

Titre : Méthode multipolaire rapide appliquée au contact pneumatique/chaussée

Mots clés : Méthode multipolaire rapide, Mécanique du contact, Contact sans frottement, Contact pneumatique/chaussée, Surfaces fractales, Surfaces routières, Bruit de roulement

Résumé : Les problèmes de contact impliquant des surfaces rugueuses sont au cœur de nombreux systèmes d'ingénierie, notamment l'interaction pneu/chaussée et la prédiction du bruit. Toutefois, résoudre des interactions de contact avec une haute résolution spatiale reste très coûteuse en termes de calcul. Cette thèse explore l'application de la Méthode Multipolaire Rapide (FMM), incluant les variantes à un seul niveau, à plusieurs niveaux et adaptative, pour résoudre efficacement des problèmes de contact à grande échelle régis par la formulation de Boussinesq, c'est-à-dire un contact sans frottement à la surface d'un demi-espace élastique. La Méthode Multipolaire Rapide à un seul niveau est d'abord comparée à la méthode classique d'inversion de matrice sur différentes géométries de surface, montrant une précision équivalente avec un temps de calcul réduit. Ensuite, la Méthode Multipolaire Rapide Multi-Niveau intègre une décomposition hiérarchique du domaine, des translations Moment-à-Moment et Local-à-Local, et exploite les structures Toeplitz et Kronecker de la matrice d'influence du contact pour accélérer davantage les calculs. Une FMM adaptative est également développée, raffinant sélectivement les régions de forte densité de contact selon des critères de seuil, ce qui améliore l'efficacité dans des scénarios réalistes de contact pneumatique/chaussée.

La validation sur des surfaces fractales et routières montre une forte concordance entre les résultats de la FMM et ceux de la méthode classique d'inversion de matrice en termes de pression de contact, de surface de contact et de champs de déplacement. Il est démontré que la résolution spatiale influence la raideur de contact et le comportement de convergence, une grille plus fine améliorant la fidélité des prédictions. Dans les études de cas pneu/chaussée, la performance et la précision sont également affectées par la texture de la surface et la discrétisation. En conditions statiques, les méthodes FMM adaptative et multi-niveau surpassent les approches traditionnelles sur des surfaces complexes en permettant un raffinement dynamique et une réutilisation parallèle des solutions. Une analyse dans le domaine fréquentiel révèle que la rugosité influence également le comportement de contact en conditions de roulement, à la fois en amplitude et via des variations du contenu spectral dépendantes de la vitesse. En conclusion, la Méthode Multipolaire Rapide s'impose comme une approche évolutive, précise et efficace pour modéliser les problèmes de contact avec surface rugueuse, avec un fort potentiel pour les applications liées au bruit de roulement pneu/chaussée où performance et précision sont essentielles.

Title : Fast Multipole Method for Tyre/Road Contact

Keywords : Fast Multipole Method, Contact Mechanics, Frictionless contact, Tyre/road contact, Fractal surfaces, Road surfaces, Tyre/road noise

Abstract : Contact problems involving rough surfaces are central to many engineering systems, including tyre/road interaction and noise prediction. However, resolving contact interaction at high spatial resolution remains computationally demanding. This thesis investigates the application of the Fast Multipole Method (FMM), including Single Level, Multi Level, and adaptive FMM, to efficiently solve large-scale contact problem governed by Boussinesq's formulation, i.e. frictionless contact at the surface of an elastic half-space. The Single Level Fast Multipole Method (SLFMM) is first benchmarked against the classical Matrix Inversion Method (MIM) across various surface geometries, demonstrating similar accuracy with reduced computation time. Then, the Multi Level Fast Multipole Method (MLFMM) incorporates hierarchical domain decomposition, Moment to Moment-Translation and Local to Local-Translation, and exploits Toeplitz and Kronecker structures of the contact influence matrix to further accelerate computations. An adaptive FMM is also developed, selectively refining regions of high contact density based on

threshold criteria, thereby improving efficiency in realistic tyre/road contact scenarios. Validation on fractal and road surfaces shows strong agreement between FMM and MIM in contact pressure, contact area, and displacement fields. Spatial resolution is shown to affect contact stiffness and convergence behavior, with finer grid enhancing prediction fidelity. In tyre/road case studies, performance and accuracy are also influenced by surface texture and discretization. In static conditions adaptive and Multi Level FMM outperform traditional methods on complex surfaces by enabling dynamic refinement and parallel solution reuse. Frequency-domain analysis reveals that roughness also affects contact behavior in rolling conditions in amplitude but also with speed-dependent variations in spectral content. In conclusion, the Fast Multipole Method emerges as a scalable, accurate, and computationally efficient approach for modeling rough contact problems, with strong potential for tyre/road noise applications where both performance and precision are essential.