

**Введение.** Робот Solo12 это шагающий четырехногий робот с 12-ю степенями свободы [1]. В настоящее время существует множество методов управления четырехногими роботами. Например, для управления роботом Cheetah 3 используется Convex Model-Predictive Control (сMPC), благодаря которому робот способен уверенно передвигаться с различными скоростями [2]. Существует другая ветка развития контроллеров (более перспективная, но и более «дорогая») — это Policy-regularized model predictive control (PR-MPC). Он схож с сMPC, но в нём положения ног оптимизируются, что приводит к большей робастности, а благодаря эвристикам (простая модель, взятая из наблюдений за реальными животными) задача нелинейного MPC решается значительно быстрее, меньше локальных минимумов, а поведение робота ближе к реальной собаке, однако без эвристик метод работает неадекватно [4].

Существует двухуровневый метод управления variable Horizon Model Predictive Control (VH-MPC) для локомоции. В его структуре более высокий уровень вычисляет место приземления стопы и время (длину горизонта) движения стопы для стабилизации, используя обратную связь от положений центров масс. Нижний уровень учитывает динамику при движении стопы и генерирует динамически согласованные траектории движения стопы для приземления в нужное время как можно ближе к желаемому месту. Для этого используется упрощенная модель динамики робота, которая учитывает ограничения на крутящий момент в суставах, а также ограничения на конусы трения опорных ног [5]. Корректировка времени шага может повысить устойчивость походки шагающих роботов, однако такой адаптацией времени шага часто пренебрегают, поскольку это приводит к невыпуклым проблемам при оптимизации на несколько шагов. Однако нет необходимости оптимизировать ходьбу на нескольких шагов вперед, чтобы обеспечить устойчивость походки: достаточно просто правильно выбрать время и место следующего шага. Была предложена стратегия адаптации движения стопы и объединение генератора моделей ходьбы с контроллером обратной динамики, который неявно управляет центром масс и центром давления стопы. Предложенный подход прост в вычислительном отношении по сравнению с стандартными подходами в литературе и одновременно гарантирует устойчивое движение. Это особенно полезно для шагающих роботов с ограничениями по контролю центра давления стопы, а также при внешних толчках и проскальзываниях стопы [6].

Также был предложен метод ускорения процесса вычислений, например, на уровне оценки состояния и контроллера всего тела, такой как Reactive Walking Controller (RWC), продемонстрированный на Solo12 [7].

Было проведено сравнение различных контроллеров (MPC), которые варьируются от упрощенной линеаризованной модели с точками контакта, фиксируемыми с помощью эвристики, до нелинейной модели, которая дополнительно оптимизирует расположение точек контакта. Интересно то, что экспериментальные результаты показали, что все MPC приводят к довольно схожим результатам и, как следствие, не подтверждают утверждение о том, что нелинейный MPC, оптимизирующий как траекторию центра масс, так и расположение ног, превосходит линеаризованную модель по качеству управления [8].

**Основная часть.** В сMPC благодаря простой линейной модели формулируется задача выпуклой оптимизации, которая имеет лишь один минимум (в отличие от PR-MPC), поэтому быстро вычисляется, но отсутствие возможности справляться с динамической локомоцией, такой как контроль тела во время коротких периодов стойки, фаз полета и высокоскоростных взмахов ног робота, является недостатком этого контроллера. Для избавления от этих недостатков MPC вводится контроллер WBIC, который является комбинацией whole-body

control (WBC) и model predictive control (MPC). MPC считает силы реакции опоры для каждой ноги, а WBIC их изменяет для большей устойчивости [3].

Для улучшения поведения робота при внешних толчках и проскальзываниях стопы вводится многоуровневая оптимизация выбора местоположение шага и время его выполнения [5-6], а для ускорения процесса вычислений используется подход Reactive Walking Controller (RWC) [7].

В методах управления четырехногими роботами, рассмотренных выше, массы и инерции ног пренебрежимо малы по сравнению с массой туловища, поэтому их динамикой часто пренебрегают, т.е. робот моделируется как единое твердое тело, подверженное воздействию сил в местах контакта. Так, например, для робота Cheetah 3 это упрощение является разумным: масса ног составляет примерно 10% от общей массы робота [2]. Однако такой подход для робота Solo12 неудовлетворителен, потому что у данного робота суммарная масса ног составляет 50% от общей массы робота, следовательно динамика ног робота также должна учитываться в модели динамики. В статьях об управлении Solo12 пишут о том, что им не удалось добиться стабильного поведения на реальном роботе возможно из-за чувствительности обратной динамики к несоответствиям между моделью и аппаратным обеспечением [8].

**Выводы.** Проведено моделирование робота Solo12, синтезирован и апробирован регулятор Reactive Walking Controller (RWC) для сценария движения: устойчивая ходьба.

Список использованных источников:

1. Основной сайт с документацией на робота Solo12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://github.com/open-dynamic-robot-initiative/open\\_robot\\_actuator\\_hardware/blob/master/mechanics/quadruped\\_robot\\_12dof\\_v1/README.md#quadruped-robot-12dof-v1](https://github.com/open-dynamic-robot-initiative/open_robot_actuator_hardware/blob/master/mechanics/quadruped_robot_12dof_v1/README.md#quadruped-robot-12dof-v1) (дата обращения: 27.01.2023)
2. Carlo, Jared & Wensing, Patrick & Katz, Benjamin & Bledt, Gerardo & Kim, Sangbae. (2018). Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control. 1-9. 10.1109/IROS.2018.8594448.
3. Kim, Donghyun & Carlo, Jared & Katz, Benjamin & Bledt, Gerardo & Kim, Sangbae. (2019). Highly Dynamic Quadruped Locomotion via Whole-Body Impulse Control and Model Predictive Control.
4. Bledt, Gerardo & Wensing, Patrick & Kim, Sangbae. (2017). Policy-regularized model predictive control to stabilize diverse quadrupedal gaits for the MIT cheetah. 4102-4109. 10.1109/IROS.2017.8206268.
5. Daneshmand, Elham & Khadiv, Majid & Grimminger, Felix & Righetti, Ludovic. (2021). Variable Horizon MPC with Swing Foot Dynamics for Bipedal Walking Control. IEEE Robotics and Automation Letters. PP. 1-1. 10.1109/LRA.2021.3061381.
6. Khadiv, Majid & Herzog, Alexander & Moosavian, S.A.A. & Righetti, Ludovic. (2020). Walking Control Based on Step Timing Adaptation. IEEE Transactions on Robotics. PP. 1-15. 10.1109/TRO.2020.2982584.
7. Léziart, P., Flayols, T., Grimminger, F., Mansard, N., & Souères, P. (2021). Implementation of a Reactive Walking Controller for the New Open-Hardware Quadruped Solo-12. 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 5007-5013.
8. Pierre-Alexandre Léziart, Thomas Corbères, Thomas Flayols, Steve Tonneau, Nicolas Mansard, et al.. Improved Control Scheme for the Solo Quadruped and Experimental Comparison of Model Predictive Controllers. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7 (4), pp.9945 - 9952.

Огурецкий Д.В. (автор)

Подпись

Колюбин С.А. (научный руководитель)

Подпись