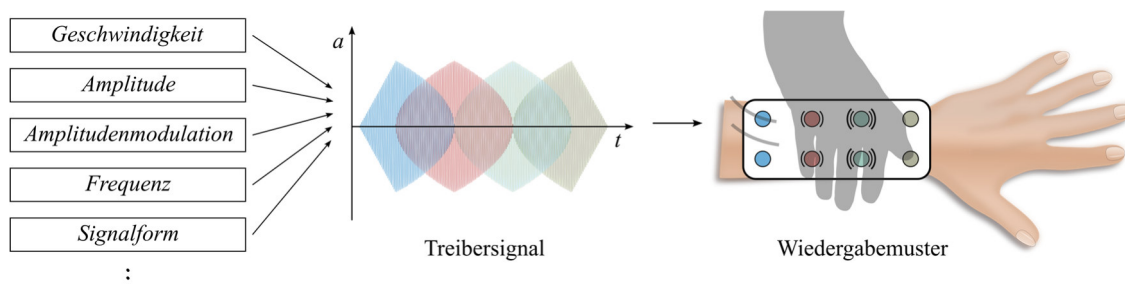


Abbildung 2: Funktionsprinzipskizze des Armbandsystems. Mit festgelegten Parametern können mehrkanalige Signale berechnet werden, welche bei der Wiedergabe durch das Armband einem Berührungsmuster entsprechen.

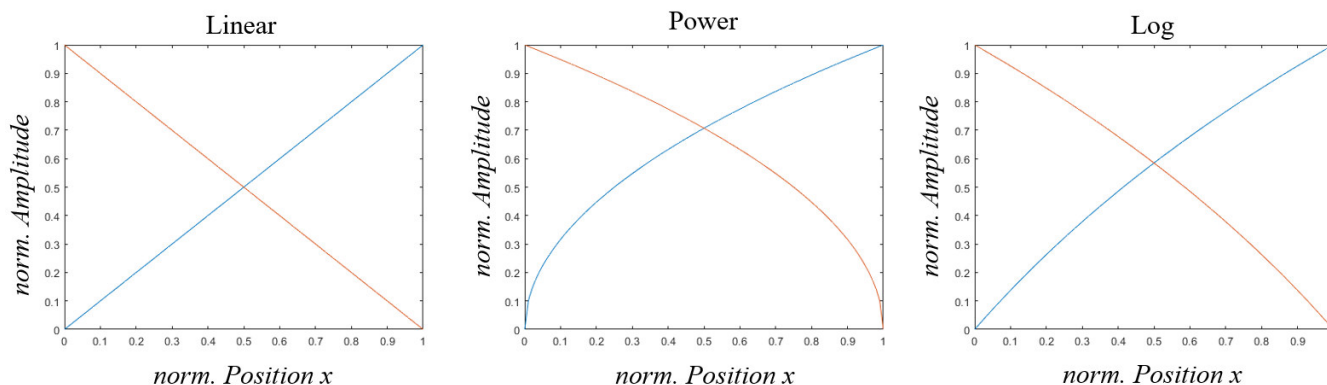


Abbildung 3: Darstellung der normierten Amplitude (y-Achse) über der normierten Position x eines virtuellen Vibrationspunktes zwischen zwei Vibrationsmotoren (rote und blaue Linie für jeweiligen Motor) für die jeweiligen Interpolationsansätze ($x = 0$ entspricht Position auf rotem Motor, $x = 1$ auf blauem Motor). „Power“ und „Log“ Ansatz verstärken die Amplitude der virtuellen Vibration zwischen den Motoren.

Für möglichst plausible Berührungsmuster ist es nötig eine gleichmäßig empfundene Intensität zu erzeugen. Für weiterführende Untersuchungen kann diese dann gezielt verändert werden. Folgend wird daher ein Wahrnehmungsversuch beschrieben, mit Hilfe dessen Einflüsse auf die Wahrnehmung der Gleichmäßigkeit der Vibrationsintensität evaluiert werden sollen.

Wahrnehmungsversuch

Für den Wahrnehmungsversuch wurde ein einfacher Stimulus verwendet, welcher dem Bewegungsmuster eines Streichens über den Arm entspricht. Hierbei bewegt sich der Vibrationspunkt, gleichförmig über eine Motorreihe längs entlang des Armes, über die gesamte Länge des Armbandes. Neben der Interpolation als vermuteten Haupteinflussfaktor wurden weiterhin die Richtung der Bewegung (Arm aufwärts/abwärts), sowie die Geschwindigkeit der Bewegung variiert. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Parameter. Hieraus ergeben sich 18 Parameterkombinationen, welche mit einfacher Wiederholung in zufälliger Reihenfolge wiedergegeben wurden. Die Probanden sollten die „Gleichmäßigkeit der Vibrationsintensität während der Bewegung der Vibration“ für jede der 36 Wiedergaben auf einer kontinuierlichen semantischen Differenzialskala (von „nicht“ bis „sehr“) bewerten. Vor Beginn des Experiments konnten sich die Probanden anhand von 5 Trainingsstimuli mit dem Experiment vertraut machen. Während des Versuchs trugen sie geschlossene Kopfhörer, um auditiven Einflüssen vorzubeugen. Der Versuch wurde mit 20 Probanden (17 männlich, 3 weiblich; Alter 25 bis 42) durchgeführt. Vor dem Versuch wurden sie über das Experiment aufgeklärt und haben eine schriftliche Einverständniserklärung abgegeben.

Tabelle 1: Parametervariationen der Stimuli

Parameter	Variation		
Geschwindigkeit in cm/s	3	10	18
Interpolation	Linear	Power	Log
Richtung	Aufwärts	Abwärts	
Amplitude in dB[$\mu\text{m/s}^2$]	137		
Frequenz in Hz	100		

Ergebnisse und zukünftige Arbeiten

Die Probanden berichteten von einem dem Streichen ähnlichen Gefühl. Damit konnte das Funktionsprinzip mit diesem Experiment validiert werden. Für die Auswertung wurden die 36 Bewertungen für jeden Probanden auf die 18 verschiedenen Stimuli gemittelt. Die Ergebnisse des Experiments sind in Abbildung 4 dargestellt. Um den Einfluss der Interpolation auf die Bewertung zu ermitteln wurde eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Hieraus ergab sich eine deutliche Signifikanz ($p < 0,001$) aller drei Interpolationen zueinander. Die „Power“ Interpolation erzielte die höchste Bewertungen, die logarithmische Interpolation die zweithöchste und die lineare Interpolation die geringste Gleichmäßigkeit. Dies bestätigt, dass eine künstliche Verstärkung der wahrgenommenen Intensität zur Mitte hin, die empfundene Gleichmäßigkeit der Intensität deutlich erhöhen kann. Je größer die Verstärkung in diesem Versuch, desto gleichmäßiger die wahrgenommene Intensität. Für unseren Anwendungsfall ist „Power“ daher zu bevorzugen. Dies steht im Gegensatz zu [6]. Hier wurde nach Wahrnehmungstests die logarithmische Interpolation bevorzugt. Allerdings war das Ziel hierbei nicht eine möglichst gleichmäßig wahrgenommene Intensität, sondern eine möglichst gute Erkennung des Bewegungspfads. Dieses

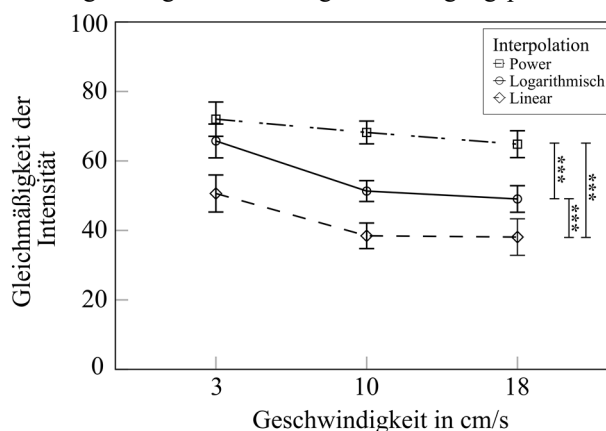


Abbildung 4: Darstellung der gemittelten Bewertungen der Gleichmäßigkeit der Intensität über der Geschwindigkeit der vibratorischen Streichbewegung über den Arm, gestaffelt nach Interpolation. Die „Power“ Interpolation erzielt signifikant ($p < 0,001$) höhere Bewertungen.

Ergebnis deckt sich mit der Beobachtung in [8], wonach eine Verstärkung der Amplitude in der Mitte zwar zu einer gleichmäßigeren Intensität führt, sie jedoch auch mit einer leichten Einbuße an Genauigkeit der örtlichen Auflösung einhergeht. Für unseren Anwendungsfall der Berührungswiedergabe besitzt die Intensität allerdings Vorrang vor der örtlichen Genauigkeit.

Ein Effekt der Bewegungsrichtung sowie Interaktionseffekte auf die Gleichmäßigkeit der Intensität wurden nicht gefunden. Jedoch ist im Diagramm die Tendenz erkennbar, dass langsamere Geschwindigkeit eine leicht höhere Gleichmäßigkeit erzielen. Dies könnte sich dadurch erklären lassen, dass sich die Ungleichmäßigkeit in der Intensität wie eine Amplitudenmodulation anfühlt. Eine langsamere Geschwindigkeit führt demnach zu einer niedrigeren Frequenz der Modulation der Amplitude. Diese langsameren Änderungen könnten als gleichmäßiger wahrgenommen werden. Wie in Abbildung 4 zu sehen erreicht auch die „Power“ Interpolation keine gemittelte Gleichmäßigkeit über 80 Punkte. Die Vermutung liegt daher nahe, dass eine weitere Anpassung der Ansatzfunktion eine noch gleichmäßigere Empfindung erreicht. Zukünftig könnte daher untersucht werden, durch welche Veränderungen eine weitere Verbesserung erreicht werden kann. Eine Möglichkeit hierfür wäre es eine parametrisierte Ansatzfunktion (bspw. veränderlicher Wurzelexponent, vergleichbar zu [9]) zu nutzen. Anhand einer eigenen Justierung durch die Probanden könnte so eine optimierte Interpolation abgeleitet werden. Aufgrund stark streuender Messwerte pro Proband wird es vermutlich jedoch nicht möglich sein eine Interpolation zu finden, welche die Lücke bis zur 100er Bewertung schließen kann. Der persönliche Fehler pro Proband erscheint auf Basis der Erfahrungen des durchgeführten Experiments zu groß. In weiteren Schritten ist unser Ziel geeignete Parameter für die Stimulusgenerierung zu bestimmen, um eine möglichst plausible Wiedergabe zu erzeugen. Weiterhin möchten wir weitere Bewegungsmuster festlegen, um das Spektrum an abspielbaren Berührungen zu erweitern.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms „Souverän. Digital. Vernetzt.“. Verbundprojekt 6G-life, Förderkennzeichen: 16KISK001K. Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden.

Literaturverzeichnis

- [1] ELSAYED, Hesham ; WEIGEL, Martin ; MÜLLER, Florian ; SCHMITZ, Martin ; MARKY, Karola ; GÜNTHER, Sebastian ; RIEMANN, Jan ; MÜHLHÄUSER, Max: Vibromap: Understanding the spacing of vibrotactile actuators across the body. In: Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies 4 (2020), Nr. 4, S. 1–16
- [2] LEDERMAN, Susan J. ; JONES, Lynette A.: Tactile and haptic illusions. In: IEEE Transactions on Haptics 4 (2011), Nr. 4, S. 273–294
- [3] ISRAR, Ali ; ABNOUSI, Freddy: Towards pleasant touch: vibrotactile grids for social touch interactions. In: Extended abstracts of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems, 2018, S. 1–6
- [4] HUISMAN, Gijs ; FREDERIKS, Aduén Darriba ; VAN ERP, Jan B. F. ; HEYLEN, Dirk K. J.: Simulating affective touch: Using a vibrotactile array to generate pleasant stroking sensations. In: International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2016, S. 240–250
- [5] ISRAR, Ali ; POUPYREV, Ivan: Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2011, S. 2019–2028
- [6] SCHNEIDER, Oliver S. ; ISRAR, Ali ; MACLEAN, Karon E.: Tactile animation by direct manipulation of grid displays. In: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, 2015, S. 21–30
- [7] ALLES, David S.: Information transmission by phantom sensations. In: IEEE transactions on man-machine systems 11 (1970), Nr. 1, S. 85–91
- [8] JONGMAN SEO ; SEUNGMOON CHOI: Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device. In: 2010 IEEE Haptics Symposium, 2010, S. 67–70
- [9] SEO, Jongman ; CHOI, Seungmoon: Perceptual Analysis of Vibrotactile Flows on a Mobile Device. In: IEEE Transactions on Haptics 6 (2013), Nr. 4, S. 522–527