



HAL
open science

Comment les centrales inertielles influent sur la compréhension de la biomécanique? Avis d'experts ouvrant de nouvelles perspectives dans l'analyse et l'amélioration des mouvements humains tout en respectant les exigences de qualité et de précision.

Mathias Blandeau, Laura Wallard

► **To cite this version:**

Mathias Blandeau, Laura Wallard. Comment les centrales inertielles influent sur la compréhension de la biomécanique? Avis d'experts ouvrant de nouvelles perspectives dans l'analyse et l'amélioration des mouvements humains tout en respectant les exigences de qualité et de précision.. Global Industrie, Jun 2024, Paris, France. hal-04793253

HAL Id: hal-04793253

<https://uphf.hal.science/hal-04793253v1>

Submitted on 20 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

AVIS D'EXPERTS

Comment les centrales inertielles influent sur la compréhension de la biomécanique, ouvrant de nouvelles perspectives dans l'analyse et l'amélioration des mouvements humains tout en respectant les exigences de qualité et de précision ?

Quel est le point commun entre un sous-marin, une personne avec les yeux fermés et votre smartphone ? Tous ces objets connaissent leur orientation dans l'espace sans vision et cela grâce à un capteur méconnu : la centrale inertielle !

Nous assistons depuis une vingtaine d'année à une forte démocratisation de l'utilisation des centrales

inertielles dans le domaine de l'analyse du mouvement (*Inertial Measurement Units* ou *IMU*). Ces dispositifs autrefois lourds et coûteux sont constitués d'au moins un accéléromètre 3D (pour mesurer la variation de vitesse linéaire), d'un gyroscope 3D (pour mesurer la variation d'angle) et parfois même d'un magnétomètre (équivalent à une boussole). Cet engouement pour ces outils de mesure s'observe notamment via l'évolution du nombre de publication scientifiques (sur Pubmed, l'occurrence du mot-clé « IMU » a été multiplié par 100 en 20 ans).

En utilisant des techniques avancées de traitement du signal et de fusion de données (ex : filtre complémentaire, filtre de Kalman, etc...), les informations mesurées par les différents capteurs permettent d'obtenir l'orientation relative d'un objet dans l'espace. Le domaine de l'analyse quantifiée du mouvement (AQM) a vu dans la miniaturisation des IMU (Figure 1), une opportunité de répondre à certains défauts des méthodes classiques de capture du mouvement basées sur des systèmes optoélectroniques classiques. En effet, le gold-standard en AQM souffre de trois grands défauts, 1) l'encombrement du système (non embarquable et

Figure 1



A. La centrale inertielle de la mission Apollo en 1961 (24kg, 263cm³)



B. Une centrale inertielle du commerce (Adafruit, 3g, 21mm³)

Figure 2

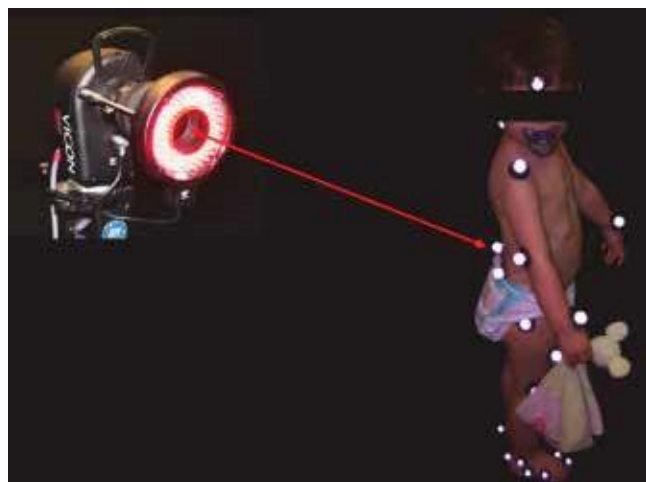


C. Systèmes IMU
(MTw Awinda,
Movella)

A. Les premières Analyse du Mouvement de Jules-Etienne Marey



B. Système optoélectronique (Chèze, 2014)



non adaptable à grande échelle), 2) le coût (jusqu'à plus de 200k€) et enfin 3) la difficulté d'utilisation liée au placement de nombreux marqueurs sur des points anatomiques précis (expertise utilisateur requise) ainsi qu'à un temps de traitement important. Sur ces trois points les IMU sont supérieures, elles sont très légères (<150g), très abordables (<100€ / IMU) et plus simples d'utilisation. C'est pourquoi leur utilisation dans le cadre de tests cliniques (ex : test du Timed Up and Go chez les personnes à risque de chute) est de plus en plus envisagée notamment dans une vision de la médecine hors hôpital dans un contexte post COVID-

19 combiné à population vieillissante. Les IMUs offrent donc de nouvelles opportunités scientifiques et médicales pour mesurer et analyser les performances motrices des usagers, et cela en lien avec un environnement plus proche de leur environnement quotidien. Néanmoins, mener une étude scientifique dans des situations réelles implique des conditions et des défis différents de ceux impliqués dans des environnements cliniques ou expérimentaux comme la prise en compte d'artefacts exotiques (ex : champ magnétique lié à un passage de métro) ou la gestion du big data résultant de mesures longues durées.

Le domaine d'utilisation des IMU est très large, allant de l'outil de mesure ergonomique pour valider des postures ●●●

- de travail (Hubaut et al., 2022) à la réalisation de tests cliniques (Storm et al., 2020) en passant par des exercices de rééducation (Blandeau et al., 2023b). Ces dispositifs ambitionnent la simplification et l'amélioration de l'AQM, ce qui peut se traduire par « optimiser la médecine actuelle grâce aux apports de nouvelles technologies ». Cependant la question fondamentale de la confiance en ce type de système (en termes de précision, fiabilité, reproductibilité et sensibilité au changement) demeure et est nécessaire à l'approche scientifique face à l'arrivée d'innovation technologique. De par la facilité de production de résultats, de très nombreuses études ont été réalisées sur une variété de mouvements et situations (Blandeau et al., 2022; Cudejko et al., 2022) et en un temps record en comparaison des AQM classiques basées sur système optoélectroniques. Il est donc possible de trouver à ce jour de nombreuses revues systématiques de la littérature scientifique (Ghislieri et al., 2019; Storm et al., 2020; Weygers et al., 2020) afin de poser un regard objectif sur la qualité de ces nouveaux dispositifs vis-à-vis du besoin clinique. Les travaux les plus récents présentent de très bons résultats de validité et reproductibilité concernant les données brutes des IMU (Cudejko et al., 2022) ainsi que sur la cinématique articulaires (Weygers et al., 2020) avec des erreurs faibles lors de mouvement variés tel que la posture statique, marche, course ou les squats. Il existe néanmoins plusieurs zones d'ombres identifiées dans la littérature, limitant le déploiement massif de ces technologies en dépit des innovations. Le premier constat est de ne pas succomber à « la fièvre » des études sur les IMU. La simplicité d'utilisation, le faible coût de ces systèmes et la possibilité de les fabriquer soi-même assez simplement ont permis de générer une quantité gigantesque de publications ces dernières années. Hélas cette combinaison de facteurs associée à l'injonction de production de publications par les laboratoires de recherche fait qu'une grande partie de ces publications sont de qualité médiocre (beaucoup d'articles dans des revues considérées comme prédatrices) et ne permettent ni la reproductibilité des résultats, ni l'avancée de la connaissance commune. Il a par ailleurs été soulevé que la sensibilité au changement (Ghislieri et al., 2019; Preatoni et al., 2022), dans un objectif d'utilisation clinique, est un paramètre encore trop peu étudié, réduisant ainsi l'intérêt clinique des articles. Deuxièmement, des études récentes ont soulevé un problème de manque de standardisation lors de l'utilisation d'IMU, notamment sur le placement, la fixation des capteurs et leur impact sur la robustesse des estimations angulaires (Kobsar et al., 2020; Preatoni et al., 2022). Dans une étude de fiabilité (Cudejko et al., 2022), les résultats test-retest étaient significativement inférieurs lorsque le placement des IMU était réalisé par les patients plutôt que les cliniciens. Des travaux récents (Blandeau et al., 2023a) ont par ailleurs montré l'impact du positionnement crano-caudal des capteurs IMU sur l'évaluation de la cinématique articulaire lors du squat. Ces résultats récents diffèrent du discours de simplicité d'utilisation souvent utilisé par les fabricants d'IMU et tendent à montrer que la technologie IMU bénéficierait d'une standardisation d'utilisation à l'instar des travaux fondateurs du début du XXI^e siècle qui ont vu l'amélioration internationale de la qualité de production scientifique en AQM. En conclusion, il existe une grande variété de technologies portables utilisées pour mesurer des paramètres biomécaniques, le niveau de maturité des approches biomécaniques utilisant les IMU est encore faible avec peu d'études validant les mesures ou évaluant leur impact en pratique clinique. Il existe un besoin de recherches plus rigoureuses et plus transparentes dans le domaine, ainsi que de lignes directrices et de bonnes pratiques pour le design, la mise en œuvre et la diffusion des études utilisant les technologies IMU pour la recherche. Ces résultats sont à interpréter comme un signe que la technologie des IMU est encore en phase de croissance.

Mathias Blandeau, PhD
Laura Wallard, PhD
Université Polytechnique
Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 LAMIH, F-59313,
Valenciennes,
France

Références

- Blandeau, M., Guichard, R., Hubaut, R., Leteneur, S., 2023a. IMU positioning affects range of motion measurement during squat motion analysis. *J. Biomech.* 111598. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111598>
- Blandeau, M., Lesaffre, R., Wallard, L., 2023b. Validation of walking events detecting algorithm during Nordic walking of healthy subjects. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization.* 26, 276–278. https://www.researchgate.net/publication/375662472_Validation_of_walking_events_detecting_algorithm_during_Nordic_walking_of_healthy_subjects
- Chèze, L., 2014. Analyse cinématique du mouvement humain, ISTE éditions. ed, Collection Bioingénierie et Santé. Cudejko, T., Button, K., Al-Amri, M., 2022. Validity and reliability of accelerations and orientations measured using wearable sensors during functional activities. *Sci. Rep.* 12, 14619. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18845-x>
- Ghislieri, M., Gastaldi, L., Pastorelli, S., Tadano, S., Agostini, V., 2019. Wearable Inertial Sensors to Assess Standing Balance: A Systematic Review. *Sensors* 19, 4075. <https://doi.org/10.3390/s19194075>
- Hubaut, R., Guichard, R., Greenfield, J., Blandeau, M., 2022. Validation of an Embedded Motion-Capture and EMG Setup for the Analysis of Musculoskeletal Disorder Risks during Manhole Cover Handling. *Sensors* 22, 436. <https://doi.org/10.3390/s22020436>
- Kobsar, D., Charlton, J.M., Tse, C.T.F., Esculier, J.-F., Graffos, A., Krowchuk, N.M., Thatcher, D., Hunt, M.A., 2020. Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: a systematic review and meta-analysis. *J. NeuroEngineering Rehabil.* 17, 62. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00685-3>
- Preatoni, E., Bergamini, E., Fantozzi, S., Giraud, L.I., Orejel Bustos, A.S., Vannozzi, G., Camomilla, V., 2022. The Use of Wearable Sensors for Preventing, Assessing, and Informing Recovery from Sport-Related Musculoskeletal Injuries: A Systematic Scoping Review. *Sensors* 22, 3225. <https://doi.org/10.3390/s22093225>
- Storm, F.A., Cesareo, A., Reni, G., Biffi, E., 2020. Wearable Inertial Sensors to Assess Gait during the 6-Minute Walk Test: A Systematic Review. *Sensors* 20, 2660. <https://doi.org/10.3390/s20092660>
- Weygers, I., Kok, M., Konings, M., Hallez, H., De Vroey, H., Claeys, K., 2020. Inertial Sensor-Based Lower Limb Joint Kinematics: A Methodological Systematic Review. *Sensors* 20, 673. <https://doi.org/10.3390/s20030673>