

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC ÎN EXTENSO

Etapă nr. 1, anul 2021

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
Realizarea unei analize critice asupra tehnicilor interactive și aplicațiilor din literatura științifică pentru controlul gestual al sistemelor informatice folosind tehnologii radar	2
Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor achiziționate sub formă de semnale radar.....	6
Implementarea colaborării dintre parteneri	9
REZUMAT EXECUTIV AL ACTIVITĂȚILOR REALIZATE ÎN PERIOADA DE IMPLEMENTARE (MAXIM 1 PAGINĂ).....	12
POSSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE ECONOMICĂ A REZULTATELOR OBTINUTE	13
REFERINȚE	13

OBIECTIVELE GENERALE URMĂRITE

Prin acest proiect de cooperare bilaterală dorim să propunem și să dezvoltăm noi abordări algoritmice și aplicații software pentru demonstrarea interacțiunilor bazate pe gesturi ce pot fi detectate cu ajutorul echipamentelor de tip radar. Proiectul este derulat în parteneriatul format dintre Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava (Laboratorul de 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.vanderdonck>). 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 pe bază de gesturi folosind tehnologii radar. Obiectivele specifice ale colaborării sunt:

- O1. Realizarea unei analize critice asupra tehnicilor interactive și aplicațiilor din literatura științifică pentru controlul gestual al sistemelor informatice folosind tehnologii radar.
- O2. Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor achiziționate 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 în contextul televiziunii interactive și augmentarea suprafețelor interactive.

OBIECTIVELE FAZEI DE EXECUȚIE

Conform planului de realizare a proiectului de cooperare bilaterală, Etapa nr. 1 aferentă anului 2021, intitulată *“Dezvoltare tehnologie: detecție radar, algoritmi și tehnici de interacțiune”*, cuprinde activități privind analiza critică a algoritmilor, tehnicilor și aplicațiilor radar în domeniul interacțiunii om-calculator (obiectivul O1), respectiv propunerea unui algoritm nou de recunoaștere a gesturilor bazat pe tehnici de tip Machine Learning sau Deep Learning și evaluarea performanței tehnice (obiectivul O2). Rezultatul așteptat pentru Etapa nr. 1 de implementare a proiectului este Raportul de cercetare al etapei (acest raport).

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

Realizarea unei analize critice asupra tehnicilor interactive și aplicațiilor din literatura științifică pentru controlul gestual folosind tehnologii radar

Pentru a adresa primul obiectiv al etapei, am realizat un studiu de tip Systematic Literature Review (SLR) al literaturii științifice din domeniul interacțiunii gestuale bazate de dispozitive de achiziție a gesturilor de tip radar, pentru care am urmat recomandările Liberati *et al.* (2009), Siddaway *et al.* (2019) și Pursell și McCrae (2020) privind proiectarea și derularea unui SLR, respectiv raportarea PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews

and Meta-Analyses).¹ Studiile SLR sau TLR (Targeted Literature Review) privind sistemele și tehnologiile interactive sunt utile pentru a înțelege practici, trenduri, dar și oportunități de a inova în domeniul interacțiunii om-calculator (HCI); a se vedea Magrofuoco *et al.* (2022), Șiean și Vatavu (2021), Vatavu 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 este orientată asupra aplicațiilor interacțiunilor bazate pe gesturi folosind dispozitive radar, identificarea de publicații relevante în această direcție în cadrul ACM Digital Library este justificată de indexarea principalelor conferințe și reviste ale SIGCHI (Special Interest Group in Computer-Human Interaction) în această bază de date, cum ar fi CHI, UIST, DIS, IWMUT, IUI, ICMI, etc.; a se vedea figura 1 pentru o ilustrare a etapelor de identificare, screening, eligibilitate și snowballing pentru studiul nostru SLR, în accord cu procedurile prezentate în (Liberati *et al.*, 2009; Siddaway *et al.*, 2019). Următoarele criterii de eligibilitate (EC) au fost alese pentru a selecta din rândul rezultatelor obținute în urma rulării interogării de mai sus doar acele articole științifice relevante pentru subiectul nostru de investigație:

- EC1: *Doar lucrări științifice.* Lucrările selectate pentru studiul nostru trebuie să fi fost evaluate în cadrul unui sistem academic de tip peer-review. Acestea pot include lucrări lungi sau scurte publicate în volumele conferințelor (full/short papers), lucrări de tip late-breaking results sau work-in-progress care au trecut prin peer-review și articole publicate în reviste, în timp ce broșuri, whitepapers, sau descrieri ale conferințelor/workshop-urilor indexate în baza de date sunt excluse de acest criteriu.
- EC2: *Lucrări științifice care folosesc tehnologia radar.* Am eliminat acele lucrări care nu tratau tehnologii de tip 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 echipamente de tip radar.

După aplicarea celor trei criterii de eligibilitate, am obținut un număr 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 tip *backward* și *forward snowballing* (Wohlin, 2014) care au

¹ <http://www.prisma-statement.org>

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

presupus o analiză a unui număr de 423 de referințe (backward snowballing), respectiv 911 citări Google Scholar (forward snowballing), din care am selectat 31 de noi lucrări științifice relevante pentru interacțiunea gestuală folosind tehnologii radar. Figura 1 prezintă rezultatele fiecărei etape din cadrul studiului nostru de tip SLR. Cele 45 de lucrări științifice eligibile au fost analizate în conformitate cu următoarele criterii: (1) *tipul aplicației* în care au fost folosite comenzile gestuale și (2) *proiectarea interacțiunii gestuale*, pentru care am luat în considerare aspecte specifice, cum ar fi cardinalitatea mulțimii de gesturi ale interfețelor acestor sisteme, tipul gesturilor, respectiv detalii privind tehnicile de recunoaștere folosite.

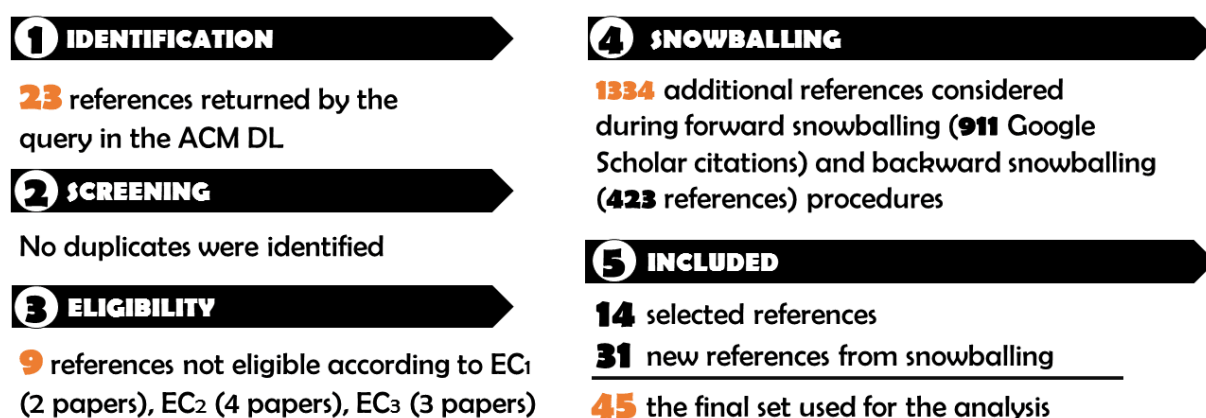


Figura 1. Diagrama PRISMA pentru studiul nostru Systematic Literature Review, ilustrând rezultatele etapelor de *identificare*, *screening*, *eligibilitate* și *snowballing* pentru lucrări științifice în domeniul interacțiunii bazate pe gesturi folosind echipamente radar.

Figura 2 ilustrează tipul aplicațiilor, pentru care insistăm asupra a două observații. În primul rând, putem remarca un număr majoritar de lucrări științifice ($25/45=55.6\%$) care s-au concentrat pe aspecte tehnice ale implementării interacțiunilor bazate pe gesturi (e.g., algoritmi de recunoaștere a gesturilor), fără a avea în vedere o aplicație anume. În al doilea rând, remarcăm o diversitate a aplicațiilor adresate în literatura științifică care au incorporat gesturi achiziționate folosind tehnologii radar, de la controlul roboților (Zhang *et al.*, 2020; Salami *et al.*, 2021) la obiecte augmentate (Pucihar *et al.* 2019), case smart (Liu *et al.*, 2020; Wan *et al.*, 2014) și tehnologii asistive pentru persoane cu dizabilități (Li *et al.*, 2015; Santhalingam *et al.*, 2020). Aceste rezultate arată oportunități pentru interacțiunea bazată pe gesturi achiziționate cu echipamente radar, pentru care aplicațiile sunt puțin examinate în literatura științifică (doar $20/45=44.4\%$ din lucrările identificate au discutat o aplicație). Figura 2, interior ilustrează modul de validare a contribuțiilor științifice din lucrările evaluate în cadrul studiului nostru SLR, după cum urmează: evaluarea performanței tehnice, de exemplu a unui algoritm de recunoaștere a gesturilor (67.74%), demonstrația sub formă de aplicații ale interacțiunii gestuale (30.65%), respectiv studii implicând utilizatori pentru a documenta comportamentul sau percepția acestora privind interacțiunea prin gesturi folosind dispozitive de tip radar (1.61%). Aceste rezultate arată o lipsă a studiilor utilizator,

doar Liu *et al.* (2020) adresând aspecte privind experiența utilizatorilor, cum ar fi nivelul de interactivitate sau cât de convenabilă este tehnologia interactivă bazată pe comenzi gestuale pentru atingerea unui scop anume.

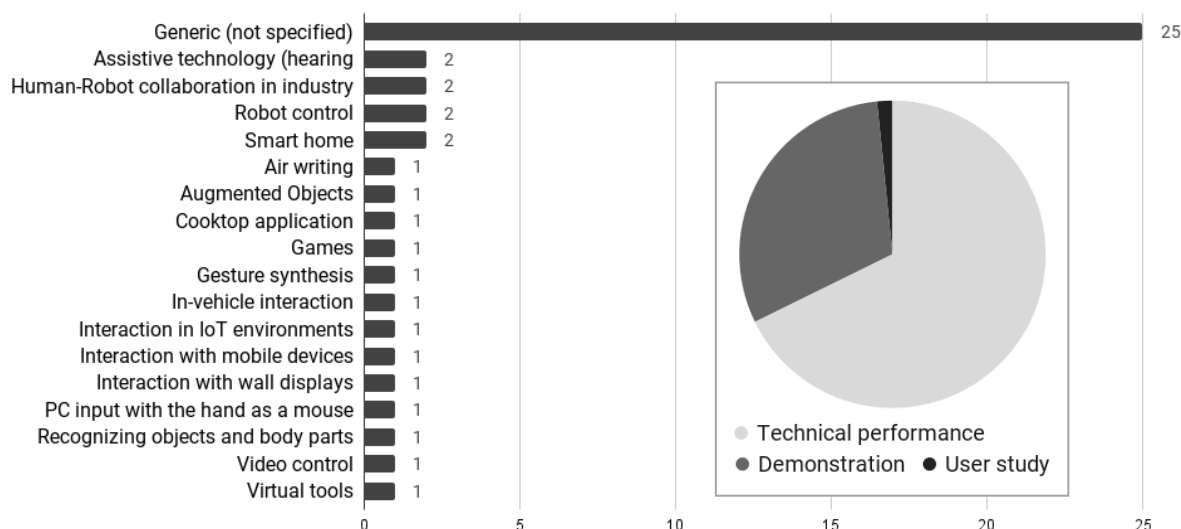


Figura 2. Aplicații ale interacțiunii bazate pe gesturi achiziționate cu dispozitive radar.
Graficul din interior prezintă modurile de validare a contribuțiilor științifice.

Am identificat un număr total de 307 gesturi în cele 45 de lucrări examinate în studiul nostru SLR: un număr minim de 3 gesturi, maxim 24, $M=7.31$ și $SD=4.78$; vezi figura 4. O ilustrare a celor mai frecvente gesturi este prezentată în figura 3.

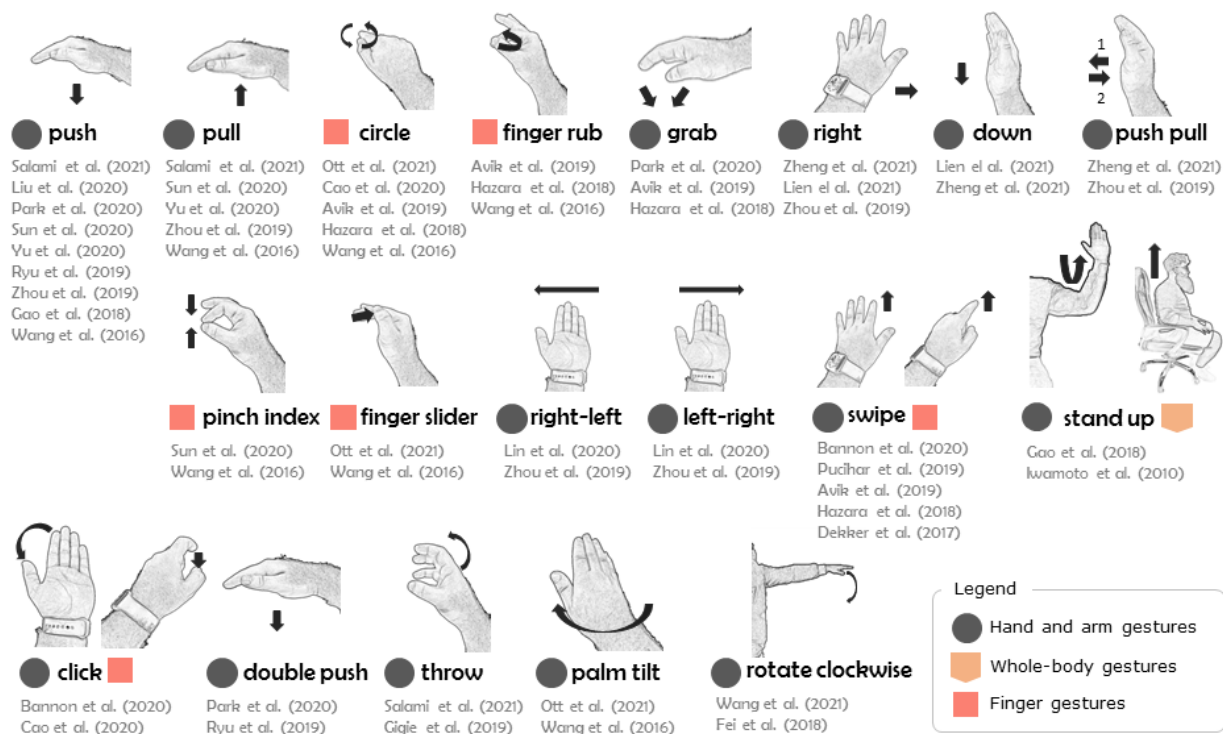


Figura 3. Ilustrare a celor mai frecvente gesturi identificate în literatura științifică a interacțiunilor bazate pe comenzi gestuale achiziționate folosind echipamente radar.

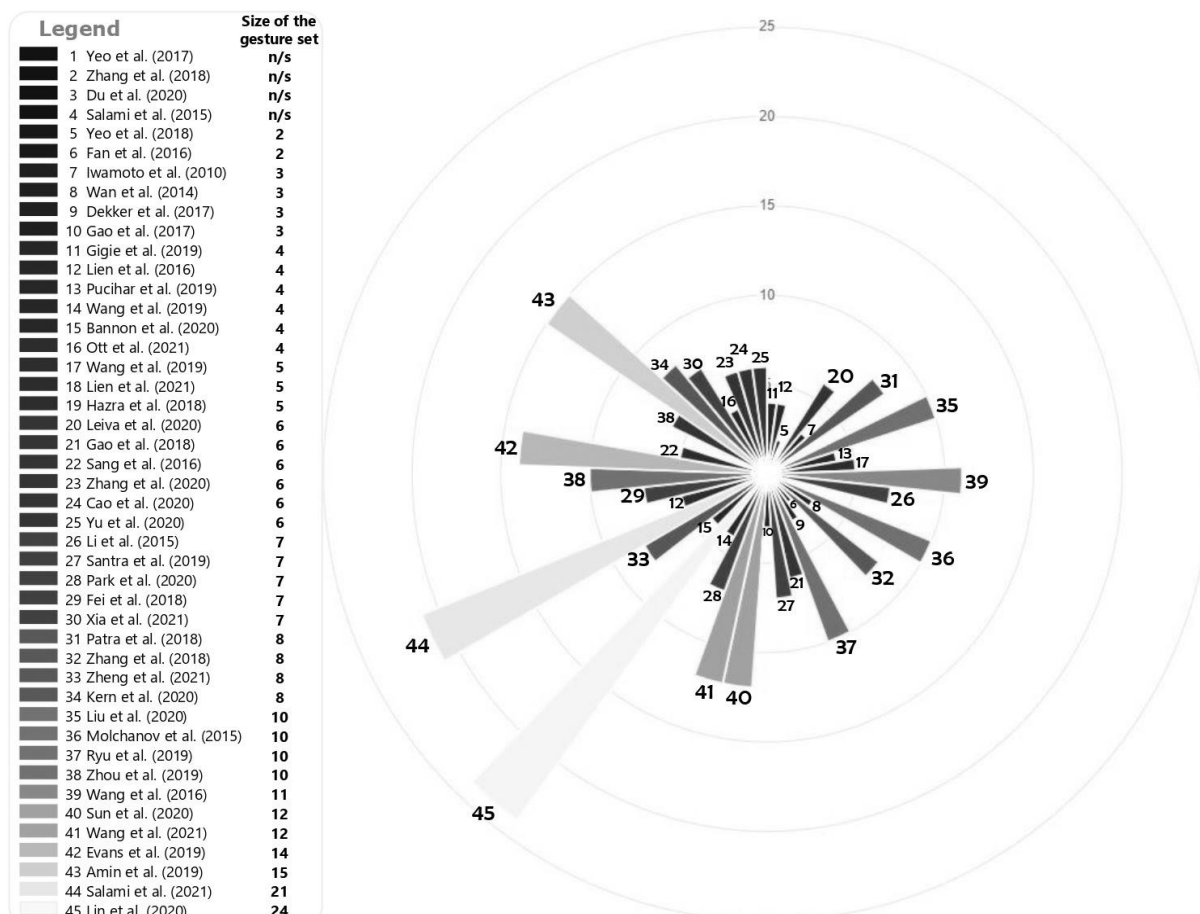


Figura 4. Dimensiunea seturilor de gesturi folosite în lucrările din literatura științifică care au adresat echipamente radar pentru achiziția și recunoașterea gesturilor ($M=7.31$, $SD=4.78$).

Aceste rezultate conduc către oportunitatea desfășurării de noi studii utilizator pentru a completa literatura științifică a domeniului, dar și către explorarea de noi aplicații și soluții tehnice pentru achiziția și recunoașterea gesturilor de tip radar, în special privind alte tipuri de gesturi (a se vedea figura 3) precum și pentru seturi mai mari de gesturi (figura 4).

Propunerea unei soluții algoritmice pentru recunoașterea gesturilor achiziționate sub formă de semnale radar

În laboratorul partenerului Université catholique de Louvain a fost implementat în cadrul etapei un cadru experimental pentru achiziția și recunoașterea gesturilor de tip radar constând într-un dispozitiv Walabot (<https://walabot.com/getting-started>, cu un număr de 18 antene, VYR2401 A3 System-on-Chip și domeniu de funcționare 6.3-8GHz), un dispozitiv Horn (Lambot și André, 2014) dezvoltat în cadrul Université catholique de Louvain, precum și un dispozitiv Leap Motion Controller (<https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller>, integrând două camere video cu rezoluție de 640×240 pixeli, funcționare near-infrared 850nm plasate la o distanță de 40mm, frecvență de achiziție a cadrelor 120Hz, adâncime de detecție a mâinilor deasupra senzorului în intervalul 10cm-80cm, field of view 140×120°), folosit drept condiție de control pentru achiziția acelorași tipuri de gesturi, dar cu un senzor video; a se vedea figura 5 pentru o fotografie a cadrului experimental.

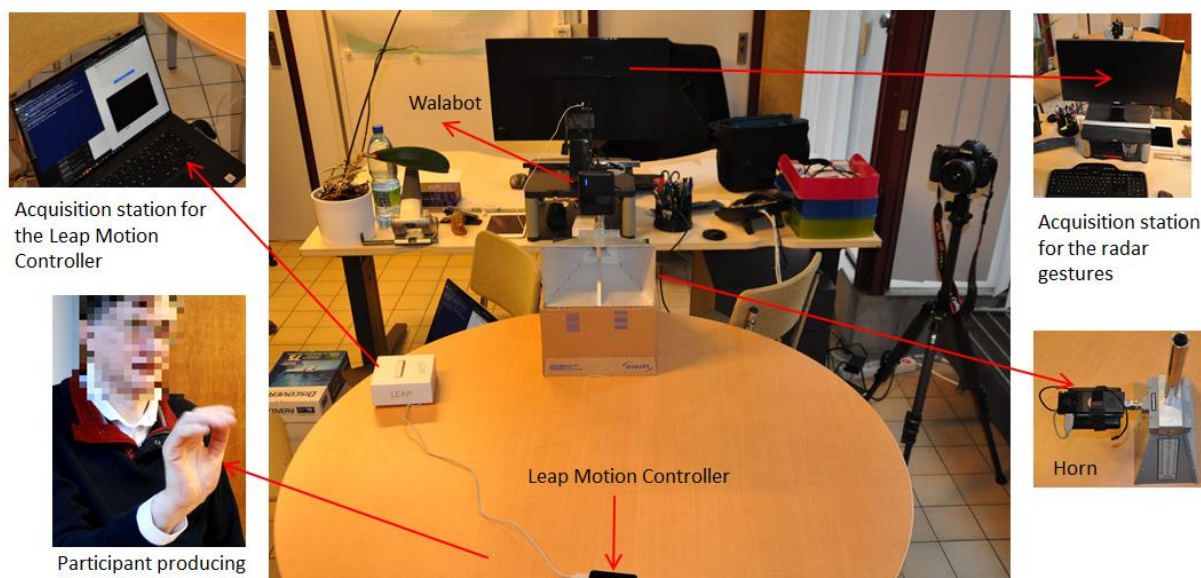


Figura 5. Cadru experimental pentru achiziția gesturilor folosind două echipamente radar (Walabot și Horn) și o condiție de control (dispozitivul Leap Motion Controller).

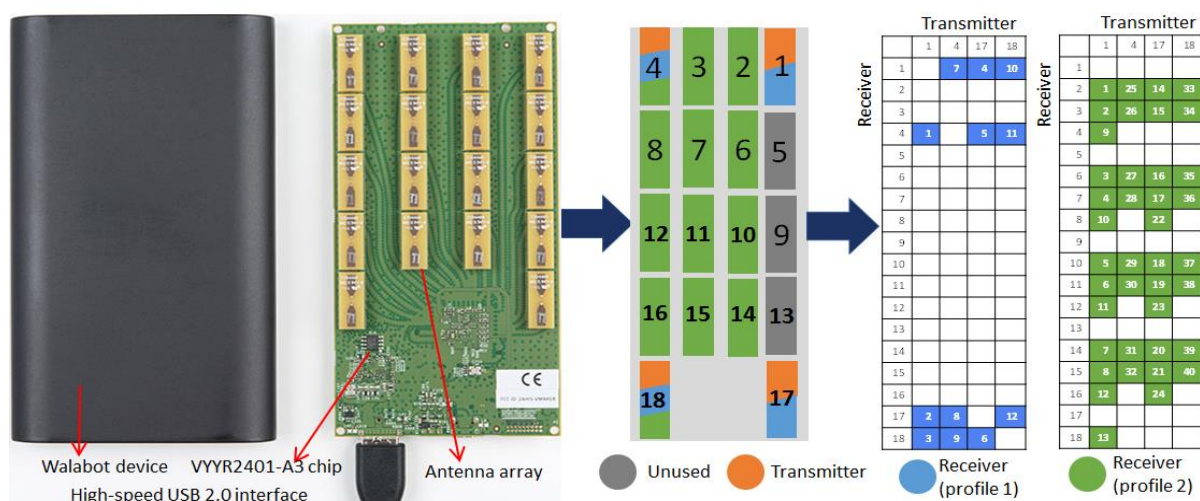


Figura 6. Dispozitivul Walabot cu două moduri de configurare a antenelor.

Dispozitivul Walabot reprezintă un radar compact (72×140mm) de tip FMCW cu bandă ultralargă (UWB). Acesta poate fi conectat la un telefon smart, o tabletă sau un PC prin intermediul conexiunii USB, ceea ce îl face potrivit pentru contexte de utilizare mobilă dar și staționară. Versiunea Walabot Developer constă într-o matrice de 18 antene, dintre care patru sunt folosite ca transmițătoare iar restul receptoare; a se vedea figura 6. Am ales Walabot pentru implementarea cadrului nostru experimental întrucât este util pentru diverse tipuri de aplicații în afara recunoașterii gesturilor, cum ar fi identificarea obiectelor și materialelor și, de asemenea, 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 pentru casa unui magazin, respectiv pentru un birou, unde dispozitivul a fost plasat sub suprafața de lucru. 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 în cadrul laboratorului de cercetare al echipei Université catholique de Louvain. Acesta constă într-o antenă BBHA 9120A Schwarzbeck Mess-Elektronik cu o lungime de 22cm, zonă de recepție de 14×24cm² și un domeniu de frecvență 0.8-5GHz.

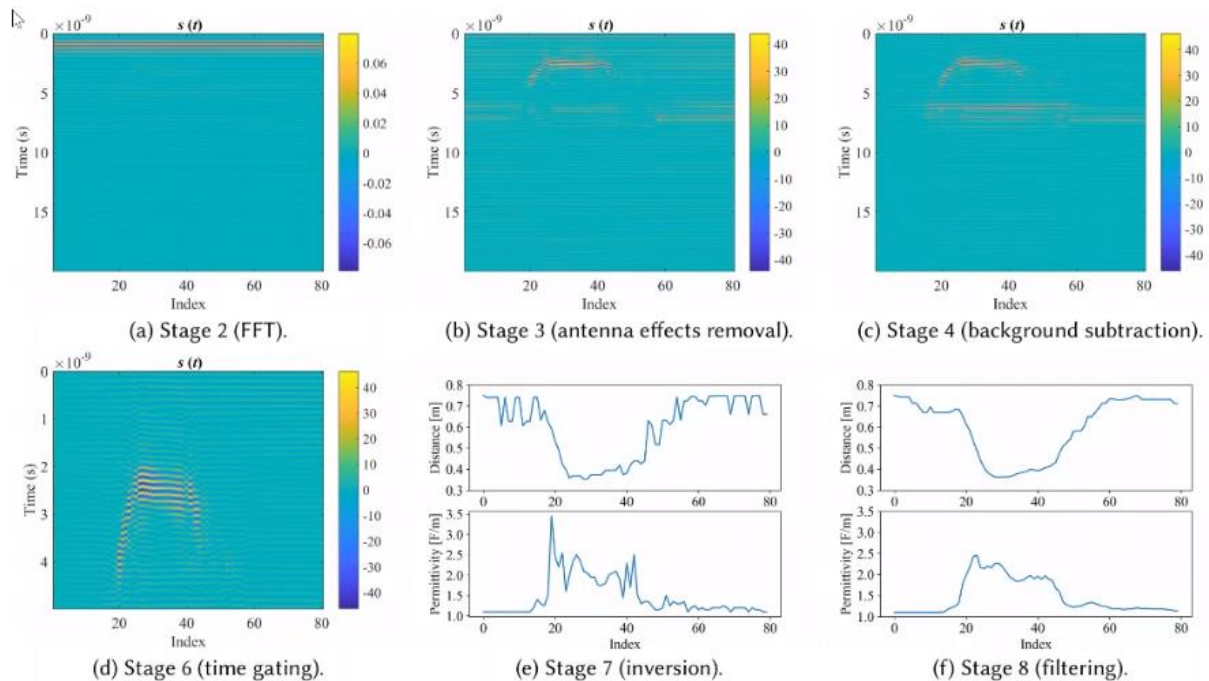
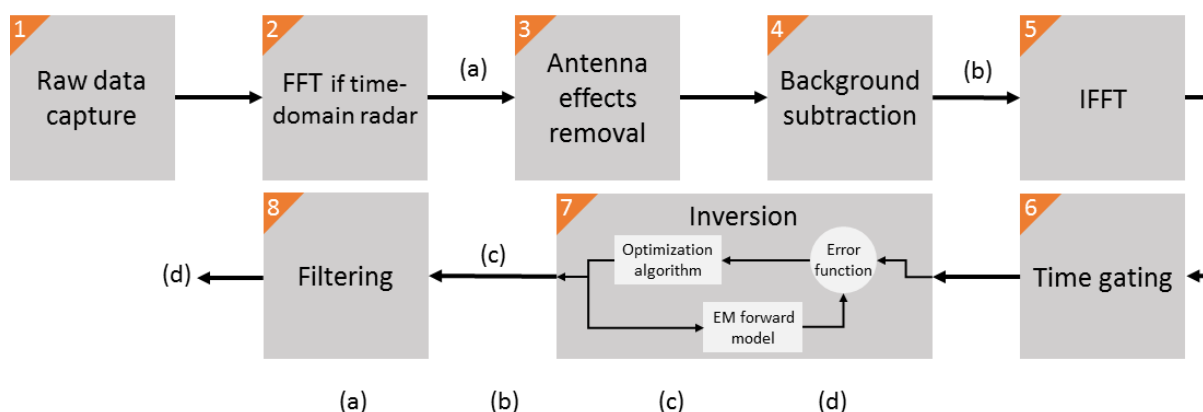


Figura 7. Rezultate ale procesării unui gest achiziționat cu dispozitivul radar Walabot.

Figura 7 ilustrează datele achiziționate de la dispozitivul Walabot corespunzătoare diverselor niveluri de procesare (e.g., transformata FFT, time gating, filtrare, etc.), în conformitate cu etapele unui flux de recunoaștere a gesturilor organizat în opt module (numerotate în figura 8): (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 pentru procesarea din cadrul modulului nr. 3; (3) **Eliminare efectelor de antenă** prin aplicarea ecuațiilor radar (Lambot și André, 2014) în domeniul frecvență pentru a elimina reflexii interne și interacțiuni antenă-țintă; (4) **Eliminarea fundalului** prin scăderea primului cadru din semnalul radar pentru a reduce influența altor obiecte asupra achiziției mișcărilor mâinilor utilizatorului efectuate în fața senzorului; (5) **Transformata Fourier inversă**. Semnalul este transformat în domeniul timp pentru a facilita procesarea din cadrul modulelor următoare; (6) **Izolarea unei ferestre temporale a semnalului (time gating)** corespunzător gestului produs de către utilizator; (7) **Extragerea caracteristicilor**: distanța mâinii față de radar (pentru obținerea de informații privind traiectoria de mișcare a gestului realizat de utilizator) și permitivitatea efectivă a mediului (pentru obținerea de informații privind postura mâinii, e.g., dacă mână este orientată către radar); (8) **Filtrarea** semnalului folosind o fereastră de dimensiune fixă.



		(a)		(b)		(c)		(d)	
Recognition		Walabot	Horn	Walabot	Horn	Walabot	Horn	Walabot	Horn
	Recognition rate [%]	79.9	94.6	84.5	95.4	72.4	55.9	70.7	54.5
	Time [ms]	5.73	3.8	5.8	3.3	0.4	0.2	0.5	0.2
	Gesture size [kB]	170	111.25	170	111.25	5	1.25	5	1.25

Figura 8. Rezultate ale recunoașterii gesturilor în funcție de diverse niveluri de procesare a datelor radar; a se vedea corespondența (a)-(d) în figura din partea de sus.

Pentru evaluarea performanțelor tehnice, am calculat rata de recunoaștere pentru un set de 16 gesturi (semnificativ mai mare decât dimensiunea medie a seturilor de gesturi utilizate în lucrările din literatura științifică în domeniul gesturilor radar; a se vedea figura 4), pentru care am obținut valori între 52.4% și 84.5% pentru Walabot, respectiv între 54.5% și 95.4% pentru dispozitivul Horn (figura 8, jos), în funcție de diversele tipuri de procesare a datelor radar (8a-8d). Timpul de clasificare a variat între 0.2ms pentru gesturi reprezentate cu o dimensiune de 1.25KB (corespunzător nivelului de procesare 8d), respectiv 170ms pentru gesturi de dimensiune 170KB (nivelul de procesare 8a). Aceste rezultate demonstrează viabilitatea recunoașterii eficiente (95.4% acuratețe, 3.3ms timp clasificare) pentru gesturile de tip radar și reprezintă punctul de plecare pentru implementarea unei librării software în cadrul Etapei nr. 2 a proiectului prevăzută pentru anul 2022.

Implementarea colaborării dintre parteneri

Două vizite de cercetare au fost planificate pentru anul 2021, conform propunerii de proiect, la fiecare dintre partenerii proiectului, dar nu au putut fi realizate în formă fizică datorită constrângerilor impuse de pandemia COVID-19. În aceste condiții, implementarea colaborării dintre echipele celor doi parteneri s-a realizat în mediul online (figura 9), pentru care au fost utilizate o serie de aplicații, cum ar fi Overleaf (pentru redactare colaborativă în Latex), Google Drive și Sheets (stocarea datelor și analiza acestora în cadrul studiului SLR), respectiv Zotero (administrarea resurselor bibliografice și referințelor științifice); a se vedea figura 10. De exemplu, la întâlnirea Microsoft Teams din luna octombrie 2021 au participat 12 membri, dintre care 10 doctoranzi (10/12=83%), conform obiectivului propunerii de proiect de a implica un număr cât mai mare de cercetători tineri: drd. ing. Alexandru-Ionuț Șiean, drd. Laura-Bianca Bilius, drd. ing. Cristian Pamparău, drd. ing. Alexandru-Tudor Andrei, drd. ing. Adrian-Vasile Catană, drd. Mihail Terenti, drd. Santiago Villarreal, drd. Mehdi Ousmer, drd. Quentin Sellier și drd. Arthur Sluÿters.

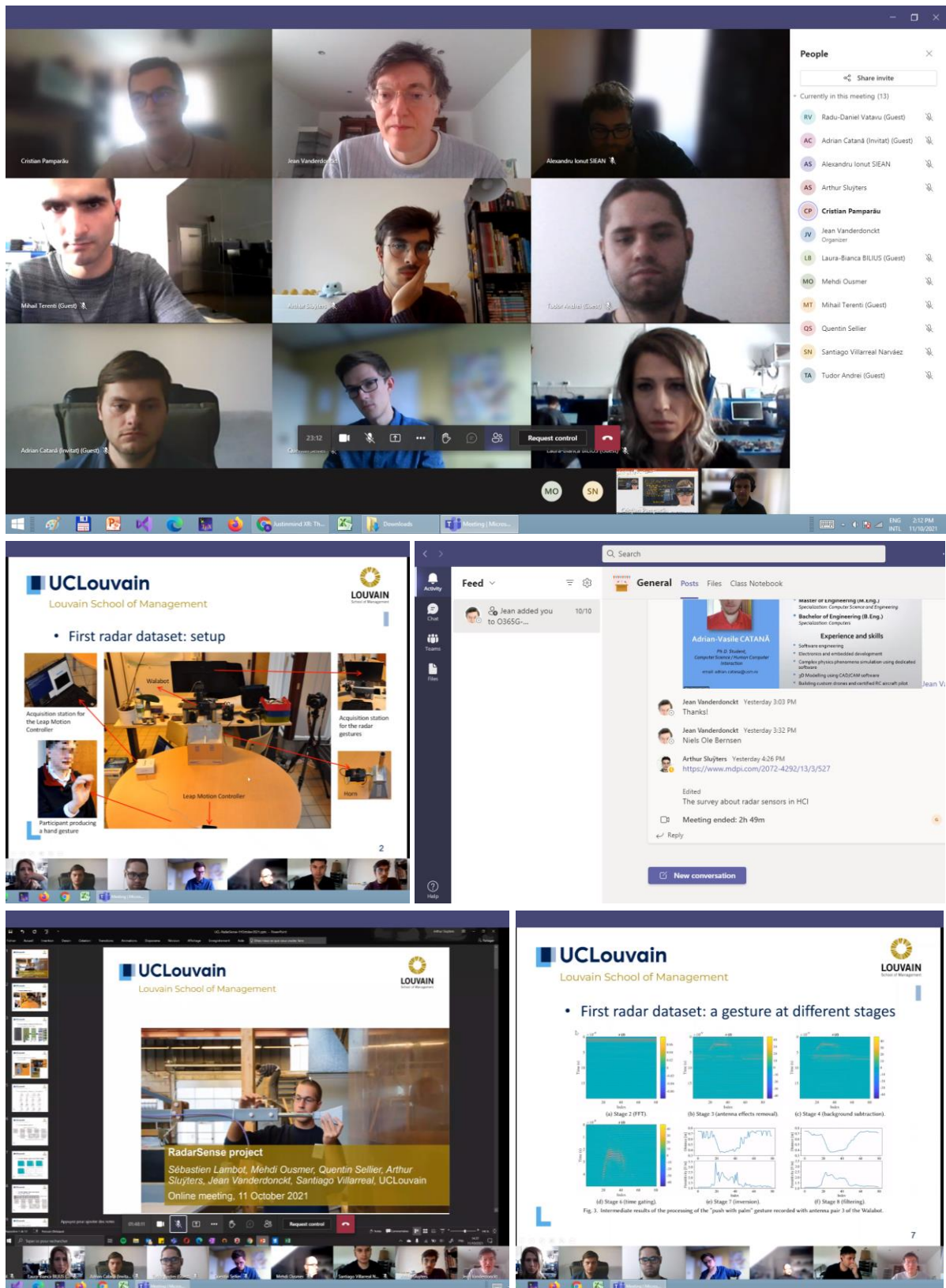


Figura 9. Realizarea de prezentări, partajarea de date și informații și implementarea colaborării online între cei doi parteneri. Întâlnirile online au permis participarea mai multor membri ai celor două echipe decât ar fi fost posibil în cazul deplasărilor fizice.

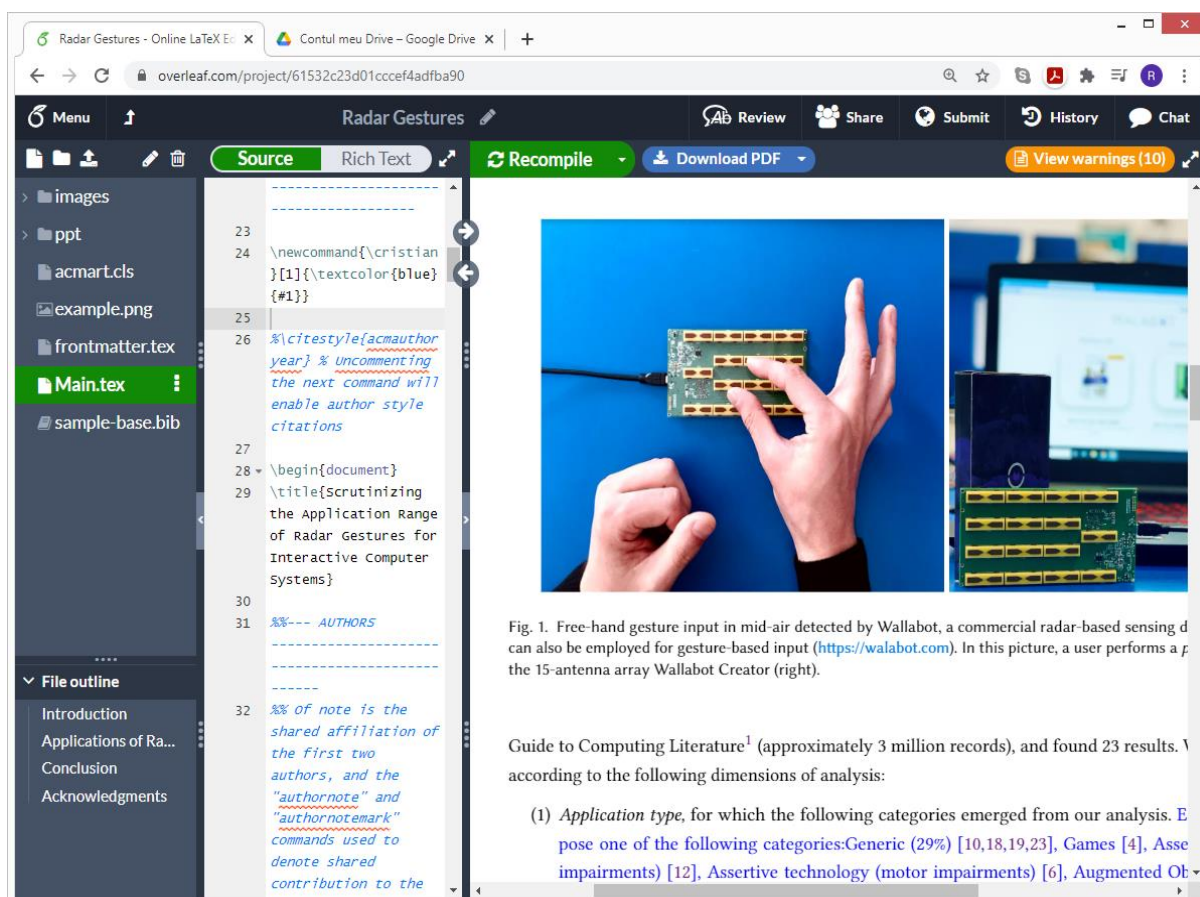


Figura 10. Exemplu al colaborării online prin intermediul platformei Overleaf, o soluție pentru redactarea colaborativă a articolelor științifice în LaTeX.

Rezultatele obținute în cadrul primei etape de implementare a proiectului de cooperare bilaterală sunt folosite în acest moment pentru redactarea a două articole științifice: (i) un articol prezentând rezultatele studiului de tip SLR privind aplicații ale interacțiunilor bazate pe gesturi achiziționate cu tehnologii și echipamente de tip radar, respectiv (ii) un articol prezentând algoritmul de procesare și recunoaștere a gesturilor radar implementând abordarea dezvoltată în cadrul etapei.

Pe baza rezultatele obținute și a colaborării implemente între cei doi parteneri, considerăm obiectivele tehnice și științifice ale proiectului îndeplinite în procent de 100% pentru etapa aferentă anului 2021. Vom utiliza aceste rezultate în cadrul etapei anului următor pentru aplicații ale interacțiunilor bazate pe gesturi achiziționate cu echipamente radar.

REZUMAT EXECUTIV AL ACTIVITĂȚILOR REALIZATE ÎN PERIOADA DE IMPLEMENTARE (MAXIM 1 PAGINĂ)

În cadrul Etapei nr. 1 de implementare a proiectului de cooperare bilaterală, am realizat un studiu sistematic asupra literaturii științifice dedicate interacțiunii cu sisteme informatice bazate pe gesturi achiziționate cu dispozitive radar cu accent asupra aplicațiilor acestora. Figura 11 prezintă un dispozitiv radar (Wallabot) prezent în laboratoarele de cercetare ale ambilor parteneri pentru a putea realiza eficient activitățile de cercetare-dezvoltare și cooperare în cadrul acestui proiect. Rezultatele noastre din cadrul etapei au scos în evidență eforturi ale comunității științifice în ceea ce privește dezvoltarea de algoritmi de recunoaștere a gesturilor (mai mult de jumătate din literatura examinată), dar o orientare mai scăzută asupra oportunităților aplicative. Drept urmare, explorarea de aplicații ale interacțiunii gestuale folosind tehnologii și echipamente de tip radar se dovedește a fi una deosebit de importantă cu oportunități importante pentru inovare, urmând a fi realizată în cadrul Etapei nr. 2 a proiectului nostru, conform planului de realizare. De asemenea, am dezvoltat în cadrul etapei un nou algoritm pentru recunoașterea gesturilor achiziționate cu dispozitive radar, pentru care am obținut rezultate excelente în ceea ce privește acuratețea clasificării gesturilor și timpul de clasificare pentru un set relativ mare de comenzi gestuale comparativ cu cele considerate în alte lucrări din literatura științifică (16 gesturi vs. o medie de 7.31 pentru lucrările examinate în cadrul studiului nostru din această etapă).

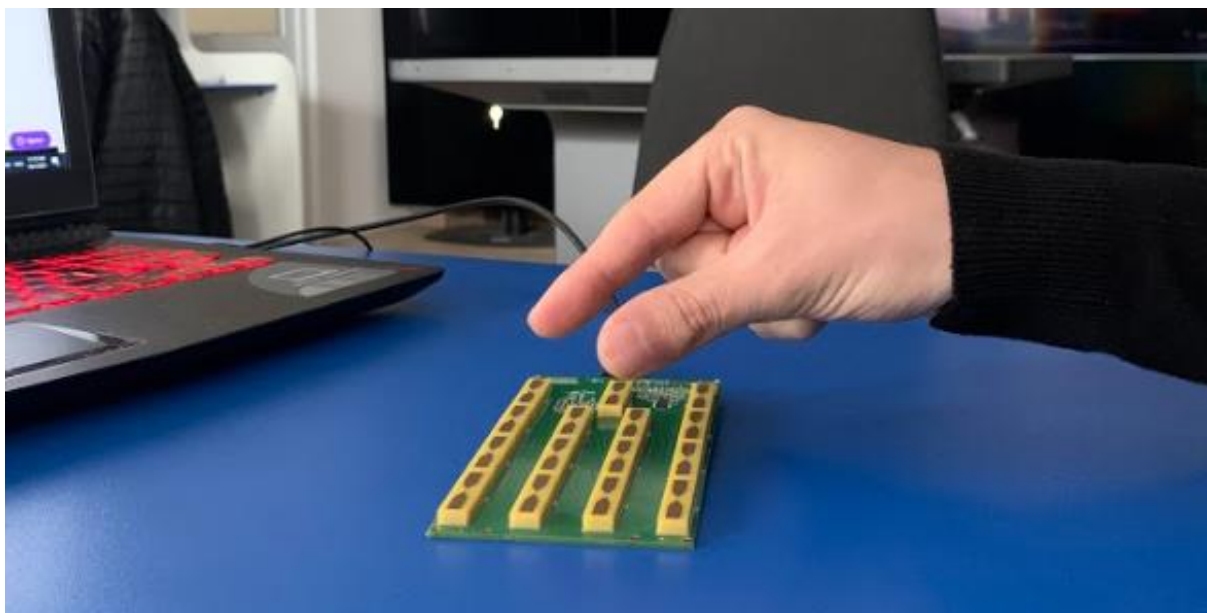


Figura 11. Dispozitiv radar (Wallabot) cu un număr de 15 antene, VYR2401 A3 System-on-Chip design și interfață USB pentru conectarea la un PC unde rulează aplicația de achiziție a gesturilor. Fotografie realizată în cadrul Laboratorului de Cercetare în Mașini Inteligente și Vizualizarea Informației al Universității Ștefan cel Mare din Suceava.

POSSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE ECONOMICĂ A REZULTATELOR OBTINUTE

Rezultatele preliminare obținute în cadrul primei etape de implementare a proiectului de cooperare bilaterală au arătat un număr limitat de lucrări științifice care să adreseze aplicații ale interacțiunii cu sisteme informatice prin gesturi achiziționate cu dispozitive radar, în timp ce majoritatea eforturilor comunității științifice au fost orientate asupra dezvoltării de tehnici de recunoaștere a gesturilor pentru astfel de dispozitive. Prin urmare, există o oportunitate de a adresa aplicații (conform planului de realizare, acest obiectiv este prevăzut în cadrul etapei nr. 2 de implementare a proiectului) și de a obține noi rezultate în această direcție. În mod special, aplicațiile pe care dorim să le adresăm vizează controlul dispozitivelor la distanță, cum ar fi ecranele în contextul televiziunii smart interactive (o piață în aflată 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/>) precum și în contextul suprafețelor interactive (cum ar fi ecranele publice, cu o piață aflată de asemenea în creștere, cu 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>), pentru care interacțiunile de tip atingere. *i.e.*, prin intermediul gesturilor touch sau multi-touch, pot fi completate de interacțiuni prin gesturi efectuate deasupra suprafeței, ce pot fi achiziționate cu ajutorul tehnologiei radar. Astfel de oportunități aplicative, cu un bun potențial de valorificare economică, vor fi explorate în cadrul etapei nr. 2 de implementare a proiectului de cooperare bilaterală.

REFERINȚE

- Avrahami *et al.* (2019) Daniel Avrahami, Mitesh Patel, Yusuke Yamaura, Sven Kratz, and Matthew Cooper. 2019. Unobtrusive Activity Recognition and Position Estimation for Work Surfaces Using RF-Radar Sensing. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.* 10, 1, Article 11 (January 2020), 28 pages. <https://doi.org/10.1145/3241383>
- Gigie *et al.* (2019) Andrew Gigie, Smriti Rani, Arijit Chowdhury, Tapas Chakravarty, and Arpan Pal. 2019. An agile approach for human gesture detection using synthetic radar data. In *Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint 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, 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>

- 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, and 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, Article 17, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3406324.3410720>
- Li et al. (2015) Zheng Li, Ryan Robucci, Nilanjan Banerjee, and 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, Douglas Altman, Jennifer Tetzlaff, Cynthia Mulrow, Peter Gøtzsche, John Ioannidis, Mike Clarke, P.J. Devereaux, Jos Kleijnen, David 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, and Ivan Poupyrev. 2016. Soli: ubiquitous gesture sensing with millimeter wave radar. *ACM Trans. Graph.* 35, 4, Article 142 (July 2016), 19 pages. <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, and Huadong Ma. 2020. Real-time Arm Gesture Recognition in Smart Home Scenarios via Millimeter Wave Sensing. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 4, 4, Article 140 (December 2020), 28 pages. <https://doi.org/10.1145/3432235>
- 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, and Petri Mähönen. 2018. Mm-Wave Radar Based Gesture Recognition: Development and Evaluation of a Low-Power, Low-Complexity System. In *Proc. of the 2nd ACM Workshop on Millimeter Wave Networks and Sensing Systems (mmNets '18)*. ACM, New York, NY, USA, 51–56. <https://doi.org/10.1145/3264492.3264501>
- Pursell and McCrae Pursell, E., McCrae, N. 2020. How to Perform a Systematic Literature review: A guide for healthcare researchers, practitioners and students. Springer.

- (2020) <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, and Luis A. Leiva. 2019. The Missing Interface: Micro-Gestures on Augmented Objects. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19)*. ACM, New York, NY, USA, Paper LBW0153, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3290607.3312986>
- Salami *et al.* (2021) Sameera Palipana, Dariush Salami, Luis A. Leiva, and Stephan Sigg. 2021. Pantomime: Mid-Air Gesture Recognition with Sparse Millimeter-Wave Radar Point Clouds. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 5, 1, Article 27 (March 2021), 27 pages. <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, and 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)*. IEEE Press, 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>
- Şiean and Vatavu (2021) Alexandru-Ionut Şiean, Radu-Daniel Vatavu. 2021. Wearable Interactions for Users with Motor Impairments: Systematic Review, Inventory, and Research Implications. *Proceedings of ASSETS '21, the 23rd International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. New York, NY, USA: ACM, Article 7, 1-15. <https://doi.org/10.1145/3441852.3471212>
- Vatavu and Bilius (2021) Radu-Daniel Vatavu, Laura-Bianca Bilius. 2021. GestuRING: A Web-based Tool for Designing Gesture Input with Rings, Ring-Like, and Ring-Ready Devices. *Proceedings of UIST '21, the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (Virtual Event). 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 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>
- 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>
- Wang *et al.* (2016) Saiwen Wang, Jie Song, Jaime Lien, Ivan Poupyrev, and Otmar Hilliges. 2016. Interacting with Soli: Exploring Fine-Grained Dynamic Gesture Recognition in the Radio-Frequency Spectrum. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*. ACM, New York, NY, USA, 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 (February 2019), 29–41. <https://doi.org/10.1007/s00779-018-1185-7>
- Wohlin, 2014 Claes Wohlin. 2014. Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering. In *Proc. of the 18th Int. Conf. on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 10 pages. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Yeo *et al.* (2017) Hui-Shyong Yeo, Barrett Ens, and Aaron Quigley. 2017. Tangible UI by object and material classification with radar. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies (SA '17)*. ACM, New York, NY, USA, Article 14, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3132818.3132824>
- Yeo *et al.* (2018) Hui-Shyong Yeo, Ryosuke Minami, Kirill Rodriguez, George Shaker, and Aaron Quigley. 2018. Exploring Tangible Interactions with Radar Sensing. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 2, 4, Article 200 (December 2018), 25 pages. <https://doi.org/10.1145/3287078>
- Zhang *et al.* (2018) Zhenyuan Zhang, Zengshan Tian, Zhou Mu, and 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 and B. Guo. 2020. RaCon: A gesture recognition approach via Doppler radar for intelligent human-robot interaction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom 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 *Proceedings 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