

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСИРУЮЩИМ РОБОТОМ

Говердовский А.Д.

Научный руководитель: Юдин А.В.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ-4, Москва, Россия

AUTOMATIC CONTROL OF A BALANCING ROBOT

Goverdovskiy A.D.

Supervisor: Yudin A.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Аннотация

В статье рассматривается задача управления двухколесным балансирующим роботом. Исследованы преимущества и существующие применения для данного типа роботов. Сделан обзор реализованных систем, их назначений и особенностей. Разработана версия робота, позволяющей сохранять баланс на месте.

Abstract

In the article the problem of control of a two-wheeled balancing robot is examined. Advantages and uses, possible in future developments, as well as already existing are reviewed. Overview of existing solutions, their functions and peculiarities is carried out. Design of a new version of a traditional two-wheeled robot which would allow for onboard manipulators to be used while maintaining both vertical and horizontal stability.

Введение

Начало робототехнике было положено в 60-х годах прошлого столетия, когда в связи с бурным ростом промышленного производства и достижений в электронике, оказалось возможным создать автомат для нужд конвейерной сборки потребительских товаров. С тех пор применение роботов значительно расширилось и вышло за рамки производственных нужд. С началом нового тысячелетия робототехника активно внедряется во все сферы деятельности человека, в том числе и в обыденную жизнь.

Традиционный робот, взаимодействующий с человеком, имеет широкое основание и передвигается с малыми ускорениями во избежание потери устойчивости. Центр масс подобных мобильных колесных роботов стараются расположить как можно ближе к поверхности, по которой осуществляется движение, при этом для устойчивости у робота всегда имеется как минимум 3 точки опоры.

Двухколесные балансирующие роботы имеют меньшее основание за счет отсутствия требования статической устойчивости. Колесная пара позволяет совершать поворот на месте, что дает им большую мобильность. Также, роботы подобной конструкции имеют пониженное энергопотребление.

В данной работе рассматривается относительно новая область¹ для мобильных изначально неустойчивых роботов – удержание равновесия и передвижение за счет смещающегося центра тяжести. Эта особенность позволяет создать мобильного двухколесного робота, способного удерживать равновесие на месте с одновременным перемещением его отдельных частей (манипуляторов).

Подобные роботы могут использоваться как мобильные помощники рабочего, имеющие в арсенале различные инструменты и способные выполнять некритичную работу по указанию оператора с помощью систем дополненной реальности; в качестве управляемых вручную погрузчиков, картографировать помещения, опасные для человека, работать в

¹ Хотя первый двухколесный балансирующий робот был сделан Казуо Ямафуджи в 1986 году, большинство подобных роботов было создано в 2003-2012 годах

качестве охранников (мобильных видеокамер), инвалидных колясок и индивидуальных средств передвижения для человека.

Методы и средства управления подобными двухколесными балансирующими роботами являются крайне важными для практической робототехники и позволяют строить на их основе системы автоматического управления любыми мехатронными системами.

1. Обзор существующих решений

Рассмотрим основные конструктивные, структурно-функциональные особенности, а также области применения существующих балансирующих двухколесных роботов.

nBot (рис. 1) использует акселерометр для получения значения угла наклона и гироскоп для получения скорости изменения угла наклона. Используется фильтр Вайнера (Weiner) для объединения сигналов этих двух сенсоров в один.

Формула балансировки: $V = A\theta + B\dot{\theta} + Cx + D\dot{x}$

На двигатель подается напряжение, пропорциональное углу наклона θ , угловой скорости $\dot{\theta}$, положению шасси x и его скорости \dot{x} .

Поворот осуществляется за счет добавления значения напряжения к одному двигателю, и вычитания его из другого. Таким образом, робот может поворачивать, сохраняя баланс. Движение по прямой осуществляется с помощью добавления значения к углу баланса [1].

JOE (рис. 2) разрабатывался как мини-прототип транспортного средства для перевозки людей. Для стабилизации используется регулятор пространства состояний, который получает информацию от гироскопа и энкодеров двигателей [2].



Рисунок 1 - nBot



Рисунок 2 - JOE

Робот, созданный Питером Миллером (Peter Miller) получает значение о положении шасси с помощью энкодеров двигателей, значение скорости с помощью дифференцирования значения положения. Гироскоп и акселерометр, объединенные фильтром Калмана позволяют получить точное значение скорости и угла наклона без потери точности со временем. Управление происходит за счет нелинейной системы на нечеткой логике, распределяющей сигналы управления на двигатель каждого из колес [3].

Ballbot (рис. 3) – робот, балансирующий на шаре. Разрабатывался для взаимодействия с людьми. Система управления (рис. 4) представляет собой два контура: внутренняя – PI регулятор, внешняя – линейно-квадратичный регулятор [4].

Segway (рис. 5) – коммерчески доступная платформа, используемая в качестве транспорта на относительно небольшие расстояния в различных областях, начиная от туризма и заканчивая полицейскими патрулями.

EN-V (рис. 6) – Концепт двухколесного автомобиля, разработанный компанией Segway совместно с General Motors. В отличие от других неустойчивых двухколесных роботов, управление осуществляется за счет перемещения груза, которое приводит к смещению центра тяжести относительно колесной оси [5].



Рисунок 3 - Ballbot

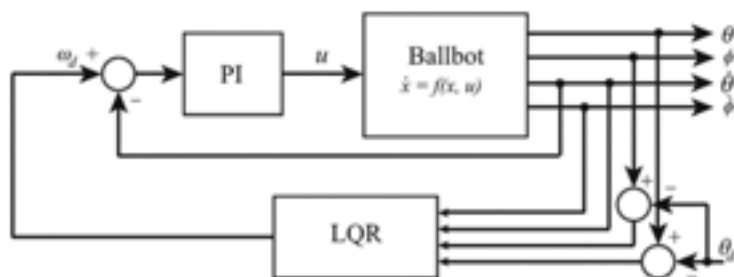


Рисунок 4 - Система управления Ballbot

В большинстве роботов угол наклона рассчитывается путем интегрирования величины угловой скорости, полученной с помощью гироскопа и корректируется последовательным приближением к углу, вычисленному из показаний акселерометров. Одновременно все параметры обрабатываются фильтром Калмана.



Рисунок 5 - Segway

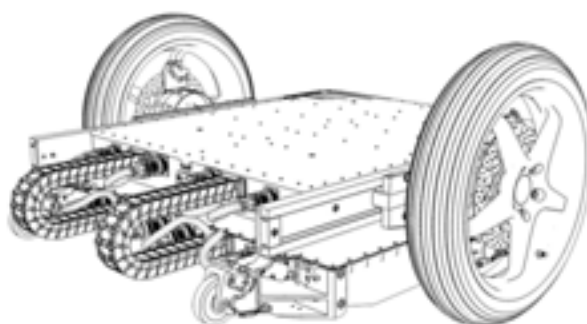


Рисунок 6 - EN-V

2. Постановка задачи

На первом этапе целью разработки является автономный двухколесный балансирующий робот без движущихся частей с двумя степенями свободы (рис. 7). Колеса соосны, питание осуществляется с помощью аккумуляторного блока. Центр тяжести находится выше оси колес. Задача – балансировать около положения равновесия.

Получение информации о положении осуществляется с помощью гироскопа и двухосевого акселерометра. Энкодеры валов двигателей позволят измерить скорость и направление движения робота. Дополнительная информация может получаться от

видеокамеры, установленной на роботе и следящей за угловым отклонением от заранее определенного визуального ориентира. Управляющие сигналы, получаемые от микропроцессора, поступают на драйверы двигателей, преобразующие в дальнейшем их в моменты двигателей.

Дополнительно на робота устанавливается система смещения центра тяжести, преобразующая вращательное движение двигателя 1 в линейное перемещение с помощью реечной передачи 2 грузу 3, в качестве которого может выступать блок питания (рис. 8). Подобная система может также использоваться для смещения центра тяжести в вертикальной плоскости. Вместе эти средства могут понадобиться при изучении поведения системы управления при смещениях центра масс в разных направлениях и ее дальнейшем улучшении.

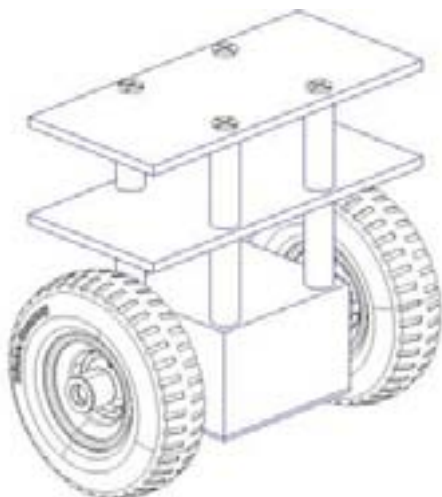


Рисунок 7 - Модель робота

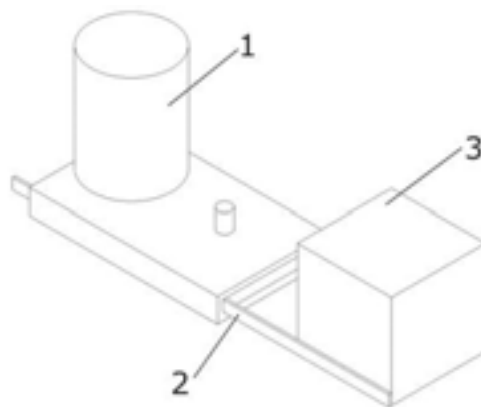


Рисунок 8 – Система смещения центра тяжести

3. Математическая модель

В данной работе используется абстракция [6], позволяющая упростить реальную систему с 5-ю степенями свободы до системы с 2-мя степенями (рис. 9).

Эта модель представляет собой тележку с одной степенью свободы (движение вдоль оси x) с закрепленным на ней с помощью шарнира шеста, способного вращаться в вертикальной плоскости. Контроллер может действовать на тележку силой F , этим изменяя её горизонтальное положение. В системе отсутствует трение.

Масса тележки – m_c , масса шеста – m_p , длина – $2l$. Переменная x – положение тележки вдоль оси x , Θ – отклонение шеста от вертикального положения.

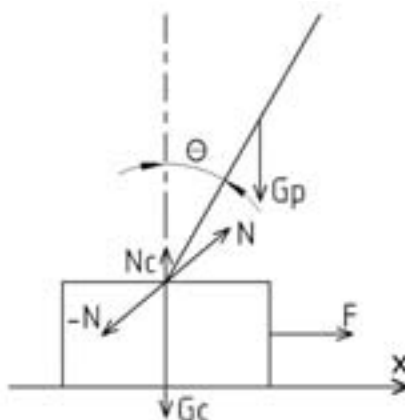


Рисунок 9 - Силовая диаграмма перевернутого маятника на тележке

Динамические уравнения данной системы:

Угловое ускорение:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{-F - m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m_p} \right)}{l \left(\frac{4}{3} \frac{m_p \cos^2 \theta}{m_c + m_p} \right)}$$

Горизонтальное ускорение:

$$\ddot{x} = \frac{F + m_p l (\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \sin \theta)}{m_c + m_p}$$

4. Постановка эксперимента

На оси обоих колес устанавливаются втулки 1, позволяющие зафиксировать робота и тем самым избавиться от лишних степеней свободы и обеспечить измеряемость угла наклона робота. Одна из втулок с одной вращательной осью свободы закрепляется шарнирно в каретке датчика измерения угла поворота 2, а вал самого датчика крепится к шасси робота с помощью крепления 3 (рис. 10, б).

Альтернативный способ измерения угла наклона – установка видеокамеры 2, сравнивающей положение робота с горизонтальным ориентиром 1, где 3 – вертикальная ось робота, связанная с его отклонением от положения равновесия. (рис.10, в).

Эксперимент заключается в выведении робота из состояния равновесия для определения качества системы управления. Переменным параметром в данной конфигурации также служит вертикальное положение центра масс робота (рис. 10, а).

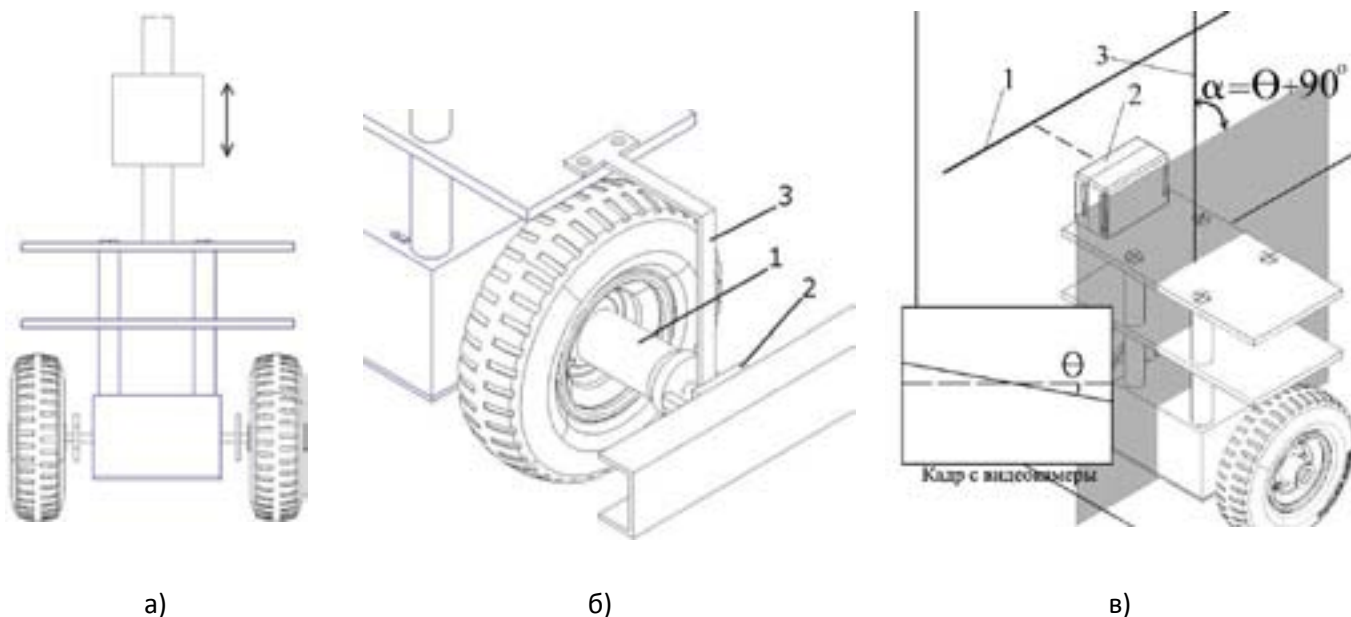


Рисунок 10 – Схема проведения эксперимента

5. Алгоритм работы

Подбор коэффициентов ПИД-регулятора происходит по методу Зиглера-Никольса. Происходит определение переменных L и α из переходной характеристики объекта. Постоянные устанавливаются в соответствии с формулами, приведенными в [7] и донастраиваются вручную при необходимости.

Режим стабилизации начинается с получения значения угла наклона θ от фильтра Калмана. Находится ошибка e , вычисляются интегральные и дифференциальные составляющие, где Δt – интервал дискретизации, определяемый быстродействием микроконтроллера, k – номер промежутка времени. Полученный сигнал управления преобразуется с помощью ШИМ и поступает через приводы на двигатели с образованием моментов $M_{\text{прав}}$ и $M_{\text{лев}}$. Значения ошибки записывается в память для использования в нахождении составляющих сигнала управления в последующих итерациях (рис. 11).

Заключение

В статье рассмотрена задача управления двухколесным балансирующим роботом. Исследованы преимущества применения данного типа роботов, а также возможность использования системы контролируемого смещения положения центра тяжести. Сделан обзор существующих систем.

Разработана версия робота с ограниченным количеством степеней свободы, способного балансировать вокруг вертикального положения равновесия.

Дальнейшая работа над проектом предполагает увеличение степеней свободы объекта управления, усложнение системы автоматического управления. Одним из перспективных направлений развития проекта видится задача управляемого смещения положения центра масс объекта управления.

Для проверки разработанных подходов необходимо провести ряд экспериментов. Постановка экспериментов является приоритетной задачей ближайшего развития проекта. В частности, получение независимых объективных данных обеспечит внедрение в систему дополнительных датчиков (например, видеокамеры).

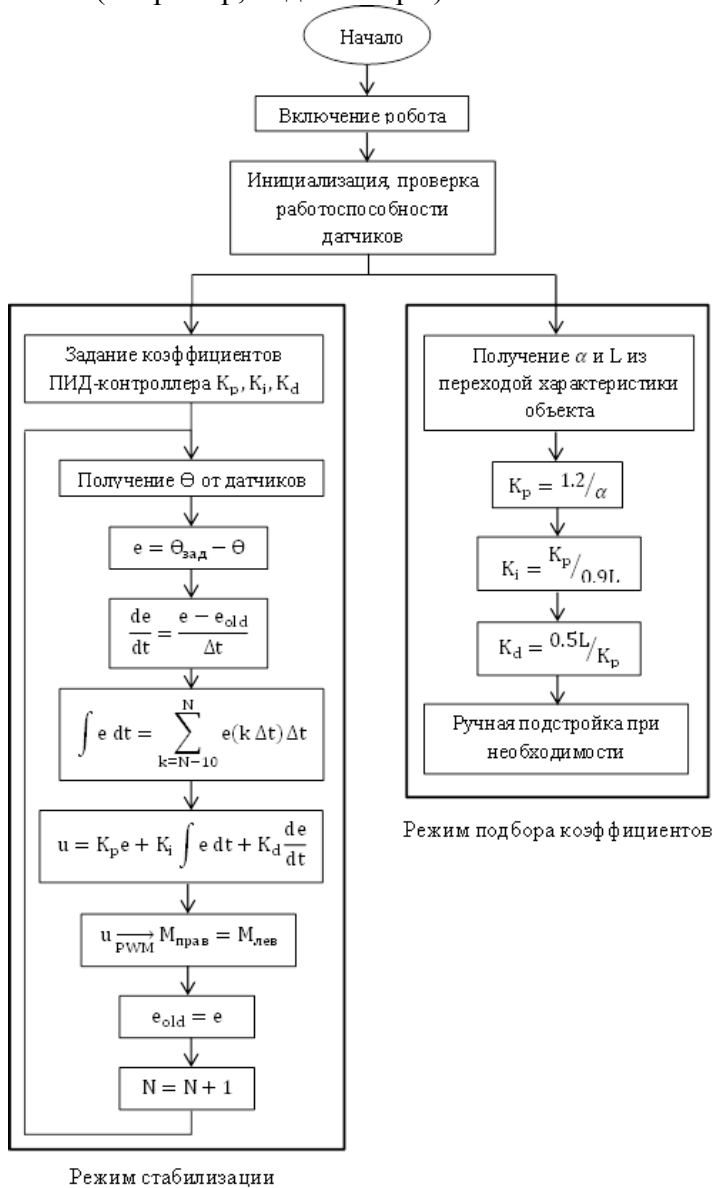


Рисунок 11 – Алгоритм работы

Литература

1. nBot Balancing Robot. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/> - Проверено 31.01.2013.
2. JOE: A Mobile, Inverted Pendulum / F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, A. Rufer // Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL
3. One is Enough! / T. Lauwers, G. Kantor, R. Hollis // Carnegie Mellon University, 2005
4. Building a Two Wheeled Balancing Robot / P. Miller // University of Southern Queensland, 2008
5. Segway Advanced Development. The EN-V project. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.segway.com/en-v/index.php/> - Проверено 31.01.2013.
6. Correct Equations for the Dynamics of the Cart-pole System / R. Florian // Center for Cognitive and Neural Studies, 2007
7. Optimum Settings for Automatic Controllers / J.G. Ziegler, N. B. Nichols // Rochester, N. Y, 1942