

УДК 62-97/98

Исследование условий проскальзывания колес в зависимости от упругих свойств подвески

Ма Тэнфэй^(*)

878752838@qq.com

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Исследование посвящено моделированию кинематики и динамики движения лунохода на ровных и наклонных поверхностях. В качестве основы модели использованы уравнения квазистатического равновесия для взаимодействия колес с опорной поверхностью. Основное внимание уделено влиянию матрицы жесткости A на устойчивость движения и условия проскальзывания колес. Эксперименты показали, что правильная настройка параметров модели повышает проходимость и сцепление лунохода на сложных рельефах.

Ключевые слова: луноход, моделирование движения, проскальзывание колес, матрица жесткости, квазистатическое равновесие

Введение. С ростом потребности в исследовании Луны разработка луноходов, способных эффективно двигаться по сложным рельефам, приобретает ключевое значение. Моделирование кинематики и динамики движения позволяет анализировать поведение системы и оптимизировать управление для предотвращения проскальзывания колес. Настоящее исследование направлено на построение модели, оценивающей способность лунохода преодолевать препятствия, используя параметры матрицы жесткости A , влияющей на сцепление колес с поверхностью.

Материалы и методы; результаты. Для анализа условий проскальзывания колес лунохода была построена система уравнений 0, описывающая взаимодействие колес с поверхностью:

$$\sum N_i + P = 0; \quad (1)$$

$$\sum R_i \times N_i = 0; \quad (2)$$

$$N_i = A_i \Delta_i; \quad (3)$$

$$\delta + \alpha \times R_i + R_c + R_i + \Delta_i = surf_i. \quad (4)$$

Здесь P — сила тяжести; R_c — радиус-вектор центра корпуса в абсолютной системе координат; R_i — радиус-вектор, проведенный из центра корпуса в точку контакта колеса с поверхностью; A_i — тензоры упругости колеса; Δ_i — упругие смещения колес; $surf_i$ — координаты точки контакта в абсолютной системе координат; δ — вектор упругого смещения центра масс; α — угол поворота корпуса, вызванный деформацией колес. Δ_i , δ и α пренебрежимо малы по сравнению с размерами ровера.

Система уравнений содержит 19 линейных уравнений с 19 неизвестными. Для численного решения использовалась библиотека SciPy 0.

Матрица жесткости A задавала упругость системы в направлениях X и Z . Были исследованы следующие варианты:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; A_2 = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}; A_3 = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}.$$

Численные эксперименты проводились на двух типах поверхности: ровной и наклонной 45° . Основным критерий оценки состояния являлось определение проскальзывания, происходящего, если касательная сила $N_{//}$ превышала максимальную силу трения $k \cdot N_{\perp 0}$.

На ровной поверхности проскальзывание не наблюдалось для всех значений матрицы A . На наклонной поверхности (45°):

- при A_4 все колеса испытывали проскальзывание из-за недостаточной жесткости;

- при A_1 повышенная жесткость не устраняла проскальзывание, поскольку усилия распределялись неравномерно;

- при A_2 и A_3 проскальзывание ограничивалось только одним колесом, что повышало устойчивость системы.

Результаты демонстрируют, что выбор параметров матрицы жесткости существенно влияет на способность лунохода преодолевать наклонные поверхности.

Заключение. Исследование подтвердило, что оптимальная настройка матрицы жесткости A минимизирует проскальзывание и обеспечивает устойчивое движение лунохода на сложных рельефах. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов управления луноходом в условиях Луны.

Список источников

- [1] Minaker D. The tangent stiffness matrix in rigid multibody vehicle dynamics. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 288–310.
- [2] Gerstmayr J., Ambrósio C.A. Component mode synthesis with constant mass and stiffness matrices applied to flexible multibody systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, vol. 73, no. 11, pp. 1518–1546.
- [3] Angeles J. On the Nature of the Cartesian Stiffness Matrix. *Ingeniería mecánica, tecnología y Desarrollo*, 2010, September.