

СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХОДЬБЫ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ

А. Сафонов, А. Телеш, А. Мельников, Ф. Палис

Университет им. Отто-фон-Герике

Университетская пл., 2, Магдебург, 39106, Германия. E-mail: frank.palis@ovgu.de

Процесс динамической ходьбы двуногого робота реализуется в два этапа: генерация траекторий динамически устойчивого движения робота на основе его математической модели в режиме оффлайн, обработка полученных траекторий ходьбы с использованием дополнительной системы стабилизации. Траектории движения робота генерируются на основе принципа ZMP. Согласно этому принципу, устойчивое состояние робота обеспечивается при условии расположения точки нулевого момента в пределах опорной плоскости стопы. В работе предлагается генерировать такие траектории, при которых движения робота относительно стоп являются свободными. Таким образом, во время ходьбы моменты в стопах не прикладываются, а точка нулевого момента располагается строго под суставом.

Ключевые слова: антропоморфный робот, динамическая ходьба, траектории движения, оптимизационный алгоритм, система стабилизации.

СИНТЕЗ ДИНАМІЧНОЇ ХОДИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ

А. Сафонов, А. Телеш, А. Мельников, Ф. Палис

Університет ім. Отто-фон-Геріке

Університетська пл., 2, Магдебург, 39106, Німеччина. E-mail: frank.palis@ovgu.de

Процес динамічної ходи двоногого робота реалізовано у два етапи: попередня генерація траєкторій динамічно стабільного руху робота на основі його математичної моделі, відпрацювання отриманих траєкторій з використанням додаткової системи підтримання рівноваги. Траєкторії руху робота генеруються на основі принципу ZMP. Згідно з цим принципом, стабільний стан робота забезпечується з умов розташування точки нульового моменту в межах опорної поверхні стопи. У роботі пропонується генерувати такі траєкторії, за якими рух робота відносно стоп є вільним. Таким чином, під час ходи моменти в стопах не прикладені, а точка нульового моменту розташована під голенистою стопною сугавом.

Ключові слова: антропоморфний робот, динамічна хода, траєкторії руху, оптимізаційний алгоритм, система стабілізації.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Антропоморфные двуногие роботы являются сложными механическими системами с множеством взаимосвязанных активных и пассивных степеней свободы. Для построения таких систем используется большое количество приводов и различных сенсоров. Организация и оптимизация движения такой системы является весьма сложной задачей, связанной с построением сложной иерархической системы управления. Одной из важнейших задач в данной области исследований является построение системы управления, обеспечивающей стабильное движение робота и поддержание его в устойчивом состоянии в условиях воздействий со стороны окружающих факторов. Целью данной работы является разработка метода синтеза траекторий движения двуногого антропоморфного робота на основе принципа «ZMP» [1, 2].

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Механизм двуногого робота имеет большое количество степеней свободы, следовательно, задача нахождения траекторий движения суставов имеет множество решений. С целью упрощения этой задачи для движения некоторых суставов задаются зависимости в виде функций от движения других суставов, так называемые рефлексы. Они дают возможность уменьшить количество степеней свободы, тем самым облегчить задачу нахождения траекторий для механизма [3]. Походка робота, представленная в этой работе, имеет следующие черты:

– торс робота удерживается в вертикальном состоянии, таз при этом перпендикулярен опорной ноге, переносимая нога остается перпендикулярной тазу;

- моменты в опорной стопе не прикладываются;
- опорная нога имеет выпрямленное состояние.

В процессе ходьбы можно выделить три принципиально различных шага:

– *начальный* – шаг, во время которого робот из состояния покоя приходит в движение и в конце которого имеет такие состояния (скорости и положения всех суставов), которые являются начальными для следующего (установившегося) шага;

– *установившийся* – шаг, в котором состояния робота в конце шага равны состояниям в начале шага. При этом начальные состояния установившегося шага являются конечными состояниями робота в начальном шаге, а конечные состояния установившегося шага являются начальными для конечного шага;

– *конечный* – шаг, за время которого робот из состояний, приобретенных за время установившегося шага, приходит в состояние покоя.

Чтобы иметь возможность влиять на состояние механизма в конце шага, необходимо производить определенные воздействия на систему. Экспериментально определено, что такими воздействиями могут быть дополнительные движения переносимой ногой и движения корпусом. При этом эти движения

должны быть полностью совершены за время шага и иметь нулевые значения и нулевые значения своих производных в начале и конце шага (рис. 1). Дополнительные движения переносимой ногой позволяют влиять на скорость движения робота в сагиттальной плоскости, а движения корпусом применяются для влияния на скорость движения робота в конце шага во фронтальной плоскости.

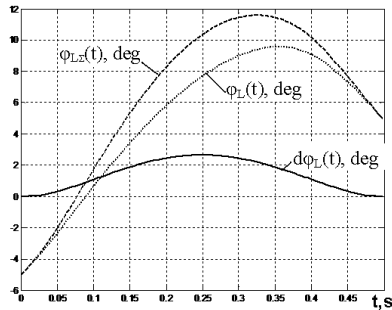


Рисунок 1 – Дополнительное движение переносимой ноги:

$\phi_L(t)$, $d\phi_L(t)$, $\phi_{L\Sigma}(t)$ – основное, дополнительное и суммарное движения переносимой ноги

Исходя из вышесказанного, можно определить, что для генерации траекторий имеются некоторые исходные данные, а именно: начальные скорости в суставах робота и их положения, имеются желаемые результаты (конечные состояния механизма) и существуют добавочные движения переносимой ногой и корпусом, которые являются входами воздействия на систему для достижения желаемых состояний робота.

Такая постановка задачи позволяет перейти непосредственно к процессу нахождения траекторий движения робота. Генерация траекторий осуществляется предварительно в режиме оффлайн на основе математической модели робота. В этой модели одна нога робота является опорной и имеет жесткую связь с поверхностью, вторая нога – переносимая. Алгоритм нахождения траекторий представляет собой оптимизационный алгоритм Эйлера. При этом производится оптимизация величин, управляющих воздействием (амплитуда дополнительных движений переносимой ногой и корпусом робота) для получения необходимых конечных состояний системы. Предложенный алгоритм представлен на рис. 2:

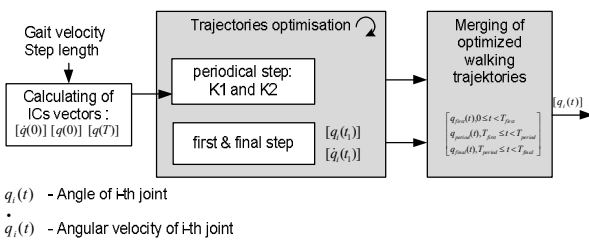


Рисунок 2 – Алгоритм получения траекторий движения

Траектории движения робота генерируются для каждого шага отдельно. Первыми генерируются траектории движения робота для установившегося шага, при котором движения суставов механизма во время текущего шага полностью повторяют движения во время предыдущего шага. В результате нахождения необходимых траекторий мы получаем не только искомые траектории, но и величины, которые являются исходными данными для генерации траекторий движения робота во время начального и конечного шагов, а именно, начальные скорости и положения суставов робота во фронтальной и сагиттальной плоскостях.

Таким образом, мы имеем траектории для движения робота, найденные в соответствии с принципом «ZMP». Данные траектории обеспечивают динамически устойчивую ходьбу робота с заданной длиной шага. Однако устойчивость такой ходьбы возможна лишь на идеальной поверхности и без наличия каких-либо возмущающих воздействий. Для того, чтобы обеспечить устойчивую ходьбу робота на неидеальных поверхностях и при наличии возмущающих воздействий со стороны окружающей среды, используется система контроля движения робота, построенная на принципах регулирования. Сигналами задания для этой системы контроля движения являются траектории изменения угла наклона таза робота во фронтальной и сагиттальной плоскостях относительно вектора гравитации, полученные при генерации траекторий движения. Сигналами обратной связи являются реальные величины этих углов, получаемые с инерциальных датчиков наклона [4] (рис. 3).

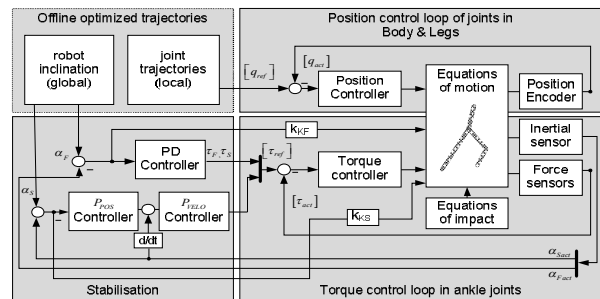


Рисунок 3 – Система поддержания равновесия робота

Система стабилизации воздействует на механизм через моменты в стопах и движения корпусом. Движения корпусом при этом определяют быстроедействие системы стабилизации. Управление моментами в стопах позволяет эффективно демпфировать колебания, возникающие при ударах с опорной поверхностью. Одновременное использование двух управляющих воздействий позволяет реализовать весьма быстроедействие регулирование механизма, избегая при этом значительной колебательности переходных процессов.

Структурная схема регулятора, используемого в системе поддержания равновесия, представлена на рис. 4.

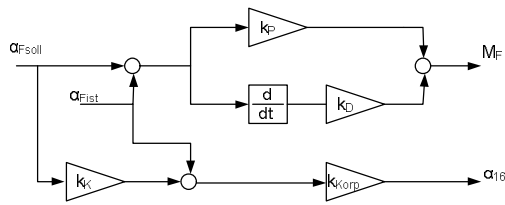


Рисунок 4 – Структурная схема регулятора

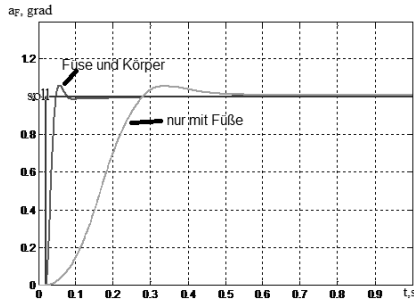


Рисунок 5 – Переходный процесс в системе поддержания равновесия

На рис. 5 показано сравнение работы системы с и без использования движений туловища в качестве управляющего воздействия.

Работу системы стабилизации можно оценить на основании графиков отработки роботом заданных траекторий изменения наклона таза во время ходьбы (рис. 6).

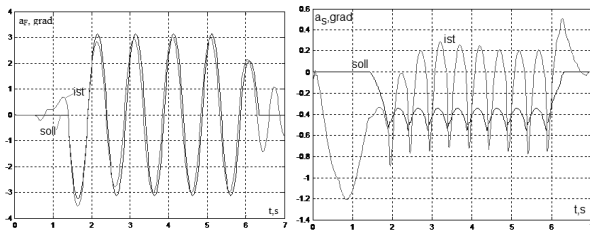


Рисунок 6 – Траектории изменения наклона таза

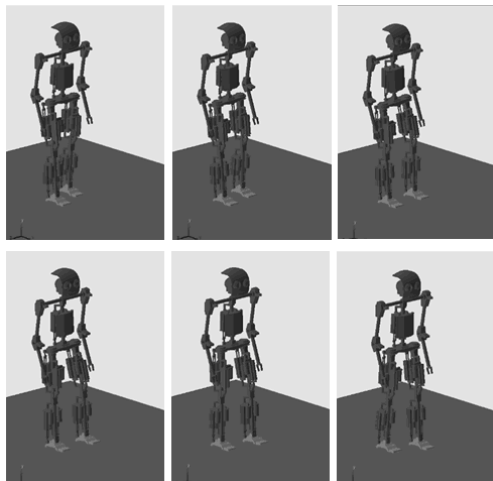


Рисунок 7 – Симуляция ходьбы робота

Симуляция работы системы стабилизации проводилась на модели робота с учетом контакта с поверхностью [5]. Скриншоты из визуализации симуляции ходьбы робота представлены на рис. 7.

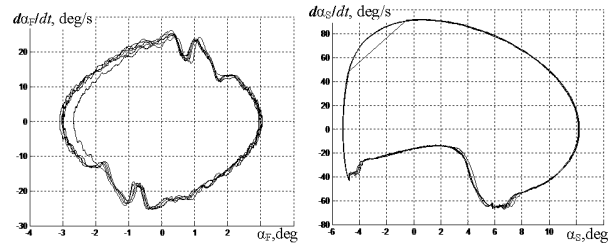


Рисунок 8 – Фазовые диаграммы системы

Кривые на рис. 8 демонстрируют стабильное поведение системы во время ходьбы. Различия в траекториях обусловлены при этом стохастическим характером процесса контакта с виртуальной поверхностью [5–8].

Используя предложенную концепцию, удалось реализовать динамическую ходьбу реального робота Ротто с длиной шага 5 см и длительностью шага ~0,49 с. Процесс ходьбы представлен на рис. 8.

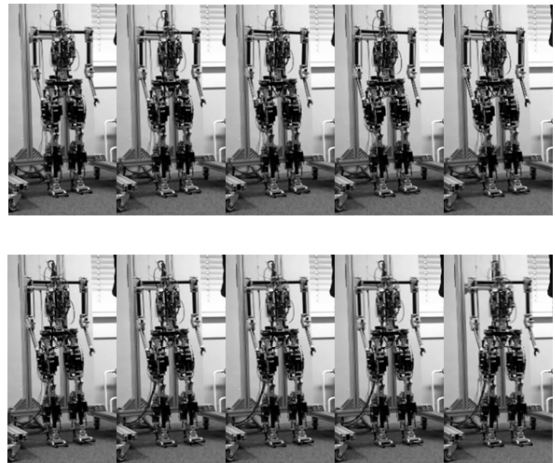


Рисунок 9 – Ходьба робота

Система стабилизации задает при этом в стопах робота моменты, ограниченные динамически на основании величины вертикальной составляющей реакции опоры, измеряемой датчиками силы, установленными в стопах робота. Моменты в стопах представлены на рис. 10.

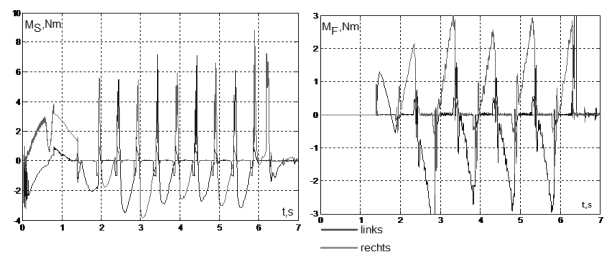


Рисунок 10 – Моменты в стопах робота

ВІСНОВКИ. Перевагою даного алгоритму генерації траєкторій руху двоногого робота є його відносна простота, зумовлена відсутністю необхідності розрахунку динаміки та кінематичних перетворень для механізму. Недоліком є жорсткість траєкторій, тобто відсутність можливості їх корекції з боку системи управління при русі робота.

В майбутньому передбачається удосконалити цю систему управління рухом робота шляхом впровадження зворотного зв'язку для корекції сгенерованих для ідеальної поверхні траєкторій руху з використанням принципу «ZMP». Це дозволить отримати більш гнучку систему контролю руху робота з точки зору адаптивності до умов навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вукобратович М. Шагаючі роботи та антропоморфні механізми. – М.: Мир, 1976. – 539 с.
2. Vukobratovic M., Borovac B. Zero-moment point-thirty five years of its life // *International Journal of Humanoid Robotics*. – 2004. – № 1. – PP. 157–173.

SYNTHESIS BIPED DYNAMIK WALKING BASED ON OFFLINE TRAJECTORY GENERATION

A. Safonov, A. Telesh, A. Melnykov, F. Palis

University of Magdeburg

pl. Universitetskaya, 2, 39106, Magdeburg, Germany. E-mail: frank.palis@ovgu.de

The aim of this paper consists in development of a method for motion trajectory synthesis of a biped anthropomorphic robot on the basis of ZMP-concept. In this paper the suggestion is made to implement the process of dynamic walking of the biped robot in two stages: trajectory generation of a dynamic stable motion of the robot on the basis of his mathematical model in offline-mode and tracking of the received walking trajectories with use of a supplementary stabilizing (control) system.

Key words: antropomorphic robot, dynamic walking, trajectory generation, optimisation algorithm, control system.

REFERENCES

1. Vukobratovic M. *Walking robots and anthropomorphic mechanisms*. – М.: Mir, 1976. – 539 p. [In Russian]
2. Vukobratovic M., Borovac B. Zero-moment point-thirty five years of its life // *International Journal of Humanoid Robotics*. – 2004. – № 1. – PP. 157–173.
3. Eric R. Westervelt, Jessy W. Grizzle, Christine Chevallereau and oth. *Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Lovomotion*. – CRC Press. – London–New York, 2009.
4. Zavgorodniy Y. *Konstruktion und Steuerung von Schreitrobotern mit ballistischem Laufverhalten*. – Ph. D. Thesis. – Magdeburg, 2009.
5. Contact processing in the simulation of CLAWAR. Juhasz, Konyev, Rusin, Schmucker // *Proceedings of 10th International Conference (CLAWAR 2007)*. – Singapore, 16–18 July 2007.
6. Formal'skij A.M. *Moving anthropomorphic mechanisms*. – М.: Nauka, 1982. – 368 p. [in Russian]
7. RobotsLab – Mode of access: www.uni-magdeburg.de/ieat/robotslab/
8. Melnykov A., Konyev M., Palis F.; Schmucker Ul. Linear elastic actuator of a biped robot "ROTTTO" // *Emerging trends in mobile robotics*. – Singapore [u.a.]: World Scientific, 2010. – Kongress: CLAWAR; 13 (Nagoya). – PP. 588–595.

Стаття надійшла 25.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Перекрестом А.І.