

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC IN EXTENSO

Etapa nr. 2, anul 2022

TITLUL PROIECTULUI: Algoritmi, tehnici și aplicații bazate pe tehnologii radar pentru noi tipuri de interacțiuni cu sisteme informatice (RadarSense: Radar-based Sensing Algorithms, Techniques, and Applications for Novel Interactions with Computing Systems)

CONTRACT NR.: 1BM/2021, **COD PROIECT:** PN-III-CEI-BIM-PBE-2020-0001

PARTENER ROMÂN: Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, Prof. Radu-Daniel Vatavu

PARTENER STRĂIN: Université catholique de Louvain, Prof. Jean Vanderdonckt

DURATA PROIECTULUI BILATERAL: 24 luni (ianuarie 2021 – decembrie 2022)

PAGINA WEB PROIECT: <http://www.eed.usv.ro/mintviz/projects/RadarSense>

CUPRINS

OBIECTIVELE GENERALE URMĂRITE.....	2
OBIECTIVELE FAZEI DE EXECUȚIE.....	2
DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ CU PUNEREA ÎN EVIDENȚĂ A REZULTATELOR ANUALE ȘI GRADUL DE REALIZARE A OBIECTIVELOR (SE VOR INDICA REZULTATELE)	2
Evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor radar	2
Aplicații care implementează interacțiuni cu gesturi radar	5
Implementarea colaborării dintre parteneri	9
Publicații științifice ale etapei	10
REZUMAT EXECUTIV AL ACTIVITĂȚILOR REALIZATE ÎN PERIOADA DE IMPLEMENTARE	13
POSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE ECONOMICĂ A REZULTATELOR OBȚINUTE	14
REFERINȚE	14

OBIECTIVELE GENERALE URMĂRITE

Prin acest proiect de cooperare bilaterală dorim să propunem și să implementăm noi algoritmi și aplicații software pentru a demonstra interacțiuni cu sistemele informatice bazate pe gesturi ce pot fi detectate cu ajutorul senzorilor de tip radar. Proiectul este derulat în cadrul parteneriatului dintre Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava (Laboratorul de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației, MintViz, <http://www.eed.usv.ro/mintviz>) și Université catholique de Louvain (Louvain Interaction Lab, <https://uclouvain.be/fr/repertoires/jean.vanderdonckt>). Obiectivul general al proiectului este reprezentat de susținerea colaborării științifice dintre cei doi parteneri în vederea realizării de activități de cercetare în comun privind interacțiunea cu sistemele informatice pe bază de gesturi achiziționate folosind tehnologii radar. Obiectivele specifice ale colaborării sunt:

- O1. Realizarea unei analize critice privind tehnicile interactive și aplicațiile din literatura științifică pentru controlul gestual al sistemelor informatice folosind tehnologii radar.
- O2. Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor achiziționate și reprezentate sub formă de semnale radar.
- O3. Demonstrarea interacțiunilor bazate pe gesturi achiziționate cu echipamente radar în diverse aplicații practice, cum ar fi controlul ecranelor la distanță și augmentarea interacțiunii cu suprafețele tactile.

OBIECTIVELE FAZEI DE EXECUȚIE

Conform planului de realizare a proiectului de cooperare bilaterală, Etapa nr. 2 aferentă anului 2022, intitulată *“Dezvoltare aplicații: control gestual bazat pe radar pentru sisteme interactive”*, cuprinde activități privind proiectarea de aplicații care implementează interacțiunea prin gesturi achiziționate cu senzori radar (obiectivul O3). Rezultatele așteptate pentru Etapa nr. 2 de implementare a proiectului sunt: (i) raportul de cercetare al etapei (acest raport) și (ii) publicații științifice (trei lucrări științifice au fost publicate și sunt disponibile în bazele de date ACM Digital Library, DBLP și Scopus, dintre care o lucrare a fost distinsă cu **Best Paper Award** în cadrul conferinței ACM Intelligent User Interfaces, IUI '22; de asemenea, alte două lucrări se află în evaluare).

DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ CU PUNEREA ÎN EVIDENȚĂ A REZULTATELOR ANUALE ȘI GRADUL DE REALIZARE A OBIECTIVELOR (SE VOR INDICA REZULTATELE)

Evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor radar

În cadrul etapei anterioare, am propus un algoritm de recunoaștere a gesturilor achiziționate cu senzori radar, pentru care am introdus operații specifice de procesare a semnalelor radar, și anume: transformata Fourier rapidă, eliminarea efectelor de antenă, eliminarea fundalului, transformata Fourier inversă, izolarea unei ferestre temporale a semnalului (*en.*: time gating), extragerea caracteristicilor, respectiv filtrarea semnalului folosind o fereastră temporală de dimensiune fixă. În această etapă, pentru evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor, am folosit senzorul radar Walabot¹ pentru a achiziționa un set de K=16 gesturi distincte (ilustrate în figura 1) de la N=30 de participanți (13 femei și 17 bărbați) cu vârste cuprinse între 18 și 58 ani (M=27.4, SD=12.6

¹ <https://walabot.com>

ani). Într-un prim pas al evaluării, am examinat cele mai bune combinații de perechi de antene din cadrul senzorului radar Walabot. Ulterior, am examinat efectul operațiilor specifice de procesare a gesturilor radar, specificate în cadrul algoritmului nostru (Sluÿters *et al.* 2022a; Sluÿters *et al.* 2022b), asupra ratei de recunoaștere a gesturilor și timpului de execuție necesar procesului de recunoaștere.

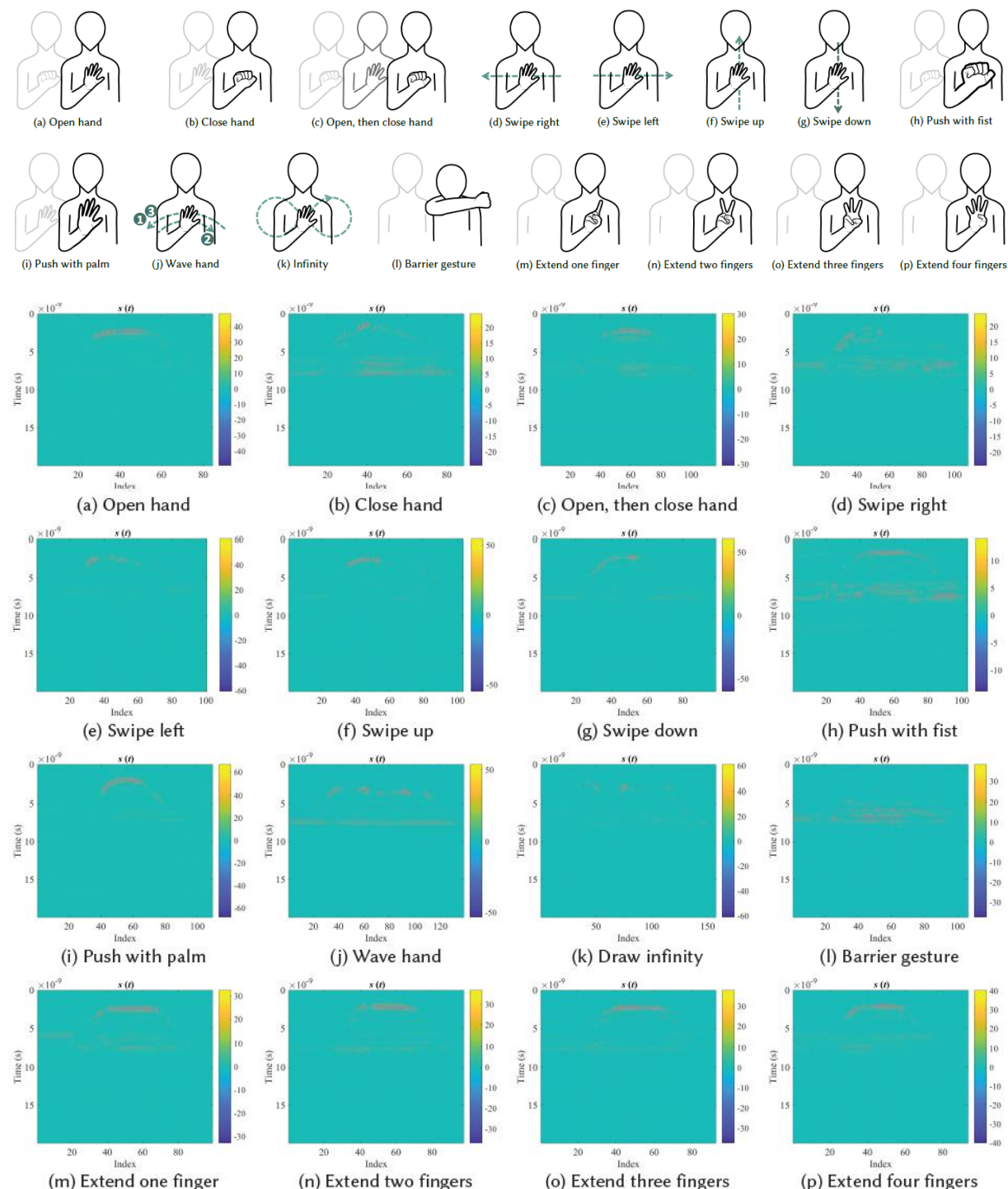


Figura 1. Setul de gesturi folosit pentru evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere: reprezentare vizuală a gesturilor (sus) și date achiziționate cu senzorul radar Walabot (jos).

Tabelul 1 prezintă rezultatele evaluării, pentru care am obținut un maxim al ratei de recunoaștere de 74.3% cu un timp de execuție de 2.2ms. Figura 2 detaliază aceste rezultate pentru gesturile specifice folosite în cadrul evaluării. Spre deosebire de alte lucrări din literatura științifică, pentru care am realizat o analiză corespunzătoare în raportul etapei anterioare, setul de gesturi folosit în cadrul evaluării noastre conține un număr mare ($K=16$) de gesturi distincte.

Tabel 1. Rata de recunoaștere (%) și timpul de execuție (ms) pentru gesturi reprezentate folosind semnale radar în funcție de diverse configurații ale algoritmului de recunoaștere.

AP	FFT		Background subtraction		Inversion		Filtering	
	RR (M, SD) [%]	ET [ms]	RR (M, SD) [%]	ET [ms]	RR (M, SD) [%]	ET [ms]	RR (M, SD) [%]	ET [ms]
1st best	73.8 (26.6)	2.2	74.3 (20.1)	2.2	58.1 (29.3)	0.2	57.8 (29.4)	0.2
2nd best	72.1 (21.1)	4.0	74.2 (18.3)	2.9	55.7 (31.1)	0.2	55.6 (31.3)	0.2
3rd best	72.1 (23.7)	4.6	72.7 (26.9)	3.6	55.6 (31.9)	0.2	55.3 (32.1)	0.2
4th best	71.8 (27.3)	3.3	72.4 (25.8)	3.5	55.1 (25.8)	0.1	54.8 (25.2)	0.1
2	48.8 (27.0)	0.8	51.9 (24.1)	0.8	36.8 (27.4)	0.1	37.8 (23.2)	0.1
3	47.7 (31.1)	0.8	48.0 (29.7)	0.9	25.8 (27.7)	0.1	25.6 (27.2)	0.1
4	49.1 (25.5)	0.8	54.3 (30.7)	0.8	25.3 (21.7)	0.1	25.9 (21.7)	0.1
6	44.6 (31.0)	0.8	46.3 (33.4)	0.9	19.3 (18.1)	0.1	18.9 (17.0)	0.1
7	51.7 (26.1)	0.8	49.3 (27.8)	0.9	23.2 (23.4)	0.1	23.4 (23.4)	0.1
10	56.6 (29.7)	0.8	52.9 (25.9)	0.8	22.0 (21.9)	0.1	21.9 (21.8)	0.1
2, 3, 4, 6, 7, 10	72.1 (23.7)	4.6	70.3 (26.2)	4.3	52.4 (29.6)	0.2	52.2 (29.4)	0.2

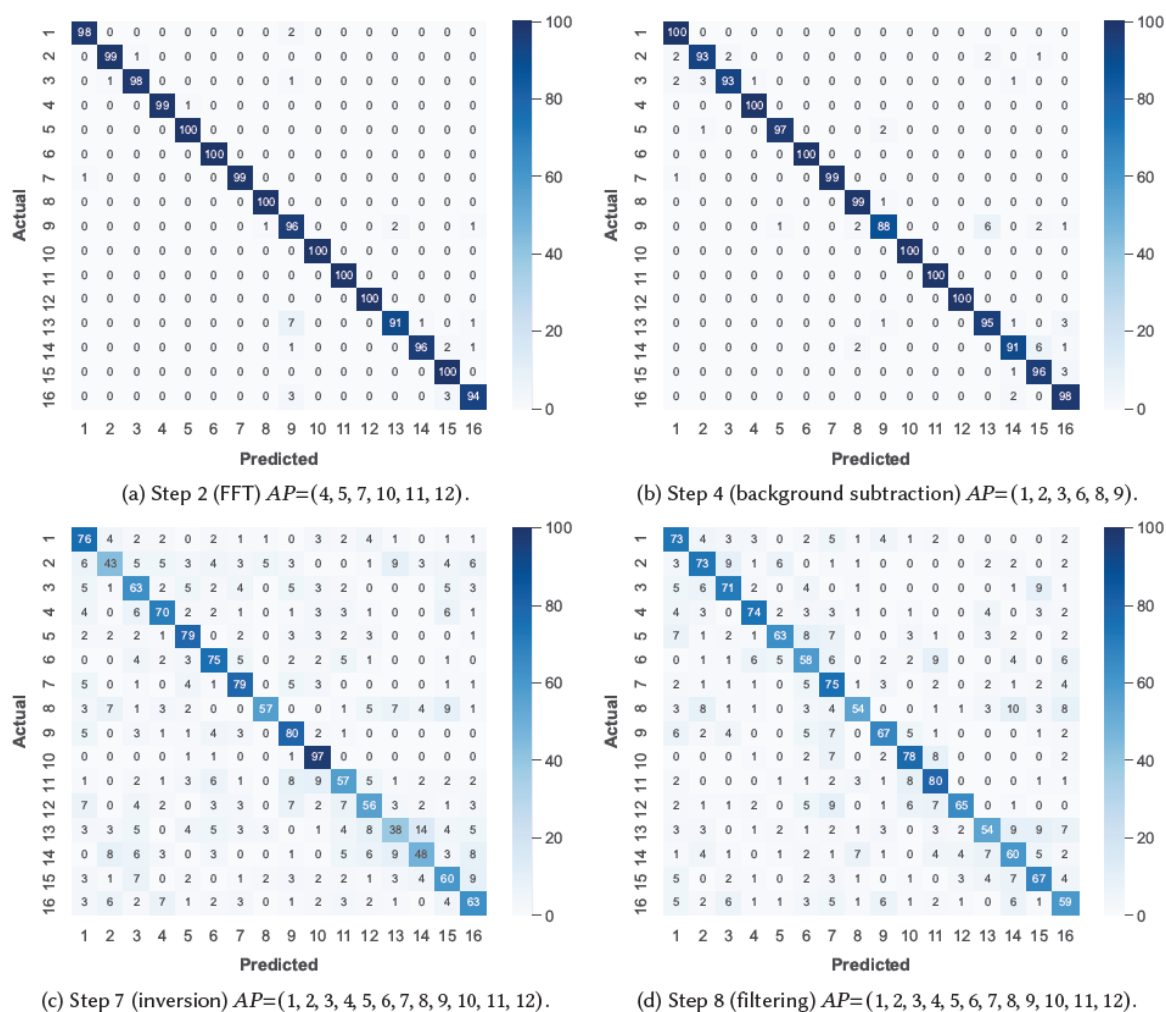


Figura 2. Matricele de confuzie pentru diverse configurații ale algoritmului de recunoaștere a gesturilor.

Aceste rezultate permit formularea unor implicații privind proiectarea interfețelor utilizator care folosesc gesturi achiziționate cu ajutorul senzorilor radar, cum ar fi: favorizarea gesturilor care au o suprafață mare de expunere (e.g., gesturile de tip “push with palm” și “push with fist” ilustrate în figura 1), folosirea gesturilor realizate cu o mișcare paralelă cu raza radarului (e.g., gesturile “swipe left”, “swipe right”, “swipe up” și “swipe down”, realizate în planul ortogonal, sunt mai dificil de diferențiat de către algoritmul de recunoaștere), alegerea configurației de perechi de antene care conduce la o performanță crescută de recunoaștere, etc. Mai multe detalii se află în lucrarea:

Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt. (2022). Hand Gesture Recognition for an Off-the-Shelf Radar by Electromagnetic Modeling and Inversion. In *Proceedings of UI '22, the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces*, 506-522. ACM, New York, NY, USA.
<https://doi.org/10.1145/3490099.3511107>

publicată în cadrul conferinței UI 2022, o conferință ACM de **rang A**, conform clasificării ARC CORE. Lucrarea a fost distinsă cu **Best Paper Award**.

Aplicații care implementează interacțiuni cu gesturi radar

În vederea explorării de noi oportunități aplicative pentru gesturile radar, am plecat de la rezultatele etapei anterioare, i.e., analiza critică a tehnicilor interactive și aplicațiilor existente în literatura științifică pentru controlul gestual al sistemelor informatice folosind tehnologii radar (Avrahami *et al.*, 2019; Iwamoto *et al.*, 2010; Leiva *et al.*, 2020; Lien *et al.*, 2016; Pucihar *et al.*, 2019; Santhalingam *et al.*, 2020; Yeo *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2014). Am completat aceste rezultate cu o analiză a tehnologiilor radar folosite în mod frecvent în literatura științifică (figurile 3 și 4), precum și a studiilor realizate pentru identificarea și analiza preferințelor utilizatorilor (Wobbrock *et al.*, 2009; Villarreal-Narvaez *et al.*, 2020) pentru gesturi achiziționate cu senzori radar (figura 5). Astfel de studii sunt utile pentru a scoate în evidență consensul privind comenzile gestuale care se formează între utilizatorii unei aplicații interactive cu o interfață bazată pe gesturi. În cazul în care eșantionul de participanți este reprezentativ pentru întreaga populație de utilizatori, setul de comenzi gestuale identificat în cadrul studiului permite implementarea de interacțiuni intuitive și naturale pentru noi utilizatori. Din păcate, am identificat doar un singur studiu de acest tip (Magrofuoco *et al.*, 2019) din peste 200 de lucrări analizate din literatura științifică a domeniului interacțiunii om-calculator, conform Villarreal-Narvaez *et al.* (2020). Magrofuoco *et al.* (2019) au raportat și analizat preferințele unui grup de participanți pentru a controla dispozitive IoT folosind gesturi de tip radar, furnizând printre rezultatele studiului un dicționar compus din 19 gesturi. Plecând de la acest rezultat, am propus recomandări privind realizarea de noi studii de identificare a preferințelor utilizatorilor pentru gesturi achiziționate cu senzori de tip radar, precum și noi studii pentru reproducerea și confirmarea rezultatelor obținute anterior în literatura științifică. Mai multe detalii se află în lucrarea:

Santiago Villarreal-Narvaez, Alexandru-Ionuț Șiean, Arthur Sluÿters, Radu-Daniel Vatavu, Jean Vanderdonckt. (2022). Informing Future Gesture Elicitation Studies for Interactive Applications that Use Radar Sensing. In *Proceedings of AVI '22, the International Conference on Advanced Visual Interfaces*. ACM, New York, NY, USA, 50:1-50:3. <https://doi.org/10.1145/3531073.3534475>

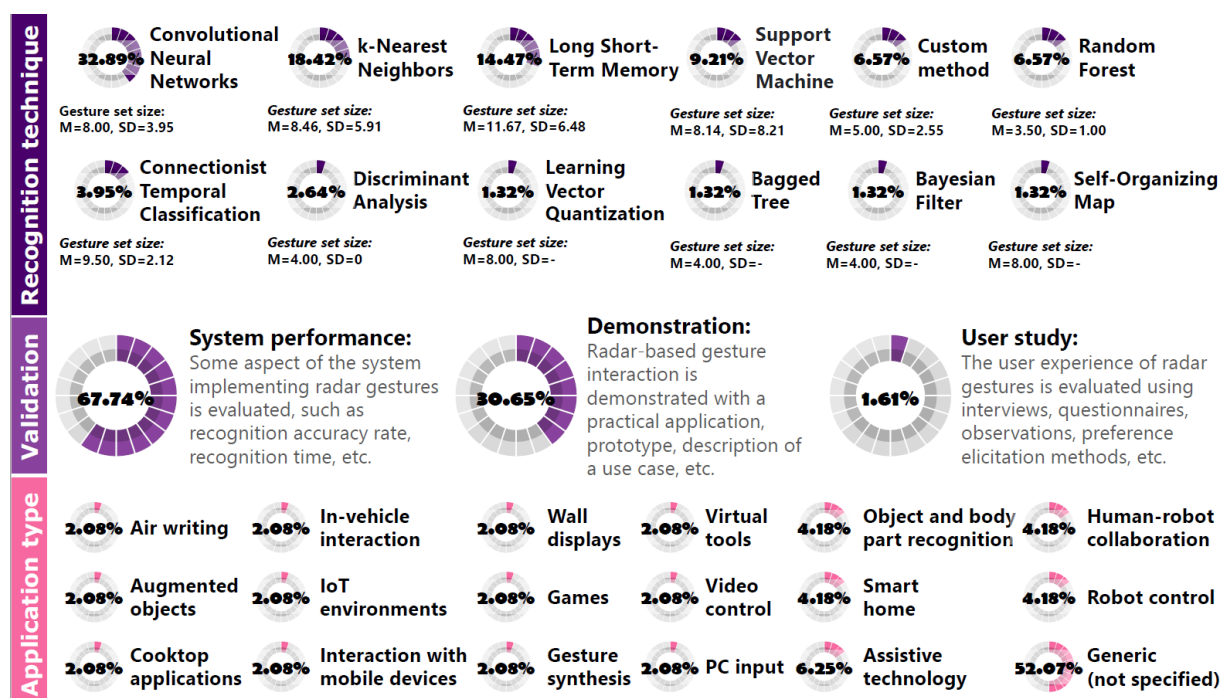


Figura 3. Tehnici de recunoaștere a gesturilor (sus) și metode de validare (mijloc) a aplicațiilor care implementează interfețe bazate pe gesturi achiziționate cu senzori radar (jos).

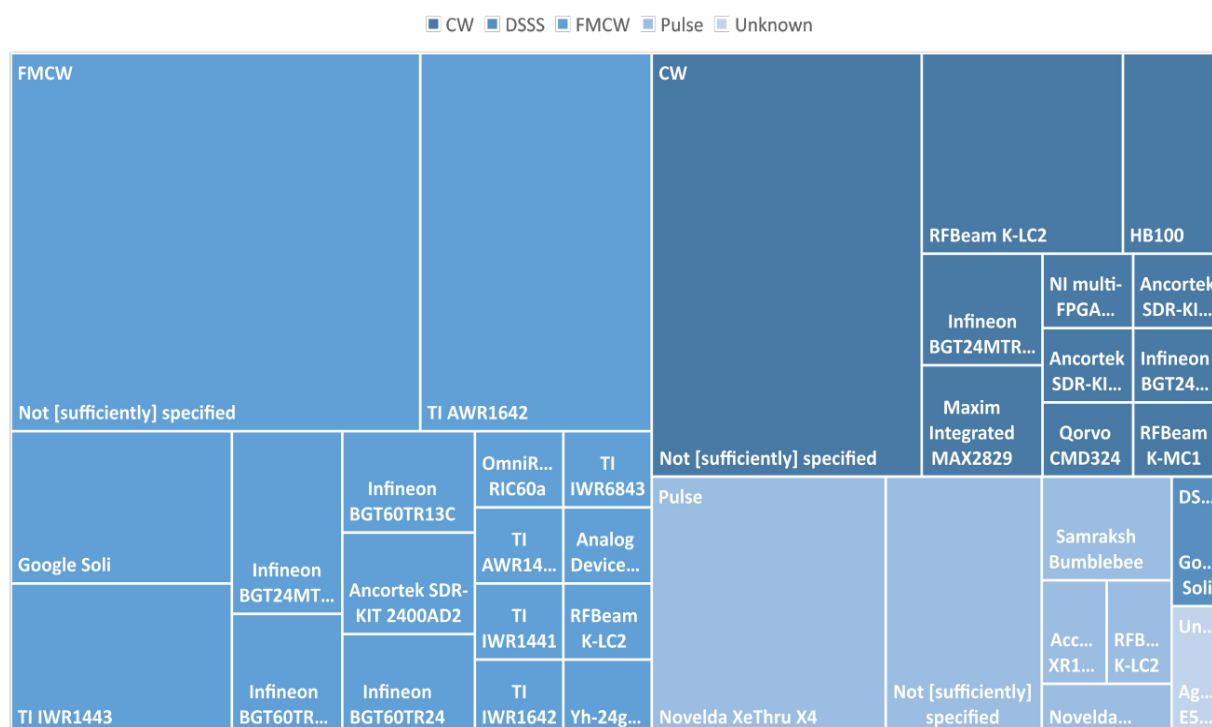


Figura 4. Tehnologii radar folosite pentru achiziția și recunoașterea gesturilor, prezentate în funcție de frecvența utilizării acestora în aplicațiile și studiile din literatura științifică a domeniului (Sluÿters *et al.*, 2022a; Sluÿters *et al.*, 2022b).

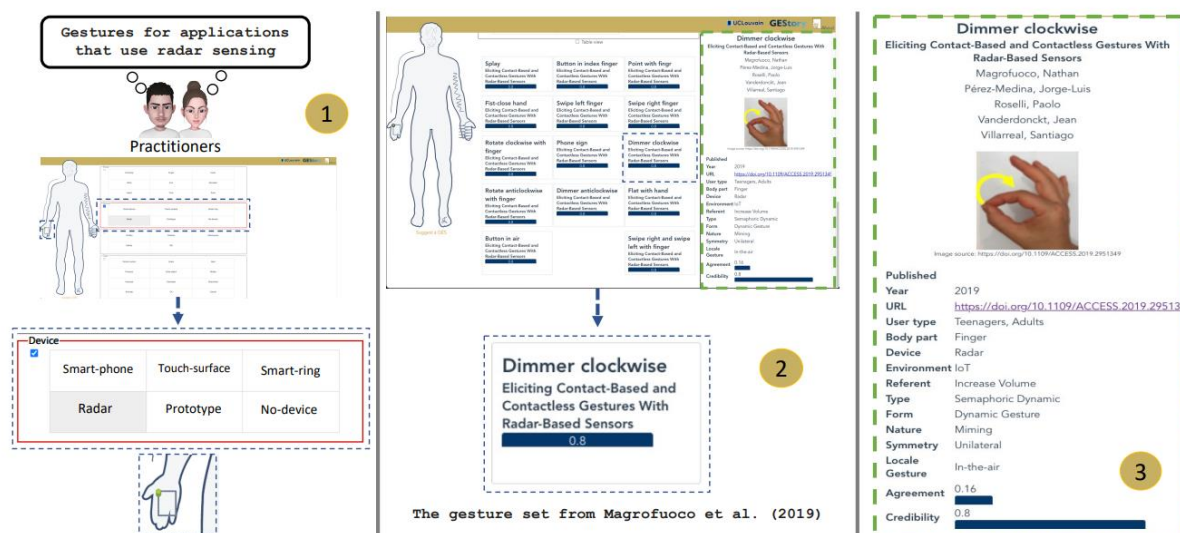


Figura 5. Rezultatele unei interogări (Villarreal-Narvaez *et al.*, 2022) realizate pentru identificarea preferințelor utilizatorilor pentru gesturi achiziționate cu senzori radar.

De asemenea, am explorat în cadrul acestei etape două oportunități aplicative pentru comenzi gestuale achiziționate cu senzori de tip radar pentru (i) controlul ecranelor TV de la distanță și (ii) augmentarea interacțiunii cu suprafețele tactile (*en.*: touchscreens). Conform analizei noastre anterioare, aceste aplicații nu au fost încă acoperite în literatura științifică a gesturilor radar (conform rezultatelor prezentate în figura 3), dar prezintă foarte bune oportunități de valorificare economică datorită prevalenței televizoarelor inteligente (*en.*: smart TV), respectiv a ecranelor tactile integrate în dispozitive de diverse tipuri și care oferă acces la diverse aplicații și servicii, *e.g.*, dispozitive mobile, purtabile, ecrane publice interactive, etc. Pentru implementarea practică, am folosit dispozitivul Walabot (cu N=15, respectiv N=18 antene, VYR2401 A3 System-on-Chip și domeniu de funcționare 6.3-8GHz), un ecran TV de tip Samsung UE55D (rezoluție 1920x1080 pixeli, 0.210x0.630mm pixel pitch, timp de răspuns 4ms și un unghi de 178°) și un cadru tactil de tip Samsung Touchscreen Overlay TM55LCC pentru ecranul TV, care poate detecta 10 atingeri simultane.

Figura 6 (sus) ilustrează șase gesturi propuse pentru controlul ecranelor TV reprezentând diverse combinații de mișcări direcționale (“swipe left” și “swipe right”, conform gesturilor ilustrate în figura 1) executate la diverse distanțe (etichetate “near”, “close”, respectiv “far” în figura 6) față de senzorul radar Walabot conectat la un calculator. Aceste gesturi pot fi asociate cu trei tipuri de acțiuni dihotome: *da-nu* (pentru a confirma sau refuza o selecție), *sus-jos* (pentru a controla valorile unei variabile, cum ar fi volumul audio sau luminozitatea ecranului TV), respectiv *înainte-înapoi* (pentru a implementa navigarea într-o listă de elemente, cum ar fi lista canalelor TV sau lista opțiunilor unui meniu). Plasarea senzorului radar în acest scenariu permite câteva posibilități interesante pentru un sistem interactiv. De exemplu, figura 6 (jos) ilustrează diverse reprezentări bidimensionale (theta, R) ale gestului static “mâna deschisă” achiziționat cu senzorul radar Walabot plasat în diverse locații, *e.g.*, în fața utilizatorului, lângă ecranul televizorului și orientat către utilizator, plasat sub telecomanda TV sau într-un buzunar. Mai multe detalii pot fi regăsite într-o lucrare publicată în cadrul acestei etape la IMX 2022, o conferință ACM dedicată mediei interactive:

Alexandru-Ionuț Șiean, Cristian Pamparău, Radu-Daniel Vatavu. (2022). Scenario-based Exploration of Integrating Radar Sensing into Everyday Objects for Free-Hand Television Control. In *Proceedings of IMX '22, the ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 357-362. ACM, New York, NY, USA.
<https://doi.org/10.1145/3505284.3532982>

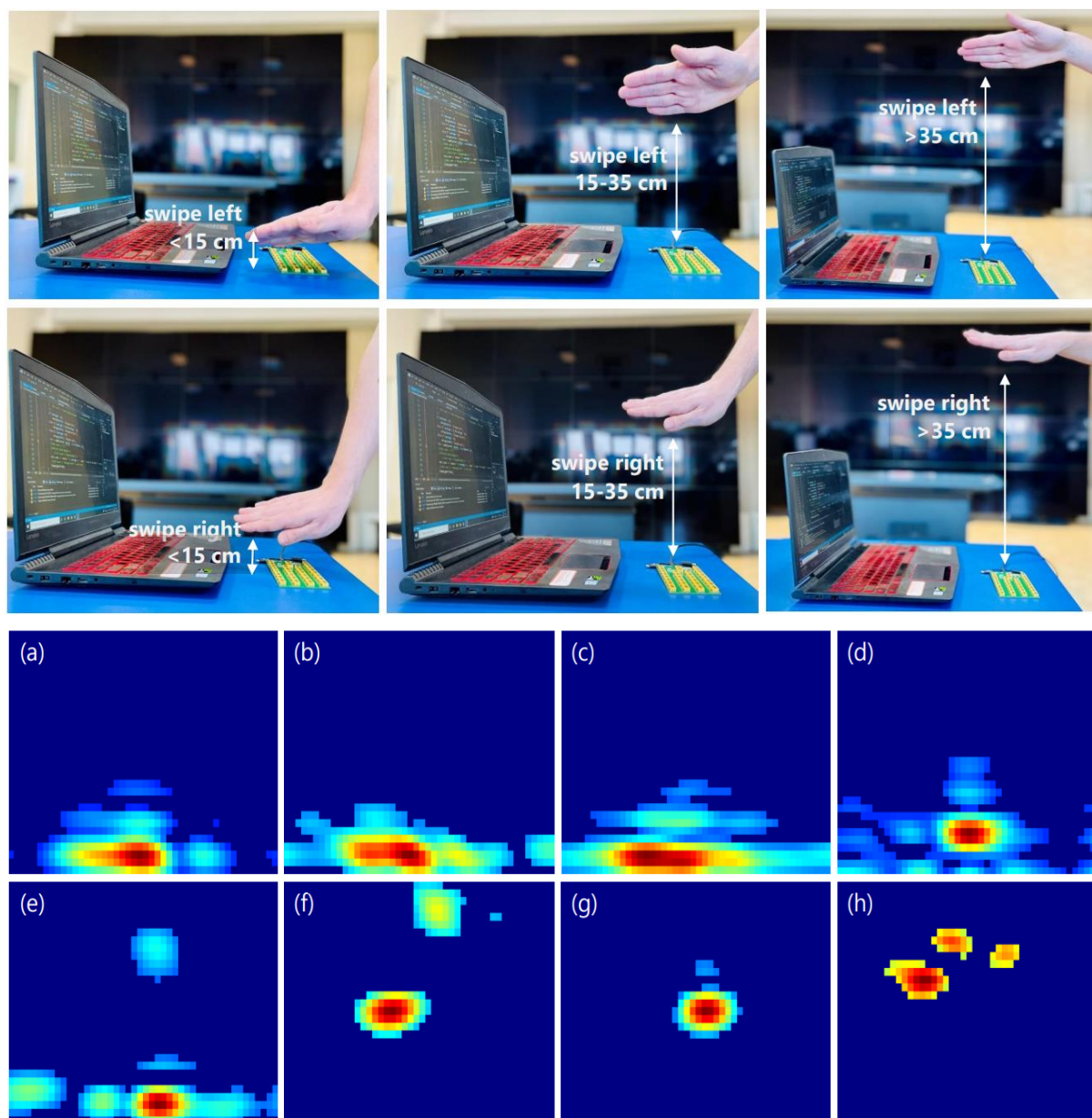


Figura 6. Gesturi direcționale executate la diverse distanțe față de senzorul radar Walabot (sus) și reprezentarea gestului static “mâna deschisă” în diverse condiții: (a) senzorul radar neacoperit, plasat pe o masă, (b) senzorul radar plasat sub masă, (c) senzorul radar acoperit, aflat într-o cutie, (d) sub telecomanda TV, (e) în buzunarul utilizatorului, (f) lângă televizor și orientat către utilizator, (g) plasat pe podea și, respectiv, (h) fixat la o înălțime de doi metri deasupra podelei.

A doua aplicație examinată în cadrul etapei a vizat combinarea gesturilor de atingere (*en.*: touch gestures), realizate pe un ecran tactil, cu gesturi executate liber în aer (*en.*: mid-air gestures). Această aplicație a fost proiectată și implementată în cadrul unei ședințe de lucru desfășurată în comun de către membrii echipei Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației și membrii echipei Université catholique de Louvain cu ocazia vizitei acestora din urmă la Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava (figura 7). Funcția principală a aplicației a constat în oferirea posibilității de a controla conținut video (i.e., redare, pauză, navigare în cadrul unui canal alcătuit din mai multe filme de același gen) folosind gesturi de atingere, respectiv schimbarea canalului/genului filmelor cu un gest executat în fața ecranului. Tehnologiile folosite pentru dezvoltarea interfeței utilizator au fost HTML/CSS/JavaScript iar comunicația cu aplicația Walabot a implementat WebSocket. Am identificat următoarele oportunități privind comenzi gestuale mixte: gestul de atingere efectuat pe ecranul tactil (figura 7, sus-stânga) este completat de mișcări libere ale mâinii în aer achiziționate cu senzorul radar (figura 7, sus-dreapta) iar gestul executat cu mâna liberă în aer în fața ecranului este completat de gesturi de atingere efectuate pe ecranul tactil. Cu acest mod de proiectare, fiecare modalitate – interacțiune tactilă, respectiv prin gesturi executate liber în aer – își păstrează avantajele proprii iar utilizatorul dispune de o mai mare flexibilitate în interacțiunea cu ecranul tactil.

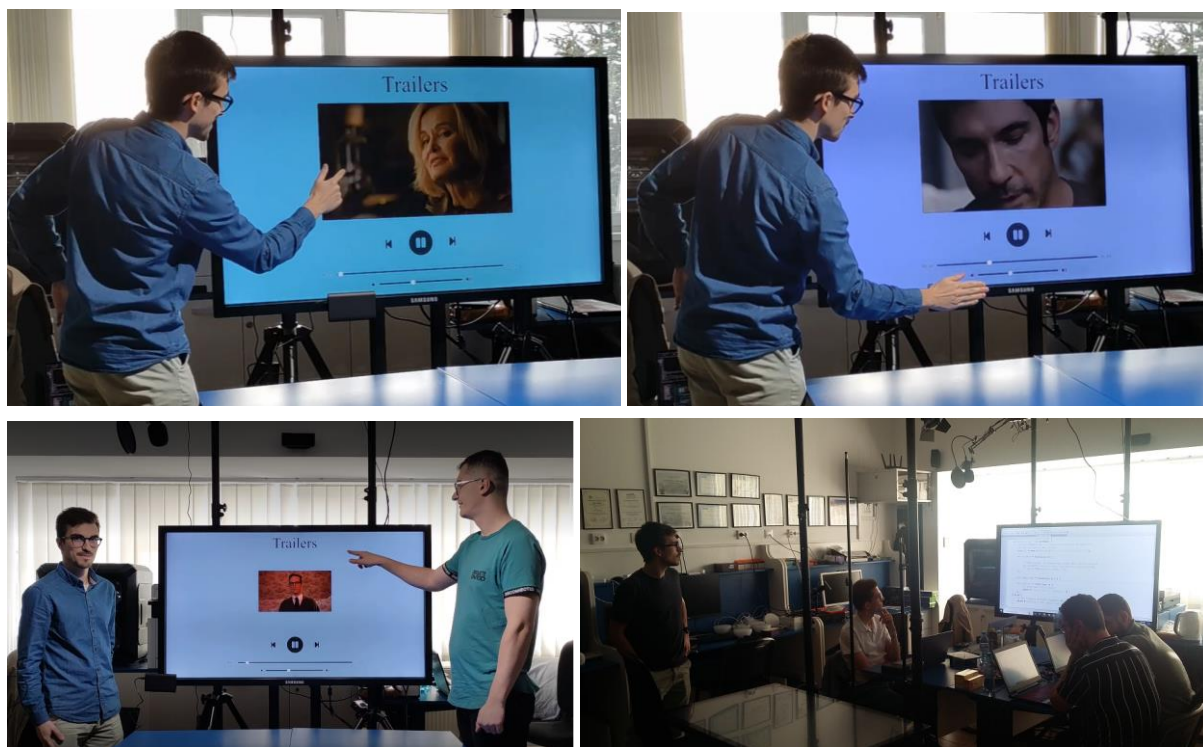


Figura 7. Aplicație interactivă combinând gesturi de atingere pe o suprafață tactilă și gesturi executate cu mâna liberă în aer achiziționate de un senzor radar (sus), realizată în cadrul unei activități colaborative cu ocazia vizitei UCL la Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava (jos).

Implementarea colaborării dintre parteneri

Două vizite de lucru au fost realizate în anul 2022 între partenerii proiectului, după cum urmează:

- Drd. Laura-Bianca Bilius și drd. Adrian-Vasile Catană, membri ai echipei Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației din cadrul Universității Ștefan cel

Mare din Suceava, au efectuat în perioada 22-26 august 2022 o vizită de lucru la Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve (figura 8). Cu această ocazie, au avut loc întâlniri și discuții privind rezultatele obținute în cadrul proiectului, livrabilele pentru etapa anului 2022 și oportunități de colaborare în viitor cu echipa coordonată de Prof. Jean Vanderdonckt: drd. Arthur Sluÿters, drd. Quentin Sellier, drd. Santiago Villarreal, drd. Mehdi Ousmer. La întâlniri au participat de asemenea și Prof. Paolo Roselli (expertiză în analiza matematică și geometria algebrică), respectiv Prof. Sébastien Lambot (expertiză în modelarea semnalelor radar).

- Drd. Arthur Sluÿters și drd. Quentin Sellier, membri ai echipei Université catholique de Louvain, au efectuat în perioada 31 octombrie-4 noiembrie 2022 o vizită de lucru în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava (figura 9). Vizita a constat în realizarea de prezentări ale rezultatelor obținute, ședințe de lucru și organizarea unei activități practice în comun privind proiectarea și dezvoltarea unei aplicații software de recunoaștere a gesturilor mixte tactile-radar. La întâlniri au participat din partea Universității Ștefan cel Mare din Suceava: Prof. Radu-Daniel Vatavu, drd. Laura-Bianca Bilius, drd. Adrian-Vasile Catană, drd. Alexandru-Ionuț Șiean, drd. Cristian Pamparău, drd. Alexandru-Tudor Andrei, drd. Irina Popovici și drd. Adrian Aiordăchioae.

Publicații științifice ale etapei

1. Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt. (2022). Hand Gesture Recognition for an Off-the-Shelf Radar by Electromagnetic Modeling and Inversion. In *Proceedings of IUI '22, the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces*, 506-522. ACM, New York, USA. **Rata de acceptare: 62/253=24.5% | ARC A** <https://doi.org/10.1145/3490099.3511107>
Lucrarea a primit distincția BEST PAPER AWARD
2. Alexandru-Ionuț Șiean, Cristian Pamparău, Radu-Daniel Vatavu. (2022). Scenario-based Exploration of Integrating Radar Sensing into Everyday Objects for Free-Hand Television Control. In *Proceedings of IMX '22, the ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 357-362. ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3505284.3532982>
3. Santiago Villarreal-Narvaez, Alexandru-Ionuț Șiean, Arthur Sluÿters, Radu-Daniel Vatavu, Jean Vanderdonckt. (2022). Informing Future Gesture Elicitation Studies for Interactive Applications that Use Radar Sensing. In *Proceedings of AVI '22, the International Conference on Advanced Visual Interfaces*, 50:1-3. ACM, NY, USA. **ARC B**
<https://doi.org/10.1145/3531073.3534475>

Alte două lucrări se află în evaluare:

4. Alexandru-Ionuț Șiean, Cristian Pamparău, Arthur Sluÿters, Radu-Daniel Vatavu, Jean Vanderdonckt. (2022). Flexible Gesture Input with Radars: Systematic Literature Review and Taxonomy of Radar Sensing Integration in Ambient Intelligence Environments. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Springer (**IF₍₂₀₂₁₎=3.662**), **ÎN EVALUARE**
5. Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt, Radu-Daniel Vatavu. (2022). RadarSense: Accurate Recognition of Mid-Air Hand Gestures with Radar Sensing and Few Training Examples. *ACM Trans. on Interactive Intelligent Systems*. (**IF₍₂₀₂₁₎=1.887**), **ÎN EVALUARE**



Figura 8. Vizita de lucru a echipei Universității din Suceava la Université catholique de Louvain.

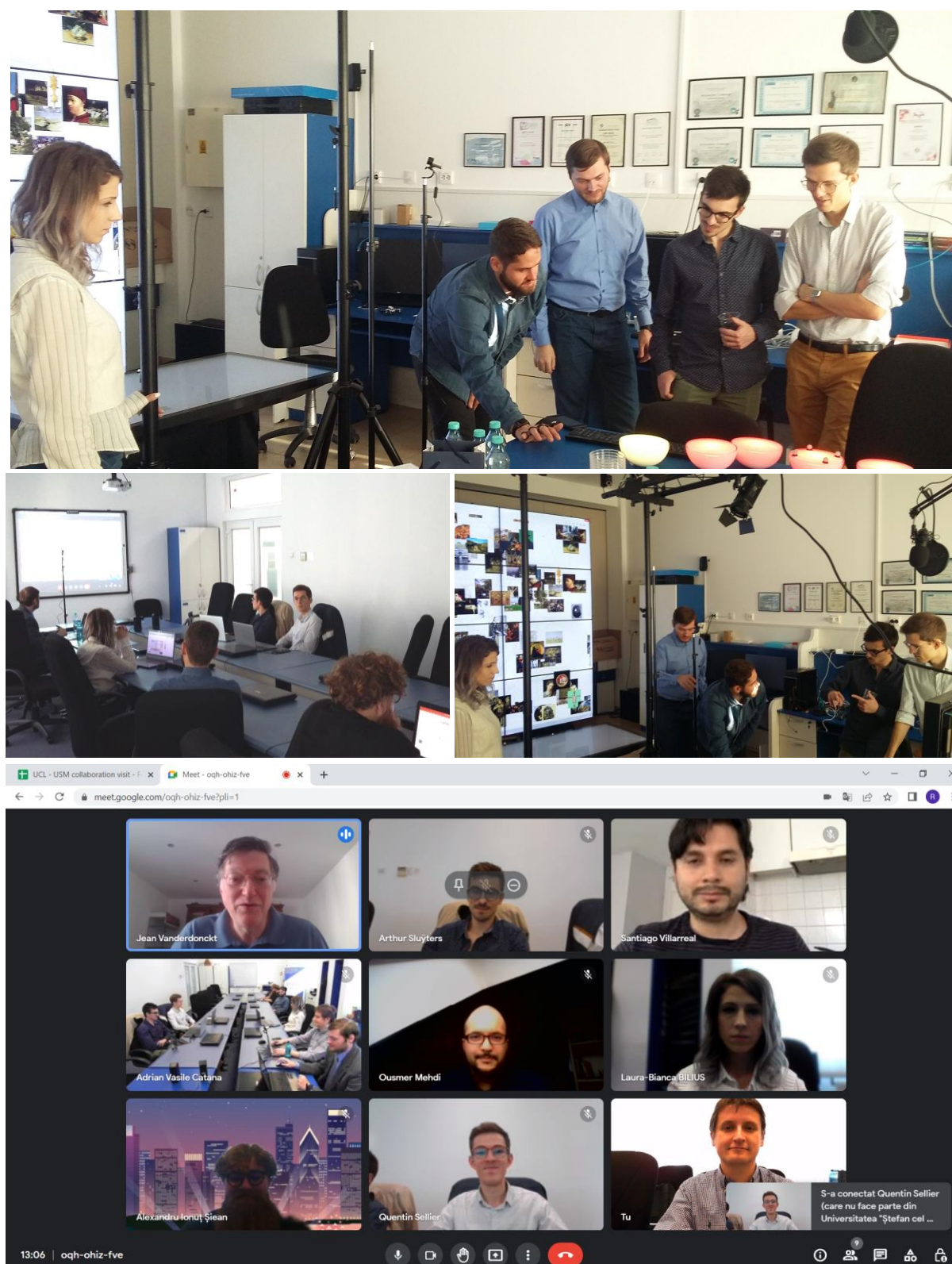


Figura 9. Vizita de lucru a echipei Université catholique de Louvain în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava (sus). Restul echipei belgiene a participat prin video-conferință (jos).

Pe baza rezultatelor obținute, vizitelor de lucru efectuate în cadrul etapei și a colaborării implementate între cei doi parteneri, considerăm obiectivele tehnice și științifice ale proiectului îndeplinite în procent de 100% pentru etapa aferentă anului 2022.

REZUMAT EXECUTIV AL ACTIVITĂȚILOR REALIZATE ÎN PERIOADA DE IMPLEMENTARE

În cadrul Etapei nr. 2 de implementare a proiectului de cooperare bilaterală, am realizat evaluarea performanțelor tehnice ale algoritmului de recunoaștere a gesturilor achiziționate de la senzori radar și am propus aplicații interactive care folosesc gesturi radar. În acest scop, am folosit infrastructura Laboratorului de Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației (<http://www.eed.usv.ro/mintviz>) și a Laboratorului Louvain Interaction Lab (<https://uclouvain.be/fr/repertoires/jean.vanderdonckt>) în ce privește senzori radar și dispozitive cu ecran tactil. Rezultatele noastre au indicat o acuratețe de 74% pentru un set alcătuit din 16 gesturi distincte, care pot fi recunoscute într-un timp mediu de 2.2ms folosind configurații specifice de antene radar și module de procesare a semnalelor. De asemenea, rezultatele etapei au scos în evidență oportunități pentru folosirea gesturilor achiziționate cu senzori radar pentru două aplicații interactive: controlul ecranelor TV de la distanță și augmentarea interacțiunii cu suprafețele tactile. Aceste rezultate recomandă explorarea în viitor a noi tipuri de gesturi achiziționate cu senzori radar, cum ar fi gesturile bimanuale (figura 10) sau gesturile detectate în combinație cu alți senzori și alte tipuri de dispozitive, *e.g.*, ecranele tactile (Magrofuoco *et al.*, 2022). De asemenea, rezultatele noastre au scos în evidență o lipsă a studiilor în literatura științifică pentru identificarea preferințelor utilizatorilor privind gesturi achiziționate folosind senzori radar și am oferit recomandări pentru realizarea de noi studii în această direcție. Rezultatele etapei au fost publicate în cadrul a trei lucrări științifice, dintre care una a fost distinsă cu **Best Paper Award** în cadrul conferinței ACM Intelligent User Interfaces (IUI '22), iar alte două lucrări se află în evaluare.

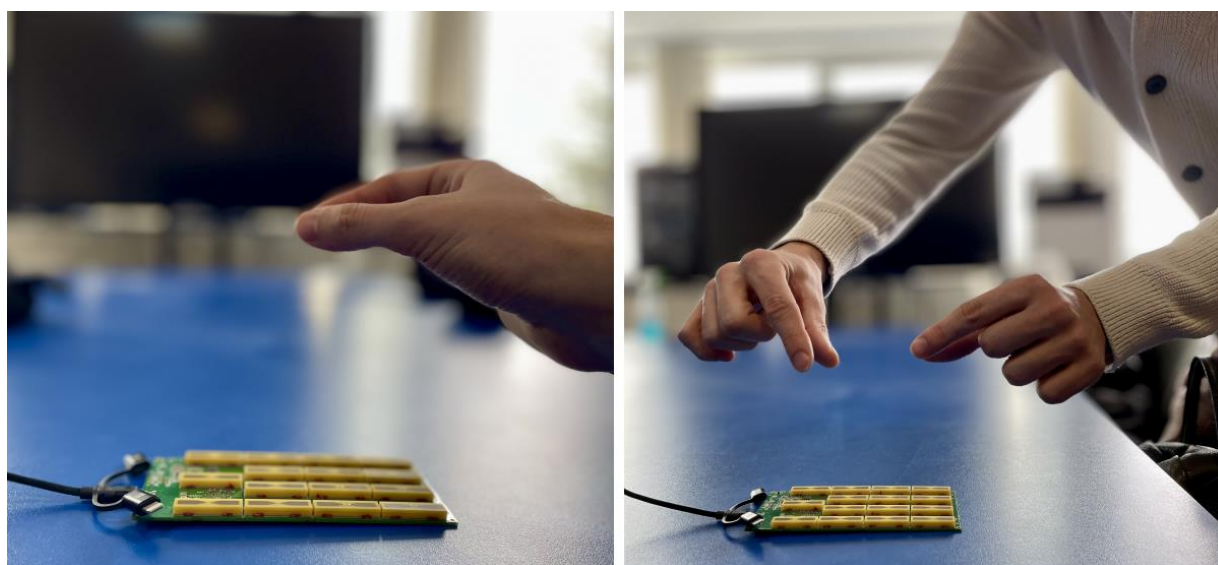


Figura 10. Exemple de gesturi unimanuale și bimanuale efectuate în proximitatea senzorului radar Walabot. Fotografiiile au fost realizate în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava.

POSSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE ECONOMICĂ A REZULTATELOR OBȚINUTE

Analiza gesturilor radar, pe care am realizat-o în cadrul acestui proiect de cooperare bilaterală, a indicat un număr limitat de lucrări științifice care să adreseze aplicații ale interacțiunii cu sistemele informatice prin gesturi achiziționate cu senzori radar, în timp ce majoritatea algoritmilor de recunoaștere au fost proiectați pentru sau evaluați folosind seturi de gesturi de mici dimensiuni. Cele două aplicații examinate în cadrul proiectului, *i.e.*, controlul ecranelor TV de la distanță și augmentarea interacțiunii tactile, prezintă un bun potențial de valorificare economică care este recomandat a fi examinat în continuare. De exemplu, controlul televizoarelor inteligente (smart TV) se încadrează într-o piață aflată în creștere conform estimărilor de 266 milioane de unități smart TV ce vor fi vândute până în anul 2025 (<https://www.statista.com/statistics/878372/smart-tv-unit-sales-worldwide>). De asemenea, noi tipuri de interacțiuni care combină gesturile de atingere cu cele de mișcare liberă pot fi oportune pentru aplicații destinate ecranelor publice ambientale, de asemenea reprezentând o piață aflată în creștere cu estimări de peste 15 miliarde USD pentru anul 2025 privind echipamente, aplicații software și servicii aferente, conform unui raport Statista din anul 2020 (<https://www.statista.com/statistics/1017130/united-states-interactive-kiosk-market-component>). Recomandăm ca astfel de oportunități să fie examinate în cadrul cercetărilor și proiectelor viitoare.

REFERINȚE

- Avrahami *et al.* (2019) Daniel Avrahami, Mitesh Patel, Yusuke Yamaura, Sven Kratz, Matthew Cooper. 2019. Unobtrusive Activity Recognition and Position Estimation for Work Surfaces Using RF-Radar Sensing. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems* 10 (1), articol nr. 11 (ianuarie 2020), 28 pagini. <https://doi.org/10.1145/3241383>
- Iwamoto *et al.* (2010) Takahisa Iwamoto, Atsushi Karino, Masayuki Hida, Atsushi Nishizaki, and Tomoyuki Takami. 2010. Development of Wall Amusements Utilizing Gesture Input. In *Proceedings of the 9th International Conference on Entertainment Computing (ICEC'10)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 499–501. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1881673.1881757>
- Leiva *et al.* (2020) Luis A. Leiva, Matjaz Kljun, Christian Sandor, Klen Copic Pucihar. 2020. The Wearable Radar: Sensing Gestures Through Fabrics. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '20)*. ACM, New York, NY, USA, articol nr. 17, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3406324.3410720>
- Lien *et al.* (2016) Jaime Lien, Nicholas Gillian, M. Emre Karagozler, Patrick Amihoud, Carsten Schwesig, Erik Olson, Hakim Raja, Ivan Poupyrev. 2016. Soli: Ubiquitous Gesture Sensing with Millimeter Wave Radar. *ACM Transactions on Graphics* 35(4), articol nr. 142 (iulie 2016), 19 pagini. <https://doi.org/10.1145/2897824.2925953>
- Magrofuoco *et al.* (2022) Nathan Magrofuoco, Paolo Roselli, Jean Vanderdonckt. 2022. Two-Dimensional Stroke Gesture Recognition: A Survey. *ACM Computing Surveys* 54(7), 155:1-155:36. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3465400>
- Magrofuoco *et al.* (2019) Nathan Magrofuoco, Jorge Luis Pérez-Medina, Paolo Roselli, Jean Vanderdonckt, Santiago Villarreal. 2019. Eliciting Contact-Based and Contactless Gestures with Radar-Based Sensors. *IEEE Access* 7, 176982–176997.

- <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951349>
- Pucihar *et al.* (2019) Klen Čopič Pucihar, Christian Sandor, Matjaž Kljun, Wolfgang Huerst, Alexander Plopski, Takafumi Taketomi, Hirokazu Kato, Luis A. Leiva. 2019. The Missing Interface: Micro-Gestures on Augmented Objects. In *EA of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19)*. ACM, New York, NY, USA, articol nr. LBW0153, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3290607.3312986>
- Santhalingam *et al.* (2020) Panneer Selvam Santhalingam, Yuanqi Du, Riley Wilkerson, Al Amin Hosain, Ding Zhang, Parth Pathak, Huzefa Rangwala, Raja Kushalnagar. 2020. Expressive ASL Recognition using Millimeter-wave Wireless Signals. In *Proceedings of the 17th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON '20)*. IEEE Press, 1–9. <https://doi.org/10.1109/SECON48991.2020.9158441>
- Sluÿters *et al.* (2022) Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt. 2022. Hand Gesture Recognition for an Off-the-Shelf Radar by Electromagnetic Modeling and Inversion. In *Proc. of IUI '22, the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces*, 506–522. ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3490099.3511107>
- Villarreal-Narvaez *et al.* (2020) Santiago Villarreal-Narvaez, Jean Vanderdonckt, Radu-Daniel Vatavu, Jacob O. Wobbrock. 2020. A Systematic Review of Gesture Elicitation Studies: What Can We Learn from 216 Studies? *Proceedings of DIS '20, the 20th ACM Conference on Designing Interactive Systems*. New York, NY, USA: ACM, 855–872. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3357236.3395511>
- Villarreal-Narvaez *et al.* (2022) Santiago Villarreal-Narvaez, Alexandru-Ionuț Șiean, Arthur Sluÿters, Radu-Daniel Vatavu, Jean Vanderdonckt. 2022. Informing Future Gesture Elicitation Studies for Interactive Applications that Use Radar Sensing. In *Proceedings of AVI '22, the International Conference on Advanced Visual Interfaces*. ACM, New York, NY, USA, 50:1–50:3. <https://doi.org/10.1145/3531073.3534475>
- Wan *et al.* (2014) Q. Wan, Y. Li, C. Li and R. Pal. 2014. Gesture Recognition for Smart Home Applications Using Portable Radar Sensors. *Proceedings of the 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 6414–6417. <http://dx.doi.org/10.1109/EMBC.2014.6945096>
- Wobbrock *et al.* (2009) Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, Andrew D. Wilson. 2009. User-Defined Gestures for Surface Computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*. ACM, New York, NY, USA, 1083–1092. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518866>
- Yeo *et al.* (2018) Hui-Shyong Yeo, Ryosuke Minami, Kirill Rodriguez, George Shaker, Aaron Quigley. 2018. Exploring Tangible Interactions with Radar Sensing. *Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable Ubiquitous Technology* 2(4), articol nr. 200 (decembrie 2018), 25 pagini. <https://doi.org/10.1145/3287078>

Director proiect,

Prof. univ. dr. ing. Radu-Daniel Vatavu