Stabilité gyroscopique et optimisation de la trajectoire d'un frisbee

Le vol d'un disque défie l'intuition, sans rotation il bascule avec rotation il vole droit. Ce paradoxe m'a conduit à combiner mécanique du solide, aérodynamique et simulation numérique, puis à le confronter à l'expérience.

Le sujet s'inscrit dans le thème de l'année : l'efficacité aérodynamique du disque (finesse portance/traînée), la sobriété (portée maximale pour une énergie de lancer donnée) et l'optimisation numérique des paramètres de lancer (vitesse, spin, angle d'attaque).

Positionnement thématique

PHYSIQUE (Mécanique), PHYSIQUE (Mécanique des fluides), INFORMATIQUE (Informatique pratique).

Mots-clés

Frisbee	Flying disc
Stabilité gyroscopique	Gyroscopic stability
Précession	Precession
Simulation numérique	Numerical simulation
Optimisation de trajectoire	Trajectory optimization

Bibliographie commentée

J'étudie le vol d'un frisbee, le premier problème est le fait que si on lance un frisbee sans rotation il pique du nez et tombe alors que si on le lance applique un rotation autour de l'axe z (on prend l'axe z comme l'axe vertical), alors le frisbee va garder sa trajectoire tout en tournant [4][6]. Lorenz étudie cette dynamique de gyroscope (précession,nutation) pour les disques,boomerangs et ricochets (mon frère tan) [4].Pour modéliser l'écoulement du fluide autour du disque on peut d'appuyer sur les travaux de Nakamura et Fukamachi ce qui nous permet de nous éclairer sur l'origine de la portance du disque et du moment de tangage [6]
Maintenant on veut décrire quantitativement le vol du frisbee, on va s'aider des études de Hubbard et Hummel qui on construit un modèle à six degrés de liberté dans lequel les forces et moments aérodynamique sont exprimés par des coefficient dépendant de l'angle d'attaque [2]. De plus Hummel détaille les équations du mouvement, estime les coefficients à partir de données expérimentales et étudie la biomécanique du lancer [1].Par la suite Hummel et Hubbard identifient ensuite ces coefficients à partir de données de vol réelles [3].Ces travaux montrent qu'un système d'équations différentielles intégré numériquement peut reproduire des trajectoires réelles, mais que le résultat dépend fortement des coefficients et des conditions initiales.
Pour le côté expérimental, Lorenz équipe un frisbee de capteurs pour mesurer son attitude comme la rotation en vol [5], une étude plus récente exploite un gyroscope MEMS triaxial embarqué [7].Ces approches donnent accès directement information de la rotation, mais exigent un matériel spécifique,

une alternative accessible (ex : téléphone) est la vidéo à haute fréquence avec pointage de la trajectoire.
Les enjeux principaux sont alors le spin pour la stabilité, l'identification des coefficients aérodynamiques, la validation d'un modèle par des mesures, enfin le choix des paramètres de lancer.

Problématique retenue

Comment la rotation stabilise-t-elle un frisbee, et comment optimiser, par une simulation numérique validée expérimentalement, les paramètres de lancer (vitesse, spin, angle d'attaque) pour maximiser la portée à énergie de lancer donnée ?

Objectifs du TIPE du candidat

- d'établir, par le théorème du moment cinétique, le rôle stabilisant du spin (précession) ;
- de construire un modèle à trois degrés de liberté (pesanteur, portance, traînée, orientation fixée) et de l'intégrer par Runge-Kutta d'ordre 4 sous Python ;
- de filmer des lancers en gymnase, avec et sans spin, d'en extraire les trajectoires et de les confronter au modèle (écart quadratique moyen) ;
- d'exploiter le modèle validé pour déterminer les paramètres de lancer maximisant la portée.

Abstract

In this work, I study the flight of a flying disc. A first question is why a spinning disc stays stable while a non-spinning one flips over, which is answered by gyroscopic precession under the aerodynamic pitching moment. I then build a three-degree-of-freedom model with lift and drag, integrated with a fourth-order Runge-Kutta scheme. The simulated trajectories are compared with high-speed video recordings of indoor throws. Last but not least, the validated model is used to find the launch parameters that maximize the range for a given launch energy.

Références bibliographiques

[1] S. HUMMEL : Frisbee Flight Simulation and Throw Biomechanics : 2003, M.Sc. thesis, University of California, Davis. https://research.engineering.ucdavis.edu/biosport/?p=87

[2] M. HUBBARD, S. HUMMEL : Simulation of Frisbee flight : 2000, 5th Conference on Mathematics and Computers in Sport, Sydney, 124-134

[3] S. HUMMEL, M. HUBBARD : Identification of Frisbee Aerodynamic Coefficients Using Flight Data : 2002, International Conference on the Engineering of Sport, Kyoto

[4] R. D. LORENZ : Spinning Flight: Dynamics of Frisbees, Boomerangs, Samaras and Skipping Stones : 2006, Springer

[5] R. D. LORENZ : Flight and attitude dynamics measurements of an instrumented Frisbee : 2005, Measurement Science and Technology 16, 738-748

[6] Y. NAKAMURA, N. FUKAMACHI : Visualization of the Flow Past a Frisbee : 1991, Fluid Dynamics Research 7, 31-35

[7] (auteurs à compléter) : Measurement of Flight Dynamics of a Frisbee Using a Triaxial MEMS Gyroscope : 2020, Proceedings 49(1), 66. https://www.mdpi.com/2504-3900/49/1/66/htm

DOT

[1] *Compréhension du rôle stabilisant du spin : moment de tangage, précession et théorème du moment cinétique*

[2] *Établissement du modèle à trois degrés de liberté (pesanteur, portance, traînée) et choix des coefficients aérodynamiques d'après [1] et [2]*

[3] *Implémentation Python de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, comparaison avec la méthode d'Euler et étude de la convergence*

[4] *Mise en place du protocole : lancers en gymnase, vidéo à haute fréquence, étalonnage et mesure du spin*

[5] *Pointage des trajectoires, superposition avec la simulation, calcul de l'écart quadratique moyen, comparaison des lancers avec et sans spin*

[6] *Analyse des écarts, incertitudes de mesure et recalage des coefficients*

[7] *Optimisation : balayage des paramètres de lancer pour maximiser la portée, conclusion et ouverture vers un modèle à six degrés de liberté*