
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 004.942

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОНД-ГРАФА ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ

В. А. ДМИТРИЕВ*, М. Я. МАРУСИНА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
valentinswsu@mail.ru

Аннотация. Описана общая динамика многозвенных систем, реализующих „шагающий“ принцип передвижения, представлен подход к построению бонд-графа шагающего робота. Представленные механизмы смоделированы для оценки ряда специфических требований, таких как динамика, точность позиционирования и энергия, затрачиваемая для движения. Описан подход к смене одноузловых бонд-графов на бонд-графы в формате мультисвязей узловых векторов и, как следствие, упрощению визуализации формируемой модели. Рассмотрено построение бонд-графа в условиях недетерминированности внешних воздействий, которые имитируются случайным характером получаемой информации.

Ключевые слова: бонд-граф, динамика, анализ, энергия, шагающий робот, недетерминированная среда, сенсорная система

Ссылка для цитирования: Дмитриев В. А., Марусина М. Я. Особенности построения бонд-графа шагающих роботов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 2. С. 195—199. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199.

FEATURES OF CONSTRUCTING A BOND GRAPH OF WALKING ROBOTS

V. A. Dmitriev*, M. Ya. Marusina

ITMO University, St. Petersburg, Russia
valentinswsu@mail.ru

Abstract. The general dynamics of multi-link systems that implement the “walking” principle of movement are described, and an approach to constructing a bond graph model of a walking robot is developed. The presented mechanisms are modeled to evaluate a number of specific requirements, such as dynamics, positioning accuracy and energy expended for movement. An approach to changing single-node bond graphs to bond graphs in the format of multi-connections of nodal vectors and, as a consequence, simplifying the visualization of the generated model is described. The construction of a bond graph model under conditions of non-determinism of external influences, which are simulated by the random nature of the information received, is considered.

Keywords: bond graph, dynamics, analysis, energy, walking robot, non-deterministic environment, sensor system

For citation: Dmitriev V. A., Marusina M. Ya. Features of constructing a bond graph of walking robots. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 2. P. 195—199 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-2-195-199.

Функциональное динамическое моделирование шагающих механизмов системы позволяет прогнозировать энергоэффективность. В настоящей статье моделирование проведено посредством метода построения бонд-графов; шагающие роботы, в целях упрощения проводимых сравнений, рассмотрены как идеальные многодоменные системы без потерь на работу

© Дмитриев В. А., Марусина М. Я., 2024

систем стабилизации положения. Одной из возможностей моделирования методом построения бонд-графов является посекционное или поэлементное построение, позволяющее вносить изменения в выделенный участок без корректировок всей модели [1—5].

Новизна подхода, предлагаемого в настоящей статье, основывается на секционном моделировании, позволяющем конфигурировать формируемую модель и заменять отдельные части без внесения изменений в оставшиеся элементы, в сочетании с моделированием сенсорных систем с соответствующими шумами, потерями данных и случайными изменениями мощности передаваемого сигнала, что дает возможность предсказать поведение модели в условиях недетерминированности среды.

Для одноногого робота доступны только возможности прыжка. При формировании контактного взаимодействия „ноги“ шагающего робота с опорной поверхностью была использована известная модель прыгающего над землей мяча [6]. Робот подобной конструкции не имеет возможности реализовать квазистатическое движение или сохранять баланс в неподвижном положении. Для управления подобным роботом важно достичь баланс между постоянным и стабильным контролем траектории его движения и приспособлением к внешним возмущающим воздействиям. Наиболее подходящим решением в достижении данного баланса будет реализация стратегии управления импедансом.

Шагающие роботы имеют возможность контроля точки нулевого момента ZMP (Zero Moment Point) [7] посредством системы управления алгоритмом движения. Если робот находится в равновесии, то его ZMP должна находиться внутри области опоры, т.е. внутри контура, образованного точками контакта робота с поверхностью.

В формировании бонд-графа использован подход последовательной детализации системы. По аналогии с представлением переноса центра масс шагающего робота в формате перевернутого маятника, модель которого детализировалась в процессе расчетов от одиночного до двойного перевернутого маятника, принципиальная схема „ноги“ шагающего робота может быть детализирована пошагово с целью постепенного формирования бонд-графа.

Метод построения бонд-графа уже на данном этапе может быть оптимизирован. Представление равными одиночными связями скалярных переменных неоптимально, сложно в построении и ограничивает векторные исчисления. Для более рационального построения корректно использование мультисвязей [8] узловых векторов. Формат подобной замены представления обобщенных связей отражен на рис. 1 (*a* — мультисвязь векторного отображения скалярных переменных; *b* — соответствующие одиночные связи).

$$\begin{array}{c} \underline{e}(t) \\ \underline{f}(t) \end{array} \begin{array}{c} \rightrightarrows \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \begin{array}{c} a) \\ \frac{e^a(t)}{f^a(t)} \\ \frac{e^b(t)}{f^b(t)} \\ \frac{e^c(t)}{f^c(t)} \end{array} \begin{array}{c} \rightrightarrows \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \begin{array}{c} b) \\ \frac{e^x(t)}{f^x(t)} \\ \frac{e^y(t)}{f^y(t)} \\ \frac{e^z(t)}{f^z(t)} \end{array}$$

Рис. 1

В подобном формате многомерного бонд-графа усилие $e(t)$ и поток $f(t)$ также являются обобщенными переменными, но записываются в векторном представлении $\mathbf{e}(t)$ и $\mathbf{f}(t)$, а мощность определяется следующим выражением:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{e}^T(t) \mathbf{f}(t),$$

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e^a(t) \\ e^b(t) \\ e^c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^x(t) \\ e^y(t) \\ e^z(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f^a(t) \\ f^b(t) \\ f^c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^x(t) \\ f^y(t) \\ f^z(t) \end{bmatrix}.$$

С учетом представленных преобразований в векторное представление многодоменного бонд-графа и сформированного подхода к последовательному построению модели возможно секционное формирование оптимальной схемы. Пример на основе сегментов абстрактной „ноги“ робота показан на рис. 2 (при построении пренебрегается трением во всех кинематических парах).

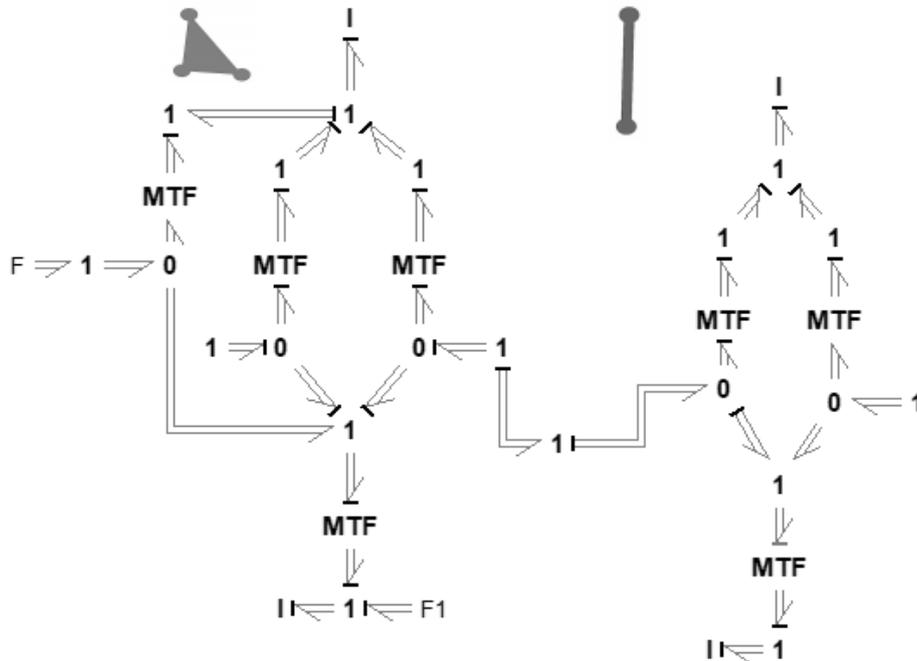


Рис. 2

При построении бонд-графа система рассматривается как единый динамический блок, состоящий из инерциального элемента (I), диссипативного элемента (R) и емкостного элемента (C). Входные данные внешних для системы источников выражаются как элементы источника усилия (Se) и источника потока (Sf). Для многопортовых элементов применяются блоки трансформатора (TF), связывающего величины одного и того же типа с входом и выходом, а именно это преобразует поток в поток и усилие в усилие, и гиратора (GY), связывающего поток с одной стороны с усилием — с другой. Система ограничений и связей представляется в виде 0 и 1, где узел типа 0 показывает общее усилие и только одну входящую причинную связь, а узел типа 1 — напротив, общий поток и одну выходящую причинную связь. При отображении многодоменных систем элементы отображаются как Mx, где x — обозначение скалярного представления элемента: например, MSe — источник усилий. В правой части рис. 2 представлен бонд-граф одиночного тела, в рамках которого поток направлен только через точки соединения, так как центр масс лежит на оси между ними, в отличие от тела в левой части рис. 2, в бонд-графе которого требуется дополнительное соединение, так как центр масс смещен относительно осей точек крепления тела. Такая модель отражает конструктивные особенности робота, но не передает информацию о среде применения.

При формировании базовой пакетной связи, которая наиболее распространена для роботизированных систем и покрывает вопросы передачи как информации о состоянии объектов, так и управляющего сигнала, возникает ряд эффектов: затухание, искажение, потеря пакетных данных и изменение времени прохождения сигнала в обоих направлениях. Для корректного моделирования функционирования системы в условиях недетерминированной среды необходимо данные выше эффекты использовать при построении бонд-графа.

На рис. 3 проиллюстрировано моделирование канала связи для сенсорной системы (PTX — мощность передаваемого сигнала, RSS — уровень передаваемого сигнала, NL — уровень шума, DPL — потеря пакетов данных, RTT — время прохождения сигнала, включая

задержку). Бонд-граф реализован таким образом, что сохраняется возможность включения и исключения параметров без необходимости реконфигурирования всей модели.

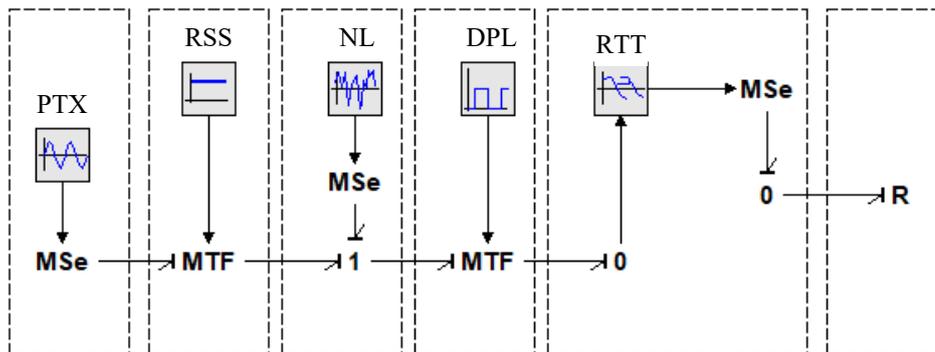


Рис. 3

Все представленные связи активируются посредством усилия, а значение потока равно нулю. Это необходимо для того, чтобы в модели информационной системы не было обмена энергией.

Представленные возможности графического моделирования методом бонд-графа в сочетании со сформированными подходами к построению модели дают возможности поэтапного моделирования конструкции робототехнической системы в оптимальном формате с применением векторного представления многопоточного бонд-графа и возможности корректного моделирования каналов сенсорной и управляющей связи с учетом потерь пакетов данных, зашумления сигнала, изменения его уровня и мощности. Совокупность данных параметров позволяет моделировать условия недетерминированности внешней среды и учитывать их при построении бонд-графа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krishnan V. L., Pathak P. M., Jain S. C., & Samantaray A. K. Reconfiguration of four-legged walking robot for actuator faults // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt I. Journal of Systems and Control Engineering. 2011. P. 11—26.
2. Zhou X. and Cui Y. Dynamic characteristics of single-loop gear system based on bond graph method // J. of Vibroengineering. 2022. Vol. 24, N 3. P. 604—614.
3. Gonzalez-Avalos G., Gallegos N. B., Ayala-Jaimes G., Garcia A. P., Ferreyra Garcia L. F., Rodríguez A. J. P. Modeling and Simulation of Physical Systems Formed by Bond Graphs and Multibond Graphs // Symmetry in Graph Algorithms and Graph Theory III. 2023. Vol. 15, N 12. P. 2170.
4. Bayart M., Bouamama B. O., & Conrard B. FDI of Smart Actuators Using Bond Graphs and External Models // IFAC Proceedings. 2002. Vol. 35, N 1. P. 391—396.
5. Shojaei Barjuei E., Caldwell D. G., & Ortiz J. Bond Graph Modeling and Kalman Filter Observer Design for an Industrial Back-Support Exoskeleton // Designs. 2020. Vol. 4, N 4. P. 53.
6. Дмитриев В. А. Элементы моделирования контактного взаимодействия средствами программного пакета 20Sim // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. 2022. С. 83—86.
7. Napoleon, Nakaura S., & Sampei M. Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and System. 2002. P. 2437—2442.
8. Balaño J. L. Bond Graph Modeling of Incompressible Thermofluid Flows // 18th Intern. Congr. of Mechanical Engineering. Ouro Preto, 6—11 November, 2005.

Сведения об авторах

Валентин Алексеевич Дмитриев

— аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: valentinswsu@mail.ru

Мария Яковлевна Марусина

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: myamarusina@itmo.ru

Поступила в редакцию 30.10.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 17.12.2023.

REFERENCES

1. Krishnan V.L., Pathak P.M., Jain S.C., & Samantaray A.K. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, pp. 11–26.
2. Zhou X. and Cui Y. *Journal of Vibroengineering*, 2022, no. 3(24), pp. 604–614.
3. Gonzalez-Avalos G., Gallegos N.B., Ayala-Jaimes G., Garcia A.P., Ferreyra García L.F., Rodríguez A.J.P. *Symmetry in Graph Algorithms and Graph Theory III*, 2023, no. 12(15), pp. 2170.
4. Bayart M., Bouamama B.O., & Conrard B. *IFAC Proceedings*, 2002, no. 1(35), pp. 391–396.
5. Shojaei Barjuei E., Caldwell D.G., & Ortiz J. *Designs*, 2020, no. 4(4), pp. 53.
6. Dmitriyev V.A. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii, avtomatizatsii i mekhatronike* (Information Technologies in Control, Automation and Mechatronics), Collection of Scientific Papers of the 4th International Scientific and Technical Conference, 2022, pp. 83–86. (in Russ.)
7. Napoleon Nakaura S., & Sampei M. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, 2002, pp. 2437–2442.
8. Baliño J.L. *18th International Congress of Mechanical Engineering*, 2005, Ouro Preto, November, 6–11, 2005.

Data on authors

Valentin A. Dmitriev

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: valentinswsu@mail.ru

Maria Ya. Marusina

— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: myamarusina@itmo.ru

Received 30.10.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 17.12.2023.