

Rapport de stage

Evaluation automatique des capacités motrices et d'interaction du bébé pour l'identification précoce des troubles du neurodéveloppement

Laboratoire: Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique



Juin - Septembre 2023

Etudiant: Randolph LENOU NKIMO

Encadrant: Louis SIMON

Master 1 Automatique Signal et Informatique (ASI), IRIV, Télécom Physique
Strasbourg

Année Universitaire 2022-2023

Abstract

As part of my first year of a Master's degree in Automatic Signal Processing and Computer Science at Télécom Physique Strasbourg, I did a 4-month placement at the Institut des Systèmes Intelligents et de la Robotique, in the PIROS team, under the supervision of Louis Simon, a PhD student, and Professor Mohamed Chetouani. The aim of this internship was to automatically assess a baby's motor and interaction skills for the early identification of Neurodevelopmental Disorders (NDDs), a group of pathologies affecting the ability to communicate, learn or socialise. One of the major challenges in the treatment of NDDs is early identification and intervention. As part of the TECH-TOYS project, I worked on the application of Bayesian recursive filters, in particular the Kalman filter, for the extraction of descriptor markers for TNDs. The aim was to estimate these motor markers and to assess the robustness of the Kalman filter estimate on the CareToy dataset. Wrist orientation was estimated using an extended Kalman filter, which then allowed us to extract various markers such as *travel path*, *work area*, *work volume* and *jerk*. In assessing the robustness of these descriptors, we found that *travel path* and *work area* were less sensitive to estimation noise.

Résumé

Dans le cadre de ma première année de Master en Automatique Signal et Informatique à Télécom Physique Strasbourg, j'ai effectué un stage de 4 mois à l'Institut des Systèmes Intelligents et de la Robotique, au sein de l'équipe PIROS, sous la supervision de Louis Simon, doctorant, et du Professeur Mohamed Chetouani. Ce stage avait pour objectif l'évaluation automatique des capacités motrices et d'interaction du bébé pour l'identification précoce des Troubles du Neuro-Développement (TNDs), un ensemble de pathologies affectant les capacités à communiquer, apprendre ou encore à socialiser. L'un des défis majeurs dans le contexte de la prise en charge des TNDs est l'identification et l'intervention précoces. Dans le cadre du projet TECH-TOYS, j'ai travaillé sur l'application des filtres récursifs bayésiens, en particulier le filtre de Kalman, pour l'extraction des marqueurs descripteurs des TNDs. L'objectif était d'estimer ces marqueurs de motricité et d'évaluer la robustesse de l'estimation du filtre de Kalman sur le jeu de données CareToy. L'estimation de l'orientation du poignet a été réalisée avec un filtre de Kalman étendu, ce qui nous a ensuite permis d'extraire différents marqueurs tels que le *travel*

path, la *surface de travail*, le *volume de travail* et le *jerk*. L'évaluation de la robustesse de ces descripteurs nous a permis de constater que le *travel path* et la *surface de travail* étaient moins sensibles aux bruits d'estimations.

Remerciement

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Mohamed Chetouani pour m'avoir offert l'opportunité enrichissante d'effectuer mon stage au sein de l'équipe PIROS. Je souhaite également adresser mes remerciements les plus chaleureux à Louis Simon pour son encadrement attentif, ses précieux conseils et sa patience inestimable tout au long de cette expérience.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Contexte	2
2.1	Approche clinique et ingénierie neuro-développementale	2
2.2	Le projet TECH-TOYS	3
2.2.1	Le projet CareToys	3
2.2.2	Origine et résumé du projet	4
2.2.3	Modules d'ingénierie	6
2.2.4	Objectifs du stage	9
3	État de l'art	10
3.1	Évaluation clinique des comportements moteurs	10
3.2	Évaluation de la motricité du bras des enfants à risque de TNDs	13
4	Modèle	16
4.1	Estimation et Filtrage récursif bayésien	16
4.2	Filtrage particulaire	16
4.3	Filtre de Kalman	16
4.3.1	Filtre de Kalman étendu (FKE)	16
4.3.2	Filtre de Kalman non parfumé	16
4.3.3	Filtre de Kalman pour l'estimation d'orientation	16
5	Expérience	18
5.1	Extraction de descripteurs	18
5.2	Dataset	18
5.2.1	CareToys dataset	18
5.2.2	Dataset émulé	19
5.3	Résultats	20
6	Limites	27
7	Conclusion	28

Table des figures

1	Dispositif de détection et d'intervention précoce TECH-TOYS	7
2	Angles de tangage, de lacet et de roulis d'un avion dont l'orientation du corps est $[\Omega, u, v]$, source [19]	16
3	Dispositif d'acquisition des données	20
4	Extraction des descripteurs de trajectoire	22

Présentation ISIR

L'ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique) est un laboratoire de recherche affilié à Sorbonne Université, au CNRS et à l'Inserm. Il est situé sur le campus de la faculté des Sciences et d'Ingénierie, place Jussieu à Paris. Le laboratoire regroupe 63 permanents et plus de 121 doctorants travaillant sur la modélisation, le design et les applications de la robotique dans divers domaines, tels que la santé, le transport, les services, l'industrie, etc.

Le laboratoire est divisé en plusieurs équipes :

1. L'équipe AGATHE (Assistance aux Gestes et Applications THERapeutiques) : recherche en robotique médicale, notamment les robots d'assistance en chirurgie, les prothèses et le contrôle moteur.
2. L'équipe AMAC (Architectures et Modèles pour l'Adaptation et la Cognition) : développement de modèles de perception et de cognition inspirés de l'Homme et du Vivant pour améliorer les capacités d'apprentissage et de prise de décision des systèmes robotiques.
3. L'équipe Interactions Multi-Échelles : travaux sur des interfaces matérielles et logicielles adaptées à l'humain, sur plusieurs échelles spatiales et temporelles.
4. L'équipe MLIA (Machine Learning & deep learning for Information Access) : recherches sur l'apprentissage machine et ses applications.
5. L'équipe PIROS (Perception, Interaction et Robotique Sociale) : concentration sur la compréhension, la mesure et l'utilisation des signaux sociaux dans les interactions humain-humain ou humain-robot. Cette équipe regroupe des spécialistes en robotique, traitement du signal, apprentissage machine, psychologie et sciences cognitives.
6. L'équipe SYROCO (SYstèmes RObotiques COmplexes) : travaille sur la conception et le contrôle de systèmes robotiques complexes.

Par ailleurs, l'ISIR est à l'origine de nombreuses start-up et contribue au transfert de technologies vers l'industrie à travers une structure interne labellisée : l'Institut Carnot.

1 Introduction

Les troubles du neuro-développement (TNDs) représentent un défi majeur de santé publique, affectant la croissance et le développement du cerveau chez les nourrissons et les jeunes enfants. Ces altérations peuvent engendrer une diversité de déficiences fonctionnelles, comprenant des troubles cognitifs, moteurs, du langage, de l'apprentissage et du comportement, souvent résultant de diverses causes, qu'elles soient génétiques, lésionnelles ou environnementales [17].

La détection précoce des nourrissons présentant un risque de TNDs revêt une importance capitale pour la mise en place de programmes d'intervention efficaces. Cependant, les méthodes cliniques traditionnelles de détection peuvent être sujettes à des limitations, notamment en termes de subjectivité, de temps requis et d'accessibilité. L'évaluation clinique, bien que cruciale, peut être fastidieuse et peu adaptée à une observation écologique dans des contextes naturels de la vie quotidienne.

Face à ces défis, les avancées en ingénierie neuro-développementale (IND) et l'utilisation des technologies informatiques ouvrent de nouvelles perspectives. Le projet TECH-TOYS s'inscrit dans cette démarche en proposant de nouvelles méthodes et outils pour comprendre les mécanismes neuro-biologiques du développement du cerveau humain, analyser quantitativement le comportement humain pendant le développement neurologique et évaluer les étapes de ce développement dès la naissance.

Ce rapport se concentre sur l'extraction des descripteurs moteurs à partir des méthodes de traitement du signal, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation du filtre de Kalman. Nous évaluons la robustesse de cette extraction de descripteurs face aux différentes incertitudes liées à l'estimation des filtres, ainsi qu'aux différentes hypothèses prises en compte, en utilisant un dataset de diverses trajectoires émulées. Après avoir introduit le projet TECH-TOYS ainsi que le concept d'ingénierie neurodéveloppementale dans la section 2, nous discuterons des principaux éléments théoriques ainsi que des modèles de filtre utilisés pour l'estimation de trajectoire dans la section 4. Le protocole expérimental mis en œuvre ainsi que les résultats seront ensuite présentés en détail dans la section 5. Enfin, les limites seront exposées dans la section 6.

2 Contexte

2.1 Approche clinique et ingénierie neuro-développementale

Les *troubles du neuro-développement* (TNDs) sont des altérations de la croissance et du développement du cerveau qui affectent plusieurs fonctions cérébrales, et comprennent les troubles cognitifs, moteurs, du langage, de l'apprentissage et du comportement dus à de nombreuses causes génétiques, lésionnelles et environnementales.[17]. Les nourrissons (jeune bébé de la naissance à 12 mois) présentant un risque élevé sont ceux nés prématurément (*i.e.* nés à moins de 37 semaines d'âge gestationnel)[12], selon l'organisation mondiale de la santé ces derniers représenteraient chaque année 15 millions de naissances dans le monde et seraient en croissance en raison de l'augmentation du taux de survie[8].

La *détection précoce* (*i.e.* au cours des premières semaines ou mois de vie) des nourrissons présentant un risque de TNDs grâce à une évaluation clinique minutieuse (*i.e.* des tests de développement, un examen neurologique, observation des mouvements spontanés) combinée à des outils techniques spécifiques tels que la neuro-imagerie (ultra-sons crâniens, imagerie par résonance magnétique du cerveau [IRM]), des tests neurophysiologiques (*e.g.* électroencéphalographie) et les tests génétiques (caryotype, hybridation génomique comparative - microréseau)[14] est une condition préalable majeure pour les programmes d'intervention et joue un rôle important dans l'efficacité de la rééducation[42, 57]. Cependant les méthodes cliniques de détection des TNDs requièrent souvent un apport subjectif de la part de professionnels qualifiés, prennent du temps et peuvent être fastidieuses à évaluer. Les sessions d'évaluation regroupent généralement plusieurs examens à la suite. La réalisation de cette évaluation peut être fatigante pour l'enfant. En outre, ces évaluations ne permettent pas de réaliser des examens écologiques (*in situ*), dans le contexte de la vie quotidienne. Par conséquent, ces tests sont peu accessibles et les listes d'attente de six mois ou plus sont fréquentes, même dans les pays les plus riches [21].

Les technologies informatiques offrent la possibilité de surmonter ces obstacles, de caractériser le comportement des enfants dans des contextes plus naturels. Ce défi a été relevé par l'ingénierie neuro-développementale (IND)

[10, 11] dans le but de fournir de « nouvelles méthodes et de nouveaux outils » pour : (1) Comprendre les mécanismes neuro-biologiques du développement du cerveau humain ; (2) Effectuer une analyse quantitative et une modélisation du comportement humain pendant le développement neurologique ; (3) Évaluer les étapes du développement neurologique atteint par les humains à partir de la naissance [11]. Les applications sont nombreuses et comprennent la robotique [53, 28], les jeux informatiques [24], le diagnostic [7, 25] et l'imagerie comportementale [58, 5, 6]. Le Machine Learning (ML), le Deep Learning (DL) [61, 34] en particulier, est de plus en plus utilisé en médecine [59, 34] en particulier en psychiatrie [32].

2.2 Le projet TECH-TOYS

2.2.1 Le projet CareToys

Le projet CareToys [45], [12] est un projet clinique d'intervention clinique mené entre 2013 et 2016 par IRCCS Fondazione Stella Maris et un ensemble de collaborateurs européens. Cette initiative, qui préfigure le projet TECH-TOYS, est centrée autour d'un dispositif intelligent, sous la forme d'un environnement de jeu pour bébé, permettant la conduite de programmes d'intervention précoce personnalisés, intensifs, à la maison et centrés sur la famille. Un ensemble d'algorithmes ont été utilisés afin d'analyser le mouvement de l'enfant [50] ainsi que ses capacités de saisie [16]. Un essai clinique [56] a été mené afin de tester le système sur des enfants de 3 à 9 mois nés avant terme et à risque de développer une paralysie cérébrale, un trouble affectant les capacités motrices tout au long de la vie. Cet essai clinique avait aussi pour but de tester les hypothèses suivantes :

- L'utilisation d'un système intelligent permet d'améliorer le développement moteur, perceptuel et cognitif du bébé
- Le dispositif modulaire développé permet d'assister les soignants dans le processus d'intervention précoce
- Le système de télé-réhabilitation développé représente une nouvelle forme crédible de prise en charge des troubles du neuro-développement

En parallèle de l'utilisation du dispositif de réhabilitation, un ensemble de tests ont été menés par les équipes cliniques afin d'évaluer l'efficacité du système, e.g l'Infant Motor Profile [26].

Ce projet a permis de mettre en lumière les bénéfices de l'intervention précoce à la maison à l'aide d'un dispositif intelligent. Un effet positif et significatif sur les capacités motrices de l'enfant après quatre mois d'intervention a été observé après comparaison du score IMP des bébés ayant suivis un programme de réhabilitation avec le dispositif CareToys et ceux ayant suivis un soin classique [55].

2.2.2 Origine et résumé du projet

Le projet TECH-TOYS est issu de l'appel à projet d'ERA PerMed portant sur la recherche multidisciplinaire en médecine personnalisée, financé en France par l'Agence Nationale de la Recherche. Il regroupe un ensemble de collaborateurs académiques et privés en Europe ayant des expertises en psychiatrie, robotique/intelligence artificielle, ingénierie et droit. L'objectif de ce consortium est de développer une technologie permettant la détection précoce des troubles du neurodéveloppement chez le bébé à domicile de façon quantitative.

La session 2021 d'EraPer Med, dont le projet TECH-TOYS émane, avait pour sujet le développement d'outils de soutien clinique pour la mise en oeuvre de la médecine personnalisée. Cet appel à projet avait pour but de sélectionner des projets de recherche européens « interdisciplinaires et démontrant clairement l'impact potentiel de la médecine personnalisée ainsi que la valeur ajoutée par la collaboration transnationale »[27]. Afin d'être sélectionné, chaque projet devait couvrir les trois modules suivants : 1) La recherche clinique, 2) L'application dans le domaine de la santé, caractérisé par une utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC), et 3) La prise en compte des aspects éthiques, légaux et sociétaux (ELSA). Ci-dessous les contributions majeures, par modules, amenées par le projet TECH-TOYS :

Module	Apport du projet TECH-TOYS
Recherche clinique	<ul style="list-style-type: none"> — L'utilisation combinée de biomarqueurs cliniques et numériques pour la création d'un <i>phénotype numérique</i> permettant la détection et le suivi précoce du développement du bébé. — Un algorithme de Machine Learning pour la stratification et l'identification de phénotypes spécifiques. — Le déploiement d'outils de télémédecine à domicile durant l'étude clinique.
Application à l'aide des TIC	<ul style="list-style-type: none"> — L'utilisation de données antérieures et nouvellement acquises pour l'entraînement de modèles d'apprentissage non-supervisés et explicables permettant de mieux comprendre le lien entre la présence ou l'absence des différents biomarqueurs. — Un outil de diagnostic pour les bébés à risque permettant de formaliser rapidement l'information fournie par les modèles de ML précédemment décrits.
Prise en compte ELSA	<ul style="list-style-type: none"> — Un système customisable et adapté à tous les enfants et familles, quel que soit le statut socio-économique. — Un système respectant le règlement général sur la protection des données.

TABLE 1 – Contributions du projet TECH-TOYS

Ce projet regroupe les cinq partenaires suivants : IRCCS Fondazione Stella Maris (FSM) représentée par Professeur Giovanni Cioni, le département de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent de la Pitié Salpêtrière (APHP) représenté par Professeur David Cohen, l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) représenté par Professeur Mohamed Chetouani, l'université Ludwig Maximilians (LMU) représentée par PD. Dr. Fiorella Battaglia, la startup Khymeia S.r.l. (KHY) représentée par Marco Pirini, PhD, et l'université Technologique d'Istanbul (ITU) représentée par Professeure Hatice Kose.

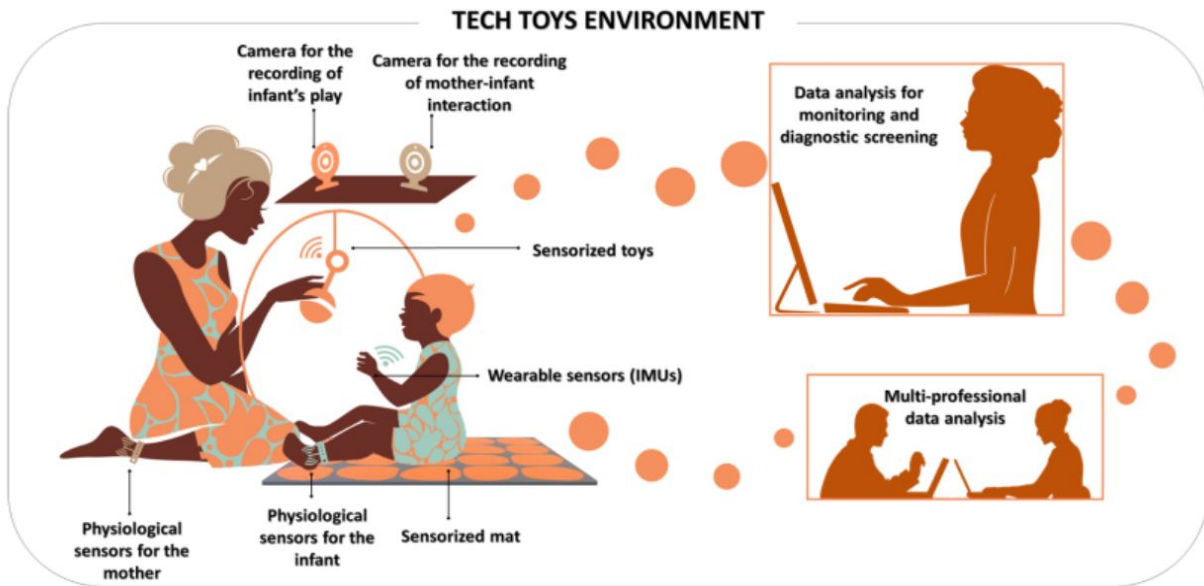
Le projet TECH-TOYS, acronyme de *acquire digiTal biomarkErs in infanCy with sensorized TOYS for early detection and monitoring of neurodevelopmental disorders*, a pour objectif d'améliorer la détection précoce des TNDs chez le bébé en combinant l'étude des comportements moteurs et l'étude de l'interaction enfant-soignants. Le projet de recherche se focalisera en particulier sur les bébés prématurés ou nés à terme avec des lésions cérébrales congénitales et ayant de forts risques de développer une paralysie cérébrale

ou autres formes modérées de TNDs. Pour se faire, un environnement de jeu ainsi qu'un ensemble d'algorithmes et modèles d'apprentissage machine vont être développés afin d'assister les professionnels de santé dans la détection et le suivi des bébés à risque. Le projet, d'une durée de 36 mois, se déroulera en plusieurs phases : 1) L'analyse de données et le design du baby-gym 2) Le test et l'évaluation des modèles d'analyse de données durant l'essai clinique prospectif 3) Le déploiement du baby-gym à domicile et la validation des modèles. La partie analyse de données sera basée en partie sur l'utilisation des données issues du projet CareToys [49], un projet mené par les équipes de FSM. Mené entre 2011 et 2015, ce projet a conduit au développement d'un système modulaire pour l'intervention précoce personnalisée et adaptée à l'environnement familial permettant la stimulation et le suivi d'enfants prématurés à risque de développer une paralysie cérébrale.

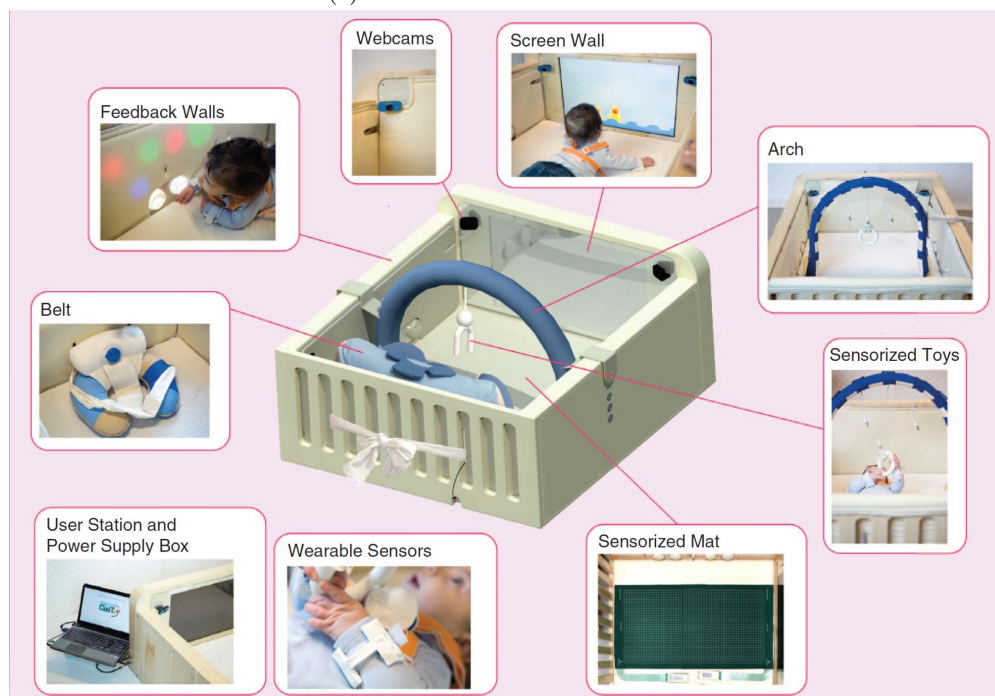
2.2.3 Modules d'ingénierie

Le travail des ingénieurs et chercheurs en robotique et IA sera partagé entre trois des modules du projet : a) Le design du dispositif de jeu TECH-TOYS, b) l'analyse de données, avec le développement d'un modèle de phénotypage et c) Le modèle de médecine de précision.

Le baby-gym TECH-TOYS : Les données nécessaires seront acquises via un système de baby-gym composé d'un matelas sensorisé, de centrales inertielles (IMUs) placées sur l'enfant et le soignant ainsi que d'un ensemble de caméras et micros (voir figure 1). Le dispositif développé sera similaire à celui utilisé pour le projet CareToys, à l'exception d'une caméra supplémentaire qui filmera à la fois l'enfant et le parent pour étudier leurs interactions ainsi que des micros pour analyser les vocalisations du bébé et le mamans, i.e. le discours, caractérisé entre autre par une prosodie inhabituelle, employé par les parents pour communiquer avec bébé.



(a) Environnement TECH-TOYS



(b) Dispositif CareToys, source : [12]

FIGURE 1 – Dispositif de détection et d'intervention précoce TECH-TOYS

Une fois déployé à la maison, le dispositif TECH-TOYS permettra d'acquérir des données physiologiques du bébé et d'un des parents via les IMUs, d'étudier la posture et le mouvement du bébé à l'aide du tapis de pression ainsi que l'interaction à l'aide des caméras. Les données ainsi récoltées pourront être directement analysées par les cliniciens et les modèles de ML grâce à une communication avec un serveur sécurisé (figure 1a). Le dispositif développé s'inspirera en grande partie de celui mis en place durant le projet CareToys (figure 1b) qui a déjà permis de récolter des données pertinentes pour l'intervention précoce.

L'analyse de données : La première partie du projet consistera à sélectionner, sur la base de données précédemment acquises, un ensemble d'indicateurs cliniques et computationnels permettant d'évaluer les capacités motrices et d'interactions des bébés. En particulier, l'activité des membres supérieurs, de la posture ainsi que de l'interaction parents-enfant seront analysés en détails. Ci-dessous une liste exhaustive des comportements qui pourront être étudiés :

- Comportements moteurs : Saisie d'objets, mouvement des membres supérieurs, mouvement pour atteindre des objets, manipulation, posture, dynamique du corps
- Comportements liés à l'interaction : Synchronie, vocalisation, dynamique des interactions vocales (e.g le turn taking), attention conjointe

Les séquences de comportements ainsi extraites permettront d'identifier des biomarqueurs numériques de la paralysie cérébrale (CP) ou d'autres TNDs. On appelle biomarqueur l'indicateur, ici numérique, de la présence ou l'absence d'un trouble. Ces biomarqueurs permettront de définir un phénotype pour chaque diagnostic, e.g, un dictionnaire regroupant tout les comportements liés à une condition (CP, TNDs, ou typique) ainsi que leur niveau d'expressivité. Ces phénotypes permettront à termes aux professionnels de santé d'obtenir une évaluation quantitative des capacités motrices et d'interactions du bébé afin de mieux planifier de futures interventions ou aider à l'établissement du diagnostic.

Le modèle de médecine de précision : La médecine de précision désigne le processus de définition d'une pathologie au moyen de techniques génomiques ou encore computationnelles, permettant un ciblage plus précis des différentes formes de ladite pathologie. Dans le cadre du projet TECH-TOYS, un outil de médecine de précision sera mis en place afin d'assister les cliniciens dans l'observation et la prise de décisions au regard du diagnostic et de l'intervention.

La dernière partie, qui n'est pas pertinente pour le cadre de mon stage, ne sera pas abordée dans la suite du rapport.

2.2.4 Objectifs du stage

Le stage a pour objectif de contribuer à la compréhension et à l'analyse du développement moteur chez les enfants à risque de troubles neurodéveloppementaux. Les données d'IMUs (Inertial Measurement Units) collectées grâce au baby-gym sont un outil précieux pour collecter des informations sur les mouvements corporels et la coordination motrice. Dans ce contexte, nous chercherons à extraire des descripteurs de finesse tels que le "jerk" (variation de l'accélération) et le "travel path" (chemin parcouru), la surface et le volume de travail à partir de ces données, ce qui permettra d'obtenir des informations détaillées sur les mouvements des enfants.

Acquisition de données IMU : Il s'agit d'apprendre la mise en œuvre et la configuration des IMUs (Unités de Mesure Inertielle) pour la collecte de données relatives aux mouvements corporels des enfants. Cela implique de comprendre le placement adéquat des capteurs et la réalisation de la calibration. À cet effet, un protocole expérimental ainsi que des spécifications techniques (caractéristiques requises des IMUs, méthodes de placement et de calibration) ont été élaborés pour remédier aux lacunes identifiées dans le dispositif Baby-Gym CareToys, dans le cadre du projet Tech Toys.

Extraction des caractéristiques de finesse : Cette étape consiste à développer des algorithmes et des scripts de traitement du signal (en utilisant, par exemple, le filtre de Kalman) en vue d'extraire des paramètres tels que le jerk (variation de l'accélération) et la trajectoire de déplacement à partir des données IMU. Ces paramètres permettront d'obtenir des informations sur la fluidité des mouvements ainsi que sur la précision des gestes effectués.

Analyse statistique : Dans cette phase, des méthodes statistiques sont employées pour analyser les paramètres extraits. Cette analyse comprend l'évaluation de la robustesse des paramètres face aux variations et à l'incertitude des paramètres d'estimation, ainsi que la capacité des algorithmes d'estimation à généraliser leur performance sur diverses trajectoires.

Ce stage vise à combiner la technologie des IMUs avec l'analyse des données pour mieux comprendre le développement moteur chez les enfants à risque de troubles neurodéveloppementaux. L'extraction de descripteurs de finesse à partir de ces données contribuera à une évaluation plus précise des performances motrices et pourrait avoir des implications importantes dans le diagnostic précoce et la prise en charge des enfants concernés.

3 État de l'art

3.1 Évaluation clinique des comportements moteurs

L'évaluation des comportements moteurs chez les nourrissons revêt une importance particulière avant leur premier anniversaire, car c'est à cette période que les bases de leurs capacités motrices futures sont établies [4]. Les évaluations neuromotrices précoces peuvent s'avérer complexes, car le développement moteur au cours de la première année de vie est à la fois rapide et étendu, et il est influencé par une combinaison de facteurs biologiques, environnementaux et sociaux. Les *méthodes cliniques* couramment utilisées, telles que l'AIMS (Alberta Infant Motor Scale), le TIMP (Test of Infant Motor Performance) et le Bayley III [51], exigent une expertise approfondie ainsi qu'un œil exercé de la part des cliniciens pour être correctement appliquées.

L'Alberta Infant Motor Scale (AIMS) est un outil normalisé qui a été développé pour évaluer le développement de la motricité globale chez les nourrissons, de la naissance (40 semaines de conception) jusqu'à l'âge de marche autonome (18mois) [37]. Cette échelle a été créée dans les années 1990 par Martha C. Piper et Johanna Darrah de l'Université de l'Alberta, au Canada[37],et elle se compose d'une feuille de résultats ainsi que d'un manuel d'instructions [37]. La feuille de score de l'AIMS comprend un total de 58 items, répartis en quatre positions (21 en position couchée, 9 en position ventrale, 12 en position assise et 16 en position debout).Chaque item évalue les composantes du développement moteur en se basant sur trois éléments principaux : le port de poids, la posture et les mouvements antigravitaires. Cette échelle prend en considération à la fois les aspects quantitatifs et qualitatifs du développement moteur, en couvrant des étapes importantes telles que le pivotement, la roulade, la reptation réciproque, la position assise et la marche. L'un des avantages majeurs de l'AIMS est sa simplicité et sa rapidité d'administration, en plus de sa relative facilité d'utilisation [18]. Cependant, il convient de noter que la version originale de l'AIMS a été développée au Canada, et les scores normatifs qu'elle fournit sont basés sur une population canadienne de nourrissons. Par conséquent, son utilisation dans d'autres contextes culturels nécessite une adaptation et une validation spécifique. Ce processus d'adaptation comprend la traduction de l'outil dans une

nouvelle langue, la synthèse des traductions, la rétrotraduction sémantique, idiomatique, expérimentale et conceptuelle, ainsi que le test de la version préliminaire et la mesure de sa fiabilité et validité [9]. De plus, il est important de noter que la fiabilité interévaluateur (la cohérence des résultats entre différents évaluateurs) et la fiabilité intra-évaluateur (la cohérence des résultats lorsqu'un même évaluateur répète la mesure dans des conditions identiques) ne sont pas toujours garanties, ce qui peut présenter des limites dans son utilisation clinique. Ces lacunes ont conduit à l'exploration de méthodes d'automatisation des évaluations cliniques, en utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC), dans le but d'améliorer la précision, la reproductibilité et la fiabilité de ce processus dans différents contextes.

Plusieurs travaux ont joué un rôle essentiel dans l'avancement des méthodes d'évaluation des comportements moteurs des nourrissons en utilisant une variété de technologies, notamment des systèmes d'acquisition d'images optiques, des capteurs de pression, des centrales magnétiques et inertielles, entre autres. Ci-dessous, voici une liste de différents outils/méthodes d'évaluation des comportements moteurs du nourrisson, accompagnée de leur description, de leurs avantages et de leurs limites :

— **Caméras numériques**

- Description et Apport : Elles ont été utilisées avec un codage et une classification supplémentaire de bandes vidéos pour étudier l'influence du contrôle postural sur le comportement de la main[51] et le comportement de préhension du nourrisson par rapport à la préférence pour la main [35].
- Limites : Souffrent d'obstruction, nécessitent un calibrage complexe de la caméra, l'éclairage des marqueurs et des réglages minutieux du zoom et de la mise au point.

— **Systèmes optoélectroniques multi-caméras**

- Description et Apport : (Optotrak, Vicon, Qualisys motion capture) exploitent les avantages du spectre infrarouge et garantissent une précision inférieure à 1 mm, même à des fréquences d'échantillonnage élevées [44].
- Limites : Le nombre élevé de marqueurs nécessaires, le système est invasif, la préparation fastidieuse du sujet et du système de mesure. Bien

que la complexité peut être réduite grâce aux groupes de marqueurs, de grands segments de données manquantes dues aux mouvements inattendus du nourrisson et de l'auto-occlusion restent un problème.

— **Électromyographie (EMG)**

- Description et Apport : Utilisée en complément avec un système basé sur une caméra optique pour extraire les meilleures informations sur le mouvement et les données d'activation musculaire, afin d'étudier le contrôle postural pendant les tâches de préhension du nourrisson [20, 23].
- Limites : Système invasif et requiert des méthodes de détection, décomposition, de traitement et de classification avancées [47].

— **Systèmes de suivi électromagnétique**

- Description et Apport : Ils ont été utilisés en coopération avec les méthodes d'élimination et de déplacement des capteurs de mouvement [30] pour dépasser les exigences en matière de visibilité directe des systèmes optiques [29].
- Limites : Souffrent de limitation de mouvement due au câblage.

— **Accéléromètres**

- Description et Apport : Ils ont été utilisés pour l'analyse des mouvements spontanés [41] des extrémités supérieures [22] et inférieures du nourrisson, mais ne fournissent pas d'informations sur la posture.
- Limites : Sensibles aux bruits de mesure et pas adaptés pour les mouvements à grande variation angulaire.

— **Centrales inertielles et magnétiques sans fil**

- Description et Apport : Ce sont des systèmes portables, non invasifs et peu coûteux composés d'un gyroscope à trois axes, d'un accéléromètre à trois axes et d'un magnétomètre à trois axes. Cet ensemble de capteur mesurent la vitesse angulaire tridimensionnelle, l'accélération et le vecteur champs magnétique.
- Limites : Sensibles aux bruits de mesure

— **Matélas à répartition de pression**

- Description et apport : Ce sont des matrices de capteurs à effet piezorésistifs. Les applications existantes sont plus nombreuses dans le

domaine de l'analyse de la posture des adultes , comme l'analyse non invasive des habitudes de sommeil [39, 36] et les méthodes de prévention des ulcères [60].

- **Limites :** Limitations de l'échantillonnage, la résolution spatiale des capteurs de pression dans les matelas peut limiter la précision des données, en particulier pour les mouvements fins ou rapides.

3.2 Évaluation de la motricité du bras des enfants à risque de TNDs

L'étude visant à évaluer les comportements moteurs du bras chez les nourrissons a révélé des développements atypiques chez les enfants présentant un risque de troubles neurodéveloppementaux (TNDs). Cette évaluation repose sur l'analyse de diverses mesures cinématiques et des aspects géométriques du mouvement. Elle englobe la description de la position, de la vitesse, de l'accélération/décélération des points de l'objet en mouvement. La combinaison de ces mesures permet d'estimer des caractéristiques telles que la trajectoire, la courbure, le jerk (variation de l'accélération), la fluidité, la rectitude, la complexité et la régularité du mouvement. De plus, cette analyse peut également prendre en compte les interactions du nourrisson avec son environnement, notamment l'espace/volume de travail, la manière dont il saisit et interagit avec les objets qui l'entourent.

L'étude menée par OUSS et al. [43] consiste à extraire les trajectoires des mouvements de la main (MMs) à partir d'enregistrements vidéo impliquant des nourrissons âgés de 2 à 10 mois. Ces nourrissons sont regroupés en différentes cohortes, notamment ceux à risque de troubles neurodéveloppementaux (TNDs) tels que le syndrome de West (SW), les prématurés (P), les enfants présentant des troubles oraux (TO), ceux issus de mères malvoyantes (MV), et ceux ayant subi une hospitalisation précoce (HP). Ces nourrissons sont comparés à des témoins qui interagissent avec leur mère dans un contexte interactif. Ils se posent les questions de recherche suivantes : 1) Les MMs diffèrent-ils avec l'âge dans toutes les cohortes ? 2) Est-ce que les MMs diffèrent en fonction du contexte (interaction avec une personne ou un objet) ? 3) Les MMs diffèrent-ils selon les cohortes : témoins ou à risque de TNDs ? et 4) Peut-on utiliser les MMs comme des indicateurs cliniques des TNDs ? Pour répondre à ces questions, ils ont calculé divers descripteurs de trajectoires basés sur les métriques cinématiques, comprenant des statistiques telles que la

moyenne, le minimum, le maximum, l'écart-type, les pauses, etc. Ensuite, ils ont effectué des analyses statistiques, notamment un regroupement hiérarchique basé sur l'indice de corrélation de Pearson pour évaluer la similarité entre les différents descripteurs. Ils ont également utilisé le test non paramétrique d'analyse de variance de Kruskal-Wallis pour évaluer les différences entre les cohortes, suivi d'un test de Dunn pour identifier précisément les groupes ayant des effets différents. Enfin, ils ont testé les interactions entre l'âge et la cohorte à l'aide d'une ANOVA de type III. Les résultats principaux de l'étude sont les suivants : 1) Les caractéristiques cinématiques des MMs étaient significativement liées à l'âge dans toutes les cohortes, 2) Les MMs différaient significativement à l'âge de 5-6 mois chez les nourrissons témoins, selon le contexte 3) Les trajectoires développementales des MMs étaient influencées de manière significative par des facteurs environnementaux et développementaux dans différentes cohortes, avec l'environnement jouant un rôle pour les nourrissons MV, le développement pour les nourrissons P et SW, et les deux facteurs pour les nourrissons TO et 4) Les courbures du MM ont montré un développement atypique chez les nourrissons SW lorsque l'âge de développement était pris en compte.

MUTY et AZIZUL [38] ont développé un système visant à détecter de manière automatique les mouvements du bras en se basant sur un score de symétrie du bras. Ce score est calculé en utilisant une modélisation de l'estimation de la posture humaine et la représentation du squelette à partir de vidéos provenant d'une base de données publique comprenant de jeunes enfants qui ont reçu un diagnostic de trouble du spectre autistique. Dans l'étude menée par QUIJANO-GONZÁLEZ et al. [46], un système de suivi de mouvement à l'aide de 6 caméras a été utilisé pour suivre la trajectoire tridimensionnelle du poignet chez des enfants âgés de 6 à 12 ans, qu'ils présentaient un risque de paralysie cérébrale (PC) ou non. Les enfants ont été observés alors qu'ils interagissaient avec des jouets, notamment en remplissant et vidant une boîte de tri contenant divers objets géométriques [31]. Dans le but d'analyser les performances des enfants dans différentes tâches, trois indicateurs de finesse ont été utilisés, à savoir le "jerk" logarithmique sans dimension (JLD), la longueur de l'arc spectral (LAS) et le nombre de pics (NP). Les résultats de l'étude ont révélé que les valeurs JLD, LAS et NP obtenues à partir des côtés affectés des enfants atteints de PC étaient généralement plus élevées que la moyenne observée dans le groupe témoin. En revanche, les côtés non affectés

des enfants atteints de PC présentaient des valeurs de ces indicateurs plus faibles que leurs côtés affectés, bien que ces valeurs n'atteignent pas systématiquement celles du groupe témoin. En conséquence, il a été constaté que les enfants souffrant de déficiences motrices éprouvaient des difficultés à contrôler la vitesse de leur membre supérieur affecté, ce qui se reflétait dans les mesures obtenues. L'absence de mouvements agités chez les nourrissons âgés de 2 à 4 mois s'est avérée être un indicateur puissant pour identifier les enfants susceptibles de développer une PC [3]. Dans une étude distincte, MACHIREDDY et al. [33] ont combiné des images de caméras avec des données provenant de centrales inertielles à 9 dimensions, comprenant un accéléromètre 3D, un magnétomètre 3D et un gyroscope 3D. Ils ont utilisé un filtre de Kalman étendu pour estimer la position et l'orientation tridimensionnelle des nourrissons âgés de 2 à 4 mois, qui étaient à risque de développer une paralysie cérébrale. Pour cette étude, des experts ont annoté les vidéos en marquant les périodes pendant lesquelles les nourrissons présentaient des mouvements agités. Les données de vitesse, d'accélération et de vitesse angulaire estimées, ainsi que leurs magnitudes, ont été utilisées pour créer une caractéristique à 12 dimensions à chaque instant. Des intervalles équivalents de mouvements agités et non agités ont été sélectionnés pour constituer le jeu de données, puis une classification à 10 niveaux a été effectuée à l'aide d'une machine à vecteurs de support (SVM) sur l'ensemble du jeu de données. Cette classification a permis d'atteindre une précision de 84% dans la distinction entre les mouvements agités et les mouvements non agités.

4 Modèle

4.1 Estimation et Filtrage récursif bayésien

4.2 Filtrage particulaire

4.3 Filtre de Kalman

4.3.1 Filtre de Kalman étendu (FKE)

4.3.2 Filtre de Kalman non parfumé

4.3.3 Filtre de Kalman pour l'estimation d'orientation

L'estimation d'orientation est le processus visant à déterminer la position tridimensionnelle d'un objet rigide en se basant sur des capteurs qui ne sont pas parfaitement précis . Cette tâche revêt une importance fondamentale et constitue un problème critique dans de nombreuses applications en ingénierie, notamment la navigation aérienne [15], la navigation interne [52], la détection de la pose humaine [54], et le suivi des points de consigne pour les robots manipulateurs [40].

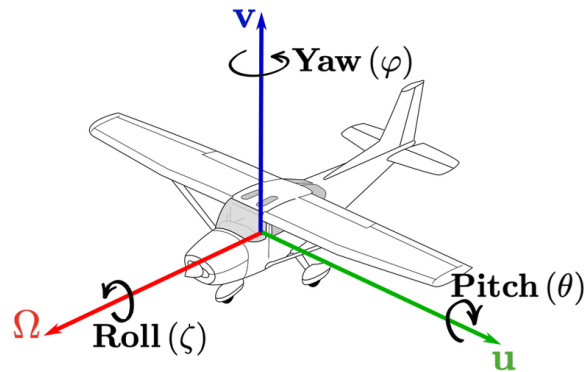


FIGURE 2 – Angles de tangage, de lacet et de roulis d'un avion dont l'orientation du corps est $[\Omega, u, v]$, source [19]

De nombreuses recherches ont été entreprises pour aborder la question de l'estimation de la pose en utilisant divers types de capteurs et en explorant différentes approches algorithmiques(3.1).

Dans le cadre de mes recherches, dont l'objectif est de parvenir à une estima-

tion précise de la pose du poignet des nourrissons en se basant sur les données provenant de centrales inertielles et magnétiques (composées d'un accéléromètre triaxial, d'un gyromètre triaxial et d'un magnétomètre triaxial, également appelées IMUs), RIHAR et al. [48] ont adopté une approche utilisant un filtre de Kalman non linéaire pour fusionner les données d'accéléromètre, de gyromètre et de magnétomètre. Cette fusion de données permet d'estimer l'orientation du poignet du nourrisson, qui est ensuite ajustée en fonction des informations provenant du tapis de pression.

En théorie, une simple intégration de l'accélération pourrait nous donner la vitesse, tandis qu'une double intégration nous fournirait des informations sur la position. Cependant, dans la pratique, pour une centrale inertielle standard, la prédiction de trajectoire est applicable sur de très courtes périodes de temps (de l'ordre des secondes) en raison de la non-linéarité, des biais et des bruits présents dans les capteurs de navigation inertielle (IMUs). Cette accumulation d'erreurs se traduit par une erreur de position et d'orientation considérable, à moins d'utiliser d'autres capteurs pour les corriger. Une approche standard consiste à fusionner les données des capteurs inertiels avec celles d'autres capteurs assistés en utilisant des filtres de Kalman ou des filtres complémentaires. Plusieurs schémas de fusion ont été envisagés, tels que la fusion de données provenant du GPS avec les IMUs, des capteurs de pression avec les IMUs, des caméras avec les IMUs, des capteurs de vision stéréo avec les IMUs, et des capteurs de vitesse de fond (DVL) avec les IMUs [1].

5 Expérience

5.1 Extraction de descripteurs

S'appuyant sur tous les travaux et sur les derniers papiers du projet CareToys [49, 48, 50], différentes métriques susceptibles de relever un comportement atypique chez les nourrissons ont été répertoriées 2 :

Partie du corps	Métriques d'évaluation
Avant-bras	<ul style="list-style-type: none"> — Accélération ; — Vitesse ; — Position 3D ; — Orientation — Espace de travail ; — Courbure ; — Longueur de l'arc spectral — "Jerk" — La préhension des jouets et l'interaction entre le jouet et la main
Tronc	<ul style="list-style-type: none"> — Centre de pression (COP) ; — Amplitude de mouvement de roulement ;

TABLE 2 – Métriques d'évaluation dans le cadre du projet TECH-TOYS

5.2 Dataset

5.2.1 CareToys dataset

Les données issues des centrales inertiellles, enregistrées au format *hdf5*, comprennent les informations relatives à l'accéléromètre, au gyroscope et au magnétomètre le long des trois axes. Actuellement, elles se trouvent à un stade brut, dépourvues de leurs dimensions physiques, et nécessitent donc un prétraitement ainsi qu'un calibrage. Malheureusement, nous ne disposons pas des données de sensibilité des capteurs, et il n'existe aucune vérité terrain disponible pour les comparer. En conséquence, ces données ne peuvent pas être utilisées pour évaluer la précision et la robustesse de l'algorithme.

Le dispositif Baby-Gym est également équipé de caméras qui enregistrent

les mouvements du bébé. Cependant, ces caméras sont mal positionnées, ce qui fait que les enregistrements vidéo disponibles ne montrent qu’une partie de l’interaction. De plus, ils souffrent d’obstructions. Tous ces défauts ont rendu le jeu de données CareToys inutilisable, nous obligeant à créer notre propre ensemble de données afin d’évaluer les performances des algorithmes développés.

5.2.2 Dataset émulé

Les données nécessaires pour évaluer la précision et la robustesse de l’algorithme développé ont été recueillies à l’aide d’une centrale inertielle fixée à une main par le biais d’un smart-phone (voir figure 3a). Une interface d’acquisition (voir figure 3b) a été utilisée conjointement avec une application mobile appelée *sensor logger* [13]. Les données ont été acquises à une fréquence de 100 Hz, et en parallèle, les mouvements du bras ont été enregistrés à l’aide d’une caméra pour permettre une analyse qualitative de la reconstitution de la pose.

Les données collectées comprennent des mesures provenant d’un accéléromètre triaxial, qui enregistre l’accélération le long des trois axes en mètres par seconde carré (m/s^2) tout en corrigeant automatiquement l’effet de la gravité. De plus, un gyroscope triaxial mesure la vitesse angulaire en radians par seconde (rad/s) et calcule l’orientation en utilisant des quaternions ou en radians (comprenant les angles de roulis, de tangage et de lacet) le long des trois axes. Un magnétomètre enregistre l’intensité du champ magnétique en microteslas (μT) suivant les trois axes. En outre, d’autres données peuvent être incluses, telles que la position GPS, des images de caméra, des enregistrements audio, des mesures de lumière ambiante, des données de podomètre, etc. Ces données ont été enregistrées en format *csv*.

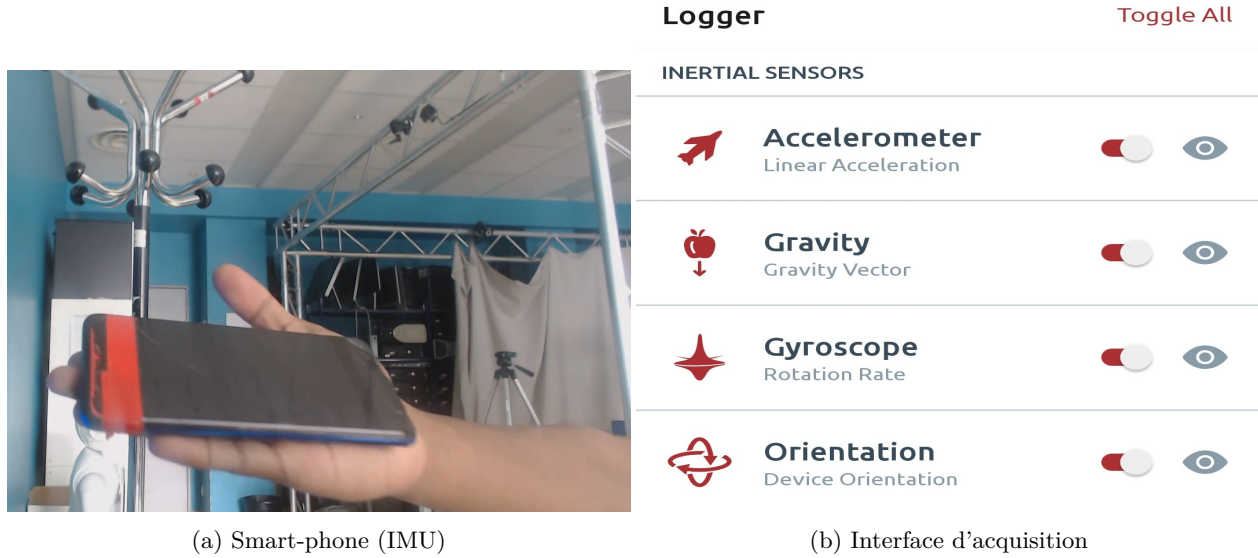


FIGURE 3 – Dispositif d'acquisition des données

5.3 Résultats

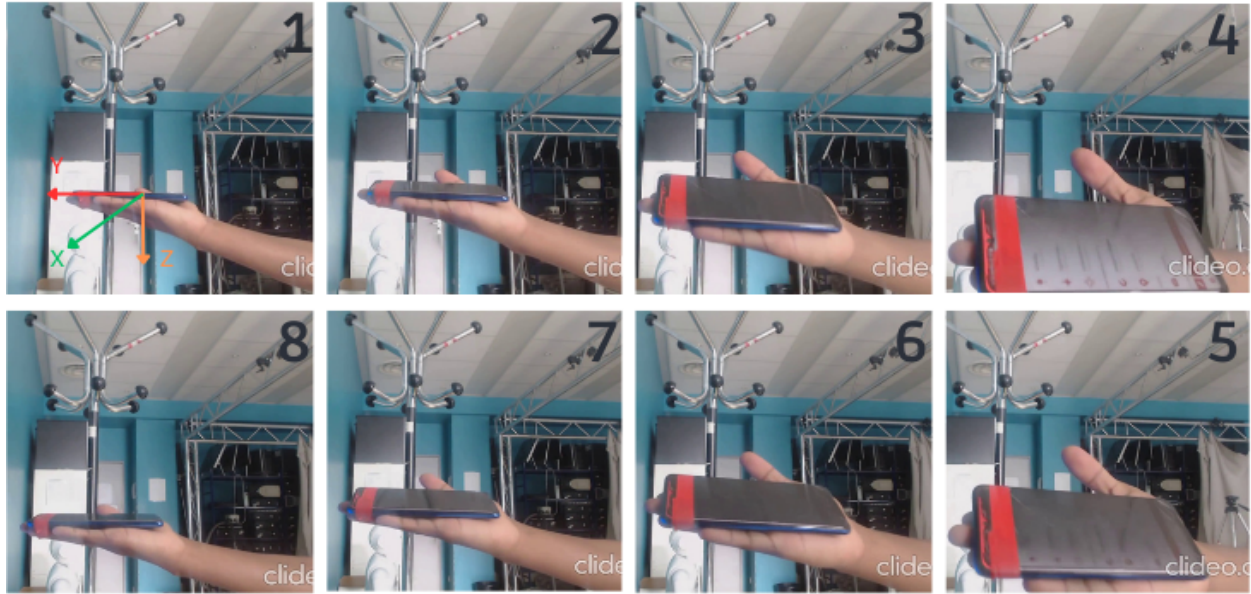
La précision et la robustesse de l'estimation de l'orientation sont évaluées en utilisant les données fournies par l'application comme référence. Pour effectuer cette évaluation, les données des centrales inertielles sont fusionnées conformément à la méthode décrite dans la section 4.3.3. L'algorithme utilisé pour cette fusion des données est *ahrsfilter* de **Matlab**, disponible depuis la version 2018b. Cet algorithme prend en entrée les données des centrales inertielles et renvoie l'orientation sous forme de quaternions ou en fonction des trois axes (en radians). Pour obtenir une estimation plus précise, il est nécessaire de configurer certains paramètres, notamment : "AccelerometerNoise", "GyroscopeNoise", "MagnetometerNoise", "GyroscopeDriftNoise", "LinearAccelerationNoise", "MagneticDisturbanceNoise", "LinearAccelerationDecayFactor" et "MagneticDisturbanceDecayFactor".

Une évaluation qualitative de l'estimation de l'orientation nous permet de détecter deux paramètres ayant un impact significatif sur la qualité de l'estimation : "MagnetometerNoise" et "LinearAccelerationNoise".

Une analyse des deux premières secondes du mouvement de la main d'une séquence de six (06) secondes a été capturée (voir 4a), la reconstruction et l'extraction des descripteurs de la trajectoire de la séquence sont effectuées

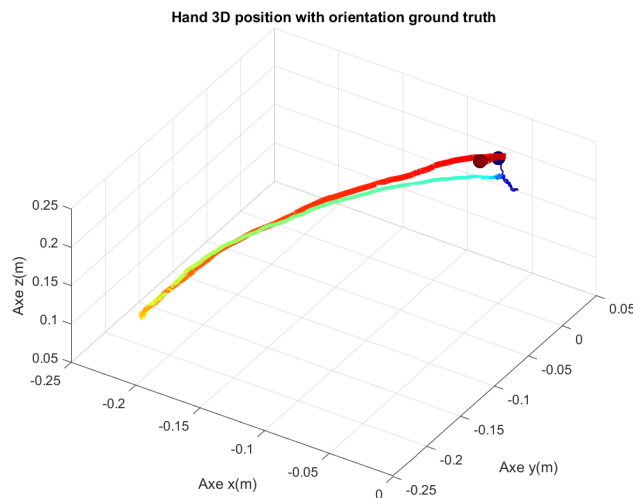
(voir 4d, 4e), puis nous évaluons l'erreur relative des descripteurs estimés par rapport à ceux de la vérité terrain obtenue à partir de l'orientation donnée par l'application.

On obtient une **loss1 = 9,04 %** pour le *Travel Path*, **11,37 %** pour la *surface de travail* et **91,48 %** pour le *volume de travail* qui est moins robuste en raison des erreurs d'estimation d'orientation créant ainsi des décalages dans le déplacement, ce qui fait varier de manière significative le volume de travail.

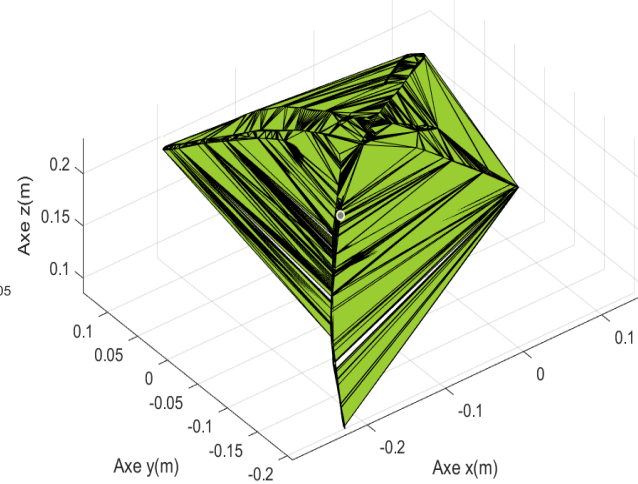


(a) Séquence de mouvement de la main pour l'évaluation qualitative (02 s)

Hand workspace

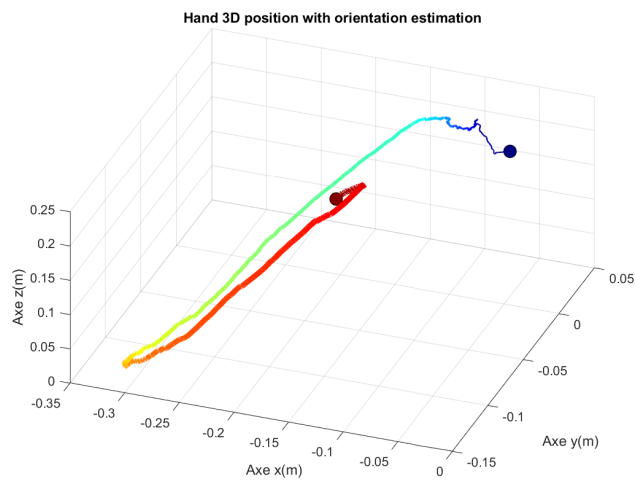


(b) Trajectoire (02 s) : vérité terrain

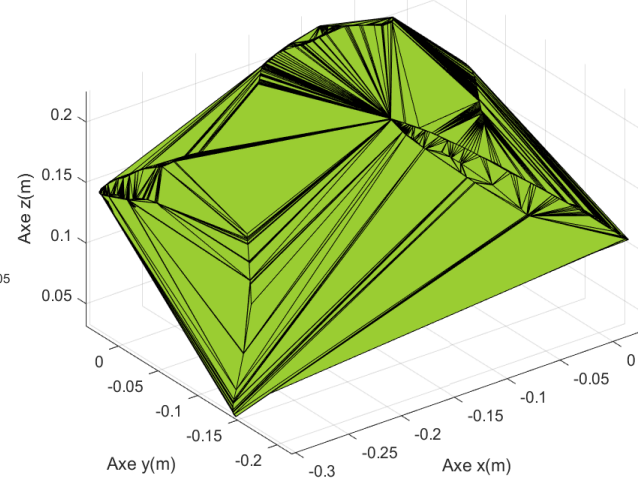


(c) Espace de travail (06 s) : vérité terrain

Hand workspace



(d) Trajectoire (02 s) : estimation



(e) Espace de travail (06 s) : estimation

FIGURE 4 – Extraction des descripteurs de trajectoire

Par la suite, une optimisation quantitative des paramètres du filtre est envisagée, comme décrit dans [2]. Des trajectoires de différentes formes et de finesse variée sont générées dans le but de généraliser les paramètres du filtre. Nous procédons à l'optimisation des paramètres du filtre de Kalman à l'aide de la fonction "tune" de Matlab. Le protocole expérimental se déroule comme suit :

- **Sélection de la trajectoire de référence** : Nous débutons le protocole expérimental en choisissant une trajectoire de référence parmi celles générées
- **Optimisation du filtre sur la trajectoire de référence** : Un filtre est ensuite ajusté afin d'optimiser son comportement spécifiquement sur cette trajectoire de référence. Cette étape vise à obtenir des paramètres de filtre qui produisent des estimations précises et robustes pour cette trajectoire particulière.
- **Création et optimisation de nouveaux filtres pour les trajectoires additionnelles** : Pour chaque trajectoire supplémentaire, un nouveau filtre est créé et ses paramètres sont optimisés spécifiquement sur cette trajectoire. Cette approche permet d'obtenir une "vérité terrain" des descripteurs pour chaque trajectoire, qui servira de référence pour évaluer leur performance.
- **Évaluation du filtre optimisé sur d'autres trajectoires** : Après l'optimisation sur la trajectoire de référence, le filtre ainsi obtenu est évalué en utilisant d'autres trajectoires disponibles. Cela permet de déterminer dans quelle mesure les paramètres du filtre optimisé sur une trajectoire donnée généralisent efficacement à d'autres trajectoires.
- **Estimation des descripteurs et évaluation de la performance** : Les descripteurs sont ensuite estimés pour chaque trajectoire à l'aide des paramètres du filtre de référence initialement ajusté sur la trajectoire de référence. Ensuite, nous comparons ces descripteurs estimés avec ceux de la vérité terrain à l'aide d'une mesure de perte (loss1). Cette comparaison nous permet de déterminer dans quelle mesure les paramètres du filtre appris sur une trajectoire donnée généralisent sur de nouvelles trajectoires et d'évaluer la robustesse des différents descripteurs associés à l'estimation du filtre de Kalman.

Descripteurs Trajectoires	Circle slow (Ref)	Circle fast	Circle shape	Square slow	Square fast	Square shape	Random	Stactic
Travel path	0.0	0.85	0.5516	0.2816	0.5406	0.2377	0.3556	4.6017
Surface de travail	0.0	0.98	1.85	1.3952	3.4701	1.2283	0.5846	1.5e+03
Volume de travail	0.0	0.99	5.4373	4.5307	3.9884	6.0779	0.7416	2.97e+05
Quaternion distance	0.0	0.63	0.308	0.2783	1.5768	1.0941	2.9316	5

TABLE 3 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Circle slow'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast (Ref)	Circle shape	Square slow	Square fast	Square shape	Random	Stactic
Travel path	0.6495	0.0	0.3140	0.8385	5.9850	3.7829	0.1281	14.9100
Surface de travail	7.3053	0.0	1.8787	6.1657	3.4230	4.3260	0.6530	9.27e+03
Volume de travail	19.2943	0.0	3.3739	11.1143	4.9416	12.5669	0.8756	3.18e+07
Quaternion distance	2.5599	0.0	4.2840	4.4080	7.3089	2.4242	4.7059	5.8834

TABLE 4 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Circle fast'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape (Ref)	Square slow	Square fast	Square shape	Random	Stactic
Travel path	0.0132	0.6513	0.0	0.3708	0.1516	0.1294	0.4654	5.2470
Surface de travail	0.0640	0.9434	0.0	2.1615	0.1385	0.4834	0.6207	1.85e+03
Volume de travail	0.2117	0.9924	0.0	6.0408	0.2856	3.6717	0.7805	1.72e+05
Quaternion distance	0.0386	0.1072	0.0	3.9363	5.2249	0.2759	3.4326	1.9141

TABLE 5 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Circle shape'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape	Square slow (Ref)	Square fast	Square shape	Random	Stactic
Travel path	0.0398	0.1637	1.3071	0.0	1.0696	2.9548	0.2592	16.0800
Surface de travail	0.4310	0.1876	8.4584	0.0	4.8488	16.7475	2.3805	1.22e+04
Volume de travail	0.6323	0.5828	38.9295	0.0	10.9859	65.1312	4.0567	5.24e+07
Quaternion distance	0.2819	1.3453	4.0381	0.0	5.2690	2.3616	3.8359	5.3946

TABLE 6 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Square slow'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape	Square slow	Square fast (Ref)	Square shape	Random	Stactic
Travel path	0.2312	0.1120	1.6015	0.3883	0.0	5.2366	0.1837	3.6942
Surface de travail	2.3179	0.0071	5.0083	4.2005	0.0	71.4706	0.0135	1.80e+03
Volume de travail	3.8897	0.1641	13.2986	13.0671	0.0	1.82e+03	0.2910	3.04e+06
Quaternion distance	1.7006	1.1922	4.0381	4.0685	0.0	2.0410	2.7033	3.1562

TABLE 7 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Square fast'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape	Square slow	Square fast	Square shape (Ref)	Random	Stactic
Travel path	0.0478	0.6382	3.8685	6.5224	3.5830	0.0	1.0536	12.3412
Surface de travail	0.0916	0.9297	63.1715	160.7643	57.4153	0.0	4.653	1.06e+04
Volume de travail	0.4186	0.9832	508.0756	2.97e+03	200.3426	0.0	6.7574	4.15e+06
Quaternion distance	0.4033	1.1897	3.5349	4.0501	6.1521	0.0	3.0732	3.5056

TABLE 8 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Square shape'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape	Square slow	Square fast	Square shape	Random (Ref)	Stactic
Travel path	0.1263	0.7382	1.1276	2.8729	0.3958	2.0800	0.0	23.7334
Surface de travail	1.7296	0.9509	4.9131	63.7266	2.2301	21.5410	0.0	2.84e+04
Volume de travail	2.7177	0.9928	15.1770	263.5282	6.4166	211.7971	0.0	8.43e+06
Quaternion distance	1.2682	1.4034	2.7536	3.1484	4.2546	1.5972	0.0	3.3200

TABLE 9 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Random'

Descripteurs Trajectoires	Circle slow	Circle fast	Circle shape	Square slow	Square fast	Square shape	Random	Stactic (Ref)
Travel path	0.7702	1.1754	15.6564	63.9433	15.6038	10.6502	11.4865	0.0
Surface de travail	8.3431	7.8085	232.1026	6.3e+03	916.6871	115.7725	108.8398	0.0
Volume de travail	24.7350	18.2055	4.83e+03	4.30e+05	1.81e+04	2.45e+03	1.05e+03	0.0
Quaternion distance	2.4056	2.2300	3.6259	4.6328	7.3611	2.2372	3.6878	0.0

TABLE 10 – loss1 des descripteurs, Trajectoire ref. : 'Stactic'

Nos constatations soulignent que l'aptitude du filtre de Kalman à généraliser est étroitement liée à la *vitesse et à la trajectoire des mouvements*. Il est intéressant de noter que le filtre semble mieux s'adapter aux trajectoires présentant des vitesses similaires. Cependant, une généralisation satisfaisante des paramètres est également observée sur une gamme variée de trajectoires. Par exemple, pour les trajectoires 'Circle slow', 'Circle fast', et 'Square fast', les erreurs de descripteurs sont minimales lorsqu'elles sont comparées à la trajectoire 'random' (mouvements aléatoires), suggérant que l'optimisation des paramètres du filtre ne se limite pas à une seule trajectoire.

En revanche, une estimation peu fiable des descripteurs est observée pour les mouvements qualifiés de 'statiques', avec des erreurs divergentes. De plus, certains descripteurs se révèlent plus robustes que d'autres. Par exemple, la '*travel path*' et la '*surface de travail*' semblent être des indicateurs plus stables, tandis que d'autres descripteurs comme 'le volume de travail' et 'la quaternion distance' semblent moins fiables pour caractériser les mouvements.

6 Limites

Cette section aborde les limitations rencontrées lors de l'estimation des descripteurs de mouvements, ainsi que les approches choisies et les données utilisées. Dans le processus d'estimation des descripteurs de mouvements, deux phases distinctes sont impliquées. Tout d'abord, nous effectuons l'estimation de l'orientation de la main à partir des données d'IMU à l'aide d'un filtre de Kalman. Une première problématique réside dans l'estimation des bruits provenant des gyroscopes et des accéléromètres des centrales inertielles. De plus, l'algorithme implémenté dans `Matlab` pour le filtre de Kalman est relativement opaque, ce qui limite notre capacité à ajuster et optimiser ses paramètres.

La deuxième étape concerne l'estimation de la position à partir de l'orientation estimée. Cette étape prend en considération plusieurs hypothèses, telles que les mouvements du bras de l'enfant étant généralement effectués bras tendu, et que les mouvements sont de faible amplitude et relativement lents. Cependant, ces hypothèses peuvent introduire des biais significatifs lors de l'application de l'algorithme à des données réelles. Il est important de souligner que nos tests ont été effectués sur des mouvements de personnes adultes, ce qui peut également influencer les performances de l'algorithme lorsqu'il est appliqué à des mouvements d'enfants, qui présentent des caractéristiques motrices différentes.

7 Conclusion

Au cours de ce stage nous avons focalisé notre attention sur l'extraction des descripteurs moteurs à partir des données de trajectoires, en utilisant le filtre de Kalman comme outil principal. À travers notre étude, nous avons souligné l'importance de développer des méthodes d'évaluation robustes et précises pour identifier les marqueurs des TNDs, permettant ainsi une intervention précoce et ciblée. L'utilisation du filtre de Kalman étendu s'est avérée prometteuse pour estimer ces marqueurs de motricité. Nos résultats soulignent l'importance de poursuivre les recherches dans ce domaine crucial.

Malgré les avancées obtenues, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la gestion des incertitudes liées à l'estimation et la nécessité d'utiliser un jeu de données cohérent, incluant les unités de mesure des capteurs et tenant compte des différentes erreurs de mesures. Pour améliorer la robustesse des méthodes d'analyse, il serait pertinent d'explorer de nouvelles approches, telles que la fusion des données des centrales inertielles avec celles des caméras, comme suggéré par OUSS et al. [43].

Références

- [1] “A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU”. In : *2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET’2014), March 21-22, 2014 Dubai (UAE)*. 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology. International Institute of Engineers, 21 mars 2014. ISBN : 978-93-82242-81-9. DOI : 10.15242/IIE.E0314552. URL : <http://iieng.org/siteadmin/upload/7697E0314552.pdf> (visité le 19/08/2023).
- [2] Pieter ABBEEL et al. “Discriminative Training of Kalman Filters”. In : 8 juin 2005, p. 289-296. DOI : 10.15607/RSS.2005.I.038.
- [3] Lars ADDE et al. “General movement assessment : predicting cerebral palsy in clinical practise”. In : *Early Hum Dev* 83.1 (jan. 2007), p. 13-18. ISSN : 0378-3782. DOI : 10.1016/j.earlhumdev.2006.03.005.
- [4] Karen E. ADOLPH et Sarah E. BERGER. “Physical and Motor Development”. In : *Developmental science : An advanced textbook, 5th ed.* Mahwah, NJ, US : Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2005, p. 223-281. ISBN : 978-0-8058-5163-2.
- [5] Salvatore ANZALONE et al. “How children with autism spectrum disorder behave and explore the 4-dimensional (spatial 3D + time) environment during a joint attention induction task with a robot”. In : *Research in Autism Spectrum Disorders* 8 (1^{er} juill. 2014), p. 814-826. DOI : 10.1016/j.rasd.2014.03.002.
- [6] Salvatore Maria ANZALONE et al. “Quantifying patterns of joint attention during human-robot interactions : An application for autism spectrum disorder assessment”. In : *Pattern Recognition Letters. Cooperative and Social Robots : Understanding Human Activities and Intentions* 118 (1^{er} fév. 2019), p. 42-50. ISSN : 0167-8655. DOI : 10.1016/j.patrec.2018.03.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865518300758> (visité le 17/08/2023).
- [7] Abi BANGERTER et al. “Autism Behavior Inventory : A Novel Tool for Assessing Core and Associated Symptoms of Autism Spectrum Disorder”. In : *J Child Adolesc Psychopharmacol* 27.9 (nov. 2017), p. 814-822. ISSN : 1557-8992. DOI : 10.1089/cap.2017.0018.
- [8] Hannah BLENCOWE et al. “National, regional, and worldwide estimates of preterm birth rates in the year 2010 with time trends since 1990 for selected countries : a systematic analysis and implications”. In : *Lancet* 379.9832 (9 juin 2012), p. 2162-2172. ISSN : 1474-547X. DOI : 10.1016/S0140-6736(12)60820-4.
- [9] Godfred O. BOATENG et al. “Best Practices for Developing and Validating Scales for Health, Social, and Behavioral Research : A Primer”. In : *Front Public Health* 6 (2018), p. 149. ISSN : 2296-2565. DOI : 10.3389/fpubh.2018.00149.
- [10] D. CAMPOLO et al. “A novel technological approach towards the early diagnosis of neurodevelopmental disorders”. In : *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2008 (2008), p. 4875-4878. ISSN : 2375-7477. DOI : 10.1109/IEMBS.2008.4650306.
- [11] Domenico CAMPOLO et al. “Neuro-Developmental Engineering : towards Early Diagnosis of Neuro-Developmental Disorders”. In : *New Developments in Biomedical Engineering*. Sous la dir. de Domenico CAMPOLO. InTech, 1^{er} jan. 2010. ISBN : 978-953-7619-57-2. DOI : 10.5772/7595. URL : <http://www.intechopen.com/books/new-developments-in-biomedical-engineering/neuro-developmental-engineering-towards-early-diagnosis-of-neuro-developmental-disorders> (visité le 17/08/2023).
- [12] Francesca CECCHI et al. “CareToy : An Intelligent Baby Gym : Home-Based Intervention for Infants at Risk for Neurodevelopmental Disorders”. In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23.4 (déc. 2016). Conference Name : IEEE Robotics & Automation Magazine, p. 63-72. ISSN : 1558-223X. DOI : 10.1109/MRA.2015.2506058.
- [13] Kelvin CHOI. *Awesome Sensor Logger*. original-date : 2022-06-10T17:36:07Z. 27 sept. 2023. URL : <https://github.com/tszheichoi/awesome-sensor-logger> (visité le 29/09/2023).

- [14] Giovanni CIONI, Emanuela INGUAGGIATO et Giuseppina SGANDURRA. “Early intervention in neuro-developmental disorders : underlying neural mechanisms”. In : *Dev Med Child Neurol* 58 Suppl 4 (mars 2016), p. 61-66. ISSN : 1469-8749. DOI : 10.1111/dmcn.13050.
- [15] Xi DAI et al. “Navigation of Simultaneous Localization and Mapping by Fusing RGB-D Camera and IMU on UAV”. In : *2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*. 2019 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). Juill. 2019, p. 6-11. DOI : 10.1109/SAFEPROCESS45799.2019.9213339. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9213339> (visité le 30/09/2023).
- [16] Martina DEL MAESTRO et al. “Sensing device for measuring infants’ grasping actions”. In : *Sensors and Actuators A-physical - SENSOR ACTUATOR A-PHYS* 165 (1^{er} fév. 2011), p. 155-163. DOI : 10.1016/j.sna.2010.08.016.
- [17] Office of Research \& DEVELOPMENT. *America’s Children and the Environment, Third Edition*. URL : https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEE&dirEntryID=217843 (visité le 19/08/2023).
- [18] Małgorzata ELIKS et Ewa GAJEWSKA. “The Alberta Infant Motor Scale : A tool for the assessment of motor aspects of neurodevelopment in infancy and early childhood”. In : *Front Neurol* 13 (14 sept. 2022), p. 927502. ISSN : 1664-2295. DOI : 10.3389/fneur.2022.927502. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9515325/> (visité le 31/08/2023).
- [19] *Figure 10 : (a) Pitch, yaw and roll angles of an aircraft with body...* ResearchGate. URL : https://www.researchgate.net/figure/a-Pitch-yaw-and-roll-angles-of-an-aircraft-with-body-orientation-0-u-v-original_fig7_348803228 (visité le 30/09/2023).
- [20] I. B. van der FITS et al. “Postural adjustments during spontaneous and goal-directed arm movements in the first half year of life”. In : *Behav Brain Res* 106.1 (déc. 1999), p. 75-90. ISSN : 0166-4328. DOI : 10.1016/S0166-4328(99)00093-5.
- [21] Thomas GARGOT et al. “Automatic Assessment of Motor Impairments in Autism Spectrum Disorders : A Systematic Review”. In : *Cognitive Computation* (2022). Publisher : Springer. DOI : 10.1007/s12559-021-09940-8. URL : <https://hal.science/hal-03520967> (visité le 17/08/2023).
- [22] Hirotaka GIMA et al. “A dynamical system analysis of the development of spontaneous lower extremity movements in newborn and young infants”. In : *J Physiol Anthropol* 30.5 (2011), p. 179-186. ISSN : 1880-6805. DOI : 10.2114/jpa2.30.179.
- [23] Victorine B. de GRAAF-PETERS et al. “Postural adjustments and reaching in 4- and 6-month-old infants : an EMG and kinematical study”. In : *Exp Brain Res* 181.4 (août 2007), p. 647-656. ISSN : 0014-4819. DOI : 10.1007/s00221-007-0964-6.
- [24] Charline GROSSARD et al. “Serious games to teach social interactions and emotions to individuals with autism spectrum disorders (ASD)”. In : *Computers & Education* 113 (2017). Place : Netherlands Publisher : Elsevier Science, p. 195-211. ISSN : 1873-782X. DOI : 10.1016/j.compedu.2017.05.002.
- [25] Jordan HASHEMI et al. “Computer vision tools for low-cost and noninvasive measurement of autism-related behaviors in infants”. In : *Autism Res Treat* 2014 (2014), p. 935686. ISSN : 2090-1925. DOI : 10.1155/2014/935686.
- [26] Kirsten R. HEINEMAN, Arend F. BOS et Mijna HADDERS-ALGRA. “The Infant Motor Profile : a standardized and qualitative method to assess motor behaviour in infancy”. In : *Dev Med Child Neurol* 50.4 (avr. 2008), p. 275-282. ISSN : 0012-1622. DOI : 10.1111/j.1469-8749.2008.02035.x.
- [27] *JOINT TRANSNATIONAL CALL 2021 » ERA PerMed*. URL : <https://erapermed.isciii.es/joint-calls/joint-transnational-call-2021/> (visité le 19/08/2023).
- [28] Melanie JOUAITI et Patrick HENAFF. “Robot-Based Motor Rehabilitation in Autism : A Systematic Review”. In : *International Journal of Social Robotics* 11 (1^{er} déc. 2019). DOI : 10.1007/s12369-019-00598-9.
- [29] Dominik KARCH et al. “Compensation of large motion sensor displacements during long recordings of limb movements”. In : *J Biomech* 43.9 (18 juin 2010), p. 1844-1848. ISSN : 1873-2380. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2010.02.018.

- [30] Dominik KARCH et al. “Quantification of the segmental kinematics of spontaneous infant movements”. In : *J Biomech* 41.13 (18 sept. 2008), p. 2860-2867. ISSN : 0021-9290. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2008.06.033.
- [31] J. KLEIN, A. CHEN et E. BURDET. “Instrumented sorting block box for children, a preliminary experiment”. In : *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2011 (2011), p. 5975458. ISSN : 1945-7901. DOI : 10.1109/ICORR.2011.5975458.
- [32] Georgia KOPPE, Andreas MEYER-LINDENBERG et Daniel DURSTEWITZ. “Deep learning for small and big data in psychiatry”. In : *Neuropsychopharmacol.* 46.1 (jan. 2021). Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group, p. 176-190. ISSN : 1740-634X. DOI : 10.1038/s41386-020-0767-z. URL : <https://www.nature.com/articles/s41386-020-0767-z> (visité le 17/08/2023).
- [33] Archana MACHIREDDY et al. “A video/IMU hybrid system for movement estimation in infants”. In : *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2017 (juill. 2017), p. 730-733. ISSN : 2694-0604. DOI : 10.1109/EMBC.2017.8036928.
- [34] Mufti MAHMUD et al. “Deep Learning in Mining Biological Data”. In : *Cogn Comput* 13.1 (1^{er} jan. 2021), p. 1-33. ISSN : 1866-9964. DOI : 10.1007/s12559-020-09773-x. URL : <https://doi.org/10.1007/s12559-020-09773-x> (visité le 17/08/2023).
- [35] Peter B. MARSCHIK et al. “From the reaching behavior at 5 months of age to hand preference at preschool age”. In : *Dev Psychobiol* 50.5 (juill. 2008), p. 511-518. ISSN : 1098-2302. DOI : 10.1002/dev.20307.
- [36] Vangelis METSIS et al. “Non-invasive analysis of sleep patterns via multimodal sensor input”. In : *Personal and Ubiquitous Computing* 18 (1^{er} jan. 2014). DOI : 10.1007/s00779-012-0623-1.
- [37] *Motor Assessment of the Developing Infant - 2nd Edition*. URL : <https://shop.elsevier.com/books/motor-assessment-of-the-developing-infant/piper/978-0-323-76057-7> (visité le 31/08/2023).
- [38] Nurliyana MUTY et Zati AZIZUL. “Detecting arm flapping in children with Autism Spectrum Disorder using human pose estimation and skeletal representation algorithms”. In : *2016 International Conference On Advanced Informatics : Concepts, Theory And Application (ICAICTA)*. 2016 International Conference On Advanced Informatics : Concepts, Theory And Application (ICAICTA). Août 2016, p. 1-6. DOI : 10.1109/ICAICTA.2016.7803118.
- [39] Hongbo NI et al. “Towards Non-intrusive Sleep Pattern Recognition in Elder Assistive Environment”. In : *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. T. 3. 26 oct. 2010, p. 96-109. ISBN : 978-3-642-16354-8. DOI : 10.1007/978-3-642-16355-5_10.
- [40] Kunihiro OGATA, Hideyuki TANAKA et Yoshio MATSUMOTO. “A Robust Position and Posture Measurement System Using Visual Markers and an Inertia Measurement Unit”. In : *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). ISSN : 2153-0866. Nov. 2019, p. 7497-7502. DOI : 10.1109/IROS40897.2019.8967887. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8967887> (visité le 30/09/2023).
- [41] Shohei OHGI et al. “Time Series Analysis of Spontaneous Upper-Extremity Movements of Premature Infants With Brain Injuries”. In : *Phys Ther* 88.9 (sept. 2008), p. 1022-1033. ISSN : 0031-9023. DOI : 10.2522/ptj.20070171. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2527216/> (visité le 21/08/2023).
- [42] Jane ORTON et al. “Do early intervention programmes improve cognitive and motor outcomes for preterm infants after discharge? A systematic review”. In : *Dev Med Child Neurol* 51.11 (nov. 2009), p. 851-859. ISSN : 1469-8749. DOI : 10.1111/j.1469-8749.2009.03414.x.
- [43] Lisa OUSS et al. “Developmental Trajectories of Hand Movements in Typical Infants and Those at Risk of Developmental Disorders : An Observational Study of Kinematics during the First Year of Life”. In : *Frontiers in Psychology* 9 (2018). ISSN : 1664-1078. URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.00083> (visité le 19/08/2023).

- [44] Laura Ann PETITTO et al. “Baby hands that move to the rhythm of language : hearing babies acquiring sign languages babble silently on the hands”. In : *Cognition* 93.1 (août 2004), p. 43-73. ISSN : 0010-0277. DOI : 10.1016/j.cognition.2003.10.007.
- [45] *Project Summary / Caretoy.eu*. URL : http://www.caretoy.eu/project_summary (visité le 31/08/2023).
- [46] Y. QUIJANO-GONZÁLEZ et al. “Upper limb functional assessment of children with cerebral palsy using a sorting box”. In : *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. ISSN : 1558-4615. Août 2014, p. 2330-2333. DOI : 10.1109/EMBC.2014.6944087.
- [47] M.B.I. RAEZ, M.S. HUSSAIN et F. MOHD-YASIN. “Techniques of EMG signal analysis : detection, processing, classification and applications”. In : *Biol Proced Online* 8 (23 mars 2006), p. 11-35. ISSN : 1480-9222. DOI : 10.1251/bpo115. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1455479/> (visité le 21/08/2023).
- [48] Andraž RIHAR et al. “CareToy : Stimulation and Assessment of Preterm Infant’s Activity Using a Novel Sensorized System”. In : *Ann Biomed Eng* 44.12 (1^{er} déc. 2016), p. 3593-3605. ISSN : 1573-9686. DOI : 10.1007/s10439-016-1669-4. URL : <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1669-4> (visité le 17/08/2023).
- [49] Andraž RIHAR et al. “Infant posture and movement analysis using a sensor-supported gym with toys”. In : *Med Biol Eng Comput* 57.2 (1^{er} fév. 2019), p. 427-439. ISSN : 1741-0444. DOI : 10.1007/s11517-018-1890-4. URL : <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1890-4> (visité le 17/08/2023).
- [50] Andraž RIHAR et al. “Infant trunk posture and arm movement assessment using pressure mattress, inertial and magnetic measurement units (IMUs)”. In : *J Neuroeng Rehabil* 11 (6 sept. 2014), p. 133. ISSN : 1743-0003. DOI : 10.1186/1743-0003-11-133.
- [51] Nelci Adriana Cicuto Ferreira ROCHA et Eloisa TUDELLA. “The influence of lying positions and postural control on hand-mouth and hand-hand behaviors in 0-4-month-old infants”. In : *Infant Behav Dev* 31.1 (jan. 2008), p. 107-114. ISSN : 1934-8800. DOI : 10.1016/j.infbeh.2007.07.004.
- [52] Milton C. P. SANTOS, Mário SARCINELLI-FILHO et Ricardo CARELLI. “Indoor waypoint UAV navigation using a RGB-D system”. In : *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*. 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). Nov. 2015, p. 84-91. DOI : 10.1109/RED-UAS.2015.7440994. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7440994> (visité le 30/09/2023).
- [53] Brian SCASSELLATI et al. “Improving social skills in children with ASD using a long-term, in-home social robot”. In : *Sci Robot* 3.21 (22 août 2018), eaat7544. ISSN : 2470-9476. DOI : 10.1126/scirobotics.aat7544.
- [54] Ionut-Cristian SEVERIN. “Head Posture Monitor Based On 3 IMU Sensors : Consideration Toward Healthcare Application”. In : *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*. 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). ISSN : 2575-5145. Oct. 2020, p. 1-4. DOI : 10.1109/EHB50910.2020.9280106. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9280106> (visité le 30/09/2023).
- [55] Giuseppina SGANDURRA et al. “Effects on Parental Stress of Early Home-Based CareToy Intervention in Low-Risk Preterm Infants”. In : *Neural Plasticity* 2019 (22 jan. 2019). Publisher : Hindawi, e7517351. ISSN : 2090-5904. DOI : 10.1155/2019/7517351. URL : <https://www.hindawi.com/journals/np/2019/7517351/> (visité le 31/08/2023).
- [56] Giuseppina SGANDURRA et al. “Home-based, early intervention with mechatronic toys for preterm infants at risk of neurodevelopmental disorders (CARETOY) : a RCT protocol”. In : *BMC Pediatr* 14 (15 oct. 2014), p. 268. ISSN : 1471-2431. DOI : 10.1186/1471-2431-14-268.
- [57] Alicia SPITTLE et al. “Early developmental intervention programmes provided post hospital discharge to prevent motor and cognitive impairment in preterm infants”. In : *Cochrane Database Syst Rev* 2015.11 (24 nov. 2015), p. CD005495. ISSN : 1469-493X. DOI : 10.1002/14651858.CD005495.pub4.

- [58] Elizabeth B. TORRES et al. “Characterization of the Statistical Signatures of Micro-Movements Underlying Natural Gait Patterns in Children with Phelan McDermid Syndrome : Towards Precision-Phenotyping of Behavior in ASD”. In : *Frontiers in Integrative Neuroscience* 10 (2016). ISSN : 1662-5145. URL : https://www.academia.edu/27086926/Characterization_of_the_Statistical_Signatures_of_Micro_Movements_Underlying_Natural_Gait_Patterns_in_Children_with_Phelan_McDermid_Syndrome_Towards_Precision_Phenotyping_of_Behavior_in_ASD (visité le 17/08/2023).
- [59] Andreas K. TRIANTAFYLLIDIS et Athanasios TSANAS. “Applications of Machine Learning in Real-Life Digital Health Interventions : Review of the Literature”. In : *J Med Internet Res* 21.4 (5 avr. 2019), e12286. ISSN : 1438-8871. DOI : 10.2196/12286.
- [60] R. YOUSEFI et al. “Bed posture classification for pressure ulcer prevention”. In : *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2011 (2011), p. 7175-7178. ISSN : 2694-0604. DOI : 10.1109/IEMBS.2011.6091813.
- [61] Ryad ZEMOURI, Nouredine ZERHOUNI et Daniel RACOCEANU. “Deep Learning in the Biomedical Applications : Recent and Future Status”. In : *Applied Sciences* 9.8 (jan. 2019). Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1526. ISSN : 2076-3417. DOI : 10.3390/app9081526. URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/8/1526> (visité le 17/08/2023).