

RAPORT FINAL DE ACTIVITATE

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 PROIECTULUI.....	2
PREZENTAREA REZULTATELOR, DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ ȘI GRADUL DE REALIZARE A OBIECTIVELOR	2
Realizarea unei analize critice privind tehnicile interactive și aplicațiile din literatura științifică pentru controlul gestual folosind tehnologii radar	2
Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor radar.....	6
Evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor radar.....	7
Aplicații care implementează interacțiuni folosind gesturi achiziționate cu senzori radar	10
Implementarea colaborării dintre parteneri	13
Publicații științifice	18
MODUL DE ATRIBUIRE ȘI EXPLOATARE DE CĂTRE PARTENERI A DREPTURILOR DE PROPRIETATE ASUPRA REZULTATELOR PROIECTULUI	18
IMPACTUL ESTIMAT AL REZULTATELOR CU SUBLINIAREA CELUI MAI SEMNIFICATIV	18
REZUMAT ÎN LIMBA ROMÂNĂ (MAXIM 3 PAGINI).....	19
REZUMAT ÎN LIMBA ENGLEZĂ (MAXIM 3 PAGINI)	21
REFERINȚE	23

OBIECTIVELE PROIECTULUI

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 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 de la distanță și augmentarea interacțiunii cu suprafețele tactile.

PREZENTAREA REZULTATELOR, DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ ȘI GRADUL DE REALIZARE A OBIECTIVELOR

Realizarea unei analize critice privind tehnicile interactive și aplicațiile din literatura științifică pentru controlul gestual folosind tehnologii radar

Pentru a adresa primul obiectiv al proiectului, am realizat un studiu de tip Systematic Literature Review (SLR) al literaturii științifice din domeniul interacțiunii folosind gesturi achiziționate cu senzori radar, pentru care am urmat recomandările din Liberati *et al.* (2009), Siddaway *et al.* (2019) și Pursell și McCrae (2020) privind proiectarea și derularea acestor studii, respectiv am raportat rezultatele conform recomandărilor PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).¹ Studiile de tip SLR privind sistemele și tehnologiile interactive sunt utile pentru a înțelege practicile, trendurile, dar și oportunitățile de a inova în domeniul interacțiunii om-calculator (HCI); a se vedea Magrofuoco *et al.* (2022), Șiean și Vataavu (2021), Vataavu și Bilius (2021) și Villarreal-Narvaez *et al.* (2020) pentru rezultate anterioare obținute de către cei doi parteneri în această direcție. Pentru a implementa studiul SLR, am folosit următoarea interogare:

```
"query": {Abstract: (radar AND gesture*)}  
"filter": {Publication Date: (01/01/2002 TO 12/31/2020)}
```

în cadrul ACM Guide to Computing Literature.² Întrucât atenția noastră a fost orientată cu precădere asupra aplicațiilor interacțiunii bazate pe gesturi cu senzori radar, folosirea ACM Digital Library este recomandată de faptul că principalele conferințe și reviste ale ACM SIGCHI (Special Interest Group in Computer-Human Interaction), cum ar fi CHI, UIST, DIS, IWMUT, IUI, ICMI, etc., sunt indexate în

¹ <http://www.prisma-statement.org>

² <https://libraries.acm.org/digital-library/acm-guide-to-computing-literature>

această bază de date; a se vedea figura 1 pentru o prezentare a rezultatelor etapelor de identificare, filtrare, eligibilitate și rostogolire pentru studiul nostru SLR, în accord cu procedurile prezentate în Liberati *et al.* (2009) și Siddaway *et al.* (2019). Următoarele criterii de eligibilitate au fost adoptate pentru a selecta din rândul rezultatelor obținute în urma rulării interogării de mai sus doar acele articole științifice relevante pentru tematica noastră:

- *EC1: Doar lucrări științifice.* Lucrările selectate trebuie să fi fost evaluate în cadrul unui sistem de tip peer-review. Acestea pot include lucrări publicate în volumele conferințelor științifice și articole publicate în reviste, în timp ce broșuri sau descrieri ale conferințelor/workshop-urilor indexate în baza de date ACM Digital Library sunt excluse de acest criteriu.
- *EC2: Lucrări științifice care folosesc tehnologii radar.* Am eliminat acele lucrări care nu tratau sau foloseau tehnologii radar, dar care au apărut printre rezultatele interogării noastre datorită faptului că au folosit cuvântul “radar” într-un alt context.
- *EC3: Lucrări care descriu interacțiuni gestuale.* Am exclus acele lucrări care nu descriu aplicații ale tehnologiei radar pentru interacțiunea om-calculator, respectiv nu descriu comenzi gestuale detectate folosind senzori radar.

După aplicarea celor trei criterii de eligibilitate, am obținut o mulțime restrânsă de 14 lucrări (Gigie *et al.* 2019; Iwamoto *et al.* 2010; Leiva *et al.* 2020; Li *et al.* 2015; Lien *et al.* 2016; Liu *et al.* 2020; Patra *et al.* 2018; Pucihar *et al.* 2019; Santhalingam *et al.* 2020; Wang *et al.* 2016; Wang *et al.* 2019; Yeo *et al.* 2017, Yeo *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2018). Plecând de la acestea, am implementat două proceduri de rostogolire – *backward* și *forward snowballing* (Wohlin, 2014) – și am analizat un număr de 423 de referințe (*backward snowballing*), respectiv 911 citări Google Scholar (*forward snowballing*), din care am identificat 31 de lucrări relevante pentru interacțiunea gestuală folosind tehnologii radar. Figura 1 prezintă rezultatele fiecărei etape din cadrul studiului nostru SLR. Cele 45 de lucrări științifice eligibile au fost apoi analizate din perspectiva următoarelor aspecte: (1) *tipul aplicației* în care au fost folosite comenzile gestuale și (2) *proiectarea interacțiunii gestuale*, pentru care am luat în considerare mărimi specifice, cum ar fi cardinalitatea mulțimii de gesturi ale interfețelor utilizator ale acestor sisteme, tipul gesturilor, respectiv detalii privind tehnicile de recunoaștere folosite.

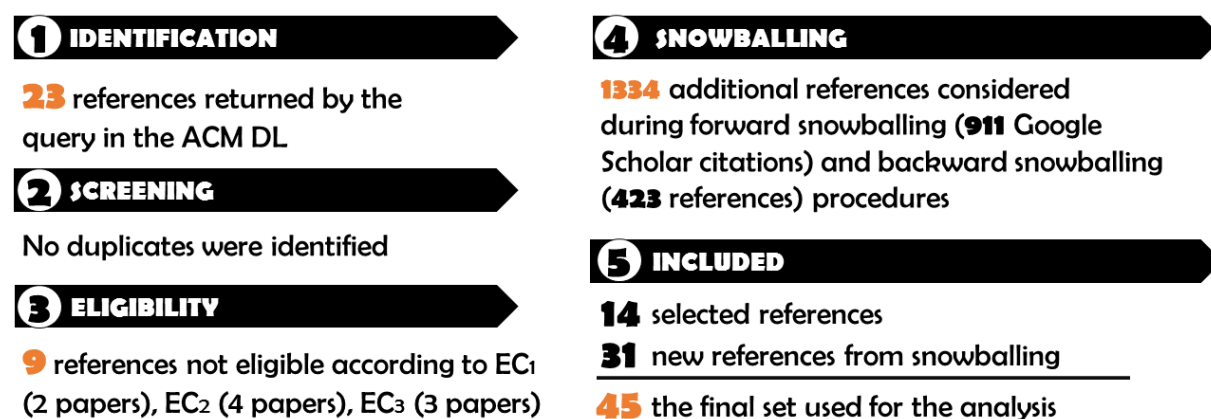


Figura 1. Diagrama PRISMA pentru studiul Systematic Literature Review (SLR) prezentând rezultatele etapelor de identificare, filtrare, eligibilitate și rostogolire pentru lucrările științifice adresând tema interacțiunii cu gesturi achiziționate folosind senzori de tip radar.

Figura 2 ilustrează aplicațiile gesturilor radar identificate în literatura științifică a domeniului, pentru care insistăm asupra a două observații. În primul rând, am remarcat un număr mare de lucrări științifice (25/45=55.6%) care au adresat doar aspecte tehnice ale implementării interacțiunilor bazate pe gesturi (*e.g.*, algoritmi de recunoaștere a gesturilor), fără a avea însă în vedere o aplicație anume. În al doilea rând, am remarcat o diversitate a aplicațiilor din literatura științifică care au folosit gesturi achiziționate cu senzori radar, de la controlul roboților (Zhang *et al.*, 2020; Salami *et al.*, 2021) la obiecte augmentate (Pucihar *et al.* 2019), case inteligente (Liu *et al.*, 2020; Wan *et al.*, 2014) și tehnologii asistive pentru persoanele cu dizabilități (Li *et al.*, 2015; Santhalingam *et al.*, 2020). Aceste rezultate arată atât oportunitățile pentru interacțiunea bazată pe gesturi achiziționate cu senzori radar dar și faptul că aplicațiile au fost încă puțin examinate în literatura științifică. Figura 2 ilustrează de asemenea și modul de validare a contribuțiilor științifice prezentate în lucrările evaluate în cadrul studiului nostru de tip SLR, după cum urmează: evaluarea performanței tehnice, de exemplu a algoritmilor de recunoaștere a gesturilor (67.74%), demonstrarea recunoașterii gesturilor radar sub forma de diverse aplicații ce permit interacțiuni bazate pe gesturi (30.65%), respectiv realizarea de studii cu utilizatori pentru a documenta comportamentul sau percepția acestora privind interacțiunea prin gesturi folosind dispozitive cu senzori radar (1.61%). Aceste rezultate din urmă arată foarte puține studii utilizator disponibile în literatura domeniului, doar Liu *et al.* (2020) adresând aspecte privind experiența utilizării gesturilor achiziționate cu senzori radar.

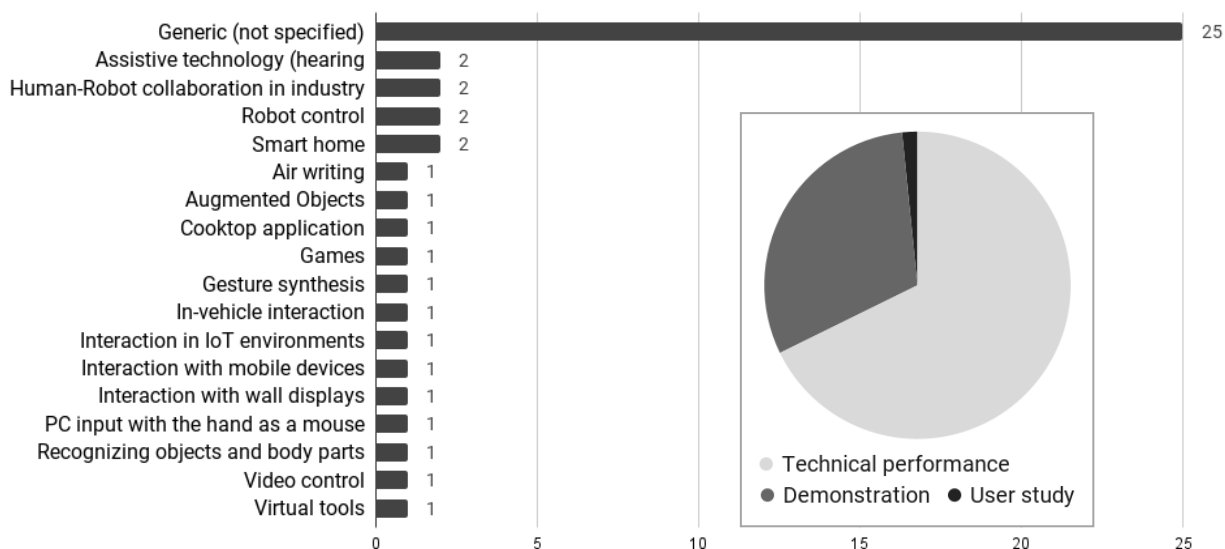


Figura 2. Aplicații ale interacțiunii bazate pe gesturi achiziționate cu senzori radar. Graficul din interior prezintă modurile de validare a contribuțiilor științifice în literatura domeniului.

În total, am identificat un număr de 307 gesturi ($M=7.31$, $SD=4.78$) din cele 45 de lucrări examinate în studiul nostru de tip SLR; vezi figurile 3 și 4. Aceste rezultate conduc către o recomandare privind necesitatea și oportunitatea desfășurării de noi studii utilizator pentru a completa puținele astfel de studii existente în literatura științifică a domeniului. De asemenea, o altă recomandare este de a explora noi aplicații și soluții tehnice pentru achiziția și recunoașterea gesturilor cu senzori radar, în special privind alte tipuri de gesturi decât cele care au fost frecvent folosite în literatura științifică (figura 3), precum și seturi mai mari de gesturi (figura 4).

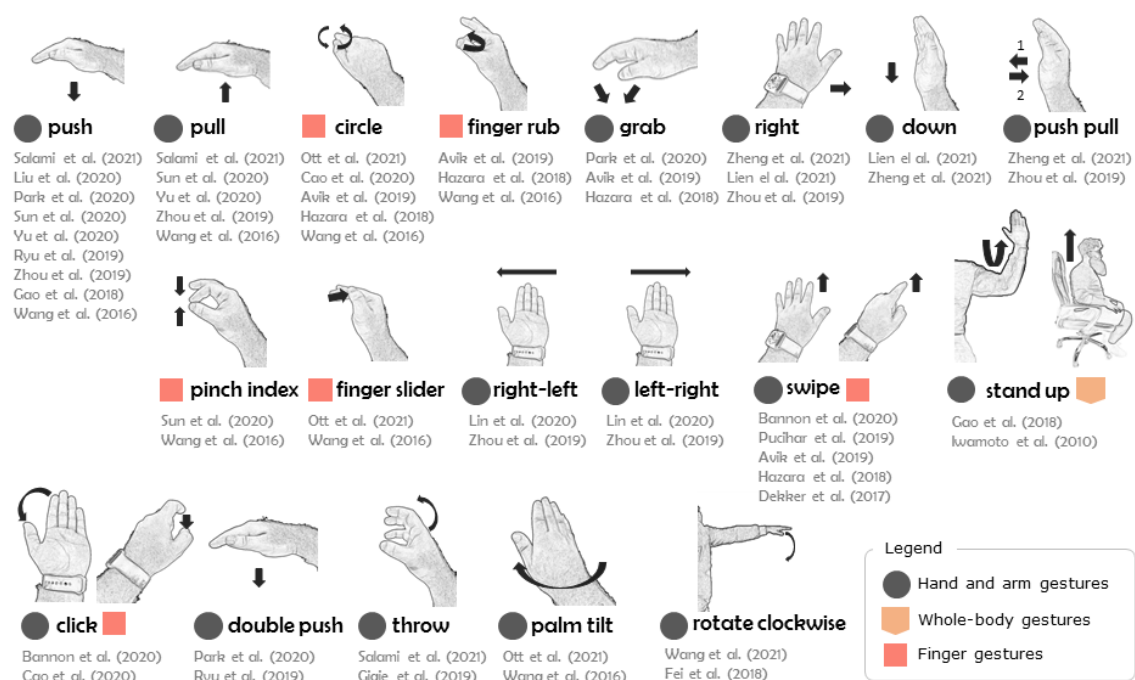


Figura 3. Ilustrare a celor mai frecvente tipuri de gesturi identificate în literatura științifică pentru interacțiuni realizate folosind senzori radar.

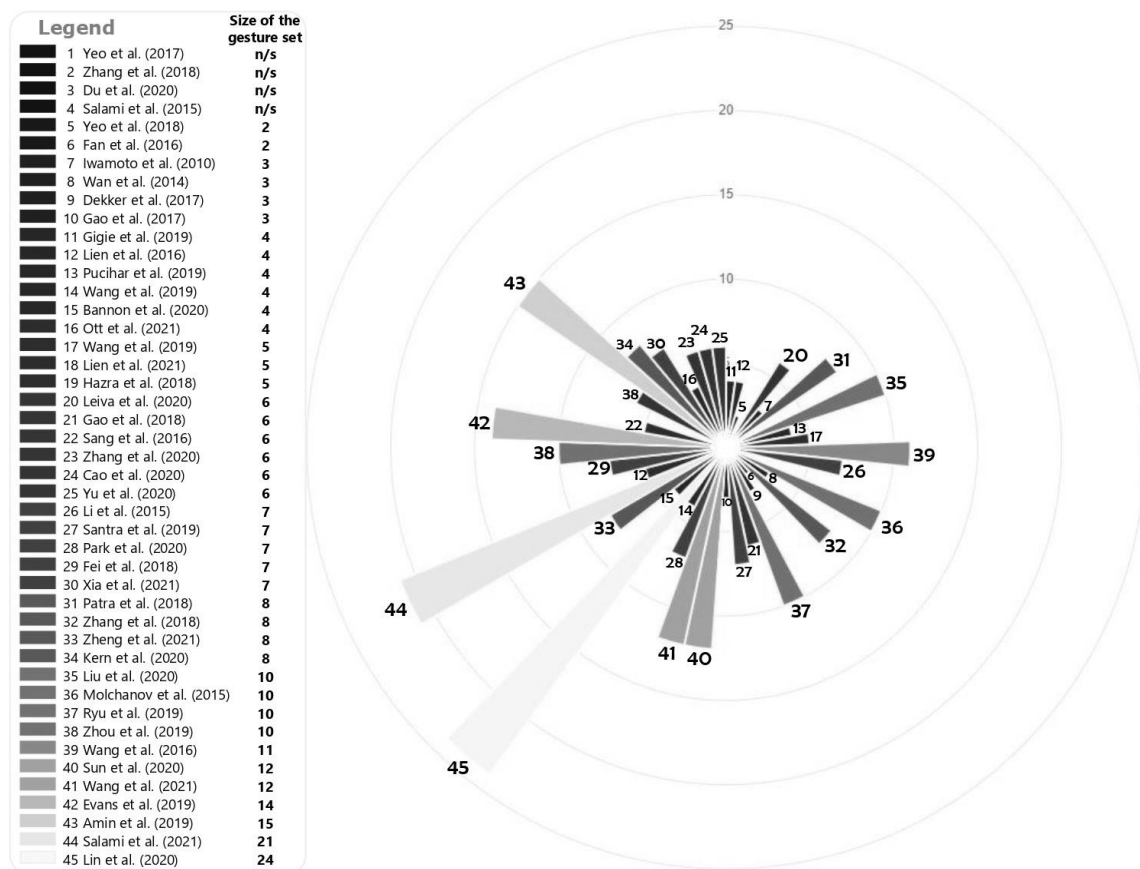


Figura 4. Dimensiunea seturilor de comenzi gestuale din lucrările din literatura științifică care au folosit senzori radar pentru achiziția gesturilor ($M=7.31$, $SD=4.78$).

Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor radar

În laboratorul partenerului Université catholique de Louvain a fost implementat un cadru experimental pentru achiziția și recunoașterea gesturilor radar constând într-un dispozitiv Walabot³ (N=18 antene, VYYR2401 A3 System-on-Chip, domeniu de funcționare 6.3-8GHz), un dispozitiv HORN (Lambot și André, 2014) dezvoltat la Université catholique de Louvain și Leap Motion⁴ (un dispozitiv cu două camere video cu o rezoluție de 640×240 pixeli, funcționare în domeniul near-infrared 850nm, frecvență de achiziție a datelor 120Hz, adâncime de detecție a mâinilor deasupra senzorului în intervalul 10-80cm), folosit drept condiție de control pentru achiziția acelorași gesturi dar cu un senzor video. Figura 5 prezintă cadrul experimental iar figura 6 senzorul radar Walabot.

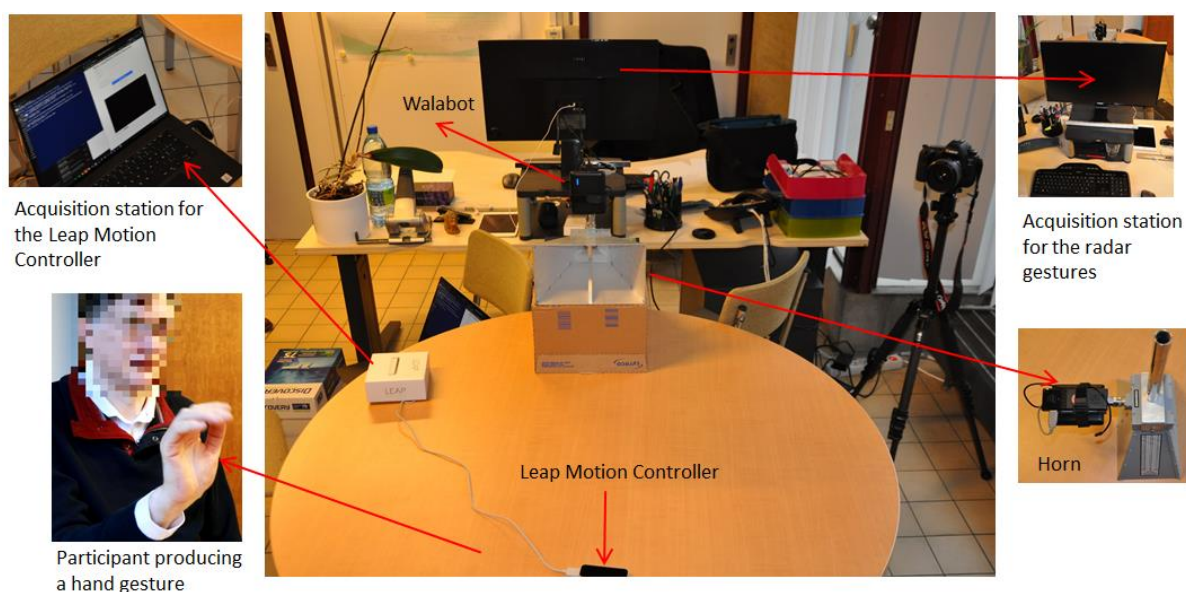


Figura 5. Cadru experimental folosit pentru achiziția gesturilor cu doi senzori radar, Walabot și HORN, și un dispozitiv Leap Motion reprezentând o condiție de control.

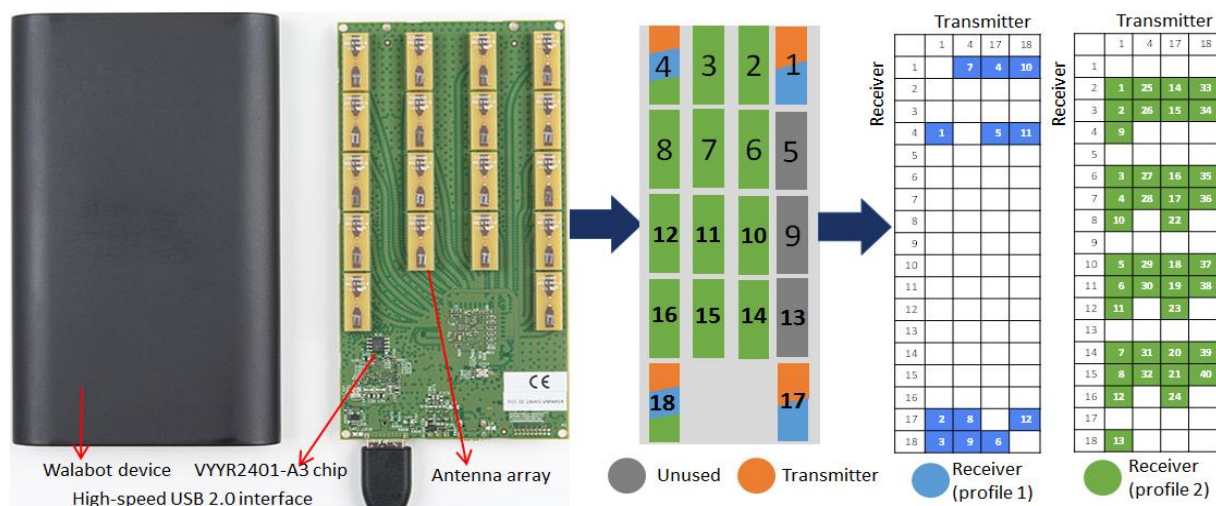


Figura 6. Dispozitivul Walabot cu două moduri de configurare a antenelor.

³ <https://walabot.com/getting-started>

⁴ <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller>

Walabot reprezintă un radar compact (72×140mm) de tip FMCW cu bandă ultra largă (UWB). Acesta poate fi conectat la un telefon, tabletă sau PC prin intermediul conexiunii USB, ceea ce îl face potrivit pentru contexte mobile de utilizare. Versiunea Walabot Developer constă într-o matrice cu $N=18$ antene, dintre care patru antene sunt folosite ca transmițătoare iar restul ca receptoare; a se vedea figura 6. Am ales Walabot pentru cadrul nostru experimental întrucât este util pentru diverse tipuri de aplicații, chiar din afara recunoașterii gesturilor, cum ar fi identificarea obiectelor și materialelor și a fost folosit anterior în literatura științifică (Avrahami *et al.* 2019; Zhang *et al.*, 2021), ceea ce permite evaluarea rezultatelor noastre în context. De exemplu, Avrahami *et al.* (2019) au folosit Walabot într-un magazin, senzorul fiind plasat sub o suprafață de lucru, iar Zhang *et al.* (2021) au propus o arhitectură de tip Auto-Encoder Neural Network pentru recunoașterea gesturilor achiziționate cu Walabot pentru care setul de antrenare a inclus 120 de exemple din fiecare tip de gest. Un al doilea dispozitiv folosit în cadrul etapei, denumit HORN (figura 5, dreapta), a fost realizat la Université catholique de Louvain. Acesta constă într-o antenă BBHA 9120A Schwarzbeck Mess-Elektronik cu o lungime de 22cm, zonă de recepție $14 \times 24 \text{ cm}^2$ și un domeniu de frecvență 0.8-5GHz.

Am propus un proces de recunoaștere a gesturilor organizat în opt module: (1) **Achiziția datelor brute**. În funcție de tipul de radar, datele pot fi în domeniul timp (de exemplu, Walabot) sau frecvență; (2) **Transformata Fourier rapidă**. Semnalele radar sunt transformate din domeniul timp în domeniul frecvență, un pas necesar pentru eliminarea efectelor de antenă; (3) **Eliminarea efectelor de antenă** prin aplicarea ecuațiilor radar (Lambot și André, 2014) în domeniul frecvență pentru a elimina reflexii interne și interacțiuni de tip antenă-țintă; (4) **Eliminarea fundalului** prin scăderea primului cadru al semnalului radar pentru a reduce influența altor obiecte asupra achiziției mișcărilor mâinilor utilizatorului în fața senzorului; (5) **Transformata Fourier inversă**. Semnalul este transformat în domeniul timp pentru a facilita procesarea ulterioară din cadrul modulelor 6-8; (6) **Izolarea unei ferestre temporale a semnalului** (*en.*: time gating) corespunzătoare gestului realizat de utilizator; (7) **Extragerea caracteristicilor**: distanța mâinii față de senzorul radar (informații privind traiectoria de mișcare a gestului) și permitivitatea efectivă a mediului (informații privind postura mâinii, *e.g.*, mâna orientată către radar); (8) **Filtrarea semnalului** cu o fereastră de dimensiune fixă.

Evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor radar

Pentru evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere, am folosit senzorul radar Walabot pentru a achiziționa un set de $K=16$ gesturi distincte (figura 7) de la $N=30$ de participanți (13 femei și 17 bărbați) cu vârste cuprinse între 18 și 58 ani ($M=27.4$, $SD=12.6$ ani). Într-o primă etapă a evaluării, am examinat cele mai bune combinații de perechi de antene. În a doua etapă, am examinat efectul operațiilor specifice de procesare a gesturilor radar asupra ratei de recunoaștere și timpului de execuție. 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 8 detaliază aceste rezultate pentru gesturi specifice folosite în cadrul evaluării. Spre deosebire de alte lucrări din literatura științifică, pentru care am prezentat o analiză corespunzătoare în raportul etapei anterioare, setul de gesturi folosit în cadrul evaluării noastre conține un număr mare ($K=16$) de gesturi distincte. Aceste rezultate permit formularea unor implicații privind proiectarea interfețelor utilizator care folosesc gesturi achiziționate cu senzori 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 7), 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 a gesturilor, etc. (Sluÿters *et al.*, 2022a; 2022b).

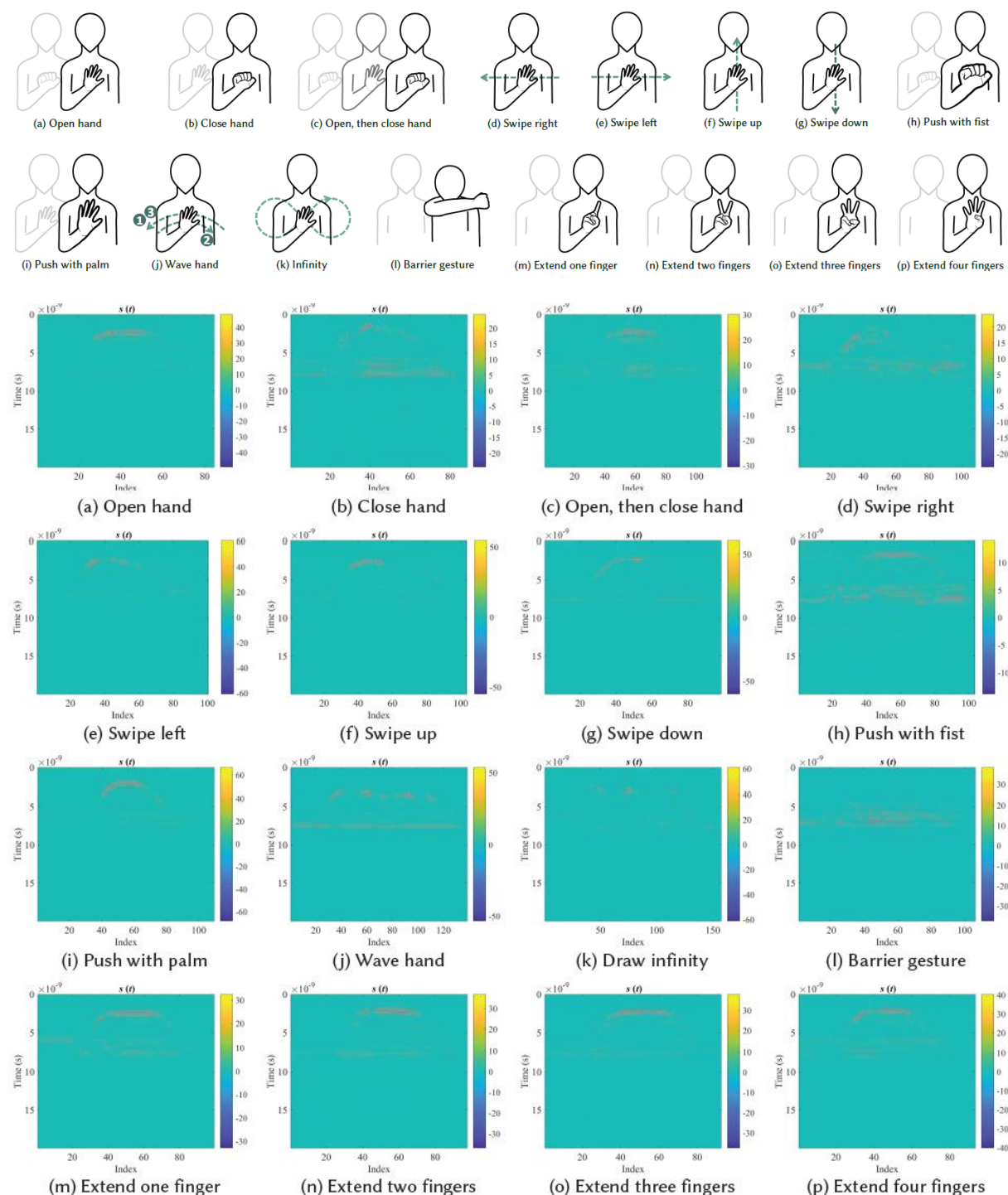


Figura 7. Setul de gesturi folosit pentru evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere: reprezentarea vizuală a gesturilor (sus) și datele achiziționate cu senzorul Walabot (jos).

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

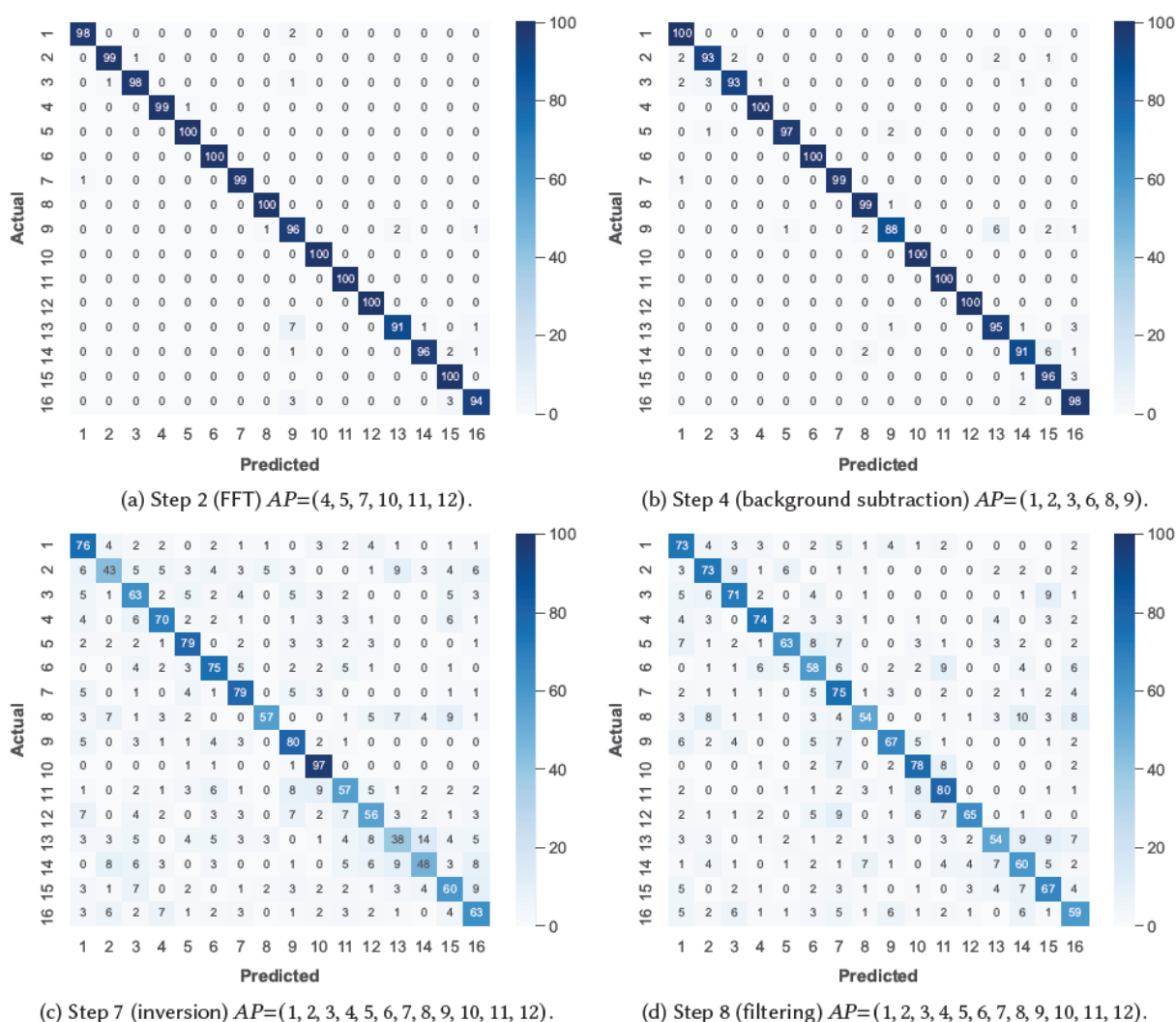


Figura 8. Matricele de confuzie pentru diverse configurații ale algoritmului de recunoaștere a gesturilor privind perechile de antene folosite și modulele de procesare a semnalelor radar.

Mai multe detalii privind algoritmul de recunoaștere a gesturilor se află în lucrarea:

Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt. (2022a). Hand Gesture Recognition for an Off-the-Shelf Radar by Electromagnetic Modeling and Inversion. In *Proceedings of UI '22, the 27th Int. 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**. De asemenea, o a doua lucrare, conținând rezultate extinse privind evaluarea performanței algoritmului de recunoaștere a gesturilor, se află în evaluare în cadrul revistei ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems:

Arthur Sluÿters, Sébastien Lambot, Jean Vanderdonckt, Radu-Daniel Vatavu. (2022b). RadarSense: Accurate Recognition of Mid-Air Hand Gestures with Radar Sensing and Few Training Examples. *ACM Trans. on Interactive Intelligent Systems*.

Aplicații care implementează interacțiuni folosind gesturi achiziționate cu senzori radar

În vederea explorării de noi oportunități aplicative pentru gesturile radar, am plecat de la rezultatele analizei critice a aplicațiilor din literatura științifică pentru controlul sistemelor informatice folosind gesturi 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 (figura 9) 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 10). Astfel de studii sunt utile pentru a scoate în evidență consensul pentru 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, 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, conform Villarreal-Narvaez *et al.* (2020). Magrofuoco *et al.* (2019) au raportat și analizat preferințele unui grup de participanți pentru a controla dispozitive IoT cu gesturi radar, furnizând printre rezultate și un dicționar alcătuit din 19 gesturi. Plecând de la acest rezultat, am propus o serie de 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. 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>

publicată în cadrul AVI '22, o conferință ACM de rang B conform clasificării ARC CORE.

De asemenea, am examinat 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 (figura 2) dar prezintă foarte bune oportunități de valorificare economică datorită prevalenței televizoarelor inteligente (*en.*: smart TV), respectiv a ecranelor tactile integrate în diverse forme: dispozitive mobile, purtabile, ecrane publice interactive, etc. Pentru implementarea practică, am folosit Walabot, un ecran TV Samsung UE55D (rezoluție 1920x1080 pixeli, 0.210x0.630mm pixel pitch, timp de răspuns 4ms) și un cadru tactil Samsung Touchscreen Overlay TM55LCC pentru ecranul TV, care poate detecta 10 atingeri simultane.

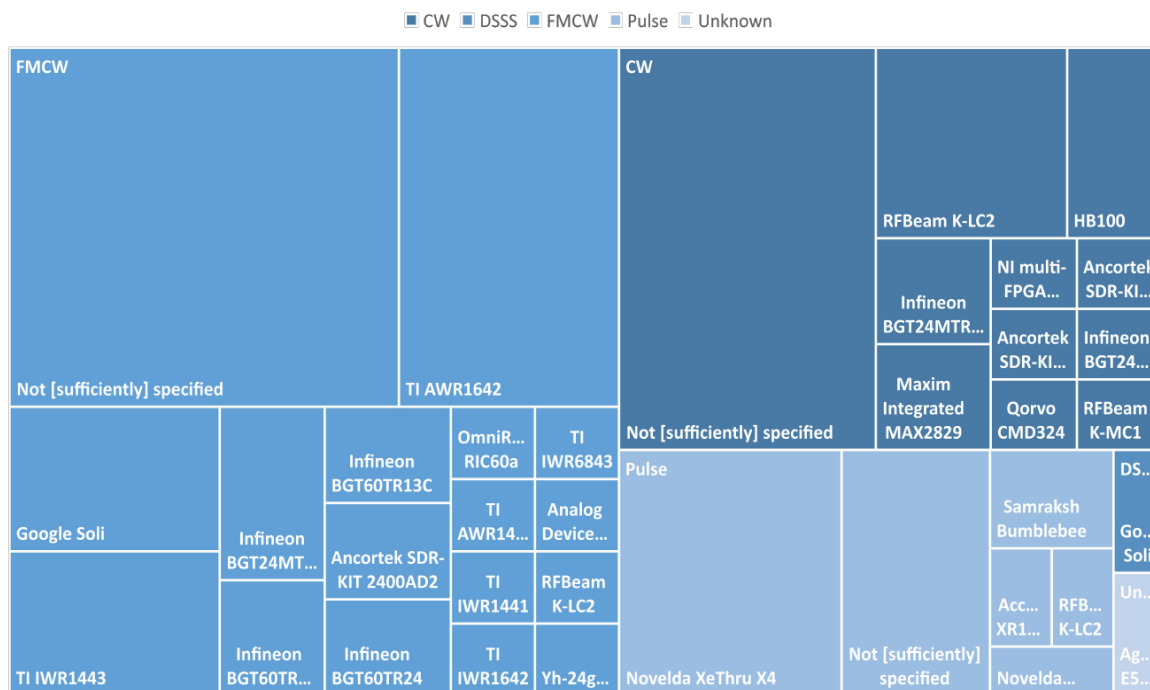


Figura 9. Tehnologii radar folosite pentru achiziția și recunoașterea gesturilor, prezentate în funcție de frecvența utilizării acestora în literatura științifică a domeniului (Sluyters *et al.*, 2022).

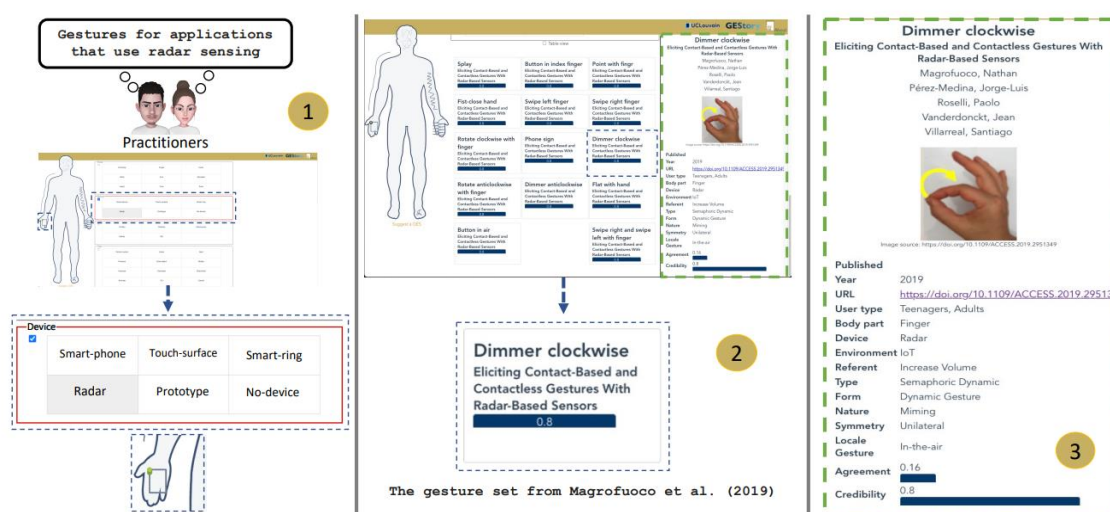


Figura 10. Rezultatele unei interogări pentru studii privind preferințele utilizatorilor pentru gesturi achiziționate cu senzori radar (Villarreal-Narvaez *et al.*, 2022).

Figura 11 (sus) prezintă șase gesturi propuse pentru controlul unui ecran TV, reprezentând diverse combinații de mișcări direcționale (“swipe left” și “swipe right”, conform gesturilor ilustrate în figura 7) executate la diverse distanțe față de senzorul 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).

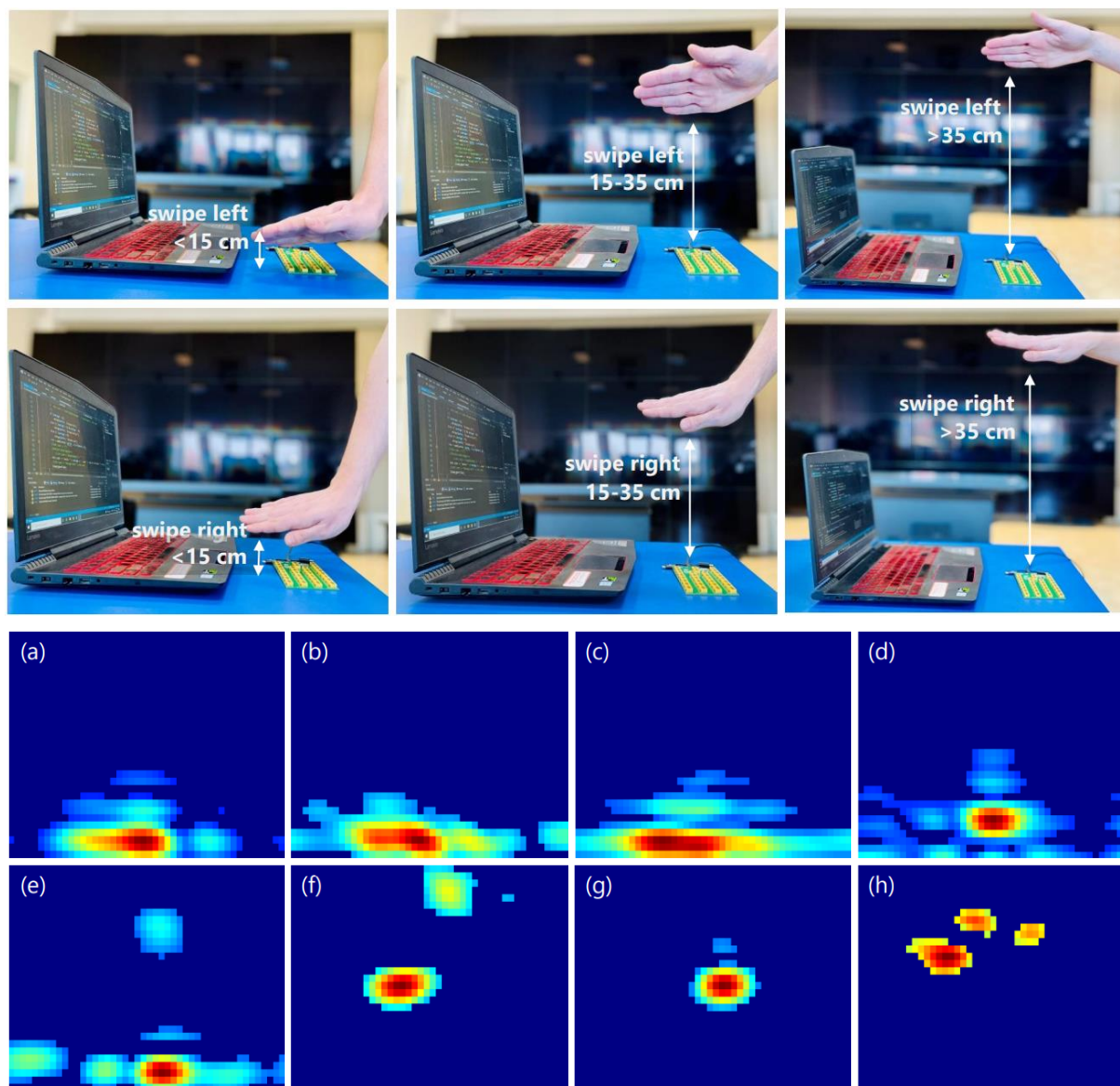


Figura 11. Gesturi direcționale executate la diverse distanțe față de senzorul radar Walabot (sus) și reprezentarea gestului static “mâna deschisă” în diverse condiții: (a) senzorul radar neacoperit, plasat pe o masă, (b) senzorul radar plasat sub masă, (c) senzorul radar acoperit, aflat într-o cutie, (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.

Plasarea senzorului radar pentru acest scenariu permite câteva posibilități interesante pentru un sistem interactiv. De exemplu, figura 11 (jos) prezintă diverse reprezentări bidimensionale (theta, R) ale gestului static “mâna deschisă” achiziționat cu senzorul Walabot plasat în diverse locații, e.g., în fața utilizatorului, lângă televizor și orientat către utilizator, plasat sub telecomanda TV sau într-un buzunar. Mai multe detalii se află în lucrarea:

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>

publicată în cadrul IMX 2022, o conferință ACM dedicată mediei interactive. A doua aplicație a vizat combinarea gesturilor de atingere realizate pe un ecran tactil cu gesturi executate liber în aer. Aplicația a fost implementată în cadrul unei ședințe de lucru desfășurată în comun de către membrii echipei laboratorului MintViz și echipei Université catholique de Louvain cu ocazia vizitei acestora din urmă la Universitatea din Suceava (figura 12). În cadrul aplicației, fiecare modalitate – interacțiune tactilă sau folosind gesturi executate în aer – își păstrează avantajele proprii, oferind utilizatorului o mai mare flexibilitate în timpul interacțiunii cu ecranul tactil.



Figura 12. Aplicație interactivă combinând gesturi de atingere și gesturi executate liber în aer.

Implementarea colaborării dintre parteneri

Două vizite de cercetare au fost planificate pentru anul 2021 la fiecare dintre cei doi parteneri, dar nu au putut fi realizate datorită restricțiilor de călătorie în vigoare în timpul pandemiei COVID-19. În aceste condiții, implementarea colaborării s-a realizat online (figura 13), pentru care au fost utilizate diverse instrumente: Overleaf pentru redactare colaborativă în LaTeX, Google Drive și Sheets pentru stocarea și analiza datelor pentru studiul SLR, Zotero pentru resurse bibliografice, etc.; a se vedea figura 14 pentru un exemplu. La o întâlnire organizată online în luna octombrie 2021 au participat 12 persoane, dintre care 10 doctoranzi, conform obiectivului proiectului de a implica un număr cât mai mare de tineri cercetători: drd. Alexandru-Ionuț Șiean, drd. Laura-Bianca Bilius, drd. Cristian Pamparău, drd. Alexandru-Tudor Andrei, drd. Adrian-Vasile Catană, drd. Mihail Terenti, drd. Santiago Villarreal, drd. Mehdi Ousmer, drd. Quentin Sellier și drd. Arthur Sluÿters.

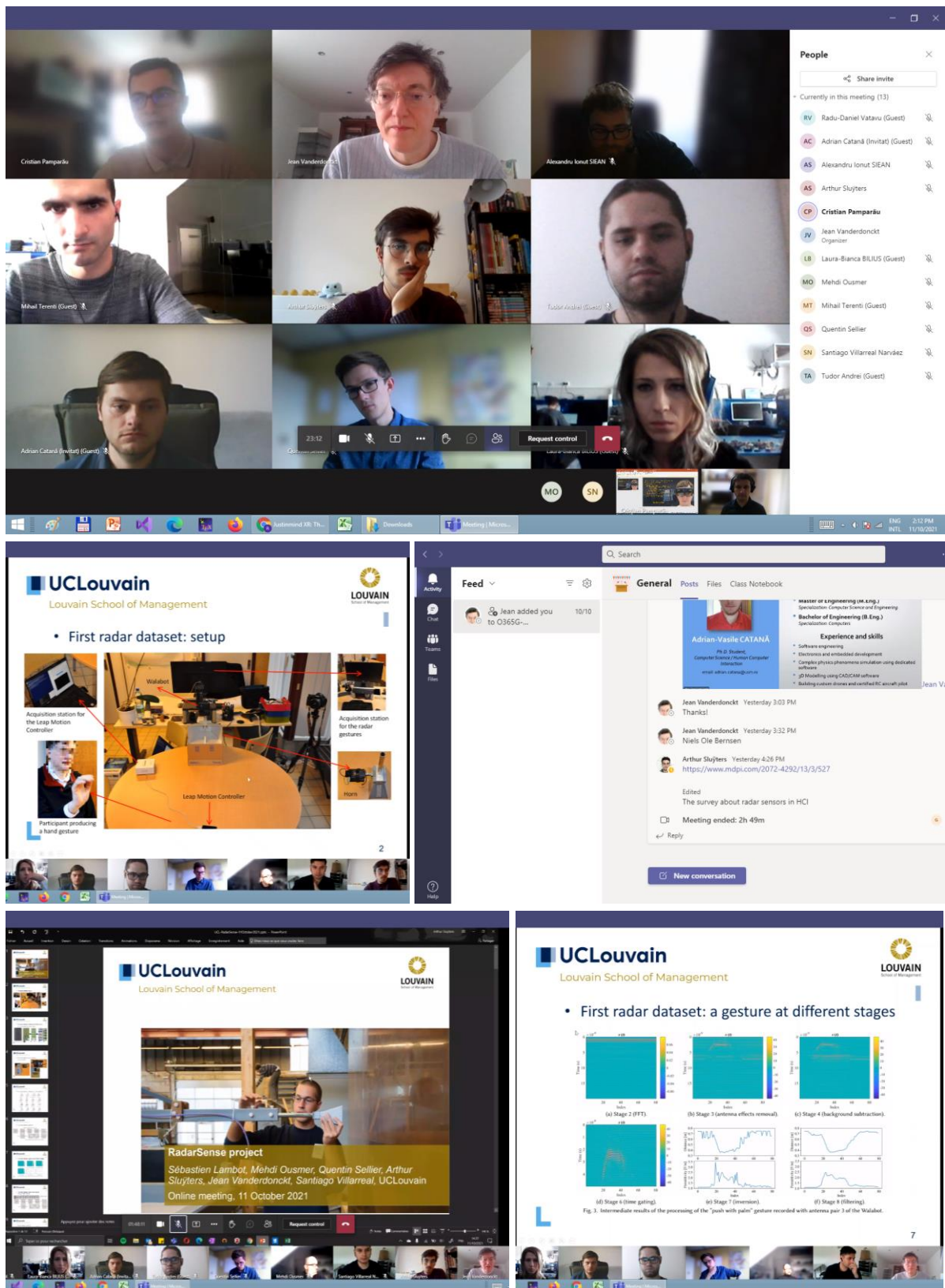


Figura 13. Implementarea colaborării online în timpul restricțiilor de călătorie din anul 2021. Întâlnirile online au permis participarea mai multor membri decât ar fi fost posibil în cazul deplasărilor fizice.

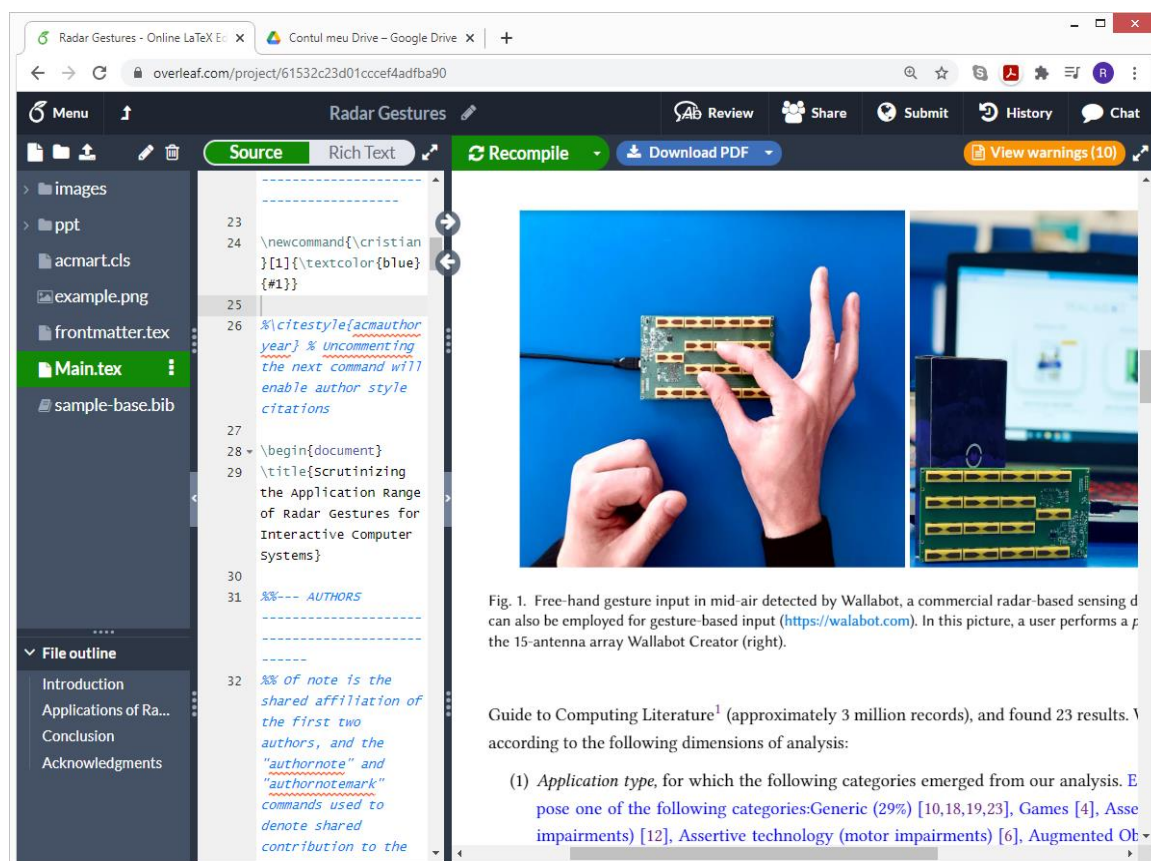


Figura 14. Exemplu al colaborării online prin intermediul platformei Overleaf.

Două vizite de lucru au fost realizate în anul 2022, 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 15). 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 16). 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 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.



Figura 15. Vizita de lucru a echipei Universității din Suceava la Université catholique de Louvain.

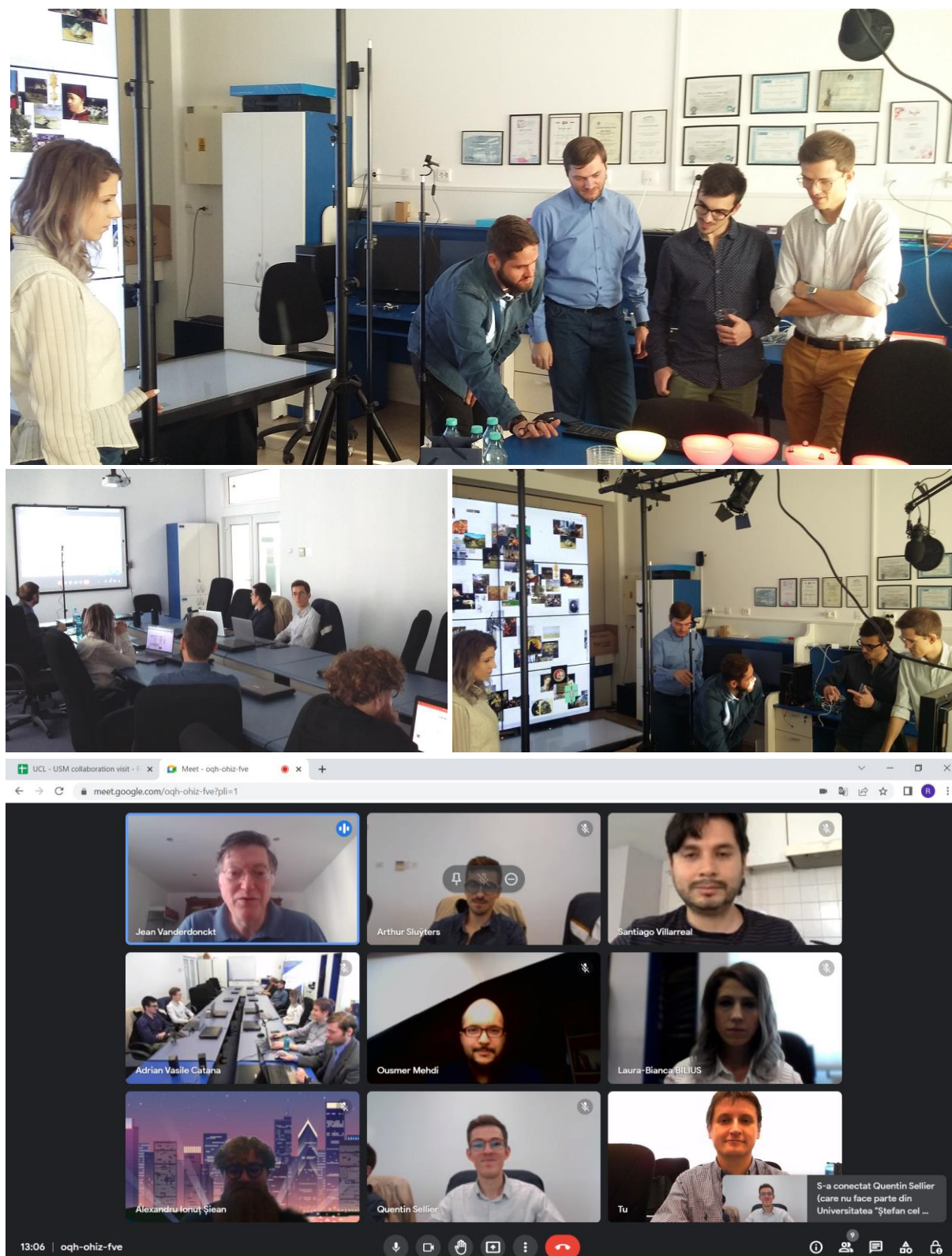


Figura 16. Vizita de lucru a echipei Université catholique de Louvain în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava. Restul echipei belgiene a participat prin video-conferință (jos).

Publicații științifice

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, NY, USA. **Rata de acceptare: 62/253=24.5% | ARC A | BEST PAPER AWARD**
<https://doi.org/10.1145/3490099.3511107>
2. Alexandru-Ionuț Șean, 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 Șean, 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 Șean, 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=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=1.887**), **ÎN EVALUARE**

Pe baza rezultatelor obținute, publicațiilor realizate și a colaborării implemente între cei doi parteneri, considerăm obiectivele tehnice și științifice ale proiectului îndeplinite în procent de 100%.

MODUL DE ATRIBUIRE ȘI EXPLOATARE DE CĂTRE PARTENERI A DREPTURILOR DE PROPRIETATE ASUPRA REZULTATELOR PROIECTULUI

Conform contractului încheiat cu UEFISCDI, "Rezultatele cercetărilor obținute pe baza derulării contractului aparțin Contractorului, partenerilor acestuia în cadrul proiectului și/sau angajaților acestora, conform Anexei VII la prezentul contract - Acord Ferm de Colaborare, parte integrantă a acestuia și conform legislației în vigoare referitoare la titlurile de proprietate industrială și drepturile de autor. Rezultatele cercetărilor sunt administrate de proprietarii acestora, cu toate drepturile care decurg din calitatea de proprietar." (Art. 16). Prin urmare, drepturile de proprietate intelectuală revin membrilor echipei care au contribuit la obținerea rezultatelor respective, cuprinse în acest raport, care au fost validate prin publicații științifice cu indicarea explicită a autorilor și ordinii acestora.

IMPACTUL ESTIMAT AL REZULTATELOR CU SUBLINIAREA CELUI MAI SEMNIFICATIV

Cel mai semnificativ rezultat al acestui proiect este reprezentat de un nou algoritm de recunoaștere a gesturilor achiziționate cu senzori radar (Sluÿters *et al.*, 2022a; 2022b), care a introdus operații

specifice de procesare a semnalelor radar. De asemenea, rezultatele obținute în cadrul acestui proiect de cooperare bilaterală au indicat un număr limitat de lucrări științifice care să adreseze aplicații ale interacțiunii cu sisteme informatice folosind gesturi achiziționate cu senzori radar, în timp ce majoritatea algoritmilor de recunoaștere au fost proiectați pentru sau evaluați cu seturi de gesturi de mici dimensiuni. Cele două aplicații practice explorate în cadrul proiectului, *i.e.*, controlul ecranelor TV de la distanță și augmentarea interacțiunii tactile, prezintă un potențial de valorificare economică care poate fi examinat în continuare. De exemplu, controlul televizoarelor inteligente (*en.*: 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 2025, <https://www.statista.com/statistics/878372/smart-tv-unit-sales-worldwide>). De asemenea, noi tipuri de interacțiuni combinând gesturile de atingere cu cele de mișcare liberă executate în aer pot fi oportune pentru aplicații destinate ecranelor publice ambientale cu o piață aflată în creștere și estimări de peste 15 miliarde USD pentru anul 2025 privind echipamente, aplicații software și servicii aferente, conform unui raport Statista din 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.

REZUMAT ÎN LIMBA ROMANĂ (MAXIM 3 PAGINI)

În acest proiect de cooperare bilaterală am propus și implementat noi algoritmi și aplicații software pentru a demonstra interacțiuni cu sistemele informatice bazate pe gesturi ce pot fi detectate cu ajutorul senzorilor radar. Proiectul este derulat în cadrul parteneriatului dintre Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava (Laboratorul de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației, <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 senzori radar în diverse aplicații, cum ar fi controlul ecranelor la distanță și augmentarea interacțiunii tactile.

În cadrul primei etape de implementare a proiectului de cooperare bilaterală, am realizat un studiu sistematic asupra literaturii științifice dedicate interacțiunii cu sistemele informatice bazate pe gesturi achiziționate cu senzori radar, punând accent asupra aplicațiilor acestora. Rezultatele noastre au scos în evidență diverse eforturi ale comunității științifice în ceea ce privește dezvoltarea de noi algoritmi de recunoaștere a gesturilor (mai mult de jumătate dintre lucrările examinate), dar o orientare mai scăzută asupra oportunităților aplicative ale acestora. Drept urmare, explorarea de aplicații ale interacțiunii gestuale folosind tehnologii și senzori radar se dovedește deosebit de importantă cu multiple oportunități de inovare. De asemenea, am propus și implementat un nou algoritm de recunoaștere a gesturilor achiziționate cu senzori radar.

În cadrul celei de-a doua etape, am realizat evaluarea performanțelor tehnice ale algoritmului de recunoaștere a gesturilor achiziționate cu senzori radar și am propus aplicații interactive care folosesc astfel de gesturi (figura 17). În acest scop, am folosit infrastructura Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației și a laboratorului Louvain Interaction Lab în ce privește senzori radar și dispozitive cu ecran tactil. Rezultatele noastre au indicat o acuratețe de 74.3% 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 radar. De asemenea, rezultatele etapei au scos în evidență oportunități pentru folosirea gesturilor achiziționate cu senzori radar pentru noi aplicații interactive, cum ar fi controlul ecranelor TV de la distanță și augmentarea interacțiunii cu suprafețele tactile. Aceste rezultate recomandă examinarea în viitor a gesturilor achiziționate cu senzori radar, cum ar fi gesturile bimanuale sau gesturile detectate în combinație cu alți senzori și alte tipuri de dispozitive.

Aplicațiile gesturilor achiziționate cu senzori radar prezintă un bun potențial de valorificare economică. De exemplu, controlul televizoarelor inteligente 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 combinând gesturile de atingere cu cele de mișcare liberă executate în aer pot fi oportune pentru aplicații destinate ecranelor publice ambientale cu o piață aflată în creștere și estimări de peste 15 miliarde USD pentru anul 2025 privind echipamente, aplicații software și servicii aferente, conform unui raport Statista din 2020 <https://www.statista.com/statistics/1017130/united-states-interactive-kiosk-market-component>. Recomandăm ca astfel de oportunități să fie explorate în cadrul cercetărilor și proiectelor viitoare. De asemenea, rezultatele noastre au scos în evidență lipsa studiilor pentru identificarea preferințelor utilizatorilor privind gesturi achiziționate cu senzori radar și am oferit recomandări pentru noi studii în această direcție.

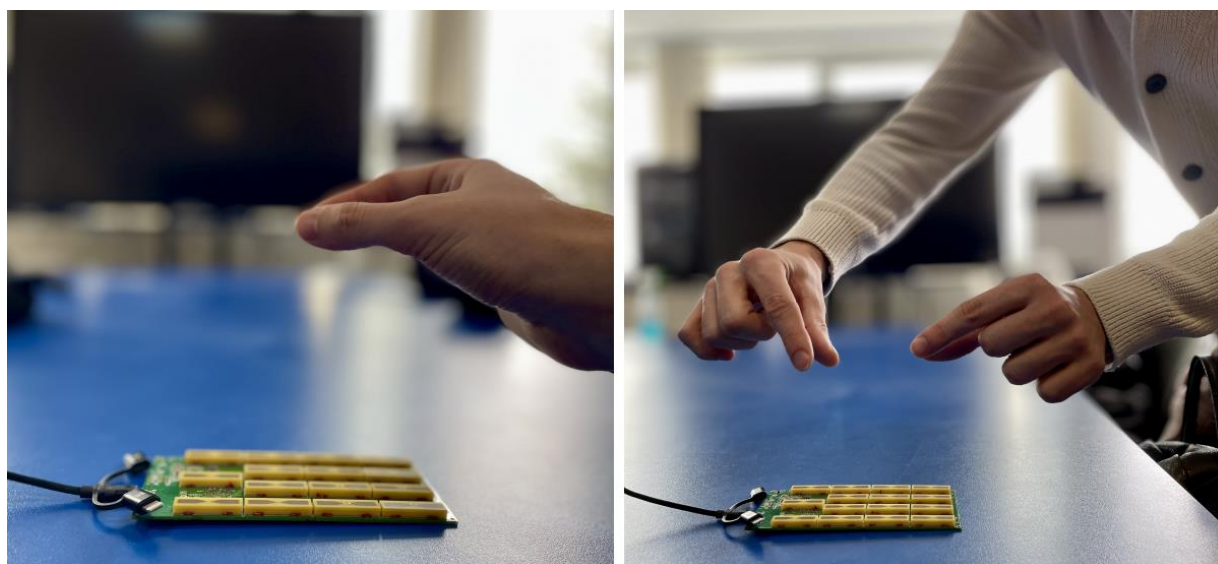


Figura 17. Exemple de gesturi unimanuale și bimanuale efectuate în proximitatea senzorului radar Walabot. Fotografiiile au fost realizate în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava.

Colaborarea dintre cei doi parteneri a fost implementată online în anul 2021 datorită contextului pandemic și restricțiilor de călătorie, respectiv prin vizite de lucru organizate în anul 2022 în cadrul Laboratorului de cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava și în cadrul Louvain Interaction Lab al Université catholique de Louvain.

Rezultatele proiectului 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, o conferință ACM de rang A conform clasificării ARC CORE, iar alte două lucrări se află în evaluare.

REZUMAT ÎN LIMBA ENGLEZĂ (MAXIM 3 PAGINI)

In this bilateral cooperation project, we have designed and implemented new algorithms and software applications to demonstrate new interactions with computer systems based on gestures that can be detected using radar sensors. The project was carried out within the partnership between Ștefan cel Mare University of Suceava (the Machine Intelligence and Information Visualization Laboratory, MintViz, <http://www.eed.usv.ro/mintviz>) and Université catholique de Louvain (Louvain Interaction Lab, <https://uclouvain.be/fr/repertoires/jean.vanderdonckt>). The general objective of the project was supporting the scientific collaboration between the two partners to carry out joint research activities for the interaction with computer systems based on gestures detected with radar sensors. The specific objectives of the collaboration were:

- O1. Carrying out a critical analysis of the interactive techniques and applications from the scientific literature for gestural control of computer systems using radar sensors.
- O2. Proposing an algorithmic solution for the recognition of gestures acquired with radars and represented in the form of radar signals.
- O3. Demonstrating gesture-based interactions acquired with radars for applications, such as remote TV control and augmented touch input.

In the first stage of the bilateral cooperation project, we carried out a systematic review of the scientific literature dedicated to interacting with computer systems with gestures acquired using radar sensors with an emphasis on practical applications. Our results highlighted many efforts of the scientific community for the development of gesture recognition algorithms (more than half of the papers that we analyzed in our review), but a lower focus on application opportunities. As a result, exploring applications of gestural interaction using radar sensors and technologies is particularly important due to the corresponding significant opportunities for innovation. We also proposed and implemented a new algorithm for recognizing gestures acquired with radar sensors.

In the second stage of our project, we evaluated the technical performance of the recognition algorithm of gestures acquired with radar sensors and proposed new interactive applications that use radar gestures (Figure 18). For this purpose, we used the infrastructure of the Machine Intelligence and Information Visualization Research Laboratory and the Louvain Interaction Lab represented by radar sensors and touchscreens. Our results indicated an accuracy of 74.3% for a set of 16 distinct gestures, which were recognized in an average time of 2.2ms using specific configurations of radar antennas and gesture processing modules. Our results also highlighted opportunities for using gestures acquired with radar sensors for new interactive applications, such as

TV control and augmenting touch input interactions. These results recommend future exploration of gestures that can be acquired with radar sensors, such as bimanual gestures or gestures detected in combination with other sensors and devices.

The applications of gestures acquired using radar sensors present a good potential for economic exploitation. For example, smart TVs are a growing market with an estimated 266 million units to be sold by 2025, <https://www.statista.com/statistics/878372/smart-tv-unit-sales-worldwide>. Also, new types of interactions combining touch and mid-air gestures may be appropriate for applications running on ambient public displays with a growing market and estimates of more than USD 15 billion by 2025 for hardware, software applications and related services, according to a 2020 Statista report <https://www.statista.com/statistics/1017130/united-states-interactive-kiosk-market-component>. We recommend that such opportunities be explored in future research projects. Our results also highlighted the lack of studies to identify users' preferences for gestures acquired with radar sensors, and we have provided recommendations for further studies in this direction.

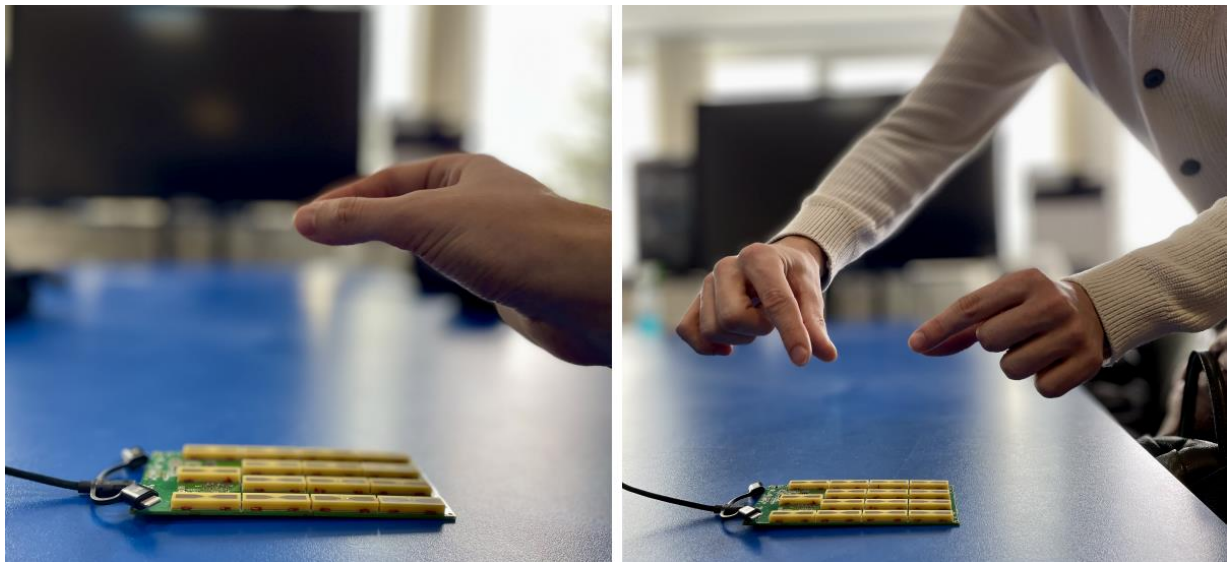


Figure 18. Examples of unimanual and bimanual gestures performed in the proximity of the Walabot radar sensor. The photos were taken in the Machine Intelligence and Information Visualization Research Laboratory of the Ștefan cel Mare University of Suceava.

The collaboration between the two partners was implemented online in 2021, because of the pandemic context and the corresponding travel restrictions, and with research missions organized in 2022 at the Machine Intelligence and Information Visualization Research Laboratory of the Ștefan cel Mare University of Suceava and the Louvain Interaction Lab of Université catholique de Louvain.

The results of the project were published in three scientific papers, one of which received the **Best Paper Award** at the ACM International Conference on Intelligent User Interfaces, an ACM A-ranked conference according to the ARC CORE classification. Two other papers are under review.

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 Trans. Interact. Intell. Syst.* 10(1), articol nr. 11. <https://doi.org/10.1145/3241383>
- Gigie et al. (2019) Andrew Gigie, Smriti Rani, Arijit Chowdhury, Tapas Chakravarty, Arpan Pal. 2019. An agile approach for human gesture detection using synthetic radar data. In *Adjunct Proceedings of the ACM Int. Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. ACM, New York, NY, USA, 558–564. <https://doi.org/10.1145/3341162.3349332>
- Iwamoto et al. (2010) Takahisa Iwamoto, Atsushi Karino, Masayuki Hida, Atsushi Nishizaki, Tomoyuki Takami. 2010. Development of Wall Amusements Utilizing Gesture Input. In *Proceedings of the 9th International Conference on Entertainment Computing (ICEC'10)*. Springer, 499–501. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1881673.1881757>
- Lambot și André (2014) Lambot, S., André, F. (2014). Full-Wave Modeling of Near-Field Radar Data for Planar Layered Media Reconstruction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(5), 2295-2303. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2259243>
- Leiva et al. (2020) Luis A. Leiva, Matjaz Kljun, Christian Sandor, Klen Copic Pucihar. 2020. The Wearable Radar: Sensing Gestures Through Fabrics. In *Proc. of the 22nd Int. Conf. on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '20)*. ACM, New York, NY, USA, Article 17, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3406324.3410720>
- Li et al. (2015) Zheng Li, Ryan Robucci, Nilanjan Banerjee, Chintan Patel. 2015. Tongue-n-Cheek: Non-Contact Tongue Gesture Recognition. In *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '15)*. ACM, New York, NY, USA, 95–105. <https://doi.org/10.1145/2737095.2737109>
- Liberati et al. (2009) Alessandro Liberati, D. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. Gøtzsche, J. Ioannidis, M. Clarke, P.J. Devereaux, J. Kleijnen, D. Moher. 2009. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- 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 Trans. Graph.* 35(4), articol nr. 142. <https://doi.org/10.1145/2897824.2925953>
- Liu et al. (2020) Haipeng Liu, Yuheng Wang, Anfu Zhou, Hanyue He, Wei Wang, Kunpeng Wang, Peilin Pan, Yixuan Lu, Liang Liu, Huadong Ma. 2020. Real-time Arm Gesture Recognition in Smart Home Scenarios via Millimeter Wave Sensing. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiq. Technol.* 4(4). <https://doi.org/10.1145/3432235>
- 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>
- Magrofuoco et al. (2022) Nathan Magrofuoco, Paolo Roselli, Jean Vanderdonckt. (2022). Two-dimensional Stroke Gesture Recognition: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 54(7): 155:1-155:36.

<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3465400>

- Patra et al. (2018) Avishek Patra, Philipp Geuer, Andrea Munari, Petri Mähönen. 2018. Mm-Wave Radar Based Gesture Recognition: Development and Evaluation of a Low-Power, Low-Complexity System. In *Proc. of the 2nd Workshop on Millimeter Wave Networks and Sensing Systems*. ACM, 51–56. <https://doi.org/10.1145/3264492.3264501>
- Pursell and McCrae (2020) Pursell, E., McCrae, N. 2020. How to Perform a Systematic Literature Review: A Guide for Healthcare Researchers, Practitioners and Students. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-49672-2>
- 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. *Ext. Abstracts of the Conf. on Human Factors in Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/3290607.3312986>
- Salami et al. (2021) Sameera Palipana, Dariush Salami, Luis A. Leiva, Stephan Sigg. 2021. Pantomime: Mid-Air Gesture Recognition with Sparse Millimeter-Wave Radar Point Clouds. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 5(1), articol nr. 27. <https://doi.org/10.1145/3448110>
- 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, 1–9. <https://doi.org/10.1109/SECON48991.2020.9158441>
- Siddaway et al. (2019) A.P. Siddaway, A.M. Wood, L.V. Hedges. 2019. 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*, 747–770. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
- Șiean and Vataavu (2021) Alexandru-Ionut Șiean, Radu-Daniel Vataavu. 2021. Wearable Interactions for Users with Motor Impairments: Systematic Review, Inventory, and Research Implications. *Proc. of the 23rd Int. ACM SIGACCESS Conf. on Computers and Accessibility*. New York, NY, USA: ACM, articol nr. 7, 1-15. <https://doi.org/10.1145/3441852.3471212>
- Vataavu and Bilius (2021) Radu-Daniel Vataavu, Laura-Bianca Bilius. 2021. GestuRING: A Web-based Tool for Designing Gesture Input with Rings, Ring-Like, and Ring-Ready Devices. *Proc. of UIST '21, the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: ACM, 710-723. <https://doi.org/10.1145/3472749.3474780>
- Villarreal-Narvaez et al. (2020) Santiago Villarreal-Narvaez, Jean Vanderdonckt, Radu-Daniel Vataavu, 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-Ionut Șiean, Arthur Sluÿters, Radu-Daniel Vataavu, 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, 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>
- Wang et al. (2016) Saiwen Wang, Jie Song, Jaime Lien, Ivan Poupyrev, Otmar Hilliges. 2016. Interacting with Soli: Exploring Fine-Grained Dynamic Gesture Recognition in the Radio-Frequency Spectrum. In *Proc. of the 29th Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, 851–860. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984565>
- Wang et al. (2019) Zhu Wang, Xinye Lou, Zhiwen Yu, Bin Guo, and Xingshe Zhou. 2019. Enabling Non-Invasive and Real-Time Human-Machine Interactions Based on Wireless Sensing and Fog Computing. *Personal Ubiquitous Comput.* 23(1), 29–41. <https://doi.org/10.1007/s00779-018-1185-7>
- Wobbrock et al. (2009) Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, Andrew D. Wilson. 2009. User-defined gestures for surface computing. In *Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 1083–1092. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518866>
- Wohlin, 2014 Claes Wohlin. 2014. Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering. *Proc. of the Int. Conf. on Evaluation and Assessment in Soft. Engineering*. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Yeo et al. (2017) Hui-Shyong Yeo, Barrett Ens, Aaron Quigley. 2017. Tangible UI by Object and Material Classification with Radar. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies*. ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3132818.3132824>
- Yeo et al. (2018) Hui-Shyong Yeo, Ryosuke Minami, Kirill Rodriguez, George Shaker, Aaron Quigley. 2018. Exploring Tangible Interactions with Radar Sensing. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 2(4). <https://doi.org/10.1145/3287078>
- Zhang et al. (2018) Zhenyuan Zhang, Zengshan Tian, Zhou Mu, Yi Liu. 2018. Application of FMCW Radar for Dynamic Continuous Hand Gesture Recognition. In *Proc. of the 11th EAI Int. Conference on Mobile Multimedia Communications*, 298–303. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3290227.3290236>
- Zhang et al. (2020) K. Zhang, Z. Yu, D. Zhang, Z. Wang, B. Guo. 2020. RaCon: A Gesture Recognition Approach via Doppler Radar for Intelligent Human-Robot Interaction. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops*, 1-6. <http://dx.doi.org/10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156109>
- Zhang et al. (2021) Bo Zhang, Lei Zhang, Mojun Wu, Yan Wang. 2021. Using Auto-Encoder Neural Networks for Memory Fault Tolerance in Gesture Recognition System. In *Proc. of the 6th International Conference on Mathematics and Artificial Intelligence*. ACM, New York, NY, USA, 25–33. <https://doi.org/10.1145/3460569.3460571>

Director proiect,

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