

Разработка алгоритма интегрального контроля динамического баланса антропоморфного робота

Ф.Б. Тебуева

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: fariza.teb@gmail.com

М.Г. Огур

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: ogur26@gmail.com

Е.А. Некрасова

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: ne-myza@yandex.ru

Е.Н. Ласкина

Институт информационных технологий и телекоммуникаций
Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Россия
e-mail: koteika.katun@mail.ru

Аннотация¹

В данной статье представлен алгоритм интегрального контроля динамического баланса, позволяющий антропоморфному роботу восстанавливать равновесие после обширных нарушений баланса и поддерживать вертикальную осанку. Баланс достигается при помощи метода интегрального управления, дифференцирующего динамику и передающего плавные сигналы крутящего момента. В алгоритме интегрального контроля применены принципы баланса человека, в работе сравниваются данные захвата человеческого движения и данные таблиц крутящих моментов с имитационной моделью. Предложен контроллер отслеживания модели, позволяющий управлять сложными робототехническими системами.

1. Введение

Исследователи антропоморфных роботов часто описывают баланс и движение с использованием простых моделей. Ранние работы по балансу и стабильности динамических двуногих роботов была проведена Вукобратовичем и др. и др. [2], затем Golliday, et. и др. [3] и Nematı, et. и др. [4]. В этих исследованиях двуногий робот обычно представлял собой плоский двойной перевернутый маятник с

основанием, представляющим стопорную ногу и голеностопный сустав.

Центр давления (CoP) используется в качестве меры устойчивости антропоморфного робота. Он представляет собой местоположение эквивалентной силы, равной интегралу распределения давления под ногой, что является мерой тенденции к тому, чтобы ноги перемещались и отрывались от земли. Использование наземных опорных точек, таких как CoP, присутствует почти в каждом антропоморфном проекте. Хотя определение и полезность CoP было поставлено под сомнение авторами [5] [6], оно по-прежнему является доминирующей мерой стабильности, используемой многими роботами, включая весьма успешную Honda Asimo [7].

Ограничения, накладываемые на голеностопный сустав, заставляют антропоморфного робота вести себя как акробата [8], который состоит из серии перевернутых маятников со всеми, кроме базового сустава. По определению, CoP акробата всегда закрепляется ниже базового сустава, но он все равно может сбалансировать себя. У антропоморфных роботов местоположение CoP примерно пропорционально величине крутящего момента на лодыжке. Если крутящий момент на лодыжке всегда задан равным нулю, тогда CoP также остается на нуле, а антропоморфный робот становится нестабильным.

Исследователи биомеханики разделили контроль баланса человека на стратегию бедер и стратегию лодыжки [9]. Для стратегии голеностопного сустава все суставы, за исключением лодыжек, фиксируются, а баланс достигается движением только лодыжек. В какой-то момент это становится слишком

Труды Шестой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

затруднительным для лодыжек, и используется стратегия бедра. Это характеризуется большой дефляцией на бедре и быстрой центровкой центра масс над лодыжкой. Смещение центра масс манипулирует моментом, созданным гравитационной силой, позволяя человеку балансировать так же, как акробат.

Контроль предварительного просмотра [10], аналогичный прогностическому контролю модели [11] и ограниченному оптимальному управлению [12], постепенно изменяет входы, моделируя систему вперед, чтобы предотвратить нарушения ограничений. Такой инкрементный контроль необходим, потому что CoP налагает ограничения на совместные крутящие моменты, а именно на бактерии, а также на то, что происходит на поверхности земли. Интегральное управление ранее использовалось для контроля баланса антропоморфного робота [13], чтобы отделить динамику центра давления и центра масс.

Идея использования интуитивно понятных контроллеров для более простых моделей сложных роботов привела к разработке средств управления рабочим пространством [14] и элементов управления виртуальной моделью [15]. Оба используют принцип виртуальной работы и якобиан для выполнения действий в пространстве задач. При управлении оперативным пространством контроллеры создаются для отслеживания траекторий рабочих точек и управления виртуальной моделью, совместные крутящие моменты создают виртуальные силы в произвольных точках тела. Хатиб и др. применяли приоритетные оперативные космические средства управления антропоморфными роботами [16], чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к производителю, находящемуся в правильной позе. Вначале диспетчер был задействован для движений рук или одиночных опорных задач, но позднее был организован в общую структуру, которая включала необходимые контактные ограничения для контроля антропоморфных роботов [17].

2. Управление балансом

Баланс антропоморфного робота может быть частично описан центром давления или CoP. Эта точка должна быть вдалеке от краев стопы, или нога начнет вращаться. Традиционное управление, такое как линейные квадратичные регуляторы и ПИД-регуляторы, не учитывает это ограничение, за исключением ограничения команд крутящего момента. При наличии большой внешней силы возмущения, эти линейные контроллеры будут командовать большим крутящим моментом, чем робот может доставить, удерживая ногу на земле. По этой причине мы выводим контроллер, который учитывает эти ограничения, гарантируя, что робот остается сбалансированным и вертикальным, при этом его ноги будут лежать на земле.

Целью исследования, описанного в данной статье, является алгоритм интегрального контроля динамического баланса, позволяющий антропоморфному роботу восстанавливать равновесие после обширных нарушений баланса и поддерживать вертикальную осанку.

Задачами, описанными в статье являются достижение баланса при помощи метода интегрального управления, дифференцирующего динамику и передающего плавные сигналы крутящего момента. Второй задачей является применение в алгоритме интегрального контроля принципов баланса человека, в работе сравниваются данные захвата человеческого движения и данные таблиц крутящих моментов с имитационной моделью. Третьей задачей является описание контроллера отслеживания модели, позволяющего управлять сложными робототехническими системами [18].

Контроллер баланса описан ниже для полностью приводимых в действие, безусловных планарных динамических систем с уравнениями движения, в форме:

$$M(\theta)\ddot{\theta} = \tau - N(\theta, \dot{\theta}), \quad (1)$$

где θ – вектор совместных углов, M – матрица инерции, τ – совместные крутящие моменты, а N – вектор, содержащий гравитационные, центробежные и кориолисовы силы.

Предлагается использовать плоские инвертированные маятниковые модели, как показано на рисунке 2, чтобы представить контроллер. Несмотря на то, что в заданной модели нет явно выделенной ноги, предполагается, что она постоянно находится на земле, не создавая никакой кинетической или потенциальной энергии. Определение центра давления по-прежнему применяется до тех пор, пока оно остается в пределах области, на которую будет покрываться нога.

Изначально игнорируется присутствие стопы, которая налагает ограничения на местоположение CoP и, следовательно, ограничивает крутящий момент лодыжки. Используется двухкомпонентный контроллер баланса, основанный на стратегиях движения тазобедренного сустава и лодыжки [19]. Первый контроллер представляет собой простой полнолинейный линейный квадратичный регулятор (LQR). Указанный оптимальный контроллер найден путем линеаризации динамики по вертикали и может быть записан как

$$\tau_{LQR} = -K_{LQR} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Данный контроллер всегда применяет восстановительные моменты для приведения углов соединения к нулю. Это заставляет робота в целом вести себя как жесткий перевернутый маятник, аналогичный стратегии лодыжки. Однако по мере того, как отклонение на лодыжке становится больше,

центр массы движется наружу, создавая большой момент из-за силы тяжести, чтобы крутящий момент лодыжки был сбалансирован. По этой причине мы добавляем еще один контроллер для регулирования горизонтального положения центра масс над лодыжкой, чтобы свести к минимуму этот момент, так же как и тазобедренную стратегию. Ускорение горизонтального положения центра масс x_{CM} можно записать в виде

$$x_{CM} = J_x \theta + J_x M^{-1} (\tau - N), \quad (3)$$

где $J_x = \partial x_{CM} / \partial \theta$. Необходимо, чтобы реакция регулятора была $\ddot{x}_{CM} = -k_{CMp}(x_{CM} - x_{CM}^d) - k_{CMd}\dot{x}_{CM}$, которую можно достичь с помощью следующего уравнения управления:

$$\tau_{CM} = N - M J_x^+ (\dot{J}_x \theta + k_{CMp}(x_{CM} - x_{CM}^d) + k_{CMd}\dot{x}_{CM}), \quad (4)$$

где J_x^+ обозначает псевдоинверсию J_x , а x_{CM}^d – желаемый центр расположения масс. Для равновесия требуемое место должно быть над лодыжкой, так что сила тяжести указывает через голеностопный сустав и не вызывает никакого момента.

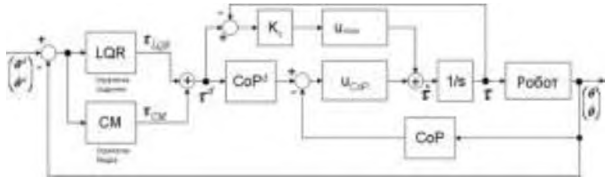


Рис. 1. Блок-схема контроллера баланса

Блок-схема контроллера изображена на рисунке 1. В отличие от контроллера LQR выше, этот контроллер будет применять невозвращающиеся моменты. Эти непереворачиваемые моменты могут привести к большому отражению на бедре, характерному для стратегии тазобедренного сустава. В общем, эти контроллеры могут быть конфликтующими. Тем не менее, регулятор CM действует только в том случае, когда CM отходит от нуля и не может поддерживать позу в одиночку, поэтому оба контроллера используются одновременно [20].

Для сравнения производительности были использованы несколько других контроллеров, которые обычно используются для этого типа проблем управления и их производительность сравнивается с описанным контроллером. Под производительностью подразумевается способность робота выдерживать большие возмущающие силы, не нарушая ограничений в центре давления и заставляя ногу вращаться или падать. Три контроллера, с которыми проводилось сравнение описанного контроллера – это неограниченный контроллер LQR, контроллер LQR с ограничением крутящего момента на лодыжке и ограниченный контроллер LQR с использованием отступающего горизонтального управления. Модель педикулатора использовалась с любым контроллером. Прежде чем горизонтальные толкатели были применены к центру масс верхнего звена, и величина повышалась до тех пор, пока робот

не стал бы неустойчивым, либо с помощью CoP, движущегося к краю стопы, либо падающего.

2.1. Регулятор CoP

Расположение центра давления является важным показателем способности робота балансировать, поскольку он представляет собой положение одной эквивалентной силы на ноге. Чтобы держать ноги на земле, этот параметр должен находиться в пределах области под ногой. Для нашей двойной перевернутой маятниковой модели плоских двуногих роботов расположение центра давления задается уравнением формы,

$$x_{CoP} = \frac{\tau_{лодыжка}}{F_{norm}} = \frac{A\tau}{B + C\tau}, \quad (5)$$

где A – матрица, которая выбирает крутящий момент лодыжки из вектора крутящих моментов, τ . Нормальная сила отменяет вес и ускорение вниз центра масс, поэтому

$$F_{norm} = m_{tot}(\ddot{z}_{cm} + g) \text{ и}$$

$$B = m_{tot}(J_z \theta - J_z M^{-1} N + g),$$

$$C = m_{tot} J_z M^{-1},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, J_z – якобиан координаты z центра масс и функцией только совместных углов. Числитель этого уравнения является функцией крутящего момента в голеностопном суставе, что означает, если крутящий момент голеностопного сустава равен нулю, то и CoP равен нулю. Из этого следует, что пределы местоположения CoP приблизительно определяют пределы крутящего момента на лодыжке. Проблема применения вышеперечисленных контроллеров заключается в том, что они могут управлять крутящим моментом лодыжки, который превышает эти ограничения [21]. По данной причине используются вышеуказанные контроллеры в качестве опорного крутящего момента,

$$\tau^d = \tau_{LQR} + \tau_{CM} \quad (6)$$

Используется опорный крутящий момент для вычисления идеального центра давления, CoP^* , используя уравнение (5). Если требуемый крутящий момент лодыжки слишком велик, заданная точка будет превышать границы стопы. Фактический желаемый центр давления, CoP^d , создается путем ограничения указанного значения под ногами. Чтобы сохранять баланс при отслеживании желаемого центра давления, используется несвязанный интегральный контроллер,

$$u = u_{CoP} + U_{положение} \quad (7)$$

где u_{CoP} регулирует местоположение CoP , а $U_{положение}$ удерживает робота в вертикальном положении. Соединительные моменты являются интегралом этого уравнения. Использование интегрального управления создает плавные входы крутящего момента и приводит к легко расчленимой динамике, как показано ниже.

Становится возможным отслеживание x_{CoP}^d с помощью управления обратной связью, которое дает ответ, $\dot{x}_{CoP} = -k_{CoP}(x_{CoP} - x_{CoP}^d)$. Динамику CoP можно найти, взяв производную от уравнения (5),

$$\dot{x}_{CoP} = D + E v \quad (8)$$

где $v = \dot{\tau}$ – новый управляющий вход и

$$D = -((B + C\tau)A\tau)/F^2$$

$$E = (FA - CA\tau)/F^2$$

$$F = B + C\tau$$

Согласно уравнению (8), для достижения желаемого ответа необходимо применить следующее уравнение контроля:

$$u_{CoP} = -E^+(D + k_{CoP}(x_{CoP} - x_{CoP}^d)) \quad (9)$$

Аппроксимация эффекта псевдоинверсии – управляющее воздействие крутящего момента, так как центр давления во многом определяется указанным крутящим моментом. Используя только уравнение (9), возможно контролировать положение CoP, но только контроль лодыжки не заставит робота стоять вертикально. Для контроля осанки были добавлены дополнительные элементы управления, которые лежат в $E^* = \text{null}(E)$. Интуитивно это пустое пространство, по существу, связано со всеми суставами, отличными от лодыжки. Согласно уравнению (8), такой контроль не повлияет на динамику CoP. Чтобы контролировать осанку, мы пытаемся отслеживать требуемый крутящий момент из уравнения (6), контроллера неограниченного баланса выше. Результирующий контроллер осанки обозначается

$$u_{\text{поза}} = \sum_i (E_i^{*T} K_\tau (\tau^d - \tau)) E_i^* \quad (10)$$

где E_i^* – единичный базисный вектор нулевого пространства, а K_τ – матрица усиления, которая определяет, насколько близко интегратор отслеживает опорный крутящий момент, τ^d . Поскольку нулевое пространство связано со всеми суставами, за исключением лодыжки, уравнение (10) не изменяет момент лодыжки. Однако опорный момент лодыжки не игнорируется, поскольку он использовался при расчете CoPd, который отслеживается с использованием уравнения (9). Весь контроллер суммируется на блок-схеме на рисунке 1.

3. Заключение

Контроллер равновесия антропоморфного робота, представленный в статье, основан на предварительной работе по балансировке нестабильных систем, таких как перевернутые маятники и акробат, и основан на стратегии тазобедренного сустава и лодыжки, наблюдаемой в экспериментах по балансу человека. Использование линейного квадратичного регулятора имитирует

стратегию лодыжки, заставляя робота вести себя как один инвертированный маятник, в то время как регулятор в горизонтальном положении центра масс напоминает контроллер стратегии бедра. Центр давления служит полезным основанием опорной точкой, как это имеет физический смысл и может быть использовано в качестве меры устойчивости. Представлен несвязанный контроллер, который отслеживает центр давления и удерживает робота в вертикальном положении. Принимая во внимание пределы расположения центра давления, мы гарантируем, что робот может стоять ногами на земле и выдерживать большие возмущения.

Для применения данного контроллера баланса к сложным системам роботов представлен общий алгоритм управления отслеживанием модели. Для модельной системы мы использовали двойной перевернутый маятник. Используя операционные точки, прикрепленные к местоположениям клавиш, мы получили контроллер обратной связи, который позволяет системе роботов отслеживать модельную систему. Модель строится, и ее динамика используется в качестве ключевого термина в управлении роботом. Важной задачей при использовании этого алгоритма управления является выбор модельной системы, которая аппроксимирует показатели робота. Из-за расхождений добавлено дополнительное интегрированное состояние, для коррекции центра масс, чтобы он формировался прямо над лодыжкой, где момент, вызванный силой тяжести, равен нулю.

Acknowledgments (благодарности)

Оргкомитет благодарит РФФИ за содействие в проведении конференции.

Список используемых источников

1. Horak I.F., Nashner L. Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations // Journal of Neurophysiology 1986. Vol. 55. № 6. P. 1369–1381.
2. Vukobratovic M., Frank A. A., Juricic D. On the stability of biped locomotion // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1970. January P. 25–36.
3. Galliday C., Hemami H. Postural stability of the two-degree-of-freedom biped by general linear feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 1976. Vol. 21, № 1 P. 74–79.
4. Hemami H., Chen B.-R. Stability analysis and input design of a two-link planar biped // The International Journal of Robotics Research. 1984. Vol. 3. № 2, P. 93–100.
5. Goswami A. Postural stability of biped robots and the foot-rotation indication (fri) point // International Journal of Robotics Research. 1999. Vol. 18. № 6. P. 523–533.

6. Popovic M., Goswami A., Herr H. Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications // *International Journal of Robotics Research*. 2005. Vol. 24. № 12. P. 1013–1032.
7. Hirai K., Hirose M., Haikawa Y., Takenaka T. The development of honda humanoid robot // *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 2, 1998. P. 1321–1326.
8. Spong M. The swing up control problem for the acrobat // *IEEE Control Systems Magazine*. 1995. Vol. 15. № 1. P. 49–55.
9. Kuo A. An optimal control model for analyzing human postural balance // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1995. Vol. 42. № 1. P. 87–101.
10. Kajita S., Kanehiro F., Kaneko K., Fujiwara K., Harada K., Yokoi K., Hirukawa H. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point, // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2003. Vol. 2. P. 1620–1626.
11. Maciejowski J. *Predictive Control with Constraints*. // Prentice Hall.
12. Goodwin G., Seron M., Dona J. D. *Constrained Control and Estimation: An Optimisation Approach*. London: Springer-Verlag. 2005.
13. Kondak K., Hommel G. Control and online computation of stable movement for biped robots. // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2003. Vol. 1. P. 874–879.
14. Khatib O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. // *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1987. Vol. 3. № 1. P. 43–53.
15. Pratt J.E. Virtual model control of a bipedal walking robot // *Master's thesis*. Massachusetts Institute of Technology. 1995.
16. Khatib O., Sentis L., Park J., Warren J., Whole-body dynamic behaviour and control of human-like robots. // *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004 Vol. 1. № 1. P. 29–43.
17. Sentis L., Khatib O., A whole-body control framework for humanoids operating in human environments. // *IEEE Conference on Robotics and Automation*. 2006. P. 2641–2648.
18. Тебуева Ф.Б., Петренко В.И., Антонов В.О., Сычков В.Б. Разработка способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора. XIII Международная научно-техническая конференция «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», 22-24 ноября 2017 года, г. Ижевск.
19. Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Сычков В.Б., Антонов В.О. Математическая модель определения пространственного положения звеньев задающего устройства на основе решения прямой задачи кинематики/ Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (ПАРУСА-2017): сборник трудов VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Геленджик, 9-10 ноября 2017 г.), Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. 397 с.
20. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Попова Е.В., Сычков В.Б. Основы построения специальных роботов для работы на космических аппаратах. Робототехника и искусственный интеллект Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2016. С. 48-53.
21. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Попова Е.В., Сычков В.Б. Комбинированные системы управления робототехническими комплексами на основе элементов сенсорики с обратными связями для обеспечения возможности замены человека при работе в условиях чрезвычайной ситуации. Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Тезисы докладов. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. С. 279-281.