

Table des matières

Résumé.....	4
1 Introduction	5
1.1 Chaîne d'effets	6
1.2 Dynamique force-mouvement.....	8
1.3 Paramètres d'inertie.....	10
1.4 Cinématique	12
1.5 Tir sportif à 10 m.....	12
1.6 Objectif du travail.....	13
2 Méthode.....	15
2.1 Équations d'estimation.....	17
2.2 Méthode des moindres carrés	19
2.3 Translations et rotations des repères	20
2.4 Excitation des axes	22
2.5 Bruit des capteurs	23
2.6 Procédure.....	24
2.7 Implémentation.....	25
2.8 Simulations.....	27
3 Résultats	32
3.1 Sphère pleine	32
3.2 Sphère munie d'un SCATT.....	33
3.3 Pavé droit muni d'un SCATT	34
3.4 Pavé droit avec plusieurs capteurs	34
3.5 Contrôle de l'échelle des forces	35
3.6 Contrôle de l'échelle des moments de forces.....	36
4 Discussion	38
4.1 Méthode d'estimation.....	38
4.2 Simulations.....	38
4.3 Valeurs de sortie.....	40
4.4 Réponses aux questions.....	41
5 Conclusion.....	44
Bibliographie.....	46
Annexe	50

Liste des abréviations	50
Résultats supplémentaires	50
Codes sources des principales fonctions	53
Remerciements	61

Résumé

Le tir sportif à la carabine à 10 m requiert beaucoup d'entraînement et d'investissement afin d'atteindre des résultats de pointe. Une multitude de facteur influence le résultat et plusieurs de ces facteurs ont déjà été étudiés. Dans ce travail, le but est de réaliser un lien plus direct entre les différents facteurs. Il s'agit de réaliser une chaîne d'effets dans le but d'améliorer l'apprentissage dans le tir. Pour compléter cette chaîne d'effets, il est nécessaire de déterminer les paramètres d'inertie de chaque carabine afin d'utiliser les capteurs de forces et moments de forces intégrés dans la carabine.

La méthode d'estimation utilise les valeurs dynamiques des capteurs de forces et moments de forces ainsi que les valeurs cinématiques provenant d'un système SCATT ("SCATT shooter trainers", 2018). La méthode utilise principalement les équations Euler-Newtoniennes. Cette méthode a été choisie car d'autres méthodes traditionnelles ne sont pas considérées comme adaptées pour un objet aussi complexe que la carabine. Une matrice augmentée est réalisée puis une méthode des moindres carrés est appliquée à la matrice afin d'estimer les paramètres d'inertie d'un objet. Les facteurs pouvant influencer la précision de l'estimation sont analysés. Ces facteurs comprennent l'orientation des capteurs, l'excitation optimale des axes ainsi que le bruit sur les capteurs et le système SCATT. Une procédure à suivre pour réaliser une prise de données et une estimation est décrite. Une description des fonctions implémentées dans Matlab permet de comprendre leur fonctionnement. Plusieurs simulations avec divers objets ont permis de tester la méthode implémentée dans Matlab.

Après analyse des simulations et des tests sur les données, les résultats des simulations ont montré que l'estimation n'était pas très fiable lorsque les données subissaient du bruit (1 à 5 % d'erreur pour le pavé droit muni d'un capteur et 1 à 7 % pour le pavé droit muni de deux capteurs). On a réalisé que les données réelles n'étaient pas suffisamment précises et fiables pour estimer de manière correcte les paramètres d'inertie d'une carabine.

Plusieurs problèmes ont été relevés tels que la précision des mesures des distances entre les différents capteurs, la détermination de l'orientation de chaque capteur, le manque de degré de liberté du système SCATT ou encore la mauvaise adaptation des scripts supposés traiter les données reçues par les capteurs.

En conclusion, il reste des solutions à trouver dans le domaine des données cinématiques, de la dynamique et du traitement des données. L'implémentation est cohérente en observant les résultats des simulations. Une autre approche, une adaptation des scripts ou des instruments mieux adaptés permettraient de réaliser une estimation plus précise et réalisable.

1 Introduction

Une performance de haut niveau dans le tir sportif à la carabine¹ à 10 m requiert beaucoup d'entraînement et d'investissement. Ce qui rend la discipline si difficile réside dans la capacité d'atteindre la cible avec le maximum de précision de manière répétée. Aucune variation pendant la compétition ne peut être tolérée si le but est d'atteindre le maximum de points. Ceci est aussi vrai pour d'autres disciplines du domaine du tir sportif tel que le tir à la carabine à 50 ou 300 m ou encore le tir au pistolet². Les résultats d'un tireur³ peuvent varier selon de multiples facteurs (Ihalainen, Kuitunen, Mononen & Linnamo, 2016). Dans cette étude, la stabilité de la posture, le temps de visée, la stabilité du maintien, la propreté du déclenchement (le fait d'appuyer sur la gâchette avec une même force jusqu'au départ du coup), la précision de la visée et le timing du déclenchement ont été analysés. Parmi ces facteurs, les meilleurs prédicteurs sont la stabilité du maintien, la propreté du déclenchement, la précision de la visée et le timing du déclenchement. 81 % de la variance du score final est influencée par ces facteurs. Ceci rend difficile une bonne performance régulière tout au long de la saison de tir. Les récentes études et recherches ont porté sur les relations entre ces facteurs et le score final en compétition (Ihalainen, Linnamo, Mononen & Kuitunen, 2016). Des facteurs tels que le maintien de la position et la propreté du déclenchement ont été mis en relation positivement avec la performance en compétition. L'équilibre postural a été lié à la propreté du déclenchement. Le nombre de facteurs pouvant avoir une influence sur le score final est conséquent et de ce fait difficile à analyser dans l'ensemble. Il faut pour cela préférer une approche structurée de la discipline.

Plusieurs secteurs ont déjà été traités. Des différences ont été démontrées entre les tireurs experts et les novices avec une activité corticale asymétrique significativement supérieure chez les experts ainsi qu'une période d'œil calme plus longue précédant le départ du coup (Janelle et al., 2000). Dans cette étude, les experts ont aussi montré des performances de tir supérieures. Les experts ont montré une augmentation significative supérieure de la puissance alpha et bêta dans l'hémisphère gauche et en contrepartie une baisse de la puissance alpha et bêta dans l'hémisphère droite dans la période de temps avant le déclenchement.

Une autre étude (Konttinen, Landers & Lyytinen, 2000) a observé les mouvements du canon de la carabine la dernière seconde avant le déclenchement en relation avec les potentiels électro-corticaux lents. Ceci donnait un aperçu du traitement secret sous-jacent. Il s'est avéré que

¹ Dans ce travail, on sous-entend la carabine à air comprimé en utilisant le terme carabine afin d'éviter d'alourdir le texte.

² Les disciplines ne sont listées que partiellement en raison du nombre conséquent de disciplines.

³ Dans ce travail, le genre masculin est utilisé comme générique.

les tireurs élités n'appuyaient sur la gâchette que dans une position de tir stable. Les tireurs pré-élités appuyaient en revanche sur la gâchette dans une position moins stable.

Concernant les méthodes d'apprentissage, des groupes recevant plusieurs feedbacks augmentés (0, 50 et 100 %) par un affichage de la trajectoire de visée du canon sur la cible ont été comparés avec un groupe contrôle (Mononen, Viitasalo, Kontinen & Era, 2003). Les effets positifs des groupes de traitements étaient présents lors du test de rétention après 2 jours. Ces effets ont disparu après 10 jours seulement. Par contre, aucun effet majeur parallèle n'a été trouvé entre les groupes concernant la stabilité de la carabine. Cela indiquerait que les feedbacks augmentés améliore la précision de la prise de vue mais que l'effet ne semble être que temporaire. Il faut examiner les raisons de l'amélioration du score de tir.

Une autre étude (Tremayne & Barry, 2001) a observé la différence du rythme cardiaque et de la conductance cutanée entre des experts et des novices. Ils ont mesuré ces valeurs chaque demi-seconde dans la phase entre 20 secondes avant et 10 secondes après le déclenchement. Ils ont observé un léger ralentissement du rythme cardiaque et de la conductance cutanée avant le tir suivi d'une légère augmentation juste après le tir chez les experts. Les tireurs novices n'ont pas montré de ralentissement du rythme cardiaque ou de la conductance cutanée ni d'augmentation après le tir. Ceci montre que les experts ont appris à contrôler leur corps pendant un cours instant afin de bénéficier des effets positifs du ralentissement cardiaque sur la stabilité.

1.1 Chaîne d'effets

Toutes ces études semblent montrer des effets intéressants pour améliorer l'entraînement et l'analyse de tireurs de compétitions mais ils contiennent tous la même lacune. En effet, les relations sont souvent trop distales pour que les variables mesurées jouent un grand rôle. Une nouvelle approche a été proposée au sein de l'Université de Berne en coopération avec la fédération suisse de tir (FST) ("swissshooting", 2018) dans le cadre d'un projet sur plusieurs années. Un modèle de chaîne d'effets (voir figure 1) a été établi afin d'étudier en détail les différents facteurs et leur effets sur la variation des trajectoires du canon de la carabine.

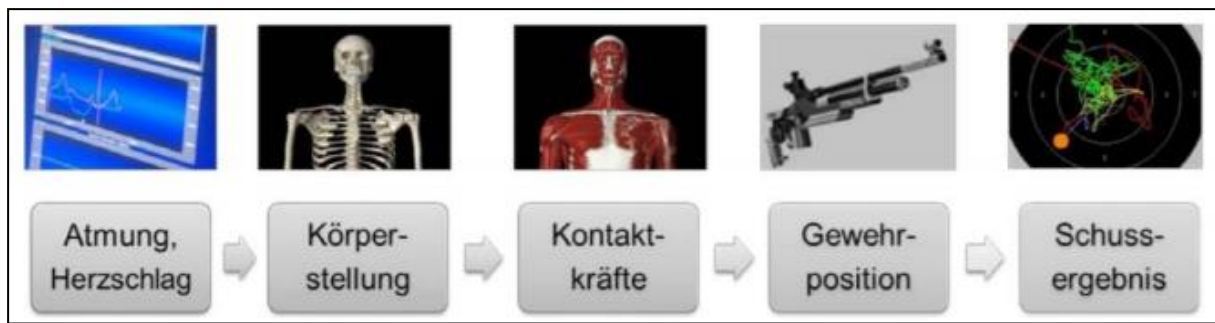


Figure 1. Schéma de la chaîne d'effet biomécanique des facteurs influençant le résultat de tir (Kredel, Tartaruga, Siegenthaler & Hossner, 2013).

Les relations distales peuvent être compensées dans la chaîne d'effet et il est de ce fait important de décomposer chaque étape afin de comprendre comment un facteur distant puisse influencer la trajectoire du canon de la carabine. Toutes les études citées auparavant observent des relations distales et le but de ce projet est de développer l'aspect proximal de chaque facteur (Kredel & Hossner, 2012). Jusqu'ici, plusieurs études ont déjà établis des liens proximaux entre les différents effets de la chaîne.

Les limitations physiologiques ont un rôle majeur (Lakie, 2010). Les tremblements peuvent être augmentés ou diminués en jouant sur la température des muscles ou des membres. Ces tremblements vont perturber la position debout et la stabilité de la carabine. Il est aussi prouvé que l'activité physique améliore la tenue du corps debout (Thomas & Magal, 2014). La respiration joue également un grand rôle dans la capacité à tenir la position debout avec le moins de mouvement possible (Malakhov & Melnikov, 2017). Il est très important de presser la détente en harmonie avec les battements du cœur (Helin, Sihvonen & Hänninen, 1987). Dans cette étude, ils ont mesuré l'activité électrique du doigt de détente en relation avec les cycles du cœur pendant le tir. Ils ont observé que les experts pressaient la détente pendant la diastole. Par contre, les novices pressaient la détente pendant la diastole et la systole. De toute évidence, les résultats réalisés en pressant pendant la diastole étaient meilleurs que pendant la systole.

La stabilité de la position debout peut aussi être influencée. Il n'existe pas de position idéale dû au fait que les segments des membres des tireurs peuvent varier mais il reste néanmoins des positions plus stables que d'autres. Un écartement idéal des jambes permet d'avoir une stabilité de la trajectoire améliorée (Tremayne & Barry, 2001). L'étude a comparé différents écartements de jambes (30, 45, 60, 75 et 90 cm) avec la dispersion et la vitesse de déplacement du centre de gravité. Il s'est avéré qu'une position plus serrée a tendance à augmenter la stabilité posturale. Une autre étude a observé le centre de pression sur une plateforme de force

pendant des séquences jusqu'à 7.5 s avant le départ du coup (Era, Konttinen, Mehto, Saarela & Lyytinen, 1996). Ils ont comparé des tireurs de niveau national avec des novices. Les hommes arrivaient en général à mieux stabiliser leur position que les femmes. Les tireurs de niveau national étaient tous plus stables que les novices. Une différence encore plus marquante a été observée pendant la dernière seconde avant le départ du coup chez les tireurs de niveau national. Chez les novices, aucune différence pendant la séquence n'a été observée.

Les variances entre les différentes forces et moments de forces ont aussi été analysées et les dimensions des forces pertinentes qui ont des effets notables sur le résultat ont été trouvées (Kredel, Grimm & Hossner, 2018). Néanmoins, cette étude se focalise sur les scores des tireurs et ne permet pas de donner avec précision les raisons et sous l'influence de quelle force le résultat a été influencé. La trajectoire de la carabine juste avant et juste après le coup est aussi d'une importance capitale.

Toutes ces relations peuvent permettre un entraînement ciblé pour améliorer la performance de tireurs à la carabine. Cependant, il n'existe à ce jour aucun lien entre les différentes forces que le tireur transmet aux différents points de contacts de la carabine et sa position. Les relations sont plus proches mais la plupart utilise encore et toujours le score final pour juger la pertinence d'une méthode ou d'un facteur.

1.2 Dynamique force-mouvement

Afin de pouvoir comprendre et analyser les études qui prennent en compte les mouvements du canon de la carabine, l'étude de la dynamique est primordiale. Ce qui manque encore dans la chaîne d'effet est la relation entre les forces engendrées par le tireur et la répercussion directe sur la trajectoire de la carabine. Avec cette relation, nous pourrions justifier et confirmer la plupart des études mentionnées auparavant. La modélisation directe de la position de la carabine sera envisageable. Il sera aussi possible de comprendre avec certitude tout le processus en commençant par un facteur distant et en suivant la chaîne d'effet pour finalement arriver au score final. Il s'agit surtout de comprendre les étapes intermédiaires. On pourra par exemple donner des feedbacks beaucoup plus précis au tireur lui permettant de se rendre compte des forces qu'il engendre sur la carabine et les répercussions possibles que ces forces ont sur la trajectoire de la carabine.

Pour construire une telle relation entre la position de la carabine et les forces engendrées, la carabine doit être considérée comme un corps rigide (CR). La carabine est constituée de parties fixes. Les seules parties mobiles sont la détente et le levier de chargement. Lorsque ce dernier est verrouillé par le tireur, il ne reste plus que la détente qui peut être actionnée. On

peut considérer la carabine comme un CR. De ce fait, il est possible d'analyser le comportement de la carabine en fonction des forces en présences produites par le tireur. On peut appliquer plusieurs théorèmes et algorithmes qui simplifient grandement l'analyse dynamique des forces appliquées à la carabine (Featherstone, 2008).

Dans le cadre du projet entre l'Université de Berne et la FST, les parties critiques de la carabine ont été équipées de capteurs⁴ à 6 degrés de liberté (DOF). Ces capteurs mesurent les forces [N] et moments de forces [Nmm] avec une fréquence de 1000 Hz dans les trois dimensions *xyz*. Ils sont intégrés à 4 emplacements pour mesurer les forces des points de contacts suivants : appui-main, épaule, appui-joue et poignée. Ils sont placés de manière à ce que le tireur ne soit pas gêné par les capteurs et que la carabine ne soit que très peu modifiée au niveau de la répartition du poids (voir figure 2).

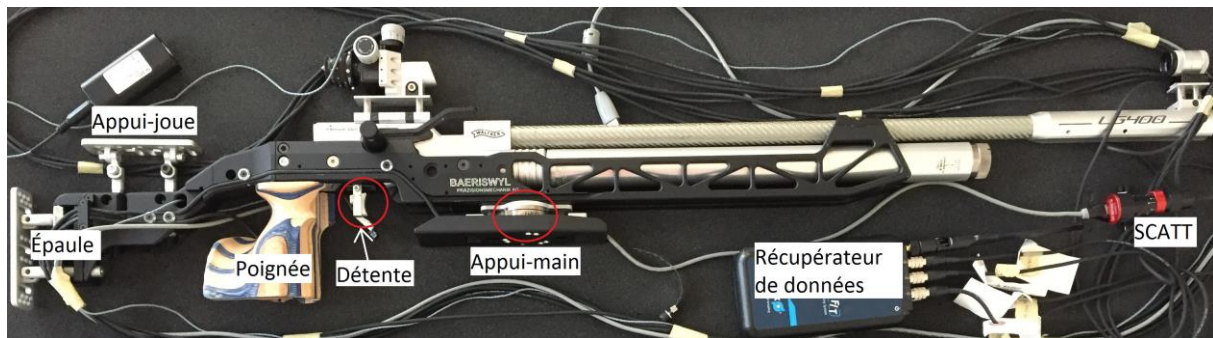


Figure 2. Carabine équipée des capteurs intégrés, système SCATT et lecteur de force de détente (SCHUNK GmbH, 2017; “SCATT shooter trainers”, 2018).

Les capteurs sont de l'entreprise SCHUNK provenant de ATI Industrial Automation (ATI-IA) (“ATI Industrial Automation”, 2018) avec les spécificités suivantes pour le capteur de l'appui-main :

SI (Metric)

Calibration	Fx,Fy [N]	Fz [N]	Tx,Ty [Nm]	Tz [Nm]	Fx,Fy [N]	Fz [N]	Tx,Ty [Nm]	Tz [Nm]
SI-145–5	145	290	5	5	1/16	1/16	1/752	1/1504
SI-290–10	290	580	10	10	1/8	1/8	1/376	1/752
SI-580–20	580	1160	20	20	1/4	1/4	1/188	1/376
	SENSING RANGES				RESOLUTION*			

Figure 3. Spécificités de calibration du Mini45 (SCHUNK GmbH, 2017).

⁴ Sauf si spécifié autrement, le terme général « capteurs » fait référence aux capteurs de forces et moments de forces.

Les capteurs de l'épaule, de l'appui-joue et de la poignée sont différents de celui de l'appui-main. Ils sont plus petits et plus sensibles que celui de l'appui-main. Ils ont les spécificités suivantes :

SI (Metric)

Calibration	Fx,Fy [N]	Fz [N]	Tx,Ty [Nm]	Tz [Nm]	Fx,Fy [N]	Fz [N]	Tx,Ty [Nm]	Tz [Nm]
SI-125-3	125	500	3	3	1/48	1/16	1/1320	1/2640
SI-250-6	250	1000	6	3.4	1/24	1/8	1/660	1/1320
	SENSING RANGES				RESOLUTION			

Figure 4. Spécificités de calibration du Mini45 (SCHUNK GmbH, 2017).

La force prodiguée sur la détente est de l'ordre de 20 à 200 g, c'est-à-dire entre 0.2 et 2 N. Ce poids est négligé dans ce projet. Le poids de détente est cependant mesuré pour donner un feedback au tireur concernant sa manière de presser la détente. Un exemple d'utilisation existe. Une étude a comparé les facteurs physiologiques avec la pression sur la détente (Helin et al., 1987).

1.3 Paramètres d'inertie

Chaque CR possède ses propres caractéristiques en termes de masse, centre de gravité et moment d'inertie (Benson, 1999). Ceci est aussi le cas pour les carabines. Chaque tireur peut modifier, en respectant les règles en vigueur (ISSF, 2017), sa carabine en ajustant et en fixant des poids. Cela permet au tireur d'adapter la carabine à ses caractéristiques physiques et son appréciation personnelle. Chaque carabine possède ses propres caractéristiques. Étant donné que ces paramètres ont un impact direct sur la dynamique des CR, il est obligatoire de connaître ces paramètres pour chaque carabine. On peut voir sur les équations de Newton-Euler les différents paramètres qui rentrent en ligne de compte pour l'analyse de la trajectoire d'un CR (Hahn, 2002).

$$\vec{F}_{ext} = m\vec{a} \quad (1)$$

$$\vec{\tau}_{ext} = I\vec{\omega} \quad (2)$$

\vec{F}_{ext} [N] = force total agissant au centre de gravité (CDG)



m [kg] = masse du corps

\vec{a} [m/s²] = l'accélération linéaire du CDG

$\vec{\tau}_{ext}$ [Nm] = moment de force total agissant au CDG

I [kg*m²] = moment d'inertie par rapport au CDG

$\vec{\omega}$ [rad/s²] = accélération angulaire du CR

Les équations (1) et (2) décrivent en mécanique classique la combinaison de translation et de rotation dynamique d'un CR. Ces équations représentent le principe fondamental de la dynamique (Combarnous, Desjardins & Bacon, 2004). Dans ces équations, la force de gravité $G = 9.80655\text{m/s}^2$ (Taylor & Thompson, 2008) doit être comprise. Ces équations prennent en compte toutes les caractéristiques de l'objet. Les paramètres qui définissent chaque objet peuvent être résumés par la matrice suivante :

$$\varphi = \begin{bmatrix} m \\ mCx \\ mCy \\ mCz \\ I_{xx} \\ I_{xy} \\ I_{xz} \\ I_{yy} \\ I_{yz} \\ I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cx, y, z [m] = les coordonnées du CDG à savoir que dans ce document, nous allons travailler avec des [mm] car les dimensions de la carabine permettent de travailler dans ces unités.

$I_{x, y, z}$ [kg*m²] = les tenseurs d'inerties. Il s'agit d'une matrice 3x3 symétrique (4) dont 6 éléments suffisent pour définir tous les moments d'inertie d'un CR (Kubus, Kroger & Wahl, 2008). Ce qui peut être intéressant à soulever ici est que les produits d'inertie (c'est-à-dire I_{xy} , I_{xz} , I_{yz} et leurs symétries respectives) se rapprochent de zéro si les 3 axes principaux possèdent la même orientation que le capteur (Meriam, Kraige & Palm, 2003).

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Avant de pouvoir travailler avec les équations (1) et (2), nous sommes obligés de savoir pour chaque carabine quelles sont ses caractéristiques. Ceci pour la raison évidente que l'analyse

des trajectoires est complètement faussée si on utilise les mêmes paramètres pour toutes les carabines. À la sortie de l'usine, les carabines de la même marque possèdent souvent les mêmes paramètres. Ces carabines possèdent des réglages qui peuvent influencer les paramètres d'inertie. De plus, comme indiqué précédemment, les tireurs peuvent ajouter ou enlever des poids dans une marge définie par le règlement. De ce fait, chaque carabine doit être considérée comme unique avec des paramètres d'inertie uniques.

1.4 Cinématique

Les accélérations contenues dans les équations (1) et (2) donnent des informations essentielles sur la trajectoire de la carabine. Pour l'instant, des systèmes d'aide à l'entraînement comme le système SCATT sont utilisés. Ces systèmes fonctionnent avec une caméra haute définition qui filme la cible. Le logiciel retrace en temps réel l'endroit sur la cible où le tireur vise. Le logiciel récupère les données à une fréquence de 100 Hz. Il est primordial de réajuster ces valeurs pour les faire correspondre avec les données des capteurs qui récupèrent les forces et moments de forces à 1000 Hz. Ces systèmes SCATT permettent d'analyser le lien distal entre le déplacement du centre de gravité et la variation de la trajectoire sur la cible (Ball, Best & Wrigley, 2003). Ce ne sont pas vraiment des accéléromètres mais il est tout de même possible d'en tirer passablement d'informations cinématiques. Ces systèmes ont leur propre méthode de calibration qui permet au tireur de replacer le positionnement du départ du coup du logiciel avec celui qui lui est apporté par le système de mesure du projectile réel. La raison de cette calibration est que la caméra est fixée à la carabine au bout du canon avec un certain décalage avec la ligne de visée réelle ainsi que celle du canon. Ce décalage devra être pris en compte pour modéliser la cinématique de la carabine.

Le système SCATT apporte plusieurs données. Premièrement, un décalage par rapport au centre de la cible en coordonnées x (horizontal) et y (vertical) en [mm]. Deuxièmement, une orientation de la caméra en xyz en [rad]. Malheureusement, aucun capteur permettant de définir la distance jusqu'à la cible n'est disponible. Il est cependant considéré que la distance est de 10 m car tous les stands de tir à air comprimé possèdent cette distance.

1.5 Tir sportif à 10 m

Cette partie se penche sur les aspects techniques du tir à 10 m afin de mieux comprendre l'enjeu majeur que représente la compréhension des effets des forces sur la carabine. Le terme tir sportif regroupe énormément de disciplines. Aucune liste n'est faite dans ce travail mais il faut connaître les spécificités de la discipline du tir à la carabine à air comprimé à 10 m. Ce

travail peut s'adapter pour d'autres carabines mais les facteurs de performance sont différents dans les autres disciplines. Les forces n'ont pas forcément le même impact sur une plus grande distance (les conditions extérieures ayant plus d'influence) ou sur des carabines plus lourdes.

La particularité du tir à 10 m réside dans le fait qu'il se déroule à l'intérieur et sur une distance relativement faible. Les tireurs doivent tirer 60 coups pour une compétition complète. Pour les meilleurs, cela peut être suivi par une finale commandée d'au maximum 24 coups. La cible totale fait 45.5 mm de diamètre. Elle se situe à 1.4 m du sol. Un maximum de 10 points peut être obtenu par coup tiré, plus récemment 10.9 points en prenant en compte les dixièmes. L'introduction des dixièmes de points a été rendue obligatoire pour pouvoir séparer les meilleurs compétiteurs. Ceux-ci se trouvaient souvent à égalité de points en ayant atteint le maximum ou 1 à 2 points de moins. L'équivalent de 9 points est un anneau de 5.5 mm de diamètre. L'équivalent de 10 points est un disque de 0.5 mm de diamètre. Plus précisément, un dixième de point équivaut à une distance de 0.25 mm. Pour obtenir au moins un 10.5, ce qui est proche du record du monde sur 60 coups de moyenne (ISSF, 2018), il faut dévier au maximum de 1.25 mm. En d'autres termes, une variation de l'inclinaison de la carabine d'au maximum 0.000125 rads permettrait d'atteindre le record du monde. Afin de prédire et d'indiquer le déplacement de la carabine selon les forces appliquées et mesurées par l'appareil, l'erreur de mesure ne doit pas dépasser un certain seuil. De plus, les calculs effectués et les fonctions doivent être suffisamment précis pour isoler les éléments importants des déplacements. Si les fonctions ne sont pas assez précises, il sera impossible de prédire un quelconque déplacement car la dispersion due aux fonctions serait plus grande que la variation et la dispersion naturelle du SCATT ou des capteurs.

1.6 Objectif du travail

La mise en relation des forces et moments de forces appliqués sur la carabine et l'accélération de la position de la carabine est un point crucial pour permettre de futures études sur les forces et moments de forces. À cet effet, les variables inconnues pour chaque carabine demeurent les paramètres d'inertie. Il faut trouver une méthode simple et efficace pour pouvoir estimer ces paramètres avec les valeurs cinématiques d'un système d'aide à l'entraînement (il s'agira du SCATT dans le présent travail) et les valeurs de forces et moments de forces produites par les capteurs.

L'objectif de ce travail est de déterminer la procédure et la méthode à appliquer afin de d'estimer de manière aussi précise et simple que possible les paramètres d'inertie d'une cara-

bine avec les capteurs intégrés aux carabines ainsi que du système SCATT. De plus, une analyse détaillée de tous les aspects techniques doit être réalisée. Les questions suivantes se posent :

- a) Quelle est la méthode ou la procédure la plus adaptée afin de définir les paramètres d'inertie d'une carabine ?
- b) Avec quelle précision la méthode peut-elle définir les paramètres d'inertie d'une carabine en simulation ?
- c) Dans quelle mesure est-il possible ou réalisable d'appliquer cette méthode à des données réelles bruitées ?
- d) Quels sont les problèmes principaux qu'il faut résoudre afin de pouvoir appliquer la méthode sur des données réelles ?

Le travail sera structuré comme suit :

La première partie mettra en évidence le contexte de la présente étude. Dans la deuxième partie, une recherche approfondie des méthodes d'estimation existantes sera présentée, notamment dans le domaine de la robotique et de l'aéronautique. La méthode utilisée sera construite en utilisant les recherches et équations existantes. Plusieurs aspects seront traités tels que le bruit des capteurs, l'excitation optimale des axes, les instruments de mesures et la procédure générale à suivre. La méthode d'estimation des paramètres implémentée avec le logiciel Matlab (R2017b) sera décrite. Toutes les principales fonctions utilisées seront décrites. La procédure à appliquer afin d'utiliser les fonctions semblable à un manuel d'utilisation sera donnée. Une application de l'implémentation progressive avec des modèles simples et connus sera décrite. Il s'agira de simulations utilisant la méthode d'estimation sur des valeurs connues de paramètres d'inertie.

Dans la troisième partie, les résultats des simulations seront montrés. Les résultats de l'essai de mise en application de la méthode sur des données réelles ainsi que les tests réalisés sur les carabines seront montrés.

La quatrième partie contiendra une discussion des résultats des simulations et des tests effectués. Les forces et les faiblesses de la présente étude seront mis en évidence. Cette partie proposera des solutions pour réaliser de futures études. Les questions issues de l'objectif du travail seront répondues.

Finalement, la dernière partie résumera les principaux résultats de l'étude. Elle rappellera les réponses aux questions posées. Cette partie donnera les conséquences qui découlent des nouvelles connaissances acquises grâce à la présente étude.

2 Méthode

Plusieurs méthodes ont déjà été évoquées dans la littérature. Les méthodes qui vont suivre traitent en général de la robotique mais un transfert sur les carabines munies de capteurs est possible en adaptant quelque peu les méthodes. Plusieurs solutions s'offrent aux chercheurs lorsqu'il s'agit d'estimer les paramètres d'inertie d'un objet. La masse d'un objet est relativement simple à déterminer au moyen d'une balance simple. Le centre de gravité quant à lui devient plus complexe. Les moments d'inerties sont les paramètres les plus difficiles à déterminer. On peut citer les solutions suivantes pour déterminer tous les paramètres :

- a) Méthodes traditionnelles : Ces méthodes ne peuvent déterminer qu'une partie des paramètres. Les balances simples (à colonne ou Roberval par exemple) sont les instruments les plus simples afin de déterminer la masse d'un objet. Ces types de balance se basent sur les lois de la mécanique. Les balances électroniques utilisent des jauges de déformations. Les variations des caractéristiques électriques sont mesurées et retransmises sur un cadran afin d'afficher la masse. Ces balances sont d'une précision bien supérieure aux balances simples.

Pour déterminer le CDG d'un objet, une méthode simple est la suspension de l'objet en plusieurs points. À chaque suspension, le centre de gravité se situe dans l'alignement du point d'ancrage perpendiculairement au sol. Il suffit de mettre ensemble les mesures afin de déterminer le CDG en 3 dimensions. Cette méthode est simple mais pas forcément très précise. Elle requiert que l'objet puisse être suspendu sans changer ses caractéristiques. Ces changements de caractéristiques peuvent provenir des outils fixés à l'objet afin de le suspendre. Une autre méthode consiste à poser l'objet sur un support faisant office de pivot. Il s'agit ensuite de trouver la position précise de l'objet pour qu'il reste en équilibre et de réaliser le processus identique qu'avec la suspension. Cette méthode requiert que l'objet puisse être posé sur le support ce qui n'est pas forcément le cas selon la forme de l'objet.

Pour déterminer les moments d'inertie d'un objet, les méthodes sont plus complexes. Une méthode est l'utilisation de pendule de torsion ou de fils multiples (Genta & Delprete, 1994). Cette méthode se base sur l'étude périodique ou non périodique du mouvement de l'objet en question. Elle profite de la relation entre la période d'oscillation et le moment d'inertie de l'objet suspendu (Koken, 2017). Les autres méthodes utilisent en général les équations dynamiques de mouvements. Ces méthodes utilisent des outils variés comme un dynamomètre simple (Son, Ryu, Kim &

Kim, 2014). Les méthodes utilisant les équations dynamiques de mouvements avec des outils plus complexes sont expliquées dans les parties b) à d). Ces

Ces méthodes traditionnelles ne sont pas utilisées dans ce travail car la forme spécifique de la carabine empêche de réaliser proprement ces méthodes.

- b) Suspension de l'objet à plusieurs câbles rigides et excitation de l'objet muni d'un accéléromètre à 3 dimensions avec un rotor provoquant des mouvements à basse fréquence (Kloepper, Sakamoto & Okuma, 2009). Les paramètres d'inertie peuvent être estimés grâce aux données de l'accéléromètre et de la connaissance des fréquences transmises par le rotor. Cette méthode utilise le principe du pendule. Les désavantages de cette méthode sont qu'elle est fastidieuse et encombrante ainsi que le coût élevé de la fixation de l'objet.

Cette méthode de suspension n'est pas utilisée dans ce travail car la forme complexe de la carabine empêche une suspension correcte.

- c) Estimation de paramètres d'inertie de manipulateurs de robots qui ont des liens entre chaque manipulateur possédant différents paramètres d'inertie. Plusieurs méthodes ont déjà été utilisées.

- 1) Hors ligne : Cette méthode utilise le fait qu'il est possible de connaître précisément l'angle que fait un manipulateur et la force qu'il doit engendrer afin de garder cet angle (An, Atkeson & Hollerbach, 1985; Lin, 1992). Il permet en bougeant chaque lien l'un après l'autre à déterminer tous les segments d'un manipulateur à plusieurs DOF.

Une méthode similaire utilise des capteurs à 12 DOF permettant de récupérer les forces et moments de forces ainsi que les accélérations linéaires et angulaires (Winkler & Suchy, 2007). Une suite de mouvements excitants les principaux axes de l'objet tenu par le manipulateur permet d'en déduire ses paramètres d'inertie. Cette approche est intéressante car celle-ci se rapproche de notre problématique.

Une autre méthode consiste à placer un capteur de force à 6 DOF à la base du robot manipulateur dans le cas où chaque lien ne possède pas de mesure de force. Ainsi, chaque manipulateur doit être estimé en utilisant seulement les mesures passant par la base du robot (Guangjun, Iagnemma, Dubowsky & Morel, 1998).

Ces méthodes ne sont pas utilisées dans ce travail car la carabine ne repose pas sur une base fixe.

- 2) En ligne : Cette approche consiste à mesurer les paramètres d'inertie des charges que les robots manipulent en ligne (Kubus et al., 2008). La méthode utilise à nouveau des capteurs intégrés aux manipulateurs permettant de mesurer la force. Auparavant, les paramètres d'inertie du manipulateur doivent être estimés. Il est ensuite possible d'estimer la charge que le manipulateur tient en prenant en compte la charge totale et les paramètres d'inertie du manipulateur. De ce fait, il est possible d'estimer les paramètres d'inertie de la charge seule. Le gain de temps par rapport à une estimation hors-ligne est non-négligeable. De plus, la méthode des moindres carrés permet une précision supérieure. Cette méthode est utilisée dans ce travail et sera développée en détail dans le sous-chapitre 2.1.
- d) Estimation de paramètres d'inertie d'objets posés sur un ou plusieurs capteurs de forces. Ces objets sont aussi équipés de plusieurs accéléromètres et enregistrent les petits mouvements occasionnés par un « impact hammer⁵ » (Wang, Celik, Catbas & Zhang, 2015). La méthode utilise une courbe de réponse en fréquence appelée « Dynamic Inertia Method ». Elle s'avère très utile pour des objets grands et lourds qui ne peuvent pas forcément être suspendus ou mis en mouvement suffisamment par un rotor (Lazor, 2004). Cette étude a entre autre aussi considéré le fait que certains paramètres déjà connus peuvent augmenter les chances de trouver les derniers paramètres. Cela a permis de modifier les équations pour les simplifier en réduisant le nombre d'inconnus. Cette méthode est utilisée dans ce travail et sera développée en détail dans le sous-chapitre 2.1.

Toutes ces méthodes utilisent en général les équations de Newton-Euler et modifient ces équations sous forme d'un set d'équation linéaires permettant d'appliquer la méthode des moindres carrés et d'en tirer les paramètres d'inertie (Reyes, 2014).

2.1 Équations d'estimation

La méthode choisie se base principalement sur l'approche en ligne de charges tenues par un manipulateur (Kubus et al., 2008) et d'une approche plus générale d'estimation de paramètres d'inertie de CR (Lazor, 2004). En se basant sur l'approche de Newton-Euler des équations (1)

⁵ Un marteau conçu pour enregistrer la force avec laquelle on frappe un objet.

et (2), nous pouvons décrire les mouvements d'un CR subissant des forces et moments de forces avec les deux équations vecteurs suivants :

$$\vec{F}_s = m\vec{a}_s - m\vec{g}_s + \vec{\alpha}_s \times m\vec{C}_s + \vec{\omega}_s \times (\vec{\omega}_s \times m\vec{C}_s) \quad (5)$$

$$\vec{\tau}_s = I_s\vec{\alpha}_s + \vec{\omega}_s \times (I_s\vec{\omega}_s) + m\vec{C}_s \times \vec{a}_s - m\vec{C}_s \times \vec{g}_s \quad (6)$$

$\vec{\alpha}_s$ [rad/s] = vitesse angulaire du CR (signe « alpha », à ne pas confondre avec l'accélération linéaire \vec{a}_s)

Toutes les valeurs marquées avec un petit « s » sont prises par rapport au point de mesure des forces situé à l'endroit des capteurs. Pour simplifier le développement des calculs, un seul capteur est pris en compte pour l'instant. Le CDG est un vecteur partant du repère du capteur. De la même façon, les accélérations linéaires et angulaires provenant du système SCATT doivent être prises par rapport au repère du capteur. Cette déviation est d'autant plus difficile à connaître car la caméra du SCATT ne sera jamais montée de la même manière. En résumé, toutes les données que l'équation a besoin doivent se référer au repère du capteur.

En effectuant les produits vectoriels et en ressortant les paramètres d'inertie, on peut trouver les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} s_f \\ s_\tau \end{pmatrix} = {}^sA(s_a, s_\alpha, s_\omega, s_g) s_\varphi \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} a_x - g_x & -\omega_y^2 - \omega_z^2 & \omega_x\omega_y - \alpha_z & \omega_x\omega_z + \alpha_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_y - g_y & \omega_x\omega_y + \alpha_z & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & \omega_y\omega_z - \alpha_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_z - g_z & \omega_x\omega_z - \alpha_y & \omega_y\omega_z + \alpha_x & -\omega_y^2 - \omega_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_z - g_z & g_y - a_y & \alpha_x & \alpha_y - \omega_x\omega_z & \alpha_z + \omega_x\omega_y & -\omega_y\omega_z & \omega_y^2 - \omega_z^2 & \omega_y\omega_z \\ 0 & g_z - a_z & 0 & a_x - g_x & \omega_x\omega_z & \alpha_x + \omega_y\omega_z & \omega_z^2 - \omega_x^2 & \alpha_y & \alpha_z - \omega_x\omega_y & -\omega_x\omega_z \\ 0 & a_y - g_y & g_x - a_x & 0 & -\omega_x\omega_y & \omega_x^2 - \omega_y^2 & \alpha_x - \omega_y\omega_z & \omega_x\omega_y & \alpha_y + \omega_x\omega_z & \alpha_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

L'équation (7) comprend les forces et moments de forces à gauche et les données matricielles sA (développé dans l'équation (8)) multipliées par les paramètres d'inertie s_φ que nous avons déjà décrits dans l'introduction. Cette dernière équation est déficiente de rang. La matrice sera

augmentée par plusieurs mesures au fil du temps afin de produire un système d'équation sur-déterminé qui peut être résolu.

$$\begin{pmatrix} s_f \\ s_\tau \end{pmatrix}_{1..n} = sA(s_a, s_\alpha, s_\omega, s_g)_{1..n} s_\varphi \quad (9)$$

L'équation (9) contient un système comportant n équations qui doivent être résolues.

2.2 Méthode des moindres carrés

Les données des capteurs contiennent du bruit provenant des vibrations naturelles et de la précision fine des capteurs. Du bruit proviendra également des données cinématiques telles que les perturbations caractéristiques (Kroger, Kubus & Wahl, 2008). Dans ce cas, les mesures d'accélération doivent être dérivées des positions et angles depuis le système SCATT. Une importante déviation peut provenir de cette étape. Afin de trouver les accélérations, nous devons dériver deux fois les positions ainsi que les angles. La première dérivation donne la vitesse et la seconde dérivation donne l'accélération (Commission romande de mathématique, 2000). Cette étape étant faite par différenciation numérique, du bruit additionnel peut s'introduire à ce moment.

$$\frac{\delta x(t)}{\delta t} = v(t) \qquad \frac{\delta v(t)}{\delta t} = \frac{\delta^2 x(t)}{\delta t^2} = a(t) \quad (10)$$

Étant donné que nos données contiennent passablement de bruits, il a été jugé utile de considérer la méthode des moindres carrés totale (MCT). Cette méthode prend en compte le fait que la matrice de données sA soit bruitée alors que la méthode standard la considère comme libre d'erreurs. La méthode MCT considère la distance orthogonale entre les points de données et la ligne d'estimation (Kubus et al., 2008). Avec cette méthode, des erreurs contenues dans chacune des dimensions peuvent être prises en compte. L'équation (11) démontre une manière plus adaptée de considérer les erreurs de chaque côté. À savoir que le signe Ξ indique un système avec plusieurs équations similaire à l'équation (9).

$$\begin{pmatrix} s_f \\ s_\tau \end{pmatrix}_{\Xi} + e = ({}^S A_{\Xi} + E) {}^S \varphi \quad (11)$$

2.3 Translations et rotations des repères

La matrice de données se réfère principalement au point S du capteur. Il faut aussi repositionner correctement les données de ce qui fait office d'accéléromètre, c'est-à-dire le SCATT. Ce dernier est en principe orienté de la même manière que les capteurs, c'est-à-dire x en direction des cibles, y pour la composante latérale et finalement z pour la composante verticale. De plus, les données SCATT devront être manipulées car elles ne contiennent que 5 DOF et la méthode requiert au moins 6 DOF pour réussir à trouver tous les paramètres. Pour cela, les données sont traitées comme suit :

1. Les données brutes sont récupérées dans une matrice $5 \times N$ composée des valeurs x et y ainsi que des 3 angles θ_{xyz} . Admettons que le vecteur de position par respect au capteur est $Vec = (V_x \ V_y \ V_z)^T$ ⁶ et que la distance SCATT – cible est de 10 m. les valeurs x et y du SCATT (noté SC) se transforme de cette manière $\begin{pmatrix} SC_x \\ SC_y \end{pmatrix} \Rightarrow (0 \ SC_x \ SC_y)^T$ car la composante x ne se modifie pas. À cela s'ajoute le décalage que pourrait apporter une rotation du SCATT en θ_y ou en θ_z . De plus, une rotation en θ_x est très difficile à en calculer l'effet car le SCATT fait une correction automatique selon la façon dont on le fixe à la carabine. Il calcule lui-même le décalage et l'orientation entre l'axe du canon et sa caméra.



2. La vitesse et l'accélération angulaire n'ont pas vraiment besoin d'être particulièrement traités car ceux-ci sont par définition identique sur tout le CR (Kane, 1996). Par contre, l'accélération linéaire à l'endroit du capteur peut dépendre de l'accélération linéaire au CDG et d'une rotation. Il est primordial de corriger cette partie afin que les valeurs cinématiques soient correctes. Il est supposé que la carabine ne bouge pas d'une ligne imaginaire distante de 10 m par rapport aux cibles. Il faut utiliser des relations trigonométriques, plus particulièrement $\tan a = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}}$ où le côté opposé représente la distance jusqu'aux cibles et le côté adjacent le décalage de la carabine en x ou z (voir figure 5).

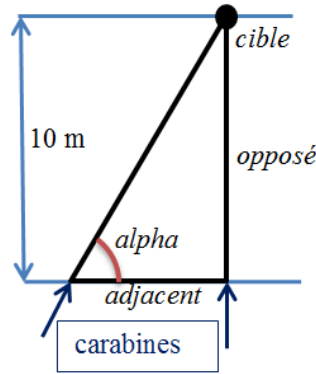


Figure 5. Schéma représentant la manière d'utiliser la trigonométrie.

3. Par convention, la carabine orientée en direction des cibles est l'équivalent de l'orientation des angles de la caméra de $\theta_{xyz} = (0 \ 0 \ 0)$. L'angle a sera $\pi/2 - |\theta|$ et l'ajout positif ou négatif du décalage est réalisé en fonction du signe de θ . Le sens positif ou négatif des angles a été fait d'après la règle du tire-bouchon.
4. L'étape suivante consiste à décaler les positions du SCATT vers la référence du capteur. Il faut connaître Vec en le mesurant le plus précisément possible à la main. Étant donné que les capteurs sont intégrés à l'intérieur des parties de la carabine, cette mesure est d'autant plus difficile à effectuer, surtout concernant la composante V_y .

5. Il faut aussi appliquer une matrice de rotation à chaque position d'angle donné par le SCATT. Cette rotation se fait par rapport à la position du SCATT. Les matrices de rotations utilisées sont très simples (voir figure 6).

$$\mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 6. Matrices de rotations dans les 3 axes (Morbidi, 2016).

6. La dernière étape consiste à dériver les positions trouvées pour trouver les vitesses et les accélérations que l'on a besoin pour estimer les paramètres d'inertie.

2.4 Excitation des axes

Les équations décrites auparavant répondent de manière adéquate seulement si les axes sont excités correctement. Dans les simulations, un effort a été réalisé pour optimiser la taille des données et le temps de calcul. La qualité de l'estimation est proportionnelle au nombre de valeurs N significatifs. Le but est de diversifier la manière de bouger les objets pour augmenter les chances de trouver les bons paramètres d'inertie. Les paramètres les plus difficiles à estimer sont les moments d'inerties. La masse et le centre de gravité subissent moins l'influence du bruit dans les données. C'est pour cette raison que les angles xyz ont été excités de manière différente des positions du SCATT xy .

Un ensemble de fonctions sinusoïdales et exponentielles ont été appliquées pour proposer des trajectoires et des angles divers et variés (voir figure 7). Les courbes décrites dans les équations (12) ont été utilisées pour réaliser les trajectoires dans les simulations. À savoir que dans le cas des équations (12), i est une variable qui passe de $\frac{\pi}{16}$ à $(N * \frac{\pi}{16})$ par incrément de $\frac{\pi}{16}$. Il a été jugé important d'utiliser un juste milieu au niveau de l'incrément afin que la courbe soit assez lisse sans avoir besoin de trop de données pour exciter tous les axes de manière hétérogène.

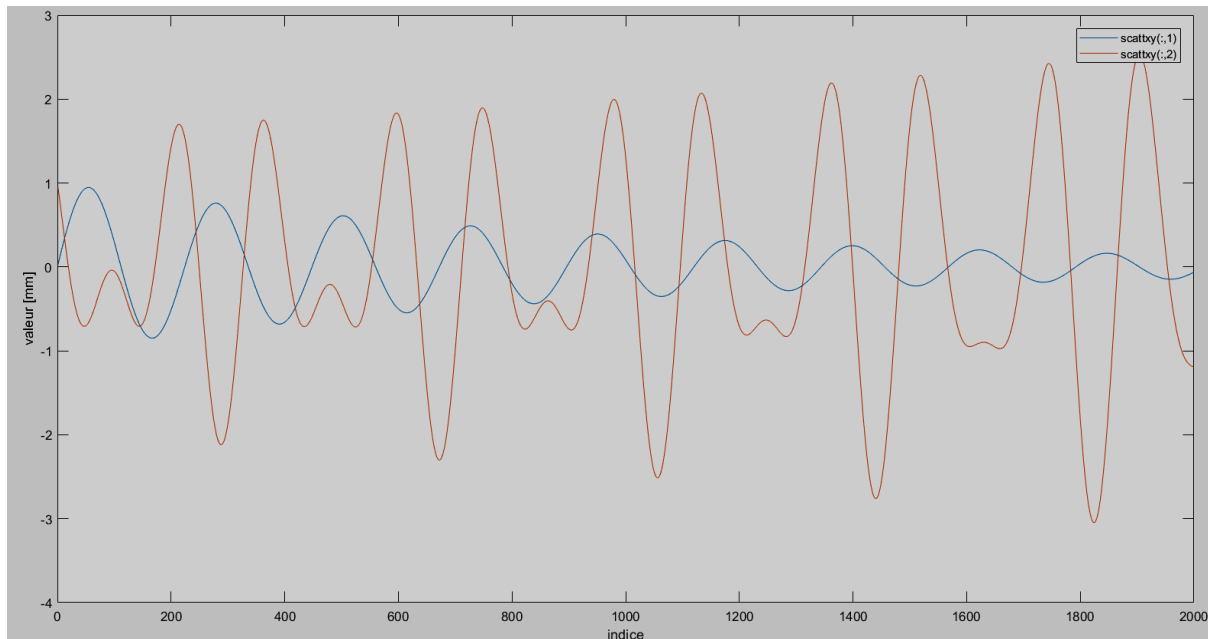


Figure 7. Courbes sinusoïdales et exponentielles utilisées pour varier les valeurs x et y , $N = 2000$.

$$x(i) = e^{-i/200} * \sin(i/7) \quad y(i) = e^{i/500} * \cos(i/6) - \sin(i/4) \quad (12)$$

2.5 Bruit des capteurs

Les données contiennent du bruit de façon naturelle. Ce bruit peut provenir de plusieurs origines. L'origine principale est la précision de mesure des capteurs. Ces capteurs sont produits à l'usine avec une certaine marge de tolérance mais des fluctuations peuvent exister.

ATI-IA définit le bruit des capteurs comme suit :

Jumps in raw strain gage readings (with transducer unloaded) greater than 80 counts is considered abnormal. Noise can be caused by mechanical vibrations and electrical disturbances, possibly from a poor ground. It can also indicate component failure within the system. ("Engineered Products for Force/Torque Sensor System", 2011, p. 110)

Le bruit est donné en « Counts ». Les « Counts » sont les valeurs mécaniques brutes enregistrées par le capteur. Ces valeurs doivent être divisées par un facteur donné par le fichier de calibration afin de retrouver les valeurs réelles en Newton et Newton-millimètres. Il a été pour les simulations approximé à 1'000'000. Les bruits sont après transformation de 0,00008 N et 0,08 Nmm. Cela s'applique dans ce cas au capteur Mini45.

Le système SCATT contient aussi du bruit. La précision de la caméra peut être influencée par la lumière et la qualité de la fixation du système sur la carabine. Il n'existe cependant pas de

quantification du bruit provenant de l'entreprise. Dans ce travail, le bruit ajouté sur les valeurs du SCATT ont été défini à 0.125 mm pour chaque composante xy , ainsi que 0.0000125 rads pour les angles xyz . Ces valeurs ont été prises par rapport au sous-chapitre 1.5. La variation du système SCATT de seulement un dixième de point est suggérée dans cette configuration de bruit. Il est cependant fortement possible que la quantité de bruit soit supérieure à celle décrite.

2.6 Procédure

Cette sous-partie dénote toutes les étapes nécessaires afin d'estimer les paramètres d'inertie. Toutes les mesures doivent être prises aussi précisément que possible.

1. La première étape consiste à générer un set de données excitant tous les paramètres d'inertie le mieux possible. Ceci comprend aussi l'installation de tout le matériel nécessaire à la prise de données et le montage de la carabine avec les diverses parties équipées de capteurs. Il faut aussi mesurer les distances séparant le système SCATT à la référence principale du capteur. Les données suivantes doivent être récupérées N fois :
 - a. Capteurs : les forces en [N] et moments de forces en [Nm] dans chaque axe donc deux matrices $N \times 3$ pour chaque capteur⁷.
 - b. SCATT : les composantes xy en [mm] et angles xyz en [rad] donc deux matrices, l'une de $N \times 2$ pour les composantes, l'autre de $N \times 3$ pour les angles.
2. Il faut récupérer ces données et les synchroniser. Ces données doivent d'abord être traitées selon le sous-chapitre 2.3. Il faut en extraire d'un côté la matrice des forces et moments de forces puis la matrice de données avec tous les calculs intermédiaires depuis l'équation (8) et finalement les 10 variables provenant de l'équation (3). Toutes ces matrices sont mises ensemble pour former les équations (9).
3. On y applique la méthode MCT en prenant si possible en compte les bruits dans la matrice de forces et moments de forces ainsi que dans la matrice de données.
4. On peut observer les résultats et les exporter dans un format approprié pour un traitement ultérieur. Les résultats peuvent être comparés avec des données connus ou d'anciens paramètres mesurés sur la même carabine.

⁷ Par soucis de simplicité, nous parlons ici que d'un seul capteur

2.6.1 Plusieurs capteurs. Une procédure pour plusieurs capteurs doit prendre en compte les positions de chaque capteur. Il est plus difficile de prendre en compte tous les capteurs en parallèles car il faut manipuler toutes les valeurs afin de les assembler en une seule coordonnée référentielle. La solution parallèle n'apporte pas beaucoup dans le cadre de ce travail car nous voulons surtout connaître les paramètres d'inertie pour chaque capteur séparément. La raison est qu'il sera possible d'effectuer de la modélisation directe et savoir l'influence d'une force sur un certain capteur sur l'ensemble de la structure. La solution serait plus élégante mais pas forcément plus simple à réaliser. Il a été décidé de travailler en séquentiel afin de déterminer les paramètres d'inertie pour chaque capteur séparément.

La procédure en séquentiel se déroule de la manière suivante :

1. Un premier capteur est utilisé. Cela signifie que l'objet n'est manipulé qu'à l'endroit du capteur. Les paramètres sont calculés en ne prenant en compte que ce capteur.
2. La procédure est appliquée de la même manière pour tous les autres capteurs. Il en résulte une liste de paramètres dont les valeurs de masses et de moments d'inertie devraient être identiques ou très proches. Ceux-ci peuvent être mis ensemble pour trouver la moyenne de ces valeurs. Les valeurs du CDG sont différentes car chaque capteur possède ses propres coordonnées référentielles.
3. Les valeurs de chaque CDG peuvent servir à connaître les positions de chaque capteur par rapport aux autres.

2.7 Implémentation

Toutes les implémentations ne seront pas détaillées mais seules les fonctions principales ainsi que les phases seront décrites. Une liste des scripts est disponible en annexe dont certaines qui ne seront pas expliquées dans ce chapitre. Les fonctions principales sont les suivantes :

- a) « calcFTs.m » :

Cette fonction s'occupe de calculer les forces et moments de forces à partir de paramètres d'inertie connus. Elle reçoit en arguments les 10 paramètres φ , un certain nombre N de valeurs cinématiques (accélération linéaire et angulaire ainsi que vitesse angulaire) et de vecteur indiquant la force de gravité. Elle parcourt chaque valeur et retourne une liste de forces et moments de force pour les valeurs correspondantes. Elle est essentiellement utilisée pour les simulations sur des objets connus.

- b) « estimparams.m » :

Cette fonction est centrale à ce présent travail. Elle s'occupe de calculer les paramètres d'inertie d'un objet. Ceci à partir de forces et moment de forces ainsi que des valeurs

cinématique correspondantes (accélération linéaire et angulaire ainsi que vitesse angulaire) et des valeurs du vecteur gravité. Elle construit la matrice augmentée similairement à l'équation (9) et la résout par application de la méthode des moindres carrés. Elle est inspirée d'une fonction similaire existante mais qui n'était pas adaptée à nos besoins.

c) « `errorprc.m` » :

Cette fonction compare 2 séries de paramètres d'inertie et en calcule le pourcentage d'erreur. Elle s'occupe aussi de regarder si une division par zéro se produit auquel cas il faut l'indiquer au moment de montrer les résultats. La solution trouvée est de noter la différence absolue au lieu d'un pourcentage pour les cas spéciaux. Ceux-ci ne devraient que rarement se produire car les CDG ainsi que les tenseurs d'inertie ne devraient pas trop s'approcher de zéro.

d) « `scatt2cinematic.m` » :

Cette fonction doit permettre de passer du système SCATT de 5 DOF en des données cinématiques de 6 DOF. Elle doit retourner les accélérations linéaires et angulaires ainsi que les vitesses angulaires en référence au capteur. La fonction reçoit en arguments les valeurs dans les composantes x et y ainsi que les angles du SCATT θ_{xyz} . Elle doit aussi recevoir le décalage par rapport à la référence du capteur $S_{offset} = (O_x \ O_y \ O_z)$. À partir de ces données, la fonction retourne les valeurs en suivant la procédure décrite dans le sous-chapitre 2.3. De plus, une dérivation des valeurs de positions est réalisée grâce à la fonction *gradient* pour trouver les vitesses et les accélérations.

e) « `realdata2params` » :

Cette fonction regroupe tous les éléments ci-dessus et utilise des données réelles sous forme de fichier Matlab. Elle a besoin en argument du nom du fichier de données à utiliser, le décalage mesuré à la main du SCATT vers le capteur, le capteur utilisé et manipulé, le nom du fichier pour exporter les résultats et si l'on souhaite utiliser les données synchronisées ou non. Elle s'occupe de manipuler les données pour pouvoir y appliquer les fonctions afin de retourner les paramètres d'inertie.

2.7.1 Procédure. Voici la procédure à suivre pour appliquer les fonctions pour un set de données. Il faut essentiellement utiliser les fonctions expliquées auparavant et modifier les arguments.

1. Récupérer les données bruts via l'application dédiée et les convertir afin d'avoir les bonnes unités et la bonne orientation. Il s'agit aussi d'avoir des données synchronisées et avec la même fréquence. Les données proviennent sous forme de fichiers Matlab contenant plusieurs matrices. On peut au besoin interpoler les valeurs du SCATT ou réduire la fréquence des capteurs pour augmenter la précision.
2. Introduire le vecteur de décalage du SCATT qui aura été préalablement défini manuellement et utiliser « `scatt2cinematic.m` » pour transformer les données SCATT en données cinématiques.
3. Construire les matrices de données pour chaque type de données afin de construire un système de N équations. Ces matrices sont données en arguments à la fonction principale « `estimparams.m` ». Cette fonction applique la méthode des moindres carrées sur les matrices et retournera les paramètres d'inertie estimés.
4. Si des paramètres sont déjà existants, il est possible d'appliquer la fonction « `errorprc.m` » qui calculera la différence entre les deux sets de paramètres.
5. Finalement, une exportation des données peut être faite sous forme de fichier texte.

Une partie optionnelle consisterait à générer les données de simulation. Celles-ci peuvent être calculées grâce aux équations (5) et (6). L'implémentation « `calcFTs.m` » permet de calculer les forces et moments de forces à partir de données cinématiques et de paramètres d'inertie connus. Cette étape sert surtout à vérifier si l'estimation fonctionne correctement. Toute cette procédure peut être effectuée avec la fonction « `realdata2params.mat` » si le fichier de données Matlab est disponible. Cette fonction exécute tout le processus décrit ci-dessus.

2.8 Simulations

Cette partie sera entièrement réalisée dans Matlab et utilisera des données simulées et générées aléatoirement afin de pouvoir tester l'implémentation des fonctions définies dans le sous-chapitre 2.7. Le but de cette étape est de comparer les paramètres d'inertie estimés avec les valeurs réelles connues d'objets simples.

La procédure qui a été suivie commence par la définition des valeurs connues concernant l'objet en question par des formules mathématiques existantes. Ensuite, une génération aléatoire de trajectoires permet d'avoir les données cinématiques grâce aux calculs des accélérations linéaires et angulaires. À partir de ces données, les forces et moments de forces théoriques sont calculés grâce à la connaissance des paramètres d'inertie et des équations (5) et (6). Une certaine quantité de bruit est ajoutée aux données selon le sous-chapitre 2.5 afin de contrôler l'influence du bruit. Finalement, l'application de la fonction d'estimation doit re-

trouver les mêmes paramètres d'inertie avec les données de forces et moments de forces et les données cinématiques.

Concernant les objets des simulations, la première sera le cas trivial d'une sphère pleine avec un seul capteur et un accéléromètre classique situés au centre de la sphère. Il s'agira dans le deuxième cas de la même sphère avec un seul capteur mais un système SCATT à la place de l'accéléromètre. Cette simulation s'approchera du cas réel de la carabine. La troisième simulation représentera un pavé droit. Cette simulation sera semblable à la deuxième mais le capteur sera excentré et la forme de l'objet s'approchera de celle d'une carabine. Finalement, une dernière simulation prendra en compte un deuxième capteur. Cette simulation se basera à nouveau sur les caractéristiques du pavé droit.

2.8.1 Sphère. Nous considérons pour cette simulation une sphère pleine de masse $m = 10$ kg et de rayon $r = 0.1$ m. Sa masse est répartie uniformément. Ses moments d'inertie sont donc identiques dans les trois axes. Ils sont définis par : $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{2}{5}mr^2$ (Serway, 1986). Les autres moments d'inertie sont nuls car la sphère est symétrique. Nous supposons que le capteur de force se situe à la surface de la sphère dont la composante z est dirigée vers le centre de la sphère (voir figure 8). Son centre de gravité théorique se situe aux coordonnées suivantes : $C_{cdg} = (0 \ 0 \ r)^T$ par respect au capteur.

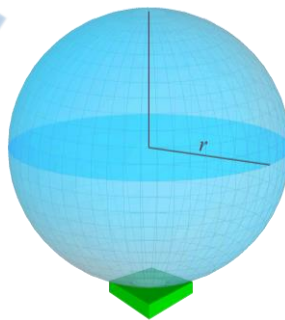


Figure 8. Sphère de rayon r avec un capteur placé en dessous (Vladivostok, 2013).

À l'état statique, c'est-à-dire posé sur une table, nous pouvons déjà définir les composantes x et y du CDG ainsi que la masse de la sphère. En fixant à zéro toutes les composantes dynamiques, c'est-à-dire les accélérations linéaires et angulaires, la fonction nous retourne les paramètres de la masse et les composantes x et y du CDG. La fonction ne peut pas définir les autres paramètres à l'état statique. Pour définir les moments d'inertie, il faut suffisamment

exciter les autres axes afin que les forces et moments de forces et la cinématique puissent être suffisamment excités afin de définir les moments d’inertie.

2.8.2 Sphère munie d’un SCATT. Nous considérons pour cette deuxième simulation la même sphère avec les mêmes caractéristiques que ci-dessus. Le but de cette deuxième simulation est de s’approcher de la configuration de la carabine. Il s’agit de contrôler que toutes les fonctions Matlab implémentées donnent les résultats espérés. Dans cette simulation, l’accéléromètre est remplacé par un système SCATT simulé (voir figure 9). Le point critique de cette simulation est l’application de la fonction « `scatt2cinematic.m` ».

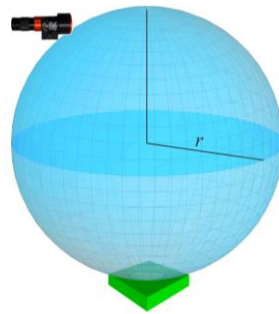


Figure 9. Sphère avec caméra SCATT décalée par rapport au capteur (Vladivostok, 2013; “SCATT shooter trainers”, 2018).

Le système SCATT est décalé par rapport au capteur de cette manière (exemple): $S_{offset} = (-r \quad -r/2 \quad -r)^T$. De cette manière, toutes les rotations sur la carabine, c’est-à-dire celles captées par le système SCATT, auront un effet sur la position du capteur. Il faut savoir que la génération aléatoire du bruit peut énormément influencer sur la pertinence de l’estimation. Il est pour cela conseillé d’utiliser des trajectoires qui excitent chaque axe. Ces trajectoires sont décrites dans le sous-chapitre 2.4. La précision de l’estimation peut aussi être améliorée en augmentant le nombre de valeurs N . Si l’on souhaite estimer précisément les valeurs, il faut augmenter le nombre de données et pouvoir manier la carabine dans tous les sens possibles.

2.8.3 Pavé droit muni d’un SCATT. Nous considérons pour cette troisième simulation un pavé droit muni d’un SCATT. Le but est de s’approcher du cas réel de la carabine. La masse du pavé est de $m = 5$ kg, sa hauteur de $h = 0.2$ m, sa longueur de $L = 1$ m et sa largeur de $l = 0.1$ m. Pour placer les différents systèmes, l’origine des coordonnées se situe à l’endroit du capteur (voir figure 10). Le capteur est placé en dessous du pavé décalé dans l’axe des x . Le centre de gravité du pavé peut être défini en référence à un sommet du pavé : $C_{cdg} =$

$\left(\frac{L}{2} \quad \frac{l}{2} \quad \frac{h}{2}\right)^T$. Ses paramètres d'inertie sont définis comme suit : $I_{xx} = \frac{1}{12}m(L^2 + h^2)$, $I_{yy} = \frac{1}{12}m(L^2 + l^2)$ et $I_{zz} = \frac{1}{12}m(h^2 + l^2)$. Les produits d'inertie (I_{xy} I_{xz} I_{yz} et leurs symétries) sont nuls. La procédure est à nouveau la même que dans la deuxième simulation.

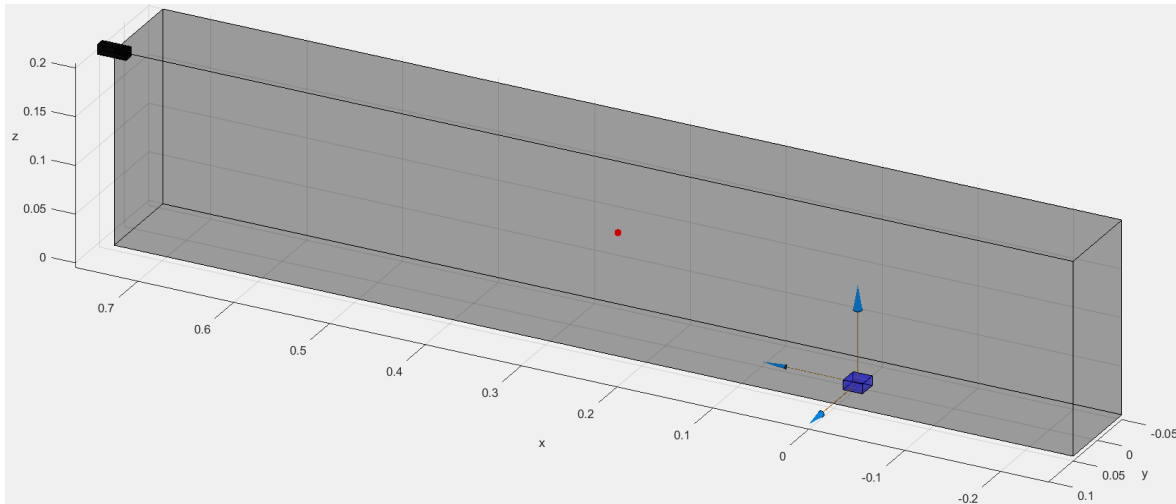


Figure 10. Pavé droit (gris) avec en bleu le capteur (ainsi que les coordonnées à l'origine), en rouge le CDG et en noir le SCATT.

2.8.4 Pavé droit avec plusieurs capteurs. Nous considérons pour cette quatrième simulation un pavé droit muni d'un SCATT. Les propriétés du pavé droit sont identiques au sous-chapitre 2.8.3. De plus, un deuxième capteur est ajouté. Celui-ci est fixé à l'arrière du pavé selon figure 11. La procédure suivie afin d'adapter la méthode d'estimation à plusieurs capteurs est une approche simple mais efficace. La procédure est séquentielle, c'est-à-dire un capteur après l'autre. La première étape consiste à n'utiliser qu'un seul des deux capteurs et de mesurer les paramètres à partir de ce dernier. La deuxième étape consiste à utiliser le second capteur et de faire la procédure identique. Dans une troisième étape, les deux paramètres estimés sont comparés et une moyenne est faite. La masse et les moments d'inerties sont identiques pour tous les capteurs. Il suffit d'ajuster le CDG par rapport à un seul référentiel. Les paramètres d'inertie sont approximatés par deux procédures séparées. Les paramètres sont finalement mis ensemble.



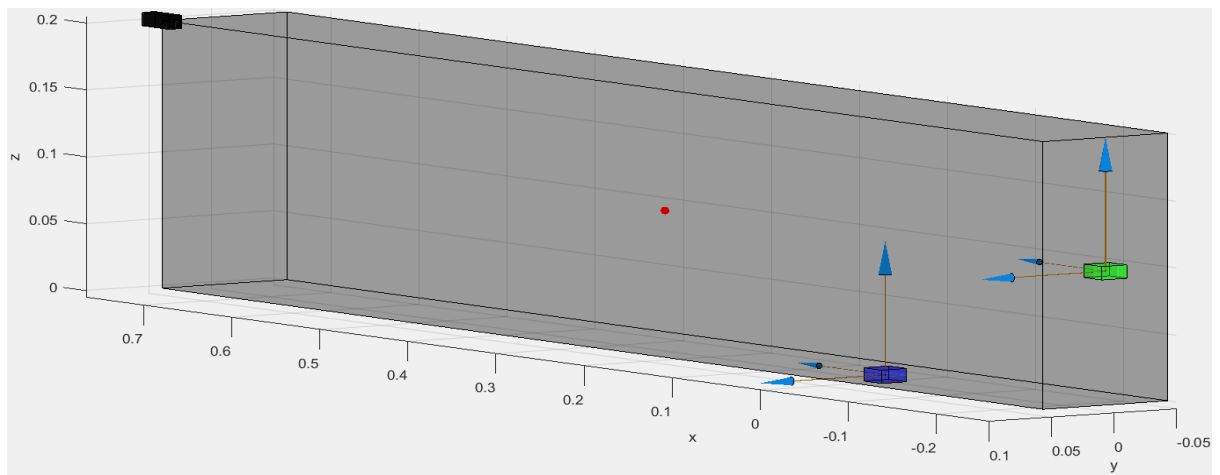


Figure 11. Pavé droit avec le deuxième capteur en vert

3 Résultats

L'application de la méthode à des données réelles s'est avérée plus difficile que prévue pour plusieurs raisons. Au lieu de présenter des résultats d'application de la méthode d'estimation des paramètres d'inertie sur des données réelles, nous montrerons les résultats des simulations ainsi que les divers tests effectués sur les capteurs.

Il avait été supposé que les capteurs fonctionnaient correctement et donnaient des valeurs avec la bonne échelle ainsi qu'avec la bonne orientation. Un script existant était censé faire la conversion lors de la prise de données. À partir de cette supposition, des calibrations ou des tests supplémentaires concernant la validité des données paraissaient superflus. Seulement, après avoir observé et analysé les données mesurées, il s'est avéré que les données des fichiers contenaient plusieurs erreurs qui ne permettaient pas d'appliquer simplement la méthode d'estimation. Il a été décidé de procéder à certains tests.

On présente d'abord les résultats des simulations. Nous avons quantifié les pourcentages d'erreur dans les simulations. Les paramètres d'inertie ont été comparés et une erreur en % est calculée (voir les tableaux dans ce chapitre). La colonne « Valeur réelle » représente les paramètres d'origine. La colonne « Estimation » indique l'estimation après l'ajout du bruit. La colonne « Erreur » indique la différence entre les deux premières colonnes en pourcent ou en valeur absolue selon la colonne « %/valeur absolue ». Cette colonne a été ajoutée car une division par zéro avait lieu dans certains cas pour le calcul de l'erreur en %. Ces cas se présentent aux paramètres approchant la valeur zéro. Les pourcentages dans ces cas sont aussi à prendre en compte dans une moindre mesure car l'erreur est vite grande alors que la différence absolue n'est pas grande.

On présente les résultats de tests et quantifie les erreurs présentes avec plusieurs facteurs possibles. Des scripts ont aussi été utilisés pour cette partie. Ces scripts sont listés en annexe. Chaque mesure a d'abord été observée par visualisation graphique afin de ne pas commettre d'erreur concernant les calculs. Il faut savoir que les capteurs n'ont pas pu être montés dans l'orientation que l'on souhaitait pour des raisons techniques. Les conséquences de ce manque de données appropriées pour appliquer les implémentations seront discutées plus en détail dans la partie discussion du travail.

3.1 Sphère pleine

Le tableau suivant résume les résultats des simulations sur la sphère pleine simple. Celle-ci ne subit que le bruit sur les forces en l'absence du système SCATT.

Tableau 1
Sphère pleine

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	10.00	10.00000	0.000	%
C_x	0.00	0.00000	-0.000	absolue
C_y	0.00	0.00000	-0.000	absolue
C_z	0.10	0.10000	0.000	%
I_{xx}	0.04	0.04000	0.001	%
I_{xy}	0.00	-0.00000	0.000	absolue
I_{xz}	0.00	-0.00000	0.000	absolue
I_{yy}	0.04	0.04000	0.003	%
I_{yz}	0.00	-0.00000	0.000	absolue
I_{zz}	0.04	0.04000	0.001	%
<i>Note.</i> Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. N (nombre de valeurs) = 2000.				

3.2 Sphère munie d'un SCATT

Tableau 2
Sphère pleine avec SCATT

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	10.00	10.00230	0.023	%
C_x	0.00	0.00001	-0.000	absolue
C_y	0.00	0.00000	-0.000	absolue
C_z	0.10	0.09999	0.005	%
I_{xx}	0.04	0.04374	9.359	%
I_{xy}	0.00	-0.00044	0.000	absolue
I_{xz}	0.00	0.00050	-0.000	absolue
I_{yy}	0.04	0.03648	8.797	%
I_{yz}	0.00	0.00240	-0.002	absolue
I_{zz}	0.04	0.04036	0.892	%
<i>Note.</i> Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. Bruit ajouté sur le SCATT _{xy} = 0.125 [mm] et angles _{xyz} = 0.0000125 [rad]. $N = 2000$.				

Le tableau 2 résume les résultats des simulations sur la sphère pleine avec un SCATT. La sphère munie d'un SCATT, au contraire de la sphère simple, subit du bruit sur les données cinématiques du SCATT.

3.3 Pavé droit muni d'un SCATT

Les résultats d'un pavé droit avec un système SCATT et un seul capteur.

Tableau 3

Pavé droit avec SCATT et un capteur

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	5.00	5.00020	0.004	%
C_x	0.25	0.24996	0.018	%
C_y	0.00	0.00000	-0.000	absolue
C_z	0.10	0.10005	0.050	%
I_{xx}	0.43	0.42831	1.158	%
I_{xy}	0.00	0.00204	-0.002	absolue
I_{xz}	0.00	-0.00077	0.001	absolue
I_{yy}	0.42	0.41085	2.373	%
I_{yz}	0.00	0.00324	-0.003	absolue
I_{zz}	0.02	0.02195	5.353	%

Note. Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. Bruit ajouté sur le SCATT_{xy} = 0.125 [mm] et angles_{xyz} = 0.0000125 [rad]. $N = 2000$.

3.4 Pavé droit avec plusieurs capteurs

Les résultats du pavé droit muni d'un SCATT et de deux capteurs sont réalisés différemment des autres. Les deux capteurs sont traités séparément puis une moyenne est faite pour les valeurs de masse et de moment d'inertie. Le CDG est calculé par rapport à un référentiel différent des deux capteurs, en l'occurrence l'un des sommets du pavé. C'est à partir de celui-ci qu'un CDG théorique est calculé.

Tableau 4
Pavé droit avec SCATT et deux capteurs

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	5.00	5.00180	0.036	%
C_x	0.50	0.49994	0.013	%
C_y	0.05	0.05000	0.004	%
C_z	0.10	0.10007	0.069	%
I_{xx}	0.43	0.42580	1.738	%
I_{xy}	0.00	0.00200	-0.002	absolue
I_{xz}	0.00	-0.00020	0.000	absolue
I_{yy}	0.42	0.41578	1.200	%
I_{yz}	0.00	0.00568	-0.006	absolue
I_{zz}	0.02	0.01949	6.434	%

Note. Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. Bruit ajouté sur le SCATT_{xy} = 0.125 [mm] et angles_{xyz} = 0.0000125 [rad]. $N = 2000$.

3.5 Contrôle de l'échelle des forces

Les résultats suivants proviennent de tests visant à contrôler que les forces enregistrées par les capteurs soient correctes et à la bonne échelle. Pour cela, un capteur a été séparé de la carabine et posé sur une surface stable. La première mesure a été prise avec uniquement le capteur de force. La seconde mesure a été prise avec un objet en bois ($m = 0.324 \text{ kg} \pm 0.002$) posé sur le capteur. La troisième mesure a été prise avec un petit pavé en béton ($m = 2.638 \text{ kg} \pm 0.002$). La mesure du poids a été réalisée au moyen d'une balance traditionnelle électronique. À chaque mesure, l'objet a été posé sur le capteur et il a été attendu que les valeurs affichées par le programme soient stables puis une mesure a été prise. Les valeurs de masse du capteur sans charge sont inconnues car il est intégré à la carabine et plusieurs plateaux séparent le capteur réel du point de contact. Il est supposé qu'avec aucune interaction, les capteurs ne retournent pas une valeur nulle. Un décalage initial est présent. Ce décalage a été soustrait aux valeurs des objets afin de connaître les valeurs réelles de l'objet seul.

Tableau 5
Contrôle des forces avec objets

	<i>Capteur</i>	<i>Bois</i>	<i>Béton</i>
Masse [kg]	normalisé	0.324	2.638
F théorique(TH) [N]	normalisé	-3.177	-25.869
Brute(B) [Counts]	43511944.649	-3573566.148	-25928103.827
Corrigé(C) [N]	-2458.280	201.943	1464.816
Facteur B/TH	-	1124698.561	1002248.212
Facteur C/TH	-	-63.557	-56.622

Note. F théorique calculé avec $G = -9.80665 \text{ m/s}^2$. Normalisé indique que pour les mesures 2 et 3, les valeurs ont été soustraites afin de garder que les valeurs relatives du bois et du béton

3.6 Contrôle de l'échelle des moments de forces

Les résultats suivants proviennent de tests visant à contrôler que les moments de forces enregistrés par les capteurs soient corrects et à la bonne échelle. La procédure est similaire à celle décrite dans le sous-chapitre 3.5. Une règle rigide a été fixée sur le capteur afin de simuler un bras de levier et provoquer un moment de force. Un crochet a été fixé à une distance ($r = 0.2 \text{ m}$) du capteur. À nouveau, la première mesure a été réalisée sans objet. La deuxième mesure a été réalisée avec un objet léger ($m_1 = 0.059 \text{ kg}$). La troisième mesure a été réalisée avec un objet un peu plus lourd ($m_2 = 0.364 \text{ kg}$). La figure 12 démontre de quelle manière était installé le montage. Le crochet permettait d'accrocher les deux objets et simulait le bras de levier avec un point d'application situé à une certaine distance. Cette distance est mesurable grâce à la règle rigide déjà en place.

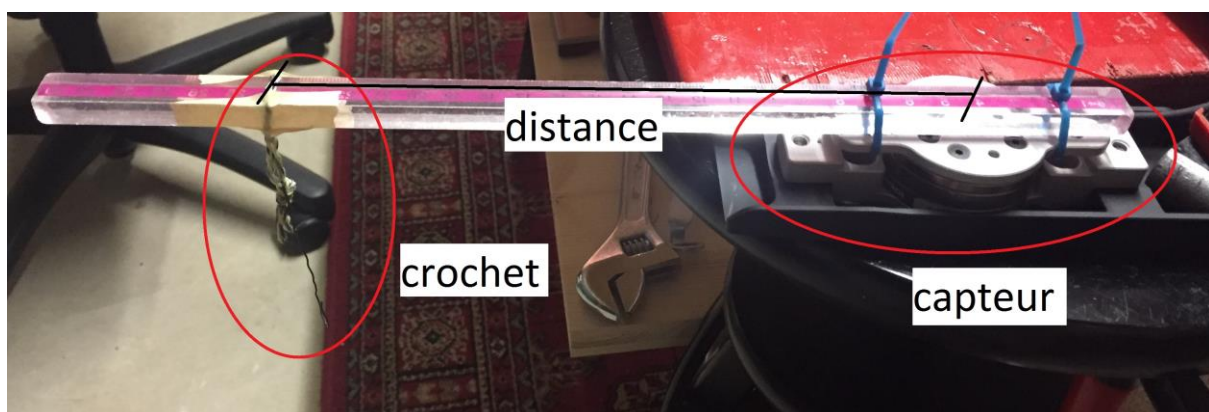


Figure 12. Bras de levier avec une règle rigide et le capteur fixé par un serre-joints.

Les valeurs brutes ont par ailleurs dû être manipulées car deux composants étaient excités lors des mesures 2 et 3 des valeurs brutes.

Tableau 6

Contrôle des moments de forces avec objets

	<i>Capteur</i>	M_1	M_2
Masse [kg]	normalisé	0.059	0.364
F théorique(TH) [N]	normalisé	-0.115	-0.713
Brute(B) [Counts]	87369.117	137997.192	853638.690
Corrigé(C) [N/mm]	-828.941	-366.575	-2284.062
Facteur B/TH	-	-1192525.210	-1195699.468
Facteur C/TH	-	3167.820	3199.306
<i>Note.</i> Les valeurs brutes ont dû être extraites à partir de deux dimensions alors que les valeurs corrigées n'avaient une variation que dans une seule dimension.			

4 Discussion

Dans ce chapitre, nous allons d'abord analyser la méthode d'estimation des paramètres d'inertie implémentée dans Matlab. Ensuite, nous interpréterons les résultats de toutes les comparaisons des simulations. Puis nous discuterons des valeurs réelles que retournent les capteurs. Ensuite, les forces de cette étude seront présentées suivi des faiblesses et améliorations possibles. Finalement, nous répondrons aux questions posées dans l'introduction. Tout au long de la discussion, des liens à d'autres études seront tirés afin de pouvoir comparer ce travail.

4.1 Méthode d'estimation

La méthode d'estimation a été construite à partir d'équations tirées de plusieurs études. Le principe suivi était la méthode d'inertie dynamique. La méthode implémentée dans Matlab (voir code source en annexe des diverses fonctions) se repose sur les équations théoriques formulées dans des travaux antérieurs (Kubus et al., 2008). L'utilisation de la fonction est très simple et son fonctionnement est efficace. Elle ne nécessite que peu de ressources. La fonction a été réalisée selon les besoins précis provenant des spécificités de la carabine et de nos moyens de prise d'informations cinématiques et dynamiques. Les avantages de ces fonctions sont qu'elles sont simples à utiliser et très rapides. En revanche, il faut traiter les données tout au début avant de pouvoir les utiliser. Ceci n'est pas optimal pour une utilisation directe par des personnes qui ne connaissent pas bien le logiciel Matlab. Un travail conséquent devra encore être fourni afin de rendre le processus automatisé et direct dans le logiciel de prise de données.

4.2 Simulations

Toutes les simulations utilisaient 2000 valeurs pour l'estimation des paramètres d'inertie. Étant donné qu'en réalité le nombre de valeurs peut varier, le N choisit est suffisamment grand pour représenter la réalité de manière efficace. La sensibilité des fonctions d'estimations à de petites oscillations n'a pas été vérifiée. Si les mouvements sont suffisamment amples, le résultat sera en réalité amélioré. Ce point particulier sera discuté plus en détail dans le sous-chapitre 4.3.

Pour commencer, la sphère simple pleine montre des résultats prometteurs. Les pourcentages d'erreurs sont négligeable (erreur maximale de 0.003 %). Ceci est évidemment dû au fait que cette simulation n'a pas subi de bruit sur les valeurs cinématiques mais seulement sur les

forces et moments de forces. Cette différence est d'autant plus importante car le bruit d'origine mécanique ou électrique indiqué par le constructeur est très faible. Il y aurait en réalité beaucoup plus de bruit provenant de diverses influences environnementales.

Concernant la sphère munie d'un SCATT, les pourcentages d'erreurs sont sensiblement supérieurs à la première simulation (8 et 9 % dans deux cas). Ces erreurs sont probablement à mettre sur le compte du bruit ajouté sur les données du SCATT. De plus, le bruit du SCATT devient amplifié car les données sont traitées par des fonctions sensibles à des petits écarts. Dans ce cas précis, la dérivée numérique pour trouver les vitesses et les accélérations est très influencée par le bruit (Martin, Hall, Crandall & Pilkey, 1998). L'erreur est bien trop importante pour permettre d'effectuer de la modélisation directe avec suffisamment de précision. De plus, les moments d'inertie sont des valeurs qui interviennent peu dans l'équation. De ce fait, les moments d'inertie ne sont pas calculés aussi précisément que la masse ou le CDG. Une autre raison est que le SCATT n'a que 5 DOF et qu'il manque une certaine liberté au niveau des mouvements afin d'exciter de manière optimale tous les axes. Le problème principal est la distance SCATT-cible qui n'est pas connue ou n'est pas fixe. La prise en compte de la précision des mesures des différentes distances séparant les capteurs, le SCATT et le CDG n'est pas possible en simulation. Une variation minime de ces distances peut contribuer à des erreurs bien plus importantes dans les paramètres d'inertie estimés (Kroger et al., 2008). À cela s'ajoute la difficulté de mesurer ces distances. Les capteurs sont intégrés à la carabine et savoir où se trouve exactement le point de mesure est très difficile. Le point de montage du système SCATT est aussi très important à connaître. Les orientations doivent être connues très précisément. Une déviation minime dans ces orientations rend la méthode d'estimation inutile (Lazor, 2004, p. 15–20).

Concernant le pavé droit muni d'un SCATT et d'un seul capteur, les pourcentages d'erreurs ne sont plus aussi conséquents. Ils restent cependant de l'ordre de 1 à 5 %. Ces erreurs sont à nouveau plutôt dans les moments d'inertie. Les problèmes sont semblables aux problèmes rencontrés pour la sphère munie d'un SCATT. Le pourcentage d'erreur est trop élevé pour permettre une modélisation directe, c'est-à-dire prédire les mouvements sur la base des forces subies par la carabine.

Concernant le pavé droit muni d'un SCATT et de deux capteurs, les résultats sont un peu plus complexes. Ici encore, la connaissance précise de l'orientation et de la position des différents outils de mesure est primordiale. La distance relative entre le SCATT et le capteur est bien plus importante. Le pourcentage d'erreur est semblable au pavé droit avec un seul capteur (1 à 7 %). On pourrait supposer qu'une moyenne de deux procédures séparées puisse augmenter

les chances de s'approcher des valeurs réelles. Cela n'est pas le cas pour cette simulation. En comparant chaque pourcentage de chaque capteur séparément, on remarque que la moyenne des deux capteurs améliore légèrement le résultat final (résultats des deux simulations séparées en annexe). On pourrait supposer qu'avec un nombre supérieur de capteurs, les moments d'inertie et la masse pourraient être définis avec une plus grande précision. En revanche, il faut que ce soit possible de manipuler l'objet à l'endroit de chaque capteur en restant dans la région de la cible avec le SCATT. Ce dernier point sera discuté dans la partie suivante concernant la carabine réelle.

4.3 Valeurs de sortie

Les valeurs de sortie de l'application supposées retourner les valeurs correctes ont été contrôlées après avoir vu que les valeurs ne correspondaient pas. On peut voir pour l'échelle des forces (voir tableau 5) que les « Counts » suivent à peu près le ratio de « Counts per Newton » de 1'000'000. Ces valeurs brutes doivent être divisées par un facteur pour connaître la vraie valeur de force en [N] (ligne « B/TH »). Les légères différences possibles peuvent avoir plusieurs origines :

- a) Les capteurs ne sont plus calibrés correctement. Ils sont censés être calibré à nouveau après une année. Malheureusement, ces capteurs n'ont plus été calibrés depuis leur mise en place.
- b) Les capteurs mesurent aussi d'autres valeurs en même temps. Si l'objet n'était pas exactement au centre du capteur lors de la mesure, des forces et moments de forces dans d'autres dimensions peuvent faire varier le résultat.

On peut voir pour les valeurs corrigées que l'échelle des forces ne correspond pas du tout. Le script permettant cette conversion peut avoir plusieurs problèmes :

- a) Les valeurs de base des « Counts per Newton » n'ont pas été lues correctement dans le fichier de calibration. Cela veut dire que le script n'a pas été contrôlé lors de sa mise en place. Une application d'ATI-IA montre les bons résultats lors de tests effectués. Il est fort probable que le script n'applique pas les bons facteurs ou ait été altéré lors d'une mise à jour.
- b) Le script n'est pas adapté aux différents capteurs. Rappelons que différents capteurs ont été utilisés (Mini45 et Nano25). Il se pourrait que les scripts n'appliquent pas les bons facteurs aux capteurs.
- c) Le script n'effectue pas correctement les rotations et introduit des erreurs lors de cette manipulation.

Les objets utilisés étant de poids suffisamment varié, ce contrôle sur l'échelle des forces nous montre qu'il est impossible de travailler avec les données corrigées. Auparavant, il avait été supposé que ces valeurs soient correctes. La correction des scripts ou leur adaptation doit encore être faite pour pouvoir utiliser correctement les données.

Pour les moments de forces, le problème est identique. On peut voir dans le tableau 6 les résultats des tests effectués. Les « Counts » sont à nouveau proches des valeurs de calibrations. Le facteur des valeurs corrigées est par contre très conséquent (proche de 3200). Ce contrôle est moins précis que celui de l'échelle des forces pour des raisons techniques. De plus, il a fallu additionner deux dimensions car les valeurs brutes n'étaient pas alignées exactement sur l'axe. Ce problème n'était pas présent pour les valeurs corrigées car elles ont subies une rotation. Ceci prouve que le script effectue apparemment les bonnes rotations. On ne peut pas savoir pour quelle raison l'échelle des données n'est pas correcte. Il est difficile de provoquer de manière précise uniquement un moment de force. La solution présentée à la figure 12 n'est pas parfaite mais suffisamment bonne en regard des différences qui sont visibles dans la ligne « C/TH ». On peut voir sur cette figure que l'alignement de la règle rigide suit la direction de la carabine. D'autres dimensions peuvent être excitées avec ce test, c'est-à-dire que des forces ou des moments de forces ont été excités sans le vouloir. Cette erreur a été négligée ici car les différences étaient suffisamment grandes pour prouver que l'échelle des valeurs corrigées n'est pas correcte.

4.4 Réponses aux questions

Dans cette partie, nous allons reprendre toutes les questions posées dans l'introduction et y répondre.

- a) Quelle est la méthode ou la procédure la plus adaptée afin de définir les paramètres d'inertie d'une carabine ?

La méthode présentée dans l'implémentation, c'est-à-dire la méthode d'inertie dynamique appliquée avec une matrice augmentée et la méthode des moindres carrés, paraît la plus adaptée. La carabine étant un objet très complexe, des méthodes traditionnelles s'avèrent très compliquées à mettre en place et moins précises. L'impossibilité de suspendre l'objet de manière convenable empêche des méthodes traditionnelles de fonctionner. La procédure séquentielle paraît la plus adaptée afin de parvenir à des résultats corrects.

Par contre, la méthode a aussi ses désavantages. Elle requiert des données précises et fiables (sans bruit) dans chaque axe, autant dans le domaine cinématique que dynamique.

- b) Avec quelle précision la méthode peut-elle définir les paramètres d'inertie d'une carabine en simulation ?

La précision reste en dessous des espérances. Elle s'approche des 8 à 9 % pour certaines simulations. Dès que les données sont trop bruitées, la méthode n'arrive plus du tout à retrouver des paramètres précis et fiables.

- c) Dans quelle mesure est-il possible ou réalisable d'appliquer cette méthode à des données réelles bruitées ?

Il est fort probable que les données réelles soient trop bruitées, surtout celles provenant du SCATT. Ce dernier doit être mieux analysé ou remplacé par un autre instrument de mesure. Il n'est pour l'instant pas possible d'appliquer la méthode sur des données réelles. Les résultats seraient pour l'instant très approximatifs et ne suffiraient pas à appliquer de la modélisation directe prévue dans une étape ultérieure.

- d) Quels sont les problèmes principaux qu'il faut résoudre afin de pouvoir appliquer la méthode sur des données réelles ?

Des adaptations doivent être effectuées afin de réduire le bruit et d'avoir des données fiables et précises. Il faut aussi penser à adapter les scripts ou l'application en elle-même pour pouvoir travailler correctement. Le problème principal est surtout l'impossibilité de manipuler la carabine avec un seul capteur. Le capteur de l'appui-main est le seul permettant d'appliquer la méthode de cette manière. Les autres capteurs sont tellement éloignés du centre de gravité qu'il est impossible de tenir la carabine à la main. Une autre solution serait de le fixer avec un outil mais cela risquerait d'endommager la carabine. Il faut savoir que la carabine doit être dirigée sur la région de la cible. Dans le cas contraire, le SCATT n'enregistre pas de données. Il n'est pas possible d'appliquer la méthode d'estimation sans les données provenant du SCATT.

Un autre problème découlant du SCATT est le fait qu'il faut produire des mouvements amples dans tous les axes. Cela n'est cependant pas possible car l'amplitude du mouvement est restreinte à la région de la cible. À cela s'ajoute qu'il faut rester précisément à 10 m de la cible, ce qui est aussi impossible en pratique. L'approche utilisée pour calculer les données cinématiques est naïve et ne suffit pas pour produire des données correctes.

Concernant les forces de la présente étude, on peut relever que la base théorique a été bien travaillée et approfondie. L'implémentation est simple et directe. L'analyse détaillée des différents aspects techniques pouvant influencer les résultats aide à mieux comprendre les enjeux d'une telle approche méthodologique. Les simulations permettent de reconnaître les problèmes principaux de l'approche choisie.

Concernant les faiblesses de la présente étude, l'approche est pour la plupart du temps théorique. Aucune estimation réelle n'a pu être réalisée. Tant que les données ne sont pas fiables, il n'est pas possible de réaliser des estimations correctes. Il aurait de ce fait été inutile d'essayer d'estimer des paramètres d'inertie à partir de données et de mesures imprécises ou erronées. Une autre option aurait été de contrôler toutes les données ainsi que la cohérence du système SCATT avec les capteurs pour s'assurer du bon fonctionnement de l'application.

5 Conclusion

Une recherche approfondie des manières d'améliorer l'apprentissage et la performance au tir à air comprimé a été réalisée. Après avoir considéré toutes les recherches des auteurs précédents, il a été remarqué que les relations sont souvent trop distales. Afin de pouvoir modéliser et comprendre chaque facteur et la relation avec la performance, il fallait approcher la problématique d'une autre manière. Une chaîne d'effet a été réalisée pour comprendre les effets directs de chaque facteur. Pour comprendre et poursuivre cette chaîne d'effet, il était primordial de connaître les effets des forces et moments de forces appliqués sur les carabines. Pour cela, il faut connaître les paramètres d'inertie de chaque carabine. Dans ce travail, une méthode a été développée et implémentée grâce aux recherches antérieures. Cette méthode utilise les équations Euler-Newtoniennes et applique une méthode des moindres carrés sur les données.

La méthode la plus adaptée afin de définir les paramètres d'inertie est en premier lieu une excitation optimale des axes par des mouvements amples. Une récolte des données cinématiques et dynamiques de ces mouvements doit suivre. Ces données doivent être retravaillées. Puis une construction de matrices à partir d'équations suivie d'une résolution par méthode des moindres carrés est appliquée aux données. Plusieurs scripts Matlab permettent d'effectuer ces étapes décrites.

La précision de la méthode s'avère relativement précise sur des simulations et des objets simples. Le bruit ajouté sur les capteurs et le SCATT rend la méthode très peu efficace. Le pourcentage d'erreur ne permet pas d'effectuer de la modélisation directe avec les données des capteurs.

Il est fort probable que la méthode ne puisse pas être appliquée sur des données réelles. Il n'a pas encore été possible d'estimer de manière suffisamment correcte les paramètres d'inertie d'une carabine à partir de données réelles.

Plusieurs problèmes doivent auparavant être corrigés afin de pouvoir appliquer la méthode d'estimation de manière convenable. Un autre choix d'instrument de mesure des données cinématiques doit être pris en compte. De plus, une adaptation du traitement des données doit avoir lieu afin d'avoir des données fiables et avec la bonne échelle.

Les conséquences que l'on peut tirer à partir de ces observations sont qu'il faudrait tout d'abord utiliser un accéléromètre au lieu du système SCATT pour vérifier la bonne fonction de la méthode. Une analyse détaillée du fonctionnement du SCATT serait nécessaire si l'on

souhaite absolument travailler avec ce dernier. Une autre conséquence serait une vérification de la calibration des capteurs ainsi qu'une revue de l'orientation de chaque capteur. Les scripts doivent être adaptés afin de traiter correctement les données. Une solution doit être trouvée pour prendre en compte tous les capteurs en parallèle. Cette étape est nécessaire car il n'est pas possible de manipuler la carabine à chaque capteur séparément. Une solution doit aussi être trouvée pour pouvoir récupérer des données suffisamment amples en restant dans la région de la cible avec le SCATT. Finalement, une solution transitoire serait d'estimer les paramètres d'inertie d'une carabine avec des moyens traditionnels simples mais moins précis afin d'avoir un ancrage quant aux valeurs estimées par les scripts. Personne n'a pour l'instant déjà estimé de manière traditionnelle les paramètres d'inertie et, de ce fait, aucune comparaison ne peut être faite avec les paramètres estimés. Une revue complète de l'application devrait avoir lieu avant de passer à la prochaine étape. Tous ces problèmes doivent encore être résolus avant de pouvoir continuer dans la voie de la modélisation directe.

Bibliographie

- An, C., Atkeson, C. & Hollerbach, J. (1985). Estimation of inertial parameters of rigid body links of manipulators. In *1985 24th IEEE Conference on Decision and Control* (p. 990–995). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CDC.1985.268648>
- ATI Industrial Automation: Robotic End Effectors and Automation Tooling. (2018). Retrieved August 25, 2018, from <https://www.ati-ia.com/>
- Ball, K., Best, R. & Wrigley, T. (2003). Body sway, aim point fluctuation and performance in rifle shooters: inter- and intra-individual analysis. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 559–566. <https://doi.org/10.1080/0264041031000101881>
- Benson, H. (1999). *Physique. 1, Mécanique*. Editions du Renouveau pédagogique. Retrieved from https://www.abebooks.fr/products/isbn/9782761310406/22546940239&cm_sp=snippet-_srp1-_PLP1
- Combarrous, M., Desjardins, D. & Bacon, C. (2004). *Mécanique des solides et des systèmes de solides : cours et exercices corrigés*. Dunod.
- Commission romande de mathématique. (2000). *Formulaires et tables : mathématiques, physique, chimie*. Ed. du Tricorne.
- Engineered Products for Robotic Productivity Network Force/Torque Sensor System*. (2011). Retrieved from www.ati-ia.com
- Era, P., Kontinen, N., Mehto, P., Saarela, P. & Lyytinen, H. (1996). Postural stability and skilled performance--a study on top-level and naive rifle shooters. *Journal of Biomechanics*, 29(3), 301–6. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8850636>
- Featherstone, R. (2008). *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7560-7>
- Genta, G. & Delprete, C. (1994). Some considerations on the experimental determination of moments of inertia. *Meccanica*, 29(2), 125–141. <https://doi.org/10.1007/BF01007497>
- Guangjun L., Iagnemma, K., Dubowsky, S. & Morel, G. (1998). A base force/torque sensor approach to robot manipulator inertial parameter estimation. In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)* (Vol. 4, p. 3316–3321). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680950>
- Hahn, H. (2002). *Rigid body dynamics of mechanisms*. Springer. Retrieved from https://books.google.ch/books?id=MqrN3KY7o6MC&pg=PA143&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- Helin, P., Sihvonen, T. & Hänninen, O. (1987). Timing of the triggering action of shooting in relation to the cardiac cycle. *British Journal of Sports Medicine*, 21(1), 33–6. <https://doi.org/10.1136/BJSM.21.1.33>
- Ihalainen, S., Kuitunen, S., Mononen, K. & Linnamo, V. (2016). Determinants of elite-level air rifle shooting performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(3), 266–274. <https://doi.org/10.1111/sms.12440>
- Ihalainen, S., Linnamo, V., Mononen, K. & Kuitunen, S. (2016). Relation of Elite Rifle Shooters' Technique-Test Measures to Competition Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(5), 671–677. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0211>
- ISSF. (2017). ISSF - International Shooting Sport Federation - issf-sports.org. Retrieved July 24, 2018, from https://www.issf-sports.org/theissf/rules/english_rulebook.ashx
- ISSF. (2018). ISSF - International Shooting Sport Federation - issf-sports.org. Retrieved August 3, 2018, from https://www.issf-sports.org/competitions/records/world_records.ashx
- Janelle, C. M., Hillman, C. H., Apparies, R. J., Murray, N. P., Meili, L., Fallon, E. A. & Hatfield, B. D. (2000). Expertise Differences in Cortical Activation and Gaze Behavior during Rifle Shooting. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 22(2), 167–182. <https://doi.org/10.1123/jsep.22.2.167>
- Kane, T. (1996). *2-7 Two Points Fixed on a Rigid Body*. Sunnyvale, California: OnLine Dynamics, Inc.
- Klopper, R., Sakamoto, H. & Okuma, M. (2009). Experimental Identification of Rigid Body Inertia Properties Using Low-Frequency Unbalance Excitation. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.728.5721&rep=rep1&type=pdf>
- Koken, M. (2017). *The Experimental Determination of the Moment of Inertia of a Model Airplane*. Retrieved from http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/585
- Kontinen, N., Landers, D. M. & Lyytinen, H. (2000). Aiming routines and their electrocortical concomitants among competitive rifle shooters. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 10(3), 169–77. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10843511>
- Kredel, R., Grimm, A. & Hossner, E.-J. (2018). *Präzisionsleistungen im (Luftgewehr-) Schiessen: Kompensatorische Effekte der Kraftproduktion bei Schweizer NachwuchssportathletInnen*. Bern.
- Kredel, R. & Hossner, E.-J. (2012). *Präzisionsleistungen im olympischen Luftgewehr-*

- schieszen*. Retrieved from <https://d-nb.info/1079477063/34>
- Kredel, R., Tartaruga, D., Siegenthaler, R. & Hossner, E.-J. (2013). Präzisionsleistungen im Olympischen Luftgewehrschiessen. Retrieved from <https://boris.unibe.ch/52874/1/Zielscheibe.pdf>
- Kroger, T., Kubus, D. & Wahl, F. M. (2008). 12D force and acceleration sensing: A helpful experience report on sensor characteristics. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (p. 3455–3462). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543739>
- Kubus, D., Kroger, T. & Wahl, F. M. (2008). On-line estimation of inertial parameters using a recursive total least-squares approach. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (p. 3845–3852). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650672>
- Lakie, M. (2010). The influence of muscle tremor on shooting performance. *Experimental Physiology*, 95(3), 441–450. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2009.047555>
- Lazor, D. R. (2004). *Considerations for using the dynamic inertia method in estimating rigid body inertia property*. Retrieved from <http://www.sdrl.uc.edu/sdrl/referenceinfo/documents/ms-phd/MS-Thesis-2004-Lazor.pdf>
- Lin, S.-K. (1992). An identification method for estimating the inertia parameters of a manipulator. *Journal of Robotic Systems*, 9(4), 505–528. <https://doi.org/10.1002/rob.4620090405>
- Malakhov, M. V. & Melnikov, A. A. (2017). Postural performance at different breathing strategies with and without restriction of body mobility. *Human Physiology*, 43(1), 47–53. <https://doi.org/10.1134/S0362119716060116>
- Martin, P. G., Hall, G. W., Crandall, J. R. & Pilkey, W. D. (1998). Measuring the Acceleration of a Rigid Body. *Shock and Vibration*, 5(4), 211–224. <https://doi.org/10.1155/1998/134562>
- Meriam, J. L., Kraige, L. G. (2003). *Engineering mechanics*. Wiley. Retrieved from https://books.google.ch/books/about/Engineering_Mechanics.html?id=GCPWQwAACAAJ&redir_esc=y
- Mononen, K., Viitasalo, J. T., Kontinen, N. & Era, P. (2003). The effects of augmented kinematic feedback on motor skill learning in rifle shooting. *Journal of Sports Sciences*, 21(10), 867–876. <https://doi.org/10.1080/0264041031000101944>
- Morbidi, F. (2016). *Licence Professionnelle Automatismes et Robotique Session 2016-Amiens ME 1.1*. Retrieved from <https://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Eng/documenti/Teaching>

/INRO15-16/InitRob3.pdf

- Reyes, R.-D. (2014). *Florida State University Libraries Identification of the Inertial Parameters of Manipulator Payloads*. Retrieved from <http://diginole.lib.fsu.edu/islandora/object/fsu:204853/datastream/PDF/view>
- SCATT shooter trainers. (2018). Retrieved July 24, 2018, from <https://www.scatt.com/>
- SCHUNK GmbH. (2017). *Six Axis Force / Torque Transducer FT Transducer Assembly and Operating Manual Superior Clamping and Gripping*. Retrieved from www.schunk.com
- Serway, R. A. (1986). *Physics for scientists and engineers*. Saunders College Pub.
- Son, J., Ryu, J., Kim, J. & Kim, Y. (2014). Determination of inertial parameters using a dynamometer. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 24(6), 2447–55. <https://doi.org/10.3233/BME-141058>
- swissshooting - Home. (2018). Retrieved June 28, 2018, from <http://www.swissshooting.ch/fr/desktopdefault.aspx>
- Taylor, B. N. & Thompson, A. (2008). The International System of Units (SI) NIST Special Publication 330 2008 Edition. *NIST Special Publication*, 330, 52. Retrieved from <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2016/12/07/sp330.pdf>
- Thomas, K. S. & Magal, M. (2014). How Does Physical Activity Impact Postural Stability? *Journal of Novel Physiotherapies*, 4(2). <https://doi.org/10.4172/2165-7025.1000206>
- Tremayne, P. & Barry, R. J. (2001). Elite pistol shooters: physiological patterning of best vs. worst shots. *International Journal of Psychophysiology*, 41(1), 19–29. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00175-6)
- Vladivostok, M. (2013). Sphere and Ball.png - Wikimedia Commons [Image]. Retrieved August 4, 2018, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sphere_and_Ball.png
- Wang, T., Celik, O., Catbas, F. N. & Zhang, L. (2015). Practical Calibration Techniques for the Modal Impact Hammer (p. 23–29). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15212-7_3
- Winkler, A. & Suchy, J. (2007). Dynamic force/torque measurement using a 12DOF sensor. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (p. 1870–1875). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399596>

Annexe

Liste des abréviations

ATI-IA	ATI Industrial Automation
CDG	Centre de gravité
CR	Corps rigide
DOF	Degrees of freedom
FST	Fédération suisse de tir
MCT	Méthode des moindres carrés totale
N	Nombre de valeurs

Résultats supplémentaires

Tableau 7

Pavé droit avec SCATT avec le premier capteur

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	5.00	5.00270	0.055	%
C_x	0.25	0.24985	0.058	%
C_y	0.00	0.00001	-0.000	absolue
C_z	0.10	0.10016	0.160	%
I_{xx}	0.43	0.42300	2.384	%
I_{xy}	0.00	0.00235	-0.002	absolue
I_{xz}	0.00	0.00109	-0.001	absolue
I_{yy}	0.42	0.41867	0.514	%
I_{yz}	0.00	0.00255	-0.003	absolue
I_{zz}	0.02	0.01902	8.702	%

Note. Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. Bruit ajouté sur le SCATT_{xy} = 0.125 [mm] et angles_{xyz} = 0.0000125 [rad]. $N = 2000$.

Tableau 8

Pavé droit avec SCATT avec le deuxième capteur

	Valeur réelle	Estimation	Erreur	%/valeur absolue
m	5.00	5.00080	0.016	%
C_x	0.25	0.50002	0.003	%
C_y	0.00	-0.00000	0.000	absolue
C_z	0.10	-0.00002	0.000	absolue
I_{xx}	0.43	0.42860	1.093	%
I_{xy}	0.00	0.00165	-0.002	absolue
I_{xz}	0.00	-0.00150	0.001	absolue
I_{yy}	0.42	0.41289	1.887	%
I_{yz}	0.00	0.00881	-0.009	absolue
I_{zz}	0.02	0.01997	4.165	%

Note. Bruit ajouté sur la force = 0.00008 [N] et moment de force = 0.08 [Nmm]. Bruit ajouté sur le SCATT_{xy} = 0.125 [mm] et angles_{xyz} = 0.0000125 [rad]. $N = 2000$.

Tableau 9
Liste des scripts

Chemin du fichier	Nom du fichier .m	Fonction	
IDInertiaParams	Fonctions	calcFTs	Calcule les forces et moments de forces à partir de données de paramètres d’inertie et cinématiques connues.
		estimparams	Estime les paramètres d’inertie à partir de valeurs de forces, moments de forces et cinématiques
		errorperc	Calcule le taux d’erreur en % entre deux paramètres d’inertie.
		scatt2cinematic	Transforme le 5DOF du SCATT en valeurs cinématiques 6DOF
	Simulations	spheresimple	Modélise et calcule les paramètres d’inertie d’une sphère avec un accéléromètre 6DOF
		sphereSCATT	Modélise et calcule les paramètres d’inertie d’une sphère avec un SCATT
		cuboidWscatt	Modélise et calcule les paramètres d’inertie d’un pavé droit avec un SCATT et un capteur de F/T excentré
		cuboid-Wscatt2sensorseq	Modélise et calcule les paramètres d’inertie d’un pavé droit avec SCATT et deux capteurs de F/T excentré
	Application	realdata2param*	Estime les paramètres d’inertie à partir d’un fichier avec des données réelles
SensorCheck	Checkfts*	checkforce	Contrôle la calibration et les données de forces d’un capteur avec des objets
		checktorque	Contrôle la calibration et les données des moments de force d’un capteur avec des objets
		checkforcesens	Identique à checkforce, sauf que la configuration des capteurs sont modifiée.
Fonction externe		inpaint_nans	Remplit les valeurs manquantes dans le signal corrigé des données. https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551-inpaint_nans

Note. (*) Les fichiers contenus dans Checkfts ainsi que realdata2param nécessitent des données sous forme de fichiers .mat pour fonctionner correctement.

Codes sources des principales fonctions

```
function [m, COM, Iparams] = estimparams(f,t, linacc,angvelo, angacc,gravity)
%ESTIMPARAMS DESC: estimates the 10 inertial parameters from forces and torques
% and cinematic values
% Autor: Jonas Epper
% INPUT: (all w.r.t sensor frame)
% f (Nx3) in [N] force
% t (Nx3) in [Nm] torque
% linacc (Nx3) [m/s^2] linear acceleration
% angvelo (Nx3) [rad/s] angular velocity on
% angacc (Nx3) [rad/s^2] angular acceleration
% gravity (Nx3) [m/s^2] gravity vector
N = size(f,1);
%preallocating
As = zeros(6,10,N);
as = zeros(N*6,10);
for i = 1:N
    fts(6*(i-1)+1:6*i,1) = [f(i,:), t(i,:)];
    lina = linacc(i,:);
    anga = angacc(i,:);
    angv = angvelo(i,:);
    g = gravity(i,:);
    As(:,1,i)= [lina(1)-g(1); lina(2)-g(2); lina(3)-g(3); zeros(3,1)]; % make
whole matrix
    As(:,2,i)= [-anga(2)^2-anga(3)^2; anga(1)*anga(2)+angv(3); an-
ga(1)*anga(3)-angv(2);0;g(3)-lina(3);lina(2)-g(2)];
    As(:,3,i)= [anga(1)*anga(2)-angv(3); -anga(1)^2-anga(3)^2; an-
ga(2)*anga(3)+angv(1);lina(3)-g(3);0;g(1)-lina(1)];
    As(:,4,i)= [anga(1)*anga(3)+angv(2);anga(2)*anga(3)-angv(1); -anga(2)^2-
anga(1)^2; g(2)-lina(2);lina(1)-g(1);0];
    As(:,5,i)= [zeros(3,1); angv(1);anga(1)*anga(3); -anga(1)*anga(2)];
    As(:,6,i)= [zeros(3,1); angv(2)-
anga(1)*anga(3);angv(1)+anga(2)*anga(3);anga(1)^2-anga(2)^2];
    As(:,7,i)= [zeros(3,1); angv(3)+anga(1)*anga(2);anga(3)^2-
anga(1)^2;angv(1)-anga(2)*anga(3)];
    As(:,8,i)= [zeros(3,1); -anga(2)*anga(3);angv(2);anga(1)*anga(2)];
    As(:,9,i)= [zeros(3,1);anga(2)^2-anga(3)^2; angv(3)-
anga(1)*anga(2);angv(2)+anga(1)*anga(3)];
    As(:,10,i)= [zeros(3,1);anga(2)*anga(3); -anga(1)*anga(3);angv(3)];
    as((i-1)*6+1:i*6,:) = squeeze(As(:, :,i));
end
%MCT
phi = as\fts;
m = phi(1);
COM = phi(2:4)/m; % see "(Kubus et al., 2008)"
Iparams = phi(5:10);
end
```

```
function [fs,ts] = calcFTs(m,com,I,linacc, angvelo,angacc, gravity)
%CALCFTS calculates the forces and torques from known values
% Detailed explanation goes here:
% % from equation (5) and (6) of the paper (Epper. J, 2018)
% INPUT:
% masse (1x1), com (3x1), I (6x1), linacc (Nx3), angvelo (Nx3), angacc
% (Nx3), gravity (Nx3).
%params:
```

```

N = size(linacc,1);
I = [I(1:3)';
     I(2) I(4:5)';
     I(3) I(5) I(6)];
fs = zeros(N,3);
ts = zeros(N,3);
for i = 1:N
    lina = linacc(i,:)';
    angv = angvelo(i,:)';
    anga = angacc(i,:)';
    g = gravity(i,:)';
    fs(i,:) = m*lina - m*g + cross(angv, m*com) +
cross(angv, cross(angv, m*com));
    ts(i,:) = I*angv + cross(angv, I*anga) + cross(m*com, lina) -
cross(m*com, g);
end
end

```

```

function [linacc, angvelo, angacc, g] = scatt2cinematic(XY,angles,sensoroffset)
% SCATT2CINEMATIC Desc: Transform the 5DOF of SCATT to cinematics values of 6DOF
% INPUT:
% XY (Nx2) [m] : scatt values in XY
% angles (Nx3) [rad] : angles of scatt xyz
% sensoroffset (1x3) [m] : vector from scatt to sensor
d = 10; % distance to target
y = XY(:,1); % transform XY to correct right hand rule
z = XY(:,2);
angx = angles(:,1);
angy = angles(:,2);
angz = angles(:,3);
N = length(y);
G = -9.80665; % Earth acceleration
g = zeros(N,3);
g(:,3) = G;

% preallocate variables
newx = zeros(N,1); % we lose a DOF here
newy = zeros(N,1);
newz = zeros(N,1);
sensor = zeros(N,3);
% first transform 5DOF position to 6DOF position
% we assume that if all angles are 0, the rifle is perpendicular to the
% target and the sensor is placed at a translation and rotation of the scatt
% position to the sensor
for i = 1:N
    omx = angx(i);
    omy = angy(i);
    omz = angz(i);
    alphay = pi/2 - abs(omy);
    alphaz = pi/2 - abs(omz);
    offsety = d/tan(alphaz); % trigonometrie and right hand rule
    offsetz = d/tan(alphay);
    if omz > 0
        offsety = -offsety;
    elseif omz == 0
        offsety = 0;
    end
end

```

```

        if omy < 0
            offsetz = -offsetz;
        elseif omy == 0
            offsetz = 0;
        end
        newy(i) = y(i) + offsety;
        newz(i) = z(i) + offsetz;
        % first make offset
        sensor(i,1) = newx(i)+sensoroffset(1);
        sensor(i,2) = newy(i)+sensoroffset(2);
        sensor(i,3) = newz(i)+sensoroffset(3);
        % then make rotation in y and z w.r.t sensor
        sensor(i,:) = rotate(sensor(i,:), 'x', angx(i), [newx(i) newy(i) newz(i)]);
        sensor(i,:) = rotate(sensor(i,:), 'y', -angy(i), [newx(i) newy(i) newz(i)]);
        sensor(i,:) = rotate(sensor(i,:), 'z', -angz(i), [newx(i) newy(i) newz(i)]);
    end
    % second transform 6DOF position to accs and velo
    [~,linacc] = gradient(gradient(sensor));
    [~,angvelo] = gradient(angles);
    [~,angacc] = gradient(angvelo);
end
function [pos] = rotate(position, axe, angle, origin)
    % understand here origin means axe of rotation
    position = position - origin;
    position = position*rot(axe,angle);
    [pos] = position + origin;
end
function [rotmatrice] = rot(axe,angle)
    if axe == 'x'
        [rotmatrice] = [1 0 0;
            0 cos(angle) -sin(angle);
            0 sin(angle) cos(angle)];
    elseif axe == 'y'
        [rotmatrice] = [cos(angle) 0 sin(angle);
            0 1 0;
            -sin(angle) 0 cos(angle)];
    elseif axe == 'z'
        [rotmatrice] = [cos(angle) -sin(angle) 0;
            sin(angle) cos(angle) 0;
            0 0 1];
    else
        error('axe must be x y or z')
    end
end
end

```

```

function [phi] = realdata2param(filename,offset, snum,outputname,sync)
%REALDATA2PARAM computes the inertial parameters of a sequence of F/T values
% and SCATT values
% ----- Explanation of the inputs needed (f and t are computed here):
% INPUT: (all w.r.t sensor frame)
% filename (String): name of the matlab file
% offset (1x3) [mm] : offset of the scatt camera
% snum (1x1) : 1-4 which sensor was used
% outputname (String) : name of the output file for saving ("none" is de-
fault)
% sync (Bool) : if the syncdata is used or not (true/false)

```

format short

```
%%% ----- PARAMS -----
%%% some parameters of computation
G = -9.80665; % Earth acceleration
sensoroffset = offset/1000;
disp("reading scatt values...");
if ~exist(filename, 'file')
    message = sprintf('%s does not exist', filename);
    uiwait(warndlg(message));
else
    mf = matfile(filename);
end
% scatt data:
datascatt = mf.scattRawData;
sname = fieldnames(datascatt);
shot = datascatt.(sname{1});
scattxy = shot(:,3:4)/1000; % [mm] to [m]
angles = shot(:,7:9); % [rad]
% sensor data:
datasensor = mf.sensorRawData;
sensors = datasensor.(sname{1});
fnum = snum*6-1;
tnum = fnum+3;
f = sensors(:,fnum:(fnum+2));
t = sensors(:,tnum:(tnum+2));
% interpolating
interscatt = length(scattxy);
interforce = length(f);
xorigin = linspace(0, interscatt, interforce);
xi = linspace(0, interscatt, interscatt);
f = interp1(xorigin, f, xi, 'linear','extrap');
t = interp1(xorigin, t, xi, 'linear','extrap');
if sync == true % both together sync
    syncdata = mf.syncData; % unused?
    both = syncdata.(sname{1});
    scattxy = both(:,1:2);
    angles = both(:,4:6);
    fnum = snum*6+3;
    tnum = fnum+3;
    f = both(:,fnum:(fnum+2));
    t = both(:,tnum:(tnum+2));
    % fill up the NaNs and flip in right direction
    scattxy(:,1) = flipud(inpaint_nans(scattxy(:,1)));
    scattxy(:,2) = flipud(inpaint_nans(scattxy(:,2)));
    for i = 1:3 % flip angles and f/t
        angles(:,i) = flipud(inpaint_nans(angles(:,i)));
        f(:,i) = flipud(inpaint_nans(f(:,i)));
        t(:,i) = flipud(inpaint_nans(t(:,i)));
    end
end
end
assignin('base','f',f)
assignin('base','scattxy',scattxy)
assignin('base','angles',angles)
disp("file read done")
% in case we want to smoothen the trajectories
% angles(:,1) = smooth(angles(:,1),'moving');
% angles(:,2) = smooth(angles(:,2),'moving');
% angles(:,3) = smooth(angles(:,3),'moving');
```

```

disp("scatt 2 cinematics...")
[linacc, angvelo, angacc] = scatt2cinematic(scattxy,angles,sensoroffset);
N = length(linacc);
Gvec = zeros(N,3);
Gvec(:,3) = G;
disp("transformation done")
disp("calculate and return estimated parameters...")
[newmasse, newCOM, newIparams] = estimparams(f, t, linacc, angvelo, angacc,Gvec);
disp("results:")
phi = [newmasse;newCOM;newIparams]
%%%%%% save output and errors: (used for results purpose)
if ~strcmp(outputname,"none")
    try
        fileID = fopen(outputname,'w');
        fprintf(fileID,'%s \r\n','Estimation');
        fprintf(fileID,'%5f \r\n',phi);
        fprintf(fileID,'%s = \t %i\r\n','N',N);
        fclose(fileID);
    catch
        warning("problem with file creation or writing, please check folder
permissions")
    end
end
end
end

```

```

% sphereSCATT.m
clear % clear workspace
format short
%%% TITLE: Testing payload of inertial params with single sensor on a
%%% sphere
%%% DESC: calculating inertial parameters with a single sensor and
%%% simulated data of a sphere
%%% AUTOR: Jonas Epper
%%% ---- some parameters of computation
G = -9.80665; % Earth acceleration
% known values for a sphere
masse = 10;
r = 0.1;
COM = [0 0 r]';
I = (2/5)*masse*(r^2);
Itens = zeros(6,1);
Itens([1 4 6]) = I;
disp("original parameters")
phi = [masse; COM; Itens]
N = 2000; % number of values
Gvec = zeros(N,3);
Gvec(:,3) = G;
% scatt to cinematics
disp("transform scatt to cinematics")
scattxy = zeros(N,2);
angles = zeros(N,3);
% make some random trajectories, those aren't best but is enough for tests
j = 1;
for i = pi/16:pi/16:(pi/16)*N
    scattxy(j,1) = exp(-i/200)*sin(i/7); % variate the position to get some accel-
eration data
    scattxy(j,2) = exp(i/500)*cos(i/6)-sin(i/4);
    angles(j,1) = exp(-i/200)*sin(i/6); % variate the position to get some accel-

```



```

eration data
    angles(j,2) = exp(i/500)*sin(i/6)-cos(i/3);
    angles(j,3) = -sin(i/5)+cos(i/4); % needed another function then sin or cos to
excite axe
    j = j+1;
end
sensoroffset = [-r -r/2 -r]; % scatt is positioned on the front of the sphere
[linacc, angvelo, angacc] = scatt2cinematic(scattxy,angles,sensoroffset);
disp("transformation done")
disp("calculate and return estimated parameters")
[f,t] = calcFTs(masse,COM,Itens,linacc,angvelo,angacc,Gvec);
[newmasse, newCOM, newIparams] = estimparams(f, t, linacc, angvelo, angacc,Gvec);
phiestim = [newmasse;newCOM;newIparams];
disp("compare with original: in percent of error")
[errm,errCOM,errI,res] = errorperc(masse, COM, Itens,newmasse, newCOM,
newIparams);
estimerror = [errm;errCOM;errI];
% add some noise on the forces
noise = 0.00008; % from the calculations of SensorCheck
noiset = 0.08/1000; % here we are using [Nm] and not [Nmm] as in Paper
s = size(f,1);
noise(:,1:3) = -noise + (noise - (-noise)).*rand(s,3);
noise(:,4:6) = -noiset + (noiset - (-noiset)).*rand(s,3);
semf = std(noise(:,1))/sqrt(s)% standard error of the mean
semt = std(noise(:,4))/sqrt(s)
% add the noise
f = f + noise(:,1:3);
t = t + noise(:,4:6);
% add some noise on the SCATT:
noisexy = 0.125;
noiseangxyz = 0.0000125;
s = size(scattxy,1);
noise(:,1:2) = -noisexy + (noisexy - (-noisexy)).*rand(s,2);
noise(:,3:5) = -noiseangxyz + (noiseangxyz - (-noiseangxyz)).*rand(s,3);
semscattxy = std(noise(:,1))/sqrt(s)% standard error of the mean
semanxyz = std(noise(:,3))/sqrt(s)
% add the noise
scattxy = scattxy + noise(:,1:2);
angles = angles + noise(:,3:5);
% recalculate the cinematic
[linacc, angvelo, angacc] = scatt2cinematic(scattxy,angles,sensoroffset);
disp("estimated parameters with noise:")
[ newmasse, newCOM, newIparams] = estimparams(f, t, linacc, angvelo, angacc,Gvec);
noisedphi = [newmasse;newCOM;newIparams]
disp("errors:")
[errm,errCOM,errI,res] = errorperc(masse, COM, Itens,newmasse, newCOM,
newIparams);
noisedperc = [errm;errCOM;errI]
%%%%%% save output and errors: (used for results purpose)
try
    fileID = fopen('sphereSCATT.txt','w');
    fprintf(fileID,'%s \t %s \t %s \t %s\r\n','Valeur réelle','Estimation', 'Er-
reur','%/valeur absolue');
    fprintf(fileID,'%0.2f \t \t \t %0.5f \t \t \t %0.3f \t
%s\r\n',[phi,noisedphi,noisedperc,res]);
    fprintf(fileID,'%s = \t %0.5f \t %0.5f\r\n','standard error to the mean
f(N)/t(Nmm)',[semf,semt*1000]);
    fprintf(fileID,'%s = \t %i\r\n','N ',N);
    fclose(fileID);

```

```

catch em
    disp(em)
    warning("problem with file creation or writing, please check folder permis-
sions")
end

```

```

% checkforce.m
format long g
clear
%retrieving the values:
m1 = matfile("appuif1.mat");
m2 = matfile("appuif2.mat");
m3 = matfile("appuif3.mat");
s1 = m1.sensorRawData;
s2 = m2.sensorRawData;
s3 = m3.sensorRawData;
ss1 = m1.syncData;
ss2 = m2.syncData;
ss3 = m3.syncData;
raw1 = s1.Shot_0001(:,23:25);
raw2 = s2.Shot_0002(:,23:25);
raw3 = s3.Shot_0003(:,23:25);
sync1 = [inpaint_nans(ss1.Shot_0001(:,27)), inpaint_nans(ss1.Shot_0001(:,28)),
inpaint_nans(ss1.Shot_0001(:,29))];
sync2 = [inpaint_nans(ss2.Shot_0002(:,27)), inpaint_nans(ss2.Shot_0002(:,28)),
inpaint_nans(ss2.Shot_0002(:,29))];
sync3 = [inpaint_nans(ss3.Shot_0003(:,27)), inpaint_nans(ss3.Shot_0003(:,28)),
inpaint_nans(ss3.Shot_0003(:,29))];
%taking relevant parts
raw1mean = mean(raw1(11000:end,:))';
sync1mean = mean(sync1(1:2500,:))';
shot1 = [raw1mean sync1mean];
raw2mean = mean(raw2(18000:end,:))';
sync2mean = mean(sync2(1:6000,:))';
shot2 = [raw2mean sync2mean];
raw3mean = mean(raw3(32000:35000,:))';
sync3mean = mean(sync3(3000:6000,:))';
shot3 = [raw3mean sync3mean];

rows = [shot1(:,1), shot2(:,1), shot3(:,1)]';
interet = rows(:,3);
capteur = interet(1)
interet = interet-capteur;
boisraw = interet(2)
betonraw = interet(3)

syncs = [shot1(:,2), shot2(:,2), shot3(:,2)]';
syncint = syncs(:,3);
capteursync = syncint(1)
syncint = syncint-capteursync;
boissync = syncint(2)
betonsync = syncint(3)
% true values from balance measure
g = -9.80665; % [m/s^2]
mbois = 0.324; %[kg]
mbeton = 2.638; % [kg]
realbois = mbois*g % [N] (=kg*m/s^2)
realbeton = mbeton*g % [N]

```

ratorawbois = boisraw/realbois
ratorawbeton = betonraw/realbeton
ratiosyncbois = boissync/realbois
ratiosyncbeton = betonsync/realbeton

Tous les codes sources peuvent être demandés par voie électronique à l'adresse suivante :

jonas.epper92@gmail.com

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail de master.

Je remercie en particulier Dino Tartaruga pour son aide et ses conseils pour tout ce qui concernait la carabine et le matériel de mesure.

Je remercie aussi Dr Wolfgang Taube pour son aide et ses conseils. Il m'a aidé à voir clair dans les moments difficiles du travail.

Je remercie finalement Fanny Mauron et Christelle Crettol pour leur grande aide et explications précieuses dans le domaine des mathématiques.