

Система управления балансирующим на шаре роботом

М. М. Копычев, Е. В. Серых, Е. В. Друян,
А. Н. Лукичев, Г. В. Бельский
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

О. В. Гончаровский
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Аннотация. Рассматривается задача балансирования на шаре и управления движением робота с тремя независимыми всенаправленными колёсами с двигателями постоянного тока. Рассматриваются вопросы проектирования конструкции балансирующего робота, выбора датчиков для получения информации о текущем положении робота в пространстве, а также написания микроконтроллерной следящей системы управления.

Ключевые слова: стабилизация; шаробот; система управления; балансирующей робот

I. ВВЕДЕНИЕ

Балансирующий на шаре робот (т.н. шаробот, от англ. "ballbot") – это мобильный робот, использующий для своего передвижения единственное сферическое колесо-шар и постоянно самобалансирующийся на нём как в движении, так и в покое. Благодаря единственной точке контакта шара с твёрдой опорной поверхностью, шаробот одинаково легко передвигается во всех направлениях и может разворачиваться в одной точке. Такая конструкция придаёт роботу повышенную маневренность, однако требует проектирования следящей системы управления для поддержания равновесия и передвижения робота. Помимо исследовательского интереса, шароботы призваны помочь передвижению пожилых, а также людей с ограниченными возможностями и, возможно, стать платформой для новых видов транспорта [1]. Необходимо отметить, что сейчас шароботы являются объектом активных исследований в области мировой робототехники и поэтому области их применения пока весьма ограничены.

II. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ШАРОБОТА

Проектирование надёжных в работе роботов с узкой колёсной базой на примере шаробота, обладающего улучшенной маневренностью в ограниченных, переполненных и динамических средах стало возможным благодаря теоретическим разработкам исследователей в области теории управления. Первым шароботом стал ERROSphere (2005 г.), приведённый на рис. 1, который был способен удерживать равновесие на шаре [2].

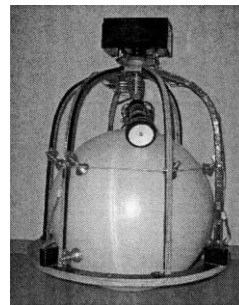


Fig. 1. Шаробот ERROSphere (Венгрия, 2005)

Робот состоял из пластиковой сферы, которая являлась и опорным колесом робота, а также клетки на которую монтировались приводные колеса и пассивные опорные шарики, позволяющие удерживать всю конструкцию на пластиковой сфере и защищающие всю конструкцию в случае отказа системы управления. Отклонение от положения равновесия осуществлялось на предельный угол в 15° .

В 2006 г. был сконструирован первый шаробот, который использовал принцип шариковой компьютерной мыши для поддержания равновесия и был высотой с человеческий рост [3]. Робот, приведённый на рис. 2, мог сопротивляться внешним возмущениям, однако не мог



Fig. 2. Шаробот CMU (США, 2006)

поворачиваться вокруг вертикальной оси, изменяя угол рысканья, так как использовал не всенаправленные колёса.

В дальнейшем другие исследователи добавили возможность вращения робота вокруг вертикальной оси, а также иные особенности в конструкцию шаробота, такие как вспомогательные ножки [4] и функциональные манипуляторы [5].

Позже были представлены несколько конфигураций балансирующих роботов, отличающихся приводной системой. Наиболее распространенной является механическая конструкция, использующая всенаправленные колеса Илона с приводом [6], [7], в числе которых на данный момент времени известен робот Резеро [8], приведённый на рис. 3.



Fig. 3. Шаробот Rezero (Швейцария, 2010)

В 2015 г. был представлен балансирующий робот SIM, приведённый на рис. 4, который не имел механического привода в отличие от всех остальных разработанных до этого момента шароботов. Его особенность заключалась в конструкции движущегося основания, использующего т.н. сферический асинхронный двигатель, ротор которого представляет собой прецизионный фрезерованный и полированный пустотелый железный шар с медными катушками внутри. Ток в роторе индуцируется шестью слоёными стальными статорами, каждый из которых оснащается трёхфазной катушкой. Статоры размещены над поверхностью железного шара и ориентированы под углом к вертикали. Робот поддерживает состояние равновесия за счет магнитного поля, генерируемого статором [9].

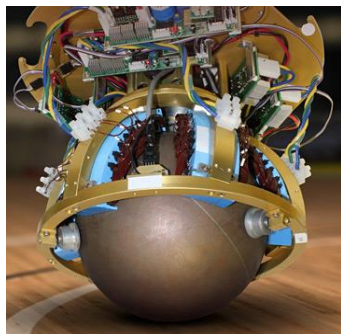


Fig. 4. Шаробот SIMbot (США/Япония, 2015)

Преимущество такой конструкции заключается в сокращении подвижных электромеханических частей, таким образом увеличивается износостойкость системы в целом, однако увеличивается сложность проектирования робота.

Кроме шароботов, существует также класс традиционных балансирующих роботов, таких как обратные маятники, а также сиквеи, моноколёса и гороскутеры, использующие принципы стабилизации обратного маятника. В 2013 г. исследователями из Австрии был продемонстрирован принцип стабилизации трёхстепенного обратного маятника на подвижном основании, основанный на системе стабилизации двухосевого обратного маятника. Система управления состояла из нелинейного регулятора в прямой связи и оптимального регулятора в обратной связи [10]. На рис. 5 приведено изображение исследовательского стенда с трёхстепенным обратным маятником.

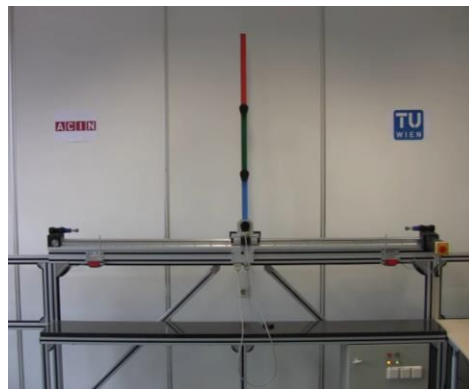


Fig. 5. Тройной перевернутый маятник (Австрия, 2013)

Проблематика и построение системы автоматического управления трёхстепенными обратными маятниками приведены также в [11].

Несмотря на успехи в построении мобильных балансирующих роботов с колесом-шаром, управление траекторным движением с одновременным поддержанием равновесия остаётся сложной в исполнении задачей по причине большого количества степеней свободы шаробота и недостаточного количества входных воздействий. Самым распространённым подходом к построению систем автоматического управления одновременно ориентацией и положением роботов рассматриваемой конструкции является линейно-квадратичный регулятор с обратными связями по переменным состояния. В [3] авторами описывается система управления с внутренним контуром с ПИ-регулятором для управления угловой скоростью и внешним контуром с линейно-квадратичным регулятором с полной обратной связью по переменным состояния. Позже, в [4] был применён ПИД-регулятор для балансировки и траекторного движения робота. В [6] входные воздействия были разделены с целью введения линейных ПД-регуляторов для управления колёсами. Получаемые с акселерометра ускорения преобразовывались с помощью кинематических зависимостей в угловые скорости вращения трёх

всенаправленных колёс с шаговыми двигателями. Следует отметить, что ни LQR-, ни ПИД-регуляторы не показали достаточную робастность к внешним возмущениям, а также большому начальному углу наклона конструкции робота. Rezero использует квази-нелинейную систему управления с прямой связью и программным изменением коэффициента усиления. В [5] был описан динамический планировщик оптимальной траектории движения шаробота, который задавал углы наклона конструкции робота для криволинейного движения в сложных условиях. Авторами в [12] было предложено использование нечеткой логики (а именно – нечеткий регулятор в скользящем режиме) для построения системы стабилизации робота на шаре. Как показано в [12] нечёткая логика показывает удовлетворительные результаты только когда траектория движения гладкая, в случае динамической траектории регулятор оказывается неэффективен.

Как уже было упомянуто выше, использование нечеткой логики, LQR- и ПИД-регуляторов не обеспечивает свойство достаточной робастности, а использование нелинейных регуляторов в системе управления является достаточно трудоёмкой задачей из-за сложной системы динамических уравнений, описывающей движение шаробота. Таким образом, следует уделить большее внимание разработке робастных подходов в проектировании систем автоматического управления движением балансирующих роботов.

В настоящей статье описывается разработка шаробота с тремя всенаправленными колёсами на приводе постоянного тока с датчиками положения. Система управления, основанная на использовании ПИД-регулятора с двумя дифференцирующими звеньями получает информацию об ускорении и угловой скорости от трекера MPU-6050. Программа написана на языке СИ для микроконтроллера ATmega128.

III. КОНСТРУКЦИЯ ШАРОБОТА ACS

Обычно, шаробот состоит из двух основных компонентов: шара-основания с достаточным коэффициентом сцепления поверхности и робота с приводными колёсами, стоящего на этом шаре. В настоящей работе описывается робот с тремя всенаправленными omni-колёсами с приводом постоянного тока, корпусом, распечатанном на 3D принтере из ABS пластика, двумя платами управления двигателями постоянного тока с двойным транзисторным мостом и одной платой с микроконтроллером и датчиками определения текущего положения конструкции в пространстве для возможности поддержания состояния неустойчивого равновесия всей конструкции. Габариты робота составляют 230 мм в высоту и 120 мм в диаметре, его вес 1350 г. Конструкция робота отличается от привычной малой высотой и, соответственно, малой инерцией, что делает необходимым проектирование крайне быстродействующей системы управления.

На рис. 6 приведено изображение описываемого робота.



Fig. 6. Шаробот ACS (РФ, 2017)

Три всенаправленных колёса расположены под углом $\alpha = 120^\circ$ друг к другу по радиусу корпуса робота. В качестве сферического колёса был выбран баскетбольный мяч диаметром $D = 235$ мм. Угол расположения продольной оси всенаправленного колёса к вертикальной плоскости составляет 48° . Из за габаритов редуктора двигателя постоянного тока пришлось разложить этот угол на два – β и γ . На рис. 7 приведена конфигурация шаробота.

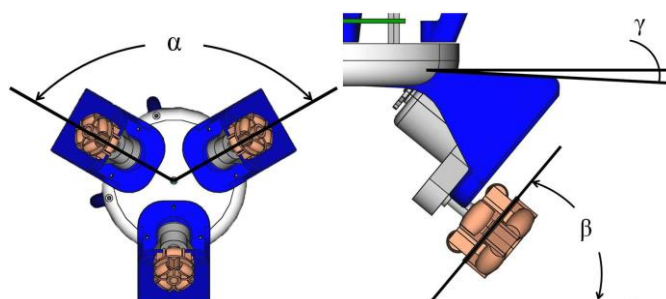


Fig. 7. Расположение колёс робота ACS

Для получения информации о текущем положении робота используется плата MPU-6050, оснащенная акселерометром и гироскопом, а также датчики, установленные на каждом двигателе, для считывания информации о текущем положении колёс, основанные на использовании щелевого фотопрерывателя и пластиковой пластины с зубцами, которая проворачивается в пропускной зоне фотопрерывателя и таким образом можно получить обратную связь по скорости движения каждого колёса.

IV. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ШАРОБОТОМ ACS

Считывание данных с акселерометра и гироскопа осуществляется посредством интерфейса I²C с частотой 100 Гц. Микроконтроллерная система управления, построенная на использовании ПИД-регулятора, получает информацию с акселерометра и гироскопа и вычисляет управляющий сигнал на двигатели постоянного тока. Проведенные эксперименты показали, что система с ПИД-регулятором не показывает удовлетворительных результатов, а поддержание баланса робота на шаре

длилось не дольше нескольких секунд при минимальных внешних возмущениях со стороны окружающей среды. По этой причине была реализована дополнительная дифференциальная часть, содержащая производную угловой скорости, помноженную на коэффициент дифференцирования. Введение дополнительной дифференциальной части показало лучшие результаты. Вычисление управляющего воздействия на колеса осуществлялось по формуле (1):

$$u(t) = P + I + D + DD = \\ = K_p \varphi(t) + K_i \int_0^t \varphi(t) dt + K_D \frac{d\varphi(t)}{dt} + K_{DD} \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал, P – пропорциональная часть регулятора, I – интегральная часть регулятора, D и DD – дифференциальная и вторая дифференциальная части регулятора, K_i – коэффициенты регулятора, φ – угол наклона шаробота.

Управляющий сигнал на выходе регулятора корректируется на основании данных с датчиков положения колес.

На рис. 8 приведена временная зависимость угла поворота робота в горизонтальной плоскости.

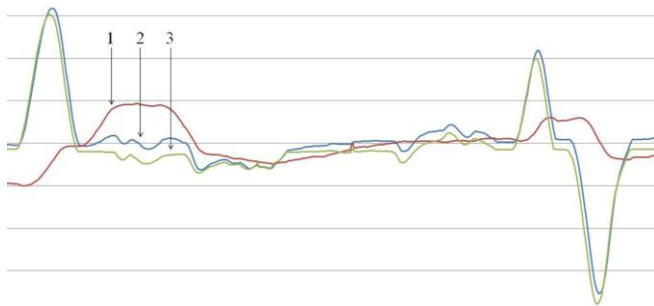


Fig. 8. Временные диаграммы угла наклона робота ACS на шаре

На рис. 8 график под номером 1 принадлежит временной зависимости усредненного значения угла по усредненным значениям акселерометра, номер 2 – мгновенному итоговому значению угла и под номером 3 – интегрированный угол по гироскопу.

Следует отметить, что зависимость интегрированного угла по гироскопу оказывается близкой по значению к мгновенному итоговому значению угла, что говорит о точности вычисленного значения угла наклона робота в горизонтальной плоскости.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен балансирующий на шаре робот, рассмотрены аспекты разработки конструкции и системы

управления роботами подобного типа. Шаробот ACS, рассматриваемый в данной работе оснащается тремя всенаправленными колесами типа omni-wheel с двигателями постоянного тока и платой-трекером MPU-605, для отслеживания текущего угла наклона в плоскостях $xy/xz/yz$. Построенная система управления с ПИД-регулятором позволила добиться достаточных для дальнейших исследований результатов. Ввиду малой высоты робота и малой инерции, следующим шагом будет испытание построенной системы управления с шаром-основанием большей массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] T. Endo and Y. Nakamura, "An omnidirectional vehicle on a basketball," in *Advanced Robotics*, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on. IEEE, 2005, pp. 573–578.
- [2] L. Havasi, "Errosphere: an equilibror robot," in *Control and Automation*, 2005. ICCA'05. International Conference on, vol. 2. IEEE, 2005, pp. 971–976.
- [3] T. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "A dynamically stable single wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive," in *Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006, pp. 2884–2889.
- [4] U. Nagarajan, A. Mampetta, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot," in *Robotics and Automation*, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on. IEEE, 2009, pp. 998–1003.
- [5] U. Nagarajan, B. Kim, and R. Hollis, "Planning in high-dimensional shape space for a single-wheeled balancing mobile robot with arms," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012, pp. 130–135.
- [6] M. Kumagai and T. Ochiai, "Development of a robot balancing on a ball," in *Control, Automation and Systems*, 2008. ICCAS 2008. International Conference on. IEEE, 2008, pp. 433–438.
- [7] L. Hertig, D. Schindler, M. Bloesch, C. D. Remy, and R. Siegwart, "Unified state estimation for a ballbot," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013, pp. 2471–2476.
- [8] S. Doessegger, P. Fankhauser, C. Gwerder, J. Huessy, J. Kaeser, T. Kammermann, L. Limacher, and M. Neunert, "Rezero," Focus Project Report, Autonomous Systems Lab., ETH Zurich, Switzerland, 2010. Available at: <http://www.rezero.ethz.ch>.
- [9] A. Bhatia, M. Kumagai, and R. Hollis, "Six-stator spherical induction motor for balancing mobile robots," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015, pp. 226–231.
- [10] T. Glück, A. Eder, and A. Kugi, "Swing-up control of a triple pendulum on a cart with experimental validation," *Automatica*, vol. 49, no. 3, pp. 801–808, 2013. doi: 10.1016/j.automatica.2012.12.006.
- [11] X.-L. Zhang, H.-M. Fan, J.-Y. Zang, L. Zhao, S. Hao, "Nonlinear control of triple inverted pendulum based on GA-PIDNN," *Nonlinear Dyn.* 79, 2015, pp. 1185–1194.
- [12] H. Navabi, S. Sadeghnejad, S. Ramezani, and J. Baltes, "Position Control of the Single Spherical Wheel Mobile Robot by Using the Fuzzy Sliding Mode Controller," *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2017, Article ID 2651976, 10 pages, 2017. doi:10.1155/2017/2651976.