



Universitatea  
Ștefan cel Mare  
Suceava

Facultatea de Inginerie  
Electrică și Știința  
Calculatoarelor

# TEZĂ DE DOCTORAT

CALCULATOARE ȘI TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI

## Proiectarea feedbackului multimodal pentru augmentarea experienței utilizatorului cu interacțiuni tactile

### REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:  
*Prof. Radu-Daniel VATAVU*

DOCTORAND:  
Mihail TEREŢI

Suceava, 2024

UNIVERSITATEA “ȘTEFAN CEL MARE” DIN SUCEAVA  
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR  
*Laboratorul de Mașini Inteligente și Vizualizare a Informației*  
*Centrul de cercetare MANSID*

**PROIECTAREA FEEDBACKULUI MULTIMODAL  
PENTRU AUGMENTAREA EXPERIENȚEI  
UTILIZATORULUI CU INTERACȚIUNI TACTILE**

*Scientific Coordinator*

Prof. Radu-Daniel VATAVU

*PhD Student*

Eng. Mihail TERENCEI

Suceava, România

2024



Această teză de doctorat a fost realizată în cadrul Laboratorului de Mașini Inteligente și Vizualizare a Informației (MintViz) din cadrul centrului integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii și Sisteme Distribuite de fabricație și control (MANSiD 671/09.04.2015) al Universității “Ștefan cel Mare” din Suceava.



# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>7</b>
1.1	Contribuțiile tezei de doctorat . . . . .	8
1.2	Publicații științifice . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Stadiul actual privind feedback multimodal în aplicații interactive</b>	<b>10</b>
2.1	Aplicații cu feedback multimodal . . . . .	10
2.2	Studiu sistematic al literaturii privind instrumente software pentru proiectarea feedback-ului vibrotactil . . . . .	11
2.3	Feedback-ul vibrotactil pentru îmbunătățirea experienței utilizatorilor în interacțiunea cu ecrane tactile . . . . .	11
<b>3</b>	<b>VIREO, o aplicație software pentru proiectarea feedback-ului multimodal, audio și vibrotactil</b>	<b>12</b>
3.1	Introducere . . . . .	12
3.1.1	Cerințe de proiectare . . . . .	12
3.1.2	Implementarea tehnică . . . . .	13
3.1.3	Proiectarea feedback-ului vibrotactil utilizând modele predefinite . . . . .	14
3.1.4	Proiectarea feedback-ului vibrotactil prin schițare . . . . .	15
3.1.5	Tehnici de generare automată a feedback-ului vibrotactil . . . . .	15
3.1.6	Augmentarea feedback-ului vibrotactil cu o componentă audio . . . . .	15
3.1.7	Integrarea în aplicații mobile și purtabile a feedback-ului multimodal proiectat în VIREO . . . . .	16
3.2	Aplicații demonstrative cu feedback vibrotactil creat utilizând VIREO . . . . .	17
3.2.1	Augmentarea unui joc video pentru smartphone . . . . .	17
3.2.2	Notificări transmise prin intermediul unui smartwatch . . . . .	17
3.2.3	Feedback vibrotactil prin intermediul unei brățări inteligente . . . . .	17
3.2.4	Aplicație pentru ochelari inteligenți . . . . .	18
3.2.5	Aplicație pentru o suprafață interactivă de mari dimensiuni . . . . .	18
3.3	Experiment 1: Evaluarea eficienței utilizării VIREO . . . . .	18
3.3.1	Experiment . . . . .	18
3.3.2	Rezultate . . . . .	19
3.4	Experiment 2: Evaluarea eficienței feedback-ului vibrotactil proiectat utilizând VIREO . . . . .	19
3.4.1	Experiment . . . . .	19
3.4.2	Rezultate . . . . .	20
3.5	Concluzii . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pentru augmentarea interacțiunilor în medii fizice și virtuale</b>	<b>21</b>
4.1	Introducere . . . . .	21
4.2	Experiment 1: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pe braț pentru interacțiunea cu ecrane virtuale . . . . .	21
4.2.1	Experiment . . . . .	21
4.2.2	Rezultate . . . . .	22
4.3	Experiment 2: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pe braț pentru interacțiunea cu ecrane fizice . . . . .	22

4.3.1	Experiment	22
4.3.2	Rezultate	22
4.4	Experiment 3: Experiența utilizator în interacțiunea fără atenție vizuală cu ecrane tactile augmentate cu feedback vibrotactil	23
4.4.1	Experiment	23
4.4.2	Rezultate	23
4.5	Experiment 4: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil simultan pe ecran și încheietura mâinii	25
4.5.1	Experiment	25
4.5.2	Rezultate	25
4.6	Concluzii	26
<b>5</b>	<b>Wear+Touch</b>	<b>28</b>
5.1	Introducere	28
5.2	Wear+Touch	28
5.3	Implementarea aplicației Wear+Touch	29
5.4	Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil prin intermediul Wear+Touch	30
5.4.1	Experiment	30
5.4.2	Rezultate	30
5.5	Concluzii	31
<b>6</b>	<b>Feedback-ul vibrotactil distal pentru augmentarea interacțiunii prin atingere</b>	<b>32</b>
6.1	Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul mâinii	32
6.2	Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul brațelor	32
6.3	Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul întregului corp	32
<b>7</b>	<b>Concluzii</b>	<b>33</b>
	<b>Mulțumiri</b>	<b>34</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>35</b>

# 1 Introducere

Tehnologiile haptice au devenit și mai răspândite odată cu creșterea numărului de dispozitive portabile și mobile. Inovații precum integrarea feedback-ului vibrotactil în smartphone-uri și introducerea unor interfețe haptice mai sofisticate în dispozitivele cu ecrane tactile (*e.g.*, tablete, sisteme de infotainment la bordul vehiculelor și altele) și-au găsit numeroase aplicații practice în diverse domenii, cum ar fi în educație [33], divertisment [29,45,51], interacțiunea eyes-free [21] și altele.

Pentru a proiecta eficient feedback-ul vibrotactil destinat aplicațiilor interactive, dezvoltatorii au nevoie de instrumente specializate, care depind de platforma și de dispozitivele portabile utilizate, precum și de obiectivele și experiența dezvoltatorilor. Sunt disponibile mai multe opțiuni pentru proiectarea, implementarea și integrarea feedback-ului vibrotactil în aplicații, printre care pot fi identificate două tendințe: (i) specificarea feedback-ului vibrotactil în mod programatic și (ii) utilizarea instrumentelor de proiectare și editare pentru crearea pattern-urilor, care sunt mai apoi integrate în diverse aplicații. Însă, unele dintre soluțiile existente vizează platforme specifice sau doar anumite sisteme de operare [1, 22]. Altele abordează o gamă mai largă de platforme și sisteme de operare, dar se specializează în sinteza haptică sau pe o anumită metodă de redare. Unele instrumente propuse nu sunt dependente de platformă, metoda de creare sau redare [35, 44, 55, 61], însă nu sunt disponibile public.

Interacțiunea prin atingere a devenit populară pe dispozitivele mobile și portabile concepute pentru a mări suprafața de atingere la întregul ecran, favorizând în același timp afișarea vizuală a conținutului în detrimentul altor modalități, cum ar fi cel haptic [8]. Ținând cont de avantajele interacțiunii prin atingeri, nu este surprinzător că acestea au fost integrate în multe dispozitive, sisteme și medii digitale. Feedback-ul vibrotactil aduce multe beneficii interacțiunii prin atingere [14, 34, 78], dar nu este mereu disponibil, *e.g.*, nu este suportat nativ de către ecranele tactile de dimensiuni mari. Deși în comunitatea științifică au fost propuse mai multe soluții tehnice pentru a depăși acest dezavantaj [42, 49], tehnologia de bază de integrare a acestora este încă prea complexă pentru o implementare practică. În această sens, există o alternativă care oferă o soluție tehnică mult mai simplă, dar care a fost puțin explorată până în prezent: utilizarea dispozitivelor portabile conectate, pentru a reda pattern-uri de vibrații pe corpul utilizatorului, extinzând ecranul tactil care nu are suport nativ. Având în vedere adoptarea în continuă creștere dispozitivelor portabile și faptul că studiile anterioare au evidențiat o experiență pozitivă a utilizatorilor în ceea ce privește feedback-ul vibrotactil pe corp care însoțește intrarea pe ecranul tactil, o astfel de soluție tehnică se poate dovedi viabilă în contextul ecranelor tactile private sau publice, inclusiv pentru interacțiunea eyes-free sau atunci când atenția utilizatorului este distribuită pentru două sarcini. Multe dintre aceste dispozitive dispun și de modalități de ieșire suplimentare, permițând dezvoltatorilor de aplicații să implementeze interacțiuni multimodale. Dispozitivele portabile pot fi utilizate pentru redarea diverselor modalități: kinestezic [17], vizual [16], termal [32, 82], cea mai răspândită modalitate fiind cea auditivă.

În această lucrare de doctorat este prezentat VIREO, un instrument software pentru crearea, stocarea, distribuirea și integrarea feedback-ului multimodal în aplicații, concentrându-se pe componentele vibrotactile și audio. Acest instrument oferă metode pentru crearea feedback-ului multimodal, cum ar fi schițarea modelelor, utilizarea modelelor matematice pentru configurarea precisă sau generarea automată a bibliotecilor de modele. În plus, în această teză sunt prezentate rezultatele a opt studii, în care au participat 132 de utilizatori, și care au urmărit investigarea experienței utilizatorului la interacțiunea prin atingeri augmentată cu feedback vibrotactil aplicat



pe diferite părți ale corpului și în diferite condiții interactive, cum ar fi realitatea virtuală (VR), ecrane publice dimensiuni mari și interacțiunile cu un ecran în condiții eyes-free. Rezultatele principale indică faptul că feedback-ul vibrotactil îmbunătățește experiența utilizatorului când este aplicat în anumite locuri pe corp, cum ar fi degetul, încheietura mâinii sau abdomenul, și nu este potrivit pentru altele, cum ar fi tâmplele.

## 1.1 Contribuțiile tezei de doctorat

1. Rezultatele unui Synopsis Literature Survey (SLS) privind modul în care instrumentele software pentru interacțiunea multimodală au fost descrise în literatura științifică. Studiul raportează caracteristicile acestor instrumente, precum și elementele descriptive utilizate pentru a prezenta și documenta a acestor aplicații.
2. Rezultatele unui studiu sistematic al literaturii (SLR) privind instrumentele software destinate proiectării și integrării feedback-ului vibrotactil în aplicațiile pentru utilizatori. Rezultatele acestui SLR arată că majoritatea instrumentelor au fost create pentru a funcționa numai pe anumite platforme și că rezultatul proiectării poate fi integrat într-un număr limitat de aplicații.
3. Implementarea VIREO, un instrument software bazat pe tehnologii web pentru proiectarea, stocarea, partajarea și integrarea modelelor multimodale în aplicațiile utilizatorilor care rulează pe diverse dispozitive mobile și portabile. Sunt prezentate mai multe aplicații demonstrative care implementează feedback multimodal, precum și rezultatele unui studiu de utilizare care evaluează crearea de modele vibrotactile.
4. Sunt propuse trei tehnici de generare a pattern-urilor vibrotactile, care permit utilizatorilor explorarea un număr mare de exemple de feedback vibrotactil și selectarea celor mai potrivite pentru diverse cazuri, utile în diferite etape ale dezvoltării aplicațiilor. În plus, sunt raportate rezultatele unui studiu în care au fost implicați programatori cu diverse niveluri de experiență și care au avut drept scop investigarea experienței utilizatorilor la utilizarea VIREO pentru crearea și generarea pattern-urilor vibrotactile.
5. Rezultatele a trei studii empirice care au implicat un număr de 42 de participanți și care au urmărit investigarea experienței utilizatorului când aceștia primesc feedback vibrotactil furnizat pe deget, încheietură și antebraț în timpul interacțiunii cu ecrane tactile în diferite condiții. Primul studiu se concentrează pe evaluarea percepției utilizatorului când feedback-ului vibrotactil este transmis pe braț în VR. Al doilea studiu investighează feedback-ul vibrotactil pe braț, în cazul în care utilizatorii interacționează cu ecranele fizice de dimensiuni mari. Al treilea studiu examinează percepția utilizatorului asupra feedback-ului vibrotactil în timp ce interacționează cu ecrane tactile în condiții eyes-free.
6. Wear+Touch, patru tehnici concepute pentru a furniza feedback vibrotactil pe braț prin intermediul dispozitivelor portabile: *addition*, *reinforcement*, *extension* și *expansion*. Aceste tehnici aplică diverse strategii pentru a îmbunătăți experiența utilizatorului la interacțiunea cu diverse aplicații. Sunt raportate rezultatele unui studiu în care au fost implicați 20 de utilizatori și compara cele patru tehnici de interacțiune propuse.
7. Un cadru teoretic pentru sistematizarea feedback-ului vibrotactil distal la nivelul întregului corp este propus. Cadrul respectiv include două dimensiuni: *Proximitatea*, care specifică distanța de la punctul de atingere a ecranului până la locul în care este redat feedback-ul vibrotactil, și *Lateralitatea*, o dimensiune care consideră partea corpului în

care a fost furnizat feedback-ul față de mâna dominantă a utilizatorului. Sunt raportate rezultatele a trei studii empirice care au implicat un număr total de 45 de participanți pentru a evalua experiența utilizatorului de feedback vibrotactil furnizat pe trei niveluri: mână, braț și întregul corp.

## 1.2 Publicații științifice

1. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2024. Wear+Touch: An Exploration of Wearables for Vibrotactile Feedback During Touchscreen Input. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 19 pages. DOI <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2372145>  
**WOS:001262175000001 Q1, IF: 3.4, 5-Year IF: 4.5 (JCR 2023)**
2. **Mihail Terenti**, Cristian Pamparău, Radu-Daniel Vatavu. 2024. The User Experience of Distal Arm-level Vibrotactile Feedback for Interactions with Virtual versus Physical Displays. *Virtual Reality* 28, 84, 21 pages. DOI <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00977-2>.  
**WOS:001189252500001 Q1, IF: 4.4, 5-Year IF: 5.4 (JCR 2023)**
3. **Mihail Terenti**, Matthieu Rupin, Baptiste Reynal, Laurent Grisoni, Radu-Daniel Vatavu. 2024. The Eclectic User Experience of Combined On-Screen and On-Wrist Vibrotactile Feedback in Touchscreen Input. In *Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 315, 1–7. DOI <https://doi.org/10.1145/3613905.3650835>.  
**A\* (ARC CORE)**
4. **Mihail Terenti**, Maria Casado-Palacios, Monica Gori, Radu-Daniel Vatavu. 2024. What Is the User Experience of Eyes-Free Touch Input with Vibrotactile Feedback Decoupled from the Touchscreen? In *Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 372, 1–8. DOI <https://doi.org/10.1145/3613905.3650804>.  
**A\* (ARC CORE)**
5. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2023. VIREO: Web-based Graphical Authoring of Vibrotactile Feedback for Interactions with Mobile and Wearable Devices. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39(20), 4162–4180. DOI <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2109584>.  
**WOS:000842281200001 Q1, IF: 3.4, 5-Year IF: 4.5 (JCR 2023)**
6. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2022. Measuring the User Experience of Vibrotactile Feedback on the Finger, Wrist, and Forearm for Touch Input on Large Displays. In *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 286, 1–7. DOI <https://doi.org/10.1145/3491101.3519704>.  
**WOS:001118038100288 A\* (ARC CORE)**
7. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2021. How Do HCI Researchers Describe Their Software Tools? Insights From a Synopsis Survey of Tools for Multimodal Interaction. In *Companion Publication of the 2021 International Conference on Multimodal Interaction*, 7–12. DOI <https://doi.org/10.1145/3461615.3485431>.  
**B (ARC CORE)**

## 2 Stadiul actual privind feedback multimodal în aplicații interactive

Sistemele multimodale sunt integrate tot mai mult în viața utilizatorilor, acestea oferindu-le metode mai naturale și mai eficiente de interacțiune cu sistemele informatice. Cu toate acestea, în majoritatea cazurilor, implementarea sistemelor informatice multimodale este un proces complex, care prezintă numeroase provocări, cum ar fi înțelegerea preferințelor și cerințelor utilizatorilor [66], combinarea eficientă a mai multor modalități, crearea a componentelor hardware și a algoritmilor pentru proiectarea și prelucrarea datelor de intrare și ieșire din astfel de sisteme. Pentru a detalia aceste provocări, am efectuat o analiză sistematică a literaturii a modurilor în care cercetătorii din domeniul HCI [25] au descris instrumentele software în lucrările științifice precum și a instrumentelor ce permit implementarea interacțiunilor multimodale în aplicații practice. În plus, am efectuat și un studiu sistematic al literaturii privind instrumentele software pentru proiectarea și integrarea feedback-ului vibrotactil în aplicații destinate utilizatorilor.

### 2.1 Aplicații cu feedback multimodal

Pentru a înțelege practicile existente adoptate la descrierea instrumentelor ce implementează interacțiuni multimodale, am efectuat o căutare sistematică în literatura științifică a lucrărilor relevante, adoptând metodologia unui Systematic Literature Review [13], fără a efectua o căutare extinsă în literatura de specialitate. Pentru identificarea lucrărilor, a fost aplicată o interogare care include cuvinte-cheie precum *multimodal*, *“tool\*”* or *“platform\*”*, and *“interaction\*”*, *“interface\*”*, or *“input”* în titlurile de lucrări de la ACM Full-Text Collection, unde au fost găsite 49 de rezultate. Eligibilitatea lucrărilor a fost verificată ținând cont de disponibilitatea conținutului, a domeniului de cercetare și a subiectului dezvoltat în lucrare. În rezultat 30 au fost selectate pentru analiza ulterioară. În urma analizei, au fost extrase următoarele caracteristici: modalități de intrare, modalități de ieșire, utilizatori aplicațiilor, platformele utilizate, contribuțiile și elementele descriptive ale lucrărilor.

Rezultatele arată că cele mai frecvente modalități de intrare analizate au fost comenzile vocale (33.3%), mouse-ul și tastatura (27.5%), și comenzile gestuale (20.3%), urmate de interacțiunea prin privire, utilizarea stylus-ului, mișcările capului și expresiile faciale. Aceste rezultate sunt în concordanță cu concluziile unui studiu anterior al lui Baig și Kavakli [4] privind sistemele multimodale, în care au fost analizate 136 de lucrări. Modalitățile de output vizuale și auditive sunt au fost egal abordate în literatură cu 51.1% și 46.7%, respectiv. Feedback-ul haptic a fost mai puțin utilizat de autorii care au implementat interacțiuni multimodale în aplicațiile lor, și utilizată într-o singură aplicație [53]. În cele mai multe cazuri, feedback-ul haptic este utilizat independent de alte modalități, autorii concentrându-se în principal pe diferite aspecte ale utilizării sale, cum ar fi performanța interacțiunii utilizatorului, numărul de erori comise sau timpul necesar pentru a efectua o anumită sarcină. Cea mai frecventă contribuții au fost implementarea aplicațiilor software (50%), urmată de studii cu utilizatori (16%) și implementarea componentelor hardware (15%) pentru a permite noi modalități de interacțiune [3]. Cele mai multe aplicații multimodale rulează pe desktop (73%), în timp ce platformele mobile și sisteme robotice au fost utilizate mai puțin (20% și 17%, respectiv). Instrumentele multimodale identificate au fost adresate în special dezvoltatorilor (61.1%) și cercetătorilor (30.6%), iar în câteva cazuri utilizatorilor [18] și instructorilor [3]. Rezultatele arată că *capturile de ecran* și

*diagramele* sunt cele mai preferate metode pentru a descrie aplicațiile în care este implementat feedback-ul multimodal.

## 2.2 Studiu sistematic al literaturii privind instrumente software pentru proiectarea feedback-ului vibrotactil

Dispozitivele mobile inteligente, cum ar fi smartphone-urile sau tabletele au devenit dominante printre dispozitivelor informatice personale, permițând interacțiunea în mișcare și diverse modalități de comunicare și schimb de informații, iar feedback-ul haptic joacă un rol important pentru experiența utilizatorilor cu aceste dispozitive. În această secțiune este descris un SLR privind lucrările anterioare care descriu aplicații software pentru a susține utilizatorii în implementarea feedback-ului vibrotactil. Pentru proiectarea SLR-ului, au fost urmate recomandările celor mai bune practici din [70] adoptând metoda PRISMA [48]. Utilizând o interogare în bazele de date ACM DL și IEEE Explore, au fost identificate 52 de lucrări relevante. După aplicarea unor criterii de eligibilitate, un set de 25 de lucrări a rămas pentru analiza ulterioară.

Rezultatele arată că există patru motive principale pentru introducerea instrumentelor de creare a feedback-ului vibrotactil, acestea fiind: pentru a îmbunătăți experiența utilizatorilor în diverse medii digitale (30.8%) [22, 26, 36, 37, 52, 56], (2) pentru a corespunde cerințelor impuse de dispozitive sau grupuri de utilizatori (30.8%) [28, 43, 57, 59, 63, 64, 74, 75], (3) instrumente generice pentru crearea feedback-ului vibrotactil (26.9%) [20, 35, 44, 55, 59, 61, 65], și (4) instrumente destinate cercetărilor feedback-ului vibrotactil (11.5%) [11, 58, 67]. Majoritatea instrumentelor descrise în comunitatea științifică pot fi utilizate pe desktop (56.0%) urmate de dispozitive mobile (20.0%), aplicații web (16.0%) [20, 24, 65, 67], și aplicații pentru dispozitive personalizate (8.0%) [36, 43]. Instrumentele analizate în SLR au implementat mai multe tipuri de tehnici de creare a feedback-ului vibrotactil: compoziția pattern-urilor (32.3%), editarea undelor (19.3%) [52, 55, 59, 64, 65, 74], utilizarea modelelor numerice pentru specificarea pattern-urilor complexe (12.9%) [20, 22, 56, 59], crearea de biblioteci cu modele predefinite (9.7%) [37, 57, 67], implicarea utilizatorilor pentru generare (9.7%) [28, 35, 43], și alte tehnici specifice diferitelor dispozitive și/sau adresate grupurilor de utilizatori (16.1%) [24, 26, 39, 44, 63].

## 2.3 Feedback-ul vibrotactil pentru îmbunătățirea experienței utilizatorilor în interacțiunea cu ecrane tactile

Mai multe studii au raportat beneficiile aduse de feedback-ul vibrotactil. Suhonen *et al.* [73] a investigat experiența utilizatorului utilizând diverse tipuri de feedback haptic — vibrotactil, termic, și prin strângeri mecanice — livrate pe deget și la încheietura mâinii. Shim *et al.* [68] a proiectat patru efecte vibrotactile pentru imitarea unor fenomenelor naturale. Singhal *et al.* [72] a introdus câteva principii de proiectare a efectelor haptice și a studiat modul în care acesta influențează experiența utilizatorilor într-un joc. Prin valorificarea faptului că utilizatorii își păstrează smartphone-urile pe diferite ale corpului, Alvina *et al.* [2] a cercetat percepția utilizatorilor privind stimulii vibrotactili de pe *palmă*, *braț*, *picior*, și *abdomen*. OmniVib, un set de opt stimuli vibrotactili, a obținut o precizie ridicată de recunoaștere (86.3%). Elsayed *et al.* [27] au cercetat feedback-ul vibrotactil transmis la *încheietura mâinii*, *antebraț*, *braț*, *spate*, *corp*, și pe *picior*, determinând distanța optimă dintre surse de vibrații.

# 3 VIREO, o aplicație software pentru proiectarea feedback-ului multimodal, audio și vibrotactil

## 3.1 Introducere

În acest capitol este prezentat VIREO (Vibrotactile Online Editor, vezi Figura 3.1), un instrument software pentru crearea de pattern-uri haptice (vibrotactile) și multimodale (vibrotactile și audio) pentru mediul web cu mai multe caracteristici utile pentru dezvoltatori: crearea de pattern-uri vibrotactile utilizând modele existente, compunerea modelelor prin manipularea lor, crearea de modele prin schițarea acestora, generarea de pattern-uri vibrotactile, gestionarea bibliotecilor de modele pe web și integrarea lor în aplicații pe dispozitive mobile și portabile.

### 3.1.1 Cerințe de proiectare

Considerând rezultatele analizei literaturii științifice și a celor mai des utilizate moduri de integrare a feedback-ului multimodal în aplicații practice ce rulează pe dispozitive mobile și portabile, au fost identificate câteva cerințe de proiectare (DRs) pentru VIREO. Aceste cerințe sunt axate pe asigurarea unui mod eficient de proiectare a feedback-ului vibrotactil și integrarea acestuia cu ușurință în diverse platforme mobile și portabile. Factori precum o experiență de utilizare pentru diverse grupuri de utilizatori, disponibilitatea pentru o gamă largă de platforme și dispozitive și performanța generală a sistemului au fost luați în considerare pentru a asigura un impact maxim al VIREO pentru comunitate.

- DR<sub>1</sub>: *Accesibilitate în mediul web.* VIREO trebuie să fie ușor accesibil cercetătorilor și dezvoltatorilor ce utilizează diferite platforme și sisteme de operare, pentru care o soluție de proiectare software bazată pe tehnologii web este cea mai simplă abordare.
- DR<sub>2</sub>: *Utilizarea modelelor pentru proiectare numerică precisă a feedback-ului vibrotactil.* VIREO trebuie să ofere acces la o colecție de modele matematice pentru a specifica pattern-uri vibrotactile cu precizie numerică.
- DR<sub>3</sub>: *Specificarea modelelor vibrotactile prin schițarea acestora permite crearea rapidă a unor prototipuri.* VIREO trebuie să ofere mecanisme simple care să permită dezvoltatorilor să genereze rapid modele de feedback vibrotactil prin o aproximare rapidă, e.g., prin schițarea sau trasarea liberă similar procedurii de utilizare a unei aplicații de editare grafică.
- DR<sub>4</sub>: *Mecanisme simple și flexibile de sincronizare pentru modele vibrotactile și feedback audio,* prin intermediul unor mecanisme ușor de gestionat în timpul procesului de proiectare și care include crearea, editarea, parametrizarea și salvarea feedback-ului multimodal.
- DR<sub>5</sub>: *Integrare simplă cu dispozitive mobile și portabile.* La etapa de proiectare a feedback-ului multimodal, sunt implicate mai multe dispozitive, inclusiv PC-uri pentru proiectare și dispozitive portabile pentru testare. Feedback-ul multimodal proiectat utilizând VIREO ar trebui să utilizeze cu ușurință toate acestor dispozitive, permițând utilizatorilor să își testeze rapid modelele și să le integreze în aplicații practice.



**Figure 3.1:** The multimodal haptic framework, VIREO [79], freely available at <https://vireoapp.com>, enables graphical authoring of vibrotactile and audio feedback patterns for augmenting interactions on mobile and wearable devices.

DR<sub>6</sub>: *Support pentru JavaScript*. Dispozitive care se integrează cu VIREO sau utilizează feedback-ul multimodal proiectat de acesta trebuie să suporte aplicații JavaScript. Suportul JavaScript facilitează integrarea cu o gamă largă de dispozitive portabile și utilizarea capacităților lor puternice de feedback vibrotactil.

Cerințele de proiectare DR<sub>1</sub> și DR<sub>4</sub> ne asigură că VIREO este accesibil pentru un grup larg de dezvoltatori, care utilizează diverse platforme sau sisteme de operare, în timp ce DR<sub>5</sub> și DR<sub>6</sub> ne asigură că VIREO poate fi utilizat în același mod, utilizând o gamă largă de dispozitive mobile și purtabile. Suport pentru DR<sub>6</sub> poate fi găsită în exemple propuse anterior în comunitatea HCI privind instrumentele de dezvoltare bazate pe JavaScript pentru dispozitive portabile [19], FlowIO [69], sau SAPIENS [62] pentru interacțiuni periferice.

### 3.1.2 Implementarea tehnică

VIREO a fost implementat pornind de la cerințele de proiectare descrise în secțiunea anterioară. Deși versiunea actuală permite proiectarea feedback-ului multimodal utilizând două modalități, părțile front-end și backend ale aplicației au fost implementate pentru a permite extinderea în versiunile viitoare cu alte modalități, care necesită o reprezentare vizuală specializată și componente backend specifice pentru procesare.

Pentru a asigura posibilitatea de scalare și extindere a aplicației, am adoptat implementarea unei arhitecturi software bazate pe componente atât pentru interfață, cât și pentru partea de backend, în care fiecare componentă a fost concepută pentru a gestiona o anumită modalitate de feedback sau pentru a gestiona pattern-urile multimodale. Principalele componente ale interfeței gestionează cele două modalități de feedback multimodal, una pentru crearea componentei audio și una pentru proiectarea feedback-ului vibrotactil. Fiecare componentă majoră din interfață are un omolog corespunzător pe partea de backend: componentele din UI interacționează în

timp real cele din partea backend pentru gestionarea și preprocesarea datelor, extragerea unor caracteristici sau sincronizarea între dispozitive, e.g., pentru testare sau distribuirea în timp real.

VIREO a fost implementat utilizând Node.js,<sup>1</sup> un mediu popular de execuție JavaScript destinat pentru crearea de aplicații extensibile și foarte performante. Caracteristicile sale distinctive au facilitat mult implementarea a unor cerințe de proiectare descrise în secțiunea 3.1.1. Tehnologiile alese au contribuit în mod semnificativ la punerea în aplicare a DR<sub>5</sub>, de exemplu prin utilizarea formatului JSON pentru exportul și distribuirea modelelor vibrotactile. JSON este un format foarte flexibil ce permite schimbul de date bazat pe notarea obiectelor similar cu JavaScript și este suportat nativ de către Node.js. Pentru implementarea părții backend am utilizat NestJS<sup>2</sup>, unul dintre cele mai populare framework-uri ce permite proiectarea și dezvoltarea de aplicații eficiente și scalabile pentru web urmând arhitectura Model-View-Controller. Interfața aplicației a fost dezvoltată utilizând Vue.js,<sup>3</sup> un framework JavaScript, rapid și flexibil, și care permite crearea interfețelor reactive, astfel încât VIREO să poată fi accesat de pe mai multe dispozitive cu o experiență de utilizare uniformă.

### 3.1.3 Proiectarea feedback-ului vibrotactil utilizând modele predefinite

Feedback-ul vibrotactil în VIREO poate fi definit ca o funcție a variației intensității în timp  $A(t)$ , cu valori cuprinse între 0 (lipsa feedback-ului) și 100 (intensitate maximă a feedback-ului vibrotactil). Stabilirea valorilor pentru limitele inferioară și superioară (0 to 100) asigură faptul că intensitatea feedback-ului vibrotactil rămâne în intervalul ce poate fi utilizat în mod practic, simplificând integrarea în dispozitive cu diverse cerințe de redare a feedback-ului vibrotactil. Modelele individuale pot fi compuse pentru a genera exemple mai complexe, cum ar fi,  $A(t) = A_1(t) + A_2(t - \tau)$ , unde  $\tau$  specifică decalajul de timp pentru al doilea model. De exemplu,  $A_1(t)$  este modelul liniar crescător definit anterior și  $A_2(t)$  este un semnal exponențial cu o curbă rapid descrescătoare.

În VIREO sunt accesibile urătoarele modele pentru definirea patter-urilor vibrotactile:

1. *Liniar*. Modelul liniar este definit de funcția  $A(t) = at + b$ , unde  $a$  și  $b$  reprezintă panta și ordonata la origine, respectiv. Acest model este universal și poate fi utilizat pentru a crea diverse modele de variație a intensității vibrațiilor în timp, cu o intensitate crescătoare atunci când  $a > 0$ , descrescătoare când  $a < 0$ , sau constantă când  $a = 0$ .
2. *Pătratic*. Este definit de funcția pătratică  $A(t) = at^2 + bt + c$ , care definește o parabolă cu axa de simetrie paralelă cu axa verticală.
3. *Exponențial*. Definit de funcția  $A(t) = A_{max}e^{-\lambda t + D} + c$  specifică intensitatea vibrațiilor care variază exponențial în funcție de timp, unde  $A_{max}$  reprezintă amplitudinea maximă, iar  $c$  este ordonata la origine.
4. *Logaritmă*. Este definit de funcția  $A(t) = A_{max} \ln(at) + c$  și este un model invers celui exponențial.
5. *Armonic*.  $A(t) = A_{max}e^{-\tau t} \sin(2\pi\omega t) + c$  specifică oscilații armonice cu frecvență  $\omega$ .

Feedback-ul vibrotactil generat cu ajutorul acestor modele poate fi combinat pentru a crea exemple din ce în ce mai complexe. Utilizatorii pot specifica decalajul în timp al modelelor individuale, fie numeric sau prin manipulare directă cu mouse-ul, trăgând modelul în locul dorit.

---

<sup>1</sup><https://nodejs.org>.

<sup>2</sup><https://nestjs.com>

<sup>3</sup><https://vuejs.org>

### 3.1.4 Proiectarea feedback-ului vibrotactil prin schițare

După cum am arătat în secțiunile anterioare, proiectarea feedback-ului pe baza de modele permite specificarea specificații numerice precise ale tiparelor cu diverse grade de complexitate. Cu toate acestea, un caz de utilizare care apare frecvent este atunci când dezvoltatorii doresc să testeze rapid cum se simte un model vibrotactil, fără a fi interesați de modelarea matematică exactă a acestuia sau de valorile precise ale variației intensității vibrațiilor. Pentru a implementa această cerință (DR<sub>3</sub>), am creat opțiunea “Free draw”, prin intermediul căreia utilizatorii pot schița forma variației vibrației utilizând mouse-ul, un pix digital sau cu degetul în cazul în care se utilizează un dispozitiv cu o suprafață tactilă, cum ar fi o tabletă. Această abordare permite o proiectare mai intuitivă a modelului tactil, ceea ce poate fi util pentru dezvoltatorii începători sau pentru cei care nu au experiență în proiectarea și implementarea feedback-ului vibrotactil în aplicații practice. VIREO aproximează această formă schițată, cu o mulțime de regiuni dreptunghiulare de lățime variabilă (care sunt de fapt modele liniare) și pentru care lățimea minimă poate fi manual pentru în funcție de cerințele aplicației în care va fi utilizat.

### 3.1.5 Tehnici de generare automată a feedback-ului vibrotactil

Mulți dezvoltatori începători, care doresc să exploreze feedback-ul vibrotactil în aplicațiile lor, întâmpină dificultăți de a selecta un model potrivit pentru aplicația pe care o dezvoltă. Pentru a rezolva această problemă, am fost dezvoltat un modul suplimentar pentru VIREO, care permite utilizatorilor să genereze automat componente vibrotactile pentru pattern-urile lor multimodale. Proiectarea manuală permite definirea precisă a componentelor specifice, pe când generarea automată a modelelor oferă eficiență și scalabilitate, facilitând procesul de crearea a unei colecții largi de pattern-uri. Au fost identificate trei metode care ar fi utile pentru utilizatori în timpul primei faze de proiectare a feedback-ului vibrotactil:

- **Random.** Pentru a genera modele vibrotactile, acesta pornește de la modele matematice existente și alege la întâmplare parametrii de configurare într-un interval dat de către utilizator, astfel încât rezultatele generate să reprezinte o diversitate de modele vibrotactile.
- **Keywords.** Această tehnică este utilă atunci când feedback-ul vibrotactil trebuie să transmită natura evenimentului prin stimulare tactilă. VIREO implementează tehnica Keywords de generare a modelelor vibrotactile, în care utilizatorii creează modele vibrotactile prin specificarea unor cuvinte-cheie asociate interacțiunii. Această tehnică se bazează pe taxonomia furnizată de VibViz *et al.* [67] și utilizează un algoritm, care permite modificarea formei pentru a obține modele similare cu cele originale.
- **Demonstration.** Utilizatorii pornesc de la un model existent și utilizează această tehnică pentru a genera exemple similare cu cel furnizat prin modificarea parametrilor de configurare ai acestuia.

### 3.1.6 Augmentarea feedback-ului vibrotactil cu o componentă audio

În a doua versiune a VIREO, a fost introdusă o nouă funcționalitate, care permite proiectarea feedback-ului audio-vibrotactil multimodal. Aceasta permite dezvoltatorilor să creeze experiențe cu feedback multimodal mai sofisticate și mai imersive pentru aplicațiile lor. Totodată, dezvoltatorii pot îmbunătăți experiența utilizatorilor prin combinarea feedback-ului audio și vibrotactil, rezultând experiențe de utilizare mai atractive și mai dinamice. În cadrul componentei



audio, utilizatorii au posibilitatea de a selecta și încărca un fișier audio, fiind suportate cele mai populare tipuri de fișiere audio \*.mp3, \*.wav, and \*.aac. În continuare, dezvoltatorii au opțiunea de a personaliza audio încărcat, prin ajustarea unor parametri, cum ar fi offset-ul, durata și selectarea unui anumit fragment audio secvența inițială. Această configurare poate fi realizată prin intermediul componentei audio din interfața VIREO utilizând mouse-ul pentru o manipulare intuitivă a parametrilor sau prin controlul numeric al fiecărui caracteristici al feedback-ului audio prin setarea valorilor exacte în casetele de text corespunzătoare.

```
1 {
2   "vibration": [
3     {"intensity":94, "duration":25}, {"intensity":84, "duration":25},
4     {"intensity":77, "duration":25}, {"intensity":71, "duration":25},
5   ],
6   "audio": "SUQzAwAAAAAJLRQRTEAAAAcAAAAU291bm...ACAAIAAgACAAIAAA"
7 }
```

**Listing 1:** An illustration of the JSON representing the “Stop” multimodal feedback pattern as it appears in the default user workspace enhanced with a corresponding audio component and exported from VIREO. *Note:* the content of the vibrotactile and audio components are presented partially.

Componenta audio permite decuparea unui fragment din fișierul audio inițial. Această funcție a fost implementată utilizând FFMPEG,<sup>4</sup> o aplicație software open-source foarte puternică, utilizată pe larg pentru gestionarea conținutului multimedia. Chiar dacă VIREO permite încărcarea fișierelor audio relativ lungi în calitate de componente pentru feedback-ul audio-vibrotactil, este recomandă evitarea utilizării acestora, deoarece pot influența semnificativ sincronizarea între diverse modalități și pot introduce latență. Modelul audio-vibrotactil poate fi exportat și integrat în aplicațiile pentru utilizatori. Considerând că VIREO este în primul rând destinată mediului web, formatul de export a fost extins pentru a include și componenta audio; vezi Listing-ul 1. Această abordare ne asigură că componentele vibrotactile și audio sunt capturate într-o singură entitate, permițând o sincronizarea între cele două modalități în aplicațiile în care vor fi utilizate. Pentru a încapsula componenta audio, care este formată din date binare, într-un fișier JSON (cu un format text), s-a utilizat codificarea Base64. În continuare, textul poate fi decodat și redat prin intermediul unui player audio. Pentru aplicațiile web, Web Audio API poate reda conținut audio direct din conținutul codificat Base64.

### 3.1.7 Integrarea în aplicații mobile și purtabile a feedback-ului multimodal proiectat în VIREO

O listă de tipare multimodale în VIREO pot fi exportate sub forma unei biblioteci JavaScript, ce conține serii de intensități ale vibrațiilor și durate de timp corespunzătoare. Această reprezentare intermediară este o aproximare a formei variației intensității proiectate în VIREO și este un mod convenabil pentru redarea feedback-ului vibrotactil utilizând Vibration Web API pe dispozitive mobile și purtabile, care oferă suport pentru JavaScript. Însă Vibration API acceptă numai modele reprezentate ca serii de durate on/off, pentru care s-a utilizat un algoritm pulse-width modulation (PWM) [7]. Biblioteca JavaScript exportă un obiect care expune câteva metode utile de a rula feedback-ul multimodal, de exemplu pentru componenta vibrotactilă poate fi utilizată metoda `toNavigatorFormat(patternName)`, care acceptă ca parametru numele modelului și îl transformă în impulsuri on/off acceptate de `navigator.vibrate(...)` din cadrul Vibration Web API, iar `navigatorVibrate(patternName)` apelează `navigator.vibrate(...)` implicit.

---

<sup>4</sup>[https://www.ffmpeg.org/](https://www ffmpeg.org/)

## 3.2 Aplicații demonstrative cu feedback vibrotactil creat utilizând VIREO

În această secțiune sunt prezentate mai multe aplicații practice, care implementează feedback vibrotactil demonstrând capacitățile VIREO pentru proiectarea modelelor multimodale. În această secțiune este arătat modul în care feedback-ul vibrotactil creat utilizând VIREO poate fi integrat în aplicații ce rulează pe dispozitive mobile și purtabile, cum ar fi un smartphone, o brățară inteligentă, un smartwatch sau o pereche de ochelari inteligenți.

### 3.2.1 Augmentarea unui joc video pentru smartphone

Pentru prima demonstrație a fost implementat jocul clasic Snake,<sup>5</sup> în care utilizatorul manevrează un șarpe în continuă mișcare și încearcă să colecteze mere pentru a acumula puncte, în timp ce corpul șarpelui crește în lungime pe măsură ce jocul progresează. Câteva evenimente din joc au fost alese și augmentate cu feedback vibrotactil, pentru care am apelat la VibViz pentru a identifica modelele potrivite. Deoarece VibViz nu oferă o reprezentare numerică a feedback-ului vibrotactil, acestea au fost create utilizând compunerea modelelor numerice din cadrul VIREO, de exemplu tiparul pentru evenimentul “game over” a fost creat prin combinarea unui model exponențial ( $10e^{-10t} + 50|_0^{0.5}$ ) cu unul liniar ( $-200t + 100|_{0.5}^1$ ), iar “points awarded” a fost construit combinând trei modele ( $650t|_0^{0.15}$ ,  $650(t - 0.15)|_{0.15}^{0.30}$ , și  $650(t - 0.3)|_{0.30}^{0.45}$ ), iar forma triunghiulară a unui din tipare a fost obținută prin combinarea a două modele liniare, unul crescător și unul descrescător:  $(650(t - 0.45)|_{0.45}^{0.60})$  și  $-650(t - 0.60) + 97.5|_{0.60}^{0.75}$ .

### 3.2.2 Notificări transmise prin intermediul unui smartwatch

Pentru această demonstrație a fost implementată o aplicație ce rulează pe un smartwatch și poate furniza notificări persoanelor care practică jogging. Aplicația monitorizează timpul de alergare și oferă utilizatorului feedback vibrotactil în funcție de anumite etape: începerea exercițiului de alergare, încurajări ușoare sau puternice atunci când timpul de alergare se apropie de anumite repere predefinite, cum ar fi 15 și 30 de minute, și atingerea unui nou record personal de timp de alergare. Modelele vibrotactile pentru aceste evenimente au fost create în VIREO utilizând compoziția modelelor liniar, logaritmice și armonice, respectiv.

### 3.2.3 Feedback vibrotactil prin intermediul unei brățări inteligente

Pentru următoarea demonstrație, a fost propusă o aplicație de vizualizare a informațiilor pe un dispozitiv tabletă, ce permite interacțiunea prin multitouch, iar atingerile ecranului au fost augmentate cu feedback vibrotactil furnizat pe mâna utilizatorului. Utilizatorul folosește gesturi multitouch de zoom-in și zoom-out pentru a parcurge regiunile unei hărți. Dar din cauza numărului mare de puncte (destinații) afișate, nu toate acestea pot fi prezentate vizual în același timp pe hartă, unele puncte devin vizibile, iar altele sunt ascunse pe măsură ce utilizatorul se apropie de o anumită regiune a hărții. Pentru a informa utilizatorul cu privire la numărul de puncte de interes disponibile în regiunea respectivă, am furnizat feedback vibrotactil pe brațul utilizatorului prin intermediul unei brățări Myo. Au fost selectate patru evenimente în cadrul aplicației și au fost augmentate cu feedback vibrotactil: multe puncte de interes sunt disponibile în jurul punctului de atingere, dar sunt ascunse vederii, unele puncte de interes sunt disponibile, foarte puține puncte sunt încă ascunse vederii și confirmarea selecției unui punct de interes.

<sup>5</sup>Snake - Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Snake\\_\(video\\_game\\_genre\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Snake_(video_game_genre)).

Aceste modele au fost proiectate în VIREO utilizând modele liniare, exponențiale și armonice, iar pentru a selecta tiparele a fost utilizat VibViz [67].

### 3.2.4 Aplicație pentru ochelari inteligenți

Harta interactivă prezentată în secțiunea 3.2.3 a fost adaptată pentru a rula pe o pereche de ochelari inteligenți Vuzix Blade<sup>6</sup>, un dispozitiv cu lentile transparente, touchpad integrat și motoare de vibrații în regiunea tâmpelor. Display-ul mic al dispozitivului cu ochelari a intensificat problema vizualizării unui număr mare de puncte de interes afișate simultan pe hartă. Considerând că Vuzix Blade poate rula un browser care suportă JavaScript și Vibration Web API, aplicația a rulat pe acestea fără modificări majore în ceea ce privește rularea feedback-ului vibrotactil, furnizând către utilizator cele patru pattern-uri vibrotactile.

### 3.2.5 Aplicație pentru o suprafață interactivă de mari dimensiuni

Pentru a demonstra modul în care feedback-ul audio și vibrotactil poate fi proiectat și integrat în aplicații, au fost utilizate tehnologiile web pentru a dezvolta un joc, care poate fi jucat de unul sau mai mulți utilizatori pe un dispozitiv tabletop. Scopul jocului este să fie alungate toate albinele leneșe afișate pe ecran cât mai rapid posibil. Pentru a face jocul mai interactiv și pentru a crește implicarea utilizatorului, câteva evenimente ale jocului au fost completate cu feedback audio-tactil. De exemplu, atunci când utilizatorul atinge o albină lucrătoare, aceasta va înțepa utilizatorul, ceea ce în cadrul jocului este reprezentat ca un sunet scurt și ascuțit însoțit de o vibrație pe antebrațul utilizatorului, sau atunci când albinele leneșe sunt atinse, un tipar “bee buzz” este redat, reprezentat de un feedback audio corespunzător și un feedback vibrotactil liniar scurt urmat de o vibrație care scade exponențial pe brațul utilizatorului.

Toate aplicațiile prezentate în această secțiune au fost dezvoltate folosind HTML, CSS, and JavaScript fie ca aplicații native (*e.g.*, pentru Galaxy Watch 3) sau aplicații web ce rulează în browse. Scopul principal a fost acela de a evidenția caracterul practic și fezabilitatea cerințelor de proiectate descrise.

## 3.3 Experiment 1: Evaluarea eficienței utilizării VIREO

### 3.3.1 Experiment

Pentru a evalua utilitatea VIREO ca instrument pentru crearea de feedback vibrotactil și integrarea acestuia în aplicații pentru dispozitive mobile, a fost efectuat un studiu cu programatori cu diferite niveluri de experiență în diverse limbaje de programare. Un număr total de șaisprezece participanți au fost recrutați pentru a participa la acest studiu. Toți participanții au fost studenți la informatică, având până la zece ani de experiență în programare ( $M=4.2$ ,  $SD=3.0$  ani) și cunoscând cu o diversitate de limbaje de programare și platforme.

Fiecare participant au accesat un cont individual VIREO, primit înainte de experiment împreună cu un tutorial cum poate fi utilizat VIREO și o demonstrație video de trei minute. De asemenea, au avut acces la jocul video Snake, pentru care au fost rugați să folosească VIREO pentru a proiecta trei pattern-uri. După experiment, participanții au fost rugați să ofere feedback cu privire la experiența lor privind utilizarea VIREO și să completeze un chestionar care a inclus System Usability Scale (SUS) [15], Computer System Usability Questionnaire (CSUQ) [46], și evaluarea dificultății utilizării modelelor matematice și a opțiunii “Free draw”.

<sup>6</sup><https://www.vuzix.com/products/blade-smart-glasses-upgraded>

### 3.3.2 Rezultate

Scorul obținut pentru scala SUS a fost de 70.47 (SD=24.63), reprezentând o valoare care se încadrează în zona “acceptabil” în apropiere de “bine”, în conformitate cu intervalele de acceptabilitate și clasificările utilizând adjective pentru interpretarea scorurilor SUS [5,6]. Scorul pentru CSUQ-OVERALL a fost de 2.68 (SD=1.41) pe o scala de la 1 la 7 unde valorile mai mici, apropiate de 1, denotă performanțe mai bune. Scorurile obținute pe fiecare subscale CSUQ au fost de o magnitudine similară: 2.74 pentru CSUQ-SYSUSE (SD=1.59), 2.75 pentru CSUQ-INFOQUAL (SD=1.37), și 2.40 pentru CSUQ-INTERQUAL (SD=1.41), respectiv. Prin conversia scorului CSUQ-OVERALL într-o valoare din intervalul 0-100 [47], scorul a fost de 70.96 (SD=26.52), o valoare aproape identică cu cea obținută cu SUS. Aceste rezultate arată experiență a utilizatorilor bună privind crearea feedback-ului vibrotactil utilizând VIREO.

În ceea ce privește metodele de a crea tipare vibrotactile, *i.e.*, utilizând modele sau schițarea, a fost obținut un scor de 1.88 (Mdn=2) pentru modele matematice și 2.31 (Mdn=2) pentru schițarea modelelor. Testul Wilcoxon signed-rank însă, nu a detectat vreo diferență semnificativă între cele două valori ( $Z = -1.567$ ,  $p = .117 > .05$ , *n.s.*). Nici testul Mann-Whitney U nu a scos la iveală vreo influență a experienței de programare a utilizatorilor asupra preferințelor pentru cele două metode descrise, cu valori  $U = 26.000$ ,  $Z = -0.732$ ,  $p = .574$ , *n.s.* pentru modele matematice și  $U = 30.000$ ,  $Z = -0.217$ ,  $p = .878$ , *n.s.* pentru schițarea modelelor.

## 3.4 Experiment 2: Evaluarea eficienței feedback-ului vibrotactil proiectat utilizând VIREO

### 3.4.1 Experiment

Pentru a evalua utilitatea metodelor de generare a tiparelor de feedback vibrotactil implementate în VIREO, a fost realizat un studiu cu programatori cu diferite niveluri de experiență în programare. Un alt obiectiv al acestui studiu a fost de a afla dacă potențialii utilizatori ar utiliza generarea de modele ca instrument principal pentru identificarea tiparelor vibrotactile pentru aplicațiile lor sau mai degrabă ca un instrument secundar pentru identificarea tiparelor aproximative.

Un număr total de nouă participanți au fost recrutați, cu vârste cuprinse între 26 și 33 de ani ( $M = 28.89$ ,  $SD = 2.76$  ani) și care erau studenți în domeniul calculatoare sau programatori profesioniști. Participanții au evaluat foarte pozitiv importanța feedback-ului vibrotactil pentru îmbunătățirea experienței utilizatorului în diverse aplicații, cu un scor mediu de 4.22 ( $SD = 0.67$ ). Câțiva dintre participanți au raportat ca având experiență în implementarea feedback-ului vibrotactil fie în aplicații pentru utilizatori finali, fie în proiectele lor personale, pentru care au folosit diverse tehnologii și platforme.

Participanții au fost rugați să își imagineze dezvoltarea unui joc care va rula pe un smartphone și să găsească trei modele vibrotactile pentru trei evenimente de joc: “New level”, “New achievement” și “Game over”. În continuare, li s-a cerut să proiecteze manual modelele folosind modele matematice sau schițarea acestora. De asemenea, li s-a cerut să genereze modele pentru cazurile propuse folosind toate cele trei tehnici propuse în cadrul VIREO. Ordinea în care au generat cele trei tipare a fost specificată în instrucțiunile individuale pe care le-au primit la începutul studiului și a fost randomizată pentru fiecare participant. Singura excepție a fost proiectarea manuală a modelelor, care a trebuit să fie finalizată înainte de tehnica demonstrativă. În cele din urmă, participanții au fost rugați să completeze un chestionar pentru a comunica experiența lor de utilizare a metodelor de generare a tiparelor. Pe lângă informațiile demografice, chestionarul a colectat măsurători menite să înțeleagă utilitatea metodelor de creare a feedback-ului vibrotac-

til prin generarea automată și proiectare manuală. Deasemeni a fost utilizat System Usability Scale pentru a evalua experiența utilizatorilor privind utilizarea VIREO.

### 3.4.2 Rezultate

Pentru scala SUS participanții au raportat un scor de 79.17 (SD=16.2) pentru proiectarea manuală a tiparelor vibrotactile, care se încadrează în categoria “bine” considerând interpretarea scalei SUS utilizând adjective. Pentru cele trei metode de generarea a tiparelor vibrotactile rezultatele pentru scala SUS au fost: 77.22 (SD=25.54) pentru Keywords, 83.89 (SD=15.52) pentru Random și 89.17 (SD=11.39) pentru Demonstration. Rezultatele pentru Random și Demonstration se încadrează în categoria “excellent” conform interpretării scalei SUS utilizând adjective. Scorul ridicat al experienței utilizatorului pentru metoda Demonstration pentru generare a modelelor confirmă faptul că aceasta poate fi utilizată cu ușurință împreună cu metoda manuală pentru a crea cele mai convenabile modele. Rezultatele privind utilizarea instrumentului de generare a modelelor arată scoruri ridicate, în special pentru metoda Demonstration. Participanții au perceput această metodă ca fiind ușor de utilizat evaluând cu un scor de 4.89 (SD=0.33) pe o scala de la 1 la 5, fiind cel mai bun rezultat, în comparație cu Random care a obținut un scor de 3.78 (SD=1.2) și Keywords cu același scor 3.78 (SD=1.72).

### 3.5 Concluzii

În acest capitol, a fost descrisă implementarea VIREO, o aplicație web care permite dezvoltatorilor să creeze, să stocheze, să distribuie și să integreze în aplicații tipare multimodale, care includ componente vibrotactile și audio. VIREO oferă o metodă simplă de specificare a tiparelor vibrotactile ca fiind variația intensității vibrațiilor în timp, ceea ce reprezintă o abstractizare comodă în diverse aplicații. Trei tehnici de generare a modelelor vibrotactile au fost implementate în VIREO, permițând dezvoltatorilor să exploreze un număr mare de tipare, alegându-l pe cel mai potrivit pentru un anumit context. Au fost efectuate două studii cu utilizatori, pentru a evalua utilitatea și experiența utilizatorilor când interacționează cu VIREO. Ambele studii au arătat un feedback pozitiv din partea participanților, inclusiv dezvoltatori începători și profesioniști cu peste cinci ani de experiență în programare.

Contribuțiile din acest capitol au fost diseminate în următoarea publicație:

1. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2023. VIREO: Web-based Graphical Authoring of Vibrotactile Feedback for Interactions with Mobile and Wearable Devices. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39(20), 4162–4180. DOI <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2109584>.  
**WOS:000842281200001 Q1, IF: 3.4, 5-Year IF: 4.5 (JCR 2023)**

# 4 Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pentru augmentarea interacțiunilor în medii fizice și virtuale

## 4.1 Introducere

În timpul interacțiunii cu conținut vizual prin touch, senzația creată de atingerea directă a obiectelor creează o experiență a utilizatorului distinctă în comparație cu manipularea indirectă, care implică utilizarea unui dispozitiv intermediar. În timp ce acest feedback tactil este inerent și natural atunci când se interacționează cu un ecran fizic, într-un mediu virtual acesta trebuie indus prin intermediul diverselor dispozitive haptice [9, 12], e.g., controlere VR [23, 71, 83], mănuși și alte dispozitive purtate pe mână [10, 31, 41], sau dispozitive de augmentare a cu feedback haptic a degetelor [50, 60]. Feedback-ul vibrotactil este benefic pentru intensificarea interacțiunilor cu conținut vizual digital sau fizic. Cu toate acestea, experiența utilizatorului la interacțiunea prin atingeri augmentate cu feedback vibrotactil distal pe braț a fost puțin examinată. În acest context, acest capitol prezintă o investigare a percepției utilizatorilor a feedback-ului vibrotactil distal atunci când se interacționează cu ecrane în medii virtuale sau fizice.

## 4.2 Experiment 1: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pe braț pentru interacțiunea cu ecrane virtuale

### 4.2.1 Experiment

Pentru a explora percepția utilizatorilor a feedbackului vibrotactil transmis la nivelul *degetului, încheieturii, și antebrațului* când se interacționează cu un ecran în realitatea virtuală, a fost efectuat un studiu cu utilizatori. Un grup de paisprezece participanți, format din adulți cu vârste cuprinse între 19 și 33 de ani ( $M=25.7$ ,  $SD=3.1$  ani), au fost invitați să participe la acest studiu.

În timpul studiului, participanții au interacționat cu o aplicație de tip hartă, astfel fiind implicați într-o interacțiune naturală și autentică de utilizare a unui ecran în mediul virtual. La pornire, aplicația se afișează harta unui oraș în care sunt marcate unele atracții turistice. Participanții au fost imersați în realitatea virtuală utilizând o cască HTC Vive Cosmos, fiind plasați într-o camera în care este afișat un ecran pe care este proiectată harta interactivă. Atunci când este selectată o țintă de pe hartă, o fereastră pop-up afișează o scurtă descriere a atracției turistice corespunzătoare, iar un feedback vibrotactil este furnizat prin intermediul controlerului VR sau pe brațul participantului prin intermediul unui dispozitiv purtabil ce conține trei vibromotoare plasate pe deget, încheietura mâinii și pe antebraț. Experimentul a urmat un design cu măsurători repetate cu două variabile independente: REGIUNEA locul unde a fost transmis feedback-ul vibrotactil și ORIENTAREA, o variabilă nominală cu două condiții: *orizontal* și *vertical*. Participanții au explorat un oraș pentru fiecare caz REGIUNEA  $\times$  ORIENTAREA și pentru care li s-a cerut să identifice o țintă dintre cele prezentate ce corespundea anumitor criterii (e.g., cel mai vechi). Feedback-ul vibrotactil a fost furnizat prin intermediul controlerului sau dispozitivul purtabil de pe mâna dominantă a participanților. Experiența utilizatorilor la interacțiunea cu ecrane tactile în VR, augmentată cu feedback vibrotactil a fost colectată prin intermediul unui chestionar pe care participanții l-au completat după interacțiunea cu harta. Măsurătorile au fost înregistrate utilizând o scală Likert cu 5 puncte, prin care participanții și-au exprimat nivelul de acord față

de următoarele aspecte: ENJOYMENT, DISTRACTEDNESS, EFFICIENCY, DIFFICULTY, CONFIDENCE, CONFUSION și INTEGRATION.

## 4.2.2 Rezultate

Rezultatele nu au arătat un efect semnificativ din punct de vedere statistic al ORIENTAREA asupra OVERALL-PREFERENCE ( $F_{(1,91)}=1.726$ ,  $p=.192$ , *n.s.*), dar au arătat un efect semnificativ pentru variabila REGIUNEA ( $F_{(3,91)} = 5.472$ ,  $p=.002$ ). Testele post-hoc (Bonferroni-corrected  $\alpha=.05/3=.017$ ) a arătat că feedback-ul vibrotactil distal furnizat pe *deget* (Mdn=3.5, M=4.2) a fost mai preferat decât cel furnizat pe *încheietură* (Mdn=7, M=6.2,  $t_{(91)} = -2.538$ ,  $p=.013$ ,  $\eta_p^2=.07$ ), *antebraț* (Mdn=7, M=6.8,  $t_{(91)} = -3.688$ ,  $p<.001$ ,  $\eta_p^2=.13$ ), și pe *controller* (Mdn=7, M=6.3,  $t_{(91)}=3.279$ ,  $p=.002$ ,  $\eta_p^2=.11$ ), respectiv. În general, experiența raportată de participanți a fost pozitivă în ceea ce privește: ENJOYMENT (Mdn=4.0, M=3.9), EFFICIENCY (Mdn=4.0, M=3.6), CONFIDENCE (Mdn=4.0, M=3.9), și INTEGRATION (Mdn=4.0, M=4.2), completate de distragerea redusă a atenției (Mdn=1.0, M=2.1), dificultate (Mdn=1.0, M=1.9), și nivel de confuzie (Mdn=2.0, M=1.9). Rezultatele pentru OVERALL-PREFERENCE indică că feedback-ul vibrotactil furnizat pe *deget* este cel mai preferat în comparație cu alte regiuni pe corp sau controlerul VR.

## 4.3 Experiment 2: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil pe braț pentru interacțiunea cu ecrane fizice

### 4.3.1 Experiment

În continuare, am efectuat un alt studiu pentru a măsura experiența utilizatorului privind feedback-ului vibrotactil furnizat în diferite regiuni pe braț pentru interacțiuni cu ecrane fizice. Un eșantion similar de paisprezece participanți, cu vârste cuprinse între 19 și 34 de ani (M=25.0, SD=4.1 ani) au fost invitați să participe la studiu. Am utilizat aceeași aplicație, care a rulat pe două dispozitive cu ecrane tactile: cu un ecran orizontal pe un dispozitiv Ideum Platform de 46-inch<sup>7</sup> și unul vertical pentru care am utilizat un Samsung UE55D de 55-inch<sup>8</sup> peste care a fost suprapus CY-TD55LDAH<sup>9</sup> pentru a permite interacțiunea prin touch. Urmând procedura din studiul descris anterior, am utilizat două variabile independente: REGIUNEA unde feedback-ul vibrotactil a fost furnizat, cercetând patru condiții: *deget*, *încheietură*, *antebraț*, and *none*, reprezentând condiția în care feedback-ul vibrotactil a fost absent; a doua variabilă independentă a fost ORIENTAREA, o variabilă nominală cu două condiții: *orizontal* și *vertical*. Sarcina a fost aceeași ca în primul experiment: explorarea hărții interactive și identificarea țintei care corespunde unui anumit criteriu.

### 4.3.2 Rezultate

Rezultatele nu au arătat un efect semnificativ din punct de vedere statistic al variabilei ORIENTAREA asupra preferinței utilizatorilor ( $F_{(1,65)}=0.243$ ,  $p=.623$ , *n.s.*), deși au scos la iveală un efect semnificativ al variabilei REGIUNEA ( $F_{(2,65)}=12.493$ ,  $p<.001$ ). Cazul când feedback-ul a fost furnizat pe *deget* (Mdn=1, M=2.9) a fost preferat în comparație cu *încheietura* mâinii (Mdn=4, M=4.2,  $t_{(65)}=-2.788$ ,  $p<.01$ ,  $\eta_p^2=.11$ ) și cu *antebrațul* (Mdn=5, M=5.5,  $t_{(65)}=-4.987$ ,  $p<.001$ ,  $\eta_p^2=.28$ , Bonferroni-corrected  $\alpha=.05/2=.025$ ).

<sup>7</sup><https://www.ideum.com/products/touch-tables>

<sup>8</sup><https://displaysolutions.samsung.com/digital-signage/detail/86/UE55D>

<sup>9</sup><https://www.samsung.com/ph/business/smart-signage/touch-overlay-td55ldah/cy-td55ldahen>

Regiunea pe braț unde a fost furnizat feedback-ul vibrotactil a influențat semnificativ experiența utilizatorului în conformitate cu șase dintre cele opt măsurători ce caracterizează UX: ENJOYMENT ( $\eta_p^2=.28$ ), EFFICIENCY ( $\eta_p^2=.42$ ), CONFIDENCE ( $\eta_p^2=.28$ ), INTEGRATION ( $\eta_p^2=.33$ ), CONFUSION ( $\eta_p^2=.13$ ), și DISTRACTEDNESS ( $\eta_p^2=.21$ ). Testele Post-hoc (Bonferroni corrected) au arătat diferențe statistice semnificative pe *deget* în comparație cu *încheietura* și *antebrațul*, dar nu a identificat vreo diferență între percepția feedback-ului pe *încheietură* și *antebraț*. În general, feedback-ul vibrotactil pe a fost cel mai preferat în ceea ce privește ENJOYMENT (Mdn=5 and 4.5 atât pentru orientare *verticală* cât și cea *orizontală*), EFFICIENCY (Mdn=5 and 5), CONFIDENCE (Mdn=5 and 5), și INTEGRATION (Mdn=5 and 4.5).

## 4.4 Experiment 3: Experiența utilizator în interacțiunea fără atenție vizuală cu ecrane tactile augmentate cu feedback vibrotactil

### 4.4.1 Experiment

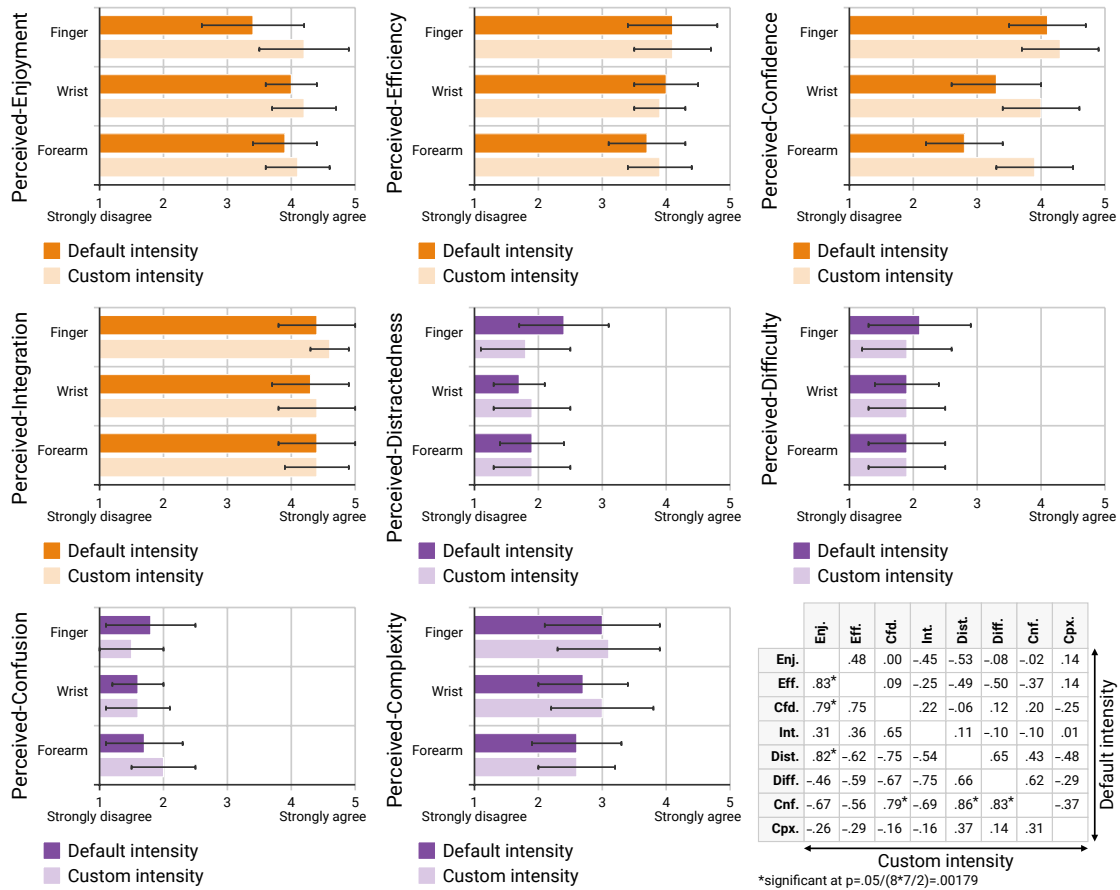
Feedback-ul vibrotactil este utilizat în sistemele interactive mobile și portabile pentru diverse sarcini practice. Cu toate acestea, nu toate dispozitivele cu ecran tactil au mecanisme integrate pentru redarea feedback-ului vibrotactil [43], pe când cele care îl suportă în mod nativ, cum ar fi smartphone-urile, sunt utilizate ocazional în condiții *eyes-free* când atenția vizuală a utilizatorului nu poate fi îndreptată către dispozitivul [38, 81]. În această secțiune, sunt prezentate rezultatele empirice ale unui studiu privind furnizarea feedback-ului vibrotactil pe braț în timpul interacțiunii cu un ecran tactil în condiții *eyes-free*.

Un număr de paisprezece participanți cu vârste cuprinse între 19 și 34 de ani ( $M=22.7$ ,  $SD=3.8$  ani), au fost recrutați pentru a participa la acest studiu. Pentru a permite participanților să interacționeze cu ecranul tactil în condiții *eyes-free*, a fost dezvoltat un joc video, care împarte ecranul unei tablete în două panouri, stâng și drept, atingerea unuia dintre panouri crește punctajul în joc. Atingerea ecranului a fost augmentată cu feedback vibrotactil prin intermediul unui dispozitiv portabil, care conține trei vibromotoare plasate pe degetul arătător, încheietura mâinii și brațul participanților. Designul experimentului a urmat un protocol de măsuri repetate cu două variabile independente: REGIUNEA unde a fost furnizat feedback vibrotactil și INTENSITATEA, o variabilă cu două condiții, *default* and *custom* condiție pentru care intensitatea în cele trei regiuni a fost modificată pentru a fi percepută ca având aceeași intensitate. Experimentul a constatat din două părți, cuprinzând toate combinațiile celor două variabile REGIUNEA și INTENSITATEA, timp în care participanții au jucat jocul video în interacționând cu dispozitivul în condiții *eyes-free*. În prima parte a studiului feedback-ul vibrotactil a fost furnizat cu aceeași intensitate în toate cele trei regiuni. În partea a doua, intensitățile vibrațiilor au fost modificate astfel încât să fie percepute ca având aceeași intensitate [40], după care participanții au repetat procedura din prima parte a studiului. Experiența utilizatorilor a fost colectată prin intermediul unui chestionar ce a inclus Usability Metric for User Experience (UMUX) [30], precum și cele opt mărimi utilizate în secțiunile anterioare pentru caracterizarea UX.

### 4.4.2 Rezultate

Rezultatele chestionarului UMUX a arătat o experiență generală pozitivă a feedback-ului vibrotactil furnizat în timpul interacțiunii cu un ecran tactil în condiții *eyes-free*, pentru ambele cazuri: atât la intensitate *default* (Mdn=95.8,  $M=91.4$ ) cât și la intensitate egal percepută *custom* (Mdn=91.7,  $M=89.9$ ) măsurate pe o scală de la 0 la 100. Deși a fost observat scor mediu ușor mai mare (+4.5%) în cazul cu intensitate *default*, nu a fost identificat niciun efect statistic semnificativ al intensității asupra scorului UMUX( $F_{(1,13)}=0.096$ ,  $p=.761$ , *n.s.*).





**Figure 4.1:** Experiența utilizatorilor evaluat pe diverse dimensiuni furnizat pe *deget*, *încheietură* și *antebraț* față de condiția de bază *none* în timpul interacțiunii cu ecrane taactile în condiții eyes-free.

De asemenea, rezultatele arată că experiența feedback-ului vibrotactil percepută de utilizator în timpul interacțiunii în condiții eyes-free a fost similară în toate cele trei regiuni de pe braț, cu diferențe statistic semnificative doar pentru CONFIDENCE ( $F_{(2,65)}=9.088, p<.001, \eta_p^2=.22$ ). Participanții s-au simțit mai încrezători interacționând în condiții eyes-free atunci când vibrațiile au fost transmise pe deget (Mdn=4.5, M=4.2) în comparație cu încheietura mâinii (Mdn=4.0, M=3.6,  $p=.039$ ) sau antebraț (Mdn=3.5, M=3.4,  $p<.001$ ). În plus, o diferență semnificativă între INTENSITATEA și REGIUNEA a fost detectată pentru mărimea menționată ( $F_{(2,65)}=3.570, p=.034$ ). Celelalte caracteristici specifice pentru UX au evidențiat percepții pozitive ale feedback-ului vibrotactil în timpul interacțiunii în condiții eyes-free, comparativ cu condiția de bază - fără feedback vibrotactil, cu având valori ne semnificative ( $p>.05, n.s.$ ). Rezultatele pentru mărimile specifice prezintă valori mari pentru ENJOYMENT (Mdn=4.0, M=4.0), EFFICIENCY (Mdn=4.0, M=3.9), INTEGRATION (Mdn=5.0, M=4.4), și scăzute pentru DISTRACTEDNESS (Mdn=2.0, M=1.9), DIFFICULTY (Mdn=1.0, M=1.9), CONFUSION (Mdn=1.0, M=1.7), și medii pentru COMPLEXITY (Mdn=3.0, M=2.9). În partea dreaptă-jos a figurii 4.1, sunt prezentați coeficienții de corelațiile Spearman calculați pentru cele opt mărimi la intensitate maximă și egal percepută.

## 4.5 Experiment 4: Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil simultan pe ecran și încheietura mâinii

### 4.5.1 Experiment

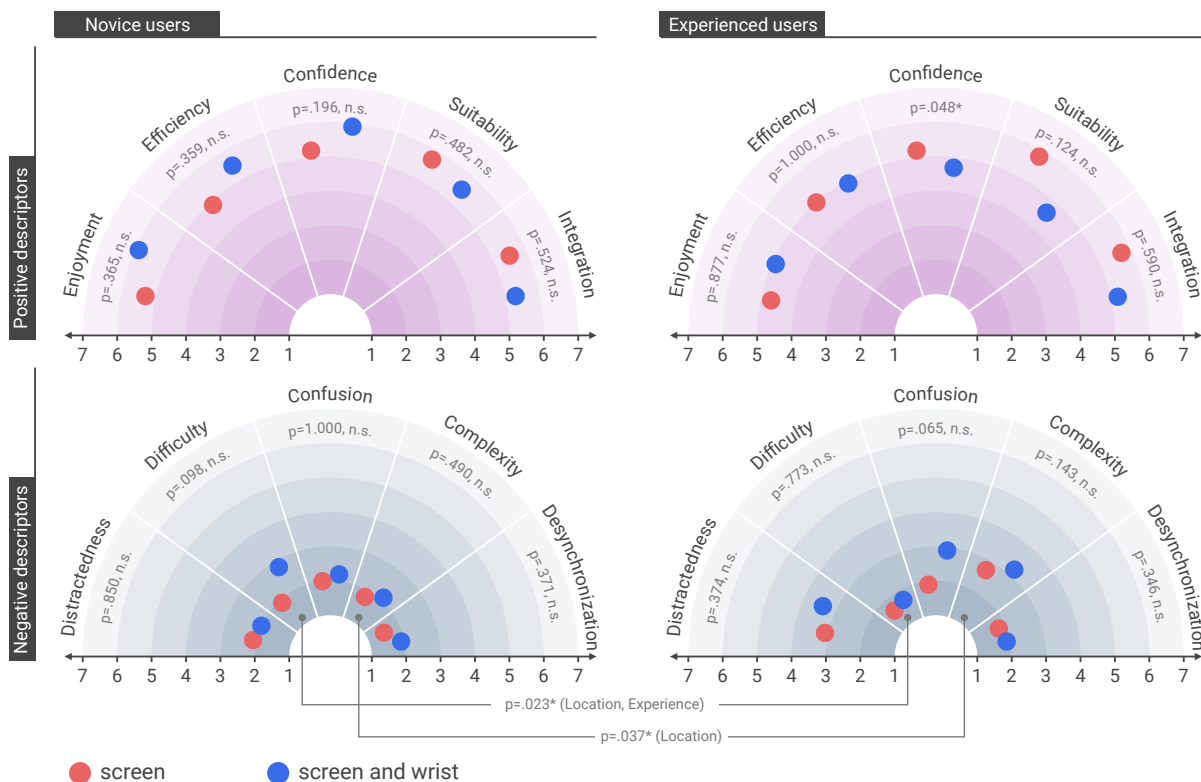
Ținând cont de rezultatele din secțiunile anterioare, feedback-ul vibrotactil furnizat la nivelul brațului conduce la o experiență a utilizatorului mai bună când se utilizează pentru a augmenta interacțiunea prin atingeri a unui ecran tactil. În această secțiune sunt raportate rezultatele unui studiu cu utilizatori în care au fost implicați 22 de participanți, care au interacționat cu un ecran tactil, interacțiunea fiind însoțită de feedback vibrotactil furnizat fie pe ecran, în punctul de atingere sau combinate pe ecran și pe încheietura mâinii. Pentru a evalua orice efecte potențiale ale experienței anterioare cu dispozitive haptice, au fost formate două grupuri cu același număr de utilizatori, și care au fost selectați în funcție de experiența profesională anterioară, ca începători și experți în haptics/HCI. Participanții au interacționat cu harta interactivă ce prezintă atracții turistice într-un oraș, utilizată în studiul prezentat în secțiunea 4.3 și care a fost modificată pentru a se potrivi pe ecranul dispozitivului utilizat. Atunci când utilizatorul atinge un punct de pe hartă, este afișată o scurtă descriere despre atracția turistică corespunzătoare, iar feedback-ul vibrotactil este furnizat pe ecran și, respectiv, pe ecran și la încheietura mâinii prin intermediul unei brățări. Pentru a transmite feedback pe ecranul dispozitivului a fost utilizat un XploreTouch,<sup>10</sup> un ecran tactil care utilizează ultrasunetul pe suprafața ecranului pentru a reduce forța de frecare dintre deget și sticlă, creând senzația de click [54]. Sarcina participanților a constat de a explora toate țintele de pe hartă pentru a o identifica pe cea mai veche. Toate atingerile au fost augmentate cu feedback vibrotactil furnizat pe ecran sau pe ecran, cât și pe încheietura mâinii, în funcție de condiția experimentală. Experimentul a avut nu design cu măsurători repetate cu două variabile independente: REGIUNEA, cercetându-se două condiții, *screen*- feedback vibrotactil doar pe ecran și *screen and wrist*- feedback vibrotactil pe ecran și pe încheietură, și EXPERIENȚA, incluzând utilizatori începători și experți. Experiența utilizatorilor a fost măsurată prin intermediul UMUX [30] și prin intermediul a celor opt mărimi specifice ce caracterizează UX, utilizate anterior.

### 4.5.2 Rezultate

Experiența utilizatorului privind feedback-ul vibrotactil furnizat în cele două condiții ale regiunii a fost evaluat cu scoruri similare, considerând scala UMUX ( $M=83.0$ ,  $SD=15.1$  vs.  $M=82.8$ ,  $SD=15.9$ ), fără nici un efect semnificativ al regiunii unde a fost furnizat feedback-ul vibrotactil ( $F_{(1,\infty)}=0.059$ ,  $p=.809$ , *n.s.*) sau grupului de utilizatori ( $F_{(1,19.726)}=0.124$ ,  $p=.728$ , *n.s.*). În general, aceste rezultate prezintă un o experiență pozitivă privind utilizarea feedback-ului vibrotactil furnizat de ecranul tactil și amplificat pe încheietura mâinii.

Analiza măsurilor caracteristice UX au dezvăluit mai multe detalii. Scorurile corespunzătoare celor cinci măsuri cu conotație pozitivă nu au fost afectate nici de regiunea unde a fost furnizat feedback-ul vibrotactil și nici de grupul de utilizatori ( $p>.05$ , *n.s.*). Testele post-hoc, efectuate între cele două grupuri de utilizatori, arată că utilizatorii experți s-au simțit mai încrezători când interacțiunea a fost augmentată cu feedback doar pe ecran (5.5 vs. 4.9,  $p=.048$ ); vezi Figura 4.2. Rezultatele au fost similare pentru mărimile cu conotație negativă, cu excepția DIFFICULTY pentru care a fost înregistrată o diferență semnificativă între cele două grupuri de utilizatori ( $Mdn=1$ ,  $M=1.5$ ,  $SD=1.1$  pentru experți vs.  $Mdn=2$ ,  $M=2.4$ ,  $SD=1.6$  pentru utilizatorii începători,  $F_{(1,19.876)}=6.064$ ,  $p=.023$ ), la fel DIFFICULTY ( $Mdn=1$ ,  $M=1.7$ ,  $SD=1.2$  pentru feedback pe ecran vs.  $Mdn=2$ ,  $M=2.2$ ,  $SD=1.6$  pentru feedback pe ecran și amplificat pe închei-

<sup>10</sup><https://www.hap2u.net>



**Figure 4.2:** User experience of vibrotactile feedback accompanying touchscreen input for *novice* (left) and *experienced* (right) users, characterized in terms of positively (top) and negatively (bottom) connoted descriptors.

etură,  $F_{(1,\infty)}=5.186$ ,  $p=.023$ ) și pentru COMPLEXITY (Mdn=2,  $M=2.2$ ,  $SD=1.7$  fpentru feedback pe ecran vs. Mdn=2,  $M=2.6$ ,  $SD=1.7$  pentru feedback pe ecran și amplificat pe încheietură,  $F_{(1,\infty)}=4.365$ ,  $p=.037$ ).

## 4.6 Concluzii

În acest capitol, au fost prezentate mai multe studii pentru a măsura experiența utilizatorului în ceea ce privește feedback-ul vibrotactil, îmbunătățind interacțiunea tactilă pe trei brațe în care ar putea fi amplasate dispozitive portabile în timpul interacțiunii cu ecrane tactile pe ecrane virtuale sau fizice. Rezultatele indică o experiență a utilizatorului pozitivă și o preferință pentru feedback vibrotactil transmise de deget față de alte părți ale brațului. Rezultatele au fost completate de un studiu efectuat cu utilizatori în care s-a cercetat experiența utilizatorilor când se interacționează cu un ecran tactil în condiții eyes-free și de un studiu în care s-au comparat preferințele utilizatorilor pentru feedback vibrotactil produs de ecranul tactil sau amplificat pe încheietura mâinii prin intermediul unei brățări.

Contribuțiile din acest capitol au fost diseminate în următoarele publicații:

1. **Mihail Terenti**, Cristian Pamparău, Radu-Daniel Vatavu. 2024. The User Experience of Distal Arm-level Vibrotactile Feedback for Interactions with Virtual versus Physical Displays. *Virtual Reality* 28, 84, 21 pages. DOI <https://doi.org/10.1007/s10055-024-00977-2>.

**WOS:001189252500001 Q1, IF: 4.4, 5-Year IF: 5.4 (JCR 2023)**

2. **Mihail Terenti**, Matthieu Rupin, Baptiste Reynal, Laurent Grisoni, Radu-Daniel Vatavu. 2024. The Eclectic User Experience of Combined On-Screen and On-Wrist Vibrotactile Feedback in Touchscreen Input. In Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 315, 1–7. DOI <https://doi.org/10.1145/3613905.3650835>.  
**A\* (ARC CORE)**
3. **Mihail Terenti**, Maria Casado-Palacios, Monica Gori, Radu-Daniel Vatavu. 2024. What Is the User Experience of Eyes-Free Touch Input with Vibrotactile Feedback Decoupled from the Touchscreen? In Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 372, 1–8. DOI <https://doi.org/10.1145/3613905.3650804>.  
**A\* (ARC CORE)**
4. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2022. Measuring the User Experience of Vibrotactile Feedback on the Finger, Wrist, and Forearm for Touch Input on Large Displays. In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 286, 1–7. DOI <https://doi.org/10.1145/3491101.3519704>.  
**WOS:001118038100288 A\* (ARC CORE)**

# 5 Wear+Touch

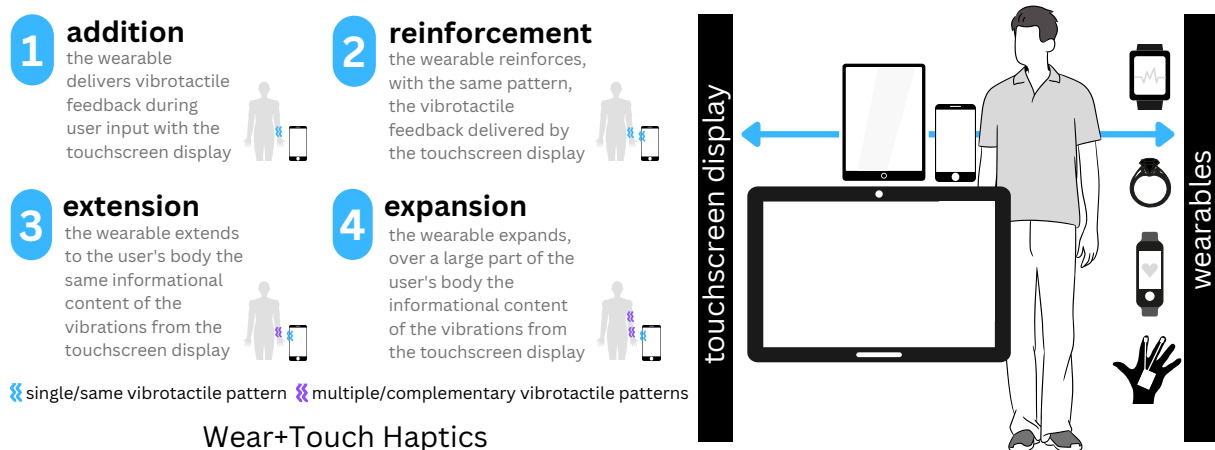
## 5.1 Introducere

În acest capitol, este descris “Wear+Touch,” un set de patru tehnici de interacțiune care utilizează dispozitive portabile conectate, concepute pentru deget, mână, încheietură și antebraț pentru a furniza feedback vibrotactil la interacțiunea cu un ecran tactil. În funcție de disponibilitatea feedback-ului vibrotactil integrat sau nu în ecranul tactil, sunt propuse patru posibilități de proiectare: *addition*, *reinforcement*, *extension*, și *expansion* a pattern-urilor vibrotactile în timpul interacțiunii prin atingeri cu ecranele tactile; vezi Figura 5.1 pentru detalii.

## 5.2 Wear+Touch

În literatură sunt descrise numeroase strategii de integrare a feedback-ului vibrotactil în cadrul dispozitivelor cu ecran tactil. Considerând posibilele combinații de dispozitive ce pot produce feedback haptic și ecranele tactile, au fost identificate câteva situații distincte în care feedback-ul vibrotactil este furnizat de acestea în apropierea punctului de atingere a ecranului.

1. **Addition.** Să considerăm un dispozitiv cu ecran tactil care nu are dispune de un mecanism nativ pentru feedback-ului vibrotactil, cum ar fi cazul ecranelor publice de dimensiuni mari. Rolul dispozitivelor purtabile este de a compensa acest dezavantaj al ecranului tactil. De exemplu, feedback-ul vibrotactil poate fi furnizat de un inel electronic purtat pe degetul care atinge suprafața ecranului [43]. Chiar dacă dispozitivul cu ecran tactil nu poate furniza feedback vibrotactil în mod nativ, inelul amplasat destul de aproape de punctul în care degetul intră în contact cu ecranul tactil compensează lipsa vibrațiilor de pe ecran.
2. **Reinforcement.** În acest caz, dispozitivul cu ecran tactil suportă nativ furnizarea de feedback vibrotactil, categorie în care se înscriu majoritatea smartphone-urilor și tabletelor. Rolul dispozitivului portabil aici este de a consolida feedback-ul vibrotactil furnizat de ecranul tactil prin intermediul vibrațiilor suplimentare furnizate pe degetul, încheietura sau antebrațul utilizatorului în funcție de contextul de utilizare și de de necesitatea de o astfel de consolidare, cum ar fi interacțiunea în condiții eyes-free [38, 81]. Deoarece contactul cu ecranul este foarte scurt, iar interacțiunea este efectuată fără atenție vizuală, vibrațiile de pe ecran sunt dublate pe încheietura mâinii utilizatorului de de un smartwatch pentru a consolida confirmarea că apăsarea butonului a fost recunoscută corect.
3. **Extension.** Această tehnică combină ecranele tactile care suportă furnizarea feedback-ului vibrotactil nativ cu vibrații furnizate de un dispozitiv portabil, acesta prezentând utilizatorului informații complementare în loc de o simplă dublare, așa cum am prezentat în descrierea tehnicii anterioare. De exemplu, în timp ce utilizatorul tastează, feedback-ul vibrotactil de pe smartphone însoțește fiecare apăsare de tastă. Cu toate acestea, atunci când interlocutorul tastează în același timp, vibrațiile de pe ceasul inteligent notifică utilizatorul despre acest lucru cu un pattern vibrotactil diferit de cel furnizat prin smartphone.
4. **Expansion.** În acest caz, considerăm ecranul tactil care poate produce feedback vibrotactil, în timp ce vibrațiile furnizate de mai multe dispozitive portabile se extind pentru a transmite informații complementare pe o zonă mai extinsă pe corpului utilizatorului. Un inel și un ceas inteligent pot fi utilizate împreună pentru a oferi o senzație de vibrații care se extinde de la punctul de contact de pe ecran atins, prin deget până la încheietura mâinii.



**Figure 5.1:** A taxonomy of Wear+Touch vibrotactile feedback techniques—*addition*, *reinforcement*, *extension*, and *expansion*—delivered in conjunction on the screen and arm by touchscreens and wearables.

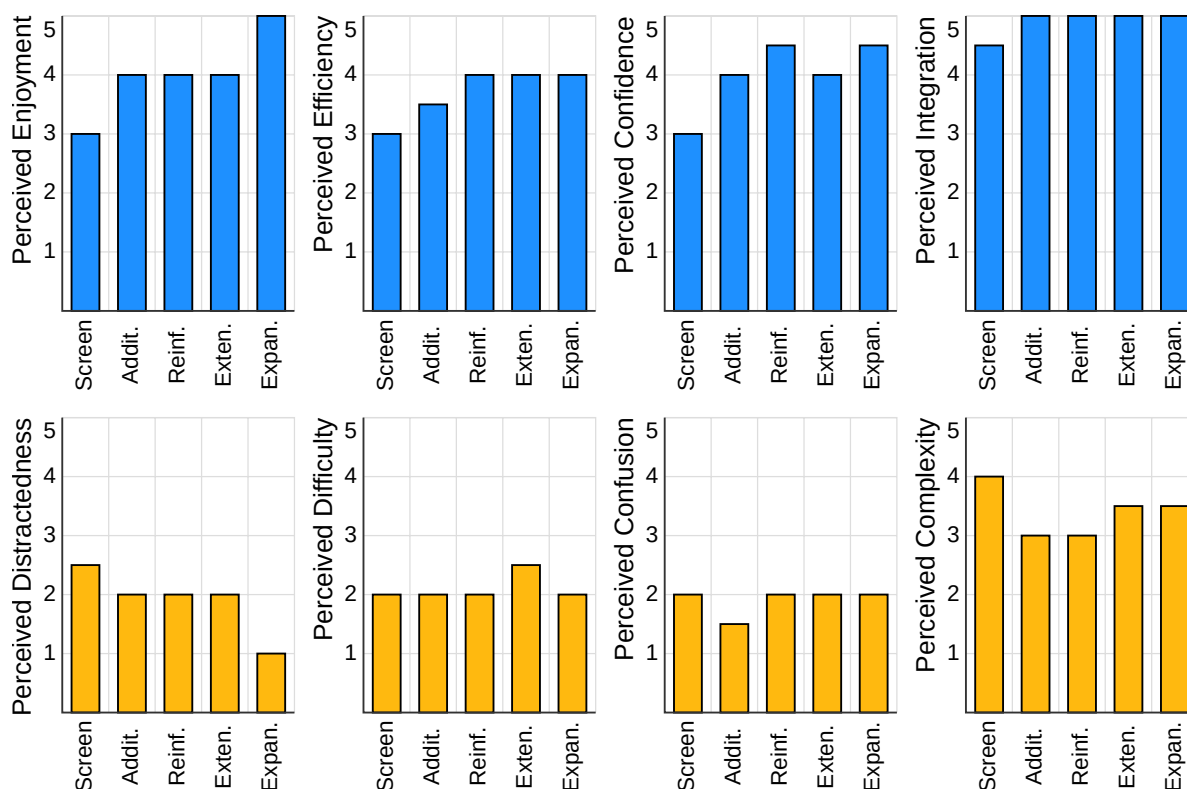
De exemplu, un utilizator care poartă un dispozitiv portabil, ce permite furnizarea vibrațiilor simultane pe degetul arătător, încheietura mâinii și antebraț și utilizează un joc pe telefonul mobil. Evenimentele frecvente care apar în joc sunt însoțite de vibrații pe ecran, iar unele evenimentele specifice, care necesită o atenție sporită din partea utilizatorilor la joc, sunt însoțite de vibrații care se extind de la ecran la deget, încheietură și antebraț.

Taxonomia Wear+Touch introduce un set de patru tehnici specializate, furnizate prin intermediul de dispozitivele purtabile și ecranele tactile pentru a transmite informații sau crea diverse efecte în aplicațiile ce rulează pe ecranele tactile. În acest cadrul acestui framework, feedback-ul vibrotactil de pe deget, încheietură și antebraț pot fi combinate pentru a adăuga, dubla sau completa feedback-ul vibrotactil de pe ecran. Astfel de interacțiuni augmentate cu feedback vibrotactil pot fi implementate cu ușurință utilizând dispozitive purtabile disponibile consumatorilor, după cum s-a arătat în Section 3.2, făcând Wear+Touch fezabil tehnic.

### 5.3 Implementarea aplicației Wear+Touch

În această secțiune prezint implementarea unei aplicații care permite conectarea unor dispozitive purtabile ce permite dezvoltării de aplicații să utilizeze cele patru tehnici descrise în secțiunea precedentă. Pentru utilizatorii finali, aplicația permite gestionarea conexiunilor cu diverse dispozitive purtabile și aplicațiile de pe ecrane tactile într-un singur sistem.

Implementarea aplicației Wear+Touch constă din trei componente principale: `BACKEND`, `WearTouchHaptics.js` API, și o aplicație pe smartphone în calitate de `MIDDLEWARE`. Aplicația Wear+Touch are rol de legătură între dispozitivele portabile ale utilizatorilor și aplicațiile ce rulează pe ecrane tactile și cu care utilizatorul dorește să interacționeze. Rolul `BACKEND` este să inițieze și să mențină canalul de comunicare între diferite părți ale sistemului. Componenta `MIDDLEWARE` este implementată sub forma unei aplicații pe sisteme Android și are rolul de mediator conexiunii între `BACKEND` și dispozitivele portabile ale utilizatorilor. Aplicația care rulează pe ecranul tactil integrează `WearTouchHaptics.js`, un API propus în cadrul Wear+Touch și care permite dezvoltatorilor să ruleze feedback vibrotactil pe dispozitivele purtabile ale utilizatorilor prin intermediul Wear+Touch.



**Figure 5.2:** Evaluarea experienței utilizatorilor (mediane) ale feedback-ului vibrotactil furnizat pe ecranul dispozitivului și tehnicile propuse: *addition*, *reinforcement*, *extension* și *expansion*.

## 5.4 Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil prin intermediul Wear+Touch

### 5.4.1 Experiment

Pentru a înțelege experiența utilizatorilor produsă Wear+Touch am efectuat un studiu cu utilizatori, în care participanții au evaluat cele patru tehnici propuse: *addition vs. reinforcement*, *extension*, și *expansion*. Pentru acest studiu au fost recrutați douăzeci de participanți reprezentând tineri adulți cu vârste cuprinse între 19 și 44 de ani ( $M=22.6$ ,  $SD=6.1$  ani). Similar studiilor descrise în capitolul anterior, a fost urmat o procedură cu măsurători repetate în care a fost considerată o singură variabilă independentă, *TECHNIQUE*, cu cinci condiții: feedback-vibrotactil pe deget (*addition*), pe ecran și dublat pe deget (*reinforcement*), pe ecran și pe deget având un pattern diferit (*extension*), un feedback vibrotactil care începe pe ecranul tactil și se propagă pe deget, încheietura mâinii și pe antebraț (*expansion*), și condiția de control - feedback vibrotactil doar pe ecranul tactil. Pentru a evalua diferitele aspecte ale experienței utilizatorului privind feedback-ul vibrotactil, au fost utilizate aceleași opt măsuri ca în studiile anterioare. Pentru acest experiment a fost folosit un dispozitiv portabil personalizat, care poate produce feedback vibrotactil pe braț utilizând diverse pattern-uri. Participanții au interacționat cu un jocul “Catch the bees, don’t get stung” descris în secțiunea 3.2.5 și care a fost adaptat pentru a rula pe un smartphone, iar gameplay-ul a fost modificat pentru a incorpora cele patru tehnici Wear+Touch.

### 5.4.2 Rezultate

Toate măsurile UX cu conotații pozitive au avut evaluări medii peste nivelul neutru de 3, pe când medianele au valoarea de 4 pentru *ENJOYMENT*, *EFFICIENCY*, *CONFIDENCE*, și *INTEGRATION*. *expansion* a fost evaluată cu cele mai mari scoruri pentru cele patru mărimi cu conotație

pozitivă, în timp ce integrarea dintre atingerea ecranului și feedback-ului vibrotactil corespunzător a fost percepută foarte pozitiv, fiind evaluată cu medii de peste 4.5 pentru toate condițiile; vezi Figura 5.2.

Rezultatele arată că **TECHNIQUE** au un efect statistic semnificativ ( $p < .05$ ) doar pentru două mărimi, **ENJOYMENT** și **EFFICIENCY**. Testele post-hoc (Bonferroni corrections) arată că *reinforcement* și *expansion* au fost evaluate cu scoruri semnificativ mai mari decât cazul când feedback-ul a fost produs doar de ecranul tactil (Mdn=4 și 5 vs. Mdn=3 pentru **ENJOYMENT** și Mdn=4 și 4 vs. Mdn=3 pentru **EFFICIENCY**, respectiv). Aceste constatări dezvăluie o experiență a utilizatorului mai bună când este utilizat feedback-ul vibrotactil prin intermediul dispozitivelor portabile în comparație cu vibrațiile doar pe ecranul tactil.

## 5.5 Concluzii

În acest capitol a fost introdus și descris un set de patru tehnici de utilizare a dispozitivelor portabile pentru a transmite feedback vibrotactil în timpul interacțiunii cu un ecran tactil care poate dispune sau nu de mecanisme de redare a feedbackului vibrotactil. Aici a fost descris cazul în care un dispozitiv portabil redă feedback vibrotactil în locul ecranului tactil (*addition*), cazul în care dispozitivul portabil este utilizat pentru a dubla și consolida feedback-ul vibrotactil redat pe ecran (*reinforcement*), și încă două cazuri în care mai multe dispozitive portabile sunt utilizate împreună cu ecranul tactil pentru a oferi un feedback vibrotactil mai complex (*extension* and *expansion*). A fost propusă și o arhitectură software cu o implementare practică pentru dispozitive mobile ce permite utilizarea celor patru interacțiuni în aplicații interactive. Preferințele utilizatorilor pentru Wear+Touch au fost evaluate într-un studiu în care au fost implicați 20 de utilizatori. Experimentul a comparat cele patru tehnici și a evaluat influența lor asupra diferitelor aspecte ale experienței utilizatorului. Aceste rezultate sugerează că utilizarea feedback-ului vibrotactil complex, transmis prin intermediul dispozitivelor portabile plasate pe diferite parti ale corpului este o strategie eficientă pentru a îmbunătăți experiența utilizatorului la interacțiunea cu ecranele tactile.

Contribuțiile prezentate în acest capitol au fost diseminate în următoarea publicație:

1. **Mihail Terenti**, Radu-Daniel Vatavu. 2024. Wear+Touch: An Exploration of Wearables for Vibrotactile Feedback During Touchscreen Input. International Journal of Human-Computer Interaction, 19 pages. DOI <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2372145> **WOS:001262175000001 Q1, IF: 3.4, 5-Year IF: 4.5 (JCR 2023)**



## 6 Feedback-ul vibrotactil distal pentru augmentarea interacțiunii prin atingere

În acest capitol sunt prezentate trei studii evaluând experiența utilizatorilor la interacțiunea prin atingere, augmentată cu feedback vibrotactil la nivelul *palmei, brațului, și întregului corp*.

### 6.1 Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul mâinii

Cincisprezece persoane, cu vârste cuprinse între 18 și 44 de ani au fost invitate să participe la acest studiu. Participanților li s-a cerut să interacționeze cu harta interactivă prezentată în secțiunea 4.3. Interacțiunea a fost augmentată cu feedback vibrotactil livrat pe ce cele cinci degete și pe partea dorsală a mâinii dominante. În continuare, participanții au evaluat experiența lor privind feedback-ul vibrotactil primit, prin intermediul unui chestionar ce include OVERALL-PREFERENCE, UMUX, și Distal Vibrotactile Feedback User Experience (DVUX) calculat printr-o procedură similară cu cea aplicată pentru UMUX.

Rezultatele dezvăluie o influență semnificativă a regiunii utilizate asupra OVERALL-PREFERENCE ( $F_{(6,84)}=6.373$ ,  $p<.001$ ,  $\eta_p^2=.31$ ), iar *index finger* fiind cel mai preferat a primi feedback.

### 6.2 Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul brațelor

Pentru a explora în continuare experiența utilizatorului cu feedback haptic pe ecrane tactile, a fost efectuat un alt experiment. De această dată, m-am concentrat pe *degetul arătător, încheietură și antebraț*, regiuni care sunt mai îndepărtate de punctul de atingere în comparație cu locațiile studiate în experimentul anterior. Alte cincisprezece persoane, cu vârste cuprinse între 22 și 44 de ani, au fost invitate pentru a participa la acest experiment. Pentru acest experiment au fost folosite aceleași dispozitive și proceduri ca și în primul experiment.

Rezultatele arată un efect semnificativ al REGIUNEA asupra OVERALL-PREFERENCE ( $F_{(6,84)}=2.454$ ,  $p=.031$ ,  $\eta_p^2=.15$ ), iar testele post-hoc arată diferențe semnificative între *degetul arătător al mâinii dominante și none* ( $p=.016$ ), dar și *încheietura mâinii dominante și none* ( $p=.049$ ), respectiv. Totuși, nu a fost identificată o influență semnificativă a REGIUNEA asupra UMUX ( $F_{(6,84)}=1.232$ ,  $p=.298$ , *n.s*) sau UNPREDICTABILITY ( $F_{(6,84)}=1.767$ ,  $p=.116$ , *n.s*).

### 6.3 Experiența utilizator a feedback-ului vibrotactil distal la nivelul întregului corp

Pentru a obține și mai multe detalii în această direcție, a fost efectuat un al treilea experiment, în care s-a extins aria de interes la nivelul *întregului corp: degetul arătător, tâmpla stângă, tâmpla dreaptă, abdomen, piciorul stâng, piciorul drept, și none*. Cincisprezece participanți cu vârste între 20 și 34 au fost invitați la acest experiment. Nici unul dintre aceștia nu a participat la studiile anterioare. În acest experiment au fost utilizate aceleași dispozitive și proceduri ca în cele două experimente anterioare.

Rezultatele arată o influență semnificativă a REGIUNEA asupra OVERALL-PREFERENCE ( $F_{(6,84)}=4.004$ ,  $p<.001$ ,  $\eta_p^2=.22$ ) și diferențe semnificative între *degetul arătător* (Mdn=7, M=6.2) și celelalte condiții ( $p<.05$  cu FDR), cu excepția *abdomenului* (Mdn=6, M=4.7,  $p=.083$ , *n.s*).

## 7 Concluzii

Feedback-ul vibrotactil îmbunătățește interacțiunea utilizatorilor prin furnizarea de răspunsuri tactile imediate, utilizarea mai simplă și cu o capacitate de reacție sporită în diverse aplicații. În această lucrare de doctorat m-am axat în primul rând pe feedback-ul vibrotactil din perspectiva unui dezvoltator software, care dorește să integreze feedback vibrotactil aplicațiile ce rulează pe dispozitive mobile și portabile. În acest sens, am dezvoltat VIREO, un instrument software ce utilizează tehnologiile web și permite proiectarea, stocarea, partajarea și integrarea pattern-urilor multimodale în aplicațiile utilizatorilor care rulează pe diverse dispozitive mobile și portabile. VIREO permite specificarea pattern-urilor vibrotactile, care sunt definite ca o variație a intensității vibrației în timp, ceea ce reprezintă o abstractizare simplă, dar generală și flexibilă. VIREO este destinat în primul rând pe mediile web și se bazează pe API-uri JavaScript și Web, cum ar fi Vibration API pentru redarea componentelor vibrotactile și Audio API pentru redarea componentelor audio.

Mai mult, această lucrare de doctorat prezintă rezultatele obținute empiric în urma efectuării a opt studii cu utilizatori [76–78, 80], care caracterizează diverse aspecte a experienței utilizatorilor la interacțiunea cu ecrane tactile în diverse medii și condiții, și augmentate cu feedback vibrotactil. Feedback-ul vibrotactil distal a fost cercetat detaliat prin examinarea a 16 locații diferite pe corpul utilizatorilor. În acest sens, au fost efectuate trei studii cu utilizatori în care au fost examinate feedback-ul vibrotactil livrat la nivelul *palmei*, *brațelor*, și *corpului* când utilizatorii interacționează cu ecrane tactile.

În concluzie, aceasta lucrare prezintă rezultatele mai multor experimente efectuate pentru a înțelege experiența utilizatorului la interacțiunea cu ecrane tactile augmentate cu vibrotactil distal în diverse regiuni ale corpului progresiv mai îndepărtate de punctul de atingere. Pe lângă confirmarea unor rezultate anterioare cu privire la preferințele pentru feedback vibrotactil livrat pe degetul arătător utilizat pentru intrarea tactilă, rezultatele au scos la iveală noi informații despre 16 părți diferite ale corpului, inclusiv locații din partea opusă față de mâna dominantă utilizată pentru atingerea ecranelor. Această abordare este deosebit de relevantă pentru ecranele tactile care nu dispun de mecanisme incorporate pentru redarea feedbackului vibrotactil și pentru care am prezentat noi direcții de cercetare. Având în vedere diversitatea și disponibilitatea tot mai mare a dispozitivelor mobile și portabile ce pot reda feedback vibrotactil și interesul tot mai mare pentru mediile de realitate mixtă și virtuală în care feedback-ul tactil joacă un rol cheie pentru sporirea imersiunii, anticipez multe progrese privind aceste direcții în viitor.

# Mulțumiri

Această teză de doctorat a fost realizată în cadrul Laboratorului de Mașini Inteligente și Vizualizare a Informației (MintViz) din cadrul centrului integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii și Sisteme Distribuite de fabricație și control (MANSiD 671/09.04.2015) al Universității “Ștefan cel Mare” din Suceava. De asemenea, această teză a fost susținută de proiectul “Multimodal Haptic With Touch Devices”, H2020-MSCA-ITN-2019, Grant Agreement 860114.

# Bibliografie

- [1] Haptrix - create share haptic experiences. <https://www.haptrix.com>.
- [2] Jessalyn Alvina, Shengdong Zhao, Simon T. Perrault, Maryam Azh, Thijs Roumen, and Morten Fjeld. OmniVib: Towards cross-body spatiotemporal vibrotactile notifications for mobile phones. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, page 2487–2496, New York, NY, USA, 2015. ACM. doi:10.1145/2702123.2702341.
- [3] Khalil J. Anderson, Theodore Dubiel, Kenji Tanaka, Marcelo Worsley, Cody Poultney, and Steve Brenneman. Chemistry Pods: A mutlimodal real time and retrospective tool for the classroom. In *2019 International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3340555.3358662.
- [4] Muhammad Zeeshan Baig and Manolya Kavakli. Multimodal systems: Taxonomy, methods, and challenges, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.03813>, arXiv:2006.03813.
- [5] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *J. Usability Studies*, 4(3):114–123, 2009. URL: <https://uxpajournal.org/determining-what-individual-sus-scores-mean-adding-an-adjective-rating-scale>.
- [6] Aaron Bangor, Philip T. Kortum, and James T. Miller. An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 24(6):574–594, 2008. URL: <https://doi.org/10.1080/10447310802205776>.
- [7] Michael Barr. Pulse width modulation. *Embedded Systems Programming*, pages 103–104, September 2001.
- [8] Cagatay Basdogan, Frederic Giraud, Vincent Levesque, and Seungmoon Choi. A review of surface haptics: Enabling tactile effects on touch surfaces. *IEEE Transactions on Haptics*, 13(3):450–470, 2020. doi:10.1109/toh.2020.2990712.
- [9] Carlos Bermejo and Pan Hui. A survey on haptic technologies for mobile augmented reality. *ACM Comput. Surv.*, 54(9), oct 2021. doi:10.1145/3465396.
- [10] Raoul Bickmann, Celine Tran, Ninja Ruesch, and Katrin Wolf. Haptic illusion glove: A glove for illusionary touch feedback when grasping virtual objects. In *Proceedings of Mensch Und Computer 2019, MuC'19*, page 565–569, New York, NY, USA, 2019. ACM. doi:10.1145/3340764.3344459.
- [11] Laurens Boer, Anna Vallgård, and Ben Cahill. Giving form to a hedonic haptics player. In *Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems, DIS '17*, page 903–914, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3064663.3064792.
- [12] Elodie Bouzbib, Gilles Bailly, Sinan Haliyo, and Pascal Frey. "Can I Touch This?": Survey of virtual reality interactions via haptic solutions. In *Proceedings of the 32nd Conference on l'Interaction Homme-Machine, IHM '21*, New York, NY, USA, 2022. ACM. doi:10.1145/3450522.3451323.
- [13] Pearl Brereton, Barbara A. Kitchenham, David Budgen, Mark Turner, and Mohamed Khalil. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, 80(4):571–583, 2007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009>.
- [14] Stephen Brewster, Faraz Chohan, and Lorna Brown. Tactile feedback for mobile interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07*, page 159–162, New York, NY, USA, 2007. ACM. doi:10.1145/1240624.1240649.
- [15] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. In Patrick W. Jordan, B. Thomas, Ian Lyall McClelland, and Bernard Weerdmeester, editors, *Usability Evaluation in Industry*, pages 189–194. CRC Press, London, UK, 1996. URL: <https://doi.org/10.1201/9781498710411-35>.
- [16] Adrian-Vasile Catană. Smart clothing and on-device gesture recognition for controlling smart buildings systems. In *2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, pages 147–151, 2024. doi:10.1109/DAS61944.2024.10541186.

- [17] Adrian-Vasile Catană and Radu-Daniel Vatavu. Fingerhints: Understanding users' perceptions of and preferences for on-finger kinesthetic notifications. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3544548.3581022.
- [18] Adam Cheyer and Luc Julia. MVIEW: Multimodal tools for the video analyst. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '98, page 55–62, New York, NY, USA, 1998. ACM. doi:10.1145/268389.268399.
- [19] Pei-Yu (Peggy) Chi and Yang Li. Weave: Scripting cross-device wearable interaction. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 3923–3932, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702451>.
- [20] Ben Clark, Oliver S. Schneider, Karon E. MacLean, and Hong Z. Tan. Predictable and distinguishable morphing of vibrotactile rhythm. In *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 84–89, 2017. doi:10.1109/WHC.2017.7989881.
- [21] Ashley Colley, Lasse Virtanen, Timo Ojala, and Jonna Häkkinen. Guided touch screen: enhanced eyes-free interaction. In *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays*, PerDis '16, page 80–86, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2914920.2915008.
- [22] Fabien Danieau, Philippe Guillotel, Olivier Dumas, Thomas Lopez, Bertrand Leroy, and Nicolas Mollet. HFX Studio: Haptic editor for full-body immersive experiences. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3281505.3281518.
- [23] Donald Degraen, Bruno Fruchard, Frederik Smolders, Emmanouil Potetsianakis, Seref Güngör, Antonio Krüger, and Jürgen Steimle. Weirding haptics: In-situ prototyping of vibrotactile feedback in virtual reality through vocalization. In *Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, page 936–953, New York, NY, USA, 2021. ACM. doi:10.1145/3472749.3474797.
- [24] Haiwei Dong, Yu Gao, Hussein Al Osman, and Abdulmotaleb El Saddik. Development of a web-based haptic authoring tool for multimedia applications. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Multimedia*, ISM '15, pages 13–20, 2015. doi:10.1109/ISM.2015.71.
- [25] Bruno Dumas, Denis Lalanne, and Sharon Oviatt. Multimodal interfaces: A survey of principles, models and frameworks. In Denis Lalanne and Jürg Kohlas, editors, *Human Machine Interaction: Research Results of the MMI Program*, pages 3–26. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-00437-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00437-7_1).
- [26] Mohamad Eid, Sheldon Andrews, Atif Alamri, and Abdulmotaleb El Saddik. HAMLAT: A HAML-based authoring tool for haptic application development. In Manuel Ferre, editor, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pages 857–866, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3\\_108](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_108).
- [27] Hesham Elsayed, Martin Weigel, Florian Müller, Martin Schmitz, Karola Marky, Sebastian Günther, Jan Riemann, and Max Mühlhäuser. VibroMap: Understanding the spacing of vibrotactile actuators across the body. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 4(4), dec 2020. doi:10.1145/3432189.
- [28] M.J. Enriquez and K.E. MacLean. The haptic editor: a tool in support of haptic communication research. In *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, HAPTICS '03, pages 356–362, 2003. doi:10.1109/HAPTIC.2003.1191310.
- [29] Cathy Mengying Fang and Chris Harrison. Retargeted self-haptics for increased immersion in VR without instrumentation. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, page 1109–1121, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3472749.3474810.

- [30] Kraig Finstad. The usability metric for user experience. *Interacting with Computers*, 22:323–327, 2010. doi:10.1016/j.intcom.2010.04.004.
- [31] Xiaochi Gu, Yifei Zhang, Weize Sun, Yuanzhe Bian, Dao Zhou, and Per Ola Kristensson. Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, page 1991–1995, New York, NY, USA, 2016. ACM. doi:10.1145/2858036.2858487.
- [32] Sebastian Günther, Florian Müller, Dominik Schön, Omar Elmoghazy, Max Mühlhäuser, and Martin Schmitz. Therminator: Understanding the interdependency of visual and on-body thermal feedback in virtual reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, page 1–14, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3313831.3376195.
- [33] Insook Han and John B. Black. Incorporating haptic feedback in simulation for learning physics. *Computers Education*, 57(4):2281–2290, 2011. doi:10.1016/j.compedu.2011.06.012.
- [34] Jay Henderson, Jeff Avery, Laurent Grisoni, and Edward Lank. Leveraging distal vibrotactile feedback for target acquisition. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, page 1–11, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3290605.3300715.
- [35] Kyungpyo Hong, Jaebong Lee, and Seungmoon Choi. Demonstration-based vibrotactile pattern authoring. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2460625.2460660.
- [36] Da-Yuan Huang, Liwei Chan, Xiao-Feng Jian, Chiun-Yao Chang, Mu-Hsuan Chen, De-Nian Yang, Yi-Ping Hung, and Bing-Yu Chen. VibroPlay: Authoring three-dimensional spatial-temporal tactile effects with direct manipulation. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Emerging Technologies*, SA '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2988240.2988250.
- [37] Ali Israr, Siyan Zhao, and Oliver Schneider. Exploring embedded haptics for social networking and interactions. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, page 1899–1904, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2702613.2732814.
- [38] Milad Jamalzadeh, Yosra Rekik, Laurent Grisoni, Radu-Daniel Vatavu, Gualtiero Volpe, and Alexandru Dancu. Effects of moving speed and phone location on eyes-free gesture input with mobile devices. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14142, pages 469–478, Cham, 2023. Springer. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42280-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42280-5_30).
- [39] Yeongmi Kim, Jongeun Cha, Jeha Ryu, and Ian Oakley. A tactile glove design and authoring system for immersive multimedia. *IEEE MultiMedia*, 17(3):34–45, 2010. doi:10.1109/MMUL.2010.5692181.
- [40] Frederick A.A. Kingdom and Nicolaas Prins. *Psychophysics: A Practical Introduction*. Academic Press, UK, 2nd edition, 2016. doi:10.1016/C2012-0-01278-1.
- [41] Robert Kovacs, Eyal Ofek, Mar Gonzalez Franco, Alexa Fay Siu, Sebastian Marwecki, Christian Holz, and Mike Sinclair. Haptic PIVOT: On-demand handhelds in VR. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, page 1046–1059, New York, NY, USA, 2020. ACM. doi:10.1145/3379337.3415854.
- [42] Laurens R. Krol, Dzmitry Aliakseyeu, and Sriram Subramanian. Haptic feedback in remote pointing. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, page 3763–3768, New York, NY, USA, 2009. ACM. doi:10.1145/1520340.1520568.
- [43] Khanh-Duy Le, Kening Zhu, Tomasz Kosinski, Morten Fjeld, Maryam Azh, and Shengdong Zhao. Ubitile: A finger-worn I/O device for tabletop vibrotactile pattern authoring. In *Proceedings of*

- the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, NordiCHI '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2971485.2996721.*
- [44] Jaebong Lee and Seungmoon Choi. Evaluation of vibrotactile pattern design using vibrotactile score. In *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium, HAPTICS '12*, pages 231–238, 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/HAPTIC.2012.6183796>.
- [45] Jaebong Lee and Seungmoon Choi. Real-time perception-level translation from audio signals to vibrotactile effects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2470654.2481354.*
- [46] James R. Lewis. IBM computer usability satisfaction questionnaires: Psychometric evaluation and instructions for use. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1):57–78, 1995. doi:10.1080/10447319509526110.
- [47] James R. Lewis. Measuring perceived usability: The csuq, sus, and umux. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 34(12):1148–1156, 2018. doi:10.1080/10447318.2017.1418805.
- [48] Alessandro Liberati, Douglas Altman, Jennifer Tetzlaff, Cynthia Mulrow, Peter Gøtzsche, John Ioannidis, Mike Clarke, P.J. Devereaux, Jos Kleijnen, and David Moher. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62:e1–34, 08 2009. doi:10.1016/j.jclinepi.2009.06.006.
- [49] Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Nakatani Masashi, Yoshihiro Tanaka, and Kouta Minamizawa. HapticAid: wearable haptic augmentation system for enhanced, enchanted and empathised haptic experiences. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Emerging Technologies, SA '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2988240.2988253.*
- [50] Tomosuke Maeda, Shigeo Yoshida, Takaki Murakami, Kenroh Matsuda, Tomohiro Tanikawa, and Hiroyuki Sakai. Fingeret: A wearable fingerpad-free haptic device for mixed reality. In *Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '22, New York, NY, USA, 2022. ACM. doi:10.1145/3565970.3567703.*
- [51] Jonatan Martinez, Adam Harwood, Hannah Limerick, Rory Clark, and Orestis Georgiou. Mid-air haptic algorithms for rendering 3D shapes. In *2019 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, pages 1–6, 2019. doi:10.1109/HAVE.2019.8921211.
- [52] Jonatan Martínez, Arturo S. García, Miguel Oliver, José P. Molina, and Pascual González. VITAKI: A vibrotactile prototyping toolkit for virtual reality and video games. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(11):855–871, 2014. doi:10.1080/10447318.2014.941272.
- [53] Marilyn Rose McGee-Lennon, Andrew Ramsay, David McGookin, and Philip Gray. User evaluation of OIDE: A rapid prototyping platform for multimodal interaction. In *Proceedings of the 1st Symposium on Engineering Interactive Computing Systems, EICS '09*, pages 237–242, New York, NY, USA, 2009. ACM. URL: <https://doi.org/10.1145/1570433.1570476>.
- [54] Jocelyn Monnoyer, Laurence Willemet, and Michael Wiertlewski. Rapid change of friction causes the illusion of touching a receding surface. *J. Royal Soc. Interface.*, 20(199):20220718, 2023. doi:10.1098/rsif.2022.0718.
- [55] Sabrina Panëels, Margarita Anastassova, and Lucie Brunet. TactiPEd: Easy prototyping of tactile patterns. In Paula Kotzé, Gary Marsden, Gitte Lindgaard, Janet Wesson, and Marco Winckler, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2013*, pages 228–245, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.
- [56] Gunhyuk Park and Seungmoon Choi. A physics-based vibrotactile feedback library for collision events. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(3):325–337, 2017. doi:10.1109/TOH.2016.2614804.

- [57] Gunhyuk Park, Seungmoon Choi, Kyunghun Hwang, Sunwook Kim, Jaechon Sa, and Moonchae Joung. Tactile effect design and evaluation for virtual buttons on a mobile device touchscreen. In *Proceedings of the 13th MobileHCI*, page 11–20, New York, NY, USA, 2011. ACM. doi: [10.1145/2037373.2037376](https://doi.org/10.1145/2037373.2037376).
- [58] Taezoon Park, Jihong Hwang, and Wonil Hwang. Facilitating the design of vibration for handheld devices. In Julie A. Jacko, editor, *Human-Computer Interaction. Novel Interaction Methods and Techniques*, pages 496–502, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02577-8\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02577-8_54).
- [59] Evan Pezent, Brandon Cambio, and Marcia K. O’Malley. Syntacts: Open-source software and hardware for audio-controlled haptics. volume 14, pages 225–233, 2021. doi: [10.1109/TOH.2020.3002696](https://doi.org/10.1109/TOH.2020.3002696).
- [60] Pornthep Preechayasomboon and Eric Rombokas. Haplets: Finger-worn wireless and low-encumbrance vibrotactile haptic feedback for virtual and augmented reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 2021. doi: [10.3389/frvir.2021.738613](https://doi.org/10.3389/frvir.2021.738613).
- [61] Jonghyun Ryu and Seungmoon Choi. posvibeditor: Graphical authoring tool of vibrotactile patterns. In *2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pages 120–125, 2008. doi: [10.1109/HAVE.2008.4685310](https://doi.org/10.1109/HAVE.2008.4685310).
- [62] Ovidiu-Andrei Schipor, Radu-Daniel Vatavu, and Wenjun Wu. SAPIENS: Towards software architecture to support peripheral interaction in smart environments. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 3(EICS), June 2019. doi: [10.1145/3331153](https://doi.org/10.1145/3331153).
- [63] Oliver S. Schneider, Ali Israr, and Karon E. MacLean. Tactile animation by direct manipulation of grid displays. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST ’15, page 21–30, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery. doi: [10.1145/2807442.2807470](https://doi.org/10.1145/2807442.2807470).
- [64] Oliver S. Schneider and Karon E. MacLean. Improvising design with a Haptic Instrument. In *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, HAPTICS ’14, pages 327–332, 2014. doi: [10.1109/HAPTICS.2014.6775476](https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2014.6775476).
- [65] Oliver S. Schneider and Karon E. MacLean. Studying design process and example use with Macaron, a web-based vibrotactile effect editor. In *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, HAPTICS ’16, pages 52–58, 2016. doi: [10.1109/HAPTICS.2016.7463155](https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2016.7463155).
- [66] Nicu Sebe. Multimodal interfaces: Challenges and perspectives. *Journal of Ambient Intelligence and smart environments*, 1(1):23–30, 2009.
- [67] Hasti Seifi, Kailun Zhang, and Karon E. MacLean. VibViz: Organizing, visualizing and navigating vibration libraries. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 254–259, 2015. doi: [10.1109/WHC.2015.7177722](https://doi.org/10.1109/WHC.2015.7177722).
- [68] Sang-Won Shim and Hong Z. Tan. palmScape: Calm and pleasant vibrotactile signals. In Aaron Marcus and Elizabeth Rosenzweig, editors, *Design, User Experience, and Usability. Interaction Design*, pages 532–548, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [69] Ali Shtarbanov. FlowIO development platform – the pneumatic ”Raspberry Pi” for soft robotics. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference*, New York, NY, USA, 2021. ACM. URL: <https://doi.org/10.1145/3411763.3451513>.
- [70] Andy P. Siddaway, Alex M. Wood, and Larry V. Hedges. How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*, 70(1):747–770, 2019. doi: [10.1146/annurev-psych-010418-102803](https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803).
- [71] Mike Sinclair, Eyal Ofek, Mar Gonzalez-Franco, and Christian Holz. CapstanCrunch: A haptic VR controller with user-supplied force feedback. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’19, page 815–829, New York, NY, USA, 2019. ACM. doi: [10.1145/3332165.3347891](https://doi.org/10.1145/3332165.3347891).



- [72] Tanay Singhal and Oliver Schneider. Juicy haptic design: Vibrotactile embellishments can improve player experience in games. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3411764.3445463.
- [73] Katja Suhonen, Kaisa Väänänen-Vainio-Mattila, and Kalle Mäkelä. User experiences and expectations of vibrotactile, thermal and squeeze feedback in interpersonal communication. In *The 26th BCS Conference on Human Computer Interaction 26*, pages 205–214, 2012.
- [74] C. Swindells, E. Maksakov, K.E. MacLean, and V. Chung. The role of prototyping tools for haptic behavior design. In *Proceedings of the 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 161–168, 2006. doi:10.1109/HAPTIC.2006.1627084.
- [75] Colin Swindells, Seppo Pietarinen, and Arto Viitanen. Medium fidelity rapid prototyping of vibrotactile haptic, audio and video effects. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pages 515–521, 2014. doi:10.1109/HAPTICS.2014.6775509.
- [76] Mihail Terenti, Maria Casado-Palacios, Monica Gori, and Radu-Daniel Vatavu. What is the user experience of eyes-free touch input with vibrotactile feedback decoupled from the touchscreen? In *Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3613905.3650804.
- [77] Mihail Terenti, Matthieu Rupin, Baptiste Reynal, Laurent Grisoni, and Radu-Daniel Vatavu. The eclectic user experience of combined on-screen and on-wrist vibrotactile feedback in touchscreen input. In *Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3613905.3650835.
- [78] Mihail Terenti and Radu-Daniel Vatavu. Measuring the user experience of vibrotactile feedback on the finger, wrist, and forearm for touch input on large displays. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. ACM. URL: <https://doi.org/10.1145/3491101.3519704>.
- [79] Mihail Terenti and Radu-Daniel Vatavu. VIREO: Web-based graphical authoring of vibrotactile feedback for interactions with mobile and wearable devices. *International Journal of Human-Computer Interaction*, pages 1–19, 2022. doi:10.1080/10447318.2022.2109584.
- [80] Mihail Terenti and Radu-Daniel Vatavu. Wear+Touch: An exploration of wearables for vibrotactile feedback during touchscreen input. *International Journal of Human-Computer Interaction*, pages 1–19, 2024. doi:10.1080/10447318.2024.2372145.
- [81] Yuntao Wang, Chun Yu, Jie Liu, and Yuanchun Shi. Understanding performance of eyes-free, absolute position control on touchable mobile phones. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, page 79–88, New York, NY, USA, 2013. ACM. doi:10.1145/2493190.2493215.
- [82] Graham Wilson, Martin Halvey, Stephen A. Brewster, and Stephen A. Hughes. Some like it hot: thermal feedback for mobile devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, page 2555–2564, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1978942.1979316.
- [83] André Zenner, Donald Degraen, Florian Daiber, and Antonio Krüger. Demonstration of Drag:On - a VR controller providing haptic feedback based on drag and weight shift. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, New York, NY, USA, 2020. ACM. doi:10.1145/3334480.3383145.



Universitatea  
Ștefan cel Mare  
Suceava

Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava

720229, Suceava, Romania

str. Universității nr. 13

tel: 0230 216 147

0230 522 978

fax: 0230 520 080